ICS
CCS

团　　体　　标　　准

T/ACEF×××—20××

有色金属矿山废弃地生态修复效果评估技术规范

Technical Specifications for Assessment of Ecological Restoration Effects of Abandoned Lands in Non-ferrous Metal Mines

（征求意见稿）

××××-×-×发布　　××××-×-×实施

中华环保联合会　发 布

目 次

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中山大学提出。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：中山大学、华南农业大学、桂润环境科技股份有限公司、江苏大地益源环境修复有限公司、中国地质大学（北京）。

本文件主要起草人：晁元卿、敖冉茏、汤叶涛、王雅斐、仇荣亮、王诗忠、刘文深、尹亚琳、邵志远、倪卓彪、林庆祺、涂方祥、单晖峰、赵中秋、刘建丽、张燕、胡海娟。

有色金属矿山废弃地生态修复效果评估技术规范

1 范围

本文件规定了有色金属矿山废弃地生态修复效果评估指标体系构建、评估指标数据获取、生态修复效果评估等方面的技术要求。

本文件适用于有色金属矿山废弃地的生态修复工程建设与管理。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1.1 标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 25.4 建设用地土壤修复技术导则

HJ 25.5 污染地块风险管控与土壤修复效果评估技术导则

HJ 651 矿山生态环境保护与恢复治理技术规范（试行）

HJ 1272 生态保护修复成效评估技术指南（试行）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

矿山废弃地 mining wasteland

指在矿山开采后形成的露天采矿场、排土场、尾矿库、塌陷区以及受重金属污染的土地。

3.2

生态修复 ecological restoration

在生态原理指导下，以生物修复为基础，结合各种物理修复、化学修复以及工程技术措施，通过优化组合，使之达到最佳效果和最低消耗的综合的污染环境修复方法。

3.3

生物多样性 biodiversity

生物（动物、植物、微生物）与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和，包括生态系统、物种和基因三个层次。本标准中的生物多样性主要指矿山废弃地生态修复后的物种丰富度，不涉及遗传多样性。

3.4

修复效果评估 evaluation of restoration effect

通过资料回顾与现场踏勘、布点采样与实验室检测，综合评估生态修复是否达到修复目标。

4 基本原则

4.1 规范性原则

采用程序化和系统化方式规范有色金属矿山废弃地生态修复效果评估工作，保证生态修复效果评估过程的科学性和客观性。

4.2 针对性原则

围绕有色金属矿山废弃地生态修复技术特点和生态修复目标，选取有针对性的生态修复评估指标，开展生态修复效果评估工作。

4.3 系统性原则

在评估过程中，需要考虑到环境、生态、社会三方面的综合效益，正确反映影响因素的相互关系，保证各指标间的协调与统一，使评估系统成为一个有机的整体。

5 工作程序和要点

有色金属矿山废弃地生态修复效果评估流程包括评估指标体系构建、评估指标数据获取、生态修复

效果评估 3 个部分，工作程序见图 1。

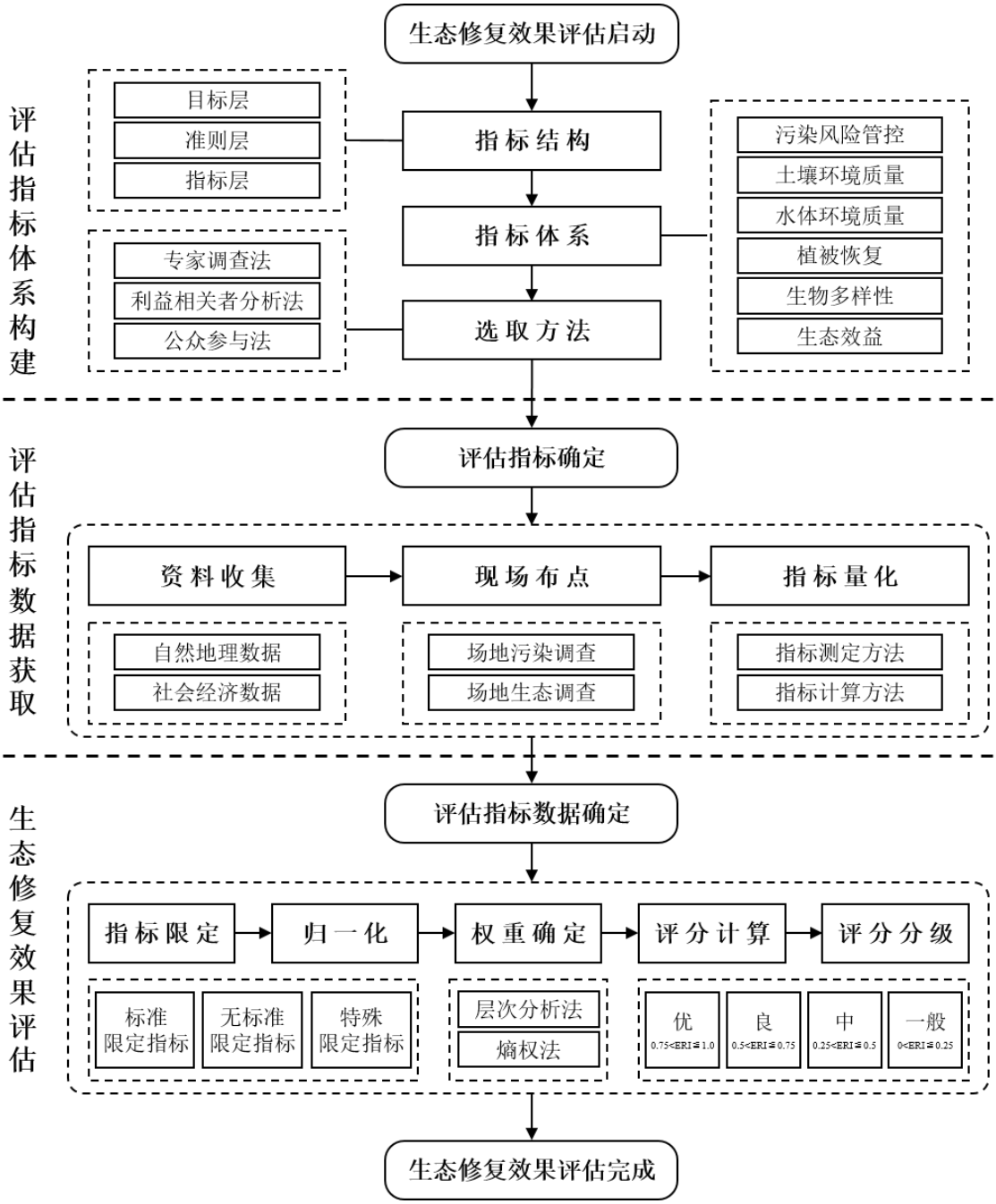

图 1 有色金属矿山废弃地生态修复效果评估工作程序

6 评估指标体系构建

6.1 指标结构

评价指标体系应以污染风险管控、土壤环境、水体环境、植被恢复、生物多样性、生态效益为目标层，应以废弃地典型污染物、污染物去除效果、土壤物理性质、土壤肥力、水体物理化学性质、植被覆

盖度、植被组成、固碳价值、工程回报、投资回报率、水源涵养、科学研究价值、教育价值、物种丰富度为准则层，指标层应包括 11 个必选指标与 18 个可选指标作为有色金属矿山废弃地生态修复效果评估的基础指标。

6.2 指标体系

表 1 有色金属矿山废弃地生态修复效果评价必选指标体系

一级指标	二级指标	三级指标		指标类型
污染风险管控	特征污染物	1	土壤重金属全量	负向指标
	污染扩散抑制	2	土壤重金属有效态含量	负向指标
		3	土壤重金属污染扩散抑制率	正向指标
土壤环境	土壤物理性质	4	土壤 pH 值	正向指标
		5	土壤电导率	正向指标
		6	土壤容重	正向指标
		7	土壤孔隙度	正向指标
	土壤肥力	8	有效氮	正向指标
		9	有效磷	正向指标
		10	速效钾	正向指标
		11	有机碳	正向指标

表 2 有色金属矿山废弃地生态修复效果评价可选指标体系

一级指标	二级指标	三级指标		指标类型
水体环境	水体物理性质	12	水体 pH 值	正向指标
		13	水体电导率	正向指标
		14	水体总悬浮物	负向指标
	水体化学性质	15	水体总有机质（BOD、COD）	负向指标
		16	水体重金属全量	负向指标
植被恢复	植被覆盖度	17	植被多度	正向指标
		18	植被盖度	正向指标
	植被组成	19	群落组成	正向指标
		20	植被高度	正向指标

生物多样性	物种丰富度	21	物种数目	正向指标
		22	香农维纳多样性指数	正向指标
生态效益	固碳价值	23	地表生物量	正向指标
		24	土壤有机碳	正向指标
	工程回报	25	环保税降低量	正向指标
	投资回报率	26	修复用地价值	正向指标
	水源涵养	27	坡面径流减少量	正向指标
	科学研究价值	28	发表论文、申报项目个数	正向指标
	教育价值	29	开展教学工作次数	正向指标

6.3 指标选取方法

矿山废弃地生态修复的目标应符合《土地管理法》第 5 条中规定的土地类型，包括农用地、建设用地和未利用地。以《土地管理法》中土地类型为修复目标，符合法律规定，有利于实现废弃地的生态修复和可持续利用，进一步促进土地资源的合理利用和保护。其中农用地是指直接用于农业生产的土地，包括耕地、林地、草地、农田水利用地、养殖水面等；建设用地是指建造建筑物、构筑物的土地，包括城乡住宅和公共设施用地、工矿用地、交通水利设施用地、旅游用地、军事设施用地等；未利用地是指农用地和建设用地以外的土地。除必选指标外，可结合自身实际修复目标以及相应的指标选取办法，选取可选指标构建适合的评估指标体系。

6.3.1 专家调查法（德尔菲法）

6.3.1.1 专家组组建

根据生态修复的专业需求，确定涵盖必要知识领域的专家人选。专家小组人数应不少于 5 人。

6.3.1.2 背景资料提供与意见征询

向专家小组成员详细阐述修复目标及相关要求，收集专家的书面答复。每位专家需明确说明其意见的选择理由与依据，确保意见具有可追溯性。

6.3.1.3 循环修订与指标确定

将首次收集到的专家意见汇总，制作对比图表供全体专家参考。专家据此进行第一次意见修订，在

整理他人评论的基础上调整看法。重复此过程，直至每位专家意见稳定，确定评估指标体系。

6.3.2 公众参与法

6.3.2.1 公众参与策划

明确公众参与指标选取的目的，如提升指标的公众认同度、确保指标反映公众需求等；根据项目性质、影响范围和资源条件，确定公众参与的地域范围、人群类型和规模；选择适当的公众参与方式，如问卷调查、公众听证会、在线讨论、社区会议等。

6.3.2.2 公众意见征集

设计符合公众理解能力、反映指标选取关键问题的问卷或议题；通过线上线下相结合的方式，广泛征集公众对指标选取的意见和建议；对公众提交的意见进行收集、整理和归类，形成公众意见数据库。

6.3.2.3 公众意见分析

对问卷调查数据进行统计分析，揭示公众对各项指标的支持度、重要性等量化信息；对公众提交的文字意见进行内容分析，提炼公众对指标选取的深层关切和期待；结合定量和定性分析结果，形成公众对指标选取的整体意见和建议。

6.3.2.4 公众意见纳入指标选取

根据公众意见，对候选指标进行筛选，剔除不符合公众需求或得不到公众支持的指标；对保留的指标进行调整，如修改指标定义、计算方法等，使之更好地反映公众需求；根据公众对各项指标的重要性排序和权重建议，确定最终的指标体系。

6.3.3 利益相关者分析法

6.3.3.1 潜在利益相关者确定

列出所有可能与指标设定相关的个人、群体或组织，如管理层、员工、客户、供应商、投资者、监管机构、社区等；之后，根据他们在指标设定过程中的影响力、依赖度、关注程度等因素，筛选出对指标设定有直接影响的关键利益相关者。

6.3.3.2 利益相关者诉求分析

通过面对面访谈、问卷调查、文献研究等方式，深入了解关键利益相关者的利益诉求、关注点和期

望；根据利益相关者对指标设定的影响程度和其利益诉求的重要性，绘制利益矩阵，识别关键利益诉求。

6.3.3.3 利益诉求转化为指标

从利益诉求中提取与指标设定直接相关的要素，如数据可获得性、指标可比性、指标公正性等；之后，为每个关键利益诉求设定具体的指标要求，如数据来源需公开透明、指标计算方法需经过第三方验证等。

6.3.3.4 指标筛选与整合

根据指标要求，对候选指标进行初步筛选，剔除不符合要求的指标；对余下的指标进行整合，避免重复或冲突，确保指标体系的简洁性和有效性；邀请利益相关者代表、行业专家等对整合后的指标体系进行评审，提供反馈意见。

7 评估指标数据获取

7.1 资料收集

7.1.1 自然地理资料

所在地气候、地形地貌、水文地质、土壤类型、动植物种类与分布状况等资料；所在地土壤、水体和大气环境质量监测资料。

7.1.2 社会经济资料

所在地经济现状和发展规划、人口总量和分布、三大产业组成和分布、敏感目标分布等资料。

7.2 现场布点

污染风险管控、土壤环境、水体环境等指标应依据 HJ 25.5 中执行。植被恢复、生物多样性、生态效益等指标当修复目标为森林生态系统时依据 HJ 1167 执行，当修复目标为草地生态系统时应依据 HJ 1168 执行。

7.3 指标量化

7.3.1 指标测定

部分可直接测定的三级指标按照下表 3 推荐方法进行监测与测定，如操作困难可根据实际工况稍作修改。

表 3 有色金属矿山废弃地生态修复效果评价指标测定方法

序号	指标项目	指标操作方法	标准编号
1	土壤重金属全量	土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法	HJ 803
2	土壤重金属有效态	土壤 8 种有效态元素的测定	HJ 804
4	土壤 pH 值	土壤 pH 值的测定 电位法	HJ 962
5	土壤电导率	土壤电导率的测定 电极法	HJ 802
6	土壤容重	土工试验方法标准	GB/T 50123
7	土壤孔隙度		
8	土壤有效氮	森林土壤氮的测定	LY/T 1228
9	土壤有效磷	土壤 有效磷的测定 碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法	HJ 704
10	土壤速效钾	森林土壤钾的测定	LY/T 1234
11	土壤有机碳	土壤 有机碳的测定 燃烧氧化-滴定法	HJ 658
12	水体 pH 值	水质 pH 值的测定 电极法	HJ 1147
13	水体总悬浮物	水质 悬浮物的测定 重量法	GB 11901
14	水体总有机质	水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法	GB 11914
15	水体电导率	地下水质分析方法	DZ/T 0064.6
16	地表生物量	全国生态状况调查评估技术规范——森林生态系统野外观测、全国生态状况调查评估技术规范——草地生态系统野外观测	HJ 1168、HJ 1167
17	植被多度		
18	植被盖度		
19	群落组成		
20	植被高度		

7.3.2 指标计算

需要计算的指标应按照如下方法进行：

7.3.2.1 土壤重金属扩散抑制率

矿山废弃地土壤重金属扩散抑制率。计算公式见式（1）：

$$R=\frac{V_1C_1-V_2C_2}{V_1C_1} \quad \text{……（1）}$$

式中：

R——土壤重金属扩散抑制率（%）；

V_1——未经生态修复收集的径流的液体体积（m^2）；

V_2——经过生态修复后收集的径流液体体积（L）；

C_1——未经生态修复的径流收集水体中重金属的浓度（mg/kg）；

C_2——经过生态修复后的径流收集水体中重金属的浓度（mg/kg）。

7.3.2.2 单位生态修复固碳价值

矿山废弃地生态修复固碳价值。计算公式见式（2）：

$$V_{carbon}=\frac{C_{total}\times P_{carbon}}{A} \quad \text{……（2）}$$

式中：

V_{carbon}——单位生态修复固碳价值（元）；

C_{total}——代表废弃地固碳总量（t）；

P_{carbon}——碳市场价格（元）；

A——代表废弃地面积（m^2）。

7.3.2.3 工程回报

工程回报按照矿山环保税降低量替代。计算公式见式（3）：

$$P_{red.}=P_{poll.}\times E_{red.} \quad \text{……（3）}$$

式中：

$P_{red.}$——环保税降低量（元）；

$P_{poll.}$——各污染物环保税（元）；

$E_{red.}$——代表污染物当量降低量。

7.3.2.4 投资回报率

矿山废弃地生态修复投资回报率利用修复用地价值与投入计算进行计算。计算公式见式（4）、（5）：

$$LVx_b=\sum_{i=1}^{n} Px_{it}Ax_i\frac{Ix_b}{Ix_t} \quad \text{……（4）}$$

$$LV_{total}=\sum_{i=1}^{m} LVx_b \quad \text{……（5）}$$

式中：

LVx_b——第 x 类修复用地折算成 b 年份的价值（元）；

x——修复用地类别（指农用地、建设用地、未利用地及二级分类用地）；

t——土地价值评估年份（用地地块的土地出让年份代替）（年）；

Ax_i——第 i 个地块的面积（m^2）；

Px_{it}——t 年份的第 x 类修复用地的出让价格或土地基准价格（元）；

Ix_b——第 x 类修复用地折算成 b 年份的地价指数；

Ix_t——第 x 类修复用地第 t 年的地价指数；

LV_{total}——折算成年份 b 的修复用地总价值，也是初始年份（元）；

n——第 x 类修复用地的地块数（个）；

m——土地类别数（个）。

矿山废弃地生态修复投资回报率。计算公式见式（6）：

$$ROI=\frac{V_{land}}{I_{inv}}\times 100\% \quad \text{……（6）}$$

式中：

ROI——生态修复投资回报率（%）；

V_{land}——修复用地价值（元）；

I_{inv}——生态修复投资额（元）。

7.3.2.5 物种丰富度

矿山废弃地物种丰富度（D），计算公式见式（7）：

$$D=S/\ln A_a \quad \text{……（7）}$$

式中：

S——种群中的物种数目（种）；

A_a——单位面积（m^2）。

香农-维纳多样性指数（H），计算公式见式（8）：

$$H=-\sum_{i=1}^{T} P_i \ln P_i \quad \text{……（8）}$$

式中：

T——全部种的个体总数（种）；

i——第i个种的个体数（个）。

物种均匀性（J_h），计算公式见式（9）：

$$J_h=3.3219\ (\log N-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{s} n_i \log_{10} n_i)\ /\ln S \quad \text{……（9）}$$

式中：

N——全部种的个体总数（种）；

n_i——第 i 个种的个体数（个）；

S——物种数目（种）。

8 生态修复效果评估

8.1 指标限定

有限定值的指标应与国家、行业、地方等标准相协调，具体指标如表 4。

表 4 有色金属矿山废弃地生态修复效果评价指标限定

序号	指标项	指标限值参考	标准编号
1	土壤重金属全量	土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行） 土壤环境质量、农用地土壤污染风险管控标准（试行）	GB 36600、GB 15618
2	土壤 pH 值	土地复垦质量控制标准	TD/T 1036
3	土壤电导率		
4	土壤容重		
5	土壤有效氮	绿化种植土壤	CJ/T 340
6	土壤有效磷		
7	土壤速效钾		
8	土壤有机碳		
9	水体 pH 值	地表水环境质量标准	GB 3838
10	水体总悬浮物		
11	水体总有机质		
12	水体电导率		

13	水体重金属全量		

8.2 指标归一化

8.2.1 标准限定指标

对有标准限定的指标按照表中限值打分，计算公式见式（10）：

$$X_n = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad \text{……（10）}$$

式中：

X_n——归一化后指标分值；

X——待归一化指标数值；

X_{min}——标准限定最小值；

X_{max}——标准限定最大值

8.2.2 无标准限定指标

对无标准限定的指标按照测定值最大最小值进行归一化，计算公式见式（11）：

$$X_n = \frac{X - X'_{min}}{X'_{max} - X'_{min}} \quad \text{……（11）}$$

式中：

X_n——归一化后指标分值；

X——待归一化指标数值；

X'_{min}——测得指标最小值；

X'_{max}——测得指标最大值。

8.2.3 特殊限定指标

根据不同土壤用地类型，土壤重金属全量超出 GB 36600 、GB 15618 管制值时该指标分值为 0，土壤 pH 与水体 pH 时，归一化最大值为 pH=7。

8.3 权重确定方法

8.3.1 层次分析法

包括以下步骤：建立层次结构模型、构造判断矩阵、层次单排序和一致性检验、层次总排序。过程如下：

8.3.1.1 标度分级

应采用 1-5 标度法，具体定义如下表 5 所示。

表 5 标度及相对重要性判断

标度等级	相对重要性判断
1	两者同等重要
3	前者比后者稍微重要
5	前者比后者明显重要
2，4	介于相邻奇数之间的情况
倒数	若元素 i 与元素 j 的重要性之比是 bij，则元素 j 与元素 i 的重要性之比是 bji = 1/bij

8.3.1.2 判断矩阵

首先，构造目标层 A_i 的判断矩阵，然后建立目标层 A_i 相对于准则层 B_i 的判断矩阵（A_i-B_i），接着建立准则层 B_i 相对于指标层 P_i 的判断矩阵（B_i-P_i）。

8.3.1.3 计算权重向量

经归一化后的各矩阵数据采用算数平均法计算各指标的权重 W，即先把各矩阵中的数据按列归一化，然后将这一列向量相加并除以 n 后结果即为所求权重，计算公式见式（12）。

$$W=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n}a_{kj}},\ (i=1,2,\cdots,n) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（12）$$

式中：

W——特征向量；

a——矩阵中的各元素。

8.3.1.4 计算最大特征根

用特征向量法可以计算最大特征根λ_{max}，利用近似算法计算公式见式（13）、（14）。

$$S_i=\sum_{i=1}^{n}a_{ij},\ (j=1,2,\cdots,n) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（13）$$

$$\lambda_{max}=\sum_{i=1}^{n}W_iS_i \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（14）$$

式中：

S——矩阵中每列元素的和；

λ_{max}——矩阵的最大特征值。

8.3.1.5 一致性检验

应对最终的结果进行误差分析与兼容性分析，当上述各判断矩阵完全兼容时，则有最大特征值等于矩阵阶数；当不兼容时，则有最大特征值大于矩阵阶数；则进行一致性检验 CI（Consistence Index）计算公式见式（15）、（16）：

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \quad \text{……（15）}$$

$$CR=\frac{CI}{RI} \quad \text{……（16）}$$

一致性检验指标CI与同阶数矩阵的随机性检验指标RI（Random Index）该指标为常数，具体数值如表 6 所示：

表 6 随机一致性指标 RI 值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

这两指标之比为一致性比率CR（Consistency Ratio）。在应用层次分析法中，若CR大于 0.1，则未通过一致性检验，应重新组织专家对指标体系进行打分，直至CR小于 0.1 为止，此时权重有效。

8.3.2 熵权法

熵权法组合赋权的方法确定各个评价指标的权重，计算公式见式（17）：

$$W_{ij}=\alpha a_{ij}+(1-\alpha)b_{ij}\ ,\ (i=1,2,\cdots,6\ ;\ j=1,2,\cdots,n_j) \quad \text{……（17）}$$

式中：

W_{ij}——第i个目标层的第j指标的权重（%）；

α——权重折中系数，取为 0.5；

a_{ij}——AHP 确定的指标权重（%）；

b_{ij}——熵权法确定的指标权重（%）；

i——目标层个数（个）；

j——指标层因子个数（个）；

n_j——第n个指标层因子（个）。

8.4 分值计算

计算所有指标最终权重，计算公式见式（18）：

$$W_{ijk}=W_iW_jW_k, (i=1,2,\cdots,I; j=1,2\cdots,J; k=1,2\cdots,K) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（18）$$

式中：

W_{ijk}——第i个一级指标的第j个二级指标的第k个三级指标所对应的相对权重（%）；

W_i——一级指标权重（%）；

W_j——一级指标对应的二级指标权重（%）；

W_k——二级指标对应的三级指标权重（%）。

计算综合生态修复效果评价指数，计算公式见式（19）：

$$ERI=\sum_{i=1}^{j} W_iX_{ni} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（19）$$

式中：

ERI——生态修复效果评价指数；

W_i——第i个指标相对权重（%）；

X_{ni}——第i个归一化后指标分数；

j——共选取j个指标（个）。

8.5 评分分级

最后，根据生态修复效果评价指数，对生态修复效果进行分级，如表 7 所示：

表 7 矿山废弃地生态修复效果分级

ERI 分值	效果评级
0.00＜ERI≤0.25	一般
0.25＜ERI≤0.50	中等
0.50＜ERI≤0.75	良
0.75＜ERI≤1.00	优

根据评分，采取不同的措施来管理废弃地的生态修复工作。评分为一般时，应评估生态修复技术的

有效性；评分为中等时，应加强针对不达标的指标开展专项生态修复优化；评分为良或优时，应持续进行环境管理与生态监测，以确保废弃地维持自然演替。