

DOI: 10.11766/trxb202311120469

CSTR: 32215.14.trxb202311120469

程刘竹, 朱柏菁, 成艳红, 万兵兵, 刘婷, 陶邑恒, 陈小云, 胡锋, 刘满强. 生物质炭与化肥减量配施对红壤线虫群落特征的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62 (3): 836–846.

CHENG Liuzhu, ZHU Baijing, CHENG Yanhong, WAN Bingbing, LIU Ting, TAO Yiheng, CHEN Xiaoyun, HU Feng, LIU Manqiang. Effects of Biochar on Red Soil Nematode Community Characteristics under Chemical Fertilizer Reduction[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (3): 836–846.

生物质炭与化肥减量配施对红壤线虫群落特征的影响^{*}

程刘竹¹, 朱柏菁¹, 成艳红³, 万兵兵¹, 刘 婷¹, 陶邑恒¹, 陈小云^{1, 2†},
胡 锋^{1, 2}, 刘满强⁴

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院土壤生态实验室, 南京 210095; 2. 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210095; 3. 江西省红壤研究所, 南昌 331717; 4. 兰州大学草地农业科技学院草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州 730020)

摘要: 增施有机物料并结合化肥减施是提高资源利用率并协同作物产量提升、生态环境保护和可持续发展的关键措施。生物质炭作为生物质热解产生的富碳、碱性和多孔的有机物料, 其性质与红壤的贫碳、酸化和黏重的不利因素形成互补, 因而在红壤耕地的生物多样性和土壤健康提升方面潜力巨大。在亚热带旱地红壤红薯-油菜种植农田中设置 2×3 全因子交互式设计试验, 包括 3 个有机物料(无有机物料施用的对照、秸秆、生物质炭)和 2 个化肥施用量(全量化肥 NPK 和减量化肥 60%NPK), 共 6 个处理, 探究生物质炭施用 5 年后对旱地红壤线虫群落的影响及驱动机制。结果表明, 全量化肥施用下, 与不施用有机物料的对照相比, 生物质炭的施用显著增加了食细菌线虫数量、食微线虫与植食性线虫数量的比例, 降低了红薯根冠比和土壤可溶性有机碳含量, 提高了土壤矿质氮含量; 相比之下, 减量化肥施用下, 与对照和秸秆相比, 生物质炭显著增加了土壤线虫总数、食细菌线虫和植食性线虫以及捕杂食线虫数量, 同时提高了红薯根系生物量和根冠比, 以及土壤 pH, 但显著降低了土壤矿质氮含量。通过分析土壤线虫群落与植物生长和土壤性质的关系, 表明生物质炭与化肥减量配施会造成土壤养分有效性降低, 进而通过养分限制促使植物将更多光合产物投资到地下, 从而增加作物根系生物量和植食性线虫数量。研究结果表明, 在我国化肥减量和有机物料增施的背景下, 生物质炭施用和化肥减量相结合的土壤施肥措施应全面考虑土壤养分缺乏对作物生长的潜在不利影响。

关键词: 旱地红壤; 生物质炭; 化肥减施; 养分限制; 线虫群落

中图分类号: S154.1 文献标志码: A

Effects of Biochar on Red Soil Nematode Community Characteristics Under Chemical Fertilizer Reduction

CHENG Liuzhu¹, ZHU Baijing¹, CHENG Yanhong³, WAN Bingbing¹, LIU Ting¹, TAO Yiheng¹, CHEN Xiaoyun^{1, 2†},
HU Feng^{1, 2}, LIU Manqiang⁴

* 国家重点研发计划项目(2021YFD1700202)和国家自然科学基金项目(42077047)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFD1700202) and the National Natural Science Foundation of China (No. 42077047)

† 通讯作者 Corresponding author, Email: xychen@njau.edu.cn

作者简介: 程刘竹(1996—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: chengliuzhu666@163.com

收稿日期: 2023-11-12; 收到修改稿日期: 2023-12-28; 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-05-16

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing 210095, China; 3. Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang 331717, China; 4. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract: 【Objective】The approach of reducing chemical fertilizer usage while increasing the application of organic amendment is a common strategy for maintaining optimal crop yields and preserving soil ecological functions. Biochar, as a carbon-rich, alkaline, and porous byproduct produced from biomass pyrolysis, has great potential in soil biodiversity restoration and soil health improvement in acidic red soil areas. 【Method】This study conducted a 2×3 full factorial interactive design experiment in red soil cultivated with sweet potato-rapeseed in subtropical arid areas. The experiment involved the application of organic amendment (control without organic material application, straw, and biochar) and two fertilizer application rates (full dose of NPK fertilizer and reduced dose of 60% NPK fertilizer), totaling six treatments. The aim was to investigate the impact of biochar application on nematode communities in upland red soils and to understand the underlying mechanisms after five years of application. 【Result】The results indicated that under full chemical fertilizer application, the use of biochar significantly increased the abundance of bacterivores and the ratio of microbivores to herbivores, reduced the root-to-shoot ratio of sweet potatoes and soil soluble organic carbon, and increased soil mineral nitrogen. Under reduced chemical fertilizer application, compared to the control and straw application, biochar significantly increased the abundance of total nematode, bacterivorous, herbivorous, and omnivorous predators. Simultaneously, it increased the sweet potato root biomass, root-to-shoot ratio, and soil pH but significantly decreased soil mineral nitrogen. By analyzing the relationship between soil nematode communities and plant growth as well as soil properties, it was evident that the application of biochar in combination with reduced chemical fertilizer led to a reduction in soil nutrient availability, thus nutrient limitation prompted plants to allocate more photosynthetic products below ground, resulting in increased crop root biomass and the abundance of herbivores. 【Conclusion】This study suggests that under the background of reducing chemical fertilizer and increasing the application of organic amendment in China, soil fertilization practices combining biochar application with reduced chemical fertilizer should take into comprehensive consideration the potential adverse effects of nutrient deficiency on crop growth.

Key words: Upland red soil; Biochar; Chemical fertilizer reduction; Nutrient limitation; Nematode community

化肥滥用导致了土壤酸化和物理结构退化、有机质含量下降及生物多样性降低等问题^[1-2], 尤其是在我国南方典型红壤地区, 因其本身酸度大、土壤质地黏重等, 化肥滥用加重了红壤生态系统功能衰退的风险^[3], 因此减少化肥施用并配施有机物料是近年来提倡的农业绿色发展方式。我国拥有丰富的农业废弃物资源, 将农业废弃物资源化利用是保障国家粮食安全和环境安全的有效措施^[4]。当前, 将农业废弃物通过高温裂解成生物质炭是一种新型的有机物料处理方法。生物质炭的施用不仅减少了秸秆直接焚烧带来的环境污染等问题, 在现代生态农业可持续发展中也表现出巨大的应用潜力^[5]。生物质炭具有碱性和多孔性质, 可以提高土壤 pH 从而缓解土壤酸化^[6], 生物质炭还有提高土壤有机碳含量、改善土壤结构, 增强土壤保水保肥能力, 为土壤微生物创造良好的生存环境, 促进作物生长等作用^[7-8]。尽管生物质炭对土壤生态系统有许多积极的

影响, 但是一个值得关注的问题是生物质炭矿质养分含量低, 长期施用生物质炭将导致有效氮降低^[9]。此外, 尽管化肥减施能够缓解化肥滥用引起的生态环境问题, 但是长期的化肥减施可能也会导致土壤养分有效性降低, 因此化肥减量配施生物质炭将可能加重土壤养分限制。

土壤动物作为土壤生物多样性的重要组分, 与土壤健康息息相关, 土壤动物多样性和功能可以灵敏反映人类活动和气候变化引起的土壤扰动^[10-11]。土壤线虫作为土壤中最丰富的后生动物, 其结构简单, 世代周期较短, 广泛分布在各种生境的土壤中, 且线虫在土壤生物区系中十分活跃, 在土壤生态系统中的有机物分解、养分转化和能量传递等生态过程中起着十分重要的作用^[12]。土壤线虫在土壤食物网中占据多个营养级, 与其他土壤动物形成复杂的关系, 共同驱动土壤生态功能^[13], 因此可以作为环境和功能指示者, 在评价农田土壤健康方面独具潜

力；此外，土壤线虫的组成和数量的变化通常对外部干扰高度敏感，土壤管理实践中土壤线虫群落结构的变化可能改变土壤食物网维持多种生态系统功能的能力^[14]。因此土壤线虫群落分析在评价土壤生态系统结构和功能变化方面具有很大的优势^[15]，可以作为一种具有代表性的土壤动物来研究不同施肥措施对土壤食物网产生的影响。

我国亚热带的农田红壤生态系统较为脆弱，增施有机物料在提高土壤肥力和土壤生物群落中发挥着决定性作用。伴随着生物质炭和化肥减施的应用，目前在旱地红壤上关于生物质炭与化肥减施对线虫群落的研究关注较少且影响机制尚不清楚。因此本研究以旱地红壤为研究对象，研究生物质炭在化肥减施背景下对土壤线虫群落的影响，通过对红壤地区线虫群落结构的研究为调控土壤养分和土壤微食物网结构、解决红壤地区生态环境退化等问题提供理论依据。本研究提出以下假说：在全量化肥施用时，施加生物质炭会提高土壤养分有效性，由于植物资源分配导致地上部资源增加，根系生长受到抑制，从而导致植食性线虫数量减少，使得食微线虫和植食性线虫数量之比增加；在化肥减施时，由于生物质炭的碳氮比高，施加生物质炭会造成土壤养分限制，由于植物资源分配导致根系资源增加，促进根系的生长和植食性线虫数量的增加，使得食微线虫和植食性线虫数量的比例降低。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省红壤研究所（ $28^{\circ}15'30''N$, $116^{\circ}20'24''E$ ），该区属亚热带季风气候，年均降水量1 537 mm，年蒸发量1 100~1 200 mm，年均气温 $17.7\sim18.5^{\circ}C$ ，海拔25~30 m，为典型的低丘红壤地貌。土壤成土母质为第四纪红黏土，为轻度熟化旱地红壤，土壤质地为粉砂质黏土。本底土壤pH 4.5、有机碳 $8.42 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.95 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $89.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $21.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试材料与试验设计

供试有机物料：(1)水稻秸秆，为当地最主要的农业废弃物资源，也是当前农业废弃物利用的典型种类，pH 6.89，碳氮比 48.46，有机碳 410.54

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全氮 $8.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全磷 $0.49 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；(2)生物质炭，原料为小麦秸秆，在 $350\sim500^{\circ}\text{C}$ 炭化所得，由河南商丘三利新能源有限公司进行制备，pH 9.01，碳氮比 65.16，有机碳 $388.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全氮 $5.96 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全磷 $2.65 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

于2015年5月布置试验，采用 2×3 全因子交互式设计，包括化肥减施量(2水平，即全量化肥NPK和减量化肥60% NPK)和有机物料(3水平，即不施有机物料对照、秸秆、生物质炭)，随机区组排列，每个处理4次重复。试验中施用全量化肥以当地常规施肥水平为基础，施用尿素 $255 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙 $375 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、氯化钾 $300 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，秸秆 $4\,500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，生物质炭 $1\,500 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，小区面积 28 m^2 ($4 \text{ m}\times7 \text{ m}$)，沟宽40 cm，种植制度为：红薯(*Ipomoea batatas L.*)—油菜(*Brassica napus L.*)轮作，红薯品种为“苏薯8号”，油菜品种为“丰油730”。秸秆、生物质炭在作物移栽前一次性施入，不追肥，田间灌溉、除草等田间管理措施均遵循当地常规管理方式。

1.3 样品采集与分析

于2020年10月在红薯收获期进行红薯植株和土壤采集，每个小区随机采集长势一致的5株植株，用水将植株冲洗，分成茎叶部、根系和红薯块根，采用烘干称重法测定干物质量，根冠比=根干重/茎叶干重。

土壤采样时，每个试验小区S形选取5点，用土钻(直径2.5 cm)采集 $0\sim20 \text{ cm}$ 土层土壤样品，并及时带回实验室保存在 4°C 冰箱中，尽快测定土壤各种理化指标。用于测定团聚体结构的土壤用军工铲采集原状土壤，放在保鲜盒中带回实验室自然风干。土壤理化性质参照《土壤农化分析》^[16]，采用常规分析方法进行测定，土壤酸碱度采用pH计电位法测定；可溶性有机碳(DOC)用TOC仪测定；矿质氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$)采用KCl浸提—连续流动分析仪测定；土壤团聚体分级采用湿筛法，分别用孔径为2、0.25和0.053 mm筛组和离心方法获得 $>2 \text{ mm}$ 、 $0.25\sim2 \text{ mm}$ 、 $0.053\sim0.25 \text{ mm}$ 和 $<0.053 \text{ mm}$ 四种团聚体粒径土壤，将分离的各粒级团聚体在 40°C 烘箱中干燥并称重，团聚体稳定性采用平均重量直径(MWD)评价^[17]，计算公式如下：

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

式中, \bar{X}_i 为某粒级的团聚体平均直径, W_i 为该粒级团聚体质量的百分含量。

土壤线虫的分离提取: 将采集来的土壤掰细, 去除石块等异物, 保留原土中的植物根系, 混合均匀。称取 80 g 土壤, 采用改进的浅盘分离-蔗糖密度离心连续提取法分离收集线虫^[18], 线虫总数在体式显微镜下进行计数, 根据土壤含水量换算为每 100 g 干土中的数量。然后随机吸取 150~200 条线虫于载玻片上, 在光学显微镜下根据线虫形态鉴定到属水平^[19~20], 根据线虫的取食食性划分四个营养类群: 食细菌线虫 (Bacterivores)、食真菌线虫 (Fungivores)、植食性线虫 (Herbivores)、捕杂食线虫 (Omnivores-predators)。在分析营养类群比例的基础上进一步计算土壤线虫群落指数, 用瓦斯乐斯卡指数 (WI) 来表示食微线虫和植食性线虫的比例:

$$WI = (BF+FF) / PP$$

式中, BF 和 FF 分别表示食细菌和食真菌线虫的数量; PP 表示植食性线虫数量; WI 反映土壤线虫种群结构组成与土壤健康程度, 当 WI = 1 时, 表明单位土壤中有益的食微线虫数量与有害的植食性线虫数量相当, 土壤健康程度一般, WI 小于 1 时, 值越小, 说明土壤健康程度越差。

1.4 数据处理

数据分析与作图在 R (version 4.1.2) 中进行,

利用 Kolmogorov-Smirnov 和 Levene 方法检验数据的正态分布及方差异性质, 不同处理之间的差异采用单因素方差分析, 均值的多重比较检验采用最小显著极差法 (LSD)。采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 表示有机物料施用和化肥减施及其交互作用对土壤理化性质、植物生长性质和线虫群落的影响。用非参数多变量排序图 (Non-metric multidimensional scaling, NMDS) 分析不同处理下土壤线虫群落结构的差异, 同时对试验数据进行了主成分分析 (Principal component analysis, PCA), 探讨有机物料施用和化肥减施下土壤理化性质、植物生长性质和线虫群落之间的关系。

2 结 果

2.1 生物质炭和化肥减施对红薯生长性质的影响

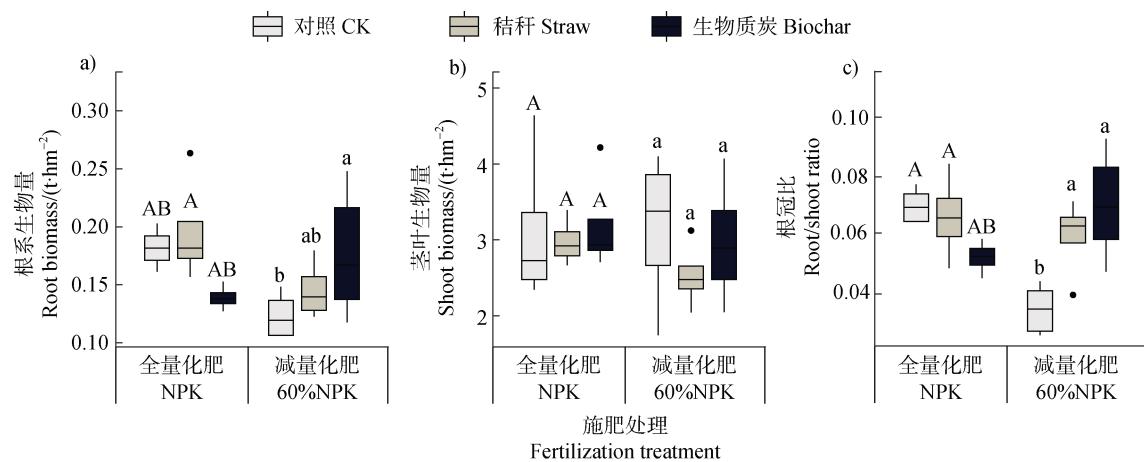
红薯根系生物量和根冠比受到生物质炭和化肥二者交互作用的显著影响 ($P < 0.05$; $P < 0.01$) (表 1), 在全量化肥下, 与不施用有机物料对照相比, 施加生物质炭降低了根系生物量 23.6% (图 1a), 增加了茎叶生物量 23.1% (图 1b), 同时显著降低了根冠比 28.6% (图 1c); 在减量化肥下, 与对照相比, 施加生物质炭显著增加了根系生物量 52.1%, 降低了茎叶生物量 5.4%, 同时显著增加了根冠比 133.3%; 与秸秆相比, 施加生物质炭显著增加了根系生物量 28.9%, 增加茎叶生物量和根冠比的比例分别为 17.8% 和 16.7%。

表 1 有机物料和化肥对植物生长性质和土壤理化性质影响的方差分析

Table 1 ANOVA results of the effects of organic amendment and chemical fertilizers on plant growth and soil physicochemical properties

变异来源 Source of variation		有机物料 Organic materials		化肥 Chemical fertilizer	O×C O×C
		(O)	(C)		
植物生长性质 Plant growth properties	茎叶生物量 Shoot biomass	0.55	0.43	0.19	
	根系生物量 Root biomass	0.41	1.52	4.27*	
	根冠比 Root/shoot ratio	0.91	1.04	6.96**	
土壤理化性质 Soil physicochemical properties	酸碱度 pH	5.26*	0.97	1.65	
	可溶性有机碳 DOC	1.17	0.44	4.52*	
	矿质氮 Mineral nitrogen	11.11***	8.19**	1.41	
	团聚体稳定性 MWD	0.59	0.55	5.73*	

注: O×C 为有机物料和化肥的交互作用。*、**和***表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 。下同。Note: O×C presents the double factors of organic amendment and chemical fertilizer. *, ** and *** indicate $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$. The same below.



注：不同大写和小写字母分别表示全量化肥和减量施用化肥条件下不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。Note: Different capital and lowercase letters indicate significant differences among treatments in conventional chemical fertilizer (NPK) and 60% chemical fertilizer (60%NPK) ($P < 0.05$)，respectively. The same below.

图 1 不同处理下根系生物量、茎叶生物量和根冠比

Fig. 1 Root biomass, shoot biomass and root/shoot ratio under different treatments

2.2 生物质炭和化肥减施对土壤理化性质的影响

有机物料处理显著影响土壤酸碱度 ($P < 0.05$) 和矿质氮含量 ($P < 0.01$) (表 1)。在全量化肥下，与不施用有机物料的对照相比，施加生物质炭降低了可溶性有机碳含量 31.7% (图 2b)，增加了矿质氮含量 18.7% (图 2c)；在减量化肥下，与对照相比，

施加生物质炭增加了可溶性有机碳含量 2.5% (图 2b)，降低了矿质氮含量 24.8% (图 2c)；与秸秆相比，施加生物质炭显著提高了 0.25 个 pH 单位，显著增加了可溶性有机碳含量 24.4%，显著降低了矿质氮含量 30%，同时显著降低了团聚体稳定性 12.3% (图 3d)。

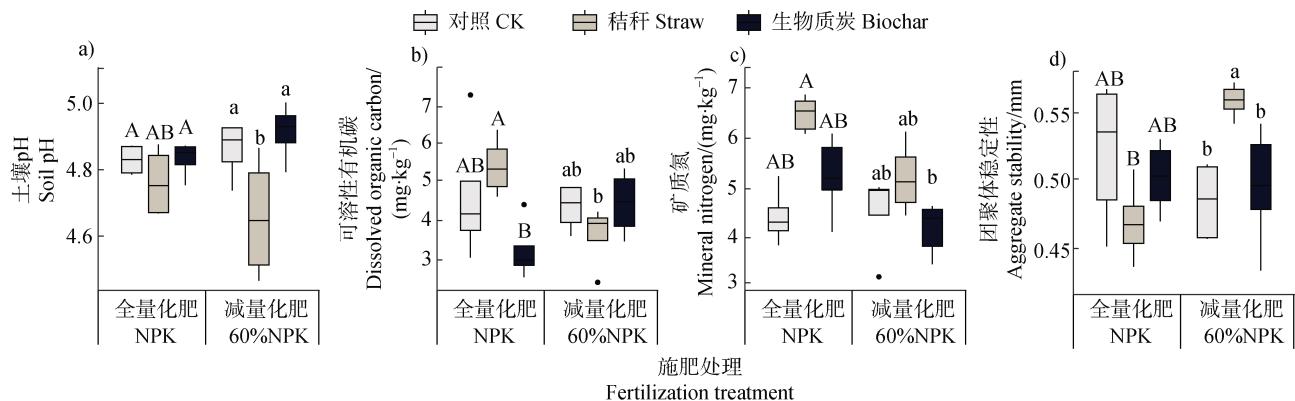


图 2 不同处理下土壤理化性质的变化

Fig. 2 Changes in soil physicochemical properties under different treatments

2.3 生物质炭和化肥减施对土壤线虫数量和群落结构的影响

生物质炭施用显著影响土壤线虫总数 ($P < 0.05$) 和食细菌线虫 ($P < 0.01$)、植食性线虫数量 ($P < 0.05$) 以及食微线虫和植食性线虫数量的比例 ($P < 0.05$) (表 2)。非度量多维尺度排序图 (NMDS)

结果显示，无论化肥减施与否，配施秸秆和生物质炭使土壤线虫群落出现明显的分化，且在减量化肥下配施生物质炭与其他处理之间的线虫群落组成差异显著 (图 3)。在全量化肥下，与不施有机物料对照相比，施加生物质炭显著增加了食细菌线虫数量 142%，且显著增加了食微线虫和植食性线虫数量的

比例 112%; 在减量化肥下, 与对照相比, 施加生物质炭显著增加了线虫总数 57.6% (图 4a), 且显著增加了食细菌线虫数量 228% (图 4b), 同时增加了食真菌线虫数量 59% (图 4c), 以及分别显著增加了植食性线虫和捕食线虫数量 57.2% 和 21.7% (图 4d、图 4e), 同时显著增加了食微线虫和植食性线虫数量的比例 66.7% (图 4f); 与秸秆相比, 施加生物质炭显著增加了线虫总数 121%, 各营养类群的线虫数量均有增加趋势, 同时食微线虫和植食性线虫数量的比例显著降低了 46%。此外, 无论化肥减施与否, 施加秸秆和生物质炭显著增加了食细菌线虫和食真菌线虫的相对丰度 (图 5a、图 5b), 在全量化肥下, 与对照相比, 施加生物质炭降低了植食性线虫相对丰度; 在减量

化肥下, 与对照相比, 施加生物质炭显著增加植食性线虫相对丰度 (图 5c), 捕杂食线虫相对丰度呈下降趋势 (图 5d)。

2.4 生物质炭和化肥减施下土壤线虫群落与植物生长和土壤理化性质的关系

采用主成分分析方法 (PCA) 对植物生长、土壤理化性质和线虫群落进行了分析, 探讨生物质炭和化肥减施下植物生长以及土壤理化性质变化与线虫群落之间的关系。第一和第二主成分分析轴分别解释了总变异的 29% 和 20.5% (图 6), 结果表明土壤矿质氮对线虫群落有很大影响, 此外发现土壤 pH 与土壤线虫总数和植食性线虫数量之间呈显著相关, 且减量化肥配施生物质炭的处理与其他处理完全区分开。

表 2 有机物料和化肥对土壤线虫群落性质影响的方差分析

Table 2 ANOVA results of the effects of organic amendment and chemical fertilizers on soil nematode community

土壤线虫群落性质 Soil nematode community properties	变异来源 Source of variation		
	有机物料 Organic amendments	化肥 Chemical fertilizer	OxC
线虫总数 Nematode abundance	5.05*	10.2**	4.11*
食细菌线虫数量 Bacterivores abundance	6.15**	0.43	0.36
食真菌线虫数量 Fungivores abundance	1.11	0.87	0.29
植食性线虫数量 Herbivores abundance	5.11*	10.32**	4.52*
捕杂食线虫数量 Omnivores-predators abundance	1.73	5.11*	0.25
食微线虫数量/植食性线虫数量 WI	5.78*	0.86	1.91

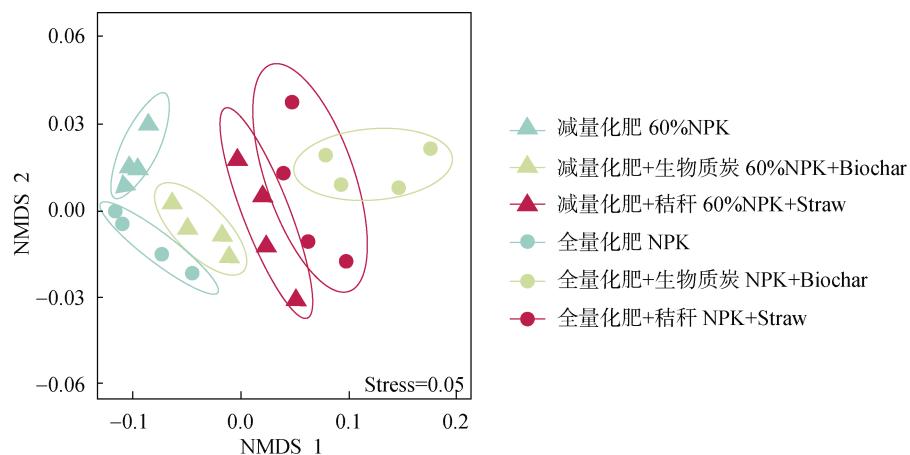


图 3 不同处理下土壤线虫群落组成的非度量多维尺度排序图 (NMDS)

Fig. 3 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) revealing the dissimilarity of soil nematode community composition under different treatments

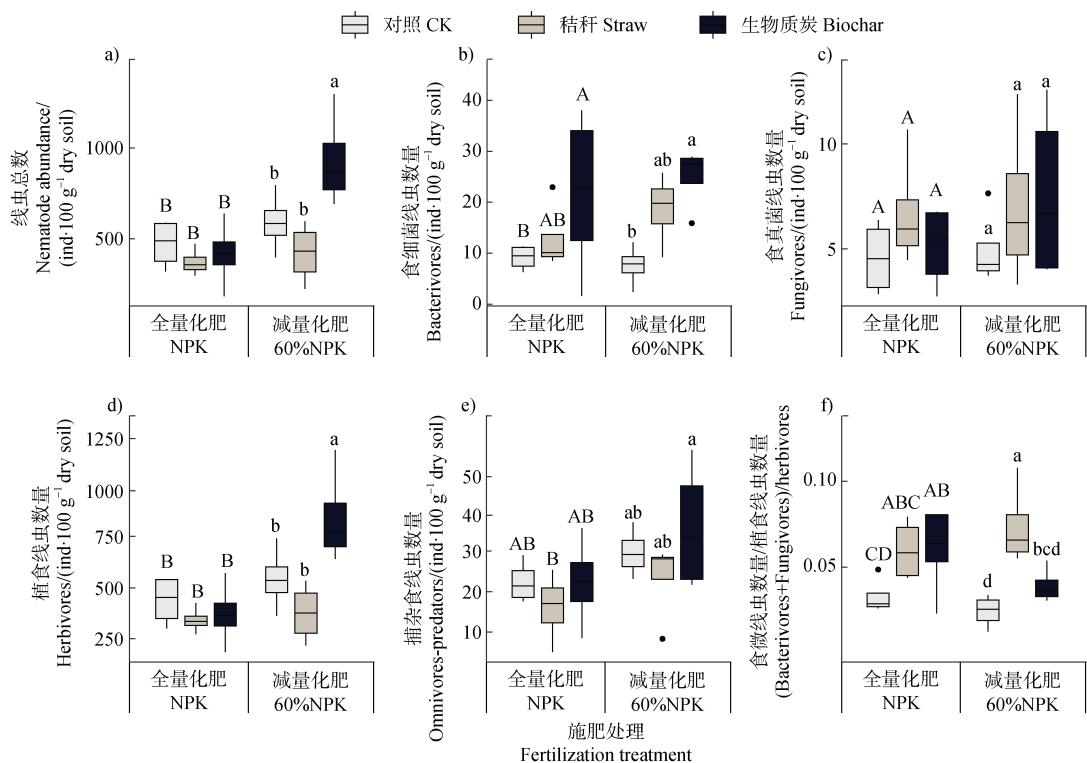


图 4 不同处理下土壤线虫总数、各营养类群数量以及瓦斯乐斯卡指数的变化

Fig. 4 Changes in the abundance of total nematode and trophic group, and the Wasleska index under different treatments

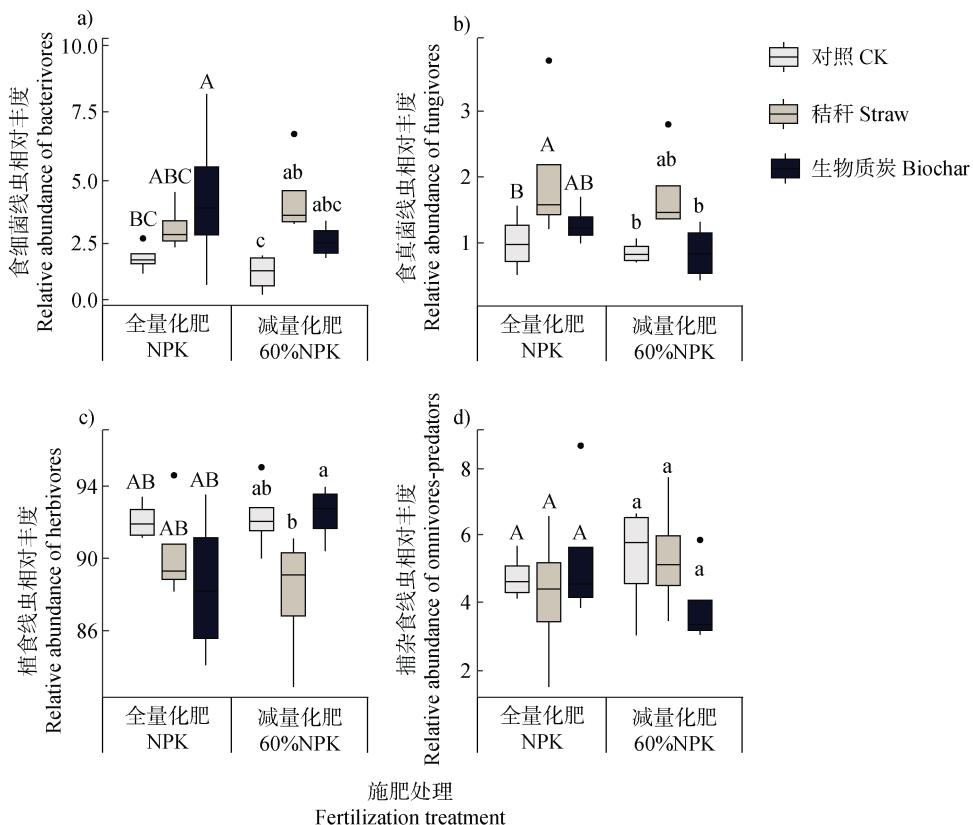


图 5 不同处理下土壤线虫各营养类群相对丰度

Fig. 5 Relative abundance of soil nematode trophic group under different treatments

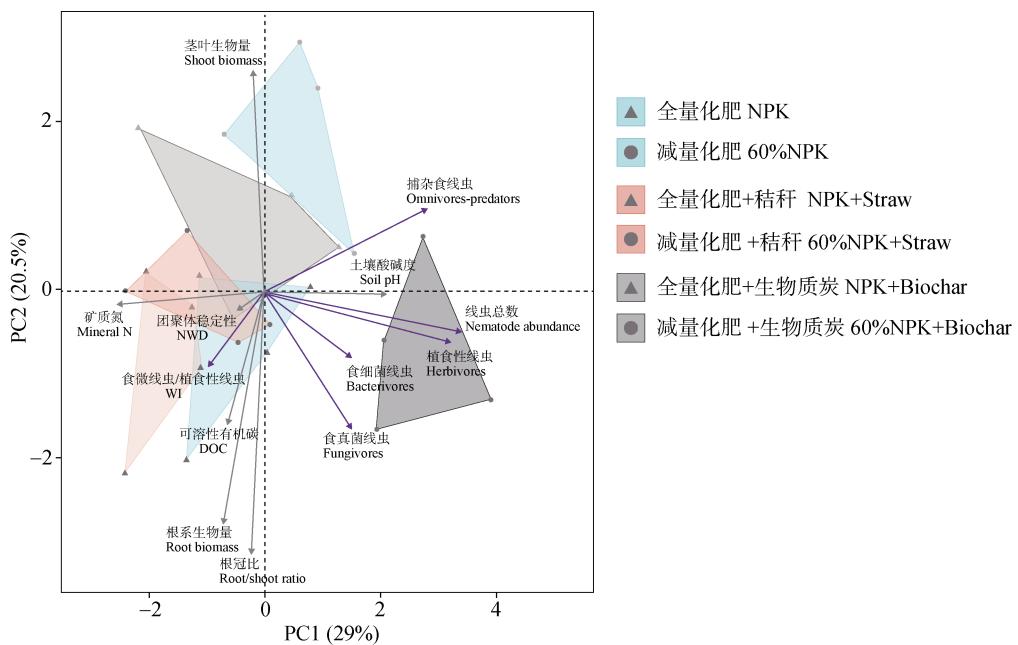


图 6 不同处理下的植物生长性质、土壤理化性质和土壤线虫群落性质的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis (PCA) of plant growth properties, soil physicochemical properties and soil nematodes community properties under different treatments

3 讨 论

3.1 生物质炭在化肥减施下对植物生长性质的影响

大量研究表明生物质炭能够通过改良土壤理化性质,比如改善土壤酸度,提升养分有效性等途径影响作物生长发育过程^[21]。本研究中,与不施有机物料对照和施用秸秆处理相比,在化肥全量施用时,施加生物质炭降低了根系生物量,但在减量化肥下,根系生物量显著增加,这与我们的假说一致,说明减施化肥下施加生物质炭会促进植物根系生长。蒋健等^[22]研究与本研究结果一致,他们发现施加生物质炭可以增加根系的总根长、根体积和根干重,从而增加植物根系与土壤的接触面积,提升对养分的吸收。在化肥减施下,施加生物质炭降低了土壤养分有效性,进而促进植物根系的生长,以便获取更多养分来支撑植物生长发育。任逸文等^[23]研究也表明养分限制会导致植物分配更多的碳到地下从而促进根系生长以便更好地吸收养分,即在化肥减施时施用生物质炭会导致土壤养分限制进而促进根系生物量增加。本研究还发现,与对照和施用秸秆相比,添加生物质炭处理中红薯根冠比的变化趋势与根系生物量变化趋势保持一致。这与许多研究得到一致的结果,即添加生物质炭不仅使得根和地上部生物

量增加,而且根和地上部的比率也会增加,这种根冠比的增加可能表明资源供应受到限制,需要更多的根来维持同样的地上生物量生产^[24]。

3.2 生物质炭在化肥减施下对土壤理化性质的影响

多项研究证实,生物质炭添加可以改变土壤的理化性质,如土壤酸碱度、团聚体结构、孔隙分布和土壤养分含量^[25]。本研究中,无论化肥减施与否,与对照相比,施加生物质炭后土壤 pH 有增加趋势,说明在本底酸性较强而缓冲能力较弱的红壤上施加生物质炭可以缓解土壤酸化,表明生物质炭是红壤地区有效的酸性改良剂。在很多研究中也发现酸性土壤中添加生物质炭后,土壤 pH 有不同程度的升高^[26]。值得关注的是,在全量化肥处理下,施加生物质炭处理的土壤矿质氮含量有增加趋势,但在减量化肥处理下,施加生物质炭显著降低了土壤矿质氮含量,这验证了我们的假说,即在化肥减施下施加生物质炭会造成土壤养分限制。这与 Lehmann 等^[27]的研究一致,该研究发现当肥料与生物质炭混合施用时,土壤中 NH_4^+ 含量明显降低,这可能是由于生物质炭具有较强的吸附能力,能够吸附土壤中的矿质氮离子。此外,生物质炭的施用通过输入碳源能够在短时间内快速增加土壤碳含量,从而激活土壤微生物,土壤的激发效应能够促进氮的矿化,从而

降低矿质氮的含量^[28-29]。

3.3 生物质炭在化肥减施下对土壤线虫数量和群落结构的影响

土壤线虫作为土壤健康的指示生物，已被广泛应用于评价各种生态系统的受干扰程度，与土壤理化指标相比，土壤线虫对环境变化的反应更加迅速，能更有效地指示环境变化产生的生态效应^[30]。有机物料的添加对土壤线虫数量的促进作用已被大量试验证实，有机物料的输入不仅通过增加养分资源的供应，而且通过改变土壤生境来增加线虫数量^[31]。本研究中，无论化肥减施与否，与不施有机物料对照相比，秸秆和生物质炭的施用均增加了食微线虫数量和相对丰度，说明土壤中增施有机物料可以促进土壤食微线虫群落发展。秸秆和生物质炭作为植物残体类有机物料，其分解过程中能改善土壤中的养分状况，通过刺激土壤微生物生物量及活性从而增加食微线虫数量^[32-33]。生物质炭在减施化肥下对食微线虫数量的促进作用强于秸秆添加处理，可能归因于生物质炭在减施化肥下通过缓解土壤酸化，进而有益于土壤结构改良，刺激了作物根系和微生物生长，从而为食微线虫提供更加良好的生境和食物来源^[34-35]。此外，本研究还发现，与对照和秸秆添加处理相比，捕杂食线虫的数量随着增施生物质炭呈增加趋势，说明了生物质炭的影响可以延伸到土壤食物网内较高的营养级水平上，提高了土壤食物网结构的复杂性^[36]。

本研究中，植食性线虫以半穿刺属 (*Rotylenchulus*) 线虫为主，占线虫总数的 90% 左右，植食性线虫数量和相对丰度的变化对线虫总数以及其他营养类群线虫的变化至关重要。另外还发现，生物质炭在减量化肥下对植食性线虫数量和相对丰度有显著促进作用，这与我们的假说一致。关于有机物料对土壤植食性线虫的变化一直以来都有不同的争议^[37]，Liu 等^[38]和 Liu 等^[39]研究发现，生物质炭替代降低了植物寄生线虫的相对丰度，但也有研究表明，有机肥的施用能够增加土壤中植食性线虫的数量^[40]。本研究发现土壤植食性线虫数量与土壤矿质氮含量呈显著负相关，在减量化肥下，与对照相比，施用生物质炭处理的根系生物量显著增加，植食性线虫数量也显著增加。该研究结果验证了我们的假说，即在减量化肥下，施加生物质炭通过降低土壤矿质氮含量导致土壤养分限制，由于植物获取资源受限，导

致根系资源分配增加，进而促进根系生长，最后增加了植食性线虫数量。

尽管生物质炭替代有利于缓解土壤酸化和增加土壤固碳能力，但在减量化肥下配施生物质炭会加重土壤养分限制，适宜的化肥施用量需要进一步研究。此外，生物质炭原料的性质和热解温度以及施用量也可能影响结果，未来的研究应进一步研究不同生物质炭的特性，以便更好地选择适合旱地红壤的生物质炭。

4 结 论

生物质炭与减量化肥施用虽然一定程度上缓解了旱地红壤酸化、土壤板结等问题，但是在化肥减施 40% 的情况下长期施用生物质炭会造成土壤养分限制，导致土壤植食性线虫数量增加，有益线虫与有害线虫数量的比例降低，导致农田食物网向着单一化方向发展，不利于农业生产可持续发展。由于生物质炭对土壤生态系统的影响是一个长期积累的过程，需要进一步研究生物质炭替代化肥的长期效应，从而为化肥减施增效技术以及生物质炭替代应用提供更为可靠的技术支撑。施用生物质炭替代化肥是旱地红壤的最有前途的施肥制度之一，应进一步研究生物质炭替代的适宜施用量以及化肥减施用量，以缓解土壤养分限制，进而最大程度上实现环境与生产双赢。

参考文献 (References)

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [2] Tilman D, Cassman K G, Matson P A, et al. Agricultural sustainability and intensive production practices[J]. Nature, 2002, 418 (6898): 671—677.
- [3] Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (24): 7615—7622. [赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7615—7622.]
- [4] Zhang Y Y, Mo F, Han J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (6): 1381—1392. [张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 稻秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58 (6): 1381—1392.]
- [5] Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects

- in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3324—3333. [陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J], 中国农业科学, 2013, 46 (16): 3324—3333.]
- [6] Bao J P, Yuan G S, Dong F Y, et al. Effects of biochar application and straw returning on organic carbon fractionations and microbial activities in a red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (3): 721—729. [包建平, 袁根生, 董方圆, 等. 生物质炭与秸秆施用对红壤有机碳组分和微生物活性的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57 (3): 721—729.]
- [7] Pathy A, Ray J, Paramasivan B. Biochar amendments and its impact on soil biota for sustainable agriculture[J]. *Biochar*, 2020, 2: 287—305.
- [8] Zhu B, Wan B, Liu T, et al. Biochar enhances multifunctionality by increasing the uniformity of energy flow through a soil nematode food web[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2023, 183: 109056.
- [9] Lu Y Y, Wang M W, Chen X Y, et al. Influences of biochar and nitrogen fertilizer on soil nematode assemblage of upland red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (1): 263—274. [卢焱焱, 王明伟, 陈小云, 等. 生物质炭与氮肥配施对红壤线虫群落的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (1): 263—274.]
- [10] Fu S L, Liu M Q, Zhang W X, et al. A review of recent advances in the study of geographical distribution and ecological functions of soil fauna diversity[J]. *Biodiversity Science*, 2022, 30 (10): 150—167. [傅声雷, 刘满强, 张卫信, 等. 土壤动物多样性的地理分布及其生态功能研究进展[J], 生物多样性, 2022, 30 (10): 150—167.]
- [11] 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.]
- [12] Wang M W, Liu Y D, Chen X Y, et al. Response of soil nematode community to cultivation in upland red soil relative to cultivation history and its significance as indicator[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (2): 510—521. [王明伟, 刘雨迪, 陈小云, 等. 旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义[J]. 土壤学报, 2016, 53 (2): 510—521.]
- [13] Chen X Y, Liu M Q, Hu F, et al. Contributions of soil micro-fauna (protozoa and nematodes) to rhizosphere ecological functions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (8): 3132—3143. [陈小云, 刘满强, 胡锋, 等. 根际微型土壤动物-原生动物和线虫的生态功能[J]. 生态学报, 2007, 27 (8): 3132—3143.]
- [14] Grandy A S, Wieder W R, Wickings K, et al. Beyond microbes : Are fauna the next frontier in soil biogeochemical models?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 102: 40—44.
- [15] Li Q, Liang W J, Jiang Y. Present situation and prospect of soil nematode diversity in farmland ecosystems[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15 (2): 134—141. [李琪, 梁文举, 姜勇. 农田土壤线虫多样性研究现状及展望[J]. 生物多样性, 2007, 15 (2): 134—141.]
- [16] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [17] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal characteristics characterized by weight distribution of particle size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38 (20): 1896—1899. [杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896—1899.]
- [18] Liu M Q, Chen X Y, Qin J T, et al. A sequential extraction procedure reveals that water management affects soil nematode communities in paddy fields[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40: 250—259.
- [19] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes [J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10 (3): 239—251.
- [20] Yin W Y. *Pictorial keys to soil animals of China*[M]. Beijing: Science Press, 1998. [尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [21] Lin Z, Rui Z, Liu M, et al. Pyrolyzed biowastes deactivated potentially toxic metals and eliminated antibiotic resistant genes for healthy vegetable production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 124208.
- [22] Jiang J, Wang H W, Liu G L, et al. Effect of biochar on root characteristics and yield in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23: 62—66. [蒋健, 王宏伟, 刘国玲, 等. 生物炭对玉米根系特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23: 62—66.]
- [23] Ren Y W, Xiao M L, Yuan H C, et al. Allocation of rice photosynthates in plant-soil system in response to elevated CO₂ and nitrogen fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (5): 1397—1404. [任逸文, 肖谋良, 袁红朝, 等. 水稻光合碳在植物-土壤系统中的分配及其对 CO₂ 升高和施氮的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29 (5): 1397—1404.]
- [24] Wilson J B. A review of evidence on the control of shoot: Root ratio, in relation to models[J]. *Annals of Botany*, 1988, 61 (4): 433—449.
- [25] Sun N T, Wang X Y, Zhou H, et al. Effects of kind and incorporation depth of biochars on water movement and nitrogen and phosphorus loss in purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (3): 722—732. [孙宁婷, 王小燕, 周豪, 等. 生物质炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (3): 722—732.]

- [26] Yang C D, Liu J J, Lu S G. Experimental study on electrochemical characteristics of acid soil amended by biochar[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 815—823. [杨彩迪, 刘静静, 卢升高. 生物质炭改良酸性土壤的电化学特性研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 815—823.]
- [27] Lehmann J, Pereira da Silva J, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon Basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249 (2): 343—357.
- [28] Blanco-Canqui H. Does biochar improve all soil ecosystem services? [J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13 (2): 291—304.
- [29] Sha Z, Li Q, Lv T, et al. Response of ammonia volatilization to biochar addition: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655 : 1387—1396.
- [30] Wan B, Liu T, Gong X, et al. Energy flux across multitrophic levels drives ecosystem multifunctionality: Evidence from nematode food webs[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 169: 108656.
- [31] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota-A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43 (9): 1812—1836.
- [32] Ye C L, Liu T, Zhang Y L, et al. Responses of soil nematode community to application of organic manure and incorporation of straw in wheat field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5): 997—1005. [叶成龙, 刘婷, 张运龙, 等. 麦地土壤线虫群落结构对有机肥和秸秆还田的响应[J]. 土壤学报, 2013, 50 (5): 997—1005.]
- [33] Xu W, Whitman W B, Gundale M J, et al. Functional response of the soil microbial community to biochar applications[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2021, 13: 269—281.
- [34] Domene X, Hanley K, Enders A, et al. Short-term mesofauna responses to soil additions of corn stover biochar and the role of microbial biomass[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 89: 10—17.
- [35] Wang C, Chen D, Shen J, et al. Biochar alters soil microbial communities and potential functions 3—4 years after amendment in a double rice cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 311: 107291.
- [36] Jiang C, Huang J H, Li X Q, et al. Responses of soil nematode community to long-term application of organic manure in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6): 1235—1241. [江春, 黄菁华, 李修强, 等. 长期施用有机肥对红壤旱地土壤线虫群落的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48 (6): 1235—1241.]
- [37] Liu T, Ye C L, Chen X Y, et al. Effects of different organic manure sources and their combinations with chemical fertilization on soil nematode community structure in a paddy field of East China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12): 3508—3516. [刘婷, 叶成龙, 陈小云, 等. 不同有机肥源及其与化肥配施对稻田土壤线虫群落结构的影响[J], 应用生态学报, 2013, 24 (12): 3508—3516.]
- [38] Liu H, Du X, Li Y, et al. Organic substitutions improve soil quality and maize yield through increasing soil microbial diversity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 347: 131323.
- [39] Liu T, Yang L H, Hu Z K, et al. Biochar exerts negative effects on soil fauna across multiple trophic levels in a cultivated acidic soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2020, 56: 597—606.
- [40] Liang W J, Lou Y, Li Q, et al. Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 883—890.

(责任编辑: 卢萍)