

罗维成, 赵文智, 刘继亮, 等. 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[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 165–175.

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

罗维成¹, 赵文智¹, 刘继亮¹, 杨竞艺^{1,2}, 白雪莲^{1,3}, 魏乐民^{1,3}, 冯怡琳⁴

(1. 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; 2. 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 宁夏大学, 宁夏 银川 750021)

摘要: 恢复人工植被是祁连山自然保护区矿区废弃地修复的主要手段, 经过近5年的修复, 矿区废弃地修复区地上植被盖度明显提高, 但关于作为评价土壤修复效果重要指标的土壤动物群落变化的认识还很有限。以祁连山自然保护区典型煤矿废弃地为研究对象, 采用野外调查的方法对比研究了煤矿修复区和毗邻区(原始地貌)大型土壤动物分布特征及其影响因素。结果表明: (1) 修复区植物丰富度、生物量、盖度及土壤粗砂、有机质、全氮含量均显著低于毗邻区($P < 0.05$), 而土壤水分、细砂、黏粉粒、全钾和全磷含量差异不显著($P > 0.05$)。 (2) 修复区土壤动物活动密度和多样性均显著高于毗邻区, 修复区和毗邻区土壤动物均以蝗科(12.7%和55.7%)和蚁科(14.4%和49.6%)为主; 进房沟、水磨沟和柳树沟煤矿修复区及毗邻区土壤动物群落相似性分别为39.9%、52.9%和43.4%。 (3) 土壤有机质含量是影响煤矿修复区和对照区捕食性土壤动物群落变化的主要因子, 而草本物种数和土壤粗砂含量是影响植食性土壤动物群落变化的主要因子。总之, 人工修复后煤矿废弃地修复区土壤动物个体数均高于对照区, 部分矿区修复生境类群丰富度及多样性已经超过了毗邻区, 这表明蚂蚁、步甲和蝗虫等地表节肢动物对煤矿矿区覆土恢复植被和封禁等措施驱动的植被和土壤环境变化响应敏感。因此, 还需要优化植被及土壤修复模式, 提高土壤动物多样性及多功能性, 使矿区废弃地生态环境能够得到快速修复。

关键词: 祁连山自然保护区; 矿区修复; 地表节肢动物; 群落结构; 影响要素

文章编号: 1000-694X(2022)06-165-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00049

中图分类号: Q958.1

文献标志码: A

0 引言

祁连山自然保护区是中国首批设立的10个国家公园体制试点之一, 地处青藏高原、蒙新高原、黄土高原交会地带的祁连山北麓, 是中国重要的生态功能区及西北地区重要的生态安全屏障和水源涵养地。祁连山自然保护区煤炭、铁等矿产资源丰富, 不合理的煤炭资源开发破坏森林、草地并污染水体, 严重威胁区域生态安全。自2017年起, 甘肃省全力对祁连山自然保护区生态环境问题进行了整改, 其中, 对于区内煤矿采取了关闭、拆除、平整、覆土和种草等整改措施, 进行生态恢复和复原, 成效显著^[1]。

露天煤矿的开采对祁连山自然保护区局部区域土壤、植被和水体造成了极大的破坏, 因此, 矿区复垦地的生态恢复是整改的核心工作。近年来, 国内外学者针对大型露天煤矿复垦地植被恢复技术^[2]、植被演变过程^[3-5]、植被修复模式及物种选择^[6]、植被修复效果评估^[2, 7-8]等方面开展了较多的研究。植被修复显著提高了修复区植物多样性^[7], 也会对土壤养分提高及土壤水分过程有积极影响^[9-11]。而与地上植被相比, 大型土壤动物对矿区环境变化更为敏感, 可以反映土壤环境的变化情况^[2, 12-14]。大型土壤动物在改善土壤结构、促进生态系统养分循环和物质流动中发挥着重要作用, 是矿

收稿日期: 2021-11-11; 改回日期: 2022-03-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0507402)

作者简介: 罗维成(1987—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 副研究员, 主要从事荒漠植物生态学研究。E-mail: luoweicheng@lzb.ac.cn

通信作者: 赵文智(E-mail: zhaowzh@lzb.ac.cn)

山生态环境恢复与重建中的重要指示生物^[15-16]。因此,在矿山生态恢复过程中,大型土壤动物群落演变过程及其对生境恢复的指示作用已经引起了许多学者关注和重视。

地上植被重建是祁连山自然保护区煤矿修复的主要手段,经过近5年的修复,煤矿修复区地上植被盖度及丰富度有明显的提高,修复区生态环境也得到了明显改善。但是,修复区土壤动物的变化及其影响因素等仍然未知,这直接影响了修复区生态环境质量评估的准确性以及后续修复措施的科学实施。鉴于此,我们在祁连山自然保护区选取典型煤矿生态修复区,对比研究生态修复区与毗邻区(原始地貌)植被、土壤性质及大型土壤动物变化趋势,明确矿区生态修复对土壤动物的影响并解析其原因,为祁连山自然保护区矿区生态环境综合评价及生态修复提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究样地选择在甘肃省祁连山国家级自然保护区中东段的西营河自然保护区,该区域气候类型属于大陆性高原寒温带季风气候,年降水量450 mm左右,超过66%的降水在7—9月。年均气温0.13℃,最低月均气温-11.4℃,最高月均气温11.2℃。土壤类型多为高山灌丛草甸土,且土层厚度40—80 cm。植被沿海拔及坡度分异明显,未破坏区植被中草本以珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、问荆(*Equisetum arvense*)和苔草(*Carex tristachya*)等为主,灌木以鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、银露梅(*Potentilla glabra*)和头花杜鹃(*Rhododendron capitatum*)等为主,乔木主要有青海云杉(*Picea crassifolia*)和祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)。

西营河保护站是祁连山国家级自然保护区煤矿开垦较集中的区域,矿区分布在坡度较大的中高海拔区,地质条件差,容易发生塌陷和滑坡。依据该区煤矿所处海拔、煤矿开采时间、修复年限及修复措施差异在西营河保护站内选取水磨沟(37°52′38″N, 101°55′51″E)、柳树沟(37°51′25″N, 102°02′43″E)和进房沟(37°51′47″N, 102°02′23″E)3个典型煤矿修复点作为土壤动物、植被和土壤样品采集区,3个煤矿修复区海拔存在梯度变化。水磨沟煤矿矿区

海拔较高(2 700 m),1954年开始开采,2017年关停;柳树沟和进房沟煤矿海拔较低(2 300 m和2 200 m),它们分别在1987年和1970年开始开采,2016年关停修复。该区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,利用客土回填覆盖矿区恢复表层土壤环境(覆土层厚度10—20 cm)。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、禁牧等措施减少人类活动干扰促进植被群落的恢复演替。3个煤矿修复区毗邻生境均是草地,以针茅等多年生草本种为主,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。

1.2 试验设计及样品采集

3个煤矿修复区依据微地形变化设置地表节肢动物样品采集区和植被、土壤环境调查区,在毗邻草地生境选择地形平坦、植被和土壤扰动小的区域作为对照生境。每个煤矿修复区和对照区分别选择5个20 m×20 m的区域作为地表节肢动物样品采集区,每个地表节肢动物样品采集区相距50—100 m。每个地表节肢动物样品采集区布设3个陷阱收集器,陷阱收集器的间距≥10 m。2021年8—9月在煤矿修复区和对照区布置陷阱收集器,陷阱收集器利用矿泉水瓶制作,它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。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),陷阱采集时间为7天。陷阱采集的地表节肢动物样品带回室内利用浮选法去除枯枝落叶和土壤,收集的地表节肢动物样品保存在装有75%酒精溶液的样品瓶中保存。地表节肢动物样品利用体式显微镜观察其形态特征,部分样品制成针插标本,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,按照科和目统计其个体数量^[17-20]。

3个煤矿修复区和对照区在每个地表节肢动物采集区内随机选取5个1 m×1 m的样方调查草本植物种类、高度和盖度,采集植物样品利用烘干法测定生物量。同时,采集5个0—10 cm土壤样品混合均匀后风干,带回室内测定土壤理化性质。土壤机械组成、pH、土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量测定参照土壤农化分析方法^[21]。

1.3 数据处理

采用Berger-Parker优势度指数计算不同煤矿修

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。统计修复区和毗邻区地表节肢动物的活动密度(每个收集器捕获动物的个体数量)、类群丰富度(每个收集器采集的动物科或目)、多样性指数和均匀度指数,统计分析使用 PAST 4.01 软件包。采用二因素方差分析(GLM 模型)比较煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落结构参数及主要类群活动密度的差异,采用单因素方差对比不同煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落及主要动物类群活动密度的差异,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)分析不同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种的贡献率,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^[22]。

利用主成分分析和相关分析等确定影响煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落变化的主要环境因子,采用 RDA 分析典型煤矿修复区和毗邻区植被和土壤环境要素对捕食性和植食性土壤动物群落变化影响的贡献率。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 $\lg(x+1)$ 转换,统计分析使用排序软件 CANOCO 5.0^[23]。利用 OriginPro 8.5 制图。

2 结果

2.1 煤矿修复区和毗邻区植被和土壤环境变化

祁连山自然保护区典型煤矿修复区及毗邻区植被及土壤性质差异明显(表 1)。修复区植物丰富度、盖度及生物量都显著低于毗邻区($P < 0.05$);修复区土壤粗砂含量显著低于毗邻区($P < 0.05$),土壤细砂及黏粉粒含量、土壤含水量差异不显著($P > 0.05$);修复区土壤 pH 值显著高于毗邻区;修复区土壤有机碳和全氮含量显著低于毗邻区($P < 0.05$),而土壤全钾及全磷含量差异不显著($P > 0.05$)。这说明经过近 5 年的人工修复,煤矿修复区和毗邻区植被状况

表 1 祁连山自然保护区典型煤矿修复区和毗邻区植被和土壤环境特征对比
Table 1 Comparison of vegetation and soil environmental characteristics between typical coal mine restoration area and adjacent area in Qilian Mountain Nature Reserve

环境变量	修复区	毗邻区
植物丰富度	1.67±0.33	4.67±0.88*
植物盖度/%	33.67±1.86	66.67±4.41**
植物生物量/g	57.34±7.31	149.27±12.94**
土壤粗砂含量/%	26.83±5.57	43.16±8.29*
土壤细砂含量/%	12.71±3.85	12.55±0.79 ^{ns}
土壤黏粉粒含量/%	0.42±0.10	0.32±0.14 ^{ns}
土壤含水量/%	10.70±0.003	10.32±0.01 ^{ns}
土壤 pH	8.70±0.29	8.20±0.19*
土壤有机碳含量/(g·kg ⁻¹)	17.00±7.24	121.60±21.01**
土壤全氮含量/(g·kg ⁻¹)	0.70±0.37	3.40±1.06*
土壤全钾含量/(g·kg ⁻¹)	41.60±13.18	46.80±1.64 ^{ns}
土壤全磷含量/(g·kg ⁻¹)	0.50±0.19	0.60±0.06 ^{ns}

*表示差异显著($P < 0.05$),**表示差异极显著($P < 0.01$),ns 表示差异不显著($P > 0.05$)。

及土壤性质有明显差异。

2.2 煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落组成和数量变化

不同煤矿修复区及毗邻区布设的陷阱采集到的地表节肢动物数量和种类不同(表 2),整体来看修复区地表节肢动物数量和种类高于毗邻区。煤矿修复区共采集地表节肢动物 1 158 头,来自 32 个科;而毗邻区共采集到 884 头,来自 28 个科。修复区地表节肢动物主要由步甲科、蝗科和蚁科组成,所占比例分别为 7.9%、12.7% 和 55.7%;而毗邻区以硬体盲蛛科、蝗科和蚁科为主,所占比例分别为 9.3%、14.4% 和 49.5%。进房沟煤矿修复区和毗邻区分别收集地表节肢动物 346 头和 235 头,来自 12 科和 21 科;水磨沟煤矿修复区和毗邻区分别收集地表节肢动物 456 头和 323 头,来自 22 科和 18 科;柳树沟煤矿修复区和毗邻区分别收集地表节肢动物 356 头和 326 头,来自 25 科和 21 科(表 2)。进房沟、水磨沟和柳树沟煤矿修复区采集的地表节肢动物个体数均高于毗邻区,进房沟和水磨沟煤矿修复区采集的地表节肢动物类群数均高于毗邻区,柳树沟煤矿修复区采集的地表节肢动物类群数低于毗邻区。

表 2 3 个煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物个体数量及所占比例
Table 2 Number of individuals and relative abundance of ground arthropods in different coal mine restoration areas and adjacent area

科名	进房沟		水磨沟		柳树沟		合计	
	修复区	毗邻区	修复区	毗邻区	修复区	毗邻区	修复区	毗邻区
石蜈蚣科(Lithobiidae)	—	—	—	1(0.3)	—	—	—	1(0.1)
蚰蜒科(Scutigerae)	—	1(0.4)	1(0.2)	—	—	1(0.3)	1(0.1)	2(0.2)
硬体盲蛛科(Sclerosomatidae)	—	29(12.3)	15(3.3)	2(0.6)	6(1.7)	51(15.6)	21(1.8)	82(9.3)
管巢蛛科(Clubionidae)	—	1(0.4)	1(0.2)	—	—	—	1(0.1)	1(0.1)
平腹蛛科(Gnaphosidae)	16(4.6)	6(2.6)	15(3.3)	5(1.5)	16(4.5)	6(1.8)	47(4.1)	17(1.9)
狼蛛科(Lycosidae)	21(6.1)	4(1.7)	12(2.6)	23(7.1)	10(2.8)	8(2.5)	43(3.7)	35(4.0)
球蛛科(Theridiidae)	—	—	1(0.2)	—	2(0.6)	1(0.3)	3(0.3)	1(0.1)
蟹蛛科(Thomisidae)	1(0.3)	2(0.9)	1(0.2)	8(2.5)	3(0.8)	10(3.1)	5(0.4)	20(2.3)
跳蛛科(Salticidae)	—	—	3(0.7)	—	—	—	3(0.3)	—
微蛛亚科(Erigoninae)	4(1.2)	2(0.9)	17(3.7)	3(0.9)	12(3.4)	1(0.3)	33(2.8)	6(0.7)
绒螨科(Trombididae)	—	14(6.0)	—	2(0.6)	—	2(0.6)	—	18(2.0)
潮虫科(Oniscidae)	—	5(2.1)	—	1(0.3)	2(0.6)	3(0.9)	2(0.2)	9(1.0)
蝗科(Acridae)	83(24.0)	48(20.4)	10(2.2)	22(6.8)	54(15.2)	57(17.5)	147(12.7)	127(14.4)
石蚱蜢科(Machilidae)	—	—	—	—	—	3(0.9)	—	3(0.3)
蚁狮科(Myrmeleontidae)	—	—	1(0.2)	—	—	—	1(0.1)	—
长蝽科(Lygaeidae)	—	1(0.4)	—	—	1(0.3)	—	1(0.1)	1(0.1)
蝽科(Pentatomidae)	—	—	5(1.1)	—	2(0.6)	—	7(0.6)	—
猎蝽科(Reduviidae)	3(0.9)	—	2(0.4)	—	2(0.6)	—	7(0.6)	—
叶蝉科(Cicadellidae)	3(0.9)	4(1.7)	8(1.8)	5(1.5)	2(0.6)	3(0.9)	13(1.1)	12(1.4)
蚜科(Aphididae)	—	—	—	—	16(4.5)	1(0.3)	16(1.4)	1(0.1)
虎甲科(Cicindelidae)	—	1(0.4)	2(0.4)	—	—	—	2(0.2)	1(0.1)
步甲科(Carabidae)	14(4.0)	14(6.0)	38(8.3)	33(10.2)	40(11.2)	14(4.3)	92(7.9)	61(6.9)
瓢甲科(Coccinellidae)	—	1(0.4)	—	1(0.3)	3(0.8)	—	3(0.3)	2(0.2)
阎甲科(Histeridae)	1(0.3)	—	—	—	1(0.3)	3(0.9)	2(0.2)	3(0.3)
隐翅虫科(Staphylinidae)	13(3.8)	3(1.3)	21(4.6)	4(1.2)	10(2.8)	6(1.8)	44(3.8)	13(1.5)
象甲科(Curculionidae)	—	7(3.0)	—	9(2.8)	1(0.3)	1(0.3)	1(0.1)	17(1.9)
叶甲科(Chrysomelidae)	—	4(1.7)	—	1(0.3)	1(0.3)	1(0.3)	1(0.1)	6(0.7)
谷盗科(Trogossitidae)	—	—	—	—	1(0.3)	—	1(0.1)	—
花金龟科(Cetoniidae)	—	—	—	—	1(0.3)	—	1(0.1)	—
天牛科(Cerambycidae)	—	—	1(0.2)	—	—	—	1(0.1)	—
芫青科(Meloidae)	—	—	1(0.2)	—	1(0.3)	—	2(0.2)	—
拟步甲科(Tenebrionidae)	2(0.6)	1(0.4)	2(0.4)	2(0.6)	6(1.7)	1(0.3)	10(0.9)	4(0.5)
丸甲科(Byrrhidae)	—	—	—	1(0.3)	—	—	—	1(0.1)
球蕈甲科(Leiodidae)	—	1(0.4)	1(0.2)	—	—	—	1(0.1)	1(0.1)
食蚜蝇科(Syrphidae)	—	—	—	—	1(0.3)	—	1(0.1)	—
夜蛾科(Noctuidae)	—	—	—	—	—	1(0.3)	—	1(0.1)
蚁科(Formicidae)	185(53.5)	86(36.6)	298(65.4)	200(61.9)	162(45.5)	152(46.6)	645(55.7)	438(49.5)

括号内数字代表该类群个体数占总个体数的百分比。

2.3 煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落相似性

煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落 PERMANOVA 多元方差分析结果表明,矿区修复对不同煤矿地表节肢动物群落结构均有显著影响(进房沟: $F=4.72, P<0.001$;水磨沟: $F=2.59, P=0.030$;柳树沟: $F=3.89, P<0.001$)。NMDS 排序和 SIMPER 分析结果反映了煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物的差异(图 1),进房沟、水磨沟和柳树沟煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落的平均相异性分别为 60.1%、47.1% 和 56.6%。不同煤矿修复区与毗邻

区不同地表节肢动物群落相异性也有差异,进房沟煤矿修复区和毗邻区差异贡献最大的类群是蚁科(38.8%)、硬体盲蛛科(8.4%)和蝗科(16.6%),它们累计贡献了煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落差异的 63.8%;水磨沟煤矿修复区和毗邻区差异贡献最大的类群是蚁科(43.5%)、蝗科(6.4%)和步甲科(9.9%),它们累计贡献了煤矿修复区和毗邻区土壤动物群落差异的 59.8%;柳树沟煤矿修复区和毗邻区差异贡献最大的类群是蚁科(31.0%)、硬体盲蛛科(13.8%)、蝗科(12.3%)和步甲科(9.9%),它们累计贡献了煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落差异的 67.0%。

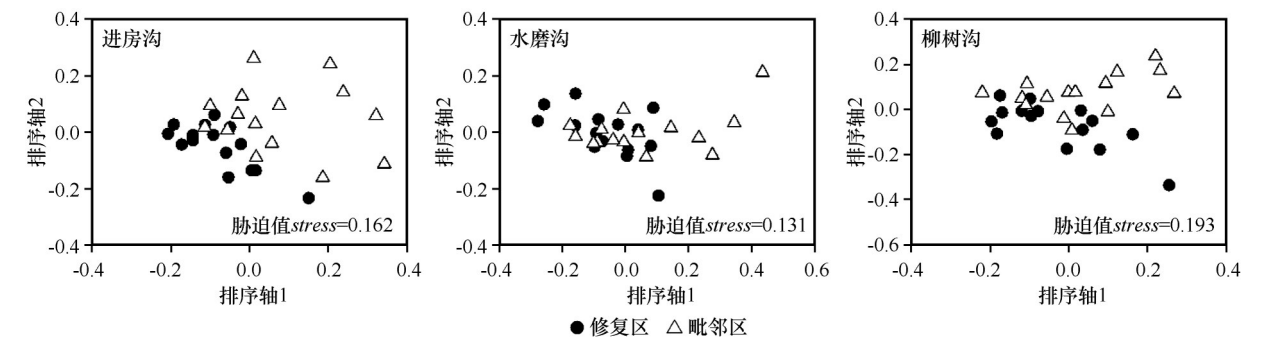


图 1 不同煤矿修复区与毗邻区地表节肢动物非度量多维尺度排序图

Fig.1 Non-metric multidimensional scaling (NMDS) plots indicating 2-dimensional distances of ground arthropods assemblage in different coal mine restoration areas and adjacent area

3 个煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落的多元方差分析结果表明,生境(不同煤矿)、微生境(煤矿修复区与毗邻区)对地表节肢动物活动密度和均匀度指数均有显著影响($P<0.05$,表 3),对类群丰富度影响不显著($P>0.05$)。总体来看,煤矿修复区的地表节肢动物活动密度均高于毗邻区,其中进房沟和水磨沟差异显著($P<0.05$);水磨沟和柳树沟煤矿修复区地表节肢动物类群丰富度高于毗邻区,其中水磨沟差异显著($P<0.05$);而进房沟煤矿修复区地表节肢动物类群丰富度低于毗邻区,但差异不显著($P>0.05$);进房沟煤矿修复区地表节肢动物多

样性指数显著低于毗邻区($P<0.05$),而水磨沟和柳树沟煤矿修复区地表节肢动物多样性指数高于毗邻区,但差异不显著($P>0.05$);不同煤矿修复区地表节肢动物均匀度指数均低于毗邻区,其中进房沟煤矿和水磨沟煤矿差异显著($P<0.05$,图 2)。这表明煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落结构有显著差异。

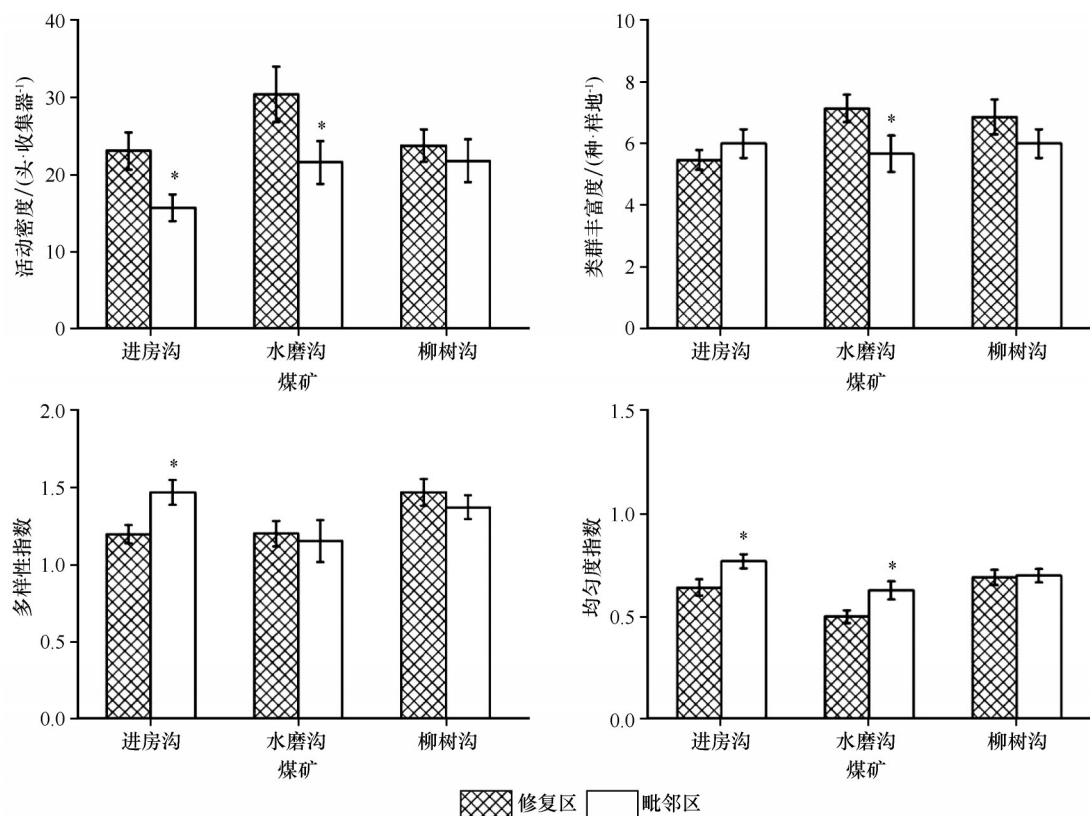
2.4 煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落营养结构变化

地表节肢动物群落依据群落组成和取食类型

表 3 煤矿矿区位置(生境)和修复(微生境)对地表节肢动物群落影响的二因素方差分析结果

Table 3 Results of two-factor ANOVA analysis of the effect of coal mine location and restoration on community characteristics of ground arthropods

因素	活动密度		类群丰富度		多样性指数		均匀度指数	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
生境	3.10	0.050	0.87	0.425	4.30	0.017	9.46	<0.001
微生境	7.05	0.009	2.51	0.117	0.12	0.735	8.49	0.005
生境×微生境	0.85	0.433	2.23	0.111	2.54	0.085	1.56	0.216



*表示修复区与毗邻区差异显著, $P < 0.05$

图2 不同煤矿修复区与毗邻区地表节肢动物活动密度、类群丰富度、多样性指数和均匀度指数比较

Fig.2 Comparison of activity density, groups richness, diversity index and evenness index of ground arthropods in different coal mine restoration areas and adjacent areas

划分为捕食性、植食性和其他食性(主要包括腐食性和杂食性类型)3大类别。PERMANOVA 方差分析结果表明,生境、微生境及其交互作用对地表节肢动物群落结构都有显著影响(表4)。不同煤矿间捕食性、植食性及其他食性地表节肢动物群落组成差异显著($P < 0.01$);煤矿矿区生态修复对捕食性和其他食性地表节肢动物群落组成影响显著($P < 0.01$);而生境和微生境的交互作用对捕食性地表节肢动物群落组成有显著影响($P < 0.01$)。不同煤矿修

表4 煤矿矿区位置(生境)及修复(微生境)对煤矿捕食性、植食性和其他食性群落影响的多元方差分析结果

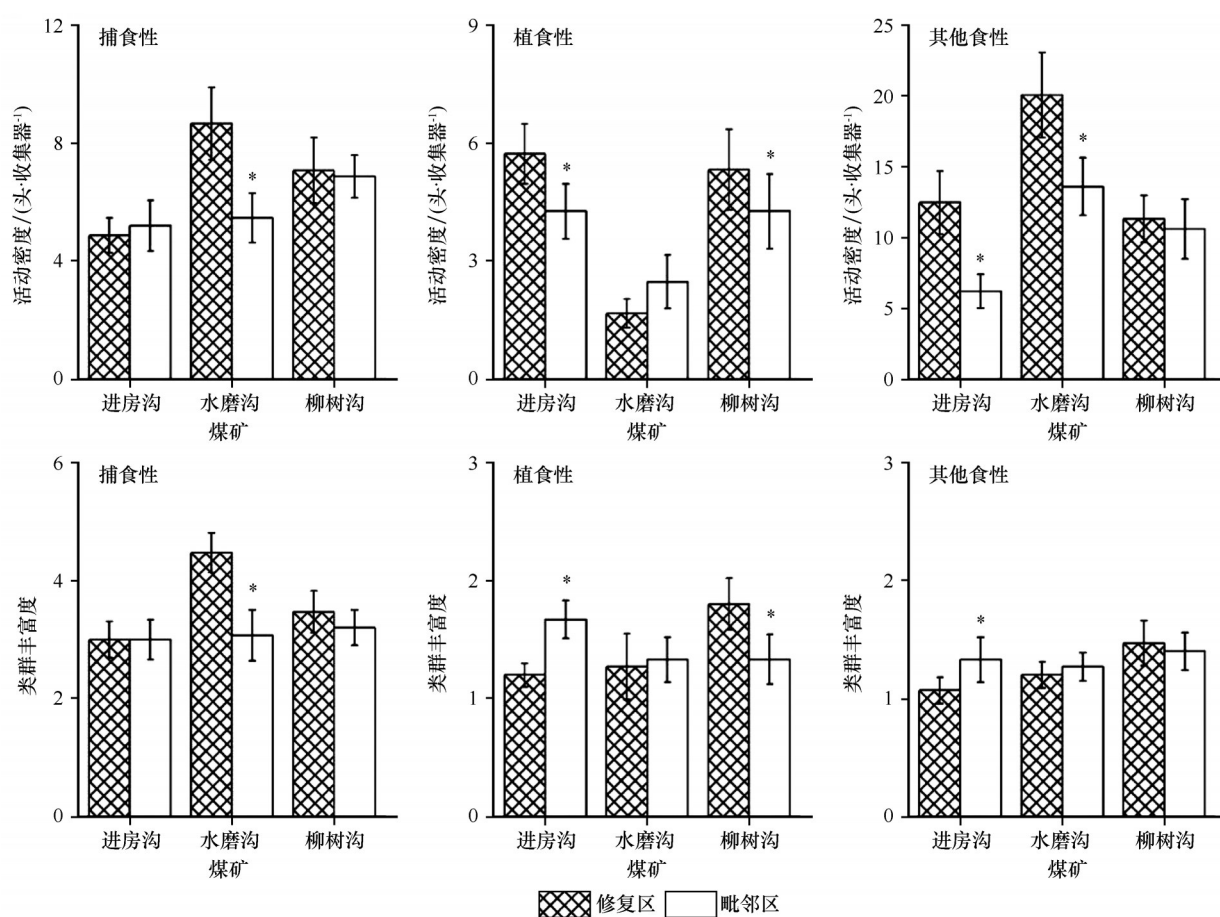
Table 4 Results of two-factor PERMANOVA of the effect of coal mine location and restoration on predators, herbivores, others of ground arthropods in coal mine

因素	捕食性类群		植食性类群		其他类群	
	F	P	F	P	F	P
生境	3.10	<0.001	7.30	<0.001	3.15	<0.007
微生境	7.61	<0.001	2.24	0.05	4.04	0.010
生境×微生境	4.19	<0.001	1.77	0.07	0.60	0.74

复区与毗邻区间地表节肢动物活动密度和类群丰富度间也有显著差异(图3)。除进房沟和水磨沟煤矿修复区的捕食性和植食性地表节肢动物活动密度略低于毗邻区外,3个煤矿修复区捕食性、植食性和其他食性地表节肢动物活动密度均高于毗邻区,其中水磨沟的捕食性地表节肢动物、进房沟和柳树沟的植食性地表节肢动物以及进房沟和水磨沟的其他食性地表节肢动物活动密度均差异显著($P > 0.05$)。对于修复区和毗邻区地表节肢动物丰富度类群丰富度来说,进房沟煤矿修复区植食性和其他地表节肢动物类群丰富度显著低于毗邻区($P > 0.05$);水磨沟修复区捕食性地表节肢动物类群丰富度显著高于毗邻区($P > 0.05$);而柳树沟煤矿修复区植食性地表节肢动物类群丰富度显著高于毗邻区($P > 0.05$)。

2.5 煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落变化的影响要素

利用主成分和相关分析确定草本盖度、草本物



*表示修复区与毗邻区差异显著, $P < 0.05$

图3 不同煤矿修复区和毗邻区捕食性、植食性和其他食性地表节肢动物活动密度及类群丰富度比较

Fig.3 Comparison of activity density and groups richness of predators, herbivores and other groups on ground arthropods in different coal mine restoration areas and adjacent areas

种数及土壤粗砂、有机质、全氮和全钾含量是影响煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物分布的主要环境要素。地表节肢动物群落中捕食性和植食性类群对矿区土壤环境变化响应十分敏感,柳树沟煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落中捕食性和植食性动物与6个环境因子的RDA排序结果表明,6个因子解释了煤矿修复区和毗邻区捕食性和植食性地表节肢动物群落变异的30.2%和16.6%。煤矿毗邻区较高草本盖度、草本物种数及土壤粗砂、有机质、全氮和全钾含量是导致煤矿修复区和毗邻区捕食性地表节肢动物组成明显不同的主要环境要素,其中土壤有机质含量是影响煤矿修复区和毗邻区捕食性地表节肢动物群落差异的关键环境要素(表5,图4)。煤矿修复区和毗邻区植食性地表节肢动物群落也存在一定差异,草本物种数和土壤粗砂含量是影响植食性地表节肢动物分布的主要环境因子(表5,图4)。

3 讨论

植被恢复与重建是扰动生境生态环境快速恢复的重要手段^[24],矿区废弃地地上植被的快速恢复会有效改善土壤容重、土壤持水特性及孔隙度,可以使矿山废弃地土壤物理性质及养分条件得到快速改善^[3,25]。因此地上植被恢复几乎是不同类型采矿废弃地的生态环境恢复的主要方法^[26-29]。而不同的植被恢复方式及恢复时间下,矿区废弃地植被及土壤性质变化特征也有很大差异。人工植被恢复可以显著增加煤矿废弃地土壤有机质、有效养分和酶活性等,而且改善程度明显优于自然恢复模式,但是经过6—10年的人工恢复,矿区废弃地土壤质量仍未恢复到破坏前水平^[29]。而王金满等^[30]发现,随着植被修复年限的增加,矿区废弃地土壤有机质、速效钾和全氮等含量都呈现增加趋势,恢复10年以后土壤质量会接近开矿前的原始地貌。我们

表5 pRDA分析确定6个植被和土壤环境因子对捕食性和植食性地表节肢动物分布的相对贡献率

Table 5 pRDA analysis determined the relative contribution rates of six vegetation and soil environmental factors to the distribution of predatory and herbivorous ground arthropods

解释变量	解释量/%	贡献率/%	F	P
捕食性类群				
草本盖度	1.73	5.70	0.60	0.686
草本物种数	3.98	13.10	1.60	0.184
土壤粗砂含量	1.89	6.30	0.70	0.634
土壤有机质含量	13.58	45.00	4.20	0.006
土壤全氮含量	4.76	15.70	1.70	0.126
土壤全钾含量	4.25	14.10	1.40	0.230
植食性类群				
草本盖度	0.67	4.00	0.30	0.813
草本物种数	6.25	37.70	3.00	0.037
土壤粗砂含量	5.33	32.20	3.30	0.022
土壤有机质含量	0.99	6.00	0.60	0.622
土壤全氮含量	2.44	14.70	1.60	0.208
土壤全钾含量	0.92	5.50	0.50	0.787

的研究结果显示,经过近5年的人工修复后,山区煤矿矿区废弃地修复区与毗邻区植被特征及土壤性质仍然有显著差异,修复区植物丰富度、盖度、生物量及土壤有机质和全氮含量均显著低于毗邻区(表1)。其中土壤有机质和全氮含量分别相差7倍和5倍,

这说明人工修复后的矿区废弃地植被和土壤质量还远没有达到煤矿开采前的原始生境。主要原因有:①植被修复物种选择单一,祁连山自然保护区矿区废弃地人工修复主要植物都是多年生草本,植被修复选取的披碱草易存活、生长快,但是后期演变会面临病虫害而退化、群落稳定性差及对土壤改良作用有限等负面问题^[31]。管理模式是全面封禁,因此如果受到人为干扰,恢复效果很难得到保证。②由于废弃地覆土层以下有很厚的矿渣,经过长时间大型机械的挤压后非常紧实,导致降水入渗减少、径流增加,也有可能造成土壤养分流失^[32]。③人工修复时间尚短,由于祁连山自然保护区煤矿废弃地人工修复时间不足5年,而地上植被尤其是土壤的形成和发育是个缓慢的过程,因此废弃地植被和土壤恢复至煤矿开采前原始地貌还需要较长时间^[26,30,33-34]。因此,为了提高祁连山自然保护区煤矿废弃地的修复效果,地上植被恢复及覆土模式还需要进一步优化。

土壤动物群落结构的演变是衡量矿区废弃地生态修复效果的关键生物指标,可以反映土壤和植被的变化,蜘蛛和甲虫等地表节肢动物还可以指示生境扰动^[35-36]。煤矿恢复区土壤动物群落恢复演替过程十分复杂,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,而蜘蛛和甲虫等一些地表节肢动物通常是通过迁移进入修复区^[37]。煤矿和采石矿等与铅锌等金属矿不同,它们只是破坏植被和土壤,而有毒有害物质积累较少对土壤生

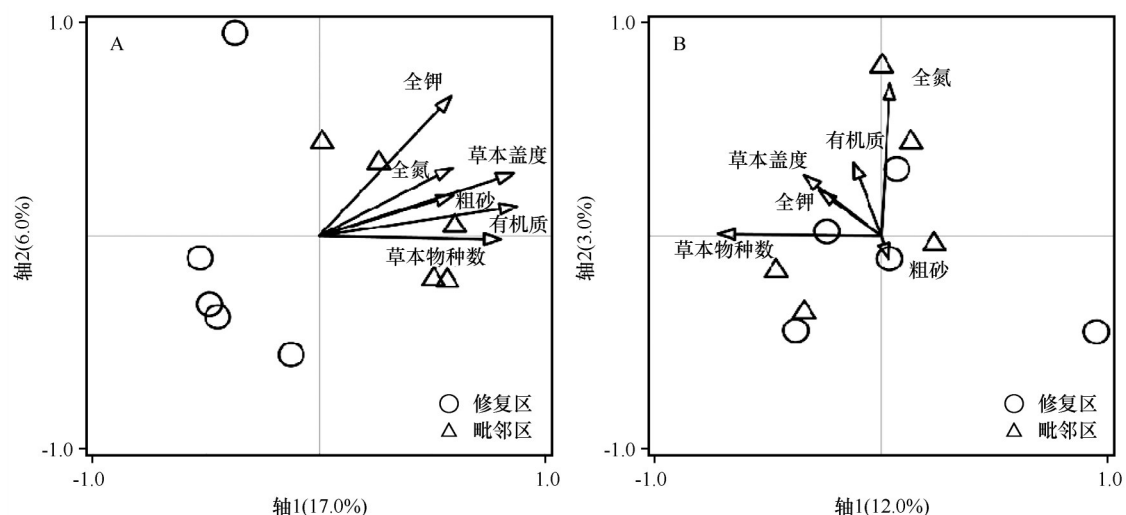


图4 典型煤矿修复区与毗邻区土壤捕食性(A)和植食性(B)地表节肢动物与主要环境因子的RDA排序图

Fig.4 The RDA two-dimensional ordination diagram of predators (A) and herbivores (B) and main environmental factors in typical coal mine restoration area and adjacent area. ○ represents the restoration area and △ represents the adjacent area

物产生毒害作用也较小。一些研究发现自然恢复与人工修复矿区相比,土壤动物多样性明显较高,主要原因是人工修复地植被盖度及丰富度较大,给一些土壤动物提供了良好的栖息环境;且人工修复区土壤有机质及全氮高于未修复区,而土壤有机质和全氮含量通常与土壤动物数量呈正相关关系^[38]。但不同的修复措施及时间也会对矿区土壤动物分布及数量产生很大影响^[26,39]。煤矿矿区自然恢复演替与人工修复对土壤动物影响略有不同,二者可以考虑结合使用^[40-41]。Hendrychová等^[41]就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,矿区修复需要多种措施结合提高土壤动物多样性。随着煤矿矿区修复年限的增加,矿区植物多样性及土壤养分条件也随之改善,这直接导致了土壤动物多样性及数量的增加^[33]。我们的研究也发现矿区植被修复可以显著提高矿区地表节肢动物数量,经过近5年的恢复,煤矿废弃地大型土壤动物数量和多样性已经显著高于毗邻区(图2),且3个煤矿修复区和毗邻区地表节肢动物群落相似性分别为39.9%、52.9%和43.4%。主要原因有:①祁连山自然保护区煤矿废弃地人工修复的主要措施是废弃地表层覆土和种植草本植物,这不但直接引入了一些土壤动物及微生物,还通过资源上行效应提高了捕食性地表节肢动物的数量^[37,42]。②祁连山自然保护区煤矿废弃地实施人工植被恢复后立即围封,禁止一切干扰,而封禁又在一定程度上促进了修复区植被生长,给一些大型土壤动物栖居和繁殖提供了理想生境^[43]。此外,废弃地人工修复区与未破坏的毗邻区土壤动物相似系数平均为0.45,说明毗邻区土壤动物有通过水流、气流或附着于其他生物入侵到修复区的可能性,这也可能导致了修复区土壤动物数量和多样性的增加^[15,37]。这说明祁连山自然保护区煤矿废弃地人工修复对于植被及土壤动物个体数量的恢复效果明显,但土壤动物物种丰富度及功能恢复还需要深入研究。

影响废弃地土壤动物分布及群落组成的主要环境因素有地上植被、土壤物理性质、土壤养分含量、土壤水分状况及土壤重金属含量等^[26,38-39,44]。废弃地不同的植被修复方式对土壤动物的影响也不同,植食性动物在混交林里的数量要显著高于纯林;捕食性土壤动物在不同植被模式下差异较

小^[39,45]。我们的研究结果表明捕食性土壤动物数量和土壤有机质有显著关系,而植食性土壤动物和草本植物丰富度和土壤粗砂含量显著相关(表5,图4),这与土壤有机质和土壤全氮对土壤动物数量影响最大的结果一致^[38]。主要原因是矿区修复采用覆土和种植草本植物等提高资源数量,围封禁牧减小了生境扰动,这导致步甲和蜘蛛等捕食性类群数量及多样性增加,因而通过保护矿区毗邻生境和增加修复区植物多样性则可以维持矿区天敌节肢动物多样性并抑制病虫害发生,这有利于矿区植被生长和加快凋落物分解过程,从而加快矿区土壤恢复过程。但是有研究发现,影响铜尾矿废弃地土壤动物群落结构的最重要因素是土壤含水量和全钾含量^[44]。这说明影响不同类型矿山废弃地土壤动物分布及演变的因素也有所不同,因此针对矿区废弃地的人工修复也要因地制宜。

4 结论

经过近5年的人工修复,矿区废弃地修复区与毗邻区植被特征及土壤性质仍然有显著差异,修复区植物丰富度、盖度、生物量及土壤有机质和全氮含量均显著低于毗邻区。其中土壤有机质和全氮含量分别相差7倍和5倍,说明虽然人工修复使矿区废弃地植被和土壤性质得到了很大的改善,但是还需要较长的时间段才能恢复至原始地貌。

祁连山自然保护区典型煤矿修复区地表节肢动物主要来自步甲科、蝗科和蚁科,所占比例分别为7.9%、12.7%和55.7%;而毗邻区以硬体盲蛛科、蝗科和蚁科为主,所占比例分别为9.3%、14.4%和49.6%。不同煤矿废弃地修复区土壤动物活动密度及多样性指数都显著高于毗邻区,修复区及毗邻区土壤动物相似性分别为39.9%、52.9%和43.4%,这表明覆土和种草有利于提高地表节肢动物的活动密度,可以在很大程度上促进修复区土壤动物群落结构的快速恢复。

pRDA排序结果表明,典型矿区土壤有机质含量是影响捕食性土壤动物分布的主要环境因子,而草本物种数和土壤粗砂含量是影响植食性土壤动物分布的主要环境因子,煤矿修复区土壤环境的改善和植被恢复提高了捕食性和植食性地表节肢动物的数量及多样性。

总体来说,虽然经过近5年的恢复,祁连山自然保护区煤矿废弃地修复区地表节肢动物类群丰富

度及多样性已经超过了毗邻区,但是这是在表层覆土和封禁的前提下,加之修复区土壤动物变化是个波动过程,土壤动物群落和土壤环境还没有达到稳定。因此,要想准确地评价废弃地人工修复效果还需要对地上植被、土壤及土壤动物的长时间持续观测。同时,也要优化地上植被及土壤修复模式,使矿区废弃地土壤动物多样性和多功能性(如抑制病虫害、凋落物分解、养分循环等)得到快速提升,维持矿区土壤健康和稳定。

参考文献:

- [1] 生态环境部.“美丽中国先锋榜(24)|甘肃整治祁连山国家级自然保护区生态环境破坏问题”[Z].2019-09-20.
- [2] 卫智军,李青丰,贾鲜艳,等.矿业废弃地的植被恢复与重建[J].水土保持学报,2003(4):172-175.
- [3] 郝蓉,白中科,赵景遼,等.黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J].生态学报,2003,33(8):1470-1476.
- [4] 郭道宇,张金屯,宫辉力,等.安太堡矿区复垦地植被恢复过程多样性变化[J].生态学报,2005,25(4):763-770.
- [5] 姚虹,马建军,张树礼.煤矿复垦地不同恢复阶段植物群落功能群结构与生物多样性变化[J].西北植物学报,2012,32(5):1013-1020.
- [6] 朱琦,聂欣然,张勇,等.华北地区煤矸石山生态修复草本植物种优选[J].北京林业大学学报,2021,43(8):90-97.
- [7] 秦文展.露天铝土矿生态恢复过程中生物多样性研究[D].长沙:中南大学,2011.
- [8] 李琦峰.肃南县马苏河矿区生态环境调研评估与修复方案研究[D].兰州:兰州大学,2019.
- [9] 董玉钲.内蒙露天煤矿排土场边坡抗冲性及减水减沙效益研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [10] 叶凌枫.不同修复措施对矿区土壤肥力质量的影响及评价[D].西安:长安大学,2016.
- [11] 魏光普.轻稀土尾矿库周边植被恢复模式及其土壤修复效应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [12] 刘莉莉,姚德利,文屹,等.鞍山铁矿废弃地生态恢复与重建中土壤动物群落研究[J].土壤通报,2009,40(2):248-251.
- [13] 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[J].生态学报,2013,33(19):6236-6245.
- [14] 辛未冬,刘华煜,杨铁荫,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.
- [15] 殷秀琴,宋博,董炜华,等.我国土壤动物生态地理研究进展[J].地理学报,2010,65(1):91-102.
- [16] 李红涛.不同植被配置下矿区大型土壤动物群落结构研究[D].北京:中国地质大学,2016.
- [17] 郑乐怡,归鸿.昆虫分类[M].南京:南京师范大学出版社,1999.
- [18] Song D X, Zhu M S, Chen J. The Spiders of China [M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 1999.
- [19] 任国栋,于有志.中国荒漠半荒漠的拟步甲科昆虫[J].保定:河北大学出版社,1999.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Clarke K R, Gorley R N. PRIMER V6: User Manual/Tutorial (Plymouth Routines in Multivariate Ecological Research) [M]. Plymouth, UK: Primer-E Ltd, 2006.
- [23] Ter Braak C J F, Smilauer P. Canoco reference manual and user's guide: software for ordination (version 5.0) [Z]. Ithaca, USA: Microcomputer Power, 2012.
- [24] Jitendra A, Kumar M S. Assessment of soil carbon pool, carbon sequestration and soil CO₂ flux in unreclaimed and reclaimed coal mine spoils [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(1):1-13.
- [25] 王丽艳,韩有志,张成梁,等.不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征[J].生态学报,2011,31(21):6429-6441.
- [26] 李晓莹,徐学华,郭江,等.不同造林树种对铁尾矿基质理化性质和土壤动物的影响[J].生态学报,2014,34(20):5746-5757.
- [27] 田佳榕,马伟波,戚旭东,等.内蒙古某铁尾矿库生态修复区的植被恢复效果[J].农业资源与环境学报,2020,37(4):601-608.
- [28] 陶贵鑫,周宏轩,孙婧,等.关闭/废弃煤矿的生态修复研究进展及展望[J].中国矿业,2021,30(5):10-19.
- [29] 杜华栋,曹伟晨,聂文杰,等.黄土沟壑区采煤塌陷地人工与自然植被恢复下土壤性质演变特征[J].煤炭学报,2021,46(5):1641-1649.
- [30] 王金满,杨睿璇,白中科.草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型[J].农业工程学报,2012,28(14):229-235.
- [31] 谢伟,钱晓彤,王东丽,等.鄂尔多斯矿区排土场苜蓿恢复地土壤种子库的演变特征[J].中国水土保持科学,2020,18(4):29-37.
- [32] 温明霞,邵明安,周蓓蓓.马家塔露天煤矿复垦区不同土地利用类型的土壤水分入渗过程研究[J].水土保持研究,2009,16(4):170-173.
- [33] 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.
- [34] 王金满,郭凌俐,白中科,等.黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J].农业工程学报,2013,29(21):223-232.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Wanner M, Dunger W. Primary immigration and succession of soil organisms on reclaimed opencast coal mining areas in east-

- ern Germany [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38 (2): 137–143.
- [38] 林英华, 宋百敏, 韩茜, 等. 北京门头沟废弃采石矿区地表土壤动物群落多样性[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4832–4839.
- [39] 王军, 李红涛, 白中科, 等. 矿区不同复垦模式下大型土壤动物功能类群及其分布研究: 以山西省平朔矿区为例[J]. *中国土地科学*, 2017, 31(11): 83–90.
- [40] Rufaut C G, Clearwater S, Craw D. Recolonization and recovery of soil invertebrate assemblages at an inactive coal mine in southern New Zealand [J]. *New Zealand Natural Sciences*, 2010, 35: 17–30.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 路凯亮, 腾悦, 李俊兰. 围封对内蒙古退化典型草原大型土壤动物群落多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(9): 2680–2689.
- [44] 朱永恒, 沈非, 余健, 等. 铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征[J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1495–1505.
- [45] 崔艳, 张继栋, 白中科, 等. 露天煤矿不同恢复植被大型土壤动物群落比较[J]. *生态环境*, 2008, 17(3): 1024–1027.

Distribution pattern and influencing factors of ground arthropods in coalmines restoration area of Qilian Mountain Nature Reserve, China

Luo Weicheng¹, Zhao Wenzhi¹, Liu Jiliang¹, Yang Jingyi^{1,2}, Bai Xuelian^{1,3}, Wei Lemin^{1,3}, Feng Yilin⁴

(1. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Artificial vegetation restoration is the main method for the restoration of abandoned mining areas in Qilian Mountain Nature Reserve. After nearly 5 years of restoration, although the coverage of vegetation in the abandoned mining areas was significantly improved, but the changes of soil fauna community as an important indicator for evaluating the effect of soil restoration were still unclear. We studied the distribution characteristics and influencing factors of ground arthropods using pitfall trapping in a typical abandoned coal mine area of Qilian Mountain Nature Reserve by field investigation. The results show that: (1) plant richness, biomass and coverage, soil coarse sand content, organic matter and total nitrogen content in the restoration area were significantly lower than those in the adjacent area ($P < 0.05$); but soil fine sand content, clay silt content, soil water content, total K and total P had no significant difference ($P > 0.05$). (2) the activity density and diversity index of ground arthropods in the restoration area were significantly higher than those in the adjacent area, and the ground arthropods in the restoration and adjacent areas were mainly from Acrididae and Formicidae, accounting for 12.7% and 55.7%, 14.4% and 49.6%, respectively. The similarity of ground arthropods was 39.9%, 52.9% and 43.4%, respectively. (3) the consequences of pRDA show that soil organic matter content were key environmental factors affecting the assemblage of predatory arthropods, while herbaceous plant richness and the coarse sand content were key environmental factors affecting the assemblage of herbivorous arthropods. In general, the abundance and diversity of ground arthropod community in the restored abandoned coal mine areas have exceeded that in the adjacent areas, which indicates that ground arthropods such as ants, beetles and locusts have a sensitive to response to vegetation and soil environment changes driven by measures such as restoration of soil and vegetation covering and enclosure in coal mining areas of the Qilian Mountain Nature Reserve. Therefore, it is necessary to optimize the vegetation and soil restoration mode, increasing soil fauna diversity and multifunction, so that the ecological environment of the abandoned mining areas can be quickly restored.

Key words: Qilian Mountain Nature Reserve; mining area restoration; ground arthropods; community structure; influencing factors