

DOI: 10.5846/stxb201410101992

黄琪, 高俊峰, 张艳会, 闫人华, 王雁, 蔡永久. 长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价. 生态学报, 2016, 36(1): - .

Huang Q, Gao J F, Zhang Y H, Yan R H, Wang Y, Cai Y J. Aquatic ecological integrity assessment of four large lakes in the middle-to-lower reaches of the Yangtze River, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

长江中下游四大淡水湖生态系统完整性评价

黄 琪^{1,2}, 高俊峰^{1,*}, 张艳会^{1,2}, 闫人华^{1,2}, 王 雁¹, 蔡永久¹

1 中国科学院流域地理学重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 长江中下游地区是我国淡水湖泊集中分布区域, 研究该区域湖泊生态系统完整性对于湖泊生态系统保护和恢复具有重要意义。物理、化学和生物完整性指标已经广泛应用于河湖生态系统健康评价, 但是缺少物理、化学和生物完整性的综合评价方法。本研究以历史调查状况为主要参照系统, 构建了基于物理、化学和生物完整性的多参数湖泊完整性综合评价指标体系, 结合近年来长江中下游四大淡水湖(洞庭湖、鄱阳湖、巢湖、太湖)生态系统调查数据, 对四大淡水湖生态系统完整性进行了评价。结果表明, 洞庭湖、鄱阳湖、巢湖和太湖的综合得分分别为 66、71、57 和 57。根据评价等级划分标准, 洞庭湖和鄱阳湖生态系统完整性状况都达到“好”的等级, 而巢湖和太湖则处于“一般”等级; 结果显示, 该指标能够表征人类活动对于湖泊生态系统完整性不同方面的干扰, 且能够反映四大淡水湖生态系统完整性历史变化状况。因此, 该方法可以作为长江中下游淡水湖泊生态系统完整性综合评价的工具并能够为湖泊生态系统的保护和恢复提供科学支撑。

关键词: 浅水湖泊; 湖泊生态系统; 生态系统完整性; 评价; 长江中下游

Aquatic ecological integrity assessment of four large lakes in the middle-to-lower reaches of the Yangtze River, China

HUANG Qi^{1,2}, GAO Junfeng^{1,*}, ZHANG Yanhui^{1,2}, YAN Renhua^{1,2}, WANG Yan¹, CAI Yongjiu¹

1 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Many freshwater lakes are distributed in the middle-lower reaches of the Yangtze River basin; they are of great importance as water supply resources and for aquatic eco-system maintenance. The evaluation of lake health and its variation is useful for environmental management of lake ecosystems. Numerous indices related to physical, chemical, and biological integrity are widely applied to assess the health of lake ecosystems. However, few studies have assessed the ecological integrity of lakes using a combination of physical, chemical, and biological integrity metrics in China, especially at a regional scale. Based on a review of previous research, a lake ecological integrity index (LEII) including physical, chemical, and biological (algae, macroinvertebrates, and fish) integrity metrics was developed to evaluate four large lakes in the middle-lower reaches of the Yangtze Basin. Reference conditions were defined mainly based on historical data collected in the 1950s and 1960s, when the status of lake ecological integrity was acknowledged as “good.” The final score for the lake ecosystems integrity index was calculated by combining the scores for physical, chemical, and biological integrity metrics. Additionally, the scores were divided into five categories, i.e., excellent, good, fair, poor, and very

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB417006); 国家水污染治理重大专项(2012ZX07501002-008, 2012ZX07506-001, 2012ZX07103003-04-01, 2012ZX07501-001-03); 江西省水利厅科技项目(KT201406); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室(江西师范大学)开放基金(PK2015007)

收稿日期: 2014-10-10; 修订日期: 2014-12-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn

poor. The LEIIs of Lake Dongting, Poyang, Chaohu, and Taihu were 66, 71, 57, and 57, respectively. Based on the LEII scores, Lake Dongting and Lake Poyang were rated “good” and Lake Chaohu and Lake Taihu were “fair.” However, the individual indices showed different status for the four large lakes. For instance, the physical integrity index was higher than 80 for all lakes except Chaohu Lake (71), suggesting an “excellent” status. The highest score for the chemical integrity index was observed in Lake Poyang (71) and the lowest score in Lake Taihu (56). Three were rated as “good.” The biological integrity index ranged from 46 in Lake Taihu to 65 in Lake Poyang, two were rated as “fair.” The four large lakes suffered from various degrees of damage in physical, chemical, and biological integrity, and these differences demonstrated the effects of human activity on the ecological integrity of the four large lakes over the past 50 years. Consequently, the LEII can be used as a tool to assess the ecological integrity of the four large lakes along the Yangtze River, and the results provide a scientific basis for lake ecosystem restoration and protection.

Key Words: shallow lake; lake ecosystem; ecological integrity; assessment, middle-lower Yangtze River

近年来,生物完整性指数在国内外河流生态系统健康评价研究中逐渐得到了广泛应用,为实现生态系统评价和管理提供了有效的生物监测工具^[1-3],然而,该方法在湖泊和水库等静生态系统中的研究和应用较少^[4-5]。其重要原因是我国绝大部分与人类活动密切相关的湖库都受到了一定程度的干扰,致使构建生物完整性指数的参照系统难以基于调查现状确定^[5]。马陶武等^[6]、汪星等^[7]依据生物指数来确定参考(清洁)和受损(污染)样点,分别构建了太湖、洞庭湖的底栖动物完整性指数,用于评价湖泊不同区域的水质状况。蔡琨等^[5]采用干扰程度最小系统法定义太湖底栖动物生物完整性指数参照系统,构建了太湖湖心区和非湖心区底栖动物完整性指数,评价了太湖生态系统健康状况。尽管这些方法对于生态系统完整性评价中参照系统建立具有较好的参考价值,但这些评价方法难以综合反映湖泊生态系统物理、化学和生物完整性状况^[8],也不能反应湖泊生态系统完整性状况历史变化。

“生态完整性”指未受到损害的,生态良好的状态^[9]。对湖泊生态系统而言,包括了物理、化学和生物完整性三个方面^[10]。因此,对流域河湖生态状态评价的研究逐渐扩展到综合采用生态系统物理、化学和生物完整性参数进行评价^[8, 11]。在评估尺度方面,也不再局限于单个湖泊,而将视野扩大到流域甚至是全球尺度^[12]。长江中下游平原是我国淡水湖泊分布最密集的核心区,洞庭湖、鄱阳湖、巢湖和太湖等四大淡水湖(图1)生态系统健康状况受到国内外高度关注^[13-14]。已有研究基于湖泊形态结构^[15]、水体富营养化^[16]和生物等单项指数^[6-7]等对湖泊健康状况进行了初步评价,但缺少综合物理、化学和生物指标的完整性评价研究。本研究在对四大淡水湖生态系统特征分析的基础上,通过构建湖泊生态系统完整性综合评价指标体系,评价人类活动干扰影响下四大湖生态系统完整性历史变化特征,建立基于生态系统完整性的湖泊综合评价方法,以期对四大淡水湖泊生态系统保护和恢复提供科学支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据收集

本研究数据来源分为现状数据和历史数据两部分。其中现状数据来自 2008—2013 年间采样调查,调查数据包括湖泊水质理化数据、生物数据(包括浮游植物、底栖动物和鱼类)。共采集样点 91 个,其中:洞庭湖

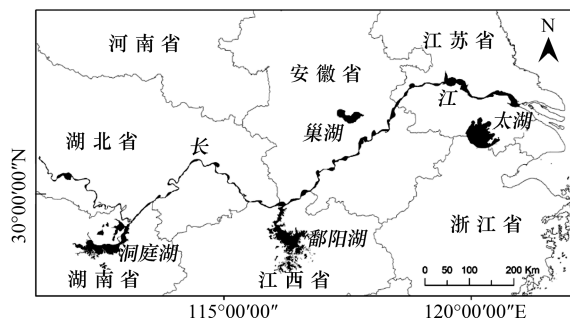


图1 长江中下游四大淡水湖泊位置图

Fig.1 Location of the four large lakes in the middle of lower reaches of the Yangtze River

2008 年 30 个调查点位,鄱阳湖 2012 年 15 个调查点位,巢湖 2013 年 34 个调查点位,太湖 2012 年 12 个调查点位。

采用 YSI6600 pro 便携式水质多参数分析仪现场测定水体 pH 值、电导率(EC)和溶解氧(DO)等 5 项理化参数。现场采集 1 L 水样,用冷藏保温箱保存后短时间运送到实验室,测定包括总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)等共 6 项化学参数。水体理化参数的采集、运送和测定均依据《水和废水监测分析方法》^[17]。藻类、大型底栖动物、鱼类采样和鉴定分别由专家进行,为避免单次鱼类调查数据的偶然性,鱼类指标依据相同时期调查且已发表文献数据计算^[18-22]。历史数据采用 1950—1960 年代或对应指标调查整理的文献资料^[23-24]。

1.2 评价指标体系的构建及计算

1.2.1 评价指标体系构建

在对四大淡水湖生态系统特征分析的基础上,从湖泊生态系统完整性物理(生境)、化学(水质)和生物(水生生物类群)三个方面的构建评价指标体系。河湖连通状况可表征长江与各大湖泊水沙输送和能量传递,继而调整和塑造湖盆结构;湖泊面积既是湖泊的基本形态参数,又能够反映本区湖泊受人类活动干扰强度(如历史围垦导致的湖泊面积萎缩)^[22],故采用河湖连通结构状况和湖泊形态参数表征物理完整性。水质理化参数中溶解氧、电导率和营养状况能够表征不同方面水化状况。浮游植物、底栖动物和鱼类是广泛应用于湖泊生态状况评价的水生生物类群。依据系统性、独立性和差异性原则,结合已有研究^[3,6-7],最终确定湖泊生态系统评价指标体系包含 7 项评价指标和 13 项分项指标(表 1)。

表 1 四大淡水湖泊生态系统完整性评价指标体系及权重
Table 1 Indicators and their weights of four large lakes ecological integrity assessment

目标层 A Target lever A	要素层 B Element level B	评价指标 C Assessment indicator C	分项指标 D Individual index D
湖泊生态系统完整性 A 1 Lakes ecological integrity A 1	物理完整性 B1 0.2	河湖连通状况 C1 0.100	口门畅通率 D1 0.100
		湖面完整状况 C2 0.100	湖面萎缩率 D2 0.100
	化学完整性 B2 0.3	水质状况 C3 0.200	溶解氧 D3 0.100
			电导率 D4 0.100
		营养状况 C4 0.100	富营养化指数 D5 0.100
	生物完整性 B3 0.5	浮游植物 C5 0.166	浮游植物种类数 D6 0.056
			Berger-Parker 优势度指数 D7 0.056
			蓝藻门比例 D8 0.056
		底栖动物 C6 0.166	底栖动物种类数 D9 0.056
			Berger-Parker 优势度指数 D10 0.056
			底栖动物 BI 指数 D11 0.056
		鱼类 C7 0.166	鱼类种类数 D12 0.083
			Berger-Parker 优势度指数 D13 0.083

1.2.2 评价指标测定与计算方法

(1) 物理完整性指标

河湖连通状况指标表征河流与湖泊水域之间的水流畅通程度,可通过河湖连通的口门畅通率计算^[22],计算公式:

$$D1 = \text{畅通口门数} / \text{总口门数} \tag{1}$$

湖面完整性通过湖面(水域)萎缩率指标计算^[22],计算公式:

$$D2 = \text{现状湖泊面积} / \text{历史湖泊面积} \tag{2}$$

(2) 湖泊基本水质指标

湖泊基本水质指标的数值计算直接通过求取所有调查样点的平均值求得,其中溶解氧和电导率指标分别通过以下公式计算:

$$D3 = \text{溶解氧平均值} / \text{溶解氧期望值} \quad (3)$$

$$D4 = \text{电导率平均值} / \text{电导率历史值} \quad (4)$$

(3) 富营养化状况

湖泊富营养化指计算公式采用金相灿等^[25]提出的公式计算,其中富营养状态指数分别总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、叶绿素(Chl a)和透明度(SD)五个基本水质参数计算。

$$D5 = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (5)$$

式中, W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重, $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数。

(4) 浮游植物指标

浮游植物物种丰富度指标采用物种损失指数^[26]计算(式6),蓝藻比例指各调查样点蓝藻占有藻类比值之平均值,通过现状调查值与历史调查值(式7),浮游植物 Berger-Parker 指数通过现状调查与历史调查平均密度比计算得到(式8)。

$$D6 = \text{现状调查浮游植物属数} / \text{历史调查浮游植物属数} \quad (6)$$

$$D7 = \text{蓝藻门密度} / \text{藻类密度} \quad (7)$$

$$D8 = \text{浮游植物最优势类群密度} / \text{生物类群总密度} \quad (8)$$

(5) 大型底栖动物指标

大型底栖动物物种丰富度指标采用物种损失指数计算, Berger-Parker 优势度指数和底栖动物生物(耐污)指数(BI)通过公式计算得到^[27]。

$$D9 = \text{现状调查底栖动物种数} / \text{历史调查底栖动物种数} \quad (9)$$

$$D10 = \text{底栖动物最优势种密度} / \text{底栖动物密度} \quad (10)$$

$$D11 = \sum_{i=1}^n W_i \cdot p_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad (11)$$

式中, W_i 为第 i 类底栖动物的密度, p_i 为第 i 类底栖动物对应的耐污 BI 值, n 为底栖动物种类数。

(6) 鱼类指标

鱼类物种丰富度指标采用物种损失指数计算,优势种比例通过调查数据计算。

$$D12 = \text{现状调查鱼类种类数} / \text{历史调查鱼类种类数} \quad (12)$$

$$D13 = \text{鱼类最优势种密度} / \text{鱼类密度} \quad (13)$$

1.2.3 评价权重确定

湖泊生态系统完整性评价指标体系建立后,进行指标权重的设置。对湖泊生物而言,物理和化学完整性是其赖以生存的外部环境,但它们又能一定程度上改变并表征生态系统的状况,所以本研究认为物理、化学完整性相关指标与生物完整性相关指标权重相等,即各占 1/2。生物中浮游植物、大型底栖动物和鱼类分别表征不同营养级的生态状况,且相互联系,故所占权重相等,各为 1/6(表 1)。

1.2.4 评价指标标准化

通过确定指标期望值(指标等级最好状态值)和阈值(指标等级最差状态值)对各类指标进行标准化。标准化方法:采用标准化公式(式 14)对分项指标进行计算,结果分布范围为 0—100,小于 0 的值记为 0,大于 100 的值记为 100。

$$S = 1 - (|T - X|) / (|T - B|) \times 100\% \quad (14)$$

式中, S 为评价指标的标准化计算值; T 为期望值; B 为临界值; X 为实际值。参照值为未受到人为干扰活动下评价参数的取值,指完整性的最佳状况;临界值指受到人类活动干扰后,湖泊生态系统面临崩溃的阈值,此时完整性状态为最差状态。

完整性优质期望值和临界阈值的确定需要大量基础调查资料和深入的研究,且不同类型的湖泊生态系统的完整性阈值存在差异^[1]。大量研究表明,历史状态可以较好的表征在人类活动强烈干扰之前生态系统的

完整性状况,因此可以作为参考状态^[28]。四大淡水湖泊有较丰富的历史观测数据,为确定参数期望值提供了良好的基础。但由于调查技术手段的发展和进步,一些指标和数据质量无法完全满足构建参考状态的要求,因此本研究采用历史调查数据、国家标准、研究文献和统计方法共同确定期望值和临界值^[1,29]。其中,各生物类群的物种损失指数根据历史调查数据确定生物种(属)数确定;而浮游植物、底栖动物类群 BP 指数依据各调查点位 BP 指数的平均数计算,以对应各个点位生物指标 BP 指数 5%分位数为期望值,95%分位数为临界阈值,鱼类类群 BP 指数期望值以历史数据确定,临界值以调查样点 95%分位数确定。蓝藻门比例以调查样点 5%分位数为期望值,调查样点 95%分位数为临界值^[1,3]。底栖动物 BI 指数参考已有研究确定期望值和阈值^[29](表 2)。

表 2 四大淡水湖生态系统完整性评价指标期望值
Table 2 The expected values of individual indexes of the four large lakes ecosystem integrity assessment

指标类型 Index type	分项指标 Individual index	洞庭湖 Dongting Lake	鄱阳湖 Poyang Lake	巢湖 Chaohu Lake	太湖 Taihu Lake	方法 Methods
物理完整性指标 Physical integrity indices	畅通口门数	全部	全部	全部	219	历史状态
	湖泊面积/km ² *	4325.00	4399.90	831.50	2498.17	历史状态 ^[23]
化学完整性指标 Chemical integrity indices	溶解氧(mg/L)	7.5	7.5	7.5	7.5	国家标准
	电导率(μs/cm)	53	40	123	176	历史状态 ^[23-24]
	营养状态	40	40	40	40	历史状态
生物完整性指标 Biological integrity indices	浮游植物属数	98	154	62	134	历史状态 ^[23-24]
	BP 指数	0.18	0.20	0.25	0.30	现状调查
	蓝藻门比例	0.20	0.15	0.38	0.40	现状调查
	底栖动物种类数	112	102	52	75	历史状态 ^[23-24]
	BP 指数	0.17	0.27	0.20	0.60	现状调查
	BI 指数	5.00	5.00	6.00	6.00	历史状态 ^[26, 28]
	鱼类种类数	103	107	72	97	历史状态 ^[23-24]
	BP 指数	0.58	0.52	0.60	0.50	历史状态 ^[23-24]

(历史)湖泊面积按现状湖泊面积与 1950s 以来围垦面积之和计算,其中洞庭湖、鄱阳湖、巢湖和太湖围垦面积分别为 1700km²、1466.9km²、62km²、160.17km²

1.2.5 综合得分及等级标准

综合得分采用等权相加计算得到,计算公式为:

$$LEII = \sum_{k=1}^l D_k \cdot U_k \tag{15}$$

式中, D_k 为第 k 个指标的评价值, U_k 为对应的指标权重。

采用等分法将生态系统完整性综合得分分为五个等级^[3]，“极差”等级分值为 0—20,表明生态系统发生严重改变,生态功能完全丧失,短期难以逆转;“差”等级分值为 20—40,生态系统发生极显著改变,生态功能大部分丧失;“一般”等级分值为 40—60,生态系统的自然生境和群落组结构发生了较大的变化,甚至出现部分生态功能丧失;“好”等级分值为 60—80,生态系统的自然生境和群落组结构成发生了一些变化,但基本功能完好且状态稳定;“极好”等级分值为 80—100,生态系统处于未被干扰的自然状态或仅有轻微改变;结构功能完整具有活力。

2 结果与分析

2.1 评价指标评价结果

2.1.1 物理完整性指标

四大淡水湖物理完整性指标评价结果良好,其中洞庭湖得分 80,鄱阳湖得分 83,巢湖得分 71,太湖得分 89,评价等级均达到好。但四大湖各项评价指标得分差异较大,其中洞庭湖和洞庭湖与长江自由连通,水情不

受口门控制,因此连通指标得分为 100。而巢湖闸控制巢湖出湖水情,因此河湖连通指标得分为 50,依据太湖畅通口门数和所有口门数计算得到太湖口门畅通率指标得分为 84。据历史资料,洞庭湖湖泊面积萎缩指标得分 61,而鄱阳湖该指数得分 67;巢湖该指标得分为 93,太湖该指标得分 94。

2.1.2 化学完整性指标

四大淡水湖化学完整性指标评价结果总体较好,其中洞庭湖得分为 62,评价等级为好;鄱阳湖得分达到 71,评价等级为好;巢湖得分 63,评价等级为好;太湖得分 56,评价等级为一般。评价指标中,各湖平均溶解氧都超过期望值,指标得分均为 100,等级均为好;而电导率指标得分为洞庭湖 34,鄱阳湖 53,巢湖 48,太湖 21。电导率指标得分洞庭湖和太湖等级为差,鄱阳湖和巢湖等级为一般;富营养化指标得分鄱阳湖 52,鄱阳湖 61,巢湖 41,太湖 46,除鄱阳湖等级为好外,洞庭湖、巢湖和太湖等级均为一般。

2.1.3 生物完整性指标

四大淡水湖生物完整性指标评价结果总体一般,其中洞庭湖得分 63,鄱阳湖得分 65,巢湖 48,太湖 46。洞庭湖和鄱阳湖等级为好,巢湖和太湖等级为一般。

浮游植物指标综合评价得分差异显著,洞庭湖得分 70,评价等级为好;鄱阳湖得分 60,评价等级为好;巢湖得分 45,评价等级为一般;太湖得分 44,评价等级为一般。其中,洞庭湖表征物种丰富程度的种类数指标评价为极好,鄱阳湖为好,巢湖和太湖为一般;巢湖表征物种优势程度的指标等级为差,其他三湖为一般;蓝藻门比例指标洞庭湖和鄱阳湖为一般,巢湖和太湖等级为差。

底栖动物指标综合评价得分差异较小,洞庭湖得分 55,评价等级为一般;鄱阳湖得分 67,评价等级为好;巢湖得分 44,评价等级为一般;太湖得分为 39,评价等级为一般。评价指标中,四大淡水湖底栖动物种类数指标评价等级为一般;优势度指标鄱阳湖评价等级为好,洞庭湖和巢湖为一般,太湖为差,BI 指数洞庭湖和鄱阳湖两湖为好,巢湖和太湖为差。

鱼类指标综合评价得分为,洞庭湖和鄱阳湖得分为 64 和 68,评价等级为好;巢湖和太湖得分均为 55,评价等级为一般。评价指标中,洞庭湖鱼类种类数指标评价等级为极好,鄱阳湖为一般,巢湖和太湖等级为好;优势度指标鄱阳湖评价等级为极好,其他三湖为一般。

2.2 综合评价结果

长江中下游四大淡水湖生态系统评价的结果表明,四大淡水湖泊生态系统完整性状况差异显著:洞庭湖综合评价得分为 66,鄱阳湖综合评价得分为 71,巢湖综合评价得分为 57,太湖综合评价得分为 57(图 2)。根据评价等级,洞庭湖和鄱阳湖为“好”,巢湖和太湖为“一般”。

2.3 结果分析

本研究基于湖泊生态系统完整性的评价指标得分能够反映四大淡水湖生态系统物理、化学和生物完整性的受损状况和历史变化。

鄱阳湖和洞庭湖流域受季风气候影响,湖泊水位和水面变化季节性明显变化,在自然淤积和人类围垦活动双重影响下,湖泊面积显著缩小,其中人类围垦活动加剧破坏了两湖物理完整性^[23-24]。而在巢湖和太湖,湖泊与河流自然连通受到人工闸坝控制,虽然实现了防洪、航运等人类服务功能,但破坏了这两个湖泊与周边河流的连通结构,使其物理完整性受损。

鄱阳湖和洞庭湖的湖水补给系数高,而且两湖与长江相互连通,交换率高,污染物质不容易累积,水体自净能力强,因此其水质理化综合评价状况较好。而巢湖和太湖水量和吞吐量也相对较小,湖水交换率相对较低^[23-24]。又因巢湖流域以农业用地为主导,污染负荷相对较少,而太湖流域经济发达,污染负荷相对较高,因此巢湖水水质理化综合评价状况比太湖好。

洞庭湖和鄱阳湖浮游植物指标综合评估等级为好,其中表征丰富程度的物种数指标相对得分较高,指示这两个湖泊的浮游植物物种丰富度较高;优势度指标和蓝藻比例指标得分处于一般等级,显示两湖浮游植物结构组成发生较大变化,且蓝藻比例增大,值得密切关注。而巢湖和太湖浮游植物指标综合评估等级为一般,

都面临较严重的浮游植物组成结构改变,蓝藻比例过高的问题,需要采取防治措施。

洞庭湖和鄱阳湖底栖动物种类数指数评价处于一般等级,优势类群评价等级分别为一般和好,这表明这两个湖泊存在底栖动物丰富程度下降,底栖动物类群趋向于演化为耐污类群,但优势类群结构变化不大^[30,31]。与之对应的是,太湖和巢湖底栖动物种类数评价等级为一般,优势类群和 BI 指数评价等级为一般和差,结果表明两湖底栖动物物种损失指数相对更大,其中巢湖底栖动物中耐污类群较多^[32],而太湖底栖动物中软体动物减少,寡毛类增加^[33]。

洞庭湖鱼类种类数指标评价好于优势度指标,而鄱阳湖鱼类种群指标评价差于优势度指标,表明洞庭湖鱼类种群单一化问题较为突出,而鄱阳湖面临部分鱼类物种丧失问题^[18-19]。巢湖和太湖鱼类指标综合评价都处于一般等级,都面临不同程度的鱼类物种丧失,优势种比例上升,种群单一化等问题^[20-21, 24]。

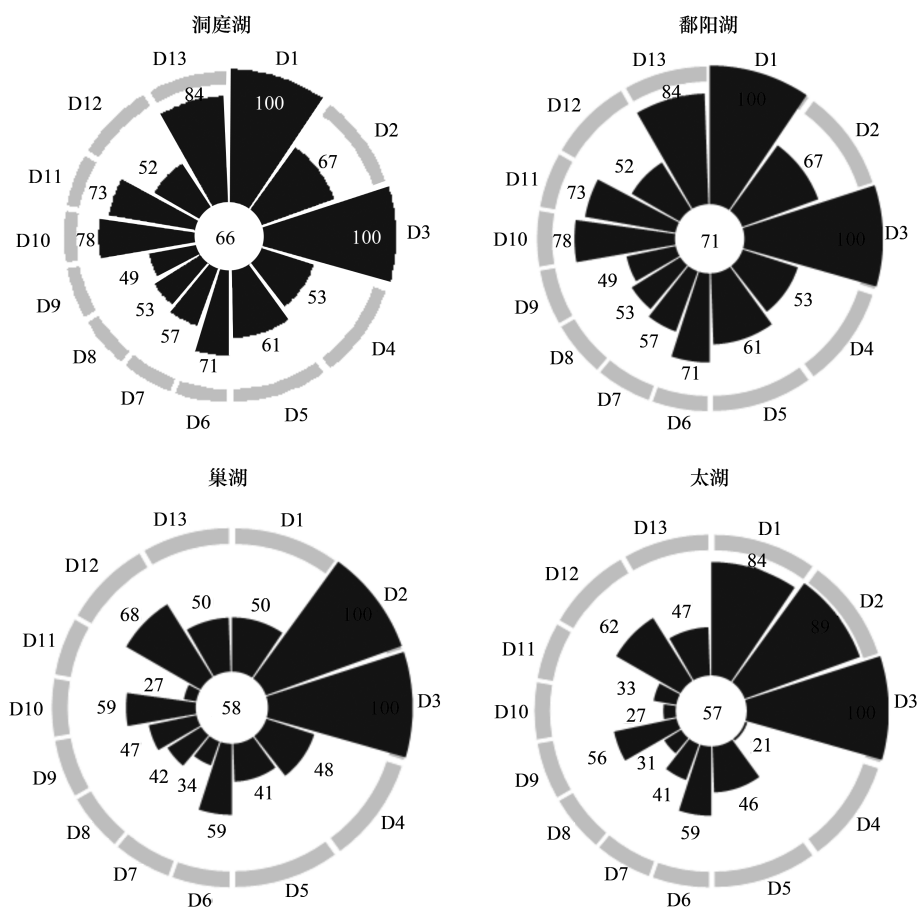


图 2 四大淡水湖生态系统完整性评价指标及综合得分

Fig.2 The individual index scores and comprehensive scores of ecosystem integrity assessment for the four large lakes

3 讨论

3.1 湖泊生态系统完整性参考状态的建立

确定合理的参考状态是进行湖泊生态系统完整性多参数评价的关键。干扰程度最小系统法和极少干扰系统法是河流生态系统中常用的参考状态确定方法^[1-3,34],然而,我国大部分湖泊都受到了中等程度以上的干扰^[9],导致这两种方法难以用于构建湖泊生态系统评价的参考状态。据文献记载和调查分析数据,20 世纪 50—60 年代长江中下游四大淡水湖泊生态系统状况都处于良好状态^[23-24],且同时期已有较为完整的观测资料,所以本研究以历史调查数据和发表文献确定物理完整性参数和大部分化学、生物完整性参数的期望值,再

结合国家标准和统计方法综合确定了剩余部分参数的期望值。同时,在研究尺度上,本研究尝试将同一湖泊的采样点数据综合计算,把单个湖泊作为整体研究,因而能够比较人类活动对于长江中下游四大淡水湖干扰强度的差异。相对于目前湖泊生态状况参考点和受损点仍采用专业判断结合理化指标来确定的方法,且主要考察单个湖泊空间差异状况的现状,本研究拓展了参考状态建立的时间尺度和湖泊生态系统完整性评价的空间尺度。

3.2 湖泊生态系统完整性评价参数的选择

评价参数的选择是进行合理评价的基础。本研究依据完整性的概念和内涵,从物理、化学和生物完整性三个方面构建了湖泊生态系统评价指标体系。参数的选择参考了已有研究和长江中下游大型淡水湖泊遭受的干扰状况。长江中下游四大淡水湖同属长江水系,历史上江湖关系密切而且复杂,目前除鄱阳湖外,其他三湖原本与长江水系的自然联系都受到了人类活动强烈干扰,特别是巢湖和太湖与周边部分河流的自然连通受到了闸坝控制,河湖连通状况受损进而影响到江湖水量交换,湖泊水位等物理完整性参数;此外,鄱阳湖和洞庭湖受人类围垦活动影响,湖泊面积显著缩小,巢湖和太湖也受到不同程度的围垦活动影响,因此选择了湖泊畅通口门数和湖泊水面面积作为物理完整性的参数^[22-24]。

浮游植物、底栖动物、鱼类和水生高等植物等水生生物通常用于表征湖泊生态系统健康状况^[24],本研究仅选择了前三种生物类群,而没有选择水生高等植物,主要原因是水生高等植物的分布、生物量等参数不仅受人类活动干扰影响,更主要受水位、底质、水动力和透明度等多种自然因素控制。洞庭湖和鄱阳湖大型通江湖泊的特征,加之季风气候影响,两湖水位季节性变化强烈,水生高等植物发育良好,虽然两湖水生植被受人类活动干扰,但是主要优势种类仍能够通过有效的繁殖策略在湖泊中广阔分布^[35]。巢湖和太湖部分区域的水生植物消失虽然与闸坝建设、水体污染等人类活动密切相关,但近年来水生植物在某些区域仍在扩张^[24,36]。因此,四大淡水湖水生植物状况的与湖泊生态完整性的关系仍待进一步研究。此外,历史调查数据中洞庭湖和鄱阳湖水生高等植物的资料不够完整,故本研究没有采用水生高等植物指标。

4 结论

(1) 基于历史资料构建了四大淡水湖生态系统完整性评价参考状态,从物理、化学和生物完整性三个方面构建评价参数和综合评价体系,结果显示,洞庭湖和鄱阳湖生态系统完整性状况等级为“好”的,而巢湖和太湖等级则为“一般”。

(2) 与已有研究主要采用单一指标或针对单个湖泊的研究相比,生态系统综合完整性指标能够表征湖泊生态完整性各组成部分的受损状况,基于历史调查数据构建参考状态可反映四大淡水湖生态系统完整性历史变化状况,因此可以为湖泊生态系统保护和恢复提供科学支撑。

致谢:感谢中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站为本研究提供鄱阳湖生态调查数据。

参考文献 (References):

- [1] 张远, 徐成斌, 马溪平, 张铮, 王俊臣. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准. 环境科学学报, 2007, 27(6): 919-927.
- [2] Ruaro R, Gubiani A. A scientometric assessment of 30 years of the Index of Biotic Integrity in aquatic ecosystems: Applications and main flaws. Ecological Indicators, 2013, 29(6): 105-110.
- [3] Huang Q, Gao J, Cai Y, Yin H, Gao Y, Zhao J, Liu L, Huang J. Development and application of benthic macroinvertebrate-based multimetric indices for the assessment of streams and rivers in the Taihu Basin, China. Ecological Indicators, 2015, 48, 649-659.
- [4] Clews E, Low E, Belle C C, Todd P A, Eikaas H S, Ng PK. A pilot macroinvertebrate index of the water quality of Singapore's reservoirs. Ecological Indicators, 2014, 38: 90-103.
- [5] 蔡琨, 张杰, 徐兆安, 吴东浩, 张咏, 王备新. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康. 湖泊科学, 2014, 26(1): 74-82.
- [6] 马陶武, 黄清辉, 王海, 王子健, 王春霞, 黄圣彪. 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. 生态学报, 2008, 28(3): 1192-1200.

- [7] 汪星, 郑丙辉, 李黎, 刘录三, 李利强, 黄代中, 田琪. 基于底栖动物完整性指数的洞庭湖典型断面的水质评价. 农业环境科学学报, 2012, 32(9): 1799-1807
- [8] 张远, 赵瑞, 渠晓东, 孟伟. 辽河流域河流健康综合评价方法研究. 中国工程科学, 2013, 15(3): 11-18.
- [9] De Leo G A, Levin S. The multifaceted aspects of ecosystem integrity. *Conservation Ecology*, 1997, 1(1): 3.
- [10] 黄艺, 舒中亚. 基于浮游细菌生物完整性指数的河流生态系统健康评价—以滇池流域为例. 环境科学, 34(8): 3010-3018
- [11] Bunn S E, Abal E G, Smith M J. Integration of science and monitoring of river ecosystem health to guide investments in catchment protection and rehabilitation. *Freshwater Biology*, 2010, 55(S1): 223-240.
- [12] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, Duarte C M, Tranvik L J, Striegl R G, McDowell W H, Kortelainen P, Caraco N F, Melack J M. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(5): 2388-2397.
- [13] 杨桂山, 朱春泉, 蒋志刚. 长江保护与发展报告. 武汉: 长江出版社, 2011.
- [14] 高俊峰, 蒋志刚. 中国五大淡水湖保护与发展. 北京: 科学出版社, 2012.
- [15] 帅红, 李景保, 夏北成, 刘春平, 李玉丹. 基于形态结构特征的洞庭湖湖泊健康评价. 生态学报, 2012, 32(8): 2588-2595.
- [16] 黄代中, 万群, 李利强, 汪铁, 卢少勇, 欧伏平, 田琪. 洞庭湖 20 年水质与富营养化状态变化. 环境科学研究, 2013, 26(1): 27-33.
- [17] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [18] 李杰钦. 洞庭湖鱼类群落生态研究及保育对策. 中南林业科技大学, 2013.
- [19] 朱其广. 鄱阳湖通江水道鱼类夏秋季群落结构变化和四大家鱼幼鱼耳石与生长的研究. 南昌大学, 2011.
- [20] 陈文江, 谭炳卿, 吕友保. 巢湖生态调水对鱼类资源的影响分析. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(12): 1681-1685.
- [21] 倪勇, 朱成德. 太湖鱼类志. 上海: 上海科学技术出版社, 2005.
- [22] 徐雪红等. 健康太湖指标体系研究. 南京: 河海大学出版社, 2012. 116
- [23] 窦鸿身, 姜加虎. 中国五大淡水湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003. 126, 142
- [24] 姜加虎, 窦鸿身, 苏守德. 江淮中下游淡水湖群. 武汉: 长江出版社, 2009, 79, 265, 319-320, 380-381, 428
- [25] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 301.
- [26] 王备新, 杨莲芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值. 生态学报, 2004, 24(12): 2768-2772.
- [27] 水利部水资源司, 河湖健康评估全国技术工作组. 湖泊健康评估指标、标准与方法(试点工作用). 北京, 2011.4
- [28] Gerritsen J, Carlson, R, Dycus D, Faulkner C, Gibson G, Harcum J, Markowitz S, Lake and reservoir bioassessment and biocriteria, Technical Guidance Document. US Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC, 1998, 202.
- [29] Qin C, Zhou J, Cao Y, Zhang, Y, Hughes, R M, Wang B. Quantitative tolerance values for common stream benthic macroinvertebrates in the Yangtze River Delta, Eastern China. *Environmental monitoring and assessment*, 2014, 186(9): 5883-5895.
- [30] 蔡永久, 姜加虎, 张路, 陈宇炜, 龚志军. 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素. 生态学报, 2013, 33(16): 4985-4999.
- [31] Cai Y, Lu Y, Wu Z, Chen Y, Zhang L, Lu Y. Community structure and decadal changes in macrozoobenthic assemblages in Lake Poyang, the largest freshwater lake in China. *Knowledge and management of aquatic ecosystems*, 2014, 414(9), 09p1-09p18.
- [32] Cai Y, Gong Z, Xie P. Community structure and spatiotemporal patterns of macrozoobenthos in Lake Chaohu (China). *Aquatic Biology*, 2012, 17: 35-46.
- [33] 蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖大型底栖动物群落结构及多样性. 生物多样性, 2010, 18(1): 50-59.
- [34] Pardo I, Gómez-Rodríguez C, Wasson J, Owen R, van de Bund W, Kelly M, Bennett C, Birk S, Buffagni A, Erba S, Mengin N, Murray-Bligh J, Ofenböeck G. The European reference condition concept: A scientific and technical approach to identify minimally-impacted river ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2012, 420(6): 33-42.
- [35] 彭映辉, 简永兴, 李仁东. 鄱阳湖平原湖泊水生植物群落的多样性. 中南林学院学报, 2003, 23(4). 22-27.
- [36] 郝贝贝. 巢湖滨湖带植被特征及其退化原因分析研究. 环境科学与管理, 2013, 38(6): 59-65.