

不同菜地土壤硝化与反硝化活性

胡晓霞^{1,3}, 丁 洪^{1,2}, 张玉树¹, 秦胜金¹, 李世清²

(1.福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013; 2.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

摘 要:硝化作用和反硝化作用是氮素气态损失的主要途径,在实验室培养条件下,研究了3种菜地土壤之间硝化反硝化活性的差异,反硝化作用利用乙炔抑制培养法对其进行测定。结果表明,培养33 d后红泥土、灰沙土和灰泥土的氮素硝化率均很高,分别为96.1%、88.3%和70.4%,其中红泥土与灰泥土的硝化率差异达到了极显著水平($P<0.01$),而灰沙土与红泥土、灰泥土之间的差异不显著($P>0.05$)。pH值最高和最低的菜地土壤其硝化率分别表现出最高和最低,值得注意的是,在pH4.61条件下灰泥土的硝化率可达70.4%。氮肥的施用显著或极显著增加了3种土壤硝化过程的 N_2O 排放量,占施氮量的0.59%~0.70%。3种菜地土壤之间氮肥的反硝化活性表现为灰泥土>红泥土>灰沙土,其差异也极显著($P<0.01$),氮肥的反硝化损失量占施氮量的-0.02%~0.20%。土壤硝化和反硝化氮素损失累积量随时间 t 的变化均符合修正的Elovich方程: $y=b\ln(t)+a$ 。

关键词:菜地土;硝化作用;反硝化作用; N_2O 排放

中图分类号:X131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2657-06

Nitrification and Denitrification Potential in Soils Grown with Vegetables

HU Xiao-xia^{1,3}, DING Hong^{1,2}, ZHANG Yu-shu¹, QIN Sheng-jin¹, LI Shi-qing²

(1.Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 320013, China; 2.State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3.College of Resource and Environmental, Fujian Agricultural and Forest University, Fuzhou 320002, China)

Abstract: Nitrification and denitrification in soil is the main pathway of gaseous nitrogen loss in the catchments. A soil incubation experiment was conducted under laboratory condition to reveal differences of nitrification and denitrification potential in vegetable field soils. The denitrification potential was determined by the acetylene (10% V/V) inhibition technique. The results showed the fact that nitrification rates were 96.1%, 88.3% and 70.4% for red soil, gray sandy soil and gray soil, respectively, after 33 days incubation. There was significant difference ($P<0.01$) about the nitrification rates between red soil and gray soil, but the difference between the gray sandy soil and red soil gray soil was not that obvious ($P>0.05$). The variation of nitrification rate was related with the chemical and physical properties of the soils, especially pH, which appeared that the higher the soil pH was, the higher or lower nitrification rate would be. The nitrification rate could reach 70.4% when pH was 4.61 for gray soil. The application of nitrogen fertilizer could significantly increase the emission of N_2O in the process of nitrification, and it accounted for 0.59%~0.70% of the total application of nitrogen fertilizer. The denitrification potential appeared significant difference ($P<0.01$) among these three soils, with an order of gray soil> red soil> gray sandy soil. Nitrogen loss in denitrification accounted for the rate of -0.02%~0.20% of the total application of nitrogen fertilizer. Nitrogen loss of soil in nitrification and denitrification with time, were in line with the revised Elovich equation: $y=b\ln(t)+a$.

Keywords: vegetable soils; nitrification; denitrification; N_2O emission

收稿日期:2009-06-17

基金项目:福建省自然科学基金重点项目(2006J0009);中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放课题(10501-210);福建省自然科学基金面上项目(2008J0120);福建省财政专项——福建省农业科学院科技创新团队建设基金(STIF-Y01)

作者简介:胡晓霞(1982—),女,硕士研究生,内蒙古人,主要从事氮素生物地球化学循环。E-mail:h_xx.821005@yahoo.com.cn

通讯作者:丁 洪 E-mail:hongding@china.com

为了满足我国人口的增加及人们生活水平的提高对优质蔬菜的需要,蔬菜生产规模和种植面积不断扩大。据统计^[1],2006 年蔬菜播种面积达 1 821.7 万 hm²。然而,菜地生态系统不同于自然生态系统,也不同于一般农田生态系统,是受人类活动剧烈影响的人工生态系统,复种指数高,氮肥用量大,肥水条件优越,其养分含量尤其是土壤全 N 和 NO₃⁻-N 含量较高。王朝辉等^[2]研究了陕西关中平原菜地土壤与一般农田土壤养分累积的差异,大棚和露天菜地 0~200 cm 土层的全氮比一般农田分别高出 36.2%和 18.6%;硝态氮累积总量比一般农田分别高出 5.2 倍和 4.5 倍;铵态氮比一般农田分别高出 29.6%和 21.2%。菜地土壤的硝化作用和反硝化作用可能有别于其他土壤。

由于硝化和反硝化过程中产生的 N₂O 既降低了肥料的利用率又加剧了全球气温升高和臭氧层破坏^[3],引起国际上普遍关注并成为一个研究的热点课题。近年来,国内外学者对菜地土壤的硝化反硝化活性开展了一些工作,但非常有限,且结果不一。金雪霞等^[4]的研究结果是,大多数菜地土壤的硝化率低于相应的水稻土。贺发云等^[5]研究结果表明改制对菜地土的硝化作用没有固定的影响,旱作粮地土壤改为菜地后,其硝化作用是增强还是减弱主要取决于土壤 pH 是上升或下降。徐玉裕等^[6]测定了五川流域内农业土壤反硝化作用的强度,发现菜地土的反硝化作用强于其他土地利用类型。Ryden 等^[7]报道芹菜地反硝化损失量占施氮量的 15.3%,N₂O 损失量占施氮量的 1.8%~2.8%。丁洪等^[8]报道,茄子地反硝化损失量和 N₂O 排放量分别占施氮量的 5.1%和 8.6%。硝化和反硝化作用是受土壤的 N 含量及形态、有机质含量、pH、水分状况、质地和温度等诸多因子影响的复杂过程,不同生态区不同菜地土壤的硝化反硝化活性可能有较大差异。

本文以福建省不同地区典型蔬菜地的土壤为研究对象,探讨不同菜地土壤的硝化反硝化活性差异,旨在进一步了解不同农地土壤的硝化反硝化作用及影响因素,为准确估算菜地土壤 N₂O 的释放提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试菜地土壤红泥土取自漳州市芗城区凤梧村,有 20 a 左右的蔬菜种植历史;灰沙土取自泉州市鲤城区浮桥街道延陵社区,长期种植蔬菜;灰泥土取自福州市晋安区新店镇泉头村,有 20 a 左右蔬菜种植历史。依据第二次土壤普查《土壤分类暂行方案》,此 3 种土壤分别为红壤的红泥土,冲积土的灰沙土和灰泥土。土壤的基本理化性质见表 1。

1.2 试验方法

3 种培养土壤是从野外采回的新鲜土壤,微风干,过 2 mm 孔筛,其土壤质量含水量分别为红泥土 14.61%,灰沙土 11.29%,灰泥土 18.81%。称折 150 g 烘干土重的风干土,装入体积为 250 mL 的广口瓶中,土层厚度 4.5~5 cm,硝化活性试验加入 200 μg N·g⁻¹ 土的硫酸铵,反硝化活性试验加入 200 μg N·g⁻¹ 土的硝酸钾。肥料均先溶于水后定量加入,然后分别加水至充水孔隙为 60%。用带有两根玻璃管的软木塞塞住瓶口,涂上 704 胶密封,两根玻璃管接一段硅胶管,其中一根接上三通阀(培养时为通气),另一根不封闭,保持瓶内外自由通气,所有培养瓶都在 28℃±1℃恒温箱中好气培养。按一定时间间距取样,每次取样设 3 次重复。并定期称量剩余培养瓶的整个瓶重,按损失的重量来补充水分。硝化作用试验在取样前封闭两个通气口,培养 24 h 后抽取瓶中气样。反硝化试验在取样前先用塑料注射针筒从培养瓶中抽出 10%的气体弃去,并充入 10%的乙炔气体,密闭通气口,继续培养 24 h 后抽取气样。取样用注射器抽取瓶中 20 mL 气体注入 18 mL 的真空玻璃瓶中,供分析用。

硝化试验每次取样时测定土壤质量含水量(%)、铵态氮和硝态氮含量^[9]。测算出瓶中自由体积。气体样品分析应用美国惠普 HP6890 气相色谱,色谱柱为填充 80/100 目 porapak Q 的填充柱,柱温 45℃,检测器温度 380℃,EC 检测,定量六通阀进样,进样量 1 mL,载气为 5%Ar-CH₄,流速 20 mL·min⁻¹。

表 1 供试土壤的基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of the studied soils

土壤类型	pH	有机质/ g·kg ⁻¹	全氮/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	CEC/ cmol·kg ⁻¹	砂粒/% 0.2~0.02 mm	粉粒/% 0.02~0.002 mm	粘粒/% <0.002 mm
红泥土	6.97	41.8	34.8	285.2	131.1	16.6	84.4	12.9	2.7
灰沙土	5.90	24.1	24.0	231.8	152.1	10.5	85.8	9.9	4.3
灰泥土	4.61	42.6	48.4	205.7	175.4	21.5	73.9	15.7	10.4

2 结果与分析

2.1 不同菜地土壤硝化活性差异

硝化作用是微生物将铵氧化为硝酸或亚硝酸的过程,而硝化率是确定氮素潜在损失的一个关键因子^[10]。从表 2 可看出,红泥土硝化作用较快,培养 3 d 内硝化率就达 68.3%,分别是灰沙土和灰泥土硝化速率的 2.4 和 6.3 倍。3 种菜地土壤的硝化率均随培养时间的延长而不断升高,而且土壤间差异较大。培养 33 d 后红泥土、灰沙土和灰泥土的硝化率分别达到 96.1%、88.3%、70.4%。经统计分析,红泥土与灰泥土的硝化率差异达到极显著水平($P<0.01$),而灰沙土与红泥土、灰泥土之间差异不显著($P>0.05$)。

土壤的硝化率可能与土壤的 pH 有关,实验中 pH 值最高和最低的土壤其硝化率也分别表现出最高和最低。值得注意的是,在 pH4.61 的条件下灰泥土的硝化率可达 70.4%,这说明南方某些酸性土壤尽管 pH 较低,仍具有很高的硝化活性。

表 2 供试土壤的硝化率(%)

Table 2 Nitrification rate(%) in the studied soils

土壤类型	培养时间/d						
	3	8	13	18	23	28	33
红泥土	68.3	74.6	83.6	89.0	95.5	96.2	96.1
灰沙土	27.9	37.4	48.6	67.1	83.0	86.6	88.3
灰泥土	10.9	12.7	28.1	53.8	54.2	63.1	70.4

注:硝化率(%)= $\text{NO}_3^- - \text{N} / (\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}) \times 100\%$

Note: Nitrification potential (%) = $\text{NO}_3^- - \text{N} / (\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}) \times 100\%$

2.2 不同菜地土壤硝化过程的 N_2O 排放

从图 1 和图 2 可看出,不同菜地土壤的 N_2O 排放通量有明显的时间变化,且土壤间的排放通量也存在明显差异。在未施氮条件下,灰泥土的 N_2O 排放通量表现最高,灰沙土最低;灰泥土的 N_2O 排放总量极显著高于灰沙土($P<0.01$)(见表 3)。灰泥土较高的 N_2O

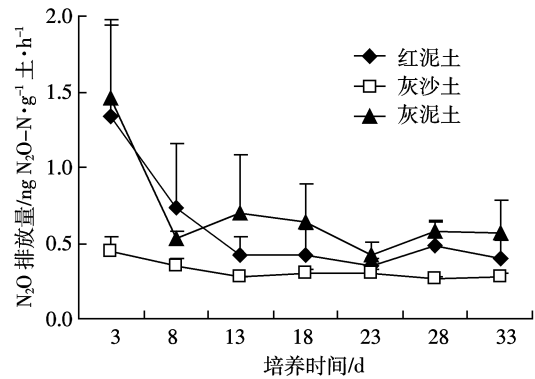


图 1 不施氮条件下不同土壤中 N_2O 排放随时间的变化

Figure 1 Temporal variation of N_2O emission from the soil by nitrification without nitrogen fertilizer applied

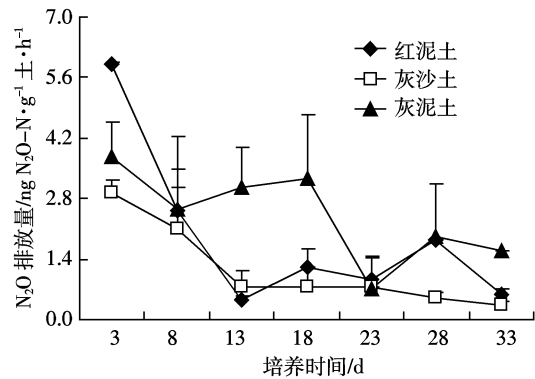


图 2 施氮条件下不同土壤中 N_2O 排放随时间的变化

Figure 2 Temporal variation of N_2O emission from the soil by nitrification with application of nitrogen fertilizer

排放通量与培养过程中该土壤的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 量一直较高有关。施氮条件下,3 种菜地土壤的 N_2O 排放通量总体上表现出灰泥土较高和灰沙土较低的趋势, N_2O 排放通量的峰值均出现在 0~3 d 内,红泥土、灰沙土和灰泥土氮素 N_2O 排放通量的峰值分别为 4.653、2.505 和 2.303 $\text{ng N} \cdot \text{g}^{-1} \text{土} \cdot \text{h}^{-1}$ 。不同土壤硝化率的大小不同程度地影响着 N_2O 排放通量。

经分析表明,不同土壤中各培养时间段的 N_2O 排

表 3 供试土壤硝化作用和反硝化作用的 N_2O 排放量

Table 3 Emission of N_2O by nitrification and denitrification progress the studied soils

土壤类型	硝化- N_2O 总量/ $\text{ng N} \cdot \text{g}^{-1} \text{土}$		差值	占施氮量/%	反硝化- $\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2$ / $\text{ng N} \cdot \text{g}^{-1} \text{土}$		差值	占施氮量/%
	+N	-N			+N	-N		
红泥土	1 652±288abA	489±140aAB	1 163	0.59	1 204±149bB	1 246±163aA	-42	-0.02
灰沙土	996±45bA	256±23bB	741	0.37	519±97cC	424±38bB	95	0.05
灰泥土	1 975±327aA	571±70aA	1 405	0.70	1 852±200aA	1 457±127aA	395	0.20

注:表中数据为平均值±标准差;同列内大写字母 A、B、C 为 1%显著水平,小写字母 a、b、c 为 5%显著水平。

Note: Data in the table are shown as mean ±S.D. The capital and small letters in the same column indicate significant difference at $P<0.01$ level and $P<0.05$ level, respectively.

放通量与土壤的硝化率有一定的正相关关系,其中红泥土中两者的线性相关水平达到极显著($P<0.01$),灰泥土中两者的幂函数关系达到显著水平($P<0.05$);3种土壤中各培养时间内的 N_2O 排放累积量与土壤的累积硝化率呈极显著正相关关系($P<0.01$)。表 3 数据显示, N_2O 排放量占施氮量的 0.37%~0.70%,其中灰泥土的排放量最高,达到 $1.98 \mu\text{g N}\cdot\text{g}^{-1}$ 土,显著高于灰沙土,这可能是由于酸性土壤条件有利于 N_2O 的产生^[11]。氮肥的施用显著或极显著地增加了 3 种菜地土壤硝化过程的 N_2O 释放量。

2.3 不同菜地土壤反硝化活性差异

反硝化作用是通过在土壤中通入乙炔抑制硝化作用过程中 N_2O 的产生和反硝化作用过程中 N_2O 还原为 N_2 而测定的,因此测得的 N_2O 量是反硝化损失(N_2O 和 N_2)的总量。从图 3 和图 4 可见,不同菜地土壤中反硝化作用过程 N_2O 和 N_2 的排放量也有明显的

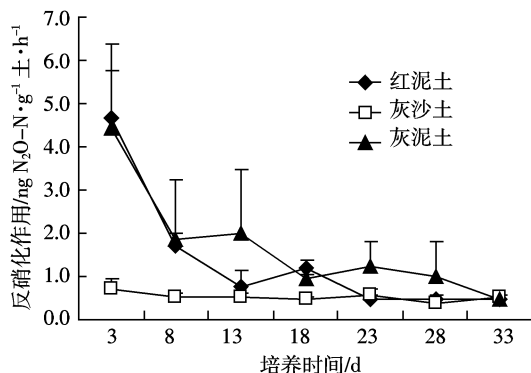


图 3 不施氮条件下不同土壤反硝化产生的 $\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$ 排放通量随时间的变化

Figure 3 Temporal variation of $\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$ emission from the soil by denitrification without nitrogen fertilizer applied

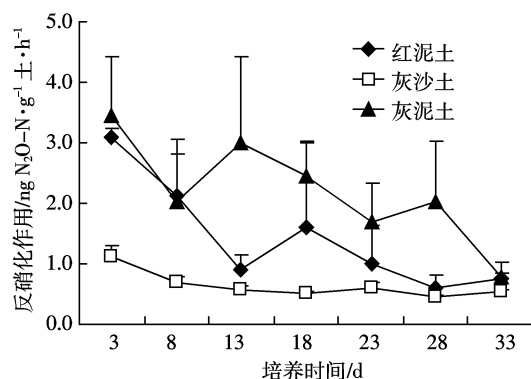


图 4 施氮条件下不同土壤反硝化产生的 $\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$ 排放通量随时间的变化

Figure 4 Temporal variation of $\text{N}_2\text{O}+\text{N}_2$ emission from the soil by denitrification with application of nitrogen fertilizer

时间变化,且都随培养时间的延长,排放通量逐渐下降,33 d 后均保持相对较低水平;土壤间有较大差异,其中灰泥土的排放通量高于其他土壤。表 3 显示,3 种菜地土壤之间氮肥的反硝化活性差异都达到了极显著水平($P<0.01$),反硝化过程造成氮的损失量占施氮量的 -0.02%~0.20%,其中灰泥土的反硝化损失量最高,达 $1.85 \mu\text{g N}\cdot\text{g}^{-1}$ 土。氮素的施用增加了灰沙土和灰泥土的反硝化损失量,而红泥土的反硝化损失量却略低于未施氮处理,其原因有待进一步研究。

在未施氮的处理中,3 种菜地土壤反硝化过程中的 N_2O 排放通量和总量都高于硝化过程,其中排放总量的差异达到极显著水平($P<0.01$),这说明 3 种菜地土壤反硝化作用都有一定的将产生的 N_2O 还原为 N_2 的能力,这对大气环境质量是有利的。因此,合理施肥是减少 N_2O 排放和保护环境的必要措施。反应物浓度和反应时间等是最基本的动力学参数,Elovich 方程是描述非理想气体化学吸附的动力学方程,本试验 3 个菜地土壤硝化和反硝化过程中 N_2O 排放累积量随时间 t 的变化均符合修正的 Elovich 方程 $y=b\ln(t)+a$,且拟合回归方程均达到了极显著性相关水平 ($n=6$, $P<0.01$),如表 4 所示。

3 讨论

有关土壤硝化作用与 pH 关系的研究,国内外已有一些报道。Katyal 等^[12]研究了 15 个土壤的硝化活性,结果显示在 pH 为 4.6~5.1 的土壤中,硝化作用不明显;在 pH 为 5.8~6.0 的土壤中硝化作用进行缓慢;只是在 pH 为 6.4~8.3 的土壤中,硝化作用才强烈进行。金雪霞等^[4]、李辉信等^[13]以及范晓晖和朱兆良^[14]通过对不同土壤的硝化作用研究,也得出了硝化率与土壤的 pH 呈正相关的结论。本试验结果符合前人研究的规律,但灰泥土的 pH 值只有 4.61,培养 33 d 后其硝化率可达 70.4%。土壤 pH 不仅影响硝化活性,而且影响其进程^[15],灰泥土的硝化率虽较低,其 N_2O 的排放量却是最高,究其原因可能是在此培养条件下, NH_4^+-N 氧化成 NO_2^- 以及 NO_2^- 氧化成 NO_3^- 的速率都很慢,其间并无 NO_2^- 的积累,进而导致 N_2O 释放量增多^[16-17]。

土壤反硝化作用的适宜 pH 值范围在 6~8 之间,但 Keeney 等^[15]的研究表明,在 pH 4.6~5.4 的土壤中,反硝化气体产物的 83%是 N_2O ,而在 pH 6.9 时反硝化的主要产物是 N_2 。本试验中灰泥土的 pH 只有 4.61,而其反硝化活性最高,可能由于在低 pH 下 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 比

表 4 供试土壤 N₂O 排放过程的回归方程

Table 4 Regressive equations of N₂O emission process in the studied soils

土壤类型	处理	不加乙炔		加乙炔	
		拟合方程	相关系数 r^2	拟合方程	相关系数 r^2
红泥土	CK	$y_1=0.858 \ln(t)-0.791$	0.975***	$y_1=2.347 \ln(t)-1.671$	0.994***
	+N	$y_2=2.790 \ln(t)-1.943$	0.993***	$y_2=2.239 \ln(t)-2.204$	0.971***
灰沙土	CK	$y_1=0.456 \ln(t)-0.536$	0.915**	$y_1=0.765 \ln(t)-0.929$	0.907**
	+N	$y_2=1.853 \ln(t)-1.599$	0.989***	$y_2=0.928 \ln(t)-1.015$	0.939***
灰泥土	CK	$y_1=0.998 \ln(t)-1.001$	0.952***	$y_1=2.666 \ln(t)-2.363$	0.982***
	+N	$y_2=3.729 \ln(t)-4.317$	0.935***	$y_2=3.472 \ln(t)-4.107$	0.920***

注: y 表示 N₂O 排放累积量, $\mu\text{g N}\cdot\text{g}^{-1}$; t 为培养时间, d; ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$ 。
Note: y : the accumulative amounts of N₂O emission. t : the incubation time. “**” and “***”: significant difference at $P<0.01$ level and $P<0.001$ level, respectively.

例较高的缘故;也可能是灰泥土的有机碳含量较高,碳的增加提高了土壤微生物的活性,从而提高了土壤的反硝化活性^[18-20]。

当然土壤的硝化和反硝化作用还受诸多因子的影响,如不同的土地利用方式、氮肥的用量和种类、不同的耕作制度等。就土地利用方式而言,和普通农田相比,蔬菜地土壤有较强的硝化和反硝化活性。丁洪等^[21]研究了福建省几种主要红壤性水稻土的硝化和反硝化活性,结果表明,培养 27 d 后几种土壤的硝化率为 6.7%~85.6%,硝化过程中 N₂O 的排放量占施氮量的 0.11%~0.44%。本试验中 3 种菜地土壤的硝化率为 70.4%~96.1%,硝化过程中 N₂O 的排放量占施氮量的 0.37%~70%。徐玉裕等^[6]通过对五川流域农业土壤的反硝化作用的测定,发现流域内不同土地利用方式下反硝化差别较大,其中蔬菜土壤的反硝化作用较强,占施氮量的 17%;其他土地利用方式下的反硝化作用损失量占施氮量比例也均高于国内其他地方。这说明东南地区的农业土壤,尤其是菜地土壤有较高的硝化和反硝化活性,其产生的 N₂O 温室气体对环境的影响值得关注。

此外,如果其他条件不成为主导限制因子时,硝化率的大小依赖于土壤的性质,本试验结果显示 3 种菜地土壤有物理性粘粒含量越高硝化率越低的趋势;灰泥土较粘重的土壤质地可能致使其反硝化活性较强。值得关注的是,本试验中有较强的反硝化活性的菜地土壤也有较高的阳离子交换量。

4 结论

(1) 3 种菜地土壤之间的硝化活性具有极显著差异,其硝化率分别为 96.1%、88.3%和 70.4%,具体表

现为红泥土>灰沙土>灰泥土,其中红泥土与灰泥土之间硝化率的差异达到了极显著水平,而灰沙土与红泥土、灰泥土之间的差异不显著。pH 值最高和最低的菜地土壤其硝化率分别最高和最低,物理性粘粒含量越高其硝化率越低。

(2) 3 种菜地土壤之间的反硝化活性差异也达到了极显著水平,表现为灰泥土>红泥土>灰沙土,氮肥的反硝化损失量占施氮量的-0.02%~0.20%。有机质含量较高的菜地土壤其反硝化活性也较高,质地较粘重的菜地土壤其反硝化活性较高。

(3) 氮肥的施用显著或极显著增加了 3 种菜地土壤的 N₂O 排放量。

(4) 菜地土壤硝化和反硝化损失累积量随时间 t 的变化均符合修正的 Elovich 方程: $y=b\ln(t)+a$ 。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局. 2007 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
National Bureau Statistics of China. China statistical yearbooks of 2007 [M]. Beijing: Chinese Statistics Press, 2007.

[2] 王朝辉, 宗志强, 李生秀. 菜地和一般农田土壤主要养分累积的差异[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 191-194.
WANG Zhao-hui, ZONG Zhi-qiang, LI Sheng-xiu. Difference of several major nutrients accumulation in vegetable and cereal crop soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (9): 191-194.

[3] William R Ruan, Cordan V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. Agronomy Journal, 1999, 91: 357-363.

[4] 金雪霞, 范晓晖, 蔡贵信, 等. 菜地土壤氮素矿化和硝化作用的特征[J]. 土壤, 2004, 36(4): 382-386.
JIN Xue-xia, FAN Xiao-hui, CAI Gui-xin, et al. Characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in vegetable garden soils[J]. Soils, 2004, 36 (4): 382-386.

[5] 贺发云, 尹 斌, 蔡贵信, 等. 菜地和旱作粮地土壤氮素矿化和硝化

- 作用的比较[J]. 土壤通报, 2005, 36(1):41-44.
- HE Fa-yun, YIN Bin, CAI Gui-xin, et al. Comparison of nitrogen mineralization and nitrification in upland soils grown with vegetables and food crops[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1):41-44.
- [6] 徐玉裕, 曹文志, 黄一山, 等. 五川流域农业土壤反硝化作用测定及其调控措施[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):1126-1131.
- XU Yu-yu, CAO Wen-zhi, HUAN Yi-shan, et al. Denitrification in soil of Wu Chuan agricultural catchment and the control measure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):1126-1131.
- [7] Ryden J C, Lund L J, Letey J, et al. Direct measurement of determination loss from soils: II. Development and application of field methods[J]. *Soils Sci Soc Am J*, 1979, 43(1):110-118.
- [8] 丁 洪, 王跃思, 项虹艳, 等. 菜田氮素反硝化损失与 N_2O 排放的定量评价[J]. 园艺学报, 2004, 31(6):762-766.
- DING Hong, WANG Yue-si, XIANG Hong-yan, et al. Denitrification losses and N_2O emission from nitrogen fertilizer applied to vegetable field[J]. *Acta Horticulture Sinica*, 2004, 31(6):762-766.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000:13-195.
- LU Ru-kun. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Technological University Press, 2000:13-195.
- [10] Aulakh, Bijay-Singh. Nutrient losses and fertilizer use efficiency in irrigated porous soils[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 1997, 47:197-212.
- [11] 齐玉春, 董云社. 土壤氧化亚氮产生、排放及其影响因素[J]. 地理学报, 1999, 54(6):534-542.
- QI Yu-chun, DONG Yun-she. Nitrous oxide emissions from soil and some influence factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(6):534-542.
- [12] Katyal J C, Cater M F, Vlek P L G. Nitrification activity in submerged soil and its relation to denitrification loss[J]. *Biol Fertil Soils*, 1998, 7:16-22.
- [13] 李辉信, 胡 锋, 刘满强, 等. 红壤氮素的矿化和硝化作用特征[J]. 土壤, 2000, 32(4):194-197.
- LI Hui-xin, HU Feng, LIU Man-qiang, et al. Characteristics of nitrogen mineralization and nitrification in red soils[J]. *Soils*, 2000, 32(4):194-197.
- [14] 范晓晖, 朱兆良. 我国几种农田土壤硝化势的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(2):124-125.
- FAN Xiao-hui, ZHU Zhao-liang. Potential of nitrification in the three soil profiles of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(2):124-125.
- [15] Keeney D R, Fillery I R, Marx G P. Effect of temperature on the gaseous nitrogen products of denitrification in a silt loam soil[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1979, 43:1124-1128.
- [16] Munro P E. Inhibition of nitrification by grass root extracts[J]. *J appl Ecol*, 1996, 3:231-238.
- [17] Goreau T J. Production of NO_2^- and N_2O by nitrifying bacteria at reduced concentration of oxygen[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1980, 40(3):526-532.
- [18] Vallejo A, Skiba U M, Grace a-Torres L, et al. Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38:2782-2793.
- [19] 梁东丽, 吴庆强, 李生秀, 等. 旱地反硝化作用和 N_2O 排放影响因子的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(12):93-98.
- LIANG Dong-li, WU Qing-qiang, LI Sheng-xiu, et al. Influential factors for denitrification and N_2O emission in dry-land soil[J]. *Journal of Northwest Science-Technology University of Agriculture and Forest (Natural Science Edition)*, 2007, 35(12):93-98.
- [20] Mathieu O, Lvque J, Hnault C, et al. Emissions and spatial variability of N_2O , N_2 and nitrous oxide mole fraction at the field scale, revealed with ^{15}N isotopic techniques[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38:941-951.
- [21] 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[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6):715-719.
- DING Hong, WANG Yue-si, XIANG Hong-yan, et al. Nitrification and denitrification potential in different type of paddy soils in Fujian Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):715-719.