

孙小霞,冯怡琳,王永珍,等.祁连山东大河林区煤矿修复对地表甲虫多样性的影响[J].中国沙漠,2023,43(6):176-186.

祁连山东大河林区煤矿修复对地表甲虫多样性的影响

孙小霞¹,冯怡琳²,王永珍³,罗维成³,杨竞艺^{3,4},史宏亮⁵,刘继亮³

(1.甘肃祁连山国家级自然保护区管护中心,甘肃 张掖 734000; 2.宁夏大学,宁夏 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,甘肃 兰州 730000; 4.甘肃农业大学,甘肃 兰州 730000; 5.北京林业大学,北京 100083)

摘要:覆土和恢复草本植物可以快速改善高寒山区煤矿矿区环境,植被和土壤环境变化会强烈影响地表甲虫的分布及多样性,煤矿矿区海拔影响甲虫的群落结构变化。以地处祁连山中部的东大河林区为研究区,依据海拔选择宏达、头沟大坂和下泉沟3个典型煤矿作为研究对象,解析高寒山区煤矿人工修复对地表甲虫多样性的影响规律,确定影响地表甲虫分布的主要环境要素。结果表明:东大河林区人工覆土和恢复草本植被的煤矿矿区5年后,煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成还存在一定差异,海拔较高的下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫群落的平均相异性(84.4%)高于海拔较低的宏达(54.6%)和头沟大坂(57.2%)煤矿。煤矿修复显著提高了头沟大坂和下泉沟煤矿地表甲虫的活动密度,地表甲虫的物种丰富度仅在下泉沟煤矿修复区显著高于对照区。煤矿修复对大、中型甲虫影响较小,但提高了小型甲虫的活动密度和物种丰富度,这在下泉沟煤矿表现尤为明显。海拔、坡度、草本盖度和土壤有机碳含量是影响煤矿修复区和对照区地表甲虫分布的主要环境因子,它们解释了地表甲虫群落变异的22.1%。大、中型地表甲虫分布与海拔和坡度密切相关,而小型地表甲虫分布与草本盖度变化有关。祁连山区煤矿修复改变了植被和土壤环境,提高了小型甲虫的活动密度和物种丰富度,而大、中型甲虫的分布则主要受海拔及坡度变化的影响,它们对煤矿修复及海拔变化的响应模式不同决定了地表甲虫多样性变化。

关键词:祁连山;东大河林区;煤矿修复;地表甲虫多样性;个体大小

文章编号:1000-694X(2023)06-176-11

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00031

中图分类号:S154.5

文献标志码:A

0 引言

祁连山自然保护区生态环境脆弱,煤矿地下开采及尾矿堆放对林区植被、土壤和水体造成极大破坏,矿区生态修复难度大^[1-2]。2017年以来,随着祁连山生态环境整治,甘肃祁连山自然保护区内开矿活动全面关停,采用矿坑填埋、建筑拆除、尾矿覆土和人工种树和种草等修复措施恢复矿区生态环境,利用围封禁牧等降低放牧等人类活动干扰促进植被和土壤环境恢复。高寒山区土壤发育缓慢,通过覆土、重构土层和人工恢复植被可以快速提高表层土壤肥力和植被盖度,但山区煤矿修复区土壤养分

及水分的匮乏会影响植被的恢复演替过程并存在明显的区域差异,从而威胁区域的生态安全与稳定^[1-5]。地表甲虫是大型土壤动物群落中的主要类群,参与物质分解和养分循环过程,其数量、多样性及功能性状对矿区生态恢复扰动的响应十分敏感,可以指示和用于评估矿区的生态修复效果^[6-9]。

煤矿等矿区自然恢复和人工修复均会影响土壤动物的分布及多样性,不同土壤动物类群对矿区修复的响应模式不同并存在一定的地域差异。大型、中型和小型土壤动物对煤矿矿区修复的响应敏感程度不同,原生动物、小型节肢动物和一些蜘蛛可以通过空气传播侵入矿区,而蜘蛛和甲虫等地表

收稿日期:2022-11-30; 改回日期:2023-04-12

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060304);国家自然科学基金项目(41771290,41701287)

作者简介:孙小霞(1966—),女,甘肃秦安人,硕士,正高级工程师,从事林业有害生物灾害监测防治及自然保护区森林资源管理工作。

E-mail: 402113966@qq.com

通信作者:刘继亮(E-mail: liujl707@lzb.ac.cn)

节肢动物通常是通过迁移进入修复区^[10]。煤矿矿区修复模式和植被类型等均会影响矿区的修复效果,人工恢复植被和覆土与矿区的自然恢复相比可以加快植被的恢复演替过程,提高土壤动物的多样性及其功能^[11-12]。此外,一些研究也发现煤矿矿区复垦,土地利用方式不同影响地表节肢动物的组成及多样性^[13],说明土壤肥力的改善和资源的增加可以提升土壤动物多样性^[10,12,14]。地表甲虫是主要的大型土壤动物类群,对煤矿矿区植被和土壤环境短期变化的响应更敏感,地表甲虫群落指数及功能性状可以指示和用于评估矿区生态恢复效果^[13,15-16]。海拔是高寒山区甲虫和蚁科等大型土壤动物分布的重要影响因子,地表甲虫多样性对煤矿矿区修复的响应会随着矿区海拔的变化而变^[17-18]。鉴于此,本文以祁连山保护区东大河林区为研究区,依据海拔变化选取宏达、头沟大坂和下泉沟3个煤矿作为研究区,解析地表甲虫多样性对祁连山区煤矿生态修复的响应规律,确定煤矿修复过程中海拔、坡度、植被和土壤环境要素变化对地表甲虫分布的影响及调控作用,这对综合评估高寒山区煤矿修复对土壤动物多样性的影响具有重要意义。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

祁连山东大河林区位于祁连山北坡中段永昌县东大河和西大河中游地区,属于典型大陆性高寒半湿润气候。年平均气温1.9℃,最高气温31℃,最低气温-25℃。年降水量385.2 mm,年蒸发量1 258.3 mm,降水变化率大,集中于7—9月;年均相对湿度50%~60%,气候干燥。植物生长期135~150 d,高山地带植物生长期更短。青海云杉(*Picea crassifolia*)是森林主要建群种,分布在2 500~3 400 m的阴坡或半阳坡上;祁连圆柏和山杨为伴生种,林地面积和蓄积不到1.0%。灌木主要有高山柳(*Salix cupularis*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、金(银)露梅(*Potentilla fruticosa*、*Potentilla glabra*)和鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)等。草本植物有禾本科、莎草科、毛茛科、藜科、蓼科、菊科、十字花科等科的植物及苔藓等。土壤的分布随海拔不同而异,2 400~2 600 m主要土壤类型为山地灰钙土和山地栗钙土,2 600~3 400 m主要土壤类型为山地黑钙土和栗钙土,3 400~3 900 m主要土壤类型为高山沼泽

土和亚高山草甸土,3 900~4 200 m主要土壤类型为高山寒漠土^[19]。

祁连山北坡中段和东段煤矿开采比较集中,规模小、矿井分散且大多位于中、高海拔区,地质条件不稳定易引发滑坡等次生灾害,该区也是祁连山生态环境治理关注的重点区域。本研究依据煤矿的海拔变化在祁连山东大河林区内选择宏达、头沟大坂和下泉沟煤矿作为研究区。宏达煤矿(38°04′58″N、101°34′50″E,海拔2 781 m)1984年开采,2017年关停修复,恢复面积约3.4万m²,覆土1.02万m²;头沟大坂煤矿(38°04′26″N、101°35′11″E,海拔2 886 m)于1984年开采,2017年关停修复,恢复面积约9.5万m²,覆土2.7万m²;下泉沟煤矿(38°04′17″N、101°36′22″E,海拔2 962 m)建于1976年,2017年关停修复,恢复地形地貌约10.3万m²,覆土2.5万m²。宏达、头沟大坂和下泉沟煤矿均位于甘肃省祁连山保护区的实验区,煤矿开采前为牧草地,煤矿矿区面积及坡向相近。煤矿开采破坏了原有植被和土壤,3个煤矿均采用填埋矿井、拆除房屋和平整土地等修复措施,随后覆土(土层厚度10~20 cm)种植草本植物(主要是冰草(*Agropyron cristatum*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)和高羊茅(*Festuca elata*)等),下泉沟煤矿修复区还栽植了少量的青海云杉幼苗。煤矿修复后利用围栏封禁修复区及毗邻区域,从而降低放牧等人类活动干扰,促进矿区植被和土壤环境恢复。

1.2 试验设计及样品采集

东大河林区宏达、头沟大坂和下泉沟3个煤矿修复区依据坡面地形变化选择上、中坡位和下坡位3个地点作为地表甲虫和环境要素调查区。同时,在煤矿修复区的上、中坡位和下坡位附近选择坡向相近、植被分布均匀且煤矿开采扰动小的毗邻区域作为对照区,代表煤矿开采前的生境。每个地表甲虫样品调查区布设5个陷阱收集器用于采集地表甲虫样品。地表甲虫样品在2021年8—9月利用陷阱收集器采集,这一时间段草本植被的多样性及生物量最高,地表甲虫的类群多样性及数量也较高。陷阱收集器的保存液使用巴氏诱液(醋、糖、酒精和水的质量比为2:1:1:20),陷阱采集时间为7 d^[20]。陷阱采集的地表甲虫样品带回室内利用浮选法去除枯枝落叶和土壤,收集的甲虫样品保存在装有75%酒精溶液的样品瓶中低温保存。利用体式显微镜

观察地表甲虫样品形态特征,确定种属信息,大多数甲虫样品鉴定至种或属,部分样品鉴定为形态种^[21-23]。个体大小是无脊椎动物功能性状的重要指标,每个地表甲虫种或属选取成熟个体测量体长,依据体长划分为大甲虫(体长>15 mm)、中甲虫(体长9~15 mm)和小甲虫(体长<9 mm)3个类群^[6,24-25]。

3个煤矿修复区 and 对照区每个地表甲虫采集区利用GPS仪测量经纬度和坡度,每个地表甲虫采集区设置3个1 m×1 m草本样方,统计草本盖度和物种丰富度,采集草本样品带回室内利用烘干法测定草本生物量。利用土钻采集0~10 cm土壤样品带回室内风干后测定土壤pH、有机质和全氮含量,使用环刀法测定土壤容重及土壤含水量。土壤pH、有机质和全氮含量测试分析参照土壤农化分析方法测定^[26]。

1.3 数据处理

东大河林区宏达、头沟大坂和下泉沟3个煤矿修复区 and 对照区采集的地表甲虫按照收集器统计种属组成并计算每一种甲虫种的相对多度,统计优势(相对多度>10%)、常见种(1%~10%)和稀有甲虫(<1%)种类和数量。煤矿修复区 and 对照区3个地表甲虫采集区5个陷阱收集器合并统计个体数和种属组成,计算地表甲虫的活动密度(每个收集器捕获动物的个体数量)、物种丰富度(每个收集器采集的动物种或属)和多样性指数(Shannon-Wiener index),统计分析使用PAST 4.01软件包。随后统计大型、中型和小型甲虫的活动密度和物种丰富度。

采用二因素方差分析比较煤矿位置和修复处理对地表甲虫群落结构参数和不同大小甲虫活动密度及物种丰富度的影响,采用独立 t 检验确定煤矿修复区 and 对照区地表甲虫群落结构参数、不同大小甲虫活动密度和物种丰富度的差异,方差分析使用SPSS 21.0软件包。采用多元方差(Permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA)分析不同煤矿位置和矿区修复对地表甲虫群落及不同大小甲虫群落组成的影响,利用相似性百分比(Similarity percentage analysis, SIMPER)分析确定不同煤矿修复区 and 对照区地表甲虫群落的平均相异性和主要甲虫种的贡献率,统计分析使用PAST 4.01软件包。利用相关分析确定海拔、坡度、草本盖度、草本物种丰富度、pH、土壤有机质和全氮含量是3个煤矿修复区 and 对照区影响地表甲虫分布的主要

环境因子,采用典范对应分析确定(Canonical correspondence analysis, CCA)地表甲虫与7个环境因子的关系,使用pCCA分析确定主要因子对地表甲虫分布的贡献率。排序分析使用地表甲虫个体数量的数据,分析过程中所有数据进行 $\lg(x+1)$ 转换并降低稀有种的权重,统计分析使用排序软件CANOCO 5.0^[27]。

2 结果与分析

2.1 煤矿修复区 and 对照区地表甲虫物种组成及数量变化

2021年8—9月在东大河林区宏达、头沟大坂和下泉沟3个煤矿的修复区 and 对照区共采集601头33种地表甲虫(表1)。步甲科是该区主要地表甲虫类群,占群落总个体数和物种数的比例分别为71.1%和42.4%。地表甲虫群落中,锥须步甲种1、隐翅虫科、暗步甲种1和纹鞘步甲是优势种;盗甲、碎纹步甲和锥须步甲种2等9个甲虫种是常见种;稀有种有20种,它们的个体数占6.7%。宏达煤矿修复区捕获的地表甲虫个体数高于对照区(94头和73头),但煤矿修复区地表甲虫物种数略低于对照区(15种和16种);煤矿修复提高了隐翅虫科和锥须步甲种1的个体数,但降低了通缘步甲的捕获数量;煤矿修复区有伪葬步甲等6个特有的甲虫种,对照区有通缘步甲等7个特有甲虫种。头沟大坂煤矿修复区(208头16种)捕获的地表甲虫个体数和物种数均高于对照区(102头13种);煤矿修复提高了锥须步甲种1的捕获数量,但降低了隐翅虫科的捕获数量;煤矿修复区有大红斑葬甲等6个特有的地表甲虫种,而对照区有密条草天牛等3个特有甲虫种。下泉沟煤矿修复区(116头10种)捕获的地表甲虫个体数和物种数均大幅高于对照区(8头4种);煤矿修复区提高了暗步甲种1、隐翅虫科和锥须步甲种1的个体数。

2.2 煤矿修复区 and 对照区地表甲虫群落结构变化

东大河林区煤矿的地点和修复对地表甲虫群落影响的PERMANOVA多元方差分析结果表明,煤矿地点和修复均对地表甲虫群落组成有显著影响($F=9.80, P<0.001$; $F=6.81, P<0.001$),煤矿修复对地表甲虫群落组成的影响又受煤矿所在位置的影响($F=4.71, P<0.001$)。宏达、头沟大坂和下泉沟煤

表 1 东大河林区宏达、头沟大坂和下泉沟煤矿修复区和对照区捕获的地表甲虫

Table 1 Number of individuals of ground beetles captured at coal mine restoration area and control area of HD, TGDB, and XQG coal mines in the Dongdahe forest region

地表甲虫	宏达		头沟大坂		下泉沟	
	修复区	对照区	修复区	对照区	修复区	对照区
云纹虎甲 (<i>Cicindela elisae</i>)	0	0	1	0	0	0
暗步甲种 1 (<i>Amara</i> sp. 1)	2	1	23	22	23	3
锥须步甲种 1 (<i>Bembidion</i> sp.1)	15	1	121	18	47	3
锥须步甲种 2 (<i>Bembidion</i> sp.2)	4	0	2	2	5	0
锥须步甲种 3 (<i>Bembidion</i> sp.3)	0	0	2	0	0	0
肉步甲 (<i>Broscus</i> sp.)	1	1	0	0	0	0
碎纹步甲 (<i>Carabus modestulus</i>)	0	0	1	7	7	0
纹鞘步甲 (<i>Carabus sculptipennis</i>)	26	25	10	6	5	0
双斑猛步甲 (<i>Cymindis binotata</i>)	0	1	0	0	0	0
婪步甲 (<i>Harpalus</i> sp.)	1	3	0	0	0	0
盗甲 (<i>Leistus farkaci</i>)	3	1	11	4	4	1
伪葬步甲 (<i>Pseudotaphoxenus originalis</i>)	2	0	0	0	0	0
伪葬步甲 (<i>Pseudotaphoxenus</i> sp.)	0	0	5	2	0	0
通缘步甲 (<i>Pterostichus haptoderoides</i>)	0	5	0	0	0	0
距步甲 (<i>Zabrus przewalskii</i>)	0	0	1	0	0	0
隐翅虫科 (<i>Staphylinidae</i> spp.)	28	9	19	32	22	0
一角甲 (<i>Notoxus monoceros</i>)	1	0	0	0	0	0
大红斑葬甲 (<i>Necrophorus japonicus</i>)	5	5	1	0	0	0
葬甲 (<i>Necrophorus</i> sp.)	1	0	0	0	1	0
密条草天牛 (<i>Eodorcadion virgatum</i>)	0	0	0	1	0	0
梨象属 1 种 (<i>Apion</i> sp.)	0	2	2	0	0	0
船象属 1 种 (<i>Baris</i> sp.)	0	0	4	0	0	0
叶象 (<i>Donus nidensis</i>)	3	6	0	0	0	0
绿叶象 (<i>Phyllobius</i> sp.)	0	0	1	1	1	0
黄褐纤毛象 (<i>Tanymecus urbanus</i>)	0	0	0	1	0	0
蜉金龟种 1 (<i>Aphodius</i> sp.1)	0	5	0	1	0	0
蜉金龟种 2 (<i>Aphodius</i> sp.2)	0	6	0	0	0	0
墨侧裸蛭螂 (<i>Gymnopleurus mopsus</i>)	0	0	0	0	1	1
东鳖甲 1 种 (<i>Anatolica</i> sp.)	0	1	0	0	0	0
贞琵甲 1 种 (<i>Agnaptoria</i> sp.)	0	0	4	5	0	0
丸甲科 1 种 (<i>Byrrhidae</i> sp.)	1	0	0	0	0	0
阎甲科 1 种 (<i>Histeridae</i> sp.)	0	1	0	0	0	0
长泥甲科 1 种 (<i>Neoheterocerus</i> sp.)	1	0	0	0	0	0

矿修复区和对照区地表甲虫群落组成均存在一定差异 ($F=2.21$, $P=0.104$; $F=4.55$, $P=0.099$; $F=10.20$, $P=0.093$)。SIMPER 分析结果表明,下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成的平均相异性(84.4%)高于宏达和头沟大坂煤矿(54.6%和57.2%),隐翅虫科和锥须步甲种 1 解释了宏达、头沟大坂和

下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫群落差异的37.6%、68.5%和62.4%。

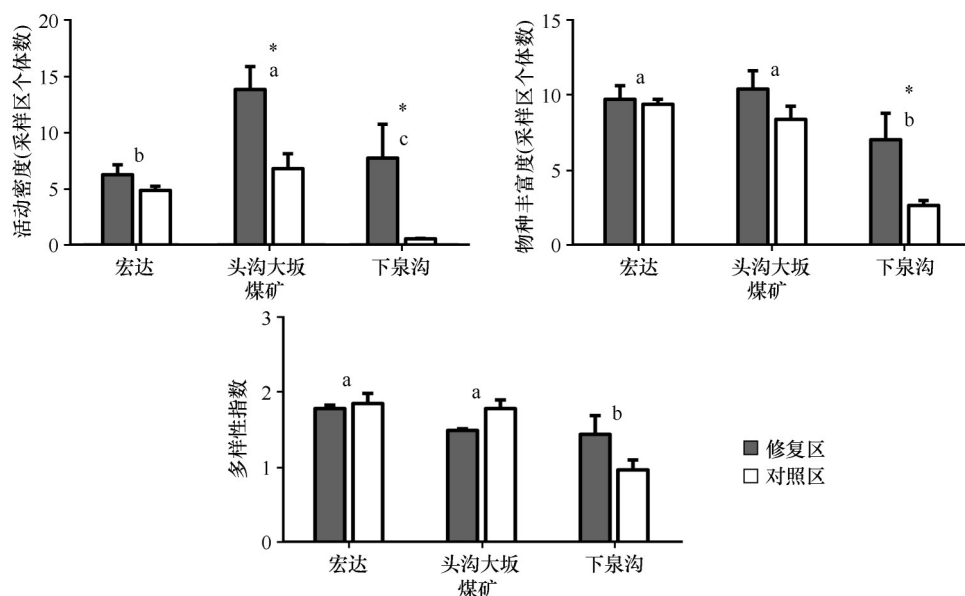
煤矿和生态修复处理均对地表甲虫活动密度和物种丰富度及二者的交互均有显著影响,煤矿对地表甲虫多样性指数有显著影响,它与生态修复处理的交互也对地表甲虫多样性指数有显著影响(表2)。头沟大坂煤矿地表甲虫活动密度显著高于宏达和下泉沟煤矿,而宏达煤矿地表甲虫活动密度又显著高于下泉沟煤矿;3个煤矿修复区地表甲虫活

动密度均高于对照区,而头沟大坂和下泉沟煤矿修复区地表甲虫活动密度显著高于对照区(图1)。宏达和头沟大坂煤矿地表甲虫类群丰富度和多样性指数均显著高于下泉沟,3个煤矿修复区地表甲虫的物种丰富度均高于对照区,其中地表甲虫的物种丰富度在下泉沟煤矿修复区显著高于对照区;下泉沟煤矿修复区地表甲虫多样性指数高于对照区,宏达和头沟大坂煤矿修复区和对照区地表甲虫多样性指数变化与下泉沟相反。

表2 煤矿和生态修复对地表甲虫群落和不同大小甲虫活动密度和物种丰富度影响的二因素方差分析结果

Table 2 Results of two-factor ANOVA analysis of the effect of coal mining and ecological restoration on community structure and different body sizes of ground beetles

指标		对照(CM)		生态修复(ER)		CM × ER	
		$F_{2,18}$	P	$F_{1,18}$	P	$F_{2,18}$	P
群落结构	活动密度	16.88	<0.001	30.63	<0.001	6.93	0.010
	物种丰富度	29.46	<0.001	15.36	0.002	4.73	0.031
	多样性指数	6.14	0.015	0.14	0.712	4.43	0.036
大甲虫	活动密度	8.07	0.006	1.98	0.185	0.51	0.612
	物种丰富度	5.29	0.022	2.91	0.114	0.53	0.599
中甲虫	活动密度	5.69	0.018	1.00	0.337	0.81	0.467
	物种丰富度	5.24	0.023	0.01	0.921	0.54	0.598
小甲虫	活动密度	13.64	<0.001	24.92	<0.001	3.64	0.058
	物种丰富度	5.07	0.025	8.07	0.015	1.87	0.197



字母不同代表不同煤矿间存在显著差异,*代表修复区和对照区存在显著差异

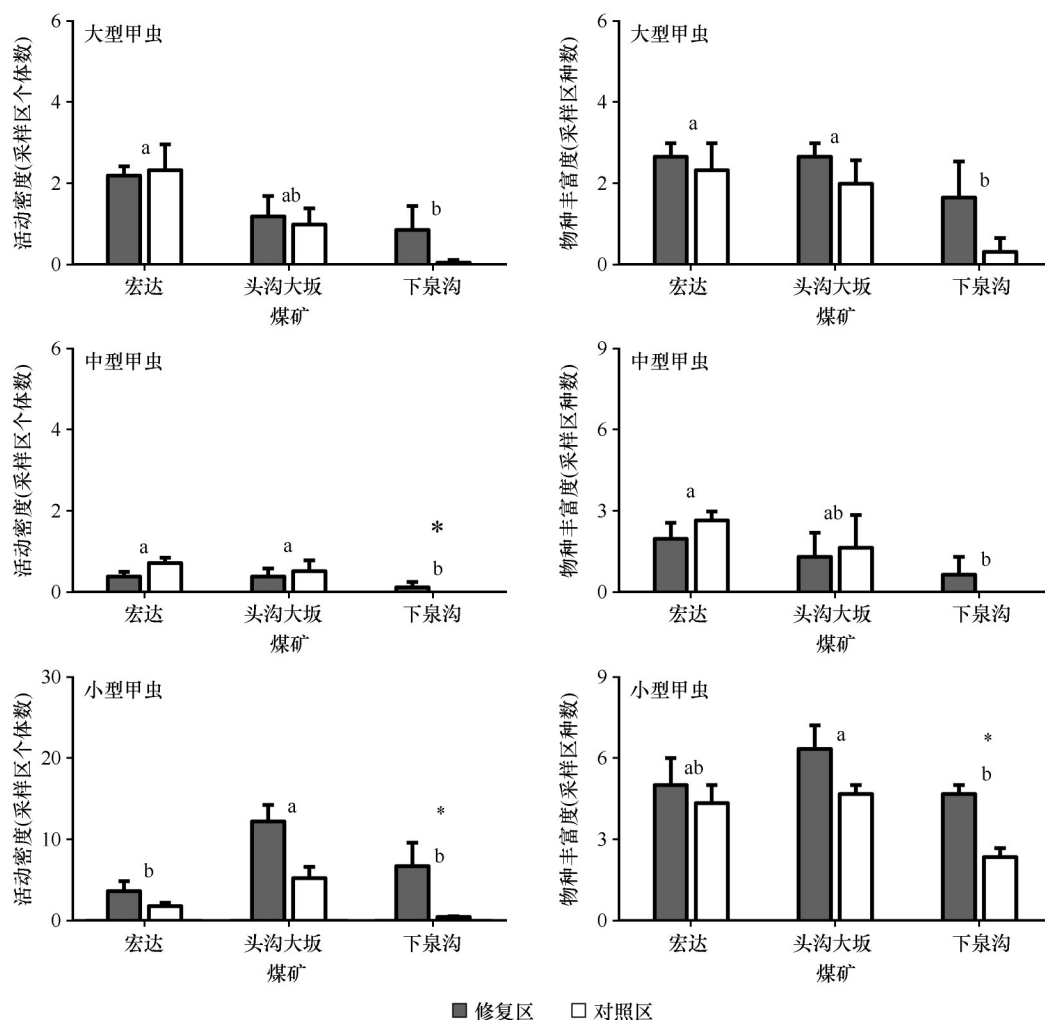
图1 东大河林区宏达、头沟大坂煤矿和下泉沟煤矿修复区(RH)和对照区(CH)地表甲虫活动密度、物种丰富度和多样性指数(Shannon-Wiener)比较

Fig.1 Comparison of activity density, species richness, and Shannon-Wiener index of ground beetles at coal mine restoration area and control area of HD, TGDB, and XQG coal mines in the Dongdahe forest region

2.3 煤矿修复区和对照区地表不同大小甲虫比较

东大河林区煤矿对大甲虫的活动密度和物种丰富度均有显著影响,而煤矿修复对大甲虫活动密度和物种丰富度的影响较小(表2)。宏达煤矿大甲虫的活动密度和物种丰富度显著高于下泉沟煤矿,头沟大坂煤矿大甲虫的物种丰富度也显著高于下泉沟;3个煤矿修复区和对照区大甲虫的活动密度和物种丰富度差异均不显著,头沟大坂和下泉沟煤矿修复区大甲虫的活动密度和物种丰富度高于对照区(图2)。中甲虫活动密度及物种丰富度对矿区变化的响应敏感,而矿区修复对中甲虫活动密度及物种丰富度的影响较小。宏达、头沟大坂煤矿修复

区中甲虫的活动密度显著高于下泉沟,宏达煤矿中甲虫物种丰富度显著高于下泉沟煤矿。宏达和头沟大坂煤矿修复区和对照区中甲虫活动密度和物种丰富度相差较小,下泉沟煤矿修复区中甲虫活动密度和物种丰富度均高于对照区,其中中甲虫的活动密度在煤矿修复区显著高于对照区。煤矿和修复对小甲虫的活动密度和物种丰富度均有显著影响,头沟大坂煤矿小型甲虫的活动密度显著高于宏达、下泉沟煤矿,头沟大坂煤矿小型甲虫的物种丰富度显著高于下泉沟煤矿。3个煤矿修复小型甲虫的活动密度和物种丰富度均高于对照区,其中下泉沟煤矿小型甲虫的活动密度和物种丰富度均显著高于对照区。



字母不同代表不同煤矿间存在显著差异,*代表修复区和对照区存在显著差异
图2 东大河保护站宏达、头沟大坂煤矿和下泉沟煤矿修复区(RH)和对照区(CH)大型、中型、小型甲虫活动密度和物种丰富度比较

Fig.2 Comparison of activity density and species richness of large, medium, and small beetles at coal mine restoration area and control area of HD, TGDB, and XQG coal mines in the Dongdahe forest region

2.4 煤矿修复区和对照区地表甲虫分布的影响要素

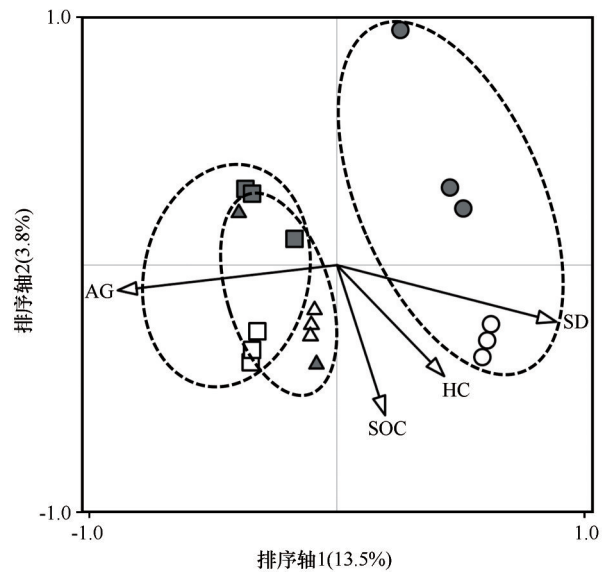
对东大河林区煤矿修复区和对照区海拔、坡度、草本盖度、草本物种丰富度、pH、土壤有机碳和全氮含量7个环境因子和地表甲虫进行CCA排序,第1排序轴($F=3.50, P=0.003$) and 所有排序轴均显著($F=1.60, P=0.009$),排序结果较好地反映了煤矿修复区和对照区对地表甲虫分布的影响。pCCA排序结果表明,海拔(解释量为11.2%, $P<0.001$)、坡度(4.3%, $P=0.084$)、土壤有机碳(3.3%, $P=0.188$)和草本盖度(3.3%, $P=0.217$)是影响地表甲虫分布的主要环境因子,它们累计解释了22.1%地表甲虫群落变异。排序轴1主要反映了海拔降低和坡度增大的梯度,它将宏达煤矿修复区和对照区与头沟大坂煤矿和下泉沟煤矿修复区和对照区分开;排序轴2主要反映了土壤有机碳和全氮含量降低的变化梯度,它将宏达、头沟大坂煤矿和宏达煤矿修复区与对照区分开,下泉沟煤矿修复区与对照区地表甲虫群落组成差异大于宏达煤矿和头沟大坂煤矿(图3)。东大河林区煤矿修复区和对照区地表甲虫群落指数和不同大小个体甲虫活动密度及物种丰富度的相关分析结果表明,地表甲虫活动密度和物种丰富度均与草本盖度呈显著负相关;地表甲虫物种丰富度和均匀度指数与海拔呈显著负相关;地表甲虫多样性指数与坡度呈显著正相关(表3)。大型、中型甲虫活动密度和物种丰富度与海拔呈显著负相关,大型甲虫活动密度和大、中型甲虫物种丰富度与坡度呈显著正相关;小型甲虫活动密度和物种丰富度均与草本盖度呈显著负相关。

表3 地表甲虫群落及不同大小甲虫活动密度和海拔、坡度、草本盖度和土壤有机碳与物种丰富度的Spearman相关系数

Table 3 Spearman correlation coefficients between the community structure groups and different body size ground beetles and altitudinal gradient, slope degree, herbaceous cover, and soil organic carbon content

地表甲虫		海拔	坡度	草本盖度	土壤有机碳
群落结构	活动密度	-0.17	0.04	-0.61**	-0.22
	物种丰富度	-0.64**	0.33	-0.47*	-0.04
	多样性指数	-0.53*	0.61**	-0.19	0.28
大甲虫	活动密度	-0.72***	0.72***	-0.20	-0.04
	物种丰富度	-0.52*	0.44+	-0.36	0.03
中甲虫	活动密度	-0.62**	0.36	0.02	0.39
	物种丰富度	-0.65**	0.46+	-0.11	0.17
小甲虫	活动密度	-0.03	-0.03	-0.68**	-0.26
	物种丰富度	-0.28	0.23	-0.55*	-0.14

*** $P<0.001$, ** $P<0.01$, * $P<0.05$, + $P<0.1$ 。



○代表宏达煤矿; △代表头沟大坂煤矿; □代表下泉沟煤矿; 灰色填充代表煤矿修复区, 白色填充代表对照区; AG代表海拔; SD代表坡度; SOC代表土壤有机碳; HC代表草本盖度

图3 东大河林区煤矿修复区和对照区地表甲虫与4个环境因子的CCA排序

Fig.3 The CCA two-dimensional ordination diagram of ground beetle community and four environmental factors at coal mine restoration area and control area of HD, TGDB, and XQG coal mines in the Dongdahe forest region

3 讨论

祁连山自然保护区东大河林区宏达、头沟大坂煤矿和下泉沟煤矿开采前土地利用类型均为牧草地,3个煤矿处的海拔2 820~3 070 m,植被类型也以山地草原和青海云杉林为主。东大河林区煤矿矿

区通过恢复表层土壤、种植禾本科草本快速恢复植被,这些措施会加快退化生境植被的恢复演替过程,强烈影响地表甲虫的分布及多样性^[7-8]。本文研究发现东大河林区煤矿矿区修复5年后,宏达、头沟大坂煤矿和下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成还存在一定差异,这种差异随着海拔的增加而增大。祁连山北坡中段降水随着海拔升高而增加、温度下降,植被呈明显的带状分布,动物物种丰富度也存在一定的梯度变化^[28-30]。前期研究也发现祁连山东大河林区昆虫区系组成以古北区为主,昆虫群落组成及多样性的垂直分布的变化趋势与植被相近,即均会随着海拔变化而变^[19,31]。本研究发现东大河林区宏达、头沟大坂煤矿和下泉沟煤矿修复措施相近、恢复年限一致,海拔较高的下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫群落的平均相异性高于海拔较低的宏达煤矿和头沟大坂煤矿,海拔影响煤矿植被和土壤恢复过程,进而影响地表甲虫多样性对煤矿修复的响应模式。东大河林区煤矿修复提高了地表甲虫活动密度和类群丰富度,这在海拔较高的下泉沟煤矿表现得尤为明显。一项在山西煤矿修复区的研究也发现,煤矿尾矿堆复垦过程中桃树和花椒栽植提升土壤肥力,增加了地表节肢动物的数量及多样性^[13]。高寒山区煤矿矿区修复提高了植被盖度和土壤修复改善了高寒山区生态环境,这会改善动物的栖居和繁殖生境,提升地表甲虫的数量及多样性^[3-4]。以上研究结果表明,高寒山区煤矿矿区修复过程中提高植被盖度和改善土壤环境会提高资源的上行效应,从而提高地表甲虫的数量及多样性^[10,14]。煤矿修复区毗邻的区域是重要的物种库,一些迁移扩散能力强的甲虫种(如步甲)可以进入修复区,它会影响煤矿修复区地表甲虫群落组成,缩小煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成差异。Willand等^[32]发现,步甲种在煤矿矿区修复生境和毗邻农田生境的取食活动随着种类和生境类型的变化而变化,*Pterostichus chalcites*在煤矿修复区及边缘生境与农田生境相比,它们偏好在白天活动;*Cyclotra-chelus seximpressus*在恢复生境偏好在白天活动;*Harpalus pensylvanicus*在煤矿修复区及边缘生境更多在夜间活动。Kędzior等^[8]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,甲虫食性影响了它们对矿区修复的响应模式。捕食性的步甲科昆虫是祁连山保护区森林和草地生境

的主要地表节肢动物,煤矿采伐迹地修复改善生境条件,促进了大中型步甲的迁入,而一些小型步甲则可以通过土壤携带进入煤矿修复区,从而导致该区煤矿修复区捕食性甲虫的活动密度显著高于对照区^[10]。此外,研究还发现海拔较高的下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫群落的组成及相似性与头沟大坂煤矿和宏达煤矿不同,海拔影响了地表甲虫群落结构对煤矿矿区修复响应的敏感程度,这与地表甲虫功能性状对煤矿矿区修复的响应模式不同有关^[32-34]。

地表甲虫是祁连山主要的昆虫类群,甲虫的迁移扩散能力较强,它们对煤矿修复引起的植被和土壤环境变化的响应十分敏感^[8,10,19]。地表甲虫的个体大小等功能性状强烈影响了它们对不同海拔煤矿矿区修复的响应模式^[24,33,35]。煤矿矿区自然恢复演替和人工恢复林地对地表甲虫群落的影响不同,自然恢复演替生境地地表甲虫种与对照林地相近,以中型捕食性甲虫、迁移散布能力弱和秋季繁殖的种类为主;林地恢复生境步甲种以中型甲虫、迁移散布能力强和春季繁殖种类为主^[8]。以上研究结果表明,煤矿修复过程中不同地表甲虫种功能性状影响它们对煤矿修复的响应。地表甲虫的个体大小影响其扩散能力,煤矿矿区修复改善生境条件促进大、中型地表甲虫种可以从毗邻区域迁入,而一些小型步甲种则可以通过土壤携带进入煤矿修复区;地表甲虫种类随着海拔变化而变,这会影响不同海拔煤矿修复区和对照区地表甲虫群落差异^[10,17]。Chungu等^[36]在赞比亚研究发现林地转变为农田降低了步甲科的个体大小,林地地表甲虫体长和活动密度呈正相关,大型和小型甲虫种的竞争存在不对称性。本研究发现,东大河林区煤矿修复对大型、中型甲虫影响较小,而煤矿修复提高了小型甲虫的数量及物种丰富度,这在海拔较高的下泉沟煤矿表现更为明显。祁连山煤矿修复区与对照区相比,植被盖度较低有利于小型甲虫栖居和觅食;矿区表层土壤回填不仅改善了土壤环境,还通过携带促进了小型甲虫进入到煤矿修复区,这也导致煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成存在一定差异^[10]。总之,地表甲虫群落中大、中型个体可以通过迁移扩散快速进入煤矿修复区,而小型甲虫则受矿区土壤和植被环境变化影响较大,地表甲虫的个体大小影响了它们对煤矿修复的响应模式。

高寒山区海拔变化是影响动植物分布的重要

环境因子,动物物种丰富度沿海拔梯度呈现的上升型或下降型模式能够改变动物的群落结构,这也会影响它们对煤矿修复的响应模式^[17,29]。本研究发现,高寒山区不同海拔煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成不同,海拔、坡度、草本盖度和土壤有机碳含量是影响地表甲虫分布的主要影响因子。海拔强烈影响降水、温度和植被组成,是不同区域山地生态系统影响甲虫分布的主要环境因子,这也导致不同海拔煤矿修复区和对照区地表甲虫群落的差异存在变化^[17,28,30]。东大河林区不同海拔煤矿修复区和对照区大、中型甲虫的活动密度及物种丰富度与海拔显著负相关,而与坡度呈显著正相关,这与Zou等^[17]在长白山关于地表甲虫垂直分布的结果相近。煤矿尾矿区微地形变化也会影响地表甲虫的分布和多样性,这与本研究结果相近^[37]。祁连山高寒山区土壤贫瘠、土层薄,煤矿开垦破坏表层土壤,矿区微地形改变和加固提高坡面稳定,土壤层重构和提升土壤肥力,这可以促使天然和人工植被的恢复演替^[5,38]。东大河林区煤矿修复平整了尾矿堆,覆盖土壤提高表层土壤肥力,种植禾本科草本提高植被盖度,这也影响了不同海拔高度大、中型甲虫对煤矿修复的响应模式。煤矿修复改善了土壤环境,这会强烈影响土壤微生物及中小型土壤动物的数量及多样性,本文研究中地表甲虫以步甲科为主,它主要与植被盖度及物种丰富度变化密切相关^[10,14,39]。东大河林区小型甲虫的活动密度及物种丰富度均与草本盖度呈显著负相关,说明煤矿修复区较低的植被盖度有利于个体较小的甲虫觅食、栖居和繁殖,这提高了煤矿修复区小型甲虫的活动密度及物种丰富度^[8]。此外,高寒山区煤矿修复过程中土壤回填覆盖也携带部分小型甲虫种(如船象属1种 *Baris* sp. 和一角甲 *Notoxus monoceros* 等)进入到煤矿修复区,增加了该区小型甲虫的物种丰富度^[10,24]。

4 结论

东大河林区煤矿矿区覆土和修复植被5年后,植被和土壤环境的改善强烈影响地表甲虫的分布及多样性,煤矿矿区海拔影响地表甲虫多样性对煤矿修复的响应规律。宏达、头沟大坂煤矿和下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成相差较小,海拔较高的下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫

群落的平均相异性(84.4%)高于海拔较低的宏达煤矿和头沟大坂煤矿(54.6%和57.2%)。煤矿修复提高了地表甲虫的活动密度及类群丰富度,这在海拔较高的下泉沟煤矿表现尤为明显,但也导致下泉沟煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成的差异增大。不同大小地表甲虫对煤矿修复的响应模式不同,煤矿修复提高了小型甲虫的活动密度及多样性,下泉沟煤矿修复区小型甲虫的活动密度及物种多样性均显著高于对照区;而大、中型甲虫对煤矿矿区修复的响应不敏感。CCA排序结果表明,海拔、坡度、土壤有机碳和草本盖度是影响煤矿修复区和对照区地表甲虫分布的主要环境因子,它们累积解释了22.1%地表甲虫群落变异。相关分析结果表明,大、中型甲虫活动密度及物种丰富度与海拔呈显著负相关,而与坡度呈正相关;小型甲虫活动密度及物种丰富度与草本盖度呈显著负相关。总之,东大河林区煤矿矿区修复提高了小型地表甲虫的数量及多样性,煤矿修复区和对照区地表甲虫群落组成还存在一定差异,这种差异随着海拔的升高而增大。

参考文献:

- [1] Feng Y, Wang J, Bai Z, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 12–25.
- [2] 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.
- [3] 王锐, 李希来, 张静, 等. 高寒矿区人工种草对露天排土场渣山表层基质的影响 [J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 938–948.
- [4] 高志香, 李希来, 张静, 等. 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 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 82–87.
- [5] 王佟, 蔡杏兰, 李飞, 等. 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 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2407–2419.
- [6] Lövei G L, Sunderland K D. Ecology and behavior of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) [J]. *Annual Review of Entomology*, 1996, 41(1): 231–256.
- [7] Cristescu R H, Frère C, Banks P B. A review of fauna in mine rehabilitation in Australia: current state and future directions [J]. *Biological Conservation*, 2012, 149(1): 60–72.
- [8] Kędzior R, Szwalec A, Mundała P, et al. Ground beetle (Coleoptera, Carabidae) life history traits as indicators of habitat recovering processes in postindustrial areas [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 142: 105615.
- [9] Sanchez S P, Courtney R, Schmidt O. Soil meso- and macrofauna indicators of restoration success in rehabilitated mine sites

- [M]//Prasad M N V. Handbook of Ecological and Ecosystem Engineering. Hoboken, USA: Wiley, 2021.
- [10] Wanner M, Dunger W. Primary immigration and succession of soil organisms on reclaimed opencast coal mining areas in eastern Germany [J]. European Journal of Soil Biology, 2002, 38(2): 137–143.
- [11] Rufaut C G, Clearwater S, Craw D. Recolonisation and recovery of soil invertebrate assemblages at an inactive coal mine in southern New Zealand [J]. New Zealand Natural Sciences, 2010, 35: 17–30.
- [12] Hendrychová M, Šálek M, Tajovský K, et al. Soil properties and species richness of invertebrates on afforested sites after brown coal mining [J]. Restoration Ecology, 2012, 20(5): 561–567.
- [13] 辛未冬, 刘华煜, 杨铁萌, 等. 复垦对煤矸石山地表节肢动物群落特征的影响 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(7): 2213–2222.
- [14] Topp W, Simon M, Kautz G, et al. Soil fauna of a reclaimed lignite open-cast mine of the Rhineland: improvement of soil quality by surface pattern [J]. Ecological Engineering, 2001, 17(2/3): 307–322.
- [15] 吴东辉, 胡克. 大型土壤动物在鞍山市大孤山铁矿废弃地生态环境恢复与重建中的指示作用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(2): 213–216.
- [16] 崔艳, 白中科, 李晋川, 等. 露天煤矿不同恢复阶段大型土壤动物群落结构 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(4): 607–610.
- [17] Zou Y, Sang W, Zhou H, et al. Altitudinal diversity patterns of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) in the forests of Changbai Mountain, Northeast China [J]. Insect Conservation and Diversity, 2014, 7(2): 161–171.
- [18] 熊忠平, 钱昱含, 徐正会, 等. 祁连山国家公园青海片区蚂蚁物种的分布格局 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(11): 92–97.
- [19] 杨全生, 刘建泉, 汪有奎. 甘肃祁连山国家级自然保护区综合科学考察报告 [M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2008.
- [20] 刘继亮, 李锋瑞, 刘七军, 等. 黑河流域荒漠生态系统地面土壤动物群落的组成与多样性 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 342–349.
- [21] 郑乐怡, 归鸿. 昆虫分类 [M]. 南京: 南京师范大学出版社, 1999.
- [22] 任国栋, 于有志. 中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫 [M]. 河北保定: 河北大学出版社, 1999.
- [23] 梁宏斌, 虞佩玉. 中国捕食粘虫的步甲种类检索 [J]. 昆虫天敌, 2000, 22(4): 160–167.
- [24] Kotze D J, Brandmayr P, Casale A, et al. Forty years of carabid beetle research in Europe—from taxonomy, biology, ecology and population studies to bioindication, habitat assessment and conservation [J]. ZooKeys, 2011, 100: 55–148.
- [25] Pey B, Nahmani J, Auclerc A, et al. Current use of and future needs for soil invertebrate functional traits in community ecology [J]. Basic and Applied Ecology, 2014, 15(3): 194–206.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [27] Ter Braak C J F, Šmilauer P. Canoco Reference Manual and User's Guide: Software for Ordination (version 5.0) [M]. Ithaca, USA: Microcomputer Power, 2012.
- [28] 王金叶, 王彦辉, 王顺利, 等. 祁连山林草复合流域降水规律的研究 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 416–422.
- [29] 吴永杰, 雷富民. 物种丰富度垂直分布格局及影响机制 [J]. 动物学杂志, 2013, 48(5): 797–807.
- [30] 牛赞, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山排露沟流域气温、冻土冻融与河川径流特征 [J]. 林业科学, 2014, 50(1): 27–31.
- [31] 郝虎, 孙建忠, 赵守平, 等. 祁连山东大河林区天敌昆虫区系结构研究 [J]. 环境昆虫学报, 2011, 33(4): 461–465.
- [32] Willand J E, McCravy K W. Variation in diel activity of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) associated with a soybean field and coal mine remnant [J]. The Great Lakes Entomologist, 2006, 39(3/4): 141–148.
- [33] Jung J K, Kim S T, Lee S Y, et al. Community structure of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) along an altitudinal gradient on Mt. Sobaeksan, Korea [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2012, 15(3): 487–494.
- [34] Tseng M, Pari S S. Body size explains interspecific variation in size–latitude relationships in geographically widespread beetle species [J]. Ecological Entomology, 2019, 44(1): 151–156.
- [35] Gerisch M. Habitat disturbance and hydrological parameters determine the body size and reproductive strategy of alluvial ground beetles [J]. ZooKeys, 2011, 100: 353–370.
- [36] Chungu D, Stadler J, Brandl R. Converting forests to agriculture decreases body size of *Carabid* assemblages in Zambia [J]. African Journal of Ecology, 2018, 56(2): 216–224.
- [37] Moradi J, Potocký P, Kočárek P, et al. Influence of surface flattening on biodiversity of terrestrial arthropods during early stages of brown coal spoil heap restoration [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 220: 1–7.
- [38] 王佟, 杜斌, 李聪聪, 等. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 230–244.
- [39] Liu Y, Duan M, Zhang X, et al. Effects of plant diversity, habitat and agricultural landscape structure on the functional diversity of carabid assemblages in the North China Plain [J]. Insect Conservation and Diversity, 2015, 8(2): 163–176.

Response of ground beetle diversity to coal mine restoration in Dongdahe forest area of the Qilian Mountains

Sun Xiaoxia¹, Feng Yilin², Wang Yongzhen³, Luo Weicheng³,
Yang Jingyi^{3,4}, Shi Hongliang⁵, Liu Jiliang³

(1. National Nature Reserve Management and Conservation Center of Qilian Mountain in Gansu Province, Zhangye 734000, Gansu, China; 2. Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 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. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Mulching with guest soil and rapid vegetation restoration in the coal mining area of the alpine mountain will greatly affect the distribution and diversity of ground beetles, and the change of altitude in coal mining areas will affect the community structure of ground beetles. In this paper, Dongdahe forest area in the middle of Qilian Mountains was selected as a research area, and three typical coal mines, Hongda (HD), Tougoudaban (TGDB) and Xiaquangou (XQG) were selected as research objects according to the altitude gradient. In the three mine remediation areas and the control area (adjacent grassland), we systematically investigated species composition and quantitative changes in ground beetles using traps and environmental factor. The impact of artificial coal mine restoration on the diversity of carabid beetles in the Qilian Mountains was analyzed and the response pattern of carabid beetle diversity to coal mine restoration was determined. Moreover, the main environmental factors affecting the distribution of ground beetles were determined by canonical correspondence analysis and correlation analysis. The main results are as follows. After five years of reclamation in the Dongdahe forest area, the composition of the ground beetle population differed a little between the coal mine restoration and control areas and varied with the elevation gradient. Furthermore, the average dissimilarity (84.4%) of the ground beetle communities at the coal mine restoration area and in the control area was higher in higher-elevation XQG coal mines than in lower-elevation HD and TGDB coal mines (54.6% and 57.2%, respectively). The activity density of ground beetles at the restoration area of TGDB and XQG coal mines was significantly higher than that in the control area, and the species richness of ground beetles at the restoration area of XQG coal mines was significantly higher than that at the control areas. The functional traits of ground beetles, such as body size, influenced the response patterns of different beetle species to coal mine restoration. The coal mine restoration significantly increased the activity density and species richness of small beetles in the three coal mines, most notably in the XQG coal mine, and had little impact on large and medium-sized beetles. The result of the CCA shows that elevation gradient, slope degree, herbaceous cover and soil organic carbon content were key factors affecting ground beetle aggregation in the restoration area and the control area of the three coal mines, explaining 22.1% of the variation in ground beetle communities. Furthermore, through correlation analysis, we found that the distribution of large and medium-sized ground beetles was closely related to altitude gradient and slope degree, while the distribution of small ground beetles is related to change in herbaceous cover. In conclusion, the vegetation and soil environment changed by coal mine restoration in Qilian Mountains increased the activity density and species richness of small beetles, while the distribution of large and medium-sized beetles was mainly affected by altitude gradient and slope degree, and determined change in the response of ground beetle diversity to the restoration of the coal mine in the Qilian Mountains.

Key words: Qilian Mountains; Dongdahe forest area; coal mine restoration; ground beetle diversity; body size