

程依涵, 欧阳逸, 赵家欣, 裴祥宇, 张琳, 鲁耀雄, 伍玉鹏. 不同肥料施用下蚯蚓对土壤氮素利用及损失的影响[J]. 土壤学报, 2025,

CHENG Yihan, OUYANG Yi, ZHAO Jiaxin, PEI Xiangyu, ZHANG Lin, LU Yaoxiong, WU Yupeng. Effects of Earthworms on Nitrogen Utilization and Loss with Different Fertilizer Applications[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

不同肥料施用下蚯蚓对土壤氮素利用及损失的影响 *

程依涵¹, 欧阳逸¹, 赵家欣¹, 裴祥宇¹, 张琳², 鲁耀雄³,
伍玉鹏^{1, 2†}

(1. 华中农业大学华农林肯学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 3. 湖南省农业科学院农业生态环境研究所, 长沙 410125)

摘要: 施用有机肥相比化肥可显著增加土壤中的蚯蚓密度, 但不同肥料施用下蚯蚓活动如何影响土壤氮素去向仍不清楚。通过盆栽试验, 探究化肥(尿素)和有机肥(堆肥)施用下蚯蚓活动对土壤氮素利用、损失及氮转化过程的影响。结果显示, 蚯蚓显著增加植物鲜重和植物吸氮量, 在化肥施用时分增加 12.14% 和 15.24%, 在有机肥施用时分增加 18.38% 和 37.28%。蚯蚓显著增加土壤累积 N₂O 排放量, 但仅在化肥施用时分显著增加土壤累积氨挥发量。蚯蚓对土壤氮淋溶损失量无显著影响。总体上, 蚯蚓在化肥施用下增加了 6.31 mg·pot⁻¹ 的氮素损失, 而在有机肥施用下增加了 1.69 mg·pot⁻¹ 的氮素损失。进一步计算总氮素植物利用量与总氮素损失量的比值, 发现化肥施用时分蚯蚓并未显著影响该比值, 而有机肥施用时分蚯蚓显著增加了该比值。土壤氮初级转化速率模型显示, 相比施用化肥, 蚯蚓在施用有机肥时分影响更多的氮素转化过程, 显著提高了土壤氮素总初级矿化速率。综上, 无论何种肥料施用, 蚯蚓均发挥了促进植物氮素利用与增加氮损失的双重作用, 但从二者的比值上看, 有机肥施用更有助于发挥蚯蚓在土壤氮循环中的有益效果。

关键词: 肥料类型; 蚯蚓; 氮循环; MCMC 模型

中图分类号: S154.1

文献标志码: A

Effects of Earthworms on Nitrogen Utilization and Loss with Different Fertilizer Applications

CHENG Yihan¹, OUYANG Yi¹, ZHAO Jiaxin¹, PEI Xiangyu¹, ZHANG Lin², LU Yaoxiong³, WU Yupeng^{1, 2†}

(1. Joint Institute of Huazhong Agricultural University and Lincoln University, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Institute of Agri-Environment and Ecology, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China)

* 国家自然科学基金项目(32171638)和国家级大学生创新创业训练计划项目(202510504103)共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 32171638) and National College Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program (No. 202510504103)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wyp19851205@126.com

作者简介: 程依涵(2006—), 女, 河北省邯郸人, 本科生, 主要研究方向为土壤生态学。E-mail: 3272077658@qq.com

收稿日期: 2025-03-29; 收到修改稿日期: 2025-09-12; 网络首发日期(www.cnki.net):

Abstract: 【Objective】The application of organic fertilizers in agricultural soils increases the density of earthworms. However, it remains unclear how earthworms change the fate of soil nitrogen under different fertilizer applications.

【Method】Using a pot experiment, the present study explores the effects of earthworms on soil nitrogen utilization, loss, and nitrogen transformation processes under the application of chemical (urea) and organic (compost) fertilizers.

【Result】The results showed that earthworms significantly increased the fresh weight of plants and the amount of nitrogen uptake by plants by 12.14% and 15.24% under chemical fertilizers and 18.38% and 37.28% under organic fertilizers, respectively. Earthworms significantly increased the cumulative soil N₂O emissions and the cumulative soil ammonia volatilization only under the application of chemical fertilizers. There was no significant difference in nitrogen leaching loss between the treatment with and without earthworms. Overall, earthworms increased the nitrogen loss by 6.31 and 1.69 mg·pot⁻¹ under the application of chemical and organic fertilizers, respectively. Also, earthworms significantly increased the ratio of the total nitrogen utilization by plants to the total nitrogen loss under the application of organic fertilizers, but no significant difference was found under the application of chemical fertilizers. The soil nitrogen primary transformation rate model showed that earthworms affected more nitrogen transformation processes under the application of organic fertilizers than under the application of chemical fertilizers, significantly increasing the total primary nitrogen mineralization rate of the soil. 【Conclusion】Regardless of the type of fertilizer applied, earthworms played a dual role in promoting plant nitrogen utilization and increasing nitrogen loss. However, considering the ratio of nitrogen utilization to loss, the application of organic fertilizers provided a more conducive environment for achieving the beneficial effects of earthworms in the soil nitrogen cycle.

Key words: Fertilizer type; Earthworm; Nitrogen cycle; MCMC model

氮肥是保证作物持续高产的关键。然而,氮肥施入土壤后,仅 24.5%~51.1%的氮被作物吸收,仍有 29.1%~54.6%的氮残留在土壤中,7.7%~38.1%的氮以不同途径损失进入环境^[1]。朱兆良^[2]对国内农田施用氮肥去向的研究进行总结,指出施入土壤的化肥氮 11%以 NH₃ 形式挥发,1%以 N₂O 形式排放,2%通过淋溶损失,5%通过径流损失。相比之下,施用有机肥则有利于提高土壤对氮素的固持,减少氮素流失,提高氮素的作物吸收率^[3]。例如,有机肥施用较单施化肥农田土壤淋溶液中硝态氮和可溶性总氮浓度分别降低了 23.81%和 36.74%^[4]。此外,有机肥促进土壤中微生物的代谢作用,通过微生物对氮的固持、释放增强作物需氮与土壤供氮的同步,从而促进植物对氮素的利用^[5-6]。鉴于在提高氮素利用率、减少环境污染方面的优势,有机肥施用在全国得到了大力推广,至 2020 年全国有机肥施用面积已达 5.5 亿亩次,较 2015 年增长了 40%^[1]。

施用有机肥改变了土壤动物群落结构,显著提高了蚯蚓的总密度和生物量^[7-9]。蚯蚓是最常见的大型土壤动物之一,是调节土壤氮素循环的核心生态系统工程师,直接或间接地参与土壤氮循环的各个过程^[10]。蚯蚓加速土壤有机氮矿化,促使其形成植物易吸收利用的形态^[11-12]。此外,蚯蚓排泄形成的土壤大团聚体有利于氮素的固定^[13]。蚯蚓活动还可增加或减少土壤微生物数量,调节微生物库的氮素固持与释放^[14]。但蚯蚓活动也可能导致土壤氮素的损失。例如,由蚯蚓活动形成的“蚓触圈(Drilosphere)”使土壤 N₂O 排放增加了 30%~56%^[15-17];蚯蚓掘穴改变土壤结构,增加土壤渗滤液产生,进而促进土壤氮素的淋溶^[18-19]。然而,在农田施肥从化肥向有机肥的转变中,蚯蚓对土壤氮素去向及氮转化过程的影响有何不同,仍需进一步研究。

因此,本研究在盆栽试验中分别施入化肥(尿素)和有机肥(堆肥),测定蚯蚓活动下的氮素利用量和损失量,并利用 ¹⁵N 同位素成对标记结合 MCMC 数值分析模型(马尔可夫链蒙特卡洛氮素转化模型)比较蚯蚓活动对土壤氮素转化过程的影响。本研究拟通过探讨不同肥料施用下蚯蚓对土壤保氮-供氮的调控作用,进一步揭示蚯蚓在农田土壤氮循环中的作用机制,为蚯蚓等土壤动物数量持续增加下的有机肥施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤取自湖北省当阳市(30°39'N, 111°48'E) 0~20 cm 菜地。该土壤为粉砂质黄棕壤, pH 为 6.13 (土水比 1:5), 有机质(SOM)和全氮(TN)含量分别为 17.31 g·kg⁻¹ 和 1.42 g·kg⁻¹。新鲜土壤过 5 mm 筛, 蒸馏水调整至 65% 土壤孔隙含水率避光预培养 7 d。土壤采集地蚯蚓密度为 51 条·m⁻², 优势种为皮质远盲蚓(*Amyntas corticis*)。手工分拣法采集成年优势种蚯蚓, 选取活性较高且大小一致的个体置于湿滤纸上清肠 24 h, 无菌蒸馏水冲洗体表备用。供试生菜(*Lactuca sativa* var. *longifolia*) 幼苗在培养基质中生长至四叶期, 选择相似大小的个体用于实验, 其平均鲜重 1.93 g·株⁻¹, TN 含量 15.60 g·kg⁻¹。供试化肥和有机肥为尿素和牛粪堆肥。尿素购自安阳中盈化肥有限公司(氮含量为 46.60%), 有机肥为秸秆和牛粪混合后好氧堆肥的产物, 其全氮含量 16.92 g·kg⁻¹, 无机氮含量 2.87 g·kg⁻¹, C/N 比 26.17。

1.2 实验设计

开展微宇宙培养实验, 设 4 个处理: 施用化肥(尿素)并接种/不接种蚯蚓(C+E 和 C-E), 施用有机肥(堆肥)并接种/不接种蚯蚓(O+E 和 O-E), 各处理 5 个重复。在塑料盆钵(直径 20 cm, 高 15 cm, 底部有数个 0.3 cm 孔)中装入折合 2.5 kg 干土的新鲜土壤, 加入不同肥料(有机肥 23.64 g, 化肥 0.86 g, 折合纯氮 160 mg·kg⁻¹ 干土)并混合均匀, 压实至容重 1.2 g·cm⁻³。接种蚯蚓处理每盆接种蚯蚓两条, 之后所有处理移植生菜幼苗一株。所有盆钵在温室大棚中培养 40 d 直至生菜收获。在培养过程中, 根据实际降雨情况在第 19 天和 28 天向每个盆中加入 312 mL 和 133 mL 蒸馏水, 过量的蒸馏水由盆底部小孔流出并收集。

1.3 样品采样与分析

在培养过程中每天进行气体的采集。通过静态气体箱法收集 N₂O 气体, 气相色谱仪(Agilent, GC-7890A)分析 N₂O 浓度。利用通气法收集 NH₃ 挥发气体, 将含有两块浸泡磷酸甘油泡沫的 PVC 管插入土壤中, 底部泡沫吸收土壤挥发的 NH₃, 上部泡沫缓冲环境中的 NH₃。利用 KCl 溶液提取底部泡沫吸收的 NH₃, 连续流动分析仪(SEAL, AA3)测量提取物中 NH₄⁺-N 的浓度。利用线性插值法计算气体(N₂O 和 NH₃)累积排放量。从塑料盆底部小孔收集渗滤液并记录体积, 凯氏定氮法测定渗滤液总氮含量。

收获期采集植株, 分根、冠称重, 之后混合、烘干、研磨后使用元素分析仪(Flashsmart, vario EL cube)测定植物全氮含量, 之后由成熟植株总含氮量与移栽幼苗总含氮量差值计算植物吸收氮量。将土壤倒出, 分离并计算蚯蚓数量。土壤混匀后采样, KCl 溶液浸提后流动分析仪测定无机氮(Inorg-N)含量, 去离子水浸提后 TOC 仪(Flashsmart, vario TOC cube)测定溶解性有机碳(DOC)含量, 氯仿熏蒸法测定土壤微生物生物量氮(MBN), 风干土壤过 100 目筛后元素分析仪测定全氮含量。

收获期采集得到的土壤用 ¹⁵N 同位素成对标记结合 MCMC 数值分析模型比较不同处理下的土壤氮转化过程: 称取 20 g (干重计) 上述 4 个处理盆栽培养结束后的鲜土于两组平行的三角瓶中, 分别加入 2 mL ¹⁵NH₄NO₃ 溶液或 2 mL NH₄¹⁵NO₃ 溶液(丰度均为 5 atom%), 调节含水量至 60% 土壤持水量(WHC), 置于 25 °C 黑暗培养箱中培养 144 h。于添加标记液后的 0.5、48、96、144 h 破坏性取样, 测定土壤中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量及其 ¹⁵N 丰度。将数据输入 MCMC 模型, 参考 Müller 等^[20]以及 Zhang 等^[21]的参数设置及具体操作, 计算土壤氮素初级转化速率参数: 难分解有机氮向 NH₄⁺-N 的矿化速率(M_{Nrec})、NH₄⁺-N 同化为难分解有机氮的速率($I_{NH4-Nrec}$)、易分解有机氮向 NH₄⁺-N 的矿化速率(M_{Nlab})、NH₄⁺-N 同化为易分解有机氮的速率($I_{NH4-Nlab}$)、有机氮异养硝化速率(O_{Nrec})、NO₃⁻-N 同化为有机氮的速率(I_{NO3})、自养硝化速率(O_{NH4})、NO₃⁻-N 异化还原成铵的速率(D_{NO3})、黏土矿物对

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附速率 (A_{NH_4})、黏土矿物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的解吸速率 (R_{NH_4})。

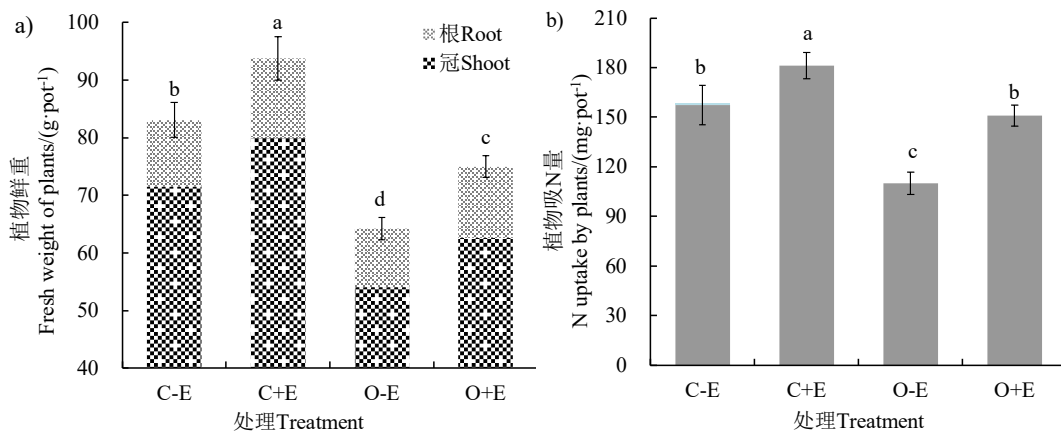
1.4 统计分析

MCMC 模型的运行及计算通过 MATLAB 9.13 (Math Works) 的 MCMC stat 工具箱实现。所有试验数据均以均值表示, 采用 SPSS 17.0 (IBM) 统计软件对不同处理进行相关的统计分析、显著性检验等, 显著性水平 α 取 0.05。

2 结 果

2.1 化肥和有机肥施用下蚯蚓活动对土壤氮素利用、损失的影响

培养结束后, 所有接种蚯蚓的处理蚯蚓均未死亡。整体而言, 施用化肥处理植物生物量高于施用有机肥处理 (图 1a)。无论施用何种肥料, 蚯蚓均显著增加了植物鲜重, 且在有机肥施用下更为明显 (增加了 18.38%, 显著高于化肥施用下的 12.14%)。有机肥施用下的植物根冠比 (在 0.19~0.20 之间) 略高于化肥 (0.16~0.17 之间)。蚯蚓促进植物根系生长, 提高根冠比, 但其作用大小在化肥、有机肥施用之间无明显差异。计算植物从土壤中吸收的氮量 (图 1b), 结果显示无论施用何种肥料, 蚯蚓均显著提高了植物吸收的氮量, 化肥施用提升了 15.24%, 而有机肥施用提升了 37.28%。



注: 图中误差线为标准差, 不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Vertical bars denote error bars, and different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

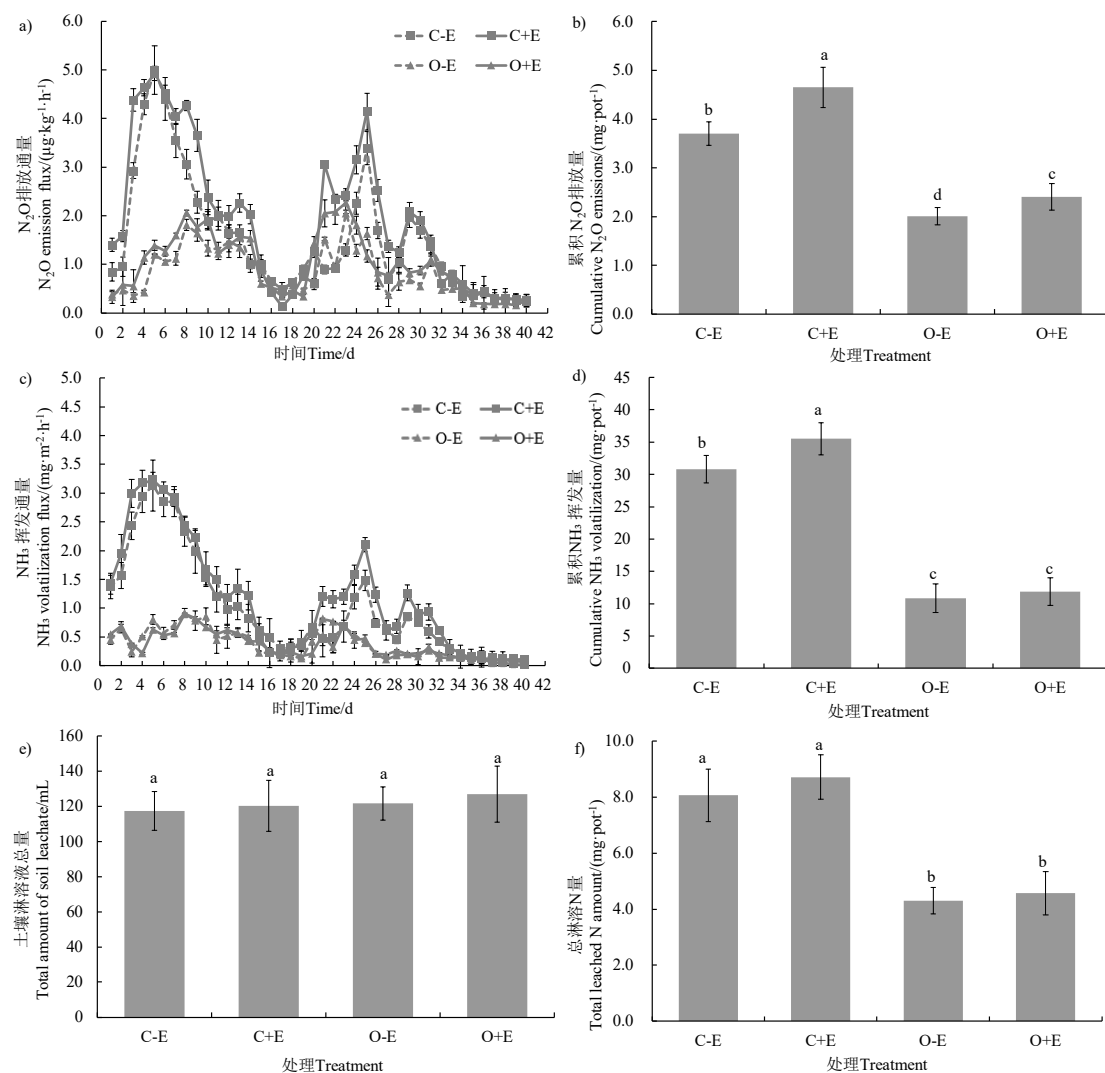
图 1 植物鲜重 (a) 及植物从土壤中同化的氮量 (b)

Fig. 1 Plant fresh weight (a) and the amount of nitrogen assimilated by plants from the soil (b)

土壤 N_2O 排放和 NH_3 挥发均集中在培养前期 (0~16 d) 和浇水后, 其中施用化肥的处理排放通量及波动幅度均高于施用有机肥的处理 (图 2a、图 2c)。接种蚯蚓显著增加了土壤的 N_2O 累积排放量, 在施用化肥和有机肥时分别增加了 0.95 和 0.40 $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ (图 2b)。接种蚯蚓仅在施用化肥时显著增加了累积 NH_3 挥发量 (增加了 4.72 $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$) (图 2d)。蚯蚓处理收集到的土壤淋溶液体积稍高于无蚯蚓处理, 但各处理间均无显著差异 (图 2e), 同一肥料施用下有、无蚯蚓处理之间的氮淋溶损失量也无显著差异 (图 2f)。

对 N_2O 排放、氨挥发及氮淋溶导致的氮素损失进行加和, 发现化肥施用下的总氮素损失量为 42.58~48.89 $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$, 显著高于施用有机肥的处理 (17.17~18.86 $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$) (图 3a)。化肥施用下蚯蚓增加了 6.31 $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ 的氮素损失, 显著高于有机肥施用下蚯蚓增加的氮素损失量 (1.69 $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$)。但无论施用何种肥料, 蚯蚓所增加的氮损失量 (1.69~6.31 $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$) 相比施入的肥料氮量 (400 $\text{mg} \cdot \text{pot}^{-1}$) 几乎均可忽略不计。进一步计算总氮素植物利用量与总氮素损失量的比值, 发现化肥施用下蚯蚓并未显著影响比值, 而有机肥施用下蚯蚓显著增加

了比值 (图 3b)。



注: 图 a 和 b 表示 N_2O 排放通量及 N_2O 排放导致的 N 损失量, 图 c 和 d 表示氨挥发通量及氨挥发导致的 N 损失量, 图 e 和 f 表示淋溶液体积及淋溶导致的 N 损失量。Note: Panels a and b show the N_2O emission flux and nitrogen loss caused by N_2O emission, respectively; panels c and d represent the ammonia volatilization flux and nitrogen loss caused by ammonia volatilization, respectively; panels e and f denote the volume of leachate and nitrogen loss caused by leaching, respectively.

图 2 土壤氮素由气态、液态损失量

Fig. 2 The losses of soil N occur in gaseous form and by leaching

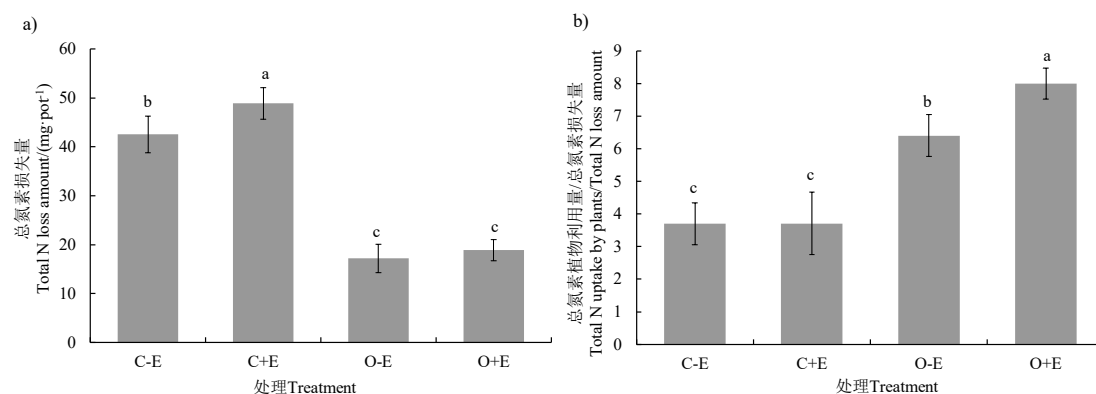


图 3 各处理总氮素损失量 (a) 及总氮素植物利用量与总氮素损失量的比值 (b)

Fig. 3 The total amount of nitrogen loss in each treatment (a) and the ratio of the total amount of nitrogen utilized by plants to the total amount of nitrogen loss (b)

2.2 化肥和有机肥施用下蚯蚓活动对土壤氮组分及溶解性有机碳的影响

在培养结束后取土并测定土壤性质,发现土壤全氮含量维持在 $1.41\sim 1.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,在各处理间均无显著差异(表 1)。施用化肥的处理土壤无机氮含量($128.74\sim 134.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)要显著高于施用有机肥的处理($42.14\sim 78.97\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),而可溶性有机碳含量则表现为施用有机肥的处理($24.69\sim 29.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于施用化肥的处理($16.47\sim 19.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。施用有机肥时,蚯蚓显著增加了土壤无机氮含量(提高了约 87.4%)。无论施用化肥还是有机肥,蚯蚓均显著增加了土壤微生物量氮(化肥和有机肥下分别提高了 23.1%和 17.4%)和土壤可溶性有机碳的含量(化肥和有机肥下分别提高了 16.7%和 20.3%)。

表 1 各处理土壤全氮(TN)、无机氮(Inorg-N)、微生物生物量氮(MBN)及溶解性有机碳(DOC)的含量

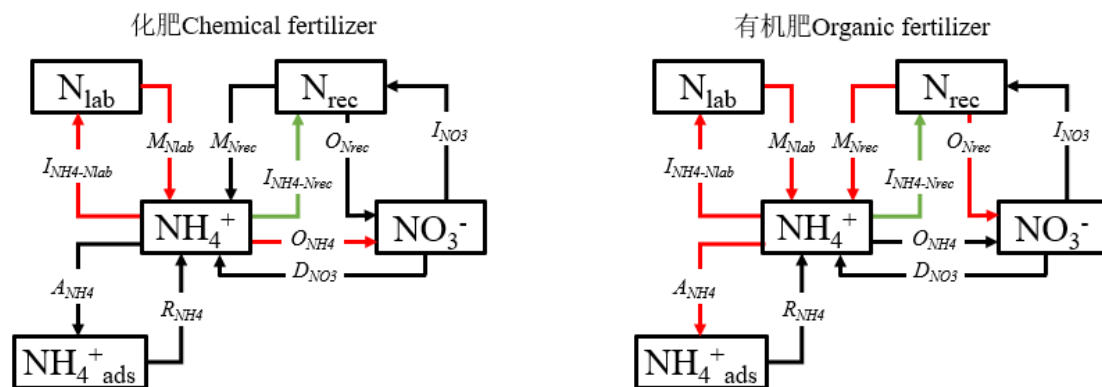
Table 1 Contents of soil total nitrogen (TN), inorganic nitrogen (Inorg-N), microbial biomass nitrogen (MBN), and dissolved organic carbon (DOC) in each treatment

处理	全氮 TN /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	无机氮 Inorg-N /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	微生物生物量氮 MBN /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	溶解性有机碳 DOC /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
C-E	$1.42\pm 0.04\text{ a}$	$128.74\pm 9.47\text{ a}$	$133.47\pm 11.47\text{ c}$	$16.47\pm 1.38\text{ d}$
C+E	$1.41\pm 0.03\text{ a}$	$134.56\pm 11.22\text{ a}$	$164.34\pm 13.34\text{ b}$	$19.22\pm 1.78\text{ c}$
O-E	$1.43\pm 0.02\text{ a}$	$42.14\pm 7.27\text{ c}$	$174.21\pm 13.77\text{ b}$	$24.69\pm 1.64\text{ b}$
O+E	$1.43\pm 0.03\text{ a}$	$78.97\pm 6.45\text{ b}$	$204.58\pm 18.21\text{ a}$	$29.71\pm 1.81\text{ a}$

注:表中数据为均值±标准差,不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。Note: Values are mean±standard deviation, and different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

2.3 化肥和有机肥施用下蚯蚓活动对土壤氮初级转化速率的影响

整体而言,施用有机肥时蚯蚓对氮素转化过程的影响更为明显,显著促进或抑制了 MCMC 模型 10 个参数中的 6 个,而施用化肥时蚯蚓仅显著影响了其中的 4 个参数(图 4,附表 1)。化肥施用,蚯蚓显著促进了易分解有机氮向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的矿化速率、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 同化为易分解有机氮的速率以及自养硝化速率,但显著降低了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 同化为难分解有机氮的速率。有机肥施用,蚯蚓显著促进了有机氮向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的矿化速率、黏土矿物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附速率、难分解有机氮向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的矿化速率及有机氮异养硝化速率,但显著降低了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 同化为难分解有机氮的速率。整体而言,无论施用何种肥料,蚯蚓均促进了土壤氮素总初级矿化速率,但仅在有机肥施用,差异显著(图 5a)。蚯蚓对土壤氮素总同化速率的影响并不显著(图 5b)。此外,有机肥施用,蚯蚓显著促进了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的生成速率(图 5c),而化肥施用,蚯蚓显著促进了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的消耗速率(图 5d)和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的生成速率(图 5e)。



注:红色箭头表示蚯蚓促进作用($P<0.05$),绿色箭头表示蚯蚓抑制作用($P<0.05$),黑色箭头表示蚯蚓无显著影响。Note:

Red arrows indicate a significant positive effect of earthworms ($P<0.05$), green arrows indicate a significant negative effect of earthworms ($P<0.05$), and black arrows indicate no significant effect of earthworms.

图 4 化肥与有机肥施用下蚯蚓对土壤氮素转化过程及氮素转化速率模型参数的影响

Fig. 4 Effects of earthworm on nitrogen transformation process and the model parameters of nitrogen transformation rate with urea and compost application

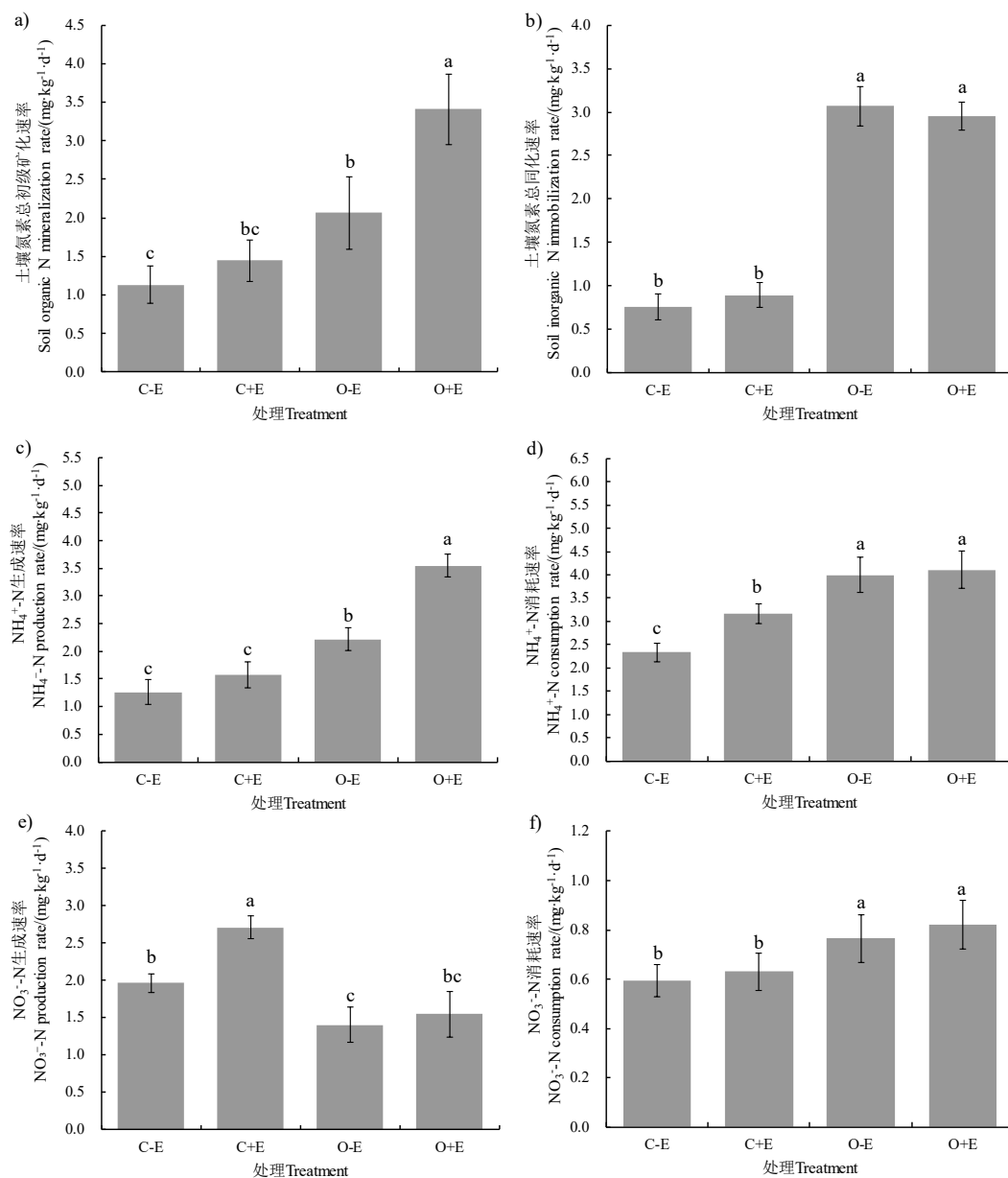


图 5 土壤氮素总初级矿化速率 (a)、氮素总同化速率 (b)、NH₄⁺-N (c、d) 与 NO₃⁻-N (e、f) 生成与消耗速率

Fig. 5 Rate of soil organic N mineralization (a), rate of inorganic N immobilization (b), production and consumption rates of NH₄⁺-N (c, d) and NO₃⁻-N (e, f)

3 讨 论

本研究显示, 蚯蚓在两种肥料施用下均显著提高了作物生物量, 这与已有的研究保持一

致,即蚯蚓存在平均可提高 25%的产量^[22]。本研究还显示,施用有机肥时蚯蚓活动增加了作物生物量 18.38%,增加了作物氮吸收量 37.28%,均高于化肥处理。这是由于蚯蚓的破碎、取食-排泄、混合等作用加速了有机肥的矿化分解速度,进而提高了氮素植物利用效率^[23-24]。反之,尿素施用后在脲酶的作用下短期内即可转化为有效氮并供给作物利用^[25],在一定程度上削弱了蚯蚓加速有机物矿化释放氮的作用。这一观点在 MCMC 模型中得到了证实,即施用有机肥时蚯蚓的存在显著增加了土壤总初级矿化速率,但在施用化肥的处理中蚯蚓对该参数的影响并不显著。此外,蚯蚓作用下土壤无机氮含量在施用有机肥时显著增加,而施用化肥时无显著变化,这也可在一定程度上支持上述观点。除促进有机氮的矿化,蚯蚓还能够通过加强土壤微食物网与植物根系的协同作用^[26]及对土壤物理性状的改良^[27]在植物生长上发挥积极功能。根系是植物吸收养分的主要器官,本研究中无论何种肥料施用,蚯蚓均在一定程度上增加了植物的根冠比,说明即便施入速效氮,蚯蚓仍能通过刺激植物根系生长来提高氮素利用效率^[24]。

无论施用何种肥料,结果显示蚯蚓均显著增加了 N_2O 累积排放量,这与 Lubber 等^[28]通过元分析得到的结果一致。反硝化作用和硝化作用被认为是农田土壤释放 N_2O 的重要途径,其中反硝化作用通常存在于低氧土壤系统中^[29],而本研究土壤采集自旱地且培养过程中排水良好,微生物处于好气环境,更有利于硝化作用的进行^[30]。Wu 等^[15]指出,蚯蚓主要通过影响微生物及反应底物来增加土壤 N_2O 排放。本研究通过 MCMC 模型进一步显示,化肥施用下蚯蚓显著增加了自养硝化速率,说明蚯蚓可能主要通过刺激驱动硝化作用的两类化能自养微生物(氨氧化微生物及亚硝酸盐氧化微生物)来增加土壤 N_2O 的排放。而蚯蚓在有机肥施用下对自养硝化速率无显著影响,则可能主要通过促进矿化作用提高硝化-反硝化底物含量来增加土壤 N_2O 排放。

土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在土壤溶液中与气态 NH_3 存在着动态平衡,当 NH_3 在土壤孔隙中积累到一定含量时,就会通过土壤表面向大气中挥发^[31]。尿素施入土壤后,在脲酶的作用下迅速水解为碳酸铵,进而分解产生 NH_3 ^[32],可能是导致本研究化肥施用下氨挥发显著高于有机肥处理的原因。此外,研究结果显示蚯蚓在化肥施用下显著增加了累积氨挥发,而在有机肥施用下并无显著影响。这与已有的研究结果存在一定差异,如 Na 等^[33]和 Hao 等^[34]的研究均显示蚯蚓对土壤氨挥发无显著影响。除施肥和气候条件外,影响土壤氨挥发的土壤环境因子包括 pH、 CaCO_3 含量、土壤总盐、土壤有机质、阳离子交换量及黏粒含量^[35-36]。本研究并未测定这些指标,不同肥料施用下蚯蚓对氨挥发的影响有待在未来进一步研究。

本研究并未发现蚯蚓对土壤淋溶液产生量及淋溶导致的氮损失量产生显著影响。已有的研究认为,蚯蚓通过改变土壤物理结构(如增加土壤孔隙度)增加了淋溶液的产生量,进而导致土壤氮素的淋溶损失^[37]。蚯蚓对土壤结构的影响依赖于蚯蚓取食-排泄形成的蚯蚓粪及在土壤中挖掘形成的洞穴^[27],这是一个相对缓慢的过程。而本研究较短的周期内(40 d),蚯蚓对土壤结构的改变可能不足以影响土壤淋溶液的产生。总体而言,无论施用何种肥料,蚯蚓均在增加土壤氮素损失的同时提高植物对氮素的吸收利用。但从总氮素植物利用量与总氮素损失量的比值来看,有机肥施用更有助于发挥蚯蚓的有益效果。

土壤中氮素转化过程对土壤氮素有效性和氮肥利用效率有重要影响,氮素初级转化速率可指示不同形态氮素的真实转化过程,反映土壤不同形态氮素的转化特征^[38-40]。无机氮水平是土壤氮素可利用性的重要指标,其动态变化是土壤有机氮和无机氮形态间相互转化的结果^[41]。MCMC 模型显示,蚯蚓主要通过影响有机氮(N_{lab} 和 N_{rec})与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之间的转化作用于土壤氮素转化过程。在有机肥施用下,蚯蚓显著增加了氮素的总初级矿化速率,这可能归结为蚯蚓对有机肥矿化的促进作用。一方面,蚯蚓促进了有机肥中氮的释放,另一方面,有机肥中碳的释放也有助于提高土壤中原有氮的矿化过程^[42]。土壤微生物的生长、繁殖和代谢活动依赖有机碳作为碳源和能源^[43]。在适宜的条件下,较高的有机碳含量能为微生

物提供更充足的底物,促进微生物群落的增殖和代谢,进而提高氮矿化潜势^[38]。已有研究显示,有机碳可以解释不同土壤间氮矿化潜势大小 60% 的差异^[44]。从氮素具体的矿化途径来看,相比化肥施用,有机肥施用时蚯蚓显著增强了有机氮异养硝化速率及难分解有机氮向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的矿化速率。Gao 等^[45]认为,假单胞菌将蛋白胨氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是有机氮异养硝化重要的生物化学途径之一,这一过程涉及羟胺氧化还原酶的作用,而蚯蚓与有机肥互作下增加的 DOC 含量有利于促进羟胺氧化为亚硝酸盐。而难分解有机氮向 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 矿化速率的增强则可能与微生物的共代谢作用有关^[46],即微生物在利用易降解的碳源时,会同时对难矿化有机氮进行转化。但需要注意的是,MCMC 模型中进行的 144 h 培养并不包含蚯蚓和植物,这忽略了植物吸收对土壤氮素转化的影响,所获得的数据也更偏于蚯蚓的遗留效应(对土壤环境的改变)而非蚯蚓的直接作用,这在一定程度上削弱了氮转化过程对本研究中氮损失与利用量的解释。未来需要通过更为先进和适当的手段来阐明化肥和有机肥施用下蚯蚓活动影响土壤氮素利用、损失的作用机理。

4 结 论

无论是化肥施用还是有机肥施用,蚯蚓均在增加土壤氮素损失量的同时增加了植物对氮素的吸收量。有机肥施用下蚯蚓对氮素转化过程的影响更大,显著提升了氮素的总初级矿化速率。化肥施用下蚯蚓未显著改变总氮素植物利用量与总氮素损失量的比值,但有机肥施用下蚯蚓显著提高了这一比值,说明有机肥施用更有助于发挥蚯蚓的有益效果。

参考文献 (References)

- [1] Ju X T, Tian X, Ji H J, et al. Evaluation of the rationality of nitrogen use efficiency approaches based on long-term fate of nitrogen fertilizer tracing experiments[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(7): 1284–1294. [巨晓棠, 田雪, 冀宏杰, 等. 基于长期氮肥示踪试验评估氮肥利用率算法的合理性[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1284–1294.]
- [2] Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 778–783. [朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778–783.]
- [3] Wang W Q, Huang L N, Cheng S M, et al. Effects of organic nitrogen replacing part of inorganic nitrogen and reducing nitrogen application on the growth and nitrogen fate of *Musaacuminata* L. AAA Cavendish. cv. Formosana at seedling stage[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(8): 1917–1924. [王雯清, 黄丽娜, 程世敏, 等. 有机氮替代部分无机氮下减氮对宝岛蕉苗期生长及肥料氮素去向的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(8): 1917–1924.]
- [4] Zheng T, Shi X J, Kang L Y, et al. Effects of organic fertilizer application on nitrogen leaching and accumulation in farmland soil based on meta-analysis[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2023, 29(8): 77–84. [郑甜, 史晓婧, 康凌云, 等. 有机肥施用对农田土壤氮素累积和淋失的整合分析[J]. 天津农业科学, 2023, 29(8): 77–84.]
- [5] Hu Q Y, Liu T Q, Ding H N, et al. The effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on soil labile organic carbon fractions and carbon pool management index in a rice–wheat rotation system[J]. Pedobiologia, 2023, 101: 150913.
- [6] Wang K K, Ren T, Yan J Y, et al. Straw residue incorporation: Influence on soil microbial biomass and carbon–nitrogen dynamics in an oilseed rape–rice rotation[J]. Soil Use and Management, 2024, 40: e12990.
- [7] Guo L Y, Wu G L, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 156: 140–147.
- [8] Arai M, Ikazaki K, Terajima Y, et al. Effects of organic amendment on earthworm density and biomass in sugarcane fields with different soil pH[J]. European Journal of Soil Biology, 2024, 122: 103645.
- [9] D'Hose T, Molendijk L, van Vooren L, et al. Responses of soil biota to non-inversion tillage and organic amendments: An

- analysis on European multiyear field experiments[J]. *Pedobiologia*, 2018, 66: 18-28.
- [10] Wang X, Li H X, Zhu L, et al. Effects of earthworms on soil N mineralization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 641-648. [王霞, 李辉信, 朱玲, 等. 蚯蚓活动对土壤氮素矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 641-648.]
- [11] Fonte S J, Hsieh M, Mueller N D. Earthworms contribute significantly to global food production[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5713.
- [12] Liao J H, Ni J P, Zou X M, et al. Earthworms regulate soil microbial and plant residues through decomposition[J]. *Geoderma*, 2024, 450: 117040.
- [13] Wu Y Z, Deng S G, Hao P G, et al. Roxarsone reduces earthworm-mediated nutrient cycling by suppressing aggregate formation and enzymic activity in soil with manure application[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 360: 124777.
- [14] Na L P, Liu Y L, Xiong X J, et al. Effects of earthworm activity on farmland nitrogen transformation under nitrogen fertilizer application: A meta-analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 597-608. [那立苹, 刘亚林, 熊兴军, 等. 氮肥施用下蚯蚓活动对农田氮转化影响的 Meta 分析[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(3): 597-608.]
- [15] Wu Y P, Liu J, Shaaban M, et al. Dynamics of soil N₂O emissions and functional gene abundance in response to biochar application in the presence of earthworms[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115670.
- [16] Wu Y P, Jiang Y B, Di H, et al. Effects of biochar addition on earthworm enhanced N₂O emission[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2024, 123: 103679.
- [17] Liu J, Na L P, Zhang L, et al. Effects of different amount of biochar application and earthworm inoculation on soil N₂O and CO₂ emissions[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(3): 353-359. [刘椒, 那立苹, 张琳, 等. 不同量生物炭施用与蚯蚓互作对土壤 N₂O 及 CO₂ 排放的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(3): 353-359.]
- [18] Domínguez J, Bohlen P J, Parmelee R W. Earthworms increase nitrogen leaching to greater soil depths in row crop agroecosystems[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(6): 672-685.
- [19] Wöhl L, Ruf T, Emmerling C, et al. Earthworm communities and their relation to above-ground organic residues and water infiltration in perennial cup plant (*Silphium perfoliatum*) and annual silage maize (*Zea mays*) energy plants[J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40(2): e13041.
- [20] Müller C, Rütting T, Kattge J, et al. Estimation of parameters in complex ¹⁵N tracing models by Monte Carlo sampling[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(3): 715-726.
- [21] Zhang J B, Müller C, Zhu T B, et al. Heterotrophic nitrification is the predominant NO₃⁻ production mechanism in coniferous but not broad-leaf acid forest soil in subtropical China[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(5): 533-542.
- [22] van Groenigen J W, Lubbers I M, Vos H M J, et al. Earthworms increase plant production: A meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 6365.
- [23] Xue R, Wang C, Liu X L, et al. Earthworm regulation of nitrogen pools and dynamics and marker genes of nitrogen cycling: A meta-analysis[J]. *Pedosphere*, 2022, 32(1): 131-139.
- [24] Na L P, Abail Z, Whalen J K, et al. Earthworms increase nitrogen uptake by lettuce and change short-term soil nitrogen dynamics[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 176: 104488.
- [25] Fisher K A, Meisinger J J, James B R. Urea hydrolysis rate in soil toposequences as influenced by pH, carbon, nitrogen, and soluble metals[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2016, 45(1): 349-359.
- [26] Aira M, Sampedro L, Monroy F, et al. Detritivorous earthworms directly modify the structure, thus altering the functioning of a microdecomposer food web[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(10): 2511-2516.
- [27] Pagenkemper S K, Athmann M, Uteau D, et al. The effect of earthworm activity on soil bioporosity—Investigated with X-ray computed tomography and endoscopy[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146: 79-88.
- [28] Lubbers I M, van Groenigen K J, Fonte S J, et al. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(3): 187-194.
- [29] Zhu Y G, Wang X H, Yang X R, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(2): 792-800. [朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N₂O 产生的关键微生物

过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 792-800.]

[30] Sun Y J, Wu H, Wang Y N. The influence factors on N_2O emissions from nitrification and denitrification reaction[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(2): 384-388. [孙英杰, 吴昊, 王亚楠. 硝化反硝化过程中 N_2O 释放影响因素[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 384-388.]

[31] Gan C, Jiang Y B, Wang Y, et al. Organic fertilizer application reduce ammonia volatilization in an acidic soil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2025, 383: 109510.

[32] Sunderlage B, Cook R L. Soil property and fertilizer additive effects on ammonia volatilization from urea[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018, 82(1): 253-259.

[33] Na L P, Hu C X, Jiang Y B, et al. Earthworms promote the transfer of ^{15}N -urea to lettuce while limit appreciably increase ^{15}N losing to environment[J]. Environmental Research, 2022, 212: 113423.

[34] Hao R, Wu Y P, Di H, et al. Elucidating the role of earthworms on the fate of fertilizer N with synthetic and organic fertilizer application[J]. Geoderma, 2024, 452: 117106.

[35] Xu Y X, He L L, Chen J Y, et al. Effects of biochar on ammonia volatilization from farmland soil: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4042-4050. [许云翔, 何莉莉, 陈金媛, 等. 生物炭对农田土壤氨挥发的影响机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4042-4050.]

[36] Shi Z Q, She D L, Chen X Y, et al. Effects of salinity on soil ammonia volatilization and denitrification rates[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(11): 1458-1464. [史祯琦, 余冬立, 陈心逸, 等. 盐分对土壤氨挥发与反硝化速率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1458-1464.]

[37] Jouquet P, Huchet G, Bottinelli N, et al. Does the influence of earthworms on water infiltration, nitrogen leaching and soil respiration depend on the initial soil bulk density? A mesocosm experiment with the endogeic species *Metaphire posthuma*[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(5): 561-567.

[38] Li P, Lang M. Effect of cultivation on gross and net N transformation rates in black soil relative to duration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 165-173. [李平, 郎漫. 开垦年限对黑土氮初级转化速率和净转化速率的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 165-173.]

[39] Davidson E A, Hart S C, Shanks C A, et al. Measuring gross nitrogen mineralization, and nitrification by ^{15}N isotopic pool dilution in intact soil cores[J]. Journal of Soil Science, 1991, 42(3): 335-349.

[40] Rütting T, Müller C. ^{15}N tracing models with a Monte Carlo optimization procedure provide new insights on gross N transformations in soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39(9): 2351-2361.

[41] Huo H N, Li J, Yuan L, et al. Effects of different straw returning amount on the potential gross nitrogen transformation rates of fertilized Mollisol[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4109-4116. [霍海南, 李杰, 袁磊, 等. 秸秆还田量对培肥农田黑土氮素初级转化速率的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4109-4116.]

[42] Cibulková A, Šantrůčková H, Kaštovská E. Rhizosphere synergy: The role of endogeic earthworms in nutrient cycling, plant growth, and soil organic matter stabilization[J]. Applied Soil Ecology, 2025, 213: 106272.

[43] Xu Q C, Zhang H, Vandenkoornhuyse P, et al. Carbon starvation raises capacities in bacterial antibiotic resistance and viral auxiliary carbon metabolism in soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(16): e2318160121.

[44] Barrett J E, Burke I C. Potential nitrogen immobilization in grassland soils across a soil organic matter gradient[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32(11/12): 1707-1716.

[45] Gao W L, Fan C H, Zhang W, et al. Heterotrophic nitrification of organic nitrogen in soils: Process, regulation, and ecological significance[J]. Biology and Fertility of Soils, 2023, 59(3): 261-274.

[46] Zeba N, Berry T D, Fischer M S, et al. Soil carbon mineralization and microbial community dynamics in response to pyrogenic organic matter addition[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2024, 191: 109328.

(责任编辑: 卢 萍)

附表 1 化肥与有机肥施用下蚯蚓对土壤氮素转化速率模型参数的影响

Table S1 Effects of earthworm on the model parameters of nitrogen transformation rate with chemical and organic fertilizer application

处理 Treatment	M_{Nrec}	$I_{NH4-Nrec}$	M_{Nlab}	$I_{NH4-Nlab}$	O_{Nrec}	I_{NO3}	O_{NH4}	D_{NO3}	A_{NH4}	R_{NH4}
C-E	0.425	0.155	0.709	0.122	0.015	0.484	1.944	0.112	0.116	0.018
C+E	0.505	0.051*	0.942	0.321*	0.011	0.523	2.694*	0.108	0.097	0.021
O-E	1.376	2.051	0.687	0.374	0.018	0.641	1.382	0.124	0.188	0.031
O+E	1.943*	1.562*	1.465*	0.683*	0.029*	0.712	1.518	0.109	0.347*	0.034

注：“*”表示相同肥料施用下，有蚯蚓与无蚯蚓处理之间差异显著（ $P < 0.05$ ）。Note: "*" indicates that there is a significant difference ($P < 0.05$) between the treatments with earthworms and without earthworms when the same fertilizer is applied.