

DOI: 10.5846/stxb201903200524

常海涛, 刘任涛, 陈蔚, 张安宁. 荒漠灌丛土壤动物分布及其生态功能. 生态学报, 2020, 40(12): 4198-4206.

Chang H T, Liu R T, Chen W, Zhang A N. Distribution and ecological function of soil faunal within shrub microhabitats in desert. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4198-4206.

荒漠灌丛土壤动物分布及其生态功能

常海涛, 刘任涛*, 陈蔚, 张安宁

宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要: 在干旱、半干旱荒漠生态系统中, 灌丛作为一种重要的植被类型, 其独特的形态和生理适应特性能够有效促进退化生态系统结构与功能的恢复。土壤动物是荒漠生态系统中不可或缺的重要组成部分, 对促进灌丛“肥岛”演变具有重要的生态作用, 有利于灌丛生态功能的发挥及退化生态系统的恢复。近年来, 国内外学者对荒漠灌丛微生境土壤动物的研究逐步深入, 取得大量的研究成果。在此基础上, 首先综述荒漠灌丛微生境土壤动物群落分布和生态功能, 总结灌丛与土壤动物分布间作用关系的数学模型, 针对荒漠灌丛土壤动物研究中存在的问题提出了未来可能的研究方向和建议。

关键词: 荒漠; 灌丛; 土壤动物; 群落结构; 生态功能; 数学模型

Distribution and ecological function of soil faunal within shrub microhabitats in desert

CHANG Haitao, LIU Rentao*, CHEN Wei, ZHANG Anning

Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Shrub is an important vegetation type in arid and semi-arid desert ecosystems. Its unique morphological and physiological adaptation characteristics can effectively promote the restoration of the structure and function of degraded desert ecosystems. Soil faunal is an indispensable and important part of desert steppe ecosystems, which plays an important ecological role in promoting the evolution of “fertile island” of shrubs, and is conducive to the play of the ecological function of shrubs and the restoration of degraded ecosystems. In recent years, domestic and foreign scholars have gradually deepened the research on soil fauna in desert shrub microhabitats and obtained a great achievement. On this basis, the distribution and ecological functions of soil faunal community in desert shrub microhabitats were summarized firstly. Then the mathematical model of the interaction between shrubs and soil faunal distribution was summarized. Finally, the possible future research directions and suggestions were put forward in view of the existing problems in the study of soil faunal within shrub microhabitats in desert.

Key Words: desert; shrub; soil faunal; distribution of community structure; ecological function; mathematical model

荒漠通常是指由于降水稀少或者蒸发量大而引起的气候干燥、植被贫乏、环境荒凉的地区^[1]。往往由于人类不合理的经济活动和脆弱生态环境的相互作用, 极易造成土地退化^[2-4]。灌丛作为荒漠生态系统中一种重要的植被类型, 不仅具有抗逆性强、生态可塑性大、抗旱、耐盐和耐沙埋等优良特性; 还具有调节土壤水分、改善土壤结构和“蓄种保种”等多种生态功能, 对于干旱、半干旱荒漠生态系统具有较强的适应性和促进防沙治沙的作用^[5-7]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41661054, 41867005); 中国科学院“西部之光”项目(XAB2016AW02); 教育部-霍英东教育基金项目(151103)

收稿日期: 2019-03-20; **修订日期:** 2019-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nxuliu2012@126.com

在荒漠生态系统中,随着灌丛的生长、发育和演化,灌丛微生境中的土壤理化性质和土壤养分的空间异质性会发生变化,而形成了灌丛“肥岛”。灌丛“肥岛”会吸引食草动物、软体动物和微生物等至灌丛下定居、生存、发育和繁殖,不断提高灌丛微生境内土壤动物的个体数和丰富度,逐渐形成“虫岛”现象^[8-10]，“虫岛”效应的形成有利于灌丛生境生物多样性保育和土壤性质改善^[6]。在荒漠生态系统中,灌丛土壤动物多样性分布及其生态功能能够显著促进荒漠生态系统的保护及结构功能的有效恢复^[11-12]。

鉴于此,本文通过对干旱、半干旱区荒漠灌丛微生境土壤动物的分布特征和生态功能进行综合分析,总结灌丛和土壤动物分布之间的关系,全方位理清荒漠草原生态系统土壤动物的研究现状,在此基础上发现的问题并为未来相关研究方向提出建议,旨在为荒漠草原生态系统维持生物多样性维持、灌丛林利用与保护以及退化生态系统的恢复与评价提供科学依据。

1 荒漠灌丛对土壤动物群落分布的影响

21 世纪以来,随着荒漠化速度加剧,灌丛土壤动物的群落结构分布也越来越受到众多学者的关注。目前,国外对于荒漠灌丛土壤动物的研究多集中于美国新墨西哥州的 Chihuahua 荒漠、以色列 Negev 荒漠和澳大利亚新南威尔士州的半干旱荒漠等区域。在 Chihuahua 荒漠腺牧豆树(*Prosopis glandulosa*)灌丛下,大型土壤动物常见类群有跳蛛科、盲蝽科、吉丁甲科、拟步甲科、步甲科和蚁科等;中型土壤动物常见类群有长须螨科、隐爪螨科、镰螯螨科、附线螨科、巨须螨科和长角跳科等^[13-14](表 1)。通过研究灌丛微生境内土壤动物的分布特征及其影响因素,发现土壤动物的群落组成、密度和生物量等方面会受到灌丛下枯落物积累量、降雨量和灌丛微生境小气候的影响^[15-16]。在 Negev 荒漠丛枝霸王(*Zygophyllum dumosum*)灌丛下,大型土壤动物常见类群有拟步甲科、潮虫科和蚁科^[17](表 1);中小型土壤动物常见类群有前气门亚目、甲螨亚目、啮虫目、弹尾目和食细菌类线虫^[18-19]。通过研究灌丛下土壤螨类的垂直分布格局,发现土壤螨类的分布和营养结构变化会受到土壤湿度的影响;而且,还发现螨类为了逃避干旱对自身生长的影响,在日落之前均分布于 6 cm 以下的土壤中;而在日落之后由于灌丛表面逐渐形成露水导致土壤表层湿度增加,促使甲螨亚目和前气门亚目等类群逐渐向土壤表层移动,数量显著增加^[19-21]。在澳大利亚新南威尔士州的半干旱荒漠区域内,通过调查研究不同灌木类型及植被密度对大中型土壤动物群落结构分布特征的影响,发现不同灌木的灌丛结构及生境条件是影响大型土壤动物活动格局的直接因素;而且,研究还发现灌丛种类对大型土壤动物群落结构的影响要显著优于植被密度^[22](表 1)。

表 1 国外荒漠灌丛土壤动物分布

Table 1 Soil fauna distribution in desert shrub in foreign countries			
荒漠类型 Desert types	气候特征 Climatic characteristics	灌丛类型 Shrub type	常见类群 Common Groups
Chihuahua 荒漠 Chihuahua desert	热带沙漠气候	腺牧豆树	大型:跳蛛科、长蝽科、盲蝽科、蝗科、吉丁甲科、瓢虫科、蜂虻科、黄潜蝇科、舞蝇科、蝉科、木虱科、拟步甲科、步甲科、蚁科等 ^[13] 中型:长须螨科、隐爪螨科、镰螯螨科、附线螨科、巨须螨科、长角跳科等 ^[14]
Negev 荒漠 Negev desert	温带沙漠气候	丛枝霸王	大型:拟步甲科、潮虫科、蚁科等 ^[17] 中型:前气门亚目、甲螨亚目、啮虫目、弹尾目等 ^[19-21] 小型:食细菌类线虫等 ^[18]
澳大利亚新南威尔士州半干旱荒漠区 Semi-arid desert area, New South Wales, Australia	亚热带沙漠气候	爱沙木属(85%) 金合欢属(15%)	大型:半翅目、木虱科等 ^[22] 中型:弹尾目等 大型:半翅目、木虱科等 中型:啮虫目、弹尾目等

国内研究多分布于甘蒙荒漠、半荒漠区(内蒙古包头以西、宁夏回族自治区中北部、甘肃北部及西部广大地区)和蒙东荒漠草原区(内蒙古阿巴嘎旗以东,大兴安岭西南缘以西,跨越辽宁西端、河北北部和山西北部的广大地域)2个基本自然区域^[23]。对蒙东荒漠草原区灌丛群落内的土壤动物调查,发现不同土壤动物类群对灌丛内外微生境的选择性和适应性存在差异,导致灌丛微生境内拟步甲科、鳃金龟科幼虫和等节跳科的个体数显著增加;拟步甲科幼虫的个体数显著降低;而缘蝽科、盲蝽科、叶甲科幼虫、食虫虻科幼虫、蚁科和虱啮科的个体数则无明显变化^[24-26](表2)。在西北干旱区黑河流域典型的戈壁荒漠灌丛生境中,优势类群为拟步甲科、蚁科、平腹蛛科、狼蛛科、象甲科和步甲科^[27-29](表2);通过研究灌丛对土壤动物群落结构分布的影响因素,发现灌丛微生境内的非生物环境因子(土壤质地、地面温度、地下日均温和土壤含水量)是决定荒漠灌丛土壤动物群落空间分布格局的重要因子之一,而环境因子(如灌丛枯落物数量和质量等)的影响作用则由于土壤动物种类的不同而存在明显的季节变异^[30]。在宁夏盐池县荒漠柠条灌丛微生境内,优势类群为鳃金龟科、拟步甲科和蚁科;其个体数分布、类群组成及其优势度等均会受到柠条灌丛微生境的影响;而且,在柠条灌丛生长发育过程中,能够促进植食性土壤动物类群的恢复,有利于食物网结构稳定性的维持^[31-33](表2)。在拉萨半干旱区砂生槐灌丛微生境内,大型土壤动物中优势类群为鞘翅目,中型土壤动物中优势类群为弹尾目和蜚蠊目;研究发现土壤动物的群落结构、类群数和多样性指数等均随着砂生槐灌丛的封育时间而呈增加趋势^[34](表2)。综合分析表明,灌丛微生境不仅会为土壤动物提供良好的栖息、繁殖场所和食物资源条件,而且灌丛的发育过程及其功能特性还会影响土壤动物的群落结构分布,在维持土壤动物生物多样性等方面起到重要作用。

表2 国内荒漠灌丛土壤动物分布

Table 2 Soil fauna distribution in desert shrub in China

荒漠类型 Desert types	气候特征 Climatic characteristics	灌丛类型 Shrub type	常见类群 Common groups
蒙东荒漠草原区 Mengdong Desert Steppe Area	温带大陆性半干旱气候	小叶锦鸡儿	大型:缘蝽科、盲蝽科、步甲科、拟步甲科、叶甲科、食虫虻科、鳃金龟科、虱啮科、蚁科等 ^[24-25] 中型:蜚蠊目、弹尾目、啮虫目等 ^[26]
西北干旱区黑河流域典型的戈壁荒漠 Typical Gobi Desert in the Heihe River Basin in the Arid Region of Northwest China	大陆性干旱荒漠气候	泡泡刺	大型:平腹蛛科、狼蛛科、拟步甲科、象甲科、步甲科、蚁科等 ^[27-29] 中型:甲螨亚目、辐螨亚目、长角跳科等 ^[30]
宁夏盐池县荒漠区 Desert area of Yanchi County, Ningxia	温带大陆性季风气候	柠条锦鸡儿	大型:蜘蛛目、盲蛛目、半翅目、革翅目、鞘翅目、膜翅目等 中型:蜚蠊目、啮虫目、弹尾目 ^[31-33]
拉萨半干旱区 Lhasa semi-arid area	高原季风半干旱气候	砂生槐	大型:盲蛛目、蜘蛛目、鞘翅目、膜翅目、等翅目、革翅目、双翅目、唇足纲等 中型:蜚蠊目、弹尾目等 ^[34]

2 荒漠灌丛土壤动物的生态功能

灌丛微生境直接影响土壤动物的群落结构组成及其多样性分布,而土壤动物又通过取食及掘穴等活动反作用于灌丛及土壤,它们在物质循环、能量流动和信息传递等方面扮演着十分重要的角色^[35]。

2.1 在物质循环中的作用

在干旱、半干旱荒漠生态系统中,土壤动物作为土壤生态系统的重要组成部分,不但可以直接反应土壤的机制状况,而且还会对已退化的土壤起到改善恢复的作用^[36]。有研究表明,灌丛“肥岛”能够为地面土壤动物提供良好的栖息地和食物资源条件,有利于土壤动物的生存、发育和繁殖^[37-38]。而土壤动物作为荒漠生态

系统灌丛群落内物质循环过程中重要的消费者和特殊的分解者,它们的机械破碎作用又有利于土壤动物和微生物取食^[38-39];并且,土壤动物的活动又能够影响有机质的降解速率和营养元素的周转量,对灌丛微生境下枯落物的分解具有极为重要的作用^[40]。其中,小型土壤动物(线虫)通过取食细菌和根际微生物,向土壤中释放 CO_2 、 NH_4^+ 和其他含氮化合物,促进灌丛“肥岛”中土壤 C 和 N 素循环,并影响细菌共生植物产生吲哚乙酸刺激植被生长^[41-43]。中型土壤动物(蜚蠊目)通过啃食、咀嚼枯落物,提高枯落物的分解速度及营养元素的释放^[44];同时通过捕食细菌、真菌和其他小型土壤动物,影响微生物群落的多样性和功能,改变灌丛微生境土壤动物的物种群落组成结构,抑制碎屑食物网中土壤动物的数量,从而间接影响养分循环过程^[38-39,45-46]。大型土壤动物(蚁科和拟步甲科等)不仅能够增加灌丛微生境中枯落物的分解破碎速率,而且还可以通过采食和掘穴等活动改变土壤结构,减小土壤容重,促进土壤中矿物质的混合,刺激中小型土壤动物分解及土壤中有机的形成,直接或间接地促进物质循环^[38]。有研究表明,在荒漠生态系统中,灌丛微生境内的植物枯落物、土壤动物的遗体残骸及排泄物中所含有的有机质和养分,在腐食性土壤动物(葬甲科等)、微生物及自然界的分解作用下会再次进入土壤,间接影响土壤团聚体形成和灌丛植被的生长,进而影响以土壤动物为纽带的荒漠生态系统灌丛微生境内的生物地球化学循环等生态过程^[47](图 1)。

2.2 在能量流动中的作用

灌丛植被和土壤动物储存的能量是荒漠生态系统中能量流的重要组成部分^[48]。在荒漠生态系统中,往往由于气候及降雨量的影响,致使灌丛植被的初级生产力水平低下,导致植食性土壤动物类群对能量的利用效率在某种程度上受到限制^[49-50]。所以,作为荒漠灌丛微生境中分解枯落物最多的食碎屑性大型土壤动物(蚁科和拟步甲科),占据了初级消费者这一重要类群的地位,而且还占据了从灌丛(枯落物和种子)到较高营养级水平的能量导管^[51]。蚂蚁是全世界荒漠生态系统中最为常见的食碎屑性大型土壤动物,在灌丛微生境中广泛分布;而拟步甲科(如 Namib 和 Mohave 荒漠)和等足目(如 Chihuahua 和 Negev 荒漠)则在有的灌丛微生境中分布较多,在有的灌丛微生境中分布较少^[52-53]。次级消费者以捕食性的蛛形纲和爬行纲(即变温型捕食者)土壤动物为主,它们取食蚂蚁和食碎屑性土壤动物(即初级消费者),形成了荒漠灌丛生境中的第三营养级水平。小型捕食性鸟类和哺乳动物(恒温动物)也是荒漠生态系统中的常见类群,通常捕食个体大小大于一定尺寸的食物,主要包括拟步甲科,构成了第四营养级水平^[54](图 1)。

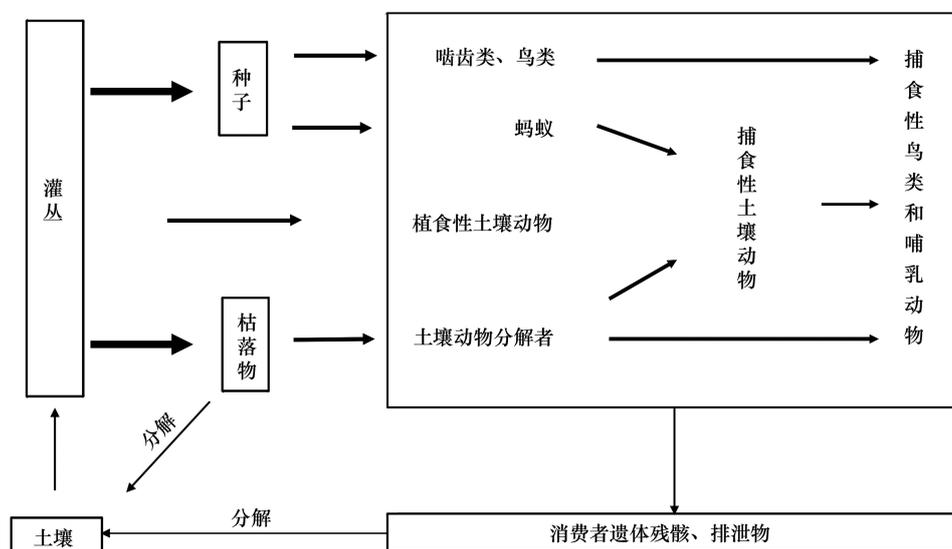


图 1 荒漠草原生物群落能量流动及物质循环概况模式图^[49]

Fig.1 Model of Energy Flow and Material Cycle in Desert Steppe Biological Communities

在对荒漠生态系统能量流进行测定计算时,土壤动物的热值数据是必不可少的资料,利用土壤动物热值数据和干物质质量相结合,对荒漠生态系统灌丛的初级生产力进行评估^[55];通过对土壤动物取食的食物和排出的排泄物进行热值测定,并在不同时期内调查研究区单位面积内的土壤动物数量,就可以进一步研究荒漠灌丛微生境中土壤动物种群的能量流动^[56]。相关研究表明,土壤动物的干物质质量热值随季节变化存在一定的差异性,对灌丛枯落物分解过程中的能量流动具有一定的影响^[48]。

2.3 在信息传递中的作用

如表 3 所示,在荒漠生态系统中,土壤动物通过互相发送、接收不同的信息(物理信息、化学信息、行为信息和营养信息)进行正常的生命活动,这些信息把系统各部分连接起来形成信息网,对于荒漠生态系统的稳定性具有重要作用^[57]。在信息传递过程中,土壤动物依靠声音信息、利用生命活动的代谢产物和性外激素,进行个体间、种群间的识别,有利于土壤动物个体的生存以及种群的发育繁殖^[58]。在荒漠灌丛群落内,由于降水及温度的影响,限制了灌丛植被的生产力和土壤养分循环过程,导致土壤动物食物资源短缺,此时土壤动物就会通过迁移选择食物充足的栖息地,以此来减轻同种群的食物竞争压力^[59]。此外,土壤动物还会受到灌丛植被分泌的代谢产物以及花粉的吸引,帮助植被传授花粉、散布种子。综合分析表明,荒漠生态系统中土壤动物的信息传递包括个体、种群、群落及其各部分间特殊的信息联系,有利于维持荒漠生态系统的有序性,在荒漠生态系统的发育、维持、演化等过程中扮演着重要的角色^[36]。

表 3 荒漠生态系统中土壤动物的信息传递

Table 3 Information transfer of soil fauna in desert ecosystems

种类 Type	表现形式 Manifestation	作用 Function	土壤动物类群 Soil fauna
物理信息 Physical information	光、声、电、热、磁、湿度、颜色等	捕食、警戒、求偶、种内、种间联系等	等翅目、膜翅目等 如:当白蚁巢受到攻击时,白蚁会用头撞击洞壁,通过洞壁传递声音,达到蚁群撤退的目的 ^[36]
化学信息 Chemical information	性激素、追踪素、警告素、食诱素、拒食素等	种间、个体间识别;刺激性成熟;调节出生率;标记领域等	等翅目、膜翅目、蜘蛛目、鞘翅目等 如:蚂蚁通过嗅觉和味觉进行联系、识别伙伴;蜘蛛可以通过化学信息物质寻找和定位配偶;拟步甲科通过化蛹现象保证自身的繁殖和生存 ^[57-58]
行为信息 Behavioral information	跳舞等	捕食、警戒、求偶、种内、种间联系等	等翅目、膜翅目等 如:蜜蜂的舞蹈行为(圆圈舞、镰形舞和摆尾舞等);蚁巢受到攻击时,工蚁和幼虫向内移动,兵蚁则向外集结的利他行为 ^[58]
营养信息 Nutrition information	食物链	捕食等	蛛螨目、鞘翅目等 如:被捕食者体重、体形和数量等

3 灌丛与土壤动物分布之间的数学关系

目前,在干旱、半干旱区荒漠生态系统中,人工种植灌丛已被认为是退化生态系统恢复的有效措施之一^[60]。灌丛与土壤及草本植物间相互作用关系数学模型构建,开展的研究较多。其中,灌丛与土壤间的相互作用关系常采用富集率(Enrichment ratio)值(E)对数据进行处理^[6,61]。Allington 和 Valone^[62]采用相对响应比率(Relative response ratio, RR)来分析长期封育管理条件下灌丛内外生境土壤养分的变化程度,表明富集率能够较好的定量反映灌丛对土壤肥力的生态作用。灌丛与草本植物间常存在着“互利共生”或“竞争排斥”的作用关系^[63]。Paine^[64]采用相对竞争指数(Relative competition index, RCI)来定量灌木与草本植物之间的扩散竞争关系,公式表示为 $RCI = (B - A) / B$ 。Hedges 和 Chanway^[65]采用对数响应比率(Log response ratio, $\ln RR$)、Markham 等^[66]采用相对邻近影响指数(Relative neighbor effect, RNE),即改进的(RCI)指数来解释灌丛和草本植物间的互利效应,公式分别为 $\ln RR = \ln(B/A)$ 和 $RNE = (B - A) / \max(A, B)$ 。也有采用相对相互作用强度(Relative interaction intensity, RII)指标来衡量灌木林冠内外草本植物的生长状况^[67],公式为 $RII = (A -$

$B)/(A+B)$,均取得了较好的效果。

结合灌丛与土壤、灌丛与草本植物间相互作用关系的数学模型(表 4),来分析上述模型在灌丛与土壤动物定量作用关系中的应用。Zhao 和 Liu^[11]利用富集率指数(E),表达灌丛对土壤动物的聚集程度。刘任涛^[10]总结了灌丛“虫岛”的内涵,即干旱、半干旱区荒漠生态系统中,灌丛为土壤动物的生存、发育和繁殖提供独特的生境“岛屿”,导致土壤动物类群、群落组成及结构在灌丛内外生境中产生特定的适应性空间分布及差异性分布,其在种群和群落水平上均具有统计学意义。Liu 等^[68]认为种群水平上相对邻近影响指数与相对互相作用强度指数表达的内涵更全面、准确,而群落水平上需考虑灌丛“虫岛”大小的实际情况。从构建模型的逻辑性与简化角度来看,相对互相作用强度指数可能更直观,并建立了灌丛与土壤动物间的定量作用模型: $RII = \alpha / (\alpha + 2B)$ (α 为灌丛对土壤动物的定量作用强度)^[7]。利用相对响应比率(RR)和相对互相作用强度指数(RII),在种群与群落 2 个水平上分析了荒漠灌丛“虫岛”效应的变化规律。应用已得到的数学模型,刘任涛等^[59]比较了科尔沁沙地和毛乌素沙地灌丛“虫岛效应”特征,进一步证明了灌丛和土壤动物分布间作用关系数学模型的可靠性和实用性。

表 4 灌丛和土壤动物分布间作用关系数学模型^[10]

Table 4 Mathematical models for the relationship between shrubs and soil faunal distribution

假设条件 Conditions	$E(RR) = A/B$	$RCI = (B-A)/B$	$\ln RR = \ln(B/A)$	$RNE = (B-A)/\max(A, B)$	$RII = (A-B)/(A+B)$
$A \neq 0, B = 0$	—	—	—	-1	1
$A = 0, B \neq 0$	0	1	—	1	-1
$A = B$	1	0	0	0	0
$A < B$	<1	>0	>0	>0	<0
$A > B$	>1	<0	<0	<0	>0

RR : 相对响应比率 Relative response ratio; RCI : 相对竞争指数 Relative competition index; RNE : 相对邻近影响指数 Relative neighbor effect; RII : 相对互相作用强度 Relative interaction intensity; A 为灌丛内节肢动物分布平均量值($A > 0$), B 为灌丛外节肢动物分布平均量值($B > 0$); “—”表示不存在

4 荒漠灌丛土壤动物研究存在的问题及建议

土壤动物是荒漠生态系统灌丛群落内不可或缺的一部分,它们大多数均处于土壤生态系统食物链的上端,在维持荒漠生态系统的食物网结构、物质循环和能量流动等方面扮演着重要的角色^[59]。对于荒漠生态系统灌丛林营造、土地资源管理及退化生态系统的恢复具有重要意义。基于此,从灌丛与土壤动物互为反馈的关系来看,未来可能存在的重要研究领域包括:

(1) 极端气候变化对荒漠灌丛土壤动物的影响。21 世纪以来,随着全球气候变暖的持续发展,极端气候事件发生的频率将会大大增加,除了夏季高温将会频繁出现而冬季低温逐渐减少之外,其他极端天气如暴雨、干旱和强对流等出现的机率也将增大,尤其以干旱、半干旱荒漠区表现最为明显^[69-70]。近几年,对于极端气候变化的研究多集中于植被生长的动态变化,而对于土壤动物与极端气候变化之间的关系研究较少。研究表明,极端气温/降水的发生会使荒漠灌丛植被的生长有一个月左右的滞后期^[71],导致土壤动物的食物资源分布发生变化,进而影响土壤动物类群的群落结构及其性别比例。因此,未来对于荒漠灌丛土壤动物的研究中增加极端气候变化对土壤动物群落分布的研究,将有助于利用土壤动物掌握极端气候变化的规律。

(2) 荒漠灌丛土壤动物群落分布对降雨事件发生前后的响应。受全球气候变化影响,我国西北干旱、半干旱荒漠区气候由暖干向暖湿变化的趋势^[72]。降雨格局发生变化,不仅会影响地上和地下土壤动物群落的食物资源及繁殖率等方面,还会影响荒漠生态系统的功能及其对环境干扰的抵抗力^[73]。目前,关于土壤动物与降雨变化的研究主要集中在草地和森林生态系统,而在西北干旱、半干旱荒漠生态系统内的研究较少,尤其是降雨事件发生前后对土壤动物群落分布的影响。所以,在全球气候变化背景下,研究降雨事件发生前后对

荒漠灌丛土壤动物群落分布的影响,对于荒漠生态系统的恢复过程、功能与稳定性维护具有重要意义。

(3) 荒漠灌丛“肥岛”形成过程中土壤动物的作用机理。“肥岛”的实质是灌丛微生境下土壤资源水平分布局部异质性显著的表现,这种异质性体现为土壤资源在灌丛下聚集,它的形成和发展是一个资源逐渐自生的动态过程。目前,对于灌丛“肥岛”的研究多集中于“肥岛”的形成过程及其特征等方面,而关于土壤动物对灌丛“肥岛”形成过程的影响尚不清楚。所以在研究灌丛“肥岛”的形成过程时增加土壤动物对“肥岛”形成过程作用机理的研究,对于退化荒漠生态系统的恢复以及灌丛林植被的保护具有重要意义。

(4) 灌丛“虫岛”形成过程中聚集分布的土壤动物对灌丛的影响。“虫岛”是“肥岛”形成过程中的必然产物,能够加速枯落物的分解过程、促进灌丛生境土壤的资源周转、维持生态系统的结构与功能,这对于灌丛本身的生存、更新及扩散非常有利^[74-75]。但是,在“虫岛”形成过程中,会吸引大量的土壤动物(捕食性、植食性和腐食性)至灌丛下定居、繁衍。这些土壤动物是否会对灌丛自身产生虫害作用,以及当这些土壤动物类群通过繁衍之后超过灌丛微生境的容纳量时,对灌丛群落的影响是否在可控范围内。因此,针对土壤动物对灌丛的虫害作用,提出针对性的防控措施是很有必要的。

参考文献 (References):

- [1] 潘伯荣. 点染沙漠的绿色——沙漠环境的植物. 生命世界, 2010, (6): 8-13.
- [2] 万敏, 郭永平, 郭映光, 祁俊华. 乌拉特草原植被恢复主要途径的研究. 内蒙古草业, 2004, 16(4): 49-51.
- [3] 王少昆, 赵学勇, 贾昆峰, 高宝兰, 曲浩, 毛伟, 连杰, 陈敏, 朱阳春. 乌拉特荒漠草原小针茅(*Stipa klemenzii*)群落土壤细菌多样性及垂直分布特征. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1564-1570.
- [4] 朱震达. 中国土地荒漠化的概念、成因与防治. 第四纪研究, 1998, (2): 145-155.
- [5] 刘任涛, 朱凡, 柴永青. 干旱区不同年龄灌丛斑块地面节肢动物的聚集效应. 应用生态学报, 2014, 25(1): 228-236.
- [6] 赵哈林, 郭轶瑞, 周瑞莲. 灌丛对沙质草地土壤结皮形成发育的影响及其作用机制. 中国沙漠, 2011, 31(5): 1105-1111.
- [7] 赵哈林, 苏永中, 张华, 赵丽娅, 周瑞莲. 灌丛对流动沙地土壤特性和草本植物的影响. 中国沙漠, 2007, 27(3): 385-390.
- [8] 殷秀琴. 松嫩沙地天然草地与人工草地土壤动物的对比研究. 中国沙漠, 1998, 18(3): 249-254.
- [9] Doblas-Miranda E, Sánchez-Piñero F, González-Megías A. Different microhabitats affect soil macroinvertebrate assemblages in a Mediterranean arid ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(3): 329-335.
- [10] 刘任涛. 沙地灌丛“虫岛”: 概念、方法与模型构建. 生物数学学报, 2016, 31(3): 344-350.
- [11] Zhao H L, Liu R T. The “bug island” effect of shrubs and its formation mechanism in Horqin Sand Land, Inner Mongolia. *CATENA*, 2013, 105: 69-74.
- [12] Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y, Drake S. Facilitative effects of shrubs in shifting sand on soil macro-faunal community in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, Northern China. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(5): 316-321.
- [13] Silva S, Whitford W G, Jarrell W M, Virginia R A. The microarthropod fauna associated with a deep rooted legume, *Prosopis glandulosa*, in the Chihuahuan Desert. *Biology and Fertility of Soils*, 1989, 7(4): 330-335.
- [14] Neher D A, Lewins S A, Weicht T R, Darby B J. Microarthropod communities associated with biological soil crusts in the Colorado Plateau and Chihuahuan deserts. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(6/7): 672-677.
- [15] Daryanto S, Eldridge D J. Shrub hummocks as foci for small animal disturbances in an encroached shrubland. *Journal of Arid Environments*, 2012, 80: 35-39.
- [16] 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.
- [17] Pen-Mouratov S, Rakhimbaev M, Barness G, Steinberger Y. Spatial and temporal dynamics of nematode populations under *Zygophyllum dumosum* in arid environments. *European Journal of Soil Biology*, 2004, 40(1): 31-46.
- [18] Pen-Mouratov S, Zaragoza S R, Mayzl-ish E, Steinberger Y. 季节变化对沙漠生态系统土壤中自由生活线虫和原生动物的营养关系的影响(英文). *动物学报*, 2008, 54(1): 84-95.
- [19] Pen-Mouratov S, Genzer N, Shukurov N, Plakht J, Steinberger Y. Seasonal effect of geomorphological chronosequence features on soil biota dynamics. *Pedosphere*, 2010, 20(6): 761-770.
- [20] Maestre F T, Cortina J. Remnant shrubs in Mediterranean semi-arid steppes: effects of shrub size, abiotic factors and species identity on understorey richness and occurrence. *Acta Oecologica*, 2005, 27(3): 161-169.

- [21] Wasserstrom H, Whitford W G, Steinberger Y. Spatiotemporal variations of soil microarthropod communities in the Negev desert. *Pedosphere*, 2016, 26(4): 451-461.
- [22] Kwok A B C, Eldridge D J. The influence of shrub species and fine-scale plant density on arthropods in a semiarid shrubland. *The Rangeland Journal*, 2016, 38(4): 381-389.
- [23] 任国栋, 于有志, 侯文君. 中国荒漠半荒漠地区拟步甲的组成和分布特点. *河北大学学报: 自然科学版*, 1999, 19(2): 79-86.
- [24] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 科尔沁沙地不同造林类型对土壤动物多样性的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 1104-1110.
- [25] 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.
- [26] 吴建波, 阮维斌, 张欣, 李晶, 郭宏宇, 李晶, 高玉葆. 内蒙古高原锦鸡儿属(*Caragana* Fabr.)植物根围线虫群落多样性研究. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(5): 624-629.
- [27] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 潘成臣. 人工固沙植被恢复对地表节肢动物群落组成及多样性的影响. *生态学报*, 2018, 38(4): 1357-1365.
- [28] Li F R, Liu J L, Liu C A, Liu Q J, Niu R X. Shrubs and species identity effects on the distribution and diversity of ground-dwelling arthropods in a Gobi desert. *Journal of Insect Conservation*, 2013, 17(2): 319-331.
- [29] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 牛瑞雪. 黑河中游荒漠灌丛斑块地面甲虫群落分布与微生境的关系. *生态学报*, 2010, 30(23): 6389-6398.
- [30] Liu J L, Zhao W Z, Li F R. The effects of the identity of shrub species on the distribution and diversity of ground arthropods in a sandy desert ecosystem of northwestern China. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2014, 6(6): 587-596.
- [31] 刘任涛, 朱凡, 辛明, 陈林. 流动沙地灌丛内外地面/地下土居节肢动物空间分布及其影响因素. *干旱区研究*, 2016, 33(2): 410-416.
- [32] 刘任涛, 郗伟华, 赵娟, 刘佳楠. 不同立地条件柠条灌丛内外地面节肢动物群落结构分布特征. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 354-362.
- [33] 刘任涛, 朱凡. 流动沙地人工种植灌丛对地面节肢动物多样性与功能群结构的影响. *林业科学*, 2016, 52(2): 91-98.
- [34] 臧建成, 孙涛, 杨小林, 幸福梅. 拉萨半干旱河谷砂生槐灌丛不同封育时间土壤动物多样性特征. *核农学报*, 2017, 31(7): 1381-1387.
- [35] 王芳. 土壤动物在生态循环系统中的作用. *河南科技*, 2011, (2X): 19-19.
- [36] 史玉菲, 苏越, 张雪萍. 我国土壤动物功能作用的研究进展. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2011, 27(3): 84-88.
- [37] 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.
- [38] Reynolds J F, Virginia R A, Kemp P R, de Soya A G, Tremmel D C. Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development. *Ecological Monographs*, 1999, 69(1): 69-106.
- [39] Lawrence K L, Wise D H. Spider predation on forest-floor Collembola and evidence for indirect effects on decomposition. *Pedobiologia*, 2000, 44(1): 33-39.
- [40] 董晶. 土壤生物及其对土壤生态学发展的影响. *科技展望*, 2016, 26(5): 289-289.
- [41] 陈文凯. 土壤线虫在恢复生态学中的应用前景展望. *科技展望*, 2016, 26(10): 86-86, 88-88.
- [42] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(1): 13-29.
- [43] 梁文举, 葛亭魁, 段玉玺. 土壤健康及土壤动物生物指示的研究与应用. *沈阳农业大学学报*, 2001, 32(1): 70-72.
- [44] 董炜华, 李晓强, 宋扬. 土壤动物在土壤有机质形成中的作用. *土壤*, 2016, 48(2): 211-218.
- [45] Miyashita T, Niwa S. A test for top-down cascade in a detritus-based food web by litter-dwelling web spiders. *Ecological Research*, 2006, 21(4): 611-615.
- [46] 陈海燕, 刘新民, 孙卫国, 孙维. 大型土壤动物在沙漠生态系统物质循环中的作用研究. *中国沙漠*, 2002, 22(6): 576-580.
- [47] 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.
- [48] 殷秀琴, 辛未冬, 齐艳红. 温带红松阔叶混交林凋落叶与主要大型土壤动物热值的季节变化. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 756-760.
- [49] Ayal Y. Trophic structure and the role of predation in shaping hot desert communities. *Journal of Arid Environments*, 2007, 68(2): 171-187.
- [50] Alcock J. Sonoran desert summer. *Journal of the Southwest*, 1989, 31(4): 549-568.
- [51] Gaigher R, Samways M J. Surface-active arthropods in organic vineyards, integrated vineyards and natural habitat in the Cape Floristic Region. *Journal of Insect Conservation*, 2010, 14(6): 595-605.
- [52] Warren-Rhodes K A, McKay C P, Ng Boyle L, Wing M R, Kieckbusch E M, Cowan D A, Stomeo F, Pointing S B, Kaseke K F, Eckardt F, Henschel J R, Anisfeld A, Seely M, Rhodes K L. Physical ecology of hypolithic communities in the central Namib Desert: The role of fog, rain, rock habitat, and light. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(4): 1451-1460.
- [53] Ayal Y, Merkl O. Spatial and temporal distribution of tenebrionid species (Coleoptera) in the Negev Highlands, Israel. *Journal of Arid Environments*, 1994, 27(4): 347-361.
- [54] Groner E, Ayal Y. The interaction between bird predation and plant cover in determining habitat occupancy of darkling beetles. *Oikos*, 2001, 93(1): 22-31.
- [55] 梁杰荣, 金菊香. 动物热值的测定方法. *动物学杂志*, 1986, (3): 33-36, 29-29.

- [56] 倪穗, 陈增鸿, 潘晓东. 能量生态学研究概述. 科技通报, 1999, 15(2): 104-108, 114-114.
- [57] 王让会, 游先祥. 荒漠生态系统中生物的信息联系特征. 农村生态环境, 2000, 16(4): 7-10.
- [58] 李诗洪. 动物信息传递. 家畜生态学报, 1987, 8(1): 13-16.
- [59] 刘任涛, 王少昆, 周娟. 科尔沁和毛乌素沙地灌丛“虫岛”效应比较. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1599-1606.
- [60] 李新荣, 谭会娟, 何明珠, 王新平, 李小军. 阿拉善高原灌木种的丰富度和多度格局对环境因子变化的响应: 极端干旱荒漠地区灌木多样性保育的前提. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(4): 504-515.
- [61] 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 陈家宽. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1541-1546.
- [62] Allington G R H, Valone T J. Islands of fertility: a byproduct of grazing? *Ecosystems*, 2014, 17(1): 127-141.
- [63] Armas C, Ordiales R, Pugnaire F I. Measuring plant interactions: a new comparative index. *Ecology*, 2004, 85(10): 2682-2686.
- [64] Paine R T. Food-web analysis through field measurement of per capita interaction strength. *Nature*, 1992, 355(6355): 73-75.
- [65] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [66] Markham J H, Chanway C P. Measuring plant neighbour effects. *Functional Ecology*, 1996, 10(4): 548-549.
- [67] 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 红砂灌丛对土壤和草本植物特征的影响. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2432-2436.
- [68] Liu R T, Pen-Mouratov S, Steinberger Y. Shrub cover expressed as an ‘arthropod island’ in xeric environments. *Arthropod-Plant Interactions*, 2016, 10(5): 393-402.
- [69] Org W M, Professor Strachan. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). United Nations, 2007, 114(D14): 48-56.
- [70] 刘吉峰, 丁裕国, 江志红. 全球变暖加剧对极端气候概率影响的初步探讨. 高原气象, 2007, 26(4): 837-842.
- [71] 祝稳. 西北干旱区植被覆盖动态及其对极端气温和降水过程的响应. 兰州: 西北师范大学, 2015.
- [72] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 王怀军, 方功焕. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304.
- [73] 刘继亮, 赵文智, 李锋瑞. 干旱荒漠土壤动物分布格局对降水脉动的响应研究进展. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1337-1342.
- [74] Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of ‘fertile islands’ in the desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 1989, 16(3): 257-262.
- [75] 刘任涛. 沙地灌丛的“肥岛”和“虫岛”形成过程、特征及其与生态系统演替的关系. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3463-3469.