

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.005

长湖水质演变特征及水环境现状评价

刘建峰^{1,2}, 张翔^{1,2}, 谢平^{1,2}, 朱志龙³

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉大学, 湖北 武汉 430072; 3. 湖北省水文水资源局, 湖北 武汉 430070)

摘要:利用湖北省长湖2001—2011年的水质监测资料,分析了长湖年际及月际的水质演变规律。结果表明,2005年长湖水水质达到最差,然后呈逐渐好转趋势,至2011年,长湖水水质已有明显改善。在1个水文年内,长湖的水质优劣顺序依次是:丰水期,平水期,枯水期。利用模糊综合评价方法对2011年长湖水水质状况进行评价,结果表明,该年3个水期长湖水水质状况的最大隶属等级为Ⅰ类,水质较好。利用卡尔森指数法对长湖2011年丰水期进行富营养化评价,结果表明,除习家口水域外,全湖水体基本上处于中度富营养化水平。对长湖水环境压力进行分析,结果表明,长湖的生态系统正面临衰退困境,而主要污染物的年入湖量已大大超出长湖的纳污能力。

关键词:水质;模糊综合评价;卡尔森指数法;富营养化;水环境压力;长湖

中图分类号:X824

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2014)04-0018-05

Variation of water quality and present water environment assessment of Changhu Lake

LIU Jianfeng^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, XIE Ping^{1,2}, ZHU Zhilong³

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Hydrology and Water Resources Bureau of Hubei Province, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on water quality monitoring data from the period of 2001 to 2011 in Changhu Lake, in Hubei Province, the inter-annual and inter-monthly variations of water quality of the lake are analyzed. The results show that the water quality was worst in 2005, and then gradually became better. In 2011, the water quality improved significantly. In a hydrological year, the water quality diminished over the following stages: the wet period, the normal period, and the dry period. The method of fuzzy comprehensive evaluation was used to evaluate the water quality of the lake in 2011. The results show that the maximum membership degree was I for the three periods, indicating that the water quality was good. The Carlson trophic state index was adopted for eutrophication assessment of the water quality in the wet period. The results show that all the water areas were in a state of moderate eutrophication, except for the Xijiaokou water area. Analysis of water environmental pressure shows that the Changhu Lake ecosystem is facing the challenge of degradation. In addition, the amount of the main pollutants into the lake has exceeded its water environmental capacity.

Key words: water quality; fuzzy comprehensive evaluation; Carlson trophic state index method; eutrophication; water environmental pressure; Changhu Lake

近30年来,在人类活动的强烈干扰下,我国湖泊由贫-中营养状态为主逐步向富营养状态转变,富营养化湖泊的数量和面积呈逐年增加的趋势^[1]。

富营养化不仅表现为湖泊中藻类等浮游植物过度生长,同时还伴随着一系列水质恶化过程。整个湖泊生态系统也伴随着富营养化的发展,呈现出生物多

样性下降、生态系统趋于不稳定的现象^[2]。

长湖是湖北省第3大湖泊和重要的保护湿地。从20世纪90年代开始,长湖水质急剧恶化,富营养化水平不断提高,湖泊各项功能的发挥受到严重制约。目前关于长湖水环境的已有研究重点主要集中在水质评价、水生生物及污染源调查等方面^[3],尚无有关长湖水水质演变特征的研究。笔者利用2001—2011年的水质监测资料,分析长湖水质的演变特征,对长湖水环境现状进行评价,旨在为长湖水环境治理提供依据和借鉴。

1 研究区概况

长湖地处湖北省荆门市沙阳县,在荆州市沙市区和潜江市亦有分布。长湖水域范围介于东经112°12'04"~112°30'25"、北纬30°21'55"~30°31'22",水面面积122.5 km²,是湖北省第3大湖泊。长湖水域及水质监测点分布见图1。近些年来,由于受到长湖流域及周边城镇工业废水、生活污水、规模化畜禽养殖污水、农业面源污染,以及湖泊围栏网养殖的影响,长湖水体受到严重的有机污染^[3]。根据近11年长湖各监测点的水质监测资料,长湖所有水质监测站点大多数年份的水质均处于Ⅳ~劣Ⅴ类,超标污染指标主要为TP、TN、COD_{Mn}等。

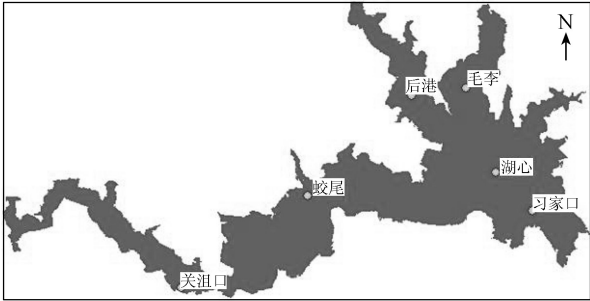


图1 长湖水域及水质监测点分布

2 长湖水质演变特征分析

2.1 长湖水质年际变化

根据2001—2011年长湖水质监测资料,得到长湖年平均水质浓度数据,采用综合污染指数法进行评价:

$$P_{ij} = C_{ij}/C_{i0} \tag{1}$$

$$\sum P_i = \sum_{i=1}^m P_{ij} \tag{2}$$

$$\sum P_j = \sum_{j=1}^n P_{ij} \tag{3}$$

式中: P_{ij} 为污染物分指数; C_{ij} 为污染物实测质量浓度; C_{i0} 为污染物Ⅲ类评价标准值; $\sum P_i$ 为综合污染指数; $\sum P_j$ 为综合污染分指数; m 为指标个数, n 为系列年份数^[4]。

根据水体具体情况,选取TP、TN、COD_{Mn}、BOD₅作为评价因子。通过计算,得到各年污染物分指数和综合污染指数,见表1。由表1可知:评价期内,长湖水质处于不达标状态,其中2001—2005年,综合污染指数基本呈递增趋势,说明长湖水质不断恶化;至2005年,综合污染指数达到最大,然后又逐渐减小,说明长湖水质有所好转;至2011年,各污染因子的质量浓度基本降到Ⅳ类水标准值以下,说明长湖水质已明显改善。在各项污染因子的综合污染分指数按从大到小顺序排序为:TP,TN,BOD₅,COD_{Mn}。

表1 长湖各污染物污染分指数和综合污染指数(年际)

年份	P_{ij}				$\sum P_i$
	TP	TN	COD _{Mn}	BOD ₅	
2001	2.39	1.28	0.95	0.98	5.6
2002	2.59	1.79	0.99	0.98	6.35
2003	0.84	1.76	0.84	0.62	4.06
2004	3.52	1.49	1.19	1.15	7.34
2005	3.54	2.27	1.29	1.19	8.29
2006	2.33	2.19	1.3	1.26	7.07
2007	2.46	1.66	1.25	1.58	6.95
2008	1.86	1.97	1.02	1.48	6.33
2009	1.70	2.30	0.99	1.24	6.23
2010	2.39	2.08	0.96	0.99	6.41
2011	1.16	1.08	0.78	0.75	3.78
$\sum P_j$	24.78	19.87	11.55	12.2	

2001—2011年,长湖各项水质指标的质量浓度变化情况见图2。从图2可知,2004—2010年时段内,TP、TN基本上处于严重超标状态,COD_{Mn}、BOD₅则轻度超标。其中,TP质量浓度在2005年达到峰值,之后总体呈明显下降趋势;TN质量浓度呈波形变化,峰值同样出现在2005年;COD_{Mn}质量浓度的年际变化比较平稳,在2005年之后,基本呈下降趋势,2010—2011年,已达到Ⅲ类水标准值以下;BOD₅的质量浓度变化趋势比较明显,2007年之前逐年增加,而2007年之后又基本呈直线下降态势。可以看出,这4个指标的质量浓度变化趋势并不同步,但近几年总体上呈下降趋势。

2.2 长湖水质年内变化

根据2001—2011年长湖水质监测资料,分别统计各月份的主要污染因子污染分指数及综合污染指数系列均值,见图3。

从图3可知,4项主要污染物中,COD_{Mn}超标的月份最少,月际间基本无变化;TN在3月份的污染分指数最大,其他月份均处于相对较低水平;BOD₅的变化趋势与TN正好相反;TP污染分指数和综合污染指数的变化趋势基本同步。分析综合污染指数变化趋势,可知,丰水期(6—9月)的水质明显优于枯水期(10月—次年1月)和平水期(2—5月)。在

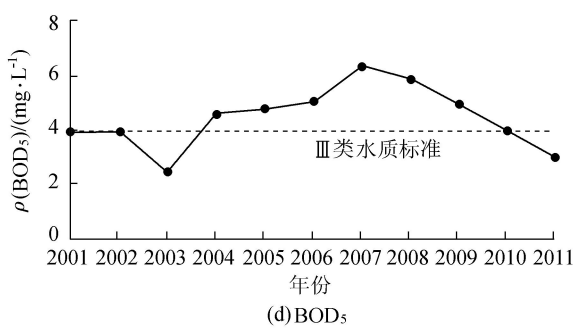
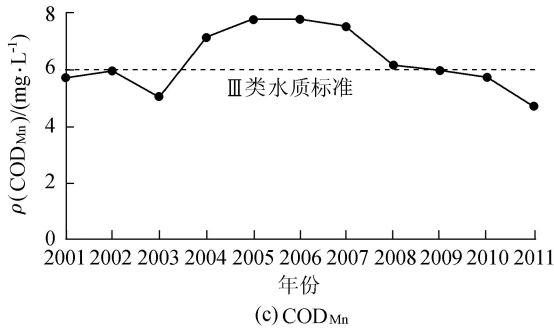
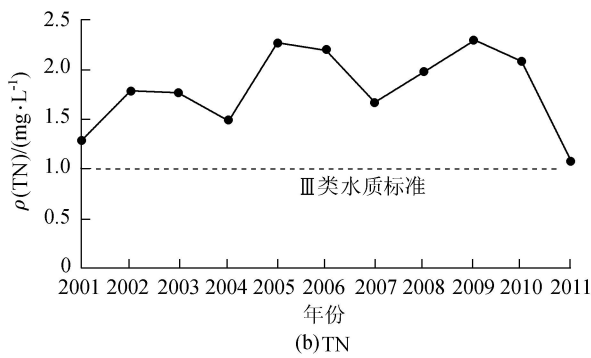
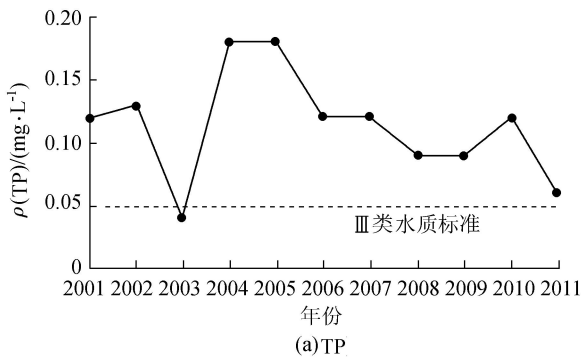


图2 长湖 TP、TN、COD_{Mn}、BOD₅ 质量浓度变化趋势

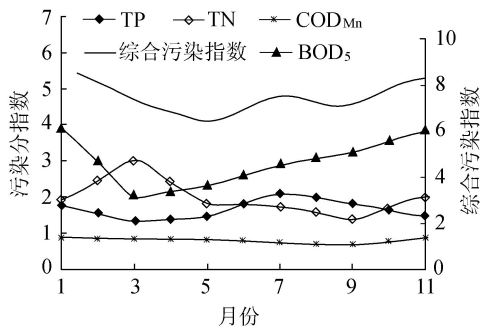


图3 长湖各污染物污染分指数和综合污染指数月际变化情况

枯水期末,水质达到最差,然后逐渐好转,至平水期末,水质达到最优,然后水质又有所恶化。根据水质变化趋势,可判断5月份之后长湖水水质持续改善至丰水期末。而实际上TP污染分指数和综合污染指数在夏季均出现了明显的上升。

根据2010年对长湖污染源情况调查分析的结果,农业面源污染为长湖流域主要污染源,农业面源污染等标污染负荷占全流域污染物总负荷的52.8%,而在排放的各项农业面源污染物中,TP的污染负荷比高达74.8%。每年6—7月,长湖流域农业活动强烈,污水量较大,TP质量浓度上升,成为主要农业面源污染源。而随着夏季来临,水温升高,水产养殖进入旺季,对水质也产生不利影响。

3 长湖水环境现状评价

3.1 水质现状模糊综合评价

利用单因子指数法和综合污染指数法来评价水

质状况,虽然简单易行,但不够客观全面,因此,笔者采用模糊综合评价法^[4-5]对长湖水水质现状进行评价。由于平水期、丰水期和枯水期长湖水水质有明显差异,因此分别选取平水期、丰水期和枯水期3个水期的水质监测结果进行评价。

a. 根据长湖水水质分级标准^[6]构建隶属函数。根据TP的5级标准构建各水质级别的隶属函数:

$$\text{I 类: } F(x) = \begin{cases} 1 & x \leq S_{i1} \\ \frac{S_{i2} - x}{S_{i2} - S_{i1}} & S_{i1} < x < S_{i2} \\ 0 & x \geq S_{i2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{II ~ IV 类: } F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq S_{i(j-1)}, x \geq S_{i(j+1)} \\ \frac{x - S_{i(j-1)}}{S_{ij} - S_{i(j-1)}} & S_{i(j-1)} < x \leq S_{ij} \\ \frac{S_{i(j+1)} - x}{S_{i(j+1)} - S_{ij}} & S_{ij} < x < S_{i(j+1)} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{V 类: } F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq S_{i4} \\ \frac{x - S_{i4}}{S_{i5} - S_{i4}} & S_{i4} < x < S_{i5} \\ 1 & x \geq S_{i5} \end{cases} \quad (6)$$

式中: S_{ij} 为第*i*个评价因子第*j*类评价标准的质量浓度值。同理,可求出其他各项指标的隶属函数(DO大小顺序相反)。

b. 将2011年3个水期的5项水质指标(TP, TN, NH₃-N, COD_{Mn}, DO)的实测质量浓度均值代入对应的隶属函数,建立监测结果的单因子模糊评价矩阵 **R**:

$$R_{\text{平}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.1 & 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0.89 & 0.11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.77 & 0.23 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{丰}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.32 & 0.68 \\ 0 & 0 & 0.99 & 0.01 & 0 \\ 0.64 & 0.36 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.45 & 0.55 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{枯}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.08 & 0.92 & 0 \\ 0.83 & 0.17 & 0 & 0 & 0 \\ 0.73 & 0.27 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.96 & 0.04 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

c. 确定各污染因子的权重,得到权重系数模糊子集 A 。对于越小越优型指标,计算公式为: $d_i = c_i/c_{0i}$;对越大越优型指标,计算公式为: $d_i = c_{0i}/c_i$ (d_i 、 c_i 、 c_{0i} 分别为第 i 种评价指标的权重、实测质量浓度和各水质类别质量浓度的均值)。然后,进行归一化处理,得到各污染因子的权重系数: $r_i = d_i/\sum d_i$,则权重系数模糊集 $A = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\}$ 。根据以上方法,得权重系数模糊集:

$$A_{\text{平}} = \{0.09, 0.03, 0.74, 0.07, 0.07\}$$

$$A_{\text{丰}} = \{0.14, 0.05, 0.48, 0.22, 0.11\}$$

$$A_{\text{枯}} = \{0.09, 0.06, 0.25, 0.39, 0.21\}$$

由模糊复合运算可以得到模糊综合评价矩阵:

$$B_{\text{平}} = A_{\text{平}} \cdot R_{\text{平}} = (0.73, 0.16, 0.02, 0, 0.09)$$

$$B_{\text{丰}} = A_{\text{丰}} \cdot R_{\text{丰}} = (0.42, 0.27, 0.17, 0.05, 0.09)$$

$$B_{\text{枯}} = A_{\text{枯}} \cdot R_{\text{枯}} = (0.49, 0.35, 0.07, 0.09, 0)$$

d. 加权综合判断^[7]。实际中最常用的判断方法是最大隶属度原则,但在某些情况下使用最大隶属度原则有些勉强,损失信息较多,甚至得出不合理的评价结果。因此,在模糊综合评价矩阵的基础上,为了利用信息进一步进行判断,把评价矩阵 B 与等级分布矩阵 $C=(1,2,3,4,5)^T$ 相乘,得到一个综合评价等级 $D=(B \cdot C)^T$ 。计算结果见表 2。

表 2 采用不同评价方法对 2011 年长湖水水质评价结果的比较

水期	加权综合评价等级	最大隶属度等级	单因子评价法水质评价结果
平水期	1.56	I	劣 V 类
枯水期	1.97	I	V 类
丰水期	1.76	I	V 类

e. 评价结果分析。由表 2 中的评价结果可知:根据最大隶属度原则,2011 年平水期、丰水期、枯水期水质的综合评价等级均为 I 类;而根据加权综合

判断,平水期、丰水期、枯水期水质综合评价等级依次为 1.56、1.97、1.76。由此可知,2011 年长湖水水质总体较好。不过,根据规范中的单因子评价方法,2011 年长湖 3 个水期的水质等级分别为:劣 V 类、V 类、V 类,属严重超标。评价结果的差异是由两种评价方法基于不同的原则造成的。单因子评价法中,超标最严重的污染因子对整个评价结果起决定作用,而模糊综合评价法则充分考虑了各污染因子对评价结果的贡献,并把贡献按权重进行分配,其评价结果是各参评污染因子综合作用的结果。

3.2 富营养化现状评价

3.2.1 富营养化评价

由于长湖全年基本上处于富营养化状态,其中以夏季富营养化水平最高,因此只需对夏季富营养化状况做出评价,即可反映长湖全年富营养化状况。采用中国环境监测总站制定的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》中推荐的综合营养状态指数法,对长湖监测水域进行富营养化评价,评价结果见表 3。

表 3 富营养化评价结果

水域	营养状态指数					综合评价状态指数	评价等级
	TP	TN	COD _{Mn}	SD	Chl-a		
后 港	71.18	57.19	50.49	87.98	81.46	70.63	重度富营养化
毛 李	58.51	52.56	44.44	95.85	74.34	65.86	中度富营养化
湖 心	58.51	53.84	46.93	74.54	75.44	62.93	中度富营养化
关沮口	76.36	61.95	42.27	78.07	79.49	68.61	中度富营养化
习家口	45.71	41.00	35.91	61.09	25.00	40.33	中营养化
蛟 尾	62.43	69.85	43.11	69.95	77.44	65.53	中度富营养化

由表 3 可知,除习家口水域为中营养水平外,其他水域基本上处于中度富营养状态。其中后港水域的富营养化程度最高,这与后港水域的湖湾位置及其污染物排放类型有密切关系。在湖心位置,富营养化程度相对较低,但也达到了中度富营养化水平。习家口水域为长湖的出流处,水质相对较好,未发生富营养化。整体来看,除习家口水域外,其他水域的富营养化水平均较高,各水域的富营养化水平差异不大。

3.2.2 富营养化类型分析

Redfield 等^[8]认为浮游植物在光合作用中吸收一定的 N/P 原子比,该比值为 16,当 $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP}) > 7$ 时,则浮游植物生长受磷限制。统计 2011 年夏季各水域 TN、TP 质量浓度值,进行富营养化类型分析,分析结果见表 4。

表 4 2011 年夏季各水域 $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$ 值

水域	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP})$
后 港	1.17	0.24	4.88
毛 李	0.89	0.11	8.09
湖 心	0.96	0.11	8.73
关沮口	1.55	0.33	4.70
习家口	0.45	0.05	9.00
蛟 尾	2.47	0.14	17.64

由表 4 可以看出,除后港和关沮口水域 $\rho(\text{TN})/\rho(\text{TP}) < 7$,浮游植物生长受氮限制外,其他水域均受磷限制。因此,要想控制长湖的富营养化进程,关键在于控制磷的污染负荷,而对外源输入的控制成为关键。

3.3 长湖水环境压力分析

根据上文分析可知,目前长湖水质正在逐步好转,但 TP、TN 等指标仍然超标严重,富营养化水平较高。因此,查明长湖承受的水环境压力,才能有效地治理水质污染,恢复其经济、生态及美学价值。

3.3.1 生态压力

20 世纪 50 年代至今,长湖 33 m 水位对应的湖面面积减少了 31.3%,相应容积减少了 1.45 亿 m^3 。水体的透明度从 1985 年的 2 m 以上降到 20 世纪 90 年代的不到 1m,至 2011 年,水体的透明度已降至 0.5m 以下,而在圈湖养殖区水体透明度甚至更低。在水生生物方面,与 1985 年相比,长湖的水生植物覆盖率与生物量分别降低了 54.85% 和 69.78%,尤以挺水植被与浮水植被面积丧失最严重。此外,长湖鱼类资源从原来的 60 多种降至 2011 年的 30 多种,且质量也已大不如前^[3]。由此可知,长湖正面临着水生生物多样性减少、生态结构功能退化的困境。目前越来越多的研究认为,以水生高等植物为优势的湖泊生态系统结构退化、功能丧失,是湖泊出现藻型富营养化现象和水质恶化的内因^[2,8]。由此可见,长湖可能会出现“富营养化—生态结构退化—加剧富营养化”的恶性循环。

3.3.2 纳污压力

根据 2010 年长湖流域污染物调查结果,流域内农业污染、城镇生活污染、工业污染、水产养殖污染的贡献率分别为 58.7%,31.0%,6.5%,3.8%。从 2011 年长湖水环境容量计算结果(表 5),可知长湖污染物入湖量已超过其纳污能力。

表 5 长湖水环境容量及污染物排放情况 t/a

污染物	有效水环境容量	污染物入湖量
TP	77.31	333.48
TN	1546.16	4985.44
COD	10115.68	11366.78
NH ₃ -N	490.13	931.70

4 结 论

长湖的主要污染因子为 TP、TN、COD_{Mn}、BOD₅ 等,其中又以 TP、TN 超标最为严重。从 2005 年以来,长湖水质整体状况有所改善,但个别指标仍然严重超标,使得水质一直处于Ⅳ类及以下类别。长湖各水期水质变化比较明显,水质以丰水期最优,平水期次之,枯水期最差,一般情况下水质最优的月份为

5 月。根据模糊综合水质评价结果,2011 年长湖水水质最大隶属等级为Ⅰ类,主要贡献污染物为 TP、TN。长湖的富营养化水平较高,除习家口水域外,全湖水体基本上处于中度富营养化水平。长湖目前面临着较大的水环境压力,水生态结构退化明显,污染物入湖量严重超标。

参考文献:

[1] 许其功,曹金玲,高如泰,等.我国湖泊水质恶化趋势及富营养化控制阶段划分[J].环境科学与技术,2011,34(11):147-151. (XU Qigong, CAO Jinling, GAO Rutai, et al. Trend of water quality deterioration and eutrophication control phases partition in China [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11): 147-151. (in Chinese))

[2] 秦伯强,高光,朱广伟,等.湖泊富营养化及其生态系统响应[J].科学通报,2013,58(10):855-864. (QIN Boqiang, GAO Guang, ZHU Guangwei, et al. Lake eutrophication and its ecosystem response [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(10): 855-864. (in Chinese))

[3] 李兆华,李瑞勤.长湖水污染防治研究[M].北京:科学出版社,2009:42-43.

[4] 杨文斌,王国祥,张利民,等.常熟市昆承湖水质时空变异特征和环境压力分析[J].自然资源学报,2007,22(2):185-192. (YANG Wenbin, WANG Guoxiang, ZHANG Limin, et al. On temporal-spatial variability of water quality and environmental stress of Kuncheng Lake in Changshu City [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 185-192. (in Chinese))

[5] 徐兵兵,张妙仙,王肖肖.改进的模糊层次分析法在南苕溪临安段水质评价中的应用[J].环境科学学报,2011,31(9):2066-2072. (XU Bingbing, ZHANG Miaoxian, WANG Xiaoxiao. Application of an improved fuzzy analytic hierarchy process in water quality evaluation of the South Tiaoxi River, Lin'an Section [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 2066-2072. (in Chinese))

[6] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].

[7] 张龙江.水质评价的模糊综合评判:加权平均复合模型应用[J].环境工程,2011,19(6):53-55. (ZHANG Longjiang. Application of fuzzy comprehensive judgment and weighted average models to water quality assessment [J]. Environmental Engineering, 2011, 19(6): 53-55. (in Chinese))

[8] 高永霞,朱广伟,何冉冉,等.天目湖水质演变及富营养化状况研究[J].环境科学,2009,30(3):673-679. (GAO Yongxia, ZHU Guangwei, HE Ranran, et al. Variation of water quality and trophic state of Lake Tianmu, China [J]. Environmental Science, 2009, 30(3): 673-679. (in Chinese))

(收稿日期:2014-02-16 编辑:彭桃英)