

不同植被恢复模式下矿山废弃地的恢复效果研究

韩煜¹, 赵伟², 张淇翔³, 王琦¹, 史娜娜¹, 肖能文¹, 全占军¹

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京控股磁悬浮技术发展有限公司,
北京 100124; 3. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为探讨矿山废弃地不同植被恢复模式对生态恢复效果的影响,以城门山铜矿排土场为研究对象,对 7 种不同植被恢复模式的植物群落结构、土壤养分和重金属含量进行调查分析,并与恢复前的排土场和未破坏的自然样地进行了比较。结果表明:(1)人工植被恢复群落的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数呈现出相同的变化趋势,刺槐—苜蓿—狗牙根的物种丰富度和多样性较高,而苜蓿—狗牙根和刺槐—田菁明显低于其他模式。(2)植被恢复能有效改善土壤养分状况,降低重金属含量。与恢复之前相比,土壤速效 K、速效 N 含量分别提高了 2.5~7.7 倍和 3.4~7.9 倍,但仍未达到自然水平;刺槐和苜蓿对降低重金属 Cu 含量作用明显,刺槐和田菁能有效修复土壤 Pb 污染。(3)基于物种多样性、土壤养分和重金属含量的综合评价得出,刺槐—田菁—苜蓿—狗牙根、刺槐—苜蓿—田菁和刺槐—狗牙根—苜蓿 3 种模式的生态恢复效果较好,可以为同类矿山废弃地植被恢复提供参考。

关键词:植被恢复; 矿山废弃地; 物种多样性; 土壤性质

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0120-06

Effects of Different Vegetation Patterns on Ecological Restoration in Mining Wasteland

HAN Yu¹, ZHAO Wei², ZHANG Qixiang³, WANG Qi¹,
SHI Nana¹, XIAO Nengwen¹, QUAN Zhanjun¹

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Beijing Enterprises Holdings Maglev Technology Development Co., Ltd., Beijing 100124, China; 3. School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: For the purpose of studying the effects of different vegetation restoration patterns on ecological restoration in mining wasteland, dumps of Chengmenshan copper mine was chosen as the study site so as to investigate and analyze plant community structure, soil nutrient and heavy metal contents under 7 different vegetation patterns, compared with the dumps before vegetation restoration and the undisturbed sites. The results showed that: (1) the richness index, diversity index and uniformity index of different vegetation modes showed the same trend; the community abundance and diversity of *Robinia pseudoacacia*-*Abutilon theophrasti*-*Cynodon dactylon* were higher, while these parameters were lower under *Abutilon theophrasti*-*Cynodon dactylon* and *Robinia pseudoacacia*-*Sesbania cannabina* than those under the other modes; (2) vegetation restoration could significantly improve soil nutrient status and decrease heavy metal contents; the soil available K and N increased by 2.5~7.7 times and 3.4~7.9 times, respectively, compared with the those before the restoration, but still did not reach up to the natural levels; the content of Cu remarkably decreased under *Robinia pseudoacacia* and *Abutilon theophrasti*, *Robinia pseudoacacia* and *Sesbania cannabina* could effectively remediate soil Pb pollution as well; (3) the comprehensive evaluation indicated that *Robinia pseudoacacia*-*Sesbania cannabina*-*Abutilon theophrasti*-*Cynodon dactylon*, *Robinia pseudoacacia*-*Abutilon theophrasti*-*Sesbania cannabina* and *Robinia pseudoacacia*-*Cynodon dactylon*-*Abutilon theophrasti* had better comprehensive improvement effects on ecological restoration, which can provide reference for similar mine wasteland.

Keywords: vegetation restoration; mining wasteland; species diversity; soil property

矿产资源是支撑社会发展的重要物质基础,也是促进国家经济增长的动力,但矿产资源开发活动也是迄今为止最大规模地破坏陆地生态系统的人类活动^[1-2]。由于长期对矿产资源高强度、掠夺式的开采,引发了一系列严重的生态环境问题,如土地破坏、植被损毁、环境污染、水土流失、地质灾害、生物多样性降低等^[3-4],造成生态系统退化甚至崩溃,严重威胁矿区的可持续发展以及区域生态安全。因此,恢复和重建退化生态系统迫在眉睫。

植被恢复是矿山生态恢复的重要环节,因为退化生态系统的恢复和重建都是以植被恢复为前提^[5]。植被恢复不仅对废弃地起着构建初始植被的作用,还能改善土壤的结构、养分状况和微生物环境,从而促进整个生态系统结构和功能的恢复。近年来,国内外众多学者开展了大量有关矿山废弃地植被恢复的研究,Harris 等认为^[6],选择豆科植物作为恢复先锋种可以增加土壤中的有机物质并且促进氮素的积累,进而改善废弃地贫瘠的土壤环境,为后续植物的生长创造有利条件。Reid 等研究表明^[7],在金伯利岩尾矿进行植被恢复后,土壤的理化性质与未采取植物措施的尾矿相比均得到不同程度的改良。彭东海等^[8]通过对福建金尾矿废弃地采取不同植被恢复措施,探索植被重建过程中最优植物配置模式,结果表明马尾松+枫香+本地河滩草的模式植被恢复效果最好,物种多样性和群落的稳定性较高。

江西省城门山铜矿是我国主要的大型铜矿之一,长期大规模的露天开采,不可避免地对当地生态环境造成了严重破坏,对矿山废弃地的生态恢复已经成为亟待解决的任务。鉴于此,本文以城门山铜矿排土场人工植被恢复群落为研究对象,通过调查分析不同恢复模式下植物群落特征和土壤理化性质,试图从中筛选出适合铜矿废弃地的植被恢复模式,为矿山废弃地的生态恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

城门山铜矿位于江西省九江县,地理坐标为 115°47′19″—115°50′15″E,29°40′8″—29°41′50″N。属于低山丘陵地貌,地处亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 17℃,多年平均降雨量 1 460 mm,土壤类型以红壤为主。排土场主要由开采剥离的覆岩、废石堆积而成,坡度为 40°~55°,高度为 10~15 m,由于废石中含有硫化矿物,在空气和水分作用下氧化后使土壤呈酸性,而且土壤十分贫瘠,缺乏植物生长所需的营养元素。因此,排土场长期处于无植被状态。为

了选择适宜的废弃地植被恢复模式,2015 年 3 月设计了大量不同植物治理措施的试验,在无客土条件下采用石灰对土壤进行改良,不同植物措施的土壤改良方式相同,然后人工种植乔木、撒播草种进行绿化,在陡坡处采用喷播方式,之后在自然状态下恢复植被,目前已形成 7 种植物配置模式下的群落类型,见表 1。

表 1 样地基本情况

模式	植被类型	坡向	坡度	海拔/m
A	刺槐—田菁—狗牙根	西	40°	86
B	刺槐—田菁—苘麻—狗牙根	北	43°	91
C	刺槐—苘麻—田菁	北	42°	87
D	刺槐—苘麻—狗牙根	北	45°	92
E	苘麻—狗牙根	西北	55°	94
F	刺槐—苘麻	西北	40°	90
G	刺槐—田菁	西	45°	89

1.2 研究方法

1.2.1 样地植被和土壤调查 2017 年 6 月,在排土场立地条件(坡位、坡向、海拔等)基本一致的 7 种不同植被恢复模式的植物群落内设置样地,分别在样地的上、中、下部位设 3 个 5 m×5 m 的样方,在每个样方内随机设 5 个 2 m×2 m 的小样方,由于乔木高度均低于 0.5 m,所以和草本植物一起调查,调查指标包括植物的种类、数量、高度、盖度,共调查样方 105 个。以矿区内未开采区作为对照样地(CK),同时将恢复前的排土场作为背景值(BK),在对照区、恢复前排土场和不同模式样地内的两条中心线上采用五点法采集 0—20 cm 土壤装入自封袋,共采集土壤样品 45 个。

1.2.2 土壤理化性质测定 将土样在室内风干后挑出根系和杂物,过 1 mm 土筛备用。速效 N 用碱解扩散法测定,速效 K 用乙酸铵浸提—火焰光度法测定,有机质采用重铬酸钾容量法—外加加热法测定;重金属 Cu、Pb、Zn、As、Cr 和 Cd 全量采用原子吸收光谱仪测定^[9]。

1.2.3 物种多样性计算方法

(1) 物种重要值计算方法^[10]。选用重要值判别物种在群落中的地位,区分该物种是优势种还是伴生种,计算公式如下:

$$\text{重要值} = \frac{(\text{相对密度} + \text{相对优势度} + \text{相对频度})}{3} \times 100\%$$

(1)

(2) 物种多样性计算方法^[11]。选用 Margalef 丰富度指数、Shannon-wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数作为物种多样性的度量指标,计算公式如下:

$$\text{Margalef 丰富度指数 } M = \frac{(S-1)}{\ln N}$$

(2)

式中:S 为群落中的总种数;N 为群落中个体总数。

$$\text{Shannon-wiener 多样性指数 } H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

(3)

式中： P_i 为第 i 种个体数占群落中所有种个体数的比例； S 为群落中的总种数。

Pielou 均匀度指数 $P=\frac{H}{\ln S}$

(4)

式中： H 为实际观察的群落多样性指数； S 为群落中的总种数。

1.2.4 数据分析方法 利用 SPSS 17 软件进行数据统计分析,采用单因素方差分析 LSD 法比较不同植被模式下的差异($p=0.05$),采用主成分分析法对不同植被恢复模式的效果进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式下植物群落的变化

2.1.1 物种重要值 从表 2 可以看出,不同植被恢复模式刺槐的重要值从大到小依次为:模式 D>模式 A>模式 F>模式 C>模式 B>模式 G,表明刺槐在模式 D

的重要性占比大,在群落竞争中处于优势地位,而模式 B 和 G 中刺槐的重要值分别为 2.64%和 2.02%,相对较低,说明刺槐在这两种模式的群落竞争中优势性较差,这可能是因为田菁和刺槐均为豆科植物,对水肥条件的竞争作用明显,而草本植物在初期生长较快,从而抑制了刺槐的生长。不同植被恢复模式下草本植物重要值排在前三位的物种有田菁、狗牙根、马棘和苘麻,其中田菁在模式 B,G 中的重要值占比最大,分别为 44.89%和 61.73%,狗牙根在模式 E 的重要值达到 43.82%,苘麻在模式 C 的重要值为 32.63%,使其成为草本群落中的优势种。同时,所有模式群落中均有田菁、狗牙根和苘麻,除模式 E,G 外,芭茅在其余 5 种群落均有出现,马棘在 4 种模式中均有出现,表明以上 5 种植物对矿山废弃地的生境条件适应能力较强,可以作为植被恢复初期的先锋植物选用。

表 2 不同植被恢复模式物种重要值

植物种类	物种重要值/%						
	A	B	C	D	E	F	G
田菁 <i>Sesbania cannabina</i>	36.93	44.89	21.31	17.68	11.52	15.30	61.73
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	8.42	2.64	3.61	12.22		5.43	2.02
波斯菊 <i>Cosmos bipinnatus</i>	4.84						
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	20.52	22.43	20.93	27.21	43.82	24.57	19.76
马棘 <i>Indigofera pseudotinctoria</i>	10.79	13.72		9.52		15.21	
苘麻 <i>Abutilon theophrasti</i>	6.96	8.70	32.63	17.08	34.71	23.71	6.28
芭茅 <i>Miscanthus floridulus</i>	7.39	5.52	15.43	8.59		11.20	
百喜草 <i>Paspalum notatum</i>	4.16						
小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i>		2.11					
剑叶金鸡菊 <i>Coreopsis lanceolata</i>			3.79				
酸模叶蓼 <i>Polygonum lapathifolium</i>			2.31			2.16	
商陆 <i>Phytolacca acinosa</i>				7.70			
田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i>					6.08		
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>					3.86		10.21
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>						2.42	

2.1.2 物种多样性 物种多样性是群落结构和功能复杂性的一种度量,研究植物群落的物种多样性特征,有利于更好地了解群落的组成、结构、功能、稳定性和演替动态^[12]。从丰富度指数来看(图 1),不同模式差异显著,模式 E,G 的物种丰富度明显低于其余 5 种模式,这两种模式的物种数量均较少,而且模式 E 中没有乔木。模式 D 的物种丰富度最高,丰富度指数为 1.59,和模式 A,B,C,F 差异不明显,这也证明了在人工植被恢复和重建过程中,适当选用乔木和增加植物种类有助于提高植物群落的丰富度^[13]。除模式 E 的多样性指数(0.5)较低外,其余模式多样性指数为 0.69~0.82,其中模式 D 最大,不同模式的多样性指数存在明显差异,这一结果和丰富度指数相一致。模式 F 的均匀度指数最高(1.43),其次是模式 B

(1.34)和 D(1.33),这三种模式群落中物种分布较均匀,而模式 E,G 的均匀度指数较低,群落中狗牙根、田菁单一种优势明显,物种分布的均匀程度较差,不同模式物种均匀度相差不大,主要是由于人工种植使植物分布比较均匀所致。综上,在 7 种植被模式中,模式 E,G 的丰富度指数、多样性指数和均匀度指数均处于较低水平,其余 5 种人工植物群落物种多样性和均匀度均较高,群落结构和稳定性较好。

2.2 不同植被恢复模式下土壤养分的变化

土壤养分是衡量土壤肥力的重要指标,它主要来源于地上植物的凋落物及地下根系,在维持土壤结构、保障物质循环等方面起着重要作用^[14]。对照区的土壤速效 K 含量为 196.54 mg/kg,显著高于人工植被恢复群落,不同模式速效 K 含量比恢复前增加

了 2.5~7.7 倍,其含量从大到小排列为模式 B>模式 C>模式 A>模式 D>模式 E>模式 F>模式 G (图 2)。植被恢复后速效 N 含量提高了 3.4~7.9 倍,其中模式 B,C,D,E 的速效 N 含量高于对照区,其余模式低于对照区,这是因为人工恢复植被选用了刺槐、田菁豆科植物,这类植物具有较强的固氮作用,能够促进土壤氮素的积累。未恢复排土场的土壤有机质含量为 0.37%,而对照区为 1.96%,不同模式土壤有机质含量由大到小依次为模式 B>模式 E>模式 C>模式 D>模式 A>模式 F>模式 G,和恢复之前的排土场相比,植被恢复后土壤有机质含量虽有所增加但仍达不到自然水平(对照区)。植物光合作用固定的碳可以通过凋落物和根系的转化进入土壤,加快腐殖质的分解和转化,使得土壤有机质含量增加。不同植被模式的土壤速效 K、速效 N 和有机质含量相比恢复之前均明显增加,可见人工恢复植被能有效改善土壤的养分状况。

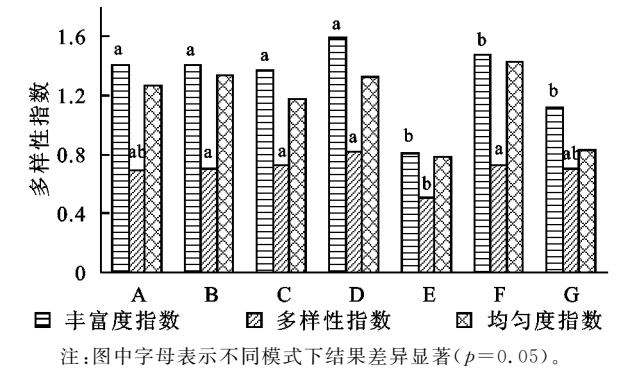


图 1 不同植被模式下物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数

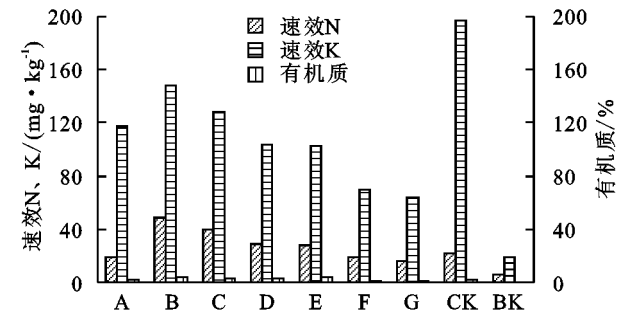


图 2 不同植被恢复模式下土壤养分含量

2.3 不同植被恢复模式下土壤重金属的变化

许多研究表明,金属矿山废弃地土壤重金属污染严重^[15-16],所以,土壤重金属污染修复一直是矿山生态恢复关注的重点。目前,矿山废弃地的重金属污染治理主要通过植物吸收、固定和转化作用来减少土壤中重金属含量或降低重金属的生物有效性,从而达到减轻土壤重金属污染的目的。由图 3 可以看出,植被恢复对排土场土壤重金属的含量有明显影响,不同模式对重金属的治理效果存在差异。相对于未恢复

的排土场,7 种模式的重金属 Cu,Pb,Zn,As,Cr 含量均有不同程度的降低,其中 Cu,Pb 和 Zn 去除效果最明显,这 3 种重金属含量均比未恢复前减少了 50% 以上。Cu 含量按大小顺序排列为模式 G>模式 B>模式 E>模式 A>模式 F>模式 C>模式 D,其中模式 C,D,F 的 Cu 含量比恢复前下降了 86.1%~87.3%,说明刺槐和苘麻对减轻 Cu 污染的效果较好。不同模式 Pb 含量依次为模式 E>模式 C>模式 D>模式 B>模式 F>模式 G>模式 A,表明刺槐和田菁在治理土壤 Pb 污染可以起到很好的作用。在所有模式中,苘麻—狗牙根对修复土壤 Zn 污染的效果最好,Zn 含量比恢复前降低了 90% 以上。恢复后土壤中 Cd 含量均比恢复前有所增加,这可能是由于重金属的转化机制不同导致的,排土场在恢复过程中受到了扰动从而造成了重金属 Cd 的释放。除模式 C,E,F,G 的 Zn 含量略低于对照区外,其余模式的重金属含量仍高于对照区,虽然植被恢复对降低排土场重金属含量可以发挥一定作用,但是要达到自然状态水平,仍需要很长一段时间。通过对不同植被模式的土壤重金属含量分析可以看出,刺槐、苘麻、田菁和狗牙根对降低土壤重金属含量具有很好的作用,可以作为修复土壤重金属污染的先锋植物,其对重金属污染的修复效果因植物组合的不同而有所差别,如刺槐—苘麻—田菁和刺槐—苘麻—狗牙根对降低土壤中 Pb 含量的作用明显,苘麻—狗牙根可以有效修复土壤 Zn 污染。

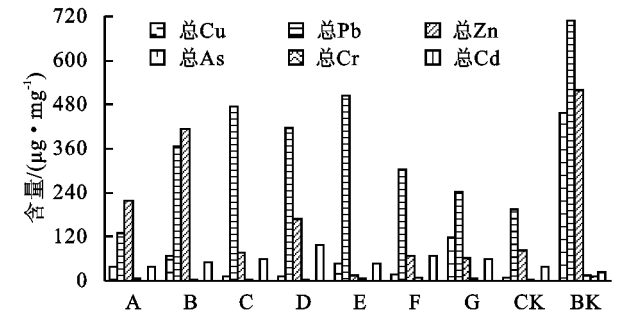


图 3 不同植被恢复模式下土壤重金属含量

2.4 不同植被恢复模式排土场恢复效果综合评价

各种评价指标从不同方面反映植被恢复模式的差别,但是不同评价指标得出的结论并不相同。因此,综合上述不同植被恢复模式的物种多样性指数、土壤养分含量、土壤重金属含量共 12 项指标,采用主成分分析法对不同模式矿山废弃地生态恢复效果进行综合研究。通过分析,提取出 4 个主成分变量,其累计贡献率已达到 93.9%,表明提取出的前 4 个综合指标能代表所有指标的绝大部分信息,可以用这 4 个主成分对不同植被恢复模式的物种多样性和土壤理化性质进行概括分析。通过综合评价公式,计算出综合评价值,得出不同植被恢复模式下综合评价结果。

由表 3 得出,不同植被恢复模式对排土场生态恢复效果综合评价为模式 B(0.73)>模式 D(0.59)>模式 C(0.37)>模式 A(-0.24)>模式 F(-0.34)>模式 G(-0.53)>模式 E(-0.59)。模式 B,C,D 的综合评价值大于 0,表明刺槐—田菁—苘麻—狗牙根、刺槐—苘麻—田菁和刺槐—狗牙根—苘麻 3 种植物恢复模式对排土场生态恢复的效果较好,说明人工进行植被恢复和重建时,应选用乔灌木多种植物组合配置,可以充分发挥不同物种的生态位优势,提高植被对生态环境的改善效果,有利于退化生态系统的恢复和维持。

表 3 不同植被恢复模式综合评价值及排序

模式	各主成分值				综合评价值	排名
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄		
A	-0.7415	0.2749	0.6927	-1.3187	-0.24	4
B	1.0463	0.2797	1.5518	-0.3005	0.73	1
C	0.9305	-0.0682	-0.1288	0.4332	0.37	3
D	0.5365	1.1867	-0.7719	1.0720	0.59	2
E	0.4990	-1.9009	-0.7956	-0.3171	-0.59	7
F	-0.7029	0.7439	-1.2005	-0.9335	-0.34	5
G	-1.5680	-0.5162	0.6523	1.3646	-0.53	6

3 结论和讨论

生物多样性是维持生态系统稳定的基础,物种多样性的丧失将损害生态系统的结构、功能和过程,提高物种多样性有利于生态系统的平衡和发展^[17]。植被恢复后,模式 D 群落的物种丰富度和多样性较高,表明其对恢复生态系统可以发挥较好的作用,模式 E 和 G 的物种丰富度和多样性明显低于其他 5 种模式,这可能是由于植物配置不合理而形成单一优势群落,造成物种丰富度和多样性较低。通过对物种重要值的调查发现,草本植物田菁、狗牙根、马棘、苜蓿和苘麻在不同群落中出现的次数较多且重要值相对较大,表明这 5 种植物对矿山废弃地的生境条件适应能力较强,可以作为植被恢复初期的先锋植物选用。侯晓龙等^[18]研究表明,金矿尾矿库不同人工植被恢复模式的物种丰富度指数、多样性指数和均匀度指数呈现相似的变化趋势,与本研究的结果一致,表明不同矿山废弃地植物群落的次生演替存在相似的演替方向。

对排土场进行人工植被恢复后,土壤速效 K、速效 N 和有机质含量与恢复之前相比均有明显提高,其中速效 K 和有机质含量仍低于对照区,而速效 N 含量接近对照区。赵洋等^[19]研究结果显示,煤矿排土场人工恢复植被 10 a 后,土壤全 N、全 P 和有机质含量仍低于撂荒地。说明人工恢复植被能有效改善

土壤的养分状况,但是要达到自然状态水平仍需要很长的时间,而且在植物配置中搭配豆科植物对于提高土壤中 N 含量的效果显著。

植被恢复对治理矿山废弃地重金属污染可以发挥较好作用,本次选用的刺槐、苘麻、田菁和狗牙根 4 种植物能有效降低土壤中的重金属含量,因此可作为修复重金属污染土壤的先锋植物。有研究显示,刺槐对 Cu,Pb,Zn 等多种金属都表现出较强的富集作用,其主要利用根系吸收土壤中的重金属,刺槐根系对重金属的积累量可以达到地上部分的 2~6 倍^[20]。而苘麻、田菁和狗牙根是对重金属具有较高耐受性和富集能力的草本植物,如苘麻植株对 Cu,Zn 的积累量高达 681.15 mg/kg,270.32 mg/kg^[21]。不同植被恢复模式对土壤重金属污染的治理效果存在一定差异,与其他模式相比,刺槐—苘麻—田菁(狗牙根)对 Cu 污染的治理效果较好,刺槐—田菁—狗牙根对降低 Pb 含量的作用明显,而苘麻—狗牙根可以有效修复土壤 Zn 污染。同时本研究还发现,不同模式下土壤重金属除 Cd 外,其他重金属含量均低于未恢复的排土场,植被恢复造成了排土场 Cd 的释放,这与彭东海等^[22]研究结论一致。

选择不同的植被恢复模式,植被恢复与重建的效果也存在较大差异。通过对植物群落结构、土壤养分及重金属含量进行综合比较得出,刺槐—田菁—苘麻—狗牙根、刺槐—苘麻—田菁和刺槐—狗牙根—苘麻 3 种植物恢复模式对排土场生态恢复的综合效果较好。退化生态系统的恢复应注重植物群落结构,适宜的物种搭配可以加快土壤质量的改善进程^[23]。因此,合理的植物配置和适宜的植物选择是矿山废弃地生态恢复成功与否的关键所在。

参考文献:

[1] 高国雄,高保山,周心澄,等. 国外工矿山土地复垦动态研究[J]. 水土保持研究,2001,8(1):98-103.

[2] Parrotta J A. The role of plantation forests in rehabilitating degraded ecosystems[J]. Agriculture,Ecosystems & Environment, 1992,41:115-133.

[3] 王婧静. 金属矿山废弃地生态修复与可持续发展研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(15):8082-8084,8087.

[4] 杨勤学,赵冰清,郭东盟. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J]. 生态学杂志,2015,34(4):1152-1157.

[5] 项元和,李国萍,于晓杰. 现代露天矿排土场生态修复与植被重建技术研究[C]//中国水土保持学会规划设计专业委员会. 2009 年年会暨学术研讨会论文集,2009:107-114.

[6] Harris J A, Birch P, Palmer P. Land restoration and reclamation: Principles and practice[M]. Singapore: Prentice Hall, 1996.

- [7] Reid N B, Naeth M A. Establishment of a vegetation cover on tundrakimberlit mine tailings: A field study[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(4): 602-608.
- [8] 彭东海, 侯晓龙, 何宗明, 等. 金尾矿废弃地不同植被恢复模式群落特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 50-55.
- [9] 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 74-76.
- [10] 韩煜, 赵廷宁, 陈琳, 等. 坡面植被恢复试验示范区植被群落特征初步研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 188-194.
- [11] 章家恩. 生态学常用试验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [12] Li X R, Xiao H L, Zhang J G, et al. Long-term ecosystem effects of sand-binding vegetation in the Tengger Desert Northern China[J]. Restoration Ecology, 2004, 12: 376-390.
- [13] 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.
- [14] 秦娟, 唐心红, 杨雪梅. 马尾松不同林型对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 598-604.
- [15] 徐佩, 吴超, 邱冠豪. 我国铅锌矿山土壤重金属污染规律研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 739-744.
- [16] 邹文佳, 张淇翔, 石林, 等. 江西某铜矿排土场与尾矿库重金属释放规律及其对地下水的污染风险[J]. 有色金属工程, 2016, 6(1): 90-94.
- [17] Wang Y B, Liu D Y, Zhang L, et al. Patterns of vegetation succession in the process of ecological restoration on the deserted land of Shizishan copper tailings in Tongling city[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(7): 780-787.
- [18] 侯晓龙, 庄凯, 刘爱琴, 等. 福建省紫金山金铜矿废弃地不同植被配置模式的恢复效果分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 147-151, 157.
- [19] 赵洋, 张鹏, 胡宜刚, 等. 露天煤矿排土场不同配置人工植被对草本植物物种多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 387-392.
- [20] 施翔, 陈益泰, 王树凤, 等. 3种木本植物在铅锌和铜矿砂中的生长及对重金属的吸收[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1818-1826.
- [21] 张然然, 罗鹏林, 刘远河, 等. 大冶铜绿山矿区优势草本植物重金属富集能力测定[J]. 化学与生物工程, 2016, 33(11): 63-70.
- [22] 彭东海, 侯晓龙, 何宗明, 等. 金尾矿废弃地不同植被恢复模式对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 137-142.
- [23] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. Plant and Soil, 2009, 318(1/2): 153-167.

~~~~~

(上接第 119 页)

- [15] 张子龙, 王文全, 缪作清, 等. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J]. 生态学杂志, 2013, 32(6): 1636-1644.
- [16] 彭新华, 李元沅, 赵其国. 我国中亚热带山地土壤有机质研究[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 489-496.
- [17] 杨克凤. 马鬃岭自然保护区土壤碳蓄积的研究[D]. 安徽芜湖: 安徽农业大学, 2011.
- [18] 车宗玺, 刘贤德, 车宗奇, 等. 祁连山青海云杉林土壤有机质及氮素的空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 164-169.
- [19] 杨万勤, 钟章成, 陶建平, 等. 缙云山森林土壤酶活性与植物多样性的关系[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 124-128.
- [20] 金裕华. 武夷山不同海拔土壤微生物多样性的变化特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [21] 蒲玉琳. 横断山区北段山地土壤坡向性分异研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2005.
- [22] 郭永龙, 毕如田, 王瑾, 等. 华北典型山区忻州不同小生境坡耕地土壤肥力特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 205-208, 218.
- [23] 陈颖, 雷波, 罗承德, 等. 康定木格措冷杉林土壤有机质水平及其预测[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 252-257.
- [24] 陈颖, 雷波, 罗承德, 等. 康定木格措冷杉林土壤有机质水平及其预测[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 252-257.
- [25] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. 土壤通报, 2009(4): 951-956.
- [26] 张仕艳, 原海红, 陆梅, 等. 滇西北不同利用类型土壤酶活性及其与理化性质与微生物的关系[J]. 亚热带水土保持, 2010(2): 13-16.
- [27] 郑文教, 王良睦, 林鹏. 福建和溪亚热带雨林土壤酶活性的研究[J]. 生态学杂志, 1995(6): 16-20.
- [28] 林绍霞, 张清海, 张珍明, 等. 基于通径分析法的土壤性质对茶叶品质的影响研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 189-194.
- [29] 吴永铃, 王兵, 戴伟, 等. 杉木人工林土壤酶活性与土壤性质的通径分析[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2): 78-83.
- [30] 刘广深, 徐冬梅, 许中坚, 等. 用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 756-762.
- [31] 杨晓娟, 廖超英, 李晓明, 等. 榆林沙区樟子松林土壤酶活性与土壤化学性质的通径分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 109-112.