

不同水土保持措施对露天煤矿排土场土壤与植被的影响

尹佳琪¹, 郭建英², 珊丹², 邢恩德², 李耀³

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站, 北京 100038; 3.鄂尔多斯市国土空间规划院 内蒙古鄂尔多斯市 017000)

摘要: [目的] 探究不同水土保持措施对露天煤矿排土场土壤养分和植物多样性的影响,旨在为矿区排土场等废弃地的生态恢复提供可行的技术措施。[方法] 在草原露天煤矿排土场裸露边坡布设8种水土保持工程措施与植物措施相结合的水土保持措施,以无措施(CK)为对照,采用样方法调查植物群落特征,并测定土壤主要理化性质,对比分析不同水土保持措施下植物群落特征、土壤特性的变化差异,采用冗余法分析植物群落特征与土壤特性之间的相互关系。[结果] ①排土场边坡采取水土保持措施对土壤主要理化性质有不同程度的影响,其中土壤速效养分含量变化明显($p < 0.05$),撒播混草+生态袋间隔1 m(Ⅱ)和撒播混草+生态袋间隔2 m(Ⅲ)2种措施的土壤速效磷含量达到3.38, 3.13 mg/kg,分别比对照(CK)(2.20 mg/kg)增加53.6%, 42.3%;撒播混草+生态袋间隔2 m(Ⅲ),撒播混草+土工格室(Ⅶ),撒播混草+草帘子(Ⅷ)3种措施的土壤速效钾含量为108.25, 126.25, 124.00 mg/kg,对照样地土壤速效钾含量仅为53.25 mg/kg。②水土保持措施对植物群落特征的影响主要表现在Simpson优势度指数上,除撒播混草+沙柳沙障(Ⅵ)和撒播混草+土工格室(Ⅶ)的与对照(CK)间差异不显著外($p > 0.05$),其他组均显著高于对照(CK, $p < 0.05$)。③冗余分析结果表明, Margalef丰富度, Simpson优势度指数和 Shannon-Wiener多样性指数均与土壤速效磷呈显著正相关; Louie均匀度指数与土壤全氮、速效钾和缓效钾呈显著正相关。[结论] 露天煤矿排土场实施水土保持措施可提高土壤养分含量和植物多样性,对于生态恢复有积极的作用;撒播混草+生态袋间隔2 m(Ⅲ)和撒播混草+沙柳沙障(Ⅵ)的水土保持措施具有较好的生态修复效果,可作为矿区排土场生态修复的主要措施推广应用。

关键词: 水土保持措施; 植被特征; 土壤特性; 冗余分析; 露天煤矿排土场

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0012-11

中图分类号: S157.2, X752

文献参数: 尹佳琪, 郭建英, 珊丹, 等. 不同水土保持措施对露天煤矿排土场土壤与植被的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 12-22. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.06.002; Yin Jiaqi, Guo Jianying, Shan Dan, et al. Effects of different soil and water conservation measures on soil and vegetation of open-pit coal mine drainage sites [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 12-22.

Effects of Different Soil and Water Conservation Measures on Soil and Vegetation of Open-pit Coal Mine Drainage Sites

Yin Jiaqi¹, Guo Jianying², Shan Dan², Xing Ende², Li Yao³

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University,

Huhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National

Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research,

Beijing 100038, China; 3. Ordos City Land Surveying and Planning Institute, Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: [Objective] The effects of different soil and water conservation measures on soil nutrients and plant diversity in open-pit coal mine dumps were explored, aiming to provide feasible technical measures for the ecological restoration of mine dumps and other abandoned lands. [Methods] Eight soil and water conservation measures combining soil and water-conservation-engineering and plant measures were deployed

收稿日期: 2024-04-25

修回日期: 2024-08-22

资助项目: 鄂尔多斯市科技合作重大专项“黄河流域绿色矿山建设生态修复关键技术研究及示范”(2021EEDSCXQDFZ2016); 创建鄂尔多斯国家可持续发展议程创新示范区项目“窟野河流域山水林田湖草沙矿城系统治理技术与示范”(2022EEDSKJXM005-03); 内蒙古自治区水利科技项目“皇甫川生态清洁小流域建设目标分类评价体系构建研究”(NSK202203)

第一作者: 尹佳琪(1999—), 女(彝族), 内蒙古自治区鄂尔多斯市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 784718344@qq.com.

通信作者: 郭建英(1979—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 主要从事草地水土保持与生态修复与绿色矿山治理等方面的研究。Email: guojianying1980@163.com.

on the exposed slopes of the grassland open-pit coal mine discharge site, with no measures (CK) as the control. Sampling was conducted to investigate the characteristics of the plant community, as well as to determine the main physicochemical properties of the soil, compare and analyze the differences in the changes in the characteristics of the plant community, and soil properties of the different soil and water conservation measures. The redundancy method was used to analyze the correlation between plant community characteristics and soil properties. [Results] ① The soil and water conservation measures applied on the slope of the discharge site affected differently the main physicochemical properties of the soil, in which the soil quick-acting nutrient content changed significantly ($p < 0.05$), and the soil quick-acting phosphorus content of the two measures—spreading mixed grass + ecological bag spacing 1 m (II) and spreading mixed grass + ecological bag spacing 2 m (III)—reached 3.38 and 3.13 mg/kg, respectively. These increased by 53.6% and 42.3% compared to that of the control (CK) (2.20 mg/kg), respectively. The soil quick-effect potassium content of the three measures of spreading mixed grass + ecological bag spacing 2 m (III), spreading mixed grass + geocell (VII), and spreading mixed grass + grass curtain (VIII) was 108.25, 126.25, and 124.00 mg/kg, respectively. In contrast, the soil quick-effect potassium content of the control plot was only 53.25 mg/kg. ② The effects of soil and water conservation measures on plant community characteristics manifested mainly in the Simpson's dominance index, which was significantly higher than that of the control (CK), except for the insignificant differences ($p > 0.05$) between the spreading of sedge + salix psammophila sand barriers (VI) and the spreading of sedge + geocell (VII) ($p < 0.05$). ③ The results of redundancy analysis showed that the Margalef richness, Simpson dominance index, and Shannon-Wiener diversity index were all significantly positively correlated with soil quick-acting phosphorus. The Louie evenness index was significantly positively correlated with soil total nitrogen, quick-acting potassium, and slow-acting potassium. [Conclusion] The implementation of soil and water conservation measures in open-pit coal mine dumps can improve the soil nutrient content and plant diversity, which has a positive effect on ecological restoration. The soil and water conservation measures of spreading mixed grass + ecological bag with an interval of 2 m (III) and spreading mixed grass + salix psammophila sand barriers (VI) have a better ecological restoration effect, which can be popularized and applied as the main measures for ecological restoration of dumps in the mining area.

Keywords: soil and water conservation measures; vegetation characteristics; soil characteristics; redundancy analysis; mine dump

内蒙古草原不仅是中国重要的生态安全保障区域,也是矿产、能源的主要供应基地之一^[1-2]。煤炭等矿产资源开发对于草原区域经济和社会的发展起着举足轻重的作用,另一方面,矿产资源开采利用过程中占据大量土地,特别是露天煤矿开采并形成了无序堆放的地下冻土、岩土、岩石和煤矸石机械堆积的大型排土场,对当地生态环境造成了一系列负面影响^[3-5],露天煤矿开采过程中的生态恢复与综合治理已经成为矿山生态修复工作的重要环节^[6-7]。自然恢复一定程度上可以修复矿山排土场的生态环境,但通常需要较长时间^[8]。已有研究表明,人工植被措施可以有效减缓矿区排土场的水土流失,促进植被恢复和土壤改良,具有较好的生态恢复效果^[9]。人工建植植被可提高土壤表层有机质含量和 pH 值并明显改善排土场基质的土壤容重、土壤持水量及孔隙度等物理性质^[10];珊丹等^[11]研究发现草原露天矿排土场植被

恢复后土壤中钾元素充足,氮、磷等营养元素的不足是植被恢复的主要限制因子,速效养分含量对草原矿区排土场的土壤肥力影响更重要;胡宜刚等^[12]研究表明黑岱沟排土场土壤养分含量受植被配置类型影响显著,并指出混播有豆科牧草的纯草本配置对土壤有机质、全氮、硝态氮恢复程度较好。植被恢复在改善露天煤矿排土场表层基质结构和肥力方面起到关键作用,是排土场土壤形成的必要条件,对重建露天煤矿排土场土壤环境也有重要作用。植被恢复通过构建矿区排土场植被,促进整个生态系统的结构和功能得以恢复,可作为排土场生态恢复的主要措施^[13]。近年来,围绕矿区排土场植被重建与生态修复展开的研究主要集中于复垦方式^[14]、植物种选择^[15]、植被配置类型^[16]和恢复年限^[17]等方面。在生态修复过程中,采用工程措施与植被措施相结合的方式已经成为较常见的技术方法。利用沙障、草帘子、生态袋等

水土保持措施防治边坡已经广泛应用到公路、铁路、堤防工程等生产建设项目,并取得了较好的生态修复效果;应用生态袋进行土石混合坡面的防护,植被逐渐恢复的同时其根系可穿透袋体,对边坡土壤形成锚固,提高了土体强度,提升了边坡稳定性;生态棒在坡面减流减沙方面具有重要作用;土工格室由于其运输便利、施工简单等优良性能而广泛应用于城市道路边坡防护^[18-20]。目前,这些新型的水土流失防治材料与措施在矿区排土场生态恢复过程中的应用研究相关成果还相对较少。本研究以内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗乌兰哈达煤矿排土场边坡为研究对象,对比分析了不同水土保持措施下排土场土壤化学性质、植物群落物种组成和植物多样性特征差异性,并研究土壤化学性质与植物多样性特征之间的相互作用关系,以期草原生态环境保护以及煤炭开发过程中排土场等废弃地生态修复提供理论依据与实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

乌兰哈达煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗准格尔召镇境内,露天开采规模 3.00×10^6 t/a,该矿露天排土场面积 $3.093 4 \text{ km}^2$,排土场剥离土石分阶梯型堆放,分层压实后覆土整治,边坡覆土深度

30—50 cm,坡度约 33° 。研究区属于温带半干旱大陆性气候,气候昼夜温差较大。年均气温 $6.2 \text{ }^\circ\text{C}$,年降雨量 400 mm,降水多集中在 7—9 月,年平均风速为 2.3 m/s 。研究区地点的地带性土壤为栗钙土,项目区周边植被以多年生、耐干旱沙生植被为主,主要包括披碱草(*Elymus dahuricus*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)等,植被盖度 25%~45%。

1.2 试验区布设

2022 年 7 月在排土场边坡设置 9 个试验小区(长 10 m,宽 2.5 m),小区间隔 0.5 m。小区内设置不同水土保持措施(详见图 1 和表 1)。生态袋和生态棒网孔袋采用耐紫外线、可降解的聚丙烯纤维丝网,生态袋、生态棒内填装的土壤均取自于同一排土场边坡覆土。混合草种来源于蒙草公司矿山修复种子生态包,包括蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、羊草、披碱草、草木樨(*Meliloutus albus*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等 22 种^[21]。土工格室是通过聚酯 PET 条带、聚丙烯 PP 条带、聚乙烯 HDPE 条带等高分子材料条带经过栓接、插接、注塑、超声波焊接、铆接等不同连接方式压制而成的具有三维蜂窝网状结构的土工合成材料^[22]。



图 1 试验小区水土保持措施布设

Fig.1 Layout of soil and water conservation measures in experimental plots

表 1 试验小区水土保持措施布设基本信息

Table 1 Basic information on layout of soil and water conservation measures in experimental plots

序号	水土保持措施
CK	撒播混合草种(播种量 0 g/m^2)
I	撒播混合草种(播种量 10 g/m^2)
II	撒播混合草种(播种量 10 g/m^2)+间隔 1 m 铺设生态袋
III	撒播混合草种(播种量 10 g/m^2)+间隔 2 m 铺设生态袋
IV	撒播混合草种(播种量 10 g/m^2)+间隔 1 m 铺设生态棒
V	撒播混合草种(播种量 10 g/m^2)+间隔 2 m 铺设生态棒
VI	撒播混合草种(播种量 10 g/m^2)+50 cm×50 cm 沙柳沙障
VII	撒播混合草种(播种量 10 g/m^2)+HDPE 土工格室
VIII	撒播混合草种(播种量 10 g/m^2)+草帘子

1.3 土壤样品采集及测定

2023 年 7 月,在各试验小区边坡坡上、坡中、坡下的同一坡位采集 0—40 cm 土壤样品,将同一试验小区内不同坡位土壤样品混合后进行测试分析。测定的土壤指标为:土壤酸碱度(pH 值)、有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、硝态氮(NO_3^- -N)、速效磷(AP)、速效钾(AK)和缓效钾(SK)。土壤有机质含量测定采用重铬酸钾外加热法;土壤 pH 测定采用酸碱滴定法;土壤速效钾含量测定采用火焰光度计法;土壤全氮含量测定采用凯氏定氮法;土壤全磷含量测定采用钼锑抗比色法;土壤

全钾含量测定采用氢氧化钠熔融—火焰光度计法;土壤硝态氮含量测定采用酚二磺酸比色法;土壤缓效钾含量测定采用火焰光度法测定;土壤速效磷含量测定采用紫外可见分光光度计测定^[23]。

1.4 植物群落特征调查

植物生长旺盛期(2023年7月)采用样方法进行植物群落特征调查。主要调查植物种类、密度、盖度和高度。地上生物量采用刈割法,将各小区样方内植物齐地刈割、烘干至恒重,测其地上生物量。

物种重要值(IV)的计算方法为:

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

式中: H_i 代表相对高度(%),为样方内种*i*的平均高度和样方内所有种的平均高度和的百分比; C_i 代表相对盖度(%),为样方内种*i*的平均盖度和样方内所有种的平均盖度和的百分比; F_i 代表相对密度(%),为样方内种*i*的个体数和样方内所有种的个体数的百分比。

本研究关注样方内植物的 α 物种多样性,具体为Margalef丰富度指数,Louie均匀度指数,Simpson优势度指数和Shannon-Wiener多样性指数,分别按照以下公式计算各指数^[24]:

(1) Margalef丰富度指数:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

式中: D 为Margalef丰富度指数; S 为物种数目; N 为个体的数目。

(2) Louie均匀度指数:

$$J = -(\sum P_i \ln P_i) / \ln S \quad (3)$$

式中: P_i 为群落或调查生境中第*i*物种个体数所占所有物种个体总数的比率; S 为物种数目。

(3) Simpson优势度指数:

$$M = 1 - \sum P_i^2 \quad (4)$$

式中: M 表示Simpson优势度指数; P_i 为群落或调查生境中第*i*物种个体数所占所有物种个体总数的比率。

(4) Shannon-Wiener多样性指数:

$$H = -\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (5)$$

式中: P_i 为第*i*个物种的个体数与群落总个体数之比,即 $P_i = n_i / N$; N 为个体的数目。

1.5 数据分析

Microsoft Excel(2023)对数据进行整理。采用单因素方差分析水土保持措施对土壤化学性质及植物群落特征的影响;LSD最小显著性差异法分析不同措施间土壤化学性质及植物群落特征的差异;采用冗余分析(RDA)研究土壤理化性质和植物群落特征的相关性;利用逐步回归筛选植物群落特征的最佳预测方程。数据分析和图片绘制在R 4.0.1中完成,如非特殊说明,本研究中所有的显著性水平均设为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同水土保持措施土壤特征差异

对研究区不同水土保持措施土壤理化性质进行方差分析,结果表明,土壤养分与土壤机械组成在不同处理间有不同程度变化(表2—3)。不同水土保持措施的土壤pH值在8.1~8.7之间,属于碱性土壤。I, V, VI, VII, VIII的土壤有机质含量相比于对照(CK)(2.30 g/kg)均有显著增加($p < 0.05$),表现为:VII(5.82 g/kg) > I(5.46 g/kg) > V(5.37 g/kg) > VI(5.13 g/kg) > VIII(4.43 g/kg)。各措施处理土壤全氮与土壤有机质具有相似的变化规律,其中, VII土壤全氮含量最高(0.35 g/kg)。对比土壤速效磷变化, II, III, IV措施土壤速效磷含量显著高于对照(CK)($p < 0.05$), VI土壤速效磷含量最低(1.48 mg/kg),且显著低于对照(CK)。

表 2 不同水土保持措施下土壤化学特征

Table 2 Soil chemical characteristics under different soil and water conservation measures

水土保持措施编号	pH 值	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	缓效钾/ (mg · kg ⁻¹)
CK	8.58±0.06 ^{abc}	2.30±0.81 ^c	0.21±0.03 ^c	2.20±0.17 ^d	0.70±0.02 ^a	7.20±0.24 ^{ab}	15.33±0.81 ^{bc}	53.25±2.25 ^d	456.25±7.75 ^b
I	8.31±0.05 ^{bc}	5.46±0.12 ^a	0.32±0.01 ^a	2.68±0.05 ^{bcd}	0.41±0.01 ^d	5.86±0.19 ^{de}	14.45±0.63 ^{bc}	110.50±2.60 ^b	453.75±6.25 ^b
II	8.70±0.03 ^{ab}	3.23±0.16 ^c	0.20±0.01 ^c	3.38±0.33 ^a	0.37±0.01 ^d	7.43±0.06 ^a	15.75±1.02 ^b	92.50±2.60 ^c	360.75±7.36 ^c
III	8.56±0.19 ^{abc}	2.89±0.09 ^c	0.17±0.01 ^c	3.13±0.19 ^{ab}	0.35±0.04 ^d	6.66±0.23 ^{bc}	18.73±0.89 ^a	108.25±2.25 ^b	458.50±14.77 ^b
IV	8.20±0.07 ^c	3.01±0.20 ^c	0.18±0.01 ^c	2.98±0.39 ^{abc}	0.40±0.01 ^d	6.35±0.22 ^{cd}	13.25±0.10 ^{bc}	56.00±2.89 ^d	362.50±7.23 ^c
V	8.85±0.18 ^a	5.37±0.32 ^{ab}	0.32±0.02 ^a	2.38±0.20 ^{cd}	0.50±0.04 ^c	5.28±0.14 ^c	13.10±0.28 ^c	55.75±2.75 ^d	380.00±12.19 ^c
VI	8.85±0.18 ^a	5.13±0.21 ^{ab}	0.30±0.01 ^{ab}	1.48±0.08 ^c	0.73±0.01 ^a	5.62±0.27 ^c	15.38±1.00 ^{bc}	56.00±2.89 ^d	379.50±12.02 ^c
VII	8.10±0.05 ^c	5.82±0.13 ^a	0.35±0.01 ^a	2.10±0.18 ^{de}	0.62±0.01 ^b	5.66±0.09 ^c	12.95±0.41 ^c	126.25±9.98 ^a	492.25±13.10 ^a
VIII	8.40±0.06 ^{abc}	4.43±0.15 ^b	0.26±0.01 ^b	2.28±0.17 ^d	0.71±0.01 ^a	5.73±0.16 ^c	14.75±1.11 ^{bc}	124.00±3.67 ^a	460.25±14.02 ^b

注:同列数据后不同小写字母表示在不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

试验区土壤全磷含量变化范围在0.035%~0.073%之间,排土场边坡采取不同的水土保持措施

对土壤全磷不会有明显变化。土壤硝态氮含量的变化与土壤全磷类似,不同措施平均土壤硝态氮含量为

6.07 mg/kg, 低于对照(CK)(7.20 mg/kg)。对比分析不同措施土壤全钾含量, 除 II, III 措施的土壤全钾含量显著高于对照(CK)外, 其他措施与对照(CK)之间无明显差异。采取水土保持措施后土壤中速效钾含量有明显增加, 但土壤中缓效钾含量相应减少。I, II, III, VII 与 VIII 措施的土壤速效钾含量显著高于对照(CK)($p < 0.05$), 其中 VII 最高, 达到 126.25 mg/kg; II, IV, V, VI 的缓效钾显著低于对照(CK)($p < 0.05$), 其中 II 最低(360.75 mg/kg)。不同组分的土壤机械组成在不同措施间变化差异明显, 土壤 2~0.2 mm 机械组成在不同水土保持措施间的变化范围 6.38%~8.10%, 其中撒播混草措施(I)最高(8.10%)。土壤 0.02~0.002 mm 机械组成与 <0.002 mm 机械组成表现出相反的变化趋势, 所有措施的土壤 0.02~0.002 mm 机械组成均显著低于对照(CK)($p < 0.05$), 而土壤 <0.002 mm 机械组成均显著高于对照(CK)($p < 0.05$)。

2.2 不同水土保持措施间植物群落特征差异

物种多样性是草本植物分布均匀性和丰富度的整体体现, 可以反映群落结构的稳定性和生境差异。根据植物群落特征调查结果, 9 个试验小区共出现 6 科 8 属 10 种植物(表 4), 以禾本科植物和豆科植物为主。其中, 禾本科 4 种, 占总数 40%; 豆科 3 种, 占总数 30%。在物种组成方面, 试验小区主要植物有人工播种的蒙古冰草、草木樨、紫花苜蓿、羊草、沙打

旺和自然生长的披碱草(*Elymus dahuricus*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、赖草(*Leymus secalinus*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、田旋花(*Convolvulus arvensis*)。

表 3 不同水土保持措施下土壤机械组成
Table 3 Soil mechanical composition under different soil and water conservation measures

水土保持措施编号	不同粒径土壤颗粒含量/%			
	2~0.2 mm	0.2~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
CK	6.55±0.44 ^d	78.78±0.54 ^{ab}	11.25±0.29 ^a	3.50±0.28 ^b
I	8.10±0.21 ^a	78.78±0.30 ^{ab}	8.10±0.14 ^{bcd}	5.10±0.16 ^a
II	7.65±0.05 ^{abc}	79.53±0.14 ^a	7.50±0.38 ^{cd}	5.35±0.29 ^a
III	7.80±0.10 ^{ab}	79.58±0.10 ^a	7.35±0.29 ^d	5.30±0.18 ^a
IV	7.93±0.11 ^{ab}	78.93±0.49 ^{ab}	7.98±0.33 ^{bcd}	5.20±0.13 ^a
V	7.58±0.41 ^{abc}	78.48±0.14 ^b	8.90±0.31 ^b	5.10±0.08 ^a
VI	7.00±0.12 ^{cd}	78.93±0.24 ^{ab}	8.85±0.35 ^b	5.20±0.27 ^a
VII	7.33±0.05 ^{bc}	78.85±0.07 ^{ab}	8.43±0.23 ^{bc}	5.45±0.22 ^a
VIII	6.38±0.11 ^d	79.25±0.05 ^{ab}	8.60±0.29 ^b	5.75±0.33 ^a

从图 2 中可以看出, 排土场边坡布设水土保持措施对植物群落特征影响不明显, VI (0.998), VII (0.861), VIII (0.979) 处理的 Margalef 丰富度指数低于对照(1.356)($p < 0.05$); VII 的 Louie 均匀度指数(1.026)高于对照(CK)(0.850)。对于 Simpson 优势度指数, 除 VI (0.655) 和 VIII (0.679) 与对照(CK)(0.635)间差异不显著外($p > 0.05$), 其他措施均显著高于对照(CK)($p < 0.05$)。

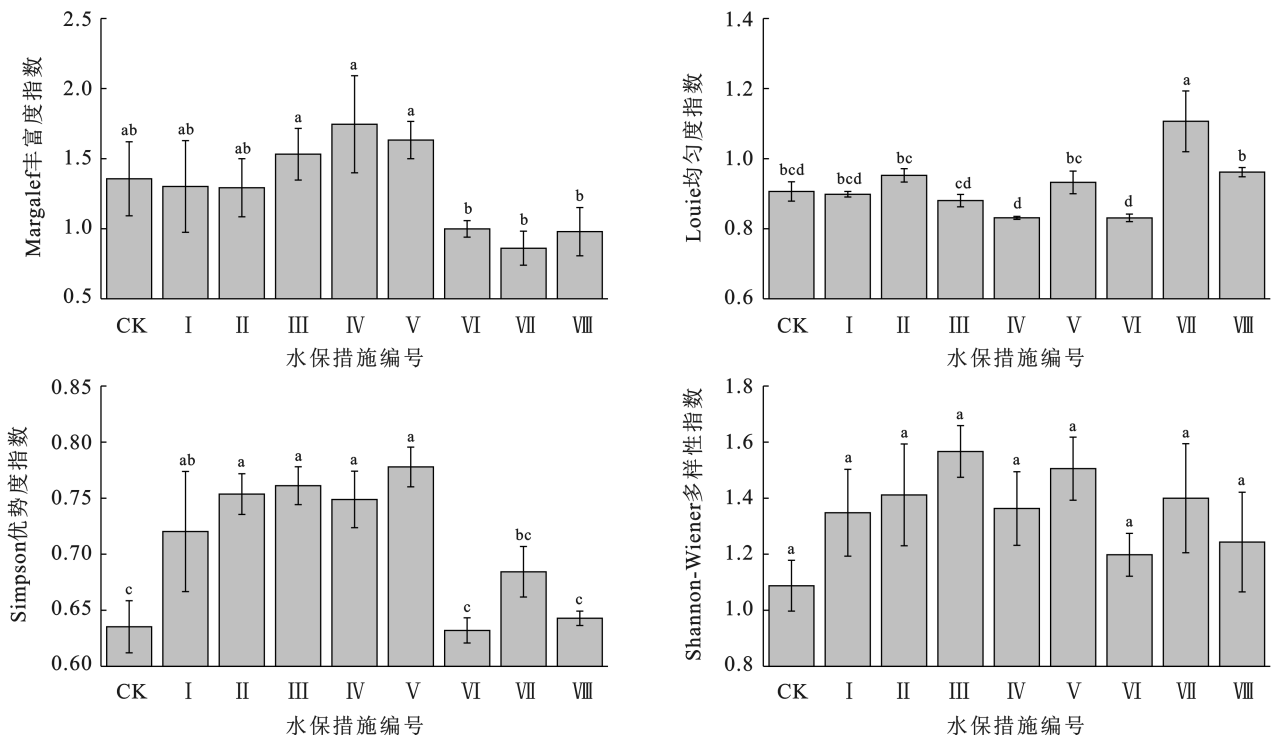


图 2 不同水土保持措施植物多样性指标的单因素方差分析

Fig.2 One-way ANOVA for plant diversity indicators of different soil and water conservation measures

表 4 不同试验小区内物种组成与其重要值

Table 4 Species composition and importance values in different plots

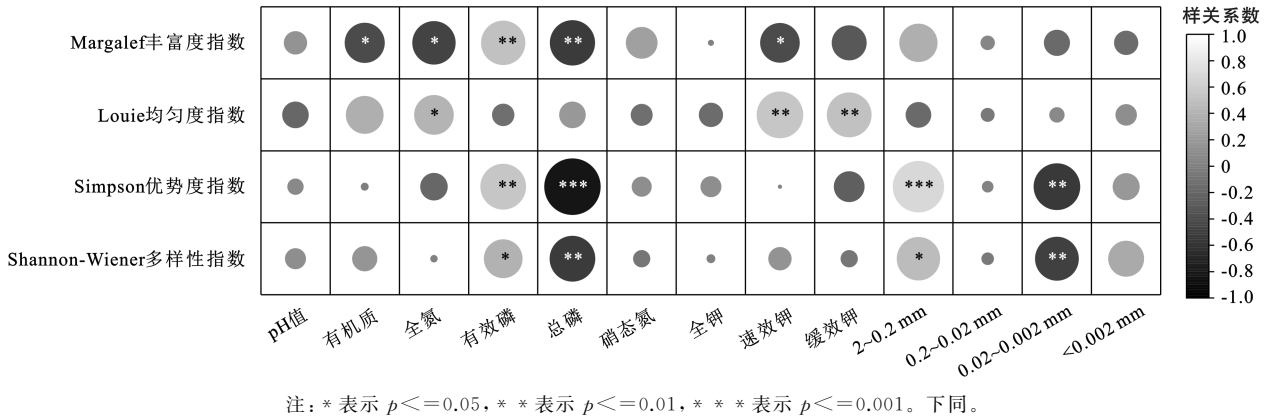
水土保持措施序号	植物种类	所属科、属	株数	盖度/%	重要值
CK	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	禾本科披碱草属	3	8	0.638
	蒙古冰草(<i>Agropyron mongolicum</i>)	禾本科冰草属	2	4	0.362
I	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	禾本科披碱草属	2	3	0.177
	草木樨(<i>Meliloutus albus</i>)	豆科草木樨属	5	13	0.663
	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科苜蓿属	1	5	0.159
II	草木樨(<i>Meliloutus albus</i>)	豆科草木樨属	5	38	0.464
	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科苜蓿属	1	4	0.070
	艾蒿(<i>Artemisia argyi</i>)	菊科蒿属	2	10	0.142
III	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	禾本科赖草属	4	20	0.324
	草木樨(<i>Meliloutus albus</i>)	豆科草木樨属	5	8	0.610
	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科苜蓿属	2	5	0.230
IV	羊草(<i>Leymus chinensis</i>)	禾本科赖草属	1	3	0.160
	草木樨(<i>Meliloutus albus</i>)	豆科草木樨属	5	20	0.350
	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科苜蓿属	4	18	0.279
V	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	禾本科赖草属	2	20	0.211
	蒙古冰草(<i>Agropyron mongolicum</i>)	禾本科冰草属	2	12	0.159
	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	禾本科披碱草属	2	5	0.123
VI	草木樨(<i>Meliloutus albus</i>)	豆科草木樨属	4	20	0.356
	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科苜蓿属	4	8	0.237
	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	禾本科赖草属	2	10	0.169
VII	沙打旺(<i>Astragalus adsurgens</i>)	豆科黄芪属	1	3	0.051
	猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)	藜科猪毛菜属	1	4	0.063
	草木樨(<i>Meliloutus albus</i>)	豆科草木樨属	3	2	0.309
VIII	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科苜蓿属	2	3	0.151
	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	禾本科赖草属	1	5	0.168
	羊草(<i>Leymus chinensis</i>)	禾本科赖草属	2	10	0.373
IX	草木樨(<i>Meliloutus albus</i>)	豆科草木樨属	1	5	0.249
	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科苜蓿属	1	3	0.152
	猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)	藜科猪毛菜属	3	10	0.432
X	田旋花(<i>Convolvulus arvensis</i>)	旋花科旋花属	1	1	0.143
	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	禾本科披碱草属	3	20	0.283
	草木樨(<i>Meliloutus albus</i>)	豆科草木樨属	3	30	0.482
XI	紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>)	豆科苜蓿属	2	5	0.174
	沙打旺(<i>Astragalus adsurgens</i>)	豆科黄芪属	1	2	0.061

2.3 植物群落特征与土壤化学性质间的关系

植物群落特征与土壤化学性质间的相关性分析结果表明(图 3), Margalef 丰富度指数与土壤有机质、全氮、全磷和速效钾显著负相关($p < 0.05$), 与土壤速效磷显著正相关($p < 0.05$)。Louie 均匀度指数与土壤全氮、速效钾和缓效钾显著正相关($p < 0.05$)。Simpson 优势度指数与土壤速效磷显著正相关($p < 0.05$), 与全磷显著负相关($p < 0.05$)。Shannon-Wiener 多样性指数与土壤速效磷和土壤 2~0.2 mm 机械组成显著正相关($p < 0.05$)。通过冗余分析对植物群落特征和土壤因子进行排序分析(图 4), 植物群

落特征与土壤因子间 RDA 分析的两个轴解释了总变量的 69.92%, 其中土壤全磷和速效钾对植物群落特征影响最大, 土壤 pH 值和土壤 0.2~0.02 mm 机械组成对植物群落特征影响最小。

根据回归分析结果(表 5), Margalef 丰富度指数, Louie 均匀度指数和 Simpson 优势度指数的最佳解释因子均为全磷、速效磷、硝态氮、全钾和速效钾, 回归方程分别解释了总方差的 81.8%, 82.6% 和 86.6%。Shannon-Wiener 多样性指数的最佳解释因子为全磷、硝态氮、全钾和速效钾, 回归方程分别解释了总方差的 64.4%。



注: * 表示 $p \leq 0.05$, ** 表示 $p \leq 0.01$, *** 表示 $p \leq 0.001$ 。下同。

图 3 植物多样性指标与土壤化学性质间的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between plant diversity indicators and soil chemical properties

表 5 土壤因子与植物群落特征回归分析

Table 5 Regression analysis of soil factors and plant community characteristics

项目	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk			逐步回归方程	R^2
	Statistics	df	p	Statistics	df	p		
Margalef	0.166	27	0.055	0.954	27	0.263	$Y_1 = 1.67 + 0.077pH + 0.171AP - 9.43TP - 0.15NO_3^- - N - 0.387TK - 0.005AK$	0.818
Louie	0.150	27	0.122	0.857	27	0.198	$Y_2 = 0.232 + 0.066pH - 0.028AP + 0.294TP + 0.035NO_3^- - N - 0.162TK + 0.002AK$	0.826
Simpson	0.137	27	0.200	0.917	27	0.289	$Y_3 = 0.683 + 0.04pH - 0.01AP - 3.836TP + 0.002NO_3^- - N - 0.075TK + 0.001AK$	0.866
Shannon-Wiener	0.136	27	0.200	0.943	27	0.141	$Y_4 = 0.582 + 0.183pH - 8.167TP - 0.01NO_3^- - N - 0.281TK + 0.01AK$	0.644

注: df 为自由度, 取值不受限制的变量个数。

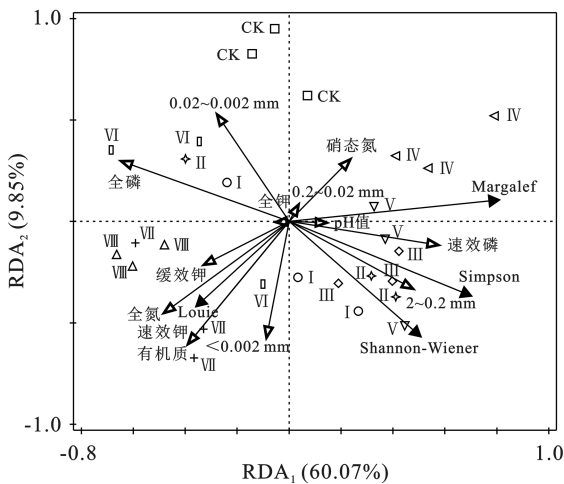


图 4 土壤与不同水土保持措施 RDA 排序图

Fig.4 Map of RDA ranking of soils with different soil and water conservation measures

3 讨论

不同的生态恢复措施在提高植物群落组成、增强土壤营养元素方面均具有一定作用,但是增加程度在不同措施之间存在差异^[25]。本研究在露天煤矿排土场边坡生态恢复过程中,采取了不同水土保持工程与植物措施相结合的方式分析不同水土保持措施对土壤理化性质及植物群落组成的影响。露天煤矿排土场边坡在采取水土保持措施后植被覆盖度增加,生物

量提高,植物通过分泌根系分泌物活化难溶性养分,根系分泌物降低了土壤的 pH 值,进而增加植物对难溶性养分的吸收能力^[26]。I, V, VI, VII, VIII 措施的土壤有机质和全氮含量显著增加,主要是由于植物群落地表枯落物的增加为土壤微生物提供了物质基础,促进腐殖质和有机质的形成,进而提高了土壤质量^[27]。水土保持措施对土壤中速效磷和速效钾的积累具有明显的促进作用,而土壤中全磷、全钾含量出现降低趋势,有研究表明,土壤中速效磷含量与全磷含量有密切关系,根系分泌物可以使土壤难溶性磷转化为速效磷以供植物利用^[28],土壤缓效钾与速效钾表现出一致的变化规律,土壤缓效钾是速效钾的储备,当土壤中速效钾由于作物吸收而减少时,缓效钾就会释放出来以补充速效钾的缺失^[29]。水土保持措施实施后的 2~0.2 mm 土壤机械组成和 <0.002 mm 土壤机械组成显著增加,有研究表明^[30],植物根系通过穿透和根际效应,对土壤水分进行调节,进而对土壤的物理结构,尤其是机械组成产生重要影响,李鹏飞等^[31]的研究结果,植被恢复可以有效改善土壤特性和空间结构也印证了这一结论。本研究中虽然土壤主要养分含量相比于对照有所提高,但全氮、全磷、全钾变化差异未达到显著水平,水土保持措施对土壤环境的影响还需要长期观测研究。

植被恢复是矿区废弃地生态修复的有效途径,生物多样性研究对矿山废弃地的土地复垦及生态重建具有一定指示意义。在排土场植被恢复过程中,植物不断适应土壤的变化,进而产生物种的更替现象。一般情况下,人工植被的生长变化及恢复状况能够表征矿区废弃地恢复的程度和质量^[32]。董倩等^[33]在安太堡露天矿排土场研究发现随着演替时间增加,物种多样性增高。也有研究表明,植被恢复第15~20 a的时间间隔才会产生最高的物种更替速率,群落结构的物种组成和层次结构会发生较大变化^[34]。研究区蒙古冰草、羊草明显增加,表明人工干预可以促进排土场植物群落的恢复和演替,这与毕丽银等^[35]在胜利矿区研究实施适当的人工干预调控可以促进矿区周边草地的恢复结论一致,张亦扬等^[36]认为人工建植优势物种的干预,可以使植被恢复的速度加快,而土壤环境改善是一个漫长的过程。撒播混草+生态袋间隔2 m(Ⅲ),撒播混草+生态棒间隔1 m(Ⅳ)和撒播混草+生态棒间隔2 m(Ⅴ)的Margalef丰富度指数,Simpson优势度指数均显著高于对照。露天煤矿排土场不同水土保持措施对植物群落变化特征的结果表明,水土保持措施在增加植物物种数量和提高植物群落均匀度方面都起到了一定的作用。排土场坡面布设生态袋、生态棒等工程措施可起到拦蓄径流、保水固土的作用,在有效降低了水土流失的同时,也提升了土壤中有机质、氮、磷、钾等元素的富集作用,为植物生长发育提供了良好的土壤条件;同时,通过撒播适合当地生态环境的生态包混草植物,提供了丰富的植物种质资源。

冗余分析的结果显示,Margalef丰富度,Simpson优势度指数和Shannon-Wiener多样性指数均与土壤速效磷呈显著正相关,黄雅茹等^[37]在关于灌木群落多样性与土壤养分相关性的研究中发现,土壤速效磷是5个典型群落多样性指数的主要影响因素。在植物多样性参数的最佳预测方程中,速效磷、全磷、硝态氮、全钾和速效钾为最佳预测因子,这表明土壤中速效养分的含量是决定植物多样性的关键因素,在矿区废弃地的生态修复过程中,氮、磷、钾元素含量对植被的影响较大。这与毕丽银等^[35]对胜利矿区周边植物多样性与土壤理化因子的冗余分析中得出的结论一致,土壤有机质、含水量、硝态氮、速效钾和速效磷与植被特征指标呈正相关关系,说明土壤含水量、有机质、硝态氮、速效磷、速效钾的变化能在一定程度上反映植物多样性的变化。王洪丹等^[38]在黄土区露天煤矿排土场研究土壤对植被恢复的影响研究表明,土壤养分中速效钾是影响物种数据的最好的解释变量,其次是

全氮、速效磷。速效养分含量是植物多样性特征的最佳解释因子,但影响因素也会随着当地的整体立地条件而发生变化。

4 结论

(1) 在露天煤矿排土场边坡采取不同水土保持措施,土壤养分与土壤机械组成有不同程度变化,其中,水土保持措施明显增加了土壤中速效养分的含量:撒播混草+生态袋间隔1 m(Ⅱ)和撒播混草+生态袋间隔2 m(Ⅲ)2种措施的土壤速效磷含量达到3.38,3.13 mg/kg,分别比对照(CK)(2.20 mg/kg)增加53.6%,42.3%;撒播混草+生态袋间隔2 m(Ⅲ),撒播混草+土工格室(Ⅶ),撒播混草+草帘子(Ⅷ)3种措施的土壤速效钾含量为108.25,126.25,124.00 mg/kg,对照样地土壤速效钾含量仅为53.25 mg/kg。

(2) 土壤因子与植物群落多样性表现出了显著的相关性,土壤中速效养分的含量是决定植物多样性的关键因素。其中Margalef丰富度,Simpson优势度指数和Shannon-Wiener多样性指数均与土壤速效磷呈显著正相关;Louie均匀度指数与土壤全氮、速效钾和缓效钾呈显著正相关。

(3) 在露天煤矿排土场边坡采取的8种不同水土保持措施中,撒播混草+生态袋间隔2 m(Ⅲ)和撒播混草+沙柳沙障(Ⅵ)的水土保持措施具有较好的生态修复效果,可作为矿区排土场生态修复的主要措施推广应用。

参考文献(References)

- [1] 阎仲康,曹银贵,李志涛,等.内蒙古东部草原区矿山生态修复研究:关键技术与减碳路径[J].农业资源与环境学报,2023,40(3):570-582.
Yan Zhongkang, Cao Yingui, Li Zhitao, et al. Ecological restoration of mines in eastern grassland area of Inner Mongolia, China: Key technologies and carbon reduction paths [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(3): 570-582.
- [2] 李全生.东部草原区大型煤电基地开发的生态影响与修复技术[J].煤炭学报,2019,44(12):3625-3635.
Li Quansheng. Progress of ecological restoration and comprehensive remediation technology in large-scale coal-fired power base in the eastern grassland area of China [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3625-3635.
- [3] 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.
Gao Zhixiang, Li Xilai, Zhang Jing, et al. Effects of

- replacing topsoil treatment on vegetation and soil characteristics of open-pit coal mine dump in alpine mining area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(1):82-87.
- [4] 徐佳,曹雪峰,王玺圳,等.半干旱地区矿区生态系统土壤保持功能评价:以神府—东胜矿区为例[J].*水土保持通报*,2023,43(4):178-185.
- Xu Jia, Cao Xuefeng, Wang Xizhen, et al. Evaluation on soil conservation function of a mining area ecosystem in semi-arid areas; A case study at Shenfu-Dongsheng mining area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4):178-185.
- [5] 丰菲,许丽,顾清敏,等.宁东矿区天然植物群落特征及其与土壤理化性质的关系[J].*水土保持通报*,2021,41(6):48-56.
- Feng Fei, Xu Li, Gu Qingmin, et al. Characteristics of natural plant community and its relationship with soil physi-chemical properties in ningdong mining area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6):48-56.
- [6] 李轲,赵勇钢,刘小芳,等.黄土丘陵区典型草地演替中植物群落特征与土壤储水量关系[J].*水土保持通报*,2019,39(1):55-60.
- Li Ke, Zhao Yonggang, Liu Xiaofang, et al. Relationship between plant community characteristics and soil water storage along typical grassland succession in loess hilly region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1):55-60.
- [7] 陈卓鑫,郭明明,王文龙,等.白草塬植被恢复后沟头草本植物多样性与土壤因子的关系[J].*水土保持通报*,2023,43(4):53-60,76.
- Chen Zhuoxin, Guo Mingming, Wang Wenlong, et al. Relationship between herbaceous plant diversity and soil factors at a gully head after revegetation in Baicao Tableland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(4):53-60,76.
- [8] 刘海亚.基于植被恢复力的矿区生态修复适应性管理研究:以黑岱沟露天煤矿排土场为例[D].江苏 徐州:中国矿业大学,2023.
- Liu Haiya. Research on adaptive management of ecological restoration in mining area based on vegetation resilience: A case study of Heidaigou open-pit coal mine dump [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2023.
- [9] 薛东明,郭小平,张晓霞.干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益[J].*水土保持学报*,2021,35(6):15-21.
- Xue Dongming, Guo Xiaoping, Zhang Xiaoxia. Runoff and sediment reduction under different slope ecological restoration modes of waste dump in arid mining area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6):15-21.
- [10] 刘宝昌,刘畅,王凯,等.矿山排土场边坡植被恢复过程中土壤团聚体稳定性机制[J].*重庆理工大学学报(自然科学)*,2023,37(1):257-264.
- Liu Baochang, Liu Chang, Wang Kai, et al. The stability mechanism of soil aggregates during the vegetation recovery process on coalmine dump slopes [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(1):257-264.
- [11] 珊丹,崔巍,邢恩德,等.矿山废弃地植被恢复对土壤养分的影响与评价[J].*山西农业大学学报(自然科学版)*,2024,44(1):101-110.
- Shan Dan, Cui Wei, Xing Ende, et al. Effects and evaluation of vegetation restoration on soil nutrients in abandoned coalmining area [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 44(1):101-110.
- [12] 胡宜刚,张鹏,赵洋,等.植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响[J].*草业科学*,2015,32(10):1561-1568.
- Hu Yigang, Zhang Peng, Zhao Yang, et al. Effects of various vegetation patterns on soil nutrients recovery in Heidaigou coal mine [J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(10):1561-1568.
- [13] 张进德,郝富瑞.我国废弃矿山生态修复研究[J].*生态学报*,2020,40(21):7921-7930.
- Zhang Jinde, Xi Furui. Study on ecological restoration of abandoned mines in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21):7921-7930.
- [14] 刘百灵,李仓水.复垦植被对排土场土壤持水能力的影响与评价[J].*山西农业大学学报(自然科学版)*,2023,43(6):89-98.
- Liu Bailing, Li Cangshui. Effects and evaluation of vegetation restoration on the soil's water retention capacity in reclaimed soil area [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(6):89-98.
- [15] 唐玉情,孙飞,刘海龙,等.基于 AHP 法黑龙江多宝山铜业矿山排土场植物筛选[J].*植物研究*,2021,41(5):700-711.
- Tang Yuqing, Sun Fei, Liu Hailong, et al. Plant screening in dumping site of Duobaoshan copper mine in Heilongjiang based on AHP method [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2021, 41(5):700-711.
- [16] 李叶鑫,吕刚,王道涵,等.露天煤矿排土场复垦区不同植被类型土壤质量评价[J].*生态环境学报*,2019,28(4):850-856.

- Li Yexin, Lv Gang, Wang Daohan, et al. Soil quality evaluation with different vegetation types of reclamation area in a surface coal mine dump [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(4): 850-856.
- [17] 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.
- 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.
- [18] 王明涛, 高国荣, 苗彦军, 等. 拉林公路生态袋护坡植被和土壤现状及关联性研究[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(4): 67-73, 89.
- Wang Mingtao, Gao Guorong, Miao Yanjun, et al. Study on the current situation and correlation between vegetation and soil of ecological bag slope protection in Lalin highway [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(4): 67-73, 89.
- [19] 詹慧宗. 柔性生态棒在高陡废弃矿山生态环境修复中的应用[J]. *现代矿业*, 2022, 38(5): 188-191.
- Zhan Huizong. Application of flexible ecological rod in ecological environment restoration of high and steep abandoned mines [J]. *Modern Mining*, 2022, 38(5): 188-191.
- [20] 范永丰, 韩宇琨, 刘丛木, 等. 土工格室加固边坡稳定性参数分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(6): 2507-2514.
- Fan Yongfeng, Han Yukun, Liu Congmu, et al. Analysis of stability parameters of geocell reinforced slope [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(6): 2507-2514.
- [21] 王召明, 王君芳, 杨红艳. 生态包: CN201410843860.1 [P]. 2015-05-13.
- Wang Zhaoming, Wang Junfang, Yang Hongyan. Ecobag: China, CN201410843860.1 [P]. 2015-05-13.
- [22] 杨广庆, 王贺, 刘华北, 等. HDPE 土工格栅加筋土结构的筋材长期强度研究[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2014, 40(2): 167-170.
- Yang Guangqing, Wang He, Liu Huabei, et al. Research on the long-term tensile strength of HDPE geogrids in reinforced soil structure [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2014, 40(2): 167-170.
- [23] 井明博, 周天林, 梁健, 等. 4 种适生植物对陇东地区油污土壤场地生态修复的响应[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(1): 286-293.
- Jing Mingbo, Zhou Tianlin, Liang Jian, et al. Response of four kinds of adaptable plants to ecological restoration of crude-oil contaminated soil in eastern Gansu Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 286-293.
- [24] 刘灿然, 马克平. 生物群落多样性的测度方法: V. 生物群落物种数目的估计方法[J]. *生态学报*, 1997, 17(6): 601-610.
- Liu Canran, Ma Keping. Measurement of biotic community diversity: V. methods for estimating the number of species in a community [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6): 601-610.
- [25] 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 Xinguang, Li Xilai, Jin Liqun, 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.
- [26] Yang Liu, Wang Xiuwei, Mao Zijun, et al. Root exudation rates decrease with increasing latitude in some tree species [J]. *Forests*, 2020, 11(10): 1045.
- [27] Dai Weiwei, Peng Bo, Liu Jun, et al. Four years of litter input manipulation changes soil microbial characteristics in a temperate mixed forest [J]. *Biogeochemistry*, 2021, 154(2): 371-383.
- [28] 杨利宁, 敖特根·白银, 李秋凤, 等. 苜蓿根系分泌物对土壤中难溶性磷的影响[J]. *草业科学*, 2015, 32(8): 1216-1221.
- Yang Lining, Aotegen·baiyin, Li Qiufeng, et al. Effects of alfalfa root exudates on insoluble phosphorus in soil [J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(8): 1216-1221.
- [29] 谢建昌, 周健民. 我国土壤钾素研究和钾肥使用的进展[J]. *土壤*, 1999, 31(5): 244-254.
- Xie Jianchang, Zhou Jianmin. Research progress of soil potassium and application of potassium fertilizer in China [J]. *Soils*, 1999, 31(5): 244-254.
- [30] Rosell R A, Galantini J A, Suñer L G. Long-term crop rotation effects on organic carbon, nitrogen, and phosphorus in haplustoll soil fractions [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 2000, 14(4): 309-315.
- [31] 李鹏飞, 张兴昌, 朱首军, 等. 植被恢复对黑岱沟矿区排土场土壤性质的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 64-70.
- Li Pengfei, Zhang Xingchang, Zhu Shoujun, et al. Effects of vegetation restoration on soil properties in Heidaigou Mine dump [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 64-70.
- [32] 寇晓蓉, 白中科, 杜振州, 等. 黄土区大型露天煤矿企业土地复垦质量控制研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(5): 957-965.

- Kou Xiaorong, Bai Zhongke, Du Zhenzhou, et al. Land reclamation quality completion standards for large open-cast coal mine enterprises in Loess areas [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):957-965.
- [33] 董倩, 李素清. 安太堡露天煤矿区复垦地不同植被下草本植物群落生态关系研究[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(4):95-100.
- Dong Qian, Li Suqing. The ecological relationships of herbaceous plant communities under different plantations on the reclaimed dumps in Antaibao opencast coal mining area [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(4):95-100.
- [34] 徐志果. 安太堡露天矿复垦地草本植物群落多样性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- Xu Zhiguo. Study on the diversity of herbaceous plant communities in reclaimed land of Antaibao opencast mine [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [35] 毕银丽, 李向磊, 彭苏萍, 等. 露天矿区植物多样性与土壤养分空间变异性特征[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(12):205-213.
- Bi Yinli, Li Xianglei, Peng Suping, et al. Characteristics of spatial variability of plant diversity and soil nutrients in open-pit mining area [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(12):205-213.
- [36] 张亦扬. 榆神府采煤塌陷区不同植被恢复方式下土壤与植物演替规律及其耦合关系[D]. 陕西 西安: 西安科技大学, 2019.
- Zhang Yiyang. Soil-vegetation evolution dynamics and coupling effects of different vegetation restoration modes in Yushenfu coal mining area [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [37] 黄雅茹, 辛智鸣, 葛根巴图, 等. 乌兰布和沙漠东北缘典型灌木群落多样性与土壤养分相关性研究[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(9):95-105.
- Huang Yaru, Xin Zhiming, Ge G, et al. Correlation of typical shrub community diversity and soil nutrient in northeast ulanbuh desert [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(9):95-105.
- [38] 王洪丹, 王金满, 曹银贵, 等. 黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16):5098-5108.
- Wang Hongdan, Wang Jinman, Cao Yingui, et al. Effect of soil and topography on vegetation restoration in an opencast coal mine dump in a loess area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16):5098-5108.

(上接第 11 页)

- [31] Ye Chao, Guo Zhonglu, Li Zhaoxia, et al. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquilts in Subtropical China [J]. *Geomorphology*, 2017, 285:82-93.
- [32] 李宏斌, 张旭, 姚晨, 等. 陕北黄土区不同植物根系抗拉力学特性研究[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4):122-129.
- Li Hongbin, Zhang Xu, Yao Chen, et al. Study on root tensile mechanical properties of six typical plants in the loess area of Northern Shaanxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4):122-129.
- [33] 张玉, 朱海丽, 张珂, 等. 3 种滨河植物单根抗拉特性与其微观结构关系[J]. *干旱区研究*, 2022, 39(2):572-583.
- Zhang Yu, Zhu Haili, Zhang Ke, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of single root of three riparian plants [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(2):572-583.
- [34] 刘亚斌, 李淑霞, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(15):157-166.
- Liu Yabin, Li Shuxia, Yu Dongmei, et al. Experiment on single root tensile mechanical properties of typical herb species in loess region of Xining Basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15):157-166.
- [35] Gray D H. Influence of vegetation on the stability of slopes: [C] // *Vegetation and slopes: Stabilisation, Protection and Ecology*. London: Thomas Telford Publishing, 1994.
- [36] 言志信, 宋杰, 蔡汉成, 等. 草本植物加固边坡的力学原理[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(2):30-34.
- Yan Zhixin, Song Jie, Cai Hancheng, et al. Mechanical analysis of herbaceous plant strengthening slope [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(2):30-34.
- [37] 陈世鑽, 张昊, 王立群, 等. 中国北方草地植物根系[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2001.
- Chen Shihuang, Zhang Hao, Wang Liqun, et al. Root system of grassland plants in Northern China [M]. Changchun: Jilin University Press, 2001.