

2012—2017年鄱阳湖水位变化与氮磷响应特征研究*

刘聚涛 温春云 韩柳 戴国飞 王法磊 胡芳 楼倩

(江西省水利科学研究院,江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室,江西 南昌 330029)

摘要 选取星子水文站作为鄱阳湖参考水位站,以2012—2017年水位、TN和TP监测数据为对象,采用相关分析和聚类分析探索鄱阳湖水位与氮磷之间的关系。结果表明:2012—2017年,鄱阳湖TN、TP浓度总体呈波动下降趋势;TN、TP年内呈周期性波动变化,枯水期TN、TP浓度较丰水期和平水期高,丰水期浓度最低;鄱阳湖水位与TN、TP呈显著负相关关系;水位、TN、TP的聚类分析结果表明,鄱阳湖6—8月为丰水期、4—5月和9月为平水期、10月至次年2月为枯水期,枯水期时间提前至10月,鄱阳湖低水位、高氮磷浓度持续时间变长。

关键词 水位 氮磷 年际变化 响应特征 鄱阳湖

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.10.017

Study on the response characteristics of nitrogen and phosphorus to water level change of Poyang Lake during 2012-2017 LIU Jutao, WEN Chunyun, HAN Liu, DAI Guofei, WANG Falei, HU Fang, LOU Qian. (Jiangxi Key Laboratory of Poyang Lake Water Resources and Environment, Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang Jiangxi 330029)

Abstract: Taking Xingzi Hydrological Station as the reference water level of Poyang Lake, the paper collected the monitoring data of water level, TN and TP from 2012 to 2017 as objects, then analyzed the relationship between water level and nitrogen and phosphorus in Poyang Lake by correlation analysis and cluster analysis. The results showed that TN and TP concentrations generally showed a gradual downward trend from 2012 to 2017, while within one year, TN and TP fluctuated periodically. Besides, TN and TP concentrations in dry season were higher than in other seasons, and they were the lowest in wet season. Water level was negatively correlated with TN and TP. Based on the clustering analysis, wet season was from June to August, normal water level season contained April, May and September, dry season was from October to February of the following year. The dry season was advanced to October, and the period with low water level and high nitrogen and phosphorus concentrations became longer.

Keywords: water level; nitrogen and phosphorus; inter-annual variability; response characteristics; Poyang Lake

水文水动力条件是湖泊生态系统的重要驱动因子和控制因素,适宜的水位是维护湖泊生态系统结构和功能稳定以及生物完整性的重要保障^{[1]2142}。水位变化是驱动氮磷等营养盐和重金属在环境中迁移转化的重要因子^{[2],[3]340},改变湖泊内营养盐浓度会间接改变浮游生物群落结构构成,并促使沉积物中氮磷含量、形态及生物有效性发生变化,进而影响湖泊水质^[4]。氮磷是引起水体富营养化的主要因素,氮磷等营养盐浓度受水位变化的影响很大^[5],不同水位期内,湖泊水环境特征和生物响应不同^{[1]2142}。

鄱阳湖是长江流域最大的通江湖泊,水位具有规律的波动特征,年际、年内变化显著。2000年以

来,鄱阳湖水质呈下降趋势,富营养化水平呈上升趋势^[6]。同时,水位下降导致鄱阳湖氮磷等营养盐的自净能力和环境承载力下降^[7],氮磷等营养盐浓度变大^[8]。氮磷是鄱阳湖的主要污染物^[9-10],并且鄱阳湖水位呈现周期性变化特征。已有研究多集中于水质的时空变化特征或者单一年份水位与营养盐相关关系研究^[11-13],缺乏长时间序列水位与氮磷营养盐关系研究,此外鄱阳湖丰平枯时段多以时间和水位为依据进行划分,缺乏考虑营养盐要素的时段划分,有必要从长时间序列分析鄱阳湖TN和TP对水位的响应特征,并以水位、TN和TP监测数据为依据,划定水位-营养盐丰平枯时段,为鄱阳湖水环

第一作者:刘聚涛,男,1983年生,博士,教授级高工,主要从事湖泊富营养化和生态评价研究。

* 国家重点研发计划项目(No. 2018YFC0407600、No. YS2017YFGH00106501);国家自然科学基金地区科学基金资助项目(No. 31660138);江西省自然科学基金面上资助项目(No. 20192BAB206049);江西省水利科技计划项目(No. KT201701、No. 202023ZDKT13、No. 201922ZDKT16、No. 201820YBKT09)。

境保护和水位调控提供支撑。

1 研究方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖是我国第一大淡水湖,位于长江中下游南侧,承纳江西省境内赣江、抚河、信江、饶河和修水“五河”来水,经过鄱阳湖调蓄后由北部湖口注入长江。鄱阳湖属典型的吞吐型湖泊,水位变幅较大,呈现“高水湖相,低水河相”“洪水一片,枯水一线”的独特自然景观。鄱阳湖年均径流量为 1 525 亿 m^3 ,约占长江流域年均径流量的 16.3%,在区域和长江流域中下游的生态安全和水安全保障中发挥着重要的作用和功能。

1.2 监测点布置与样品检测

选择星子水文站作为鄱阳湖的参考站,监测 2012—2017 年鄱阳湖日平均水位(吴淞高程,下同)。同时,从 2012 年开始连续定位监测鄱阳湖水环境状况,监测时段包括 2012 年 1 月至 2018 年 1 月,监测月份主要在 1 月、2 月、4 月、6—10 月和 12 月,监测时段为监测月份的下旬,共设置监测点 35 个,其中平水期和枯水期设 16 个点位,丰水期设 35 个点位(见图 1)。现场采用 5 L 有机玻璃采水器

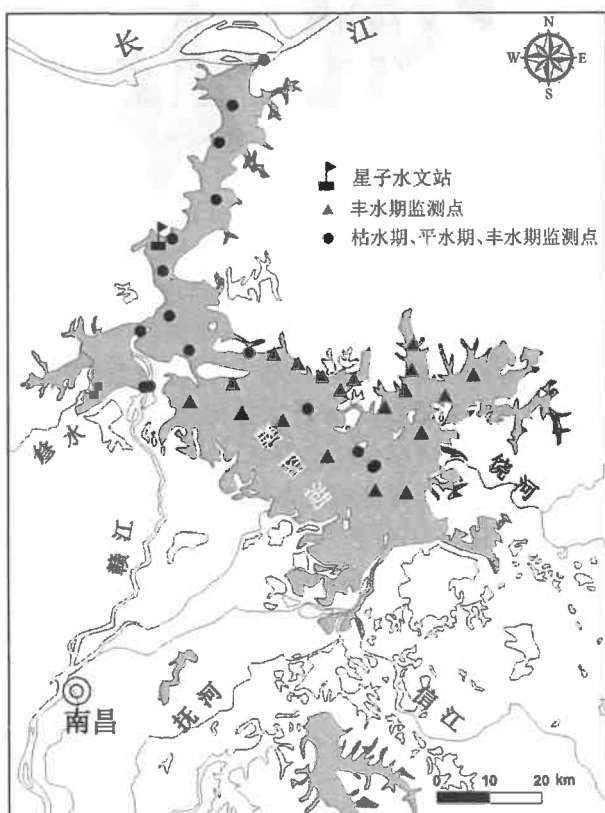


图 1 鄱阳湖位置与监测点布置

Fig.1 Sketch of the position and sampling points in Poyang Lake

采集上(水面以下 0.5 m)、下(距离湖底 0.5 m)水层等量水样,混合均匀后,采用 5 L 酸泡处理的塑料桶储藏,冷藏保存并带回实验室进行化学指标分析,监测指标主要为 TN、TP,检测方法参照文献[14]。

1.3 分析方法

采用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析,分析过程中,首先检验数据是否符合正态分布,如不符合正态分布,则需要对数据进行转化。水位与 TN、TP 相关分析采用 Pearson 相关分析;水位、TN、TP 聚类分析采用样本聚类分析。

2 结果与分析

2.1 鄱阳湖水位变化特征

鄱阳湖水位呈现周期性变化(见图 2),总体上 1—2 月水位较低,7—8 月水位达到最高值后逐渐下降,12 月水位又基本降至最低。2012—2017 年,月均最低水位分别为 8.73、8.10、7.75、7.96、9.83、8.46 m,月均最低水位主要集中在 12 月、1 月和 2 月;月均最高水位分别为 18.58、16.40、17.78、18.15、20.55、19.27 m,月均最高水位主要集中在 7 月。

鄱阳湖水位变幅较大(见表 1),日水位变幅区间集中于 10~13 m,水位极值比为 2.29~2.68;月均水位变幅区间集中在 8~11 m,水位极值比为 2.02~2.29。

2.2 鄱阳湖 TN、TP 变化特征

经统计,鄱阳湖 2012—2017 年 TN 年均质量浓度分别为 2.258、2.260、1.721、2.442、1.532、1.540 mg/L,TP 年均质量浓度分别为 0.088、0.106、0.121、0.115、0.056、0.057 mg/L。2012—2017 年鄱阳湖 TN、TP 变化趋势分别见图 3、图 4。由图 3、图 4 可见,鄱阳湖 TN、TP 浓度呈周期性波动变化,总体来看 TN 浓度年最大值集中在 10—12 月,最小值集中在 7—8 月;TP 最大值集中在 10 月至次年 2 月,最小值多集中在 8 月。

2012—2017 年,TN 浓度年内变化幅度呈逐渐减小趋势;TP 浓度年内变化幅度在 2012—2014 年呈增加趋势,在 2014—2017 年呈减小趋势。2012 年,TN 浓度变幅最大,极值比为 4.87;2017 年变幅最小,极值比为 1.65。2014 年,TP 浓度变幅最大,极值比为 11.88;2017 年变幅最小,极值比为 2.10。鄱阳湖 TN 和 TP 年内变幅逐渐变小,表明丰水期和枯水期 TN、TP 浓度逐渐趋于一致。而丰水期 TN、TP 浓度年际变化不大,表明枯水期 TN、TP 浓度降低。

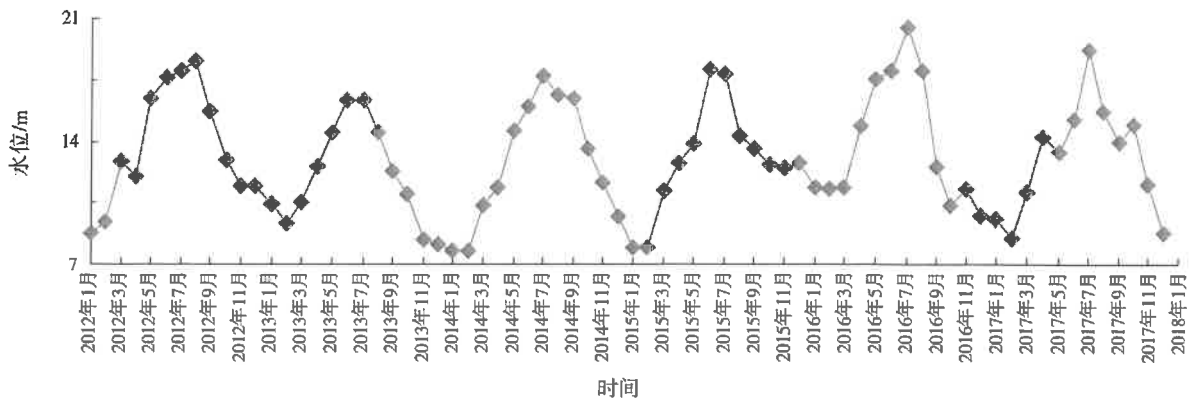


图 2 2012—2017 年鄱阳湖月平均水位变化特征
 Fig.2 Characteristics of monthly mean water level variation in Poyang Lake in 2012-2017

表 1 2012—2017 年鄱阳湖水位变化情况
 Table 1 Variation of water level in Poyang Lake in 2012-2017

年份	日水位				月均水位			
	最大值/m	最小值/m	变幅/m	极值比 ¹⁾	最大值/m	最小值/m	变幅/m	极值比 ¹⁾
2012	19.65	7.79	11.86	2.52	18.58	8.73	9.85	2.13
2013	16.95	7.40	9.55	2.29	16.40	8.10	8.30	2.02
2014	18.68	7.39	11.29	2.53	17.78	7.75	10.03	2.29
2015	19.46	7.59	11.87	2.56	18.15	7.96	10.19	2.28
2016	21.36	8.99	12.37	2.38	20.55	9.83	10.72	2.09
2017	20.87	7.80	13.07	2.68	19.27	8.46	10.81	2.28

注：¹⁾指极大值与极小值之比。下同。

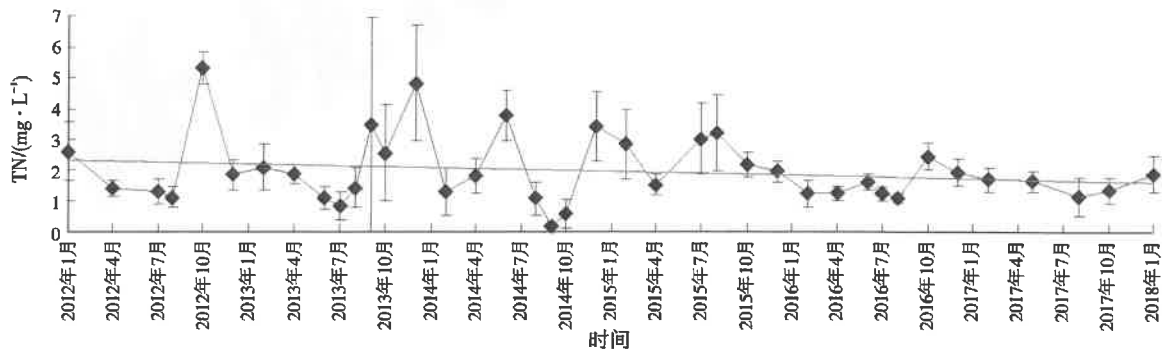


图 3 2012—2017 年鄱阳湖 TN 变化特征
 Fig.3 Change characteristics of TN in Poyang Lake in 2012-2017

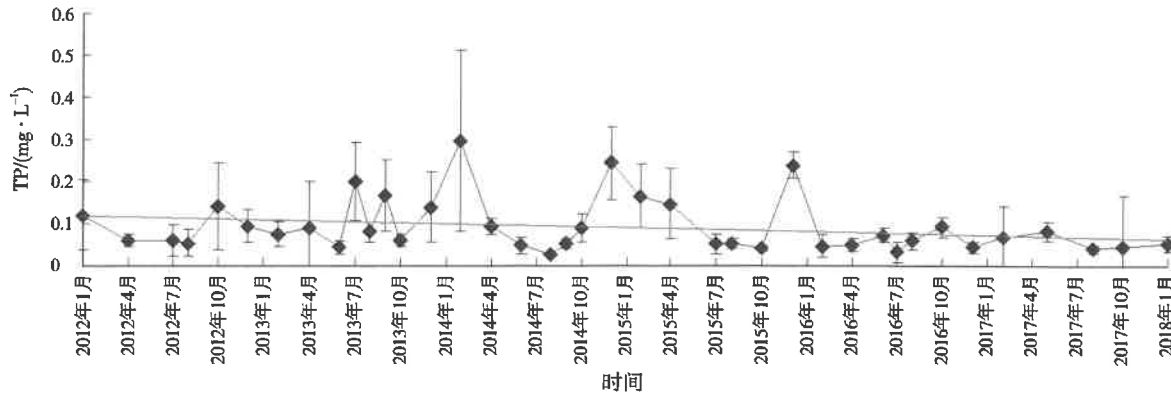


图 4 2012—2017 年鄱阳湖 TP 变化特征
 Fig.4 Change characteristics of TP in Poyang Lake in 2012-2017

2.3 鄱阳湖水位与 TP、TN 关系分析

2012—2017 年鄱阳湖水位与 TN、TP 相关关系分析见图 5、图 6。根据鄱阳湖水位与 TN、TP 的 Pearson 相关分析结果,鄱阳湖水位与 TN、TP 均呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), 相关系数分别为 -0.319 、 -0.396 , 说明鄱阳湖水位对 TN、TP 浓度有一定影响。鄱阳湖水体中 TN、TP 相关性并不显著 ($P > 0.05$), 表明水体中氮磷来源存在一定的差异性。鄱阳湖规律的水位波动不仅会影响湖泊湿地生物的生长、分布, 还会对水体环境产生诸多方面的影响^{[33]340}。磷的主要来源为地表径流和大气中含磷物质的直接沉降以及内源循环。降雨能够增加外源磷输入, 同时降雨导致的水位增加有利于水体中颗粒物的沉降从而减少内源磷的循环^[15]。已有的关于大型浅水湖泊的研究指出, 底泥的内源补给相对于水体氮的影响要小于水体磷的影响, 水体氮与浮游植物和水生植物生长有直接关系^{[16]280}。另外, 鄱阳湖频繁干湿交替促使氮磷固定量增大^[17], 对上覆水内源磷负荷蓄积具有促进作用^[18]。由于

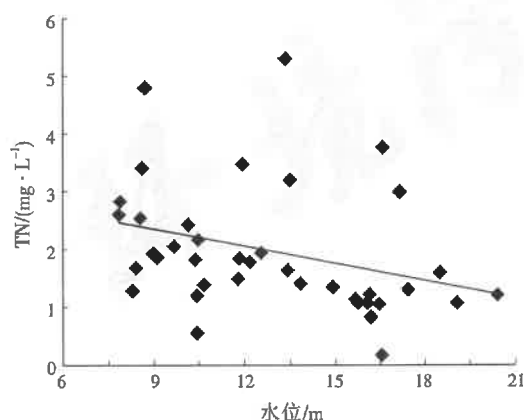


图 5 2012—2017 年鄱阳湖水位与 TN 关系
Fig.5 Relationship between water level and TN in Poyang Lake in 2012-2017

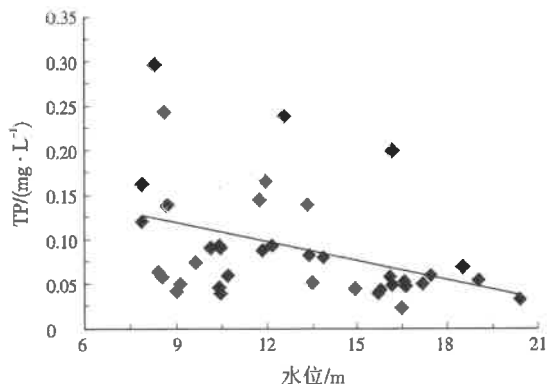


图 6 2012—2017 年鄱阳湖水位与 TP 关系
Fig.6 Relationship between water level and TP in Poyang Lake in 2012-2017

氮磷的来源及水体迁移转化过程不同, 导致鄱阳湖氮磷无显著相关关系。

2.4 鄱阳湖不同时段水位与 TN、TP 特征分析

以监测的水位、TN 和 TP 为样本, 用样本聚类分析对不同采样时段进行聚类, 结果见图 7。39 个有效样本可分为 3 个类别, 第 1 类共 14 个监测样本, 重点包括 6—8 月监测样本; 第 2 类共 16 个监测样本, 重点包括 10 月至次年 2 月监测样本; 第 3 类共 9 个监测样本, 重点包括 4—5 月和 8—9 月监测样本, 其中 8 月样本数据监测时间在 8 月下旬, 接近 9 月。根据分类结果, 结合鄱阳湖丰水期、平水期、枯水期特征, 第 1 类对应丰水期, 监测时间段为 6—8 月; 第 2 类对应枯水期, 监测时段为 10 月至次年 2 月; 第 3 类对应平水期, 监测时段为 4—5 月和 9 月。总体看来, 近年来鄱阳湖枯水期时段提前至 10 月, 枯水期相应延长。

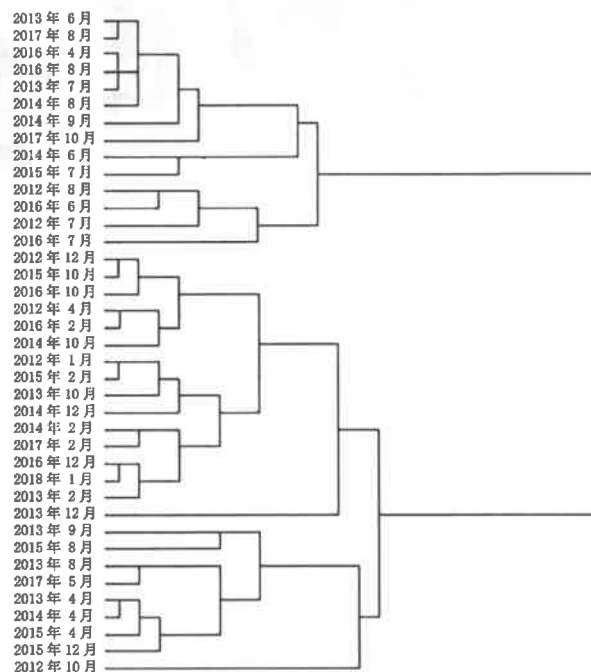


图 7 鄱阳湖水位、TN、TP 聚类分析
Fig.7 Cluster analysis of water level, TN and TP in Poyang Lake

根据聚类分析结果, 分别统计丰水期、平水期、枯水期 3 个时段的水位、TN 和 TP 浓度特征值, 结果如表 2 所示。由表 2 可见, 丰水期和平水期 TN 浓度相差不大, 均小于枯水期, TP 浓度呈现丰水期 $<$ 平水期 $<$ 枯水期的特征, 表明鄱阳湖水位越高, TN、TP 浓度越低, 鄱阳湖水位越低, TN、TP 浓度越高。鄱阳湖丰水期和平水期水质类别相同, TN 属于 V 类, TP 属于 IV 类; 枯水期, TN 属于劣 V 类, TP 属于 V 类, 丰水期和平水期水质优于枯水期一个级别。

表2 2012—2017年丰水期、平水期、枯水期的水位及氮磷特征¹⁾
Table 2 Water level, TN and TP of wet season, normal water level season and dry season in 2012-2017

水期	水位/m	TN		TP	
		质量浓度/(mg·L ⁻¹)	水质类别	质量浓度/(mg·L ⁻¹)	水质类别
丰水期	16.67±1.91	1.676±0.972	V	0.062±0.044	IV
平水期	13.08±2.16	1.633±0.916	V	0.092±0.043	IV
枯水期	9.96±1.95	2.327±1.197	劣V	0.113±0.077	V

注:1)以《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)作为水质类别判断依据。

3 讨论

3.1 鄱阳湖氮磷污染特征

鄱阳湖流域非点源污染是鄱阳湖水体污染的主要来源。2012年以来,鄱阳湖TN、TP总体呈波动下降趋势,但并无显著下降趋势。导致这一现象产生的原因可能是近年来江西省实施生态文明建设,严格控制氮磷化肥施用量造成的,2012—2017年,氮肥施用量和磷肥施用量分别减少9.46%、7.23%^[19]。

3.2 鄱阳湖氮磷与水位的响应

鄱阳湖周期性水位变化是氮磷浓度变化的重要原因。鄱阳湖沉积物丰水期氮磷释放量分别为144.73、176.27 t,平水期氮磷释放量分别为605.22、70.21 t,枯水期氮磷释放量分别为44.39、-7.93 t,氮磷释放量呈现丰水期>平水期>枯水期的特征^[20]。同时,水位也呈现出丰水期>平水期>枯水期的特征,但鄱阳湖氮磷浓度与水位呈显著负相关关系。高水位条件下,“五河”和长江来水较大,鄱阳湖水环境容量增加,高水位造成的污染物稀释作用可能是影响湖泊年内水质波动的主要因素。

鄱阳湖TN与水位呈显著负相关关系。鄱阳湖水位上升时期,出露水面沉积物覆水后,营养盐释放量增加^{[21]449};虽然农业生产活动导致高水位期鄱阳湖氮营养盐使用量增加,但高水位大大稀释了氮营养盐浓度,导致氮营养盐浓度降低^{[1]2145};最后,鄱阳湖蓝藻生物量占浮游植物生物量百分比可超过15%^{[1]2147},高水位期氮营养盐增加可能引起蓝藻等固氮蓝藻的大量生长,进而使鄱阳湖局部发生蓝藻水华现象。有研究指出,夏季水体氮浓度的快速下降,与夏季水华期湖体反硝化脱氮能力大幅提升,以及湖泊湿地生态系统中反硝化脱氮速率随温度升高而提高也有关^{[16]290}。在低水位期,水体普遍出现水质下降现象^{[21]449}。低水位期鄱阳湖呈河流状态,水力冲刷和风浪作用导致对营养盐产生扰动并进入水体;另外,鄱阳湖水质还因为洲滩植物分解作用而释放营养盐,导致TN浓度升高^[22]。营养盐与水位

呈负相关关系现象在长江中下游湖泊中广泛存在^[23]。

张其林等^[24]认为,TP与水位变化趋势一致,但没有显著相关性,这与本研究发现的水位与TP呈显著负相关不一致,这可能由以下几方面原因造成:一是研究尺度不同,本研究从多年时间序列开展研究,有别于文献^[24]集中单一年份监测数据的研究;二是鄱阳湖高水位期水体流速变缓,颗粒物在自身作用下聚集沉降,使丰水期TP浓度减小;三是近年来实施农业肥药双控和生活污水减磷控制措施,汇入鄱阳湖的磷污染减少。

根据2012—2017年鄱阳湖监测结果可知,TN浓度年内极值比为1.65~4.87,TP浓度年内极值比为2.10~11.88,并且在整个水位周期中,氮磷等营养盐浓度最高值均出现在最低水位阶段。WU等^[25]通过对长江中下游33个浅水湖泊(包括鄱阳湖)研究指出,低水位期TN浓度是高水位阶段的2~3倍,并且该结果在国外的类似湖泊中得到证明^[26],与本研究结果基本相一致。

4 结论

鄱阳湖水位呈现周期性变化,总体上1—2月水位较低,7—8月水位达到最高值后开始逐渐下降,至12月水位又基本降至最低。鄱阳湖水位变幅较大,日水位极值比为2.29~2.68;月均水位极值比为2.02~2.29。2012—2017年,鄱阳湖TN、TP浓度总体呈逐渐下降趋势,鄱阳湖水位与TN、TP呈显著负相关关系,受鄱阳湖水位波动影响,TN、TP呈周期性波动变化,枯水期TN、TP浓度较丰水期和平水期高。考虑TN、TP,鄱阳湖枯水期提前,并且持续时间延长,枯水期氮磷维持高浓度时间变长。

参考文献:

- [1] 刘霞,刘宝贵,陈宇炜,等.鄱阳湖浮游植物叶绿素a及营养盐浓度对水位波动的响应[J].环境科学,2016,37(6).
- [2] 胡茂林,吴志强,刘引兰.鄱阳湖湖口水位特性及其对水环境的影响[J].水生态学杂志,2010,3(1):1-6.
- [3] 丁庆章,刘学勤,张晓可.水位波动对长江中下游湖泊湖滨带底

- 质环境的影响[J].湖泊科学,2014,26(3).
- [4] 王悦敏,倪兆奎,冯明雷,等.鄱阳湖枯水期沉积物磷释放特征及对水位变化响应[J].环境科学学报,2017,37(10):3804-3812.
- [5] 赵林林,朱光伟,顾钊,等.太湖水体氮磷赋存量的逐月变化规律研究[J].水文,2013,33(5):28-33.
- [6] 江西省水利厅.江西省水资源公报 2017[R].南昌:江西省水利厅,2018.
- [7] 渠庚,郭小虎,朱勇辉,等.三峡工程运用后荆江与洞庭湖关系变化分析[J].水力发电学报,2012,31(5):163-172.
- [8] 刘志刚,倪兆奎.鄱阳湖发展演变及江湖关系变化影响[J].环境科学学报,2015,35(5):1265-1273.
- [9] 唐国华,林玉茹,胡振鹏,等.鄱阳湖区氮磷污染物分布、转移和削减特征[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1436-1445.
- [10] 李冰,杨桂山,万荣荣,等.鄱阳湖出流水质 2004~2014 年变化及其对水位变化的响应:对水质监测频率的启示[J].长江流域资源与环境,2017,26(2):289-296.
- [11] 高桂青,阮仁增,欧阳球林.鄱阳湖水质状况及变化趋势分析[J].南昌工程学院学报,2010,29(4):50-53.
- [12] 李艳红,成静清,郭春晶.鄱阳湖水质时空相关性及其因素分析[J].江西水利科技,2013,38(3):185-188.
- [13] 刘发根,李梅,郭玉银.鄱阳湖水质时空变化及受水位影响的定量分析[J].水文,2014,34(4):37-43.
- [14] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].2 版.北京:中国环境科学出版社,1990.
- [15] JOHN R J, MATTHEW F K. Suspended solids in Missouri reservoirs in relation to catchment features and internal process[J]. Water Research, 2005, 39(15): 3629-3635.
- [16] 朱广伟,秦伯强,张运林,等.2005—2017 年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素[J].湖泊科学,2018,30(2).
- [17] FRANZLUEBBERS K, WEAVER R W, JUO A S R, et al. Carbon and nitrogen mineralization from cowpea plants part decomposing in moist and in repeatedly dried and wetted soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(10): 1379-1387.
- [18] 曹琳,吉芳英,林茂,等.三峡库区干湿交替消落区土壤磷形态[J].长江流域资源与环境,2011,20(1):101-105.
- [19] 顾平,万金保.鄱阳湖水文特征及其对水质的影响研究[J].环境污染与防治,2011,33(3):15-19.
- [20] 吴志强.江湖关系变化对鄱阳湖沉积物氮磷形态及释放风险的影响[D].南昌:南昌大学,2014.
- [21] 吴起鑫,韩贵琳,唐杨.水位变化对湖泊(水库)消落带生态环境影响的研究进展[J].地球与环境,2009,37(4).
- [22] 张广帅,于秀波,刘宇,等.鄱阳湖磷形湖泊植物分解和水位变化对水体碳氮浓度的叠加效应[J].湖泊科学,2018,30(3):668-679.
- [23] 陈焰,黄宏,彭文启,等.基于套索性数据分析的汉丰湖富营养化驱动因子研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(5):1104-1113.
- [24] 张建林,张曼,肖利娟,等.流溪河水库丰水年与枯水年营养盐动态的比较分析[J].生态科学,2012,31(3):259-266.
- [25] WU S K, XIE P, WANG S B, et al. Changes in the patterns of inorganic nitrogen and TN/TP ratio and the associated mechanism of biological regulation in the shallow lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Science in China Series D, 2006, 49(Suppl.1): 126-134.
- [26] TRAIN S, RODRIGUES L C. Temporal fluctuations of the phytoplankton community of the Baía River, in the upper Paraná River flood plain, Mato Grosso do Sul, Brazil[J]. Hydrobiologia, 1997, 361(1/2/3): 125-134.

编辑:丁 怀 (收稿日期:2019-10-20)

(上接第 1262 页)

3 结 论

(1) 水洗液固比、水洗温度、搅拌转速、水洗时间均会对飞灰水洗脱氯产生一定的影响,影响程度大小为:水洗液固比>水洗时间>水洗温度>搅拌转速。

(2) 飞灰水洗脱氯的最适宜条件为:水洗液固比 10 mL/g、水洗时间 28 min、水洗温度 30 ℃、搅拌转速 450 r/min、水洗 2 次,氯离子洗脱率可达 93.3%。将水洗飞灰代替 3% 的水泥原料生产水泥产品,可以达到 GB 175—2007 规定的水泥中氯离子质量分数不得大于 0.06% 的要求。

参考文献:

- [1] 祝兴林.垃圾焚烧发电飞灰处理现状及技术选择[J].电力安全技术,2015,17(6):59-62.
- [2] 芦谢.水泥窑协同处置垃圾焚烧飞灰预处理工艺试验研究[J].环境工程,2013,31(增刊):333-335.
- [3] 张国亮,李忠锋,黄岚,等.水泥窑协同处置垃圾焚烧飞灰技术应用[J].水泥,2017(增刊):8-12.
- [4] 唐新宇,黄庆.水泥窑协同处置垃圾焚烧飞灰技术的应用进展[J].水泥技术,2019(1):79-82.
- [5] 李小东,刘阳生.飞灰水洗脱氯及其烧结稳定化的试验研究[J].北京大学学报(自然科学版),2007,43(6):752-758.
- [6] 王旭,陆胜勇,陈志良,等.生活垃圾焚烧飞灰水洗液中氯离子的去除研究[J].环境科学学报,2017,37(6):2218-2222.
- [7] 周建国,张曙光,李萍,等.城市生活垃圾焚烧飞灰水洗脱氯实验研究[J].天津城建大学学报,2015,21(6):417-422.
- [8] LI Q H, FU C L. Application of response surface methodology for extraction optimization of germinant pumpkin seeds protein[J]. Food Chemistry, 2005, 92(4): 701-706.
- [9] ATTAR P, DOWELL E. A stochastic analysis of the limit cycle behavior of a nonlinear aeroelastic model using the response surface method[J]. Journal of Aircraft, 2013, 43(4): 1044-1052.
- [10] 李云钊,宋兴福,孙玉柱.基于响应曲面法的反应-萃取-结晶工艺优化[J].化工学报,2016,67(2):588-597.
- [11] SPOLAORE P, JOANNIS CASSAN C, DURAN E. Optimization of *Nannochloropsis oculata* growth using the response surface method[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2006, 81(6): 1049-1056.
- [12] CESCUT J, SEVERAC E, MOLINA JOUVE C. Optimizing pressurized liquid extraction of microbial lipids using the response surface method[J]. Journal of Chromatography A, 2011, 1218(3): 373-379.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2019-11-11)