

利用方式对红壤硝化作用的水分效应的影响

钱琛^{1,2}, 蔡祖聪¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2. 扬州工业职业技术学院化学工程系, 扬州 225127)

摘要:风干过程是土壤水分丢失的过程, 研究亚热带酸性土壤硝化作用对水分水平的响应, 有助于分析干土效应对硝化作用影响。本试验以分别发育于第四纪红土(Quaternary red earth, Q)和↓岩(Tertiary red sandstone, S)、利用方式为水稻(rice, R)与旱地(upland, U)的4个农田土壤的风干土为供试材料, 分别加入铵态氮0和150 mg·kg⁻¹, 在5个即时水分含量下室内培养35 d。结果表明, 土壤水分水平显著影响供试土壤的硝化作用($p < 0.01$), 但影响程度因利用方式而异。对供试条件下无外源铵输入的处理而言, 旱地土壤QU和SU硝化率的极差分别为11%和8%, 显著低于水稻土的硝化率极差(QR与SR分别为35%和20%)。外源铵的加入增加了土壤硝化率的极差, 土壤QR、QU、SR和SU硝化率的极差分别达到56%、26%、31%、26%, 且随水分水平的增高, 加铵有促进土壤酸化的趋势。总之, 利用方式显著影响了土壤硝化作用对水分效应的响应, 进而体现为干土效应的差异。

关键词:硝化率; 极差; 土壤利用方式; 硝化活性; 干土效应

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)10-2417-06

Influence of Land-Use Type on Moisture-Effect of Nitrification in Subtropical Red Soils

QIAN Chen^{1,2}, CAI Zu-cong¹

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Department of Chemical Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Air-drying is always accompanied by soil moisture loss. The different influences of air-drying on soil nitrification might due to the different nitrification responses to moisture changing of acid subtropical soils. So, after applying 0 and 150 mg·kg⁻¹ of ammonium bicarbonate, a 35-day incubation study was conducted to determine the nitrification potential of four acid subtropical soils under 5 soil moisture levels, namely 30% water-holding capacity (WHC), 45% WHC, 60% WHC, 75% WHC and 90% WHC. Four soils, designated QR, QU, SR and SU, derived from Quaternary red earth and Tertiary red sandstone, were collected from rice and upland field. The results indicated that the soil nitrification was significantly influenced by the moisture content ($p < 0.01$), and the nitrification sensitivities to soil moisture content varied with land-use types. For the treatments without ammonium input, the ranges of nitrification ratio were 11% and 8% in upland soils, QU and SU respectively, which were obviously lower than those in paddy soils (35% for QR, and 20% for SR). The ammonium input would increase the ranges of nitrification ratio which were 56%, 26%, 31%, and 26% for soil QR, QU, SR, and SU, respectively. And the ammonium input would accelerate soil acidification under high moisture levels. In a word, the land-use type presents a significant influence on the nitrification response to moisture content, which might lead to the difference of air-drying effect.

Key words: nitrification ratio; range; land-use type; nitrification activity; air-drying effect

土壤水分可以为硝化菌活动提供水分条件, 但自养硝化细菌作为好气性微生物^[1], 其活性还受到土壤氧气扩散条件即含氧量的影响, 而土壤含水量与含氧量呈反相关。当土壤含水量较低时, 大气中的氧可直接渗入一定深度的土层中, 因而氧含量高, 但土壤干燥不利于硝化菌存活, 含水量过高则供氧不足^[2]。因此土壤含水量过高过低均不利于硝化微生物的活动。一般认为, 硝化作用最适的水分含量为最大持水量(WHC)的50%~70%。有研究表明土壤水分含量为最大持水量的65%时的硝化率大于最大持水量的30%, 更远大于淹水条件下土壤的

硝化率^[3]。但前人的研究^[4~7]中并不缺乏高水分水平甚至淹水条件下仍有较强硝化作用发生的报道。由此可见, 土壤水分含量对硝化活性的影响在不同类型的土壤之间存在显著差异^[8,9]。不同性质的土壤其硝化细菌种属和活性可能存在差异^[10], 而且具有硝化能力的细菌和真菌对土壤水分含量的响应也因种属而异^[11], 说明水分条件对不同性质土壤的硝

收稿日期: 2009-12-23; 修订日期: 2010-02-26

基金项目: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目(CXTD-Z2005-4)

作者简介: 钱琛(1980~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为材料化学、环境污染防治与修复, E-mail: qianch@ypi.edu.cn

化作用的影响不能一概而论。

水分损失始终伴随于土样的风干过程,而风干过程常引起土壤理化性质的改变. Allison 等^[12]指出,干土中硝化细菌活性的恢复至少要培养 10 周以上. 但笔者的前期研究表明:土壤硝化作用对干土效应的响应是否显著因其利用方式而异^[13]. 干土效应导致土壤微生物活性改变的因素有多种,可通过改变土样的制备方法而弱化部分因素的影响,最终尽可能地体现为因风干过程中土壤水分的丢失而引起的部分灭菌作用^[13]. 因此研究土壤含水量对供试土壤硝化作用的影响,并分析不同利用方式的土壤间差异存在的可能原因,可

以为分析不同土壤之间硝化作用的干土效应差异提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试的 4 个农田土壤样本均采自江西省鹰潭市,分别为发育于第四纪红土(Quaternary red earth, Q)和↓岩(Tertiary red sandstone, S),利用方式分别为水稻(rice, R)与旱地(upland, U),即 QR、QU、SR 和 SU. 采样时间为 2007 年 7 月. 土样(0~20 cm)采集后,室内风干并过 2 mm 筛为宜,4℃下保存备用. 供试土壤的部分理化性质见表 1.

表 1 土壤部分理化性质

Table 1 Selected properties of studied soils

土壤	pH (2 mol/L KCl)	有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	粘粒 /%	最大持水量 /g·kg ⁻¹	阳离子交换量 /cmol(+)g·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹
QR	4.31	32.90	2.50	16.60	605	11.78	18.59	0.59
QU	3.68	6.90	0.73	23.25	565	10.63	5.90	1.65
SR	3.76	14.30	1.46	12.50	777	9.08	13.05	6.22
SU	3.58	7.90	0.86	17.00	682	11.34	4.98	1.27

1.2 试验处理

称取 10.00 g(以烘干土计)风干土分别置于 100 mL 的塑料瓶中,均匀滴加去离子水至 20% WHC,并于 25℃下恒温预培养 1 周. 然后,通过改变碳酸氢铵(NH₄HCO₃)溶液的加入量使每个土样样本具有 2 个铵态氮添加水平(0 和 150 mg·kg⁻¹,以 N₀ 和 N₁ 表示),并用去离子水调节土壤含水量使得各土样具有 5 个水分水平:30% WHC、45% WHC、60% WHC、75% WHC、90% WHC,加盖以保持土壤水分,继续在 25℃下恒温培养 35 d,每 3 d 补水一次. 所有处理均设 3 个重复.

在培养的第 0(加铵当天)、7、21 和 35 d 提取测定土壤 pH 以及土壤中的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量,同一处理随机取 3 个培养个体作为重复取样.

1.3 测定方法

土壤 pH 采用电位法测定(用 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 浸提,水:土比 5:1),土壤有机碳和全氮采用 Elementar 碳氮元素分析仪测定,铵态氮和硝态氮采用 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 浸提-Skalar 连续流动分析仪测定,黏粒含量采用 Beckman Coulter 激光粒度分析仪测定,阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵法测定^[14],土壤最大持水量用烘干法测定^[15].

1.4 数据处理

土壤硝化作用的表征采用硝化率,是指经过培

养后,土壤中 NH₄⁺-N 通过硝化过程最终转化为 NO₃⁻-N 的总量占无机态氮(NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)总量的百分比. 净有机氮矿化量(net mineralization)为培养期内无机态氮(NH₄⁺-N + NO₃⁻-N)之差,记为 ΔM; 净硝化量(net nitrification)为硝态氮(NO₃⁻-N)之差,记为 ΔN. 数据分析在 SPSS13.0 上完成. 采用 ANOVA 进行方差分析,用 LSD 和 Duncan's 分析法检验处理间的差异显著性. 逐步回归分析研究 pH 与净硝化量、净矿化量间的关系.

2 结果与分析

2.1 矿化作用(对照处理 N₀)

水分水平对供试土壤矿化作用的影响因土壤性质而异. 培养期间,土壤的有机氮不断矿化,培养结束时不同土壤的所有水分水平的平均有机氮净矿化量大小与它们的总 N、有机 C 含量的高低顺序一致,图 1 给出了培养结束时各处理的无机氮含量. 方差分析结果显示,对于土壤 QR、SR 和 SU,含水量对净矿化量存在显著影响($p < 0.05$),其中 QR 受水分水平的影响最显著,土壤 QR 有机氮矿化的最佳水分水平为 45% WHC,有利于 SR 和 SU 矿化作用进行的最佳水分范围分别是(30%~75%)WHC、(60%~90%)WHC. 虽然 QU 的矿化作用对土壤水分水平没有显著响应($p > 0.05$),但根据图 1 的结果,QU 在较

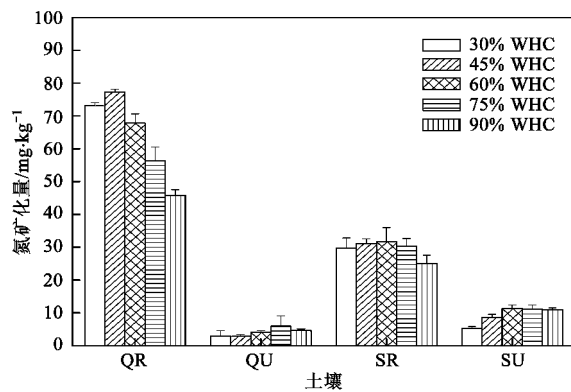


图1 不同水分水平下,各土壤的对照处理(N_0)在35 d培养期间的氮矿化量

Fig.1 Net mineralization in control-treatment (N_0) of studied soils over 35-day incubation at different soil moisture level

高水分水平(约75% WHC)下矿化作用较强。

2.2 硝化作用

根据前期研究结果^[13],采用硝化率指示土壤的硝化作用,能够较好地“屏蔽”因干土效应对矿化作用的影响而引起的对硝化作用的次级效应,因此在本研究中均使用硝化率表征土壤的硝化作用。

2.2.1 对照处理 N_0

方差分析显示,在对照处理 N_0 中,水分水平对所有供试土壤的硝化作用的影响都达极显著($p < 0.001$)。随着水分水平的升高,水稻土 QR 和 SR 的硝化率呈现出先增加再降低的趋势,试验水分范围内存在有利于土壤硝化的最佳水分条件:QR 在75% WHC 附近,此时硝化率是37%;SR 为(45% ~ 60%) WHC,硝化率达到70%,且所有水分水平下的SR 的硝化率均高于50%。QR 在低水分水平30% WHC 时几乎没有硝化作用发生[图2(a)]。

虽然旱地土壤 QU 和 SU 的硝化作用对土壤水分状况的响应也达极显著水平,但是相对于水稻土而言,旱地土的硝化受水分影响较弱[图2(a)]。在试验水分范围内,QU 和 SU 的硝化率随水分水平的升高而增加,QU 硝化率的极差为11%、SU 为8%,显著低于水稻土硝化率的极差(QR 和 SR 分别为35%和20%)。

不同土壤之间平均硝化率高低顺序为:SU > SR > QU > QR,存在母质与利用方式之间的差异,即红砂岩母质的土壤的硝化率高于第四纪红土发育的土壤,旱地土壤的硝化率高于水稻土。

2.2.2 加铵处理 N_1

施用碳铵(NH_4HCO_3)不仅加快了所有供试土

壤的硝化作用强度^[13],而且增加了实验水分范围下土壤硝化率的极差,即促进了土壤硝化作用对水分水平的响应显著性[图2(b)],加铵与水分水平间存在交互作用。QR、QU、SR 和 SU 硝化率的极差分别达到56%、26%、31%和26%。所有土壤的硝化率都随水分水平的升高而增加,相关性达到极显著($p < 0.01$)。

加铵处理中水稻土 QR 的硝化率显著高于对照处理,其中不施30% WHC 水分水平,因为此条件下土壤 QR 的硝化作用很难发生(图2)。但加铵处理降低了土壤 QU 在30% WHC 下的硝化率,而对其它水分水平没有显著影响。对于土壤 SR 与 SU,在所有水分水平下,加铵均导致了硝化率的降低。

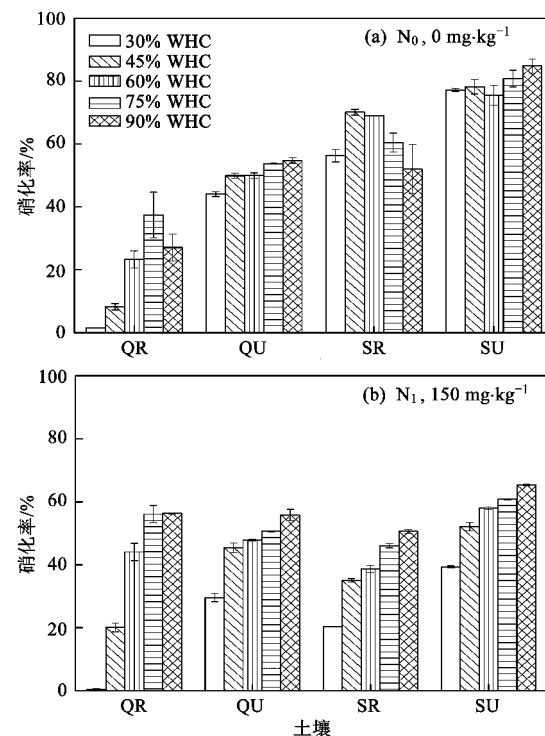


图2 在不同水分下培养35 d后,各土壤的硝化率

Fig.2 Nitrification ratio of studied soils at different soil moisture level and NH_4HCO_3 adding rate over 35 d incubation

2.3 pH 变化

2.3.1 N_0 处理

经过1周的预培养(25℃、20% WHC),供试土壤的pH都发生了不同程度的降低。QR 的pH从4.31(表1)下降至4.02(表2),QU 的pH从3.68下降至3.43,SR 和 SU 的pH也都降低了约0.13单位;在此后35 d不同水分水平的培养中[(30% ~ 90%) WHC],供试土壤的pH变化不大(表2),未出现明显的土壤酸化。

表 2 各处理在不同培养时间的土壤 pH 以及整个培养期间的 pH 变化值 (ΔpH)¹⁾Table 2 Soil pH on a given incubation-day and net changes of soil pH (ΔpH) during whole period of each treatment

土壤	水分水平 (WHC)/%	土壤 pH								
		本底值	N ₀ 处理 ²⁾				N ₁ 处理			
			0 d	7 d	35 d	ΔpH	0 d ³⁾	7 d	35 d	ΔpH
QR	30	4.31	4.02	4.07	4.05	0.03 a	4.56	4.32	4.14	-0.42 a
	45		4.02	4.12	4.04	0.02 a	4.56	4.28	4.01	-0.55 b
	60		4.02	4.13	3.98	-0.04 ab	4.56	4.32	3.86	-0.70 c
	75		4.02	4.12	3.95	-0.07 b	4.56	4.31	3.82	-0.74 c
	90		4.02	4.13	3.97	-0.05 ab	4.56	4.42	3.86	-0.70 c
QU	30	3.68	3.43	3.51	3.49	0.06 a	3.74	3.67	3.52	-0.22 a
	45		3.43	3.51	3.50	0.07 a	3.74	3.65	3.46	-0.28 b
	60		3.43	3.52	3.51	0.08 a	3.74	3.65	3.46	-0.28 b
	75		3.43	3.52	3.51	0.08 a	3.74	3.65	3.46	-0.28 b
	90		3.43	3.53	3.51	0.08 a	3.74	3.64	3.45	-0.29 b
QR	30	3.76	3.63	3.69	3.58	-0.05 a	4.01	3.87	3.73	-0.28 a
	45		3.63	3.71	3.58	-0.05 a	4.01	3.92	3.66	-0.35 ab
	60		3.63	3.71	3.58	-0.05 a	4.01	3.91	3.64	-0.36 ab
	75		3.63	3.72	3.61	-0.02 a	4.01	3.92	3.61	-0.40 b
	90		3.63	3.74	3.61	-0.02 a	4.01	3.93	3.58	-0.43 b
QU	30	3.58	3.45	3.55	3.45	0.00 a	3.82	3.72	3.47	-0.35 a
	45		3.45	3.55	3.46	0.01 a	3.82	3.72	3.42	-0.39 b
	60		3.45	3.56	3.45	0.00 a	3.82	3.73	3.40	-0.42 bc
	75		3.45	3.56	3.44	-0.01 a	3.82	3.72	3.38	-0.43 c
	90		3.45	3.57	3.46	0.01 a	3.82	3.75	3.38	-0.44 c

1) 不同小写字母表示同一土壤、相同施氮处理下不同水分水平间差异达到显著水平 $p < 0.05$; 2) 施氮水平: N_0 , 0 mg kg^{-1} ; N_1 , 150 mg kg^{-1} ; 3) 数值为加入 NH_4HCO_3 后立即测定的土壤 pH

2.3.2 N_1 处理

与 N_0 处理相比,加铵导致土壤初始 pH 值上升,由于土样间酸碱缓冲能力的差异,土壤 pH 的增加值则各土不同(表 2),但均在 $0.3 \sim 0.5$ 单位范围内,其中 QR 的 pH 变化最大,增加了 0.5 单位. 随培养的进行,土样 pH 逐渐降低,QR 的平均下降幅度最大,约 0.6 pH 单位;QU 下降最小,约 0.3 单位(表 2).

对于同一土壤而言,水分水平越高,培养结束时的土壤 pH 越低,而且土壤 pH 的降低值(ΔpH)与土壤硝化作用极显著负相关($p < 0.01$). 在较高水分水平下,加铵有促进土壤酸化的趋势.

将各供试土壤 10 个处理(2 个施氮水平 $\times$ 5 个水分水平)的净 pH 变化对净硝化量(ΔN)进行逐步回归分析,回归方程如下:

$$\Delta\text{pH}_{\text{QR}} = -0.0056\Delta N - 0.0463$$

$$R^2 = 0.722^{***}, p < 0.001$$

$$\Delta\text{pH}_{\text{QU}} = -0.0050\Delta N + 0.086$$

$$R^2 = 0.966^{***}, p < 0.001$$

$$\Delta\text{pH}_{\text{SR}} = -0.0062\Delta N + 0.10$$

$$R^2 = 0.820^{***}, p < 0.001$$

$$\Delta\text{pH}_{\text{SU}} = -0.0052\Delta N - 0.057$$

$$R^2 = 0.559^{***}, p < 0.001$$

式中, R^2 值表明硝化过程至少可以解释土壤 pH 半数以上的变异,是本试验中影响土壤 pH 变化的主要因子,而且对于供试土壤而言,单位 ΔN 变化对土壤 pH 下降的贡献相近.

3 讨论

土壤水分既直接又间接地作用于土壤的硝化行为. 满足硝化菌活动的水分条件为其直接影响,影响硝化细菌活动的氧气扩散条件则为间接效应. Miller 等^[16]和 Malhi 等^[17]认为当土水势为 0 kPa 时过多的水分导致土壤中的 O_2 欠缺,进而硝化作用停止. 理论计算^[18]和田间试验^[19]结果显示 50% ~ 60% 的土壤水分含量是硝化作用进行的最佳水分条件,李良漠等^[3]的研究结果也表明水稻土在水分含量为 65% WHC 时硝化率最高. 但即便如此,前人的研究^[5,6]中并不缺乏高水分水平甚至淹水条件下仍有硝化作用发生的报道. Gødde 等^[20]报道了 80% WHC 时土壤的硝化作用 10 倍于 30% 和 60% WHC

下的硝化作用,Ingwersen 等^[7]以及 Maag 等^[21]都发现在饱和持水量下土壤的硝化作用最强.同时,本试验的测定结果也表明,供试土壤的最强硝化作用出现在较高的土壤水分水平下,尤其在加铵处理(N_1)中,供试土壤的硝化作用与水分水平显著正相关.Zaman 等^[22]认为在保证土壤通气性的前提下,充足的水分既能够保证微生物的新陈代谢又可以加强流动性以方便微生物(硝化菌)接近底物,有利于硝化作用的进行.这些结论都说明即使在高水分条件下, O_2 扩散速度仍然能满足硝化菌的活动需求.

由此可见,有利于土壤硝化作用进行的最佳水分条件与研究主体——土壤的类型有关.Linn 等^[19]指出由于土壤间性质的差异,可能导致土壤硝化作用的最佳水分条件不同.不同性质的土壤不但硝化细菌种属和活性可能存在差异^[11],而且具有硝化能力的细菌和真菌对土壤水分含量的响应也因种属而异^[12].这很好地解释了本试验中水稻土(QR和SR)与旱地土壤(QU和SU)对土壤水分梯度的不同响应程度.在 N_0 处理中,虽然水分水平对旱地土壤硝化作用的影响达显著水平,但相对于水稻土而言,旱地土壤的硝化作用受水分水平的影响还是比较弱(图2).此结果也为前期研究中旱地土壤的鲜土与风干土间不存在硝化差异的结论提供了有力的证据:旱地土壤中的硝化细菌对水分状况的响应较弱,风干处理对其数量和活性的影响较小甚至没有影响^[13].

加铵增加了水分水平对土壤硝化作用影响的显著性,且随水分水平的增高,加铵有促进土壤酸化的趋势.虽然统计结果说明加铵或pH改变与水分水平间存在交互作用,但根本原因还有待商榷,需要进一步的试验结果支撑.

4 结论

土壤间性质的差异可能导致其硝化作用对水分条件的响应不同,如不同土壤间硝化细菌种属的差异.本研究结果显示,对于不加铵的原土(N_0 处理)而言,水分条件对硝化作用的影响在土壤利用方式间存在差异,土壤水分水平对水稻土硝化作用的影响较大,旱地土壤响应较弱,最终导致风干处理对不同利用方式下的土壤硝化作用影响的显著性存在差异.加铵促进了土壤硝化作用对水分水平的响应程度,进而使得土壤硝化作用的干土效应显著;加铵处理 N_1 中的硝化率与土壤水分水平呈显著正相关,试验条件下不存在最佳水分水平.

参考文献:

- [1] Hwang S, Hanaki K. Effects of oxygen concentration and moisture content of refuse on nitrification, denitrification and nitrous oxide production[J]. *Bioresour Technol*, 2000, **71**:159-165.
- [2] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学技术出版社,1992.37-59.
- [3] 李良漠,藏双,周秀如,等.土壤中硝化-反硝化作用的初步研究[A].见:太湖地区科学讨论会论文集汇编[C].南京:中国科学院南京土壤研究所,1982.
- [4] Gainey P L. Parallel formation of carbon dioxide, ammonia and nitrate in soil[J]. *Soil Sci*, 1919, **7**:293-311.
- [5] Dubey H D. Effect of soil moisture levels on nitrification[J]. *Can J Microbiol*, 1968, **14**:1348-1350.
- [6] Patrick W H, Reddy K R. Nitrification-denitrification reactions in flooded soils and water bottoms: dependence on oxygen supply and ammonium diffusion[J]. *J Environ Qual*, 1976, **5**:469-472.
- [7] Ingwersen A, Butterbach-Bahl K, Gasche R, et al. Barometric process separation: New method for quantifying nitrification, denitrification, and nitrous oxide sources in soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, **63**:117-128.
- [8] Sierra J. Temperature and soil moisture dependent of N mineralization in intact soil cores[J]. *Soil Biol Biochem*, 1997, **29**:1557-1563.
- [9] Paul K I, Polglase P J, O'Connell A M, et al. Defining the relation between soil water content and net N mineralization[J]. *Eur J Soil Sci*, 2003, **54**:39-47.
- [10] 袁飞.不同农田土壤中的硝化作用及硝化细菌种群[D].南京:南京农业大学,2004.
- [11] Castaldi S. Cycloheximide inhibition of peptone-induced nitrate production across a soil moisture gradient[J]. *Biol Fert Soils*, 2005, **41**:288-290.
- [12] Allison S M, Prosser J I. Survival of ammonia oxidizing bacteria in air-dried soil[J]. *FEMS Microbiol Lett*, 1991, **79**:65-68.
- [13] 钱琛,蔡祖聪.亚热带红壤硝化特性的干土效应响应[J].*环境科学*, 2010, **31**(5):1379-1385.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:农业出版社,2000.12-26.
- [15] 蔡祖聪, Mosier A R. 土壤水分状况对 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J].*土壤*, 1999, **31**:289-294.
- [16] Miller R D, Johnson D D. The effect of soil moisture tension on CO_2 evolution, nitrification and nitrogen mineralization[J]. *Soil Sci Soc Am Pro*, 1964, **28**:644-647.
- [17] Malhi S S, McGill W B. Nitrification in three Alberta soils: effect of temperature, moisture and substrate concentration[J]. *Soil Biol Biochem*, 1982, **14**:393-399.
- [18] Skopp J, Jawson M D, Doran J W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, **54**:1619-1625.
- [19] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non tilled soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, **48**:1267-1272.

- [20] Gödde M, Conrad R. Simultaneous measurement of nitric oxide production and consumption in soil using a simple static incubation system, and the effect of soil water content on the contribution of nitrification [J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, **30**: 433-442.
- [21] Maag M, Vinther F P. Nitrous oxide emission by nitrification and denitrification in different soil types and at different soil moisture contents and temperatures [J]. *Appl Soil Ecol*, 1996, **4**:5-14.
- [22] Zaman M, Chang S X. Substrate type, temperature, and moisture content affect gross and net N mineralization and nitrification rates in agroforestry systems [J]. *Biol Fert Soils*, 2004, **39**:269-279.
-

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2009 年 11 月 27 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2008 年“百种中国杰出学术期刊”评选结果.《环境科学》再次荣获“百种中国杰出学术期刊”的称号,这也是自首次评选以来连续 8 次获此殊荣.

“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.