

DOI: 10.11766/trxb202404080148

CSTR: 32215.14.trxb202404080148

由乐林, 张婷婷, 代文才, 肖乃川, 赵欢, 张雅蓉, 谢军, 高明. 不同氮肥施用量下白符跳 (*Folsomia candida*) 对土壤微团聚体的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62 (4): 1162–1173.

YOU Lelin, ZHANG Tingting, DAI Wencai, XIAO Naichuan, ZHAO Huan, ZHANG Yarong, XIE Jun, GAO Ming. Effects of *Folsomia candida* on Soil Microaggregates Under Different Nitrogen Addition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (4): 1162–1173.

不同氮肥施用量下白符跳 (*Folsomia candida*) 对土壤微团聚体的影响^{*}

由乐林¹, 张婷婷¹, 代文才¹, 肖乃川¹, 赵欢², 张雅蓉², 谢军¹, 高明^{1†}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 贵州省农业科学院农业资源与环境研究所, 贵阳 550006)

摘 要: 阐明不同氮肥施用量下白符跳生长繁殖对土壤微团聚体的影响, 可为改善土壤结构提供科学依据。采集田间试验不同氮肥施用量 (N0: 0 kg·hm⁻²、N90: 90 kg·hm⁻² (以 N 计, 下同)、N180: 180 kg·hm⁻²、N270: 270 kg·hm⁻²、N360: 360 kg·hm⁻²) 的土壤进行培养试验, 研究不同施氮处理土壤在不同培养周期 (28 d、42 d、56 d) 下白符跳的繁殖数、总体重差异及其对土壤微团聚体的影响。结果表明, 不同氮肥施用量对土壤 pH 产生显著影响, N360 处理较 N0 处理 pH 下降了 0.9 个单位 ($P < 0.05$)。随着培养周期的延长, 白符跳的繁殖率随氮肥施用量增加受到显著的抑制作用, 在 56 d 培养周期后, N0 处理的繁殖数为其他处理的 1.10 倍~1.53 倍 ($P < 0.05$)。白符跳总体重与繁殖数基本呈现相同的趋势, 三个培养周期均在 N360 处理出现最低值。不同氮施用量处理下白符跳均能显著提升 0.05~0.01 mm 微团聚体的数量, 相较于对照处理的土样提升 11.3%~48.4%; 同时显著降低 2~0.25 mm 小团聚体的数量, 相较于未培养土壤降低了 27.9%~60.9% ($P < 0.05$)。各氮肥处理下土壤的平均重量直径和几何平均直径均显著低于未经过白符跳培养的土样 ($P < 0.05$)。可见, 白符跳的生长繁殖受氮肥施用的抑制, 高密度的白符跳可提升土壤微团聚体含量但破坏小团聚体, 从而导致土壤的稳定性下降。

关键词: 氮肥用量; 白符跳; 繁殖; 土壤微团聚体; 密集效应

中图分类号: S154.4 **文献标志码:** A

Research Progresses on Farmland Soil Ecosystem Multifunctionality

LI Yizan^{1,2}, ZHANG Jiangzhou^{3,1}, JIA Jiyu^{1,2}, FAN Fan¹, ZHANG Fusuo¹, ZHANG Junling^{1†}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

Abstract: 【Objective】This study aimed to investigate the impact of different nitrogen fertilizer application rates on the growth

^{*} 国家自然科学基金项目 (4230071170, 42177019) 和中央高校基本科研业务费专项资金 (SWU-KR22026) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 4230071170 and 42177019), and the Special Fund for Basic Research Funds of Central Universities, China (No. SWU-KR22026)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

作者简介: 由乐林 (2000—), 女, 河北临西人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量与环境研究。E-mail: youlelin2000@163.com

收稿日期: 2024-04-08; 收到修改稿日期: 2024-07-17; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-08-14

and reproduction of *Folsomia candida* and their effects on soil micro-aggregates. 【Method】 Soil samples from field experiments with varying nitrogen application rates (N0: 0 kg·hm⁻², N90: 90 kg·hm⁻², N180: 180 kg·hm⁻², N270: 270 kg·hm⁻², N360: 360 kg·hm⁻²) were cultivated to examine the differences in *Folsomia candida* reproduction, total body weight, and their effects on soil micro-aggregates over different cultivation periods (28 d, 42 d, 56 d). 【Result】 The results indicated that nitrogen application significantly affected soil pH, with the N360 treatment showing a decrease of 0.9 pH units compared to the N0 treatment ($P < 0.05$). The reproduction of *Folsomia candida* showed significant differences among the nitrogen treatments as the cultivation period extended. After a 56 d cultivation period, the reproduction number in the N0 treatment was 1.10-1.53 times higher than that in the other treatments ($P < 0.05$). The total biomass of *Folsomia candida* larvae generally followed the same trend as the reproduction, with the lowest values observed in the N360 treatment across all cultivation periods. Also, *Folsomia candida* significantly increased the quantity of 0.05-0.01 mm micro-aggregates by 11.3%-48.4% compared to the untreated soil samples, and significantly decreased the quantity of 2-0.25 mm small aggregates by 27.9%- 60.9%, with more pronounced effects as the cultivation period extended ($P < 0.05$). The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GWD) of soil under all nitrogen treatments were significantly lower than those of the untreated soil samples ($P < 0.05$). 【Conclusion】 The growth and reproduction of *Folsomia candida* were inhibited by nitrogen fertilization, and high densities of *Folsomia candida* can increase the content of soil micro-aggregates but destroy small aggregates, leading to reduced soil stability. The results of this study will provide a scientific reference for improving soil structure.

Key words: Nitrogen fertilizer dosage; *Folsomia candida*; Reproduction; Soil microaggregates; Crowding effect

氮肥的施用尽管在一定程度上可提升作物产量, 过量施用却会引发严重的生态环境问题。不仅影响土壤的健康, 还会降低肥力有效性, 造成资源的浪费^[1]。氮肥的过量施用导致土壤 pH 的降低和盐基离子的流失, 对陆地生态系统中的生物产生有害影响^[2]。有研究表明, 土壤氮的添加增加了除真菌以外的所有微生物群的生物量, 从而增加了细菌的相对优势。同样, 添加氮后, 螨虫的丰度显著增加^[3], 跳虫的密度和多样性下降^[4], 氮肥的施用通过降低微生物碳含量, 降低了土壤线虫的丰度和营养级多样性^[5]。相对地, 通过控制氮素的添加, 可恢复生物多样性^[6]。

白符跳 (*Folsomia candida*), 作为跳虫的一种, 主要以真菌菌丝为食, 孤雌生殖, 对环境变化敏感, 广泛分布于全球各地的土壤中, 能促进有机质分解和养分循环, 维持土壤结构^[7]。因此, 土壤微生物的改变会自下而上地调控白符跳的数量。氮肥的施用通过提升土壤中硝态氮和铵态氮的含量, 降低土壤 pH, 间接调控了土壤微生物的取食和代谢过程, 导致菌食性跳虫生长受到抑制^[8]。当前针对跳虫响应施肥以探究土壤质量的研究较少^[9]。

土壤结构被定义为初级颗粒和土壤有机化合物排列成的团聚体和相应的孔隙空间, 在生态系统中起着关键作用, 包括气体和水的交换、养分循环和

抗外力侵蚀^[10]。土壤微团聚体的三维结构形成了一个稳定而复杂的系统, 为许多生物提供生态位^[11]。微团聚体相对于大团聚体更加稳定, 近几十年来, 在了解大团聚体方面取得了很大进展, 主要是关于它们的生物形成、组成和对土壤环境的响应^[12-13], 对微团聚体的相关研究相对欠缺。有研究表明, 长期氮肥施用通过诱导大团聚体 (> 2 mm) 中根生物量和真菌生物量的增加提升了大团聚体的比例, 但对微团聚体 (< 2 mm) 的影响并不明显^[14]。跳虫在土壤的分解过程中起到了重要作用, 并通过爬行和挖掘行为直接对土壤结构产生影响^[15]。此外, 由于跳虫的摄食行为, 大量的有机物被掺入粪便颗粒中, 增加了细菌和真菌的利用表面积和可及性, 进而促进了有机质分解, 微生物在分解有机质的过程中产生的代谢产物, 如多糖和蛋白质, 能够促进土壤颗粒的凝聚, 形成稳定的微团聚体, 间接影响微团聚体的形成^[16]。有人假设跳虫可通过它们的粪便颗粒促进土壤团聚, 但在极高密度下跳虫可能通过爬行、挖掘或以微生物、植物残骸或各种排泄物为食来消耗有机质, 抵消团聚体的形成^[17]。

目前, 针对于土壤动物对土壤结构的影响研究多集中于蚯蚓等大型土壤动物对大团聚体的影响^[18], 有关氮素控制下土壤小型节肢动物对土壤微团聚体聚集作用的研究甚少。更加欠缺直接关注施

氮控制白符跳生长繁殖的作用下，高密度白符跳对土壤微团聚体的影响研究。本研究采集田间试验不同氮肥施用量的土壤开展培养试验，探究在不同氮肥施用量的土壤中白符跳繁殖继而影响土壤微团聚体的作用，为健康土壤的培育提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤：采自四川雅安氮肥施用量的长期定位试验。当地属于亚热带季风气候，土壤类型为紫

色湿润雏形土。该试验于 2010 年开始，所用氮肥类型为尿素，设置 5 个氮水平，分别为 0、90、180、270 和 360 kg·hm⁻²（以 N 计，下同；分别记为 N0、N90、N180、N270 和 N360）。2022 年采集该试验 0~20 cm 土层的土壤，放置于阴凉干燥处，经自然风干后，去除其中的小石块、动植物残体，再碾碎过 2 mm 筛，用于培养试验。施氮试验前土壤基本理化性质为：pH 6.27，有机质 29.8 g·kg⁻¹，全氮 1.28 g·kg⁻¹，有效磷 35.9 mg·kg⁻¹，速效钾 71.2 mg·kg⁻¹，土壤质地为黏土，机械组成数据见表 1，土壤最大田间持水量（WHC）为 44%。

表 1 初始土样机械组成

Table 1 Mechanical composition of initial soil sample/ (g·kg⁻¹)

粒径 Particle size	1-0.5 mm	0.5-0.25 mm	0.25-0.1 mm	0.1-0.05 mm	0.05-0.002 mm	<0.002 mm
含量 Content	0.1	18.7	59.4	65.4	382.1	474.3

供试跳虫：本试验采用的跳虫为模式生物白符跳（*Folsomia candida*），属于弹尾目昆虫。将白符跳置于覆有 0.5 cm 厚水饱和的活性炭/石膏（1：10）基质的培养皿（90 mm × 13 mm）中，在光照强度为 400~800 Lux、光照/黑暗（16 h/8 h）循环、温度为 20 °C ± 1 °C、湿度为 75% 的培养箱中培养。培养期间，每周添加两次蒸馏水和食物（酵母，安琪酵母有限公司）。实验前，按照经济合作与发展组织（OECD）导则进行同步化获取个体差异较小的同龄幼虫^[19]。

具体同步化操作步骤为：将 50 头大小一致的成虫转移至新的培养皿中刺激其产卵，用毛笔将卵收集在卵片上转移至新的培养基，待有幼虫孵化开始计时 3 d，将卵片上的幼虫用洗耳球轻轻吹下并把卵片移除，然后幼虫培养基在上述培养条件下继续培养直至为 9~12 d 幼虫。

1.2 试验设计

采集田间试验不同氮肥施用量的土壤作为培养试验所用土壤，根据 OECD 导则和前人的研究将 10 头 9~12 d 的白符跳幼虫加入含有 25 g 供试土壤的 100 mL 玻璃瓶中^[15, 19]，将土壤含水量调节为最大田间持水量的 1/2。在上述培养箱中培养 28、42、56 d。期间持续观察，每四天补充食物（每次约 2 mg 酵母），用去离子水补充蒸发的水分。共三个培养周

期，五个氮肥施用处理，每个处理设置 5 个平行，共 75 个样品，同时测定未添加白符跳初始土样的微团聚体和理化性质，五个氮肥施用处理，每个处理设置 3 个平行，共 15 个样品。培养周期结束，利用程序控温烘虫器（HG-KWHC100，南京苏科仪器仪表有限公司）收集虫子和干燥后土壤。程序控温烘虫器的上部隔室温度在 48 h 内，从 20 °C 以 1 h 升高 5 °C，恒温保持 5 h 后再 1 h 升高 5 °C，逐步增加至 50 °C，而下部隔室的温度保持在 5 °C。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤性质的测定 测定方法参照文献[20]，pH 测定采用 DMP-2mV 酸度计（土水比为 1：2.5）；阳离子交换量（CEC）测定采用草酸钾—火焰光度法；土壤有机质（SOM）测定采用重铬酸钾容量法；全氮（TN）测定采用 H₂SO₄ 消煮—凯氏定氮法；碱解氮（AN）测定采用碱解扩散法；铵态氮（NH₄⁺-N）测定采用氯化钾浸提—靛酚蓝比色法；硝态氮（NO₃⁻-N）测定采用氯化钾浸提—紫外分光光度法。土壤微团聚体经蒸馏水浸泡 24 h，震荡 2 h 后采用吸管法测定。

1.3.2 白符跳繁殖数和总体重测定 经过程序控温烘虫器处理，虫子全部从土壤中转移至下层低温收集杯中。为了加强收集杯中白色动物和它们漂浮的水之间的对比，加入三滴蓝色墨水。拍照，然后

用 Image J 软件对漂浮的动物进行计数。所有动物在体视镜 (SZ680, 重庆奥特光学仪器有限公司) 下进行人工观察。收集成虫和幼虫于 2 mL 离心管冷冻于 -80℃ 冰箱, 后利用十万分之一天平 (SQP, 赛多利斯科学仪器有限公司) 称总体重。在第一个培养周期中由于体型差异可轻易区分原始成虫和孵化的幼虫。第二、三个培养周期由于第一批幼虫的长大而难以区分, 故统一收集。如表 2 所示, 在 28 d 的培养试验中, 各处理成虫存活率均超过 80%, 确保实验结果的可靠性和重复性, 说明实验条件和方法符合国际标准^[24]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 23.0 软件对数据进行统计分析, 采用邓肯 (Duncan) 新复极差法进行显著性分析, 显著性水平 $P < 0.05$; 数据基础处理和作图分别采用 Excel 2016 和 Origin 2022 进行。利用 Canoco 5.0 进行冗余分析 (RDA), 为了进一步将氮添加影响的环境因子与白符跳生长繁殖和微团聚体联系起来, 同时利用 R 进行了偏最小二乘路径建模 (PLS-PM)。使用拟合优度 (GOF) 统计量评估具有不同结构的模型, $GOF > 0.7$ 时模型的总体预测能力可接受。土壤微团聚体稳定性用平均重量直径 (Mean weight diameter, MWD) 和几何平均直径 (Geometric mean diameter, GMD) 指标进行评价, 计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{x}_i\right) \quad (2)$$

式 (1) 和式 (2) 中, n 为粒径分组的组数; \bar{x}_i 为 i 粒级分组团聚体的平均直径, mm; W_i 为第 i 级团聚体的质量, g。

2 结 果

2.1 氮肥施用量对土壤 pH 和养分的影响

如表 3 所示, 随着施氮量增加土壤 pH 显著下降 ($P < 0.05$)。N360 相比于 N0 处理, 下降了 0.9 个单位。施氮显著提升了 SOM ($P < 0.05$), N270 和 N360 相较于 N0 分别提升了 24.14% 和 19.46%。N0 处理下的 CEC 最高为 $21.51 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, N90 处理的

CEC 最低为 $17.6 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。随着施氮量的增加, 土壤全氮含量显著增加 ($P < 0.05$), N270 和 N360 处理相比于 N0 分别提升了 28.49% 和 23.84%。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均在 N270 处理下达到最大, 相较于 N0 分别提升了 47.74% 和 102.42%。随着施氮量的增加, 土壤碱解氮含量显著增加 ($P < 0.05$), N270 和 N360 处理相比于 N0 分别提升了 24.35% 和 21.43%。

表 2 不同氮肥施用量下 28 d 培养周期成虫存活率及总体重

Table 2 Survival rate and total body weight of *F. candida* during the 28-day culture cycle with different nitrogen additions

处理	存活率	总体重
Treatment	Survival rate/%	Total body weight/mg
N0	82±13.0b	2.086±0.6ab
N90	80±12.2b	1.786±0.3b
N180	98±4.5a	2.793±0.5a
N270	98±4.5a	2.808±0.4a
N360	98±8.4ab	2.604±0.7a

注: N0: $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N90: $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N180: $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N270: $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N360: $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 以 N 计。数据为 5 次重复的平均值±标准误。组间不同小写字母表示不同处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: N0: $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N90: $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N180: $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N270: $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, N360: $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, in N. Data are the means of 5 repetitions ± standard error. Different lowercase letters between groups indicated significant differences between different treatments ($P < 0.05$). The same as below.

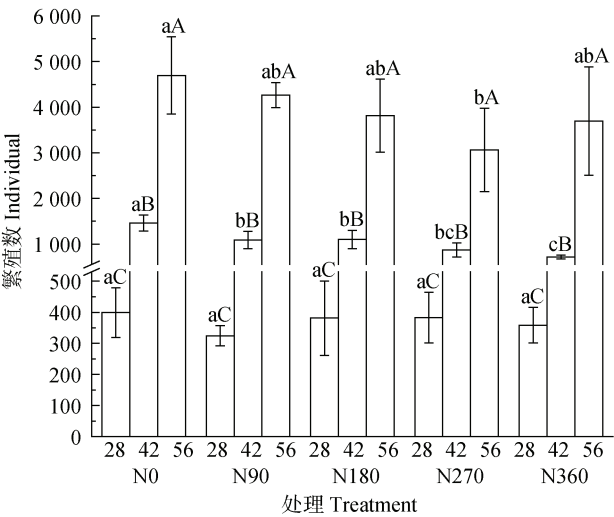
2.2 氮肥施用量对白符跳繁殖数及总体重的影响

如图 1 所示, 在所有氮肥处理中, 随着培养周期的延长, 白符跳的繁殖数均显著上升 ($P < 0.05$)。在 28 d 培养周期结束后, 不同氮肥添加量处理下白符跳的繁殖数并无显著差异。在 42 d 和 56 d 培养周期结束后, 不同氮肥添加量处理下白符跳的繁殖数具有显著差异 ($P < 0.05$)。在 42 d 后, 繁殖数的大小排序为: $\text{N0} > \text{N180} > \text{N90} > \text{N270} > \text{N360}$, N0 处理的繁殖数分别为 N90、N180、N270 和 N360 处理的 1.34 倍、1.33 倍、1.37 倍和 2.05 倍。在 56 d 后, 繁殖数的大小排序为: $\text{N0} > \text{N90} > \text{N180} > \text{N360} > \text{N270}$, N0 处理的繁殖数为 N90、N180、N270 和 N360 处理的 1.10 倍、1.23 倍、1.53 倍和 1.27 倍。根据双因素方差分析显示氮肥处理和不同培养周期对白符跳繁殖数有显著的交互作用 ($F = 2.457$, $P = 0.23$)。

表 3 不同氮肥施用量下土壤的 pH 和养分

Table 3 Soil pH and nutrients under different nitrogen fertilizer application rates							
处理 Treatment	pH	SOM/(g·kg ⁻¹)	CEC/(cmol·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	AN/(mg·kg ⁻¹)
N0	6.2±0.21a	26.51±0.62c	21.51±0.38a	1.72±0.007e	5.53±0.24b	7.44±0.37d	127.6±0.34d
N90	6.0±0.07b	29.39±0.73b	17.60±0.26b	1.86±0.002d	5.77±0.72b	10.97±0.19b	136.2±0.13c
N180	5.6±0.06c	28.86±0.18b	19.88±0.46ab	1.95±0.004c	6.97±0.87ab	7.99±0.49d	145.4±2.18b
N270	5.4±0.05d	32.91±0.31a	20.77±0.76a	2.21±0.011a	8.17±0.24a	15.06±0.32a	158.6±1.35a
N360	5.3±0.006d	31.67±0.44a	21.49±1.73a	2.13±0.010b	6.49±0.42ab	9.67±0.49c	154.9±0.78a
F	166.0	25.1	3.3	636.9	3.6	60.8	113.4
P	<0.001	<0.001	0.056	<0.001	0.047	<0.001	<0.001

注：SOM：土壤有机质；CEC：阳离子交换量；TN：全氮；NH₄⁺-N：铵态氮；NO₃⁻-N：硝态氮；AN：碱解氮。数据为 3 次重复的平均值±标准误。组间不同小写字母表示不同处理之间的差异显著 ($P<0.05$)。F 表示某一指标组间平均方差与组内平均方差的比值，P 代表显著性。下同。Note: SOM: soil organic matter; CEC: cation exchange capacity; TN: total nitrogen; NH₄⁺-N: ammonium nitrogen; NO₃⁻-N: nitrate nitrogen; AN: alkali hydrolyzed nitrogen. Data are the means of 3 repetitions ± standard error. Different lowercase letters between groups indicated significant differences between different treatments ($P<0.05$), F represents the ratio of the mean inter-group variance to the mean intra-group variance of an indicator, and P represents significance. The same as below.



注：图中不同小写字母表示同一培养周期下不同氮肥处理间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示同一氮肥处理不同培养周期下差异显著 ($P<0.05$)。28：28 天培养周期，42：42 天培养周期，56：56 天培养周期。误差棒代表不同处理下五个重复的繁殖数标准误。下同。Note: Different lowercase letters indicate that there is a significant difference in the different nitrogen fertilizer treatments under the same culture cycle ($P<0.05$), and different uppercase letters indicate that there is a significant difference in the same nitrogen fertilizer treatments under different culture cycle ($P<0.05$) . 28: 28 d culture cycle; 42: 42 d culture cycle; 56: 56 d culture cycle; The error bar represents the reproduction number standard error of five repetitions under different treatments. The same as below.

图 1 不同培养周期下不同氮肥添加量对白符跳繁殖数的影响

Fig. 1 Effects of different nitrogen fertilizer supplemental levels on individuals of *F. candida* during the different culture cycles

如图 2 所示，在所有氮肥处理中，随着培养周期的延长，白符跳的总体重均显著上升 ($P<0.05$)。白符跳总体重与繁殖数呈现相同的趋势，不同处理下幼虫的总体重具有显著差异 ($P<0.05$)。在 28 d 培养周期结束后，N180 处理中幼虫总体重最大，为 N90、N270 和 N360 的 1.67 倍、1.41 倍和 1.47 倍。培养瓶当中白符跳密度达到每克土壤 12.98~15.95 头。在 42 d 后，N0 处理中白符跳总体重最大，为 N90、N180、N270 和 N360 的 1.01 倍、1.18 倍、1.13 倍和 1.32 倍。培养瓶当中白符跳密度达到每克 28.55~58.46 头。在 56 d 后，N0 处理中白符跳总体重最大，为 N90、N180、N270 和 N360 的 1.01 倍、1.11 倍、1.09 倍和 1.20 倍。培养瓶当中白符跳密度达到每克 122.5~187.7 头。根据双因素方差分析显示氮肥处理和不同培养周期对白符跳总体重有显著的交互作用 ($F=2.776$, $P=0.011$)。

2.3 不同培养周期下白符跳对土壤微团聚体的影响

如表 4 所示，相比于未培养的土样，各处理在不同培养周期均显著降低 2~0.25 mm 的小团聚体含量 ($P<0.05$)，其中 N0、N90、N180、N270 和 N360 处理下，28 d 培养周期后相比于未培养的土样小团聚体含量分别显著下降了 42.8%、32.0%、40.2%、48.7%和 27.9%；42 d 培养周期后小团聚体含量分别显著下降了 53.9%、49.7%、50.1%、51.9%和 52.8%；56 d 培养周期后小团聚体含量分别显著下降了 48.8%、40.9%、48.8%、54.9%和 60.9%。除

了 N180 处理在 56 d 培养周期外，粒径在 0.05~0.01 mm 之间的微团聚体数量随着培养周期的延长而增大 ($P<0.05$)。N0、N90、N180、N270 和 N360 处理下，28 d 培养周期后相比于未培养的土样分别提升了 20.9%、17.9%、17.5%、9.7%和 3.3%；42 d 培养周期后相比于未培养的土样提升了 25.5%、19.0%、19.1%、11.3%和 40.3%；N0、N90、N270 和 N360 处理下 56 d 培养周期后该粒级占比相比于未培养土样提升了 47.8%、27.5%、26.8%和 48.4%。粒径在 0.25~0.05 mm 之间的微团聚体占比较稳定，不同氮肥施用量处理下差异不显著，随培养周期延长未发生显著变化。

如表 5 所示，在所有氮处理下，不同培养周期下白符跳对土壤微团聚体的平均重量直径（MWD）和几何平均直径（GWD）的影响差异并不显著，但是与未添加白符跳的初始土壤相比均有显著的下降

表 4 不同氮肥施用量不同培养周期下白符跳对土壤微团聚体的影响

Table 4 Effects of <i>F. candida</i> on soil microaggregates under different culture cycles in the different nitrogen fertilizer treatments							
处理 Treatment	培养周期 Cultivate cycle/d	2-0.25mm/ (g·kg ⁻¹)	0.25-0.05mm/ (g·kg ⁻¹)	0.05-0.01mm/ (g·kg ⁻¹)	0.01-0.005mm/ (g·kg ⁻¹)	0.005-0.001mm/ (g·kg ⁻¹)	<0.001mm/ (g·kg ⁻¹)
N0	0	212 ± 20a	443 ± 13a	194 ± 13c	57 ± 7a	71 ± 18a	23 ± 1a
	28	121 ± 30b	473 ± 87a	235 ± 21b	55 ± 26a	84 ± 37a	32 ± 8a
	42	97 ± 32b	490 ± 27a	243 ± 37b	65 ± 12a	74 ± 13a	31 ± 7a
	56	109 ± 30b	446 ± 36a	287 ± 38a	63 ± 25a	83 ± 22a	12 ± 6b
N90	0	157 ± 15a	464 ± 41a	236 ± 31b	48 ± 14a	72 ± 14a	23 ± 8a
	28	107 ± 29b	436 ± 31a	278 ± 44a	60 ± 9a	89 ± 14a	30 ± 9a
	42	79 ± 27b	441 ± 58a	281 ± 22a	67 ± 15a	103 ± 29a	29 ± 16a
	56	93 ± 18b	437 ± 45a	301 ± 58a	62 ± 14a	89 ± 14a	18 ± 2b
N180	0	209 ± 47a	434 ± 32a	215 ± 36b	48 ± 8a	74 ± 15a	20 ± 5a
	28	125 ± 64b	449 ± 56a	252 ± 35a	58 ± 17a	84 ± 20a	32 ± 3a
	42	104 ± 39b	462 ± 25a	255 ± 20a	61 ± 12a	91 ± 14a	27 ± 7a
	56	107 ± 40b	468 ± 118a	202 ± 51b	112 ± 13a	90 ± 21a	21 ± 11a
N270	0	237 ± 12a	407 ± 35a	210 ± 53b	43 ± 15a	76 ± 7a	27 ± 6a
	28	122 ± 17b	456 ± 43a	230 ± 13b	66 ± 23a	97 ± 36a	29 ± 9a
	42	114 ± 11b	471 ± 33a	234 ± 9b	79 ± 15a	75 ± 20a	27 ± 9a
	56	107 ± 28b	437 ± 47a	266 ± 26a	68 ± 12a	94 ± 19a	28 ± 5a
N360	0	238 ± 12a	426 ± 30a	186 ± 20b	60 ± 16a	67 ± 18a	23 ± 1b
	28	172 ± 78b	336 ± 93a	247 ± 53a	89 ± 35a	110 ± 50a	46 ± 14a
	42	113 ± 23b	396 ± 62a	261 ± 23a	85 ± 24a	107 ± 40a	38 ± 11a
	56	93 ± 24b	395 ± 36a	277 ± 43a	77 ± 21a	127 ± 33a	31 ± 4ab

注：数据为 3 次重复的平均值 ± 标准误。不同小写字母表示同一氮肥施用量不同培养周期下差异显著 ($P<0.05$)。Note: The data are the average values of 3 repetitions ± standard error. Different lowercase letters between groups indicated significant differences in soil microaggregate content under the same nitrogen fertilizer application amount and different culture cycles ($P<0.05$) .

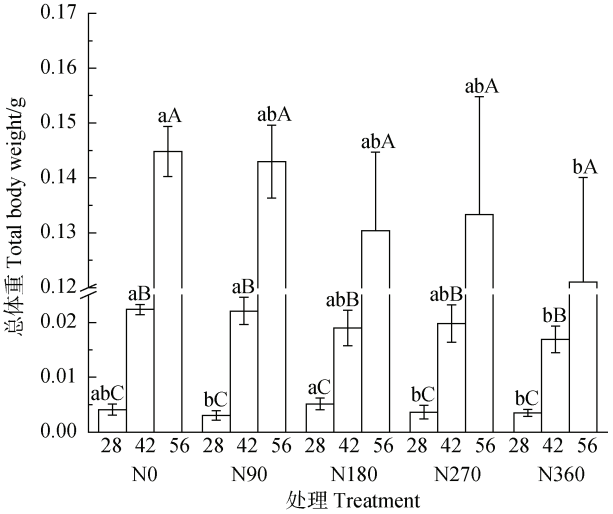


图 2 不同培养周期下不同氮肥添加量对白符跳总体重的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen fertilizer supplemental levels on the total body weight of *F. candida* during the different culture cycles

($P<0.05$)。N360 处理下, 28 d、42 d 和 56 d 培养周期相比于未经培养土壤 MWD 分别下降了 25.44%、42.31%和 48.82% ($P<0.05$), GWD 分别下降了 43.27%、47.92%和 50.50% ($P<0.05$); N270 处理下, 28 d、42 d 和 56 d 培养周期相比于未经培养土壤 MWD 分别下降了 36.42%、38.21%和 42.69% ($P<0.05$), GWD 分别下降了 34.60%、32.44%和 38.41% ($P<0.05$); N180 处理下, 28 d、42 d 和 56 d 培养周期相比于未经培养土壤 MWD 分别下降了

29.97%、36.48%和 35.50% ($P<0.05$), GWD 分别下降了 29.15%、34.04%和 34.79% ($P<0.05$); N90 处理下, 28 d、42 d 和 56 d 培养周期相比于未经培养土壤 MWD 值分别下降了 23.23%、35.43%和 29.13% ($P<0.05$), GWD 分别下降了 25.99%、33.79%和 26.73% ($P<0.05$); N0 处理下, 28 d、42 d 和 56 d 培养周期相比于未经培养土壤 MWD 分别下降了 31.09%、38.78%和 36.22% ($P<0.05$), GWD 分别下降了 27.09%、31.85%和 30.05% ($P<0.05$)。

表 5 不同培养周期白符跳对土壤微团聚体平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GWD) 的影响

Table 5 Effects of *F. candida* on the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GWD) of soil microaggregates under different culture cycles

培养周期 Cultivate cycle/d	MWD/mm					GWD/mm				
	N0	N90	N180	N270	N360	N0	N90	N180	N270	N360
0	0.312±	0.254±	0.307±0.042	0.335±	0.338±	0.0945±	0.0808±	0.0940±	0.0971±	0.1010±
	0.021a	0.012a	a	0.017a	0.013a	0.006a	0.002a	0.011a	0.010a	0.002a
28	0.215±	0.195±	0.215±	0.213±	0.252±	0.0689±	0.0598±	0.0666±	0.0635±	0.0573±
	0.033b	0.034b	0.064b	0.019b	0.083b	0.017b	0.009b	0.015b	0.011b	0.019b
42	0.191±	0.164±	0.195±	0.207±	0.195±	0.0644±	0.0535±	0.0620±	0.0656±	0.0526±
	0.035b	0.034b	0.042b	0.010b	0.025b	0.011b	0.014b	0.010b	0.006b	0.017b
56	0.199±	0.180±	0.198±	0.192±	0.173±	0.0661±	0.0592±	0.0613±	0.0598±	0.0500±
	0.033b	0.022b	0.053b	0.022b	0.026b	0.004b	0.006b	0.013b	0.010b	0.010b

注: 数据为 3 次重复的平均值±标准误。不同小写字母表示同一氮肥施用量不同培养周期下的土壤微团聚体平均重量直径或几何平均直径显著性差异 ($P<0.05$)。Note: The data are the average values of 3 repetitions ± standard error. Different lowercase letters indicated significant differences in the mean weight diameter or geometric mean diameter of soil microaggregates under the same nitrogen fertilizer application amount and different culture cycles ($P<0.05$) .

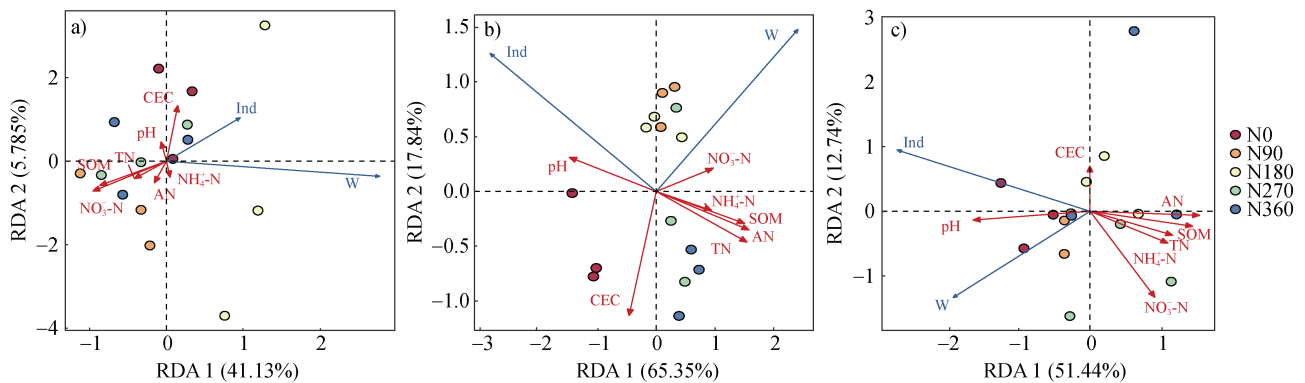
2.4 环境因子对白符跳的影响继而对团聚体的作用

通过冗余分析 (RDA) 评估环境因素对不同周期的白符跳繁殖和总体重的影响。培养 28 d 后, 根据图 3a 所示, RDA 的第一轴和第二轴分别解释了环境变异的 41.13%和 5.78%。然而, 环境因子的 P 值均不具统计学意义 ($P>0.05$)。

培养 42 d 后, 根据图 3b 所示, RDA 的第一轴和第二轴分别解释了 65.35%和 17.84%的数据变异, 表明所选择的环境因素能较好地解释繁殖和生长数据的变异。在这些因素中, SOM、TN 和 AN 的贡献度较高, r^2 值分别为 0.657、0.731 和 0.735 ($P=0.001$)。pH 对试验结果的差异性解释显示了强相关 ($r^2=0.6424$, $P<0.05$)。

培养 56 d 后, 根据图 3c 所示, RDA 的第一轴和第二轴分别解释了 51.44%和 12.74%的数据变异, 表明所选择的环境因素能较好地解释繁殖和生长数据的变异。在这些因素中, NO_3^- -N、TN 和 AN 的贡献度较高, r^2 值分别为 0.466、0.513 和 0.566 ($P<0.05$)。pH 对试验结果的差异性解释显示了强相关 ($r^2=0.6308$, $P<0.05$), 表明酸碱度是影响白符跳繁殖和生长的关键环境因子。

根据图 4 所示, 偏最小二乘路径模型拟合了土壤 pH、SOM 和 TN 对白符跳生长繁殖的影响以及其生长繁殖对团聚体的直接影响。结果表明, 氮肥施用量对土壤 pH (−0.97) 有显著负向影响, 对 SOM (0.87) 和 TN (0.93) 有显著正向影响。pH 对白符



注: 蓝色箭头表示白符跳繁殖和生长, W: 总体重; Ind: 繁殖数; 红色箭头分别代表环境影响因子, 不同颜色的点代表不同氮肥处理组; RDA1 和 RDA2 分别表示第 1 和第 2 排序轴。下同。Note: The blue arrow indicates white *F. candida* reproduction and growth, W: total body weight; Ind: reproductive number; The red arrows represent environmental impact factors; the different colored points represent different nitrogen fertilizer treatment groups; RDA1 and RDA2 represent the first and second sort axes, respectively. The same as below.

图 3 28 d (a)、42 d (b) 和 56 d (c) 培养周期下环境因子对白符跳生长繁殖的冗余分析 (RDA)

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of environmental factors on growth and reproduction of *F. candida* during 28 days (a), 42 days (b), and 56 days (c) culture cycles

跳繁殖 (0.13) 有显著正向影响, SOM 对白符跳的生长 (-0.04) 和繁殖 (-0.14) 有显著负向影响。白符跳的生长 (-0.49)、繁殖 (-0.56) 和培养周期 (-0.87) 对 2~0.25 mm 的小团聚体有显著的负向影响; 白符跳的生长 (0.79)、繁殖 (0.83) 和培养周期 (0.86) 对 0.05~0.01 mm 的微团聚体有显著的正向影响。偏最小二乘路径建模解释了 83% 的 2~0.25 mm 小团聚体占比的变异和 81% 的 0.05~0.01 mm 微团聚体占比的变异。

3 讨论

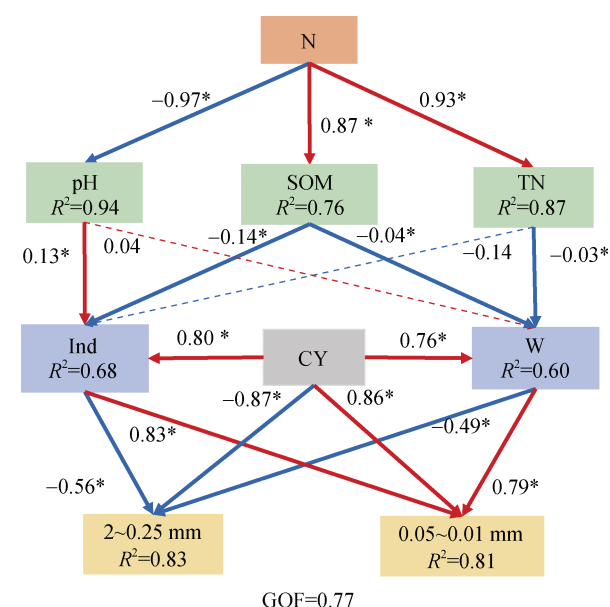
3.1 氮肥施用量对土壤理化性质及白符跳生长繁殖的影响

本研究表明, 长期施氮导致土壤 pH 显著下降 ($P < 0.05$, 表 3)。由于尿素经过微生物催化的水解反应, 最终转化为 NH_4^+ 和 HCO_3^- , 然后 NH_4^+ 可进一步被氧化成 NO_3^- , 这个过程会释放出 H^+ , 导致土壤酸化^[21]。同时, 施氮量的增加显著提高了土壤全氮和有机质的含量。这与前人研究结果一致: 邹温馨等^[22]的结果表明长期施氮会改变酸性紫色土壤 pH、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。

土壤的理化性质直接影响白符跳的数量与分布, 与此同时白符跳又反作用于土壤, 它们在有机质的分解、养分循环、改善土壤结构和土壤肥力方

面扮演着十分重要的角色^[23]。相比于 28 d 培养周期, 在较长培养周期 (42 d 和 56 d) 中环境因子对繁殖和跳虫总体重的变异解释度增加 (图 3), 这可能是由于白符跳在较短的生命周期内对环境变化的响应有限, 因而环境因子的作用尚未完全显现。每个生物均有偏好的环境, 有些物种甚至被限制在特定的环境中^[24]。白符跳的繁殖力在 pH5.6 左右时为最佳^[7], 因此在 42 d 和 56 d 培养周期中, 不同处理中白符跳的繁殖率存在显著差异, N0、N90 和 N180 处理的繁殖数显著高于其他处理 (图 1), 因为其土壤酸碱度条件更加适宜。根据偏最小二乘路径模型结果可知, 施氮导致的土壤酸化对白符跳的繁殖产生显著的负面影响 (图 4)。RDA 分析强调了土壤肥力指标对白符跳繁殖和生长的重要性 (图 3)。前人研究表明, 土壤有机质的含量和组成会影响跳虫群落组织^[25], 卢萍等^[26]研究表明土壤节肢动物个体数与土壤含水量、土壤有机碳、全氮、全磷和碳氮比存在显著的正相关关系。土壤中小型动物个体与类群数的变化趋势与农田土壤有机质的输入和流动动态基本一致^[27], 但是偏最小二乘路径模型结果表示, SOM 和 TN 对白符跳有显著负相关 (图 4), 原因是相比于养分条件, 跳虫对酸碱度更加敏感, 导致酸化对跳虫生长繁殖的抑制作用抵消了养分的促进作用^[28]。

本试验在白符跳最适宜的水分含量 (最大田间持水量的 50%) 和温度 (20℃) 下进行的, 虽然由



注: GOF = 0.77 表示模型具有较好的拟合度; 蓝色和红色箭头分别表示负向影响和正向影响, 箭头上的数字表示标准化路径系数, 实线代表显著* ($P < 0.05$), 虚线代表不显著; R^2 表示模型解释的因变量的方差。N: 不同氮肥施用量; CY: 不同培养周期; 2~0.25 mm: 0.25~2 mm 的小团聚体占比; 0.05~0.01 mm: 0.05~0.01 mm 的微团聚体占比。Note: GOF = 0.77 indicates that the model has a good degree of fit; The blue and red arrows represent negative and positive effects respectively, the numbers on the arrows represent standardized path coefficients, the solid line represents significant* ($P < 0.05$), and the dashed line represents insignificant; R^2 represents the variance of the dependent variable explained by the model. N: different nitrogen fertilizer treatments; CY: different culture cycle; 2~0.25 mm: 2~0.25 mm small aggregate proportion; 0.05~0.01 mm: 0.05~0.01 mm microaggregate proportion.

图4 偏最小二乘路径模型拟合环境因子和生物因子对两种团聚体影响的主要途径

Fig. 4 Partial least squares path model fits the main ways of environmental factors and biological factors influencing the two aggregates

于氮肥添加导致不同处理下 pH 有所下降 (表 3), 但是总体范围仍不超过白符跳最适宜的弱酸环境^[7]。各氮肥处理在各培养周期后培养瓶中白符跳密度远超自然环境下的密度 (每克 0.1~5.52 头)^[29], 因此会产生密集效应, 密集效应通常会通过个体之间的推挤干扰昆虫休息, 导致平均食物减少以及产生的大量代谢废物, 进而改变土壤性质, 抑制交配以及产卵质量。此外, 过度拥挤或喂养不足的幼虫可能导致发育不良, 成虫后繁殖力较低, 甚至死亡^[30]。根据结果 (图 1) 显示, 56 d 培养周期后,

N0 处理的繁殖数分别为 N90、N180、N270 和 N360 处理的 1.10 倍、1.23 倍、1.53 倍和 1.27 倍, 42 d 培养周期后, N0 处理的繁殖数为 N90、N180、N270 和 N360 处理的 1.34 倍、1.33 倍、1.37 倍和 2.05 倍。可见, 由于密集效应的限制, 导致幼虫孵化和存活受到抑制, 延长培养周期并不能继续放大氮肥对白符跳繁殖的影响差异。

3.2 不同培养周期白符跳对土壤微团聚体的影响

本研究表明, 白符跳会导致土壤微团聚体的粒径分布占比发生显著变化 ($P < 0.05$, 表 4)。小型节肢动物可通过间接和直接两种方式影响土壤结构。跳虫对土壤微生物的取食以及跳虫排泄含有大量肠道细菌的粪便^[31], 可能导致现有土壤微生物群落结构发生改变^[32]。土壤微生物群落结构的改变势必会影响微生物黏结剂的分泌, 从而间接影响土壤团聚体的形成^[33]。有研究表明, 白符跳对原生腐生菌的选择性取食导致枯枝落叶层中的次生腐生菌替代成为优势物种^[34], 腐生真菌可通过菌丝和分泌胞外聚合物形成团聚体, 与多样化和竞争性的微生物群落相比, 大量相同或相似物种的真菌有利于菌丝之间的相互吸引, 从而更强烈地促进土壤团聚^[35]。还有研究表明, 跳虫 (*Protaphorura armata*) 会促进接合菌 *Umbelopsis isabellina* 胞外聚合物的产生^[36], 节肢动物丰度的增加会促进微生物对几丁质、甲壳素和木质素的分解^[37], 分解过程中产生的多糖可帮助形成和稳定土壤团聚体^[38]。白符跳产生大量的粪便颗粒、蜕皮、卵和坏死物质等形式有机物质作为黏合剂, 可能作为微团聚体形成的关键因素直接发挥重要作用^[39]。

试验结果 (表 4) 显示, 2~0.25 mm 的小团聚体含量占比显著下降 ($P < 0.05$), 0.05~0.01 mm 的微团聚体含量占比显著升高 ($P < 0.05$)。由于密集效应导致争夺食物, 虽然在定期补充酵母作为食物, 但是仍然不能满足极高密度的白符跳取食需求, 导致白符跳以微生物或各种排泄物、卵皮和坏死物质等有机物为食来抵消小团聚体的形成。高密度会导致幼虫的运动更加剧烈^[40], 通过爬行、挖掘、破碎提高食物资源利用率从而导致土壤结构的破坏^[41], 使得 WMD 和 GMD 显著下降 ($P < 0.05$, 表 5)。又因为粪便的粒径通常在 30~90 μm 之间, 高密度的白符跳产生大量的粪便促进了 0.05~0.01 mm 的微

团聚体形成^[19]。由于该部分微团聚体更加稳定,不易受到耕作等外力因素影响,在自然条件下受真菌菌丝和植物根系缠绕,可为更高级别团聚体形成提供团聚体储备^[42]。

4 结 论

氮肥施用量提高导致的土壤酸化会抑制白符跳的生长繁殖。在生产实践中可通过氮肥管理来调控土壤动物丰度。氮肥通过影响白符跳的生长繁殖从而影响土壤团聚体数量。白符跳有助于 0.05~0.01 mm 微团聚体的形成,但是高密度的白符跳对 2~0.25 mm 小团聚体有破坏作用,导致土壤结构稳定性显著下降。为了更好地了解氮肥控制下跳虫对土壤结构的影响,应进一步研究跳虫丰度和多样性在施氮大田中的作用,以便在施肥提高生产力的同时调控土壤生物多样性并维持良好的土壤结构,进而最大程度上实现生产与生态环境的双赢。

参考文献 (References)

- [1] Yang K W, Han S H, Wang Y T, et al. Sustainable production and in-place utilization of a liquid nitrogenous fertilizer[J]. *Joule*, 2023, 7 (9): 1948—1955.
- [2] Zhang H Y, Tian M Y, Jiang M G, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil nematode community of soybean farmland[J]. *Soil Ecology Letters*, 2024, 6: 230200.
- [3] Peguero G, Folch E, Liu L, et al. Divergent effects of drought and nitrogen deposition on microbial and arthropod soil communities in a Mediterranean forest[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2021, 103: 103275.
- [4] Song L H, Liu J, Yan X M, et al. Euedaphic and hemiedaphic Collembola suffer larger damages than epedaphic species to nitrogen input[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 413—415.
- [5] Li Y B, Liang S W, Du X F, et al. Mowing did not mitigate the negative effects of nitrogen deposition on soil nematode community in a temperate steppe[J]. *Soil Ecology Letters*, 2021, 3 (2): 125—133.
- [6] Storkey J, MacDonald A J, Poulton P R, et al. Grassland biodiversity bounces back from long-term nitrogen addition[J]. *Nature*, 2015, 528 (7582): 401—404.
- [7] Fountain M T, Hopkin S P. *Folsomia candida* (Collembola): A “standard” soil arthropod[J]. *Annual Review of Entomology*, 2005, 50 (1): 201—222.
- [8] Zhang Y, Zhang A J, Luo R Y, et al. Response of soil Collembola to nitrogen and phosphorus deposition: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33 (9): 2585—2592. [张燕, 张阿娟, 罗如熠, 等. 土壤跳虫对氮磷养分响应的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2022, 33 (9): 2585—2592.]
- [9] Zhu X Y, Zhu B. Effect of different fertilization regimes on the main groups of soil fauna in cropland of purple soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (5): 911—920. [朱新玉, 朱波. 不同施肥方式对紫色土农田土壤动物主要类群的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (5): 911—920.]
- [10] Romero R A, Linde N, Keller T, et al. A review of geophysical methods for soil structure characterization[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56 (4): 672—697.
- [11] Lehdorff E, Rodionov A, Plümer L, et al. Spatial organization of soil microaggregates[J]. *Geoderma*, 2021, 386: 114915.
- [12] Wang W Y, Shen P F, Zhang H P, et al. Relationship between total nitrogen and nitrogen functional microorganisms in soil aggregates under long-term conservation tillage [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (6): DOI: 10.11766/trxb202307120214. [王威雁, 沈鹏飞, 张侯平, 等. 长期保护性耕作下土壤团聚体全氮与氮功能微生物关系研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61(6): DOI: 10.11766/trxb202307120214.]
- [13] Tan W F, Xu Y, Shi Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (5): 1297—1308. [谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (5): 1297—1308.]
- [14] Wang Y D, Wang Z L, Zhang Q Z, et al. Long-term effects of nitrogen fertilization on aggregation and localization of carbon, nitrogen and microbial activities in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 1131—1139.
- [15] Siddiky M R K, Schaller J, Caruso T, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and Collembola non-additively increase soil aggregation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 47: 93—99.
- [16] Maaß S, Caruso T, Rillig M C. Functional role of microarthropods in soil aggregation[J]. *Pedobiologia*, 2015, 58 (2/3): 59—63.
- [17] Rusek J. Die bodenbildende funktion von Collembolen und Acarina [J]. *Pedobiologia*, 1975, 15(4/5): 299—308.
- [18] Cheng S Y, Li H, Mei H L, et al. Effects of earthworms and organic materials on soil structure in tea plantation[J].

- Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (1): 259—268. [程思远, 李欢, 梅慧玲, 等. 接种蚯蚓与添加有机物料对茶园土壤结构的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 (1): 259—268.]
- [19] OECD. Test No. 232: Collembolan reproduction test in soil for the testing of chemicals[S]. OECD (Organisation for Economic Co-operation Development), 2016.
- [20] Yang J H, Wang C L, Dai H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land Press, 2008. [杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.]
- [21] Wu C M. Study on the mechanism of fertilization on soil acidification in dry land and paddy field[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2022. [吴聪敏. 施肥对旱地和稻田土壤酸化的影响机制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2022.]
- [22] Zou W X, Su W H, Chen Y X, et al. Effects of long-term nitrogen application on ammonia oxidizer communities for nitrification in acid purple soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55 (3): 529—542. [邹温馨, 苏卫华, 陈远学, 等. 长期施氮对酸性紫色土氨氧化微生物群落及其硝化作用的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55 (3): 529—542.]
- [23] Sun X, Li Q, Yao H F, et al. Soil fauna and soil health[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (5): 1073—1083. [孙新, 李琪, 姚海凤, 等. 土壤动物与土壤健康[J]. 土壤学报, 2021, 58 (5): 1073—1083.]
- [24] Liu Z X, Ou Y D, Su Z Y, et al. Effect of soil texture and pH value on soil arthropod abundance[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30 (7): 150—154. [柳泽鑫, 区余端, 苏志尧, 等. 土壤质地和 pH 值对节肢动物多度的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30 (7): 150—154.]
- [25] Hasegawa M. The response of collembolan community to the amount and composition of organic matter of a forest floor[J]. Pedobiologia, 2002, 46 (3/4): 353—364.
- [26] Lu P, Di M X, Weng X D, et al. Effects of environmental factors on soil arthropod community structure in a typical shoal wetland in Poyang Lake region [J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2023, 47 (3): 246—254. [卢萍, 底明晓, 翁晓东, 等. 环境因子对鄱阳湖区典型洲滩湿地土壤节肢动物群落结构的影响[J]. 江西师范大学学报 (自然科学版), 2023, 47 (3): 246—254.]
- [27] Lin Y H, Huang Q H, Liu H, et al. Effect of long-term cultivation and fertilization on community diversity of cropland soil animals[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43 (11): 2261—2269. [林英华, 黄庆海, 刘骅, 等. 长期耕作与长期定位施肥对农田土壤动物群落多样性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43 (11): 2261—2269.]
- [28] Hu J X, Zhou S X, Tie L H, et al. Effects of nitrogen addition on soil faunal abundance : A global meta-analysis[J]. Global Ecology and Biogeography, 2022, 31 (8): 1655—1666.
- [29] Tong F C, Wu Z H, Lin R X, et al. Effects of Phyllostachys phyllostachys expansion on soil hoppers community in subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. Chinese Journal of Forestry Investigation and Planning, 2024, 43 (1): 51-57+70. [佟富春, 吴智华, 林瑞雪, 等. 毛竹扩张对亚热带常绿阔叶林土壤跳虫群落特征的影响[J]. 中南林业调查规划, 2024, 43 (1): 51-57+70.]
- [30] 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. [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.]
- [31] Hao C, Chen T W, Wu D H. A review on gut microbial diversity of soil animals[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42 (8): 3093—3105. [郝操, Chen Ting-Wen, 吴东辉. 土壤动物肠道微生物多样性研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42 (8): 3093—3105.]
- [32] Ding J, Zhu D, Chen Q L, et al. Effects of long-term fertilization on the associated microbiota of soil collembolan[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 130: 141—149.
- [33] Mo Y H, Tang J, Zhang R D, et al. Impact of microbial aggregating agents on soil aggregate stability under addition of exogenous nutrients[J]. Environmental Science, 2012, 33 (3): 952—957. [莫艳华, 汤佳, 张仁铎, 等. 外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响[J]. 环境科学, 2012, 33 (3): 952—957.]
- [34] Klironomos J N, Widden P, Deslandes I. Feeding preferences of the collembolan *Folsomia candida* in relation to microfungus successions on decaying litter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24 (7): 685—692.
- [35] Li F, Niu Y X, Zhang J B, et al. The grape string theory is inspired by *Mortierella* and *Trichocladium* species that promote soil aggregation more than indigenous microorganisms[J]. Geoderma, 2023, 435: 116524.
- [36] Crowther T W, Boddy L, Hefin Jones T. Functional and ecological consequences of saprotrophic fungus-grazer interactions[J]. The ISME Journal, 2012, 6 (11): 1992—2001.

- [37] Jernigan A B, Kao-Kniffin J, Pethybridge S, et al. Microarthropods improve oat nutritional quality and mediate fertilizer effects on soil biological activity[J]. *Agronomy Journal*, 2024, 116 (4): 2007—2033.
- [38] Li F Q. Effects of crops and fertilization on soil aggregates and microbial population and microbial mechanism of aggregate formation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018. [李凤巧. 作物及施肥对土壤团聚体和微生物种群的影响及团聚体形成的微生物学机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.]
- [39] Chen J X, Ma Z C, Yan H J, et al. Roles of springtails in soil ecosystem[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15 (2): 154—161. [陈建秀, 麻智春, 严海娟, 等. 跳虫在土壤生态系统中的作用[J]. *生物多样性*, 2007, 15 (2): 154—161.]
- [40] Bengtsson G, Hedlund K, Rundgren S. Food- and density-dependent dispersal: Evidence from a soil collembolan[J]. *The Journal of Animal Ecology*, 1994, 63 (3): 513.
- [41] Wu Y J, Wang Q, Yang W K, et al. The cluster digging behavior of larvae confers trophic benefits to fitness in insects[J]. *Insect Science*, 2024, 31 (3): 870—884.
- [42] Wang Q, Zhu Y X, Xu L Z, et al. Effects of biochars application on humus composition and water-stable aggregates distribution of black soil[J]. *Soils*, 2023, 55 (3): 605—611. [王琪, 朱莹雪, 许连周, 等. 施用生物质炭对黑土腐殖质组成及水稳性团聚体分布的影响[J]. *土壤*, 2023, 55 (3): 605—611.]

(责任编辑: 陈荣府)