

不同母质发育旱地土壤反硝化功能差异及其关键影响因素^①

邢肖毅^{1,2}, 盛 荣¹, 徐慧芳^{1,2}, 张文钊¹, 侯海军¹, 魏文学^{1*}

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所桃源农业生态试验站, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 农田土壤反硝化作用强度具有较高的空间异质性, 不同类型土壤反硝化作用活性的影响机制可能存在差异。本研究通过大规模样带调查, 系统采集了 3 种不同母质发育的旱地农田土壤, 对比分析了土壤反硝化能力的差异及其与土壤环境因子的关系。结果发现: 土壤反硝化势在 3 个类型土壤间有显著差异, 其中河流冲积物发育的潮土(AS)反硝化势(以单位时间单位质量土壤的 N_2O 释放量表示)显著高于其他两个类型土壤 22.22 ~ 579.09 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, 平均高达 213.34 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, 黑土(BS)的反硝化势平均为 136.38 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$, 略高于第四纪红色黏土发育的红壤(QRCS)(96.17 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$), 但两者无显著差异。相关性分析表明, 土壤 pH 与反硝化势极显著正相关, 说明在本研究所测定的土壤性质中, pH 可能是影响不同类型土壤反硝化势差异的关键因素, 另外, 有机质含量对 3 个类型土壤反硝化势也有一定影响。同一母质发育的土壤, 反硝化能力在不同采样地点也存在差异, 而且调控不同类型土壤内部反硝化势的关键土壤环境因素不尽相同, 其中对第四纪红色黏土发育的红壤、潮土和黑土影响最为显著的因素分别为土壤有机质、pH 和黏粒含量。

关键词: 旱地农田土壤; 反硝化势; 第四纪红色黏土发育红壤; 潮土; 黑土

中图分类号: X144 **文献标识码:** A

氮素是作物生长发育所需的重要营养元素, 合理施用氮肥是作物高产的关键措施。然而, 我国农田氮肥利用率较低, 施入农田的氮肥约有 40% ~ 50% 通过各种途径流失^[1]。反硝化作用是氮肥流失的重要途径, 不同土壤环境中可导致 0 ~ 25% 的氮肥损失^[2], 同时反硝化作用还是农田生态系统 N_2O 释放的主要途径^[3]。旱作农田作为主要的耕地类型, 氮肥施用量的剧增使其成为了农田生态系统 N_2O 的主要贡献者^[4], 其反硝化作用规律亟待研究。

目前国内外学者已经对旱地农田土壤反硝化作用开展了很多研究, 涉及不同土壤类型、不同作物类型、不同农业管理措施等^[5-11]。旱地农田土壤反硝化作用活性受多种因素的影响, 例如土壤 pH、质地、硝态氮含量、碳有效性、水分状况等^[8, 12-13], 并且, 这些因素对反硝化作用的影响方式和程度会因土壤类型的不同而表现出不同的规律。Lan 等^[14]在湖北的研究发现 pH 是影响土壤反硝化作用的最重要因

素, 而 Xu 和 Cai^[10]却发现 pH 并不是影响我国亚热带区红壤反硝化能力的关键因素。丁洪等^[15]在我国华北平原的研究则表明土壤反硝化作用与土壤质地有关。可见不同类型土壤反硝化作用的强度可能有其特别的影响机制。目前对于土壤反硝化作用的研究主要开展于较小的空间尺度内, 研究方法存在差异, 研究结果缺乏可比性, 对于揭示不同类型土壤反硝化作用特征尚显不足。不同类型土壤的对比分析对阐明反硝化作用变异以及反硝化与环境因素的关系具有重要意义。

采用统一的方法对大尺度样品进行分析, 是研究土壤反硝化作用差异的重要手段。本试验系统收集了 3 种不同母质发育的旱地农田土壤样品, 对比分析了土壤反硝化势和理化性质, 以期阐明我国不同类型旱地土壤反硝化作用的差异, 探明土壤反硝化作用的主要影响因素, 对于针对性地制定措施减少农业氮肥通过反硝化作用的损失和保护环境提

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB15020200)、国家自然科学基金项目(41330856, 41501277, 41401295)和湖南省自然科学基金项目(2016JJ3133)资助。

* 通讯作者(wenxuewei@isa.ac.cn)

作者简介: 邢肖毅(1988—), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 主要研究方向为土壤微生物分子生态学。E-mail: xingxiaoyi101@163.com

供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

从我国 5 个省份采集 3 种不同母质发育的旱地农田土壤,分别为第四纪红色黏土发育的红壤(QRCS)、河流冲积物发育的潮土(AS),以及东北地区的黑土(BS)。采样时间为 2014 年 7 月至 8 月,农作物类型

为收获季节的玉米。采用多点混合取样的方法采集 0~15 cm 耕作层土壤。样品采集后,一部分置于 4℃ 冰箱保存,用于分析土壤反硝化势、pH 和速效氮;一部分风干,用于有机质、全氮和土壤机械组成的分析。每个类型土壤样品数量为 30 个,采集自两个不同区域,每个区域 15 个采样点,共计 90 个样点。采样点地理分布及其气候条件信息如表 1 所示,随采样点从南到北的分布,年均温度和年均降雨量逐渐降低。

表 1 采样点地理分布及气候条件情况
Table 1 Geographic information and climate conditions of sampling sites

样地名称	土壤类型	经度	纬度	年均温度(℃)	年均降雨(mm)
祁阳(QY)	QRCS	111.83°~112.17°E	26.39°~26.84°N	18.2	1 276
桃源(TY)	QRCS	111.24°~111.54°E	28.92°~29.34°N	16.5	1 448
封丘(FQ)	AS	113.89°~114.63°E	34.43°~35.19°N	13.9	615
栾城(LC)	AS	114.63°~114.76°E	37.79°~37.92°N	12.8	474
公主岭(GZL)	BS	124.62°~125.05°E	43.38°~43.84°N	5.6	595
哈尔滨(HEB)	BS	126.25°~126.92°E	45.84°~46.33°N	3.5	533

1.2 土壤理化性质测定

土壤理化性质测定采用常规的分析方法。土壤 pH 采用水土比 1:1 浸提后,用 pH 计进行测定(FE-20, METTLER TOLEDO, China);土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮以 H₂SO₄ 消化后采用流动注射分析仪进行测定(FIAstar5000, FOSS, Sweden);土壤硝态氮和铵态氮采用 1 mol/L KCl 溶液按土液比 1:10 浸提后,使用 AA3 分光光度计测定(FIAstar5000, FOSS, Sweden)。土壤机械组成采用比重计法(GB 7845—87)测定,砂粒、粉粒、黏粒的粒径分别为 2~0.05、0.05~0.002、<0.002 mm,对比美国制土壤质地分类三角坐标图对土壤质地进行命名。

1.3 土壤反硝化势测定

土壤反硝化势(DEA,以单位时间单位质量土壤的 N₂O 释放量表示)的测定方法参照 Pell 等^[16]:称取 25 g 解冻鲜土于 125 ml 广口瓶中,25℃ 过夜;次日加入 25 ml 底物(1 mmol/L 葡萄糖和 1 mmol/L KNO₃),反复用氮气填充 3 次,橡胶塞密封,将瓶内 10% 的气体置换为乙炔,使瓶内气压保持在一个大气压;将广口瓶放入摇床培养 6 h(225 r/min, 25℃),每小时收集一次气体。采气方法为用 5 ml 注射器通过橡胶塞顶部的三通阀采集 2 ml 瓶内气体,充入 12 ml 真空气瓶中,再向气瓶中注入 28 ml 高纯氮气。采用气相色谱法检测 N₂O 浓度,所用仪器为安捷伦公司生产的 GC7890A(Agilent, USA)。土壤反硝化势的计算公式如下:

$$DEA = \frac{(C_6 - C_1) \times 44 \times 273 \times 125 \times (1 + \text{含水量})}{5 \times 22.4 \times (273 + 25) \times W}$$

式中: C₆ 和 C₁ 分别表示培养 1 h 和 6 h 时气体样品中 N₂O 的浓度(μmol/mol); W 表示鲜土质量(g)。

1.4 统计分析

本研究数据的统计分析均采用 SPSS 18.0 软件(表 1)。不同土壤类型土壤理化性质和反硝化势的差异性分析采用单向方差分析法(One Way ANOVA, LSD 检验);土壤理化性质与反硝化势的相关分析采用 Pearson 相关分析和偏相关分析,并对所有土壤样品和各个土壤类型分别进行分析。图形制作采用 Excel 2007 和 Origin Pro 8.0 软件。

2 结果

2.1 不同母质发育旱地农田土壤的理化性质

不同母质发育旱地农田土壤理化性质具有显著差异表 2。在土壤质地方面,第四纪红色黏土发育的红壤黏粒含量最高,变化范围在 281.52~487.13 g/kg,其中尤以祁阳红壤含量更高,平均值达 413.55 g/kg,桃源红壤平均为 322.58 g/kg。潮土和黑土土壤质地较为相似,均以粉粒含量最高,二者的粉粒含量分别在 276.21~687.92 g/kg 和 550.24~683.13 g/kg,土壤质地多属于粉(砂)壤土。第四纪红色黏土发育的红壤多属于强酸性和酸性土壤,pH 变化范围在 4.42~6.40,平均为 5.45;潮土为碱性土壤,pH 在 7.47~8.87,平均为 8.20;而黑土 pH 跨度较大,变化范围在 4.88~8.19,其中多数在 5~7,接近于中性。土壤养分方面,

表 2 土壤理化性质
Table 2 Soil physicochemical properties

理化性质	QRCS		AS		BS	
	QY	TY	FQ	LC	GZL	HEB
砂粒(g/kg)	89.33 ± 60.62 b	114.01 ± 67.22 b	246.15 ± 212.12 a	131.90 ± 35.52 b	130.02 ± 32.32 b	129.92 ± 26.02 b
粉粒(g/kg)	497.12 ± 44.80 c	563.41 ± 4.23 b	539.68 ± 155.62 b	632.31 ± 23.13 a	614.67 ± 40.31 a	619.73 ± 39.62 a
黏粒(g/kg)	413.55 ± 51.72 a	322.58 ± 39.91 b	214.17 ± 110.07 c	235.79 ± 21.82 c	255.31 ± 34.15 c	250.35 ± 37.61 c
pH	5.68 ± 0.82 c	5.23 ± 0.54 c	8.35 ± 0.57 a	8.05 ± 0.14 a	5.43 ± 0.49 c	6.21 ± 0.76 b
有机质(g/kg)	22.66 ± 4.90 c	22.52 ± 5.07 c	16.95 ± 6.09 d	22.32 ± 2.68 c	25.92 ± 4.19 b	33.45 ± 5.01 a
全氮(g/kg)	1.52 ± 0.26 a	1.38 ± 0.20 ab	1.04 ± 0.30 d	1.34 ± 0.14 bc	1.20 ± 0.16 c	1.46 ± 0.20 ab
C/N	8.65 ± 1.05 c	9.47 ± 0.56 bc	9.45 ± 1.31 bc	9.66 ± 0.89 b	12.53 ± 1.66 a	13.29 ± 0.76 a
NO ₃ ⁻ -N(mg/kg)	10.79 ± 5.44 b	9.98 ± 4.18 b	16.98 ± 11.65 b	33.60 ± 27.48 a	32.55 ± 22.07 a	33.66 ± 32.04 a
NH ₄ ⁺ -N(mg/kg)	3.23 ± 2.09 b	9.36 ± 9.89 a	1.67 ± 0.99 b	3.86 ± 4.20 b	8.12 ± 7.76 a	2.13 ± 1.61 b

注：表中数值为平均值 ± 标准差，*n*=15；同行不同字小写字母表示不同采样区土壤理化性质差异显著(*P*<0.05)，下同。

第四纪红色黏土发育的红壤具有最高的全氮含量，变化范围在 0.97 ~ 1.75 g/kg，同时具有最低的 C/N，平均值仅为 9.06；潮土养分含量相对于其他土壤略低，有机质、全氮和铵态氮整体低于其他两个土壤类型，其平均含量分别为 19.64 g/kg、1.19 g/kg 和 2.77 mg/kg；黑土养分含量最为丰富，有机质、硝态氮和铵态氮的含量均较高，变化范围分别在 18.01 ~ 45.82 g/kg、11.70 ~ 125.75 mg/kg、0.97 ~ 29.67 mg/kg，而 C/N 也最高，平均为 12.91。

2.2 不同母质发育旱地农田土壤的反硝化势

土壤反硝化势变异较大(图 1)，整体以潮土最高，变化范围为 22.22 ~ 579.09 μg/(kg·h)，平均为 213.34 μg/(kg·h)，其次是黑土，其反硝化势变化范围在 20.54 ~ 464.09 μg/(kg·h)，平均为 136.38 μg/(kg·h)，而红壤反硝化势最低，在 4.77 ~ 228.00 μg/(kg·h)，平均值仅为 96.17 μg/(kg·h)。尽管同一母质类型两个采样区域相隔数百公里，但其土壤反硝化势相近，无显著差异。

2.3 旱地农田土壤反硝化势与土壤理化性质的关系

为了明确影响不同类型土壤反硝化能力差异的关键影响因素，将所有样点土壤反硝化势与土壤性质进行 Pearson 相关分析，结果发现，土壤反硝化势与 pH 及有机质、硝态氮、砂粒、黏粒含量均显著相关，而土壤理化性质间也存在显著的相关关系，因此进一步对数据进行偏相关分析。结果表明(图 2)，土壤反硝化势与 pH、有机质含量极显著正相关(*P*<0.01)。可见，在本试验所测定的土壤性质中，土壤 pH 和有机质可能对土壤反硝化势在不同土壤间的变异有更重要的影响。

3 种不同类型土壤反硝化势具有一定差异，而在每个土壤类型内部反硝化势同样存在很大的变异，为了阐明土壤类型内部反硝化势变异的影响因素，对不

同类型土壤分别进行反硝化势与土壤性质的相关分析，结果表明不同类型土壤与反硝化势相关的土壤性质有所不同。据偏相关分析(图 3)，与红壤、潮土和黑土反硝化势显著相关的土壤性质分别为有机质含量、黏粒含量和 pH。

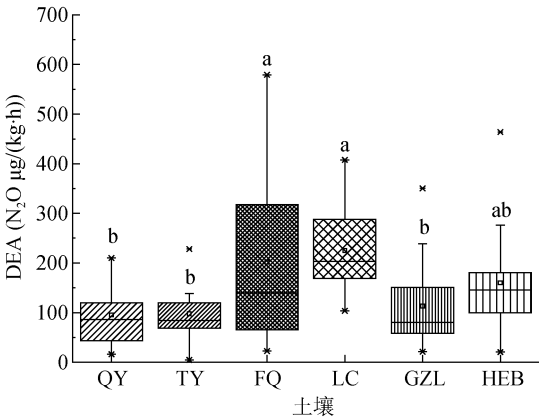


图 1 土壤反硝化势
Fig. 1 Soil denitrifying enzyme activities

3 讨论

亚热带第四纪红色黏土发育的红壤、华北平原潮土、东北黑土作为我国主要的农业生产用土，其土壤反硝化作用为很多研究者所关注^[10,11,15,17-20]。本试验以反硝化势表征 3 种不同类型土壤反硝化功能的差异，结果显示，土壤反硝化势变异较大，介于 4.77 ~ 579.09 μg/(kg·h)，整体以潮土最高，黑土次之，第四纪红色黏土发育的红壤最低。

土壤反硝化势在不同土壤间的变化规律与土壤 pH 的变化一致，本研究相关分析表明，pH 与 3 种类型土壤反硝化势的整体变异极显著正相关，可能是影响研究区土壤反硝化势的最关键因素。土壤 pH 和反

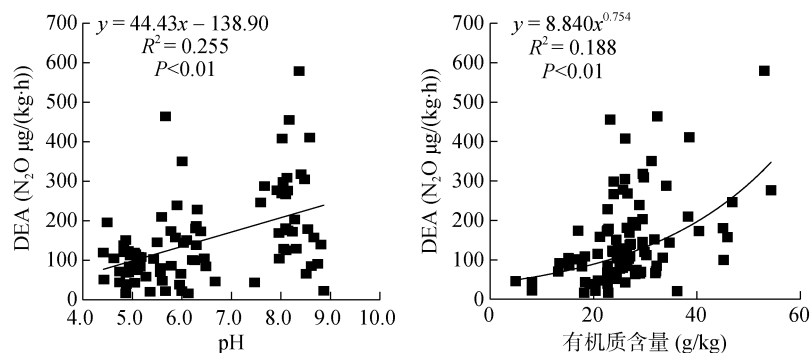


图 2 大尺度区域土壤反硝化势与理化性质的关系

Fig. 2 Correlation between soil DEA and physicochemical properties on large spatial scale

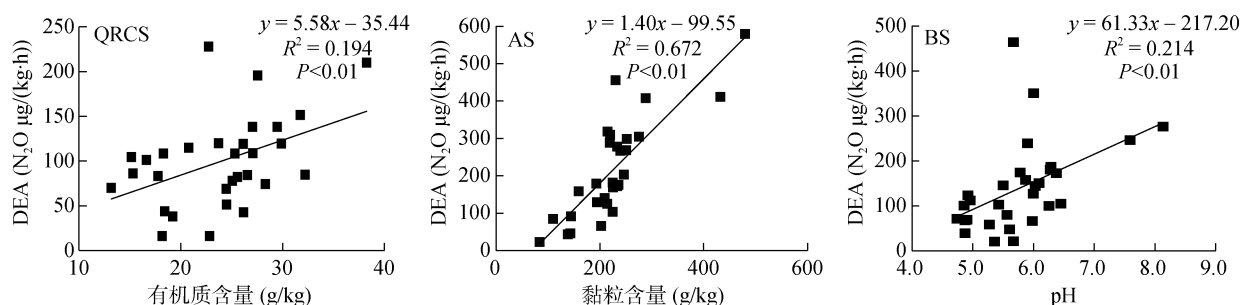


图 3 不同类型土壤反硝化势与理化性质的关系

Fig. 3 Correlation between soil DEA and physicochemical properties under different soil types

硝化作用的相关性已为很多研究所证明^[14,21-23]。包括土壤 pH 在内的土壤诸多性质,例如有机质含量、NO₃-N 含量、土壤质地、碳有效性、水分状况等都可能导致土壤反硝化速率的瞬间或持久性的变化^[10,14,22-25]。而在这些因素中,pH 可以直接或间接地影响其他性质,被认为是土壤的主变量^[23,26],是影响土壤反硝化作用的主要因素^[14]。土壤 pH 与反硝化势正相关,一方面是因为较低的 pH 会限制土壤反硝化微生物的生长,另一方面较低的 pH 可能导致反硝化微生物可利用的有机碳和矿质氮的有效性下降^[27]。本研究土壤 pH 的变化范围在 4.42 ~ 8.87,其中潮土的平均 pH 为 8.20,黑土为 5.82,第四纪红色黏土发育的红壤最低,平均仅为 5.45。较低的 pH 可能在不同程度上限制了黑土和第四纪红色黏土发育红壤的反硝化势。土壤 pH 除了在大的空间尺度上对反硝化势具有调控作用,同时还影响黑土内部反硝化势的变异。这可能是因为本试验所采集黑土 pH 具有较大变异性(pH 4.88 ~ 8.19),因此对其反硝化势的影响表现得更为重要。Yin 等^[20]同样发现 pH 对于东北黑土反硝化作用的重要影响。

除 pH 外,土壤有机质含量与反硝化势也呈现极显著正相关关系,是影响 3 种不同类型土壤反硝化势差异的另一个重要因素。很多研究发现有机质对土壤反硝化有促进作用^[10,28-29]。黑土反硝化势在 3 种类型

土壤中居中,一方面是因为黑土的 pH 居中,另一方面也可能是因为较高的有机质含量。有机质是影响土壤反硝化势空间变异的重要因素之一^[30-31]。反硝化作用需要消耗电子,并且是异养过程^[32-33]。有机质不仅可以提供电子,还可以作为反硝化微生物生长和活动的有机底物,并且有机物质的分解需要消耗氧气,促进土壤厌氧环境的形成,有利于反硝化作用的发生^[33]。有机质含量除了影响 3 种不同类型土壤反硝化势的差异,还对第四纪红色黏土发育红壤内部反硝化势的变化有重要影响。Xu 和 Cai^[10]在亚热带地区开展的试验表明,有机碳和氮的有效性对反硝化作用的影响至关重要。本试验中第四纪红色黏土发育的红壤相较于其他两个类型土壤,黏粒含量较高,而黏粒会通过配位体交换、氢键及疏水键等作用吸附有机碳,形成惰性矿物结合态有机碳^[34-35]。由此可推测,本试验中虽然红壤有机质含量与其他类型土壤相比居中等水平,但是有机质的活性可能较低,因此成为限制土壤反硝化势的又一因素。本研究发现第四纪红色黏土发育红壤反硝化势较低,平均值仅为 96.17 μg/(kg·h)。其他研究也发现,我国亚热带红壤反硝化作用强度普遍较低,反硝化作用并不是该区氮损失的主要途径^[10,27]。

土壤 pH 和有机质分别影响了黑土和第四纪红色

黏土发育红壤内部反硝化势的变异,而对于潮土反硝化势的变化,黏粒含量可能更为重要。相关分析表明,黏粒含量与潮土反硝化势正相关。丁洪等^[15]在我国华北平原的研究也发现,pH、有机质等因素不再成为限制土壤反硝化作用的主要因素,而质地黏重的土壤反硝化活性强。土壤组分在很大程度上决定了土壤的渗透系数、持水能力、孔隙度和气体含量^[34]。黏粒的存在有利于土壤保有更多的毛细管孔隙,利于水分的留存,而不利水分的排出,使土壤内部形成局部厌氧条件^[36],有利于反硝化作用的发挥。本研究中,潮土黏粒含量最低,质地较轻,从土壤质地而言不利于反硝化作用的进行,因此成为了限制潮土反硝化作用的重要因素。

4 结论

我国旱作农田土壤反硝化势变异较大,3种不同类型的土壤表现为华北平原潮土反硝化势最高,其次是东北地区的黑土,而第四纪红色黏土发育的红壤最低。在本试验所测定土壤性质中,土壤pH和有机质可能是导致不同类型土壤反硝化势空间差异的主要因素。不同类型土壤内部反硝化势也存在较大的变异,且对于不同类型土壤,影响其变化的因素不同。对第四纪红色黏土发育的红壤、潮土和黑土,最为重要的影响因素分别为有机质含量、黏粒含量和pH。因此,为减少氮肥损失以及N₂O温室气体排放,应考虑不同土壤特征,因土制宜地采取相应措施。

参考文献：

- [1] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921-933
- [2] Philippot L, Hallin S, Schlöter M. Ecology of denitrifying prokaryotes in agricultural soil[J]. *Advances in Agronomy*, 2007(96): 249-305
- [3] Conrad R. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO)[J]. *Microbiological Reviews*, 1996, 60(4): 609-640
- [4] Gao B, Ju X T, Zhang Q, et al. New estimates of direct N₂O emissions from Chinese croplands from 1980 to 2007 using localized emission factors[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(10): 3011-3024
- [5] 周汉昌, 张文钊, 刘毅, 等. 土壤团聚体 N₂O 释放与反硝化微生物丰度和组成的关系[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1144-1152
- [6] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47-50
- [7] 陈浩, 李博, 熊正琴. 减氮及硝化抑制剂对菜地氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 938-946
- [8] Lin S, Iqbal J, Hu R, et al. N₂O emissions from different land uses in mid-subtropical China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 136(1/2): 40-48
- [9] Zhang Y, Zhao W, Zhang J, et al. N₂O production pathways relate to land use type in acidic soils in subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(2): 306-314
- [10] Xu Y B, Cai Z C. Denitrification characteristics of subtropical soils in China affected by soil parent material and land use[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(6): 1293-1303
- [11] Cui P, Fan F, Yin C, et al. Urea- and nitrapyrin-affected N₂O emission is coupled mainly with ammonia oxidizing bacteria growth in microcosms of three typical Chinese arable soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 66: 214-221
- [12] Morales S E, Jha N, Saggar S. Biogeography and biophysicochemical traits link N₂O emissions, N₂O emission potential and microbial communities across New Zealand pasture soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 82: 87-98
- [13] 范晓晖, 朱兆良. 旱地土壤中的硝化-反硝化作用[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 385-391
- [14] Lan Y, Cui B, Han Z, et al. Spatial distribution and environmental determinants of denitrification enzyme activity in reed-dominated raised fields[J]. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(4): 438-450
- [15] 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 华北平原几种主要类型土壤的硝化及反硝化活性[J]. 农业环境科学学报, 2001, 20(6): 390-393
- [16] Pell M, Stenberg B, Stenstrom J, et al. Potential denitrification activity assay in soil-With or without chloramphenicol[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(3): 393-398
- [17] 续勇波, 蔡祖聪. 亚热带土壤亚铁与厌氧反硝化[J]. 土壤, 2015, 47(1): 63-67
- [18] Ding W, Cai Y, Cai Z, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373(2/3): 501-511
- [19] Li P, Lang M. Gross nitrogen transformations and related N₂O emissions in uncultivated and cultivated black soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(2): 197-206
- [20] Yin C, Fan F, Song A, et al. Denitrification potential under different fertilization regimes is closely coupled with changes in the denitrifying community in a black soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(13): 5719-5729
- [21] Wijler J, Delwiche C C. Investigations of the denitrifying process in soil [J]. *Plant and Soil*, 1954, 5(2): 155-169
- [22] Russenes A L, Korsath A, Bakken L R, et al. Spatial variation in soil pH controls off-season N₂O emission in an agricultural soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 99: 36-46

- [23] Simek M, Cooper J E. The influence of soil pH on denitrification: progress towards the understanding of this interaction over the last 50 years[J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(3): 345–354
- [24] Simek M, Cooper J E, Picek T, et al. Denitrification in arable soils in relation to their physico-chemical properties and fertilization practice[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(1): 101–110
- [25] Cao J, Lee J, Six J, et al. Changes in potential denitrification-derived N₂O emissions following conversion of grain to greenhouse vegetable cropping systems[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 68: 94–100
- [26] 邓小华, 张瑶, 田峰等. 湘西植烟土壤 pH 和主要养分特征及其相互关系[J]. *土壤*, 2017, 49(1): 49–56
- [27] 续勇波, Zhi H X, 蔡祖聪. 热带亚热带土壤氮素反硝化研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014(9): 1557–1566
- [28] Attard E, Recous S, Chabbi A, et al. Soil environmental conditions rather than denitrifier abundance and diversity drive potential denitrification after changes in land uses[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(5): 1975–1989
- [29] 范晓晖, 朱兆良. 农田土壤剖面反硝化活性及其影响因素的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(2): 97–104
- [30] Christensen S, Simkins S, Tiedje J M. Spatial variation in denitrification-dependency of activity centers on the soil environment[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(6): 1608–1613
- [31] Fujikawa J I, Hendry M J. Denitrification in clayed till[J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 127(1/2/3/4): 337–348
- [32] McLain J E T, Martens D A. N₂O production by heterotrophic N transformations in a semiarid soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 32(2): 253–263
- [33] Ahn Y H. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review[J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(8): 1709–1721
- [34] Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H, et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation[J]. *Plant and Soil*, 2005, 268(1/2): 319–328
- [35] 李忠佩, 刘明, 江春玉. 红壤典型区土壤有机质的分解、积累与分布特征研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 220–228
- [36] Bollmann A, Conrad R. Influence of O₂ availability on NO and N₂O release by nitrification and denitrification in soils[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(4): 387–396

Denitrification Characteristics of Dryland Soils Derived from Different Parent Materials

XING Xiaoyi^{1,2}, SHENG Rong¹, XU Huifang^{1,2}, ZHANG Wenzhao¹, HOU Haijun¹, WEI Wenxue^{1*}

(1 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Taoyuan Station of Agro-Ecology Research, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Denitrification actively takes place in dryland soils due to drastic increase of anthropogenic application of nitrogen fertilizer. Many studies have demonstrated that soil properties strongly influence the heterogeneity of denitrifying capacity in dryland soils, and the relationship between denitrification and soil properties of different soil types differentiate in some degree. However, most studies were restricted to small-scale spatial denitrifying activity and were difficult to uncover the variation of denitrifying capacity of different soils. Soil denitrifying enzyme activities (DEA) and physicochemical properties were studied over 90 sites in dryland soils derived from three different parent materials, including red soil derived from quaternary red clays (QRCS), alluvial soil derived from river deposits (AS), and black soil (BS). The results showed that DEAs were significantly different in the three tested soils. DEA in AS was ranged from N₂O 22.22 to 579.09 μg/(kg·h) with an average of N₂O 213.34 μg/(kg·h), significantly higher than those of other two soils. The average DEA in BS was N₂O 139.68 μg/(kg·h), higher but not significantly than that of QRCS with an average DEA of N₂O 98.53 μg/(kg·h). Correlation analysis based on all soil samples showed that DEA significantly positively correlated with pH, indicating that pH might be the key factor of DEA. Furthermore, soil organic matter (SOM) also influenced DEA. Soil DEAs and their influential factors were different in different sampling sites even with the same parent material. SOM, pH or clay content was the dominant factor for DEAs of QRCS, AS and BS, respectively. This study suggests that DEAs are different in different soil types, hence soil type should be considered when adopting measures to decrease nitrogen loss through denitrification.

Key words: Dryland soil; Denitrifying enzyme activity; Red soil derived from quaternary red clays; Alluvial soil; Black soil