

高寒露天矿山生态修复实践

史兴萍¹,刘招平²,尚 卿¹,蓝晓聪²,李希来³,张 明¹,张 全¹

(1. 青海威斯特铜业有限责任公司; 2. 紫金矿业集团股份有限公司; 3. 青海大学农牧学院)

摘要:针对高寒矿山特殊气候与地质条件导致的土地复垦难题,如植被恢复困难、土壤资源匮乏、施工周期短等,以德尔尼铜矿为研究对象,探索适用于高寒露天金属矿山的土地复垦方法,为同类矿区可持续发展提供范例。分析了德尔尼铜矿概况及土地复垦技术瓶颈;采用土壤模拟、盆栽种植等试验方法,研究蛇纹石渣土与当地原土的配制和改良技术,确定种植基质的优化方案,即蛇纹石渣土与原土配比为6:4。通过3因素3水平正交实验,确定基质改良剂最佳用量分别为羊板粪 3.12 kg/m^2 、腐殖酸 1 kg/m^2 和保水剂 12 g/m^2 。该研究构建了“本地渣土利用+改良剂优化+喷播技术”的高寒矿区复垦模式,不仅能有效解决高寒露天矿山土地复垦难题,还可推广应用于华北半湿润地区及其他季节性干旱、雨量集中的建设项目区域,为矿山废弃地生态修复提供了创新思路与实践路径。

关键词:高寒;露天矿山;生态修复;土地复垦;土壤改良;腐殖酸

中图分类号:TD11 P618.51

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)11-0120-06

doi:10.11792/hj20251117

引 言

在全球对矿产资源需求持续增长的背景下,矿山开采活动日益频繁,由此引发的土地破坏与生态退化问题愈发严峻^[1-2],尤其高寒地区的矿山,土地复垦因特殊地质与气候条件(如低温、冻土、土壤稀缺等)面临更大挑战^[3-4]。传统客土法在高寒地区矿山土地复垦中曾被广泛应用,即从外地搬运适宜的土壤至矿区用于复垦^[5-6]。然而,这种方法在实际操作中暴露出诸多缺点。高寒地区通常地形复杂、交通不便,客土法运输成本极高,这不仅耗费大量的人力、物力和财力,还限制了客土的供应量,难以满足矿山大面积土地复垦的需求^[7-8]。而且,客土与当地的生态环境兼容性较差,可能无法适应高寒地区的低温、冻土等特殊条件,导致土壤结构不稳定,保水保肥能力不足,影响植被的生长和存活^[9]。

为解决高寒地区矿山缺土问题,以德尔尼铜矿为例,创新性研发了一种土壤和蛇纹石渣土改良喷播技术^[10]。该技术通过将本地有限的土壤与蛇纹石渣土进行合理配比改良,利用喷播的方式均匀覆盖于矿区地表。蛇纹石富含多种矿物质元素,能够为土壤提供丰富的养分,改善土壤的理化性质,增强土壤的保水保肥能力,促进微生物的生长与繁殖,从而为植被生长创造良好的土壤环境^[11]。同时,喷播技术可以根据

矿区地形和植被需求,精确控制土壤和改良剂的喷洒量与分布范围,提高复垦效率,有效解决了原始土壤少和客土法的诸多弊端,为高寒地区矿山土地复垦开辟了新的途径。“本地渣土利用+改良剂优化+喷播技术”的高寒矿区复垦模式,对于推动高寒地区矿山生态修复、实现矿山可持续发展具有重要的现实意义。

1 研究区概况

1.1 地理与气候特征

德尔尼铜矿隶属于紫金矿业集团股份有限公司全资子公司青海威斯特铜业有限责任公司,位于青海省果洛藏族自治州玛沁县大武乡,属典型高原气候,四季区分不明显,仅有冷暖季差异。每年10月至次年4月是冷季,多年平均气温 $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温 $-26.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;5—9月为暖季,平均气温 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温 $19.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,7—8月最热,平均气温 $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,此期间绝对湿度与相对湿度高于冷季。多年平均降雨量 $406.4\sim 575.6\text{ mm}$,蒸发量 $1\,149.4\text{ mm}$,相对湿度 56% , 80% 以上降水量集中于暖季,多暴雨。矿区大气压约 62 kPa ,植被以高寒草甸类为主,是当地牧民天然草场,优势种有小嵩草、矮嵩草等,草高 $5\sim 10\text{ cm}$,覆盖度 $70\%\sim 90\%$ 。山地阴坡及峡谷地带生长灌丛草甸。矿区土壤贫瘠,保水性差,土层薄,多在 $0\sim 20\text{ cm}$ 。

收稿日期:2025-07-14; 修回日期:2025-08-20

基金项目:青海省科技计划项目(2021-0302-ZJC-0130)

作者简介:史兴萍(1980—),女,高级工程师,研究方向为露天矿山安全管理、环境管理、高寒矿山生态修复及环境工程等;E-mail:westsxp@hotmail.com

1.2 生态破坏情况

矿山开采导致表土剥离、植被破坏,形成大量裸露边坡与排土场,引发水土流失、土壤退化。排土场边坡坡度主要为25°~45°,单台阶高约15 m,平台宽约4 m,原始土壤稀缺。传统客土法难以实施,亟须进行针对性修复。

2 生态修复技术分析

2.1 修复工艺演变与对比

2.1.1 2020年前

2020年前的数十年,德尔尼铜矿土地复垦采用4种工艺:一是草皮移植,用于尾矿库坝面复垦,优点是效果好、成活率与覆盖率高,接近原始地貌,能削减草籽、肥料等成本;缺点是需整体剥离天然草皮及薄土,人工转运费力,成本高且无法大面积作业。二是撒播种植,对复垦区平整、覆土、撒籽、施肥,省时经济,但3 m以上坡面覆土不均,雨水侵蚀严重,长势不均。三是育苗袋点播种植,采用可降解育苗袋,将土

壤、有机肥、草籽拌匀装入后埋植,降低了土壤需求且成活率较高,但对种植技术要求高、劳动密集、覆盖率低。四是苗木种植,因周边环境不适,矿区栽植的雪松、圆柏等苗木,除避风处,存活率极低,且需厚植土层,苗木成本高、生长慢。

2.1.2 2020年后

2020年起,德尔尼铜矿对排土场高陡边坡分台阶修整,受征地红线限制,边坡坡度主要为25°~45°,单台阶高约15 m,平台宽约4 m^[12]。依据《边坡喷播绿化工程技术标准》,结合矿区实际,25°以上边坡全部挂网喷播,25°以下直喷不挂网^[13]。具体而言,坡度25°~33°区域采用挂网喷播工艺,33°~45°区域采用挂椰网、挂生态棒喷播工艺,大于45°岩质边坡采用挂铁丝网、挂生态棒喷播;坡高小于3 m及平地采用覆土撒播工艺。工艺流程为边坡修整—边坡清理—挂生态棒—挂椰网—客土筛分—材料搅拌—客土喷播—铺水保草毯—开挖排水沟—平地覆土撒播—养护管理—监测评估,见图1。

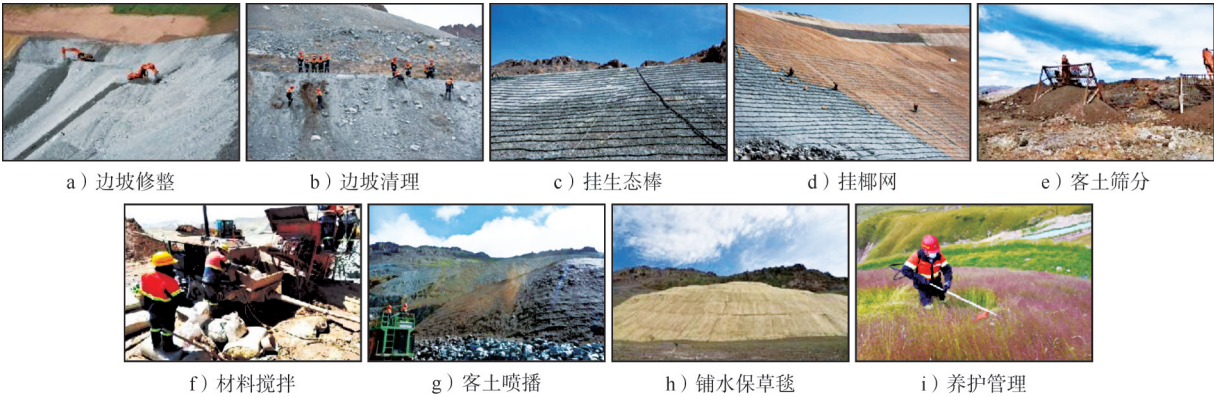


图1 土地复垦流程

Fig. 1 Land reclamation process

2.2 基质材料配比优化研究

2.2.1 土壤配比

针对高寒矿区土壤稀缺问题,设计多组基质配比

方案,考察蛇纹石渣土与原土配比对土壤及植物生长的影响,结果见表1、表2、图2。

由表1可知:蛇纹石渣土与原土配比6:4时,土壤

表1 土壤配比试验主要理化指标

Table 1 Main physicochemical metrics for soil proportioning tests

方案编号	$m(\text{蛇纹石渣土}):$ $m(\text{原土})$	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	田间持水量/%	pH值	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	含盐率/%
CK	10:0	1.34	46.63	28.05	18.58	22.51	7.82	308.3	0.21
A	9:1	1.34	45.67	27.38	18.29	20.87	8.21	273.0	0.17
B	8:2	1.38	44.66	29.73	14.93	22.50	8.18	271.0	0.07
C	7:3	1.38	43.42	29.68	13.74	21.90	8.11	277.3	0.08
D	6:4	1.39	42.55	32.29	10.26	24.09	8.11	247.0	0.09
E	5:5	1.37	44.00	29.88	14.12	22.86	8.05	254.3	0.07
F	4:6	1.38	43.11	32.02	11.09	24.49	7.92	251.7	0.06
G	3:7	1.38	42.54	33.23	9.31	25.26	7.93	290.3	0.08
H	2:8	1.34	43.68	36.69	6.99	28.34	7.80	282.3	0.11
I	1:9	1.35	42.73	35.77	6.96	28.97	7.71	277.0	0.10
J	0:10	1.38	40.92	35.14	5.78	26.83	7.65	293.7	0.12

表2 披碱草生长情况

		Table 2 Grow status of Elymus					cm
方案编号	m(蛇纹土石渣):m(原土)	播种时间/d					生长情况
		14	18	22	31	38	
CK	10:0	10	21	24	29	29	出苗快,苗小,叶绿细小卷皱,发黑,盐害
A	9:1	7	21	24	30	31	出苗快,苗小,叶绿细小卷皱,淡黑,淡盐害
B	8:2	7	22	25	26	27	出苗一般且零散,苗小,叶绿细
C	7:3	9	26	29	28	30	出苗快但零散,苗中,叶长绿卷皱
D	6:4	8	23	27	28	30	出苗较快且集中,苗大,叶长绿
E	5:5	5	24	29	28	30	出苗较慢且集中,苗大,叶长绿
F	4:6	9	23	27	28	30	出苗快且集中,苗大,叶长绿
G	3:7	9	23	28	31	31	出苗快且集中,苗大,叶长绿
H	2:8	7	18	23	25	26	出苗一般且零散,苗中,叶长绿
I	1:9	3	17	20	25	27	出苗慢且零散,苗小,叶长淡绿,缺氧
J	0:10	2	10	13	14	17	出苗慢且零散,苗小,叶淡绿色,缺氧

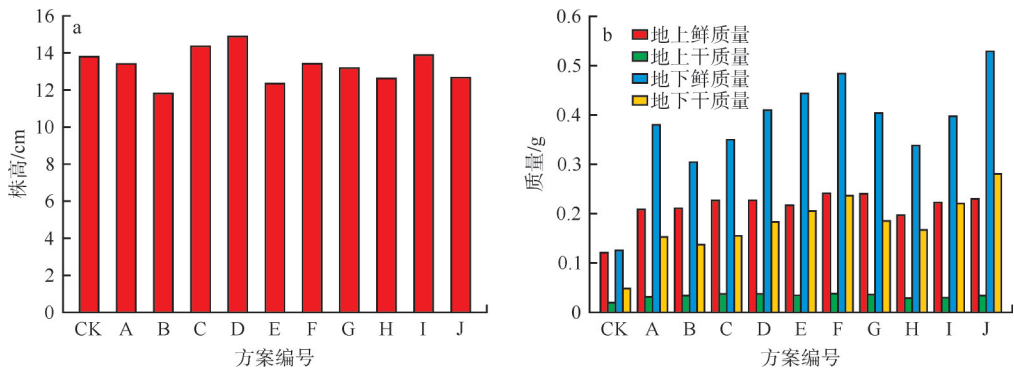


图2 披碱草株高及生物量情况

Fig. 2 Height and biomass status of Elymus

理化性质为密度 1.39 g/cm³,总孔隙度 42.55 %,毛管孔隙度 32.29 %,非毛管孔隙度 10.26 %,田间持水量 24.09 %,pH 值为 8.11,电导率 247.0 μS/cm,含盐率 0.09 %。此时,土壤含有机质 8.2 g/kg、有效磷 19.5 mg/kg、速效钾 94 mg/kg。土壤理化性质满足 CJJ/T292—2018 《边坡喷播绿化工程技术标准》和 CJJ 82—2012 《园林绿化工程施工及验收规范》基质配制要求。

由表2、图2可知:不同处理条件下,披碱草株高有明显差异,方案D的株高最高;地上鲜质量、地上干质量、地下鲜质量、地下干质量变化趋势基本相同,均较方案CK显著提高。方案C~G,地上鲜质量和地上干质量较方案CK分别提高78.15%~98.75%、78.29%~97.72%;地下鲜质量和地下干质量较方案CK分别提高171.78%~289.89%和257.31%~404.16%。添加原土可改变牧草幼苗生物量的分配模式,而植物为适应环境将更多资源分配到根系中,其地下生物量增加可能是植物对生态环境的一种重要适应。综上,蛇纹石渣土与原土配比6:4为矿区土壤修复的适宜配比。

2.2.2 改良剂筛选

通过3因素3水平正交实验,分析不同改良剂对基质性能的影响。3因素为羊板粪、腐殖质、保水剂,设计羊板粪用量分别为1.56 kg/m²、3.12 kg/m²、4.68 kg/m²;腐殖酸用量分别为0.5 kg/m²、1 kg/m²、1.5 kg/m²;保水剂(KM3005)用量分别为8 g/m²、12 g/m²、16 g/m²,见表3。

表3 改良剂优化正交实验设计

Table 3 Test design for modifier optimization			
方案编号	羊板粪用量/ (kg·m ⁻²)	腐殖酸用量/ (kg·m ⁻²)	保水剂用量/ (g·m ⁻²)
1	1.56	0.5	8
2	1.56	1	12
3	1.56	1.5	16
4	3.12	0.5	12
5	3.12	1	16
6	3.12	1.5	8
7	4.68	0.5	16
8	4.68	1	8
9	4.68	1.5	12

将不同配比混合好的改良剂、土壤样品装盆培养,每盆500 g,每个方案设3个重复试验,置于室内避光培养7 d。在培养期间,平均每隔3~4 d浇蒸馏水1次,保持田间持水量80%,保证土壤表面微微湿润即可。其间取样分析土壤密度、孔隙度等物理指标,以及pH、有机质、可溶性离子浓度等化学指标,以未添加改良剂土壤作为对照,获得改良剂优化配比。结合其功能性、环保性、经济性进行综合评价,最终确定最佳用量分别为羊板粪 3.12 kg/m^2 、腐殖酸改良剂 1 kg/m^2 和保水剂 12 g/m^2 。

2.2.3 喷播材料

喷播材料有客土、草纤维、椰糠、羊板粪、牧草专用肥、腐殖酸、黏合剂、保水剂、6类草种,将以上材料按一定配比在喷播机内混合、加水、搅拌,技术难点在于物料添加符合要求,搅拌浓度适合喷播^[14-16];所喷播的草种避开争肥力强的品种,为根系发达、生长快、抗寒冷、耐贫瘠的多年生品种,主要有青海草地早熟禾、青海冷地早熟禾、青海中华羊茅、垂穗披碱草、多叶老芒麦、同德小花碱茅等6种,每 667 m^2 各使用 2.6 kg ;草纤维、椰糠、羊板粪、有机缓释肥、腐殖酸主要作用为改良土壤养分,保持土壤的蓬松特性,增加土壤的黏性;保水剂主要起到吸收多余水分,旱天缓慢释放的作用;黏合剂主要是提高土壤黏性,减少水土流失^[17-20]。保水剂可根据气候条件及特点进行相应的调整;黏合剂根据坡度而定,与坡度大小成正比。

2.2.4 养护管理

旱季喷播车喷水养护,采用网围栏封育。返青季追施有机缓释肥,对长势好区域割草以防枯草影响返青。同时,尝试放羊啃食、踩踏、排便,促进自然演替。

3 生态修复效果评估

3.1 土壤微生物群落与生态功能提升

通过高通量测序分析,修复后土壤微生物多样性显著提高,优势菌门包括变形菌门(33.94%)、酸杆菌门(14.80%)、放线菌门(9.61%),优势菌属如鞘脂单胞菌属、芽孢杆菌属占比分别提升15%和12%。这些微生物通过分解有机质、固氮解磷,促进土壤养分循环,修复区土壤阳离子交换量较修复前增加20%,氮、磷、钾有效态养分含量提升30%~50%,形成良

性生态循环。与未修复区相比,生态系统碳储量增加 1.2 t/hm^2 ,固碳能力提高40%,表明土壤生态功能显著增强^[21]。

3.2 植被恢复效果

青海大学农牧学院遥感监测显示,2007—2023年排土场区域植被指数(NDVI)先降后升,为0.58,较修复前提升40%,植被覆盖度超60%,垂穗披碱草、青海草地早熟禾等草种成为优势种,群落正向演替明显^[22]。与未修复区相比,修复区水土流失减少50%,土壤侵蚀模数从 $5\,200\text{ t/(km}^2\cdot\text{a)}$ 降至 $1\,800\text{ t/(km}^2\cdot\text{a)}$,生态系统稳定性显著提升。联合评价表明,德尔尼铜矿植被恢复正向演替,相关成果经青海省科学技术厅鉴定处于国内领先水平,可用于工程实践。

3.3 技术优势

该修复技术在基质配比经济性(成本降低30%)、植被成活率(提高25%)、修复周期(缩短1~2 a)等方面表现更优,尤其适用于高海拔、低气温、土壤稀缺的极端环境^[23]。此外,德尔尼铜矿虽地处高原,但降雨充足,不需要喷淋灌溉,免维护。本项目的实施解决了德尔尼铜矿生态修复用土紧缺,生态修复“卡脖子”问题,减少了生态修复用土量,降低了外运客土成本,具有良好的生态、经济和社会效益^[24-26]。通过人工配制种植基质和人工种草重建矿山废弃地植物群落,是矿区植被恢复的有效措施,形成了适宜高寒矿区植被恢复的土壤种植基质,为青海高海拔地区矿区土壤修复提供技术支持,对促进青海高寒矿区的生态修复具有重要参考。同时,研究为高原高寒高海拔缺土地区植被恢复工作探索出了新的技术方法,起到引领和示范作用,助力矿产资源行业实现绿色、科学、高效发展。

3.4 应用效果

2024年9月1日,青海威斯特铜业有限责任公司、中国矿业大学、青海大学等科研院所发布团体标准,即T/CSER 005—2024《高寒矿区植被恢复的土壤改良应用技术规程》,为行业提供参照范例,助力高寒露天矿山土地复垦技术更广泛应用。该项植被恢复方法已在德尔尼铜矿进行了大面积的推广,累计应用面积超 100 hm^2 ,目前均为正向演替,未出现植被退化现象(见图3)。

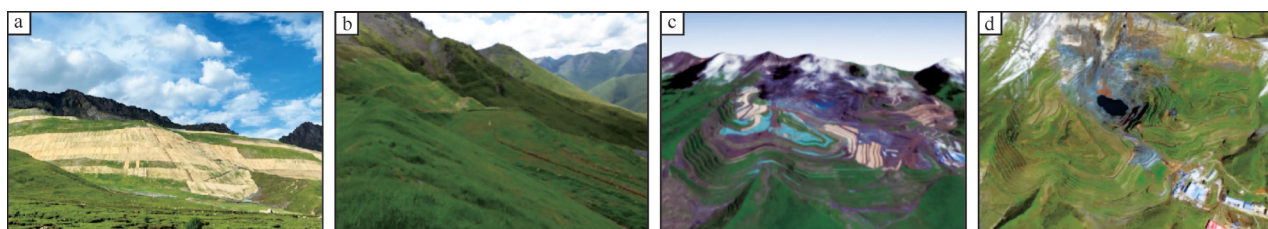


图3 生态修复效果

Fig. 3 Ecological restoration outcomes

4 研究展望

1)技术推广与生态-经济协同。将蛇纹石渣土改良喷播技术推广至青藏高原其他高寒矿区,探索“修复+牧草种植+畜牧业”一体化模式,实现生态修复与地方经济协同发展。

2)气候变化适应性技术研发。针对高原暖干化趋势(近10年矿区平均气温上升0.8℃,蒸发量增加5%),开展极端干旱/暴雨条件下基质抗侵蚀性能研究。通过添加高分子聚合物(如聚丙烯酰胺)提升基质黏结力,模拟降雨试验显示,2%黏合剂可使边坡径流冲刷量减少40%。同时,筛选耐旱、抗寒基因草种(如垂穗披碱草)。

5 结论

1)根据试验结果,确定蛇纹石渣土与原土配比6:4为最优方案,辅以羊板粪、腐殖酸、保水剂等改良材料,可显著改善土壤物理化学性质,毛管孔隙度32.29%,田间持水量24.09%,pH值降至8.11,含有效磷19.5 mg/kg、速效钾94 mg/kg,为植被生长创造适宜条件。

2)通过“ $m(\text{蛇纹石渣土}):m(\text{原土})=6:4$ +腐殖酸改良+挂网喷播”技术体系,成功解决了高寒矿区土壤稀缺、植被成活率低等难题。修复后植被覆盖度达62%,NDVI为0.58(修复前0.35),生态系统碳储量增加1.2 t/hm²,固碳能力提高40%,构建了“渣土利用-结构改良-植被重建”的全链条技术模式。

3)突破传统客土法局限,构建“本地渣土利用+改良剂优化+喷播技术”的高寒矿区复垦模式,成本较传统方法降低30%,修复周期缩短1~2 a,且具有良好的环境效益、经济效益和社会效益,为同类矿区提供了可复制的技术范例。环境效益:水土流失减少55%,土壤侵蚀模数从5 200 t/(km²·a)降至1 800 t/(km²·a),重金属有效态含量降低25%~40%;经济效益:修复成本较客土法降低40%,每667 m²节约运输费200元,牧草增产带动畜牧业增收;社会效益:修复区成为高原矿区生态修复示范基地,为地区绿色发展提供样板。

4)虽然取得了显著成效,但仍需关注长期冻融循环对基质结构的影响(如冬季土壤冻胀导致植被成活率下降10%),以及极端气候下的应急修复能力。未来需深化“土壤-植被-微生物”协同机制研究,结合智能化监测与精准调控,推动高寒矿区生态修复技术向高效化、可持续化迈进。

【参考文献】

[1] 夏源,涂光远,廖骥,等.黄金矿山生态修复:现状、挑战与展

望[J].黄金,2024,45(12):1-7.

[2] 迟崇哲,刘影,王超,等.有色金属矿山尾矿土壤化生态修复技术研究进展[J].黄金,2024,45(12):8-12.

[3] 苟晓斌,赵林海,张腾,等.露天矿山排土场生态污染现状及修复技术研究[J].黄金,2024,45(12):20-25,66.

[4] 李昊,潘翰林,吴亮亮,等.矿山露天采场废弃地生态治理修复研究实例[J].黄金,2024,45(12):26-30.

[5] 刘信超,王海洋,于千傲,等.失活污泥腐殖酸制备及其改良尾矿试验研究[J].黄金,2025,46(5):91-95.

[6] 孔令健,张琳,王颖南,等.高寒矿区蛇纹石渣土配制及其改良种植基质的试验——以青海威斯特铜矿为例[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(3):120-128.

[7] 赵健赞,彭军还.基于MODIS NDVI的青海高原植被覆盖时空变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(4):67-73.

[8] 中关村众信土壤修复产业技术创新联盟.高寒矿区植被恢复的土壤改良应用技术规程:T/CSE 005—2024[S].北京:中国建筑工业出版社,2024.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.边坡喷播绿化工程技术标准:CJJ/T 292—2018[S].北京:中国标准出版社,2024.

[10] 李聪聪,王佟,赵欣,等.边坡监测与治理技术在高寒矿区露天煤矿生态修复中的应用研究[J].中国矿业,2024,33(4):122-131.

[11] 王佟,蔡杏兰,李飞,等.高原高寒矿区生态地质层修复中的土壤层构建与成分变化差异[J].煤炭学报,2022,47(6):2 407-2 419.

[12] 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.

[13] 刘帅,熊涛,孙浩,等.高原高寒木里矿区生态治理中土壤重构治理效果研究[J].中国煤炭地质,2021,33(11):77-80,86.

[14] 展秀丽,董智今,马亚莉,等.旱区农牧交错带不同土地利用类型土壤碳氮磷及其生态化学计量特征[J].生态科学,2024,43(6):1-9.

[15] 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.

[16] 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):112-114,90.

[17] 王佟,刘峰,赵欣,等.生态地质层理论及其在矿山环境治理修复中的应用[J].煤炭学报,2022,47(10):3 759-3 773.

[18] 刘玲.木里煤田露天矿采坑与渣山一体化生态治理[J].露天采矿技术,2024,39(3):66-70.

[19] 陈峰,杨利亚,冯海波,等.祁连山南麓露天矿区高寒草地植被生态系统稳定性研究——以青海木里-聚乎更矿区为例[J].安全与环境工程,2024,31(1):291-300.

[20] 青海威斯特铜业有限责任公司,青海天境源生态环境科技有限公司.一种基于高寒矿区蛇纹石渣土的种植基质及其应用:CN202410267974.X[P].2024-05-03.

[21] 孔令健,张琳,刘一帆,等.三种环境材料混施对高寒矿区边坡土壤的影响[J].水土保持通报,2024,44(6):97-105.

[22] 孔令健,张琳,任杰,等.高寒矿区环境材料混施下土壤改良及工程应用研究[J].煤炭科学技术,2024,52(增刊1):299-311.

[23] 大连地拓环境科技有限公司.一种采石场废弃渣土资源化利用

- 方法:CN201711447 515.6[P].2018-05-11.
- [24] 山东高速建设管理集团有限公司,山东省高速路桥养护有限公司,北京林业大学.一种基于工程渣土的植生基质及其制备方法和应用:CN202010426216.X[P].2022-05-06.
- [25] 北京林业大学.一种改良采石场废弃渣土的绿化基质及其制备方法和应用:CN201310414867.7[P].2014-12-10.
- [26] 邓川,郭晶晶,郭小平,等.工程渣土配制喷播基质的配方筛选研究[J].土壤通报,2016,47(4):959-965.

Ecological restoration practice in alpine open-pit mines

Shi Xingping¹, Liu Zhaoping², Shang Qing¹, Lan Xiaocong², Li Xilai³, Zhang Ming¹, Zhang Quan¹

(1. Qinghai West Copper Co., Ltd.; 2. Zijin Mining Group Co., Ltd.;

3. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University)

Abstract: To address land reclamation challenges in alpine mines caused by special climate and geological conditions, including difficult vegetation restoration, scarce soil resources, and short construction periods, the De'erni Copper Mine was taken as the research subject, and suitable land reclamation methods for alpine open-pit metal mines were explored to provide sustainable development examples for similar mining areas. The overview of the De'erni Copper Mine and technical bottlenecks in land reclamation were analyzed. Through experimental methods including soil simulation and pot planting, the preparation and improvement technology of serpentine slag soil and local original soil were investigated. The optimal scheme for planting substrate was determined as a 6:4 ratio of serpentine slag soil to original soil. Through a three-factor three-level orthogonal experiment, the optimal dosages of substrate amendments were determined as 3.12 kg/m² sheep manure, 1 kg/m² humic acid, and 12 g/m² water retaining agent. This research established a reclamation model of "local slag soil utilization + amendment optimization + spray-seeding technology" for alpine mining areas, which can not only effectively solve land reclamation problems in alpine open-pit mines but also be extended to semi-humid areas in North China and other construction project areas with seasonal drought and concentrated rainfall, providing innovative ideas and practical approaches for ecological restoration of mining wastelands.

Keywords: alpine; open-pit mine; ecological restoration; land reclamation; soil improvement; humic acid