

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.02.016

城市浅水湖泊生态系统健康与保护研究

陈星¹, 许钦², 何新玥¹, 崔广柏¹, 卢婉莹¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对我国东部平原地区淡水湖泊资源丰富, 且多为中小型浅水湖, 受到社会经济快速发展的影响, 城市化率高, 人类干扰强烈, 境内湖泊面临着富营养化、服务功能丧失等生态环境问题, 以太湖流域东南部苏州市吴江区的湖泊群为例, 在分析浅水湖泊特征的基础上, 提出这一类型湖泊生态健康的概念框架, 构建湖泊水生态健康评价体系, 选择生态因子、环境因子、人类活动干扰与生态建设4个要素共12个指标描述湖泊健康水平, 并分析其原因。结果表明: 水环境质量的恶化与人类对湖泊资源的粗放式开发是造成湖泊生态功能失衡的主要原因。以评价结果为指导, 制定典型湖泊三白荡的生态修复与建设的措施与方法, 旨在为湖泊生态系统管理与修复提供科学依据。

关键词: 城市浅水湖泊; 湖泊健康; 生态保护; 评价体系

中图分类号: X32 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2016)02-0077-05

Research on health evaluation and protection of urban shallow lake ecosystem

CHEN Xing¹, XU Qin², HE Xinyue¹, CUI Guangbo¹, LU Wanying¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, 210098, China;

2. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Freshwater shallow lakes of small-to-medium size are distributed across the eastern plain areas of China. Influenced by a high rate of urbanization and intense human disturbance due to rapid economic development, these lakes are facing such environmental problems as eutrophication and ecological service function loss. A case study was conducted on the lakes in the Wujiang District, in Suzhou City, to the southeast of Taihu Lake. Based on ecological characteristics of shallow lakes, a conceptual framework of lake ecosystem health was put forward to establish the lake ecosystem health evaluation system. Four factors and 12 indices were selected to describe the state of lake health. The factors include the ecological factor, the environmental factor, human disturbance, and ecological construction. Results show that water quality degradation and extensive human exploitation are the critical causes of the imbalance of the lake ecosystem. Based on these results, ecological restoration and construction measures are formulated for a typical lake, Sanbaidang Lake, providing a scientific basis for lake ecosystem management and protection.

Key words: urban shallow lake; lake health; ecosystem protection; evaluation system

我国是多湖泊国家, 其中我国东部平原区的湖泊开发利用程度较高, 水环境污染和水生态退化是我国东部平原区湖泊面临的主要问题^[1-3]。湖泊生态系统是生物与环境的综合体, 具有一定结构和功能^[4-6]。自20世纪70年代提出生态系统健康, 这一概念在各领域不断发展。由于湖泊生态系统的复杂性与异质性, 迄今为止尚未形成湖泊生态健康评价

统一的指标和方法^[7-9], 其中接受度较高的指标和方法由Constanza等^[10]提出。我国的湖泊生态系统健康评价正处于起步阶段。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、生物、环境、气象、社会经济等多方面的综合评价体系^[11-14]。湖泊生态系统健康评价已成为湖泊环境管理的基础, 通过评价找出湖泊结构与功能退化的原因, 由此提出

基金项目: 国家自然科学基金(51209071, 51579148)

作者简介: 陈星(1980—), 女, 讲师, 博士, 主要从事环境水文、水环境保护方面研究。E-mail: chenxing@hhu.edu.cn

针对性的治理方案,为湖泊保护与治理提供科学依据。但由于湖泊类型多样、区域差异明显,湖泊生态系统评价体系也具有特有性与针对性,加之我国大多数湖泊缺乏生态监测资料,生态指示物种不明确,使得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。笔者以苏州市吴江区的湖泊群为研究对象,基于该湖泊的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,构建湖泊水生态评价体系,由此探讨湖泊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 健康湖泊体系要素

我国东部平原区湖泊多为浅水湖泊,具有对外界环境作用响应敏感的特征,水土、水气的交互作用极易在短时间内波及整个湖体,与湖泊排水流域内陆地环境的物质和能量交换强烈,人类活动的压力易引起湖泊生态失衡。这一类型湖泊的保护应综合考量湖泊的生态功能和服务功能,以生态文明的理念保护湖泊、合理利用湖泊,基于此,笔者认为中小型浅水湖泊生态健康主要包含以下4个要素:①具有可持续的湖泊生态系统,能够保持和恢复生态与环境,保持自身结构和功能相对稳定。②具备合理的湖泊形态。湖泊形态应自然流畅,湖滨带结构稳定、生态良好,河湖保持良好的连通性和完整性。③完整的湖泊生态服务功能。有足够的水量和良好的水质,能够维持生态系统的结构和活力,满足水生生物繁育的需要,提供多种服务功能。④湖泊抗干扰能力强。湖泊自净能力强,具备较强的自我修复能力。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区域概况

太湖东南部的苏州市吴江区,地处北亚热带季风区,四季分明,气候温和,雨水丰沛,年平均气温为15.7℃,春夏两季盛行东南风,秋冬季节多偏北风。多年平均年降雨量为1100mm左右,其中汛期(5—9月)的多年平均降雨量为650mm,占全年降雨量的60%左右。

研究区境内河港如织,湖荡星罗棋布(图1),是太湖流域河湖分布最密集的区域,水面面积267km²(不包括太湖水域),占区域总面积的22.7%。其中列入江苏省湖泊保护名录的有55个湖泊(不含太湖),占吴江区总水域面积的40%。研究区内湖泊分属东部平原湖区,为过水型湖泊,湖底地形平坦,为浅水湖泊,具有对外界环境作用响应强烈的特征。

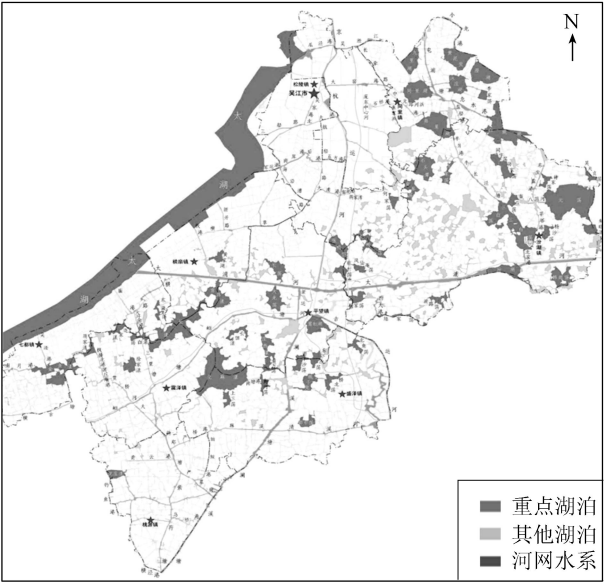


图1 研究区水域分布

2.2 湖泊水生态健康指标体系构建

根据湖泊的自然生态状况、人类活动影响程度及湖泊周边建设情况,采用模糊综合评价法对研究区55个重点湖泊进行综合分类。湖泊健康水平具体可分为3类:高安全的适宜状态、中安全的一般状态与低安全的预警状态。

2.2.1 指标筛选

依据健康湖泊生态体系的需求,分析吴江区湖泊特征与影响因素,建立3层指标体系。目标层为湖泊水生态健康,约束层分为生态因子、环境因子、人类活动干扰、生态保护措施4个要素,针对每个约束层要素最终提出指标层12个指标^[9-13](表1),并对指标进行无量纲化处理,计算评价指标间的相关系数。结果表明,指标间相关系数均小于0.5,因此认为指标所反映信息无重叠,构建的评价指标体系是科学合理的。

表1 湖泊健康评价指标与权重

目标层 A	约束层 B	约束层权重	指标层 C	约束层权重
湖泊水生态健康	生态因子 (B ₁)	0.178	景观多样性指数 C ₁	0.333
			景观破碎度指数 C ₂	0.234
			最小生态需水保证率 C ₃	0.433
	环境因子 (B ₂)	0.406	ρ(DO) C ₄	0.182
			ρ(COD _{Mn}) C ₅	0.318
			ρ(NH ₃ -N) C ₆	0.5
	人类活动干扰 (B ₃)	0.265	岸线建设用地占用比例 C ₇	0.387
			湖内围网养殖面积比例 C ₈	0.5
			道路密度 C ₉	0.113
	生态保护措施 (B ₄)	0.151	湖滨带生态建设面积比例 C ₁₀	0.212
			重点污染源污水达标排放率 C ₁₁	0.453
			生活污水处理率 C ₁₂	0.335

2.2.2 指标含义与计算

生态因子指标层的确定,综合考虑代表性与数

据的易获取性,选择景观多样性指数、景观破碎度指数和最小生态需水保证率 3 个指标。其中,景观多样性指数是用来度量生态系统结构组成复杂程度,景观多样性指数高,物种多样性丰富,生态系统稳定,抵御外界干扰的能力强,其计算公式为

$$I_{\text{SHDI}} = - \sum_{k=1}^m P_k \ln(P_k) \tag{1}$$

式中： I_{SHDI} 为 Shannon 多样性指数; P_k 为景观类型 k 所占面积比,% ; m 为景观类型数目。

景观破碎度指数表征景观被分割的破碎程度,当生境斑块数量增加而面积减小,作为物质交换的廊道被切断,破碎化程度越高,则生态系统越脆弱。景观破碎度指数计算公式为

$$I_{\text{F}} = (N_{\text{f}} - 1) / N_{\text{c}} \tag{2}$$

式中： I_{F} 为景观破碎度指数; N_{f} 为重要生态景观斑块数; N_{c} 为总面积与最小斑块面积的比值。

最小生态需水保证率表征湖泊最小生态需水满足的程度。本文以 90% 保证率的枯水年型为特征年,计算维持最低生态水位所需消耗的水量,以此代表湖泊最小生态需水量。

环境因子反映水质要素对水生态的作用,本文选择 DO、COD_{mn}和 NH₃-N 为指示指标,基于 2010 年湖泊水质监测数据进行评价。

人类活动干扰主要考虑城市建设与湖泊开发对湖区生态的影响,选择岸线建设用地占用比例、湖泊围网养殖面积比例与道路密度 3 个指标。

生态保护措施指为改善湖泊生态环境已实施且发挥一定生态环境效益的工程,主要指标包括湖滨带生态建设面积比例、重点污染源污水达标排放率与生活污水处理率。

2.3 评价模型

2.3.1 层次分析法

为克服确定指标权重的主观性,提供指标赋权的一致性,采用层次分析法确定各指标权重。首先建立层级结构模型,确立层级间隶属关系,在此基础上构造判断矩阵,采用 9 标度法对指标相对重要程度进行两两比较,并计算矩阵最大特征值与对应特征向量,将其规范化后即得到相关要素权重值。两两比较法得到的判断矩阵有可能发生判断不一致,因此最后还需进行一致性检验,调整判断矩阵直至满足一致性,最终确定约束层与指标层要素权重(表 1)。

2.3.2 模糊综合评价

选择模糊综合评价法,根据隶属度理论,结合定性分析与定量分析,以避免评价过程中的不确定性。首先构建模糊评价的因素集 U 与评价集 V ,进行单

因素评价,由隶属函数计算评价集元素的隶属度,得到从 U 到 V 的模糊关系矩阵 R 。单因素评价是多因素综合评价的基础,权重集 A 与评价矩阵 R 相乘得到模糊综合评价集 B ,将 B 归一化后与 V 相乘,得到综合评价指数。

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态安全分为 3 级(表 2),并制定各指标的分级标准与阈值(表 3)。

表 2 湖泊健康综合评价等级标准

等级	分值/表征状态	指标特征
I	≥0.7	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
	健康状态/高安全	生态系统功能尚好,一般干扰下可恢复
II	[0.4-0.7)	水环境与生态系统服务功能已有退化,生态环境受到一定破坏
	亚健康状态/中安全	生态系统结构有变化,但尚可维持基本功能
III	<0.4	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,
	疾病状态/低安全	生态环境系统结构失衡,功能退化,受外界干扰后恢复困难

表 3 湖泊健康综合评价指标阈值

指标层 C	指标属性	指标阈值		
		健康	亚健康	疾病
景观多样性指数	↑	≥1.1	[0.7,1.1)	<0.7
景观破碎度指数	↓	≤0.4	(0.4,0.8]	>0.8
最小生态需水保证率	↑	≥50	[25,50)	<25
$\rho(\text{DO})$	↑	≥5	[3,5)	<3
$\rho(\text{COD}_{\text{mn}})$	↓	≤6	(6,10]	>10
$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	↓	≤1	(1,1.5]	>1.5
岸线建设用地占用比例	↓	≤15	(15,30]	>30
湖内养殖面积比例	↓	≤10	(10,20]	>20
道路密度	↓	≤600	(600,2000]	>2000
湖滨带生态建设面积比例	↑	≥50	[20,50)	<20
重点污染源污水达标排放率	↑	≥95	[85,95)	<85
生活污水处理率	↑	≥85	[65,85)	<65

注:↑代表正向指标,数值越大则安全度越高;↓代表逆向指标,数值越大则安全度越低。

3 重点湖泊水生态安全评估结果与分析

3.1 湖泊水生态安全评价结果

研究区重点湖泊评价结果显示,55 个湖泊中,11 个湖泊为健康状态,25 个湖泊为亚健康状态,19 个湖泊为疾病状态(表 4)。总的来看,吴江区湖泊健康状况不容乐观,35% 的湖泊生态退化较为严重,80% 的湖泊生态环境受到一定程度损坏,湖泊保护面广且难度大。

对比约束层评价结果,环境因子与人类活动干扰是影响湖泊水生态安全的主要因素。根据 2010 年湖泊水环境监测资料,55 个湖泊中水质达到或优

表 4 研究区重点湖泊健康综合评价结果	
健康类别	湖泊名称
I	金鱼漾、东藏荡、南万荡、前村荡、元荡、洋砂荡、袁浪荡、雪落漾、庄西荡、大龙荡、张鸭荡
II	蒋家漾、荡白漾、连家漾、东下沙荡、西下沙荡、汾湖、沈庄漾、黄家湖、长漾、北麻漾、桥北荡、野河荡、北角荡、普陀荡、凤仙荡、徐家漾、长荡、长田漾、九里湖、澄湖、蚰子兜、陆家荡、长崎荡、南星湖、同里湖
III	上下荡、杨家荡、方家荡、吴天贞荡、郎中荡、三白荡、南庄荡、同字荡、孙家荡、诸曹漾、钟家荡、石头潭、沐庄湖、季家荡、黄泥兜、白蚰湖、南参荡、何家漾、莺脰湖

于Ⅳ类有 32 个,水质为Ⅴ类 3 个,水质劣Ⅴ类 20 个,超标项目主要为 TP、TN、NH₃-N 和 COD_{Mn}。湖泊的主要污染来源,一是未达标排放的工业污水以及生活污水通过入湖河网排入湖泊,二是湖区围网养殖加重了的湖泊的内源污染,三是湖区周边地区农业耕地以及畜禽养殖业输出的面源污染。湖泊排水区内的城市建设与生产生活对湖滨带生态环境的影响也较大。湖滨带是水陆生态系统的过渡带,湖泊岸线被建设用地、居住用地以及鱼塘等占用,以致滨水生态保护空间不足,对河湖防洪安全、河势稳定和生物多样性等造成不利影响,加之一些湖泊内围网养殖问题较为严重,有 29 个重点湖泊的围网面积超过了湖泊面积的 60%,投放的过剩饵料、鱼类的排泄物加重了湖泊内源污染。

3.2 湖泊分类治理方案

健康度较高的Ⅰ类湖泊,水生态环境条件较好,大多地处城郊,周边开发利用强度低、人口密度低。这些湖泊以生态保护为主,控制湖内围网养殖面积,划定湖泊保护范围,严格进行湖泊保护空间管理,注重保护湖泊周边自然湿地,维护生态多样性。

健康度居中的Ⅱ类湖泊,城镇发展与生态保护的矛盾日益突出,应严格划定湖泊保护范围,控制周边建设与生产生活对湖泊岸线的侵占,对环境恶化的湖泊加强周边污染源治理,并清理湖泊围网养殖,适当建设人工湿地,加强水质净化,对有景观开发功能的湖泊,应将开发与生态建设相结合。

健康度较低的Ⅲ类湖泊,水生态环境呈恶化趋

势,首先应改善湖泊水环境质量,严格治理湖泊排水流域范围内的污染源,降低人类活动对湖泊的干扰,控制湖内围网养殖面积,对内源污染较重、底泥淤积厚度大的湖泊进行清淤,发挥河湖连通改善湖泊水环境的功能。在水质改善的基础上开展生态修复。

4 典型湖泊生态治理

三白荡位于吴江区东部,湖泊面积 6.68 km²。其湖泊健康评价结果为健康度较低的疾病类型,其中环境因子层、人类活动干扰层与生态保护措施层评价结果均为疾病。三白荡水环境保护面临较大压力,湖泊承载能力下降,并且湖滨带缺乏保护空间,滨湖的鱼塘、耕地等对湖泊影响较大。

根据健康湖泊理论,首先明确三白荡服务功能,即,由于区位优势,除发挥三白荡蓄洪、供水等功能外,还将开发其生态休闲、景观旅游功能。吴江区水环境功能区划要求三白荡水质达到Ⅲ类,因此三白荡的治理应从水环境改善入手,加强对排水流域内工业、生活、农业污染源的治理,促进湖泊水质改善。

调查湖泊周边土地利用类型,将部分鱼塘还湖,局部调整湖泊岸线,并且划定湖泊保护范围,留出湖泊缓冲带,弱化陆域对湖泊生态的干扰。同时对湖周水系进行调整,加强河湖连通性,加大对三白荡的生态补水,促进水环境改善。

建立二维水动力模型,对调整前后的湖泊进行流场模拟(图 2),计算连通河道出流入流,以及盛行风对湖泊流场的影响。从图 2 可以看出,三白荡湖泊形态调整后,风生流与吞吐流流场都更为均匀,河湖连通补水能够拉动整个湖体的水流流动。由于湖中岛屿的影响,风生流在湖内形成几个大的环流,对局部岸线有一定冲刷作用。这也为生态护岸的选择提供了一定依据。在水流急促的湖岸带,采用耐冲刷的生态护岸类型,其他区域可以选择自然原型生态护岸。在水流较缓处,可以布置湿地植物,以有利于湖泊生物多样性的恢复。

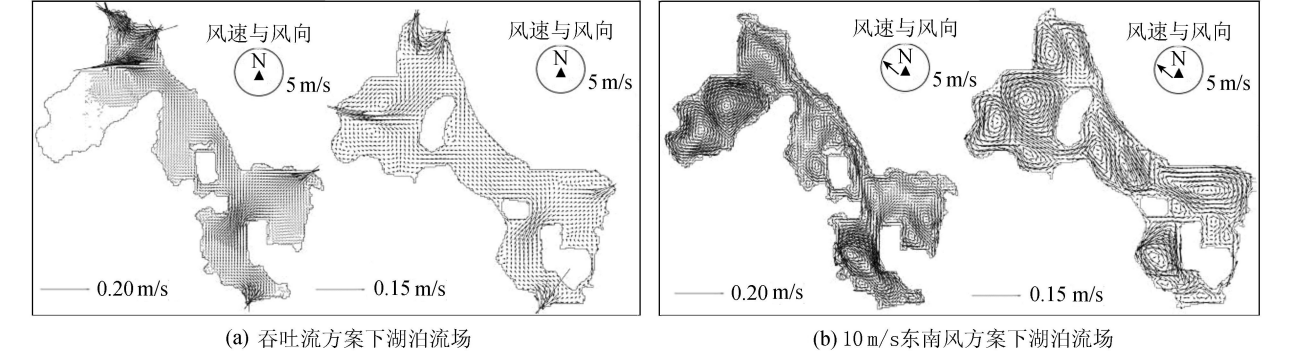


图 2 三白荡治理前后不同工况条件下流场对比

5 结 论

湖泊是生物与环境之间相互作用、相互制约的复杂生态系统。笔者针对我国东部平原区分布最广的中小型浅水湖泊生态特征,提出健康湖泊概念体系。综合考虑这一类型湖泊生态敏感性影响因素,通过生态因子、环境因子、人类活动干扰、生态保护措施 4 个因子对湖泊健康进行评价,研究结论如下:

a. 中小型浅水湖泊与排水流域间有着强烈的物质、能量交换,湖泊保护的目标为可持续的生态系统、合理的湖泊形态、完整的服务功能、抗干扰能力强。

b. 湖泊生态安全指标体系研究结果显示,约束层 4 个要素重要性排序为:环境影响>人类活动影响>生态影响>生态建设,综合权重达到 0.1 以上的指标为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、湖内养殖面积比例与湖泊岸线建设用地占用比例。这与实际情况相符,水环境恶化与人类的过度开发,是这一区域湖泊生态退化的主要原因。

c. 综合评价结果显示,研究区内湖泊生态健康状况不容乐观,仅 11 个湖泊生态健康情况较好,25 个湖泊需加强生态保护,19 个湖泊生态退化较为严重,亟待治理。

参考文献:

[1] 林泽新. 太湖流域水环境变化及缘由分析[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2): 111-116. (LIN Zexin. Analysis of water environmental change in Taihu watershed [J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(2): 111-116. (in Chinese))

[2] 崔广柏, 刘凌, 姚琪, 等. 太湖流域富营养化控制机理研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2009: 12-36.

[3] 华祖林, 顾莉, 刘晓东. 调水对改善浅水型湖泊水体的置换率研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(1):9-13, 17. (HUA Zulin, GU Li, LIU Xiaodong. Improving water exchange rate of shallow lakes through water diversion works [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(1):9-13,17. (in Chinese))

[4] 刘永, 郭怀成, 黄凯, 等. 湖泊-流域生态系统管理的内容与方法[J]. 生态学报, 2007, 27(12):5352-5360. (LIU Yong, GUO Huaicheng, HUANG Kai, et al. The theories and methods of lake-watershed ecosystem management [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5352-5360. (in Chinese))

[5] 秦伯强, 高光, 胡维平, 等. 浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1):9-16. (QIN Boqiang, GAO Guang, HU Weiping, et al. Reflection on the theory and practice of shallow lake

ecosystem restoration [J]. Journal of Lake Sciences, 2005, 17(1):9-16. (in Chinese))

[6] NES E H V, RIP W J, SCHEFFER M. A Theory for cyclic shifts between alternative states in shallow lakes [J]. Ecosystems, 2007, 10: 17-27.

[7] RAPPORT D J, MCMICHAEL A J, COSTANZA R. Assessing ecosystem health [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1999, 14(2): 69-70.

[8] MACH M E, MARTONE R G, CHAN K M A. Human impacts and ecosystem services:insufficient research for trade-off evaluation [J]. Ecosystem Services, 2015, 16: 112-120.

[9] 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(6): 1306-1315. (ZHANG Yanhui, YANG Guishan, WAN Rongrong. Ecosystem health assessment indicators for lakes [J]. Resources Science, 2014, 36(6): 1306-1315. (in Chinese))

[10] COSTANZA R, NORTAN B, HASKELL B. Ecosystem health: new goals for environmental management [M]. Washington D C: Island Press, 1992: 18-24.

[11] 李春华, 叶春, 赵晓峰, 等. 太湖湖滨带生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2012, 32(12):3806-3815. (LI Chunhua, YE Chun, ZHAO Xiaofeng, et al. Ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(12):3806-3815. (in Chinese))

[12] 廖静秋, 曹晓峰, 汪杰, 等. 基于化学与生物复合指标的流域水生态系统健康评价:以滇池为例[J]. 环境科学学报, 2014, 34(7): 1845-1852. (LIAO Jingqiu, CAO Xiaofeng, WANG Jie, et al. Basin-scale aquatic ecosystem health assessment with composite indices of chemistry and aquatic biota: a case study of Dianchi Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(7): 1845-1852. (in Chinese))

[13] 孔令阳, 李中强, 王双玲, 等. 基于生态适宜性分析的湖泊保护与利用:以湖北斧头湖为例[J]. 2012, 24(1): 67-74. (KONG Lingyang, LI Zhongqiang, WANG Shuangling, et al. Lake conservation an utilization based on ecological suitability analysis: a case study of lake Futou in Hubei Province [J]. Journal of Lake Sciences. 2012, 24(1): 67-74. (in Chinese))

[14] 毕温凯, 袁兴中, 唐清华, 等. 基于支持向量机的湖泊生态系统健康评价研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8):1984-1990. (BI Wenkai, YUAN Xinzhong, TANG Qinhua, et al. Investigation of health assessment for lake ecosystem based on support vector machine [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(8):1984-1990. (in Chinese))

(收稿日期:2015-12-28 编辑:彭桃英)