

化肥配施不同有机物料对热带砖红壤氮素转化过程的影响

冷有锋^{1,2}, 王晓彤^{2,4}, 付亚军^{2,4}, 张琪^{2,4}, 范长华^{2,3*}, 陈森^{2,3},
李玮^{2,3}, 陈歆^{2,3}, 宁梓好^{2,3}, 朱四喜^{1*}

(1. 贵州民族大学生态环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所/海南省热带生态循环农业重点实验室/农业农村部热区农业绿色低碳重点实验室, 海南 海口 571101; 3. 海南儋州热带农业生态系统国家野外科学观测研究站, 海南 儋州 5717374; 4. 海南大学生态与环境学院, 海南 海口 570228)

摘要:【目的】探究化肥配施不同类型有机物料连续施用对热带砖红壤性质、氮素转化过程速率及相关土壤酶活性的影响, 以期为提高砖红壤生产力及发展农田氮素管理高效模式提供理论依据。【方法】基于田间原位试验, 采集了连续种植 6 年不同施肥管理的砖红壤土样, 测定单施化肥(N)、化肥配施秸秆(N+straw)和化肥配施羊粪(N+manure)处理的土壤理化性质、氮素转化速率和相关酶活性。【结果】化肥配施有机物料较单施化肥处理增加了土壤有机碳、土壤全氮及 pH 值, 增幅范围分别为 7.43%~40.28%, 28.57%~42.86% 和 1.60%~52.05%; 降低了土壤 C/N 值, 降幅范围为 1.44%~15.35%, 其中化肥配施羊粪影响较大。有机物料连续施用土壤氮素矿化速率、氨氧化潜力、净硝化速率和反硝化潜力分别增加了 3.00 倍, 11.48 倍, 0.28 倍和 4.07 倍。化肥配施有机物料显著增加了土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和 β -1,4-葡萄糖苷酶, 但显著降低了土壤亚硝酸氧化酶和多酚氧化酶活性, 其中化肥配施羊粪较化肥配施秸秆作用更强。氮素转化速率(除净硝化速率)与土壤有机碳、全氮和 pH 呈显著正相关, 与脲酶、亚硝酸还原酶、硝酸还原酶活性均呈显著正相关, 而与多酚氧化酶活性呈显著负相关。【结论】化肥配施有机物料能够改善砖红壤性状, 加速土壤氮素周转, 其中化肥配施羊粪较化肥配施秸秆效果更加明显, 因此化肥配施羊粪是改善热带砖红壤性状和提升氮素可利用性的有效措施。

关键词: 有机物料; 氮素转化速率; 土壤酶活性; 砖红壤

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)06-1429-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022081903

冷有锋, 王晓彤, 付亚军, 张琪, 范长华, 陈森, 李玮, 陈歆, 宁梓好, 朱四喜. 化肥配施不同有机物料对热带砖红壤氮素转化过程的影响[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1429-1438

LENG You-feng, WANG Xiao-tong, FU Ya-jun, ZHANG Qi, FAN Chang-hua, CHEN Miao, LI Wei, CHEN Xin, NING Zi-yu, ZHU Si-xi. Effects of Chemical Fertilizer Application Combined with of Different Organic Materials on Nitrogen Transformations in a Tropical Latosol[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1429-1438

【研究意义】砖红壤是我国热带地区重要的土壤类型, 受成土母质和气候环境因素影响总体呈现黏、酸、瘦的特征^[1-2]。为满足作物的生长需求, 大量的化肥被长期持续投入农田, 进而导致土壤功能退化和生产力下降^[3]。我国是传统农业大国, 农业生产中会产生大量秸秆、畜禽粪便等农业废弃物^[4], 由于其富含氮磷钾等元素因而是一个巨大的养分库^[5]。研究表明, 有机物料农田施用可以提升土壤肥力和促进作物增产^[6], 因而对农业绿色低碳发展具有十分重要的意义。因此, 探讨化肥配施不同类型有机

料连续配施对砖红壤的理化性质与养分转化的影响对提升热带农田土壤质量与优化养分管理具有重要的指导意义。【前人研究进展】化肥配施有机物料能够改善土壤结构、增加土壤养分含量和缓解土壤酸化, 从而提升土壤肥力和作物生产力^[7-8]。大量研究表明化肥配施有机物料能够降低土壤容重, 促进土壤大团聚体的形成^[9-10]。农田化肥配施有机物料能够增加土壤碳氮储量, 同时也能够增加硝态氮(NO_3^- -N)和碱解氮(AN)等速效养分含量^[7]。此外, 化肥配施羊粪连续施用后酸性菜地土壤中 pH 增

收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2023-01-03

基金项目: 海南省自然科学基金(421QN0915, 322QN364)、国家自然科学基金(42007098)、海南省重大科技专项资助(ZDKJ2021008)和中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金(1630042021010, 1630042022022)资助

作者简介: 冷有锋(1996-), 男, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 主要从事农田氮素循环研究。E-mail: lengyoufeng1996@126.com

*通讯作者: E-mail: fch19890110@126.com; E-mail: zhuxixi2011@163.com

加 1.74 个单位^[10]。化肥配施有机物料对土壤酶活性也产生显著的影响。尿素配施不同有机物料增加土壤硝酸还原酶 (NR)、亚硝酸还原酶 (NIR), 以及 N-乙酰-β-D 氨基葡萄糖苷酶活性^[11]。同时, 添加猪粪和沼渣显著增加砂质土壤细菌群落多样性, 提升参与硝化与反硝化过程的变形菌门 (Proteobacteria)、酸杆菌门 (Acidobacteria) 以及厚壁菌门 (Firmicutes) 丰度^[12]。土壤氨氧化微生物和反硝化细菌丰度随着水稻秸秆施用表现出增加的趋势, 而在玉米和小麦秸秆施用下无显著变化^[13]。因此推测, 化肥配施用有机物料引起的土壤理化性质、酶活性及微生物群落的变化会潜在影响土壤养分循环, 尤其是氮转化过程^[14]。目前, 有研究表明化肥配施有机物料添加会促进棕红壤氮素矿化与净硝化速率^[15], 但也有研究指出化肥配施有机物料的添加会降低黑土和海滨盐碱土的氮素矿化与反硝化速率^[16-17]。另外, 化肥配施粪肥后土壤易利用碳含量明显增加, 有利于微生物进行反硝化作用, 而化肥配施碳氮比较高的有机物会促进微生物对无机氮素的固定从而降低反硝化速率^[18]。因此, 化肥配施有机物料对土壤氮素转化的影响在很大程度上与有机物料种类、土壤类型及气候条件有关^[10]。热带地区土壤呈强酸性, 土壤硝化过程较弱, 高温导致土壤有机质快速分解, 由于土壤碳匮乏削弱了反硝化作用, 施用有机物料能够缓解土壤酸化和提供有机碳源从而潜在加速土壤氮转化过程。【本研究切入点】目前, 国内关于化肥配施有机物料对农田土壤氮素转化影响主要集中于暖温带和亚热带, 而对热带地区典型砖红壤的影响鲜有报道。此外, 化肥配施有机物料对土壤氮素转化多关注于氮素矿化和硝化过程, 而对反硝化过程研究不足, 且化肥配施不同类型有机物料对氮素转化速率及相关酶活性影响尚不明确, 土壤性质、酶活性和土壤氮素转化速率之间关系值得深入探讨。【拟解决的问题】基于野外长期定位试验, 探究化肥配施不同类型有机物料对土壤性质、氮素转化速率、土壤酶活性的影响, 明确化肥配施有机物料连续输入下热带砖红壤氮素转化规律及与土壤性质和酶活性的关系, 以期为农业废弃物资源化利用、热带农田土壤地力提升和养分高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于海南省文昌市中国热带农业科学院

试验基地 (110.46° E, 19.32° N), 该地区属于热带岛屿季风性气候, 年平均温度为 23.9 °C, 年平均降雨量 1886 mm。土壤由花岗岩发育而来, 为砖红壤。土壤质地为砂壤土 (粘粒 15.0%, 粉粒 8.6%, 砂粒 76.4%)。试验开始前表层土壤 (0~20 cm) 理化性质: 土壤有机碳 (SOC) 2.91 g kg⁻¹, 全氮 (TN) 0.15 g kg⁻¹, 全磷 (TP) 0.13 g kg⁻¹, 全钾 0.80 g kg⁻¹, pH 值 5.86, 容重 1.56 g cm⁻³, 电导率 (EC) 10.12 μS cm⁻¹, 阳离子交换量 (CEC) 为 2.05 cmol kg⁻¹^[10]。

1.2 试验设计

试验开始于 2015 年, 种植模式为辣椒—豆角轮作。本研究选自其中 3 个施肥处理: 单独施用化肥 (N)、化肥配施秸秆 (N + straw)、化肥配施羊粪 (N + manure)。试验小区 (6.2 m × 10 m) 采取随机分布原则布置, 每个处理设置三个重复。秸秆和羊粪均匀撒到蔬菜种植垄上, 然后与耕层土壤 (0~20 cm) 充分混匀。所用化肥为复合肥 (N : P₂O₅ : K₂O 为 15 : 15 : 15), 在辣椒生长季和豆角生长季施用量分别为 N 315 kg hm⁻²、P₂O₅ 315 kg hm⁻²、K₂O 315 kg hm⁻² 和 N 170 kg hm⁻²、P₂O₅ 170 kg hm⁻²、K₂O 170 kg hm⁻²。每季作物施三次肥, 分别于种植前基施以及在第一次和第二次采摘后进行追施, 施肥比例为 4 : 3 : 3。蔬菜生长期间所有种植垄上都覆盖黑色薄膜, 其他田间管理 (包括打药、除草和灌溉) 均参照当地农民习惯进行操作; 根据当地农民管理习惯, 每种作物生长季施用秸秆与羊粪的施用量分别为 1.8 t hm⁻² 和 3.0 t hm⁻², 相当于分别额外引入氮量为 16.0 kg hm⁻² 和 53.1 kg hm⁻²。秸秆与羊粪的化学性质如表 1 所示。

1.3 样品采集及测定

土壤样品于 2021 年豆角收获后采集, 采用五点采样法采样, 用土钻采集表层 0~20 mm 的土样, 装入聚乙烯密封袋中, 带回实验室, 挑去可见的动植物残体以及石块, 过 2 mm 筛混匀备用。各样品分装两份, 每份大约 1000 g, 一份于 4 °C 冷藏保存, 用于测定土壤酶活性, 另一份经过风干, 研磨, 过筛用于测定土壤理化性质。

土壤基本理化性质测定参照《土壤农化分析》^[19]: pH 在土水比为 1 : 2.5 悬液中测定, 电导率 (EC) 在土水比为 1 : 5 悬液中测定; 土壤有机碳 (SOC) 用重铬酸钾容量法—外加热法测定; 全氮 (TN) 用凯氏定氮法测定; 采用 2 mol L⁻¹ KCl 浸提土壤无机

表 1 秸秆和羊粪化学性质
Table 1 Chemical properties of straw and sheep manure

有机物料 Organic material	总有机碳 (g kg ⁻¹) Total organic carbon	全氮 (g kg ⁻¹) Total nitrogen	C/N	全磷 (g kg ⁻¹) Total phosphorus	全钾 (g kg ⁻¹) Total potassium
秸秆	428.22 ± 22.23	8.9 ± 0.15	49.2 ± 0.47	2.76 ± 0.45	13.25 ± 0.70
羊粪	175.8 ± 5.12	17.7 ± 0.18	10.0 ± 0.44	9.7 ± 0.62	8.00 ± 0.50

氮, 浸提液经过过滤后, 溶液中的 NH₄⁺-N 采用靛酚蓝比色法测定, NO₃⁻-N 采用双波长比色法测定; 阳离子交换量 (CEC) 采用乙酸铵交换法测定; TP 采用碱熔—钼锑抗分光光度法测定。田间持水量 (WHC) 根据 Verheerjen^[20] 所描述方法来测定。

净氮素矿化速率 (NNM) 和净硝化速率 (NNR) 根据 Ouyang^[21] 所描述的方法来测定。称取 25 g 风干土于 120 ml 血清瓶中, 调节含水至 60% WHC 于 25 °C 恒温培养 21 d, 培养期间每隔 5 d 采用称重法保持培养期间土样水分恒重。通过测定培养初始和结束的 NO₃⁻-N 含量计算土壤净矿化和净硝化速率, 净矿化速率、净硝化速率单位为 (mg kg⁻¹ d⁻¹)。

$$\text{土壤净矿化速率 (NNM)} = \frac{(\text{培养后无机氮} - \text{培养前无机氮})}{\text{培养时间}}$$

$$\text{土壤净硝化速率 (NNR)} = \frac{(\text{培养后硝氮} - \text{培养前硝氮})}{\text{培养时间}}$$

氨氧化潜力 (PAO) 通过摇浆法测定, 根据 Kong^[22] 的方法做出适当的调整, 称取过 2 mm 筛土样 5.0 g 于 150 ml 血清瓶中, 然后加入 20 ml 1 mM 硫酸铵溶液和 5 ml 50 mg L⁻¹ 氯酸钾溶液, 并加入 80 mg 碳酸钙, 于 25 °C 震荡 1 h 后分别吸取 2 ml 泥浆测定亚硝氮 (NO₂⁻-N) 浓度, 作为培养初始浓度, 然后继续摇 23 h 后吸取 2 ml 泥浆测定 NO₂⁻-N 浓度作为培养结束浓度。氨氧化潜力计算按照单位时间内 NO₂⁻-N 产生量计算, 氨氧化潜力 (PAO) 单位为 (mg kg⁻¹ h⁻¹)。

$$\text{土壤氨氧化潜力 (PAO)} = \frac{\text{培养后亚硝氮} - \text{培养前亚硝氮}}{\text{培养时间}}$$

反硝化潜力 (PDR) 采用乙炔抑制法来测定^[21]。首先将冷藏土样取出于室温复苏 12 h, 称取复苏土样 2.5 g 于 25 ml 血清瓶中, 加入 1 mmol 葡萄糖、1 mmol 硝酸钾和 1 g L⁻¹ 氯霉素, 并将血清瓶抽真空, 然后充入乙炔: 氮气体积比为 1:9 的混合气体, 在 25 °C 培养 4 h 采集气体测 N₂O 浓度, 气体样品使用

安捷伦气相色谱仪 (GC, Agilent 7890A, Agilent Technologies, Sanra Clara, CA, USA) 测定。N₂O 排放量计算^[23]:

$$F = \frac{dc}{dt} \frac{M}{V_m} V \frac{273}{273 + T} \frac{1}{m}$$

式中, F 代表 N₂O-N 的排放通量 (μg kg⁻¹ h⁻¹), $\frac{dc}{dt}$ 在单位时间内 N₂O 浓度的变化量 (mg L⁻¹ h⁻¹), M 表示 N₂O 的摩尔质量, 为 28 g mol⁻¹, V_m 表示标准状态下 N₂O 的摩尔体积, 为 22.4 L mol⁻¹, V 代表血清瓶内有效体积, 为 20 ml, T 为培养温度 25 °C, m 代表培养土样干基重量 (g)。

本试验采用微孔板荧光分光光度计测定土壤 β-1,4-葡萄糖苷酶 (BG)、多酚氧化酶 (PHO) 和脲酶 (UR) 活性。硝酸还原酶 (NIR) 和亚硝酸还原酶 (NIO) 活性分别采用 α-萘胺比色法和对氨基磺酸比色法^[24] 测定。

1.4 数据分析

分别使用 Excel 2019 和 Origin 2021 软件进行数据计算和绘图、利用 IBM SPSS Statistics 26 进行数据统计分析, 采用皮尔森相关分析构建土壤化学性质、酶活性与氮素转化速率的相关关系。采用单因素方差 (One-way ANOVA) 分析不同有机物料施用对土壤理化性质、酶活性和氮素转化的影响, 运用 LSD 多重比较检验其显著性 ($P < 0.05$), 数据结果以平均值 (Mean) ± 标准误差 (SD) 表示 ($n = 3$)。

2 结果与分析

2.1 不同处理菜地土壤性质

连续六年不同施肥管理模式显著改变土壤性质 (表 2)。与单施化肥相比, 化肥配施秸秆和化肥配施羊粪提升 SOC 和 TN 含量及 pH 值 ($P < 0.05$), 其中化肥配施羊粪的提升效果较化肥配施秸秆更为明显。化肥配施有机物料土壤 C/N 呈下降趋势, 其中化肥配施秸秆处理 C/N 较对照下降 15.4% ($P < 0.05$)。与单施化肥相比, 化肥配施羊粪显著提升土壤 CEC 和 EC, 而化肥配施秸秆无显著影响。化肥配施有机物料土壤无机氮总量增加 41.4% ~ 143.1%,

表 2 不同施肥处理下的土壤性质
Table 2 Soil chemical properties under different fertilization treatments

处理 Treatment	有机碳 Soil organic carbon (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	C/N	pH	阳离子交换量 Cation exchange capacity (cmol kg ⁻¹)	电导率 Electrical conductivity (μS cm ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate nitrogen (mg kg ⁻¹)
N	4.17 ± 0.07 c	0.35 ± 0.01 c	11.79 ± 0.54 a	4.38 ± 0.01 c	2.65 ± 0.04 b	16.24 ± 1.84 b	5.76 ± 0.12 b	5.56 ± 0.15 c
N + straw	4.48 ± 0.04 b	0.45 ± 0.01 b	9.98 ± 0.12 b	4.45 ± 0.01 b	2.67 ± 0.04 b	18.22 ± 0.30 b	6.67 ± 0.09 a	9.31 ± 0.09 b
N + manure	5.85 ± 0.12 a	0.50 ± 0.01 a	11.62 ± 0.21 a	6.66 ± 0.02 a	3.18 ± 0.10 a	67.01 ± 1.47 a	1.81 ± 0.08 c	25.66 ± 0.90 a

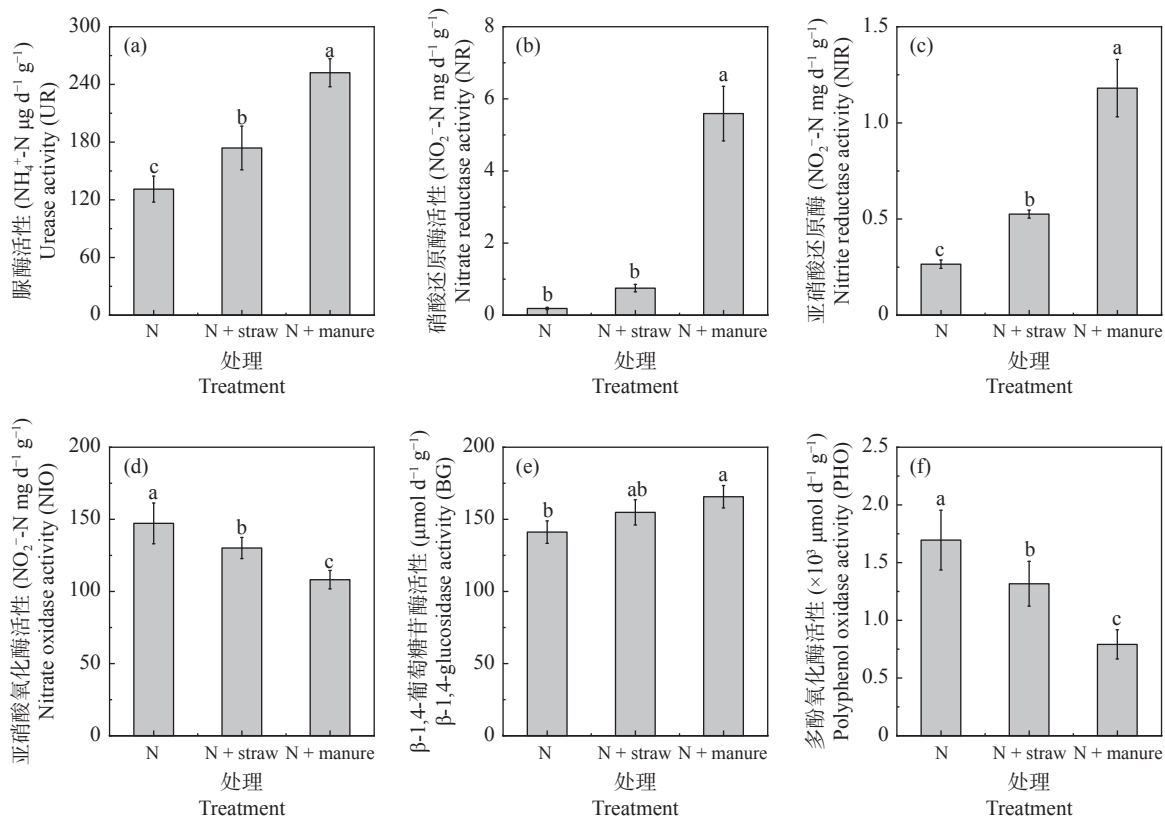
注:表中数值表示为平均值 ± 标准误差,不同的小写字母表示 $P < 0.05$ 水平显著; N: 单施化肥, N + straw: 化肥配施秸秆, N + manure: 氮肥配施羊粪。

其各形态氮素含量响应规律不同。与单施化肥相比,化肥配施秸秆土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著增加了 16.2%, 而化肥配施羊粪土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著降低了 68.5%; 此外,化肥配施有机物料显著增加土壤了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量,且化肥配施羊粪提升效果较化肥配施秸秆更加明显。

2.2 不同处理土壤酶活性

连续六年不同施肥管理模式对土壤酶活性产生

显著影响 (图 1)。与单施化肥相比,化肥配施秸秆或化肥配施羊粪显著提高土壤 UR、NR 和 NIR 活性 (图 1a-c), 显著降低了 NIO 活性 (图 1d, $P < 0.05$)。有机物料的添加增加了土壤 BG 活性,且在化肥配施羊粪处理下达到显著水平 (图 1e, $P < 0.05$)。化肥配施有机物料后土壤 PHO 活性呈现下降趋势,在化肥配施羊粪处理中活性最低 (图 1f)。



注:图中不同小写字母表示不同施肥处理间的差异在 $P < 0.05$ 水平上显著。N: 单施化肥; N + straw: 化肥配施秸秆; N + manure: 化肥配施羊粪。

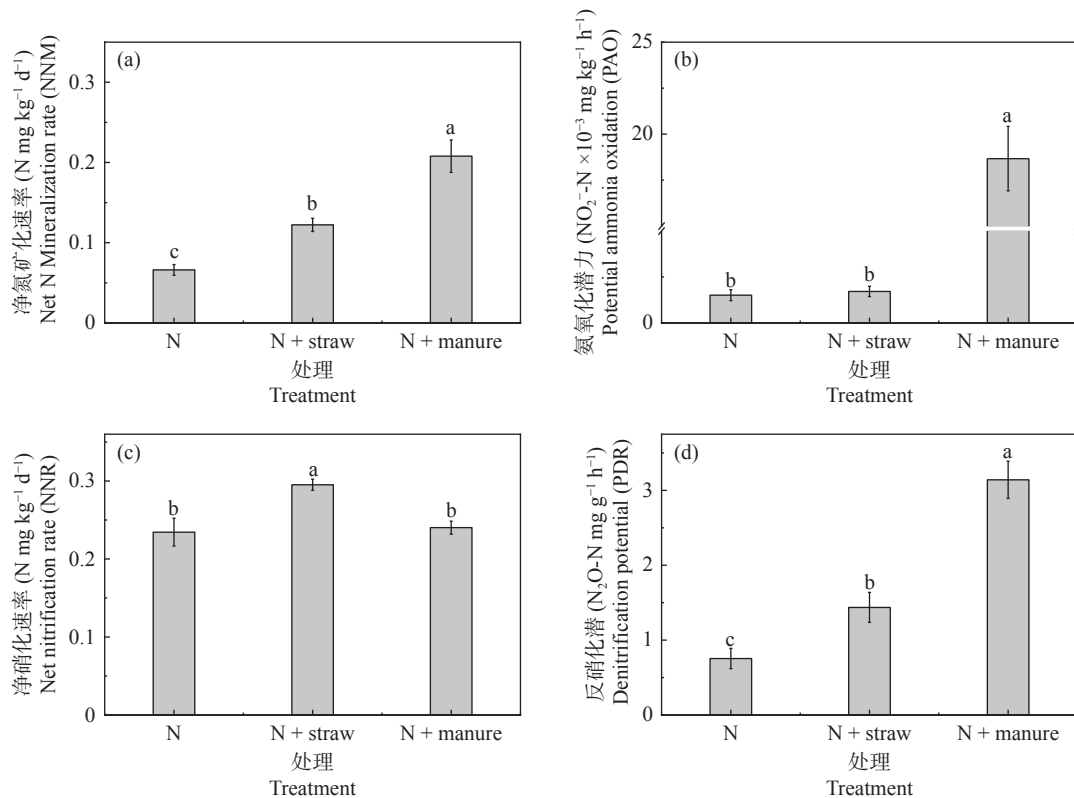
图 1 不同施肥处理土壤酶活性

Fig.1 Soil enzyme activities for different fertilization treatments

2.3 不同处理土壤氮素转化速率

连续 6 年不同施肥管理模式对土壤氮素转化速率产生显著影响 (图 2)。与单施化肥相比,化肥配施秸秆或化肥配施羊粪处理均提高了土壤 NNM、

NNR、PAO 和 PDR。与化肥配施秸秆相比,化肥配施羊粪土壤 NNM、PAO 和 PDR 分别增加了 0.70、9.91 和 1.19 倍,而土壤 NNM 却显著降低了 23.1% (图 2, $P < 0.05$)。



注: 图中不同小写字母表示不同施肥处理间的差异在 $P < 0.05$ 水平上显著。N: 单施化肥; N + straw: 化肥配施秸秆; N + manure: 化肥配施羊粪。

图 2 不同施肥处理的土壤氮素转化率

Fig. 2 Soil N transformation rates under different fertilization treatments

2.4 氮素转化与酶活性和土壤性质之间关系

相关分析表明, 除 NNR 以外, 其余氮素转化速率均与土壤 TN、SOC 和 pH 呈显著正相关 (图 3, $P < 0.05$)。此外, 土壤 PAO 和 PDR 还与 CEC 和 NO₃⁻-N 呈显著正相关。NNR 仅与土壤 C/N 呈显著负相关。除 NNR 以外其余氮素转化速率均与 UR、NR 和 NIR 活性呈显著正相关关系, 与 PHO 活性呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。此外, NNM 与 BG 活性存在显著正相关关系, PAO 和 PDR 与 NIO 活性之间存在显著负相关关系 ($P < 0.05$)。

多元逐步回归分析表明土壤氮素转化速率与土壤理化性质和土壤酶活性存在显著的线性回归关系 (表 3)。NNM 主要受到 SOC、NH₄⁺-N 含量和 BG 活性影响, 且与三者呈均存在正相关关系; NNR 主要受土壤 C/N 负向影响; PAO 受土壤 SOC 含量正向影响; 而 PDR 主要是受 NIR 和 BG 活性影响, 且 NIR 对 PDR 正向作用更强。

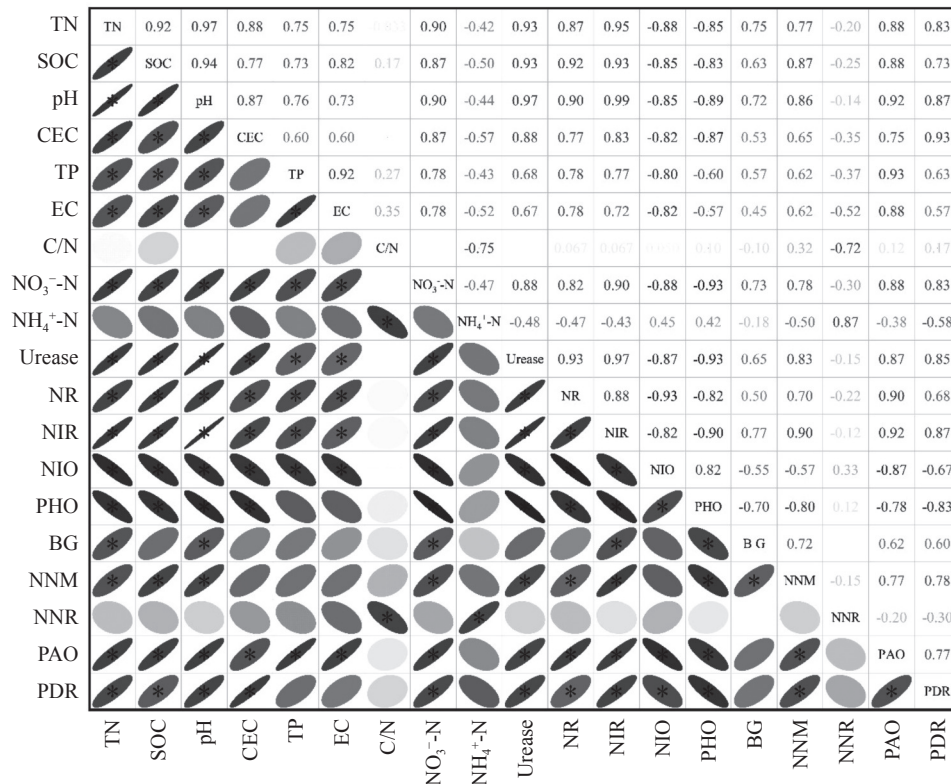
3 讨论

3.1 化肥配施不同有机物料对土壤性质的影响

化肥配施有机物料能够改变土壤理化性质进而

改善土壤肥力, 因而被广泛用作提高农田生产力的重要措施^[6]。与试验初始土壤 pH 相比, 连续六年单独施用化肥导致土壤 pH 下降 1.48 个单位。化学氮肥为硝化过程提供了底物 NH₃, 硝化作用会释放 H⁺ 进入土壤, 从而导致土壤酸化^[25]。化肥配施有机物料能够提升土壤 pH 值, 其中化肥配施羊粪较化肥配施秸秆更能有效缓解土壤酸化 (表 2), 这主要是由于羊粪中含有碳酸氢盐和有机酸等物质, 可以中和及缓冲土壤 H⁺ 释放, 从而延缓土壤酸化^[26-27]。秸秆添加对土壤 pH 提升作用较弱, 这与之前的研究结果一致^[28-29]。秸秆中含有丰富的纤维素, 其在微生物的作用下分解产生乙酸等酸性物质从而在一定程度上削弱其对土壤 pH 提升作用^[30-31]。

SOC 和 TN 是指示土壤肥力的重要指标^[28, 32-33]。总体来看, 化肥配施有机物料显著增加 SOC 和 TN 含量, 这是由于施肥促进作物生长, 从而增加作物地上和地下残留物向土壤的输入, 最终提高 SOC 和 TN 含量^[32-34]。此外, 化肥配施有机物料比单施化肥更能增加 SOC 和 TN, 这之前报道一致^[21, 35]。有机物料中富含碳氮元素, 其农田施用可增加土壤 SOC



注: * 表示 $P < 0.05$ 显著相关, 椭圆偏向为右表示正相关、椭圆偏为偏左表示负相关。TN: 全氮; SOC: 土壤有机碳; CEC: 阳离子交换量; NO_3^- -N: 硝态氮; NH_4^+ -N: 铵态氮; Urease: 脲酶活性; NR: 硝酸还原酶活性; NIR: 亚硝酸还原酶活性; NIO: 亚硝酸氧化酶活性; PHO: 多酚氧化酶活性; BG: β -1,4-葡萄糖苷酶活性; NNM: 净矿化速率; NNR: 净硝化速率; PAO: 氨氧化潜力; PDR: 反硝化潜力。

图 3 土壤理化性质、土壤酶活性和氮转化速率之间的皮尔逊相关性矩阵

Fig.3 A matrix showing the pearson correlations between physicochemical properties, soil enzyme activities and soil N transformation rates

表 3 NNM, NNR, PAO 和 PDR 与土壤性质和酶活性的逐步线性回归模型
Table 3 Stepwise regression models between NNM, NNR, PNR, PDR and Soil enzyme activities and soil properties

因变量 Dependent variable	回归方程 Regression equation	P	R ²
NNM	$\text{NNM} = 1.14\text{SOC} + 0.37\text{NH}_4^+\text{-N} + 0.254\beta\text{G} - 2.95 \times 10^{-7}$	< 0.001	0.992
NNR	$\text{NNR} = 0.624 - 0.034\text{C/N}$	< 0.001	0.948
PAO	$\text{PAO} = 0.988\text{SOC} + 2.209 \times 10^{-6}$	< 0.001	0.988
PDR	$\text{PDR} = 0.794\text{NIR} + 0.257\text{BG} - 2.86 \times 10^{-7}$	< 0.001	0.898

注: NNM: 净矿化速率; NNR: 净硝化速率; PAO: 氨氧化潜力; PDR: 反硝化潜力; SOC: 土壤有机碳; NH_4^+ -N: 铵态氮; NIR: 亚硝酸还原酶活性; BG: β -1,4-葡萄糖苷酶活性; NIR: 亚硝酸还原酶活性。

和 TN 含量, 配施秸秆较配施羊粪作用略弱 (表 2), 这与 Sun 等^[30] 研究结果一致。另外, 本研究发现化肥配施羊粪较化肥配施秸秆和单施化肥相比增加了土壤 EC、TP 和 NO_3^- -N 含量, 该结果与 Liu 等^[31] 报道一致。羊粪的添加显著增加土壤 CEC, 这与 Cai 等^[27] 在红壤中的研究结果相一致, 这可能是因为连续添加羊粪提高土壤 pH, 改善土壤结构, 增加土壤保肥能力。综上可知, 长期化肥配施羊粪较化肥配施秸秆对土壤质量的改善效果更加明显。

3.2 化肥配施不同有机物料对土壤酶活性的影响

土壤酶直接参与土壤生化反应, 是作为评价土

壤微生物活跃程度的重要指标^[29]。本研究发现化肥配施有机物料显著提升土壤脲酶活性, 其中化肥配施羊粪提升作用较秸秆更显著 (图 1a), 这可能是化肥配施有机物料能够增加土壤中有机质含量从而提升土壤中微生物活性, 促进分泌脲酶^[36] (将脲水解为 NH_4^+); 有机物料连续施用提升土壤 TN, 土壤脲酶活性与土壤 TN 含量成正比^[37], 其中化肥配施羊粪土壤 TN 含量高于化肥配施秸秆土壤, 因而化肥配施羊粪处理土壤脲酶活性较高。

亚硝酸氧化酶 (NIO) 是参与土壤硝化过程主要酶, 能够将 NO_2^- -N 催化转化为 NO_3^- -N^[38]。本研究发

现化肥配施有机物料显著降低 NIO 活性 (图 1d)。这与 Han 等^[39]的研究结果不同, 其原因为分泌 NIO 亚硝化螺旋菌为 K-策略类型微生物, 对底物亲和力强、适宜在低氮环境中生存^[40]。硝酸还原酶 (NR) 与亚硝酸还原酶 (NIR) 为参与反硝化过程的重要酶, 其中前者在反硝化过程的第一阶段将 NO_3^- -N 还原成 NO_2^- -N, 后者在反硝化过程的第二阶段将 NO_2^- -N 还原成一氧化氮^[41]。化肥配施有机物料显著增加土壤反硝化酶活性 (NR 和 NIR) (图 1), 这与 Pu 等^[36]和杨海滨等^[11]研究结果一致, 其原因可能是有机物料不仅能够通过促进硝化作用为反硝化提供底物 NO_3^- , 同时还提供了易分解有机物质, 从而促进反硝化微生物的生长, 增加 NR 和 NIR 活性^[42]。本研究发现, 化肥配施羊粪较化肥配施秸秆对土壤硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性提升更显著, 这可能与羊粪能够更加明显改变土壤养分有关。Li 等^[43]研究发现 NO_3^- -N 和 TN 是影响土壤反硝化的重要指标。本研究也发现 NIR 和 NR 与 NO_3^- -N 和 TN 呈显著正相关关系 (图 3)。化肥配施羊粪较化肥配施秸秆对 NO_3^- -N 和 TN 提升幅度更大, 因此化肥配施羊粪土壤 NR 和 NIR 活性高于化肥配施秸秆土壤 (图 1)。此外, SOC 是影响 *nirS* 和 *nirK* 型反硝化微生物的重要因子^[41], 化肥配施羊粪土壤 SOC 含量显著高于化肥配施秸秆土壤, 因此其反硝化微生物丰度和活性可能相对较高, 其反硝化活性也就越强。此外, 通过对比可知, 化肥配施羊粪较化肥配施秸秆能够为微生物提供利用更多的氮源, 因而更有利于反硝化微生物繁殖与生长, 从而更显著地提升土壤反硝化酶活性^[44]。

β -1,4-葡萄糖苷酶 (BG) 是由微生物产生分解多糖的水解酶^[45]。本研究得出化肥配施有机物料均提高土壤 BG 活性, 其中化肥配施羊粪较化肥配施秸秆提升效果明显。有机物向土壤输入了额外的氮源, 从而促使微生物分泌更多的水解碳的胞外酶来获取易利用碳^[45]。由于化肥配施羊粪较化肥配施秸秆显著提升土壤氮素含量, 所以化肥配施羊粪土壤 BG 活性高于化肥配施秸秆土壤。多酚氧化酶 (PHO) 是最常见的两种氧化酶之一, 参与木质素的分解, 从而为微生物生长提供可利用碳^[46]。有机物料添加下多酚氧化酶活性呈现降低态势, 这之前 Jiang 等^[47]研究结果一致。有机物料添加到土壤中增加了土壤中易利用有机质, 降低土壤微生物对难降解碳获取的能力,

导致 PHO 活性降低。

3.3 化肥配施不同种类有机物料对土壤氮素转化速率的影响

土壤氮素矿化和硝化是土壤氮素周转的重要过程, 是评价土壤氮素供应关键指标^[48]。本研究发现化肥配施有机物料显著提升氮素矿化速率, 这可能是因为施用有机物料能够提升土壤 pH (表 2), 缓解土壤酸化, 促进微生物分泌 BG 从而对氮素矿化产生正向影响 (图 2)。此外, 相关分析和多元逐步回归分析都表明土壤 NNM 与土壤 SOC 含量存在显著正相关关系 (图 3, 表 3), 表明化肥配施有机物通过增加土壤 SOC 含量来提升土壤净矿化速率^[49]。此外, 本研究得出化肥配施羊粪较化肥配施秸秆对土壤 NNM 提升更加显著, 这与羊粪 C/N 更低更易促进土壤氮矿化有关^[50]。

土壤硝化作用是微生物作用下将 NH_3 转化为 NO_3^- -N 过程, 是为植物生长提供所需要氮素重要过程^[25]。在该研究中化肥配施秸秆显著提高了土壤 NNR (图 2)。本研究表明 NNR 与土壤 C/N 呈显著负相关 (表 3), 这与之前研究结果一致^[51]。化肥配施秸秆土壤 C/N 显著低于化肥配施羊粪和单施化肥土壤 (表 2), 因而其 NNR 相对较高。此外, Strauss 等^[52]研究指出当土壤 C/N < 20 时硝化速率主要受到 NH_4^+ -N 影响。连续六年处理后, 化肥配施有机物料后土壤 C/N 均小于 20, 化肥配施秸秆土壤 NH_4^+ -N 含量高于化肥配施羊粪处理 (表 2), 因而化肥配施秸秆 NNR 高于化肥配施羊粪处理。

氨氧化潜力 (PAO) 表征在底物充足条件下氨氧化微生物将 NH_3 转化为 NO_2^- 的最大能力。氨氧化微生物为化能自养型, 而本研究发现 SOC 与 PAO 存在显著的正相关关系 (表 3), 这可能是本试验土壤较为贫瘠, 微生物生长受到碳限制。化肥配施有机物料增加土壤 SOC 含量进而促进了 PAO, 化肥配施羊粪较化肥配施秸秆对提升 SOC 幅度更大因而能够明显提升土壤 PAO。此外, 在酸性土壤中氨氧化古菌是氨氧化过程的主要贡献者, 而在中碱性土壤中氨氧化细菌是硝化过程的主要驱动者^[25]。施用秸秆虽在一定程度上增加了土壤 pH, 但土壤仍为强酸性, 有效底物 NH_3 浓度仍处于相对较低水平 ($\text{NH}_3 = \text{NH}_4^+ \times 10^{(\text{pH}-9.25)}$), 氨氧化古菌的丰度与活性可能无显著变化^[25], 导致化肥配施秸秆处理 PAO 增幅不显著。连续施用羊粪后土壤 pH 显著增加, 氨氧化细菌的丰

度和活性显著提升^[10]，所以化肥配施羊粪能够更显著地提升土壤的 PAO。

化肥配施机物料显著增加土壤反潜力（PDR），其中化肥配施羊粪较化肥配施秸秆对土壤 PDR 提升作用更强（图 2）。参与反硝化微生物大多为异养型微生物^[53]，需要有机碳能够为其提供能源。此外，NIR 能够将 NO₂⁻还原为 NO，该过程为限速步骤，因此反硝化潜力主要受 NIR 的影响（表 3）。多元逐步回归分析也表明反硝化潜力与 BG 呈显著正相关，这与 BG 能够将纤维素分解为易被微生物利用的葡萄糖，从而为反硝化提供碳源和电子受体有关。化肥配施羊粪处理 SOC，NIR 和 BG 高于化肥配施秸秆，因而配施羊粪土壤 PDR 更高。

4 结论

与单施化肥相比，化肥配施有机物料（秸秆或羊粪）能够显著增加砖红壤有机碳、全氮、无机氮含量，提高土壤阳离子交换量和电导率，降低土壤 C/N，增加土壤 pH 值，其中化肥配施羊粪的效果优于化肥配施秸秆。化肥配施秸秆或羊粪显著提高土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶和 β-1,4-葡萄糖苷酶活性，降低了亚硝酸氧化酶和多酚氧化酶活性，其中化肥配施羊粪影响幅度大于化肥配施秸秆。此外，化肥配施不同类型有机物料配施对土壤氮素转化的总体效果表现为促进，土壤氮素矿化速率、氨氧化潜力和反硝化潜力均增加，其中化肥配施羊粪较化肥配施秸秆对土壤氮素转化速率影响更强。因此，化肥配施羊粪是改善热带砖红壤性状与增加砖红壤氮素有效性的有效措施。

参考文献：

- [1] 李进, 段婷婷, 高宇, 等. 不同种植模式对雷州半岛玄武岩母质砖红壤氮磷钾养分状况的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39(2): 62–69.
- [2] 罗雪华, 吴小平, 王文斌, 等. 温度、水分对添加牛粪后橡胶园砖红壤 pH 值的影响[J]. *热带农业科学*, 2017, 37(12): 4–9.
- [3] Liu B, Xia H, Jiang C C, et al. 14 year applications of chemical fertilizers and crop straw effects on soil labile organic carbon fractions, enzyme activities and microbial community in rice-wheat rotation of middle China[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 841: 156608.
- [4] Liu W, Liu Y, Liu G, et al. Estimation of maize straw production and appropriate straw return rate in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 328: 107865.
- [5] 朱金霞, 孔德杰, 尹志荣. 农作物秸秆主要化学组成及还田后对土壤质量提升影响的研究进展[J]. *北方园艺*, 2020, (5): 146–153.
- [6] Shakoor A, Shahzad S M, Chatterjee N, et al. Nitrous oxide emission from agricultural soils: Application of animal manure or biochar? A global meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112170.
- [7] Song D, Dai X L, Guo T F, et al. Organic amendment regulates soil microbial biomass and activity in wheat-maize and wheat-soybean rotation systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 333: 107974.
- [8] Tian S Y, Zhu B J, Yin R, et al. Organic fertilization promotes crop productivity through changes in soil aggregation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 165: 108533.
- [9] 宋燕凤, 张前前, 吴震, 等. 田间陈化生物质炭提高稻田土壤团聚体稳定性和磷素利用率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(4): 613–621.
- [10] Fan C H, Zhang W, Chen X, et al. Residual effects of four-year amendments of organic material on N₂O production driven by ammonia-oxidizing archaea and bacteria in a tropical vegetable soil[J]. *Science of Total Environment*, 2021, 781: 146746.
- [11] 杨海滨, 李中林, 邓敏, 等. 不同施肥措施对重庆茶园土壤氮转化酶活性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(5): 1107–1114.
- [12] 郝近羽, 刘瑾, 陈源泉, 等. 施用不同有机物料对砂质土壤玉米成熟期根际细菌群落变化的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(10): 65–79.
- [13] 谢婉玉, 王永明, 纪红梅, 等. 秸秆还田种类对稻田 N₂O 排放及硝化反硝化微生物的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(4): 769–778.
- [14] Wang Y, Ji H F, Wang R, et al. Synthetic Fertilizer Increases Denitrifier Abundance and Depletes Subsoil Total N in a Long-Term Fertilization Experiment[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 2026.
- [15] 石博文, 赖欣, 李洁, 等. 尿素与有机肥配施对棕红壤氮素转化的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(5): 938–945.
- [16] 郎漫, 李平, 李森, 等. 浅层淹水条件下不同施肥处理对黑土氮素净转化的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (2): 42–48.
- [17] 胡立煌, 史文竹, 项剑, 等. 生物炭、秸秆和粪肥对滨海盐碱土氮矿化和硝化作用的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(8): 1089–1096.
- [18] Zhou M H, Zhu B, Wang S J, et al. Stimulation of N₂O emission by manure application to agricultural soils may largely offset carbon benefits: a global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4068–4083.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析 3 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Verheijen F G A, Zhuravel A, Silva F C, et al. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment[J]. *Geoderma*, 2019, 347: 194–202.
- [21] Ouyang Y, Reeve J R, Norton J M. Soil enzyme activities and

- abundance of microbial functional genes involved in nitrogen transformations in an organic farming system[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54(4): 437 – 450.
- [22] Kong Y, Ling N, Xue C, et al. Long-term fertilization regimes change soil nitrification potential by impacting active autotrophic ammonia oxidizers and nitrite oxidizers as assessed by DNA stable isotope probing[J]. *Environmental Microbiology*, 2019, 21(4): 1224 – 1240.
- [23] 王海翠, 刘兆东, 李丹丹, 等. 种植模式影响施肥导致的土壤反硝化势变化及其微生物机制[J]. *土壤学报*, 2022, 59(1): 242 – 252.
- [24] Liu Y W, Yang F, Yang W Q, et al. Effects of naphthalene on soil fauna abundance and enzyme activity in the subalpine forest of western Sichuan, China[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 2849.
- [25] Duan P P, Fan C H, Zhang Q Q, et al. Overdose fertilization induced ammonia-oxidizing archaea producing nitrous oxide in intensive vegetable fields[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 650: 1787 – 1794.
- [26] Whalen J K, Chang C, Clayton G W, et al. Cattle Manure Amendments Can Increase the pH of Acid Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3): 962 – 966.
- [27] Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 260 – 270.
- [28] Li Y Z, Hu Y C, Song D P, et al. The effects of straw incorporation with plastic film mulch on soil properties and bacterial community structure on the loess plateau[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(2): 979 – 994.
- [29] 侯建勋, 张水梅, 袁静超, 等. 玉米秸秆源有机物料对黑土养分有效性及酶活性的提升效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(4): 610 – 618.
- [30] Sun R, Zhang X X, Guo X S, et al. Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 88: 9 – 18.
- [31] Liu H, Xu W, Li J Y, et al. Short-term effect of manure and straw application on bacterial and fungal community compositions and abundances in an acidic paddy soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(9): 3057 – 3071.
- [32] Liu E K, Yan C R, Mei X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3): 173 – 180.
- [33] Blanco-Canqui H. Crop Residue Removal for Bioenergy Reduces Soil Carbon Pools: How Can We Offset Carbon Losses?[J]. *BioEnergy Research*, 2013, 6(1): 358 – 371.
- [34] Šimek M, Hopkins D W, Kalčík J, et al. Biological and chemical properties of arable soils affected by long-term organic and inorganic fertilizer applications[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(3): 300 – 308.
- [35] Wu L, Zhang W J, Wei W J, et al. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135: 383 – 391.
- [36] Pu Y L, Zhu B, Dong Z X, et al. Soil N₂O and NO_x emissions are directly linked with N-cycling enzymatic activities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 139: 15 – 24.
- [37] 鲍勇, 高颖, 曾晓敏, 等. 中亚热带3种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系[J]. *植物生态学报*, 2018, 42(4): 508 – 516.
- [38] Faull K F, Wallace W, Nicholas D J D. Nitrite oxidase and nitrate reductase in *Nitrobacter agilis*[J]. *Biochemical Journal*, 1969, 113(3): 449-455.
- [39] Han S, Zeng L Y, Luo X S, et al. Shifts in *Nitrobacter*- and *Nitrospira*-like nitrite-oxidizing bacterial communities under long-term fertilization practices[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124: 118 – 125.
- [40] Blackburne R, Vadivelu V M, Yuan Z G, et al. Kinetic characterisation of an enriched *Nitrospira* culture with comparison to *Nitrobacter*[J]. *Water Research*, 2007, 41(14): 3033 – 3042.
- [41] Sun H S, Jiang S X. A review on nirS-type and nirK-type denitrifiers via a scientometric approach coupled with case studies[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2022, 24: 221 – 232.
- [42] Song X T, Ju X T, Topp C F E, et al. Oxygen Regulates Nitrous Oxide Production Directly in Agricultural Soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(21): 12539 – 12547.
- [43] Li Z L, Tang Z, Song Z P, et al. Variations and controlling factors of soil denitrification rate[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(6): 2133 – 2145.
- [44] Weiler D A, Giacomini S J, Recous S, et al. Trade-off between C and N recycling and N₂O emissions of soils with summer cover crops in subtropical agrosystems[J]. *Plant and Soil*, 2018, 433(1): 213 – 225.
- [45] Jian S Y, Li J W, Chen J, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 101: 32 – 43.
- [46] Wang G S, Post W M, Mayes M A, et al. Parameter estimation for models of ligninolytic and cellulolytic enzyme kinetics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 48: 28 – 38.
- [47] Jiang M D, Yang N P, Zhao J S, et al. Crop straw incorporation mediates the impacts of soil aggregate size on greenhouse gas emissions[J]. *Geoderma*, 2021, 401: 115342.
- [48] 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 等. 青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例[J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2449 – 2456.
- [49] 钱佳彤, 郭涛, 长期定位施肥对紫色土氮矿化特征的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(5): 1152-1159.
- [50] 王亚萨, 邹悦, 张晶, 等. 碳添加对农田土壤氮转化过程影

- 响的研究进展[J]. *农学学报*, 2017, 7(2): 36 – 41.
- [51] 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土, 黄河口典型潮滩湿地土壤净氮矿化与硝化作用[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(5): 1466-1473.
- [52] Strauss E A, Lamberti G A. Regulation of nitrification in aquatic sediments by organic carbon[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(8): 1854 – 1859.
- [53] 陈刚亮, 李建华, 王育来. 河岸带土壤反硝化作用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(30): 14799 – 14803.

Effects of Chemical Fertilizer Application Combined with of Different Organic Materials on Nitrogen Transformations in a Tropical Latosol

LENG You-feng^{1,2}, WANG Xiao-tong^{2,4}, FU Ya-jun^{2,4}, ZHANG Qi^{2,4}, FAN Chang-hua^{2,3*},
CHEN Miao^{2,3}, LI Wei^{2,3}, CHEN Xin^{2,3}, NING Zi-yu^{2,3}, ZHU Si-xi^{1*}

(1. *College of Eco-environment Engineering, Guizhou Nationality University, Guiyang 5500251, China*; 2. *Institute of Environment and Plant Protection, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/ Hainan Key Laboratory of Tropical Eco-Circular Agriculture/ Key Laboratory of Green and Low Carbon Agriculture in Tropical China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou 571101, China*;
3. *Hainan Danzhou Tropical Agro-ecosystem National Observation and Research Station, Danzhou 571737, China*;
4. *College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China*)

Abstract: [Objective] This study was to investigate the effects of chemical fertilizer combined with different types of organic materials on soil properties, nitrogen transformations and related soil enzyme activities of tropical latosol, which would provide theoretical basis for improving soil productivity and developing rational nitrogen management strategies. [Methods] Based on a field experiment, we collected soils treated with chemical fertilizer (N), chemical fertilizer plus straw (N + straw) and chemical fertilizer plus sheep manure (N + manure) for six years, and determined soil chemical properties, nitrogen transformation rates and related enzyme activities. [Results] The organic material amendment increased soil organic carbon (SOC), soil total nitrogen (TN) and pH by 7.43%-40.28%, 28.57%-42.86% and 1.60%-52.05%, respectively, and decreased soil C/N values by 1.44%-15.35%, compared with the CK treatment, with greater effect under sheep manure application. Soil net N mineralization rate, potential ammonia oxidation, net nitrification rate and potential denitrification rate were increased by 3.00, 11.48, 0.28 and 4.07 times, respectively, when organic materials were continuously incorporated. The amendment of organic material significantly increased the activities of soil urease, nitrate reductase, nitrite reductase and β -1,4-glucosidase, but significantly decreased the activities of nitrite oxidase and polyphenol oxidase. Nitrogen transformations rates (except net nitrification rate) were significantly and positively correlated with SOC, TN, pH and activities of urease, nitrite reductase and nitrate reductase, but had significantly negative correlation with polyphenol oxidase activities. [Conclusion] Chemical fertilizer co-applied with organic material can improve the soil properties and promote nitrogen transformations of tropical latosol, with greater effect under sheep manure application. Therefore, chemical fertilizer combined with sheep manure is an effective measure to improve soil properties and enhance nitrogen availability of tropical latosol.

Key words: Organic material; Nitrogen transformation rate; Soil enzyme activity; Latosol

[责任编辑: 张玉玲]