

张玉丹, 徐加聪, 付思齐, 任自飞, 郭皓元, 张涵禹, 王景瑞, 王冬. 人工草地建植对黄泛区农田砂质土壤线虫群落和能量结构的影响[J]. 土壤学报, 2027,

ZHANG Yudan, XU Jiacong, FU Siqi, REN Zifei, GUO Haoyuan, ZHANG Hanyu, WANG Jingrui, WANG Dong. Effects of Artificial Grassland Construction on Soil Nematode Community and Energy Structure in Sandy Farmland of the Yellow River Floodplain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2027,

人工草地建植对黄泛区农田砂质土壤线虫群落和能量结构的影响*

张玉丹, 徐加聪, 付思齐, 任自飞, 郭皓元, 张涵禹, 王景瑞, 王冬[†]

(河南大学生命科学学院, 全球变化生态学国际联合实验室, 河南省黄河流域小秦岭生态修复野外科学观测研究站, 河南大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 河南开封 475004)

摘要: 土壤线虫是表征土壤健康的关键指示生物, 对土地利用变化十分敏感。为探究人工草地建植对黄泛区农田砂质土壤线虫群落和能量结构的影响, 于 2022 年 6 月和 2023 年 6 月, 在黄河下游冲积平原对农田(冬小麦-夏玉米轮作)、单播黑麦草(*Lolium perenne* L.) 人工草地、单播紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.) 人工草地及混播人工草地的土壤线虫群落进行分析。结果发现, 与农田相比, 混播人工草地的土壤线虫总丰度显著提高了 68.06%; 人工草地处理使食细菌线虫相对丰度显著降低 18.43%~21.11%, 而植食性线虫相对丰度显著提高 133.80%~180.28%, 各营养类群分布更为均衡。在生态功能方面, 人工草地虽未显著改变成熟度指数, 但显著提高了结构指数并降低了基础指数, 表明土壤食物网复杂性和稳定性得以提高; 能量流动分析显示, 人工草地, 特别是混播模式, 通过强化“植物-植食性线虫-高阶消费者”这一能量通道, 显著提高了土壤线虫食物网总能量通量, 生态系统碳代谢和能量流动更为活跃。此外, 冗余分析指出, 土壤微生物生物量碳/微生物生物量氮含量、可溶性有机碳含量、土壤有效磷及毛管孔隙度是驱动该区域土壤线虫群落结构与功能变化的主要环境因子。人工草地通过协同提升土壤活性碳、氮库与改善土壤微生境, 促进了线虫群落向复杂、稳定状态演替及能量流动的增强。上述研究表明, 人工草地有效改善了黄泛区砂质土地的土壤线虫群落结构与功能, 并能支持线虫食物网更高的能量通量。混播人工草地因植物功能多样性表现出更显著的生态效益, 相关结果可为区域土地管理与生态修复提供重要参考。

关键词: 黄泛区; 人工草地; 豆禾混播; 土壤线虫群落; 能量结构; 生态功能

中图分类号: S812.2 文献标志码: A

Effects of Artificial Grassland Construction on Soil Nematode Community and Energy Structure in Sandy Farmland of the Yellow River Floodplain

*国家自然科学基金项目(32371672)、河南省高等学校重点科研项目计划基础研究专项(27ZX006)和河南科技智库调研课题(SKXJCZX-2026-80B)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 32371672), the Special Project for Basic Research of the Key Scientific Research Program of Henan Provincial Institutions of Higher Education, China (No. 27ZX006), and the Science and Technology Think Tank Research Topics of Henan Province, China (No. SKXJCZX-2026-80B)

[†]通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangdong19882005@163.com

作者简介: 张玉丹(2004—), 女, 湖北襄阳人, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: zhydan@henu.edu.cn

收稿日期: 2025-12-12; 收到修改稿日期: 2026-07-14; 网络首发日期(www.cnki.net): 202 - -

ZHANG Yudan, XU Jiacong, FU Siqi, REN Zifei, GUO Haoyuan, ZHANG Hanyu, WANG Jingrui, WANG Dong[†]

(International Joint Research Laboratory of Global Change Ecology, College of Life Sciences, Henan University, Xiaolinling Ecological Restoration Field Observation and Research Station of the Yellow River Basin, Henan Dabieshan National Field Observation and Research Station of Forest Ecosystem, Kaifeng, Henan 475004, China)

Abstract: 【Objective】 Soil nematodes are pivotal for soil health and highly sensitive to land use changes. This study investigated the effect of artificial grassland construction on soil nematode community structures and energy flow in sandy soils of the Yellow River Floodplain. 【Method】 The experiment was conducted in June 2022 and 2023, examining nematode communities across four land use types: farmland (winter wheat-summer maize rotation), monoculture ryegrass (*Lolium perenne*), monoculture alfalfa (*Medicago sativa* L.), and a mixed alfalfa-ryegrass artificial grassland. 【Result】 Results showed that compared with farmland, the mixed artificial grassland significantly increased the total nematode abundance by 68.06%. Artificial grassland significantly reduced the relative abundance of bacterivore nematodes by 18.43%-21.11%, while increasing plant-parasitic nematodes by 133.80%-180.28%, leading to a more balanced trophic structure. Regarding ecological function, although artificial grassland did not significantly alter the maturity index, it increased the structural index and decreased the basal index, thereby enhancing the complexity and stability of the soil food web. Energy flow analysis revealed that artificial grassland, particularly the mixed-sowing system, significantly increased the total energy flux of the soil nematode food web through the plant-based pathway (plant-herbivore-omnivore/predators), reflecting intensified ecosystem carbon metabolism and energy flow. Notably, redundancy analysis identified soil microbial biomass carbon/nitrogen, dissolved organic carbon, available phosphorus, and capillary porosity as the primary environmental drivers of nematode community structure and function. Artificial grassland promoted the succession of nematode communities toward complex, stable states and enhanced energy flux through the synergistic improvement of labile C and N pools and amelioration of soil microenvironments. 【Conclusion】 This study reveals that artificial grasslands construction effectively improves the structure and function of soil nematode communities and supports higher energy flux through the nematode food web in the sandy soil of the Yellow River Floodplain. Mixed-sowing artificial grasslands demonstrate more significant ecological benefits due to greater plant functional diversity, providing important references for regional land management and ecological restoration.

Key words: Yellow River Floodplain; Artificial grasslands; The mixed alfalfa-ryegrass artificial grassland; Soil nematode community; Energy structure; Ecological function

农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,是人类赖以生存的重要物质生产基地^[1]。长期不合理的农业措施及高强度的利用方式易导致农田生态系统功能退化,如土壤有机质含量降低、生物多样性减少,进而削弱生态系统的稳定性和能量转化效率^[2]。近年来,国家相继出台了《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》《“十四五”全国饲草产业发展规划》等政策,在全国范围内推动保护性耕作,部分区域采用粮草轮作和退耕建植人工草地等系统性修复措施。人工草地作为实现资源节约型农业的有效途径,对提升退化农田的生态系统服务功能具有积极影响^[3]。黄泛区地处黄河下游冲积平原,部分土壤结构疏松、保水保肥能力弱,是典型的生态脆弱带^[4]。在此区域,将退化的砂质耕地转为人工草地,是协调黄泛区土地生态修复与农业转型的重要实践。

土地利用方式转变可通过改变植被组成、土壤理化性质及其与生物互作等多途径调控土壤生态过程^[5-6]。当前人工草地主要包括单播和混播两种模式,豆科与禾本科混播是提高人工草地生产力的有效种植模式^[7]。豆科植物能够通过深根系穿透作用打破土壤板结、降低紧实度并改善孔隙结构,同时凭借根瘤固氮功能可为土壤补充氮素,提升土壤肥力^[8]。禾本科植物则通过发达的须根系,在土壤表层形成密集根网,从而增强土壤孔隙度和通气性;其根系分泌物与残体归还土壤也有助于增加土壤有机质含量,改善土壤理化性质。豆科与禾本科混播在生态位及养分利用上表现出互补效应,有助于提高土壤肥力、结构稳定性和生态功能^[8]。作为土壤食物网的核心组分,土壤动物对生态系统变

化响应十分敏感,其群落结构可有效指示土壤养分的亏盈状况和土壤环境质量^[9]。因此,将土地利用方式评价与土壤动物研究相结合,对于科学管理土地资源、推动退化生态系统恢复具有重要意义。

土壤线虫是土壤中种类和数量最丰富的后生动物^[9]。作为土壤微食物网的关键组分,线虫占据多个营养级,直接参与有机质分解、养分循环等生态过程。不同功能群的线虫对土地利用方式改变的响应存在差异。其中,植食性线虫对地上植物群落变化最敏感、迅速,其次是食细菌线虫和食真菌线虫^[10]。Ye 等^[11]发现禾本科植物对植食性线虫的吸引力弱于豆科植物。王楠等^[12]的研究指出,豆科牧草会降低食细菌线虫相对丰度,而提高植食性线虫相对丰度。但田建霞等^[13]则得出相反结论,认为豆科牧草通过促进细菌的增殖提高了食细菌线虫相对丰度,反映出线虫响应机制的复杂性。此外,线虫丰度、群落结构指数及能量通量可有效表征土壤食物网的生态结构与功能^[10]。其中,群落结构指数能灵敏指示线虫群落对干扰的响应,能量流动动态也是评估土壤生态系统功能与稳定性的重要依据^[14]。因此,揭示土壤线虫群落对土地利用方式改变的响应机制,对理解传统耕地转为人工草地的生态影响具有重要意义。前期人工草地相关研究多聚焦于退化草地修复,而在黄泛区,关于人工草地对于农田砂质土壤线虫的影响研究较为有限^[8-9]。基于此,本研究调查该地区多元化线虫群落特征(丰度、群落结构指数、食物网能量通量)对不同土地利用方式的响应,旨在为区域土壤健康和可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于河南省开封市祥符区西姜寨(34°26'N, 114°37'E, 海拔 76 m),属暖温带季风气候,年平均气温 14.5 °C,年降水量 627 mm 左右,无霜期 221 d。试验地土壤类型为冲积型潮土,形成源于黄河冲积沉积物^[15]。土壤由 7 g·kg⁻¹黏粒、391 g·kg⁻¹粉粒和 602 g·kg⁻¹砂粒构成,pH 为 8.23。在建立田间试验之前,冬小麦和夏玉米轮作是该区的主要耕作方式。

1.2 试验设计

利用 2020 年在我国华北平原黄泛区砂质土壤建立的不同土地利用方式试验平台,采用随机区组试验设计,共设四个处理:农田(冬小麦-夏玉米轮作)、单播黑麦草(*Lolium perenne* L.)人工草地、单播紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)人工草地及二者混播人工草地。试验区总面积约 400 m²,每个处理设置 4 个重复,共计 16 个样方,样方面积为 4 m × 4 m,样方间至少有 1 m 的缓冲带。黑麦草、紫花苜蓿单播及混播人工草地采用人工播种方式建立。其中,黑麦草与紫花苜蓿混播面积比例为 1:1,行距为 15 cm。三种人工草地每年 6、9 月各进行一次刈割处理,刈割后凋落物留置原地自然分解,无灌溉、除草和施肥。农田作为对照处理,维持当地常规轮作制度,秸秆还田,无除草和施肥。

1.3 样品采集与处理

分别于 2022 年 6 月和 2023 年 6 月进行土壤样品采集。在每个样地内,去除枯枝落叶层后使用直径为 7 cm 的土钻采集 0~20 cm 深的土样,取 5 个采样点并充分混合为 1 个样品,将样品用自封袋密封后于 4 °C 保存并运回实验室。去除明显石块和植物残茎后,通过 2 mm 土筛进行预处理。将采集的新鲜土壤样品分成两部分:一份在室温下自然风干后用于测定土壤理化性质;另一份置于 4 °C 冰箱中保存,用于土壤线虫的提取与鉴定。

1.4 样品测定方法

1.4.1 土壤理化性质的测定 参考《土壤农化分析》^[16],土壤含水量(SWC)和毛管孔隙度(CP)通过环刀法获取原状土样后测定;微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提法提取后,分别采用 TOC 分析仪(vario TOC, Elementar, 德国)和紫外分光光度计(UV-2600, Shimadzu, 日本)测定;土壤可溶性有机碳(DOC)以蒸馏水为浸提剂,经振荡、离心和过滤后,同样用 TOC 分析仪测定;土壤有效磷含量(AP)采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;土

壤碱解氮含量 (AN) 采用碱解扩散法测定。

1.4.2 土壤线虫的分离鉴定 采用 Baermann 漏斗法^[17]分离土壤线虫: 于实验室内称取 50 g 的新鲜土壤样品, 置于铺有双层纱布的漏斗内, 以去离子水室温静置分离 48 h, 收集线虫悬浮液。离心后, 用三乙醇胺-福尔马林溶液进行固定和保存; 使用倒置显微镜对线虫进行计数和鉴定: 依据土壤含水量的测定结果计算每 100 g 干土中线虫数量, 物种鉴定参照《中国土壤动物检索图鉴》^[18], 每份样品随机挑取 100 条线虫鉴定至属水平。若样品线虫总数不足 100 条, 则对全部个体进行鉴定。

1.5 土壤线虫群落生态指数的计算

基于食性特性与口器类型, 将鉴定到的线虫分为 4 个营养类群: 食细菌线虫 (Bacterivores)、食真菌线虫 (Fungivores)、植食性线虫 (Plant-parasites) 和杂/捕食线虫 (omnivore-predators); 同时依据 Bongers 和 Bongers^[19]提出的生活史对策, 将线虫划分为 5 个定殖者-持久者 (colonizer-persister, c-p) 类群, 其中 c-p 1~2 对应世代周期短、繁殖快、耐扰动能力强的 r-对策者; c-p 4~5 对应体型大、世代长、生境专一性高的 K-对策者; c-p 3 为两者间的过渡型, 不同 c-p 类群对养分投入和环境扰动的响应各异。综合营养类群比例与 c-p 值分布, 计算线虫群落生态指数, 公式如下:

营养多样性指数 (Trophic diversity index, TD)^[20]:

$$TD = \frac{1}{\sum p_i^2} \quad (1)$$

成熟度指数 (Maturity index, MI)^[3]:

$$MI = \sum_{i=1}^n c_i \times p_i \quad (2)$$

式中, p_i 指第 i 个线虫类群丰度与线虫总丰度的比值; c_i 为土壤线虫第 i 类群生活史策略 c-p 值; n 为每个样品中线虫类群总数。

结构指数 (Structure index, SI)^[21]:

$$SI = 100 \times \frac{s}{s+b} \quad (3)$$

基础指数 (Basal index, BI)^[22]:

$$BI = 100 \times [b/(b+e+s)] \quad (4)$$

式中, e 、 b 和 s 分别代表食物网中的富集成分、基底成分和架构成分, $e = \sum k_e n_e$, $b = \sum k_b n_b$, $s = \sum k_s n_s$, 其中, k_e 、 k_b 和 k_s 对应各类群的加权数, n_e 、 n_b 和 n_s 对应各类群的相对丰度。

1.6 土壤线虫群落能量结构的计算

线虫的能量通量 (F) 是生产和呼吸所消耗的能量^[14], 计算公式如下:

$$F = \sum \{N_i [0.1(W_i/c_i/12) + 0.273 \times 0.058(W_i^{0.75})]\} \quad (5)$$

式中, N_i 、 W_i 和 c_i 分别指第 i 个属的个体数量、生物量和 c-p 值。

线虫食物网每个营养级的潜在碳通量 F_i 的计算公式如下:

$$F_i = \frac{F + D_{io} \times F_0}{e_i} \quad (6)$$

式中, F 为生产和呼吸消耗的能量通量; D_{io} 代表更高营养级 (即杂/捕食线虫) 对第 i 类营养类群的捕食偏好; F_0 代表杂/捕食线虫的能量通量; e_i 代表营养级间的同化效率, 食细菌线虫、食真菌线虫、植食性线虫和杂/捕食线虫的同化效率分别为 0.60、0.38、0.25 和 0.50^[20]。

1.7 数据统计分析

本研究使用 R 软件^[23] (version 4.4.3) 进行数据分析, 所有数据进行正态检验 (Shapiro-Wilk test) 和方差齐性检验 (Levene's test), 使用 stats 包中 aov 函数进行双因素方差分析 (Two-way ANOVA analysis), 检验不同土地利用方式、不同年份下土壤线虫总丰度、相对丰度以及群落结构指数的变化。采用邓肯多重范围检验 (Duncan's multiple range test) 分析不同土地类型间的差异。使用 stats 包的 cor 函数进行相关分析, 研究土壤线虫总丰度、相对丰度以及土壤线虫群落结构指数与土壤环境因子、线虫群落能量结构之间的关系。使用 vegan 包^[24]中的 rda 函数进行冗余分析 (Redundancy

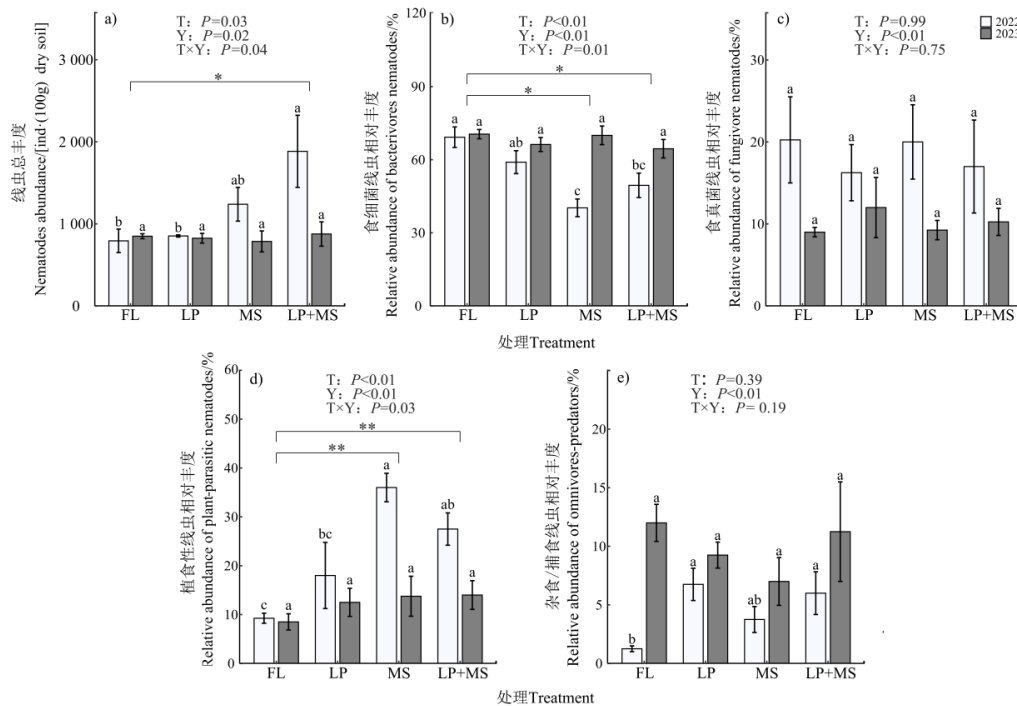
analysis, RDA), 解释土壤线虫群落组成与土壤理化因子的关系。

2 结果与讨论

2.1 人工草地建植对土壤线虫总丰度的影响

土地利用方式和取样年份显著影响土壤线虫总丰度 ($P < 0.05$, 图 1)。与农田对照相比, 混播人工草地土壤线虫总丰度显著提高 68.06%, 而单播人工草地无显著变化。在 2022 年, 混播人工草地土壤线虫总丰度较农田显著增加 1.38 倍, 较黑麦草人工草地显著增加 1.21 倍; 不同处理的线虫总丰度在 2023 年无显著差异。土地利用方式与年份的交互作用对土壤线虫总丰度影响显著。

在农田和人工草地生态系统中, 土壤线虫群落结构受施肥措施、土壤养分、微生物及植物类型等多种因素的影响^[3, 20]。黑麦草人工草地处理下土壤线虫总丰度与农田相比无显著差异(图 1a), 这与包涵等^[25]的研究结果相似, 可能是因为黑麦草与小麦、玉米同属禾本科, 相似的根系构型、凋落物特性及根际环境弱化了土地利用改变带来的生态效应^[26]。相比之下, 混播人工草地线虫总丰度显著提高(图 1a), 表明豆科与禾本科混播组合主要表现为互补效应而非竞争关系^[27]: 二者不同的根系分布和凋落物组成, 为不同偏好的土壤微生物及线虫创造了更丰富的生态位, 从而促进线虫总丰度增加。



注: FL: 农田; LP: 单播黑麦草人工草地; MS: 单播紫花苜蓿人工草地; LP+MS: 黑麦草+紫花苜蓿混播人工草地; 柱状图上方为双因素方差分析结果; T: 土地利用方式的影响; Y: 年份的影响; T×Y: 土地利用方式和年份交互效应。不同小写字母表示相同年份不同土地利用方式处理间差异显著 ($P < 0.05$); *表示未考虑年份因素下, 不同土地利用方式间差异显著, *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns: $P > 0.05$ 。下同。Note: FL: farmland; LP: monoculture ryegrass (*Lolium perenne* L.); MS: monoculture alfalfa (*Medicago sativa* L.); LP+MS: mixed ryegrass-alfalfa artificial grassland. The results of two-way ANOVA are shown at the top of the bar chart, T: the effect of land use type; Y: the effect of year; T×Y: the interaction effect of land use type and year. Different lower cases indicate significant differences among different land use types in the same year ($P < 0.05$); * Indicates significant differences among different land use types without considering the year factor, *: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$ and ns: $P > 0.05$. The same below.

图 1 不同土地利用方式处理下土壤线虫总丰度 (a) 和相对丰度 (b. 食细菌线虫相对丰度, c. 食真菌线虫相对丰度, d. 植食性线虫相对丰度, e. 杂食/捕食线虫相对丰度)

Fig. 1 Total abundance (a) and relative abundance of soil nematodes (b. relative abundance of bacterivores nematodes, c. relative abundance of fungivore nematodes, d. relative abundance of plant-parasitic nematodes, e. relative abundance of omnivore-predators) under different land use types

2.2 人工草地建植对土壤线虫各营养类群相对丰度的影响

土地利用方式和取样年份显著影响土壤食细菌线虫及植食性线虫相对丰度 ($P < 0.05$, 图 1)。与农田对照相比, 紫花苜蓿和混播人工草地处理下, 食细菌线虫相对丰度分别显著降低 21.11% 和 18.43%, 植食性线虫相对丰度分别显著升高 1.80 倍和 1.33 倍。在 2022 年, 与农田对照相比, 紫花苜蓿和混播人工草地食细菌线虫相对丰度分别显著降低 41.88% 和 28.52%, 植食性线虫相对丰度分别显著升高 2.89 倍和 1.97 倍; 不同处理的各营养类群线虫相对丰度在 2023 年无显著差异。土地利用方式与年份的交互作用对食细菌线虫相对丰度及植食性线虫相对丰度影响显著。

人工草地建植对食细菌线虫和植食性线虫的影响存在差异, 这与植物类型和土壤性质密切相关。本研究中, 紫花苜蓿和混播人工草地食细菌线虫相对丰度较轮作农田显著降低, 而植食性线虫的相对丰度则显著提高 (图 1b, 图 1d)。这与田建霞等^[13]在黄土高原的研究结果不同, 可能源于黄泛区砂质土壤与黄土高原壤质土壤在物理结构和养分保持能力上的差异。在黄土高原单作玉米系统的固化土壤环境中, 植食性线虫为优势营养类群, 苜蓿种植后因细菌数量增加而表现为食细菌线虫相对丰度显著提高。而在本研究中, 食细菌线虫在四种土地利用方式下均为优势类群, 多年生人工草地通过提升根系资源质量, 导致植食性线虫急剧增加, 食细菌线虫相对丰度相应减少, 这与王楠等^[12]的研究结果一致。此外, 混播人工草地增强了线虫微生物生境异质性, 使土壤食物网结构更为复杂, 因而指示食物网复杂性的杂食/捕食线虫比例也有所上升^[17]。

2.3 人工草地建植对土壤线虫群落结构指数的影响

土地利用方式显著影响土壤线虫营养多样性指数、结构指数及基础指数 ($P < 0.05$, 图 2)。与农田相比, 黑麦草人工草地结构指数显著提高 50.33%, 基础指数显著降低 23.15%; 紫花苜蓿人工草地营养多样性指数、结构指数分别显著提高 28.21%、50.72%, 基础指数显著降低 25.30%; 混播人工草地营养多样性指数和结构指数分别显著提高 29.79% 和 73.48%, 基础指数显著降低 34.47%。在 2022 年, 紫花苜蓿和混播人工草地营养多样性指数显著提高 56.29% 和 45.95%; 在 2023 年, 紫花苜蓿和混播人工草地结构指数显著提高 59.77% 和 82.49%, 基础指数显著降低 39.16% 和 50.93%。

线虫多样性指数是评估群落结构变化的重要量化指标^[14]。人工草地建植后, 食细菌线虫相对丰度下降, 植食性线虫及杂食/捕食性线虫占比相应提升, 各营养类群分布趋于均衡, 由此提高了营养多样性指数 (图 2a)。线虫群落生态功能指数可反映土壤食物网的结构与功能, 是评估土壤恢复状况的重要依据^[22]。周广帆等^[3]研究表明, 退耕还草能显著提升线虫成熟度指数, 推动食物网向更成熟稳定方向演替。然而在本研究中, 与农田相比, 人工草地对线虫群落成熟度的促进作用并不明显 (图 2b), 可能因建植时间较短, 线虫群落结构尚未稳定, 仍处于演替初期阶段^[19]。尽管如此, 人工草地显著提高了结构指数, 降低了基础指数 (图 2c, 图 2d), 表明食物网复杂性与稳定性增强。这与 Ferris 等^[22]的土壤食物网诊断理论高度吻合, 指示系统正在从以 r -对策者为主的简单食物网, 向以 K -对策者为主的稳定食物网演替。

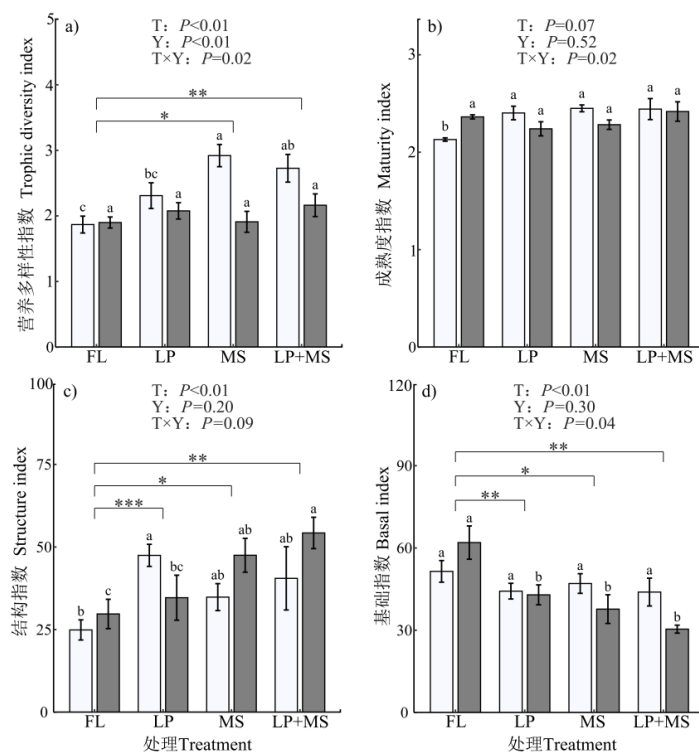


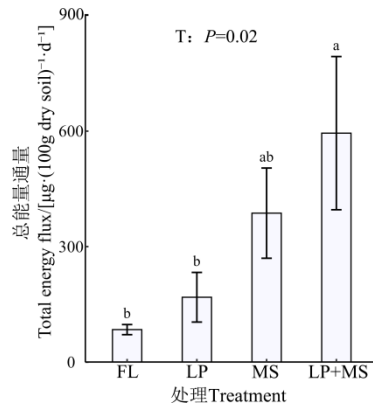
图2 不同土地利用方式处理下土壤线虫群落结构指数 (a. 营养多样性指数, b. 成熟度指数, c. 结构指数, d. 基础指数)

Fig. 2 Community structure indices of soil nematodes (a. Trophic diversity index, b. Maturity index, c. Structure index, d. Basal index) under different land use types

2.4 人工草地建植对土壤线虫群落能量结构的影响

土地利用方式影响土壤线虫食物网的能量结构 (图3和图4)。与农田相比, 人工草地均增加了线虫的总能量通量, 混播人工草地处理增幅最大且达到显著水平, 较农田、黑麦草人工草地分别显著提高了 6.04 倍和 2.52 倍。此外, 紫花苜蓿和混播人工草地显著增强了资源-植食性线虫-杂/捕食线虫这一能量通道的通量。资源向植食性线虫的能量流动在所有处理中均占主导地位, 是试验地土壤线虫食物网最主要的能量流动路径。

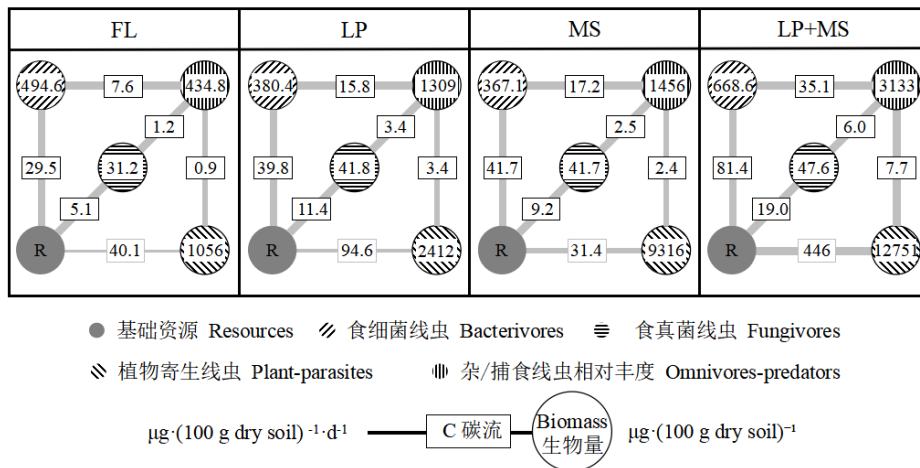
土壤线虫食物网内的能量流动代表了能量从初级生产者向更高营养级的转移^[20]。与农田相比, 人工草地处理均提高了食物网的总能量通量, 其中混播人工草地最为显著 (图3), 这与其更高的植物多样性和复杂的群落结构密切相关。曹雪乔等^[8]指出, 物种多样性增加可通过根系生态位分化, 促进资源利用互补, 从而提升系统生产力。豆科植物通过共生固氮不仅满足自身需要, 还可向禾本科转移氮素, 而禾本科对土壤无机氮的竞争又促使豆科更依赖生物固氮, 两者形成互惠机制^[7]。这种协同作用既增加系统氮素输入, 也提高养分利用效率, 从而向土壤中输送更多数量与种类的有机资源, 为土壤线虫食物网提供更丰富的能量基础^[28]。本研究中, 线虫食物网的总能量通量与营养多样性指数、成熟度指数呈显著正相关, 更复杂多样化的食物网支持更高的能量通量, 这与 Zheng 等^[14]的研究结论一致。植物通道的能量通量占据主导地位, 植食性线虫作为初级消费者, 能够诱导植物源碳释放至土壤, 为更高营养级的线虫提供丰富的食物资源^[12]。因此, 人工草地特别是混播系统, 可能通过强化“植物-植食性线虫-高阶消费者”这一通道 (图4), 提高流入土壤食物网的能量通量^[12], 显著影响了食物网能量流动。



注：不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著。Note: Different lower cases indicate significant differences among land use types.

图 3 不同土地利用方式处理下土壤线虫群落总能量通量

Fig. 3 Total energy flux of soil nematode communities under different land use types



注：R 为线虫群落的碳供给源。圆圈内的数字代表线虫新鲜生物量 ($\mu\text{g} \cdot (100 \text{ g dry soil})^{-1}$)，方框内的数字表示能量通量 ($\mu\text{g} \cdot (100 \text{ g dry soil})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。Note: R is the carbon source for the nematode community. The numbers within the circles represent the fresh biomass of nematodes ($\mu\text{g} \cdot (100 \text{ g dry soil})^{-1}$), and the numbers within the squares denote the energy flux ($\mu\text{g} \cdot (100 \text{ g dry soil})^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$).

图 4 不同土地利用方式处理下土壤线虫群落内能量结构

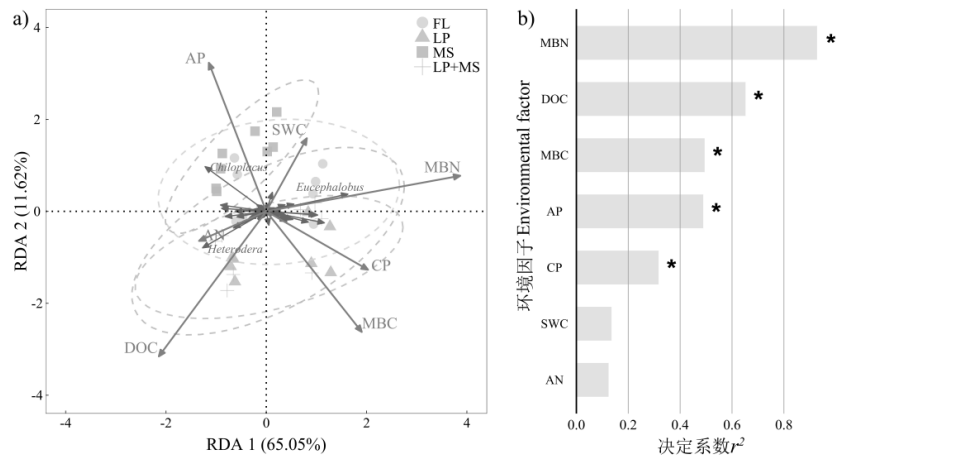
Fig. 4 Energy structure of soil nematode communities under different land use types

2.5 土壤线虫群落与环境因子的关系

冗余分析 (图 5) 显示：线虫属水平群落结构与土壤理化指标有较强的相关性。第一主轴与第二主轴对线虫群落相对丰度方差的解释比例分别为 65.05% 和 11.62%，共解释了 76.67% 的方差变化。土壤微生物生物量氮含量、可溶性有机碳含量、微生物生物量碳含量、有效磷含量和毛管孔隙度是驱动土壤线虫群落组成变化的主要环境因子。

相关分析 (图 6) 表明：土壤线虫群落结构及能量通量的变化可能与土壤活性碳、氮库和土壤物理结构密切相关。紫花苜蓿和混播人工草地通过生物固氮和根系沉积显著提高了微生物生物量碳氮和可溶性有机碳含量，这与 Zhou 等^[29]的研究结果一致。微生物生物量碳与结构指数呈显著正相关，而与基础指数呈显著负相关 (图 6)，反映微生物生物量的增加不仅提升了资源可利用性，还有利于 K-策略线虫定殖，为食物网向复杂稳定状态演替提供机制基础。可溶性有机碳与植食性线虫相对丰度、营养多样性指数、资源-植食性线虫能量通量及总能量通量均呈显著正相关 (图 6)，更高质量的根系分泌物输入促进了基于植物通道的能量流动，进而提高线虫食物网总能量通量，这与植食性线虫比例上升、食细菌线虫下降的营养结构转变相呼应。同时，人工草地土壤物理结构的改善或与

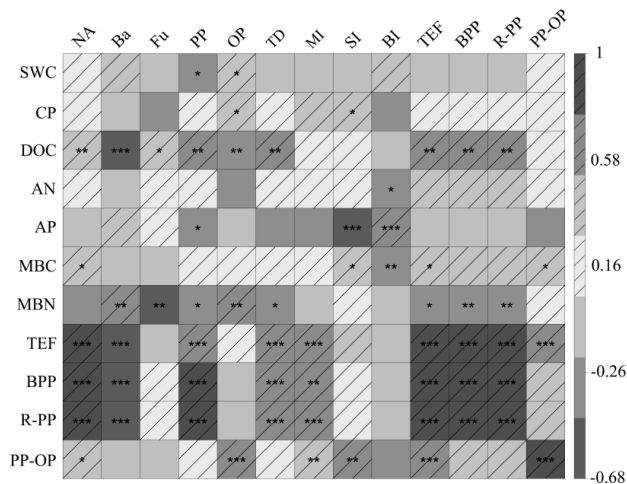
线虫栖息环境优化相关。毛管孔隙度与杂/捕食线虫相对丰度及结构指数呈显著正相关（图 6）。相较于受频繁干扰的农田，人工草地的连续根系与枯落物覆盖有助于土壤团聚体的形成，混播草地豆科深根系与禾本科须根系的生态位互补，进一步改善孔隙结构^[30]，为线虫活动繁殖创造更适宜的栖息环境，加速土壤有机质分解和养分释放，通过上行效应为更复杂食物网结构的形成提供支撑^[31]。



注：* ($P < 0.05$)；MBN，微生物生物量氮；DOC，土壤可溶性有机碳；MBC，微生物生物量碳；AP，土壤有效磷含量；CP，毛管孔隙度；SWC，土壤含水量；AN，土壤有效氮含量；*Chiloplacus*，板唇属；*Eucephalobus*，真头叶属；*Heterodera*，异皮属。下同。Note: * ($P < 0.05$); MBN, Microbial biomass nitrogen; DOC, Dissolved organic carbon content; MBC, Microbial biomass carbon; AP, Soil available phosphorus content; CP, Capillary porosity; SWC, Soil water content; AN, Soil available nitrogen content. The same below.

图 5 线虫群落与环境因子冗余分析 (RDA)

Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) of the composition of the nematode community and environmental factors



注：NA，线虫总丰度；Ba，食细菌线虫相对丰度；Fu，食真菌线虫相对丰度；PP，植食性线虫相对丰度；OP，杂/捕食线虫相对丰度；TD，营养多样性指数；MI，成熟度指数；SI，结构指数；BI，基础指数；TEF，总能量通量；BPP，植食性线虫生物量；R-PP，资源-植食性线虫能量通量；PP-OP，植食性线虫-杂/捕食线虫能量通量。Note: NA, Nematode abundance; Ba, Relative abundance of bacterivore nematodes; Fu, Relative abundance of fungivore nematodes; PP, Relative abundance of plant-parasitic nematodes; OP, Relative abundance of omnivore-predators; TD, Trophic diversity index; MI, Maturity index; SI, Structure index; BI, Basal index; TEF, Total energy flux; BPP, Biomass of plant parasitic nematodes; R-PP, Energy flux from resources to plant-parasitic nematodes; PP-OP, Energy flux from plant parasitic nematodes to omnivore-predators.

图 6 土壤线虫组成、群落结构与环境因子、能量结构的相关性

Fig. 6 Correlation analysis of soil nematode composition, community structure with environmental factors and energy structure

3 结 论

本研究探讨了人工草地建植对黄泛区砂质土壤线虫群落及能量结构的影响。研究发现,与农田相比,人工草地通过改变土壤养分输入、根系分泌物组成和线虫栖息环境,显著改变了土壤线虫群落结构。具体而言,混播人工草地显著提高线虫总丰度;紫花苜蓿单播和混播人工草地均显著降低食细菌线虫相对丰度,提高植食性线虫相对丰度,各营养类群分布更趋均匀,营养多样性指数显著增加。在食物网结构方面,人工草地尤其是混播处理,显著提高结构指数,降低基础指数,土壤食物网复杂性、稳定性增强,对资源的响应与利用效率提高。能量流动分析进一步显示,人工草地的建植增加了输入土壤线虫食物网的总能量,提高各线虫通道的能量通量,呈现出更高效、活跃的能量流状态。研究表明,人工草地通过增加土壤活性碳氮库,改善土壤微生境,驱动土壤线虫群落结构与能量通量的变化。混播人工草地在资源互补与生态位分化方面具有优势,有助于维持线虫群落稳定性并改善土壤环境,其生态效益优于单播模式。因此,建议人工草地种植模式的选择以混播模式为宜。本研究为黄泛区退化农田的生态修复提供了科学依据,在人工草地种植模式的选择与管理方面,具有重要的实践价值。

参考文献 (References)

- [1] Wu X, Cai J J, Wang C J, et al. Soil health evaluation of farmland in Yinchuan Plain based on minimum data set[J]. *Soils*, 2026, 58(1): 225-234. [吴霞, 蔡进军, 王长军, 等. 基于最小数据集的银川平原农田土壤健康评价[J]. *土壤*, 2026, 58(1): 225-234.]
- [2] Xue W F, Chen S S, Hu F, et al. Ecological intensification enhance soil multifunctionality: A review[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2027, DOI:10.11766/trxb202505040204. [薛文凤, 程赛赛, 胡锋, 等. 生态集约化提升农田土壤多功能性的研究进展[J]. *土壤学报*, 2027, DOI:10.11766/trxb202505040204.]
- [3] Zhou G F, Qin J, Qi X X, et al. Effect of restoration of cultivated land to artificial grassland on soil nematodes communities in Danjiangkou water ecological conservation function area[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 308-318. [周广帆, 秦洁, 祁小旭, 等. 丹江口水源涵养区退耕还草土壤线虫群落变化特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(3): 308-318.]
- [4] Dong X D, Yang L Y, Harbo L S, et al. Effects of land use on soil microbial community structure and diversity in the Yellow River floodplain[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2023, 16(1): rtac075.
- [5] Hole F D. Effects of animals on soil[J]. *Geoderma*, 1981, 25(1/2): 75-112.
- [6] Chang H, Ye R H, Wang H M, et al. Research progress in effects of environmental factors on soil nematode community[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2021, 42(1): 74-77. [常虹, 晔霁罕, 王慧敏, 等. 环境因子对土壤线虫群落的影响研究进展[J]. *畜牧与饲料科学*, 2021, 42(1): 74-77.]
- [7] Gao H S, Yin Y L, Zhao W, et al. Effects of monoculture and mixed sowing on soil fungal community characteristics in degraded grasslands[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(10): 3205-3214. [高汉森, 尹亚丽, 赵文, 等. 单播和混播对退化草地土壤真菌群落特征的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(10): 3205-3214.]
- [8] Cao X Q, Lin Y, Zhao L J, et al. Effects of mixed sowing of forage oats and legumes on forage yield and stem-leaf ratio[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(11): 58-65. [曹雪乔, 林悦, 赵丽娟, 等. 饲用燕麦与豆科牧草混播对饲草产量及茎叶比的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(11): 58-65.]
- [9] Wu Y W, Luo S, La Q, et al. Response of soil nematode communities to restoration of alpine meadow grassland in Three-River Headwater Region on Qinghai-Tibet Plateau in different restoration periods[J]. *Soils*, 2022, 54(3): 532-538. [吴雨薇, 罗珊, 拉琼, 等. 青藏高原三江源区不同恢复期高寒草甸土壤线虫群落演变[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 532-538.]
- [10] He Y X, He J L, Feng J L, et al. Soil nematode community structure and composition along a pomegranate plantation chronosequence in the Loess Plateau[J]. *Applied Soil Ecology*, 2026, 219: 106820.

- [11] Ye Y Y, Rui Y C, Zeng Z X, et al. Responses of soil nematode community to monoculture or mixed culture of a grass and a legume forage species in China[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(6): 791-800.
- [12] Wang N, Huang J H, Huo N, et al. Characteristics of soil nematode community under different vegetation restoration approaches in the mountainous region of southern Ningxia: A comparative study based on morphological identification and high-throughput sequencing methods[J]. *Biodiversity Science*, 2021, 29(11): 1513-1529. [王楠, 黄菁华, 霍娜, 等. 宁南山区不同植被恢复方式下土壤线虫群落特征: 形态学鉴定与高通量测序法比较[J]. *生物多样性*, 2021, 29(11): 1513-1529.]
- [13] Tian J X, Luo Z Z, Li L L, et al. Soil nematode community characteristics of alfalfa field with different growing ages in the semi-arid Loess Plateau of Central Gansu, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(10): 2829-2835. [田建霞, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 陇中黄土高原半干旱区不同种植年限紫花苜蓿土壤线虫群落分布特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2829-2835.]
- [14] Zheng H, Gao D D, Zhou Y Q, et al. Energy flow across soil food webs of different ecosystems: Food webs with complex structures support higher energy flux[J]. *Geoderma*, 2023, 439: 116666.
- [15] Chen Z J, Xiao Y T, Dong X D, et al. Effects of sediment deposition on soil stoichiometric ratios in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, 41(7): 1334-1341. [陈志杰, 肖宇童, 董雄德, 等. 黄河中下游滩区泥沙淤积对土壤化学计量比的影响[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(7): 1334-1341.]
- [16] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 22-187. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 22-187.]
- [17] Zeng X L, Jiang C, Chen Y Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil nematode communities in dry-hot valley under different altitude gradients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, 63(1): 303-314. [曾小玲, 姜川, 陈远洋, 等. 不同海拔梯度下干热河谷植被恢复对土壤线虫群落的影响[J]. *土壤学报*, 2026, 63(1): 303-314.]
- [18] Yin W Y. Pictorial keys to soil animals of China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 437-475. [尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 437-475.]
- [19] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes[J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239-251.
- [20] Ma Q H, Wang Y, Veen G F C, et al. Herbivore species and patch heterogeneity modulate grazing-induced shifts in soil nematode trophic structure and energy flux[J]. *Functional Ecology*, 2026, 40(1): 163-175.
- [21] He Y X, Zhang Y H, Zhang R B, et al. Effects of natural grass coverage on soil nematode communities and structure in apple orchards on the Loess Plateau in western Henan Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(3): 798-805. [贺雨轩, 张钰杭, 张若冰, 等. 豫西黄土高原果园自然生草对土壤线虫群落及结构的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(3): 798-805.]
- [22] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics: Extension of the nematode faunal analysis concept[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(1): 13-29.
- [23] R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. 2025[2025-02-04]. <https://www.R-project.org/>.
- [24] Oksanen J, Simpson G L, Blanchet F G, et al. Vegan: Community Ecology Package[M]. 2022.
- [25] Bao H, Lyu D D, Shi Y, et al. Effects of orchard grass cover on soil nematode community and structure in the Loess Plateau of western Henan Province[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(1): 96-104. [包涵, 吕丹丹, 施赟, 等. 豫西黄土高原果园生草对土壤线虫群落及结构的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(1): 96-104.]
- [26] Sohlenius B, Viketoft M, Boström S. Effects of plant species and plant diversity on soil nematodes—A field experiment on grassland run for seven years[J]. *Nematology*, 2011, 13(1): 115-131.
- [27] Suter M, Huguenin-Elie O, Lüscher A. Multispecies for multifunctions: Combining four complementary species enhances multifunctionality of sown grassland[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 3835.
- [28] Yang C, Zhang Y X, Zhang H, et al. Recent advances in understanding the ecosystem functioning of diverse forage mixtures[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 206-219. [杨策, 张玉雪, 张鹤, 等. 牧草混播生态系统功能研究进展[J]. *草业学报*, 2022, 31(9): 206-219.]
- [29] Zhou J Q, Gong J C, Wang P S, et al. Historical tillage promotes grass-legume mixtures establishment and accelerates soil microbial activity and organic carbon decomposition[J]. *Journal of Arid Land*, 2024, 16(7): 910-924.
- [30] Rabot E, Wiesmeier M, Schlüter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review[J]. *Geoderma*, 2018, 314: 122-137.

- [31] Zhang Y, Xiao B, Wang Y F, et al. Effects of biocrust cover on the vertical distribution pattern of soil nematodes on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19): 8447-8458. [张颖, 肖波, 王彦峰, 等. 黄土高原生物结皮覆盖对土壤线虫垂直分布格局的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(19): 8447-8458.]

（责任编辑：陈荣府）