

水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响

孙波¹, 郑宪清^{1,2}, 胡锋², 李辉信², 孔滨¹, 王帘里¹, 隋跃宇³

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150040)

摘要: 水热条件、土壤性质和耕作管理影响了土壤的硝化作用从而影响农田氮素循环和平衡. 本试验选择中国东部3个气候带上的主要农田土壤: 中温带黑龙江海伦的黑土、暖温带河南封丘的潮土和中亚热带江西鹰潭的红壤, 在上述3个地点的生态试验站建立土壤置换试验, 对比研究不同水热条件和土壤类型对玉米单作系统中土壤硝化作用的交互影响. 2006~2007年的试验结果表明, 在玉米抽雄期, 从海伦到鹰潭(月均温由22.3℃上升到26.8℃, 月降水由100.8 mm增加到199.6 mm), 3种土壤的硝化作用强度均随着月均温和月降水的增加而下降, 黑土、潮土和红壤分别下降了64.2%~67.2%、52.1%~52.5%和41.7%~75.2%, 土壤的硝化作用强度与气温($r = -0.354, p < 0.01$)和降水($r = -0.290, p < 0.01$)均呈极显著负相关. 土壤类型也显著影响了土壤硝化细菌的数量和硝化强度, 硝化细菌数和硝化强度的大小顺序为: 潮土 > 黑土 > 红壤. 土壤pH对土壤硝化强度有显著影响, 其相关系数 $r = 0.551 (p < 0.01)$. 总体上, 在玉米抽雄期, 区域水热状况及土壤类型、施肥均影响了土壤的硝化强度, 水热 × 土壤类型、水热 × 施肥、土壤类型 × 施肥、水热 × 土壤类型 × 施肥等对硝化强度有着极显著的交互作用.

关键词: 土壤硝化作用强度; 硝化细菌; 土壤类型; 气温; 降雨; 交互作用; 土壤置换试验

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0206-08

Effect of Temperature, Rainfall and Soil Properties on Farmland Soil Nitrification

SUN Bo¹, ZHENG Xian-qing^{1,2}, HU Feng², LI Hui-xin², KONG Bin¹, WANG Lian-li¹, SUI Yue-yu³

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150040, China)

Abstract: Climate conditions, soil properties and management practices control soil nitrification process which affects nitrogen cycling and balance in agro-ecosystems. The interaction of temperature, rainfall, soil type and fertilization on the soil nitrification process was studied by a soil transplantation experiment installed in 3 experiment stations of Chinese Ecological Research Network, i. e. Hailun, Fenqiu and Yingtan Agroecological Experiment Station, which represents middle temperature, warm temperature and middle subtropical zone, respectively. Three types of cropland soils were selected, i. e. neutral black soil (Phaeozem), alkaline Chao soil (Cambisol) and acidic red soil (Acrisol). Then one-meter depth soil profiles for each soil were transplanted in 3 stations to build the field experiment. The two-year experimental results (2006-2007) showed soil nitrification intensity (SNI) changed with the temperature and rainfall during the maize tasseling stage. From Hailun to Yingtan, with an increase of monthly average temperature from 22.3℃ to 26.8℃ and the monthly rainfall from 100.8 mm to 199.6 mm, SNI decreased by 64.2%-67.2% for black soil, 52.1%-52.5% for Chao soil, and 41.7%-75.2% for red soil, respectively. There were significant negative correlations between SNI and temperature and rainfall, with a correlation coefficient of $r = -0.354 (p < 0.01)$ and $r = -0.290 (p < 0.01)$, respectively. The total number of soil nitro bacteria and the intensity of soil nitrification was affected by soil types, which increased in a sequence of Chao soil > black soil > red soil. Among soil properties, pH affected SNI significantly, with a correlation coefficient of $r = 0.551 (p < 0.01)$. In generally, climate condition (temperature and rainfall), soil type and fertilization present an integrated impact on soil nitrification process, and there were significant interactions of climate × soil type, climate × fertilization, soil type × fertilization, and climate × soil type × fertilization.

Key words: soil nitrification; nitro bacteria; soil type; temperature; rainfall; interaction; soil transplantation experiment

土壤微生物是土壤生态系统中极其重要和最为活跃的部分^[1], 在土壤养分转化、循环、系统稳定性和抗干扰能力以及土壤可持续生产力中占据主导地位^[2, 3]. 由于全球变暖, 未来几十年内全球平均气温将每10 a升高0.2℃. 我国预计在2013~2022年, 全国平均气温将增加0.45℃, 降水增加3%^[4]. 全球变化通过影响温度、降雨和养分沉降等影响着土壤生态过程^[5, 6], 最终影响了生态系统的生产力及其稳

定性. 土壤硝化过程是生态系统氮循环中的重要过程, 影响了温室气体(N₂O)的排放, 是全球变化研究中的一个重要内容^[7]. 水热条件和土壤性质影响了土壤硝化过程的强度. Cookson等^[8]通过室内培养试

收稿日期: 2008-01-25; 修订日期: 2008-03-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-YW-407); 国家自然科学基金重大项目(30590381)

作者简介: 孙波(1968~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为土壤质量演变与农田养分循环, E-mail: bsun@issas.ac.cn

验研究了 5 ~ 25℃ 森林、草地和农田土壤硝化作用的变化,认为温度是通过改变土壤供应碳的能力和微生物种群组成影响了土壤的硝化过程.但 Dalias 等^[9]发现土壤类型不同,硝化强度的最佳温度也不同,寒冷地区土壤其硝化强度的最适温度较低.周才平等^[10]对山地土壤的室内土柱试验发现,在 5 ~ 25℃ 范围内,硝化速率与温度和含水量呈正相关;当温度超过 25℃,含水量超过 0.20 kg/kg 时,净硝化速率反而降低,同时温度和湿度对土壤硝化过程有明显的交互作用.范晓辉等^[11]基于长期施肥试验中土壤样品的培育试验,发现酸性红壤中的硝化作用明显低于偏碱性的潮土,长期施用有机肥和化肥明显提高了土壤氮素的硝化速率.

上述对土壤硝化过程影响因素的研究以实验室控制试验为主,在利用定位试验对比研究土壤性质对土壤硝化过程的影响时,由于设置在不同的水热条件下,因此无法剔除气候条件不一致导致的差异,同时也无法比较不同土壤类型中土壤硝化过程对气候条件变化的响应程度.本试验针对我国东部主要的农田土壤类型(中温带的黑土、暖温带的潮土,中亚热带的红壤),通过在中国科学院生态系统研究网络的农业生态试验站设置田间土壤剖面的置换试验,研究气候条件对不同土壤硝化过程的影响,分析土壤性质、水热条件和施肥对硝化细菌数量和硝化强度的作用,以期提出适应水热变化的农田养分管理措施提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤及实验小区的设计

在中国东部南北热量梯度带上的主要农区选择 3 种土壤:黑龙江海伦(代表半湿润的中温带季风气候)黄土母质发育的黑土,河南封丘(代表半湿润的暖温带季风气候)黄河冲击物发育的潮土和江西鹰潭(代表湿润的中亚热带季风气候)第四纪红粘土发育的红壤,分别置换至 3 个气候条件下,研究气候-土壤对土壤养分转化过程的影响.本试验主要研究在玉米生长旺盛期,中国东部南北热量梯度带上不同气候条件下温度、降雨和土壤性质对土壤硝化过程的影响(表 1).黑土、潮土和红壤在中国系统分类中分别属于粘化湿润均腐土、淡色潮润锥形土和粘化湿润富铁土^[12],在国际土壤分类参比系统中分别属于 Phaeozem、Cambisol 和 Acrisol^[13].

置换试验于 2005 年 10 月分别设置在中国科学院黑龙江海伦、河南封丘和江西鹰潭农业生态试验

表 1 不同气候带玉米抽雄期的气象条件(2006 ~ 2007 年)
Table 1 Meteorological conditions during the maize tasseling stage in different climate zones (2006-2007)

玉米抽雄期的气象因子	年份	农业生态试验站		
		海伦	封丘	鹰潭
月均温/℃	2006	22.5	26.7	28.3
	2007	22.1	25.8	25.2
表层土壤温度(0 ~ 20 cm)/℃	2006	22.1	27.5	30.0
	2007	23.2	26.4	26.8
月降水/mm	2006	119.2	167.5	265.0
	2007	82.4	204.2	134.2

站.试验小区规格为:1.2 m 宽 × 1.4 m 长 × 1 m 深度,小区隔墙厚 20 cm(高出地面 30 cm),以砖砌水泥覆盖,底部铺有石英沙,内壁覆盖防水布(防止水肥互渗).2005 年 9 ~ 10 月,在中国科学院海伦、封丘和鹰潭生态试验站,按小区规格分层(以 20 cm 为 1 层)采集 3 种土壤 1 m 深度的剖面,分别置换至 3 个实验站上(在每一站选取 3 份土壤原地留 1 份,其余 2 份分别运至其余 2 站),分层填装到小区中,小区建成后休闲.并在 2006 年 4 月(江西鹰潭)、5 月(黑龙江海伦)、6 月(河南封丘)种植玉米,开始正式的置换试验.试验开始前土壤的基本性质见表 2.

试验设置 2 个施肥处理:①不施肥(CK);②施肥(NPK),施肥量为 N 150 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 60 kg/hm²,NPK 肥料分别为尿素、(NH₄)₂HPO₄ 和 KCl.每个处理 3 个重复.每年种植 1 季玉米,品种为海育 6 号(海伦),郑单 958(封丘)和澄海 11 号(鹰潭),采用雨养,不灌溉.种植前条施底肥(1/2 氮肥、全部磷肥和钾肥),玉米大喇叭口期追施尿素(1/2 氮肥).

1.2 研究区气候条件

海伦站(47°26'N, 126°38'E)属于半湿润的中温带季风气候,年均气温 1.5℃,年降水量 500 ~ 600 mm.站区土壤主要为松嫩平原典型黑土,有机质含量较多.

封丘站(35°00'N, 114°24'E)属半干旱、半湿润的暖温带季风气候,年均温为 13.9℃,年降水量 605 mm,年蒸发量 1 875 mm.站区土壤主要为黄河沉积物发育的潮土,并伴有部分盐土、碱土、沙土和沼泽土的插花分布.

鹰潭站(28°15'N, 116°55'E)属于中亚热带湿润季风气候,年均温度 17.6℃,年均降雨量 1 795 mm,蒸发量 1 318 mm.站区土壤主要为第四纪红色粘土发育的红壤.

表2 不同气候带3种土壤表土(0~20 cm)理化性状的比较(2006年)¹⁾

Table 2 Soil physicochemical properties in the surface layer (0-20 cm) in different climate zones (2006)

土壤性质	黑土			潮土			红壤		
	海伦	封丘	鹰潭	海伦	封丘	鹰潭	海伦	封丘	鹰潭
有机质/g·kg ⁻¹	53.74a	49.95b	52.40a	8.88a	8.50a	9.15a	8.44a	8.68a	8.42a
全 N/g·kg ⁻¹	2.28a	2.24a	2.35a	0.50a	0.65a	0.95a	0.61a	0.81a	0.77a
全 P/g·kg ⁻¹	0.94a	0.88b	0.87b	0.69a	0.62a	0.89a	0.25a	0.29a	0.27a
全 K/g·kg ⁻¹	13.52c	14.75b	16.68a	12.32a	13.12a	13.53a	6.80b	6.82b	7.83a
速效 P/mg·kg ⁻¹	30.11a	25.59b	24.47b	8.11a	11.76a	12.77a	40.13a	34.27a	26.47a
速效 K/mg·kg ⁻¹	153.05b	144.16b	177.28a	53.11c	64.41b	76.75a	207.05a	213.45a	180.18a
NH ₄ ⁺ -N/mg·kg ⁻¹	21.80a	21.08a	21.78a	16.87a	15.16b	16.85a	23.21a	19.15a	19.49a
NO ₃ ⁻ -N/mg·kg ⁻¹	14.47ab	21.28a	10.25b	12.66b	23.67a	7.91c	14.70a	17.62a	2.04b
pH	5.46a	5.34b	5.37b	7.68a	7.75a	7.72a	3.97b	4.02a	3.98ab
含水量/%	32.53a	31.83a	29.59b	20.27a	19.73a	17.51a	23.69a	22.15a	20.47c
田间持水量/%	38.6 ^[14]	—	—	—	30.0 ^[15]	—	—	—	30.2 ^[16]
含水量/持水量/%	84.27	82.46	76.66	67.57	65.77	58.37	78.44	73.34	67.78

1) 同一行中同种土壤平均值后面的不同字母表示显著性差异($p = 0.05$),下同

1.3 采样和分析方法

当玉米生长进入抽雄期(追肥后 15 d)时采集土壤样品,采集时间分别为:鹰潭(2006-07-10、2007-06-05)、海伦(2006-08-04、2007-07-27)、封丘(2006-07-28、2007-07-25)。用不锈钢土钻(直径 2 cm)采集 0~20 cm 耕层土壤,每个小区采用对角线法采集 10 个点左右,混合后采用四分法留取实验用土量,并将新鲜土壤装入聚乙烯封口袋中,用保鲜箱低温冷藏带回实验室。一部分土样风干磨碎进行理化性状的测定^[17];另一部分放入冰箱于 4℃ 保存,立即进行硝化细菌数量与硝化强度的测定。土壤硝化细菌数量采用最大或然值法(most possible number, MPN),土壤硝化强度采用悬液培养法测定^[18]。数据的统计分析采用 SPSS13.0,差异显著性分析利用方差分析(ANOVA)中的 Post Hoc Multiple Comparisons 法,计算 $p = 0.05$ 的最小显著性差异(LSD)。

测定方法:土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定,全氮采用自动定氮仪(Büchi, Autokjeldahl Unit, K-370)测定,氨态氮和硝态氮采用 2 mol/L KCl 浸提-连续流动分析仪测定,全磷采用酸溶-钼锑抗比色法,速效磷采用碳酸氢钠法,全钾采用氢氧化钠熔融法-火焰光度计测定,速效钾采用乙酸铵提取法-火焰光度计测定,pH 值采用电位法测定(其中黑土、潮土用 0.01 mol/L 的 CaCl₂ 浸提;红壤用 1.0 mol/L 的 KCl 浸提,水:土比为 2.5:1),含水量采用烘干法测定。

2 结果与分析

2.1 土壤硝化细菌数量的变化

硝化细菌数量在不同气候条件、土壤和施肥处理间存在差异,3 种土壤中(以干土计,下同)硝化细菌数量的变幅在 $0.01 \times 10^4 \sim 2.37 \times 10^4$ 个/g 之间。2006 年的实验结果显示,在玉米抽雄期,施肥处理中黑土和潮土的硝化细菌数量在封丘显著高于在海伦和鹰潭,而红壤在 3 个地点差异不显著;不施肥处理中黑土和红壤的硝化细菌数量在海伦和封丘显著高于鹰潭,而潮土的变化顺序是封丘 > 海伦 > 鹰潭。从土壤类型对土壤硝化细菌数量的影响看,土壤硝化细菌数量的大小顺序是潮土 > 黑土 > 红壤(表 3),这与土壤 pH 的大小顺序一致,而与土壤有机质及养分的大小顺序不同(表 2),说明土壤 pH 的影响较土壤养分大,但施肥均增加了土壤中硝化细菌的数量。

同一种土壤在不同的气候区,土壤硝化细菌平均数量的大小顺序是:封丘 > 海伦 > 鹰潭。在玉米抽雄期海伦、封丘、鹰潭的月均温分别为 22.3℃、26.5℃和 26.8℃,说明除了温度,其他环境因素(如降雨等)也影响了土壤中硝化细菌数量的变化。

2.2 硝化强度的变化特征

2.2.1 同种土壤在不同气候带上硝化强度的变化

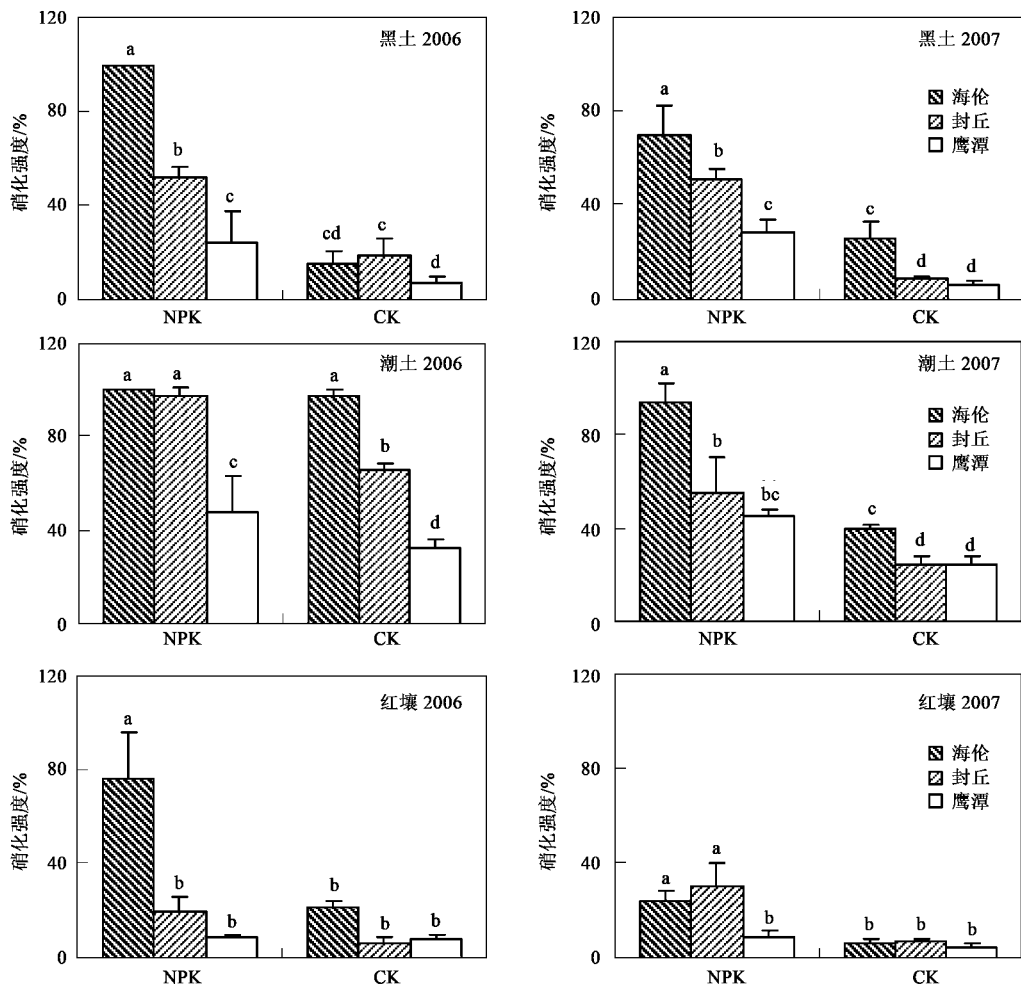
硝化强度是指亚硝酸氧化细菌将 NH₄⁺-N 氧化成 NO₃⁻-N 的作用,土壤环境因子对硝化作用强度有明显的影响。在玉米抽雄期,从海伦到鹰潭,3 种土壤均随着温度和降水量在不同气候带上的增加而显著下降(图 1),土壤硝化强度与温度($r = -0.354, p < 0.01$)和降水量($r = -0.290, p < 0.01$)均呈极显著负相关。

2.2.2 同一气候带上不同土壤的硝化强度的比较

表 3 玉米抽雄期表土(0~20 cm)硝化细菌数的变化(2006~2007 年)¹⁾

Table 3 Changes of the total number of soil nitrobacteria in the surface layer (0-20 cm) during the maize tasseling stage (2006-2007)

处理		硝化细菌数 $\times 10^4/\text{个}\cdot\text{g}^{-1}$					
		2006 年			2007 年		
		黑土	潮土	红壤	黑土	潮土	红壤
NPK	海伦	1.42b	1.44bc	0.16ab	1.01b	1.63b	0.15bc
	封丘	2.30a	2.37a	0.17a	1.92a	2.12a	0.27a
	鹰潭	1.00c	1.31cd	0.11b	0.85c	1.26c	0.16b
CK	海伦	1.02c	1.25d	0.15ab	0.39d	1.22c	0.11cd
	封丘	1.03c	1.56b	0.18a	0.23e	1.66b	0.03e
	鹰潭	0.54d	0.91e	0.01d	0.19e	0.23d	0.09d



图中不同字母代表具有显著差异, $p < 0.05$, 误差线为标准差

图 1 玉米抽雄期 3 种土壤施肥(NPK)和不施肥(CK)处理中土壤硝化强度的变化

Fig. 1 Changes of soil nitrification intensity during the maize the tasseling stage for fertilization (NPK) and non-fertilization (CK) treatment

土壤质地、酸碱性、养分含量直接影响着土壤微生物的生长和活性。在相同气候带上玉米抽雄期,不同土壤硝化强度的大小顺序是: 潮土(99.9% ~ 24.4%) > 黑土(99.0% ~ 6.57%) > 红壤(75.9% ~ 4.83%), 方差分析表明在同一气候带上 3 种土壤间均呈现出显著性差异($p < 0.05$)。同时, 施肥也显著

提高了土壤的硝化强度。

总体上看, 土壤硝化强度在碱性潮土中最高, 在酸性红壤中最低, 这与其他一些研究的结果一致。丁洪等^[19]对潮土在玉米种植期氮肥硝化反硝化损失的研究表明, 潮土硝化作用活性较强, 施入的氮肥在 20 d 内基本硝化完全; 李辉信等^[20]对红壤氮素的矿

化和硝化作用的研究表明,红壤硝化作用很弱,这可能是由于红壤养分贫瘠,本身氮素含量较低^[21]

3 讨论

3.1 硝化细菌的影响因素

硝化细菌数量受土壤类型(黑土、潮土、红壤)以及环境因子(温度、降水量)的影响较大.在3种土壤间硝化细菌数量的顺序是:潮土>黑土>红壤.虽然在土壤置换实验中,3个气候带分别种植了不同的玉米品种,但已有的研究表明土壤类型是影响土壤细菌群落结构和群落密度的主要因素,玉米品种的影响很小^[22].da Dasilva等^[23]研究了2种不同土壤中玉米根际土壤类芽孢杆菌(*Paenibacillus*)的结构和数量,发现土壤类型而非玉米栽培品种是决定因素.Latour等^[24]对荧光假单胞菌(*Pseudomonas*)属的细菌种群多样性研究也表明,土壤类型是主要的影响因子,寄主植物类型的影响较小.

同种土壤硝化细菌数量在暖温带的封丘高于中温带的海伦和中亚热带的鹰潭,很可能与温度和降水量的大小及其季节分配有关.相关分析表明(表4),月均气温、降水量、土壤含水量与土壤硝化细菌数量之间有显著和极显著的相关性.

表4 土壤和气候因素与土壤硝化细菌和土壤硝化强度之间的相关性¹⁾

Table 4 Correlations between the soil and climate factors and the total number of soil nitrobacteria and soil nitrification intensity

影响因子	相关系数 $r(n=108)$	
	硝化强度	硝化细菌总数
全 N	-0.122	0.149
全 P	0.134	0.197*
全 K	0.324**	0.216*
NH ₄ ⁺ -N	0.092	0.126
NO ₃ ⁻ -N	0.290**	-0.053
土壤有效 P	-0.340**	-0.044
土壤速效 K	-0.495**	-0.023
土壤有机质	-0.066	0.124
土壤 pH	0.551**	0.076
鲜土含水量	-0.040	0.326**
月均温	-0.354**	0.246*
月降水	-0.290**	0.225*

1) *表示两尾测验显著性相关水平($p=0.05$), **表示两尾测验显著性相关水平($p=0.01$); n 指土壤硝化细菌和硝化强度在2a中的所有测定数,下同

3.2 水热因素对土壤硝化过程的影响

温度和降水量等环境因子控制硝化细菌生长的同时,对土壤硝化强度也产生强烈的作用.影响土壤有机质分解和氮矿化过程的环境因子主要是温度和

水分^[25-27].本研究中发现,在玉米抽雄期,不同气候带上的温度与降水共同影响了土壤的硝化强度,从海伦、封丘到鹰潭,随着温度和降雨量的提高(表1),土壤的硝化强度下降,且与温度和降水呈显著或极显著的相关性(表4).玉米抽雄期的高温(22~28℃)可能抑制了3种土壤的硝化作用,因为高温降低O₂的溶解度,并增加异养微生物对O₂的需求,硝化微生物在缺O₂条件下活性下降.Keeney^[28]曾报道在40℃下土壤的硝化活性很低,没有发生硝态氮的累积.Thiagalagam等^[29]研究夏威夷土壤的硝化作用发现,4种土壤中有3种土壤在40℃下硝化作用受到很强的抑制.Brady等^[30]认为硝化作用的最适温度范围是25~35℃,低于5℃或高于50℃硝化作用基本停止.这些研究说明土壤硝化作用的合适温度范围依赖于不同土壤所在的气候带,是硝化微生物长期适应性的表现.不同土壤中硝化强度的最适温度不同,吕殿青等^[31]报道,在20~40℃范围内,低温(20℃)对石灰性土壤硝化作用比较适宜;张树兰等^[32]对3种耕作土壤(黄绵土、垆土和水稻土)的研究表明,20℃和40℃均抑制了土壤硝化作用,30℃最适宜.本试验中说明红壤、潮土和黑土在低于25℃下有利于土壤的硝化作用,这与周才平等^[10]对山地土壤的研究结果相似,他们发现低温(5~25℃)时净硝化速率随温度的升高有所增加,超过25℃时呈下降趋势^[33].

降水通过改变土壤含水量来间接影响硝化强度.不同质地和性质的土壤,最大田间持水量不同,硝化强度的最适含水量也不一样.研究表明^[32],黄绵土、垆土和水稻土的土壤含水量为田间持水量的60%时土壤硝化作用最适合,过湿(80%)和过干(40%)都抑制了土壤的硝化作用.左余宝等^[16]发现潮土和火山灰土中硝化作用的适宜土壤水分含量分别为田间持水量的60%~90%和75%~90%,过干土壤硝化力降低.本实验中,潮土在海伦(67.6%)和封丘(65.8%)的土壤含水量较适合土壤硝化过程的进行,而在鹰潭的土壤含水量(58.4%)较低,不适宜土壤硝化过程的进行.

3.3 土壤性质对土壤硝化过程的影响

土壤硝化作用是供给作物生长所需氮素的关键过程^[34].在水热条件和植被相同时,改变土壤性质和施肥成为调控土壤微生物硝化强度的重要方法.贫瘠的酸性红壤不利于硝化作用的进行,而施肥显著提高了红壤中的硝化细菌数量,增加了土壤的硝化强度.Martikainen^[35]也发现,在酸性土壤上施用尿

素有利于硝化作用的进行,但施用硫酸铵则抑制了硝化作用,这可能是施用尿素后水解导致短时间内土壤 pH 值的提高促进了硝化作用,其他研究也表明施用尿素可使土壤 pH 从 7.0 上升到 9.0^[36].

土壤养分影响了土壤微生物的数量和活性,在

同一气候带上,土壤全钾含量对硝化作用强度表现出显著或极显著的正相关(表 5),而速效 K 和速效 P 含量在玉米抽雄期与土壤硝化作用强度之间表现出极显著的负相关,说明此时这些速效养分在土壤含量过多不利于硝化强度.

表 5 土壤硝化作用强度与影响因子间的相关性分析(2006~2007 年)

Table 5 Correlation analysis of soil nitrification intensity and impact factors (2006-2007)

影响因子	相关系数 $r(n=36)$					
	不同气候带下			同一气候带上		
	黑土	潮土	红壤	海伦	封丘	鹰潭
土壤全 N	0.102	-0.361 *	-0.067	-0.106	-0.137	-0.167
土壤全 P	-0.224	0.018	0.029	0.265	0.248	0.305
土壤全 K	-0.259	-0.154	-0.021	0.405 *	0.445 * *	0.419 *
土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	0.041	0.461 *	0.343 *	0.176	0.114	-0.088
土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.333 *	0.517 * *	0.319	0.002	0.443 * *	0.167
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_3^- - \text{N}$	-0.078	0.041	-0.145	0.049	-0.135	-0.293
土壤速效 P	0.416 *	0.109	0.090	-0.459 * *	-0.489 * *	-0.606 * *
土壤速效 K	-0.129	-0.220	0.104	-0.562 * *	-0.609 * *	-0.675 * *
土壤有机质	0.165	0.081	-0.173	-0.050	-0.110	-0.151
土壤碳氮比	-0.064	0.441 * *	0.117	0.105	-0.063	-0.046
土壤 pH	-0.096	0.150	-0.202	0.565 * *	0.680 * *	0.796 * *
土壤含水量	-0.101	0.058	0.143	0.166	-0.019	0.106
月均温	-0.439 * *	-0.429 * *	-0.420 *	0.345 *	0.256	0.057
月降水	-0.370 *	-0.409 *	-0.248	0.345 *	-0.256	0.057
月降水/月均温	-0.343 *	-0.389 *	-0.186	0.345 *	-0.256	0.057

总体上,红壤、潮土和黑土的硝化强度并没有随有机质和全氮含量的增加而增加,而是表现出随土壤 pH 的增加而增加,说明土壤 pH 控制了土壤硝化作用的大小.通常 pH 值的升高增加了有机质的可溶性,为微生物生长提供了大量 C、N 基质,促进了 C、N 的矿化. Dancer 等^[37]的研究表明,土壤 pH 从 4.7 增高到 6.5 时,硝化速率增加 3~5 倍.李良谟等^[38]对太湖地区土壤的研究也表明,在 pH 5.6~8.0 的范围内,土壤硝化速率随 pH 的升高而增大,呈极显著的正相关($r=0.941$).研究表明,酸性土壤中亚硝化单胞菌属的活性受到抑制^[39].酸性土壤中自养硝化菌的数量很少,这是土壤硝化活力低的主要原因.

3.4 多因子的交互作用对硝化作用强度的影响

气候、土壤和耕作施肥因素对土壤硝化强度的影响是综合的.方差分析表明,在玉米抽雄期水热 × 土壤、水热 × 施肥、土壤 × 施肥、水热 × 土壤 × 施肥等对硝化强度有着明显的交互影响作用, F 值分别为 7.60、41.3、23.1 和 45.8,均达到了极显著程度($p=0.05$).虽然各种影响因素共同对硝化作用强度产生影响,但在不同的空间尺度上,各因素的影响程度也是不同的.

在相同的气候带水热条件下,以土壤全氮含量(X_1)、全磷(X_2)、全钾(X_3)、铵态氮(X_4)、硝态氮(X_5)、速效磷(X_6)、速效钾(X_7)、有机质(X_8)、pH(X_9)、鲜土含水量(X_{10})以及温度(X_{11})和降水量(X_{12})为自变量,以硝化强度(Y)为因变量,进行逐步回归,在温度、降水量和植被相同的条件下,最优回归方程如下.

$$\text{海伦站: } Y = -88.485 + 11.95X_9 + 0.742X_{12} \\ (r^2 = 0.410, n = 36)$$

$$\text{封丘站: } Y = 86.35 - 3.54X_9 + 2.06X_5 - 0.469X_7 \\ (r^2 = 0.671, n = 36)$$

$$\text{鹰潭站: } Y = -25.5 + 8.14X_9 \\ (r^2 = 0.619, n = 36)$$

可以看出在相同的气候带水热条件下,土壤 pH、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、速效 K、降水量是决定土壤硝化强度的关键因素,其中土壤 pH 与硝化强度的相关性最强,相关系数 $r=0.551(p<0.01)$.而同种土壤在不同气候带上,土壤硝化强度(Y)与影响因子的最优回归方程如下.

$$\text{黑土: } Y = 847.7 - 8.29X_{11} - 110.7X_9 \\ (r^2 = 0.333, n = 36)$$

潮土: $Y = 427.6 - 19.54X_{11} + 4.008X_5 + 0.492X_{12}$

$$(r^2 = 0.726, n = 36)$$

红壤: $Y = 176.078 - 5.375X_{11} + 0.166X_4 - 0.249X_7$

$$(r^2 = 0.447, n = 36)$$

可以看出同种土壤在不同气候带水热条件下, 温度、降水量以及土壤 pH、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、速效 K 是决定土壤硝化强度的关键因素, 其中温度与硝化强度的相关性最强, 相关系数(r)为 -0.354 ($p < 0.01$)。

利用水热梯度变化条件土壤置换试验开展的模拟试验, 反映的是土壤微生物过程对气候条件突变的响应, 需要通过长期试验研究土壤微生物过程对气候条件变化的长期适应性。但本试验中 2 a 的研究结果表明, 沿南北水热梯度设置土壤置换试验是一种研究气候变化对土壤生态学过程影响的有效方法。

4 结论

(1) 在玉米抽雄期, 同种土壤在不同气候带下, 从黑龙江的海伦站至江西的鹰潭站土壤硝化强度随温度和降水量的增加而呈降低趋势, 但不同土壤因本身性质不同而降幅不同, 较贫瘠的红壤降幅最大, 达 75.2%。

(2) 在相同的气候带和植被下, 土壤性质影响了土壤的硝化强度, 不同土壤间硝化作用强度的大小顺序是: 潮土 > 黑土 > 红壤。主要影响因素包括土壤 pH、硝态氮和速效钾含量, 其中土壤 pH 值最重要。

(3) 区域水热状况及其土壤类型、施肥对土壤硝化作用有交互作用。

致谢: 感谢张兴义、梁音、郝红涛协助设置土壤置换试验; 感谢陈长青、赵莉敏协助分析土壤样品和数据处理。

参考文献:

- [1] Jenkinson D S, Ladd J N. Microbial biomass in soil: Measurement and turnover [A]. In: Paul V E A, Ladd J N (eds). Soil Biochemistry [C]. New York: Marcel Dekker, 1981. 415-471.
- [2] Doran J W, Coleman D C, Stewart B A. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment [J]. Soil Science Society of America, Inc., American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1995, 66(2): 163-164.
- [3] Abbott L K, Murphy D V. Soil Biological Fertility: A Key to Sustainable Land Use in Agriculture [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [4] 王绍武, 叶瑾琳. 近百年全球气候变暖的分析 [J]. 大气科学, 1995, 19(5): 545-553.
- [5] Smith P, Powlson D S. Considering manure and carbon sequestration [J]. Science, 2000, 287: 428-429.
- [6] Mosier A R. Soil processes and global change [J]. Biol Fert Soils, 1998, 27: 221-229.
- [7] 彭少麟, 李跃林, 任海, 等. 全球变化条件下的土壤呼吸效应 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 705-713.
- [8] Cookson W R, Osman M, Marschner P, et al. Controls on soil nitrogen cycling and microbial community composition across land use and incubation temperature [J]. Soil Biol Biochem, 2007, 39(3): 744-756.
- [9] Dalias P, Anderson J M, Bottner P, et al. Temperature responses of net N mineralization and nitrification in conifer forest soils incubated under standard laboratory conditions [J]. Soil Biol Biochem, 2002, 34: 691-701.
- [10] 周才平, 欧阳华. 温度和湿度对暖温带落叶阔叶林土壤氮矿化的影响 [J]. 植物生态学报, 2001, 25(2): 204-209.
- [11] 范晓辉, 孙永红, 林德喜, 等. 长期试验地红壤与潮土的矿化和硝化作用特征比较 [J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 672-674.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 中国土壤系统分类检索 [M]. (第三版). 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. 1-275.
- [13] ISSS-ISRIC-FAO. World Reference Base for Soil Resources [R]. World Soil. Resources Reports, No. 84. FAO, Rome, 1998. 1-88.
- [14] 孟凯, 张兴义, 随跃宇, 等. 黑龙江海伦农田黑土水分特征 [J]. 土壤通报, 2003, 34(1): 11-14.
- [15] 姚贤良. 华中丘陵红壤的水分问题 I. 低丘坡地红壤的水分状况 [J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 249-257.
- [16] 左余宝, Hosen Y, 褚海燕. 不同水分含量对潮土和火山土硝化动态的影响 [J]. 土壤肥料, 2004, (5): 21-24.
- [17] 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, 1999. 256-262.
- [18] 许光辉. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1986. 110-240.
- [19] 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米-潮土系统中氮肥硝化反硝化损失与 N_2O 排放 [J]. 中国农业科学, 2001, 34(4): 416-421.
- [20] 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.
- [21] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国中亚热带缓丘区红粘土红壤肥力的演化 [J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 203-217.
- [22] Chiarini L, Bevivino A, Dalmastrì C, et al. Influence of plant development, cultivar and soil type on microbial colonization of maize roots [J]. Appl Soil Ecol, 1998, 8: 11-18.
- [23] da Dasilva K R A, Salles J F, Seldin L, et al. Application of a novel *Paenibacillus*-specific PCR-DGGE method and sequence analysis to assess the diversity of *Paenibacillus* spp. in the maize rhizosphere [J]. J Microbiol Meth, 2003, 54(2): 213-231.
- [24] Latour X, Corberand T, Laguerre G, et al. The composition of fluorescent *Pseudomonas* population associated with roots is influenced by plant and soil type [J]. Appl Environ Microbiol, 1996, 62: 2449-2456.
- [25] Sabey B R, Frederick L R, Bartholomew W V. The formation of nitrate from ammonium nitrogen in soils III. Influence of temperature

- and initial population of nitrifying organisms on the maximum rate and delay period[J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1959, **23**: 462-465.
- [26] Gilmour J T. The effect of soil properties on nitrification and nitrification inhibition[J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1984, **48**: 1262-1266.
- [27] Flowers T H, O'Callaghan J R. Nitrification in soils incubated with pig slurry or ammonium sulphate[J]. *Soil Biol Biochem*, 1983, **15** (3): 337-342.
- [28] Keeney D R. Prediction of soil nitrogen availability in forest ecosystems: A literature review[J]. *Forest Sci*, 1980, **26**: 159-171.
- [29] Thiagalingam K, Kanehiro Y. Nitrification in some tropical soil[J]. *Plant Soil*, 1982, **65**: 281-286.
- [30] Brady N C, Weil R R. *The Nature and properties of soils*[M]. USA: Prentice-Hall Inc., 1999. 1-881.
- [31] 吕殿青, 刘杏兰, 吴长征. 在石灰性土壤上碳铵挥发损失条件及其防止途径的研究[J]. *陕西农业科学*, 1980, **6**: 7-10.
- [32] 张树兰, 扬学云, 吕殿青, 等. 温度水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响[J]. *生态学报*, 2001, **22**(12): 2147-2153.
- [33] 周才平, 欧阳华. 长白山两种主要林型下土壤氮矿化速率与温度的关系[J]. *生态学报*, 2001, **21**(9): 1469-1473.
- [34] 胡锋, 李辉信, 谢连琪, 等. 土壤食细菌线虫与细菌的相互作用及其对 N, P 矿化-生物固定的影响及机理[J]. *生态学报*, 1999, **18**(6): 914-920.
- [35] Martikainen P J. Nitrification in two coniferous forest soil after different fertilization treatment[J]. *Soil Biol Biochem*, 1984, **16**: 577-582.
- [36] 李良谟. 反硝化作用[A]. 见: 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[C]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 145-170.
- [37] Dancer W S, Peteson L A, Chesters G. Ammonification and nitrification of N as influenced by soil pH and previous n treatments [J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1973, **37**: 67-69.
- [38] 李良谟, 潘映华, 周秀如, 等. 太湖地区主要类型土壤的硝化作用及其影响因素[J]. *土壤*, 1987, **19**: 289-293.
- [39] Biederbeck V O, Campbell C A, Ukrainetz H, *et al.* Soil microbial and biochemical properties after ten years of fertilization with urea and anhydrous ammonia [J]. *Can J Soil Sci*, 1996, **76**(1): 7-14.