

太湖湖泊生态系统健康评价*

胡志新^{1,2}, 胡维平¹, 谷孝鸿¹, 陈宇炜¹, 季江¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 太湖湖泊生态系统研究站, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 湖泊生态系统健康包含两个方面的内涵: 满足人类社会合理要求的能力和湖泊生态系统自我维持与更新的能力. 获知湖泊生态系统健康状况及其区域分异特征, 对于湖泊管理具有重要意义. 本文基于对太湖的野外调查, 计算了表征湖泊生态系统健康的系统能、系统能结构、生态缓冲容量和湖泊营养状态指数. 聚类分析结果表明, 太湖不同湖区生态系统健康状况存在一定差异, 东部湖区较好, 西部湖区较差, 呈现由东南部湖区向西北部湖区递减的趋势. 该结果对进一步研究湖泊生态系统健康评价指标阈值具有重要的参考意义.

关键词: 生态系统健康; 评价; 指标; 空间分异; 太湖

Assessment of Ecosystem Health in Lake Taihu

HU Zhixin^{1,2}, HU Weiping¹, GU Xiaohong¹, CHEN Yuwei¹ & JI Jiang¹

(1: Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

Abstract: Ecosystem health is a new field in ecology and environmental management and it is about fostering a new integrative science. Lake ecosystem health refers to a state of a lake both supplying services for people and maintaining its function and complexity. Assessment on lake ecosystem health is the basis of lake environmental management and ecosystem control, so it is important to learn the ecosystem health and spatial differentiation characteristics of a lake. In this case study for Lake Taihu, a large shallow eutrophic lake, an attempt to apply exergy, structural exergy, ecological buffer capacity and trophic state index to the assessment of the lake ecosystem health was presented. The results revealed there was different ecosystem health to some extent in each area of Lake Taihu through cluster analysis. The ecosystem health of East Lake Taihu was the best among the different areas of Lake Taihu. The ecosystem health of the east part near the bank and Lake Gonghu was better. The ecosystem health of the center part and the west part of Lake Taihu was worse. That is to say, the ecosystem health of the east part was better than that of the west part in Lake Taihu, and moreover, the ecosystem health in different areas of Lake Taihu descended from the southeast part to the northwest. The results will give some advice for environmental management of Lake Taihu and can be used to set up the standard for evaluating ecosystem health of shallow eutrophic lakes.

Keywords: Ecosystem health; assessment; indicator; spatial differentiation; Lake Taihu

根据 Costanza 等关于生态系统健康的定义^[1], 湖泊生态系统健康可理解为湖泊内的关键生态组分和有机组织完整且没有疾病, 受突发的自然或人为扰动后能保持原有的功能和结构, 物质循环、能量和信息流动未受到损害, 整体功能表现出多样性、复杂性和活力^[2,3]. 也就是说, 湖泊生态系统健康包含两个方面的内涵: 满足人类社会合理要求的能力和湖泊生态系统自我维持与更新的能力^[4,5].

由于人口增加和工农业生产的发展, 湖泊生态系统承受的外部压力逐年增加, 生态系统日益退化, 并产生严重的环境问题. 特别是富营养化问题, 是我国湖泊目前普遍遇到的环境问题, 严重威胁到社会经济的

* 国家自然科学基金项目(40271100)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-12-II-01)和中国科学院野外台站研究基金项目联合资助.

2004-04-02 收稿; 2005-04-12 收修改稿. 胡志新, 男, 1980年生, 硕士研究生, E-mail: zxhu@niglas.ac.cn.

可持续发展和人们身体健康^[6]。目前为止,湖泊环境问题受到了各级政府部门高度重视,对滇池、太湖、巢湖等已进行了大规模治理,但已实施治理工程的效果与期望达到目标之间的差距较大。究其原因,部分为治理措施未到位,更重要的是对湖泊环境问题产生的机理认识不足,目标定得不客观,相应措施不科学。大量研究表明:湖泊环境问题,多数是环境对生态系统的压力过大,生态系统的结构、功能发生剧烈变化后的恶果。湖泊管理和环境整治的实践也表明:没有弄清湖泊生态系统功能、结构和演变规律,难以科学制定湖泊环境管理依据和整治措施,难以综合、准确评估管理和整治措施的效果。迄今为止,我国湖泊整治工作存在一定盲目性,往往仅从环境角度,开展治理工作,忽视生态建设与管理。因此,加强湖泊生态系统结构、功能及演化机理研究,建立切实可行、可客观地表征湖泊生态系统健康的评价指标体系与方法,对湖泊环境整治和管理来说,显得十分迫切,而且具有重要意义。

基于此,本研究针对大型浅水湖泊太湖的富营养化和藻类水华等生态环境问题,利用生态热力学理论及相应指标,首次开展了不同营养类型生态系统健康状况研究,以期对太湖环境综合治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样与实验方法

太湖是我国第三大淡水湖泊,水面积为 2338 km²,是我国三大富营养化湖泊之一^[7]。太湖生态系统结构与营养盐水平空间分异较大,为准确表征其生态系统结构与水质状况,本研究在太湖均匀布设采样点 15 个(图 1),藻型湖区 5 个(JTB1-5),草型湖区 6 个(JTB7-12),草藻过渡型湖区 2 个(JTB14 和 JTB15),湖心区 2 个(JTB6 和 JTB13),其中有 5 个测点位于河口附近(JTB1、JTB4、JTB5、JTB7 和 JTB15)。

2002 年 9 月 25-27 日、12 月 26-28 日和 2003 年 4 月 26-28 日、7 月 21-22 日对上述测点进行了四次采样。监测项目包括物理化学指标(SD、SS、TN、TP、COD 和 Chl-a 等),生物指标(浮游植物、浮游动物、底栖动物和大型水生植物的生物量及其干重)以及其他一些指标(水深和水温等)。物理化学和生物指标的分析方法见《湖泊生态调查观测与分析》^[8]。

1.2 评价方法

湖泊生态系统健康的评价方法较多^[9],本文采用 Jørgensen 等 1995 年在系统生态学能质概念基础上构建的目标函数系统能(exergy)、系统能结构(structural exergy)和生态缓冲容量(ecological buffer capacity)以及湖泊营养状态指数(TSI, trophic state index)等指标对太湖生态系统健康的区域分异状况进行评价^[10,11]。徐福留曾用该方法来评价巢湖生态系统健康,认为运用系统能、系统能结构和生态缓冲容量等指标对湖泊生态系统健康状况进行评价的指标体系和方法是可行的^[12]。

系统能为生态系统回复到无生命混沌平衡的无序状态所能做的功,表征湖泊生态系统所含的生物量及其所携带的信息量,可测量湖泊远离生态系统热力平衡状态的距离,可表示为^[12,13]:

$$Ex = \sum_{i=1}^n W_i \times C_i \quad (1)$$

其中, W_i 为生态系统第 i 种有机体或有机物信息含量(权重), C_i 为生态系统第 i 种有机体或有机物的干重含量, n 为生态系统有机体种类总数。 W_i 值是根据生态系统中某一种生物有机体所含的无重复基因的个数来确定的,不同物种有机体所含的无重复基因数不同,甚至相差很大(表 1)^[13]。

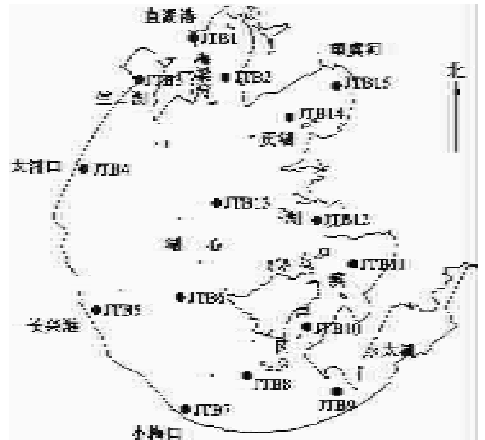


图 1 太湖采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites distribution in Lake Taihu

表1 几类有机体所含的无重复基因近似数及相应的信息含量权重值^[13]

Tab. 1 Approximate number of non-repetitive genes and conversion factor in selected organisms

	碎屑	细菌	浮游植物	浮游动物	底栖动物	水生植物	鱼
基因个数	0	600	850	10000 - 15000	10000 - 15000	10000 - 30000	100000 - 120000
权重	1	3	3.9	30 - 46	30 - 46	30 - 87	300 - 370

系统能结构为生态系统单位生物量和有机质所蕴含的系统能, 独立于湖泊生态系统的营养水平, 表征湖泊生态系统利用环境资源的能力. 系统能结构可用公式表示为^[14]:

$$Ex_{st} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_t} \times W_i \quad (2)$$

其中, C_i 为湖泊生态系统所含干重的总和.

生态缓冲容量是生态系统状态变量的变化量与其所受外部胁迫的变化量之比. 外部胁迫是指能影响湖泊生态系统状况的外部条件变化, 比如污染物的排入和排出, 底泥的沉积与再悬浮, 风, 温度, 太阳辐射等. 湖泊生态系统状态变量是表征湖泊生态系统结构和功能的量, 比如浮游植物和浮游动物生物量的变化等. 根据定义生态缓冲容量可表示为:

$$\beta = \frac{1}{\delta(c)/\delta(f)} \quad (3)$$

其中, c 为状态变量, f 为外部胁迫. 生态缓冲容量为负值表示湖泊受外部胁迫向反方向演变. 太湖属于磷为浮游植物生长限制性因子的湖泊^[15], 而浮游植物是湖泊中主要的初级生产者, 在湖泊生态系统中具有重要的地位. 因此, 可以用浮游植物生物量和总磷含量的变化来计算生态缓冲容量($\beta_{(TP)(phyto)}$)的值.

湖泊富营养化是由于营养物质在水中积蓄过多, 造成水体生产力从较低的贫营养状态逐步向生产力较高的富营养状态过渡的一种现象. Carlson 和相崎守弘等人根据湖泊水体中叶绿素与 TP、SD、COD、TOC 等水质指标间的相关关系, 给出了一套湖泊营养状态指数的分级指标, 从而可用以综合各参数的 TSI 指数评价结果来判断湖泊的营养状态^[15].

本文将碎屑、浮游植物、浮游动物、底栖动物和大型水生植物看作太湖的主要物种来计算系统能(Ex)和系统能结构(Ex_{st}); 用浮游植物干重和总磷含量变化量的绝对值来计算生态缓冲容量($|\beta_{(TP)(phyto)}|$), 2002年9月份, 2002年12月份, 2003年4月份和2003年7月份四次的值分别选用2002年12月份, 2002年9月份, 2003年4月份, 2002年12月份, 2003年7月份和2003年4月份的资料作为参照变量来计算, 其中2002年12月份和2003年4月份的值两个参照计算值的平均值; 同时选用透明度、悬浮质、 COD_{Mn} 、总氮、总磷、叶绿素 a 和浮游植物生物量来计算营养状态指数(TSI).

1.3 评价原则

系统能(Ex)、系统能结构(Ex_{st})和生态缓冲容量($|\beta|$)指标是相互独立的, 只有将三个指标结合起来, 才能对湖泊生态系统的健康状况进行评价. 根据 Jørgensen 等人^[10-12]的观点, (1) 如果湖泊生态系统的 Ex 、 Ex_{st} 和 $|\beta|$ 的值较大, 湖泊就处于相对健康的状态; (2) 如果 Ex 和 Ex_{st} 较大, $|\beta|$ 较小, 则需要引入其它的参数作为补充, 如 TSI 指标; (3) 如果 Ex 较大, Ex_{st} 和 $|\beta|$ 较小, 湖泊就处于富营养化的不健康状态.

1.4 聚类分析

聚类分析就是根据事物本身的特性, 按照一定的准则对所研究的事物进行归类. 指标聚类树状图可以形象的反映类间的距离(相似性或亲疏关系), 有效的揭示类间的联系. 选择不同的距离标准, 可以得到不同的组, 组内指标具有相似性. 对太湖各样点以系统能、系统能结构、生态缓冲容量和营养状态指数等指标在 SPSS 软件下做聚类分析, 选择最远邻法(Furthest Neighbor)为聚类算法, 对变量标准化到 0 - 1 值.

2 结果与讨论

2.1 太湖生态系统健康指标

太湖各样点系统能、系统能结构、生态缓冲容量和营养状态指数的四次采样统计结果见表 2, 四次采样

平均值空间变化状况见图2和图3.

表2 太湖不同样点生态系统健康指标统计($\bar{X} \pm SD$)
Tab.2 Calculation of ecological indicators in different sites of Lake Taihu

不同样点	系统能($\times 10^5$ J/L)	系统能结构($\times 10^8$ J/g)	生态缓冲容量	营养状态指数
JTB1	14.62 ± 13.07	1.10 ± 1.07	1.93 ± 1.97	73.89 ± 5.59
JTB2	53.98 ± 83.46	2.51 ± 2.72	0.55 ± 0.58	73.43 ± 8.56
JTB3	42.59 ± 65.23	1.76 ± 1.99	0.29 ± 0.12	74.79 ± 4.59
JTB4	5.97 ± 1.52	0.61 ± 0.15	0.28 ± 0.28	70.32 ± 5.21
JTB5	8.45 ± 9.67	1.04 ± 0.91	0.26 ± 0.23	65.43 ± 1.43
JTB6	11.70 ± 19.06	1.53 ± 1.91	0.48 ± 0.44	61.32 ± 3.71
JTB7	81.73 ± 54.60	3.49 ± 2.04	0.26 ± 0.21	63.00 ± 1.99
JTB8	551.81 ± 607.31	5.59 ± 0.78	0.93 ± 0.47	62.93 ± 5.38
JTB9	2342.12 ± 1796.91	5.48 ± 0.09	22.02 ± 26.35	48.54 ± 9.20
JTB10	907.48 ± 592.04	5.10 ± 0.74	0.17 ± 0.08	53.39 ± 11.60
JTB11	614.05 ± 534.01	5.14 ± 0.62	1.50 ± 1.18	57.75 ± 9.90
JTB12	534.45 ± 628.22	4.83 ± 1.36	0.61 ± 0.47	55.07 ± 9.34
JTB13	13.42 ± 9.19	1.98 ± 1.19	0.12 ± 0.05	65.71 ± 3.47
JTB14	279.44 ± 343.82	4.43 ± 1.28	0.34 ± 0.21	61.18 ± 4.50
JTB15	1203.03 ± 617.84	5.47 ± 0.08	0.09 ± 0.06	59.86 ± 7.73

系统能反映湖泊生态系统的发展水平与生存能力^[12]. 对于一般的生态系统而言,系统对环境的响应有使 E_x 变大的趋势,其值越大,表明湖泊对外作功的能力越强. 系统能值在 JTB9 样点很大,该样点位于东太湖附近,全年水草繁盛,系统所含的生物量很大. JTB8、JTB10、JTB11、JTB12、JTB14 和 JTB15 样点位于草型和草藻过渡型湖区,大型沉水植物占优,系统能值相对较大. 草型湖区 JTB7 样点系统能值偏小,该样点位于小梅口附近,受人为活动影响,水生植被遭到破坏,生态环境恶化. 其余样点位于藻型湖区和湖心区,系统所含的生物量较小,系统能值较小,其中, JTB4、JTB5、JTB6 和 JTB13 样点值相对较小.

系统能结构反映湖泊生态系统的多样性和复杂性^[12]. 一般而言,其值越大,湖泊生态系统结构就越复杂. 系统能结构的值在 JTB8、JTB9、JTB10、JTB11、JTB12、JTB14 和 JTB15 样点较大, JTB1、JTB3、JTB4、JTB5 和 JTB6 样点较小,这与系统能值的空间分异状况相似.

生态缓冲容量反映湖泊生态系统的稳定性和弹性^[12]. 其值越大,表明湖泊生态系统越稳定,自我维持和恢复的能力越强. 生态缓冲容量值在 JTB9 样点很大,表明东太湖生态系统非常稳定,抗干扰能力强. JTB1、JTB8、JTB11 和 JTB12 样点的生态缓冲容量值较大, JTB10、JTB13 和 JTB15 样点值较小. JTB1 样点位于梅梁湾直湖港附近,入湖河水污染严重,受其影响,生态系统处于难以修复的重污染阶段. JTB8、JTB11 和 JTB12 样点生态系统较为复杂,对人类活动的不利影响具有一定的承受能力. JTB10 样点位于东山、西山之间的航道上,受人类活动影响大,系统不稳定. JTB13 样点位于湖心,水深浪大,系统较为脆弱. JTB15 样点位于贡湖湾底,受望虞河调水(引江济太)影响而表现为结构和功能的极不稳定.

对富营养化湖泊而言,营养状态指数值越小,水质越好,湖泊越健康. 营养状态指数的值 JTB9 样点最小, JTB10、JTB11 和 JTB12 样点较小,这些样点位于东太湖和湖东滨岸区,远离污染源,水质较好. JTB1、JTB2、JTB3 和 JTB4 样点位于太湖西北部,污染严重,水质较差,湖泊营养状态指数值较大.

2.2 太湖生态系统健康评价

图4为太湖各样点生态系统健康指标聚类分析树形图,图中横坐标为样点间的距离,距离越近,表明

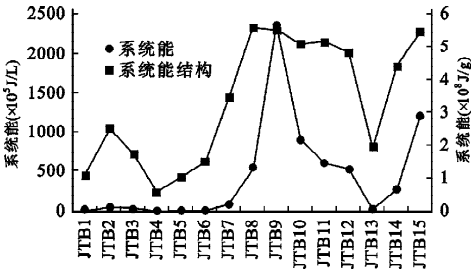


图2 太湖各样点系统能和系统能结构平均值的变化

Fig. 2 The mean of exergy and structural exergy in different sites of Lake Taihu

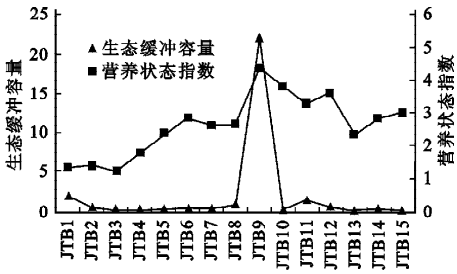


图3 太湖各样点生态缓冲容量和营养状态指数平均值的变化

Fig. 3 The mean of ecological buffer capacity and trophic state index in different sites of Lake Taihu

两者越相似. 选择5为组间距离标准,得到差异明显的3个组. 根据湖泊生态系统健康的评价原则,结合湖泊营养状态指数,对各组不同样点的指标值进行定性分析和评价(表3).

东太湖附近的JTB9样点,系统能和生态缓冲容量值很大,系统能结构值较大,营养状态指数值最小. 与其它湖区明显不同的是东太湖仍保持茂盛的水生植被,湖水清澈,透明度较高,水质较好^[7],是太湖各湖区中健康状况最好的. 小梅口(JTB7)、湖东滨岸区(JTB8、JTB10、JTB11、JTB12)、贡湖(JTB14)和望虞河(JTB15)等样点系统能和系统能结构值一般较大,营养状态指数值相对较小. 这些测点所在的湖区分布有一些大型水生植物,水质相对较好,处于相对较好的亚健康状况. 直湖港(JTB1)、梅梁湾(JTB2)、竺山湖(JTB3)、大浦口(JTB4)、长兴港(JTB5)和湖心(JTB6、JTB13)等样点系统能和系统能结构值一般较小,生态缓冲容量值相对较大,营养状态指数值一般较大,处于相对较差的不健康状况. 其中,梅梁湾、竺山湖和大浦口一带受无锡、常州等地城镇工业废水、生活污水及农田大量施肥的影响,已成为富营养化最严重的水域,也是目前太湖蓝藻水华爆发最严重的湖区. 湖心风大浪大,不利于大型水生植物生长,受梅梁湾等湖区的影响,水质较差,生态系统脆弱.

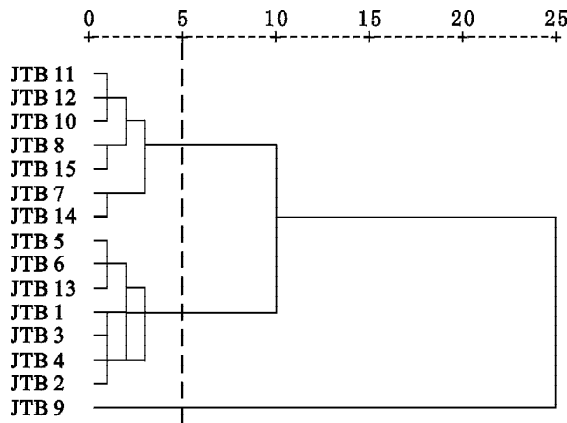


图4 太湖各样点聚类分析的树形图

endrogram of hierarchical cluster analysis for different sites of Lake Taihu

本文用碎屑、浮游植物、浮游动物、底栖动物和大型水生植物来计算系统能(Ex)和系统能结构(Ex_{st})的值,由于监测分析的难度而没有考虑细菌、鱼和虾等,所得到的 Ex 和 Ex_{st} 值是一个相对的指标,所做的评价是不完全评价. 徐福留^[12]和刘永等^[14]在评价巢湖和滇池生态系统健康时只用了浮游植物和浮游动物来计算 Ex 和 Ex_{st} 值,相比较而言,本文所用资料较丰富,评价更深入. 此外,由于采样点个数和次数有限,以后还应该增加采样点个数和采样次数,以便能更好反映太湖生态系统健康的状况及其区域分异特征.

表3 太湖不同样点生态系统健康指标评价¹⁾
Tab.3 Indicator values in different sites of Lake Taihu

不同样点	系统能	系统能结构	生态缓冲容量	营养状态指数	健康状况
JTB9	+++	++	+++	—	健康
JTB11	++	++	++	—	亚健康
JTB12	++	++	++	—	亚健康
JTB10	++	++	—	—	亚健康
JTB15	++	++	—	—	亚健康
JTB8	++	++	++	+	亚健康
JTB14	++	++	+	+	亚健康
JTB7	+	+	+	+	亚健康
JTB6	—	—	+	+	不健康
JTB5	—	—	+	++	不健康
JTB13	—	+	—	++	不健康
JTB2	+	+	++	+++	不健康
JTB1	+	—	++	+++	不健康
JTB3	+	—	+	+++	不健康
JTB4	—	—	+	+++	不健康

1) +++表示指标值很大或最大; ++表示指标值较大; +表示指标值居中; —表示指标值较小; —表示指标值很小或最小。

3 结语

本文基于野外调查资料,计算了表征湖泊生态系统健康的系统能、系统能结构、生态缓冲容量和湖泊营养状态指数,聚类分析结果表明,太湖不同湖区生态系统健康状况存在一定差异。东太湖(JTB9)是太湖各湖区中健康状况最好的;小梅口(JTB7)、湖东滨岸区(JTB8、JTB10、JTB11、JTB12)、贡湖(JTB14)和望虞河(JTB15)等湖区处于相对较好的亚健康状况;直湖港(JTB1)、梅梁湾(JTB2)、竺山湖(JTB3)、大浦口(JTB4)、长兴港(JTB5)和湖心(JTB6、JTB13)等湖区处于相对较差的不健康状况。总的来说,太湖生态系统健康状况为,东部湖区较好,西部湖区较差,且呈现由东南部湖区向西北部湖区递减的趋势。该结果对进一步研究湖泊生态系统健康评价指标阈值具有重要的参考意义,为太湖湖泊管理提供一定的科学依据。

致谢:本文水化学由实验师钱荣树和黄建明等人分析,周万平研究员在浮游植物生物量的统计中给予了一定帮助,在此一并表示感谢!

4 参考文献

- [1] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health. In: Costanza R, Norton B G, Haskell B D, ed. *Ecosystem health: new goals for environmental management*. Washington D. C.: Island Press, 1992: 239 - 256.
- [2] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 I. 理论. 生态学报, 2002, 22(7): 1005 - 1011.
- [3] 崔保山,杨志峰. 湿地生态系统健康的时空尺度特征. 应用生态学报, 2003, 14(1): 121 - 125.
- [4] 李瑾,安树青,程小莉等. 生态系统健康评价的研究进展. 植物生态学报, 2001, 25(6): 641 - 647.
- [5] Rapport D J. Ecological footprints and ecosystem health: complementary approaches to a sustainable future. *Ecological Economics*, 2000, 32: 367 - 370.
- [6] 濮培民,王国祥,李正魁等. 健康水生态系统的退化及其修复——理论、技术及应用. 湖泊科学, 2001, 13(3): 193 - 203.
- [7] 秦伯强,胡维平,陈伟民等编著. 太湖水环境演化过程与机理. 北京:科学出版社, 2004.
- [8] 黄祥飞主编. 湖泊生态调查观测与分析. 北京:中国标准出版社, 2000.
- [9] 马克明,孔红梅,关文彬等. 生态系统健康评价:方法与方向. 生态学报, 2001, 21(12): 2106 - 2116.

- [10] Jørgensen S E. Exergy and ecological buffer capacities as measures of ecosystem health. *Ecosystem Health*, 1995, **1**(3): 150 – 160.
- [11] Jørgensen S E, Nielson S N, Mejer H F. Energy, environ, exergy and ecological modelling. *Ecological Modelling*, 1995, **77**: 99 – 109.
- [12] Xu F-L. Ecosystem health assessment of Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 1996, **2**: 101 – 109.
- [13] Jørgensen S E. Application of exergy and specific exergy as ecological indicators of coastal areas. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, **3**: 419 – 430.
- [14] 刘永, 郭怀成, 戴永立等. 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.
- [15] 孙顺才, 黄漪平主编. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993.