

卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区金矿生态恢复区的土壤理化性质和植被群落特征

田燕菲¹, 刘冬志², 初红军^{1,3,4}, 石攀基³, 马伟⁵

(1.新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2.新疆环疆绿源环保科技有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000; 3.新疆大学 生命科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
4.新疆林业科学院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 5.卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区管理中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: [目的] 调查实施生态修复措施后的矿区土壤状况与植物群落的恢复情况, 为矿区修复治理措施提供评价依据。[方法] 以新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区的金矿生态恢复区为研究对象, 通过样方法和室内试验, 进行研究区植被特征、植物群落多样性调查和土壤理化性质检测分析。[结果] 与原生对照区相比, 经过生态修复工作的金矿生态恢复区土壤 pH 值、电导率、有机质、总氮、全钾的含量普遍较低; 植物物种较少, 以人为撒播草种的藜科植物占优势; 植物群落多样性指数低, 与原生对照联系紧密; 植物群落主要受土壤有机质、有效磷、速效钾等含量的影响。[结论] 在进行生态修复措施后, 青河大沙沟和富蕴大沙沟的土壤理化性质和植物群落改善较明显, 恢复效果显著。金矿恢复区由于恢复时间较短, 所以植物种类稀少, 群落稳定性低, 土壤理化性质的含量普遍不高, 还需要时间进行恢复。

关键词: 卡拉麦里山; 有蹄类野生动物自然保护区; 金矿生态恢复区; 土壤理化性质; 植物群落多样性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0107-08

中图分类号: Q948.13⁺3, S714.2

文献参数: 田燕菲, 刘冬志, 初红军, 等. 卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区金矿生态恢复区的土壤理化性质和植被群落特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 107-114. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.015; Tian Yanfei, Liu Dongzhi, Chu Hongjun, et al. Soil physicochemical properties and vegetation community characteristics in a gold mine at Ungulates Wildlife Nature Reserve in Kalamaili Mountain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 107-114.

Soil Physicochemical Properties and Vegetation Community Characteristics in a Gold Mine at Ungulates Wildlife Nature Reserve in Kalamaili Mountain

Tian Yanfei¹, Liu Dongzhi², Chu Hongjun^{1,3,4}, Shi Panji³, Ma Wei⁵

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi,

Xinjiang 830046, China; 2.Xinjiang Huanjiang Green Source Environmental Technology Co.Ltd,

Urumqi, Xinjiang 830000, China; 3.College of Life Sciences and Technology, Xinjiang University,

Urumqi, Xinjiang 830046, China; 4.Xinjiang Academy of Forestry Sciences, Urumqi, Xinjiang 830000,

China; 5.Management Center of Mt. Kalamaili Ungulate Nature Reserve, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: [Objective] The restoration of soil and plant communities in a mining area after the implementation of ecological restoration measures was investigated in order to provide a basis for the evaluation of restoration measures in the mining area. [Methods] The study was conducted in the gold mine ecological restoration area at Ungulated Wildlife Nature Reserve in the Kalamaili Mountain of Xinjiang Wei Autonomous Region. The vegetation characteristics, plant community diversity, and soil physical and chemical properties were investigated and analyzed through sampling methods and laboratory experiments. [Results] Soil pH value, electrical

收稿日期: 2021-03-29

修回日期: 2021-05-24

资助项目: 科技部科技基础性工作专项重大项目“卡山保护区管理中心 2019 中央财政林业改革发展资金(森林生态效益补偿补助)项目”(2013FY110300)。

第一作者: 田燕菲(1994—), 女(汉族), 甘肃省武威市人, 硕士研究生, 主要从事生物多样性和生态保护研究。Email: tianyanfei@163.com。

通讯作者: 初红军(1964—), 男(汉族), 山东省威海市人, 博士生导师, 高级工程师, 主要从事动物生态和濒危物种保护生物学。Email: hongjunchu@vip.163.com。

conductivity, organic matter, total nitrogen, and total potassium in the gold mine ecological restoration area were generally lower than in the primary control area. There were fewer plant species, and the Chenopodiaceae plants from human sowing were dominant. The plant community diversity index was low and was closely related to the diversity index in the native control area. The plant community was mainly affected by the contents of soil organic matter, available phosphorus, and rapidly available potassium. [Conclusion] The soil physical and chemical properties and plant communities of Qinghe Dashagou and Fuyun Dashagou improved significantly after the ecological restoration measures, and the restoration effect was significant. Due to the short time available for recovery observations in this study, there were few plant species, low community stability, and generally low content of soil physical and chemical properties at all gold recovery areas. Therefore, these areas require still more time to recover.

Keywords: the Kalamaili Mountain; Ungulate Wildlife Nature Reserve; ecological restoration area of gold mine; soil physicochemical properties; plant community diversity

采金等矿业活动导致整个矿区生态环境的破坏,改变了矿区地形地貌、土壤、水文、植被等生态系统状况^[1]。新疆卡拉麦里山有蹄类野生动物自然保护区(以下简称卡山保护区)是以保护多种珍稀濒危有蹄类野生动物及其生存环境为主的保护区,有重大的科研价值和自然保护价值^[2]。自 1990 年开始,金矿等矿产资源的开发利用,较大规模的露天开采导致卡山保护区地貌景观破碎,造成土层裸露、水土流失以及土壤沙化等严重问题,对分布在该保护区的荒漠有蹄类野生动物的栖息繁殖产生了影响,威胁到了濒危野生动植物的生存。卡山保护区荒漠植被的破坏,将加剧土地荒漠化和沙化,影响区域气候,进而影响整个区域的生态安全。

土壤的质量和涵养水源的能力不仅与土壤理化性质有关,而且也反映在植被的生长发育,因为土壤质量影响植物的生长发育,并且影响物种多样性^[3-4]。相关研究已经发现,表土修复在矿山修复中的效果较好,能更快地恢复生态系统及生物多样性^[5]。其中王梦等^[6]、田佳榕等^[7]、金立群等^[8]对煤矿、铁矿、排土场进行土壤理化性质的研究,但目前尚未有关于卡山保护区金矿修复区土壤和植物修复的研究。因而,本研究以卡山保护区 6 处金矿生态恢复区为研究对象,分析土壤理化性质和植物群落特征及两者间的相关性,并计算其恢复效果得分,旨在为卡山保护区矿区治理和植被恢复提供科学依据,便于更好地恢复和维护卡山保护区的生态环境。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

卡山保护区(88°30′—90°03′E, 44°36′—46°00′N)位于新疆准噶尔盆地的东部,属低山荒漠、半荒漠景观,从东部到西部海拔逐渐降低,海拔高度为 800~1 467 m。自南向北呈垂直地带性分布,南部为古尔班

通古特沙漠和卡拉麦里山山前戈壁,中部为卡拉麦里低山地,北部为荒漠丘陵带。以卡拉麦里山为核心,属中温带大陆性干旱气候,有寒冷漫长的冬季、炎热短暂的夏季。年平均温度在 2.5~8℃,降水量 159.1 mm。土壤以棕钙土和灰棕漠土为主,是典型的荒漠、半荒漠干旱地区。卡山保护区内植被组成简单,分布稀疏,主要由超旱生、旱生植物组成,以藜科(Chenopodiaceae)、菊科(Asteraceae)、豆科(Fabaceae)、蓼科(Polygonaceae)等为主^[9-10]。

1.2 恢复措施

(1) 基础设施拆除。对采矿企业的采矿设备和生活设施予以拆除,切断污染源。并撤出人类活动,恢复野生动物生境和迁徙路径,并拒绝因此产生二次破坏。

(2) 地貌恢复。治理区主要采用削高填低、回填压实、场地平整的治理方案。原则上就近、就地推方,就近拉运,不产生新的环境问题。矿区采用分层填埋处理,在大型机械的作业下,将矿渣堆或尾矿堆填埋到采矿坑中,回填次序总体上按照由深坑到浅坑、由大坑到小坑,自上而下、逐层回填的顺序展开。表层覆盖 20 cm 左右厚土层,以便后期植被恢复。

(3) 植被恢复。植被的恢复措施是平地植被恢复为主;在平地或坡度小于 15% 的缓坡地采用播种机进行草种和小灌木种混合条播。播种时采用种子+有机肥+保水剂+沙土混合播种,播种时间最后在 3—4 月或 10 月,以便充分利用卡拉麦里地区春季的融雪水。撒播草种主要为盐生草等藜科植物,灌木种植为梭梭。

1.3 调查样地设置

选择卡山保护区中南部的卡姆斯特北金矿、清水西金矿、卡拉麦里 1 号金矿、科仍尔 1 号金矿、富蕴大沙沟金矿、青河大沙沟金矿为研究对象,于 2020 年 9 月进行植物样方的布设和土壤样品的采集。并以

金矿所在区域附近为原生样地,在矿区周围 500 m 处设置原生对照,用于比较生态恢复区与自然环境之间的差异。样地编号依次为 JK₁, JK₂, JK₃, JK₄, JK₅, JK₆。

6 处金矿生态恢复区和原生对照均位于卡山保护区中部的卡拉麦里低山地地貌,周边土地利用类型为荒漠草原,以荒漠草本植物为主,土壤以棕钙土和灰棕漠土为主。整体生态环境脆弱,属于类似地质环境。采样点基本情况见表 1。

表 1 卡山保护区不同金矿样地基本情况

样地编号	名称	复垦时间/年	经度	纬度	海拔/m
JK ₁	卡姆斯特北金矿	2017	89°20'39"	45°17'49"	1 155
JK ₂	清水西金矿	2017	89°28'21"	45°11'12"	1 197
JK ₃	卡拉麦里 1 号金矿	2017	89°32'56"	45°11'14"	1 278
JK ₄	科仍尔 1 号金矿	2017	89°39'50"	45°08'04"	1 277
JK ₅	富蕴大沙沟金矿	2017	89°52'06"	45°06'02"	1 160
JK ₆	青河大沙沟金矿	2017	89°58'29"	45°06'24"	1 218

1.4 样品采集

2020 年 9 月期间,在每个金矿生态恢复区设置 3 个条件相近的 10 m×10 m 的样地,每个样地中沿对角线设置 3 个 1 m×1 m 的小样方,记录每个小样方内植物的长、宽、高、种类、盖度、株数等相关信息,用于估算样地总体植物特征信息,用 GPS 记录经纬度、海拔等。选恢复区毗邻原生生境 500 m 范围左右设置 10 m×10 m 的对照样地,每个样地内沿对角线选取 3 个 1 m×1 m 的样方进行植被调查,调查内容同恢复区一致。金矿生态恢复区共设置样地 36 个,对照设置 36 个。金矿生态恢复区样地编号依次为 JK₁, JK₂, JK₃, JK₄, JK₅, JK₆。

土样采集选用对角线取样法采集 3 个 1 m×1 m 小样方的 0—10, 10—20 cm 两层土壤。取样时用土钻采集,并去除石头、植物等地表覆盖物,分层次多次采样,按照四分法混匀后装入塑封袋,标明信息,带回。使用凯式法测定土壤总氮;电位法测定土壤 pH 和电导率;K₂Cr₂O₇—外加加热法测定土壤有机质;HF 消解法—火焰原子吸收分光光度法测定土壤全钾;H₈M₀N₂O₄ 分光光度法测定土壤总磷;碱解扩散法测定土壤碱解氮;0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗分光光度法测定土壤有效磷;CH₃COONH₄—火焰原子吸收分光光度法测定土壤速效钾^[11]。

1.5 植物群落计算

$$\text{重要值(IV)} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度} + \text{相对多度} + \text{相对频度}) / 4 \quad (1)$$

因为卡山保护区植物群落以草本和灌木为主,结合韩铁等^[12]的研究方法,选取相对高度,计算重要值。采用相对盖度、相对高度、相对多度、相对频度作为评价指标。

Margalef 丰富度指数 D_m ^[13]

$$D_m = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (2)$$

Simpson 优势度指数 D ^[14]

$$D = 1 - \sum \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \quad (3)$$

Shannon-Wiener 多样性指数 H ^[15]

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (4)$$

Pielou 均匀度指数 J ^[16]

$$J = \frac{H}{\ln N} \quad (5)$$

式中: S 为物种数目; N 为所有物种的个体数之和; n_i 为第 i 个种个体数; P 为 i 个种的个体数占所有种个体数的比例; H 为 Shannon-Wiener 多样性指数。

1.6 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理和统计作图,计算植物重要值。通过 SPSS 25 软件的单因素方差 (one-way ANOVA) 和显著性检验分析土壤理化性质;运用 Pearson 进行植物群落多样性与土壤理化性质间的相关关系分析;运用主成分分析法计算各金矿生态恢复区恢复效果综合得分。

2 结果与分析

2.1 不同金矿土壤物理性质

卡山保护区金矿生态恢复区土壤 pH 值呈弱碱性。在 0—10 cm 土层中,与原生对照相比,除 JK₆ 外,其余金矿土壤 pH 值均有所下降,变化范围为 8.08~8.38,其中 JK₁ 土壤 pH 值下降最明显,与原生对照显著性差异 ($p < 0.05$)。6 处金矿生态恢复区电导率远小于原生对照 (15.75 $\mu\text{S}/\text{cm}$),变化范围为 2.61~6.59 $\mu\text{S}/\text{cm}$,含量下降都超过 100%,各样地土壤电导率间无显著性差异 ($p > 0.05$)。

在 10—20 cm 土层中,JK₃, JK₆ 的土壤 pH 值高于原生对照 (8.34), JK₁ 土壤 pH 值最小 (8.00),且与原生对照显著性差异 ($p < 0.05$)。6 处金矿生态恢复区土壤电导率含量与表层类似,均小于原生对照 (13.42 $\mu\text{S}/\text{cm}$),变化范围为 2.42~5.77 $\mu\text{S}/\text{cm}$,各样地土壤电导率间无显著性差异 ($p > 0.05$) (表 2)。

表 2 卡山保护区不同金矿土壤物理性质

性质	土层/cm	样地类型						
		JK ₁	JK ₂	JK ₃	JK ₄	JK ₅	JK ₆	对照
pH 值	0—10	8.08±0.07 ^{Ba}	8.38±0.02 ^{ABa}	8.24±0.02 ^{Ba}	8.17±0.04 ^{Ba}	8.27±2.03 ^{ABa}	8.56±1.61 ^{ABa}	8.50±0.19 ^{Aa}
	10—20	8.00±0.01 ^{Ba}	8.32±0.03 ^{ABa}	8.44±0.03 ^{ABb}	8.11±0.04 ^{ABa}	8.22±1.55 ^{ABa}	8.56±1.34 ^{ABa}	8.34±0.23 ^{Aa}
电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	0—10	3.05±0.05 ^{Aa}	2.61±0.05 ^{Aa}	2.84±0.06 ^{Aa}	3.31±0.09 ^{Aa}	3.93±0.94 ^{Aa}	6.59±1.25 ^{Aa}	15.75±9.73 ^{Aa}
	10—20	2.95±0.04 ^{Aa}	2.57±0.07 ^{Aa}	3.48±0.11 ^{Ab}	3.70±0.10 ^{Ab}	2.42±1.10 ^{Ab}	5.77±0.55 ^{Aa}	13.42±9.44 ^{Aa}

注:表中数值采用平均值±标准误,大写字母表示不同矿区同一土层间差异显著($p<0.05$),小写字母表示同一矿区不同土层间差异显著($p<0.05$),下同。

2.2 不同金矿土壤化学性质

土壤化学性质方面,在 0—10 cm 土层中,相比原生对照,6 处金矿生态恢复区的土壤养分含量不同程度有所降低,土壤有机质、总氮、总磷、全钾、速效钾含量均值分别降低了 31.66%,16.97%,8.47%,17.18%,9.79%。JK₅,JK₆ 土壤有机质含量远小于原生对照(4.68 g/kg),仅为 0.82,0.34 g/kg,与原生对照显著性差异($p<0.05$)。JK₂ 土壤总氮含量显著低于原生对照($p<0.05$),JK₆ 最低为 0.91 g/kg。土壤总磷含量变化范围为 0.87~1.50 g/kg,其中 JK₁,JK₃,JK₄ 显著低于原生对照($p<0.05$)。各恢复区土壤全钾与原生对照相比差异不显著($p>0.05$),在 10.77~16.09 g/kg 范围变化,含量均低于原生对照(16.28 g/kg)。JK₂,JK₃,JK₅ 的土壤碱解氮含量显著高于原生对照($p<0.05$)。6 处金矿生态恢复区的土壤有效磷含量出现增加的现象,变化范围为 2.78~6.39 mg/kg,均高于原生对照(2.04 mg/kg),其中 JK₁,JK₂,JK₅ 与原生对照差异显著($p<0.05$)。土壤速效钾的含量排序为:JK₁<JK₃<JK₄<JK₆<对照<JK₂<JK₅,JK₁ 的速效钾含量显著低于原生对照($p<0.05$)。

在 10—20 cm 土层中,6 处金矿生态恢复区的土壤养分含量和表层情况类似,有机质、总氮含量同样出现了下降的情况,含量均值分别降低了 29.27%,25.27%。土壤有机质含量在 JK₅,JK₆ 显著低于原生对照($p<0.05$),为 0.63,0.34 g/kg,与表层含量类似。JK₂,JK₃,JK₄ 土壤总氮含量显著低于原生对照($p<0.05$),JK₄ 最低为 1.11 g/kg。土壤总磷变化范围与表层接近,为 0.88~1.48 g/kg,JK₁ 显著低于原生对照($p<0.05$)。各恢复区土壤全钾与原生对照相比,除 JK₁,JK₂ 外差异不显著($p>0.05$),含量为 8.19~17.20 g/kg。各恢复区土壤碱解氮含量均值相比原生对照增加 12.67%,且 JK₂,JK₃ 土壤碱解氮含量显著高于原生对照($p<0.05$)。6 处金矿生态恢复区的土壤有效磷含量与表层变化特征一样,均出现增加的情况,变化范围 3.79~5.63 mg/kg,高于原生对照(1.47 mg/kg),JK₁,JK₂,JK₅ 与原生对照显著性差异($p<0.05$)。土壤速效钾含量在 46.30~530.39 mg/kg

之间变化,浮动范围较大,且 JK₅ 与原生对照显著性差异($p<0.05$)。6 处金矿生态恢复区土壤表层(0—10 cm)与深层(10—20 cm)之间,整体表现为差异不显著($p>0.05$),且同一矿区分层土壤间土壤理化性质含量无明显垂直变化规律。

综上所述,在金矿开采以后的后期生态修复过程中,将在一定范围内导致土壤养分含量的损失,尤其降低土壤有机质、总氮、全钾的含量,其中对有机质的影响最大,会影响到土壤肥力以及植物的生长与演替(表 3)。

2.3 不同金矿植被特征

研究发现,金矿生态恢复区和原生对照的植物群落组成差异较明显,其中原生对照植物种类较为丰富,共调查植物 25 种 23 属 11 科,重要值排在前 3 的有沙漠绢蒿(*Seriphidium santolinum*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*),分别为 0.236 2,0.223 6,0.214 1,在群落中处于优势地位,且各物种重要值间差距较小。所有样地中盐生草(*Halogeton glomeratus*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、沙漠绢蒿(*Seriphidium santolinum*)出现频次最高,分别为 22,20,13 次。

金矿生态恢复区共调查植物 5 种 3 属 3 科,植物组成差异不明显。其中 JK₅,JK₆ 植物种类最少,仅为 2 种,共有种为盐生草。恢复区植物以藜科为主,常见的有盐生草、刺沙蓬、梭梭,与原生对照相比植物种简单、科属单一。

重要值是以综合数值表示植物物种在群落中的地位和作用,优势种对群落的结构和群落环境的形成有明显控制作用。各恢复区优势种有一定共性,其中 JK₁,JK₃,JK₄ 金矿优势种为梭梭,重要值分别为 0.631 7,0.822 4,0.451 0;JK₂,JK₅,JK₆ 优势种为盐生草,重要值分别为 0.647 4,0.772 9,0.735 1。恢复区优势种与原生对照有明显区别,均高于原生对照植物重要值,说明不同矿区之间形成群落复杂水平不同,表明工程措施对群落的复杂程度具有一定得影响,金矿生态恢复区的植物现处于撒播草种的藜科植物为主阶段,尚处于向原生生境方向进行进化的阶段(表 4)。

表 3 卡山保护区不同金矿土壤化学性质

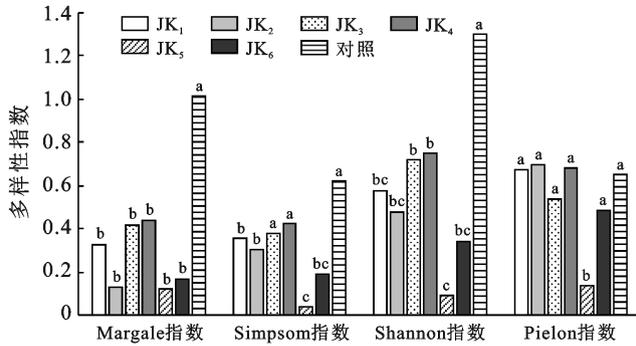
样方	土层/ cm	土壤有机质/ (g · kg ⁻¹)	土壤总氮/ (g · kg ⁻¹)	土壤总磷/ (g · kg ⁻¹)	土壤全钾/ (g · kg ⁻¹)	土壤碱解氮/ (g · kg ⁻¹)	土壤有效磷/ (g · kg ⁻¹)	土壤速效钾/ (g · kg ⁻¹)
JK ₁	0—10	4.92±0.52 ^{Aa}	2.11±0.02 ^{ABa}	0.99±0.16 ^{Ba}	10.77±0.25 ^{Ba}	20.77±0.47 ^{Ba}	4.85±0.24 ^{Ba}	48.57±0.30 ^{Ba}
	10—20	4.56±1.18 ^{Aa}	1.80±0.02 ^{ABb}	0.88±0.02 ^{Cb}	8.19±0.70 ^{Cb}	18.67±1.02 ^{Ba}	5.58±0.36 ^{Aa}	46.30±0.47 ^{Bb}
JK ₂	0—10	5.83±1.50 ^{Aa}	1.24±0.04 ^{Ba}	1.50±0.04 ^{Aa}	16.09±0.48 ^{Aa}	32.67±1.02 ^{Aa}	6.39±0.70 ^{Aa}	274.33±8.67 ^{Aa}
	10—20	4.60±0.29 ^{Aa}	1.19±0.01 ^{Ba}	1.48±0.03 ^{Aa}	17.20±0.41 ^{Aa}	30.80±1.21 ^{Aa}	5.63±0.93 ^{Aa}	272.33±10.53 ^{Ba}
JK ₃	0—10	3.73±0.48 ^{Aa}	2.26±0.05 ^{Aa}	0.95±0.05 ^{Ba}	13.81±0.39 ^{ABa}	35.00±1.19 ^{Aa}	2.78±0.15 ^{Ca}	56.60±0.36 ^{ABa}
	10—20	2.80±0.08 ^{ABa}	1.26±0.04 ^{Ba}	1.07±0.06 ^{BCa}	14.10±0.87 ^{ABa}	31.97±2.33 ^{Aa}	4.14±0.55 ^{Aa}	69.03±0.57 ^{Ba}
JK ₄	0—10	3.55±0.38 ^{Aa}	2.10±0.05 ^{ABa}	0.87±0.04 ^{Ca}	13.48±0.41 ^{ABa}	24.27±1.63 ^{Ba}	3.05±0.37 ^{BCa}	59.17±1.09 ^{ABa}
	10—20	3.45±0.79 ^{ABa}	1.11±0.02 ^{Ba}	1.06±0.07 ^{BCb}	14.35±0.41 ^{ABa}	21.93±1.02 ^{Ba}	4.76±0.87 ^{Aa}	72.63±0.24 ^{Bb}
JK ₅	0—10	0.82±0.54 ^{Ba}	2.29±0.47 ^{Aa}	1.23±0.27 ^{ABa}	13.54±3.39 ^{ABa}	38.50±8.30 ^{Aa}	4.87±0.81 ^{Ba}	527.66±141.85 ^{Aa}
	10—20	0.63±0.06 ^{Ba}	2.59±0.23 ^{Aa}	1.30±0.28 ^{ABa}	13.73±2.43 ^{ABa}	28.23±4.05 ^{ABb}	5.39±0.85 ^{Aa}	530.39±38.88 ^{Aa}
JK ₆	0—10	0.34±0.11 ^{Ba}	0.91±0.41 ^{ABa}	1.38±0.26 ^{Aa}	13.21±2.73 ^{Ba}	24.97±4.76 ^{Ba}	4.38±0.82 ^{BCa}	191.21±75.43 ^{ABa}
	10—20	0.34±0.10 ^{Ba}	1.69±0.45 ^{ABa}	1.42±0.20 ^{Aa}	13.63±2.35 ^{ABa}	19.83±5.68 ^{Bb}	3.79±0.96 ^{ABa}	149.30±120.88 ^{ABa}
原生	0—10	4.68±1.36 ^{Aa}	2.19±0.57 ^{Aa}	1.26±0.12 ^{Aa}	16.28±0.46 ^{ABa}	23.45±2.02 ^{Ba}	2.04±0.38 ^{Ca}	213.86±25.92 ^{Aa}
	10—20	3.86±0.66 ^{Aa}	2.15±0.44 ^{Aa}	1.08±0.09 ^{Ba}	13.71±1.01 ^{Ba}	22.40±2.33 ^{Ba}	1.47±0.43 ^{Ba}	142.66±20.03 ^{Bb}

表 4 卡山保护区不同金矿物种组成及重要值

植物种类	不同样地类型物种重要值						
	JK ₁	JK ₂	JK ₃	JK ₄	JK ₅	JK ₆	对照
矮大黄(<i>Rheum nanum</i>)							0.005 0
糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)							0.045 2
刺沙蓬(<i>Salsola ruthenica</i>)		0.447 2	0.136 3	0.490 9	0.321 7		0.073 9
刺旋花(<i>Convolvulus tragacanthoides</i>)							0.052 0
东方旱麦草(<i>Eremopyrum orientale</i>)							0.009 6
狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)							0.011 0
棉藜(<i>Kirilovia eriantha</i>)						0.340 1	0.096 0
琵琶柴(<i>Reaumuria songarica</i>)							0.146 8
蒙古韭(<i>Allium mongolicum</i>)							0.148 5
沙漠绢蒿(<i>Seriphidium santolinum</i>)			0.091 3	0.215 1			0.236 2
蛇麻黄(<i>Ephedra distachya</i>)							0.111 5
中麻黄(<i>Ephedra intermedia</i>)							0.004 4
梭梭(<i>Haloxylon ammodendron</i>)	0.631 7		0.822 4	0.451 0			0.226 2
驼绒藜(<i>Ceratoides latens</i>)							0.214 1
驼蹄瓣(<i>Zygophyllum fabago</i>)				0.173 7			0.016 2
猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)			0.047 5				
盐生假木贼(<i>Anabasis salsa</i>)	0.232 5						0.179 5
小甘菊(<i>Cancrinia discoidea</i>)							0.014 0
亚菊(<i>Ajania pallasiana</i>)							0.104 5
盐生草(<i>Halogeton glomeratus</i>)	0.287 6	0.647 4	0.400 5		0.772 9	0.735 1	0.194 2
硬萼软紫草(<i>Arnebia decumbens</i>)							0.037 6
羽状三芒草(<i>Aristida pematata</i>)							0.029 6
针茅(<i>Stipa capillata</i>)							0.177 9
木蓼(<i>Atraphaxis frutescens</i>)							0.075 0
怪柳(<i>Tamarix chinensis</i>)							0.050 4
阿尔泰狗娃花(<i>Heteropappus altaicus</i>)							0.024 4
物种数量/种	3	2	5	4	2	2	25

2.4 植物群落多样性

由图 1 可知,JK₅ 的多样性指数整体最低,表明 JK₅ 的植物群落物种最少,稳定性差。



注:图中不同小写字母表示不同金矿植物群落多样性指数的差异显著($p < 0.05$)。

图 1 卡山保护区不同金矿生态恢复区植物群落多样性指数

6 处金矿生态恢复区的 Simpson 指数和 Shannon 指数在所有样方中出现相同的变化趋势,为:JK₅ < JK₆ < JK₂ < JK₁ < JK₃ < JK₄, 均低于原生对照,其中 JK₁, JK₂, JK₅, JK₆ 与原生对照差异显著($p < 0.05$),由此可以看出,6 处金矿生态恢复区的植物群落的复杂程

度有相似的趋势。Margalef 指数表现为:JK₅ < JK₂ < JK₆ < JK₁ < JK₃ < JK₄, 说明 JK₄ 的植物物种数量最多,且显著低于原生对照($p < 0.05$),与原生对照联系紧密。JK₁, JK₂, JK₃, JK₄, JK₆ 的 Pielou 指数处于 0.48~0.70 之间,在植物数量上与原生对照(0.65)接近,无显著性差异($p > 0.05$)。结合多样性指数来看,金矿在恢复过程中,由于时间较短,导致植物群落的多样性指数低,群落稳定性差。

2.5 土壤理化性质与植物的关系

植物多样性指数与土壤理化性质间联系密切。表现为 Margalefe 指数与土壤电导率、碱解氮间呈极显著相关关系($p < 0.01$),与有效磷间呈显著负相关关系($p < 0.05$)。Simpson 指数与土壤有机质、有效磷呈极显著相关关系($p < 0.01$),与速效钾间呈显著负相关关系($p < 0.05$)。Shannon 指数与有机质、碱解氮间呈极显著相关关系($p < 0.01$),与碱解氮、速效钾间呈显著负相关关系($p < 0.05$)。Pielou 指数与有机质、速效钾间呈极显著相关关系($p < 0.01$)。综上所述,卡山保护区 6 处金矿生态恢复区的植物群落多样性指数主要受土壤有机质、有效磷、速效钾含量的影响,彼此之间联系紧密(表 5)。

表 5 卡山保护区金矿恢复区土壤理化性质与植物群落多样性指数关系

多样性指数	pH 值	电导率	有机质	总氮	总磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾
Margalef	0.24	0.607**	0.394	0.465*	-0.278	-0.231	-0.569**	-0.453*	-0.285
Simpson	-0.048	0.361	0.634**	0.242	-0.285	0.012	-0.383	-0.525**	-0.484*
Shannon	0.013	0.436*	0.566**	0.343	-0.284	-0.019	-0.413*	-0.553**	-0.413*
Pielou	-0.251	0.134	0.713**	-0.157	-0.225	0.083	-0.306	-0.186	-0.575**

注:* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著;** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

2.6 主成分分析

对于各金矿恢复区进行植物群落多样性分析、土壤理化性质分析和相关性分析,不能系统地表现金矿修复区的植物群落结构和土壤特性间的不同,

利用主成分分析法,运用以上指标进行了综合评价,筛选出恢复效果较好的金矿生态恢复区,为今后卡山保护区矿区恢复区土壤及植被的恢复提供理论依据(表 6)。

表 6 卡山保护区金矿恢复区相关性分析总方差解释

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
1	5.676	43.658	43.658	5.676	43.658	43.658	4.283	32.946	32.946
2	4.300	33.081	76.739	4.300	33.081	76.739	2.969	22.841	55.787
3	1.717	13.206	89.944	1.717	13.206	89.944	2.848	21.911	77.698
4	1.027	7.900	97.844	1.027	7.900	97.844	2.619	20.146	97.844
5	0.223	1.712	99.556						
6	0.058	0.444	100						
7	4.08 E-16	3.14 E-15	100						
8	3.20 E-16	2.46 E-15	100						
9	4.71 E-17	3.62 E-16	100						
10	-1.44 E-17	-1.11 E-16	100						
11	-2.53 E-16	-1.95 E-15	100						
12	-5.23 E-16	-4.02 E-15	100						
13	-1.44 E-15	-1.11 E-14	100						

根据表中提取的 4 个主成分。第一主成分 F_1 , 第二主成分 F_2 , 第三主成分 F_3 , 第四主成分 F_4 分别解释总数据变异的 43.625%, 33.081%, 13.206%, 7.9%。共解释 97.844% 的数据变异, 较好的解释了大多数指标的信息。结合 4 个主成分的系数得分矩阵, 对提取到的主成分进行计算得到综合得分 F :

$$F = (43.625\% \times F_1 + 33.081\% \times F_2 + 13.206\% \times F_3 + 7.9\% \times F_4) / 100\%$$

由表 7 可知, 各金矿生态恢复区的主成分分析综合得分结果排序依次为: $JK_6 > JK_5 > JK_3 > JK_1 > JK_4 > JK_2$ 。由此可见, JK_6 (0.542 03) 的土壤理化性质和植物群落多样性得分最高, 恢复效果最好, 与原生对照最为接近 (0.779 13), 其次是 JK_5 (0.280 12)。其余金矿生态修复区的 F 值较低, 说明其植被和土壤的修复效果还需要更长时间来恢复。

表 7 卡山保护区各金矿生态恢复区主成分综合得分

样方	F_1	F_2	F_3	F_4	F
JK_1	-0.302 67	-0.580 21	0.935 05	-1.632 42	-0.329 44
JK_2	-1.280 25	-0.185 74	-0.081 76	-0.381 25	-0.660 87
JK_3	-1.076 85	0.908 74	0.706 05	1.380 75	0.033 18
JK_4	-0.311 77	-0.930 00	-1.703 57	0.310 44	-0.644 15
JK_5	1.099 51	-0.694 74	-0.123 35	0.589 56	0.280 12
JK_6	1.096 30	-0.344 70	1.046 84	0.500 40	0.542 03
对照	0.775 73	1.826 65	-0.779 27	-0.767 48	0.779 13

3 讨论

本文通过对卡山保护区 6 处金矿生态恢复区进行调查, 在对土壤理化性质的分析中表明, 金矿生态恢复区的土壤 pH 值 > 8 , 为碱性, 在 5 处金矿生态恢复区均有所下降, 低于原生对照。研究结果符合保护区地理位置, 土壤偏碱性是新疆盐渍土的一个重要特征, 因为新疆是中国盐渍土集中分布的大区, 盐渍土分布区土壤 pH 值在 8.5 以上, 盐基饱和度为 100%^[17]。土壤电导率在金矿生态恢复区均呈现变小的趋势。各金矿生态恢复区的土壤有机质、总氮含量降低最为明显, 与韩煜等^[18] 研究结果类似。土壤养分含量减少的情况在各金矿生态恢复区表现不同, 例如 JK_6 的土壤总氮的含量下降明显, JK_5 的土壤有机质下降明显, 说明进行生态修复措施后, 金矿生态恢复区的土壤理化性质受到地理位置等因素的影响, 空间差异性较大, 彼此间有不同的变化趋势。矿区生态修复工作通过改良土壤质量来提高土壤养分。在恢复治理时, 因伴有肥料的添加等措施, 使得检测出

的土壤有效磷、速效钾等含量较为丰富。土壤理化性质的含量在各金矿生态恢复区中的表现有差距, 这也与前期地貌恢复过程中覆土土壤的选择有关。

本研究中, 金矿在进行植被恢复措施后, 植物物种数量整体较少, 植物组成趋于简单化, 主要以撒播草种的藜科植物占有优势。原因是藜科植物具有很强的耐盐碱氮能力, 是干旱和养分匮乏的矿区废弃地进行植被恢复最有效的植物^[19]。植物群落物种数的匮乏影响植物多样性指数, 导致 Margalef 指数、Simpson 指数和 Shannon 指数值较小, 与前人结论类似^[20]。在对金矿生态恢复区植物群落调查与土壤理化性质测定后发现, 植被群落特征与土壤理化特征间关系紧密, 植物的生长状况受土壤有机质、有效磷、速效钾含量的影响较大, 植被与土壤之间是相互影响的。这一结果与李晓娜等^[21] 在延庆区荒滩地土壤碳氮含量对植物群落多样性影响的研究结果类似, 与韩煜等^[18] 在胜利煤田得出土壤全钾和速效钾的含量是影响群落结构的关键因子结论相似。与龚艳宾等^[22] 研究表明草本植物多样性受到土壤全钾、pH 值、速效磷的影响接近。

综上所述, 卡山保护区的金矿生态修复工作还需要后期的维护和进一步的完善, 在后期继续关注土壤肥力的提升与土壤结构的改善, 及时有效的补充肥料, 确保覆土的深度和土壤质量, 提高土壤养分含量, 继续选择耐旱生命力顽强的藜科植物, 以利于加速植被恢复的进程与进一步的演替, 促进金矿生态恢复区的逐步恢复与可持续发展。

4 结论

(1) 与原生对照相比, 金矿生态恢复区的土壤 pH 值、电导率、有机质、总氮、全钾等含量较低。

(2) 与原生对照相比, 金矿生态恢复区的植物物种较少, 以人为撒播草种的藜科植物占优势, 群落稳定性低。

(3) 与原生对照相比, 金矿生态恢复区的植物群落多样性指数低, 与原生对照联系紧密, 植物群落主要受与土壤有机质、有效磷、速效钾等含量影响。

(4) 通过主成分分析得出, 青河大沙沟和富蕴大沙沟的综合得分较高, 恢复效果明显。

[参 考 文 献]

- [1] 苑煜焯, 白玉锋, 徐海量, 等. 阿尔泰山采金矿区植被恢复效果初探[J]. 土壤通报, 2016, 4(4): 966-972.
- [2] 徐海量. 矿区恢复典型案例分析: 以卡拉麦里自然保护区为例[J]. 新疆林业, 2018(4): 33-36.
- [3] 马国飞, 满苏尔·沙比提. 托木尔峰自然保护区喀拉玉尔

- 滚河上游河谷土壤理化性状特征[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):251-256.
- [4] 丁青坡,王秋兵,魏忠义,等.抚顺矿区不同复垦年限土壤的养分及有机碳特征研究[J].土壤通报,2007,38(2):262-267.
- [5] Ribeiro R A, Giannini T C, Gastauer M, et al. Topsoil application during the rehabilitation of a manganese tailing dam increases plant taxonomic, phylogenetic and functional diversity [J]. Journal of Environmental Management, 2018,227:386-394.
- [6] 王梦,张继卫,李昊宇,等.哈密大南湖二矿区土壤理化性质分析[J].陕西农业科学,2020,66(3):70-76.
- [7] 田佳榕,马伟波,戚旭东,等.内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果[J].农业资源与环境学报,2020,37(4):601-608.
- [8] 金立群,李希来,孙华方,等.高寒矿区排土场不同坡向植被和土壤特征研究[J].土壤,2020,52(4):831-839.
- [9] 冯锦,初雯雯,端肖楠.新疆卡拉麦里山有蹄类自然保护区蒙古野驴 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及系统发育研究[J].野生动物学报,2018,39(4):737-744.
- [10] 徐文轩,杨维康,张弛,等.准噶尔盆地东部卡拉麦里山有蹄类自然保护区主要植物群落及其特征[J].植物生态学报,2016,40(5):502-507.
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [12] 韩轶,杨永梅,郭志林,等.大青山小井沟自然植物群落及其土壤环境特征调查[J].干旱区资源与环境,2020,34(12):115-121.
- [13] Margalef R. Information theory in ecology [J]. International Journal of General Systems, 1958,3:36-71.
- [14] Greenberg J H. The measurement of linguistic diversity [J]. Language, 1956,32(1):109-115.
- [15] Magurran A E. Why diversity? [M]//Ecological Diversity and Its Measurement. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988:1-5.
- [16] Pielou E C. Ecological Diversity [M]. New York: Wiley, 1975.
- [17] 郗金标,张福锁,毛达如,等.新疆盐渍土分布与盐生植物资源[J].土壤通报,2005,36(3):299-303.
- [18] 韩煜,王琦,赵伟,等.草原区露天煤矿开采对土壤性质和植物群落的影响[J].生态学杂志,2019,38(11):3425-3433.
- [19] Herrera M A, Salamanca C P, Barea J M. Inoculation of woody legumes with selected arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia to recover desertified Mediterranean ecosystems [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993,59(1):129-133.
- [20] 乌仁其其格,张德平,雷霆.呼伦贝尔草原采煤塌陷区植物群落变化分析:以内蒙古宝日希勒煤矿区为例[J].干旱区资源与环境,2016,30(12):141-145.
- [21] 李晓娜,张微微,赵春桥,等.延庆区荒滩地土壤理化性质及其对植物多样性的影响[J].草地学报,2019,27(3):695-701.
- [22] 龚艳宾,郭建斌,赵秀海,等.吉林蛟河天然阔叶红松林草本植物多样性及其与土壤因子的关系[J].浙江农林大学学报,2016,33(4):620-628.

(上接第 22 页)

- [26] 徐晓锋,史龙新,许海,等.水培经济植物对污水中磷的吸收利用及去除效果[J].生态学杂志,2006,25(4):383-388.
- [27] Nguyen X C, Chang S W, Nguyen T L, et al. A hybrid constructed wetland for organic-material and nutrient removal from sewage: Process performance and multi-kinetic models [J]. Journal of Environmental Management, 2018,222:378-384.
- [28] Yang Yan, Zhao Yaqian, Liu Ranbin, et al. Global development of various emerged substrates utilized in constructed wetlands [J]. Bioresource Technology, 2018,261:441-452.
- [29] Listosz A, Kowalczyk-Jusko A, Józwiakowski K, et al. Productivity and chemical properties of *Salix viminalis* in a horizontal subsurface flow constructed wetland during long-term operation [J]. Ecological Engineering, 2018,122:76-83.
- [30] 董佳,田相利,董双林,等.三疣梭子蟹和凡纳滨对虾混养系统的氮磷收支的研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(12):16-24.
- [31] 杨忠臣.人工湿地植物根系泌氧和分泌物影响污染物去除的机制研究[D].山东 济南:山东大学,2016.