

矿山生态修复技术及模式的研究和应用

任利平^{1, 2, 3, 4)}, 许连峰⁵⁾, 杜开元^{1, 2, 4)}, 李瑞强^{1, 2, 4)}, 史琳^{1, 2)},
王海勇^{1, 2)}, 王子凡⁶⁾, 马育恒⁷⁾, 刘琳珂^{1, 2, 4)}

1) 河南省地质研究院, 郑州, 450016;

2) 河南省地质研究院国家自然资源科普基地, 郑州, 450016;

3) 自然资源部中原城市群多要素城市地质大数据工程技术创新中心, 郑州, 450016;

4) 中国地质大学(北京)自然文化研究院黄河分院, 郑州, 450016;

5) 河南省地质科学研究所有限公司, 郑州, 450001;

6) 东华理工大学, 南昌, 330013; 7) 东北林业大学, 哈尔滨, 150040

内容提要:针对矿山生态修复中普遍存在的技术单一、地质支撑不足、忽视地质条件差异及文化融合缺失等问题,笔者等以河南息县濮公山废弃矿山为对象,旨在探索一种融合生态恢复、文化传承与经济可持续发展的综合治理模式。项目创新性地从地质角度切入,系统构建了包含地质景观重建、土地重建防固、土地基质改良、水资源重建等地质修复技术,结合植被生态修复、景观生态养护等自然修复技术,并融入文化元素与旅游空间开发技术的综合性修复体系,形成“地质+自然+文化+旅游”四位一体的4.0生态修复模式。实施结果表明,该模式成功恢复了矿山生态环境,有效解决了地质安全隐患,同时打造了特色文化景观并实现了旅游产业开发,形成了生态、文化、旅游功能的三位一体融合。其核心价值在于不仅消除了环境问题,更创造了持久性的经济收益,有力推动了区域可持续发展。该模式为国内同类废弃矿山的系统性、多功能生态修复提供了可复制、可推广的成功经验和示范案例,具有重要的生态、经济和社会综合效益。

关键词: 矿山生态修复;地质技术;治理模式;息县;濮公山

随着采石行业的发展,引发的矿山地质环境问题日益加剧,严重威胁周边的生态、环境(蒙永辉等,2016;张宪尧等,2016;李军栋,2019;陆峰等,2022;徐庆福等,2022;刘传娥等,2022;王志亮,2023)。河南息县濮公山作为历史悠久的石灰岩矿区,尤其是露天开采形成的高陡边坡、采坑、大型废弃矿渣、石灰窑、办公场区、工业广场等严重影响了土地资源和地形地貌景观。其矿山地质环境问题复杂、治理修复难度大。为恢复濮公山的生态活力与历史生机,让残山剩水变成金山银山,实现社会经济与生态环境的可持续发展,探索废弃矿山生态修复的新思路成为息县政府及全县人民的迫切需求。

国外对矿山生态修复研究有较长的历史,近年来国内对矿山生态修复也日渐重视,提出了很多矿

山生态修复技术。但许多矿山生态修复存在忽视地质条件的差异性、缺乏地质技术支撑、修复技术单一、缺少文化元素的融合和长期养护机制等,尤其对多种修复技术的联合应用、关键技术的体系构建以及对矿山生态修复模式的研究尚不完善,没有一套可以将多种生态修复技术优化集合而成的全面成熟的生态修复技术体系。这些问题导致修复效果不理想,治理成果不可持续,甚至出现反复破坏的情况。针对这些问题,在濮公山废弃矿山生态修复过程中,重点考虑矿山地质行业的转型发展及生态修复建设和可持续发展问题,既要结合本地自然禀赋和人文资源优势、经济承受能力、区域发展规划和功能定位,还要考虑废弃矿山的类型、开采历史、现状等实际情况等,制订有针对性的生态修复方案。修复方



注:本文为2024年度河南省地质研究院地质科技攻关项目(编号:2024-909-XM04、2024-909-XM13)资助和息县濮公山废弃采石场矿山地质环境恢复治理项目(编号:豫财建[2014]127号)和全国重要地质遗迹资源立典调查评价项目(编号:DD20243476)的成果。

收稿日期:2024-10-13;改回日期:2025-05-10;网络首发:2025-07-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.041

作者简介:任利平,男,1980年生,硕士研究生,正高级工程师,主要从事地质文化和旅游地质、生态修复技术研究;Email: 285804699@qq.com。通讯作者:许连峰,男,1978年生,本科,工程师,主要从事环境地质、地质遗迹保护及布展设计研究;Email: 2648200097@qq.com。

案应围绕一个明确主题,以实现一个或多个功能为目标,达到废弃矿山生态修复的再利用,从而推动当地经济可持续发展(许鸿,2021;刘德成,2023)。现有生态修复模式如“复垦、复绿”、生态旅游建设(许鸿,2021),将距离城市较近的废弃矿坑劣势资源转化为不同特色的优势资源(张亚玲等,2018;刘宇等,2021;雒建利等,2021;刘德成等,2022),生态修复和多产业融合发展(李国政,2019),旅游景观再造、农林渔禽和植被复绿(北京模式)(张春燕,2019),循环经济(马跃等,2018)等,虽各具特色,均未能全面满足濮公山当前生态文明建设的需求,亟需创新废弃矿山生态修复的新技术和新的治理模式,以更科学、系统的方式解决复杂的地质环境问题。笔者等在深入调查濮公山地质、生态、旅游及历史文化现状的基础上,借鉴国内外如上海辰山植物矿坑花园(李瑞琪等,2016)、唐山南湖生态公园(陈德荣,2013;刘婧,2022)、长沙湘江欢乐城(孟和苏乙拉,2020)、南宁园博园景区(王向荣,2019)、上海佘山世茂洲际酒店、黄石国家矿山公园等为代表的矿山生态修复典型案例的修复路径、修复模式、修复方法及修复技术、修复对策等先进经验;总结我国众多学者对不同自然条件、社会条件、经济条件以及不同类型的废弃矿山生态修复模式开展的一系列研究成果(马跃等,2018;刘洋,2019;刘德成等,2020;孙晓玲等,2020;刘德成,2020;刘德成等,2021;赵力文等,2022)等成功案例,废弃矿山旅游资源开发是贯彻“可持续发展”理念,优化国土空间开发保护格局,实现生态文明新突破的重要举措(李超等,2021)。结合本地实际,从地质角度研究生态修复方案,根据矿山的特殊地质背景和环境问题,创新修复技术,构建更加全面、系统的生态修复技术体系,使得生态修复技术在实际应用中变得更加高效,确保生态修复成果的长久性和可持续性。基于矿山修复后生态环境标准的严格要求,通过全面的研究与实践,首先采取地质景观重建技术、土地重建防固技术、土地基质改良技术、水资源重建技术等地质技术重塑矿山损毁区的地形地貌和山体修复;通过植被生态修复技术、景观生态养护技术等自然技术恢复重建废弃矿山地的生态系统;同时采取文化融合技术打造和复原当地特色的文化景观;以旅游空间开发技术进行旅游空间的总体规划和具体建设,实现矿山生态修复后集矿业文化展示、地质科普、历史文化、生态农业和生态养生等多功能于一体的旅游。这些关键技术的集成应用,为濮公山废弃矿山的生

态恢复提供了坚实的技术支撑,并形成了其特有的生态修复技术体系。同时提出了息县濮公山废弃矿山的独特生态修复模式,即“地质+自然+文化+旅游”的4.0废弃矿山生态修复模式,旨在通过地质技术与自然技术的融合,以文化为灵魂,旅游为可持续发展动力,以濮公山矿坑周边的植被为载体,以石灰岩矿开采遗迹景观为主体,以地质科普游乐、石灰岩采矿遗迹治理等环境更新、生态恢复手段展示为核心,融合濮公山历史人文景观,实现濮公山从废弃矿山到地质文化生态乐园的华丽转身。这一模式不仅融合了地质技术与自然技术的基础性恢复功能,还创新性地引入了文化融合技术作为灵魂,通过文化元素的注入提升矿区的文化内涵与吸引力;以旅游等可持续发展为目标,将矿区打造成集休闲、求知、娱乐、养生、健身、宗教等多功能于一体的旅游目的地;这一生态修复模式的实施,不仅实现了矿山的生态恢复,解决矿山生态环境问题;还带来了持久性的效益,实现了经济的可持续发展;将濮公山打造成为息县矿山生态修复的典范(地质、矿产、历史)和文化的展示窗口;同时,也成为息县开展全域旅游的启动器。该模式充分发挥地质技术优势,以地质文化创新驱动旅游产业发展,用地质与文化耦合的视角解读和支撑“行走河南·读懂中国”品牌,对生态环境保护修复提出地质解决方案并加以利用和实践。服务河南文化强省建设,铸就社会主义文化新辉煌,实现传统文化旅游内的换道领跑。该模式不仅修复了生态环境,还促进了地质科普、文化展示及旅游开发,为河南省乃至全国的废弃矿山生态修复提供了新思路与典型案例。

1 研究区概况

矿区位于淮河以南为缓丘垄岗区,濮公山为一突出的山体,原濮公山主体已被十几个石料场开采挖掉,形成目前地势南北高(原地形),中间低(采坑)的地势,海拔标高20.3~128.3 m。矿山表层主要为开矿堆积的弃土及粉质黏土,下部为灰岩。灰岩大面积出露,是矿山开采目的层。20世纪计划经济时期就已经形成规模化开采,为历史老矿山。大规模开采集中于2007~2012年,共有7个私营矿山露天开采,均为开采建筑石料用灰岩,单个生产规模均为 9.72×10^4 t/a,2012年县政府对所有矿山采取集体闭坑。

濮公山石灰岩等矿产资源的开发利用,造成了一系列矿山地质环境问题。其内整体地形地貌景观



图 1 矿区矿山地质环境问题现状图

Fig. 1 Current status map of mine geological environment issues in the mining area

(a) 一号矿坑全景; (b) 二号矿坑; (c) 三号矿坑; (d) 四号矿坑; (e) 五号矿坑; (f) 一号废渣堆; (g) 二号废渣堆; (h) 一号危岩体; (i) 二号危岩体; (j) 三号危岩体; (k) 四号危岩体; (l) 一号滑坡体; (m) 二号滑坡体; (n) 三号滑坡体

(a) panoramic view of No. 1 pit; (b) pit of No. 2; (c) pit of No. 3; (d) pit of No. 4; (e) pit of No. 5; (f) tailings pile of No. 1; (g) tailings pile of No. 2; (h) hazardous rock mass of No. 1; (i) hazardous rock mass of No. 2; (j) hazardous rock mass of No. 3; (k) hazardous rock mass of No. 4; (l) landslide body of No. 1; (m) landslide body of No. 2; (n) landslide body of No. 3

遭到严重破坏,岩层裸露,水土流失严重,对当地生态环境造成巨大影响;矿区内采坑错落分布(图1a—e),废弃矿渣随意堆放(图1f,g),压占损毁土地资源;采矿活动在一些区域形成了高陡边坡,引发崩塌(图1h—k)、滑坡(图1l—n)等地质灾害时有发生,是区内严重的地质灾害隐患;矿山的开采严重破坏了当地的生态环境,造成生态失衡,生物的多样性遭到不可逆的破坏;采矿活动造成的大气污染、水体污染及留下的固体废弃物的污染,严重破坏了当地地质环境和生态环境。

2 矿区旅游资源概况

2.1 矿业遗迹资源

息县濮公山矿区矿产资源类型丰富,经过多年的生产,其内遗留了石灰岩矿、大理岩矿、珉玉矿(图2a)、黏土岩等典型矿床和寒武系张夏组地层剖面、石炭系本溪组地层剖面及石炭系与奥陶系之间的平行不整合面等矿产地质遗迹类资源;形成了石灰厂、水泥厂、石灰窑(图2b)、碎石场、炮孔痕、安全洞(避炮棚)等生产遗迹资源;同时也赋予由巨大采坑、以及由采矿平台和边坡形成的壮观的台阶式采矿崖台、崖壁、长墙、残留峰等空间地貌景观。根据《中国国家矿山公园建设工作指南》的分类标准,可将公园内矿业遗迹分为矿产地质遗迹、矿业生产活动遗迹、矿业制品遗存、矿山社会活动遗迹和矿业开发文献史籍5大类,其中开发历史悠久的石灰岩矿、大理岩矿、西区采坑、中区采坑、息石灰等20处属重要级矿业遗迹。

2.2 人文资源

息县历史悠久,文化底蕴丰厚,是中华文明的发

祥地之一。息县境内名胜古迹,如繁星灿烂。曾被苏东坡誉为“东南第一峰”的濮公山隔淮与县城相望。站在峰顶,可南阅楚天,北眺中原。刘邓大军南下,将军试水,传为美谈,在中国革命史上,留下深深的足迹。“濮山拱翠”、“古息含烟”、“兴国寻幽”、“竖斧春耕”、“寨河晚渡”、“葛陂夜雨”、“广丰浸碧”、“淮汝交流”等八大景观,把息县绘就成一幅瑰丽的画卷。

3 矿山生态修复技术

3.1 矿山生态修复技术体系构建

自濮公山废弃矿山生态修复以来,根据矿山生态修复后生态环境标准要求,在矿区生态环境修复实践中,进行了新的探索,综合研究形成了八大关键技术:地质景观重建技术、土地重建防固技术(魏忠义等,2001;卢誉之等,2023)、土壤基质改良技术(魏忠义等,2001;朱晓勇等,2022;卢誉之等,2023)、水资源重建技术(魏忠义等,2001;郑飞,2015;卢誉之等,2023)、植被生态修复技术(魏忠义等,2001;卢誉之等,2023)、景观生态养护技术(魏忠义等,2001;卢誉之等,2023)、文化融合技术、旅游空间开发利用技术,综合运用以上技术,使濮公山废弃矿区生态环境得到有效修复。

首先采取地质景观重建技术、土地重建防固技术、土地基质改良技术、水资源重建技术等地质技术重塑矿山损毁区的地形地貌和山体修复;并通过植被生态修复技术、景观生态养护技术等自然技术恢复重建废弃矿山地的生态系统;同时采取文化融合技术从而打造和复原当地特色的文化景观;以旅游空间开发技术进行旅游空间的总体规划和具体的建

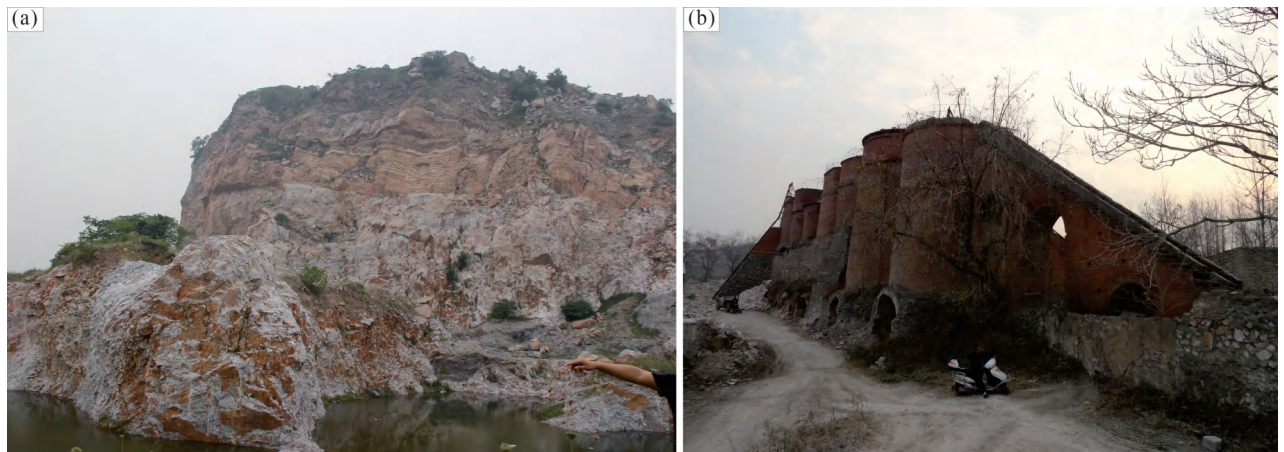


图2 矿区矿业遗迹图:(a)珉玉矿矿体;(b)石灰窑遗址

Fig.2 Map of mining heritage in the mining area: (a) jadeite ore body; (b) lime kiln site

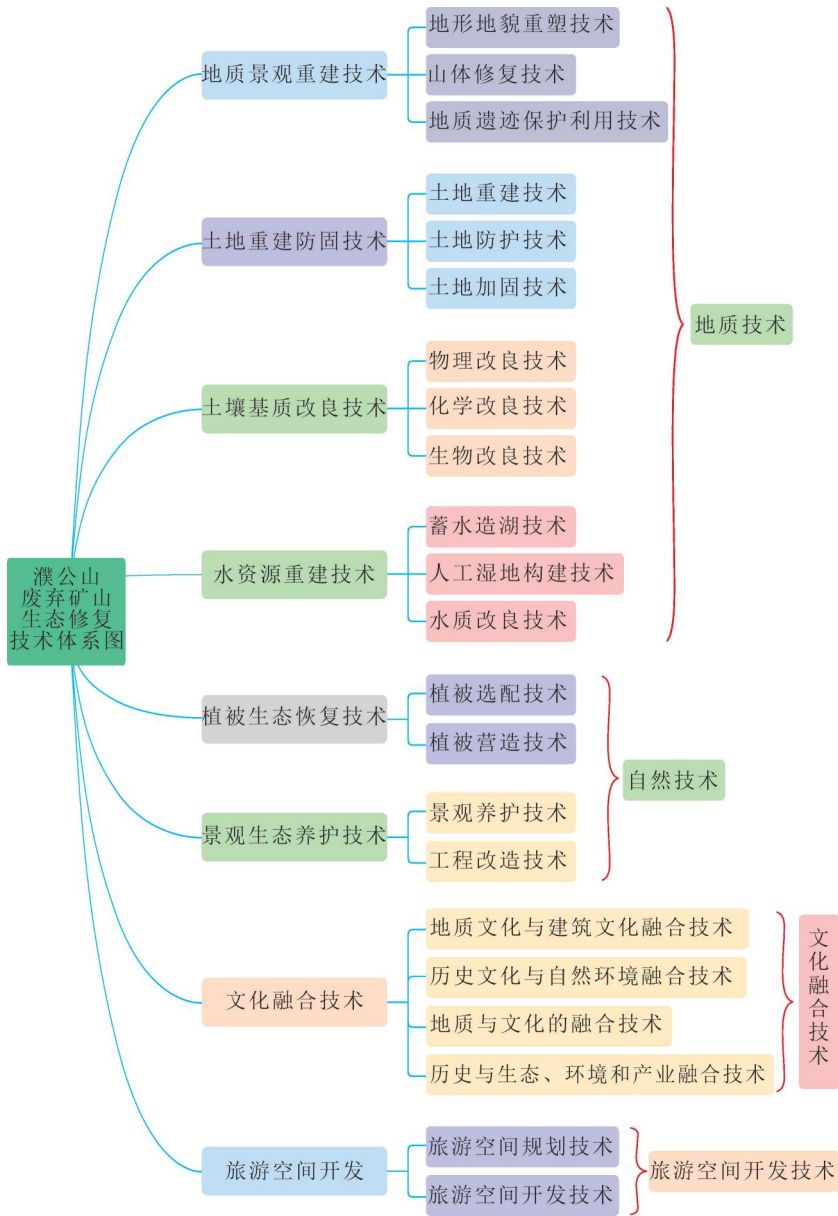


图 3 濮公山废弃矿山生态修复治理技术体系图

Fig. 3 Technical diagram of ecological rehabilitation restoration and management of the abandoned mine at Pugong Mountain

设方案,实现矿山生态修复后成为息县集休闲、求知、娱乐、养生、健身、宗教等于一体的旅游目的地。最终构建了以地质技术和自然技术为依托,以文化融合技术为魂,以旅游空间开发技术等可持续发展为宗旨的技术体系(图 3)。探索了露天废弃矿山生态环境一体化生态修复路径,在息县濮公山废弃矿区生态修复实践中得到有效的应用。

3.2 矿山生态修复技术

3.2.1 地质技术

地质技术是指运用地质科学技术手段对地质问

题进行探索 and 解决的过程。废弃矿山是一个地质灾害隐患、水土流失严重和地形地貌破坏等地质环境问题密集分布区,急需要用地质技术的手段来消除这些隐患和问题(王琼杰,2022),因此矿山生态修复的根本目的是将其被破坏的生态系统恢复和重建,以改善矿区人民的生活环境和可持续发展(魏艳等,2007;徐飞等,2022)。地质景观重建技术、土地重建防固技术、土地基质改良技术、水资源重建技术,是地质技术的重要组成部分和技术手段,通过这些技术手段可以重建濮公山废弃矿山损毁的地形地貌、山体、水资源和土地资源;消除地质灾害;有效的保护和利用地质遗迹资源及矿业遗迹资源。

3.2.1.1 地质景观重建技术

地质景观重建技术主要包括地形地貌重塑技术、山体修复技术、地质遗迹资源保护利用技术等。

(1)地形地貌重塑技术:主要包括削坡减载技术、土壤覆盖技术、贴岩技术及填平技术。在废弃矿山生态修复时,首先利用地形削坡减载技术(姜杉钰和谭丽萍,2024)对开采后形成的废弃矿坑或采坑、危岩体及崩塌、滑坡等地质灾害进行修整,消除地质灾害隐患;对斜坡采取坡降措施,建立缓冲平台(姜杉钰等,2024),减少山坡的倾斜度,增加稳定性;废渣或弃渣堆积的地方根据与周边地形条件相融合特征,进行地形整理,塑造微地形,避免出现陡坡陡坎等突变地形;在削坡减载的基础上,采用土壤覆盖技术,在坡脚进行填方压脚或地表上覆盖一层肥沃的土壤,一方面起到降坡作用,提高边坡的整体稳定性,一方面利用其改善植被生长条件和土地生态功能;同时,采用贴岩技术在边坡或废弃矿坑周边铺设矸(块)石或岩石,重建地质景观和生态环境,利于区域扬尘控制以及地被物种入驻自然修复;在削坡减载技术、土壤覆盖技术、贴岩技术等岩土工程的基础上,采用填平技术,利用矿区内原渣堆和清

题进行探索 and 解决的过程。废弃矿山是一个地质灾害隐患、水土流失严重和地形地貌破坏等地质环境问题密集分布区,急需要用地质技术的手段来消除这些隐患和问题(王琼杰,2022),因此矿山生态修复的根本目的是将其被破坏的生态系统恢复和重建,以改善矿区人民的生活环境和可持续发展(魏艳等,2007;徐飞等,2022)。地质景观重建技术、土地重建防固技术、土地基质改良技术、水资源重建技术,是地质技术的重要组成部分和技术手段,通过这些技术手段可以重建濮公山废弃矿山损毁的地形地貌、山体、水资源和土地资源;消除地质灾害;有效的保护和利用地质遗迹资源及矿业遗迹资源。

理危岩废料进行采坑整平,改变地表形态和地貌,有效增加治理区内建设用地和林地面积,提高土地利用效率改善,治理区内生态环境。

(2)山体修复技术:山体修复主要包括有自然修复技术、支挡工程技术、截排水工程技术、锚杆固定技术、边坡稳定性综合监测技术。

自然修复技术是凭借山体的自身调整、更新、适应性改变等恢复力,辅以生物因素恢复技术、封育技术等,在不通过大规模的工程措施恢复到原有生态系统结构和功能基础上的生态修复方法;对部分山体因矿山开采受损较为严重的地段采取支挡工程技术、截排水工程技术、锚杆固定技术等岩土工程进行修复。首先利用锚固技术,将受拉杆件固定在边坡岩层或土层中,从而维持山体的稳定;支挡工程技术采用挡土墙、抗滑桩等岩土工程,用来支撑、加固填土或山坡土体、防止坍塌以保持其稳定的一种建筑工程;截排水工程技术是在坡面以及坡顶等部位设置对应的截水沟或截水盲沟(武剑,2022)或是排水沟,从而有效避免雨水对坡面进行持续冲刷,促进后续生态修复工作的顺利开展。通过截水与排水措施的应用,就可以保证坡面基质能够处在稳定运转的状态中,还可以大幅度降低滑坡等危险问题的发生几率(胡耀东,2023);边坡稳定性综合监测技术是在基本完成山体修复的同时,通过空地深一体化多源数据融合和多手段在线监测系统,识别、监测和评估山体的稳定性,可以针对性的及时采取工程措施。

(3)地质遗迹资源保护利用技术:地质遗迹作为一种特殊资源,在保护地质与生态环境、促进地方经济、推动地球科学研究、普及地球科学知识、传播地球科学文化、提升国际影响力等方面,已显现出巨大的综合效益。如何利用中国智慧实现对地质遗迹的可持续性保护和利用,是眼下亟待解决的问题(高秦等,2022)。地质遗迹资源保护利用技术主要有安全隔离技术、工程保护技术、地质遗迹修复技术、地质遗迹开发利用技术等。安全隔离技术是对具有典型、稀缺、具有极高的科学价值并易受破坏的地质遗迹,如寒武系张夏组地层剖面、石炭系本溪组地层剖面及石炭系与奥陶系之间的平行不整合面及由采矿平台和边坡形成的壮观的台阶式采矿崖台、崖壁、长墙、残留峰等空间地貌景观采用围栏、安全网等安全隔离技术禁止采石、取土等以及其它对保护对象有损害的活动;工程保护技术是对地质遗迹综合实施界桩(碑)、围栏(网)、围墙、标识牌、警示

牌等围护与保护说明工程,重点地段实施监视预警工程,根据实际需要还应实施地质遗迹保护设施和科普解说设施工程、地质遗迹原址馆或科普廊道等建设工程;地质遗迹修复技术主要是对破碎岩体进行主体加固,通过削坡减载、回填压脚工程措施消除地质灾害隐患。通过清除浮石和破损岩层,使地质遗迹完整展现出来,让参观者感受到大自然的力量和造物的神奇。同时,对周围环境进行美化绿化,并建设科普长廊、科普广场,进行展示宣传,提供特色科普教育;地质遗迹开发利用技术是在地质遗迹调查评价和加强地质遗迹监测保护的基础上,大力推动资源转化。本着“在保护中开发,在开发中保护”的原则,合理开发利用地质遗迹资源(侯万荣等,2006)。地质遗迹是历史文化和自然遗产的重要组成部分,存在着巨大的科学研究和文化学术价值。地质遗迹与人文景观相结合存在着巨大的旅游价值,二者相得益彰,互为补充(侯万荣等,2006)。开展教学、科研、科普教育、地质旅游、休闲度假、文化娱乐等活动是地质遗迹资源科技开发利用的重要内容。

3.2.1.2 土地重建防固技术

土地重建防固是矿山修复中一个很重要的环节,也是改善矿区土壤质量的必要条件。土地重建防固的地段主要包括矿区周边土地、矿区压占土地和裸露山体表面的土地。土地重建防固的目标是对矿山废弃地的土地现状进行综合分析后,对矿山废弃地进行土地重建和边坡的防固,降低对周围土壤环境、植物生长和水资源,甚至是对人类生活的威胁,为后期土壤基质改良、土壤生产力的提高以及植被生态修复等技术建立基础。其中涵盖的技术有土地重建技术、防护技术和加固技术这3种(魏忠义等,2001)。

(1)土地重建技术:在矿山地形地貌重塑、山体修复、地质遗迹资源保护利用等地质景观重建的基础上,通过清理工程技术、土地平整技术、覆土工程技术等技术方法对矿山土地进行重建。清理工程技术是将矿山开采底板、开采平台、破碎区、加工区、外部排土场内机械设备、建筑物及水泥地坪地及废渣堆积物、清理危岩废料进行进行拆除和清理。同时,对矿山占用土地进行地表砾石清理工作,清除剩余垃圾及石渣等。能利用的建筑拆除物、原渣堆和清理危岩废料进行采坑整平,不能利用的拉运至附近垃圾填埋场进行填埋;土地平整技术是在清理工程完成的基础上,对场地进行机械平整,土地平整后地

面坡度小于 5° ,防止地面起伏;覆土工程技术是在土地平整的基础上,利用表土转换技术、客土覆盖技术重建土壤结构。

(2)土地防护、固技术:土地防护主要是对边坡或矿坑周围或河流阶地上的土地利用砌石防护技术和植被防护技术进行防护。砌石防护主要采用废弃石料石笼挡墙护坡和砌石挡墙护坡;植被防护主要采用植被混凝土防护和鱼鳞坑防护;土地加固采用土体置换技术、挡土墙加固技术、防护网加固技术、生物加固技术对土地进行加固,防止水土流失。

3.2.1.3 土壤基质改良技术

土壤基质改良技术是通过将矿山废弃地土壤基质进行改良,能够恢复矿山土壤的肥力和土层结构,很大程度上可以提高土壤的抗侵蚀性和水土保持能力(朱晓勇等,2022),给植物提供良好的生长环境。依靠本地的岩土条件、水热与温湿条件等,充分利用采矿剥离的表土和采矿遗留的废石(渣)、清理危岩废料等固体废弃物,通过培肥改良、土层置换、表土覆盖、土层翻转、化学改良、生物修复等措施,帮助改良和提高矿区废弃地土壤的肥力,增加矿区地表土壤的有机质成分和提高养分循环效率及提高植物生长的速率。采用的改良技术主要有物理改良技术、化学改良技术、生物改良技术等。土壤改良后,交付当地村民使用,可根据需要选择种植适宜农作物或经济林或植被或草地,如小麦、玉米、大豆或桃树等。

(1)物理改良技术:该技术涵盖耕植土回填技术、深耕翻土改良技术、农家肥培肥技术、秸秆焚烧培肥技术等。耕植土回填主要对矿区清理回收后,将含有凋落生物层、种子库和粗木屑等有机材料的表土,覆盖在土壤的表面,构成土壤改良层,以增加矿区地表土壤的有机质成分和提高养分循环效率(Burger,2011);利用农家肥培肥技术、秸秆焚烧培肥技术对土壤进行施肥,并通过翻耕、松土,让表层土和深层土壤进行翻动混合。一方面改良土壤的结构,促进土壤中微生物的活动与繁殖,使肥土相融,培肥土壤,提高地力。同时还可降低表层土壤中污染物含量。

(2)化学改良技术:本次主要采用吸附技术、营养元素添加技术和有机肥培肥技术等。吸附技术是添加黏土、石灰、人工合成材料等吸附性物质吸附土壤中的污染物,减少其对环境的危害;随后,在土壤检测的基础上,对矿山修复区域内添加相应的营养元素及有机肥料(腐殖质),改善土壤质量和提高植物生长量。

(3)生物改良技术:生物修复是利用植物、微生物等生物体,改善矿山区域的生态环境和土壤质量的修复方法。生物修复可以提高矿山区域的生态系统稳定性和土壤肥力,促进植被恢复和生物多样性的增加。本次选用植物修复技术,恢复植被,增强土壤稳定性,防止土壤沙化与水土流失,提高生态系统的自我调节能力。其一,利用抗逆植物,如沙生植物、旱生植物等,具有较强的逆境适应性,多以本土化为主,利于矿山环境的生长和繁殖;其二,利用高产、耐旱的绿肥作物进行种植,增加土壤有机质含量,改善土壤质量;其三,利用灌木种植,灌木在根系发育较为发达,具有良好的土壤保持能力,同时也是很好的动物栖息地和食物来源;同时,在矿山区域进行森林建设,增加植被覆盖率,改善土壤质量和水文条件。

3.2.1.4 水资源重建技术

此项技术是在地质景观重建的基础上,利用的重塑地貌和景观重新分配水资源。该技术包括蓄水造湖技术、人工湿地构建技术和水质改良技术3类工程技术。

(1)蓄水造湖技术:利用一些截排水工程、地下水拦蓄技术和生态系统回收技术,修筑截水沟、排水沟、截排水盲沟、挡土墙、排水廊道、排水孔等,恢复水文的流动路径,确保雨水、地表径流或洪水进入废弃的矿坑;同时,修筑地下水拦蓄坝以恢复水文的流动路径,确保水的渗透、储存、排水和地下水补给等水文过程的正常,一方面为濮公湖、秦王潭、龙女潭等蓄水湖存储创造条件,一方面减少地表径流或洪水进入矿山坡地中,防止下渗至地面以下的水流量过多,造成土壤肥力的流失和植被损害(卢誉之等,2023);通过生态系统回收技术,改善土壤渗透性,促进植被生长。

(2)人工湿地构建技术:主要包括湿地水域恢复技术(李瑞强,2024)、湿地地形改造技术(李瑞强,2024)、湿地基质恢复技术(李瑞强,2024)和湿地岸坡恢复技术(李瑞强,2024)。湿地水域恢复技术是通过扩挖、沟通小水面、局部深挖和区域滞水等工程技术措施对水体形状、规模、空间布局进行调整,稳定水域面积(李瑞强,2024);湿地地形改造技术是通过营建浅滩湿地、规整小型水面和营造生境岛等工程技术措施改善和营造湿地植被和水鸟的生存环境;湿地基质恢复技术是通过分层回填壤质土、种植坑回填壤质土和种植槽回填壤质土等工程技术措施增强湿地基质储存水分和营养物质的能力,为

植被提供良好的营养条件,为鸟类等动物提供栖息地(李瑞强,2024);湿地岸坡恢复技术是通过木桩护坡、块石护坡、生态砖、生态混凝土护坡、生态袋护坡、植物护坡、生物工程护坡等技术措施对湿地岸坡进行恢复(李瑞强,2024);植物护坡和生物工程护坡技术是利用具有生命力的湿地植物根、茎(秆)或完整的湿地植物体作为护岸结构体,实现加固和稳定岸坡,控制水土流失(李瑞强,2024)。

(3)水质改良技术:针对濮公山废弃矿山生态修复中蓄水造湖及湿地构建中的水来源主要为雨水和地下水渗透及部分的特性,主要选择沉淀、过滤的技术方法来进行水质改良。同时,结合水资源重建技术,利用水生植物修复技术提高水的质量。过滤、沉淀技术是通过天然降雨进行收集存储,并作为源水回补到水系中,基本方法是集水的收集—截污—过滤—沉淀—存储—渗透—提升—回用和控制一体化的过程。通过过滤、沉淀能够有效去除水体中的颗粒物、悬浮物和溶解物等有害物质;水生植物修复技术是通过合理种植挺水—浮水—沉水植物,利用其对污染物的吸收、降解作用,达到水质净化的效果;同时,可以合理放养水生动物等方式构建较为完整的食物链,提高水体自净能力。

3.2.2 自然技术

自然技术是利用自然与环境和谐共生理念,探索和遵循自然系统和生物成长的运行规律,采用因地制宜原则所形成的生态技术或生物技术。通过模拟自然生态系统的运行方式,实现矿山生态绿色修复。本次采用植被生态修复技术和景观生态养护技术,可将相关技术归属到植被选配、植被营造和植被养护这3大环节(姜杉钰等,2024)。植被选配技术、植被营造技术为植被生态修复技术的关键技术。经过一系列自然技术的运用及改造,使濮公山废弃矿山的植被生态得到有效的修复,大大扩大了濮公山废弃矿山碳的寄存体,提高了森林、草地、土壤和耕地的固碳能力,实现了利用自然生态系统进行碳清除,成为绿色碳汇(陈关升,2012)的重要途径。

3.2.2.1 植被生态修复技术

(1)植被选配技术是矿山复绿的先导性环节,包含选取和配置两方面技术(姜杉钰等,2024)。通过选择植物品种、配置方式等,将生态系统原有的生物群落进行重组或重建,建立新的具有较强适应性和较高生产力的生物群落结构(罗金妹,2024)。根据矿区气候条件、植物演替过程,综合实验方法,以适应性强、抗逆性好、优先固氮树种、乡土树种和先

锋树种等多功能效益为原则选择植物(郑飞,2015)。在选取技术上,注意当地的气候、土壤、水文等环境,选择适合当地生长,且具有一定经济价值的植物种类(罗金妹,2024),在保持森林植被的原始状态同时,因地因景制宜、适地适树,保持植被类型的多样化,突出区域地带性植物群落的特色,以乡土树种为主,适当引进观赏价值高的树种。主要以抗逆植物、绿肥植物为首选。如湘潭锰矿废弃地种植栎树对土壤中的锰和镉进行吸收净化(方晰等,2007);安徽铜陵铜矿利用天蓝苜蓿、马棘等豆科植物固氮以增加土壤肥力(田胜尼等,2005);在配置技术上,采取自然式的植物配置方式,乔灌藤草相结合,注重立体种植,形成自然结构类型和富于季相变化的植物群落。“乔灌草”的立体配置模式因有利于增强群落稳定和生物多样性,如江西坪市稀土矿“构树+胡枝子+香根草”模式(宋祥兰等,2015;李瑞强,2024)和福建紫金山金铜矿“马尾松+胡枝子+香根草+本地河滩草”模式(侯晓龙等,2012)等。濮公山废弃矿山生态修复选择“乔藤灌草”的立体配置模式,乔木选择杨树、马尾松、池杉、落羽杉、水杉、栎类、板栗、柿树、银杏、榆树、泡桐、刺槐、臭椿、苦楝、楸树、柳树、梨树、李树、枣树等树种;灌木树种选择紫穗槐、枸杞、花椒、荆条、茶树等;草本植物选择茅草、狗牙根、马齿苋、莎草等;藤类植物选择紫藤、凌霄、牵牛花、石楠藤、藤本月季、蔷薇等;农作物主选择水稻、小麦、玉米、大豆、绿豆、红薯、花生、芝麻、红麻、烟草等。

(2)植被营造的技术手段众多,不同技术优缺点明显、适用性不同,实践中常根据具体需求进行优选和组合(姜杉钰等,2024)。濮公山废弃矿山生态修复应用人工种植技术、喷播覆盖技术、挡墙蓄坡绿化技术、森林建设技术及植被景观营造技术,使这一区域的植物群落保持生态平衡,发生群落演替。人工种植技术是在合理地选址、培土、选种、配置的基础上,采用播种、植苗和分殖、无人机飞播等技术。播种主要有沟播、穴播、条播、撒播等几种形式,实现局部控制性植被恢复;喷播覆盖技术是将含有植被种子的混合物喷播到矿山地表裸露区域以形成复绿效应(姜杉钰等,2024);挡墙蓄坡绿化技术是对高陡、坡前修建挡土墙,墙后回填渣土蓄坡,蓄坡后覆种植土,选择乔藤灌草种植绿化;森林建设技术是在适宜造林的荒山、荒地、采伐迹地、火烧迹地、滩涂地、沙荒地和废矿基地等地方,采用播种造林、植苗造林和分殖造林技术进行森林建设,造林作业包括

采种、育苗、栽植(或播种)及幼林抚育等。森林建设是生物多样性和野生动物保护、生态系统可持续能力、保持水土能力的重要保障。

(3) 植被景观营造技术以乡土树种与外来树种相结合,以自然乔、灌、藤、草本植物群落的种类、结构、层次和外貌为基础,通过抚育、嫁接、整形等艺术手法,形成山水—植物、建筑—植物、街道—植物等综合景观。在位置选择上以主入口周边、广场边、水系边、假山周边、建筑物和构筑物周边、道路交叉口、观赏停留处的视线焦点位置等为主;在植物空间配置上采取列植、丛植、群植等形式,营造出多种仿自然或半自然群落景观;在植物景观营造方法上利用借景、框景、夹景等手法打造疏林草地景观、密林景观、规则式植物景观等。如:利用广玉兰、柏树、松属等四季常绿为基调树,以桃树、柳树、雪松、紫薇、栾树、银杏、樱花等乡土树种为骨干树种,植物搭配采取常绿与落叶搭配,速生与慢生结合,既保证了植物景观的稳定性和地域性,又具有季相变化,避免景观的单调性。在坡度($5^{\circ} \sim 15^{\circ}$)的坡地上,建立经济林园艺化管理的农果复合型生态农业建设模式或果树丰产及产业化为主的农果复合型生态农业建设模式(杨振京等,2006),息县利用废弃矿坑自然空间,结合本地适合种植树种桃树,融合桃花夫人文化元素,建设桃花谷,形成景观资源,交付周边居民维护并收益。

3.2.2.2 景观生态养护技术

景观生态养护是矿山生态修复过程中提升植被成活率,维持生态环境长期稳定发展的关键技术,也是维护复绿成果的最后一道技术屏障(姜杉钰等,2024)。该技术包括景观养护技术和工程改造技术。景观养护技术主要涵盖采种利用、抚育、苗木补

植、施肥、灌溉、病虫害防治等,其中,灌溉技术,尤以高陡边坡的喷灌和滴灌系统布设研究比较典型(李立,2022;杨阳等,2022;姜杉钰等,2024),在综合服务区、矿业文化展示区、地质科普游乐区、历史文化游览区、矿山环境恢复治理示范区和生态涵养区的藤、冠、草种植区则以旋雾状喷灌为主;工程改造技术涵盖有体型修复绿化、文化景观维护、植物景观整形等,目前,濮公山废弃矿山工程改造技术集中在嫁接、修剪、整形。如徐州邱山山体改造工程在解决邱山山体的生态和安全问题后,将山体复绿作为工程重点,并根据当地环境特色进行了景观设计,使修复后的山体与自然相融合,成为徐州市第一个景观山体公园(梁好雅,2020)。

3.2.3 文化融合技术

文化融合技术,是运用当地的历史文化元素、地质要素、生态要素,找出三者之间的耦合关系,从而打造和复原一种文化景观,其中又包含着丰富的地质科学内涵,把地球系统科学文化与中国传统历史文化巧妙融合,依据“一方水土养一方人”理念打造文化自信的地质文化新质生产力(何哲,2024)。息县历史文化悠久,文化内涵丰富,古息国、华夏第一县、息夫人、濮公悬壶济世、苏东坡东南第一峰、王安石太阳碑、滴水洞等历史传说的典故在百姓当中影响深远。但这些文化资源很多都没有实体展现形式,如何传承这些文化,需要我们发挥创造性思维、创新性手段去实施。在废弃石灰窑矿业遗址治理中,利用矿业遗址矿业文化传承需要,融合石灰烧制后造型到博物馆主体建筑外形中(图 4a),实现地质文化与建筑文化的融合(息县濮公山矿山公园博物馆成为标志性建筑,在 2021 年意大利米兰国际设计



图 4 多元文化融合实景展示图:(a)濮公山地质博物馆;(b)东南第一峰及周围矿坑生态恢复实景

Fig. 4 Real-scene display of multicultural integration; (a) geological museum of the Pugong Mountain;

(b) the scene of ecological restoration around the first peak of the southeast and its surrounding mine pits

大赛中获得银奖,意大利设计大奖赛创建于2010年,是目前世界上规模最大、种类最多的综合性设计比赛);在一区矿坑资源转型中,打造苏东坡文化,矿坑积水区域设计砚台、墨汁、洗笔池,崖壁摩崖石刻复原“东南第一峰”,实现历史文化与自然环境的融合(图4b);崖壁下落石、安全防护等地质灾害问题处理,修建人工防护涵洞,给涵洞内结合石灰岩喀斯特地貌特点和息县“滴水洞”历史传说,复原滴水洞景观,实现地质与文化的融合;在采矿峡谷内种植在当地便于存活生长的桃树,溶于息夫人即桃花夫人、“三生三世十里桃花”影视网红,营造桃花谷景点,实现历史与生态、环境和桃产业的融合。累计完成濮公山博物馆、东坡湖、濮公湖、桃花谷、滴水洞等创新景观,以文化融合技术为濮公山乃至息县打造出文化自信的新质生产力。

3.2.4 旅游空间开发技术

旅游空间开发技术涵盖旅游空间规划和旅游空间开发两类技术。旅游空间规划是根据旅游资源的分配、旅游环境的塑造、旅游产业的布局等,通过对旅游资源开发空间格局的优化,整合区域内的旅游资源,构建层次分明、协调有序的旅游开发空间布局,形成有机联系、功能互补的旅游产业集群,形成集“食、住、行、游、购、娱”旅游产业;旅游空间开发技术是通过旅游线路有机贯通,形成相互协调和联合动态开发格局,提升濮公山旅游的整体水平,形成相对完善的产品组合,最大限度地促进产业结构优化和升级。

(1)旅游空间规划。对于濮公山矿山修复按照总体保护与适度开发相结合、地质特色与生态人文相结合、休闲健身与度假旅游相结合、特色原则与统一布局相结合的原则,将濮公山生态修复空间布局为“一个中心、四条主线、六大亮点”。一个中心指的是山门及游客服务中心,四条主线分别是地球演化主线、矿业文化主线、历史文化主线和养生文化主线,六大亮点分别是矿山博物馆、矿业遗址及矿业广场,东坡园、濮公湖,秦王潭、龙女潭等水上乐园,矿业文化走廊及石灰园,祖师庙和养生区。旅游空间布局采用“六区”的总体构架:综合服务区、矿业文化展示区、地质科普游乐区、历史文化游览区、生态农业区和生态涵养区等六大区。

(2)旅游空间开发。旅游空间开发是在生态修复、土地流转、土地平整的基础上,对综合服务区、矿业文化展示区、地质科普游乐区、历史文化游览区、生态农业区和生态涵养区等进行总体布局及方案实

施,形成集地质科普、矿业文化、历史文化、养生文化、特色餐饮、旅游接待、商品购物、休闲娱乐和文化活动为一体的旅游体系。分三个步骤进行全方位的生态修复:第一步主要对矿业广场、东坡园、公园博物馆、矿业文化长廊、地质广场、长寿(石灰岩)广场和相关连接步道进行生态修复建设;第二步主要围绕矿山全面开展旅游的要求,对濮公湖、秦王潭、龙女潭、寒武—奥陶奇虾园、石炭—二叠蜻蜓园(日月湖广场)、中生代恐龙园、新生代象园和养生园及祖师庙进行生态修复建设;第三步完成矿山内各种基础设施建设,对矿业遗迹进行科学保护,同时,对矿山内环道、内环道与景点的连接道等进行建设和生态绿化。濮公山废弃矿山生态修复后通过旅游线路的有机贯通形成以下几种旅游线路:A综合服务区—东坡园—濮公湖—矿业文化长廊—石灰园—祖师庙—养生园—秦王潭—龙女潭—综合服务区的旅游游程组合;B综合服务区—生态涵养区—养生园—综合服务区的养身观光旅游线路;C综合服务区—濮公湖—秦王潭—综合服务区的休闲度假旅游线路;D综合服务区—国营石灰厂—矿业广场—矿业博物馆—矿业文化长廊—石灰园—双龙水泥厂—综合服务区的地质科普旅游线路;E综合服务区—濮公湖—秦王潭—龙女潭—综合服务区的科普教育旅游线路;F综合服务区—东坡园—祖师庙的历史文化旅游线路。

4 矿山生态修复模式构建

4.1 国内外典型矿山生态修复模式

生态恢复模式旨在通过减少干扰、促进生物变化,加速退化生态系统的恢复。这涉及改善土壤、选用适宜植被,并采取边坡稳定措施。成功案例包括南宁园博园、唐山南湖生态公园、上海辰山植物园矿坑花园、绿金湖矿山地质环境生态修复、寻乌县废弃矿山综合治理,国外的法国 Biville 采石场生态恢复、委内瑞拉古里采料场生态恢复、美国东 Anaconda 铜矿生态恢复等,它们通过精妙设计,将废弃采石场转变为特色景观区,既修复了生态,又创造了休闲空间,展现了生态恢复与工业遗址再利用的典范。

根据不同的功能和特性,目前矿山修复主要有生态恢复、博物资源利用、旅游开发、复垦造田、引水造湖、垃圾处理厂和仓储等七种模式(河北省自然资源厅科技外事处,2021)。

博物资源利用(矿山公园)模式聚焦于矿山历

史发掘、遗迹保护及可持续发展。国内外典型如黄石国家矿山公园、安徽淮北国家矿山公园、康乃狄克州矿山公园、玛丽纳矿山公园、罗马尼亚“地下盐宫”矿山公园等,通过恢复生态、弘扬矿冶文化,将废弃矿山转变为集科普、科研、文化展示与环保示范于一体的多功能公园,不仅保留了矿业遗产,还促进了人与自然和谐共生。

旅游开发模式主要利用废弃矿山发展旅游,实现经济、生态、社会效益。旅游开发不仅创造经济价值,还解决就业,并吸引政策资金支持生态修复。成功案例如黄石国家矿山公园与英国伊甸园,前者融合矿冶文化与生态恢复,后者则将废弃矿坑改造为世界级植物园,均展现了矿山旅游的巨大潜力。

复垦造田模式在欧美已应用数十年,有效改善地质,增加耕地,带来显著经济和社会效益。莱芜区苗山镇大漫子复垦造田是典型案例,通过复垦废弃地、土地提质,将破坏严重的砂石厂转变为农田。

引水造湖模式通过治理矿坑环境,引入水源将其变为湖泊,进而带动周边土地转化为农田、森林,促进矿区综合发展。法国 Biville 采石场是典范,将废弃矿坑改造成 3.5 km² 湖泊休闲区,保留工业痕迹,设计湖岸适应休闲活动,并植绿恢复自然,展现了对历史文脉的尊重。

垃圾处理厂模式利用废弃矿坑处理垃圾,解决占地、污染及资源回收问题。加拿大蒙特利尔圣米歇尔环保中心原为石灰岩矿坑,后成垃圾填埋场致污染严重。1995 年起,政府引导改造为综合垃圾处理场,先建沼气发电厂,后设污水处理系统减污染。现正转型为大型公园绿地,规划教育、休闲设施,保留开采历史,实现生态与人文并重的新生。

仓储模式主要利用围岩稳定、交通便利的废弃矿山,改造为仓储设施,存储温控物品如蔬果,或作为工业医疗废弃物存放地。佳木斯大堆丰项目通过“生态+多产业”模式,将 20 hm² 废弃矿山转型为集生态、渔业、农业、仓储于一体的综合区,特别利用矿坑特性节能仓储,开创生态保护新路,实现土地资源的有效盘活。

4.2 息县濮公山矿山生态修复模式构建

结合濮公山废弃矿山的地质环境问题现状及矿山的治理现状及下一步治理修复计划,以建设濮公山矿山公园(博物资源利用)为主题,在集生态恢复、复垦造田、蓄水造湖、旅游开发等多种模式综合利用的基础上,依托地质景观重建技术、土地重建技术、土地基质改良技术、水资源重建技术等地质技术

和植被生态恢复技术、景观生态养护技术等自然技术以及文化融合技术、旅游开发技术,制定了息县濮公山废弃矿山特有的生态修复治式,即“地质+自然+文化+旅游”的 4.0 废弃矿山生态修复模式(图 4),该模式以地质技术和自然技术为依托,以文化融合技术为魂,以旅游等可持续发展为宗旨,以濮公山矿坑周边的植被为载体,以石灰岩矿开采遗迹景观为主体,以地质科普游乐、石灰岩采矿遗迹治理等环境更新、生态恢复手段展示为核心,融合濮公山历史人文景观,将濮公山打造成息县矿山环境治理的示范地、(地质、矿产、历史)文化的展示地、城乡居民的休闲地,成为息县集休闲、求知、娱乐、养生、健身、宗教等于一体的旅游目的地。同时也成为息县开展全域旅游的启动器。该模式将地质文化融入废矿改造的矿业文化和悠远历史,因地制宜,以濮公山矿业遗迹、地质生态环境及祖师庙为主体,充分发挥地质技术优势,对生态环境保护修复提出地质解决方案并加以利用和实践,充分体现息县地质、矿业的科普价值,自然价值和宗教、民俗等历史文化价值。

5 结论

(1) 当前,许多废弃矿山的生态修复方案存在共性问题,如忽视地质条件的差异性、缺乏地质技术支撑、修复技术单一、缺少文化元素的融合和长期养护机制等,尤其对多种修复技术的联合应用、关键技术的体系构建以及对矿山生态修复模式的研究尚不完善,没有一套可以将多种生态修复技术优化集合而成的全面成熟的生态修复技术体系。针对这些问题,在濮公山废弃矿山生态修复中,从地质角度研究生态修复方案,根据矿山的特殊地质背景和环境问题,创新修复技术,构建更加全面、系统的生态修复技术体系,使得生态修复技术在实际应用中变得更加高效,确保生态修复成果的长久性和可持续性。

(2) 笔者等提出了一套可以将多种生态修复技术优化集合而成的全面成熟的生态修复技术体系。首先采取地质景观重建技术、土地重建防固技术等地质技术重塑矿山损毁区的地形地貌;再通过植被生态修复技术、景观生态养护技术等自然技术恢复重建废弃矿山地的生态系统;继而采取文化融合技术打造和复原当地特色的文化景观;最后以旅游空间开发技术进行旅游空间的总体规划和具体建设,实现矿山生态修复后集矿业文化展示、地质科普、历史文化、生态农业和生态养生等多功能于一体的旅游。这些关键技术的集成应用,为濮公山废弃矿山

的生态恢复提供了坚实的技术支撑,并形成了其特有的生态修复技术体系;

(3)笔者等提出了息县濮公山废弃矿山的独特生态修复模式,即“地质+自然+文化+旅游”的4.0废弃矿山生态修复模式,旨在通过地质技术与自然技术的融合,以文化为灵魂,旅游为可持续发展动力,以濮公山矿坑周边的植被为载体,以石灰岩矿开采遗迹景观为主体,以地质科普游乐、石灰岩采矿遗迹治理等环境更新、生态恢复手段展示为核心,融合濮公山历史人文景观,实现濮公山从废弃矿山到地质文化生态乐园的华丽转身。这一模式不仅融合了地质技术与自然技术的基础性恢复功能,还创新性地引入了文化融合技术作为灵魂,通过文化元素的注入提升矿区的文化内涵与吸引力;以旅游等可持续发展为目标,将矿区打造成集休闲、求知、娱乐、养生、健身、宗教等多功能于一体的旅游目的地。

(4)笔者等提出的“地质+自然+文化+旅游”的4.0废弃矿山生态修复模式,以及八大关键技术体系,为濮公山废弃矿山的生态恢复提供了有力支撑。在注重地质技术的运用的同时,还融合了自然、文化和旅游等多个方面,实现了废弃矿山生态修复和综合治理及可持续发展。不仅实现了矿山的生态恢复,解决矿山生态环境问题、节约了治理成本,并且满足保护濮公山废弃矿山独特、珍稀的矿业遗迹的需要,也为科学研究和科学知识的普及提供了重要场所,带来了持久性的效益,实现了经济的可持续发展。经过实践验证,该生态修复技术体系及生态修复模式取得了显著成效,不仅解决了矿山的生态环境问题,还带动了当地旅游产业的发展,为经济社会的可持续发展做出了积极贡献。同时,该模式也为其他地区的废弃矿山治理提供了可借鉴的经验和案例。

(5)随着时代进程的演变,粗放型的资源利用方式正在被可循环利用的集约型方式所替代。“蓝天常在,青山常在、绿地常在、碧水常在”成为人们美好的向往。濮公山矿山生态修复的成功为河南省生态修复可持续发展的“地质+”转型发展模式提供了新的思路和典型案例,以地质文化创新驱动了旅游产业的发展,用地质与文化耦合的视角激发全民族文化创新创造活力,解读和支撑“行走河南·读懂中国”品牌,服务河南文化强省建设,铸就社会主义文化新辉煌,实现在传统文化旅游内的换道领跑。

致谢:本文在构思与撰写过程中,河南省地质研究院正高级工程师张忠慧、裴中朝给予了重要的理

论指导和案例素材支持;中国科学院地质与地球物理研究所副研究员周艳艳、河南永安工程检测有限公司高级工程师井燕给予翻译校对方面的大力帮助;审稿专家和责任编辑对论文提出了多轮的、宝贵的修改建议,在此一并致以诚挚的谢意!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 陈德荣. 2013. 基于SWOT分析的唐山城市旅游形象的定位研究. 工业技术与职业教育, 11(3): 49~50.
- 陈关升. 2012. 能源知识: 碳汇是什么[EB/OL]. 北京: 中国城市低碳经济网, 引用日期: 2012-10-25.
- 方晰, 田大伦, 康文星. 2007. 湘潭锰矿渣废弃地植被修复盆栽试验. 中南林业科技大学学报, 27(1): 14~19.
- 高秦, 厉子龙, 王孔忠, 李翔, 秦海燕, 李春忠, 张佩珍, 曾志杰. 2022. 如何破解地质遗迹保护与利用的难题?. 地球科学, 47(10): 3847~3848.
- 何哲. 2024. 新质生产力: 概念本质、重点方向与关键机制. 科学观察, 19(2): 8~13.
- 河北省自然资源厅科技外事处. 2021. 矿山修复主流的操作方式[N]. 科技发展, 2021. 08. 25.
- 侯万荣, 陈小五, 黄志全, 满来, 张兴芝. 2006. 地质遗迹的保护和合理开发. 内蒙古煤炭经济, (5): 79~82.
- 侯晓龙, 庄凯, 刘爱琴, 蔡丽平. 2012. 福建省紫金山金铜矿废弃地不同植被配置模式的恢复效果分析. 水土保持通报, 32(6): 147~151+157.
- 胡耀东. 2023. 碳中和视角下露天废弃矿山生态修复技术优化. 世界有色金属, (21): 145~147.
- 姜杉钰, 谭丽萍, 冯聪, 王佳佳, 樊笑英, 李小雨. 2025. 系统观下的矿山生态修复关键技术体系构建. 环境科学, 46(1): 489~497.
- 姜杉钰, 谭丽萍, 冯聪, 王佳佳, 樊笑英, 李小雨. 2025. 系统观下的矿山生态修复关键技术体系构建. 环境科学, 46(1): 489~497.
- 李超, 阎长虹, 郭书兰, 郭建强, 姜志会, 万佳佳, 于建伟. 2021. 江苏省废弃矿山旅游资源开发利用探析. 地质论评, 64(4): 1147~1156.
- 李国政. 2019. 新时代矿山地质修复模式的升级与重塑: 基于“地质修复3.0”的概念分析. 西北地质, 52(4): 270~278.
- 李军栋. 2019. 关于矿山地质灾害防治与地质环境保护的探讨. 世界有色金属, (22): 130+132.
- 李立. 2022. 废弃矿山高陡岩壁生态修复浅析——以三亚某采石场生态修复项目为例. 化工矿产地质, 44(1): 42~47.
- 李瑞琪, 王琴. 2016. 矿山废弃地生态恢复与景观设计初探——以上海辰山植物园矿坑花园为例. 现代园艺, (23): 139~141.
- 李瑞强. 2024. 湿地保护建设工程技术规范[EB/OL]. 河南: 人人文库, 2024-06-06.
- 梁好雅. 2020. 矿山废弃地生态修复与景观设计研究——以温州市华亭山公园为例. 导师: 吴铁明. 长沙: 湖南农业大学硕士学位论文.
- 刘传娥, 李生清, 胡靖爽, 蒋磊. 2022. “双碳”战略下废弃露天矿山生态修复模式研究与实践——以山东省废弃露天矿山为例. 山东国土资源, 38(9): 40~44.

- 刘德成, 李玉倩, 刘学贤, 张永雷, 李慧, 高雪媛. 2021. 废弃矿山生态环境修复技术研究——以唐山市玉田县为例. 四川地质学报, 41(1): 98~102.
- 刘德成, 李玉倩, 刘学贤, 张永雷, 李慧, 夏相骅, 高雪媛. 2021. 废弃矿山环境治理的景观再造研究——以玉田县某采石场为例. 化工矿产地质, 43(1): 54~58.
- 刘德成, 周亚伟, 李玉倩, 李慧, 顾杰. 2020. “矿山地质环境恢复治理+文化创意”模式探析——以满城矿山高陡岩质边坡修复为例. 文化产业, (36): 20~22.
- 刘德成, 周亚伟. 2022. 城市生态修复理念下的废弃矿坑公园景观重塑研究. 环境生态学, 4(1): 37~41+70.
- 刘德成. 2020. 京津冀矿山环境修复治理措施研究——以玉田县某矿山为例. 环境生态学, 2(11): 69~73.
- 刘德成. 2023. “废弃矿山生态修复治理+”研究. 环境生态学, 5(8): 126~130.
- 刘婧. 2022. 唐山南湖景区公共艺术的造型研究. 导师:李延. 唐山: 华北理工大学硕士学位论文.
- 刘洋. 2019. 无主砂石矿山生态恢复综合规划治理模式探讨. 中国国土资源经济, 32(1): 67~70.
- 刘宇, 李佩乔. 2021. “破旧立新”城市双修理论影响下的南京汤山矿坑公园设计解析. 设计, 34(19): 135~137.
- 卢誉之, 陈银萍, 曹渤, 李玉强. 2023. 矿山生态修复技术体系构建. 环境保护科学, 49(5): 41~50+54.
- 鲁峰, 王强, 韩新, 王建伟. 2022. 黄河流域下游泰山区域生态地质环境问题及修复模式. 山东国土资源, 38(3): 63~69.
- 罗福申. 2023. 区域性废弃矿山生态修复实践与思考. 冶金与材料, 15(10): 147~149.
- 罗金妹. 2024. 废弃矿山生态修复模式及关键技术研究. 能源与节能, (4): 212~214.
- 雒建利, 马宁, 丁孟雄. 2021. 从实施性规划到规划的实施——汤山矿坑公园规划设计思考. 建筑技艺, 27(4): 18~22.
- 马跃, 李森, 赵福强, 郝凤明, 徐婷婷, 朱方伟. 2018. 铁矿山资源化生态修复模式研究. 生态经济, 34(1): 214~219.
- 马跃, 李森, 赵福强, 郝凤明, 徐婷婷, 朱方伟. 2018. 铁矿山资源化生态修复模式研究. 生态经济, 34(1): 214~219.
- 蒙永辉, 许燕, 王集宇, 高善坤. 2016. 山东省矿山地质环境治理工作形势分析. 山东国土资源, 32(9): 26~29+35.
- 孟和苏乙拉. 2020. 试论“矿山地质环境恢复治理+”思维在生态环境修复中的探索与应用. 西部资源, (6): 191~194.
- 宋祥兰, 王兰英, 邝先松, 刘作梅, 胡小康, 李小青, 刘晓红, 丁菲, 郭圣茂. 2015. 赣南废弃稀土矿区植被恢复模式试验. 中南林业科技大学学报, 35(6): 58~62.
- 孙晓玲, 韦宝玺. 2020. 废弃矿山生态修复模式探讨. 环境生态学, 2(10): 55~58+63.
- 田胜尼, 孙庆业, 王铮峰, 彭少麟, 夏汉平. 2005. 铜陵铜尾矿废弃地定居植物及基质理化性质的变化. 长江流域资源与环境, 14(1): 88~93.
- 王琮杰. 2022. 应以多维度来看待和修复废弃矿山. 中国矿业报, 09-27(2).
- 王向荣, 林箐. 2019. 景观的发现与重构——南宁园博园采石场花园设计. 中国园林, 35(7): 24~33.
- 王志亮, 李军, 尚振, 王少杰, 刘康, 韩宗瑞, 李文斌, 马标. 2023. 典型露天矿山生态修复模式探讨——以山东省归来庄金矿为例. 山东国土资源, 39(6): 26~31.
- 魏艳, 侯明明, 卿华, 李若愚. 2007. 矿业废弃地的生态恢复与重建研究. 矿业工程, 5(1): 52~55.
- 魏忠义, 胡振琪, 白中科. 2001. 露天煤矿排土场平台“堆状地面”土壤重构方法. 煤炭学报, 26(1): 18~21.
- 武剑. 2022. 露天矿山边坡稳定化治理与生态修复技术探究. 西部资源, (3): 99~100+103.
- 徐飞, 焦玉国, 唐丽伟, 程凤, 王玲, 赵玮, 魏凯, 尹衍鹏. 2022. 泰安市山水林田湖草生态修复区废弃露天矿山治理模式与技术体系研究. 山东国土资源, 38(6): 63~71.
- 许鸿. 2021. 关于矿山修复的现状分析与探讨. 中国建材科技, 30(4): 97~99.
- 许庆福, 梁东, 乔庆伟, 丁喜莲, 唐伟, 杨振宇. 2022. 基于生态保护格局的省域国土空间生态修复策略——以山东省为例. 山东国土资源, 38(4): 74~80.
- 杨阳, 赵金召, 张兆长, 李克强. 2022. 矿山高陡岩质边坡复绿中节水灌溉技术现状与发展趋势. 资源环境与工程, 36(2): 239~243.
- 杨振京, 徐建明, 毕志伟, 张宏达, 王建中, 陈立. 2006. 宁夏南部干旱—半干旱黄土梁峁区生态环境调查与生态建设模式. 地质论评, 52(6): 815~820.
- 张春燕. 2019. 北京市典型废弃矿山生态修复模式研究. 导师:魏天兴. 北京: 北京林业大学硕士学位论文.
- 张宪尧, 魏开宝, 薛林, 孙彦伟, 韩玉珍. 2016. 矿山地质环境与生态文明建设研究. 中国人口·资源与环境, 26(S1): 232~235.
- 张亚玲, 安常伟. 2018. 基于“城市双修”理念的“品质西安”绿地系统建设研究. 中国园林, 34(S2): 165~168.
- 赵力文, 常飞. 2022. 生态优先绿生金[N]. 河南日报, 2022-09-23(10).
- 郑飞. 2015. 露采矿山土地复垦及生态重建关键技术研究. 地质论评, 61(z1): 845~846.
- 朱晓勇, 胡国长. 2022. 花岗岩露天关闭矿山生态修复技术应用. 地质与勘探, 58(1): 168~175.
- Burger J A. 2011. Sustainable mined land reclamation in the eastern u. s. coalfields: A case for an ecosystem reclamation approach. Journal American Society of Mining and Reclamation, 2011(1): 113~141.
- Chen Derong. 2013. Orientation research on tourism image of Tangshan City based on SWOT analysis. Industrial Technology & Vocational Education, 11(3): 49~50.
- Chen Guansheng. 2012. Energy Knowledge: What is Carbon Sink [EB/OL]. Beijing, China Urban Low Carbon Economy Network, 2012-10-25.
- Fang Xi, Tian Dalun, Kang Wenxing. 2007. Analysis of potted plant test of plant restoration in the slag wasteland in Xiangtan manganese mine. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 27(1): 14~19.
- Gao Qin, Li Zilong, Wang Kongzhong, Li Xiang, Qin Haiyan, Li Chunzhong, Zhang Peizhen, Zeng Zhijie. 2022. How to solve the problem of protection and utilization of geological relics? Earth Science, 47(10): 3847~3848.
- He Zhe. 2024. New quality productivity: Conceptual essence, main directions and key institutions. Science Focus, 19(2): 8~13.
- Hou Wanrong, Chen Xiaowu, Huang Zhiqian, Man Lai, Zhang Xingzhi. 2006. On the protection and rational exploitation of Geological vestige resources. Inner Mongolia Coal Economy, (5): 79~82.
- Hou Xiaolong, Zhuang Kai, Liu Aiqin, Cai Liping. 2012. Efficiency of different vegetative restoration settings deployed on wastelands of Zijinshan gold—copper mine in Fujian Province. Bulletin of Soil and Water Conservation, 32(6): 147~151+157.
- Hu Yaodong. 2023. Optimization of ecological restoration technology for abandoned open-pit mines from the perspective of carbon neutralization. World Nonferrous Metals, (21): 145~147.
- Huang XX. 2024. Technical Specification for Wetland Protection

- Construction Projects [EB/OL]. Shanghai, Renren Library, 2024-04-22.
- Jiang Shanyu, Tan Liping, Feng Cong, Wang Jiajia, Fan Xiaoying, Li Xiaoyu. 2025&. Construction of key technology system for mine ecological restoration under system perspective. *Environmental Science*, 46(1): 489~497.
- Li Chao, Yan Changhong, Guo Shulan, Guo Jianqiang, Lou Zhihui, Wan Jiajia, Yu Jianwei. 2021&. Analysis on the Development and Utilization of Tourism Resources in Abandoned Mines in Jiangsu Province. *Geological Review*, 64(4): 1147~1156.
- Li Guozheng. 2019&. Upgrading and reshaping of mine geological restoration model in new era: Conceptual analysis based on “geological restoration 3.0”. *Northwestern Geology*, 52(4): 270~278.
- Li Jundong. 2019&. Discussion on prevention and control of mine geological disaster and protection of geological environment. *World Nonferrous Metals*, (22): 130+132.
- Li Li. 2022&. Analysis on ecological restoration of high and steep cliff in abandoned mines—a case study on a quarry in Sanya. *Geology of Chemical Minerals*, 44(1): 42~47.
- Li Ruiqi, Wang Qin. 2016&. Preliminary study on ecological restoration and landscape design of mine wasteland—A case study of mine garden in Shanghai Chenshan Botanical Garden. *Xiandai Horticulture*, (23): 139~141.
- Liang Haoya. 2020#. Study on ecological restoration and landscape design of mine wasteland. Changsha: Hunan Agricultural University Master Thesis.
- Liu Chuane, Li Shengqing, Hu Jingshuang, Jiang Lei. 2022&. Study and practices on ecological restoration mode under the strategy of “carbon peaking and carbon neutrality goals” —Taking abandoned open pit mines in Shandong Province as an example. *Shandong Land and Resources*, 38(9): 40~44.
- Liu Decheng, Li Yuqian, Liu Xuexian, Zhang Yonglei, Li Hui, Gao Xueyuan. 2021&. A study on ecological environment restoration technology of abandoned mine—By the example of Yutian County, Tangshan. *Acta Geologica Sichuan*, 41(1): 98~102.
- Liu Decheng, Li Yuqian, Liu Xuexian, Zhang Yonglei, Li Hui, Xia Xianghua, Gao Xueyuan. 2021&. Study on the landscape reconstruction of environmental management of abandoned mines—a case study of a quarry in Yutian County. *Geology of Chemical Minerals*, 43(1): 54~58.
- Liu Decheng, Zhou Yawei, Li Yuqian, Li Hui, Gu Jie. 2020&. Analysis on the model of “mine geological environment restoration and management + cultural creativity” —Taking the restoration of high and steep rock slopes in Mancheng mine as an example. *Culture Industry*, (36): 20~22.
- Liu Decheng, Zhou Yawei. 2022&. Study on landscape reconstruction of abandoned mine park under the concept of urban ecological restoration. *Environmental Ecology*, 4(1): 37~41+70.
- Liu Decheng. 2020&. Study on the measures of mine environment restoration in Beijing, Tianjin and Hebei—Taking a mine in Yutian County as an example. *Environmental Ecology*, 2(11): 69~73.
- Liu Decheng. 2023&. Analysis of “ecological environment restoration and treatment of abandoned mines+”. *Environmental Ecology*, 5(8): 126~130.
- Liu Jing. 2022&. A study on the public art modeling of Tangshan Nanhu scenic area. Tangshan: North China University of Science and Technology Master Thesis.
- Liu Yang. 2019&. Discussion on the model of comprehensive planning and management of ecological restoration about unowned sand mine. *Natural Resource Economics of China*, 32(1): 67~70.
- Liu Yu, Li Peiqiao. 2021&. Analysis on the design of Tangshan mine park in Nanjing under the influence of the theory of “dilapidated old and new” urban double repairs. *Design*, 34(19): 135~137.
- Lu Feng, Wang Qiang, Han Xin, Wang Jianwei. 2022&. Restoration mode and ecological and environment problems in the Taishan Mountain area in the lower reaches of the Yellow River. *Shandong Land and Resources*, 38(3): 63~69.
- Lu Yuzhi, Chen Yiping, Cao Bo, Li Yuqiang. 2023&. Construction of technique system for mine ecological restoration. *Environmental Protection Science*, 49(5): 41~50+54.
- Luo Fushen. 2023&. Practice and thinking of eco-restoration of regional abandoned mines. *Metallurgy and Materials*, 15(10): 147~149.
- Luo Jianli, Ma Ning, Ding Mengxiang. 2021&. From the implementable planning to the implementation of planning: Reflection on the planning and design of Tangshan quarry park. *Architecture Technique*, 27(4): 18~22.
- Luo Jinmei. 2024&. Ecological restoration model and key technology of abandoned mines. *Energy and Energy Conservation*, (4): 212~214.
- Ma Yue, Li Sen, Zhao Fuqiang, Xi Fengming, Xu Tingting, Zhu Fangwei. 2018&. Recycling ecological restoration model of iron mine. *Ecological Economy*, 34(1): 214~219.
- Meng Yonghui, Xu Yan, Wang Jining, Gao Shankun. 2016&. Analysis on situation of mining geological environment control in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 32(9): 26~29+35.
- Menghe Suyila. 2020&. Discussion on the exploration and application of the thinking of “mine geological environment restoration and governance +” in ecological environment restoration. *Western Resources*, (6): 191~194.
- Science and Technology and International Affairs Division, Hebei Provincial Department of Natural Resources. 2021#. *Mainstream Operating Methods for Mine Restoration [N]*. Technology Development, 2021-08-25.
- Song Xianglan, Wang Lanying, Kuang Xiansong, Liu Zuomei, Hu Xiaokang, Li Xiaoqing, Liu Xiaohong, Ding Fei, Guo Shengmao. 2015&. Experiments on abandoned rare earth mining area’s vegetation restoration mode in southern Jiangxi province. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 35(6): 58~62.
- Sun Xiaoling, Wei Baoxi. 2020&. Discussion on ecological restoration model of abandoned mines. *Environmental Ecology*, 2(10): 55~58+63.
- Tian Shengni, Sun Qingye, Wang Zhengfeng, Peng Shaolin, Xia Hanping. 2005&. Plant colonization on copper tailings and the change of the physio—chemistry properties of substrate in Tongling city, Anhui province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 14(1): 88~93.
- Wang Qiongjie. 2022#. *Viewing and Restoring Abandoned Mines from Multiple Dimensions [N]*. *China Mining News*, 2022-09-27.
- Wang Xiangrong, Lin Qing. 2019&. The revealing and reconstitution of landscape—Quarry gardens in Nanning garden expo park. *Chinese Landscape Architecture*, 35(7): 24~33.
- Wang Zhiliang, Li Jun, Shang Zhen, Wang Shaojie, Liu Kang, Han Zongrui, Li Wenbin, Ma Biao. 2023&. Study on ecological restoration model of typical open pit mines—Taking Guilaizhuang gold deposit in Shandong Province as an example. *Shandong Land*

- and Resources, 39(6): 26~31.
- Wei Yan, Hou Mingming, Qing Hua, Li Ruoyu. 2007&. Study on ecological restoration and reconstruction in mining wasteland. Mining Engineering, 5(1): 52~55.
- Wei Zhongyi, Hu Zhenqi, Bai Zhongke. 2001&. The loose-heaped-ground method of soil reconstruction on the stockpiles of open-pit coal mine. Journal of China Coal Society, 26(1): 18~21.
- Wu Jian. 2022&. Discussion on slope stabilization treatment and ecological restoration technology in open pit mine. Western Resources, (3): 99~100+103.
- Xu Fei, Jiao Yuguo, Tang Liwei, Cheng Feng, Wang Ling, Zhao Wei, Wei Kai, Yin Yangepeng. 2022&. Study on treatment mode and technical system of abandoned open-pit mines in mountains rivers forests farmlands lakes grass ecological restoration area in Tai' an City. Shandong Land and Resources, 38(6): 63~71.
- Xu Hong. 2021&. Discussion on present situation of mine restoration. China Building Materials Science & Technology, 30(4): 97~99.
- Xu Qingfu, Liang Dong, Qiao Qingwei, Ding Xilian, Tang Wei, Yang Zhenyu. 2022&. Ecological restoration strategy of provincial land space based on ecological protection pattern—Taking Shandong Province as an example. Shandong Land and Resources, 38(4): 74~80.
- Yang Yang, Zhao Jinzhao, Zhang Zhaochang, Li Keqiang. 2022&. Present situation and development trend of water-saving irrigation technology in greening of high-steep rock slope in mines. Resources Environment & Engineering, 36(2): 239~243.
- Yang Zhenjing, Xu Jianming, Bi Zhiwei, Zhang Hongda, Wang Jianzhong, Chen Li. 2006. Investigation on the ecological environment and ecological construction model in the arid and semi-arid loess Ridgetrough Area in Southern Ningxia. Geological Review, 52(6): 815~820.
- Zhang Chunyan. 2019&. Study on ecological remediation modes of typical abandoned mines in Beijing. Beijing: Beijing Forestry University Master Thesis.
- Zhang Xianyao, Wei Kaibao, Xue Lin, Sun Yanwei, Han Yuzhen. 2016&. Mining geo-environment and ecology civilization construction: Taking Laiwu City as an example. China Population, Resources and Environment, 26(S1): 232~235.
- Zhang Yaling, An Changwei. 2018&. Research on the construction of "quality Xi'an" green space system development based on the concept of "ecological restoration & urban renovation". Chinese Landscape Architecture, 34(S2): 165~168.
- Zhao Liwen, Chang Fei. 2022#. Ecology First, Green and Gold [N]. Henan Daily, 2022-09-23(10).
- Zheng Fei. 2015#. Research on key technologies of land reclamation and ecological reconstruction in open-pit mines. Geological Review, 61: 845~846.
- Zhu Xiaoyong, Hu Guochang. 2022&. Application of ecological restoration technology to closed granite open pit mines. Geology and Exploration, 58(1): 168~175.

Research and application of mine ecological restoration technologies and models

REN Liping^{1, 2, 3, 4)}, XU Lianfeng⁵⁾, DU Kaiyuan^{1, 2, 4)}, LI Ruiqiang^{1, 2, 4)}, SHI Lin^{1, 2)},
WANG Haiyong^{1, 2)}, WANG Zifan⁶⁾, MA Yuheng⁷⁾, LIU Linke^{1, 2, 4)}

1) Henan Academy of Geology, Zhengzhou, 450016;

2) National Natural Resources Science Education Base of Henan Academy of Geology, Zhengzhou, 450016;

3) Engineering Technology Innovation Center for Multi-element Urban Geology Big Data of Central Plains Urban Agglomeration, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou, 450016;

4) Yellow River Branch of Institute of Natural Culture, China University of Geosciences (Beijing), Zhengzhou, 450016;

5) Henan Academy of Geology Co., Ltd., Zhengzhou, 450001;

6) East China University of Technology, Nanchang, 330013;

7) Northeast Forestry University, Harbin, 150040

Objectives: To address the prevalent issues in mine ecological restoration, such as monotonous techniques, insufficient geological foundation, neglect of geological condition differences, and a gap in cultural integration, this study focuses on the abandoned mine at Pugongshan in Xixian County, Henan. It aims to explore an integrated approach that combines ecological restoration, cultural preservation, and sustainable economic development.

Methods: The project innovatively adopts a geological perspective, systematically constructing a comprehensive restoration system. This system integrates geological restoration technologies (including geological landscape reconstruction, land reconstruction and stabilization, land substrate improvement, and water resource reconstruction) with natural restoration techniques (such as vegetation ecological restoration and landscape ecological maintenance). It further incorporates cultural elements and tourism space development techniques, forming a "geology + nature + culture + tourism" four-in-one integrated 4.0 ecological restoration model.

Results: The implementation results demonstrate that this model successfully restored the mine's ecological

environment, effectively resolved geological safety hazards, while simultaneously creating distinctive cultural landscapes and realizing tourism industry development. It formed a three-in-one integration of ecological, cultural, and tourism functions. Its core value lies not only in eliminating environmental problems but also in creating long-term economic benefits, powerfully promoting regional sustainable development.

Conclusions: This model provides replicable and scalable successful experience and a demonstration case for systematic, multifunctional ecological restoration of similar abandoned mines domestically, delivering significant comprehensive ecological, economic, and social benefits.

Keywords: mine ecological restoration; geological technology; governance model; Xixian County; Pugongshan

Acknowledgements: This paper was supported by the 2024 geological science and technology research project of Henan Academy of Geology (Nos. 2024-909-XM04, 2024-909-XM13), and the achievement of the restoration and management project of the abandoned quarry in Pugongshan, Xixian County (No. Yuchaijian [2014] 127), and the national important geoheritage resources inventory and evaluation project (No. DD20243476). During the conception and writing of this paper, Senior Engineers ZHANG Zhonghui and PEI Zhongchao from the Henan Academy of Geology provided significant theoretical guidance and case material support; Associate Researcher ZHOU Yanyan from the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, and Senior Engineer JING Yan from Henan Yong'an Engineering Testing Co., Ltd. offered significant assistance in translation and proofreading; We would also like to express our sincere gratitude to the reviewers and the editorial staff for their numerous and valuable suggestions for revision

First author: REN Liping, male, born in 1980, master's degree, senior engineer, is mainly focuses on geological culture, tourism geology, and ecological restoration research; Email: 285804699@qq.com

Corresponding author: XU Lianfeng, male, born in 1978, bachelor's degree, engineer, is mainly focuses on environmental geology, geoheritage conservation, and exhibition design research; Email: 2648200097@qq.com

Manuscript received on: 2024-10-13; Accepted on: 2025-05-10; Published online on: 2025-05-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.041

Edited by: LIU Zhiqiang

中国地质学会发布两项团体标准

近期,根据国家标准化委员会、民政部印发的《团体标准管理规定》和《中国地质学会团体标准管理办法(试行)》的有关要求,经中国地质学会团体标准委员会审定通过,批准发布《超长重力热管地热能开发技术规范》T/GSC 012-2025)、《陆域科学钻探岩芯整理技术规程》(T/GSC 013-2025)两项团体标准。自2026年1月1日起正式实施。

《超长重力热管地热能开发技术规范》T/GSC 012-2025);件按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件起草单位:中国科学院广州能源研究所,中国地质科学院水文地质环境地质研究所,清华大学,河北省煤田地质局第二地质队,双良节能股份有限公司,西安交通大学,电力规划设计总院,中国矿业大学。

本文件主要起草人:蒋方明、王贵玲、岑继文、黄文博、邢林啸、李龙、陈娟雯、李曼、郭剑、杨军、上官栓通、田兰兰、鞠贵冬、李龙、汪丽君、高铁瑜、王家瑞、邓立生、何雨江、王婉

丽、李骥飞、乔伟、解经宇。

《陆域科学钻探岩芯整理技术规程》(T/GSC 013-2025);按照 GB/T1.1—2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件起草单位:自然资源实物地质资料中心、中国石化华北油气分公司、大庆油田有限责任公司、黑龙江省地质资料档案馆、内蒙古地质调查研究院、辽宁省地矿集团地质资料中心有限责任公司、山东省鲁南地质工程勘察院、山东省自然资源资料档案馆。

本文件主要起草人:宋利强、张森、南青民、高鹏鑫、崔立伟、李宝民、齐荣、赵旭、支成龙、田荣军、李秋玲、徐博、李长江、姜志超、李彬、李艳霞、王佳彬、郭文军、李光、张喆、杨晓东、付玉蕾、周文军、张国霞、刘晶晶。

张婧 供稿

ZHANG Jing: The Geological Society of China releases two group standards