

蔡保新, 李芹, 孔志岗, 等. 云南历史遗留废弃矿山生态修复对策研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(6): 1422-1429.

DOI: 10.11932/karst20240618

云南历史遗留废弃矿山生态修复对策研究

蔡保新^{1,2,3}, 李芹^{1,2,3}, 孔志岗^{1,2,4}, 杨晓艳^{1,2,3}, 李燕清⁵, 宋增宏^{1,2,3}

(1. 自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室, 云南昆明 650216; 2. 云南省高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室(筹), 云南昆明 650216; 3. 云南省地质环境监测院, 云南昆明 650216; 4. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093; 5. 云南省交通运输厅, 云南省交通安全统筹中心, 云南昆明 650031)

摘要: 实施历史遗留废弃矿山生态修复工作, 是践行生态文明建设重要举措, 对维护国家西南生态安全屏障及云南省生态文明排头兵建设具有重要意义。历史采矿遗留下的废弃矿山生态环境问题突出, 生态难以修复, 给当地村民的生产和生活带来困难。文章基于云南省历史遗留废弃矿山生态环境破坏现状、面临的形势和困难, 结合矿区自然地理、生态修复规划、激励政策、国土空间用途管制要求等, 聚焦自然资源要素保障, 从修复方向、工程措施、投入机制、监督管理等方面, 提出生态修复对策, 以期“山水林田湖草是生命共同体”新背景下的历史遗留废弃矿山生态修复工作提供技术支撑和新思路。

关键词: 历史遗留废弃矿山; 生态环境; 生态修复; 矿山修复技术; 自然要素保障

创新点: 云南省历史遗留废弃矿山生态修复面临数量多、分布散、修复难等问题, 需因地制宜, 结合自然恢复与人工修复, 通过政策激励和资金引导, 吸引社会参与, 实现生态、经济、社会效益统一, 推动修复自我循环发展。

中图分类号: F426.1; X171.4 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)06-1422-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

云南省矿产资源丰富, 素有“有色金属王国”和“磷化工大省”之称。矿业是云南的支柱产业之一, 为云南乃至国家社会经济发展做出了重要贡献。然而, 历史上不合理的矿产资源开发, 大量矿山遗留了生态环境问题, 对矿区及周边人民群众生产生活、生态环境等造成负面影响, 制约了当地经济社会发展。云南省尤为重视历史遗留废弃矿山的生态修复工作, 积极推动矿山生态修复, 这已成为践行“绿水青山就

是金山银山”的发展理念, 争当全国生态文明建设排头兵、筑牢祖国西南生态安全屏障、推动美丽云南建设的重要内容。

近年来, 矿山生态修复技术理论研究已成为国内生态修复领域专家学者研究的热点和方向, 形成了一批有意义的研究成果。如傅伯杰等^[1]提出了生态环境胁迫理论与评价指标体系; 张进德等^[2]结合国家生态综合区划提出了农业用地、建设用地、生态景观、自然封育的废弃矿山生态修复模式; 白中科等^[3]提出了地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观重

第一作者简介: 蔡保新(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事矿山生态修复、地质灾害防治研究。E-mail: 156016617@qq.com。

通信作者: 孔志岗(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事环境地质、矿产地质研究。E-mail: zhigangkong@kust.edu.cn。

收稿日期: 2023-11-28

现的矿山生态修复措施；樊彬^[4]针对贵州某历史遗留废弃矿山生态环境问题，提出以消除地质灾害安全隐患、地形重塑、生态土壤重构、生态植被重建及辅助工程措施的技术路线，开展废弃矿山生态修复工程；姜丽丽等^[5]提出，联合修复技术是矿山生态修复未来的发展趋势，提高政府和社会资本的参与度和积极性，树立资源开发和环境保护协调发展的科学发展理念，增强矿山修复治理，统筹推进将废弃矿山变成绿水青山的技术路途。但是，目前针对历史遗留废弃矿山生态环境问题的修复治理研究工作尚不系统、不全面，研究成果较少。

云南省在历史遗留废弃矿山生态修复方面已取得显著进展，然而，面对废弃矿山数量多，生态环境问题复杂多样，地质环境脆弱以及资金缺口大等挑战，生态修复工作依然面临严峻形势。本文基于历史遗留废弃矿山的分布及规模、主要生态问题及其修复现状，结合生态安全布局、现行法规政策及规范标准，提出有针对性生态修复对策与措施，为管理部门推进历史遗留废弃矿山生态修复工作提供科学参考与实践指导。

1 历史遗留废弃矿山概况

1.1 历史遗留废弃矿山现状

云南省历史遗留废弃矿山数量多、分布散、单个矿点规模小，历史欠账多，生态问题复杂，自然恢复能力薄弱，治理任务重。近年来，新形势下对做好历史遗留废弃矿山生态修复提出了更高要求，全力推进全省历史遗留废弃矿山生态修复工作，已累计完成修复面积约1.9万 hm^2 ，尚需修复历史遗留废弃矿山约0.9万 hm^2 ，主要分布于滇东金沙江流域东部、南盘江流域西部、红河流域中北部，以及滇西北怒江流域南部、金沙江与澜沧江过渡区玉龙—弥渡一带（图1）。

需要修复的历史遗留废弃矿山以建材及其他非金属类矿山为主，矿山数量约占总数的85.64%，需修复面积约占78.63%；能源类矿山（以煤矿为主）次之，矿山数量约8.32%，需修复面积约占9.05%；黑色金属类矿山相对较少，矿山数量约占2.92%，需修复面积约占7.34%；有色金属类、冶金辅助原料非金属类、化工原料非金属类矿山数量较少，矿山数量和面积

均不足3%（表1）。从矿山损毁土地图斑规模来看，单个面积规模一般较小，10亩以下的数量占总数量的46.81%；10~50亩的次之，占42.22%；50亩以上的较少，尤其是100亩的不足4%（表2）。

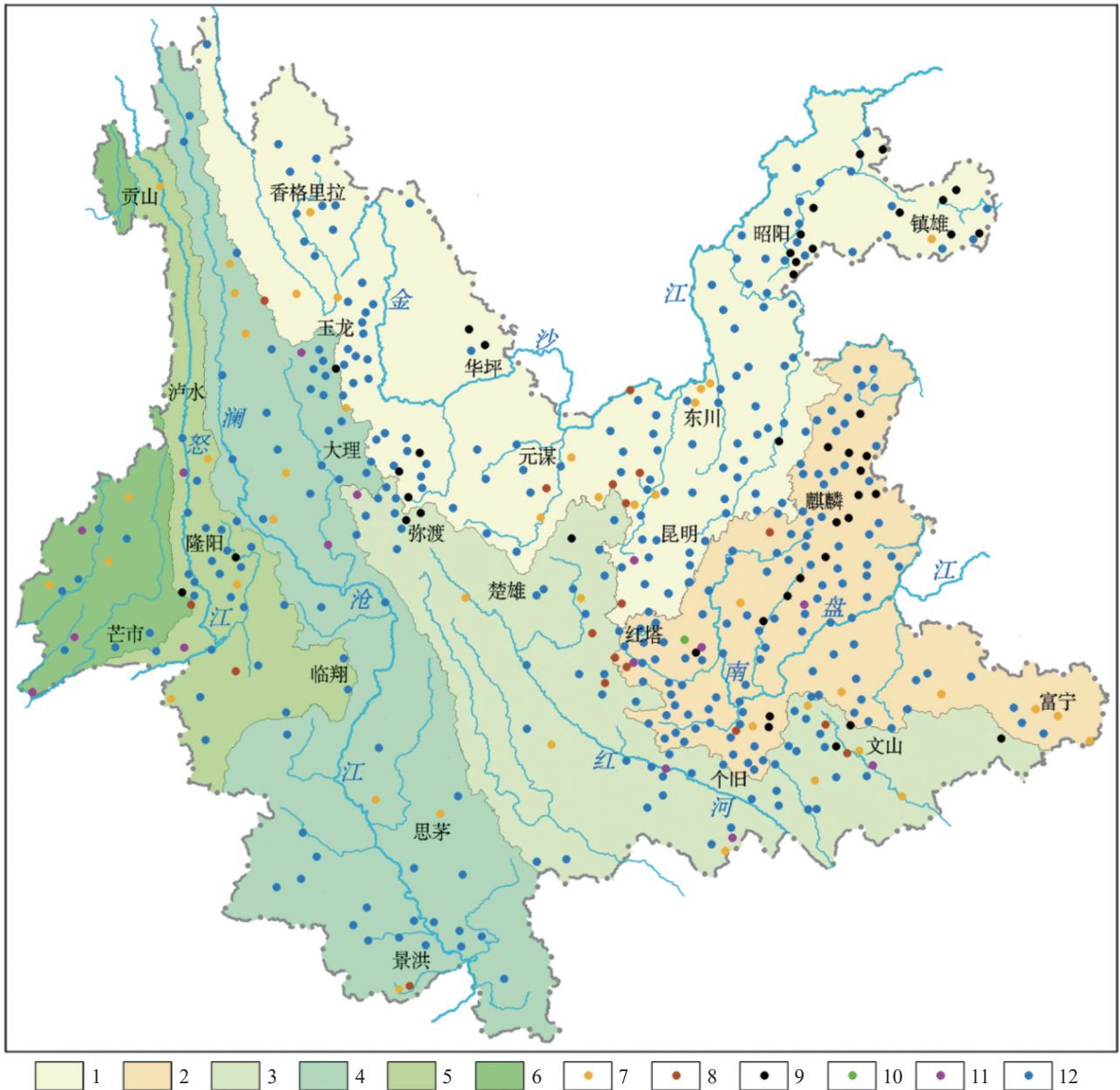
1.2 环境与资源条件

云南省作为典型的高原山地省份，山地面积占全省总面积的94%，地形地貌复杂，全省地势呈现西北高、东南低的特点，自北向南呈阶梯状逐级下降，相对高差6000多米。以元江谷地和云岭山脉南段宽谷为界，分为东西两大地形区。东部为滇东、滇中高原，属于云贵高原的重要组成部分，平均海拔2000m左右，喀斯特地貌广布，发育着各种类型的岩溶地貌，表现为起伏和缓的低山和浑圆丘陵；西部高山峡谷相间，地势险峻，有高黎贡山、怒山、云岭等巨大山系，山岭和峡谷相对高差超过1000m。受板块碰撞、地壳运动作用影响，地质构造复杂、地层发育齐全，形成了多样的自然环境和丰富的矿产资源。

全省河川纵横，湖泊众多，境内径流面积在100 km^2 以上的河流有1000多条，分属长江、珠江、元江（红河）、澜沧江、怒江、伊洛瓦底江六大水系。高原湖泊40多个，滇池、洱海、抚仙湖、星云湖等“九大高原湖泊”，多数为断陷型湖泊，主要分布在元江谷地和东云岭山地以南。

云南省属于亚热带高原季风气候，气候温和，雨量充沛，立体气候特点显著，具有“一山分四季，十里不同天”特点。全省平均气温最热（7月）月均气温20~23 $^{\circ}\text{C}$ ，最冷（1月）月均气温7~11 $^{\circ}\text{C}$ 。全省降水的地域分布差异大，大部分地区年降水量在900mm以上，最多超过2300mm，最少的仅有547mm，干湿季节分明，雨季（5月至10月）降水量占全年总量的80%以上，干季（11月至次年4月）降水量仅占10%~20%。

云南气候多样性对环境保护和生态修复提出了不同的要求和挑战。滇西北属于寒带型气候区，长冬无夏，春秋较短，植被生长缓慢，生态修复难度大，修复工作需考虑耐寒植物的选育和冻土处理技术；滇东、滇中属于温带型气候区，四季变化不明显，年平均气温和降水量适中，降水量有利于植被的恢复和生长；滇南、滇西南为热带、亚热带气候区，气温较高，降水充沛，生物多样性丰富，有利于植被恢复和生物多样性的保护，实施修复应考虑水土流失及病虫害防治；金沙江、元江（红河）为干热河谷区，气



1. 金沙江流域 2. 南盘江流域 3. 红河流域 4. 澜沧江流域 5. 怒江流域 6. 伊洛瓦底江流域 7. 有色金属矿山
8. 黑色金属矿山 9. 能源矿山 10. 化工原料非金属矿山 11. 冶金辅助原料非金属矿山 12. 建材及其他等非金属矿山

图 1 需修复治理历史遗留废弃矿山分布简图

Fig. 1 Distribution of the abandoned mines for restoration

表 1 需修复治理历史遗留废弃矿山统计一览表

Table 1 Statistics of the abandoned mines for restoration

主要矿产类别	矿山数量占比/%	需治理面积占比/%	备注
有色金属	1.40	2.12	
黑色金属	2.92	7.34	
能源矿产	8.32	9.05	以煤矿为主
化工原料非金属	0.40	0.85	
冶金辅助原料非金属	1.32	2.01	
建材及其他等非金属	85.64	78.63	均为固体矿产
合计	100.00	100.00	

表2 需修复治理历史遗留废弃矿山图斑规模统计一览表
Table 2 Statistics of the scales of abandoned mines for restoration

单图斑损毁土地规模/亩	数量占比/%	平均面积/亩	备注
小于10	46.81	4.49	
10~20	21.50	14.30	
20~50	20.72	31.56	
50~100	7.58	68.80	
100~200	2.67	134.20	
大于200	0.72	300.38	
合计	100.00	100.00	

候炎热,干旱少雨,水热组合失衡,土壤有机质、养分含量较低,是典型的生态脆弱区,生态修复需要重视水土保持和水源涵养。

2 矿山生态环境问题分析

全省历史遗留废弃矿山以小中型的建材类矿山为主,矿区主要生态问题为矿山地质安全隐患、土地资源损毁、生态系统受损(退化)、石漠化和水土流失加剧、水源涵养功能下降等。

2.1 矿山地质安全隐患

矿山开采改变了坡体原有自然物理学平衡,遗留下大量“一面墙”式高陡边坡,坡高一般在30米以上,最高可达上百米,一般坡度60°以上,坡面凌空,基岩裸露、裂隙发育,局部存在危岩体,处于欠稳定—不稳定状态,受风化、降雨、震动等作用影响,易产生崩塌、滑坡等地质安全隐患,威胁周边流动人员及基础设施安全。

2.2 土地资源损毁

全省历史遗留废弃矿山共损毁土地超40万亩,主要表现为矿山开采挖损、矿山固体废弃物及废弃建筑压占等。露天矿山对土地损毁最为严重,约占90%,地下开采矿山次之,损毁土地类型主要为采矿用地,其次为林草地,形成“白茬山”,制约了当地经济社会的发展。

2.3 生态系统受损(退化)

云南是我国植被类型最为丰富多样的地区之一,分布着我国最完整的热带山地森林植被垂直带谱,成为众多动物的栖息地。然而采矿活动改变了原有的地形地貌景观,破坏林草等植被,植被覆盖率降低,

森林开“天窗”,生态廊道连通性受阻,生态系统完整性受损或退化,导致服务功能下降,破坏动植物栖息地和生境,外来物种入侵的风险增高。

2.4 石漠化和水土流失加剧

区域地表石灰岩广布,喀斯特地貌发育,采矿造成土石裸露、植被破坏等现象广发,原生植被生境旱化,松散土层被地表径流所侵蚀,加剧水土流失。同时,影响地下水水位,覆盖型岩溶向裸露型岩溶转化,石漠化程度加剧,威胁当地生态环境和生存空间。

2.5 水源涵养功能下降

森林—村寨—田地—水系四要素共同构成了一个庞大的人文—自然复合农业生态系统,水以径流、蒸发的形式贯通全局,使整个区域形成了能量循环,并可相对独立运行。采矿破坏森林植被,影响水源涵养生态系统稳定性,地表坡面径流加速,降水入渗时间短,水源涵养功能下降,导致山区供水量不足,甚至干旱等问题。

3 矿山生态修复进展与经验

云南地处长江、珠江、红河等重要河流上游,承担着维护区域生态安全的战略任务,同时又是生态环境比较脆弱敏感的地区。新形势下,对历史遗留废弃矿山生态修复提出了更高要求。在摸清历史遗留废弃矿山现状的情况下,围绕长江经济带(云南段)、赤水河源头、青藏高原东南缘、九大高原湖泊流域等重要生态区,组织实施了一批历史遗留废弃矿山生态修复项目,各地亦积极探索投入机制,吸引社会资金参与矿山生态修复,目前全省历史遗留废弃矿山生态修复率近68%。

历史遗留废弃矿山生态修复过程中,应遵循自然生态系统演替规律,本着尊重自然、顺应自然的原则展开^[6],即以自然恢复为主,工程恢复为辅,聚焦自然资源要素保障,在符合国土空间用途管制和相关规划的前提下^[7],合理确定修复方向,盘活矿山废弃土地,挖掘其价值。因地制宜、技术可行、财力可能,科学选取生态修复方式和修复措施,避免过度人工干预。同时要突出重点流域,实施山水林田湖草沙一体化保护和修复,推动流域从“一湖之治”转向“全域之治、系统之治”,充分体现了综合治理、系统修复的理念。

4 有效修复模式构建

根据矿区自然环境条件,分析自然恢复能力,因地制宜,分区施策,科学选取和组合国家提出的“自然恢复、辅助再生、生态重建、转型利用”等修复方式,构建符合实际的矿山生态修复模式^[8]。

4.1 自然恢复模式

在没有或少量人工干预的情况下,利用自然生态系统的自我恢复、自我调节、自我修复、自我发展的自身恢复力实现生态修复。主要适用于植物生长缓慢、人工修复难或者是水热条件良好,植被能快速恢复的潜在生态风险低的矿区。

4.2 生态修复+农耕模式

结合补充耕地需求,通过地形重塑、客土重构土壤、土壤改良、翻耕等措施,配套相应灌溉设施,将废弃采矿用地复垦为具备耕种条件的旱地、水田等耕地的修复模式,弥补耕地来源不足。这一修复模式主要适用于无污染风险、地势平缓、符合国土空间用途管制要求,且一般距离居民点3 km内矿区。

4.3 生态修复+产业导入模式

矿山生态修复时,结合产业发展的土地资源需求,拓宽土地资源利用维度和方式,提高土地综合利用效率,并获得更多的经济效益和社会效益。如,生态修复+光伏、生态修复+休闲运动、生态修复+文旅观光、生态修复+经济林木等。该模式主要适用于具有独特可利用资源禀赋的矿区。

4.4 生态碳汇模式

科学选取辅助再生、生态重建等修复方式,通过地形重塑、土壤重构、植树种草等人工措施,恢复成为林地、草地、湿地,增加林草植被覆盖度、湿地面积等,改善矿区生态质量,提高生态碳汇功能,助力国家“双碳”战略。生态碳汇模式主要适用无制约植物生长发育因子,以及气候、水热条件满足林草植被恢复等基本条件的矿区。

4.5 转型利用模式

结合社会经济发展需求,通过转型利用实现变废为宝,提高土地资源利用效率,土地类型由废弃采矿用地转变为其他用于建设的土地,适当辅以景观重塑和生态恢复,其修复责任主体由地方政府转变

为现利用人,包括原有矿山建筑物再利用等。这种修复模式主要适用于区位优势显著、交通便利的矿区。

5 对策建议及讨论

5.1 转变矿山生态修复思路

贯彻落实习近平生态文明思想和“绿水青山就是金山银山”理念,历史遗留废弃矿山生态修复过程应充分考虑各生态要素间的相互依存、相互影响、相互制约关系^[9]。精准识别历史遗留废弃矿山的生态问题,准确把握生态本底和自然恢复能力,开展矿山生态修复适宜性分析,结合国土空间用途管制要求,突出安全和生态功能、兼顾生态景观功能,分区分类统筹部署。鼓励市场化运作、利用型修复、综合式治理,力求取得良好生态效益、社会效益和经济效益。

5.2 注重自然资源要素保障

生态修复中加强与增减挂钩、占补平衡、进出平衡、国土绿化等用地政策的衔接,促进地方经济发展。结合全国国土调查成果数据,属第二次国土调查(简称“二调”)曾经为耕地且第三次国土调查(简称“三调”)为非耕地的区域可考虑作为进出平衡后备资源;“二调”和“三调”均为非耕地区域可考虑作为占补平衡后备资源;“三调”成果中的城镇村和工矿用地区域可考虑作为城乡建设用地增减挂钩后备资源。结合国土空间用途管制要求“三区三线”划定成果,生态保护红线控制线区域以恢复矿区植被生态功能为主,优先考虑作为国土绿化造林空间后备资源;永久基本农田控制区域以复垦耕地为主,用于补充耕地保有量,守住耕地红线,保证国家粮食安全;城镇开发边界控制线区域合理确定城镇建设用地规模,以恢复用于建设的土地为主。

5.3 合理确定生态修复方向

在符合国土空间用途管制要求的前提下,结合矿区社会经济发展现状、微地貌、周边植被、交通状况、水土条件等因素实施矿山生态修复,开展适宜性评价。涉及25°以上陡坡地、重要水源地15°以上坡地的区域优先考虑恢复植被,改善矿区生态系统功能。25°以下其他区域,居民点附近、交通条件一般和较为便利的矿区,这些区域地形相对平缓、水土条件较好,可优先考虑复垦耕地;地形起伏较大,且不

具备复垦耕地条件的地段,可考虑恢复种植园用地;远离居民点的区域,多属交通不便,周边以林草地为主,应以恢复植被为主,防止水土流失,提高水源涵养能力,维护生物多样性。

5.4 科学部署生态修复措施

矿山生态修复技术措施主要包括消除地质安全隐患、地貌重塑、土壤重构、植被重建、跟踪监测、后期管护等^[10]。对高陡边坡等存在矿山地质灾害地段,通过应采取危岩清理、分台处置、拦挡、固化、边坡修理、疏导排水等工程措施,消除安全隐患,确保修复区域及周边居民生活生产安全。对应恢复植被的场地,结合矿山周边地貌特点,依山就势布置废石(渣)清理、平台整理、采坑回填等工程,适度重塑地形,为植被恢复提供条件;对于复垦耕地、建设的用地等场地,结合复垦后的土地用途,按照土地整治相关技术规范,布置平台整理、采坑回填、台阶修筑、挖深垫浅等工程,重塑地形,地形坡度一般控制在25°以下,合理修建道路、配置截排水系统等。土壤重构是指对通过客土工程及物理、化学、生物等工程改良,重新构造土壤基质,形成适宜植被生长的土壤剖面结构与肥力等条件,场地修复后用作耕地、园地、灌木林地的有效表土厚度不小于40 cm,用作乔木林地的有效表土厚度不小于60 cm,用作草地的有效表土厚度不小于20 cm;对存在土壤污染的场地,应对污染场地进行先导治理或协同治理,使其达到土壤环境质量相关标准的要求。

在地貌重塑和土壤重构基础上,按照生态系统的生物种群特点,综合考虑植被立地条件和物种多样性,合理配置植物种群组成和结构,采取乔灌草混合模式,尽量选择与周边生态系统相协调的多类型乡土植物物种重建的生态系统,保障植物群落持续稳定。跟踪监测包括地质稳定性监测、土壤肥力和理化性质监测、植被成活率和长势监测、水环境监测等,为后期管护和成效评估提供依据。矿山生态修复“三分种七分养”,主要采取定期或不定期喷水、追肥、防治病虫害、补植补种等措施,对复绿植被进行养护,确保修复成效,一般管护时间为2—3年,生态脆弱区管护时间为3—5年。

5.5 构建历史遗留废弃矿山多元化投入机制

坚持政府主导、市场运作模式,按照谁修复谁受益的原则,立足废弃土地资源潜在价值,引导社会资

本参与历史遗留废弃矿山生态修复。盘活历史遗留废弃矿山存量建设用地,复垦修复腾退指标,为生产矿山企业提供采矿用地保障。合理利用废弃矿山土石料,通过公共交易平台销售收益,用于本地区生态修复工作。用活激励政策,充分发挥财政资金的撬动作用,切实解决矿山生态修复欠账多、资金投入不足、投入渠道较单一等问题,协同推进历史遗留废弃矿山生态修复工作^[11-12]。

6 结论

(1)云南省历史遗留废弃矿山数量多、分布散、单个矿山规模小,生态修复过程中面临诸多问题和困难,开展历史遗留废弃矿山生态修复对策研究具有重要意义,以自然恢复为主,因地制宜实施分区分类修复,转变修复思路,聚焦自然资源要素保障,盘活废弃土地,避免为复绿而复绿。

(2)准确把握好自然修复与人工修复之间的关系,遵循保障安全、恢复生态、兼顾景观次序要求,科学选取矿山生态修复模式和工程技术措施,基于适宜性评价结果及国土空间用途管制要求,合理确定修复方向,实现生态效益、经济效益、社会效益相统一。

(3)围绕矿山生态修复历史欠账多、投入不足等突出问题,基于废弃采矿用地潜在价值,通过政策激励和财政资金的撬动,吸引社会各方共同参与,实现历史遗留废弃矿山生态修复的自我造血、自我循环的新格局。

参考文献

- [1] 傅伯杰,刘国华,陈利顶,马克明,李俊然.中国生态区划方案[J].生态学报,2001,21(1):1-6.
FU Bojie, LIU Guohua, CHEN Liding, MA Keming, LI Junran. Scheme of ecological regionalization in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 1-6.
- [2] 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.
- [3] 白中科,周伟,王金满,赵中秋,曹银贵,周妍.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,2018,32(11):1-9.
BAI Zhongke, ZHOU Wei, WANG Jinman, ZHAO Zhongqiu, CAO Yingui, ZHOU Yan. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. *China Land Science*, 2018,

- 32(11): 1-9.
- [4] 樊彬. 历史遗留废弃矿山的生态环境问题及修复治理对策: 以贵州省某历史遗留废弃矿山生态修复治理项目为例[J]. *四川有色金属*, 2023(2): 4-7.
FAN Bin. Ecological environment problems and remediation countermeasures of the historically abandoned mines: Take the ecological restoration and treatment project of a historical abandoned mine in Guizhou Province as an example[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2023(2): 4-7.
- [5] 姜丽丽, 李少飞, 徐洪伟. 历史遗留废弃矿山生态修复现状及治理对策研究[J]. *自然资源情报*, 2023(1): 22-27.
JIANG Lili, LI Shaofei, XU Hongwei. Research of current situation and countermeasures of ecological restoration of abandoned mines left over by history[J]. *Natural Resources Information*, 2023(1): 22-27.
- [6] 自然资源部办公厅. “十四五”历史遗留矿山生态修复行动计划[R]. 2022.
- [7] 云南省自然资源厅. 云南省国土空间生态修复规划(2021—2035年)[R]. 2023.
- [8] 段昌群, 李世玉, 温庆忠, 等. 基于云南实际的矿山生态修复模式选择研究[R]. 2022.
- [9] 张进德. 科学实施山水林田湖草生态保护与修复工程[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 3.
- [10] TD/T 1070.1-2022. 矿山生态修复技术规范 第 1 部分: 通则[S].
TD/T 1070.1-2022. Technical specifications for ecological restoration of mines—Part 1: General rule[S].
- [11] 蔡保新, 杨晓艳, 刘涛, 等. 云南省矿山生态保护修复评估报告[R]. 2023.
CAI Baoxin, YANG Xiaoyan, LIU Tao, et al. Evaluation report of mine ecological protection and restoration of Yunnan Province[R]. 2023.
- [12] 许庆良, 刘长伟. 废弃矿山生态修复综合技术[J]. *林业实用技术*, 2010(12): 15-16.

Study on ecological restoration countermeasures of abandoned mines in Yunnan Province

CAI Baoxin^{1,2,3}, LI Qin^{1,2,3}, KONG Zhigang^{1,2,4}, YANG Xiaoyan^{1,2,3}, LI Yanqing⁵, SONG Zenghong^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, MNR, Kunming, Yunnan 650216, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geoecological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming, Yunnan 650216, China;

3. Yunnan Institute of Geo-Environment Monitoring, Kunming, Yunnan 650216, China; 4. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming

University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 5. Yunnan Provincial Traffic Safety Coordination

Center, Department of Transport of Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650031, China)

Abstract Ecological restoration of abandoned mines is an important step in practicing ecological civilization and is of great significance in maintaining ecological security in Southwest China. Yunnan Province is abundant in mineral resources and is often referred to as the "Kingdom of Non-ferrous Metals" and the "Province for Phosphorus Chemical Industry". Mining is one of the pillar industries in Yunnan, making significant contributions to the socio-economic development of Yunnan and the rest of China. However, the ecological and environmental issues carried over from mining activities of the past are prominent. The abandoned mines have, to some extent, hindered local socio-economic development; however, they also represent a natural resource that can be re-exploited. Mining activities in the past have excavated and occupied land resources, changed the original topography, destroyed forest and grassland vegetation, disrupted the connectivity of ecological corridors, caused damage or degradation to ecosystems, diminished water conservation functions, and aggravated rocky desertification and soil erosion. There are numerous abandoned mines in Yunnan Province, which are widely distributed and predominantly small in scale. These sites are burdened by significant debt, face complex ecological issues carried over from the past, and possess inadequate natural recovery capacity, resulting in a challenging remediation task. In recent years, there has been a focus on key watersheds and important ecological areas. This focus aligns with the overarching principles of respecting and adapting to nature, following the laws of natural ecosystem succession, prioritizing natural recovery while supplementing it with engineering solutions, and ensuring that all actions are suitable, technically feasible, and financially viable. As a result, ecological restoration methods and measures have been selected based on scientific criteria. Near-natural solutions have been implemented to fully embody the principles of comprehensive management and systematic restoration. These approaches have actively and systematically promoted the ecological restoration of abandoned mines, resulting in positive outcomes. However, the extensive number of abandoned mines and the funding shortfall for restoration efforts have resulted in a critical ecological restoration situation. Currently, over 100,000 acres of abandoned mines in

Yunnan Province urgently require ecological restoration, posing significant challenges to the livelihoods and daily lives of local villagers.

The diversity of Yunnan's climate presents varying requirements and challenges for environmental protection and ecological restoration. The northwestern cold climate zone of Yunnan experiences long winters with no summers and only short spring and autumn seasons, resulting in slow vegetation growth and significant challenges for ecological restoration. In contrast, the eastern and central temperate climate zones of Yunnan have indistinct seasons, characterized by moderate average annual temperatures and precipitation, which facilitate the recovery and growth of vegetation. The southern and southwestern tropical and subtropical climate zones of Yunnan are abundant in precipitation and biodiversity, creating favorable conditions for vegetation restoration and the protection of biodiversity. Dry and hot river valley regions of the Jinsha river and Yuanjiang river experience a scorching climate characterized by drought and limited rainfall. This results in an imbalance between water and heat, as well as low soil organic matter and nutrient content. Ecological restoration efforts in these areas should prioritize soil and water conservation, along with the protection of water sources.

Based on the current situation of ecological and environment damage caused by abandoned mines in Yunnan Province, this paper analyzes the ecological problems of mines. Drawing on the experience gained in the ecological restoration of abandoned mines, it constructs restoration modes such as "natural restoration, ecological carbon sink, transformation and utilization, and ecological restoration+". Fully considering factors such as the natural geography of mining areas, the pattern of ecological restoration, incentive policies, and the requirements of controlling national land space use, it discusses countermeasures and suggestions for the ecological restoration of abandoned mines, focusing on aspects such as restoration direction, engineering measures, and investment mechanisms. The aim is to provide technical support and innovative ideas for the ecological restoration of abandoned mines in the context of the new paradigm of "mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands as a community of life". In the next step of promoting the restoration of abandoned mines, it is necessary to redefine the concept of ecological restoration of mines. This involves accurately understanding the relationship between natural and artificial restoration. It is crucial to adhere to the principles of ensuring safety, restoring ecological balance, and considering the landscape. Additionally, it is important to scientifically select appropriate models for mine ecological restoration and engineering measures based on the potential value of abandoned land resources, while also complying with regulations of controlling national land space use. Taking into account the current situation of social and economic development in mining areas, as well as factors such as micro-landforms, surrounding vegetation, traffic conditions, and water and soil quality, the ecological restoration of mines has been carried out, and the restoration direction has been determined with careful consideration. Through policy incentives and the strategic allocation of financial funds, we will encourage social capital to engage in the ecological restoration of abandoned mines. Our goal is to revitalize these sites, and establish a new model of self-sustaining and self-cycling ecological restoration of abandoned mines.

Key words abandoned mine, ecological environment, ecological restoration, restoration technology for mines, protection of natural elements

(编辑 张玲)