

基于 PSR 模型的乌梁素海生态系统健康分区评价*

毛旭锋^{1,2}, 崔丽娟¹, 张曼胤¹

(1: 中国林业科学研究院湿地研究所, 北京 100091)

(2: 青海师范大学生命与地理科学学院, 西宁 810006)

摘要: 在压力-状态-响应 (Pressure-State-Response, PSR) 模型的基础上, 诊断了内蒙古乌梁素海不同湖区的生态系统健康状况。从湖泊生态环境特征、生态功能和社会环境 3 个方面筛选出 25 项诊断指标, 在专家打分法的基础上, 采用层次分析法确定每项指标的权重。根据湖区生态环境特征差异, 将湖泊划分为 I、II 和 III 3 个不同的区域, 分别诊断各个区域的健康状态。结果显示, 乌梁素海生态系统综合健康指数在 0.3~0.5 之间, 属于警戒或者较差的状态。I、II 和 III 区域的综合健康指数分别为 0.3395、0.3866 和 0.4494。基于湖泊的生态系统健康存在区位上差异, 为恢复湖泊健康提出有针对性的措施。本研究的开展, 可为湖泊生态系统恢复和管理政策的制定提供科学依据。

关键词: 湖泊生态系统; 健康评价; PSR 模型; 乌梁素海

A PSR-model-based regional health assessment of the Lake Wuliangsuhai

MAO Xufeng^{1,2}, CUI Lijuan¹ & ZHANG Manyin¹

(1: *Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, P. R. China*)

(2: *College of Life and Geography Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810006, P. R. China*)

Abstract: A Pressure-State-Response (PSR) model was developed to diagnose the sub-regional health of the Lake Wuliangsuhai in the Inner Mongolia. A total of 25 indicators including ecological character indicators, ecological function indicators and social environment indicators were combined to assess the ecosystem health of the lake. Expert Evaluation Method (EEM) and Analytic Hierarchy Process (AHP) were used to identify the weight of each indicator. The Lake Wuliangsuhai was classified into three sub-regions (I, II and III) in consideration of their ecological and environmental characteristics. Results indicate that the lake is staying in a state of alarming or worse quality. The Comprehensive Health Indices (CHI) of three sub-regions are 0.3395, 0.3866 and 0.4494, respectively, reflecting obvious regional differences in the lake ecosystem health. The current study may provide useful information for wetland restoration and management.

Keywords: Lake ecosystem; health assessment; PSR model; Lake Wuliangsuhai

中国湖泊众多, 面积在 1 km² 以上的天然湖泊就有 2800 多个。湖泊不仅提供了涵养水源、抵御洪水、调节气候、净化污染、野生动植物栖息地等生态功能, 而且提供了丰富的产品资源、历史迹地和休闲观光场所等社会服务功能, 对于地区生态环境维持具有不可替代的作用^[1]。

在自然和人类扰动日益加剧、湖泊生态环境日益退化的背景下, 定量分析湖泊生态健康特征, 评价湖泊生态系统健康状态, 对合理利用有限的湖泊资源、实现湖泊生态系统的科学管理和有效恢复具有重要的理论和现实意义, 生态系统健康已经成为环境管理的新目标^[2]。早在 1980s, Rapport 等就提出用生态系统压力指标评估湖泊生态系统健康程度^[3], 而不同压力状态下湖泊的生产力和生物网络的完整性也可以用来判断湖泊的健康状态^[4-5]。Constanza 等提出的生态系统健康概念得到广泛认可^[2], 共涵盖 6 个方面: 自我平衡、没有病征、多样性、有恢复力、有活力和能够保持系统组分间的平衡, 不同学者提出的指标多涵盖于其中。Ul-

* 国家科技支撑计划课题项目(2011BAC02B03)、中央公益性科研院所专项项目(CAFINT2012C09)和国家林业公益性行业科研专项项目(201304315)联合资助。2012-12-20 收稿; 2013-04-28 收修改稿。毛旭锋, 男, 1981 年生, 博士, 助理研究员; E-mail: nanpishu1234@163.com.

anowicz 从食物网络结构中营养物质流角度评价了湖泊生态系统健康^[2]. 热力学指标也因简单快速的特点被广泛和深入地应用到湖泊生态健康评价^[6], 研究案例区包括巢湖等国内外不同类型湖泊^[7-10]. 随着研究的深入, 除生态系统以外的包括社会、经济和人口健康等方面的指标也逐渐被关注^[11]. 生态系统不同功能组的状态也被用来指示湖泊生态系统的健康^[12]. 在借鉴国外研究的基础上, 刘永等^[13]从生态系统完整性和湖泊内物质循环等角度研究了湖泊生态系统的健康. 胡志新等^[14]用系统能、系统能结构、生态缓冲容量和湖泊营养状态指数表征湖泊生态系统健康. 由于指标众多, 对现有的评价指标的总结和分析研究也开展起来^[15].

在评价方法上, Jørgensen 提出了一套初步评价方法^[6]; 而生态系统健康指数法也被提出并被广泛应用^[7-10, 16]. 此外, 人工神经网络方法^[17]、层次分析法^[18]等也不断应用到湖泊生态系统健康评估中. 随着研究的深入, 人们发现生态系统健康并非反映在系统本身, 湖泊系统的外在压力下系统呈现的状态以及人类对系统压力的反应, 都是衡量湖泊生态系统健康的重要因子. 因此, 一些学者将 PSR 模型应用到生态系统健康评估中^[19-20]. 然而, 湖泊由于植被分布、地形变化、水文特征的差异, 不同湖区健康状态也会不同, 尤其是面积较大的湖泊, 区别更是明显^[21]. 用一个评价指标反映整个湖区健康状态, 并不能客观、准确地反映不同湖区的健康状态. 因此, 本研究在 PSR 模型的基础上, 以内蒙古乌梁素海为例, 开展湖泊生态系统健康分区评价研究, 以期推动湖泊生态系统健康评价体系和方法的完善, 为湖泊生态系统科学有效的管理提供有效信息.

1 研究区概况

乌梁素海(40°36'~41°03'N, 108°43'~108°57'E)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内(图1). 乌梁素海现有水域面积 292 km², 湖面高程海拔 1018 m, 湖水深度多数区域在 0.5~2.5 m 之间, 多年平均水深为 0.7 m. 湖泊呈南北长、东西窄的狭长形态, 其中南北长 35~40 km, 东西宽 5~10 km, 蓄水 2.5×10⁸~3.0×10⁸ m³. 它是我国第八大淡水湖, 也是黄河流域同纬度最大的淡水湖, 对改善周边地区气候、气象条件、增加大气降水、维持当地的生态平衡有着极为重要的作用.

近几十年来, 随着上游工、农业生产的发展和城镇人口的增加, 每年都有相当数量的农田退水、工业污水和城镇生活污水通过总排干进入湖中, 使乌梁素海的水质受到了严重污染、水体富营养化严重、生态系统退化迅速, 严重影响到当地的生态安全. 由于湖泊主要的水源为排干排入的上游农田退水、工业废水和生活污水, 由湖区南部出口排出. 所以湖区由北向南的水质污染程度和富营养化程度是逐渐降低的, 不同湖区生态系统健康呈现不同的水平. 根据乌梁素海环境污染的特征和消减规律^[22], 将湖区划分为 I、II 和 III 3 个区. I 区为湖区西北部入水口附近, II 区位于湖区中部, III 区为湖区西南部出水口附近区域. 开展乌梁素海湿地生态健康分区评价研究, 以期找出其湖泊健康退化的主要原因, 并提出有效保护、恢复及合理利用乌梁素海湿地的措施.

2 评价指标与方法

2.1 评价指标体系

综合考虑乌梁素海社会、经济和环境现状, 从湖泊的压力、状态和响应 3 个角度选取湖泊健康评价指标, 确定生态环境特征、生态功能和社会环境 3 类不同但又相互联系的 25 项指标及其量化标准, 构建出适合该地区湖泊生态系统健康评价的指标体系. 压力指标反映人类活动给湿地生态系统所带来的影响与胁迫, 反映资源的利用强度和变化趋势; 状态指标反映湿地生态环境要素的变化, 体现环境保护政策的最终目标; 响应指标反映了社会或个人为停止、减轻、预防或恢复不利于湿地生态系统变化采取的措施. 该指标体系由目标层、子系统层和评价指标层构成. 详细的指标如表 1 所示.

2.2 评价方法

2.2.1 指标权重确定方法 采用层次分析法(AHP)定性、定量结合, 借助专家经验判断量化各指标权重. 层次分析法权重确定过程如下, 首先请专家们评价指标的相对重要性. 将初步结果经数学验证和处理后的结果反馈给数位专家, 请专家确认, 经多次征求意见形成判断矩阵. 例如, 子系统 B₁、B₂ 和 B₃ 的最终相对重要性判断矩阵为 A. 如 B₂ 相对 B₁ 的重要性均值为 3, 则 B₁ 相对 B₂ 的重要性均值为 1/3; B₂ 相对 B₃ 的重要性均

值为 5, 则 B_3 相对 B_2 的重要性均值为 $1/5$.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 \\ 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

表 1 乌梁素海湖泊健康诊断指标

Tab. 1 Health diagnosis indices of the Lake Wuliangsuhai

目标层	子系统层	评价指标层	量化标准	
乌梁素海 生态系统 健康状态 A	压力 B_1	人口密度 C_1	单位面积的人口数量	
		水资源开发利用率 C_2	现状年 ($P=50%$) 流域水资源使用量占多年平均水资源量	
		农药使用强度 C_3	每年每公顷的农药使用量	
		化肥使用强度 C_4	每年每公顷的化肥使用量	
		万元 GDP COD 排放强度 C_5	工业废水排放量除 GDP	
	状态 B_2	生态状态	人均水资源量 C_6	人均拥有水资源量
			湿地植物 C_7	以湿地植物的种类衡量
			初级生产力 C_8	优势种生长情况衡量
			鱼类丰富度 C_9	鱼类种类衡量
			优势种覆盖度 C_{10}	优势种覆盖度
		环境状态	水质类别 C_{11}	采用 COD、BOD、pH 值、有毒物质等衡量水质
			富营养化程度 C_{12}	通过 Chl. a、TP、TN、SD、COD _{Mn} 的综合营养指数确定
			土壤有机质 C_{13}	以土壤有机质含量确定
			补水保证率 C_{14}	以湖区湿地可补水量和生态需水的比例衡量
			湖泊淤积程度 C_{15}	湖区淤积占湖区容积的比例衡量
	功能状态	物质生产功能 C_{16}	以湖泊鱼类的年收获量表示	
		水文调节功能 C_{17}	通过换水的周期表示	
		水质净化功能 C_{18}	以湖泊对主要污染物的净化程度	
		栖息地维持功能 C_{19}	以湖泊优势植物破坏或退化率表示	
		科考旅游功能 C_{20}	以珍稀鸟类种类衡量	
	响应 B_3	废水处理指数 C_{21}	以湖泊周边城市工业、生活污水处理率核算	
		公共环境意识 C_{22}	有保护意识的人口占总人口数的比重	
		环保投资系数 C_{23}	环境投入占 GDP 的比重	
		湿地管理水平 C_{24}	以群众对湿地管理的满意度来评价湿地管理水平	
		湿地科研水平 C_{25}	以湿地保护区科研人员占部门总人数的比重	

将对矩阵 A 进行归一化(矩阵元素除以每一列元素之和), 得到归一化的矩阵 B.

$$B = \begin{bmatrix} 3/13 & 5/23 & 3/9 \\ 9/13 & 15/23 & 5/9 \\ 1/13 & 3/23 & 1/9 \end{bmatrix}$$

将矩阵 B 各行相加结果分别为 $3/13 + 5/23 + 3/9 = 0.774$ 、 $9/13 + 15/23 + 5/9 = 1.911$ 、 $1/13 + 3/23 + 1/9 = 0.315$. 矩阵 B 中, $\lambda_{max} = 3$; $CI = 0$; $RI = 0.58$; $CR = 0 < 0.10$. 其中, CR 为判断矩阵的随机一致性比率, CI 为判断矩阵一致性指标, RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标. 子系统的权重为 B 中行元素之和与 λ_{max} 的比值, 即 $0.774/3 = 0.258$ 、 $1.911/3 = 0.637$ 和 $0.315/3 = 0.105$, 即权重矩阵为 $W = (0.258 \ 0.637 \ 0.105)^T$. 其他指标的权重同样采用上述方法, 剔除无效结果后经多次验证确定.

2.2.2 湖泊综合评价方法 本研究采用基于 PSR 模型的综合评价方法^[23]. 该模型最初由加拿大统计学家 Rapport 和 Friend 提出, 后由经济合作与发展组织 (OECD) 和联合国环境规划署 (UNEP) 于 20 世纪八九十年代共同发展起来的用于研究环境问题的框架体系. 该方法从社会经济与环境有机统一的观点出发, 精确地反映了生态系统健康的自然、经济、社会因素间的关系, 综合考虑了环境受到的压力和环境退化之间的因果关系, 压力、状态、响应 3 个环节相互制约、相互影响, 以及环境决策和制定对策措施的全过程. 湖泊生态系统的健康状态, 采用综合健康指数 (Comprehensive Health Index, CHI) 定量评价:

$$CHI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i \tag{1}$$

式中, CHI 为湖泊生态系统综合健康指数; W_i 为各指标的综合权重; X_i 为各指标得分. 按照综合指数由高到低将湖泊生态系统健康分为 5 个等级: ① $[0.8, 1.0]$, 良好状态; ② $[0.6, 0.8]$, 较好状态; ③ $[0.4, 0.6]$, 警戒状态; ④ $[0.2, 0.4]$, 较差状态; ⑤ $[0, 0.2]$, 极差状态.

其他评价方法包括湖泊富营养化程度评价, 主要采用综合营养状态指数 (Trophic Level Index, TLI) 表示^[25]:

$$TLI(\Sigma) = \sum W_j \cdot TLI(j) \tag{2}$$

式中, $TLI(\Sigma)$ 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数. 依照 $TLI(\Sigma)$ 指数大小, 可将营养状态划分为贫营养 ($TLI(\Sigma) < 30$)、中营养 ($30 \leq TLI(\Sigma) < 50$)、轻度富营养 ($50 \leq TLI(\Sigma) < 60$)、中度富营养 ($60 \leq TLI(\Sigma) \leq 70$) 和重度富营养 ($TLI(\Sigma) > 70$). 参考相关资料, $Chl. a$ 、 TP 、 TN 、 SD 和 COD_{Mn} 等指标权重分别为 0.2663、0.2237、0.2183、0.2210 和 0.2210^[24].

2.3 数据来源

水质类别、富营养化程度、湖泊淤积程度、土壤有机质、湿地植物、初级生产力、水质净化功能等数据来自于课题组 2011—2012 年监测和调查数据, 监测点遍布全湖 20 个地区. 水质类别参照《中华人民共和国地表水环境质量标准》(GB/T 3838—2002) 要求, 对不同水体指标进行监测评估, 水质分类数据主要来自乌拉特后旗环境保护监测站的定期监测结果. 乌拉特后旗湿地管理水平和公共环境意识等数据来自 2011 年对游客、当地居民的抽样调查以及网络调查数据, 共计 456 份. 鱼类丰富度、优势种覆盖度、补水保证率、珍稀鸟类种类、栖息地维持功能、物质生产功能、水文调节功能数据主要来自乌梁素海渔场和乌梁素海鸟类管理站, 其他数据主要来源于内蒙古河套灌区管理局^[25] 和《巴彦淖尔统计年鉴》等.

3 结果与讨论

3.1 各指标权重结果

基于专家打分法构建判断矩阵, 在层次分析法的基础上, 分析不同子系统中各指标的权重. 其中, 压力指标、状态指标和响应指标的权重分别为 0.258、0.637 和 0.105, 其中状态指标中生态状态、环境状态和功能状态具有同等重要性, 权重均为 0.333, 其他指标层指标的权重和综合权重如表 2 所示.

表 2 各评价指标权重

Tab.2 Weights of various assessment indices

评价指标层	权重	综合权重	评价指标层	权重	综合权重
C_1	0.052	0.0134	C_{14}	0.079	0.0167
C_2	0.219	0.0565	C_{15}	0.136	0.0288
C_3	0.317	0.0817	C_{16}	0.263	0.0557
C_4	0.317	0.0817	C_{17}	0.062	0.0178
C_5	0.072	0.0185	C_{18}	0.417	0.0884
C_6	0.023	0.0059	C_{19}	0.160	0.0358
C_7	0.218	0.0464	C_{20}	0.062	0.0142
C_8	0.439	0.1143	C_{21}	0.421	0.0422
C_9	0.121	0.0256	C_{22}	0.102	0.0107
C_{10}	0.121	0.0256	C_{23}	0.195	0.0201
C_{11}	0.264	0.0561	C_{24}	0.152	0.0156
C_{12}	0.452	0.0958	C_{25}	0.152	0.0156
C_{13}	0.069	0.0146			

根据专家打分的结果, 状态指标是反映湖泊健康的最重要的指标, 压力指标次之, 响应指标最低. 压力指标中农药使用强度 (C_3) 和化肥使用强度 (C_4) 具有最高的权重, 反映了湖泊高污染和高营养状态. 相应指

标中污水处理指数(C_{21})的权重最大. 状态层又进步细化划分为生态状态、环境状态和功能状态, 根据专家打分结果, 三者具有相同的权重. 而净初级生产力(C_8)、富营养化程度(C_{12})和水质净化功能(C_{18})分别是 3 类状态指标中权重最大的评价指标.

3.2 各评价指标综合得分

由于指标体系中的各项评价指标的类型复杂, 各系数之间的量纲不统一, 各指标之间缺乏可比性. 为了便于比较和计算, 依据当地经济、社会和自然环境特点, 并参考其他研究结果^[26-27], 按指标实际数值等级划分为 5 级, 标准化分值设定在 0~1.0 之间(0~0.2 代表极差, 0.2~0.4 代表较差, 0.4~0.6 代表警戒, 0.6~0.8 代表较好, 0.8~1.0 代表良好, 主要参考其他数据和历史数据确定), 每项指标得分见表 3.

表 3 各评价指标得分及综合得分
Tab. 3 Scores of different assessment indices

指标	单位	良好	较好	警戒	较差	极差	得分	综合得分
C_1	人/ km^2	<100	(50,100)	(250,400)	(400,600)	>600	0.68	0.0091
C_2	%	<15	(15,25)	(25,35)	(35,40)	>40	0.12	0.0067
C_3	kg/hm^2	<2.5	(2.5,3.0)	(3.0,5.0)	(5.0,7.0)	>7.0	0.43	0.0351
C_4	kg/hm^2	<175	(175,225)	(225,275)	(275,325)	>325	0.49	0.0400
C_5	kg	<1.5	(1.5,2.25)	(2.25,3.0)	(3.0,5.0)	>5.0	0.68	0.0125
C_6	$\text{m}^3/\text{人}$	>3000	(1700,3000)	(1000,1700)	(500,1000)	<500	0.27	0.0015
C_7	种	>200	(150,200)	(100,150)	(50,100)	<50	0.31	0.0143
C_8	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	>70	(60,70)	(50,60)	(30,50)	<30	0.45	0.0514
C_9	—	>3.0	(2.5,3.0)	(2.0,2.5)	(1.5,2.0)	<1.5	0.26	0.0066
C_{10}	%	>70	(60,70)	(50,60)	(30,50)	<30	0.23,0.52,0.65	0.0058,0.0133,0.0166
C_{11}	—	I	II	III	IV	V	0.11,0.37,0.56	0.0061,0.0207,0.0314
C_{12}	—	<30	(30,50)	(50,60)	(60,70)	>70	0.24,0.35,0.54	0.0229,0.0335,0.0517
C_{13}	%	>0.7	(0.6,0.7)	(0.5,0.6)	(0.4,0.5)	<0.4	0.51	0.0074
C_{14}	%	>90	(65,90)	(35,65)	(20,35)	<20	0.46	0.0077
C_{15}	%	<10	(10,25)	(25,40)	(40,60)	>60	0.27,0.33,0.38	0.0078,0.0095,0.0109
C_{16}	t/a	>1000	(700,1000)	(400,700)	(100,400)	<100	0.13,0.17,0.33	0.0072,0.0095,0.0183
C_{17}	d	<90	(90,180)	(180,270)	(270,360)	>360	0.42	0.0075
C_{18}	%	>90	(75,90)	(60,75)	(45,60)	<45	0.27,0.39,0.62	0.0238,0.0344,0.0548
C_{19}	%	<10	(10,20)	(20,30)	(30,40)	>40	0.49	0.0175
C_{20}	—	>10	(8,10)	(4,8)	(2,4)	<2	0.48	0.0068
C_{21}	%	>95	(85,95)	(75,85)	(60,75)	<60	0.34	0.0143
C_{22}	%	>50	(40,50)	(25,40)	(15,25)	<15	0.42	0.0044
C_{23}	%	>0.8	(0.4,0.8)	(0.1,0.4)	(0.05,0.1)	<0.05	0.36	0.0072
C_{24}	%	>80	(60,80)	(50,60)	(30,50)	<30	0.48	0.0074
C_{25}	%	>50	(40,50)	(30,40)	(20,30)	<20	0.47	0.0073

从子系统层来看, 压力指标层中得分最高和最低的分别为 C_5 (万元 GDP COD 排放强度) 和 C_2 (水资源开发利用效率) 指标, 但综合得分最高和最低的分别为 C_4 (化肥使用强度) 和 C_2 , 说明指标得分与综合得分趋势并不一致. 状态指标中综合得分较高的指标包括 C_8 (初级生产力)、 C_{12} (富营养化程度)、 C_{18} (水质净化功能) 和 C_{19} (栖息地维持功能), 而综合得分较低的指标包括 C_9 (鱼类丰富度)、 C_{13} (土壤有机质)、 C_{14} (补水保证率)、 C_{17} (水文调节功能) 和 C_{20} (科考旅游功能). 值得一提的是, 虽然乌梁素海湖区为富营养化湖泊, 但富营养化指数获得较高的得分, 说明不能仅通过分析富营养化状态判断湖泊的健康状况. 与压力指标层得分类似, 指标得分和综合得分情况并不完全一致. 响应指标中综合得分最高和最低的指标分别为 C_{21} (废水处理指数) 和 C_{22} (公共环境意识). 对Ⅲ区不同指标进行聚类分析, 划分为 2~4 类群集结果(表 4).

对指标的聚类分析结果显示, 按照指标对生态系统健康的贡献值不同, 可将指标划分为 4 类. 从分析结

果来看, C_8 、 C_{12} 和 C_{18} 是反映该湖泊 III 区健康的第 4 类指标,而在 I 区中的第 4 类指标为 C_{12} , III 区中则为 C_{12} 和 C_{18} 。从不同湖区得分来看,3 个湖区生态系统健康指标在压力层和响应层的得分上没有区分,差异主要体现在状态层的指标上,包括优势种覆盖度(C_{10})、水质类别(C_{11})、富营养化程度(C_{12})、湖泊淤积程度(C_{15})、物质生产功能(C_{16})和水质净化功能(C_{18})。造成这些指标得分差异的主要原因是湖区地形、水文特征等差异引起水质、水生植被种类和分布、水生动物分布的差异,进而使得不同湖区在物质生产功能、泥沙淤积程度、富营养化程度呈现不同的状态。同一指标 I 区和 III 区的差异最大达到 5 倍。指标呈现的基本规律是,随着水体由北向南流动,污染物浓度逐渐减小,湖泊泥沙的淤积程度和富营养化程度均逐渐降低,物质生产功能逐渐升高,优势种的覆盖度也逐渐增大,湖泊的水质由入口处的 V 类甚至劣 V 类水升至出口处 III 类水,水质净化功能逐渐提升。因此,3 个湖区的健康综合指数基本上呈现递增的趋势。

表 4 聚类分析结果

Tab. 4 Results of cluster analysis

分类	第 1 类	第 2 类	第 3 类	第 4 类
2 群集	$C_1 C_2 C_5 C_6 C_7 C_9 C_{10} C_{13} C_{14} C_{15} C_{16}$ $C_{17} C_{19} C_{20} C_{21} C_{22} C_{23} C_{24} C_{25}$	$C_3 C_4 C_8 C_{11} C_{12} C_{18}$	—	—
3 群集	$C_1 C_2 C_5 C_6 C_7 C_9 C_{10} C_{13} C_{14} C_{15}$ $C_{16} C_{17} C_{19} C_{20} C_{21} C_{22} C_{23} C_{24} C_{25}$	$C_3 C_4 C_{11}$	$C_8 C_{12} C_{18}$	—
4 群集	$C_1 C_2 C_6 C_9 C_{13} C_{14} C_{17} C_{20} C_{22} C_{23} C_{24} C_{25}$	$C_3 C_4 C_{11}$	$C_5 C_7 C_{10} C_{15} C_{16} C_{19} C_{21}$	$C_8 C_{12} C_{18}$

3.3 乌梁素海综合健康指数

3 个湖区的综合健康指数分别为 0.3395、0.3866 和 0.4494 (图 1a),均处于警戒状态或者较差状态。这说明乌梁素海生态系统健康已经出现严重的问题,亟需采取相关的措施改善湖区的生态环境,恢复乌梁素海的生态功能。从分区来看,健康指数分别是 III 区 > II 区 > I 区 (图 1a),说明随着湖泊对污染物的消减和净化过程,湖泊生态系统健康指数逐渐增加,同时,这也说明不同湖区的生态系统健康状况不尽相同,对不同地区应实施不同的湖泊恢复措施。

3 个区域各指标对综合健康指数的贡献率都是状态指标 > 压力指标 > 响应指标 (图 1b、c、d)。从不同湖区来看,生态系统的状态指标的得分逐渐升高,对健康指数的贡献率由 67% 上升到 70%、最后升至 74%;而压力指标和响应指标对健康指数的贡献率是逐渐降的,二者在 I、II 和 III 区的贡献率分别表现为 30% 和 12%、26% 和 10%、22% 和 9%。由上文可知,3 类指标的权重分别为 0.2578、0.6359 和 0.3081,状态指标的权重明显大于其他两类指标,这也是造成上述结果的主要原因。然而,从 3 类指标得分占各自权重的比例 (得分率) 来看, I、II 和 III 区的压力指标和响应指标得分率均为 39%,而状态指标在 3 个区域的得分率分别为 31%、37% 和 47%。

总体而言,3 类指标的得分率均低于 50%,说明在湖泊健康的恢复上,还需要加大源头治理的力度,进一步减少农药化肥的使用强度;同时,应提升入湖污水处理率,增加环保的投资。分区对比可以发现,对 I 区和 II 区而言,压力指标和响应指标的得分率略大于状态指标得分率;而在 III 区,压力指标和响应指标的得分率要小于状态指标的得分率。因此,针对不同湖区的不同情况,还应采取不同的措施恢复湖泊的健康。例如,对于污染和富营养化较重的 I 区,应注重提高生态状态和环境状态指标的得分,如采用效果较快的物理和化学开展水质恢复;而对于 II 区,应注重提高其功能状态指标的得分,如科研旅游功能、物质生产功能和栖息地维持功能等。

3.4 敏感性分析

PSR 模型具有很强的因果关系,可作为湿地生态系统健康评价的指标分类体系,但它未能对所有指标进行严格的分类,也不能判断不同指标之间的相互关系和影响,只是对相关状态的综合评价结果。因此,对模型的不确定性进行分析,测试模型结果对指标变化的反映,分析不同指标的敏感性,是分析检验模型科学性的重要途径之一。通过调整系数 $K(-10\%, +10\%, -20\%, +20\%)$,采用公式 $CHI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i(1 + \Delta K)$ 核算敏感性,相关结果如图 2 所示。

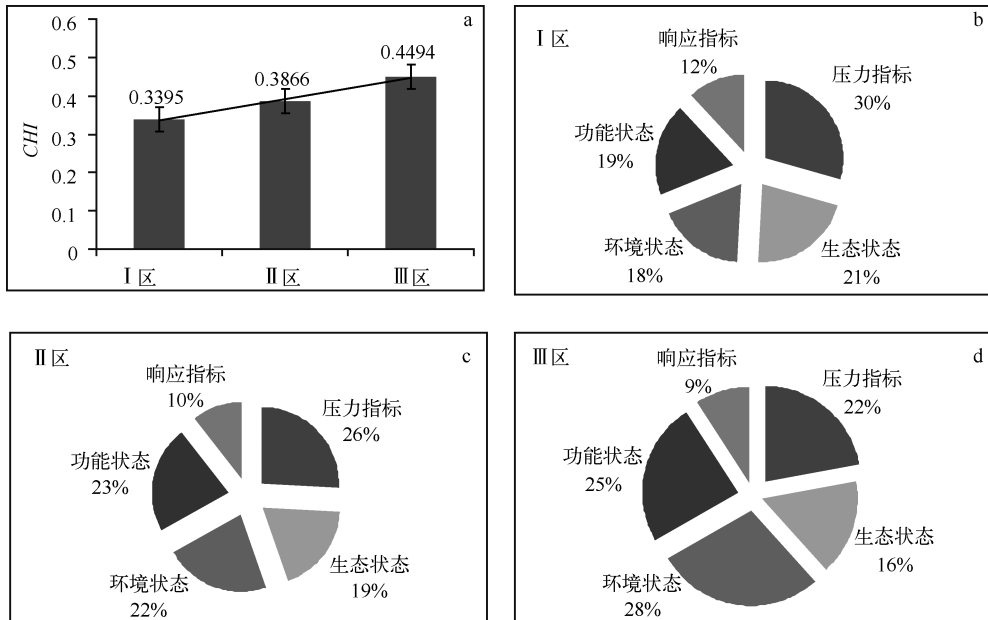


图1 乌梁素海健康评价结果

Fig. 1 The CHI of the Lake Wuliangsu

压力指标变化 $\pm 10\%$, 综合健康指数变化 $\pm 2.7\%$; 状态指标变化 $\pm 10\%$, 综合健康指数变化约 $\pm 6.2\%$; 而响应指标变化 $\pm 10\%$, 综合健康指数变化 $\pm 1.0\%$ 左右. 当压力指标变化 $\pm 20\%$, 综合健康指数变化 $\pm 5.5\%$; 状态指标变化 $\pm 20\%$, 综合健康指数变化 $\pm 12.4\%$ 左右; 响应指标变化 $\pm 20\%$, 综合健康指数变化 $\pm 2.1\%$ 左右, 模型敏感性排序为状态指标 > 压力指标 > 响应指标 (图 2). 总体而言, 模型对指标变化的反映较为敏感, 说明本模型具有较好的适用性.

从敏感性分析结果来看, 乌梁素海综合健康指数受状态指标的影响最大, 这也与乌梁素海当前富营养化严重、湖泊生态系统的生态环境受到破坏、生态系统功能退化有关^[22, 28]. 状态指标与生态系统初级生产、水质类别、富营养化程度、水文调节、水质净化等状态密切相关, 这与其他研究成果一致, 即强调对生态系统水质、生态和水文的修复, 恢复湖泊调节、供给和支撑功能. 因此, 首先需改善水质、保证水量充足并提高湖泊整体联通性和流动性^[28]. 此外, 水华暴发对湖泊状态指标的影响巨大, 其与营养盐的空间分布具有很强的相关性^[29]. 由于营养盐呈现北高南低、西高东低的规律, 加上该区域湖体较为封闭, 水动力条件较为稳定, 导致乌梁素海黄苔集中在湖区北部和西岸排干口附近区域暴发^[30], 这也导致第 I 湖区的综合健康指数最低. 随着水流由北向南的流动过程, 营养盐浓度逐渐降低, 富营养化导致的水华现象减少, 湖泊健康指数在第 II 区有所升高, 但仍应加强该区域底泥疏浚和水体疏通, 保持湖泊连通性是提高该区域湖泊健康指数的重要措施^[31]. 在水质相对改善的第 III 区域, 应注重其生态状态和功能状态指标的恢复. 提高水生态系统中的生物多样性, 如采用投放鱼苗等方式恢复鱼类多样性. 同时, 应尽量减少人为影响和破坏, 尤其应控制游船数量和旅游范围, 减少对动物栖息地干扰, 提高栖息地维持功能的得分.

4 结论

乌梁素海作为干旱区典型的湖泊湿地, 其生态系统具有敏感性和脆弱性的特点, 基于 PSR 模型的生态系统健康评价, 能客观描述湖泊生态生态系统退化的原因和程度, 为科学有效地恢复湖泊提供依据. 尤其是对湖泊健康的分区评价, 能根据湖泊不同区域理化特征和生态差异评价湖泊健康, 更具针对性和准确性. 通过本次研究, 初步得到以下几点结论:

- 1) 乌梁素海的综合健康指数得分较低, 湿地整体正处于警戒状态或者较差状态, 说明该湖泊正受到较

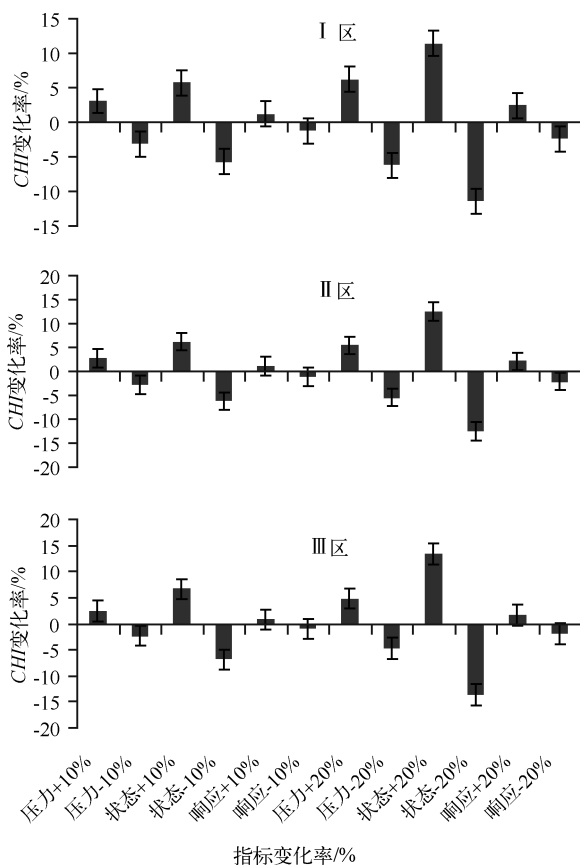


图 2 I、II、III 区敏感性分析结果

Fig. 2 Results of sensitive analysis of three regions in the Lake Wuliangsuhai

大的外界压力,湖泊生态系统结构和功能正处于较差的状态。

2) 乌梁素海不同湖区的综合健康指数存在较为明显的区别,总体表现为 III 区 > II 区 > I 区,而各区域中不同指标的得分情况依次为状态指标 > 压力指标 > 响应指标。

3) 对 I 区和 II 区而言,压力指标和响应指标的得分率略大于状态指标得分率;而在 III 区,压力指标和响应指标的得分率要小于状态指标的得分率。针对不同湖区的不同情况,应关注不同的指标得分,采取不同的措施恢复湖泊的健康。

致谢:感谢内蒙古乌拉特梭梭林—蒙古野驴国家级自然保护区管理局、乌梁素海保护区管理站在野外监测、资料共享等方面提供的帮助。

5 参考文献

- [1] Mao XF, Yang ZF. Functional assessment of associated aquatic ecosystems in the Baiyangdian Basin: an ecological network analysis based approach. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(23/24): 3811-3820.
- [2] Costanza R, Norton BG, Hasbell BD. Ecosystem health: New goals for environmental management. Washington DC: Island Press, 1992:190-206, 239-256.
- [3] Rapport DJ, Regier HA, Hutchinson TC. Ecosystem behavior under stress. *American Naturalist*, 1985, **116**: 326-346.
- [4] Hannon B. Ecosystem flow analysis. *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1985, **213**:97-118.
- [5] Karr JR, Fausch KD, Angermeier PL et al. Assessing biological integrity in running waters: A method and its rationale. Champaign: Illinois Natural History Survey, Special Publication 5, 1986.

- [6] Jørgensen SE. Exergy and ecological buffer capacities as measures of ecosystem health. *Ecosystem Health*, 1995, **1**(3): 150-160.
- [7] Xu FL. Ecosystem health assessment for Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 1996, **2**:101-109.
- [8] Xu FL, Jørgensen SE, Tao S. Ecological indicators for assessing fresh water ecosystem health. *Ecological Modeling*, 1999, **116**(1): 77-106.
- [9] Xu FL, Tao S, Dawson PW. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods. *Water Research*, 2001, **35**(13): 3157-3167.
- [10] Xu FL, Dawson RW, Tao S. A method for lake ecosystem health assessment: an ecological modelling method and its application. *Hydrobiologica*, 2001, **443**(1/2/3):159-175.
- [11] Shear H. The development and use of indicators to assess ecosystem health state in the Great Lake. *Ecosystem Health*, 1996, **2**(2):241-258.
- [12] Connor RJ, Walls TE, Hughes RM. Using multiple taxonomic groups to index the ecological condition of lakes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, **61**: 207-228.
- [13] 刘永, 郭怀成, 戴永立. 湖泊生态系统健康评价方法研究. 环境科学学报, 2004, **24**(4):723-729.
- [14] 胡志新, 胡维平, 谷孝鸿等. 太湖湖泊生态系统健康评价. 湖泊科学, 2005, **17**(3):256-262.
- [15] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体 II: 方法与案例. 生态学报, 2002, **22**(8):1231-1239.
- [16] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍等. 湖泊生态系统健康定量评价方法. 生态学报, 2005, **25**(6):1466-1474.
- [17] Mo MH, Wang XL, Wu HJ. Ecosystem health assessment of Honghu Lake wetland of China using Artificial Neural Network Approach. *Chinese Geographical Science*, 2009, **19**(4): 125-129.
- [18] Ma LG, Cao YR, Li XT. Assessment of ecosystem health in Lashihai Lake using AHP method. *Journal of Geo-Information Science*, 2011, **13**(2): 234-239.
- [19] 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. 水文, 2010, **30**(5):64-68.
- [20] Chen WG. Study on urban lake ecosystem health assessment. *Applied Mechanics and Material*, 2012, **178-181**: 304-308.
- [21] 胡志新, 胡维平, 陈永根等. 太湖不同湖区生态系统健康评价方法研究. 农村生态环境, 2005, **21**(4): 28-32.
- [22] 毛旭锋, 崔丽娟, 李胜男等. 乌梁素海水体营养盐削减的空间变化规律研究. 干旱区资源与环境, 2012, **11**:116-121.
- [23] Rapport DJ, Friend AM. Towards a comprehensive framework for environmental statistics: a stress-response approach. *Statistics Canada*, Ottawa, 1979: 11-510.
- [24] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [25] 内蒙古河套灌区管理总局. 浅析巴彦淖尔市水资源开发与利用. 黄河流域部分城市水环境论坛论文集, 2008.
- [26] 颜利, 王金坑, 黄浩. 基于 PSR 框架模型的东溪流域生态系统健康评价. 资源科学, 2008, **30**(1):107-112.
- [27] 许文杰, 许士国. 湖泊生态系统健康评价的熵权综合健康指数法. 水土保持研究, 2008, **15**(1):125-127.
- [28] 姜忠峰, 李畅游, 张生等. 改进 AHP 法在乌梁素海生态系统服务功能评价中的应用. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(1):135-139.
- [29] 王艳, 黄永梅, 于长水等. 基于 MODIS 数据的 2000—2010 年乌梁素海“黄苔”时空变化. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 519-527.
- [30] 杨志岩, 李畅游, 张生等. 乌梁素海氮磷浓度与叶绿素 a 时空分布关系研究. 干旱环境监测, 2009, (1):16-19.
- [31] 厚福祥, 邓芳. 内蒙古乌梁素海生态恢复工程试验研究. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2006, **37**(1):105-110.