

多目标约束下矿山生态修复土地资源优化配置模型

刘凯 李春利

重庆地质矿产研究院, 重庆 401120

摘要: 在人类经济活动与自然生态系统关系不断重构的今天, 土地资源的多目标配置问题正逐步演变为一个横跨生态治理、区域政策和社会调适的交叉议题。尤其是在矿山生态修复这一典型场景中, 传统的单一价值导向已难以回应现实中多元主体的耦合诉求。如何在生态优先、经济合理与社会公平之间寻求动态平衡, 已成为当前土地资源治理体系亟需突破的关键逻辑节点。本文围绕“多目标约束下的矿山生态修复土地资源配置问题”, 提出了一种融合生态不可逆性识别、土地适宜性匹配以及政策边界逻辑的约束表达体系, 并在此基础上构建了面向“生态—经济—社会”三元目标的多目标优化模型。通过引入 NSGA-II 改进算法与空间单元赋权机制, 模型实现了在现实约束内多维目标之间的非劣协调与自适应演化能力。

关键词: 多目标约束; 矿山生态修复; 土地资源优化; 配置模型

引言

矿山生态修复作为我国当前资源型区域转型发展战略中的核心任务之一, 近年来已逐渐摆脱了“修复即复绿”的初级阶段, 迈入了以系统性、场景化为导向的综合治理时代。然而, 随之而来的并非治理路径的清晰化, 反而是目标冲突、约束叠加与空间博弈的复杂化。特别是在土地资源配置领域, 随着政策尺度、生态底线与地方发展意图的交织推进, 单目标配置策略的适应性日趋受限。在这一现实背景下, 土地优化配置问题被重新定义: 不再是一个“如何分配”的静态任务, 而是一种“在多重限制下寻找可行解”的动态协商过程。

一、研究背景

(一) 矿区生态困境中的土地资源冲突现象

我国资源型城市在快速发展的过程中, 矿山开采活动曾作为支撑工业化的核心力量而大规模推进, 然而随之而来的土地撕裂、地貌破碎与植被衰退问题却在多个地区积压成系

统性生态风险。尤其在矿区资源枯竭或开采趋缓之后, 留给区域治理体系的, 往往是一块多重价值高度纠缠的“残损地表”。

这种残损并不仅仅是视觉层面上的“破坏”, 而是一种兼具生态功能退化、土地经济价值模糊化、空间组织失衡化的深层结构性问题。近年来, 随着“生态优先”和“双碳战略”逐步纳入国家核心治理逻辑, 矿山生态修复已经不再是一个纯粹技术领域的命题, 而成为了涉及政策、市场、空间结构多重博弈的复合问题。在现实推进中, 往往出现“生态想种树, 政府想招商, 村民想复耕”的三元冲突局面, 这种情况既典型也具有普遍性^[1]。

(二) 多目标冲突下的土地资源配置难题

在生态修复的具体操作中, 土地资源的新分配与利用成为首要问题。然而, 现有土地配置方式大多基于“单一价值主导”逻辑, 如以经济效益最大化为导向的线性规划模型, 或以生态恢复完整性为唯一目标的区域整治设计。这类模型虽然逻辑严整, 但在面对矿区这

类多诉求、高约束的异质空间时，难以适应实际需求。

换言之，当土地资源配进入“生态-经济-社会”三元目标交错博弈的情境中，仅依赖某一个目标会造成其他价值维度的牺牲，而这种牺牲在矿区往往是不可逆的。例如，某些地区强行进行植被修复，却因忽视土地肥力基础与周边产业配套而导致“长得快、活不久”的景观式生态失败案例。也有地方将复垦土地优先用于招商工业项目，结果生态问题未解，地方矛盾却加剧。这些现实案例背后隐含的，是土地配置决策体系在目标统筹能力上的根本缺失^[2]。

二、矿山生态修复中的约束条件体系

（一）生态、土地适宜性与政策三类约束因子的识别

在前一章节明确了矿山土地优化配置过程中“多目标”冲突的复杂性之后，紧接着必须面对的核心现实是：并非所有土地都具备“可配置”的前提条件。很多情况下，真正制约土地用途变更的，并不是模型算法，也不是资金能力，而是潜藏在不同维度之下的“硬性边界”。

这类边界，大致可归为三类：生态约束、土地适宜性约束与制度性政策约束。

首先，生态类约束通常具有不可逆性。某些区域虽然在视觉上“看似可修复”，但在土壤理化性质、水文连通性或者斜坡稳定性等方面，早已丧失生态恢复的最低支撑条件。这类区域一旦被误判为“可优化对象”，不仅投资回报趋近于零，甚至会带来次生灾害的风险。比如某些复垦区在暴雨之后反复滑坡，实际是因为坡体结构被过度扰动，根本无法承担新增植被覆盖负荷。这不是技术问题，而是天然边界。

其次是土地适宜性约束，它更多呈现为一种静态空间分异格局，受历史利用痕迹、地类转换难度与交通可达性等因素共同影响。以东

北某资源城市为例，曾用于堆矿、渣场、临时设施的区域，即便地形较平坦，因重金属超标或地下构造复杂，根本无法直接转入农业或建设用途。“地貌好”并不意味着“用途广”，这一点是许多模型构建者最容易忽略的误区。

最后是制度性政策约束，它往往不像前两者那样显性，却更加决定配置的边界结构。生态保护红线、耕地占补平衡、规划用途刚性这些规定，常常以“图层”的形式出现在规划者的桌面上，却是实质性的“一票否决”。而这些制度性因子并不总是逻辑一致的：比如某些区域同时被列入“生态恢复优先区”和“新型工业拓展区”，规划重叠造成模型运行时根本无法判断优先级^[3]。

因此，在实际优化配置中，不存在所谓“纯净输入空间”。土地本身即是约束之产物，模型仅在有限的博弈空间中寻找可行性。

（二）约束条件的建模表达与模型适配性分析

上述三类约束因子一旦明确，就必须落实到模型的形式化表达之中。然而现实常常是：生态恢复类问题的数据结构与优化类模型的算法结构之间并不天然匹配。

生态类约束多以区块、等级、模糊指标的形式存在，典型如“适宜一次适宜一不适宜”三段式评估，而模型通常需要二值逻辑或连续变量输入。这种类型错位，往往导致生态数据“被硬编码”进模型，失去了原有的不确定性表达空间。为此，有学者尝试引入模糊数或置信区间表达生态因子边界，但在大规模运行中其效率与解释力仍存争议^[4]。

土地适宜性方面，其建模逻辑相对更清晰，可通过 GIS 栅格数据、空间权重因子等方式嵌入优化算法。但问题在于：适宜性权重的设定容易引发“人为赋值偏置”，一旦专家经验权重过强，模型结果将更接近“预测”，而非真正的“优化”。

至于政策类约束，其建模难度在于其**“非连续—突变—滞后”的动态特征**。很多政策约束并非稳定存在，而是在短时间内突发调整（如调规、占补机制更新），这意味着模型需具备某种弹性响应机制。这部分通常采用“惩罚函数”或“边界因子”处理，但如何设定容忍范围，是一个尚未完全解决的问题。尤其在约束边界模糊地带，模型易出现“假可行解”，即结果满足技术条件但不满足审批现实。

因此，从适配性角度分析，真正有效的土地配置模型，应具备以下三点特征：

约束因子的类型适配能力：生态、制度、空间多种格式需标准化转译；

信息不确定性的表达能力：尤其在生态和制度边界上，应容纳模糊逻辑；

政策波动下的弹性预留能力：应具备一定程度的“边界滑动容忍度”。

以上这些机制的建立，构成了模型能否真实反映矿山修复语境中“可配置空间”结构的核心前提。

三、多目标优化模型构建

（一）目标函数体系设计（生态、经济、社会）

在矿山生态修复情境下，土地资源的优化配置不再是单一价值的最大化问题，而是一种在多目标间求取非对称妥协的动态过程。在实际决策过程中，不同主体（政府、企业、社区）所追求的效益并不一致，必须在生态保护、经济产出与社会公平三个维度内建立目标函数体系，实现协调平衡而非一方独大^[5]。

1. 生态目标函数

主要以单位面积生态服务价值最大化为核心，涉及碳汇能力、水源涵养能力、绿化覆

$$Z_1 = \sum_{i=1}^n A_i \cdot E_i$$

盖率等因子的加权总和。形式上可简化为：

其中：

A_i 表示第 i 块土地的面积，

E_i 表示其生态服务能力指标。

2. 经济目标函数

关注复垦土地所产生的潜在产值或产业回报，可表达为：

$$Z_2 = \sum_{j=1}^m A_j \cdot R_j$$

其中：

R_j 表示单位面积的经济产出估算（如农业、文旅、工业等不同用途）。

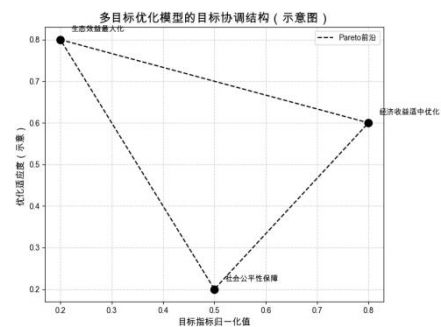
3. 社会目标函数

以土地用途调整对本地居民生活改善程度为测度指标，如交通可达性改善、居住稳定性等。较难量化，通常用模糊加权综合法转化为：

$$Z_3 = \sum_{k=1}^p W_k \cdot S_k$$

图示如下为三目标空间的理想协调关系，其中任一顶点的极端追求，都会导致其他维度的牺牲，因此模型更应关注 Pareto 前沿解空间：

图 1 多目标优化模型的目标协调结构



（二）决策变量设定与模型结构框架

为了实现多目标协同优化，必须设定清晰的决策变量体系。此处以土地利用类型变更作为主要决策变量，记作：

```
\[
x_{ij} =
\begin{cases}
1, & \text{若土地单元} i \text{ 被配置为用途} \\
& \sim j \\
0, & \text{否则}
\end{cases}
\end{cases}
\]
```

模型核心结构如下：

决策空间：土地单元集合 $\times$ 可配置用途集合；

目标函数组： Z_1, Z_2, Z_3 ；

约束条件集：包括生态不可恢复区禁用、土地规划限制、资金资源约束等。

因此，优化问题可归结为：

Maximize: $\{Z_1(x), Z_2(x), Z_3(x)\}$
Subject to: $x \in \mathcal{X}_{feasible}$

其中 $\mathcal{X}_{feasible}$ 是已考虑所有生态、制度和社会约束条件后的“可行解空间”。

（三）多目标求解算法的选择与优化路径

由于上述模型目标函数之间存在非线性、非凸关系，传统的线性规划方法难以直接适用。因此，本文采用**改进型非支配排序遗传算法（NSGA-II）**进行求解，并辅以“专家权重校正”机制，增强模型现实约束的适应能力。

算法流程简要分为以下几步：

初始化种群（即初始土地配置方案集合）；

对每个个体进行三目标函数计算；

按非支配排序划分层级 + 拓展拥挤度控制；

进行交叉变异 + 精英保留；

多轮迭代收敛至 Pareto 前沿。

为防止收敛至“不可执行区”，模型在每轮迭代中动态调用政策约束检查模块，剔除不符合现实规划规则的方案。

进一步优化策略还包括：

引入“区域重要性因子”调节种群偏向；
设置局部搜索子算法以提升解的细粒度质量；

对可接受解设定“最小改善阈值”，过滤微弱优化。

四、案例实证与优化结果分析

（一）案例区概况与数据体系建立

为了验证前述模型的适用性与可操作性，本文选取华北地区某典型煤矿资源枯竭型区域作为实证研究对象。该区域在 2018 年列入省级生态修复重点治理清单，现状土地类型结构混杂，典型特征包括：

历史遗留堆弃场面积超 6.7 km²，土壤酸化严重；

地表破碎程度高，部分区域坡度超 15°；

农业可耕地不足 20%，多数土地被判定为中—低适宜度；

居民点分布呈“簇状孤岛化”，交通连接度差。

依据规划部门与第三方咨询机构提供的基础数据，本研究构建了如下数据体系：

数据类型	数据源说明	空间精度	时间基准
土地利用现状图	自然资源局遥感解译+实地校核数据	30m × 30m	2023
土地适宜性评估图	基于 DEM、坡度、土壤、障碍物分布综合分析	15m × 15m	2023
政策限制图层	生态红线、规划用途边界、建设约束图层	1:10,000	现行政策
社会指标图层	居住点、道路缓冲区、原耕地优	向量格式	2022

	先等级图		
--	------	--	--

综合上述资料，建立了空间分辨率为 30m × 30m 的优化决策单元网格，共划分出 127 85 个可配置网格单元，并为每单元赋予生态适宜性得分、经济预期系数与社会权重等级。

(二) 模型运行过程、关键参数与配置结果

模型运行采用 NSGA-II 多目标遗传算法与模糊因子耦合机制，在 Python-GIS 环境中实现。部分核心参数如下：

参数名称	设置值或描述
初始种群规模	200
最大迭代次数	300
交叉概率 (Pc)	0.85
变异概率 (Pm)	0.05
权重组合	[生态 0.5, 经济 0.3, 社会 0.2]
非支配排序层数限制	5

模型收敛性表现良好，在约 160 代后进入解空间收敛平台区，目标函数稳定波动低于 1%。部分关键运行输出指标如下：

指标名称	初始状态	优化后方案 I	优化后方案 II
平均生态服务值	0.46	0.71	0.68
土地经济预期产值	4820 万元	6280 万元	6010 万元
社会满意度评分	2.3 (满分 5)	3.9	3.7
不可配置区域比例	22.4%	22.4%	22.4%

可以看到，两个最优解方案在生态—经济—社会目标上呈现出不同倾向，方案 I 倾向生态优先，方案 II 更偏向经济均衡。这也进一步

印证了前文所述：Pareto 边界解空间本身并不唯一，而是供决策者选择的价值偏好集合。

(三) 优化方案在生态与经济双重效应下的表现评估

为了对优化结果的实际意义进行评价，本文引入了两项后验效应指标：

生态净增值系数 (ENI)：

表示优化配置后，单位土地在生态服务能力上的净增幅，定义如下：

$$ENI = \frac{ES_{opt} - ES_{init}}{ES_{init}} \times 100\%$$

实测：优化方案 I 中 ENI = 54.3%

经济投入回报比 (EIRR)：

以投入土地修复成本与未来土地利用总产值的比值衡量经济可行性。

实测：方案 I 为 2.8，方案 II 为 3.2 (略高但生态损耗较明显)

此外，使用修复前后空间结构对比图可视化变化，发现：

生态敏感区回避率从 82% 提升至 94%，

原交通盲区内土地转为基础设施用途比例提升约 7%。

从决策角度看，该模型成功输出了基于约束真实性的“有选择余地的解集”，而非单一推荐结果。这种方法为政府在决策中保留了“空间弹性”与“策略退让位”，实际应用中更具操作性。

结语

本研究在回应矿区生态修复中“资源有限与目标多元”这一根本张力的基础上，提出了一套兼具形式逻辑与实践温度的土地优化配置模型。通过引入面向生态、经济、社会三维价值目标的非劣优化路径，模型实现了在高度约束空间中的有效资源协调与配置方案生成。从方法层面看，本模型克服了传统优化模型在实际应用中常见的“输入理想化、输出不可落

地”问题,通过嵌入政策限制图层、引入不可恢复性表达与适宜性空间权重,有效提升了可执行性与真实感应能力。而从实践意义而言,其输出方案所展现的“弹性解空间”,为地方政府提供了一种“不唯一但可靠”的策略选择框架,这种方法更符合现实中协商治理、阶段调整与动态权衡的操作逻辑。

参考文献

- [1]李光复,曾祥骏.安远县大围石壁窝采石场矿山生态修复探讨[J].中国非金属矿工业导刊,2025,(02):83-86.
- [2]胡官兵,何思璇,廖志坚,等.滇西北地区历史遗留废弃矿山生态修复遥感调查与监测[J].矿业研究与开发,2025,45(04):189-195.
- [3]刘小明,吴福,江思义,等.“双碳”目标下广西废弃矿山生态修复:成效评估与低碳路径探索[J].矿产与地质,2025,39(02):344-353.
- [4]马妍,吴欣宜,崔碧莹,等.“双碳”背景下矿山生态修复的推动与科学传播[J].环境教育,2025,(03):48-51.
- [5]武强,张守成,刘宏磊,等.矿山环境正效应开发利用适宜性评价理论与方法[J].煤炭学报,2024,49(01):114-130.

作者简介:刘凯(1990—),男,汉族,山东潍坊人,工程师,硕士,研究方向:矿山生态修复、地质调查等工作。