



请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

石灰性农田土壤-水稻系统根际与非根际土氮转化速率差异

何晓茜,刘汐霓,黄宇潇,兰婷

引用本文:

何晓茜,刘汐霓,黄宇潇,兰婷.石灰性农田土壤-水稻系统根际与非根际土氮转化速率差异[J].农业环境科学学报,2023,42(2):384-392.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0586

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪,张嘉伟,孙星星,徐轶群,许健,朱靖 农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1723-1733 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110

温度对农田黑土氮初级转化速率的影响

郎漫, 李平, 魏玮 农业环境科学学报. 2021, 40(4): 815-822 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1133

不同水分对砂壤土初级氮转化速率的影响

郎漫,魏玮,李平 农业环境科学学报. 2022, 41(1): 107-114 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0113

施磷增氧条件对水稻光合特性及镉吸收分配的影响

张文萍,管啸,钟诚,易宇,肖卫华,易达理,杨良玖,吴根义 农业环境科学学报. 2022, 41(9): 1875-1886 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1346

不同遮阴处理下施肥对水稻生长及生理特性的影响

刘迎霞,娄运生,王坤,邢钰媛,刘健,苏磊,汤丽玲 农业环境科学学报.2021,40(12):2603-2613 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0317



关注微信公众号,获得更多资讯信息

农业环境科学学报 Iournal of Agro-Environment Science

何晓茜,刘汐霓,黄宇潇,等.石灰性农田土壤-水稻系统根际与非根际土氮转化速率差异[J].农业环境科学学报,2023,42(2): 384-392.

HE X Q, LIU X N, HUANG Y X, et al. Difference in nitrogen transformation rates between rhizosphere and bulk soil in a calcareous soilrice system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(2): 384-392.



石灰性农田土壤-水稻系统根际 与非根际土氮转化速率差异

何晓茜^{1,2}, 刘汐霓^{1,2}, 黄宇潇^{1,2}, 兰婷^{1,2*}

(1.四川农业大学资源学院,成都 611130; 2.耕地资源调查监测与保护利用重点实验室,成都 611130)

摘 要:为探讨石灰性农田土壤-水稻系统根际与非根际土的氮素转化特征差异,本研究以石灰性紫色土发育而成的水稻土为研究对象,通过采集水稻分蘖期和成熟期的根际与非根际土壤,开展¹⁵N成对标记室内好氧培养试验,并计算土壤各初级氮转化速率。结果表明:水稻分蘖期根际土初级矿化速率(4.45 mg·kg⁻¹·d⁻¹)和硝化速率(9.16 mg·kg⁻¹·d⁻¹)均显著低于非根际土(P<0.05);水稻成熟期根际土初级矿化速率(6.75 mg·kg⁻¹·d⁻¹)和硝化速率(16.86 mg·kg⁻¹·d⁻¹)与非根际土无显著差异,但显著高于分蘖期根际土的初级矿化和硝化速率(P<0.05)。水稻分蘖期NH¹-N固定速率显著高于成熟期,其中,分蘖期根际土NH¹-N固定速率为19.75 mg·kg⁻¹·d⁻¹,与成熟期根际土相比增加了42.21%;此外,两个生育期的水稻根际土NO₅-N固定速率均显著高于非根际土。水稻分蘖期根际土无机氮总固定速率显著大于有机氮矿化速率,有利于氮素的留存和周转,相应地,初级硝化速率显著降低,减少了土壤NO₅-N损失。研究表明,水稻不同生育期对石灰性水稻土主要氮转化速率的影响具有差异,且这种差异可能受水稻生育期内土壤水分、根系分泌物及无机氮含量变化的调控。

关键词:石灰性水稻土;水稻根际;初级氮转化速率;¹⁵N标记;硝化作用 中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)02-0384-09 doi:10.11654/jaes.2022-0586

Difference in nitrogen transformation rates between rhizosphere and bulk soil in a calcareous soil-rice system

HE Xiaoqian^{1,2}, LIU Xini^{1,2}, HUANG Yuxiao^{1,2}, LAN Ting^{1,2*}

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Key Laboratory of Investigation and Monitoring, Protection and Utilization for Cultivated Land Resources, Chengdu 611130, China)

Abstract: To better understand the differences in nitrogen transformation between the rhizosphere and bulk soil in a calcareous soil-rice system, soils were collected at the tillering stage and maturity stage of rice and differences in the gross rates of mineralization, nitrification, and immobilization were investigated in aerobic microcosmic experiments. The results showed that: The gross rates of mineralization and nitrification of the rhizosphere soil were 4.45 mg·kg⁻¹·d⁻¹ and 9.16 mg·kg⁻¹·d⁻¹, respectively, which are significantly lower than that of bulk soil(P<0.05). There was no significant difference in the gross mineralization rate (6.75 mg·kg⁻¹·d⁻¹) and nitrification rate(16.86 mg·kg⁻¹·d⁻¹) between the rhizosphere and bulk soil at the maturity stage, but these rates were significantly higher than those at the tillering stage (P<0.05). The NH⁴-N immobilization rate at the tillering stage was higher than that at the maturity stage. The NH⁴-N immobilization rate of rhizosphere soil was 19.75 mg·kg⁻¹·d⁻¹ at the tillering stage, which is 42.21% higher than that at the maturity stage. Additionally, the NO³-N

2023年2月

收稿日期:2022-06-10 录用日期:2022-09-13

作者简介:何晓茜(1998—),女,四川南充人,硕士研究生,从事农田根际土壤氮循环方面的研究。E-mail:13350661815@163.com

^{*}通信作者:兰婷 E-mail:tlan@sicau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42077096);四川省科技创新人才项目(2021JDRC0034)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42077096); The Science and Technology Department of Sichuan Province, China (2021JDRC0034)

immobilization rates of rhizosphere soil in both stages were higher than that of bulk soil. In the tillering stage, the gross mineralization rate of rhizosphere soil was significantly higher than the inorganic nitrogen immobilization rate, whereas the gross nitrification rate was decreased, enabling nitrogen retention and curbing NO₃-N loss. Our results indicate that the nitrogen transformation rates of rhizosphere soil differ in different growth stages because of variations in the water content, mineral nitrogen, and root exudation.

Keywords; calcareous soil; rhizosphere of rice; gross nitrogen transformation rate; ¹⁵N labeling; nitrification

氮素是水稻生长发育、产量和品质形成中起关键 作用的三大常量元素之一¹¹,氮肥施用量增加促进了 水稻的持续高产。我国每年消费的氮肥量约占世界 氮肥施用量的30%,而氮肥利用率(NUE)却普遍较低, 仅有30%~35%[2]。当前,氮素的严重流失已经引起了 诸多环境问题,如土壤酸化、盐碱化加剧、N2O气体排 放量增多、水资源污染加重等3,因此,亟需采取措施 减少土壤氮素损失。稻田土壤不断发生的氮素的动 态转化,直接关系着土壤氮素供应与作物吸收利用,其 过程主要包括有机氮矿化、硝化、反硝化、固氮和厌氧 氨氧化等[4]。因此,调控稻田土壤氮转化过程对阻控 氮素损失,提高作物氮肥利用率有重要意义⁵³。

经矿化作用产生的无机氮是植物生长发育过程 中可直接吸收利用的氮素形态,土壤的氮矿化过程 主要受到有机氮含量、碳输入、作物类型、pH、CO2 浓度以及水热条件等因素的综合影响16-7]。有研究 指出[8-9],有机氮矿化依赖于土壤中的微生物及各种 活性酶,同时土壤氧化还原电位(Eh)的提高也能刺 激有机氮矿化。此外,氮矿化过程与无机氮固定过 程有着耦合关系,郎漫等100报道,在淹水条件下,水 稻土的初级氮矿化速率、NH4-N及NO3-N固定速率 均大于非饱和水分状态。氮素硝化过程是指土壤 中的NH4-N在硝化微生物的作用下,首先被氧化为 NO₂-N,进而氧化为NO₃-N的过程,硝化过程的速度 直接关系到农田生态系统的保氮能力。研究表明,底 物(NH[‡]-N)浓度、氧气含量、pH、温度等均会对硝化 作用产生影响¹¹¹。在土壤-作物系统中,氮素循环在 根-土界面最为活跃,根系是作物与土壤密切联系的 部位,根际土壤与非根际土壤的理化性质存在显著差 异[12]。相关研究发现[13-14],根系分泌的质子、离子和有 机物质等根系分泌物对根际土壤作用明显,因此根际 土壤中微生物群落组成和结构与非根际土壤中存在 较大差异,从而可能导致根际和非根际土壤中氮转化 过程存在差异。例如,水稻根系分泌物中可能产生的 一些生物硝化抑制剂(BNIs),能抑制硝化细菌的氨单 加氧酶(AMO)和羟胺氧化酶(HAO)活性,从而使硝 化速率降低[15]。此外,水稻根系的泌氧能力会显著影

响根际土的硝化过程[16]。

紫色土是四川盆地的重要耕地资源,发育程度 轻,成土时间短,有机质及氮素含量低,保水保肥能 力弱^{117]}。受成土母质的影响,四川盆地内大部分紫 色土为石灰性紫色土,pH呈碱性,土壤硝化作用 强烈[18],由石灰性紫色土发育形成的水稻土也呈现 出相似问题。水稻为喜NH‡-N作物,而石灰性水 稻土中无机氮的主导形态为NO3-N,与水稻对无机 氮形态的喜好不契合119,从而可能造成氮素利用率 较低,进而导致水稻产量较低[20]。因此,有必要探讨 石灰性水稻土的根际与非根际土壤氮转化特征,以为 后续探索水稻根系调控高pH土壤氮转化过程的生物 学原理奠定基础。此外,目前相关水稻土氮转化过程 的研究较多关注氮转化微生物及碳氮组分等变 化[21-22],鲜见有对水稻根际和非根际土壤初级氮转化 速率的定量研究。为此,本试验以石灰性紫色土发育 形成的水稻土为研究对象,通过水稻根箱盆栽试验, 在水稻不同生育期分别采集根际与非根际土进行¹⁵N 同位素标记培养,测定培养过程中无机氮含量及 其¹⁵N丰度变化,并计算初级氮转化速率,以揭示氮转 化特征差异。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤是侏罗系遂宁组紫色钙质砂泥岩风化 残积物发育而成的钙质石骨子田,属淹育水稻土亚 类,淹育钙质紫泥田土属,土壤发育浅,熟化度低,为 石灰性紫色土发育形成的水稻土。采样地点为四川 省遂宁市安居区玉丰镇,该地种植制度为水旱轮作。 2020年春季通过S形采样法采集新鲜耕层土壤(0~ 20 cm)。将土样混合均匀并去除石块、根系、作物残 茬,一部分土壤通过2mm筛后4℃储存用于测定基 本理化性质,其余土壤装盆进行盆栽试验。土壤相 关理化性质见表1,其中NHI-N及NO3-N含量采用鲜 土测定,其余理化性质采用风干土测定。供试水稻品 种选用适宜成都平原水旱轮作区种植的水稻(Oryza sativa L., Wuyunjing 7).

农业环境科学学报 第42卷第2期

Table 1 Physico-chemical properties of the calcareous soil									
рН (H ₂ O)	有机碳 Organic C/ (g•kg ⁻¹)	总氮 Total N/ (g•kg ⁻¹)	碳氮比 C/N ratio	黏粒 Clay content (<2 µm)/%	粉粒 Silt content (2~20 µm)/%	砂粒 Sand content (20~2 000 µm)/%	铵态氮 NH₄−N/ (mg•kg ⁻¹)	硝态氮 NO₃-N/ (mg·kg ⁻¹)	
7.97	10.72	0.89	12.04	20.1	30.6	49.3	0.57	8.58	

表1 供试土壤的理化性质

1.2 水稻盆栽试验

水稻盆栽试验开展于四川农业大学成都校区温 室。采用根箱盆栽装置培养水稻,盆栽装置由聚乙烯 制成,规格为30 cm×30 cm×35 cm,由2个尼龙网袋 (孔径为300目)将盆栽装置分隔为2个根室和3个边 室(图1)。每个尼龙网袋内装入相当于3kg干土质 量的新鲜土壤,尼龙网袋外装入相当于15kg干土质 量的新鲜土壤。施肥量为纯 N 220 kg·hm⁻²·季⁻¹, P₂O₅ 105 kg·hm⁻²·季⁻¹, K₂O 90 kg·hm⁻²·季⁻¹, 供试肥料为尿 素(N≥46%)、过磷酸钙(P2O5≥16%)和氯化钾(K2O≥ 60%),其中磷肥与钾肥作为基肥一次性施入,尿素基 肥施用60%,分蘖期追肥40%。土壤与肥料混匀后装 入盆栽装置,均匀浇水。将消毒(30% H₂O₂)过的水稻 种子放入穴盘中培养,待水稻幼苗长至15 cm时移栽 至根箱,每个网袋中移栽2株幼苗,每个生育期设置3 个重复,分蘖期时间段为2020年6月中下旬至7月下 旬,采样时间为7月10日,成熟期时间段为2020年8 月下旬至9月中旬,采样时间为2020年9月12日。结 合水稻生育期,定期观察水稻生长情况并进行水肥管 理(成熟期之前保持淹水2~3 cm,进入成熟期之后土 壤逐渐落干)。于水稻分蘖期和成熟期破坏性采样,使 用抖根法收集根际土壤,同时采集边室中的土壤作为 水稻非根际土。水稻根系分泌物的收集方法为使用



图1 水稻盆栽装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of the rice pot culture

去离子水将根系表面土层冲洗干净,用0.5 mmol·L⁻¹ CaCl₂溶液浸提根系2 min,过0.45 μm的水系滤膜,过 滤后的溶液保存于离心管中用于测定有机酸含量。

1.3 ¹⁵N 成对标记培养试验

采集的新鲜土样立即用于开展 ¹⁵N 同位素成对标 记室内培养试验,共分为两组,具体步骤为:称取相当 于 30 g干土质量的新鲜土样装入400 mL培养瓶,随后 向其中一组的每个培养瓶中均匀加入2 mL ¹⁵NH4NO3 氮肥溶液(丰度为10.12%),另一组加入2 mL NH4¹⁵NO3 滚液(丰度为10.10%),使土壤中的NH4-N和NO3-N添 加量均为50 mg·kg⁻¹。轻盖瓶口后放入培养箱,于 25 ℃恒温培养。在2 h和3、5、10 d时破坏性取样,用 2 mol·L⁻¹ KCl溶液(水土比5:1)振荡浸提1 h,过滤后 收集滤液测定 NH4-N、NO3-N含量及其 ¹⁵N 丰度。

1.4 样品分析

土壤基本理化性质按鲍士旦¹²³提供的方法进行, pH、有机碳、全氮、土壤机械组成分别采用 pH 电位 法、重铬酸钾容量法、半微量凯氏定氮法和比重计速 测法测定。¹⁵N 好氧标记培养试验的 NH₄-N含量采用 靛酚蓝比色-紫外分光光度法测定,NO₃-N含量采用 紫外分光光度法测定;NH₄-¹⁵N 丰度和 NO₃-¹⁵N 丰度 测定时先采用微扩散法¹²⁴富集样品,然后使用同位素 质谱联用仪测定。

1.5 速率计算方法与统计分析

1.5.1 氮转化速率计算方法

初级氮转化速率的计算按照 Hart 等^[25]改进的方 程进行,分别如下:

$$m_{ijj} = \frac{[\mathrm{NH}_{4}^{+}]_{0} - [\mathrm{NH}_{4}^{+}]_{t}}{t} \times \frac{\log_{2}(APE_M_{0}/APE_M_{t})}{\log_{2}([\mathrm{NH}_{4}^{+}]_{0}/[\mathrm{NH}_{4}^{+}]_{t})}$$

$$n_{ijj} = \frac{[\mathrm{NO}_{3}^{-}]_{0} - [\mathrm{NO}_{3}^{-}]_{t}}{t} \times \frac{\log_{2}(APE_N_{0}/APE_N_{t})}{\log_{2}([\mathrm{NO}_{3}^{-}]_{0}/[\mathrm{NO}_{3}^{-}]_{t})}$$

$$c_{\mathrm{NH}_{4}^{+}} = m_{ijj} - \frac{[\mathrm{NH}_{4}^{+}]_{t} - [\mathrm{NH}_{4}^{+}]_{0}}{t}$$

$$i_{\mathrm{NH}_{4}^{+}} = c_{\mathrm{NH}_{4}^{+}} - n_{ijj}$$

$$i_{\mathrm{NO}_{3}^{-}} = c_{\mathrm{NO}_{3}^{-}} = n_{ijj} - \frac{[\mathrm{NO}_{3}^{-}]_{t} - [\mathrm{NO}_{3}^{-}]_{0}}{t}$$

式中:t代表时间间隔,d;[NH4]。表示t=0时的NH4-N

含量,mg·kg⁻¹;[NH⁴],表示*t*时的NH⁴₄-N含量,mg·kg⁻¹; [NO₃⁻]₀表示*t*=0时的NO₃⁻-N含量,mg·kg⁻¹;[NO₃⁻],表示*t* 时的NO₃⁻-N含量,mg·kg⁻¹;*APE_M*₀表示*t*=0时的 NH⁴₄-¹⁵N原子百分超;*APE_M*₁表示*t*时的NH⁴₄-¹⁵N原子 百分超;*APE_N*₀表示*t*=0时的NO₃⁻¹⁵N原子百分超; *APE_N*₁表示*t*时的NO₃⁻¹⁵N原子百分超;*m*₁为初级矿 化速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹;*n*₁为初级硝化速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹; c_{NH_3} 为NH⁴-N消耗速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹;*i*_{NH_3}→NH⁴-N固定 速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹;*i*_{NO3}→N回定速率,mg·kg⁻¹·d⁻¹;

1.5.2 统计分析

本研究使用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 进行数据处 理和统计分析,采用 Origin 9绘图。

2 结果与分析

2.1 不同生育期水稻根际与非根际土壤 pH、无机氮 及根系有机酸含量变化

试验分别在分蘖期及成熟期测定根际与非根际 土壤pH、NH:-N及NO3-N含量,结果如表2所示。淹 水后,土壤pH随生育期变化逐渐降低,两个生育期均 表现为根际土壤pH大于非根际土壤。无机氮含量整 体表现为NO3-N含量显著高于NH:-N含量,同时,分 蘖期土壤的无机氮含量高于成熟期。同一生育期内, 非根际土NH:-N含量均高于根际土,此外,成熟期-根际土NH:-N含量均高于根际土,此外,成熟期-根际土NH:-N含量为18.98 mg·kg⁻¹,显著低于非根际 土。图2为分蘖期及成熟期水稻根系分泌有机酸含 量的变化。根系分泌的有机酸中以乳酸、酒石酸和苹 果酸为主要有机酸类型,总体上水稻分蘖期根系分泌 的有机酸含量显著高于成熟期,其中苹果酸及乳酸含 量从分蘖期到成熟期显著下降(P<0.05),两个生育期 之间酒石酸含量的变化不显著。

表2 根际与非根际土壤pH及无机氮含量的变化

Table 2 Changes of pH and inorganic nitrogen content in the rhizosphere soil and bulk soil

处理 Treatment	рН	铵态氮含量 NH靠−N content/ (mg•kg ⁻¹)	硝态氮含量 NO3-N content/ (mg·kg ⁻¹)
分蘖期-根际土	$7.83 \pm 0.05 a$	26.34±3.29a	$70.97 \pm 5.06a$
分蘖期-非根际土	7.73±0.12a	29.61±4.17a	$65.24 \pm 4.74 a$
成熟期根际土	$7.63 \pm 0.09 a$	$18.98 \pm 1.68 \mathrm{b}$	65.16±2.00a
成熟期-非根际土	$7.40 \pm 0.08 \mathrm{b}$	27.54±1.21a	61.06±1.77a

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P < 0.05).



Figure 2 Changes in the concentration of organic acids at tillering stage and maturity stage

2.2 不同生育期水稻根际与非根际土壤NH₄-N_{NO3}-N 含量及其丰度变化

水稻分蘖期及成熟期根际与非根际土壤¹⁵N成对标记培养2h和3、5、10d后的NH⁴-N、NO³-N含量及 其丰度的变化如图3所示。NH⁴-N含量在整个培养 期间均显著下降(图3a,P<0.05)。分蘖期-根际土的 NH⁴-N含量由46.34 mg·kg⁻¹降低到1.92 mg·kg⁻¹,而 同时期的非根际土壤降低幅度较根际土壤更大。成 熟期-根际土与非根际土也表现出相同的趋势,非根 际土的降低幅度为根际土的1.23倍。与NH⁴-N含量 变化相反,除分蘖期-根际土的NO³-N含量降低(由 190.97 mg·kg⁻¹降到118.96 mg·kg⁻¹)以外,其余土壤的 NO³-N含量均显著上升(图3b,P<0.05)。培养结束 时,土壤的NO³-N含量排序为分蘖期-非根际 (298.47 mg·kg⁻¹)>成熟期-非根际(277.26 mg·kg⁻¹)> 成熟期-根际(231.50 mg·kg⁻¹)>分蘖期-根际(118.96 mg·kg⁻¹)。

NH¹₄-¹⁵N 丰度和NO⁵₃-¹⁵N 丰度在整个培养期间均显 著降低(图 3c 和图 3d, P<0.05)。分蘖期-非根际土的 NH¹₄-¹⁵N 丰度从 9.05%降低至 4.15%,成熟期-非根 际土的 NH¹₄-¹⁵N 丰度从 8.96%降低至 4.19%。对于 NO⁵₃-¹⁵N 丰度而言,在不同生育期内根际土的降低幅 度均略高于非根际土,其中,成熟期-根际土的下降 速度最快(从 8.50%降到 5.31%)。

2.3 不同生育期水稻根际与非根际土壤初级矿化速率及初级硝化速率变化

通过时间加权平均计算的初级矿化速率及初级 硝化速率如图4所示,其中,分蘖期-非根际土的初级 矿化速率为6.58 mg·kg⁻¹·d⁻¹,为同生育期根际土的 1.48倍,成熟期-非根际土初级矿化速率与成熟期-根

387



Figure 3 Changes in the concentration and ¹⁵N enrichments of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N during the incubation period







Figure 4 Gross rates of mineralization and nitrification between the rhizosphere soil and bulk soil

际土矿化速率相比无显著差异。此外,根际土的初级 矿化速率在不同生育期差异显著(P<0.05),在分蘖期 时其初级矿化速率为4.45 mg·kg⁻¹·d⁻¹,成熟期达到 6.75 mg·kg⁻¹·d⁻¹,而非根际土初级矿化速率在不同生 育期无显著变化。 分蘖期初级硝化速率表现出非根际土显著大于根际土(P<0.05),其中分蘖期-非根际土的初级硝化速率为12.63 mg·kg⁻¹·d⁻¹,为同生育期根际土的1.38倍,而成熟期初级硝化速率无显著差异。此外,不同生育期根际土初级硝化速率表现为分蘖期(9.16 mg·kg⁻¹·d⁻¹)显

中文核心期刊

著小于成熟期(16.86 mg·kg⁻¹·d⁻¹)(P<0.05),而不同生 育期非根际土初级硝化速率无显著差异。

2.4 不同生育期水稻根际与非根际土壤无机氮固定 速率变化

无机氮固定速率如图5所示,不同生育期根际土的NH4-N固定速率和NO3-N固定速率存在显著差异(P<0.05)。分蘖期根际土与非根际土的NH4-N固定速率分别为19.75 mg·kg⁻¹·d⁻¹与18.98 mg·kg⁻¹·d⁻¹,而成熟期NH4-N固定速率显著降低,但同一生育期内,根际土和非根际土的NH4-N固定速率未表现出显著差异。根际土NO3-N固定速率在分蘖期为10.73 mg·kg⁻¹·d⁻¹,显著高于成熟期(-5.17 mg·kg⁻¹·d⁻¹)(P<0.05)。此外,同一生育期内根际与非根际土的NO3-N固定速率趋为负值。同时,由图6可知,分蘖期根际土的无机氮固定速率大于有机氮矿化速率,非根际土在两个生育期均表现为有机氮矿化大于无机氮固定。

3 讨论

3.1 不同生育期水稻根际与非根际土壤初级矿化速 率的差异

有机氮矿化过程直接关系着土壤NH4-N库的动态变化,同时NH4-N对喜铵作物水稻的生长至关重要。通常,矿化速率的差异主要受土壤理化性质的影响,而在根际微域,矿化速率很大程度上受到根-土-微生物的互作调控^[26]。本试验的结果表明,分蘖期-根际土的初级矿化速率显著低于非根际土(P<0.05),这可能与水稻根际环境的变化有关。事实上,根系分泌物对氮素矿化既能促进也能抑制^[27]。根系分泌物能够为土壤微生物提供营养和能源,使根际微生物的



图 6 根际与非根际土壤初级矿化速率与总固定速率的比值 Figure 6 Ratio of mineralization to immobilization between the rhizosphere soil and bulk soil

活性及丰富度均大于非根际,同时也可提高氮素矿化 相关酶的活性,从而促进有机氮矿化[28]。与此相反, Taylor 等[29]指出,根系分泌物中的小分子有机酸使根 际土的pH降低,进而抑制矿化作用相关酶的活性; Dijkstra 等^[30]研究表明在土壤氮素有效性较高的条件 下,微生物优先利用根系分泌物中的碳源,从而抑制 了本底有机质矿化。由图2可知,分蘖期水稻根系分 泌有机酸的含量较高,从而可能影响土壤矿化速率。 然而,本研究分蘖期与成熟期的土壤pH均为根际土 大于非根际土,为此,有必要进一步研究石灰性农田 土壤-水稻系统根系分泌物的组成,以期更好地揭示 根际土壤矿化速率较低的原因。此外,本研究还发 现,与分蘖期相比,成熟期根际与非根际土的矿化速 率均得到提高。据报道[31-32],分蘖期至成熟期,水稻 根系逐渐发达,通气组织逐渐完善,从而增强了根系 的泌氧能力。水稻根系泌氧可以为根际微生物提供 部分氧气作为电子受体,从而提高有机氮的矿化速



Figure 5 Gross rates of immobilization of NH₄⁴-N and NO₃³-N between the rhizosphere soil and bulk soil

www.aer.org.cn

率,进而增加无机氮底物供作物吸收利用。同时,水 稻泌氧增强了根系氧化还原能力,使作物能够快速吸 收同化氮素^[31],因此,本试验中成熟期根际土NH₄-N 含量较低的现象可能是根系同化吸收能力增强的结 果。另外,分蘖期到成熟期土壤含水量发生变化,土 壤环境逐渐从淹水到落干,通气性增强使酶活性及 好氧微生物的活性增加,这也可能促进有机氮矿化。 如 Ke等^[33]的研究报道,土壤氧浓度的变化会很大 程度影响氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌 (NOB)的活性和丰度;Li等^[34]的研究也表明,水稻根 系氧气状况改善增加了土壤脲酶活性,从而间接提 高了有机氮矿化速率,这与本研究中氮矿化速率的 结果一致。

3.2 不同生育期水稻根际与非根际土壤初级硝化速 率的差异

土壤硝化作用受土壤水分、pH、有机质等的综合 影响^[11]。研究表明,土壤的pH较高,其初级硝化速率 也较高[35]。即使在淹水条件下,由于表层土壤具有较 高的氧气含量,硝化作用仍可以进行,已有研究表 明1301, 淹水后碱性水稻土的初级硝化速率高达7.91 mg·kg⁻¹·d⁻¹(以N计),这与本文的结果相似。然而, 在石灰性农田土壤-水稻系统中,较高的硝化速率意 味着NHI-N的滞留时间短,土壤中的无机氮以NO5-N 形态大量留存,显然并不利于喜铵作物水稻的生长。 但同时本研究也发现,水稻分蘖期的根际土初级硝化 速率显著低于非根际土,推测其原因可能是分蘖期 根际土处于还原状态,而根系通气组织尚未发育良 好,导致土壤矿化速率较低,加之分蘖期水稻根系对 NHI-N的需求和吸收能力逐渐增强,从而降低了硝化 作用的底物含量。从分蘖期到成熟期根际土的硝化 速率逐渐上升,其原因可能是水稻生长环境由积水变 为落干,水分的减少改善了土壤的通气状况,同时根 系泌氧能力增强,使成熟期土壤氧含量高于分蘖期, 从而增强了硝化微生物的活性。此外,水稻产生的根 系分泌物也会影响硝化过程。已有研究报道[37-38],水 稻根系分泌物中的特异性物质对土壤硝化作用有很 强的抑制效果,如小分子有机物1,9-癸二醇被鉴定 为一种有效的生物硝化抑制剂(BNI)。根系分泌物 在土壤水分运动的作用下发生迁移[39],使其从根系向 土体土壤迁移的过程中逐渐被稀释,从而可能导致根 系分泌物对根际土硝化作用的抑制效果强于对非根 际土的,因此,进一步研究BNI对硝化作用的影响将 有助于更全面地阐述水稻根际氮转化过程。

3.3 不同生育期水稻根际与非根际土壤无机氮固定 速率的差异

土壤中的无机氮固定主要为微生物的同化作用, 而微生物对氮形态有特定偏好。研究表明[40],与NO5-N 相比,微生物会优先利用NHI-N,因此,土壤中的无机 氮固定作用通常为NH4-N高于NO3-N,这与本研究 结果一致。此外,本试验结果还表明,分蘖期-根际 土 NO₃-N 固定速率最高(10.73 mg·kg⁻¹·d⁻¹),相应地, 同一培养期内根际土NO3-N含量显著降低。已有研 **穷指出,水稻分蘖期土壤为淹水状态,其中存在多种** 电子受体(如O2、Fe3+和SO2-等)[31],同时伴随着根系分 泌大量活性碳源,根-土界面很容易发生强烈的反硝 化作用。但由于本试验采用的速率计算方法未考虑 反硝化及硝酸盐异养还原为铵(DNRA)的过程,部分 被认为参与固定作用的NO3-N事实上可能被反硝化 及DNRA过程消耗,基于此前提,可以推测分蘖期-根 际土的反硝化过程较强烈,并且这可能是造成培养期 内NO3-N含量降低的主要原因。总体上,尽管研究 结果表现为石灰性水稻土无机氮固定速率较高,但长 期来看,这部分NH[‡]-N或NO⁵-N被微生物同化后储 存为土壤有机氮,并可能通过再矿化供作物吸收利 用,因此较高的无机氮固定速率有利于土壤氮素的留 存与周转。此外,在土壤-作物系统中,土壤无机氮 的周转可能受根际环境影响较大,本研究显示,与分 蘖期的非根际土相比,根际土的无机氮固定速率显著 大于有机氮矿化速率,同时初级硝化速率显著降低, 表现为负的根际激发效应,这可能是减少氮素损失的 部分生物调节策略。进一步揭示水稻分蘖期根际土 氮转化过程的生物学机制,将有助于采取有针对性的 措施提高石灰性农田土壤-水稻系统的氮素利用率。

另外,本试验仅定量研究了水稻根际与非根际土的矿化和硝化过程,然而,水稻田干湿交替会产生较强烈的反硝化作用,因此,有必要进一步测定石灰性农田土壤-水稻系统的反硝化速率,以更好地揭示水稻根际氮转化过程。值得注意的是,由于本研究的¹⁵N标记培养试验并未添加作物,因而忽视了标记期间作物根系吸收无机氮对土壤氮转化速率的影响,He等^[41]对3种作物-土壤系统进行了6d的¹⁵N原位标记,研究表明,土壤-作物系统的氮矿化、硝化及固定速率显著大于裸土,且因不同作物类型而异。但由于现有技术的限制,仅能在短期培养试验条件下测定并计算土壤-作物系统的氮转化速率,无法原位定量作物全生育期的土壤氮转化速率。因此,未来对这一技

术的突破将有助于更深入地了解土壤-作物系统氮 转化的部分关键过程及机制。

4 结论

(1)对根际与非根际土而言,水稻分蘖期根际土 初级矿化速率和初级硝化速率均显著低于非根际土 (P<0.05),成熟期根际土的初级矿化速率和初级硝化 速率与非根际土的无显著差异。

(2)对不同生育期而言,分蘖期根际土的初级矿 化速率及初级硝化速率显著低于成熟期(P<0.05),而 非根际土不受生育期的影响。

(3)分蘖期根际土的无机氮固定速率显著大于有 机氮矿化速率(P<0.05),从而促进了土壤的氮素周转 与留存,相应地,初级硝化速率降低有利于减少NO₃-N 的损失。

(4)研究结果表明,水稻生长对根际土壤主要氮 转化过程具有不同程度的调控作用,且这种调控差异 可能受水稻生育期内土壤水分、根系分泌物及无机氮 含量变化的影响。

参考文献:

- COSKUN D, BRITTO D T, SHI W, et al. How plant root exudates shape the nitrogen cycle[J]. *Trends in Plant Science*, 2017, 22(8):661– 673.
- [2] 王响玲, 宋柏权. 氮肥利用率的研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(5):93-97. WANG X L, SONG B Q. Nitrogen fertilizer use efficiency: Research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(5):93-97.
- [3] CAMERON K C, DI H J, MOIR J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: A review[J]. Annals of Applied Biology, 2013, 162:145–173.
- [4] FOWLER D, COYLE M, SKIBA U, et al. The global nitrogen cycle in the twenty-first century[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*: *Biological Sciences*, 2013, 368(1621): 20130164.
- [5] ERISMAN J W, GALLOWAY J N, SEITZINGER S, et al. Consequences of human modification of the global nitrogen cycle[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 368 (1621):20130116.
- [6] ZHANG J B, CAI Z C, MULLER C. Terrestrial N cycling associated with climate and plant-specific N preferences: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(3):488–501.
- [7] CHEN B Q, LIU E K, TIAN Q Z, et al. Soil nitrogen dynamics and crop residues. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34 (2):429–442.
- [8] 刘秋丽,马娟娟,孙西欢,等.土壤的硝化-反硝化作用因素研究进展[J]. 农业工程, 2011, 1(4):79-83, 13. LIU Q L, MA J J, SUN X H, et al. Research advancement on soil nitrification-denitrification and its influencing factors[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(4):79-83,

13.

- [9] SUN L, LU Y F, YU F W, et al. Biological nitrification inhibition by rice root exudates and its relationship with nitrogen-use efficiency[J]. *New Phytologist*, 2016, 212(3):646-656.
- [10] 郎漫,魏玮,李平.不同水分对砂壤土初级氮转化速率的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(1):107-114. LANG M, WEI W, LI P. Effects of different moisture contents on gross N transformation rates in sandy loam soil[J]. Journal of Agro Environment Science, 2022, 41(1):107-114.
- [11] NORTON J, OUYANG Y. Controls and adaptive management of nitrification in agricultural soils[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1931.
- [12] MOREAU D, BARDGETT R D, FINLAY R D, et al. A plant perspective on nitrogen cycling in the rhizosphere[J]. *Functional Ecology*, 2019, 33(4):540-552.
- [13] MA Y, OLIVEIRA R S, FREITAS H, et al. Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: Relevance for phytoremediation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7:918.
- [14] HU L, ROBERT C A M, CADOT S, et al. Root exudate metabolites drive plant-soil feedbacks on growth and defense by shaping the rhizosphere microbiota[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1):2738.
- [15] 郝晓晖.长期施肥对亚热带稻田土壤有机碳氮及微生物学特性的 影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2008. HAO X H. Effect of longterm fertilization on soil organic carbon, organic nitrogen and microbial properties in subtropical paddy soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [16] 李奕林.水稻根系通气组织与根系泌氧及根际硝化作用的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2066-2074. LI Y L. Relationship among rice root aerechyma, root radial oxygen loss and rhizosphere nitrification[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2066-2074.
- [17] 储栎泉, 焦涵薇, 余靖, 等. 四川紫色土壤中流氮流失特征及控制 技术[J]. 四川环境, 2022, 39(4):111-116. CHU L Q, JIAO H W, YU J, et al. Characteristics and control techniques of nitrogen loss in purple soil interflow in Sichuan[J]. Sichuan Environment, 2022, 39 (4):111-116.
- [18] 李梦潇. 氯调控措施对石灰性紫色土关键氮转化过程的调控作用 与机制研究[D]. 成都:四川农业大学, 2020. LI M X. Study on the effects and mechanism of nitrogen control measures on the key nitrogen transformation process of calcareous purple soil[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [19] LIU S, CHI Q, CHENG Y, et al. Importance of matching soil N transformations, crop N form preference, and climate to enhance crop yield and reducing N loss[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1265–1273.
- [20] ZHANG R F, VIVANCO J M, SHEN Q R. The unseen rhizosphere root-soil-microbe interactions for crop production[J]. *Current Opinion* in Microbiology, 2017, 37:8–14.
- [21] BAGHERI S, MIRSEYED H, ETESAMI H, et al. Rice straw and composted azolla alter carbon and nitrogen mineralization and microbial activity of a paddy soil under drying-rewetting cycles[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 154:103638.

391

www.aer.org.cn

1GR_392

[22] JIANG X, HOU X, ZHOU X, et al. pH regulates key players of nitrification in paddy soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, 81:9– 16.

- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1999. BAOSD. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [24] 张珮仪, 温腾, 张金波, 等. 扩散法测定土壤无机氮¹⁵N 丰度方法优 化研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(4):948-957. ZHANG P Y, WEN T, ZHANG J B, et al. On improving the diffusion method for determination of δ¹⁵N-NH⁴ and δ¹⁵N-NO³ in soil extracts[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4):948-957.
- [25] HART S C, STARK J M, DAVIDOSON E A, et al. Nitrogen mineralization, immobilization and nitrification[M]//WEAVER R. Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties. Madison Wisconsin: Soil Science Society of America, 1994:985-1018.
- [26] HE X X, CHI Q D, CAI Z C, et al. ¹⁵N tracing studies including plant N uptake processes provide new insights on gross N transformations in soil-plant systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 141: 107666.
- [27] 王锐, 陈士勇, 陈志青, 等. 根系分泌物对根际土壤关键氮转化过程的影响[J]. 作物杂志, 2021(6):1-8. WANG R, CHEN S Y, CHEN Z Q, et al. Effects of root exudates on key processes of soil nitrogen cycling: A review[J]. Crops, 2021(6):1-8.
- [28] LIU D, FANG S, TIAN Y, et al. Nitrogen transformations in the rhizosphere of different tree types in a seasonally flooded soil[J]. *Plant*, *Soil and Environment*, 2014, 60(6):249–254.
- [29] TAYLOR A E, ZEGLIN L H, DOOLEY S, et al. Evidence for different contributions of archaea and bacteria to the ammonia-oxidizing potential of diverse oregon soils[J]. *Applied and Environmental Microbiolo*gy, 2010, 76(23):7691-7698.
- [30] DIJKSTRA F A, CARRILLO Y, PENDALL E, et al. Rhizosphere priming: A nutrient perspective[J]. Frontiers in Microbiology, 2013, 4: 216.
- [31] 孙凯, 胡丽燕, 张伟, 等. 水稻根系泌氧对土壤微生物区系及氮素 矿化影响的研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3413-3420.
 SUN K, HU L Y, ZHANG W, et al. Effects of rice root radial oxygen loss on soil microflora and organic nitrogen mineralization: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3413-3420.

农业环境科学学报 第42卷第2期 K稻根际氧浓度对分蘖期根系形态和氮代谢的影响机

- [32] 徐春梅.水稻根际氧浓度对分蘖期根系形态和氮代谢的影响机制 [D]. 南昌:江西农业大学, 2016. XU C M. Effect mechanism of rice rhizosphere oxygen concentration on root morphology and nitrogen metabolism at tillering stage[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2016.
- [33] KE X B, LU W, CONRAD R. High oxygen concentration increases the abundance and activity of bacterial rather than archaeal nitrifiers in rice field soil[J]. *Microbial Ecology*, 2015, 70(4):961–970.
- [34] LI Y L, WANG X X. Root-induced changes in radial oxygen loss, rhizosphere oxygen profile, and nitrification of two rice cultivars in Chinese red soil regions[J]. *Plant and Soil*, 2013, 365(1/2):115–126.
- [35] LAN T, LI M X, HE X Q, et al. Effects of synthetic nitrification inhibitor(3, 4-dimethylpyrazole phosphate; DMPP) and biological nitrification inhibitor (methyl 3-(4-hydroxyphenyl) propionate; MHPP) on the gross N nitrification rate and ammonia oxidizers in two contrasting soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2022, 58(3):333-344.
- [36] 池巧东.中国水稻土氮素转化特征及其对氮肥利用率的影响机理 [D].南京:南京师范大学, 2021. CHIQD. Characteristics of nitrogen transformation and its effect on nitrogen efficiency in paddy soils in China[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.
- [37] LU Y F, ZHANG X N, JIANG J F, et al. Effects of the biological nitrification inhibitor 1, 9-decanediol on nitrification and ammonia oxidizers in three agricultural soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129:48-59.
- [38] SUBBARAO G V, SAHRAWAT K L, NAKAHARA K, et al. Biological nitrification inhibition: A novel strategy to regulate nitrification in agricultural systems[J]. Advances in Agronomy, 2012, 114:249–302.
- [39] ZHANG M X, ZENG H Q, AFZAL M R, et al. BNI-release mechanisms in plant root systems: Current status of understanding[J]. Biology and Fertility of Soils, 2021, 58(3):225-233.
- [40] RICE C W, TIEDJE J M. Regulation of nitrate assimilation by ammonium in soils and in isolated soil microorganisms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(4):597-602.
- [41] HE X X, CHI Q D, ZHAO C, et al. Plants with an ammonium preference affect soil N transformations to optimize their N acquisition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 155:108158.

(责任编辑:李丹)