

孔令国,汪永辉,韩晓东,等. 禾稼春叶面肥对不同氮素水平下水稻生长及大米品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 790-798.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2018.04.011

禾稼春叶面肥对不同氮素水平下水稻生长及大米品质的影响

孔令国¹, 汪永辉², 韩晓东², 薄海舰², 孙健¹, 汪良驹¹

(1.南京农业大学园艺学院,江苏 南京 210095; 2.黑龙江庆阳农场,黑龙江 哈尔滨 150778)

摘要: 以东北粳稻牡丹香2号为试验材料,研究了不追施氮肥、半量追氮和全量追氮条件下叶面喷施含有5-氨基乙酰胺丙酸(ALA)的禾稼春叶面肥对植株形态、产量和品质的影响,分析了不同处理对大米矿质营养元素含量的影响。结果表明,追施氮肥和禾稼春叶面肥处理均显著促进水稻植株营养生长,提高水稻产量,其中,半量追氮(75 kg/hm²)+禾稼春处理的产量最高,大米的蛋白质、可溶性糖和直链淀粉含量也显著高于其他处理。追施氮肥和禾稼春叶面肥处理还不同程度地提高大米氮、磷、钾、钙、镁、铁、锰、锌和铜等矿质营养元素含量。因而,在东北黑土地上,适量追施氮肥,同时配合施用禾稼春叶面肥,不仅可以提高水稻产量,而且能够提高大米营养价值。禾稼春叶面肥可以部分替代尿素,从而为农业减肥生产实践提供了一条新的可选途径。

关键词: 5-氨基乙酰胺丙酸; 氮素; 水稻; 矿质元素; 产量; 品质

中图分类号: S511.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)04-0790-09

Effect of Cropspring foliar fertilizer on growth and quality of rice under different nitrogen supplies

KONG Ling-guo¹, WANG Yong-hui², HAN Xiao-dong², BO Hai-jian², SUN Jian¹, WANG Liang-ju¹

(1. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Qingyang Farm of Heilongjiang, Harbin 150778, China)

Abstract: The effects of Cropspring, a foliar fertilizer containing 5-aminolevulinic acid (ALA) on plant growth, yield and mineral nutrition levels in rice (*Oryza sativa* L. cv. Mudanxiang 2) grown under different nitrogen supplies were studied in northeast China. The results showed that the application of nitrogen fertilizer and Cropspring foliar fertilizer significantly promoted plant growth and rice yield. Rice yield was highest in the treatment of applying nitrogen fertilizer (75 kg/hm²) and Cropspring, and the contents of protein, soluble sugars and amylose were significantly higher than those in other treatments. Additionally, the application of nitrogen fertilizer and Cropspring foliar fertilizer significantly improved grain mineral nutrition levels, including nitrogen, phosphate, potassium, calcium, magnesium, iron, manganese, zinc and copper. Therefore, the application of nitrogen fertilizer in a suitable dosage, combined with Cropspring foliar fertilizer, could improve rice yield and rice nutrition value in the black soil of northeast China. It is considered that Cropspring foliar fertilizer can partially substitute the function of urea, and can be used as a new alternative in agriculture fertilizer discount practice.

Key words: 5-aminolevulinic acid; nitrogen; rice; mineral element; yield; quality

收稿日期:2017-09-04

基金项目:国家自然科学基金项目(31772253)

作者简介:孔令国(1991-),男,山东泰安人,硕士研究生,从事植物生

长发育调控研究。(E-mail) 2015804169@njau.edu.cn

通讯作者:汪良驹,(E-mail) wlj@njau.edu.cn

目前,中国每年水稻播种面积 3.0×10^7 hm²,总产量 2.0×10^8 t,其中,黑龙江省水稻种植面积和产

量都占全国总量的10%以上,是仅次于湖南省的第2大产粮省^[1]。黑龙江的大米因产地土壤肥沃、水源清洁、阳光充足、生育期长、病虫害少,营养丰富,绿色安全,深受消费者喜爱^[2-3]。但近年来,化学肥料尤其以尿素为代表的氮肥被过度施用,导致土壤板结、水体污染、土壤养分流失等问题日益严重,制约着农业可持续发展^[4-5]。如何合理施肥、提高肥料利用效率是中国农业生产面临的新课题。

5-氨基乙酰丙酸(ALA)是一种天然氨基酸,是所有生物体内卟啉化合物(例如叶绿素、血红素等)生物合成的关键前体^[6]。有关ALA在农业生产上应用研究已经有大量报道,ALA最主要的功能是提高植物叶片光合效率^[7],增强植株抵抗多种逆境胁迫的能力^[8-9],促进植物生长,提高作物产量,并改善品质^[10-12]。但是,ALA与植物矿质营养关系的研究还比较少。姚素梅等观察到,ALA处理可以促进水稻稻穗、叶片、茎鞘、根系等器官对磷的吸收,有利于磷在穗部分配,从而提高结实率,增加产量^[13]。在小白菜上,Wei等发现,ALA促进不同氮素水平下植株对氮素的吸收、运输和转化^[14]。然而,张丽颖等用ALA溶液浇灌苹果根系后发现,它可以提高叶片Ca、Mg、Fe、Cu和Zn等中微量元素含量,但却降低P和K含量^[11]。在椰枣上,Pentakeep(一种含有ALA的叶面肥)可以提高叶片N、Cu和Zn含量,而对P、K、Fe和Mn含量没有影响^[15]。在盐胁迫下,ALA能够提高棉花植株耐盐性,其主要机理是减少根系对Na吸收,抑制地上部Na含量上升,但是ALA对植株K、Ca和Mg含量没有显著影响^[16]。但是,Naeem等^[17]认为,在非盐胁迫下,叶面喷施ALA溶液可以提高油菜根系和叶片N、P、Mg、Zn和Fe含量,而在盐胁迫下,ALA降低根系N、P、Mn、Zn、Cu含量,还进一步地降低叶片Fe含量。显然,ALA与植物矿质营养元素的关系还远未阐明。最近,一系列研究结果证明,ALA可以促进植物叶片气孔开放,增加蒸腾速率^[18-20]。这不仅有利于CO₂进入叶肉细胞^[21],而且增强根系活力,带动根系吸水^[22]。由于植物矿质元素需要首先溶解于土壤溶液,然后通过主动或被动方式进入根系细胞,而在木质部导管中,矿质元素的运输、分配均与蒸腾流密切相关,因而我们推测,ALA能够促进植物矿质营养元素吸收,在农业减肥实践中具有独特作用,但是这有待于试验证明。

‘禾稼春’是一种以ALA为主要活性成分的水溶性氨基酸叶面肥。在苹果^[11]、芸豆^[23]、大豆^[24]、草莓^[25]、葡萄^[26]、梨^[27]、无花果^[28]等作物上,它都能提高叶片光合性能,增强植株抗逆性,增加产量并改善品质。但是,它是否能提高水稻产量并且促进矿质营养元素吸收迄今未见报道。本研究以东北寒地水稻为材料,研究不同氮素水平下‘禾稼春’叶面肥对植株生长及矿质营养元素含量的影响,并探讨对大米矿质营养元素含量的影响,以期为农业生产中减少化肥用量,提高肥料利用效率提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及其处理

试验于2016年4月至2016年10月在黑龙江庆阳农场进行。试验地土壤有机质含量6.22%,碱解氮180.78 mg/kg,有效磷29.12 mg/kg,速效钾203.50 mg/kg,属于典型的东北肥沃黑土地。选择一块地势平坦、肥力均匀的水稻生产田。将地块垒埂,隔成各自面积约200 m²的小区。小区间水分互不流通,小区外有排水渠,保证定期排水。灌水时,采用汽油抽水机逐个注入,保证小区间互不干扰。试验设2个因素,即氮素水平和禾稼春叶面肥处理。其中,氮素追施每667 m²施用尿素0 kg、5 kg和10 kg等3个水平,叶面肥设处理与不处理2个水平,共计6个处理,设3次重复,18个小区,随机排列。

供试材料为寒地粳稻(*Oryza sativa* L.)牡丹香2号。4月5日用LB-P609水稻浸种催芽机(哈尔滨灵波科技有限公司研制生产)温水浸种催芽。10 d后,将发芽的种子转移至穴盘,放置在温室大棚中育苗。待秧苗长至3叶1心时(5月11日),选取大小一致的幼苗移栽到试验田中,株行距12.5 cm×30.0 cm。试验区肥料管理如下:(1)移栽前整地时,每667 m²施用40 kg有机肥(挑大梁牌)+5 kg磷酸二铵(18% N+46% P₂O₅)+5 kg K₂SO₄(K₂O 50%)+10 kg生物菌肥(黑龙江省大地丰农业科技开发有限公司生产)。(2)返青分蘖期追施氮肥。追肥共6个处理:处理1不追施氮肥;处理2不追施氮肥,但在不同时间点喷施稀释2 000倍的禾稼春氨基酸叶面肥(氨基酸含量10%,南京禾稼春生物科技有限公司生产)4次;处理3为半量氮肥,即在分蘖期每667 m²施用5 kg尿素;处理4为半量氮肥,外加在不同时间点喷施2 000倍禾稼春叶面肥4次;处理5为全

量氮肥,即在分蘖期每 667 m²施入 10 kg 尿素;处理 6 为全量氮肥,外加在不同时间点喷施 2 000 倍禾稼春叶面肥 4 次。叶面肥使用的具体时间、方法和用肥量为:育苗期(5 月 6 日),用背负式喷雾器苗床喷施,0.4 L/m²;返青分蘖期(5 月 20 日),在稻田追施尿素的同时,用背负式喷雾器叶面喷施,每 667 m² 20 L;拔节期(7 月 14 日),无人机作业叶面喷施,每 667 m² 3.5 L;灌浆期(8 月 11 日),用背负式喷雾器叶面喷施,每 667 m² 20 L。(3) 其他追肥。在所有试验小区内,5 月 20 日(返青期)统一撒施硅肥 0.2 kg(辽宁省土壤肥料研究所生产);7 月底至 8 月初,每 667 m²施用 K₂SO₄ 5 kg。

1.2 调查与分析

1.2.1 植株农艺性状调查 在水稻成熟收割前(9 月下旬),每个小区内随机选取一点,挖出 15 株,测定取样面积,洗净根系泥土,测定株高,晾干、烘干,计数单株有效穗数、单穗稻谷粒数,并称取茎秆、根系干质量、稻谷质量和千粒质量。同时,收割各个试验小区水稻,脱粒,烘干,计算单位面积产量。

1.2.2 稻米品质分析 将脱粒后的稻谷,按《GB/T17891-1999 优质稻谷》方法^[29]测定糙米率和精米率。用种子大米外观品质检测分析仪(SE-E)测定垩白粒率和垩白度。用蒽酮比色法测定米粒可溶性糖含量。用 Foss Tecator 公司生产的近红外谷物分析仪(Infratec TM 1241 grain analyzer)测定米粒脂肪酸、直链淀粉和蛋白质含量以及大米食味值^[30]。

1.2.3 大米矿质营养元素含量分析 将大米磨成干粉,过 100 目筛,然后分别取样,用 Foss Tecator 公司生产的凯氏定氮仪(Kjettac 2300)测定 N 含量,用电感耦合等离子体发射光谱(ICP)测定 P、K、Na、Ca、Mg 等大、中量元素含量,以及 Fe、Cu、Mn、Zn、B 等微量元素含量。每个样品重复测定 3 次。

1.3 数据处理

所有数据均重复测定 3 次以上,取平均值,并采用 SPSS 进行双因素方差分析,进行邓肯氏测验。

2 结果与分析

2.1 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下水稻植株生物学性状的影响

方差分析结果表明,氮素水平和禾稼春叶面肥处理均有促进水稻植株生长的效应($F>F_{0.05}$)。无论株高,还是根系质量、茎秆质量、稻谷质量以及植株总干质量,氮素越多,生长量越大,说明即使是在东北黑土地上,氮素水平仍然是影响植株生长的重要因素。与不追施氮肥对照相比,每 667 m²施用半量(5 kg)尿素处理的株高、根系质量、茎秆质量、稻谷质量和植株总干质量平均值分别高出 20.5%、12.1%、25.3%、37.9%和 29.0% ($P<0.05$),但是,与追施全量(10 kg)尿素处理相比,这些指标虽然也有一定变化,但差异均未达到显著水平,说明在本试验条件下,每 667 m²追施 10 kg 尿素对水稻植株生长的效应与追施 5 kg 尿素之间没有显著差异。另一方面,在不追施氮肥情况下,喷施禾稼春叶面肥显著促进植株生长,其中株高、根质量、茎质量、稻谷质量和植株总干质量等 5 项指标平均值分别比不追施氮肥对照高出 5.8%、44.1%、21.4%、15.9%和 19.0% ($P<0.05$),说明禾稼春叶面肥具有类似于追施氮肥那样促进植株生长的效应。此外,氮素水平与禾稼春叶面肥有一定互作效应($F>F_{0.05}$)。从表 1 可知,不追施氮肥的水稻株高、根系质量、茎秆质量、稻谷干质量以及整株生物学总量最低,而半量尿素+禾稼春处理的各项指标(除株高外)最高,部分指标例如稻谷干质量和生物学总量,都显著高于全量尿素处理($P<0.05$),表明这一组合对水稻植株生长的促进效应最好。

表 1 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下水稻植株生物学性状的影响

Table 1 Effect of Cropspring foliar fertilizer on biological traits of rice plants grown under different nitrogen supplies

| 处理 | 株高 (cm) | 根系干质量 (g) | 茎秆干质量 (g) | 稻谷干质量 (g) | 植株总干质量 (g) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 0 N(对照) | 94.47±1.28e | 4.56±0.11d | 29.31±1.10c | 35.51±1.85d | 71.23±4.67d |
| 0 N+禾稼春 | 102.88±1.70d | 7.45±0.83ab | 37.08±3.54bc | 41.67±5.85c | 86.20±5.04c |
| 1/2 N | 115.96±3.92c | 5.15±0.27cd | 33.60±2.78bc | 42.08±2.22c | 80.83±1.62c |
| 1/2 N+禾稼春 | 121.96±1.85c | 8.31±0.53a | 49.56±5.62a | 64.34±6.43a | 122.20±6.45a |
| 1 N | 125.16±0.84b | 5.85±0.64bcd | 44.83±5.75ab | 58.78±9.01b | 109.45±10.29b |
| 1 N+禾稼春 | 130.33±0.94a | 6.66±0.70abc | 44.11±5.01ab | 52.04±3.80bc | 102.81±6.74bc |

处理 0 N、1/2 N 和 1 N 分别代表不追施氮肥、每 667 m²追施 5 kg 尿素和每 667 m²追施 10 kg 尿素。同一列中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.2 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下水稻产量构成因素的影响

方差分析结果表明,氮素水平对水稻植株有效穗数、单穗粒数、千粒质量、单株产量以及单位面积产量等都有显著影响($F>F_{0.01}$),而禾稼春叶面肥处理也有类似效应($F>F_{0.05}$),只是对稻谷千粒质量的影响未达到显著水平。从有效穗数和单穗籽粒数上看,半量追肥处理比不追肥对照分别高出 32.7%和 38.3%,但半量追肥与全量追肥之间没有显著差异。类似地,不追肥情况下,禾稼春叶面肥处理的有效穗数和单穗籽粒数比不追肥对照分别高出 8.6%和 10.0% ($P<0.05$)。追施氮肥对水稻千粒质量有显著影响($P<0.05$),与不追肥对照相比,追施氮肥后千粒质量增幅为 1.9%~3.3%,但 2 种氮素水平之

间没有显著差异。单株产量和实测单位面积产量与此类似,半量追施氮肥处理比不追肥对照分别高出 27.9%和 42.74%,不追肥情况下,禾稼春处理比不追肥对照分别高出 14.6%和 20.9% ($P<0.01$),而半量追肥处理与全量追肥处理之间没有显著差异。由表 2 可以看出,不追施氮肥的产量最低,而半量追肥+禾稼春叶面肥处理的单穗籽粒数、千粒质量、单株产量和单位面积产量最高,其中单株产量和实测单位面积产量都显著高于全量追肥处理,说明在本试验条件下,每 667 m²施用 10 kg 尿素对水稻产量的促进效应与施用 5 kg 尿素的相似。施用过多的尿素并不能提高水稻产量,而在不追施氮肥情况下喷施叶面肥处理的水稻产量提高 9.4%,在半量追氮情况下喷施叶面肥的增产率为 16.4%。

表 2 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下水稻产量构成因素的影响

Table 2 Effect of Cropspring foliar fertilizer on yield components of rice grown under different nitrogen supplies

| 处理 | 有效穗数 | 单穗籽粒数 | 千粒质量 (g) | 单株产量 (g) | 实测单位面积 (667 m ²)产量 (kg) |
|-----------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------------------------------|
| 0 N (对照) | 13.60±4.67e | 58.45±6.78c | 23.00±0.12c | 38.15±2.36c | 466.11±2.04c |
| 0 N+禾稼春 | 15.38±7.32d | 62.21±5.45c | 23.07±0.07bc | 40.81±2.45c | 509.88±24.26b |
| 1/2 N | 20.00±6.10c | 77.56±7.96b | 23.42±0.24abc | 44.32±3.56c | 480.45±3.92bc |
| 1/2 N+禾稼春 | 21.65±8.42bc | 89.32±8.98a | 23.95±0.23a | 58.65±4.58a | 559.06±11.38a |
| 1 N | 25.32±9.52b | 81.34±8.19abc | 23.50±0.07abc | 50.24±3.55b | 473.14±4.00bc |
| 1 N+禾稼春 | 26.97±11.06a | 88.45±7.59ab | 23.61±0.20ab | 52.67±4.97bc | 475.36±7.09bc |

各处理见表 1 注。同一列中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.3 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下大米品质的影响

不同处理大米品质指标分析结果表明,糙米率、粒宽、垩白率、垩白度以及脂肪酸含量和食味值等多项指标并没有显著差异,而精米率、粒长、蛋白质含量、可溶性糖含量以及直链淀粉含量则出现不同程度变化(表 3)。其中,精米率、粒长受到氮素水平促进($F>F_{0.01}$),而禾稼春处理没有显著效应。追施 10 kg 尿素+禾稼春处理的精米率和粒长最高,比不追肥对照高出约 13%。大米蛋白质含量既没有受到氮素水平影响,也没受到禾稼春处理影响,但是,两者却存在互作效应($F>F_{0.05}$)。在 5 kg 尿素+禾稼春处理时,蛋白质含量最高,比不追肥对照高出 19%。其他处理与不追肥对照间均无显著差异。大米可溶性糖含量既受氮素水平影响,也受禾稼春叶面肥影响($F>F_{0.01}$),其中追施 5 kg 尿素处理的最高,其次

为 10 kg 尿素,不追施氮肥对照的最低,说明适当追施氮肥可以提高大米可溶性糖含量。禾稼春叶面肥处理显著提高大米可溶性糖含量,增幅为 5%,达到极显著水平($P<0.01$)。另外,大米直链淀粉含量不受氮素水平影响,而受到禾稼春叶面肥促进($F>F_{0.01}$),且两者还存在互作效应($F>F_{0.05}$),以 5 kg 尿素+禾稼春处理最高,比不追肥对照高出 17% ($P<0.05$)。表明氮素和禾稼春肥料处理可以不同程度地改善大米品质。

2.4 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下大米矿质营养元素含量的影响

2.4.1 大量、中量元素含量

方差分析结果表明,追施尿素对水稻米粒氮含量有显著影响($F>F_{0.05}$),但是,也并非尿素越多,米粒氮含量越高,而是追施 5 kg 尿素的米粒氮含量最高(表 4)。5 kg 尿素处理的氮含量比不追肥对照高出

50.7% ($P < 0.05$)。追施 10 kg 的氮含量也比不追肥对照高 35.2%, 但因标准差较大, 差异未达到显著水平。另外, 在不同氮素水平下, 喷施禾

稼春处理米粒氮含量也比未喷施禾稼春处理高, 但也因标准差大, 差异未达到显著水平。

表 3 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下水稻品质指标的影响

Table 3 Effect of Cropspring foliar fertilizer on quality indices of rice grown under different nitrogen supplies

| 处理 | 精米率 (%) | 粒长 (mm) | 蛋白质含量 (%) | 可溶性总糖含量 (%) | 直链淀粉含量 (%) |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 0 N(对照) | 74.14±6.09b | 5.35±0.52c | 6.83±0.99bc | 0.78±0.01c | 20.31±1.46b |
| 0 N+禾稼春 | 72.71±5.73b | 5.63±0.41abc | 6.91±1.34abc | 0.81±0.01bc | 20.46±2.15b |
| 1/2 N | 77.28±6.67ab | 5.41±0.56bc | 6.56±0.31c | 0.82±0.02bc | 20.02±2.23b |
| 1/2 N+禾稼春 | 79.28±6.17b | 5.45±0.55bc | 8.14±0.48a | 0.88±0.00a | 22.65±3.19a |
| 1 N | 79.21±4.25ab | 5.85±0.29ab | 7.94±0.98ab | 0.81±0.01bc | 20.54±1.49b |
| 1 N+禾稼春 | 83.71±2.42a | 6.02±0.41a | 7.02±0.74abc | 0.83±0.01b | 21.25±1.58ab |

各处理见表 1 注。同一列中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

与氮不同, 增施尿素和施用禾稼春对水稻米粒的磷含量均有显著影响 ($F > F_{0.01}$), 而且是施氮越多, 磷含量越高。其中, 追施 5 kg 尿素的磷含量比不追肥对照高出 22.4%, 追施 10 kg 后则高出 48.7%, 均达到极显著水平。在不同氮素水平下, 喷施禾稼春处理的磷含量比不喷施禾稼春处理高, 差异达到极显著水平。在 3 种氮素水平下, 禾稼春促进磷素水平提高的效应都非常稳定。

增施氮肥极显著提高大米中钾含量 ($F > F_{0.01}$), 而禾稼春处理没有类似效应, 但两者之间存在着互作效应。追施 5 kg 与 10 kg 尿素后大米钾含量都极显著高于不追肥对照, 两者增幅为 24.7% 和 26.2%, 两者间没有显著差异。另外, 氮肥追施与禾稼春处理存在互作效应, 在不追施氮肥或半量追氮时, 禾稼春处理大米的钾含量比不喷施处理高 10.3%、11.4%, 而追施 10 kg 尿素时, 禾稼春处理的钾含量只有不喷施处理的 78.4%。说明在氮素不足时, 喷施禾稼春, 可以提高大米钾含量; 但若施氮量过量, 再喷施禾稼春, 会导致大米钾含量下降。这是导致禾稼春处理没有效应的原因。

本研究观察到, 追施 5~10 kg 尿素对大米钙含量没有明显影响, 而施用禾稼春叶面肥则极显著增加米粒中钙含量 ($F > F_{0.01}$)。喷施禾稼春叶面肥的 3 种氮素水平处理大米钙素含量总平均值比不喷施处理高出 34.5%, 说明禾稼春叶面肥处理可以增加大米的钙含量 (表 4)。

尿素和禾稼春处理对大米镁含量有显著影响,

其中追施尿素的效应显著 ($F > F_{0.05}$), 禾稼春处理的效应极显著 ($F > F_{0.01}$), 而且两者之间存在互作效应。5 kg 与 10 kg 尿素处理间没有显著差异, 都显著高于不追肥对照, 增幅为 7.5%、8.1%。就两者互作而言, 不追施尿素时, 禾稼春处理使大米镁含量增加 5.5%, 而在施用 5 kg 和 10 kg 尿素时, 镁含量分别增加 7.8% 和 24.4%, 说明追氮量与禾稼春处理存在着加成效应。

施用尿素和禾稼春叶面肥对大米钠含量也有显著影响, 其中, 施用尿素会增加大米中钠含量, 而禾稼春处理显著减少钠含量。施用半量尿素的大米钠含量比不追肥对照高出 12.6%, 施用全量尿素的比不追肥对照高出 20.3%, 这些差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。不施氮或施全量氮时, 禾稼春处理对大米钠含量无显著效应, 半量施氮时, 禾稼春处理显著降低大米钠含量。

2.4.2 微量元素含量 大米中常见微量元素里铁和锰含量最高, 其次为锌, 然后是铜和硼, 后两者相差不大 (表 5)。方差分析结果显示, 氮素水平和禾稼春处理均对大米铁素营养有极显著影响 ($F > F_{0.01}$), 同时也存在互作效应。全量施氮的大米铁含量与不追肥对照无显著差异, 而半量施氮的比不追肥对照减少 23.2%, 原因有待进一步研究。就两因素互作而言, 在半量施氮和全量施氮时, 禾稼春处理显著提高大米铁含量, 而在不施氮肥时, 叶面肥处理效应不明显, 说明只有在追施氮肥的同时, 喷施禾稼春才能提高大米中铁离子含量。

表4 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下生长的水稻大米大量、中量营养元素含量的影响

Table 4 Effect of Cropspring foliar fertilizer on the content of mineral nutrient elements in the rice grain grown under different nitrogen supplies

| 处理 | 氮含量 (mg/g) | 磷含量 (mg/g) | 钾含量 (mg/g) | 钙含量 (mg/g) | 镁含量 (mg/g) | 钠含量 (mg/g) |
|-----------|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| 0 N(对照) | 17.36±1.88b | 7.47±0.13f | 8.54±0.09e | 0.041±0.003bc | 3.61±0.12c | 2.16±0.04b |
| 0 N+禾稼春 | 16.39 ±2.98b | 8.24±0.11e | 9.51±0.27d | 0.049 ±0.005abc | 3.81±0.12c | 2.27±0.07b |
| 1/2 N | 22.18 ±1.36ab | 9.25±0.06d | 10.84 ±0.09c | 0.037 ±0.004c | 3.86±0.09bc | 2.73±0.02a |
| 1/2 N+禾稼春 | 28.68 ±5.95a | 9.97±0.20c | 11.96 ±0.18b | 0.056±0.001a | 4.16±0.04ab | 2.27±0.00b |
| 1 N | 21.24±0.89ab | 10.71±0.24b | 12.62 ±0.34a | 0.039±0.005c | 3.56±0.15c | 2.68±0.03a |
| 1 N+禾稼春 | 24.36±4.09ab | 12.62±0.36a | 9.90 ±0.04d | 0.052 ±0.003ab | 4.43±0.09a | 2.67±0.03a |

各处理见表1注。同一列中不同字母表示在0.05水平上差异显著。

大米的锰含量也受到氮素水平和禾稼春处理的影响($F>F_{0.01}$),但两者间没有互作效应。从氮素水平上看,半量氮处理与不追肥对照间没有显著差异,而全量氮处理的锰含量比不追肥对照高出25.6% ($P<0.01$)。无论氮素水平如何,禾稼春处理对大米锰含量的促进作用都是明显的。

大米中锌含量不受氮素水平影响($F<F_{0.05}$),但受到禾稼春处理的影响,而且两因素间存在极显著的互作效应($F>F_{0.01}$),不施氮、半量氮和全量氮3种氮水平下,禾稼春处理的锌含量增幅分别为69.4%、41.7%和28.6%。说明氮素水平越低,禾稼春处理促进大米锌素营养水平的效应越强(表5)。

大米的铜素营养水平既受到氮素水平影响($F>F_{0.01}$),也受到禾稼春处理的影响,两者还存在着互

作效应($F>F_{0.05}$)。然而,半量施氮对大米铜素水平没有显著效应,只有全量施氮才极显著促进大米中铜含量增加,且增幅达46.0%。从互作效应上看,全量追氮时,禾稼春处理没有显著效应,而在不施氮和半量施氮时,禾稼春处理使铜含量分别增加53.3%和63.6%,达到极显著水平($P<0.01$),说明在氮素不足或适量条件下,禾稼春处理可以促进大米铜素水平上升。

大米硼含量与追氮水平有关($F>F_{0.05}$),但与禾稼春处理无关,而且两因素间没有互作效应。全量施氮处理的硼含量显著高于半量施氮和不施氮($P<0.05$),但半量施氮和不施氮间没有显著差异,说明在大量施氮时,大米中硼素水平明显提高。

表5 禾稼春叶面肥处理对不同氮素水平下生长的水稻大米微量元素含量的影响

Table 5 Effect of Cropspring foliar fertilizer on the content of micro elements in the rice grain grown under different nitrogen supplies

| 处理 | 铁含量(μg/g) | 锰含量(μg/g) | 锌含量(μg/g) | 铜含量(μg/g) | 硼含量(μg/g) |
|-----------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 0 N(对照) | 47.03±1.17b | 35.17±1.82c | 4.47±0.19c | 0.50±0.06cd | 0.23±0.03b |
| 0 N+禾稼春 | 42.87±2.20b | 42.27 ±0.50b | 7.57±0.09a | 0.77±0.07ab | 0.20±0.06b |
| 1/2 N | 27.97±0.23c | 35.67 ±0.50c | 5.03±0.32bc | 0.37±0.07d | 0.13±0.03b |
| 1/2 N+禾稼春 | 41.10±4.45b | 43.70±0.90b | 7.13±0.15a | 0.60±0.06bc | 0.30±0.06ab |
| 1 N | 46.93±2.66b | 44.3±0.90b | 5.60±0.25b | 0.97±0.12a | 0.33±0.09a |
| 1 N+禾稼春 | 62.67±0.03a | 53.40 ±0.47a | 7.20±0.15a | 0.87±0.03a | 0.47±0.09a |

各处理见表1注。同一列中不同字母表示在0.05水平上差异显著。

3 讨论

5-氨基乙酰丙酸(ALA)在农业生产实践上的应用研究已经有大量报道^[7-8,31-32]。在水稻上,Hotta等最早提出,ALA可以提高秧苗耐冷性^[33]。而且该效应与其提高水稻叶片抗氧化酶活性,减少活性氧积累,缓解PSII光抑制等效应有关^[34]。杨文平等认

为,在孕穗期叶面喷施适宜浓度ALA可以提高叶片光合速率,并增加产量^[35]。魏中伟等也认为,在齐穗期叶面喷施ALA溶液,可以显著提高晚稻叶片叶绿素含量、光合速率、干物质积累和经济产量,说明ALA在水稻生产上有着重要应用前景^[36]。利用沼泽红假单胞菌(*Rhodospseudomonas palustris*)发酵液(含有ALA)处理水稻,可以显著提高植株耐盐

性^[37]。由于这种发酵液价格低廉,有望代替商品性 ALA 运用于农业生产。

我们团队从本世纪初开始研究 ALA^[31],并且按照 NY1429-2010 标准^[38]研发出新型含氨基酸的水溶性肥料,获得国家发明专利^[39]。在芸豆^[23]、大豆^[24]、草莓^[25]、葡萄^[26]、梨^[27]和无花果^[28]等作物上,该肥料具有良好的生长促进效应。本研究首次将它运用于寒地水稻上,发现它也能促进水稻生长,提高产量,并且改善大米品质,从而为水稻增产增收提供了一种新的技术选择。

有关 ALA 促进植物生长并增加产量的机理,已有大量研究报告。目前已有的有:(1)促进光能吸收。由于 ALA 是植物叶绿素生物合成的关键前体^[40],添加外源 ALA 不仅促进叶绿素合成,而且调节叶绿素积累^[31,40],导致叶色浓绿,有利于光能吸收利用。(2)促进光合电子传递。ALA 还是血红素生物合成前体,后者为植物电子传递载体。在光反应中,无论是 PSII 供体侧、反应中心还是受体侧,施加 ALA 后光合电子传递速率均得到明显提高,而光抑制程度下降^[23,41-43]。(3)提高暗反应速率。RuBP 羧化酶是 CO₂ 固定的限速酶,外源 ALA 处理可以诱导 RuBP 羧化酶小亚基编码基因表达量上升^[44],提高羧化效率^[21,45]。(4)提高抗氧化酶活性。植物体内抗氧化酶例如过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POX)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)等,都以血红素为辅基,因而,ALA 处理可以诱导超氧化物歧化酶(SOD)、CAT、POX、APX 等活性上升,从而提高植物抗逆性^[8,46]。(5)提高逆境下光合积累。植物生长经常遭遇逆境。即使环境适宜,也存在着光合午休期。业已证明,施用外源 ALA 可以显著缓解植物叶片光合午休程度^[23],促进逆境下叶片光合积累^[47]。本研究也检测了禾稼春处理后水稻叶片叶绿素含量、叶绿素快速荧光特性以及抗氧化酶活性,发现与光合作用有关的指标都受到不同程度的促进,故而认为 ALA 促进水稻生长和增产的原因与其他作物相似。

本研究的重点在于禾稼春肥料对水稻矿质营养水平的促进效应。2015年3月中国农业部宣布,要在2020年实现农药化肥施用量零增长。国家之所以提出这一目标,很大程度上是针对当前农业增产片面倚重于增施化肥的问题。大量施用化肥会引起农田土壤酸化,有机质含量下降,地下水污染,农产

品品质下降^[48]。若不及时控制,必将影响农业可持续性发展^[5,49]。为此,国家要求综合运用施肥技术,逐渐减少并实现化肥施用量的零增长^[50]。因此,ALA 的作用值得关注。

Mishra 等发现,外源 ALA 可以诱导离体玉米叶片硝酸还原酶活性上升,并提高组织总氮和蛋白质含量^[51]。Iwai 等的研究结果表明,在水培条件下 ALA 促进辣椒和草莓对硝酸盐的吸收,并提高产量^[52]。Wei 等证明^[14],在不同氮素水平下,ALA 可以促进小白菜植株对氮素的吸收,并诱导硝酸还原酶(NR)编码基因表达上调,提高 NR 活性以及氨基酸和蛋白质含量,并减少硝酸盐积累。这些结果说明 ALA 能促进植物对氮素的吸收,提高肥料利用效率。本研究结果表明,氮素水平对水稻生长和产量都是重要因素,即使在东北黑土地上,不追施氮将导致植株生长受抑,产量下降。但是,过量追施尿素虽然促进植株营养生长,但不能继续增产。从本试验结果看,每 667 m² 追施 5 kg 尿素,是适宜施用量。如果此时再施用禾稼春氨基酸肥料,则不仅促进植株营养生长,而且提高产量,并改善大米品质。半量追肥+禾稼春处理的大米可溶性糖和直链淀粉含量均显著高于其他处理,说明它可以增进米饭的口感。另外,禾稼春处理后大米氮素含量比对照高出 14.2%。这与 Wei 等报道的小白菜增加 17.6%^[14]以及 Iwai 等报道的草莓增加 16%^[52]相近,说明禾稼春肥料和 ALA 纯品相似,都能促进植物组织氮素积累。由此可见,禾稼春肥料能促进水稻植株对氮肥的吸收,提高氮素利用效率,可以在农业减肥增产中发挥独特功效。

本研究中观察到禾稼春叶面肥处理可以提高稻米中多种营养元素含量。比如磷,无论是氮素水平还是禾稼春处理对磷含量都有显著促进效应。这与姚素梅等利用³²P 观察到的 ALA 促进水稻磷素水平提高的结果^[13]相似,证明禾稼春叶面肥可以促进水稻磷素积累。然而,对钾素的效应与此不同,禾稼春叶面肥在不施氮或半量施氮条件下可以促进稻米钾含量增加,而在全量施氮时,钾素水平反而降低。任忠秀等^[53]报道,一种含有 ALA 的水溶性肥料可以促进月季植株对钾素吸收,提高钾含量。但是,根灌 ALA 溶液会降低苹果叶片钾含量^[11];在过量合成内源 ALA 的转基因油菜上,无论盐胁迫与否,转基因植株叶片钾含量均显著低于野生型,高水平内源

ALA 反而降低叶片钾含量^[54]。在苹果上,ALA 灌根能提高苹果叶片 Ca、Mg、Fe、Cu、Zn 等元素含量^[11]。本研究结果与此类似。经禾稼春处理的大米中钙含量平均增加 25%,镁平均增加 12.8%,铁平均增加 21.5%,锰平均增加 21.1%,锌平均增加 45.1%,铜平均增加 21.3%,但是硼含量没有变化。这些结果与椰枣^[15]和油菜^[17]上的研究结果基本相似。另外,在半量施氮时,禾稼春处理减少稻米钠含量。这与在棉花^[16]、苹果^[11]和转基因油菜^[54]上的研究结果相似,说明 ALA 抑制钠离子从根系向地上器官运输。这也是一个重要的耐盐机制。

ALA 与植物矿质营养的关系是一个崭新的课题。目前观察到的都是表现现象,其深层机理还远未阐明。植物对矿质元素的吸收运输既有主动过程,也有被动过程,其中共质体运输涉及到载体蛋白,而木质部导管运输主要靠蒸腾拉力。近年来的研究结果证明,ALA 可以促进植物叶片气孔开放^[22],增加蒸腾速率^[21],这不仅有利于 CO₂ 进入叶肉细胞,而且增强根系活力,带动根系吸水。我们推测,含有 ALA 的禾稼春肥料可以促进水稻叶片气孔开放,增加蒸腾拉力,促进土壤溶液中矿质营养元素进入根系内皮层,而后在木质部蒸腾拉力作用下运输至地上部,从而提高大米矿质营养水平。这种“以水换肥”方式,可以减少化肥使用量,增进稻米营养品质,而且比单纯增施某种肥料的效果更为简单而有效。

参考文献:

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2015[M]. 北京:中国农业出版社, 2016.
- [2] 孙岩松. 东北寒地稻区稻米品质评价及其影响因素分析[J]. 中国稻米, 2007, 13(2): 17-19.
- [3] 李辉,张瑞英,戴常军,等. 东北三省水稻品质差异性比较[J]. 中国稻米, 2013, 19(2): 18-22.
- [4] 林建材,李艳红,曲日涛. 化肥滥用隐患及对策研究[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(22): 66-68.
- [5] CHENG Z H, LUO F. Assessment of economic losses on agricultural non-point source pollution by abuse of fertilizer in Manasi River Basin of China[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1073-1076: 484-488.
- [6] BEALE S I. Biosynthesis of the tetrapyrrole pigment precursor, δ -aminolevulinic acid, from glutamate[J]. Plant Physiol, 1990, 93: 1273-1279.
- [7] HOTTA Y, TANAKA T, TAKAOKA H, et al. Promotive effects of 5-aminolevulinic acid on the yield of several crops[J]. Plant Growth Regul, 1997, 22: 109-114.
- [8] AKRAM N A, ASHRAF M. Regulation in plant stress tolerance by a potential plant growth regulator, 5-aminolevulinic acid[J]. J Plant Growth Regul, 2013, 32: 663-679.
- [9] 李小玲,华智锐,张丹婷. 5-氨基乙酰丙酸(ALA)对秦岭高山杜鹃耐盐性的诱导效应[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(20): 176-179.
- [10] 汪良驹,刘卫琴,孙国荣,等. ALA 对萝卜不同叶位叶片光合作用与叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2005, 25(3): 488-496.
- [11] 张丽颖,冯新新,高晶晶,等. 根际浇灌 ALA 溶液对苹果叶片生理特性与果实品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(1): 158-165.
- [12] 安玉艳,冯新新,丁恒毅,等. 5-氨基乙酰丙酸(5-ALA)对春茶生长与品质成分的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 224-228.
- [13] 姚素梅,王维金,陈国兴. 5-氨基酮戊酸对水稻植株中³²P 吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 70-75.
- [14] WEI Z Y, ZHANG Z P, LEE M R, et al. Effect of 5-aminolevulinic acid on leaf senescence and nitrogen metabolism of pakchoi under different nitrate levels[J]. J Plant Nutrition, 2012, 35(1): 49-63.
- [15] AWAD M A. Promotive effects of a 5-aminolevulinic acid-based fertilizer on growth of tissue culture-derived date palm plants (*Phoenix dactylifera* L.) during acclimatization[J]. Sci Hortic, 2008, 118: 48-52.
- [16] WATANABE K, TANAKA T, HOTTA Y, et al. Improving salt tolerance of cotton seedlings with 5-amino-levulinic acid[J]. Plant Growth Regul, 2000, 32(1): 99-103.
- [17] NAEEM M S, JIN Z L, WAN Z L, et al. 5-Aminolevulinic acid improves photosynthetic gas exchange capacity and ion uptake under salinity stress in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Plant Soil, 2010, 332: 405-415.
- [18] 陈令会,刘龙博,安玉艳,等. 外源 5-氨基乙酰丙酸促进苹果叶片气孔开放机理的初探[J]. 园艺学报, 2014, 41(10): 1965-1974.
- [19] AN Y Y, FENG X X, LIU L B, et al. ALA-induced flavonols accumulation in guard cells is involved in scavenging H₂O₂ and inhibiting stomatal closure in *Arabidopsis* cotyledons[J]. Front Plant Sci, 2016, 7: 1713.
- [20] LIU L B, XIONG L J, AN Y Y, et al. Flavonols induced by 5-aminolevulinic acid are involved in regulation of stomatal opening in apple leaves[J]. Hortic Plant J, 2017, 2(6): 323-330.
- [21] WANG L J, JIANG W B, HUANG B J. Promotion of 5-aminolevulinic acid on photosynthesis of melon (*Cucumis melo*) seedlings under low light and chilling stress conditions[J]. Physiol Plant, 2004, 121: 258-264.
- [22] AN Y Y, LIU L B, CHEN L H, et al. ALA inhibits ABA-induced

- stomatal closure via reducing H_2O_2 and Ca^{2+} levels in guard cells [J]. *Front Plant Sci*, 2016, 7:482.
- [23] 孙新娥,申明,王中华,等.两种叶面肥对日光温室芸豆叶片光合作用和果实品质的影响[J].南京农业大学学报,2011,34(3):37-42.
- [24] 段春慧,申明,张治平,等.氨基酸肥料对大豆叶片光合作用与产量的影响[J].南京农业大学学报,2012,35(4):15-20.
- [25] 成学慧,冯新新,张治平,等.“爱乐壮”氨基酸肥料对大棚草莓叶片光合效率和产量的影响[J].果树学报,2012,29(5):883-889.
- [26] 谢荔,成学慧,冯新新,等.氨基酸肥料对‘夏黑’葡萄叶片光合特性与果实品质的影响[J].南京农业大学学报,2013,36(2):31-37.
- [27] 申明,成学慧,谢荔,等.氨基酸叶面肥对砂梨叶片光合作用的促进效应[J].南京农业大学学报,2012,35(2):81-86.
- [28] 马娜,齐琳,高晶晶,等.5-ALA对高温下无花果扦插幼苗的生长及叶片叶绿素荧光特性的影响[J].南京农业大学学报,2015,38(4):546-553.
- [29] 唐瑞明,龙伶俐,朱之光,等.优质稻谷:GB/T17891—2017[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [30] 李红宇.我国东北地区水稻产量和品质及遗传多样性研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2009.
- [31] 汪良驹,姜卫兵,章镇,等.5-氨基乙酰丙酸的生物合成和生理活性及其在农业中的潜在应用[J].植物生理学通讯,2003,39(3):185-192.
- [32] 李素华,庄文明,朱孔杰,等.5-氨基乙酰丙酸在农业中的作用及应用[J].山东化工,2016,45(22):82-83.
- [33] Hotta Y, Tanaka T, Luo B S, et al. Improvement of cold resistance in rice seedlings by 5-aminolevulinic acid [J]. *J Pesticide Sci*, 1998, 23(1):29-33.
- [34] 刘芳,郭晶晶,龚丽丽,等.5-氨基乙酰丙酸促进水稻耐低温光抑制与抗氧化酶活性有关[J].中国水稻科学,2008,22(4):411-415.
- [35] 杨文平,王春虎,李恒昌.叶面喷施ALA对水稻豫粳6号光合特性及产量的影响[J].广东农业科学,2011(4):36-37.
- [36] 魏中伟,马国辉,龙继锐,等.5-氨基乙酰丙酸叶面肥对杂交晚稻光合作用和产量的影响[J].湖南农业科学,2013(7):65-67,72.
- [37] Nunkaew T, Kantachote D, Kanzaki H, et al. Effects of 5-aminolevulinic acid (ALA)-containing supernatants from selected *Rhodospseudomonas palustris* strains on rice growth under NaCl stress, with mediating effects on chlorophyll, photosynthetic electron transport and antioxidative enzymes [J]. *Electronic J Biotechnol*, 2014, 17: 19-26.
- [38] 王旭,封朝晖,刘红芳,等.含氨基酸水溶肥料:NY1429—2010[S].北京:中国农业出版社,2011.
- [39] 汪良驹,张治平,成学慧,等.一种高效生物氨基酸液态肥料:ZL201010204235.4[P].2012-11-21.
- [40] Jahn D, Heinz D W. Biosynthesis of 5-aminolevulinic acid: Birth, lift and death [M]. Landes: Bioscience and Springer Science+Business Media, 2009:29-42.
- [41] Xu F, Cheng S Y, Zhu J, et al. Effects of 5-aminolevulinic acid on chlorophyll, photosynthesis, soluble sugar and flavonoids of *Ginkgo biloba* [J]. *Not Bot Hort Agrobot Cluj*, 2011, 39(1): 41-47.
- [42] 康琅,汪良驹.ALA对西瓜叶片叶绿素荧光响应曲线的影响[J].南京农业大学学报,2008,31(1):31-36.
- [43] 孙永平,张治平,徐呈祥,等.5-氨基乙酰丙酸处理对低温下西瓜叶片快速叶绿素荧光诱导曲线的影响[J].园艺学报,2009,36(5):671-678.
- [44] Shen M, Zhang Z P, Wang L J. Effect of 5-aminolevulinic acid on leaf diurnal photosynthetic characteristics and antioxidant activity in pear (*Pyrus pyrifolia* Nakai): Artificial photosynthesis [M]. Rijeka: InTech, 2012:239-265.
- [45] 刘卫琴,康琅,汪良驹.ALA对草莓光合作用的影响及其与抗氧化酶的关系[J].西北植物学报,2006,26(1):57-62.
- [46] Nishihara E, Kondo K, Parvez M M, et al. Role of 5-aminolevulinic acid (ALA) on active oxygen-scavenging system in NaCl-treated spinach (*Spinacia oleracea*) [J]. *J Plant Physiol*, 2003, 160:1085-1091.
- [47] Youssef T, Awad M A. Mechanisms of enhancing photosynthetic gas exchange in date palm seedlings (*Phoenix dactylifera* L.) under salinity stress by a 5-aminolevulinic acid-based fertilizer [J]. *J Plant Growth Regul*, 2008, 27(1): 1-9.
- [48] 于日新,张文辉.化肥过量使用的危害及对策[J].农民致富之友,2012(13):50.
- [49] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test [J]. *Field Crops Research*, 2008, 105: 48-55.
- [50] 王立士.实现农作物化肥使用零增长技术措施探讨[J].农业与技术,2015,35(18):9.
- [51] Mishra S N, Srivastava H S. Stimulation of nitrate reductase activity by delta aminolevulinic acid in excised maize leaves [J]. *Experientia*, 1983, 39: 1118-1120.
- [52] Iwai K, Saito A, Van Leeuwen J, et al. A new functional fertilizer containing 5-aminolevulinic acid promoted hydroponically-grown vegetables in the Netherlands [J]. *Acta Hort*, 2005, 697: 351-355.
- [53] 任忠秀,聂立水,张强,等.含5-氨基乙酰丙酸等养分水溶肥料对月季生长、开花及体内养分元素含量的影响[J].中国土壤与肥料,2011(4):59-64.
- [54] Sun X E, Feng X X, Li C, et al. Study on salt tolerance with *YHem1* transgenic canola (*Brassica napus*) [J]. *Physiol Plant*, 2015, 154: 223-242.

(责任编辑:张震林)