

DOI: 10.11766/trxb201210100404

大型土壤动物群落对高寒草甸退化的响应*

吴鹏飞 张洪芝 崔丽巍 钟红梅

(西南民族大学生命科学与技术学院, 成都 610041)

摘要 为了查明大型土壤动物群落对高寒草甸退化的响应, 2009 至 2010 年间对青藏东缘若尔盖湿地的草甸沼泽草甸、草原草甸、退化草甸和沙化草甸 4 个退化阶段的大型土壤动物群落进行了 7 次调查。结果表明: 高寒草甸的不同退化阶段大型土壤动物群落的类群组成和优势类群存在差异, 且退化和沙化对大型土壤动物群落的丰富度、密度、Shannon 多样性和群落结构均有显著影响 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)。其中退化可使带马陆目 (Polydesmida) 和鞘翅目幼虫 (Coleoptera) 等多个类群的密度显著增加 ($p < 0.05$), 而沙化则使优势类群密度显著降低 ($p < 0.05$)、常见类群和稀有类群消失。植物种类、生物量和土壤理化性质, 尤其是有效磷和速效钾含量与大型土壤动物的丰富度、密度和多样性间存在显著相关关系 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)。季节变化对大型土壤动物的群落密度和多样性有显著影响 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$), 但不同退化阶段的大型土壤动物对季节变化的响应存在差异。研究结果表明高寒草甸的中度退化能够增加大型土壤动物群落多样性, 而严重退化 (即沙化) 则显著降低土壤动物群落多样性, 且不同退化阶段大型土壤动物群落的季节动态不同。

关键词 若尔盖高寒草甸; 土壤动物; 植物群落; 土壤理化性质; 退化; 沙化

中图分类号 S154.5 **文献标识码** A

草地是陆地生态系统的重要组成部分, 约占陆地生态系统总面积的 40%^[1]。而草地生态系统的初级生产力、群落组成等对气候变化的直接及间接影响具有高度的敏感性^[2-3]。位于青藏东缘的若尔盖湿地是世界上最典型的高原湿地, 该区域不仅是黄河和长江的重要水源区, 也是高原生物多样性维持基地和世界山地生物物种的一个重要起源和分化中心。从 20 世纪 50 年代开始, 在气候变化及人类活动的影响下若尔盖湿地开始向疏干方向发展, 湿地面积呈萎缩状态^[4], 沙化草地面积逐渐扩大^[5]。沼泽湿地旱化及退化后, 植物群落^[6]及土壤养分^[7]均发生明显变化。已有研究表明土壤动物群落及其功能易受植物群落^[8]和土壤理化性质^[8-9]等环境因子变化的影响, 但目前关于高寒草甸土壤动物的研究相对较少^[10], 以至于对高寒草甸生态系统地下土壤动物群落结构及多样性在退化过程中的变化情况还不清楚。

本研究以青藏东缘若尔盖湿地范围内不同退

化阶段高寒草甸生态系统为研究对象, 其目的是查明: (1) 高寒草甸大型土壤动物群落组成及多样性等特征; (2) 高寒草甸退化对大型土壤动物的影响及主要影响因子。研究结果可以提供青藏东缘高寒草甸生态系统土壤动物多样性方面的基础资料, 还能为高寒草甸生态系统健康评价和退化高寒草甸的生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

若尔盖湿地位于青藏高原东北边缘, 属于黄河上游地区, 其地理坐标介于东经 102°08' ~ 103°39', 北纬 32°56' ~ 34°19' 之间。海拔 3 400 ~ 3 800 m, 平均海拔 3 500 m。该区属高原寒带湿润季风气候。最冷月 (1 月) 多年平均气温 -10.6℃, 绝对最低气温 -33.7℃, 最大冻土深 72 cm; 最热月 (7 月) 平均气温 10.8℃, 绝对最高气温 24.6℃, 年平均气温

* 国家自然科学基金青年基金项目 (40801092)、四川省青年基金项目 (2012JQ0030)、教育部科学技术研究重点项目 (209154)、四川省科技支撑项目 (2010SZ0126)、国家科技支撑计划项目 (2011BAK12B04-01)、中央高校基本科研业务费项目 (11NZYTH01) 和西南民族大学硕士点建设基金 (2011XWD-S071012) 联合资助

作者简介: 吴鹏飞 (1975—), 男, 河南淮滨人, 教授, 博士, 主要从事土壤生态学和恢复生态学研究。E-mail: wupf@swun.cn

收稿日期: 2012-10-10; 收到修改稿日期: 2012-12-14

0.7℃。年降雨量 600 ~ 800 mm, 其中 86% 多集中于 4 月下旬至 10 月中旬, 年均蒸发量 1 232 mm, 年均日照 2 389 h。植被以沼泽植被和草甸植被为主; 沼泽植被的优势种有木里苔草 (*Carex muliensis*)、毛果苔草 (*Carex lasiocarpa*)、乌拉苔草 (*Carex meyeriana*)、藏嵩草 (*Kobresia tibetica*) 等, 草甸植被以嵩草属 (*Kobresia* spp.)、蓼属 (*Polygonum* spp.) 植物为主, 禾本科及毒害草占有一定数量。土壤以高原草甸土、高原沼泽土、高原泥炭土为主, 成土母质多为质地均匀的粉沙和亚黏土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2009 年 4 月至 2010 年 10 月间, 在若尔盖县境内根据植物的群落组成、盖度和土壤类型的选取沼泽草甸、草原草甸、退化草甸和沙化草甸 4 种典型生境的作为固定样地, 样地大小为 50 m × 50 m 的正方形。各样地的土壤类型分别为沼泽土、草甸土、草甸土和风沙土。沼泽草甸的主要植物种类有: 垂穗披碱草 (*Elymus nutans*)、高原毛茛 (*Ranunculus tanguticus*)、火绒草 (*Leontopodium*

nanum)、珠芽蓼 (*Polygonum viviparum*)、蒲公英 (*Taraxacum maurocarpum*)、紫菀 (*Aster tataricus*)、毛茛状金莲花 (*Trollius ranunculoides*)、报春花 (*Primula malacoides*)、老鹳草 (*Geranium pylzovianum*) 等, 高度 10 ~ 30 cm, 盖度 90% 以上。草原草甸的主要种类为: 藏羊茅 (*Festuca wallichanica*)、四川嵩草 *Kobresia setchwanensis*、高原毛茛、葛缕子 (*Carum carvi*)、狼毒 (*Stellera chamaejasme*)、乳白香青 (*Anaphalis lactea*)、条叶银莲花 (*Anemone trullifolia*)、矮金莲花 (*Trollius farreri*)、垂穗披碱草、草地早熟禾 (*Poa pratensis*)、棘豆 (*Oxytropis Kansuensis*) 等, 高度 20 ~ 40 cm, 盖度 90% 以上。退化草甸主要为鹅绒委陵菜 (*Potentilla ansrina*)、嵩草 (*Kobresia bellardii*)、黄帚橐吾 (*Ligularia virgaurea*)、蒲公英、高原毛茛、棘豆等, 高度 0 ~ 5 cm, 盖度 50 ~ 70% 以上。沙化草甸的主要植物有: 垂穗披碱草、葛缕子, 高度 0 ~ 20 cm, 盖度 10% 以下。4 个退化阶段的植物种类、生物量和土壤理化性质的基本情况存在一定差异 (表 1)。

表 1 不同退化阶段的基本情况

Table 1 Characteristics of plant communities and soil properties in different degradation phases ($n = 6$)

退化阶段 Degradation phases	植物种类数 Plant species	地上生物量	地下生物量	土壤容重		含水量	有机质
		Aboveground biomass ($g\ m^{-2}$)	Below-ground biomass ($g\ m^{-2}$)	Bulk density ($g\ cm^{-3}$)	pH	Water content (%)	SOM ($g\ kg^{-1}$)
沼泽草甸 ^①	15a	244 ± 72b	1796 ± 666b	0.5 ± 0.1c	6.1 ± 0.2b	80.4 ± 8.3a	145.1 ± 10.2a
草原草甸 ^②	14a	494 ± 165a	3512 ± 1755a	0.9 ± 0.1b	6.0 ± 0.2b	29.4 ± 8.2b	69.5 ± 8.0c
退化草甸 ^③	8b	216 ± 65b	437 ± 289c	0.9 ± 0.1b	7.1 ± 0.1a	35.8 ± 6.5b	102.7 ± 6.9b
沙化草甸 ^④	2c	103 ± 41c	164 ± 94c	1.4 ± 0.1a	8.5 ± 0.0c	5.1 ± 0.8c	4.3 ± 1.1d

退化阶段 Degradation phases	全氮 TN ($g\ kg^{-1}$)	全磷 TP ($g\ kg^{-1}$)	全钾 TK ($g\ kg^{-1}$)	速效氮 AN ($mg\ kg^{-1}$)	有效磷 AP ($mg\ kg^{-1}$)	速效钾 AK ($mg\ kg^{-1}$)
沼泽草甸	6.4 ± 0.5a	1.1 ± 0.1ab	14.4 ± 0.2b	181.6 ± 5.9a	8.6 ± 1.4b	152.2 ± 55.1b
草原草甸	3.6 ± 0.3c	1.2 ± 0.1a	18.6 ± 0.3a	98.7 ± 9.6b	7.1 ± 1.2b	361.4 ± 164.4a
退化草甸	4.4 ± 0.4b	1.0 ± 0.1b	18.2 ± 0.4a	113.4 ± 7.2b	21.2 ± 5.2a	503.0 ± 15.7a
沙化草甸	0.3 ± 0.1d	0.4 ± 0.0c	11.8 ± 0.6c	22.7 ± 4.4c	3.0 ± 0.2b	35.8 ± 2.4c

注: 1) 沼泽草甸 Swampy meadow, 草原草甸 Grassland meadow, 退化草甸 Degraded meadow, 沙化草甸 Desertifying meadow。2) 同一列中字母不同表示表示差异显著 ($p < 0.05$) Different letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level

1.2.2 土壤动物调查及鉴定 在每个样地内随机选取 6 个 50 cm × 50 cm 的样方, 每个样方间隔距离 5 m 左右。用铁铲挖掘深度 0 ~ 15 cm 范围内的土壤, 手捡法收集大型土壤动物, 并放入 75% 酒精溶液内保存。2009 年 4 月至 2010 年 10 月间, 对若

尔盖高寒草甸进行 7 次调查, 共调查大型土壤动物样方 168 个 (4 个阶段 × 7 次调查 × 6 个重复)。

实验室内根据《中国土壤动物检索图鉴》^[11] 在体视显微镜 (Olympus SZX16) 下对大型土壤动物进行鉴定。除少数类群外, 大多数土壤动物鉴定到科。

1.3 数据分析处理

群落结构分析:根据捕获量占捕获总量的百分比来划分各类群数量等级,个体数量大于捕获总量10%以上者为优势类群,1%~10%者为常见类群,不足1%者为稀有类群。

多样性分析:用类群数表示土壤动物类群丰富度(Richness),平均密度表示丰度(Abundance),Shannon 指数 $H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$ 表示相对多样性,式中, S 为类群数, P_i 为第 i 类群的百分比。

群落排序分析:由于调查样方较多,首先将各季节每个阶段6个样方的调查数据综合以降低样方数;其次,在目分类阶元上对大型土壤动物各大类群的数量进行统计,删除仅出现1次且平均密度低于4个 m^{-2} 的稀有类群,使用于排序的土壤动物可以反映出整个土壤动物群落的特征。采用主成分分析(Principal component analysis, PCA)和相关分析研究不同退化阶段土壤动物群落结构差异及其与环境因子的关系,分析过程中对数据进行 $\lg(x+1)$ 转换。采用 Canoco for Windows 4.5 软件进行分析和作图。

统计分析:对与服从正态分布的数据,利用重复调查资料的方差分析(Repeated measures ANOVA)和单因素方差分析(One-way ANOVA)分别对不同退化阶段和季节间土壤动物群落多样性的差异显著性进行检验,如果差异显著则用 LSD 法(方差齐性)和 Tamhane's T2 法(方差不齐)进行多重比较分析。对于不服从正态分布的数据,利用 $\lg(x+1)$ 转换,如果仍不服从正态分布,则用 Kruskal Wallis Test(H) 法进行非参数检验。分析处理使用 EXCEL 2003 和 SPSS 15.0 软件。

2 结果

2.1 若尔盖高寒草甸大型土壤动物群落组成

2009 至 2010 年间在若尔盖高寒草甸共捕获大型土壤动物 117 类,隶属于 6 纲 20 目至少 90 科(表 1)。优势类群有奇马陆科(Paradoxosomatidae)、象甲科(Curculionidae)幼虫和矛带马陆科(Doratomyrmecidae),分别占总捕获量的 30.46%、23.19% 和 15.33%,共占 68.98%;常见类群有金龟甲科(Scarabaeidae)幼虫、尖眼覃蚊科(Sciaridae)幼虫、叶甲科(Chrysomelidae)幼虫、蝇科(Muscidae)幼虫、路舍蚁属(*Tetramorium*)和象甲科成虫 6 类,共占

17.58%;稀有类群共 111 类,仅占全部个体的 13.44%。

在纲分类阶元上,以昆虫纲(Insecta)的种类和个体数最多,有 11 目 74 科 113 类,占全部个体数的 53.47%。其中,鞘翅目(Coleoptera)有 31 科 41 类,占全部个体数的 40.63%;双翅目(Diptera)18 科 18 类,占 6.94%;膜翅目(Hymenoptera)2 科至少 14 类,2.10%;鳞翅目(Lepidoptera)至少 4 科 10 类,占 1.66%;半翅目(Hemiptera)7 科 9 类,占 0.68%;其他类群至少 7 目 11 科 11 类,1.46%。其次为倍足纲(Diulopoda),有 1 目 2 科 2 类,占总个体数的 45.87%。寡毛纲(Oligochaeta)4 目 5 科 5 类,占 0.52%。蛛形纲(Arachnida)2 目 5 科 5 类,占 0.11%。唇足纲(Chilopoda)和综合纲(Symphyla)均为 1 目 1 科 1 类,分别占 0.08% 和 0.02%。由种类组成和个体数来看,昆虫纲是若尔盖高寒草甸大型土壤动物的主要组成部分。

2.2 大型土壤动物群落多样性动态

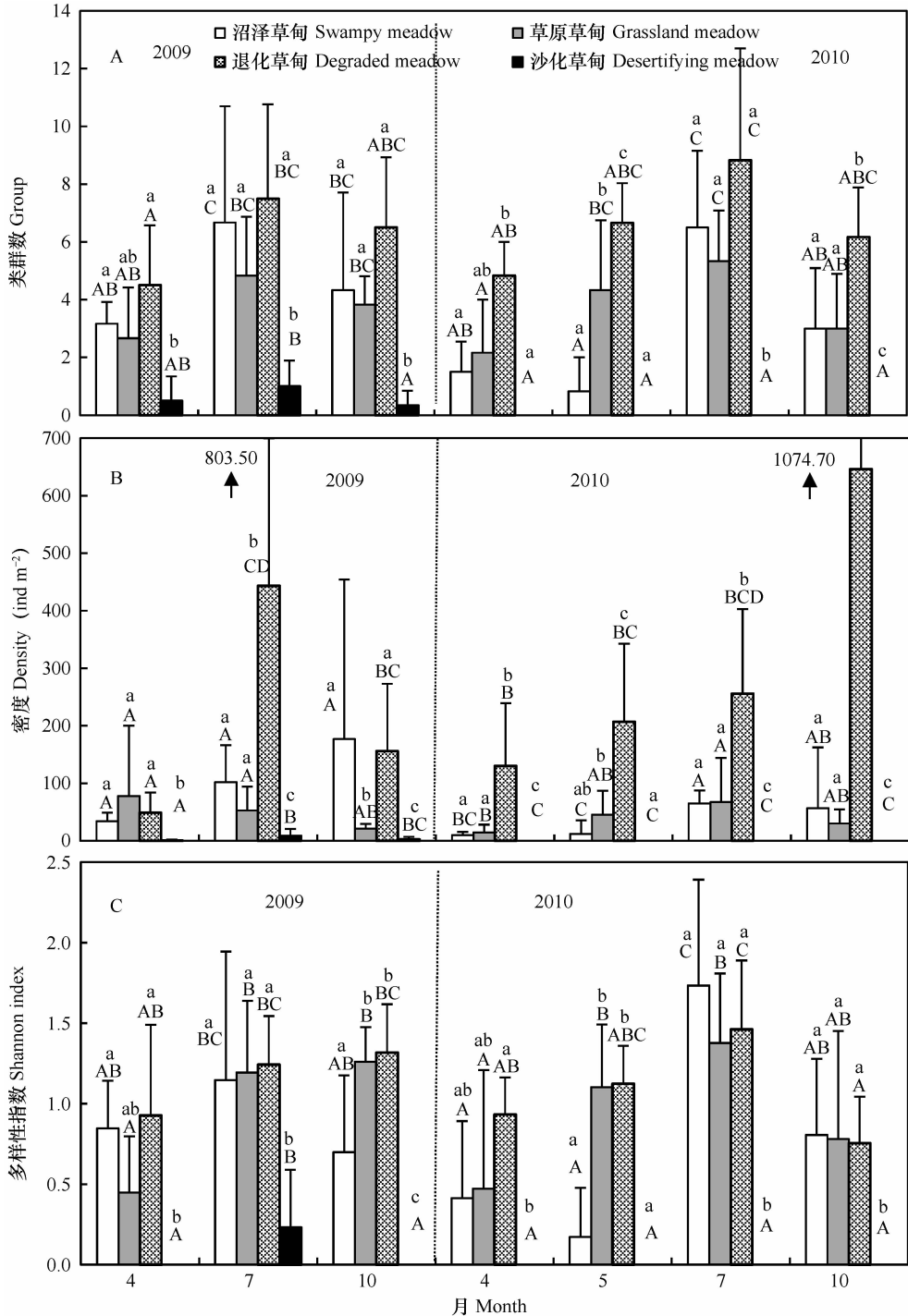
4 个退化阶段的大型土壤动物类群数以退化草甸最高,其次是草原草甸和沼泽草甸,沙化草甸最低(图 1A)。各阶段的类群数在 4 至 7 月间均呈增加趋势,而 7 至 10 月间则呈下降趋势;年间变化趋势相同。高寒草甸的退化($F = 54.77, p < 0.001$)、季节变化($F = 8.58, p < 0.001$)及生境 × 季节交互作用($F = 1.85, p < 0.05$)均对类群数有显著影响;其中沼泽草甸、草原草甸和退化草甸的类群数均显著高于沙化草甸,夏季(7 月份)的类群数显著高于冬季(4 月)(图 1A)。类群数动态表明,高寒草甸的退化和季节变化对大型土壤动物的物种丰富度有显著影响。

群落密度在 4 个退化阶段间亦呈现明显变化(图 1B)。除 2009 年 4 月、10 月外,退化草甸的密度均高于其他 3 个阶段,沼泽草甸和草原草甸的密度变化相对较小。此外,沼泽草甸的群落密度在 4 月至 10 月间逐渐增加,年间变化趋势一致;草原草甸的群落密度在 2009 年的 4 月至 10 月间持续下降,2010 年 4 月至 10 月间呈波动性变化;退化草甸在 2009 年各月份间呈波动性变化,2010 年则持续增加。方差分析结果表明群落密度易受退化($F = 163.45, p < 0.001$)和季节变化($F = 9.18, p < 0.001$)及生境 × 季节交互作用($F = 4.26, p < 0.001$)的影响,退化草甸的密度显著高于沼泽草甸和草原草甸(2009 年 4 月、10 月除外),且三者均显著高于沙化草甸(图 1B)。

除 2009 年 4 月和 2010 年的 4 月、5 月外,沼泽

草甸、草原草甸和退化草甸 3 个阶段间的 Shannon 指数显著高于沙化草甸 ($p < 0.01$) (图 1C)。2009 年 4 月至 10 月间,沼泽草甸、草原草甸和退化草甸 3 个阶段的 Shannon 指数均呈增加趋势,但 2010 年

则以 7 月最高。方差分析结果表明高寒草甸的退化 ($F = 63.73, p < 0.001$)、季节变化 ($F = 8.86, p < 0.001$) 及生境 \times 季节交互作用 ($F = 2.66, p < 0.01$) 对大型土壤动物群落多样性也均有显著影响。



注: 不同大写字母表示同一生境不同季节间的差异显著 ($p < 0.05$), 不同小写字母表示相同季节不同生境间差异显著 ($p < 0.05$) Note: Different capital letters indicate significant differences among seasons of the same habitat, and lowercase letters indicate significant differences among habitats in the same season

图 1 不同退化阶段大型土壤动物群落多样性

Fig. 1 Diversities of soil macrofauna communities of different phases of the degradation process of Zoigê alpine meadow

2.3 高寒草甸退化对大型土壤动物群落的影响

主成分分析 (PCA) 对大型土壤动物群落的排序结果见图 2。PC1 和 PC2 两排序轴将大型土壤动物群落分为 3 组, 沼泽草甸和草原草甸为一组, 退化草甸和沙化草甸各为一组, 表明高寒草甸的退化及沙化对大型土壤动物群落结构有显著影响, 而退化草甸和沙化草甸大型土壤动物群落结构的差异也反映了生境条件的不同。

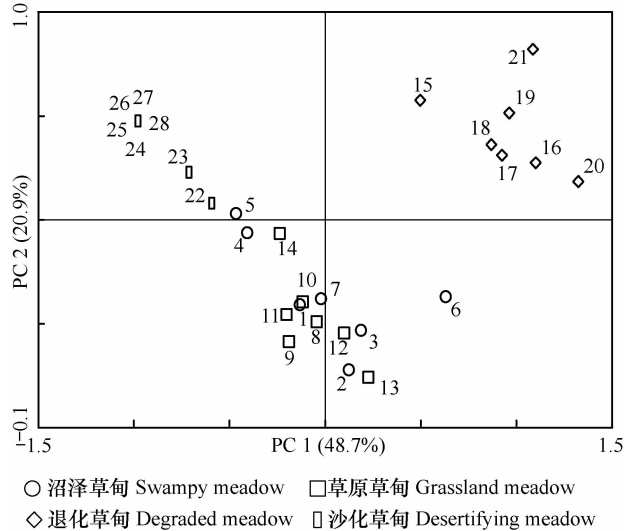


图 2 大型土壤动物群落的 PCA 二维排序

Fig. 2 Principal component analysis of soil macrofauna communities in different phases

2.4 不同退化阶段主要类群的密度动态

大型土壤动物群落的 13 个主要类群密度在不同退化阶段间存在差异 (表 2)。双翅目幼虫密度以

沼泽草甸阶段最高, 鞘翅目成虫和膜翅目的密度以草原草甸阶段最高, 带马陆目、鞘翅目幼虫和鳞翅目幼虫等 9 个类群的密度以退化草甸阶段最高, 所有类群的密度均以沙化草甸最低。除直翅目 (Orthoptera)、蜘蛛目 (Araneae) 和石蜈蚣目 (Lithomorpha) 外, 其他类群的密度在 4 个退化阶段间均存在显著差异 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)。从多重比较结果 (表 2) 可知, 高寒草甸的中度退化可使部分土壤动物类群, 尤其是带马陆目和鞘翅目幼虫的密度显著增加 ($p < 0.05$); 严重退化 (即沙化) 则使优势类群密度显著降低 ($p < 0.05$), 常见类群和稀有类群消失。

2.5 环境因子与大型土壤动物间的关系

相关分析结果 (表 3) 表明, 大型土壤动物的类群数与植物种类 ($p < 0.05$)、土壤理化性质 (含水量除外) 有显著相关关系 ($p < 0.01$); 群落密度与有机质、全氮、全钾、有效磷和速效钾的含量呈显著正相关 ($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$); Shannon 多样性指数则与植物种类 ($p < 0.01$)、地上生物量 ($p < 0.05$) 和土壤养分 (有效磷除外) 呈显著正相关 ($p < 0.01$), 与土壤容重和 pH 呈显著负相关 ($p < 0.01$)。在 13 个主要类群中, 鞘翅目幼虫密度与植物种类、地下生物量和土壤化学性质呈显著相关 ($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$), 其次是鞘翅目成虫, 其他类群的密度与环境因子的相关性较弱。总体上看, 环境因子中有效磷和速效钾的含量与大型土壤动物群落的关系较为密切, 而大型土壤动物中的鞘翅目最易受环境因子变化的影响。

表 2 不同退化阶段大型土壤动物主要大类群的密度

Table 2 Densities of the major soil macrofauna groups in different degradation phases (ind m^{-2})

主要类群 Major groups	沼泽草甸 Swampy meadow	草甸草原 Grassland meadow	退化草甸 Degraded meadow	沙化草甸 Desertifying meadow	差异性 Significance
带马陆目 Polydesmida	0.29 ± 0.29b	0.00 ± 0.00b	174.29 ± 43.51a	0.00 ± 0.00b	H = 121.23, $p < 0.01$
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	38.48 ± 6.47ab	27.81 ± 8.52b	60.95 ± 9.41a	0.95 ± 0.38c	F = 57.87, $p < 0.01$
双翅目幼虫 Diptera larvae	21.71 ± 15.83a	3.33 ± 0.76b	5.71 ± 0.86b	0.00 ± 0.00c	H = 44.87, $p < 0.01$
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	3.43 ± 1.03a	4.10 ± 1.15a	3.62 ± 1.40a	0.29 ± 0.16b	H = 15.42, $p < 0.01$
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	0.19 ± 0.13b	1.71 ± 0.58a	4.68 ± 2.05a	0.10 ± 0.01b	H = 19.03, $p < 0.01$
膜翅目 Hymenoptera	0.38 ± 0.23b	5.71 ± 2.19a	0.29 ± 0.21b	0.00 ± 0.00b	H = 28.76, $p < 0.01$
同翅目 Homoptera	1.33 ± 0.60ab	0.19 ± 0.19bc	2.57 ± 1.20a	0.00 ± 0.00c	H = 10.24, $p < 0.05$
半翅目 Hemiptera	0.38 ± 0.23ab	0.38 ± 0.18ab	0.95 ± 0.47a	0.00 ± 0.00b	H = 5.07, $p > 0.05$
正蚓目 Lumbricida	0.00 ± 0.00b	0.10 ± 0.10b	1.14 ± 0.48a	0.00 ± 0.00b	H = 17.85, $p < 0.01$
小蚓类 Microdrile oligochaetes	0.00 ± 0.00b	0.10 ± 0.10b	0.48 ± 0.24a	0.00 ± 0.00b	H = 8.84, $p < 0.05$
直翅目 Orthoptera	0.00 ± 0.00b	0.00 ± 0.00b	0.29 ± 0.21a	0.00 ± 0.00b	H = 6.04, $p > 0.05$
石蜈蚣目 Lithomorpha	0.00 ± 0.00	0.10 ± 0.10	0.19 ± 0.13	0.00 ± 0.00	H = 3.71, $p > 0.05$
蜘蛛目 Araneae	0.10 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.10 ± 0.10	0.00 ± 0.00	H = 2.01, $P > 0.05$

注: 平均值 ± 标准误。H 表示非参数检验, 同行数据间不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。Note: Means ± SE. H denotes non-parametric Kruskal - Wallis test and the different letters in the same row represent significant differences at 0.05 level

表 3 土壤动物群落与环境因子间的相关系数

Table 3 Correlation indices between soil macrofauna community and environmental factors ($n = 28$)

土壤动物群落 Soil macrofauna community	PS	AB	BB	BD	WC	SOM	TN	TP	TK	AN	AP	AK	pH
多样性 Diversity indices													
类群数 Richness	0.40*	0.31	0.10	-0.44*	0.32	0.56**	0.59**	0.73**	0.69**	0.48**	0.61**	0.74**	-0.53**
密度 Density	0.00	-0.09	-0.22	-0.20	0.11	0.40*	0.38*	0.35	0.44*	0.29	0.74**	0.56**	-0.12
多样性指数 Shannon index	0.58**	0.44*	0.33	-0.51**	0.36	0.50**	0.55**	0.76**	0.66**	0.50**	0.31	0.57**	-0.70**
主要类群 Major groups													
带马陆目 Polydesmida	-0.15	-0.13	-0.25	-0.01	-0.06	0.17	0.14	0.13	0.30	0.09	0.57**	0.41*	0.06
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	0.38*	0.15	0.36	-0.36	0.29	0.46*	0.49**	0.50**	0.51**	0.38*	0.44*	0.47*	-0.41*
双翅目幼虫 Diptera larvae	0.22	-0.09	0.03	-0.28	0.28	0.34	0.37	0.27	-0.02	0.38*	0.07	-0.10	-0.28
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	0.34	0.19	0.05	-0.33	0.23	0.33	0.40*	0.47*	0.35	0.30	0.19	0.48**	-0.39*
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	-0.08	0.00	-0.18	-0.04	0.03	0.14	0.14	0.15	0.28	0.07	0.48**	0.35	0.00
膜翅目 Hymenoptera	0.24	0.29	0.11	-0.02	-0.09	-0.07	0.03	0.27	0.29	-0.05	-0.14	0.39*	-0.26
同翅目 Homoptera	0.06	-0.10	-0.10	-0.13	0.05	0.17	0.15	0.15	0.08	0.14	0.10	0.15	-0.11
半翅目 Hemiptera	0.08	0.08	-0.12	-0.19	0.12	0.25	0.27	0.29	0.25	0.20	0.40*	0.32	-0.16
正蚓目 Lumbricida	-0.07	-0.13	-0.17	-0.03	-0.06	0.14	0.09	0.16	0.34	0.06	0.47*	0.42*	0.02
小蚓类 Microdrile oligochaetes	-0.08	0.14	-0.13	-0.06	-0.01	0.16	0.15	0.19	0.29	0.09	0.52**	0.30	-0.03
直翅目 Orthoptera	-0.07	-0.11	-0.19	-0.02	-0.04	0.09	0.06	0.14	0.17	0.01	0.16	0.32	0.00
石蜈蚣目 Lithomorpha	-0.01	0.23	0.02	-0.03	-0.05	0.10	0.07	0.21	0.30	0.05	0.28	0.22	-0.12
蜘蛛目 Araneae	0.23	-0.14	0.02	-0.35	0.35	0.35	0.33	0.21	-0.03	0.34	0.05	0.03	-0.21

注:双尾检验, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ Note: Two - tailed test, and * and ** represent significant difference at 0.05 and 0.01 levels

3 讨 论

3.1 退化对大型土壤动物群落的影响

随着若尔盖高寒草甸的退化,大型土壤动物群落组成发生明显变化,尤其是沙化草甸阶段的类群数、密度和 Shannon 多样性指数均显著低于沼泽草甸、草原草甸和退化草甸($p < 0.01$)。研究表明生态系统的地上过程对地下生物以及生态系统的功能和稳定性均有决定性的影响^[12],而草地生态系统的地上植物群落时空变化格局则可以影响地下土壤动物的组成^[13]。若尔盖高寒草甸的植物种类数对大型土壤动物多样性有显著影响(表 3),已有研究表明草地植物群落的物种组成能够影响土壤动物群落组成和结构^[8,14-15]。其原因是植物群落多样性的提高可增加初级生产力,这不仅可为土壤动物提供充足的食物来源,满足其生长发育需要,还能能为土壤动物提供适宜的栖息环境^[16]。由本文 1.2.1 节知随着若尔盖高寒草甸退化程度的加剧,植物群落盖度和高度明显下降,组成种类也显著降低($F = 255.73, p < 0.01$),其中退化草甸和沙化草甸的种类数显著低于沼泽草甸和草原草甸($p < 0.05$)。其他

研究也表明若尔盖沼泽植物群落随退化而改变^[6]。因此,高寒草甸植物群落的变化是影响大型土壤动物结构和多样性的重要因素。此外,草地生态系统地上地下的凋落物质输入^[17]以及根系分泌物^[18]也可影响土壤动物多样性。

已有研究表明生产力是决定生态系统生物多样性的两个关键因子之一^[19]。由表 3 知若尔盖高寒草甸的地上生物量与 Shannon 多样性指数间呈显著正相关($p < 0.05$),而 4 个退化阶段间的地上生物量呈显著下降趋势($p < 0.01$)(表 1),表明高寒草甸初级生产力的下降也对大型土壤动物多样性产生一定的影响。而若尔盖高寒草甸的植物群落生产力与物种多样性间存在显著的正相关关系($r = 0.66, p < 0.01$),因此植物群落的物种多样性不仅可以直接影响土壤动物,还可以通过影响初级生产力来间接影响土壤动物多样性。由此可知高寒草甸植物群落的物种多样性与地下土壤动物多样性存在密切的关系。

相关分析结果(表 3)表明高寒草甸大型土壤动物群落的类群数、密度和多样性也与土壤有机质、氮、磷、钾含量和 pH 有显著相关关系。其他研究也表明土壤动物的个体密度与土壤理化性质有密切

的关系^[9]。由表 1 知随高寒草甸退化的加重,土壤容重和 pH 呈波动性增加($p < 0.01$),有机质、全效养分和速效养分含量则呈波动性下降($p < 0.01$)。其他研究也发现若尔盖高寒草甸不同退化阶段土壤养分呈明显变化^[7]。Hemerik 和 Brussaard^[8]研究发现土壤动物的群落密度与草地土壤的营养状况有关,且最贫瘠土壤中大型土壤动物的数量最低。因此,高寒草甸退化过程中土壤养分含量的下降也可能是导致大型土壤动物群落密度和多样性下降的原因。已有研究表明湿度是影响土壤动物分布的重要因素之一^[20]。在若尔盖高寒草甸生态系统中,土壤含水量与土壤动物群落密度及多样性间并无显著相关关系(表 3)。这可能是因为若尔盖高寒草甸的降水量相对丰富,土壤水分不是土壤动物群落的限制因子。pH 除了与土壤动物群落的类群数和多样性指数显著负相关外,还与有效磷之外的其他环境因子有显著相关(主要为负相关)($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)。在高寒草甸的 4 个退化阶段间 pH 呈显著增加趋势($p < 0.01$),因此 pH 的增加可在一定程度上降低大型土壤动物群落多样性。

在植被和土壤等环境因子的综合影响下,4 个退化阶段大型土壤动物的类群数(依次为 59、80、62 和 13 个)呈波动性下降($p < 0.01$);特有类群分别为 16、27、17 和 1 个,共有类群为象甲科幼虫和金龟甲科幼虫等 7 类(表 1)。各退化阶段的优势类群也存在差异。象甲科幼虫为 4 个退化阶段的共同优势类群。此外,沼泽草甸的优势类群还有金龟甲科幼虫和尖眼罩蚊科幼虫,草原草甸和沙化草甸还有金龟甲科幼虫,退化草甸有奇马陆科和矛带马陆科。以上变化表明高寒草甸的退化对大型土壤动物群落的物种组成影响较大,而优势类群和特有类群的差异也反应出不同退化阶段的环境异质性。

不同退化阶段间土壤动物群落密度差异显著,而其对应的 Shannon 多样性指数则无显著差异(如 2009 和 2010 年的 7 月、10 月),Cole 等^[16]对温带草原土壤动物研究也发现这一现象,并认为其原因是在食物等资源充足的情况下土壤动物群落内不会发生激烈的竞争排斥。而各类群间的相关分析结果(未给出)表明大型土壤动物各类群间负相关关系均不显著(最大负相关系数 $r = 0.12, p > 0.05$),而达到显著水平($p < 0.05$)的均为正相关。说明在若尔盖高寒草甸生态系统中大型土壤动物各类群间的竞争排斥作用非常弱,而相互依存关系较强。

在若尔盖高寒草甸生态系统中,不同类群大型土壤动物对退化的响应方式和速度不同,而不同环境因子对各类群的影响也存在差异。在 13 个大类群中,仅鞘翅目幼虫的密度与植物种类有显著相关关系,而鞘翅目幼虫和成虫的密度与土壤有效磷和速效钾等多个环境因子有显著相关关系,其他类群的密度也主要与有效磷和速效钾等土壤养分含量呈显著相关(表 3)。在其他生态系统中也发现土壤理化性质是影响大型土壤动物的主要环境因子^[21-22]。本研究表明高寒草甸生态系统中的土壤养分对大型土壤动物各类群密度有重要影响。此外,大型土壤动物各类群(鞘翅目除外)的密度与 pH 无显著相关关系,表明大型土壤动物的各类群对 pH 的变化不敏感,这与小型土壤动物对 pH 反应敏感截然不同^[13]。其原因可能是不同类群的土壤动物对生态系统由下至上或由上至下控制的响应不同^[23]。

3.2 退化对大型土壤动物群落季节动态的影响

若尔盖高寒草甸的 4 个退化阶段大型土壤动物的类群数、密度和多样性指数均有显著季节变化,且各退化阶段大型土壤动物的季节动态不同。已有研究表明温度和湿度是影响土壤动物群落的主要气候因子^[20],而且温度^[24]和降水^[25]的季节性变化可导致土壤动物的种类和个体数变化。但在若尔盖高寒草甸生态系统,草原草甸和退化草甸的大型土壤动物类群数分别与气温($r_{\text{草原草甸}} = 0.87, p < 0.05$; $r_{\text{退化草甸}} = 0.82, p < 0.05$)、土温($r_{\text{草原草甸}} = 0.89, p < 0.01$; $r_{\text{退化草甸}} = 0.84, p < 0.05$)和降雨量($r_{\text{草原草甸}} = 0.90, p < 0.01$; $r_{\text{退化草甸}} = 0.89, p < 0.01$)有显著正相关关系,沼泽草甸和沙化草甸土壤动物的类群数与温度和降水量无显著相关关系($p > 0.05$)。其原因可能是沼泽草甸土壤为沼泽土,疏松、且含水量高,对温度和降水量不敏感;而沙化草甸的风沙土虽对温度和降水敏感,但大型土壤动物种类及个体数非常稀少,且季节变化弱,因此与温度和降水无显著相关关系。草原草甸和退化草甸两阶段均为草甸土,含水量相对较低(表 1),且土壤动物丰富,因此土壤动物类群数与温度和降水的季节变化显著相关。此外,温度和降水对大型土壤动物群落密度和 Shannon 多样性的影响较弱,仅有草原草甸的 Shannon 多样性与降水量有显著正相关($r = 0.79, p < 0.05$)。由此可知不同退化阶段大型土壤动物群落对季节变化的响应不同。

4 结 论

若尔盖高寒草甸大型土壤动物共有 6 纲 20 目至少 90 科,奇马陆科、象甲科幼虫和矛带马陆科为优势类群,在纲分类阶元上昆虫纲为优势类群;不同退化阶段间大型土壤动物群落结构和优势类群存在差异。退化和沙化对大型土壤动物群落的丰富度、密度和多样性均有显著影响。其中退化可使矛带马陆目和鞘翅目幼虫等类群的密度显著增加,而沙化则使优势类群密度显著降低、常见类群和稀有类群消失。植物群落和土壤理化性质与大型土壤动物的丰富度、密度和多样性间存在显著相关关系。此外,退化对大型土壤动物群落的季节动态也有明显影响。

致 谢 感谢西南民族大学的杨大星、何先进、于晓飞、李占洋、师方等同学协助野外采样工作。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Land-use, land-use change, and forestry. IPCC Special Report, 2000
- [2] Volk M, Niklaus P A, Körner C. Soil moisture effects determine CO₂ responses of grassland species. *Oecologia*, 2000, 125(3): 380—388
- [3] Morgan J A, Pataki D E, Körner C, et al. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO₂. *Oecologia*, 2004, 140(1): 11—25
- [4] 白军红, 欧阳华, 崔保山, 等. 近 40 年来若尔盖高原高寒湿地景观格局变化. *生态学报*, 2008, 28(5): 2245—2252. Bai J H, Ouyang H, Cui B S, et al. Changes in landscape pattern of alpine wetlands on the Zoigê Plateau in the past four decades(In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2245—2252
- [5] 胡光印, 董治宝, 魏振海, 等. 近 30a 来若尔盖盆地沙漠化时空演变过程及成因分析. *地球科学进展*, 2009, 24(8): 908—916. Hu G Y, Dong Z B, Wei Z H, et al. Spatial and temporal change of desertification land of Zoigê basin in recent 30 years and its cause analysis (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2009, 24(8): 908—916
- [6] 王乾, 包维楷, 晏兆莉, 等. 若尔盖西部草甸的基本类型、特点及近几十年来的变化. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(2): 133—141. Wang Q, Bao W K, Yan Z L, et al. Basic types and characters of the western Zoigê meadows and their changes in recent decades (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Environment and biology*, 2002, 8(2): 133—141
- [7] 田应兵, 熊明标, 宋光煜. 若尔盖高原湿地土壤的恢复演替及其水分与养分变化. *生态学杂志*, 2005, 24(1): 21—25. Tian Y B, Xiong M B, Song G Y. Restoration succession of wetland soils and their changes of water and nutrient in Ruergai Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(1): 21—25
- [8] Hemerik L, Brussaard L. Diversity of soil macro-invertebrates in grasslands under restoration succession. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38(2): 145—150
- [9] Doblas-Miranda E, Wardle D A, Peltzer D A, et al. Changes in the community structure and diversity of soil invertebrates across the Franz Josef Glacier chronosequence. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(5): 1069—1081
- [10] 张洪芝, 吴鹏飞, 崔丽巍. 高寒草甸大型土壤动物群落结构特征及其与环境的关系. *土壤学报*, 2012, 49(6): 192—198. Zhang H Z, Wu P F, Cui L W. Structural characteristics of soil macrofauna community in the alpine meadow and its relationship with environment (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 192—198
- [11] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998. Yin W Y. Pictorial keys to soil animals of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1998
- [12] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629—1633
- [13] Chauvat M, Wolters V, Dauber J. Response of collembolan communities to land-use change and grassland succession. *Ecography*, 2007, 30(2): 183—192
- [14] Bardgett R D, Mawdsley J L, Edwards S, et al. Plant species and nitrogen effects on soil biological properties of temperate upland grasslands. *Functional Ecology*, 1999, 13(5): 650—660
- [15] Zaller J G, Arnone III J A. Earthworm responses to plant species' loss and elevated CO₂ in calcareous grassland. *Plant and Soil*, 1999, 208(1): 1—8
- [16] Cole L, Buckland S M, Bardgett R D. Relating microarthropod community structure and diversity to soil fertility manipulations in temperate grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(9): 1707—1717
- [17] Sieman E. Experimental tests of effects of plant productivity and diversity on grassland arthropod diversity. *Ecology*, 1998, 79(6): 2057—2070
- [18] Nguyen C. Rhizodeposition of organic C by plants: Mechanisms and controls. *Agronomie*, 2003, 23(5—6): 375—396
- [19] Cole L, Buckland S M, Bardgett R D. Influence of disturbance and nitrogen addition on plant and soil animal diversity in grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(2): 505—514
- [20] Setälä H, Marshall V G, Trofymow J A. Influence of micro- and macro-habitat factors on collembolan communities in Douglas-fir stumps during forest succession. *Applied Soil Ecology*, 1995, 2(4): 227—242
- [21] Berg M P, Hemerik L. Secondary succession of terrestrial isopod, centipede, and millipede communities in grasslands under restoration. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 40(3): 163—170
- [22] 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. Liu J L, Yin X Q, Qiu L L. Large-sized soil fauna and soil fac-

- tors in Zuoqia Nature Reserve (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 130—136
- [23] Wardle D A, Yeates G W, Barker G M, et al. The influence of plant litter diversity on decomposer abundance and diversity. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(5): 1052—1062
- [24] Bokhorst S, Huiskes A, Convey P, et al. Climate change effects on soil arthropod communities from the Falkland Islands and the Maritime Antarctic. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(7): 1547—1556
- [25] 廖崇惠, 李健雄, 杨悦屏, 等. 海南尖峰岭热带林土壤动物群落-群落结构的季节变化及其气候因素. *生态学报*, 2003, 23(1): 139—147. Liao C H, Li J X, Yang Y P, et al. The community of soil animal in tropical rain forest in Jianfeng Mountain, Hainan Island, China: Relationship between seasonal change of community structure and climatic factors (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 139—147

RESPONSE OF SOIL MACROFAUNA COMMUNITIES TO DEGRADATION OF ALPINE MEADOW

Wu Pengfei Zhang Hongzhi Cui Liwei Zhong Hongmei

(College of Life Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China)

Abstract Zoigê alpine wetland meadow, located on the eastern edge of the Qinghai-Tibetan Plateau, is degrading under the impact of global climate change and the increasingly heavy burden of livestock in recent years, demonstrating four typical phases, i. e. swampy meadow, grassland meadow, degraded meadow and desertifying meadow in the process. From April 2009 to October 2010, seven investigations were conducted of soil macrofauna communities in the four phases for analysis of impacts of the degradation on soil macrofauna. Results show that differences existed between the phases in taxonomic composition and dominant groups of the soil macrofauna communities. Statistical analysis shows that the impacts of the degradation on richness, density and Shannon diversity index of the soil macrofauna communities were extremely significant ($p < 0.01$ or $p < 0.05$) in the last two phases. Principal Component Analysis (PCA) shows that in the phase of graded meadow, Polydesmida and Coleoptera larvae increased significantly ($p < 0.05$), while in the phase of desertifying meadow the dominant groups decreased significantly in density ($p < 0.05$) and some common and rare groups disappeared. Correlation analysis shows that richness, density and diversity of soil macrofauna communities were closely related to species and biomass of the plants and physical and chemical properties of the soils ($p < 0.01$ or $p < 0.05$), especially available phosphorus and readily available potassium, in the meadows. And soil macrofauna communities also responded to changes in season significantly in abundance and diversity, and the responses varied from phase to phase of the degradation process ($p < 0.01$ or $p < 0.05$). All the findings indicate that moderate degradation of alpine meadows may increase soil macrofauna community in diversity, whereas severe degradation (desertification) significantly reduces the diversity, and moreover, seasonal dynamics of soil macrofauna communities varies from phase to phase of the degradation process.

Key words Zoigê alpine meadow; Soil fauna; Plant community; Soil physical and chemical properties; Degradation; Desertification

(责任编辑: 卢 萍)

表 1 若尔盖高寒草甸不同退化阶段大型土壤动物群落组成
 Table 1 Taxonomic compositions of soil macrofauna communities in different degradation phases of Zoigé alpine meadow ($n=42$)

类群 Taxon	沼泽草甸 Swampy meadow			草原草甸 Grassland meadow			退化草甸 Degraded meadow			沙化草甸 Desertifying meadow			合计 Total		
	密度 Density	百分比 Percentage	(%)	密度 Density	百分比 Percentage	(%)	密度 Density	百分比 Percentage	(%)	密度 Density	百分比 Percentage	(%)	密度 Density	百分比 Percentage	
	(ind m ⁻²)	(%)	(%)	(ind m ⁻²)	(%)	(%)	(ind m ⁻²)	(%)	(%)	(ind m ⁻²)	(%)	(%)	(ind m ⁻²)	(%)	
昆虫纲 Insecta															
鞘翅目 Coleoptera															
象甲科幼虫 Curculionidae larvae	20.50	32.03		16.95	30.77		53.05	19.66		4.00	21.49		94.49	23.19	
金龟甲科幼虫 Scarabaeidae larvae	10.87	16.98		12.22	22.19		2.00	0.74		13.14	70.56		38.23	9.38	
叶甲科幼虫 Chrysomelidae larvae	0.07	0.12		1.29	2.34		4.10	1.52		0.07	0.40		5.46	1.34	
象甲科成虫 Curculionidae adult	0.89	1.39		2.39	4.33		0.76	0.28		0.07	0.40		4.11	1.01	
叩甲科幼虫 Elateridae larvae	1.83	2.86		0.25	0.46		1.14	0.42		0.15	0.80		3.23	0.79	
步甲科幼虫 Carabidae larvae	0.67	1.04		1.04	1.88		1.14	0.42		0.07	0.40		2.99	0.73	
拟步甲科幼虫 Tenebrionidae larvae	1.26	1.97		0.67	1.21		0.57	0.21		0.07	0.40		2.57	0.63	
步甲科成虫 Carabidae adult	0.66	1.03		1.16	2.10		0.57	0.21		0.11	0.60		2.49	0.61	
蕨甲科成虫 Lathrididae adult	1.85	2.89											1.85	0.45	
长角象甲科成虫 Anthribidae adult	0.52	0.81		0.89	1.61		0.10	0.04					1.50	0.37	
长角象甲科幼虫 Anthribidae larvae				0.24	0.43		1.24	0.46		0.07	0.40		1.55	0.38	
蕨甲科成虫 Silphidae adult	0.22	0.35		0.37	0.67		0.38	0.14					0.97	0.24	
长角沼甲科幼虫 Philodactylidae arvae	0.70	1.09					0.19	0.07					0.89	0.22	
粪金龟科成虫 Geotrupidae adult	0.07	0.12					0.10	0.04		0.44	2.39		0.61	0.15	
苔甲科成虫 Scydmaenidae adult	0.44	0.69					0.10	0.04					0.54	0.13	
苔甲科幼虫 Scydmaenidae larvae				0.37	0.67								0.37	0.09	
蕨甲科幼虫 Silphidae larvae				0.30	0.54		0.10	0.04					0.39	0.10	
隐翅甲科成虫 Staphylinidae adult	0.15	0.23		0.09	0.16		0.10	0.04					0.33	0.08	
金龟甲科成虫 Scarabaeidae adult	0.13	0.20		0.15	0.27								0.28	0.07	
粪金龟科幼虫 Geotrupidae larvae				0.24	0.43								0.24	0.06	
叩甲科成虫 Elateridae adult	0.15	0.23		0.07	0.13								0.22	0.05	
隐翅虫科幼虫 Staphylinidae larvae	0.06	0.10		0.07	0.13		0.10	0.04					0.23	0.06	
伪瓢甲科成虫 Endomychidae adult				0.09	0.16					0.11	0.60		0.20	0.05	
粗角叩甲科幼虫 Throscidae larvae				0.18	0.32								0.18	0.04	

续表

类群 Taxon	沼泽草甸 Swampy meadow			草原草甸 Grassland meadow			退化草甸 Degraded meadow			沙化草甸 Desertifying meadow			合计 Total	
	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)		密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)		密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)		密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)		密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)
阔甲科幼虫 Histeridae larvae	0.06	0.10		0.09	0.16								0.15	0.04
圆泥甲科成虫 Geonissidae adult				0.07	0.13		0.10	0.04					0.17	0.04
黑蜚科成虫 Passalidae adult							0.10	0.04					0.17	0.04
出尾覃甲科成虫 Scaphidiidae adult	0.07	0.12		0.07	0.13					0.07	0.40		0.15	0.04
蚁甲科幼虫 Pselaphidae larvae				0.09	0.16								0.09	0.02
三锥象甲科成虫 Brentidae adult				0.09	0.16								0.09	0.02
水龟甲科幼虫 Hydrophilidae larvae				0.07	0.13								0.07	0.02
拟球甲科幼虫 Corylophidae larvae	0.07	0.12											0.07	0.02
拟叩甲科成虫 Languriidae adult				0.07	0.13								0.07	0.02
拟步甲科成虫 Tenebrionidae adult	0.07	0.12											0.07	0.02
牧场金龟科成虫 Aphodiidae adult										0.07	0.40		0.07	0.02
露尾甲科成虫 Nitidulidae adult				0.07	0.13								0.07	0.02
花萤科幼虫 Cantharidae larvae	0.07	0.12											0.07	0.02
负泥甲科成虫 Crioceridae adult							0.10	0.04					0.10	0.02
蚁形甲科幼虫 Anthicidae larvae	0.06	0.10											0.06	0.02
小蕈甲科成虫 Mycetoptophagidae	0.06	0.10											0.06	0.02
水龟甲科成虫 Hydrophilidae adult	0.06	0.10											0.06	0.02
双翅目 Diptera														
尖眼覃蚊科幼虫 Sciariidae larvae	14.52	22.69		0.15	0.27		0.29	0.11					14.95	3.67
蝇科幼虫 Muscidae larvae	1.48	2.32		1.33	2.42		1.81	0.67					4.62	1.13
大蚊科幼虫 Tipulidae larvae	0.29	0.45		0.59	1.08		2.10	0.78					2.97	0.73
舞虻科幼虫 Empididae larvae	1.26	1.97											1.26	0.31
鹬虻科幼虫 Rhagionidae larvae	0.66	1.03		0.07	0.13		0.48	0.18					1.21	0.30
食木虻科幼虫 Xylophagidae larvae	0.07	0.12		0.24	0.43		0.29	0.11					0.60	0.15
腐木蝇科幼虫 Clusiidae larvae				0.44	0.81		0.10	0.04					0.54	0.13
食虫虻科幼虫 Asilidae larvae				0.07	0.13		0.38	0.14					0.46	0.11
蚤蝇科幼虫 Phoridae larvae	0.37	0.58											0.37	0.09
摇蚊科幼虫 Chironomidae larvae	0.19	0.30		0.18	0.32								0.37	0.09

续表

类群 Taxon	沼泽草甸 Swampy meadow			草原草甸 Grassland meadow			退化草甸 Degraded meadow			沙化草甸 Desertifying meadow			合计 Total		
	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)		密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)		密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)		密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)		密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	
长足蚯蚓幼虫 <i>Dolichopodiidae</i> larvae	0.07	0.12		0.07	0.13		0.10	0.04		0.10	0.04		0.24	0.06	
剑虹科幼虫 <i>Therevidae</i> larvae				0.07	0.13		0.10	0.04		0.10	0.04		0.17	0.04	
沼大蚊科幼虫 <i>Limoniidae</i> larvae							0.10	0.04		0.10	0.04		0.10	0.02	
伪大蚊科幼虫 <i>Anisopodiidae</i> larvae							0.10	0.04		0.10	0.04		0.10	0.02	
毛蚊科幼虫 <i>Bibionidae</i> larvae							0.10	0.04		0.10	0.04		0.10	0.02	
冬大蚊科幼虫 <i>Trichoeridae</i> larvae							0.10	0.04		0.10	0.04		0.10	0.02	
蠓科幼虫 <i>Ceratopogonidae</i> larvae	0.07	0.12		0.07			0.10	0.04		0.10	0.04		0.07	0.02	
酪蝇科幼虫 <i>Prophiliidae</i> larvae							0.13						0.07	0.02	
膜翅目 Hymenoptera															
路舍蚊属 <i>Tetramorium</i>	0.41	0.64		3.65	6.63		0.19	0.07		0.19	0.07		4.26	1.04	
短猛蚁属 <i>Brachyponera</i>	0.19	0.30		1.69	3.07		0.10	0.04		0.10	0.04		2.20	0.54	
弓背蚁属 <i>Camponotus</i>	0.07	0.12		0.73	1.33								0.80	0.20	
土蜂科 <i>Scolidae</i>				0.18	0.32								0.18	0.04	
行军蚁属 <i>Dorylus</i>				0.15	0.27								0.15	0.04	
拟猛切叶蚁属 <i>Tetraponera</i>				0.15	0.27								0.15	0.04	
卷尾猛蚁属 <i>Proceratium</i>				0.15	0.27								0.15	0.04	
钝蚁属 <i>Amblyopone</i>				0.07	0.13								0.14	0.03	
切根虫属 <i>Euxoa</i>	0.06	0.10		0.09	0.16								0.09	0.02	
切叶蚁属 <i>Myrmecina</i>				0.09	0.16								0.09	0.02	
举腹蚁属 <i>Crematogaster</i>				0.09	0.16								0.09	0.02	
双针蚁属 <i>Pristomyrmex</i>	0.07	0.12											0.07	0.02	
臭蚁属 <i>Dolichoderus</i>				0.07	0.13								0.07	0.02	
草蚁属 <i>Lasius</i>				0.07	0.13								0.07	0.02	
鳞翅目 Lepidoptera															
夜蛾科幼虫 <i>Noctuidae</i> larvae				0.10	0.18		2.29	0.85		2.29	0.85		2.39	0.59	
蝠蛾属幼虫 <i>Hepialus</i> larvae				0.97	1.76		0.29	0.11		0.29	0.11		1.25	0.31	
卷叶蛾科幼虫 <i>Tortricidae</i> larvae				0.61	1.10		0.29	0.11		0.29	0.11		0.89	0.22	
舟蛾科幼虫 <i>Notodontidae</i> larvae							0.76	0.28		0.76	0.28		0.76	0.19	

续表

类群 Taxon	沼泽草甸 Swampy meadow		草原草甸 Grassland meadow		退化草甸 Degraded meadow		沙化草甸 Desertifying meadow		合计 Total	
	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)
	掌舟蛾属幼虫 <i>Phalera</i> larvae			0.44	0.16	0.44	0.16	0.44	0.11	0.44
蝙蝠蛾科幼虫 Hepialide larvae			0.44	0.16	0.44	0.16	0.44	0.11	0.44	0.11
鳞翅目成虫 Lepidoptera adult			0.19	0.07	0.19	0.07	0.26	0.06	0.26	0.06
地老虎属幼虫 <i>Agrotis</i> larvae			0.10	0.04	0.10	0.04	0.17	0.04	0.17	0.04
蝙蝠蛾属幼虫 <i>Phassus</i> larvae			0.10	0.18	0.10	0.18	0.10	0.02	0.10	0.02
剑纹夜蛾属幼虫 <i>Acrocyta</i> larvae	0.06	0.10					0.06	0.02		0.02
半翅目 Hemiptera										
小长蝥属 <i>Nysius</i>	0.15	0.23	0.22	0.40	0.29	0.11	0.66	0.16		
宽蝥属 <i>Velia</i>	0.07	0.12	0.15	0.27	0.38	0.14	0.60	0.15		
点刻花蝥属 <i>Almeida</i>			0.30	0.54			0.30	0.07		
叉胸花蝥属 <i>Amphiareus</i>	0.07	0.12	0.07	0.13	0.19	0.07	0.34	0.08		
膜蝥属 <i>Hebrus</i>			0.16	0.30	0.10	0.04	0.26	0.06		
鳖土蝥属 <i>Adrisa</i>			0.18	0.32			0.18	0.04		
紫蓝土蝥属 <i>Canthoporus</i>			0.15	0.27			0.15	0.04		
光背奇蝥属 <i>Stenopirates</i>			0.15	0.27			0.15	0.04		
红蝥属 <i>Pyrhocoris</i>	0.15	0.23					0.15	0.04		
其他类群 Others										
直翅目 Orthoptera										
蚱总科 Tetrigoidea	0.06	0.10	0.15	0.27			0.21	0.05		
蟋蟀科 Gryllidae	0.06	0.10			0.19	0.07	0.25	0.06		
稻蝗属 <i>Oxya</i>			0.10	0.04	0.10	0.04	0.10	0.02		
蚊蝎蛉科 Bittacidae			0.10	0.04	0.10	0.04	0.10	0.02		
未定目 Unidentified	0.22	0.35	0.37	0.67	0.48	0.18	1.07	0.26		
同翅目幼虫 Homoptera larvae	1.04	1.62	0.15	0.27	2.57	0.95	3.76	0.92		
同翅目成虫 Homoptera adult			0.16	0.30			0.16	0.04		
丝尾蝻科 Diplatyidae			0.07	0.13			0.07	0.02		
蜚蠊科 Blattidae	0.07	0.12					0.07	0.02		
草蜚科 Hodotermitidae			0.13	0.07			0.07	0.02		

续表

类群 Taxon	沼泽草甸 Swampy meadow		草原草甸 Grassland meadow		退化草甸 Degraded meadow		沙化草甸 Desertifying meadow		合计 Total	
	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)	密度 Density (ind m ⁻²)	百分比 Percentage (%)
昆虫目 Psocoptera			0.10	0.04					0.10	0.02
倍足纲 Diolopoda										
带马陆目 Polydesmida										
奇马陆科 Paradoxosomatidae	0.22	0.35	123.90	45.92			124.13	30.46		
矛带马陆科 Doratodesmidae			62.48	23.15			62.48	15.33		
唇足纲 Chilopoda										
石蜈蚣目 Lithomorpha	0.07	0.12	0.07	0.13	0.19	0.07	0.34	0.08		
寡毛纲 Oligochaeta										
正蚓目 Lumbricida										
巨蚓科 Megascolecidae			0.10	0.18	0.76	0.28	0.86	0.21		
链胃蚓科 Moniligastridae			0.05	0.09	0.38	0.14	0.43	0.11		
小蚓类 Microdrile oligochaetes										
带丝蚓属 <i>Lumbriculus</i>	0.06	0.10	0.07	0.13	0.19	0.07	0.33	0.08		
单向蚓科 Haplotaxidae			0.15	0.27	0.10	0.04	0.24	0.06		
线蚓科 Enchytraeidae			0.07	0.13	0.19	0.07	0.26	0.06		
蛛形纲 Arachnida										
蜘蛛目 Araneae										
壁钱属 <i>Urostea</i>	0.06	0.10	0.09	0.16			0.15	0.04		
逍遥蛛科 Philodromidae	0.06	0.10					0.06	0.02		
狼栉蛛科 Zoridae							0.10	0.02		
卷叶蛛科 Dictynidae	0.07	0.12	0.10	0.04			0.07	0.02		
盲蛛目 Opiliones										
长奇盲蛛科 Phalangidae	0.07	0.12					0.07	0.02		
综合纲 Symphyla										
地么蚣科 Geophilidae			0.07	0.13			0.07	0.02		
群落密度 Density(ind m ⁻²)	63.99	100.00	55.08	100.00	269.82	100.00	18.62	100.00	407.51	100.00
类群数 Group(ind)	59		80		62	13	119			