ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第1期

Vol.35 No.1

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第1期
2014年1月15日

目 次

太湖水质与水生生物健康的关联性初探

周笑白[1,2],张宁红[2],张咏[2],牛志春[2],刘雷[2],于红霞[1*]
(1. 南京大学环境学院,南京 210046; 2. 江苏省环境监测中心,南京 210036)

摘要: 分别利用内梅罗指数法和底栖动物完整性指数法评价 2008 ~ 2012 年太湖水质和水生生物健康状况. 结果表明,太湖全湖水质受到污染,水生生物健康基本处于亚健康状态. 水质评价和水生生物评价结果在较大的尺度上呈现相同的趋势:从全湖尺度上看,水质和水生生物评价都显示东太湖的水生态健康状况总体上好于太湖其他部分. 从时间上看,2008 ~ 2012 年太湖水质等级和水生生物健康状况均低于 20 世纪 60 年代的水平. 两种评价结果在短时间尺度和某些点位间存在差异,这是由于:①两种评价方法关注的时间尺度有所差异; ②水生生物健康不仅与水质有关,还与水体生境有关. 有机污染物和过剩营养盐是影响太湖水质和水生生物健康状况的主要因素,因此降低太湖及其入湖河流中有机污染物和营养盐的浓度是改善太湖水质和水生态功能的有效方法.

关键词:水质评价; 水生生物健康评价; 内梅罗指数法; 底栖动物完整性指数法; 太湖
中图分类号: X826 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)01-0271-08

Preliminary Study on the Relationship Between the Water Quality and the Aquatic Biological Health Status of Taihu Lake

ZHOU Xiao-bai[1,2], ZHANG Ning-hong[2], ZHANG Yong[2], NIU Zhi-chun[2], LIU Lei[2], YU Hong-xia[1]
(1. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 2. Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: Nemerow index method and benthic index of biological integrity method have been used to evaluate the water quality and the health status of aquatic organisms in Taihu Lake during 2008-2012, respectively. The results showed that the water in the whole Taihu Lake was polluted, and the aquatic organisms were basically kept in sub-health state. The results of the water quality and aquatic biological assessment exhibited generally the same trend at a large scale. In the view of the whole lake, the water quality and aquatic health status in East Taihu Lake were better than those of the other parts. In the view of time, the water quality and aquatic health status during 2008-2010 were worse than those of the lake in the 1960s. The results observed from the two assessment methods were not the same during short periods of time and in some special sample points, which were attributed to the following reasons: ① the two assessment methods focused on different time scales and ② the aquatic biological health status was related to the water quality as well as the environmental habitat. Since organic pollutants and excessive nutrients were the main factors influencing the water quality and aquatic health status, reducing the concentrations of the organic pollutants and inorganic nutrients should be a feasible method to improve the water quality and the ecological function of Taihu Lake.

Key words: water quality assessment; aquatic biological assessment; nemerow index method; benthic index of biological integrity method; Taihu Lake

人类在开发利用太湖的水资源过程中,将大量污染物和营养盐不断排入太湖,严重影响了太湖水环境安全和水生态功能[1,2]. 为了解太湖水环境状况,制定合理的太湖开发和管理措施,我国对太湖进行了例行水质监测评价和多次水生生物监测评价[3~5].

水质和水生生物监测和评价都为太湖管理提供了理论依据,但两种评价方法存在分歧. 如从 20 世纪 90 年代开始太湖水质恶化趋势得到初步遏制,总磷、总氮、COD 和 BOD 等主要污染指标均有所好转,但蓝藻水华在 1999 ~ 2007 年间发生面积和持续时间却有所增长,水生生物健康状况恶化[6]. 评价结果的差异为太湖的管理和治理提出了难题. 分析两种方法评价结果的异同,对太湖水资源管理和水环境保护具有非常重要的意义.

本研究在太湖湖体布设了 9 个点位,评估了 2008 ~ 2012 年的湖区水质和水生生物健康状况. 水质评价选用国内外较为常用的内梅罗指数法,水生生物评价选用底栖动物完整性指数评价法[7]. 底栖动物在湖泊生态系统的物质循环和能量流动中起到承上启下的作用[8],且活动性较差,能反映区域水

收稿日期:2013-04-28; **修订日期**:2013-06-06
基金项目:国家水体污染控制与污染治理科技重大专项(2012ZX07506-004); 江苏省博士后基金项目(1202061C)
作者简介:周笑白(1982 ~),女,博士,主要研究方向为环境生态学,E-mail: dianadeweyzp@163.com
* 通讯联系人,E-mail: yuhx@nju.edu.cn

环境变化. 基于底栖动物的生物完整性指数作为一种综合性生物评价方法已经被广泛应用于北美、欧洲和我国的河流及湖泊水生生物监测中[9~13]. 本研究旨在分析太湖水质和水生生物健康评价结果,初步探讨改善太湖水生态环境的方法.

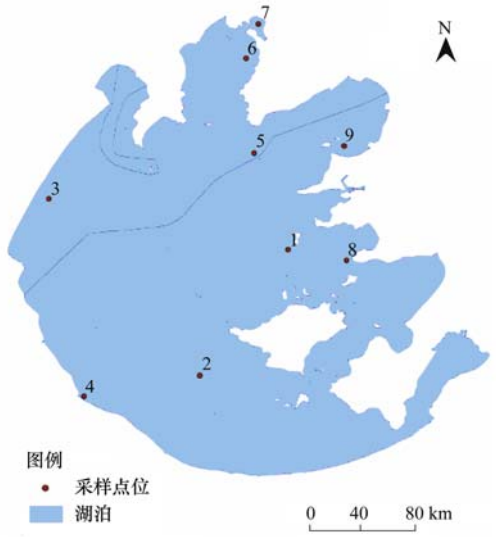
1 材料与方法

1.1 采样点布设和样品采集

本研究采样点分布如图 1 所示.

水质监测指标包括透明度、溶解氧、电导率、高锰酸盐指数、五日生化需氧量(BOD_5)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)和总磷(TP). 现场使用 YSI 6600V2 型多参数水质监测仪测定水体表层电导率及溶解氧,观测样点水体透明度. 采集1 000 mL 水样冷冻保存,带回实验室测定总氮、总磷、氨氮、高锰酸盐指数和五日生化需氧量,处理和检测方法详见文献[14]. 底栖动物采样所用的仪器为开口面积为 1/16 m^2 的彼得逊采样器,每个样点采样 3 次. 采集的样品过 450 μm 的滤网后盛装在棕色试剂瓶中(500 mL)带回实验室处理. 将样品置于白瓷盘中,人工拣选活体后加入 8% 的福尔马林溶液固定,并在显微镜下鉴定样品种类并计数.

1.2 底栖动物完整性指数评价



采样点名称:1. 漫山; 2. 十四号灯标; 3. 大浦口; 4. 新塘港; 5. 沙渚; 6. 小湾里; 7. 五里湖心; 8. 渔洋山; 9. 金墅港

图 1 太湖采样点分布示意

Fig. 1 Locations of the sampling sites in Taihu Lake

1.2.1 生物指标的选择

为表征底栖动物的丰富度、耐污性、多样性和结构组成,本研究综合考虑了太湖底栖动物组成和国内外底栖动物完整性评价的案例,选择总分类单元数、个体数量等多种生物参数(见表 1)[8, 13].

表 1 候选生物指标及其对干扰的反应1)

Table 1 Candidate metrics and their expected response to disturbance

指标类型	参数名称	参数描述	对干扰的反应
反映物种丰富度	优势种比例	优势种个体数占总个体数比例	增加
	总分类单元数	底栖动物种类数	降低
	总个体数	单位面积内底栖动物个体总数	降低
反映物种耐污程度	BI 指数	整体的污染评估,公式为: $BI = (\sum_0^n TV_i S_i)/S$	升高
	优势种耐污值	优势种的耐污能力	升高
	Goodnight 指数	寡毛纲个体占总个体的比例: $S_{寡毛纲}/S$	升高
	BPI 指数	$BPI = \lg(N_1+2)/[\lg(N_2+2)+\lg(N_3+2)]$	升高
反映种群多样性	香农维纳指数	多样性指数: $H = -\sum_0^n P_i \times \ln P_i$	降低
	辛普森指数	多样性指数: $D = 1 - \sum_0^n P_i^2$	降低
	Pielou 指数	均匀度指数: $E = H/H_{max} = H/\ln S$	降低
	Margalef 指数	丰富度指数: $D = (S-1)/\ln N$	降低
个体数量及比例	寡毛纲数量	寡毛纲总个体数	升高
	瓣鳃纲数量	瓣鳃纲总个体数	升高
	腹足纲数量	腹足纲总个体数	降低
	摇蚊数量	摇蚊总个体数	升高
个体比例	瓣鳃纲丰度	瓣鳃纲个体占总个体的比例: $S_{瓣鳃纲}/S$	升高
	腹足纲丰度	腹足纲个体占总个体的比例: $S_{腹足纲}/S$	降低
	摇蚊丰度	摇蚊个体占总个体的比例: $S_{摇蚊}/S$	升高

1) S 表示生物个体数量; S_i 表示第 i 种生物的个体数量; N 表示生物种类数; P 表示每种生物所占的比例,即 $P = S_i/S$; TV_i 为第 i 个生物单元的耐污值,本研究中耐污值选自文献[15]

1.2.2　参照点的选取

太湖流域人类活动频繁，湖体无未受人类干扰的地区．在以往的太湖参照点选择中，马陶武等[4]重点考虑了湖泊污染程度，应用了 HBI 法选择污染程度较低的点作为参照点．而高欣等[13]考虑生态系统的复杂性，选用大型底栖动物多样性指数较高，理化指标较好的点作为参照点．本研究肯定了耐污性和多样性在生态体系健康中的重要作用，同时也考虑群落丰富度和清洁种、耐污种个体数量及比例在生态系统健康程度中的指示作用，选择了多种参数共同衡量各个样点的健康程度，并筛选生物健康状况较好的样点作为参照点．方法如下：计算各采样点的候选生物指数，并计算其值的频度分布：最小值、10% 分位数、50% 分位数、90% 分位数、最高值．对于随污染胁迫增加而降低的参数，高于 50% 分位值、10% ~50% 分位值和低于 10% 分位值的点位分别记 5、3、1 分．对随污染胁迫增加而数值增加的参数，则低于 50% 的分位值、50% ~90% 分位值和高于 90% 分位值分别记为 5、3、1 分[4]．计算所有点位的总分值，并选取 17 个分值较高的点位作为参照点．

1.2.3　候选生物的选定基赋分

(1)判别能力分析

为消除极值的影响，对所有候选参数进行 95% 置信区间的标准化处理[13]．本研究采用 Barbour 的方法，考察参照点和试验点在 25% ~ 75% 百分位数范围内箱体之间的重叠情况，以检验生物指数在参照点和试验点之间差异的显著性(见图 2)[16]．

选择判别能力较强的候选生物参数，即参照点和试验点两箱体之间无重叠或箱体重叠但两箱体的中位线均在对方箱体之外的参数[优势种占百分比(M1)、总分类数(M2)、香农-维纳指数(M3)、辛普森指数(M4)、Margalef 指数(M5)、BI 指数(M6)、BPI 指数(M7)、腹足纲数量(M8)和腹足纲比例(M9)]用于进一步分析．

(2)相关性分析

相关性分析的目的是剔除冗余因子，使各参数反映的信息具有独立性．对以上 9 个因子的 Pearson 分析结果如表 2 所示．

表 2　候选生物 Perason 相关分析结果表

Table 2　Person correlation matrix of the candidate metrics

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
M1	1.000								
M2	0.779***	1.000							
M3	0.943***	0.918***	1.000						
M4	0.979***	0.814***	0.970***	1.000					
M5	0.795***	0.989***	0.929***	0.834***	1.000				
M6	0.134	0.124	0.136	0.127	0.157	1.000			
M7	0.271	0.307*	0.331*	0.302*	0.316*	−0.678***	1.000		
M8	0.381*	0.627***	0.490***	0.359*	0.621***	0.244	0.310*	1.000	
M9	0.377*	0.538***	0.453**	0.352*	0.551***	0.247	0.338*	0.721***	1.000

当 $r>0.7$ 时，两种因素为高度相关，保留其中一个即可代表相关参数间所包含的大部份信息．经过相关性分析，发现香农-维纳指数(M3)、BI 指数(M6)、BPI 指数(M7)和腹足纲数量(M8)可以表述 9 种候选参数所包含的主要信息．因此最终选择这 4 个生物参数作为 B-IBI 的指标．

(3)参照点分布及分值计分标准

累加所有选定参数的赋分值，得出所有样点 B-IBI 的得分．以参考点位 B-IBI 分值分布的 25% 分位数作为健康标准，将低于 25% 分为点的分值四等分，将健康水平分为健康、亚健康、一般、较差、差 5 个等级的划分标准(见表 3)[13]．值得注意的是，由于太湖缺乏无人类干扰的清洁点，也没有足够的历史数据值得借鉴，本研究中选用水生生物丰度、多样性和结构组成较好的点作为参照点，并以参照点的参数为标准定义了相对的健康等级，因此本研究中所定义的“健康”是相对而非绝对的．

表 3　B-IBI 评价分级标准

Table 3　Standard for the scores of the B-IBI assessment

B-IBI 值	>2.29	1.74 ~ 2.29	1.18 ~ 1.74	0.56 ~ 1.18	0 ~ 0.56
健康等级	健康	亚健康	一般	较差	差

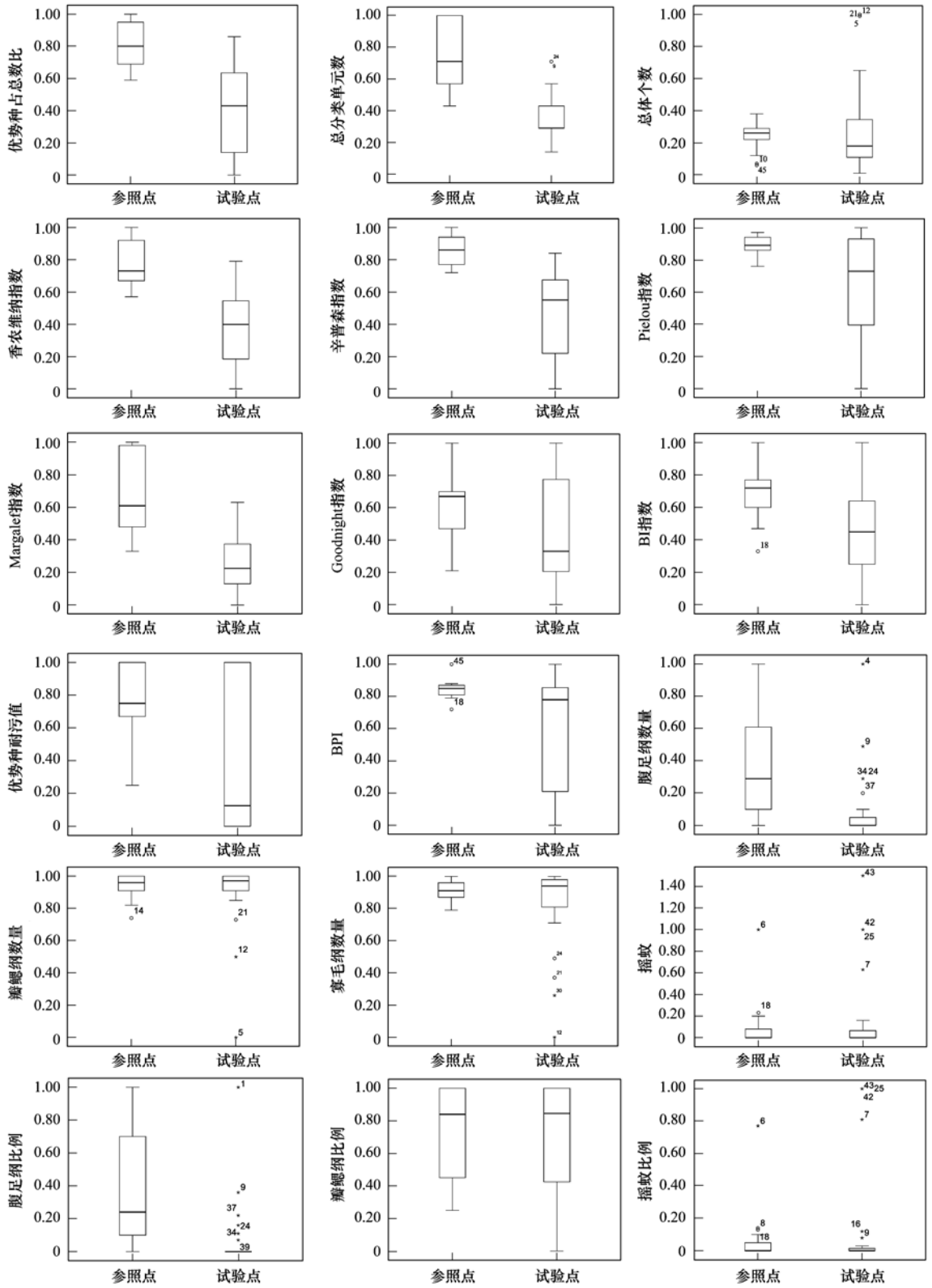


图 2 参照点和试验点的候选参数箱线图

Fig. 2 Box-plots of the candidate metrics in reference sites and experimental sites

1.3 内梅罗指数法水质评价

内梅罗污染指数同时考虑了共存的多种污染参数和最主要的污染物对水质的影响,计算方法简单,是目前应用最为广泛的水质评价方法之一[11]. 其计算方法如公式(1)所示.

$$P_{li} = \sqrt{\frac{[(c_i/L_{ij})_{mean}]^2 + [(c_i/L_{ij})_{max}]^2}{2}} \quad (1)$$

式中,P_{li}表示内梅罗指数,c_i 表示实测水质参数的浓

度，L_{ij}表示水质参数允许的最高浓度值.

受监测数据的限制，本研究仅选取 TN、TP、NH_4^+-N、DO、高锰酸盐指数和 BOD_5 这 6 个参数评价水质污染状况. L_{ij}为地表水Ⅲ类水的水质参数指标.

1.4　数据分析

本研究应用 SPSS 18 软件实现参数之间的相关性分析.

2　结果与分析

2.1　太湖水生生物评价结果

2008 ~ 2012 年太湖共发现大型底栖动物 23 种，其中每年发现大型底栖动物种类分别为 13、13、8、9、9 种. 东太湖(渔洋山和金墅港)的生物种类数明显高于其它点位. 5 a 间在东太湖 2 个点位发现的底栖动物种类为 18 种，在其它湖区 7 个点位仅为 9 种.

太湖优势种为河蚬和霍甫水丝蚓. 但河蚬为优势种的点位也逐年减少(由 2008 年的 4 个点位降低到 2012 年的 0 个点位). 霍甫水丝蚓在全湖各点的优势地位日益明显：到 2012 年以霍甫水丝蚓为优势种的点位已达到 5 个，主要集中在太湖西北部. 大浦口在 2009 ~ 2012 年的优势种都是霍甫水丝蚓，该点位年平均生物总数和霍甫水丝蚓数量(887 ind·m^{-2}和 451 ind·m^{-2})明显高于其它点位. 生物耐污性 BI 指数太湖所有样点(包括参照点和试验点)的都达到了 8 以上，太湖湖体内的大型底栖动物以耐污种为主.

底栖动物完整性评价结果显示，太湖大部分区域处于亚健康状态(表 4). 太湖 2011 年和 2012 年水生生物健康状况较之前 3 年略有下降. 东太湖(渔洋山和金墅港)5 a 间水生生物基本都处于健康状态，其底栖动物完整性指数最高的点位于太湖西北区域(大浦口、沙诸、小湾里、五里湖心). 五里湖心的年均底栖动物完整性指数最低，5 a 间水生生物平均健康状况较差.

表 4　太湖采样点位的 B-IBI 指数值和生态健康状况[1)]

Table 4　B-IBI value and health status of the sample sites in Taihu Lake

采样点	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	多年平均
漫山	1.76 亚健康	2.25 亚健康*	2.78 健康*	0.14 差	2.06 亚健康	1.80 亚健康
十四号灯标	1.99 亚健康	2.28 亚健康*	2.60 健康*	1.44 一般	1.79 亚健康	2.02 亚健康
大浦口	2.15 亚健康	2.00 亚健康	1.89 亚健康	1.14 较差	1.81 亚健康	1.80 亚健康
新塘港	3.00 健康	2.29 亚健康*	2.47 健康*	1.85 亚健康	1.91 亚健康	2.30 亚健康
沙渚	2.00 亚健康	2.46 健康*	0.69 较差	1.78 亚健康	0.95 较差	1.58 一般
小湾里	1.83 亚健康*	1.90 亚健康	1.92 亚健康	2.00 亚健康	0.82 较差	1.69 一般
五里湖心	1.04 较差	0.99 较差	0.25 差	1.73 一般	0.36 差	0.87 较差
渔洋山	3.28 健康*	3.45 健康*	3.00 健康*	3.17 健康*	2.70 健康*	3.12 健康
金墅港	2.42 健康	2.18 亚健康*	3.48 健康*	3.07 健康*	2.98 健康*	2.83 健康
平均	2.16 亚健康	2.20 亚健康	2.12 亚健康	1.81 亚健康	1.71 一般	— —

1) * 表示参照点，下同

2.2　太湖水质内梅罗指数评价

2008 ~ 2012 年太湖的水质在Ⅲ ~ 劣Ⅴ类，主要的污染物是总氮，全湖大部分样品的总氮含量超过了国家Ⅲ类水标准. 部分点位的总磷和高锰酸盐指数也超出了Ⅲ类水质标准. 根据内梅罗指数法，计算太湖不同点位和时间的水质状况，结果如表 5 所示. 太湖水质变化随年度没有明显的变化趋势，2008 ~ 2012 年影响太湖内梅罗指数的最重要的水

表 5 太湖采样点位的内梅罗指数值

Table 5 Nemerow value of the sample sites in Taihu Lake

采样点	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	多年平均
漫山	2.47	1.91*	2.88*	1.55	1.45	2.05
十四号灯标	1.85	2.28*	2.41*	1.86	0.95	1.87
大浦口	5.12	5.72	4.67	4.25	5.96	5.14
新塘港	1.17	3.00*	2.38*	1.45	3.97	2.39
沙渚	3.09	2.38*	3.10	1.88	2.54	2.60
小湾里	3.25*	2.98	2.60	2.03	1.85	2.54
五里湖心	1.31	1.12	1.01	0.70	0.60	0.95
渔洋山	1.43*	1.68*	3.21*	1.17*	0.80*	1.66
金墅港	1.95	0.99*	1.64*	1.60*	2.68*	1.77
平均	2.40	2.45	2.66	1.83	2.31	—

质参数是总氮. 五里湖心和东太湖点位水质较好,太湖西北部地区水质较差,水质最差的样点是大浦口.

3 讨论

3.1 太湖水生生物评价和水质评价时空相似性分析

总体上说,太湖水质评价和水生生物评价结果表现出相似趋势,说明水质和水生生物之间存在一定的相关性. 东太湖水生生物健康水平处于健康和亚健康状态,水生生物种类较多,并检出沙蚕、环棱螺和钩虾等耐污性较差的物种,这与东太湖水质相对较好(长期处于Ⅲ~Ⅳ级)有关. 而东太湖污染物和营养盐较低与该地区完整的生态系统也不无关系. 东太湖水草繁盛,生态系统相对复杂,有利于区域的营养盐的固定和循环,有效降低了水体中有机物和营养盐含量,抑制了蓝藻水华暴发. 相反,大浦口的水质等级和水生生物健康状况都较差. 该采样点位于河口地区,入湖河流带来的大量黏质底泥、有机质和营养盐导致湖区有机污染物和多种无机营养盐严重超标. 水体中过量的有机物和营养盐造成该区域藻类大量繁殖,隔断了水体中光和氧气交换,且有机污染物和蓝藻分解也会消耗大量溶解氧,这可能是大浦口地区生物种类减少,而耐缺氧生物霍甫水丝蚓大量滋生的原因.

从时间上看,根据 1960~1961 年的调查[3],太湖全湖水质优于地表水Ⅲ类水的标准,而水生底栖动物种类超过了 40 种[3]. 而本研究中,2008~2012 年间,太湖平均水质为Ⅴ类和劣Ⅴ类,而底栖动物种类也仅有 23 种. 太湖水质等级和水生生物丰富度在 50 a 间都呈现出了明显的下降趋势,这说明太湖水生态健康状况与水质之间在长时间范围内表现出一致性.

3.2 太湖水生生物评价和水质评价时空差异分析

内梅罗指数和生物完整性指数之间却缺乏相关性($r = 0.023$, $P = 0.885$),水质评价结果与水生生物评价结果之间也存在一定的差异. 空间上,五里湖心点位虽然水质等级与东太湖相当,但水生生物健康状况明显差于太湖其它点位. 时间上,太湖水质在 2008~2012 年间没有明显的变化,但水生生物健康状况却略下降.

水质理化和水生生物评价的目的都是衡量水环境健康程度,分析水环境安全问题,有目的性地管理并保护水资源,因而两者之间是相辅相成的. 然而,由于两种评价方法的评价角度和内容的差别,评价结果间常存在分歧. 当两者出现分歧时,不能简单地规定以何种监测方法结果为准,而应该分析分歧所产生的深层次原因,探讨相应的管理手段. 如本研究中五里湖水质和水生生物监测结果的差异主要源于人类清淤和闸控等干扰. 五里湖虽然水质较好,但水环境功能性和现有生态系统抗干扰能力较差,需要进一步地恢复水体生态功能. 而在 Nedeau 等[17]研究中排污通过增加浅滩生境增加了下游的石蛾、蜉蝣等水生昆虫的丰富度,但排污后流域水质有所降低,因此不能因水体生物丰富度增加就认定排污有利于生态健康,仍然需要对污水进行净化处理. 只有掌握了影响水质和水生物健康的深层次原因才能准确有效地进行环境管理和污染治理.

本研究中水质评价和生物评价的差异可能主要源于以下 3 点.

第一,水质评价和水生生物评价所涉及的时间尺度有所区别. 水质参数所表征的是采样瞬时样点的水环境质量,受诸如风力、温度等环境因素影响较大. 而水生生物评价结果则表征的是湖区长时间的水环境综合质量. 如本研究中底栖动物的种类和数量可以反映一个世代,甚至多个世代期间水质变化的积累状况,相对稳定. 此外,由于太湖中有机物

和营养盐浓度对底栖动物没有明显的毒性效应，而底栖动物在生态系统中等级较高，因此其生物健康状况对水质变化反映具有一定的滞后性.

第二，水质评价主要关注水体中污染物和营养盐浓度是否超出了环境阈值，而水生生物评价所关注的是水环境对水生生物生长的承载功能，不仅要考虑水质因素，还需要考虑生境（底质、流速、温度、泥沙含量、大型水生植物覆盖等[18~20]）因素. 如五里湖虽然目前水质高于地表水Ⅲ级水平，但由于：①该地区水质曾一度污染严重，底栖动物大量死亡[21]；②2003 年进行生态清淤，底栖生态系统遭到严重破坏[22]；③五里湖和梅梁湖之间设置了水闸隔断了湖区间的物质交换和生物迁移，因而水生生物健康状况较差[23]. 仅有水质差异成为影响底栖动物生存最重要的因素时，底栖动物的种类和数量（本研究中体现为生物完整性指数的变化）才能表征水质变化.

第三，底栖动物完整性指数和内梅罗指数均属于综合性评价方法，其结果同时反映不同权重的多个参数. 如本研究中底栖动物完整性指数涵盖了物种丰富度、物种个体数量比例、物种耐污性和物种多样性 4 类参数，而内梅罗指数包含了 6 个参数. 这些参数之间相互影响，影响方向和强度有所差异. 因此很难找出内梅罗指数和生物完整性指数之间的相关性.

此外，污染物浓度低于底栖动物的检出限、污染物高于底栖动物的耐受能力以及污染物之间的相互作用等也可能影响水质评价和水生生物评价的一致性.

3.3　生物指标与水质指标的影响因素相关性分析

水质评价和水生生物评价的最终目的都是更好地管理太湖水资源. 分析影响水质和水生生物健康的主要因素，寻求改善水环境的可控手段对太湖水质管理和功能恢复具有非常重要的意义. 五里湖心的水质已可以满足多种底栖动物需求，因而模拟历史生态系统组成，通过水生生物种植、底栖动物和鱼苗放养恢复多层次的生态系统应该是该区域水生态功能保护和恢复的重点.

太湖其他区域水质和水生生物评价存在相似的趋势，说明水质控制有利于保障区域水生态功能. 生物完整性指数评价指标中丰富度、耐污性、多样性和结构组成这 4 类环境参数与水质参数之间关系更紧密. ①底栖动物总数量可反映底栖动物的丰富度，其与高锰酸盐指数、生化需氧量、总氮和氨氮浓度都呈正相关，说明水体中有机物和营养盐是底栖动物生长提供了必要的生长条件. ②耐污性指数 BI 与叶绿素 a 呈正相关，多样性指数（香农维纳指数、辛普森指数和 Margalef 指数）与水体的叶绿素 a 呈负相关. 叶绿素 a 可以表征湖泊中藻含量，是富营养化的重要参数[24, 25]. 这说明太湖富营养化增加了湖泊的污染，降低了水生生态系统稳定性，是影响水生生物健康的主要因素之一. ③寡毛纲分布广泛，是常见的耐污种[26, 27]. 本研究中寡毛类生物在水质和水生生物健康较差的西北湖区数量较大，其数量与高锰酸盐指数、生化需氧量、总氮、氨氮、总磷浓度及内梅罗指数都呈显著正相关. 因而可以考虑利用寡毛纲作为太湖水污染和富营养化的指示种.

尽管有机物和营养盐为水生生物提供了生长必须的营养物质，但过量的氮磷造成的太湖藻类大量繁殖，降低了生态系统稳定性，最终造成了生态系统功能退化. 因而，控制太湖流域有机污染物和氮磷浓度是实现水生生态系统平衡和健康的可行而有力手段. 其中，大浦口地区水质和水生生物健康状态较差说明入湖河流是太湖重要的污染源. 因而，严控入湖河流的水质等级和营养输入是维护太湖水生态功能的重中之重.

4　结论

（1）太湖全湖水质受到污染，水生生物健康基本处于亚健康状态.

（2）水质和水生生物评价结果总体上呈现相似趋势. 东太湖水质和水生生物健康状态明显好于西太湖，太湖的水质和水生生物健康从 20 世纪 60 年代开始出现了明显的恶化. 水质和水生生物评价结果在短时间和个别点位的差异与两种评价的时间尺度及影响因素有关.

（3）控制太湖流域，特别是入湖河流的有机物和营养盐的排放对改善太湖水质、保护太湖水生生物健康和恢复太湖水生态功能具有积极的意义.

致谢：苏州市环境监测站、无锡市环境监测站和常州市环境监测站在样品采集及分类鉴定中做了大量工作，在此致以诚挚的感谢.

参考文献：

[1]　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[J]. 湖泊科学，2001，**13**(3)：193-203.

[2]　陆铭锋，徐彬，杨旭昌. 太湖水质评价计算方法及近年来水质变化分析[J]. 水资源保护，2008，**24**(5)：30-33.

[3] 中国科学院南京地理研究所. 太湖综合调查初步报告[M]. 北京: 科学出版社, 1965.

[4] 马陶武, 黄清辉, 王海, 等. 太湖水质评价中底栖动物综合生物指数的筛选及生物基准的确立[J]. 生态学报, 2008, **28**(3): 1192-1200.

[5] 杨桂军, 秦伯强, 高光, 等. 太湖不同湖区轮虫群落结构季节变化的比较研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2963-2969.

[6] Duan H T, Ma R H, Xu X F, *et al*. Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(10): 3522-3528.

[7] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities [J]. Fisheries, 1981, **6**(6): 21-27.

[8] 巴伯著. 郑丙辉, 刘录三, 李黎, 译. 溪流及浅河快速生物评价方案——着生藻类、大型底栖动物及鱼类[M]. (第二版) 北京: 中国环境出版社, 2010. 100-133.

[9] Beck M W, Hatch L K. A review of research on the development of lake indices of biotic integrity[J]. Environmental Reviews, 2009, **17**: 21-44.

[10] Brucet S, Poikane S, Lyche-Solheim A, *et al*. Biological assessment of European lakes: ecological rationale and human impacts[J]. Freshwater Biology, 2013, **58**(6): 1106-1115.

[11] 张远, 徐成斌, 马溪平, 等. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 919-927.

[12] 耿世伟, 渠晓东, 张远, 等. 大型底栖动物生物评价指数比较与应用[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2281-2287.

[13] 高欣, 牛翠娟, 裴雪姣. 太湖流域大型底栖动物生物完整性研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, **48**(4): 392-398.

[14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版) (增补版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 200-284.

[15] 张跃平. 江苏大型底栖无脊椎动物耐污值、BI 指数及水质生物评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.

[16] 曹艳霞, 张杰, 蔡德所, 等. 应用底栖无脊椎动物完整性指数评价漓江水系健康状况[J]. 水资源保护, 2010, **26**(2): 13-17, 23.

[17] Nedeau E J, Merritt R W, Kaufman M G. The effect of an industrial effluent on an urban stream benthic community: water quality vs. habitat quality[J]. Environmental Pollution, 2003, **123**(1): 1-13.

[18] Ligeiro R, Hughes R M, Kaufmann P R, *et al*. Defining quantitative stream disturbance gradients and the additive role of habitat variation to explain macroinvertebrate taxa richness[J]. Ecological Indicators, 2013, **25**: 45-57.

[19] McGoff E, Aroviita J, Pilotto F, *et al*. Assessing the relationship between the lake habitat survey and littoral macroinvertebrate communities in European lakes[J]. Ecological Indicators, 2013, **25**: 205-214.

[20] Rempel L L, Richardson J S, Healey M C. Macroinvertebrate community structure along gradients of hydraulic and sedimentary conditions in a large gravel-bed river[J]. Freshwater Biology, 2000, **45**(1): 57-73.

[21] 李文朝. 五里湖富营养化过程中水生生物及生态环境的演变[J]. 湖泊科学, 1996, **8**(S1): 37-45.

[22] 徐卫东, 毛新伟, 吴东浩, 等. 太湖五里湖水生态修复效果分析评估[J]. 水利发展研究, 2012, (8): 60-63.

[23] Wang H Z, Wang H J, Liang X M, *et al*. Empirical modelling of submersed macrophytes in Yangtze lakes [J]. Ecological Modelling, 2005, **188**(2-4): 483-491.

[24] Lorenzen C. Determination of chlorophyll and pheopigments: Spectrophotometric equations[J]. Limnology and Oceanography, 1967, **12**(2): 343-346.

[25] 邓建才, 陈桥, 翟水晶, 等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3382-3386.

[26] 梁彦龄, 王洪涛. 中国水栖寡毛类的研究: Ⅳ. 仙女虫科和颤蚓科的新纪录和稀有种[J]. 水生生物学报, 1998, **22**(1): 54-61.

[27] 王宗兴. 中山水栖寡毛类区系调查及底栖动物对湖泊环境定量指示初探[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007.

HUANJING KEXUE Vol. 35 No. 1
Environmental Science (monthly) Jan. 15, 2014

CONTENTS

《环境科学》第6届编辑委员会

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976年8月创刊）

2014年1月15日　35卷　第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 1　Jan. 15, 2014

主　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　编	欧阳自远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱（海淀区双清路18号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　行	科学出版社 电话：010-64017032 E-mail：journal@mail.sciencep.com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京399信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国内定价：90.00元　　**国外发行代号**：M 205

国内外公开发行