

恢复年限对高寒金属矿山排土场植物多样性和土壤化学特性的影响

庞景豪¹, 梁 桑¹, 刘亚斌^{1,2}, 李国荣^{1,2},

朱海丽^{1,2}, 胡夏嵩^{1,2}, 史兴萍³, 尚 卿³, 缪晓星⁴, 王延秀⁴

(1.青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 2.青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 青海 西宁 810016; 3.青海威斯特铜业有限责任公司, 青海 果洛 814000; 4.青海省水土保持中心, 青海 西宁 810001)

摘 要: [目的] 研究恢复年限对高寒金属矿山排土场植物多样性和土壤化学特性的影响,为深入探讨高寒矿山排土场植物演替趋势,优化高寒矿山排土场植物恢复工艺方法提供科学指导。[方法] 以青海省果洛藏族自治州德尔尼铜矿恢复期为1~12 a范围内的10个矿山排土场边坡为研究对象,通过样方法调查排土场植物物种组成和多样性特性,并进一步调查土壤化学特性,明确了排土场 Patrick 丰富度指数等4个 α 植物多样性指数以及全氮等8个土壤化学特性指标与恢复年限的关系。[结果] 随着恢复年限的增大,天然植物不断侵入,排土场植物的科、属、种数呈现出逐渐增加的趋势,各年限排土场物种组成和群落特征存在一定的差异性。排土场 Patrick 丰富度指数随着恢复年限的增大呈幂函数增长趋势;Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数随着恢复年限增大呈先增大后减小趋势,且均符合二次函数关系。随着排土场恢复年限的增大,土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮和速效磷含量均呈先增大后减小趋势;速效钾和有机质含量呈幂函数增长趋势;pH 值呈逐渐降低趋势。排土场植物4个多样性指数与土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾和有机质含量呈不同程度的正相关关系,而与速效磷和pH 值呈负相关关系。[结论] 恢复期为12 a时,试验区排土场植物仍处于演替发展阶段,未达到稳定状态;排土场植物演替和土壤养分之间存在明显的相互作用;建议矿区排土场植物恢复选用高氮高磷低钾型缓释复合肥。

关键词: 高寒金属矿山; 排土场; 人工恢复植物; 植物多样性指数; 土壤化学特性; 植物演替

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0110-11

中图分类号: X171.4

文献参数: 庞景豪, 梁桑, 刘亚斌, 等.恢复年限对高寒金属矿山排土场植物多样性和土壤化学特性的影响[J].水土保持通报,2023,43(4):110-120.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.014; Pang Jinghao, Liang Shen, Liu Yabin, et al. Influence of recovery years on plant diversity and soil chemical properties for alpine metal mine dumps [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):110-120.

Influence of Recovery Years on Plant Diversity and Soil Chemical Properties for Alpine Metal Mine Dumps

Pang Jinghao¹, Liang Shen¹, Liu Yabin^{1,2}, Li Guorong^{1,2}, Zhu Haili^{1,2},

Hu Xiasong^{1,2}, Shi Xingping³, Shang Qing³, Miao Xiaoxing⁴, Wang Yanxiu⁴

(1.Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016,

China; 2.Key Laboratory of Cenozoic Resources and Environment on the Northern Edge of the

Qinghai-Tibet Plateau, Xining, Qinghai 810016, China; 3.Qinghai West Copper Industry Co., Ltd, Guoluo,

Qinghai 814000, China; 4.Qinghai Soil and Water Conservation Research Center, Xining, Qinghai 810001, China)

Abstract: [Objective] The effects of restoration years on plant diversity and soil chemical characteristics of alpine metal mine dumps were studied in order to provide scientific guidances for further exploring the plant

收稿日期:2022-11-03

修回日期:2022-12-18

资助项目:青海省自然科学基金项目“高寒矿山排土场边坡人工恢复植被演替规律及其护坡效应评价:以果洛德尔尼铜矿为例”(2021-ZJ-956Q)

第一作者:庞景豪(1998—),男(汉族),河北省定州市人,硕士研究生,研究方向为生态工程地质。Email:qdpangjinghao@163.com。

通讯作者:刘亚斌(1987—),男(汉族),青海省西宁市人,博士,副教授,主要从事生态工程地质等方面的研究工作。Email:liuyabincug@163.com。

succession trends and optimizing the plant restoration process of alpine mine dumps. [Methods] The study was conducted at the Delny copper mine, Guoluo Xizang Autonomous Prefecture, Qinghai Province. Plant species composition and diversity and soil chemical properties of ten alpine metal mine dump slopes varying in recovery years (1—12 years) were measured by quadrat survey and soil chemical analysis. Relationships between four α plant diversity indexes (Patrick richness index, etc.), eight soil chemical property indexes (total nitrogen, etc.) and number of recovery years were determined. [Results] The number of families, genera, and species of plants at the dump sites increased with increasing number of recovery years due to the continuous invasion of natural plants. There were differences in plant species composition and community characteristics of the dumps in different years. The Patrick richness index increased as a power function as number of recovery years increased. The Shannon-Wiener diversity index, Simpson diversity index, and Pielou evenness index initially increased with increasing recovery year, and then decreased, and all indexes changed with time following quadratic relationships. The contents of total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline hydrolysis nitrogen, and rapidly available phosphorus initially increased with increasing number of recovery years, and then decreased. The contents of rapidly available potassium and organic matter increased as a power function as number of recovery years increased. pH value decreased as number of recovery years increased. The four α plant diversity indexes were positively correlated with the contents of soil total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline hydrolysis nitrogen, rapidly available potassium, and organic matter, but negatively correlated with the contents of rapidly available phosphorus and with the pH values. [Conclusion] When the recovery period was 12 years, the plants in the dump area were still in the successional development stage and had not yet reached a stable state. There was an obvious interaction between plant succession and soil nutrients. It is suggested that high nitrogen, high phosphorus and low potassium slow release compound fertilizer should be used for plant restoration in mine dumps.

Keywords: alpine metal mine; dump; artificial vegetation restoration; plant diversity index; soil chemical properties; plant succession

矿山排土场是人为形成的地质体,是矿山采矿废弃物集中排放的场所^[1]。青藏高原自然生态环境脆弱,是风力侵蚀、水力侵蚀、冻融侵蚀交替作用最为严重的地区之一,因此排土场生态恢复是区内矿山生态恢复的核心工作^[2-3]。由于高寒地区气候恶劣、排土场表层土壤极度贫瘠,因此通过自然恢复的方法需要较长的时间才能实现排土场生态恢复,故高寒矿区生态恢复工作主要采用人工植物恢复措施^[4-7]。人工植物恢复是改变矿区恶劣生态环境的有效途径,不仅可以构建退化矿区生态系统初始群落,还可以有效改良土壤结构,增加土壤肥力,促使矿区生态系统朝正向发展^[8-10]。人工植物恢复初期,植被群落格局主要受人工建植的影响^[11-12]。随着植物演替的进行,伴随着植物的生长和自然侵入,植被群落的物种组成与结构会发生改变,不同物种的群落功能及其生态关系也会随之发生变化^[13-14]。因此,明确不同恢复年限条件下的植物特征和土壤特性变化规律,对揭示高寒矿区排土场植物恢复过程中的物种共存和生物多样性维持机制至关重要,同时对优化植物配置模式和可持续经营管理具有重要意义^[15]。

在高寒地区不同恢复年限与人工植物恢复排土场及人工草地植物特征和土壤化学特性规律方面,诸多学者开展了较为丰富的研究与实践。吴晓慧等^[16]对青藏高原地区“黑土滩”型退化高寒草甸人工恢复植物演替特征开展研究发现,随着恢复年限的增加,人工种植植被〔垂穗披碱草(*Elymus nutans*)或草地早熟禾(*Poa pratensis*)〕与原生植被在经历一个激烈的竞争阶段后,逐渐趋于动态平衡;人工种植的垂穗披碱草、草地早熟禾等本土植被,可以促进青藏高原地区“黑土滩”型退化高寒草甸的有效恢复。杨鑫光^[6]研究了青海木里煤田江仓矿区、聚乎更矿区恢复期为 0, 2, 4 a 的排土场植物生态多样性特征,结果表明恢复时间的延长引起人工草地 Patrick 和 Margalef 丰富度指数逐步增加,但是增加程度不显著,Shannon-Wiener 和 Simpson 多样性指数以及 Pielou 均匀度指数逐步下降,恢复 4 a 后达显著性水平;原始群落物种数量小、人工草地入侵物种少、垂穗披碱草的群落中优势地位的提高等是造成这一变化的原因。金立群等^[17]分析了不同恢复年限高寒露天煤矿区渣山植物与土壤特征,结果表明除土壤全钾外,土壤理化性质

随恢复时间增长而改善,除 pH 值外,土壤理化性质与植物特征之间相关性显著,并指出高寒地区矿区植物恢复过程中土壤物理性质的恢复滞后于化学性质。孙华方等^[18]研究了黄河源区不同年限人工草地植物群落特征和土壤养分的动态变化,结果表明人工草地土壤养分中全氮、全钾、速效氮、速效钾以及有机质随年限增加呈现积累趋势,土壤 pH 值逐渐趋于中性,高寒地区人工草地群落结构和土壤营养随着建植时间的延长在逐渐恢复。

综上所述,有关高寒地区不同恢复年限条件下排土场及退化草地植物特征和土壤特性变化规律方面,诸多学者已取得了较为丰富的研究成果。然而,有关连续长时间序列条件下高寒矿山排土场植物变化特征和土壤特性变化规律方面的相关研究成果则鲜有报道。同时,现有的研究多围绕非金属矿山排土场和退化草地开展相关研究,而有关高寒地区金属矿山排土场的相关研究亦相对较少。基于此,本研究以青海省果洛藏族自治州德尔尼铜矿恢复期为 1~12 a 的排土场为研究对象,以空间代替时间的方法开展研究。在样方调查基础上,对各恢复期排土场植物种类、株数和覆盖度等生长量指标进行调查,分析各恢复期排土场物种组成和植物多样性特征,并进一步探讨 α 多样性指数与恢复年限的关系;通过土壤化学特性调查,分析和探讨排土场土壤化学特性与恢复年限的关系,及其与植物多样性指数的相关性。该项研究的实施对于深入探讨高寒矿山排土场植物演替趋势,优化高寒矿山排土场植物恢复工艺具有重要意义。

1 研究区概况

德尔尼铜矿位于青藏高原东北部,青海省果洛藏族自治州玛沁县大武镇辖区内,2005 年建矿。矿区最高点位于其西北部的分水岭德尔尼岭,海拔高程 4 783.50 m,最低点在德尔尼河,海拔高程 3 980.00 m。矿区属于高原大陆性气候,年平均气温 $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 733 mm,年平均蒸发量 1 103 mm。研究区属于高原地区,当地少见树木,多为高原草甸。自 2007 年起,矿山逐年开展排土场人工植物恢复。人工恢复植物选择垂穗披碱草和冷地早熟禾 2 种禾本科草本植物,恢复工艺主要以覆土撒播工艺为主,覆土来源主要为矿山开采过程中剥离贮存的原生土壤,覆土厚度为 10 cm。矿区排土场岩土体主要为矿山开采过程中形成的蛇纹岩和角砾状蛇纹岩矿渣。截至 2020 年,矿区已连续 13 a 采用相同植物和工艺开展排土场人工植物恢复工作(表 1)。

2 试验设计与方法

2.1 排土场植物调查

该项研究于 2021 年 8 月在德尔尼矿区不同恢复期排土场开展了样方调查试验。在试验区选取坡度和坡向相近似,且恢复期分别为 1,2,3,4,5,6,7,9,10,12 a 共 10 个排土场进行相关试验研究,不同年限排土场基本信息如表 1 所示。通过样方调查获得排土场植物种类、株数、株高和覆盖度。样方调查过程中,相同恢复期排土场内以对角线的形式设置 3 个面积为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方,间距 8~12 m。样方由 100 个面积为 $0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}$ 的方格组成,现场通过计算未被植物覆盖的空方格面积以估算小区植物覆盖面积,并以小区植物覆盖面积与样方面积的百分比表征样方植物覆盖度。在此基础上,计算出植物重要值(IV)以表示物种优势程度,其中,重要值 $\geq 40\%$ 的物种确定为样地优势种,重要值 $\geq 3\%$, $< 40\%$ 的物种确定为样地亚优势种^[19]。

采用 α 多样性指数分析评价不同恢复年限排土场植物群落的物种组成、功能和结构的异质性,包括 Patrick 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Simpson 多样性指数(D)、Pielou 均匀度指数(J)^[20-22]。其中,Shannon-Wiener 多样性指数描述的是个体物种的无序和不确定性,不确定性越高,多样性越高,是植物群落结构的重要参数,能客观反映植物群落内物种组成的变化情况;Simpson 多样性指数为从一个植物群落中连续两次抽样所得到的个体数属于不同种的概率;Pielou 均匀度指数指一个植物群落中全部物种个体数目的分配状况,反映了各物种个体数目分配的均匀程度,其值越大,各物种分配越均匀^[23]。物种重要值(IV)、Patrick 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Simpson 多样性指数(D)和 Pielou 均匀度指数(J)计算公式为:

$$IV = (H_i + F_i + D_i) / 3 \quad (1)$$

$$R = S \quad (2)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$D = 1 / \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (4)$$

$$J = H' / \ln S \quad (5)$$

式中: IV 为样方中植物 i 的重要值(%); H_i 为相对高度(%),为样方中植物 i 的平均高度与样方中所有植物平均高度之和的百分比; F_i 为相对频度(%),为样方中植物 i 的频度与样方中所有植物频度之和

的百分比; D_i 为相对密度(%), 即样方中植物 i 的个体数与样方中所有植物个体数之和的百分比; S

为群落内物种总数(种); P_i 为样方中某一物种的个体数和样方中所有植物个体数之和的比值。

表 1 德尔尼矿区不同恢复年限排土场及采样点基本信息

Table 1 Dump information and sampling point coordinates of different recovery years in Delny copper mine

排土场 恢复年份	排土场 恢复年限/a	坡度/ (°)	坡向/ (°)	海拔/ m	采样点位置		
					(1)	(2)	(3)
2020	1	34.0±2.2	313	4 194.00	N34°22'59" E100°7'15"	N34°22'59" E100°7'15"	N34°22'59" E100°7'16"
2019	2	36.2±3.4	72	4 238.00	N34°23'18" E100°7'5"	N34°23'18" E100°7'4"	N34°23'18" E100°7'6"
2018	3	32.2±7.2	45	4 180.00	N34°23'1" E100°7'20"	N34°23'2" E100°7'20"	N34°23'0" E100°7'21"
2017	4	37.8±2.7	30	4 400.00	N34°23'19" E100°7'53"	N34°23'19" E100°7'54"	N34°23'19" E100°7'55"
2016	5	30.7±4.7	10	4 136.00	N34°22'58" E100°7'42"	N34°22'58" E100°7'43"	N34°22'58" E100°7'44"
2015	6	14.8±3.4	10	4 039.50	N34°21'58" E100°7'33"	N34°21'58" E100°7'34"	N34°21'58" E100°7'35"
2014	7	28.5±7.1	42	4 073.32	N34°22'36" E100°7'47"	N34°22'36" E100°7'48"	N34°22'36" E100°7'49"
2012	9	29.7±4.6	22	4 050.00	N34°22'36" E100°7'35"	N34°22'36" E100°7'36"	N34°22'36" E100°7'37"
2011	10	35.3±1.2	283	4 130.20	N34°22'45" E100°7'46"	N34°22'45" E100°7'47"	N34°22'45" E100°7'48"
2009	12	31.3±4.1	33	4 070.00	N34°22'38" E100°7'46"	N34°22'37" E100°7'46"	N34°22'39" E100°7'46"

2.2 土壤化学特性分析

样方调查结束后,在样方周围进行土壤试样采集。土壤采样时,在每个样方周围随机选择 3 个取样点分别采集地表以下 0—20 cm 深度范围内土样,然后将 3 个取样点土壤混合后称取 1 kg 土样作为该样方点处的土样,每个排土场共采集 3 个土样。排土场土壤样品用以土壤化学指标测定,包括全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质和 pH 值,具体测试方法如下,全氮采用半微量凯氏定氮法测定;全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定;全钾采用氢氧化钠熔融—火焰光度法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定;土壤 pH 值采用电极法(水土比 2.5:1)测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定^[24]。

2.3 数据分析

通过回归分析,分析不同恢复年限排土场覆盖度、植物多样性指数和土壤化学特性指标与恢复年限的关系;通过相关分析,明确植物多样性指数和土壤化学特性指标相关性。以上分析均采用 Excel 2016 软件进行。植物多样性指数和土壤化学特性指标相关性分析中,相关程度划分类标准详见文献[24]。采用单因素

方差分析(one-way ANOVA, LSD 法),分析排土场植物多样性指数和土壤化学特性在不同恢复年限间的差异性。单因素方差分析使用 IBM SPSS Statistics 23 软件^[25]。此外,文中所涉及的其他数据统计分析,及相关图件制作均采用 Excel 2016 软件进行。

3 试验结果

3.1 不同恢复年限排土场物种组成及群落特征

由表 2—3 可知,试验区不同恢复年限排土场共出现 33 种植物,包括 32 种草本植物和 1 种灌木植物,分属 14 科 29 属。随着恢复年限的增加,排土场植物的科、属、种数总体呈现出逐渐增长的趋势。由表 3 可知,垂穗披碱草是恢复年限为 1~12 a 的排土场仅有的 1 种共有植物,而自恢复期为 2 a 起,甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)亦成为不同恢复年限排土场的共有植物。进一步分析可知,在恢复期 1~4 a 间,各恢复年限排土场之间共有物种数平均为 1.86±1.67 种。而自恢复期为 5 a 起,各恢复年限排土场之间共有物种数显著增多,平均为 5.86±1.86 种,说明物种组成差异存在减小趋势。但相对于 5~12 a 各年限排土场的物种数而言,各年限间物种组成依然存在显著的差异性。

表 2 研究区不同恢复年限排土场植物物种数统计

Table 2 Statistics of plant species of dumps with different recovery years in study area

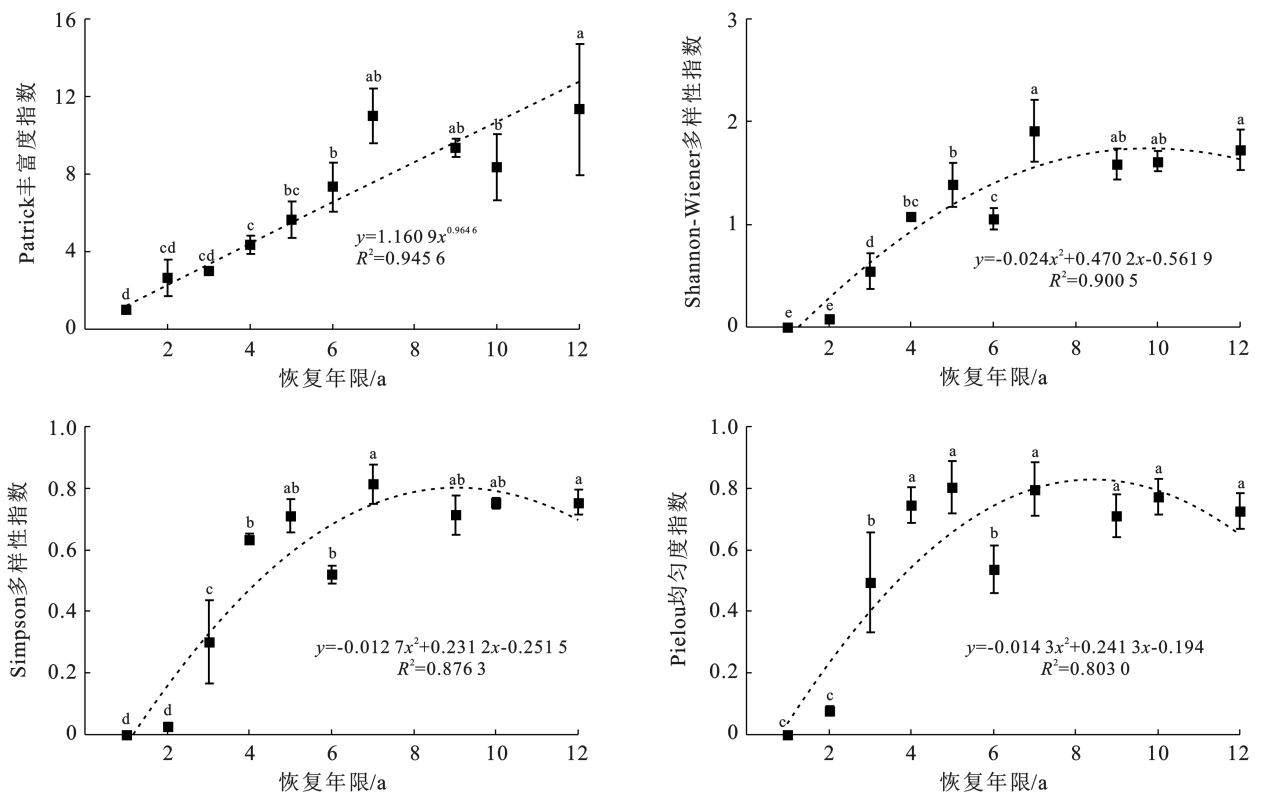
恢复年限/a	科数	属数	种数
1	1	1	1
2	4	4	4
3	2	3	3
4	4	5	5
5	7	9	9
6	6	11	11
7	9	16	16
9	7	10	11
10	9	15	15
12	9	16	18
合计	14	29	33

由表 3 可知,不同恢复年限排土场的优势种亦存在差异,导致对应的群落类型存在差异。恢复年限为 1 a 的排土场仅有 1 种植物,即人工播种的垂穗披碱草。恢复期为 2 a 时,排土场开始有天然植物侵入,排土场优势种除垂穗披碱草以外,还有甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*),且 2 种植物重要值差异性较大,该恢复年限排土场群落为“垂穗披碱草+甘肃

马先蒿”群落。与恢复期为 2 a 的排土场相比,恢复期为 3 a 时,群落增加了优势种雀麦(*Bromus japonicus*),对应的排土场群落为“垂穗披碱草+雀麦+甘肃马先蒿”群落。自恢复期为 4 a 起,随着自然侵入植物的种类和重要值逐渐升高,初期人工播种的垂穗披碱草在排土场群落中的重要值降低,且与其他优势种重要值差异程度亦减小。与此同时,自恢复期为 5 a 起,最先侵入的植物甘肃马先蒿重要值总体亦呈降低趋势,故在恢复期为 4,5,6,7 和 9 a,对应的植被群落分别为“甘肃马先蒿+垂穗披碱草+雀麦”群落、“垂穗披碱草+甘肃马先蒿+冷蒿+乱草”群落、“垂穗披碱草+喉毛花+甘肃马先蒿”群落、“垂穗披碱草+雀麦+蕨麻”群落和“垂穗披碱草+冷地早熟禾+乱草+甘肃马先蒿+弱小火绒草”群落。在恢复期为 10 和 12 a,排土场对应的群落分别为“垂穗披碱草”群落和“垂穗披碱草+蕨麻”群落。虽然恢复期为 10 和 12 a 的排土场优势种相对单一,但以上排土场群落内亚优势种数量相对高于其他年限。

3.2 不同恢复年限排土场植物多样性变化特征

图 1 所示为排土场植物多样性指数和恢复年限之间的关系。



注:图中标注的小写字母表示在 10 个恢复年限排土场中,Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的差异显著性结果(LSD 法), $p < 0.05$ 。下同。

图 1 研究区 α 多样性指数与恢复年限的关系Fig.1 Relationship between α plant diversity indexes and recovery years in study area

表 3 研究区不同恢复年限排土场植物物种组成及其重要值

Table 3 Plant species composition and important value of dumps with different recovery years in study area %

植物名	所属科属	不同恢复年限物种重要值									
		1 a	2 a	3 a	4 a	5 a	6 a	7 a	9 a	10 a	12 a
垂穗披碱草	禾本科披碱草属	100.00	86.05	73.38	53.36	53.61	64.16	46.83	52.42	52.52	45.26
甘肃马先蒿	玄参科马先蒿属		43.57	41.47	54.77	43.65	41.21	38.80	40.40	27.33	38.38
湿生扁蕾	龙胆科扁蕾属		14.19				26.35	25.16	38.45	26.37	37.99
弱小火绒草	菊科火绒草属		11.75			12.10		39.19	40.03	35.32	23.30
雀麦	禾本科雀麦属			51.82	54.60		13.91	45.12		15.79	
五脉绿绒蒿	罂粟科绿绒蒿属				25.33						
隐匿景天	景天科景天属				23.05						
乱草	禾本科画眉草属					44.28			40.67	31.77	26.77
冷蒿	菊科蒿属					45.41	13.36	12.53			12.52
斜茎黄芪	豆科黄芪属					13.42				13.23	
车前	车前科车前属					12.44		12.01		12.17	15.57
露蕊乌头	毛茛科乌头属					14.24					
细蝇子草	石竹科蝇子草属					16.40					
喉毛花	龙胆科喉毛花属							41.56	36.40		11.79
铺地小叶儿金露梅	蔷薇科委陵菜属							35.32	23.39		
乳白香青	菊科香青属							25.19	36.82	12.08	12.63
大花苣荬草	禾本科苣荬草属							13.90	13.54		13.41
蒲公英	菊科蒲公英属							12.18			37.28
平车前	车前科车前属							11.99	11.93	37.62	26.46
高山韭	百合科葱属							11.97			0.00
蕨麻	蔷薇科委陵菜属								41.23	39.07	47.39
粉条儿菜	百合科肺筋草属								25.21		11.67
蓟	蓟科蓟属								12.96		
少花米口袋	豆科米口袋属								12.22		29.63
高原毛茛	毛茛科毛茛属										13.10
冷地早熟禾	禾本科早熟禾属									41.68	
糙叶黄芪	豆科黄芪属									23.67	
矮火绒草	菊科火绒草属									11.69	23.46
高山豆	豆科高山豆属										12.84
珠芽蓼	蓼科蓼属										12.00
小大黄	蓼科大黄属										
麻花艽	龙胆科龙胆属										23.33
星状雪兔子	菊科风毛菊属										11.90
											11.30

注:表中植物学名分别为湿生扁蕾(*Gentianopsis paludosa*),弱小火绒草(*Leontopodium pusillum*),五脉绿绒蒿(*Meconopsis quintuplinervia*),隐匿景天(*Sedum celatum*),乱草(*Eragrostis japonica*),冷蒿(*Artemisia frigida*),斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*),车前(*Plantago asiatica*),露蕊乌头(*Aconitum gymnantrum*),细蝇子草(*Silene gracilicaulis*),喉毛花(*Comastoma pulmonarium*),铺地小叶儿金露梅(*Potentilla parvifolia*),乳白香青(*Anaphalis lactea*),大花苣荬草(*Koeleria cristata*),蒲公英(*Taraxacum mongolicum*),平车前(*Plantago depressa*),高山韭(*Allium sikkimense*),蕨麻(*Potentilla anserina*),粉条儿菜(*Aletris spicata*),蓟(*Cirsium japonicum*),少花米口袋(*Chorispora tenella*),高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*),糙叶黄芪(*Astragalus scaberimus*),矮火绒草(*Leontopodium nanum*),高山豆(*Tibetia himalaica*),珠芽蓼(*Polygonum viviparum*),小大黄(*Rheum pumilum*),麻花艽(*Gentiana straminea*),星状雪兔子(*Saussurea stella*)。

由图 1 可知,随着恢复年限的逐渐增大,排土场 Patrick 丰富度指数呈幂函数增长趋势。Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与恢复年限之间均呈二次函数关系,即随着恢复年限的增大,上述 3 个指数呈先增大后减小的变化关系。在排土场恢复初期时(1~2 a),由于排土场植物种相对较少,主要以人工播种的垂穗披碱草以及天然侵入的甘肃马先蒿和雀麦等植物为主,因此,

排土场 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数显著低于其他恢复年限。随着恢复期的增长,排土场植物种逐渐增多,排土场 Patrick 丰富度指数亦随之增大,在第 12 a 达到峰值为 11.33 ± 3.40 ,但在恢复期中后期(5~10 a),各年限排土场 Patrick 丰富度指数差异性并不显著。Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数在恢复期为 7 a 时达到最大值,

分别为 1.91 ± 0.30 和 0.81 ± 0.06 , Pielou 均匀度指数在恢复期为 5 a 时达到最大值 0.80 ± 0.09 。随后,至恢复期为 12 a, 以上 3 个指数均呈降低趋势, 但各恢复期之间差异性不显著, 总体趋于平稳。

3.3 不同恢复年限排土场植物覆盖度变化特征

由图 2 可知, 随着恢复年限逐渐增大, 研究区排土场植物覆盖度整体呈逐渐上升趋势, 二者间呈幂函数关系。其中, 在恢复年限为 1~2 a 时, 排土场在仅生长有垂穗披碱草或少量自然侵入植物的条件下, 覆盖度即可达到 $73.33\% \pm 2.49\% \sim 79.00\% \pm 3.74\%$ 。自第 3 a 起, 排土地表植物覆盖度即达到 $94.33\% \pm 4.64\%$, 并在第 12 a 达到最大值 $99.33\% \pm 0.94\%$ 。3~12 a 排土场覆盖度平均值为 94.90% , 且各年限排土场覆盖度显著高于恢复期为 1~2 a 时排土场覆盖度。以上结果说明人工干预在排土场恢复早期取得了较好的坡面植物覆盖效果, 这对于排土场表层土体水土保持和覆土土壤养分保存具有重要意义^[26-27]。后期, 随着自然侵入植物种类和数量的不断增多, 排土场坡面植物覆盖度相应增大。

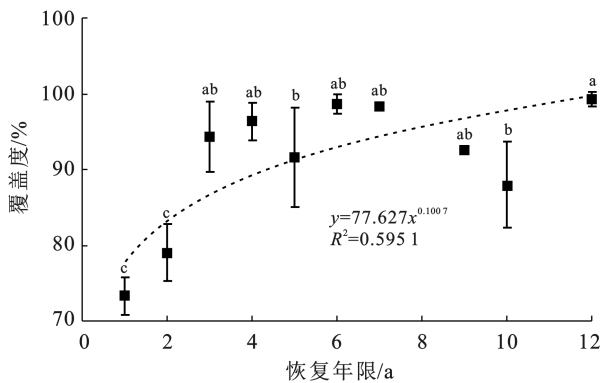


图 2 研究区排土场植物覆盖度与恢复年限关系

Fig.2 Relationship between vegetation coverage of dumps and recovery years in study area

3.4 不同恢复年限排土场土壤化学特性变化特征

图 3 所示为研究区排土场土壤化学特性指标与恢复年限之间的关系。由图 3 可知, 随着排土场恢复年限的增大, 土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮和速效磷含

量均呈先增大后减小的变化趋势, 峰值出现在恢复年限为 5~7 a。其中, 土壤全氮和速效磷含量与恢复年限之间的关系符合二次多项式函数关系, 决定系数 (R^2) 分别为 0.734 1 和 0.747 0, 而土壤全磷、全钾和碱解氮仅表现出随着恢复年限增大先增大后减小的变化趋势, 但相互间不存在显著性的函数关系。此外, 排土场土壤速效钾和有机质含量随着恢复年限的增大, 呈幂函数增长趋势, 决定系数 (R^2) 分别为 0.659 3, 0.604 9。值得一提的是, 恢复期为 10 a 时, 排土场土壤 pH 值为 6.60 ± 0.25 , 显著低于其他年限, 且土壤呈酸性, 这可能与采样随机性以及局部土壤酸碱度异常有关。由方差分析可知, 在恢复年限 1~5 a, 各恢复年限之间土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾、有机质含量和 pH 值均不存在显著性差异。排土场土壤速效磷含量在恢复年限 1~9 a 时各年间不存在显著性差异。

3.5 不同恢复年限排土场植物多样性与土壤化学特性相关性分析

由表 4 可知, 排土场 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均与土壤全氮含量和速效钾含量呈中度及以上正相关关系, 其中 Pielou 均匀度指数与土壤全氮含量和速效钾含量相关系数相对较高, 分别为 0.740, 0.867。Patrick 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数与全钾含量呈中度正相关关系, Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数与全钾含量呈低度正相关关系。除 Simpson 多样性指数与土壤有机质含量呈低度正相关关系外, Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均与土壤有机质含量呈中度正相关关系。4 个多样性指数与土壤碱解氮含量均为低度正相关关系。除 Pielou 均匀度指数与全磷含量呈低度正相关关系以外, 其余 3 个多样性指数与全磷含量均为弱正相关关系。此外, 除 Pielou 均匀度指数与土壤速效磷含量呈中度负相关关系以外, 其余 3 个多样性指数均与土壤速效磷含量呈低度负相关关系。4 个多样性指数与土壤 pH 值均呈低度负相关关系。以上结果表明, 排土场植物演替和土壤养分之间存在明显的互作关系。

表 4 研究区土壤化学特性指标与植物多样性指数相关系数

Table 4 Correlation coefficient between soil chemical properties indexes and α plant diversity indexes in study area

项目	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质	pH 值
Patrick 丰富度指数	0.685	0.289	0.561	0.423	-0.496	0.785	0.533	-0.439
Shannon-Wiener 多样性指数	0.646	0.241	0.480	0.445	-0.469	0.704	0.523	-0.398
Simpson 多样性指数	0.585	0.189	0.356	0.464	-0.369	0.618	0.468	-0.324
Pielou 均匀度指数	0.740	0.358	0.714	0.451	-0.508	0.867	0.590	-0.487

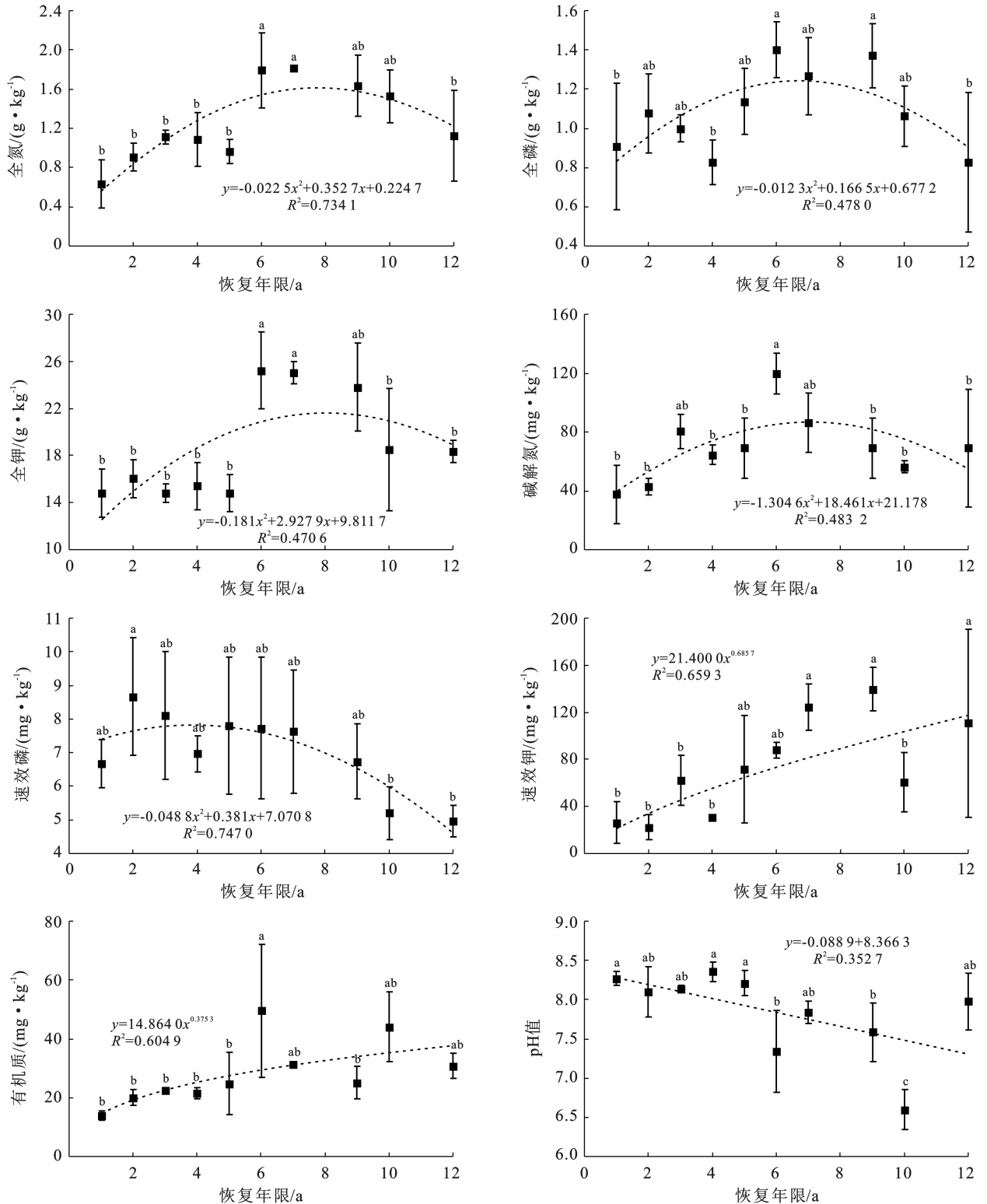


图3 研究区排土场土壤化学特性指标与恢复年限关系

Fig.3 Relationship between soil chemical properties indexes of dumps and recovery years in study area

4 讨论

4.1 不同恢复年限排土场植物物种特征

恢复时间对于排土场人工群落植物的演替发展存在巨大影响^[28]。本研究结果表明,研究区不同年

限排土场共出现 32 种草本植物和 1 种灌木植物,隶属于 14 科 29 属。其中,菊科、禾本科和豆科植物种类相对较多,这与其他学者^[29-30]在其他区域开展排土场人工植物恢复植物调查所得出的结果相类似。禾本科、菊科和豆科植物具有生命力强、耐性好、矮小丛

生等特点,并且具有改善周围微环境促使自身生长的良性循环的能力,能够在生境恶劣的环境下广泛生存,常被选作矿山废弃地的先锋植物^[29-30]。排土场恢复初期(恢复期为 1 a)仅有人工种植的垂穗披碱草生长,自第 2 年起,甘肃马先蒿等天然植物开始侵入排土场。此后,随着恢复时间的增加,植物的科、属、种数呈现出逐渐增加的趋势,相应的,排土场 Patrick 丰富度指数呈幂函数增长趋势。人工种植的垂穗披碱草在不同恢复期排土场均有生长,且均为重要值相对较大的植物,这与孙华方等^[18]和邢云飞等^[31]学者在三江源地区不同恢复年限人工草地开展植被群落特征调查所获得的研究结果相类似。同时,在恢复期早期(1 a),单一生长垂穗披碱草的情况下,排土场坡面覆盖度就能达到 $73.33\% \pm 2.49\%$,能够起到相对较好的水土保持效果。说明该种植物作为研究区矿山排土场人工恢复植物使用,具有较好的应用效果。相比之下,同为人工播种植物的冷地早熟禾仅在恢复期为 1 a 排土场坡脚处局部零星出现(该恢复期样方中未出现),而在其他恢复年限,亦只在 9 a 排土场中有出现,说明该种在该矿区作为人工恢复植物使用的效果不明显。

4.2 恢复年限与排土场植物多样性指数的关系

该项研究结果表明,不同植被恢复年限排土场 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与恢复年限之间均呈二次函数关系,即随着恢复年限的增大,呈先增大后减小的变化关系。孙华方等^[18]研究了黄河源区不同年限人工草地植物群落特征动态变化,研究结果表明随着种植年限的增大,人工草地 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数呈先增大后减小的变化趋势,与本研究结果类似。此外,周涛等^[30]研究了四川省攀枝花地区钒钛磁铁矿不同恢复年限排土场植物群落多样性指数变化特征,结果亦表明 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数随着恢复年限增长呈先增大后减小的变化趋势。但是,本项研究中不同恢复年限排土场 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数峰值所对应的年限与上述两项研究存在一定的差异性,这可能与不同研究中排土场和人工草地所处的环境因素和土壤条件存在差异性有关。

排土场物种多样性指数随恢复时间的变化规律,能够反映排土场植物恢复前期物种生长出现到后期竞争淘汰的过程^[29]。就该项研究而言,由恢复初期至恢复期为 7 a 的排土场,Shannon-Wiener 多样性指

数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数 3 个多样性指数随恢复期增大呈上升趋势,Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 多样性指数在恢复期为 7 a 时达到最大值,Pielou 均匀度指数在恢复期为 5 a 时达到最大值,同时,各恢复期排土场植物种类差异性较大,以上现象说明该阶段,排土场植物演替过程发展相对较快,植物之间的竞争相对激烈。此后,自恢复期 7~12 a,排土场 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数虽然有降低趋势,但各恢复年限间不存在显著性差异,整体趋于平稳,这说明排土场植物群落稳定性有所增加,但从各年限排土场植物种类差异性而言,排土场仍处于演替的发展阶段,并未达到稳定状态^[9]。许丽等^[20]对海州露天煤矿排土场植物自然恢复过程中物种多样性研究结果表明,即使是恢复期达到 25~35 a 的排土场,仍处于演替的发展阶段,并未达到稳定状态。相比之下,青藏高原地区高寒矿山排土场受控于高海拔和高寒气候影响,可能需要更长时间达到相对稳定的群落演替阶段^[30]。

4.3 排土场植物演替与土壤化学特性的关系

物种多样性和均匀度水平一定程度上反映了群落的稳定性和发育阶段^[32]。而排土场人工恢复植物群落演替与土壤理化性质演变是个相关联的过程^[22]。植物群落的演替是恢复植被对土壤质量适应和改造的过程,同时也是不同物种在土壤水分和养分等资源下相互竞争和替代的过程^[33]。某一阶段的土壤肥力状况,不仅反映了之前群落中的植物—土壤系统协同作用的结果,同时也为植物群落的后续演替创造了基础的土壤肥力条件^[33]。该项研究中,随着恢复年限的增大,矿区排土场土壤全氮和碱解氮呈先增大后减小的变化趋势,峰值出现在恢复年限为 5~7 a。金立群^[17]的研究表明,木里煤田江仓矿区排土场覆土人工植物建植样地土壤全氮和碱解氮随恢复年限增大呈先增大后减小的变化趋势,并指出该现象可能是由于建植前期土壤中植物可用氮素缺乏,随着种植时间的延长,前期施用肥料逐渐消耗,因此土壤氮素随之减少。以上相关结论亦可用于该项研究中全氮和碱解氮,以及全磷和全钾与恢复年限关系的解释。即该项研究中,排土场恢复前期,植物生长所需营养成分主要依靠覆土中养分和恢复初期使用的复合肥所提供的养分,由于德尔尼矿区处于高寒地区,加之植物恢复时间较短,故养分循环缓慢,植物生长损耗了大量养分而得不到及时补充。与此同时,孙华方等^[18]的研究指出禾本科植物不利于土壤全氮的积累,而该项研究中,在恢复年限为 1~4 a 时,禾本科

植物垂穗披碱草和雀麦在不同年限排土场中重要值相对较大。因此,恢复年限为1~5 a时排土场土壤全氮、碱解氮、全磷和全钾的含量相对较低。随着恢复年限增长,植物多样性增加,其他具有固氮且易于降解的植物逐渐增多,促进了全氮和其他养分的积累^[24]。随后,由于植物演替激烈消耗大量土壤养分,故导致上述土壤养分又呈降低趋势^[33]。在恢复年限1~9 a期间,排土场土壤速效磷含量在各年间不存在显著性差异,而在恢复年限9 a后,呈逐渐降低趋势,究其原因,可能亦与土壤原始养分消耗而未得到及时补充相关^[24]。

本研究结果表明,随着恢复年限的增大,排土场表层土壤速效钾呈幂函数增长趋势。由于德尔尼铜矿堆砌排土场的主要岩土体为蛇纹岩和角砾状蛇纹岩。该种岩石易于风化水解后形成高供钾能力的黏土矿物,包括水云母、伊利石和高岭石^[34]。土壤水分运移过程中,将部分可溶性钾运移至表层土壤,导致随着恢复年限的增加,表层土壤速效钾含量逐渐增多。因此,矿区在排土场植物恢复肥料选用时,建议选用高氮高磷低钾型缓释复合肥。土壤有机质是衡量土壤肥力的一个重要指标,排土场土壤有机质来源主要为植物的死亡根系和枯枝落叶产生的有机残体。随着恢复年限的增大,排土场植物种类和数量的不断增多,土体有机质积累亦相应增大,故有机质和恢复年限之间呈幂函数增长关系。这与金立群等^[17]、杨鑫光等^[24]和 Tripathi 等^[35]学者的研究相一致。该项研究中,排土场土壤 pH 值随着恢复年限的增大呈逐渐降低的变化趋势,这与 Huang 等^[8]、Kumar 等^[36]、高志香等^[37]和杨鑫光等^[24]学者的研究相类似。这是因为植物可以通过分泌质子、有机酸等对根际土壤必需营养元素进行活化,以利于根系吸收,从而起到降低土壤 pH 值的效果^[37]。

土壤是提供植物养分的基础,植物吸收土壤养分用于生长,植物生长以后经过生物量积累和腐化对土壤进行反馈,进一步改善土壤营养状况。该项研究结果表明,排土场 Patrick 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与土壤化学特性指标均存在一定的相关性。其中,排土场各指数与土壤全氮、全钾、碱解氮、速效钾和有机质均呈正相关关系,说明土壤养分含量对于推动排土场植物正向演替具有积极作用,同时植物也在一定程度上改善了土壤养分。由于土壤资源有限,故该项研究中排土场人工植物恢复采用的覆土层相对较薄(10 cm)。而排土场岩土体本身较为贫瘠,难以持续为植物正向演替提供养分。因此,当恢复年限到达到一

定时间,土壤质量的恢复落后于植物恢复时,就会导致后期多样性指数趋于稳定,不再进一步上升的情况。这与周涛的研究结果相类似^[30]。此外,该项研究中,4个多样性指数与土壤速效磷含量呈负相关关系,说明植物演替竞争过程对于土壤速效磷的需求较大或覆土原始速效磷含量相对较低,同时植物演替对于土壤速效磷的改善能力相对较弱。

此外,由于本次调查是以空间代替时间的方法进行,而且不同恢复年限排土场环境地质条件亦存在一定的差异性,本次调查结果和相关结论具有一定的局限性,需要更多后续排土场植物特征和土壤理化特性调查数据作依托,从而进一步明确恢复年限对高寒金属矿山排土场植物特征和土壤特性的影响,为高寒地区矿山排土场人工植物恢复提供更为科学可靠的理论依据和指导。

5 结论

(1) 不同年限排土场共出现 33 种植物,分属 14 科 29 属 33 种;随着恢复年限的逐渐增大,排土场 Patrick 丰富度指数呈幂函数增长趋势,Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数与恢复年限之间均先增大后减小的二次函数关系;排土场仍处于演替的发展阶段,并未达到稳定状态,可能需要更长的时间达到相对稳定的群落演替阶段。

(2) 随着排土场恢复年限的增大,土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮和速效磷含量均呈先增大后减小的变化趋势;排土场土壤速效钾和有机质含量随着恢复年限的增大呈幂函数增长趋势,土壤 pH 值随着恢复年限的增大呈逐渐降低的变化趋势。矿区在排土场植物恢复肥料选用时,建议选用高氮高磷低钾型缓释复合肥。

(3) 排土场 4 个多样性指数与土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾和有机质含量呈不同相关程度的正相关关系;而与速效磷含量和 pH 值分别呈负相关关系,排土场植物演替和土壤养分之间存在明显的互作关系。

[参 考 文 献]

- [1] 赵福刚.金属矿山废弃地综合处置技术研究现状[J].现代矿业,2022,38(1):194-208,218.
- [2] 官传刚.高寒矿区大型排土场生态致灾机理及功能提升研究[D].北京:中国矿业大学,2022.
- [3] 王家臣,王炳文,徐文彬,等.高海拔高寒地区金属矿山采选固废安全处置现状及研究进展[J].中国安全生产科学技术,2022,18(7):54-60.

- [4] 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.
- [5] 夏汉平,蔡锡安.采矿地的生态恢复技术[J].应用生态学报,2002,13(11):1471-1476.
- [6] 杨鑫光.高寒矿区煤矸石山植被恢复潜力研究[D].青海西宁:青海大学,2019.
- [7] Miao Z, Marrs R. Ecological restoration and land reclamation in open-cast mines in Shanxi Province, China [J]. Journal of Environmental Management, 2000, 59(3):205-215.
- [8] Huang Lei, Zhang Peng, Hu Yigang, et al. Vegetation succession and soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine [J]. Global Ecology and Conservation, 2015, 4:255-263.
- [9] 牛星,蒙仲举,高永,等.伊敏露天煤矿排土场自然恢复植被群落特征研究[J].水土保持通报,2011,31(1):215-221.
- [10] Zhang Yaohua, Xu Xianli, Li Zhenwei, et al. Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of Southwest China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650:2657-2665.
- [11] 李洁,潘攀,王长庭,等.三江源区不同建植年限人工草地根系动态特征[J].草业学报,2021,30(3):28-40.
- [12] 彭少麟.恢复生态学及植被重建[J].生态科学,1996,15(2):28-33.
- [13] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报,2012,21(9):1640-1646.
- [14] 李军豪,杨国靖,王少平.青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J].应用生态学报,2020,31(6):2109-2118.
- [15] 邵伟.川西北地区某灰岩露天矿生态修复研究[D].四川绵阳:西南科技大学,2022.
- [16] 吴晓慧,单照凯,董世魁,等.基于改进的 Lotka-Volterra 种间竞争模型预测退化高寒草地人工恢复演替结果[J].生态学报,2019,39(9):3187-3198.
- [17] 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].生态学杂志,2019,38(1):121-128.
- [18] 孙华方,李希来,金立群,等.黄河源区人工草地植被群落和土壤养分变化[J].水土保持通报,2019,39(3):25-30,38.
- [19] 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.
- [20] 许丽,樊金栓,周心澄,等.阜新市海州露天煤矿排土场植被自然恢复过程中物种多样性研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(6):154-159.
- [21] 李瑞,张克斌,刘云芳,等.西北半干旱区湿地生态系统植物群落空间分布特征研究[J].北京林业大学学报,2008,30(1):6-13.
- [22] 邵田田,王明玖,齐雪.草原露天煤矿排土场重建植被与土壤相关性研究[J].草原与草业,2021,33(3):21-27.
- [23] 牛翠娟,娄安茹,孙儒泳,等.基础生态学[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [24] 杨鑫光,李希来,金立群,等.短期恢复下高寒矿区煤矸石山土壤变化特征研究[J].草业学报,2018,27(8):30-38.
- [25] 谢蕾蕾,宋志刚,何旭洪. SPSS 统计分析实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2013.
- [26] 仲亚婷,张文太,黄俊华,等.伊犁河谷不同草地类型坡面水土保持效应的模拟降雨试验[J].水土保持通报,2016,36(6):21-25.
- [27] 李国荣,李希来,陈文婷,等.降雨侵蚀对退化草地土壤养分含量的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):40-45.
- [28] Yuan Ye, Zhao Zhongqiu, Niu Shuye, et al. Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: a case study from *Robinia pseudoacacia* reclaimed forests, Pingshuo mine, China [J]. Catena, 2018, 165:72-79.
- [29] 吴翊平,周国驰,杨卓,等.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[J].生态学报,2022,42(24):10088-10097.
- [30] 周涛,苏正安,何周窈,等.不同恢复年限矿山排土场植物群落特征[J].草业科学,2019,36(6):1508-1517.
- [31] 邢云飞,王晓丽,刘永琦,等.不同建植年限人工草地植物群落和土壤有机碳氮特征[J].草地学报,2020,28(2):521-528.
- [32] 李愈哲,樊江文,于海玲.京津风沙源治理工程不同恢复措施对草地恢复过程的差异性影响[J].草业学报,2018,27(5):1-14.
- [33] 杨勤学,赵冰清,郭东罡.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.
- [34] 桑隆康,马昌前,王国庆,等.岩石学[M].北京:地质出版社,2012.
- [35] Tripathi N, Singh R S, Hills C D. Soil carbon development in rejuvenated Indian coal mine spoil [J]. Ecological Engineering, 2016, 90:482-490.
- [36] Kumar S, Maiti S K, Chaudhuri S. Soil development in 2-21 years old coalmine reclaimed spoil with trees: a case study from Sonepur-Bazari opencast project, Raniganj Coalfield, India [J]. Ecological Engineering, 2015, 84:311-324.
- [37] 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):82-87,96.