

氮肥施用下蚯蚓活动对农田氮转化影响的Meta分析

那立苹, 刘亚林, 熊兴军, 朱超亚, 王薇, 明润廷, 伍玉鹏

引用本文:

那立苹, 刘亚林, 熊兴军, 朱超亚, 王薇, 明润廷, 伍玉鹏. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0709>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蚯蚓作用下不同C/N秸秆还田对土壤CO₂及N₂O排放的影响

王争妍, 雷紫烟, 叶志雄, 伍玉鹏

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1908–1915 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0187>

猪场废弃物和解磷菌、蚯蚓联合施用对旱坡地土壤碳循环相关酶的影响

程雄, 王利英, 李文彦, 张海春, 李永涛, 张玉龙

农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2479–2485 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0686>

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 孙丽娟, 蔡润众, 彭曦, 柏佳, 黄硕霏, 周青

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2762–2770 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0605>

长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

土施纳米氧化锌对蚯蚓生理和黄瓜幼苗生长的影响

杨静雅, 符倩, 张皓月, 彭晴晴, 钟民正, 毛晖

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 525–534 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1077>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.
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.



开放科学 OSID

氮肥施用下蚯蚓活动对农田氮转化影响的 Meta 分析

那立苹¹, 刘亚林², 熊兴军³, 朱超亚¹, 王薇¹, 明润廷¹, 伍玉鹏^{1*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051)

摘要: 蚯蚓在自然土壤中既能促进植物氮(N)素利用、增加土壤N固持,也会导致土壤N素气逸和淋溶损失,但农田土壤中持续的N肥施用如何影响蚯蚓的这些作用却并不清楚。因此,本研究提取了52篇文献中的202对数据,利用Meta分析从N肥类型、施肥量和施肥方式3个方面进行研究,评估N肥施用下蚯蚓活动对农田N转化的影响。总体结果表明,N肥施用下蚯蚓活动显著增加了作物生物量(地上部、地下部分别增加了12.00%、19.30%)及作物总氮(TN)含量(地上部、地下部分别增加了20.35%、21.06%),显著增加了土壤可利用N(9.16%)、微生物生物量氮(MBN,23.19%)及脲酶活性(23.73%),但与此同时也导致土壤氧化亚氮(N₂O)排放和N淋溶增加了16.41%和16.15%。蚯蚓活动对不同肥料类型、施肥量及施肥方式下土壤N转化过程的影响不同。有机-无机N肥配施时,蚯蚓活动对作物生物量和TN含量均有显著的促进作用(地上部、地下部生物量分别增加了17.90%、18.03%;地上部、地下部TN含量分别增加了37.62%、25.76%);无论N肥施用量为多少,蚯蚓活动均显著增加了作物地上部生物量和地上部TN含量,但对其他指标无显著影响;N肥深施时,蚯蚓活动显著增加了作物生物量(地上部、地下部生物量分别增加了16.75%、22.75%)、TN含量(地上部、地下部TN含量分别增加了33.24%、27.62%)和微生物活性(MBN、脲酶分别增加了27.87%、28.21%),而N肥表施时,蚯蚓活动仅显著增加了土壤可利用N含量(17.56%)和脲酶活性(9.03%)。蚯蚓活动显著增加生态系统多功能性(5.93%)。N肥深施相比N肥表施更有助于充分发挥蚯蚓在农田土壤N转化过程中的积极作用,而N肥类型和施用量对蚯蚓诱导的N转化过程的综合作用并无显著影响。

关键词: 蚯蚓;氮肥;农田土壤氮转化;生态系统多功能性;Meta分析

中图分类号:S143 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)03-0597-12 doi:10.11654/jaes.2023-0709

Effects of earthworm activity on farmland nitrogen transformation under nitrogen fertilizer application : a Meta-analysis

NA Liping¹, LIU Yalin², XIONG Xingjun³, ZHU Chaoya¹, WANG Wei¹, MING Runtong¹, WU Yupeng^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. China Power Construction Group Kunming Survey, Design and Research Institute Co., Ltd, Kunming 650051, China)

Abstract: Earthworms can promote plant N utilization, increase soil N retention, and cause soil N loss through gas escape and leaching in natural soil. However, it is unclear how continuous N fertilizer application affects earthworms on farmland soil. Therefore, 202 data records from 52 pieces of literature were collected and analyzed using a Meta-analysis of N fertilizer type, fertilizer rate, and fertilization method, and the effects of earthworm activity on farmland soil N transformation under N fertilizer application were comprehensively evaluated. The

收稿日期:2023-08-31 录用日期:2023-11-13

作者简介:那立苹(1994—),女,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,研究方向为土壤生态。E-mail:1562111574@qq.com

*通信作者:伍玉鹏 E-mail: wyp19851205@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(32171638);云南省科技人才和平台计划项目(202205AF150004)

Project supported: National Natural Science Foundation of China (32171638); Yunnan Provincial Science and Technology Talent and Platform Plan (202205AF150004)

overall results showed that earthworm activity significantly increased crop biomass (aboveground and belowground by 12.00% and 19.30%, respectively), crop total nitrogen (TN) content (aboveground and belowground by 20.35% and 21.06%, respectively), soil available N content (9.16%), microbial biomass N (MBN) content (23.19%), urease activity (23.73%), N_2O emission (16.41%), and N leaching (16.15%). The effects of earthworm activity on soil N transformation differed under different fertilizer types, rates, and methods. Earthworm activity had a significant positive effect on crop biomass (aboveground and belowground biomass increased by 17.90% and 18.03%, respectively) and TN content (aboveground and belowground increased by 37.62% and 25.76%, respectively) when organic-inorganic mixed fertilizer was applied. Earthworm activity significantly increased crop aboveground biomass and aboveground TN content regardless of N fertilizer application rate; however, no such results were found for other parameters. When N fertilizer was applied deeply, earthworm activity significantly increased crop biomass (aboveground and belowground biomass by 16.75% and 22.75%, respectively), TN content (aboveground and belowground by 33.24% and 27.62%, respectively), and microbial activity (MBN and urease by 27.87% and 28.21%, respectively). However, when N fertilizer was applied on the soil surface, earthworm activity only significantly increased available N content (17.56%) and urease activity (9.03%). Furthermore, earthworm activity significantly increased the ecosystem multifunctionality index by 5.93%. Compared with N fertilizer applied on the soil surface, deep application of N fertilizer was more conducive to promoting the positive role of earthworms in farmland soil N transformation. There was no significant difference in the comprehensive effects of N fertilizer types and application rates on the earthworm-induced N transformation.

Keywords: earthworm; nitrogen fertilizer; farmland soil nitrogen transformation; ecosystem multifunctionality; Meta-analysis

施用氮(N)肥不仅为土壤提供了N源,也通过改变土壤微生物种类和数量导致土壤N激发效应发生^[1],影响N素转化过程,使N素或残留在土壤中、或被植物吸收利用、或经不同途径[如渗漏淋移、氨挥发(NH_3)和氧化亚氮(N_2O)挥发等]损失^[2]。施N时涉及的肥料种类、施用量和施用方式是影响土壤N转化的重要因素。相比有机N肥,化肥N可快速提供植物所需养分,但也更易导致N素流失^[3]。一定范围内增施N肥可提高作物产量,但过量施N却导致N损失成倍增加^[4]。此外,N肥深施相比表施也更有利于提高植物对N素的利用^[5]。我国N肥利用率整体偏低,并由此产生了一系列潜在的环境问题^[6]。在此背景下,深入了解N肥施用下农田N素的转化过程及调控机制对提升N利用率具有十分重要的意义。

蚯蚓在调节土壤N转化方面发挥着重要作用^[7]。一方面,蚯蚓可促进土壤有机质矿化,增加N素有效性^[8],进而提高植物对N素的吸收^[9]。植物根系分泌物也可为蚯蚓提供所需养分,影响蚯蚓在土壤N转化过程中的功能。Xue等^[10]发现,相比无植物系统,种植植物后蚯蚓活动对土壤总氮(TN)的影响减弱。此外,蚯蚓还能通过排泄促进大团聚体形成以增强土壤N库稳定^[11]。另一方面,蚯蚓也会通过促进硝化和反硝化作用增加N素损失^[12]。虽然蚯蚓自身排放的 N_2O 很少,但其形成的“蚓触圈”为 N_2O 排放热点^[13],导致土壤 N_2O 排放增加30%~56%^[12]。Domínguez等^[14]在6年的定位研究中发现,高密度蚯蚓小区中的淋溶N损失为低密度蚯蚓小区的2.5倍。

外源N输入是影响蚯蚓诱导土壤N转化的重要因素之一。但蚯蚓活动对不同施N量下土壤N转化过程的影响并不相同,例如当化肥和粪肥施N量超过 $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时,蚯蚓对植物生长的促进作用由原来的19%下降到9%,而作物残茬的施用量越多,蚯蚓对植物生长的促进作用越显著^[9]。此外,N肥类型和施用方式也是影响蚯蚓功能的主要因素,Na等^[15-16]开展的培养实验发现:施用尿素时,蚯蚓增加了红壤-植物系统整体的N素损失,但也显著促进了植物对尿素N的吸收利用;而施用水稻秸秆时,蚯蚓显著促进了植物对土壤原有N的吸收利用,却让更多的秸秆N留存在土壤中。Lubbers等^[12]通过元分析发现,蚯蚓仅在施用有机肥的土壤中显著增加 N_2O 排放。于建光等^[17]发现,相比秸秆覆盖处理,秸秆与土壤混匀后蚯蚓对土壤TN含量的影响更为显著。

总体来看,蚯蚓在土壤N转化过程中既存在如促进植物N素利用、增加土壤N固持的有利影响,也同时存在增加土壤N素气逸和淋溶损失的不利影响。虽然已有的研究提示外源N输入下蚯蚓活动改变了农田N转化过程,但大多基于单个实验开展或仅关注蚯蚓对作物吸N、土壤固N或N素损失中的一个方面,尚未全面、深入地分析不同肥料种类、施用量和施用方式下蚯蚓活动对土壤N转化过程的影响。这限制了对农田土壤中蚯蚓生态多功能性的准确评价,也不利于深入了解N肥施用下土壤动物在农田土壤N素转化过程中的调控机制。

生态系统多功能性能同时提供并维持多种生态

系统服务和功能^[18]。不同的学者采用了不同的指标来评价生态系统多功能性,如Liu等^[19]基于13 a的田间试验,选择作物生物量、作物碳氮磷含量等21个指标进行综合评价,以探索蚯蚓对生态系统多功能性直接或间接的影响。因此,本研究广泛收集国内外农田土壤N转化过程与蚯蚓功能的相关文献,利用Meta分析研究蚯蚓活动对N肥施用下作物吸N、土壤固N及N素损失所包含的10种生态功能的影响,探讨肥料种类、施用量和施用方式的效应大小,并基于前人构建的农田土壤多功能性评价体系,综合评估蚯蚓活动对N肥施用下农田土壤N转化过程的作用。研究结果不仅有助于深入了解N肥施用下蚯蚓在农田土壤中的生态功能,亦能够为将来利用蚯蚓等土壤动物调控农田土壤N转化过程、实现农田土壤N素“保供应、稳固持、降损失”提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集与整理

本研究以“蚯蚓(Earthworm)”、“氮(Nitrogen/N)”和“施肥(Fertilizer application)”等关键词组成的中英文布尔逻辑检索式,在中国知网、万方数据知识服务平台、Web of Science等数据库中检索于2022年5月14日之前发表的中英文文献,对文献进行筛选并汇编数据库。文献筛选及数据提取标准为:(1)研究对象为农田土壤并种植有作物;(2)实验类型包括大田和盆栽实验,在实验过程中需施用N肥;(3)大田实验如果包含多个生长季,每个生长季当作一个独立的实验进行处理;(4)实验中必须有严格的处理(有蚯蚓)和对照(无蚯蚓),处理组和对照组的实验条件一致;(5)如果在实验中植物和土壤指标呈动态取样,只录取最终采样时间的数据;如果土壤数据取自多个土层,则取多个土层的平均值^[20]。

数据库汇编对应土壤N素的三个主要去向,即:(1)作物吸收利用量,包含作物生物量及作物N含量等指标;(2)土壤留存量,包含土壤N含量及微生物活性等指标;(3)损失量,包含N₂O气态和N淋溶损失等指标。文献中通过表或文字形式展示的数据、标准偏差(SD)直接进行提取,图形形式展示的数据使用取点软件GetData Graph Digitizer v2.26提取。如果文献使用的是标准误差(SE),则利用公式 $SD=SE \times \sqrt{n}$ 转换为SD^[21]。如果没有给出或无法计算SD,则假设SD为平均值的10%^[21]。经过以上标准筛选,最终共获得52篇文献(附表1,可扫首页OSID码获取),提取数据

202对,其中涉及的作物类型包括:经济作物10篇,粮食作物42篇,涉及的土壤类型包括:淋溶土、初育土、铁铝土、盐碱土和钙层土^[22]。研究按照N肥施用时涉及的N肥类型、施用量和施用方式设置分组,具体分组情况如下:N肥类型分为有机肥(Organic fertilizer)、无机肥(Inorganic fertilizer)和有机-无机配施(Both);N肥施用量分为 ≤ 50 、51~100、101~200 kg·hm⁻²和 >200 kg·hm⁻²;施用方式分为表施(Broadcasting)和深施(Deep-placement)。并将不足两对数据的分组排除在外^[23]。

1.2 农田土壤多功能性评价体系的构建及测度方法

对于农业生产来说,蚯蚓活动对土壤N转化过程的影响存在有利和不利两个方面。因此,本研究基于前人提出的评价体系进一步修改、优化,以构建适用于本研究的多功能性评价体系来综合评价蚯蚓在农田土壤N转化过程中的作用^[24]。本研究选取作物生物量及N含量(地上部、地下部生物量及对应N含量)、土壤N含量及微生物活性[土壤TN、可利用N、微生物生物量氮(MBN)和脲酶]、土壤N素损失量(N₂O气态和N淋溶)相关的10项功能指标来表征农田土壤多功能性。为了统一所有功能指标的单位,使用 $x=\lg(x+1)$ 公式对每个生态系统功能进行标准化处理^[25],之后对所有功能取平均值^[24,26]记为生态系统多功能性,其中按照金碧洁等^[25]方法取至少3项功能记为生态系统多功能性,所获得的数据为100对。对于N₂O排放和N淋溶这些不利于农业生产的指标,通过数据乘以-1的方式保持与其他指标方向一致^[26]。

1.3 数据分析

本研究采用效应比的自然对数(lnRR)计算生态系统功能和多功能性的效应值^[27],计算生态系统多功能性时,使用标准化之后的数据来度量效应大小,公式为:

$$\ln RR = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) = \ln X_t - \ln X_c \quad (1)$$

式中, X_t 和 X_c 分别表示蚯蚓和对照处理的平均值。

效应值的方差(V)计算如下:

$$V = \frac{S_t^2}{N_t \bar{X}_t^2} + \frac{S_c^2}{N_c \bar{X}_c^2} \quad (2)$$

式中: S_t 和 S_c 分别是蚯蚓和对照处理的标准偏差, N_t 和 N_c 分别是蚯蚓和对照处理的样本量^[28]。

采用非参数权重因子(W)对其进行加权:

$$W = 1/V \quad (3)$$

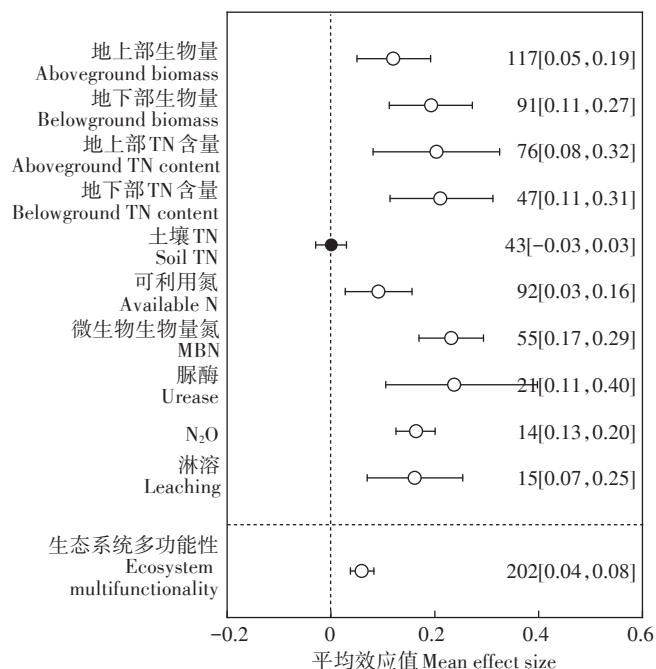
本研究使用Metawin 2.1的随机效应模型研究蚯

蚓活动对农田土壤N转化的影响。因本研究个别指标样本量不足,因此选用拔靴法(迭代次数为64 999次)计算平均效应值的95%置信区间(95% CI)^[29],95%的置信区间包含0、全部小于0和全部大于0分别代表蚯蚓活动对农田土壤N转化无显著影响、有显著的负效应和有显著的正效应。使用罗森塔尔失安全系数(Rosenthal's Fail-safe Number)检验出版偏倚。采用Origin 2023绘制森林图。

2 结果与分析

2.1 N肥施用下蚯蚓活动对农田N转化的影响

除土壤TN含量外,N肥施用下蚯蚓活动对所提取的数据指标均呈显著的正向促进作用(95% CI=-0.03,0.03)(图1)。相比对照处理,蚯蚓活动显著促进了作物生长,其地上部、地下部生物量分别增加12.00%、19.30%,促进了作物对N素的吸收,其地上



误差线和圆点分别表示95%置信区间和平均效应值,实心圆表示蚯蚓活动对农田土壤N转化无显著影响,空心圆表示蚯蚓活动对农田土壤N转化有显著影响。误差线右侧的数字表示相应组分的样本数和95%置信区间。下同。

Error bar and dot represents 95% confidence interval and mean effect size, respectively. Solid circles indicate that earthworm activity has no significant effect on N transformation in farmland soil, while hollow circles indicate that earthworm activity has significant effect on N transformation in farmland soil. The number at the right of the error bar indicates the number of samples and 95% confidence interval. The same below.

图1 蚯蚓对生态系统多种功能及生态系统多功能性的平均效应值

Figure 1 Mean effect size of earthworm on multiple ecosystem functions and ecosystem multifunctionality

部、地下部TN含量分别增加20.35%、21.06%。蚯蚓活动虽未显著改变土壤TN含量,但增强了土壤N素的转化能力,其可利用N、MBN和脲酶活性分别增加了9.16%、23.19%和23.73%。与此同时,蚯蚓活动也增加了土壤N素损失,其中N₂O排放和N淋溶分别增加了16.41%和16.15%。综合来看,N肥施用下蚯蚓活动显著提高了农田土壤多功能性(相比无蚯蚓提高了5.93%)。

2.2 不同肥料类型、施肥量及施肥方式下蚯蚓活动对作物生长及N素利用的影响

在施用无机N肥和有机-无机N肥配施时,蚯蚓活动显著增加了作物地上部生物量(8.29%和17.90%,图2A)。无论施用何种N肥,接种蚯蚓均显著增加了作物地下部生物量(图2B),有机N肥、无机N肥和有机-无机N肥配施的增加幅度分别在12.27%~36.81%、3.24%~28.98%和3.10%~33.09%之间。蚯蚓活动增加了作物地上部TN含量,但仅在有机-无机N肥配施时存在显著差异(37.62%)(图2C)。在施用有机N肥和有机-无机N肥配施时,蚯蚓活动显著增加了地下部TN含量(16.51%和25.76%,图2D)。

无论N肥施用量为多少,接种蚯蚓均显著增加了作物地上部生物量及地上部TN含量,增加幅度分别为9.15%~23.24%和18.03%~39.62%。但当施N量超过100 kg·hm⁻²后,蚯蚓活动对地下部作物生物量的促进作用并不显著。当施N量为101~200 kg·hm⁻²时,蚯蚓活动并未显著提高作物地下部TN含量。

当N肥深施时,蚯蚓活动显著增加了作物地上部生物量(16.75%)、地下部生物量(22.75%)、地上部TN含量(33.24%)和地下部TN含量(27.62%)。但N肥撒施时,蚯蚓活动对所提取的指标均无显著差异。

2.3 不同肥料类型、施肥量及施肥方式下蚯蚓活动对土壤N含量及微生物活性的影响

无论施用何种类型N肥,蚯蚓活动对土壤TN含量均无显著影响(图3A),但显著增加了MBN(有机N肥、无机N肥和有机-无机N肥配施分别为20.08%、15.57%和28.02%,图3C)和脲酶活性(有机N肥、无机N肥和有机-无机N肥配施分别为11.16%、42.63%和35.31%,图3D)。蚯蚓活动增加了土壤可利用N含量(图3B),但仅在施用有机N肥(9.95%)和有机-无机N肥配施(11.77%)时存在显著差异。

由于样本量不足,本研究未能在脲酶指标中对N肥施用量进行详细分组。但当施N量≤50 kg·hm⁻²时,蚯蚓活动显著增加了土壤TN含量(6.27%)。当施N

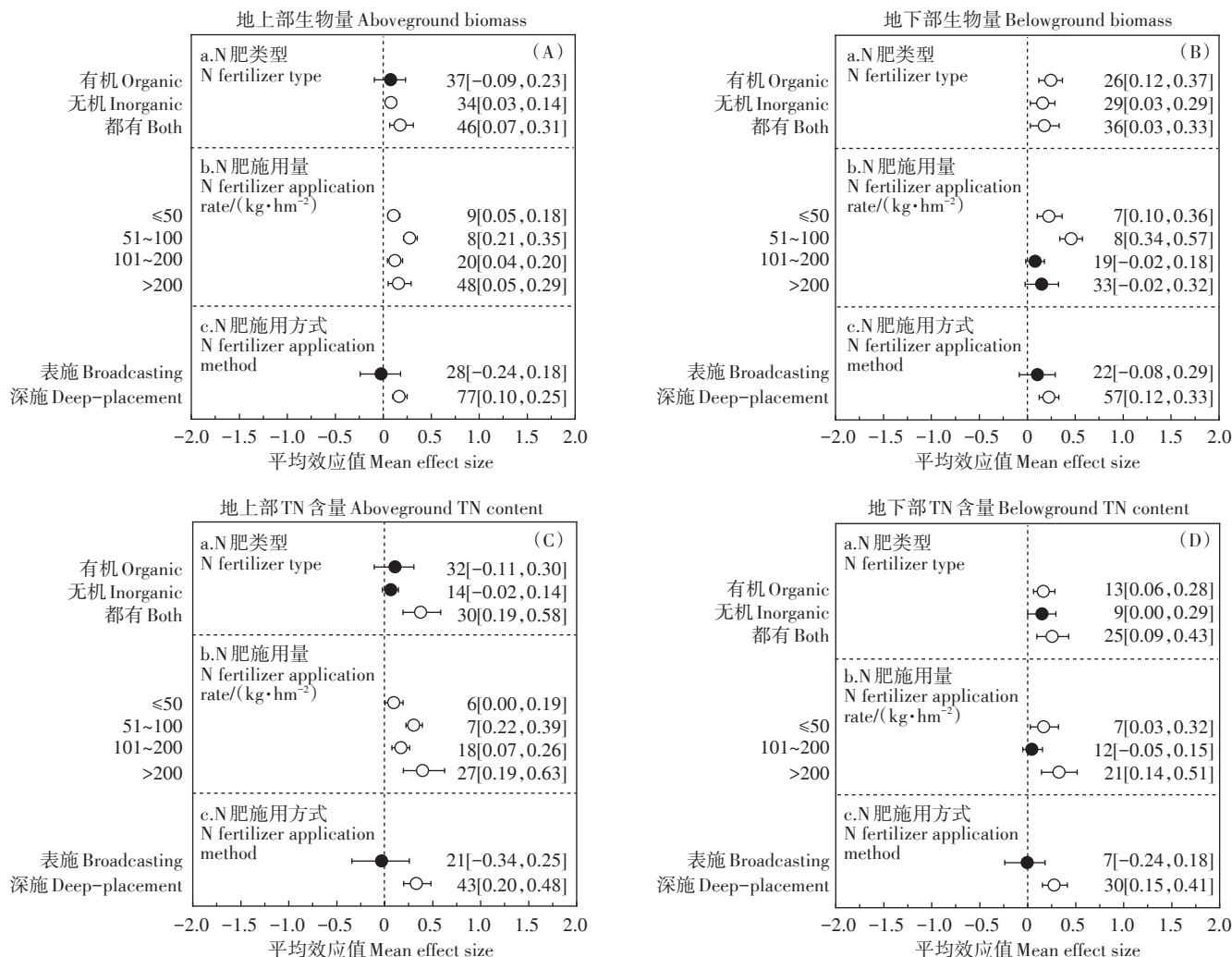


图2 蚯蚓对(A)地上部生物量、(B)地下部生物量、(C)地上部TN含量、(D)地下部TN含量的影响

Figure 2 Effects of earthworm on (A) Aboveground biomass, (B) Belowground biomass, (C) Aboveground TN content, (D) Belowground TN content

量为51~100 kg·hm⁻²时,蚯蚓活动显著增加了MBN含量(21.12%),却显著减少了土壤可利用N含量(86.39%)。当施N量为101~200 kg·hm⁻²时,蚯蚓活动显著增加了MBN和脲酶活性(11.82%和48.23%)。当施N量>200 kg·hm⁻²时,蚯蚓活动显著增加了土壤可利用N和MBN含量(11.71%和30.00%)。

N肥表施时,蚯蚓活动使可利用N和脲酶分别显著增加17.56%和9.03%;N肥深施时,蚯蚓活动使MBN和脲酶分别增加27.87%和28.21%。

2.4 不同肥料类型及施肥方式下蚯蚓活动对土壤N损失的影响

无论采用何种类型N肥,蚯蚓活动均显著增加了N₂O排放,施用有机N肥和有机-无机N肥配施时分别增加了16.97%和13.79%(图4A)。当有机或无机

N肥单独施用时,蚯蚓活动显著增加了N淋溶,增加幅度分别为9.55%~25.50%和40.84%~41.54%,但当有机-无机N肥配施时,蚯蚓活动对N淋溶却无显著影响(图4B)。

由于样本量不足,未能在该部分对N肥施用量进行详细分组。无论是肥料表施或深施,蚯蚓活动均显著增加了N淋溶损失,增加幅度分别为3.88%~26.37%和3.04%~31.80%。

2.5 不同肥料类型、施肥量及施肥方式下蚯蚓活动对农田土壤N转化过程影响的综合评价

蚯蚓活动对作物吸N、土壤固N及N素损失等相关指标的影响因N肥类型、施用量及施用方式的不同而异(图2~图4)。鉴于所提取指标对农业生产来说包括有利和不利影响,本研究利用构建的多功能性评

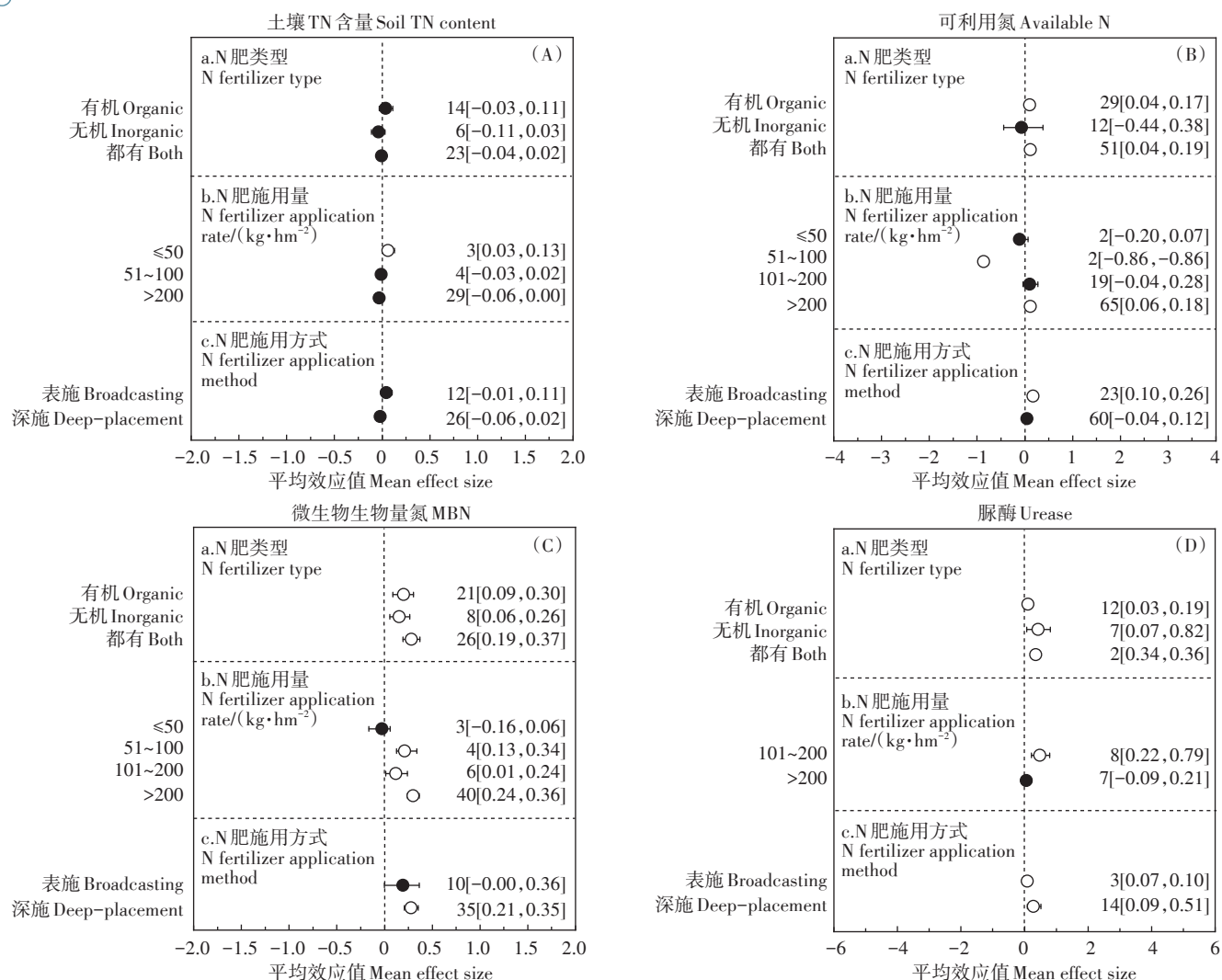


图3 蚯蚓对(A)土壤TN、(B)可利用N、(C)MBN和(D)脲酶的影响

Figure 3 Effects of earthworm on (A) Soil TN, (B) Available N, (C) MBN, and (D) Urease

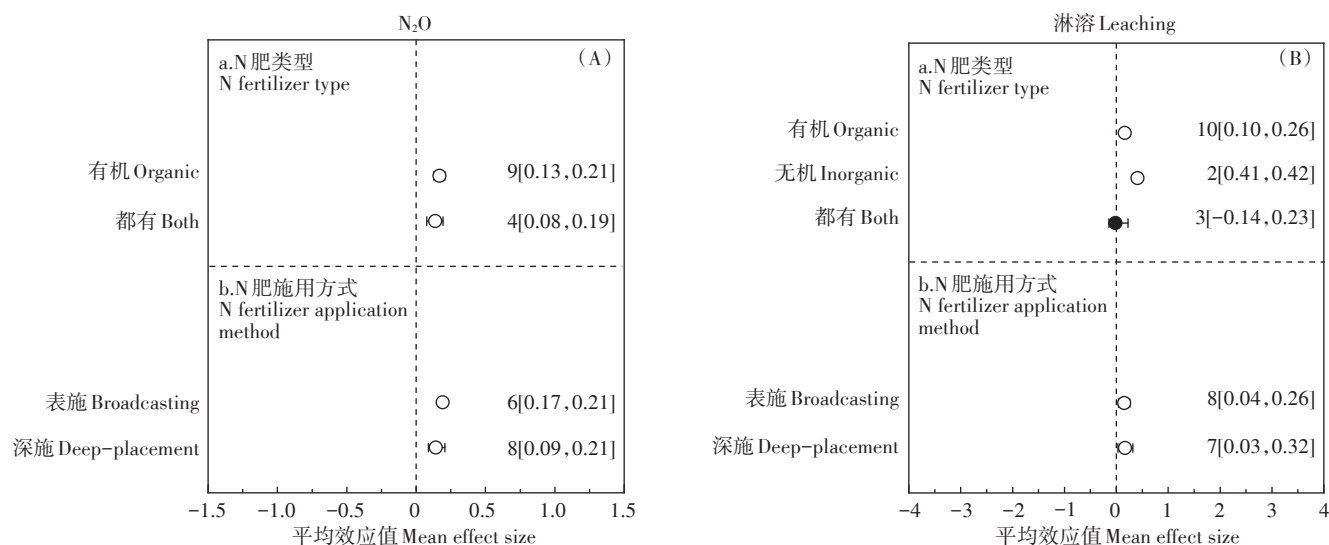


图4 蚯蚓对(A)N₂O和(B)淋溶的影响

Figure 4 Effects of earthworm on (A) N₂O and (B) Leaching

价体系来综合评价施肥措施下蚯蚓活动对农田土壤N转化的贡献(图5)。无论N肥类型和施用量如何,蚯蚓活动均显著增加了生态系统多功能性(有机N肥、无机N肥和有机-无机N肥配施分别为3.73%、7.90%和7.35%;施用量 ≤ 50 、51~100、101~200 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $>200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 分别为6.02%、7.06%、6.79%和6.23%)。从N肥施用方式看,只有N肥深施时,蚯蚓活动才使得生态系统多功能性显著提高5.81%。

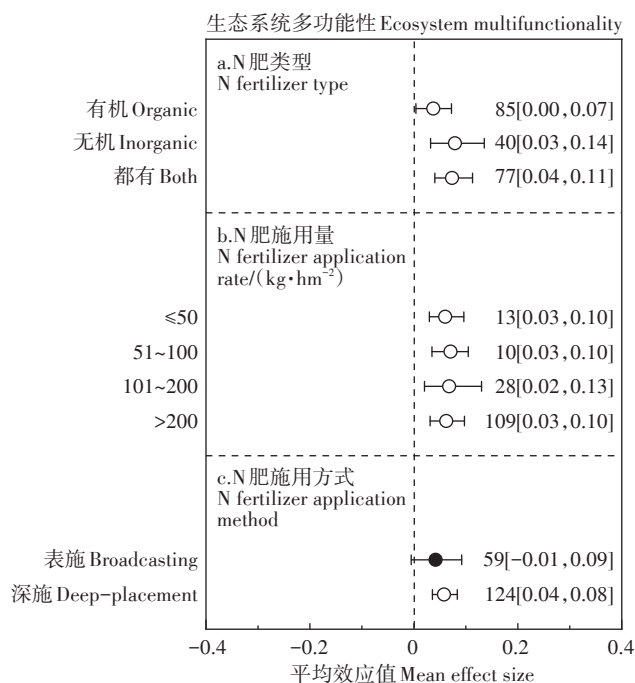


图5 蚯蚓对生态系统多功能性的影响

Figure 5 Effects of earthworm on ecosystem multifunctionality

2.6 蚯蚓活动对农田土壤N转化过程影响的发表偏倚检验

本研究对各项指标进行偏倚检验,除去95%CI包含0的土壤TN含量外,地上部生物量、地下部生物量、地上部TN含量、地下部TN含量、可利用N、MBN、脲酶、 N_2O 、淋溶和生态系统多功能性的失安全数分别为18 609、13 413、21 584、4 558、3 161、6 098、1 468、886、408和11 044,均远高于相应的临界值($5n+10$),说明本研究的结果可靠。

3 讨论

3.1 N肥施用下蚯蚓活动对农田N转化的影响

通过Meta分析发现,蚯蚓活动显著增加了作物地上部和地下部生物量(图1),分别为12%和19.3%,这与van Groenigen等^[9]研究结果趋势一致,但效果弱

于van Groenigen等的计算结果:蚯蚓增加植物地上部和地下部生物量23%和20%。已有研究认为,蚯蚓主要通过3种途径促进养分利用:①增加土壤中植物易利用养分含量;②对土壤物理性状进行改良;③与微生物等其他生物相互作用来促进植物生长^[30]。但在农田土壤中,大量的肥料投入可能掩盖了蚯蚓在增加土壤易利用养分方面的作用,而周期性的耕作也破坏了蚯蚓活动所形成的良好土壤团聚结构。这些差异可能是导致蚯蚓增加作物生物量效果弱化的原因。此外,van Groenigen等的研究包括了自然生态系统中的植物。相比于本研究集中于农作物,自然植物具有更深、更广的根系结构,为蚯蚓作用下的菌根定植^[31]和菌丝网络形成^[32]提供了更加充足的空间,通过扩大植物根系对养分的吸收面积^[33],在一定程度上增强了蚯蚓-植物根系互作对植物生物量累积的促进作用。

本研究中,蚯蚓活动显著增加了农田作物地上部和地下部总N吸收量,这与Wurst等^[34]和Lubbers等^[35]在自然生态系统中得出的结果一致。Na等^[15-16]通过添加尿素和秸秆的培养实验进一步指出,蚯蚓的存在使茼蒿中TN含量分别增加了29.6%和43.8%,但从茼蒿N含量看,有、无蚯蚓处理间并无显著差异。因此,本研究中蚯蚓对作物N素吸收总量的促进作用可能主要归结为蚯蚓对作物生物量的促进作用。也有少部分学者发现蚯蚓活动抑制了植物对N素的吸收利用,如Callaham等^[36]发现蚯蚓对植物N素吸收产生了负效应,但并未阐明其中机制。Fisk等^[37]认为,森林中入侵的蚯蚓未对植物N含量产生显著影响,但通过减少树木的须根系总量降低了须根系对N素的吸收。此外,蚯蚓活动下土壤N形态的转变与植物对N形态的偏好也可能导致蚯蚓对植物总吸N量产生不同的影响。例如蚯蚓作用下蕨类植物对N的吸收增加要同时归功于蚯蚓活动增加土壤中 NH_4^+ 的浓度,以及蕨类植物偏好吸收 NH_4^+ 的双重作用^[38]。

Meta分析显示蚯蚓活动对农田土壤TN含量无显著影响,这可能与土壤TN含量的变化是一个相对缓慢的过程有关^[39]。本研究收集的文献通常在当季作物收获后即终止数据采集,其相对较短的实验周期无法准确反映蚯蚓对土壤TN含量的影响。Ferlian等^[40]针对森林和草原的Meta分析显示,入侵蚯蚓显著降低了土壤有机层的TN含量,但显著增加了矿质土壤层的TN含量。Ferlian等认为这可能是由于入侵蚯蚓对有机层和矿质层土壤的混合作用,改变了养分在土壤中的垂直分配状况。但在农田土壤中,大多研究主

要考虑耕层范围,忽略了蚯蚓对更深层次土壤的影响。此外,入侵蚯蚓占据了森林或草原土壤中空缺的生态位^[41],相比本研究中涉及的土著蚯蚓,入侵蚯蚓会对土壤造成更大的扰动,增加土壤N淋溶^[42],并导致土壤TN含量与入侵蚯蚓数量表现出明显的负相关关系^[43]。

研究结果表明,土壤可利用N、MBN及脲酶活性在有蚯蚓的处理中显著增加,说明蚯蚓提高了N素在农田土壤中的有效性及转化能力,这与在自然土壤中得到的结果一致^[44]。蚯蚓作为生态系统的分解者,能够通过破碎、过腹等作用促进有机物质的矿化过程,将结构复杂的有机N转化为植物、微生物易利用的矿质N,并为微生物营造良好的生存环境刺激微生物繁殖^[45]。但也有研究认为,蚯蚓肠道中富含消化酶,易分解经过蚯蚓肠道的微生物,减少微生物量^[46]。蚓穴和非蚓穴中微生物群落结构高度的空间异质性及蚯蚓对微生物的影响方式等,导致微生物量发生改变^[45]。相比自然土壤,蚯蚓对微生物量的调控或许在农田土壤中发挥更大的作用。肥料施用时代蚯蚓对微生物繁殖的促进作用或可暂时固定N素,并在后期通过对微生物的取食作用释放N素,使微生物量成为N素在土壤中的一个缓冲库^[47]。土壤脲酶会促进尿素水解,并为土壤环境提供N素和水^[48]。而土壤脲酶活性与土壤团聚体MWD之间呈显著的正相关关系^[49],因此成德久等^[50]认为,蚯蚓对土壤团聚体形成的有利作用或是蚯蚓提高土壤脲酶活性的主要原因。

蚯蚓被认为是N₂O排放的移动“热点”,其活动显著增加了土壤N₂O排放^[12]。这可归结为蚯蚓对土壤硝化、反硝化过程的促进作用^[51],以及蚯蚓肠道厌氧环境对土壤微生物群落结构的调控^[13]。本研究结果表明,蚯蚓活动使土壤N₂O排放显著增加16.41%,低于Lubbers等^[12]的研究结果(蚯蚓活动增加土壤N₂O排放42%)。这一差异可能是因为本研究中只考虑了种植作物的系统,而蚯蚓活动刺激了作物对土壤矿质N的吸收利用,在一定程度上减少了反硝化基质并降低N₂O排放^[12]。此外,本研究所提取的数据均基于肥料施用下有、无蚯蚓的差异开展。施肥本身也是影响土壤N₂O排放的重要因素^[52],与蚯蚓影响土壤N₂O排放的作用大小关系并不明确,这影响了蚯蚓活动诱导农田土壤N₂O排放作用强度的判断。基于本研究所提取的淋溶相关文献,蚯蚓活动显著增加了N淋溶损失,Domínguez等^[14]将其归结于蚯蚓显著增加了淋溶总量。但在自然生态系统中,不同学者的研究结果并

不一致。Andriuzzi等^[53]发现蚯蚓*A. chlorotica*, *A. longa*和*L. terrestris*均不会对草地生态系统中淋溶N损失有显著影响。Bohlen等^[54]发现蚯蚓活动显著增加了农业土壤中淋溶N损失,但是对森林土壤淋溶N损失没有影响,可能和土壤中黏土含量有关。Marhan等^[55]通过不同含沙量的实验发现蚯蚓在耕地(黏土量低)土壤中导致的N损失比在森林(黏土量高)土壤中导致的N损失更大,认为与农田土壤相比,自然土壤中黏土含量高,较高的黏土含量可能有助于稳定森林土壤中蚓粪所含的有机物,减少淋溶损失。

3.2 不同肥料类型、施肥量及施肥方式下蚯蚓活动对农田土壤N转化的影响

在农田土壤N转化过程中,N素或固持在土壤中、或被作物吸收利用、或通过不同途径损失,而施N时所选择的肥料种类、施用量和施用方式则是影响这一过程的重要因素。

虽然不同N肥类型施用下蚯蚓均能增加作物地上部、地下部生物量及TN含量(图2),但仅当有机-无机N肥配施时其作用效果才全部具有差异显著性。这是因为有机-无机N肥配施能较好地调节土壤C/N^[56],可避免高C/N的有机肥单独施入后微生物-蚯蚓-作物之间在可利用碳、氮方面产生竞争,也有助于避免无机N肥单独施入后短期内N素大量损失。蚯蚓提高了N素在农田土壤中的有效性及转化能力(图3),尤其当施用的N肥中包含有机物料(包括有机肥单施或有机-无机N肥配施)时,土壤可利用N及MBN含量的增加效果更为明显,这可归结为蚯蚓对有机物质的分解矿化作用^[57]。而无机肥料施用时代,蚯蚓活动对土壤可利用N含量无显著影响,或许是因为蚯蚓加速了尿素在脲酶作用下转化成NH₄⁺,又在微生物作用下快速转化为NO₃⁻和NO₂⁻^[47]的过程,增加无机N的淋溶损失(图4)。

van Groenigen等^[9]将N肥施用量以30 kg·hm⁻²·a⁻¹为标准划分后进行Meta分析,发现当N肥施用量超过30 kg·hm⁻²·a⁻¹时,蚯蚓对植物生长的促进作用由原来的19%下降到9%,并指出蚯蚓的矿化作用是其促进植物生长的主要原因。虽然本研究将施肥量划分了更多的等级,但并未发现蚯蚓活动对作物生长的促进作用随施肥量的增大而变小。在土壤N固持的相关指标中,也未发现与施N量具有相关关系。这可能与农田施肥量较大有关,例如本研究划分的最低施N量为50 kg·hm⁻²,要高于van Groenigen等的划分标准。此外,本研究中提取的数据最高施N量在200

kg·hm⁻²以上,超过了大部分作物对N的需求量,削弱了蚯蚓诱导的矿化作用在作物生长中的贡献。未来若从施肥量和作物需肥量的耦合进行分析,或能更好地刻画不同N肥施用量下的蚯蚓作用。

不同N肥施用方式对蚯蚓活动下植物生长相关指标的影响较为明确。即N肥深施下蚯蚓对植物生物量和TN含量的促进作用均大于N肥表施。这可能是因为N肥表施时蚯蚓向上取食的活动更加频繁,破坏了真菌菌丝网络^[19],限制了菌根真菌与大部分高等植物根系形成的共生关系^[58]。例如王笑等^[59]在野外实验中发现蚯蚓 *Metaphire guillelmi* 和 *Eisenia foetida* 在牛粪表施时降低了菌根真菌生物量。反之,N肥深施减少了蚯蚓对真菌菌丝的潜在损害^[60],还有助于加快有机物的分解过程^[17]。王霞等^[61]认为秸秆混施时,蚯蚓对秸秆的破碎和取食活动会促进秸秆的分解和矿化,而秸秆表施的矿化作用较弱,养分释放不如秸秆混施迅速。

N₂O排放和N淋溶不仅导致了土壤N素损失,还会造成环境问题。施用有机N肥或无机N肥时,蚯蚓活动均显著增加了淋溶N损失,且施用无机N肥时的N淋溶损失显著高于施用有机N肥,这与多数研究结果一致^[14,53]。这可能是施用无机N肥时,蚯蚓活动刺激了脲酶活性,促进了尿素转化为易随淋溶流失的NO₃⁻和NO₂⁻。这一观点可从无机N肥相比有机N肥有更高的脲酶活性和更低的可利用N含量得到证实。另一方面,无机N肥中含有大量的矿质N,施用无机N肥时,蚯蚓可能会通过避开高浓度矿质N的行为导致肥料N在团聚体中固存较少,造成大量损失^[51]。

综合来看,蚯蚓活动既能提高作物对土壤N的吸收利用,也能加速N素从农田土壤中损失,对这些有利或不利的影 响进行综合分析成为准确评价蚯蚓在农田土壤N转化过程中的关键。Liu等^[19]利用13 a的田间数据从植物生产、植物养分、碳氮循环等方面评价蚯蚓对生态系统多功能性的直接或间接影响,认为蚯蚓是通过将微生物功能组成从以真菌为主的群落转向以细菌为主的群落来加强土壤食物网中的生物关联,进而增强其生态系统多功能性,并认为蚯蚓会通过排泄蚓粪活动释放矿质养分,刺激植物生长,或通过掘穴活动改变土壤微生物群,从而对生态系统多功能性产生直接或间接影响。本研究从农田土壤N转化角度得出了类似的结果,并进一步指出,无论N肥类型或肥料施用量如何,蚯蚓活动对生态系统多功

能性均呈显著的促进作用。但相比于N肥表施,深施更有助于充分发挥蚯蚓在农田土壤N转化过程中的有利作用,这可能是由于蚯蚓更喜欢以土壤和半分解有机物质的混合物为食,而深施有助于促进细菌的定植和对有机物质的分解^[19]。此外,N肥深施更有利于N素通过蚯蚓掘穴行为与土壤混合并在土壤中迁移,进而促进根系对养分的吸收^[62](图2),并刺激更大范围内微生物生长和酶活性提高^[63](图3)。

农田土壤N损失除了本文涉及的N₂O和淋溶损失外,还包括NH₃挥发和地表径流等其他损失方式。但由于相关文献较少,获取的数据不足,本研究并未将这些内容包含在分析中。已有的研究发现,施用尿素后蚯蚓活动对NH₃挥发总量无显著影响^[15],但农田土壤NH₃挥发可占新施入N量的14%^[64]。蚯蚓活动虽对径流中N浓度无显著影响,但在不同施肥方式下可改变产生的径流总量,进而影响N素径流损失量^[65]。因此,在未来的研究中应当进一步丰富农田施肥下NH₃挥发和地表径流的研究,并在蚯蚓生态系统多功能性的分析中将 这些因素考虑在内。

4 结论

本研究通过Meta分析综合评估N肥施用下蚯蚓活动对农田N转化的影响,研究表明:

(1)N肥施用下,蚯蚓活动显著提高了作物生物量、作物总氮(TN)含量、土壤可利用N、微生物生物量氮(MBN)及脲酶活性,但同时也显著增加了土壤N₂O排放和N淋失。

(2)蚯蚓活动对不同N肥类型、施肥量及施肥方式下土壤N转化过程的影响不同。有机-无机N肥配施时蚯蚓活动显著促进了作物对N素的吸收利用,而N肥表施时有、无蚯蚓处理之间在作物生物量及作物TN含量上却无显著差异;N肥深施更有利于土壤MBN的提高并充分发挥蚯蚓在作物生长及N素吸收方面的有利作用,而不同施N量下蚯蚓对所选取土壤N转化指标的影响并无一致性规律。

(3)从蚯蚓作用下的生态系统多功能性看,N肥深施更有助于充分发挥蚯蚓在农田土壤N转化过程中的积极作用,而N肥施用类型和施用量的改变却不会对N转化过程的综合作用产生较大的影响。

参考文献:

- [1] 吕殿青,张树兰,杨学云.外加碳、氮对土壤氮矿化、固定与激发效应的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(2):223-229. LÜ D

- Q, ZHANG S L, YANG X Y. Effect of supplying C and N on the mineralization, immobilization and priming effect of soil nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(2):223-229.
- [2] DAN X, MENG L, HE M, et al. Gross N transformations and plant N use efficiency in intensive vegetable production soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 174:108817.
- [3] DANG P F, LI C F, LU C, et al. Effect of fertilizer management on the soil bacterial community in agroecosystems across the globe[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2022, 326:107795.
- [4] LU M, YANG Y H, LUO Y Q, et al. Responses of ecosystem nitrogen cycle to nitrogen addition: a Meta-analysis[J]. *New Phytologist*, 2011, 189(4):1040-1050.
- [5] 邵蕾, 张民, 王丽霞. 不同控释肥类型及施肥方式对肥料利用率和氮素平衡的影响[J]. *水土保持学报*, 2006(6):115-119. SHAO L, ZHANG M, WANG L X. Effects of different controlled-release fertilizers and different applying methods on fertilizer use efficiency and nitrogen balance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006(6):115-119.
- [6] 熊正琴, 张晓旭. 氮肥高效施用在低碳农业中的关键作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6):1433-1440. XIONG Z Q, ZHANG X X. Key role of efficient nitrogen application in low carbon agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6):1433-1440.
- [7] VAN GROENIGEN J W, VAN GROENIGEN K J, KOOPMANS G F, et al. How fertile are earthworm casts? a Meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2019, 338:525-535.
- [8] BERTRAND M, BAROT S, BLOUIN M, et al. Earthworm services for cropping systems. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2015, 35(2):553-567.
- [9] 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.
- [10] XUE R, WANG C, LIU X, 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.
- [11] LUBBERS I M, PULLEMAN M M, GROENIGEN J W V. Can earthworms simultaneously enhance decomposition and stabilization of plant residue carbon?[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 105:12-24.
- [12] 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.
- [13] DRAKE H L, HORN M A. As the worm turns: the earthworm gut as a transient habitat for soil microbial biomes[J]. *Annual Review of Microbiology*, 2007, 61:169-189.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 于建光, 李辉信, 陈小云, 等. 秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4):818-824. YU J G, LI H X, CHEN X Y, et al. Effects of straw application and earthworm inoculation on soil labile organic carbon[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4):818-824.
- [18] HECTOR A, BAGCHI R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. *Nature*, 2007, 448(7150):188-190.
- [19] LIU T, CHEN X Y, GONG X, et al. Earthworms coordinate soil biota to improve multiple ecosystem functions[J]. *Current Biology*, 2019, 29(20):3420.
- [20] DAI Z M, YU M J, CHEN H H, et al. Elevated temperature shifts soil N cycling from microbial immobilization to enhanced mineralization, nitrification and denitrification across global terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(9):5267-5276.
- [21] CHAO H, SUN M, WU Y, et al. Quantitative relationship between earthworms' sensitivity to organic pollutants and the contaminants' degradation in soil: a Meta-analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 429:128286.
- [22] 张维理, 徐爱国, 张认连, 等. 土壤分类研究回顾与中国土壤分类系统的修编[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(16):3214-3230. ZHANG W L, XU A G, ZHANG R L, et al. Review of soil classification and revision of China soil classification system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(16):3214-3230.
- [23] LI P, LI Y, XU L, et al. Crop yield-soil quality balance in double cropping in China's upland by organic amendments: a Meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2021, 403:115197.
- [24] MAESTRE F T, CASTILLO-MONROY A P, BOWKER M A, et al. Species richness effects on ecosystem multifunctionality depend on evenness, composition and spatial pattern[J]. *Journal of Ecology*, 2012, 100(2):317-330.
- [25] 金碧洁, 张彬. 增温对土壤生态系统多重功能性影响的元分析[J]. *土壤通报*, 2020, 51(4):832-840. JIN B J, ZHANG B. A Meta-analysis of the response of soil multifunctionality to climate warming[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(4):832-840.
- [26] MA X, GENG Q, ZHANG H, et al. Global negative effects of nutrient enrichment on arbuscular mycorrhizal fungi, plant diversity and ecosystem multifunctionality[J]. *New Phytologist*, 2021, 229(5):2957-2969.
- [27] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The Meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80(4):1150-1156.
- [28] BENÍTEZ-LÓPEZ A, ALKEMADE R, SCHIPPER A M, et al. The impact of hunting on tropical mammal and bird populations[J]. *Science*, 2017, 356(6334):180-183.
- [29] 牛清清, 张琳, 陈云峰, 等. 生态栽培对果园水土及养分流失影响的Meta分析[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(10):3175-3183. NIU Q Q, ZHANG L, CHEN Y F, et al. Effects of eco-cultivation on soil erosion and nutrient loss in orchards: a Meta analysis[J]. *Chinese Journal*

- of Ecology, 2021, 40(10):3175–3183.
- [30] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. 生态学报, 2015, 35(20):6614–6625. SHAO Y H, ZHANG W X, LIU S J, et al. Diversity and function of soil fauna[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20):6614–6625.
- [31] HARINIKUMAR K M, BAGYARAJ D J. Potential of earthworms, ants, millipedes, and termites for dissemination of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, 18(2):115–118.
- [32] FRIESE C F, ALLEN M F. The spread of VA mycorrhizal fungal hyphae in the soil: inoculum types and external hyphal architecture[J]. *Mycologia*, 1991, 83(4):409–418.
- [33] 李欢, 杜志勇, 刘庆, 等. 蚯蚓菌根互作对土壤酶活、甘薯根系生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1):209–215. LI H, DU Z Y, LIU Q, et al. Effect of earthworm-mycorrhiza interaction on soil enzyme activities, root growth and nutrients uptake of sweet potato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1):209–215.
- [34] WURST S, LANGE R, REINEKING A, et al. Effects of earthworms and organic litter distribution on plant performance and aphid reproduction[J]. *Oecologia*, 2003, 137(1):90–96.
- [35] LUBBERS I M, BRUSSAARD L, OTTEN W, et al. Earthworm-induced N mineralization in fertilized grassland increases both N₂O emission and crop-N uptake[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1):152–161.
- [36] CALLAHAM M A, BLAIR J M, HENDRIX P F. Different behavioral patterns of the earthworms *Octolasion tyraeum* and *Diplocardia* spp. in tallgrass prairie soils: potential influences on plant growth[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(1):49–56.
- [37] FISK M G, FAHEY T J, GROFFMAN P M, et al. Earthworm invasion, fine-root distributions, and soil respiration in north temperate forests[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(1):55–62.
- [38] HE X X, CHEN Y Q, LIU S J, et al. Cooperation of earthworm and arbuscular mycorrhizae enhanced plant N uptake by balancing absorption and supply of ammonia[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 116:351–359.
- [39] 高英志, 汪诗平, 韩兴国, 等. 退化草地恢复过程中土壤氮素状况以及植被地上绿色生物量形成关系的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(3):285–294. GAO Y Z, WANG S P, HAN X G, et al. Soil nitrogen regime and the relationship between aboveground green phytobiomass and soil nitrogen fractions at different stocking rates in the Xilin River Basin, Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(3):285–294.
- [40] FERLIAN O, THAKUR M P, GONZALEZ A C, et al. Soil chemistry turned upside down: a Meta-analysis of invasive earthworm effects on soil chemical properties[J]. *Ecology*, 2020, 101(3):e02936.
- [41] WARDLE D A, BARDGETT R D, CALLAWAY R M, et al. Terrestrial ecosystem responses to species gains and losses[J]. *Science*, 2011, 332(6035):1273–1277.
- [42] FRELICH L E, HALE C M, SCHEU S, et al. Earthworm invasion into previously earthworm-free temperate and boreal forests[J]. *Biological Invasions*, 2006, 8(6):1235–1245.
- [43] MCLEAN M, PARKINSON D. Soil impacts of the epigeic earthworm *Dendrobaena octaedra* on organic matter and microbial activity in lodgepole pine forest[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 27:1907–1913.
- [44] WILCOX C S, DOMINGUEZ J, PARMELEE R W, et al. Soil carbon and nitrogen dynamics in *Lumbricus terrestris*. L. middens in four arable, a pasture, and a forest ecosystems[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 36(1):26–34.
- [45] 曹佳, 王冲, 皇彦, 等. 蚯蚓对土壤微生物及生物肥力的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5):1579–1586. CAO J, WANG C, HUANG Y, et al. Effects of earthworm on soil microbes and biological fertility: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(5):1579–1586.
- [46] ZHANG B G, LI G T, SHEN T S, et al. Changes in microbial biomass C, N, and P and enzyme activities in soil incubated with the earthworms *Metaphire guillelmi* or *Eisenia fetida*[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14):2055–2062.
- [47] 那立苹, 李宇婷, 何纪强, 等. 施氮后蚯蚓对植物吸氮及微生物固氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2):343–350. NA L P, LI Y T, HE J Q, et al. Effects of earthworms on nitrogen uptake by lettuce and microbial nitrogen fixation after nitrogen application[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2):343–350.
- [48] TENG Y, ZHOU Q X. Response of soil enzymes, functional bacterial groups, and microbial communities exposed to Sudan I-IV[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 166:328–335.
- [49] 马建辉, 叶旭红, 韩昌东, 等. 膜下滴灌不同灌水控制下限对设施土壤团聚体养分、酶活性和球囊霉素含量的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8):2713–2720. MA J H, YE X H, HAN C D, et al. Effects of different low limits of irrigation on nutrients, enzyme activity and glomalin-related soil protein in soil aggregates of drip irrigation under plastic film[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8):2713–2720.
- [50] 成德久, 邵将, 张学海, 等. 蚯蚓多样性与土壤生态功能的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(17):23–24, 144. CHENG D J, SHAO J, ZHANG X H, et al. Research progress on earthworm diversity and soil ecological function[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2020, 26(17):23–24, 144.
- [51] FONTE S J, KONG A Y Y, VAN KESSEL C, et al. Influence of earthworm activity on aggregate-associated carbon and nitrogen dynamics differs with agroecosystem management[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(5):1014–1022.
- [52] YAMAMOTO A, AKIYAMA H, NAKAJIMA Y, et al. Estimate of bacterial and fungal N₂O production processes after crop residue input and fertilizer application to an agricultural field by ¹⁵N isotopomer analysis[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 108:9–16.
- [53] ANDRIUZZI W S, SCHMIDT O, BRUSSAARD L, et al. Earthworm functional traits and interspecific interactions affect plant nitrogen acquisition and primary production[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 104:148–156.
- [54] BOHLEN P J, PELLETIER D M, GROFFMAN P M, et al. Influence

- of earthworm invasion on redistribution and retention of soil carbon and nitrogen in northern temperate forests[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(1): 13–27.
- [55] MARHAN S, SCHEU S. Effects of sand and litter availability on organic matter decomposition in soil and in casts of *Lumbricus terrestris* L.[J]. *Geoderma*, 2005, 128(1/2): 155–166.
- [56] 李浩, 陈金, 王洪亮, 等. 红壤性水稻土有机无机复合体中碳氮特征对长期施肥的响应[J]. 中国农业科学, 2023, 56(7): 1333–1343. LI H, CHEN J, WANG H L, et al. Response of carbon and nitrogen distribution in organo-mineral complexes of red paddy soil to long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(7): 1333–1343.
- [57] LIU X J A, VAN GROENIGEN K J, DIJKSTRA P, et al. Increased plant uptake of native soil nitrogen following fertilizer addition—not a priming effect?[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114: 105–110.
- [58] 王宇涛, 辛国荣, 李韶山. 丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 834–843. WANG Y T, XIN G R, LI S S. An overview of the updated classification system and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 834–843.
- [59] 王笑, 王帅, 滕明姣, 等. 两种代表性蚯蚓对设施菜地土壤微生物群落结构及理化性质的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(15): 5146–5156. WANG X, WANG S, TENG M J, et al. Impacts of two typical earthworms on soil microbial community structure and physicochemical properties in a greenhouse vegetable field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 5146–5156.
- [60] LI H, XIANG D, WANG C, et al. Effects of epigeic earthworm (*Eisenia fetida*) and arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*) on enzyme activities of a sterilized soil-sand mixture and nutrient uptake by maize[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(8): 879–887.
- [61] 王霞, 胡锋, 李辉信, 等. 秸秆不同还田方式下蚯蚓对旱作稻田土壤碳、氮的影响[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 462–466. WANG X, HU F, LI H X, et al. Effects of earthworms on soil carbon and nitrogen in dryland rice fields under different straw returning methods[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 462–466.
- [62] SU W, LIU B, LIU X, et al. Effect of depth of fertilizer banded-placement on growth, nutrient uptake and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 62: 38–45.
- [63] 陶军, 张树杰, 焦加国, 等. 蚯蚓对秸秆还田土壤细菌生理菌群数量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1306–1311. TAO J, ZHANG S J, JIAO J G, et al. Effects of earthworm on number of soil bacterial physiological groups and enzyme activity in a maize residue amended wheat agro-ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1306–1311.
- [64] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 农田氮素的气态损失与大气氮湿沉降及其环境效应[J]. 土壤, 2005, 42(2): 113–120. SU C G, YI B, ZHU Z L, et al. Nitrogen gas loss and atmospheric nitrogen wet deposition in farmland and its environmental effects[J]. *Soils*, 2005, 42(2): 113–120.
- [65] JOUQUET P, PLUMERE T, THUY D T, et al. The rehabilitation of tropical soils using compost and vermicompost is affected by the presence of endogeic earthworms[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(1): 125–133.

(责任编辑:叶飞)