

# 水工环一体化在矿产资源开发中的环境保护作用

于月涛

山西金地源地质科技有限公司 山西 晋中 030600

**摘要：**矿产资源开发与生态环境保护的协同发展是绿色经济的核心命题。本文以“水工环一体化”理念为切入点，围绕矿产开发全周期中水资源保护、工程活动生态化改造、生态环境系统修复的协同逻辑，剖析传统开发模式的环境痛点，构建“预防—控制—修复”全流程管控体系，并结合具体技术路径与应用场景，论证其在破解水环境污染、生态扰动等问题中的实践价值，为矿产行业绿色转型提供可落地的理论框架与操作指引。

**关键词：**水工环一体化；矿产资源开发；水资源保护；工程生态化；生态修复

## 1 引言

矿产资源作为工业发展的物质基础，其开发活动常伴随“水-工-环”系统失衡：水资源因过度开采与污染加剧短缺，工程扰动引发地表损毁与生态破碎，环境治理的碎片化导致“边开发、边破坏”问题突出。“水工环一体化”以系统性思维整合水资源（Water）、工程活动（Engineering）、生态环境（Environment）三大要素，通过全流程协同管控，实现开发与保护的动态平衡。本文聚焦该理念的核心逻辑、技术路径与实践应用，旨在为矿产资源开发的环境保护提供兼具理论深度与实操性的解决方案。

## 2 矿产资源开发中的“水—工—环”割裂问题剖析

### 2.1.1 水资源层面：量质失衡与循环断裂

水量供需矛盾突出：传统开采模式下，矿井疏干排水、选矿高耗水工艺导致区域水资源过度消耗。以北方某煤矿为例，年疏干排水量达200万m<sup>3</sup>，相当于周边湖泊年蓄水量的40%，引发地下水漏斗区扩展与地表作物退化<sup>[1]</sup>。

### 2.1.2 水质污染链条化

矿坑水、尾矿淋滤液中的重金属（铅、镉）与化学药剂随地表径流扩散，形成“开采—污染—扩散”链式效应。南方某铜矿监测显示，选矿废水未经处理排放后，下游河流镉浓度超标3倍，导致10km范围内水生生物群落消失。

## 2.2 工程活动层面：生态扰动与治理脱节

### 2.2.1 地表生态碎片化

露天矿剥离、排土场堆放直接破坏生物与土壤层，形成“生态孤岛”。某铁矿排土场占地500亩，剥离后地表裸露率达90%，土壤侵蚀模数较背景值增加5倍，雨季泥沙流失量占矿区面源污染总量的60%。

### 2.2.2 工程措施生态适配性不足

边坡加固仅侧重力学稳定（如混凝土喷护），忽视

生物生长需求，导致“硬工程”与“软生态”割裂。某金矿边坡治理后，虽稳定性达标，但3年内生物覆盖率仍低于5%，水土流失问题未根本解决<sup>[2]</sup>。

### 2.2.3 环境治理层面：碎片化导致效率低下

传统“末端治理”模式下，水资源处理、工程修复、生态恢复分属不同主体，缺乏协同。某铅锌矿投入2000万元建设废水处理站，但因未同步规划尾矿库防渗与周边生物缓冲带，暴雨期尾矿淋滤液仍通过地表径流污染下游水体，治理成本增加30%却未达预期效果。

## 3 水工环一体化的核心理念与协同机制

### 3.1 核心理念：全周期协同与要素耦合

“水工环一体化”以“水资源保护为核心、工程活动为载体、生态环境为目标”，将矿产开发划分为勘探规划—开采选冶—闭坑修复三阶段，通过“水-工-环”要素的深度耦合，构建“源头预防—过程控制—末端修复”闭环体系，实现开发活动与生态系统的动态兼容。

### 3.2 协同作用机制

#### 3.2.1 水资源本底调研

聚焦地表水径流网络（河流、湿地）、地下水补径排区域，划定“水资源敏感保护区”，禁止在饮用水源补给区、生态湿地周边500米范围内布设开采区。例如，在西南岩溶地区，优先避开地下暗河系统，避免开采导致的岩溶塌陷与地下水漏失。

工程生态化预设计：结合开采工艺（露天矿排水方案、地下矿支护方式），同步规划水资源循环系统（如矿井水预处理池、雨水收集管网）与生态缓冲带（排土场周边预留10-20米生物隔离区），从源头减少开发扰动。

### 3.3 开采选冶阶段：过程管控“减污降扰”

#### 3.3.1 水资源循环利用体系构建

“梯级处理+分质回用”模式：矿坑水经“沉淀（去除悬浮物）—过滤（活性炭吸附）—膜处理（脱盐）”

后,清水回用于选矿、降尘(回用率 $\geq 80\%$ ),浓水经蒸发结晶处理重金属,实现“废水零外排”。

案例:西北某金矿建设矿井水回用系统,年节约新鲜水15万 $\text{m}^3$ ,选矿成本降低12%。

雨水与再生水替代技术:建设矿区雨水收集管网,配套蓄水池(容积按3年一遇暴雨量设计),替代30%生产用水;生活污水经生化处理后用于绿化灌溉,形成“开源—节流—循环”立体节水体系。

### 3.3.2 工程活动生态化改造

排土场“结构—生物”协同设计:底层铺设碎石盲沟导排渗滤液,中层设置土工膜防渗层,顶层覆盖30cm客土(添加有机肥+保水剂),生物选择耐旱耐贫瘠的本地物种(如柠条、沙打旺),采用“乔灌木”混播(乔木间距5m,灌木丛间距2m,草本覆盖率 $\geq 90\%$ ),形成“工程固坡—土壤改良—生物固土”复合防护层。

实施效果:某煤矿排土场治理1年后,土壤侵蚀模数从4500 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 降至800 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,生物覆盖率从5%提升至65%。

### 3.3.3 选厂清洁生产升级

推广无氰选矿、生物选矿工艺,减少药剂使用(如氰化物用量降低90%);建设尾矿浓缩池,将尾矿浆浓度从20%提升至40%,减少废水产生量的同时,为后续尾矿干堆、充填创造条件,降低尾矿库溃坝风险。

## 3.4 闭坑修复阶段:系统重构“水-工-环”生态链

### 3.4.1 水资源系统修复

封堵废弃矿井涌水点,通过人工回灌(地表水经沉淀后注入含水层)恢复地下水水位;修复因开采改道的河流,重建“河道—湿地—塘坝”水系网络,恢复区域水文循环。案例:东北某铁矿闭坑后,修复河道5km,新建人工湿地200亩,1年后周边地下水水位回升1.2m,河流径流系数恢复至开发前的85%。

### 3.4.2 生态系统渐进式重建

地形重塑:对塌陷区采用“挖深填浅”法,低洼处建人工湖(兼顾蓄水与景观功能),高处平整为梯田,配套布设灌溉管网。

土壤改良:尾矿库闭库后,覆盖50cm厚混合土(客土:矿渣=7:3,添加微生物菌剂),通过种植先锋植物(如紫花苜蓿,根系分泌有机酸活化土壤养分),逐步提升土壤有机质含量(目标年增幅 $\geq 0.5\%$ )。

生物演替引导:遵循“草本(第1-2年)—灌木(第3-5年)—乔木(第5年以后)”演替规律,优先选择与本地气候、土壤适配的物种(如南方矿区种植香根草、马尾松,北方矿区种植沙棘、刺槐),构建稳定的生态

群落<sup>[3]</sup>。

## 4 水工环一体化的关键技术与实施路径

### 4.1 水资源高效保护与循环利用技术

矿井水精准处理技术:针对不同水质(中性矿坑水、酸性矿坑水、高盐矿坑水),采用差异化处理工艺。

中性矿坑水:沉淀+过滤,直接回用于降尘、选矿;

酸性矿坑水:石灰中和(调节pH至6-9)+硫化物沉淀(去除重金属)+湿地净化;

高盐矿坑水:膜分离(反渗透)+蒸发结晶,清水回用,结晶盐安全处置。

### 4.2 水资源智能监测技术

布设水质传感器(监测pH、电导率、重金属离子浓度)、水位计,数据接入物联网平台,实时预警水资源超载(如回用率低于70%、污染物浓度超标),自动触发应急处理流程(启动备用处理设备、调整开采强度)。

### 4.3 工程活动生态化改造技术

#### 4.3.1 生态边坡构建技术

采用“锚杆格构+客土喷播”组合工艺:锚杆格构保证边坡力学稳定(间距2m $\times$ 2m,锚杆长度3-5m),客土配方含腐殖土(40%)、泥炭土(20%)、保水剂(0.5%)、草种(狗牙根+紫花苜蓿混合),喷播厚度5-8cm,实现“工程加固与生物恢复同步完成”。

#### 4.3.2 尾矿库生态化处置技术

推行“尾矿干堆+分层覆土+生物重建”模式:尾矿经压滤脱水后分层堆放(每层厚度 $\leq 3\text{m}$ ,压实度 $\geq 90\%$ ),顶部覆盖防渗膜+30cm营养土,种植耐重金属植物(如蜈蚣草、遏蓝菜),同步建设渗滤液收集池(容积按10年一遇暴雨量设计),防止污染扩散。

#### 4.3.3 生态环境系统修复技术

土壤微生物修复技术:针对重金属污染土壤,接种功能微生物(如枯草芽孢杆菌、丛枝菌根真菌),通过微生物吸附、代谢活动降低重金属生物有效性(如镉的植物可吸收态降低40%以上),同时改善土壤团粒结构,提升肥力。

生态景观重构技术:结合矿区地形,将闭坑后的排土场、塌陷区改造为“生态公园”“农业产业园”,例如:露天采坑蓄水成湖,周边种植挺水植物(芦苇、菖蒲)净化水质,形成“水体—湿地—绿地”景观带,实现生态价值与社会价值双赢。

## 4.4 实施路径:以某非金属矿为例

### 4.4.1 矿区概况

某石膏矿位于华北平原,属半干旱气候,年降水量500mm,周边有小型水库(农业灌溉水源地)。开采方

式为露天开采,原存在矿坑水直排(SS超标5倍)、排土场扬尘污染(TSP浓度超标2倍)、地表环境覆盖率不足10%等问题。

#### 4.4.2 水工环一体化实施方案

水资源管控:建设矿坑水沉淀回用池(容积3000m<sup>3</sup>),经“混凝沉淀—过滤”处理后,回用于矿石清洗、道路降尘(回用率90%),剩余10%经人工湿地(面积5000m<sup>2</sup>)净化后排入水库(SS≤20mg/L,达《地表水环境质量标准》Ⅳ类)。

铺设雨水收集管网(总长2km),配套蓄水池(容积1000m<sup>3</sup>),年收集雨水约8000m<sup>3</sup>,替代25%生产用水。

#### 4.4.3 工程生态化改造

排土场按1:1.2坡度分级堆放,各级平台设置混凝土截排水沟(宽30cm,深40cm),表面喷播客土(含保水剂、草种),种植耐旱草本(披碱草)与灌木(柞柳),形成“固坡—抑尘—绿化”一体防护。开采区道路采用“碎石基层+透水混凝土面层”,两侧布设绿化(宽度5m,种植杨树+紫花苜蓿),减少扬尘与地表径流污染。

#### 4.4.4 生态修复

闭坑后,将采坑回填至地表标高,重塑为梯田,配套滴灌系统,种植经济作物(花生、向日葵);排土场覆盖50cm营养土,引入蚯蚓、微生物菌剂改良土壤,2年后土壤有机质含量从0.3%提升至1.2%,生物覆盖率达80%,生态系统逐步向草本—灌木群落演替<sup>[4]</sup>。

#### 4.5 实施效果

水资源:实现“零外排”,年节约新鲜水2.3万m<sup>3</sup>,周边水库水质稳定达标,地下水水位下降速率从0.5m/a减缓至0.1m/a。

生态环境:排土场扬尘污染降低70%,土壤侵蚀量减少85%,矿区周边鸟类、昆虫种类增加2倍,形成可持续的人工生态系统。

### 5 挑战与对策

#### 5.1 主要挑战

技术集成度要求高:“水-工-环”跨领域技术协同需突破学科壁垒,如水资源处理工艺与工程布局的适配性、生物修复与土壤改良的时效性衔接。

长效管理机制缺失:部分矿区重开发轻保护,一体化理念落地依赖政策强制力与企业环保意识提升。

成本投入与收益平衡:初期生态化改造投入较高(如矿井水回用系统建设成本占矿山基建投资的15%-20%),需探索“生态效益反哺经济效益”路径。

#### 5.2 对策建议

技术层面:建立“水工环一体化”技术创新联盟,推动水利工程、环境科学、生态修复等领域的产学研合作,研发低成本、易推广的集成技术(如模块化废水处理设备、耐贫瘠速生生物组合)。

政策层面:将“水工环一体化实施方案”纳入矿产开发项目环评审批强制要求,制定行业标准(如矿井水回用率≥80%、排土场覆盖率≥60%),对达标企业给予税收减免、生态补偿等激励。

管理层面:构建矿区“水工环一体化”智慧管理平台,整合监测数据、治理流程、资源调度功能,实现“实时监测—智能预警—精准施策”闭环管理,降低人工管控成本。

### 6 结束语

“水工环一体化”通过打破矿产开发中“水-工-环”要素的割裂状态,构建了从源头预防到系统修复的全流程环境保护体系,其核心价值在于以系统性思维破解传统开发的生态痛点,实现资源利用效率与生态保护效能的双重提升。未来,随着绿色发展理念的深入,该理念需进一步与智慧技术(物联网、大数据)、循环经济模式(尾矿资源化、水资源循环)深度融合,为矿产资源开发的“生态化转型”提供更具韧性的解决方案,助力“双碳”目标下人与自然和谐共生的现代化实践。

#### 参考文献

- [1]黄贝贝,马骁.浅谈水工环地质勘察的现状与新技术应用[J].数字化用户,2017,23(30):81. DOI:10.3969/j.issn.1009-0843.2017.30.079.
- [2]张太明.矿产资源开发利用与生态环境的协调发展策略分析[J].中国资源综合利用,2025,43(4):199-201. DOI:10.3969/j.issn.1008-9500.2025.04.056.
- [3]赵永士.探讨水利工程生态化建设[J].城市建设理论研究(电子版),2016(14):3343-3343. DOI:10.3969/j.issn.2095-2104.2016.14.343.
- [4]葛湃飞.路域裸露坡面生态修复实践[J].中国水土保持,2025(4):19-22. DOI:10.3969/j.issn.1000-0941.2025.04.005.