DOI:10.15928/j.1674-3075.2019.05.002

水文气象过程对千岛湖氮磷变化的影响

笪文怡[1,2],黎云祥[1],朱广伟[2],许 海[2],刘明亮[3],兰 佳[4],王裕成[4],吴志旭[4],郑文婷[4]

(1.西华师范大学 环境科学与工程学院,四川 南充 637002;
2.中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室,江苏 南京 210008;
3.杭州市环境保护科学研究院,浙江 杭州 310000;
4.杭州市生态环境局淳安分局,浙江 杭州 311700)

摘要: 水库作为一类人工修建的重要水资源调蓄地,其水体营养盐含量等指标受水文气象过程的影响很大。为探索我国东南山区水库营养盐的时空变化规律,以钱塘江流域千岛湖(新安江水库)为例,利用2016年8月至2017年12月的水质调查数据,结合同期气温、降雨量和入库流量等气象水文数据,分析了水文气象过程对千岛湖水体氮、磷等营养盐浓度的影响特征。结果显示:(1)千岛湖营养盐浓度具有较大的时空差异性,TN浓度0.69~2.06 mg/L,平均值为(1.12±0.26) mg/L,高值出现在冬季和春季;TP浓度0.004~0.096 mg/L,平均值为(0.030±0.021) mg/L,高值出现在春季;空间上呈现为河流区到湖泊区浓度逐渐降低的趋势;(2)千岛湖降雨量、入库流量及气温等水文气象条件存在显著季节差异($P<0.01$),3-7月的降雨和入库流量超过总量的70%,高温出现在7-8月,月均温度高达30℃;(3)氮磷营养盐浓度与入库流量的相关性强于降雨,且入库流量及降雨对磷的影响更大;不同区域对入库流量的响应时间存在差异,河流区响应最快,其次是过渡区,湖泊区最慢,反映出氮、磷在水库扩散过程中的滞后性;(4)温度通过影响水体浮游植物生长带来的水体颗粒态氮、磷变化影响水体TN、TP浓度,但不同湖区的响应不同;3~7 d的累积温度与过渡区氮、磷的关系好于河流区,可能与过渡区浮游植物生长与营养盐浓度变化更为敏感有关。研究表明,水文气象过程对大型水库水体氮磷的影响作用强烈且复杂,物理扩散与沉降、化学变化及生物生长累积等作用使得水体氮磷浓度对水文气象过程响应具有较大的时空差异性,在水库水质管理和机制分析中应当充分考虑这种非同步性。

关键词: 千岛湖;营养盐;水文过程;气象因素

中图分类号: X832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2019)05-0009-11

水库是由大坝拦截水流而形成的一种半人工半自然水体(林秋奇,2001),可有效解决水资源时空分布不均的问题,满足人们在水利发电、防洪、灌溉、水产养殖、生态旅游及气候调节等多方面需求(韩博平,2010)。近年来,随着城市化的发展,城市对水资源的需求规模更大,水库成为许多城市的供水水源,北京、天津、广州等许多城市的供水都依赖于水库,水库的水质和水生态问题越来越受到关注,特别是富营养化问题,已成为我国乃至全球水库面临的重大生态环境问题(张振克,2006;Qin et al,2010;Huang et al,2014;Qiao,2015;Zhang,2015)。因此,探究水库氮磷营养盐浓度变化对提高水库水质管理水平具有重要的科技支撑作用。

氮磷营养盐是水库富营养化及藻类异常增殖的主要营养物质基础,城镇工业及生活污水排放、农业及流域面源污染排放、底泥内源释放、大气干湿沉降、水体食物网过程等都对水体氮磷含量产生影响(杨梅玲,2013);其中,对于流域植被保护较好的水源地水库而言,包括农业在内的面源污染已成为湖库污染的主要来源(Oenema,1998;温海广,2011;高伟,2013);而面源污染的产生与负荷受气象、水文过程的影响明显(罗献宝,2006;Zhang,2016);Lee等(2010)发现季风期水文气候变化是影响温带水库营养盐含量变化及藻类生物量的决定性因子;张德林(2016)对淀山湖的研究表明,气象条件对淀山湖水体营养盐的影响大,日均气温与总氮(TN)浓度反相关,与总磷(TP)则正相关,降雨对TN、NH_3-N等具

收稿日期: 2018-08-28

基金项目: 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008);国家自然科学基金项目(41830757);中国科学院南京地理与湖泊研究所"一三五"战略规划项目(NIGLAS2017GH04);淳安县环境保护局招标项目(CAZFCGGK2016-111);杭州市社会发展科研专项(20150533B06)。

作者简介: 笪文怡,1994年生,女,硕士研究生,研究方向为水环境化学。E-mail:dwyzls@163.com

通信作者: 黎云祥,1968年生,男,教授。E-mail:yxli@263.net

有稀释作用;刘蕾(2008)研究也表明,降雨会导致水库营养盐含量发生变化,进而影响库区浮游植物的生长与分布;范志伟(2017)对三峡库区的研究表明,氮营养盐的浓度主要与降雨量有关。

钱塘江流域的千岛湖是长三角地区最大的淡水人工湖和战略水源地,水质和水生态受到国家和地方政府高度关注。近20年来,千岛湖一直受富营养化问题的困扰,已发生过局部的曲壳藻、束丝藻及鱼腥藻等藻类异常增殖问题,对千岛湖水质、生态保护及水质安全保障构成了严峻的威胁(余员龙,2010;韩晓霞,2013)。近年来,有关千岛湖水质变化特征及机制开展了大量的研究(余员龙等,2010;杨丽丽,2013;陈峰,2014;盛海燕,2014;Wu,2015;白杨,2016;俞焰,2017;Li,2018)。这些研究均表明,外源负荷、渔业养殖、洪水过程等对千岛湖水体氮、磷含量具有重要影响(吕唤春,2002;刘其根,2010;李培培,2010;盛海燕,2015);但前期的研究表明,水体氮磷与气象水文参数的统计相关关系并不好(韩晓霞,2013);而藻类叶绿素与氮磷浓度之间的统计关系也不理想(赵新民,2005)。其中,水文与气象过程对氮、磷影响的复杂性可能是相关性不佳的重要原因。

关于水文气象条件对千岛湖水生态系统的影响,盛海燕(2015)分析了气象因子与营养盐之间的相关性;Li等(2017)基于遥感数据探讨了气象水文条件对TN和TP的影响。然而,基于不同时间和空间尺度分析研究所获得的统计结果差异较大,给探究水文气象对水体氮磷的影响作用机制带来了困惑。因此,本研究基于2016年7月至2017年12月对千岛湖水质理化参数进行采集与测定,结合相应的水文气象数据(气温、入库流量、降雨量),分析了千岛湖水质的时空变化特点,探讨入库径流、气温、降雨对氮、磷浓度的影响特性,以期为千岛湖水生态保护及水质安全保障管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

千岛湖位于浙江省淳安县和建德市境内(29°22′～29°50′N,118°36′～119°14′E),为亚热带季风湿润性气候,雨量充沛,四季分明,年均气温为17.8℃,年均降水量为1 636.5 mm,年日照时数达1 951 h。水位为108 m时,千岛湖蓄水量178亿 m^3,平均水深30.44 m,最大水深100 m。千岛湖的入库河流包新安江、富强溪、武强溪等30多条,其中新安江约占入库总水量的60%,年均流入千岛湖的水量超过67.77亿 m^3(Li et al,2017;张红举,2014);水库换水周期约2年(张欣,2007)。

2016年8月至2017年12月,对千岛湖5个采样点(街口、威坪林场、小金山、三潭岛、大坝)进行了逐月监测(图1)。其中,街口、威坪林场、小金山采样点位于河流区,三潭岛位于过渡区,大坝位于湖泊区(Li et al,2017)。透明度(SD)使用塞氏盘现场测定。通过5 L采水器采集水下50 cm处的水样,现场过滤叶绿素a(Chl-a)及悬浮颗粒物(SS)样品。之后将水样及滤膜冷藏于保温箱中,带回实验室分析。

实验室分析的水环境指标包括总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、颗粒态氮(PN)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、颗粒态磷(PP)、叶绿素a(Chl-a);其中,TN、DTN通过碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法(波长210 nm)测定;TP、DTP通过碱性过硫酸钾消解-钼锑抗显色分光光度法(波长700 nm)测定(国家环境保护总局,2002);Chl-a采用采用热乙醇萃取分光光度法测(陈宇炜,2006)。

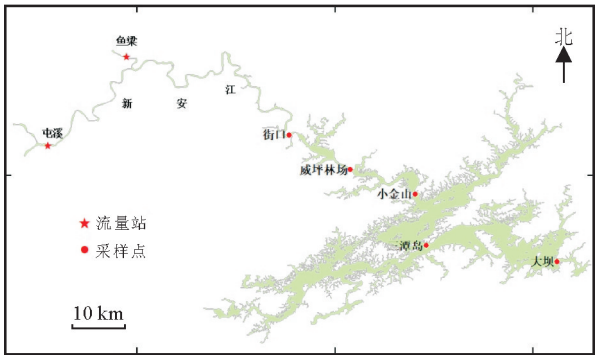

图1 千岛湖监测点位分布

Fig.1 Location of the monitoring sites in Qiandao Lake

1.2 数据获取与处理

从国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn)获取淳安县2016年7月1日至2017年12月31日期间的日均降雨量及日均气温数据。从太湖流域片水文信息服务系统收集了新安江上游鱼梁、屯溪两个站点的流量数据(http://218.1.102.99:8100/indexWater.html)。本文使用的千岛湖入库流量数据为鱼梁流量监测站和屯溪流量监测站的流量累加值。千岛湖氮、磷的时间变化值为5个监测点的月监测数据平均值;水质空间变化的各指标浓度值分别按照春季(3-5月)、夏季(6-8月)、秋季(9-11月)、冬季(12-2月)计算平均值,数据分析及处理均通过Excel 2010及SPSS 23.0完成。

2　结果与分析

2.1　水文和气象因子变化特征

2016 年 7 月至 2017 年 12 月的降雨量、入库流量及日均气温统计见表 1 和图 2。千岛湖降雨事件和入库流量均从 3 月中旬开始明显增高，其中降雨量在 3 月中旬至 5 月中旬以及 6 月中下旬出现两个阶段的峰值，而入库流量峰值集中在 3－7 月，峰宽一般 3－5 日，比降雨量峰值大；气温的峰值比降雨量峰值滞后，出现在 7－8 月，甚至 9 月上旬的温度仍较高。

在 18 个月研究期间，月累积降水量 19.1～492.6 mm，平均值为 113.4 mm，月度变化幅度较大，且春、夏季的降雨量明显高于秋、冬季（$P=0.005$），最低值和最高值分别出现在 2017 年 2 月和 2017 年 6 月。采样期间各月的累积流量在 4.7×10^7～$132.6\times10^7\,m^3$，均值达 $32\times10^7\,m^3$，其中 2017 年 6 月和 2016 年 7 月的流量值最大，分别位居第一和第二，2017 年 8 月的累积入库流量为 $31.5\times10^7\,m^3$，显著高于 2016 年 $7.5\times10^7\,m^3$。与降雨量类似，千岛湖的入库流量也表现为春、夏两季明显高于秋、冬季节（$P<0.01$）。2016 年 8 月至次年 2 月以及 2017 年8－12 月为新安江入库流量的低值期，这是因为新安江上游为维持水位及水量，在进入枯水期之前就开始控制下泄的水量，致使新安江在每年 8 月至次年 2 月均为入库流量的低值期。

监测期间，千岛湖的月平均气温差异较大，四季气温之间存在显著差异（$P<0.01$）。月平均气温在 7.8～30.2℃，平均值为 19.29℃，最低气温出现在 2017 年 12 月，比 2016 年的 12 月低了 2.3℃。日平气温除每年 7－8 月的波动幅度较小，其余月份均存在较大的波动。

表 1　千岛湖的气象水文数据统计

Tab.1　Summary of hydrometeorological data for Qiandao Lake

指标	季节	样本量	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数/%	*F*	*P*
降雨量/mm	春	92	5.11	9.80	0.00	44.70	192	4.32	0.005
	夏	154	5.12	12.90	0.00	83.30	252		
	秋	181	3.45	9.16	0.00	63.80	265		
	冬	122	1.30	3.48	0.00	27.30	268		
入库流量/$\times10^7\,m^3$	春	92	1.63	1.54	0.08	7.58	95	22.80	0.000
	夏	154	2.12	4.15	0.05	26.25	196		
	秋	181	0.37	0.32	0.05	2.36	86		
	冬	122	0.29	0.22	0.09	1.17	76		
气温/℃	春	92	17.31	5.33	7.20	27.20	31	447.18	0.000
	夏	154	28.57	3.31	19.60	33.80	12		
	秋	181	19.73	5.67	4.10	30.80	29		
	冬	122	8.68	2.97	3.10	14.70	34		

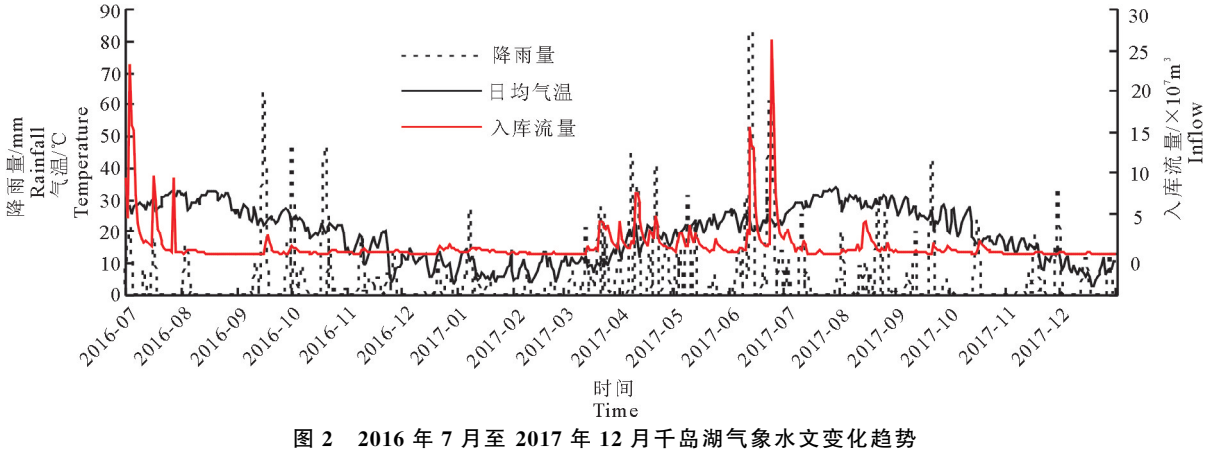

图 2　2016 年 7 月至 2017 年 12 月千岛湖气象水文变化趋势

Fig.2　Meteorological and hydrological variability in Qiandao Lake from July 2016 to December 2017

2.2　氮磷营养盐的时间变化特征

TN 浓度在 0.854～1.397 mg/L(图 3-a)，最低值和最高值均高于 2013 年的监测浓度（0.78～0.18 mg/L）。4－7 月，TN 浓度较高，且 5 个点位之前的差异较大，推测是由于春雨径流作用带入了耕地的营养物质所致。2016 年及 2017 年的 8－10 月，

TN浓度均呈现出明显的下降趋势，这可能与雨季结束后，入库流量、降雨量的减少以及高温下水库的反硝化作用增强有关。DTN浓度在0.72～1.09 mg/L，其不同月份间的波动幅度及波动周期基本与TN同步。DTN/TN在0.68～0.94，平均值为(0.82±0.08)，说明千岛湖的氮主要以溶解态存在。PN浓度在0.058～0.388 mg/L，平均值为0.21 mg/L。

TP浓度不同月份存在明显差异，最高值出现在春季(4月)，最低值出现在冬季，最大值和最低值分别为0.067 mg/L和0.009 mg/L。DTP浓度在0.004～0.048 mg/L，最高值同样出现在2017年4月，说明千岛湖的入库流量会带来大量的营养盐，其变化趋势与TP基本一致。DTP/TP在0.26～0.78，平均值为(0.57±0.15)，说明千岛湖的磷赋存形式变化大，且溶解态的磷略高于颗粒态，与氮的主要存在形式不同。

整体上看，2017年的TP浓度比2016年浓度稍高，2016年雨季之后TP呈现出明显的降低趋势，2017年则表现为波动下降。PP浓度在0.002～20.24 mg/L，均值为0.012 mg/L，月季间的变化趋势与TP也基本一致。

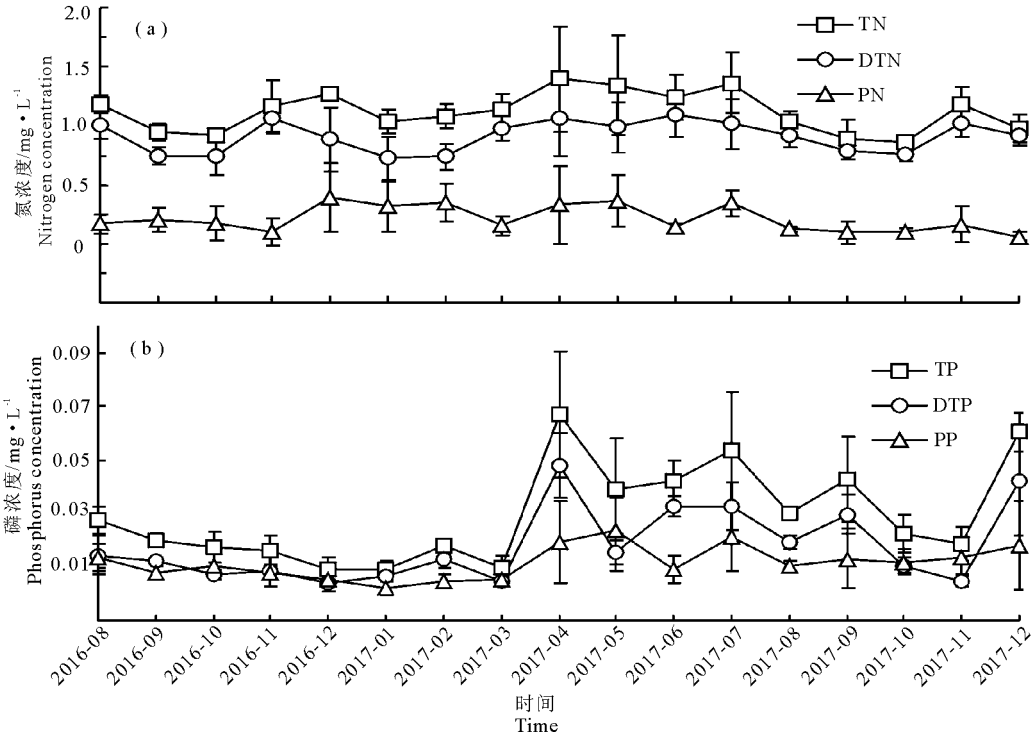

图3 2016年8月至2017年12月千岛湖氮磷营养盐的时间变化趋势

Fig.3 Temporal variation of nitrogen and phosphorus in Qiandao Lake from August 2016 to December 2017

2.3 氮磷营养盐的空间变化特征

2016年8月至2017年12月，各监测点位的TN和DTN浓度从高到低依次为街口、威坪林场、小金山、三潭岛、大坝。虽然三潭岛浓度略低于大坝，但不存在统计学差异，推测是由于茅头尖方向来水水质较好，混合后显著稀释了三潭岛的TN浓度。除威坪林场，街口TN及DTN浓度与其它几个点的浓度之间均存在统计学差异($P<0.01$)，表明从入库口到大坝的总氮逐渐降低，折射出外源入库对千岛湖水体氮浓度的决定性作用。

TP、DTP及PP的浓度大体为从街口到大坝逐渐降低，但威坪林场的DTP浓度略高于街口，三潭岛的PP略低于大坝。说明除了上游来水对千岛湖水体总磷的影响外，局地性的面源污染等因素仍对水库磷浓度有一定的影响。

从季节上看，氮磷营养盐的变化也有所差异，春季的TN及DTN均表现为威坪林场高于街口，这可能与威坪林场周边复杂的流域环境有关，较强的流域农业活动以及当地的网箱渔业，可能都对该区域氮的偏高有贡献；此外，春季的三潭岛及大坝的氮磷营养盐均略低于夏季，这可能是两个区域夏季藻类生长较春季更高的缘故。街口、威坪林场、小金山的PN值春季和冬季高于夏季和秋季，三潭岛夏季的PN最高，大坝则是冬季最高。TP、DTP、PP基本表现为街口到大坝逐渐降低，且春季和夏季的浓度最高。

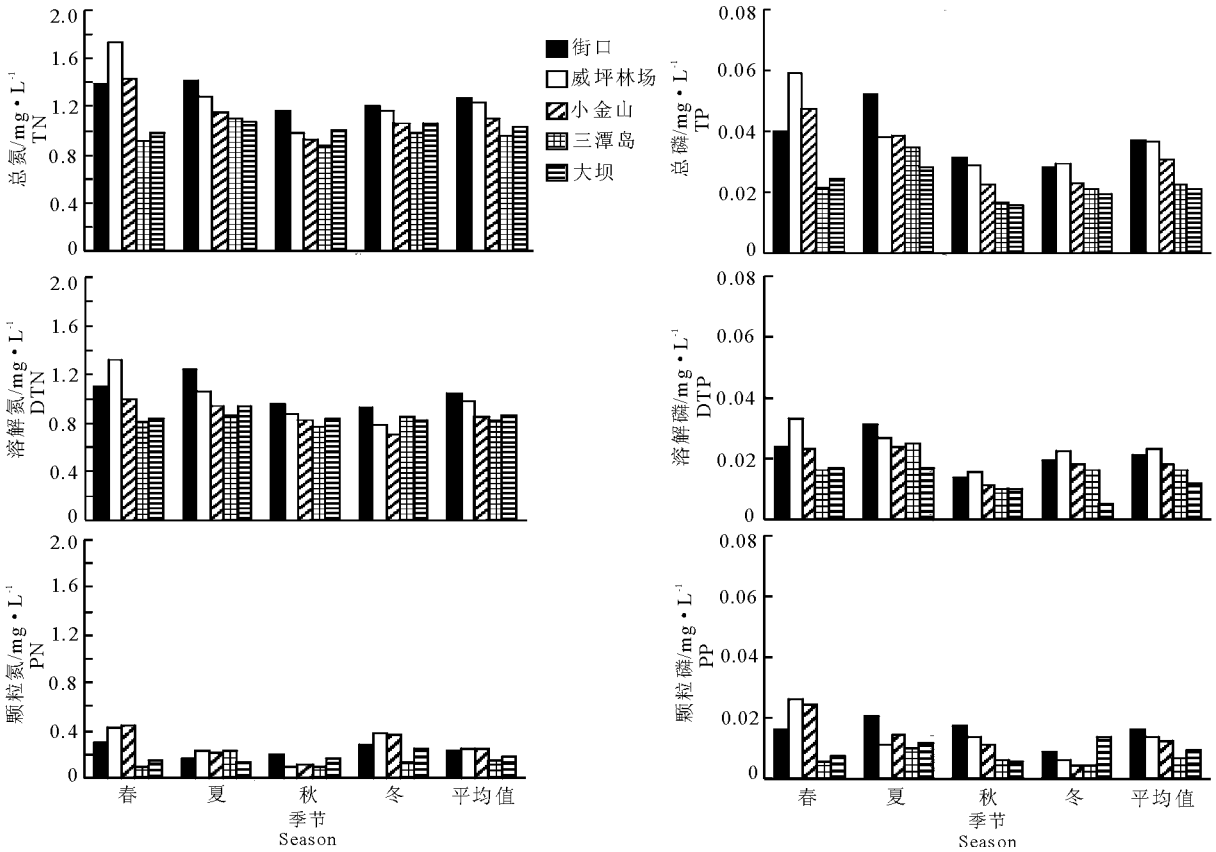

图 4　2016 年 8 月至 2017 年 12 月千岛湖氮磷营养盐的空间变化趋势

Fig.4　Spatial variation of nitrogen and phosphorus in Qiandao Lake from August 2016 to December 2017

3　讨论

3.1　降雨量对氮磷变化的影响

降雨对千岛湖营养盐及污染物浓度具有决定性的影响。有学者分析了 1996 年台风雨带来的洪水对千岛湖水质影响巨大，一场 5.5 d 的 417 mm 暴雨引起当年全库性总氮、高锰酸盐指数、BOD_5、粪大肠杆菌、Cd、Pb、氨氮等指标显著高于多年平均值，呈现明显的“污染峰”（文军，2004；罗献宝，2006）。污染负荷来源研究表明，千岛湖氮磷营养盐的来源包括上游河流输入、农业生产、畜牧养殖、生产生活污水等，水体中的氮磷负荷大多来自于农业流域非点源污染的输出（吕唤春，2002；余员龙等，2010；陈江海，2015）。然而，降雨量与水体氮磷含量的相关关系往往不是很显著。兰佳等（2014）在分析 2008－2009 年千岛湖水体 TP、TN 与降雨量的关系时发现，统计上水体 TN、TP 与上月降雨量的相关性不显著；盛海燕等（2015）在对 2003－2012 逐月降雨量与下月水体氮磷含量时，也没有发现显著相关性，总氮与水库的出库流量显著正相关，但与入库流量的相关性不显著。这表明降雨对氮磷营养盐的影响可分为两方面：一方面，降雨事件会带入大量的营养盐及污染物，增加湖库的营养水平；另一方面，持续且大量的降雨又会稀释湖库中的营养盐等物质浓度（张恒，2011；Huang，2014）；此外，由于氮磷的颗粒态比例不同，降雨入库的氮磷在水库中的扩散行为也不同，降雨量与氮、磷浓度的统计关系也就不同。

为探究不同时间尺度（前 3 天、前 7 天、前 15 天及前 30 天）的降雨量对水库氮磷营养盐的影响情况，对不同时间尺度的累积降雨量与颗粒态氮磷及溶解态氮磷浓度进行 Person 相关性分析见表 2。降雨量与 DTN 及 PN 均不存在显著相关关系（$P>0.05$），这与前人研究的降雨量与氮营养盐之间关系的结果一致（盛海燕，2015；Li，2017）。主要是因为氮主要以溶解态的形式存在，降雨带来氮负荷的同时，也对水体的氮浓度起到一定的稀释作用；同时氮营养盐来源与转化途径多样，例如降雨形成的地表径流、大气沉降为库区带来了氮负荷，而微生物引起的反硝化作用将从水生态去除大量氮等（Oenema，1998；高伟，2013；马腾飞，2015），这些综合因素导致氮浓度并没有因为降雨量的增加而升高；此外，降雨量在空间上分布的差异性比较大，一个站点的降雨

量数据代表性可能不够强，特别是利用淳安县气象站的降雨量，而非流域上游屯溪等地的降雨量，对相关性的影响都比较大。

表2 不同时间尺度累计降雨量与氮磷的相关性分析

Tab.2 Correlation analysis between nitrogen, phosphorus and rainfall at different time scales

指标	时间尺度	街口	威坪林场	小金山	三潭岛	大坝
PN	前3天	0.07	0.15	0.11	0.39	-0.15
	前7天	0.14	0.35	0.28	0.15	-0.01
	前15天	0.20	0.26	0.26	0.31	-0.20
	前30天	0.14	0.33	0.28	0.45	-0.17
DTN	前3天	0.45	0.09	0.00	0.06	-0.05
	前7天	0.46	0.30	0.05	0.22	-0.24
	前15天	0.44	0.28	-0.05	0.10	-0.02
	前30天	0.47	0.30	-0.01	0.05	-0.01
PP	前3天	0.56*	0.16	0.01	0.40	0.02
	前7天	0.45	0.44	0.16	0.41	0.53*
	前15天	0.71**	0.35	0.19	0.46	0.10
	前30天	0.76**	0.44	0.29	0.56*	0.11
DTP	前3天	0.36	0.10	0.17	0.17	0.26
	前7天	0.66**	0.45	0.49*	0.41	0.06
	前15天	0.48	0.31	0.25	0.18	0.16
	前30天	0.50*	0.33	0.30	0.24	0.23

注：* $P<0.05$；** $P<0.01$。

统计发现，累积降雨量只与PP存在显著相关关系（$P<0.05$），并且与入库点的街口断面相关性最好，采样前3天累积降雨量就与PP浓度显著正相关（$R^2=0.56$），说明入库口的磷营养盐对降雨的响应快，在较短时间就能改变PP浓度。三潭岛的PP浓度则与采样前30天的累积降雨量存在显著相关关系（$R^2=0.56$），与较短的降雨量相关性不显著，表明三潭岛和街口相比，其对降雨的响应相对滞后。相关研究表明，不同强度的降雨引发地表径流中的PP含量存在一定差异，其中暴雨因其对地表的冲击最大，携带最高含量的颗粒磷，小雨形成径流携带的颗粒磷含量最低（梁斐斐，2012；徐冯迪，2016）。因此，具体的响应时间还会因降雨强度不同而有所差异。

不同降雨强度的降雨量对千岛湖的影响范围及程度也不同，降雨量对河流区的影响高于过渡区。采样前7天的累积降雨量与大坝的PP浓度存在显著正相关，很可能是大坝附近支流入库造成的。降雨量对街口和小金山的DTP也存在显著相关，说明降雨量对DTP的影响与PP一样，最先对街口产生影响。总体来说，无论是对总氮、总磷还是溶解性总氮、溶解性总磷，淳安县降雨量与水库中各指标的关系都不是特别好，反映出降雨对氮磷指标影响的复杂性。

3.2 入库流量对氮磷变化影响

新安江流域面积10 442 km²，其中60%位于安徽省境内，只有40%位于浙江省淳安县境内。有学者认为从新安江流入千岛湖的流速主要取决于上游流域的降雨量，而上游降雨量对于水库的影响，以入库流量的形式进行估算更为科学（Zhou et al，2016）；这能够避免因降雨量空间分布不均带来的不确定性。因此，为进一步分析地表径流对千岛湖水质的影响，将入库流量处理成采样日期前、不同时间尺度的累积流量（前3天、前7天、前15天及前30天），并将其与街口、威坪林场、小金山、三潭岛及大坝进行Pearson相关性分析（表3）。

表3 不同时间尺度的入库流量与氮磷相关性分析

Tab.3 Correlation analysis between nitrogen, phosphorus and inflow at different time scales

指标	时间尺度	街口	威坪林场	小金山	三潭岛	大坝
PN	前3天	0.18	0.41	0.40	0.56*	-0.04
	前7天	0.11	0.31	0.49*	0.62**	-0.16
	前15天	0.21	0.41	0.40	0.61*	-0.13
	前30天	0.12	0.30	0.21	0.69**	-0.16
DTN	前3天	0.40	0.33	-0.02	0.14	-0.04
	前7天	0.40	0.47	-0.03	0.15	0.16
	前15天	0.45	0.44	0.07	0.09	0.05
	前30天	0.50*	0.36	0.17	0.06	0.18
PP	前3天	0.68**	0.35	0.39	0.48	-0.05
	前7天	0.54*	0.32	0.60*	0.47	0.03
	前15天	0.71**	0.43	0.51*	0.57*	-0.01
	前30天	0.62**	0.36	0.47	0.67**	0.08
DTP	前3天	0.48	0.39	0.34	0.27	0.40
	前7天	0.45	0.42	0.34	0.39	0.40
	前15天	0.50*	0.41	0.35	0.33	0.41
	前30天	0.40	0.26	0.23	0.34	0.24

注：* $P<0.05$；** $P<0.01$。

从表3可以看出，不同时段入库流量与各形态氮、磷的相关关系存在较大差异；其中，入库流量与街口、小金山及三潭岛的PN、DTN存在一定的显著正相关关系，表明随着入库流量的增大，街口、小金山、三潭岛位点的PN、DTN含量也会增加，这与前期研究得出千岛湖入库流量与氮营养盐不存在相关关系的结果不同（盛海燕，2015；Li，2017）。将小金山和三潭岛两个点的PN浓度与叶绿素浓度进行相关分析（图5），决定系数分别达到0.49及0.38，这说明PN浓度在很大程度上还受藻类生物量变化影响。采样前3天的累积入库流量与三潭岛的PN显著正相关，而小金山的PN只与采样前7天的累积入库流量相关，小金山对累积入库流量的响应相较于三潭岛滞后一点。分析其原因，可能是小金山点位的浮游植物生长吸收、转换对氮与流量关系产生

了较大的干扰所致。浮游植物生长主要利用的是湖库中的溶解态氮，街口、小金山及三潭岛在春夏两季的硝态氮浓度从高到低依次为街口(0.90 mg/L)、小金山(0.72 mg/L)及三潭岛(0.66 mg/L)。相关研究表明，浮游植物在氮浓度低于 0.8 mg/L 时，氮营养盐浓度将限制浮游植物的生长(Xu，2015)，三潭岛具有最低的硝态氮浓度，低于浮游植物增殖中氮的阈值，小金山、三潭岛水体氮受浮游植物的影响强度不同；此外，三潭岛的水流速度较河流区已变缓，利于浮游生物的生长与繁殖(韩博平，2010)。入库流量与街口、小金山、三潭岛的 PP 均存在显著相关，采样前 3 天的累积流量就开始与街口 PP 浓度显著相关，前 7 天的累积流量才开始与小金山 PP 浓度显著相关，三潭岛的 PP 浓度则与前 15 天的累积流量显著相关，大坝的 PP 浓度与所有时间尺度的累积流量均不显著相关(表 3)。说明入库流量对不同位置的 PP 影响存在时间滞后过程，河流区 PP 对径流的响应最快，其次是过渡区，湖泊区的响应不明显。小金山及三潭岛的 PP 浓度与叶绿素的相关性决定系数分别 0.87 和 0.48(图 4)，表明两地的颗粒磷大多来源于浮游植物。街口、小金山、三潭岛之间存在一定的距离，因此入库流量到达各个位点的时间不一致，且浮游植物的增殖需要一定的时间，所以街口的 PP 对入库流量响应最快，而三潭岛的 PP 响应相对滞后一点。因此，对于千岛湖，入库流量可直接为千岛湖带来了大量的营养盐，而营养盐的增加，反过来，对浮游植物生长提供了必要的营养物质，促进了浮游植物的生长(韩博平，2010)。

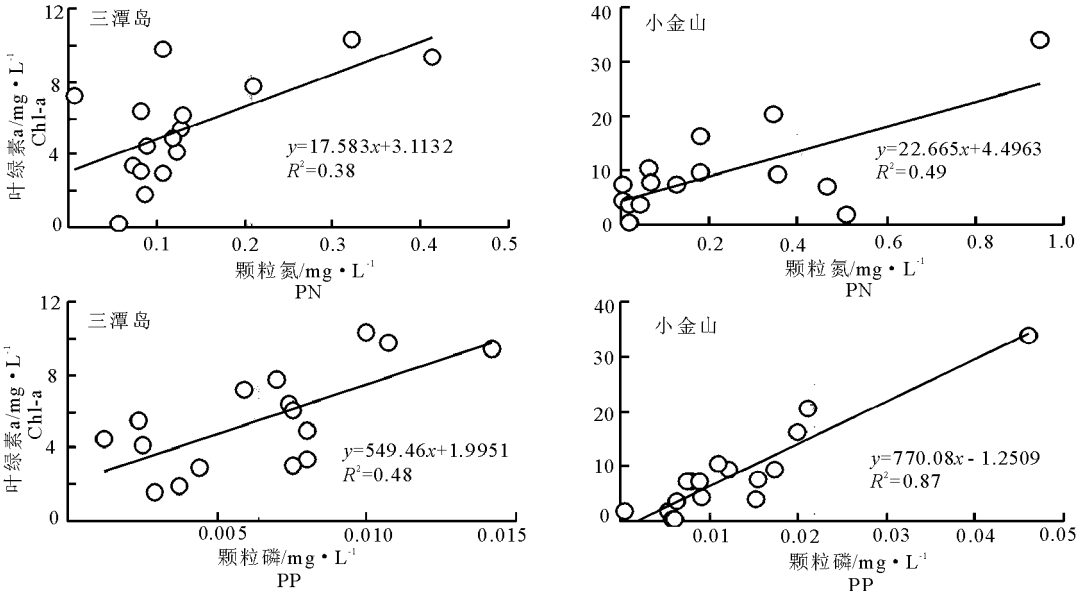

图 5　三潭岛、小金山的颗粒态氮磷与叶绿素散点图

Fig.5　Scatter plots showing the relationships of particulate nitrogen and phosphorus to chlorophyll

3.3　温度对水质时空变化的影响

温度、光照等气象因素对千岛湖浮游植物的生长、季节演替产生重要影响(周小玉，2012；兰佳，2014)。王炜等(2003)发现千岛湖的蓝藻密度与水温、pH、总磷浓度显著正相关。气温可以通过热量交换及辐射等方式改变水温，深水水库表层水温与地区气温高度相关，且变化基本同步(Adrian，2009)。水温的变化会对水体离子之间的反应速度、浮游生物的组成、初级生产力及污染物的扩散等产生影响，进而影响到水质(张德林，2016)；此外，千岛湖在春季、夏季和秋季均会形成温跃层，温跃层会阻碍水体垂直方向的对流、致使下层水中的营养物质不能交换到表层水。气温的突然变化会对水体分层产生影响，使水体稳定性发生变化，从而影响水环境性质(丘华北，2011；夏品华，2011)。

统计分析表明，采样前 3 日和前 7 日的累积温度与水中氮、磷营养盐弱相关，表明积温对千岛湖的氮、磷营养盐浓度变化不存在直接影响。研究表明，累积温度对水库的影响主要表现为影响其理化过程及改变水体动力学，进而对浮游植物及初级生产力产生影响(Wilhelm，2010；盛海燕，2015)。相关研究表明，千岛湖的浮游植物组成具有明显的季节变化，且河流区、过渡区及湖泊区之间存在一定的差异，各种藻类的优势种交替出现，春季和冬季主要为硅藻和隐藻，夏季是蓝藻、绿藻占优势，而秋季则主要为蓝藻和硅藻为主(兰佳，2014)；但不同季节又会

有一些特殊浮游植物存在，如春季，具有低温耐受性的束丝藻在低温下可能会异常增殖。春季入库流量增大会带入大量营养盐到库区，为其异常增殖提供条件，进从而影响入库流量与磷营养盐之间的相关。采样前3日和前7日的累积温度与叶绿素的相关性分析见图6。

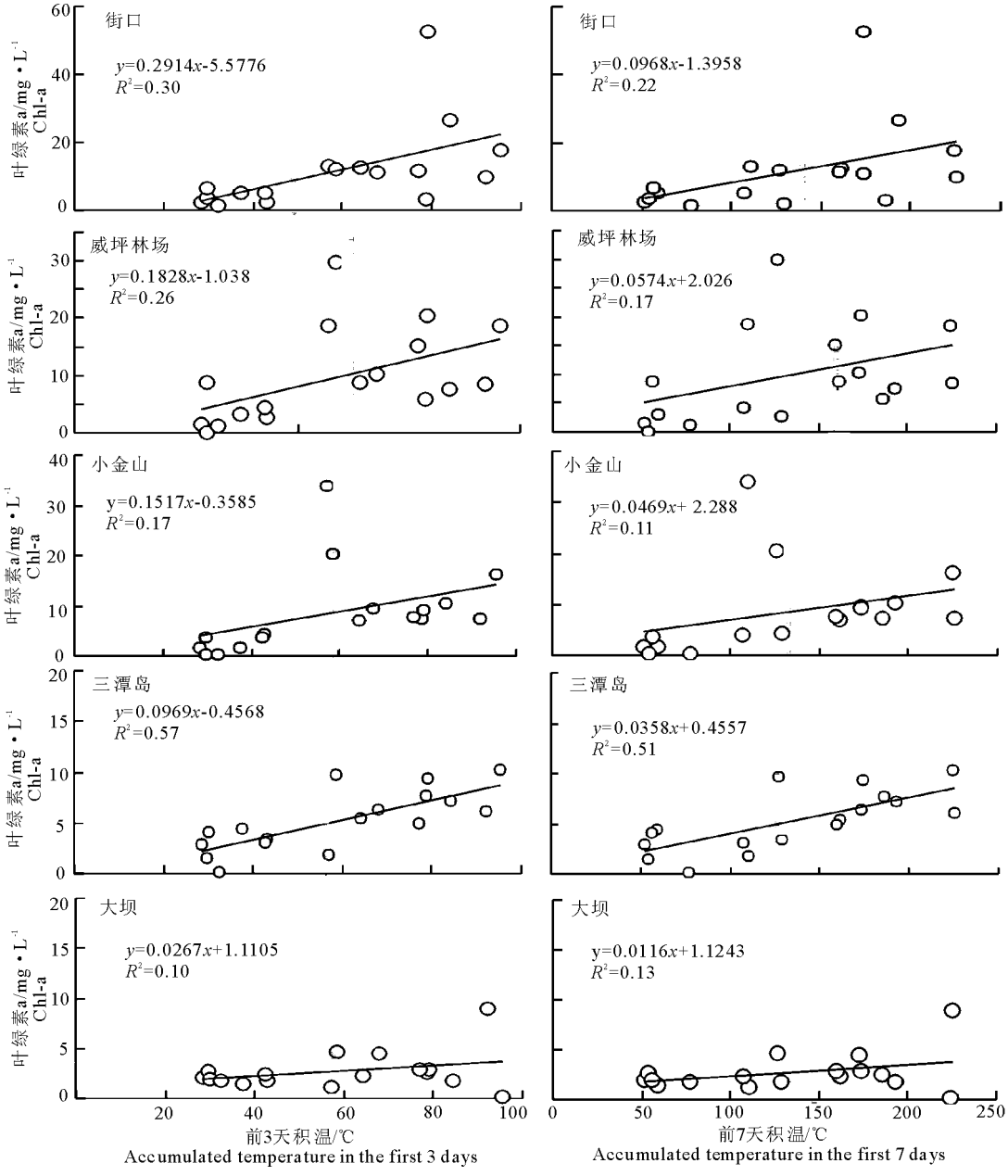

图6　叶绿素与不同时间尺度累积温度的散点图

Fig.6　Scatter plots showing the relationship of chlorophyll and cumulative temperature at different time scales

除大坝外，采样前3天的积温对千岛湖浮游植物的影响大于采样前7日积温，且不同区域的浮游植物对积温的响应由大到小为：过渡区＞河流区＞湖泊区，入库流量携带了营养盐进入库区，为浮游植物的生长提供了条件，但同时也带入了较多悬浮颗粒物，流速也较大；而过渡区的水流速度变缓，悬浮颗粒物的沉降速率增大，水体光照条件改善，为浮游植物的生长繁殖提供了条件。位于湖泊区的大坝，其透明度最高，相关研究表明，当透明度增大时，就会有更强的紫外线进入水下，UVR会破坏浮游植物色素、降低光合速率，影响其生长（Bracher，2000；Llabrés，2010；王锦旗，2015）；另一方面，夏季大坝的总磷营养盐平均浓度（0.028±0.004）mg/L低于三潭岛（0.035±0.005）mg/L，而千岛湖是磷限制性水体，较低的磷浓度限制了大坝区域浮游植物的生长（韩博平，2010）。

志谢：孙祥、余茂蕾等人协助了样品的采样及前处理，周永强在水文数据收集过程中给与了帮助，郑泽霖、张兰英实验员协助对样品进行分析与处理，在此一并表示感谢。

参考文献

白杨，张运林，周永强，等，2016. 千岛湖水温垂直分层的空间分布及其影响因素[J]. 海洋与湖沼，47(5)：906－914.

陈峰，唐访良，徐建芬，等，2014. 千岛湖表层沉积物中有机氯农药的残留特征及生态风险评价[J]. 湖泊科学，26(4)：593－599.

陈江海，2015. 千岛湖现状水质评价及纳污能力研究[J]. 资源节约与环保，(3)：250－251.

陈宇炜，陈开宁，胡耀辉，2006. 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，18(5)：550－552.

范志伟，郝庆菊，黄哲，等，2017. 三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素[J]. 环境科学，38(1)：129－137.

高伟，陈岩，徐敏，等，2013. 抚仙湖水质变化(1980－2011 年)趋势与驱动力分析[J]. 湖泊科学，25(5)：635－642.

国家环境保护总局，2002. 水和废水监测分析方法（第 4 版）[M]. 北京：中国环境科学出版社.

韩博平，2010. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学，22(2)：151－160.

韩晓霞，朱广伟，吴志旭，等，2013. 新安江水库(千岛湖)水质时空变化特征及保护策略[J]. 湖泊科学，25(6)：836－845.

兰佳，吴志旭，李俊，等，2014. 新安江水库浮游植物群落特征及影响因素分析[J]. 中国环境监测，30(2)：40－46.

李培培，2010. 千岛湖鲢鳙鱼的生态化学计量学及其驱动的养分再循环[D]. 上海：上海海洋大学.

梁斐斐，蒋先军，袁俊吉，等，2012. 降雨强度对三峡库区坡耕地土壤氮、磷流失主要形态的影响[J]. 水土保持学报，26(4)：81－85.

林秋奇，韩博平，2001. 水库生态系统特征研究及其在水库水质管理中的应用[J]. 生态学报，21(6)：1034－1040.

刘蕾，肖利娟，韩博平，2008. 一座南亚热带小型贫营养水库浮游植物群落结构及季节变化[J]. 生态科学，27(4)：217－221.

刘流，刘德富，肖尚斌，等，2012. 水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响[J]. 环境科学，33(9)：3046－3050.

刘其根，王钰博，陈立侨，等，2010. 保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响[J]. 生态学报，30(10)：2774－2783.

罗献宝，文军，骆东奇，等，2006. 洪水胁迫因子对千岛湖水质的影响与风险评估[J]. 中国生态农业学报，14(3)：118－121.

吕唤春，2002. 千岛湖流域农业非点源污染及其生态效应的研究[D]. 杭州：浙江大学.

马腾飞，黄莹波，2015. 高州水库氮磷营养盐变化特征及水质管理对策[J]. 生态科学，34(1)：31－37.

邱华北，商立海，李秋华，等，2011. 水体热分层对万峰湖水环境的影响[J]. 生态学杂志，30(5)：1039－1044.

盛海燕，吴志旭，刘明亮，等，2015. 新安江水库近 10 年水质演变趋势及与水文气象因子的相关分析[J]. 环境科学学报，35(1)：118－127.

盛海燕，虞左明，刘明亮，等，2014. 千岛湖冬季浮游植物光合活性[J]. 生态学杂志，33(2)：365－372.

孙祥，朱广伟，笪文怡，等，2018. 水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响[J]. 环境科学，39(3)：1129－1140.

王锦旗，郑有飞，薛艳，等，2015. 紫外辐射对水生生物的影响研究进展[J]. 生态学杂志，34(1)：263－273.

王炜，方志发，余卫东，2003. 千岛湖蓝藻密度制约因素分析[J]. 黑龙江环境通报，27(2)：60－63.

温海广，周劲风，李明，等，2011. 流溪河水库流域非点源溶解态氮磷污染负荷估算[J]. 环境科学研究，24(4)：387－394.

文军，2004. 千岛湖区域生态风险评价研究[D]. 长沙：中南林学院.

夏品华，林陶，李存雄，等，2011. 贵州高原红枫湖水库季节性分层的水环境质量响应[J]. 中国环境科学，31(9)：1477－1485.

徐冯迪，高扬，董文渊，等，2016. 我国南方红壤区氮磷湿沉降对森林流域氮磷输出及水质的影响[J]. 生态学报，36(20)：6409－6419.

杨丽丽，何光喜，胡忠军，等，2013. 鲢鳙占优势的千岛湖浮游动物群落结构特征及其与环境因子的相关性[J]. 水产学报，37(6)：894－903.

杨梅玲，2013. 几个主要生态过程对千岛湖 N、P 循环的影响[D]. 上海：上海海洋大学.

余员龙，2010. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布格局及其与主要环境因子的关系[D]. 上海：上海海洋大学.

余员龙，任丽萍，刘其根，等，2010. 2007－2008 年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素[J]. 湖泊科学，22(5)：684－692.

俞焰，刘德富，杨正健，等，2017. 千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素[J]. 环境科学，38(4)：1393－1402.

张德林，陆佳麟，张佳婷，等，2016. 气象条件对淀山湖水质的影响[J]. 湖泊科学，28(6)：1235－1243.

张恒，曾凡棠，房怀阳，等，2011. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响[J]. 环境科学学报，31(5)：927－934.

张红举，彭树恒，周娅，等，2014. 千岛湖现状污染负荷分析

与限制排污总量研究[J]. 水资源保护,(4):53-56.

张欣,徐高福,沈栋伟,等,2007. 千岛湖岛屿苦槠(*Castanopsis sclerophylla*)种群的维持和天然更新[J]. 生态学报,27(2):424-431.

张振克,孟红明,殷勇,2006. 中国水库环境面临的主要问题及其对策[J]. 科技导报,24(12):82-84.

张正德,吴世萍,许亚群,等,2016. 江苏横山水库浮游植物群落结构的动态变化[J]. 水生态学杂志,37(1):53-61.

赵新民,王军,朱淑君,2005. 千岛湖水体叶绿素a时空变化特征及其影响因子分析[J]. 浙江树人大学学报,5(5):99-103.

周小玉,2012. 千岛湖浮游藻类演替格局与环境因子的关系及其机理初探[D]. 上海:上海海洋大学.

Adrian R, O'Reilly C M, Zagarese H, et al, 2009. Lakes as sentinels of climate change[J]. Limnology & Oceanography, 54(6part2): 2283-2297.

Bracher A U, Wiencke C, 2000. Simulaion of the effects of naturally enhanced UV radiation on photosynthesis of Antarctic phytoplankton [J]. Marine Ecology Progress, 196(4):127-141.

Huang C, Wang X, Yang H, et al, 2014. Satellite data regarding the eutrophication response to human activities in the plateau lake Dianchi in China from 1974 to 2009 [J]. Science of the Total Environment, 485/486(1):1-11.

Huang T L, Li X, Ma W X, et al, 2014. Dynamic characteristics of nutrients and causal analysis in eutrofic reservoir: a case study of Shibianyu reservoir[J]. Desalination & Water Treatment, 52(7/9):1624-1635.

Lee J H, Kim J M, Kim D S, et al, 2010. Nutrients and chlorophyll-a, dynamics in a temperate reservoir influenced by Asian monsoon along with in situ nutrient enrichment bioassays[J]. Limnology, 11(1):49-62.

Li Y, Zhang Y, Shi K, et al, 2017. Monitoring spatiotemporal variations in nutrients in a large drinking water reservoir and their relationships with hydrological and meteorological conditions based on Landsat 8 imagery [J]. Science of the Total Environment, 599/600:1705-1717.

Li Y, Zhang Y, Shi K, et al, 2018. Spatiotemporal dynamics of chlorophyll-a in a large reservoir as derived from Lands at 8 OLI data: understanding its driving and restrictive factors[J]. Environmental Science and Pollution Research, 25(2): 1359-1374.

Llabrés M, Agustí S, 2010. Effects of ultraviolet radiation on growth, cell death and the standing stock of Antarctic phytoplankton[J]. Aquatic Microbial Ecology, 59 (2):151-160.

Oenema O, Roest C W J, 1998. Nitrogen and phosphorus losses from agriculture into surface waters; the effects of policies and measures in the Netherlands[J]. Water Science and Technology, 37(3): 19-30.

Qiao Z, Huo D, Zhang J, et al,2015. The distribution and molecular identification of the microcystis aeruginosa, in Yuqiaoreservoir[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 333:43-51.

Qin B, Zhu G, Gao G, et al, 2010. A drinking water crisis in lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management[J]. Environmental Management, 45 (1):105-112.

Wilhelm S, Adrian R, 2010. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton[J]. Freshwater Biology, 53(2):226-237.

Wu Z, Zhang Y, Zhou Y, et al, 2015. Seasonal-Spatial Distribution and Long-Term Variation of Transparency in Xin'anjiang Reservoir: Implications for Reservoir Management[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 12(8):9492-507.

Xiao Y, Li Z, Guo J, et al, 2016. Succession of phytoplankton assemblages in response to large-scale reservoir operation: a case study in a tributary of the three gorges reservoir, China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 188(3):1-20.

Xu H, Paerl H W, Qin B, et al, 2015. Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic lake Taihu, China[J]. Environmental Science & Technology, 49(2):1051.

Zhang Y, Shi K, Zhou Y, et al, 2016. Monitoring the river plume induced by heavy rainfall events in large, shallow, Lake Taihu using MODIS 250 m imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 173: 109-121.

Zhang Y, Wu Z, Liu M, et al, 2015. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China) [J]. Water Research, 75:249-258.

Zhou Y, Zhang Y, Jeppesen E, et al, 2016. Inflow rate-driven changes in the composition and dynamics of chromophoric dissolved organic matter in a large drinking water lake[J]. Water research, 100: 211-221.

(责任编辑 万月华)

Influence of Hydrometeorological Processes on Nutrient Dynamics in Qiandao Lake

DA Wen-yi[1,2], LI Yun-xiang[1], ZHU Guang-wei[2], XU Hai[2], LIU Ming-liang[3], LAN Jia[4], WANG Yu-cheng[4], WU Zhi-xu[4], ZHENG Wen-ting[4]

(1.China West Normal University, College of Environmental Science and Engineering, Nanchong 637002, P.R. China;
2.State Key Laboratory of Lake Environment and Science, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China;
3.Hangzhou Institute of Environmental Sciences, Hangzhou 310000, P.R.China;
4.Hangzhou Bureau of Ecology and Environment Chun′an Branch, Hangzhou 311700, P.R.China)

Abstract: Reservoirs play an important role in regulating water quality in aquatic systems and nutrient loading in reservoirs is influenced by hydrological and meteorological process. Qiandao Lake (Xin′anjiang Reservoir) is the largest artificial fresh water lake and a strategic water resource in the Yangtze River delta area. In this study, we analyzed the effects of hydrological and meteorological process on the spatial-temporal distribution of nutrients in Qiandao Lake. The objectives were to explore the nutrient dynamics and better understand the underlying factors for reservoirs in the southeastern mountainous area of China and to provide a database for preserving the ecology and managing the water resources of Qiandao Lake. From August 2016 to December 2017, physicochemical variables related to water quality were monitored monthly at five sampling sites (three sites in the riverine zone, one site in the transition zone and one in the lacustrine zone) and hydrometeorological conditions were recorded, including air temperature, inflows and rainfall. Results are as follows: (1) The ranges of TN and TP in Qiandao Lake were 0.69 - 2.06 mg/L and 0.004 - 0.096 mg/L and averaged (1.12±0.26) mg/L and (0.030±0.021) mg/L. Nutrient concentrations exhibited obvious spatial-temporal variation. The concentrations of TN and TP both decreased from riverine zone to lacustrine zone. The TN concentration in Qiandao Lake peaked during winter and spring, and TP peaked in the spring. (2) Rainfall, inflow and air temperature varied significantly by season ($P<0.01$). Rainfall and inflow from March to July exceeded 70% of the annual total and the highest temperatures were in July and August, averaging 30℃. (3) TN and TP concentrations displayed stronger correlation with cumulative inflow than with rainfall and the cumulative inflow and rainfall affected phosphorus more than nitrogen. The response time of nutrient concentrations to inflow varied by zone, with the riverine zone responding the most quickly, followed by the transition zone and then the lacustrine zone, reflecting the lag time of nutrients being carried downstream and then mixing in the reservoir. (4) Temperature influenced TN and TP levels by affecting phytoplankton growth and therefore the proportions of soluble and particulate nitrogen and phosphorus. TN and TP levels were more closely related with the cumulative temperature (3 -7 days) in the transition zone than the riverine zone, due to the larger sensitivity of phytoplankton growth to variation of nutrient concentrations. In summary, hydrometeorological conditions exerts significant but complex effects on the nutrient condition in large reservoirs. The effects of physical mixing and sedimentation, chemical alteration and biomass accumulation lead to large spatial and temporal heterogeneity of nutrients. These unsynchronized ecological characteristics should be considered when developing water quality management plans for reservoirs.

Key words: Qiandao Lake; nutrient; hydrological processes; meteorological factors