

# 基于层次分析法-熵权法的河湖健康评估

——以无锡蠡湖为例

宋为威, 鞠茂森\*

(河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

**摘要:**在水生态安全的基础上,基于层次分析-熵权法模型,构建了蠡湖健康评估体系。将主观评价和客观评价相结合的权重确定方法也提高了评价的科学性和精准性。蠡湖健康状况指数综合得分为87.78,健康综合评价等级为“健康”水平,作为城市景观湖泊在社会服务层面的得分表现良好,由于湖泊连通性差,生物准则层得分较低,从而需要寻找合适的外部水源进行生态补水。

**关键词:**层次分析法-熵权法; 健康评估; 蠡湖

中图分类号:X52

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)01-0039-0004

## Health Assessment Based on Analytic Hierarchy Process-Entropy Weight Method: A Case Study of Lihu Lake in Wuxi City

SONG Weiwei, JU Maosen\*

(National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety,  
Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** On the basis of water ecological security, the health assessment system of Lihu Lake was constructed based on the analytic hierarchy process-entropy weight method model. The weight determination method combining subjective evaluation and objective evaluation also improves the scientificity and accuracy of evaluation. The comprehensive score of Lihu Lake's health status index is 87.78, and the comprehensive health evaluation level is 'healthy'. As an urban landscape lake, the score of social service level is good. Due to the poor connectivity of the lake, the score of the biological criterion layer is low, so it is necessary to find a suitable external water source for ecological water replenishment.

**Key words:** analytic hierarchy process-entropy weight method; health assessment; Lihu Lake

河湖健康评估从水文水资源、物理结构、水质、生物和社会服务功能等多个层面对河湖进行评估,及时全面掌握河湖生态完整性状况和社会服务功能状况,找出存在的问题和改进的方法,为河湖管理提供基础信息<sup>[1-2]</sup>。通过开展河湖健康评估工作,

对全面掌握河湖健康状况、提升河湖管理与保护水平和促进水生态文明建设有重要意义<sup>[3-4]</sup>。

### 1 区域概况

蠡湖,又名五里湖,地处江苏省无锡市境内,是

收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(52100175)

作者简介: 宋为威(1991—),男,副研究员,博士,主要从事生态水利研究。E-mail: weiweisong@hhu.edu.cn

通信作者: 鞠茂森(1967—),男,研究员,博士,主要从事工程项目管理、河湖管理和河湖长制研究。E-mail: maosenju@hhu.edu.cn

太湖北部的一个内湖,是典型的城市浅水型湖泊。湖泊东西长约6 km,南北宽0.3~1.8 km,正常水位时湖体周长约为21 km,面积约为86 km<sup>2</sup>,湖底高程0.5~15 m(吴镇江基面,下同),以中部横卧湖面的宝界桥为界,分别称为“东蠡湖”和“西蠡湖”。蠡湖经梁溪河闸、五里湖闸及支流与梅梁湖相通,通过曹王泾、长广溪等分别与京杭大运河、贡湖相连接,湖周围还有一些小河及断头浜,是一个既相独立又与太湖相通的水体。

## 2 研究方法

### 2.1 层次分析法-熵权法

构建湖泊健康评价体系,在选定指标的基础上,先确定各评价指标的权重。为加强权重确定的合理性和准确性,采用层次分析法确定主观权重,然后利用熵权法确定客观权重,最后将主观权重和客观权重进行耦合得到综合权重。

#### 2.1.1 层次分析法确定主观权重

确定主观权重,首先在结合蠡湖所处的自然环境下,考虑水文、水质、生态、服务功能,确定指标层次及指标体系,然后采用1~9比例标度法进行相互判断比,建立判断矩阵。通过矩阵运算,计算最大特征值和特征向量,进行一致性检验。若 $C_R < 0.1$ ,则通过检验,特征值即为评价指标客观权重 $P_j$ ,计算公式如下:

$$C_1 = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

$$C_R = C_1 / R_1 \quad (2)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征根; $C_1$ 、 $R_1$ 为随机一致性指标; $C_R$ 为平均随机一致性比例; $R_1$ 在1~9阶矩阵取值分别为0、0.58、0.9、1.12、1.24、1.34、1.41、1.45。

#### 2.2.2 熵权法确定客观权重

确定客观权重,首先需要构建评价指标矩阵 $A = (x_{ij})_{m \times n}$ ,然后计算指标特征比值 $r_{ij}$ ,然后根据特征比值 $r_{ij}$ 计算第 $j$ 个指标的信息熵 $S_j$ ,最后计算出相应指标权重 $V_j$ ,公式如下:

$$r_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^m b_{ij}} \quad (3)$$

$$S_j = -(\ln m)^{-1} \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln r_{ij} \quad (4)$$

$$V_j = \frac{1 - S_j}{\sum_{i=1}^m (1 - S_j)} \quad (5)$$

式中: $r_{ij}$ 为评价指标矩阵的特征比值; $S_j$ 为评价指标信息熵; $V_j$ 为评价指标客观权重。

### 2.2.3 AHP-熵权法确定综合权重

在确定评价指标主观权重和客观权重后,采用乘数归一法计算综合权重,计算公式为

$$a_j = \frac{V_j P_j}{\sum_{j=1}^n (V_j P_j)} \quad (6)$$

式中: $a_j$ 为AHP-熵权法确定的综合权重; $P_j$ 为评价指标主观权重。

## 2.2 湖泊健康评价指标体系

湖泊健康源于湖泊生态系统的健康,但不局限于生态系统的健康。根据蠡湖的水生态环境特征和社会环境状况,结合湖泊健康评估国内外的实践应用情况,蠡湖的健康评价体系构建更适用于多层次多指标的指标框架体系<sup>[5]</sup>。采用目标层—准则层—指标层关系框架,依据评估指标选取原则,结合蠡湖结构类型、自然地理条件和所处区域的社会经济发展水平,同时参考国外RCE、ISC等评价指标体系、国内《河湖健康评估技术导则》(SL/T793—2020)的评价指标体系,综合其他河湖健康评价指标体系的基础上,提出能综合体现蠡湖健康状况的常用河湖健康评价指标<sup>[6-7]</sup>。蠡湖健康评价指标体系以湖泊健康为目标层,以水文、物理结构、水质、生物、社会服务为准则层,以水环境健康、生态健康、社会服务健康为目标,分别选取了22项可以代表蠡湖健康状况的评价指标。指标体系,见表1。

## 3 结果与讨论

### 3.1 蠡湖健康调查分析

蠡湖保持在3.3 m常水位,参照太湖最低生态水位2.9 m。由此可见,蠡湖完全满足生态水位的要求。为保护蠡湖水质,环湖32条主要支流均被闸断,蠡湖的水体交换动力因此受到极大的制约,外部补水只能依靠降雨,蠡湖联通指数为0。近年以来,蠡湖始终保持3.3 m的常水位,湖泊水域面积保持稳定态势,蠡湖的湖泊面积萎缩比例赋分为100分。蠡湖岸线大约65%为生态护岸,植被覆盖率高,赋分为95分;35%为硬质护岸,无植被覆盖,赋分为0分。蠡湖的入湖排污口建设均满足“看得见,可测量,有监控”的规范化要求,布局合理,违规开发利用水域岸线程度赋分为100分。当有多个水质项目浓度均为最差水质类别时,分别进行评分计算,取最低值,蠡湖水质优劣程度赋分为71.10分。通过计算,蠡

湖营养状态指数为54.18,蠡湖水质优劣程度赋分为46.06分。根据2023年5月16日《蠡湖水质调查报告(第5-10期)》数据,蠡湖溶解氧质量浓度为8.96 mg/L,饱和度为107%,蠡湖水体自净能力赋分为100分。2021年,蠡湖完成首次鸟类调查,调查选取了湿地公园内渤公岛、宝界湖滨、长广溪、金城湾4个具有代表性的区域进行,用一年时间,共记录到鸟类16目47科136种,其中包括鸮、林雕、凤头鹰等国家二级重点保护野生动物12种,水鸟状况赋分为85分。浮游植物密度为6 364万个/L,大型水生植物覆盖度为1.2%。蠡湖一期全面整治以及后续的保护工作的开展,蠡湖岸线目前没有已利用生产岸线且全部恢复原状。通过网上问卷调查以及随机发放问卷,已有超过500人次完成了问卷调查,大部分民众对于目前蠡湖现状持满意态度,部分群众对水体水质透明度等问题表达了担忧,公众满意度赋分为92。

3.2 AHP-熵权法的指标权重确定

利用层次分析法确定海湖泊健康评价体系中各项指标的权重。以准则层权重确定为列,采取专

家咨询法,咨询5位行业专家,对准则层子系统进行打分,构建判断矩阵。

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 1/2 & 1/4 \\ 1 & 1 & 2 & 1/2 & 1/4 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1/4 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 4 & 4 & 4 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

采用近似解法计算判断矩阵的特征向量,然后进行一致性检验。通过计算得出,准则层判断矩阵H的最大特征根 $\lambda_{\max}=5.325$ , $C_R=0.081<0.1$ 。该矩阵通过一致性检验,得到主观权重值为 $P_A=0.13$ , $P_B=0.13$ , $P_C=0.086$ , $P_D=0.26$ , $P_E=0.394$ 。再通过熵权法计算指标信息熵确定信息权重,得到客观权重 $V_A=0.1146$ , $V_B=0.2201$ , $V_C=0.2475$ , $V_D=0.194$ , $V_E=0.2238$ 。通过乘数合成归一法得到准则层的综合权重 $a_A=0.0904$ , $a_B=0.0987$ , $a_C=0.0641$ , $a_D=0.182$ , $a_E=0.5648$ 。指标层权重计算方法与准则层一致,判断矩阵及最大特征根均通过一致性检验,最终确定蠡湖健康评价指标权重,见表1。

表1 蠡湖评价指标权重计算结果

亚准则层	主观权重	客观权重	指标层	主观权重	客观权重	综合权重
水文完整性	0.130	0.1146	水资源开发利用率(A1)	0.0546	0.0389	0.0382
			入湖流量变异程度(A2)	0.0182	0.0368	0.0121
			最低生态水位满足程度(A3)	0.0572	0.0389	0.0401
化学完整性	0.130	0.2201	水质优劣程度(B1)	0.0208	0.0341	0.0128
			饮用水水源地水质达标状况(B2)	0.0182	0.0728	0.0239
			营养状态(B3)	0.0195	0.0368	0.0129
			底泥污染状况(B4)	0.0351	0.0381	0.0241
			水功能区达标率(B5)	0.0364	0.0383	0.0251
形态结构完整性	0.086	0.2475	湖泊联通指数(C1)	0.00946	0.0385	0.0066
			湖泊面积萎缩比例(C2)	0.01376	0.0391	0.0097
			湖岸稳定性(C3)	0.01548	0.0425	0.0118
			湖岸带植被覆盖度(C4)	0.01978	0.0414	0.0147
			排污口布局合理程度(C5)	0.01462	0.0432	0.0114
			湖岸带人工干扰程度(C6)	0.0129	0.0428	0.0099
生物完整性	0.260	0.1940	浮游植物密度(D1)	0.0676	0.0389	0.0473
			浮游动物生物损失指数(D2)	0.0312	0.0368	0.0207
			大型水生植物覆盖度(D3)	0.0364	0.0405	0.0265
			大型底栖无脊椎动物生物完整性指数(D4)	0.0598	0.0389	0.0419
			鱼类保有指数(D5)	0.0650	0.0389	0.0455
社会服务功能 可持续性	0.394	0.2238	公众满意度(E1)	0.2167	0.0925	0.3609
			防洪指标(E2)	0.09456	0.0389	0.0662
			供水指标(E3)	0.08274	0.0924	0.1377

### 3.3 蠡湖健康评估

根据《河湖健康评估技术导则》(SL/T793—2020)进行蠡湖的健康评价各指标结果测算,计算结果如下表所示。总体而言,蠡湖在“水”和社会服务功能准则层上各个分区的得分相对较高,而在生物准则层方面的得分相对较低,见表2。参照导则的定义,将河湖健康状况划分为五类,分别为一类河湖(非常健康,  $90 \leq I_{\text{RHH}} \leq 100$ )、二类河湖(健康,  $75 \leq I_{\text{RHH}} < 90$ )、三类河湖(亚健康,  $60 \leq I_{\text{RHH}} < 75$ )、四类河湖(不健康,  $40 \leq I_{\text{RHH}} < 60$ )、五类河湖(劣汰,  $I_{\text{RHH}} < 40$ )。

蠡湖健康状况指数综合得分为87.78,健康综合评价等级为“健康”,从准则层来看,蠡湖作为城市景观湖泊在社会服务层面的得分表现良好。蠡湖湖泊连通性差,造成了湖泊换水周期长,水动力不足,水体悬浮颗粒物多,最终导致了蠡湖透明度全年偏低。蠡湖水动力不足,藻密度水平较高。蠡湖水草覆盖度低且存在进一步萎缩风险,无法与藻类竞争成为初级生产者,不足以支撑蠡湖向草型清水生境稳态的自然转换。

表2 蠡湖健康评价各准则层测算结果

目标层		准则层		
名称	赋分	名称	权重	赋分
蠡湖健康评价	87.78	“盆”	0.0641	76.77
		“水”	0.1891	89.10
		生物	0.1820	66.00
		社会服务功能	0.5648	95.60

## 4 结 语

湖泊生态健康直接影响区域水生态安全。基于层次分析法-熵权法湖泊健康评价可以较好反应蠡湖健康水平的指标权重,指标体系不仅体现了各单项指标差异,而且从准则层和指标层体现了湖泊健康特征。将主观评价和客观评价相结合的权重确定方法也提高了评价的科学性和精准性。蠡湖健康状况指数综合得分为87.78,健康综合评价等级为“健康”水平,作为城市景观湖泊在社会服务层面的得分表现良好,由于湖泊连通性差,生物准则层得分较低,从而需要寻找合适的外部水源进行生态补水。建议今后继续加强蠡湖管理保护,建立基于实时移动监测与驳岸河湖长平台有机结合的河湖健康管理一站式系统。

### 参考文献:

- [1] 周子俊,单凯,娄广艳,等.新形势下黄河健康评估指标体系研究[J]. 人民黄河,2021,43(8):79-83.
- [2] 张金良. 黄河流域河湖生态环境复苏研究[J]. 水资源保护,2022,38(1):141-146.
- [3] 陈进. 长江健康评估与保护实践[J]. 长江科学院院报,2020,37(2):7.
- [4] 贡力,田洁,靳春玲,等. 基于ERG需求模型的幸福河综合评价[J]. 水资源保护,2022,38(3):25-33.
- [5] 张浩,高晓月,周绪申. 海河流域河湖健康评估探索与展望[J]. 中国水利,2018(6):3.
- [6] 张咏,吕学研,蔡琨,等. 太湖流域(江苏)水生态健康评估[M]. 北京:科学出版社,2021.
- [7] 郭千里,周焱钰. 湖州市探索实行最严格水资源管理制度的实践与思考[J]. 中国水利,2021(9):3.