



文章栏目：流域水环境整治与修复

DOI 10.12030/j.cjee.202306074

中图分类号 X171.4

文献标识码 A

李冠廷, 王启文, 高继军, 等. 流域生态恢复潜力评估不同赋权方法适用情景分析[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3159-3168. [LI Guanting, WANG Qiwen, GAO Jijun, et al. Scenario analysis of different weighting methods for ecological restoration potential evaluation of watershed[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3159-3168.]

# 流域生态恢复潜力评估不同赋权方法适用情景分析

李冠廷, 王启文, 高继军<sup>✉</sup>, 刘来胜, 劳天颖, 宁珍

中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100000

**摘要** 流域生态恢复潜力评估研究经常面临赋权方法选择问题, 不同数据完整度情景选择合适的权重方法可以使评估结果更为准确。以小南海湖为研究对象, 按照生态恢复潜力评估方法要求, 分别选取层次分析法、熵权法、Critic 法、因子分析法这 4 种赋权方法开展适用情景分析研究。结果表明, 层次分析法适用于各评估指标客观数据不足需要专家主观经验判断的情景, 熵权法适用于各评估指标间独立性较强且数据较多的情景, Critic 法适用于各评估指标间联系清晰且数据较少的情景, 因子分析法适用于数据同质化严重且评估指标选取过多的情景。该研究结果对于流域生态恢复潜力评估研究赋权方法的选择具有一定指导意义。

**关键词** 生态恢复潜力评估; 评估指标权重; 层次分析法; 熵权法; Critic 法; 因子分析法

随着中国生态文明建设的持续推进, 人们对赖以生存的生态环境有了更高的需求, 但我国幅员辽阔, 需要生态修复的区域众多, 且资源有限, 这就需要科学确定优先开展生态修复的区域<sup>[1]</sup>。生态恢复潜力评估研究就是为了满足这一战略需求而发展起来的新兴研究方向, 其通过构建评估模型<sup>[2]</sup>, 综合考虑生物、土壤、水资源等多方面的因子, 以科学的方法量化评估确定修复区域的生态恢复潜力值, 将生态恢复潜力值作为排序依据得到修复区域优先顺序, 提出修复区域优选清单, 从而使急需修复的区域得到优先治理, 在有限的资金支持下, 提高生态修复所产生的效益。生态恢复潜力评估研究主要包含 4 部分内容: 一是需要对流域生态环境进行全面调查研究, 确定流域生态问题并构建生态恢复潜力评估的指标库, 并获取相关数据; 二是针对流域内的具体生态问题以及恢复目的和各方利益, 选取出最为合适的生态恢复潜力评估指标体系, 并对指标数据进行综合处理; 三是根据不同的评估指标体系, 确定每个指标的权重, 以反映指标在整个评估过程中的相对重要性; 四是使用生态恢复潜力模型对流域进行生态恢复潜力评估, 得出治理区域优先顺序及治理建议, 为决策者提供科学的治理依据。整个生态恢复潜力评估过程会受到指标数量、指标权重、数据质量、专家经验、应用场景等各种因素影响, 其中指标权重确定是流域生态恢复潜力评估过程中一个至关重要的环节, 权重方法选择的合理性将会直接影响到评估结果的准确性<sup>[3]</sup>。而国内外关于赋权方法对生态恢复潜力评估结果影响的内容尚不完善, 为进一步提高生态恢复潜力评估研究的准确性, 有必要进一步开展生态恢复潜力评估赋权方法适用情景分析研究, 以提高评估结果的准确性和科学性, 进而丰富完善生态恢复潜力评估研究学科内容, 推动学科发展。

在多指标综合评估领域中, 权重计算方法有很多种, 大体上可以分为 2 类: 主观赋权法和客观赋权法<sup>[4]</sup>。主观赋权法是指使用专家经验、调查问卷、会议讨论等方式, 通过主观方法对指标进行评估赋权<sup>[5]</sup>, 比

收稿日期: 2023-06-16; 录用日期: 2023-10-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFC3200017-002)

第一作者: 李冠廷 (1998—), 男, 硕士研究生, 915410342@qq.com; 通信作者: 高继军 (1977—), 男, 博士, 正高级工程师, gaojj@iwhr.com

如层次分析法 (analytic hierarchy process)、网络层次分析法 (analytic network process)、决策实验室法 (dematel)、序关系分析法 (G1)、模糊数学法 (fuzzy comprehensive evaluation) 等就是常见的主观赋权方法。主观赋权法的计算结果依赖于专家主观判断和调查问卷的质量, 优点是不受数据完整度的制约, 可以从学识经验角度出发, 结合实际情况具体问题具体分析。而缺点则容易具有较强的主观随意性, 且在实际使用过程中增加决策分析者的负担, 具有很大的局限性。客观赋权法是指使用统计方法、数学模型、信息论等客观方法, 通过计算指标之间的关系和重要性, 给出每个指标的权重<sup>[6]</sup>, 比如熵权法、数据包络分析法 (data envelopment analysis)、CRITIC 法和均方误差法 (mean squared error) 等是常见的客观赋权方法。客观赋权法的计算方法主要基于数据之间的客观差异, 优点是易于操作且具有较强的客观性, 方法具有较强的数学理论依据且不增加决策者的负担, 但缺点是赋权结果较为机械, 容易受到数据充分性的制约, 且在使用过程中由于没有考虑决策者的主观意向, 权重结果会与实际情况不一致, 特殊情况下稳健性差<sup>[6]</sup>。由此可见, 根据具体情况选择合适的赋权方法可以扬长避短, 使得评估结果更为精准。

本研究以生态恢复潜力评估过程中权重计算方法为重点, 结合主观赋权与客观赋权方法的优缺点, 选用层次分析法 (AHP)、熵权法、Critic 法以及因子分析法这 4 种常见的底层权重计算方法进行对比分析研究。并以小南海湖流域为研究对象, 对比不同权重计算方法在生态恢复潜力评估过程中面对不同情景的适用性, 以确定生态恢复潜力评估过程中不同权重计算方法的适用情景。

## 1 材料与方法

### 1.1 生态恢复潜力计算方法

生态恢复潜力评估模型在计算各个区域间的恢复潜力排名时需以得分高低反应各区域的潜力值, 计算方法如式 (1) 所示。

$$F_{潜} = \sum_{k=1}^n I_k * Q \quad (1)$$

式中:  $F_{潜}$  为生态恢复潜力得分值情况;  $I_k$  为指标分值;  $Q$  为指标权重值;  $n$  为指标数;  $k$  为指标序号。

在各个区域中, 由于各评估指标表征的恢复潜力属性不同, 指标分值  $I$  并不能够直接进行计算, 还需要对指标分值进行线性变化, 将其映射到  $[0, 1]$  区间内, 使其可以进行运算。使用此方法进行线性变化不仅可以将不同属性的评估指标进行计算, 还可以放大指标之间的差异, 使评估分化更为明显, 最终结果更为精准。线性变化方式如式 (2) 所示。

$$I' = \frac{I - \text{Min}_I}{\text{Max}_I - \text{Min}_I} \quad (2)$$

式中:  $I'$  为线性变换后的指标分值;  $I$  为指标原始数值;  $\text{Min}_I$  为各区域中该指标的最小值;  $\text{Max}_I$  为各区域中该指标的最大值。

### 1.2 生态恢复潜力评估区域与指标

1) 研究区域概况与划分。小南海流域位于湖北省松滋市内, 范围为东经  $111^{\circ}47'11'' \sim 111^{\circ}53'04''$ 、北纬  $30^{\circ}03'29'' \sim 30^{\circ}08'44''$ 。小南海流域属亚热带过渡性季风气候, 春夏秋冬四季分明, 年均气温  $16.0^{\circ}\text{C}$ , 年均无霜期 265 d, 年均日照时数  $1\ 600 \sim 1\ 900\ \text{h}$ , 年均降水量  $1\ 206\ \text{mm}$ 。松滋境内年均降水总量  $25.9 \times 10^8\ \text{m}^3$ , 地表径流  $10.6 \times 10^8\ \text{m}^3$ 。小南海流域具有长江流域较为典型的气候、生态特点。

本研究基于流域管理与行政区划管理相结合的原则, 结合前期小南海流域的生态环境现状调查结果, 以小南海湖流域镇级行政区划为边界, 将流域范围分为 5 个评估单元 (用 A1~A5 表示) 如图 1 所示。

2) 数据来源。本研究数据主要来源于前期小南海湖流域生态环境调查数据和松滋市统计年鉴社会经济统计数据<sup>[7]</sup>。

3) 指标选取及数据处理。首先根据前期的调查结果得知, 小南海湖流域的生态问题复杂, 一个评估单元内存在多种生态问题, 但为了研究结果的准确性, 针对各个评估单元进行控制变量处理, 突出评估单元的主要生态问题。由此, A1~A5 单元分别对应水体富营养化问题、植被退化问题、城市化严重问题、生物多样性缺失问题以及生态无明显问题区域。针对各评估单元的主要生态问题, 结合实际经验与前沿研究, 选取了

4 组具有针对性的评估指标体系。

其次本研究旨在探明不同数据情景下的的权重方法适用情况，因此，对数据情景做了假设拟定，将数据情况分为丰富、较多、较少、极少这 4 种常见情况。并将这 4 种拟定情况赋到 4 组评估指标体系中，拟定在评估水体富营养化严重问题时指标数据丰富、评估植被退化问题时指标数据较多、评估城市化严重问题时指标数据较少、评估生物多样性缺失问题时指标数据极少，如表 1 所示。

在前期调查研究和数据梳理的基础之上，选取了能够表征小南海湖生态环境状况特征、压力特征和社会经济的 19 项指标 (详见表 2) 开展小南海湖流域生态恢复潜力评估赋权方法适用情景分析研究。由于本研究需对不同情境下评估指标的权重进行赋权计算，而指标原始数据存在量纲、单位以及数据维度的不同，无法直接对其进行计算。由此，本研究采用 Z-Score 方法对原始数据进行标准化处



图 1 评估区域示意图

Fig. 1 Schematic of the assessment area

表 1 不同情景下的生态恢复潜力评估指标

Table 1 Evaluation indicators of ecological restoration potential in different scenarios

情景序号	区域主要问题	突出主要问题的评估单元序号	指标数量情况	选取指标
一	水体富营养化严重问题	A1	丰富	总N
				总P
				COD
				叶绿素a
				亚硝酸盐
				氨氮
				溶解氧
				单位面积化肥使用量
				河流自净能力
				植被覆盖指数
二	植被退化问题	A2	较多	土壤含水率
				植被多样性指数
				GDP
				单位面积化肥使用量
				重金属污染指数
				基本农田面积
				重金属污染指数
				COD
				区域内工业企业数量
				单位工业产值废水排放量
三	城市化严重问题	A3	较少	水质等级
				生物多样性指数
				植被覆盖指数
四	生物多样性缺失问题	A4	极少	水生生物多样性指数

表2 小南海湖流域生态恢复潜力评估指标库

Table 2 Evaluation index database of ecological restoration potential in Xiaonanhai Lake Basin

指标序号	指标名称	A1	A2	A3	A4	A5
C1	总N	0.835 807	1.619 377	-0.586 23	-0.992 52	-0.876 44
C2	总P	0.688 155	-0.294 92	-0.786 46	1.671 233	-1.278
C3	COD	1.477 121	-0.698 98	-0.239 32	0.539 556	-1.078 38
C4	叶绿素a	0.191 507	0.855 06	-1.345 59	1.443 018	-1.144
C5	亚硝酸盐	1.337 96	0.831 157	-1.094 69	-0.182 45	-0.891 97
C6	氨氮	-0.146 64	2.143 605	-0.698 72	-0.780 67	-0.517 57
C7	溶解氧	0.350 076	-1.837 9	0.787 671	1.225 266	-0.525 11
C8	单位面积化肥使用量	-0.734 85	0.489 898	-0.122 47	1.714 643	-1.347 22
C9	河流自净能力	0.089 86	-1.707 33	-0.509 2	0.539 158	1.587 521
C10	植被覆盖指数	1.342 309	0.556 916	-1.013 87	-1.299 47	0.414 117
C11	土壤含水率	-0.086 39	0.345 547	1.641 35	-0.518 32	-1.382 19
C12	植被多样性指数	1.586 976	-0.290 74	0.617 83	-0.654 17	-1.259 89
C13	GDP	-0.799 01	0.752 266	-0.613 92	1.595 35	-0.934 69
C14	重金属污染指数	-1.030 99	-0.171 83	0.025 352	1.856 345	-0.678 88
C15	基本农田面积	1.262 086	1.016 225	-0.736 02	-1.338 32	-0.203 97
C16	区域内工业企业数量	-0.765 09	0.191 273	1.785 215	-1.083 88	-0.127 52
C17	单位工业产值废水	-0.586 2	-0.226 2	0.758 234	1.446 379	-1.392 22
C18	水质等级	-1.224 74	0.816 497	0.816 497	0.816 497	-1.224 74
C19	水生生物多样性指数	-1.229 36	0.370 494	-0.555 741	1.711 7 74	-0.303 13

注：A1评估单元突出的主要生态问题为水体富营养化问题；A2评估单元突出的主要生态问题为植被退化问题；A3评估单元突出的主要生态问题为城市化严重问题；A4评估单元突出的主要生态问题为生物多样性缺失问题；A5评估单元为无明显生态问题区域。

理后再对其进行权重计算<sup>[8]</sup>，Z-Score 标准化可以将不同单位或不同尺度的数据转化为无单位的标准分值，从而提高数据的可比性和统一性。Z-Score 标准化的计算如式 (3) 所示。处理后的评估指标库及其数据如表 2 所示。

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

式中： $x$  为原始数据； $\mu$  为原始数据的平均值； $\sigma$  为原始数据的标准差。

### 1.3 评估指标权重计算方法

1) 层次分析法。AHP(analytic hierarchy process) 是由美国运筹学家 Satty 提出的一种可以进行定性以及定量分析的方法<sup>[9]</sup>，这是一种在环境管理领域经常被用到的方法。本研究使用层次分析法，将各二级评估指标作为准则层，将生态恢复潜力作为目标层，请相关专家填写问卷得到判断矩阵 $a_{ij}$ ，并采用一致性指标 CR 作为检验指标，当  $CR < 0.1$  时，认为判断矩阵的一致性检验通过，若不然，对各项评估指标使用德尔菲法重新比较。CR 的计算如式 (4) 所示。各个评估指标的权重计算如式 (5) 所示。

$$CR = \frac{\lambda - n}{RI(n - 1)} \quad (4)$$

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (5)$$

式中： $\lambda$ 为判断矩阵的特征值； $RI$ 值为平均随机一致性指标。 $W_i$ 为第*i*个指标权重值； $n$ 为判断矩阵的阶数； $a_{ij}$ 为判断矩阵中对应的值。

2) 熵权法。在信息论当中，熵是系统无序程度的一个度量，根据信息熵的定义，对于某项评估指标，可以用熵值来判断此指标的离散程度，其信息熵值越小，指标的离散程度越大，该指标对综合评估的影响就越大，如果某项评估指标的值全部相等，则该指标在综合评估中不起作用<sup>[10]</sup>。各指标权重值的计算如式(6)~式(8)所示。

$$F_{ij} = X_{ij} / \sum_{i=1}^n X_{ij} \quad (6)$$

$$E_j = \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n F_{ij} \ln F_{ij} \quad (7)$$

$$W_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{i=1}^n E_i} \quad (8)$$

式中： $F_{ij}$ 为第*j*个指标下第*i*个系统的特征比重； $X_{ij}$ 为*i*个系统中第*j*项观测数据； $E_j$ 为第*j*个指标的熵值； $n$ 为第*j*个指标下*i*个系统的数量； $W_j$ 为第*j*个评估指标权重值。

3) Critic 法。Critic 法是 DIAKOULAKI 提出的一种客观赋权法<sup>[11]</sup>，其基本思路是根据评估指标间的对比强度以及冲突性作为基础，来进行权重的计算与比较。其中对比强度以标准差的形式来体现，其标准差越大，表明辨别力越强。相反，标准差越小，表明各指标之间辨别力越弱。指标之间的冲突性使用指标的相关程度作为基础，一般使用相关系数度量指标之间的冲突性。指标权重的计算如式(9)~式(11)所示。

$$r_{ij} = \frac{\sum (x_{ij} - \bar{x}_{ij})(y_{ij} - \bar{y}_{ij})}{\sqrt{\sum (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2 (y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2}} \quad (9)$$

$$C_j = \sigma_j \sum_{j=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (10)$$

$$W_i = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (11)$$

式中： $r_{ij}$ 为指标的相关系数； $\bar{y}_{ij}$ 为 $y_{ij}$ 的平均值， $\bar{x}_{ij}$ 为 $x_{ij}$ 的平均值； $C_j$ 为指标的信息量程度； $\sigma_j$ 为第*j*个指标的标准差； $n$ 为同一级别下指标的个数； $W_i$ 为指标权重。

4) 因子分析法。因子分析法是一种常用的多元统计方法<sup>[12]</sup>，其基于对数据进行降维的思想，在尽可能不损失或者少损失原始数据信息的情况下，将错综复杂的众多变量提取成为几个公共因子，这几个公共因子可以反映原来众多的主要信息，在减少变量个数的同时，又可以有效的反应变量之间的内在联系，并根据浓缩后的变量贡献度进行赋权，能显著的减少重复信息干扰并尽可能的避免信息丢失情况的发生。使用因子分析法计算指标权重如式(12)~式(14)所示。

$$A = \frac{a}{\sqrt{\lambda}} \quad (12)$$

$$B = \frac{\sum(A * \text{方差解释率})}{\sum \text{方差解释率}} \quad (13)$$

$$W = \frac{B}{\sum B} \quad (14)$$

式中： $A$ 为线性组合系数； $a$ 为载荷系数； $\lambda$ 为对应特征根； $B$ 为综合得分系数； $W$ 为权重值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 数据丰富情景

在情景一中，以水体富营养化严重问题为评估指标选取标准，表征数据丰富情景权重方法的适用情况。

使用 4 种权重方法分别对小南海流域的生态恢复潜力进行综合评估,得到的各评估指标权重结果如表 3 所示,各评估区域的生态恢复潜力排名结果如表 4 所示。

通过恢复潜力排名结果来看,因子分析法赋权的生态恢复潜力最终排名在情景一下最为准确,A1 地区的最突出的生态问题为水体富营养化严重问题,通过因子分析法得到的 A1 地区生态恢复潜力排名第一,应对 A1 地区进行优先恢复。纵向对比 4 种权重方法得到的评估指标权重结果。因子分析法得到的评估指标权重结果中最大的指标 C7(溶解氧)为 12.53%,最小的指标 C8(单位面积化肥使用量)为 7.78%,相差 4.75%,总体权重结果分布较为均匀。而 AHP 法得到的各指标权重结果极差达到了 26.4%,最小的指标结果 C5(亚硝酸盐指数)权重结果仅为 2.21%,但在实际评估过程中,C5(亚硝酸盐指数)重要性较高。这是由于 AHP 法为主观权重方法,当评估指标数据较多时,专家打分量较大,很难完美的分辨指标之间的重要性问题。并且此次 AHP 法打分的专家多从生态学角度出发,对水体富营养化评估指标间的重要程度评估并不完全客观。

## 2.2 数据较多情景

在情景二中,以植被退化问题为评估指标选取标准,来表征数据较多情景适用的权重方法,得到不同赋权方法指标权重结果,如表 5 所示,生态恢复潜力评估结果如表 6 所示。

在数据较多情景下,A1 地区在因子分析法、Critic 法与 AHP 法赋权的情况下都被评为了生态恢复潜力最好的区域,但事实上,以植被退化评估指标为标准,A2 地区的主要生态问题才是植被退化严重问题,A2 地区应是恢复潜力最大的区域。而 A5 地区应是各项条件均较好的区域,恢复潜力最弱,应最后修复。只有 Critic 法与熵权法权重得到的 A5 地区生态恢复潜力结果与实际设定相符。因此,熵权法的赋权结果最为准确。对比各权重方法得到的权重结果,AHP 法的权重结果与情景一中权重结果有相似之处,极差达到 37.86%。与情景一中不同的是,因子分析法在数据较多的情况下明显“失误”,其权重最小的指标 C14(重金属污染指数)仅为 0.41%,这与众多研究结果及实际情况极度不符。而熵权法与 Critic 法赋权的结果较为相似,评估指标间权重的平均差值只有 1.88%,如图 2 所示,但熵权法赋权得到的最终恢复潜力排名却更为精准。出现这种情况的原因可能是由于数

表 3 数据丰富情景各方法权重结果  
Table 3 Weight results of each method in the case of abundant data

指标	因子分析法 赋权结果	Critic法 赋权结果	熵权法 赋权结果	AHP法 赋权结果
C1	11.84	11.87	14.94	28.62
C2	12.07	8.04	9.93	15.77
C3	10.41	8.00	10.18	8.59
C4	11.96	8.51	10.70	3.27
C5	12.48	8.29	11.26	2.21
C6	11.03	13.88	20.36	20.76
C7	12.53	13.78	6.53	10.87
C8	7.78	10.24	9.04	4.07
C9	9.89	17.38	7.05	5.84

表 4 数据丰富情景各方法生态恢复潜力评估结果

Table 4 Ranking results of ecological restoration potential of each method under data abundance

区域	因子分析法赋权 恢复潜力排名	Critic法赋权 恢复潜力排名	熵权法赋权 恢复潜力排名	AHP法赋权 恢复潜力排名
A1	1	2	2	2
A2	3	3	1	1
A3	4	4	4	4
A4	2	1	3	3
A5	5	5	5	5

表 5 数据较多情景各方法权重结果  
Table 5 Weight results of each method in the case of large data volume

指标	因子分析法 赋权结果	Critic法 赋权结果	熵权法 赋权结果	AHP法 赋权结果
C10	12.43	13.47	13.57	34.73
C11	9.61	15.00	11.19	25.13
C12	21.43	12.10	12.87	15.22
C13	13.66	16.34	21.23	7.15
C8	21.88	12.08	12.61	10.41
C14	0.41	19.10	16.31	2.87
C15	20.58	11.91	12.21	4.48

表 6 数据较多情景各方法生态恢复潜力评估结果

Table 6 Ranking results of ecological restoration potential of each method under large data volume

区域	因子分析法赋权 恢复潜力排名	Critic法赋权 恢复潜力排名	熵权法赋权 恢复潜力排名	AHP法赋权 恢复潜力排名
A1	1	1	2	1
A2	2	2	1	2
A3	3	4	4	3
A4	5	3	3	5
A5	4	5	5	4

据较多时，情景二选取的评估指标间独立性过强，且指标之间的冲突性与联系性均较弱。而 Critic 法赋权需要依赖指标数据间的联系性与冲突性，由此，导致 Critic 法的“失误”。同样，因子分析法也对数据间关联程度较为依赖，而情景二的数据情况使因子分析法不能合理的判断指标间的贡献度，因此，最终只有熵权法在情景二中结果较为准确。

### 2.3 数据较少情景

在情景三中，以城市化问题为评估指标选取标准，表征指标数据较少情景不同权重方法的适用情况。得到的评估指标权重结果如表 7 所示，生态恢复潜力评估结果如表 8 所示。

在情景三中，从生态恢复潜力评估结果来看，因子分析法、熵权法、Critic 法的评估结果相似。但 Critic 法赋权的生态恢复潜力评估结果更为精准，认为 A3 地区的生态恢复潜力最高，最应对其进行优先修复，这与情景三的设置是相符合的。这是由于 Critic 法虽然与熵权法、因子分析法一样依赖数据间的关系，但 Critic 法主要是通过数据间的冲突性与联系性对评估指标权重进行判断，而当数据较少时，指标间的关联程度会变得简单清晰，数据间的冲突性与联系性可以更好的体现。如在此情景中 C16(区域内工业企业数量)与 C3(COD)二者呈正相关关联，而 C18(水质等级)与 C14(重金属污染指数)二者呈负相关关联。因此 Critic 法评估的结果更为准确。而当数据减少时，熵权法与因子分析法则无法很好的判断数据间的相关性。

### 2.4 数据极少情景

在情景四中，以生物多样性缺失问题为评估指标的选取标准，表征指标数据极少时各权重方法的适用情况，得到的评估指标权重结果如表 9 所示，最终生态恢复潜力评估排名结果如表 10 所示。

从生态恢复潜力排名结果来看，除了 AHP 法之外的权重确定方法全部判断“错误”，只有 AHP 法得到了正确的权重结果，使生态恢复潜力排名结果最为准确。A4 地区恢复潜力最终排名第一，生物多样性最差，最应优先修复，A5 地区恢复潜力排名第五，应最后修复。结合表 9 的各项评估指标权重结果，因子分析法，熵权法，得到的评估指标权重结果呈现均匀分布，权重区分度极弱，赋权结果近乎无效，而 Critic 法赋权结果稍好，指标权重的大小顺序与 AHP 法一致，但 Critic 法对指标权重的区分度却没有 AHP 法好，因此使得最终排名结果并不准确。这是由于当评估指标数极少时，因子分析法、Critic 法、熵权法从数据之

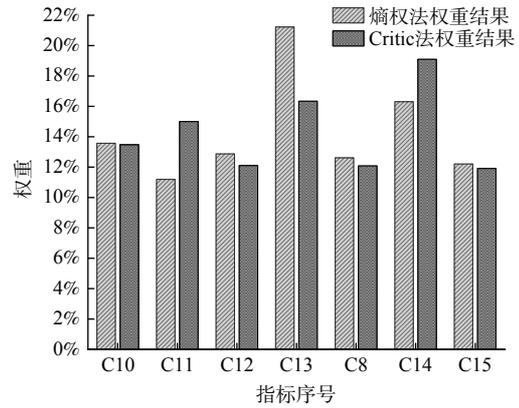


图 2 情景二下 Critic 法与熵权法各指标权重结果对比

Fig. 2 Comparison of weight results of each indicator between Critic method and entropy weight method under scenario 2

表 7 数据较少情景各方法权重结果

Table 7 Weight results of each method in the case of less data

指标	因子分析法 赋权结果	Critic法 赋权结果	熵权法 赋权结果	AHP法 赋权结果
C14	21.87	16.88	21.77	17.43
C3	15.89	27.75	19.06	24.82
C16	15.94	27.65	20.93	9.84
C17	21.94	12.71	15.14	41.53
C18	24.37	15.00	23.09	6.38

表 8 数据较少情景生态恢复潜力评估结果

Table 8 Ranking results of ecological restoration potential under less data

区域	因子分析法赋权 恢复潜力排名	Critic法赋权 恢复潜力排名	熵权法赋权 恢复潜力排名	AHP法赋权 恢复潜力排名
A1	4	4	4	3
A2	3	3	3	4
A3	2	1	2	2
A4	1	2	1	1
A5	5	5	5	5

表 9 数据极少情景各方法权重结果

Table 9 Weight results of each method in the case of minimal data volume

指标	因子分析法 赋权结果	Critic法 赋权结果	熵权法 赋权结果	AHP法 赋权结果
C10	31.73	29.34	34.42	16.37
C12	31.23	29.10	32.90	29.72
C19	37.04	41.55	32.67	53.89

因此使得最终排名结果并不准确。这是由于当评估指标数极少时，因子分析法、Critic 法、熵权法从数据之

中得到的信息极为有限,因此不能依赖数据之间的关联程度给出权重。而此时 AHP 法作为主观赋权法的典型方法,优势则较为明显,其可以在数据极少的情况下,依据专家们的主观经验,对评估指标进行赋权,使得最终的恢复潜力排名结果最符合实际情况。

## 2.5 结果分析

在生态恢复潜力评估过程中,由于最终计算生态恢复潜力得分及排名的方法需要使用评估指标的无属性值乘以指标权重值,因此容易出现马太效应<sup>[13]</sup>。由于特定评估内容中评估指标的选取方案几

乎一致,且评估指标的无属性值无法改变,因此,权重方法的选择就至关重要。本研究通过对 4 种常见且基础的权重方法进行拟定情景的适用性分析,并结合前人的研究结果,得出了在生态恢复潜力评估中各情景下适用的权重方法。

综合来看,在进行生态恢复潜力评估赋权时,AHP 法适合用在评估指标数据极少的情况下。如情景四中,面对选取的评估指标完整度低、可用指标数量极少时,使用 AHP 法对其进行主观赋权则可以使得评估结果更加符合实际,这与张殿巍<sup>[14]</sup>的研究结论一致。但 AHP 法也由于自身方法的局限性,当评估指标数据较多时,如情景一、二中,使用 AHP 法赋权则会由于评估标准间的相对重要性十分复杂,而使得专家判断打分不再精准。不仅在使用评估方法过程中会产生判断矩阵不一致,导致专家多次反复打分的情况出现,还会导致评估指标权重结果极差过大的情况。这与 SONG 等<sup>[15]</sup>在其研究中提到的观点一致。除此之外,在实际使用 AHP 法进行决策时,由于评估标准的复杂性和多样性,很难找到一位专家同时具备对所有领域的精通和综合评估的能力。这可能导致评估标准和权重的制定受到专家自身的领域知识和经验的影响,而缺乏系统性和客观性,从而影响决策结果的可靠性和有效性。因此,在利用 AHP 法对生态恢复潜力进行赋权时,只有当指标数量极少,其他方法失效时再采用 AHP 法进行赋权,同时需要采用多专家评估、专家培训和知识转移等方法,结合各方面的意见和建议,减小由于专家产生的人为限制条件,最终得出较为客观和全面的评估结果。

熵权法作为经典的客观赋权法,在生态恢复潜力评估中适用于决策问题准则清晰,数据较多,且所选取的评估指标之间相互独立的情况。如情景二,在评估植被退化严重问题时,选取的评估指标之间独立性较强,指标之间几乎没有任何联系。评估指标间的数据差异可以很好的反映出指标之间的重要程度,此时选用熵权法作为赋权方法则较为合适,这与 USTINOVICHUS<sup>[16]</sup>所提到的相同。但熵权法也有其客观存在的局限性,熵权法在赋权过程中过分依赖数据间的差异性,尤其是面对一些等级型评估指标时,熵权法由于本身的计算特点,会认为等级型指标数据差异量较小,从而对其赋权紊乱。但在实际评估工作中,通常认为等级型指标重要程度相对较高。因此,鉴于熵权法的局限性,需要综合考量指标体系是否合适使用熵权法进行赋权。总的来说,在生态恢复潜力评估中,如果目标区域已经有了很多相关的研究,并且对问题的分析已经比较透彻,评估指标选取也相对独立,同时可观测的数据也比较丰富,那么使用熵权法对指标进行赋权就非常合适。这与周贵华等<sup>[17]</sup>的研究结论一致。

Critic 法适用于评估指标之间有一定联系,且数据冲突性与关联性较为清晰,指标数据较为客观、数据较少的情况,这与魏子茹等<sup>[18]</sup>的研究结果一致。如情景三中,Critic 法的赋权结果相较于其他方法更为合理。但 Critic 法同样存在着方法的局限性,Critic 法依赖于数据间的关联性与冲突性,但这两种性质却对指标数量有着较高的要求,当指标数量过多时,指标间的冲突性与关联性变得十分复杂,且不能确定指标间是否存在耦合关联性<sup>[19]</sup>,此时使用 Critic 法易造成赋权失真。但当指标数量极少时,会导致 Critic 法无法对其冲突性与关联性进行衡量。因此,在生态恢复潜力评估中,如评估指标数据较少,指标数据客观,且指标数据之间关联性与冲突性较为清晰,此时,使用 Critic 法作为赋权方法较为合适。

因子分析法与 Critic 法均会对指标间的关联性进行参考,不同于 Critic 法的是因子分析法可以挖掘出数据间的潜在联系<sup>[20]</sup>,并不需要指标间的关联性较为清晰。因此,因子分析法适用于评估指标数据丰富时,如

表 10 数据极少情景各方法生态恢复潜力评估结果

Table 10 Ranking results of ecological restoration potential of each method under minimal data

区域	因子分析法赋权 恢复潜力排名	Critic法赋权 恢复潜力排名	熵权法赋权 恢复潜力排名	AHP法赋权 恢复潜力排名
A1	1	1	1	3
A2	2	2	2	2
A3	4	5	4	4
A4	3	3	3	1
A5	5	4	5	5

情景一，因子分析法可以很好的评估指标间的贡献度，通过指标间不同的贡献度对评估指标进行赋权。但因子分析法的局限性也较为明显，其方法需要丰富的数据作为参考，且给出的“潜在联系”在通常情况下也需要人为根据实际工作经验加以辨析。此外，因子分析法还可以对指标进行浓缩处理，将多项强相关的评估指标浓缩成为某一个具有代表性的指标，构建更为精简的评估指标体系<sup>[21]</sup>。因此，在进行生态恢复潜力评估时，当评估指标选取过多时，应首先对指标使用因子分析法挖掘出数据间的关联性，对评估指标进行浓缩从而精简评估指标体系，再根据浓缩后的评估指标数量选择合适的赋权方法对其进行赋权。

生态恢复潜力评估虽然可以快速高效的得到各个待修复区域的优先顺序，为有关部门提供决策依据，节省了大量的时间与精力，但由于其出现时间较晚，诸多研究尚不完善。需要较为专业的人士对其进行指标上的选取与权重计算方法的选取，否则易出现指标表征的重复或缺漏，导致总体结果有失偏颇。因此，生态恢复潜力评估方法局限于需要使用者具备一定的专业知识储备，且对指标体系具有较高的认知程度。

### 3 结论与建议

1) 层次分析法确定权重操作简单，结果直观，但对参与评估的人员有较高的要求，适用于评估指标数据极少，指标数量在 4 个以下时，且指标涉及跨领域内容较少的情况。

2) 熵权法权重结果较为客观，但仅从数据出发，赋权结果客观教条，适合用于评估指标数据较多，指标数量在 6~8 个时，且指标表征内容独立性强的情况下。

3) Critic 法结果客观，可以根据数据间冲突性与相关性进行科学赋权，但对数据质量要求较高，需要数据较少且客观可测。适用于评估指标数据较少，指标数量在 4~6 个时，指标同质化程度较低，且指标间冲突性与联系性较为清晰的情况。

4) 因子分析法计算复杂、结果直观。但面对表征内容独立性较强的指标时则赋权结果较差。因子分析法适用于评估指标数据丰富，指标数量在 8 个之上时。因子分析法不仅可以对大量指标通过贡献度赋权，还可以挖掘指标间的潜在联系，对同质化严重的指标体系进行精简。

5) 在实际生态恢复潜力评估研究中确定评估指标权重时，要结合具体的指标体系，考虑所面对的具体情况，针对不同的情况选择不同的权重确定方法，以达到生态恢复潜力最佳评估结果。

### 参考文献

- [1] 刘世梁,董玉红,王方方,等.生态系统服务价值评估在生态修复中的应用[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(8):1343-1354.
- [2] NORTON D J, WICKHAM J D, WADE T G, et al. A Method for Comparative Analysis of Recovery Potential in Impaired Waters Restoration Planning[J]. *Environmental Management*. 2009, 44(2): 356-368.
- [3] 封志明, 闵兴龙, 江维, 等. 基于组合赋权的数控机床精度模糊评价[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 64-72.
- [4] 郭昱. 权重确定方法综述[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(8): 252-253.
- [5] 何群, 陈明, 徐力群, 等. 大坝综合评价指标专家主观权重的计算方法[J]. 人民黄河, 2019, 41(S2): 67-68.
- [6] 陈鹏宇. 客观赋权法的适用性检验及应用建议——以突出局部差异赋权法为例[J]. 调研世界, 2021, 329(2): 65-73.
- [7] 松滋市统计局, 国家统计局松滋调查队. 松滋统计年鉴[EB/OL]. [2023-2-22]. <http://zwgk.hbsz.gov.cn/szstj/25144/202306/t20230608/352565.shtml>, 2021.
- [8] 袁莹, 白前, 石蒙蒙, 等. 坡垒相对叶绿素含量与图像特征的非线性分析及估测[J]. 森林与环境学报, 2023, 43(3): 295-302.
- [9] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [10] 章德, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.
- [11] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems[J]. *Computers and Operations Research*. 1995, 22(7): 763-770.
- [12] 彭浩, 张璐, 李书婵, 等. 福建省碳排放影响因素实证研究: 基于因子分析法[J]. 黑河学院学报, 2022, 13(11): 24-26.
- [13] MERTON R K. The Matthew Effect in Science: The reward and communication systems of science are considered[J]. *Science*. 1968, 159(3810): 56-63.
- [14] 张殿巍. 人工智能在信息安全风险评估中的应用[J]. 智慧城市, 2020, 6(3): 49-50.
- [15] SONG B, KANG S. A Method of Assigning Weights Using a Ranking and Nonhierarchy Comparison[J]. Hindawi Publishing Corporation. 2016, 8963214: 1-9.
- [16] USTINOVICHUS, L. Methods of determining objective, subjective and integrated weights of attributes[J]. *International Journal of Management and Decision Making*. 2007, 8(5/6): 540-554.
- [17] 周贵华. 机电产品检测中的质量评价指标体系建设与标准化研究[J]. 大众标准化, 2023, 391(7): 174-176.
- [18] 魏子茹, 卢延辉, 王鹏宇, 等. 基于 CRITIC 法的灰色关联理论在无人驾驶车辆测试评价中的应用[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 99-108.
- [19] 周文慧, 钞小静. 黄河流域数字基础设施、经济发展韧性与生态环境保护的耦合协调发展分析——基于三元系统耦合协调模型[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(9): 1-9.

[20] 常佳慧. 哈佛分析框架下 GC 矿业公司财务分析与改进[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.

[21] 罗思琪. 农村污水治理 PPP 项目可持续性视角下的风险评价研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.

(责任编辑: 金曙光)

## Scenario analysis of different weighting methods for ecological restoration potential evaluation of watershed

LI Guanting, WANG Qiwen, GAO Jijun\*, LIU Laisheng, LAO Tianying, NING Zhen

Department of Water Ecology and Environment China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100000, China

\*Corresponding author, E-mail: [gaojj@iwhr.com](mailto:gaojj@iwhr.com)

**Abstract** Basin ecological restoration potential assessment research is often faced with the problem of selecting the assignment method, and different data integrity scenarios to choose the appropriate weighting method can make the evaluation results more accurate. Taking Xiaonanhai Lake as the research object, according to the requirements of ecological restoration potential assessment methods, the four empowerment methods of hierarchical analysis, entropy weighting, Critic method and factor analysis were selected to carry out the analysis of applicable scenarios. The results showed that the hierarchical analysis method was suitable for the scenarios where the objective data of the assessment indicators were insufficient and the subjective judgment of experts was needed. The entropy weight method was suitable for the situation where the independence of the assessment indicators was strong and there were more data. The Critic method was suitable for the scenarios where the connection between the assessment indicators was clear and there are fewer data, and the factor analysis method was suitable for the scenarios where there was serious homogenization of the data and the assessment indicators were too much selected. The results of this study are of some guidance significance for the selection of empowerment methods for the assessment of ecological restoration potential of watersheds.

**Keywords** ecological restoration potential; the weight of the evaluation index; analytic hierarchy process; entropy weight method; critic method; factor analysis method