

DOI: 10.11766/trxb201804080533

不同肥力潮土硝化潜势及其影响因素*

王萍萍^{1, 2} 段英华² 徐明岗² 张水清³ 王小利^{1†}

(1 贵州大学农学院, 贵阳 550025)

(2 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

(3 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

摘要 依托河南郑州潮土长期定位施肥试验, 探索不同肥力土壤的硝化潜势 (NP) 及其主要影响因素。采集高肥力土壤 (有机无机肥配施)、中肥力土壤 (化肥平衡施用) 和低肥力土壤 (不施肥或不施氮肥), 分析土壤 NP、全氮 (TN)、铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、微生物生物量碳 (MBC) 和微生物生物量氮 (MBN), 并通过逐步回归、路径分析和方差分解分析 (VDA) 等统计分析方法, 明确不同肥力潮土 NP 的主要影响因素, 量化各主效应因子对 NP 的贡献率。结果表明: 潮土 NP 为 $0.3 \sim 1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 在不同肥力梯度土壤中差异显著 ($P < 0.05$), 其中高肥力较中肥力平均提高 7.9%; 中肥力较低肥力平均提高 162.5%。在各项土壤指标中, MBC、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、MBN 是土壤 NP 变化的主要影响因素, 其中, MBC、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 MBN 与 NP 为直接效应, TN 与 NP 为间接效应大于直接效应, 微生物生物量碳、氮 (MBC 和 MBN)、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 对 NP 变异的贡献率分别为 24.3%、18.9% 和 13.7%, 而 4 个主效应因子交互作用对硝化潜势变异的贡献率达 52.8%, 各变量及其交互作用对硝化潜势变异的总贡献率达 92.9%。可见, 高肥力土壤上硝化作用较强, 铵态氮很容易被硝化成为硝态氮, 硝态氮累积和淋洗的可能性较大, 应通过改善水肥条件适当降低其土壤硝化强度, 进而达到构建氮素养分库和减少氮素损失的目的。

关键词 土壤肥力; 微生物生物量; 全氮; 硝化作用

中图分类号 S151.9³; S158.2 **文献标识码** A

氮素是作物生长所必需的营养元素之一^[1], 硝化作用是土壤氮素转化的重要过程, 它将土壤有机氮矿化产生或来源于肥料的铵态氮转化为硝态氮^[2], 从而减少氮素的挥发损失, 但是其产生的硝态氮又易通过淋洗或反硝化作用损失, 并对水体和大气环境产生负面影响^[3-4]。我国潮土呈弱碱性, 硝化作用能力较强, 铵态氮肥很容易被硝化成为硝态氮,

氮肥通过淋洗和反硝化损失的可能性较大, 因此, 对我国潮土硝化潜势及其主要影响因素的研究具有重要的生态学和农学意义, 可为农业生产中合理施肥提供理论依据和指导。土壤硝化过程一直是氮素研究的热点, 众多学者研究了温度、pH、施肥、土壤类型以及土地利用方式等气候、环境和农业管理等因素对土壤硝化作用的影响^[5-10]。Chu 等^[11]

* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0200301)、国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2015CB150505) 和国家自然科学基金项目 (41471247) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0200301), the National Basic Research Program of China (No. 2015CB150505) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41471247)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xlwang@gzu.edu.cn

作者简介: 王萍萍 (1992—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤氮循环及微生物机制研究。E-mail: 18754388651@163.com

收稿日期: 2018-04-08; 收到修改稿日期: 2018-05-13; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-09-11

发现长期施用氮肥能够增加土壤硝化潜势。Ai 等^[12]研究也表明,随着施氮量的增加,土壤硝化潜势也在增加。然而,Verchot等^[13]在美国黄石国家公园的研究发现,总硝化速率与全碳、全氮、C/N 等土壤理化性质并不存在显著相关性。此外,有研究表明低C/N的有机粪肥的施用会促进土壤有机氮的矿化作用和硝化作用^[2];而高C/N的作物秸秆还田增加了土壤微生物对无机氮的生物固持作用,使其转化成微生物体氮^[14],短期内会显著降低土壤有机氮的矿化作用和硝化作用^[15]。

然而,硝化作用作为土壤氮素循环过程中的一个重要环节,其强度是不是受到土壤全氮、速效氮含量或者微生物量影响,即不同肥力梯度土壤上,硝化潜势是否由于底物浓度差异而形成梯度差异,其主要控制因素有哪些,都尚不清楚。本研究旨在依托长期定位施肥形成了比较稳定的不同肥力土壤,分析土壤氮素循环转化过程中的各个指标,研究不同肥力梯度下土壤硝化潜势的差异,并通过现代统计学分析方法阐明其与各氮素形态之间的相互效应关系,为该地区不同肥力土壤上的合理施肥和环境可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验点位于郑州市,国家潮土肥力与肥料效益长期监测基地(113°41'25.5" E, 35°47'31.9" N)。该基地地处暖温带,年均气温14.5℃,年均降水量615.1 mm,年均蒸发量1 450 mm,年均日照时数2 324 h。试验地土壤为潮土,成土母质为黄河冲积物。

试验始于1990年,试验开始时的耕层(0~20 cm)土壤主要性状为有机质10.1 g·kg⁻¹,全氮0.65 g·kg⁻¹,全磷0.64 g·kg⁻¹,全钾16.9 g·kg⁻¹,碱解氮76.6 mg·kg⁻¹,有效磷(Olsen-P)7.7 mg·kg⁻¹,交换性钾65 mg·kg⁻¹,pH 8.3。种植制度为一年两熟,小麦-玉米轮作。

1.2 试验设计

试验设置6个处理,分别为:(1)对照(不施肥,CK);(2)施磷钾肥(PK);(3)施氮磷肥(NP);(4)氮磷钾平衡配施(NPK);(5)有机肥与氮磷钾配施(与NPK施肥量相同,其中70%

的N由有机肥提供,MNPK);(6)1.5倍MNPK(1.5MNPK)。小麦每季氮肥施用量为N165 kg·hm⁻²,玉米1991年氮肥施用量为165 kg·hm⁻²,1992年后改为187.5 kg·hm⁻²;氮肥为尿素,磷肥为普通过磷酸钙(P₂O₅含量12%左右),钾肥为氯化钾(K₂O为60%计算),氮、磷、钾肥配比为N:P₂O₅:K₂O=1:0.5:0.5。有机肥处理,1990—1998年施用马粪,1999年开始牛粪和猪粪隔年轮换施用,有机肥中全氮含量为12.0±4.5 g·kg⁻¹、全磷含量为6.8±2.7 g·kg⁻¹、全钾含量为7.9±3.4 g·kg⁻¹,有机肥用量根据当年的含氮量和含水量计算,在秋季小麦播种前一次底施,随有机肥施入的磷、钾肥未计入施肥量。全部的磷、钾肥和1/3的氮肥作基肥底施,2/3的氮肥在小麦返青期及玉米喇叭口期作追肥。灌水量根据当年的气候状况而定;分别在小麦幼苗期、返青期和玉米3~5叶期进行除草管理;根据不同品种小麦、玉米的不同特性,在搞好测报的基础上,按照防治指标有针对性地进行病虫害防治工作。2009年前,小区面积为400 m²,无重复;2009年后搬迁至现代农业研究基地,小区面积为43 m²,3次重复,随机排列。小麦播种量常年在150~180 kg·hm⁻²,玉米行距60 cm,株距25 cm。

1.3 土壤样品采集

土壤样品采集于2016年10月中旬(玉米成熟期),采用“S”形取样法分别对18个小区进行取样(6个处理,3个重复),各小区取5个点,采集0~20 cm耕层土壤组成混合样品。田间采集的原状土样用硬质塑料盒运回实验室,挑去细根后过2 mm筛,一部分放入4℃冰箱保存,用于土壤微生物生物量的测定;一部分风干,用于土壤基本理化性质的测定。供试土壤各理化性质见表1。

1.4 测定项目与方法

土壤pH用pH计测定,水土比为2.5:1;土壤全氮(TN)采用半微量凯氏法;有机碳(SOC)用重铬酸钾容量法;硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)采用连续流动分析仪测定;有效磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提,比色法测定;速效钾采用NH₄OAc浸提,火焰光度计法测定^[16]。

微生物生物量碳、氮(MBC、MBN)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法(FE)测定^[17],微生物生物量碳的换算系数为0.38,微生物生物量氮的换算

系数为0.45^[18]。

土壤固定态铵 (Fixed ammonium, FA) 采用 Silva-Bremner法^[19]测定。称取1g过100目的干土, 加入20 mL次溴酸钾溶液, 摇匀后静置2 h。然后加入60 mL蒸馏水, 并在电磁炉上煮沸5 min, 煮后冷却至隔夜。第二天弃上层清液, 用0.5 mol·L⁻¹ KCl将残余物洗入离心管中, 摇匀, 离心10 min (1100 r·min⁻¹)。离心后弃上层清液, 再加入0.5 mol·L⁻¹ KCl摇匀, 离心, 以上过程重复3次。之后加入20 mL 5 mol·L⁻¹的HF和1 mol·L⁻¹的HCl混合酸, 震荡24 h以释放矿物固定的NH₄⁺, 最后用凯氏法蒸馏定氮, 标准酸滴定, 测定氮含量。

土壤硝化潜势 (Nitrification potential, NP) 测定采用氯酸盐抑制法^[20]。以水土比4:1向5 g土壤中加入含1 mmol·L⁻¹ (NH₄)₂SO₄的磷酸盐缓冲液 (NaCl 8.0 g·L⁻¹, KCl 0.2 g·L⁻¹, Na₂HPO₄ 0.2 g·L⁻¹; pH 7.4), 并加入10 mmol·L⁻¹ KClO₃溶液抑制亚硝酸盐的氧化。土样悬浊液于25℃黑暗培养24 h后加入5 mL的2 mol·L⁻¹ KCl溶液浸提NO₂-N。NO₂-N以N-(1-萘基)-乙二胺显色, 在540nm波长下测定, 用测得单位时间单位土壤样品增加的NO₂-N含量表示硝化潜势。

1.5 数据处理与分析

数据统计与分析采用Excel 2010和SPSS 19.0软件进行, 所有数据测定结果均以平均值表示。不同施肥处理之间采用Duncan新复极差法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$); 逐步回归分析和路径分析均采用SPSS 19.0软件完成; 方差分解分析 (VDA) 采用R语言中的“vegan”程序包处理; 所有的图采用Origin 9.1完成。

2 结果

2.1 长期不同施肥处理下土壤的肥力梯度

与CK相比, 不同施肥处理土壤全氮含量在施肥处理下增加了9.7%~75.8% (表1)。其中, 1.5MNPk和MNPk处理最高, NPK和NP处理次之, PK处理较CK处理仅增加9.6%。土壤有机碳含量在不同处理间呈明显梯度, 在MNPk和1.5NPKM处理最高, 为9.3~10.0 g·kg⁻¹, NP和NPK处理为7.3~7.7 g·kg⁻¹, 在CK和PK处理为

6.6~6.7 g·kg⁻¹。土壤铵态氮含量在各处理之间无显著差异, 硝态氮含量和固定态铵含量在MNPk、NPK和CK处理下依次递减。土壤有效磷含量在1.5NPKM、PK、MNPk处理最高, 为43.4~69.8 mg·kg⁻¹, NPK和NP处理次之, 为25.4~27.3 mg·kg⁻¹, CK处理含量最低, 为2.6 mg·kg⁻¹。土壤速效钾含量在不同处理间呈明显梯度, 与CK处理相比, 速效钾含量在1.5MNPk、PK、MNPk和NPK处理下增加了4.4%~67.0%, 而在NP处理下降低了27.9%。

张水清等^[21]和魏猛^[22]的研究表明, 潮土上1.5MNPk处理肥力最高, MNPk处理为中等偏上肥力, NPK和NP处理为中等偏下肥力, PK处理肥力较低, CK处理肥力最低。土壤有机碳、全氮含量是土壤肥力的重要构成因素^[23], 本研究中长期不同施肥处理下土壤有机碳和全氮含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 呈明显的肥力梯度, 因此, 本试验根据土壤养分含量将CK和PK定义为低肥力土壤 (L)、NP和NPK为中肥力土壤 (M)、MNPk和1.5MNPk为高肥力土壤 (H)。

2.2 不同肥力梯度土壤的微生物生物量碳和氮

由表2可以看出, 潮土微生物生物量碳、氮 (MBC、MBN) 在不同肥力梯度下差异显著 ($P < 0.05$)。除NP处理外, 不同肥力土壤MBC和MBN均呈现出高肥力土壤>中肥力土壤>低肥力土壤的规律。其中, MBC在MNPk处理下为NPK处理下的1.1倍、CK处理下的1.5倍; MBN在MNPk处理下为NPK处理下的1.2倍、CK处理下的2.6倍。

土壤微生物量碳氮比 (MBC/MBN) 可以反映微生物群落结构信息, 其显著变化预示着土壤微生物群落结构可以直接影响土壤微生物生物量的高低^[24], 细菌的MBC/MBN一般在5左右, 真菌的MBC/MBN在6左右, 放线菌的MBC/MBN在10左右, 表2中NPK、MNPk、1.5MNPk处理的MBC/MBN分别为4.6、4.7、4.6, 说明其土壤微生物群落可能以细菌为主。MBN/TN的值在一定程度上反映了土壤中氮素的生物有效性, 由表3可知, 从低肥力到高肥力, 其表现为升高趋势, 表明提高土壤肥力增加了氮素的生物有效性。

表1 不同施肥处理土壤的基本理化性状

Table 1 Basic properties of the test soil relative to fertility

施肥处理 Treatment	土壤肥力 Soil fertility	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	有机碳 Organic C /(g·kg ⁻¹)	pH	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)
CK	L	0.62 ± 0.01e	6.55 ± 0.44c	8.35 ± 0.10ab	2.06 ± 0.30a
PK		0.68 ± 0.01d	6.70 ± 0.25c	8.41 ± 0.12a	2.00 ± 0.11a
NP	M	0.77 ± 0.01c	7.30 ± 0.20bc	8.18 ± 0.02cd	1.99 ± 0.04a
NPK		0.77 ± 0.01c	7.70 ± 0.83b	8.25 ± 0.01bc	1.93 ± 0.12a
MNPK	H	0.97 ± 0.01b	9.29 ± 0.64a	8.08 ± 0.03d	2.21 ± 0.18a
1.5MNPK		1.09 ± 0.00a	9.96 ± 0.12a	8.09 ± 0.01d	1.97 ± 0.09a

施肥处理 Treatment	土壤肥力 Soil fertility	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N /(mg·kg ⁻¹)	固定态铵 Fixed ammonium /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	有效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)
CK	L	7.13 ± 0.18b	151.7 ± 0.49c	2.6 ± 0.05d	114.5 ± 2.16e
PK		5.81 ± 0.28c	160.0 ± 0.68b	45.6 ± 1.73b	156.8 ± 1.25b
NP	M	12.93 ± 0.06a	157.1 ± 1.23b	25.4 ± 0.90c	82.5 ± 2.16f
NPK		7.30 ± 0.04b	160.2 ± 0.78b	27.3 ± 0.98c	119.5 ± 2.16d
MNPK	H	12.52 ± 0.19a	172.6 ± 0.42a	43.4 ± 0.94b	147.2 ± 2.62c
1.5MNPK		12.87 ± 0.57a	172.0 ± 3.66a	69.8 ± 4.71a	191.2 ± 2.49a

注：1) L, 低肥力; M, 中肥力; H, 高肥力。2) 同列数据后字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同 Note: 1) L: Low fertility; M: Moderate fertility; H: High fertility. 2) Different letters in the same column mean significant difference between treatments at 0.05 level. The same below

表2 不同肥力土壤的微生物生物量碳、氮

Table 2 Microbial biomass carbon (MBC) and microbial biomass nitrogen (MBN) in the soil relative to fertility

土壤肥力 Soil fertility	施肥处理 Treatment	微生物生物量碳 MBC/(mg·kg ⁻¹)	微生物生物量氮 MBN/(mg·kg ⁻¹)	MBC/MBN	MBN/TN/%
L	CK	213.8 ± 2.0f	30.0 ± 1.6d	7.14 ± 0.36ab	4.85 ± 0.28d
	PK	245.3 ± 9.2e	39.3 ± 0.9c	6.68 ± 0.30b	5.39 ± 0.15c
M	NP	267.7 ± 6.5d	36.2 ± 0.7c	7.41 ± 0.31a	4.70 ± 0.11d
	NPK	289.3 ± 3.3c	62.9 ± 1.2b	4.60 ± 0.14c	8.17 ± 0.15a
H	MNPK	322.9 ± 1.8b	78.0 ± 2.7a	4.74 ± 0.23c	8.05 ± 0.26a
	1.5MNPK	346.7 ± 4.1a	76.0 ± 2.7a	4.56 ± 0.11c	6.98 ± 0.22b

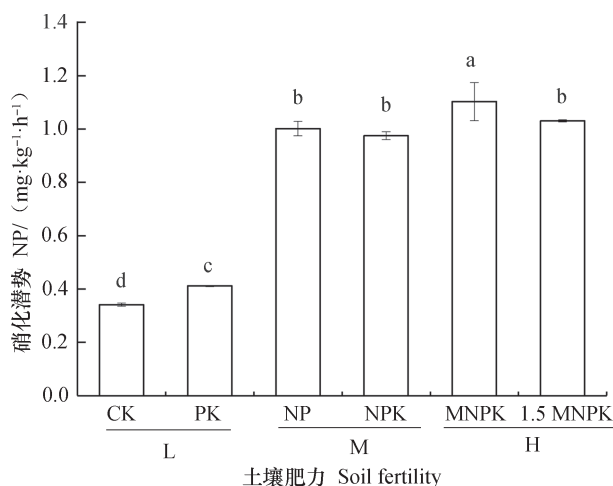
2.3 不同肥力梯度土壤的硝化潜势

硝化潜势在高肥力土壤最高, 为 $1.0 \sim 1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 其次为中肥力土壤, 为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 低肥力土壤最低, 为 $0.3 \sim 0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (图1)。其中, 高肥力土壤中MNPK处理硝化潜势显著高于其他处理, 为CK处理的3.2倍, 其次1.5MNPK处理, 为CK处理的3.0倍; 中肥力土壤硝化潜势显著高于低肥力, 为低肥力土壤的2.4倍~2.9倍。可见, 土壤硝化潜势在长期不同施肥处理形成的土壤肥力梯度之间有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.4 土壤硝化潜势的主要影响因素

对土壤NP和其他氮素相关指标的相关分析 (表3) 可知, NP与TN、SOC、MBC、MBN、FA和NO₃⁻-N含量均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$); 与pH呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$); 与NH₄⁺-N、AP、AK含量无显著相关关系。

为了解不同肥力土壤上, 土壤理化性质与硝化潜势之间的关系, 以土壤pH (x_1)、全氮含量 (x_2)、有机碳含量 (x_3)、硝态氮含量 (x_4)、铵态氮含量 (x_5)、固定态铵含量 (x_6)、微生物生物量碳 (x_7) 和微生物生物量氮 (x_8) 为自



注：不同字母表示处理间有显著差异 ($P < 0.05$) Note: Different letters above the bars mean significant difference between treatments at 0.05 level

图1 不同肥力土壤的硝化潜势

Fig. 1 Soil nitrification potential (NP) in fluvo-aquic soil relative to soil fertility

变量，以土壤硝化潜势 (y) 为因变量进行逐步回归分析，得到最优方程为： $y = -0.555 + 0.01 x_7 + 0.087 x_4 - 3.264 x_2 + 0.009 x_8$ ， ($P < 0.05$)。从该方程可知，MBC、 NO_3^- -N、TN和MBN是土壤NP的主要影响因子。

2.5 土壤硝化潜势的直接和间接影响因素

为进一步揭示土壤硝化潜势与其主要因素之间的关系，对土壤硝化潜势的4个主要影响因子进行了路径分析。从表4可知，MBC、 NO_3^- -N、TN和MBN与NP之间的总效应均为显著正效应。其中MBC、

NO_3^- -N和MBN与NP之间为直接效应，直接效应系数分别为1.397、0.855和0.539；而TN与NP之间为间接效应 ($r=2.479$) 大于直接效应 ($r=-1.707$)。

2.6 土壤硝化潜势主要影响因素对其变异的贡献率

为进一步了解硝化潜势的4个主要影响因素对其变异的贡献率，对潮土硝化潜势与其主要影响因素进行了VDA分析。由图2可知，微生物生物量碳氮 (MBC和MBN)、 NO_3^- -N和TN含量对硝化潜势变异的贡献率分别为24.3%、18.9%和13.7%。四

表3 土壤硝化势与土壤基本理化性质之间的相关系数

Table 3 Pearson correlation coefficients between soil nitrification potential and soil basic properties

	pH	TN	SOC	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	FA	MBC	MBN	AP	AK	NP
pH	1	-0.815**	-0.749**	-0.248	-0.842**	-0.684**	-0.814**	-0.686**	-0.471*	-0.216	-0.831**
TN		1	0.942**	0.110	0.763**	0.913**	0.965**	0.888**	0.809**	0.632**	0.772**
SOC			1	0.109	0.696**	0.874**	0.919**	0.870**	0.722**	0.609**	0.720**
NH_4^+ -N				1	0.198	0.210	0.035	0.140	-0.021	0.037	0.082
NO_3^- -N					1	0.586*	0.692**	0.500*	0.426	0.075	0.789**
FA						1	0.897**	0.896**	0.845**	0.698**	0.665**
MBC							1	0.927**	0.795**	0.572*	0.842**
MBN								1	0.693**	0.617**	0.746**
AP									1	0.820**	0.464
AK										1	0.067
NP											1

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$

表4 土壤硝化潜势主要影响因素的路径分析

Table 4 Path analysis of the main affecting factors of soil nitrification potential

响应变量 Response variable	驱动因素 Driver factors	总效应 Total effects		直接效应 Direct effects		间接效应 Indirect effects	
		<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
		NP	MBC	0.842	<0.001	1.397	0.01
NO ₃ ⁻ -N	0.789		<0.001	0.855	<0.001	-0.066	<0.001
TN	0.772		<0.001	-1.707	<0.001	2.479	<0.001
MBN	0.746		<0.001	0.539	0.36	0.207	<0.001

注：*r*，路径相关性，是基于相关性矩阵分析计算得出的标准化相关性 Note: *r*, Path coefficients corresponds to the standardized correlativity calculated based on the analysis using correlation matrices

个主效因子的交互作用对硝化潜势变异的贡献率达52.8%，各变量及其交互作用对硝化潜势变异的总贡献率达92.9%。

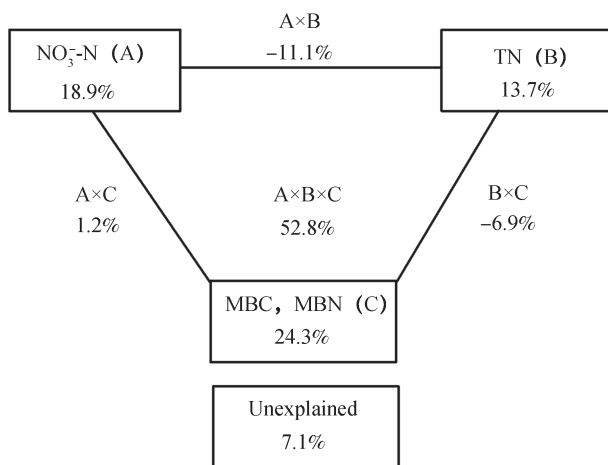


图2 土壤硝化潜势主要影响因素的VDA分析图

Fig. 2 VDA analysis diagram of main affecting factors of soil nitrification potential (NP)

3 讨论

3.1 不同肥力潮土全氮与硝化潜势

有研究表明无论是单施化肥还是有机无机肥配施均能提高土壤全氮含量^[25]，在本研究中长期不同施肥处理下土壤全氮含量呈显著差异 ($P<0.05$)，1.5MNPk和MNPk处理下最高，NPK和NP处理次之，PK和CK处理下最低，土壤全氮含量是土壤肥力的一个重要指标，根据各施肥处理的养分含量将其分为了三种肥力梯度。硝化作用是氮素(N)内循环的重要过程之一，与土壤N素的矿化-生物固持、N素肥力的供应紧密联系^[26-27]。

本研究结果显示，土壤硝化潜势在肥力梯度之间有显著差异 ($P<0.05$)，呈高肥力土壤>中肥力土壤>低肥力土壤的规律，说明肥力越高硝化潜势越强。本研究中，土壤硝化潜势与其主要影响因素的VDA分析结果显示4个主效因子对硝化潜势变异的贡献率分别为24.3%、18.9%和13.7%，而其交互作用对硝化潜势变异的贡献率达52.8%，各变量及其交互作用对硝化潜势变异的总贡献率达92.9%，并且4个主效因子相互之间存在极显著相关关系 ($P<0.01$)，这说明土壤硝化潜势的差异主要是微生物生物量碳氮、全氮和硝态氮协同作用的结果。而有研究表明，土壤pH是影响红壤各层次土壤硝化潜势的主要因素，与硝化潜势呈显著正相关^[4,8]，这可能是由于南方红壤pH较低，且长期不同施肥后酸度差异较大，在一定范围内土壤pH的升高有利于促进硝化作用。而本研究中潮土呈弱碱性，各处理之间pH差异较小 (8.1~8.4)，因此pH非硝化作用的限制因素。潮土上，土壤全氮是硝化潜势的主要影响因素之一，且全氮对土壤硝化潜势变异性的解释率可达13.7% (图2)，此外，路径分析结果显示，全氮对硝化潜势的影响为间接效应 (表4, $r=2.479$) 大于直接效应 ($r=-1.707$)，而全氮与微生物生物量碳、微生物生物量氮存在极显著相关关系 ($P<0.01$)，相关系数分别达0.965、0.888 (表3)，说明全氮可能主要是通过影响微生物生物量来影响硝化潜势的。总体而言，土壤全氮影响硝化潜势的原因可能有：(1) 施肥或者高量施肥后，全氮含量增加，硝化作用增强，是氨氧化菌基因表达增强的结果。有研究表明^[28]，氨氧化细菌 (Ammonia oxidizing bacteria, AOB) 数量与土壤全氮含量呈显著正相

关关系, Ai等^[12] 研究发现氮肥明显增加AOB丰度和土壤硝化潜势, 有机肥则增加氨氧化古菌 (*Ammonia oxidizing archaea*, AOA) 的丰度。

(2)因为土壤氮素矿化过程受土壤全氮和有机质含量水平的影响^[29-30], 土壤肥力的提高导致土壤氮素矿化作用增强^[31], 从而使土壤中硝化作用底物 NH_4^+ 浓度增加, 硝化作用增强。

3.2 不同肥力潮土微生物量碳、氮与硝化潜势

土壤微生物量是植物营养物质的源和库, 并积极参与养分循环, 是土壤养分的活性部分, 其中土壤微生物生物量碳和氮是土壤碳氮库中最为活跃的部分, 是土壤生物学评价的重要指标之一^[32]。本研究结果显示MBC和MBN在不同施肥处理间存在显著差异 ($P<0.05$), 并且均呈现出高肥力土壤>中肥力土壤<低肥力土壤的规律, 这可能是因为长期施用化肥改善了土壤团粒结构和养分状况等, 植物生长旺盛从而促进根系分泌物的释放, 还能增加根系残茬的还田量, 进而创造了有利于土壤微生物生存生长的环境, 根际土壤微生物的活性增强。此外, Jackson等^[33] 研究结果也表明, 有机肥与化肥配合施用很大程度上提高了土壤微生物的活性, 土壤有机碳源得到补充的同时也提高了土壤的有效养分和保水能力, 所以有机无机肥配施的土壤微生物生物量碳氮含量较高, 与此同时, 有机肥中本身含有大量微生物, 这也可能是有机无机肥配施处理下土壤微生物量增加的原因之一。与低肥力土壤相比, 长期施用含氮化肥形成的中肥力土壤中硝化潜势显著提高, 土壤微生物生物量碳、氮均与硝化潜势呈显著正相关关系 ($P<0.05$), 路径分析结果也表明微生物生物量碳是影响土壤硝化潜势最直接的效应因子, 微生物生物量碳、氮对硝化潜势变异性的解释率可达24.3%。这可能是因为如上所述, 化学氮肥的施入不仅可以直接为硝化作用提供底物铵态氮, 而且施氮还可激发诱导土壤氨氧化菌的活性和数量。Chu等^[11] 研究表明, NPK处理下氨氧化细菌的群落多样性显著高于CK和PK处理下, 杨亚东等^[28] 也发现, 在对华北潮土上, 增施化学氮肥可使AOB数量提高0.64倍~1.99倍, 对总细菌和AOA数量的影响不显著。推测土壤微生物量对硝化潜势的贡献主要来源于氨氧化菌对硝化潜势的影响。

有研究表明, 无论是单施有机肥还是有机-无

机配施, 均能有效地培肥地力和提高土壤固氮能力并提高作物产量^[34-35]。本研究中, 除1.5 M NPK处理之外, 长期有机无机肥配合施用形成的高肥力土壤中硝化潜势显著高于中肥力土壤的硝化潜势。长期施用有机肥刺激土壤硝化作用的机制较为复杂, He等^[36] 研究发现有机-无机肥配施不仅可以缓冲土壤pH变化, 还能为AOB和AOA提供基质、养分及适宜的生存环境, 从而促进其生长繁殖, 而且有机肥在分解矿化的过程中可以产生大量铵态氮, 刺激硝化作用的发生。此外, 研究表明有机肥处理土壤的AOB硝化潜势和数量明显高于化学氮肥处理^[37]。Chu等^[11] 还指出, 向土壤中施加有机肥后硝化细菌种属发生了改变, 不施肥土壤中土壤硝化细菌主要是*Nitrosospira cluster 9*, 施用有机粪肥后硝化细菌的主要种属转变为*Nitrosospira cluster 3*, 其硝化能力显著高于前者, 这也可能是土壤硝化潜势升高的原因之一。

3.3 不同肥力潮土硝态氮 (NO_3^- -N) 与硝化潜势

土壤硝态氮 (NO_3^- -N) 是旱地作物吸收的主要氮素形态, 过量施氮引起土壤中硝态氮的大量累积, 调控土壤中硝态氮含量是降低氮损失和提高氮素利用率的关键^[38]。本试验点河南郑州距离黄河较近, 地下水位较浅, 硝态氮在土壤中随水向下淋溶, 对浅层地下水的环境不利^[39-40]。在本研究中, 长期不同施肥处理下土壤中 NO_3^- -N含量呈显著差异 ($P<0.05$), 肥力较高的土壤中硝化潜势较高, NO_3^- -N与硝化潜势之间存在显著正相关关系 ($P<0.05$), 硝化作用增强造成高肥力土壤中 NO_3^- -N含量也高于低肥力土壤。可见, 长期施肥可提高土壤氮素水平, 一方面可以给作物供给更多硝态氮, 而另一方面却易造成硝态氮在土壤中的累积, 引发氮素向深层土壤迁移从而增加淋溶风险^[41]。因此, 对于长期有机无机配施的高肥力土壤, 应当控制有机肥施用量、合理灌溉, 对土壤进行适时深耕以增加土壤通气条件, 控制硝态氮的产生和累积, 从而减少硝态氮的淋溶和反硝化损失。

4 结 论

在长期不同施肥处理下, 该地区土壤养分含量发生了很大的变化, 有机无机肥配施有利于土壤养分的积累和土壤肥力的提高。长期不同施肥处理下

不同肥力土壤硝化潜势存在显著差异 ($P < 0.05$), 呈现高肥力土壤大于中肥力土壤大于低肥力土壤的规律, 土壤硝化潜势的差异主要是微生物生物量碳氮、全氮和硝态氮协同作用的结果, 三个因素对硝化潜势变异性的解释率分别为24.3%、13.7%和18.9%, 三者之间的交互作用可达52.8%, 各变量及其交互作用对硝化潜势变异的总贡献率达92.9%, 这也说明氮素形态之间的转化过程是影响硝化潜势的主要因素, 值得进一步研究。该地区有机无机肥配施有利于农田土壤肥力的提高, 但是高肥力土壤上硝化作用较强, 铵态氮肥很容易被氧化为硝态氮, 通过淋洗和反硝化途径损失的风险较高, 在农业管理当中应通过改善水肥条件来调控其土壤硝化强度, 进而达到构建氮素养分库和减少氮素损失的目的。

参考文献

- [1] Dane F, Zhang X, Rhodes B. Molecular markers in watermelon. Research Report, 1996, 28 (5) : 22—28
- [2] 秦子娴, 张宇亭, 周志峰, 等. 长期施肥对中性紫色水稻土氮素矿化和硝化作用的影响. 中国农业科学, 2013, 46 (16) : 3392—3400
Qin Z X, Zhang Y T, Zhou Z F, et al. Characteristics of mineralization and nitrification in neutral purple paddy soil from a long-term fertilization experiment (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46 (16) : 3392—3400
- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erismann J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. Science, 2008, 320 (5878) : 889—892
- [4] 范晓辉, 朱兆良. 我国几种农田土壤硝化势的研究. 土壤通报, 2002, 33 (2) : 124—125
Fan X H, Zhu Z L. Potential of nitrification in the three soil profiles of China (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33 (2) : 124—125
- [5] Cruber N, Galloway J N. An earth-system perspective of the global nitrogen cycle. Nature, 2008, 451 (7176) : 293—296
- [6] Prosser J I. Autotrophic nitrification in bacteria. Advances in Microbial Physiology, 1989, 30 (1) : 125—181
- [7] 贺纪正, 张丽梅. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展. 生态学报, 2009, 29 (1) : 406—415
He J Z, Zhang L M. Advances in ammonia-oxidizing microorganisms and global nitrogen cycle (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (1) : 406—415
- [8] 张苗苗, 王伯仁, 李冬初, 等. 长期施加氮肥及氧化钙调节对酸性土壤硝化作用及氨氧化微生物的影响. 生态学报, 2015, 35 (19) : 6362—6370
Zhang M M, Wang B R, Li D C, et al. Effects of long-term N fertilizers application and liming on nitrification and ammonia oxidizers in acidic soils (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (19) : 6362—6370
- [9] 贺纪正, 张丽梅. 土壤氮素转化的关键微生物过程及机制. 微生物学通报, 2013, 40 (1) : 98—108
He J Z, Zhang L M. Key processes and microbial mechanisms of soil nitrogen transformation (In Chinese). Microbiology, 2013, 40 (1) : 98—108
- [10] 刘义, 陈劲松, 尹华军, 等. 川西亚高山针叶林土壤硝化作用及其影响因素. 应用与环境生物学报, 2006, 12 (4) : 500—505
Liu Y, Chen J S, Yin H J, et al. Nitrification and impact factors of subalpine coniferous forest soil in western Sichuan, China (In Chinese). Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2006, 12 (4) : 500—505
- [11] Chu H Y, Fjii T, Morimoto S, et al. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73 (2) : 485—491
- [12] Ai C, Liang G Q, Sun J W, et al. Different roles of rhizosphere effect and long-term fertilization in the activity and community structure of ammonia-oxidizers in a calcareous fluvo-aquic soil. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57 (3) : 30—42
- [13] Verchot L V, Groffman P M, Frank D A. Landscape versus ungulate control of gross mineralization and gross nitrification in semi-arid grasslands of Yellowstone National Park. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34 (11) : 1691—1699
- [14] Said-Pullicino D, Cucu M A, Sodano M, et al. Nitrogen immobilization in paddy soils as affected by redox conditions and rice straw incorporation. Geoderma, 2014, 228/229 (1) : 44—53
- [15] 李平, 郎漫, 李倩文, 等. 不同施肥处理对黑土硝化作用和矿化作用的影响. 农业环境科学学报, 2015, 34 (7) : 1326—1332
Li P, Lang M, Li Q W, et al. Effects of different fertilization on nitrification and mineralization in black

- soil (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (7): 1326—1332
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2008
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2008
- [17] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006: 71—74
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Soil microbial biomass measurement method and its application (In Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2006: 71—74
- [18] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化. *生态学报*: 2009, 29 (10): 5500—5507
Yang K, Zhu J J, Zhang J X, et al. Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (10): 5500—5507
- [19] Silva J A, Bremner J M. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 5. Fixed ammonium. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1966, 30 (5): 587—594
- [20] Kurola J, Salkinoja-Salonen M, Aarnio T, et al. Acitivity, diversity and population size of ammonia-oxidising bacteria in oil-contaminated land farming soil. *FEMS Microbiology Letters*, 2005, 250 (1): 33—38
- [21] 张水清, 黄绍敏, 郭斗斗. 主成分分析在潮土土壤肥力评价中的应用. *河南农业科学*, 2011, 40 (4): 82—86
Zhang S Q, Huang S M, Guo D D. Evaluation of fluvo-aquic soil fertility quality with the method of principal component analyses (In Chinese). *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40 (4): 82—86
- [22] 魏猛. 潮土有机碳库及肥力特性对长期施肥的响应. 山东泰安: 山东农业大学, 2017
Wei M. Response of soil organic carbon pools and fertility characteristics to long-term fertilization in fluvo-aquic soil (In Chinese). Tai'an, Shandong: Shandong Agricultural University, 2017
- [23] Walker S M, Desanker P V. The impact of land use on soil carbon in Miombo Woodlands of Malawi. *Forest Ecology and Management*, 2004, 203 (1/3): 345—360
- [24] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: Effects of management changes. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27 (7): 969—975
- [25] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响. *土壤*, 2011, 43 (3): 336—342
Gong W, Yan X Y, Wang J Y. Effect of long-term fertilization on soil fertility (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (3): 336—342
- [26] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992
Zhu Z L, Wen Q X. Nitrogen in soils of China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1992
- [27] 李振高, 俞慎. 土壤硝化-反硝化作用研究进展. *土壤*, 1997, 29 (6): 281—286
Li Z G, Yu S. Research progress of nitrification and denitrification in soil (In Chinese). *Soils*, 1997, 29 (6): 281—286
- [28] 杨亚东, 张明才, 胡君蔚, 等. 施氮肥对华北平原土壤氨氧化细菌和古菌数量及群落结构的影响. *生态学报*, 2017, 37 (11): 3636—3646
Yang Y D, Zhang M C, Hu J W, et al. Effects of nitrogen application on abundance and community structure of ammonia oxidizing bacteria and archaea in a North China agricultural soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (11): 3636—3646
- [29] Islam M M, Iyamuremye F, Dick R P. Effects of organic residue amendment on mineralization of nitrogen in flooded rice soils under laboratory conditions. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1998, 29 (7/8): 971—981
- [30] 张恒, 王晶君, 石俊雄. 贵州省主要植烟黄壤氮素矿化潜力研究. *土壤学报*, 2013, 50 (2): 102—108
Zhang H, Wang J J, Shi J X. Nitrogen mineralization potential of yellow soil, a major tobacco planting soil in Guizhou (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (2): 102—108
- [31] 贾俊仙, 李忠佩, 车玉萍. 添加葡萄糖对不同肥力红壤水稻土氮素转化的影响. *中国农业科学*, 2010, 43 (8): 1617—1624
Jia J X, Li Z P, Che Y P. Effects of glucose addition on N transformations in paddy soils with a gradient of organic C content in subtropical China (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43 (8): 1617—1624
- [32] 胡婵娟, 刘国华, 吴雅琼. 土壤微生物生物量及多样性测定方法评述. *生态环境学报*, 2011, 20 (6/7): 1161—1167
Hu C J, Liu G H, Wu Y Q. A review of soil microbial biomass and diversity measurements (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20

- (6/7) : 1161—1167
- [33] Jackson L E, Calderon F J, Steenwerth K L, et al. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality. *Geoderma*, 2003, 114 (3) : 305—317
- [34] Nosengo N. Fertilized to death. *Nature*, 2003, 425 (6961) : 894—895
- [35] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响. *土壤学报*, 2014, 51 (2) : 314—324
- Gao J S, Huang J, Dong C H, et al. Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2) : 314—324
- [36] He J Z, Shen J P, Zhang L M, et al. Quantitative analyses of the abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea of a Chinese upland red soil under long-term fertilization practices. *Environment Microbiology*, 2007, 9 (9) : 2364—2374
- [37] Innerebner G, Knapp B, Vasara T, et al. Traceability of ammonia-oxidizing bacteria in compost-treated soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38 (5) : 1092—1100
- [38] Lee S J, Shin J S, Park K W, et al. Detection of genetic diversity using RAPD-PCR and sugar analysis in watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb.) Mansf.] germplasm. *Theoretical and Applied Genetics*, 1996, 92 (6) : 719—725
- [39] 黄绍敏, 张鸿程, 宝德俊, 等. 施肥对土壤硝态氮含量及分布的影响及合理施肥研究. *土壤与环境*, 2000, 9 (3) : 201—203
- Huang S M, Zhang H C, Bao D J, et al. Effects of applying fertilizer on content and distribution of NO_3^- -N in Chao soil and reasonable fertilizer application (In Chinese). *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9 (3) : 201—203
- [40] 李彦, 孙翠平, 井永苹, 等. 长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (7) : 1386—1394
- Li Y, Sun C P, Jing Y P, et al. Effects of long-term application of organic manure on soil fertility and nitrate-N transport in fluvo-aquic soil (In Chinese). *Journal of Agro-Environmental Science*, 2017, 36 (7) : 1386—1394
- [41] 刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 等. 长期配施有机肥对宁夏银黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响. *农业环境科学学报*, 2015, 34 (5) : 947—954
- Liu R L, Zhang A P, Li Y H, et al. Rice yield, nitrogen use efficiency (NUE) and nitrogen leaching losses as affected by long-term combined applications of manure and chemical fertilizers in Yellow River irrigated region of Ningxia, China (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34 (5) : 947—954

Nitrification Potential in Fluvo-aquic Soils Different in Fertility and Its Influencing Factors

WANG Pingping^{1,2} DUAN Yinghua² XU Minggang² ZHANG Shuiqing³ WANG Xiaoli^{1†}

(1 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(2 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China)

(3 Institute of Plant Nutrition and Environmental Resources Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract 【Objective】 soil nitrification potential (NP) and its main influencing factors in fluvo-aquic soils were studied based on a long-term fluvo-aquic soil fertilization experiment in Zhengzhou, Henan Province. 【Method】 Three tracts of farmlands of fluvo-aquic soil different in fertility level, i.e. High (applied with chemical fertility plus organic manure); Moderate (applied with balanced chemical fertilizers); and Low (applied with no fertilizer or no N fertilizer), were selected for soil sampling for analysis of total N (TN), ammonium nitrogen (NH_4^+ -N), nitrate nitrogen (NO_3^- -N), microbial biomass C (MBC) and microbial biomass N (MBN). And stepwise regression analysis, path analysis and variance

decomposition analysis (VDA) were performed to define main influencing factors in fluvo-aquic soil relative to soil fertility and quantify contribution of each factor to NP. 【Result】 Results show that NP in the fluvo-aquic soils varied in the range of $0.3 \sim 1.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$, and differed significantly between the soils. It was 7.9% higher in the soil high in fertility than in the soil moderate in fertility, and 162.5% higher in the soil moderate in fertility than in the soil low in fertility. Among all the soil fertility indices, MBC, NO_3^- -N, TN and MBN were found to be the main influencing factors of soil NP. MBC, NO_3^- -N and MBN affected NP directly, while TN did more indirectly. The contribution rate of microbial biomass (MBC and MBN), NO_3^- -N and TN to NP variation is worked out to be 24.3%, 18.9% and 13.7%, respectively. The contribution of four main influencing factors' interaction effects to the variation of soil nitrification potential has reached to 52.8%, while the total contribution of each variant and its interaction effects amounted to 92.9%. Therefore, it can be concluded that nitrification is much stronger in soils of high fertility than in soils low and moderate in fertility. 【Conclusion】 As result of strong nitrification, ammonium nitrogen is nitrified into nitrate nitrogen, which is readily accumulated and/or leached. It is, therefore, essential to regulate soil water and nutrient regimes to a proper level so as to reduce soil nitrification intensity and eventually achieve the target of constructing a nitrogen nutrient pool and reducing nitrogen loss in fluvo-aquic soils.

Key words Soil fertility; Microbial biomass; Total N; Nitrification

(责任编辑: 卢 萍)