



我国矿山生态修复进展简介

矿产资源开发活动触发和产生了一系列矿山生态问题，矿山地质环境变化一旦超出了其容量，就会产生突发性的地质灾害、水土环境质量下降、生物多样性丧失与生态平衡破坏、水系连通性阻断等矿山生态问题，危及矿山正常生产和人居生存环境的安全。自习近平总书记提出“绿水青山就是金山银山”等著名论断以来，我国的矿山环境治理工作取得了重大进展。全国开展了 26 个山水林田湖草沙一体化治理工程项目和 49 个历史遗留矿山生态修复示范工程项目，形成了一套完善的生态修复技术。2022 年“中国山水工程”入选联合国首批十大“世界生态恢复旗舰项目”。

一、矿山生态修复技术

1. 地质安全隐患消除技术：地质安全隐患包括了矿区及周边因自然因素或人为活动引发的危害人民生命和财产安全的地质现象，主要包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地裂缝和地面沉降等与地质作用有关的灾害。对于矿山在尊重自然、顺应自然、保护自然的基础上，优先开展地质安全隐患消除。地质安全隐患消除技术包括减载反压技术、抗滑支挡技术、锚杆锚索加固技术、注浆固体技术、排水导流方法、植被防护措施等。

2. 含水层重建技术：矿山露天开采和井工开采对扰动了原始含水层结构，破坏水系连通和原始生境，改变了原始的补径排条件，影响大气降水的入渗，进一步影响到区域水源涵养能力和水质安全问题。物理方法有含水层结构再造，比如运用底板改造技术对矿井强含水层截流区域水害进行治理。

3. 地形地貌景观重塑技术：矿业活动对地形地貌景观、人文景观、地质遗迹的破坏也是不容小觑，根据破坏的地形坡度大小分为三种：一是地表平面挖损修复技术；对于采矿后地形落差大的采坑复垦，修筑成水库、鱼塘、水上公园或作为工矿企业用水的补给水。有奇特景观的露天采坑还可做为地质公园遗迹进行部分保留。二是矿山边坡挖损修复技术：缓坡一般是指坡度在 30°以下，最大不应超过 45°的边坡。对场地边坡进行整理，清除浮石、危石后，实施不同的修复工程。主要修复技术包括：三维植被网坡面复绿技术、生态植被毯垫坡面复绿技术、生态灌浆坡面复绿技术、液力种子喷播技术、土工格室坡面复绿技术、格宾笼挡墙边坡复绿技术等。三是岩质陡坡挖损修复技术：超过 45°的边坡，多采用有绿色屏障技术、填充造坡复绿技术、开凿平台坡面复绿技术、生态袋坡面绿化技术、利用废弃轮胎坡面绿化防护技术、鱼鳞穴栽植坡面复绿技术、植生洞坡面栽植复绿技术、植生槽坡面复绿技术、挂网喷混植生坡面绿化防护技术等。

4. 水土环境修复技术：水土污染是矿山开采的主要环境问题之一，因此水环境的修复尤为重要。常用的水环境修复技术包括生物、物理和化学修复。生物修复是通过引入适宜的微生物和植物来降低水土体污染物。物理修复是通过物理手段去除水土体污染物。化学修复是利用化学物质对污染物进行处理和还原，有电化学修复、化学钝化方法等。

5. 土地复垦技术：土壤修复技术在矿山生态修复中具有重要的地位。矿山开采会导致土壤结构破坏、土壤肥力下降和重金属等污染物的积累，进而影响生态系统的稳定性和可持续发展。因此，采用适当的土壤修复技术对矿山生态环境的恢复至关重要。土壤改良是土壤修复中常用的方法之一。它通过添加有机质、改变土壤结构和调整土壤化学性质，改善土壤的通透性、保水性和肥力。此外，通过合理管理和保护土壤，减少了水土流失和侵蚀，保护土壤的层次结构，促进土壤的自我修复能力。

6. 植被重建技术：植被修复技术在矿山生态修复中发挥着重要作用。它能够在短时间内重建植被，恢复土壤的稳定性和水土保持功能，提高生态系统的抗干扰能力。植被修复不仅能够改善矿区环境，减少土壤侵蚀、水质污染等问题，还能够提供生态服务功能，增加当地居民经济收入。主要有两种：人工植被修复和自然修复。

7. 生物多样性恢复技术：生物多样性是生态系统的重要组成部分，其丧失会导致生态平衡的破坏。为了恢复矿山附近的生物多样性，需要采取一系列的措施来保护和重新建立物种和种群。常用的生物多样性恢复技术

包括物种保护、栖息地恢复、野生动植物迁地保护和生态赔偿等。

二、矿山生态修复模式

1. 黄土高原区：在黄土高原矿山开采区，小流域是土壤侵蚀发生、水土流失治理及土壤侵蚀研究的基本单元，中国小流域综合治理已经取得了巨大成效，在粮食增产、拦蓄泥沙、退耕还林等方面起到了重要作用。陈祖煜提出的建设小流域分布式光、水、生态农牧能源网，形成光-水-梯-农-储能一体化，是黄河流域矿山生态保护修复的新思路。利用抽水电站的原理将水抽到水库中，将风能和光能转换成水能加以储存，等到需要用电时再放水发电，以流域为整体进行“风水光”一体化工作。以陕北能源化工基地为例。

2. 秦巴山区：基岩山地由于土少地少，同时由于该区自然条件良好，适宜打造成矿山公园或学研基地。秦巴山区生态系统中不仅包括基本的地质环境、生态环境、残余资源等，还包含人为开采后所留下的文化环境等。传统的矿山生态修复一般侧重于地质隐患消除、废弃土地复垦和复绿，而随着生态文明建设作为国家战略部署全面推进，矿山生态修复不仅要立足于自然生态系统，还要考虑社会经济系统层面，尽可能的探索为矿区居民提供更好生态服务。构建了自然环境-地质环境-价值挖掘-资金投入一体化治理模式，以潼关国家地质公园为例。

3. 长江三角洲：赣州四种废弃稀土矿山生态修复治理模式为例。一是龙南“林-果-草”模式。龙南足洞稀土矿区复垦土地引进多种生物物种，采用“山顶栽松，坡面布草，台地种桑，沟谷植竹”的整体布局。二是龙南“林（果）-草-渔（牧）”模式。该模式将废弃稀土矿山的山坡整治为林果地和草地，种植经济作物和草本植物，山谷和尾矿库则筑坝成库，污水治理后用于鱼类水产养殖，利用山坡种植的草料喂鱼、放牧，同时筑坝形成的山塘水库还可用于农业。三是信丰“猪-沼-林（果）”模式。该模式是利用腐生生物和养猪产生的猪粪来治理稀土尾砂。大量的腐生生物在稀土尾矿上把猪粪最终转化成活体蛋白和有机肥与尾砂发生物理化学反应，形成保水保肥、营养丰富的优质土壤。结合经济林（果）的种植，从而达到综合治理猪粪污染和稀土尾砂、减少水土流失的效果，形成绿色低碳循环生态农业。四是寻乌“工业园”模式。寻乌县对已废弃稀土矿区土地进行平整，开发成工业用地。同时，积极引进稀土精深加工企业落户工业园区，积极开展尾砂利用及产业化技术研究。通过综合利用文峰石排废弃稀土矿山打造工业园区，在节约用地、资源再利用和环境保护方面取得了“一石三鸟”的效果。

4. 华东沿海丘陵山地：韶关凡口铅锌矿生态修复攻克难题——凡口铅锌矿伴生硫化矿物，经化学氧化作用而产生含重金属的酸性废水，植物难以生长，废水迁移将影响周边生态环境。酸化土壤植被难以存活。当地政府从源头上降低区域土壤环境风险，从减少污染物产生和切断扩散途径两个角度着手，通过“原位基质改良+直接植被技术”、清污分流和污水处理等综合治理措施，守住周边生态环境安全防线，建立同类矿山尾矿库生态环境修复技术示范基地，为覆土植绿创造了可能性。同时，通过实施帷幕注浆截流工程，每年减排井下水 700 多万吨，保障了浅部 530 多万吨价值 150 多亿元的优质矿石的安全开采，生态效益和经济效益十分显著。该治理模式为我国强岩溶地下开采矿山解决水患问题和修复矿山水系生态提供了成功经验。

三、发展展望

一是矿山生态修复监测需要天空地-人一体化全要素全流程实时高效低成本的修复监测手段；二是构建不同区域自然地理条件、生态系统类型、采矿方式、生态损毁程度等因素矿山生态修复成效评估体系。

（中国地质调查局西安地质调查中心（西北地质创新中心）、陕西典型矿山地质环境野外科学观测研究站、陕西省地质环境监测总站、华电煤业集团数智技术有限公司：刘瑞平、陈华清、彭婕、崔云龙 供稿）

封面图片：新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州乌恰县乌拉根铅锌矿矿山工程治理图（中国地质调查局西安地质调查中心 王洪亮、李瑞平 供图）