

洪泽湖生态系统健康状况评价和保护

蔡永久¹, 张 祯², 唐荣桂², 陈 业³, 黄 蔚¹, 龚志军¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 江苏省洪泽湖管理委员会, 江苏 淮安 223100;
3. 安徽师范大学生命科学学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:根据生态系统完整性和管理需求,从水文水资源、自然形态、水环境质量、水生态和服务功能5个方面筛选12个指标建立评价体系,基于2018年周年监测数据开展评价。针对研究得出的问题,从入湖污染物控制、底泥生态清淤、湖区生活污染控制、退圩还湖、水生态修复、网格化管理、监测体系完善等方面提出湖泊保护对策建议。

关键词:浅水湖泊;生态完整性;健康评价;污染控制;湖泊管理;淮河流域

中图分类号:X522 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2020)07-0001-07

Evaluation and protection of ecosystem health in Hongze Lake

CAI Yongjiu¹, ZHANG Zhen², TANG Ronggui², CHEN Ye³,
HUANG Wei¹, GONG Zhijun¹

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;
2. The Hongze Lake Water Conservancy Project Management Office of Jiangsu Province, Huai'an 223100, China;
3. College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract: According to the needs of ecosystem integrity and management, 12 indicators were selected from the five aspects of hydrology and water resources, natural form, water environment quality, water ecology and service function to establish an evaluation system, and the evaluation was carried out based on the annual monitoring data in 2018. In view of the problems obtained in the study, the countermeasures and suggestions for lake protection were put forward from the aspects of pollutant control into the lake, ecological dredging of the sediment, control of domestic pollution in the lake area, return of the polder to the lake, water ecological restoration, grid management, and improvement of monitoring system.

Key words: shallow lake; ecological integrity; health assessment; pollution control; lake management; Huaihe River Basin

1 概 述

湖泊生态系统是生物与环境的综合体,具有复杂的结构和功能^[1-3]。洪泽湖是中国五大淡水湖之一,是苏北地区重要水源地,也是南水北调东线重要调蓄库,具有饮用水源地、防洪、灌溉、航运、水产养殖、生态保护、文化旅游等多种功能^[4-5]。长期以

来,洪泽湖为促进地区经济社会的发展发挥了重要作用,但是受粗放式发展模式的影响,洪泽湖非法侵占水域、富营养化、水产养殖等生态环境问题较为严重,削弱了洪泽湖综合功能的发挥,洪泽湖的健康遭受严重威胁^[6-7]。为准确把握洪泽湖健康状况,本研究从湖泊生态系统的自然属性和社会服务功能两方面考虑,通过对调查收集洪泽湖自然形

收稿日期:2020-04-02

基金项目:江苏省水利科技项目(2018039,2019005)

作者简介:蔡永久(1985—),男,副研究员,博士,研究方向为湖泊生态与水生态健康评价。E-mail:caiyj@njglas.ac.cn

态、水文水资源、水环境质量、水生态等资料,评估洪泽湖健康状态,诊断水生态系统面临的主要问题和驱动因素,以期洪泽湖生态环境的保护与修复提供科学支撑。

2 研究区概况

洪泽湖位于江苏省西北部淮安、宿迁两市境内,为淮河流域最大湖泊,是我省第二大、全国第四大的淡水湖泊,地理位置在东经 $118^{\circ}10' \sim 118^{\circ}52'$ 、北纬 $33^{\circ}06' \sim 33^{\circ}40'$ 之间^[8]。平均水深 1.9 m,最大水深 4.5 m;湖泊最大长度约 60 km,平均宽度约 24.4 km。现状正常蓄水位 13.00 m,南水北调东线一期工程实施后规划蓄水位 13.50 m,相应水面积 $1\,793\text{ km}^2$ 、蓄水量 $37.3 \times 10^8\text{ m}^3$ 。全湖水域由成子湖湾、溧河湖湾、淮河湖湾等湖湾组成,其中西北部为成子湖湾、西部为溧河湖湾、西南部为淮河干流入湖口,东部为洪泽湖大堤。入湖河流主要在湖西侧,主要有淮河、怀洪新河、新汴河、汴河、新(老)濉河和徐洪河等,淮河入湖水量占总入湖水量的 70% 以上。出湖主要河道有淮河入江水道、入海水道、淮沭新河和苏北灌溉总渠(废黄河)等,其中淮河入江水道为主要泄洪通道,约 70% 的洪水由三河闸下泄后,经入江水道流入长江。

3 评价方法与数据获取

3.1 指标体系和评价方法

参考水利行业标准《河湖健康评估技术导则(征求意见稿)》和“太湖健康评估指标体系”^[9],构建洪泽湖健康评估指标体系。为遵循科学性、系统性、层次性、独立性、指标定量性与可操作性等原则,指标构建过程中需考虑洪泽湖的生态环境特征^[10-11]、各评价指标数据和资料能及时获取,并兼顾指标变化的敏感性,以及公众在湖泊管理中的作用。通过综合分析,提出涵盖水文水资源、自然形态、水环境、水生态、社会服务功能 5 个方面共 12 项指标(表 1),对湖区的健康状况先进行单项评估评估,并根据各指标权重系数,综合评价洪泽湖的健康状况。赋分结果对应 0~100 数值区间,把湖泊各指标健康状况及综合评价状况分为“优”、“良”、“中”、“差”和“劣”的 5 个等级(表 2)。

3.2 数据获取

水位数据采用蒋坝水文站日平均水位数据。湖泊自然形态以自由水面率指标表征,利用卫星

遥感图片解译获取。水生态监测综合考虑洪泽湖的形状、地形、地貌、湖泊养殖状况以及入湖、出湖河流情况,设置了 10 个监测点位(图 1),基本覆盖了洪泽湖的典型水域。水质监测项目主要包括总氮、总磷、高锰酸盐指数、氨氮、化学需氧量、五日生化需氧量、叶绿素 a、透明度等指标,监测频次为每月 1 次。水生态监测的指标主要包括浮游植物、浮游动物、水生高等植物、底栖动物等内容,监测方法依据《湖泊水生态监测规范》(DB32/T 3202—2017)。浮游植物、浮游动物、底栖动物监测于 2018 年 1 月至 2018 年 12 月每月 1 次;水生高等植物监测选择夏季(2018 年 5 月)和秋季(2018 年 9 月)进行 2 次全湖调查。水功能区达标率参照《地表水资源质量评价技术规程》(SL 395—2007)。公众满意度指公众对湖泊水质、水量、景观、舒适性、美学价值等水文化建设以及湖长履职、管理情况等方面的满意程度,通过发放公众调查问卷方式进行评价。

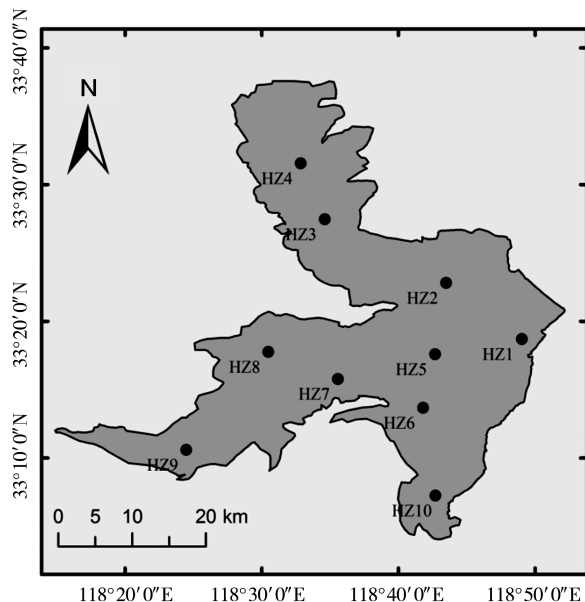


图 1 洪泽湖水生生物监测点位分布图

4 评价结果和讨论

4.1 洪泽湖生态环境现状分析评价

4.1.1 水文水资源

2018 年平均水位 12.97 m,较历年均值偏高 0.15 m(年最高水位 13.81 m 3 月 15 日);年最低水位 11.99 m 8 月 14 日)(图 2)。日平均水位均高出最低生态水位(11.5 m),生态用水满足程度评价得分 100 分,评价结果为“优”(图 3)。年内水位最大变幅 1.80 m,对比洪泽湖历年月平均水位,2018 年

表 1 洪泽湖健康评价指标体系

目标层	功能层	指标层	指标说明及计算方法
洪泽湖生态系统健康	水文水资源 (0.2)	生态用水满足程度(0.7)	日水位满足生态水位的天数
		湖泊水位变幅程度(0.3)	月平均水位相对多年均值的偏离程度
	自然形态(0.2)	自由水面率(1.0)	自由流动的水面占湖泊总面积的比例
	自然属性 (0.7)	水质类别指数(0.3)	GB3838-2002 水质类别
		水环境(0.2)	耗氧有机污染状况(0.3)
			COD _{Mn} 、COD _{Cr} 、BOD ₅ 、NH ₃ -N
			营养状态(0.4)
			EI 营养状态指数
	水生态(0.4)	浮游植物数量(0.3)	藻类细胞丰度(万个/L)
		浮游动物多样性(0.2)	采用 Shannon-Wiener 多样性指数
		大型水生植物覆盖度(0.2)	与历史参照状态相比水生植被覆盖度变化率
		底栖动物生物学指数(0.3)	底栖动物 BPI 指数,反映有机污染状况
	社会服务功能 (0.3)	水功能区达标率(0.3)	SL395-2007,供水水质保障能力
		公众满意度(0.7)	社会公众对湖泊生态环境状况的认可度

注:括号中数值为权重

表 2 洪泽湖生态系统健康评价分级标准

指标层	指标分级标准				
	优	良	中	差	劣
生态用水满足程度	[80, 100]	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	[0, 20)
湖泊水位变幅程度	[0, 0.5]	[0.1, 0.5)	[0.5, 1.5)	[1.5, 3.5)	[3.5, 5]
自由水面率	[0.9, 1.0]	[0.8, 0.9)	[0.7, 0.8)	[0.6, 0.7)	[0, 0.6)
水质类别指数	I、II	III	IV	V	劣 V
耗氧有机污染状况	[80, 100]	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	[0, 20)
营养状态	[30, 50)	[50, 60)	[60, 70)	[60, 70)	[70, 100]
浮游植物数量	[0, 200)	[200, 800)	[800, 2000)	[2000, 4000)	[4000, 10000)
浮游动物多样性	[3.0, 4.0)	[2.0, 3.0)	[1.0, 2.0)	[0.5, 1.0)	[0, 0.5)
大型水生植物覆盖度	[0, 0.05]	[0.05, 0.1)	[0.1, 0.2)	[0.5, 0.5)	[0.5, 1.0]
底栖动物生物学指数	[0, 0.1]	[0.1, 0.5)	[0.5, 1.5)	[1.5, 5.0)	[5.0, 10]
水功能区达标率	[80, 100]	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	[0, 20)
公众满意度	[80, 100]	[60, 80)	[40, 60)	[20, 40)	[0, 20)
综合得分	[85, 100]	[70, 85)	[50, 70)	[20, 50)	[0, 20)

洪泽湖的湖泊水位变幅程度得分 70.3 分,评价结果为“良”。

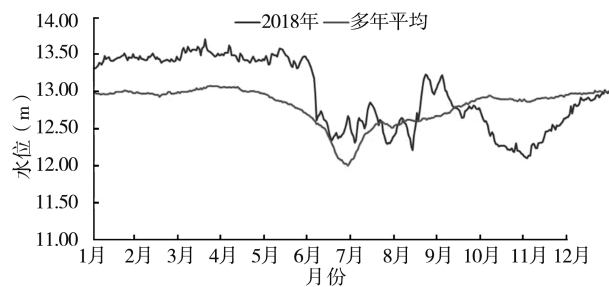


图2 洪泽湖 2018 年日平均水位与多年均值比较

4.1.2 自然形态

洪泽湖自然形态健康状况较差,评价等级为“中”,接近“差”等级。目前洪泽湖自由水面面积为 1 262.5 km²,自由水面率 70%,自由水面率不高,湖泊生态空间开发强度较大。虽然洪泽湖一直在开展退渔还湖、退圩还湖工作,但是围网养殖、圈圩面积仍然较大。圈圩养殖会侵占湖泊自由水面、降低湖泊水环境容量、增加湖泊污染物负荷,对水环境负面影响较大。

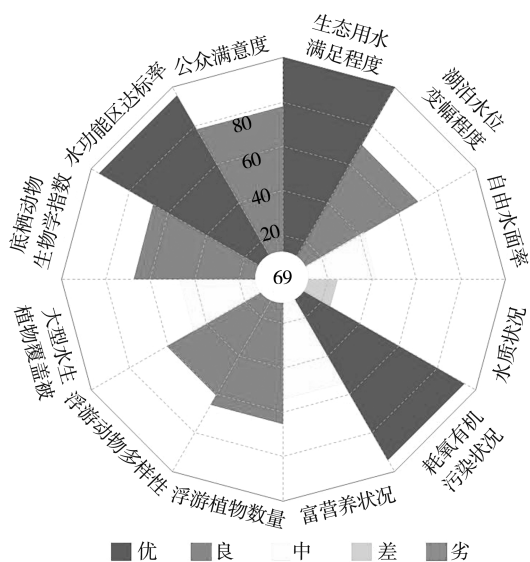


图3 洪泽湖健康状况评价风玫瑰图

4.1.3 水环境质量

洪泽湖水质较差,健康等级为“中”。其中水质类别状况赋分最低(24.6 分),评估结果为“差”;营养状态指数均值为 55.6,评价等级为“中”(图 3)。本年度调查中,洪泽湖透明度在 10 ~ 95 cm 之间,平均值仅为 32 cm,水体中总氮总磷质量浓度偏高,总氮质量浓度年均值达 1.89 mg/L (IV ~ 劣 V 类),而总磷质量浓度年均值为 0.10 mg/L (III ~ V 类)(图 4)。各月份营养状态指数基本稳定,介于 52.9 ~ 59.8,均属于轻度富营养。从评估结果可知,

TN、TP 质量浓度偏高是导致水质状况、营养状态偏差的主要原因,虽然洪泽湖属于过水型湖泊,换水频率高,发生大面积蓝藻水华的可能性不大,但水流速度缓慢的局部湖区,有利于蓝藻生长聚集,加大了发生水华的风险^[12]。

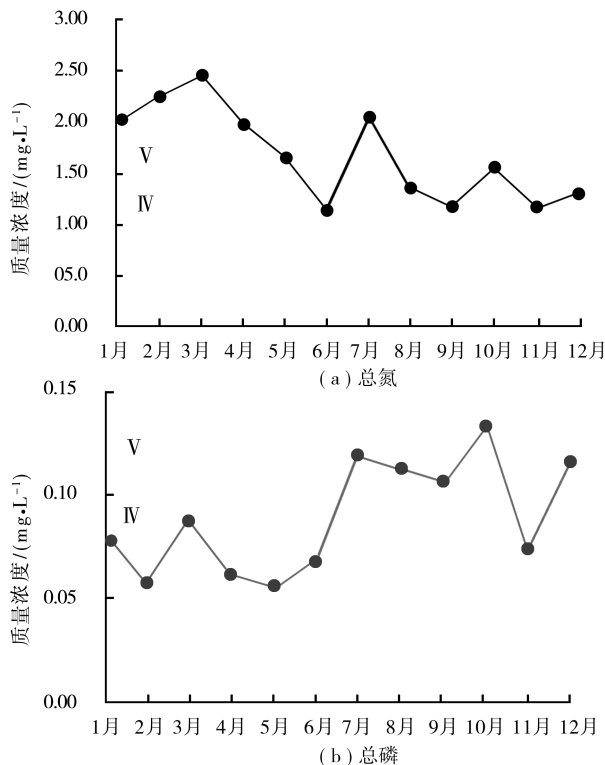


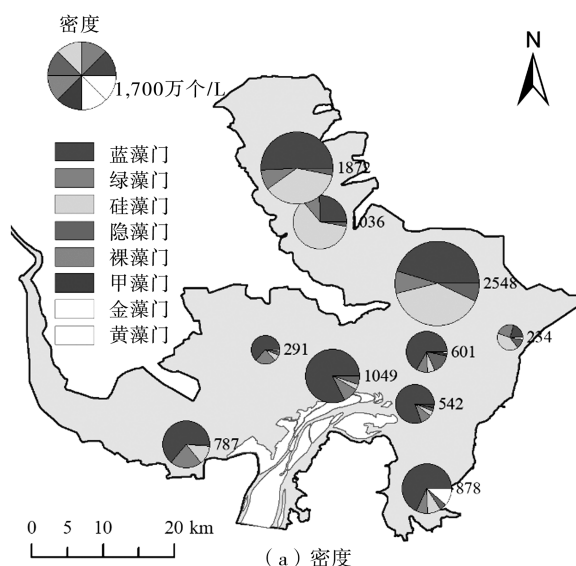
图4 2018 年洪泽湖总氮和总磷质量浓度变化情况

4.1.4 水生态状况

洪泽湖水生态健康评价等级为“良”。其中浮游植物数量、浮游动物多样性、大型水生植物覆盖度、底栖动物生物学指数 4 个指标以大型水生植物覆盖度得分最低(47 分),是导致水生态功能层降低的主要指标,其他 3 个指标评价结果为“良”(图 3)。

大型水生植物共记录到 16 科 28 种,其中挺水植物 9 种,沉水植物 11 种,浮叶植物 4 种,漂浮植物 4 种。水生植物的优势种主要有荇菜、菱和穗花狐尾藻。以沉水植物占优势,沉水植物主要分布在成子湖湾内,其次是顺河滩附近水域。水生植被覆盖面积总体不高,植被群落结构较为简单,部分湖区优势种类频繁更替,系统稳定性不高。空间分布上,植物主要分布在沿岸带,尤其是北部和西部湖湾的沿岸带,而东部岸带大型水生植物分布较少,通常只有菱、马来眼子菜和菰齿眼子菜零星分布。在溧河洼水域,因围网密度较高,大型水生植物的生长明显受阻,这与长期集约式的围网养殖和渔民收割非围网区的大型水生植物有关^[13]。

浮游植物共镜检到99种(属),绿藻门、硅藻门和蓝藻门是出现种类数最多的门类。优势种主要是富营养化指示物种,如盘星藻、颗粒直链硅藻、裸藻和隐藻。浮游植物年均生物量为2.33 mg/L,最大值为26.18 mg/L。在空间分布上,浮游植物生物量呈现由北向南、由东向西逐渐递减趋势。生物量高值主要出现在主湖区和成子湖等水域,以及溧河洼水域和蒋坝水域,生物量范围2.0~4.9 mg/L,夏秋季节蓝藻细胞丰度所占比例较高。总体上生物量优势类群主要为绿藻和硅藻。



部水域、成子湖和溧河洼,低值叶出现在主湖区高良涧闸出湖水域和成河乡东部水域。生物量较高的点位均为双壳类(主要是河蚬)和腹足类所主导,而低值的点位则被多毛类、双壳类和甲壳类共同主导。

4.2 社会服务功能评价

洪泽湖共有2个水功能区,分别为洪泽湖调水保护区(淮安)和洪泽湖调水保护区(宿迁),2个水功能区达标率分别为100%和91.7%,均值赋分95.8分,健康等级为“优”。洪泽湖公众满意度调查得分为78分,公众反映湖区的河湖环境、水质水量、

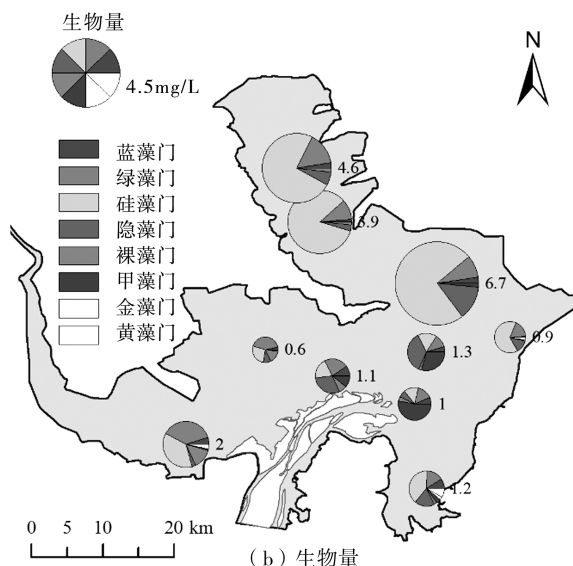


图5 洪泽湖浮游植物年均密度和生物量空间格局

浮游动物共采集到81种,其中原生动物25种、轮虫20种、枝角类15种和桡足类21种。优势种主要有轮虫的曲腿龟甲轮虫、针簇多肢轮虫、萼花臂尾轮虫和矩形龟甲轮虫,枝角类的筒弧象鼻溞、老年低额溞和长额象鼻溞,桡足类的锯缘真剑水蚤、汤匙华哲水蚤和中华哲水蚤。洪泽湖全湖浮游动物密度上原生动物占优势,而生物量上枝角类为绝对优势类群(109.3 $\mu\text{g/L}$)。年平均密度最高出现在成子湖北部水域,最低出现在老子山东部水域;年平均生物量高值出现在成河乡东部水域,最低出现在蒋坝水域(图6)。

底栖动物共采集到27种,其中节肢动物门9种,软体动物门11种,环节动物门7种,优势种主要有河蚬、背蚓虫、霍甫水丝蚓、寡鳃齿吻沙蚕、大螯蜚等。密度高值出现在成子湖高湖区域,而主湖区的高良涧闸出湖水域和成河乡东部水域密度最低。双壳类和多毛类密度总体上在各样点占据优势,寡毛类也在部分样点占据一定比重,甲壳类仅在少数点位占据优势(图7)。生物量高值出现在老子山北

涉水景观、舒适性、美学价值等有待进一步改善和提高。

4.3 健康状况综合评价

洪泽湖2018年健康状况综合得分69分,健康等级为“良”。自然属性得分62.6,评价等级为“良”,其中各功能层得分:水文水资源91.1分,自然形态41.8分,水体质量57.4分,水生态质量61.4分。社会服务功能综合得分为83.4分,其中水功能区达标率95.8分、公众满意度78分(图3)。评价结果表明现阶段洪泽湖健康状态面临的主要问题为:蓄水保护范围内水域开发利用强度大,湖泊自由水面率低,水生植物覆盖度低;水质类别较差,总氮、总磷质量浓度偏高,水体处于轻度富营养状态。

5 生态环境保护对策和建议

基于上述对洪泽湖生态系统健康状况的评价和分析,为保障和改善洪泽湖的健康状况,提出以下几个方面保护措施和建议:

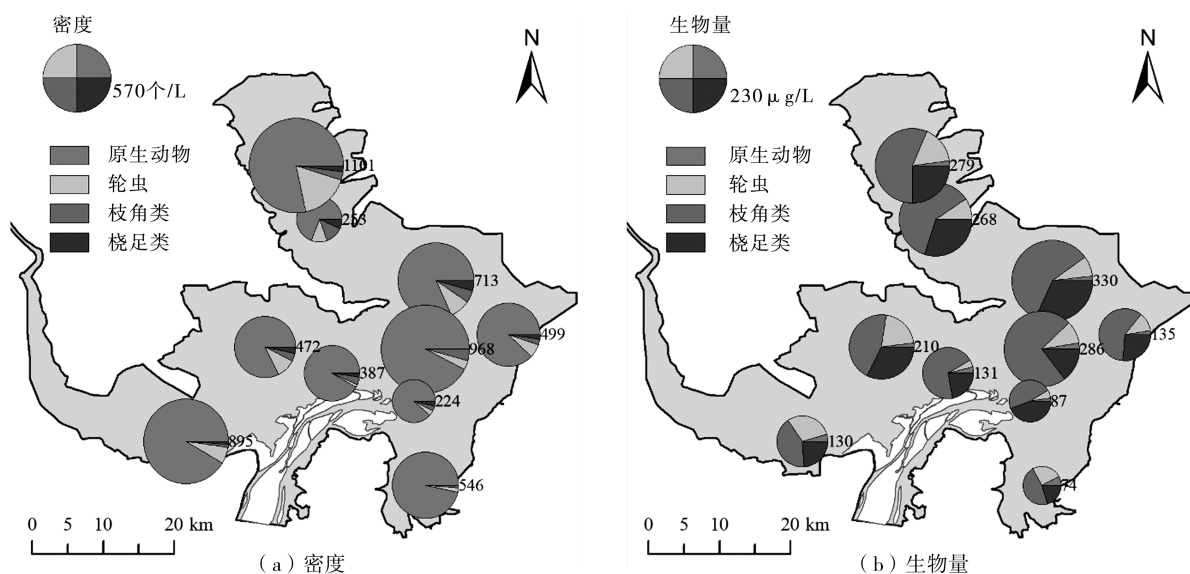


图 6 洪泽湖浮游动物年均密度和生物量空间格局

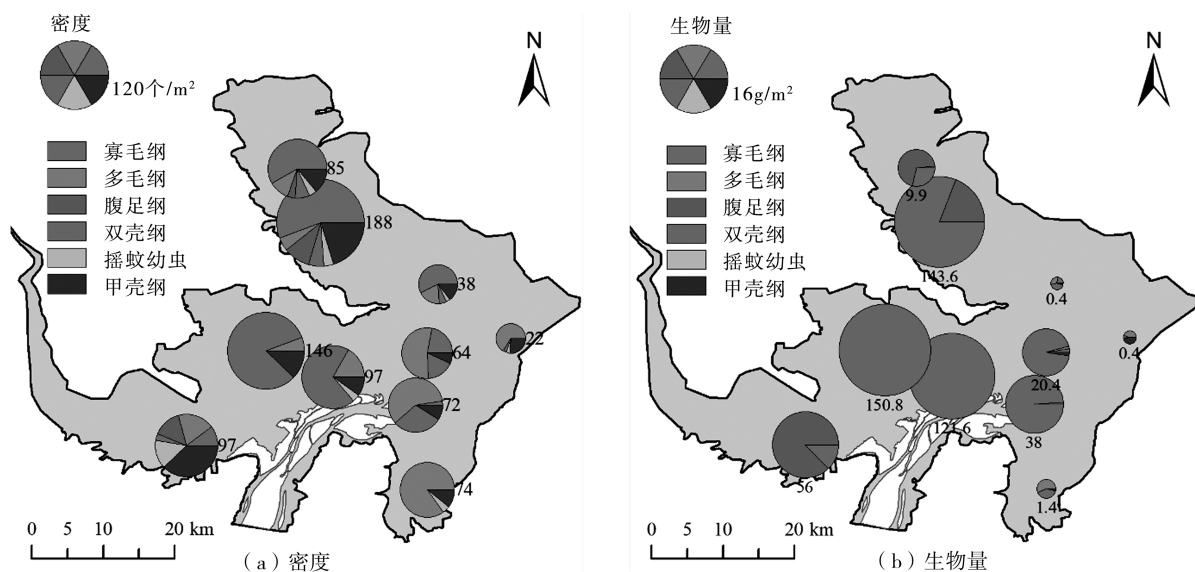


图 7 洪泽湖底栖动物年均密度和生物量空间格局

(1) 加强入湖污染治理, 防治湖泊富营养化

受到淮河污染物输入以及洪泽湖周边工农业生产的影响, 洪泽湖的营养程度已经达到较高水平, 通过目前的调查及对比分析, 洪泽湖营养盐浓度与蓝藻频频爆发的太湖基本相当, 其总磷浓度甚至超过了太湖, 表明洪泽湖营养水平足够形成蓝藻水华, 但夏季微囊藻密度远较太湖低很多, 这可能与洪泽湖夏季的高换水率有关, 夏季洪泽湖入湖径流量大, 湖流流速较快及湖水混浊, 这不利于微囊藻生长、增殖和聚集^[14]。然而一旦出现上游来水减少, 加之洪泽湖开始蓄水, 水流变缓, 湖水的滞留时间变长, 根据相关研究表明湖水滞留时间超过 3 d, 果其他条件合适, 就能形成水华。为了降低洪泽湖发生水华的风险, 需控制湖泊营养盐水平。长期来看, 洪泽湖富营养化控制主要工作还是削减氮磷污

染。控制入湖污染物, 消减外源负荷, 可有效控制因水流速度缓慢而引发的局部湖区蓝藻水华。外源污染物控制可根据其特征采取以下措施:

整治入湖河道, 入湖河道水质的好坏将直接影响到洪泽湖生态系统的健康状况。针对湖区西部主要入湖河流环境现状, 开展河道环境综合整治工作, 以河道疏浚、岸坡整治、生态修复等为主要整治措施^[6], 提升入湖河流水环境的自我修复和净化能力。

面源污染治理, 洪泽湖周边地区相对落后和粗放的经济模式已不再适应当前经济社会发展要求。相关部门加大对沿湖地方的产业扶持, 鼓励推进农业绿色发展, 发展生态农业和有机农业, 有效遏制农业面源污染和生态退化以减少地表径流对洪泽湖的污染。鼓励发展生态养殖业, 构建科学合理的

畜牧业布局。

(2) 加强底泥内源和湖区生产生活污染治理

加强底泥内源污染治理。洪泽湖是典型浅水湖泊,其底泥在强风浪扰动下必然发生再悬浮,沉积物再悬浮过程中也释放大量的营养盐进入水体,其引起的内源磷释放浓度可达无扰动条件下沉积物磷释放的20~30倍^[15]。虽然现阶段洪泽湖沉积物营养盐含量总体低、换水周期快,但在成子湖等封湖湾,沉积物也有可能成为污染物的来源。建议开展洪泽湖底泥调查,进行污染底泥在不同沉积层的污染物释放实验用来模拟不同疏浚深度产生的污染物释放,获得最佳疏浚深度等关键参数。依据国内外底泥污染物释放与不同类型动力扰动的研究成果调研,结合洪泽湖底泥调查结果,绘制洪泽湖底泥清淤深度空间分布图,参照太湖经验^[16],制定分区域、分步骤的底泥生态清淤方案。

湖区生活和船舶污染防治。洪泽湖湖区渔民众多,其生活污水和船舶是另一重要污染源。建议对管理范围内餐饮船、住家船、旅游船、运输船进行调查摸底,并制定综合整治方案。研究制定渔民安置政策,分阶段逐渐推进,对上岸的渔民应妥善解决安置、就业等问题,充分利用现行有关城乡住房和社会保障相关政策,多渠道支持渔民上岸安居工程。严格船舶污染防治,在现有船舶上必须安装油水分离设备、油污水收集存储装置,避免向湖中随意倾倒。

(3) 稳步推进退圩还湖,开展水生态修复

洪泽湖自2012年开展清障行动,历时3年经过两轮洪泽湖清障行动累计清除非法圈圩372处、面积0.527万hm²,共恢复洪泽湖调蓄库容1亿m³。2016年,实施网格化管理以来,网格长加强巡查,基本实现了新增圈圩的及时发现和及时处置,洪泽湖非法圈圩达到“零增长”目标。2017年底,宿迁市水务局编制了《洪泽湖(泗阳县)退圩还湖实施方案》,规划清退圈圩总面积37.64km²。近日编制完成并报批的《江苏省洪泽湖退圩还湖规划》,划定了湖滨带退圩还湖的面积和范围。即便如此,目前洪泽湖自由水面率仅有70%左右,围网和圈圩养殖面积仍然较大,因此需根据规划稳步推进退圩还湖工作。

对于退圩还湖腾让出来的水面,应及时开展生态修复。可依据退圩还湖区的防洪、供水、生态与景观等功能需求,结合湖盆湖岸地形地貌特征与功能类型分布格局,在系统分析水文、水质、底质以及生物特征等基础上,集成生态护坡、基底改造、基质

改良、生态实岛、滨岸生态廊道以及生态河口等技术,并兼顾湖流通畅、生物友好与景观优美等期望,开展洪泽湖退圩还湖区湖滨带草型生态系统重构。

(4) 落实洪泽湖网格化管理,加强水环境与水生生态监测

2016年4月,省洪泽湖管理委员会第一次全体成员会议研究通过了《洪泽湖网格化管理实施意见》,将洪泽湖蓄水范围线内的区域划分为455个网格,其中陆域三级网格125个、水域三级网格330个^[17]。在今后工作中,需要进一步落实属地管理,进一步明确相关部门职责,充分发挥好牵头部门、相关部门作用。沿湖曲线应将任务分解好、责任落实好。推进和完善洪泽湖管理网格化管理,落实网格长,同河长制以及湖长制工作有效结合,实现洪泽湖生态环境保护精细化管理。

洪泽湖作为南水北调东线工程重要的调蓄库,其健康状况对于关系到南北北调的安全运行。因此需要持续对洪泽湖生态环境要去开展长期监测,在监测过程中,需要考虑以下方面:(1)完善监测体系,可采用人工监测、自动监测、卫星遥感、视频监控等监测技术相结合的方式,特别是取水口等重要水域,获取高频监测水质动态变化数据,为准确预测水质变化提供科学数据,从而采取合适应对措施;(2)加强水生态的监测,藻类水华是江苏省湖泊面临的主要问题之一,尽管现阶段洪泽湖并未大面积暴发蓝藻水华,但其营养盐浓度并不低,已具备相应条件,目前藻类生物量并不到可能得益于其较短的换水周期,但藻类群落结构的监测工作应持续开展,为预测水华的发生和预防措施的制定提供依据;(3)全覆盖入湖河流监测,外源输入是洪泽湖污染物的主要来源,然而目前数据较为缺乏,无法估算污染物的入湖量及滞留量,因此有必要开展流域外源入湖污染物的监测,为污染减排和氮磷削减方案制定提供科学依据。

参考文献:

- [1] 陈星,许钦,何新玥,等.城市浅水湖泊生态系统健康与保护研究[J].水资源保护,2016,32(2):77-81.
- [2] 秦伯强,高光,胡维平,等.浅水湖泊生态系统恢复的理论与实践思考[J].湖泊科学,2005,17(1):9-16.
- [3] 李冰,杨桂山,万荣荣.湖泊生态系统健康评价方法研究进展[J].水利水电科技进展,2014,34(6):98-106.

(下转第13页)

- [3] 郑洪领,王龙,耿玉秀. 黄河水质现状分析及提高水质对策建议[J]. 中国农村水利水电, 2010(5):21-24.
- [4] 王金霞,姚伟静. 有害藻类水华的形成机制[J]. 科技信息, 2014(7):172, 120.
- [5] 何友文,袁和平,戴雪芹. 活性炭吸附 COD 的试验研究[J]. 江西化工, 2017(4):67-68.
- [6] 邓冬梅,肖林成,梁国风,等. 化学混凝与活性炭吸附联用处理水源水研究[J]. 广西工学院学报, 2013(3):1-4, 9.
- [7] 李改枝,郭博书,李景峰. 黄河水中沉积物与锌、镉液—固界面的作用[J]. 环境污染与防治, 2001(4):143-145.
- [8] 沈飞,陈向荣,万印华,等. 生化废水综合治理中的膜技术及其应用[J]. 生物产业技术, 2010(5):66-72.
- [9] 王世昌,丁涛,周清,等. 膜技术在生态环境治理中的应用[J]. 膜科学与技术, 2006(3):1-6.
- [10] 邹丛阳,张维佳,李大鹏. 城市河道水质恢复技术及发展趋势[J]. 环境科学与技术, 2007(8):99-102.
- [11] 武秀琴,张建云. 污染水体的生物修复技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2008(17):331-333.
- [12] 姜磊,马溪平,徐成斌. 活性污泥法脱氮条件的优化研究[J]. 辽宁大学学报:自然科学版, 2012(1):21-23.
- [13] 邓荣森,张新颖,王涛,等. 氧化沟工艺的技术经济评估[J]. 中国给水排水, 2007(16):37-40.
- [14] J. Rajesh Banu, Do Khac Uan, Ick -Tae Yeom. Nutrient removal in an A2O - MBR reactor with sludge reduction [J]. Bioresource Technology, 2009, 100: 3820 - 3824.
- [15] 于亮. 低温条件生物膜与活性污泥复合工艺强化生物脱氮性能的中试研究[J]. 环境科学与管理, 2017(4):96-99.
- [16] 雷俊侠,高智荣. 城市污水处理脱氮除磷工艺[J]. 广东化工, 2011(7):118-119.
- [17] 朱泽龙,王琴. 改良型 Bardenpho 工艺处理生活污水的效果分析[J]. 煤炭与化工, 2016(12):143-147.
- [18] 牛学义. PhoStrip 侧流除磷工艺及其应用实例[J]. 给水排水, 2002(11):8-12.
- [19] 邵辉煌,李艺,王磊. A2/O 工艺污水处理厂生物除磷研究[J]. 给水排水, 2015(11):131-134.
- [20] 陈鹏,姚华明,庄华清. 生物——生态复合修复技术在常州市黑臭河道治理中的应用[J]. 水电能源科学, 2018(10):62-64.
- [21] 姚晓丽,梁运祥. 微生物技术改善河道水质的研究[J]. 环境科学与技术, 2007(6):59-61.
- [22] 颜薇芝,郝健,史吉平. 拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性[J]. 环境科学, 2016(7):2673-2680.
- [23] 李广胜,雷利荣. 曝气复氧+微生物菌剂修复黑臭河道工程试验[J]. 环境工程, 2018(4):34-36, 169.

(上接第7页)

- [4] 黄辉,陈旭,蒋功成,等. 洪泽湖水环境质量模糊综合评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(10):186-190.
- [5] 叶春,李春华,王博,等. 洪泽湖健康水生态系统构建方案探讨[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5):725-730.
- [6] 陈立冬,何孝光,王阳,等. 江苏省洪泽湖退圩还湖的思考[J]. 江苏科技信息, 2019,(12):75-77.
- [7] 王智源,刘劲松,唐荣桂,等. 洪泽湖水生态健康综合评价指标体系[J]. 江苏水利, 2017(4):39-45.
- [8] 郝达平. 洪泽湖水环境现状评价及水污染分析[J]. 江苏水利, 2005(11):32-34.
- [9] 吴东浩,朱玉东,王玉,等. 太湖健康评价体系的分析与比较[J]. 中国农村水利水电, 2013(2):21-23.
- [10] 陈磊,唐荣桂. 洪泽湖水生态问题分析及对策[J]. 治淮, 2016(1):50-51.
- [11] 奚璐璐,袁哲,吴燕. 洪泽湖湿地生态环境保护问题识别及防治措施[J]. 污染防治技术, 2016, 29(6):55-59.
- [12] 王霞,刘雷,何跃,等. 洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析[J]. 环境监测管理和技术, 2019, 31(2):58-61.
- [13] 郭军,朱海锋,陈娟,等. 洪泽湖周边滞洪区的建设与管理研究[J]. 江苏水利, 2018(11):31-34.
- [14] 吴晓辉,李其军. 水动力条件对藻类影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7):1732-1738.
- [15] 朱广伟,秦伯强,高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. 科学通报, 2005, 50(1):66-71.
- [16] 陆桂华,张建华,马倩. 太湖生态清淤及调水引流[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [17] 唐荣桂,郑福寿,吴晓兵. 洪泽湖网格化管理探索[J]. 江苏水利, 2017(3):34-36.