

曹小闯, 李烨锋, 吴龙龙, 等. 氨基酸水溶肥施用模式对水稻氮素吸收和转运的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 888-895.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.012

氨基酸水溶肥施用模式对水稻氮素吸收和转运的影响

曹小闯¹, 李烨锋¹, 吴龙龙¹, 田 仓^{1,2}, 朱春权¹, 朱练峰¹, 孔亚丽¹, 金千瑜¹,
张均华¹

(1. 中国水稻研究所水稻生物学国家重点实验室, 浙江 杭州 311400; 2. 长江大学农学院, 湖北 荆州 434023)

摘要: 采用大田小区试验研究了不同时期喷施氨基酸水溶肥对水稻产量、氮素吸收和转运的影响。结果表明, 氨基酸水溶肥浸种以及分蘖期、破口前5~7 d和抽穗期喷施氨基酸水溶肥处理(T3), 秧苗期、破口前5~7 d和抽穗期喷施氨基酸水溶肥处理(T5), 氨基酸水溶肥浸种以及秧苗期、分蘖期、破口前5~7 d和抽穗期喷施氨基酸水溶肥处理(T6)水稻产量较高, 分别达8 355 kg/hm²、8 259 kg/hm²和8 313 kg/hm², 较常规施肥处理(T1)显著增产7.2%、6.0%和6.7%。这可能与上述时期喷施氨基酸水溶肥能提高水稻千粒质量有关。与T1处理相比, 各水溶肥施用组合均能显著增加齐穗期叶片、成熟期穗氮含量和分蘖盛期至齐穗期茎鞘氮素累积速率; T3、T5、T6处理显著增加齐穗期至成熟期叶片氮素转运量及氮素转运率, 并提高水稻氮素回收利用率。水稻产量与抽穗前营养器官(茎鞘、叶片)氮素累积量、抽穗后叶片向穗的氮素转运量呈显著正相关关系。总之, 通过施用氨基酸水溶肥增加水稻营养器官氮素累积量以及叶片氮素向穗转运, 有利于提高水稻产量和氮素利用率, 其中以秧苗期、破口前5~7 d和抽穗期喷施3次氨基酸水溶肥(T5处理)效果较好。

关键词: 氨基酸水溶肥; 氮素累积; 氮素转运; 氮素利用率; 水稻

中图分类号: S511.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0888-08

Effects of different application patterns of amino acid soluble fertilizer on nitrogen accumulation and translocation in rice

CAO Xiao-chuang¹, LI Ye-feng¹, WU Long-long¹, TIAN Cang^{1,2}, ZHU Chun-quan¹, ZHU Lian-feng¹,
KONG Ya-li¹, JIN Qian-yu¹, ZHANG Jun-hua¹

(1. State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 311400, China; 2. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: To study the effects and reasonable usage time of the amino acid soluble fertilizer (AASF) in rice, the yield, nitrogen (N) accumulation and translocation in different application patterns were studied through the field experiment. Results demonstrated that rice yields were relative higher in the three following treatments, spraying AASF at seed soaking, tillering, 5-7 days before rupturing and heading stages (T3); spraying AASF at seedling, 5-7 days before rupturing and heading stages (T5); and spraying AASF at seed soaking, seedling, tillering, 5-7 days before rupturing stage and heading stages (T6). Their yield values were 8 355 kg/hm², 8 259 kg/hm² and 8 313 kg/hm², respectively, and significantly increased by 7.2%, 6.0% and 6.7% in relative to the control treatment (T1), which likely attributed to the increased thousand seed weight of rice. Compared with the T1 treatment, AASF application significantly improved the N contents of leaf in heading stage, N contents of panicle in maturity stage, and the N accumulation rate of stem-sheath in tillering-heading period. In addition, the N

收稿日期: 2020-01-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300106, 2016YFD0200800)

作者简介: 曹小闯(1985-), 男, 河南南阳人, 博士, 副研究员, 从事稻田养分资源管理研究。(E-mail) caoxiaochuang@126.com

通讯作者: 张均华, (E-mail) zhangjunhua@caas.cn

increased thousand seed weight of rice. Compared with the T1 treatment, AASF application significantly improved the N contents of leaf in heading stage, N contents of panicle in maturity stage, and the N accumulation rate of stem-sheath in tillering-heading period. In addition, the N

translocation and translocation rate of leaf from the heading to maturity stage, and rice N recovery efficiency were all significantly increased in the T3, T5 and T6 treatments. There were significant positive correlations between rice yield and the N accumulation in leaf and stem-sheath before the heading stage, and rice yield was also significant and positive related to the N translocation of leaf from the heading to maturity stage. Therefore, maintaining the relative higher N accumulation of stems-sheaths and leaves in the vegetative period, and the higher N translocation from leaves to panicles via the application of AASF are benefit for grain yield increasing. And the optimal application method is spraying the AASF three times at seedling, 5–7 days before rupturing and heading stages.

Key words: amino acid soluble fertilizer; nitrogen accumulation; nitrogen translocation; nitrogen use efficiency; rice

水稻是中国的主要粮食作物,水稻生产中长期以来存在施肥量大、肥料利用率较低(仅 30% ~ 35%)等问题^[1],导致了土壤板结、酸化、环境污染和生态平衡破坏等诸多问题,严重威胁粮食安全、农产品质量和生态安全。近年来,国内利用田间长期肥料定位试验,开展了一系列基于氮肥运筹^[2]、农业废弃物有机替代^[3]、新型肥料应用^[4]、水肥一体化^[2]等绿色高效施肥技术研究,为农作物高效施肥提出了很多合理化建议。随着施肥技术的发展,通过新材料、新方法或新工艺制备新型肥料已成为提高作物肥料利用率的重要措施^[5]。其中,氨基酸水溶肥富含促进植物生长发育所需的中微量营养元素,具有全水溶、高活性、营养丰富、针对性强、吸收速率快等优势,在作物生长发育、养分吸收转运、作物营养生物强化和抗逆调控等方面均有明显的促进和激活作用^[5-6]。

叶片是植物最重要的根外营养器官,植物能通过叶片表面快速吸收利用各种养分。理论上,在作物生长过程中任何阶段都可进行叶面施肥。然而,不同叶龄作物的叶片代谢活力、细胞膜通透性、角质层及蜡质层组成等的差异显著影响叶面养分吸收效果,作物不同生育时期叶面养分利用效率存在很大差异^[5]。有研究者发现小麦同叶位叶面养分摄入量孕穗期明显高于齐穗期,但地上部的回收率在生殖生长期反而高于营养生长期;作物生长后期,根系吸收能力降低,叶面施肥可以及时补充作物所需的养分,有利于作物延迟衰老和增产^[7]。高翔等研究发现水稻返青期喷施叶面肥可以增加分蘖数,但成穗率低于空白对照处理,不同类型叶面肥增产效果差异显著;水稻关键生育期全程喷施叶面肥处理水稻有效穗数、成穗率和产量均要高于其他时期单独喷施叶面肥处理^[8]。抽穗期是水稻产量形成的关键时期,翟虎渠等认为水稻产量高低与抽穗前后叶片光合性能紧密相关^[9]。因此,该时期喷施叶面肥有利于维持水稻功能叶较高的光

合性能,促进干物质的合成和籽粒灌浆并提高产量^[10]。目前市场上不同类型叶面肥施肥效果差异较大^[11]。一方面,这可能与叶面肥质量良莠不齐、缺乏规范的市场监管机制有关;另一方面,这可能也与作物叶片对养分的吸收效果受叶片类型、自身营养状况、生育时期、环境条件、叶面肥性质等诸多因素影响有关^[8,12-13]。

因此,根据水稻各生育期养分需求特性,通过优化叶面肥最佳喷施时期、组合模式保持或提高水稻生育后期叶片光合能力,延缓衰老进程,对于获得高产具有重要意义。本研究以籼型三系杂交水稻中浙优 8 号为供试材料,通过研究不同时期施用氨基酸水溶肥及其组合对水稻氮素吸收转运、产量和氮素利用率的影响,以期优化氨基酸水溶肥最佳施用时期及大面积推广应用提供参考和理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试田块概况

试验于 2019 年在中国水稻研究所富阳试验基地进行,试验田基础设施良好,排灌条件良好。供试土壤为青紫泥,pH 6.9,有机质 36.8 g/kg,全氮 2.65 g/kg,有效磷 17.0 mg/kg,速效钾 54.1 mg/kg,碱解氮 142 mg/kg。

1.2 试验材料

供试水稻品种为当地主栽水稻品种中浙优 8 号(浙审稻 2006002)。供试含氨基酸有机水溶肥由衡阳瑞秣森农业发展有限公司提供,主要成分为氨基酸(≥ 100 g/L)、锌+硼(≥ 20 g/L)。其余肥料尿素(N 46%)、氯化钾(K_2O 60%)和过磷酸钙(P_2O_5 12%)采购于当地。

1.3 试验设计

试验设 7 个处理:T1(常规施肥),氮肥纯量 180 kg/hm²按照基肥:分蘖肥:穗肥=5.0:2.5:2.5 分 3 次施入,磷肥纯量 90 kg/hm²一次性基施,钾肥

纯量 120 kg/hm²按基肥和保花肥=5:5分2次施入;T2,常规施肥基础上,秧苗期+破口前5~7 d施用氨基酸水溶肥2次;T3,常规施肥基础上,氨基酸水溶肥浸种+分蘖期+破口前5~7 d+抽穗期施用氨基酸水溶肥;T4,常规施肥基础上,秧苗期+分蘖期+破口前5~7 d施用氨基酸水溶肥;T5,常规施肥基础上,秧苗期+破口前5~7 d+抽穗期施用氨基酸水溶肥;T6,常规施肥基础上,氨基酸水溶肥浸种+秧苗期+分蘖期+破口前5~7 d+抽穗期施用氨基酸水溶肥;T7(空白对照),不施氮肥,其他肥料同T1。

叶面肥施用与农药“三防两控”相结合,二者混施对叶面肥和农药效果均无影响。分别在水稻秧苗期(幼苗移栽前1~3 d,秧田病虫第2次防治用药)、分蘖期(移栽后30 d左右,大田病虫第1次防治用药)、破口前5~7 d(大田病虫第3次防治用药)、抽穗期喷施氨基酸水溶肥,施用量分别为450 g/hm²(1:600稀释)、900 g/hm²(1:300稀释)、900 g/hm²(1:200稀释)和900 g/hm²(1:200稀释),浸种时1 kg种子施用2 g氨基酸水溶肥(1:800稀释)。

各处理重复3次,随机区组排列,小区面积22 m²,单独排灌。小区田埂用防水薄膜覆盖,隔离防渗。2019年5月22日育秧,6月20日插秧,10月7日收获。叶面肥分别在7月4日、8月18日和9月9日人工喷施。病、虫、草害防控都按当地常规田间管理进行。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 氮含量 分别在水稻分蘖盛期(7月22日)、齐穗期(8月28日)和成熟期(10月5日)采集各小区有代表性的3穴水稻样品,分成茎鞘(包含茎和叶鞘)、叶片、穗3部分,105℃杀青30 min,75℃烘干至恒质量。样品磨细后采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,凯氏定氮法测定水稻各部位氮含量。

1.4.2 产量及其构成因子 成熟后,每小区调查连续横10丛、竖10丛的有效穗数,按小区平均有效穗数取3丛考察每穗粒数、每穗秕粒数、千粒质量和结实率,各小区实收测产。

1.4.3 数据处理与分析 水稻氮素积累、转运与肥料利用率相关计算方法如下^[14]:氮素积累量(kg/hm²)=某生育期单位面积氮素积累量;氮素积累速率[kg/(hm²·d)]=某生育阶段单位面积单位时间某器官的氮积累量;氮素转运量(kg/hm²)=抽穗

期至成熟期单位面积某器官氮素积累量;氮素转运率(%)=植株叶片和茎鞘的氮素转运量/抽穗期叶片和茎鞘的氮素积累量×100%;氮素转运贡献率(%)=茎鞘和叶片的氮素转运量之和/抽穗至成熟期穗部氮素积累总量×100%;氮肥回收效率(%)=(施氮区氮素积累量-空白区氮素积累量)/施氮量×100%;氮素生理利用率(kg/kg)=(施氮区产量-空白区产量)/(施氮区氮素积累量-空白区氮素积累量)。所有数据均采用Microsoft excel 2010和SPSS数据分析软件包进行数据整理和方差分析,用LSD_{0.05}(Least significant difference test)进行差异显著性多重比较。

2 结果与分析

2.1 氨基酸水溶肥对水稻产量及其构成因子的影响

如表1所示,T3处理水稻产量最高,达到8355 kg/hm²,但与T5、T6处理无显著差异。与T1处理相比,各时期施用氨基酸水溶肥均增加水稻产量,T3、T4、T5、T6处理水稻产量较T1处理分别显著增加7.2%、3.0%、6.0%和6.7%(P<0.05)。从产量构成因子来看,各施肥处理(除T7外)对水稻有效穗数均无显著影响。与T2处理相比,T4处理分蘖期增施氨基酸水溶肥虽然显著提高了穗粒数,但对水稻产量无显著影响;T5处理抽穗期增施氨基酸水溶肥提高了每穗穗粒数,也显著提高了水稻产量。与T1处理相比,T3、T6处理显著增加水稻千粒质量,其他各喷施氨基酸水溶肥处理虽然也能一定程度提高水稻穗粒数、结实率和千粒质量,但差异不显著。

2.2 氨基酸水溶肥对水稻主要生育期各器官氮含量的影响

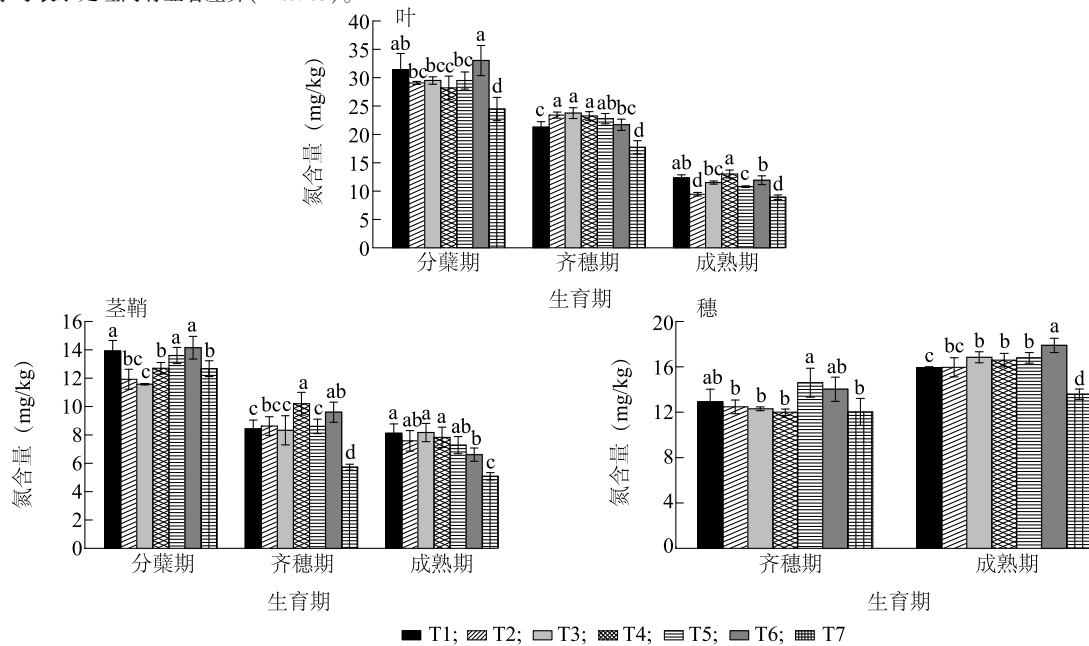
随生育进程推进,水稻茎鞘和叶片氮含量逐渐下降,穗氮素含量在成熟期较抽穗期显著增加(图1)。分蘖盛期,T6处理叶片和茎鞘氮含量最高;茎鞘氮含量在T6、T5和T1各处理间无显著差异,但显著高于T2、T3和T4各处理。齐穗期,叶片氮含量T2、T3、T4、T5处理均显著高于T1处理;茎鞘氮含量T4、T6处理显著高于T1、T3、T5处理;穗部氮含量T5处理较高,显著高于T2、T3、T4处理,但与T1、T6处理无显著差异。成熟期,除T1处理外,T4处理叶片氮含量显著高于其他各处理;茎鞘氮含量T1、T3、T4处理显著高于T6,但与T2、T5处理差异不显著;穗部氮含量T6处理最高,达17.89 mg/kg,且喷施氨基酸水溶肥各处理均显著高于不喷施处理。

表 1 不同氨基酸水溶肥处理的水稻产量及其构成因子

Table 1 Rice yield and its yield components in different amino acid soluble fertilizer treatments

处理	有效穗数 ($\times 10^4$, 1 hm ²)	千粒质量 (g)	穗粒数	结实率 (%)	产量 (kg/hm ²)	较 T1 增产量 (kg/hm ²)	较 T1 增产率 (%)
T1	15.7 \pm 0.1a	25.7 \pm 0.1b	155.2 \pm 3.6ab	83 \pm 0.6bc	7 791 \pm 60c	—	—
T2	15.8 \pm 0.2a	25.6 \pm 0.1b	153.0 \pm 1.6b	86 \pm 1.1a	7 998 \pm 74bc	207	2.7
T3	15.9 \pm 0.1a	26.1 \pm 0.2a	158.8 \pm 1.6a	85 \pm 1.5ab	8 355 \pm 60a	564	7.2
T4	15.8 \pm 0.2a	25.8 \pm 0.2ab	157.6 \pm 1.8a	82 \pm 0.4c	8 028 \pm 56b	237	3.0
T5	16.0 \pm 0.1a	25.9 \pm 0.1ab	158.7 \pm 1.5a	85 \pm 1.0ab	8 259 \pm 60a	468	6.0
T6	16.0 \pm 0.1a	26.1 \pm 0.1a	158.8 \pm 3.1a	85 \pm 0.5abc	8 313 \pm 465a	522	6.7
T7	14.2 \pm 0.2b	25.6 \pm 0.1b	151.0 \pm 2.8b	82 \pm 0.5c	6 809 \pm 89d	—	—

T1: 常规施肥; T2: 常规施肥基础上秧苗期+破口前5~7 d 喷施氨基酸水溶肥; T3: 常规施肥基础上氨基酸水溶肥浸种+分蘖期+破口前5~7 d+抽穗期喷施氨基酸水溶肥; T4: 常规施肥基础上秧苗期+分蘖期+破口前5~7 d 喷施氨基酸水溶肥; T5: 常规施肥基础上秧苗期+破口前5~7 d+抽穗期喷施氨基酸水溶肥; T6: 常规施肥基础上氨基酸水溶肥浸种+秧苗期+分蘖期+破口前5~7 d+抽穗期喷施氨基酸水溶肥; T7: 空白对照。同一列不同字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。



T1~T7 处理见表 1 注。不同字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。

图 1 不同氨基酸水溶肥处理水稻各生育期茎鞘、叶片和穗部氮含量

Fig.1 Nitrogen contents in stems-sheaths, leaves and panicles of rice at different growth stages in different amino acid soluble fertilizer treatments

2.3 氨基酸水溶肥对水稻主要生育期各器官氮素积累量的影响

水稻茎鞘氮素积累量呈现先增加后降低的趋势;穗氮积累量、总氮积累量从齐穗期到成熟期显著增加,叶片呈现相反趋势(表 2)。具体来讲,分蘖盛期、齐穗期和成熟期水稻叶片氮素积累量、比例平均分别为 80.7 kg/hm² 和 62.8%、77.5 kg/hm² 和 42.4%、31.7 kg/hm² 和 11.5%,茎鞘氮素积累量、比例平均分别为 47.4 kg/hm² 和 37.2%、76.3 kg/hm² 和 41.9%、43.4 kg/hm² 和 15.8%;齐穗期、成熟期穗氮素积累量、比例平均分别为 28.3 kg/hm² 和

15.7%、198.3 kg/hm² 和 72.7%。

与 T1 处理相比,各喷施氨基酸水溶肥处理对分蘖期(T6 除外)和齐穗期茎鞘氮素积累量及比例均无显著影响($P>0.05$)。分蘖盛期 T6 处理叶片氮素积累量最高,达到 99.4 kg/hm²,显著高于其他各处理;齐穗期叶片氮素含量和比例在 T1~T6 各处理间无显著差异;成熟期叶片氮素积累量在 T1、T3、T5 处理间无显著差异,T6 处理显著高于 T2 处理,但低于 T4 处理。成熟期,T6 处理穗氮素积累量最高,达到 233.0 kg/hm²,较 T1 处理增加 17.6%,但 T2、T3、T4、T5 与 T1 处理间无显著差异。

表 2 水稻主要生育期茎鞘、叶片和穗氮素积累量及其比例

Table 2 Nitrogen accumulation and its proportion in stems-sheaths, leaves and panicles of rice at different growth stages

生育时期	处理	茎鞘		叶片		穗		总氮素积累量 (kg/hm ²)
		氮素积累量 (kg/hm ²)	比例 (%)	氮素积累量 (kg/hm ²)	比例 (%)	氮素积累量 (kg/hm ²)	比例 (%)	
分蘖盛期	T1	50.4ab	36.4b	88.0b	63.6a	—	—	138.3b
	T2	44.2bc	36.3b	77.2b	63.7a	—	—	121.3c
	T3	46.2bc	34.9b	86.8b	65.1a	—	—	133.0bc
	T4	47.3b	38.1b	77.7b	61.9bc	—	—	125.0bc
	T5	48.0b	38.2ab	77.8b	61.8bc	—	—	125.8bc
	T6	55.6a	35.8b	99.4a	64.2a	—	—	154.9a
	T7	39.9c	40.6a	58.2c	59.4c	—	—	98.1d
齐穗期	T1	76.5a	40.9a	82.3a	44.2a	28.1bc	14.9bc	186.9a
	T2	81.4a	44.2a	76.1a	41.5a	26.4bc	14.3bc	183.8a
	T3	75.8a	39.7a	86.1a	44.2a	31.2ab	16.1a	193.1a
	T4	83.2a	44.9a	78.1a	42.0a	24.4c	13.2c	185.7a
	T5	81.2a	39.9a	88.1a	43.6a	33.3a	16.4a	202.7a
	T6	83.3a	43.0a	81.0a	42.1a	28.5bc	15.0bc	192.8a
	T7	53.1b	41.1a	50.6b	39.0a	26.0bc	20.0a	129.7b
成熟期	T1	46.1ab	16.5bc	34.8bc	12.5b	198.1bc	71.0c	278.9b
	T2	53.5a	19.8a	25.0d	9.2c	191.7c	71.0c	270.2b
	T3	46.7ab	16.4bc	29.6cd	10.6bc	205.2bc	73.1bc	281.5b
	T4	47.4ab	16.8bc	43.8a	15.4a	193.0bc	67.9d	284.3ab
	T5	44.7ab	15.4c	33.7bc	11.6b	212.1b	73.0bc	290.5ab
	T6	40.0b	12.9d	37.0b	12.1b	233.0a	75.1b	310.0a
	T7	25.5c	12.9d	18.1e	9.2c	155.0d	78.0a	198.7c

T1~T7 处理见表 1 注。同一列不同字母表示处理间有显著差异 ($P<0.05$)。

2.4 氨基酸水溶肥对水稻各器官抽穗前氮素积累速率的影响

从表 3 可知,与 T1 处理相比,T2、T3、T4、T5 处理播种至分蘖盛期茎鞘、叶片氮素累积速率均无显著差异;T6 处理茎鞘和叶片氮素累积速率显著高于其他各处理,较 T1 处理分别增加 10.4% 和 12.8%。分蘖盛期到齐穗期间,水稻茎鞘氮素累积速率 T2 处理最高,显著高于其他各处理;T3、T4、T5 处理水稻茎鞘氮素累积速率显著高于 T1 处理。值得注意的是,分蘖盛期至抽穗期叶片氮素累积速率受喷施时期的影响差异显著,T1、T2、T3、T6 处理出现负累积。

2.5 氨基酸水溶肥对水稻齐穗期至成熟期各器官氮素转运的影响

由表 4 可见,与 T1 处理相比,T5 处理显著提高了齐穗期至成熟期茎鞘氮素转运量,但 T2、T3、T4、T6 处理氮素转运量和转运率与 T1 处理无显著差异。T3、T5、T6 处理叶片氮素转运量显著高于 T1 处理,前者较后者分别增加 19.2%、14.7% 和 18.9%,

且 T3 和 T6 处理叶片氮素转运率也显著高于 T1 处理。从转运氮素对穗部氮素贡献率来看,T5 处理转运氮素贡献率最高,达 58.3%。

表 3 水稻抽穗前茎鞘、叶片氮素积累速率

Table 3 Accumulation rate of nitrogen in stems-sheaths and leaves of rice before the heading stage

处理	茎鞘氮素积累速率 [kg/(hm ² ·d)]		叶片氮素积累速率 [kg/(hm ² ·d)]	
	播种至 分蘖盛期	分蘖盛期 至齐穗期	播种至 分蘖盛期	分蘖盛期 至齐穗期
T1	0.67b	26.10f	1.17b	-5.70
T2	0.59bc	37.20a	1.03b	-1.10
T3	0.62bc	29.60d	1.16b	-0.70
T4	0.63b	35.90b	1.04b	0.40
T5	0.64b	33.20c	1.04b	10.30
T6	0.74a	27.70e	1.32a	-18.30
T7	0.53c	13.20g	0.78c	-7.60

T1~T7 处理见表 1 注。同一列不同字母表示处理间有显著差异 ($P<0.05$)。

表4 水稻齐穗期至成熟期茎鞘和叶片氮素转运量、氮素转运率及其转运氮素对穗贡献率

Table 4 Nitrogen translocation and nitrogen translocation rate in stems-sheaths and leaves of rice from heading to maturity stage, and its contribution of nitrogen translocation in panicle of rice

处理	茎鞘		叶片		穗	
	氮素转运量 (kg/hm ²)	氮素转运率 (%)	氮素转运量 (kg/hm ²)	氮素转运率 (%)	氮素增加量 (kg/hm ²)	转运氮素贡献率 (%)
T1	37.1bc	45.4bc	47.5b	57.7b	170.0b	50.3b
T2	32.8cd	41.7c	51.1ab	67.1a	165.4b	50.7b
T3	33.6cd	47.3abc	56.6a	64.4a	174.1b	52.9ab
T4	43.8ab	49.3ab	34.3c	44.2c	168.6b	46.4b
T5	46.1a	49.4ab	54.5a	61.9ab	178.8b	58.3a
T6	34.1cd	44.1bc	56.5a	65.0a	204.5a	49.5b
T7	27.6d	51.6a	32.5c	64.0a	129.1c	47.0b

T1~T7 处理见表1注。同一列不同字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。

除齐穗期穗部外,水稻主要生育期叶片、茎鞘和穗氮素积累量均与产量呈显著正相关关系(表5)。从不同生育期来讲,水稻产量与分蘖盛期至齐穗期叶片、播种至分蘖盛期叶片和茎鞘氮素累积速率呈

显著正相关关系,但与分蘖盛期至齐穗期茎鞘氮素累积速率的相关性不显著。水稻生育后期(齐穗期至成熟期),水稻叶片氮素转运量与产量呈极显著正相关关系,与其转运率的相关性不显著。

表5 水稻各器官氮素积累量、氮素累积速率、氮素转运量和氮素转运率与产量的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of rice yield with nitrogen accumulation, nitrogen accumulation rate, nitrogen translation, nitrogen translation rate in different organs of rice

器官	氮素积累量			氮素累积速率		齐穗期至成熟期氮素转运量	齐穗期至成熟期氮素转运率
	分蘖盛期	齐穗期	成熟期	播种至分蘖盛期	分蘖盛期至齐穗期		
茎鞘	0.44 *	0.70 **	0.54 **	0.44 **	0.19	0.46	-0.34
叶片	0.75 **	0.77 **	0.58 **	0.69 **	0.77 **	0.64 **	-0.02
穗	-	0.37	0.61 **	-	-	-	-

*, ** 分别表示 0.05 和 0.01 显著水平。

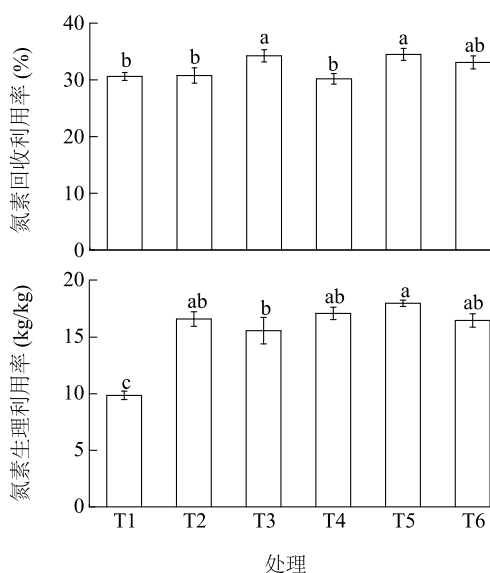
2.6 氨基酸水溶肥对水稻氮素回收利用率和氮素生理利用率的影响

如图2所示,不同时期喷施氨基酸水溶肥对水稻氮素回收利用率的影响差异显著,T3、T5处理水稻氮素回收利用率较高,分别达到34.2%和34.5%,显著高于T1、T2、T4处理,但其与T6处理无显著差异。水稻氮素生理利用率T5处理最高,达18.0 kg/kg,显著高于T3处理,但与T2、T4、T6处理无显著差异。

3 讨论

与常规施肥相比,喷施氨基酸水溶肥的T3、T4、T5、T6处理均显著提高了水稻产量。原因可能为氨基酸水溶肥富含促进植物生长发育所需的中微量元素,对叶片光合作用、生长发育、养分吸收转运等均有明显的促进和激活作用^[5-6]。从产量构成因素上看,各氨基酸水溶肥处理水稻产量的提高主要得益于

水稻千粒质量的提高。研究者发现水稻中后期喷施有机水溶肥能显著提高剑叶光合特性,延长水稻灌浆期,减少秕谷,提高结实率和千粒质量等,进而增加水稻单产^[5, 6, 13],这与本研究结果基本一致。从不同喷施时期来看,T4处理较T2处理产量无显著差异,表明分蘖期增施氨基酸水溶肥对水稻无明显增产作用;T5处理水稻产量显著高于T2处理,表明抽穗期喷施氨基酸水溶肥增产效果较好。T3、T5、T6处理水稻产量较高,也间接表明水稻生长后期喷施氨基酸水溶肥,尤其是破口前5~7 d、抽穗期喷施氨基酸水溶肥增产效果优于营养生长期喷施。值得注意的是,不同时期喷施氨基酸水溶肥对水稻有效穗均无显著影响,表明氨基酸水溶肥浸种,秧苗期、分蘖期施用氨基酸水溶肥对分蘖发生和成穗作用不大,这与前期研究结果不同^[8]。我们分析这可能与水稻品种、施氮水平和环境条件差异有关。本研究所用杂交稻中浙优8号植



T1~T7 处理见表 1 注。不同字母表示处理间有显著差异 ($P < 0.05$)。

图 2 不同氨基酸水溶肥处理的水稻氮素回收利用率和氮素生理利用率

Fig. 2 Nitrogen recovery efficiency and Nitrogen physiological efficiency of rice in different amino acid soluble fertilizer treatments

株生物量、库容量大,生育前期营养元素(尤其是氮素)需求是影响水稻分蘖、生长发育的主要限制因素。本研究在浸种、秧苗期氨基酸水溶肥用量较少,对水稻生长发育所提供的营养物质十分有限,故对水稻分蘖无显著影响。

氮素是影响水稻生长和产量形成的重要因素。有研究者发现水稻抽穗前积累的氮素主要累积在叶片,而成熟期积累的氮素主要分配在穗部^[14-15]。本研究中水稻氮素在分蘖期主要集中在叶片,齐穗期集中于茎鞘和叶片,成熟期主要集中在穗部。这可能与不同研究中取样时期不同有关,本研究取样时期在齐穗期,处于养分从“源”向“库”转运的关键时期,因此氮素主要累积于茎鞘和叶片。总体来讲,分蘖期叶片氮含量在 T1~T5 处理间无显著差异,齐穗期 T2~T5 处理叶片氮含量显著高于 T1 处理,但水稻各部位氮含量与氨基酸水溶肥喷施时期并无明显的规律性。从氮素累积量来看,T2、T3、T4、T5 和 T6 各处理分蘖盛期(除 T6 处理叶片外)、齐穗期叶片和茎鞘氮累积量无明显差异,但营养生长期叶片和茎鞘氮含量与水稻生物量呈显著正相关关系。这可能与不同处理中水稻叶片、茎鞘干物质累积差异显著诱导的氮浓度浓缩或者稀释效应有关。不同时期

喷施氨基酸水溶肥以及喷施次数有可能影响水稻根系生理特性和氮养分吸收能力^[5, 9],也会影响地上部氮含量。相关分析结果表明,除齐穗期穗部氮素累积量外,水稻产量与抽穗前茎鞘、叶片、穗氮素累积量呈现显著或极显著正相关关系,这与凌启鸿的研究结果一致^[16]。Jiang 等也指出要提高水稻产量,关键是提高抽穗前植株的氮素积累量^[17]。魏中伟等研究发现施用有机水溶肥能提高水稻叶片的叶绿素和糖含量,有利于维持较高的光合作用并减缓叶片衰老,促进同化产物向颖果转运与分配^[18]。

灌浆期至成熟期,作物体内的养分主要是进行转运分配,养分的累积量趋于平缓。前人从水稻产量形成的“库”-“源”关系、氮素转运上进行了较多研究,发现水稻灌浆期根系吸收的氮素仅占吸收总量的 10%~30%,其余所需氮素主要通过水稻茎、叶等营养器官的氮素转运来实现^[19]。本研究中,各处理中水稻齐穗期至成熟期营养器官(茎鞘、叶片)转运氮对穗部的贡献率达 46.4%~58.3%,也间接证明了维持齐穗期至灌浆期营养器官较高的氮素转运量对水稻高产的重要性。从氮素转运量来看,各喷施氨基酸水溶肥处理水稻齐穗期至成熟期叶片、茎鞘氮素向穗部的氮素转运量差异显著。与 T1 处理相比,喷施氨基酸水溶肥的 T3、T5、T6 处理显著提高水稻齐穗期至成熟期叶片氮素转运量和氮素转运率, T5 处理还显著提高茎鞘氮素转运量。相关分析结果表明,水稻产量与齐穗期叶片氮素累积速率以及抽穗后叶片氮素转运量呈显著正相关关系,但与茎鞘氮素转运量和转运率的相关性不显著。霍中洋等发现,抽穗至成熟阶段叶片的氮素转运量与产量呈显著正相关($r = 0.333$)^[14]。这也进一步表明维持水稻营养生长期较高的氮素累积量,同时增强抽穗期至成熟期叶片氮素向穗转运,是水稻获得高产的基础。水稻生育后期,尤其在破口期和灌浆期喷施氨基酸水溶肥,维持较高的叶片氮含量,不仅能防止叶片早衰,增强后期光合作用,还有利于维持生育后期较强的根系活力和氮素吸收,保证灌浆期间穗部籽粒对氮素的需求^[18]。

氮素利用效率是氮素吸收、同化、转运和再利用等多个生理过程综合作用的结果。协调产量和氮肥利用率之间的矛盾,应在保证作物产量的前提下,提高氮肥利用效率并避免营养器官对氮素的奢侈吸收^[20]。前人从氮素吸收利用率、农学利用率、生理

利用率、籽粒生产效率和偏生产力等不同侧面描述了作物对氮素的利用情况^[21-22]。其中,氮素回收利用率和氮素生理利用率,能够反映作物对当季施入肥料氮的吸收利用率效率和作物对所吸收的氮素在作物体内的利用特征。因此,实现水稻对肥料氮的大量吸收、“源”-“库”氮素高效运转,才能协同实现水稻高产高效的生产要求。同时,水稻老叶向新叶、营养器官向籽粒转移氮素的能力,以及灌浆期氮素和干物质累积会影响水稻氮素生理利用率^[23-24]。本研究中,T5 处理水稻氮素回收利用率和氮素生理利用率最高,较常规施氮处理分别显著提高 35.6% 和 31.3%。虽然各氨基酸水溶肥处理对各时期茎鞘、叶片氮素累积量无显著影响,但 T3、T5、T6 处理较 T1 处理显著增加齐穗期至成熟期叶片向穗部氮素转运量和氮素转运率,同时还显著提高齐穗期叶片氮含量。这两种因素综合导致喷施氨基酸水溶肥处理(如 T3、T5 处理)的水稻氮素回收利用率和氮素生理利用率明显高于不施氨基酸水溶肥处理。张耀鸿等^[25]也认为提高抽穗前的氮素积累量、抽穗后的氮素转运量是提高水稻氮素利用效率的关键。因此,从节本、省工、绿色、高效角度考虑,本研究推荐秧苗期、破口前 5~7 d 和抽穗期喷施 3 次氨基酸水溶肥可作为中浙优 8 号适宜的叶面肥施用模式。

参考文献:

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 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.
- [2] 孙永健,孙园园,徐 徽,等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. 作物学报,2014,40(9):1639-1649.
- [3] 姜丽娜,王 强,李艾芬,等. 休闲稻田消解沼液生态效应及其对水稻安全生产影响研究[J]. 农业环境科学学报,2011,30(12):2483-490.
- [4] 陈贤友,吴良欢,韩科峰,等. 包膜尿素和普通尿素不同掺混比例对水稻产量与氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(4):918-923.
- [5] 李燕婷,李秀英,肖 艳,等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. 中国农业科学,2009,42(1):162-172.
- [6] 张 敏. 叶面肥应用研究进展及营养机制[J]. 磷肥与复肥,2014,29(5):25-27.
- [7] 沈其荣,徐国华. 小麦和玉米叶面标记尿素态¹⁵N 的吸收和运输[J]. 土壤学报,2001,38(1):67-74.
- [8] 高 翔,王亚萍,王金锁. 不同生育期施用叶面肥对水稻产量的影响[J]. 安徽农学通报,2019,25(6):63-65.
- [9] 翟虎渠,曹树青,万建民,等. 超高产杂交稻灌浆期光合功能与产量的关系[J]. 中国科学(C 辑:生命科学),2002,32(3):211-217.
- [10] 杨雪芹,张彩霞,杨永杰,等. “美加富”对水稻生长发育的生理影响及增产效果[J]. 中国稻米,2014,20(5):68-71.
- [11] 王少鹏,洪煜丞,黄福先,等. 叶面肥发展现状综述[J]. 安徽农业科学,2015,43(4):96-98.
- [12] 谭乾开,黎华寿,郑小红,等. 叶面肥美加富(Megafol)对水稻收获期农艺性状及产量构成的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(24):142-147.
- [13] 李婷婷,何铁光,胡钧铭,等. 功能型叶面对杂交水稻叶片生理特性和产量的影响[J]. 杂交水稻,2017,32(6):55-58.
- [14] 霍中洋,杨 雄,张洪程,等. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种各器官的干物质和氮素的积累与转运[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(5):1035-1045.
- [15] 江立庚,甘秀芹,韦善清,等. 水稻物质生产与氮、磷、钾、硅素积累特点及其相互关系[J]. 应用生态学报,2004,15(21):226-230.
- [16] 凌启鸿. 中国特色水稻栽培理论和技术体系的形成与发展:纪念陈永康诞辰一百周年[J]. 江苏农业学报,2008,24(2):101-113.
- [17] JIANG LG,DAO T B,JIANG D,et al. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars[J]. Field Crops Research,2004,88(2/3):239-250.
- [18] 魏中伟,马国辉,龙继锐,等. 5-氨基乙酰丙酮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.
- [19] MAE T,OHIRA K. The remobilization of nitrogen related to leaf growth and senescence in rice plants (*Oryza Sativa* L.)[J]. Plant and Cell Physiology,1981,22(6):1067-1074.
- [20] CHEN G,CHEN Y,ZHAO G H,et al. Do high nitrogen use efficiency rice cultivars reduce nitrogen losses from paddy fields[J]. Agriculture Ecosystems and Environment,2015,209:26-33.
- [21] 李 超,韦还和,许俊伟,等. 甬优系列粳籼杂交稻氮素积累与转运特征[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(5):1177-1186.
- [22] SUI B,FENG X M,TIAN G L,et al. Optimizing nitrogen supply increases rice yield and nitrogen use efficiency by regulating yield formation factors[J]. Field Crops Research,2013,150:99-107.
- [23] JIANG L G,DAI T B,JIANG D,et al. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars[J]. Field Crops Research,2004,88:239-250.
- [24] 陈 贵,张红梅,沈亚强,等. 嘉兴地区不同基因型水稻的氮利用效率研究[J]. 浙江农业学报,2015,27(11):1965-1970.
- [25] 张耀鸿,张亚丽,黄启为,等. 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.

(责任编辑:张震林)