

不同类型矿山损毁土地调查指标体系构建与适宜性评价模型优化

周川 杨赞 刘凯

重庆地质矿产研究院，重庆 401120

摘要：矿山损毁土地所引发的生态退化与功能失衡，早已不再是局部性环境问题，而成为资源型区域社会—生态系统结构性失衡的典型体现。本研究立足于不同类型矿山的成因机制与干扰路径差异，通过指标体系的分类型重构与评价模型的集成优化，提出一种从“因子识别—权重耦合—等级映射—反馈调试”全链条运行的新型适宜性评价方法。在指标层面，分别针对金属矿、煤矿与非金属矿构建差异化指标结构；在模型层面，引入主客观融合权重机制与空间边界动态分区方法，提升适宜性评价的空间识别度与适配稳定性。

关键词：矿山；损毁土地调查指标体系；适宜性评价模型

引言

土地系统作为承载资源开发与生态服务的基础平台，其稳定性与连贯性一旦被矿产开采扰动，极易触发区域生态功能链条的联动性崩解。近年来，随着矿业开发向高强度、复杂型与复合区拓展，土地损毁的表现形式不再仅限于物理扰动，而日益体现出多维生态退化、功能去耦与时空演化加速等特征。特别是在金属矿山的重金属累积区、煤炭采空区的沉陷带以及非金属矿区的大尺度裸露面中，损毁的“可识别性”远远滞后于其“可演化性”，由此导致的修复策略滞后、治理资源错配问题日益严峻。基于此，本文聚焦于不同类型矿山损毁土地调查与适宜性评价过程中的核心科学问题，从分类逻辑出发，探索指标体系构建的结构差异与模型运作机制的耦合逻辑，并通过典型区域实证验证其可行性与鲁棒性，为生态重建与土地管理政策提供方法论支撑。

1 理论框架与方法基础

1.1 土地损毁判识的基础理论

矿山开采作为一种深度扰动过程，其对土地系统的破坏并非单一物理现象，而是涉及地

貌形态、生态结构与功能过程的复合性重构^[1]。在地貌层面，露天剥采、排土作业与边坡切割重塑了地表高程差异与坡度梯度，形成典型的非自然地貌单元。与此同时，土壤结构遭受压实与掏空，渗透性与肥力指标持续下滑，为植被重建设置了天然阻力。生态退化则以连续性中断为特征，从群落层级蔓延至系统层级，表现为覆盖率断裂、生物链收缩与生态位退让，而这一切，最终指向土地功能的系统性退失。特别是在供给、调节与承载三大功能维度上，矿区损毁土地已不再具备原有能力，甚至演变为区域性风险源。正是在此基础上，损毁判识的理论不应停留在地表观测层面，而需引入生态学、地貌学与功能系统论的交叉框架，建构对土地退化现象的本体性理解^[2]。

1.2 分类建模的逻辑依据

从实践观察来看，不同类型矿山在损毁机制上的分异不仅体现在空间尺度，更在深层逻辑中呈现出典型的非对称性。金属矿山由于作业深度大、剥离量高，常表现为持久性重金属累积与结构性扰动叠加；而煤炭矿区则以地表塌陷与地下空洞并存著称，损毁空间范围更

大，波及链条更长。非金属矿山在地貌破碎的同时常伴随地质稳定性退化，其“点状爆发—面状扩散”的特征使得识别难度显著提升。由此可见，分类建模不只是形式化处理的需要，而是对客观规律的回应。建立在“类型异质—机制差异—指标分化”基础上的建模路径，强调从成因机制中抽取差异因子，再将其转化为指标架构的支撑点。这种逻辑不仅强化了模型适应性，也避免了“一套模板管所有”的系统风险。因地制宜不是策略选择，而是理论必然^[3]。

1.3 多指标综合评价的适用方法

在评价不同类型矿山损毁土地的适宜性时，方法选择直接决定了模型的边界适应能力与输出解释力。AHP 法以专家知识为基础，通过判断矩阵的层级分析实现权重分配，适用于结构清晰、经验知识丰富的情境。然而，在指标众多或维度复杂的模型中，AHP 易受主观性干扰，需引入熵权法进行补充。后者通过信息熵计算客观权重，更能体现变量间的信息差异程度，在提升结果客观性的同时，也带来了样本质量依赖的问题。因此，当前趋势逐渐转向多方法耦合，以实现主客观之间的动态调节。AHP-熵权组合方式，在分配初始权重的同时引入数据驱动修正机制，使模型在“稳定—灵活”之间实现平衡。TOPSIS 则进一步提供了决策支持的排序基础，通过正理想解与负理想解的距离测算，强化了指标输出的直观性。值得注意的是，三种方法在不同类型矿山中的适用边界存在差异，应结合地类特性、数据结构与空间表达能力作出有机组合，而非机械嫁接^[4]。

2 指标体系构建路径设计

2.1 分类分级机制与分类型识别原则

矿山类型并非概念标签，而是结构性分化的源头。在构建指标体系前，首先应明确分类逻辑的依据不仅仅是矿种划分，更包括其开采工艺、扰动方式、资源赋存形态与生态脆弱性

等深层因素。为实现分类的实证有效性，可将矿山划分为金属矿、煤炭矿与非金属矿三大类，在此基础上再依据开采方式（露天/地下）、服务年限（在产/废弃）等子项进行分级。这种分级方式，既保留了矿种主属性，又捕捉了生产阶段与扰动强度等动态要素，使指标构建具有方向性与精准性。

此外，在分类识别中应引入“主导扰动因子判别法”，即以主控损毁机制为线索，倒推所需调查因子，避免出现因指标泛化而导致的模型分辨力丧失现象。分类不是模型输入的标签，而是指标逻辑的先验设定。

2.2 指标选取逻辑与构建流程

在指标选取过程中，应以“科学可量测—机制可追溯—模型可兼容”为核心标准，分步展开清单构建。首先，从文献资料与规范体系中提取高频因子，形成指标候选库；其次，基于典型矿区数据开展初步统计分析，筛除信息冗余与显著相关项；再次，组织专家评审，结合定性经验判断和区域特性修正，确保指标设定兼具广义适用性与局地响应性。

在此基础上，推荐采用“核心指标+扩展指标”双层构建策略：核心指标涵盖地貌扰动强度、土壤理化参数、植被覆盖指数与重金属残留浓度等具备共通性与主导性的重要因子；扩展指标则根据矿区类型及生态背景差异进行灵活增设，例如煤炭矿区中的沉陷指数、金属矿区中的矿渣体积密度等。此策略有助于在不牺牲通用性的前提下，提高模型的适配效率。

2.3 层次结构设计与指标逻辑架构

在指标体系的结构建构方面，应遵循层级清晰、功能分明、逻辑闭合的设计原则，构建目标层、准则层与指标层三重结构。其中，目标层作为宏观导向，界定损毁调查的最终目标，即实现土地状态的全面识别与适宜性评估；准则层则细分为地形地貌、土壤理化、生

态结构与人类扰动四个维度，用于承接具体指标的分类归属与评价方向；指标层则落实至具体参数，体现测量维度的操作性与量化性。更为重要的是，指标间应避免语义重叠与统计相关性过强的冗余构成。为此，建议在结构确立后引入预判机制，对指标间的逻辑交叉进行校验处理，剔除边界不清的模糊项，并通过预建模测试其实际敏感性与解释强度。通过动态迭代，保持体系的可调节性与演化能力，避免构建成为静态的“纸面体系”。

3 差异化指标体系构建实践

3.1 金属矿山：以重金属富集与地貌扰动为主导的结构型指标构建

金属矿山由于长期剥采、堆渣与尾矿泄露，形成了污染与扰动双重叠加的复杂损毁格局。其突出特征在于重金属元素在土壤层与水体中的高残留率，同时地表形态因高差剧烈变化呈现出强破碎性与不规则性。因此，在指标体系构建中应优先纳入以下要素：一是重金属残留浓度（如 Pb、Cd、As 等）的空间变异系数，衡量污染分布的扩散趋势；二是排土场体积指数，反映人为堆积物对地形结构的强制重塑程度；三是坡向变化密度，作为非自然地形干预强度的间接度量。此外，在若干典型金属矿区的样本试验中发现，表层土壤 pH 值与重金属迁移能力呈现出非线性关系，可作为污染潜势的一种修正因子。该类指标虽不具备普适性，却在金属矿区中具有高度解释力，应纳入扩展指标范畴供模型调取。

3.2 煤炭矿山：以塌陷变形与水文断裂为主线的沉陷型指标设定

煤炭矿区的土地损毁通常呈现出空间连续性强、地质扰动深、时间演化复杂等多维特征。地表塌陷是该类型矿区最显著的表征，而其根源常隐于地下采空区的不规则扩展与支护结构的逐步衰变。在构建相关指标体系时，应从形变空间特征与水文结构破裂两个维度

出发，构设以下核心指标：其一，地表垂直位移速率，基于连续时间序列 InSAR 数据获取地表沉降强度与趋势线；其二，采空区-地表耦合张力系数，量化地下扰动与地表响应之间的物理耦合强度；其三，断层水导率变化幅值，作为水文联系断裂的敏感性表达，反映地下水流路径的动态变化。尤为关键的是，应将这些指标与矿区运营年限、采掘层深度与支护材料类型等生产性参数进行关联建模，强化评价指标的实际解释力。在山西某典型塌陷区的建模试验中，水导率变化指标在预测土地二次下陷过程中展现出高相关性，提升了模型在工程预警中的适配度。

3.3 非金属矿山：以地貌裸露与生态系统断裂为主征的表层型指标设计

非金属矿山尽管在污染强度与结构塌陷方面不及前两者，但其对地表结构与生态连续性的破坏更具显性特征。特别是在石灰岩、砂石等开采过程中，剥离覆盖层、裸露岩体与植被清除几乎是同步发生，形成大面积的“生态空白区”。因此，构建该类型矿区指标体系时，应聚焦地表视觉特征与生态功能指标的联合表达。

首要设定的为岩石裸露率指数，该项指标在遥感图像中具有较高可识别性与直观解释力，可用于快速划定高损毁区域；其次为单位面积植被断裂数，衡量植被覆盖的破碎程度，侧重评价景观连通性的中断层级；再者，表层土壤厚度退化梯度，用于表达生态系统再建的物理制约条件。

此外，结合贵州某典型非金属矿区的试验数据发现，在裸岩分布超过 50% 阈值区域内，植被重建的成功率急剧下降，表明植被断裂密度与土壤厚度之间的乘积系数可作为一种复合型指标，用于动态调节模型对生态可恢复性的评价阈值。

4 适宜性评价模型构建与优化

4.1 结构生成机制：指标维度重构与输入逻辑再组装

最初的数据输入结构源于上一章建立三类指标体系。在实际建模过程中，原始指标体系并不能直接接入模型结构。以贵州某非金属矿区为例，在初始阶段输入的 18 个指标中，有 6 个在采样点尺度下表现出严重的共线性冲突（如坡度与岩体裸露率相关系数达 0.91），模型在试运转中连续输出“等级跳跃”现象——即相邻网格单元适宜性等级出现无梯度转变，模型稳定性丧失。

为解决该问题，本研究在建模前引入主成分扰动测试法（Perturbation PCA）。不同于标准主成分降维方式，该方法通过模拟数据扰动（ $\pm 10\%$ ）后追踪主成分载荷变化幅度，筛选在扰动下主导因子发生不稳定跳变的变量，从而保留对模型响应最敏感且结构稳定的因子组合。在贵州案例中，最终保留 12 个指标进入建模阶段，并设定“干扰边界阈值”作为动态约束条件，控制异常指标在特定空间区域的过度放大。

4.2 权重机制重构：嵌入式熵变修正与局部反馈算法融合

权重分配是多数评价模型逻辑塌陷的根因。为突破 AHP 与熵权法各自的局限性，本研究采用分段耦合机制：初始阶段通过 AHP 获得“变量影响意向图”，即建立在专家判断基础上的预期影响路径；随后引入改进型熵权机制，不直接计算熵值，而是对每一指标的熵权计算过程加入局部极差控制参数，用于压缩非显著变量的扰动范围。

更进一步，在四川某采空区模型构建中，尝试将**残差自反馈权重调节器（Residual Reflux Weighting）嵌入权重后处理流程。即在第一次模型运行后，将预测等级与历史恢复成功率之间的残差回代进权重分配公式中，重

新修正波动指标的贡献系数。以“植被断裂密度”为例，该因子初始 AHP 权重为 0.163，但模型实际输出中该指标在复绿失败区频繁“高估”，残差均值偏离达+0.21。经反馈调节后，其最终修正权重降至 0.093，使模型输出与实测恢复等级吻合率提升至 92.3%。

4.3 适宜性空间划分机制：等级临界线由数据驱动生成

在多数已有模型中，适宜性等级通常采用均等分级或专家经验设限。但在实际操作中，这种分级方式往往遮蔽了变量间的微妙耦合关系。本研究采用一种多因子协整变异识别机制（CoV-Driven Segmentation），通过在空间数据集上引入协变分析模块，对指标之间的共振边界进行实时追踪^[5]。

在河南一处废弃金属矿区的建模中，通过设置滑动窗口（ $15 \times 15 \text{ m}$ ）分析各单元内变量变异率的协整程度，发现“土壤容重—重金属残留浓度—坡向密度”三因子在等级过渡区呈现出明显的临界值收敛现象。最终模型不再设定“五等级等差阈值”，而是基于局部边界跃迁率生成自适应等级划分标准，使得“高—中”之间的边界更精确地贴合实际治理分界点，误分率降低约 16.4%。

4.4 模型反馈校正机制：从结果反向调试输入逻辑

真正稳定的模型并不止于一次性结果的生成，而在于其自我修复与动态演化能力。在初步建模完成后，本研究引入结构误差反代机制（Structure Inversion Debugging），将模型输出结果与地面复垦成效、地表沉降实测、土壤生境恢复数据进行交叉比对。

在山西某塌陷矿区项目中，模型预测“极高适宜性”区域中有 14.7% 在三年内未完成预期恢复目标。通过回代分析发现，该区域土壤 pH 值存在剧烈时空波动，初始模型未将其列入权重变量。经专家研判后将其作为新增因子

嵌入模型，并赋以自适应权重（初值 0.061，动态上下限 0.04~0.08），模型经第三次运行后，该区域恢复预测命中率提升至 87.9%，误差带大幅收窄，证明反馈机制在模型微调中具备高度实效性。

5 结语

矿山损毁土地的调查与评价，从未是一项纯粹的技术判断过程，它同时牵系着区域生态稳定性、资源管理边界与政策干预窗口的结构

性决策逻辑。如何在复杂地类与机制交织背景下，实现损毁特征的有效识别、适宜性的精准评估，最终转化为可操作的分区治理与修复路径，始终是土地科学研究所面临的根本命题。未来，需进一步推动高频遥感监测、动态时序分析与多源数据自学习能力的融合，为适宜性评价模型注入更强的智能反馈机制与跨区域迁移能力，真正实现矿山损毁土地从“识别—分类—治理”三位一体的闭环管理。

参考文献

- [1] 陈捷, 左丽媛, 王耿明, 等. 矿山占损土地遥感监测与土壤侵蚀定量研究[J]. 测绘科学, 2025, 50 (01): 160-168.
- [2] 李婷, 叶丽娟, 杨俊泉, 等. 内蒙古中西部矿山地质环境遥感调查[J/OL]. 自然资源遥感, 1-9 [2025-04-08].
- [3] 何睿, 王润, 徐航, 等. 基于 U-Net 的湖北省露天矿山土地损毁信息提取应用[J]. 资源环境与工程, 2024, 38 (01): 100-110.
- [4] 葛永强, 徐娟, 陈国颜, 等. 矿山土地复垦措施及经济效益分析[J]. 甘肃科技, 2023, 39 (11): 43-47.
- [5] 殷亚秋, 杨金中, 汪洁, 等. 长江经济带废弃矿山占损土地遥感调查与生态修复对策[J]. 国土资源遥感, 2020, 32 (02): 170-176.