

洪泽湖水生态健康综合评价指标体系

王智源^{1,*}, 刘劲松², 唐荣桂³, 郑福寿³, 张敏³

(1. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省水利厅工程管理处, 江苏 南京 210029; 3. 江苏省洪泽湖管理委员会办公室, 江苏 洪泽 223100)

摘要: 湖泊生态系统健康综合评价是当前湖泊保护与管理的热点问题。湖泊生态系统健康综合评价指标体系的构建是湖泊生态系统健康评价的前提。本文以洪泽湖为研究对象, 根据洪泽湖管理需求和服务需求, 结合洪泽湖功能定位、生态健康要素现状特征和周边区域社会经济特征, 基于“压力—状态—响应”(PSR)系统模型, 从自然属性和社会服务属性两个方面筛选指标, 构建了洪泽湖水生态健康综合评价指标体系。本文采用层次分析法和模糊评价法建立了一个包含指标录入及预处理、指标权重层次分析、模糊综合评价三个计算模块的洪泽湖水生态健康综合评价模型, 建立了完整的洪泽湖水生态健康综合评价方法, 以期洪泽湖的科学开发、系统管理和有效保护提供理论依据。

关键词: 洪泽湖; 水生态健康; 指标体系; 层次分析法; 模糊评价法

中图分类号: X524

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2017)04-0039-07

Comprehensive evaluation index system of water ecological health of Hongze Lake

WANG Zhiyuan^{1,*}, LIU Jinsong², TANG Ronggui³, ZHENG Fushou³, ZHANG Min³

(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu;*

2. *Project Management Division, Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu;*

3. *Hongze Lake Management Committee Office of Jiangsu Province, Huaian 223100, Jiangsu*)

Abstract: Comprehensive assessment of Lake Ecosystem health is a hot issue in lake protection and management. The construction of comprehensive evaluation index system for it is the precondition. Taking Hongze Lake as the research object, according to the demand of management and service, combined with elements of the ecological health function, present situation and characteristics of Hongze Lake and the surrounding region social and economic characteristics, based on the "pressure-state-response" (PSR) system model, index selected from two aspects: natural attribute and social service attribute, comprehensive evaluation index system of Hongze Lake ecosystem health is constructed. The AHP and fuzzy evaluation method are used to establish a comprehensive evaluation of Hongze lake ecosystem health index contains index input and pretreatment, index weight of AHP and fuzzy comprehensive evaluation. The establishment of a complete Hongze lake ecosystem health comprehensive evaluation method could provide theoretical basis for scientific development, system management and effective protection of Hongze Lake.

收稿日期: 2017-02-08

基金项目: 江苏省水利科技项目(2016030, 2016021), 江苏省自然科学基金(BK20160143)

作者简介: 王智源(1988-), 男, 博士, 工程师, 研究方向为水生态修复与水污染控制。

Key words: Hongze Lake; water ecological health; index system; analytic hierarchy process; fuzzy evaluation method

0 引言

湖泊在人类经济社会发展过程中发挥重要的制约和服务功能,制定有效的湖泊保护和管理措施的前提是了解其水生态系统的演变规律^[1]。通过对湖泊水生态系统健康状态进行评价,可以甄别引起湖泊生态结构变化与功能退化的关键影响因素,由此提出具有针对性的治理方案,从而为湖泊的保护与治理提供科学依据。

湖泊生态系统是自然—社会—经济复合系统,结构复杂,层次众多,部分关键因子具有改变整个系统的能力^[2]。作为度量生态系统特征参数,评价指标的选取在湖泊水生态健康综合评价中起决定性作用。水质状况在一定程度上可以直接反映湖泊水安全问题,而水生物群落与所生存的整个水生态系统,随时在进行物质和能量的交换,其群落结构和特性对系统干扰具有高度敏感性,其变化幅度能迅速反映人类活动对水生态系统的影响程度和水生态系统的安全。近年来,学者们不断发展湖泊生态健康内涵,提出了包含生态胁迫^[3]、生物完整性^[4]、水质指标、水文气象、社会经济等多方面的综合评价体系。指标体系通常既包括浮游植物生物量、浮游动物生物量等单一生物指标^[5],也包括以热力学为导向,或基于网络分析的综合性指标,比如生态能质^[6]、生态缓冲容量^[7]、多样性指数^[8]、富营养化指数^[2]等。

由于湖泊类型多样、区域差异明显,湖泊生态系统具有复杂性和不稳定性,湖泊生态系统评价体系也具有特异性和针对性。此外,由于我国大多数湖泊缺乏生态监测资料,生态指示物种不明确,生物与生态群落指标难以定量评价,一些以生物要素为核心的评价体系无法应用,迄今尚未形成全面、统一的湖泊生态健康评价方法和指标体系,如何从众多水生态系统健康评价指标中遴选出最具代表性的定性和定量指标是目前亟需解决的问题^[3]。本文以洪泽湖为研究对象,基于洪泽湖生态系统结构与功能特点,提出湖泊水生态健康的理论框架,构建洪泽湖水生态健康综合评价指标体系,由此探讨洪泽湖生态治理的途径与方

法,旨在为湖泊资源可持续发展提供依据。

1 研究区域概况

洪泽湖是我省第二大湖泊、全国第四大淡水湖,湖泊面积 1780 km²,是淮河流域最大的防洪供水调蓄湖泊,也是南水北调东线工程的重要水源地,在防洪抗旱、调节气候、保护生物多样性以及农业、渔业、航运和旅游业等方面起着极其重要的作用。洪泽湖拥有国家级湿地自然保护区,湖周分布有大面积洼地、滩地和低平原湿地,区域内湿地生态系统发育完全,是众多野生动植物的最后栖息地和繁殖地。近年来伴随着经济社会快速发展和人类活动加剧,洪泽湖非法采砂、圈圩养殖、光伏发电等不合理开发利用加快了湖体水质恶化和生态失衡,严重影响了洪泽湖生态环境和周边地区社会经济的可持续发展。当前洪泽湖仍存在人为侵害严重、水域岸线开发利用无序、生态退化严重的问题。针对洪泽湖开展水生态健康综合评价是开展洪泽湖开发利用和生态保护的迫切需求,将为科学制定洪泽湖开发利用规划、改善洪泽湖水生态环境提供理论依据,具有重要意义和紧迫性。

2 洪泽湖水生态健康关键指标识别

洪泽湖属于平原浅水湖泊,与流域内陆地环境资源的物质能量交换频繁,具有环境响应敏感度高特点,人类开发活动的压力易造成水生态系统失衡。洪泽湖水生态健康应包含以下四方面要素:(1)湖泊具有可持续的生态系统,能够维持水生态系统的结构和活力;(2)湖泊形态完整,滨岸带结构稳定,河湖连通性良好;(3)湖泊水质良好,水量充足,生态服务功能完整,满足水生生物繁衍需求;(4)湖泊水环境风险低,抗干扰能力和自净能力强,具有较完备的自我修复能力。

根据洪泽湖的管理需求和服务需求,结合洪泽湖功能定位、生态健康要素现状特征和周边区域社会经济特征,从整体保护的角度出发,分析维系水源地自身生态系统健康的自然属性指标和

水源地服务于人类社会可持续发展的社会服务属性指标。指标筛选遵循系统性、全面性、层次性、科学性、实用性、可操作性的原则^[9]。基于“压力(人类干扰)—状态(环境和自然资源)—响应(状态和措施)”系统模型, 构建洪泽湖水生态健康综合评价指标体系, 见表 1。目标层为洪泽湖水生态

表 1 洪泽湖水生态健康综合评价指标体系

属性	约束层要素及权重	指标层类别	详细指标	计算方法与说明	指标权重	
水质状况 (0.256)	综合污染指数	水质达标率	水质指标	采用单项指数超标法, 参照《地表水环境质量标准》III 类水标准	0.206	
		综合污染指数	综合污染指数	对各指标的相对污染指数进行统计, 采用算术平均值法计算综合指数评价水体污染程度	0.399	
		分级评价指数	分级评价指数	划分水质等级并赋予一定的分值, 确定单项污染分级, 计算等级指标的算术平均值表征总体水质状况	0.102	
		内梅罗指数	内梅罗指数	兼顾极值或称突出最大值的计权型多因子环境质量综合指数, 在加权过程中避免了权系数中主观因素的影响	0.115	
		富营养化 TLI 指数	富营养化 TLI 指数	选取 SD、COD _{Mn} 、Chl-a、TN、TP 指标计算水体富营养化综合指数	0.178	
水生生物 (0.230)	鱼类 底栖动物 浮游动物 浮游植物	耐污能力、优势种群、数量、IBI 指数	鱼类	反映鱼类和底栖动物群落特征, 用于综合评价水生态系统健康状况	0.356	
		生物量、种群优势度、多样性指数	底栖动物	反映浮游动物群落特征, 用于综合评价水生态系统健康状况	0.274	
		密度、叶绿素浓度、种群优势度、丰度、多样性	浮游动物	反映浮游植物群落特征, 用于综合评价水生态系统健康状况	0.202	
			浮游植物		0.168	
自然属性	水文状况	水位波动	水位波动	基于水文历史数据分析平丰枯不同季节潮位变化周期、趋势, 根据实际情况判断是否满足生态水位需求	0.114	
		枯水期最小水量	枯水期最小水量	评估枯水期低流量事件背景下的平均最低流量能否满足生态水量需求	0.171	
	水文及形态学 (0.297)	围垦强度	围垦强度	围垦强度	建圩强度与湖泊现有面积比例, 反映洪泽湖自由水面率缩减量	0.101
			退圩还湖	退圩还湖	退圩面积与开圩面积比例, 反映退圩还湖工作成效	0.075
		河湖畅通率	河湖畅通率	河道与湖区的畅通情况, 反映湖体与入湖河道的水体交换情况	0.028	
		涵养指数	涵养指数	反映栖息地功能, 考虑滩涂、湿地、沼泽、林地和草地的覆盖面积比例	0.153	
		形态学	河道冲刷	河道冲刷	河道稳定及泥沙淤积程度	0.015
			护岸形式	护岸形式	土质护岸、混凝土护岸、生态护岸、湖滨缓冲带、人工湿地等不同护岸形式所占比例	0.069
			底质强度	底质强度	底质厚度、硬度、孔隙率、粒径分布	0.022
			植被覆盖率	植被覆盖率	植被受扰程度及盖度, 参照植被覆盖率安全等级划分标准	0.094
退化程度	退化程度	以人类扰动下湿地或野生动物栖息地退化面积比例计	0.094			
水土流失治理率	水土流失治理率	水土流失治理率	参照水土流失治理率安全等级划分标准	0.064		

续表 1

属性	约束层要素及权重	指标层类别	详细指标	计算方法与说明	指标权重	
服务功能 (0.116)	资源利用		洪水调蓄	防洪附加费增加率	0.146	
			农业灌溉	以灌溉面积计	0.073	
			固废处理	废物处理率或净化率	0.098	
			旅游资源	以湿地旅游、休闲游乐活动设施面积、年均收入和游览人次计	0.191	
	供水规模		物质生产	渔业、芦苇年收获量变化率	0.083	
			年供水量	设计年供水量、最大年供水量、人均综合生活用水量	0.062	
			供水人口	以水源地水厂供水人口、区域供水普及率为准	0.022	
	防洪能力		取水口安全指数	取水管长度、材质、使用年限,取水设施运行状况	0.084	
			防洪标准适应度	水源地上下游堤防防洪标准与规划防洪标准的适应情况	0.126	
			防洪工程完好率	达到堤防标准的防洪工程比例	0.115	
			人类活动强度	以人口密度计	0.158	
	社会属性	固定风险源		围网养殖	围网养殖现状与规划控制情况的比例,反映围网养殖管理达标情况	0.167
				港口码头	港口码头数量、年吞吐量、与取水口距离、危化品比例	0.066
		环境风险 (0.101)		工业园区	排污口数量、年均排污量、与取水口距离、污染物种类、工业废水达标排放率	0.043
渔猎养殖				畜禽数量、围网养殖面积、农村污水排放管控达标率	0.099	
农田				农田面积、年均农药化肥施用面积、与取水口距离	0.112	
移动风险源				航运	年均过境船舶艘次、泄漏风险指数	0.083
应急能力			旱涝灾害	以全年灾害天数所占比例计	0.108	
			突发污染监测设备	系统自动化水平、监测盲区以及管理人员综合素质、从业年限,参照监测设备建设情况等级划分标准	0.071	
			应急水源地建设情况	应急启动能力、备用水量、供水保证率、日常保护措施	0.093	

健康,约束层包括自然属性和社会服务属性共5个因素,针对不同的约束层因素提出指标层共14类指标。

3 洪泽湖水生态健康综合评价模型构建

结合已建立的洪泽湖水生态健康综合评价指标体系,采用层次分析法和模糊综合评价法建立一个包含指标录入及预处理、指标权重层次分析、模糊综合评价分析三个计算模块的洪泽湖水生态健康综合评价模型,见图1。

3.1 数据录入及预处理

对定量指标进行一致化、归一化和无量纲化处理,将极小型指标、居中型指标和区间型指标转化为极大型指标:

极小型转化: $x_j' = \frac{1}{x_j}$ 或 $x_j' = M_j - x_j$, 其中 $M_j =$

$\max_{1 \leq i \leq n} \{x_{ij}\}$

居中型转化: $x_j' = \begin{cases} \frac{2(x_j - m_j)}{M_j - m_j}, & m_j \leq x_j \leq \frac{M_j + m_j}{2} \\ \frac{2(M_j - x_j)}{M_j - m_j}, & \frac{M_j + m_j}{2} \leq x_j \leq M_j \end{cases}$

其中, $M_j = \max \{x_{ij}\}$, $m_j = \min \{x_{ij}\}$

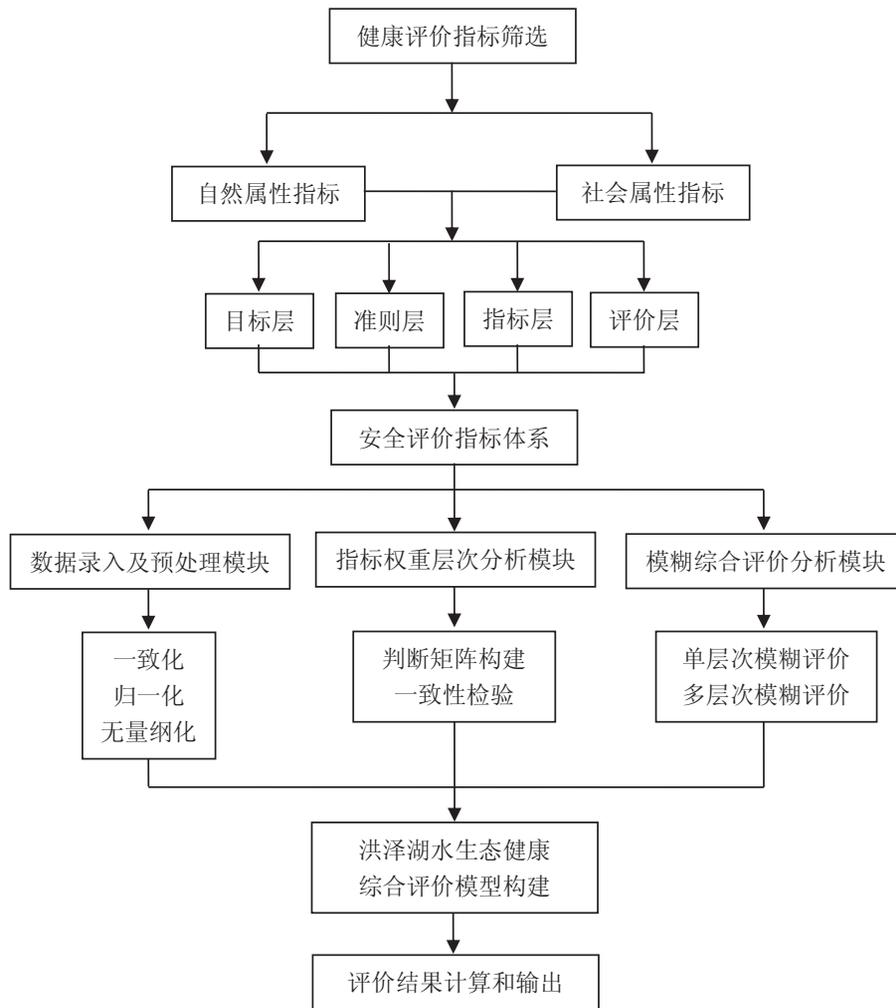


图1 洪泽湖水生态健康综合评价模型流程

$$\text{区间型转化: } x'_j = \begin{cases} 1 - \frac{a-x}{c}, & x < a \\ 1, & a \leq x \leq b \\ 1 - \frac{x-b}{c}, & x > b \end{cases}$$

其中, $[a, b]$ 为 x 的最佳稳定区间, $c = \max\{a-m, M-b\}$, M 和 m 分别为 x 可能取值的最大值和最小值。

对定性指标进行量化处理, 按照相应评价标准, 从优到差分成 A、B、C、D、E 不同的等级, 构造模糊隶属函数的连续量化方法, 取偏大型柯西分布和对数函数作为隶属函数:

$$f(x) = \begin{cases} [1 + \alpha(x-\beta)^{-2}]^{-1}, & E \leq a \leq C \\ a \ln x + b, & C \leq x \leq A \end{cases}$$

b 为待定常数。

采用标准差法将评价指标无量纲化: 令 $x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}$

($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$), 其中 x_{ij} 为标准观测值, $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$, $s_j = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \right]^{1/2}$ 。

3.2 指标权重层次分析

采用层次分析法确定指标权重, 在确定目标集 O 和评价指标集 G 的前提下, 将指标集中的评价指标准两两比较求得相应最重要的判断矩阵 $[g_{ij}]_{n \times n}$, 以 $g_{ij} \in G$ ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$) 表示评价指标, g_{ij} 表示 g_i 对 g_j 的相对重要性数值(即标度)。 g_{ij} 的取值如表 2 所示。

通过评价指标两两比较可得到判断矩阵 U :

$$U = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1n} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nn} \end{bmatrix}$$

求解 $U \times A = \lambda_{max} \times A$, 计算判断矩阵 U 的最

大特征值 λ_{max} , 其所对应的单位特征向量 A 即为所要确定的各指标权重向量 ω , 单位特征向量 A 各向量即为各评价指标相应的权重, 记为 $\omega=(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)$ 。结果表明, 各指标间相关系数小于 0.5, 可认为指标反映信息准确无重叠, 构建的指标体系科学合理。

表 2 判断矩阵标度及其含义

标度 g_{ij}	含义
1	g_i 与 g_j 比较具有同等重要性 (equally)
3	g_i 比 g_j 稍微更具重要性 (slightly)
5	g_i 比 g_j 明显更具重要性 (significantly)
7	g_i 比 g_j 更具强烈重要性 (strongly)
9	g_i 比 g_j 更具极端重要性 (extremely)
2, 4, 6, 8	分别表示相邻判断 1-3, 3-5, 5-7, 7-9 的中值
倒数	g_i 与 g_j 比较得 g_{ij} , g_j 与 g_i 比较得 $g_{ji}=1/g_{ij}$

对判断矩阵 U 进行一致性检验:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

式中:

CR —判断矩阵 U 的随机一致性比率;

CI —判断矩阵 U 的一般一致性指标;

RI —判断矩阵 U 的平均随机一致性指标;

结果表明, $CR < 0.1$ 时, 即可认为判断矩阵 U 具有满意的一致性 (desirable consistence), 说明指标权重合理。

3.3 模糊综合评价分析

利用模糊综合评价法, 根据隶属度理论, 结合定性分析与定量分析, 以避免综合评价过程中的不确定性。

首先进行单层次模糊评价, 设因素集 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 评价集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 对因素集 U 中的 $u_i (i=1, 2, \dots, n)$ 作单因素评判, 考虑到对决策评价集 V 的隶属度, 第 i 个因素的单因素评判集为 $r_i=(r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ 。

根据 n 个因素的评判集, 形成总判断矩阵 R , 代表因素集 U 到评价集 V 的模糊关系, 可表示为 $R=[r_{ij}]_{n \times m}$ 的 $n \times m$ 阶矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

通过模糊变换进行综合评判:

$$B = \omega \cdot R = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_m)$$

利用加权平均法, 按照普通矩阵乘法符号计算 b_i :

$$b_i = \sum_{j=1}^m \omega_j r_{ij}$$

采用多层次模糊综合评价法, 针对各因素子集, 利用单层次评价模型得出模糊综合判断总矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_k \end{bmatrix}$$

设 U_1, U_2, \dots, U_k 的权向量为 $\omega, \omega=(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_k)$, 且满足 $\sum_{i=1}^k \omega_i=1$, 构建模糊综合评价模型:

$$B = \omega \cdot R = \begin{bmatrix} \omega_1 \cdot R_1 \\ \omega_2 \cdot R_2 \\ \dots \\ \omega_k \cdot R_k \end{bmatrix}$$

由最低层向上层逐层评判, 得到目标层的模糊综合评价值。参考国家标准、地方法规、区域规划与相关文献中的特征值, 将研究区域的湖泊水生生态健康综合评价指标分为 5 个等级, 见表 3, 用连续实数区间表示, 最健康状态其值为 1, 最不健康状态其值为 0。在量化过程中制定各指标的量化分级标准和阈值。根据最大隶属度原则, 若 $b_j = \max(b_1, b_2, \dots, b_n)$, 则洪泽湖水生态健康综合级别应评价为第 j 等。

4 结语

本文在明确洪泽湖水生态系统健康概念框架

表3 洪泽湖水生态健康综合评价等级标准

等级	分值	状态	指标特征
A	[1, 0.8)	非常健康 / 安全	水环境与生态系统功能完善,生态环境良好,开发利用强度低,外界干扰下可迅速恢复
B	[0.8, 0.6)	健康 / 较安全	水环境与生态系统服务功能较为完善,生态环境较少受到破坏,一般干扰下可自我恢复
C	[0.6, 0.4)	亚健康 / 不安全	水环境与生态系统服务功能出现退化,生态环境受到一定破坏,开发利用强度适中,但尚可维持基本功能
D	[0.4, 0.2)	不健康 / 低风险	水环境与生态系统服务功能严重退化,生态环境受到较大破坏,受外界干扰后恢复困难
E	[0.2, 0)	疾病 / 高风险	水环境与生态系统服务功能丧失,生态环境破坏严重,开发利用与生态保护严重冲突,受外界干扰后无法恢复

要素的前提下,制定生态系统健康整体评价目的和指标筛选原则,根据洪泽湖管理需求和服务需求,结合洪泽湖功能定位、生态健康要素现状特征和周边区域社会经济特征,基于“压力—状态—响应”(PSR)系统模型,从自然属性和社会服务属性两个方面,筛选构建包含14类指标的洪泽湖水生态健康综合评价指标体系。采用层次分析法和模糊综合评价法建立一个包含指标录入及预处理、指标权重层次分析、模糊综合评价分析三个计算模块的洪泽湖水生态健康综合评价模型,建立了完整的洪泽湖水生态健康综合评价方法。由于湖泊生态系统的复杂性和异质性,本文建立的综合评价指标体系在时空尺度上仅适用于洪泽湖,在今后的应用过程中应根据实际情况的变化进行补充和完善,从而对洪泽湖水生态系统健康状况进行客观分析和评价。

参考文献:

- [1] Xu FL, Zhao ZY, Zhan W, Zhao SS, Dawson R, Tao S. An ecosystem health index methodology (EHIM) for lake ecosystem health assessment[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 188: 327-339.
- [2] 肖韬,袁兴中,唐清华,等.基于概率神经网络的城市湖泊生态系统健康评价研究[J].*环境科学学报*, 2013, 33: 3166-3172.
- [3] 张艳会,杨桂山,万荣荣.湖泊水生态系统健康评价指标研究[J].*资源科学*, 2014, 36: 1306-1315.
- [4] Liao JQ, Huang Y. 应用生物完整性指数评价水生态系统健康的研究进展[J].*应用生态学报*, 2013, 24: 295-302.
- [5] Xu F, Yang Z, Chen B, Zhao Y. Ecosystem health assessment of the plant-dominated Baiyangdian Lake based on eco-exergy[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222: 201-209.
- [6] Ludovisi A, Poletti A. Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems: 2. Exergy and specific exergy indices[J]. *Ecological Modelling*, 2003, 159: 223-238.
- [7] Silow EA, Mokry AV. Exergy as a tool for ecosystem health assessment[J]. *Entropy*, 2010, 12: 902-925.
- [8] Jørgensen SE. The application of ecological indicators to assess the ecological condition of a lake[J]. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 1995, 1: 177-182.
- [9] 李灿,李永,李嘉.湖泊健康评价指标体系及评价方法初探[J].*四川环境*, 2011, 30: 71-75.

(责任编辑:华智睿)