J. Lake Sci.(湖泊科学),2010,**22**(5):684-692
http://www.jlakes.org. E-mail:jlakes@niglas.ac.cn
© 2010 by *Journal of Lake Sciences*

2007－2008 年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素*

余员龙[1],任丽萍[2],刘其根[1]**,史　文[1],刘国栋[1],何光喜[2],陈来生[2],洪荣华[2]
(1:上海海洋大学水产与生命学院,上海 201306)
(2:杭州千岛湖发展有限公司,淳安 311700)

摘　要:2007－2008 年对千岛湖水体中 5 个采样点(S1,S3,S4,S8,S9)的总氮、总磷、三态氮、溶解性总磷和可溶性活性磷等进行了不同深度的逐月监测,以研究探讨千岛湖营养盐的时空分布格局. 结果表明,两年间总磷、总氮和硝酸盐氮浓度都呈现从上游(S1)至下游(S9)逐渐下降的趋势;2007－2008 年汛期(3－7 月)位于千岛湖上游新安江干流段的样点 S1 各种营养盐均为全年最高. 但是 2007 年与 2008 年营养盐时空分布差异显著. 2008 年汛期(3－7 月),S1 的总磷和总氮浓度分别极显著低于和高于 2007 年同期. 相对于 2007 年,虽然 2008 年具有更高的温度,但没有增强水体热稳定性. 2008 年强对流天气一方面通过打破水体热分层和促进水体混合,另一方面通过雨水带来大量的地表营养盐来影响营养盐的分布. 汛期高浓度的总磷在 1－2 个月内平均降低 64.4%,最大降低 88.6%,显示千岛湖生态系统具有较强的净化能力. 分析结果显示千岛湖营养盐时空分布总体格局是由水文、生物以及人类活动等各种因素之间的相互作用所产生的综合效应而形成的,而极端天气能够改变这一格局.
关键词:营养盐;时空分布;千岛湖;分层;气候;水文

Temporal and spatial distribution of nutrients and the influence factors of Lake Qiandao during 2007－2008

YU Yuanlong[1], REN Liping[2], LIU Qigen[1], SHI Wen[1], LIU Guodong[1], HE Guangxi[2], CHEN Laisheng[2] & HONG Ronghua[2]
(1: *College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *P. R. China*)
(2: *Hangzhou Qiandao Development Co. Ltd., Chun'an* 311700, *P. R. China*)

Abstract: The temporal and spatial distribution patterns of nutrients (N and P) were investigated according to the monthly monitoring the total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO_3-N), nitrite nitrogen (NO_2-N), ammonia nitrogen(NH_4-N), total phosphorus (TP) and soluble reactive phosphorus (SRP) at five sampling sites(S1,S3,S4,S8,S9) in Lake Qiandao during 2007－2008. The results showed that the concentration of TP, TN and NO_3-N decreased gradually from upstream to downstream (from S1 to S9) during the two years. The concentrations of various nutrients at the upstream sampling site S1 located in the mainstream of Xin'anjiang River peaked during the rainy season (March-July). But there was much difference between 2007 and 2008 in the temporal and spatial distribution of nutrients. The concentration of TP and TN at sampling site S1 during rainy season in 2008 was very significantly lower and higher than those in 2007 respectively. Contrasted with 2007, although the water temperature was higher in 2008, and it had not increased the stability of the water column. The severe convective weather in 2008, by disturbing water stratification and increasing water mixing and carrying much nutrient to the lake, affected the distribution patterns of nutrients. The high level of total phosphorus concentration during flood seasons was reduced by 64.4% averagely and 88.6% in maximum within 1－2 months, suggesting the strong self-purification capacity of Lake Qiandao ecosystem. Our results suggested that the comprehensive effects made by the interaction among hydrology, organism, and human production activities determine the general patterns of tem-

---

* 国家自然科学基金项目(30670388)、国家科技支撑计划十一五项目(2006BAD03B02－07)和上海市重点学科建设项目(Y1101)联合资助. 2010－01－14 收稿;2010－03－17 收修改稿. 余员龙,男,1984 年生,硕士研究生;E-mail: yuanlong.2008@yahoo.com.cn.
** 通讯作者;E-mail:qgliu@shou.edu.cn.

poral and spatial distributions of nutrients of Lake Qiandao, but which could be changed on extreme whether.
Keywords: Nutrient; spatial and temporal distribution; Lake Qiandao; stratification; extreme whether; hydrology

氮磷等营养元素的含量及其比例不但为湖泊生态系统的正常运转提供了必需的物质基础，对其初级生产力和渔产力产生重要影响[1]，而且还与湖泊生态系统的发育和营养演化密切相关[2]. 因而历年来为国内外湖泊生态学研究所关注[1-6]，特别是在湖泊富营养化治理中，对于氮、磷究竟是控制哪一个更重要，更是引起了生态学界的广泛关注甚至争议[7-9]. 水体的营养盐含量，一方面通过上行效应对水生生物的分布与生长产生重要影响，另一方面其本身又会受到水体食物网结构的强烈（下行）影响. 我国湖泊/水库食物网的一个显著特点就是，这些水体通常人工大量放养鲢、鳙，使其成为湖泊特别是水层食物网（pelagic food web）中最主要的优势类群，从而不可避免地对湖泊生态系统的生态过程特别是营养物质循环格局产生重要影响；同时，我国的很多湖泊、水库还常常是各地重要的渔业生产基地，渔业利用本身，特别是不合理的渔业方式，如集约化网箱养殖使营养盐输入增加等，也对水体的营养盐动态产生影响，进而影响整个生态系统. 因此研究以放养鲢、鳙鱼为主的湖泊中营养盐的时空分布及其变动格局对这些湖泊的渔业利用和水环境保护均有重要指导意义.

虽然我国长江中下游湖泊多为浅水湖泊，以往研究也以这些浅水湖泊的营养盐变动较多[3-6]，但我国也有为数不少的大型人工深水湖泊——水库，如长江三峡、密云水库、千岛湖等. 由于水库是介于河流和湖泊之间的半人工水体，与湖泊相比，在水体形态、水动力学特征和生态系统结构等方面均存在明显差异[10-11]. 水库水动力学与用水模式直接相关，不同功能的水库其用水模式相差较大，水库水动力学过程因此存在明显差异，从而导致营养盐时空分布和变化规律的明显差异，并进而对浮游植物的种类组成和数量变动产生显著影响[12-14]. 因此水库的富营养化防治必须依赖对水库营养盐分布格局及其影响因素的研究. 千岛湖作为我国长江中下游地区的一座特大型水库，其用水量所占水体比例很小，水库水交换周期长达 2 年，因此也决定了千岛湖水体既是一座山谷型水库，同时也具有了湖泊型水库的典型性状. 其营养盐的分布和变动格局与湖泊/水库的社会功能、生态系统的结构和环境管理的模式具有密切的关系.

千岛湖是一个集旅游、航运、水力发电、水资源供应和渔业生产等多个社会功能于一体的人工深水湖泊，其水环境质量对地区的经济和社会发展具有极其重要的影响，因而有关其营养盐来源和水体营养状况一直受到关注[15-20]，特别是 1998、1999 年发生大面积蓝藻水华后，对千岛湖水质的研究受到了重视[21-27]，并自 2000 年起在千岛湖实施了以鲢鳙放养为主要措施旨在预防控制蓝藻水华和改善水质的保水渔业试验[28]，因此，当前千岛湖的水质状况必然与十年前发生了很大的改变. 对当前千岛湖的营养盐时空分布及其影响因素开展研究，不但有助于了解千岛湖的营养状况及其预测其未来演化趋势，同时也可为合理评价保水渔业对千岛湖水质的中长期影响以及为类似于千岛湖的深水湖泊/水库如三峡水库等今后的水环境保护提供重要的依据.

1 材料与方法

1.1 千岛湖概况

千岛湖位于浙皖交界处，主体在浙江省淳安县境内（29°22′－29°50′N，118°34′－119°15′E），属亚热带季风气候，气候温暖，雨量充沛，年平均气温 16.9℃. 千岛湖呈树枝型，岸线总长度 1406km，分为东北、东南、西北、西南、中心五大湖区. 千岛湖水量主要来自地表径流，共有大小入库支流 30 余条，其中新安江是最主要的入库径流，占入库地表径流总量的 60% 左右. 千岛湖多年平均入库水量 $94.5\times10^8 m^3$，出库水量为 $91.07\times10^8 m^3$. 千岛湖水位 108m 时，库区面积为 $573km^2$，总库容为 $178.4\times10^8 m^3$，平均水深 30.44m.

1.2 采样点设置

根据千岛湖的水体形态、水流特点等，即按照从上游至下游设置 5 个采样点（图 1），分别是赤山（S1，118°45′08.5″E，29°42′37.1″N），温馨岛（S3，119°01′54.1″E，29°38′105″N），猴岛（S4，118°57′56.6″E，29°34′47.7″N），姥山（S8，119°00′37″E，29°33′12″N），密山（S9，119°08′55.5″E，29°31′46.8″N）. 其中 S1 位于西北湖区，S3、S4 位于中心湖区，S8、S9 位于东南湖区.

1.3 水样采集、水化学指标测定和数据处理

水样使用 20L 采水器采集，回实验室后立即进行各种水化学测定. 水样采集在每月中旬进行. 根据各采

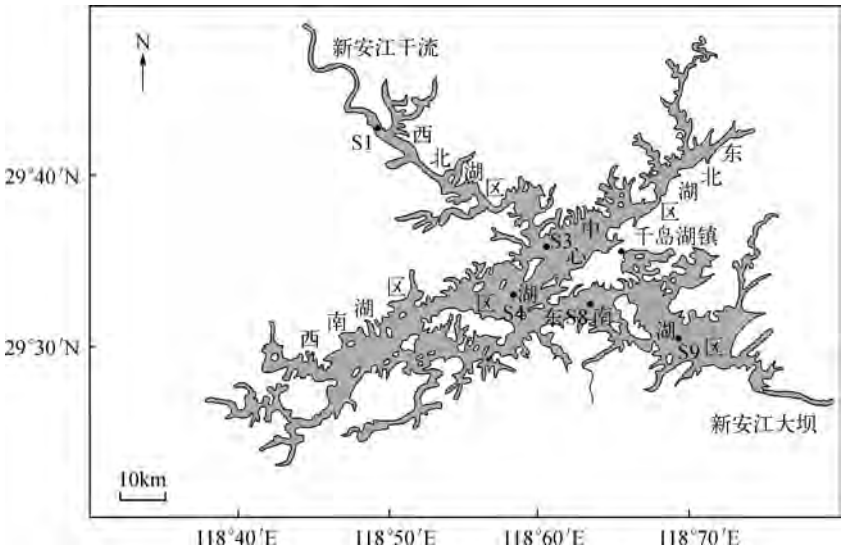


图 1 千岛湖地形图及采样点设置

Fig. 1 Map of Lake Qiandao, showing the sampling stations

样点水深情况及生态特点,对各点水样进行相应的分层采集. 其中,S1 按照 0.5、4、8、12、16、20、25m 等水层依次采集;S4 按照 0.5、4、8、12、16、20、25、30m 等水层依次采集;S9 按照 0.5、4、8、12、16、20、25、30、35、40、45、50m 等水层依次采集;S3 和 S8 按照 0.5、4、8、12、16、20、25、30m 等水层进行混合采样.

透明度测定使用 Secchi 盘进行;温度和溶解氧测定使用 YSI58 型溶氧仪现场测定;总磷、总氮采用国家地表水质量监测标准进行. 其中 TN 测定用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-1989),TP 测定采用磷钼酸铵比色法(GB11893-1989),其他指标测定是采用中国环境科学出版社出版的《水和废水监测分析方法》中的方法:硝酸盐氮采用紫外分光光度法 B;亚硝酸盐氮采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法 A;氨氮采用纳氏试剂光度法 A;溶解性总磷和溶解性磷酸盐采用钼锑抗分光光度法 A;高锰酸盐指数采用高锰酸钾酸性法.

本文使用了美国 GOLDEN 软件公司的 Surfer 8.0 作图.

2 结果

2.1 温度、溶解氧、高锰酸盐指数的时空动态

2007 和 2008 年的 4 - 11 月份,S1、S4、S9 样点均发生较强的水体热分层,形成明显的温跃层,温跃层发生在约 8 - 20m 水层;但与 2007 年相比,2008 年各样点中下层 12 - 35m 绝大部分水层水温高于 2007 年,各样点分别平均高出 3.3℃、2.5℃和 2.9℃,使得在温跃层及其以下水层的水温随水深下降梯度 2008 年小于 2007 年(图 2). 这说明千岛湖整个水柱的热学特性在不同的年份是不一样的,由于 2008 年整个水柱的平均温度普遍高于 2007 年,可能对 2008 年水柱的生产力和湖泊的生态过程有促进作用. 千岛湖的同温层(垂直对流)主要出现在 12 月至翌年的 3 月,但与 2007 年相比,2008 年的同温层出现的时间较 2007 年长,至 4 月份仍处在同温层.

2007 - 2008 年千岛湖各样点的溶氧分布也呈现出与水温相关联的垂直分层现象,在出现温跃层的季节,三个样点的溶氧也出现了"氧跃层":即出现了随水深增加,氧气含量急速下降的水层,同时不难看出,S1、S4 和 S9 开始发生氧分层的位置依次加深,分别在 5m、8m、10m 左右. 这与千岛湖各点透明度变化趋势相似(图 3),这暗示水体中光合作用所能达到的深度对溶解氧的分布影响显著,但是也不能排除水生生物在这一区域活动强烈对其产生较大的影响,同时水体温度对其也有影响.

高锰酸盐指数的时空分布与水温和溶解氧的显著不同,且相互之间的关联性不明显(图 2). 高锰酸盐指

数的分布主要呈现出一定的季节变化格局，2007 年高峰主要出现在上半年（2－5 月），而 2008 年 S1 高锰酸盐指数有春季和秋季两个高峰，S4 和 S9 高峰出现在下半年. 而且从 S1 到 S4 再到 S9，高锰酸盐有逐渐下降和均匀的趋势. 总体上，2008 年高锰酸盐指数年均值显著大于 2007 年（$P<0.05$）.

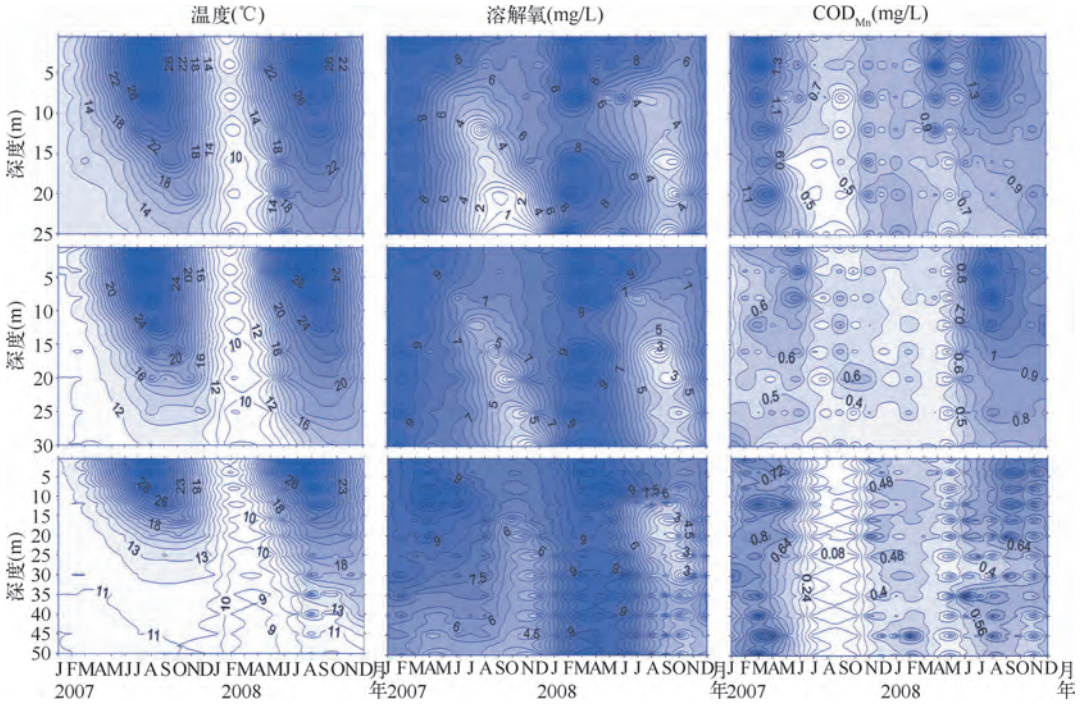


图 2 2007－2008 年 S1（上）、S4（中）、S9（下）温度、溶解氧、高锰酸盐指数垂直分布随季节变化情况

Fig. 2 Vertical and temporal variation of water temperature, DO and COD in sampling stations S1 (upper), S4 (middle) and S9 (lower) during 2007 to 2008

2.2 营养盐的赋存形态

对千岛湖 2007 和 2008 年总氮（TN）、三态氮（NH_4-N、NO_2-N、NO_3-N）、总磷（TP）、溶解性总磷等的检测结果（表 1）表明，水体的总氮主要以总无机氮（TIN）特别是 NO_3-N 形式存在，占 TN 的 80% 左右，其次是氨氮. 各采样点亚硝酸盐氮所占比例很小，并且从上游至下游逐渐下降. 与亚硝酸盐氮相反，溶解性总磷占总磷的比例从上游至下游逐渐升高.

表 1 2007－2008 年各采样点三态氮、溶解性总磷分别占总氮、总磷比例（%）

Tab. 1 The ratio of nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, ammonia nitrogen and soluble reactive phosphorus in TN and TP respectively during 2007－2008

营养盐	S1	S3	S4	S8	S9
硝酸盐氮	80.15	77.51	77.54	82.27	76.16
亚硝酸盐氮	1.52	0.77	0.46	0.41	0.32
氨氮	7.98	11.11	7.75	9.14	7.12
溶解性总磷	13.33	12.14	18.08	24.81	24.79

2.3 营养盐的时空分布

2.3.1 氮的时空分布　总氮和硝酸盐氮垂直分布年际变化基本一致（图 3），在水平方向上，从上游的 S1 至下游的 S9，总氮和硝酸盐氮浓度依次有明显下降的趋势（图 3，图 4a，图 4b）. 与 2007 年相比，2008 年各采样点总氮和硝酸盐氮浓度均有小幅下降. 在垂直方向上，2008 年的总氮和硝酸盐氮的垂直分布都存在明显

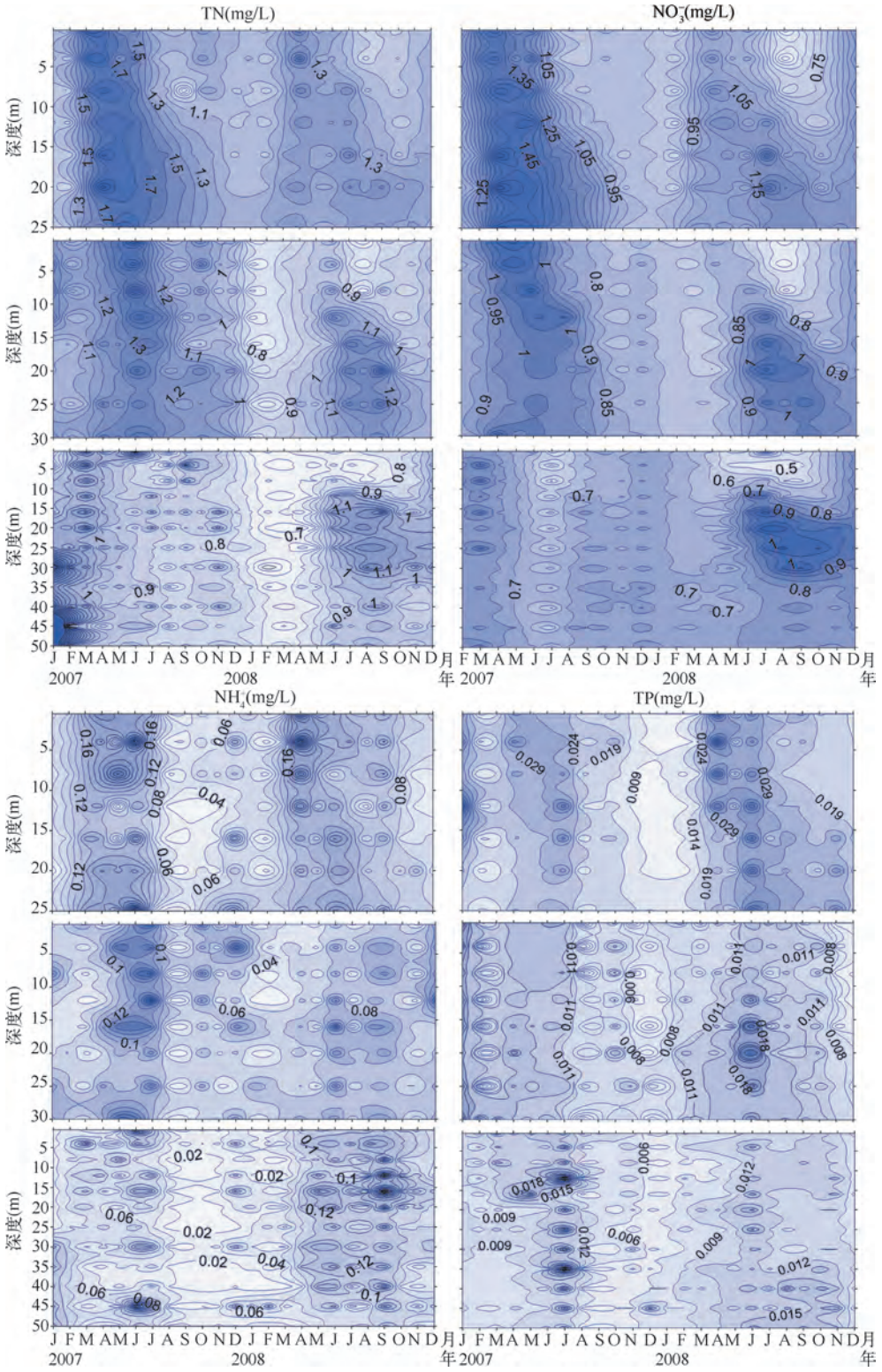


图 3 2007－2008 年 S1(上)、S4(中)、S9(下)总氮、硝酸盐氮、氨氮和总磷垂直分布随季节变化情况

Fig. 3 Vertical and temporal variation of TN, nitrate nitrogen, ammonia nitrogen and TP in sampling stations of S1(upper), S4(middle) and S9(lower) in 2007 and 2008

的分层. 在时间上，2007 年 3－7 月 S1、S4、S9 总氮和硝酸盐氮浓度都是全年最高，并且比其他季节高出很多. 而 2008 年汛期地表径流只对 S1 有明显的影响. 除 S1 和汛期外，各采样点亚硝酸盐氮浓度 2007－2008 年长期处于非常低的水平（平均 0.005 mg/L）. 氨氮分布与总氮和硝酸盐氮不同，两年的数据均显示氨氮浓度随时间变化较大，呈现周期性的增加和减少. 在水平空间上，2007 年呈现上游较高，下游较低（图 4d）；而相对于 2007 年，2008 年 S3、S4 氨氮浓度明显下降，而 S8、S9 氨氮浓度却有较大上升.

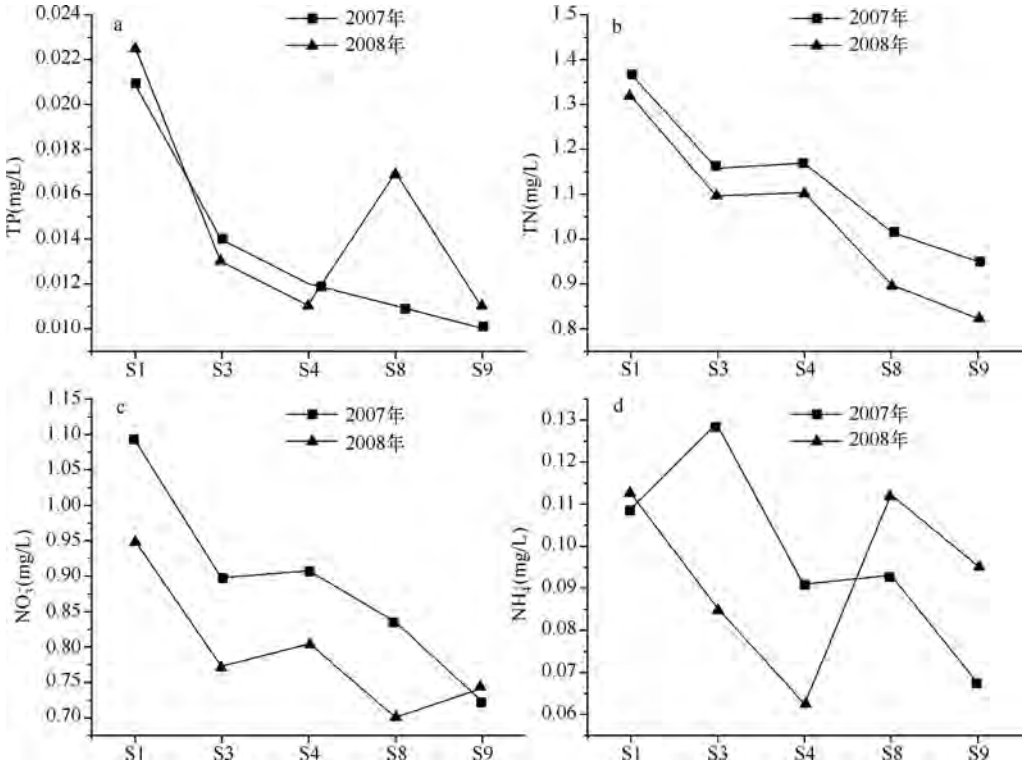


图 4 千岛湖各采样点 2007 和 2008 年总磷、总氮、硝酸盐氮和氨氮浓度

Fig. 4 Concentrations of TP, TN, nitrate nitrogen and ammonia nitrogen in all sampling stations of Lake Qiandao in 2007, 2008

2.3.2 磷的时空分布　2007 年总磷垂直分布显示 S1 和 S4 在 4－7 月份期间总磷浓度明显高于其他各月（图 3），S9 在 3－6 月份在水体上层出现较小的高浓度总磷的水团，同时容易看出，S9 在 7 月份各水层平均浓度为 0.029mg/L，明显高于其他月份. 2007 年 8－12 月各采样点总磷都处于全年较低水平，全湖平均为 0.0087mg/L，溶解性总磷普遍低于最低检测水平. 2008 年 S1、S4、S9 总磷浓度呈现明显的变化规律：各点总磷浓度最大值均出现在 6 月份，S1 和 S9 出现分层，其中 S1 在 8－12 月份的 10－15m 出现分层，上层低，下层高，而 S9 在 7－11 月份总磷分布出现分层，并分为三层，中间层（16－35m）浓度较低. 从水平方向看，2007 年上游至下游总磷浓度呈现逐渐下降趋势；而 2008 年由于 S8 总磷比 2007 年有显著升高而改变了这种趋势.

3 讨论与分析

3.1 千岛湖营养盐时空分布与环境因子关系

3.1.1 地表径流对千岛湖营养盐分布影响　从水平方向看，除 2008 年 S8 总磷外，两年间总磷、总氮和硝酸盐氮基本上都呈现上游大于下游；在时间上，2007－2008 年 S1 和 S4 在汛期（3－7 月）的各种营养盐、高锰酸盐指数均为全年最高或较高水平. 这表明新安江上游的地表径流是千岛湖营养盐主要来源，对千岛湖营养

盐分布影响非常大,这与韩伟明等[15],严力蛟等[21],吕焕春等[16-18],王飞儿等[19]和谭湘萍等[26]的研究结果相符.经分析显示,2008 年汛期,S1 的总磷浓度极显著大于($P<0.01$)2007 年,而同期 S1、S4 总氮浓度极显著小于($P<0.01$)2007 年(图 3).2008 年汛期,千岛湖出现近十年罕见暴雨,湖区水位接近 108m 高程,是自 1999 年以来最高水位.2008 年暴雨引入的大量泥沙可能是导致高浓度的总磷主要的原因,而带来大量雨水则会冲淡总氮的浓度,可能是 2008 年千岛湖上游总氮浓度较 2007 年低的原因.

3.1.2 气象、水文等对千岛湖营养盐分布影响 Catherine[29]等报道显示:气候变暖加强了水体分层,抑制了下层水体营养盐向表层转移,最终导致水生态系统的生产力下降.该结果与 2007 年相似,即由于夏季水体温度较高,同时气候稳定,进而形成较稳定的水体分层,从而导致底层营养盐未能供应到表层,最终导致 2007 年的较低生产力.而 2008 年夏季温度虽然高于 2007 年,但是 2008 年高锰酸盐指数年均值显著大于 2007 年,这从侧面反映 2008 年浮游植物生物量可能大于 2007 年,从镜检来看确实如此.这可能与夏秋季突变天气有关.强对流天气(暴雨、台风、季风等)影响水体分层而产生的一系列效应[4,10,30-31].相对于 2007 年,2008 年千岛湖水温有 3 个明显特点:温跃层跨度较大,全年平均温度较高,下层温度较高.从气象部门了解到,2008 年夏季和秋季发生近 10 年少见的 5 次暴雨,7-10 月发生 4 次强台风,夏季和秋季气温较常年正常略偏高.这些气象和水文的剧烈变化影响水体分层和水温,增加了水体的混合和温度,推测是导致 2008 年与 2007 年水温时空分布明显差别的主要原因.夏季突发和高温天气对营养盐会产生各种显著的影响.首先,降雨可以带入大量的外源营养盐,间歇地弥补营养盐的消耗.其次,2008 年高温天气和突变天气的相互作用促使水温上升和水体混合加强.一方面,水温升高不仅加速有机碎屑的降解和营养盐的释放,而且加快营养盐在水体中的自由扩散速度;另一方面,水体混合的加强,虽然不足以打破水体分层,但在一定程度上可抑制磷沉降,增加对磷的循环利用.上述各因素都促进了上层水体营养盐供应的增加,同时加上较高的水温,势必促进 2008 年浮游植物的生长.与 2008 年相比,2007 年 8-10 月份出现非常显著的磷限制,在 8-10 月份各点高锰酸盐指数均处于全年最低,而且 S9 各水层高锰酸盐指数均处于 0.15 以下,极显著小于 2008 年同期水平($P<0.01$).这显示夏季水体混合程度的大小对水体磷的供应量以及初级生产力大小有显著影响.

以上结果表明,湖泊的热分层和混合方式决定水体混合的频率和程度,对湖泊理化、生物学和生态学功能具有深远意义[10].同时,多发突变天气可以通过间歇地增加外源营养盐输入、改变水体分层结构和水温来影响营养盐的分布.

3.2 浮游生物对千岛湖营养盐分布的影响

虽然 2008 年夏秋季(6-11 月)水体的混合度较 2007 年强,但是 2008 年 6-11 月营养盐浓度(尤其是氮素)呈现上层水体营养盐浓度明显小于下层水体的分层分布,而 2007 年无明显分层分布(图 3).这是由于 2008 年浮游植物生长旺盛,吸收了上层水体中的大量营养盐.2008 年 6-11 月 S1、S4、S9 上层水体(0-12m)高锰酸盐指数浓度较高部分反映了浮游植物生物量.而下层有较高浓度的营养盐是由于源于表层水体的浮游生物的碎屑在中下层水体被微生物大量分解后形成大量无机盐(特别是硝酸盐氮)[32].

从上可以看出,一方面,浮游植物通过吸收上层水体营养盐影响上层水体营养盐的分布;另一方面又通过沉降而起到直接去除水体营养盐的作用.而微生物则起到物质循环的作用.

3.3 千岛湖净化作用对千岛湖营养盐分布的影响

2007-2008 年汛期 S1、S4、S9 各层水体中高浓度总磷在一个月内就下降很多,平均降低 64.4%,最大降低 88.6%,这显示千岛湖生态系统对磷的净化能力非常强.水体净化能力包括生物的和非生物的净化能力,沉降可能是深水湖泊去磷的主要非生物净化方式[2].每年汛期特别是大暴雨过后,千岛湖湖水变浑浊,含大量的颗粒物质.并且进一步分析显示 2007 年相应时期的溶解性总磷均低于检测线.因此推测,汛期千岛湖总磷快速下降主要是由颗粒磷的快速沉降引起的.与总磷相比,总氮浓度在短期内迅速下降较小,平均降低 10%,而且分析表明其中主要为溶解性氮的下降,说明沉降对其影响不大.这些结果表明汛期地表径流所输入的总氮对全年总氮分布影响显著,总磷由于沉降量较大而对全年影响有限.

3.4 网箱养殖对千岛湖营养盐分布的影响

相对于总氮,虽然总磷浓度较低,但是我们也发现 2008 年 4 月份 S8 样点总磷浓度达到 0.039 mg/L 的

水平，导致 2008 年 S8 总磷平均浓度比其上游 S3、S4 分别高出 0.003、0.006mg/L，并明显高于 2007 年. 这是致使 2008 年千岛湖全湖平均总磷浓度上升的主要原因之一. 从当地了解到，2008 年初在离 S8 约 2000m 左右的地方开始网箱养殖鲫鱼. 该养殖基地规模较大，有网箱近 400 只，2008 年进箱鱼种 200 万尾. 我们推测，该养殖基地可能是引起 S8 总磷含量明显升高的主要原因. 这里有以下几个原因：新安江是千岛湖营养盐主要来源；千岛湖其他主要支流虽然在东南湖区有一条，但是位于 S9 下游，因此不可能影响 S8；千岛湖植被丰富，沿岸的泥沙进入湖中较少；总氮的含量却与 2007 年相似，这与新安江地表氮磷含量比不一样. 除总磷异常外，两年的氨氮含量也存在较大的差异. 我们研究显示（图 4d），相对于 2007 年，2008 年 S3、S4 氨氮浓度明显下降，而 S8、S9 氨氮浓度却有较大上升. 如果这些营养盐是来自于该养殖基地，那么其所带入的营养物质（磷、氨）对千岛湖水质的影响是非常严重的. 焦荔等的报道表明千岛湖网箱养殖对千岛湖湖区影响较明显[33]. 另外近几年养殖规模激增，存在分布密度过大、破坏自然水生资源、港湾区域水污染严重、影响交通航运等问题[34]. 因此，各部门应该继续重点加强网箱养殖、农业污染、水土流失、旅游业等的管理，这对保护千岛湖脆弱的生态系统具有重要意义.

4 小结

汛期地表径流对千岛湖中上游营养盐分布具有显著影响. 千岛湖生态系统对总磷具有较强的净化能力. 而对总氮的净化能力弱于总磷，即汛期地表径流所输入的高浓度总氮对全年总氮分布影响显著. 千岛湖总磷含量较低，因此控制总磷含量是控制千岛湖富营养化的有效对策.

类似于深水湖泊，千岛湖夏季形成的稳定水体热分层对营养盐分布影响显著. 强对流天气一方面通过雨水带来大量的地表营养盐，另一方面通过突然降温和大风来打破水体热分层和促进水体混合而影响营养盐在水体中的流动.

新安江上游环境状况和湖区水产养殖对千岛湖的富营养化造成巨大的压力. 对处于中营养向富营养过渡和钱塘江流域上游的千岛湖而言，进行富营养化防治具有重要的科研、社会和经济价值.

5 参考文献

[1] Vollenweider RA. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem Ist Ital Idrobiol*, 1976, **33**: 53-83.

[2] Wetzel RG. Limnology, lake and river ecosystems (Third Edition). Academic Press, 2001: 205-288.

[3] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学，2002，**14**(3)：194-202.

[4] 王东红，黄清辉，王春霞等. 长江中下游浅水湖泊中总氮及其形态的时空分布. 环境科学，2004，**25**：27-30.

[5] 张堂林，李钟杰，郭青松. 长江中下游四个湖泊鱼类与渔业研究. 水生生物学报，2008，**32**(2)：167-175.

[6] 张　路，范成新，王建军. 长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系. 湖泊科学，2008，**20**(3)：263-270.

[7] Schindler DW, Heck RE. Eutrophication: More nitrogen data needed. *Science*, 2009, **324**: 721-722.

[8] Schelske CL. Eutrophication: Focus on phosphorus. *Science*, 2009, **324**: 722.

[9] Jacoby CA, Frazer TK. Eutrophication: Time to adjust expections. *Science*, 2009, **324**: 723-724.

[10] Brian Moss. Ecology of freshwaters. Blackwell Scientific Publications, 1980: 11-35.

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

[12] Petr Znachor, Eliška Zapomělová, Klára Řeháková *et al*. The effect of extreme rain fall on summer succession and vertical distribution of phytoplankton in a lacustrine part of a eutrophic reservoir. *Aquat Sci*, 2008, **70**: 77-86.

[13] Han BP, Armengol J, Garcia JC *et al*. The thermal structure of San Reservoir (Spain NE): A simulation approach. *Ecol Mod*, 2000, **125**: 109-122.

[14] Naselli FL, Barone R. Importance of water-level fluctuation on population dynamics of cladocerans in a hypertrophic reservoir (Lake Arancio, south-west Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, 1997, **360**: 223-232.

[15] 韩伟明，胡水景，金　卫等. 千岛湖水环境质量调查与保护对策研究. 湖泊科学，1996，**8**(4)：337-344.

[16] 吕唤春，陈英旭，方志发等. 千岛湖水体营养物质的主导因子分析. 农业环境保护，2002，**21**(4)：318-321.

[17] 吕唤春，陈英旭，方志发等. 千岛湖流域坡地利用结构对径流氮、磷流失量的影响. 水土保持学报，2002，**16**(2)：91-93.

[18] 吕唤春,陈英旭,虞左明等. 千岛湖水体主要污染物动态变化及其成因分析. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2003,**29**(1):87-92.
[19] 王飞儿,吕唤春,陈英旭等. 基于 AnnAGNPS 模型的千岛湖流域氮、磷输出总量预测. 农业工程学报,2003,**19**(6):281-284.
[20] 文 军,罗献宝,骆东奇等. 千岛湖水体生态风险胁迫因子氮、磷预测模型应用研究. 水土保持研究,2005,**12**(6):65-67.
[21] 严力蛟,俞新华,方志发. 影响千岛湖水质的主要环境问题与富营养化防治对策. 当代生态农业,2001,(3):94-96.
[22] 王飞儿,吕唤春,陈英旭等. 千岛湖叶绿素 a 浓度动态变化及其影响因素分析. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2001,**30**(1):22-26.
[23] 李共国,虞左明等. 千岛湖轮虫群落结构及水质生态学评价. 湖泊科学,2003,**15**(2):169-176.
[24] 刘 英,王 珂,周 斌等. 千岛湖水体叶绿素浓度高光谱遥感监测研究初报. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2003,**29**(6):621-626.
[25] 吕唤春,王飞儿,陈英旭等. 千岛湖水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析. 应用生态学报,2003,**14**(8):1347-1350.
[26] 谭湘萍,闵 怀. 千岛湖生态环境主要问题及保护对策. 环境污染与防治,2004,**26**(3):200-203.
[27] 刘其根,陈立侨,陈 勇. 湖水华发生与主要环境因子的相关性分析. 海洋湖沼通报,2007,(1):117-123.
[28] 刘其根,陈马康,何光喜等. 保水渔业-大水面渔业发展的时代选择. 中国水产,2003,**11**:20-22.
[29] Catherine MO, Simone RA, Pierre DP *et al*. Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of Lake Tanganyika, Africa. *Nature*, 2003, **424**:766-768.
[30] Plisnier PD, Chitamwebwa D, Mwape L *et al*. Limnological annual cycle inferred from physical-chemical fluctuations at three stations of Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 1999, **407**: 45-58.
[31] 王雨春,朱 俊,马 梅等. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化. 湖泊科学,2005,**17**(1):54-56.
[32] Li Wen, Wu Fengchang, Liu Congqiang. Temporal and spatial distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in two small lakes on the Southwestern China Plateau. *Limnology*, 2008, **9**:163-171.
[33] 焦 荔,方志发,朱淑君. 千岛湖网箱养鱼对水质的影响. 环境监测管理与技术,2007,**19**(4):23-25.
[34] 陈顺友,余艳芝. 千岛湖网箱养鱼的现状及对策. 杭州农业科技,2007,**2**:14.