

基于综合指标法的鄱阳湖生态系统健康评价*

毛智宇^{1,2}, 徐力刚^{1,5**}, 赖锡军¹, 王晓龙¹, 李云良¹, 李相虎¹, 蔡永久¹, 范宏翔¹, 吴亚坤⁴, 魏凡凯^{1,3}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 南昌工程学院水利与生态工程学院, 南昌 330000)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 安徽工业大学, 马鞍山 243000)

(5: 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 由于湖泊生态问题日益突出, 湖泊生态系统安全状态已经成为人们关注的热点问题, 了解湖泊水生态系统的状况并根据湖泊生态系统健康状况开展精准治理和生态修复与保护尤为重要。本文基于对鄱阳湖及其流域生态环境的长期监测数据和资料收集, 采用综合指标体系法, 从物理形态、水文、水环境、水域生态、湿地生态和社会服务 6 个方面构建了鄱阳湖生态系统健康评估的指标体系, 主要涵盖了湖泊口门状况、“五河”入湖径流变异程度、入湖河流水质达标率等 26 个指标。依据设置的阈值等级得到鄱阳湖生态系统健康评价各层次健康状况等级, 通过对各湖泊生态系统各指标得分进行加权计算, 得出生态系统健康评估准则层和目标层的得分, 最终对鄱阳湖生态系统健康进行了客观的评价。结果表明, 构建的湖泊生态系统健康评价体系针对性强、科学全面、具有可操作性, 可为鄱阳湖及类似通江湖泊的生态系统健康评价提供案例和方法借鉴。评价结果表明鄱阳湖健康体征状况目标层得分为 73.45 分, 评价结果为亚健康, 鄱阳湖水生态系统健康主要受泄流能力、水文节律变化、富营养化程度和物种多样性的影响。最后根据鄱阳湖的水生态系统健康评分等级探讨了鄱阳湖水生态系统中亟需解决的问题, 针对性地提出了鄱阳湖保护的对策与建议。

关键词: 生态系统健康; 鄱阳湖; 综合指标法; AHP 层次分析法; 现状分析; 指标体系

Assessment on ecosystem health of Lake Poyang based on a comprehensive index method*

Mao Zhiyu^{1,2}, Xu Ligang^{1,5**}, Lai Xijun¹, Wang Xiaolong¹, Li Yunliang¹, Li Xianghu¹, Cai Yongyong¹, Fan Hongxiang¹, Wu Yakun⁴ & Wei Fankai^{1,3}

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *School of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Engineering, Nanchang 330000, P.R.China*)

(3: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China*)

(4: *Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, P.R.China*)

(5: *University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, P.R.China*)

Abstract: Due to the increasing problems of lake ecology, the security state of lake ecosystem has become a hot issue of people's attention. It is particularly important to understand the status of lake ecosystem and carry out precise management, ecological restoration and protection according to its health status. Based on the long-term monitoring data and other data collected on the ecological

* 2022-04-26 收稿; 2022-06-20 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2018YFE0206400)、国家自然科学基金 (41971137、U2240224)、江西省科技计划项目 (20192BBHL8003, 20203CCD46006, 20213AAG01012, 20212BBG71002, 20222BCD46002) 和江西省教育厅科技项目 (GJJ201905) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: lgxu@niglas.ac.cn。

environment of Lake Poyang and its watershed, this paper constructed an indicator system for lake health assessment from six aspects: physical form, hydrology, aquatic environment, water area ecology, wetland ecology and social services by using comprehensive indicator system method. It covered 26 indexes, such as lake entrance condition, variation degree of runoff from five inflow rivers to the lake, and water quality compliance rate (as to national criteria) of rivers to the lake. According to the set threshold level, the health status of each level of Lake Poyang ecosystem health was evaluated, and the scores of the criteria layer and the target layer were obtained by weighting scores of each index of lake ecosystem. Finally, the objective evaluation of Lake Poyang ecosystem health was carried out. The results showed that the constructed system had strong pertinence, comprehensive science and operability, and could provide a case and method reference for the ecosystem health evaluation of Lake Poyang and similar Yangtze river-connected lakes. The evaluation results showed that the target level score of Lake Poyang health signs was 73.45, and the evaluation result was sub-healthy. The health of Lake Poyang aquatic ecosystem was mainly affected by discharge capacity, hydrological regime change, eutrophication degree and species diversity. Finally, according to the aquatic ecosystem health rating of Lake Poyang, this paper raised some problems that need to be solved in Lake Poyang aquatic ecosystem protection, and puts forward countermeasures and suggestions for its protection.

Keywords: Ecosystem health; Lake Poyang; comprehensive index method; AHP; current situation analysis; index system

河湖健康是伴随生态系统健康概念出现的一个新概念,也是河湖生态系统状况的综合表征。一直以来,河湖健康都有不同的定义,引发了国内外专家的研究讨论,国外的研究学者认为健康的河湖不仅要保持生态学意义上的完整性,还应强调对人类生态服务功能的发挥^[1-6]。国内学者认为河湖健康主要体现在两个方面,一是具有良好的恢复能力,二是具有自我维持能力^[6-14]。总结来看,河湖健康的基本范畴在于水、土、植、功能4个方面^[7]。具有良好的恢复能力和自我维持能力,即对污染能稀释、降解,对干扰能化解、排除,达到回归河流原生态的能力,在不同区域、不同时期健康标准也不一样^[14]。国内外学者在研究河湖健康的同时也进行了专门针对湖泊的生态系统健康研究,湖泊是陆地表层系统各要素相互作用的节点,具有多种重要的生态功能。湖区能调节河川径流、减轻洪涝灾害和改善周边环境,湖水可以灌溉农田、沟通航运、保障工业和生活用水,还能为水生动植物提供生存环境等^[15-16]。湖泊生态系统是指在环境与社会和谐发展的方针下,综合考虑湖泊生态与其社会功能所构成的复杂系统^[17]。研究认为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^[18]。近年来,人类活动直接影响了湖泊生态系统的结构和功能,造成湖泊生态系统健康恶化、服务丧失等,这严重制约着流域可持续发展^[19],恢复和维持湖泊生态系统健康已成为流域管理的重要策略,亟需从其生物完整性、化学完整性、社会服务等方面进行系统评价湖泊生态系统健康。

在河湖健康定义的基础上构建生态系统健康评估指标体系,是当今河湖健康评价的主要趋势,生态系统健康评估指标体系是指用来推断或解释该生态系统其他属性的相应变量和组分,并提供生态系统或其组成的综合特性或概况^[20]。构建科学的生态环境保护综合评价指标体系,能够为生态环境保护工作的开展提供依据与标准^[21]。早在19世纪,欧洲就开始了水质评价层面的河流健康评价^[22],1970s至1980s河流“健康”的研究逐渐由水质延伸到包含多种环境要素的“生态环境”^[23],因此,英国开始运用Trem生物指数法^[24]和Chandler指数法^[25]评价河水中有机的成分,到了1980s生态多指标评价法和河流生物预测模型法逐渐开始应用^[26],后来,岸边与河道环境细则(REC)、河流生态环境调查(RHS)、溪流健康指数(ISC)也逐渐应用到河流与湖泊的生态系统健康研究中^[27-30]。与此同时,中国受到国外河湖健康评估的影响,在1980s开始进行了一系列的水生态监测研究,主要的研究工作侧重于总结和比较流域生态健康评估方法、评估体系及指标,1990年以来在河湖管理中开始重视生态保护和修复,21世纪初,长江、黄河、海河、珠江等河流管理部门结合河流实际特点及河流管理目标,先后开展了河流的健康评估。自2010年以来,国家更加重视河湖生态保护,有关河湖生态保护与修复的重要政策、制度及意见^[31]明确要求定期开展河湖健康评估工作。在全国河湖健康评估试点技术标准基础上,结合大范围多类型水体健康评估检验与应用,形成了一套科学的河湖健康评估指标与标准、实用可行的技术方法^[32]。

综合指标体系法在生态系统健康评价中被广泛应用^[33-35],其主要根据水生态系统的物理、化学和生物特征,构建综合指标体系,通过计算指标得分状况,结合指标权重,最终计算得到综合得分并进行等级划分

和评定^[36]。该方法可以全面、直观地反映目标生态系统各局部的健康状态,但实践中往往由于数据需求量巨大、数据采集难度高、处理过程复杂等因素影响,指标体系会根据实际需要进行适当调整。综合指标体系的研究可以更全面地反映生态系统的健康状况,并为不同方法的适用性提供指导。由于鄱阳湖重要的国际地位,国内外专家逐渐对鄱阳湖进行生态健康评估方面的研究,2010年林玉茹首先开始了江湖水系生态监测与评估的研究,并提出了建立鄱阳湖生态监测系统的有关对策与建议^[37];2018年,贾海燕从湖泊生态完整性和社会服务功能两方面出发,构建了长江中下游大型通江湖泊健康状况综合评价指标体系^[38];2021年,卢路构建了基于生态过程的鄱阳湖水文健康评价指标体系^[39]。

由于水环境退化、洪涝灾害频发等问题的出现,鄱阳湖面临着巨大的生态环境压力^[40],为保障鄱阳湖地区水安全,迫切需要弄清鄱阳湖目前的健康状况、影响机制和发展趋势,并在此基础上提出相关建议,从而确保鄱阳湖的健康发展,这既是国家的重大战略需求,也是亟待解决的科学问题。因此,本文通过湖泊的物理、水文、水环境、水域生态、湿地生态、社会服务6个准则进行研究,以综合指标法建立了适合鄱阳湖的目标层—准则层—指标层3级生态系统健康综合评价框架。鄱阳湖生态系统的健康评价研究,对维护鄱阳湖生态系统健康具有重要意义,并为国内外类似湖泊的进一步研究提供重要参考。

1 鄱阳湖生态系统健康评估指标体系的确定

1.1 指标体系构建

选取合适的评价指标是进行湖泊健康评价的关键,本研究运用综合指标评价法,采用目标层、准则层和指标层3级体系构建湖泊生态系统健康评价指标体系。结合指标选取原则确定出具有适用性强、代表性高的关键指标^[41],根据鄱阳湖的具体情况,将鄱阳湖生态系统健康分为6个准则和26个指标^[42](附表I),其中指标的解释及其计算方案参照附表II~VII。

1.2 评价等级与标准

评价等级与标准的设定要依据国家、行业和地方规定的标准和规范、根据国家 and 地方发展规划目标和要求,参考国内外已有的科学研究成果判定的生态因子^[43-44],整理湖泊的历史资料、类比标准、采用专家咨询及通过公众的参与来综合考虑加以筛选判断确定湖泊健康的标准^[45-47],本研究中采用《河湖健康评价指南》(试行)作为湖泊健康分级的依据。一类湖泊(非常健康)、二类湖泊(健康)、三类湖泊(亚健康)、四类湖泊(不健康)、五类湖泊(劣态)赋分范围分别为[90,100]、[75,90]、[60,75]、[40,60]、[0,40]。

2 研究对象与数据来源

鄱阳湖(28°24'~29°46'N,115°49'~116°46'E)是我国公布的第一批国家重点湿地保护区之一,于1992年我国加入湿地公约后被列入《世界重要湿地名录》^[48]。鄱阳湖是中国最大的淡水湖,对长江中下游水资源、水环境、水生态和水安全具有重要作用,是长江中下游重要的洪水调蓄区^[49]和水资源补给区^[50];在全球迁徙候鸟越冬和长江江豚保护上具有重要的国际地位^[51]。

本文系统收集了2010—2020年涉及到水文、泥沙和水环境各项指标的观测数据,其中将2010—2019年的观测数据的平均值作为历史背景水平,将2020年作为现状年份,基于现状年与历史背景年对比分析开展水文、水环境准则层的评估。本节所用到的数据及其站点基本情况,见图1。

2.1 水文泥沙数据

鄱阳湖入湖水量主要来自赣江、抚河、信江、饶河和修水五大河流,其中大部分来自赣江(55.0%),其次是信江(14.4%)和抚河(12.1%),三者之和超过入湖总径流量的80%^[52]。水文分析中,选取五河出口断面流量监测站的径流数据来分析鄱阳湖流域径流时间序列的变化趋势与规律。采用江西省水文局在星子、都昌和康山站的观测水位以及推算的水面积、蓄水量来分析湖泊的动态与响应。

2.2 水环境数据

根据鄱阳湖特殊的水文条件、湖泊形态和功能区特点,中国科学院鄱阳湖湿地观测研究站在全湖设有15个监测点位,在4个季度各取样1次,分别为1、4、7和10月,指标主要有:溶解氧(DO)、pH值、透明度(SD)、水温(WT)、叶绿素a(Chl.a)、总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、硝态氮(NO₃-N)和氨氮

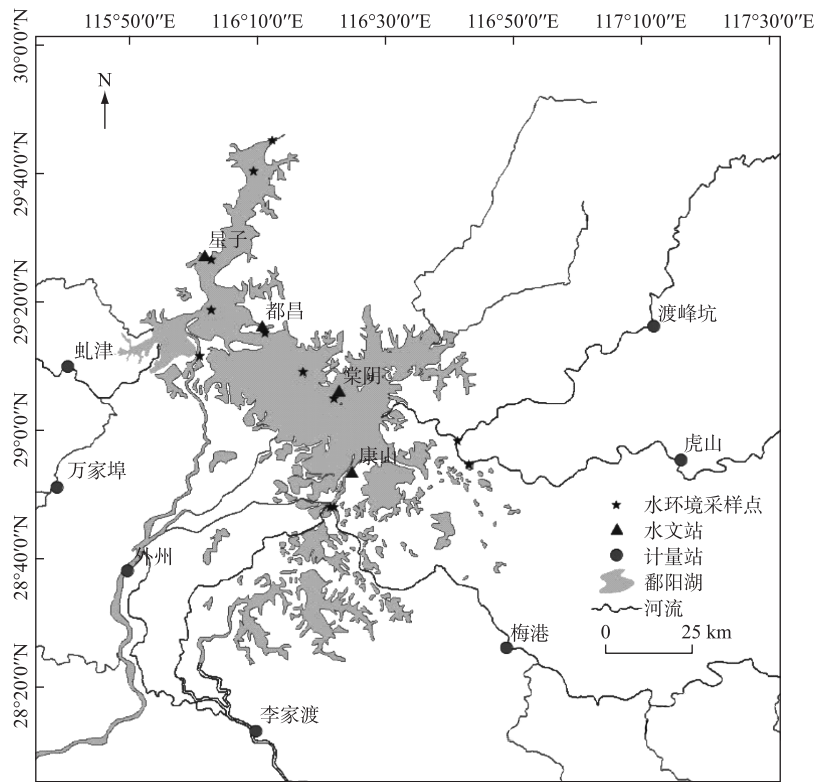


图 1 鄱阳湖监测采样点

Fig.1 Monitoring and sampling points of Lake Poyang

($\text{NH}_3\text{-N}$)。采用中国科学院鄱阳湖湿地观测研究站提供的 2009—2020 年湖区水质数据,对鄱阳湖水环境时空分布特征进行分析。

2.3 水生态数据

在鄱阳湖设置 15 个常规水生态监测点(同水质监测点位),此外 2019 年夏季在鄱阳湖开展加密监测,主湖区设立 155 个水生态监测点,在主要的阻隔湖泊设立 23 个水生态监测点,总计有 178 个水生态监测点位。主要监测浮游植物、浮游动物、底栖动物及水生植物的生理生态指标。

鱼类、江豚近期数据主要来源于《长江流域渔业生境公报(2018 年)》、《长江流域水生生物资源及生境状况公报(2019 年)》、王克雄等^[53],历史数据主要源于文献资料。

2.4 洲滩湿地生态数据

依托鄱阳湖站设立两处野外长期观测样带,分别位于四独洲和站区外码头湿地,主要监测洲滩湿地土壤理化性质、主要植被生理指标等,候鸟监测数据来源于江西省鄱阳湖国家级自然保护区管理局年度候鸟监测报告。

2.5 鄱阳湖生态系统健康评价指标的权重确定

AHP(analytic hierarchy process)层次分析法是一种定性与定量相结合的方法,多应用于多指标评价体系中各指标权重的确定。本研究通过层次分析法确定鄱阳湖生态系统健康评估的评价范围和评价对象,进行相关性分析后建立层次结构,分为目标层、准则层和指标层 3 层。根据专家意见构造判断矩阵,判断矩阵可以确定出下层指标对上一层元素的影响情况,从而获得最基层指标对总目标值权重情况。计算判断矩阵的最大特征值及其特征向量,通过归一化处理而得到权向量。进行一致性检验,在 $C_r < 0.1$ 情况下可判断通过检验,经过计算得知指标体系的权重 $C_r = 0.02715$,可知判断矩阵具有满意的一致性。最终得出指标体系的权重如表 1 所示。

表 1 鄱阳湖生态系统健康评价指标权重
Tab.1 Weights of ecological health evaluation indicators of Lake Poyang

准则层及权重	指标层及权重	准则层及权重	指标层及权重
物理形态:0.064	湖泊口门状况:0.2	水域生态:0.215	浮游植物密度:0.24
	湖泊面积变化:0.3		底栖动物完整性指数:0.2
	自然岸线保有率:0.2		鱼类完整性指数:0.25
	湖盆冲淤情况:0.3		江豚:0.32
水文:0.215	蓄水量变异度:0.15	湿地生态:0.215	珍稀候鸟分布数量:0.3
	换水周期变异度:0.29		碟型湖水生植物群落状况:0.2
	五河入湖径流变异度:0.15		洲滩典型植物群落稳定指数:0.25
	江湖水量交换变异度:0.12		景观稳定性指数:0.25
水环境:0.215	湖泊水位变异度:0.29	社会服务:0.076	防洪达标率:0.25
	水质优劣程度:0.26		供水保证率:0.25
	富营养化程度:0.26		集中式饮用水水源地水质达标率:0.25
	入湖河流水质达标率:0.2		公众满意度:0.25
	底泥污染状况:0.08		
	水体自净能力:0.2		

3 鄱阳湖生态系统健康评估结果分析与讨论

3.1 鄱阳湖生态系统健康关键指标健康状况分析

鄱阳湖生态系统健康评估各指标的得分情况如图 2 所示。

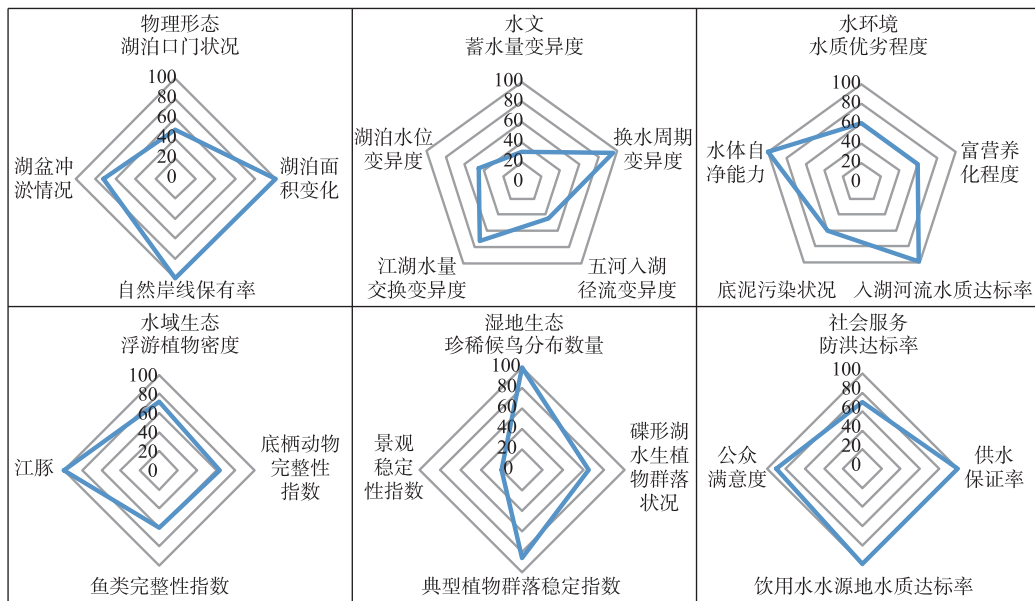


图 2 各指标得分雷达图
Fig.2 Radar chart of each index score

3.1.1 物理形态 在物理形态方面,湖泊口门状况得分 49,湖泊面积变化和自然岸线保有率得分 100。湖盆冲淤情况得分 72,物理形态总得分 81.4,处于健康状态。

计算现状条件下不同特征水位的湖泊泄流能力与参照年份湖泊泄流能力的比值,可知湖泊泄流能力变

异程度为 71%,说明现状条件下的湖泊泄流能力与参考状态下的泄流能力存在较大差异,处于不健康状态。计算评估年不同特征水位下湖泊水面萎缩面积与参照水面面积的比值,可得湖泊面积变化比例为-41%,小于湖泊面积萎缩比例 5%,说明 2020 年现状条件下的湖泊水面面积是增加的,该指标处于非常健康状态。基于 2018 年遥感及调查数据,鄱阳湖自然岸线和人工岸线分别为 952 和 486 km,自然岸线保有率为 66%。对应湖泊岸线情况处于非常健康状态。根据历年的鄱阳湖湖盆冲淤变化程度,2018 年现状条件下鄱阳湖湖盆冲淤的变异程度为 22%,说明湖盆冲淤变化相对平稳,湖盆冲淤情况处于亚健康状态。

3.1.2 水文 水文方面,蓄水量变异度得分为 30,换水周期变异度得分为 95,“五湖”入河径流变异度得分为 44,江湖水量交换变异度得分为 72,水文综合得分 60.5,处于亚健康状态。

基于计算,2020 年湖泊蓄水量的变异程度为 3.5,表明评估年湖泊水量相对于多年平均状况而言,水量波动变化比较明显,处于不健康状态。通过计算,2020 年湖泊平均换水周期的变异程度为 0.05,表明评估年湖泊换水情况相对于多年平均而言比较稳定,处于非常健康状态。基于鄱阳湖五河的入湖月平均流量计算评估入湖径流变异程度,1960—2016 年“五河”入湖径流变异程度基本上在 0.77~4.04 之间,2001 年径流变异程度最小,为 0.77;1998 年“五河”入湖径流变异程度最大,为 4.04。2020 年“五河”入湖径流变异程度计算值为 1.61,处于不健康状态。1960—2016 年鄱阳湖江湖水量交换变异程度基本在 0.72~3.50 之间。变异程度最小值出现在 1969 年,为 0.72,最大值出现在 1998 年,为 3.50。2020 年江湖水量交换变异程度计算值为 1.05,处于亚健康状态。1960—2016 年鄱阳湖水位变异程度基本在 0.01~0.15 之间。水位变异程度最小值出现在 2003 年,为 0.01,水位变异程度最大值出现在 1998 年,为 0.15。2020 年湖泊水位变异程度计算值为 0.11,处于不健康状态。

3.1.3 水环境 水环境方面,水质优劣程度得分 60,富营养化程度得分 60,入湖河流水质达标率为 99 分,底泥污染状况得分为 60,水体自净能力得分 100,水环境综合得分 75.8,处于健康状态。

根据 2020 年江西省环境健康状况公报,鄱阳湖点位水质优良比例为 41.2%,水质轻度污染。2020 年鄱阳湖水质优劣程度处于亚健康状态。通过综合营养状态指数($TLI(\Sigma)$)法对鄱阳湖水质的营养状况进行评价,评价因子包括 $Chl.a$ 、TP、TN、SD 和 COD^[54]。根据鄱阳湖站监测数据,2020 年鄱阳湖全湖平均 $TLI(\Sigma)$ 指数为 50.50,处于亚健康状态。根据 2020 年江西省环境健康状况公报,赣江断面水质优良比例为 98.3%,水质优,主要污染物为氨氮;抚河断面水质优良比例为 100%,水质优;信江断面水质优良比例为 100%,水质优;饶河断面水质优良比例为 100%,水质优;修河断面水质优良比例为 100%,水质优。综上,总体达标率为 99.3%。处于非常健康状态。按照《中国土壤元素背景值》^[55],选取江西省土壤背景值为参考,根据调查,2020 年鄱阳湖湖区底泥中超标浓度最高的污染物为 Mn,浓度为 967.54 mg/kg,超标倍数为 3 倍,处于劣态。水体自净能力与 DO 有关,DO 对水生动植物十分重要,过高和过低的 DO 对水生生物均造成危害,根据鄱阳湖站监测数据,2020 年鄱阳湖全湖的 DO 浓度平均为 10.48 mg/L,处于非常健康状态。

3.1.4 水域生态 水域生态方面,浮游植物密度得分 71.7,底栖动物完整性指数得分 64,鱼类完整性指数得分 60,江豚得分 100。水域生态综合得分 75.73,处于健康状态。

2020 年 4 个季度浮游植物密度均值为 122.1×10^4 cells/L,最高值在秋季(175.77×10^4 cells/L),最低值在春季(82.04×10^4 cells/L),处于亚健康状态。大型底栖无脊椎动物生物完整性指数($B-IBI$)通过对比参考点和受损点大型底栖无脊椎动物状况进行评价。夏季丰水期全湖加密监测共鉴定到大型底栖动物 48 种,隶属 7 纲 16 目 22 科 38 属,全湖大型底栖动物的平均密度和平均生物量分别为 158.38 ind./m² 和 173.76 g/m²,根据监测数据,计算各样点 $B-IBI$ 得分,介于 23.0~94.8, IBI 均值为 64,处于亚健康状态。鱼类完整性指数通过历史资料和现场调查比对进行分析,根据文献资料记载鄱阳湖共有鱼类约 134 种,隶属于 12 目 26 科 78 属,其中鲤科鱼类占据绝对优势地位,鲮科和鳊科鱼类也较为丰富^[56-57]。现阶段鄱阳湖鱼类多样性相比历史时期明显下降,根据资料统计,现阶段鄱阳湖鱼类不超过 100 种,鱼类保有指数约为 0.75,处于亚健康状态。江豚方面,根据研究结果^[58-60]和《长江流域水生生物完整性指数评价体系(试行)》,鄱阳湖江豚基准值为 450 头,现阶段种群数量超过此数量,处于非常健康状态。

3.1.5 湿地生态 湿地生态方面,珍稀候鸟分布数量得分 100,碟形湖水生植物群落状况得分 65,洲滩典型植物群落稳定指数得分 86,景观稳定性指数得分 20,湿地生态综合得分 69.5,处于亚健康状态。

珍稀候鸟分布数量以鄱阳湖指示性候鸟物种数量为考核指标,基准值以多年历史监测年均值为基准,经测算,2020年鄱阳湖珍稀候鸟保有指数 *BOE* 值为 1.21,处于非常健康状态。水生植物群落状况评价选取 2~3 个典型碟形湖,分别设置 1~2 个评价断面,对断面区域水生植物种类、数量、外来物种入侵状况进行调查,取各断面情况作为水生植物群落状况得分,处于亚健康状态。洲滩典型植物群落稳定指数以鄱阳湖代表性洲滩植物群落芦苇群落与灰化苔草群落为主要考核对象,基准值以多年平均值(2011—2019年鄱阳湖站持续观测数据)为基准值,经测算,2020年鄱阳湖典型洲滩植物群落稳定指数(*SBP*)为 0.13,处于健康状态。景观稳定性指数以秋草期洲滩湿地植被面积变化幅度来表征,以 1990s 年均值为参考基准值,经测算,2020年鄱阳湖景观稳定性指数(*LS*)为 0.88,处于劣态。

3.1.6 社会服务 社会服务方面,防洪达标率得分 100,供水保证率得分 100,集中式饮用水水源地水质达标率得分 100,公众满意度得分为 90,社会服务综合得分 97.5,表明鄱阳湖的社会服务功能处于非常健康状态。

鄱阳湖生态经济区重要圩堤 139 条总长度 3053 km,其中 46 条重点圩堤长 1694 km、12 条 33.35 hm² 以上圩堤长 447 km、47 条 6.67~33.35 hm² 以上圩堤长 636 km、根据新的建设布局提高防洪标准至 20 年以上的 8 条 2.00~6.67 hm² 以上圩堤长 25 km、18 条保护县城以上的城防圩堤长 128 km、8 条长江干堤长 123 km^[61-62],其中,达到防洪标准的堤防长度占堤防总长度的 55.4%,因此,防洪达标率处于亚健康状态。根据调研资料,鄱阳湖饮用水取水的主要市县有庐山市、都昌县,庐山市鄱阳湖型砂厂取水口水源地,都昌在鄱阳湖饮用水源地取水口高程位置约为 7.98 m,根据 2020 年都昌逐日水位数据,逐日水位介于 7.78~22.41 m 之间,年均水位为 13.83 m,供水水量保证程度为 97.3%,处于非常健康状态。根据调研资料,鄱阳湖县级以上集中式饮用水水源地有 3 个,分别是都昌县鄱阳湖水源地、庐山市鄱阳湖水源地、湖口县鄱阳湖水源地,根据集中式生活饮用水水源地水质状况报告,上述 3 个水源地 2020 年水质类别分别为 II 类、III 类、III 类,均达到 III 类,该指标处于非常健康状态。通过公众调查方法评价,公众满意度处于非常健康状态。

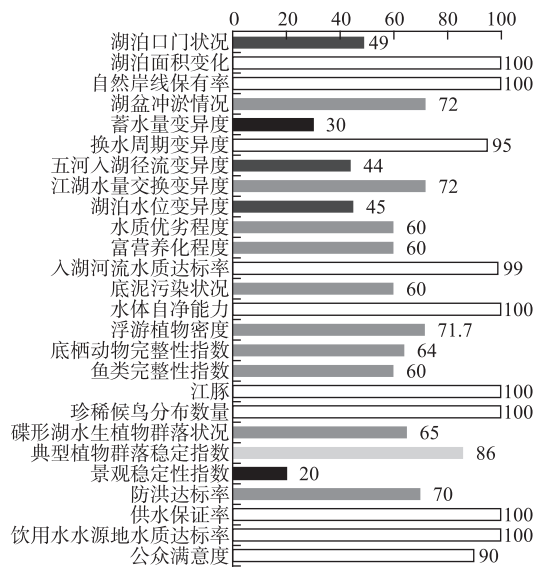


图 3 鄱阳湖生态系统健康评估指标层得分

Fig.3 Ecological health assessment index layer score of Lake Poyang

图 3 鄱阳湖生态系统健康评估指标层得分

3.2 鄱阳湖生态系统健康评估指标层结果分析

3.2.1 鄱阳湖生态系统健康评估指标层结果分析

鄱阳湖生态系统健康评估指标层如图 3 所示,鄱阳湖劣态指标 2 个,不健康指标 3 个,亚健康指标 10 个,健康指标 1 个,非常健康指标 10 个。总体来讲,鄱阳湖生态系统健康 26 个指标中非常健康和亚健康指标居多。

鄱阳湖劣态的指标有两个,分别是蓄水量变异度和景观稳定性指数;说明 2020 年特大洪水对鄱阳湖蓄水量造成较大影响,水量波动变化较大;景观稳定性方面,湿地景观呈现破碎化、形状复杂化的趋势,景观连通性也有所下降。

不健康的指标有 3 个,分别是湖泊口门状况、五河入湖径流变异度和湖泊水位变异度;湖泊口门变化综合体现在湖泊口门的泄水能力上,研究表明,大规模采砂是鄱阳湖泄流能力变化的主因,应加强鄱阳湖采砂管理^[63];"五河"入湖径流也与往年出现了较大差异,通过与历史多年平均(2018 年之前)水文状况的对比,认为现状条件下(2020 年)鄱阳湖流域五河径流出现较为明显的下降趋势,尤其是春、冬季的流域来水,且年入湖总水量下降幅度接近 10%,但夏季"五河"来水增加趋势尤为显著;与此同时,现状条件下鄱阳湖水位高于历史平均状况,主要表现在洪水和退水时期,水位增加幅度基本介于 2~3 m,但局部地区可达 3~4 m。同时,因现状年湖区出现特大洪水,湖泊水面积也明显高于历史同期平均水平。

3.2.2 鄱阳湖生态系统健康评估准则层结果分析 根据湖泊指标层的赋分情况,通过加权求和计算的方

法^[42],综合得出鄱阳湖生态系统健康得分。准则层的得分情况如图4所示,在准则层得分中,最高的是社会服务,评价结果为非常健康状态,最低的是水文,评价结果为亚健康状态。

鄱阳湖物理形态得分为81.4分,处于健康状态。其中得分较低的指标是湖泊口门泄水能力,湖泊泄流能力的显著变化主要是由近十年大规模的采砂改变湖口水道过水断面几何要素引起的,湖泊口门状况的变化改变了鄱阳湖与长江相互作用的水力特性,从而使鄱阳湖水量平衡发生了变化,加剧了近年的枯水情势^[64]。

鄱阳湖水文得分为60.5分,处于亚健康状态。水文层的得分在准则层中最低,主要是由于其中蓄水量变异度的指标得分相对较低,处于劣态;五河入湖径流变异度与湖泊水位变异度处于不健康状态。这几个指标得分较低的原因主要在于2020年7月长江中下游降雨持续增多,鄱阳湖水位快速上涨,至2020年7月13日,星子站水位达22.60 m,超警戒水位3.6 m,刷新历史最高水位(22.52 m)(江西省水利厅实时共享数据)^[64],导致鄱阳湖水文状况评分较低。

鄱阳湖水环境得分为75.8,处于健康状态。其中,鄱阳湖的底泥污染情况得分较低,超标浓度最高的污染物为Mn,超标倍数为3倍。应该对达到或接近强度污染湖区引起重视并加强检测;对确定的污染源应采取治理措施以免污染进一步扩大危及其它湖区^[65]。

鄱阳湖水域生态得分为75.7分,处于健康状态。其浮游植物、底栖动物和鱼类的完整性都处于亚健康状态,通过健康监测评估,水域方面出现的问题有:1)局部水域蓝藻水华风险较高;2)底栖动物物种多样性降低,群落结构趋于小型化;3)鱼类群落结构小型化和低龄化。因此应该高度重视保护鄱阳湖的主要经济鱼类、珍稀及濒危鱼类的生境,以保护鄱阳湖水生生物资源为主线,对保护区内的经济鱼类、珍稀濒危鱼类等进行常年监测并开展相关科学研究和科学规划,建立鄱阳湖鱼类生境保护区,适度控制人类活动对鱼类的干扰,尽量恢复其栖息地的自然属性。

鄱阳湖湿地生态得分为69.5分,处于亚健康状态。其景观稳定性指数处于劣态,碟形湖水生植物完整性处于亚健康状态,导致鄱阳湖湿地生态得分偏低。鄱阳湖湿地生态存在的问题有:1)生态系统结构稳定性降低;2)生态功能下降;3)景观格局破碎化趋势加剧。

鄱阳湖评估社会经济方面的得分为90,处于非常健康状态。由于近年来洪灾频发,2020年更是发生鄱阳湖特大洪水,因此,鄱阳湖流域防洪系统得到了高度重视,应该在现有的基础上,加固、修缮未达标的堤防,进一步改进、完善鄱阳湖流域防洪工程的建设。

3.3 鄱阳湖生态系统健康目标层结果分析与讨论

3.3.1 鄱阳湖生态系统健康影响因素分析 通过对准则层得分的加权计算,得到鄱阳湖生态健康评估总分为73.45分,处于亚健康状态。对生态系统健康的影响因素作如下分析:

1)鄱阳湖与长江的江湖关系。泄流能力的变异改变了鄱阳湖与长江相互作用的水力特性,从而影响了鄱阳湖的水量平衡,加剧了近年的枯水情势。

2)水文条件是影响鄱阳湖生态系统健康的重要因素。鄱阳湖季节性水资源紧张、汛后水位消退加速、湖泊萎缩等干旱化问题日益严重。鄱阳湖流域入湖水量总体呈现减少趋势,湖泊水文要素动态变化剧烈,且湖泊流域水文均存在洪季偏洪、枯季偏枯的分布态势,未来鄱阳湖面临的风险因素仍是极端水文事件和洪旱灾害。

3)富营养化影响湖泊生态系统健康。鄱阳湖大多数水环境参数,如Chl.a、TN和NO₃-N在2009—2020年期间呈现显著的增加趋势,湖区轻度富营养化的比例总体呈现上升趋势,而中营养状态的比例显著减小,湖区水质逐渐富营养化。

4)底栖动物物种多样性降低,优势种小型化特征明显。与历史相比,鄱阳湖底栖动物群落结构发生明

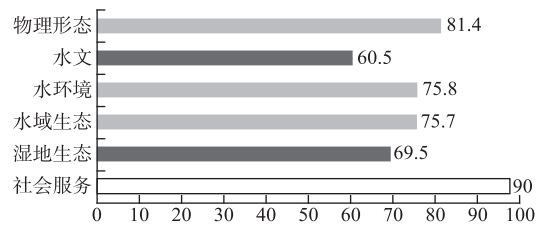


图4 鄱阳湖生态系统健康评估准则层得分

Fig.4 Ecological health assessment criterion layer score of Lake Poyang

显变化,表现为物种丰富度下降,群落结构趋于小型化,软体动物密度呈降低趋势。底栖动物群落小型化可降低底栖食性鱼类捕食效率,增加了其在获得食物中所消耗的能量,导致食物网能量流动过程受到限制。

5)受水文节律变化异常影响,近年来鄱阳湖洲滩湿地生态结构脆弱性增加、生态功能下降。与1980s相比,近十几年来生物量有较大提高,尤其是2008—2012年间生物量显著上升。鄱阳湖湿地面积近30年来呈现显著的增加趋势,总体呈高滩植被挤占中滩植物生长空间,中低滩植被分布空间下延态势,湿地景观呈现破碎化、形状复杂化的趋势,景观连通性下降的变化趋势。

3.3.2 对策与建议 基于鄱阳湖生态系统健康评估的结果与分析,未来对鄱阳湖的保护应该从以下几个方面出发:

1)针对鄱阳湖生态系统健康评估水文指标评分较低的情况,应构建湖区与流域协同防洪体系,完善防洪工程体系与洪水调控并加强湖区与流域的协同治理。

2)水环境方面,应加强主要入湖河流污染物排放控制并加强湖滨区畜禽养殖污染防治。重点加强“五河”流域生活、工业污染源和农村面源污染控制,加强对家禽养殖场的管理,推行对家禽粪便、废饲料的回收利用,走污染物循环利用的道路。

3)水域生态和湿地生态方面,应高度重视保护鄱阳湖的鱼类、候鸟的生境,对保护区内的鱼类、候鸟进行常年监测并开展相关科学研究和科学规划,建立鄱阳湖生境保护区,控制人类活动对生物的干扰,尽量恢复其栖息地的自然性属性。

4)由于鄱阳湖景观稳定性指数评分较低,应加强鄱阳湖湿地保护,划定鄱阳湖湿地生态红线,减少人为干扰,大力推行湿地生态补偿机制,对鄱阳湖重要湿地因保护候鸟等野生动物而遭受的损失或影响给予补偿。

5)社会服务的评分较高,在此基础上应该提升社会公众参与鄱阳湖保护意识。通过宣传引导,持续推进节水、河湖保护、水土保持等宣传,提升社会水生态环境保护意识。

4 结论

1)根据鄱阳湖流域生态的实际情况和湖泊评估指标体系构建的目的性、科学性、可操作性、代表性、避免重复性5个原则选择了包括湖区物理形态、水文、水环境、水域生态、湿地生态、社会服务在内的共26个评价指标来构建鄱阳湖生态系统健康评估指标体系,构建的湖泊生态系统健康评价体系针对性强,科学全面,具有可操作性,对类似湖泊的生态系统健康评价提供了案例借鉴。

2)鄱阳湖生态系统健康评估的结果可知,社会服务指标处于非常健康状态;物理形态和水域生态处于健康状态;水文、水环境以及湿地生态指标处于亚健康状态。而鄱阳湖整体得分处于亚健康状态。在处于亚健康的水文与水环境方面,鄱阳湖当前水文情势动态主要体现在夏秋等典型时期的变化上,已导致一些自然灾害的发生;水环境方面,鄱阳湖湖区轻度富营养化的比例总体呈现上升趋势,而中营养状态的比例显著减小,说明湖区水质逐渐富营养化。

3)根据准则层评价结果和加权计算,鄱阳湖生态系统健康处于亚健康状态。对湖泊生态系统健康的影响因素进行分析后发现鄱阳湖生态系统健康主要受泄流能力、水文节律变化、富营养化程度和物种多样性的影响。未来,构建湖区与流域协同防洪体系、加强主要入湖河流污染物排放控制、强化湖滨区畜禽养殖污染防治、高度重视保护鄱阳湖的鱼类、候鸟的生境保护、提升社会公众参与是提升鄱阳湖水生态系统健康水平的主要对策。

致谢:江西省生态文明研究院、江西鄱阳湖国家级自然保护区管理局、江西省水利科学研究院、江西省水文局、江西省渔业渔政局等单位为本文提供了相关数据,在此一并致谢。

5 附录

附表 I ~ VII 见电子版 (DOI:10.18307/2023.0321)。

6 参考文献

[1] Angermeier PL, Karr JR. Ecological health indicators. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 2008.

- [2] Fairweather PG. State of environment indicators of 'river health': Exploring the metaphor. *Freshwater Biology*, 1999, **41**(2): 211-220. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1999.00426.x.
- [3] Vugteveen P, Leuven RSEW, Huijbregts MAJ *et al.* Redefinition and elaboration of river ecosystem health: Perspective for river management. *Hydrobiologia*, 2006, **565**(1): 289-308. DOI: 10.1007/s10750-005-1920-8.
- [4] Karr JR. Biological integrity—A long-neglected aspect of water-resource management. *Ecological Applications*, 1991, **1**(1): 66-84.
- [5] Sun XL, Hu CH. Review on river health connotation and assessment method. *Journal of Sediment Research*, 2007, (5): 74-81. [孙雪岚, 胡春宏. 关于河流健康内涵与评价方法的综合评述. 泥沙研究, 2007, (5): 74-81.]
- [6] 王超, 夏军, 李凌程. 河流健康评价研究与进展. 水资源研究, 2014, **3**(3): 189-97.
- [7] Liu H, Tu M. Brief review of healthy river issues in foreign countries. *China Water Resources*, 2005, (4): 19-22. [刘恒, 涂敏. 对国外河流健康问题的初步认识. 中国水利, 2005, (4): 19-22.]
- [8] 董哲仁. 国外河流健康评估技术. 水利水电技术, 2005, **36**(11): 15-19.
- [9] Liu XY, Zhang YF. Essence and indicators of the healthy Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, **37**(6): 649-654, 661. [刘晓燕, 张原峰. 健康黄河的内涵及其指标. 水利学报, 2006, **37**(6): 649-654, 661.]
- [10] 孙治仁, 宋良西. 对河流健康的认识和维护珠江健康的思考. 人民珠江, 2005, **26**(3): 4-5.
- [11] Kim S, Lee SW, Park S *et al.* Socioeconomic risks and their impacts on ecological river health in South Korea: An application of the analytic hierarchy process. *Sustainability*, 2021, **13**(11): 6287-6287. DOI: 10.3390/SU13116287.
- [12] Li GY. "Keeping healthy life of the Yellow River"—an ultimate aim of taming the Yellow River. *Yellow River*, 2004, **26**(1): 1-2, 46. [李国英. 黄河治理的终极目标是“维持黄河健康生命”. 人民黄河, 2004, **26**(1): 1-2, 46.]
- [13] Wen FB, Han QW, Xu JX *et al.* Definition and connotation of river health. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(1): 140-150. [文伏波, 韩其为, 许炯心等. 河流健康的定义与内涵. 水科学进展, 2007, **18**(1): 140-150.]
- [14] Li B, Yang GS, Wan RR. Progress on evaluation methods of lake ecosystem health. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2014, **34**(6): 98-106. [李冰, 杨桂山, 万荣荣. 湖泊生态系统健康评价方法研究进展. 水利水电科技进展, 2014, **34**(6): 98-106.]
- [15] Wu JY, He YJ, Chen K *et al.* Ecosystem health assessment of shallow lakes based on O/E model. *Environmental Monitoring in China*, 2022, **38**(1): 27-35. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2022.01.03. [吴俊燕, 和雅静, 陈凯等. 基于 O/E 模型的浅水湖泊生态系统健康评价. 中国环境监测, 2022, **38**(1): 27-35.]
- [16] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] Xu GB, Ren W, Guo SY *et al.* Analyses on the development of lake complex ecosystem health based on entropy theory. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 795-800. [徐国宾, 任旺, 郭书英等. 基于熵理论的湖泊生态系统健康发展评估. 中国环境科学, 2017, **37**(2): 795-800.]
- [18] Hu ZX, Hu WP, Gu XH *et al.* Assessment of ecosystem health in lake Taihu. *J Lake Sci*, 2005, **17**(3): 256-262. DOI:10.18307/2005.0311. [胡志新, 胡维平, 谷孝鸿等. 太湖湖泊生态系统健康评价. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 256-262.]
- [19] Vörösmarty CJ, McIntyre PB, Gessner MO *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 2010, **467**(7315): 555-561. DOI: 10.1038/nature09440.
- [20] 冷维亮, 郭照河, 毕钦祥等. 健康淮河生态指标体系与评价方法初探. 治淮, 2013, (12): 33-34.
- [21] 杨杉. 生态环境保护综合评价指标体系构建研究. 农业与技术, 2021, **41**(17): 97-99.
- [22] Yang WH, Yan ZM, Wu JH. Advances in river health assessment. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2005, **33**(6): 607-611. [杨文慧, 严忠民, 吴建华. 河流健康评价的研究进展. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, **33**(6): 607-611.]
- [23] 于宁, 马锡铭, 赵洪波等. 河流水生态系统健康评价研究进展. 环境保护与循环经济, 2014, **34**(1): 49-51.
- [24] Woodiwis FS. The biological system of stream classification used by Trent River Board. *Chemistry & Industry*, 1964, **11**: 443-447.
- [25] Chandler J. A biological approach to water quality management. *Water Pollution Control*, 1970, **69**(4): 15-22.
- [26] 王国胜, 徐文彬, 林亲铁等. 河流健康评价方法研究进展. 安全与环境工程, 2006, (4): 14-17.
- [27] 龙笛. 国外健康流域评价理论与实践. 海水水利, 2005, (3): 1-5.
- [28] Zhang XP, Yang QK, Li R. "Healthy" diagnostic index of watershed—a new method of ecological environment assessment. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, **18**(4): 57-62. DOI:10.3969/j.issn.1000-288X.1998.04.014. [张晓萍, 杨勤科, 李锐. 流域“健康”诊断指标——一种生态环境评价的新方法. 水土保持通报, 1998, **18**(4): 57-62.]
- [29] Zeng DH, Jiang FQ, Fan ZP *et al.* Ecosystem health and sustainable development for human. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(6): 751-756. [曾德慧, 姜凤岐, 范志平等. 生态系统健康与人类可持续发展. 应用生态学报, 1999, **10**(6): 751-756.]
- [30] 张颖睿. 小清河流域生态健康评估研究[学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [31] 陈雷. 全面落实河长制各项任务 努力开创河湖管理保护工作新局面——在贯彻落实《关于全面推行河长制的意见》视频会议上的讲话. 中国水利, 2016.
- [32] 彭文启. 河湖健康评估指标、标准与方法研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2018, **16**(5): 394-404, 416.
- [33] 周泉, 叶茂, 赵凡凡. 基于 VOR 模型的阿尔泰山林区森林生态系统健康评价. 甘肃农业大学学报, 2021, **56**(3): 137-148.
- [34] Yang TY, Zhao Q, Wang KF *et al.* Comprehensive evaluation of water ecological security in Shandong Province based on analytic hierarchy process and entropy weight method. *Journal of University of Jinan: Science and Technology*, 2021, **35**(6): 566-571, 579. [杨天翼, 赵强, 王奎峰等. 基于层次分析法和熵权法综合评价山东省水生态安全. 济南大学学报: 自然科学版, 2021, **35**(6): 566-571, 579.]

- [35] Wan JB, Zhao HY, Zhu BH. Application of principal component analysis in evaluation of water quality of lean river. *China Water & Wastewater*, 2009, **25**(16): 104-108.
- [36] Liao JQ, Huang Y. Research progress on using index of biological integrity to assess aquatic ecosystem health. *Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(1): 295-302.
- [37] 林玉茹, 胡振鹏. 江湖水系生态监测与评估. *江西水利科技*, 2010, **36**(1): 1-5.
- [38] 贾海燕, 朱焯, 卢路. 鄱阳湖健康综合评价研究. *三峡生态环境监测*, 2018, **3**(3): 74-81.
- [39] 卢路, 裴中平, 贾海燕. 基于生态过程的湖泊水文健康评价体系研究 II: 应用. *三峡生态环境监测*, 2019, **4**(2): 40-44.
- [40] 许小华, 雷声, 张秀平等. 鄱阳湖区生态指标体系分析. *中国农村水利水电*, 2017, (10): 70-74, 79.
- [41] Fan XL, Xu GB. Lake health assessment method based on the coordinated development degree of ecology and social service function. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1225-1234. DOI:10.18307/2018.0506. [樊贤璐, 徐国宾. 基于生态—社会服务功能协调发展度的湖泊健康评价方法. *湖泊科学*, 2018, **30**(5): 1225-1234.]
- [42] 寇利卿. 拒马河生态健康评估及保护对策探究. *水科学与工程学报*, 2021, (4): 37-41.
- [43] 王文杰, 张哲, 王维等. 流域生态健康评价框架及其评价方法体系研究(一)——框架和指标体系. *环境工程技术学报*, 2012, **2**(4): 271-277.
- [44] 卢路, 裴中平, 贾海燕. 基于生态过程的湖泊水文健康评价体系研究 I: 理论. *三峡生态环境监测*, 2019, **4**(1): 40-46.
- [45] Shah HB, Yousuf AR, Chishti MZ *et al.* Helminth communities of fish as ecological indicators of lake health. *Parasitology*, 2012, **140**(3): 352-360.
- [46] 李璐. 浅析湿地在生态环境保护中的功能价值. *林业勘查设计*, 2021, **50**(6): 45-47.
- [47] 李晓璐. 衡水湖生态健康评估体系和方法探究. *内蒙古水利*, 2020, (11): 37-39.
- [48] 谢诗怡, 况润元, 宋子豪. 鄱阳湖水域面积变化特征及对气象因素的响应. *中国农村水利水电*, 2022, (7): 103-109.
- [49] Cui LJ. Evaluation on functions of Lake Poyang ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**(4): 47-51. [崔丽娟. 鄱阳湖湿地生态系统服务功能价值评估研究. *生态学杂志*, 2004, **23**(4): 47-51.]
- [50] Cai QH. Healthy Yangtze River and ecological Lake Poyang: A keynote report at the seminar on the protection and management of lakes in the Yangtze River Basin. *Yangtze River*, 2009, **40**(21): 1-4. [蔡其华. 健康长江与生态鄱阳湖——在长江流域湖泊的保护与管理研讨会上的主题报告. *人民长江*, 2009, **40**(21): 1-4.]
- [51] 邓月萍, 邢久生, 熊丽黎等. 人类活动对鄱阳湖赭箕湖水环境影响的研究. *江西水利科技*, 2022, **48**(1): 40-45.
- [52] Fan HX, He HD, Xu LG *et al.* Simulation and attribution analysis based on the long-short-term-memory network for detecting the dominant cause of runoff variation in the Lake Poyang Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3): 866-878. DOI:10.18307/2021.0319. [范宏翔, 何菡丹, 徐力刚等. 基于长短记忆模型的鄱阳湖流域径流模拟及其演变的归因分析. *湖泊科学*, 2021, **33**(3): 866-878.]
- [53] Wang KX, Wang ZT, Mei ZG *et al.* Ecological assessment indicator of the Yangtze River: Passive acoustic monitoring based population size of the Yangtze finless porpoise. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(6): 1390-1395. [王克雄, 王志陶, 梅志刚等. 长江生态考核指标: 基于被动声学监测的长江江豚数量. *水生生物学报*, 2021, **45**(6): 1390-1395.]
- [54] 水利部水环境监测评价研究中心. 地表水资源质量评价技术规程, 2007.
- [55] Cheng H, Li K, Li M *et al.* Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China. *Earth Science Frontiers*, 2014, **21**(3): 265-306. DOI:10.13745/j.esf.2014.03.028. [成杭新, 李括, 李敏等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值. *地学前缘*, 2014, **21**(3): 265-306.]
- [56] 方春林, 陈文静, 周辉明等. 鄱阳湖鱼类资源及其利用建议. *江苏农业科学*, 2016, **44**(9): 233-243.
- [57] Yang SR, Li MZ, Zhu QG *et al.* Spatial and temporal variations of fish assemblages in Poyanghu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(1): 54-64. [杨少荣, 黎明政, 朱其广等. 鄱阳湖鱼类群落结构及其时空动态. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(1): 54-64.]
- [58] Zhang XF, Liu RJ, Zhao QZ *et al.* The population of finless porpoise in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Acta Theriologica Sinica*, 1993, **13**(4): 260-270. DOI: 10.16829/j.skb.1993.04.005. [张先锋, 刘仁俊, 赵庆中等. 长江中下游江豚种群现状评价. *兽类学报*, 1993, **13**(4): 260-270.]
- [59] 傅培峰, 王生, 贺刚. 浅谈江西省鄱阳湖长江江豚保护. *江西水产科技*, 2017, (3): 44-46, 48.
- [60] 长江流域水生生物资源及生境状况公报发布. *中国环境监察*, 2020, (12): 7.
- [61] 章卫. 鄱阳湖区堤防管理现状及措施的研究. *科技风*, 2019, (1): 223.
- [62] Lei S. Review and reflection on Lake Poyang flood in 2020. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(6): 7-12. [雷声. 2020年鄱阳湖洪水回顾与思考. *水资源保护*, 2021, **37**(6): 7-12.]
- [63] Lai XJ, Huang Q, Zhang YH *et al.* Discharge capacity analysis on Lake Poyang. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 529-534. DOI:10.18307/2014.0406. [赖锡军, 黄群, 张英豪等. 鄱阳湖泄流能力分析. *湖泊科学*, 2014, **26**(4): 529-534.]
- [64] Zhang Q, Liu YB, Yao J *et al.* Lake hydrology in China: Advances and prospects. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1360-1379. DOI:10.18307/2020.0511. [张奇, 刘元波, 姚静等. 我国湖泊水文学研究进展与展望. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1360-1379.]
- [65] Gong XF, Chen CL, Zhou WB *et al.* Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Lake Poyang. *Environmental Science*, 2006, **27**(4): 732-736. DOI: 10.13227/j.hjlx.2006.04.026. [弓晓峰, 陈春丽, 周文斌等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价. *环境科学*, 2006, **27**(4): 732-736.]

附表 I 鄱阳湖生态系统健康评估指标体系

Attached Tab. I Index system of Lake Poyang ecosystem health assessment

准则层	说明	指标层
物理形态	物理指标评价的主要内容是评价对象的物理形态, 包括岸边带情况, 湖泊泥沙及水域情况等 ^[43] 。	湖泊口门状况
		湖泊面积变化
		自然岸线保有率
		湖盆冲淤情况
水文	湖泊水文健康是河湖健康评价的重要子项, 湖泊水文健康的评估目的是弄清楚湖泊水文变化过程中对河流造成影响的要素 ^[44] , 本研究在鄱阳湖 2020 年遭遇特大洪水的前提下进行研究。	蓄水量变异度
		换水周期变异度
		五河入湖径流变异度
		江湖水量交换变异度
水环境	随着经济的发展, 许多湖泊受到生产和生活过程造成的污染, 向湖泊排放大量的有机污染物氮和磷等营养化物质, 在水中大量积累, 造成藻类等浮游植物迅速繁殖, 导致水体中的溶解氧减少, 甚至腐败发臭, 产生毒素, 影响供水水质、鱼类生长和旅游环境 ^[45] 。	湖泊水位变异度
		水质优劣程度
		富营养化程度
		入湖河流水质达标率
水域生态	湖泊的水域生态指标主要包含湖泊中的动植物情况, 因此, 水域生态通过浮游植物、底栖动物完整性、鱼类保有指数和江豚 4 个方面进行分析。	底泥污染状况
		水体自净能力
		浮游植物密度
		底栖动物完整性指数
湿地生态	湿地生态系统服务功能价值包括为生物提供栖息地、固碳释氧、提供水源净化水质、改善小气候、降解污染、固土保水保肥、积累营养物质、游憩服务和科研探索等方面内容 ^[46] 。	鱼类完整性指数
		江豚
		珍稀候鸟分布数量
		碟形湖水生植物群落状况
社会服务	社会服务指标从推进公众满意度和景观舒适度建设, 提高社会服务功能水平, 促进流域生态系统协调发展出发。	洲滩典型植物群落稳定指数
		景观稳定性指数
		防洪达标率
		供水保证率
		集中式饮用水水源地水质达标率
		公众满意度

附表 II 物理指标计算方法与主要参数

Attached Tab. II Calculation methods and main parameters of physical indicators

指标层	说明	计算方法	主要参数
湖泊口门状况	通江湖泊口门控制着湖泊水量与长江的交换, 口门变化对湖泊的水量平衡过程产生影响, 湖泊口门变化综合体现在湖泊口门的泄水能力上。	$AKI = \left(\frac{AC_i}{AR_i} - 1 \right) \times 100$ $i = 1, 2, \dots$	AKI 为湖泊泄流能力变异程度; AC_i 为评估年第 i 个特征水位对应的湖泊泄流能力; AR_i 为参考年第 i 个特征水位对应的湖泊泄流能力。
湖泊面积变化	单一的湖泊最大、最小或者平均水面面积等难以体现出湖泊萎缩状况, 为此, 拟采用特征水	$ASI = \left(1 - \frac{AC_i}{AR_i} \right) \times 100$	ASI 为湖泊面积萎缩比例; AC_i 为评估年第 i 个特征水位对应的湖泊水面面积;

	位下湖泊的水面面积的萎缩比例来评估鄱阳湖的萎缩状况。	$i = 1, 2, \dots$	AR_i 为历史参考年第 i 个特征水位下湖泊水面面积。
自然岸线保有率	湖泊岸线是湖泊水体与岸边的交线，可分为自然岸线和人工岸线，自然岸线保有率是指一定长度单元内自然岸线长度占总岸线长度的比例，反映自然岸线资源的保存、保护状况。	$RONS = \frac{LNS}{LT} \times 100\%$	$RONS$ 为自然岸线保有率； LNS 为自然岸线长度； LT 为岸线总长度。
湖盆冲淤情况	鄱阳湖的泥沙来源于鄱阳湖流域和长江倒灌，以鄱阳湖流域为主，即主要来源于“五河”和“区间”入湖水体所携带的泥沙。	$FNI = \left \frac{R_{出i} - R_{入i}}{R_{入i}} \right \times 100$ $i = 1, 2, \dots$	FNI 为湖盆冲淤变化的百分比； $R_{出i}$ 为第 i 年出湖输沙量； $R_{入i}$ 为第 i 年入湖输沙量。

附表III 水文指标计算方法与主要参数

Attached Tab.III calculation method and main parameters of hydrological indicators

指标层	说明	计算方法	主要参数
蓄水量变异度	蓄水量是反映河流、湖泊（水库）等地表系统水量盈亏的重要指标。采用水位-容积（蓄量）关系曲线进行鄱阳湖蓄水量估算。	$FVI = \sqrt{\sum_{m=1}^{12} \left(\frac{V_m - \bar{V}}{\bar{V}} \right)^2}$ $\bar{V} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} V_m$	FVI 为蓄水量变异程度； V_m 为评估年湖泊第 m 月蓄水量； V_m 为湖泊第 m 月多年平均蓄水量； \bar{V} 为湖泊多年平均蓄水量； m 为年内月份序号。
换水周期变异度	湖泊换水周期通常表示湖泊内部水体更新一次所需时间，也是湖泊水体交换能力的一个重要指示。	$Tr = \left \frac{t - \bar{T}}{\bar{T}} \right \times 100\%$	Tr 为换水周期相对变化百分比； t 为评估年湖泊平均换水周期，用评估年的平均水位计算蓄水量； \bar{T} 为湖泊多年平均换水周期，用多年的平均水位计算蓄水量。
五河入湖径流变异度	入湖流量变异程度是湖泊健康的重要指标，该指标衡量环湖河流实测径流与天然径流过程的差异，反映湖泊流域水资源开发利用对湖泊水文情势的影响程度，同时也是对湖泊水文节律变异评价的重要方面。	$FLI = \sqrt{\sum_{m=1}^{12} \left(\frac{r_m - \bar{R}}{\bar{R}} \right)^2}$ $\bar{R} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} R_m$	FLI 为入湖径流变异程度； r_m 为评估年五河第 m 月总流量； R_m 为五河第 m 月多年平均总流量； \bar{R} 为五河多年平均总流量； m 为年内月份序号。
江湖水量交换变异度	江湖水量交换效应主要受上游来水差异驱动，上游来水量虽取决于气象因素影响，但在人类活动作用下，特别是水利工程蓄水调度，容易引起下游江湖关系发生变化。	$FDI = \sqrt{\sum_{m=1}^{12} \left(\frac{q_m - \bar{Q}}{\bar{Q}} \right)^2}$ $\bar{Q} = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} Q_m$	FDI 为江湖水量交换变异程度； q_m 为评估年湖口第 m 月平均流量； Q_m 为湖口第 m 月多年平均流量； \bar{Q} 为湖口多年平均流量； m 为年内月份序号。
湖泊水位变异度	水位是表征江河湖泊水文情势的一项重要参数，且对维系河湖生态系统健康及完整性至关重要。	$WLF = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 \left(\frac{h_m - \bar{H}_m}{\bar{H}_m} \right)^2}$	WLF 为湖泊水位变异程度； h_1 、 h_2 、 h_3 分别为评估年鄱阳湖星子站年最高水位、最低水位、年平均水位； \bar{H}_1 、 \bar{H}_2 、 \bar{H}_3 分别为星子站年最高水位、最低水位、平均水位的多年平均值。

附表IV 水环境指标的计算方法与主要参数

Attached Tab.IV Calculation methods and main parameters of water environment indicators

指标层	说明	计算方法	主要参数
水质优劣程度	水质优劣程度可以准确地量化河流和湖泊的水环境质量。	质类别比例应根据《地表水资源质量评价技术规范》(SL395)进行评估	河流按照河长统计, 湖泊按照湖泊水面面积统计。
富营养化程度	富营养化是一种氮、磷等植物营养物质含量过多所引起的水质污染现象。	$TLI(Chla) = 10 \times (2.500 + 1.086 \times \ln Chla)$ $TLI(TP) = 10 \times (9.436 + 1.624 \times \ln TP)$ $TLI(TN) = 10 \times (5.453 + 1.694 \times \ln TN)$ $TLI(SD) = 10 \times (5.118 - 1.941 \times \ln SD)$ $TLI(COD_{Mn}) = 10 \times (0.109 + 2.661 \times \ln COD_{Mn})$	
入湖河流水质达标率	水质达标率是水资源管理考核的重要指标, 可以真实直观地反映水环境质量状况。	$WFZ_r = WFZ_p \times 100$	WFZ _r 为入湖河流水质达标率指标赋分; WFZ _p 为入湖河流水质达标率。
底泥污染状况	底泥是水生生态系统的重要组成部分, 修复池塘底质是保持水质稳定和防控水生生物病害的基础, 也是水体富营养化防治的关键。	底泥污染指数即底泥中每一项污染物浓度占对应标准值的百分比进行评估。	

附表V 水域生态指标的计算方法与主要参数

Attached Tab.V Calculation methods and main parameters of water ecological indicators

指标层	说明	计算方法	主要参数
水体自净能力	水体自净能力, 是废水或污染物一旦进入水体后, 就开始自净过程的能力。	根据《河湖健康评价指南》, 选择水中溶解氧浓度衡量水体自净能力。	
浮游植物密度	浮游植物密度是反映湖泊水生态状况的重要指标, 其密度情况能很好地反映湖泊水环境现状与演变。	采用浮游植物密度指标评估湖泊浮游植物状况	
底栖动物完整性指数	大型底栖无脊椎动物生物完整性指数(B-IBI)通过对比参考点和受损点大型底栖无脊椎动物状况进行评价。	$100 \times M_1 / 7$ $100 \times (1 - M_2) / (1 - 0.27)$ $100 \times (8.5 - M_4) / (8.5 - 4.5)$	M ₁ 总分类单元数 M ₂ Berger-Parker 优势度指数 M ₃ BPI 生物学指数 M ₄ FBI 指数
鱼类完整性指数	鱼类及其洄游等生物学特征分别是湿地生态系统中重要的生态组分和生态过程, 鱼类物种多样性信息也是评估湿地生态效益的重要指标。	$FOE = \frac{FO}{FE}$	FOE 为鱼类保有指数; FO 为鄱阳湖近五年内调查获得的鱼类种类数量; FE 为 1980s 鄱阳湖记录的鱼类物种数, 为 134 种。
江豚	江豚, 列入《世界自然保护联盟濒危物种红色名录》濒危等级, 其种群数量反映重点保护物种状况和鄱阳湖生态环境保护成效。	江豚种群指数=评价时段江豚种群数量/江豚种群数量基准值	

附表VI 湿地生态指标的计算方法和主要参数

Attached Tab.VI Calculation methods and main parameters of wetland ecological indicators

指标层	说明	计算方法	主要参数
珍稀候鸟分布数量	以鄱阳湖指示性候鸟物种数量为考核指标。	$BOE = \frac{\sum BO}{BE}$	BOE 为珍稀候鸟保有指数； BO 为鄱阳湖指示性候鸟物种（白鹤+东方白鹳+小天鹅+小白额雁）数量； BE 为基准值，即往年鄱阳湖指示性候鸟物种年均保有量。 i 为纳入计算的珍稀候鸟物种数。
碟形湖水生植物群落状况	水生植物群落状况评价为选取典型 2-3 个典型碟形湖，分别设置 1-2 个评价断面，对断面区域水生植物种类、数量、外来物种入侵状况进行调查。	取典型 2-3 个典型碟形湖，分别设置 1-2 个评价断面，对断面区域水生植物种类、数量、外来物种入侵状况进行调查。	结合现场验证，按照丰富、较丰富、一般、较少、无 5 个等级分析水生植物群落状况。
洲滩典型植物群落稳定指数	以鄱阳湖代表性洲滩植物群落芦苇群落与灰化苔草群落为主要考核对象。基准值以多年平均值（2011-2019 年鄱阳湖站持续观测数据）为基准值。	$SBP = \left 1 - \frac{BPO}{BPE} \right $	SBP 为植物群落稳定指数； BPO 为观测期鄱阳湖代表性洲滩植物群落芦苇群落与灰化苔草群落生物多样性指数； BPE 为基准值，即芦苇群落与灰化苔草群落生物多样性指数多年平均值（2011-2019 年鄱阳湖站持续观测数据）。
景观稳定性指数	景观指数高度浓缩景观格局信息，能有效反映景观结构的组成和空间配置等方面特征，是描述景观格局及其变化的经典方法。	$LS = \left 1 - \frac{LSO}{LSE} \right $	LS 为景观稳定性指数； LSO 为观测期鄱阳湖秋季洲滩湿地植被面积； LSE 为基准值，即上世纪 90 年度鄱阳湖秋季洲滩湿地植被面积年均值。

附表VII 社会服务指标的计算方法和主要参数

Attached Tab.VII Calculation methods and main parameters of social service indicators

指标层	说明	计算方法	主要参数
防洪达标率	防洪达标率指已达到防洪标准的堤防长度占堤防总长度的比例。	$FLDE = \frac{BLA}{BL}$	FLDE 为防洪达标率； BLA 为达到防洪标准的堤防长度； BL 为有防洪要求的堤防总长度。
供水保证率	供水水量保证程度等于一年内湖泊逐日水位达到供水保证水位的天数占年内总天数的百分比。	$R_{gs} = \frac{D_0}{D_n} \times 100\%$	R _{gs} ——供水水量保证程度； D ₀ ——水位达到供水保证水位的天数； D _n ——一年内总天数。
集中式饮用水水源地水质达标率	集中式饮用水水源地水质达标率指达标的集中式饮用水水源地（地表水）的个数占鄱阳湖集中式饮用水水源地总数的百分比。	$R_Y = \frac{Y_0}{Y_n} \times 100$	R _Y 为饮用水水源地水质达标率； Y ₀ 为达标的饮用水水源地的个数； Y _n 为鄱阳湖饮用水水源地总数。
公众满意度	评价公众对鄱阳湖水量、水质、生物多样性、涉水景观等的满意程度，采用公众调查方法评价，其赋分取评价区域内参与调查的公众赋分的平均值。	评价公众对鄱阳湖水量、水质、生物多样性、涉水景观等的满意程度，采用公众调查方法评价	赋分取评价区域内参与调查的公众赋分的平均值。