

生态修复背景下矿山土地资源多功能转型 路径探索

李春利 刘凯

重庆地质矿产研究院, 重庆 401120

摘要: 在生态文明建设不断深化与资源枯竭型区域转型需求日益突出的双重背景下, 传统意义上的矿山土地修复正逐步从工程导向迈向功能重构。这一转变不仅是恢复生态表征的物理过程, 更是土地系统内部功能关系的深层次重组。本文基于“生态—经济—社会”三维功能协同理论, 构建矿山土地多功能识别体系, 融合空间耦合度模型与路径演化模拟方法, 系统探讨不同转型路径下的功能协调格局与生态—产业耦合效率。最后, 通过构型方案比选与适应性评估, 本文提出了具有分区导向的最优路径适配策略。

关键词: 生态修复; 土地多功能; 转型路径; 系统耦合; 矿区治理

引言

矿山作为典型的人类活动强干预地貌单元, 其土地系统的演化轨迹往往呈现出剧烈的功能单一化与生态失衡特征。长期以来, 关于矿区土地治理的研究多聚焦于地表修复与生态恢复技术, 尽管在工程方法与绿化覆盖层面取得一定进展, 但对于功能重构的系统性响应机制关注不足, 导致“复绿之后无所用”“修复之后无转型”的现象屡见不鲜。这种现象的本质, 反映的是修复路径与土地功能演化之间逻辑错位的问题。与此同时, 土地作为资源空间、生产空间与生活空间的复合载体, 其多功能属性决定了其利用方式不能再依据单一经济产出逻辑展开。尤其是在“三区三线”与“双碳”政策并行推进的时代背景下, 土地功能需要在生态保护、社会承载与经济增长之间寻求新的平衡。矿山土地, 因其历史遗留问题与区域战略转型双重压力, 更需要从路径层面进行系统性的空间策略重构。

一、理论基础与分析视角

(一) 土地多功能利用理论概述

土地多功能利用理论最早源于农业与乡村发展研究领域, 近年来在城市更新、生态治理与区域空间重构等多个方向得到拓展。该理论主张将土地视为承载多元功能的复合载体, 不同空间单元在生态保护、经济产出与社会服务等方面并非孤立运作, 而是处于一个互动共生的动态体系之中。西欧国家较早开展了多功能土地价值测度与功能冲突识别研究, 强调通过综合评估体系优化土地用途配置效率。我国相关研究虽起步稍晚, 但近年来在国土空间规划、生态产品价值核算与用地权能再构方面已形成初步理论体系。

(二) 系统转型与路径演化机制

相较于静态土地分类与功能归属的划分方法, 路径研究更需从动态演化与系统非线性转变的角度展开。土地转型并非一系列孤立的事件, 而是系统在内外驱动共同作用下的路径跃迁过程。根据复杂系统理论与路径依赖原理, 矿区土地功能演化具有明显的“初始状态锁定”特征, 即既有生态破坏与产业模式对转型路径形成初期路径设限。一旦路径形成, 将通过资源配置惯性与制度惰性继续固化原有结构。

因此,构建多功能转型路径模型,首要任务是识别其阶段性特征与系统内在驱动因素。本研究以系统跃迁机制为基础,引入功能协调度与路径潜势作为评估参数,在模型构建中设置路径扰动因子与转型阈值,模拟其在不同干预强度与修复能力下的演化逻辑,从而揭示系统跃迁的最优轨迹^[1]。

(三) “修复—转型”双逻辑下的综合分析框架

矿区土地的再利用不能仅以生态修复为单一目标,也不能将转型视为修复之后的附属过程。事实上,生态修复与功能转型之间存在密切的结构性嵌套关系,两者在空间上交叉、在时间上重叠、在机制上耦合。传统研究往往将二者割裂处理,忽视其交互影响与共生潜力,导致路径设计在实际推进中出现断裂与失效。

为克服上述局限,本文提出“修复—转型”双逻辑一体化分析框架,即将生态修复作为路径演化的基础阶段,构建生态底板与功能承载能力;同时将多功能转型作为目标导向,引导土地用途优化配置与产业功能导入。框架中嵌入了从初始识别—功能叠加—路径模拟—反馈优化的闭环机制,通过耦合空间动态模拟技术与系统评估方法,建立修复与转型的同步调控机制,从而推动矿区土地资源向生态安全、经济可行与社会适配并重的方向演进。

二、研究区域与数据支撑

(一) 案例区选择原则与基本概况

研究案例区位于山西省晋中市灵石县北部,地处吕梁山与太岳山交界地带,属中温带半湿润气候区,总面积约 1465 平方公里。该地区长期以来以煤炭资源开采为主,自 20 世纪 90 年代以来,累计建成各类大中型煤矿 30 余处,矿业经济占地方财政收入的比重一度高达 68.3%。然而,由于长期高强度地表采掘与井下开采,区域内形成了大面积塌陷区、废弃矸石堆、裸露采空地与严重的土壤退化现象。

据灵石县自然资源局 2022 年统计数据,全县废弃矿区土地面积达 4127 公顷,占全县建设用地的 19.6%。

此外,该地区常年面临水土流失、地表径流异常及农林用地碎片化等典型生态问题,区域经济高度依赖煤炭,二产比重在 2021 年仍高达 56.2%,新兴产业布局滞后。地方政府正推动“以生态修复带动转型发展”战略,为本研究提供了现实政策背景与数据支撑^[2]。

(二) 土地利用现状及其多功能特征

为掌握案例区土地利用结构与功能分布情况,本文结合 2021 年 Landsat 8 OLI 遥感影像(空间分辨率 30 米)及自然资源部土地利用现状数据库,提取土地类型与变化趋势。经分类处理后,区域内现有土地结构如下:林地占比 28.7%,耕地占比 24.3%,建设用地 19.1%,草地 13.5%,裸地及未利用地占比 14.4%。其中,废弃采矿地及其附属场地集中于县域北部,占比达 6.2%,呈带状分布,与周边生态斑块形成明显断裂^[3]。

在功能属性识别方面,本文采用“土地多功能空间叠加法”,结合生态服务功能(如水源涵养、土壤保持)、经济产出功能(如产值密度、就业吸纳能力)及社会服务功能(如基础设施可达性、土地利用可及性)等指标,对典型地块进行功能评价。结果显示,约 35.6% 的土地具备双重功能叠加特征,9.8% 存在明显的功能冲突区域(如矸石堆场临近基本农田),具有显著的空间重构需求与多功能转化潜力。

(三) 数据来源与处理方法概览

数据体系构建方面,本文基于多源数据集成与标准化处理原则,整合以下数据类型:

遥感影像数据:获取自美国地质调查局(USGS) 2021 年发布的 Landsat 8 影像,用于土地分类与时序变化分析;

土地利用现状数据:源自 2020 年国家土地利用调查成果,由山西省自然资源厅提供;

统计数据：主要引用《晋中市统计年鉴（2022）》《灵石县国民经济与社会发展统计公报（2021）》中产业结构、人口密度、财政收入等数据；

实地调研数据：2023 年 5—7 月，研究团队在该区域开展 3 轮实地踏勘，采集 GPS 点位、典型样地拍摄与现场问卷（有效样本共 112 份）；

GIS 数据与 DEM 地形数据：由国家基础地理信息中心提供，用于空间建模与功能适宜性分析。

数据处理采用 ArcGIS 10.8 进行空间叠加、缓冲区分析与斑块提取，功能识别基于层次分析法（AHP）确定指标权重，并通过标准化处理统一量纲，确保数据之间可比性。为消除异常值对模型干扰，对连续型变量采用 3σ 原则进行异常剔除，对分类变量进行一致性校正与人工核查。

三、多功能识别与路径建模

（一）土地多功能指标体系构建

为系统识别土地多功能状态，本文基于“生态恢复—经济产出—社会服务”三维度构建功能评价指标体系，详见表 1。生态维度聚焦于生态系统服务能力，包括生物多样性指数（BI）、土壤保持量（SL）与归一化植被指数（NDVI）；经济维度反映产出能力与开发潜力，涵盖单位面积 GDP、土地投入产出比（TIO）及可达性加权市场指数（ACMI）；社会维度则侧重空间服务的公平性，设定基础设施密度（IFD）、教育医疗可达率（EMAR）与居民满意度指数（PSI）等九项指标，采用层次分析法（AHP）确定权重，标准化后进行功能叠加评价^[4]。

表 1 土地多功能识别指标体系

指标类别	指标名称	指标类型	数据来源	指标类别
生态	NDVI、生物	正向	Landsat	生态

功能	多样性指数、SL		8、生态年鉴	功能
经济功能	GDP/km ² 、TIO、ACMI	正向	统计局、实地调研	经济功能
社会功能	IFD、EMAR、PSI	正向	GIS 数据库、问卷数据	社会功能

（二）功能耦合关系识别与空间特征分析

在完成指标构建与多功能计算后，本文进一步识别功能间的耦合协同关系。耦合度计算采用如下模型：

$$\sqrt{i=1}$$

其中 F_i 为第 i 功能维度的归一化得分， n 为功能维度数。耦合协调度通过将 C 值与综合效能 T 进行函数转化得到：

$$D = \sqrt{C \cdot T}$$

基于该模型，在 ArcGIS 中进行空间叠加分析，生成三类型区域：①功能协调区（ $C > 0.6$ 且 $D > 0.7$ ），主要集中于南部生态林地与坡耕地交界区域；②冲突区域（ $C < 0.4$ ），如北部废弃地与工业用地交汇带；③潜力提升区（ $0.4 \leq C \leq 0.6$ ），在耕地与建设用地边缘区占比较大。图 1 展示了典型三功能耦合区的空间分布形态^[5]。

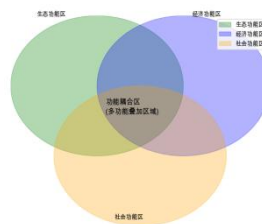


图 1 三功能耦合区的空间分布形态

图 1 显示，生态、经济、社会三功能交汇区呈显著带状分布，揭示矿区在功能修复中存在明显空间断裂，需要通过复合路径进行协调填补。

（三）多路径构型方案设定与模拟方法

在识别空间分异特征基础上，结合地方政策规划与资源禀赋，构建三类典型转型路径模型：

路径 A：生态优先型——适用于生态敏感区与水源涵养区，优先转为生态林地、草地等非生产性用地；

路径 B：产居融合型——用于可开发区块，导入农旅融合、生态产业园，兼顾居住与产值；

路径 C：复合利用型——针对冲突区域，进行地块功能叠合设计，通过“边修复、边转型”的复合开发方式实现土地再生。

路径模拟采用 PLUS（Patch-generating Land Use Simulation）模型进行，设置 1995—2025 年历史土地转移矩阵作为训练输入，叠加 2023 年功能耦合度结果作为约束条件，同时嵌入 Markov 预测对模型进行动态校正。各路径均在一致初始条件下进行 100 次 Monte Carlo 模拟，确保样本稳定性。

（四）路径演化的情景模拟与对比分析

为全面评估路径适应性，本文设定三种情景变量：

- S1：生态约束强化（生态红线全程锁定）；
S2：资金投入增强（修复/开发比提高 50%）；
S3：政策激励增强（产业导入奖励系数提高 30%）

模型输出主要分析以下指标差异：①功能协调度提升率；②经济产出增幅；③耦合冲突缓解比率。结果显示，路径 C 在 S2 场景下表现最佳，协调度平均提升 22.6%，产出提升幅度高于路径 B，而路径 A 在生态场景下表现稳定但经济增长受限。表 2 列出了主要模拟结果汇总。

表 2 各路径在不同情景下的模拟表现

模型 路径	场景	协调 度提 升	产值 增长	冲突 缓解
A	S1	18.4%	4.3%	27.1%

B	S2	19.8%	15.6%	24.7%
C	S2	22.6%	18.3%	32.2%

综合评估结果表明，复合利用型路径在多数情境下实现了生态保护与经济转型的相对均衡，具备较强的推广适应性，成为后续政策重点倾斜的首选方案。

四、优化结果与路径评估

（一）各转型路径的功能协调度评估

为定量评价不同转型路径在多功能空间中的协调表现，本文引入“多功能协调指数”（Multi-Function Coordination Index, MCI），通过加权聚合生态、经济、社会三类功能评分的归一化值与其空间耦合程度进行综合计算。具体表达如下：

$$i=1$$

其中， F_i 表示第 i 维功能（生态、经济、社会）的标准化得分， ω_i 为对应权重， D 为空间耦合协调度， λ 为耦合效应调节系数（经验设定为 0.3）。

模拟结果显示，生态优先型路径在生态维度表现最优（均值达 0.82），但在经济与社会评分上存在显著不足；产居融合型路径在经济与社会维度协调性较高，平均 MCI 达到 0.64；复合利用型路径整体评分均衡，协调指数平均值为 0.71，具有明显的综合平衡优势。图 5-1 绘制了各路径 MCI 对比图，清晰呈现三种路径在多功能协调性方面的横向表现。

（二）不同路径下生态与产业耦合效率分析

考虑转型不仅影响功能总量，还对功能之间的交互关系构成重塑，本文进一步构建“生态—产业耦合效率指数”（Ecological-Industrial Coupling Efficiency, EICE），通过生态恢复增量与产业单位生态代价的比值进行衡量：

$$EICE = \frac{\Delta E}{\Delta C}$$

其中， ΔE 为生态指标提升值（NDVI 均值提升率、土壤流失减少率加权平均）， ΔC 为单位 GDP 增长对应的生态压力增长量。结果显示，生态优先路径虽生态指标增益高，但因缺乏产业支持，EICE 波动性大；产居融合型路径生态收益较低，但单位代价相对合理；复合利用路径在保持较高生态增益的同时，实现单位生态代价最小化，EICE 达 0.76，明显优于其余路径（表 3）。

表 3 各路径生态-产业耦合效率对比

径类型	NDVI 提升	土壤流失减少率	GDP 增长	EICE
生态优先型	15.4%	28.3%	+4.3%	0.51
产居融合型	8.9%	13.7%	+16.2%	0.44
复合利用型	12.6%	23.5%	+13.9%	0.76

可以看出，路径选择不仅决定转型方向，更对区域生态与产业系统之间的协同发展起到根本性影响。复合路径兼具结构重构与外部适应能力，表现出较高的系统稳定性。

（三）最优路径的适应性识别与应用场景匹配

转型路径的优劣并非静态绝对，而需结合具体区域的资源禀赋、空间格局、人口结构与制度环境等多重变量进行适配性判断。为此，

本文在模拟分析结果基础上，采用层次聚类方法对全区域土地单元进行聚类分析，识别出三类典型场景单元：

类 I：生态敏感—基础设施薄弱区，建议匹配生态优先路径；

类 II：人口密集—交通通达区，适宜导入产居融合路径；

类 III：空间破碎—功能冲突区，优先应用复合利用路径。

根据聚类结果，研究区域中约 43.5% 的土地单元归入类 III，即复合利用最适配区，其次为类 II（33.8%）与类 I（22.7%）。图 5-2 展示了三类区域的空间分布图，明确各类路径的推广边界与演化潜能。

进一步分析显示，复合利用路径不仅在空间适配性上占据主导，更因其具备灵活调整机制与容错设计，适合在矿山转型初期资源不确定性高、修复目标未稳定的情境下推广应用。同时，政策侧支持（如绿色金融机制、耕地占补平衡弹性管理）亦为其落地提供了制度支撑。

结语

矿区土地的可持续转型，不应仅被视为修复工程的“附属命题”，而应被重新定义为区域发展范式转移过程中的结构性核心问题。本文从多功能空间识别出发，构建了涵盖功能评价、路径建模与情景模拟的完整技术路径，并在典型案例中验证了复合利用型路径的系统协调优势与现实落地能力。研究进一步证明，生态修复与土地转型应作为一体化系统进行统筹规划，其路径选择不仅要符合功能协同的内在逻辑，还需回应区域差异化条件与政策资源配置的动态环境。

参考文献

- [1] 王莹. 矿山土地资源利用管理和保护实践[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(03): 86-88.
- [2] 杨雯平. 大型矿山土地污染生态系统修复策略及资源化利用[J]. 科技与创

新,2025,(05):208-210+214.

[3]赵云,基于复垦及其土地利用在矿山工程的影响研究[J].世界有色金属,2025,(01):115-117.

[4]王亮,邓久帅,韩雨,等.绿色矿山资源与环境平衡体系:土地平衡研究[J].矿产勘查,2024,15(S2):628-634.

[5]段楚尧,王小雨,周志军.全域土地综合整治研究进展[J].热带农业工程,2025,49(01):154-160.

作者简介:李春利(1992—),女,汉族,重庆忠县人,工程师,硕士,研究方向:矿山生态修复工作。