

淹水条件下粳稻与籼稻苗期根际土壤
硝化作用的时空变异

李奕林, 张亚丽, 胡 江, 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: 由于硝态氮(NO_3^- -N)对于水稻的生长起到非常重要的作用, 所以发生在水稻根际的硝化作用越来越受到人们的重视。试验采用根盒(3室)——速冻切片技术研究了常规粳稻(扬稻 6 号)和常规籼稻(农垦 57)苗期根际土壤矿质态氮、硝化作用和氨氧化细菌数量的时空变异。结果表明, 在淹水条件下, 土壤矿质态氮主要为铵态氮(NH_4^+ -N), NH_4^+ 含量随水稻生育期的推进变化不大, 但随着距根区的距离增加其含量随之增加, 两个水稻品种之间差异不显著; 而 NO_3^- 的变化趋势与 NH_4^+ 不一致, NO_3^- 含量随水稻生育期的延长而显著下降, 在培养 58d 时其平均含量约为 0.05 mg kg^{-1} , 同时在整个土体内呈均匀分布, 两个水稻品种之间差异显著。

土壤的硝化强度随水稻的生长而增强, 且两种水稻的硝化强度均为根际土壤最高, 然后依次为土体土壤和根区土壤。扬稻 6 号和农垦 57 硝化强度最大值分别出现在距根 6 mm 和 2 mm 处, 最大值分别为 $0.88 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 和 $0.73 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。土壤氨氧化细菌(AOB)数量随水稻生长时间的增加而增加, 且其水平变异趋势与土壤的硝化强度一致, 根际土壤 AOB 数量最多, 土体土壤次之, 根区土壤最少。相关分析结果表明, 硝化强度和 AOB 数量呈显著正相关关系($r = 0.86$, $p < 0.01$)。种植扬稻 6 号的土壤 NO_3^- 浓度、硝化强度以及 AOB 数量总是高于农垦 57。

关键词: 粳稻; 籼稻; 淹水; 根际; 硝化微生物

文章编号: 1000-0933(2006)05-1461-07 中图分类号: S511.2, S154 文献标识码: A

Spatiotemporal variations of nitrification in rhizosphere soil for two different rice cultivars at the seedling stage growing under waterlogged conditions

LI Yi-Lin, ZHANG Ya-Li, HU Jiang, SHEN Qi-Rong* (College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1461 ~ 1467.

Abstract: Increasing amounts of evidence is showing that nitrification in the rhizosphere is very significant for the nitrogen nutrition of rice plants. A rhizobox with three compartments and subsequent soil-slicing after quick freezing was used to measure simultaneously the spatiotemporal variations of mineral nitrogen, nitrification and AOB in the rhizosphere soil of two rice cultivars Yangdao 6 (Indica) and Nongken 57 (Japonica) growing at the N level of 30 mg N kg^{-1} . The results obtained can be listed as follows: the main nitrogen form was ammonium (NH_4^+ -N) in flooded paddy soil and NH_4^+ -N concentrations in bulk soil showed almost no changes with incubation time, but NH_4^+ -N concentrations increased with the distance from root zone of both rice cultivars. The NH_4^+ -N concentration of both Yangdao 6 and Nongken 57 in the zone 40 mm from the root at 51 days after sowing, for example, achieved 13.8 and 14.6 mg kg^{-1} soil, respectively. However, the nitrate (NO_3^- -N) concentration decreased significantly with the development of the incubation time, although the distribution of NO_3^- -N was even in the bulk soil. The

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40471074, 30390082)

收稿日期: 2005-10-10; **修订日期:** 2006-01-26

作者简介: 李奕林(1979~), 女, 河南郑州人, 博士, 主要从事根际土壤硝化特征研究. E-mail: njndlyl@tom.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shenqirong@njau.edu.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471074, 30390082)

Received date: 2005-10-10; **Accepted date:** 2006-01-26

Biography: LI Yi-Lin, Ph. D., mainly engaged in nitrification characteristics in rhizospheric soil. E-mail: njndlyl@tom.com

average NO_3^- -N concentration for both cultivars was 0.05 mg kg^{-1} soil. When the two varieties were compared, the NH_4^+ -N concentration was almost the same, while NO_3^- -N concentration was significantly different at every sampling time.

The nitrification activities of both rice cultivars increased with incubation time. Maximal nitrification activities were found in rhizosphere soil, followed by those in the bulk soil and in the root zone in every sampling. In the rhizosphere the nitrification activities decreased with increased distance from the root. The maximal nitrification activity measured at 44, 51 and 58 days after sowing of Yangdao 6 and Nongken 57 rice cultivars was at a distance of 6 mm and 2 mm from root zone, respectively. The maximal nitrification activity values measured were 0.88 and $0.73 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectively. The AOB in the root zone, rhizosphere ($0 \sim 4$ mm away from root zone) and bulk soil (> 4 mm away from root zone) for both rice cultivars increased during the growth periods. The AOB in the root zone was always the lowest, while that in the rhizosphere soil was the highest in both cultivars. In these experiments, the nitrification activities measured were significantly proportional to AOB ($r = 0.86$, $p < 0.01$). The nitrate concentration, nitrification activities and AOB of Indica were always higher than those of Japonica rice.

Key words: Indica rice; Japonica rice; waterlogged; rhizosphere soil; nitrification microorganisms

水稻是我国主要粮食作物之一,其产量高低对农业可持续性发展起至关重要的作用。据估计亚洲水稻产量 2025 年将比 1991 年增加 64%,而氮肥用量将增加 180%;即每千克氮肥带来的产量将从 51.7 kg 下降至 $30.2 \text{ kg}^{[1]}$ 。我国每季稻田施 $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮肥是很普遍的现象,一些地区氮肥施用量甚至达到 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此我国氮肥利用率通常只有 30%^[2]。过量施用氮肥不仅造成经济损失,更重要的是带来了环境的污染^[3]。

由于淹水条件下土壤硝化作用被强烈抑制,所以人们在对水稻氮素营养的研究中,重点放在铵态氮(NH_4^+ -N)营养的研究上,但水稻通过贯穿于植株茎部和根部的通气组织将氧气从地上部向根部运输^[4-6],并将其中一部分氧气释放到根际土壤中^[7],硝化作用在根际和根表立即发生。因此,尽管在淹水条件下,水稻田氮素形式以 NH_4^+ -N 为主^[8,9],但水稻根仍是处于铵硝混合营养中。尽管由于水稻根际和根表硝化作用形成的硝态氮(NO_3^- -N)数量甚微,但对水稻氮素营养起到重要的作用^[10,11]。已有许多研究结果表明,当水稻在铵硝混合营养条件下,不论是水稻植株生长、籽粒产量、氮素吸收量以及氮素向地上部的转运量均比单一 NH_4^+ 源要高^[10,12,13]。

硝化作用是氮素生物地球化学循环中非常重要的一个环节,包括两个步骤:首先氨在氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)的作用下被氧化为亚硝酸盐(NO_2^- -N),然后 NO_2^- 在亚硝氧化细菌(nitrite-oxidizing bacteria, NOB)作用下被氧化为 NO_3^- ^[14,15]。因此,由有机态 N 矿化以及人类施用的氮肥形成的铵盐就成为水稻和 AOB 共同竞争的底物。

以往的研究表明不同的水稻品种对 NO_3^- 的响应不同^[13]。根据以往的研究结果,即扬稻 6 号(常籼)对氮素吸收速率以及对硝响应均比农垦 57(常粳)高^[13],因此本试验选用这两个水稻品种来研究它们的根际硝化作用及其相关因子。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤采自江苏省农科院试验田的水稻土,其理化性状为:有机质 $28.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、全氮 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 NH_4^+ -N $1.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 NO_3^- -N $7.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、粘粒($< 10 \mu\text{m}$)26.4%、pH(水土比 1:2.5)6.1。水稻品种选用两种典型常规籼稻扬稻 6 号和粳稻品种农垦 57。

1.2 方法

本试验采用的根盒为有机玻璃制成(规格为长 12 cm、宽 8 cm、高 8 cm),在根箱中由两块 300 目尼龙网将根箱分隔为一个根室和两个边室,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两个边室之间自由通过。

试验用水稻土风干后过 1 mm 筛,每盒装 600 g 土(根室 100 g,两边室各 250 g)。土壤与尿素(30 mg N kg^{-1}

土)和 KH_2PO_4 ($93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 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,每盒播 6 粒,1 周后间苗每盒留 3 株苗。在整个种植期间,所有根盒置于人工气候室(恒温 28°C),保持 1 cm 淹水层。

采样时间为水稻播种后 44 d、51 d 和 58 d,即水稻叶龄分别为 7 叶 1 心、8 叶 1 心和 9 叶 1 心。在每次采样的前一天均不浇水,采样时两个品种水稻各取 6 盒,其中 3 盒迅速置于 -20°C 冰箱中冷冻 2 h 后,将两边室按离尼龙网 2、4、6、8、10、20、30 mm 和 40 mm 距离切片,用于土壤矿质态氮和硝化强度的测定,另外 3 盒直接将两边室在距尼龙网 4 mm 处切片,用于 AOB 数量测定。在本次试验中种植水稻的根室土壤被定义为根区土壤,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 $>4 \text{ mm}$)。

1.2.1 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的测定 土壤样品用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl 溶液(水土比 10:1)振荡浸提 30 min 后,用连续流动分析仪(AA3, Bran Luebbe 公司)测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量。

1.2.2 硝化强度的测定 短期硝化强度通常用于表征土壤硝化特征,本文参考 Berg 和 Rosswall^[16]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_3 ($75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),其中两份在 25°C 下培养 24h,另一份置于 -20°C 冰箱中 24h 作对照。培养结束后每份加 5 ml 去离子水、10 ml KCl ($2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$),完全摇匀后立即过滤;吸取 5 ml 滤液放入试管中,加 3 ml NH_4Cl 缓冲溶液($0.19 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 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。硝化强度按下列公式计算:

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

式中,12.5 为所加入试剂的体积,5 为所称取土样的重量,dwt 表示每克湿土的干重,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。

1.2.3 氨氧化细菌计数 采用 MPN 法,其中液体培养基包含: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、NaCl $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.03 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 K_2HPO_4 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 CaCO_3 $7.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 7.8。 25°C 恒温培养 14 d。具体方法见《农业微生物学实验技术》^[17]。

1.2.4 数据分析 所用数据均采用 SPSS 统计软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的时空变异

从图 1 可以看出,随着水稻生育期的延长,扬稻 6 号土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量几乎无变化,但农垦 57 土体土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量则随时间增加而下降。在水稻播种后 44、51 d 和 58 d,距扬稻 6 号根区土壤 30 mm 处 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量分别为 10.7 、 $12.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1A),农垦 57 则分别为 13.6 、 $10.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1B)。这可能是因为粳稻对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 吸收能力高于籼稻。两种水稻边室土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量在播种 44、51 d 和 58 d 后均明显呈现梯度变化,即随距根距离的增加而增加。3 次取样中,根区土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均含量,扬稻 6 号和农垦 57 分别为 $3.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;根际土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均含量,扬稻 6 号和农垦 57 分别为 $4.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而在距根 40 mm 处的土体土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均含量,扬稻 6 号和农垦 57 分别为 $12.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1)。以上结果表明水稻对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的强烈吸收导致根际出现亏缺区^[18]。

2.2 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的时空变异

从图 2 可看出,随水稻生育期的延长土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均显著下降。在水稻播种后 44、51 d 和 58 d,扬稻 6 号土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均含量分别为 1.86 、 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2A);农垦 57 则分别为 1.67 、 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2B)。两种水稻的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均含量在播种后 44 d 和 58 d 约下降了 97% 和 98%,而且在水稻播种后 58 d $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量非常低,这表明水稻随生育期增加对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 吸收量也在增加。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,这可能是因为 NO_3^- 是阴离子不受土壤胶体的吸

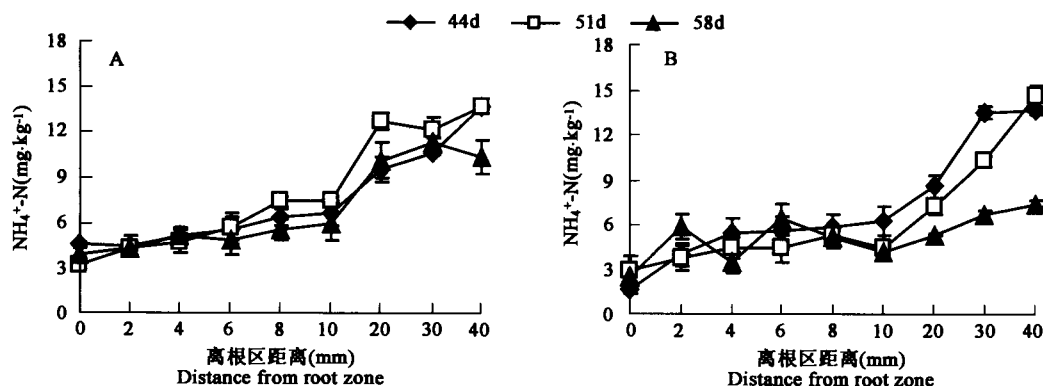


图 1 土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的时空变异(A)扬稻 6 号;(B)农垦 57

Fig.1 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ measured at different distance from the rice root in the flooded paddy soil growing Yangdao 6 and Nongken 57 rice cultivars at different sampling dates; (A) Yangdao 6; (B) Nongken 57

附,在土壤中的迁移速度较快的原因。在水稻苗期,扬稻 6 号土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量总是高于农垦 57,所以这可能是由于扬稻 6 号根际土壤硝化强度大于农垦 57(图 3)造成的(下面的试验数据可以证明)。

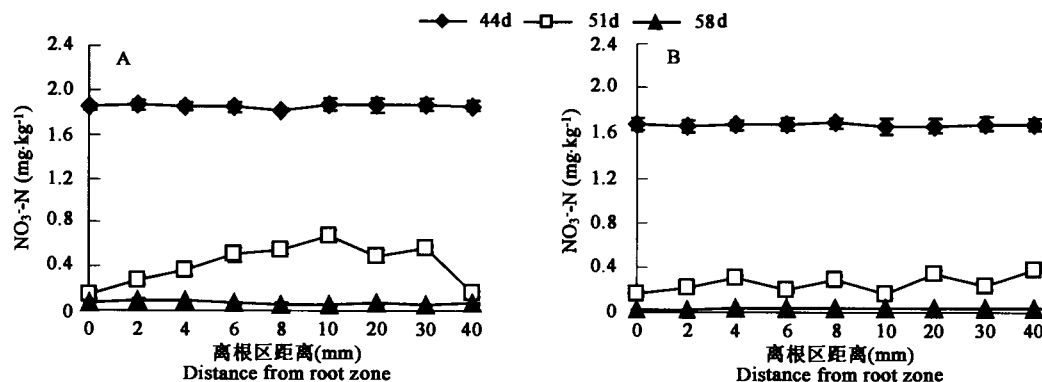


图 2 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量时空变异(A)扬稻 6 号;(B)农垦 57

Fig.2 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ measured at different distance from the rice root in the flooded paddy soil growing Yangdao 6 and Nongken 57 rice cultivars at different sampling dates. (A) Yangdao 6; (B) Nongken 57

2.3 短期硝化强度时空变异

从图 3 可看出,土壤硝化强度随水稻生育期延长而增强,且两个水稻硝化强度均为根际土壤最高,其次依次为土体土壤和根区土壤。在水稻生长期,扬稻 6 号和农垦 57 硝化强度最大值分别出现在距根 6 mm 和 2 mm 处,最大值分别为 $0.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;而根区硝化强度值最小,扬稻 6 号和农垦 57 分别为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在土体土壤中硝化强度随距根区距离增加而减少。在本试验中有一个有趣的现象,即与根际和土体土壤相比,无论是扬稻 6 号还是农垦 57 根区土壤硝化强度均最低,这可能和水稻根分泌有机酸引起根区土壤 pH 值下降以及根区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量低^[18](图 1),导致根区 AOB 数量低有关(表 1)。就这两种水稻而言,无论根区土壤、根际土壤还是土体土壤,扬稻 6 号的硝化强度总是高于农垦 57(图 3)。

2.4 AOB 数量时空变异

无论是扬稻 6 号还是农垦 57 在整个苗期,无论是根区土壤,还是根际土壤(距根区 4 mm 以内)和土体土壤(距根区 > 4 mm),土壤 AOB 数量总是随水稻生育期延长而增加,根区土壤 AOB 数量最低而根际土壤中最高(表 1)。由表 1 可知,扬稻 6 号土壤 AOB 数量总是高于农垦 57,其中扬稻 6 号根区土壤 AOB 数量与农垦 57 差异显著($p < 0.05$);根际土壤在播种后 44 d 二者差异不显著,而在播种 51 d 和 58 d 后差异显著($p < 0.05$);

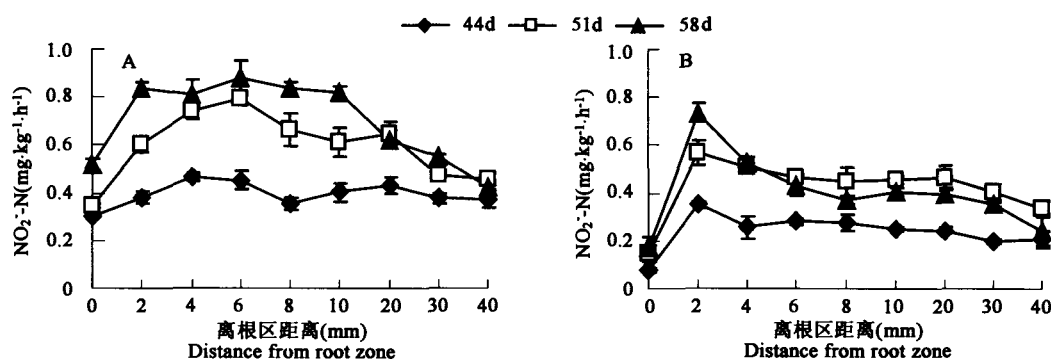


图3 土壤短期硝化强度时空变异(A)扬稻6号;(B)农垦57

Fig. 3 Nitrification activity (short-term estimation) measured at different distance from the rice root in the flooded paddy soil growing Yangdao 6 and Nongken 57 rice cultivars at different sampling dates. (A) Yangdao 6; (B) Nongken 57

而土体土壤变化趋势与根际土壤相反,即在播种后44d二者差异显著,而在播种51d和58d后差异不显著($p < 0.05$)。例如,扬稻6号在播种44d后根际土壤AOB数量是农垦57的1.1倍,而且在播种51d和58d AOB数量分别是播种后44d的2.4倍和2.6倍。本试验中硝化强度和AOB数量呈显著正相关关系($r = 0.86$, $p < 0.01$)。

3 讨论

3.1 籼稻与粳稻对 NO_3^- -N 的吸收

无论是 NH_4^+ -N 还是 NO_3^- -N 都能被水稻吸收并利用^[10,11],而且在水稻根中, NH_4^+ 转运蛋白以及 NO_3^- 转运蛋白都已经被发现^[19,20]。尽管 NO_3^- -N 在淹水水稻土壤中含量很低,但 NO_3^- -N 对水稻生长有非常重要的作用^[10,11]。张亚丽等^[13]研究了40个水稻品种对 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的响应,结果发现所有试验水稻品种在铵、硝混合营养中生长和氮素累积最好,其次是在纯铵营养液中,增硝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。在过去的20a中,我国农民为获得更高的产量已经开始广泛种植籼稻。众所周知,籼稻的产量远高于粳稻产量,籼稻的高产可能与其对 NO_3^- -N 的吸收能力更强有关。曹云等^[21]采用水培方法研究扬稻6号和农垦57体内硝酸还原酶活性(NRA)发现,籼稻体内 NRA 比粳稻高,其中籼稻叶片的 NRA 比粳稻高58.7%。范晓荣等^[22]发现在 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NO_3^- 条件下,扬稻6号根细胞膜电位对低浓度 NO_3^- 响应比农垦57强。籼稻对 NO_3^- -N 优势性吸收能力主要是由于在水稻生长初期(20d),籼稻具有较高的 V_{max} ,而在其生长中期(50d),籼稻 NO_3^- 运输蛋白对 NO_3^- 亲和力更强^[23]。大量研究结果表明,籼稻对 NO_3^- -N 比粳稻具有更强的同化利用能力^[11,24]。在本次试验中,扬稻6号和农垦57在播种后44到58d之间, NO_3^- -N 含量分别下降96.5%和98.1%。在最后1次采样中,扬稻6号和农垦57平均 NO_3^- -N 含量分别为 $0.065 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图2)。 NH_4^+ -N 通过硝化作用一旦形成 NO_3^- -N,将被水稻根迅速吸收或是迅速扩散到其它地方^[25],因此硝态氮在水稻田中的分布应呈现出均匀分布,本次试验结果再次证明此特点(图2)。

3.2 硝化强度时空变异

本试验结果表明两种水稻土壤硝化强度随水稻生长时间的延长而增强(图3),这可能与水稻根系泌氧能力随生育期增加而增强和根系分泌物的增加有关^[26]。由于水稻根系周围氧气浓度增加,AOB数量增加,硝化强度随之增强,所以水稻根际由于硝化作用所产生的 NO_3^- -N 量也增多。由于淹水水稻土壤中的 NO_3^- -N 主要

表1 扬稻6号和农垦57 AOB 数量时空变异

Table 1 AOB abundance of Yangdao 6 and Nongken 57 in root zone, rhizosphere and bulk soil after incubation of 44, 51 and 58 days

处理 Treatment	培养时间 Incubation time (d)	根区土壤 Root zone soil	根际土壤 Rhizospheric soil	土体土壤 Bulk soil
		(10 ⁵ g ⁻¹ dry soil)		
扬稻6号 Yangdao 6	44	3.5 ± 0.7	10.6 ± 1.0	8.9 ± 0.5
	51	5.9 ± 0.6	25.1 ± 2.3	10.5 ± 0.5
	58	6.1 ± 0.8	27.4 ± 2.6	10.7 ± 1.1
农垦57 Nongken 57	44	2.1 ± 0.3	9.8 ± 0.6	7.2 ± 0.7
	51	2.5 ± 0.3	19.4 ± 1.2	9.5 ± 0.4
	58	3.3 ± 0.5	20.5 ± 1.2	9.9 ± 0.5

是通过发生在水稻根际和淹水层与土壤界面的硝化作用将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化而成的^[18,27,28], 所以硝化强度随水稻生育期增加而增强将可能为水稻更好的生长提供更多的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

本试验中水稻根际硝化强度可能与水稻根尖泌氧能力有关。有研究表明, 径向泌氧量随距根尖距离增加而降低, 在距根尖 30 ~ 60mm 处达最小值^[4,29]。由于水稻根系吸收 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 因此根表 pH 值迅速降低^[30], 而且水稻根区 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 严重亏缺(图 1), 由于上述原因使得根区硝化强度比根际和土体土壤都低(图 3)。就两个品种水稻硝化强度差异而言, 在水稻的培养时间内, 扬稻 6 号均比农垦 57 强。而且扬稻 6 号和农垦 57 硝化强度最大值分别出现在距根区 6 mm 和 4 mm 处(图 3)。这种差异可能是由于不同基因型水稻根系泌氧能力不同而产生的^[26]。另外, 这个结果可能也能解释籼稻 $V_{\max}$ 比粳稻高^[23] 的原因。

3.3 AOB 数量与硝化强度之间的关系

两个品种水稻 AOB 数量上的差异可能和水稻根孔隙率不同导致根系泌氧能力不同有关^[26]。本试验中硝化强度和 AOB 数量呈显著正相关($r = 0.86$, $p < 0.01$)。在污水处理系统中, AOB 数量和硝化强度呈正相关^[31]。Ghosh 等^[26] 研究了 3 种水稻品种在田间淹水条件下, 施肥处理硝化速率与 AOB 数量呈显著正相关($p < 0.05$), 而未施肥的对照处理中, 二者则呈反比关系。上述这些结果证明了硝化作用主要是一种化能自养过程^[32,33], 而且 NH_4^+ 氧化成亚硝的过程被认为是整个硝化作用过程的限速步骤^[34]。然而, 除了 AOB, 一些甲烷营养型细菌也能利用其甲烷单加氧酶系将 NH_4^+ 氧化成 NO_2^- , 而且此类甲烷营养型亚硝化细菌在整个稻田硝化过程中占有一定比重^[35], 应该在今后对稻田系统硝化过程的研究中对其进行更深入的研究。

4 结论

在淹水条件下, 扬稻 6 号(常籼)苗期根际土壤硝化强度大于农垦 57(常粳)。对于这两个品种水稻, 硝化强度大小为: 根际土壤 > 土体土壤 > 根区土壤。硝化强度随水稻的生长而增强, 且无论在根区、根际还是土体土壤中均和 AOB 数量呈显著正相关关系($r = 0.86$, $p < 0.01$)。因此, 由硝化作用产生的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对水稻氮素营养起到非常重要的作用。

References:

- [1] Fischer K S. Toward increasing nutrient-use efficiency in rice cropping systems: the next generation of technology. *Field Crops Res*, 1998, 56: 1 ~ 6.
- [2] Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1 ~ 6.
- [3] Vlek P L G, Byrnes B H. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice. *Fert Res*, 1986, 9: 131 ~ 147.
- [4] Armstrong W. Radial oxygen losses from intact rice roots as affected by distance from the apex, respiration and water-logging. *Physiol Plant*, 1971, 25: 192 ~ 197.
- [5] Justin S H F W, Armstrong W. The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding. *New Phytol*, 1987, 106: 465 ~ 495.
- [6] Blom C W P M, Voeseek L A C J. Flooding: the survival strategies of plants. *TREE*, 1996, 11: 290 ~ 295.
- [7] Frenzel P, Rothfuss F, Conrad R. Oxygen profiles and methane turnover in a flooded rice microcosm. *Biol Fertil Soils*, 1992, 14: 84 ~ 89.
- [8] Rubinigg M, Stulen I, Elzenga J T M, *et al.* Spatial patterns of radial oxygen loss and nitrate net flux along adventitious roots of rice raised in aerated or stagnant solution. *Functional Plant Biology*, 2002, 29: 1475 ~ 1481.
- [9] Briones A M, Okabe S, Umemiy Y, *et al.* Ammonia-oxidizing bacteria on root biofilms and their possible contribution to N use efficiency of different rice cultivars. *Plant and Soils*, 2003, 250: 335 ~ 348.
- [10] Kronzucker H J, Siddiqi M Y, Glass A D M, *et al.* Nitrate-ammonium synergism in rice: a subcellular flux analysis. *Plant Physiol*, 1999, 119: 1041 ~ 1045.
- [11] Kronzucker H J, Glass A D M, Siddiqi M Y, *et al.* Comparative kinetic analysis of ammonium and nitrate acquisition by tropical lowland rice: implications for rice cultivation and yield potential. *New Phytol*, 2000, 145: 471 ~ 476.
- [12] Raman D R, Spanswick R M, Walker L P. The kinetics of nitrate uptake from flowing nutrient solutions by rice: Influence of pretreatment and light. *Bioresource Technology*, 1995, 53: 125 ~ 132.
- [13] Zhang Y L, Duan Y H, Shen Q R. Screening of physiological indices for response of rice to nitrate. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 571 ~ 576.
- [14] Prosser J I. Autotrophic nitrification in bacteria. *Adv. Microb. Physiol.*, 1989, 30: 125 ~ 181.

- [15] Liu Z P, Liu S J. Advances in the molecular biology of nitrifying microorganisms. *Chin J Appl Environ Biol*, 2004, 10(4): 521 ~ 525.
- [16] Berg P, Rosswall T. Ammonium oxidizer numbers, potential and actual oxidation rates in two Swedish arable soils. *Biol Fert Soils*, 1985, 1: 131 ~ 140.
- [17] Li F L, Yu Z N, He S J. *Agricultural microbiological experimental technique*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1996. 34 ~ 36.
- [18] Arth I, Frenzel P. Nitrification and denitrification in the rhizosphere of rice: the detection of process by a new multi-channel electrode. *Biol Fert Soils*, 2000, 31: 427 ~ 435.
- [19] Suenaga A, Moriya K, Sonoda Y, *et al.* Constitutive expression of a novel type ammonium transporter OsAMT2 in rice plants. *Plant Cell Physiology*, 2003, 44: 206 ~ 211.
- [20] Lin C M, Koh S, Stacey G, *et al.* Cloning and functional characterization of a constitutively expressed nitrate transporter gene, OsNRT1, from rice. *Plant Physiol*, 2000, 122: 379 ~ 388.
- [21] Cao Y, Fan X R, Jia L J, *et al.* Comparison of nitrate utilization by four different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, 28(1): 52 ~ 56.
- [22] Fan X R, Shen Q R, Ma Z Q, *et al.* A comparison of nitrate transport in four different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Sciences of China*. (accepted), 2005.
- [23] Feng K, Wang X L, Chen P, *et al.* Nitrate uptake of rice as affected by growth stages and ammonium. *Agricultural Sciences in China*, 2003, 2(1): 62 ~ 67.
- [24] Aurelio M B J, Satoshi O, Yoshiaki U, *et al.* 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.
- [25] Cai Z C. Ammonium transformation in paddy soils affected by the presence of nitrate. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 267 ~ 274.
- [26] Ghosh P, Kashyap A K. Effect of rice cultivars on rate of N-mineralization, nitrification and nitrifier population size in an irrigated rice ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24: 27 ~ 41.
- [27] Adhya T K, Patnaik P, Rao V R, *et al.* Nitrification of ammonium in different components of a flooded rice soil system. *Biol Fert Soils*, 1996, 23: 321 ~ 326.
- [28] Arth I, Frenzel P, Conrad R. Denitrification coupled to nitrification in the rhizosphere of rice. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30: 509 ~ 515.
- [29] Gilbert B, Frenzel P. Rice roots and CH₄ oxidation: the activity of bacteria, their distribution and the microenvironment. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30: 1903 ~ 1916.
- [30] Colmer T D, Bloom A J. A comparison of NH₄⁺ and NO₃⁻ net fluxes along roots of rice and maize. *Plant Cell Environ*, 1998, 21: 240 ~ 246.
- [31] Chen J S, Shi J L, Xu Y T. Measurement of nitrifying rate nitro bacteria count for application to investigating the effects of denitrification. *Shanghai Environmental Science*, 1996, 5(3): 18 ~ 20.
- [32] Sahrawat J. Nitrification in some tropical soils. *Plant and Soil*, 1982, 65: 281 ~ 286.
- [33] Kowalchuk G A, Stephen J R. Ammonia-oxidizing bacteria: a model for molecular microbial ecology. *Annu. Rev. Microbiol*, 2001, 55: 486 ~ 491.
- [34] De B W, Klein G P J A, Troelstra S R. Nitrification in Dutch heathland soils II. Characteristics of nitrate production. *Plant Soil*, 1990, 127: 193 ~ 200.
- [35] Bodelier P L E, Frenzel P. The contribution of methanotrophic and nitrifying bacteria to CH₄ and NH₄⁺ oxidation in the rice rhizosphere using new methods for discrimination. *Appl Environ Microbiol*, 1999, 65: 1826 ~ 1833.

参考文献:

- [2] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1 ~ 6.
- [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. *土壤学报*, 2004, 41(4): 571 ~ 576.
- [15] 刘志培, 刘双江. 硝化作用微生物的分子生物学研究进展. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(4): 521 ~ 525.
- [17] 李阜棣, 喻子牛, 何绍江. *农业微生物学实验技术*. 北京: 中国农业出版社, 1996. 34 ~ 36.
- [21] 曹云, 范晓荣, 贾莉君, 等. 不同水稻品种对 NO₃⁻ 同化差异的比较. *南京农业大学学报*, 2005, 28(1): 52 ~ 56.
- [31] 陈金声, 史家梁, 徐亚同. 硝化速率测定和硝化细菌计数考察脱氮效果的应用. *上海环境科学*, 1996, 5(3): 18 ~ 20.