

# 红壤区不同肥力水稻土根际硝化作用特征\*

李奕林 王兴祥<sup>†</sup>

(中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 通过根际培养箱(三室)——速冻切片技术研究了红壤地区高、低两种肥力下水稻苗期根表、根际和土体土壤矿质态氮含量和硝化强度,以及水稻生长、氮素积累的差异。结果表明,肥力水平对水稻根表和根际土壤铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)含量无显著影响,但高肥力显著提高土体土壤 $\text{NH}_4^+$ -N含量,以及根表、根际和土体土壤硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)含量及硝化强度。两种肥力水稻土硝化强度最大值均出现在距根表2 mm处,分别为0.20和0.31  $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ 。土体土壤硝化强度随距根表距离增加而降低,低肥力土壤在距根表10~40 mm处时硝化强度接近本底值,而高肥力土壤在距根表20~40 mm处时接近本底值。与不种水稻的CK相比,种植水稻显著提高根际土壤硝化强度。高肥力能显著改善水稻生长,增加植株氮素积累量,尤其显著促进根系生长及通气组织发育。由于红壤稻田肥力水平的差异造成水稻根际硝化强度以及水稻吸收 $\text{NO}_3^-$ 的差异,导致高肥条件下水稻显示出更强的生长势和氮素吸收利用能力。因此,合理提高红壤稻田肥力水平对改善红壤区水稻根际土壤硝化作用及水稻氮素营养具有重要意义。

**关键词** 水稻土;肥力;水稻;根际;硝化作用

**中图分类号** Q945.1;S154.4;S511

**文献标识码** A

水稻土是我国最重要的耕作土壤,占全国耕地面积的1/5,其中93%分布在长江以南的热带、亚热带地区。水稻土是在种植水稻或以稻作为主的耕作制度下,经过水耕熟化的灌水淹育、排水疏干、氧化还原交替,大量施用有机、无机肥等人为管理措施以及自然成土因素作用下形成的<sup>[1]</sup>。不断的水耕熟化以及长期施肥,使水稻土物理、化学和生物学肥力显著提高<sup>[1-4]</sup>。硝化作用是氮素循环过程中重要的环节,以往的研究表明根际硝化作用的强弱与水稻氮素营养密切相关<sup>[5-7]</sup>。目前关于水稻根际硝化作用影响因素已有大量研究,但有关水稻土肥力水平对水稻根际硝化作用的影响尚未见报道。在同一区域内,当水稻土形成过程中气候、母质、地形等自然因素基本相同时,时间和人为因素则是导致水稻土肥力特征差异的主要因素<sup>[8]</sup>。本文以江西余江县红壤发育水稻土为例,选取不同耕作时间及施肥水平的稻田,通过盆栽试验,研究不同肥力水稻土条件下水稻根表、根际和土体土壤硝化作用差异,以及不同肥力土壤种植条件下水稻生长及氮素吸收差异,为进一步改善红壤区水稻氮素营养提

供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与处理

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鹰潭红壤生态实验站(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℃,年降雨量1785 mm,年蒸发量1318 mm,无霜期261 d。供试土壤均为第四纪红黏土红壤发育的水稻土,分别采自不同肥力稻田(低肥力稻田开垦年限为15 a,双季稻产量7500  $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ ;高肥力稻田开垦年限超过50 a,双季稻产量10000  $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )。其中低肥力水稻土理化性质为:有机质17.5  $\text{g kg}^{-1}$ ,全氮0.85  $\text{g kg}^{-1}$ , $\text{NH}_4^+$ -N 0.72  $\text{mg kg}^{-1}$ , $\text{NO}_3^-$ -N 0.17  $\text{mg kg}^{-1}$ ,黏粒( $< 2 \mu\text{m}$ )36.3%,pH 5.02(水土比1:2.5);高肥力水稻土理化性质为:有机质39.1  $\text{g kg}^{-1}$ ,全氮1.49  $\text{g kg}^{-1}$ , $\text{NH}_4^+$ -N 1.46  $\text{mg kg}^{-1}$ , $\text{NO}_3^-$ -N 0.21  $\text{mg kg}^{-1}$ ,黏粒( $< 2 \mu\text{m}$ )20.9%,pH 4.75(水土比1:2.5)。

\* 国家自然科学基金项目(30900923)、中国科学院知识创新工程领域前沿项目(ISSASIP0705)资助

<sup>†</sup> 通讯作者,E-mail: xxwang@issas.ac.cn

作者简介:李奕林(1979—),女,河南郑州人,博士,副研究员,主要从事根际土壤生态研究。E-mail: ylli@issas.ac.cn

收稿日期:2011-10-12;收到修改稿日期:2011-12-29

试验水稻品种选用江西常规籼稻品种禾盛 10 号。

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<sup>-1</sup>土)和 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>(93 mg kg<sup>-1</sup>土)混匀后装入根箱中,均匀浇水。然后将用 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 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。试验设置两个处理,即高肥力和低肥力土壤处理,同时每个处理分别设置不种植水稻的对照(CK)处理作为本底值。

采样时间为水稻播种后 40、50 和 60 d。为防止淹水层内 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-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,两个肥力水平水稻土分别取 6 个根箱,其中 3 盒用于水稻生物量和含氮量的测定,采样时将水稻根用去离子水小心冲洗干净,并用吸水纸将冲洗干净的水稻根表面附着的水吸干。其余 3 盒用于土壤样品测定,采样时将水稻根上附着的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 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、硝化强度的测定。将水稻根表土壤样品采集完毕后,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,将根箱迅速置于 -20℃ 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 8 cm、宽 8 cm、)紧贴边室外侧的内壁缓慢插入,将推出的土壤切下就获得距尼龙网 2 mm 的土壤样品了,依此方法插入多片 2 mm 厚度的插片,即可获得距尼龙网 2、4、6、8、10、20、30 和 40 mm 距离的土壤切片<sup>[5]</sup>。此部分土壤样品分别用于根际和土体土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和硝化强度的测定。本试验中根箱中央附着于水稻根表的土壤定义为根表土壤,两边室距尼龙网 4 mm 以内的土壤定义为根际土壤(距根 0 ~ 4 mm),两边室距尼龙网 4 mm 以外的土壤定义为土体土壤(距根大于 4 mm)。

## 1.2 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 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,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<sup>[9]</sup>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,然后至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。

土壤样品用 2 mol L<sup>-1</sup> KCl 溶液(水土比 10:1)振荡浸提 30 min 后,用连续流动分析仪(AA3, Bran Luebbe 公司)测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-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<sup>[10]</sup>的方法。其简要步骤为:称取 5 g 鲜土样 3 份,分别置于 100 ml 三角瓶中,加 2.5 ml NaClO<sub>3</sub>(抑制 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>转换为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 75 mmol L<sup>-1</sup>), 170 r min<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>), 170 r min<sup>-1</sup> 振荡 30 min 后立即过滤;吸取 5 ml 滤液放入试管中,加 3 ml NH<sub>4</sub>Cl 缓冲溶液(0.19 mol L<sup>-1</sup>, 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。

## 1.3 数据分析

水稻根孔隙度(POR)计算公式如下:

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

式中,POR 为根孔隙度(%),P<sub>gr</sub> 为研磨后的根和装满水的比重瓶的总质量(g),Pr 为未经研磨的根和装满水的比重瓶的总质量(g),r 为根重(g),P 为充满水的比重瓶质量(g)。

硝化强度按下列公式计算:

$$NO_2^- - N \text{ (mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}) = (\text{滤液 } NO_2^- - N \text{ 浓度} - \text{对照滤液 } NO_2^- - N \text{ 浓度}) \text{ (mg L}^{-1}) \times 12.5/5 / \text{dwt}/24$$

式中,12.5 为所加入试剂的体积,5 为所称取土样的质量,dwt 表示每克湿土的烘干重,24 为土样培养时间。硝化强度用单位时间内产生的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的量表示。

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 ( $X \pm S. D.$ )。利用 SPSS V13.0 数据分析软件进行方差分析等工作。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水稻土肥力水平下土壤铵态氮含量时空变异

根表、根际和土体土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量随着水稻生育期的延长而下降 (图 1A, 图 1B, 图 1C), 表明水稻苗期对  $\text{NH}_4^+$ -N 的大量吸收。同样的, 由于水稻根系对  $\text{NH}_4^+$ -N 的强烈吸收导致水稻根表和根际土壤存在明显的亏缺区。就空间分布而言, 土壤的  $\text{NH}_4^+$ -N 含量在播种 40、50 和 60 d 后均呈现明显的

梯度变化, 即随距根表距离的增加  $\text{NH}_4^+$ -N 含量显著增加。由于高肥力土壤氮素含量显著高于低肥力土壤, 因此高肥力条件下, 水稻土体土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量均显著高于低肥力土壤 (水稻播种后 40 d 二者无显著差异), 且随时间推移二者差异越来越大; 而不同肥力水稻土根表和根际土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量无显著差异 (图 1A, 图 1B, 图 1C)。不种水稻的 CK 土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量随时间有所增加, 且高肥力土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量显著高于低肥力土壤 (图 1D)。除播种后 40 d 低肥力土体土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量与 CK 无显著差异外, 其余均表现为种植水稻的土体土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量显著低于 CK, 这也主要是由于水稻对  $\text{NH}_4^+$ -N 的大量吸收造成的。

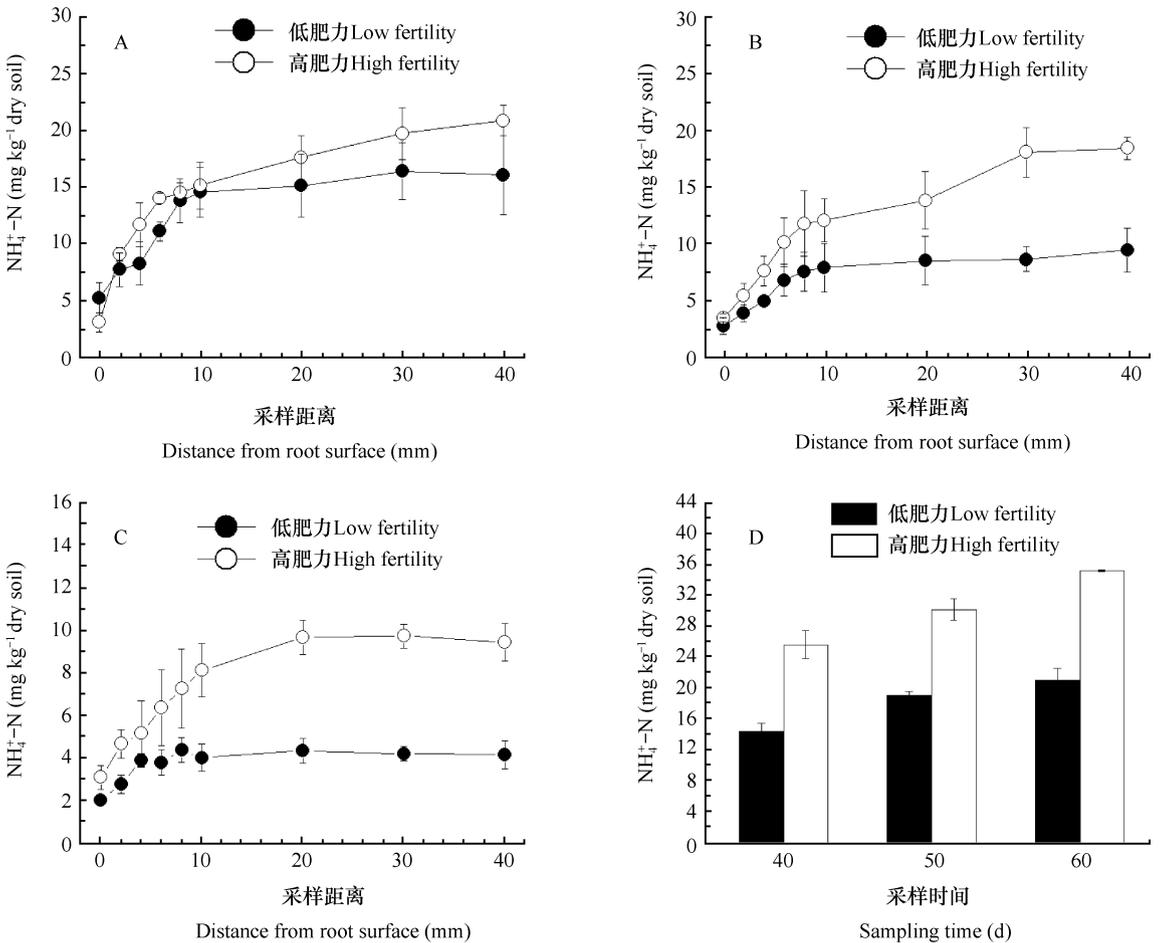


图 1 不同肥力水稻土铵态氮含量差异 (A: 播种后 40 d; B: 播种后 50 d; C: 播种后 60 d; D: CK)

Fig. 1 Tempo-spatial variation of  $\text{NH}_4^+$ -N content in paddy soils different in soil fertility (A: At 40 d after sowing; B: at 50 d after sowing; C: at 60 d after sowing; D: CK)

### 2.2 不同水稻土肥力水平下土壤硝态氮含量时空变异

随水稻生育期的延长, 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量无显著

性变化。在水稻播种后 40、50 和 60 d, 低肥力水稻土  $\text{NO}_3^-$ -N 平均含量分别为 0.09、0.06 和 0.07  $\text{mg kg}^{-1}$ , 高肥力水稻土  $\text{NO}_3^-$ -N 平均含量分别为 0.13、0.14

和  $0.10 \text{ mg kg}^{-1}$  (图 2A, 图 2B, 图 2C)。从图 2 还可看出, 土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量在空间分布上无明显梯度变化, 这可能是由于  $\text{NO}_3^-$  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造成的。在水稻苗期, 高肥力水稻土  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量总是高于低肥力水稻土, 这可能是由于高肥力水稻土硝化强度大于低肥力水稻土 (图 3) 造成的。不种稻的 CK 土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量随时间而增加, 且由于高肥力土壤本底硝化强度高于低肥力土壤

(图 3D), 因此造成高肥力水稻土在不种稻的情况下,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量显著高于低肥力水稻土。由于水稻根系泌氧, 硝化作用迅速在根表和根际发生, 因此种植水稻后土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量增加。但土壤中实际  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量一方面受硝化作用影响, 另一方面与水稻根系对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  吸收也密切相关。本试验结果表明种植水稻土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度与 CK 无显著差异 (图 2), 这主要是由于水稻对  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  大量吸收造成的。

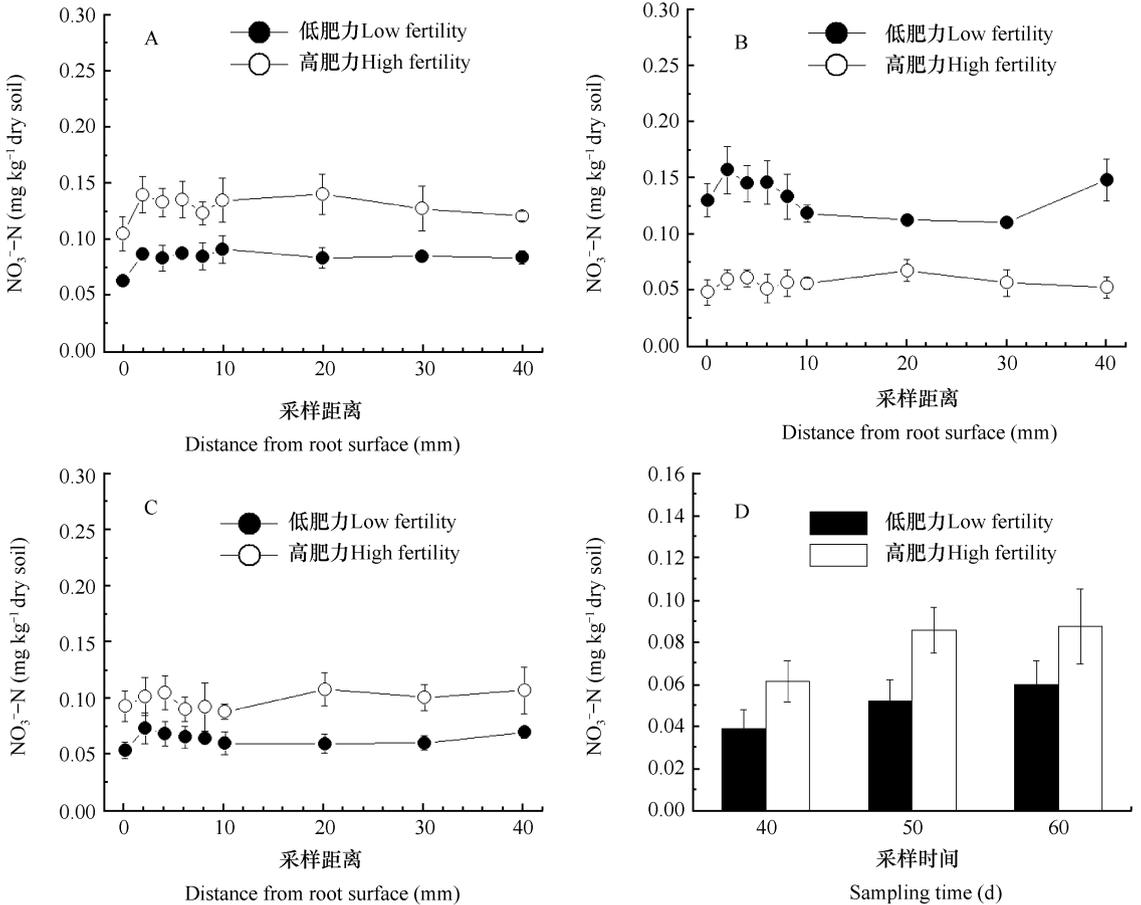


图 2 不同肥力水稻土硝态氮含量差异 (A: 播种后 40 d; B: 播种后 50 d; C: 播种后 60 d; D: CK)

Fig. 2 Tempo-spatial variation of  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content in paddy soils different in soil fertility (A: At 40 d after sowing; B: at 50 d after sowing; C: at 60 d after sowing; D: CK)

### 2.3 不同水稻土肥力水平下土壤硝化强度时空变异

土壤硝化强度随水稻生育期延长而逐渐增强, 且两个肥力水稻土硝化强度均表现为根际土壤最高, 其次依次为土体土壤和根表土壤。在水稻生育期内, 低肥力和高肥力水稻土硝化强度最大值均出现在距根表 2 mm 处, 最大值分别为  $0.20$  和  $0.31 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$  (图 3A); 而根表土壤和距根表

20 ~ 40 mm 的土体土壤硝化强度值最小, 且二者无显著差异。低肥力和高肥力水稻土根表土壤硝化强度分别为  $0.07$  和  $0.11 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$  (图 3)。之所以会出现根表土壤硝化强度最低, 这可能与水稻根分泌有机酸引起根表土壤 pH 下降以及根表土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  含量低 (图 1A, 图 1B, 图 1C), 导致根表土壤硝化细菌数量低有关。在土体土壤中硝化强度随距根表距离增加而减少。除水稻播种后第 40 和 50

天高肥力水稻土根表硝化强度与低肥力水稻土无差异外,无论根表、根际还是土体土壤,高肥力水稻土硝化强度总是高于低肥力水稻土(图3A,图3B,图3C)。高肥力土壤硝化强度本底值显著高于低肥力土壤,且不同肥力CK土壤硝化强度均随时间缓慢下降(图3D)。种植水稻的根际土壤硝化强度均

显著高于CK土壤,而种植水稻的根表土壤硝化强度与CK土壤无显著差异(图3)。不同肥力水稻土土体土壤与CK土壤硝化强度相比存在差异,高肥力土壤在距根表20~40mm处时硝化强度接近本底值,而低肥力土壤在距根表10~40mm处时硝化强度接近本底值。

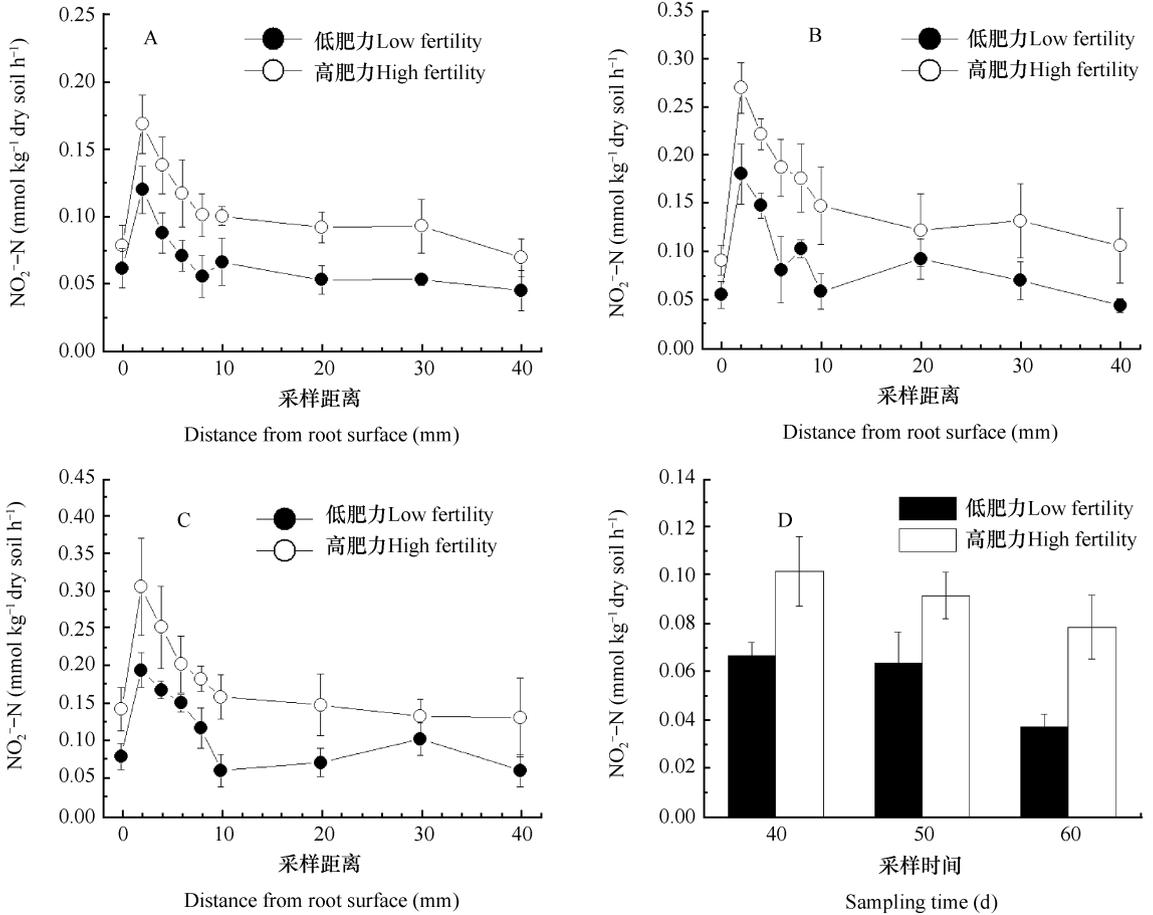


图3 不同肥力水稻土种植条件下硝化强度差异(A:播种后40 d;B:播种后50 d;C:播种后60 d;D:CK)  
 Fig. 3 Tempo-spatial variation of nitrification intensity in paddy soils different in soil fertility (A: At 40 d after sowing; B: at 50 d after sowing; C: at 60 d after sowing; D: CK)

### 2.4 不同水稻土肥力水平下水稻生长及氮素积累量差异

由图4可知,不同肥力水平水稻土种植条件下,水稻生长存在显著差异,高肥力土壤显著提高水稻干物质积累量。高肥力下,水稻在播种后40、50和60 d生物量分别较低肥力水稻土种植条件下提高90.4%、65.2%和45.6%。

著提高水稻植株氮素积累量。与低肥力土壤相比,种植于高肥力土壤的水稻在播种后40、50和60 d氮素积累量分别较低肥力土壤的水稻提高47.9%、48.6%和29.9%(图5)。因此水稻土肥力水平对水稻生长及氮素积累存在显著影响,即高土壤肥力水平能显著改善水稻生长,增加水稻植株氮素积累量,且对增加水稻生物量作用更显著(图4,图5)。

与水稻生物量趋势相一致,高肥力水稻土显

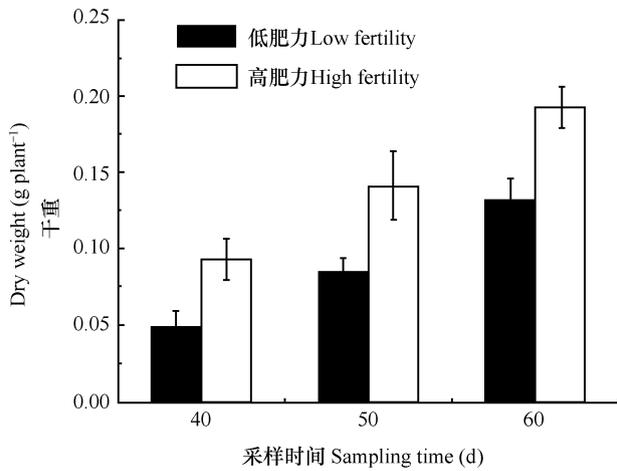


图4 不同肥力水稻土种植条件下水稻生长差异

Fig. 4 Biomass difference between rice plants growing in paddy soils different in soil fertility

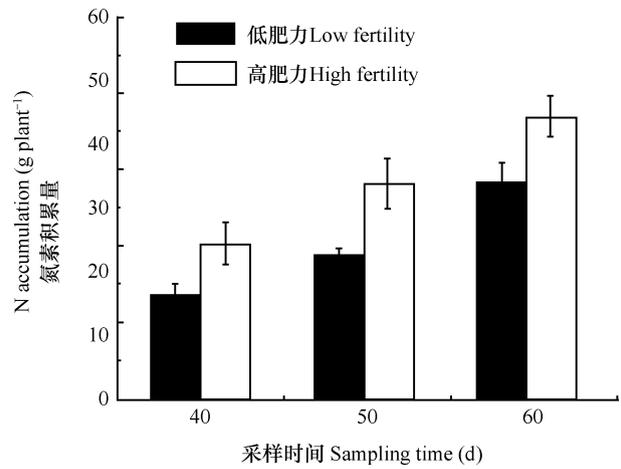


图5 不同肥力水稻土种植条件下水稻氮素积累量差异

Fig. 5 Difference in N accumulation between rice plants growing in paddy soils different in soil fertility

## 2.5 不同水稻土肥力水平下水稻根系生长及形态结构差异

不同肥力条件下,水稻根系生长及形态结构差异显著。具体表现为高肥力下,水稻根系干重、单株不定根数量、根直径及根孔隙度(POR)显著大于低肥力土壤(表1)。水稻根系干重、单

株不定根数量及根直径可以表征水稻根系发达程度;而POR表示植物根内通气组织大小占整个根体积的比例,用来表征通气组织发育程度。因此,土壤基础肥力高可显著促进水稻根系生长,并且可以有效改善水稻根系通气组织发育程度。

表1 土壤肥力水平对水稻根系生长及形态结构的影响

Table 1 Effect of soil fertility on growth and morphology of rice root

肥力水平 Fertility level	采样时间 Sampling time (d)	干重 DW (g plant <sup>-1</sup> )	不定根数量 Root number (plant <sup>-1</sup> )	根直径 Root diameter (mm)	根孔隙度 POR (%)
低肥力 Low fertility	40	0.11d	22d	0.88d	14.1e
	50	0.20c	42c	1.08c	16.2d
	60	0.24c	49c	1.12c	16.9cd
高肥力 High fertility	40	0.21c	28d	1.31d	19.6bc
	50	0.35b	61b	1.45b	22.0ab
	60	0.42a	82a	1.53a	23.1a

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

## 3 讨论

### 3.1 红壤区稻田土壤肥力差异主要原因

第四纪红黏土发育的红壤,黏粒含量通常高于35%,因此新垦红壤水田由于土壤质地黏重而不利于耕作和水稻生长,由于水耕利用后黏粒不断淋失,以及土壤氧化还原过程交替发生的铁解作用对黏粒的破坏,使得红壤水稻土结构发育,耕性和通

气透水状况得到显著改善,物理肥力显著提高<sup>[1]</sup>。本试验供试的两种水稻土分别采自水耕15和50a的稻田,其土壤黏粒(<2 μm)含量分别为36.3%和20.9%。可以看出随着水耕年限的增加,土壤黏粒含量显著下降,因此水耕50a的稻田土壤物理肥力显著高于水耕15a的稻田。长期施肥是红壤水稻土培肥的重要举措,能够显著提高土壤化学和生物学肥力<sup>[3-4,11]</sup>。水耕50a的稻田土壤有机质和全氮含量分别为39.1 g kg<sup>-1</sup>和1.49 g kg<sup>-1</sup>,而水耕15a

的稻田土壤有机质和全氮含量仅为  $17.5 \text{ g kg}^{-1}$  和  $0.85 \text{ g kg}^{-1}$ 。本试验供试的两种水稻土由于水耕利用年限以及施肥措施的不同而导致物理、化学和生物化学肥力差异显著(详见材料与方法)。

### 3.2 不同肥力水稻土矿质态氮含量差异

由于根际微域内的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  或  $\text{NO}_3^--\text{N}$  可直接被水稻根系吸收利用,因此,研究根际微域环境内氮素存在形态及其转化规律,对研究水稻对不同氮形态的吸收利用特性具有指导作用,从而达到调控水稻生长的目的<sup>[12]</sup>。以往的研究认为稻田土壤由于长期淹水,硝化作用被强烈抑制,因此稻田土壤几乎检测不到  $\text{NO}_3^--\text{N}$ <sup>[13-14]</sup>。本试验结果表明,红壤发育水稻土主要氮素形态为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ (图 1),而土壤中可检测到  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,但含量较低,约为  $0.1 \text{ mg kg}^{-1}$ (图 2)。由于水稻根系对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的大量吸收,土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在水平空间呈现梯度变化,即随距水稻根距离增加而升高,根表和根际存在明显亏缺区(图 1A,图 1B,图 1C)。而  $\text{NO}_3^-$  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,因此在土壤中呈现较均匀分布状态(图 2A,图 2B,图 2C)。高肥力土壤由于长期施肥导致土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量本底值高于低肥力土壤(图 1D)。尽管由于水稻根系大量吸收  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,导致种植水稻的土体土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  显著低于 CK,但不同肥力土体土壤之间仍存在显著差异,表现为高肥力土体土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  显著高于低肥力土体土壤,且二者差异随时间而增加。同样的,高肥力水稻土  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量显著高于低肥力水稻土(图 2),这主要是由于高肥力水稻土硝化作用强造成的(图 3)。由于  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  是植物吸收利用的主要氮素形态<sup>[15]</sup>,因此,土壤中矿质态氮含量的差异可能最终造成水稻生长及氮素营养差异。

### 3.3 不同肥力水稻土种植条件下水稻根系生长及形态结构差异及其与根际硝化作用的关系

本试验结果表明,高土壤基础肥力显著提高水稻生物量和氮素积累量。王月福等<sup>[16]</sup>在小麦中也发现了相同的现象,高土壤肥力有利于小麦根系的生长发育,同时提高根系活力,增加小麦根系氮素同化酶活性,促进氮素在小麦体内的积累。本研究发现高肥力土壤能有效提高水稻根系通气组织发育,以往的研究结果并未有相关报道。水稻根系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

径向地向根际土壤释放氧气,这种氧气的释放量与通气组织的发育程度呈正相关<sup>[9]</sup>。因此水稻种植于高肥力水稻土中由于其通气组织发育更加完善,径向泌氧量也较多;由于根际土壤氧气含量较高,同时促进根际土壤好氧硝化作用,且本试验土壤硝化强度结果(图 3A,图 3B,图 3C)也验证此推测。由于稻田土壤长期处于淹水状态,因此土壤中氧气含量较低,导致硝化作用被强烈抑制<sup>[5,7]</sup>。由于水稻根系通过通气组织向外释放氧气,使得根际存在微域氧化圈,从而促进根际硝化作用进行,因此水稻根系通气组织发育程度与根际土壤硝化作用密切相关。

硝化作用除受土壤氧气含量影响外,还受土壤温度、水分含量、质地、有机质含量、含氮量和微生物量及其活性等诸多因素的影响,因此不同生态区、不同土壤中的硝化作用可能有较大差异<sup>[17]</sup>。我国南方红壤地区由于高温多雨,盐基离子淋溶过程强烈,特别是钙离子的淋溶,导致土壤酸化<sup>[18]</sup>。李忠佩等<sup>[1]</sup>通过长期定位试验研究表明,红壤开垦利用后随着水耕熟化过程的进行,土壤 pH 显著提高,亚硝化细菌数量呈递增趋势,硝化强度显著增加。因此,本试验供试高肥力水稻土由于开垦年限较长,硝化强度本底值显著高于开垦年限较短的低肥力水稻土(图 3D)。

以往的水培试验和土培试验结果表明,水稻增  $\text{NO}_3^-$  营养能够显著促进水稻生长与氮素吸收利用<sup>[12]</sup>,根际土壤硝化作用和  $\text{NO}_3^-$  浓度与水稻生长及氮素吸收利用密切相关<sup>[7]</sup>。因此,尽管红壤发育水稻土由于 pH 较低等因素导致硝化强度较弱,但不同肥力水稻土根际硝化强度仍存在显著差异,由于高肥力水稻土根际硝化作用较强,导致根际  $\text{NO}_3^-$  浓度显著高于低肥力水稻土(图 2A,图 2B,图 2C),由于二者吸收  $\text{NO}_3^-$  的差异最终导致水稻生长及氮素吸收的差异。

## 4 结 论

红壤发育水稻土尽管硝化势较弱,但不同肥力土壤之间硝化强度存在显著差异。一方面,高肥力水稻土由于基础肥力较高,导致根际硝化作用强于低肥力水稻土,而两种肥力水平水稻土硝化作用的差异,造成根际土壤  $\text{NO}_3^-$  浓度的差异,最终导致高肥力水稻土条件下,水稻生长和氮素吸收利用均优于低肥力水稻土。另一方面,高肥力促进水稻根系

生长以及通气组织发育,而通气组织发育好的水稻根系径向泌氧量较高,又促进了根际土壤硝化作用。因此,适当提高和改善红壤水稻土肥力对红壤区水稻生长及氮素营养具有重要意义。

## 参考文献

- [ 1 ] 李忠佩,李德成,张桃林,等. 红壤水稻土肥力性状的演变特征. 土壤学报,2003,40(6): 870—878. Li Z P, Li D C, Zhang T L, et al. Dynamics of soil properties of paddy fields in red soil region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(6): 870—878
- [ 2 ] 乔洁,毕利东,张卫健,等. 长期施用化肥对红壤性水稻土中微生物生物量、活性及群落结构的影响. 土壤,2007,39(5): 772—776. Qiao J, Bi L D, Zhang W J, et al. Effects of long-term chemical fertilization on soil microbial biomass, activity and community in paddy soil in red soil region of China (In Chinese). *Soils*, 2007, 39(5): 772—776
- [ 3 ] 孙波,张桃林,赵其国. 我国中亚热带缓丘区红黏土红壤肥力的演化 I. 物理学肥力的演化. 土壤学报,1999,36(1): 35—47. Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Fertility evolution of red soil derived from quaternary red clay in low-hilly region in middle subtropics I. Evolution of soil physical fertility (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(1): 35—47
- [ 4 ] 孙波,张桃林,赵其国. 我国中亚热带缓丘区红黏土红壤肥力的演化 II. 化学和生物学肥力的演化. 土壤学报,1999,36(2): 203—217. Sun B, Zhang T L, Zhao Q G. Fertility evolution of red soil derived from quaternary red clay in low-hilly region in middle subtropics II. Evolution of soil chemical and biological fertilities (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(2): 203—217
- [ 5 ] 李奕林,张亚丽,胡江,等. 淹水条件下籼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): 1 461—1 467. Li Y L, Zhang Y L, Hu J, et al. Spatiotemporal variations of nitrification in rhizosphere soil for two different rice cultivars at the seedling stage growing under waterlogged conditions (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1 461—1 467
- [ 6 ] 李奕林,张亚丽,张耀鸿,等. 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): 2 507—2 515. Li Y L, Zhang Y L, Zhang Y H, et al. Effect of N application on fertilizer-N use efficiencies, nitrification and nitrifying microorganisms in rhizosphere soil growing with different lowland rice cultivars (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2 507—2 515
- [ 7 ] Li Y L, Zhang Y L, Hu J, et al. 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 ] 慈恩,杨林章,程月琴,等. 耕作年限对水稻土有机碳分布和腐殖质结构特征的影响. 土壤学报,2008,45(5): 950—956. Ci E, Yang L Z, Cheng Y Q, et al. Effect of cultivation history on distribution of organic carbon and structure of humus in paddy soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 950—956
- [ 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 ] Zhong W H, Cai Z C. Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36: 84—91
- [ 12 ] 段英华,范晓荣,李奕林,等. 水稻增硝营养的生理与分子生物学机制. 中国农业科学,2008,41(6): 1 708—1 716. Duan Y H, Fan X R, Li Y L, et al. Physiological and molecular mechanisms of enhanced nitrate nutrition in rice (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6): 1 708—1 716
- [ 13 ] Arth I, Frenzel P, Conrad R. Denitrification coupled to nitrification in the rhizosphere of rice. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 509—515
- [ 14 ] Kronzucker H J, Schjoerring J K, Erner Y, et al. Dynamic interactions between root  $\text{NH}_4^+$  influx and long-distance N translocation in rice: insights into feedback processes. *Plant and Cell Physiology*, 1998, 39: 1 287—1 293
- [ 15 ] Escobar M A, Geisler D A, Rasmusson A G. Reorganization of the alternative pathways of the Arabidopsis respiratory chain by nitrogen supply: Opposing effects of ammonium and nitrate. *The Plant Journal*, 2006, 45: 775—788
- [ 16 ] 王月福,于振文,李尚霞,等. 土壤肥力和施氮量对小麦根系氮同化及子粒蛋白质含量的影响. 植物营养与肥料学报,2003,9(1): 39—44. Wang Y F, Yu Z W, Li S X, et al. Effects of nitrogen rates and soil fertility levels on root nitrogen absorption and assimilation and grain protein content of winter wheat (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 39—44
- [ 17 ] 丁洪,王跃思,项虹艳,等. 福建省几种主要红壤性水稻土的硝化与反硝化活性. 农业环境科学学报,2003,22(6): 715—719. Ding H, Wang Y S, Xiang H Y, et al. Nitrification and denitrification potential in different types of paddy soils in Fujian Province (In Chinese). *Journal of Agro-environment Science*, 2003, 22(6): 715—719
- [ 18 ] 赵其国,张桃林,鲁如坤,等. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控. 北京: 科学出版社,2002: 70—71. Zhao Q G, Zhang T L, Lu R K, et al. Mechanism, temporal-spatial changes and controlling countermeasures of soil degradation in hilly red soil region of southeastern China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2002: 70—71

## NITRIFICATION IN RHIZOSPHERE OF RICE IN PADDY SOILS DIFFERENT IN FERTILITY IN RED SOIL REGIONS OF SUBTROPICAL CHINA

Li Yilin Wang Xingxiang<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Differences between two paddy soils, high and low in soil fertility in the red soil region were explored in content of mineral N ( $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$ ) and nitrification intensity at the root surface and rhizosphere of rice and in the bulk soil, as well as in growth and N accumulation of rice seedlings at 40, 50 and 60 d after sowing. Results show that soil fertility had no significant effect on  $\text{NH}_4^+$ -N content at the root surface and rhizosphere of rice, while high fertility significantly increased  $\text{NH}_4^+$ -N content in the bulk soil, and  $\text{NO}_3^-$ -N contents and nitrification intensity at the root surface and rhizosphere of rice and in the bulk soil, as well. The highest nitrification intensity was observed at 2 mm away from the root surface in both soils, being 0.20 and 0.31  $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$  in the low and high fertility soils, respectively. Nitrification intensity in the bulk soil decreased with the increasing distance from the root surface, and approximated to the background value at 10 ~ 40 mm and 20 ~ 40 mm away from the root surface in the low and high fertility soils, respectively. Rice planting significantly enhanced nitrification intensity in the rhizosphere of the plant as compared with CK (rice plant free). High fertility improved the growth of rice significantly, especially rice root growth and aerenchyma formation and increased N accumulation in the plant. The difference in soil fertility of paddy field might cause differences in rhizospheric nitrification intensity and rice  $\text{NO}_3^-$  absorption, which might lead to stronger rice growth potential and N accumulation ability of the plant in the soil high in fertility. Hence, appropriate increasing soil fertility of red soil paddy fields is of great significance to improving nitrification in rhizosphere of the plants and rice N nutrition in the red soil regions of subtropical China.

**Key words** Paddy soil; Fertility; Rice; Rhizosphere; Nitrification