

DOI: 10.20103/j.stxb.202302280363

冯怡琳, 杨竞艺, 王永珍, 赵文智, 辛未冬, 袁虹, 刘继亮. 祁连山国家公园煤矿修复对地表节肢动物多样性的影响. 生态学报, 2024, 44(4): 1575-1587.

Feng Y L, Yang J Y, Wang Y Z, Zhao W Z, Xin W D, Yuan H, Liu J L. Effects of coal mine restoration on ground arthropod diversity in Qilian Mountain National Park. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1575-1587.

祁连山国家公园煤矿修复对地表节肢动物多样性的影响

冯怡琳^{1,2}, 杨竞艺⁴, 王永珍³, 赵文智^{2,3}, 辛未冬⁵, 袁虹⁶, 刘继亮^{3,*}

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地/西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

3 中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000

4 甘肃农业大学, 兰州 730000

5 山西师范大学, 临汾 041004

6 甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心, 张掖 734000

摘要:高寒山区煤矿覆土回填和种植草本植物能够快速改善环境, 强烈影响地表节肢动物多样性及其生态功能, 地表节肢动物对煤矿修复的响应还会因海拔及放牧扰动强度的变化而异。选择祁连山国家公园甘肃片区中部西营河和东大河保护站煤矿修复区和毗邻草地(对照区)为研究对象, 利用陷阱法调查煤矿修复区及对照区地表节肢动物的种类组成和数量变化, 解析地表节肢动物群落及关键类群对煤矿修复的响应模式, 确定影响地表节肢动物多样性变化的关键要素。结果表明, 煤矿修复缩小了修复区和对照区地表节肢动物群落差异, 但煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落组成明显不同并存在地域差异。西营河煤矿修复显著提高了地表节肢动物活动密度, 而东大河保护站煤矿修复导致地表节肢动物活动密度略有降低, 地表节肢动物类群丰富度、多样性和均匀度指数变化与活动密度相反。主要地表节肢动物科对煤矿矿区修复的响应模式不同并存在区域差异, 西营河保护站煤矿修复显著提高了平腹蛛科、微蛛亚科和隐翅虫科的活动密度, 但显著降低了硬体盲蛛科和象甲科的活动密度; 东大河保护站煤矿修复显著提高了步甲科活动密度, 但降低了蚁科和狼蛛科的活动密度。pRDA 排序结果表明, 海拔高度和全氮含量解释了西营河保护站煤矿修复区和对照区 20.8% 的地表节肢动物群落变异; 草地上生物量和海拔高度解释了东大河保护站煤矿修复区和对照区 24.3% 的地表节肢动物群落变异。总之, 高寒山区人工覆土和植被建设引起的植被和土壤环境变化强烈影响地表节肢动物多样性, 地表节肢动物对煤矿修复的响应存在明显的区域差异, 地表节肢动物多样性可以指示和评估煤矿修复效果。

关键词:祁连山国家公园; 煤矿矿区; 生态修复; 地表节肢动物多样性; 指示种

Effects of coal mine restoration on ground arthropod diversity in Qilian Mountain National Park

FENG Yilin^{1,2}, YANG Jingyi⁴, WANG Yongzhen³, ZHAO Wenzhi^{2,3}, XIN Weidong⁵, YUAN Hong⁶, LIU Jiliang^{3,*}

1 School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Breeding Base for State Key Lab. of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China / Key Lab. of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, China

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项 A (XDA23060304); 国家自然科学基金项目 (41771290, 41701287); 甘肃省科技支撑计划项目 (2GS064-A41-003-02)

收稿日期:2023-02-28; **网络出版日期:**2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liujl707@lzb.ac.cn

3 Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

4 Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China

5 Shanxi Normal University, Linfen 041004, China

6 National Nature Reserve Management and Conservation Center of Qilian Mountain in Gansu Province, Zhangye 734000, China

Abstract: Backfilling with guest soil and planting herbs in the coal mining areas of the alpine mountain can improve the environment rapidly, which strongly affect the diversity and ecological function of ground arthropods. The response of ground arthropods to coal mine restoration will also vary with the changes of altitude and grazing disturbance intensity. We systematically investigated the assemblage and quantity of ground arthropods in coal mine restoration areas and control areas of Xiyinghe and Dongdahe nature conservation station using pitfall traps, analyzed the response pattern of ground arthropod community and the key groups to the coal mine restoration, and determined the main factors affecting the diversity of ground arthropods. The key results were as follows. Coal mine restoration reduced the difference of ground arthropod communities between the restoration areas and control areas, but the community composition of ground arthropods differed between the restoration areas and control areas and showed obviously regional variations. The restoration of coal mine significantly increased the activity density of ground arthropod community in Xiyinghe, while the activity density of ground arthropod community in Dongdahe slightly decreased. The changes of groups richness, diversity index and evenness index of ground arthropod community in the two nature conservation stations were both opposite to the activity density. The response patterns of the dominant groups to the restoration of coal mining areas were different and showed obviously regional variations. Coal mine restoration significantly increased the activity density of Gnaphosidae, Erigoninae and Staphylinidae, but significantly decreased the activity density of Sclerosomatidae and Curculionidae in Xiyinghe. Coal mine restoration significantly increased the activity density of Carabidae, but decreased the activity density of Formicidae and Lycosidae in Dongdahe. Furthermore, pRDA showed that altitude elevation and total nitrogen accounted for 20.8% of the variation in ground arthropod community at coal mine restoration areas and control areas of Xiyinghe; herb aboveground biomass and altitude elevation accounted for 24.3% of the variation in ground arthropod community at coal mine restoration areas and control areas of Dongdahe. In conclusion, the changes of vegetation and soil environment caused by artificial covering and vegetation construction in alpine mountain areas strongly affected the diversity of ground arthropod community, and there were obviously regional differences in the response of ground arthropod community to coal mine restoration. The diversity of ground arthropod community can indicate and evaluate the effects of coal mine restoration.

Key Words: Qilian Mountain National Park; coal mining areas; ecological restoration; ground arthropod diversity; indicator species

祁连山国家公园地处青藏高原、蒙古高原和黄土高原的交汇处,它是中国西部重要的生态安全屏障和水源产流地,还是我国重点生态功能区和生物多样性保护优先区域^[1-2]。祁连山国家公园甘肃片区内采矿、探矿、旅游、水电站建设、水利设施和公路建设等人类活动工程有 350 余处,采矿和探矿活动占比近 60%,这些人类活动干扰严重威胁生物多样性及其生态功能。煤矿资源开发对祁连山国家公园的破坏比较严重,祁连山北坡煤矿开采及探矿点主要集中在中、东部,大多位于海拔较高和坡度较大的区域,煤矿的修复治理难度大,极易引发土壤侵蚀、滑坡和泥石流等次生灾害^[3-5]。2017 年以来,祁连山国家公园甘肃片区煤矿等矿产开发活动全部禁止,煤矿等矿区采用矿坑填埋、建筑拆除、尾矿覆土和人工种树、种草等修复措施恢复矿区生态环境,通过围封禁牧等降低人类活动干扰,促进退化植被和土壤恢复^[6]。蜘蛛、甲虫和蚂蚁等是地表节肢动物群落中的关键类群,它们对煤矿修复引起的植被和土壤环境变化响应十分敏感,煤矿修复区地表节肢动物的迁入和定居还会影响土壤食物网结构及其功能,促进煤矿修复区土壤恢复并维持植被群落稳定^[7-8]。然而,高寒山区地表节肢动物对煤矿矿区生态恢复的响应不仅受修复措施的影响,它还与地形、地貌和气候变化有关,而

放牧等人类活动扰动增强还会影响地表节肢动物对矿区修复的响应模式。因而,急需开展祁连山国家公园煤矿修复对地表节肢动物多样性的影响研究,为该矿区煤矿修复效果评估提供科学依据和数据支撑。

地表节肢动物是陆地生态系统中重要的组成部分,它与土壤形成发育和土壤健康密切相关,人类活动引起的土地利用变化已经导致节肢动物多样性大幅降低,这在矿产资源开发区域表现尤为明显^[9-11]。近年来,煤矿等矿区生态修复效果评估已经引起了许多学者的关注,与植被和土壤相比,地表节肢动物因其世代周期短、生殖潜能大、种群数量大和对环境扰动敏感等特点可以更高效、更准确的反映煤矿修复区生态恢复状况^[3, 12-13]。地表节肢动物的个体数量、生物量、栖居类型、营养结构、多样性及其功能变化已被当作敏感指标来预警生态恢复中的生境变化^[13]。煤矿矿区恢复过程中,大型和中小型节肢动物对矿区修复引起的植被和土壤环境变化的响应模式不同,不同节肢动物类群对矿区修复的权衡变化决定了土壤食物网结构及其功能演变^[13-15]。利用土壤覆盖、土壤改良和植被建设等人工恢复措施会加快煤矿修复区的生态恢复进程,但这种影响也会因气候背景、海拔和地形变化而异^[16-18],煤矿修复区植被和土壤环境改变会强烈影响地表节肢动物多样性及其生态功能。地表节肢动物迁移、扩散能力强,它们对煤矿修复引起的植被和土壤环境变化响应也较中小型土壤节肢动物快,步甲科、蚁科和狼蛛科等主要的地表节肢动物扰动土壤、搬运植物种子和捕食等会影响其它土壤生物多样性,从而改变矿区植物和动物群落的恢复演替^[7-8, 19-20]。因而,通过祁连山国家公园地表节肢动物群落及关键类群对煤矿矿区修复的响应研究,确定不同气候和放牧扰动强度背景下影响煤矿修复区和毗邻区(对照区)地表节肢动物分布关键要素,这可为高寒山区煤矿修复效果评估及健康管理提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

祁连山国家公园甘肃片区中西段煤矿开采和勘探比较集中,该区采矿及勘探规模小且分散,矿区主要分布在中高海拔区域,坡面地质条件不稳定,修复治理难度大。地表节肢动物对煤矿修复响应研究区选择在祁连山国家公园中、东部的西营河保护站和东大河保护站。西营河保护站气候类型属于大陆性高原寒温带季风气候,年均降水 450 mm 左右,66%的降水集中在 7—9 月;年均温 0.13℃,最低月均温 -11.4℃,月均最高温 11.2℃。东大河保护站与西营河保护站相邻,年降水量 385.2 mm,多集中于 7、8、9 月 3 个月;年平均气温 1.9℃,最高达 31℃,最低为 -25℃。依据海拔高度变化在西营河保护站内选择柳树沟(37°51'25"N, 102°02'43"E; 2186 m a.s.l)、进房沟(37°51'47"N, 102°02'23"E; 2232 m a.s.l)和水磨沟(37°52'38"N, 101°55'51"E; 2630 m a.s.l)与东大河保护站内的宏达(38°04'58"N, 101°34'50"E; 2781 m a.s.l)、头沟大坂(38°04'26"N, 101°35'11"E; 2886 m a.s.l)和下泉沟(38°04'17"N, 101°36'22"E; 2962 m a.s.l) 6 个典型煤矿修复点作为地表节肢动物、植被和土壤样品采集区。

2017 年祁连山国家公园甘肃片区西营河和东大河保护站内煤矿全部关停,煤矿整改修复措施相近,先拆除厂房等地上建筑、平整尾矿堆和封填矿井,利用客土回填恢复矿区表层土壤环境(覆土层厚度在 10—20 cm 之间)。随后在矿区种植一年生草本植物(以披碱草 *Elymus dahuricus* 为主),通过围封、禁牧等减少人类活动干扰,促进植被群落的恢复演替。西营河和东大河保护站煤矿资源开采前生境主要为草地,草本以针茅(*Stipa capillata*)等多年生草本为主,放牧导致草地出现不同程度退化,高海拔生境草地退化程度略有降低;西营河保护站放牧扰动强度高于东大河保护站,西营河保护站煤矿修复区和对照区草本植被盖度低于东大河保护站。

1.2 试验设计及样品采集

2021 年 8—9 月在西营河和东大河保护站内分别选取煤矿大小和修复年限、修复模式一致的 3 个煤矿修复区作为地表节肢动物样品采集区,在每个煤矿修复区毗邻草地生境选择海拔、坡向与煤矿开采区相近,植被和土壤扰动小的区域作为对照生境。煤矿修复区和对照区坡向相近,煤矿修复区坡度小于对照区,煤矿修复

区和对照区坡面的上部、中部和下部分别设置 1 个 30 m×50 m 的区域作为地表节肢动物样品采集区,每个动物样品采集区相距 50—100 m,两个保护站 6 个煤矿共设置 36 个动物样品采集区。地表节肢动物陷阱收集器利用矿泉水瓶制作,可以有效阻止地表节肢动物样品溢出和大型食草动物踩踏破坏陷阱。每个地表节肢动物样品采集区布设 5 个陷阱收集器,收集器间距 ≥ 10 m,收集器上口与地面持平,陷阱保存液使用巴氏诱液(醋、糖、酒精和水的重量比为 2:1:1:20),陷阱收集器采集时间为 7 d。陷阱采集的节肢动物样品带回室内利用浮选法去除枯枝落叶和土壤,然后保存于装有 75%酒精溶液的样品瓶中。利用体式显微镜观察地表节肢动物样品的形态特征,参照分类资料鉴定至科和目,部分种类鉴定至种属用于划分取食类型,按照科统计其个体数量^[21—24]。

地表节肢动物样品采集完利用手持 GPS 测量西营河和东大河保护站每个煤矿修复区和对照区的海拔高度。地表节肢动物样品采完后在每个地表节肢动物采集区内选取 3 个 1 m×1 m 的草本样方,调查草本植物物种数,估算草本盖度;采集样方内草本植物地上部分,带回室内利用烘干法测定生物量。同时,采集每个样方内 0—10 cm 的土壤样品,土样风干后测定土壤有机碳和全氮含量,土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定,全氮采用半微量凯氏法测定^[25]。

1.3 数据处理

采用稀度曲线估算西营河和东大河保护站地表节肢动物物种丰富度变化,利用 Berger-Parker 优势度指数计算不同煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落组成及类群优势度变化;每个煤矿修复区和对照区 5 个陷阱收集器合并统计,计算西营河和东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物活动密度(个体数/收集器)、类群丰富度(科/收集器)、多样性指数(Shannon-Wiener index)和均匀度(Pelou index)指数,统计分析使用 PAST 4.01 软件包。采用二因素方差分析(GLM 模型)确定保护站(西营河和东大河)和煤矿修复(修复区和对照区)对地表节肢动物群落结构及主要类群活动密度的影响,方差分析使用 SPSS 20.0 软件包。

采用非度量多维尺度(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)和多元方差(Permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA)分析西营河和东大河保护站煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落组成差异,利用相似性百分比(Similarity percentage analysis, SIMPER)分析确定地表节肢动物群落的平均相异性和主要动物类群的贡献率,统计分析使用 PAST 4.01 软件包。NMDS 排序结果采用胁迫系数(Stress)衡量排序分析结果的优劣,其中 stress<0.01,完全可信;0.01<stress<0.05,可信的;0.05<stress<0.1,基本可信;0.1<stress<0.2,部分信息不可信;0.2<stress<0.3,不可信^[26]。

西营河和东大河 2 个保护站 3 个煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落与海拔高度、植物和土壤要素的关系利用 RDA 排序分析,排序分析前利用相关分析确定海拔高度、草本盖度、草本生物量、草本物种丰富度、土壤有机碳和全氮含量是主要的影响因子。排序分析使用地表节肢动物个体数量的数据,分析前所有数据进行 $\log(x+1)$ 转换,统计分析使用排序软件 CANOCO 5.0。利用指示种分析(Indicator species analysis, ISA)确定不同地表节肢动物类群 IV(Indicator value)值及显著程度,用来评估节肢动物类群对煤矿矿区修复和对照生境的指示效果,统计分析使用 PC-ORD 5.0 软件包。

2 结果与分析

2.1 西营河和东大河煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落组成比较

西营河保护站煤矿修复区及其毗邻的草地生境共捕获 2009 头 31 科地表节肢动物,蚁科和网翅蝗科是西营河保护站的优势类群,硬体盲蛛科、平腹蛛科、狼蛛科、蟹蛛科、微蛛亚科、步甲科和隐翅虫科是西营河保护站的常见类群,西营河保护站稀有类群有 22 科,个体数占 7.9%(表 1)。西营河保护站煤矿修复区与对照区相比,提高了平腹蛛科、微蛛亚科、步甲科、隐翅虫科和蚁科的捕获数量及其比重,但降低了硬体盲蛛科和蟹蛛科的捕获数量及其比重(表 1)。石蜈蚣科、绒螯科、石蛎科和丸甲科是西营河保护站对照区特有的地表节肢动物类群,跳蛛科、猎蝽科、蝽科、花金龟科、天牛科和芫菁科是煤矿修复区特有的地表节肢动物类群(表 1)。

东大河保护站煤矿修复区及其毗邻的草地生境共捕获 1976 头 26 科地表节肢动物,蚁科、步甲科和狼蛛科是东大河保护站的优势类群,长跗盲蛛科、微蛛亚科、网翅蝗科、蜡科、隐翅虫科、象甲科和拟步甲科是东大河保护站的常见类群,东大河保护站稀有类群有 16 科,个体数占 5.6%(表 1)。东大河保护站煤矿修复区与对照区相比,提高了长跗盲蛛科、蜡科、步甲科和隐翅虫科的捕获数量及其比重,但降低了狼蛛科、网翅蝗科、拟步甲科和蚁科的捕获数量及比重(表 1)。管巢蛛科、阎甲科、天牛科和蜉金龟科是东大河对照区的特有地表节肢动物类群,球蛛科、跳蛛科和虎甲科是煤矿修复区特有的地表节肢动物类群(表 1)。

表 1 祁连山国家公园西营河和东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物个体数和相对多度统计

Table 1 Number of individuals and relative abundance of ground arthropods at coal mine restoration and adjacent habitats of the Xiyinghe and Dongdahe nature conservation station in Qilian Mountain National Park.

类群 Groups	西营河保护站 Xiyinghe Reserve				东大河保护站 Dongdahe Reserve			
	修复区 Restorations		对照区 Controls		修复区 Restorations		对照区 Controls	
	NI	RA	NI	RA	NI	RA	NI	RA
石蜈蚣科 Lithobiidae	0	0.0	1	0.1	11	1.1	5	0.5
蚰蜒科 Scutigeridae	1	0.1	2	0.2	0	0.0	0	0.0
硬体盲蛛科 Sclerosomatidae	21	1.8	82	9.0	0	0.0	0	0.0
长跗盲蛛科 Phalangidae	0	0.0	0	0.0	29	3.0	3	0.3
管巢蛛科 Clubionidae	1	0.1	1	0.1	0	0.0	1	0.1
平腹蛛科 Gnaphosidae	47	4.1	17	1.9	8	0.8	1	0.1
狼蛛科 Lycosidae	43	3.8	35	3.9	128	13.4	206	19.7
球蛛科 Theridiidae	3	0.3	1	0.1	4	0.4	0	0.0
蟹蛛科 Thomisidae	5	0.4	20	2.2	2	0.2	1	0.1
跳蛛科 Salticidae	3	0.3	0	0.0	1	0.1	0	0.0
微蛛亚科 Erigoninae	33	2.9	6	0.7	16	1.7	15	1.4
绒螯科 Trombidiidae	0	0.0	18	2.0	0	0.0	0	0.0
潮虫科 Oniscidae	2	0.2	9	1.0	0	0.0	0	0.0
石蛎科 Machilidae	0	0.0	3	0.3	0	0.0	0	0.0
网翅蝗科 Arcypteridae	147	12.8	123	13.6	44	4.6	67	6.4
长蜡科 Lysaeidae	1	0.1	1	0.1	4	0.4	2	0.2
蜡科 Pentatomidae	7	0.6	0	0.0	22	2.3	2	0.2
猎蜡科 Reduviidae	7	0.6	0	0.0	4	0.4	6	0.6
虎甲科 Cicindelidae	2	0.2	1	0.1	1	0.1	0	0.0
步甲科 Carabidae	92	8.0	61	6.7	377	39.4	161	15.4
瓢虫科 Coccinellidae	3	0.3	2	0.2	0	0.0	0	0.0
隐翅虫科 Staphylinidae	44	3.8	13	1.4	81	8.5	52	5.0
阎甲科 Histeridae	2	0.2	3	0.3	0	0.0	1	0.1
象甲科 Curculionidae	1	0.1	17	1.9	11	1.1	14	1.3
叶甲科 Chrysomelidae	1	0.1	6	0.7	0	0.0	0	0.0
花金龟科 Cetoniidae	1	0.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0
天牛科 Cerambycidae	1	0.1	0	0.0	0	0.0	1	0.1
芫菁科 Meloidae	2	0.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0
金龟子科 Scarabaeidae	0	0.0	0	0.0	1	0.1	7	0.7
拟步甲科 Tenebrionidae	10	0.9	4	0.4	4	0.4	18	1.7
葬甲科 Silphidae	0	0.0	0	0.0	6	0.6	5	0.5
蜉金龟科 Aphodiidae	0	0.0	0	0.0	0	0.0	7	0.7
丸甲科 Byrrhidae	0	0.0	1	0.1	1	0.1	1	0.1
球蕈甲科 Leiodidae	1	0.1	1	0.1	3	0.3	1	0.1
蚁科 Formicidae	635	55.5	465	51.3	188	19.6	453	43.3

NI 个体数 Number of individuals, RA 相对多度 Relative abundance (%)

2.2 西营河和东大河煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落比较

祁连山国家公园西营河和东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物稀度曲线均接近水平,说明采样的代表性较好(图1)。西营河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物类群数累积曲线变化趋势相近,说明两种生境地表节肢动物类群丰富度相近,东大河保护站煤矿修复区地表节肢动物类群丰富度略高于对照区(图1)。西营河煤矿修复区地表节肢动物群落 Chao-1 指数高于对照区(32.6 和 32.0),而东大河煤矿修复区地表节肢动物群落 Chao-1 指数低于对照区(25.0 和 30.0)。

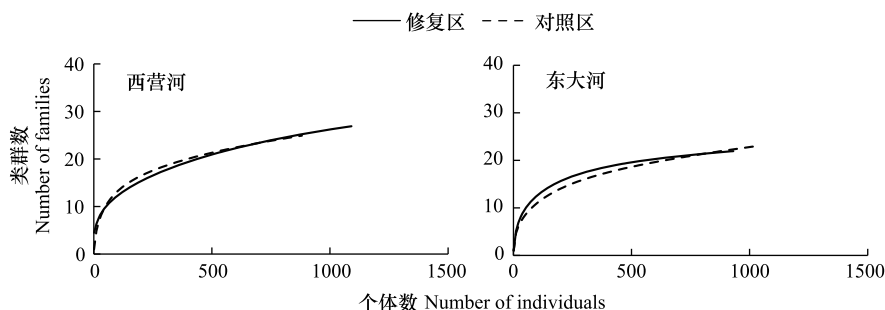


图1 祁连山国家公园西营河和东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物稀度曲线

Fig.1 Observed number of families on ground arthropods based on species accumulation curves at coal mine restoration and adjacent habitats of the Xiyinghe and Dongdahe nature conservation station in Qilian Mountain National Park

西营河和东大河煤矿修复和对照处理下地表节肢动物二因素 PERMANOVA 分析结果表明,修复处理(煤矿修复区和对照区)和保护站(两个保护站海拔和人为扰动不同)均显著影响地表节肢动物群落组成($F=18.20, P<0.001$; $F=3.85, P=0.010$),修复处理和保护站对地表节肢动物群落组成还存在显著的交互影响($F=4.67, P=0.004$)。西营河($F=3.36, P=0.024$)与东大河($F=5.03, P=0.002$)保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落均存在显著差异。西营河与东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落组成均存在一定差异(图2)。SIMPER 分析结果表明,西营河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落的平均相异性为 38.4%,蚁科、网翅蝗科、硬体盲蛛科和步甲科解释了 2 种生境地表节肢动物群落差异的 67.6%;东大河保护站 2 种生境地表节肢动物群落的平均相异性为 45.1%,蚁科、步甲科、狼蛛科和隐翅虫科解释了 2 种生境地表节肢动物群落差异的 79.6%。

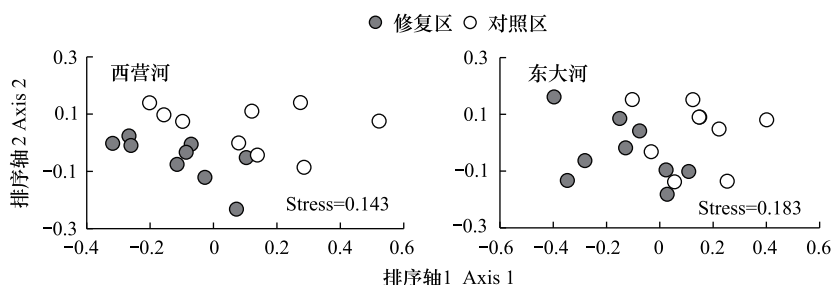


图2 祁连山国家公园西营河和东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落 NMDS 排序图

Fig.2 NMDS plots indicating 2-dimensional distances of ground arthropod community at coal mine restoration and adjacent habitats of the Xiyinghe and Dongdahe nature conservation station in Qilian Mountain National Park

NMDS: 非度量多维尺度分析 Non-metric multidimensional scaling

西营河和东大河煤矿修复和对照处理下地表节肢动物群落结构参数的二因素方差分析结果表明,保护站和煤矿修复处理及二者交互对地表节肢动物活动密度、类群丰富度和多样性指数的影响均较小,保护站仅对地表节肢动物群落的均匀度指数有显著影响;保护站和煤矿修复处理及二者交互均对硬体盲蛛科和平腹蛛科

的活动密度有显著影响(表2)。西营河保护站地表节肢动物群落均匀度指数显著低于东大河保护站,但2个保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落多样性指数相差较小(图3)。西营河与东大河保护站地表节肢动物活动密度和类群丰富度变化趋势相反,西营河保护站煤矿修复区地表节肢动物活动密度显著高于对照区(图3)。

表2 祁连山国家公园自然保护区和煤矿修复处理对地表节肢动物群落结构参数和主要类群活动密度影响的二因素方差分析结果

Table 2 The results of two-way ANOVA analysis of nature conservation stations and restorations effected on the variance of the community structure of ground arthropods and the activity density of dominant groups in Qilian Mountain National Park

	保护站 Reserves		修复处理 Restorations		保护站×修复处理 Reserves×Restorations	
	$F_{1,36}$	P	$F_{1,36}$	P	$F_{1,36}$	P
群落结构 Community structure						
活动密度 Activity density	0.209	0.651	0.627	0.434	2.906	0.098
类群丰富度 Group richness	2.888	0.099	0.473	0.497	1.193	0.283
多样性指数 Diversity index	1.672	0.205	0.247	0.622	0.582	0.451
均匀度指数 Evenness index	6.688	0.014	1.736	0.197	2.002	0.167
主要类群 Dominant groups						
硬体盲蛛科 Sclerosomatidae	20.28	<0.001	4.67	0.039	4.67	0.039
平腹蛛科 Gnaphosidae	65.04	<0.001	24.46	<0.001	6.30	0.018
狼蛛科 Lycosidae	42.98	<0.001	1.17	0.288	3.61	0.067
微蛛亚科 Erigoninae	0.43	0.519	5.76	0.023	3.94	0.056
网翅蝗科 Arcypteridae	10.34	0.003	0.27	0.607	0.59	0.447
步甲科 Carabidae	42.55	<0.001	10.16	0.003	1.92	0.175
隐翅虫科 Staphylinidae	9.96	0.004	7.59	0.010	0.15	0.699
象甲科 Curculionidae	1.56	0.221	6.14	0.019	2.58	0.119
蚁科 Formicidae	14.94	<0.001	1.54	0.224	10.35	0.003

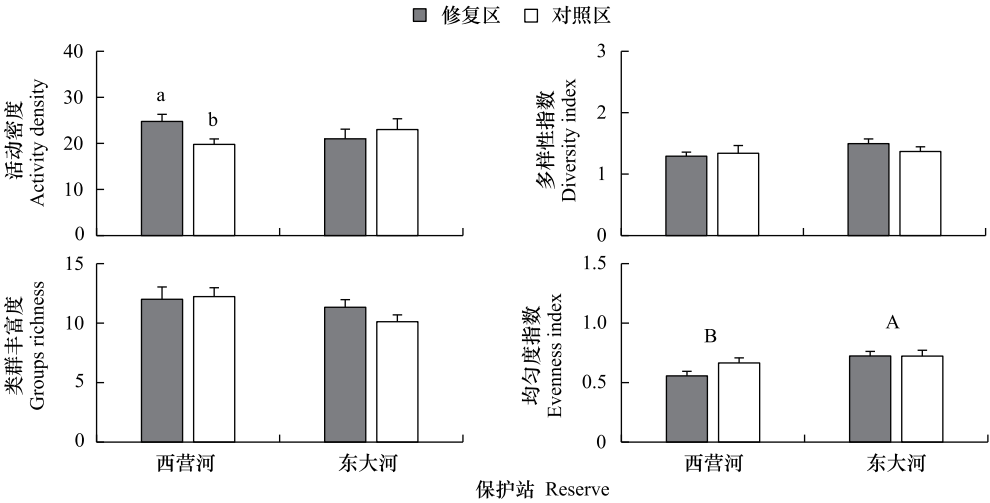


图3 祁连山国家公园西营河和东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落活动密度、类群丰富度、多样性指数和均匀度指数比较

Fig.3 Comparison of activity density, groups richness, diversity index and evenness index of ground arthropod community at coal mine restoration and adjacent habitats of the Xiyinghe and Dongdahe nature conservation station in Qilian Mountain National Park

小写字母代表煤矿修复区和对照区存在显著差异,大写字母代表两个保护站存在显著差异

2.3 西营河和东大河煤矿修复区和对照区主要节肢动物类群活动密度比较

祁连山国家公园主要节肢动物类群对保护站和煤矿修复的响应模式不同。硬体盲蛛科、平腹蛛科、狼蛛科、网翅蝗科、步甲科、隐翅虫科和蚁科的活动密度在西营河和东大河保护站存在显著差异(表2),其中硬体盲蛛科、平腹蛛科、网翅蝗科和蚁科的活动密度均表现为西营河显著高于东大河保护站,而狼蛛科、步甲科和隐翅虫科的活动密度在两个保护站表现相反(图4)。硬体盲蛛科仅分布在西营河保护站,煤矿修复显著降低了硬体盲蛛科的活动密度(图4)。平腹蛛科、步甲科和隐翅虫科对煤矿修复的响应模式一致,煤矿修复提高了这3个类群的活动密度,煤矿修复显著提高了西营河保护站平腹蛛科和隐翅虫科的活动密度与东大河保护站步甲科的活动密度(图4)。西营河和东大河保护站狼蛛科、网翅蝗科和蚁科的活动密度对煤矿修复的响应模式不同,煤矿修复提高了西营河保护站狼蛛科、网翅蝗科和蚁科的活动密度,但东大河保护站煤矿修复显著降低了狼蛛科、网翅蝗科和蚁科的活动密度(图4)。微蛛亚科和象甲科的活动密度在2个保护站相差较小,它们在2个保护站对煤矿修复的响应规律相近(表2)。西营河保护站微蛛亚科的活动密度在修复区显著高于对照区,而象甲科的活动密度在修复区显著低于对照区(图4)。

指示种分析结果表明,西营河保护站平腹蛛科($IV=83.3, P<0.05$)、微蛛亚科($IV=55.6, P<0.05$)和隐翅虫科($IV=70.0, P<0.05$)主要分布在煤矿修复区,它们对修复区具有较好的指示作用;蟹蛛科($IV=55.6, P<0.05$)偏好在对照区活动,它的数量变化可以指示对照区环境变化。东大河保护站步甲科($IV=69.8, P<0.05$)对煤矿修复区具有指示作用,它在煤矿修复区捕获的数量大幅增加;蚁科($IV=70.0, P<0.05$)在对照区活动较高,它的数量变化可以指示对照区环境变化。

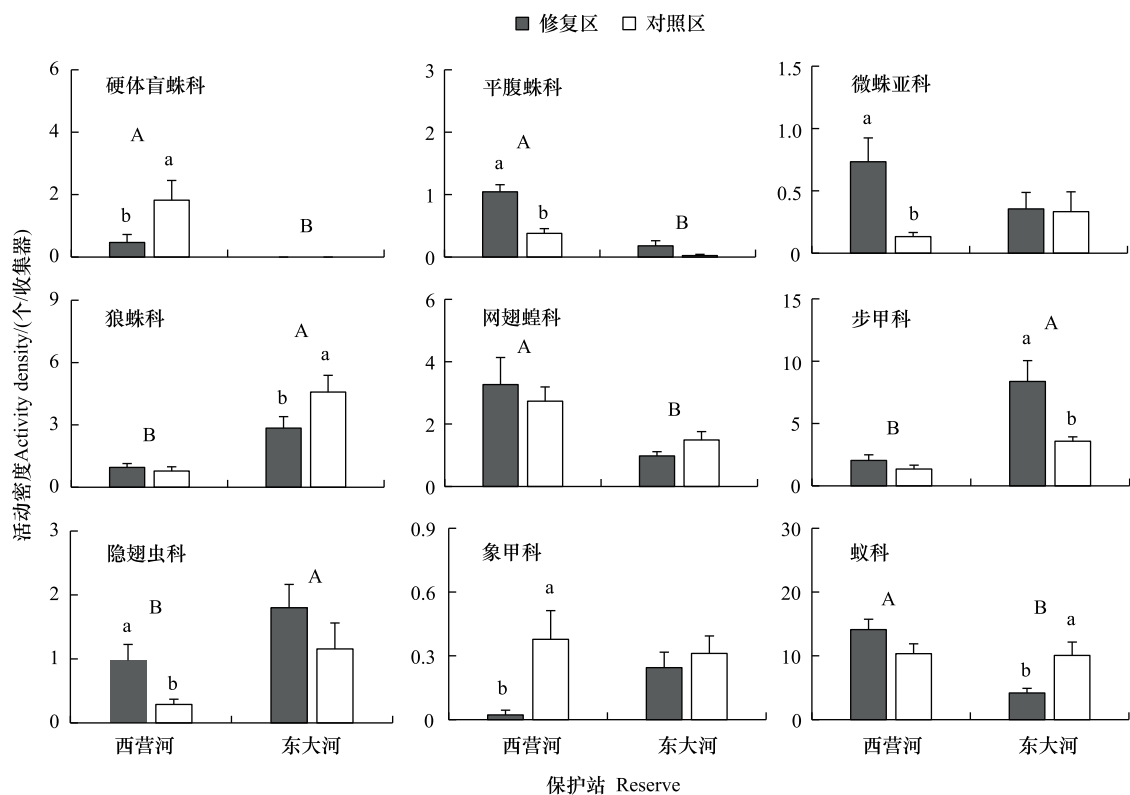


图4 祁连山国家公园西营河和东大河保护站9种主要节肢动物类群活动密度比较

Fig.4 Comparison of activity density on nine dominant taxa of arthropods at coal mine restoration and adjacent habitats of the Xiyinghe and Dongdahe nature conservation station in Qilian Mountain National Park

2.4 西营河和东大河煤矿修复区和对照区地表节肢动物分布的影响要素

西营河和东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落与6个环境因子的RDA排序结果的第一

排序轴 ($F=4.4$, $P=0.014$; $F=5.8$, $P=0.002$) 和所有排序轴均显著 ($F=2.3$, $P=0.004$; $F=2.6$, $P=0.002$), 表明排序结构较好的解释了煤矿修复区和对照区环境要素差异对地表节肢动物分布的影响。西营河保护站 6 个环境因子解释了 31.5% 的地表节肢动物群落变异, pRDA 分析结果表明海拔高度 ($F=4.3$, $P=0.002$) 和土壤全氮 ($F=3.7$, $P=0.006$) 是影响地表节肢动物群落分布的主要因子, 它们解释了 20.8% 的地表节肢动物群落变异。西营河保护站随着海拔升高, 土壤全氮含量逐步下降, 它们形成的环境梯度导致煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落组成明显不同; 不同煤矿修复区和对照区植被和土壤养分的差异程度不同, 这对煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落组成也有一定影响 (图 5)。东大河保护站 6 个环境因子解释了 35.4% 的地表节肢动物群落变异, pRDA 分析结果表明草本地地上生物量 ($F=5.2$, $P=0.004$) 和海拔高度 ($F=3.9$, $P=0.002$) 是影响地表节肢动物群落分布的主要因子, 它们解释了 24.3% 的地表节肢动物群落变异。东大河保护站煤矿修复区和对照区草本地地上生物量变化是影响煤矿修复区和对照区地表节肢动物分布的主要因子, 海拔高度引起煤矿修复区和对照区植被和土壤养分的差异也对煤矿修复区和对照区地表节肢动物分布产生一定影响 (图 5)。西营河和东大河地表节肢动物对煤矿修复区响应存在相近和相异变化, 平腹蛛科、微蛛亚科、隐翅虫科和步甲科在西营河和东大河保护站对煤矿修复均有正响应, 而象甲科在两个保护站对煤矿修复有负响应, 狼蛛科、网翅蝗科和蚁科对煤矿修复的响应因保护站不同而异 (图 5)。

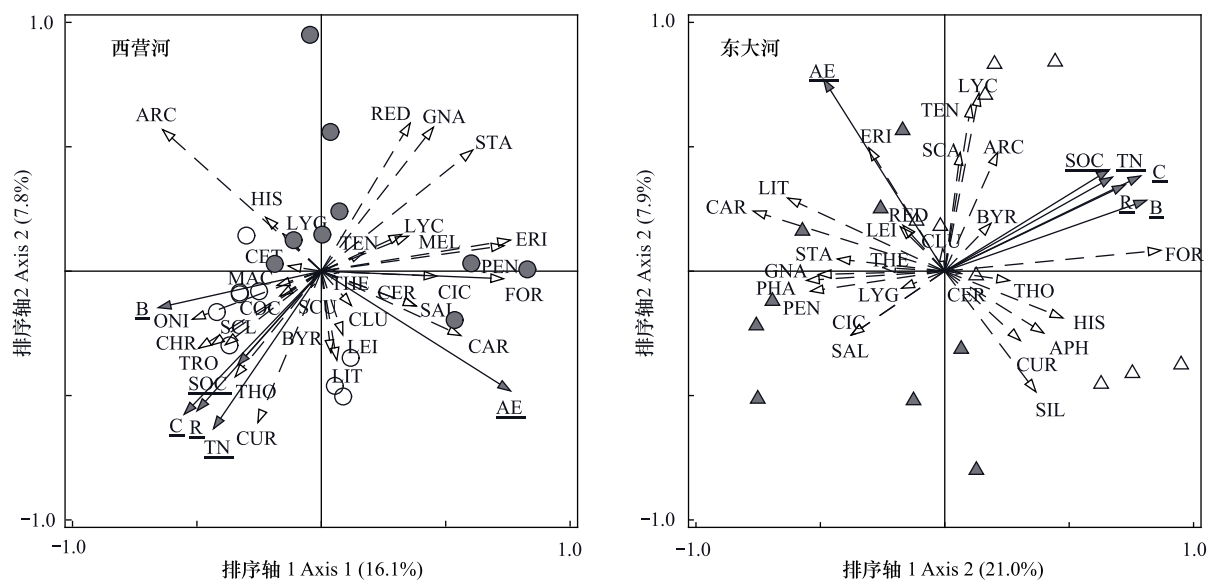


图 5 西营河和东大河修复区和对照区地表节肢动物与 6 个环境因子的 RDA 排序图

Fig.5 The RDA two-dimensional ordination diagram of ground arthropod community and six environment factors at coal mine restoration and adjacent habitats in Xiyinghe and Dongdahe nature conservation station

图中○代表西营河保护站, △代表东大河保护站, 灰色代表煤矿修复区, 白色代表对照区; RDA: 冗余分析 Redundancy analysis; 实线箭头代表环境因子, AE: 海拔高度; C: 草本盖度; B: 草本地地上生物量; R: 草本丰富度; SOC: 土壤有机碳; TN: 全氮; 虚线箭头代表地表节肢动物类群, LIT: 石蜈蚣科; SCU: 蚰蜒科; SCL: 硬体盲蛛科; PHA: 长跗盲蛛科; CLU: 管巢蛛科; GNA: 平腹蛛科; LYC: 狼蛛科; THE: 球蛛科; THO: 蟹蛛科; SAL: 跳蛛科; ERI: 微蛛亚科; TRO: 绒螨科; ONI: 潮虫科; ARC: 网翅蝗科; MAC: 石蛎科; LYG: 长蝽科; PEN: 蝽科; RED: 猎蝽科; CIC: 虎甲科; CAR: 步甲科; COC: 瓢虫科; HIS: 阎甲科; STA: 隐翅虫科; CUR: 象甲科; CHR: 叶甲科; CET: 花金龟科; CER: 天牛科; MEL: 芫菁科; TEN: 拟步甲科; SIL: 葬甲科; APH: 蜉金龟科; SCA: 金龟子科; BYR: 丸甲科; LEI: 球蕈甲科; FOR: 蚁科

3 讨论

祁连山国家公园甘肃片区煤矿修复区地处高寒山区, 煤矿地下开采及尾矿堆放破坏表层土壤, 植被的恢复和土壤发育过程十分缓慢; 通过人工平整土地、覆土来重建表层土壤会提升土壤肥力, 种植草本和木本植物

抑制坡面土壤侵蚀会加快植被的恢复演替,这些增强了煤矿修复区植被和土壤的稳定性^[6, 16-18]。煤矿矿区植被和土壤恢复会影响地表节肢动物的多样性,崔艳等^[27]在山西平朔矿区研究发现植被类型在露天煤矿修复中强烈影响大型土壤动物群落组成;辛未冬等^[28]在山西煤矿尾矿开发研究发现,尾矿堆土地利用方式不同改变地上植被,这会强烈影响地表节肢动物的群落组成及多样性;林英华等^[29]在北京市门头沟废弃采石矿区研究发现矿区的恢复方式、土壤养分及植被状况强烈影响地表节肢动物的数量和营养功能群的分布,本文在高寒山区煤矿修复对地表节肢动物多样性影响的结果与这些研究相近。近期的一些研究也发现,煤矿矿区修复措施会影响矿区植被演变和土壤发育过程,这会影响土壤动物的响应模式^[15, 30]。Colombini 等^[30]在法国西北部煤矿修复区的研究发现,不同修复措施对矿区土壤环境和土壤动物的群落组成、营养结构影响不同,修复技术引起的土壤环境变化对土壤动物聚集的影响较大。Hendrychová 等^[15]在欧洲煤矿自然恢复演替和人工修复过程对土壤动物影响的对比研究发现,土壤动物物种丰富度变化不仅受土壤环境影响,还受小气候和生境扰动的影响,矿区修复需要结合多种措施来提高土壤动物多样性及其功能^[31]。本文在高寒山区的研究也发现,西营河和东大河两个保护站气候及放牧扰动背景不同改变了煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落聚集的差异程度,西营河煤矿修复区显著提高了地表节肢动物的数量,而东大河保护站煤矿修复区地表节肢动物数量与对照区相比略低,两个保护站环境背景差异影响了高寒山区甲虫、蜘蛛和蚂蚁等迁移扩散能力强的地表节肢动物对矿区修复的短期响应模式^[13, 20]。煤矿修复区毗邻的草地中一些蜘蛛、甲虫和蚂蚁等地表节肢动物可以快速迁移进入到修复区,但煤矿修复区和对照区植被和土壤环境差异程度会影响主要地表节肢动物聚集程度^[32-33]。此外,研究还发现西营河和东大河保护站内煤矿修复区均会捕获到一些蜘蛛、甲虫和蜻类,这些类群在毗邻草地均没有分布,这说明人工覆土和植被栽植会携带一些地表节肢动物种进入到煤矿修复区^[34]。

地表节肢动物群落中主要科在煤矿修复区和对照区均有分布,这些表栖的节肢动物类群的迁移扩散能力较强,与中小型土壤动物相比它们从毗邻生境可以快速进入煤矿修复区^[13, 20]。祁连山国家公园地表节肢动物对煤矿修复的响应十分敏感,但不同节肢动物类群的生理生态特征存在一定差异,导致它们对煤矿修复响应的敏感程度不同并存在区域差异^[27, 34-35]。步甲科和隐翅虫科是祁连山国家公园森林和草地广泛分布的表栖节肢动物类群,煤矿修复提高了步甲科、隐翅虫科和平腹蛛科的活动密度,这与这些捕食性节肢动物类群迁移扩散能力较强有关,它们是先锋物种可以快速进入修复扰动区并栖居和繁殖^[20, 36-37]。象甲科属于植食性类群,煤矿修复降低了西营河和东大河象甲科的活动密度,植物种类引起的资源及捕食强度变化对这些植食性节肢动物影响较大。Kędzior 等^[35]研究发现矿区林地恢复提高了一些植食性甲虫的数量,而步甲科等捕食性甲虫对矿区修复的响应不敏感,甲虫食性不同影响了它们对矿区修复的响应模式,这与本文研究略有不同,高寒山区煤矿修复对步甲科和象甲科活动密度均有影响,但二者对煤矿修复的响应模式不同。蚁科和狼蛛科对煤矿修复的响应存在明显的区域差异,说明煤矿修复区和对照区植被群落组成及盖度引起的资源数量及质量变化影响它们在煤矿修复区和对照区的活动,环境背景变化影响了它们对煤矿修复驱动植被和土壤环境变化的响应模式^[38-39]。狼蛛科是祁连山高寒生境重要的捕食性类群,煤矿修复显著降低了东大河保护站狼蛛科的活动密度,但它对西营河保护站的影响较小,这可能与放牧扰强度不同引起煤矿修复区和对照区植被盖度变化有关^[40]。蚁科是祁连山国家公园重要的地表节肢动物类群,它广泛分布在各种生境类型,煤矿修复对蚁科活动密度的影响随着保护站的环境变化而变,这可能与海拔及放牧扰动有关^[41]。蚁科在祁连山南坡不同垂直带出现多域效应、中域效应或底域效应现象,不同海拔高度上栖息着适应了不同生境的物种聚集群,同时受到人类对生境干扰的影响^[41-42]。此外,蚁科等地表节肢动物在煤矿修复区的栖居和繁殖还会影响土壤物理结构和植物群落变化,影响土壤生物多样性及土壤多功能性^[7]。总之,祁连山国家公园高寒山区煤矿短期修复影响了地表节肢动物的分布及多样性,煤矿毗邻生境及其气候与生境扰动影响了主要地表节肢动物科对矿区修复的响应模式,从而影响了煤矿修复区和对照区地表节肢动物的聚集结构。

海拔高度影响植物和土壤动物的分布,祁连山国家公园内煤矿矿区的海拔、地形及人为扰动背景等决定

了修复区和对照区植被和土壤环境的差异程度,从而影响了修复区和对照区地表节肢动物的分布及多样性^[42-43]。海拔引起降水和温度的梯度变化是影响祁连山国家公园植被和土壤垂直分布的主要因子^[44-45],飞行和表栖昆虫对海拔升高的响应十分敏感^[41-42],它也会影响地表节肢动物对煤矿修复的响应模式。本文研究发现海拔高度是西营河和东大河保护站影响煤矿修复区和对照区地表节肢动物分布的重要环境因子,它还会影响煤矿修复区植被和土壤环境变化影响地表节肢动物分布。煤矿修复区毗邻草地生境地表节肢动物也会因海拔高度变化而存在一定差异,毗邻生境又是煤矿修复区地表节肢动物物种资源库,它们迁入到煤矿修复区影响地表节肢动物群落结构。祁连山高寒山区土壤修复和植被建设对地表节肢动物的影响存在明显的地域差异,说明海拔、地形及扰动强度等会影响地表植被和土壤环境变化影响地表节肢动物聚集。煤矿修复过程中土地平整造成生境异质性的降低会抑制地表节肢动物的多样性^[46],但土壤覆盖提升表层土壤肥力会对地表节肢动物多样性产生积极的影响。林英华等^[29]研究发现矿区修复过程中土壤有机碳及全氮等养分含量的增加会提高土壤动物多样性,本文关于地表节肢动物研究与之不同。地表节肢动物迁移扩散能力强,它们对环境胁迫的抵御能力也强,西营河煤矿修复区全氮含量较低,但食物资源及扰动变化会促进一些地表节肢动物类群偏好选择在煤矿修复区活动。东大河保护站与西营河不同,草本的地上生物量是影响煤矿修复区和对照区地表节肢动物分布的关键因子,草本地上生物量、盖度及物种丰富度均在煤矿修复区低于对照区,这会导致地表节肢动物的数量下降。高寒山区草地植被盖度变化强烈影响地表节肢动物的数量及多样性,这可能与围封和禁牧等人为扰动强度驱动植被短期变化有关^[40]。高寒山区利用平整土地、覆盖土壤和种植草本会缩小修复区和对照区的生境差异,海拔引起的毗邻生境植被和土壤环境变化会影响地表节肢动物在修复区和对照区间迁移。地表节肢动物多样性对高寒山区煤矿短期修复有较好的指示作用,可以反映海拔、地形及人为扰动变化对煤矿修复效果的影响^[20]。高寒山区土壤发育十分缓慢,煤矿开发破坏表层土壤结构,人工修复土壤可以快速恢复土壤肥力,但对土壤健康及稳定的影响十分有限^[18]。因而,针对煤矿自然环境和人为扰动背景制定高寒山区煤矿修复措施及后续管理策略,通过培肥、加固坡面和植被修复等提升土壤生物多样性,这有利于快速恢复煤矿修复区的健康与稳定。此外,高寒山区煤矿修复效果长期评估还需要引入土壤大型和中小型类群,它们能更准确认识和理解煤矿修复对土壤动物群落演替和土壤多功能性提升的影响^[13, 30, 47]。

4 结论

祁连山国家公园高寒山区煤矿矿区人工覆土和植被建设可以快速改善土壤质量和恢复植被,但海拔、地形和人为扰动背景等会影响地表节肢动物多样性对煤矿的响应模式。西营河和东大河保护站煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落组成明显不同并存在区域差异,主要地表节肢动物科对煤矿修复的响应模式不同决定了煤矿修复区和对照区地表节肢动物群落聚集结构。西营河煤矿修复显著提高了地表节肢动物活动密度,而东大河保护站煤矿修复导致地表节肢动物活动密度略有降低,地表节肢动物类群丰富度、多样性和均匀度指数变化与活动密度相反。西营河和东大河保护站平腹蛛科、微蛛亚科、隐翅虫科、步甲科和象甲科活动密度对煤矿修复的响应模式相近,西营河保护站煤矿修复显著提高了平腹蛛科、微蛛亚科和隐翅虫科活动密度,但显著降低了象甲科活动密度,东大河保护站煤矿修复显著提高了步甲科活动密度。西营河和东大河保护站狼蛛科、网翅蝗科和蚁科活动密度对煤矿修复的响应模式不同,西营河保护站煤矿修复显著降低了硬体盲蛛科活动密度,东大河保护站煤矿修复显著降低了狼蛛科和蚁科的活动密度。pRDA 排序结果表明,海拔高度和全氮含量解释了西营河保护站煤矿修复区和对照区 20.8% 的地表节肢动物群落变异;草本地上生物量和海拔高度解释了东大河保护站煤矿修复区和对照区 24.3% 的地表节肢动物群落变异。总之,地表节肢动物对高寒山区煤矿的短期修复(5 年)的响应十分敏感,海拔、地形变化及放牧扰动影响了地表节肢动物对煤矿修复的响应模式,针对煤矿环境背景制定管理和修复策略可以提高地表节肢动物的多样性及其生态功能,这会加快高寒山区煤矿修复区土壤健康恢复并促进人工植被群落向天然群落恢复演替。

参考文献 (References):

- [1] 李新, 勾晓华, 王宁练, 盛煜, 金会军, 祁元, 宋晓谕, 侯扶江, 李育, 赵长明, 邹松兵, 王宏伟, 郑东海, 陈莹莹, 牛晓蕾. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复. 科学通报, 2019, 64(27): 2928-2937.
- [2] 李敏, 宣晶, 冯虎元. 国家公园巡礼——祁连山国家公园篇. 生命世界, 2021(7): 94-95.
- [3] Feng Y, Wang J M, Bai Z K, Reading L. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: a review. Earth-Science Reviews, 2019, 191: 12-25.
- [4] 刘娟. 甘肃祁连山地区矿山遥感监测与生态恢复治理评价[D]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [5] 王佟, 杜斌, 李聪聪, 王辉, 周伟, 王宏, 林中月, 赵欣, 熊涛. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术. 煤炭学报, 2021, 46(1): 230-244.
- [6] 罗维成, 赵文智, 刘继亮, 杨竞艺, 白雪莲, 魏乐民, 冯怡琳. 祁连山自然保护区煤矿修复区地表节肢动物分布特征及其影响因素. 中国沙漠, 2022, 42(6): 165-175.
- [7] Domínguez-Haydar Y, Gutierrez-Rapalino B P, Barros-Torres Y, Jiménez J J, Lozano-Baez S E, Castellini M. Impact of *Pheidole fallax* (Hymenoptera: Formicidae) as an ecosystem engineer in rehabilitated coal mine areas. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1573.
- [8] Morales-Márquez J, Meloni F. Soil fauna and its potential use in the ecological restoration of dryland ecosystems. Restoration Ecology, 2022, 30(6): e13686.
- [9] Bardgett R D, van der Putten W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. Nature, 2014, 515(7528): 505-511.
- [10] Orgiazzi A, Bardgett R D, Barrios E. Global soil biodiversity atlas. European Commission, 2016.
- [11] 孙新, 李琪, 姚海凤, 刘满强, 吴东辉, 朱冬, 朱永官. 土壤动物与土壤健康. 土壤学报, 2021, 58(5): 1073-1083.
- [12] Cristescu R H, Frère C, Banks P B. A review of fauna in mine rehabilitation in Australia; current state and future directions. Biological Conservation, 2012, 149(1): 60-72.
- [13] Sanchez S P, Courtney R, Schmidt O. Soil meso-and macrofauna indicators of restoration success in rehabilitated mine sites. Handbook of Ecological and Ecosystem Engineering, 2021, 67-94.
- [14] Rufaut C, Clearwater S, Craw D. Recolonisation and recovery of soil invertebrate assemblages at an inactive coal mine in southern New Zealand. New Zealand Natural Sciences, 2010, 35: 17-30.
- [15] Hendrychová M, Šálek M, Tajovský K, Řehoř M. Soil properties and species richness of invertebrates on afforested sites after brown coal mining. Restoration Ecology, 2012, 20(5): 561-567.
- [16] 王锐, 李希来, 张静, 周华坤. 高寒矿区人工种草对露天排土场渣山表层基质的影响. 草地学报, 2019, 27(4): 938-948.
- [17] 高志香, 李希来, 张静, 金立群, 周伟. 覆土处理对高寒矿区露天煤矿排土场植被和土壤特征的影响. 水土保持通报, 2021, 41(1): 82-87, 96.
- [18] 王佟, 蔡杏兰, 李飞, 王辉, 刘金森, 周伟, 谢色新, 赵欣, 宁康超, 杨庆祝, 李聪聪, 高超, 孙浩, 龚雨杭. 高原高寒矿区生态地质层修复中的土壤层构建与成分变化差异. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2407-2419.
- [19] Snyder B A, Hendrix P F. Current and potential roles of soil macroinvertebrates (earthworms, millipedes, and isopods) in ecological restoration. Restoration Ecology, 2008, 16(4): 629-636.
- [20] Tizado E J, Núñez-Pérez E. Terrestrial arthropods in the initial restoration stages of anthracite coal mine spoil heaps in northwestern Spain: potential usefulness of higher taxa as restoration indicators. Land Degradation & Development, 2016, 27(4): 1131-1140.
- [21] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [22] Song D X, Zhu M S, Chen J. The Spiders of China. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 1999.
- [23] 任国栋, 于有志. 中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫. 保定: 河北大学出版社, 1999.
- [24] 梁宏斌, 虞佩玉. 中国捕食粘虫的步甲种类检索. 昆虫天敌, 2000, 22(4): 160-167.
- [25] 鲍士旦. 土壤理化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] Clarke K R, Gorley R. N-PRIMER V6: User Manual/Tutorial (Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research). Plymouth: Primer-ELtd, 2006.
- [27] 崔艳, 张继栋, 白中科, 李晋川, 韩丽君, 樊文华. 露天煤矿不同恢复植被大型土壤动物群落比较. 生态环境, 2008, 17(3): 1024-1027.
- [28] 辛未冬, 刘华煜, 杨铁萌, 赵浩志. 复垦对煤矸石山地地表节肢动物群落特征的影响. 生态学杂志, 2021, 40(7): 2213-2222.
- [29] 林英华, 宋百敏, 韩茜, 王静, 张永, 于长青. 北京门头沟废弃采石矿区地表土壤动物群落多样性. 生态学报, 2007, 27(11): 4832-4839.
- [30] Colombini G, Watteau F, Auclerc A. Technosol rehabilitation strategies drive soil physico-chemical properties and fauna diversity on a former coking plant area. Applied Soil Ecology, 2022, 177: 104542.

- [31] 吴翊平, 周国驰, 杨卓, 冯嘉懿, 江新奇, 付合英, 朱宴南, 佟佳庆, 李文海, 赵亮, 张涵羽, 王志超, 田野. 高寒地区煤矿排土场植被恢复研究——以内蒙古扎哈淖尔煤矿为例. 生态学报, 2022, 42(24): 10088-10097.
- [32] Dunger W, Wanner M, Hauser H, Hohberg K, Schulz H J, Schwalbe T, Seifert B, Vogel J, Voigtländer K, Zimdars B, Zulka K P. Development of soil fauna at mine sites during 46 years after afforestation¹. *Pedobiologia*, 2001, 45(3): 243-271.
- [33] 朱永恒, 赵春雨, 张平究, 陆林. 矿区废弃地土壤动物研究进展. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2088-2092.
- [34] Wanner M, Dunger W. Primary immigration and succession of soil organisms on reclaimed opencast coal mining areas in eastern Germany. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38(2): 137-143.
- [35] Kędzior R, Szwalec A, Mundała P, Skalski T. Ground beetle (Coleoptera, Carabidae) life history traits as indicators of habitat recovering processes in postindustrial areas. *Ecological Engineering*, 2020, 142: 105615.
- [36] Lövei G L, Sunderland K D. Ecology and behavior of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Annual Review of Entomology*, 1996, 41: 231-256.
- [37] Barton P S, Manning A D, Gibb H, Wood J T, Lindenmayer D B, Cunningham S A. Experimental reduction of native vertebrate grazing and addition of logs benefit beetle diversity at multiple scales. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(4): 943-951.
- [38] Holec M, Frouz J. Ant (Hymenoptera: Formicidae) communities in reclaimed and unreclaimed brown coal mining spoil dumps in the Czech Republic. *Pedobiologia*, 2005, 49(4): 345-357.
- [39] Willand J E, McCravy K W. Variation in diel activity of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) associated with a soybean field and coal mine remnant. *Great Lakes Entomologist*, 2006, 39: 141-148.
- [40] 王永珍, 冯怡琳, 林永一, 赵文智, 陈生云, 邓艳芳, 刘继亮. 长期围封对疏勒河源区高寒草甸地表节肢动物多样性的影响. 生态学报, 2022, 42(18): 7495-7506.
- [41] 熊忠平, 和秋菊, 徐正会, 翟奖, 李彪, 黄钊, 钱昱含. 祁连山国家公园青海片区蚂蚁物种多样性研究. 环境昆虫学报, 2021, 43(1): 93-103.
- [42] 汪有奎, 杨全生. 祁连山森林昆虫. 甘肃科学技术出版社出版, 2008.
- [43] Tropek R, Hejda M, Kadlec T, Spitzer L. Local and landscape factors affecting communities of plants and diurnal Lepidoptera in black coal spoil heaps: implications for restoration management. *Ecological Engineering*, 2013, 57: 252-260.
- [44] 王金叶, 王彦辉, 王顺利, 于澎涛, 张学龙, 葛双兰. 祁连山林草复合流域降水规律的研究. 林业科学研究, 2006, 19(4): 416-422.
- [45] 牛赞, 刘贤德, 敬文茂, 车宗玺, 赵维俊. 祁连山排露沟流域气温、冻土冻融与河川径流特征. 林业科学, 2014, 50(1): 27-31.
- [46] Moradi J, Potocký P, Kočárek P, Bartuška M, Tajovský K, Tichánek F, Frouz J, Tropek R. Influence of surface flattening on biodiversity of terrestrial arthropods during early stages of brown coal spoil heap restoration. *Journal of Environmental Management*, 2018, 220: 1-7.
- [47] Moradi J, Vicentini F, Šimáčková H, Pižl V, Tajovský K, Stary J, Frouz J. An investigation into the long-term effect of soil transplant in bare spoil heaps on survival and migration of soil meso and macrofauna. *Ecological Engineering*, 2018, 110: 158-164.