



喷施生长调节剂缓解甘薯干旱胁迫的机理

王金强, 李思平, 刘庆, 李欢

(青岛农业大学资源与环境学院, 山东青岛 266109)

摘要:【目的】探讨干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯光合产物分配的影响以及对干旱胁迫的缓解效应。【方法】采用人工旱棚和旱池模拟薯块膨大高峰期(100—120 d)干旱胁迫, 结合 ^{13}C 标记方法, 研究喷施 6-苄氨基嘌呤(6-BA)、 α -萘乙酸(NAA)和脱落酸(ABA)3种外源激素对甘薯干旱胁迫的缓解效应。测定甘薯叶片 ^{13}C 积累量和分配率、内源激素含量、碳代谢酶活性、光合荧光特性等生理生化指标, 并进行逐步回归分析、通径分析和RDA分析。【结果】与正常供水相比, 干旱胁迫导致甘薯产量下降了18.76% ($P < 0.05$), 而喷施生长调节剂可以显著降低干旱胁迫条件下甘薯减产的幅度 ($P < 0.05$), 喷施 6-BA 效果最佳, 其次分别是喷施 ABA 和 NAA。干旱胁迫下喷施生长调节剂可显著提高功能叶光合效率, 从而促进薯块膨大期光合产物的合成。其中, 喷施 6-BA 与喷清水处理相比, 叶片净光合速率(P_n)提高了10.93%, 最大光化学效率(F_v/F_m)增加了20.00%。干旱喷施不同生长调节剂均能显著提高甘薯瞬时 ^{13}C 积累量和向块根的分配率, 6-BA 处理分别提高了75.68%和27.68%, 促进了光合产物(^{13}C)由叶片向块根中的转移和分配。此外, 喷施生长调节剂可提高叶片碳代谢酶活性, 喷施 6-BA、NAA 和 ABA 与喷清水处理相比, SS 酶活性分别提高29.59%、19.25%和13.03%。喷施生长调节剂可以缓解因干旱引起的ZR和IAA含量下降, 喷施 6-BA 与喷清水处理相比, ZR 和 IAA 分别增加了18.72%和10.97%。逐步回归分析表明, 光合特性、叶绿素荧光特性、碳代谢酶活性和内源激素是调控薯块膨大高峰期光合产物(^{13}C)分配的关键指标 ($R=0.997$); 通径分析表明, 对甘薯光合产物(^{13}C)由叶片向块根中转移与分配的影响直接作用系数较大的是 P_n 、SPS、ABA、ZR、SS 和 F_v/F_m 。RDA 分析表明, 喷施 6-BA 与甘薯 ^{13}C 总积累量、块根 ^{13}C 分配率、ZR、 P_n 、 F_v/F_m 、SS 和 SPS 具有很好的相关性。【结论】干旱胁迫下, 喷施生长调节剂能提高内源激素含量和SPS、ADPGase 为主的碳代谢酶活性, 改善叶片光合特性, 促进薯块膨大期光合产物(^{13}C)由叶片向块根转运, 缓解干旱胁迫的影响。

关键词: 甘薯; 干旱胁迫; 生长调节剂; ^{13}C 转移分配

Mechanism of Spraying Growth Regulators to Alleviate Drought Stress of Sweet Potato

WANG JinQiang, LI SiPing, LIU Qing, LI Huan

(College of Resources and Environmental Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong)

Abstract: 【Objective】The study was conducted to investigate the effects of spraying growth regulators on the distribution of photosynthetic products in sweet potato and the alleviation effects on drought stress. 【Method】Artificial dry shed and dry pond were used to simulate the drought stress of potato swell (100-120 d), and based on ^{13}C labeling method, the alleviation effects of spraying three exogenous hormones such as 6-benzylaminopurine (6-BA), α -naphthyl acetic acid (NAA) and abscisic acid (ABA) on drought stress of sweet potato were studied. The physiological and biochemical indexes, such as the accumulation and distribution rate of ^{13}C ,

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-07-03

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-11-B10)

联系方式: 王金强, E-mail: wangjin.qiang123@163.com. 通信作者李欢, E-mail: lihuancomcomcom@163.com

endogenous hormone content, carbon metabolism enzyme activity and photosynthetic fluorescence characteristics of sweet potato leaves, were analyzed. And then we performed stepwise regression analysis, path analysis and RDA analysis.【Result】Compared with normal water supply, drought stress decreased the yield of sweet potato by 18.76% ($P<0.05$). The degree of the decrease of yield was greatly smaller with the spraying of growth regulator under drought stress ($P<0.05$). The best effect of spraying was 6-BA which was followed by ABA and NAA. Spraying growth regulators under drought stress could significantly improve the photosynthetic efficiency of functional leaves, which could promote the synthesis of photosynthetic products during the expansion of potato tubers. Compared with the spraying of water, the spraying of 6-BA promoted the net photosynthetic rate (P_n), which increased by 10.93% and the maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) which increased by 20.00%. Spraying different growth regulators in drought could significantly increase the instantaneous accumulation of ^{13}C and the rate of distribution to the roots of sweet potato. Different growth regulators could promote the transfer of photosynthetic products (^{13}C) from leaves to roots and distribution which increased by 75.68% and 27.68% by spraying 6-BA, respectively. In addition, spraying growth regulators increased leaf carbon metabolizing enzyme activity. Compared with the spraying of water, the spraying of 6-BA, NAA and ABA increased SS enzyme activity increased by 29.59%, 19.25% and 13.03%, respectively. Spraying growth regulators alleviated the decrease of ZR and IAA content caused by drought. Compared with the spraying of water, the spraying of 6-BA increased ZR and IAA by 18.72% and 10.97%, respectively. Stepwise regression analysis showed that photosynthetic characteristics, chlorophyll fluorescence characteristics, carbon metabolism enzyme activity and endogenous hormones were key indicators for regulating the distribution of photosynthetic products (^{13}C) at the peak of potato tube expansion ($R=0.997$); Path analysis showed that P_n , SPS, ABA, ZR, SS and F_v/F_m had the higher direct interaction coefficient on the transfer and distribution of the product (^{13}C) from the leaves to the roots for sweet potato photosynthesis; RDA analysis showed that the spraying of 6-BA had a good correlation with the total ^{13}C accumulation of sweet potato, the distribution of ^{13}C in roots, ZR, P_n , F_v/F_m , SS and SPS.【Conclusion】Spraying growth regulators under drought stress raised endogenous hormone content, carbon metabolism enzyme activity based on SPS and ADPGase, improved leaf photosynthetic characteristics, and promoted the transport of photosynthetic products (^{13}C) from leaf to root in potato tube expansion stage, besides which could relieve the effects of drought stress.

Key words: sweet potato; drought stress; plant growth regulators; ^{13}C distribution

0 引言

【研究意义】我国甘薯多种植于丘陵旱薄地区, 生育期内降雨量偏少, 严重影响甘薯的产量和品质^[1]。干旱胁迫是甘薯产量提高的主要限制因子, 其造成的减产已成为我国甘薯生产面临的重要问题^[2]。源库关系对作物经济产量的形成起到关键作用, 大多数作物库源关系均有建立和平衡的过程, 甘薯是典型的库源关系作物, 协调库源关系是甘薯稳产的保障^[3]。甘薯块根膨大期是甘薯源库关系平衡的关键时期, 若此时遭遇干旱胁迫会导致甘薯库源关系协调失衡, 光合产物向块根转移和积累受阻, 干物质积累量下降, 潜在的生产能力得不到充分发挥。【前人研究进展】前人在增强甘薯抗旱性方面的研究多集中于培育抗旱品种、施肥和地膜覆盖等方法^[4-7], 但喷施生长调节剂增强甘薯抗旱性的理论研究较少。生长调节剂一般是植物激素或类激素物质, 它们通过影响植物内源激素的合成、光合特性和活性氧积累等一系列生理特性, 来改变作物的生长发育过程^[8]。在逆境胁迫下施加适当浓度的生长调节剂可以缓解胁迫对植物的伤害作用, 前人已

在玉米、小麦、水稻和大豆等植物进行了探讨^[9-12]。张明才^[13]研究认为水分胁迫下, 细胞分裂素 (CTK) 通过防止叶绿体解体、增加 RuBPCase 酶活性、提高光合电子的传递速率, 阻止胁迫下作物光合速率下降。脱落酸 (ABA) 不仅调控叶片气孔的开闭和蒸腾作用的强弱, 还可以降低叶绿体细胞膜的电势和光合电子的传递, 进而提高净光合效率^[14]。生长素 (IAA) 不仅提高植物光合作用, 加速生长发育, 而且能增强碳代谢酶的活性^[15]。研究表明, 光合产物 (^{13}C) 与净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等光合生理性状密切相关^[16-17], 其中光系统 II (PS II) 是光合作用正常生理功能的关键环节, 叶绿素荧光指标可以快速反映 PS II 反应中心光能利用率、电子供体侧和受体侧的功能变化^[18]。同时, 光合作用同化产物葡萄糖等单糖被叶片中以蔗糖合成酶 (SS) 和蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 为主的碳代谢酶催化形成蔗糖, 光合产物以蔗糖的形式在甘薯植株内运输并积累^[19]; 而淀粉的形成是由光合同化物产生的蔗糖等碳水化合物, 腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶 (ADPGase) 是淀粉合成的限速酶, 最终影响淀粉的合成。【本研究切入点】

喷施生长调节剂缓解甘薯干旱胁迫效应的研究报道较少,且多采用盆栽和室内模拟进行甘薯苗期光合特性和活性氧代谢等生理的比较研究^[20-22]。研究干旱胁迫喷施生长调节剂条件下叶片内源激素含量变化、光合特性和碳代谢酶活性的变化以及甘薯体内 ^{13}C 的分配与积累,对于揭示干旱胁迫喷施生长调节剂对甘薯光合产物分配积累的生理机制有重要的意义。因此,干旱胁迫下喷施生长调节剂调控甘薯薯块膨大期光合产物转移分配及其生理机制有待进一步探究。【拟解决的关键问题】本文以北方主栽甘薯品种烟薯 25 号为材料,利用叶片 ^{13}C 同位素示踪技术,在甘薯薯块膨大期,从内源激素变化、光合特性和碳代谢酶活性角度研究干旱胁迫下喷施 6-BA、ABA 和 NAA 对甘薯光合产物分配的影响以及对于干旱胁迫的缓解效应,以期生长调节剂改善甘薯库源关系的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验选用北方主栽鲜食型甘薯品种烟薯 25 号,于 2018 年 5 月 10 日在青岛农业大学平度试验基地防雨旱棚内布置盆栽试验。

试验设正常供水(CK)+叶面喷清水、轻度干旱(LD)+叶面喷清水、轻度干旱+叶面喷施 ABA 溶液(LD+ABA)、轻度干旱+叶面喷施 NAA 溶液(LD+NAA)和轻度干旱+叶面喷施 6-BA 溶液(LD+6-BA)5 个处理。于移栽 100 d 进行干旱处理,正常供水和轻度干旱处理的土壤含水量分别为土壤田间最大持水量的(75±5)%和(55±5)%,干旱处理持续 20 d,采用测墒补灌的方法,保证土壤含水量保持在各处理的水分含量范围之内。喷施植物生长调节剂的各处理在干旱处理后第 10 天分别连续 2 d 喷施 4 mg·L⁻¹ 脱落酸(ABA)溶液、50 mg·L⁻¹ α-萘乙酸(NAA)溶液和 30 mg·L⁻¹ 6-苄氨基嘌呤(6-BA)溶液,在植株叶片正反两面均匀喷施,喷施程度为叶面湿透无滴水,喷用量约为 57.8 mL·m⁻²。试验采用起垄净作栽培方式,株距 0.22 m、垄距 0.8 m,小区面积 19.2 m² (6 m×3.2 m),每个处理 3 次重复,随机区组排列。

田间试验移栽后 117 d,进行 ^{13}C 叶片标记。在晴朗天气上午 9:00—12:00,从每个小区选择生长一致具有代表性的植株 6 株,在其主茎第四、五片展开叶上标记 $^{13}\text{CO}_2$, CO_2 由 Ba¹³CO₃ 和磷酸在反应器中反应生成,并用集气袋收集。标记前将欲标记叶用聚氯

乙烯透明塑料薄膜袋密封,然后用医用注射器注入 $^{13}\text{CO}_2$ 浓度约为 8% 的气体 30 mL,透明塑料袋的体积约为 40 mL。标记叶在自然光照下光合同化 2 h 之后撤掉透明塑料袋,标记完成 3 d 后收获 3 株,其余 3 株于 160 d 进行收获。将植株在 105℃ 杀青 30 min,然后 75℃ 烘干至恒重,最后粉碎。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生物量和产量测定 于移栽后 120 d 采样,每次采样 10 株,记录地上部茎叶鲜重和地下部块根鲜重。将地上部茎叶和块根分别切碎混合均匀后,称取鲜样 200 g 左右,于 75℃ 下烘至恒重,测定其干物质重。于移栽后 160 d 收获,收获时进行小区测产,获得小区产量平均值,计算鲜薯产量。

1.2.2 光合参数的测定 采用 CIRAS-3 便携式光合测定仪(Hansatech, USA)测定光合参数,于移栽后 120 d 上午 9:00—11:00 人工控制 CO_2 浓度 400 μmol·mol⁻¹、温度 25℃、光照强度 1 200 μmol·m⁻²·s⁻¹,测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。

1.2.3 叶绿素荧光参数测定 甘薯第四片功能叶先进行 20 min 的暗适应处理,然后采用 M-PEA 便携式连续激发式荧光仪(Hansatech, UK)测定叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(O-J-I-P 曲线)。随后利用 JIP-test 对 O-J-I-P 曲线进行分析,解析 F_0 、 F_v 、 F_m 、 F_m' 、 F_j 和 F_v' 等叶绿素荧光参数。

1.2.4 SS、SPS 和 ADPGase 酶活性测定 参照汪顺义等^[23]的方法测定。称取 0.5 g 甘薯叶片样品,加入 7 mL Hepes-NaOH 缓冲液(pH=7.5),冰浴研磨至匀浆,匀浆转入 15 mL 离心管,10 000×g 4℃ 离心 10 min,上清液即为酶液。取 50 μL 酶液加入 50 μL 缓冲液、40 μL 25 mmol·L⁻¹ MgCl₂、40 μL 50 mmol·L⁻¹ UDPG 和 20 μL 100 mmol·L⁻¹ 6-磷酸果糖,30℃ 保温 30 min,100℃ 沸水浴 1 min,加入 100 μL 2 mol·L⁻¹ NaOH 混匀,100℃ 水浴 10 min,加入 2.0 mL 30% HCl 和 1 mL 1% 间苯二酚,混匀后 80℃ 保温 10 min,冷却后 480 nm 波长下比色,测定生成磷酸蔗糖量,用蔗糖生成量表示酶活性。酶液经沸水浴后加入反应液为对照。

1.2.5 叶片内源激素测定方法 参照何钟佩^[24]的酶联免疫吸附法(ELISA),略有改动,试剂盒由南京建成生物工程研究所提供。用 0.1 mol·L⁻¹ PBS 缓冲溶液(pH=7.3)提取内源激素,用酶联免疫吸附法(ELISA)测定内源激素(脱落酸(ABA)、生长素

(IAA)、玉米素核糖核苷(ZR))含量。

1.2.6 样品全碳含量及 ^{13}C 丰度测定 各部位用蒸馏水洗净后烘干磨碎,用同位素比率质谱仪(IRMS)在美国加州大学戴维斯分校的植物科学系稳定性同位素实验室测定 $\delta^{13}\text{C}$ 及全碳含量(C%)。计算方法如下:

样品中 ^{13}C 同位素比值 $R_{\text{样}}=(\delta^{13}\text{C}/1000+1)\times R_{\text{标}}$;

各器官总 ^{13}C 积累量= $R_{\text{样}}/(R_{\text{样}}+1)\times\text{C\%}\times\text{生物量干重(g)}$;

^{13}C 分配率(%)=该器官 ^{13}C 积累量/植株总 ^{13}C 积累量 $\times 100$ 。

式中, $R_{\text{标}}$ 为标准物质的碳同位素比值, $R_{\text{标}}=1.078328406$ 。

1.3 数据分析方法

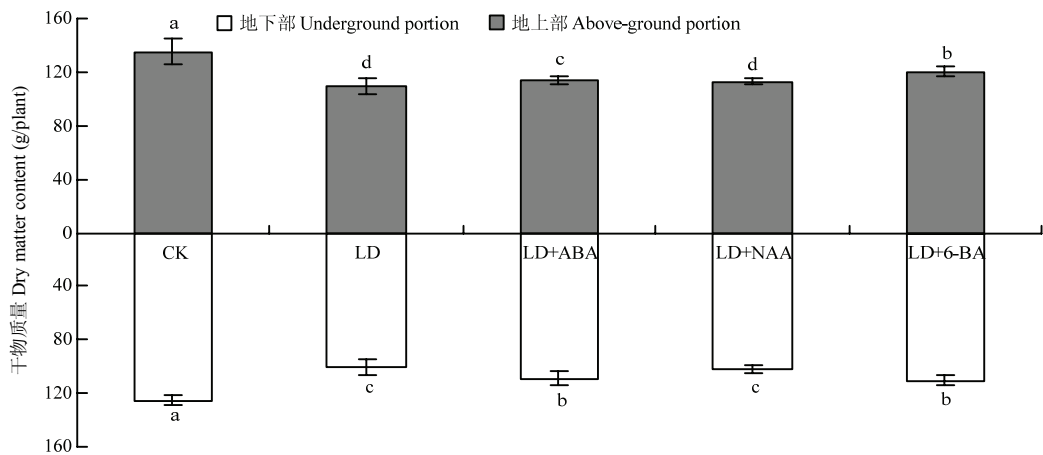
采用 Microsoft Excel 2010 计算试验数据平均值及作图,用 SPSS 20.0 软件进行数据统计分析,方差分析比较处理间的效应差异,LSR 法比较平均数间的差异显著程度;用 DPS 7.5 软件进行逐步回归分析和通

径分析;采用 Canoco4.5 软件对光合产物积累分配与光合特性和内源激素对应关系进行 RDA (redundancy analysis) 分析。

2 结果

2.1 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯生物量和产量的影响

干旱胁迫导致甘薯地上和地下干物质量显著低于正常供水 ($P<0.05$),而喷施 6-BA 和 ABA 能不同程度缓解干旱胁迫所造成的损失,较干旱胁迫相比,喷施 6-BA 处理地上部干物质量增幅为 9.62%,喷施 ABA 处理增幅为 3.58%(图 1);而喷施 NAA 效果不显著。干旱胁迫下,喷施不同生长调节剂对地下干物质量的变化规律与地上部干物质量的规律一致,其增幅规律为喷施 6-BA>喷施 ABA。说明干旱胁迫下,喷施生长调节剂对甘薯的干物质量能起到缓解作用;就喷施不同生长调节剂而言,喷施 6-BA 缓解效果最佳。



不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Different small letters indicate significant difference at 0.05 level

图 1 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯干物质量的影响 (120 d)

Fig. 1 Effects of spraying growth regulators on dry matter content of sweet potato under drought stress (120 d)

甘薯生物量的变化会影响甘薯的最终产量,由表 1 可知,与正常供水相比,干旱胁迫导致甘薯产量下降了 18.76% ($P<0.05$),而干旱胁迫下喷施不同生长调节剂均能显著降低甘薯减产的幅度 ($P<0.05$),其中喷施 6-BA 效果最佳,降幅为 5.03%;喷施 ABA 次之,为 9.94%;最后是喷施 NAA,为 12.10%。干旱胁迫下,喷施不同生长调节剂对单株结薯数和平均薯重的下降幅度规律与甘薯产量的规律一致,其下降幅

度规律为喷施 6-BA>喷施 ABA>喷施 NAA。说明干旱胁迫下,喷施生长调节剂对甘薯的减产能起到缓解作用;就喷施不同生长调节剂而言,喷施 6-BA 缓解效果最佳。

2.2 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯 ^{13}C 积累量和分配率的影响

由表 2 可知,甘薯 ^{13}C 积累量受干旱胁迫和生长调节剂种类的影响。干旱胁迫导致甘薯膨大期短期 ^{13}C

总积累量和各器官 ¹³C 积累量显著低于正常供水 ($P<0.05$), 而喷施不同生长调节剂均能不同程度缓解干旱胁迫所造成的损失。在薯块膨大期 (120 d), 与 LD 处理相比, 以喷施 6-BA 效果最佳, ¹³C 总积累量、叶和块根分别增加了 108.16%、75.68%和 234.90%; 其次是喷施 ABA, 分别增加了 65.64%、26.10%和 174.81%; 最后是喷施 NAA。由 ¹³C 分配率来看, 干旱胁迫下喷施不同生长调节剂显著降低了茎叶中 ¹³C 短期分配率 (14.41%—17.91%和 35.57%—42.96%) 和显著提高了块根中 ¹³C 短期分配率 (35.12%—43.60%)。

表 1 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯产量的影响 (160 d)
Table 1 Effects of spraying growth regulators on yield of sweet potato under drought stress (160 d)

处理	产量	单株结薯数	平均薯重
Treatment	Yield (t·hm ⁻² FW)	Root number	Root weight (g)
CK	33.80±1.21a	3.17±0.05a	213.47±2.49a
LD	27.46±0.45d	2.33±0.04e	205.36±1.40e
LD+ABA	30.44±0.88bc	2.67±0.05c	211.31±0.89c
LD+NAA	29.71±0.50c	2.50±0.03d	208.73±1.04d
LD+6-BA	32.10±1.06ab	2.83±0.04b	212.47±1.59b

同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同
Different letters in the same column mean significant differences at 0.05 level. The same as below

由表 2 可以看出, 甘薯 ¹³C 最终各器官分配率受干旱胁迫和生长调节剂种类的影响。干旱胁迫导致收获期甘薯茎叶 ¹³C 分配率显著高于正常供水, 而块根

¹³C 分配率显著低于正常供水 ($P<0.05$)。干旱胁迫下喷施不同生长调节剂显著降低了茎叶中 ¹³C 最终分配率 (10.90%—12.25%和 23.76%—27.04%) 和显著提高了块根中 ¹³C 最终分配率 (58.62%—61.85%) ($P<0.05$), 其中以喷施 6-BA 效果最佳, 块根 ¹³C 分配率增加了 27.68%; 其次是喷施 ABA, 增加了 21.24%; 最后是喷施 NAA。表明干旱胁迫下, 喷施生长调节剂促进了光合产物 (¹³C) 向块根的分配与积累, 且以喷施 6-BA 效果最佳。

2.3 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯叶光合和叶绿素荧光特性的影响

干旱胁迫导致甘薯净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO₂ 浓度 (C_i) 等光合指标显著低于正常供水 ($P<0.05$), 而喷施 6-BA 和 ABA 能不同程度地缓解干旱胁迫所造成的损失。与干旱胁迫相比, 喷施 6-BA 处理 P_n 和 C_i 增幅分别为 10.93%和 15.51%, 喷施 ABA 处理增幅为 4.09%和 5.78%, 喷施 NAA 处理为 1.08%和 1.52% (表 3)。喷施 6-BA 和 NAA 能显著提高甘薯叶片 T_r 和 G_s , 而喷施 ABA 则导致 T_r 和 G_s 的分别下降了 2.22%和 5.33%。干旱胁迫下, 喷施生长调节剂对甘薯净光合速率的降低能起到缓解作用, 加速光合产物的合成; 就喷施不同生长调节剂而言, 喷施 6-BA 缓解效果最佳。

由表 4 可知, 干旱胁迫下甘薯叶片光化学效率和电子传递速显著低于正常供水 ($P<0.05$), 喷施不同

表 2 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯 ¹³C 积累量的影响
Table 2 Effects of spraying growth regulators on the accumulation of ¹³C in sweet potato under drought stress

时期	处理	总积累量	叶	分配率	茎	分配率	块根	分配率	须根	分配率
Stage	Treatment	Total accumulation	Leaf	Distribution	Stem	Distribution	Root tuber	Distribution	Fibrous root	Distribution
		(μg/plant)	(μg/plant)	rate (%)	(μg/plant)	rate (%)	(μg/plant)	rate (%)	(μg/plant)	rate (%)
膨大期 Expansion stage	CK	16.67±0.23a	6.32±0.07a	37.91±0.65c	2.48±0.07a	14.89±0.27c	7.28±0.12a	43.68±0.40a	0.59±0.07a	3.51±0.36d
	LD	6.53±0.15e	3.05±0.09e	46.73±1.15a	1.42±0.07c	21.73±0.57a	1.72±0.04e	26.33±0.67d	0.34±0.03d	5.21±0.43a
	LD+ABA	10.82±0.17c	3.85±0.14d	35.57±1.06d	1.91±0.12b	17.64±1.02b	4.73±0.08c	43.67±0.12a	0.34±0.05d	3.11±0.48e
	LD+NAA	10.42±0.17d	4.48±0.13c	42.96±0.85b	1.87±0.06b	17.91±0.34b	3.66±0.09d	35.12±0.96c	0.42±0.03c	4.01±0.29b
	LD+6-BA	13.60±0.15b	5.36±0.06b	39.44±0.38c	1.96±0.10b	14.41±0.59c	5.76±0.07b	42.35±0.55b	0.52±0.04b	3.80±0.29c
收获期 Harvest stage	CK	15.37±0.27a	4.09±0.08a	26.59±0.03b	1.94±0.08a	12.62±0.30b	9.12±0.07a	59.35±0.78b	0.22±0.04c	1.44±0.24b
	LD	6.09±0.04e	1.98±0.02d	32.53±0.58a	1.04±0.03d	17.00±0.22a	2.95±0.08e	48.44±0.77c	0.12±0.01d	2.02±0.16b
	LD+ABA	9.93±0.04c	2.24±0.01c	23.76±0.30d	1.20±0.04c	12.25±0.40b	6.08±0.06c	61.85±0.36a	0.34±0.05b	3.49±0.29a
	LD+NAA	9.67±0.20d	2.40±0.09c	25.09±1.08c	1.17±0.06c	12.23±0.67b	5.62±0.03d	58.73±0.05b	0.38±0.07ab	3.96±0.65a
	LD+6-BA	12.51±0.07b	3.38±0.06b	27.04±0.55b	1.36±0.07b	10.90±0.42c	7.33±0.04b	58.62±0.25b	0.43±0.01a	3.33±0.03a

表 3 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯叶片光合特性的影响（120 d）

Table 3 Effects of spraying growth regulators on photosynthetic characteristics of sweet potato leaves under drought stress (120 d)

处理 Treatment	净光合速率 P_n ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	细胞间隙 CO_2 浓度 C_i ($\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
CK	20.60±0.70a	5.11±0.04a	390.50±20.60a	280.57±11.70a
LD	18.58±1.46b	3.16±0.91c	212.67±11.30c	240.00±6.32c
LD+ABA	19.34±0.68b	3.09±0.06d	201.33±11.98d	253.86±5.25b
LD+NAA	18.78±0.96b	3.21±0.26c	214.94±15.11c	243.64±7.71bc
LD+6-BA	20.61±0.40a	3.51±0.04b	235.95±10.98b	277.23±8.42a

表 4 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯叶片叶绿素荧光特性的影响

Table 4 Effects of spraying growth regulators on chlorophyll fluorescence characteristics of sweet potato leaves under drought stress

处理 Treatment	F_v/F_m	PI abs	ABS/CSm	ETo/CSm	TRo/ABS
CK	0.69±0.02a	2.32±0.16b	28784±1878a	9916±211ab	0.69±0.04a
LD	0.55±0.04d	1.23±0.08d	20875±594c	5744±756d	0.56±0.05b
LD+ABA	0.64±0.02b	2.03±0.06c	25412±1474b	8955±207b	0.70±0.04a
LD+NAA	0.60±0.03c	1.94±0.08c	28684±488a	7854±688c	0.65±0.03a
LD+6-BA	0.66±0.01b	2.90±0.16a	28312±910a	10750±717a	0.70±0.01a

生长调节剂均能降低干旱胁迫对甘薯叶片最大光化学效率 (F_v/F_m) 的影响。与干旱胁迫相比, 喷施 6-BA 处理增加了 20.00%, 喷施 ABA 处理增加了 16.36%, 喷施 NAA 处理增加了 9.09%; PS II 反应中心的性能指数 (PI abs)、单位叶面积吸收的光能 (ABS/CSm) 和用于电子传递的能量 (ETo/CSm) 亦呈现此规律, 而干旱胁迫下喷施不同生长调节剂对甘薯叶片 TRo/ABS 的影响不显著。喷施生长调节剂对甘薯 PS II 的降低能起到缓解作用, 提高光能由 PSII 向 PSI 的传递过程, 从而加速 CO_2 的同化; 就喷施不同生长调节剂而言, 喷施 6-BA 缓解效果最佳。

2.4 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯叶片 SS、SPS 和 ADPGase 酶活性的影响

甘薯光合产物由蔗糖合成酶 (SS)、磷酸蔗糖合

成酶 (SPS) 和腺苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶 (ADPGase) 为主的碳代谢酶催化合成, 蔗糖的转运和淀粉的持续积累促进了块根的膨大。干旱胁迫下甘薯叶片 SS、SPS 和 ADPGase 酶活性显著低于正常供水 ($P<0.05$), 而喷施不同生长调节剂均能不同程度地缓解干旱胁迫所造成的损失。与干旱胁迫相比, 喷施 6-BA、ABA 和 NAA 3 个处理 SS 活性分别提高 29.59%、19.25% 和 13.03%, SPS 活性分别提高 23.11%、18.45% 和 8.87%, ADPGase 活性分别提高 33.33%、29.10% 和 15.67% (表 5)。干旱胁迫下, 喷施生长调节剂可以提高甘薯 SS 和 SPS 酶的活性, 促进蔗糖的形成与积累; 同时也可提高甘薯 ADPGase 酶的活性, 促进淀粉的形成与积累。就喷施不同生长调节剂而言, 喷施 6-BA 缓解效果最佳。

表 5 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯 SS、SPS 和 ADPGase 酶活性的影响（120 d）

Table 5 Effects of spraying growth regulators on SS, SPS and ADPGase in sweet potato leaves under drought stress (120 d)

处理 Treatment	SS ($\text{mg Suc}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{h}^{-1}$)	SPS ($\text{mg Suc}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{h}^{-1}$)	ADPGase ($\mu\text{mol NADPH}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{h}^{-1}$)
CK	24.28±0.34a	22.31±0.34a	5.98±0.34a
LD	17.80±0.31e	17.09±0.04e	4.02±0.04e
LD+ABA	21.22±0.35c	20.24±0.36c	5.19±0.36c
LD+NAA	20.12±0.49d	18.61±0.38d	4.65±0.38d
LD+6-BA	23.06±0.20b	21.04±0.19b	5.36±0.19b

2.5 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯叶片内源激素含量的影响

如表 6 所示,与正常供水相比,干旱胁迫导致甘薯 ZR 和 IAA 等内源激素含量分别下降了 28.00%和 33.84% ($P<0.05$)。而喷施不同生长调节剂均能不同程度缓解干旱胁迫所造成的损失,与干旱胁迫相比,喷施 6-BA 处理 ZR 增加了 18.72%;喷施 ABA 处理 ZR 和 IAA 分别增加了 13.12%和 8.03%;喷施 NAA 处理 IAA 增加了 16.34%。干旱胁迫下,喷施生长调节剂对甘薯促生长激素含量的下降能起到缓解作用;就喷施不同生长调节剂而言,喷施 6-BA 缓解效果最佳。

表 6 干旱胁迫下喷施生长调节剂对甘薯叶片内源激素含量的影响

Table 6 Effects of spraying growth regulators on endogenous hormones in sweet potato leaves under drought stress

处理 Treatment	ZR (ng·g ⁻¹ FW)	IAA (ng·g ⁻¹ FW)	ABA (ng·g ⁻¹ FW)
CK	35.68±0.87a	114.50±8.13a	191.43±1.34e
LD	25.69±1.00d	75.75±1.18d	247.36±2.30b
LD+ABA	29.06±0.17c	81.83±1.96c	270.31±1.29a
LD+NAA	28.02±0.34c	88.13±3.56b	221.49±6.48c
LD+6-BA	30.50±0.69b	84.06±1.81c	215.77±3.46d

干旱胁迫导致甘薯 ABA 含量显著提高了 29.22% ($P<0.05$)。干旱胁迫下喷施外源 ABA 能显著提高甘薯叶片 ABA 含量,增加了 41.21%;而干旱胁迫下喷施外源 6-BA 和 NAA 能显著降低甘薯叶片 ABA 含量,分别降低了 15.70%和 12.71%。

2.6 逐步回归分析与通径分析

以甘薯 $Pn(X_1)$ 、 $Gs(X_2)$ 、 $Fv/Fm(X_3)$ 、 $PI\ abs(X_4)$ 、 $ABS/CSm(X_5)$ 、 $SS(X_6)$ 、 $SPS(X_7)$ 、 $ADPGase(X_8)$ 、 $ZR(X_9)$ 和 $ABA(X_{10})$ 为自变量,甘薯 ^{13}C 积累量(Y ,膨大期块根 ^{13}C 积累量)为因变量进行的逐步回归分析,回归关系为 $Y=12.43+0.09X_1+0.01X_2+0.37X_3+0.05X_4+0.01X_5+0.06X_6+0.05X_7+0.41X_8+0.03X_9+0.06X_{10}$ ($R=0.997$ 、 $F=71.52$ 、 $P=0.0005$),说明以上指标是影响影响甘薯 ^{13}C 分配的主要因素。为进一步明确逐步回归确定的指标对 ^{13}C 分配差异的调控效应,本研究进行了通径分析(表 7)。结果表明,在干旱条件下不同生长调节剂对甘薯 ^{13}C 分配的直接作用系数最大的是 Pn 、 SPS 、 ABA 、 ZR 、 SS 和 Fv/Fm 。这表明干旱胁迫下, Pn 、 SPS 、 ABA 、 ZR 、 SS 和 Fv/Fm 起主导作用。

2.7 不同处理对甘薯光合产物积累分配与光合特性和内源激素影响的 RDA 分析

为了分析干旱胁迫下不同生长调节剂贡献度大小

表 7 干旱胁迫下生长调节剂对甘薯膨大期 ^{13}C 分配量与生理指标的通径系数

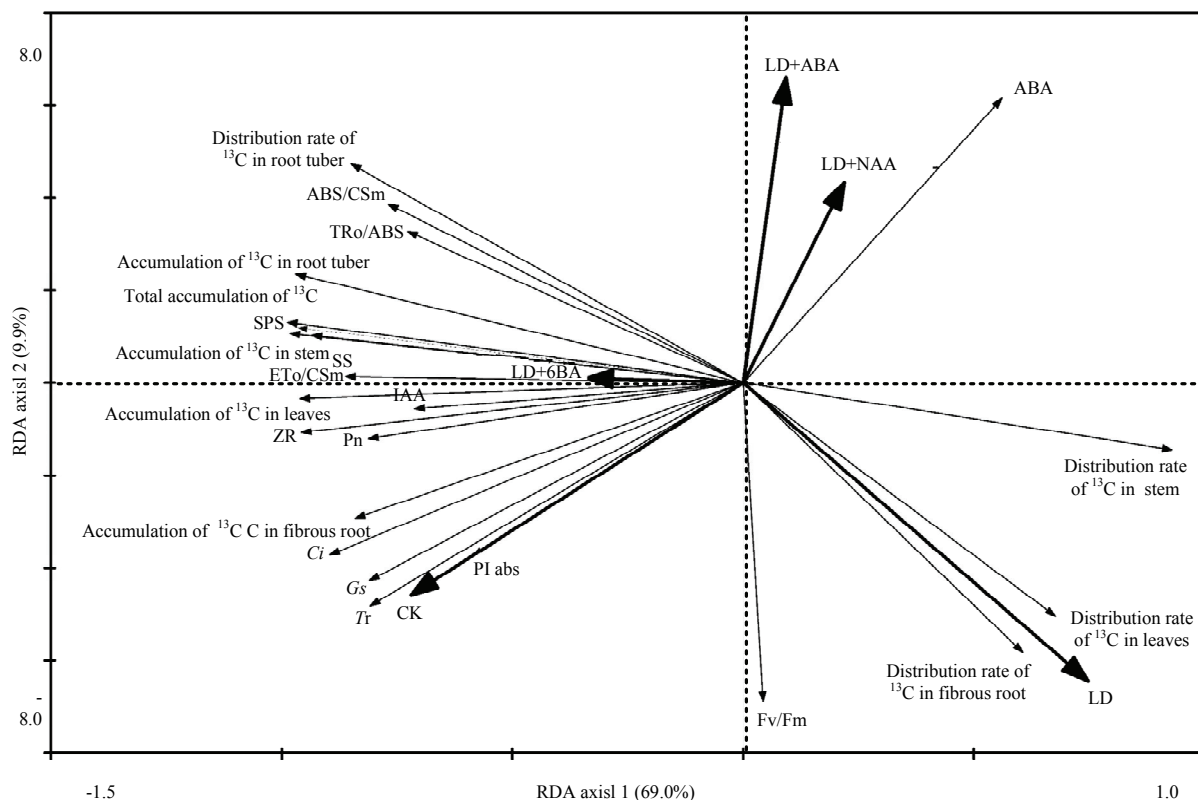
Table 7 Path coefficient between physiological indexes and ^{13}C accumulation of sweet potato by growth regulators during expansion period under drought stress

作用因子 Action factor	直接效应 Direct action	间接效应 Indirect effect									
		→ Pn	→ Gs	→ Fv/Fm	→ $PI\ abs$	→ ABS/CSm	→ SS	→ SPS	→ $ADPGase$	→ ZR	→ ABA
Pn	1.5730		0.1240	0.0031	-0.8223	0.0959	0.0603	0.0381	-0.6058	1.0433	-0.6749
Gs	0.3297	0.0279		0.0012	0.0177	0.0736	0.0556	0.0357	-0.1108	0.0516	0.3714
Fv/Fm	0.8119	0.0123	0.0328		-0.0138	-0.0319	-0.0042	-0.0064	0.0235	0.0086	-0.0834
$PI\ abs$	0.0303	0.0349	0.1922	0.0054		0.0677	0.0454	0.0272	-0.0782	0.0391	0.3159
ABS/CSm	0.1727	-0.0263	0.1404	-0.0022	-0.0119		0.0573	0.0328	-0.1000	0.0289	0.5702
SS	1.0762	0.0374	0.2405	-1.3207	0.1181	0.1299		0.0470	-0.1960	0.0473	0.5867
SPS	1.3484	-0.6372	0.2429	-1.9016	-0.2170	0.4171	0.0741		-0.1417	1.0473	0.5540
$ADPGase$	0.1439	0.0348	0.2540	-0.0019	0.0165	-0.1200	0.0742	0.0477		-0.0478	0.5519
ZR	1.1557	0.0368	0.3054	0.9018	-0.9130	-0.0894	0.0648	0.0411	-1.1234		0.4757
ABA	1.1986	-0.0352	-0.1917	0.0015	1.0150	-0.9542	-0.0700	-0.0920	0.1243	-0.0415	

决定系数 $R=0.9944$, 剩余通径系数 $Pe=0.0746$
Determination coefficient $R=0.9944$, Residual path coefficient $Pe=0.0746$

以及与各指标间的相关关系, 进行 RDA 分析。RDA 分析图中各指标与处理间夹角的余弦值表示它们之间的相关性。如图 2 所示, ^{13}C 总积累量、块根 ^{13}C 积累量、块根 ^{13}C 分配率、ZR、SS、SPS、Pn、Gs、ETo/CSm、TRo/ABS 和 ABS/CSm 与 LD+6-BA 处理的夹角的余

弦值在 0—1 范围之内, 表明 LD+6-BA 处理与 ^{13}C 总积累量、块根 ^{13}C 积累量、块根 ^{13}C 分配率、ZR、SS、SPS、Pn、Gs、ETo/CSm、TRo/ABS 和 ABS/CSm 有较好的线性关系, 说明干旱胁迫下喷施 6-BA 缓解效果最佳。



RDA 分析表明前两个排序轴的解解释量分别达到 69.0% 和 9.9%, 经蒙特卡洛检验 $P=0.002$, 达显著性水平

The coordination from the first two ordination axes was explained by 69.0% and 9.9% of the variance. The significance based on Monte Carlo permutation test of all canonical axes was $P=0.002$

图 2 甘薯光合产物积累分配与光合特性和内源激素 RDA 分析

Fig. 2 Redundancy analysis between photosynthesis product accumulation and photosynthetic characteristics, endogenous hormones of sweet potato

3 讨论

3.1 干旱胁迫下生长调节剂对甘薯光合产物合成和分配的影响

光合作用是作物生长和产量形成的重要代谢过程, 是植物生长发育的物质和能量的主要来源, 干旱胁迫下喷施生长调节剂可以显著提高作物的光合作用^[25]。一方面, 干旱胁迫下, 喷施 6-BA 可以显著提高叶片气孔导度和细胞间 CO_2 浓度, 显著降低 CO_2 从细胞间隙向叶绿体传递阻力, 并使碳同化过程 CO_2

的利用显著增加, 进而显著提高净光合速率, 有利于光合产物较多地积累在植株中并向块根中转移。另一方面, 喷施生长调节剂可以显著提高叶片蔗糖磷酸合成酶和蔗糖合成酶的活性^[15], 最终显著提高甘薯的净光合速率, 促进光合产物的制造量和积累^[11], 最终提高甘薯产量。干旱胁迫下喷施生长调节剂处理通过提高 PS II 和 Pn 等光合途径增加光合产物的同化量。本试验 ^{13}C 积累量的研究表明, 干旱胁迫下喷施生长调节剂, 叶和茎短期 ^{13}C 积累量分别增加了 26.10%—75.68% 和 31.43%—37.98% ($P<0.05$)。

叶绿素荧光动力学参数能准确反映甘薯叶片光能吸收的分配去向^[26], 其中反应中心性能指数 (PI abs) 反映了光系统 II 的整体性能, Fv/Fm 等参数能表征原初反应中心的光能利用率和转化率^[18]。植物在干旱胁迫条件下, 光化学效率和电子传递速率等显著下降^[27]。本试验结果表明, 喷施生长调节剂能缓解干旱胁迫对甘薯叶片光能利用和光系统 II 整体性能的伤害, 显著提高了 Fv/Fm、ETo/CSm、TRo/ABS 和 PI abs ($P < 0.05$)。一方面, 干旱胁迫下, 喷施 6-BA、ABA 和 NAA 可以显著提高 Fv/Fm 和 PI abs, 表明植物喷施 6-BA、ABA 和 NAA 可修复因干旱胁迫导致的放氧复合体损伤, 提高 PSII 反应中心电子传递的能量和最大量子产额。另一方面, 喷施植物生长调节剂增强了 PSII 反应中心过剩激发能的有效耗散, 从而缓解了干旱胁迫对叶片 PSII 反应中心的损伤。叶绿素荧光是研究干旱胁迫及缓解干旱胁迫下甘薯光合作用敏感的探针, 光合结构的改善必然会引起光合作用的变化。

光合产物 (^{13}C) 在甘薯植株体内的运输与分配主要由源-库器官间膨压决定^[28-29], 以 SS、SPS 和 ADPGase 为主的碳代谢酶通过调控蔗糖和淀粉合成速率进而调控源-库器官间的膨压差^[30]。SS、SPS 和 ADPGase 是调控蔗糖和淀粉合成的限速酶。本研究结果发现, 干旱胁迫下喷施生长调节剂处理的 SS、SPS 和 ADPGase 酶的活性分别提高 13.03%—29.59%、8.87%—23.11% 和 15.67%—33.33% ($P < 0.05$)。因此, 本研究认为干旱胁迫下喷施生长调节剂通过提高 SS、SPS 酶的活性, 加速叶片中蔗糖积累速率; 同时提高 ADPGase 酶的活性, 促进淀粉的合成。光合产物 (^{13}C) 在库-源器官膨压差的作用下由叶片向块根中分配, 促进光合产物在块根中的积累与分配。

3.2 干旱胁迫下生长调节剂对甘薯内源激素含量的影响

叶片是合成干物质的源和获得高产的基础, 而叶片内源激素协调作用是影响叶片生长、发育和生理功能的主要内在因素。IAA 具有前期促进叶片生长发育和后期加速叶片衰老的双重作用^[31], CTK 延缓叶片衰老^[32], ABA 促进衰老^[33]。NAA 减缓干旱胁迫下的根系移栽成活率和须根数量, 提高氧化酶的活性, 避免细胞膜受到丙二醛等毒害物质的损伤^[21]。周宇飞等^[34]研究结果表明, ZR 调控气孔的运动, 并影响光合速率及光合电子传递等其他光合生理过程。此外, 段留生等^[35]研究结果表明, ZR 作

为一种诱导光合产物合成和向库转移的重要信号, 维持或改变植物源库关系。6-BA 可提高抗氧化酶系统活性, 降低气孔阻力和丙二醛含量, 从而减轻水分胁迫下膜质过氧化物对细胞膜的伤害, 增强作物耐旱性^[25]。另有研究表明, ABA 可促进光合产物 (^{13}C) 向库的运输^[12,36]。同时作为一种逆境应激激素, 干旱胁迫下叶片中 ABA 含量升高, 诱导叶片气孔开度受抑或气孔关闭、蒸腾作用下降, 因而水耗散减少, 提高净光合速率, 最终植物保水能力和对干旱的耐受性提高^[37]。研究发现, 生长调节剂能够缓解干旱胁迫导致甘薯 IAA 和 ZR 下降的现象^[38]。本试验结果表明, 干旱胁迫下, 喷施 6-BA 和 NAA 能显著提高甘薯叶片 ZR 和 IAA 的含量; 而喷施 ABA 导致 ZR、IAA 和 ABA 含量均显著升高。这与 WANG 等^[39]、RAVI 等^[40]研究结果类似。说明干旱胁迫条件下, 喷施生长调节剂促进叶片和茎蔓生长, 延长叶片的功能期, 进而促进干物质积累。

3.3 生长调节剂与光合荧光、碳代谢酶和内源激素的关系分析

干旱胁迫喷施生长调节剂条件下, 对光合产物积累与分配差异的调控效应进行途径分析, 在薯块膨大期, 喷施生长调节剂对甘薯 ^{13}C 分配的影响直接作用系数最大的是 Pn、ZR、ABA、SS、SPS 和 Fv/Fm。这表明在薯块膨大期, 喷施生长调节剂能维持光合特性并加速光合产物的生成, 促进 ^{13}C 随光合产物运输而向块根转移与积累, 从而调控库源平衡。为了进一步明确不同生长调节剂贡献度大小以及各指标间的相关关系, 进行了 RDA 分析。 ^{13}C 总积累量、块根 ^{13}C 积累量、块根 ^{13}C 分配率、ZR、SS、SPS、Pn、Gs、ETo/CSm、TRo/ABS 和 ABS/CSm 与 LD+6-BA 处理的夹角余弦值在 0—1 范围之内, 表明 LD+6-BA 处理与 ^{13}C 总积累量、块根 ^{13}C 积累量、块根 ^{13}C 分配率、ZR、SS、SPS、Pn、Gs、ETo/CSm、TRo/ABS 和 ABS/CSm 有较好的线性关系, 说明干旱胁迫下喷施 6-BA 缓解效果最佳。

3.4 生长调节剂通过调控甘薯光合产物积累与分配进而协调库源关系

干旱胁迫喷施生长调节剂条件下, 不同生长期内光合产物的转移分配速率存在差异。本研究结果表明, 随着甘薯的标记时间的增加, 各处理甘薯植株体内 ^{13}C 总积累量显著降低 ($P < 0.05$), 降低 6.74%—9.18%。由于植物自身呼吸作用和根系分泌代谢物导致甘薯光合产物 (^{13}C) 下降^[41], 使收获期 (160 d)

甘薯植株体内 ^{13}C 总积累量显著低于薯块膨大期 (120 d) 积累量。收获期 (160 d) 喷施生长调节剂处理, 甘薯 ^{13}C 块根转移速率是叶片 ^{13}C 转移速率的 2.3 倍左右, 而薯块膨大期 (120 d) 喷施生长调节剂处理, 甘薯 ^{13}C 块根转移速率是叶片 ^{13}C 转移速率的 1.1 倍左右 ($P < 0.05$)。喷施生长调节剂促进薯块膨大期光合产物向地下部“库”的转移, 即实现了“促流”目的^[42]。

4 结论

薯块膨大期干旱胁迫下, 喷施 6-BA 可以提高叶片 ZR 和 IAA 的含量, 改善光合特性和提高碳代谢酶活性, 加速光合产物 (^{13}C) 由叶片向块根中的转移与积累, 收获期块根 ^{13}C 分配率达 58%, 从而缓解甘薯的干旱胁迫。

References

- [1] 孙哲, 史春余, 刘桂玲, 高俊杰, 柳洪鹏, 郑建利, 张鹏. 干旱胁迫与正常供水钾肥影响甘薯光合特性及块根产量的差异. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 1071-1078.
SUN Z, SHI C Y, LIU G L, GAO J J, LIU H J, ZHENG J L, ZHANG P. Effect difference of potassium fertilizer on leaf photosynthetic characteristics and storage root yield of sweet potato under drought stress and normal water condition. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 1071-1078. (in Chinese)
- [2] 汪宝卿, 姜瑶, 解备涛, 张海燕, 董顺旭, 段文学, 王庆美, 张立明. 2 个不同耐旱性甘薯品种的苗期根系蛋白组差异分析. 核农学报, 2017, 31(2): 232-240.
WANG B Q, JIANG Y, XIE B T, ZHANG H Y, DONG S X, DUAN W X, WANG Q M, ZHANG L M. Proteomic analysis of roots in seedling stage of two sweetpotato varieties with different drought tolerance. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(2): 232-240. (in Chinese)
- [3] 宁运旺, 马洪波, 张辉, 汪吉东, 许仙菊, 张永春. 甘薯源库关系建立、发展和平衡对氮肥用量的响应. 作物学报, 2015, 41(3): 432-439.
NING Y W, MA H B, ZHANG H, WANG J D, XU X J, ZHANG Y C. Response of sweetpotato in source-sink relationship establishment, expanding and balance to nitrogen application rates. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(3): 432-439. (in Chinese)
- [4] 周志林, 唐君, 金平, 刘恩良, 曹清河, 赵冬兰, 张安. 甘薯抗旱鉴定及早胁迫对甘薯叶片生理特性的影响. 西南农业学报, 2016, 29(5): 22-24.
ZHOU Z L, TANG J, JIN P, LIU E L, CAO Q H, ZHAO D L, ZHANG A. Identification of drought resistance and effect of soil drought on physiological characteristics of sweetpotato. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(5): 22-24. (in Chinese)
- [5] 李长志, 李欢, 刘庆, 史衍玺. 干旱胁迫后供水与施氮对甘薯生长与产量的影响. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(4): 29-32.
LI C Z, LI H, LIU Q, SHI Y X. Effects of water supply and nitrogen application on growth and yield of sweet potato after drought stress. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 34(4): 29-32. (in Chinese)
- [6] 孙哲, 史春余, 刘忠良, 焦娟, 田昌庚, 柳洪鹏. 干旱胁迫下钾肥对甘薯产量形成及钾素分配利用的影响. 西北农业学报, 2017, 26(3): 390-396.
SUN Z, SHI C Y, LIU Z L, JIAO J, TIAN C G, LIU H J. Effect of potassium fertilizer rate on formation of storage root yield and potassium distribution of sweet potato under drought stress. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2017, 26(3): 390-396. (in Chinese)
- [7] 江燕, 史春余, 王振振, 王翠娟, 柳洪鹏. 地膜覆盖对耕层土壤温度水分和甘薯产量的影响. 中国生态农业学报, 2014, 22(6): 627-634.
JIANG Y, SHI C Y, WANG Z Z, WANG C J, LIU H J. Effects of plastic film mulching on arable layer soil temperature, moisture and yield of sweet potato. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(6): 627-634. (in Chinese)
- [8] 解备涛, 王庆美, 张海燕, 李爱贤, 侯夫云, 汪宝卿, 董顺旭, 张立明. 植物生长调节剂对甘薯产量和激素含量的影响. 华北农学报, 2016, 31(1): 155-161.
XIE B T, WANG Q M, ZHANG H Y, LI A X, HOU F Y, WANG B Q, DONG S X, ZHANG L M. The effect of plant growth regulators on the yield and phytohormone concentration in sweet potato. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(1): 155-161. (in Chinese)
- [9] 袁刘正, 柳家友, 王会强, 付家锋, 张运栋, 吴伟华, 闫海霞. 叶面肥和生长调节剂对玉米遮荫胁迫的缓解作用. 河南农业科学, 2018, 47(4): 21-25.
YUAN L Z, LIU J Y, WANG H Q, FU J F, ZHANG Y D, WU W H, YAN H X. Mitigative effects of growth regulator and foliar fertilizer on maize under shading stress. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47(4): 21-25. (in Chinese)
- [10] MOHAMMADI H, MORADI F. Effects of plant growth regulators on endogenous hormones in two wheat cultivars differing in kernel size under control and water stress conditions. *Agriculture & Forestry*, 2013, 51(4): 162-167.

- [11] 郭贵华, 刘海艳, 李刚华, 刘明, 李岩, 王绍华, 刘正辉, 唐设, 丁艳锋. ABA 缓解水稻孕穗期干旱胁迫生理特性的分析. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4380-4391.
- GUO G H, LIU H Y, LI G H, LIU M, LI Y, WANG S H, LIU Z H, TANG S, DING Y F. Analysis of physiological characteristics about ABA alleviating rice booting stage drought stress. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(22): 4380-4391. (in Chinese)
- [12] 李欣欣, 廖红, 赵静. GA₃、ABA 和 6-BA 对大豆根系生长的影响. 华南农业大学学报, 2014, 35(3): 35-40.
- LI X X, LIAO H, ZHAO J. Effects of GA₃, ABA and 6-BA on soybean, *Glycine max* L. Merrill, root growth and development. *Journal of South China Agricultural University*, 2014, 35(3): 35-40. (in Chinese)
- [13] 张明才. 大豆高产优质性状高效表达的激素调控机理及技术研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- ZHANG M C. Hormonal physiology and regulation techniques for efficient expression of the characters of yield and quality of soybean (*Glycine max* L.) [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- [14] 魏道智, 江力, 张荣铤, 宁书菊. ABA 和 ZT 对小麦叶细胞质膜某些生理特性的影响. 西北植物学报, 2002, 22(6): 1360-1364.
- WEI D Z, JIANG L, ZHANG R X, NING S J. Effects of ABA and ZT on some physiological characteristics of cell membrane in wheat leaf. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(6): 1360-1364. (in Chinese)
- [15] 邢兴华, 徐泽俊, 齐玉军, 王晓军, 孙东雷, 卞能飞, 王幸. 外源 α -萘乙酸对花期干旱大豆碳代谢的影响. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1215-1224.
- XING X H, XU Z J, QI Y J, WANG X J, SUN D L, BIAN N F, WANG X. Effect of exogenous α -naphthaleneacetic acid on carbon metabolism of soybean under drought stress at flowering stage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(4): 1215-1224. (in Chinese)
- [16] KONG L G, WANG F B, FENG B, LI S D, SI J S, ZHANG B. The structural and photosynthetic characteristics of the exposed peduncle of wheat (*Triticum aestivum* L.): An important photosynthate source for grain-filling. *BMC Plant Biology*, 2010, 10(1): 141-150.
- [17] 陈晓杰, 张建伟, 杨保安, 张福彦, 程仲杰, 胡银岗. 冬小麦碳同位素分辨率与产量、旗叶光合性状的关系. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 166-172.
- CHEN X J, ZHANG J W, YANG B A, ZHANG F Y, CHENG Z J, HU Y G. Relationships among carbon isotope discrimination, grain yield and photosynthetic traits of flag leaves in winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(1): 166-172. (in Chinese)
- [18] 高杰, 张仁和, 王文斌, 李志伟, 薛吉全. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光系统 II 性能的影响. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1391-1396.
- GAO J, ZHANG R H, WANG W B, LI Z W, XUE J Q. Effects of drought stress on performance of photosystem II in maize seedling stage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5): 1391-1396. (in Chinese)
- [19] 徐云姬, 许阳东, 李银银, 钱希旸, 王志琴, 杨建昌. 干湿交替灌溉对水稻花后同化物转运和籽粒灌浆的影响. 作物学报, 2018, 44(4): 554-568.
- XU Y J, XU Y D, LI Y Y, QIAN X Y, WANG Z Q, YANG J C. Effect of alternate wetting and drying irrigation on post-anthesis remobilization of assimilates and grain filling of rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(4): 554-568. (in Chinese)
- [20] 孙哲, 范维娟, 刘桂玲, 田昌庚, 张鹏, 柳洪鹏, 杨俊, 赵丰玲, 史春余. 干旱胁迫下外源 ABA 对甘薯苗期叶片光合特性及相关生理指标的影响. 植物生理学报, 2017, 53(5): 873-880.
- SUN Z, FAN W J, LIU G L, TIAN C G, ZHANG P, LIU H J, YANG J, ZHAO F L, SHI C Y. Effects of exogenous ABA on leaf photosynthetic characteristics and associated physiological indexes of sweetpotato (*Ipomoea Batatas*) seedlings under drought stress. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(5): 873-880. (in Chinese)
- [21] 解备涛, 王庆美, 张立明. 不同水分条件下植物生长调节剂对甘薯移栽后根系的影响. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2008, 25(4): 247-252.
- XIE B T, WANG Q M, ZHANG L M. The effect of plant growth regulator on the root of sweet potato (*Ipomoea Batatas* L.) after transplantation under drought stress. *Journal of Qingdao Agricultural University(Natural Science)*, 2008, 25(4): 247-252. (in Chinese)
- [22] 杜召海, 汪宝卿, 解备涛, 张海燕, 王庆美, 张立明. 模拟干旱条件下植物生长调节剂对夏薯苗期根系生理生化特性的影响. 西北农业学报, 2014, 23(10): 97-104.
- DU Z H, WANG B Q, XIE B T, ZHANG H Y, WANG Q M, ZHANG L M. Effects of plant growth regulators on physiological and biochemical characteristics of roots in summer sweet potato seedlings under simulated drought stress. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, 23(10): 97-104. (in Chinese)
- [23] 汪顺义, 刘庆, 史衍玺, 李欢. 氮钾配施对甘薯光合产物积累及分配的影响. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2706-2716.

- WANG S Y, LIU Q, SHI Y X, LI H. Interactive effects of nitrogen and potassium on photosynthesis product distribution and accumulation of sweet potato. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14): 2706-2716. (in Chinese)
- [24] 何钟佩. 农作物化学控制实验指导. 北京: 中国农业大学出版社, 1993: 60-68.
- HE Z P. *Experimental Guidance of Crop Chemical Control*. Beijing: China Agricultural University Press, 1993: 60-68. (in Chinese)
- [25] 王军, 陈帆, 温明霞, 李小龙, 饶兴义, 夏志林, 许本波. 6-BA 处理对烤烟耐旱性的影响. 作物研究, 2017, 31(2): 44-47, 82.
- WANG J, CHEN F, WEN M X, LI X L, RAO X Y, XIA Z L, XU B B. Effect of 6-BA on drought tolerance of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Crop Research*, 2017, 31(2): 44-47, 82. (in Chinese)
- [26] 张善平, 冯海娟, 马存金, 李耕, 刘鹏, 董树亭, 赵斌, 张吉旺, 杨今胜. 光质对玉米叶片光合及光系统性能的影响. 中国农业科学, 2014, 47(20): 3973-3981.
- ZHANG S P, FENG H J, MA C J, LI G, LIU P, DONG S T, ZHAO B, ZHANG J W, YANG J S. Effect of light quality on photosynthesis and photosystem of maize (*Zea mays* L.) leaves. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20): 3973-3981. (in Chinese)
- [27] CAI R G, LI P M, PENG T, GAO H Y, WANG Z L. Partitioning of excitation energy in two wheat cultivars with different grain protein contents grown under three nitrogen applications in the field. *Physiologia Plantarum*, 2007, 129(4): 822-829.
- [28] 柳洪鹏, 姚海兰, 史春余, 张立明. 施钾时期对甘薯济徐 23 块根淀粉积累与品质的影响及酶学生理机制. 中国农业科学, 2014, 47(1): 43-52.
- LIU H J, YAO H L, SHI C Y, ZHANG L M. Effect of potassium application time on starch accumulation and related enzyme activities of sweet potato variety Jixu 23. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(1): 43-52. (in Chinese)
- [29] KUADALI F, AL-AIN F, AL-CHAMMAA M. Evaluation of water stress tolerance in advanced breeding lines of durum and bread wheat using ^{13}C . *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 2018, 14(2): 5-18.
- [30] 刘春娟, 冯乃杰, 郑殿峰, 宫香伟, 孙福东, 石英, 崔洪秋, 张盼盼, 赵晶晶. 植物生长调节剂 S3307 和 DTA-6 对大豆源库碳水化合物代谢及产量的影响. 中国农业科学, 2016, 49(4): 657-666.
- LIU C J, FENG N J, ZHENG D F, GONG X W, SUN F D, SHI Y, CUI H Q, ZHANG P P, ZHAO J J. Effects of plant growth regulators S3307 and DTA-6 on carbohydrate content and yield in soybean. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(4): 657-666. (in Chinese)
- [31] 王海波, 王帅, 王孝娣, 史祥宾, 王宝亮, 郑晓翠, 王志强, 刘凤之. 光质对设施葡萄叶片衰老与内源激素含量的影响. 应用生态学报, 2017, 28(11): 88-96.
- WANG H B, WANG S, WANG X D, SHI X B, WANG B L, ZHENG X C, WANG Z Q, LIU F Z. Effects of light quality on leaf senescence and endogenous hormones content in grapevine under protected cultivation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(11): 88-96. (in Chinese)
- [32] 杨帆, 刘春晖, 杨晓艳, 翁建峰, 周羽, 王振华, 邸宏. 延缓叶片衰老 ZmIPT2 基因的玉米遗传转化及功能验证. 玉米科学, 2017, 25(1): 45-51.
- YANG F, LIU C H, YANG X Y, WENG J F, ZHOU Y, WANG Z H, DI H. Transformation of ZmIPT2 gene related to leaf senescence into maize and function identification. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(1): 45-51. (in Chinese)
- [33] 张立明, 王庆美, 何钟佩. 脱毒和生长调节剂对甘薯内源激素含量及块根产量的影响. 中国农业科学, 2007, 40(1): 70-77.
- ZHANG L M, WANG Q M, HE Z P. Effects of virus-eliminating and plant growth regulators on the endogenous level of hormone and tuber root yield of sweetpotato. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(1): 70-77. (in Chinese)
- [34] 周宇飞, 王德权, 陆樟镛, 王娜, 王艺陶, 李丰先, 许文娟, 黄瑞冬. 干旱胁迫对持绿性高粱光合特性和内源激素 ABA、CTK 含量的影响. 中国农业科学, 2014, 47(4): 655-663.
- ZHOU Y F, WANG D Q, LU Z B, WANG N, WANG Y T, LI F X, XU W J, HUANG R D. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and endogenous hormone ABA and CTK contents in green-stayed sorghum. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(4): 655-663. (in Chinese)
- [35] 段留生, 田晓莉. 作物化学控制原理与技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2005: 40-50.
- DUAN L S, TIAN X L. *Crop Chemical Regulation Mechanism and Technique*. Beijing: China Agricultural University Press, 2005: 40-50. (in Chinese)
- [36] 王庆美, 张立明, 王振林. 甘薯内源激素变化与块根形成膨大的关系. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2414-2420.
- WANG Q M, ZHANG L M, WANG Z L. Formation and thickening of tuberous roots in relation to the endogenous hormone concentrations in sweetpotato. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2414-2420.

- (in Chinese)
- [37] SCHUSSLER J R, BRENNER M L, BRUN W A. Relationship of endogenous abscisic acid to sucrose level and seed growth rate of soybeans. *Plant Physiology*, 1991, 96(4): 1308-1313.
- [38] 匡逢春, 萧浪涛, 夏石头. 脱落酸对植物气孔运动的调控作用. *植物生理学通讯*, 2003, 39(3): 262-266.
- KUANG F C, XIAO L T, XIA S T. Regulation of stomatal movement by abscisic acid. *Plant Physiology Communications*, 2003, 39(3): 262-266. (in Chinese)
- [39] WANG P, LI X Y, TIAN L, GU Z X, YANG R Q. Low salinity promotes the growth of broccoli sprouts by regulating hormonal homeostasis and photosynthesis. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 2019, 30(1) 19-30.
- [40] RAVI V, DAVIES W J, REYNOLDS M P, IAN C. Foliar abscisic acid-to-ethylene accumulation and response regulate shoot growth sensitivity to mild drought in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7(461): 1-13.
- [41] 马田, 刘肖, 李骏, 张旭东, 何红波. CO₂ 浓度升高对土壤-植物(春小麦)系统光合碳分配和积累的影响. *核农学报*, 2014, 28(12): 2238-2246.
- MA T, LIU X, LI J, ZHANG X D, HE H B. Effects of elevated atmospheric CO₂ on the distribution and accumulation of photosynthetic carbon in soil-plant (spring wheat) system. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(12): 2238-2246. (in Chinese)
- [42] 刘鑫, 高智杰, 汤志平, 董克强. 马铃薯不同生育期喷施植物生长调节剂对产量的影响. *中国园艺文摘*, 2011, 27(10): 28-29.
- LIU X, GAO Z J, TANG Z P, DONG K Q. The effect of spraying plant growth regulator at different stages on the yield of potatoes. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2011, 27(10): 28-29. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)

氮肥水平与栽植密度对植稻土壤养分含量变化与氮肥利用效率的影响

李思平 曾路生* 吴立鹏 张玉晓 解军蕊 丁效东*

(青岛农业大学 资源与环境学院, 山东 青岛 266109; *通信联系人, E-mail: zenglsh@163.com; xiaodongding2004@163.com)

Effects of Nitrogen Fertilizer Level and Planting Density on Changes in Soil Nutrient contents and Nitrogen Use Efficiency in Rice

LI Siping, ZENG Lusheng*, WU Lipeng, ZHANG Yuxiao, XIE Junrui, DING Xiaodong*

(College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; *Corresponding author, E-mail: zenglsh@163.com; xiaodongding2004@163.com)

Abstract: 【Objective】In order to improve soil fertility, rice grain yield, and nitrogen fertilizer utilization efficiency, 【Method】a two-factor field experiment (nitrogen fertilizer level and planting density) was carried out in paddy fields in Rencheng District, Jining City, Shandong Province. The nitrogen application rates were as follows: zero nitrogen (N_1), 0 kg/hm²; low nitrogen (N_2), 216 kg/hm²; medium nitrogen (N_3), 288 kg/hm²; and high nitrogen (N_4), 360 kg/hm², coupling with three planting densities including low density(D_1 , 240 000 hill/hm²), medium density(D_2 , 270 000 hill/hm²) and high density(D_3 , 300 000 hill/hm²). The soil nutrient contents and nitrogen use efficiency were measured in mature stage under different nitrogen fertilizer levels and planting densities. 【Result】The contents of nitrogen, phosphorus, potassium and organic matter decreased significantly with the deepening soil layer. Among them, the content of alkali nitrogen in D_3N_4 treatment decreased by 60.8%, and the content of available phosphorus in D_3N_3 treatment decreased by 72.7%. With the increase of nitrogen application rate, the soil pH and organic matter content decreased, and the available potassium content increased, the partial productivity of fertilizer and nitrogen fertilizer agricultural utilization efficiency decreased, and yield increased first and then decreased. With the increase of planting density, the soil pH and available phosphorus decreased, the alkali nitrogen content of surface soil increased slightly, and the organic matter content, yield and fertilizer partial productivity increased first and then decreased, and the nitrogen agricultural utilization efficiency decreased. 【Conclusion】Under D_2N_3 , the rice yield was the highest, reaching 14 615.3 kg/hm². At the same density, the nitrogen fertilizer level of N_2 help give rise to higher rice yield, nitrogen fertilizer agricultural utilization efficiency and fertilizer partial productivity. The research results can be referenced in actual production.

Keywords: application level of nitrogen fertilizer; planting density; rice; soil nutrient; yield; fertilizer use efficiency

摘 要: 【目的】为解决水稻土壤保肥能力较弱, 水稻产量较低, 氮肥利用效率不高等问题, 【方法】于山东省济宁市任城区水稻田设置氮肥水平与栽植密度双因素大田试验, 设 4 个施氮量水平, 即无氮(N_1 , 0 kg/hm²)、低氮(N_2 , 216 kg/hm²)、中氮(N_3 , 288 kg/hm²)和高氮(N_4 , 360 kg/hm²); 栽植密度设 3 个梯度, 即低密度(24 万穴/hm²)、中密度(27 万穴/hm²)和高密度(30 万穴/hm²)。以探究不同氮肥水平和栽植密度下水稻成熟期土壤养分含量及氮肥利用效率的变化。【结果】随着土层加深, 氮、磷、钾、有机质含量均明显下降。其中 D_3N_4 处理碱解氮含量下降了 60.8%, D_3N_3 处理速效磷含量降低了 72.7%。随着施氮量增加, 土壤 pH 值和有机质含量有所下降, 速效钾含量升高, 肥料偏生产力与氮肥农学利用效率降低, 产量先升高后降低; 随着栽植密度增加, 土壤 pH 值与速效磷含量有所下降, 表层土壤碱解氮含量略有升高, 有机质含量与产量及肥料偏生产力均先升高后降低, 氮肥农学利用效率降低。【结论】当栽植密度为 27 万穴/hm²时, 氮肥用量 288 kg/hm², 水稻产量最高, 为 14 615.3 kg/hm²; 相同密度下氮肥按照 216 kg/hm²施用, 水稻产量、氮肥农学效率和肥料偏生产力均较高。研究结果可在实际生产

收稿日期: 2019-04-12; 修改稿收到日期: 2019-11-04。

基金项目: 山东省现代农业产业体系水稻创新团队栽培建设项目(SDAIT-17-05); 国家重点研发计划资助项目(2018YFD0200204-06)。

中参考应用。

关键词: 氮肥施用量; 栽植密度; 水稻; 土壤养分; 产量; 肥料利用效率

中图分类号: S143.1; S511.062

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2020)01-0069-11

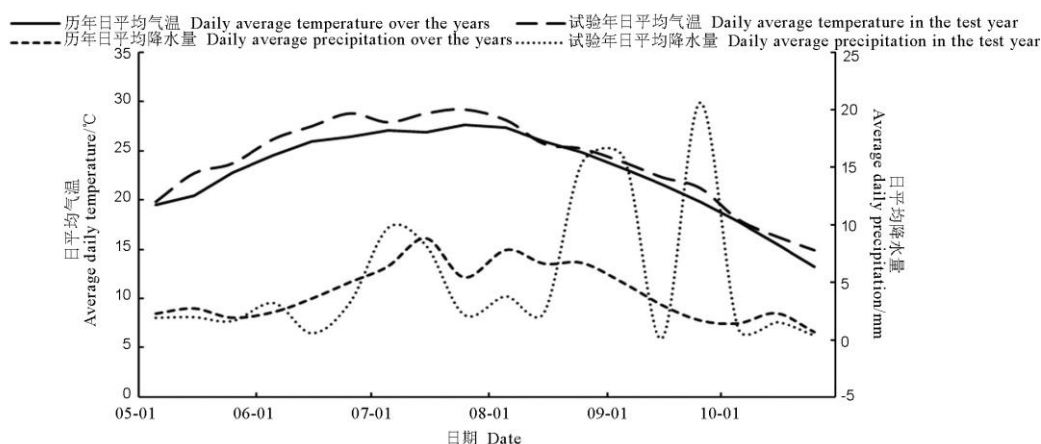
我国是世界上人口最多的国家,全国有65%的人口以稻米为主食。水稻作为我国最主要粮食作物,总产量占全国粮食产量的50%,对我国的粮食安全起着至关重要的作用^[1-2]。在水稻栽培生产过程中,氮肥用量与栽植密度均为影响水稻生长发育的关键因素^[3]。20世纪80年代以来,大量的氮肥投入显著提高了我国的水稻产量。但是,当氮肥供应量超过作物生长需求时,产量的限制因子已不再是氮素^[4]。目前水稻生产中仍以增施氮肥作为提高产量的主要手段,盲目过量施氮不仅降低了氮肥增产效率和肥料利用率,还会造成环境污染和生态破坏^[5]。所以,合理的氮肥施用量和运筹模式尤为重要。另外,控制水稻栽植密度也是提高产量的重要手段之一。相关研究表明,水稻稀植能够促进分蘖,发挥个体优势,提高单株生产力^[6-7]。但从农业生产的角度来看,水稻高产需要发挥群体结构优势,栽植密度过稀,会导致基本苗数不足,不利于光能与地力的充分利用^[8-10]。王成瑗等^[11]认为稀植栽培适合育苗,而合理密植栽培才是稳产的栽培手段。大量研究表明,只有合理的氮肥用量和栽植密度才能保证水稻在正常生长发育的基础上,改善生长环境,调整群体结构,从而提高氮肥利用率,增加产量^[12-14]。关于氮肥运筹对水稻根际土壤养分和氮肥利用率的影响,前人已有较多研究。陈军等^[15]研究表明,适当地前氮后移能显著增加水稻产量,增加水稻生

育后期的土壤速效养分,降低土壤pH值。张玉等^[16]研究认为,在水稻各需肥高峰期分次施用氮肥,能明显改善免耕水稻的根际环境,有助于提高肥料利用率,显著提高水稻生育后期根际土壤有机质、碱解氮含量。而氮肥与栽植密度相互作用下的土壤养分变化和水稻的氮肥利用率则需进一步探索。山东稻区土壤保肥能力较弱,水稻产量较低,氮肥利用效率不高。本研究通过研究不同氮肥水平和栽植密度下水稻成熟期土壤养分含量及氮肥利用效率的变化,结合水稻需肥规律,以期寻求水稻氮肥用量与栽植密度的最佳组合,为实现山东水稻的高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在山东济宁任城水稻试验田进行,土壤类型为肥力中等的砂姜黑土。试验前0—20 cm土层土壤基本理化性质为pH 8.1,有机质11.7 g/kg,全氮1.19 g/kg,全磷0.85 g/kg,全钾1.31 g/kg,速效磷24.6 mg/kg,速效钾212.0 mg/kg。试验对象为第二季水稻,品种为圣稻18,于2017年6月17日插秧,10月15日收割。供试肥料包括尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 16%)、氯化钾(含K₂O 60%)和硫酸锌(ZnSO₄·7H₂O)。



图中数据来自中国气象数据网地面气象资料。

The data in the figure are from China Meteorological Data Network.

图1 山东济宁稻区水稻生育期日平均气温与日平均降水量变化趋势

Fig. 1. Trends of daily average temperature and daily average precipitation during rice growth period in Jining rice region of Shandong Province.

表 1 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层 pH 值的影响

Table 1. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on pH of different soil layers in rice maturity.

处理 Treatment	土层深度 Soil layer		均值 Average value	变异系数 Coefficient of variation
	0—20 cm	20—40 cm		
D ₁ N ₁	7.72±0.06 b	7.87±0.02 c	7.80	0.014
D ₁ N ₂	7.69±0.01 bc	7.75±0.01 e	7.72	0.005
D ₁ N ₃	7.87±0.06 a	7.99±0.09 ab	7.93	0.011
D ₁ N ₄	7.91±0.05 a	8.03±0.02 a	7.97	0.011
D ₂ N ₁	7.69±0.01 bc	7.98±0.02 ab	7.84	0.026
D ₂ N ₂	7.65±0.04 bcd	7.80±0.02 de	7.73	0.014
D ₂ N ₃	7.63±0.05 cd	7.74±0.06 e	7.69	0.010
D ₂ N ₄	7.59±0.01 de	7.66±0.07 f	7.63	0.006
D ₃ N ₁	7.69±0.03 bc	7.94±0.02 b	7.82	0.023
D ₃ N ₂	7.71±0.03 b	7.84±0.01 cd	7.78	0.012
D ₃ N ₃	7.54±0.06 ef	7.82±0.03 cd	7.68	0.026
D ₃ N ₄	7.51±0.01 f	7.99±0.03 ab	7.75	0.044
氮肥水平 Nitrogen level(N)	*	***		
栽植密度 Planting density(D)	***	***		
N×D	***	***		

N₁—氮肥用量 0kg/hm²；N₂—氮肥用量 216kg/hm²；N₃—氮肥用量 288kg/hm²；N₄—氮肥用量 360kg/hm²；D₁—栽植密度 24 万穴/hm²；D₂—栽植密度 27 万穴/hm²；D₃—栽植密度 30 万穴/hm²。每行数据后不同小写字母表示各处理间在 P<0.05 水平上差异显著；*，P<0.05；**，P<0.01；***，P<0.001。下表同。

N₁, Zero nitrogen, 0kg/hm²; N₂, Low nitrogen application level, 216 kg/hm²; N₃, Medium nitrogen level, 288 kg/hm²; N₄, High nitrogen level, 360 kg/hm²; D₁, Planting density of 24000 hill/hm²; D₂, Planting density of 27000 hill/hm²; D₃, Planting density of 30000 hill/hm². Different lowercase letters in each line indicate significant difference at P < 0.05 level; *, P<0.05; **, P<0.01; ***, P<0.001. The same as in tables and figures below.

1.2 试验设计

试验设施氮量与栽植密度双因素处理，施氮量(折合纯氮)设 4 个水平：无氮(N₁)，0 kg/hm²；低氮(N₂)，216 kg/hm²；中氮(N₃)，288 kg/hm²；高氮(N₄)，360 kg/hm²。其中，中氮(N₃)为农民常规施氮量。水稻插秧机移栽，密度设 3 个梯度：低密度，24 万穴/hm²；中密度，27 万穴/hm²；高密度，30 万穴/hm²。其中，低密度为当地常规栽培密度。共 12 个处理，3 次重复。小区面积为 30.24 m²(3.6 m×8.4 m)，随机区组排列，各小区之间用塑料薄膜隔开，嵌入土层以下 40 cm，地面以上保留 60 cm。区组之间设置 60 cm 宽的排灌沟，排灌沟中央开挖宽度和深度各 25~30 cm 的走水沟，全部小区实行单排单灌。氮肥分四次施用，其中基肥、返青肥、分蘖肥、穗肥施用量各占总施氮量的 30%，25%，35%和 10%。磷肥用量(折合 P₂O₅)112.5 kg/hm²，全部作基肥；钾肥用量(折合 K₂O)112.5 kg/hm²，全部作基肥。各处理均基施硫酸锌 15 kg/hm²。水稻种植期间保持田面水位 1~6 cm，拔节和抽穗之前各喷施一次防病虫害农药，其他田间管理均按当地常规方法进行。

1.3 测定项目及方法

于水稻成熟期采集土壤样品，用土钻分别采取各小区 0~20 cm、20~40 cm 两个土层的土壤样品。每小区土样多点采集，同层土样混匀后平铺在牛皮纸上置于阴凉处自然风干、去杂，过 1mm 筛后装袋保存。于水稻收获期每小区选择 1m² 计算水稻产

量，带回实验室进行脱粒烘干称重。

土壤分析测定参考文献[17]；土壤 pH 值采用 ST-2100 型 pH 计进行测定；土壤碱解氮采用碱解扩散法测定；土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提比色法测定；土壤速效钾采用醋酸铵—火焰光度计法测定；土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。

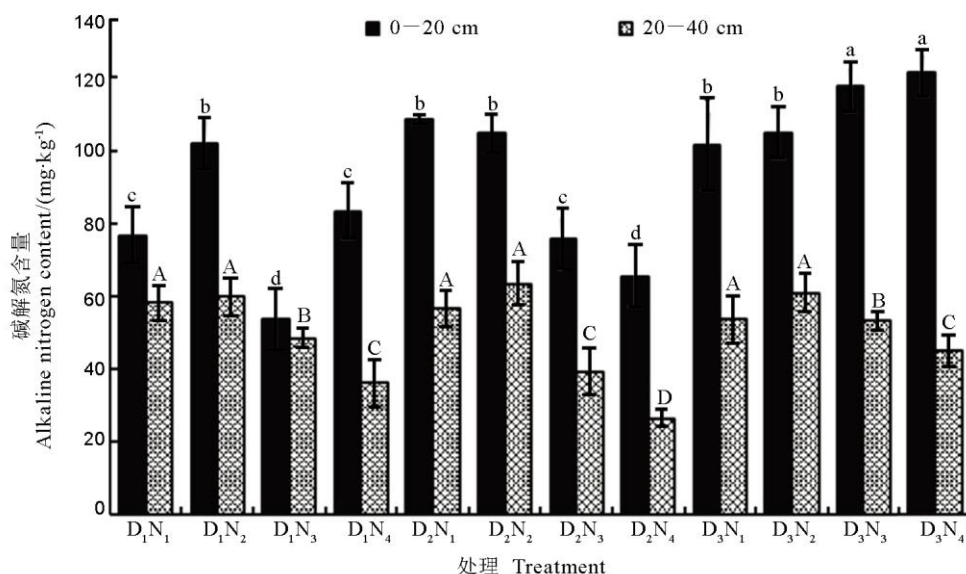
1.4 统计分析

采用 SPSS 20.0 和 Microsoft Office Excel 工作表对各指标数据进行统计分析，并绘制图表。方差分析比较处理间的效应差异，LSD 法比较平均数之间的差异显著性，并进行相关性分析。肥料利用率计算方法^[18]：氮肥农学利用率(kg/kg)=(施氮处理产量—不施氮处理产量)/施氮量；肥料偏生产力(kg/kg)=施肥后所获得的作物产量/化肥纯养分的投入量。

2 结果与分析

2.1 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层 pH 的影响

由表 1 数据可知，分层土壤的 pH 值在 7.54~8.03 之间波动，为微碱性土壤。随着土层加深，各处理土壤 pH 均有所升高，其中 D₁N₄ 处理的 20—40 cm 土层 pH 最高，为 8.03。随着栽植密度增大，pH 有所降低，土壤酸化程度加深，且栽植密度对 0—20 cm 和 20—40 cm 土层 pH 的影响均呈极显著。且在低密度处理时，施氮量的增加，各土层 pH 有



图柱上方不同小写字母表示不同处理间 0—20 cm 土层在 $P<0.05$ 水平上差异显著; 不同大写字母表示不同处理间 20—40 cm 土层在 $P<0.05$ 上差异显著。图 3~4 同。

Different lowercase letters above the bars indicate significant difference between the 0-20cm soil layers at $P<0.05$ level, and different capital letters indicate significant difference between 20—40 cm soil layer at $P<0.05$ level. The same as in figures below.

图 2 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层碱解氮含量的影响

Fig. 2. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on alkali nitrogen content in different soil layers during rice maturity.

升高的趋势, 如 0—20 cm 土壤的 D₁N₁ 处理 pH 为 7.71, 而 D₁N₄ 处理 pH 高达 7.91。但在中、高密度处理时, 随着施氮量的增加, 各处理土层 pH 有下降的趋势, 如 0—20 cm 土层的 D₃N₁ 处理 pH 为 7.69, 而 D₃N₄ 处理则低至 7.51。且氮肥水平对 0—20 cm 土层 pH 影响显著, 对 20—40 cm 土层 pH 影响极显著。另外, 在不同土层中, 氮肥水平与栽植密度的交互效应均为极显著。

2.2 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层碱解氮含量的影响

由图 2 可知, 随着土层加深, 各处理碱解氮含量均明显下降, 其中 D₃N₄ 处理碱解氮含量下降最明显, 由浅层的 114.3 mg/kg 下降至深层的 44.8 mg/kg, 下降了 60.8%。0—20 cm 土层碱解氮含量在低密度下随施氮量增多而升高; 而 20—40 cm 土层碱解氮含量均随施氮量增加先升高后降低, 且在 N₂ 水平处有峰值。随着栽植密度的增加, 0—20 cm 土层碱解氮含量略有升高趋势。由表 2 因素分析可知, 氮肥水平和栽植密度对 0—20 cm 和 20—40 cm 土层碱解氮含量的影响均极显著。另外, 不同土层中氮肥水平与栽植密度的交互效应也极显著。

2.3 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层速效磷含量的影响

由图 3 可知, 随着土层的加深, 各处理速效磷

含量均明显下降, 其中下降最大的 D₃N₃ 处理速效磷含量由表层的 92.8 mg/kg 下降至深层的 25.3 mg/kg, 降低了 72.7%。低密度下各处理的速效磷含量较高, 随着栽植密度的增加, 土壤速效磷含量呈递减趋势。且由表 2 可知, 栽植密度对 0—20 cm 和 20—40 cm 土层速效磷含量均有极显著影响。不同氮肥用量水平对各土层速效磷含量影响波动较大, 氮肥水平对 0—20 cm 土层速效磷含量无显著影响, 但 20—40 cm 土层速效磷含量在中、低密度下随施氮量的增加先升高后降低, 在高密度下先降低后升高。且氮肥水平对 20—40 cm 土层速效磷含量有极显著影响, 且在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中, 氮肥水平与栽植密度的交互效应也极显著。

2.4 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层速效钾含量的影响

由图 4 可知, 随土层加深各处理速效钾含量均明显降低, 其中下降最大的 D₁N₂ 处理由表层的 166.2 mg/kg 下降至深层的 88.9 mg/kg, 降低了 46.5%。无氮(N₁)和低氮(N₂)条件下, 土壤速效钾含量随栽植密度升高有降低趋势, 而中氮(N₃)和高氮(N₄)条件下, 土壤速效钾含量随栽植密度升高有升高趋势。且 0—20 cm 与 20—40 cm 土层的速效钾含量变化趋势基本一致。由表 2 可知, 氮肥水平和栽植密度对 0—20 cm 和 20—40 cm 土层速效钾含

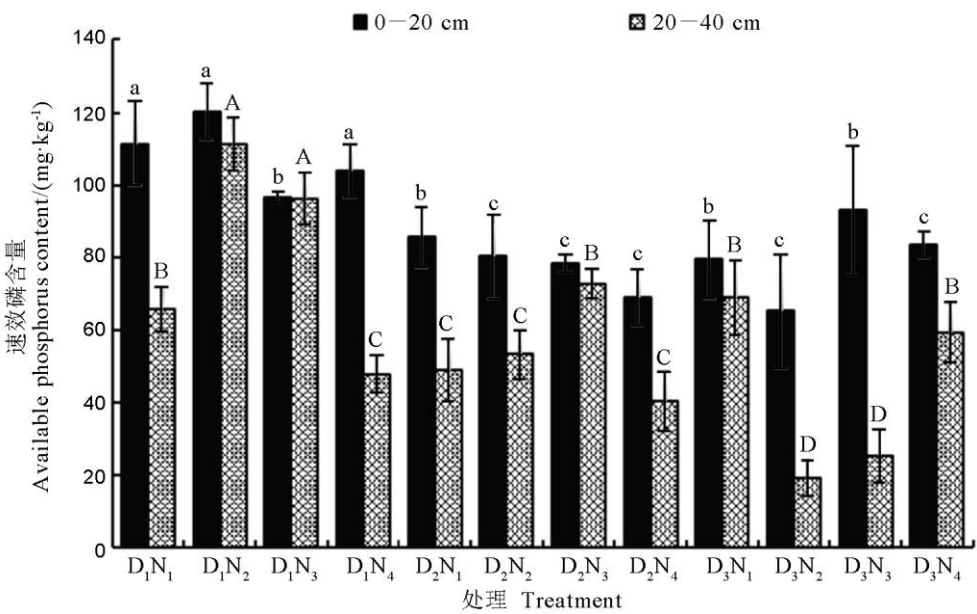


图 3 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层速效磷含量的影响

Fig. 3. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on available phosphorus content in different soil layers during rice maturity.

表 2 氮肥水平与栽植密度对水稻土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量的影响因素分析

Table 2. Effects of nitrogen fertilizer level and planting density on the contents of alkali nitrogen, available phosphorus and available potassium in rice soil.

因素分析 Factor analysis	碱解氮 Alkaline nitrogen		速效磷 Available phosphorus		速效钾 Available potassium	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
氮肥水平 Nitrogen level	***	***	NS	***	***	***
栽植密度 Density	***	**	***	***	***	***
N×D	***	**	**	***	***	***

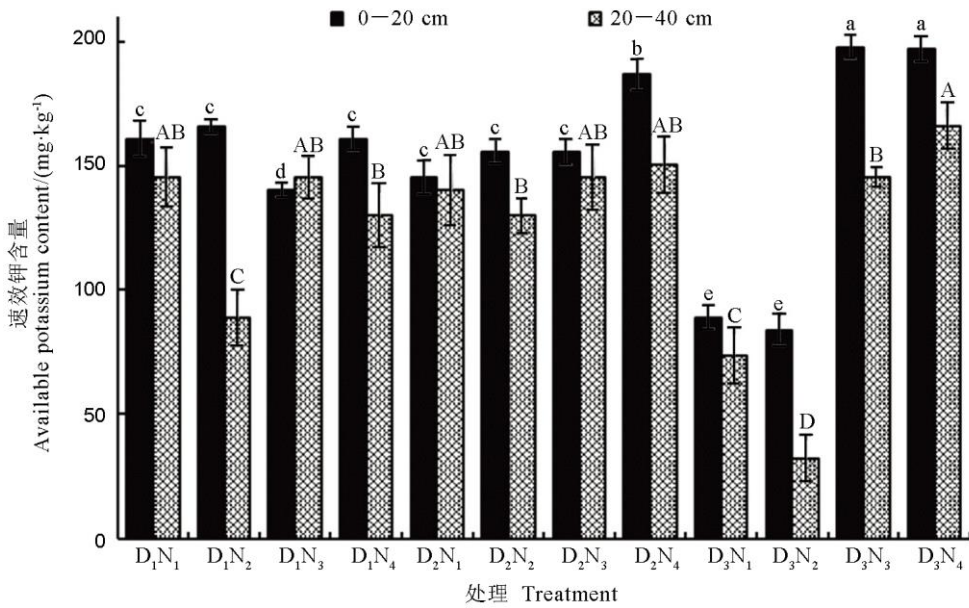


图 4 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层速效钾含量的影响

Fig. 4. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on available potassium content in different soil layers during rice maturity.

表3 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层有机质含量的影响

Table 3. Effect of nitrogen fertilizer level and planting density on organic matter content in different soil layers during rice maturity.

g/kg

处理 Treatment	土壤层次 Soil level		均值 Average value	变异系数 Coefficient of variation
	0—20 cm	20—40 cm		
D ₁ N ₁	25.1±1.2 ab	14.7±0.3 de	19.9	0.37
D ₁ N ₂	20.8±2.7 d	18.8±1.1 ab	19.8	0.07
D ₁ N ₃	21.2±0.6 cd	12.7±1.6 e	17.0	0.35
D ₁ N ₄	25.7±0.9 a	16.0±2.0 cd	20.9	0.33
D ₂ N ₁	22.4±0.5 bcd	19.6±0.7 a	21.0	0.09
D ₂ N ₂	25.0±2.8 ab	17.3±1.0 abc	21.2	0.26
D ₂ N ₃	23.7±0.5 abc	17.9±1.8 abc	20.8	0.20
D ₂ N ₄	24.1±0.7 ab	19.0±1.6 ab	21.6	0.17
D ₃ N ₁	23.2±0.5 bc	16.7±0.4 bcd	20.0	0.23
D ₃ N ₂	24.8±1.9 ab	16.2±0.5 cd	20.5	0.30
D ₃ N ₃	22.6±2.7 bcd	16.8±1.9 bcd	19.7	0.21
D ₃ N ₄	22.9±0.3 bc	12.9±2.3 e	17.9	0.40
氮肥水平 Nitrogen level(N)	*	***		
栽植密度 Planting density(D)	NS	*		
N×D	**	***		

量影响极显著。另外,各土层氮肥水平与栽植密度的交互效应也极显著。

2.5 氮肥水平与栽植密度对水稻成熟期不同土层有机质含量的影响

由表3数据可知,且随着土层加深,各处理有机质含量均明显下降,其中D₂N₄处理的0—20 cm土壤有机质含量为25.7 g/kg,20—40 cm土壤有机质含量为16.0 g/kg,下降了37.7%。栽植密度对0—20 cm土层有机质含量无显著影响,而对20—40 cm土层有机质含量影响显著。且氮肥水平对0—20 cm土层pH影响显著,对20—40 cm土层pH影响极显著。另外,在不同土层中,氮肥水平与栽植密度的交互效应均为极显著。分析各处理0—40 cm土层有机质含量的均值可以看出,中密度栽植下水稻土壤有机质含量较高;随施氮量增加,中、低密度土壤有机质含量呈先减少后增加的趋势,而高密度下,有机质含量随施氮量增加而降低。

2.6 氮肥水平与栽植密度对水稻产量及肥料利用效率的影响

由表4可知,氮肥用量与栽植密度互作对水稻产量有显著影响。D₂N₃处理的产量最高,可达14 615.3 kg/hm²,对比常规处理D₁N₃,产量提高了18.5%;其次是D₂N₂,产量为14 366.2 kg/hm²。D₃N₁处理产量最低,仅有8 221.1 kg/hm²。从氮肥水平来看,288 kg/hm²的氮肥用量为最佳。从栽植密度看,27万穴/hm²的栽植密度为最佳。从产量构成因子来

看,氮肥水平和栽植密度对千粒重、穗数、结实率的交互效应均表现为极显著,其中穗数对氮肥水平和栽植密度的单因素响应也均为极显著,且变化趋势与产量相似,D₂N₃处理最高,D₃N₁最低,说明水稻穗数是影响产量最关键的构成因子。从利用效率来看,随着施氮量增加,中、低密度处理的氮肥农学利用效率有降低趋势,而高密度下D₃N₄处理氮肥农学利用效率升高较多。虽然D₃N₄处理的氮肥农学利用率最高,为10.49 kg/kg,但产量不高;D₂N₄处理氮肥利用率最低。对于肥料偏生产力而言,各密度下均以不施氮肥的N₁处理为最高,但产量不是最高,随着施氮增多偏生产力下降。结合高产高效原则,D₂N₃和D₂N₂可推荐在生产中参考应用。

2.7 氮肥水平与栽植密度作用下植稻土壤养分与水稻产量及肥料利用效率的相关性分析

由表5可知,水稻产量与土壤速效磷、速效钾含量显著相关($r=0.57^*$ 和 $r=0.44^*$),但与土壤pH和土壤碱解氮负相关,与其他指标相关性未达显著。氮肥利用效率与土壤碱解氮含量显著相关($r=0.58^*$),与土壤pH和土壤速效磷负相关。肥料偏生产力与土壤速效磷含量也显著相关($r=0.52^*$)。此外,研究发现土壤pH与速效磷含量正相关,而与碱解氮、速效钾均负相关。碱解氮与速效磷、钾的相关性不高,但速效磷与速效钾之间正相关($r=0.32$)。

表 4 氮肥水平与栽植密度交互对水稻产量、构成因子及肥料利用效率的影响

Table 4. Effects of interaction between nitrogen level and planting density on rice yield, its components and fertilizer use efficiency.							
处理 Treatment	产量 Yield/(kg hm ⁻²)	千粒重 Thousand seed weight/g	穗数 Number of panicles per 667m ² (×10 ⁴)	穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed setting rate/%	氮肥农学利用效率 Nitrogen fertilizer agricultural utilization efficiency/(kg kg ⁻¹)	肥料偏生产力 Fertilizer partial productivity/(kg kg ⁻¹)
D ₁ N ₁	11124.1±799.2 b	22.5±0.3 cd	220.3±16.7 d	224.7±12.3 abc	89.0±1.2 abc	/	49.44
D ₁ N ₂	11957.9±299.7 b	21.2±0.4 f	246.0±13.8 cd	229.7±8.7 a	89.3±1.1 ab	3.86	27.12
D ₁ N ₃	12331.7±949.1 b	24.1±0.7 a	248.6±7.9 cd	205.9±10.8 cd	87.5±0.7 cde	4.19	24.04
D ₁ N ₄	11338.7±49.9 c	21.3±1.2 ef	241.8±15.6 cd	220.0±11.3 abc	88.5±1.0 bc	0.60	19.38
D ₂ N ₁	13037.5±1398.6 ab	22.9±0.5 bc	253.6±22.1 c	224.6±6.9 abc	88.3±0.4 bcd	/	57.94
D ₂ N ₂	14366.2±699.3 a	22.2±0.4 cdef	311.0±14.7 b	207.9±15.2 bcd	86.8±0.7 de	6.15	32.58
D ₂ N ₃	14615.3±1098.9 a	22.2±0.6 cdef	376.7±20.7 a	174.8±13.7 e	89.3±1.3 ab	5.47	28.49
D ₂ N ₄	13165.6±449.6 b	22.4±0.7 cde	321.1±19.3 b	182.9±12.2 e	86.5±0.5 e	0.36	22.51
D ₃ N ₁	8221.1±499.5 d	22.2±0.8 cdef	164.4±9.5 e	224.9±10.9 abc	90.1±0.6 a	/	36.54
D ₃ N ₂	9259.1±749.3 cd	23.7±1.1 ab	172.4±14.5 e	226.4±7.3 ab	88.9±0.8 abc	4.81	21.00
D ₃ N ₃	9466.7±499.5 c	21.1±0.2 f	233.7±18.9 cd	191.9±16.0 de	86.4±0.7 e	4.33	18.45
D ₃ N ₄	11999.5±1148.9 b	21.7±0.3 def	236.2±26.7 cd	233.9±14.8 a	89.2±1.3 ab	10.49	20.51
氮肥水平 Nitrogen level(N)	***	NS	***	***	*		
密度 Growing density(D)	*	NS	***	***	*		
N×D	***	***	***	*	***		

表 5 水稻成熟期 0—20 cm 植稻土壤养分与水稻产量及肥料利用率的相关性分析

Table 5. Correlation analysis between soil nutrient contents and rice yield and fertilizer utilization rate in 0—20 cm rice soil layer during rice maturity.								
相关系数 Correlation coefficient	土壤 pH Soil pH	土壤碱解氮 Soil alkaline nitrogen	土壤速效磷 Soil available phosphorus	土壤速效钾 Soil available potassium	土壤有机质 Soil organic matter	氮肥农学利用效率 Nitrogen fertilizer agricultural utilization efficiency	肥料偏生产力 Fertilizer partial productivity	水稻产量 Yield
土壤 pH Soil pH value	1.00							
土壤碱解氮 Soil alkaline nitrogen	-0.31	1.00						
土壤速效磷 Soil available phosphorus	0.38	-0.09	1.00					
土壤速效钾 Soil available potassium	-0.33	0.04	0.32	1.00				
土壤有机质 Soil organic matter	0.13	-0.08	-0.29	-0.13	1.00			
氮肥农学利用效率 Nitrogen fertilizer agronomy utilization efficiency	-0.38	0.58 [*]	-0.15	0.02	-0.24	1.00		
肥料偏生产力 Fertilizer partial productivity	0.17	0.03	0.52 [*]	-0.22	0.15	0.17	1.00	
水稻产量 Yield	-0.32	-0.25	0.57 [*]	0.44 [*]	0.07	0.06	0.14	1.00

3 讨论

3.1 不同氮肥水平对植稻土壤养分变化、水稻产量和氮肥利用效率的影响

谢金兰等^[19]认为，土壤氮素、速效钾含量随着氮肥施用量增加而增加，但大量施用氮肥会引起土壤酸化；侯云鹏等^[20]研究发现施用氮肥明显增加了 0—100 cm 土壤残留的氮素含量，且明显造成了氮素损失。本研究结果与之相似，随着土层的加深，各处理碱解氮、速效磷、速效钾含量均明显下降；而随着施氮量增加，中、高密度处理 pH 下降，速

效钾含量升高，高密度处理碱解氮含量升高，有机质含量下降。究其原因，对于分层土壤而言，表层土壤受影响较大，土层越深影响越小^[21-22]。济宁水稻土呈碱性，土壤剖面越深 pH 越高，且各养分均在表层含量最高。施氮量增加是碱解氮含量升高的直接原因，且土壤 C/N 降低会加快稻田微生物分解土壤有机质，促进氮的矿化^[23]。另外，不同氮肥水平对氮肥农学利用效率和水稻产量有显著影响。本研究条件下，随施氮量增加，肥料偏生产力和氮肥农学利用效率降低。这与郑克武^[24-25]等的研究一致。晏娟等^[26]发现，当施氮量超过 150 kg/hm²时，水稻籽粒产量不再显著增加。与这些研究相似，本

研究中 288 kg/hm² 的中氮用量为最佳, 其中 D₂N₃ 处理产量最高, 为 14 615.3 kg/hm², 其次是 D₂N₂ 处理产量, 14 366.2 kg/hm²。究其原因, 适宜的施氮量可以提高幼穗分化期叶片和籽粒中氮代谢酶的活性, 增加抽穗前氮素和干物质的积累, 有利于产量形成^[27], 但氮肥施用仅在一定用量范围内具有增产作用, 过量施氮会导致水稻营养生长过度, 产量下降^[28]。综上所述, 本研究中 288 kg/hm² 的施氮量效果最佳。

3.2 不同栽植密度对植稻土壤养分含量、水稻产量和氮肥利用效率的影响

不同栽植密度对植稻土壤养分变化同样有明显的影响。除土壤有机质外, 栽植密度对其他养分指标影响均极显著。鲁叶江等^[29]发现, 土壤速效磷含量会随箭竹群落密度的增加而显著减少。本研究条件下, 随着栽植密度增大, 水稻土壤 pH 与速效磷含量逐渐降低, 0—20 cm 土层碱解氮含量略有升高, 有机质含量先升高后降低。证明了栽植密度的变化影响了水稻根系对土壤养分吸收以及土壤微生物的生命活动^[23]。不同栽植密度对水稻产量和氮肥农学利用效率有显著影响。赵双等^[30]研究表明水稻产量随栽培密度的增加而升高, 但超过适宜密度后会下降。本研究结果与之相似, 相同氮肥水平下, 水稻产量随着栽植密度的增加先升高后降低, 中密度下水稻产量最高。究其原因, 适宜的栽植密度增加了有效分蘖, 进而提高了有效穗数以及水稻对光照的吸收和对土壤养分的利用^[31]。随栽植密度升高, 肥料偏生产力先升高后降低。对于氮肥农学利用效率而言, 除 D₃N₄ 处理过高外, 其余各处理均随栽植密度的升高而降低, 中密度下水稻氮肥农学利用效率较高。故而本研究中 27 万穴/hm² 的栽植密度效果最佳。

3.3 土壤养分与水稻产量、氮肥利用效率之间的关系及氮肥水平与栽植密度的交互效应

相关性分析表明, 水稻产量与土壤速效磷、速效钾含量显著相关, 这与刘洁^[32]的研究结果基本一致。此外, 水稻产量与土壤 pH 和土壤碱解氮负相关。究其原因, 济宁水稻土为碱性土壤, pH 过高会影响水稻产量的形成, 所以偏中性的土壤更适合水稻的生长。而水稻成熟期土壤中碱解氮含量越多说明水稻生育期根系吸收氮素越少。氮肥利用效率与土壤碱解氮含量显著相关, 肥料偏生产力与土壤速效磷含量也显著相关。所以, 合理施肥以及平衡的土壤养分对提高作物产量和肥料利用率至关重要。

氮肥水平与栽植密度是影响作物生长和产量的重要指标, 且二者间存在显著的交互效应^[33-34]。本研究条件下, 氮肥水平与栽植密度对土壤各养分指标均表现出显著的交互效应。低密度增加施氮量, 土壤 pH 升高, 有机质含量先减少后增加; 表层速效磷先增加后减少; 高密度增加施氮量, 土壤 pH 和有机质含量降低。表层速效磷先减少后增加; 低氮增加栽植密度, 速效钾含量降低; 高氮增加栽植密度, 速效钾含量升高。另外, 氮肥水平与栽植密度对水稻产量也有极显著的交互效应, 且适宜的氮肥水平和种植密度组合有利于水稻获得高产^[12]。本研究条件下, 当氮肥按照 288 kg/hm² 施用, 栽植密度为 27 万穴/hm² 时产量最高; 从农学利用效率来看, 当氮肥按 360 kg/hm² 施用, 栽植密度为 30 万穴/hm² 时氮肥农学利用率最高, 但产量不是最高。因此, 在实际生产中应严格注意施肥量与栽植密度的合理搭配, 达到高产高效的生产目标。

4 结论

1) 在水稻成熟期的土壤剖面分布上, 随着土层加深, 各处理的氮、磷、钾、有机质含量均会明显下降, pH 值有所升高。其中 D₃N₄ 处理碱解氮含量下降了 60.8%, D₃N₃ 处理速效磷含量降低了 72.7%。

2) 随着施氮量增加, 土壤 pH 有所下降, 速效钾含量升高, 有机质含量下降。肥料偏生产力和氮肥农学利用效率降低; 随着栽植密度的增加, 土壤 pH 与速效磷含量有所下降, 表层土壤碱解氮含量略有升高, 有机质含量与肥料偏生产力先升高后降低。氮肥农学利用效率降低。

3) 结合高产高效, 当栽植密度为 27 万穴/hm² 时, 氮肥按照 288 kg/hm² 和 216 kg/hm² 施用, 水稻产量和氮肥农学效率均较高, 该组合在降低氮肥用量, 控制合理密度的同时, 实现了产量和效益的优化, 值得在山东济宁地区的水稻生产中推荐应用。

参考文献:

- [1] 邓明君, 邓俊杰, 刘佳宇. 中国粮食作物化肥施用的碳排放时空演变与减排潜力[J]. 资源科学, 2016, 38(3): 534-544.
Deng M J, Deng J J, Liu J Y. On the space-time evolution of carbon emissions and reduction potential in Chinese grain crop fertilizer application[J]. *Resources Science*, 2016, 38(3): 534-544. (in Chinese with English abstract)

- [2] 刘书通, 李春生, 方福平, 张小惠, 毛一剑, 孔宪琴, 张克勤, 吴荣梁. 我国水稻生产区域变化及其比较优势分析[J]. 中国稻米, 2014, 20(4): 9-13.
Liu S T, Li C S, Fang F P, Zhang X H, Mao Y J, Kong X Q, Zhang K Q, Wu R L. Study on the variation and comparative advantage of regional rice production structure in China[J]. *China Rice*, 2014, 20(4): 9-13. (in Chinese with English abstract)
- [3] Ladha J K, Gjd K, Bennett J, Peng S, Reddy C K, Reddy P M, Singh U. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved lowland rice germplasm[J]. *Field Crops Research*, 1998, 56(1-2): 41-71.
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J, Cui Z L, Yin B, Christie P, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [5] Zheng X, Han S, Huang Y, Wang Y S, Wang M X. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2), DOI: 10.1029/2003GB002167, 2004.
- [6] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 向镜, 张义凯. 中国水稻高产栽培技术创新与实践[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.
Zhu D F, Zhang Y P, Chen H Z, Xiang J, Zhang Y K. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414. (in Chinese with English abstract)
- [7] Huang M, Yang C L, Ji Q M, Jiang L G, Tan J L, Li Y Q. Tillering responses of rice to plant density and nitrogen rate in a subtropical environment of southern China. *Field Crops Research*, 2013, 149: 187-192.
- [8] 邓中华, 明日, 李小坤, 郑磊, 徐维明, 杨运清, 任涛, 丛日环, 鲁剑巍. 不同密度和氮肥用量对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响[J]. 土壤, 2015, 47(1): 20-25.
Deng Z H, Ming R, Li X K, Zheng L, Xu W M, Yang Y Q, Ren T, Cong R H, Lu J W. Effects of nitrogen application rate and planting density on grain yields, yield components and nitrogen use efficiencies of rice[J]. *Soils*, 2015, 47(1): 20-25. (in Chinese with English abstract)
- [9] 陈小荣, 肖自京, 孙嘉, 钟蕾, 朱昌兰, 彭小松, 贺晓鹏, 傅军如, 欧阳林娟. 不同产量晚稻品种分蘖期动态密度稀化下群体自动调节力的差异与生理机制. 中国水稻科学[J], 2013, 27(4): 405-412.
Chen X R, Xiao Z J, Sun J, Zhong L, Zhu C L, Peng X S, He X P, Fu J R, Ou-Yang L J. Discrepancy and its physiological mechanism of population self regulatory ability for late rice varieties under treatment of dynamic thinning of seedlings during tillering stage[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(4): 405-412. (in Chinese with English abstract)
- [10] 林洪鑫, 肖运萍, 袁展汽, 刘仁根, 汪瑞清. 水稻合理密植及其优质高产机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 1-4.
Lin H X, Xiao Y P, Yuan Z Q, Liu R Y, Wang R Q. Advance in rational colse planting and its mechanism of superior quality and high yield in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(9): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [11] 王成瑗, 王伯伦, 张文香, 赵磊, 赵秀哲, 高连文. 栽培密度对水稻产量及品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(4): 318-322.
Wang C A, Wang B L, Zhang W X, Zhao L, Zhao X Z, Gao L W. Effect of planting density on grain yield and quality of rice[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(4): 318-322. (in Chinese with English abstract)
- [12] 周江明, 赵琳, 董越勇, 徐进, 边武英, 毛杨仓, 章秀福. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.
Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y, Xu J, Bian W Y, Mao Y C, Zhang X F. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(2): 274-281. (in Chinese with English abstract)
- [13] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 孙静文, 王秀斌, 何萍, 徐芳森, 余喜初. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 1279-1286.
Xu X P, Zhou W, Liang G Q, Sun J W, Wang X B, He P, Xu F S, Yu X C. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(3): 1279-1286. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴培, 陈天晔, 袁嘉琦, 黄恒, 邢志鹏, 胡雅杰, 朱明, 李德剑, 刘国林, 张洪程. 施氮量和直播密度互作对水稻产量形成特征的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 269-281.
Wu P, Chen T Y, Yuan J Q, Huang H, Xing Z P, Hu Y J, Zhu M, Li D J, Liu G L, Zhang H C. Effects of interaction between nitrogen application rate and direct-sowing density on yield formation characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(3): 269-281. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陈军, 黄珊珊, 刘冰, 吴林坤, 林文雄. 不同氮肥运筹对水稻根际土壤理化性质及代谢物质的影响[J]. 福建农业学报, 2015, 30(11): 1082-1089.
Chen J, Huang S Y, Liu B, Wu L K, Lin W X. Effects of

- different nitrogen regimes on soil physico-chemical properties and metabolites in rice rhizosphere[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 30(11): 1082-1089. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张玉, 秦华东, 黄敏, 江立庚, 徐世宏. 氮肥运筹对免耕水稻根系生长、根际土壤特性及产量的影响[J]. 广西植物, 2014(5): 681-685, 621.
Zhang Y, Qin H D, Huang M, Jiang L G, Xu S H. Effect of different nitrogen application modes on root growth, rhizosphere soil characteristics and rice yield under no-tillage[J]. *Guihaia*, 2014(5): 681-685, 621. (in Chinese with English abstract)
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil Agro-chemical Analysis[M]. 3rd. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] 吕丽华, 陶洪斌, 王璞, 赵明, 赵久然, 鲁来清. 施氮量对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 630-637.
Lv L H, Tao H B, Wang P, Zhao M, Zhao J R, Lu L Q. The effect of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 630-637. (in Chinese with English abstract)
- [19] 谢金兰, 王维赞, 朱秋珍, 刘晓燕, 梁强, 李毅杰, 罗亚伟, 梁阗. 氮肥施用方式对甘蔗产量及土壤养分变化的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(4): 607-610.
Xie J L, Wang W Z, Zhu Q Z, Liu X Y, Liang Q, Li Y J, Luo Y W, Liang T. Effects of nitrogen fertilizer application mode on sugarcane yield and soil nutrient change[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2013, 44(4): 607-610. (in Chinese with English abstract)
- [20] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 尹彩侠, 秦裕波, 李前, 谢佳贵. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836-845.
Hou Y P, Han L G, Kong L L, Yin C X, Qin Y B, Li Q, Xie J G. Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2015, 21(4): 836-845.
- [21] 姚小萌, 周正朝, 田霄鸿, 王淑娟, 党珍珍. 长期机械化秸秆全量还田对土壤养分分层的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 198-202.
Yao X M, Zhou Z C, Tian X H, Wang S J, Dang Z Z. Effects of long-term all straw return to field with machine on the stratifications of soil nutrients[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(1): 198-202. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王若水, 康跃虎, 万书勤, 孙甲霞. 水分调控对盐碱地土壤盐分与养分含量及分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 96-104.
Wang R S, Kang Y H, Wan S Q, Sun J X. Effects of water regulation methods on soil salt, nutrient content and its distribution in overlying saline wasteland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- [23] 葛顺峰, 许海港, 季萌萌, 姜远茂. 土壤碳氮比对平邑甜茶幼苗生长和碳氮分配的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(10): 942-949.
Ge S F, Xu H G, Ji M M, Jiang Y M. Effects of soil C:N on growth and distribution of nitrogen and carbon of *Malus hupehensis* seedlings[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(10): 942-949. (in Chinese with English abstract)
- [24] 郑克武, 邹江石, 吕川根. 氮肥和栽插密度对杂交稻"两优培九"产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(6): 885-893.
Zheng K W, Zou J S, Lv C G. Effects of Transplanting Density and nitrogen fertilizer on yield formation and N absorption in a two-line intersubspecific hybrid rice "Liangyoupei jiu"[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(6): 885-893. (in Chinese with English abstract)
- [25] 曹胜彪, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 杨今胜. 施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1343-1353.
Cao S B, Zhang J W, Dong S T, Liu P, Zhao B, Yang J S. Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition & Fertilizer*, 2012, 18(6): 1343-1353. (in Chinese with English abstract)
- [26] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 沈其荣, 朱兆良. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 835-839.
Yan J, Yin B, Zhang S L, Shen Q R, Zhu Z L. Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and distribution in rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 835-839. (in Chinese with English abstract)
- [27] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 郭翔, 马均. 水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J]. 作物学报, 2009, 35(11): 2055-2063.
Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, Guo X, Ma J. Relationship of activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism with nitrogen utilization in rice under water-nitrogen interaction[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(11): 2055-2063. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李鹏程, 董合林, 刘爱忠, 刘敬然, 孙淼, 王国平, 刘绍东, 赵新华, 李亚兵. 种植密度氮肥互作对棉花产量及氮素利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 122-130.
Li P C, Dong H L, Liu A Z, Liu J R, Sun M, Wang G P,

- Liu S D, Zhao X H, Li Y B. Effects of planting density and nitrogen fertilizer interaction on yield and nitrogen use efficiency of cotton[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 122-130. (in Chinese with English abstract)
- [29] 鲁叶江, 王开运, 杨万勤, 吴福忠. 缺苞箭竹群落密度对土壤养分库的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(6):996-1001.
- Lu Y J, Wang K Y, Yang W Q, Wu F Z. Effects of *Fargesia denudata* density on soil nutrient pool[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(6): 996-1001. (in Chinese with English abstract)
- [30] 赵双, 朱小荣. 不同栽培密度对水稻产量影响的研究[J]. *中国盐业*, 2016(15): 56-57.
- ZHAO S, ZHU X R. Study on the influence of different cultivation density on rice yield[J]. *China Salt Industry*, 2016(15): 56-57. (in Chinese with English abstract)
- [31] 何虎, 曾勇军, 贾维强, 潘晓华, 石庆华. 栽插密度对天优华占辐射利用及产量的影响[J]. *杂交水稻*, 2015, 30(4): 65-70.
- He H, Zeng Y J, Jia W Q, Pan X H, Shi Q H. Effects of planting density on radiation use and grain yield of tianyou huazhan[J]. *Hybrid Rice*, 2015, 30(4): 65-70. (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘洁, 胡冬华. 水稻基础产量与土壤速效养分含量的相关性[J]. *作物研究*, 2015(3): 277-280.
- Liu J, Hu D H. Correlation between basic yield of rice and soil available nutrient content[J]. *Crop Research*, 2015(3): 277-280. (in Chinese with English abstract)
- [33] 曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 门洪文, 王成雨. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 815-822.
- Cao Q, He M R, Dai X L, Men H W, Wang C Y. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 815-822. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张娟, 武同华, 代兴龙, 王西芝, 李洪梅, 蒋明洋, 贺明荣. 种植密度和施氮水平对小麦吸收利用土壤氮素的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1727-1734.
- Zhang J, Wu T H, Dai X L, Wang X Z, Li H M, Jiang M Y, He M R. Effects of plant density and nitrogen level on nitrogen uptake and utilization of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1727-1734. (in Chinese with English abstract)

不同配方生物炭改良盐渍土对小白菜和 棉花生长及光合作用的影响

李思平¹, 曾路生¹, 李旭霖¹, 柳新伟¹, 宋祥云¹, 王英平², 崔德杰¹

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2. 山东黄岛出入境检验检疫局, 山东 青岛 266555)

摘要: 针对盐渍土壤理化性质差、肥料利用率低和作物长势弱的问题, 利用不同配方生物炭进行土壤改良。采用盆栽试验的方法, 以小白菜和棉花为研究对象, 设置 5 个不同的处理: 不施肥(对照 CK0)、常规施肥(CK)、常规施肥+生物炭(C1)、常规施肥+生物炭+硝化抑制剂(C2)和常规施肥+生物炭+硫酸钙(C3), 研究不同配方的生物炭处理对小白菜和棉花生长及光合作用的影响。结果表明, 与常规施肥比较, C3 处理效果更明显。小白菜的株高和株重分别增加 32.7% 和 112.0%, 叶绿素含量与净光合速率分别提高 45.5% 与 32.9%; 胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率分别下降 15.0% 和 59.2%。光谱分析表明, C3 处理反射率更高, 叶片组织更完好。与 CK 比较, 生物炭处理同样促进棉花生长, 显著提高叶绿素含量, 降低叶片中丙二醛含量和过氧化氢酶活性, 增强抗逆性, 减少棉花损伤。同时, 降低了棉花叶片中胞间 CO₂ 浓度, 提高水分利用率。土壤分析表明, 生物炭配施改良剂能显著改善土壤理化性质, 与常规施肥相比, C2 处理的土壤有机质、速效磷和碱解氮含量分别提高 57.3%、22.9% 和 40.8%, 而对土壤速效钾和 pH 影响较小, C3 处理对土壤电导率有较大提高。因此, 实践中在改良盐渍土壤时, 需注意改良剂的合理施用, 防止土壤盐分的进一步积累。

关键词: 生物炭; 盐渍土壤; 小白菜; 棉花生理指标; 叶绿素; 光合参数

中图分类号: S156.4; S634.3; S562 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)02-0363-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.055

Amelioration of Saline Soil with Different Biochar Fertilization Formulas and Its Effects on Growth and Photosynthesis of *Brassica Chinensis* and Cotton

LI Siping¹, ZENG Lusheng¹, LI Xulin¹, LIU Xinwei¹, SONG Xiangyun¹, WANG Yingping², CUI Dejie¹

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109;

2. Shandong Huangdao Entry Exit Inspection and Quarantine Bureau, Qingdao, Shandong 266555)

Abstract: Aiming at the poor physicochemical properties, the low fertilizer use efficiency and the weak crop growth in saline soils, a saline soil was ameliorated with different biochar fertilizers in this study. *Brassica chinensis* and cotton were used as research materials in this pot experiment. Five different treatments were conducted, i. e., non-fertilized control group (CK0), conventional fertilization (CK), conventional fertilization + biochar (C1), conventional fertilization + biochar + nitrification inhibitor (C2), conventional fertilization + biochar + Calcium sulphate (C3). The growth and photosynthesis of *Brassica chinensis* and cotton were measured. The results showed that C3 treatment was more effective in crop growth than that of CK. The plant height and weight of *Brassica chinensis* were increased by 32.7% and 112.0%, respectively, and the chlorophyll content and net photosynthetic rate were increased by 45.5% and 32.9%, respectively. The intercellular CO₂ concentration and transpiration rate were decreased by 15.0% and 59.2%, respectively. Spectral analysis indicated that the C3 treatment had higher reflectance and better leaf tissue. The experimental results also indicated that, compared to CK, biochar treatments promoted cotton growth, expressed as increase in chlorophyll content significantly, decreasing malon dialdehyde content and catalase activity in leaves, leading to the enhanced stress resistance and the reduced plant damage. At the same time, the intercellular CO₂ concentration in cotton leaves was reduced, and the water use efficiency was improved. Soil analysis suggested that the application of biochar significantly improved the physical and chemical properties of soil. Compared with CK,

收稿日期: 2018-10-06

资助项目: 山东省重点研发计划项目(2016CYJS05A01, 2017CXGC0303); 山东省现代农业产业体系棉花岗位创新团队项目(SDAIT-03-06)

第一作者: 李思平(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: lisiping911@163.com

通信作者: 曾路生(1966—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土壤与肥料教学与研究。E-mail: zenglush@163.com

the organic matter content, available phosphorus content and alkali nitrogen content in C2 treated soil were increased by 57.3%, 22.9% and 40.8%, respectively. However, the influence on soil available potassium content and pH value was not obviously, and C3 treatment had an obvious increase in soil electrical conductivity. Therefore, when ameliorating the saline soil, it is necessary to pay attention to the reasonable application amount of the modifiers to prevent further accumulation of soil salinity.

Keywords: biochar; saline soil; *Brassica chinensis*; cotton physiological index; chlorophyll; photosynthetic parameters

土壤盐渍化不利于作物生长,严重影响作物的养分吸收,导致生长衰退,甚至脱水枯死^[1]。盐渍化致使大量低产田出现,使土壤资源难以高效利用,农业综合生产力下降,严重影响当地农业生产和农民的生活水平^[2-3]。当前,我国的盐碱土地面积已达到 9 913 万 hm^2 ,盐渍化仍是限制我国农林业发展的主要障碍之一。因此,对盐碱地的改良与修复具有重要现实意义。通过对盐渍土壤的改良,改善土壤生态环境,可以扩大耕地面积,促进当地经济发展,提高人民的生活水平^[4]。

改良盐渍土壤的常规方法有大水洗盐、节水灌溉、增施有机肥、降低地下水位等,有学者^[5-6]发现,种植盐地碱蓬等盐生植物也能降低滨海盐渍土的含盐度。近年来,国内外利用生物炭改良盐渍土壤取得了一些成效。孙军娜等^[7]通过研究糠醛渣及其生物炭对盐渍土壤理化性质的影响,表明生物炭能有效提高土壤总有机碳含量,降低土壤碱化程度;杨放等^[8]研究发现,用生物炭改良盐碱土能明显减少氮素淋失,增强土壤的持续供氮能力;Lin 等^[9]研究表明,生物炭可以提高盐渍土壤的生产力和碳固存,使生长在滨海盐渍土的小麦单株籽粒质量增加了 27.7%;Usman 等^[10]研究表明,生物炭可以使盐水灌溉系统中的番茄总产量比对照组增加 14.0%~43.3%,并认为生物炭可以有效地用作土壤改良剂,提高干旱条件下受盐分胁迫的砂质土壤生产力;Drake 等^[11]研究发现,在高盐碱土中施用生物炭能提高苗木高度,降低根系、地上部和土壤中锰、氮、硫的含量,在低盐碱土中施用生物炭提高了叶片中磷、钾、硫的含量,证实生物炭有助于盐碱地的再造林。

生物炭与其他改良剂组合用于盐渍土的改良效果需进一步探索。硝化抑制剂作为一种肥料增效剂,可抑制土壤中氮的亚硝化及硝化过程,延缓铵态氮向硝态氮的转化,从而减少土壤中硝态氮的积累与损失,提高土壤中氮素利用效率^[12]。硫酸钙作为一种土壤改良剂,钙离子可把土壤胶体表面吸附的代换性钠离子置换下来,随水淋洗掉,促进土壤团聚体的形成,改善盐渍土壤的通气透水性。硫酸根离子可平衡盐渍土壤中的碳酸根和重碳酸根离子,降低土壤 pH,改善土壤理化性质。同时,硫酸钙补充了土壤中钙素和硫素营养,促进作物生长^[13]。本试验利用生

物炭与硝化抑制剂、硫酸钙组合,探究不同配方生物炭处理改良盐渍土对小白菜和棉花生长及光合作用的影响,旨在寻找生物炭与其他改良剂的优化组合,为生物炭的农业应用与盐渍土壤的高效改良提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试作物为棉花(鲁棉 11 号,山东省棉花研究中心育成)和小白菜(青岛市蔬菜林公司)。

供试土壤采自山东省东营市利津县北宋镇碾李村($37^{\circ}23'N$, $118^{\circ}10'E$)的盐渍土壤,选择有代表性的地块,走“S”形路线,多点采取 0—20 cm 土壤,样品充分混匀,自然风干后过 2 mm 筛备用。

试验中所需生物炭由木材为原材料烧制而成,硝化抑制剂由中科院沈阳应用生态所研发提供,硫酸钙为试剂公司购买。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2017 年 4—9 月在青岛农业大学资源与环境学院实验场进行。风干过筛的土样充分混合后,分别称取 6.0 kg,置于口径 30 cm、底径 20 cm、高 20 cm 的塑料盆中,调节土壤的含水量为田间持水量的 65%。

设置 5 个不同处理:不施肥(对照 CK0)、常规施肥(CK)、常规施肥+生物炭(C1)、常规施肥+生物炭+硝化抑制剂(C2)、常规施肥+生物炭+硫酸钙(C3)。常规施肥按照基肥为 $N:P_2O_5:K_2O$ 为 15:15:15 的复合肥 $750\text{ kg}/\text{hm}^2$,追肥尿素为 $225\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。硝化抑制剂按 N 总量的 7‰加入,生物炭处理为 $4\ 500\text{ kg}/\text{hm}^2$,硫酸钙为 $7\ 500\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。添加剂与土壤充分混匀,施入基肥。

种子采用直播,小白菜每盆 15 粒,棉花每盆 4 粒,常规管理。作物生长旺盛期时,分析测定植株的生长指标和生化指标。小白菜与棉花分别于 6 月 15 日和 9 月 28 日进行收获,收获后用土壤刀采集盆栽土样,用以分析土壤有机质、碱解氮、速效钾、速效磷和 pH 等指标的变化。

1.3 项目测定

(1)植物 SPAD 值采用日产 SPAD-520 型叶绿素仪进行测定;MDA 含量采用 TBA 法测定;CAT

活性采用滴定法测定。

(2)作物光合作用参数,选择晴天、少云的天气,利用美国汉莎公司生产的 CIRAD-3 仪器测定。叶绿素荧光参数,采用美国汉莎公司生产的 M-PEA 仪器测定;冠层光谱:采用北京爱万提斯生产的 Auaspel-ULS2048 光纤光谱仪,在作物旺盛期,采集不同处理的作物冠层光谱。测量时,选择晴朗、无风、少云天气,测量时间为 11:00—14:00,每次测量时采用白板进行校正。

(3)土壤理化性质采用常规分析方法。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加加热法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;速效磷含量采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用醋酸铵浸提—火焰光度计法测定;土壤 pH

采用电位测定法;电导率采用电导仪法测定。

1.4 数据处理

试验数据应用 Excel 2003、DPS 软件进行分析和统计,用 LSD 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 生物炭改良盐渍土对小白菜生长指标的影响

由表 1 可知,与常规施肥的 CK 比较,不施肥处理的小白菜株高、株重、根长、根体积、叶宽等指标都要更小,说明肥料是作物生长的营养条件,合理施肥可促进作物增产。在常规施肥基础上,添加生物炭的 3 个处理均促进了小白菜生长指标的增加。其中,生物炭与硫酸钙组合的 C3 处理效果更好,小白菜的株高和株重分布增加 32.7%和 112.0%,根体积和叶宽分布增加 50.0%和 20.3%。

表 1 不同生物炭处理对小白菜生长指标的影响

处理	株高/ cm	比 CK/ %	株重/ g	比 CK/ %	根长/ cm	比 CK/ %	根体积/ cm ³	比 CK/ %	叶宽/ cm	比 CK/ %
CK0	7.0c	-32.7	1.1c	-56.1	6.6a	-2.9	0.07c	-41.7	2.51b	-36.5
CK	10.4b	—	2.5b	—	6.8a	—	0.12b	—	3.95a	—
C1	13.0ab	25.1	4.9a	96.0	8.2a	20.9	0.17a	41.7	4.49a	13.7
C2	12.7ab	22.1	4.6a	84.0	7.1a	4.4	0.15ab	25.0	4.60a	16.6
C3	13.8a	32.7	5.3a	112.0	7.3a	7.4	0.18a	50.0	4.75a	20.3

注:表中同列数据后的不同字母表示各处理差异显著(α=0.05)。下同表 2~4。

2.2 生物炭改良盐渍土对小白菜叶绿素含量的影响

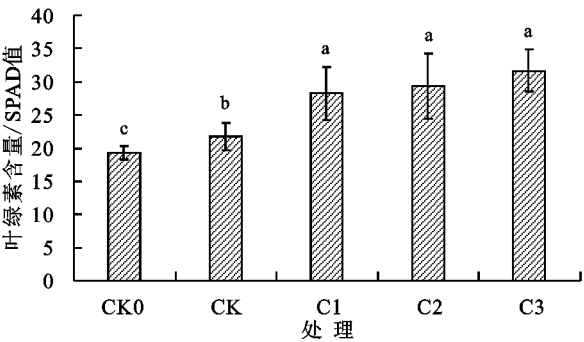
从图 1 可以看出,与常规施肥比较,不施肥处理的叶绿素含量更低,而添加生物炭的处理均具有较高的叶绿素含量,C1、C2 和 C3 处理分别比常规施肥分别增加 29.9%,35.2%和 45.5%,且与常规施肥处理具有显著差异。

生物炭与硫酸钙共同处理的 C3 更明显。与常规施肥比较,C3 处理的净光合速率上升 32.9%,胞间 CO₂ 浓度、气孔导度和蒸腾速率分别下降 15.0%,68.4%和 59.2%。

植物的胞间 CO₂ 利用率随着净光合速率的增长而提高,致使其浓度也相应降低;植物蒸腾系数与植物水分利用率呈反比关系,植物蒸腾系数越低,植物水分利用率就越高。通常情况下,气孔导度指数随着净光合速率的增长而降低,但在测光合作用速率时如果受到环境和温度的影响,或是由于作物的蒸腾作用过强,为使作物自身不受到伤害,保卫细胞可使气孔导度减小,以降低蒸腾作用。

2.4 生物炭改良盐渍土对小白菜光谱特征的影响

从图 3 可以看出,在不同处理下小白菜叶片光谱的反射率也存在着差异性。试验中小白菜叶片的光谱反射率的变化趋向相同,均在波长 480 nm 的蓝光处和 670 nm 的红光处,因为叶绿素的强吸收出现 2 个反射谷的现象。而在波长 560 nm 左右由于叶绿素的强反射产生形成 1 个反射峰。在可见光波段(350~750 nm)的反射率大小为:C3>C2>CK>CK0>C1,各处理差异较小。一般情况,反射率大小与叶绿素含量密切相关,反射率在 750 nm 左右达到最大。由于叶片内部的组织结构多次的反射和散射



注:图中不同字母表示处理间差异显著(α=0.05)。下同图 2~4。

图 1 不同生物炭处理对小白菜叶绿素的影响

2.3 生物炭改良盐渍土对小白菜光合作用的影响

从图 2 可以看出,与常规施肥比较,没有施肥的 CK0 胞间 CO₂ 浓度(C_i)更高,说明光合作用强度更弱,而生物炭各个处理胞间 CO₂ 浓度整体更低,说明光合作用强度更强。经生物炭 3 个处理净光合速率(P_n)比常规施肥更高,而气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)均比常规施肥低。特别是在常规施肥基础上,

导致在 760~950 nm 波段内形成近红外反射平台,在此波段内反射率越高,表明叶片内部的组织结构越完好。在近红外波段(760~1 050 nm)内的平均反射

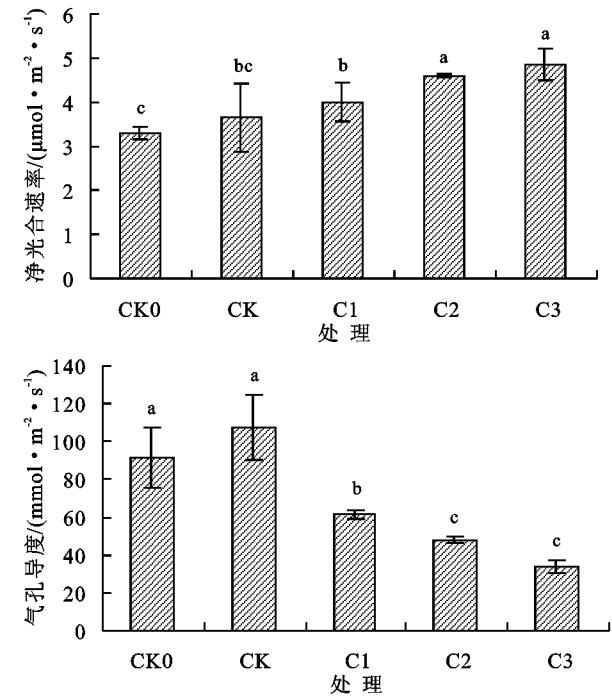


图2 不同生物炭处理对小白菜光合参数的影响

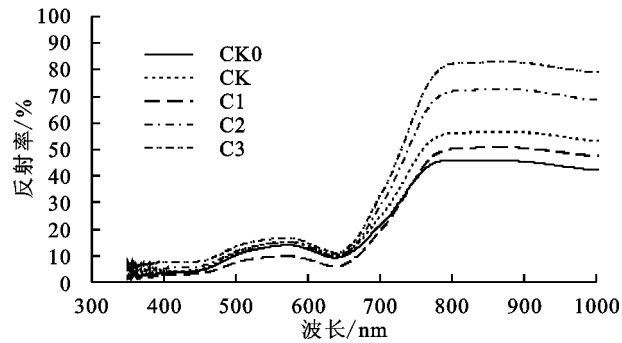
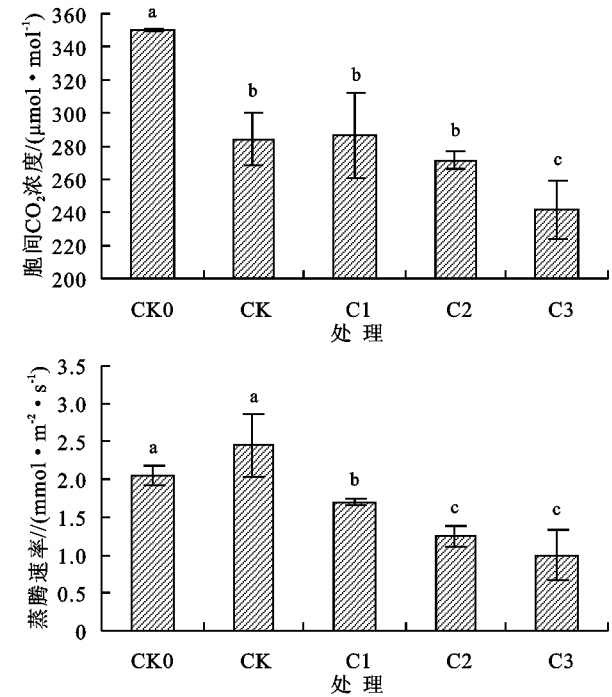


图3 不同生物炭处理对小白菜光谱特征的影响

2.5 生物炭改良盐渍土对棉花生长指标的影响

从表 2 可以看出,与小白菜试验相似,不同配方的生物炭处理对棉花的株高、株重、根长和叶面积均有一

率大小为:C3>C2>CK>C1>CK0,且差异明显,特别是 C3 处理反射率最高,并向近红外波段偏移,叶片组织更完好。



定促进作用。其中,生物炭与硫酸钙共同组合的 C3 处理具有较好的改良效果,棉花的株高、株重、根长和叶面积分别增加了 17.2%,54.2%,42.5%和 61.3%。其次,生物炭与硝化抑制剂组合的 C2 处理,也表现较好。

2.6 生物炭对棉花叶绿素、丙二醛和过氧化氢酶活性的影响

由图 4 可知,与常规施肥相比,不同配方的生物炭处理显著地增加了棉花叶绿素的含量。其中,C1、C2 和 C3 处理分别增加 19.1%,11.5%和 15.1%。降低了棉花叶片中丙二醛含量和过氧化氢酶的活性,其中,C3 处理效果更好,丙二醛含量和过氧化氢酶的活性分别降低 74.2%和 49.1%。

表 2 不同生物炭处理对棉花生长指标的影响

处理	株高/ cm	比 CK/ %	株重/ g	比 CK/ %	根长/ cm	比 CK/ %	叶面积/ cm ²	比 CK/ %
CK0	21.6b	-38.9	4.9b	-31.9	7.4b	-14.9	81.0b	-22.9
CK	35.4a	—	7.2b	—	8.7ab	—	105.0ab	—
C1	37.0a	4.5	9.8ab	36.1	11.2ab	28.7	119.7ab	14.0
C2	39.4a	11.3	9.6ab	33.3	11.0ab	26.4	153.7ab	46.4
C3	41.5a	17.2	11.1a	54.2	12.4a	42.5	169.4a	61.3

2.7 生物炭对棉花光合作用的影响

由表 3 可知,与常规施肥的 CK 相比,添加生物炭的 C1、C2 和 C3 处理棉花叶片中细胞间隙 CO₂ 浓度分别降低 6.1%,26.4%和 18.4%,净光合速率分别提高 5.8%,15.4%和 9.6%,而水分利用率分别提高 20.0%,40.0%,33.3%。在试验中,C2 与 C3 处

理均表现出较好的效果。

2.8 生物炭对植棉土壤理化性质的影响

由于棉花生长时间较长,试验处理对土壤理化性质影响更明显。由表 4 可知,与常规施肥的 CK 相比,添加生物炭的各个处理对土壤理化性质的变化产生了一定的影响。其中,对土壤有机质的增加幅度更明

显,C1、C2 和 C3 处理分别增加 55.5%、57.3%和53.6%。其次,较显著的增加了土壤速效磷和碱解氮含量,对

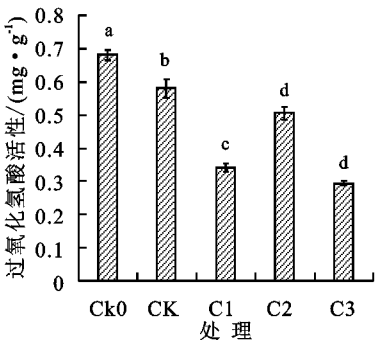
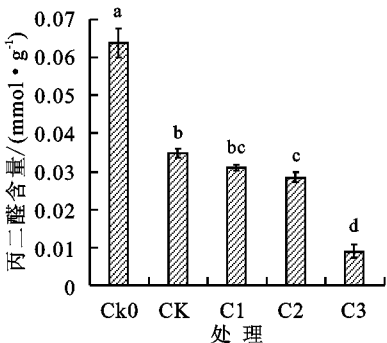
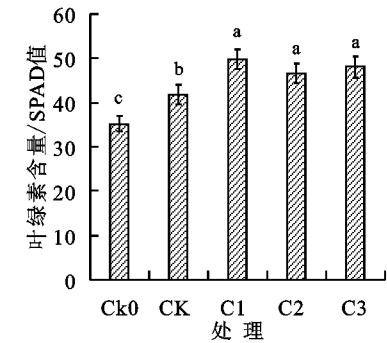


图 4 不同生物炭处理对棉花叶绿素、丙二醛和过氧化氢酶活性的影响

表 3 不同生物炭处理对棉花光合参数的影响

处理	胞间 CO ₂ 浓度 C _i / (μmol·mol ⁻¹)	比 CK/ %	气孔导度 G _s / (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	比 CK/ %	净光合速率 P _n / (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	比 CK/ %	蒸腾速率 T _r / (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	比 CK/ %	水分利用率 W _u / (g·kg ⁻¹)	比 CK/%
CK0	212.0a	2.7	102.5a	50.7	4.9a	-13.5	9.1a	42.2	0.70a	-6.7
CK	206.5 a	—	68.0b	—	5.2a	—	6.4bc	—	0.75a	—
C1	194.0 a	-6.1	63.5b	-6.6	5.5a	5.8	5.9c	-7.8	0.90a	20.0
C2	152.0 a	-26.4	42.0c	-38.2	6.0a	15.4	4.1d	-36.0	1.05a	40.0
C3	168.5 a	-18.4	66.0b	-11.8	5.7a	9.6	5.6b	-12.5	1.00a	33.3

表 4 不同生物炭处理对植棉土壤理化性质的影响

处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	比 CK/ %	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	比 CK/ %	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	比 CK/ %	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	比 CK/ %	pH	比 CK/ %	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	比 CK/ %
CK0	9.8b	-10.9	37.3b	-10.1	13.5b	-26.6	72.6b	-3.5	7.83a	-0.51	192.7b	-24.7
CK	11.0b	—	41.5b	—	18.4b	—	75.2ab	—	7.87a	—	255.9ab	—
C1	17.1ab	55.5	52.5a	26.5	28.3a	53.8	75.8ab	0.8	7.91a	0.51	307.5ab	20.2
C2	17.3a	57.3	51.0ab	22.9	25.9a	40.8	76.1ab	1.2	7.80a	-0.88	295.5ab	15.5
C3	16.9ab	53.6	56.5a	36.1	28.7a	56.0	80.4a	6.9	7.95a	1.01	357.5a	39.7

3 讨论

生物炭改良盐渍土能促进作物的生长发育。杨艳丽等^[14]研究表明,用 2%生物质炭配合盐酸处理轻度苏打盐渍化土壤,燕麦株高增加 6.3%,干重增加 65.5%;Wang 等^[15]试验发现,不添加生物炭的重度盐碱地小麦种子萌发率为 0,而添加 45%生物炭后,小麦种子萌发率高达 48.9%。本试验中添加生物炭处理与常规施肥相比,小白菜和棉花的株高、株重、根长分别提高 25.1%、96.0%、20.9%和 4.5%、36.1%、28.7%。究其原因:生物炭除为土壤微生物提供碳源外,还含有一定量的 N、P、K 等元素,能作为营养供应源为作物的生长发育过程提供必需的养分^[16];另外,生物炭能促进土壤团粒的形成,吸附土壤中的水和养分,延迟释放,减弱其在土壤中的迁移与转化,促进作物对养分的吸收与利用^[17-19]。

生物炭改良盐渍土壤可提高作物的光合能力。张芙蓉等^[20]研究发现,生物炭处理盐渍土对甜瓜开花期净光合速率和气孔导度分别提高 14.3%和 70.0%;韩光明等^[21]研究表明,施用生物炭提高棉花叶片的净光合速率、气孔导度、光合能力及表观量子效率。本研究发现,在小白菜试验中,添加硫酸钙比单一

土壤速效钾和土壤 pH 影响不明显,C3 处理对土壤电导率有较明显的增加,比 CK 提高 39.7%。

施用生物炭的叶绿素含量增加 12.0%。叶绿素含量的升高可以提高作物的光能利用率,从而提高光合速率^[22]。另外,在近红外波段,小白菜在 C3 处理下光谱反射率最高,说明硫酸钙与生物炭配合施用下,作物的内部结构较好。在棉花试验中,添加硝化抑制剂比单一施用生物炭的水分利用率提高 16.6%,胞间 CO₂ 浓度降低 21.6%,说明生物炭与硝化抑制剂组合更有利于提高棉花的光和能力,而与硫酸钙组合更有利于提高小白菜的光和能力。究其原因:生物炭除了能固持土壤养分促进作物发育外,还可以吸附部分酚酸类化感物质,降低其有害浓度,从而提高棉花的光合能力^[23]。

生物炭配合改良剂显著改善盐渍土壤的理化性质。韩剑宏等^[24]利用生物炭和脱硫石膏混合施用改良盐碱土,降低土壤盐碱度,提高土壤养分含量。本试验发现,对于植棉土壤,生物炭可以有效提高土壤有机质、碱解氮和有效磷的含量,尤其是在生物炭与硫酸钙组合下,土壤养分含量显著增加。相关研究^[25]认为,生物炭中的有机大分子和空隙结构,在施入土壤后易产生大的团聚体,增加对土壤养分的吸附和保持,特别是对 NH₄⁺ 有很强的吸附作用。生物炭中碳含量很高且不易降解,这是土壤有机质含量增加的主要原因^[26]。生物炭会吸附土

壤中的磷酸根,减少有效磷的淋溶,促进有机态磷的矿化,因此速效磷的含量显著增加^[27]。

4 结论

(1)生物炭改良盐渍土壤显著增加作物的株高、株重、叶宽、根体积等生长指标。其中,常规施肥与生物炭、硫酸钙组合效果最优。小白菜的株高和株重分别增加 32.7%和 112.0%。生物炭还能有效降低棉花叶片中丙二醛含量和过氧化氢酶活性,提高抗逆性,减少损伤程度,延缓植株衰老。

(2)常规施肥下,生物炭与硫酸钙组合,小白菜和棉花的叶绿素含量分别提高 45.5%和 15.1%,增强对 CO₂ 的吸收能力,降低叶片的气孔导度和蒸腾速率,棉花的水分利用率提高 33.3%,从而提高光能利用率。

(3)生物炭与硫酸钙组合显著增加土壤有机质、碱解氮和速效磷的含量,与常规施肥相比分别提高 53.6%,36.1%和 56.0%,但对速效钾和土壤 pH 影响不明显。同时,土壤电导率增加 39.7%,说明土壤盐分有一定的增加。因此,实践中需注意合理施用改良剂用量,防治土壤盐分的进一步积累。

参考文献: 修改为: 止

- [1] Li J G, Pu L J, Han M, et al. Soil salinization research in China: Advances and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(5): 943-960.
- [2] 周健民. 浅谈我国土壤质量变化与耕地资源可持续利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 459-467.
- [3] 马晨, 马履一, 刘太祥, 等. 盐碱地改良利用技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(2): 28-32.
- [4] 邵华伟, 孙九胜, 胡伟, 等. 新疆盐碱地分布特点和成因及改良利用技术研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2014(11): 160-164.
- [5] 王鹏山, 张金龙, 苏德荣, 等. 不同淋洗方式下滨海沙性盐渍土改良效果[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 136-140.
- [6] 林学政, 沈继红, 刘克斋, 等. 种植盐碱地修复滨海盐渍土效果的研究[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 65-69.
- [7] 孙军娜, 董陆康, 徐刚, 等. 糠醛渣及其生物炭对盐渍土理化性质影响的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 532-538.
- [8] 杨放, 李心清, 荆英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 972-977.
- [9] Lin X W, Xie Z B, Zheng J Y, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emissions, carbon sequestration and crop growth in coastal saline soil[J]. European Journal of Soil Science, 2015, 66(2): 329-338.
- [10] Usman A R A, Al-Wabel M I, Yong S O, et al. Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation[J]. Pedosphere, 2016, 26(1): 27-38.

- [11] Drake J A, Cavagnaro T R, Cunningham S C, et al. Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils? [J]. Land Degradation and Development, 2016, 27(1): 52-59.
- [12] 皮荷杰, 曾清如, 蒋朝晖, 等. 两种硝化抑制剂对不同土壤中氮素转化的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 68-72.
- [13] 黄明杰, 张杰. 硫酸钙在农业中的应用简述[J]. 南方农业, 2016, 10(7): 58-60.
- [14] 杨艳丽, 李秀军, 陈国双, 等. 生物炭与盐酸配施对苏打盐渍土理化性状的影响研究[J]. 土壤与作物, 2015(3): 113-119.
- [15] Wang G J, Xu Z W. The effects of biochar on germination and growth of wheat in different saline-alkali soil[J]. Asian Agricultural Research, 2013, 5(11): 116-119.
- [16] 刘阿梅, 向言词, 田代科, 等. 生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 193-198.
- [17] 黄德荣, 衡德茂, 倪宏章, 等. 施用生物炭对土壤和作物的影响[J]. 安徽农业科学, 2015(2): 130-132.
- [18] Chen Y, Shinogi Y, Taira M, et al. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7): 526-530.
- [19] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930-2934.
- [20] 张芙蓉, 赵丽娜, 张瑞, 等. 生物炭对盐渍化土壤改良及甜瓜生长的影响[J]. 上海农业学报, 2015(1): 54-58.
- [21] 韩光明, 刘东, 孙世清, 等. 生物炭对不同连作年限棉田棉花光合特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2015(24): 6202-6206.
- [22] 张学艳, 曹莹, 孟军, 等. 生物炭对镉胁迫下水稻生长及光合产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 45(5): 97-101.
- [23] Wittenmayer L, Szabó K. The role of root exudates in specific apple (*Malus × domestica* Borkh.) replant disease (SARD) [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 163(4): 399-404.
- [24] 韩剑宏, 李艳伟, 张连科, 等. 生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9): 5291-5297.
- [25] Dong X, Guan T, Li G, et al. Long-term effects of biochar amount on the content and composition of organic matter in soil aggregates under field conditions[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(5): 1481-1497.
- [26] 张瑞, 杨昊, 张芙蓉, 等. 生物竹炭改良崇明滩涂盐渍化土壤的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2404-2411.
- [27] Yao Y, Gao B, Zhang M, et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil[J]. Chemosphere, 2012, 89(11): 1467-1471.

氮肥水平与栽植密度互作对不同 生育期水稻生长及产量的影响

李思平¹, 丁效东¹, 向丹¹, 曾路生¹, 张玉晓¹, 解军蕊¹, 黄信诚², 高发瑞²

(1. 青岛农业大学 资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 2. 济宁市农业科学研究院, 山东 济宁 272009)

摘要: 针对水稻生产中氮肥用量增加、栽植密度越来越低等问题, 深入探究水稻施氮量和栽植密度的互作效应对水稻生长、养分吸收及产量的影响, 以期为减少施氮、高效施肥提供理论依据, 从而找出水稻栽植密度与施氮量的最佳组合。以山东省济宁市任城区水稻试验田种植的第2季水稻圣稻18号为研究对象, 通过田间试验设置氮肥水平与栽植密度双因素处理, 施氮量设4个水平: 无氮(N1) 0 kg/hm²; 低氮(N2) 216 kg/hm²; 中氮(N3) 288 kg/hm²; 高氮(N4) 360 kg/hm²。栽植密度设3个梯度: 低密度 24 万穴/hm²; 中密度 27 万穴/hm²; 高密度 30 万穴/hm²。共12个处理, 3次重复。结果表明, 本试验条件下, 拔节期水稻的株高、鲜质量、叶面积及分蘖数均以30N3处理为最佳。对于水稻养分吸收, 中氮中密度下的水稻氮素含量最高, 其中27N2处理在抽穗期比24N2处理高出20.2%, 27N3处理在灌浆期比27N1处理高出1.30%。而水稻全磷、全钾含量随着施氮量增加有不同程度的提高。试验还表明, 在中密度条件下, 288 kg/hm²的施氮处理比不施氮肥产量提高12.1%; 在中氮条件下, 27 万穴/hm²的栽植密度比低密度处理产量提高18.5%。因此, 氮肥水平与栽培密度的最优组合为288 kg/hm²和27 万穴/hm², 该组合在降低施氮量、控制合理密度的同时, 产量实现最优, 达到14 615.3 kg/hm²。

关键词: 水稻; 氮肥水平; 栽植密度; 生长指标; 产量

中图分类号: S147.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2019)04-0174-09

doi: 10.7668/hbxb.201751248



Effects of Interaction Between Nitrogen Application Level and Planting Density on Growth and Yield of Rice at Different Growth Stages

LI Siping¹, DING Xiaodong¹, XIANG Dan¹, ZENG Lusheng¹, ZHANG Yuxiao¹,
XIE Junrui¹, HUANG Xincheng², GAO Farui²

(1. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

2. Jining Academy of Agricultural Sciences, Jining 272009, China)

Abstract: In view of the increase of nitrogen fertilizer application and decrease of planting density in rice production. The aim of the study was to explore the effects of nitrogen application rate and planting density on the growth, nutrient uptake and yield of rice, in order to provide a theoretical basis for reducing nitrogen application and high-efficiency fertilization. This experiment was carried out in rice field of Rencheng District, Jining City, Shandong Province, taking the second season rice Saint Rice 18 as the material, and setting up 4 nitrogen application rates: no nitrogen(N1) 0 kg/ha, low nitrogen(N2) 216 kg/ha, medium nitrogen(N3) 288 kg/ha and high nitrogen(N4) 360 kg/ha, and 3 planting densities: low density(240 000 plants/ha), medium density(270 000 plants/ha) and high density(300 000 plants/ha). A total of 12 treatments and 3 repetitions were arranged. The results showed that 30N3 was the best treatment for plant height, fresh weight, leaf area and tiller number at jointing stage. For rice nutrient uptake, the nitrogen content of rice under medium nitrogen and density was the highest, and 27N2 treatment was 20.2% higher than that of 24N2 treatment at heading stage, and 27N3 treatment was 1.30% higher than that of

收稿日期: 2019-01-25

基金项目: 山东省现代农业产业体系水稻岗位创新团队建设项目(SDAIT-17-05); 国家重点研发计划项目(2018YFD0200204-06)

作者简介: 李思平(1996-), 男, 山东寿光人, 在读硕士, 主要从事农业资源与环境研究。

通讯作者: 向丹(1984-), 女, 湖北宜昌人, 副教授, 博士, 主要从事植物营养研究。

27N1 treatment during grain filling period. The contents of total phosphorus and total potassium in rice increased with the increase of nitrogen application rate. The test also indicated that under medium density, the nitrogen application rate of 288 kg/ha was 12.1% higher than that of no nitrogen fertilizer. Under medium nitrogen condition, the planting density of 270 000 plants/ha was 18.5% higher than that of low-density treatment. The optimal combination of nitrogen fertilizer and density in this experiment was 288 kg/ha and 270 000 plants/ha. The combination reduced the amount of nitrogen fertilizer and controlled the reasonable density and the yield was optimal (14 615.3 kg/ha).

Key words: Rice; Nitrogen application levels; Planting density; Growth index; Yield

水稻作为世界上种植历史最悠久的粮食作物,全球近一半人口都以水稻为食。由于基础产量较高,所以水稻对粮食安全起着至关重要的作用^[1-2]。济宁市地处山东省西南部,气候属暖温带季风气候,四季分明,光温充足,土质为肥力水平中等的砂姜黑土,适合水稻生长,目前水稻种植面积可达 4.77 hm²。济宁水稻种植历史悠久,品质优良,选育了圣稻 18 等一批生育期适宜且适应性较强的优良品种在鲁西南地区推广使用^[3]。近年来,由于农田水利设施基础的薄弱以及高产水稻品种不断培育推广,我国水稻种植出现氮肥用量不断增加、栽植密度越来越低等一系列问题^[4-6]。一方面,大量的氮肥投入会增加水稻的无效分蘖,延迟水稻生育期,加剧硝态氮肥的淋失和铵态氮肥的挥发,以至于造成地表水或地下水的硝酸盐含量严重超标,导致环境污染和生态破坏^[7-9]。另一方面,水稻播种密度越来越低,虽然可以省工节本,但基本苗数不足,分蘖数过少,不利于光能与地力的充分利用。故只有合理的施氮量和栽植密度才能在促进水稻生长、提高产量的基础上,提高氮肥利用率,为个体发育与群体成长奠定坚实的基础,保证单位面积水稻产量的提高^[10-11]。另外,合理施肥可以改善土壤环境,培肥土壤^[12],合理的栽植密度还能增强水稻抗倒伏性,提高水稻产量与质量^[13]。本试验通过田间设置氮肥水平与种植密度互作,深入探究水稻氮肥水平和栽植密度的互作效应对水稻生长、养分吸收和产量的影响,以期探究水稻施氮量与种植密度的最佳组合,为减少施氮、制定合理的水稻种植措施,实现水稻高效增产提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本研究以山东省济宁市任城区水稻试验田为研究区域,试验时间为 2017 年 6 月—2018 年 10 月。土壤类型为肥力中等的砂姜黑土,试验对象是第 2 季水稻,品种为圣稻 18 号。供试肥料包括尿素(含

N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)和氯化钾(含 K₂O 60%)。

1.2 试验设计

试验设双因素处理,即施氮量与栽植密度。施氮量设 4 个水平:无氮(N1) 0 kg/hm²;低氮(N2) 216 kg/hm²;中氮(N3) 288 kg/hm²;高氮(N4) 360 kg/hm²。其中中氮(N3)为农民常规施氮量。栽植密度设 3 个梯度:低密度 24 万穴/hm²;中密度 27 万穴/hm²;高密度 30 万穴/hm²。其中,低密度为当地常规栽培密度。共 12 个处理,3 次重复。小区面积为 30.24 m² (3.6 m × 8.4 m),区组随机排列,各小区之间用塑料薄膜隔开,嵌入土层以下 40 cm,地面以上保留 60 cm。区组之间设置 60 cm 宽的排灌沟,排灌沟中央开挖宽度和深度为 25~30 cm 的走水沟,全部小区实行单排单灌。本试验氮肥分 4 次施用,其中基肥、返青肥、分蘖肥、穗肥施用量各占总施氮量的 30%、25%、35%、10%。磷肥按照 P₂O₅ 112.5 kg/hm² 施用,全部作基肥;钾肥按照 K₂O 112.5 kg/hm² 施用,全部作基肥。各处理均基施硫酸锌 15 kg/hm²。

1.3 测定项目及方法

分别于水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期以及成熟期时采集水稻样品,每个处理随机采集 12 株水稻,用以分析测定生长指标。

1.3.1 水稻生长指标的测定 株高、根长用直尺进行测量;根体积用排水法测量;叶面积用打孔仪法测定;分蘖数直接数出;鲜质量由电子天平称量。

1.3.2 水稻养分吸收的测定 水稻全氮采用凯氏定氮法测定;全磷采用浓硫酸消煮,钒钼黄比色法测定;全钾采用浓硫酸消煮,火焰光度计法测定。

1.3.3 水稻叶绿素的测定 叶绿素是在试验田使用叶绿素测定仪 SPAD-502 进行测定,多次测定取平均值。

1.3.4 水稻产量的测定 每小区选择 1 m² 计算水稻产量,收获时连同秸秆一并带回实验室进行脱粒烘干。

1.4 统计分析

采用 SPSS 进行方差分析,采用 Microsoft Office Excel 工作表对各指标数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥水平与栽植密度互作对水稻不同生育期生长指标的影响

2.1.1 氮肥水平与栽植密度互作对分蘖期生长指标的影响 由表 1 可知,在分蘖期,随着氮肥处理水平的提高,低密度和高密度下,水稻株高有逐渐增高的趋势,而中密度下水稻株高随氮肥增加先增高后降低。其中,30N4 的处理株高最高,24N1 处理的株高最低,且差异显著。中、高密度下,根长有逐渐降低的趋势,鲜质量则有先增加后减少的趋势,其中,

不同栽培密度的处理中,传统施肥的 N3 都具有较高的鲜质量。分蘖数随氮肥处理水平的提高,中低密度有先增加后减少再增加的波动趋势,而高密度则有先增加后减少的趋势。

2.1.2 氮肥水平与栽植密度互作对拔节期生长指标的影响 由表 2 可以看出,与分蘖期相比,拔节期水稻的鲜质量和叶面积增加了 3~4 倍,株高与根体积增加了 2 倍多,根长与分蘖数有一定量的增加。其中,拔节期水稻的 30N3 处理株高最高,为 81.6 cm,对比常规处理 24N3 增长了 8.9%,且各处理之间无显著差异。30N1 的根长最长,对比常规处理增长了 51.5%,且差异显著。比较鲜质量发现,30N3 与 27N3 处理最重,24N2 处理最轻。总体来说,在拔节期 30N3 处理的水稻生长指标较好。

表 1 氮肥水平与栽植密度互作对水稻分蘖期生长指标的影响

Tab.1 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on growth index of rice at tillering stage

生长指标 Growth indicator	处理 Treatment											
	24N1	24N2	24N3	24N4	27N1	27N2	27N3	27N4	30N1	30N2	30N3	30N4
株高/cm Plant height	29.8±1.1c	32.0±2.1abc	31.5±1.7bc	33.3±2.4abc	29.8±1.5c	35.3±2.8ab	32.3±3.1abc	32.2±2.7abc	31.7±1.1abc	32.9±2.1abc	34.5±3.2ab	35.9±4.2a
根长/cm Root length	12.9±1.1abc	11.9±0.9bc	13.1±0.5abc	12.3±1.5abc	13.9±1.7ab	12.6±1.0abc	11.1±0.8c	11.1±1.3c	14.1±1.5a	13.0±1.2abc	12.3±1.5abc	12.9±0.9abc
鲜质量/(g/株) Fresh weight	5.0±0.6de	5.7±0.4cd	6.1±0.4abc	5.9±0.5bc	4.4±0.4e	5.6±0.7cd	5.9±0.6bc	4.3±0.3e	4.4±0.4e	5.7±0.6cd	6.8±0.3a	6.6±0.5ab
根体积/(cm ³ /株) Root volume	1.4±0.2ab	1.1±0.2bc	1.5±0.2ab	1.4±0.2ab	1.1±0.1bc	1.5±0.2ab	1.3±0.1b	0.9±0.2c	1.3±0.2ab	1.7±0.2a	1.6±0.2ab	1.1±0.2bc
叶面积/(cm ² /株) Leaf area	71.6±5.6de	76.5±7.1bcde	75.2±6.2cde	82.7±7.3bc	58.1±4.5f	86.3±7.7ab	67.0±6.6ef	68.9±5.6def	65.7±5.7ef	79.0±6.7bcd	95.6±7.8a	95.9±5.6a
分蘖数/(个/株) Tiller number	2.2±0.2de	2.4±0.2bcd	1.8±0.1f	2.6±0.3bc	1.8±0.2f	2.7±0.2b	1.9±0.2ef	2.4±0.2bcd	2.3±0.1cd	2.5±0.2bcd	3.1±0.3a	2.4±0.3bcd

注:每行数据后不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 差异显著。表 2-8 同。

Note: Different lowercase letters after each line of data indicate a significant difference at $P < 0.05$. The same as Tab. 2-8.

表 2 氮肥水平与栽植密度互作对水稻拔节期生长指标的影响

Tab.2 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on growth index of rice at jointing stage

生长指标 Growth indicator	处理 Treatment											
	24N1	24N2	24N3	24N4	27N1	27N2	27N3	27N4	30N1	30N2	30N3	30N4
株高/cm Plant height	75.2±6.2abc	77.3±7.8ab	74.9±7.2abc	70.9±6.8abc	73.9±6.5abc	74.6±6.8abc	73.8±5.3abc	65.1±4.5c	68.6±5.2bc	77.9±6.1ab	81.6±7.7a	79.9±6.3a
根长/cm Root length	16.8±1.7bcd	15.7±1.4cde	14.4±1.3def	13.8±1.0efg	16.6±1.9cd	19.2±1.6b	16.1±1.7cde	9.8±0.1h	21.8±2.0a	17.0±1.3bc	13.0±1.5fg	11.8±1.3gh
鲜质量/(g/株) Fresh weight	40.0±3.8ab	23.6±4.2d	25.6±6.3cd	25.5±8.1cd	34.3±6.5bc	27.3±5.1cd	45.8±10.2a	25.2±4.1cd	29.5±6.0cd	32.3±2.2bcd	45.8±3.2a	32.6±7.6bcd
根体积/(cm ³ /株) Root volume	4.4±0.3a	2.2±0.2ef	2.6±0.3de	2.9±0.3cd	2.9±0.3cd	2.9±0.3cd	1.9±0.2fg	1.7±0.1g	3.2±0.2bc	3.4±0.2b	2.7±0.3d	2.9±0.3cd
叶面积/(cm ² /株) Leaf area	371.1±36.8b	310.8±19.6cde	319.4±25.3cde	271.7±32.1e	313.0±19.9cde	291.5±25.5de	299.6±26.1de	301.8±30.5de	304.4±25.4de	324.1±28.7bcd	454.5±44.7a	357.4±28.5bc
分蘖数/(个/株) Tiller number	2.4±0.2c	2.5±0.2bc	2.9±0.3b	2.9±0.2b	2.7±0.3bc	2.9±0.2b	2.5±0.2bc	2.7±0.2bc	2.8±0.2bc	2.7±0.3bc	3.6±0.4a	2.8±0.2bc

分析表 3 数据可知,抽穗期中等密度的 27N4 处理株高最高,对比常规处理 24N3 增长了 9.7%,而高密度的 30N4 株高最低,且差异显著。24N4 处理的鲜质量最高,27N1 处理的鲜质量最低,且差异显著。常规处理 24N3 的分蘖数最多,27N4 处理分蘖最少。总体来说,到了抽穗期,低密度高氮处理的 24N4 具有较好的生长指标。

2.1.3 氮肥水平与栽植密度互作对灌浆期生长指标的影响 由表 4 可知,到了灌浆期,不同处理的水

稻生长指标与拔节期比较差异不大,甚至略有减少,说明水稻开始衰老。低密度和高密度下,随着氮处理水平增加,水稻的株高出现先增加后下降的趋势,而中密度的水稻株高呈先降低后增加的趋势。水稻根长整体呈下降趋势。常规施肥的 N3 水平下,随着栽植密度的增加,水稻根体积、叶面积和分蘖数都呈现先减少后增加的趋势。总体来看,灌浆期 30N1 处理的生长指标相对较好。

表 3 氮肥水平与栽植密度互作对水稻抽穗期生长指标的影响

Tab.3 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on growth index of rice at heading stage

生长指标 Growth indicator	处理 Treatment											
	24N1	24N2	24N3	24N4	27N1	27N2	27N3	27N4	30N1	30N2	30N3	30N4
株高/cm Plant height	88.4±7.6ab	90.7±6.1ab	89.1±8.8ab	86.5±9.6b	91.2±7.2ab	88.4±6.4ab	92.9±3.1ab	97.7±3.3a	89.4±5.0ab	90.7±4.4ab	90.5±3.2ab	87.3±1.7b
根长/cm Root length	14.9±2.2cde	18.0±1.5ab	15.7±1.5bcd	17.8±1.7ab	13.3±0.8def	18.3±2.0a	16.8±1.4abc	13.0±1.7ef	17.0±2.1abc	8.7±0.9g	8.6±0.6g	12.1±0.9f
鲜质量/(g/株) Fresh weight	31.6±1.1ab	31.8±4.2ab	29.5±2.2bc	34.8±2.9a	18.9±1.7fg	19.6±0.6f	22.2±1.7ef	15.1±1.0g	27.6±2.2cd	25.4±3.1de	24.4±2.8de	29.6±1.6bc
根体积/(cm ³ /株) Root volume	3.8±0.4a	1.9±0.2cd	1.1±0.1e	2.5±0.2b	1.6±0.1d	1.8±0.2cd	2.8±0.3b	2.6±0.2b	1.9±0.2cd	2.0±0.2c	1.7±0.1cd	2.6±0.2b
叶面积/(cm ² /株) Leaf area	222.9±7.7c	258.6±14.9b	257.2±8.9b	327.4±25.1a	134.2±11.7e	141.6±6.8e	190.5±21.3d	120.1±9.7e	217.5±16.7c	175.6±14.8d	190.1±9.7d	231.5±20.8c
分蘖数/(个/株) Tiller number	2.5±0.2bc	2.5±0.4bc	3.3±0.3a	2.8±0.3b	1.7±0.2e	2.2±0.2cd	2.8±0.3b	1.6±0.2e	2.4±0.2bc	1.8±0.2de	2.6±0.2bc	2.6±0.2bc

表 4 氮肥水平与栽植密度互作对水稻灌浆期生长指标的影响

Tab.4 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on growth index of rice at filling stage

生长指标 Growth indicator	处理 Treatment											
	24N1	24N2	24N3	24N4	27N1	27N2	27N3	27N4	30N1	30N2	30N3	30N4
株高/cm Plant height	86.6±1.7abc	91.9±4.7ab	85.7±2.1bc	84.0±0.8c	87.4±7.7abc	84.4±0.6c	83.5±1.3c	86.4±6.5abc	91.6±5.7ab	92.8±2.5a	90.1±4.1abc	89.0±3.6abc
根长/cm Root length	17.4±1.5bcd	18.4±2.4bc	16.8±0.8bcd	15.7±0.5de	19.1±0.9b	17.5±2.1bcd	15.8±0.3de	14.3±0.7e	22.1±1.3a	18.3±2.0bc	16.7±1.1cd	16.7±1.2cd
鲜质量/(g/株) Fresh weight	28.3±0.7cde	30.9±2.8c	39.8±1.6ab	20.1±1.8f	45.0±4.4a	30.0±2.8cd	25.4±3.2def	23.5±2.7ef	43.1±3.7ab	30.4±5.4cd	38.5±2.8b	38.2±3.6b
根体积/(cm ³ /株) Root volume	1.2±0.2de	1.4±0.1d	2.4±0.3ab	1.0±0.1e	2.0±0.1c	1.2±0.2de	1.2±0.1de	2.4±0.2ab	2.1±0.2bc	1.4±0.1d	2.0±0.1c	2.6±0.3a
叶面积/(cm ² /株) Leaf area	131.8±11.2fg	131.7±15.3fg	270.7±30.2a	112.8±7.8g	237.3±25.5b	171.4±15.0de	166.6±13.6e	148.7±9.2ef	222.0±41.3bc	150.9±8.7ef	200.9±18.5cd	179.8±7.6de
分蘖数/(个/株) Tiller number	1.8±0.1g	2.3±0.2de	3.1±0.2a	2.5±0.1cd	2.6±0.2bc	1.9±0.1fg	1.8±0.2g	1.5±0.1h	2.8±0.3ab	1.9±0.1fg	2.1±0.2ef	2.2±0.2e

2.1.4 氮肥水平与栽植密度互作对成熟期生长指标的影响 分析表 5 数据可知,到了成熟期,中低密度处理的水稻鲜质量有一定量的增加,而高密度处理水稻鲜质量却有一定量的减少。各个处理的水稻叶面积都有一定量的增加,根体积有一定量的减少。其他生长指标与灌浆期比较差异不大。其中,30N3 处理株高最高,对比常规处理 24N3 增长了 8.1%,差异不显著。根长 24N1 最长,对比常规处理 24N3 增长了 61.8%,且差异显著。常规处理 24N3 的鲜

质量、根体积、叶面积和分蘖数均为最大,且差异性显著。分析成熟期生长指标发现,24N3 处理的生长指标相对较好。

纵观水稻整个生长周期,发现水稻在分蘖期和拔节期,30N3 处理的生长指标较高。在抽穗期时,24N4 与 27N4 的生长指标较高,灌浆期则是 30N1 处理的生长指标相对较高。由此可知,氮肥用量的增加对水稻分蘖数、株高及叶面积的增加有一定促进作用,而水稻生长指标为中等栽植密度的较好。

2.2 氮肥水平与栽植密度互作对水稻不同生育期养分吸收的影响

2.2.1 氮肥水平与栽植密度互作对水稻不同时期全氮吸收的影响 分析表 6 数据可知,水稻从分蘖期到成熟期,所有处理的全氮含量总体呈下降趋势,下降最多的 27N2 处理全氮含量下降了 63.7%。下

降最少的 24N1 处理全氮含量也下降了 19.6%。可以看出,中密度处理的全氮含量指标较好,其中 27N2 处理在抽穗期比 24N2 处理高出 20.2% 27N3 处理在灌浆期比 27N1 处理高出 1.30%。氮肥处理中 N3 处理的全氮含量指标较好,其中 27N3 处理在灌浆期比 27N1 处理高出 106.6%。

表 5 氮肥水平与栽植密度互作对水稻成熟期生长指标的影响

Tab.5 Effects of Interaction between nitrogen application levels and planting density on growth indicators of rice at mature stage

生长指标 Growth indicator	处理 Treatment											
	24N1	24N2	24N3	24N4	27N1	27N2	27N3	27N4	30N1	30N2	30N3	30N4
株高/cm Plant height	89.9±4.1a	88.9±5.2a	89.6±2.3a	95.3±7.6a	92.3±6.5a	88.2±2.3a	89.7±5.1a	94.8±3.4a	96.0±8.2a	95.2±6.8a	96.9±4.3a	96.8±6.3a
根长/cm Root length	16.5±1.1a	10.8±0.9d	10.2±0.6d	11.6±2.1d	13.8±0.5bc	10.1±0.7d	11.6±1.3d	11.8±2.2cd	14.2±0.5b	13.9±1.1b	11.2±1.3d	14.0±0.5b
鲜质量/(g/株) Fresh weight	37.2±2.4bc	42.2±3.9b	55.6±4.3a	32.7±6.1cd	34.8±3.6cd	34.6±2.1cd	21.5±0.6f	25.3±1.8ef	26.7±2.7ef	30.6±3.2de	26.6±2.3ef	25.6±2.8ef
根体积/(cm ³ /株) Root volume	2.8±0.3ab	2.5±0.1b	3.2±0.2a	0.9±0.1f	1.2±0.3def	1.4±0.2cde	1.0±0.2ef	1.6±0.2cd	1.2±0.3def	1.3±0.3def	1.8±0.4c	1.5±0.2cd
叶面积/(cm ² /株) Leaf area	314.3±22.8bc	326.1±31.7b	505.8±22.7a	286.2±25.5cd	343.1±18.8b	338.6±26.3b	173.4±20.1f	244.4±9.1e	246.8±14.9e	289.9±9.8cd	270.9±25.6de	337.5±6.7b
分蘖数/(个/株) Tiller number	1.6±0.1ef	2.1±0.2bcd	2.8±0.3a	2.3±0.3b	2.2±0.2bc	1.8±0.2def	1.9±0.3cde	1.5±0.2f	2.0±0.1bcd	2.1±0.1bcd	1.9±0.1cde	1.8±0.2def

表 6 氮肥水平与栽植密度互作对水稻不同时期全氮吸收的影响

Tab.6 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on total nitrogen absorption in different stages of rice

生长时期 Growth stage	处理 Treatment												g/kg
	24N1	24N2	24N3	24N4	27N1	27N2	27N3	27N4	30N1	30N2	30N3	30N4	
分蘖期 Tillering stage	21.4±1.6h	29.6±2.4fg	35.3±2.1def	44.5±5.6ab	31.4±2.2efg	49.9±7.1a	41.5±3.8bc	37.0±2.5cde	40.8±3.7bcd	30.7±2.1fg	28.9±1.8g	35.2±4.2def	
拔节期 Jointing stage	21.0±1.4e	31.0±2.8ab	29.0±1.5abc	27.5±3.0bc	21.4±0.8e	26.2±1.7cd	27.9±3.2bc	27.3±1.3bc	27.9±2.1bc	22.4±1.4de	27.6±0.7bc	32.2±4.5a	
抽穗期 Heading stage	26.5±0.4cde	24.2±1.7e	31.0±4.5a	28.9±2.4abd	24.7±1.5e	29.1±0.6abcd	29.5±1.7abc	26.0±0.9de	27.2±1.0bcde	27.9±0.6abcd	29.5±2.2abc	29.8±1.3ab	
灌浆期 Filling stage	15.5±0.7ef	15.9±1.2de	25.6±3.4b	18.9±0.7cd	12.2±0.6f	19.3±2.1c	25.2±1.6b	21.4±1.7c	34.4±3.2a	15.2±1.4ef	19.6±1.9c	20.9±2.7c	
成熟期 Mature stage	17.2±1.4abcd	18.5±1.1ab	18.8±2.0a	15.7±0.7cd	14.9±1.2d	18.1±1.5ab	18.9±2.1a	16.2±0.8bcd	17.5±1.7abc	15.5±0.6cd	17.7±0.5abc	17.7±1.6abc	

分析还可知,水稻体内吸收的氮量,在分蘖期差异更明显,到了成熟期各处理间的差异已不太明显。在分蘖期,水稻体内的氮含量低密度时随氮处理水平的增加而增加,中密度时先增加后减少,而高密度时表现为先减少后增加,说明氮的变化非常复杂。

2.2.2 氮肥水平与栽植密度互作对水稻不同时期全磷吸收的影响 根据表 7 数据可知,水稻整个生长周期的全磷含量总体表现出先下降后上升的趋势。从分蘖期-抽穗期,所有处理全磷含量持续下降,到抽穗期下降至最低值,然后逐渐回升。下降最多的是 24N1 处理,全磷含量下降了 93.0%。回升最多的是 30N1 处理,全磷含量从 2.3 g/kg 增高至 17.3 g/kg。同一栽植密度下,随着氮肥用量的增加,水稻全磷含量整体有一定的上升;同一氮肥水平

下,随着栽植密度的增加,全磷含量在灌浆期以前有一定程度的下降,至成熟期反而增加。

2.2.3 氮肥水平与栽植密度互作对水稻不同时期全钾吸收的影响 由表 8 可知,随着水稻不断生长,水稻全钾含量整体呈现先上升后下降的趋势。分蘖期-拔节期,大部分处理的全钾含量都有小幅度升高,但 24N2、30N1 和 30N2 3 个处理的全钾含量略微下降。拔节期-灌浆期,所有处理的全钾含量持续下降,下降较多的 24N4、30N4 处理分别下降了 53.8%、70.3%。从灌浆期-成熟期,大部分处理的全钾含量出现一定程度的回升,小部分处理继续下降,但程度不大。伴随着氮肥用量的增加,水稻全钾含量在拔节期表现为持续略微升高,而在灌浆期则呈现先升高后降低的趋势。

表 7 氮肥水平与栽植密度交互对水稻不同时期全磷吸收的影响

Tab. 7 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on total phosphorus absorption in different stages of rice												g/kg
生长时期 Growth stage	处理 Treatment											
	24N1	24N2	24N3	24N4	27N1	27N2	27N3	27N4	30N1	30N2	30N3	30N4
分蘖期 Tillering stage	35.9±3.1b	34.7±2.8b	33.3±2.1b	22.0±3.8cd	14.5±1.7e	33.2±3.5b	44.7±3.2a	23.0±2.2c	18.6±1.4de	14.7±0.8e	16.7±1.1e	17.8±1.4e
拔节期 Jointing stage	6.4±0.4de	7.6±0.7bcd	7.6±1.0bcd	10.3±2.0a	8.8±0.8ab	6.9±0.5cd	4.2±0.6f	8.4±1.2bc	10.2±1.8a	5.0±0.4ef	7.4±0.9bcd	8.7±1.0ab
抽穗期 Heading stage	2.5±0.2cd	2.9±0.3bc	3.0±0.4b	3.8±0.3a	2.3±0.2d	2.7±0.3bcd	3.1±0.3b	2.3±0.3d	2.3±0.2d	2.3±0.1d	2.3±0.4d	3.7±0.2a
灌浆期 Filling stage	4.8±0.5c	13.1±1.0a	14.7±2.2a	10.8±1.8b	2.7±0.2e	4.8±0.4c	5.3±1.3c	3.9±0.4cde	2.6±0.2e	3.1±0.2de	4.5±0.4cd	3.9±0.3cde
成熟期 Mature stage	8.4±0.9d	6.2±0.4ef	15.9±0.5b	15.0±0.8b	5.9±0.3ef	7.1±0.5de	4.9±0.2fg	4.1±0.3g	17.3±1.2a	10.5±0.6c	15.7±1.2b	15.4±1.6b

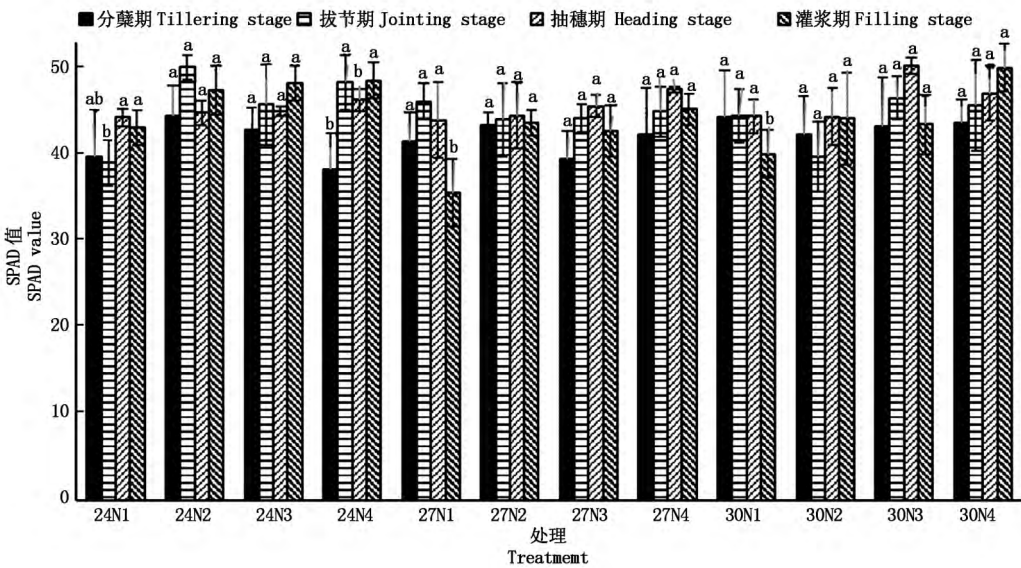
表 8 氮肥水平与栽植密度交互对水稻不同时期全钾吸收的影响

Tab. 8 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on total potassium absorption in different stages of rice												g/kg
生长时期 Growth stage	处理 Treatment											
	24N1	24N2	24N3	24N4	27N1	27N2	27N3	27N4	30N1	30N2	30N3	30N4
分蘖期 Tillering stage	19.3±2.1c	29.6±0.7b	28.8±1.6b	26.8±1.5b	26.3±0.6b	20.7±1.2c	21.5±3.1c	10.2±1.7d	36.1±2.7a	39.8±4.6a	10.1±1.1d	18.8±2.4c
拔节期 Jointing stage	27.5±2.0cd	27.9±1.4bcd	30.2±2.7bc	35.1±3.4a	25.4±2.0d	28.5±1.7bcd	27.0±1.2cd	30.2±2.1bc	28.0±1.1bcd	29.1±0.6bc	30.4±2.2bc	31.3±2.4b
抽穗期 Heading stage	22.0±1.7abcd	20.6±1.1bcde	22.9±3.1abc	24.9±2.3a	18.7±0.6de	18.7±0.4de	19.9±2.1cde	18.9±2.8de	23.5±2.0ab	17.8±0.6e	21.4±3.6bcd	21.3±0.9bcd
灌浆期 Filling stage	8.9±0.4de	11.6±2.2c	20.3±3.2a	16.2±0.8b	7.0±0.5e	17.6±1.2b	15.8±1.0b	10.6±1.1cb	8.3±0.9de	10.3±1.2cd	9.5±0.5cd	9.3±1.1cde
成熟期 Mature stage	16.0±1.0a	6.4±0.7d	6.9±0.8d	10.9±1.1c	15.1±0.5ab	10.9±2.0c	11.3±0.7c	14.1±0.5b	10.7±0.9c	14.7±0.4ab	11.2±0.9c	11.2±1.1c

2.3 氮肥水平与栽植密度交互对水稻不同时期叶绿素含量的影响

由图 1 可知,从分蘖期-灌浆期,水稻叶绿素含

量整体呈现先上升后下降的趋势。随着氮肥水平的增加,叶绿素平均含量呈增加趋势。随着栽植密度的增大,叶绿素含量变化差异不明显。



图柱上方不同字母表示相同生长时期的不同处理在 $P < 0.05$ 差异显著。图 2 同。

The different letters above the column indicate significant differences between treatments in the same growth stage at $P < 0.05$. The same as Fig. 2.

图 1 氮肥水平与栽植密度交互对水稻不同时期叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on chlorophyll content in different stages of rice

在水稻分蘖期, 24N2 的叶绿素含量相对较高, 各处理之间的差异不显著。拔节期, 24N2 处理的叶绿素含量相对较高, 24N1 处理最低。在抽穗期时, 30N3 处理的叶绿素含量最高。在灌浆期时, 30N4 的处理叶绿素含量较高, 27N1 处理最低, 且差异显著。总体来讲, 对于水稻的整个生长周期而言, 30N4 处理的叶绿素含量相对较高, 说明叶绿素含量受氮的影响较大。

2.4 氮肥水平与栽植密度互作对水稻产量的影响

由图 2 可知, 氮肥用量与栽植密度互作对水稻产量有明显影响。27N3 处理的产量最高, 可达 14 615.3 kg/hm², 比同密度下不施氮肥的 27N1 处理产量提高了 12.1%, 比相同氮肥水平下低密度的常规处理 24N3 产量提高了 18.5%。而 30N1 处理的产量最少, 仅有 8 221.1 kg/hm²。从氮肥水平来看, 中等栽植密度的氮肥用量与水稻产量呈抛物线关系, 288 kg/hm² 的氮肥用量为最佳。从栽植密度看, 27 万穴/hm² 的栽植密度为最佳, 24 万穴/hm² 次之, 30 万穴/hm² 种植效果最差。分析原因可能为密度过小会导致有效穗数过少从而无法获得预期产量, 密度过大则会影响水稻对光照的吸收和对土壤养分的利用, 导致产量过低。

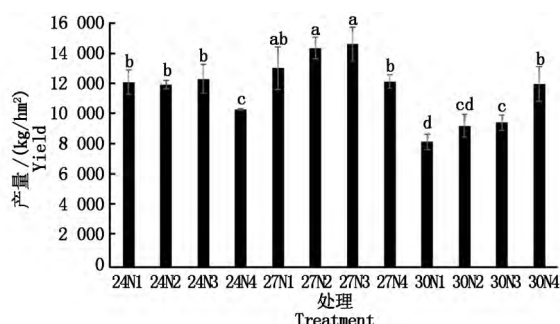


图 2 氮肥水平与栽植密度互作对水稻产量的影响

Fig. 2 Effects of interaction between nitrogen application levels and planting density on rice yield

3 结论与讨论

氮肥施用与控制栽植密度作为水稻种植过程中的主要栽培手段, 对水稻的生长起关键性作用。大量的研究表明, 合理的氮肥用量搭配适宜的栽植密度能够有效地提高水稻的产量^[14]。水稻产量是品种遗传特性和环境条件综合作用的结果^[15]。氮肥用量达到一定程度以后, 水稻产量将不再提高, 相反还会有所降低^[4]。张耀鸿等^[16]认为, 超过一定施肥量随着氮肥用量的增加, 水稻的总吸氮量及氮肥利用率都会下降。邓中华等^[17]根据模型分析来研究不同密度和氮肥对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响, 并得出其试验条件下氮肥密度的最优组

合为 194.9 kg/hm² 和 22.1 万穗/hm²。本试验研究发现, 随着氮肥用量的增加, 拔节期水稻的株高、鲜质量、叶面积及分蘖数均以施氮量 288 kg/hm²、栽植密度 30 万穴/hm² 为最佳。

氮素是叶绿素的组成成分, 叶绿素 a 和叶绿素 b 都是含氮化合物^[18]。氮素的增加能促进叶绿素的合成, 本试验条件下, 拔节期的 24N2 处理与抽穗期的 30N3 处理叶绿素含量较高。氮肥用量增加还可以促进水稻的养分吸收, 随着施氮量的增加, 水稻植株的全氮、全磷及全钾的含量均有不同程度的升高。合理优化施肥是水稻高产稳产的关键环节^[19-20], 所以施氮水平要与追求的产量水平相一致^[21]。兰艳等^[22]研究表明, 成都平原稻作区施氮量为 225 kg/hm², 栽插密度为 2.667 × 10⁵ 穴/hm² 时, 能够促进粳稻 D46 高产并提高氮肥利用率。本研究发现, 中等密度下氮肥用量与水稻产量呈一定的抛物线关系, 且当氮肥水平按照 288 kg/hm² 施用, 栽植密度为 27 万穴/hm² 时产量最高, 可达 14 615.3 kg/hm²。

有研究认为, 中密度时有效穗数、实粒数均不是最优, 但产量最高^[23], 这与本试验结果相似。对于低密度植株而言, 个体生长数据较好。比如 24N4 处理在抽穗期的叶面积、鲜质量最高, 24N1 处理根体积最大。但由于低密度基本苗少, 有效穗数有限, 故总体产量较低。而密度过高时, 田间过于荫蔽相互遮挡, 个体之间竞争激烈, 不仅个体生长数据较差, 而且总体产量也不容乐观。所以只有合理的密度才能充分协调穗、粒结构, 满足个体与群体的发展, 改善田间结构, 有效地提高水稻产量^[24-25]。

本试验研究表明, 相同的栽植密度下, 288 kg/hm² 的施氮水平可以有效提高水稻产量。在中密度条件下, 288 kg/hm² 的施氮处理比不施氮肥产量提高 12.1%; 相同的施氮水平下, 27 万穴/hm² 的栽植密度可以有效提高水稻产量。在常规施肥, 即中氮条件下, 27 万穴/hm² 的栽植密度比常规的低密度处理产量提高 18.5%。

综上所述, 氮肥水平与栽培密度的最优组合为 288 kg/hm² 和 27 万穴/hm², 该组合在降低氮肥用量, 控制合理密度的同时, 实现了产量的最大化。

参考文献:

- [1] 钟楚, 曹小闯, 朱练峰, 张均华, 禹盛苗, 金千瑜. 稻田干湿交替对水稻氮素利用率的影响与调控研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 20(19): 139-147. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.19.020.
- Zhong C, Cao X C, Zhu L F, Zhang J H, Yu C M, Jin Q Y. A review on effects and regulation of paddy alternate

- wetting and drying on rice nitrogen use efficiency [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2016 20(19): 139–147.
- [2] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J, Cui Z L, Yin B, Christie P, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2009 106(9): 3041–3046. doi: 10.1073/pnas.0813417106.
- [3] 孔贺, 杜中民, 朱红梅, 黄信诚, 高发瑞, 王绪营, 崔太昌. 济宁市水稻生产现状、问题及建议 [J]. 中国稻米 2016 22(2): 104–106. doi: 10.3969/j.issn.1006-8082.2016.02.029.
- Kong H, Du Z M, Zhu H M, Huang X C, Gao F R, Wang X Y, Cui T C. Rice production status, problems and suggestions of jining city [J]. China Rice 2016 22(2): 104–106.
- [4] 徐新朋, 周卫, 梁国庆, 孙静文, 王秀斌, 何萍, 徐芳森, 余喜初. 氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报 2015 23(3): 763–772. doi: 10.11674/zwf.2015.0324.
- Xu X P, Zhou W, Liang G Q, Sun J W, Wang X B, He P, Xu F S, Yu X C. Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015 23(3): 763–772.
- [5] 汪新国, 吴文革, 孔令娟, 刘磊, 王宏斌, 吴红星, 许有尊, 张丽娟. 不同播种密度和施肥量对江淮稻田免耕直播油菜产量形成及农艺性状的影响 [J]. 安徽农业科学 2010 38(27): 14901–14902, 14910. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2010.27.032.
- Wang X G, Wu W G, Kong L J, Liu L, Wang H B, Wu H X, Xu Y Z, Zhang L J. Effects of different density and application amount on yield formation and agronomical character of no-tillage direct seeding of rape [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences 2010 38(27): 14901–14902, 14910.
- [6] Yan W J, Zhang S, Sun P, Seitzinger S P. How do nitrogen inputs to the Changjiang basin impact the Changjiang River nitrate: A temporal analysis for 1968–1997 [J]. Global Biogeochemical Cycles 2003 17(4): 1–9. doi: 10.1029/2002GB002029.
- [7] 刘海东, 唐湘如, 赵烈, 田华, 莫钊文, 段美洋, 潘圣刚. 不同施肥深度对直播水稻氮素积累与转移的影响 [J]. 华北农学报 2016 31(5): 216–221. doi: 10.7668/hbxb.2016.05.033.
- Liu H D, Tang X R, Zhao L, Tian H, Mo Z W, Duan M Y, Pan S G. Influences of different nitrogen application depths on nitrogen accumulation and transfer in direct-seeded rice [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica 2016 31(5): 216–221.
- [8] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报 2008 45(5): 915–924. doi: 10.3321/j.issn:0564-3929.2008.05.018.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in china and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica 2008 45(5): 915–924.
- [9] 曹小闯, 李晓艳, 朱练峰, 张均华, 禹盛苗, 吴良欢, 金千瑜. 水分管理调控水稻氮素利用研究进展 [J]. 生态学报 2016 36(13): 3882–3890. doi: 10.5846/stxb201411202298.
- Cao X C, Li X Y, Zhu L F, Zhang J H, Yu C M, Wu L H, Jin Q Y. Effects of water management on rice nitrogen utilization: a review [J]. Acta Ecologica Sinica 2016 36(13): 3882–3890.
- [10] 梁玉凤, 钱永德, 张亚辉, 王浩. 水稻播种密度及施肥量对产量品质影响 [J]. 农业与技术 2016 36(5): 23–27. doi: 10.11974/nyjys.20160332008.
- Liang Y F, Qian Y D, Zhang Y H, Wang H. Effect of rice seeding density and fertilization amount on yield and quality [J]. Agriculture & Technology 2016 36(5): 23–27.
- [11] 谢小兵, 蒋鹏, 黄敏, 曹放波, 周雪峰, 张瑞春, 陈佳娜, 伍丹丹, 邹应斌. 基于黄金分割法的双季稻合理密植研究 [J]. 核农学报 2016 30(12): 2467–2476. doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2016.12.2467.
- Xie X B, Jiang P, Huang M, Cao F B, Zhou X F, Zhang R C, Chen J N, Wu D D, Zou Y B. Study on rational close planting based on golden section method for double cropping rice [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences 2016 30(12): 2467–2476.
- [12] Li P, Zhang T L, Wang X X, Yu D S. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China [J]. Soil and Tillage Research 2013 126(1): 112–118. doi: 10.1016/j.still.2012.07.011.
- [13] 邓接楼, 欧阳佰玲, 张高阳, 周木华, 桂在智, 朱元元, 王鹏飞. 不同栽培条件对杂交晚稻茎秆抗倒伏性状的影响 [J]. 浙江农业学报 2016 28(12): 1970–1978. doi: 10.3969/j.issn.1004-4524.2016.12.02.
- Deng J L, Ouyang B L, Zhang G Y, Zhou M H, Gui Z Z, Zhu Y Y, Wang P F. Influence of different cultivation conditions on stalk lodging resistances of hybrid late rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis 2016 28(12): 1970–1978.
- [14] 周江明, 赵琳, 董越勇, 徐进, 边武英, 毛杨仓, 章秀福. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报 2010 18(2): 274–281. doi: 10.11674/zwf.2010.0203.
- Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y, Xu J, Bian W Y, Mao Y C, Zhang X F. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science 2010 18(2): 274–281.
- [15] Cheng W D, Zhang G P, Zhao G P, Yao H G, Xu H M. Variation in rice quality of different cultivars and grain positions as affected by water management [J]. Field Crops Research 2003 80(3): 245–252. doi: 10.1016/S0378-4290(02)00193-4.
- [16] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 徐阳春, 沈其荣. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较 [J]. 植物营养与肥料学报 2006 12(5): 616–621. doi: 10.3321/j.issn:1008-505X.2006.05.003.
- Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W, Xu Y C, Shen J R. Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science 2006 12(5): 616–621.
- [17] 邓中华, 明日, 李小坤, 郑磊, 徐维明, 杨运清, 任涛, 丛日环, 鲁剑巍. 不同密度和氮肥用量对水稻产量, 构成因子及氮肥利用率的影响 [J]. 土壤 2015 47

- (1): 20–25. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2015.01.004.
Deng Z H ,Ming R ,Li X K ,Zheng L ,Xu W M ,Yang Y Q ,Ren T ,Cong R H ,Lu J W. Effects of nitrogen application rate and planting density on grain yields ,yield components and nitrogen use efficiencies of rice [J]. Soils 2015 47(1): 20–25.
- [18] 李汉生 徐永. 光照对叶绿素合成的影响[J]. 现代农业科技 2014(21): 161–164. doi: 10.3969/j.issn.1007-5739.2014.21.101.
Li H S ,Xu Y. Effect of light on synthesis of chlorophylls [J]. Anhui Agriculture 2014(21): 161–164.
- [19] Zhang J B ,Zhu T B ,Meng T Z ,Zhang Y C ,Yang J J ,Yang W Y ,Müeller C ,Cai Z C. Agricultural land use affects nitrate production and conservation in humid subtropical soils in China [J]. Soil Biology and Biochemistry 2013 ,62(5): 107–114. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.03.006.
- [20] 吴立鹏,张士荣,娄金华,魏立兴,王凯荣,丁效东. 有机无机配施对滨海盐渍化土壤磷含量及水稻生长、产量的影响[J]. 华北农学报 2018 ,33(1): 203–210. doi: 10.7668/hbxb.2018.01.029.
Wu L P ,Zhang S R ,Lou J H ,Wei L X ,Wang K R ,Ding X D. Effects of organic-inorganic fertilizer on soil P the yield and growth of rice in coastal saline soil [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica 2018 ,33(1): 203–210.
- [21] Sheehy J E ,Mitchell P L ,Kirk G J D ,Ferrer A B. Can smarter nitrogen fertilizers be designed?: Matching nitrogen supply to crop requirements at high yields using a simple model [J]. Field Crops Research 2005 94(1): 54–66. doi: 10.1016/j.fcr.2004.11.008.
- [22] 兰艳,黄鹏,江谷驰弘,雷小波,许光利,丁春邦,李天. 施氮量和栽插密度对粳稻 D46 产量及氮肥利用率的影响[J]. 华南农业大学学报 2016 37(1): 20–28. doi: 10.7671/j.issn.1001-411X.2016.01.004.
Lan Y ,Huang P ,Jianggu C H ,Lei X B ,Xu G L ,Ding C B ,Li T. Effect of planting density and nitrogen application on yield and nitrogen uptake and utilization of japonica rice cultivar D46 [J]. Journal of South China Agricultural University 2016 37(1): 20–28.
- [23] 李静. 两种生态条件下栽培密度对水稻根系形态的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版) 2016 38(9): 12–19. doi: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.09.003.
Li J. Effect of planting density on root morphology of rice under two different ecological condition [J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition) , 2016 38(9): 12–19.
- [24] 赵黎明,李明,郑殿峰,顾春梅,那永光,解保胜. 灌溉方式与种植密度对寒地水稻产量及光合物质生产特性的影响[J]. 农业工程学报 2015 31(6): 159–169. doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.06.022.
Zhao L M ,Li M ,Zheng D F ,Gu C M ,Na Y G ,Xie B S. Effects of irrigation methods and rice planting densities on yield and photosynthetic characteristics of matter production in cold area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2015 31(6): 159–169.
- [25] 潘圣刚,黄胜奇,江洋,蔡明历,曹凑贵,唐湘如,黎国. 秧龄和栽插密度对水稻生物学特性的影响[J]. 华北农学报 2011 26(3): 134–138. doi: 10.7668/hbxb.2011.03.027.
Pan S G ,Huang S J ,Jiang Y ,Cai M L ,Cao C G ,Tang X R ,Li G. Effects of rice seedling age and transplanting density on the biological characteristics of rice [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica 2011 26(3): 134–138.

甘薯对干旱胁迫响应的生理诊断研究

李思平¹, 杨硕¹, 李欢^{1*}, 刘庆¹, 辛国胜²

¹青岛农业大学资源与环境学院, 青岛266109

²烟台市农业科学研究院, 山东烟台265500

摘要: 针对甘薯(*Ipomoea batatas*)生长过程中常受季节性干旱的胁迫, 本试验采用砂培试验法, 在甘薯定植70 d后添加不同浓度的聚乙二醇(PEG-6000)营养液, 模拟轻度、中度和重度干旱胁迫。通过连续三天的动态生理生化指标监测, 探索生长中期基于甘薯地上部生理指标的干旱诊断。结果表明: 干旱胁迫24~72 h过程中, 胁迫48 h后甘薯地上部的生理指标对干旱的响应程度更为明显。对干旱胁迫48 h的生理指标与PEG浓度水势进行相关性分析得出, 叶片相对含水量、丙二醛(MDA)含量、 F_v/F_m 和净光合速率(P_n)均与不同程度干旱胁迫存在显著相关关系, 其中‘烟薯25’相关系数分别为0.93*、0.98**、-0.98**、0.96**。甘薯生理指标与地上部鲜重的逐步回归分析与通径分析表明, 叶片相对含水量和 F_v/F_m 是影响甘薯地上部生物量的关键指标($R_1=0.987$, $R_2=0.998$), 其中‘商薯19’的直接作用系数分别为2.30、1.52。综上所述, 通过对干旱胁迫后甘薯关键生理指标的诊断, 可为指导甘薯季节性干旱的旱后灌溉提供理论依据。

关键词: 甘薯; 干旱胁迫; 叶绿素荧光参数; 干旱诊断

我国是世界上最大的甘薯(*Ipomoea batatas*)生产国, 甘薯作为重要的粮食作物和工业原料, 对我国粮食安全和能源安全起着至关重要的作用(吴银亮等2017)。甘薯对生长环境的适应性较强, 但其生产力仍受到各种非生物胁迫的限制(陈传信等2019)。在农业生产中, 土壤水分亏缺是严重的非生物胁迫之一(Van Heerden等2008)。甘薯在世界大部分地区都作为一种雨养作物被广泛种植, 但其生长季节中经常受到降雨量不均的影响(Gajjanayake等2016)。我国北方甘薯种植区多为干旱半干旱地区, 在甘薯生长中期, 由于季节性干旱导致的土壤水分亏缺严重影响了甘薯生长和薯块膨大, 限制了产量的形成(李长志等2016)。干旱导致的减产已成为我国甘薯生产中亟待解决的重要问题。充足的土壤水分对于保持甘薯叶片舒展、促进薯块膨大以及加快同化物生成与运输具有重要意义(孙哲等2016; 王庆美等2005)。甘薯生长季节中雨量较少时, 通过及时灌溉保证充足的土壤水分对维持作物生长发育至关重要。

水是维持植物正常生理活动和膜转运过程必不可少的物质条件(李强等2010; 王星等2017), 土壤水分亏缺导致作物生长受阻、产量下降, 其主要原因是植物生理功能发生改变(Chartzoulakis等1993)。诊断作物受旱的指标可分为土壤指标、气象指标和

植物指标(康绍忠等1996), 因为土壤类型和土层结构的复杂多样, 气象的变化多端均会给胁迫诊断带来极大的障碍, 所以从植物本身生理特性入手成为胁迫诊断的重要方法(安东升2011)。干旱影响了植物的光合、呼吸、转运、离子吸收、养分代谢等一系列生理生化作用, 并且水分胁迫对植物各种生理指标的影响常随干旱严重程度和持续时间而变化(李仪曼等2019; Agüera等1997)。因此, 利用生理指标的变化诊断植物是否受到干旱胁迫具有重要意义。

前人曾采用气孔计测定气孔传力以及用红外测温仪测定叶片温度等方法来诊断作物干旱, 但其他环境因子会影响测定的准确性(王宏等1989)。因此, 针对甘薯中期干旱胁迫的快速准确的诊断指标的确定有待于进一步研究。本研究选用长蔓鲜食型品种‘烟薯25’和中长蔓淀粉型品种‘商薯19’作为研究对象, 采用砂培法进行盆栽试验, 于生长中期通过浇灌不同浓度的聚乙二醇(PEG-6000)模拟正常水分及轻度、中度和重度干旱胁迫。

收稿 2019-09-16 修定 2019-11-18

资助 现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-10-B10)。

* 通讯作者(lihuancomcomcom@163.com)。

迫,找出不同程度干旱胁迫与植物生理指标的内在关系,实现甘薯生长中期基于生理响应的干旱诊断研究,为指导甘薯生产的旱后灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验选用粒径2~3 mm石英砂,盐酸浸泡2 d后用蒸馏水清洗3次,加入少量珍珠岩混合均匀装入塑料桶(直径35 cm×高30 cm)进行砂培试验。供试甘薯[*Ipomoea batatas* (L.) Lam]品种为长蔓鲜食型‘烟薯25’和中长蔓淀粉型‘商薯19’,选取长势相同的甘薯幼苗,每盆定植1株。试验于2019年5月10日在青岛农业大学日光温室进行,各处理定期均以Hoagland 营养液浇灌,统一水分管理。于薯苗移栽后第70天进行干旱处理,设4个水分梯度(Michel等1973):正常:Hoagland营养液;轻度干旱:5% PEG的Hoagland营养液($\Psi=-0.50$ MPa);中度干旱:10% PEG的Hoagland营养液($\Psi=-1.48$ MPa);重度干旱:15% PEG的Hoagland营养液($\Psi=-2.95$ MPa)。4次重复,完全随机排列。分别于干旱胁迫后24、48、72 h取样,测定生理指标后收获,测定生物量。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 甘薯叶片含水量的测定

剪取甘薯叶片用分析天平称取鲜重。将叶片浸入水中,6小时后取出,用吸水纸吸干表面水分称重,重复操作,直到两次称重的结果相等,最后的结果即为饱和鲜重。而后将叶片装入纸袋中,烘箱100~105℃杀青10 min,而后70~80℃烘干至恒重,取出称取干重。含水量计算公式为:叶片含水率(%)=(鲜重-干重)/(鲜重)×100;叶片相对含水率(%)=(鲜重-干重)/(饱和鲜重-干重)×100。

1.2.2 甘薯叶片叶绿素的测定

SPAD值采用SPAD-502叶绿素测定仪直接测定。

1.2.3 甘薯叶片细胞膜透性的测定

甘薯叶片细胞膜透性用相对电导率表示,将叶片置于烧杯中,加入20 mL去离子水,室温下静置2 h,用DDS-307 A电导仪测定电导率。再将其置于沸水浴10 min后取出,测定电导率。相对电导率

(%)计算公式为:(处理电导率-去离子水电导率)/(处理煮沸后电导率-去离子水煮沸后电导率)×100。

1.2.4 甘薯叶片丙二醛(MDA)含量、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的测定

MDA含量采用TBA法试剂盒测定;POD和CAT活性均采用紫外分光比色法试剂盒测定。测定所用试剂盒均购于南京建成生物工程研究所。

1.2.5 甘薯叶片光合参数与叶绿素荧光参数的测定

选取甘薯第4片功能叶,采用汉莎公司生产的CIRAD-3便携式光合仪,于上午9:00~11:00测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)与水分利用率(WUE)。采用由汉莎公司生产的M-PEA叶绿素荧光仪,暗适应20 min后进行测定叶绿素荧光参数及荧光动力学曲线(O-J-I-P曲线)。

1.3 统计分析

采用SPSS 20.0和Microsoft Office Excel工作表对各指标数据进行统计分析,并绘制图表。方差分析比较处理间的效应差异,LSR法比较平均数之间的差异显著性。并进行相关性分析和逐步回归分析。

2 实验结果

2.1 不同干旱胁迫对甘薯地上部生物量的影响

由表1可知,随PEG处理浓度的升高,干旱胁迫程度加深,两种甘薯的地上部鲜重有逐渐降低的趋势。其中‘烟薯25’在在重旱胁迫下鲜重较正常处理下降了18.2%,而‘商薯19’鲜重下降了58.0%,说明同一干旱水平下,‘商薯19’的鲜重下降程度较‘烟薯25’高。

2.2 不同干旱胁迫对甘薯叶片含水量和叶绿素SPAD值的影响

由表2可以看出,随着PEG浓度升高,甘薯叶片的含水量不断降低。其中重度胁迫24 h的‘烟薯25’和‘商薯19’的含水量分别比正常处理降低了5.0%和7.6%。随着胁迫时间的增长,重度胁迫72 h的‘商薯19’含水量比胁迫24 h降低了9.7%。说明干旱程度越高、胁迫时间越长,对甘薯叶片含水量的影响越严重。另外,干旱胁迫对‘烟薯25’叶片含水量的影响较低,而对‘商薯19’影响较高。

表1 不同干旱胁迫对甘薯地上部生物量的影响

Table 1 Effect of different drought stress on shoot biomass of sweet potato

PEG处理浓度/%	‘烟薯25’		‘商薯19’	
	鲜重/g·株 ⁻¹	干重/g·株 ⁻¹	鲜重/g·株 ⁻¹	干重/g·株 ⁻¹
0	167.6±5.3 ^a	19.5±1.6 ^{ab}	144.2±3.1 ^a	11.8±1.2 ^a
5	148.4±4.2 ^b	21.2±1.9 ^a	98.8±6.9 ^b	10.8±0.8 ^a
10	144.3±6.6 ^{bc}	19.8±1.3 ^{ab}	77.9±4.0 ^c	12.6±1.2 ^a
15	137.1±2.7 ^c	17.8±1.0 ^b	60.6±7.6 ^d	10.1±1.7 ^a

表中小写字母表示同种甘薯品种在 $P<0.05$ 水平差异显著。

表2 不同干旱胁迫24~72 h对甘薯叶片含水量的影响

Table 2 Effect of different drought stress 24~72 h on water content of sweet potato leaves

时间/h	PEG处理浓度/%	‘烟薯25’		‘商薯19’	
		含水量/%	相对含水量/%	含水量/%	相对含水量/%
24	0	85.4±1.3 ^a	83.1±5.1 ^a	86.0±2.7 ^a	87.2±3.2 ^a
	5	84.6±1.2 ^{ab}	77.7±4.7 ^a	83.9±2.5 ^{ab}	73.5±4.1 ^b
	10	82.3±1.4 ^b	65.9±4.3 ^b	83.7±1.8 ^{ab}	72.9±2.8 ^b
	15	81.1±0.8 ^b	60.9±2.8 ^c	79.5±2.8 ^b	54.9±6.7 ^c
48	0	85.4±2.1 ^a	82.7±5.3 ^a	86.0±1.1 ^a	87.2±2.5 ^a
	5	83.6±0.4 ^a	71.9±2.8 ^b	83.1±0.7 ^b	69.4±3.4 ^b
	10	81.6±1.3 ^b	62.6±2.4 ^c	83.6±1.0 ^b	61.9±1.7 ^c
	15	80.3±0.7 ^b	57.6±3.7 ^c	78.0±2.7 ^c	50.2±4.2 ^d
72	0	85.3±0.5 ^a	82.3±4.7 ^a	86.0±2.2 ^a	87.2±4.6 ^a
	5	82.0±0.7 ^b	64.6±3.3 ^b	83.3±1.7 ^{ab}	70.8±5.4 ^b
	10	80.2±0.3 ^c	57.3±2.6 ^c	83.1±0.5 ^b	69.3±2.2 ^b
	15	79.6±1.4 ^c	55.2±1.1 ^c	71.8±5.1 ^c	36.0±3.8 ^c

表中小写字母表示相同时期同一甘薯品种不同PEG浓度处理在 $P<0.05$ 差异显著, 表3和4同。

随着干旱程度越高、胁迫时间越长, 甘薯叶片相对含水量下降幅度越大, 而且比含水量变化更明显。其中‘烟薯25’与‘商薯19’重度干旱24 h的相对含水量分别比正常处理下降了7.6%和37.1%, 而胁迫72 h后分别比正常处理下降了16.6%和41.3%。

由表3可以看出, 适度干旱可以促进甘薯叶片叶绿素SPAD的提高, 但干旱程度过高或胁迫时间过长, 都会导致SPAD值下降, 且干旱胁迫对‘烟薯25’的SPAD值的影响较‘商薯19’更小。不同干旱程度对甘薯叶绿素SPAD值的影响不明显, 随着PEG浓度升高, 甘薯SPAD值有先升高后降低的趋势。

2.3 干旱胁迫对甘薯叶片细胞膜透性的影响

随着PEG浓度升高和胁迫时间增长, 甘薯叶片的细胞膜透性持续增加。其中重度干旱下‘商薯

19’的细胞膜透性分别在24、48、72 h比正常处理升高了185.9%、276.4%和473.5%。说明干旱胁迫可以导致甘薯叶片细胞膜结构受损, 且随着干旱程度升高或胁迫时间加长, 均会使叶片的膜结构受损加重。另外, 干旱胁迫对‘烟薯25’叶片细胞膜透性的影响较‘商薯19’更小, 说明‘烟薯25’叶片膜结构抵御干旱的能力更强(图1)。

2.4 干旱胁迫对甘薯叶片MDA含量、POD及CAT活性的影响

随着PEG浓度升高, 甘薯叶片中MDA含量不断升高。其中‘烟薯25’在5%、10%、15%PEG浓度胁迫24 h的MDA含量分别比正常处理升高了166.7%、221.2%和356.1%, 可以看出重度干旱胁迫对甘薯叶片MDA含量影响最大。随着时间增长, 各处理MDA含量也不断升高(表4)。

表3 不同干旱胁迫24~72 h对甘薯叶绿素SPAD的影响
Table 3 Effect of different drought stress 24~72 h on chlorophyll SPAD of sweet potato

品种	PEG处理浓度/%	SPAD值		
		24 h	48 h	72 h
‘烟薯25’	0	48.7±1.3 ^b	48.8±0.6 ^b	48.9±1.9 ^{ab}
	5	51.2±0.9 ^a	50.7±0.9 ^{ab}	50.9±1.7 ^a
	10	52.1±1.6 ^a	51.5±0.8 ^a	49.1±1.8 ^{ab}
	15	49.4±0.7 ^b	49.2±1.0 ^b	46.3±1.6 ^b
‘商薯19’	0	48.8±1.1 ^{ab}	50.3±1.2 ^a	50.4±1.0 ^a
	5	50.6±0.9 ^a	50.9±0.8 ^a	50.1±1.0 ^a
	10	47.7±1.0 ^b	47.4±1.4 ^b	46.6±1.4 ^b
	15	47.7±0.6 ^b	45.7±1.0 ^b	42.6±1.8 ^c

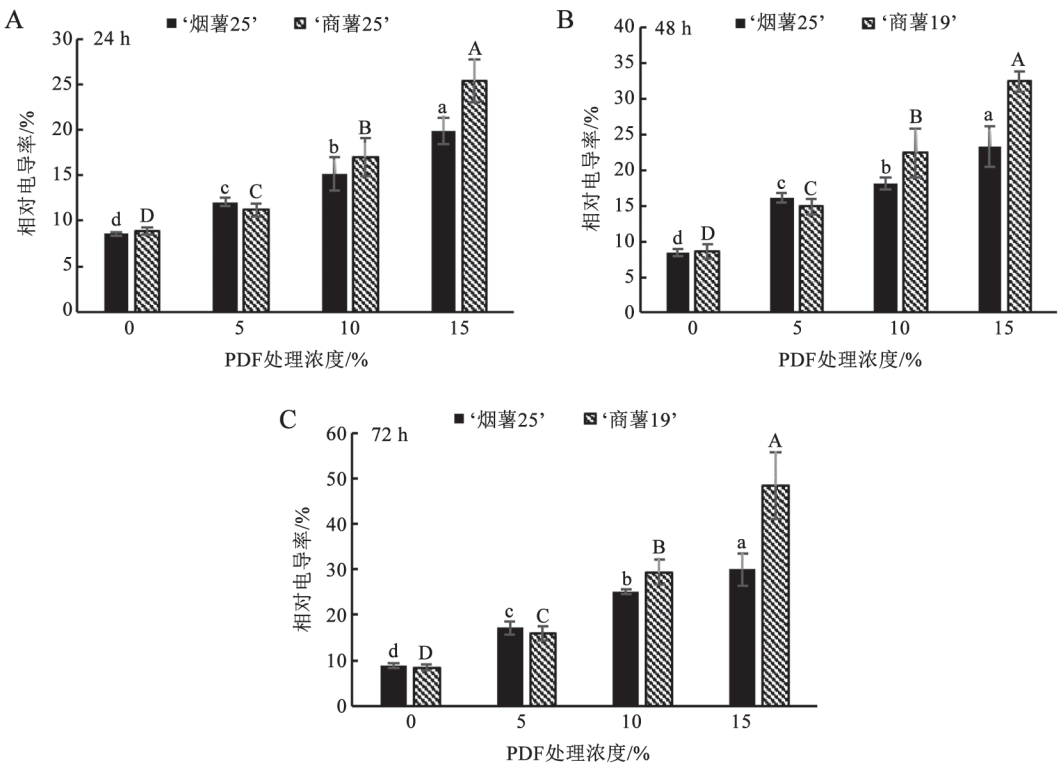


图1 不同干旱胁迫24~72 h对甘薯叶片相对电导率的影响

Fig.1 Effect of different drought stress on the relative conductivity of sweet potato leaves at 24~72 h

图柱上方小写字母表示‘烟薯25’各时期不同PEG浓度处理在 $P < 0.05$ 差异显著, 大写字母表示‘商薯19’各时期不同PEG浓度处理在 $P < 0.05$ 差异显著。图2~4同。

随着PEG浓度升高, 甘薯叶片中POD活性不断升高。随着胁迫时间增长, 两种甘薯叶片POD活性均开始升高, 48 h之后, ‘商薯19’各干旱处理开始下降, ‘烟薯25’虽无明显下降, 但升高趋势基本减缓。对比两种甘薯品种POD活性发现, 干旱胁迫

24 h时‘商薯19’略高于‘烟薯25’, 但72 h后‘烟薯25’高于‘商薯19’ (表5)。

随着PEG浓度升高, 甘薯叶片中CAT活性不断升高。随着胁迫时间增长, ‘烟薯25’中旱和重旱处理CAT活性开始下降, 至72 h下降为最低。而‘商薯

表4 不同干旱胁迫24~72 h对甘薯叶片MDA含量的影响

Table 4 Effect of different drought stress 24~72 h on MDA content in sweet potato leaves

品种	PEG处理浓度/%	MDA含量/nmol·mg ⁻¹ (蛋白)		
		24 h	48 h	72 h
‘烟薯25’	0	0.86±0.09 ^c	0.89±0.12 ^d	0.85±0.07 ^c
	5	2.30±0.18 ^b	1.29±0.17 ^c	2.11±0.18 ^b
	10	2.78±0.39 ^b	2.55±0.19 ^b	2.26±0.24 ^b
	15	3.94±0.46 ^a	3.79±0.48 ^a	3.11±0.26 ^a
‘商薯19’	0	0.83±0.08 ^c	0.89±0.08 ^c	0.83±0.13 ^c
	5	2.13±0.23 ^b	2.24±0.15 ^b	1.19±0.24 ^b
	10	2.66±0.16 ^a	2.83±0.36 ^{ab}	1.44±0.16 ^b
	15	2.91±0.35 ^a	3.04±0.26 ^a	2.80±0.36 ^a

表5 不同干旱胁迫24~72 h对甘薯叶片POD活性的影响

Table 5 Effect of different drought stress 24~72 h on activity of POD in sweet potato leaves

品种	PEG处理浓度/%	POD活性/U·mg ⁻¹ (蛋白)		
		24 h	48 h	72 h
‘烟薯25’	0	23.78±2.59 ^c	24.02±1.70 ^c	25.86±2.42 ^b
	5	30.19±3.16 ^b	41.54±2.19 ^b	49.01±3.26 ^a
	10	36.17±3.89 ^b	48.77±4.89 ^{ab}	54.51±3.44 ^a
	15	43.95±2.46 ^a	52.16±5.46 ^a	51.36±2.83 ^a
‘商薯19’	0	27.46±1.78 ^c	26.78±1.26 ^c	22.38±1.41 ^c
	5	36.79±2.34 ^b	37.96±3.34 ^b	35.62±2.36 ^b
	10	44.19±3.63 ^a	45.68±5.63 ^{ab}	47.35±3.46 ^a
	15	49.26±5.36 ^a	56.67±6.36 ^a	40.99±5.08 ^a

19’各干旱处理CAT活性先升高后降低。对比两种甘薯品种CAT活性发现, 干旱初期‘烟薯25’较高, 但72 h后则‘商薯19’较高(表6)。

2.5 干旱胁迫对甘薯叶片光合参数的影响

随着PEG浓度的升高, 甘薯叶片净光合速率

(P_n)与气孔导度(G_s)逐渐下降, 胞间CO₂浓度(C_i)不断升高。说明随着干旱程度的加深, 甘薯的光合作用不断减弱, 其中重度干旱下降最多, ‘烟薯25’在重旱条件下净光合速率(P_n)与气孔导度(G_s)较正常处理下降了59.2%和84.2%, 胞间CO₂浓度(C_i)升

表6 不同干旱胁迫24~72 h对甘薯叶片CAT活性的影响

Table 6 Effect of different drought stress 24~72 h on activity of CAT in sweet potato leaves

品种	PEG处理浓度/%	CAT活性/U·mg ⁻¹ (蛋白)		
		24 h	48 h	72 h
‘烟薯25’	0	9.77±0.39 ^d	9.31±0.70 ^b	10.67±0.42 ^b
	5	13.87±0.16 ^c	12.67±1.18 ^a	13.02±0.65 ^a
	10	14.74±0.49 ^b	13.12±0.88 ^a	12.66±1.69 ^a
	15	16.11±0.66 ^a	14.11±1.26 ^a	13.42±1.57 ^a
‘商薯19’	0	10.21±0.52 ^d	10.10±0.56 ^c	10.38±1.38 ^b
	5	12.25±0.34 ^c	14.22±0.64 ^b	12.93±1.47 ^{ab}
	10	13.12±0.33 ^b	13.73±1.03 ^b	13.62±1.19 ^a
	15	14.55±0.76 ^a	16.12±0.86 ^a	14.95±1.02 ^a

高了77.5%, 而‘商薯19’的光合指标的下降幅度高于‘烟薯25’(图2)。

干旱条件下甘薯叶片气孔导度(G_s)减小, 气孔关闭也致使蒸腾速率(T_r)不断降低。蒸腾拉力的减弱导致甘薯根系很难汲取到水分。本研究中, 高旱条件严重影响了甘薯的水分利用效率(WUE)。其中, 重度干旱下‘商薯19’的水分利用效率(WUE)较正常处理下降了79.5%, ‘烟薯25’水分利用效率(WUE)仅下降了38.2%, 说明‘烟薯25’抗旱性高于‘商薯19’。

2.6 干旱胁迫对甘薯叶片叶绿素荧光生理特性的影响

由表7可知, 随着PEG浓度的升高, 甘薯的最大光化学效率(F_v/F_m)不断降低, 反应中心的性能指数(PI_{abs})不断下降。其中, 重度干旱下72 h的‘烟薯25’ F_v/F_m 与 PI_{abs} 分别比正常下降了16.9%和85.5%。另外, 随着干旱程度加深, F_0 及单位反应中心的吸收光能(ABS/RC)有增长趋势, 单位叶面积吸收的光能(ABS/CSm)与各处理间电子传递能量占总吸收光能的比例(ETo/ABS)均有下降趋势, 但差异不

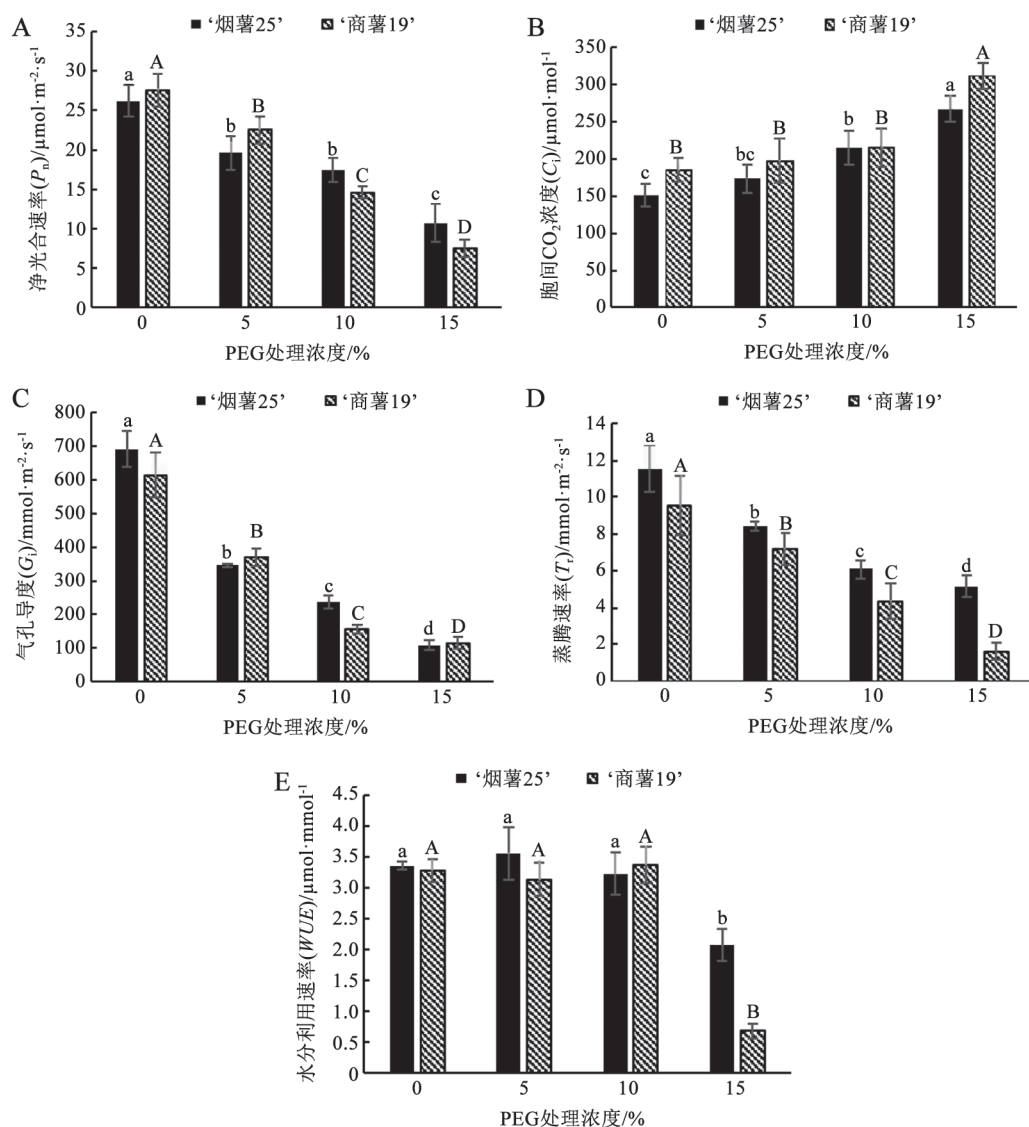


图2 不同干旱胁迫48 h对甘薯光合参数的影响

Fig.2 Effect of different drought stress on photosynthetic parameters of sweet potato at 48 h

表7 不同干旱胁迫24~72 h对甘薯叶片荧光参数的影响

Table 7 Effect of different drought stress 24~72 h on the fluorescence parameters of sweet potato leaves

品种	时间/h	PEG处理浓度/%	F_0	F_v/F_m	PI_{abs}	ABS/RC	ABS/CSm	ETo/ABS
‘烟薯25’	24	0	3855.5±287.8 ^a	0.84±0.01 ^a	17.39±2.73 ^a	0.99±0.19 ^a	23 064.0±1 754.7 ^a	0.64±0.01 ^a
		5	3933.5±309.0 ^a	0.82±0.01 ^b	16.89±3.45 ^a	0.90±0.07 ^a	19 826.5±823.8 ^b	0.63±0.03 ^a
		10	3958.5±173.2 ^a	0.81±0.01 ^{bc}	15.2±2.53 ^a	1.04±0.10 ^a	21 619.0±29.7 ^a	0.63±0.05 ^a
		15	3990.5±154.9 ^a	0.79±0.02 ^c	12.5±2.32 ^b	1.08±0.05 ^a	20 940.5±989.2 ^{ab}	0.60±0.06 ^a
	48	0	4884.5±381.4 ^b	0.83±0.01 ^a	15.42±2.36 ^a	1.25±0.18 ^b	23 581.0±1 043.7 ^a	0.53±0.07 ^a
		5	4724.5±285.7 ^b	0.79±0.01 ^b	7.91±1.86 ^b	1.39±0.07 ^b	20 710.5±358.9 ^b	0.58±0.05 ^a
		10	5776.0±364.4 ^a	0.75±0.01 ^c	4.82±0.68 ^c	1.37±0.11 ^b	22 658.5±1 346.7 ^{ab}	0.52±0.04 ^a
		15	5549.5±132.5 ^a	0.71±0.02 ^d	4.19±0.68 ^c	1.81±0.34 ^a	20 522.5±1 844.5 ^b	0.52±0.02 ^a
	72	0	4625.5±157.8 ^b	0.83±0.01 ^a	14.39±2.63 ^a	0.99±0.04 ^c	23 857.0±954.2 ^a	0.63±0.02 ^a
		5	4863.0±284.3 ^b	0.79±0.01 ^b	5.14±1.52 ^b	1.39±0.33 ^b	22 640.5±2 100.8 ^a	0.46±0.08 ^b
		10	4977.0±347.9 ^b	0.77±0.01 ^c	4.50±0.67 ^b	1.37±0.21 ^b	21 803.0±1 084.7 ^a	0.48±0.09 ^b
		15	5828.5±542.4 ^a	0.69±0.01 ^d	2.08±0.36 ^c	1.98±0.15 ^a	18 966.5±884.6 ^b	0.42±0.06 ^b
‘商薯19’	24	0	3754.5±71.4 ^b	0.83±0.01 ^a	15.4±2.35 ^a	0.90±0.01 ^b	22 662.0±1 253.0 ^b	0.61±0.02 ^a
		5	3955.0±247.7 ^b	0.81±0.01 ^a	17.8±1.75 ^a	0.82±0.02 ^c	22 791.0±1 583.7 ^b	0.62±0.02 ^a
		10	4468.2±326.1 ^a	0.79±0.01 ^b	12.6±0.68 ^b	1.05±0.04 ^a	26 208.0±1 633.5 ^a	0.61±0.04 ^a
		15	4526.0±36.8 ^a	0.77±0.01 ^b	5.66±2.38 ^c	1.00±0.06 ^a	19 963.0±393.2 ^c	0.47±0.05 ^b
	48	0	3628.5±258.3 ^b	0.82±0.01 ^a	14.3±0.85 ^a	0.95±0.02 ^c	22 577.0±476.0 ^a	0.64±0.03 ^a
		5	4576.0±482.2 ^a	0.78±0.01 ^b	5.70±1.04 ^b	1.13±0.11 ^b	20 614.5±1 538.0 ^b	0.50±0.01 ^b
		10	5076.5±303.3 ^a	0.75±0.02 ^c	3.78±0.98 ^{bc}	1.38±0.05 ^a	20 690.0±461.0 ^b	0.47±0.03 ^c
		15	5307.0±437.0 ^a	0.70±0.02 ^d	2.49±1.22 ^c	1.25±0.14 ^{ab}	19 907.0±1 587.3 ^b	0.35±0.02 ^d
	72	0	3799.5±148.6 ^b	0.82±0.01 ^a	14.1±1.77 ^a	0.93±0.03 ^c	22 336.0±1 756.7 ^a	0.63±0.01 ^a
		5	4498.0±520.3 ^a	0.79±0.01 ^b	6.94±1.23 ^b	1.28±0.09 ^b	22 410.0±1 533.3 ^a	0.55±0.02 ^b
		10	4918.0±488.3 ^a	0.77±0.01 ^b	5.53±1.10 ^b	1.25±0.01 ^b	21 119.0±1 395.8 ^a	0.52±0.03 ^b
		15	5043.5±197.3 ^a	0.73±0.02 ^c	2.03±0.56 ^c	1.77±0.17 ^a	19 026.5±733.3 ^b	0.41±0.03 ^c

明显,说明干旱程度越深,甘薯叶片的PSII损伤越严重。随着胁迫时间的增长, ABS/RC 明显升高, ETo/ABS 显著减小,甘薯的 F_v/F_m 与 PI_{abs} 下降幅度加大,其中重度干旱24 h至72 h,‘烟薯25’的 F_v/F_m 由0.79下降为0.69, PI_{abs} 下降了83.4%。说明干旱胁迫时间越长,甘薯叶片的PSII受损越严重。

叶绿素荧光动力学曲线一定程度上能反映干旱胁迫对叶片PSII功能的影响。从图3可以看出,随着PEG浓度的升高,两种甘薯品种的最大吸收值 F_m (P值)均会降低。与正常相比,15% PEG重度干旱处理的降低幅度最大。表明干旱胁迫程度越高,PSII反应中心受损越严重。不同程度干旱胁迫对两种甘薯的影响趋势基本相同。

2.7 甘薯生理指标与地上部生物量的回归分析及与不同浓度PEG水势相关性分析

分别以两个甘薯品种干旱胁迫48 h的相对含水

量(X_1)、相对电导率(X_2)、MDA含量(X_3)、SPAD值(X_4)、净光合速率 P_n (X_5)、气孔导度 G_s (X_6)、 F_v/F_m (X_7)、 PI_{abs} (X_8)为自变量,甘薯地上部鲜重作为因变量(Y)进行逐步回归分析,分析得‘烟薯25’的回归关系为 $Y_1 = -38.52 + 131.10X_1 - 0.82X_2 - 4.18X_3 - 0.80X_4 + 0.65X_5 + 0.06X_6 + 339.6X_7 + 0.39X_8$ ($R_1 = 0.987$, $F_1 = 262.35$, $P_1 = 0.01$),‘商薯19’的回归关系为 $Y_2 = 738.85 + 532.65X_1 - 2.57X_2 - 10.26X_3 - 1.86X_4 + 1.95X_5 + 0.12X_6 + 1038.30X_7 + 7.27X_8$ ($R_2 = 0.998$, $F_2 = 923.46$, $P_2 = 0.001$)。为进一步明确逐步回归分析的各项指标对干旱的响应程度,本研究进行了通径分析(表8)。逐步回归与通径分析表明,叶片相对含水量和 F_v/F_m 是影响甘薯地上部生物量的关键指标,对干旱胁迫响应较为敏感。

根据Michel等人研究的公式计算,25°C条件下,5%、10%、15%的PEG 6000溶液的水势(Ψ)分

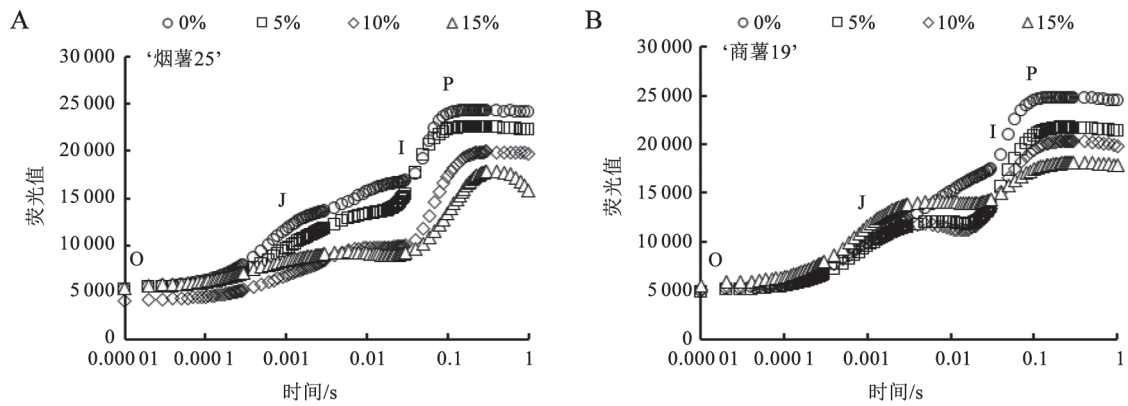


图3 不同干旱胁迫48 h对甘薯叶绿素荧光动力学曲线的影响
Fig.3 Effect of different drought stress on the chlorophyll fluorescence kinetics curve of sweet potato for 48 h

表8 干旱胁迫48 h甘薯生理指标对甘薯地上部鲜重作用的直接途径系数
Table 8 Direct path coefficient of the physiological index of sweet potato for 48 h under drought stress on the fresh weight of sweet potato

作用因子	直接效应							
	相对含水量	相对电导率	MDA含量	SPAD	净光合速率	气孔导度	F_v/F_m	PI_{abs}
‘烟薯25’	1.27	-0.40	-0.43	-0.11	0.33	0.86	1.38	0.17
‘商薯19’	2.30	-0.74	-0.28	-0.10	0.48	0.75	1.52	0.38

别为: -0.50 MPa、-1.48 MPa和-2.95 MPa, 正常处理水势近似看作0 MPa。选取两种甘薯的相对含水量、 F_v/F_m 、MDA含量、净光合速率(P_n)分别与不同浓度PEG水势 Ψ 进行相关性分析。由表8可知, PEG水势与两个甘薯品种干旱胁迫48 h的相对含水量、 F_v/F_m 、净光合速率(P_n)显著相关, 并与‘烟薯25’的MDA含量呈显著负相关($r=-0.98^{**}$)。说明叶片相对含水量、 F_v/F_m 等生理指标均对干旱胁迫有明显响应, 可以作为甘薯干旱诊断的重要生理指标。两个甘薯品种的各生理指标与PEG浓度水势 Ψ 的线性拟合模型见图4。

3 讨论

3.1 干旱胁迫对甘薯叶片含水量、细胞膜透性与活性氧代谢的影响

水分是活细胞的必要组成和代谢活动的重要物质, 抗旱性强的植物叶片结构更有利于减少水分损失, 因此叶片的保水力直接体现了植物的抗旱能力(刘颖慧等2006)。在小麦、树种等研究中均表明叶片相对含水量与植物抗旱性呈正相关(李德全等1990; 冯慧芳等2009)。本研究中, 随着干旱程度升高和胁迫时间增长, 甘薯叶片相对含水量持续下

表9 不同PEG浓度水势与胁迫48 h甘薯生理指标的相关性
Table 9 Correlation between osmotic potential of different PEG concentrations and physiological indexes of sweet potato for 48 h

品种	水势	相关系数			
		相对含水量	F_v/F_m	MDA含量	净光合速率(P_n)
‘烟薯25’	Ψ	0.93*	0.98**	-0.98**	0.96**
‘商薯19’		0.91*	0.98**	-0.84	0.99**

**和*分别表示在0.01和0.05水平上显著相关。

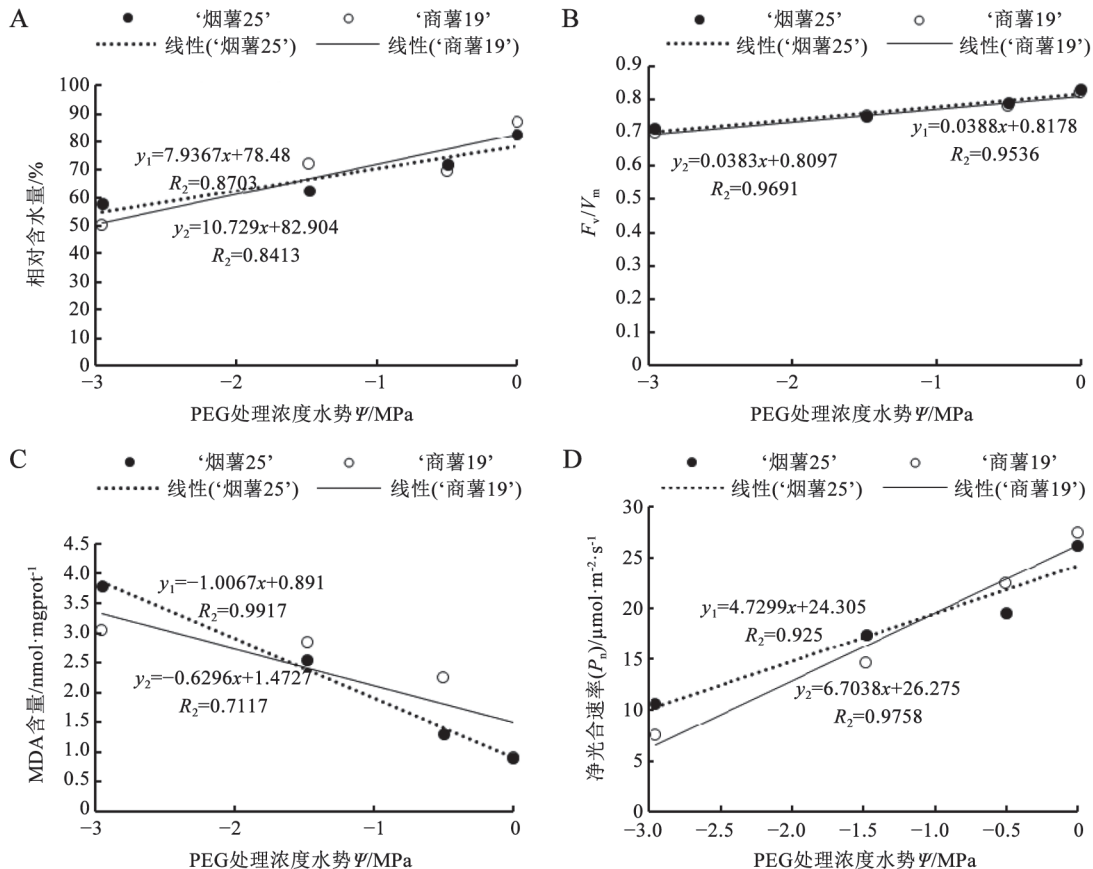


图4 不同PEG浓度水势与胁迫48 h甘薯生理指标拟合结果

Fig.4 Fitting results of different PEG concentration osmotic potential and physiological index of sweet potato for 48 h

y_1 和 y_2 分别表示‘烟薯25’号和‘商薯19’号的拟合方程。

降。其中重度干旱24 h的‘烟薯25’与‘商薯19’相对含水量分别比正常处理下降了7.6%和37.1%。植物在受到干旱胁迫时组织电解质外渗量增加是胁迫导致的细胞膜透性增加的结果, 所以用相对电导率表示叶片的细胞膜透性可以反映植物叶片膜结构的损伤程度(Demidchik等2014; 解卫海等2015)。有研究发现(史普想等2016), 干旱胁迫下花生幼苗叶片的细胞膜透性增加, 膜系统受到破坏。与之相似, 本试验条件下, 随着干旱程度升高和胁迫时间增长, 甘薯叶片的细胞膜透性不断增加。其中重度干旱24、48、72 h下, ‘商薯19’细胞膜透性分别在比正常处理升高了185.9%、276.4%和473.5%。其中, ‘烟薯25’叶片保水能力较高, 膜结构更完整, 抗旱性较强。

正常情况下植物细胞内氧自由基的产生与清除处于一种动态平衡, 一旦植物受到胁迫, 平衡遭

到破坏, 会导致细胞氧自由基的活性增高(梁新华等2006)。MDA是一种高活性脂膜过氧化物, 能通过影响膜蛋白从而影响活性氧代谢系统的平衡(袁琳等2005)。而POD和CAT作为细胞保护酶, 可在逆境胁迫时过度表达, 清除活性氧, 增强细胞防卫能力(何冰等1997)。本研究中, 随着干旱程度加深, 甘薯叶片中MDA含量、POD及CAT活性均不断升高。随着胁迫时间的增长, ‘烟薯25’各干旱处理的MDA含量和CAT活性逐渐下降, POD活性缓慢升高; 而‘商薯19’的MDA含量和POD、CAT活性均先升高后降低。

3.2 干旱胁迫对甘薯光合参数和荧光生理特性的影响

光合作用是作物生长和产量形成的重要代谢过程, 是植物生长发育的物质和能量的主要来源

(王军等2017)。干旱胁迫会导致叶片气孔关闭以降低蒸腾速率,但气孔闭合在减少水分散失的同时,也减少了 CO_2 的进入,从而使光合速率不断下降(安玉艳等2012)。除气孔限制外,干旱条件下甘薯叶片的光合器官结构受到严重破坏,而此时叶片光合主要受叶绿体对光的吸收能力和对 CO_2 的固定能力影响(龚秋等2015)。张海燕等(张海燕等2018)研究发现,甘薯薯蔓并长期处于干旱条件下,净光合速率较正常下降了18.7%。本研究中也得到了证实,随着干旱程度加深,甘薯的气孔导度与光合速率均不断降低,重度干旱下‘烟薯25’的净光合速率(P_n)与气孔导度(G_s)较正常处理下降了59.2%和84.2%,胞间 CO_2 浓度(C_i)升高了77.5%。

叶绿素荧光参数能从叶片PSII的光能转换和电子传递效率等方面反映干旱胁迫下甘薯叶片对光能的吸收与转换,其中 F_v/F_m 是最大光化学效率,能表征原初反应中心的光能利用率和转化率,反应中心性能指数(PI_{abs})反映了PSII的整体性能(张善平等2014)。有研究(谌端玉等2016;孙景宽等2009)认为, F_v/F_m 小于0.8说明植物受到胁迫,且 F_v/F_m 值随胁迫加深不断减小。本研究与之相似,胁迫24 h的‘烟薯25’与‘商薯19’仅有重旱处理的 F_v/F_m 小于0.8,而胁迫48 h后各干旱处理的 F_v/F_m 均小于0.8,说明干旱程度越深,胁迫时间越长, F_v/F_m 下降越多。 PI_{abs} 也随干旱程度的升高不断下降,其中重旱72 h下‘烟薯25’的 PI_{abs} 比正常处理下降了85.5%。有研究认为植物的 F_0 上升可能是由于植物热耗散保护机制失去作用,使其反应中心受到不可逆失活(蒲光兰等2005)。植物 F_0 的增幅越小,说明干旱胁迫对其反应中心的破坏程度越小,植物抗旱性越强(綦伟等2006)。本研究,两种甘薯的 F_0 均随干旱加深而升高,但‘商薯19’的 F_0 增幅明显高于‘烟薯25’,说明‘烟薯25’的抗旱性较强。

3.3 干旱胁迫下甘薯生理指标的变化与干旱诊断研究

前人在进行作物的干旱诊断研究时,将叶绿素荧光指标作为一种常规的诊断技术。有学者通过叶绿素荧光和光谱扫描成像技术对黄瓜的早期干旱进行了诊断研究(Wang等2015)。还有研究发现, Φ_{NO} (非调节性能量耗散)对干旱胁迫敏感且

较为稳定(安东升等2015),可作为甘蔗苗期抗旱性的快速诊断指标。本试验采用光合、荧光与生理特性指标相结合,通过多元分析选取叶片相对含水量、MDA含量、 F_v/F_m 和净光合速率(P_n)作为甘薯的干旱诊断指标。

本研究发现,‘烟薯25’的 F_v/F_m 在胁迫24 h后均高于0.79,此时甘薯还未对干旱产生明显响应。另外,商薯19各干旱处理的CAT、POD、CAT会随时间变化先升高后降低,于48 h时达到峰值,所以干旱胁迫下甘薯48 h的生理指标响应更为明显。本试验条件下,对于长蔓鲜食型甘薯‘烟薯25’,当相对含水量低于71.9%时,说明甘薯受到干旱胁迫的影响;当CAT含量处于1.29~2.55 $\text{nmol}\cdot\text{mg}^{-1}$ (蛋白),或 F_v/F_m 位于0.75~0.79时,或者 P_n 处于17.4~19.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,说明甘薯受到轻中度干旱胁迫,需要尽快灌水缓解干旱;而当CAT含量高于3.79 $\text{nmol}\cdot\text{mg}^{-1}$ (蛋白), F_v/F_m 小于0.71时,或者 P_n 小于10.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,说明甘薯受到重度干旱,可能已造成不可逆的损伤。对于中长蔓淀粉型甘薯‘商薯19’来说,相对含水量处于61.9%~69.4%时,或 F_v/F_m 位于0.75~0.78时,或者 P_n 处于14.6~22.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,说明甘薯受到轻中度干旱胁迫;而当相对含水量小于50.2%时,或 F_v/F_m 小于0.70时,或者 P_n 小于7.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,说明甘薯受到重度干旱胁迫。

参考文献(References)

- Agüera F, Villalobos FJ, Orgaz F (1997). Evaluation of sunflower (*Helianthus annuus*, L.) genotypes differing in early vigour using a simulation model. *Eur J Agron*, 7: 109–118
- An DS (2011). Chlorophyll fluorescence based water stress diagnosis for cut lily grown in greenhouse (dissertation). Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [安东升(2011). 温室切花百合对干旱胁迫响应的叶绿素荧光诊断研究(学位论文). 南京: 南京农业大学]
- An DS, Cao J, Huang XH, et al (2015). Application of Lake-model based indices from chlorophyll fluorescence on sugarcane seedling drought resistance study. *J Plant Ecol*, 39 (4): 398–406 (in Chinese with English abstract) [安东升, 曹娟, 黄小华等(2015). 基于Lake模型的叶绿素荧光参数在甘蔗苗期抗旱性研究中的应用. *植物生态学报*, 39 (4): 398–406]
- An YY, Liang ZS (2012). Staged strategy of plants in response

- to drought stress. *Chin J Appl Ecol*, 23 (10): 2907–2915 (in Chinese with English abstract) [安玉艳, 梁宗锁 (2012). 植物应对干旱胁迫的阶段性策略. *应用生态学报*, 23 (10): 2907–2915]
- Chartzoulakis K, Noitsakis B, Therios I (1993). Photosynthesis, plant growth and dry matter distribution in kiwifruit as influenced by water deficits. *Irrig Sci*, 14 (1): 1–5
- Chen CX, Tang J, Gao HF, et al (2019). Analysis of drought resistance difference between different varieties of sweet potato. *Anhui Agr Sci Bull*, 25 (1): 55–56+78 (in Chinese with English abstract) [陈传信, 唐君, 高海峰等 (2019). 不同品种间甘薯抗旱性差异分析. *安徽农学通报*, 25 (1): 55–56+78]
- Chen DY, Ou J, Wang LJ, et al (2016). Effects of drought stress on chlorophyll content and fluorescence parameters of *Rhododendron annae* Franch. seedlings inoculated with ERM fungi. *South Agr Sci*, 47 (7): 1164–1170 (in Chinese with English abstract) [谌端玉, 欧静, 王丽娟等 (2016). 干旱胁迫对接种ERM真菌桃叶杜鹃幼苗叶绿素含量及荧光参数的影响. *南方农业学报*, 47 (7): 1164–1170]
- Demidchik V, Straltsova D, Medvedev SS, et al (2014). Stress-induced electrolyte leakage: the role of K^+ -permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. *J Exp Bot*, 65 (5): 1259–1270
- Feng HF, Xue L, Ren XR, et al (2009). Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG. *Acta Ecol Sin*, 31 (2): 371–382 (in Chinese with English abstract) [冯慧芳, 薛立, 任向荣等 (2009). 4种阔叶幼苗对PEG模拟干旱的生理响应. *生态学报*, 31 (2): 371–382]
- Gajanayake B, Reddy KR (2016). Sweetpotato responses to mid- and late-season soil moisture deficits. *Crop Sci*, 56: 1865–1877
- Gong Q, Wang X, Hou M, et al (2015). Effects of drought stress on photosynthetic properties and dry matter accumulation of purple sweet potato. *Acta Agr Boreali-Sin*, 30 (3): 111–116 (in Chinese with English abstract) [龚秋, 王欣, 后猛等 (2015). 干旱胁迫对不同品系紫甘薯光合特性及干物质积累的影响. *华北农学报*, 30 (3): 111–116]
- He B, Xu HY, Chen J (1997). Effects of drought stress on the permeability of plasma membrane and anti-oxidation enzymes of the leaves of sweet potato. *Geno Appl Biol*, 16 (4): 287–290 (in Chinese with English abstract) [何冰, 许鸿源, 陈京 (1997). 干旱胁迫对甘薯叶片质膜透性及抗氧化酶类的影响. *基因组学与应用生物学*, 16 (4): 287–290]
- Kang SZ, Cai HJ (1996). *Agricultural Water Management*. Beijing: China Agriculture Press, 12: 101–118, 172–174 (in Chinese) [康绍忠, 蔡焕杰 (1996). *农业水管理学*. 北京: 中国农业出版社, 12: 101–118, 172–174]
- Li CZ, Li H, Liu Q, et al (2016). Comparison of root development and fluorescent physiological characteristics of sweet potato exposure to drought stress in different growth stages. *J Plant Nutr Fert*, 22 (2): 511–517 (in Chinese with English abstract) [李长志, 李欢, 刘庆等 (2016). 不同生长时期干旱胁迫甘薯根系生长及荧光生理的特性比较. *植物营养与肥料学报*, 22 (2): 511–517]
- Li DQ, Zou Q, Cheng BS (1990). Relationship between water status and osmotic adjustment of wheat leaves different in drought resistance. *Chin Bull Bot*, 7 (4): 43–48 (in Chinese with English abstract) [李德全, 邹琦, 程炳嵩 (1990). 抗旱性不同的小麦叶片的渗透调节与水分状况的关系. *植物学报*, 7 (4): 43–48]
- Li Q, Cao JH, Yu LJ, et al (2010). Effect of exogenous calcium on the photosynthetic characteristics of *Lonicera japonica* Thunb under drought stress. *Ecol Environ Sci*, 19 (10): 2291–2296 (in Chinese with English abstract) [李强, 曹建华, 余龙江等 (2010). 干旱胁迫过程中外源钙对忍冬光合生理的影响. *生态环境学报*, 19 (10): 2291–2296]
- Li YM, He XR, Li QM, et al (2019). Effect of CO_2 enrichment on antioxidant system in cucumber seedling root system under drought stress. *Plant Physiol J*, 55 (7): 1011–1019 (in Chinese with English abstract) [李仪曼, 贺新蕊, 李清明等 (2019). CO_2 加富对干旱胁迫下黄瓜幼苗根系抗氧化系统的影响. *植物生理学报*, 55 (7): 1011–1019]
- Liang XH, Shi DG (2006). Effect of drought stress on the content of malondialdehyde and activity of cell defense enzymes in *Glycyrrhiza glabra* seedlings roots. *Agr Res Arid Areas*, 24 (3): 108–110 (in Chinese with English abstract) [梁新华, 史大刚 (2006). 干旱胁迫对光果甘草幼苗根系MDA含量及保护酶POD、CAT活性的影响. *干旱地区农业研究*, 24 (3): 108–110]
- Liu YH, Gao Q, Jia HK (2006). Leaf-scale drought resistance and tolerance of three plant species in a semi-arid environment: application and comparison of two stomatal conductance models. *J Plant Ecol*, 30 (1): 64–70 (in Chinese with English abstract) [刘颖慧, 高琼, 贾海坤 (2006). 半干旱地区3种植物叶片水平的抗旱耐旱特性分析——两个气孔导度模型的应用和比较. *植物生态学报*, 30 (1): 64–70]
- Michel BE, Kaufmann MR (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol*, 51: 914–916
- Pu GL, Zhou LY, Hu XH, et al (2005). Effect of soil drought stress on characteristics of chlorophyll fluorescence in Jintaiyang apricot variety. *Agr Res Arid Areas*, 23 (3): 44–48 (in Chinese with English abstract) [蒲光兰, 周兰英, 胡学华等 (2005). 干旱胁迫对金太阳杏叶绿素荧光动力学参数的影响. *干旱地区农业研究*, 23 (3): 44–48]

- Qi W, Tan H, Zhai H (2006). Photosynthetic characters and fluorescence parameters of different grape stocks under water stress. *Chin J Appl Ecol*, 17 (5): 835–838 (in Chinese with English abstract) [綦伟, 谭浩, 翟衡(2006). 干旱胁迫对不同葡萄砧木光合特性和荧光参数的影响. *应用生态学报*, 17 (5): 835–838]
- Shi PX, Qin X, Liu YR, et al (2016). The effects of coronatine on antioxidant enzyme activity and cell membrane permeability of peanut (*Arachis hypogaea* L.) seedling leaves under drought stress. *J Peanut Sci*, 45 (4): 30–35 (in Chinese with English abstract) [史普想, 秦欣, 刘盈茹等(2016). 干旱胁迫下冠菌素(COR)对花生幼苗叶片抗氧化酶活性及细胞膜透性的影响. *花生学报*, 45 (4): 30–35]
- Sun JK, Zhang WH, Lu ZH, et al (2009). Chlorophyll fluorescence characteristics of *Elaeagnus angustifolia* L. and *Grewia biloba* G. Don var. *Parviflora* (Bge.) Hand-Mazz. seedlings under drought stress. *Bull Botan Res*, 29 (2): 216–223 (in Chinese with English abstract) [孙景宽, 张文辉, 陆兆华等(2009). 干旱胁迫下沙枣和孩儿拳头叶绿素荧光特性研究. *植物研究*, 29 (2): 216–223]
- Sun Z, Shi CY, Liu GL, et al (2016). Effect difference of potassium fertilizer on leaf photosynthetic characteristics and storage root yield of sweet potato under drought stress and normal water condition. *J Plant Nutr Fert*, 22 (4): 1071–1078 (in Chinese with English abstract) [孙哲, 史春余, 刘桂玲等(2016). 干旱胁迫与正常供水钾肥影响甘薯光合特性及块根产量的差异. *植物营养与肥料学报*, 22 (4): 1071–1078]
- Van Heerden PDR, Laurie R (2008). Effects of prolonged restriction in water supply on photosynthesis, shoot development and storage root yield in sweet potato. *Physiol Plant*, 134 (1): 99–109
- Wang H, Li H, Xu L (2015). A new indicator in early drought diagnosis of cucumber with chlorophyll fluorescence imaging. *Proc SPIE-Int Soc Opt Eng*, 9530
- Wang H, Yu HN, Deng GY, et al (1989). Studies on effects of wheat water stress at different development stages on yield and drought determination. *Acta Agr Boreali-Sin*, 1989, 4 (4): 1–5 (in Chinese with English abstract) [王宏, 于沪宁, 邓根云等(1989). 小麦不同生育期水分胁迫对产量的影响及干旱诊断方法初探. *华北农学报*, 4 (4): 1–5]
- Wang J, Chen F, Wen MX, et al (2017). Effect of 6-BA on drought tolerance of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Crop Res*, 31 (2): 142–145+180 (in Chinese with English abstract) [王军, 陈帆, 温明霞等(2017). 6-BA处理对烤烟耐旱性的影响. *作物研究*, 31 (2): 142–145+180]
- Wang QM, Zhang LM, Wang ZL (2005). Formation and thickening of tuberous roots in relation to the endogenous hormone concentrations in sweetpotato. *Sci Agr Sin*, 38 (12): 2414–2420 (in Chinese with English abstract) [王庆美, 张立明, 王振林(2005). 甘薯内源激素变化与块根形成膨大的关系. *中国农业科学*, 38 (12): 2414–2420]
- Wang X, Zhang JL, Feng XX, et al (2017). The molecular mechanisms of plant plasma membrane intrinsic proteins trafficking and stress response. *Hereditas*, 39 (4): 293–301 (in Chinese with English abstract) [王星, 张纪龙, 冯秀秀等(2017). 植物质膜水通道蛋白转运及逆境胁迫响应的分子调控机制. *遗传*, 39 (4): 293–301]
- Wu YL, Wang HX, Yang J, et al (2017). Advances in storage root development and regulation in sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.]. *Plant Physiol J*, 53 (5): 8–16 (in Chinese with English abstract) [吴银亮, 王红霞, 杨俊等(2017). 甘薯储藏根形成及其调控机制研究进展. *植物生理学报*, 53 (5): 8–16]
- Xie WH, Liu D, Sun JL, et al (2015). Permeability of cells in leaves of *Vitex trifolia* var. *simplicifolia* under stresses of dehydration and high oxygen pressure. *Sci Silvae Sin*, 51 (6): 44–49 (in Chinese with English abstract) [解卫海, 刘丹, 孙金利等(2015). 脱水和高氧压过程中单叶蔓荆叶片细胞膜透性分析. *林业科学*, 51 (6): 44–49]
- Yuan L, KARIM Ali, Zhang LQ (2005). Effects of NaCl stress on active oxygen metabolism and membrane stability in *Pistacia vera* seedlings. *J Plant Ecol*, 29 (6): 985–991 (in Chinese with English abstract) [袁琳, 克热木·伊力, 张利权(2005). NaCl胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响. *植物生态学报*, 29 (6): 985–991]
- Zhang HY, Xie BT, Duan WX, et al (2018). Effects of drought stress at different growth stages on photosynthetic efficiency and water consumption characteristics in sweet potato. *Chin J Appl Ecol*, 29 (6): 1943–1850 (in Chinese with English abstract) [张海燕, 解备涛, 段文学等(2018). 不同时期干旱胁迫对甘薯光合效率和耗水特性的影响. *应用生态学报*, 29 (6): 1943–1850]
- Zhang SP, Feng HJ, Ma CJ, et al (2014). Effect of light quality on photosynthesis and photosystem of maize (*Zea mays* L.) leaves. *Sci Agr Sin*, 47 (20): 3973–3981 (in Chinese with English abstract) [张善平, 冯海娟, 马存金等(2014). 光质对玉米叶片光合及光系统性能的影响. *中国农业科学*, 47 (20): 3973–3981]

Physiological diagnosis of response to drought stress of sweet potato

LI Siping¹, YANG Shuo¹, LI Huan^{1,*}, LIU Qing¹, XIN Guosheng²

¹College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

²Yantai Academy of Agricultural Sciences, Yantai, Shandong 266109, China

abstract: In response to the seasonal drought stress during the growth of sweet potato (*Ipomoea batatas*), the experiment used sand culture test method to add different concentrations of polyethylene glycol (PEG-6000) nutrient solution after 70 d of sweet potato planting to simulate mild, moderate and severe drought stress. Through the monitoring of dynamic physiological and biochemical indicators for three consecutive days, the drought diagnosis based on the physiological index of sweet potato in the middle of sweet potato growth was explored. The results showed that the physiological indexes of sweet potato after 48 h of stress were more obvious to drought in the process of drought stress for 24–72 h. Correlation analysis between physiological indexes of drought stress for 48 h and PEG concentration showed that the relative water content, malondialdehyde content, F_v/F_m and net photosynthetic rate (P_n) of the leaves were significantly correlated with different degrees of drought stress, among which the correlation coefficients of ‘Yan sweetpotato 25’ were 0.93*, 0.98**, –0.98**, and 0.96**, respectively. The stepwise regression analysis and path analysis of sweet potato physiological index and fresh weight of the ground showed that the relative water content and F_v/F_m of the sweet potato were the key indicators affecting the aboveground biomass of sweet potato ($R_1=0.987$, $R_2=0.998$), among which the direct action coefficients of ‘Shang sweetpotato 19’ are 2.30 and 1.52, respectively. In summary, the diagnosis of key physiological indicators of sweet potato after drought stress can provide a theoretical basis for guiding post-drought irrigation of sweet potato seasonal drought.

key words: sweet potato; drought stress; chlorophyll fluorescence parameter; drought diagnosis

Received 2019-09-16 Accepted 2019-11-18

This work was supported by Special Funded Project for the Construction of Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-10-B10).

*Corresponding author (lihuancomcomcom@163.com).

秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标及光合参数的影响

李思平，丁效东，曾路生，吴立鹏，张玉晓，解军蕊，李 栋

(青岛农业大学资源与环境学院,山东 青岛 266109)

摘要：针对水稻生产中存在秸秆处理不当以及化肥用量增多等问题，以山东省济宁市稻麦轮作体系下水稻“圣稻 18 号”为研究对象，通过田间试验设置 3 个处理：常规施肥，小麦秸秆不还田(CK)；常规施肥+小麦秸秆全量还田(T1)；常规施肥量的 85%+小麦秸秆全量还田(T2)，深入探究秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻生长、光合参数和产量的影响，为合理的水稻种植措施提供理论依据。结果表明，稻麦轮作体系下秸秆还田不利水稻前期生长，但能显著提高水稻生长中、后期的生长指标，并增强水稻生长中、后期对氮、磷、钾等养分的吸收。水稻生长中后期 T2 处理的叶绿素含量、净光合速率以及光谱反射率均为最高，其中灌浆期 SPAD 值与净光合速率分别较 CK 处理升高 4.4% 和 37.5%；另外，T2 处理生长后期的 F_v/F_m 、 PI_{abs} 均较前期所升高。试验还表明，T2 处理水稻产量最高，比 CK 处理增产 13.1%，增产的直接原因是单位面积有效穗数的增加。综上所述，秸秆还田配合化肥减施有助于水稻栽培生产中实现高产增效，在实际生产中值得推广应用。

关键词：水稻；秸秆还田；化肥减施；生长指标；光合参数；产量

中图分类号：S141.4；S314；S511.01 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2020)02-0000-00

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.000

Effects of Straw Returning and Chemical Fertilizer Reduction on Growth Index and Photosynthetic Parameters of Rice

LI Siping, DING Xiaodong, ZENG Lusheng, WU Lipeng, ZHANG Yuxiao, XIE Junrui, LI Dong

(College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109)

Abstract: In view of the problems of improper straw treatment and increased fertilizer application in rice production, taking Saint Rice 18 under the rice-wheat rotation system in Jining City, Shandong Province as the research object, three treatments were set up through field experiments: conventional fertilization, wheat straw non-return (CK); conventional fertilization + wheat straw full return (T1); 85% of the conventional fertilization + wheat straw full return (T2). The rice growth, photosynthetic parameters and yield at different growth stages were studied to provide theoretical basis for working out the reasonable rice planting measures. The results indicated that straw returning to field under rice-wheat rotation system was adverse to the early growth of rice, however, it could significantly improve rice growth in the middle and late growth stages, and enhance the absorption of nitrogen, phosphorus, potassium and other nutrients in the middle and late growth stages. The chlorophyll content, net photosynthetic rate and spectral reflectance of T2 were the highest in the middle and late growth stages, and the SPAD value and net photosynthetic rate increased by 4.4% and 37.5%, respectively, compared with CK. During the filling stage, both F_m and PI_{abs} were higher than the previous periods. The experiment also showed that T2 had the highest yield, which increased by 13.1% compared with CK. The direct reason for yield increasing was the increase of effective panicle per unit area. In summary, straw returning to the field combined with fertilizer reduction is helpful to achieve high yield and efficiency in rice cultivation production, which is worth popularizing and applying.

Keywords: rice; straw returning; fertilizer application reduction; growth index; photosynthetic index; yield

水稻作为我国单产最高的粮食作物,总产量占全国粮食产量的 50%,全国约有 65%的人口以稻米为食^[1-2]。上世纪 80 年代以来,我国农业生产中开始大规模使用化肥,大量的化肥投入显著提高了我国粮食产量,为我国农业生产的快速发展起到重要作用^[3]。当前水稻生产中农民仍以增施化肥作为提高产量的主要手段,但长期过量施肥不仅会降低肥料利用率,还会造成土壤质量下降和环境污染^[4]。许多研究^[5-6]表明,农业面源污染是导致生态环境破坏的主要原因之一,严重威胁农业的可持续发展。在当前我国大力倡导节肥增效的新形势下,如何将化肥减施与保持土壤肥力相平衡已成为农业生产的重要问题。近年来,秸秆还田作为一种培肥地力的增产措施被普遍接受和应用。秸秆还田不仅能保证生物资源合理利用,还可以减少因秸秆焚烧造成的环境污染和资源浪费,优化农田生态环境,提高作物产量^[7-9]。秸秆还田后被土壤微生物分解,还能改良土壤的理化性质,有效提高土壤养分含量^[10]。许多学者通过研究秸秆还田取得了一些成效,白和平等^[11]研究发现,秸秆还田后土壤有机质含量平均提高 0.29 g/kg,且秸秆在分解过程中缓慢释放有效养分,对提高土壤肥力具有重要意义;白伟等^[12]研究发现,相同施氮条件下秸秆还田 2 年的春玉米最高增产 11.5%,氮肥农学利用率明显提高;谢佳贵等^[13]研究表明,秸秆还田能提高玉米产量的稳定性,使玉米子粒中氮、磷、钾的吸收量分别提高 10.7%、4.5%和 25.5%。秸秆还田对作物产量和土壤养分的影响前人研究较多,而将秸秆还田与化肥减施相配合,对其条件下水稻不同生育期的生长指标的探究相对较少。本文通过田间试验深入探究秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻生长、养分吸收和产量的影响,为山东济宁地区制定合理的水稻种植措施,实现水稻高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究以山东省济宁市任城区水稻试验基地(35°33'N,116°47'E)为研究区域,试验时间为 2017 年 6—10 月。土壤类型为肥力中等的砂姜黑土,试验前 0—20 cm 土层土壤基本理化性质为:pH 8.1,有机质含量 11.7 g/kg,全氮含量 1.19 g/kg,全磷含量 0.85 g/kg,全钾含量 1.31 g/kg,速效磷含量 24.6 mg/kg,速效钾含量 212.0 mg/kg。试验对象是第二季水稻,品种为“圣稻 18 号”,于 2017 年 6 月 17 日插秧,10 月 15 日收割。供试肥料包括尿素(含 N 46%)、复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15)。种植模式为水稻—小麦轮作,还田秸秆为稻麦轮作体系中上季小麦的秸秆。

1.2 试验设计

试验共设 3 个处理,分别为:常规施肥,小麦秸秆不还田(CK);常规施肥+小麦秸秆全量还田(T1);常规施肥量的 85%+小麦秸秆全量还田(T2)。3 次重复,小区面积为 222 m²(22.2 m×10 m),区组随机排列,各小区之间用塑料薄膜隔开,区组之间设置 60 cm 宽的排灌沟,全部小区实行单排单灌。常规施肥按照复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15)600 kg/hm²作基肥施用;尿素(含 N 46%)600 kg/hm²分别按基肥、返青肥、分蘖肥、穗肥施用量各占总施氮量的 30%、25%、35%、10%,小麦秸秆粉碎后翻压还田,作基肥施用。T2 处理施用化肥时,基肥与各时期追肥均按 T1 处理常规施肥量的 85%施用。水稻种植期间保持田面水位 1~6 cm,拔节和抽穗之前各喷施一次防病虫害农药,其他田间管理均按当地常规方法进行。

1.3 测定项目与方法

分别于水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期、以及成熟期时采集水稻样品,每个处理随机采集 12 株水稻,用以分析测定生长指标。

1.3.1 水稻生长指标的测定 株高、根长:采用直尺直接进行测量;根体积用排水法测量;叶面积用打孔计重法测定;分蘖数直接数出;鲜质量由电子天平称量。

1.3.2 水稻养分吸收的测定 水稻样品采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用钒钼黄比色法测定;全钾含量采用火焰光度计法测定。

1.3.3 水稻光合参数及叶绿素的测定 水稻光合作用指标利用汉莎公司 CIRAD-3 光合仪,选择晴天测定;叶绿素使用 SPAD-502 叶绿素测定仪在试验田直接测定;水稻冠层光谱采用 Auaspel-ULS2048 光纤光谱仪,选择晴朗、无风天气,收集不同处理的水稻冠层光谱反射率。

1.3.4 叶绿素荧光参数的测定 采用美国汉莎公司生产的 M-PEA 叶绿素荧光仪。测定时,选取不同处理水稻同一高度的叶片,选在晴天,进行暗适应 20 min 后进行测定。

1.3.5 水稻产量的测定 每小区选择 1 m²有代表性的样点计算水稻产量,并测量穗数、穗粒数、千粒重与结实率。

1.4 统计分析

采用 SPSS 20.0 和 Microsoft Office Excel 软件对各指标数据进行统计分析,并绘制图表。方差分析比较处理间的效应差异,LSD 法比较平均数之间的差异显著性,并进行逐步回归分析与通径分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标的影响

由表 1 可知,在水稻分蘖期,CK 水稻株高、根长、分蘖数均为最高,而 T1 处理下水稻鲜质量、根体积均为最高,且差异显著。T1 处理的叶面积最高,较 CK 处理高出 41.3%。在水稻拔节期,CK 根长最长为 22.2 cm,T2 处理根长最短为 15.1 cm,且各处理之间差异显著。T2 处理根体积最大,T1 处理的水稻叶面积与分蘖数最高,分别比 CK 高出 8.6%和 37.9%。在水稻分蘖期 CK 生长指标较好,而到拔节期 T1 处理的生长指标相对较好。

在水稻抽穗期,除株高和根长外,T2 处理各项生长指标均为最高,其中叶面积和分蘖数分别比 T1 处

理高出 110.2%和 100.0%。在水稻灌浆期,除株高外各生长指标均比抽穗期略有减少,说明水稻开始衰老。比较发现,T1 处理的株高、根长和叶面积指标均为最高,其中根长比 CK 高出 10.2%。T2 处理的根体积、鲜重和分蘖数指标均为最高,其中根体积较其他处理差异显著。T2 处理在水稻抽穗期有较好的生长指标,而在水稻灌浆期 T1 与 T2 处理均表现较好。在水稻成熟期,T2 处理的鲜质量、根体积均为最高,且较其他处理差异显著。T2 处理水稻分蘖数也最高,但较 T1 处理差异不显著。T1 处理下根长最长为 12.9 cm,比 CK 高出 20.6%,差异不显著。常规施肥 CK 下,株高和叶面积均为最高。成熟期 T2 处理的生长指标相对较好。

表 1 秸秆还田与化肥减施处理下水稻不同生育期生长指标的变化

生长指标	分蘖期			拔节期			抽穗期			灌浆期			成熟期		
	CK	T1	T2	CK	T1	T2	CK	T1	T2	CK	T1	T2	CK	T1	T2
株高/cm	35.7±1.1a	34.9±0.8ab	33.0±1.2b	73.1±1.3a	74.8±2.2a	73.1±1.6a	89.6±2.2a	90.2±1.6a	92.2±3.6a	87.5±1.1a	88.5±2.6a	88.3±1.7a	93.3±4.2a	81.7±5.1b	85.1±4.3ab
根长/cm	16.4±0.6a	15.6±1.1a	11.1±1.3b	22.2±2.0a	17.8±1.6 b	15.1±0.9c	13.0±0.6b	14.3±0.8ab	15.1±1.2a	14.7±0.5b	16.2±0.8a	15.2±1.3ab	10.7±1.8ab	12.9±0.7a	9.8±1.5b
鲜质量/(g/株)	5.3±0.4a	5.6±0.3a	4.3±0.2b	36.2±2.8a	38.9±3.1a	34.0±1.8a	18.1±2.4b	15.0±1.0b	30.5±2.3a	25.8±1.2a	28.2±2.0a	28.6±3.3a	32.7±1.8ab	30.7±2.4b	37.0±3.5a
根体积/(cm ³ /株)	1.7±0.2a	2.1±0.3a	0.9±0.1b	2.5±0.3b	2.9±0.2b	3.6±0.3a	1.2±0.1b	1.5±0.1b	2.1±0.1a	1.1±0.1b	1.0±0.1b	2.7±0.2a	1.1±0.1b	1.1±0.1b	1.6±0.2a
叶面积/(cm ² /株)	62.2±4.3b	87.9±8.1a	70.7±10.2ab	355.7±8.7b	386.3±11.4a	355.3±13.5b	149.9±22.1b	113.2±18.5b	237.9±18.8a	154.6±12.1ab	168.8±7.8a	147.5±9.7b	347.8±19.2a	323.3±20.7ab	296.9±15.7b
分蘖数/(个/株)	2.6±0.3a	2.2±0.3a	1.5±0.1b	2.9±0.2b	4.0±0.2a	2.7±0.1b	1.5±0.3b	1.4±0.2b	2.8±0.4a	1.6±0.2a	1.7±0.1a	1.9±0.2a	2.3±0.2b	2.7±0.3ab	2.8±0.2a

注:同行数据后不同字母表示相同生长时期不同处理间在差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 秸秆还田与化肥减施对水稻养分吸收的影响

从图 1 可以看出,各处理的水稻全氮含量均从分蘖期开始降低,至抽穗期出现回升,灌浆期再次降低。且水稻整个生育期内,T1 处理的全氮含量均高于 T2 处理,其中在分蘖期和灌浆期分别高出 51.6%和 10.5%。拔节期各处理间全氮含量差异不大,而从抽穗期到成熟期均为 T1 处理最高,T2 处理次之,CK 最低。对于水稻整个生育期而言,T1 处理的全氮含量指标较好,说明秸秆还田促进了水稻对土壤氮素的吸收。

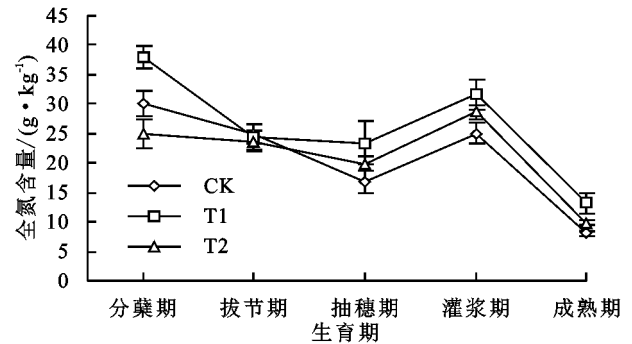


图 1 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻全氮含量的影响

从图 2 可以看出,各处理间水稻全磷含量均从分蘖期开始大幅度降低,其中下降程度最大的是 T2 处理,降低 86.8%;至拔节期各处理全磷含量下降幅度变小;到抽穗期各处理间已无明显差异,而后开始回升;至灌浆期再次降低。水稻在分蘖期 T2 处理的全

磷含量最高,T1 处理含量最低,而其他时期各处理间全磷含量差异不大。总体来说,秸秆还田与化肥减施对水稻全磷含量影响不大。

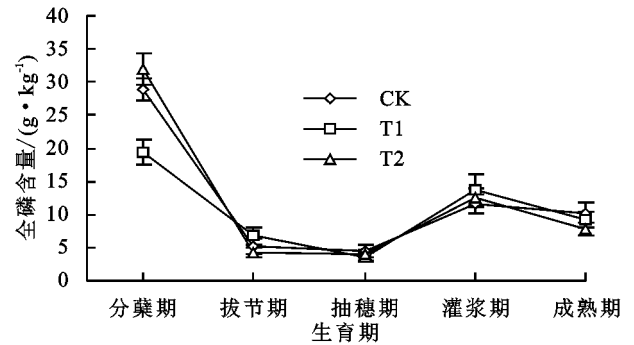


图 2 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻全磷含量的影响

由图 3 可知,随着水稻生长发育,所有处理的全钾含量总体呈现下降趋势,其中 T1 和 T2 处理自分蘖期至成熟期分别下降 67.5%和 70.6%。且水稻整个生育期内,T1 和 T2 处理的全钾含量均高于 CK,说明秸秆还田可促进水稻对土壤钾素的吸收。在分蘖期 T1 处理全钾含量最高为 41.5g/kg,比 CK 高出 17.2%;在灌浆期 T2 处理全钾含量最高为 18.6g/kg。总体来说,秸秆还田与全量化肥配施的 T1 处理水稻全钾含量最高。

2.3 秸秆还田与化肥减施对水稻叶绿素 SPAD 的影响

从图 4 可以看出,随着水稻生长发育,水稻叶绿素

含量从分蘖期至灌浆期呈逐渐上升的趋势。在水稻分蘖期,各处理间叶绿素含量差异不明显;到拔节期和抽穗期,T2 处理的叶绿素含量最高,分别比 CK 高出 8.2% 和 8.4%,且差异显著;灌浆期叶绿素含量最高的仍是 T2 处理,比 CK 高出 4.4%。对水稻整个生育期来说,T2 处理的叶绿素含量较好。

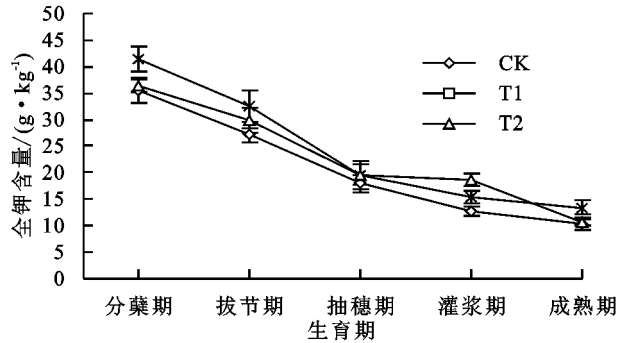


图 3 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻全钾含量的影响

2.4 秸秆还田与化肥减施对水稻光合参数的影响

从图 5 可以看出,在拔节期 CK 的净光合速率(P_n)最高,胞间 CO_2 浓度(C_i)最低,说明拔节期 CK 光合作用最强。到了抽穗期和灌浆期 CK 净光合速率(P_n)略低

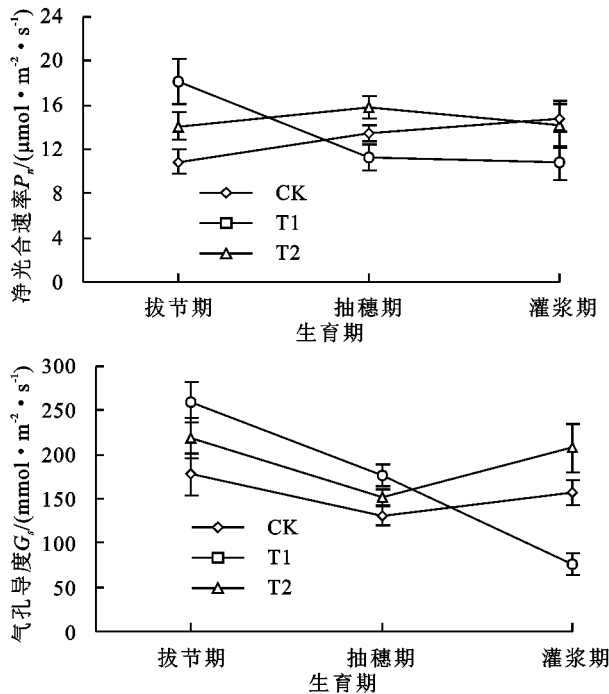
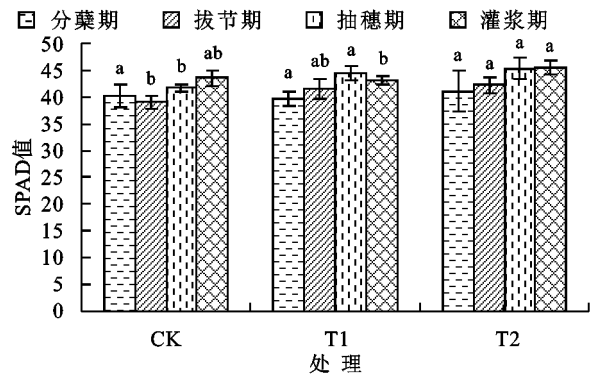


图 5 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻光合参数的影响

2.5 秸秆还田与化肥减施对水稻光谱特征的影响

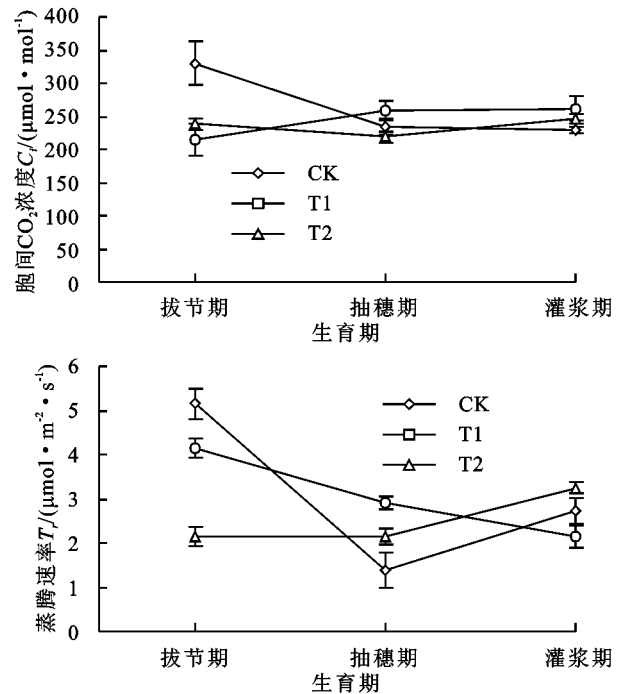
从图 6 可以看出,不同生育期不同处理的水稻冠层光谱反射率的变化趋势大致相同,均在 550 nm 左右形成反射峰“绿峰”,于 680 nm 左右形成反射谷“红谷”。均在近红外光段(760~900 nm)反射率升高,形成“近红外反射平台”,在此波段反射率越高,叶片组织越完好。在拔节期与灌浆期,水稻冠层光谱可见光(350~760 nm)反射率大小为 $\text{T2} > \text{T1} > \text{CK}$;而在近红外光(760~900 nm)下,水稻拔节期与灌浆

于其他处理,说明 CK 在水稻生长中后期光合作用减幅较大。到了灌浆期 T2 处理的净光合速率(P_n)最高,较 CK 高出 37.5%,说明水稻灌浆期 T2 处理的光合作用相对较好。各处理的气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)均从拔节期开始下降,而 T1、T2 处理在抽穗期到灌浆期之间有所升高,CK 继续下降,在水稻生长后期 CK 的蒸腾作用弱于其他处理。



注:图中不同字母表示相同生长时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 4 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻叶绿素 SPAD 的影响



期冠层反射率大小为 $\text{T2} > \text{CK} > \text{T1}$,分蘖期为 $\text{T1} > \text{CK} > \text{T2}$,抽穗期为 $\text{T1} > \text{T2} > \text{CK}$,均差异显著。尤其是在灌浆期,T2 处理反射率是其他处理的 1.5 倍以上,说明在水稻灌浆期 T2 处理叶片组织更完好。

2.6 秸秆还田与化肥减施对水稻荧光参数的影响

在水稻分蘖期,T1 处理的最大光化学效率(F_v/F_m)和反应中心的性能指数(PI_{abs})最高,T2 处理最低,而从单位反应中心的吸收光能(ABS/RC)来看,T1 处理比 CK 处理下降了 16.0%。各处理间电子传

递能量占总吸收光能的比例(ET_o/ABS)无显著差异。常规施肥处理单位叶面积吸收的光能(ABS/CS_m)最高,对比 CK,T1 处理下降 6.7%,T2 处理下降 22.1%,均差异显著。

在水稻拔节期,各处理 F_v/F_m 与 ET_o/ABS 均无显著差异,T1 处理 ABS/RC 最高,对比 CK 处理提高 28.8%;T2 处理的 ABS/CS_m 与 PI_{abs} 均最高,分

别比 CK 提高 17.8% 和 47.3%。到水稻抽穗期,T2 处理的 F_v/F_m 、 ET_o/ABS 、 ABS/CS_m 与 PI_{abs} 均变为最低,分别比 T1 处理降低 9.6%,26.2%,13.6% 和 63.9%,但 T2 处理的 ABS/RC 最高。在水稻灌浆期,T2 处理的 ABS/CS_m 仍为最低,比 T1 处理降低 10.7%,其余各荧光指标均无显著差异(表 2)。

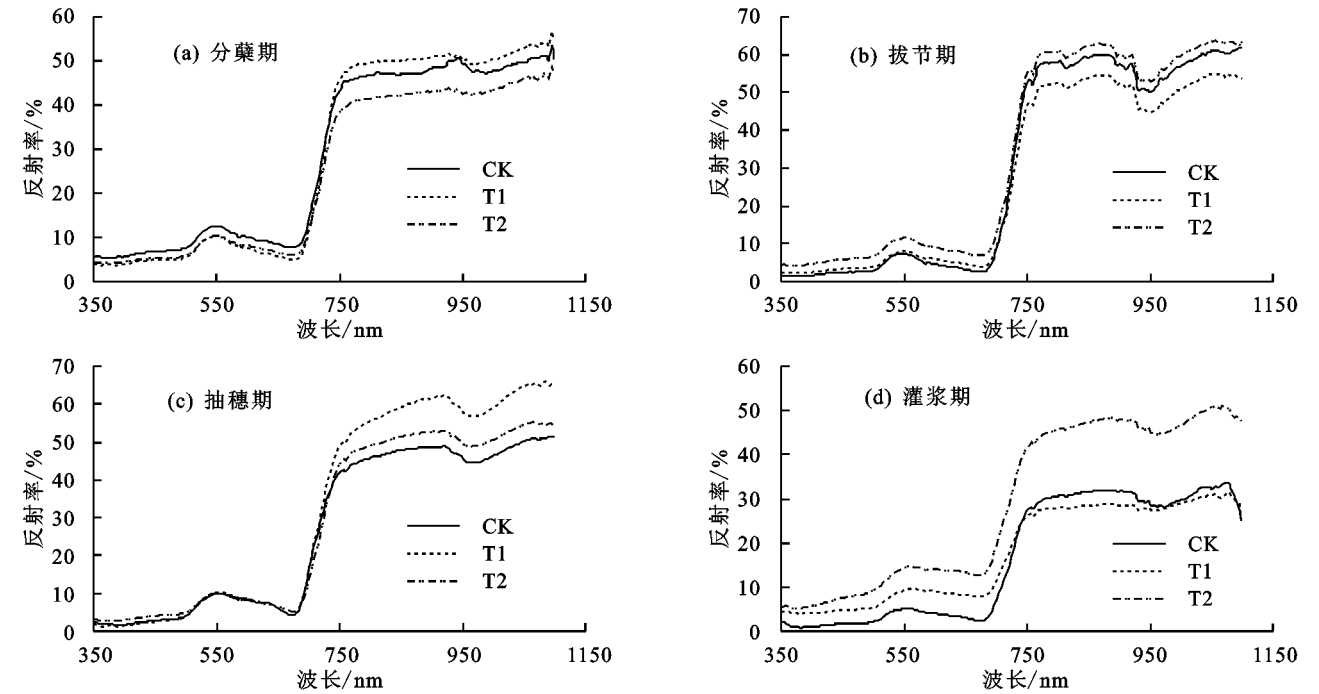


图 6 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻冠层光谱反射率的影响

表 2 秸秆还田与化肥减施对水稻不同生育期荧光参数的影响

时期	处理	F_v/F_m	ABS/RC	ET_o/ABS	ABS/CS_m	PI_{abs}
分蘖期	CK	$0.76 \pm 0.04ab$	$1.19 \pm 0.08a$	$0.48 \pm 0.14a$	$22453.5 \pm 710.6a$	$5.48 \pm 2.67ab$
	T1	$0.79 \pm 0.01a$	$1.00 \pm 0.06b$	$0.58 \pm 0.04a$	$20945.5 \pm 89.8b$	$10.39 \pm 3.86a$
	T2	$0.71 \pm 0.05b$	$1.20 \pm 0.02a$	$0.42 \pm 0.16a$	$17482.0 \pm 1331.6c$	$3.25 \pm 0.47b$
拔节期	CK	$0.76 \pm 0.02a$	$1.11 \pm 0.04b$	$0.51 \pm 0.09a$	$18133.5 \pm 1134.3b$	$6.42 \pm 1.06a$
	T1	$0.71 \pm 0.05a$	$1.43 \pm 0.15a$	$0.49 \pm 0.08a$	$17849.5 \pm 1824.5b$	$4.35 \pm 0.49b$
	T2	$0.78 \pm 0.03a$	$1.12 \pm 0.11b$	$0.57 \pm 0.07a$	$21354.5 \pm 1402.2a$	$9.46 \pm 2.77a$
抽穗期	CK	$0.82 \pm 0.02a$	$0.88 \pm 0.14ab$	$0.58 \pm 0.04ab$	$23811.4 \pm 2076.1a$	$13.51 \pm 2.58a$
	T1	$0.81 \pm 0.01a$	$0.90 \pm 0.01b$	$0.61 \pm 0.02a$	$21560.6 \pm 547.3a$	$14.28 \pm 3.22a$
	T2	$0.74 \pm 0.05b$	$1.05 \pm 0.10a$	$0.45 \pm 0.13b$	$18623.5 \pm 2115.4b$	$5.14 \pm 2.17b$
灌浆期	CK	$0.79 \pm 0.02a$	$1.18 \pm 0.12a$	$0.53 \pm 0.04a$	$23343.2 \pm 1176.3a$	$6.31 \pm 1.87a$
	T1	$0.81 \pm 0.04a$	$1.12 \pm 0.07a$	$0.49 \pm 0.02a$	$23808.8 \pm 655.6a$	$5.62 \pm 1.11a$
	T2	$0.78 \pm 0.03a$	$1.23 \pm 0.11a$	$0.49 \pm 0.07a$	$21258.6 \pm 987.4b$	$4.98 \pm 0.36a$

2.7 秸秆还田与化肥减施对水稻产量构成的影响

从表 3 可以看出,T2 处理的水稻产量最高为 12 174.9 kg/hm²,比 CK 处理高出 13.1%,差异显著;T1 处理次之,产量为 11 355.6 kg/hm²,比 CK 处理高出 5.5%;CK 处理产量最低,为 10 763.2 kg/hm²。从产量构成要素来看,T1 处理的穗数最高,比 CK 处理高出 27.9%。CK 处理穗数最低,但千粒重最高,且较其他处理差异显著,可以看出穗数与千粒重之间存在一定的负补偿效应。各处理间的穗粒数与结实率无明显差异,说明

秸秆还田对水稻穗粒数影响不大。

2.8 水稻产量与灌浆期生长指标及光合指标间的回归分析与通径分析

以水稻灌浆期的株高(X_1)、根体积(X_2)、叶面积(X_3)、分蘖数(X_4)、SPAD 值(X_5)、 F_v/F_m (X_6)、净光合速率 P_n (X_7)为自变量,水稻产量为因变量(Y)进行逐步回归分析,水稻灌浆期的回归关系为 $Y = -59860.825 + 88.490X_1 + 697.608X_2 + 9.237X_3 + 2542.982X_4 + 333.921X_5 + 54551.019X_6 + 366.074X_7$

($R=0.991, F=7.508, P=0.274$), 由此说明各观测指标是影响水稻产量的主要因素。为进一步明确逐步回归确定的各项指标对产量的调控效应, 本研究进行了通径分析(表 4)。结果表明, 在水稻灌浆期,

分蘖数和 F_v/F_m 对产量的直接作用系数最大, 根体积、叶面积、株高和 SPAD 值次之。说明在水稻生长后期, 有效分蘖与最大光化学效率对产量形成起主导作用。

表 3 秸秆还田与化肥减施对水稻产量及其构成的影响

处理	产量/(kg·hm ⁻²)	穗数/(万穗·hm ⁻²)	穗粒数/(个·穗 ⁻¹)	千粒重/g	结实率/%
CK	10763.3±141.3b	208.9±26.2b	179.3±22.3a	25.5±0.7a	88.7±0.7a
T1	11355.6±353.6a	267.1±22.4a	171.4±13.9a	21.9±1.3b	88.3±1.1a
T2	12174.9±747.7a	245.5±18.2ab	189.8±21.0a	22.7±0.5b	86.9±1.3a

注: 同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

表 4 秸秆还田与化肥减施处理下水稻灌浆期生长、光合指标对产量作用的通径系数

作用因子	直接效应	间接效应						
		株高	根体积	叶面积	分蘖数	SPAD	F_v/F_m	净光合速率 P_n
株高	1.086		-0.814	-0.336	-2.169	0.777	1.402	-0.078
根体积	1.102	-0.802		0.515	1.583	-0.347	-1.478	-0.079
叶面积	1.173	0.311	-0.484		0.649	0.247	0.378	-0.023
分蘖数	3.082	-0.764	0.566	-0.247		-0.485	-2.115	0.052
SPAD	1.080	0.781	-0.354	-0.268	-1.385		1.059	-0.391
F_v/F_m	2.552	0.596	-0.638	-0.174	-2.554	0.448		-0.173
净光合速率 P_n	0.573	0.147	0.153	-0.048	-0.281	0.737	0.771	

3 讨论

3.1 秸秆还田与化肥减施与不同生育期水稻生长指标及光合参数的关系

秸秆还田能够在水稻生长中后期显著提高水稻生长指标。叶文培等^[14]发现, 秸秆还田显著提高了水稻分蘖数, 并在水稻生育中后期显著提高了叶面积指数; 金鑫等^[15]认为, 小麦秸秆全量还田降低了水稻分蘖期的根系活力, 导致水稻前期生长缓慢, 但到抽穗期后却能增加干物质的生产与积累。本试验结果与之相似, 在水稻分蘖期, CK 的株高、根长、分蘖数均为最高, 分别比 T1 处理高出 2.3%, 5.1% 和 18.1%。而在水稻分蘖期的秸秆还田条件下, T1 处理的水稻鲜质量、根体积比 T2 处理分别高出 30.2% 和 133.3%。究其原因: 其一, 秸秆还田后土壤温度会降低 2~6℃, 不利于水稻生长发育和干物质的积累^[16-17]; 其二, 秸秆还田后的腐解过程会与作物争夺氮源, 影响水稻的养分吸收^[18], 从而不利于水稻前期的生长发育, 且在化肥减施处理下尤为明显。而抽穗期之后, T2 处理的水稻生长指标逐渐上升为最佳, 而常规施肥处理的水稻生长指标逐渐变差。究其原因, 可能由于秸秆覆盖为水稻生长中后期提供了良好的土壤水温环境, 秸秆养分逐渐腐解释放并被作物吸收, 促进了水稻中后期的生长发育^[19]。

光合作用是作物生长和产量形成的重要代谢过程, 是植物生长发育的物质和能量的主要来源^[20]。唐志敏等^[21]认为, 秸秆还田可以促进植物叶片气孔开放, 加强蒸腾作用, 改善叶肉细胞 CO₂ 的供应能

力, 提高叶片的光合速率。本试验结果与之相似, 常规施肥处理在水稻拔节期的光合能力最强, 而到灌浆期 T2 处理的叶绿素、净光合速率(P_n)和光谱反射率均变为最高, 叶片气孔开放程度加大, 蒸腾作用增强。另外, 水稻叶绿素含量与光合能力呈正相关, 水稻拔节期之后, T2 处理的叶绿素含量最高, 其中拔节期和抽穗期分别比 CK 处理高出 8.2% 和 8.4%。

叶绿素荧光动力学参数能准确反映水稻叶片光能吸收的分配去向^[22], 其中 F_v/F_m 等参数能表征原初反应中心的光能利用率和转化率, 反应中心性能指数(PI_{abs})反映了光系统 II 的整体性能^[23]。本试验条件下, 各处理 F_v/F_m 差异不大, T1 处理该指标较好, 说明秸秆还田能提高水稻的光能利用率, 而 T2 处理略低, 表明化肥减施条件下水稻可能受到一定的光抑制。有研究^[24]表明, 非胁迫条件下 F_v/F_m 的变化程度极小, 显然本试验化肥减施条件下并未造成胁迫。对于 PI_{abs} 而言, 秸秆还田处理在整个生育期内该指标较好, 化肥减施的 T2 处理除在拔节期较高外, 其余时期均为最低。说明秸秆还田有利于提高水稻光系统 II 的性能, 而化肥减施一定程度上起了负面作用。

3.2 秸秆还田与化肥减施与不同生育期水稻养分吸收及产量的关系

秸秆还田能增强水稻生长中后期对氮、磷、钾等养分的吸收。张媛媛等^[25]研究表明, 秸秆还田与化肥配施提高了土壤中矿质氮的含量, 水稻吸收氮素的能力相对提高, 从而增加了水稻植株的含氮率; 徐国伟等^[26]认为, 秸秆还田后, 植株生育前期的氮、磷、钾

养分含量较单施化肥处理略低,但会随着生育进程而增加,后期显著高于单施化肥处理。本试验结果与之相似,本试验条件下,拔节期之前秸秆还田化肥减施处理的水稻全氮含量最低,但拔节期之后该处理全氮含量超过常规施肥处理;全磷、全钾含量也有相似之处。究其原因:一方面,秸秆还田后需要土壤微生物的分解利用,而分蘖期还田的秸秆还未分解,土壤中养分含量较低;另一方面,秸秆还田后土壤 C/N 较高,土壤微生物分解秸秆需要消耗大量氮素营养,造成早期的“夺氮”,影响了水稻前期的养分吸收^[27]。而随着秸秆分解加快,养分逐渐释放并被水稻吸收,同时也为土壤微生物提供了能源物质,土壤微生物活性上升,加速土壤有机质矿质化并释放速效养分,有利于水稻后期的养分吸收^[28-29]。秸秆还田后可以通过调控土壤碳氮比促进水稻对氮素的吸收,究其原因,土壤 C/N 升高可以促进有机氮的矿化与固定氮的转化,从而提高土壤的供氮能力^[30]。

秸秆还田有利于提高水稻产量,且配合化肥减施效果更明显,达到高产增效的目的。袁玲等^[31]研究发现,常规水作下秸秆还田较不还田处理,水稻增产 113.6 kg/hm²,且稻米中铁、锌含量有所提高;许轲等^[32]研究表明,秸秆还田能有效增加水稻的穗粒数和结实率,在黏土和沙土 2 种土壤条件下均能显著提高水稻产量;黄容等^[33]研究发现,秸秆还田与化肥减量配施处理下,水稻产量比常规施肥处理增产 3.0%~17.9%。本试验结果与之相似,本试验条件下 85% 常规施肥量配合秸秆全量还田处理的水稻产量达到最高,为 12 174.9 kg/hm²,比常规施肥产量高出 13.1%,增产效果明显。究其原因:秸秆还田能补偿土壤潜在的肥力消耗,代替减量的化肥为水稻生长提供养分^[34];其次,秸秆还田能够降低土壤容重,提高水稻田耕层土壤孔隙度,提高土壤团聚体和微团聚体的含量,增强土壤保水保肥能力,有利于水稻生长发育^[35];此外,秸秆还田提高了叶片的气孔导度,改善了对 CO₂ 的吸收能力,从而提高光合速率,有利于干物质的形成。另外,Slafra 等^[36]认为,单位面积的穗数主要取决于环境因素,而穗粒数则主要由作物的基因型决定。这在本试验中得到证实,秸秆还田显著增加了单位面积内水稻的有效穗数,而对穗粒数影响不大。所以从产量构成来看,水稻增产的直接原因是单位面积有效穗数的增加。

4 结论

(1) 秸秆还田前期并不能有效提高水稻生长水平,但在水稻生长中后期能显著提高水稻的株高、根长、鲜质量、根体积等生长指标,并在生长中后期增强

对氮、磷、钾等养分的吸收能力。

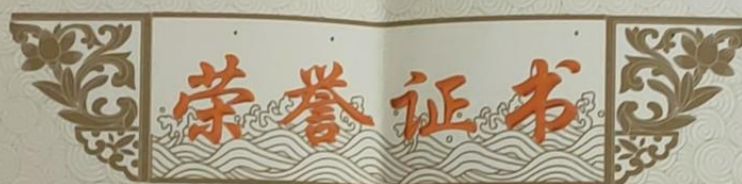
(2) 秸秆还田能显著提高水稻生长中后期的叶绿素含量、净光合速率和光谱反射率,并有利于提高水稻光能利用率和光系统 II 的整体性能。

(3) 结合高产高效,秸秆粉碎还田配合常规化肥用量 85% 的处理实现了产量最大化,值得在实践中推荐应用。

参考文献:

- [1] 方福平,程式华.论中国水稻生产能力[J].中国水稻科学,2009,23(6):559-566.
- [2] Lv Z F, Zhu Y, Liu X J, et al. Climate change impacts on regional rice production in China [J]. Climatic Change,2018,147(2):1-15.
- [3] 吕家珑,张一平,王旭东,等.长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J].应用生态学报,2001,12(4):569-572.
- [4] 鲁艳红,廖育林,聂军,等.长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响[J].土壤学报,2016,53(1):202-212.
- [5] Kou X R, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices [J]. Agro-environmental Protection,2002,21(5):385-388.
- [6] 李玉庆,张存,张文贤.水稻灌区农业面源污染物迁移转化规律模拟研究[J].灌溉排水学报,2017,36(11):31-37.
- [7] 劳秀荣,吴子一,高燕春.长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):49-52.
- [8] Chen Z M, Wang H Y, Liu X W, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice - wheat cropping system[J].Soil and Tillage Research,2017,165:121-127.
- [9] 余延丰,熊桂云,张继铭,等.秸秆还田对作物产量和土壤肥力的影响[J].湖北农业科学,2008,47(2):169-171.
- [10] 顾美英,唐光木,葛春辉,等.不同秸秆还田方式对和田风沙土壤微生物多样性的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(4):489-498.
- [11] 白和平,胡喜巧,朱俊涛,等.玉米秸秆还田对麦田土壤养分的影响[J].科技信息,2011(11):43-44.
- [12] 白伟,张立祯,逢焕成,等.秸秆还田配施氮肥对春玉米水氮利用效率的影响[J].华北农学报,2018,33(2):224-231.
- [13] 谢佳贵,侯云鹏,尹彩侠,等.施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(5):1110-1118.
- [14] 叶文培,谢小立,王凯荣,等.不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J].中国水稻科学,2008,22(1):65-70.
- [15] 金鑫,蔡林运,李刚华,等.小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响[J].中国土壤与肥料,2013(5):80-85.
- [16] Wang X B, Wu H J, Dai K, et al. Tillage and crop

- residue effects on rainfed wheat and maize production in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 132(3):106-116.
- [17] 李潮海,赵霞,刘天学,等.麦茬处理方式对机播夏玉米的生态生理效应[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1):162-166.
- [18] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R, et al. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices [J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(6):1096-1103.
- [19] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等.不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(2):565-575.
- [20] 王军,陈帆,温明霞,等.6-BA 处理对烤烟耐旱性的影响[J]. *作物研究*, 2017(2):44-47, 82.
- [21] 唐志敏,刘军,刘建国.秸秆还田对长期连作棉花光合速率及叶绿素荧光的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2012, 30(3):302-307.
- [22] Li P M, Cai R G, Gao H Y, et al. Partitioning of excitation energy in two wheat cultivars with different grain protein contents grown under three nitrogen applications in the field[J]. *Physiologia Plantarum*, 2007, 129(4):822-829.
- [23] 张善平,冯海娟,马存金,等.光质对玉米叶片光合及光系统性能的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20):3973-3981.
- [24] 李强,王国祥,潘国权,等.水体浊度对菹草萌发及幼苗光合荧光特性的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(11):3594-3601.
- [25] 张媛媛,李建林,王春宏,等.氮素和生物腐解剂调控下稻草还田对水稻氮素积累及产量的影响[J]. *土壤通报*, 2012, 43(2):435-438.
- [26] 徐国伟,杨立年,王志琴,等.麦秸还田与实地氮肥管理对水稻氮磷钾吸收利用的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(8):1424-1434.
- [27] 曾研华,吴建富,曾勇军,等.机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响[J]. *作物学报*, 2018, 44(3):454-462.
- [28] 刘立军,桑大志,刘翠莲,等.实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(12):1456-1461.
- [29] Chaves B, Neve S D, Boeckx P, et al. Manipulating the N release from ¹⁵N labelled celery residues by using straw and vinasses[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8):2244-2254.
- [30] 鲁彩艳,陈欣.不同施肥处理土壤及不同 C/N 比有机物料中有机 N 的矿化进程[J]. *土壤通报*, 2003, 34(4):267-270.
- [31] 袁玲,张宣,杨静,等.不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2):350-359.
- [32] 许轲,刘萌,陈京都,等.麦秸秆全量还田对稻田土壤溶解有机碳含量和水稻产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2):430-436.
- [33] 黄容,高明,万毅林,等.秸秆还田与化肥减量配施对稻—菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(11):4446-4456.
- [34] 张亚丽,吕家珑,金继运,等.施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2):307-314.
- [35] 马永良,师宏奎,张书奎,等.玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(增刊 1):42-46.
- [36] Slafer G A, Savin R, Sadras V O. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157(2):71-83.



CONGRATULATION

李思平 获得，资源与环境学院第二届“柏森杯”
大学生学术论坛优秀奖。

资源与环境学院

二〇一九年十二月二十四日