

红壤区不同产量籼稻品种苗期根表和根际土壤硝化特征

李奕林, 王兴祥*, 张桃林

(中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:以不同产量籼稻品种中旱 22(ZH, 高品种)和禾盛 10 号(HS, 低品种)为材料, 采用根际培养箱(三室)——速冻切片技术研究了红壤水稻土种植条件下, 水稻苗期生长、氮素积累和氮素利用率(*NUE*)、根孔隙度(*POR*)、根际土壤矿质态氮含量和硝化强度。结果表明, ZH 苗期生长、氮素吸收及 *NUE* 均显著优于 HS, 且 ZH 单株不定根数量及根系通气组织发育程度(用 *POR* 表示)均显著高于 HS。ZH 根际和土体土壤中铵(NH_4^+)含量始终低于 HS, 而硝(NO_3^-)含量则始终高于 HS, 但二者根表土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量均无显著差异。ZH 和 HS 硝化强度最大发生部位均是在距根表 2 mm 的根际土壤, 分别为: $0.48 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 和 $0.31 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。随着距根表越远, 硝化强度就越弱, 直至距根表 10 ~ 20 mm 处土壤硝化强度就接近于土体土壤。ZH 根际土壤硝化强度始终显著高于 HS, 但二者根表和土体土壤硝化强度均无显著差异。与不种水稻的 CK 相比, 根际土壤硝化强度提高了约 2 ~ 3.5 倍。尽管红壤水稻土硝化作用很弱, 但红壤区水稻根际硝化作用与水稻苗期生长和氮素营养密切相关。

关键词: 籼稻; 根际; 硝化作用; 氮素利用率

文章编号: 1000-0933(2009)07-3704-09 中图分类号: Q945.1, S154.4 文献标识码: A

Research on characteristics of root surface and rhizosphere nitrification for Indica cultivars with different yield potential at the seedling stage in red soil regions

LI Yi-Lin, WANG Xing-Xiang*, ZHANG Tao-Lin

Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3704 ~ 3712.

Abstract: Two different Indica cultivars, Zhong Han 22 (ZH, high yield) and He Sheng 10 (HS, low yield) popularly planted in red paddy soil were used to study nitrogen (N) nutritional characteristics using a rhizobox with three compartments and a soil-slicing method. Rice plant biomass, N accumulation, N use efficiency (*NUE*), porosity of root (*POR*), rhizosphere mineral N concentration and nitrification activity were determined at 40, 50 and 60 d after sowing. The results obtained were showed as follows. The rice plant biomass, N accumulation, *NUE* and number of adventitious roots per plant for ZH were all superior to HS. Furthermore, aerenchyma development (expressed as *POR*) of ZH was also much better than that of HS. The ammonium (NH_4^+) concentrations in rhizosphere and bulk soil for ZH were much lower than those for HS, but the reverse was true for nitrate (NO_3^-). The mineral N (NH_4^+ and NO_3^-) concentrations in root surface soil were not significantly different between ZH and HS. Interestingly, the maximal nitrification activities were always found at the distance of 2 mm away from the root surface, and they were 0.48 and $0.31 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ for ZH and HS, respectively. The nitrification activity decreased with the increasing distance from the root surface, and it was almost the same at the zone of 10 — 20 mm away from the root surface as the bulk soil. The rhizosphere nitrification activities for ZH were always much higher than HS, while there had no statistically significant difference of nitrification activity in root

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB109301); 中国科学院知识创新工程资助项目(ISSASIP0705)

收稿日期: 2009-02-27; 修订日期: 2009-03-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xxwang@issas.ac.cn

surface and bulk soil between both rice cultivars. Compared with the CK (rice plant free), the rhizosphere nitrification activities increased for 2—3.5 times. Although rhizosphere nitrification happened in red paddy soil was very weak, it might be important for rice growth and N nutrition at the seedling stage.

Key Words: Indica; rhizosphere; nitrification; nitrogen use efficiency

由于稻田土壤氮素形态以铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)为主,因此以往对水稻氮素营养的研究多集中于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的研究^[1]。然而由于水稻具有通气组织,能够将氧气从地上部向根部运输,并将其中一部分氧气释放到根际土壤中,根表和根际土壤立即发生硝化作用^[2~4]。越来越多的研究表明,由根际硝化作用形成的硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)对水稻氮素营养起着重要的作用^[5,6]。

以往研究表明,太湖地区乌栅土发育水稻土种植条件下,籼稻苗期根际硝化强度显著高于粳稻,且二者硝化作用差异是引起二者生长和氮素利用率(*NUE*)差异的主要原因之一^[7]。热带和亚热带红壤地区水热资源丰富,生产潜力大,是我国重要的水稻产区之一。而红壤水稻土由于 pH 值较低等因素,导致土壤硝化作用很弱。目前尚未有红壤水稻土种植条件下,不同水稻品种根际土壤硝化作用差异,及其与水稻苗期生长及氮素吸收利用关系的相关报道。本研究选择以往田间试验筛选出的二个不同产量潜力的籼稻品种,研究其苗期根际硝化作用差异及其与水稻生长及 *NUE* 之间的关系,以期为提高红壤区水稻产量,改善水稻氮素营养提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽试验于中国科学院南京土壤研究所温室进行,试验土壤采自中国科学院红壤生态实验站(东经 116°5'30", 北纬 28°5'30"),属亚热带季风气候区,年均气温 17.8 °C,年降雨量 1785 mm,年蒸发量 1318 mm,无霜期 261 d。供试土壤母质为第四纪红黏土红壤发育的水稻土,采自高度熟化稻田(开垦年限超过 50a)。其理化性质为:有机质 27.3 mg g⁻¹、全氮 1.74 mg g⁻¹、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 2.27 mg kg⁻¹、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 0.48 mg kg⁻¹、粘粒(<2 μm) 12.7%、pH 5.02(水土比 2.5:1)。

试验用水稻品种选用江西常规籼稻品种,中旱 22(ZH,高产品种)和禾盛 10 号(HS,低产品种)。

1.2 根际培养箱设计

本试验采用根际培养箱培养水稻,根箱为有机玻璃制成,规格为 12 cm × 8 cm × 8 cm,由两块 400 目尼龙网将根箱分隔为 1 个根室和 2 个边室,根室与边室长分别为 2 cm 和 5 cm。水稻种植于根室中,水稻根系被限制于根室中生长,水分与养分可以在根室与 2 个边室之间自由通过。

试验用水稻土风干后过 1 mm 筛,每个根箱装 600 g 土(根室 100 g,两边室各 250 g)。土壤与尿素(纯氮 120 mg kg⁻¹土)和 KH_2PO_4 (93 mg kg⁻¹土)混匀后装入根箱中,均匀浇水。然后将用 30% H_2O_2 消毒过的水稻种子(已露白)直播于根室中,每个根箱播 6 粒,一周后间苗,每盒留 3 株苗。在整个培养期间,每天早晚浇水,保持 1 cm 淹水层。试验同时设置不种水稻的对照(CK)处理,培养方式与种植水稻处理方式相同。

1.3 采样时间及方法

采样时间为水稻播种后 40、50 d 和 60 d。为防止淹水层内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 离子干扰后续土壤矿质态氮含量测定,在每次采样前一天晚间均不浇水。采样为毁灭性采样,两个水稻品种各取 6 个培养箱,同时取 3 个 CK 进行土壤样品切片。采样时将水稻根上附着的土壤(根际培养箱中央部分的土壤,定义这部分土壤为根表土壤)用无菌镊子小心剥除,并将此部分土壤收集用来进行根表土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、硝化强度的测定。将土壤采集完毕后,用去离子水小心将根系冲洗干净,并用吸水纸将冲洗干净的水稻根表面附着的水吸干。将水稻植株样品采集完毕后,进行根际及土体土壤样品采集。为了解决因土壤含水量太高而影响土壤切片的问题,采样时将根箱迅速置于 -20 °C 冰箱中冷冻 2 h 后,使之变为半坚硬状态,然后取出进行切片。具体切片

方法为将根际培养箱左右两边室分开后,先将 2 mm 厚度的有机玻璃插片(长 8cm、宽 8cm、)紧贴左边室外侧的内壁缓慢插入,将推出的土壤切下就获得距根表 2 mm 的土壤样品了,依此方法插入多片 2 mm 厚度的插片,即可获得距根表 2、4、6、8、10、20、30 mm 和 40 mm 距离的土壤切片^[8]。此部分土壤样品分别用于根际和土体土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和硝化强度的测定。

1.4 测定方法及统计分析

1.4.1 测定方法

将水稻植株称取鲜重后,于 105℃ 杀青 30 min 后在 70℃ 烘干 72 h 至恒重并称重。样品粉碎后,用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,消煮液稀释后用连续流动分析仪(AA3,德国 Bran & Luebbe 公司)测定其含氮量。

水稻根孔隙度(POR)测定方法参照并改进 Kludze 等^[9]的方法。将水稻根用去离子水冲洗干净后,用吸水纸将其表面水分彻底吸干。选取新长出的水稻根,并将每条根切成 2~2.5 cm 小段之后备用。将 50 ml 比重瓶装去离子水后称重,称取 0.5 g 左右的根,然后置于装满水的比重瓶中后,称重。将装入根的比重瓶抽真空 2 h 后,将根取出并置于干燥的研钵中研磨至糊状。将研磨好的根重新放入比重瓶中并称重。POR 计算公式如下:

$$\text{POR}(\%) = [(P_{gr} - P_r)/(r + P - P_r)] \times 100$$

式中,POR 为根孔隙度(%), P_{gr} 为研磨后的根和装满水的比重瓶的总重量(g), P_r 为未经研磨的根和装满水的比重瓶的总重量(g), r 为根重(g), P :充满水的比重瓶重量(g)。

土壤样品用 2 mol L^{-1} KCl 溶液(水土比 10:1)振荡浸提 30 min 后,用连续流动分析仪(AA3,德国 Bran & Luebbe 公司)测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。

短期硝化强度通常用于表征土壤硝化特征,本文参考并改进 Berg 和 Rosswall^[10]的方法。称取 5 g 鲜土样 3 份,分别置于 100 ml 三角瓶中,加浓度为 75 mmol L^{-1} 的 NaClO_3 2.5 ml(抑制 NO_2^- 转换为 NO_3^-),170 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 30 min 后,其中两份在 25℃ 下培养 24 h,另一份置于 -20℃ 冰箱中 24 h 作对照。培养结束后每份加 5 ml 去离子水、10 ml KCl(2 mol L^{-1}),170 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 30 min 后立即过滤;吸取 5 ml 滤液放入试管中,加 3 ml NH_4Cl 缓冲溶液(0.19 mol L^{-1} ,pH 8.5)、2 ml 磺胺试剂,摇匀后室温下放置 15 min,520 nm 波长下比色测定 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量。硝化强度按下列公式计算:

$$\text{NO}_2^-\text{-N}(\text{mg kg}^{-1}\text{h}^{-1}) = \frac{(\text{滤液 NO}_2^-\text{-N 浓度} - \text{对照滤液 NO}_2^-\text{-N 浓度})(\text{mg L}^{-1}) \times 12.5}{5 \times \text{dwt} \times 24}$$

式中,12.5 为所加入试剂的体积,5 为所称取土样的重量,dwt 为每克湿土的烘干重,24 为土样培养时间。硝化强度用单位时间内产生的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的量表示。

1.4.2 统计分析

$$\text{氮素利用率}(NUE) = \text{干物质积累量} / \text{氮素积累量}$$

试验结果用算术平均数和标准误差表示测定结果的精密度($\bar{X} \pm \text{S. D.}$)。利用 SPSS v 13.0 数据分析软件进行方差分析(ANOVA)及相关性分析工作。

2 结果与分析

2.1 不同水稻品种生长差异

除播种后 40 d 两个水稻品种地上部生物量无显著性差异外,高产品种 ZH 在其余生长期均显著高于低产品种 HS,二者根生物量均无显著性差异。高产品种在播种后 40、50 d 和 60 d 地上部干重分别是低产品种的 1.28、1.39 倍和 1.40 倍(表 1)。两个品种根冠比随时间无显著变化,ZH 根冠比较之 HS 略低,但差异未达显著水平(表 1)。高产品种苗期根系生物量略高于低产品种,且根冠比略低于低产品种,但不同品种间根系生物量和根冠比差异并不显著,而其单株不定根数量却显著高于低产品种。以上结果说明高产水稻品种根系构型理想,一方面根系干物质积累量占整株积累量比例较低,另一方面较多的不定根数量又提高了水稻根系对氮素的吸收。

表 1 不同水稻品种生长差异

Table 1 Growth difference for ZH and HS at different sampling time

品种 Variety	采样时间 Sampling time (d)	地上部		根		植株		根冠比 Root/shoot ratio	单株不定根数量 Adventitious root number per plant	根孔隙度 POR (%)
		Shoot(g plant ⁻¹)		Root(g plant ⁻¹)		Plant(g plant ⁻¹)				
		鲜重 FW	干重 DW	鲜重 FW	干重 DW	鲜重 FW	干重 DW			
ZH	40	4.38 ^d	0.91 ^{cd}	1.48 ^c	0.22 ^c	5.86 ^{de}	1.13 ^d	0.25 ^b	54 ^c	26.4 ^{bc}
	50	5.56 ^c	1.47 ^b	2.15 ^{ab}	0.38 ^b	7.70 ^c	1.85 ^b	0.26 ^b	81 ^b	29.9 ^{ab}
	60	7.75 ^a	2.10 ^a	2.53 ^a	0.49 ^a	10.3 ^a	2.59 ^a	0.23 ^b	103 ^a	32.1 ^a
HS	40	3.61 ^e	0.71 ^d	1.43 ^c	0.21 ^c	5.04 ^e	0.93 ^d	0.30 ^{ab}	28 ^d	19.6 ^d
	50	4.63 ^d	1.06 ^c	2.01 ^b	0.35 ^b	6.64 ^d	1.41 ^c	0.34 ^a	61 ^c	22.0 ^{cd}
	60	6.41 ^b	1.50 ^b	2.46 ^a	0.42 ^b	8.86 ^b	1.92 ^b	0.28 ^{ab}	82 ^b	23.1 ^{cd}

同列中不同字母表示 *LSD* 检验 5% 水平差异显著 Means followed by different letters on the same column indicate significant difference at 5% level by *LSD* test

水稻根际硝化作用与水稻根系泌氧能力密切相关,而水稻根系通气组织发达的水稻品种相应的根系泌氧能力较强。通气组织发育程度,可以用根孔隙度(*POR*)表示。高产品种 ZH 苗期 *POR* 约是低产品种 HS 的 1.4 倍,因此高产品种苗期通气组织较之低产品种更发达(表 1)。相关性分析表明,*POR* 和根际土壤硝化强度呈极显著正相关关系($p < 0.01$),同时与水稻生物量、氮素积累量和 *NUE* 均显著相关(表 3)。

2.2 不同水稻品种氮素积累和氮素利用率差异

不同品种地上部、根和植株氮素积累量在水稻播种后 40 d 无显著差异,而在播种后 50 d 和 60 d 高产品种地上部和植株氮素积累量显著高于低产品种,而根氮素积累量则表现出相反的趋势(表 2)。说明高产品种 ZH 苗期氮素吸收以及氮素向地上部转运均优于低产品种 HS,且随水稻生长其氮素吸收及转运优势越来越大。

植株 *NUE* 表征单位土壤氮素产出干物质的量,因此 *NUE* 可以作为水稻对氮素利用能力高低的有效指标。由表 2 可以看出,水稻地上部和植株 *NUE* 随时间显著升高,而根则表现出相反的趋势。除两个水稻品种在播种后 40 d 根系 *NUE* 以及播种后 50 d 地上部 *NUE* 无显著差异外,高产品种 ZH 在其余生长期地上部、根和植株 *NUE* 均显著高于低产品种 HS。

表 2 不同水稻品种氮素吸收利用差异

Table 2 Difference of N accumulation and N use efficiency for ZH and HS at different sampling time

品种 Variety	采样时间(d) Sampling time	氮素积累量 N accumulation (mg plant ⁻¹)			氮素利用率 N use efficiency (mg mg ⁻¹)		
		地上部 Shoot	根 Root	植株 Plant	地上部 Shoot	根 Root	植株 Plant
ZH	40	23.7 ^c	3.39 ^c	27.1 ^d	38.5 ^c	66.3 ^a	41.9 ^{bc}
	50	33.9 ^b	7.22 ^b	41.2 ^b	43.2 ^b	53.2 ^{bc}	44.9 ^b
	60	43.4 ^a	8.04 ^b	51.4 ^a	48.4 ^a	60.6 ^{ab}	50.3 ^a
HS	40	21.2 ^c	3.64 ^c	24.8 ^d	33.8 ^d	58.4 ^{ab}	37.4 ^d
	50	25.0 ^c	9.73 ^a	34.8 ^c	42.1 ^b	36.5 ^d	40.4 ^c
	60	35.2 ^b	9.95 ^a	45.1 ^b	42.6 ^b	42.2 ^{cd}	42.5 ^{bc}

同列中不同字母表示 *LSD* 检验 5% 水平差异显著 Means followed by different letters on the same column indicate significant difference at 5% level by *LSD* test

2.3 不同水稻品种土壤 NH₄⁺-N 含量差异

随着水稻生育期延长,两个水稻品种根表土壤 NH₄⁺-N 含量几乎无变化,根际和土体土壤 NH₄⁺-N 含量随时间显著下降(图 1)。根表土壤 NH₄⁺-N 含量存在明显亏缺现象,根际和土体土壤随距根表距离的增加而升高。两个品种除根表土壤及播种后 50 d 根际土壤 NH₄⁺-N 含量无差异外,其余生长期均表现为低产品种 HS 显著高于高产品种 ZH,且随着水稻生长,差异越来越大。二者根际和土体土壤 NH₄⁺-N 含量差异主要是由于

高产品种根际硝化作用强于低产品种(图3),导致更多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转换为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,且高产品种吸收更多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 所致。由图1还可以看出,与不种水稻的CK相比,两个水稻品种土体土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量均始终低于CK,这主要是由于水稻大量吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 所致。

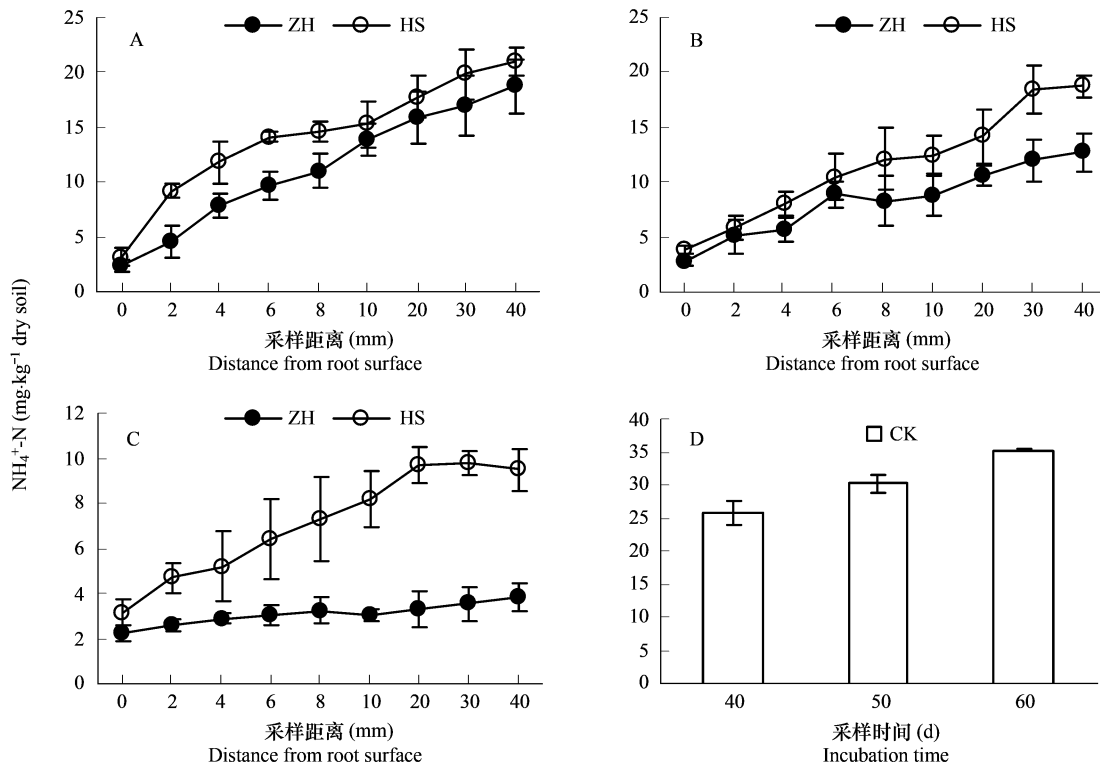


图1 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的时空变异

Fig. 1 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ measured at different distance from the rice root surface in the flooded paddy soil growing with ZH and HS at different sampling time (A) 播种后 40 d; (B) 播种后 50 d; (C) 播种后 60 d; (D) CK (A) At 40 d after sowing; (B) at 50 d after sowing; (C) at 60 d after sowing; (D) CK

2.4 不同水稻品种土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量差异

随水稻生育期的延长土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量无显著性变化,但在播种后 60 d 由于水稻自身吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 量增加,导致土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量略有下降(图2)。土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在水平空间分布上与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 存在较大差异,呈现较为平滑的分布曲线,这可能是由于 NO_3^- 属于弱吸附型阴离子,不易被红壤胶体所吸附,在土壤中迁移速度较快所致。整个采样期间,二者根表土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量无显著差异,而除水稻播种后 40 d 二者土体土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量无显著差异外,其余生长期均表现为高产品种根际和土体土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量始终显著高于低产品种。较之不种稻的CK处理,除低产品种HS在最后一次取样中土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与CK无显著差异外,由于根系泌氧促进根际硝化作用,导致种植水稻处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均显著高于CK(图2)。HS在最后一次取样中土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与CK无显著差异,主要是由于HS根表和根际硝化作用较弱(图3),且水稻根系大量吸收 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 导致土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较低。由于红壤性水稻土pH值较低,因此水稻根际硝化强度较弱(图3),致使由于硝化作用产生的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量也较低,加之水稻根系对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收,因此导致土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较低,整个采样期间,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量范围在 $0.09 \sim 0.21 \text{ mg kg}^{-1}$ 之间(图2)。

2.5 不同水稻品种土壤硝化强度差异

从图3可知,根表和距根表 20~40 mm 的土体土壤硝化强度随水稻生长无显著性变化,而根际土壤硝化强度随水稻生育期延长显著增加。两个水稻品种硝化强度均为根际土壤最高,其次为土体和根表土壤。硝化

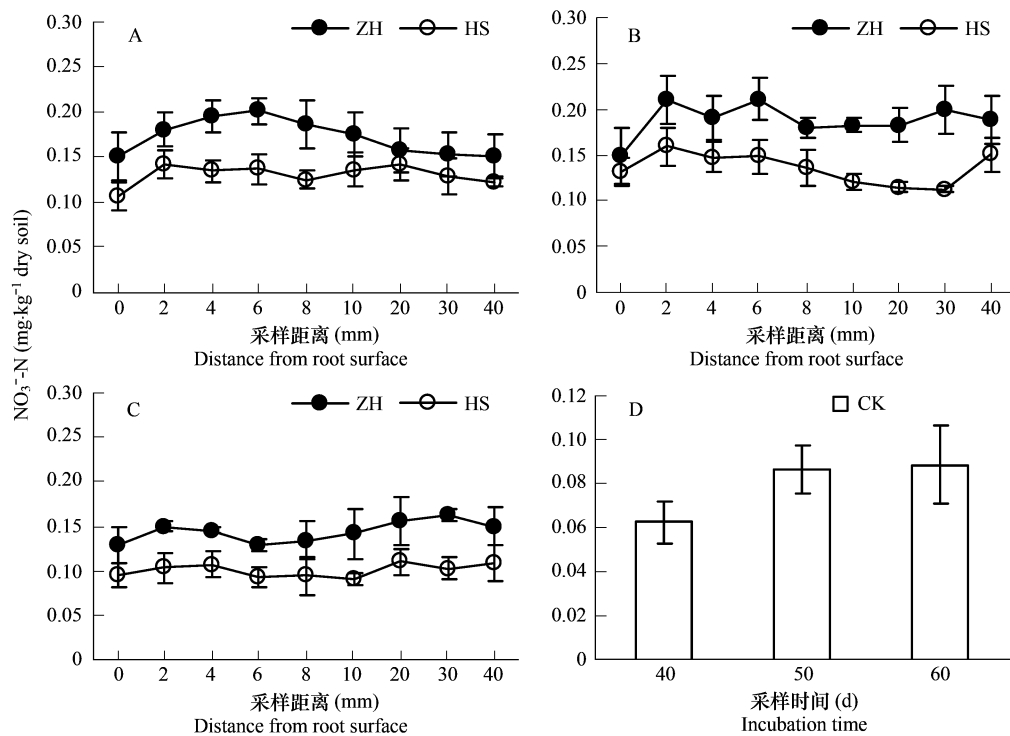


图2 土壤 NO_3^- -N 含量的时空变异(A)播种后 40 d;(B)播种后 50 d;(C)播种后 60 d;(D)CK

Fig. 2 NO_3^- -N measured at different distance from the rice root surface in the flooded paddy soil growing with ZH and HS at different sampling time. (A) At 40 d after sowing; (B) at 50 d after sowing; (C) at 60 d after sowing; (D) CK

强度最大的发生部位均是在距根表 2 mm 的根际土壤,ZH 和 HS 硝化强度最大值分别为:0.48 $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 和 0.31 $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。随着离水稻根越远,硝化强度就越弱,直至离根表 10~20 mm 处土壤硝化强度就接近于土体土壤。就两个水稻品种差异而言,二者在根表和距根表 8~40 mm 处,土壤硝化强度均无显著性差异,而 ZH 根际土壤硝化强度始终大于 HS。在水稻播种后 40、50 d 和 60 d,ZH 在距根 2 mm 处的根际土壤硝化强度分别是 HS 的 1.55、1.49 倍和 1.38 倍。不种水稻的 CK 处理中,土壤硝化强度随时间略有下降,但无显著性变化。CK 与距 HS 根表 20~40 mm 的土体土壤无显著性差异,但 ZH 根际和土体土壤以及 HS 根际土壤硝化强度均显著高于 CK(图 3)。与不种水稻土壤相比,根际土壤硝化强度提高了约 2~3.5 倍,因此,由于水稻根系泌氧显著提高了根际土壤硝化强度。相关性分析结果表明,根表硝化强度与水稻生长与氮素吸收利用无显著相关关系,而根际硝化强度则与水稻生长和 NUE 显著相关(表 3)。

3 讨论

3.1 不同水稻品种苗期根际土壤矿质态氮含量差异

由于本试验仅在水稻播种时施用一次氮肥,而水稻植株对土壤 NH_4^+ -N 吸收量日益增大,因此造成土壤 NH_4^+ -N 含量随时间显著下降(图 1)。高产品种 ZH 根际土壤 NH_4^+ -N 含量始终显著低于低产品种 HS(图 1),而 NO_3^- -N 含量则显著高于 HS(图 2)。一方面 ZH 吸收 NH_4^+ -N 量高于 HS(ZH 植株谷氨酰胺合成酶活性显著高于 HS 可以证明,试验结果未列出),另一方面由于 ZH 根际硝化作用强于 HS(图 3),导致更多的 NH_4^+ -N 转换为 NO_3^- -N,因此由于水稻根系对 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 吸收以及土壤转化等差异,导致不同水稻品种根际土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量差异显著。以往田间试验结果^[11]表明,不同粳稻品种生育后期根际土壤 NO_3^- -N 含量也存在显著差异,即高产品种根际土壤 NO_3^- -N 含量显著高于低产品种。因此,根际土壤 NO_3^- -N 含量高低在一定程度上与水稻产量关系密切,可以作为田间土壤快速诊断的指标之一。

3.2 不同水稻品种苗期根际土壤硝化强度差异

本试验结果表明,水稻根表土壤硝化强度显著低于根际土壤(图 3),同样的结果也出现在以往的研究^[7]

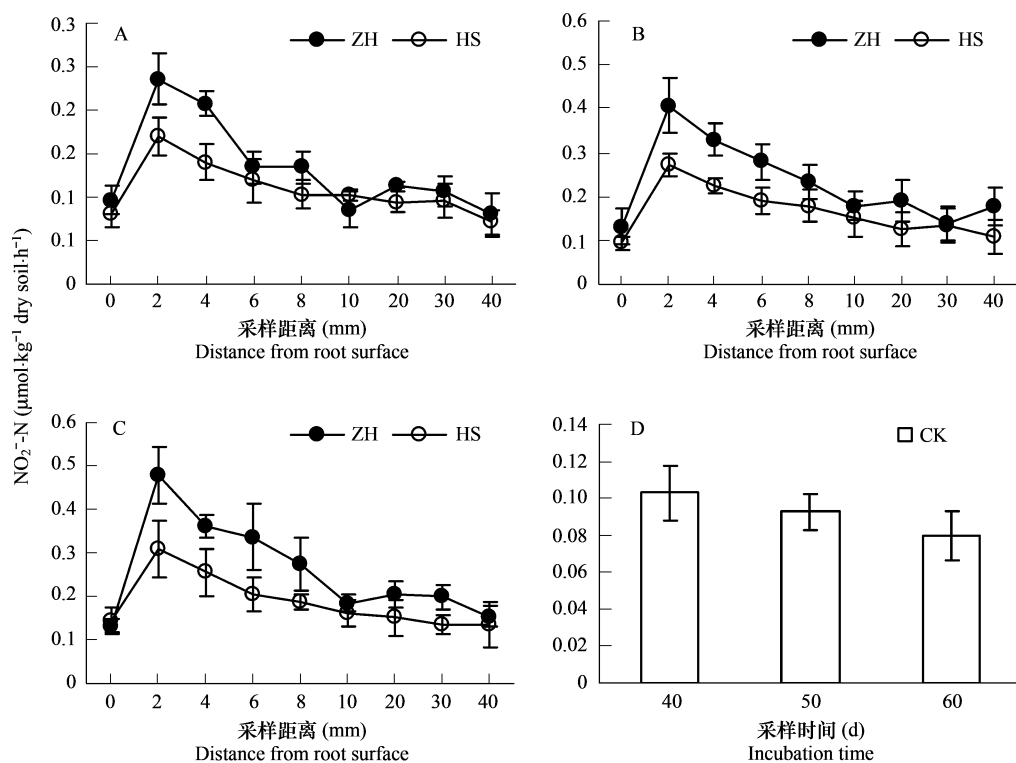


图3 土壤硝化强度的时空变异

Fig. 3 Nitrification activities measured at different distance from the rice root surface in the flooded paddy soil growing with ZH and HS at different sampling time

(A) 播种后 40 d; (B) 播种后 50 d; (C) 播种后 60 d; (D) CK (A) At 40 d after sowing; (B) at 50 d after sowing; (C) at 60 d after sowing; (D) CK

表3 不同水稻品种生物量、氮素吸收利用率及硝化特征相关性分析

Table 3 Correlation matrix among biomass, N accumulation, N use efficiency (NUE), and nitrification activity for both ZH and HS

指标 Parameter	根际硝化强度 Rhizosphere Nitrification activity	鲜重 FW	干重 DW	氮素积累量 N accumulation	NUE	单株不定 根数量 Root number per plant	POR
根表硝化强度 Root surface nitrification activity	0.713 **	0.293 NS	0.372 NS	0.281 NS	0.573 *	0.327 NS	0.650 *
根际硝化强度 Rhizosphere nitrification activity		0.533 *	0.580 *	0.461 NS	0.784 **	0.603 **	0.679 **
鲜重 FW			0.977 **	0.979 **	0.832 **	0.893 **	0.599 **
干重 DW				0.979 **	0.898 **	0.905 **	0.650 **
氮素积累量 N accumulation					0.800 **	0.897 **	0.560 *
NUE						0.845 **	0.759 **
单株不定根数量 root number per plant							0.675 **

NS 表示差异不显著, * 和 ** 分别表示 5% 和 1% 条件下差异显著; 表中数值为相关系数 (r 值) NS; not significant, * and **: significant at $P < 0.05$ and 0.01 , respectively; Data are correlation coefficients (r -values)

中,这可能与水稻根分泌有机酸引起根表土壤 pH 值下降,以及根表 NH_4^+ -N 含量低^[12](图 1),导致根表硝化细菌数量低^[8]有关。由图 3 可知,ZH 和 HS 苗期土壤硝化强度最大值均出现在距根表 2 mm 处,这与以往的研究结果^[8]相同。由于硝化细菌是严格好氧的,因此当土壤 NH_4^+ -N 含量不是限制性因素时,硝化细菌数量与土壤氧浓度成正比^[13, 14],水稻土壤氧浓度随距根表距离增加而显著降低,因此导致硝化强度随距根距离增

加而显著降低^[8](图3)。

红壤稻田土壤由于 pH 值较低,导致硝化细菌生长及活性受到抑制,因此硝化强度很弱^[16]。以往的研究表明,种植于乌栅土(pH 接近中性)的水稻根际硝化强度范围在 $13.9 \sim 14.7 \mu\text{mol kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ 左右,而本试验中种植于红壤水稻土的水稻根际硝化强度非常弱,仅为 $0.31 \sim 0.48 \mu\text{mol kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ (图3)。而在不种水稻的情况下,红壤水稻土硝化强度仅为 $0.09 \mu\text{mol kg}^{-1}\text{h}^{-1}$ 左右(图3D)。尽管红壤水稻土根际硝化强度很弱,但不同产量潜力籼稻品种苗期根际硝化强度差异显著,表现为高产品种根际硝化强度显著高于低产品种(图3)。

Kludze 等^[9]对水稻研究结果表明,通气组织不仅向处于缺氧环境中的根组织呼吸代谢提供氧气,而且根轴通过通气组织还可径向地向根际释放氧气。这种氧气的释放量与通气组织的发达程度呈正相关。Huang 等^[21]的研究表明,在淹水条件下小麦根内通气组织的发育程度与其抗涝性密切相关,抗涝性强的小麦基因型有较发达的通气组织。以上结果均表明,通气组织越发达,即 *POR* 越大,径向泌氧量就越大。本试验研究结果表明,高产品种 *POR* 显著高于低产品种(表1),水稻根际土壤硝化强度与水稻 *POR* 呈极显著正相关关系($r = 0.679; p < 0.01$,表3)。不同水稻品种 *POR* 随水稻生育期延长显著增加,即通气组织的发育程度日趋完善,这也是水稻根际土壤硝化强度随时间显著增强的原因(图3)。因此,具有发达的根系(表现为单株不定根数量较多),且通气组织较发达(表现为 *POR* 大)的水稻品种,相应的径向泌氧量就大,因此根际硝化细菌数量和活性增强,最终导致根际土壤硝化作用更强。同时,不同产量籼稻品种根际土壤硝化作用差异与相关土壤酶活性以及微生物活性等其它影响硝化作用的因素有关,其影响程度及机理还有待于进一步研究。

3.3 苗期根际土壤硝化作用与籼稻生长及氮素营养的关系

由于淹水稻田土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 常常处于动态变化之中,水稻吸收 NO_3^- 的多少一方面决定于水稻自身的需要,另一方面也取决于根际土壤中由 NH_4^+ 通过硝化作用产生 NO_3^- 的多少。以往的水培试验结果^[17]表明,水稻在 NH_4^+ 、 NO_3^- 混合营养中生长和氮素累积显著优于纯 NH_4^+ 或纯 NO_3^- 营养液中,增 NO_3^- 使水稻各项生理指标增加,尤其是对根系生长促进作用更显著,且主要表现为有更多不定根的发生。张岳芳等^[18]通过群体水培法研究了 122 个籼稻品种,多重比较结果表明,高氮素累积量品种单株不定根数多且品种间差异较小。本试验中高产品种根系生物量比低产品种略高,但未达显著水平,然而高产品种单株不定根数量显著高于低产品种,而且高产品种地上部生物量显著大于低产品种(表1)。因此也可以看出高产品种由于根际硝化强度较强,导致水稻吸收较多 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (ZH 植株硝酸还原酶活性显著高于 HS 可以证明,试验结果未列出),从而不定根数量增多,且地上部干物质积累量增加,而不定根数量增加又导致了高产品种吸收更多的氮(表2)。

不同产量籼稻品种在苗期已经表现出生长和氮素吸收与利用上的差异,表现为高产品种在苗期生物量(鲜重和干重)、氮素积累量和 *NUE* 均显著高于低产品种(表1,2)。由于根际土壤硝化作用强可导致根际 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量较高,从而水稻根吸收 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的量也高。由于水稻对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 吸收量的差异最终可能导致水稻生长及 *NUE* 的差异,即根际硝化作用越强,水稻吸收的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 越多,水稻 *NUE* 越高。另一方面,高产水稻苗期根系通气组织比低产品种发达,而通气组织发育好的水稻根系泌氧量较高,又促进了根际土壤硝化作用。尽管红壤水稻土硝化作用较弱,但红壤区水稻根际硝化作用与水稻苗期生长和氮素营养密切相关,因此根际硝化作用强弱可作为红壤区水稻氮素营养快速诊断指标之一。

References:

- [1] Wang M Y, Siddiqi M Y, Ruth T J, Glass A D M. Ammonium uptake by rice roots. I. Fluxes and subcellular distribution of $^{15}\text{NH}_4^+$. *Plant Physiology*, 1993, 103: 1249 – 1258.
- [2] Armstrong W. Aeration in higher plants. *Advances in Botanical Research*, 1979, 7: 697 – 708.
- [3] Armstrong W, Justin S H F W, Beckett P M, Lythe S. Root adaptation to soil waterlogging. *Aquatic Botany*, 1991, 39: 57 – 73.
- [4] Jackson M B and Armstrong W. Formation of aerenchyma and the process of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence. *Plant Biology*, 1999, 1: 274 – 287.

- [5] Kronzucker H J, Siddiqi M Y, Glass A D M, Kirk G J D. Nitrate-ammonium synergism in rice: a subcellular flux analysis. *Plant Physiology*, 1999, 119: 1041 — 1045.
- [6] Kronzucker H J, Glass A D M, Siddiqi M Y, Kirk G J D. Comparative kinetic analysis of ammonium and nitrate acquisition by tropical lowland rice: implications for rice cultivation and yield potential. *New Phytologist*, 2000, 145: 471 — 476.
- [7] Li Y L, Zhang Y L, Hu J, Shen Q R. Contribution of nitrification happened in rhizospheric soil growing with different rice cultivars to N nutrition. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 43: 417 — 425.
- [8] Li Y L, Zhang Y L, Hu J, Shen Q R. Spatiotemporal variations of nitrification in rhizosphere soil for two different rice cultivars at the seedling stage growing under waterlogged conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1461 — 1467.
- [9] Kludze H K, DeLaune R D, Patrick W H. Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 386 — 391.
- [10] Berg P, Rosswall T. Ammonium oxidizer numbers, potential and actual oxidation rates in two Swedish arable soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1985, 1: 131 — 140.
- [11] Li Y L, Zhang Y L, Zhang Y H, Shen Q R. Effect of N application on fertilizer-N use efficiencies, nitrification and nitrifying microorganisms in rhizosphere soil growing with different lowland rice cultivars. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2507 — 2515.
- [12] Arth I, Frenzel P. Nitrification and denitrification in the rhizosphere of rice: the detection of process by a new multi-channel electrode. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 31: 427 — 435.
- [13] Aurelio M B J, Satoshi O, Yoshiaki U, Niels B R, Wolfgang R, Hidetoshi O. Ammonia-oxidizing bacteria on root biofilms and their possible contribution to N use efficiency of different rice cultivars. *Plant and Soil*, 2003, 250: 335 — 348.
- [14] Kirk G J D, Kronzucker H J. The potential for nitrification and nitrate uptake in the rhizosphere of wetland plants: a modeling study. *Annals of Botany*, 2005, 96: 639 — 646.
- [15] Huang B, Johnson J W, Nesmith D S, Bridges D C. Growth, physiological and anatomical response of two wheat genotypes to waterlogging and nutrient supply. *Journal of Experimental Botany*, 1994, 45: 193 — 202.
- [16] Li Z P, Li D C, Zhang T L, Chen B Y, Yin R L, Shi Y Q. Dynamics of soil properties of paddy fields in red soil region. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 870 — 878.
- [17] Zhang Y L, Shen Q R, Duan Y H. Physiological effects of different nitrogen forms on rice. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(2): 130 — 135.
- [18] Zhang Y F, Wang Y L, Zhang C S, Dong G C, Yang L X, Huang J H, Long Y C. Relationship between N accumulation and root traits in conventional Indica rice varieties (*Oryza sativa* L.). *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(8): 1121 — 1129.

参考文献:

- [8] 李奕林, 张亚丽, 胡江, 沈其荣. 淹水条件下水稻与粳稻苗期根际土壤硝化作用的时空变异. *生态学报*, 2006, 26(5): 1461 ~ 1467.
- [11] 李奕林, 张亚丽, 张耀鸿, 沈其荣. 施 N 对不同水稻品种 N 肥利用率及根际硝化作用和硝化微生物的影响研究. *生态学报*, 2007, 27(6): 2507 ~ 2515.
- [16] 李忠佩, 李德成, 张桃林, 陈碧云, 尹瑞玲, 施亚琴. 红壤水稻土肥力性状的演变特征. *土壤学报*, 2003, 40(6): 870 ~ 878.
- [17] 张亚丽, 沈其荣, 段英华. 不同氮素营养对水稻的生理效应. *南京农业大学学报*, 2004, 27(2): 130 ~ 135.
- [18] 张岳芳, 王余龙, 张传胜, 董桂春, 杨连新, 黄建晔, 龙银成. 籼稻品种的氮素累积量与根系性状的关系. *作物学报*, 2006, 32(8): 1121 ~ 1129.