

DOI: 10.5846/stxb201311272829

李金霞, 张乐, 红梅, 乌云塔娜. 大型土壤动物群落对短花针茅草原荒漠化过程的响应. 生态学报, 2016, 36(2): - - .

Li J X, Zhang L, H M, Wu Y T N. Response of soil macrofauna to desertification in *Stipa breviflora* desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): - - .

大型土壤动物群落对短花针茅草原荒漠化过程的响应

李金霞^{1,*}, 张 乐², 红 梅³, 乌云塔娜¹

1 包头师范学院资源与环境学院, 包头 014030

2 包头师范学院生物科学与技术学院, 包头 014030

3 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010019

摘要: 土壤动物是草地生态系统的重要组成部分, 对维持草地生态系统结构与功能的稳定性具有重要作用, 研究土壤动物群落对草地荒漠化的响应有助于揭示地下与地上生态过程的联系, 全面认识荒漠化的本质。本研究选取鄂尔多斯高原西部未荒漠化 (I)、轻度荒漠化 (II)、中度荒漠化 (III)、重度荒漠化 (IV) 及极重度荒漠化 (V) 5 种短花针茅荒漠草原生境, 采用手拣法对大型土壤动物群落进行了野外调查。共获得 1 门 2 纲 6 目 25 个土壤动物类群, 优势类群为蚁科和金龟子总科幼虫, 常见类群 8 个。结果显示, 短花针茅荒漠草原大型土壤动物群落具有温带草原土壤动物群落的基本特征。在荒漠化进程中, 优势类群 (蚁科和金龟子总科幼虫) 未发生变化, 但土壤动物群落个体密度和类群数显著下降 ($P < 0.01$, $P < 0.01$), 群落香浓多样性、丰富度和均匀度降低 ($P < 0.01$; $P < 0.01$; $P < 0.05$), 群落结构趋于简单。不同荒漠化生境土壤动物群落显示出明显的退化梯度, 各土壤动物类群的分布揭示了它们对生境因子的偏好和响应模式的差异。短花针茅草原荒漠化对土壤动物垂直分布的影响具有由个体到类群、由表土层到下层的变化规律, 但未改变土壤动物分布的表聚性。荒漠化导致的食物资源减少是蚁科动物个体密度变化的主要原因, 轻度荒漠化 (II) 最适宜蚁科动物生存, 土壤全氮、有机质和地上生物量对步甲科和象甲科幼虫个体密度影响较大, 重度荒漠化 (IV) 和极重度荒漠化 (V) 生境将严重影响步甲科和象甲科幼虫的生存, 但对金龟子总科和蜘蛛目动物个体密度影响不大。土壤动物与生境因子、生境及荒漠化进程之间的关系综合地反应了草地生态系统的退化过程。

关键词: 土壤动物; 短花针茅草原; 荒漠化

Response of soil macrofauna to desertification in *Stipa breviflora* desert steppe

LI Jinxia^{1,*}, ZHANG Le², Hong Mei³, Wuyuntana¹

1 Department of Resources and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, China

2 Department of Biological Science and Technology, Baotou Teachers' College, Baotou 014030, China

3 College of Ecology and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China

Abstract: Soil fauna is an important component of grassland ecosystems and plays a key role in maintaining the stability of ecosystem structure and functioning. Studying the response of soil fauna to desertification may reveal the ecological linkage between aboveground and belowground processes, and improve our understanding of the ecological consequences of desertification. A survey of the soil macrofauna community was conducted by hand sorting at No-desertification (I), Light-desertification (II), Moderate-desertification (III), Heavy-desertification (IV), and Extreme-desertification (V) habitats in *Stipa breviflora* steppe. A total of 25 fauna groups belonging to 6 orders, 2 classes and 1 phylum were found. The dominant groups were Formicidae and Scarabaeidae larvae with 8 common groups. Soil macrofauna communities in the *Stipa*

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41161040); 内蒙古自然科学基金项目 (2010MS0607)

收稿日期: 2013-11-27; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cinderella72@163.com

breviflora steppe were similar to those in other areas in temperate prairies. As desertification progressed, the dominant groups (Formicidae and Scarabaeidae larvae) did not change. However, the structure of soil macrofauna communities became simpler with total individual density and number of soil animal groups ($P < 0.01$, $P < 0.01$), biodiversity ($P < 0.01$), richness ($P < 0.01$) and evenness indices ($P < 0.05$) decreasing significantly. Soil fauna communities and soil animal groups in different habitats along a degradation gradient showed different preferences and responses to habitat factors. Desertification in the *Stipa breviflora* steppe affected the vertical distribution of soil fauna, with first affected individuals and then groups. The first effects were seen in the top layers and later in the deeper layers of the soil, but the highest faunal abundances were found in the top soil layers. The Light-desertification (II) habitat was most preferred by the Formicidae, but food shortage resulting from desertification led to a decrease in Formicidae abundance. Soil total nitrogen, organic matter and aboveground dry biomass were the main factors affecting individual densities of Carabidae and Curculionidae larvae, which did not survive in Heavy-desertification (IV) and extreme-desertification (V) habitats. Desertification had little effect on the total individual density of Scarabaeidae and Araneida. The degradation of grassland ecosystems was reflected by the relations among soil fauna, habitat factors, and desertification.

Key Words: Soil fauna; *Stipa breviflora* steppe; desertification

荒漠化作为全球性土地退化问题,受到了国内外学界的高度重视。学界从不同角度对荒漠化过程展开了系统研究,尤其是在荒漠化对植被和土壤的影响及植物生理对荒漠化响应等方面取得了很多成果^[1-4]。当前,越来越多的学者开始关注地下生态系统的结构、功能、过程及地下生态系统与地上生态系统之间联系,并特别重视地下生态系统对全球变化响应的研究^[5],试图从地下生态过程的研究中解读陆地生态系统的响应机制,从整体上认识生态系统结构、功能和过程的本质^[6]。土壤动物是地下生态系统的重要组成部分,它们与土壤微生物一起参与生态系统凋落物分解和碳氮等重要营养元素的生物、化学循环过程^[7-8]。因此,土壤动物对改善土壤结构和土壤微环境、维持生物多样性和食物网结构、调节生态系统的结构和功能等方面发挥着重要的作用^[6,9]。研究表明,植物群落物种组成、凋落物厚度和土壤理化特性均是影响土壤动物分布的重要因子^[10-11]。土壤动物群落随着植被演替而发生变化^[12-13];草地沙化直接影响土壤动物个体密度、类群丰富度、多样性和均匀性,植被恢复和沙丘逆转有利于土壤动物群落多度、丰富度和多样性的提高,促进了土壤和植被状况的改善^[14-15];鞘翅目土壤动物是监测草地退化的理想指示生物,大型土壤动物多样性能够指示退化草地生态系统的恢复与重建过程^[16]。土壤动物已成为土地退化的指示器而被广泛应用于生态系统和土壤健康评价^[17-18]。因此,研究土壤动物对荒漠化的响应能加深对生物多样性结构和功能及人类活动导致的全球变化的生态效应的理解和认识,可为区域生态系统健康评价与生态恢复提供科学依据。

位于草原与荒漠过渡带的鄂尔多斯高原是欧亚大陆生态脆弱性最强、受荒漠化危害最严重地区之一,也是我国的灌木生物多样性中心之一^[19],其生态系统结构、功能、生态过程及其对全球变化和人类活动的响应备受关注^[20-21]。但已报道成果主要集中在鄂尔多斯高原的东南部和东北部^[20-21],对中西部地区的关注较少。然而,近几十年的草原垦殖和过度放牧导致库布其沙漠与毛乌素沙地范围不断扩大,直接威胁四合木(*Tetraena mongolica*)和半日花(*Helianthemum soongoricum*)等濒危特有植物的生存。因此,以鄂尔多斯高原西部短花针茅荒漠草原为研究对象,从土壤动物群落角度开展荒漠化过程研究对区域荒漠化防治和生物多样性保护具有重要意义。

1 研究方法 with 数据处理

1.1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯高原鄂托克旗(38°18'—40°11'N, 106°41'—108°54'E)西部,以波状高平原为主,中温带季风性大陆性气候,多年平均降水量为150—360cm,主要集中于7—9月。年均温自东北向西南逐渐升

高(6—9℃), $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温 2800—3500℃,年平均蒸发量为 2400—2900mm,湿润度在 0.1—0.4 之间。常年干旱多风,年均沙尘暴日数在 17d 以上。地带性土壤为棕钙土,地带性植被为荒漠草原并呈现几种不同的群落类型。短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原总盖度为 5—55%,以多年生丛生禾草层片占绝对优势,灌木、半灌木层片不发达,主要植物有短花针茅、戈壁针茅(*Stipa gobica*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)等。

1.2 样地设置

在野外考察基础上,根据《中国三北地区荒漠化区域分类与发展趋势综合研究野外调查技术规范中的荒漠化监测指标》将短花针茅草原划分为未荒漠化(I)、轻度荒漠化(II)、中度荒漠化(III)、重度荒漠化(IV)及极重度荒漠化(V)5种生境(表1)。为了消除自然因素(地形地貌等)干扰,各生境均选择在地形平坦处作为采样点,土壤为棕钙土,不同生境植被生长状况有共性也存在着差异。各生境建群种均为短花针茅,未荒漠化(I)和轻度荒漠化(II)生境土壤较松软,植物分布均匀,物种较丰富,常见无芒隐子草、碱蒿(*Artemisia anethifolia*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*),伴生狭叶锦鸡儿、刺叶柄棘豆(*Oxytropis aciphylla*)、碱蒿和猪毛菜(*Salsola collina*),蒙古韭(*Allium mongolicum*)在轻度荒漠化(II)生境也常见;中度荒漠化(III)生境物种减少,狭叶锦鸡儿、猪毛菜和碱蒿为常见种,伴生冷蒿(*Artemisia frigida*)和银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)等,空间异质性增强,土层较硬;重度(IV)和极重度荒漠化(V)生境地表砾质化明显,羊道密集,土层坚硬,植被稀疏低矮,物种明显减少,冷蒿和银灰旋花明显增多。

表 1 短花针茅草原不同荒漠化生境的基本情况

Table 1 The general conditions at different desertification habitats

生境/指标 Habitat/ index		I	II	III	IV	V
植被 Vegetation	VC/%	52.2±1.47a	38.7±1.27b	32.5±1.06b	18.5±0.89c	9.2±1.58d
	DB/(g/cm ²)	70.9±9.48a	95.6±46.36a	82.6±16.48a	44.4±6.74a	17.8±5.48b
	SDB/(g/cm ²)	5.5±2.03c	24.6±19.13a	36.7±19.01a	13.8±4.05b	1.5±0.88c
土壤 Soil (0—10cm)	SOM/(g/kg)	11.8±0.64a	8.93±0.55b	8.28±0.28b	8.08±0.38b	5.58±0.38c
	TN/(g/kg)	1.04±0.15a	0.77±0.07a	0.75±0.06a	0.69±0.07a	0.37±0.05b
	SM/%	4.99±0.63a	3.26±0.27a	3.3±0.32a	3.02±0.69a	3.04±0.56a
	pH	8.80±0.04bc	8.67±0.08c	8.93±0.07ab	9.13±0.03a	8.99±0.06ab
	EC/(us/cm)	122±8.4a	107±7.4a	95.3±6.0a	72.1±7.5a	99.8±3.6b
	SBD/(g/cm ³)	1.55±0.01b	1.55±0.02b	1.55±0.01b	1.55±0.02b	1.64±0.02a

VC:植被盖度 Vegetation cover; DB:地上干生物量 Dry biomass; SDB:地上灌木干生物量 Shrub dry biomass; SOM:土壤有机质 Soil organic matter content; TN:土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; SM:土壤水分含量 Soil moisture content; pH:土壤酸碱度 Soil pH; EC:土壤电导率 Soil electric conductivity; SBD:土壤容重 Soil Bulk density.

1.3 样品采集及室内处理和动物鉴定

野外调查于 8 月中下旬进行。每种生境选择 4—7 个典型样地,各样地间距保持在 5km 以上(图 1)。样地面积为 25hm²(500m×500m),样地之间为不同退化程度或性质的其他斑块。在每个样地内随机布置 5—6 个样方,样方间距不小于 50m。草本群落样方为 1m×1m,灌木群落样方为 4m×4m。在每个样方内,分别刈割灌木和草本植物带回实验室经烘干后测定干重。在刈割后的样方内采集大型土壤动物。土壤样品采集是在 0—10cm 层打 9 钻,将 9 钻土壤充分混合,采用 1/4 法取大约 1kg 土壤带回实验室。土壤容重样品用环刀法采集,装入密封袋带回实验室。土壤水分样品用土壤钻采集,装入铝盒带回实验室。大型土壤动物样方大小 50cm×50cm,采用手拣法按 0—10cm 和 10—20cm 土层采集动物,在盛有 75%酒精的容器中杀死并密封带回实验室,在体式显微镜下鉴定并统计数量(幼虫与成虫分开统计)。

1.4 样品制备及分析方法

将土样捏碎并剔除植物残体及砾石等杂物,自然风干,研磨过筛供测试。含水量用烘干法,容重采用环刀法测定。有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法,全氮采用凯氏定氮法(KDN-04A 定氮仪),pH 值用酸度计

(PHS-3D 型酸度计)测定,土壤电导率用电导仪测定(PDSJ-308A 型电导率仪)。

1.5 数据分析

采用 Excel 2003 进行土壤动物数量统计,采用 BioDiversity Professional Verision2 计算香浓多样性(Shannon-Wiener)、均匀度(Pielou)、优势度(Simpson's)和丰富度(Margalef's)指数,采用 SPSS 15.0 软件进行方差(ANOVA)分析,并进行 Tukey 法多重比较。采用 CANOCO 4.5 进行排序分析运算^[22],分析前对物种数据进行了 $\log(x+1)$ 转换和中心化,排序尺度侧重于样本间距离,变量的显著性用 999 次蒙特卡洛置换检验(Monte-Carlo permutation test)考察。

2 结果分析

2.1 土壤动物群落组成

在研究区短花针茅荒漠草原获取大型土壤动物 25 类、2936 只,隶属 1 门 2 纲 6 目。按个体数量划分,优势类群为蚁科(Formicidae)和金龟子总科幼虫

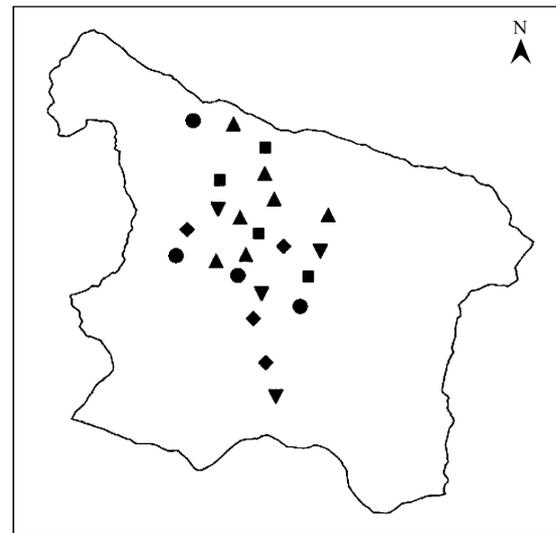
(Scarabaeidae larvae),分别占大型土壤动物个体总数的 53.71% 和 24.24%,合计占 77.95%;常见类群 8 个,分别为蜘蛛(Araneida)、叶甲科幼虫(Chrysomelidae larvae)、拟步甲科(Tenebrionidae)、双翅目幼虫(Diptera larvae)、步甲科(Carabidae)、步甲科幼虫(Carabidae larvae)、象甲科幼虫(Curculionidae larvae)和半翅目若虫(Hemiptera nymph),合计数量占大型土壤动物个体总数的 18.27%。优势和常见类群对短花针茅荒漠草原生境适应性较强,是短花针茅荒漠草原大型土壤动物群落的主体,合计占大型土壤动物个体总数的 96.21%。其余为稀有类群(表 2)。

2.2 荒漠化过程中土壤动物群落结构变化

2.2.1 土壤动物类群和个体密度变化

在短花针茅草原荒漠化过程中,大型土壤动物群落变化主要表现在类群数、个体密度及主要类群个体密度占群落个体密度比例方面。其中,类群数由未荒漠化(I)到极重度荒漠化(V)逐渐减少,变化范围为 5—3 类,平均相差 1 倍以上。方差分析表明,不同荒漠化生境大型土壤动物类群数差异显著($P < 0.01$),其中极重度荒漠化(V)与未荒漠化(I)生境类群数差异显著($P < 0.05$),其他生境之间无显著差异(表 2)。群落个体密度变化是先升高再降低,变化范围为 46.67—118.86 只/m²,平均个体密度为 76.65 只/m²,轻度荒漠化(II)生境最高,极重度荒漠化(V)生境最低,前者是后者的 1.7 倍。方差分析显示,不同荒漠化生境大型土壤动物群落个体密度具有显著差异($P < 0.01$),重度(IV)和极重度荒漠化(V)与轻度荒漠化(II)生境大型土壤动物群落个体密度具有显著差异($P < 0.05$),其他生境之间无显著差异(表 2)。

随着荒漠化发展,主要类群的个体密度及其在群落中的地位存在差异。虽然,各荒漠化阶段优势类群相同且均为蚁科和金龟子总科幼虫,但其个体密度与比例变化规律有所不同。其中,蚁科个体密度及其所占比例均先升高再降低,个体密度变化范围为 18.00—85.71 只/m²,比例变化范围为 36.36—72.12%,最高值均出现在轻度荒漠化(II)生境(表 2、表 3)。金龟子总科幼虫个体密度变化较小,但所占比例变化较大,变化范围为 12.50—45.71%,轻度荒漠化(II)生境最低。蜘蛛和叶甲科(含幼虫)在各生境均为常见类群,但没有明显变化规律。步甲科(含幼虫)在极重度荒漠化(V)生境消失,但在其他生境为常见类群;象甲科(含幼虫)在重度荒漠化生境(IV)消失(表 3)。



图例

▲ 未荒漠化 ● 中度荒漠化 ▼ 极重度荒漠化
■ 轻度荒漠化 ◆ 重度荒漠化

图 1 研究区短花针茅草原不同荒漠化生境分布图

Fig. 1 Distribution of different desertification habitats in study area

表 2 不同荒漠化阶段短花针茅草原大型土壤动物群落类群及个体密度统计(只/m²)Table 2 Group and density statistics of soil macrofauna in different desertification stages (ind m⁻²)

类群 Groups/境 Habitats	I	II	III	IV	V	平均 Average	% Proportion	多度 Abundance
蚁科 Formicidae	40.44	85.71	43.00	18.00	18.67	41.17	53.71	+++
金龟子总科幼虫 Scarabaeidae larvae	14.22	14.86	26.50	16.00	21.33	18.58	24.24	+++
蜘蛛目 Araneida	3.11	5.71	2.50	3.00	1.33	3.13	4.09	++
叶甲科幼虫 Chrysomelidae larvae	6.22	2.86	2.00	2.50	1.33	2.98	3.89	++
拟步甲科 Tenebrionidae	4.89	0.57	3.50	0.50	1.33	2.16	2.82	++
步甲科 Carabidae	4.00	0.57	1.50	2.00		1.61	2.11	++
双翅目幼虫 Diptera larvae	0.89	2.86	2.00	1.00	0.67	1.48	1.93	++
象甲科幼虫 Curculionidae larvae	0.44	1.14	1.00	2.50		1.02	1.33	++
步甲科幼虫 Carabidae larvae	0.44	1.71	1.50	0.50		0.83	1.09	++
半翅目若虫 Hemiptera nymph	2.67	0.57			0.67	0.78	1.02	++
叶甲科 Chrysomelidae		0.57		1.00	0.67	0.45	0.58	+
土蟥科 Cydidae	2.22					0.44	0.58	+
鳞翅目幼虫 Coleoptera larvae	0.44	0.57		0.50	0.67	0.44	0.57	+
拟步甲幼虫 Tenebrionidae larvae	0.89			0.50		0.28	0.36	+
天牛科幼虫 Cerambycidae larvae				1.00		0.20	0.26	+
叶蝉总科 Cicadellidea			0.50	0.50		0.20	0.26	+
象甲科 Curculionidae		0.57				0.11	0.15	+
沫蝉科 Cercopidae		0.57				0.11	0.15	+
隐翅虫科幼虫 Staphylinidae larvae			0.50			0.10	0.13	+
麦蛾科 Gelechiidae			0.50			0.10	0.13	+
叩甲科幼虫 Elateridae larvae			0.50			0.10	0.13	+
姬蟥科 Nabidae			0.50			0.10	0.13	+
金龟子总科 Scarabaeidae	0.44					0.09	0.12	+
瓢虫科幼虫 Coccinellidae larvae	0.44					0.09	0.12	+
长足虻科 Dolichopodidae	0.44					0.09	0.12	+
合计 Total	82.22ab	118.86a	86.00ab	49.50b	46.67b	76.65	100	
类群数 Group number	5.33a	4.57ab	4.63ab	3.50ab	2.59b	4.11		

+++为优势类群,个体数占总捕获量 10%以上 Dominant group, individual number is more than 10% of total individuals; ++为常见类群,个体数占总捕获量 1—10% Frequent group, individual number is between 10% and 1% of total individuals; +为稀有类群,个体数占总捕获量 1%以下 Rare group, individual number is less than 1% of total individuals。大、小写字分别表示大型土壤动物群落个体密度和类群数的差异($P < 0.05$)。下同 Same below。

表 3 不同荒漠化阶段主要大型土壤动物类群的比例及多度(%)

Table 3 Proportion and abundance of main soil macrofauna groups in different desertification stages (%)

类群 Groups/生境 Habitats	I	II	III	IV	V
蚁科 Formicidae	49.19(+++)	72.12(+++)	50.00(+++)	36.36(+++)	40.00(+++)
蜘蛛目 Araneida	3.78(++)	4.81(++)	2.91(++)	6.06(++)	2.86(++)
金龟子总科幼虫 Scarabaeidae larvae	17.30(+++)	12.50(+++)	30.81(+++)	32.32(+++)	45.71(+++)
步甲科 Carabidae	4.86(++)	0.48(+)	1.74(++)	4.04(++)	
步甲科幼虫 Carabidae larvae	0.54(+)	1.44(++)	1.74(++)	1.01(++)	
拟步甲科 Tenebrionidae	5.95(++)	0.48(+)	4.07(++)	1.01(++)	2.86(++)
拟步甲科幼虫 Tenebrionidae larvae	1.08(++)			1.01(++)	
叶甲科幼虫 Chrysomelidae larvae	7.57(++)	2.40(++)	2.33(++)	5.05(++)	2.86(++)
叶甲科 Chrysomelidae		0.48(+)		2.02(++)	1.43(++)
象甲科幼虫 Curculionidae larvae	0.54(+)	0.96(+)	1.16(++)	5.05(++)	

续表

类群 Groups/生境 Habitats	I	II	III	IV	V
天牛科幼虫 Cerambycidae larvae				2.02(++)	
叶蝉总科 Cicadellidea			0.58(+)	1.01(++)	
土蝽科 Cydnidae	2.70(++)				
半翅目若虫 Hemiptera nymph	3.24(++)	0.48+			1.43(++)
双翅目幼虫 Diptera larvae	1.08(++)	2.40(++)	2.33(++)	2.02(++)	1.43(++)
鳞翅目幼虫 Coleoptera larvae	0.54(+)	0.48(+)		1.01(++)	1.43(++)

2.2.2 土壤动物类群和个体密度垂直分布变化

短花针茅草原各种生境大型土壤动物类群数和个体密度的垂直分布均为 0—10cm > 10—20cm, 呈表聚性。0—10cm 土层大型土壤动物类群数变化范围为 2—5 类, 10—20cm 土层 1—2 类; 0—10cm 土层个体密度为 3.7—99.4 只/m², 10—20cm 土层 12.0—27.6 只/m²。各荒漠化阶段 0—10cm 土层大型土壤动物类群数差异显著 ($P < 0.05$), 但在荒漠化初中期并不具有统计学意义, 到极重度荒漠化 (V) 阶段才显示出与未荒漠化 (I) 生境的显著差异 ($P < 0.05$); 各荒漠化阶段 10—20cm 土层土壤动物类群数没有显著差异 (图 2 (I))。荒漠化过程中个体密度的垂直分布变化有所不同, 0—10cm 和 10—20cm 土层大型土壤动物个体密度均具有显著差异 ($P < 0.01$)。其中 0—10cm 土层是轻度荒漠化 (II) 与其他所有阶段差异显著, 重度 (IV) 和极重度荒漠化 (V) 生境在 10—20cm 土层均显示出与未荒漠化 (I) 生境的显著差异 (图 2 (II))。

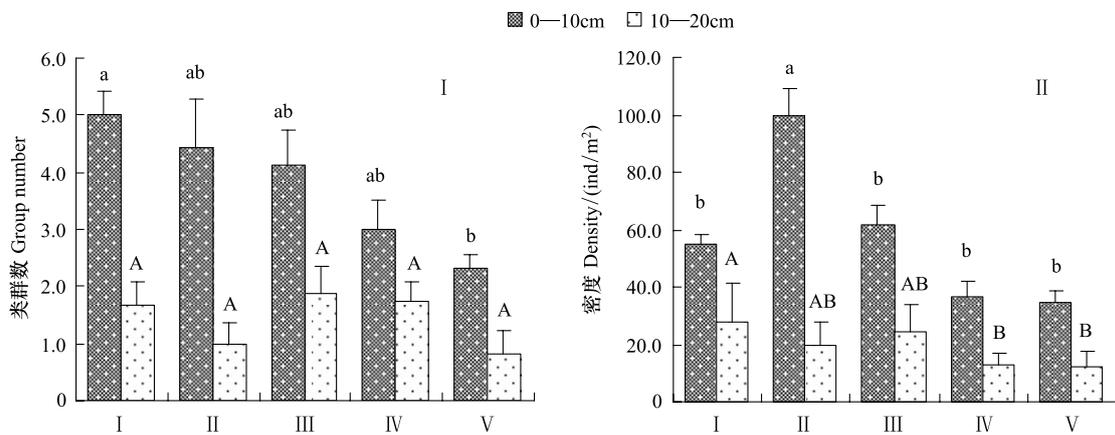


图 2 不同荒漠化阶段大型土壤动物类群数和个体密度垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of group and individual density of soil macrofauna in different desertification stages

大、小写字母分别表示不同土层各生境间大型土壤动物差异 ($P < 0.05$)

2.2.3 土壤动物群落生物多样性变化

分析发现, 大型土壤动物群落丰富度、香浓多样性和均匀度指数从未荒漠化 (I) 到极重度荒漠化 (V) 基本呈降低趋势, 最高值均出现在未荒漠化 (I) 阶段, 最低值出现在极重度荒漠化 (V) 阶段, 但香浓多样性和均匀度指数在中度荒漠化 (III) 阶段稍有升高; 而优势度指数基本呈相反的变化趋势 (表 4)。方差分析显示, 丰富度、香浓多样性、均匀度和优势度指数均具有显著性差异 ($P < 0.01$; $P < 0.01$; $P < 0.05$; $P < 0.01$)。其中, 未荒漠化 (I) 阶段香浓多样性指数与轻度 (II) 和极重度荒漠化 (V)、重度 (IV) 与未荒漠化 (I) 和极重度荒漠化 (V) 阶段之间差异显著 ($P < 0.05$); 重度 (IV) 和极重度 (V) 与未荒漠化 (I)、轻度荒漠化 (II) 和重度荒漠化 (III) 阶段的丰富度指数差异显著 ($P < 0.05$), 其他均无显著差异; 未荒漠化 (I) 和重度荒漠化 (III) 阶段的均匀度指数与极重度荒漠化 (V) 差异显著 ($P < 0.05$), 其他荒漠化生境之间无显著差异 (表 4)。

2.3 不同荒漠化生境大型土壤动物排序

采用对应分析 (CA) 对处于不同荒漠化阶段短花针茅荒漠草原的大型土壤动物群落进行了排序 (图 3)。

大型土壤动物 CA 排序的特征值为 1.000, 四个排序轴的特征值分别为 0.586、0.252、0.106 和 0.056, 排序轴 Axis1 解释了 58.6% 的生境和动物物种变化, 前两个排序轴解释了 83.8% 的生境和大型土壤动物物种变化。从图 3 可以看出, 未荒漠化(I)和轻度荒漠化(II)相邻较近且被排序轴 Axis1 把它们与中度(III)和重度荒漠化(IV)生境分开, 被排序轴 Axis2 把它们与极重度荒漠化(V)分开。分析各大型土壤动物类群与生境的关系可知, 不同的土壤动物对环境的偏好明显不同。

表 4 不同荒漠化阶段大型土壤动物生物多样性指数

Table 4 Biodiversity indexes of soil macrofauna in different desertification stages

生物多样性指数 Biodiversity index	丰富度指数 Margalef's index	香浓多样性指数 Shannon-Wiener index	均匀度指数 Pielou index	优势度指数 Simpson's index
I	1.14±0.06a	1.32±0.08a	0.85±0.06a	0.36±0.04b
II	0.99±0.03a	0.90±0.08b	0.81±0.05a	0.53±0.04ab
III	0.98±0.04a	1.06±0.04ab	0.83±0.03a	0.47±0.06b
IV	0.77±0.04b	0.90±0.06b	0.78±0.06a	0.50±0.06ab
V	0.62±0.07b	0.60±0.04c	0.65±0.02a	0.61±0.03a

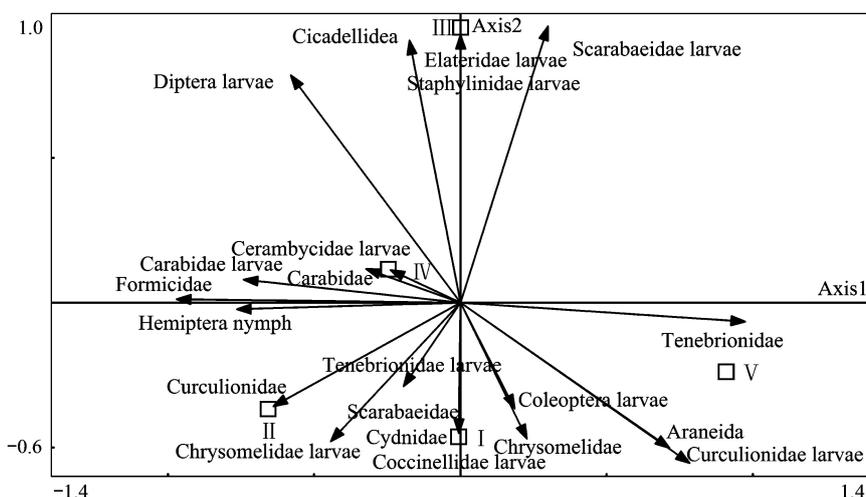


图 3 短花针茅草原不同荒漠化生境和土壤动物的对应分析

Fig. 3 Correspondence analysis of soil macrofauna and habitats in different desertification stages

蚁科 Formicidae; 金龟子总科幼虫 Scarabaeidae larvae; 蜘蛛目 Araneida; 叶甲科幼虫 Chrysomelidae larvae; 拟步甲科 Tenebrionidae; 双翅目幼虫 Diptera larvae; 金龟子总科 Scarabaeidae; 步甲科 Carabidae; 土蝽科 Cydnidae; 半翅目若虫 Hemiptera nymphae; 象甲科幼虫 Curculionidae larvae; 拟步甲幼虫 Tenebrionidae larvae; 步甲科幼虫 Carabidae larvae; 鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae; 叶甲科 Chrysomelidae larvae; 隐翅虫幼虫 Staphylinidae larvae; 瓢虫科幼虫 Coccinellidae larvae; 天牛科幼虫 Cerambycidae larvae; 叶蝉总科 Cicadellidea; 象甲科 Curculionidae; 叩甲科幼虫 Elateridae larvae

2.4 土壤动物与环境因子的关系

由大型土壤动物与环境因子 RDA 排序的结果(表 5)可知, 植物群落地上生物量、土壤有机质、全氮、含水量以及电导率与排序轴 Axis1 和 Axis2 呈负相关, 土壤容重和 pH 与两个轴均呈正相关, 灌木生物量与排序轴 Axis1 呈正相关, 与排序轴 Axis2 成负相关。土壤全氮与排序轴 Axis2 的相关性较大, 土壤 pH 与排序轴 Axis1 的相关性较大, 其他因子与同一排序轴的相关性基本相似, 但与排序轴 Axis2 的相关性明显大于与 Axis1 的相关性。由此可知, 排序轴 Axis1 主要反映的是土壤酸碱性, 排序轴 Axis2 反映的是土壤肥力和植被状况。

由图 4 可以看出, 重度荒漠化(IV)和极重度荒漠化(V)生境沿着排序轴 Axis1 由左至右交错位于排序轴 Axis2 两侧, 而轻度荒漠化(II)生境主要分布在该轴的左侧; 未荒漠化(I)生境主要分布在排序轴 Axis1 的上侧, 中度荒漠化(III)生境分布规律不明显。由此可知排序轴 Axis1 和 Axis2 基本反映了不同荒漠化生境的

生态梯度。生境制约着大型土壤动物的分布状况,土壤全氮、有机质、含水量及地上生物量对步甲科动物、象甲科幼虫及叶甲科影响较大且均呈正相关关系,而蜘蛛和金龟子总科幼虫受土壤酸碱度影响较大且呈正相关,灌木生物量对鳞翅目幼虫影响明显,其余大型土壤动物的分布受土壤和植被因子影响较小。

表 5 环境因子与排序轴相关系数、特征值和解释方差

Table 5 Eigenvalues, correlations, cumulative percentage variance for habitat variances

排序轴 Axis	Axis1	Axis2
生物量 Dry biomass (DB)	-0.0907	-0.2503
灌木生物量 Shrub dry biomass (SDB)	0.0933	-0.2456
土壤有机质 Soil organic matter content (SOM)	-0.0656	-0.2357
全氮 Soil total nitrogen content (TN)	-0.0872	-0.5541
土壤含水量 Soil moisture content (SM)	-0.0335	-0.2884
土壤 pH Soil pH (pH)	0.5789	0.2479
土壤电导率 Soil electric conductivity (EC)	-0.1524	-0.2454
土壤容重 Soil bulk density (SBD)	0.1189	0.1217
特征值 Eigenvalues	0.096	0.073
物种与环境关系系数 Species-environment correlations	0.663	0.767
物种环境数据变化累积比率 Cumulative percentage variance of species-environment relation	35.4%	62.4%

3 讨论

在鄂尔多斯西部短花针茅荒漠草原获得大型土壤动物 25 个类群,优势类群 2 个,为蚁科和金龟子总科幼虫,常见类群 8 个。由此可知,干旱与半干旱过渡带大型土壤动物类群还是比较丰富的,它们参与着荒漠草原生态系统物质循环和能量流动过程^[7,23]。与温带草原带其他地区相比,主要大型土壤动物类群相似,但群落个体密度和类群数有所降低,例如蚁科和鞘翅目动物在温带草原带各地区大型土壤动物群落中均占据重要地位。然而,蚁科在本研究区大型土壤动物群落中所占比例高于松嫩草原、科尔沁沙地和锡林郭勒草原,甚至达到科尔沁沙地的 2 倍^[11,24-25],揭示了蚁科在短花针茅荒漠草原生态系统物质循环与能量流动中的重要作用。值得注意的是,温带草原带各地区大型土壤动物群落占优势或常见类群地位的鞘翅目动物是不同的。在本研究区占优势的是金龟子总科幼虫(24.24%),松嫩草甸草原为象甲科幼虫(10.24%)^[24],锡林郭勒典型草原为鳃金龟科幼虫(24.28%)^[11];在科尔沁沙地,数量最多的是常见类群拟步甲幼虫(8.21%)^[25]。由此可知,温带草原带各地区大型土壤动物群落共性与差异共存,前者可能主要受热量和植被等地带性因素影响^[6,9],后者主要是受区域性因素(水分、植物群落和土壤特性等)影响的结果^[9,11,16,23-25]。

荒漠化最明显的标志之一是植被退化^[1,26],荒漠化及植被退化导致土壤环境恶化^[21,27]。荒漠化对土壤动物群落的影响主要是通过改变植被、土壤特性及食物资源而进行的^[6,10,14],土壤动物群落退化反应的是生境的变迁^[13,16,23]。研究表明,在科尔沁沙地,土壤有机碳、酸碱度及土壤含水量是影响大型土壤动物类群分布与生长的主要因素,从流动经半流动、半固定到固定沙丘,随着土壤环境和植被的改善与恢复,大型土壤动物多度、丰富度和生物多样性呈增长趋势^[15,25]。本研究中,土壤动物群落个体密度和类群、香浓多样性、丰富度及均匀度随着荒漠化进程降低,群落结构趋于简单,与刘任涛等(2012)和赵哈林等(2013)的研究结论基本一致^[28]。本研究还发现,在荒漠化进程中,土壤动物个体密度在 0—10cm 和 10—20cm 土层显著降低,而类群的显著减少只发生在 0—10cm 土层,揭示出荒漠化对土壤动物群落影响具有由个体密度到类群、由表土层到下层的规律,但尚未改变土壤动物个体密度和类群数分布的表聚性^[24]。另外,有两个问题值得注意。其一是蚁科动物个体密度的变化规律。在荒漠化进程中,蚁科动物个体密度在轻度荒漠化(Ⅱ)生境出现最高值,在重度(Ⅳ)和极重度荒漠化(Ⅴ)生境急剧降低,与刘仁涛等(2009)研究结果基本一致,说明轻度退化生

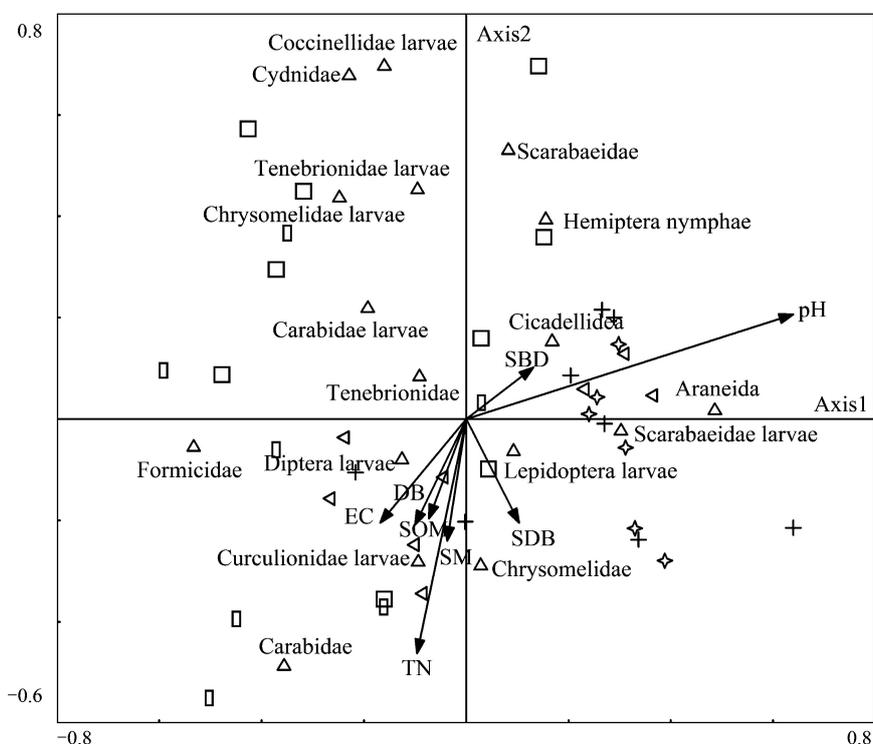


图 4 大型土壤动物与环境因子的 RDA 排序

Fig. 4 RDA dimensional ordination of soil macrofauna and environment factors

蚁科 Formicidae; 金龟子总科幼虫 Scarabaeidae larvae; 蜘蛛目 Araneida; 叶甲科幼虫 Chrysomelidae larvae; 拟步甲科 Tenebrionidae; 双翅目幼虫 Diptera larvae; 金龟子总科 Scarabaeidae; 步甲科 Carabidae; 土蝽科 Cydnidae; 半翅目若虫 Hemiptera nymphae; 象甲科幼虫 Curculionidae larvae; 拟步甲幼虫 Tenebrionidae larvae; 步甲科幼虫 Carabidae larvae; 鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae; 叶甲科 Chrysomelidae; 叶蝉总科 Cicadellidae; 瓢虫科幼虫 Coccinellidae larvae。正方形(□)未荒漠化样地 No-desertification; 长方形(▭)轻度荒漠化样地 Light-desertification; 十字形(+)中度荒漠化样地 Moderate-desertification; 左三角(<)重度荒漠化样地 Heavy-desertification; 星号(*)极重度荒漠化样地 Extreme-desertification; 三角形(△)物种 Species; DB: 地上干生物量 Dry biomass; SDB: 地上灌木干生物量 Shrub dry biobass; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter content; TN: 土壤全氮含量 Soil total nitrogen content; SM: 土壤水分含量 Soil moisture content; pH: 土壤酸碱度 Soil pH; EC: 土壤电导率 Soil electric conductivity; SBD: 土壤容重 Soil Bulk density。

境最适宜蚁科动物生存,到重度退化生境对蚁科动物具有一定的胁迫作用^[25,28]。研究发现,食物资源减少和土壤环境恶化是导致土壤动物群落个体密度下降的主要原因^[28],其中蚁科动物个体数量与地上植物密度显著正相关,与 pH 值显著负相关^[15]。结合本研究各荒漠化阶段生境特征和蚁科的食性(杂食性)可推断,蚁科动物个体密度及土壤动物群落个体密度的降低主要是食物资源减少的结果^[6,25,29]。其二是中度荒漠化(Ⅲ)生境的香浓多样性和均匀度低于未荒漠化生境(Ⅰ),而高于其它荒漠化生境。Connell 提出的中度干扰假说认为,中度干扰有利于生物多样性的保持^[30]。而贺奇等(2011)的研究也显示,适度干扰有利于步甲群落多样性、丰富度和均匀度的提高。本研究结果与中度干扰假说及贺奇等(2011)的研究结论相似但也有差异^[30-31],说明土壤动物生物多样性问题比植物多样性复杂得多,推断可能与土壤动物功能群之间的相互作用及食物网具有密切关系^[13,28]。

大量研究表明,植被和土壤环境因子影响着土壤动物分布及群落多样性^[13-15,29,32],土壤有机质、含水率、pH 值、全氮、全磷和温度对主要大型土壤动物类群(鞘翅目成虫、蚁科等)分布影响较大^[33]。在科尔沁沙地草地沙化过程中,土壤有机碳和 pH 值是影响大型土壤动物数量分布的主要因子,其中丽金龟科幼虫与土壤有机碳呈正相关,步甲科及其幼虫喜好偏碱性、电导率高并富含氮的土壤^[25]。而本研究表明,在荒漠化进程中,金龟子总科幼虫主要受土壤 pH 值影响,其个体密度变化很小而占群落个体密度比例变化较大,变化规律与科尔沁沙地的研究结果相似^[25,28],说明金龟子总科动物对温带草原适应性较其它土壤动物强,荒漠化对其个

体密度影响很小。本研究发现,步甲科和象甲科幼虫的分布主要受土壤全氮、有机质和地上生物量影响,因此其在重度荒漠化生境消失。这一结果不仅解释了刘仁涛等在科尔沁沙地的研究结果^[25],同时也说明草地荒漠化导致的植被与土壤环境恶化才是步甲科和象甲科动物减少的直接原因。研究表明,科尔沁沙地蜘蛛个体密度主要与土壤有机碳、电导率及地上植被状况关系密切^[15]。而在本研究中,蜘蛛在各荒漠化生境均为常见类群且个体密度变化没有规律性且主要受土壤 pH 值的影响,说明蜘蛛与生境因子关系因地区不同而不同,这可能与蜘蛛在不同地区可能为不同属和不同种及其对环境因子的偏好和耐受程度不同有关^[15,25,31-32]。由此可以推断,不同地区的土壤动物类群对生境的偏好和适应性及对生境变化响应模式^[25,28]既有相似性也存在差异,土壤动物群落特征及变化综合地反映了它们与生境因子、生境及荒漠化进程之间的关系。

荒漠化是土地的综合退化过程^[4,14,21]。土壤动物、生境因子、生境与荒漠化进程之间的关系综合反应了生态系统的退化过程^[15,25,28,33]。荒漠化进程中的植被退化和土壤环境恶化导致了土壤动物群落的退化^[14,15],土壤动物群落的改变又通过影响土壤特性、微生物活动及凋落物状况而影响分解过程^[6,7],进而影响生态系统的物质循环与能量流动,导致生态系统结构和功能的退化^[5,7],加剧荒漠化进程。这是一个正反馈的恶性循环过程,最终会影响到人类的生存与发展。呼吁加强荒漠化地区土壤生态系统的研究,将地上与地下生态过程联系起来,全面解读荒漠化过程,为区域荒漠化防治与生态系统健康评价提供科学依据。

4 结论

短花针茅荒漠草原大型土壤动物群落呈现出温带草原土壤动物群落的基本特征,蚁科和鞘翅目动物在温带草原生态系统中占据优势地位。在荒漠化进程中,大型土壤动物优势类群未发生变化,但土壤动物群落个体密度和类群数显著降低,香浓多样性、丰富度和均匀度指数降低,群落结构趋于简单。不同荒漠化生境土壤动物群落显示出明显的退化梯度,不同土壤动物的分布揭示了它们对生境因子的偏好和响应模式的差异。草地荒漠化对土壤动物垂直分布的影响具有由个体到类群、由表土层到下层的变化规律,但未改变土壤动物分布的表聚性。荒漠化导致的食物资源减少是蚁科动物个体密度变化的主要原因,土壤全氮、有机质和地上生物量对步甲科和象甲科幼虫个体密度影响较大,荒漠化加剧将严重影响步甲科和象甲科幼虫的生存,但对金龟子总科和蜘蛛目动物个体密度影响不大。土壤动物与生境因子、生境以及荒漠化进程之间的关系综合地反映了草地生态系统的退化过程。

致谢:感谢内蒙古师范大学和内蒙古农业大学研究生嘎毕日、秀梅、都业军、于娜和王志勇等对野外采样的贡献。

参考文献 (References):

- [1] Maestre F T, Escudero A. Is the patch size distribution of vegetation a suitable indicator of desertification processes?. *Ecology*, 2009, 90(7): 1729-1735.
- [2] Allington G R H, Valone T J. Reversal of desertification; the role of physical and chemical soil properties. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(8): 973-977.
- [3] Li F R, Zhao W Z, Kang L F, Liu J L, Huang Z G, Wang Q. Seed distribution of four co-occurring grasses around *Artemisia halodendron* shrubs in a sandy habitat. *Acta Oecologica*, 2009, 35(3): 444-451.
- [4] Shi P J, Yan P, Yuan Y, Nearing M A. Wind erosion research in China: past, present and future. *Progress in Physical Geography*, 2004, 28(3): 366-386.
- [5] Kuiper I, de Deyn G B, Thakur M P, van Groenigen J W. Soil invertebrate fauna affect N₂O emissions from soil. *Global Change Biology*, 2013, 19(9): 2814-2825.
- [6] 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.
- [7] Xin W D, Yin X Q, Song B. Contribution of soil fauna to litter decomposition in Songnen sandy lands in northeastern China. *Journal of Arid*

- Environments, 2012, 77: 90-95.
- [8] Rashid M I, de Goede R G M, Corral Nunez G A, Brussaard L, Lantinga E A. Soil pH and earthworms affect herbage nitrogen recovery from solid cattle manure in production grassland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 1-8.
- [9] Yin X Q, Song B, Dong W H, Xin W D, Wang Y Q. A review on the eco-geography of soil fauna in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(3): 333-346.
- [10] 李娜, 张雪萍, 张利敏. 三种温带森林大型土壤动物群落结构的时空动态. *生态学报*, 2013, 33(19): 6236-6245.
- [11] 刘新民, 杨劼. 干旱、半干旱区几种典型生境大型土壤动物群落多样性比较研究. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 216-222.
- [12] 朱永恒, 沈非, 余健, 张小会, 陆林. 铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征. *生态学报*, 2013, 33(5): 1495-1505.
- [13] 李晓强, 殷秀琴, 孙立娜. 松嫩草原不同演替阶段大型土壤动物功能类群特征. *生态学报*, 2014, 34(2): 442-450.
- [14] 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.
- [15] Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y, Zuo X A, Drake S. Soil macrofaunal response to sand dune conversion from mobile dunes to fixed dunes in Horqin sandy land, northern China. *European Journal of Soil Biology*, 2009, 45(5/6): 417-422.
- [16] 吴东辉, 胡克, 殷秀琴. 松嫩草原中南部退化羊草草地生态恢复与重建中大型土壤动物群落生态特征. *草业学报*, 2004, 13(5): 121-126.
- [17] 刘伟, 门丽娜, 刘新民. 内蒙古武川县农田退耕还草对粪金龟子群落的影响. *生态学报*, 2013, 33(15): 4724-4736.
- [18] Cortet J, Vauflery A G-De, Poinsoot-Balaguer N, Gomot L, Texier C, Cluzeau D. The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects. *European Journal of Soil Biology*, 1999, 35(3): 115-134.
- [19] Li X R. Study on shrub community diversity of Ordos Plateau, Inner Mongolia, Northern China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(3): 271-279.
- [20] 丁金枝, 来利明, 赵学春, 朱林海, 姜联合, 郑元润. 荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响. *生态学报*, 2011, 31(6): 1594-1603.
- [21] 刘峻杉, 高琼, 郭柯, 刘新平, 邵振艳, 张智才. 毛乌素裸沙丘斑块的实际蒸发量及其对降雨格局的响应. *植物生态学报*, 2008, 32(1): 123-132.
- [22] Ter Braak C J F, Šmilauer P. *CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5)*. Wageningen: Biometris, 2002.
- [23] Tripathi G, Ram S, Sharma B M, Singh G. Soil faunal biodiversity and nutrient status in silvopastoral systems of Indian desert. *Environmental Conservation*, 2005, 32(2): 178-188.
- [24] 刘静. 松嫩草地植被不同演替阶段大型土壤动物群落结构及动态特征研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2007: 7-12.
- [25] 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.
- [26] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 李玉霖, 苏永中. 北方农牧交错区沙漠化的生物过程研究. *中国沙漠*, 2002, 22(4): 309-315.
- [27] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征. *土壤学报*, 2002, 39(6): 877-881.
- [28] 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.
- [29] Goncharov A A, Khramova E Y, Tiunov A V. Spatial variations in the trophic structure of soil animal communities in Boreal Forests of Pechora-Ilych Nature Reserve. *Eurasian Soil Science*, 2014, 47(5): 441-448.
- [30] Connell J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science*, 1978, 199(4335): 1302-1310.
- [31] 贺奇, 王新谱, 杨贵军. 宁夏盐池荒漠草原步甲物种多样性. *生态学报*, 2011, 31(4): 923-932.
- [32] 刘继亮, 殷秀琴, 邱丽丽. 左家自然保护区大型土壤动物与土壤因子关系研究. *土壤学报*, 2008, 45(1): 130-136.
- [33] Sylvain Z A, Wall D H, Cherwin K L, Peters D P C, Reichmann L G, Sala O E. Soil animal responses to moisture availability are largely scale, not ecosystem dependent: insight from a cross-site study. *Global Change Biology*, 2014, 20(8): 2631-2643.