

金矿废弃地人工植被恢复草本层植物群落特征

杨海裕^{1,2,3}, 吕 寻^{1,2,3}, 刘小林^{1,2,3*}, 郑子龙^{1,2}, 张江涛^{1,2}, 陈瑞锋^{1,2}

(1. 甘肃省小陇山林业实验局 林业科学研究所, 甘肃 天水 741022; 2. 甘肃小陇山森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 天水 741022;
3. 甘肃省次生林培育重点实验室, 甘肃 天水 741022)

摘 要:以小陇山林区金矿废弃地人工恢复植被和自然恢复植被为对象,采用样方法对草本层植物进行了调查,计算物种重要值和多样性指数,分析不同人工植被恢复下草本层植物组成和物种多样性特征。结果表明:1)金矿废弃地共出现草本植物 17 科 44 属 52 种,其中菊科 15 属 21 种,豆科 5 属 6 种,蔷薇科 4 属 4 种,伞形科 4 属 4 种,这 4 种植物适应能力强,总体表现为单属单种植物较多;2)群落中水蒿、牛尾蒿、紫花苜蓿、大火草重要值(I_V)表现最高。不同人工植被恢复措施,均能形成植被,各群落物种 Simpson 指数(D)和 Evenness 均匀度指数(E)变化不大;3)不同恢复年限油松林下草本层 Margalef 丰富度指数(R)、Evenness 均匀度指数、Simpson 指数和 Shannon-Wiener 多样性指数(H)的变化与油松林龄增长一致,表现在 5 a 时多样性指数随油松林龄增加而增大,10 a 时随油松林龄增加而减小;4)人工建植日本落叶松+刺槐和油松+云杉,能够增加 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数,是金矿废弃地人工植被恢复的有效措施。研究结果为林区矿山废弃地植被可持续经营管理和植被恢复物种选择提供理论依据。

关键词:小陇山林区;金矿废弃地;草本层;植被结构;物种多样性

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2022)01-0053-07

Plant Community Characteristics of Herbaceous Layer in Artificial Vegetation Restoration of Gold Mine Wasteland

YANG Hai-yu^{1,2,3}, LÜ Xun^{1,2,3}, LIU Xiao-lin^{1,2,3*}, ZHENG Zi-long^{1,2}, ZHANG Jiang-tao^{1,2}, CHEN Rui-feng^{1,2}

(1. Gansu Xiaolongshan Research Institute of Forest Science, Tianshui 741022, Gansu, China;
2. Gansu Xiaolongshan Forest Ecosystem National Research Station, Tianshui 741022, Gansu, China;
3. Gansu Key Laboratory of Secondary Forest Cultivation, Tianshui 741022, Gansu, China)

Abstract: In this study, artificial restoration vegetation and natural restoration vegetation of gold mine wasteland in Xiaolongshan forest region were taken as the research objects. The species of herbaceous layer were investigated by sample method, and the species importance value and diversity index were calculated. The composition and species diversity of the herb layer under different artificial vegetation restorations were analyzed. The results showed 1) there were 52 species of herbaceous plants belonging to 44 genera and 17 families in gold mine wasteland, among them, 21 species belonging to 15 genera of Compositae, 6 species belonging to 5 genera of Leguminosae, 4 species belonging to 4 genera of Rosaceae and 4 species belonging to 4 genera of Umbelliferae were found. The adaptability of these 4 families was strong, and there were more single genus and single species. 2) The important values (I_V) of *Artemisia selengensis*, *A. dubia*, *Medicago sativa* and *Anemome tomentosa* were the highest in the community. Vegetation could be

收稿日期:2021-03-08 修回日期:2021-06-09

基金项目:生态环境部生物多样性调查评估项目(2019HJ2096001006);林业科技创新平台运行补助项目(2020132067)。

第一作者:杨海裕,高级工程师。研究方向:森林生态学。E-mail: yanghy3866@163.com

*通信作者:刘小林,正高级工程师。研究方向:森林生态学。E-mail: LiuxL.99@163.com

formed by different artificial vegetation restoration measures, and the Simpson index (D) and Evenness index (E) of each community changed little. 3) The changes of Margalef index (R), Evenness index (E), Simpson index (D) and Shannon—Wiener diversity index (H) in the herb layer of *Pinus tabulaeformis* forest with different restoration years were consistent with the growth of *P. tabulaeformis* forest age, this reflected in the diversity index that increased with the increase of *P. tabulaeformis* forest age at 5 a and decreased with forest age at 10 a. 4) Planting *Larix kaempferi* + *Robinia pseudoacacia* and *P. tabulaeformis* + *Picea crassifolia* could increase Margalef index (R) and Shannon—Wiener (H), which were effective measures for artificial vegetation restoration in gold mine wasteland. The results provide a theoretical basis for the sustainable management of vegetation and the selection of vegetation restoration species in forest mine wasteland.

Key words: Xiaolongshan forest region; gold mine wasteland; herbaceous layer; vegetation structure; species diversity

矿产开发在推动区域经济社会发展上做出了巨大贡献,同时带来的生态环境退化问题也越来越受到人们的高度重视^[1-2]。矿山废弃地植被恢复与重建,能够短期内快速恢复植被,被认为是解决生态环境问题的重要措施之一^[3-5]。植物物种组成和群落特征既是生态恢复与重建的基础,也是评价植被恢复成效的重要指标^[6-7]。国内有关煤矿渣土场、煤矸石山等矿山废弃地植被恢复和重建的研究较多^[8-9]。孔令伟等^[10]对露天煤矿排土场生态修复效果的研究认为,穴铺植生袋建植技术在矿区排土场及类似区域生态修复中具有良好作用。金立群等^[11]研究认为,不同恢复年限对高寒露天煤矿区渣山植被,与恢复 1 a 相比,恢复 3 a 的植被地上生物量显著增加,恢复 5 a 的植被高度、盖度均显著增加。杨鑫光等^[12]比较分析了高寒矿区煤矸石山不同人工建植措施间的恢复效果,认为采取人工建植+覆土+施肥的组合方式,是恢复煤矸石山生态系统的有效途径。施翔等^[13]研究认为物种的丰富度指数、多样性指数与群落的结构以及立地环境条件关系密切,群落结构越复杂,多样性指数越高。分析植物结构和物种多样性,对揭示植物群落稳定性和更新、演替规律具有重要意义^[14]。

小陇山林区矿产开发主要以金矿、铅锌矿、铁矿为主。在经济利益驱动下,金矿被大量开采,严重影响了森林生态环境的改善和发展。随着国家对退化生态系统恢复工程的实施,林区相继开展了以金矿废弃地为主的人工植被恢复工作。不同的恢复措施使得植物群落组成、结构特征和物种多样性发生了改变^[15]。已在铅锌矿废弃地植被培育和人工恢复方面有研究报道^[16-17],而对金矿废弃地植被结构和多样性特征的研究未见报道。因此,本研究利用样方法调查林区金矿废弃地不同人工恢复植被,计算反映群落特征的综合指标,分析不同人工植被恢复

下草本层植物结构和物种多样性变化特征,初步筛选出适宜矿山废弃地植被恢复的乡土物种。对完善同类地区矿山废弃地植被恢复和生物多样性保护具有指导价值。

1 研究区概况

小陇山林区位于甘肃省东南部(104°23′—106°43′E、33°31′—34°41′N),地处秦岭西段,是嘉陵江、渭河的发源地,地跨天水、陇南、定西 3 市 8 县区,总面积 82.4 万 hm^2 。为我国北方典型天然次生林区和重要水源涵养区,对维护我国西北地区生态平衡有着非常重要的作用。境内以秦岭山地为主,海拔 700~3 200 m,相对高差 2 500 m。气候为大陆性季风气候,属暖温带湿润区。年平均气温 7~12℃,极端高温 36℃,极端低温-21℃。年平均降水 600—800 mm,且分布不均匀。森林土壤以褐色土为主, pH 6.5~7.5^[18]。林区有高等植物 225 科 877 属 2 753 种(含种下等级)。主要乔木为栓皮栎(*Quercus variabilis*)、锐齿槲栎(*Q. aliena* var. *acuteserrata*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、白桦(*B. platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)等;灌木为虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、卫矛(*Euonymus alatus*)和马桑(*Coriaria sinica*)等;草本植物为狗尾草(*Setaria viridis*)、野菊花(*Dendranthema indicum*)和蒿属(*Artemisia*)等^[19]。

小陇山林区于 20 世纪 90 年代开始,所属地方对部分矿产资源进行开采,原生植被受到损毁。2010 年前后,对矿山废弃地经人工表面平整、加固、削坡处理,并覆盖一定厚度的林缘土,利用日本落叶松(*Larix kaempferi*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)裸根苗和油松、云杉(*Picea crassifolia*)容器苗,按照一般造林标准,进行了人工植被恢复工作。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

通过资料收集和线路踏查,选择小陇山林区金矿废弃地日本落叶松+刺槐混交林、油松林、油松+云杉混交林人工植被和自然恢复植被 4 种类型,2020 年 8 月,共设置了 20 m×20 m 乔木样方 6 个(表 1)。每个样地内按品字形设置 5 m×5 m 灌木

样方 5 个、1 m×1 m 草本样方 5 个,即 5 次重复。调查记录每个样方内植物种类和数量,同时测定每个样方内植物高度、密度和盖度。草本层植物高度用钢卷尺直接测量,密度以样方内每个植物数量计算,盖度采用目测法,即样方内草本植物垂直投影面积占样方面积的比值,频度利用实测样方内某个种出现的次数计算。同时,用 GPS 记录调查样方的海拔和经纬度。

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic survey of sample plots

样地编号	经纬度	海拔/m	土壤厚度/cm	植被特征	坡度/(°)
1	106°11'35"E,34°20'1"N	1 630	15	3 年生日本落叶松+刺槐	10
2	105°54'49"E,34°20'43"N	1 894	1	10 年生油松容器苗	25
3	106°21'37"E,33°34'10"N	2 175	25	5 年生油松容器苗	5
4	106°21'14"E,33°41'4"N	2 311	30	3 年生油松+云杉容器苗	0
5	106°13'41"E,33°36'25"N	1 100	10	2 年生油松容器苗	20
6	106°11'50"E,34°15'10"N	1 600	3	10 年生自然恢复	0

2.2 群落综合指标重要值测定

物种重要值(important value, IV, 公式中用 I_v 表示)采用以下公式计算^[20]:

$$I_v = (C_r + E_r + H_r + R_r) / 4 \tag{1}$$

式中: C_r 为相对盖度; E_r 为相对密度; H_r 为相对高度; R_r 为相对频度; S 为每个样方总的物种数。

2.3 物种多样性测定

群落物种多样性测定采用 Margalef 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 多样性指数(D)、Evenness 均匀度指数(E) 4 个指标进行测定^[20]。

$$R = (S - 1) / \ln N \tag{2}$$

$$H = - \sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N} \left(\ln \frac{N_i}{N} \right) \tag{3}$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right)^2 \tag{4}$$

$$E = \left[1 - \sum_{i=1}^S \left(\frac{N_i}{N} \right)^2 \right] / \left(1 - \frac{1}{S} \right) \tag{5}$$

式中: N 为 S 个全部物种的重要值之和; N_i 为 i 第物种的重要值。

数据统计、图表制作和分析采用 Excel 2010、SPSS 19.0 完成。

3 结果与分析

3.1 草本层植物科、属、种组成

在调查的金矿废弃地植被中,共出现草本植物 17 科 44 属 52 种(表 2),其中以菊科 15 属 21 种、豆科 5 属 6 种、蔷薇科 4 属 4 种、伞形科 4 属 4 种为主,这 4 个科植物共计 35 种,占本群落总种的 67.3%,其他科以单属单种为主。1 号样地为 3 年生

日本落叶松+刺槐人工植被,出现 21 种植物;5 号样地为 2 年生油松人工植被,草本层植物种类较少。

3.2 物种重要值分析

计算结果表明(表 3):金矿废弃地草本层物种重要值 $IV > 20$ 的物种有水蒿(*Artemisia selengensis*)、草木犀(*Melilotus officinalis*)、野草莓(*Fragaria vesca*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和小果博落回(*Macleaya cordata*)等 8 种,在各植物群落中重要值最大,为优势种,对植被恢复具有重要作用; IV 在 10~20 的物种有飞蓬(*Erigeron acer*)、野草莓(*Fragaria vesca*)、大火草(*Anemome tomentosa*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)等 9 种,重要值相对较大,在林下分布较集中,为主要伴生种; IV 在 5~10 的物种有 16 种, $IV < 5$ 的物种较多,在各植被群落中零星分布。这种植被结构仍处于自然恢复阶段。

3.3 草本层植物生长特征

不同人工植被恢复措施下,促进了金矿废弃地植被的形成,但植物生长特征变化较大(图 1)。植被高度方面,与 6 号自然恢复样地相比,不同人工植被恢复措施没有显著提高植被高度,不同植被恢复措施间差异不显著($P > 0.05$);植被密度方面,1 号样地日本落叶松+刺槐,显著高于 4 号样地油松+云杉容器苗和 5 号样地油松容器苗($P < 0.05$);植被盖度方面,4 号样地油松+云杉容器苗,显著高于 1 号样地日本落叶松+刺槐、2 号样地和 5 号样地油松容器苗($P < 0.05$)。与自然恢复植被相比,人工日本落叶松+刺槐和油松+云杉容器苗措施,能够提高植被密度和植被盖度。

表 2 不同恢复植被草本层植物科、属、种组成

Table 2 Family,genus and species composition of herbaceous layer in different vegetation restorations

样地编号	总科数/科	总属数/属	总种数/种	常见科物种数					占本群落 比率/%
				菊科	豆科	蔷薇科	伞形科	合计	
1	10	18	21	6	3	1	3	13	61.9
2	6	8	8	2	2	1	0	5	62.5
3	9	13	13	3	1	0	0	4	30.8
4	8	17	18	5	3	3	0	11	61.1
5	4	6	6	3	0	1	0	4	66.7
6	9	19	20	10	2	2	1	15	75
合计	17	44	52	21	6	4	4	35	67.3

表 3 不同恢复植被草本层植物重要值

Table 3 The IV of herbaceous plants in different restoration vegetations

样地 1		样地 2		样地 3		样地 4		样地 5		样地 6	
物种	IV	物种	IV	物种	IV	物种	IV	物种	IV	物种	IV
水蒿	36.69	草木犀	22.81	紫花苜蓿	20.35	紫花苜蓿	21.33	小果博落回	55.37	牛尾蒿	26.54
飞蓬	6.90	野草莓	22.81	水蒿	18.63	牛尾蒿	13.79	水蒿	52.82	大火草	17.78
窃衣	6.69	贯叶连翘	11.30	大火草	12.00	一年蓬	7.51	蒲公英	14.90	珠光香青	9.49
紫花苜蓿	6.44	窃衣	10.18	野胡麻	8.94	三叶草	7.49	野草莓	13.80	防风	5.88
啤酒花	5.70	阴地蒿	9.91	飞蓬	7.98	裂叶橐吾	6.93	车前草	11.01	紫杆蒿	5.42
卵穗苔草	4.98	毛莲菜	7.77	广布野豌豆	6.71	广布野豌豆	4.98	凤毛菊	7.74	败酱	3.85
路边青	4.46	三叶草	3.94	车前草	4.95	臭草	4.82			野菊花	3.67
蒲公英	3.45	卵穗苔草	3.32	黑麦草	3.80	活血丹	4.23			卵穗苔草	3.47
独活	2.83			乳白香青	3.76	防风	3.93			百脉根	3.37
天名精	2.81			风轮菜	3.66	乳白香青	3.61			泥胡菜	2.92
蛇床子	2.60			夏至草	3.60	大蓟	3.23			天名精	2.67
金挖耳	2.54			苔草	3.25	狗筋蔓	3.10			堇菜	2.55
粗酱草	2.54			窃衣	2.36	野草莓	2.81			紫菀	2.43
广布野豌豆	2.24					一枝蒿	2.79			天蓝苜蓿	2.07
风轮菜	2.07					细蔓萎陵菜	2.73				
草木犀	2.02					夏至草	2.69				
						风轮菜	2.42				

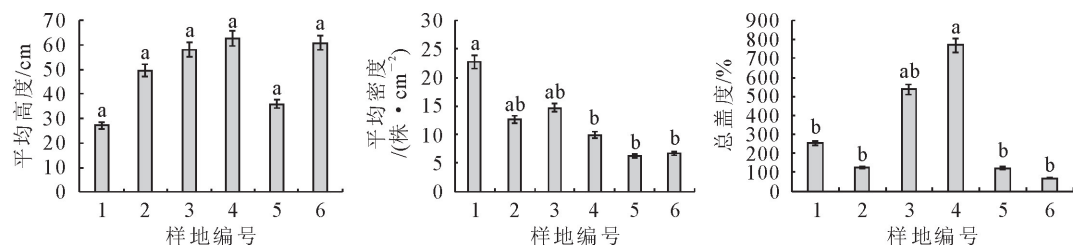
注:IV<2 的物种在调查样方中零星出现,表中未列入。水蒿、飞蓬、窃衣(*Torilis scabra*)、紫花苜蓿、啤酒花(*Humulus lupulus*)、卵穗苔草(*Carex duriuscula*)、路边青(*Geum aleppicum*)、蒲公英、独活(*Angelica pubescens*)、天名精(*Carpesium abrotanoides*)、蛇床子(*Cnidium monnieri*)、金挖耳(*Carpesium divaricatum*)、败酱(*Patrinia scabiosaefolia*)、广布野豌豆(*Vicia cracca*)、风轮菜(*Clinopodium chinense*)、草木犀、野草莓、贯叶连翘(*Hypericum perforatum*)、阴地蒿(*A. sylvatica*)、毛莲菜(*Picris hieracioides*)、三叶草(*Trifolium repens*)、大火草、野胡麻(*Dodartia orientalis*)、车前草(*Plantago asiatica*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)、夏至草(*Lagopsis supina*)、牛尾蒿(*A. dubia*)、一年蓬(*E. annuus*)、裂叶橐吾(*Ligularia przewalskii*)、臭草(*Melica scabrosa*)、活血丹(*Glechoma longituba*)、防风(*Saposhnikovia divaricata*)、大蓟(*Cirsium japonicum*)、狗筋蔓(*Cucubalus baccifer*)、一枝蒿(*A. rupestris*)、细蔓萎陵菜(*Potentilla reptans*)、小果博落回、凤毛菊(*Saussurea pectinata*)、珠光香青(*Anaphalis margaritacea*)、紫杆蒿(*A. dubia*)、野菊花、百脉根(*Lotus corniculatus*)、泥胡菜(*Hemistepta lyrata*)、堇菜(*Viola verecunda*)、紫菀(*Aster tataricus*)、天蓝苜蓿(*M. lupulina*)。

3.4 物种多样性分析

3.4.1 不同恢复措施下物种多样性特征 物种多样性指数计算表明(表 4),4 号样地油松+云杉措施的 Shannon-Wiener 多样性指数最高,但物种分布不均,Evenness 均匀度指数最低;6 号自然恢复样地,Shannon-Wiener 多样性指数次之,但 Margalef 丰富度指数最大;1 号样日本落叶松+刺槐措施,Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Evenness 均匀度指数相对较高,但 Simpson 多

样性指数较低;2 号、3 号和 5 号样地油松容器苗恢复措施,物种多样性指数相对最低。4 种不同植被恢复措施,Shannon-Wiener 多样性指数由大到小表现为:人工油松+云杉、自然恢复、人工日本落叶松+刺槐、人工油松。采用人工混交造林措施,林下植物多样性增加,对植被恢复有明显促进作用。

3.4.2 不同恢复年限油松林草本层植物多样性特征 比较分析人工油松林不同恢复年限草本层植物多样性(表 5),结果显示,与恢复初期 2 a 相比,5 a



注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同恢复植被草本层植物生长状况

Fig. 1 Growth status of herbaceous plants in different vegetation restorations

表 4 草本层植物多样性变化

Table 4 Changes of plant diversity in herbaceous layer

样地编号	物种多样性指数			
	R	E	D	H
4	3.69	0.11	0.90	2.62
6	4.13	0.92	0.87	2.48
1	3.91	0.89	0.84	2.41
3	2.61	1.04	0.96	2.32
2	1.52	0.96	0.84	1.84
5	0.87	0.84	0.67	1.30

表 5 不同恢复年限油松林草本层植物多样性指数

Table 5 Plant diversity index of herb layer in *Pinus tabulaeformis* forests with different restoration years

物种多样性指数	恢复年限/a		
	2	5	10
R	0.87	2.61	1.52
E	0.84	1.04	0.96
D	0.67	0.96	0.84
H	1.30	2.32	1.84

时,Margalef 丰富度指数、Evenness 均匀度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数随油松林龄增加而增加;10 a 时,随油松林龄的增加而有所下降。

2 a 时,油松生长在植被恢复初期,以草木犀、野草莓、小果博落回等少数先锋物种在林下物种组成中占绝对的优势,群落 Margalef 丰富度指数、Evenness 均匀度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指标均较低;5 a 时,随着油松林生长,多数草本植物能适应林下环境,Margalef 丰富度指数、Evenness 均匀度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指标增大;10 a 时,随着油松林进一步生长,林分郁闭度增大导致林下光照环境变化,草本层植物种间竞争加剧,林下物种数量减少,少数能够适应林下光照环境变化的草本植物物种存活下来,Margalef 丰富度指数、Evenness 均匀度指数、Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指标有所降低。

4 结论与讨论

小陇山林区金矿废弃地通过人工植被恢复后,物种丰富度和多样性指数增加,植被以菊科、豆科、蔷薇科、伞形科植物为主,天然更新乔木和灌木出现很少。群落结构简单,植被恢复较慢。不同恢复年限油松林下草本层植物 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指标和 Evenness 均匀度指数变化随油松林生长年限的增加变化一致,5 a 时多样性指标随油松林龄增加而增加,10 a 时随油松林龄增加开始下降,优势度指数变化则相反。人工植被恢复后,形成了不同的植被型,水蒿在金矿废弃地植被群落中占绝对优势,紫花苜蓿、大火草和牛尾蒿为主要伴生种,这些种对严酷环境的适应性较强,可作为植被恢复的先锋物种。营造人工日本落叶松+刺槐和油松+云杉混交林,能有效提高金矿废弃地草本层植物 Margalef 丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指标。

矿山废弃地表面裸露,原有群落生物多样性被破坏,短期内难以形成植被,采取人工恢复措施,能够对群落物种组成和结构产生不同的影响^[12]。人工植被恢复后,形成了以菊科植物水蒿、牛尾蒿、飞蓬,豆科植物草木犀和毛茛科植物大火草为优势种的植物群落。植物群落结构不仅能反映植物群落特征,同时也能体现出植物群落所在生境条件^[21]。本研究区共出现草本植物种 52 种,分属 17 科 44 属,物种构成表现为单科单属较多,物种组成简单。因受环境条件限制,金矿废弃地零星出现青麸杨(*Rhus potaninii*)、白桦、青皮槭(*Acer cappadoci-cum*)等野生乔木和红泡刺藤(*Rubus niveus*)、葱皮忍冬(*Lonicera ferdinandii*)、美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)、悬钩子(*Rubus corchorifolius*)等灌木物种。这种结构和党荣理等^[22]关于西北荒漠地区植物区系研究结果基本一致。

安俊珍^[23]研究了植被恢复对土壤理化性质的

改良作用,确定了刺槐等植被恢复物种和乔灌木结合的配置模式,同时对野蒿测定了重金属含量,认为蒿类植物对重金属富集能力最强。本研究也证实了采用人工日本落叶松+刺槐和油松+云杉混交林,能有效提高金矿废弃地林下草本层植物物种和多样性,对矿山废弃地植被恢复起到了促进作用。本研究还发现,不同生长年限的油松林草本层植物 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指标和 Evenness 均匀度指数随油松林生长的变化特征,与崔静等^[24]在黄土丘陵区人工柠条林下草本植物物种多样性研究结果相一致。因为物种多样性的增加主要是由于人工恢复措施的长期作用改善了林下小环境,促进了新物种增加,使群落物种丰富度和多样性升高^[25]。在生长初期,油松林分郁闭度较小,林下光照充足,为大量草本植物生存提供了适宜的空间,喜光性草本植物大量入侵,故草本层物种多样性较高;随着油松林生长,林分郁闭度增大,喜荫性植物出现,喜光性植物减少,种内竞争导致物种多样性减少,与王国梁等^[26]在黄土沟壑区的植被恢复研究结果基本一致。

研究结果将对矿山废弃地植被恢复物种选择和配置模式提供依据。受条件所限,本研究仅从群落综合指标重要值和多样性指数方面进行了表征。不同恢复措施对土壤理化性质的影响和植被群落的演替还需持续研究。

参考文献:

- [1] GUO X Y, KOMNITSAS K, LI D L. Correlation between herbaceous species and environmental variables at the abandoned Haizhou coal mining site[J]. *Environmental Forensics*, 2010, 11: 146-153.
- [2] 关军洪,郝培尧,董丽,等. 矿山废弃地生态修复研究进展[J]. *生态科学*, 2017, 36(2): 193-200.
GUAN J H, HAO P Y, DONG L, *et al.* Review on ecological restoration of mine wasteland[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(2): 193-200. (in Chinese)
- [3] 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, 17(4): 172-175.
WEI Z J, LI Q F, JIA X Y, *et al.* Vegetation recovery on industrial mining disposal site[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(4): 172-175. (in Chinese)
- [4] 李娟,赵竟英,陈伟强. 矿区废弃地复垦与生态环境重建[J]. *国土与自然资源研究*, 2004(1): 27-28.
LI J, ZHAO J Y, CHEN W Q. Mining wasteland and its ecological restoration and reconstruction. [J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2004(1): 27-28. (in Chinese)
- [5] 韩煜,赵伟,张洪翔,等. 不同植被恢复模式下矿山废弃地的恢复效果研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 120-125.
HAN Y, ZHAO W, ZHANG Q X, *et al.* Effects of different vegetation patterns on ecological restoration in mining wasteland[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(1): 120-125. (in Chinese)
- [6] 刘斌,孙艳玲,王中良,等. 华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(1): 12-23.
LIU B, SUN Y L, WANG Z L, *et al.* Analysis of relative effects of vegetation cover change and its influencing factors in north China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(1): 12-23. (in Chinese)
- [7] 陈文思. 陕北黄土区自然恢复植物群落的结构及多样性特征[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [8] 张百胜. 内蒙古平庄矿区露天煤矿植被恢复与重建的研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2007.
- [9] 杜华栋,宋世杰,张勇,等. 彬长矿区不同地表沉陷类型下植物群落特征[J]. *生态学报*, 2019, 38(5): 1520-1527.
DU H D, SONG S J, ZHANG Y, *et al.* Characteristics of plant community in different types of coal mining subsidence in Binchang mining area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(5): 1520-1527. (in Chinese)
- [10] 孔令伟,薛春晓,苏凤,等. 不同建植技术对露天煤矿排土场生态修复效果的影响及评价[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 187-193.
KONG L W, XUE C X, SU F, *et al.* Evaluation and effect of different construction techniques on the ecological restoration of the stackpile in opencast coal mine[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 187-193. (in Chinese)
- [11] 金立群,李希来,孙华方,等. 不同恢复年限对高寒露天煤矿区渣山植被和土壤特性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 38(1): 121-128.
JIN L Q, LI X L, SUN H F, *et al.* Effects of different years of recovery on vegetation and soil characteristics of open-pit coal mine dumps in alpine region[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 121-128. (in Chinese)
- [12] 杨鑫光,李希来,金立群,等. 不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究[J]. *草业学报*, 2019, 28(3): 1-11.
YANG X G, LI X L, JIN L Q, *et al.* Effectiveness of different artificial restoration measures for soil and vegetation recovery on coal mine tailings in an alpine area[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(3): 1-11. (in Chinese)
- [13] 施翔,孟凡翔,杨姗姗,等. 不同生境准噶尔无叶豆群落特征及物种多样性研究[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 91-96.
SHI X, MENG F X, YANG S L, *et al.* Community characteristics and species diversity of *Eremosparton songoricum* under different habitats[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 91-96. (in Chinese)
- [14] PANDEY S K, SHUKLA R P. Plant diversity in managed sal (Shorea robusta Gaertn.) forests of Gorakhpur, India: species composition, regeneration and conservation [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12: 2295-2319.
- [15] 马红彬,沈艳,谢应忠,等. 不同恢复措施对宁夏黄土丘陵区典型草原植物群落特征的影响[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(1): 200-206.
MA H B, SHEN Y, XIE Y Z, *et al.* Effects of different restoration measures on plant community characteristics of typical

- grassland in Loess Hilly Region of Ningxia[J]. Northwest Agricultural Sciences, 2013, 22(1):200-206. (in Chinese)
- [16] 王红利,郭蓉,王红红,等. 铅锌矿山废弃地人工植被恢复研究[J]. 中国林副产品, 2017, 3(6):27-28.
- [17] 王红利,李军. 徽废弃铅锌浮选尾矿库表层植被培育[J]. 中国林副产品, 2017, 4(8):75-76.
- [18] 杨海裕,张宋智,刘小林,等. 秦岭西段天然落叶阔叶林乔木种间关联性[J]. 生态学报, 2012, 31(10):2513-2520.
YANG H Y, ZHANG S Z, LIU X L, *et al.* Interspecific associations among tree species in natural deciduous broadleaved forests in western Qinling, northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10):2513-2520. (in Chinese)
- [19] 安定国. 甘肃省小陇山高等植物志[M]. 兰州:甘肃民族出版社, 2002.
- [20] 张建贵,王理德,姚拓,等. 祁连山高寒草地不同退化程度植物群落结构与物种多样性研究[J]. 草业学报, 2019, 28(5):15-25.
ZANG J G, WANG L D, YAO T, *et al.* Plant community structure and species diversity differences in alpine grassland in the Qilian Mountains with different levels of degradation[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(5):15-25. (in Chinese)
- [21] 何芳兰,刘世增,李昌龙,等. 甘肃河西戈壁植物群落组成特征及其多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4):74-78.
HE F L, LIU S Z, LI C L, *et al.* Study on the composition and diversity of Gobi Desert plant community in Hexi Gansu Province[J]. Arid Area Resources and Environment, 2016, 30(4):74-78. (in Chinese)
- [22] 党荣理,潘晓玲. 西北干旱荒漠区种子植物科的区系分析[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1):24-32.
DANG R L, PAN X L. Floristic analysis of the spermatophyte family in the northwestern arid desert region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(1):24-32. (in Chinese)
- [23] 安俊珍. 风化型土质金矿尾矿库植被恢复研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2010.
- [24] 崔静,黄佳健,陈云明,等. 黄土丘陵区人工柠条林下草本植物物种多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3):14-20.
CUI J, HUANG J J, CHEN Y M, *et al.* Biodiversity of herbaceous species under caragana microphylla plantations in Loess Hilly Region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3):14-20. (in Chinese)
- [25] SU Y Z, ZHANG T H, LI Y L, *et al.* Changes in soil properties after changes in soil properties after establishment of *Artemisia halodendron* and *Caragana microphylla* on shifting sand dunes in semiarid Horqin sandy land, northern China[J]. Environmental Management, 2005, 36:272-281.
- [26] 王国梁,刘国彬,刘芳,等. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化[J]. 生态学报, 2003, 23(12):2550-2557.
WANG G I, LIU G B, LIU F, *et al.* Changes in composition and structure of plant communities during the course of restoration at loess gully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12):2550-2557. (in Chinese)

(上接第 32 页)

- [22] 艾金泉,陈文惠,陈丽娟,等. 冠层水平互花米草叶片光合色素含量的高光谱遥感估算模型[J]. 生态学报, 2015, 35(4):1175-1186.
AI J Q, CHEN W H, CHEN L J, *et al.* Hyperspectral remote sensing estimation models for foliar photosynthetic pigment contents at canopy level in an invasive species, *Spartina alterniflora*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4):1175-1186. (in Chinese)
- [23] 徐晋,蒙继华. 农作物叶绿素含量遥感估算的研究进展与展望[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1):74-85.
XU J, MENG J H. Overview on estimating crop chlorophyll content with remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1):74-85. (in Chinese)
- [24] 彭建,徐飞雄,邓凯,等. 琅琊山景区不同叶绿素条件下树种叶片光谱差异分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(6):1839-1849.
- [25] 罗庆辉,徐泽源,许仲林. 天山雪岭云杉林生物量估测及空间格局分析[J]. 生态学报, 2020, 40(15):5288-5297.
LUO Q H, XU Z Y, XU Z L. Estimation and spatial pattern analysis of biomass of piceaschrenkiana forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15):5288-5297. (in Chinese)
- [26] GELADI P, KOWALSKI B R. Partial least-squares regression; a tutorial[J]. Anal Chim Acta, 1986, 185:1-17.
- [27] WOLD S, SJÖSTRÖM M, ERIKSSON L. PLS-regression; a basic tool of chemometrics[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems, 2001, 58:109-130.
- [28] 陶培峰,王建华,李志忠,等. 基于高光谱的土壤养分含量反演模型研究[J]. 地质与资源, 2020, 29(1):68-75, 84.
- [29] 王国华,张虎,魏岳嵩. 偏最小二乘回归在 SPSS 软件中的实现[J]. 统计与决策, 2017(7):67-71.
- [30] 于雷,洪永胜,耿雷,等. 基于偏最小二乘回归的土壤有机质含量高光谱估算[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14):103-109.
YU L, HONG Y S, GENG L, *et al.* Hyperspectral estimation of soil organic matter content based on partial least squares regression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14):103-109. (in Chinese)