DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2024.0721

甜瓜连作种植降低中小型土壤动物多样性及土壤生态系统多功能性

阿衣加玛丽•库都热提,刘煜祥,潘卫萍,阿斯亚•乃吉米丁,赛得尔丁•帕尔丁,郭　江,毛　亮,张以和,茹先古丽•艾坦木

(吐鲁番市农业技术推广中心　新疆吐鲁番　838000)

摘　要:长年连作会导致土壤理化性质恶化、土壤酶活性降低、自毒物质积累,引起微生物群落发生变化,进而严重危害土壤生物多样性。然而,连作种植对土壤动物多样性及其功能的影响尚不清楚。以不同种植年限的甜瓜生境为研究对象,利用野外调查和室内分离鉴定的方法,研究中小型土壤动物群落特征、多样性及生态系统多功能性的变化,重点探讨甜瓜连年种植对中小型土壤动物及生态系统多功能性的影响。研究区域共采集土壤动物(中小型)556 个,主要优势类群为线虫、蜱螨目、弹尾目,占总土壤动物丰富度的 75.72%。中小型土壤动物多度、类群数及多样性随着土壤盐度的降低均呈现增加的趋势。而土壤生态系统多功能性随着连续种植年限的延长呈现降低趋势。冗余分析(RDA)结果表明,土壤有机质含量、硝态氮含量、植被特性和土壤总盐度是影响研究区域土壤动物群落多样性的主要因子。回归分析结果显示,各环境因子中,土壤总盐度对土壤动物多样性的影响力度最大(p<0.05),是研究区土壤动物多样性变化的主控因子。PLS-PM 最小偏二乘结构模型分析结果显示,植被生物量直接正向显著影响生态系统多功能性,同时通过影响中小型土壤动物多样性来间接正向影响生态系统多功能性。综上,甜瓜连年种植降低中小型土壤动物多样性和生态系统多功能性,主要是长年连续种植会提高土壤总盐度,同时降低甜瓜生物量所致。研究结果对我国西北地区甜瓜产业高效、安全及可持续发展具有重要意义。

关键词:甜瓜;中小型土壤动物;群落多样性;连作障碍;生态系统多功能性

中图分类号:S652　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1673-2871(2025)06-044-11

Continuous cropping of melon reduced the diversity of soil mesofauna and soil ecosystem multifunctionality

Ayijiamali · Kudoureti, LIU Yuxiang, PAN Weiping, Asiya · Naijimiding, Saideerding · Paerding, GUO Jiang, MAO Liang, ZHANG Yihe, Ruxianguli · Aitanmu

(*Turpan Agricultural Technology Extension Center, Turpan 838000, Xinjiang, China*)

Abstract: Continuous cultivation of melons lead to deterioration of soil properties, the decrease of soil enzyme activity, the accumulation of self toxic substances, and changes in microbial community, which in turn seriously endangers soil biodiversity. However, the impact of continuous cropping on soil fauna is still unclear. Taking the habitats of melon with different planting years(1 year, 3 years, 7 years, 20 years)as research objects, the methods of field in survey and indoor isolation identification were used to investigate the changes in community characteristics, diversity, and ecosytem multifunctionality of mesofauna, with a focus on exploring how the continuous planting process of melon affects mesofauna and ecosystem multifunctionality. A total of 556 soil mesofauna were collected in the study area, and the dominant groups were nematodes, collembola and mites, accounting for 75.72% of the total soil fauna abundance. The abundance, group numbers and diversity of soil mesofauna showed an increasing trend with the decrease of soil salinity. However, the multifunctionality decreased with the extension of continuous planting years. The results of redundancy analysis(RDA)showed that soil organic matter content, nitrate nitrogen content, vegetation characteristics and soil salinity were the main factors affecting the diversity of soil mesofauna community in the study area. Regression analysis showed that among the environmental factors, total salinity had the greatest impact on soil fauna diversity (p<0.05). The results of PLS- PM

收稿日期:2024-11-14;**修回日期:**2025-01-28

基金项目:新疆维吾尔自治区科技厅少数民族科技人员特殊培养计划项目;自治区创新环境(人才、基地)建设专项(2023D03004)

作者简介:阿衣加玛丽•库都热提,女,高级农艺师,研究方向为土壤生态学。E-mail:547681821@qq.com

通信作者:郭　江,女,推广研究员,主要从事土壤与肥料相关研究。E-mail:344506915@qq.com

least-squares structure model also showed that vegetation biomass had a direct positive and significant impact on ecosystem multifunctionality, and also had an indirect positive impact on ecosystem multifunctionality by affecting the diversity of soil mesofauna. In conclusion, continuous planting of melon reduces the diversity of soil mesofauna and ecosystem multifunctionality, mainly due to the increase in total salinity and decrease in melon biomass caused by long-term continuous planting. Results are of great significance for the efficient, safe, and sustainable development of muskmelon industry in the northwest China.

Key words: Melon; Soil mesofauna; Community diversity; Continuous cropping; Ecosystem functionality

甜瓜，又名香瓜、哈密瓜，富含维生素、蛋白质、水分以及矿物质等营养成分。由于甜瓜具有较高的销量和良好的经济效益，如今已成为在我国广泛种植的一种水果。但甜瓜多年连续种植会引起土壤特征发生变化，包括物理性质、化学性质和生物性质等，进而导致土壤恶化。甜瓜连作使土壤中速效钾和速效磷含量降低，速效氮含量升高，出现养分失衡[1]，造成土壤容重增大，总孔隙度减小，土壤板结，通气透水性变差[2]。与未种过甜瓜的土壤相比，连续种植的瓜地细菌丰富度和多样性明显降低，真菌多样性显著提高[3]。甜瓜连作种植过程中的土壤生物、非生物特性的变化不可避免地影响土壤动物生存环境及食物资源，进而对其群落组成、多样性，甚至对土壤生态系统多功能性产生严重影响。根据现有的研究结果，笔者推测甜瓜连作障碍对土壤动物的影响机制包括以下三种：一是连作障碍导致的土壤结构破坏，总孔隙度降低，土壤板结，直接影响土壤动物的生存环境，影响其生长发育和生存力。二是连作障碍导致的土壤有机质含量和微生物多样性降低会间接影响土壤动物的食物资源，进而影响其群落结构和多样性。三是连作障碍导致土壤盐度逐年升高，高盐度对土壤动物产生渗透胁迫和生理胁迫，进而影响其生存力。中小型土壤动物是陆地生态系统重要的组成部分，在生态系统物质循环和能量流动过程中发挥着关键性作用，且其对环境变化高度敏感，是重要的指示生物[4]。甜瓜在连作种植过程中，有关植被生物量、微生物多样性、土壤性质，特别是养分和总盐度变化如何影响中小型土壤动物群落组成、多样性，从而改变土壤生态系统多功能性的研究较少，目前仍然未知。鉴于此，笔者以不同种植年限（1 年、3 年、7 年、20 年）的甜瓜生境为研究对象，利用野外调查和室内分离鉴定的方法，研究中小型土壤动物群落特征、多样性及生态系统多功能性的变化，重点探讨甜瓜连续种植过程如何影响中小型土壤动物及生态系统多功能性，以期为甜瓜连作土壤改良及甜瓜产业的高质量发展提供重要支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2024 年 7 月在吐鲁番市高昌区二堡乡古城村的甜瓜地块进行。试验地块种植的甜瓜品种为新疆葡萄瓜果开发研究中心培育的西州密 25 号。高昌区由于特殊的地理位置以及盆地内的地形、地势特点，形成了独特的暖温带干旱荒漠气候，具有干燥、高温、多风的特征，全年中 1 月最冷，7 月最热，气温年较差为 40.0~47.5 ℃。降水分布不均且季节差异大，是中国内陆降水量最少且最干旱的地区之一，降水多为间歇性，持续性降水较少。气候干燥，蒸发能力强，吐鲁番市高昌区气象站多年平均蒸发量（20 cm 口径蒸发器）为 2675 mm，最大年水面蒸发量高达 4 107.2 mm。

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计，共设 4 个处理，分别为种植 1 年（1Yr），种植 3 年（3Yr），种植 7 年（7Yr），种植 20 年（20Yr）生境，研究区域面积为 13 340 m^2。甜瓜收获后，在不同种植年限甜瓜地下收集土壤及土壤动物样本。中小型土壤动物每个生境内选取 4 个重复样方，大小为 5 m×5 m，每个样方之间距离 10 m 以上，每个样方内随机选取 3 个代表性的采样点（每个采样点的距离＞5 m），共采集 4 个样地×4 个样方×3 个重复，先去除地表植物，沿剖面 0~30 cm 取样。分别用直径 5 cm 和 3.6 cm 的不锈钢采样器，采集干生土壤动物样品和湿生土壤动物样品（体积为 100 cm^3），用自封袋封装带回实验室处理。同时，使用 100 cm^3 环刀取土，用于测定土壤理化性质及酶活性。

1.3 土壤动物分离与鉴定

干生和湿生中小型土壤动物分别使用 Tullgren 干漏斗和湿漏斗（滤网孔径 5 mm，白炽灯功率 25 W）

进行分离 24 h，将分离出的土壤动物标本保存于75%的乙醇溶液中[5]，随后采用 OLYMPUS SZX16 体视镜对所采集的中小型土壤动物进行鉴定和计数。鉴定时参考土壤动物分类学方面的书籍，如尹文英[6-7]的《土壤动物检索图鉴》《中国亚热带土壤动物》，郑乐怡等[8]的《昆虫分类》等。所有的土壤动物一般都鉴定到科，个别土壤动物鉴定到目或者亚目。由于土壤动物的成虫和幼虫不仅在个体形态上存在较大差别，在生态功能上也不尽相同，因此统计时需将两者分开。

1.4 测定指标与方法

参考鲍士旦[9]的方法测定土壤理化性质。采用重铬酸钾容量法（外加热法）测定土壤有机质（soil organic matter，SOM）含量；采用硫酸消化法测定土壤全氮（total nitrogen，TN）含量；采用 0.01 mol · L^{-1} 氯化钙浸提法测定土壤硝态氮（nitrate nitrogen，NN）和铵态氮（ammonium nitrogen，AN）含量；采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷（available phosphorus，AP）含量；采用梅特勒-托利多 FiveEasy Plus pH 计测定 pH；采用 HANNA H1 2315 电导率仪测定电导率（electrical conductivity，EC）；采用干渣法测定总盐度（TS）；采用 105 ℃烘干法测定土壤含水率（moisture content，MC）。

8 月 10 日，在甜瓜结果期，每块地每个样方内随机选择 5 株甜瓜，用直尺测定株高，并将其地上部与地下部分隔开，用天平称量地上部鲜质量后，将地上部置于 105 ℃烘箱杀青 30 min，然后将温度调至 65 ℃烘干 48 h，称质量即得地上部干质量，即作为生物量，株高和干质量均重复测定 3 次，取平均值。参照 Wang 等[10]的方法测定叶片的氮（N）、磷（P）、钾（K）含量。

1.5 生态系统多功能性的评估

生态系统多功能性指数（EMF）使用平均值法进行计算[11]。选取甜瓜地上质量（干质量、鲜质量）、土壤有机碳含量、有机质含量、铵态氮含量、总氮含量、硝态氮含量、总磷含量、有效磷含量、β-葡萄糖苷酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、叶片全氮含量、叶片全磷含量、叶片全钾含量等 15 个生态系统功能指标。这些指标全面表征了生态系统积累、循环碳和营养物质的能力。植物群落参数和种子产量能很好地表征生态系统生产力；土壤养分资源是养分循环和固存能力的良好标志。在使用平均值法计算 EMF 之前，每个变量的原始数据使用 $\log_{10}$ 转换进行标准化，然后对变量的 Z 分数进行平均，以获得土壤多功能性指数。

1.6 数据处理

土壤动物群落多样性以 Shannon-Wiener 多样性指数（H）、Margalef 丰富度指数（D）、Simpson 优势度指数（C）、Pielou 均匀度指数（J）来表示，计算公式如下：

$$H=-\sum_{i=1}^{S} n_i/N \ln\left(\frac{n_i}{N}\right); \quad (1)$$

$$D=(S-1)/\ln N; \quad (2)$$

$$C=\sum\left(\frac{n_i}{N}\right)^2; \quad (3)$$

$$J=H/\ln S。 \quad (4)$$

式中：n_i 为种 i 的个体数占群落总个体数的比例；S 为物种数；N 为全部种的个体数。中小型土壤动物类群优势度根据个体数占捕获总量的百分比划分各类群数量等级。个体数占捕获总量 10%以上的为优势类群（dominant group），介于 1%~10%的为常见类群（common group），1%以下的为稀有类群（rare group）。

采用单因素方差分析（one-way ANOVA）和 LSD 比较不同生境土壤动物多度、丰富度、环境因子及植物生物量的差异。为分析土壤动物群落的主要差异，基于 R 语言 Vegan 包进行主坐标分析（PCoA）来展示土壤动物在不同生境中的分布情况。使用 R 语言 plspm 包构建偏最小二乘结构模型（PLS-PM），筛选出影响土壤动物多样性的环境因子，阐明不同种植年限甜瓜对中小型土壤动物的影响路径。采用 IBM SPSS Statistics 19.0 软件进行差异显著性分析；采用 Graphpad Parism 8.0 和 R（Version 4.3.1）软件 ggplot2 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同连作甜瓜生境中小型土壤动物群落数量及多样性分析

所有样地共捕获中小型土壤动物 556 只，隶属于 2 门 4 纲 9 目 22 个类群（表 1）。土壤动物平均密度为 5795 只·m^{-2}，低于吉林省的松嫩草原盐碱生境（平均密度为 5 876.5 只·m^{-2}）[12]。其中种植 20 年生境（20Yr）密度最低，为 2415 只·m^{-2}，种植 3 年生境（3Yr）密度最高，为 10 125 只·m^{-2}。土壤动物多度随着种植年限的延长呈先增加后减少的趋势，种

表 1 不同种植年限甜瓜中小型土壤动物群落组成

Table 1 Composition of soil mesofauna communities in melon fields with different cropping years

类群 Group	1Yr		3Yr		7Yr		20Yr	
	多度 Abundance	百分比 Percentage/%	多度 Abundance	百分比 Percentage/%	多度 Abundance	百分比 Percentage/%	多度 Abundance	百分比 Percentage/%
线虫 Nemotode	33	20.89	96	39.51	28	28.87	5	8.62
前期门亚目 Prostigmata	22	13.92	54	22.22	16	16.49	10	17.24
中气门亚目 Mesostigmata	0	0.00	7	2.88	4	4.12	0	0.00
甲螨亚目 Oribatida	7	4.43	14	5.76	3	3.09	1	1.72
等节跳虫科 Isotomidae	15	9.49	32	13.17	12	12.37	9	15.52
球角跳科 Hypogastruridae	11	6.96	9	3.70	4	4.12	4	6.90
长跳虫科 Entomobryidae	4	2.53	7	2.88	5	5.15	0	0.00
圆跳虫科 Sminthuridae	9	5.70	0	0.00	0	0.00	0	0.00
蚁科 Formicidae	13	8.23	4	1.65	6	6.19	9	15.52
蜂科 Cimbicidae	0	0.00	0	0.00	1	1.03	0	0.00
蝇科 Muscidae	0	0.00	0	0.00	1	1.03	1	1.72
蚊科 Sciaridae	9	5.70	1	0.41	2	2.06	2	3.45
双翅目幼虫 Diptera larva	0	0.00	0	0.00	1	1.03	0	0.00
蚜总科 Aphidoidea	4	2.53	3	1.23	2	2.06	2	3.45
蓟马科 Thripidae	0	0.00	0	0.00	2	2.06	0	0.00
步甲科 Carabidae	1	0.63	0	0.00	0	0.00	2	3.45
拟布甲科 Tenebrionidae	0	0.00	1	0.41	0	0.00	1	1.72
布甲幼虫 Carabidae lavra	1	0.63	0	0.00	0	0.00	0	0.00
隐翅虫 Culculionidae	9	5.70	7	2.88	5	5.15	3	5.17
隐翅虫幼虫 Culculionidae lavra	3	1.90	1	0.41	1	1.03	0	0.00
蚁甲科 Pselaphidae	7	4.43	3	1.23	3	3.09	2	3.45
鼠妇科 Porcellionidae	10	6.33	4	1.65	1	1.03	7	12.07
合计 Total	158	100.00	243	100.00	97	100.00	58	100.00

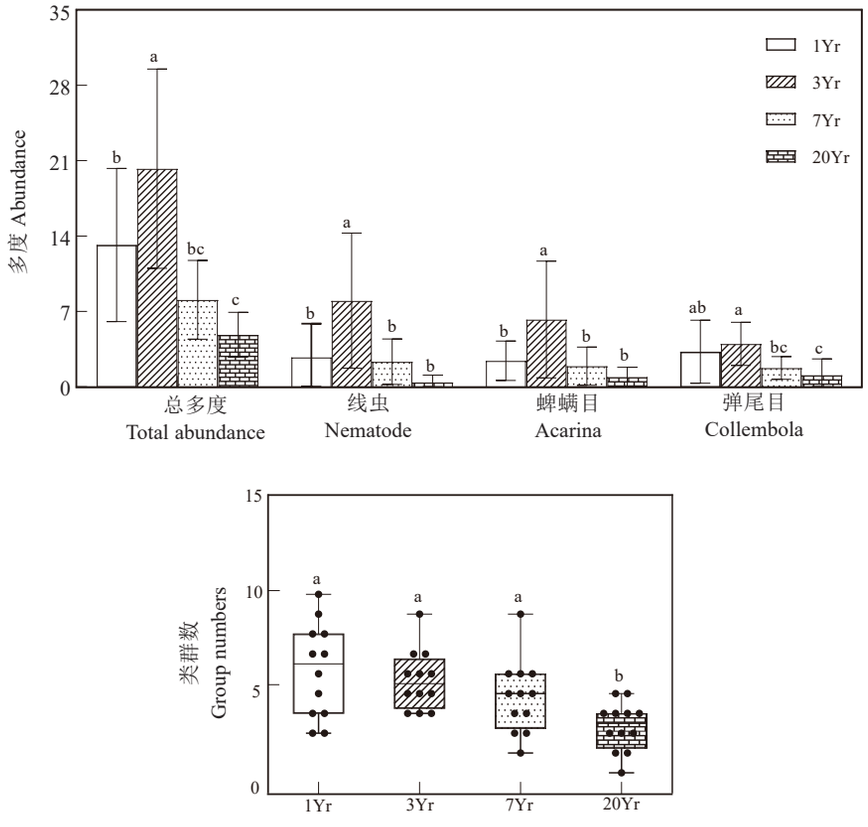
植 3 年达到最高，然后逐年下降，到种植 20 年时土壤动物数量和类群数均为最低。各生境土壤动物数量大小顺序为：种植 3 年的甜瓜生境（243 只）>种植 1 年的甜瓜生境（158 只）>种植 7 年的甜瓜生境（97 只）>种植 20 年的甜瓜生境（58 只）。

不同种植年限生境中小型土壤动物多度和类群数差异如图 1 所示，多重比较方差分析结果表明，不同种植年限甜瓜生境中小型土壤动物群落和优势类群多度、类群数均具有显著差异。随着种植年限的延长，中小型土壤动物群落多度呈先升高后降低的变化趋势，其中种植 3 年生境的多度均显著高于其他种植年限的生境（1 年生境的弹尾目除外）。而中小型土壤动物群落类群数，1~7 年生境逐渐降低但没有显著差异，而种植 20 年的类群数显著低于其他处理。

土壤动物多样性指数分析结果显示（图 2），不同种植年限甜瓜生境的 Shannon-Winner 指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数均存在一定差异。其中 Shannon-Winner 指数、Simpson 优势度指数和 Margalef 丰富度指数变化趋势基本一致，即甜瓜种植 1 年到种植 20 年整体上呈下降趋势，种植 1 年生境的多样性指数最高，种植 20 年生境则最低。而 Pielou 均匀度指数，种植 3 年生境显著低于其他种植年限生境，说明种植 3 年的甜瓜地土壤动物分布不均匀。

2.2 不同种植年限甜瓜生境中小型土壤动物群落组成

由图 3 可知，不同种植年限甜瓜生境中小型土壤动物群落的组成存在差异。整体上看，线虫、蜱螨目、弹尾目是土壤动物群落的优势类群，分别占土壤动物总个体数的 29.14%，24.82%和 21.76%。常见类群膜翅目蚁科占 5.76%，双翅目纹科占 2.52%，半翅目蚜总科占 1.98%，鞘翅目隐翅虫科占



注：不同小写字母表示各处理间存在显著差异（p<0.05）。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments（p< 0.05）. The same below.

图 1　不同种植年限甜瓜生境中小型土壤动物多度和类群数变化

Fig. 1　Changes in abundance and group number of soil mesofauna in different cropping fields

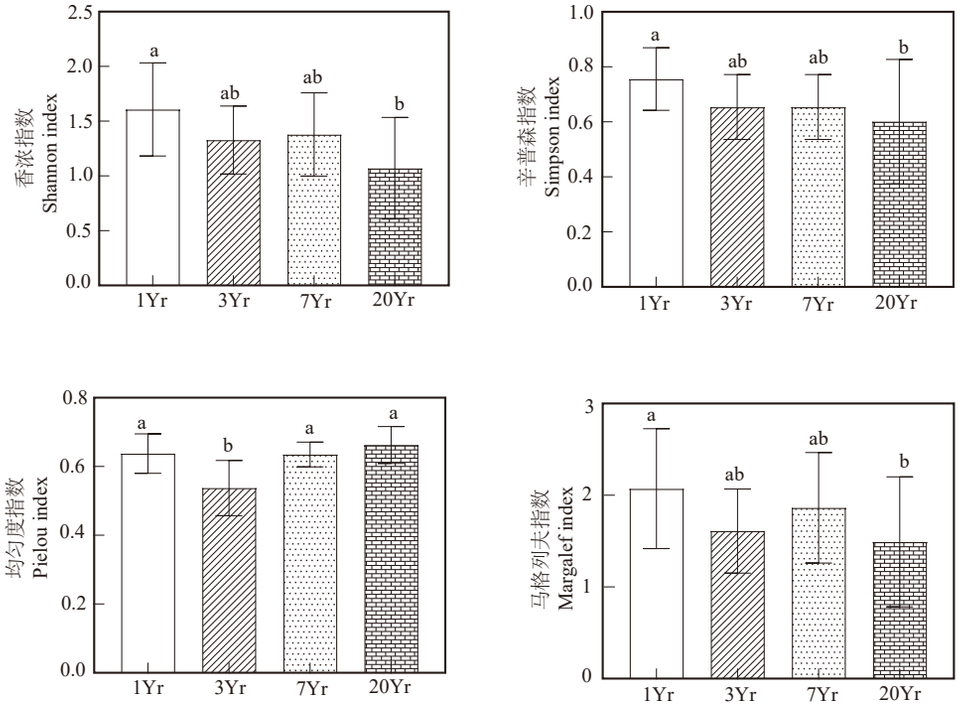


图 2　不同种植年限甜瓜生境中小型土壤动物多样性指数

Fig. 2　Diversity index of soil mesofauna in different cropping fields

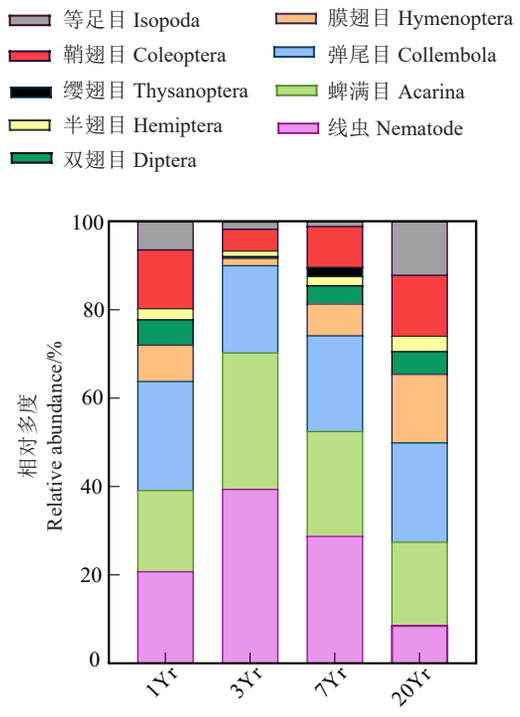


图 3　不同种植年限甜瓜生境中小型土壤动物多相对多度

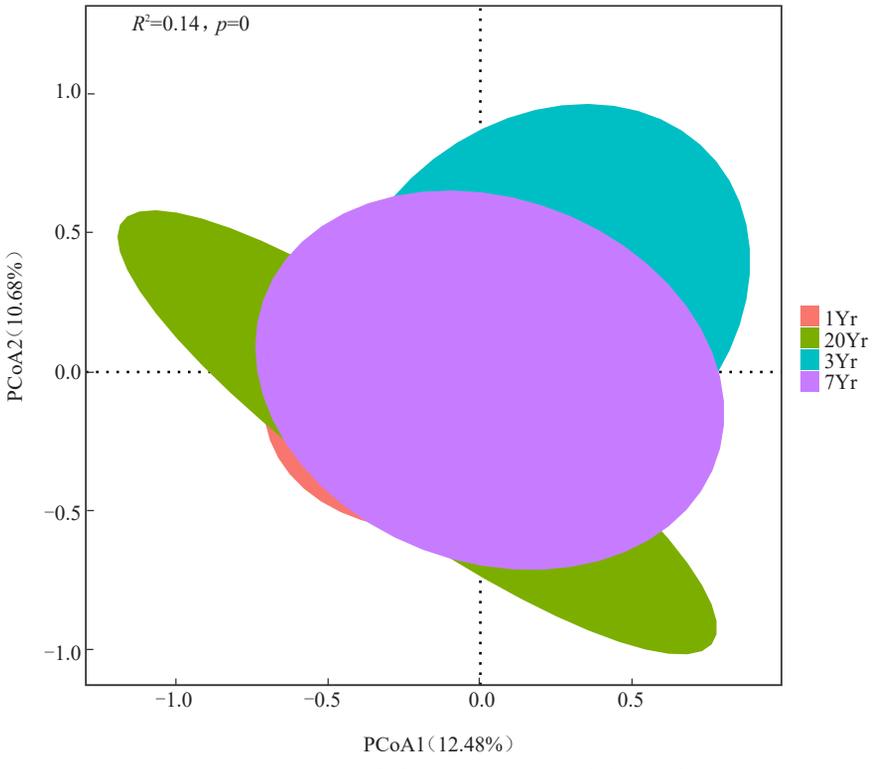
Fig. 3　Relative abundance of soil mesofauna in different cropping fields

4.32%，鞘翅目蚁甲科占 2.70%，等足目鼠妇科占 3.96%，其他均为稀有类群。所有生境共发现 11 个土壤动物类群，包括线虫、前期门亚目、甲螨亚目、等节跳虫科、球角跳虫科、蚁科、纹科、蚜总科、隐翅虫科、蚁甲科、等足目鼠妇科等。

为进一步明确土壤动物分布情况，对不同种植年限甜瓜生境土壤动物群落组成进行主坐标分析（PCoA），结果（图 4）表明，不同种植年限甜瓜生境中小型土壤动物群落分布存在显著差异（p<0.05），但从 95%置信椭圆的重叠来看，各生境土壤动物群落组成亦具有一定的相似性。PCoA 主坐标分析的第一轴和第二轴分别解释了 12.48%、10.68%的土壤动物群落结构变异。

2.3　不同种植年限中小型土壤动物数量与环境因子的关系

如图 5 所示，连续种植甜瓜，使土壤有机质含量持续下降，种植 20 年生境有机质含量显著低于种植 1 年和种植 3 年生境。随着甜瓜种植年限的延长，植被生物量呈先增加后减少的变化趋势，种植 3 年生境显著高于其他生境，而种植 20 年生境显著低于其他生境。甜瓜连续种植期间，土壤总盐



注：p<0.05 说明不同生境土壤动物群落分布存在显著差异。

Note: p<0.05 indicates significant difference in the distribution of soil mesofauna communities in different habitats.

图 4　不同种植年限甜瓜生境中小型土壤动物分布主坐标分析

Fig. 4　Principal coordinate analysis（PCoA）of soil mesofauna community in different cropping fields

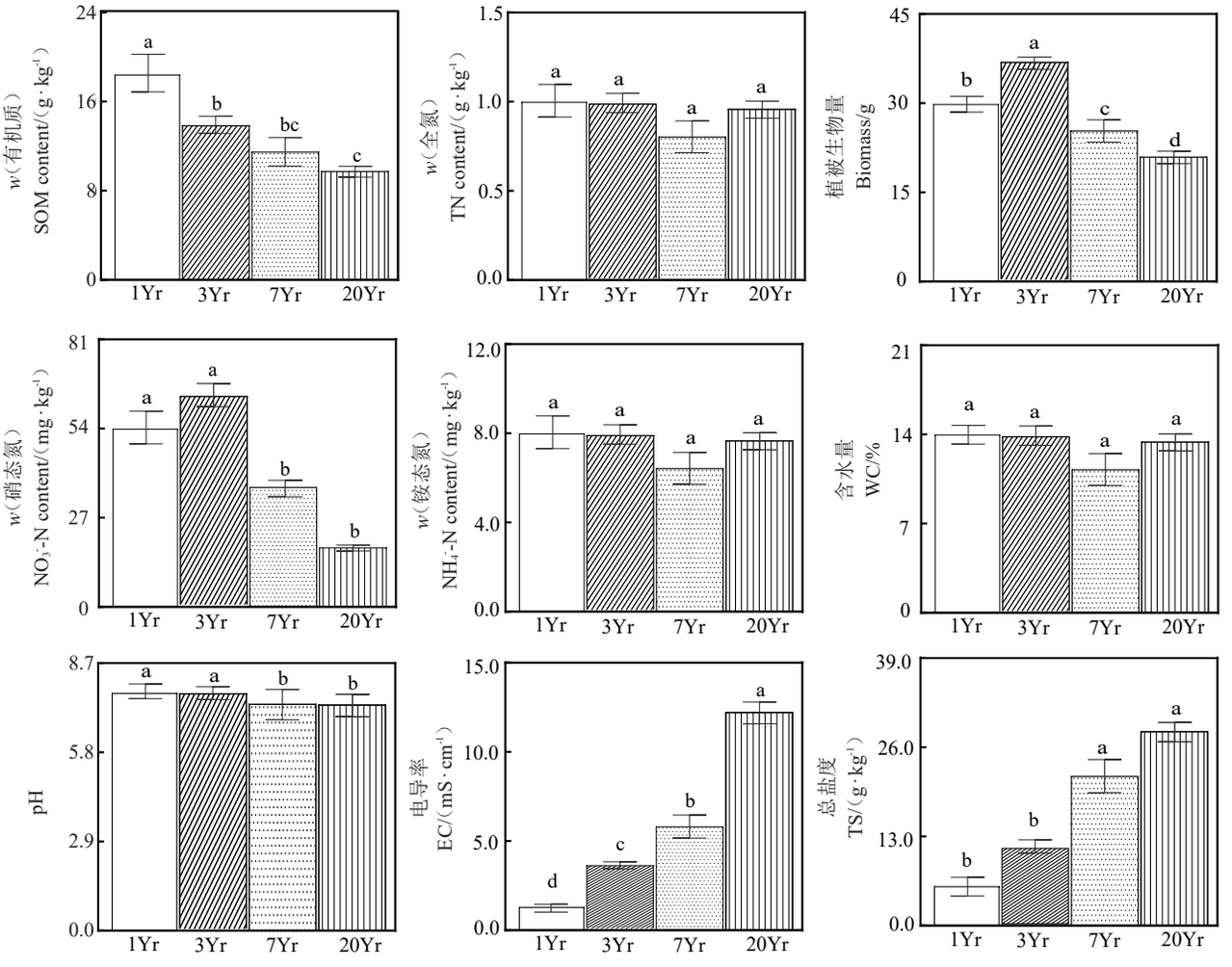


图 5　不同种植年限甜瓜生境环境因子变化

Fig. 5　Changes in environmental factors of melons with different cropping years

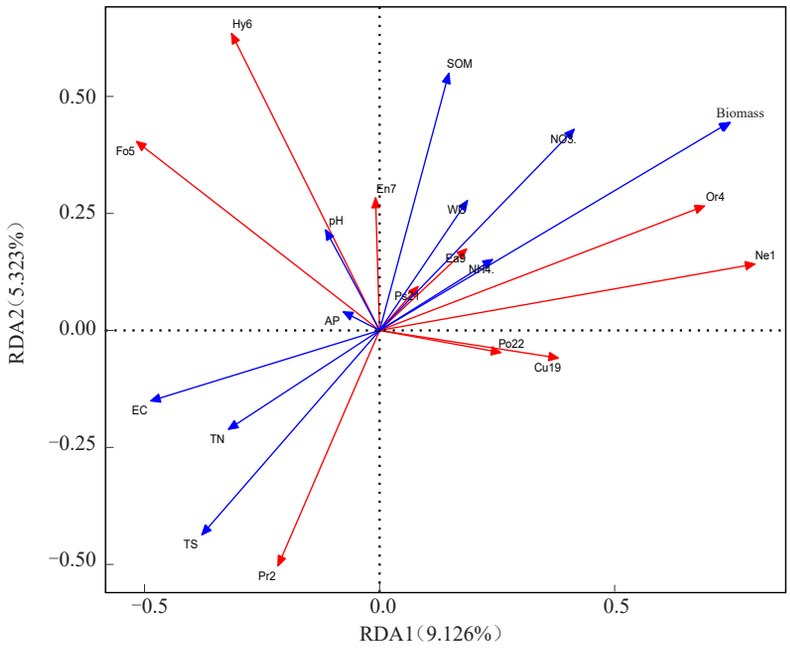
度和电导率(EC 值)持续上升,到种植 20 年时达到最高,且 EC 值显著高于其他处理,而总盐度与种植 7 年生境差异不显著,但显著高于种植 1 年和种植 3 年生境。种植 7 年和 20 年生境土壤硝态氮含量和 pH 显著低于种植 1 年和 3 年生境,而土壤全氮含量、铵态氮含量及含水量在不同处理间均差异不显著。

利用冗余分析(RDA)对土壤动物优势类群、常见类群与环境因子的关系进行分析,结果显示(图 6),影响土壤动物优势类群和常见类群的主要环境因子为土壤有机质含量、硝态氮含量、植被生物量和土壤总盐度。研究区域中小型土壤动物群落与土壤有机质含量、硝态氮含量和植被生物量呈显著正相关,与土壤总盐度呈显著负相关。回归分析结果表明(图 7),各环境因子中土壤有机质含量和土壤总盐度与土壤动物多度相关性最强。

2.4　甜瓜连作对土壤生态系统多功能性的影响

甜瓜长年连续种植显著降低土壤生态系统多功能性,与种植 1 年生境相比,种植 3 年生境降低了 14.91%,种植 7 年生境降低了 28.81%,种植 20 年生境降低了 32.60%%,且均达到显著差异水平(图 8)。

为明确各个环境因子和土壤动物多样性影响生态系统多功能性的途径,笔者进行了最小偏二乘路径模型分析(PLS-PM),结果显示,植被生物量、土壤总盐度、土壤养分含量、中小型土壤动物多样性共同影响生态系统的多功能性,并解释了生态系统多功能性总变异的 76.50%(图 9),其中植被生物量对土壤生态系统多功能性的直接正向影响最显著(通路系数最高,为 0.645 6),植被生物量还通过影响土壤动物多样性来间接正向调控生态系统多功能性(通路系数为 0.349 7)。

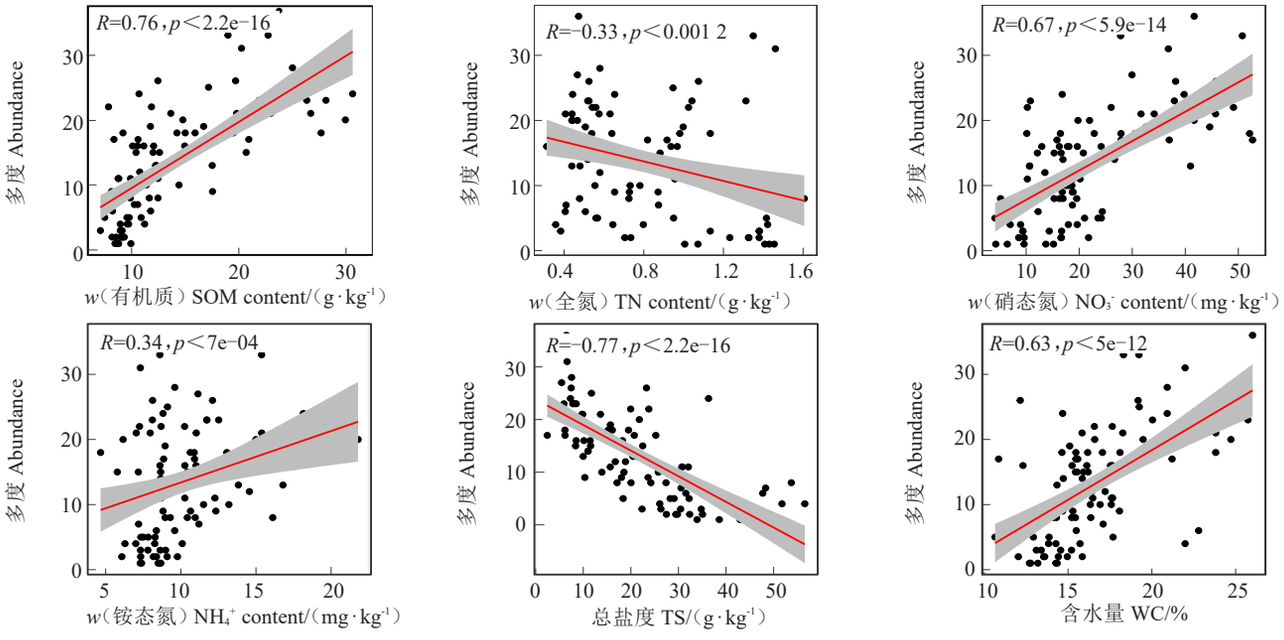


注：蓝色线表示环境因子，红色线表示土壤动物优势类群和常见类群，蓝色线与红色线之间的夹角小于 90°说明存在正相关性，大于 90°说明存在负相关性。线的长度越长说明相关性越强。SOM. 土壤有机质含量；NH_4. 铵态氮含量；TN. 土壤全氮含量；TP. 土壤全磷含量；AP. 有效磷含量；WC. 含水量；TS. 总盐度；NO_3. 硝态氮含量；Biomass. 植被生物量；EC. 导电率。Ne1. 线虫；Pr2. 前期门亚目；Or4. 甲螨亚目；Fo5. 等节跳虫科；Hy6. 球角跳虫科；En7. 长跳虫科；Fo9. 蚁科；Cu19. 隐翅虫科；Ps21. 蚁甲科；Po22. 鼠妇科。

Note: The blue line represents environmental factors, the red line represents dominant and common groups of soil fauna, and an angle between the blue and red lines less than 90° indicates positive correlation, while an angle greater than 90° indicates negative correlation. The longer the length of the line, the stronger the correlation. SOM. Soil organic matter content; NH_4. Soil ammonium content; TN. Soil total nitrogencontent; TP. Soil total phosphorus content; AP. Available phosphorus content; WC. Water content; TS. Total salinity; NO_3. Soil nitrate-nitrogen content; Biomass. Plant dry mass; EC. Electric conductivity. Ne1. Nematode; Pr2. Prostigmata; Or4. Oribatida; Fo5. Isophoridae; Hy6. Hypogastruridae; En7. Entomobryidae; Fo9. Formicidae; Cu19. Staphylinidae; Ps21. Pselaphidae; Po22. Porcellionidae.

图 6　土壤动物多度与环境因子间相关性冗余分析

Fig. 6　Redundancy analysis（RDA）of soil mesofauna abundance and environmental factors



注：p<0.05 说明土壤动物多度与环境因子呈显著相关。

Note: p<0.05 indicates significant correlation between soil mesofauna and environmental factors.

图 7　土壤动物多度与环境因子间相关性

Fig. 7　Correlation between soil mesofauna abundance and environmental factors

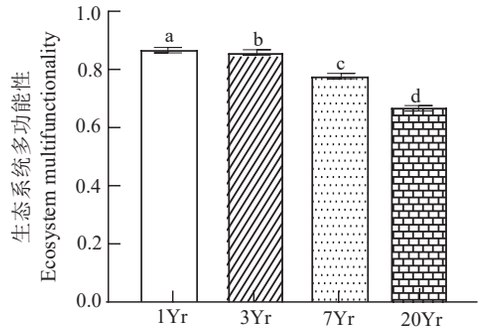
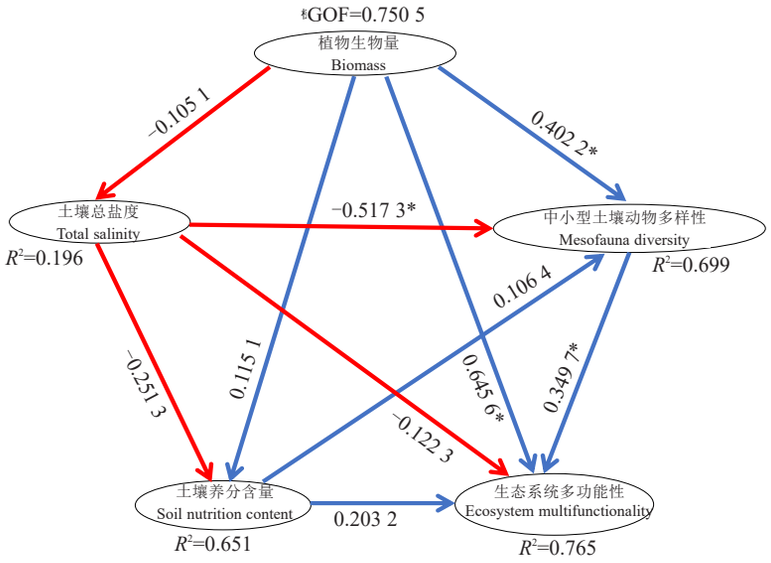


图 8　不同种植年限生境生态系统多功能性变化

Fig. 8　Changes in soil ecosystem multifunctionality of habitats with different cropping years

3　讨论与结论

同一种作物常年连续种植，最直接的影响就是土壤养分含量失衡，土壤性质发生变化，这些特性可以进一步强烈地影响土壤生物的组成和多样性[13]。笔者的研究结果表明，甜瓜连续种植显著改变了中小型土壤动物群落组成，这与前人连续种植改变土壤动物群落组成的结果一致[14-15]。研究区域共发现线虫、蜱螨目、弹尾目和蚁科等 4 个优势类群，其中，线虫和蜱螨目的前气门亚目在所有生境中均广泛分布。线虫作为地球上个体数量最多的



注：蓝色线表示正相关，红色线表示负相关，*表示显著相关。GOF 表示整体模型的预测能力。

Note: The blue line represents positive correlation, the red line represents negative correlation, and * indicates significant correlation. GOF means predictive ability of the whole model.

图 9　不同种植年限生境生态系统多功能性的影响途径的最小偏二乘模型路径分析

Fig. 9　PLS-PM analysis of the impact pathways of ecosystem multifunctionality in habitats with different cropping years

动物[16]，分布范围很广，甚至在一些极端的环境，如高山、沙漠、南极和盐碱地中都可发现。大部分前气门亚目以真菌或藻类为食的物种，是机会主义者，能够在受到干扰或资源转变后迅速繁殖[17]，这些类群也常在一些极端生境下被发现，例如干热沙漠地区[18]和南极洲冰川[19]等。本研究冗余分析结果表明，前气门亚目的多度与土壤总盐度和 EC 值呈正相关，说明这些类群对盐碱环境胁迫具有耐受性。相比于前气门亚目，蜱螨目的甲螨亚目对干扰和胁迫敏感，它们多以凋落物以及其上附着的真菌为食[20]，因此在干扰强烈和甜瓜长势弱的种植 20 年生境土壤中并未发现甲螨亚目。而甲螨亚目常常会成为未受干扰生境中的优势类群。研究区域发现的弹尾目对种植年限为 1 年和 3 年生境表现出一定偏好，可能是它们的习性所决定，弹尾类土壤动物是初级分解者，多生活在土壤表层或凋落物层中，主要取食凋落物和真菌[21]，因此，食物资源丰富的生境为它们提供良好的生存环境。

笔者在本研究中还发现随着甜瓜种植年限的延长，中小型土壤动物多度和多样性显著降低，主要表现在优势类群的变化上，其中线虫变化最明显，如种植 20 年生境土壤线虫多度与种植 1 年生境土壤线虫多度相比减少了 84.8%。也有学者[22-23]发现了类似的结果，即线虫对食物资源投入和干扰表现出高度敏感性。连续种植甜瓜能降低土壤动物多度和多样性，一方面可能是逐年增加的土壤盐

分所致的高渗透压和离子毒害对土壤动物的生存产生直接危害[24]；另一方面，随着连续种植年限的延长，降低了有机质、有效养分含量及微生物多样性等均能间接负面影响土壤动物的生存、生长发育及食物资源，进一步导致其多样性降低[25]。RDA 结果表明，土壤动物多度与有机质含量、植被生物量、有效养分含量呈正相关，与土壤总盐度、EC 值呈显著负相关。PLS-PM 最小偏二乘结构模型分析结果表明，甜瓜长年连续种植主要是通过提高土壤总盐度来负面影响中小型土壤动物多样性（盐度通路系数最高，−0.517 3）。

有趣的是，随着甜瓜种植年限的延长，土壤动物多度和多样性不是持续下降的，而是呈先增加后减少的趋势，种植 3 年显著高于其他处理。这可能是因为种植 1 年至 3 年，土壤植被生物量、硝态氮和铵态氮含量的增加，提高了土壤 C、N 含量，进一步增加土壤动物的食物来源，从而对土壤动物产生自下而上的调节[26]。

随着甜瓜连作种植年限的延长，土壤生态系统多功能性逐年显著降低，这与 Zheng 等[27]的研究结果一致。原因可能是连作障碍导致土壤理化性质退化[28]和微生物多样性降低[29]，但本试验未对研究区域的微生物变化进行研究，未能确定微生物变化对土壤和土壤动物变化的影响。最小偏二乘模型路径分析结果表明，随着甜瓜连续种植，植被生物量的变化直接正向显著影响生态系统多功能性或者通过影响中小型土壤动物多样性而间接正向显著影响生态系统的多功能性。

综上所述，甜瓜连续种植显著改变中小型土壤动物群落组成，降低群落多样性和生态系统多功能性。随着甜瓜连续种植，土壤动物多样性呈先增加后减少的趋势，种植 3 年时最高，而种植 20 年时最低。植被生物量、土壤有机质含量、硝态氮含量和总盐度为研究区域影响中小型土壤动物多样性的主要因子。甜瓜连续种植期间，植被生物量的减少直接降低生态系统多功能性或者通过减少土壤动物多样性来间接降低生态系统的多功能性。这些研究结果表明，提高植物生物量和保护土壤动物多样性是改善土壤质量和连作甜瓜土壤多功能性的有效策略，同时也有助于建立可持续的农业生态系统。

参考文献

[1] CHEN X L，ZHANG D L，LI Y M，et al. Changes in rhizospheric microbiome structure and soil metabolic function in response to continuous cucumber cultivation[J]. FEMS Microbiology Ecology，2022，98（12）：129.

[2] MA Z M，GUAN Z J，LIU Q C，et al. Obstacles in continuous cropping：Mechanisms and control measures[J]. Advances in Agronomy，2023，179：205-256.

[3] DING M J，DAI H X，HE Y，et al. Continuous cropping system altered soil microbial communities and nutrient cycles[J]. Frontiers in Microbiology，2024，15：1374550.

[4] 周园园，陈淤，魏强，等. 施秉喀斯特遗产地常绿阔叶林土壤螨类群落结构及对环境因子的响应[J]. 生态与农村环境学报，2023，39（4）：511-522.

[5] 张荣祖. 开展土壤动物学的研究[J]. 动物学杂志，1981（3）：63-66.

[6] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京：科学出版社，1998.

[7] 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京：科学出版社，1992.

[8] 郑乐怡，归鸿. 昆虫分类（下）[M]. 南京：南京师范大学出版社，1999.

[9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2008.

[10] WANG N，ZHAO Z Y，ZHANG X Y，et al. Plant growth，salt removal capacity，and forage nutritive value of the annual euhalophyte *Suaeda salsa* irrigated with saline water[J]. Frontiers Plant Science，2024，13：1040520.

[11] MAESTRE F T，QUERO J L，GOTELLI N J，et al. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands[J]. Science，2012，335（6065）：214-218.

[12] YIN X Q，MA C，HE H S，et al. Distribution and diversity patterns of soil fauna in different salinization habitats of Songnen Grasslands，China[J]. Applied Soil Ecology，2018，123：375-383.

[13] CHEN C，CHEN H Y H，CHEN X L，et al. Meta-analysis shows positive effects of plant diversity on microbial biomass and respiration[J]. Nature Communications，2019，10：1332.

[14] WANG X，YANG M H，GAO L X，et al. Continuous cropping obstacles：Insights from the community composition and the imbalance carbon fluxes within soil nematode food web[J]. Geoderma，2024，451：117060.

[15] DOU Z C，MA J，WANG K G，et al. Use of soil nematodes as indicators of soil and plant health in continuous cropping systems：A case study in dragon fruit[J]. Journal of Intergrative Agriculture，2024，16：1-5.

[16] QING X，ZHANG Y M，SUN S D，et al. Phylogenomic insights into the evolution and origin of nematoda[J]. Systematic Biology，2024：syae073.

[17] BLOCK W. Nanorchestes antarcticus strandtmann（Prostigmata）from antarctic ice[J]. Acarologia，1980，21：173-176.

[18] WALTER D E，PROCTOR H C. Mites：Ecology，evolution and behaviour[M]. Berlin：Springer，1999.

[19] WIERZBICKA A，DYDERSKI M K，KAMCZYC J，et al. Responses of soil mite communities（Acari：Oribatida，Mesostigmata）to elemental composition of mosses and pine needles and long-term air pollution in scots pine（*Pinus sylvestris* L.）stands[J]. Science of the Total Environment，2019，691：284-295.

[20] POTAPOV A，POLLIERER M M，SALMON S，et al. Multidi-

mensional trophic niche revealed by complementary approaches: Gut content, digestive enzymes, fatty acids and stable isotopes in collembola[J]. Journal of Animal Ecology, 2020, 90(8):1919-1933.

[21] BRIONES M J I. The serendipitous value of soil fauna in ecosystem functioning: The unexplained explained[J]. Frontiers in Environmental Science, 2018, 6:149.

[22] HOOGEN J V D, GEISEN S, ROUTH D, et al. Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale[J]. Nature, 2019, 572(7768):194-198.

[23] RAFAEL O, VICTORY C, RYAN N, et al. Dominant plants mediate effects of grazing on soil nematode traits in a wet meadow grassland[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 191:105047.

[24] WU Y P, ZHANG Y, BI Y M, et al. Biodiversity in saline and non-saline soils along the bohai sea coast, China[J]. Pedosphere, 2015, 25(2):307-315.

[25] ZHAO S, LIU X, BANERJEE S, et al. Continuous planting of euhalophyte *Suaeda salsa* enhances microbial diversity and multifunctionality of saline soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2024, 90(4):1-5.

[26] JIANG Y, WANG Z H, LIU Y, et al. Nematodes and their bacterial prey improve phosphorus acquisition by wheat[J]. New Phytology, 2023, 237(3):974-986.

[27] ZHENG X Q, WEI L, LU W G, et al. Long-term bioorganic and organic fertilization improved soil quality and multifunctionality under continuous cropping in watermelon[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2024, 359:108721.

[28] REICHEL R, HÄNSCH M, SCHULZ S, et al. Comparing a real and pseudo chronosequence of mining soil reclamation using free-living nematodes to characterize the food web and C and N dynamics[J]. Agriculture, Ecosystem and Environment, 2024, 376:109234.

[29] ZHU B J, WAN B B, LIU T, et al. Biochar enhances multifunctionality by increasing the uniformity of energy flow through a soil nematode food web[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 183:109056.