

千岛湖叶绿素 a 的时空分布及其与影响因子的相关分析*

李培培¹, 史文¹, 刘其根^{1**}, 余元龙¹, 何光喜², 陈来生², 任丽萍², 洪荣华²

(1: 上海海洋大学农业部水产种质资源与利用重点开放实验室, 上海 201306)

(2: 浙江杭州千岛湖发展有限公司, 杭州 311700)

摘要: 为了解千岛湖在大量放养鲢鳙鱼后叶绿素 a 的时空分布格局及其与主要环境因子的相关性, 本文于 2007 年 1 月至 2009 年 12 月对千岛湖叶绿素 a 及其他 10 个水质理化指标进行了每月定期采样及监测. 结果表明: 上游河流区和过渡区叶绿素 a 含量存在明显的季节变化, 其共同特点是每年会形成春季和夏末秋初的双高峰. 叶绿素 a 含量在空间分布上具有一定的分异性, 河流区叶绿素 a 含量明显高于中下游区(过渡区和湖泊区). 叶绿素 a 含量的最高峰通常出现在 4-12m, 最深出现在 20m, 春夏季出现明显分层. 千岛湖叶绿素 a 与亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、水温(WT)和硅酸盐(SiO_3^{2-})呈低度相关, 与其他环境因子无显著相关性或相关性很弱. 多元逐步回归分析结果显示, 千岛湖叶绿素 a 与筛选出的几个关键环境因子之间的回归方程为: $\text{Chl. } a = 0.114\text{WT} + 2.120\text{COD}_{\text{Mn}} + 17.157\text{SiO}_3^{2-} - 37.391\text{NO}_2\text{-N} - 1.946$.

关键词: 千岛湖; 叶绿素 a; 时空分布; 相关分析

Spatial and temporal distribution patterns of chlorophyll-a and the correlation analysis with environmental factors in Lake Qiandao

LI Peipei¹, SHI Wen¹, LIU Qigen¹, YU Yuanlong¹, HE Guangxi², CHEN Laisheng², REN Liping² & HONG Ronghua²

(1: *Key Laboratory of Aquatic Genetic Resources and Utilization, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P. R. China*)

(2: *Hangzhou Qiandao Development Co., Ltd., Hangzhou 311700, P. R. China*)

Abstract: The temporal and spatial distribution patterns of chlorophyll-a and its correlation with the main environmental factors were analyzed according to the monthly investigation from January, 2007 to December, 2009 in Lake Qiandao where a large number of silver carp and bighead carp stocked. Results showed that the concentration of chlorophyll-a in sampling stations located in the upper reach riverine and transitional zones of the reservoir showed a significant seasonal variations with two concentration peaks occurred in spring and late summer or early fall, respectively. The concentrations of chlorophyll-a in upstream sites (in the riverine and transitional zones) were significantly higher than those of downstream sites. The chlorophyll-a during the warm season was usually stratified with a concentration peak occurring at depths between 4m and 12m, occasionally at a depth of 20m. The result of correlation analysis showed a weak correlation between chlorophyll-a and $\text{NO}_2\text{-N}$, COD_{Mn} , water temperature (WT) and silicate (SiO_3^{2-}), while no significant correlations of the chlorophyll-a were found with other environmental factors, especially with the TP in the water. The regression equation between chlorophyll-a and the correlated environmental factors could be expressed through the multiple linear stepwise regressions as: $\text{Chl. } a = 0.114\text{ WT} + 2.120\text{ COD}_{\text{Mn}} + 17.157\text{ SiO}_3^{2-} - 37.391\text{ NO}_2\text{-N} - 1.946$.

Keywords: Lake Qiandao; chlorophyll-a; spatial and temporal distribution; correlation analysis

湖泊、水库的富营养化问题是当前我国乃至全世界面临的最主要水环境问题. 在我国不仅太湖、滇池等高度富营养化的湖泊会经常暴发蓝藻水华^[1-2], 就连环境优美水质较好的千岛湖, 也曾于 1998、1999 年发生

* 国家自然科学基金项目(30670388, 31072218)和上海市重点学科项目(Y1101)联合资助. 2010-09-03 收稿; 2010-12-03 收修改稿. 李培培, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: peisimple@live.cn.

** 通讯作者; E-mail: qgliu@shou.edu.cn.

过大面积蓝藻水华,这引起了广大专家、学者对千岛湖水环境问题的重视.由于叶绿素 a 是浮游植物现存量的重要指标^[3],其含量的高低能够反映水体的营养状况,因此,叶绿素 a 是湖泊富营养化调查的一个主要参数,并且在水体富营养状况评价中起关键性作用^[4].开展叶绿素 a 的监测,对于了解千岛湖水环境质量现状及演变趋势具有重要意义.

近年来国内外很多学者对湖泊(水库)中叶绿素 a 的分布对其与各种环境因子的相关性开展了深入的研究,得到的结果不尽相同:虽然大多数研究认为叶绿素 a(或其对数)主要与总磷(或其对数)呈线性相关,但也有不少报道认为两者呈其他回归关系^[5-7];此外,也有叶绿素 a 与其他环境因子的相关性分析.虽然有关千岛湖的叶绿素 a 及其与各环境因子间的相互关系曾有过一些研究,但这些研究主要集中于发生水华的 1998-1999 年及随后的 2000 年^[8-10].自 2000 年起千岛湖开展了以鲢鳙鱼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后^[11],千岛湖的食物网结构发生了显著的改变,水质也得到了明显的改善,特别是总磷下降明显^[12].这些食物网和水质的双重改变是否会影响到叶绿素 a 的分布及其与环境因子的相关性值得关注.而有关滤食性鱼类(鲢、鳙)能否用于控制浮游植物以及改变藻类生物量与营养盐之间的相关性在国内外也仍存有争议^[13-16].因此,本文将重点对 2007 年 1 月-2009 年 12 月千岛湖叶绿素 a 浓度的动态变化及其与环境因子的相关性进行分析,旨在了解千岛湖在大量放养鲢鳙鱼后叶绿素 a 的时空分布特征及影响因子,从而了解千岛湖初级生产力的现存状况、发展趋势,合理评价保水渔业对千岛湖水质的中长期影响并为千岛湖今后的水环境保护提供重要的依据.

1 研究方法

1.1 研究地区概况

千岛湖原名新安江水库,是 1959 年新安江水库大坝建成后形成的巨大人工湖,位于浙江省淳安县境内(29°22'-29°50'N,118°34'-119°15'E),正常水位 108m 时,库区面积 573km²,蓄水量 178.4 × 10⁸ m³,平均水深 30.44m,多年平均入库水量 94.5 × 10⁸ m³,出库水量为 91.07 × 10⁸ m³,水体交换周期长达 2 年.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地表径流,约占入库总径流量的 60%.

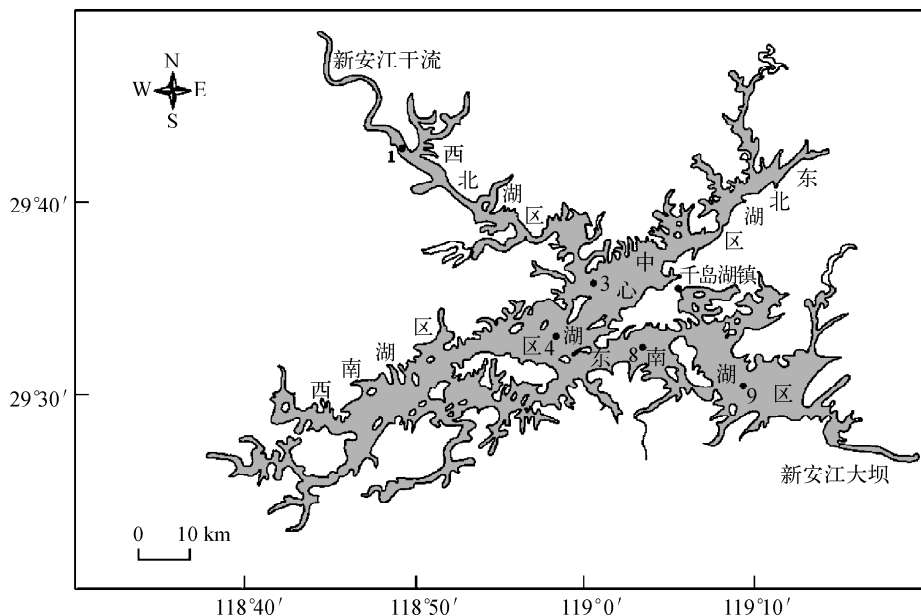


图 1 千岛湖地形图及采样点

Fig. 1 Sampling stations and Map of Lake Qiandao

1.2 采样点设置

根据水库自上而下常区分为河流区、过渡区和湖泊区的生态特点设置样点: 河流区样点宅上(1[#]), 过渡区样点温馨岛(3[#]), 湖泊区样点猴岛(4[#]), 姥山(8[#])和密山(9[#]), 它们分别位于千岛湖的西北、中心和东南湖区. 采样的具体位置分别用 Garmin72 型(中国台湾产)全球定位仪(GPS)进行定位.

1.3 样品采集和处理

从2007年1月至2009年12月每月中旬采集水样一次, 根据各采样点的水文特征及其水体深度, 对各采样点水样进行分层采集. 其中1[#]设定了七个水层(0.5、4、8、12、16、20、25m), 4[#]设定了八个水层(0.5、4、8、12、16、20、25、30m), 9[#]设定了十二个水层(0.5、4、8、12、16、20、25、30、35、40、45、50m), 3[#]和8[#]为(0.5、4、8、12、16、20、25、30m)分层采样后再取混合水样.

样品采集方法按照《湖泊富营养化调查规范》^[17]进行, 监测项目主要有水温、pH、溶解氧(DO)、叶绿素a(Chl. a)、透明度(SD)、总氮(TN)、硝酸盐氮(NO₃-N)、亚硝酸盐氮(NO₂-N)、铵氮(NH₄-N)、总磷(TP)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、硅酸盐(SiO₃²⁻)等.

透明度采用 Secchi 盘法现场测定, 水温和 DO 采用 YSI-58 型溶解氧测定仪现场测定, pH 值采用 pH B-2 型便携式 pH 仪现场监测, 其余项目于 24 小时内实验室里进行相关分析测定: Chl. a 采用分光光度法分析^[17]; TN、TP 采用国家地表水质量监测标准进行, 其中 TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89), TP 测定采用磷钼酸铵分光光度法(GB11893-89). 其他指标的测定采用《水和废水监测分析方法》中的方法^[18].

1.4 统计分析和作图

采用多元统计分析技术及 PASW Statistics 18 (SPSS 18) 软件进行 Pearson 相关性分析、三因素方差分析和逐步回归分析, 使用美国 GOLDEN 软件公司的 Surfer 进行作图.

2 结果

2.1 Chl. a 的时空分布

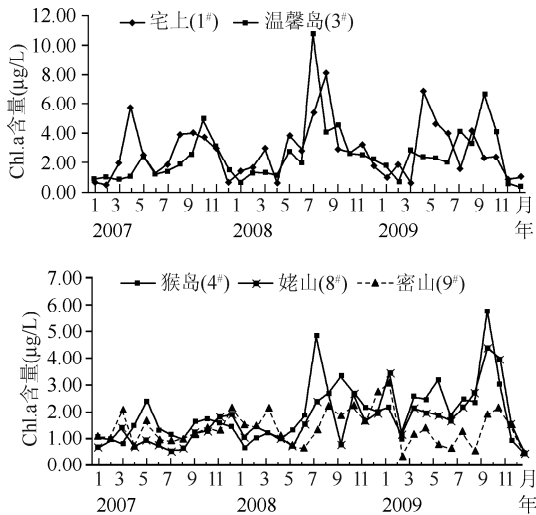


图2 千岛湖各采样点 Chl. a 含量的时间变化
Fig. 2 Temporal change of Chl. a in different sampling stations of Lake Qiandao

2.1.1 Chl. a 浓度的时间分布 从冬季到春季, 全湖的 Chl. a 含量逐渐上升. 从区域分布上看, 湖泊区除 4[#] 在 2008 年 7 月和 2009 年 9 月形成峰值外, 8[#] 和 9[#] 的 Chl. a 含量随季节变化幅度不大, 但河流区和过渡区(1[#]、3[#])存在明显的季节变化, 其共同特点是每年会形成 2 个高峰, 即春季的高峰和夏末秋初的高峰, 冬季为全年最低. 最高值出现在 2008 年 7 月温馨岛采样点(3[#]), 均值为 10.7 µg/L, 最低值出现在 2009 年 2 月密山采样点(9[#]), 均值为 0.33 µg/L (图 2).

三因素方差分析表明, 千岛湖 Chl. a 含量在季节、年份、采样点间均有极显著差异, 且季节与年份 ($P < 0.001$)、季节与采样点 ($P < 0.05$) 对 Chl. a 均有交互作用, 而年份与采样点对 Chl. a 无交互作用 (表 1). 2007 年 5 个采样点的 Chl. a 含量基本维持在 1.06 - 2.48 µg/L 之间, 2008 年的变动范围在 1.59 - 3.13 µg/L 之间, 2009 年则在 1.27 - 2.62 µg/L 之间. 除 4[#] 和 8[#] 外, 各样点的 Chl. a 含量 2008 年最高, 2009 年次之. 但 4[#] 和 8[#] 的 Chl. a 含量在 2009 年

最高,2008 年次之.各样点 Chl. a 均是 2007 年最低(图 3).

2.1.2 Chl. a 浓度的水平分布

Chl. a 含量在空间分布上具有一定的分异性,即河流区 Chl. a 含量(1[#])最高,过渡区(3[#])次之,湖泊区(4[#]、8[#]和 9[#])最低(图 3),这与其他理化指标空间分布基本保持一致,且各采样点的 Chl. a 含量差异极显著(表 1).

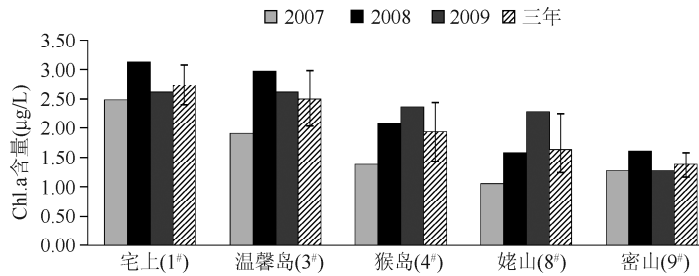


图 3 千岛湖各采样点 Chl. a 含量的比较

Fig. 3 Spatial changes of Chl. a content in different sampling stations of Lake Qiandao

表 1 千岛湖 Chl. a 含量季节、年份、采样点的三因素方差分析

Tab. 1 Three-way ANOVA of season, year and sampling station for Chl. a content in Lake Qiandao

变异来源	平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
截距	749.904	1	749.904	495.713	<0.001 **
季节	40.945	3	13.648	9.022	<0.001 **
年份	15.836	2	7.918	5.234	0.007 *
采样点	47.068	4	11.767	7.778	<0.001 **
季节 × 采样点	41.063	12	3.422	2.262	0.013 *
季节 × 年份	32.123	6	5.354	3.539	0.003 *
采样点 × 年份	10.003	8	1.250	0.827	0.581
季节 × 采样点 × 年份	23.900	24	0.996	0.658	0.882
误差	181.534	120	1.513		

* 表示差异显著($P < 0.05$); ** 表示差异极显著($P < 0.001$).

2.1.3 Chl. a 浓度的垂直分布 千岛湖 2007-2009 年各采样点在 4-11 月 Chl. a 形成明显且稳定的分层现象.这种分层现象较大可能是伴随着“温跃层”的出现而出现的.千岛湖叶绿素 a 的峰值普遍出现在 4m 以下,最深出现在 20m.此外,河流区(1[#])Chl. a 的垂直分布情况在不同月份之间的变化较大,而湖泊区各点(4[#]、9[#])不同月份的变化相对较小(图 4),这可能与湖泊区水体营养物含量较稳定而上游河流段营养盐随入库径流量出现较大的月变动有关.

2.2 Chl. a 含量的变化与主要理化因子的相关性

2.2.1 叶绿素与各理化因子之间的相关分析 湖水的理化因子对 Chl. a 含量有着间接或直接的影响.对 2007-2009 年 Chl. a 与湖水理化因子进行相关分析,结果表明千岛湖三年的 Chl. a 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、WT 和 SiO_3^{2-} 呈低度相关,其 r 值分别为 0.364、0.486、0.498 和 0.362,与其他环境因子无显著相关性或相关性很弱.

表 2 千岛湖 Chl. a 与环境因子的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between Chl. a and environmental factors in Lake Qiandao

	TN	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	TP	COD_{Mn}	WT	pH	DO	SiO_3^{2-}
Chl. a	0.123 **	0.033	0.364 **	0.077 *	0.157 **	0.498 **	0.486 **	0.224 **	-0.014	0.362 **

* 代表 $P < 0.05$; ** 代表 $P < 0.01$.

2.2.2 叶绿素与各理化因子之间的逐步回归分析 千岛湖三年间 Chl. a 含量与环境因子的逐步回归分析,4 个关键因子入选,回归方程 $P(\text{Chl. a}) = 0.114\text{WT} + 2.120\text{COD}_{\text{Mn}} + 17.157\text{SiO}_3^{2-} - 37.391\text{NO}_2\text{-N} - 1.946$ ($R^2 = 0.445, P < 0.05$).千岛湖 Chl. a 与 WT、 COD_{Mn} 、 SiO_3^{2-} 都表现为正相关,然而与 TP 没有相关性.

3 讨论与分析

3.1 Chl. a 含量的时空分布特点

从千岛湖 2007-2009 年 Chl. a 的时间分布来看,总体上在一年中呈现出春秋高、冬季低的特点;从年际看,三年中以 2008 年最高,2009 年次之,2007 年最低(图 2). 每年的 12 月到次年的 3 月全湖月平均水温为一年中最低,此时即便有大量外源营养盐补充到水体中,也会因水温过低严重抑制浮游植物生长,导致 Chl. a 含量在全年中最低. 随着春季来临,水温升高,光照适宜,浮游植物开始大量繁殖,尤其是河流区(1#)由于上游河流携带而来的营养盐急剧增加,以及河流段相对升温快,从而形成较为明显的春季高峰. 夏季光照和水温均过大,反而抑制了浮游植物的繁殖,而随着秋季的到来,光照开始减弱,更适于藻类光合作用,同时,夏末初秋常受台风等影响,雨量增多,外源性营养物质不断输入,使浮游植物生物量推向最高峰. 本研究显示 Chl. a 浓度与水温的相关性显著,这也从另一方面解释了千岛湖 Chl. a 时间分布上的这一特点.

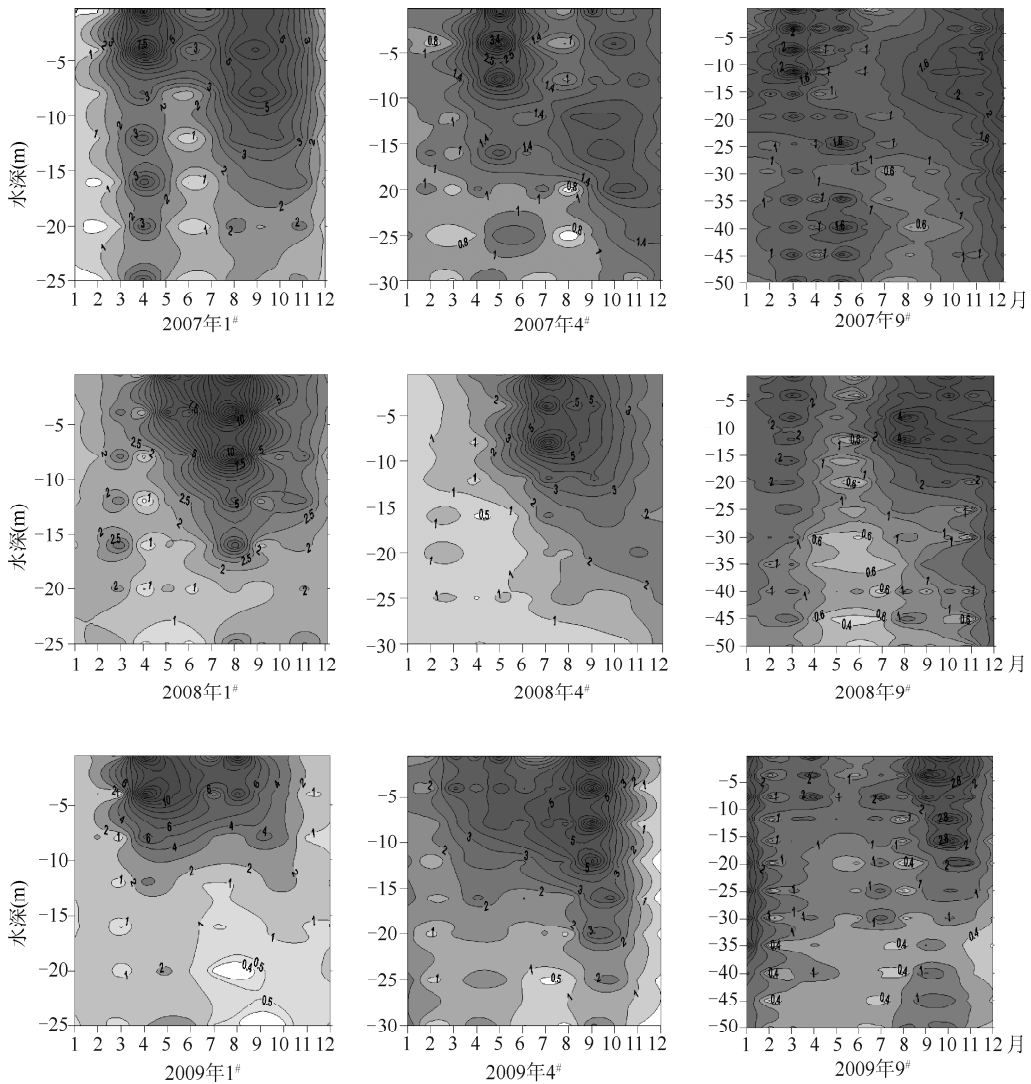


图 4 2007-2009 年 1#、4#、9# 点位 Chl. a 浓度垂直分布随时间变化

Fig. 4 Vertical and temporal variation of Chl. a in sampling stations 1#, 4# and 9# from 2007 to 2009

本研究证实,夏季水体分层,也会导致 Chl. a 含量下降. 从年际变化来看,2008 年春夏季雨量多,增加了水体的上下对流,而 2007、2009 年夏季雨量相对较少,导致水体分层时间延长,进而形成较稳定的水体分层,从而底层营养盐未能供应到表层,最终导致两年相对较低的生产力. 2008 年夏、秋季温度虽然高于 2007、2009 年,但其特殊的强对流天气(暴雨、台风、季风等)影响水体分层而产生了一系列效应^[19-22],从而导致较高的生产力.

从空间分布特点来看,千岛湖 Chl. a 含量变动有空间上的异质性,Chl. a 含量从上游河流区到中下游区(过渡区和湖泊区)依次减少,这符合一般水库的特点. 另一方面,由于千岛湖流域土地利用状况及土壤类型对水质影响相对较大,千岛湖 Chl. a 含量在受人类活动影响较大的区域要高于受人类活动影响较小的区域^[10].

千岛湖 Chl. a 的垂直分布和温度类似,每年能形成两次类似于“温跃层”的格局. 在较深水域还有浮游植物的存在,Chl. a 浓度的高值甚至出现在 20m 水层,其原因可能有以下两方面:一是由于千岛湖水体透明度高,最大值为 11m,在较深的地方还有阳光照射能够进行光合作用;另一方面是由于全同温期的出现,水体垂直交换强度大,部分浮游植物被水流带到更深的区域. 而湖泊区 Chl. a 分布较河流区稳定,也显示出湖泊强大的生态净化功能.

3.2 影响千岛湖 Chl. a 含量及其时空动态的主要环境因子

在淡水湖泊或水库中,Chl. a 含量或藻类的生长是由多因素控制的,一般地,影响藻类生长的因子主要有水动力条件,气象条件、营养盐等^[23]. 千岛湖 Chl. a 含量和环境因子之间的相关性分析表明,各理化因子对千岛湖 Chl. a 含量都有着直接或间接的影响,其中 TN、WT、 SiO_3^{2-} 与 Chl. a 的相关性较为明显. 从相关性分析可以看出,千岛湖 Chl. a 与国内外许多磷限制性湖泊存在着一定的差异,Chl. a 含量容易受到上游新安江来水、人类活动的影响,另外天气状况、降雨量以及水生生物(尤其是鱼类)对 Chl. a 含量的分布起到不可忽视的作用.

3.2.1 千岛湖 Chl. a 与 SiO_3^{2-} 的关系 硅藻作为千岛湖主要的藻类^[24],主要在春、秋季大量出现,其生物量与浮游植物总生物量具有一定的一致性,而 Chl. a 是浮游植物现存量的重要指标,所以两者与环境因子相关性相似. 余元龙^[24]研究表明,硅酸盐是通过影响硅藻生物量而影响浮游植物总生物量的. 国内外大量的文献也表明 SiO_3^{2-} 对硅藻是必不可少的,对硅藻的生物量具有极为重要的贡献^[25-27].

3.2.2 千岛湖 Chl. a 与 TP 的关系 磷是藻类生长的限制因子已经多次在各类湖泊,甚至在千岛湖中得到证实^[4,9-10]. 吕唤春等^[9]曾在 1999-2000 年对千岛湖 Chl. a 含量及理化因子进行监测,结果表明影响千岛湖 Chl. a 含量变化的主要因子有氮、磷、水温、透明度和降水等,Chl. a 含量与 TN、TP 之间的相关系数分别为 0.250、0.450,藻类数量的增长受磷的影响较为明显. 自 2000 年在千岛湖实施“保水渔业”措施,大量放养鲢鳙鱼后,刘其根等^[12]通过分析 2004 年监测数据得到 Chl. a 与 TN($r=0.473, P<0.01$)、TP($r=0.443, P<0.01$)之间有极显著的正相关关系. 本研究通过三年的数据分析得出千岛湖氮元素的含量逐年上升,局部区域已达到国家 VI-V 类水标准,而磷元素含量呈现下降趋势,特别是磷酸盐含量常低于国家检测标准. 2007-2009 年以来,千岛湖全湖 TN:TP 值远远大于 90,根据经典的 Liebig 最小因子定律和目前国际上广泛认可的 Redfield 定律(藻类细胞组成的原子比率 C:N:P=106:16:1),千岛湖藻类生长的限制因子是总磷,这一矛盾可能主要与以下几个因素有关,如千岛湖较大的纵宽比导致的纵向梯度和空间异质性、滤食性鲢鳙为主的食物网结构以及其他环境因子对两者关系的强烈干扰作用等;由于千岛湖上中下游相距较远,不但上游采样点受地表径流影响强烈,其响应时间较短,且下游湖泊区水质稳定,易产生热分层等而且其本底营养程度和食物网结构也都存在较大差异,这些因素均可能导致上下游 Chl. a 对营养盐响应的程度有很大差异,其叠加的结果可能使 Chl. a 与 TP 的相关性削弱. 正常情况下对于千岛湖这样的大型水体而言,湖中藻类数量的变动主要取决于繁殖和死亡两个方面,而影响藻类繁殖的因素主要是水体营养盐含量(即通常认为的上行效应),以及光照和水温等理化因素;而导致藻类数量减少的主要因素则包括藻食生物(主要是浮游动物和鲢、鳙)的多少(即下行效应)和是否发生藻类病害等^[28],因此推断鲢鳙等对藻类的滤食等“下行效应”改变了 Chl. a 和 TP 的关系的可能性较大,这表明营养化程度相对较低的千岛湖,其浮游植物可能更主要由藻食生物控制的(下行效应),而不是受水体中的营养元素控制(上行效应). 千岛湖自 2000 年以来,每年都要投放近百万斤的鲢、鳙鱼种,并且大量捕捞鳊鱼等凶猛鱼类,使得整个湖泊中的浮游植物生物量受鲢鳙鱼的强

烈控制,可能使 Chl. a 含量与 TP 相关性减弱,乃至不显著.当然,千岛湖中叶绿素与 TP 不显著相关的原因尚有待进一步验证.

致谢:陈来生、余元龙帮助野外采样,史文、任丽萍等参与环境指标的测定,在此向他们表示衷心的感谢.

4 参考文献

- [1] 秦伯强,胡维平,陈伟民等.太湖水环境演化过程与机理.北京:科学出版社,2004.
- [2] 王红梅,陈燕.滇池近 20a 富营养化变化趋势及原因分析.环境科学导刊,2009,28(3):57-60.
- [3] Reynolds CS. The ecology of fresh water phytoplankton. London: Cambridge University Press, 1984.
- [4] 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,2001,30(1):22-26.
- [5] Dillon PJ, Rigler FH. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnology and oceanography*, 1974, 19(5): 767-773.
- [6] Mccauley E, Downing JA, Watson S. Sigmoid relationships between nutrients and chlorophyll among lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 46: 1171-1175.
- [7] Chow FP, Trew DO, Findlay D *et al.* A test of hypotheses to explain the sigmoidal relationship between total phosphorus and chlorophyll a concentrations in Canadian Lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1994, 51: 2052-2065.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 赵新民,王军,朱淑君等.千岛湖水体叶绿素 a 时空变化特征及其影响因子分析.浙江树人大学学报,2005,5(5):99-103.
- [11] 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.
- [12] 刘其根.千岛湖保水渔业及其对湖泊生态系统的影响.上海:华东师范大学,2004.
- [13] 陈少莲,刘肖芳.鲢鳙在东湖生态系统的氮,磷循环中的作用.水生生物学报,1991,15(1):8-26.
- [14] Domaizon I, Devaux J. Experimental study of the impacts of silver carp on plankton communities of eutrophic Villerest reservoir(France). *Aquatic Ecology*, 1999, 33: 193-204.
- [15] Xie P, Liu J. Practical success of biomaniipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms: a synthesis of decades of research and application in a subtropical hypereutrophic lake. *The Scientific World Journal*, 2001, 8(1): 337-356.
- [16] Wang HJ, Liang XM, Jiang PH *et al.* TN: TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes. *Freshwater Biology*, 2008, 53: 935-944.
- [17] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范(第2版).北京:中国环境科学出版社,1990.
- [18] 国家环保总局.水和废水监测分析方法(第四版).北京:中国环境科学出版社,2002:88-200.
- [19] 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.
- [20] Brian moss. Ecology of fresh waters. London:Blackwell Scientific Publications, 1980: 11-35.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 翁笑艳.山仔水库叶绿素 a 与环境因子的相关分析及富营养化评价.干旱环境监测,2006,20(2):73-78.
- [24] 余元龙.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.上海:上海海洋大学,2010.
- [25] 杨东方,李宏,张越美等.浅析浮游植物生长的营养盐限制及其判断方法.海洋环境科学,2000,12:47-50.
- [26] Yang DF, Zhang J, Gao ZH *et al.* Examination of silicate limitation of primary production in the Jiaozhou Bay, North China II. Critical value and time of silicate limitation and satisfaction of the phytoplankton growth. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2003, 21(1): 46-63.
- [27] Hutchins DA, Bruland KW. Iron-limited diatom growth and Si: N uptake ratios in a coastal upwelling regime. *Nature*, 1998, 393: 561-564.
- [28] 刘其根,陈立侨,陈勇.千岛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):117-12.