

## 不同水稻基因型的根系形态生理特性与高效氮素吸收\*

程建峰<sup>1,2</sup> 戴廷波<sup>1</sup> 荆奇<sup>1</sup> 姜东<sup>1</sup> 潘晓云<sup>2</sup> 曹卫星<sup>1</sup>

(1 南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095)

(2 江西农业大学农学院, 南昌 330045)

**摘要** 土培盆栽试验下, 采用 3 个氮素吸收效率 (NAE) 有显著差异的水稻基因型五优 244 (低 NAE)、R83212 (中 NAE) 和水源 349 (高 NAE) 为材料, 研究了水稻拔节期根系形态特征和生理特性的基因型差异及其与高效氮素吸收的关系。结果表明, 水源 349 总根长、根密度、根表面积和根干重极显著高于 R83212 和五优 244, 且根系总吸收面积、活跃吸收面积和活跃吸收面积/总吸收面积最大, 为高效氮素吸收提供了条件。水源 349 具有较强的根系耗能、氧化还原力、硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合酶和谷氨酸脱氢酶活性, 促进根内碳水化合物合成及氮吸收和同化, 提高了根系伤流强度及可溶性糖和游离氨基酸含量, 进而显著提高了地上部氮含量和氮积累量。逐步回归表明, 拔节期较高的根密度、根系总吸收面积和地上部氮含量是水稻氮素高效吸收的重要特征, 可作为水稻氮素高效管理和遗传改良的可靠指标。

**关键词** 水稻; 基因型; 氮素吸收效率; 根系形态; 根系生理

**中图分类号** S143.1 **文献标识码** A

氮素是水稻生长发育所需的必需元素, 但不合理的氮肥施用造成氮利用率下降、经济效益低下、环境污染和危害人类健康<sup>[1, 2]</sup>。在实践上最有效的解决途径是提高水稻自身的氮素吸收效率, 减少氮肥用量, 特别是提高移栽至拔节阶段的氮素吸收, 此阶段吸氮量占全生育期总吸氮量的 50% 以上, 且吸收比例随氮肥用量的升高而增加<sup>[3, 4]</sup>。根系作为植株养分吸收和运输的器官, 是土壤养分的直接利用者和产量的重要贡献者, 其功能发挥与根系形态特征和生理特性密切相关, 并受基因控制和环境因素的双重影响<sup>[5, 6]</sup>。因此, 根系发育状况及其获取氮素能力严重影响着植株氮素营养状况, 国内外为此进行了大量研究, 明确了根系对氮素反应的基因型差异、氮对根群分布的影响、氮肥运筹对根系生长的调控和根系吸氮规律等<sup>[7~11]</sup>, 但对不同水稻基因型间的根系形态和生理特性差异缺乏系统研究, 尤其是吸收量较大的拔节期根系状况。为此, 本试验在前期工作的基础上, 选用 3 个氮吸收效率存在显著差异的水稻基因型为材料, 研究了水稻拔节期根系形态特征和生理特性的基因型差异及其与高效氮素吸

收的关系, 为提高水稻氮素吸收效率的栽培调控和遗传改良提供理论依据及技术指标。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计与处理

2004 年在江西农业大学植物生理研究室进行土培盆栽试验。材料为已鉴定的 3 个氮素吸收效率 (NAE) 显著不同的水稻基因型五优 244 (低 NAE)、R83212 (中 NAE) 和水源 349 (高 NAE)<sup>(1)</sup>。盆钵上内径为 24 cm, 下内径为 18 cm, 高 17 cm, 装潴育型水稻土 5 kg 盆<sup>-1</sup>。土壤有机质 25.46 g kg<sup>-1</sup>, 容重 1.07 g cm<sup>-3</sup>, pH 为 6.12, 全氮 1.97 g kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 74.25 mg kg<sup>-1</sup>, 速效磷 8.87 mg kg<sup>-1</sup>。常规露地湿润育秧, 选取生长一致的五叶一心秧苗单本移栽, 每盆 4 株, 每基因型 20 盆, 施氮水平为 N 0.139 g kg<sup>-1</sup>, 为水稻 NAE 基因型鉴定的适宜氮水平<sup>(1)</sup>。每基因型种植 10 盆, 不施氮, 供计算土壤供氮量之用<sup>[12]</sup>。

### 1.2 测定项目与方法

于拔节期每基因型选生长较一致的水稻 8 盆,

\* 国家自然科学基金重点项目 (30030090) 和国家 863 计划项目 (2003AA209030) 资助

- 通讯作者, E-mail: caov@njau.edu.cn

作者简介: 程建峰 (1972~), 男, 江西横峰人, 博士, 副教授, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: chjfkarl@163.com

(1) 程建峰. 水稻高效氮素营养的种质鉴定及生理基础. 南京农业大学博士学位论文, 2005. 68~85

收稿日期: 2005-12-31; 收到修改稿日期: 2006-04-20

按照张宪政等<sup>[13]</sup>的方法, 冲洗出干净、具有完整根系的水稻植株, 用于根系形态和生理指标测定。其他盆栽待生长成熟时, 用于产量测定。

**1.2.1 器官含氮量和氮素吸收效率** 将部分稻株分为根系和地上部, 烘至恒重, 测定器官干重和含氮量<sup>[13]</sup>。计算氮素吸收效率= 植株氮积累量/(土壤供氮量+ 施氮量) @100%, 土壤供氮量为不施氮下的植株氮积累量<sup>[12]</sup>。

**1.2.2 根系形态特征** 采用直接称重法测定根鲜重(RFW)和烘干称重法测定根干重(RDW)<sup>[13]</sup>, 采用排水法测定根系体积<sup>[13]</sup>, 采用交叉截取法测定总根长(RL)<sup>[5]</sup>, 根半径(RR) = (RFW/RL @P)<sup>1/2</sup>, 根表面积(RS) = 2PRR @RL, 根密度(RD) = RL/V(V为根系生长的土壤体积)。

**1.2.3 根系活力** 采用甲烯兰吸附法测定根系总吸收面积(St)、活跃吸收面积(Sa)和 Sa/St<sup>[13]</sup>; 采用  $\Delta$ 萘胺法和 TTC(三苯基氯化四氮唑)还原法分别测定根系氧化力和还原力<sup>[13]</sup>。采用 YSI model 5300 型生物耗氧仪测定根系离子吸收耗能<sup>[14]</sup>。

茎基部节间伤流液的收集与测定于拔节期进行, 选取长势一致的稻株 6 穴, 按照常江等<sup>[15]</sup>的方法收集伤流液, 收集时间统一为 6:00~ 12:00。伤流液带回实验室后, 称重, 计算伤流强度。取出脱脂棉放入注射器中挤出伤流液, 贮于瓶中密封, 于 -25 e 保存待测。采用蒽酮比色法和茚三酮比色法分别测定伤流液中可溶性糖和游离氨基酸含量<sup>[13]</sup>。

**1.2.4 根系氮代谢酶** 取直径 1 mm 的功能根前段(约 1cm)。硝酸还原酶(NR)活性测定参照 Ra2 jasek 等的方法<sup>[16]</sup>, 谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合酶(GOGAT)活性测定参照 Zhang 等方法<sup>[17]</sup>, 谷氨酸脱氢酶(GDH)活性测定参照 Loulakakis 等的方法<sup>[18]</sup>。

### 1.3 数据分析

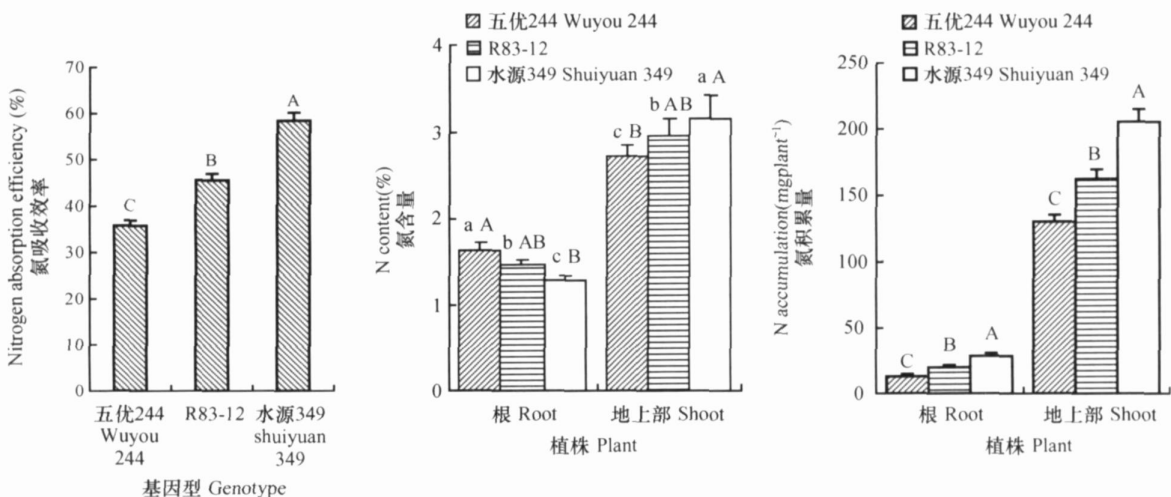
数据以平均数 ± 标准误(Mean ± SE)表示, 进行显著性测验。对基因型间达极显著差异的根系形态和生理指标与 NAE 进行逐步回归。采用 SPSS 统计软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮素吸收效率与植株含氮量和氮积累量

不同水稻基因型拔节期氮素吸收效率(NAE)差异极显著(图 1), 水源 349 的 NAE 为最大, 是五优 244 的 1.63 倍, 是 R83212 的 1.28 倍。这说明水源 349 是高效氮素吸收基因型, 五优 244 是低效氮素吸收基因型, R83212 为中效氮素吸收基因型。

拔节期水稻地上部氮含量、根系和地上部氮积累量为水源 349 > R83212 > 五优 244, 根系氮含量则相反, 基因型间的根系和地上部氮含量差异显著, 根系和地上部氮积累量差异极显著(图 1)。表明高 NAE 水稻具有较高的氮积累能力, 且能维持较低根系氮水平。



注: 大、小字母分别表示 1% 和 5% 差异显著性 Note: Capital and small letters indicate significance of difference at 1% and 5% levels, respectively

图 1 不同水稻基因型拔节期氮素吸收效率与植株氮含量和氮积累量的差异

Fig 1 Differences between three different genotypes of rice in NAE, N content and N accumulation at the jointing stage

## 2.2 根系形态特征

不同水稻基因型的单株根系形态指标以水源349最高、五优244最低,基因型间的总根长、根密度、根体积、根表面积和根干重达极显著差异(表

1)。可见,高NAE水稻根系生长发育良好,增大了根系与土壤的接触面积,为氮素的获取提供了基本条件。

表1 不同水稻基因型的单株根系形态特征差异

Table 1 Differences between three different genotypes of rice in root morphological characters

基因型 Genotype	总根长 Total length (m)	根密度 Root density ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	根体积 Root volume ( $\text{cm}^3$ )	根表面积 Root surface area ( $\text{cm}^2$ )	根干重 Root dry weight (g)
五优244 Wuyou 244	16.5? 0.7 C	0.26? 0.01 C	23.6? 1.2 C	463.9? 19.9 C	2.24? 0.02 C
R83212	21.4? 0.7 B	0.33? 0.01 B	34.2? 1.5 B	701.9? 23.6 B	3.35? 0.08 B
水源349 Shuiyuan 349	28.4? 0.6 A	0.44? 0.01 A	51.4? 2.1 A	1059? 31 A	4.14? 0.07 A

注:大写字母表示1%差异显著性 Note: Capital letters indicate significance of difference at 1% level

## 2.3 根系活力

2.3.1 根系表面特性 作物根系总吸收面积和活跃吸收面积等根表面特性与作物养分高效利用呈正相关<sup>[19]</sup>。不同水稻基因型根系总吸收面积、活跃

吸收面积和活跃吸收面积/总吸收面积均表现为水源349> R83212> 五优244,基因型间达极显著差异(表2)。这表明高NAE水稻根系总吸收面积和活跃吸收面积大,能从土壤中吸收较多的氮素。

表2 不同水稻基因型单株根表面特性的差异

Table 2 Differences between three different genotypes of rice in root surface characteristics

基因型 Genotype	总吸收面积 $S_t$ Total absorption area ( $\text{m}^2$ )	活跃吸收面积 $S_a$ Active absorption area ( $\text{m}^2$ )	活跃吸收面积/总吸收面积 $S_a/S_t$
五优244 Wuyou 244	1.65? 0.21 C	0.80? 0.05 C	0.45? 0.05 C
R83212	1.92? 0.14 B	1.08? 0.02 B	0.56? 0.03 B
水源349 Shuiyuan 349	2.34? 0.17 A	1.65? 0.03 A	0.71? 0.01 A

注:大写字母表示1%差异显著性 Note: Capital letters indicate the significance of difference at 1% level

2.3.2 根系氧化还原力 不同水稻基因型根系耗能、氧化力和还原力表现为水源349> R83212> 五优244,基因型间的根系氧化力达极显著差异,根系

耗能和根系还原力达显著差异(表3)。这说明高NAE水稻根系氧化还原能力强,能将根系吸收的物质迅速同化,促进根系对氮高效吸收<sup>[20]</sup>。

表3 不同水稻基因型的单株根系氧化还原力差异

Table 3 Differences between three different genotypes of rice in root oxidizing and reducing capacities

基因型 Genotype	根系耗能 Energy cost ( $\text{O}_2 \text{L g}^{-1} \text{min}^{-1} \text{FW}$ )	根系氧化力 Oxidizing capacity ( $\text{Lg g}^{-1} \text{h}^{-1} \text{FW}$ )	根系还原力 Reducing capacity ( $\text{Lg g}^{-1} \text{h}^{-1} \text{FW}$ )
五优244 Wuyou 244	5.4? 0.1 c B	20.3? 0.1 C	73.7? 0.9 c B
R83212	6.2? 0.0 b A	25.1? 0.3 B	83.9? 1.2 b AB
水源349 Shuiyuan 349	7.2? 0.1 a A	31.9? 0.6 A	92.3? 1.5 a A

注:大、小写字母分别表示1%和5%差异显著性 Note: Capital and small letters indicate significance of difference at 1% and 5% levels, respectively

2.3.3 根系伤流量及其组分差异 根系伤流是反映根系吸收、合成和运输营养及根系同化能力的重要指标,是根系生长和代谢的综合表现<sup>[15]</sup>。不同水稻基因型的根系伤流强度及伤流液中游离氨基酸和可

溶性糖含量的差异达极显著水平,以水源349最高,五优244最低(表4)。这表明高NAE水稻根系氮素同化、碳水化合物的合成能力较强,根系物质向地上部的输送较快,有利于地上部干物质和氮素的积累。

表 4 不同水稻基因型根系伤流及其组分

Table 4 Differences between three different genotypes of rice in intensity and composition of basal internode bleeding

基因型 Genotype	伤流强度 Bleeding intensity (mg h <sup>-1</sup> stem <sup>-1</sup> )	游离氨基酸总量 Total free amino acid content (mg L <sup>-1</sup> )	可溶性糖总量 Total soluble sugar content (%)
五优 244 Wuyou 244	64.4? 0.9 C	17.3? 0.1 C	0.22? 0.01 C
R83212	78.6? 1.1 B	22.4? 0.3 B	0.31? 0.01 B
水源 349 Shuiyuan 349	91.2? 1.5 A	30.0? 0.5 A	0.37? 0.01 A

注: 大写字母表示 1% 差异显著性 Note: Capital letters indicate the significance of difference at 1% level

## 2.4 根系氮代谢酶活性

根系吸收的氮素必须同化为其他有机物质(如蛋白质, 氨基酸和激素等)才能被植物所利用, 同化能力的大小受控于氮代谢酶活性<sup>[16~18]</sup>。由表 5 可见, 高 NAE 水稻根中的氮代谢酶活性较高, 不同水

稻基因型的硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸合酶和谷氨酸脱氢酶均表现为水源 349> R83212> 五优 244, 谷氨酸合酶达显著差异, 其他氮代谢酶均达极显著差异。

表 5 不同水稻基因型的根系氮代谢酶活性差异

Table 5 Differences between three different genotypes of rice in root nitrogen metabolic enzyme activity

基因型 Genotype	硝酸还原酶 Nitrate reductase (g h <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> FW)	谷氨酰胺合成酶 Glutamine synthetase (Lmol h <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> FW)	谷氨酸合酶 Glutamate synthase (Lmol h <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> FW)	谷氨酸脱氢酶 Glutamate dehydrogenase (Lmol h <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> FW)
五优 244 Wuyou 244	19.1? 0.8 C	124.3? 2.1 C	33.6? 0.7 c B	9.3? 0.1 C
R83212	27.3? 0.5 B	145.6? 1.8 B	40.2? 1.0 b B	14.2? 0.2 B
水源 349 Shuiyuan 349	36.5? 1.1 A	168.7? 1.3 A	44.7? 0.7 a A	19.3? 0.2 A

注: 大写字母表示 1% 差异显著性 Note: Capital letters indicate the significance of difference at 1% level

## 2.5 根系形态和生理特性与氮素吸收效率的关系

水稻拔节期根系形态指标中(表 6), 以根密度对水稻氮素吸收效率(NAE)影响最大, 决定了该时期 NAE 的 91.0%, 这表明单位土壤体积的根长在水稻高效氮素吸收中起着决定性作用, 可将其作为水稻高 NAE 的育种的形态选择指标加以应用。

水稻拔节期根系生理指标中(表 6), 根系总吸收面积和地上部含 N 量共同决定了该时期 NAE 的 88.9%, 效应的大小为根系总吸收面积> 地上部含 N 量。可见, 水稻拔节期 NAE 的基因型差异主要是由根系总吸收面积和地上部含氮量这二个生理指标造成的, 因此提高上述生理指标是提高水稻 NAE 栽培和遗传改良的重要途径。

表 6 水稻根系形态和生理特性与氮素吸收效率的逐步回归

Table 6 Stepwise regression of NAE against root morphological and physiological characters at the jointing stage of rice

指标类型 Type of index	入选变量 Selected dependent	回归方程 Regression equation	标准化偏回归系数 Standardized coefficient	决定系数 R <sup>2</sup>
根系形态特性 Root morphological character	根密度 (X) Root density	Y= 2.930+ 126.353X	X(B <sub>1</sub> )= 0.954	0.910* *
根系生理特性 Root physiological character	根总吸收面积 (X <sub>1</sub> ) Total root absorption area	Y= 14.468+ 5.176X <sub>1</sub> + 7.300X <sub>2</sub>	X(B <sub>1</sub> )= 0.697	0.889* *
	地上部 N 含量 (X <sub>2</sub> ) Shoot N content		X(B <sub>2</sub> )= 0.298	

注: \*\* 表示 0.01 水平的差异显著性 Note: Significant at the 0.01 level

### 3 小结与讨论

#### 3.1 水稻根系形态发育与高效氮素吸收的关系

植物所需的氮除种子提供外,绝大部分来自土壤,而根系是植物从土壤中获取氮的主要器官。氮素对根系形态、生长及其在介质中的分布影响是所有矿质营养中最大的<sup>[21]</sup>。本研究表明,高 NAE 基因型水稻的根数、根体积、根表面积和根密度较大,与 Ladha 等的报道一致<sup>[7]</sup>。说明水稻高效氮素吸收与其根系形态关系极为密切,即高效氮素吸收水稻可通过发育良好的根系形态来提高根系对氮的吸收和利用能力,从而提高地上部氮含量和氮积累量。逐步回归表明,根密度(单位土壤体积的根长)对水稻高效氮素吸收起着决定性作用,与根系对氮肥响应的敏感指标))) 根系表面积不同<sup>[7]</sup>,因此培育或选育根密度大的水稻基因型有利于提高水稻自身对氮素的高效吸收。

#### 3.2 水稻根系生理特性与高效氮素吸收的关系

土壤氮素和肥料氮素经根系吸收进体内后,只有不断的被同化和转运才能更有效地再吸收,无疑根系生理特性对高效氮素吸收产生重要影响<sup>[22]</sup>。根系吸收离子是一个主动的需能过程<sup>[23]</sup>,高 NAE 水稻的根系耗能多,为高效氮素吸收和同化提供了能量来源。植物不同基因型的吸收能力与根系活力大小有关<sup>[12]</sup>,本研究表明高 NAE 水稻基因型的根系氧化力和还原力强,总吸收面积和活跃吸收面积大,有利于植株根部对氮素的高效吸收和可溶性糖含量的增加。同时发现,高 NAE 水稻根系 NR、GS、GOGAT 和 GDH 的活性均极显著高于低 NAE 水稻,可将根系吸收进根内的大量无机氮迅速同化为有机氮,并向地上部运输,使得根系伤流强和伤流中游离氨基酸含量升高,导致地上部氮含量和氮积累量极显著增加。逐步回归表明,根系总吸收面积和地上部含氮量是造成水稻 NAE 差异的主要生理原因,可作为水稻高 NAE 栽培调控的主攻方向和遗传改良的生理选择指标。

#### 3.3 水稻根系形态发育与生理特性的关系

作物可以通过某种机制感知根际养分变化,然后通过启动体内特定基因的表达和相应的生理生态反应,最终通过根系的形态和生理学变化,来增加养分吸收,因此植物对养分的吸收是根系形态特征和生理特性共同影响的结果<sup>[24]</sup>。本研究表明,根系形态发育良好的高 NAE 水稻基因型的根系生理特性

也较好,即水稻根系形态发育和生理特性存在一致性,结合前人的研究结果<sup>[25~27]</sup>分析,可推断如下几点:(1)良好的根系形态发育增加了根系对氮素的接触面积,为根系吸收氮提供了最基本的条件;(2)较高的根系氧化力、还原力和耗能为水稻根系吸收氮提供了充足的能量,促进了根系对氮素的高效吸收;(3)根系高活性的氮代谢酶有效地同化根系大量吸收的氮素并向地上部输送,造成地上部旺盛生长;(4)水稻地上部的旺盛生长增加了植株对氮的生理需求量,减少了再循环的物质质量,促进根系的形态发育和对氮的吸收。至于上述推测正确与否及何种原因起决定性作用,有待于进一步深入研究和验证。

### 参考文献

- [1] 李伟波, 吴留松, 廖海秋, 等. 太湖地区高产稻田的氮肥施用与作物吸收利用研究. 土壤学报, 1997, 34(1): 61~73. Li W B, Wu L S, Liao H Q, et al. Application and crop recovery of N<sub>2</sub> fertilizer in high yielding paddy fields of Taihu region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1): 61~73
- [2] J Gao X J, Hu X F, Wang S P, et al. Nitrogen losses from flooded rice field. Pedosphere, 2002, 12(2): 151~156
- [3] 吴伟明, 程式华. 水稻根系育种的意义与前景. 中国水稻科学, 2005, 19(2): 174~180. Wu W M, Cheng S H. Significance and prospects of breeding for root system in rice (*Oryza sativa* L.) (In Chinese). Chinese Journal of Rice Science, 2005, 19(2): 174~180
- [4] 闫德智, 王德建, 林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的影响. 土壤学报, 2005, 42(3): 440~446. Yan D Z, Wang D J, Lin J H. Effects of fertilizer N application on rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 440~446
- [5] 程建峰, 潘晓云, 刘宜柏. 土壤条件对陆稻根系生长的影响. 土壤学报, 2002, 39(4): 590~598. Cheng J F, Pan X Y, Liu Y B. Studies on the growth of upland rice roots under various soil conditions (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 590~598
- [6] Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U. Plant Root. New York: Marcel Dekker Press, 2003
- [7] Ladha J K, Kirk G J D, Bennett J, et al. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved lowland rice germplasm. Field Crops Research, 1998, 56: 41~71
- [8] Yang C H, Yang L Z, Yang Y X, et al. Rice root growth and nutrient uptake as influenced by organic manure in continuously and alternately flooded paddy soils. Agricultural Water Management, 2004, 70(1): 67~81
- [9] 王余龙, 姚有礼, 刘宝玉, 等. 不同生育时期氮素供应水平对杂交水稻根系生长及其活力的影响. 作物学报, 1997, 23(6): 699~706. Wang Y L, Yao Y L, Liu B Y, et al. Effect of nitrogen supplying levels and timings on the development of roots in hybrid

- brid indica rice (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23 (6): 699~ 706
- [10] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山, 等. 水稻根系在根袋处理条件下对氮养分的反应. *生态学报*, 2003, 23(6): 1 109~ 1 116. Cai K Z, Luo S M, Duan X S, et al. The response of the rice root system to nitrogen conditions under root confinement (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1 109~ 1 116
- [11] 董桂春, 王余龙, 吴华, 等. 水稻主要根系性状对施氮时期反应的品种间差异. *作物学报*, 2003, 29(6): 871~ 877. Dong G C, Wang Y L, Wu H, et al. Varietal differences in response in rice (*Oryza sativa* L.) (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(6): 871~ 877
- [12] Cassman K G, Dobmann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 2002, 31 (2): 132~ 140
- [13] 张宪政, 陈凤玉, 王荣富. 植物生理学实验技术. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994. Zhang X Z, Chen F Y, Wang R F. Experiment Technology of Plant Physiology (In Chinese). Shenyang: Liaoning Sciences and Technology Press, 1994
- [14] 石庆华, Ries de Visser. 杂交水稻赣化 7 号的植株生长、离子吸收和维持呼吸的能量消耗. *中国水稻科学*, 2001, 15(3): 182~ 186. Shi Q H, Ries de Visser. Energy cost for growth, ion uptake and maintenance of hybrid rice Ganhua 7 (In Chinese). *Chinese Journal of Rice Science*, 2001, 15(3): 182~ 186
- [15] 常江, 张自立, 郜红建, 等. 外源稀土对水稻伤流组分的影响. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(5): 522~ 525. Chang J, Zhang Z L, Gao H J, et al. Effect of rare earth on composition of bleeding sap of rice (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(5): 522~ 525
- [16] Rajasek V K, Mohr H. Appearance of nitrate reductase in cotyledons of the mustard seedling as affected by nitrate, phytochrome and photooxidative damage of plastids. *Planta*, 1986, 168: 369~ 376
- [17] Zhang C F, Peng S B, Bennet J. Glutamine synthetase and its isoforms in rice spikelets and rachis during grain development. *J. Plant Physiol.*, 2000, 156: 230~ 233
- [18] Loulakakis K A, Roubelakis Angelakis K A. Intracellular localization and properties of NADH-glutamate dehydrogenase from *Vitis vinifera* L.: Purification and characterization of the major leaf isoenzyme. *J. Exp. Bot.*, 1990, 41: 1 223~ 1 230
- [19] 邹春琴, 李振声, 李继云. 小麦对钾高效吸收的根系形态学和生理学特征. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 36~ 43. Zou C Q, Li Z S, Li J Y. Study on difference in morphological and physiological characters of wheat varieties to potassium (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1): 36~ 43
- [20] 熊明彪, 田应兵, 熊晓山, 等. 钾肥对冬小麦根系营养生态的影响. *土壤学报*, 2004, 41(2): 285~ 291. Xiong M B, Tian Y B, Xiong X S, et al. Effects of potassium fertilizer on winter wheat root nutritional ecology (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 285~ 291
- [21] Marschner H, Kirkby E A, Cakmak T. Effect of mineral nutritional status on shoot/root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47: 1 255~ 1 263
- [22] 江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径. *中国水稻科学*, 2002, 16(3): 261~ 264. Jiang L G, Cao W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice (In Chinese). *Chinese Journal of Rice Science*, 2002, 16(3): 261~ 264
- [23] Marschner H, Romheld V, Cakmak I. Mineral Nutrition of Higher Plants. London: Academic Press, 1995, 270~ 274
- [24] Lynch J P. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiol.*, 1995, 109: 7~ 13
- [25] Wade G, Shoji S, Mae T. The relationship nitrogen absorption and growth and yield of rice plants. *Japanese Agric Res.*, 1986, 20: 135~ 145
- [26] Bufalo A J, Bollich P K, Kovar J L. Rice variety differences in dry matter and nitrogen accumulation as related to plant stature and maturity group. *J. Plant Nutr.*, 1997, 20(9): 1 203~ 1 224
- [27] Bufalo A J, Bollich P K, Kovar J L. Rice plant growth and nitrogen accumulation from a midseason application. *J. Plant Nutr.*, 1997, 20(9): 1 191~ 1 201

## ROOT MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS IN RELATION TO NITROGEN ABSORPTION EFFICIENCY IN DIFFERENT RICE GENOTYPES

Cheng Jianfeng<sup>1, 2</sup> Dai Tingbo<sup>1</sup> Jing Qi<sup>1</sup> Jiang Dong<sup>1</sup> Pan Xiaoyun<sup>2</sup> Cao Weixing<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Crop Growth Regulation, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract** Three rice genotypes differing in nitrogen absorption efficiency (NAE), namely Wuyou 244 low in NAE, R832 12 medium in NAE and Shuiyuan 349 high in NAE, were planted in a pot experiment to investigate physiological and morphological characteristics of the roots of these plants growing with optimum nitrogen supply at the jointing stage, and their relationships with NAE. Results showed that Shuiyuan 349 was much higher than R83212 and Wuyou 244 in total length, density, surface area and dry weight of roots, and the highest in total absorption area (St), active absorption area (Sa) and ratio of Sa/St of roots, which were essential conditions for efficient nitrogen absorption. Moreover, Shuiyuan 349 was also higher in energy con-

sumption, oxidizing capacity, reducing capacity and activities of nitrate reductase, glutamine synthetase, glutamate synthase and glutamate dehydrogenase in roots, which accelerated carbohydrate synthesis and nitrogen uptake and assimilation in roots, and enhanced bleeding intensity, free amino acid and soluble sugar content in roots, thus resulting in significantly high nitrogen content and accumulation in shoots. Stepwise regression indicated that root density, root total absorption area and nitrogen content in shoots at the jointing stage were the main characters of high efficient nitrogen absorption of rice and could be regarded as reliable indicators for efficient nitrogen management and genetic improvement of rice.

Key words Rice; Genotype; Nitrogen absorption efficiency; Root morphology; Root physiology