

# 从生态环境修复角度浅析矿产资源开发与环境保护关系

王亮<sup>1</sup> 王勇<sup>2</sup>

(1. 中关村绿色矿山产业联盟, 北京 100089;

2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

**[摘要]** 矿产资源的开发利用对自然环境和生态系统造成不同程度的负面影响,研究矿产资源开发与环境保护的关系具有重要意义。在此背景下,本文研究了矿产资源开发产生的环境污染与环境修复能力的关系,以及矿产资源开发产生的生态系统影响与生态系统修复能力的关系,分析如何利用环境自净化和生态的自修复能力,在成本最低情况下实现资源开发与生态保护的平衡,并定性定量相结合给出了不同矿山保护性开采和非保护性开采条件下的人工修复难度,从宏观层面指导绿色矿山建设。

**[关键词]** 矿产资源开发; 环境保护; 人工修复; 难度模型; 绿色矿山

**[中图分类号]** TD88 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2023)06-0068-06

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn11-1873/tf.2023.06.013

## 0 前言

人类社会进入工业文明后,经济发展高度依赖化石能源和矿产资源等不可再生资源。众所周知,矿产资源开发在促进社会文明发展和进步的同时,给自然环境带来严重的负面影响。矿产资源的开采、运输、选冶过程,产生难以治理的固体废弃物污染、水体污染、大气污染以及土地污染等环境问题<sup>[1-3]</sup>,甚至造成地表沉陷或变形、河流改道等巨大的环境扰动<sup>[4]</sup>。

矿产资源开发利用对生态环境的影响具有宏观性、区域性特点,影响范围大,影响因子复杂。目前,我国矿产资源高强度开发所引起的生态问题和环境污染问题相当严重,边治理边破坏、点上治理面上破坏、治理赶不上破坏的问题很突出,生态环境整体功

能下降,抵御各种自然灾害的能力减弱。生态环境恶化将严重影响我国社会经济的可持续发展和国家生态环境安全。因此保护生态环境,加强污染治理,促进绿色低碳发展,维护能源与资源安全,是当前面临的重要挑战。国家“十四五”规划强调,要深入打好污染防治攻坚战,建立健全环境治理体系,坚持“绿水青山就是金山银山”理念,坚持生态优先、绿色发展<sup>[5]</sup>。

遭受破坏的水、土壤环境和生态系统需要修复,但如果破坏强度过大,修复难度将很大,成本也很高;然而如果开采的强度过低,则无法满足我国经济发展的需要。因此寻找资源开发与环境保护之间的平衡点是生态文明建设的需要,是我国经济实现高质量、可持续发展的需要。因此,有必要对矿产资源开发与环境保护之间的关系进行深入探讨。目前,在生态修复方面,国内外学者研究总结了物理修复、化学修复、生物修复等方法论<sup>[6-8]</sup>;在污染治理方面,提出了固废综合利用、废水处理与回收等“变废为宝”措施<sup>[9-12]</sup>。然而,这些研究主要针对具体的技术层面,对于矿产资源开发与其引起的环境破坏及生态修复之间的宏观关系缺乏深刻的理解与表征。

**[收稿日期]** 2023-11-27

**[作者简介]** 王亮(1970—),男,河南三门峡人,硕士,高级工程师,主要从事绿色矿山高质量发展路径与模式研究等工作。

**[引用格式]** 王亮,王勇.从生态环境修复角度浅析矿产资源开发与环境保护关系[J].绿色矿冶,2023,39(6):68-73.

本文从生态环境修复的角度,建立资源开发过程产生的环境污染影响与环境修复以及生态系统损失与生态系统修复的关系模型,分析如何利用环境自净化和生态的自修复能力,在成本最低情况下实现资源开发与生态保护的平衡。最后又针对不同矿山,提出人工修复难度模型,从宏观层面指导绿色矿山建设。

## 1 研究基础

### 1.1 环境修复能力

环境修复是指采取物理、化学和生物学技术措施,使存在于环境中的污染物质浓度减少、毒性降低或完全无害化的方法。环境污染体现在污染物质或者能量因子的过分集中,超过了环境的承载能力而使环境质量下降、功能衰退。

环境修复包括各种各样的净化机制,如物理机制、化学机制和生物机制。物理机制包括稀释、扩散、沉降、挥发等过程;化学机制包括氧化还原、中和、分解、离子交换的过程;生物机制主要指有机生命体代谢的过程。环境修复包括自净化和人工修复两类。自净化是在物理、化学和生物等自然作用下环境中污染物浓度或总量降低的过程,但环境自净化能力有限,体现的是环境的承载能力,自净化是环境自然、被动的过程<sup>[13-15]</sup>;人工修复是人类有意识的外源活动对污染物质能量的清除过程,是人为的、主动的过程。当污染物进入环境时,因环境具有自净化能力并不一定会引起污染,只有当污染物质或能量因子超过了环境的承载能力才会导致污染。

### 1.2 生态系统的修复能力

生态系统修复是指通过一系列的措施和方法,恢复、保护和改善受到破坏或退化的生态系统。生态系统修复一般分为人工修复和自然修复两种。

自然恢复是指不依靠人工干预或以最小化的人工干预措施达到生态恢复的目标,主要是指生态系统自我调节和自我修复的能力。当生态系统受到干扰或破坏时,它会通过自身动态平衡机制恢复到原来的状态或达到一种新的平衡状态。这种自我修复能力使得生态系统能够保持其生物多样性和生态功能,确保持续地为人类提供生态服务。

人工修复是指依靠人工干预或诱导措施达到生态恢复的目标。生态系统的自我修复能力是有限的,当人类的活动对生态系统造成的破坏超出其自

我修复的能力(即生态承载力),就可能导致生态失衡和组成的改变。可以采用人工修复的方式,通过植树造林、河流修复等方式使受到破坏的生态系统恢复,促进恢复进程。

### 1.3 人工环境修复程度

人工环境修复程度指固体废弃物利用量占固体废弃物总量的百分比,或废气或废水净化降低的污染强度占总污染强度的百分比。当人工环境修复率为100%时,表示废弃物全部被利用或全部被净化。

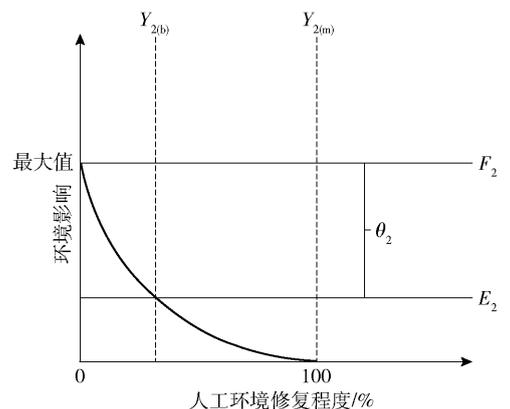
### 1.4 土地可利用状态程度

土地可利用状态程度是指被复垦的土地达到土地可利用水平的百分比。土地可利用状态程度为100%时,表示被矿山占用和破坏的土地全部达到可利用水平。

## 2 资源开发与环境保护内在关联构建

### 2.1 矿山环境污染与环境修复能力的关系

资源开发过程产生的废水、废气、废渣等废弃物对水体、土壤和空气造成的污染破坏如果在短时期能够得到全部净化,说明环境的自净化能力大于环境污染的破坏力,反之就需要进行人工环境修复来降低污染强度。环境污染强度与人工环境修复程度的关系如图1所示。



$Y_{2(m)}$  - 人工环境修复程度最大值;  $Y_{2(b)}$  - 人工修复与自然净化分界点

图1 环境污染强度与人工环境修复程度关系

根据图1,得出人工环境修复力度计算公式(1):

$$\theta_2 = F_2 - E_2 \quad (1)$$

式中: $\theta_2$ 为人工环境修复力度; $E_2$ 为环境自净化能力或环境承载能力; $F_2$ 为资源开发过程产生的固废、废水、废气等废弃物对水体、土壤和大气的破坏力。

由公式(1)推断出以下结论。

1) 当环境污染强度在  $E_2$  之下, 属于环境自净化区, 不需要进行人工环境修复; 当环境污染强度在  $E_2$  之上, 属于人工修复区, 需要通过人工修复将环境污染降到  $E_2$  之下。

2) 当  $\theta_2 > 0$ , 表示排放到土地、河流、空气中的污染的破坏力大于土地、河流、空气对污染的净化能力, 需要辅助人工措施对环境进行修复, 降低污染强度, 才能实现污染物的破坏力与环境自净化能力的平衡。

3) 当  $\theta_2 \leq 0$ , 表示排放到土地、河流、空气里的污染的破坏力小于等于土地、河流、空气对污染的净化能力, 此时不需要再辅助人工措施对环境进行修复, 环境对污染完全可以实现自净化。

4) 当  $Y_{2(b)} = Y_{2(m)} = 100\%$ , 表示人工环境修复程度达到 100%, 排放到土地、河流、空气中的污染物已全部被进行无害化处理, 不会产生污染, 但此时修复成本最高。当  $Y_{2(b)} = 0$ , 表示人工修复程度为 0, 即没有对污染物进行人为无害化处理, 完全靠环境自净化, 无治理成本。当  $Y_{2(b)}$  处于 0 至 100 之间时, 需要采取人工措施和环境自净化相结合的方式降低污染强度。

5)  $E_2$  为污染强度与环境承载力的平衡点, 此时排放到土地、河流、空气里的污染的破坏力降到  $E_2$  之下后, 不再需要进行人工修复或综合利用, 依靠环境自净化, 治理成本最低, 这是绿色矿山追求的内涵。

## 2.2 资源开发破坏与生态修复能力的关系

资源开发对生态系统产生的破坏如果在短时期内能够全部得到修复, 说明生态自修复能力大于资源开发对生态系统的破坏力, 反之就需要进行人工生态修复, 以加快修复进程。生态破坏与土地可利用状态程度的关系如图 2 所示。

根据图 2, 得出人工生态修复力度计算公式(2)。

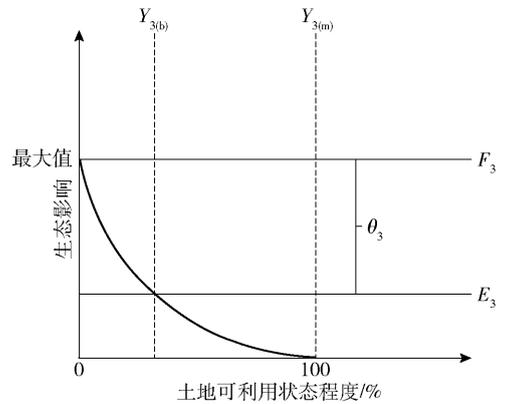
$$\theta_3 = F_3 - E_3 \quad (2)$$

式中:  $\theta_3$  为人工生态修复力度;  $E_3$  为生态自修复能力;  $F_3$  为资源开发过程对生态系统的破坏力。

由公式(2)推断出以下结论。

1) 当资源开发的破坏力在  $E_3$  之下, 属于生态自修复区, 即不需要进行人工修复; 当资源开发的破坏力在  $E_3$  之上, 属于人工修复区, 即需要通过人工修复措施将生态破坏降到  $E_3$  之下。

2) 当  $\theta_3 > 0$ , 表示资源开发过程对生态系统的



$Y_{3(m)}$  - 土地可利用状态程度最大值;  $Y_{3(b)}$  - 人工修复与自然修复分界点

图 2 生态破坏与土地可利用状态程度关系

破坏力大于生态系统自修复能力, 必须进行人工生态修复, 以加快修复进程, 从而达到资源开发过程对生态系统的破坏力与生态系统恢复能力的平衡。

3) 当  $\theta_3 \leq 0$ , 表示资源开发过程对生态系统的破坏力小于生态系统自修复能力, 不需要再辅助人工措施对生态系统进行修复, 生态系统完全可以利用自然修复能力进行自修复。

4)  $Y_{3(b)} = Y_{3(m)} = 100\%$ , 表示复垦率达到 100%, 即没有利用生态系统的自修复能力, 而对生态环境进行高质量人工修复, 修复成本最高。当  $Y_{3(b)}$  处于 0 至 100 之间时, 需要采用人工修复和自然修复相结合的方法对生态系统进行修复。

5)  $E_3$  为生态系统破坏与生态承载力的平衡点, 当人工修复使生态系统的污染降到  $E_3$  时, 不再需要进行人工修复, 仅依靠生态系统自修复, 修复成本最低, 这是绿色矿山追求的内涵。

## 2.3 资源开发与生态环境修复能力的关系

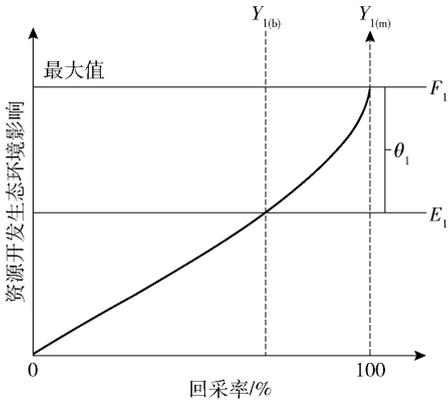
资源开发过程对生态环境主要产生两个破坏, 一是对水、土壤、大气的污染破坏, 二是对生态系统造成的破坏。如果资源开发对生态环境的破坏超过生态环境的自修复(自净化)能力, 就必须辅助人工修复, 反之则不需要进行人工修复。

### 2.3.1 资源开发与生态环境修复能力基本关系

资源开发对生态环境的破坏与回采率的关系如图 3 所示。根据图 3, 得出生态环境人工生态环境修复计算公式(3)。

$$\theta_1 = F_1 - E_1 \quad (3)$$

式中:  $\theta_1$  为人工生态环境修复力度, 同时  $\theta_1 = \theta_2 + \theta_3$ ;  $E_1$  为生态环境自修复(自净化)能力;  $F_1$  为资源开发的破坏力。



$Y_{1(m)}$  - 回采率的最大值;  $Y_{1(b)}$  - 最佳回采率, 资源开发与生态环境破坏分界点

图3 资源开发对环境的破坏与回采率关系

由公式(3)推断出以下结论。

1) 当资源开发的破坏在  $E_1$  之下, 属于生态环境自修复区, 不需要采取人工措施对生态环境进行修复; 当资源开发的破坏在  $E_1$  之上, 属于人工修复区, 需要通过人工修复将资源开发对生态环境的破坏降低到  $E_1$  之下。

2) 当  $\theta_1 > 0$ , 表示资源开发对生态环境破力大于生态环境自修复(自净化)能力, 这种情况属于资源开发强度比较大, 忽略或不重视对生态环境的保护。

3) 当  $\theta_1 \leq 0$ , 表示资源开发对生态环境破力小于等于生态环境自修复能力, 这种情况表明资源开发强度比较小, 对生态环境的影响有限。

4)  $Y_{1(b)} = Y_{1(m)} = 100%$ , 表示回采率达到 100%, 即资源开发过程对生态环境破坏最大, 在这种情况下生态环境治理成本最高。

### 2.3.2 保护性资源开发与生态环境修复能力关系

在资源开发过程中, 如果不采用保护性开采技术且没有及时对生态环境进行防治, 即  $\theta_1$  较大, 资源开发所引起的生态问题和环境污染问题就会非常大。根据上述分析, 要想减少资源开发对生态环境的影响, 就必须减小  $\theta_1$  值。减小  $\theta_1$  可从降低  $F_1$ 、增加  $E_1$  或降低回采率三个方面着手。保护性资源开发对环境的破坏与回采率的关系如图 4 所示。

1) 减少  $F_1$  的方法。采用充填开采、采空区回填等技术减少地表沉降、降低资源贫化率、防止地质灾害, 以及在选矿环节减少废弃物的产生和排放。

2) 提升  $E_1$  的方法。把废弃物末端治理转化为源头控制、过程管理和末端治理相结合的方法, 从源

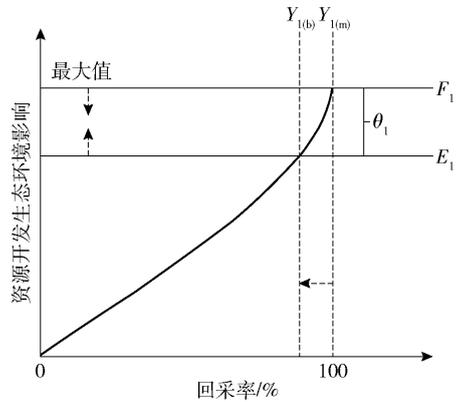


图4 保护性资源开发对环境的破坏与回采率关系

头上减少废弃物的产生, 进而减少废弃物对生态环境的伤害, 积极开展循环经济, 提高废弃物资源化利用水平, 按要求对堆放的废弃物进行管理。通过提升  $E_1$ , 提高生态承载能力。

3) 研究适合本单位的回采率。通过降低回采率, 减少资源开发过程废弃物的产生和降低对生态环境的破坏, 寻找经济效益和环境保护的平衡点。

## 3 人工修复难度分析

完全依赖生态环境自修复(自净化)能力很难对冲高强度资源开发的破坏力, 因此必须辅助人工修复。

### 3.1 修复难度等级划分

#### 3.1.1 人工环境修复( $\theta_2$ )等级划分

根据修复难度将人工环境修复划分为五个等级, 分别为:

- 1) 一级, 易修复。废弃物存量小, 基本无污染。
- 2) 二级, 较易修复。对环境污染小。
- 3) 三级, 较难修复。对环境污染较大但数量较小。
- 4) 四级, 难修复。对环境污染较大且数量较大。
- 5) 五级, 极难修复。对环境污染很大。

#### 3.1.2 人工生态修复( $\theta_3$ )等级划分

根据修复难度将人工生态修复划分为五个等级, 分别为:

- 1) 一级, 易修复。地质环境稳定。
- 2) 二级, 较易修复。地质环境较稳定。
- 3) 三级, 较难修复。地质环境较稳定, 破坏的地质环境条件较复杂。

4) 四级, 难修复。破坏的地质环境条件复杂, 范围较小。

5) 五级, 极难修复。破坏的地质环境条件复杂, 范围较大。

### 3.1.3 人工生态环境修复( $\theta_1$ )等级划分

根据修复难度将人工生态环境修复等级划分为四个等级,分别为:

- 1) 一级(1~2),修复难度一般。成本低、难度小。
- 2) 二级(3~4),修复难度小。修复有一定技术难度,需要一定的投入。
- 3) 三级(5~6),修复难度中。技术不成熟或经济不合理。
- 4) 四级(7~8),修复难度大。技术不成熟、经济不合理。

理论上应分为五个等级,由于采矿对环境的污染和对生态系统的破坏具有一定相关性,经过分析,人工环境修复和人工生态修复很难同时都达到难修复等级以上,因此把人工生态环境复等级划分为四个等级。

### 3.2 非保护性开采和保护性开采条件下的人工修复难度

如果没有采用充填开采、保水开采等保护性开采技术或工艺,降低资源开发过程对环境的破坏、减少废弃物产生以及降低生态系统损伤,各类矿山的人工修复难度见表1。

表1 非保护性开采人工修复难度

不同矿种及开采方式	人工环境修复( $\theta_2$ )		人工生态修复( $\theta_3$ )		人工生态环境修复( $\theta_1 = \theta_2 + \theta_3$ )	
	逻辑值	形象值(等级)	逻辑值	形象值(等级)	逻辑值	形象值(等级)
煤矿井工矿	>0	●●○○○	≥0	●●●●●	≥0	●●●●●●●○
煤矿露天矿	>0	●●○○○	≥0	●●○○○	>0	●●●●○○○○
金属井工矿	>0	●●●○○	≥0	●●●●○	≥0	●●●●●●●○
金属露天矿	≥0	●●●●○	≥0	●○○○○	>0	●●●●●○○○
砂石等非金属	≥0	●○○○○	≥0	●○○○○	≥0	●●○○○○○○

如果采用减少开采破坏、减少废弃物产生、降低生态系统损伤的技术、工艺,可降低资源开发过程对环境的破坏强度。资源开发与生态环境修复能力的

关系优化后,人工环境修复( $\theta_2$ )、人工生态修复( $\theta_3$ )以及人工生态环境修复( $\theta_1$ )发生了变化。各类矿山的人工修复难度变化见表2。

表2 保护性开采人工修复难度

不同矿种及开采方式	人工环境修复( $\theta_2$ )		人工生态修复( $\theta_3$ )		人工生态环境修复( $\theta_1 = \theta_2 + \theta_3$ )	
	逻辑值	形象值(等级)	逻辑值	形象值(等级)	逻辑值	形象值(等级)
煤矿井工矿	≥0	●○○○○	≥0	●●●●○	≥0	●●●●●●●○
煤矿露天矿	≠0	●●○○○	≥0	●●○○○	>0	●●●●○○○○
金属井工矿	>0	●●○○○	≥0	●○○○○	≥0	●●●○○○○○
金属露天矿	≥0	●●●○○	≥0	●●○○○	>0	●●●●●○○○
砂石等非金属	≥0	○○○○○	≥0	●○○○○	≥0	●○○○○○○○

从表1、表2可以看出,采用保护性开采技术或工艺后,各种矿山的人工修复难度等级都有不同程度的下降,相应地绿色矿山建设的难度也降低。不同矿种的开采方式不同,需要人工干预修复的程度也差别较大。大部分煤矿井工矿由于多种原因没有真正实现充填开采,对环境的实质性破坏较大,生态环境修复难度最高;砂石等非金属矿山由于废弃物污染强度比较低,资源开发工艺、方法、技术简单,生态环境修复的难度最低。

## 4 结束语

绿色矿山建设的难度与人工修复的难度具有相关性,绿色矿山的内涵就是通过建设绿色矿山,实现资源开发与生态环境保护相平衡。本文从人工生态修复的角度分析了资源开发过程产生的废弃物对环境的污染破坏与环境修复的关系,以及生态系统破坏与生态系统修复的关系,定性与定量相结合给出了保护性开采和非保护性开采条件下的人工修复难度,为不同矿种绿色矿山建设提供参考。

## [参考文献]

- [1] 吴卫国,宋言. 铜铅锌冶炼固废协同处理及有价金属综合回收[J]. 绿色矿冶,2023,39(1):47-52.
- [2] 王建法,刘建兴,陈晔. 金属矿绿色开采的理念与技术框架[J]. 矿业工程,2016,14(6):16-18.
- [3] TAOUIK E R, MOHAMED N, ABDELMAJID H. Metals in mine wastes: environmental pollution and soil remediation approaches - a review [J]. Geosystem Engineering, 2017,24(3).
- [4] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等. 金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J]. 金属矿山,2021(1):1-13.
- [5] 王亮,王勇,乔江晖. 绿色矿山建设:生态文明建设在矿业领域的生动实践[J]. 科技纵览,2022(7):66-69.
- [6] 康莹,赵文廷,张俊梅,等. 添加不同配比客土对改良铁矿废石复垦土壤碳排放的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(5):346-353.
- [7] KASTYUCHIK A, KARAM A, AIDER M. Effectiveness of alkaline amendments in acid mine drainage remediation [J]. Environmental Technology & Innovation, 2016,6.
- [8] 林海,江昕昝,李冰,等. 有色金属尾矿植物修复强化技术研究进展[J]. 有色金属工程,2019,9(11):122-132.
- [9] 吴英杰,赖伟. 某铜矿尾矿处置及采空区充填协同治理实践[J]. 黄金,2021,42(10):79-82.
- [10] 王桂芳,王翼文,张帅,等. 硫化矿尾矿的综合利用及污染治理研究进展[J]. 金属矿山,2020(2):111-116.
- [11] 安昌. 西藏某铅锌矿选矿厂回水处理工艺研究与实践[J]. 现代矿业,2020,36(7):233-235.
- [12] 赵迤琳. “双碳”目标下中国矿山的发展与建设模式[J]. 中国矿山工程,2022,51(3):83-89.
- [13] 刘新亮,刘梦茹,杨亚东,等. 重金属污染土壤修复技术研究现状及发展方向[J]. 化工矿物与加工,2021,50(10):52-57.
- [14] 陈萍,陶恒畅,郭超华,等. 非均相 Fenton 氧化法处理铅锌选矿废水[J]. 矿冶,2021,30(6):109-112,119.
- [15] WAHSHA M, NADIMI-GOKI M, FORNASIER F, et al. Microbial enzymes as an early warning management tool for monitoring mining site soils[J]. Catena, 2017,148.

## Relationship Between Mineral Resources Exploitation and Environmental Protection from the Viewpoint of Ecological Environment Restoration

WANG Liang, WANG Yong

**Abstract:** The development and utilization of mineral resources have different degrees of negative impact on the natural environment and ecosystems. It is of great significance to study the relationship between mineral resources development and environmental protection. In this context, this paper studied the relationship between environmental pollution caused by mineral resources development and environmental remediation capacity, as well as the relationship between ecosystem impact caused by mineral resources development and ecosystem remediation capacity, and analyzed how to use environmental self-purification and ecological self-remediation capacity to achieve the balance between resource development and ecological protection at the lowest cost. The difficulty of artificial restoration under the conditions of protective mining and non-protective opening of different mines was given by combining qualitative and quantitative analysis, which guided the construction of green mines from the macro level.

**Key words:** mineral resources development; environmental protection; artificial remediation; difficulty model; green mine