

基于模糊 AHP 的长寿湖生态系统健康评价

刘存东¹, 何太蓉^{1,2}, 苏维词^{1,3}

(1. 重庆师范大学地理科学学院, 重庆 400047; 2. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;
3. 贵州科学院山地资源研究所, 贵州 贵阳 55000)

摘要:生态系统健康评价是当前生态学研究领域的一个焦点和热点, 目前尚没有统一的评价指标和方法。根据长寿湖区域自然人文特征和已有研究成果, 建立了生态特征指标、功能作用指标和社会经济指标 3 个亚类、20 个指标的生态系统健康评价体系, 基于模糊层次分析 (FAHP) 的生态系统健康指数, 对其生态健康进行了初步评价, 得出 2006 年长寿湖生态系统健康指数为 0.471。表明长寿湖生态系统处于亚健康状态, 其主要原因在于长期受到上游垫江县、梁平县排放的工业污水污染及湖区网栏养鱼的影响。

关键词:生态系统健康评价; 模糊层次分析; 长寿湖

中图分类号: Q332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2009)06-0057-05

健康的生态系统为人类提供了自然资源和生存环境的多种服务功能, 生态系统服务功能是人类生存和发展的基础 (马克明等, 2001)。但随着人类对生态系统干预的增强, 地球上已经不存在未受人类影响的生态系统了 (Cairns & Munawar, 1994), 生态系统正承受着各种各样由人类社会所带来的巨大压力, 同时也对人类生存和发展构成了威胁。20 世纪 80 年代, 生态系统健康 (ecosystem health) 应运而生, 它从理论与实践两方面研究了生态系统结构与功能的现状、发展规律、修复对策等问题, 为解决生态环境问题、生态系统管理以及实现可持续发展提供理论与方法 (尹连庆和解莉, 2007)。

被誉为“地球之肾”的湿地生态系统是一个自然-经济-社会复合系统, 其生态系统健康评价指标的选取不仅要考虑生态、经济、社会要素相整合, 而且还需要考虑不同管理条件下所导致的湿地生态过程、经济结构、社会组成的动态变化, 以利于维持湿地系统的持续性 (Simpson, 1998)。湿地生态系统在各类型生态系统中的效益价值最高 (陈仲新和张新时, 2000), 成为野生动植物的栖息地和繁殖地。湖

泊湿地又是人类主要的生境所在, 但随着社会经济的发展, 湿地内的资源和生态系统受到了越来越多的外界胁迫, 湖泊污染和生态退化已成为目前我国面临的重要生态环境问题 (吴刚和蔡庆华, 1998; 邓红兵等, 1998)。因此, 本文选择具有典型性的西南地区最大人工湖泊——长寿湖流域湿地生态系统为研究对象, 根据区域自然人文特征, 建立了健康评价指标体系, 基于模糊 AHP 的生态系统健康指数对其生态健康进行了初步评价, 为保证长寿湖水资源安全、湖泊湿地生态系统健康的监测、湿地保护及科学管理提供依据。

1 研究区概况

长寿湖位于重庆市长寿区境内, 北纬 $29^{\circ}50'$ ~ $30^{\circ}04'$, 东经 $107^{\circ}15'$ ~ $107^{\circ}25'$, 水域面积约 60 km^2 , 总库容 10.27 亿 m^3 , 是西南地区最大的人工湖泊, 同时也是重庆市重要的淡水鱼养殖基地之一; 属于中亚热带湿润气候区, 雨量充沛, 由河流型生态系统演变为湖泊型生态系统, 形成了独特的局部气候。常年平均气温 17.7°C , 年降水量 1 128.8 mm, 降水多集中在 5 ~ 10 月。长寿湖的主要水源是龙溪河, 多年径流量为 $54.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 是重庆市辖区内流入长江的主要河流。随着旅游业、养殖业的蓬勃发展, 长寿湖已经成为集饮用、灌溉、旅游、养殖、发电为一体的多功能水体 (杨志敏等, 2005)。区内人多地少, 土地垦殖系数高, 植被覆盖度较低, 水土流失现象较为严重。长寿湖水质类别总体可达到 III 类水标准, TP、TN 污染严重 (杨钢等, 2003)。

收稿日期: 2009-03-02

基金项目: 重庆市软科学计划项目 (CSTC2008CE9095); 重庆市自然科学基金 (CSTC, 2007BB7225); 重庆市教委科技资助项目 (KJ080803); 重庆师范大学人文地理学市级重点学科资助。

通讯作者: 何太蓉, 1973 年生, 女, 博士, 副教授。E-mail: he_trong@263.net

作者简介: 刘存东, 1981 年生, 男, 山东滕州人, 硕士, 主要从事环境灾害与生态保护方面的研究。E-mail: liucundong@163.com

2 评价体系与方法

2.1 建立指标体系及评价标准

参考前人研究成果(崔保山和杨志峰,2002;罗跃初等,2003;刘永等,2004;蒋卫国等,2005;林木隆等,2006;龙笛和张思聪,2006;张祖陆等,2008;李春晖等,2008),依据长寿湖组成、结构和功能特征的分析,结合相关的外部社会经济资料,最终共筛选出20个评价指标,构建了长寿湖生态系统健康评价的指标体系。考虑设置指标数据的可得性与可操作性,选择其中的12项指标进行生态健康评价。

在生态系统健康提出之后,评价标准一直是生态系统健康评价最困难的问题之一,目前学术界尚没有统一认可的生态系统健康标准(曾勇等,2005)。本文在确定生态系统健康具体操作标准时,查阅历史资料,借鉴相关研究成果,进行实地考察并与其它湖泊湿地对比分析,将长寿湖生态系统健康评价标准分为很健康、健康、亚健康、不健康、病态5个等级(官冬杰等,2007),每个级别赋予不同分值,分别为1.0、0.8、0.6、0.4、0.2,进行标准化处理(表1)。

有关指标的计算公式如下:①湿地面积变化率=(洪水期水域面积-枯水期水域面积)/常年水域面积 $\times 100\%$ 。②水生生物多样性计算方法为: $a =$

$(S/\sqrt{N}) \times 100\%$,式中: S 为种类数, N 为个体数;以水禽来替代水生生物计算多样性。③生物第一性潜在生产力利用迈阿密模型(李春晖等,2008)进行计算: $NPPt = 3000/[1 + \exp(1.315 - 0.119t)]$; $NPPR = 3000[1 - \exp(-0.000664R)]$; $NPP = \min(NPPt, NPPR)$;式中: t 为年平均气温($^{\circ}\text{C}$), R 为年平均降水量(mm)。④水质净化率:以水生植物对N、P的去除率来替代。⑤污水处理达标率=污水处理达标量/污水排放总量 $\times 100\%$ 。⑥物质生活指数以人均年收入水平来替代。

2.2 计算指标权重

评价指标的权重决定了各个因子对生态系统健康状况的贡献大小。为了避免片面性和主观性,应针对区域实际特点,采用合理的技术方法来确定指标权重。本文采用模糊集合论与决策理论相结合的产物——模糊层次分析法(FAHP)并结合专家评判的方法加以合理确定(高虹霓等,2001)。模糊AHP是AHP在模糊环境下的扩展形式。

2.2.1 计算步骤

1) 建立优先关系矩阵 $F = (f_{ij})_{m \times m}$

$$f_{ij} = \begin{cases} 0.5, & s(i) = s(j) \\ 1.0, & s(i) > s(j) \\ 0.0, & s(i) < s(j) \end{cases}$$

表1 长寿湖生态系统健康指标体系及指标量化标准

Tab.1 Indicators system and quantification standard of the Changshou lake ecosystem health assessment

要素	具体指标	标准化分值				
		很健康	健康	亚健康	不健康	病态
		>0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.4~0.2	<0.2
生态特征指标	水质类别	I	II	III	IV	V
	河道、湖泊冲刷淤积	-	-	-	-	-
	湿地面积变化率/%	<2	2~4	4~6	6~8	>8
	生物量	-	-	-	-	-
	动、植物个体尺度	-	-	-	-	-
	水生生物多样性指数/%	>40	40~30	30~20	20~10	<10
功能作用指标	生物第一性潜在生产力/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	>1 000	1 000~800	800~600	600~400	<400
	对局部气候的影响	-	-	-	-	-
	水文调节功能	-	-	-	-	-
	水质净化率/%	>80	80~60	60~40	40~20	<20
	富营养化或水生植物状况	-	-	-	-	-
	观赏游憩价值/万元	>8 000	6 000~5 000	5 000~4 000	3 000~2 000	<2 000
	鱼类生产/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	>100	80~70	70~60	60~50	<50
	年平均出湖流量/亿 m^3	>20	20~15	15~10	10~5	<5
社会经济指标	周边人口素质	-	-	-	-	-
	人口密度/人 $\cdot \text{km}^{-2}$	<100	100~300	300~500	500~700	>700
	物质生活指数/元 $\cdot \text{a}^{-1}$	>4 000	4 000~3 000	3 000~2 000	2 000~1 000	<1 000
	污水处理达标率/%	>80	80~70	70~60	60~50	<50
	化肥农药利用率/%	>50	50~40	40~30	30~20	<10
	环保投资指数	-	-	-	-	-

其中: $s(i)$ 和 $s(j)$ 分别表示指标 f_i 和 f_j 的相对重要性程度。

2) 将优先关系矩阵 F 改造成模糊一致矩阵 R , 即先对 F 按行求和, 记为:

$$r_i = \sum_{k=1}^m f_{ik} \quad i=1,2,3,\cdots,m$$

然后作变换:
$$r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2m} + 0.5$$

由此建立的判断矩阵可以保证模糊一致性。

3) 指标权重计算

模糊一致判断矩阵每行元素的和(不含自身比较):

$$l_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} - 0.5 \quad i=1,2,3,\cdots,m$$

由于 l_i 表示出指标 i 相对于上层目标的重要性,所以对 l_i 归一化即可得到各指标权重:

$$w_i = l_i / \sum l_i = 2l_i / m(m-1)$$

2.3 生态健康综合评价

生态健康综合评价采样以下公式:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i W_i$$

式中: E 为整个生态系统的健康指数, W_i 为第 i 评价指标的权重, n 为系统评估指标个数, E_i 为第 i 指标标准化后的值。

3 结果分析

3.1 指标权重

运用模糊层次分析法计算出长寿湖生态系统健康评价各级指标的权重(表 2)。需要说明的是,生态特征、功能作用和社会经济 3 大类指标相比较而言,生态特征是系统健康存在的基本体现,而社会经济发展状况及人们对湖泊的重视程度同样制约着系

统的健康,因而二者同等重要,功能作用是上述二者协调发展的功能体现,因而在三者比较中是次重要的(崔宝山和杨志峰,2002)。

表 2 长寿湖生态系统健康评价指标权重

Tab.2 Indicators weight of the Changshou lake ecosystem health assessment

要素	权重	指标	分项权重	总权重
生态特征指标	0.417	水质类别	0.375	0.156
		湿地面积变化率	0.167	0.070
		水生生物多样性指数	0.167	0.070
		生物第一性潜在生产力	0.291	0.121
功能作用指标	0.167	水质净化率	0.375	0.063
		观赏游憩价值	0.208	0.035
		鱼类生产	0.125	0.021
		年平均出湖径流量	0.292	0.049
社会经济指标	0.417	人口密度	0.375	0.156
		物质生活指数	0.125	0.052
		污水处理达标率	0.292	0.122
		化肥农药利用率	0.208	0.087

3.2 生态健康评价

评价中所涉及到的原始数据来自重庆市统计年鉴(2007)、重庆市环境质量报告书(2006)和重庆市长寿湖风景名胜区总体规划(重庆大学城市规划与设计研究院,2006),利用前述评价体系和计算权重,得出长寿湖 2006 年生态系统健康评价结果。

从最终评价结果看(表 3),2006 年长寿湖生态系统健康指数为 0.471,生态系统整体处于亚健康状态;其中,水质净化率的标准化值最低,这与其生物结构有关,长寿湖没有大面积的漂浮植物、挺水植物和浮叶植物,而这些植物可以吸收大部分的氮、磷,对湖泊水质的净化起到关键作用。污水处理率也处于不健康状态,经调查,长寿湖主要水源龙溪河的水质污染主要是由于梁平县和垫江县的生活污

表 3 长寿湖生态健康评价结果

Tab.3 Ecosystem health assessment conclusion of the Changshou lake

要素	指标	数据	权重	标准化数值	评价等级
生态特征指标	水质类别	Ⅲ	0.156	0.50	亚健康
	湿地面积变化率/%	5	0.070	0.50	亚健康
	水生生物多样性指数/%	22.4	0.070	0.45	亚健康
	生物第一性潜在生产力/ $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$	935.67	0.121	0.74	健康
功能作用指标	水质净化率/%	25	0.063	0.25	不健康
	观赏游憩价值/万元	5 120	0.035	0.62	健康
	鱼类生产/ $g \cdot m^{-2}$	76.92	0.021	0.74	健康
	年平均出湖径流量/亿 m^3	7.48	0.049	0.30	不健康
社会经济指标	人口密度/人 $\cdot km^{-2}$	493	0.156	0.41	亚健康
	物质生活指数/元 $\cdot a^{-1}$	3 480	0.052	0.69	健康
	污水处理达标率/%	54	0.122	0.28	不健康
	化肥农药利用率/%	30	0.087	0.40	亚健康
长寿湖生态系统健康指数			0.471		亚健康

水、酿酒、造纸等行业排放废水造成,而这些污水大多未达到排放要求;另外,湖区内实行大面积肥水性网栏养殖,投放大量的化肥、鸡粪,最终导致水库的水质下降,长寿湖处于长江一级支流龙溪河流域,其水质状况将直接威胁到长江水质的安全,应引起注意。观赏游憩价值、鱼类生产、物质生活指数等指标虽然处于健康状态,但由于权重较小,因而对生态系统健康贡献不大。

4 结论

根据长寿湖的区域特点,全面考虑其生态问题,从生态特征指标、功能作用指标和社会经济指标3方面建立了长寿湖生态系统健康综合评价指标体系,运用模糊层次分析法(FAHP)确定了各指标的权重,计算出生态系统的健康指数,并将生态系统健康状况分为很健康、健康、亚健康、不健康、病态共5个等级。结果表明,2006年长寿湖生态系统处于亚健康状态。

本文在选择评价指标时,考虑数据的可得性与可操作性,仅选用12个指标,而要获得湖泊生态系统健康状况的全面信息,必须选择尽可能多的指标,进行综合评价,以避免某些单一指标反映的片面情况。生态系统健康及其评价是一个正在逐步发展的理论方法体系,对如何确定全面合理的评价指标体系,如何在确定指标权重时避免片面性和主观性,如何在评价中利用3S技术,都有待于进一步探讨。

参考文献:

- 陈仲新,张新时. 2000. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报, 45(1):17-22.
- 崔保山,杨志峰. 2002. 湿地生态系统健康评价指标体系Ⅱ. 方法与案例[J]. 生态学报, 22(8):1231-1240.
- 邓红兵,王庆礼,蔡庆华. 1998. 流域生态学——新学科、新思想、新途径[J]. 应用生态学报, 9(4):443-449.
- 高虹霓,杨建军,曹泽阳. 2001. 基于模糊 AHP 的道路选优评价方法研究[J]. 空军工程大学学报自然科学版, 2(2):82-84.
- 官冬杰,苏维词,周继霞. 2007. 重庆都市圈生态系统健康评价研究[J]. 地域研究与开发, 26(4):102-106.
- 蒋卫国,李京,李加洪,等. 2005. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报, 25(3):408-414.
- 李春晖,郑小康,崔嵬,等. 2008. 衡水湖流域生态系统健康评价[J]. 地理研究, 27(3):565-573.
- 林木隆,李向阳,杨明海. 2006. 珠江流域河流健康评价指标体系初探[J]. 人民珠江, (4):1-3.
- 刘永,郭怀成,戴永立,等. 2004. 湖泊生态系统健康评价方法研究[J]. 环境科学学报, 24(4):723-729.
- 龙笛,张思聪. 2006. 滦河流域生态系统健康评价研究[J]. 中国水土保持, (3):14-17.
- 罗跃初,周忠轩,孙铁,等. 2003. 流域生态系统健康评价方法[J]. 生态学报, 23(8):1606-1614.
- 马克明,孔红梅,关文彬,等. 2001. 生态系统健康评价方法与方向[J]. 生态学报, 21(12):2106-2116.
- 吴刚,蔡庆华. 1998. 流域生态学研究内容的整体表述[J]. 生态学报, 18(6):575-581.
- 杨钢,张晟,李崇明,等. 2003. 重庆长寿湖水水质富营养化的调查及评价[J]. 西南师范大学学报自然科学版, 28(3):492-495.
- 杨志敏,熊海灵,张晟,等. 2005. 重庆长寿湖富营养化评价及氮磷平衡研究[J]. 水土保持学报, 19(2):73-75.
- 尹连庆,解莉. 2007. 生态系统健康评价的研究进展[J]. 环境科学与管理, 32(11):163-176.
- 曾勇,沈根祥,黄沈发,等. 2005. 上海城市生态系统健康评价[J]. 长江流域资源与环境, 14(2):208-212.
- 张祖陆,梁春玲,管延波. 2008. 南四湖湖泊湿地生态健康评价[J]. 中国人口资源与环境, 18(1):181-184.
- Cairns J Jr, Munawar M (ed). 1994. Ecosystem health through ecological restoration: barriers and opportunities[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 3(1):5-14.
- Simpson R D. 1998. Economic analysis and ecosystems: Some concepts and issues. [J] Ecological Applications, 8(2):342-349.

(责任编辑 万月华)

Evaluation of Changshou Lake Ecosystem Health on the Basis of Fuzzy AHP

LIU Cun-dong¹, HE Tai-rong^{1,2}, SU Wei-ci^{1,3}

(1. Geography Science College of Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. Key laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment,
Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. Institute of Mountain Resources of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: Ecosystem health assessment is a focus and hot spots field of ecological research, there is no unified evaluation indicators and evaluation methods. First, according to the area physical, human features of the Changshou lake and existed research, We established ecosystem health evaluation system which has included three secondary indexes: the ecological characteristics indicators, the function indicators and the socio – economic indicators, and has 20 indicators. Second, we assess the Changshou lake ecosystem with the ecosystem health index which based on the fuzzy AHP. The conclusions are as follows: in 2006, the Changshou lake ecosystem health index was 0.471, it is showed that the ecosystem is in sub health, the mainly reasons is its upper reaches of the Dianjiang county, Liangping county long – term discharge of industrial sewage and pollution of fencing fish.

Key words: Ecosystem health assessment; FAHP; Changshou lake