

DOI: 10.20103/j.stxb.202405101046

郑成卓, 李玉强, 王旭洋, 王立龙, 姚博, 卢建男, 李宝成. 土地荒漠化及其恢复过程土壤动物生态学研究进展. 生态学报, 2025, 45(3): 1059-1069.  
Zheng C Z, Li Y Q, Wang X Y, Wang L L, Yao B, Lu J N, Li B C. Advances in soil fauna ecology in the process of land desertification and its restoration. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1059-1069.

## 土地荒漠化及其恢复过程土壤动物生态学研究进展

郑成卓<sup>1,2,3</sup>, 李玉强<sup>1,2,3,4,\*</sup>, 王旭洋<sup>1,2,3,4</sup>, 王立龙<sup>1,2,4</sup>, 姚博<sup>1,2,3</sup>, 卢建男<sup>1,2</sup>, 李宝成<sup>5</sup>

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院西北生态环境资源研究院 奈曼沙漠化研究站, 兰州 730000

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 自然资源部黄河上游战略性矿产资源重点实验室, 兰州 730000

5 奈曼旗大柳树国有治沙林场, 通辽 028300

**摘要:** 全球变化和人类活动加剧引起的土地荒漠化正威胁着全球生物多样性, 土壤动物作为其重要组成部分, 对生物地球化学循环及生态系统稳定性具有重要作用。为深入理解土壤动物群落对土地退化的响应及其在生态恢复中的作用, 本文重点总结了国内外有关土壤动物对土地荒漠化的响应及其在荒漠化土地恢复中的作用等研究成果, 并展望未来研究方向。研究表明, 土地荒漠化主要通过改变土壤环境、植物和土壤微生物特征影响土壤动物群落; 不同土壤动物类群(线虫、螨类、蚂蚁和甲虫)对土地荒漠化的响应存在差别; 自然恢复和人工植被建设恢复均可促进土壤动物多样性恢复; 土壤动物通过改善土壤结构、提高土壤肥力、促进有机质分解和养分周转、以及生态指示作用, 在生态恢复中发挥作用。针对未来荒漠生态系统中土壤动物的研究, 我们提出以下建议: 1) 实行室内微缩实验与野外控制实验相结合并长期监测, 整合地上地下生态系统开展荒漠化对土壤动物的多因素分析研究; 2) 开展生态退化和恢复措施对土壤动物多维功能性状的影响研究, 重点关注群落内性状变化对荒漠化的响应机理, 从而为极端干旱环境中土壤动物适应性维持机制与群落构建机制提供新证据; 3) 探索荒漠土壤动物多样性丧失对土壤碳循环过程、土壤多功能性的影响机理, 及其在生态系统多服务性应用价值为荒漠生态系统的稳定性、恢复效果评估及精细管理提供科学依据; 4) 重视荒漠化土地生态恢复过程及其措施对土壤动物多样性的影响, 因为这直接关系到荒漠生态系统结构恢复、功能维持及其稳定性。

**关键词:** 土壤动物群落; 土地荒漠化; 生态恢复; 生态功能; 响应机制

## Advances in soil fauna ecology in the process of land desertification and its restoration

ZHENG Chengzhuo<sup>1,2,3</sup>, LI Yuqiang<sup>1,2,3,4,\*</sup>, WANG Xuyang<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Lilong<sup>1,2,4</sup>, YAO Bo<sup>1,2,3</sup>, LU Jiannan<sup>1,2</sup>, Li Baocheng<sup>5</sup>

1 Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

4 Key Laboratory of Strategic Mineral Resources of the Upper Yellow River, Ministry of Natural Resources, Lanzhou 730000, China

5 Daliushu State Owned Sand Control Forest Farm in Naiman Banner, Tongliao 028300, China

**Abstract:** Land desertification, caused by global change and intensified human activities, threaten global biodiversity. Soil

**基金项目:** 内蒙古自治区科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目(2024JBGS000701); 国家自然科学基金项目(31971466); 中国科学院青年创新促进会项目(2023449)

**收稿日期:** 2024-05-10; **网络出版日期:** 2024-10-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyq@lzb.ac.cn

fauna, as a crucial role component of biodiversity, plays an important role in biogeochemical cycles and the ecosystem stability. To deeply understand how soil fauna communities respond to land degradation and their role in ecological restoration, this study summarizes domestic and international research on the response of soil fauna to desertification and its role in restoration, and proposes future research directions. The results show that land desertification primarily affects soil fauna through changes in soil quality, plant traits, and soil microbes. Distinctions in the response of different soil fauna groups (nematodes, mites, ants and beetles) to land desertification. Both natural restoration and artificial vegetation construction restoration can contribute to soil fauna diversity recovery. Soil fauna plays a role in desertified land restoration by improving soil structure, increasing soil fertility, facilitating organic matter decomposition and nutrient turnover, and ecological indication significance. For future research on soil fauna in desert ecosystems, we propose the following recommendations: 1) Combining indoor micro-experiments with controlled field experiments and long-term monitoring. Integrating above-ground and below-ground ecosystems to carry out a multifactorial analytical study of desertification on soil fauna. 2) Analyzing the effects of ecological degradation and restoration measures on the multidimensional functional traits of soil fauna, focusing on the response mechanism of trait changes within the community to desertification, so as to provide new evidence for the adaptive maintenance mechanism of soil fauna and the mechanism of community construction in the extreme arid environment. 3) Exploring the mechanism of the loss of soil fauna diversity on soil carbon cycle process, soil multifunctionality, and its value in desert ecosystem multi-service application, providing scientific basis for the stability of desert ecosystems, the assessment of restoration effect and fine management. 4) Emphasizing the impact of the ecological restoration process of desertified land and its measures on soil fauna diversity, because it is directly related to the structural recovery, functional maintenance and stability of desert ecosystems.

**Key Words:** soil fauna communities; land desertification; ecological restoration; ecological functions; response mechanisms

全球极度干旱、干旱和半干旱地貌占陆地面积的 25.8%,对于实现地球的可持续发展至关重要<sup>[1]</sup>。但随着全球变化和人类活动的加剧,土地退化对世界各地的生存和发展均构成了强大的威胁,已成为全球普遍存在的问题,其中旱区因荒漠化对国际粮食安全构成严重威胁,被联合国确定为全球关注的重点区域<sup>[2]</sup>。作为我国生态系统最脆弱的地区之一,干旱半干旱地区孕育了非常丰富的特有生物,拥有陆地生态系统大部分的生物多样性,这些生物能够在高温和低湿度的环境中生存繁衍,对干旱胁迫有着很强的适应能力。但是,在气候变化和人类活动干扰下土地荒漠化发生对生态系统生产力和生物多样性产生负面影响<sup>[3]</sup>。荒漠生态系统物种数量相对较少,但物种的地方特有性较高,尤其是功能多样性较高,因此土地荒漠化导致物种的丧失在生物多样性丧失中所占的比例远高于物种较丰富的地区<sup>[4]</sup>。然而,在热带森林等高度多样化的生态系统中生物多样性等方面的研究受到广泛关注,而荒漠等其他生态系统中生物多样性研究受到的关注偏低,可能被忽视、甚至是被边缘化<sup>[5]</sup>。

土壤动物是生态系统生物多样性的主体之一,可以提供有关土地退化或生态恢复程度的重要信息<sup>[6]</sup>。并且,土壤动物作为生物地球化学功能、能量流动和物质循环的重要驱动力,是土壤食物网中的重要节点,既是消费者也是分解者,通过影响凋落物分解、与土壤微生物群落相互作用和调节植被生产力等改变土壤理化及生物特性,影响地上-地下生态系统过程<sup>[7]</sup>,从而深刻影响生态系统的功能和服务。因此,开展生物多样性保护与土地退化恢复措施也应考虑土壤动物多样性,以提高土壤肥力、养分、水分保持能力和促进受损生态系统的多功能性。此外,土壤动物常被用于指示生态恢复的成功与否,而且它们也可以成为生态恢复的重要资产<sup>[8]</sup>。例如,将蚯蚓引入退化或重新恢复的土地以提高土壤质量<sup>[9]</sup>;白蚁穴可以提升土壤恢复能力、植物丰富度和植物多样性<sup>[10]</sup>。

基于此,本文以荒漠生态系统中的土壤动物类群为研究对象,对土壤动物生态学在土地荒漠化及其生态

恢复方面的国内外研究进行了梳理和归纳,详细阐述了土地荒漠(沙漠、砾漠(戈壁)、石漠和盐漠)化对土壤动物类群的作用途径、不同土壤动物类群对土地荒漠化的响应、土壤动物在生态恢复中的作用以及土壤动物的生态指示作用,以期干旱荒漠区土壤动物的生态学研究、生物多样性保护以及退化生态系统恢复提供相关理论依据。

## 1 土壤动物的定义、分类

土壤动物对土壤生态过程以及陆地生态系统的功能有很大影响<sup>[11]</sup>。随着全球生态系统的不断变化,生态系统功能如何维持,土壤动物多样性的变化又会如何影响土壤生态系统功能?土壤动物的分类和定义则是实现相关研究并且找到以上问题答案的首要步骤。随着学者对土壤动物研究的不断深入,认为土壤动物是指在生活史中某一阶段定期在土壤中栖息,并对土壤产生一定影响的动物,目前被广泛认可<sup>[12]</sup>。

生物分类在生态学中有着广泛的应用和悠久的历史。然而,“生物群”的含义以及如何对生物进行分类仍是许多理论和实践工作的主题<sup>[13]</sup>。分类方法本身并不能揭示土壤动物的生态学特征,但要了解它们在生态系统形成和维持过程中的作用,将它们划分为不同功能群尤为重要。由于土壤动物不同类群之间体型、食性和功能差异巨大,因此在生态学研究过程中会依据研究目的采用不同标准划分土壤动物功能群(表1),从而来综合土壤动物对环境的反应及其对生态系统功能的影响。然而,土壤动物种类繁多(约占全球已知生物多样性的23%),部分类群同属种间形态学特征非常相似,或是大部分已知类群的生物学特性还有待探索,更不用讲未知类群,因此土壤动物分类研究仍然面临巨大挑战。

表1 土壤动物功能群常见划分标准

Table 1 Common classification standards for functional groups of soil fauna

分类标准 Classification standard	功能类群 Functional group	参考文献 References
在土壤中的栖息时间 Inhabitation time in soil	永久性、定期性、暂时性和短暂性;	[14]
在土壤中的栖息位置 Habitat location in soil	真土居、表土居和半土居;	[15]
生态作用 Ecological role	微食物网组成者、凋落物分解者和生态系统工程师;	[16]
食性 Dietray	植食性、菌食性、枯食性、捕食性和杂食性等;	[17]
体宽 Body width	小型土壤动物:体宽< 0.1 或 0.2 mm,例如原生动物、线虫和轮虫等; 中型土壤动物:体宽在 0.1 或 0.2—2 mm,例如螨类、跳虫和线蚓等; 大型土壤动物:体宽在 2—20 mm,例如蚯蚓、蜘蛛、甲虫等;巨型土壤动物:体宽> 20 mm;	[18]

## 2 土地荒漠化对土壤动物的影响

荒漠化是一项复杂而紧迫的环境挑战,是人类活动(不合理的土地扩张、耕作方式和过度放牧等)和自然因素(长期干旱、降雨模式发生改变等)共同作用的结果<sup>[19]</sup>。由于土地生产力和资源的丧失,这种后果远远超出了发生地区,致使生物多样性丧失、农业生产下降、水资源减少和环境退化<sup>[20]</sup>。就土壤动物而言,荒漠化导致多样性丧失,栖息地遭到破坏,敏感物种面临灭绝<sup>[21]</sup>,其作用途径主要包括以下三种路径(图1)。

### 2.1 土地荒漠化通过改变土壤环境影响土壤动物群落

土壤作为生物生长发育的载体,可以提供土壤提供重要的生态系统服务和功能,负责养分循环、分解和植物生产,健康的土壤有助于提高生态系统的恢复力,而土地荒漠化会使地下水位的持续下降、土壤有机质丧失和土壤肥力下降<sup>[22-23]</sup>,从而直接或间接地对土壤动物群落产生负面影响。总体而言,土壤碳氮比、钙、镁、钾和磷等是对土壤动物群落影响最大的化学变量,而团聚体稳定性、粘土、孔隙度、土壤有机质和电导率等则是

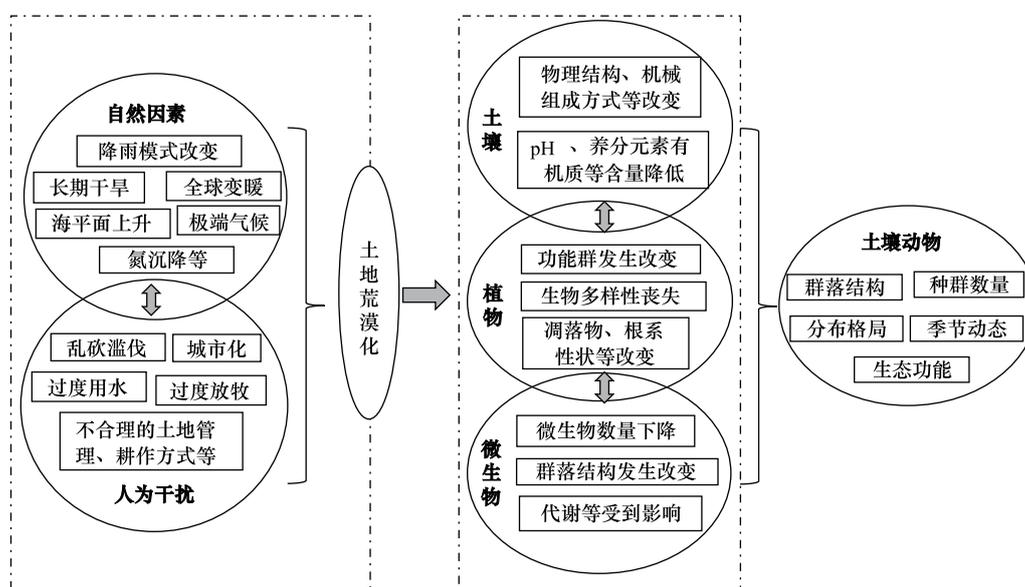


图1 土地荒漠化驱动因素及其对土壤动物群落的作用途径

Fig.1 Factors affecting land desertification and its pathways on soil fauna communities

影响最大的物理变量<sup>[24]</sup>。例如,(1)随着沙漠化的发展,土壤动物丰富度和密度的变化与土壤机械组成、土壤温度、土壤有机碳、总氮和总磷的变化呈正相关,而与土壤含沙量和土壤湿度呈负相关<sup>[25]</sup>;其均匀度和优势度指数与土壤沙粒和水分含量呈正相关,与土壤黏粉粒含量、土壤温度、土壤有机碳和养分呈负相关<sup>[26-27]</sup>。(2)戈壁荒漠中土壤电导率、全氮和机械组成是影响土壤动物分布格局发生改变的主要土壤因子<sup>[28]</sup>。(3)土壤盐碱化通过改变土壤有机质或碱基饱和度对土壤动物产生影响,并且随着土壤含水量的升高,土壤 pH 和盐碱化程度降低,而土壤动物群落多样性升高<sup>[29]</sup>。但是不同荒漠类型由于空间异质性的存在,所以影响土壤动物群落特征的土壤因子并不一致。

## 2.2 土地荒漠化通过改变土壤微生物群落特征影响土壤动物群落

微生物几乎存在于所有环境中,经过数百万年的适应,它们能够从资源丰富<sup>[30]</sup>到极端恶劣<sup>[31]</sup>的荒漠等各种环境中生存和繁衍。荒漠化会直接导致微生物群落组成改变和生物多样性的丧失,还可以通过改变土壤环境(如养分丧失、pH 值降低和盐度增加)对微生物群落产生间接影响<sup>[32]</sup>,最终通过级联效应影响生态系统中的土壤动物群落。例如,土壤微生物可以通过降解凋落物的化感物质,加速养分循环,为土壤动物提供更多的食物资源<sup>[33]</sup>。部分土壤大型动物群偏好以特定的有机基质为食,因此它们的分布可能会受到凋落物和根系周转的质量和沉积模式的影响,并且这些过程主要是土壤微生物发挥作用<sup>[34]</sup>。但是,荒漠化(如干旱条件)会减少凋落物或增加这些落叶中的碳氮比间接影响土壤微生物群落组成,因此某些食菌性土壤动物类群的数量可能会增加,从而在自下而上的营养级联中取代其竞争者。此外,土壤微生物还可以通过寄生影响土壤动物群落。相关研究表明,在干旱荒漠中,寄生在动物体的微生物群有助于宿主在如此恶劣的条件下生存,这可能是研究模式生物微生物群的已知机制,也可能是通过独特的机制<sup>[35]</sup>。土壤动物与其肠道内定居的共生微生物构成了一个独特的微生态系统,这些微生物在土壤动物取食、营养吸收、行为调控以及群落稳定与维持等方面均发挥重要作用<sup>[36]</sup>。例如:白蚁通常与真菌(白蚁真菌)共生,从而完成所取食凋落物的降解<sup>[37]</sup>;切叶蚁是土壤动物与多种微生物共生体之间相互作用更为典型的案例:其工蚁通过采集新鲜的双子叶植物或单子叶植物的叶子作为基质,以滋养互生真菌用于取食<sup>[38]</sup>。

## 2.3 土地荒漠化通过改变植物特征影响土壤动物群落

在干旱和半干旱生态系统中,随着荒漠化程度加重,多年生植被减少,一年生植被和沙生灌木增加,植被

物种组成逐步单一,多样性也随之减少<sup>[39]</sup>。以上植物特征的退化使资源(凋落物等)输入、根系分泌物和微生境发生变化,从而影响土壤动物群落结构<sup>[40]</sup>。如不同植被类型下调落物质量和养分的不同会直接导致土壤动物群落组成存在差异。多年生草地向灌木林地的转化是一个重要的全球荒漠化过程,在荒漠化区域以灌木为主的斑块是土壤动物群生存繁衍的重要微生境<sup>[41]</sup>,而灌丛通过形成小气候和肥岛效应,通过降风滞尘、遮蔽暴晒、改善灌丛内土壤质地和养分条件,从而影响灌丛内外土壤动物的群落结构<sup>[42-43]</sup>。相比于其他灌木,覆盖度较高的灌丛更能增加植株间土壤动物群落的丰度和多样性,而且植被可使土壤动物群落多样性免受降水量变化的影响<sup>[44]</sup>。总体而言,土壤动物群落的组成与地表植被的组成密切相关,但它们之间的相互作用是非常复杂和动态的。而荒漠化的加剧会导致植被群落结构、物种多样性和植物功能群等发生变化从而调节土壤动物群落,如植物多样性随着石漠化等级的增加而逐渐减少,草本和灌木物种组成发生显著变化<sup>[45]</sup>;即使土壤盐渍化程度较低也会导致耐盐物种和盐生植物占据主导地位,而致使植物多样性显著下降<sup>[46]</sup>。最终,荒漠化导致植物群落与土壤动物之间的物质循环、能量流动和信息传递发生改变或受到阻碍,从而引起土壤动物群落发生改变以适应环境恶化。

### 3 不同类群土壤动物对土地荒漠化的响应

#### 3.1 线虫

荒漠生态系统中土壤线虫是最具代表性的小型土壤动物,被认为是土壤动物群落的中心,空间位置和植物覆盖度是荒漠化影响土壤线虫群落多样性的主要因素<sup>[47]</sup>。研究表明,荒漠化所导致的植被连接的减少和裸露地面间隙的增加,可能减少线虫群落依附的多种微生境和能量渠道,这种景观破碎化使线虫群落变得更加异质和缺乏多样性,并且植食性和菌食性线虫数量显著下降<sup>[48]</sup>。随着荒漠化加重,土壤含水量急剧下降,有机质含量减少,盐度增加,pH 值升高均会影响土壤线虫丰度或多样性,并且多年生植物成为荒漠生境中有机物和养分的集中来源,这些“资源岛”有利于食菌性线虫的稳定,其中荒漠灌丛对土壤线虫数量和多样性特征无显著影响,却显著影响其群落组成,进而引起线虫代谢途径发生明显变化。这种结果归因于土壤线虫群落对灌丛具有物种选择性,并认为灌丛可能主要是通过根系分泌物、凋落物质量等因素,而不是通过调节土壤性质和林下植被影响线虫群落组成<sup>[49]</sup>。由于荒漠化导致土壤含水量较低,因此荒漠生境中线虫群落的季节性变化与降雨量密切相关,这是因为土壤中的含水量决定了土壤线虫的传播,土壤湿度限制线虫的移动,而且线虫确实需要水来移动、进食和繁殖,尽管在干燥环境中它们会通过身脱水和活动停止进入一种非代谢状态适应荒漠化环境<sup>[50]</sup>。此外,盐碱化作为荒漠化的一种表现形式,使线虫群落受到土壤溶液的低渗透势和大量有毒离子的影响,导致生态平衡改变,呈现出结构较少、复杂程度较低和高死亡率,也可能通过增加土壤电导率和抑制有机物的分解影响线虫群落<sup>[51]</sup>。

#### 3.2 螨类

土壤螨类是一种无处不在的微型节肢动物,栖息于枯枝落叶层、苔藓、其他碎屑和矿质土层中,几乎存在于所有陆地生态系统,可以促进地下生态系统物质的生成和分解、加速能量流动,并在荒漠化治理区的土壤结构和质地改善等方面发挥着重要的调节作用<sup>[52-53]</sup>。目前,关于土壤螨类对荒漠化的响应研究基本集中在石漠化生境中。研究表明,随着荒漠化(石质荒漠化)程度的加重,土壤螨类密度(科级和属级水平)总体上呈下降趋势,但群落多样性变化并不显著。其次,相比于石漠化严重的生境,还未发生石漠化或可能发生石漠化的生境中螨类最为丰富,这是由于荒漠化促进了水土流失,植被单一且覆盖度降低,基岩逐步裸露,使得原本资源丰富的栖息地遭到破坏、生境系统稳定性和抗逆性减弱、面对干扰敏感性变强、抗外界干扰能力低,最终物质和能量获取通道受阻甚至消失所致<sup>[54]</sup>。并且荒漠化生境中自然降雨变化对土壤螨类的短期影响明显受降雨出现的季节调控,但降雨量大小及灌木种类等对其影响较小<sup>[55]</sup>,而且土壤螨类对荒漠化生境由于昼夜温差形成的土壤表层露水非常敏感并出现上移的现象<sup>[56]</sup>。

#### 3.3 蚂蚁

蚂蚁作为在干旱荒漠区土壤动物的优势类群,具有多种重要的生态系统功能,研究其对土地荒漠化的响

应,对于生态恢复实践和土壤生态系统服务评估具有重要指导意义。相关研究表明,荒漠化并没有减少蚂蚁的多样性,甚至还会高于其他未遭遇荒漠化的生境,这是由于随着荒漠化的发生,植被盖度降低、物种组成单一有利于蚂蚁在觅食时穿过狭窄的空间,从而影响其觅食的成功率<sup>[57]</sup>。其次,荒漠化的发生,促使豆科灌木向草地蔓延,这使得相关蚂蚁物种(如切叶蚁)向以前不适合的草地栖息地扩展,并且其密度随着荒漠化的加剧而增加,这是因为蚂蚁有更多的机会接触到灌木所形成的“资源岛”<sup>[58]</sup>。此外,随着沙漠化(沙质荒漠化)的发生,受植被、土壤条件退化和风蚀的影响,流动沙丘不同方位微生境存在空间异质性,导致蚁穴分布存在差异,并且固定沙丘由于土壤表面细物质的沉积以及土壤结皮的产生,使得土壤受风蚀作用的影响较小,相对稳定的微生境为蚂蚁定居创造了有利条件。与大多数生活在荒漠中的动物不同,蚂蚁(如箭蚁)并不试图躲避高温,相反它们却有惊人的耐热性<sup>[59]</sup>。

### 3.4 地表甲虫

甲虫是鞘翅目昆虫的统称,其中地表甲虫是荒漠生态系统重要的无脊椎动物类群,相比于原生动物、线虫、螨类和跳虫等中小型土壤动物对荒漠生境的不适,地表甲虫则广泛分布在干旱少雨的荒漠生境<sup>[60]</sup>。研究显示,荒漠化形成的不同生境,由于土壤质地和植物特征的差异,地表甲虫种群数量在不同荒漠类型中存在明显差异,但是种类分布基本相同,这是由于气候及降雨量的影响,致使荒漠植被的初级生产力处于较低水平,会在某种程度上限制甲虫的能量利用效率。其中,沙漠化的加剧导致地表甲虫物种丰度、数量和多样性都表现出下降趋势,土壤含水量是主要限制因素<sup>[61]</sup>,并且拟步甲科昆虫对土壤荒漠化的程度响应较敏感,是重要的荒漠指示生物。其次,随着土壤沙漠化程度的增加和灌木及草本盖度的降低,地表甲虫的活动密度呈先增后降的趋势,部分物种(如拟步甲科及一些常见种)物种丰富度、活动密度与灌木盖度呈负相关,但在土壤粗砂含量高的区域较高,这与它们生存和繁殖对灌木及土壤质地等栖境的需求有关<sup>[62]</sup>。总之,沙漠化过程中植被特征的变化对地表甲虫分布的影响大于土壤质地的改变,但二者对甲虫分布的影响均低于植被和土壤的交互作用,其中灌木盖度、草本多样性、土壤机械组成和有机碳含量是影响地表甲虫分布的主要驱动因子<sup>[63]</sup>。

## 4 荒漠化土地生态恢复过程中土壤动物多样性的演变规律

掌握荒漠化土地在不同恢复措施下土壤动物多样性的演变规律,对于荒漠化土地更为科学的恢复措施制定,退化生态系统结构与功能的有效恢复均具有重要意义。毋庸置疑的是自然恢复和人工辅助恢复都可以通过改善土壤和植被条件影响土壤动物多样性,从而促进荒漠化生态系统的有效恢复,但目前恢复措施主要遵循以自然恢复为主、人工修复为辅的原则。放牧管理(如围栏封育)被认为是退化生态系统在自然恢复和控制荒漠化的主要方法之一,而人工辅助恢复主要是通过人工植被建设来实现,其中多年生荒漠灌木被选为植树造林的“热点”,成为决定土壤生物群落的明显“枢纽”<sup>[64]</sup>。研究表明,人工种植的灌木林比自然恢复的草原更有利于土壤动物群落多样性的恢复,并影响土壤动物分布格局<sup>[65]</sup>,对保护土壤动物多样性的贡献也更大。具体而言,围栏封育可促进荒漠化草原生态系统中土壤动物群落多样性的恢复,这是因为自然恢复的草地可提供足够的适口食物资源,使土壤动物群落受益<sup>[66]</sup>。而灌木造林则有利于土壤动物群落多样性的恢复和流动沙地的稳定,这是因为在流动沙地种植灌木所形成的斑块(形成“虫岛效应”)有利于土壤动物的聚集,这与食物网结构和生态功能直接相关。而且,人工林的恢复年限同样会影响其多样性,如树龄6年油松人工林中土壤动物群落多样性最高,土壤食物网最稳定;11年和8年树龄的油松人工林中土壤动物群落多样性最低,食物网最不稳定<sup>[67]</sup>。

## 5 土壤动物在荒漠化土地恢复中的主要作用机制

随着土壤荒漠化和水土流失的后果日益明显,荒漠化的治理已成为全球的当务之急。生态恢复则是应对生态退化和提高生态系统稳定性的最有前景的方法,已引起学者的广泛关注<sup>[68]</sup>。生态恢复思想最早是由Leppold于1935年提倡的<sup>[69]</sup>,是指通过一系列的措施和方法,恢复、保护和改善受到破坏或退化的生态系统。

土壤动物在生态恢复中通过自身摄食、挖掘活动来影响土壤理化性质,进而为凋落物分解和微生物代谢提供必要条件,在营养循环、土壤结构改善等方面发挥着重要作用,因此深入研究土壤动物在荒漠化治理与恢复中发挥关键作用的复杂机制,对于制定有效的、基于自然的防治荒漠化和恢复退化土地的战略至关重要。此外,利用土壤动物群可以提高生态恢复的成功率,但是在应用时必须保证一定的最低地上和地下环境条件,在荒漠化的旱地等恶劣环境中尤需如此。

### 5.1 改善土壤结构、提高土壤肥力

体型较小的土壤动物类群(如线虫、原生动物等)由于活动能力有限,主要通过取食对土壤物质循环和植物生长发挥作用,而对土壤物理性质无显著影响<sup>[70]</sup>。相反,蚯蚓等大型动物的穴居活动会促进有机颗粒与土壤的混合、增大土壤孔隙,而土壤孔隙增加对于水力生态系统服务(如水的保持、流动和通气)至关重要<sup>[71]</sup>;挖掘型土壤动物通过筑穴及取食活动,同样会增加土壤孔隙,降低土壤容重,促进土壤团聚体的形成<sup>[72]</sup>。与其他物种相反,白蚁不在巢穴中加入粪便,而是用唾液丰富巢穴结构,唾液中含有易降解的碳水化合物,从而改变土壤理化性质提高土壤肥力<sup>[73]</sup>。此外,土壤动物一方面通过取食地表动、植物残体后排出富含有机质的粪便影响土壤质量,另一方面通过对凋落物等物质的粉碎作用,增加与微生物的接触面积,加速凋落物分解速率提高土壤肥力<sup>[74]</sup>。

### 5.2 促进有机质分解和养分周转

凋落物分解是恢复生态系统中养分释放和土壤有机质形成的基本调节过程,可调节分解过程中产生的碳在系统中是以有机碳的形式保留或以 CO<sub>2</sub> 的形式流失,从而影响土壤中的净碳储量<sup>[75]</sup>。土壤动物可以通过直接破碎、穴居、取食凋落物直接影响分解,也可以刺激微生物活动调控营养级结构和分泌胞外酶,间接调控凋落物分解,对凋落物的分解起着不可替代的作用<sup>[76]</sup>。不同体型土壤动物对凋落物分解的作用机制同样存在差异<sup>[77]</sup>,大型土壤动物在土壤中穿梭、掘穴,使得土壤团聚体不断形成或分解,增大土壤环境的通气性和透水性,从而改变凋落物分解的潜在土壤微环境。例如,蚯蚓和蚂蚁均可通过改变土壤孔隙度和土壤湿度而影响凋落物的分解<sup>[78]</sup>。中小型土壤动物则可以通过选择性的取食凋落物,调控土壤微生物群落丰度和多样性,进而导致分解速率发生变化。然而,土壤动物对凋落叶分解的作用强度依然受局域环境和凋落物基质性质的影响,因此而备受争议<sup>[79]</sup>。

## 6 土壤动物的生态指示作用

### 6.1 土壤动物对荒漠化的指示作用

土壤动物作为活的有机体,受到土地荒漠化的影响会随之发生改变,所以土壤动物可以反应土壤健康水平、土壤生物学效应、生态系统受干扰的程度等方面的指示生物<sup>[80]</sup>。如学者曾利用主要针对于土壤微型节肢动物的 QBS(土壤生物质量)指数选择指示生物,主要通过评估微型节肢动物对土壤环境变化的适应症状(如应对环境变化体型变小、体毛更加紧凑以及视觉退化等)来分析<sup>[81]</sup>。目前,用于生态指示的生物有土壤动物和节肢动物群落、以及甲虫和线虫种群等。据调查显示,土壤动物群落对荒漠化土地土壤环境的改变较敏感,随荒漠化程度的不断加剧,由于有机质输入减少、土壤小栖境不适宜、土壤侵蚀加剧以及土壤养分最终枯竭,土壤动物群落特征均呈明显递减趋势,严重荒漠化土壤中的土壤动物甚至完全消失,因此土壤动物适用于指示荒漠化状态<sup>[82]</sup>。但是,荒漠化致使动物种类相对贫乏,出现频度较低,各动物类群的指示值普遍较低<sup>[83]</sup>。其中,地表甲虫群落及优势甲虫种对环境变化响应敏感,其群落结构及优势种类活动密度变化可以用于指示沙漠化过程。

### 6.2 土壤动物对生态恢复的指示作用

土地荒漠化的恢复仍然迫在眉睫,因此本节就荒漠化恢复方面对不同土壤动物类群的生态指示作用展开探讨。研究表明,选择用于指示荒漠化土地恢复状态的土壤动物群落,主要是通过不同动物群落对植物-土壤生态系统的恢复过程的反映差异性来确定。然而,仅是同一分类群的不同物种对环境改变的反应都存在差

别,而且生物指标的应用往往受到土壤动物类群分类困难的限制,因此选择合适的指示物种也就显得尤为复杂。目前,地表节肢动物被认为对不同恢复地具有很好的指示作用,但是生境不同所对应的指示生物也存在差异,如适用于荒漠生境的指示生物为拟步甲科,而梭梭林恢复地指示生物为潮虫科等<sup>[55]</sup>。此外,荒漠化土地植被恢复过程显著影响土壤线虫群落数量和线虫营养类群丰度,并且群落的变化可以预测因种植人工植被而导致沙丘初步稳定的情况,还能清楚地区分伴随植被演替和土壤特性变化的沙丘演替,在恢复过程中线虫群落的变化与结壳的发展是平行的,因此线虫还可作为荒漠化土地生物结壳发展的指标。

## 7 研究展望

在过去近 20 年,土地荒漠化被认为是生物多样性丧失的驱动因素之一,但相较于植物和微生物,土壤动物在退化生态系统中的相关研究仍处于起步阶段。因此,在土地荒漠化不断加剧的背景下,深入研究土地退化对土壤动物群落特征及其生态功能的影响具有重要意义。但由于退化生态系统的脆弱性和敏感性以及土壤动物不同类群间的差异性等问题,基于现阶段的研究进展,未来亟需聚焦荒漠化,加强以下几个方面研究:

(1) 加强基础分类研究,提升研究方法。将传统形态学鉴定与分子生物学技术相结合,提升土壤动物分类水平,丰富荒漠生态系统土壤动物资源库。研究手段方面,实行长期的室内微缩实验与野外控制试验相结合,整合地上地下生态系统展开多因素分析研究。通过长期监测土壤动物的数量、种类和分布,以评估气候变化或土地退化(荒漠化)对土壤动物生态功能、群落调控、以及对土壤生态系统功能的影响,为制定退化土地动物生态保护政策提供科学依据,有助于优化相关生态系统功能模型。

(2) 深化研究内容、聚焦机理研究。目前的研究主要集中在探索荒漠化驱动土壤动物群落的关键因子,缺少机理的深入揭示。如土壤动物、植物、微生物之间和土壤动物内部种群之间的相互作用如何调整以应对荒漠化及其恢复。此外,功能性状是生物对栖息地环境变化响应的直观表现,可结合系统发育信息从多维功能性状(生态-进化)深入理解物种共存机制。开展生态退化和恢复措施对土壤动物多维功能性状的影响研究,重点关注土壤动物群落内性状变化而不是单个或几个物种对荒漠化的响应机理,从而为极端干旱环境中土壤动物适应性维持机制与群落构建机制提供新证据,为理解生物多样性丧失所导致的生态后果,以及生态恢复实践的研究提供理论基础。总之,未来应结合具体的生态恢复目标,重视本地物种及功能性状的生态功能研究,充分考虑并纳入土壤动物群落特征,制定更为科学和有效的荒漠土壤动物多样性保护与调控策略。

(3) 结合全球研究热点,拓展研究方向。1) 将土壤动物纳入生物地球化学研究对于提高我们对土壤碳循环的认识和有机碳模型的预测能力至关重要,而且梳理土壤动物对养分供应、碳固存、土壤呼吸和植物生长的直接和间接影响,是在全球碳循环模型中了解有机碳动态的关键,但我们对荒漠化导致的土壤动物多样性丧失对土壤碳循环过程的影响机理和哪些物种发挥关键驱动作用仍存在研究空白。2) 以往的聚焦在荒漠土壤动物及其多样性和土壤功能关系的研究相对薄弱。随着荒漠化和景观破碎化,土壤动物结构组成及群落多样性发生改变,不仅影响其与土壤生物间的营养级关系,同时物种组成发生改变后不同的生物学特性对土壤功能亦产生重要影响。3) 把土壤动物生态系统功能、群落多样性及其生态系统多服务性应用到生物多样性保护的评价中,对于评价荒漠化土地的恢复效果及其提供的生态系统服务具有重要作用。

(4) 重视荒漠化土地恢复过程中土壤动物多样性恢复及其对生态系统功能的影响,尤其是在荒漠化综合防治与三北防护林生态工程建设过程中,因为土地荒漠化生态恢复措施与三北防护林生态建设模式对土壤动物多样性的影响直接关系到荒漠生态系统结构恢复、功能维持及其稳定性。总之,在荒漠及其恢复生态系统中关注以上研究方向,探索此过程中土壤动物群落结构及其多样性和荒漠生态系统功能的协同演变规律,对于丰富地下生物多样性与生态系统多功能性关系研究,验证其相关理论具有重要意义,将为干旱、半干旱荒漠生态系统的稳定性、恢复效果评估及精细管理提供科学依据。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Tariq A, Ullah A, Sardans J, Zeng F J, Graciano C, Li X Y, Wang W Q, Ahmed Z, Ali S, Zhang Z H, Gao Y J, Peñuelas J. *Alhagi sparsifolia*: an ideal phreatophyte for combating desertification and land degradation. *Science of the Total Environment*, 2022, 844: 157228.
- [ 2 ] Horion S, Ivits E, De Keersmaecker W, Tagesson T, Vogt J, Fensholt R. Mapping European ecosystem change types in response to land-use change, extreme climate events, and land degradation. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(8): 951-963.
- [ 3 ] Ren Y, Zhang B, Chen X D, Liu X J. Analysis of spatial-temporal patterns and driving mechanisms of land desertification in China. *Science of the Total Environment*, 2024, 909: 168429.
- [ 4 ] Maestre F T, Benito B M, Berdugo M, Concostrina-Zubiri L, Delgado-Baquerizo M, Eldridge D J, Guirado E, Gross N, Kéfi S, Le Bagousse-Pinguet Y L, Ochoa-Hueso R, Soliveres S. Biogeography of global drylands. *The New Phytologist*, 2021, 231(2): 540-558.
- [ 5 ] Yao J Y, Liu H P, Huang J P, Gao Z M, Wang G Y, Li D, Yu H P, Chen X Y. Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1665.
- [ 6 ] Li Y Y, Liao J H, Chen H Y H, Zou X M, Delgado-Baquerizo M, Ni J P, Ren T T, Xu H M, Ruan H H. Soil fauna alter the responses of greenhouse gas emissions to changes in water and nitrogen availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 179: 108990.
- [ 7 ] Wang L F, Zhou Y, Chen Y M, Xu Z F, Zhang J, Liu Y, Joly F X. Litter diversity accelerates labile carbon but slows recalcitrant carbon decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 168: 108632.
- [ 8 ] Harper R J, Dell B, Ruprecht J K, Sochacki S J, Smettem K R J. Salinity and the reclamation of salinized lands. *Soils and Landscape Restoration*. Amsterdam: Elsevier, 2021: 193-208.
- [ 9 ] Ducasse V, Darboux F, Auclerc A, Legout A, Ranger J, Capowiez Y. Can *Lumbricus terrestris* be released in forest soils degraded by compaction? Preliminary results from laboratory and field experiments. *Applied Soil Ecology*, 2021, 168: 104131.
- [ 10 ] De Almeida T, Mesléard F, Santonja M, Gros R, Dutoit T, Blight O. Above- and below-ground effects of an ecosystem engineer ant in Mediterranean dry grasslands. *Proceedings Biological Sciences*, 2020, 287(1935): 20201840.
- [ 11 ] Hu Z K, Delgado-Baquerizo M, Fanin N, Chen X Y, Zhou Y, Du G Z, Hu F, Jiang L, Hu S J, Liu M Q. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 2858.
- [ 12 ] 尹文英. 土壤动物学研究的回顾与展望. *生物学通报*, 2001, 36(8): 1-3.
- [ 13 ] Hedde M, Blight O, Briones M J I, Bonfanti J, Brauman A, Brondani M, Calderón Sanou I, Clause J, Conti E, Cortet J, Decaëns T, Erktan A, Gérard S, Goulpeau A, Iannelli M, Joimel-Boulanger S, Jouquet P, Le Guillaume N, Marsden C, Martinez Almoyna C, Mulder C, Perrin W, Pétilion J, Pey B, Potapov A M, Si-moussi S, Thuiller W, Trap J, Vergnes A, Zaitsev A, Capowiez Y. A common framework for developing robust soil fauna classifications. *Geoderma*, 2022, 426: 116073.
- [ 14 ] Coleman D C, Crossley D A Jr, Hendrix P F. Future developments in soil ecology. *Fundamentals of Soil Ecology*. Amsterdam: Elsevier, 2004: 271-298.
- [ 15 ] 尹文英. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000.
- [ 16 ] Lavelle P. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Advances in Ecological Research*, 1997, 27(8): 93-132.
- [ 17 ] 高雅荣, 蒋罗, 罗嫚丽, 鲁琴琴, 张庭昊, 肖玖金, 张健. 林窗改造对马尾松人工林土壤动物群落结构的影响. *四川农业大学学报*, 2022, 40(5): 782-791.
- [ 18 ] 褚海燕, 刘满强, 韦中, 柯欣, 王玉军, 梁玉婷, 马玉颖, 高贵锋, 施卫明, 孙瑞娟. 保持土壤生命力, 保护土壤生物多样性. *科学: 上海*, 2020, 72(6): 38-42+4.
- [ 19 ] D'Etorre U S, Liso I S, Parise M. Desertification in karst areas: A review. *Earth-Science Reviews*, 2024, 253: 104786.
- [ 20 ] Huang J P, Zhang G L, Zhang Y T, Guan X D, Wei Y, Guo R X. Global desertification vulnerability to climate change and human activities. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(11): 1380-1391.
- [ 21 ] Potapov A M, Goncharov A A, Semenina E E, Korotkevich A Y, Tsurikov S M, Rozanova O L, Anichkin A E, Zuev A G, Samoylova E S, Semenyuk I I, Yevdokimov I V, Tiunov A V. Arthropods in the subsoil: Abundance and vertical distribution as related to soil organic matter, microbial biomass and plant roots. *European Journal of Soil Biology*, 2017, 82: 88-97.
- [ 22 ] An H, Tang Z S, Keesstra S, Shanguan Z P. Impact of desertification on soil and plant nutrient stoichiometry in a desert grassland. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 9422.
- [ 23 ] Ning Z Y, Zhao X Y, Li Y L, Wang L L, Lian J, Yang H L, Li Y Q. Plant community C:N:P stoichiometry is mediated by soil nutrients and plant functional groups during grassland desertification. *Ecological Engineering*, 2021, 162: 106179.
- [ 24 ] Mamabolo E, Gaigher R, Pryke J S. Conventional agricultural management negatively affects soil fauna abundance, soil physicochemical quality and multifunctionality. *Pedobiologia*, 2024, 104: 150961.
- [ 25 ] Zhao H L, Li J, Liu R T, Zhou R L, Qu H, Pan C C. Effects of desertification on temporal and spatial distribution of soil macro-arthropods in Horqin sandy grassland, Inner Mongolia. *Geoderma*, 2014, 223: 62-67.
- [ 26 ] 赵哈林, 刘任涛, 周瑞莲, 曲浩, 潘成臣, 王燕, 李瑾. 沙漠化对科尔沁沙质草地大型土壤动物群落的影响及其成因分析. *草业学报*, 2013, 22(3): 70-77.

- [27] 刘任涛, 赵哈林. 沙质草地生境中大型土壤动物对土地沙漠化的响应. *生态学报*, 2012, 32(2): 557-566.
- [28] 冯怡琳, 王永珍, 林永一, 赵文智, 高俊伟, 刘继亮. 戈壁生态系统蚁穴微生境对大型土壤动物多样性的影响. *生物多样性*, 2022, 30(12): 84-94.
- [29] Rousk J, Elyaagubi F K, Jones D L, Godbold D L. Bacterial salt tolerance is unrelated to soil salinity across an arid agroecosystem salinity gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(9): 1881-1887.
- [30] AbdelRahman M.A.E. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 2023, 34(3): 767-808.
- [31] Islam W, Zeng F J, Alotaibi M O, Ali Khan K. Unlocking the potential of soil microbes for sustainable desertification management. *Earth-Science Reviews*, 2024, 252: 104738.
- [32] Delgado-Baquerizo M, Doucier G, Eldridge D J, Stouffer D B, Maestre F T, Wang J T, Powell J R, Jeffries T C, Singh B K. Increases in aridity lead to drastic shifts in the assembly of dryland complex microbial networks. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(3): 346-355.
- [33] Wang M G, De Deyn G B, Bezemer T M. Separating effects of soil microorganisms and nematodes on plant community dynamics. *Plant and Soil*, 2019, 441(1): 455-467.
- [34] Pauli N, Oberthür T, Barrios E, Conacher A J. Fine-scale spatial and temporal variation in earthworm surface casting activity in agroforestry fields, western Honduras. *Pedobiologia*, 2010, 53(2): 127-139.
- [35] Osborne P, Hall L J, Kronfeld-Schor N, Thybert D, Haerty W. A rather dry subject; investigating the study of arid-associated microbial communities. *Environmental Microbiome*, 2020, 15(1): 20.
- [36] 郝操, Chen Ting-Wen, 吴东辉. 土壤动物肠道微生物多样性研究进展. *生态学报*, 2022, 42(8): 3093-3105.
- [37] Jouquet P, Traoré S, Choosai C, Hartmann C, Bignell D. Influence of termites on ecosystem functioning. Ecosystem services provided by termites. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(4): 215-222.
- [38] Pereira J S, Costa R R, Nagamoto N S, Forti L C, Pagnocca F C, Rodrigues A. Comparative analysis of fungal communities in colonies of two leaf-cutting ant species with different substratum preferences. *Fungal Ecology*, 2016, 21: 68-75.
- [39] Fischer C, Gerstmeier R, Wagner T C. Seasonal and temporal patterns of rainfall shape arthropod community composition and multi-trophic interactions in an arid environment. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 3742.
- [40] Bernier N, Gillet F. Structural relationships among vegetation, soil fauna and humus form in a subalpine forest ecosystem; a Hierarchical Multiple Factor Analysis (HMFA). *Pedobiologia*, 2012, 55(6): 321-334.
- [41] Klass J R, Peters D P C, Trojan J M, Thomas S H. Nematodes as an indicator of plant-soil interactions associated with desertification. *Applied Soil Ecology*, 2012, 58: 66-77.
- [42] 赵哈林, 刘任涛, 周瑞莲, 赵学勇, 张铜会. 科尔沁沙地灌丛的“虫岛”效应及其形成机理. *生态学杂志*, 2012, 31(12): 2990-2995.
- [43] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 流动沙地灌丛内外生境中土壤动物群落结构研究. *中国沙漠*, 2013, 33(1): 167-173.
- [44] Ball B A, Bergin K, Morrison A. Vegetation influences desert soil arthropods and their response to altered precipitation. *Journal of Arid Environments*, 2023, 208: 104873.
- [45] Zheng W, Wu Q, Rao C J, Chen X Y, Wang E W, Liang X C, Yan W D. Characteristics and interactions of soil bacteria, phytocommunity and soil properties in rocky desertification ecosystems of Southwest China. *CATENA*, 2023, 220: 106731.
- [46] Rahman M H, Lund T, Bryceson I. Salinity impacts on agro-biodiversity in three coastal, rural villages of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 2011, 54(6): 455-468.
- [47] Marais E, Maggs-Kölling G, Sherman C, Doniger T, Liu R T, Tripathi B M, Steinberger Y. Profiling soil free-living nematodes in the Namib Desert, Namibia. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(1): 130-143.
- [48] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239-251.
- [49] 赵芳, 张明伟, 王春雯, 梅续芳, 解李娜, 马成仓. 锦鸡儿属灌丛化对草原化荒漠区土壤线虫群落组成和代谢足迹的影响. *生态学报*, 2022, 42(10): 4124-4136.
- [50] Treonis A M, Marais E, Maggs-Kölling G. Nematode communities indicate diverse soil functioning across a fog gradient in the Namib Desert gravel plains. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(6): e9013.
- [51] de Sá C S B, Shiosaki R K, dos Santos A M, da Silva Campos M A. Salinization causes abrupt reduction in soil nematode abundance in the Caatinga area of the Submedial San Francisco Valley, Brazilian semiarid region. *Pedobiologia*, 2021, 85: 150729.
- [52] Fu S L, Zou X M, Coleman D. Highlights and perspectives of soil biology and ecology research in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 868-876.
- [53] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, van der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [54] Liu W J, Yin X M, Gong T, Liu Y, Chen H. Community structure of epilithic moss mites and their response to environmental factors in different grades of rocky desertification habitats. *Sustainability*, 2022, 14(22): 14860.
- [55] 刘继亮, 李锋瑞, 赵文智, 孙特生. 干旱荒漠螨类和跳虫对降雨的响应. *中国沙漠*, 2017, 37(3): 439-445.
- [56] Steinberger Y, Wallwork J A. Composition and vertical distribution patterns of the microarthropod fauna in a Negev desert soil. *Journal of Zoology*, 1985, 206(3): 329-339.

- [57] Bin Kalban M, Al Hammadi A, Bartholomew A. Vegetation reduces the foraging efficiency of desert ants *Cataglyphis urens*, and they prefer unvegetated microhabitats. *Journal of Arid Environments*, 2024, 220: 105104.
- [58] Eldridge D J, Whitford W G, Duval B D. Animal disturbances promote shrub maintenance in a desertified grassland. *Journal of Ecology*, 2009, 97(6): 1302-1310.
- [59] Boulay R, Aron S, Cerdá X, Doums C, Graham P, Hefetz A, Monnin T. Social life in arid environments: the case study of *Cataglyphis* ants. *Annual Review of Entomology*, 2017, 62: 305-321.
- [60] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 牛瑞雪. 黑河中游干旱荒漠地面节肢动物群落季节变异规律. *草业学报*, 2010, 19(5): 161-169.
- [61] Liu X Q, Wang X P, Bai M, Shaw J J. Decrease in carabid beetles in grasslands of northwestern China: further evidence of insect biodiversity loss. *Insects*, 2021, 13(1): 35-35.
- [62] 王巍巍, 贺达汉, 张大治. 荒漠景观地表甲虫群落边缘效应研究. *应用昆虫学报*, 2013, 50(5): 1383-1391.
- [63] Liu J L, Li F R, Sun T S, Ma L. F., Liu L. L., Yang K. Interactive effects of vegetation and soil determine the composition and diversity of carabid and tenebrionid functional groups in an arid ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 2016, 128: 80-90.
- [64] Liu R T, Zhu F, Steinberger Y. Effectiveness of afforested shrub plantation on ground-active arthropod communities and trophic structure in desertified regions. *CATENA*, 2015, 125: 1-9.
- [65] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 巴义彬. 天然和人工固沙灌木林蜘蛛和甲虫分布与环境因子的关系. *生态学报*, 2020, 40(21): 7987-7996.
- [66] Liu R T, Zhu F., An H., Steinberger Y. Effect of naturally vs manually managed restoration on ground-dwelling arthropod communities in a desertified region. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 545-552.
- [67] Zhou Y W, Liu C H, Ai N., Qin, J F, Shi J H, Nan Z Z. Soil fauna community characteristics and driving factors of *Pinus tabulaeformis* in the loess region of northern Shaanxi. *CATENA*, 2023, 229: 107196.
- [68] Liu H, Liu S L, Wang F F, Liu Y X, Liu Y X, Sun J, McConkey K R, Tran L S P, Dong Y H, Yu L, Wang Q B. Identifying ecological compensation areas for ecosystem services degradation on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 423: 138626.
- [69] Miles J, Jordan W R, Gilpin M E, Aber J D. Restoration ecology. A synthetic approach to ecological research. *The Journal of Applied Ecology*, 1989, 26(3): 1096.
- [70] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 王晓丽, 傅声雷. 土壤动物多样性及其生态功能. *生态学报*, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [71] Hallam J, Holden J, Robinson D A, Hodson M E. Effects of winter wheat and endogeic earthworms on soil physical and hydraulic properties. *Geoderma*, 2021, 400: 115126.
- [72] Sarr M, Agbogba C, Russell-Smith A, Masse D. Effects of soil faunal activity and woody shrubs on water infiltration rates in a semi-arid fallow of Senegal. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16(3): 283-290.
- [73] Joseph G S, Seymour C L, Cumming G S, Cumming D H M, Mahlangu Z. Termite mounds increase functional diversity of woody plants in African savannas. *Ecosystems*, 2014, 17(5): 808-819.
- [74] Zuo Q Q, Wang S J, Wang P, Cao Q B, Zhao S, Yang B. Ant-mediated effects on soil nitrogen mineralization vary with species in a tropical forest. *CATENA*, 2021, 203: 105352.
- [75] Keiluweit M, Nico P, Harmon M E, Mao J D, Pett-Ridge J, Kleber M. Long-term litter decomposition controlled by manganese redox cycling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(38): E5253-E5260.
- [76] Koltz A M, Classen A T, Wright J P. Warming reverses top-down effects of predators on belowground ecosystem function in Arctic tundra. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(32): E7541-E7549.
- [77] Coleman D C, Whitman W B. Linking species richness, biodiversity and ecosystem function in soil systems. *Pedobiologia*, 2005, 49(6): 479-497.
- [78] Schon N L, MacKay A D, Gray R A, van Koten C, Dodd M B. Influence of earthworm abundance and diversity on soil structure and the implications for soil services throughout the season. *Pedobiologia*, 2017, 62: 41-47.
- [79] Potapov A M, Tiunov A V, Scheu S. Uncovering trophic positions and food resources of soil animals using bulk natural stable isotope composition. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2019, 94(1): 37-59.
- [80] Braun J, Westphal M, Lortie C J. The shrub *Ephedra californica* facilitates arthropod communities along a regional desert climatic gradient. *Ecosphere*, 2021, 12(9): e03760.
- [81] Parisi V, Menta C, Gardi C, Jacomini C, Mozzanica E. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105(1/2): 323-333.
- [82] 吕世海, 卢欣石, 高吉喜. 呼伦贝尔草地风蚀沙化土壤动物对环境退化的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(9): 2055-2060.
- [83] 刘新民, 杨劼. 沙坡头地区人工固沙植被演替中大型土壤动物生物指示作用研究. *中国沙漠*, 2005, 25(1): 40-44.