

· 创新与探索 ·

洪泽湖水体富营养化时空分布特征与影响因素分析

王霞¹, 刘雷¹, 何跃², 范宏翔³

(1. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036;

2. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042;

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

摘要:通过2014年—2017年对洪泽湖12个水质断面定期调查,采用营养状态指数(TLI)综合评价其水体富营养状态,同时应用主成分分析方法(PCA)分析其富营养化状态的时空变化特征。结果表明,洪泽湖70%以上的调查断面水质全年处于轻度富营养化状态,夏季是其富营养化最严重的季节;洪泽湖年内水体水质差异较大,而其水华特征并未呈现明显差异;洪泽湖富营养化很大程度上受制于营养盐的积累程度,并与湖泊透明度呈现极显著的负相关关系($p < 0.001$),与湖水pH值呈现极显著的正相关关系。

关键词:洪泽湖;富营养化;营养状态指数;主成分分析;时空分布特征

中图分类号:X824

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2019)02-0058-04

Temporal-Spatial Distribution Characteristics and Factor Analysis of Eutrophication in Hongze Lake

WANG Xia¹, LIU Lei¹, HE Yue², FAN Hong-xiang³

(1. Jiangsu Environment Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210036, China;

2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environmental of the People's Republic of China, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

3. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract: Based on periodic investigation on 12 water quality monitoring sections in Hongze Lake during 2014—2017, the eutrophic state of water body was evaluated via trophic level index (TLI), and the temporal-spatial distribution characteristics of eutrophication was analyzed by principal component analysis method. Results showed that the water quality of over 70% monitoring sections was slightly eutrophication, and it was the most serious in summer. The water quality was quite different during a whole year in Hongze Lake, but the algal bloom was not. The eutrophication level in Hongze Lake greatly depended on the accumulation of nutritive salts. It had significant negative correlation with transparency ($p < 0.001$) and significant positive correlation with pH value of the lake water.

Key words: Hongze Lake; Eutrophication; Trophic level index; Principal component analysis; Temporal-spatial distribution characteristics

洪泽湖是我国第四大淡水湖,是淮河流域最大的平原湖泊型水库^[1-2]。湖区已经形成以三河入江为主流,以苏北灌溉总渠为入海河道,辅以二河闸出废黄河入海和经由杨庄水利枢纽入新沂河,实现南北并疏,四渠分流,成为以防洪调蓄为主,兼有

收稿日期:2018-04-02;修订日期:2018-12-25

基金项目:国家科技支撑计划基金资助项目(2014BAC09B02);江西省重点研发计划基金资助项目(20171BBH80015);江西省科学院重点科研(对外合作)基金资助项目(2018-YZD2-03)

作者简介:王霞(1978—),女,湖北襄阳人,高级工程师,硕士,从事环境监测与评价研究。

灌溉、供水、水产、航运和发电等多种功能综合利用的水库^[1]。同时,洪泽湖还是“南水北调”东线工程重要的过水通道和调水泵站^[3],其水质直接影响苏北地区乃至淮海平原和山东半岛的用水质量与安全。有研究指出^[4],淮河上游污水排放不仅严重污染了洪泽湖水质,还会威胁下游饮水安全。很多学者通过长期野外调查发现,洪泽湖湖水在感官上混浊度较高,透明度低,在水质状况上总磷(TP)、总氮(TN)严重超标,富营养化加剧^[2-7]。近年来,随着流域内工农业的发展和人口的增加,大量工农业和生活废水排入洪泽湖,远远超过水体的自净能力,严重影响了水质,破坏了湿地生态环境,并且导致湖区渔业资源的衰退^[8]。因此,系统研究洪泽湖富营养化时空分布特征,对了解洪泽湖水水质现状和保护“南水北调”工程供水安全具有重要意义。

近年来,虽然有学者对洪泽湖水水质状况进行了分析和探讨,但是调查点位较少,调查周期较短,不能很好反映洪泽湖水水质特征^[9]。大多数研究主要针对水质指标的时空分布规律,对湖泊富营养化状态的特征研究较少。今根据洪泽湖形态和功能特点,在全湖设置12个采样断面,于2014年—2017年定期调查湖泊水质,应用主成分分析方法(PCA)分析水质指标,并通过营养状态指数(TLI)评价水体富营养化水平,以期管理部门宏观掌握湖泊水质营养状态及制定水质改善措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样点位置

洪泽湖位于江苏省北部(33°06′~33°40′N),京杭大运河以西。湖区东岸平直,其余岸线曲折多弯。湖泊平均水位12.37 m,长65.0 km,最大宽度55.0 km,平均宽度24.26 km,面积1 576.9 km²,最大水深4.37 m,平均水深1.77 m,蓄水量约27.9×10⁸ m³。湖区属于北亚热带与南温带过渡气候,多年平均气温16.3℃,多年平均降水925.5 mm,汛期降水占全年降水的65.5%。湖水依赖地表径流和湖面降水补给,入湖地表径流主要在湖西部,包括淮河、濉潼河、池河、濉河、老濉河和新汴河,其中淮河入湖流量最大。出湖河道集中分布于湖东部,主要有三河、苏北灌溉总渠和淮沭新河,其中三河为湖水下泄入江的主要河道,另两条是分泄入海的

主要河道^[1,10-11]。根据洪泽湖湖泊形态特征和功能特点,共设置12个监测断面,于2014年1月—2017年7月按月度采样调查。采样点分布见图1。

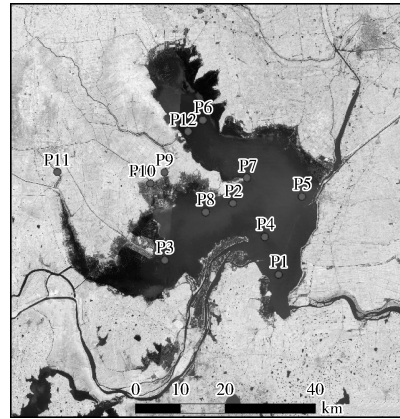


图1 采样点分布

Fig. 1 Sampling sites in Hongze Lake

1.2 水样分析

湖泊调查基本参照《湖泊生态系统观测方法》^[12]。水样分析透明度(SD)采用塞奇式圆盘法;高锰酸盐指数(I_{Mn})采用酸性高锰酸钾滴定法;TP采用钼酸铵分光光度法;TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法;叶绿素a(Chla)采用热乙醇提取法^[13-14]。

1.3 水质营养状况评价

采用TLI评价洪泽湖水水质营养状况^[15],评价因子包括Chla、TP、TN、SD和I_{Mn}。以Chla作为基准参数,各因子TLI计算方法参照《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》。采用0~100的一系列连续数字对湖泊营养状态分级,TLI<30为贫营养;30≤TLI≤50为中营养;TLI>50为富营养,其中,50<TLI≤60为轻度富营养,60<TLI≤70为中度富营养,TLI>70为重度富营养。同一营养状态下,TLI值越大,其营养程度越重。

1.4 数据分析

数据统计分析采用R 3.2.4软件。

2 结果与分析

2.1 洪泽湖营养状况年内变化特征

12个调查断面2014年—2017年的监测数据显示,70%以上的断面水质全年处于轻度富营养化状态,除1月、3月、6月外,其他月份有15%左右

的断面呈现中度富营养化状态。夏季是洪泽湖富营养化最严重的季节,8月全湖均呈现富营养化状态,超过30%的断面水质呈现中度富营养化状态。

洪泽湖水水质参数主成分分析结果显示,前两个主成分分别描述了27.93%和20.19%的环境差异。与第一主成分高度相关的环境变量是SD和Chla,因子载荷分别为0.52和-0.54。SD反映了湖水的清澈状况,湖水中悬浮物质和浮游生物越多,对光的散射和吸收越强,SD越小,而Chla含量则直接反映了浮游植物生物量。因此,第一主成分主要反映洪泽湖水体水华的特征。第二主成分主要与水温(WT)和溶解氧(DO)含量相关,因子载荷分别为0.69和-0.64。DO常用于研究水体自净能力,第二主成分主要反映洪泽湖水体污染的特征。

不同季节洪泽湖的水环境梯度存在一定差异,该差异主要沿着第二主成分轴展开。洪泽湖夏季和冬季水质差异最大,在主成分分析图中表现为距离最远;春、秋两季水环境特征相近,无法通过主成分区分。第一主成分主要反映洪泽湖水体水华的特征,并不能区分不同季节的湖体。

2.2 洪泽湖营养状况空间分布特征

分析洪泽湖不同点位水质参数的监测均值可以发现,全湖不同点位的 I_{mn} 值略有差异,位于东南部湖区的1、2、4、5号点位 I_{mn} 值较低,且3a年内没有显著变化,其余点位 I_{mn} 值较高;全湖TP监测值的空间差异虽不显著,但年际波动较大,2014年和2016年TP值显著高于2015年;TN与TP情况类似,全湖未出现明显的空间分异特征,在年际上除了2、3、6号点位TN值逐年下降外,其余点位TN值未发生明显的年际变化;2、3、6号点位水体SD明显高于其他点位,且逐年提高,其余点位水体SD较低,且没有明显的年际变化;Chla变化情况与SD相反,SD较高的2、3、6号点位Chla值较低,并且随着SD增加而降低,其余点位Chla值较高,且没有明显的年际变化。

分析洪泽湖水体营养状况的空间分布特征,结果表明,洪泽湖一年四季湖体均呈现富营养化状态,TLI值超过50,处于轻度富营养化状态,其中夏、秋两季富营养状况较春、冬两季严重。在季节尺度上,春季洪泽湖TLI值呈现北低南高的空间分布格局,南部湖区富营养化状况较为严重;夏季全湖均处于轻度富营养化状态,TLI值全湖空间差异

不显著;秋季与夏季类似,全湖均呈现轻度富营养化状态,且不存在显著的空间差异;冬季与春季类似,TLI值呈现北低南高的空间分布格局,且北部湖区富营养状况较春季加重。

2.3 水质与Chla浓度之间的关系

洪泽湖湖区水华现象严重。分析调查期间Chla浓度与其他水质参数之间的相关关系,结果表明,反映浮游植物生物量的Chla指标与水质富营养化指标TN呈现极显著的正相关关系($p < 0.001$),说明富营养化在很大程度上受制于营养盐的积累程度,而水华的严重程度与富营养化程度密切相关;Chla与湖泊SD呈现极显著的负相关关系($p < 0.001$),且与湖水pH值呈现极显著的正相关关系;其他指标如DO、 I_{mn} 、TP与Chla的相关性并不显著。

3 讨论

3.1 洪泽湖水质空间分异分析

洪泽湖目前全湖均处于轻度富营养化状态,这是多方面原因综合导致的结果。湖泊水质的空间分布往往与不同区域的湖泊形态特点,以及周边的环境状况密切相关^[16]。有研究表明,洪泽湖北部湖区水体相对封闭,流速缓慢,水质主要受周围养殖污染的影响,湖区畜禽养殖和水产养殖过程中所产生的残饵和养殖生物排放的COD、氮、磷均会对湖区水质产生影响。洪泽湖东部及南部水域开阔,水质主要受淮河入湖和航运的影响。该区域航运繁忙,风浪大,水体浑浊,不利于沉水植物生长,同时位于淮河入湖口与三河闸及苏北灌溉总渠和淮沭新河之间,直接承接淮河入湖河水。淮河多年平均流量 $825.5 \text{ m}^3/\text{s}$,占入湖河道总流量 $932.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 的88.5%,是洪泽湖的主要入湖河道^[1]。因此,淮河水水质直接影响着该区域水质好坏。洪泽湖西部水域远离航道,水质主要受养殖废水和城镇生活污水的影响,周边地区农业生产过程中化肥、农药的大量使用都会造成局部地区水体的污染。

3.2 洪泽湖水体富营养化分析

根据2014年—2017年的采样调查,发现洪泽湖水体几乎全年处于富营养状态。研究认为,水体发生富营养化的风险大小与水体中TN、TP质量浓度密切相关,通常当TN质量浓度超过 0.20 mg/L 、TP质量浓度超过 0.02 mg/L 时,湖泊水体存在极大的富营养化风险。洪泽湖全年平均水体TN、TP

质量浓度分别达到 1.67 mg/L 和 0.10 mg/L, 远远超过上述限值, 因而湖体出现富营养状况。此外, 藻类的爆发性生长与水体的氮磷比 (N/P) 密切相关。有研究显示, 当水体的 $N/P \leq 7$ 时, 氮将限制藻类生长; 当 N/P 在 8 ~ 30 之间时, 水体比较适合藻类生长; 而当 N/P 超过 30 时, 磷成为藻类生长的限制因子^[16]。洪泽湖 2014 年—2017 年水体年内 N/P 在 18 ~ 27 之间, 非常适合藻类的生长繁殖。与此同时, 洪泽湖年均水温为 15.5 °C, 夏季平均水温为 22.9 °C ~ 29.1 °C, 也十分适宜藻类生长, 因而其水体具备发生富营养化的条件。然而, 洪泽湖属于过水型湖泊, 换水频率高, 换水周期短, 发生大面积蓝藻水华的可能性不大^[17]。只有在局部湖区, 水流速度缓慢, 有利于蓝藻向表层上浮、扩散, 加之湖区内存在大量的水生植物, 夏季腐烂导致水体发臭变黑, 营养盐含量急剧上升, 为藻类繁殖提供了充分的条件^[5], 加大了发生蓝藻水华的可能性。

在工农业生产发展和城市化进程中, 湖区地表径流和入湖河流携带的面源污染和工业废弃物等排入湖体, 使洪泽湖水质受到污染。相关研究表明, 外源污染是洪泽湖的主要污染源, 占总污染源的 95% 以上^[6]。据统计, 20 世纪 90 年代以来, 由入湖河流引起洪泽湖及周边地区污染事故造成的直接经济损失近 20 亿元^[18]。在入洪泽湖的淮河、新濉河、老汴河、濉河、徐洪河和怀洪新河等 6 条河流中, 新濉河水质最差, 为劣 V 类, 淮河和怀洪新河为 V 类。淮河作为主要的入流来源^[5], 是洪泽湖污染负荷的主要贡献者, 其入湖污染占总污染的 51% 以上^[6]。在丰水期, 淮河下泄大量污染物, 营养负荷高, 湖泊水质经常在此时发生突变。根据疾控部门提供的资料, 在淮河污水下泄期间, 淮安市肠道疾病发病率比平常增加近 1 倍。而在平水期和枯水期, 虽然外源营养负荷不大, 但湖泊内部的营养盐浓度仍然较高。

4 结论

(1) 洪泽湖 70% 以上的调查断面水质全年处于轻度富营养化状态, 夏季是其富营养化最严重的季节, 8 月全湖均呈现富营养化状态, 超过 30% 的断面水质呈现中度富营养化状态。

(2) 通过对水质指标进行主成分分析, 挑选出两组主成分, 第一主成分主要反映洪泽湖水体水华

的特征, 第二主成分主要反映洪泽湖水体污染的特征。洪泽湖年内水体水质差异较大, 而其水华特征并未呈现明显差异。

(3) 通过分析 Chla 与其他水质因子之间的关系, 发现洪泽湖富营养化很大程度上受制于营养盐 (TN) 的积累程度, 并与湖泊 SD 呈现极显著的负相关关系 ($p < 0.001$), 与湖水 pH 值呈现极显著的正相关关系。

[参考文献]

- [1] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [2] 楚恩国. 洪泽湖流域水文特征分析 [J]. 水科学与工程, 2008, 2008(3): 22-25.
- [3] 李为, 都雪, 林明利, 等. 基于 PCA 和 SOM 网络的洪泽湖水质时空变化特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(12): 1593-1600.
- [4] 崔彩霞, 花卫华, 袁广旺, 等. 洪泽湖水质现状评价与趋势分析 [J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(10): 44-47.
- [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] 葛绪广, 王国祥. 洪泽湖面临的生态环境问题及其成因 [J]. 人民长江, 2008, 39(1): 28-30.
- [7] 王兆群, 张宁红, 张咏, 等. 洪泽湖水质富营养化评价 [J]. 环境监控与预警, 2010, 2(6): 31-35.
- [8] 范亚民, 何华春, 崔云霞, 等. 洪泽湖水域的环境演变遥感分析 [J]. 污染防治技术, 2008, 21(6): 29-33.
- [9] 吴延东, 刘绪庆, 陈飞龙. 洪泽湖水质状况的主成分分析和聚类分析 [J]. 淮阴工学院学报, 2010, 19(1): 71-76.
- [10] 王伟, 樊祥科, 黄春贵, 等. 洪泽湖渔业水质监测点位优化布设 [J]. 环境监测管理, 2015, 27(2): 53-56.
- [11] 张利民, 刘伟京, 尤本胜, 等. 洪泽湖流域生态环境问题及治理对策 [J]. 环境监测管理, 2010, 22(4): 30-35.
- [12] 陈伟民. 湖泊生态系统观测方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [13] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨 [J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 550-552.
- [14] 陈明, 孙洁梅, 李敏. 水体中藻类叶绿素 a 提取方法的比较 [J]. 环境监测管理, 2017, 29(4): 57-59.
- [15] 高敏, 胡维平, 邓建才, 等. 太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 [J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4570-4576.
- [16] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 439-445.
- [17] 刘远书, 曹鹏飞. 论南水北调东线洪泽湖蓝藻暴发的可能性 [J]. 水利规划与设计, 2014(1): 9-12.
- [18] 赵长森, 夏军, 王纲胜, 等. 淮河流域水生态环境现状评价与分析 [J]. 环境工程学报, 2008, 2(12): 1698-1704.