

基于熵权模糊综合评价法的白马湖生态系统健康评价

吴苏舒, 高士佩, 胡晓东, 徐季雄

(江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要: 以白马湖为研究对象, 根据白马湖管理和服务需求, 结合白马湖功能定位、生态健康要素现状特征和周边区域社会经济特征, 从水文特征、水质状况、水生态状况、物理形态结构、社会服务等 5 个方面筛选指标, 确立了白马湖生态系统健康评价指标体系, 建立了基于熵权的白马湖生态系统健康模糊综合评价模型。对 2014 ~ 2016 年白马湖生态健康进行现场调查及监测, 确定影响白马湖生态系统健康的主导因子, 以期为白马湖的科学开发、系统管理和有效保护提供理论依据。

关键词: 白马湖; 生态系统; 指标体系; 模糊综合评价法

中图分类号: X826

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 07-0017-07

Assessment on the ecosystem health of Baima Lake based on entropy weight fuzzy comprehensive evaluation

WU Sushu, GAO Shipai, HU Xiaodong, XU Jixiong

(Hydraulic Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, Jiangsu)

Abstract: Taking Baima Lake as a research object, and according to its management and service demands, considering its functions, ecology and socioeconomic characteristics, the article selected indicators from five aspects as hydrology, water quality, water ecology, physical form structure and social service. The evaluation index and fuzzy comprehensive evaluation model of Baima Lake ecosystem was established. Field investigation and monitoring were conducted on the ecological health of Baima Lake from 2014 to 2016 to determine the leading factors influencing the health of ecosystem, so as to provide a theoretical basis for the scientific development, system management, and effective protection of Baima Lake.

Key words: Baima Lake; ecosystem; evaluation index; fuzzy comprehensive evaluation method

白马湖作为区域生态系统的重要组成部分, 其健康状况和人类生存和发展密切相关。当前, 由于城市化进程不断加快, 白马湖生态系统已经受

到了比较严重的生态破坏与退化。国内外对湖泊生态系统健康评价的研究已取得了不少进展。基于生态系统, Rapport 等^[1]提出了生态健康评价指

收稿日期: 2018-03-20

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2015033)

作者简介: 吴苏舒 (1979—), 女, 博士, 高级工程师, 从事水文水资源及水生态环境方面的研究。

标, Karr 等^[2]提出了从水生生物完整性方面提出评价指标;刘永^[3]等建立了考虑水环境及水生态的指标体系,徐福留等^[4]从结构及生态缓冲能力等方面建立评价指标体系。在评价方法方面,主要有单因子评价法^[5]、层次分析法^[6]、灰色聚类法^[7]、人工神经网络评价法^[8]、投影寻踪法^[9]、模糊综合评价法^[10]等。模糊综合评价法的理论来源于模糊数学,对受到多个因素制约的事物或对象做出总体评价,在湖泊生态系统评价中得到了广泛应用^[11-14]。

1 研究区概况

白马湖地处淮河流域下游,是南水北调东线工程重要的过境湖泊,也是淮安市第二水源地,湖泊保护范围面积 113.4 km²,保护范围线长 77.05 km。湖泊为平原浅水型湖泊,原属草型湖泊。白马湖是江苏省十大湖泊之一,因 20 世纪围垦造田、圈圩养殖造成湖泊水面明显萎缩,调蓄洪涝能力明显下降。围垦、圈圩和围网养殖等开发利用面积占湖区水面的 92%,湖泊水面明显减小,调蓄能力下降;水体污染日益严重,富营养化趋势明显;无序、过度开发利用,生态环境呈逐年下降趋势。近年来,淮安市政府已投入数十亿元,通过退圩还湖、退渔还湖、尾水截留、环湖大道建设、生态清淤、生态修复等工程与非工程措施开展白马湖生态建设。为了解白马湖生态系统健康状况,保障南水北调东线工程及城市饮用水安全,本文开展了对白马湖生态系统健康评估工作。

2 白马湖生态状况

在白马湖湖区设置了 11 个采样点,各采样点分布详见图 1,按月调查浮游植物、浮游动物以及底栖动物。

2.1 浮游植物现状调查

2016 年在白马湖湖区共观察到浮游植物 65 属, 109 种,其中绿藻门的种类最多,有 26 属 50 种。2016 年白马湖浮游植物优势种,春季主要以硅藻门、绿藻门、蓝藻门、金藻门和隐藻门的浮游植物为主,夏季和秋季主要以蓝藻门、硅藻门和隐藻门的浮游植物为主,冬季主要以硅藻门、绿藻门和金藻门的浮游植物为主。

应用 Pantle ~ Buck 方法(1955)计算污染指数,对水质进行评价,公式如下:

$$SI = \sum (s \times h) / \sum h \quad (1)$$

式中, SI 为污染指数, s 为藻类污染指示等级, h 为该种藻类的估算数量分级。

水体污染指数 SI 在 1.0 ~ 1.5 之间,为中营养水平(轻度污染), 1.5 ~ 2.5 为中—富营养水平(中度污染), 2.5 ~ 3.5 为富营养水平(重度污染), 3.5 ~ 4.0 为超富营养水平(严重污染)。数据显示,白马湖的平均污染指数约为 2.4,说明白马湖整体处于中—富营养(中度污染)状态。其中位于生态养殖和景观娱乐区的白马湖北部干南河河口的 bmh2 和位于中部生态养殖区的 bmh6 样点的污染指数最高,均超过 2.5,达到了富营养水平(重度污染);位于东北部水源地保护区的 bmh4,南部阮桥河河口资源保留区的 bmh10 和景观娱乐区的 bmh11 样点,污染指数最低,均低于 2.3,说明该区

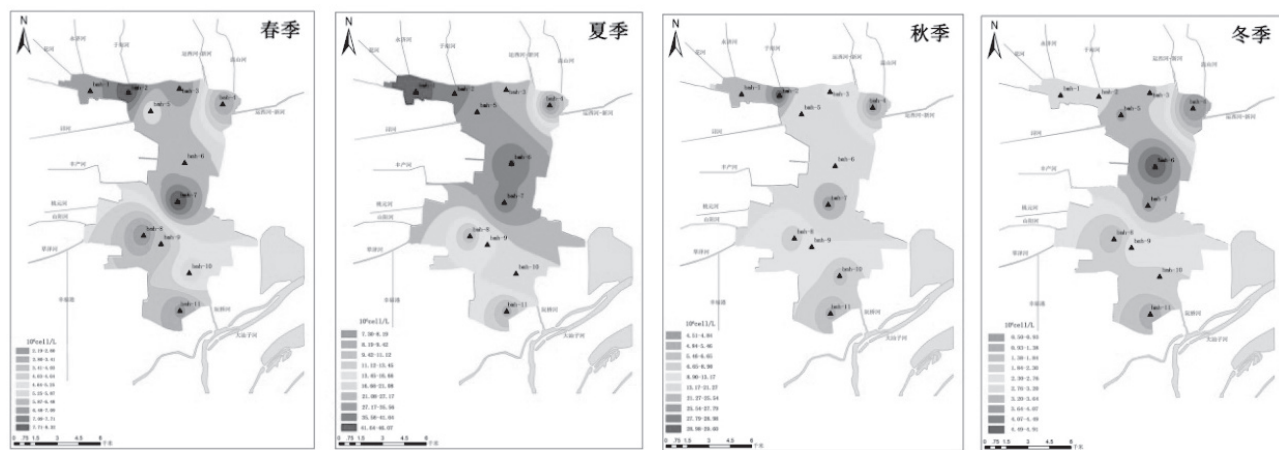


图 1 2016 年度白马湖各监测点浮游植物丰度空间分布差异

域水质相对较好。

2.2 浮游动物现状调查

全年浮游动物水样镜检见到的种类共有 56 种(含桡足类的无节幼体和桡足幼体),其中原生动物 18 种,占总种类的 32.1%;轮虫 22 种,占 39.3%;枝角类 7 种,占 12.5%;桡足类 9 种,占 16.1%。

根据臂尾轮虫 B 多是属于富营养型种,异尾轮虫 T 多是贫营养型种,提出了常用于评价水质营养情况的 B/T 指数。

$B/T = B$ (臂尾轮虫属的种数)/ T (异尾轮虫属的种数)。

当 $B/T < 1$ 时,为贫营养型湖泊;当 B/T 在 1 ~ 2 之间时,为中营养型湖泊;当 $B/T > 2$ 时,为富营养型湖泊。2016 年白马湖各站点的 QB/T 值变化范围为 1.7 ~ 3.0,均值为 2.2,所以白马湖整体上为富营养型湖泊。

2.3 底栖动物现状调查

2016 年 1 ~ 12 月期间白马湖共鉴定出底栖动物 16 种(属),其中摇蚊科幼虫种类最多,共计 8 种;寡毛类次之,共 3 种,主要为寡毛纲颤蚓科的种类;其次为软体动物,共 2 种;其他包括蛭类 2 种,分别为扁舌蛭和八目石蛭,以及中华小长臂虾 1 种。

应用 Shannon-wiener 生物多样性指数评价白马湖营养及污染状况。

$$\text{Shannon-wiener 指数} = - \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N} \times \ln \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

式中: n_i —第 i 个种的个体数目, N —群落中所有种的个体总数。

2016 年白马湖各站点的 Shannon-wiener 生物多样性指数值变化范围为 1.09 ~ 2.55,均值为 2.06,所以白马湖整体上为轻污染湖泊。

2.4 白马湖自由水面率现状调查

自由水面率是湖泊自由流动的水面占湖泊总面积的比例,是衡量湖泊水资源开发利用的程度的指标,湖泊总面积指正常蓄水位时的湖泊面积。自由水面率可用下列公式:

自由水面率 = [湖泊范围 - (圈圩范围 + 围网范围)] / 湖泊范围 × 100%。

经调查,白马湖 2014 年及 2016 年自由水面率分别为 0.408 及 0.683,详见下图 2。

3 评价指标体系的构建及计算



图 2 白马湖 2014、2016 年水域面积测算图

3.1 评价指标筛选及计算

湖泊生态健康包括湖泊生态系统结构的健康和功能的健康 2 个方面^[9]。本文主要从白马湖水文特征、水质状况、水生态、物理形态结构、社会服务 5 个方面进行分析,筛选能够反映白马湖生态健康状况的指标,见表 1。

3.3 评价等级确定

为了全面概括白马湖生态系统的健康状况, 本文将白马湖生态系统相对健康状况分为 5 个等级^[15], 1 级为白马湖生态系统很健康, 5 级为白马湖生态系统健康状态为病态。

上述是对白马湖生态系统健康 5 个级别的定性描述, 要对评价指标制定分级标准, 因为进行客观具体的评价需要将各评价指标量化分级^[16-18], 划分依据如下: 有国家或行业标准的, 优先采用标准; 无明确标准时, 参考国内外相关标准及研究成果, 其余查阅以往数据资料并结合白马湖区典型特征值。由此制定白马湖生态系统健康评价的分级标准, 如表 2 所示, 其中定性指标物理稳固性分级标准如表 3 所示。

4 白马湖生态系统健康综合评价模型构建

建立白马湖熵权模糊综合评价模型主要包括以下几个步骤:

①构建白马湖个综合评价指标的判断矩阵, n 为样本数, m 为模糊数;

②对于效益型指标, 通过下式进行标准化:

$$q_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}};$$
 对于成本型指标, 通过下式进行标
准化:
$$q_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}}。$$

③根据熵的定义 H_i 可用来度量第 i 项指标数据的效用价值, 得到第 i 项指标的熵为:

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \left(\sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right),$$
 其中, 经修正:
$$f_{ij} = \frac{1 + q_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + q_{ij})}。$$

④计算各指标的权重 $w_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)}$, 由

此得到权重集 $W = \{w_1, w_2, \cdots, w_m\}。$

⑤模糊合成后可得到白马湖模糊综合评价模型:

$$B = W \times R = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_m] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1c} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mc} \end{bmatrix}$$

表 1 白马湖生态系统健康评价指标体系

目标层 (A)	准则层 (B)	指标层 (C)	指标说明及计算方法
白马湖 健康 评价 指标 体系	水文特征指标 (B1)	湖泊蓄水量 (C1)	年平均蓄水位对应的蓄水量
		湖水交换能力 (C2)	年出湖水量与湖泊容积的比值
	水质状况指标 (B2)	TP (C3)	用于表征湖泊水体的质量及水体自净能力, 采用湖泊各水质监测点的平均值
		TN (C4)	
		Chl-a (C5)	
		DO (C6)	
		透明度 (C7)	
	水生态指标 (B3)	浮游植物生物量 (C8)	表征湖泊生态系统结构的完整性, 采用各采样点浮游植物生物量的平均值
		浮游动物生物量 (C9)	表征湖泊生态系统结构的完整性, 采用各采样点浮游动物生物量的平均值
		底栖动物多样性指数 (C10)	采用 Shannon-Wiener 多样性指数公式
	物理形态结构指标 (B4)	自由水面率 (C11)	湖泊自由流动的水面占湖泊总面积的比值
		入湖门口通畅率 (C12)	湖泊门口与周围水体畅通程度
		物理稳固性 (C13)	包括河湖岸坡稳定性及湖泊湖盆稳定性, 定性分析并赋予分值
	社会服务 (B5)	水功能区达标率 (C14)	湖泊供水水质保障能力
		调蓄指数 (C15)	湖泊调洪保洪的能力

表 2 白马湖生态系统健康评价指标标准

评价指标	指标等级				
	很健康	健康	亚健康	微病态	病态
湖泊蓄水量 / (亿 m ³)	37.3	28.23	12.97	6.09	5.46
湖水交换能力	8	6	5	3	2
TP/ (μg/L)	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2
TN (mg/L)	0.2	0.35	0.75	1.25	1.75
Chl-a (μg/L)	10	20	40	60	85
DO (mg/L)	7.5	6	5.5	4	2.5
透明度 / (m)	2.5	1.7	0.7	0.4	0.2
SI 指数	1.0	1.5	2.5	3.5	4.0
B/T 指数	0.5	1.0	1.5	2	2.5
底栖动物多样性指数	3.5	3	2	1.5	1
自由水面率	0.8	0.65	0.5	0.35	0.2
入湖门口通畅率	0.9	0.75	0.6	0.4	0.2
物理稳固性	9.5	8	6	4	2
水功能区达标率	0.9	0.8	0.65	0.5	0.4
调蓄指数	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5

5 结果及分析

表 3 白马湖物理稳固性分级标准

级别	湖泊护岸形式	分值
很健康	有植被覆盖的自然土质岸坡	9
健康	近自然的斜坡式生态护岸	8
亚健康	亲水平台护岸或无植被的土质岸坡	6
微病态	台阶式人工护岸或浆砌块石护岸	4
病态	直立式钢筋混凝土	2

5.1 熵权模糊综合评价结果

5.1.1 数据处理

选取 2014 ~ 2016 年的数据通过表 1 的计算方法得到各指标的指标值, 见表 4。

5.1.2 隶属度确定

由各指标的隶属度函数计算得到各评价指标的隶属矩阵, 根据最大隶属度原则, 选择隶属度最大值所对应的等级作为评估的最终结果, 得到

各指标所属等级, 见表 4。

5.1.3 指标权重确定

通过 SPSS 软件对指标标准化, 建立指标标准化阵, 通过所建立的判断矩阵及熵的计算方法, 可得到熵值; 根据熵权可以计算各指标的差异系数, 由权重计算公式, 可以得到各指标的权重, 见表 4。

5.1.4 熵权模糊综合评价

将所得的隶属度矩阵及权重集带入熵权模糊综合评价模型, 通过模糊合成, 得到 2014、2016 年对生态系统健康 5 个等级的隶属度, 结果如表 5 所示。

由表 5 可得, 隶属度最大值分别为 0.4172 及 0.3835, 分别对应于一般病态及亚健康。这一评判结果说明白马湖整体生态系统健康状况尽管不是太好, 但呈现出上升的趋势, 说明近年来对白马湖退圩还湖的治理措施已取得了初步成效。

5.2 结论和分析

由权重大小和差异系数可以得出各评价因子

表 4 白马湖 2014 ~ 2016 年各指标年平均值及熵权

评价指标	指标值				熵权
	2014	等级	2016	等级	
湖泊蓄水量 / (亿 m ³)	1.3184	微病态	1.7945	微病态	0.0335
湖水交换能力	5.7	健康	5.84	健康	0.0316
TP/ (μg/L)	0.072	微病态	0.08	微病态	0.0794
TN (mg/L)	1.28	微病态	1.47	微病态	0.0835
Chl-a (μg/L)	15.04	健康	12.23	健康	0.0719
DO (mg/L)	7.32	健康	9.49	很健康	0.0738
透明度 / (m)	0.73	亚健康	0.61	亚健康	0.0673
SI 指数	2.16	亚健康	2.4	亚健康	0.0705
B/T 指数	3.5	病态	2.2	病态	0.0729
底栖动物多样性指数	2.06	亚健康	3.03	健康	0.0768
自由水面率	0.408	微病态	0.683	健康	0.0775
入湖门口通畅率	0.75	健康	0.8	健康	0.0431
物理稳固性	7	健康	7.5	健康	0.0763
水功能区达标率	0.333	病态	0.417	微病态	0.0562
调蓄指数	0.564	微病态	0.663	亚健康	0.0857

表 5 2014、2016 年各健康等级的隶属度

年份	对各级别的隶属度					所属级别
	很健康	健康	亚健康	一般病态	病态	
2014	0.0634	0.0872	0.2153	0.4172	0.2169	病态
2016	0.131	0.1185	0.3835	0.2693	0.0977	亚健康

对白马湖生态系统健康的影响程度从大到小依次为: 调蓄指数、TN、TP、自由水面率、底栖动物多样性指数、物理稳固性、DO、浮游动物生物量、Chl-a、浮游植物生物量、透明度、水功能区达标率、入湖门口通畅率、湖泊蓄水量、湖水交换能力。湖泊的调蓄指数是影响湖泊水环境质量及各项服务功能的重要因素。由于近年来白马湖过度的围垦、围网养殖, 白马湖面积与容积不断减小, 湖泊的自净能力随之减弱, 防洪调蓄能力也不断削弱。同时,

白马湖连续 3 年的水功能区达标率均不到 50%, 作为淮安市第二水源地, 水质状况较差, 社会服务功能有待提高。此外, 对比白马湖 2014 ~ 2016 年的自由水面率可知, 白马湖的自由水面在不断扩大, 退圩还湖工程已初见成效。

鉴于此, 对白马湖提出以下治理建议: ①白马湖环湖主要分布有大量的农田以及村庄, 表现为分散非点源污染, 目前针对此类污染源的控制收效甚微。现阶段监测结果显示白马湖营养状态仍

处于中度富营养状态,作为浅水型湖泊,富营养化治理工作不容懈怠;②最近几年,通过对湖内养殖围网进行大幅度整治,使得白马湖围网占有面积大幅度下降,应继续推进退渔还湖工作,减少围网养殖,扩大自由水域面积,保持湖泊生态系统的平衡;③白马湖湖形为两头大、中间小,南北湖区水体的交换依赖于中间的狭长通道,白马湖湖区内存在着大量的资源开发利用活动,严重阻碍了湖水的交换及对流,应优先推进中部湖区退渔还湖措施,改善局部富营养化状态。

参考文献:

- [1] Rapport DJ, Costanza R, Mc Michael AJ. Assessing ecosystem health[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1998, 13(10):397.
- [2] Karr JR. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries, 1981, 6(6):21-27.
- [3] 刘永,郭怀成,戴永立,等.湖泊生态系统健康评价方法研究[J].环境科学学报,2004,24(4):723-729.
- [4] XU F L, DAWSON R W, TAO S. A method for lake ecosystem health assessment: an ecological modeling method and its application[J]. Hydrobiologica, 2001, 443(1-3):159-175.
- [5] 曾永,樊引琴,王丽伟.水质模糊综合评价法与单因子指数评价法比较[J].人民黄河,2007,29(2):64-65.
- [6] Pan Feng, Fu Qiang, Liang Chuan. Application of fuzzy comprehensive evaluation based on AHP in quality evaluation of water environment. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2003, 28(8):22-24.
- [7] 李晴新.天津及附近海域海岸带生态系统健康评价研究[D].天津:南开大学,2010.
- [8] 李福,郭建.改进的BP神经网络算法在水质监测中的应用[J].计算机系统应用,2015,24(1):243-247.
- [9] 薛联青,朱祯真,王思琪,等.基于投影寻踪的湖泊生态健康评价[J].水资源保护,2016,32(2):67-72.
- [10] 吴会民,张韦,梁传辉,等.用熵权模糊综合评价法评价养殖池塘水质状况的研究[J].安徽农业科学,2012,40(10):6110-6112.
- [11] Wang Peizhuang. Abstract about fuzzy mathematics [I]. Mathematics in Practice and Theory, 1980(2):45-59.
- [12] 许文杰,曹升乐.基于PSR熵权综合健康指数法的城市湖泊生态系统健康评价[J].水文,2010,30(5):64-68.
- [13] 吴易雯,李莹杰,张列宇,等.基于主客观赋权模糊综合评价法的湖泊水生态系统健康评价[J].湖泊科学,2017,29(5):1091-1102.
- [14] 池源,李升峰.基于改良模糊综合评价法的城市湖泊水环境质量分析——以南京玄武湖为例.华中师范大学学报:自然科学版,2013,47(1):124-128.
- [15] HASLE G R. Phytoplankton manual: monographs on oceanographic methodology[M]. Paris: UNESCO, 1978.
- [16] 李冰,杨桂山.湖泊生态系统健康评价方法研究进展[J].水利水电科技进展,2014(34).
- [17] 黄琪等.长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价[J].生态学报,2016,26(1):118-126.
- [18] 张新星,郝达平.白马湖健康评估实践与探索[J].水文水资源,2017,23(5):10-12.
- [19] 潘妍妍,赵存.模糊评价法在潞安矿区水质评价中的应用[J].煤炭技术,2010,29(5):10-12.