

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.02.028

CSTR:32310.14.stbxb.2026.02.028

马振升,李茜,李梓榕,等.高寒矿区煤炭开采对植被土壤的损伤及修复效果[J].水土保持学报,2026,40(2):357-364,374.

MA Zhensheng, LI Qian, LI Zirong, et al. Damage to vegetation and soil induced by coal mining in alpine mining areas and their restoration effects [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2):357-364,374.

## 高寒矿区煤炭开采对植被土壤的损伤及修复效果

马振升<sup>1,2</sup>, 李茜<sup>1</sup>, 李梓榕<sup>3</sup>, 曹广民<sup>1</sup>, 钱大文<sup>4</sup>, 张凯<sup>1,2</sup>, 杨航<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院西北高原生物研究所,西宁810001; 2.中国科学院大学,北京100049; 3.青海大学生态环境工程学院,西宁810016; 4.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆401331)

**摘要:** [目的] 探讨煤炭开采对植被群落与土壤养分的影响, 以为高寒矿区生态修复提供理论依据。 [方法] 以青海海西木里煤田典型矿井区为研究对象, 通过植被群落调查及土壤养分测定对比2 a与9 a人工植被修复区的修复效果。 [结果] 采矿导致景观破碎化, 形成矿坑与煤矸石渣山, 其植被盖度和生物量极低, 矿坑及渣山土壤含水率、全碳、全氮等指标显著低于原生草地, 其中渣山降幅尤为剧烈(分别达90.9%、68.9%、88.2%), 且有效磷极度匮乏。人工修复(以种植草地早熟禾和垂穗披碱草为主, 并辅以羊板粪和有机肥混合改善土壤肥力)2 a后, 植被盖度可恢复至与原生草地无显著差异, 有效磷质量分数显著提升(163.4 mg/kg); 但随修复年限延长至9 a, 植被盖度(31.75%)与地下生物量(524.7 g/m<sup>2</sup>)均显著低于原生草地。人工修复2 a矿区草地土壤含水率(42.7%)、全碳(149.6 g/kg)、全氮(8.6 g/kg)和有机碳(144.1 g/kg)较原生草地均显著降低( $p < 0.05$ ), 且随修复年限延长(9 a), 降低趋势增大, 有效磷维持在极低水平。灰色关联度与相关性分析显示, 植被指标与土壤含水率、全氮、全碳和有机碳呈显著正相关, 且修复2 a的生态效益关联度最高。 [结论] 高寒矿区人工修复短期有效但具有干预依赖性, 长期稳定性不足, 需平衡人工干预与自然恢复。

**关键词:** 木里矿区; 高寒草地; 生态修复; 土壤养分; 植物群落

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0357-08

## Damage to Vegetation and Soil Induced by Coal Mining in Alpine Mining Areas and Their Restoration Effects

MA Zhensheng<sup>1,2</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, LI Zirong<sup>3</sup>, CAO Guangmin<sup>1</sup>, QIAN Dawen<sup>4</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, YANG Hang<sup>1,2</sup>

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Ecological and Environmental Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 4. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** [Objective] This study investigates the effects of coal mining on vegetation communities and soil nutrients, aiming to provide a theoretical basis for ecological restoration in alpine mining areas. [Methods] Taking a typical mining area of the Muli Coalfield, Haixi, Qinghai Province, as the study area, the restoration effects in 2- and 9-year-old artificially restored areas were compared through vegetation community surveys and soil nutrient measurements. [Results] Mining caused landscape fragmentation, resulting in mining pits and gangue piles with extremely low vegetation coverage and biomass. Soil moisture, total carbon (TC), and total nitrogen (TN) in these disturbed areas were significantly lower than in the native grasslands, with gangue piles showing the most drastic reductions (decreases of 90.9%, 68.9%, and 88.2%, respectively). Available phosphorus (AP) was critically deficient. After 2 years of artificial restoration (primarily planting *Poa pratensis* and *Elymus nutans*, supplemented with sheep manure and organic fertilizer to improve soil fertility), vegetation coverage recovered to levels comparable to native grassland, and AP content increased significantly to 163.4 mg/kg. However, after

收稿日期: 2025-10-10

修回日期: 2025-10-23

录用日期: 2025-10-30

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-24

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1303301); 国家自然科学基金面上项目(32171650); 中国科学院青年创新促进会项目(2022432)

第一作者: 马振升(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事高寒草地退化研究。E-mail: mazhensheng@nwipb.cas.cn

通信作者: 李茜(1986—), 女, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事高寒草地土壤研究。E-mail: liqian@nwipb.cas.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

9 years of restoration, both vegetation coverage (31.75%) and belowground biomass (524.7 g/m<sup>2</sup>) became significantly lower than in native grassland. In the 2-year restored grassland, soil moisture (42.7%), TC (149.6 g/kg), TN (8.6 g/kg), and organic carbon (144.1 g/kg) were all significantly lower than in native grassland ( $p < 0.05$ ). This decreasing trend became more pronounced after 9 years of restoration, while AP remained critically low. Grey relational and correlation analyses indicated that vegetation indices were significantly positively correlated with soil moisture, TN, TC, and organic carbon, with the highest ecological benefit observed with 2-year restoration. [Conclusion] Artificial restoration in alpine mining areas can effectively improve vegetation and soil conditions in the short term but is highly intervention-dependent, exhibiting poor long-term stability. A balance between artificial intervention and natural recovery processes is crucial.

**Keywords:** Muli mining area; alpine grassland; ecological restoration; soil nutrient; vegetation community

**Received:** 2025-10-10

**Revised:** 2025-10-23

**Accepted:** 2025-10-30

**Online**(www.cnki.net): 2025-12-24

青海祁连山地区地处黄土高原、青藏高原及蒙新荒漠的交会地带,拥有丰富的生物资源,涵盖草原、沼泽、河流等湿地类型,生态地位独特,是我国重要的生态屏障和水源涵养区域<sup>[1]</sup>。其南麓腹地的木里煤矿区(主要包括聚乎更、江仓等矿区)属于高海拔地区,区内广泛分布大片冻土和高寒草甸,植被生长缓慢、生长期短、抗干扰能力弱<sup>[2]</sup>。自 2003 年起,该区域经历大规模露天煤炭开采活动,形成巨大的露天采坑、堆积如山的剥离废渣(渣山)及大面积的裸露煤层<sup>[3]</sup>。这种高强度、大规模的采矿活动,严重破坏矿区原有的水资源、植被资源和土地资源,导致生态系统难以自然恢复到原有状态<sup>[4]</sup>。有研究<sup>[5]</sup>表明,采矿活动形成 11 个规模不等的采坑和 19 座渣山,渣山最高接近 50 m,直接侵占并压占原有高寒草地植被。同时,采坑导致周边地表水与降水汇流泄漏,潜水位下降,引发植被退化与覆盖率下降的问题<sup>[6]</sup>,表层土壤的频繁剥离和搬运加速土壤养分流失,致使土壤严重退化<sup>[7]</sup>,区域水源涵养功能持续减弱。采坑、渣山及工业场地等工程景观与周边自然生境极不协调,严重威胁区域生态完整性与可持续发展<sup>[8]</sup>。因此,高寒脆弱环境下的木里矿区生态修复已成为一项迫切而典型的科学问题和实践挑战,其生态退化问题在青藏高原矿产资源开发区域具有重要代表性。

高寒矿山生态修复是改善矿区生态环境质量的重要举措,同时也是我国社会主义生态文明建设的重要一环。尽管人工建植<sup>[9]</sup>及渣山地形地貌重塑、植被重建<sup>[10]</sup>等集成技术在促进高寒矿区植被快速恢复、改善土壤结构方面已取得一定成效,并被推广应用于青海省农牧区的水土保持与草场重建(如退耕还林还草)中<sup>[11-12]</sup>,但当前矿区生态修复研究主要集中于低海拔平原地区,而受限于高海拔、缺氧、寒冷等恶劣环境,高寒矿区生态修复研究相对薄弱<sup>[13-17]</sup>。

现有的修复实践虽能识别采矿引发的生态破坏类型并制定针对性修复策略,但对于像木里这样经历长期修复的典型区域,不同治理模式下的修复效果、修复时效性及生态可持续性等关键科学问题,仍缺乏系统评估和深入探究,成为制约高寒矿区生态修复质量与成效的瓶颈。

本研究通过对木里典型矿区采矿坑内植被群落特征、土壤结构和养分进行调查分析,以研究煤炭开采对高寒草地植被和土壤的受损影响;选取典型修复样地,分析不同年限与地段生态系统的恢复成效及植被-土壤修复特征,总结木里矿区修复成果,为后续实践提供指导,并为高寒矿区生态修复及土壤植被重构提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

木里矿区地处青藏高原东北缘(37°30′~38°15′N, 98°50′~100°50′E),空间上由聚乎更矿区(含哆嗦贡玛)、江仓矿区、弧山矿区三大区域构成,聚乎更矿区和江仓矿区较为典型<sup>[18]</sup>(表 1)。该区域呈典型高寒大陆性气候特征,平均海拔 4 000 m,最高气温 19.8℃,最低气温为-35.6℃,年平均气温-4.2℃;降水主要集中于夏季,年降水量 477.1 mm,蒸发量达 1 049.9 mm<sup>[7]</sup>。木里高寒矿区原有的土壤类型主要以高山草甸土和沼泽土为主<sup>[19]</sup>,矿区植被类型可以分为高寒沼泽草甸类和高寒草甸类<sup>[20]</sup>。其中,高寒沼泽草甸为矿区的主要植被类型,通常与高寒草甸类植被镶嵌交错,原生草地植物主要有西藏嵩草(*Carex tibetikobresia*)、木里嵩草(*Carex muliensis*)、矮生嵩草(*Carex alatauensis*)、高山嵩草(*Carex parvula*)、三脉梅花草(*Parnassia trinervis*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)和垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等。

表1 木里高寒矿区典型区域样地情况  
Table 1 Sample plot conditions in typical regions of Muli alpine mining area

研究样地	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	样地情况
木里原生草地	38°08'39"	99°11'18"	3 887	土壤类型为高山草甸土和沼泽土。植被覆盖率高,总盖度90%~95%,其中,西藏嵩草( <i>Carex tibetikobresia</i> )占45%~60%,木里藁草( <i>Carex muliensis</i> )占35%~40%,矮生嵩草( <i>Carex alatauensis</i> )占20%,高山嵩草( <i>Carex parvula</i> )占10%,三脉梅花草( <i>Parnassia trinervis</i> )占2%~3%
聚乎更5号井(人工修复2a矿区)	38°06'59"	99°08'07"	4 125	修复前土壤类型为采矿堆积的渣土与煤矸石混合基质。修复方式为粉碎渣土、将有机肥与羊板粪混合,对土壤进行改良,同时采取“覆、捡、拌、耙、种、镇”种草复绿七步工作法 <sup>[19]</sup> ,在人工建植过程中,种植的草种主要为垂穗披碱草( <i>Elymus nutans</i> )、草地早熟禾( <i>Poa pratensis</i> ),且全部采用可降解无纺布进行养护。目前,采矿坑和边坡均人工种植了大面积的植被,总盖度85%~95%,其中,草地早熟禾占75%,垂穗披碱草占20%,为2021年修复
江仓2号井(人工修复9a矿区)	38°02'21"	99°34'17"	3 786	修复前土壤类型为采矿堆积的地下冻土、岩石、煤矸石混合基质。修复方式为采用“削坡减重”和“回填压脚”相结合的边坡稳定控制技术,确保边坡的长期稳定,同时使用羊板粪和有机肥改善土壤肥力,选择草地早熟禾等乡土草种进行混播,用以提高植被的成活率和适应性,并铺设无纺布进行养护 <sup>[19]</sup> 。目前,边坡植被分布稀疏,总盖度25%~45%,其中,垂穗披碱草( <i>Elymus nutans</i> )占25%,草地早熟禾( <i>Poa pratensis</i> )占15%,甘肃马先蒿( <i>Pedicularis kansuensis</i> )占10%,矮火绒草( <i>Leontopodium nanum</i> )占2%,为2014年修复

## 1.2 植被群落调查方法

于2023年9月中下旬,对木里煤矿区的木里原生草地、聚乎更5号矿坑内2021年人工建植草地及江仓2号矿东坡2014年人工播种草地进行植物群落调查。在每个样地随机选取4个0.25 m×0.25 m的样方,记录植物群落的物种组成,测定高度与盖度。随后,对样方内群落物种分种取样以测算地上生物量,并采用根钻法(直径7 cm土钻)于各样方选取6个取样点,分2组各3个取样点,皆是采集0~10 cm土层土壤样品,一组用于分析土壤养分,另一组作根系生物量样品。根系生物量样品经筛洗、去除杂质后,于65℃干燥箱烘干48 h达恒重后进行称重,测定植物群落地下根系生物量。

## 1.3 土壤养分测定方法

在上述植被群落调查的样地采集土壤样品,采集的土样封装于自封袋中。用1 mm孔径的筛子将自封袋中的新鲜土样过筛,挑出肉眼可见的根系,并将其分为2份:1份保存于4℃下用于含水率的测定;另外1份风干用于测定土壤理化性质。其中,全碳(total carbon, TC)和全氮(total nitrogen, TN)以干式燃烧法用元素分析仪(2400 II CHNS/O, Perkin-Elmer, 美国)测定;无机碳(inorganic carbon, IC)以体积测量法用无机碳分析仪(Calcimeter 08.53, Eijkelkamp, 荷兰)测定;有机碳(organic carbon, OC)则由TC与IC的差值计算获得;有效磷(available phosphorus, AP)采用0.5 mol/L碳酸氢钠浸提一铜

钼抗比色法测定;含水率采用烘干法(105±2℃)测定;pH采用酸度计中和滴定法(PHS-3C, 水土比为2.5:1)测定。

## 1.4 数据处理

1.4.1 灰色关联度分析 灰色关联度分析能够清晰地呈现评估序列与最优序列之间的关联程度。以郭秀云<sup>[21]</sup>及刘文瑾等<sup>[22]</sup>的研究作为参考,将测定的11个土壤和植物指标作为一个灰色系统,选取原生草地的相关指标为最优序列 $Z_0$ ,计算不同修复年限的指标与构建的理想修复环境(原生草地)的关联度,关联度越大,说明该修复处理的综合恢复效果越好;反之则越差。

计算参评指标 $Z_i$ 的标准差系数,进行归一化处理,最后计算权数( $w_i$ )。

$$w_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} / \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad (1)$$

式中: $i$ 为评价对象; $n$ 为样本数量; $\sigma_i$ 和 $\mu_i$ 分别为 $Z_i$ 的平均值和标准差。

利用灰色关联系数公式计算第 $j$ 个评价对象 $E_j$ 与最优序列 $Z_0$ 的关联系数 $\epsilon_i(E_j, Z)$ :

$$\epsilon_i(E_j, Z) = \frac{\min_i \min_j |E_{ij} - Z_i| + \rho \max_i \max_j |E_{ij} - Z_i|}{|E_{ij} - Z_i| + \rho \max_i \max_j |E_{ij} - Z_i|} \quad (2)$$

式中: $\min_i \min_j |E_{ij} - Z_i|$ 和 $\rho \max_i \max_j |E_{ij} - Z_i|$ 分别为两级极小差和两级极大差; $|E_{ij} - Z_i|$ 为评价对象与最优序列的绝对差; $\rho$ 为分辨率(分辨系数),一般取0.5。

最后,计算第 $j$ 个评价对象 $E_j$ 与最优向量 $Z_0$ 的关联度 $R(E_j, Z)$ :

$$R(E_j, Z) = \sum_{i=1}^n w_i \times \varepsilon_i(E_j, Z) \quad (3)$$

数据整理和初步处理使用Excel 2021软件完成,并运用SPSS 26软件对植物群落生物量及土壤养分进行邓肯分析和单因素方差分析(One-way ANOVA),表格数据以“平均数±标准差”形式表示。使用SPSSAU进行灰色关联度分析,Origin 2022软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 煤炭开采后高寒矿区植被及土壤养分的受损特征

2.1.1 煤炭开采后高寒矿区植被的受损特征 木里原生草地以湿生植物为主,植被生长密集,总盖度达90%~95%。其中西藏嵩草盖度高达45%~60%,木里藁草达35%~40%,其次为矮生嵩草和高山嵩草,分别占20%和10%,三脉梅花草仅为2%~3%。原生草地地上和地下生物量分别可达182.64、4 571.26 g/m<sup>2</sup>。煤炭开采后形成的渣山覆盖有大量的煤矸石,现场调查发现,这些渣山表面呈现深灰至黑色,

结构松散,地表物质以碎石和煤屑为主,缺乏连续的表土层。渣山表面基本无植被定居,呈现近乎完全裸露的状态,且在调查样方内,未见明显的地上植物体。对表层土壤进行初步观察,未发现有效根系网络。综合观测结果可知,煤炭开采形成的煤矸石渣山区域表现出植被与地上及地下生物量近乎缺失的状态。

2.1.2 煤炭开采后高寒矿区土壤养分的受损特征与木里原生草地相比,木里5号矿坑与煤渣山的土壤含水率、全碳、全氮及有机碳含量均显著降低( $p < 0.05$ ) (表2)。矿坑底部土壤含水率(42.71%)、全碳(149.55 g/kg)、全氮(8.58 g/kg)、有机碳(144.09 g/kg)较原生草地降幅显著( $p < 0.05$ ),分别降低32.7%、24.3%、41.6%、27.0%;渣山相应指标(含水率5.79%,全碳61.43 g/kg,全氮1.73 g/kg,有机碳59.08 g/kg)降幅更大,分别降低90.9%、68.9%、88.2%、70.1%。矿坑底部土壤有效磷含量显著增加至163.4 mg/kg ( $p < 0.05$ ),原因是在对矿坑底部进行人工修复的过程中,利用羊板粪进行人工覆土,致使土壤中速效养分含量极高。矿坑底部和渣山土壤均呈弱碱性( $pH > 7$ ),且均显著大于原生草地( $p < 0.05$ )。

表2 土壤养分的受损特征

Table 2 Characteristics of soil nutrient damage

研究样地	含水率/%	酸碱度(pH)	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	全碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )
木里原生草地	63.44±4.17a	7.13±0.14b	6.30±1.12b	197.6±11.09a	14.70±0.42a	197.48±11.08a
木里5号矿坑底部	42.71±0.57b	7.88±0.24a	163.4±33.19a	149.55±5.14b	8.58±0.62b	144.09±5.06b
木里5号矿渣山	5.79±2.01c	8.06±0.19a	0b	61.43±12.24c	1.73±0.06c	59.08±12.02c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

### 2.2 不同修复年限矿区植被及土壤养分的修复特征

2.2.1 不同修复年限矿区植被的修复特征 以草地早熟禾和垂穗披碱草为修复种,在木里高寒矿区人工建植恢复草地,并以木里原生草地为对照,对不同修复年限矿区人工草地的植物群落盖度和生物量进行对比(表3)发现,在木里原生草地中,西藏嵩草的盖度[(39.33±28.92)%]及生物量[(157.97±46.23)g/m<sup>2</sup>]均高于其他物种;在人工修复2 a草地中,植物群落由种植的草地早熟禾[盖度(70.50±14.85)%,生物量(383.48±157.14)g/m<sup>2</sup>]和垂穗披碱草组成,草地早熟禾在盖度和生物量上均占优势;而在人工修复9 a草地中,除建植的草地早熟禾[盖度(13.25±8.69)%,生物量(55.64±35.81)g/m<sup>2</sup>]和垂穗披碱草持续存在外,经过自然恢复还出现甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)和矮火绒草(*Leontopodium nanum*)等物种,其中草地早熟禾的盖度和生物量仍为该草地最高。煤炭开采形成的渣山覆盖大量煤矸石,植被完全缺失,地上与地下生

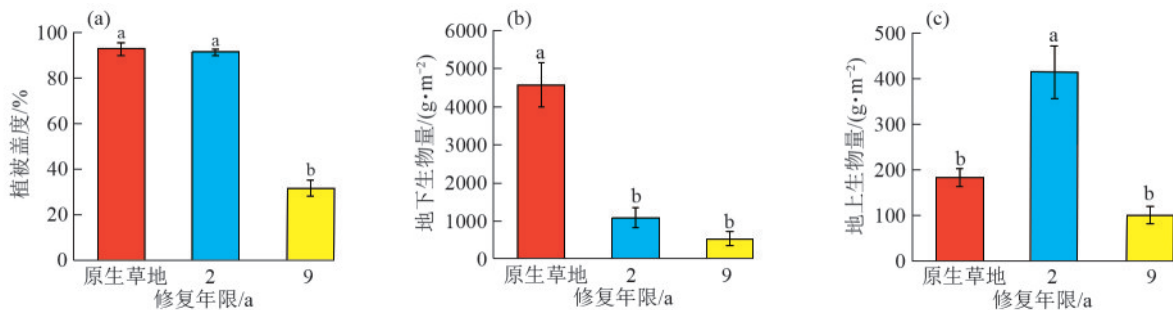
物量均趋近于零,相比之下,人工建植区域植被特征得到显著改善。与木里原生草地相比(图1),人工修复草地(2、9 a)的地下生物量均显著偏低( $p < 0.05$ );修复2 a的人工草地地上生物量显著高于原生草地( $p < 0.05$ );修复9 a草地的植被盖度显著低于原生草地( $p < 0.05$ )。在人工修复草地内部比较发现,修复9 a的植被盖度及地上生物量均显著低于修复2 a( $p < 0.05$ )。

2.2.2 不同修复年限矿区土壤养分的修复特征 与原生草地相比(表4),人工修复草地的土壤含水率、全碳、全氮和有机碳均显著降低( $p < 0.05$ ),且随修复年限增加,降低幅度越大。与修复2 a相比,修复9 a草地的土壤含水率、全碳、全氮和有机碳分别降至15.84%、114.88、2.08、114.68 g/kg,降幅分别为62.9%、23.2%、75.8%和20.4% ( $p < 0.05$ );两地土壤均呈弱碱性( $pH > 7$ )且显著大于原生草地( $p < 0.05$ );修复2 a草地的土壤有效磷含量显著高于原生草地( $p < 0.05$ )。

表 3 高寒矿区不同修复年限草甸植物群落的盖度及生物量特征

Table 3 Coverage and biomass characteristics of meadow plant communities after different restoration years in alpine mining area

植物种类	木里原生草地		人工修复 2 a 草地		人工修复 9 a 草地	
	盖度/%	生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	盖度/%	生物量/(g·m <sup>-2</sup> )	盖度/%	生物量/(g·m <sup>-2</sup> )
藏高草 ( <i>Kobresia tibetica</i> )	39.33±28.92	157.97±46.23	0	0	0	0
苔草 ( <i>Carex spp</i> )	25.00±7.07	48.76±29.80	0	0	0	0
三脉梅花草 ( <i>Parnassia trinervis</i> )	1.50±0.71	0.18±0.15	0	0	0	0
矮嵩草 ( <i>Kobresia humilis</i> )	14.33±8.14	20.43±15.80	0	0	0	0
小嵩草 ( <i>Kobresia pygmaea</i> )	15.00±8.00	28.43±22.76	0	0	0	0
早熟禾 ( <i>Poa pratensis</i> )	0	0	70.50±14.85	383.48±157.14	13.25±8.69	55.64±35.81
垂穗披碱草 ( <i>Elymus nutans</i> )	0	0	19.50±14.85	61.36±36.32	10.25±3.30	32.36±11.28
甘肃马先蒿 ( <i>Pedicularis kansuensis</i> )	0	0	0	0	7.25±3.59	11.76±5.72
矮火绒 ( <i>Leontopodium nanum</i> )	0	0	0	0	2.00±0.50	5.60±0.70



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著(p<0.05)。

图 1 矿区不同修复年限草地植物群落总生物量特征

Fig. 1 Total biomass characteristics of grassland plant communities after different restoration years in mining area

2.3 不同年限的修复效果评价

为系统地评估不同年限下高寒矿区的修复效果,本研究选取 11 项评价指标,包括植被特征(高度、盖度、地上生物量、地下生物量)和土壤养分(含水率、酸碱度、有效磷、全碳、全氮、有机碳、无机碳)。基于对以上指标的分析,将原生草地设置为理想修复状态的参照序列,与修复年限(2、9 a)进行比较和相关性评估。将所有评估数据进行均值化处理,并利用关联系数计算公式,得到不同修复年限相较于理想状态的关联系数,并进一步计算得出关联度,量化不同年限的综合修复效能。结果表明,以原生草地为最优序列时,修复 2 a 的各项指标关联度为 0.911,高于修复 9 a 的关联度。因此,修复 2 a 的效果更接近于原生草地。

2.4 植被特征与土壤养分间的相关性分析

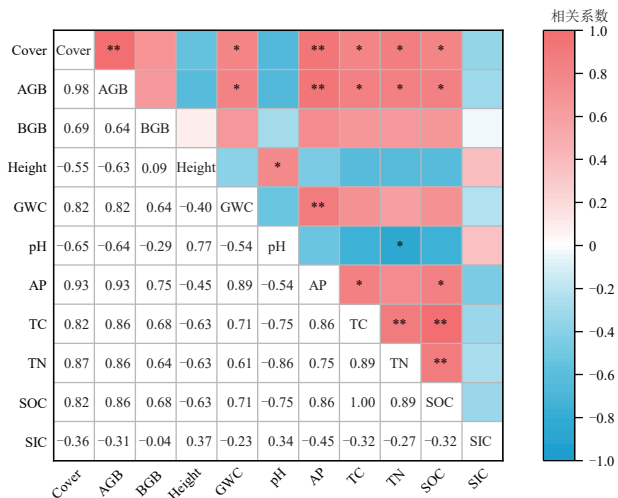
选取植被盖度、地上生物量、地下生物量及株高作为植被修复评价指标,同时测定土壤含水率、pH、有效磷含量及全碳、全氮、有机碳、无机碳等关键土壤参数。

探讨不同修复阶段植被特征与土壤理化性质的内在联系(图 2)表明,植被盖度与地上生物量、土壤有效磷之间呈极显著正相关(p<0.01),与土壤含水率、全碳、全氮和有机碳之间呈显著正相关(p<0.05)。植被地上生物量与土壤有效磷呈极显著正相关(p<0.01),并与土壤含水率、全氮、全碳及有机碳呈显著正相关(p<0.05)。株高与土壤 pH 呈显著正相关(p<0.05)。

表4 高寒矿区不同修复年限草地土壤养分的修复特征

Table 4 Characteristics of grassland soil nutrient restoration after different restoration years in alpine mining area

研究样地	含水率/%	酸碱度(pH)	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	全碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )
木里原生草地	63.44±4.17a	7.13±0.14b	6.30±1.12b	197.6±11.09a	14.70±0.42a	197.48±11.08a
人工修复2a草地	42.71±0.57b	7.88±0.24a	163.4±33.19a	149.55±5.14b	8.58±0.62b	144.09±5.06b
人工修复9a草地	15.84±2.94c	7.74±0.13a	3.50±0.95b	114.88±9.22c	2.08±0.22c	114.68±9.18c



注: Cover为植被盖度; AGB为地上生物量; BGB为地下生物量; Height为植被高度; GWC为土壤含水率; pH为酸碱度; AP为有效磷; TC为全碳; TN为全氮; SOC为土壤有机碳; SIC为土壤无机碳; \*表示显著相关( $p < 0.05$ ); \*\*表示极显著相关( $p < 0.01$ )。

图2 植被主要特征与土壤各养分间的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between major vegetation characteristics and soil nutrients

### 3 讨论

#### 3.1 煤炭开采对高寒草地的影响及植被土壤受损特征探讨

高寒草甸是维持木里矿区生态系统稳定的关键植被类型,其原生群落以西藏嵩草和木里藁草为优势种。为准确评估采矿活动对植被的干扰程度,本研究首先调查矿区未受开采影响的典型原生高寒草地发现,其植被覆盖率达92.75%,显著高于2003年大规模开采前区域植被覆盖率(77.43%)<sup>[17]</sup>。此结果明确了在无干扰条件下矿区原生草地的生态本底水平,为揭示开采导致的植被退化提供重要参照。煤炭开采后,矿区景观呈明显的破碎化与斑块化特征,金润等<sup>[23]</sup>研究指出,开采过程中的土地压占与损毁可导致植被永久性丧失,使局部生物多样性降为零。本研究结果与之高度一致,即煤渣山区域的植被覆盖率降至零,生物量完全丧失。造成此现象的主要原因有3个方面:首先,采坑与渣山的形成彻底改变地表微地形,使适应平坦或低洼生境的植物群落失去生存基础;其次,高寒地区植物生长周期短、更新缓慢,开采干扰及其引发的重金属污染进一步

抑制植被恢复;最后,高寒生态系统本身脆弱,自我修复能力极弱,使得矿区植被破坏呈现长期不可逆的特征,生态恢复面临严峻挑战。

在土壤方面,露天开采形成的渣山严重破坏土壤结构和水肥保持能力。郑元铭等<sup>[24]</sup>研究指出,渣山虽具一定初始养分,但有机碳和全氮的含量总体偏低,难以支持植物持续生长;李凤明等<sup>[3]</sup>研究发现,木里矿区经开采后的区域表层所存在的风化物少、土层薄、养分含量匮乏,本研究进一步验证了该结论。本试验中,矿区形成的渣山土壤中含水率、全氮、全碳及有机碳质量分数均表现为下降趋势,速效磷质量分数极低,表明煤炭开采不仅直接剥离植被,更导致土壤水分和养分的严重流失,形成“贫瘠-干旱-无植被”的恶性循环,加剧水土流失和系统崩溃。

#### 3.2 不同修复年限矿区生态系统的修复特征探讨

植被重建是矿区生态修复的核心,但在高寒脆弱的木里矿区,自然恢复进程极为缓慢,人工干预对于启动生态修复进程至关重要<sup>[25]</sup>。本研究表明,人工建植能在短期内(修复2a)取得显著成效,植被覆盖度迅速提升至91.25%,地上生物量甚至显著高于原生草地与修复9a草地,表现出显著的生态修复效果( $p < 0.05$ ),与金立群等<sup>[25]</sup>的研究结果一致,即初期高投入(如播种、施肥等)对植被快速建成的促进作用。其中,垂穗披碱草与草地早熟禾表现优异,其优势可能分别源于根际耐寒促生菌与较高的脂肪酸含量<sup>[26-28]</sup>等抗逆特性。然而,修复效果随年限延长呈现“快速响应-持续衰减”特征,修复9a后,植被覆盖度与生物量均呈下降趋势,与杨鑫光等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。此现象主要归因于2个方面:其一,现行的人工建植周期普遍短于5a,缺乏持续的播种更新、养分补给及地表覆盖等维护措施<sup>[28]</sup>;其二,高寒环境固有的低温限制植物群落的自疏作用,导致系统在人为干预减弱后难以维持初期的旺盛生长<sup>[29]</sup>。

土壤性质的演变进一步印证上述模式。短期修复(2a)后,由于采用羊板粪改良与表层覆土重构技术,土壤有效磷等养分显著提升( $p < 0.05$ ),pH也因有机肥的弱碱性而升高。但长期(9a)来看,土壤含水率、全氮、全碳及有机碳质量分数均显著降低( $p <$

0.05),表明初始改良效应的不可持续性,皆与前人<sup>[29]</sup>的研究结果相一致。主要是由于高寒地区土壤熟化进程缓慢,短期内输入的养分易被消耗或流失,缺乏持续的外源补给与稳定的植被-土壤系统,最终使养分库无法有效累积。

### 3.3 不同修复年限的生态效益评价

灰色关联度法作为一种成熟的系统综合评价方法,在矿区生态修复效果评估中具有良好的适用性与可靠性。张皓<sup>[30]</sup>基于此方法构建矿山生态环境修复效果评价模型,其评价结果相对一致率达99%以上,验证该模型评价的精准性,为本研究采用灰色关联度法进行生态效益分析提供了方法学支持,也增强了平均结果的可信度。本研究通过对人工修复2、9 a草地与原生草地的多项指标进行灰色关联分析发现,人工修复2 a草地的综合生态指标与原生草地的关联度最高,表明其在植被结构(盖度、高度、生物量)和土壤养分(有机碳、有效磷、全氮、全碳等)方面更接近原生生态系统状态,反映短期高强度人工干预在快速改善矿区生态景观特征方面的显著优势。通过人工建植与羊板粪施用等措施,植被得以迅速建植,土壤养分在短期内得到有效补充,从而形成与原生系统较高的相似性。

然而,修复9 a草地的关联度相对较低,说明其生态效益随修复年限延长出现衰减,揭示当前修复模式的潜在问题,即短期人工干预虽能快速启动生态进程,但未能有效推动系统向自我维持的稳态发展。随着人工管理力度减弱,系统转而依赖自然恢复力,而在高寒矿区严苛的环境中,养分的持续供给能力不足,群落结构稳定性差,导致植被与土壤指标逐步退化,与原生草地的差距重新拉大。

### 3.4 不同修复年限植被特征与土壤养分之间的关系

随着高寒矿区人工建植时间的延长,除地下生物量、土壤有机碳和无机碳以外,其余各项指标与植被特征之间均具有一定的相关性,说明在植被修复的过程中,土壤各营养元素之间具有复杂关系。植被盖度和地上生物量与土壤含水率、全碳、全氮和有机碳呈显著正相关( $p < 0.05$ ),与有效磷呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),说明外源养分投入能有效激发植被恢复,但是这样的投入难以在长期维持,一旦管理减弱,矿区生态系统便因内部养分循环功能不足而衰退。

## 4 结论

1)煤炭开采严重破坏高寒草甸生态系统的原生植被群落结构与土壤肥力。尽管以覆土和人工建植为代表的短期干预能迅速改善植被覆盖度与土壤养分,但修复区生态系统并未因此走向自我调节。随着恢复年限延长,在人工干预减弱后,植被与土壤关

键指标均呈现退化趋势,显示出当前修复策略对持续管理的过度依赖。

2)灰色关联分析进一步证实,短期修复效果在结构上更接近原生状态,而长期恢复轨迹则偏离预期目标。因此,高寒矿区的生态修复不能仅依赖于初期的人工干预,而应着眼于促进生态系统的自我恢复能力。未来的修复策略需重视人工引导与自然过程的有机结合,以实现区域生态系统的真正稳定与可持续演替。

### 参考文献:

- [1] 李凤明,丁鑫品,白国良,等.高原高寒露井联合矿区生态地质环境综合治理模式[J].煤炭学报,2021,46(12):4033-4044. LI F M, DING X P, BAI G L, et al. Eco-geological environment comprehensive management model of combined mining area of open-pits and underground mines in frigid plateau region [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(12): 4033-4044.
- [2] 卢荣坤,夏伦娣.高原高寒露天矿区生态修复及环境影响因素分析[J].中国井矿盐,2023,54(3):33-35. LU R K, XIA L D. Analysis of ecological restoration and environmental factors in alpine open-pit mining area [J]. China Well and Rock Salt, 2023, 54(3): 33-35.
- [3] 李凤明,白国良,韩科明.木里矿区生态环境受损特征及治理方法研究[J].煤炭工程,2021,53(10):116-121. LI F M, BAI G L, HAN K M. Characteristics and treatment methods of ecological environment damage in Muli mining area [J]. Coal Engineering, 2021, 53(10): 116-121.
- [4] 赵欣,王佟,李聪聪,等.露天矿区生态地质层修复中地形重塑层的构建技术及应用[J].煤田地质与勘探,2023,51(7):113-122. ZHAO X, WANG T, LI C C, et al. Construction and restoration technology of terrain remodeling layer in the restoration of ecological geological layer in open-pit mining areas [J]. Coal Geology and Exploration, 2023, 51(7): 113-122.
- [5] 王锋利,王佟,方惠明,等.祁连山南麓露天采坑生态环境修复技术研究[J].中国煤炭地质,2021,33(8):49-55. WANG F L, WANG T, FANG H M, et al. Study on environment rehabilitation technology of open pits in south foot of Qilian Mountains [J]. Coal Geology of China, 2021, 33(8): 49-55.
- [6] 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 Z X, LI X L, ZHANG J, 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.
- [7] 段新伟,左伟芹,杨韶昆,等.高寒缺氧矿区草原生态恢复探究:以青海省木里煤田为例[J].矿业研究与开发,

- 2020,40(2):156-160.
- DUAN X W, ZUO W Q, YANG S K, et al. Study on ecological restoration of grassland in alpine and anoxic mining areas: Taking the Muli coal field in Qinghai Province as an example [J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 156-160.
- [8] FU J, HUANG B. Involvement of antioxidants and lipid peroxidation in the adaptation of two cool-season grasses to localized drought stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2001, 45(2): 105-114.
- [9] 张振佳, 曹银贵, 王舒菲, 等. 平朔黄土露天矿区复垦地表层土壤微生物与酶活性分析 [J]. 生态学报, 2021, 41(1): 110-123. 梁峰伟, 刘士杰, 霍豪, 等. 木里煤矿生态环境修复治理模式 [J]. 煤炭与化工, 2023, 46(5): 112-114.
- ZHANG Z J, CAO Y G, WANG S F, et al. Characteristics and differences of surface soil microbial population and enzyme activities in opencast mining area of Pingshuo [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 110-123.
- [10] 梁峰伟, 刘士杰, 霍豪, 等. 木里煤矿生态环境修复治理模式 [J]. 煤炭与化工, 2023, 46(5): 112-114.
- LIANG F W, LIU S J, HUO H, et al. Ecological environment restoration and management mode of Muli coal mine [J]. Coal and Chemical Industry, 2023, 46(5): 112-114.
- [11] 道日娜, 张英, 苏贝贝, 等. 高寒煤矿渣山植被建植年限对土壤细菌多样性的影响 [J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2590-2599.
- DAO R N, ZHANG Y, SU B B, et al. Effects of construction years of coal mine slag mountain grass on soil bacterial diversity [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(10): 2590-2599.
- [12] 张立, 徐辉, 王彦君, 等. 青海省祁连山地区某煤矿地质环境问题及生态环境修复研究 [J]. 能源与环保, 2023, 45(8): 87-92.
- ZHANG L, XU H, WANG Y J, et al. Study on geological environment problem and ecological environment restoration of a coal mine in Qilian Mountain of Qinghai Province [J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(8): 87-92.
- [13] 乔千洛, 杨文权, 赵帅, 等. 种草基质对木里矿区植被恢复效果的影响 [J]. 草业科学, 2022, 39(9): 1782-1792.
- QIAO Q L, YANG W Q, ZHAO S, et al. Effects of grass planting substrate on vegetation restoration in the Muli mining area [J]. Pratacultural Science, 2022, 39(9): 1782-1792.
- [14] ZHAO Z Q, SHAHROUR I, BAI Z K, et al. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China [J]. European Journal of Soil Biology, 2013, 55: 40-46.
- [15] LI S Q, YANG B S, WU D M. Community succession analysis of naturally colonized plants on coal gob piles in Shanxi mining areas, China [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2008, 193(1): 211-228.
- [16] 王锐, 李希来, 张静, 等. 不同覆土处理对青海木里煤田排土场渣山表层土壤基质特征的影响 [J]. 草地学报, 2019, 27(5): 1266-1276.
- WANG R, LI X L, ZHANG J, et al. Effects of different soil-covering thicknesses on the characteristics of coalmine spoils in the mulicoalfield of Qinghai Province [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(5): 1266-1276.
- [17] 王锐, 李希来, 马钰, 等. 青海圣雄煤矿煤矸石堆积对周边高寒湿地植被和土壤的影响 [J]. 土壤, 2020, 52(2): 386-393.
- WANG R, LI X L, MA Y, et al. Effects of coal gangue accumulation in Shengxiong coal mining of Qinghai on vegetation and soil of surrounding alpine wetland [J]. Soils, 2020, 52(2): 386-393.
- [18] 才永吉, 宁黎平, 程璐. 江仓露天矿区生态环境评价体系研究 [J]. 煤炭工程, 2015, 47(12): 127-129.
- CAI Y J, NING L P, CHENG L. Ecological environment evaluation system of Jiangcang open-pit mining area [J]. Coal Engineering, 2015, 47(12): 127-129.
- [19] 李永红, 李希来, 唐俊伟, 等. 青海木里高寒矿区生态修复“七步法”种草技术研究 [J]. 中国煤炭地质, 2021, 33(7): 57-60.
- LI Y H, LI X L, TANG J W, et al. Study on " seven-step " grass planting technology for ecological rehabilitation of frigid zone muri mining area in Qinghai [J]. Coal Geology of China, 2021, 33(7): 57-60.
- [20] 李聪聪, 王佟, 王辉, 等. 木里煤田聚乎更矿区生态环境修复监测技术与方法 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1451-1462.
- LI C C, WANG T, WANG H, et al. Monitoring technology and method of ecological environment rehabilitation and treatment in Jvhugeng mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1451-1462.
- [21] 郭秀云. 灰色关联法在区域竞争力评价中的应用 [J]. 统计与决策, 2004, 20(11): 55-56.
- GUO X Y. Application of grey relational method in regional competitiveness evaluation [J]. Statistics and Decision, 2004, 20(11): 55-56.
- [22] 刘文谨, 蒋福祯, 祁凯斌, 等. 不同施肥量和播种量对高寒矿区植被恢复和土壤质量的影响及综合评价 [J]. 草业学报, 2025, 34(5): 27-39.
- LIU W J, JIANG F Z, QI K B, et al. Effects of different fertilization and sowing amounts on vegetation restoration and soil quality in alpine mining areas and comprehensive evaluation [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(5): 27-39.
- [23] 金润, 宋明丹, 祁凯斌, 等. 青海省木里露天煤矿区生态修复技术现状及展望 [J]. 青海农林科技, 2023(2): 40-43.
- JIN R, SONG M D, QI K B, et al. Current status and outlook of ecological restoration technology in the open-pit coal mine area of Muli, Qinghai Province [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2023(2): 40-43.

(下转第 374 页)