

## 铵硝比 ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ) 对不同氮素利用效率水稻的生理效应

段英华, 张亚丽, 王松伟, 沈其荣\*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** 采用控制条件下的水培试验方法, 研究了不同铵硝配比 ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  分别为 100/0、75/25、50/50 和 25/75) 营养条件对 8 种不同氮素利用效率水稻苗期生长的影响。结果表明: 在增硝营养条件下, 不同水稻品种对硝态氮 ( $\text{NO}_3^-$ ) 的反应不同。与纯铵营养条件相比, 铵硝混合的营养条件对大多数氮高效水稻品种的生长都有显著促进作用, 而对氮低效品种的生长没有显著影响。试验重点研究了增硝营养对氮高效水稻品种南光、云梗 38 和氮低效水稻品种 ELIO 生长的影响。结果发现, 对于南光和云梗 38, 增硝营养可以使水稻的分蘖数和光合速率分别增加 35% 和 24%, 从而促进水稻生长和氮吸收, 提高氮素利用率; 而增硝营养对 ELIO 的生长并无显著影响。不同基因型水稻在增硝营养下氮积累量增幅不同主要是由于其生物量增幅不同造成的, 而整株氮素含量增幅差异不大;  $\text{NO}_3^-$  的存在可增加干物质在水稻根系的积累, 增加根系体积, 促进水稻根系的生长。

**关键词:** 水稻;  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ; 氮利用效率; 根系

中图分类号: S511.01 文献标识码: A 文章编号: 1000-2030 (2007) 03-0073-05

## Effect of $\text{NH}_4^+$ to $\text{NO}_3^-$ ratio ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ) on biological characteristics of rice with different nitrogen use efficiency

DUAN Ying-hua, ZHANG Ya-li, WANG Song-wei, SHEN Qi-rong\*

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** As the rice plant is increasingly cultivated in the soil intermittently irrigated or even in aerobic soil in which nitrate nutrition of rice is more important than ever before, there are many evidences of enhanced effect by nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) on rice crop although it prefers the ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) nutrition to nitrate. Solution culture experiment were carried out to study the effects of different ratios of  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  as 100/0, 75/25, 50/50 and 25/75) on the biological characteristics of eight genotypes of rice with different nitrogen (N) efficiency at the seedling stage. The results obtained were as follows. Different rice genotypes had different responses to  $\text{NO}_3^-$ . Among the eight rice genotypes, the improvement of growth by  $\text{NO}_3^-$  to the rice genotypes with higher N use efficiency was greater than that with lower N use efficiency. Furthermore, we compared the growth of Nanguang (higher N efficiency), Yunjing 38 (higher N efficiency) and ELIO (lower N efficiency) at the ratio of  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  as 75/25 and 100/0. The tillers and photosynthetic rate in the leaves of Nanguang and Yunjing 38 were averagely increased by 35% and 24%, respectively, while those of ELIO had no significant difference, between the treatments of 75/25 and 100/0. It was not the N content but the increased dry matter that partial replacement of  $\text{NH}_4^+$  by  $\text{NO}_3^-$  contributed to N accumulation in rice plants.  $\text{NO}_3^-$  could improve the accumulation of dry matter in the roots of Nanguang and Yunjing 38 and increase the volume of roots of Nanguang, Yunjing 38 and ELIO.

**Key words:** rice;  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ; N use efficiency; roots

由于淹水条件下硝化作用被强烈抑制, 使土壤溶液中的铵态氮 ( $\text{NH}_4^+$ ) 浓度大大增加, 一般认为水稻对  $\text{NH}_4^+$  的吸收多于硝态氮 ( $\text{NO}_3^-$ ),  $\text{NH}_4^+$  是水稻氮素 (N) 吸收利用的主要形态<sup>[1-2]</sup>。但近年来逐渐兴起的水稻节水栽培技术使水稻根系所处的环境条件发生了很大变化, 其中最主要的变化就是通气条件的改善<sup>[3]</sup>。在较好的通气条件下, 氮肥和土壤有机氮矿化释放出的  $\text{NH}_4^+$  更易被氧化成  $\text{NO}_3^-$ , 从而使水稻生长过程中  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{NO}_3^-$  在土壤内并存。在完全淹水条件下, 由于水稻根系的泌氧 ( $\text{O}_2$ ) 作

收稿日期: 2006-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30390082, 40471074); 江苏省研究生创新计划

作者简介: 段英华, 博士研究生。\* 通讯作者: 沈其荣, 教授, 主要从事植物营养学研究, E-mail: shenqirong@njau.edu.cn。

用,使水稻根表和根际土壤的硝化作用增强,从  $\text{NH}_4^+$  氧化而来的  $\text{NO}_3^-$  可立即被水稻吸收,因而通常从水稻田中采集的土样中较难测到  $\text{NO}_3^-$  或数量极微,但实际情况下,水稻根系是处于铵、硝混合营养之中的。Kirk<sup>[4]</sup>通过建立模型来评价水稻吸收根际硝化作用生成的  $\text{NO}_3^-$  的数量,由该模型可知,在淹水条件下水稻吸收的  $\text{NO}_3^-$  可达到吸氮总量的 30%。已有研究表明<sup>[5]</sup>,吸收效率对于氮效率起到较为重要的作用,吸氮能力强的水稻品种对于提高氮肥利用率具有十分重要的作用。水稻获取氮的能力取决于水稻的根系形态特征和根系对氮的吸收速率和时间。据我们以前的研究结果<sup>[6-7]</sup>,增硝营养能促进水稻对铵的吸收速率,刺激水稻根系的发育。笔者采用水培的试验方法研究增硝营养对不同氮素利用效率水稻的生理效应,挖掘水稻高效利用氮素养分的潜力,为进一步深入研究水稻高效利用氮肥的生理机制提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 品种选择

根据 2003 年和 2004 年的大田试验结果筛选出氮素利用效率不同的粳稻 (*Oryza sativa* L.) 品种 8 个:豫粳 7 号(河南)、武运粳 7 号(江苏)、云粳 38(云南)、桂单 4 号(江苏)、黔育 421(贵州)、南光(日本)、4007、ELIO。其中 ELIO 为氮低效水稻品种,其余 7 个为氮高效水稻品种。

### 1.2 植株培养

种子经 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  (体积分数) 消毒 30 min,催芽,然后播于盛有蛭石的育苗盘中。7 d 后将幼苗移栽至 pH 6.0 的 1/2 国际水稻所 (IRRI) 常规营养液中<sup>[8]</sup>,总氮浓度为  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其中  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  分别为 100/0、75/25、50/50 和 25/75。营养液中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  的浓度保持不变。其中 Fe 用 Fe (EDTA- $\text{Na}_2$ ) 代替,并加入硅酸钠以保持营养液中的  $\text{SiO}_2$  为  $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,以  $7.0 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的二氰胺作为硝化抑制剂。为了维持营养液中  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  的浓度和离子平衡,每 3 d 换 1 次营养液。营养液 pH 值每天用  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  KOH 和 HCl 调至 6.0。水培容器为 500 mL 的塑料杯,上覆 3 孔塑料盖,每孔 1 株苗,塑料杯和塑料盖用遮光布包裹。随机区组设计,3 次重复。

### 1.3 收获与测定

1.3.1 植株干重及含氮量的测定 在水稻生长至 48 d 时测分蘖数,分别采集地上部和地下部并称取干重。干样经  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消化后用流动分析仪(型号为 AA3)测定全氮含量,计算氮积累量。

1.3.2 净光合速率的测定 水稻叶片净光合速率测定采用美国 CID 公司生产的 CI-310 便携式光合作用测定系统,于晴天上午 9:00 至 11:00 进行,采用开放式气路系统,空气流量  $0.56 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,温度为  $32 \sim 37 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,叶室  $\text{CO}_2$  水平为  $384.9 \sim 394.1 \text{ } \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3.3 水稻的总根长、根表面积等根系参数的测定 用德国产 Mac/WinRHIZO™ 根系分析仪分析。

### 1.4 数据分析

数据均采用 SPSS 软件 (SPSS 11.0.0) 进行 ANOVA 方差分析和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 铵硝配比 ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ) 对不同品种水稻干重和氮积累量的影响

由表 1 和表 2 可看出,与纯铵营养条件下生长的水稻相比,在  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 75/25 的营养条件下,南光和云粳 38 的干重和氮积累量均显著增加,其中南光的干重和氮积累量的增幅最大,分别为 115% 和 145%,云粳 38 的增幅分别为 31% 和 25%;在  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 50/50 的营养条件下,4007、豫粳 7 号和桂单 4 号的干重和氮积累量也显著增加,但是增幅较小;武运粳 7 号、黔育 421 和 ELIO 在  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 75/25 和 25/75 的营养条件下差异不显著,其中 ELIO 甚至有下降趋势;在  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 25/75 的营养条件下,南光的干重和氮积累量均显著增加,云粳 38 的氮积累量也显著增加,而其他品种均无显著增加。可见,在不同铵硝配比中, $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 75/25 和 50/50 的营养条件对水稻的生长有较大的促进作用。

不同氮素利用效率水稻品种对  $\text{NO}_3^-$  反应不同。与纯铵营养条件下相比,在增硝营养条件下 7 个氮

高效水稻品种中有 5 个品种的干重和氮积累量有所增加, 而氮低效品种 ELIO 的生长没有显著变化。

表 1 不同水稻品种在不同铵硝配比 ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ) 营养条件下的干重

Table 1 The dry weight of different rice cultivars grown in the nutrient condition with different ratio of  $\text{NH}_4^+$  to  $\text{NO}_3^-$  ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ )

品种 Varieties	干重/g Dry weight per pot			
	100/0	75/25	50/50	25/75
南光 Nanguang	0.41 ± 0.01 <sup>d</sup>	0.88 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.78 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.64 ± 0.02 <sup>c</sup>
云梗 38 Yunjing 38	1.32 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.73 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.56 ± 0.04 <sup>b</sup>	1.29 ± 0.02 <sup>c</sup>
4007	1.04 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.17 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.21 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.01 ± 0.03 <sup>b</sup>
豫梗 7 号 Yujing 7	1.28 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.47 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.47 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.34 ± 0.04 <sup>b</sup>
桂单 4 号 Guidan 4	1.22 ± 0.04 <sup>b</sup>	1.25 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.37 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.23 ± 0.01 <sup>b</sup>
武运梗 7 Wuyunjing 7	1.15 ± 0.02 <sup>ab</sup>	1.20 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.18 ± 0.04 <sup>a</sup>	1.10 ± 0.03 <sup>b</sup>
黔育 421 Qianyu 421	1.23 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.25 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.28 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.25 ± 0.03 <sup>a</sup>
ELIO	1.30 ± 0.04 <sup>a</sup>	1.35 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.36 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.22 ± 0.02 <sup>b</sup>

注: 表中数据为 3 个重复的平均值。不同小写字母表示同一品种不同处理间在 0.05 水平上差异显著。

Note: Each value is the average of three replicates. Different samll letters indicate the significant difference of same cultivar between different treatments at 0.05 level. The same as follows.

表 2 不同铵硝配比 ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ) 营养条件下水稻的植株氮积累量

Table 2 The N accumulation of different rice cultivars grown in the nutrient condition with different ratio of  $\text{NH}_4^+$  to  $\text{NO}_3^-$  ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ )

品种 Varieties	氮积累量/mg N accumulation per pot			
	100/0	75/25	50/50	25/75
南光 Nanguang	13.9 ± 0.17 <sup>d</sup>	34.0 ± 0.71 <sup>a</sup>	27.3 ± 0.24 <sup>b</sup>	22.7 ± 0.65 <sup>c</sup>
云梗 38 Yunjing 38	43.8 ± 0.87 <sup>c</sup>	54.9 ± 0.73 <sup>a</sup>	51.4 ± 1.15 <sup>b</sup>	49.1 ± 1.09 <sup>b</sup>
4007	39.2 ± 0.61 <sup>b</sup>	42.8 ± 0.54 <sup>a</sup>	43.9 ± 0.70 <sup>a</sup>	25.5 ± 0.12 <sup>c</sup>
豫梗 7 号 Yujing 7	46.0 ± 0.60 <sup>b</sup>	52.3 ± 1.03 <sup>a</sup>	53.4 ± 1.79 <sup>a</sup>	48.5 ± 1.92 <sup>b</sup>
桂单 4 号 Guidan 4	44.1 ± 0.50 <sup>b</sup>	46.8 ± 1.57 <sup>a</sup>	46.0 ± 0.52 <sup>a</sup>	44.2 ± 1.11 <sup>ab</sup>
武运梗 7 Wuyunjing 7	42.5 ± 1.18 <sup>a</sup>	44.5 ± 1.37 <sup>a</sup>	43.0 ± 0.95 <sup>a</sup>	43.4 ± 0.20 <sup>a</sup>
黔育 421 Qianyu 421	49.9 ± 0.92 <sup>a</sup>	51.3 ± 1.67 <sup>a</sup>	52.5 ± 1.94 <sup>a</sup>	50.2 ± 0.83 <sup>a</sup>
ELIO	53.1 ± 0.96 <sup>a</sup>	53.0 ± 0.52 <sup>a</sup>	55.3 ± 0.43 <sup>a</sup>	45.0 ± 0.26 <sup>b</sup>

从不同水稻品种对增硝营养的反应来看, 南光和云梗 38 对硝态氮的响应程度最高, 且在  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 75/25 营养条件下的生长优于在 50/50 营养条件下的生长, ELIO 对硝态氮的响应程度最低, 在  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 100/0 和 75/25 营养条件下生长无显著差异。下面的内容具体分析了对增硝营养反应最强的南光、云梗 38 和反应最弱的 ELIO 在纯铵营养 ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 100/0) 和增硝营养 ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 75/25) 条件下的生长情况。

## 2.2 增硝营养对水稻光合速率的影响

与纯铵营养下的水稻相比, 在增硝营养 ( $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  为 75/25) 条件下生长的氮高效品种南光和云梗 38 叶片的净光合速率均显著增加, 而氮低效品种 ELIO 的光合速率增加不显著 (图 1)。其中, 南光和云梗 38 叶片的光合速率分别增加了 26.2% 和 21.9%。

## 2.3 增硝营养对水稻分蘖的影响

从图 2 可见, 与纯铵营养下生长的水稻相比, 在增硝营养下生长的南光和云梗 38 的分蘖数显著增加, 而 ELIO 的分蘖数增加不显著。其中, 南光和云梗 38 的分蘖数分别增加了 36.6% 和 33.5%。

## 2.4 增硝营养对不同品种水稻根系干重、体积和氮素吸收的影响

由表 3 可见, 在增硝营养条件下, 南光和云梗 38 的根系干重分别增加了 100% 和 21.0%, 根系氮积累量分别增加了 160% 和 23.6%, 而 ELIO 根系干重和氮积累量增加不显著。由表 3 还可看出, 增硝营养条件下, 南光根系的含氮量显著增加, 而云梗 38 和 ELIO 的含氮量增加不显著。可见, 不同水稻品种对增硝营养反应有较大差异, 增硝营养条件能够促进氮高效品种南光和云梗 38 根系的生长及氮素吸收量, 提高氮素利用率, 从而增加了干物质在根系的积累, 促进根系的生长, 而对氮低效品种 ELIO 根系的生长没有影响。

与纯铵营养条件下生长的水稻相比, 增硝营养可显著促进水稻根系体积的增加 (表 3)。其中, 南

光、云梗 38 和 ELIO 的根系体积分别增加了 84.7%、99.2% 和 46.1%。

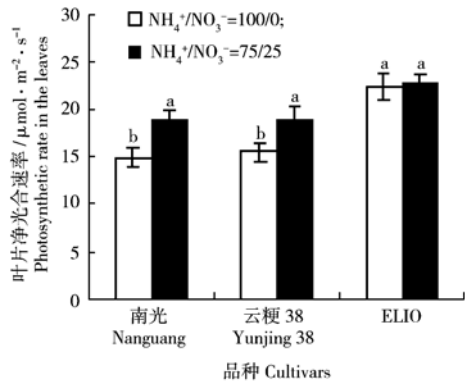


图 1 增硝营养对水稻叶片净光合速率的影响

Fig. 1 Effect of enhanced NO<sub>3</sub><sup>-</sup> on the photosynthetic rate in the leaves of rice

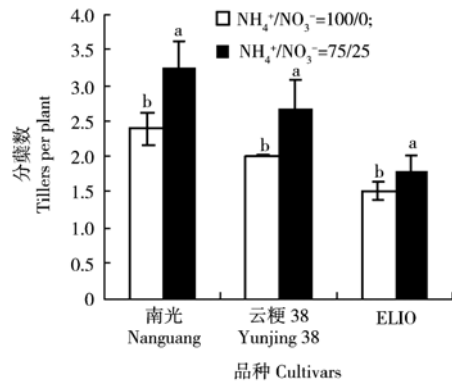


图 2 增硝营养对水稻分蘖数的影响

Fig. 2 Effect of enhanced NO<sub>3</sub><sup>-</sup> on the tillers of rice

表 3 增硝营养对不同品种水稻根系干重和氮积累量的影响

Table 3 Effect of enhanced NO<sub>3</sub><sup>-</sup> on the dry weight and N accumulation of root

品种 Cultivars	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	干重/g Dry weight per pot	含氮量/% N content	氮积累量/mg N accumulation per pot	体积/cm <sup>3</sup> Volume
南光 Nanguang	100/0	0.09 ± 0.02 <sup>b</sup>	2.18 ± 0.14 <sup>b</sup>	1.96 ± 0.17 <sup>b</sup>	1.44 ± 0.25 <sup>b</sup>
	75/25	0.18 ± 0.02 <sup>a</sup>	2.83 ± 0.22 <sup>a</sup>	5.10 ± 0.31 <sup>a</sup>	2.66 ± 0.18 <sup>a</sup>
云梗 38 Yunjing 38	100/0	0.19 ± 0.01 <sup>b</sup>	2.90 ± 0.24 <sup>a</sup>	5.51 ± 0.22 <sup>b</sup>	1.23 ± 0.33 <sup>b</sup>
	75/25	0.23 ± 0.02 <sup>a</sup>	2.96 ± 0.16 <sup>a</sup>	6.81 ± 0.29 <sup>a</sup>	2.45 ± 0.12 <sup>a</sup>
ELIO	100/0	0.21 ± 0.03 <sup>a</sup>	2.87 ± 0.21 <sup>a</sup>	6.03 ± 0.25 <sup>a</sup>	1.78 ± 0.12 <sup>b</sup>
	75/25	0.22 ± 0.01 <sup>a</sup>	2.85 ± 0.19 <sup>a</sup>	6.27 ± 0.23 <sup>a</sup>	2.60 ± 0.09 <sup>a</sup>

### 3 讨论

在小麦、大麦、玉米等作物上的研究都已证明，同种作物的不同基因型在离子吸收上往往存在较大的差别<sup>[9-10]</sup>。试验表明，水稻在氮素吸收上也存在着明显的基因型差异<sup>[7,11-12]</sup>。张亚丽等<sup>[13]</sup>曾根据不同水稻品种对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的反应程度把水稻分为硝高度响应型、硝中度响应型和硝低度响应型。在本试验的 8 个水稻品种中，南光和云梗 38 对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 最为敏感，ELIO 等其他 6 个品种对硝态氮响应程度较低。值得注意的是，增硝营养对本试验中 7 个氮高效水稻品种中的 5 个水稻品种生长均有显著促进作用，而对氮低效品种的生长促进作用较小，所以我们认为一部分水稻品种由于对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的响应度较强，从而促进了氮吸收，提高了氮吸收利用效率，水稻对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的响应度可能是水稻高效吸收利用氮素的机制之一，这个问题值得进一步深入研究。

水稻对两种形态的氮都可吸收和利用<sup>[14]</sup>。张亚丽等<sup>[13]</sup>在评价不同水稻基因型营养液对硝营养的响应时，干重和氮积累量可作为筛选的主要生理指标。从本研究结果可以看出，南光和云梗 38 的植株干重和氮积累量均在增硝营养下明显增加，说明增硝营养比纯铵营养更能促进南光和云梗 38 的生长，而对 ELIO 的生长没有显著影响。增硝营养能够大大扩大植株氮素累积的容量，这是作物增产的潜能之一。

氮素是叶绿体、蛋白质的主要构成要素，与植物的干物质生产和叶的光合成机能之间有较强的关系，是植物生长重要的元素之一。谈健康等<sup>[15]</sup>研究发现，水稻叶片光合作用对不同形态比例的氮素反应差异明显，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 比例为 25/75 时，光合速率最大。本研究结果表明增硝营养可促进部分水稻叶片光合系统活力，提高叶片光合速率，促进植株的分蘖，促进水稻生物量的增加。

增硝营养可以促进作物根系的生长<sup>[16-17]</sup>。张亚丽等<sup>[13]</sup>发现，在增硝营养下，水稻（8 叶 1 心）根系的干重比同期纯铵营养下高 20% ~ 40%，主要表现在有更多的侧根发生。Wang 等<sup>[16]</sup>的分根试验结果也表明，在 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 营养下的水稻侧根较缺 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 营养下水稻侧根生长好。在本研究中，增硝营养增加了部分水稻根系的干重和根体积，促进了水稻根系的生长。ELIO 根系干重虽然没有显著增加，但是根系

体积显著增加, 其中原因可能与根系根长和表面积等根系参数的变化有关, 具体原因有待进一步研究。

总之, 不同氮素利用效率水稻品种对  $\text{NO}_3^-$  营养的反应不同, 水稻对硝态氮的响应度强弱可能是水稻品种氮素效率差异性的因子之一。增硝营养下, 对硝敏感的水稻根系生物量增加且  $\text{NH}_4^+$  吸收速率及氮素同化能力增加, 扩大了植株氮素累积的容量。对于水稻来说, 谷粒中 70% 以上的氮以及新建光合作用叶片中 50% 以上的氮都来源于植株地上部组织中氮的再利用<sup>[16]</sup>, 所以对硝营养敏感的水稻在增硝营养条件下最终提高了其氮素利用效率, 从而提高了其生物产量和籽粒产量水平。

#### 参考文献:

- [1] Arth I, Frenzel P, Conrad R. Denitrification coupled to nitrification in the rhizosphere of rice soil [J]. *Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 509-515
- [2] Kronzucker H J, Kirk G J D, Siddiqi M Y, et al. Effects of hypoxia on  $^{13}\text{NH}_4^+$  flux in rice roots: kinetics and compartmental analysis [J]. *Plant Physiology*, 1998, 116: 581-587
- [3] 崔国贤, 沈其荣, 崔国清, 等. 水稻旱作及对旱作环境的适应性研究进展 [J]. *作物研究*, 2001(3): 70-73
- [4] Kirk G J D. Plant-mediated processes to acquire nutrients: nitrogen uptake by rice plants [J]. *Plant and Soil*, 2001, 232(1/2): 129-134
- [5] Wiesler F, Horst W J. Root growth and nitrate utilization of maize cultivars under field condition [J]. *Plant and Soil*, 1994, 163(6): 267-277
- [6] 段英华, 张亚丽, 沈其荣, 等. 增硝营养对不同基因型水稻苗期氮素吸收同化的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(2): 160-165
- [7] 段英华, 张亚丽, 沈其荣. 增硝营养对不同基因型水稻苗期吸铵和生长的影响 [J]. *土壤学报*, 2005, 42(2): 260-265
- [8] 毛达如. *植物营养研究方法* [M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994: 16
- [9] Walter J H, Mohamed A, Franz W. Differences between wheat cultivars in acquisition and utilization of phosphorous [J]. *Zeitschrift für Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, 1996, 159(2): 155-161
- [10] Wu F B, Zhang G P, Dominy P. Four barley genotypes respond differently to cadmium: lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50: 67-78
- [11] 封克, 汪晓丽, 陈平, 等. 不同苗期水稻  $\text{NO}_3^-$  吸收特点及其受  $\text{NH}_4^+$  的影响 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(3): 307-312
- [12] Yamasaki T, Seino K. Use of nitrate fertilizer for the cultivation of paddy rice. Part I. About the physiological character of rice seedlings supplied with nitrate as sources of nitrogen [J]. *J Sci Soil Manure Jpn*, 1965, 36: 153-158
- [13] 张亚丽, 段英华, 沈其荣. 水稻对硝态氮响应的生理指标筛选 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 571-576
- [14] Sasakawa H, Yamamoto Y. Comparison of the uptake of nitrate and ammonium by rice seedlings [J]. *Plant Physiology*, 1978, 62: 665-669
- [15] 谈建康, 张亚丽, 沈其荣, 等. 不同形态氮素对水稻苗期水分利用效率及其生物效应的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2002, 25(3): 49-52
- [16] Wang X B, Wu P, Hu B, et al. Effect of nitrate on the growth of lateral root and nitrogen absorption in rice [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(6): 678-683
- [17] Sattelmacher B, Thoms K. Morphology and physiology of the seminal root system of young maize (*Zea mays* L.) as influenced by a locally restricted nitrate supply [J]. *Zeitschrift für Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, 1995, 158(5): 493-497

责任编辑: 范雪梅