

施氮和肥料添加剂对水稻产量、氮素吸收转运及利用的影响*

李文军^{1,2} 夏永秋¹ 杨晓云¹ 郭 淼¹ 颜晓元^{1**}

(¹中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; ²湖南文理学院资源环境与旅游学院, 湖南常德 415000)

摘 要 在苏南太湖地区开展田间试验,研究了施氮和肥料添加剂对水稻产量、氮素吸收转运及利用的影响.结果表明:施氮对水稻产量、各生育时期植株累积吸氮量、阶段氮累积量和花后氮素转运量具有显著的促进作用($P<0.01$),当施氮量高于 $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,增施氮肥的增产效应不显著($P>0.05$);花后氮素转运率和氮肥利用率均随施氮量的增加而降低.施用肥料添加剂可进一步提高水稻产量、累积吸氮量、花后氮素转运量和氮肥利用率,且该效应在高施氮量($\geq 200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)条件下表现更明显.本试验条件下不施用肥料添加剂时,施氮 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可同时获得较高的产量和氮肥利用率.

关键词 水稻 施氮量 肥料添加剂 产量 累积吸氮量 氮素转运 氮肥利用率

文章编号 1001-9332(2011)09-2331-06 **中图分类号** Q948.3 **文献标识码** A

Effects of applying nitrogen fertilizer and fertilizer additive on rice yield and rice plant nitrogen uptake, translocation, and utilization. LI Wen-jun^{1,2}, XIA Yong-qiu¹, YANG Xiao-yun¹, GUO Miao¹, YAN Xiao-yuan¹ (¹State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ²College of Resources and Environment and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(9): 2331-2336.

Abstract: A field experiment was conducted in the Taihu Lake region of southern Jiangsu to study the effects of applying nitrogen (N) fertilizer and fertilizer additive on the rice yield and the rice plant N uptake, translocation, and utilization. Applying N fertilizer had significant positive effects on the rice yield, accumulative absorbed N at all growth stages and at each growth stage, and N translocation rate after anthesis ($P<0.01$). However, when the N application rate exceeded $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, its yield-increasing effect was not significant ($P>0.05$). The N translocation rate after anthesis and the N fertilizer use efficiency decreased with increasing N application rate. Applying fertilizer additive further improved the rice yield, accumulative absorbed N, N translocation rate after anthesis, and N fertilizer use efficiency, and this effect was more evident when the N application rate was equal to or greater than $200\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. Relatively high rice yield and N use efficiency were achieved when applying $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of N fertilizer without the application of fertilizer additive.

Key words: rice; nitrogen application rate; fertilizer additive; yield; accumulative absorbed nitrogen; nitrogen translocation; nitrogen fertilizer use efficiency.

在植物所有必需营养元素中,氮是限制植物生长和产量形成的首要因素,因此多数情况下施用氮肥都可以获得明显的增产效果^[1-2].水稻是我国种植面积最大、产量最高、氮肥用量最高的粮食作物之

一.目前,我国稻田单季氮肥施用量平均为 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右,较世界平均用量高约75%,水稻生产所消耗的氮肥占世界水稻氮肥总消耗量的37%,水稻平均单产为 $6800\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,比世界平均单产高65%左右^[3].苏南太湖地区是我国的水稻主产区之一,该区农业集约化程度高,氮肥用量也高,稻季氮肥平均用量达到 $270\sim 300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,局部地区甚至

* 国家重点基础研究规划项目(2009CB118603)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-440)资助.

** 通讯作者. E-mail: yanxy@issas.ac.cn

2011-01-17 收稿,2011-06-20 接受.

达到 $350 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施用氮肥的增产效应已经很小, 而氮肥利用效率却急剧下降, 在部分高施氮区氮肥利用效率甚至低于 20%^[4]. 过量施氮不仅会造成资源浪费, 也会给生态环境和人类健康带来危害^[5]. 因此, 适量施氮, 实施适宜的氮肥管理措施, 对于提高稻田氮肥利用率具有重要意义.

施用肥料添加剂是提高氮肥利用效率的有效途径, 我国近些年开展了此方面的研究, 并在一些作物上取得了一定的应用成果^[6-10]. 目前, 在苏南太湖地区有关水稻生产中肥料添加剂的应用效果研究尚不多见. 为此, 本试验研究了施氮和肥料添加剂对苏南太湖地区水稻产量和氮素吸收转运及利用的影响, 旨在为该区域合理施氮、提高氮肥利用率提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

田间试验于 2010 年 6—10 月在江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站 ($31^{\circ}33' \text{ N}$, $120^{\circ}38' \text{ E}$) 进行. 该地属亚热带北部湿润季风气候, 是长江下游典型的水稻产区, 年均气温 $15.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 最高气温 $39.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 年降雨量 1038 mm . 站区地形属阳澄湖低洼平原, 海拔 3.2 m , 土壤类型为竖头乌栅土, 地下水深 60 cm 左右, 耕层 ($0 \sim 20 \text{ cm}$) 土壤的基本理化性质为: pH 7.50, 有机质 $34.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $2.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $0.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $18.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $180.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $8.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $123.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阳离子代换量 $21.1 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2 供试材料

供试水稻品种为常优 2 号, 田间移栽密度为 $240000 \text{ 穴} \cdot \text{hm}^{-2}$, 6 月 23 日移栽, 10 月 29 日收获; 供试肥料添加剂为 Goloagra-5, 含有一定比例的草药提取物、根腐病防治剂及低量腐殖酸, 由中国科学院和无锡德冠生物有限公司联合生产; 试验施用氮肥为含氮 46.6% 的尿素.

1.3 试验设计

试验共设 12 个处理, 分别标记为 U_0 、 U_{50} 、 U_{100} 、 U_{150} 、 U_{200} 、 U_{250} 、 G_0 、 G_{50} 、 G_{100} 、 G_{150} 、 G_{200} 和 G_{250} , 其中 U 代表单施尿素处理, G 代表尿素配施肥料添加剂处理; 数字代表供氮水平, 如 50 表示 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. 每个处理设置 3 次重复, 随机区组排列, 小区面积 30.6 m^2 . 各小区均施磷肥 (过磷酸钙) $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和钾肥 (氯化钾) $125 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 作为基肥一次性施用, 氮肥分基肥、分蘖肥和穗肥以 4 : 3 : 3 的比例分

别于 6 月 22 日、7 月 5 日和 8 月 5 日施入, 肥料添加剂用量为 $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与基施尿素混匀后在水稻移栽前施入. 试验期间其他管理措施统一按常规管理方式进行.

1.4 样品采集与分析

将每一个试验小区依面积平分为动态采样区和收获区两个半区, 在动态采样区内采集植株样品, 收获区专用于水稻收获计产. 分别在水稻分蘖盛期 (7 月 23 日)、拔节期 (8 月 14 日)、开花期 (9 月 7 日) 和成熟期 (10 月 28 日) 采集水稻植株地上部样品, 每小区采集 5 株, 按茎秆、叶片和籽粒分离, 在 $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干称量, 植株样品经硫酸-混合加速剂消煮后, 用半微量开氏定氮法测定全氮含量. 水稻成熟时在每小区计产区将中部 6 m^2 内的水稻植株样品全部收割, 脱粒风干计产.

植株累积吸氮量采用徐阳春等^[11]的方法计算; 阶段氮素累积比例 (%)、花后氮素转运量、花后氮素转运率和转运氮贡献率采用晏娟等^[12]的方法计算; 氮肥吸收利用率和氮肥农学利用率采用范亚宁等^[13]的方法计算; 氮肥偏生产力采用晏娟等^[14]的方法计算.

1.5 数据处理

用 SPSS 16.0 软件对所有试验数据进行统计分析. 应用单变量双因素方差分析 (Univariate analyses) 确定施氮量和肥料添加剂两个因素及其交互作用对籽粒产量、植株累积吸氮量、阶段氮素累积量、氮素转运及氮肥利用率的影响程度; 对单施尿素和尿素配施肥料添加剂处理下不同供氮水平间结果进行单因素方差分析, 并用 Duncan 法进行多重比较. 采用 Microsoft Excel 2003 软件作图.

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻籽粒产量的影响

由表 1 可知, 不论单施尿素还是尿素配施肥料添加剂条件下, 施氮处理的籽粒产量均显著高于无氮处理 ($P < 0.05$). 单施尿素条件下, 当施氮量高于 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 籽粒产量不再显著增加 ($P > 0.05$), 施氮量为 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时获得最高产量. 尿素配施肥料添加剂条件下, 籽粒产量随施氮量的增加而增加, 在施氮量为 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时获得最高产量, 但与 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 处理无显著差异 ($P > 0.05$). 增产百分比的变化趋势与产量一致, 单施尿素和尿素配施肥料添加剂条件下分别在施氮 200 和 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时具有最高的增产率.

表 1 不同处理水稻籽粒产量
Table 1 Grain yield of rice under different treatments (kg · hm⁻²)

处 理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg · hm ⁻²)	增产率 Increased percent (%)
U ₀	5248d	-
U ₅₀	7050c	34.3
U ₁₀₀	7760b	47.9
U ₁₅₀	8327ab	58.7
U ₂₀₀	8737a	66.5
U ₂₅₀	8624a	64.3
G ₀	5464d	-
G ₅₀	7403c	35.5
G ₁₀₀	8026b	46.9
G ₁₅₀	8520b	55.9
G ₂₀₀	9521a	74.2
G ₂₅₀	9727a	78.0
F 值	N	128.6**
F value	F	19.2**
	N×F	1.9 ^{ns}
		1.7 ^{ns}

N: 施氮水平 N application rate; F: 肥料添加剂 Fertilizer additive. 相同肥料处理同列数据后不同字母表示不同施氮水平间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters in the same column under the same fertilizer treatment meant significant difference at 0.05 level among different N application rates. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; ns: 差异不显著 No significant difference. 下同 The same below.

方差分析结果表明, 施用肥料添加剂对水稻产量具有显著的增加作用 ($P < 0.01$), 但在不同施氮水平下的增产效应并不一致。当施氮量低于 150 kg · hm⁻² 时, 尿素配施肥料添加剂处理比单施尿素处理产量提高 2.3% ~ 5.0%, 增产效应并不明显; 当施氮量为 200 和 250 kg · hm⁻² 时, 尿素配施肥料添加剂处理增产效应明显, 增产率分别达到 9.0% 和 12.8%。

2.2 不同处理对水稻氮素吸收的影响

2.1.1 水稻不同生育时期累积吸氮量

从不同生育时期植株累积吸氮量 (表 2) 可知, 施氮提高了水稻对氮素的累积吸收量, 全生育期内植株累积吸氮量随施氮量的增加而增加。不论单施尿素处理还是尿素配施肥料添加剂处理, 在分蘖盛期不同施氮水平间植株吸氮量的差异相对较小, 施氮 50 kg · hm⁻² 处理甚至与无氮处理无显著差异; 分蘖结束后, 植株进入快速营养生长期, 对氮肥的吸收能力增加, 在拔节、开花和成熟期施氮处理植株累积吸氮量均显著高于无氮处理 ($P < 0.05$), 施氮处理间也具有较明显的差异。

与单施尿素相比, 尿素配施肥料添加剂提高了各生育时期植株累积吸氮量 (表 2)。除分蘖盛期外, 添加肥料添加剂对其他各生育时期植株累积吸氮量

表 2 不同处理下不同生育期水稻植株累积吸氮量
Table 2 N accumulation of rice plant at different growth stages under different treatments (kg · hm⁻²)

处 理 Treatment	分蘖盛期 Tiller stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Maturity stage
U ₀	36.7e	57.1e	73.8f	109.3e
U ₅₀	40.2de	89.4d	102.4e	131.9d
U ₁₀₀	48.0cd	119.9c	126.9d	151.8c
U ₁₅₀	53.3bc	127.2bc	143.2c	166.5b
U ₂₀₀	61.3ab	134.2b	156.9b	175.1ab
U ₂₅₀	65.0a	146.3a	171.0a	181.7a
G ₀	37.8e	61.8e	81.1e	113.3e
G ₅₀	42.1de	93.8d	110.8d	137.9d
G ₁₀₀	49.0cd	126.0c	136.5c	161.2c
G ₁₅₀	56.8bc	132.9bc	156.8b	178.8b
G ₂₀₀	63.8ab	143.9b	177.2a	195.2a
G ₂₅₀	69.7a	162.9a	194.2a	204.6a
F 值	N	35.3**	110.3**	206.1**
F value	F	2.1 ^{ns}	8.3**	39.8**
	N×F	0.1 ^{ns}	0.5 ^{ns}	1.4 ^{ns}
				1.9 ^{ns}

均有显著影响 ($P < 0.01$), 在 0、50、100、150、200 和 250 kg · hm⁻² 6 个供氮水平下, 肥料添加剂处理在成熟期植株累积吸氮量的增幅分别达到 3.7%、4.5%、6.2%、7.4%、11.5% 和 12.6%。

2.2.2 水稻不同生育阶段氮素累积量

由表 3 可知, 水稻在分蘖盛期-拔节期氮素累积量最大, 累积比例变幅为 18.7% ~ 47.8%, 均值达到 39.2%, 同时该时段氮素累积量与成熟期累积吸氮量具有极好的线性回归关系 (图 1)。第 2 个阶段累积高峰在移栽-分蘖盛期, 不同处理阶段氮累积比例均值为 31.2%。可见, 分蘖期和拔节孕穗期为氮素反应敏感期, 保证此时期适量氮素供应, 对提高植株氮素总累积量进而提高产量具有重要意义。

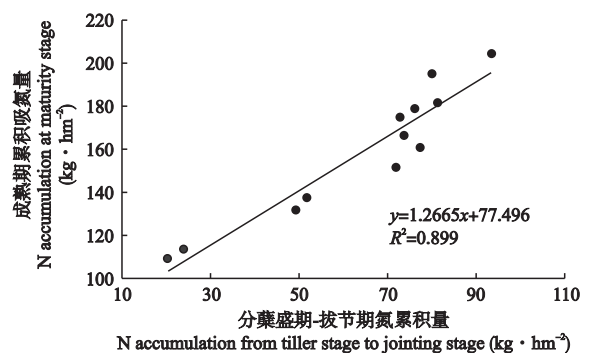


图 1 水稻分蘖盛期-拔节期阶段氮素累积量与成熟期累积吸氮量的回归关系

Fig. 1 Linear regression relationship between N accumulation from tiller to jointing stage and N accumulation at maturity stage of rice plant.

表 3 水稻各生育阶段氮素累积量及累积比例

Table 3 N accumulation and percentage of rice plant at different growth periods

处理 Treatment	移栽-分蘖盛期 Transplanting-tiller		分蘖盛期-拔节期 Tiller-jointing		拔节期-开花期 Jointing-flowering		开花期-成熟期 Flowering-maturity	
	累积量 Accumulation (kg · hm ⁻²)	%	累积量 Accumulation (kg · hm ⁻²)	%	累积量 Accumulation (kg · hm ⁻²)	%	累积量 Accumulation (kg · hm ⁻²)	%
U ₀	34.5e	31.6	20.4c	18.7	16.7abc	15.3	35.5a	32.5
U ₅₀	38.0de	28.8	49.2b	37.3	13.0bc	9.9	29.5ab	22.4
U ₁₀₀	45.8cd	30.2	71.9a	47.4	7.0c	4.6	25.8bc	17.0
U ₁₅₀	51.1bc	30.7	73.9a	44.4	16.0abc	9.6	23.3bc	14.0
U ₂₀₀	59.1ab	33.8	72.9a	41.6	22.7ab	13.0	18.2cd	10.4
U ₂₅₀	62.8a	34.6	81.3a	44.7	24.7a	13.6	10.7d	5.9
G ₀	35.6e	31.4	24.0d	21.2	19.3ab	17.0	32.2a	28.4
G ₅₀	39.9de	28.9	51.7c	37.5	17.0b	12.3	27.1ab	19.7
G ₁₀₀	46.8cd	29.0	77.0b	47.8	10.5b	6.5	24.7ab	15.3
G ₁₅₀	54.6bc	30.5	76.1b	42.6	23.9ab	13.4	22.0ab	12.3
G ₂₀₀	61.6ab	31.6	80.1b	41.0	33.3a	16.9	18.8ab	9.6
G ₂₅₀	67.5a	33.0	93.2a	45.6	31.3a	15.3	10.5b	5.1
F 值 N	35.3**		136.6**		9.9**		8.6**	
F value F	2.1 ^{ns}		11.6**		8.8**		0.4 ^{ns}	
N×F	0.1 ^{ns}		1.3 ^{ns}		0.4 ^{ns}		0.1 ^{ns}	

方差分析结果表明(表3),施氮始终对阶段氮累积有显著影响($P < 0.01$),施用肥料添加剂只对分蘖盛期-拔节期和拔节期-开花期两阶段的氮素累积有显著影响($P < 0.01$),不存在施氮水平和肥料添加剂对阶段氮累积的交互作用.施用肥料添加剂提高了花前各施氮水平下的阶段氮素累积量,但对阶段氮累积比例却无明显影响.

2.3 不同处理对水稻花后氮素转运的影响

施氮对花后氮转运量、氮素转运率及转运氮贡献率均有显著影响($P < 0.01$)(表4).花后氮素转运

量和转运氮贡献率均随施氮水平的提高而增加,而氮素转运率则呈现相反的趋势,不同施氮水平间转运率差异较小,变化范围为45.7%~58.4%.

施用肥料添加剂对各供氮水平下花后氮转运量、氮素转运率和转运氮贡献率均有促进作用(表4),但其对氮素转运率和转运氮贡献率的影响不显著($P > 0.05$),对花后氮转运量的影响显著($P < 0.01$),在0、50、100、150、200和250 kg · hm⁻² 6个供氮水平下,尿素配施肥料添加剂处理氮转运量较单施尿素处理分别增加5.2、5.4、6.2、8.3、13.4和14.2 kg · hm⁻².

2.4 不同处理对水稻氮肥利用率的影响

由表5可以看出,水稻氮肥吸收利用率(UE_N)、农学利用率(AE_N)和氮肥偏生产力(PFP_N)均随施氮量的增加而降低.不论单施尿素处理还是尿素配施肥料添加剂处理,当施氮量高于200 kg · hm⁻²时, UE_N 和 AE_N 降低不显著($P > 0.05$),而 PFP_N 在所有施氮水平间差异显著($P < 0.05$).

施用肥料添加剂对水稻氮肥利用率有促进作用,且这种效应在高施氮量(≥ 200 kg · hm⁻²)水平下表现较明显,在施氮200 kg · hm⁻²和250 kg · hm⁻²时,尿素配施肥料添加剂处理 UE_N 、 AE_N 和 PFP_N 较单施尿素处理分别平均提高25.5%、21.3%和10.9%.方差分析结果表明,施用肥料添加剂对 UE_N 和 PFP_N 有显著影响($P < 0.05$),但对 AE_N 影响不显著($P > 0.05$).

表 4 水稻花后氮素转运特性

Table 4 Nitrogen transfer characteristics of rice plant after flowering

处理 Treatment	氮素转运量 N translocation (kg · hm ⁻²)	氮素转运率 N translocation efficiency (%)	转运氮贡献率 N contribution efficiency (%)
U ₀	42.1d	57.0a	54.2d
U ₅₀	56.8c	55.5ab	65.8c
U ₁₀₀	67.8b	53.4abc	73.1bc
U ₁₅₀	71.0ab	49.6abc	75.3bc
U ₂₀₀	75.0ab	47.8bc	80.5ab
U ₂₅₀	78.0a	45.7c	87.9a
G ₀	47.3e	58.4a	59.5d
G ₅₀	62.2d	56.1a	69.7c
G ₁₀₀	74.0c	54.2ab	75.0c
G ₁₅₀	79.3bc	50.6ab	78.3bc
G ₂₀₀	88.4ab	49.9ab	84.8ab
G ₂₅₀	92.2a	47.5b	89.9a
F 值 N	58.2**	6.8**	32.0**
F value F	26.9**	0.8 ^{ns}	4.1 ^{ns}
N×F	0.9 ^{ns}	0 ^{ns}	0.1 ^{ns}

表 5 不同处理下水稻氮肥吸收利用率、农学利用率及氮肥偏生产力

Table 5 N uptake efficiency (UE_N), N agronomy efficiency (AE_N) and partial factor productivity of applied N (PFP_N) of rice plant under different treatments

处 理 Treatment	氮肥吸收 利用率 N uptake efficiency (%)	氮肥农学利用率 N agronomy efficiency ($kg \cdot kg^{-1}$)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of applied N ($kg \cdot kg^{-1}$)
U_0	-	-	-
U_{50}	45.2a	36.0a	141.1a
U_{100}	42.5a	25.1b	77.6b
U_{150}	38.1ab	20.5bc	55.5c
U_{200}	32.9bc	17.4cd	43.7d
U_{250}	28.9c	13.5d	34.5e
G_0	-	-	-
G_{50}	49.2a	38.8a	148.1a
G_{100}	47.9a	25.6b	80.3b
G_{150}	43.7ab	20.4bc	56.8c
G_{200}	41.0ab	20.3bc	47.6d
G_{250}	36.5b	17.0c	38.9e
F 值 N	11.0**	30.3**	756.8**
F value F	13.8**	1.7 ^{ns}	7.2*
N×F	0.2 ^{ns}	0.3 ^{ns}	0.4 ^{ns}

3 讨 论

3.1 施氮对水稻产量、氮素吸收转运及利用的影响

施氮能提高水稻产量,但并非越多越好,过量施氮往往导致减产^[15-16]。本研究表明,单施尿素条件下,施氮量高于 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,施氮的增产效应不显著。施氮可增加植株吸氮量。本研究中,在分蘖盛期施氮 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,植株累积吸氮量并未显著高于无氮处理,这与两方面的因素有关:一方面,水旱轮作体系土壤在稻季淹水初期矿化供氮能力较强,土壤有效氮水平较高^[17];另一方面,低氮水平下土壤氮对植株吸收氮的贡献率更高^[18]。随着生育进程的推进,氮肥对植株吸收氮发挥着越来越重要的作用,表现为在拔节期、开花期和成熟期,施氮处理的植株累积吸氮量均显著高于无氮处理。关于水稻在不同生育时期氮素的积累进程,王秀芹等^[19]认为,拔节期至抽穗期是水稻的吸氮高峰期,该阶段的氮累积量占全生育期累积量的 34.2% ~ 47.8%,本研究结果与其相反,拔节期-开花期植株氮素累积比例最低,分蘖期和拔节期是水稻吸氮的高峰期和关键期,这与晏娟等^[12]和闫德智等^[20]的研究结果一致。

有研究表明,水稻籽粒氮素主要靠营养器官中氮素的转运^[21]。本试验水稻籽粒中 54.2% ~ 89.9% 的氮素来自于营养器官氮素的转运,籽粒氮贡献率

随施氮量的增加而升高,该结果进一步说明提高花后氮素转运量对改善籽粒氮营养具有重要作用。本研究中,氮肥利用率随施氮量增加而持续降低,因此在农业生产中应兼顾产量和氮肥利用率进行氮肥运筹。

3.2 施用肥料添加剂对水稻产量、氮素吸收转运及利用的影响

关于施用肥料添加剂对水稻产量的影响,以前的研究结论并不一致,施用肥料添加剂的增产效应因添加剂类型、试验条件的不同而有所差异^[22-24]。研究表明,施用肥料添加剂可减少氮肥的环境损失量,增加植株吸氮量,进而提高氮肥吸收利用率^[8, 25-26]。在本研究中,施用肥料添加剂对水稻产量、累积吸氮量、氮素转运及利用均具有促进效应。该效应可能与供试肥料添加剂含有一定量的腐植酸有关。研究表明,腐植酸在活化土壤养分、促进作物生长发育、提高作物产量和肥料利用率等方面有显著效果^[27-28]。

本研究还表明,在高氮条件下施用肥料添加剂对氮素吸收利用具有更好的促进作用,能更好地发挥氮肥的增产效应,该结果表明供试肥料添加剂在苏南太湖高氮输入区有一定的应用价值,但还需进一步研究施用肥料添加剂的农学效应,同时对其环境效应及经济效益进行评价,为地区农业生产和氮肥利用提供理论依据。

参考文献

- [1] Lu J-L (陆景陵). Plant Nutrition. Beijing: China Agricultural University Press, 2003 (in Chinese)
- [2] Camargo FAO, Gianello C, Tedesco MJ. Soil nitrogen availability evaluated by kinetic mineralization parameters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2004, **35**: 1293-1307
- [3] Peng S-B (彭少兵), Huang J-L (黄见良), Zhong X-H (钟旭华), et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2002, **35** (9): 1095-1103 (in Chinese)
- [4] Wang GH, Dobermann A, Witt C, et al. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in southeast China. *Agronomy Journal*, 2001, **93**: 869-878
- [5] Zhu Z-L (朱兆良). Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction. *Soil and Environmental Sciences* (土壤与环境), 2000, **9**(1): 1-6 (in Chinese)
- [6] Waston CJ, Miller H, Poland P, et al. Soil properties and the ability of the urease inhibitor *N*-(n-BUTYL) thiophosphoric triamide (nBTPT) to reduce ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Biology and*

- Biochemistry*, 1994, **26**: 1165–1171
- [7] Tiessen KHD, Flaten DN, Grant CA, *et al.* Efficiency of fall-banded urea for spring wheat production in Manitoba: Influence of application date, landscape position and fertilizer additives. *Canadian Journal of Soil Science*, 2005, **85**: 649–666
- [8] Lu W-F (卢婉芳), Chen W (陈 苇). Effectiveness of urease inhibitors related to environmental factors in paddy field. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 1992, **6**(3): 135–138 (in Chinese)
- [9] Xu X-K (徐星凯), Zhou L-K (周礼恺), van Cleemput O. Effect of urease/nitrification inhibitors on the behavior of urea-N in the soil planted to rice. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21**(10): 1682–1686 (in Chinese)
- [10] Yu G-H (余光辉), Zhang Y-Z (张扬珠), Wan D-J (王大娟). Effects of nitrification inhibitors on nitrate content in soil and pakchoi and on pakchoi yield. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(2): 247–250 (in Chinese)
- [11] Xu Y-C (徐阳春), Wu X-Q (吴小庆), Guo S-W (郭世伟), *et al.* Nitrogen use efficiency and ammonia volatilization from rice shoot in late growth stages. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(2): 207–212 (in Chinese)
- [12] Yan J (晏 娟), Shen Q-R (沈其荣), Yin B (尹斌). Effects of nitrogen application rate on uptake, translocation and use of nitrogen by rice germ plasm 4007 high in nitrogen use efficiency. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(1): 107–114 (in Chinese)
- [13] Fan Y-N (范亚宁), Li S-Q (李士清), Li S-X (李生秀). Utilization rate of fertilizer N and dynamic changes of soil NO_3^- -N in summer maize field in semi-humid area of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(4): 799–806 (in Chinese)
- [14] Yan J (晏 娟), Shen Q-R (沈其荣), Yin B (尹斌), *et al.* Effects of fertilizer N application rate on yields and use efficiencies in rice-wheat rotation system in Tai Lake region. *Soils* (土壤), 2009, **41**(3): 372–376 (in Chinese)
- [15] Cui Y-T (崔玉亭), Cheng X (程 序), Han C-R (韩纯儒), *et al.* The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake Watershed. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(1): 658–662 (in Chinese)
- [16] Song Y-S (宋勇生), Fan X-H (范晓晖). Nitrogen uptake and its utilization by rice in paddy field of Taihu area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(11): 2081–2083 (in Chinese)
- [17] Li HL, Han Y, Cai ZC. Nitrogen mineralization in paddy soils of the Taihu Region of China under anaerobic conditions: Dynamics and model fitting. *Geoderma*, 2003, **115**: 161–175
- [18] Liu X-J (刘学军), Zhao Z-J (赵紫娟), Ju X-T (巨晓荣), *et al.* Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(7): 1122–1128 (in Chinese)
- [19] Wang X-Q (王秀芹), Zhang H-C (张洪程), Huang Y-Z (黄银忠), *et al.* Effects of N-application rate on the characters of uptake nitrogen and nitrogen recovery of different rice varieties. *Journal of Shanghai Jiaotong University* (Agricultural Science) (上海交通大学学报·农业科学版), 2003, **21**(4): 325–330 (in Chinese)
- [20] Yan D-Z (闫德智), Wang D-J (王德建), Lin J-H (林静慧). Effects of fertilizer-N application rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu region. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2005, **42**(3): 440–446 (in Chinese)
- [21] Ntanos DA, Koutroubas SD. Dry matter and N accumulation and translocation for Indica and Japonica rice under Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, 2002, **74**: 93–101
- [22] Freney JR, Keerthisinghe DG, Phongpan S, *et al.* Effect of urease, nitrification and algal inhibitors on ammonia loss and grain-yield of flooded rice in Thailand. *Fertilizer Research*, 1995, **40**: 225–233
- [23] Chaiwanakupt P, Freney JR, Keerthisinghe DG, *et al.* Use of urease, algal inhibitors, and nitrification inhibitors to reduce nitrogen loss and increase the grain yield of flooded rice (*Oryza sativa* L.). *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **22**: 89–95
- [24] Carreres R, Sendra J, Ballesteros R, *et al.* Assessment of slow release fertilizers and nitrification inhibitors in flooded rice. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, **39**: 80–87
- [25] Wang Z-Y (王正银), Xu W-H (徐卫红), Huang Y (黄 云), *et al.* Effects of plant urease inhibitor on crop nutrition and soil characters. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica* (核农学报), 2002, **16**(2): 109–114 (in Chinese)
- [26] Gioacchini P, Natri A, Marzadori C, *et al.* Influence of urease and nitrification inhibitors on N losses from soils fertilized with urea. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, **36**: 129–135
- [27] Ayuso M, Hernandez T, Garcia C, *et al.* A comparative study of the effect on barley growth of humic substances extracted from municipal wastes and from traditional organic materials. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1996, **72**: 493–500
- [28] Wang R-J (王汝娟), Wang Z-L (王振林), Liang T-B (梁太波), *et al.* Effects of HA-K fertilizers on the absorption and utilization of potassium and the storage root yield in sweet potato for table use. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(3): 520–526 (in Chinese)

作者简介 李文军,男,1982年生,博士研究生.主要从事土壤氮素循环及植物营养研究. E-mail: wenjunli82@gmail.com
责任编辑 张凤丽
