

## 特大洪水对浮游植物群落及其演替的影响——以广东高州水库为例\*

陈修康<sup>1</sup>, 郭跃华<sup>1</sup>, 冯 喻<sup>1</sup>, 张华俊<sup>1</sup>, 韩博平<sup>1,2</sup>, 肖利娟<sup>1,2\*\*</sup>

(1: 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

(2: 广东省水库蓝藻水华防治中心, 广州 510632)

**摘 要:** 洪水事件能够在短时间内对生态系统的物理与生物过程产生重大影响, 从而导致浮游植物群落结构的快速演替. 2010 年 9 月, 广东省大型水库——高州水库发生特大洪水. 为了解洪水的生态效应, 于 2010 年 1 月—2011 年 12 月对高州水库湖沼学变量和浮游植物进行了调查研究. 特大洪水期间, 高州水库流域内大量泥沙等颗粒物进入水体, 将原有有机物相对较多的沉积物覆盖, 有助于减少营养盐的底泥释放, 洪水后次年春季枯水期水体营养盐浓度明显降低 (尤其是磷, 总磷浓度低于 0.01 mg/L). 洪水过后水体中悬浮物的组成改变, 在接下来的水体混合期间无机颗粒物的再悬浮导致水体透明度显著降低, 但次年水库整体的透明度升高, 浮游植物生物量降低. 洪水事件导致的水体理化环境的改变使水库浮游植物群落结构改变, 由洪水前以群体蓝藻和大个体绿藻 ( $H_1$  和  $N_A$  功能类群) 为优势类群的群落转变为洪水后以中心纲浮游硅藻和甲藻 (A、B 和  $L_0$  功能类群) 为优势类群的群落, 而以往枯水期常有发生的粘质鱼腥藻等蓝藻水华在洪水后春季枯水期没有出现.

**关键词:** 特大洪水事件; 浮游植物功能类群; 湖沼学变量; 演替; 高州水库

## Impact of great flood on phytoplankton assemblages and their succession: A case study of Gaozhou Reservoir, Guangdong Province

CHEN Xiukang<sup>1</sup>, GUO Yuehua<sup>1</sup>, Feng Yu<sup>1</sup>, ZHANG Huajun<sup>1</sup>, HAN Boping<sup>1,2</sup> & XIAO Lijuan<sup>1,2</sup>

(1: Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China)

(2: Guangdong Center for Control and Prevention of Reservoir Cyanobacterial Blooms, Water Resources Department of Guangdong Province and Jinan University, Guangzhou 510632, P. R. China)

**Abstract:** To identify the impact of a great flood event on phytoplankton assemblages and their succession in Gaozhou Reservoir, limnological variables and phytoplankton were investigated from January, 2010 to December, 2011. During flood, a mass of particles were flushed into the reservoir and overlaid the original surface sediment, which suppressed nutrients releasing from sediment. Nutrients concentration, especially phosphorus sharply decreased, and total phosphorus concentration was below 0.01 mg/L. After the flood event, the composition of suspended particles were changed, and water transparency decreased during the next mixing period because of the decreased resuspension of inorganic particles and phytoplankton biomass. The phytoplankton community structure rapidly responded to the significant change in the physical environmental variable. Dominant phytoplankton groups changed from colonial blue-green and large unicell Chlorophyta (Coda  $H_1$  and  $N_A$ ) to planktonic centric diatoms and dinoflagellates (Coda A, B and  $L_0$ ). *Anabaena mucosa* which caused blooms yearly in every spring dry season could not be detected after the flood event.

**Keywords:** Great flood event; phytoplankton functional groups; limnological variables; succession; Gaozhou Reservoir

浮游植物群落结构主要受水体物理、化学、生物特性和水文水动力等环境因子的影响<sup>[1-3]</sup>. 其中, 营养盐 (碳、氮、磷等) 和光照是影响浮游植物生长的主要环境因子<sup>[2]</sup>. 水动力 (冲刷率、垂直混合)、水体形态和水文等因素影响水体浮游植物空间分布与营养盐的获得性, 从而直接或间接地影响浮游植物群落结构<sup>[4]</sup>.

\* 广东省水利厅科技创新项目 (2009-22) 和 NSFC—广东联合基金项目 (U0733007) 联合资助. 2013-03-04 收稿; 2013-04-10 收修改稿. 陈修康 (1986~), 男, 硕士研究生; E-mail: chenxiangkang861023@163.com.

\*\* 通信作者; E-mail: tljxiao@jnu.edu.cn.

洪水是一种极端的水文事件,能影响洪泛区生态系统的结构、功能和动态特征,其频率、周期和强度影响下游水体的物理、化学和生物的年际变化和季节变化特征<sup>[5-7]</sup>.洪水对水生生态系统表现为相互矛盾的两方面:一方面,大量固体颗粒物随水流进入水体,降低水体的光照条件,限制藻类的生长<sup>[1]</sup>,同时,某些颗粒物类似于絮凝剂,能够吸附营养盐并最终沉积在沉积物中,降低可利用性营养盐浓度,尤其是磷<sup>[5]</sup>,一定程度上减轻水体营养水平<sup>[8]</sup>.另一方面,洪水携带大量的营养盐等物质进入水体,沉积在水体底部,增加水体营养盐的负荷,对水体微生物群落产生一定的干扰<sup>[9]</sup>.洪水对浮游植物的影响体现在两个方面:一方面,浮游植物随洪水直接流失,其生物量、丰度、群落结构、种类多样性等均受到影响<sup>[10-11]</sup>;另一方面,洪水事件改变水体环境(物理、化学、生物条件),从而影响浮游植物群落结构.因此,虽然洪水是一个短期的事件,但是对生态系统和浮游植物群落有连续和长期的影响.

近年来,受全球气候变化的影响,洪水等极端水文事件的发生愈加频繁,洪水对其发生地区的水体生态系统的作用也变得重要.我国华南地区受亚热带季风气候的影响,降雨丰富,气候变化带来的异常降雨天气也时有发生,近年来,洪水事件发生较频繁.水库的流域面积/库面积之比较大,对洪水事件更为敏感.2010年9月,高州水库流域内发生了洪水事件,简称“921特大洪水”,本文为了了解特大洪水对水库湖沼学特征和浮游植物群落结构的年际影响,对比研究洪水前后两年的湖沼学特征和浮游植物群落结构,探讨特大洪水对高州水库浮游植物群落结构及其演替的影响.浮游植物功能类群(phytoplankton functional groups, PFGs)是以浮游植物形态、生态和生理特性作为分类依据对浮游植物进行归类的方法,即将具有相似形态、生态功能和生理特性的藻类作为一个功能群,该方法比传统的形态分类方法更能反映环境的变化<sup>[12]</sup>,因此本文以功能类群的方法对浮游植物群落变化进行分析.

## 1 材料与方法

### 1.1 高州水库概况

高州水库(22°2'N, 111°1'E)位于广东省粤西地区鉴江流域(亚热带和热带的过渡地带),属于亚热带海洋性季风气候区.该气候区具有明显的丰水期和枯水期,降雨主要集中在4—9月份,枯水期的降雨量较低.高州

水库是茂名市重要的供水水源地,其集雨面积1022 km<sup>2</sup>,水库面积58.49 km<sup>2</sup>,水库库容为11.5 × 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>,有两条主要的入库河流——曹江与大井河,属于大型山谷型水库,2009和2010年水库库区连续两年发生春季蓝藻水华<sup>[13-14]</sup>.

### 1.2 采样设置

2010年1月—2011年12月在高州水库设置4个采样点(图1),分别是供水口(S1)、大坝(S2)、库中(S3)和河流入水口(S4).每月采样1次(2010年2月、10月和2011年1月除外).

### 1.3 样品采集与数据处理

于距水面0.5 m处用采水器采集1 L水样,用于测定水体中总氮(TN)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)和溶解性磷酸盐(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)浓度,24 h内完成测定<sup>[15]</sup>.

浮游植物的定性样品使用38 μm浮游生物网于水平和垂直方向上拖取,在光学显微镜(OLYMPUS-BX51)下进行观察和鉴定<sup>[16-17]</sup>.同时于距表层0.5 m处用采水器采集1 L水样,现场用福尔马林固定,带回实验室沉淀、浓缩后在光学显微镜下对浮游植物进行定性和定量分析<sup>[16-17]</sup>,浮游植物体积根据种类相近几何形状的面积公

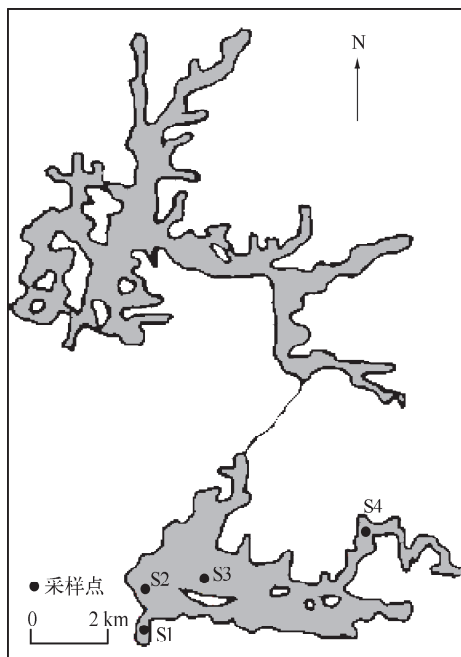


图1 高州水库库形图以及采样点分布

Fig. 1 Morphology of Gaozhou Reservoir and distribution of sampling sites

式计算,按照密度为  $1\text{ g/cm}^3$  计算水体中浮游植物生物量<sup>[18]</sup>.

现场采用便携式多参数水质监测仪(YSI 185)以  $1\text{ m}$  间隔测定水温( $T$ ),使用塞氏黑白盘测定透明度( $SD$ )数据.于 2011 年 12 月 23 日,在河流入水口用 Uwitec 柱状采泥器(PVC 管长  $60\text{ cm}$ ,直径  $6\text{ cm}$ )垂直采集未受扰动的柱状沉积物定性样品.降雨量、入库流量、出库流量、水位等水文水动力学数据由鉴江流域管理局提供.

使用 Excel 2010 和 SPSS statistics 19 进行数据分析,使用 Origin 8.5 作相关数据图.

2 结果与分析

2.1 降雨量

2010 年和 2011 年高州水库的降雨量分别为  $2141$  和  $1358\text{ mm}$ ,主要集中在夏、秋两季(图 2).受台风影响,2010 年 9 月 21 日—23 日高州水库流域内遭遇特大暴雨,日降雨量达到  $120\text{ mm}$ ,引发洪水,大量的地表径流汇入水库,对整个水体带产生了巨大冲击.

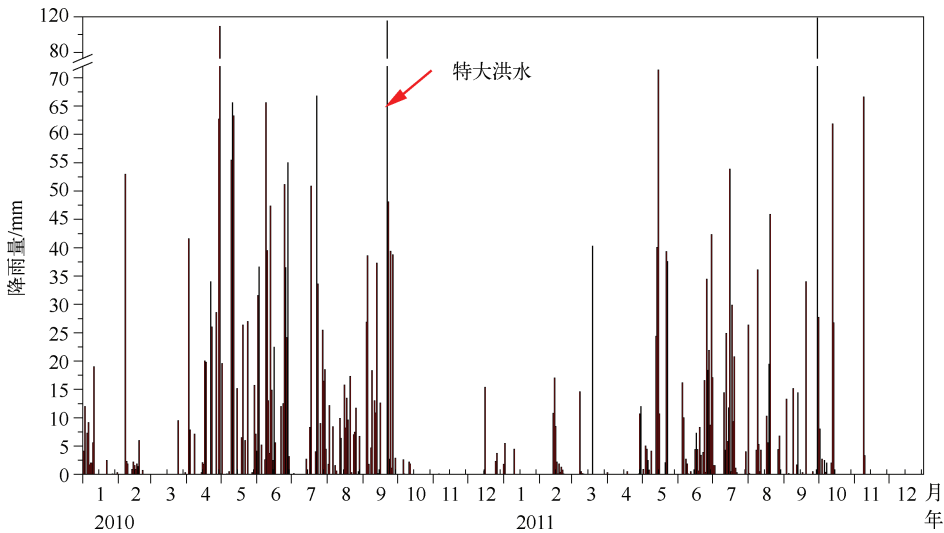


图 2 高州水库日降雨量变化

Fig. 2 Variation of daily precipitation in Gaozhou Reservoir

2.2 水体分层和透明度的季节变化

调查期间高州水库表层水温在  $17.8\sim31.9^{\circ}\text{C}$  之间,其季节差异显著,夏、秋季水温高而春、冬季较低,5—10 月表层水温都在  $25^{\circ}\text{C}$  以上.从水体混合模式上看,高州水库属于暖单次混合型水体,水体从 4 月份开始形成明显分层但处于弱分层状态,越趋近于夏季,表层水温和底层水温的差异越大,水体分层越明显;9 月份开始,随着表层水温的降低,水体混合开始,至 11 月份水体混合深度达到  $20\text{ m}$ ,在 12 月份整个水体的温度都下降到  $20^{\circ}\text{C}$  以下,水体完全混合(图 3).

采样期间,高州水库水体透明度在  $0.5\sim4.0\text{ m}$  之间变化,平均为  $1.8\text{ m}$ ,其时空异质性较大(图 4).在空间上,枯水期水体透明度的空间异质性不显著( $P>0.05$ ),丰水期河流入水口的水体透明度显著低于供水口、大坝和库中( $P<0.01$ ),供水口和库中的透明度略低于大坝,但差异不显著( $P>0.05$ ).在时间上,水体分层时期,尤其是 8—9 月透明度相对较高,水体混合时期(1 月和 12 月)整个水库的透明度明显下降;在两年的调查期间,水库的透明度有较大的年际差异,2011 年水体透明度明显比 2010 年高.大坝处,2010 年 2—3 月透明度相对于 1 月是降低的,而在 2011 年 2—3 月透明度却明显升高(图 4).

2.3 水体营养盐

高州水库总氮浓度范围为  $0.46\sim1.54\text{ mg/L}$ ,平均为  $0.78\text{ mg/L}$ .洪水前水体中总氮浓度的空间差异不显

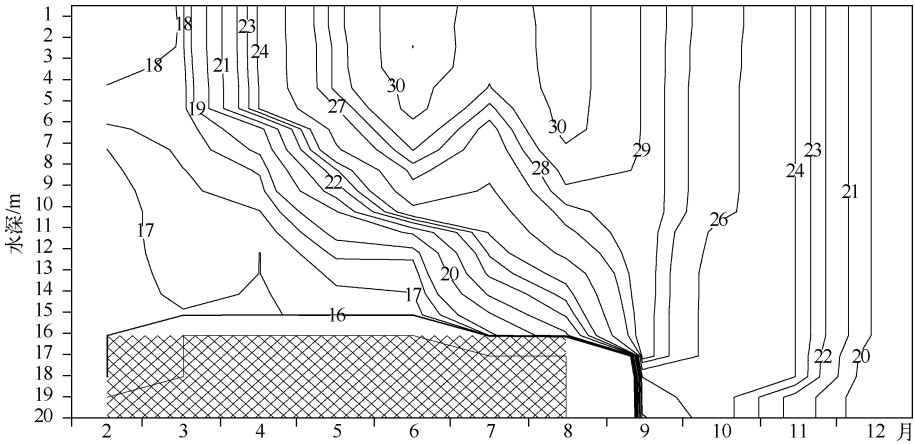


图 3 2011 年高州水库水温(℃)垂直剖面图

Fig. 3 Vertical profile of water temperature(℃) in 2011 of Gaozhou Reservoir

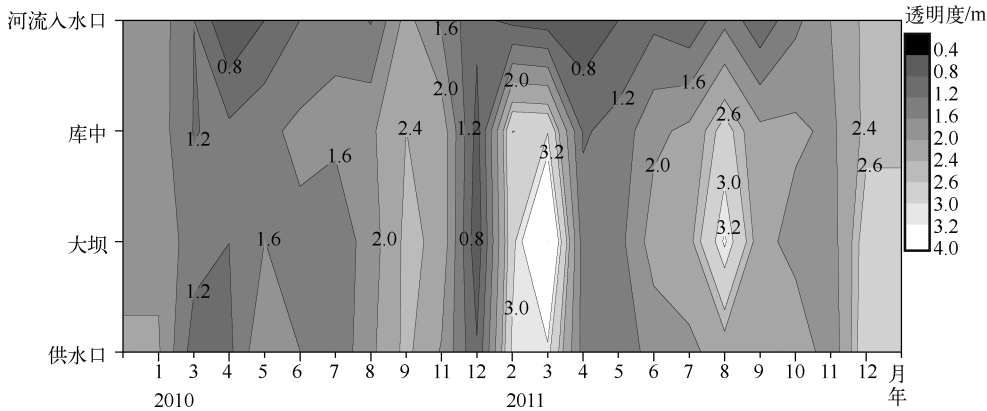


图 4 高州水库水体透明度的时空变化

Fig. 4 Spatio-temporal variation of transparency in Gaozhou Reservoir

著( $P>0.05$ ),且在低水位的枯水期(1—4月)坝前总氮浓度明显高于其他各点,同时大坝处的季节变化与其他各点有明显的不同,说明坝前总氮的主要来源与其他各点略有区别.洪水后,总氮的空间分布为河流区最大,库中和供水口比较接近,大坝处最低,且4个采样点的总氮浓度季节变化趋势一致,说明其主要来源相似,同时所有的样点在低水位的枯水期总氮浓度都相对较低(图5).溶解性无机氮的浓度在洪水前后没有明显的变化(表1).

表 1 采样期间丰水期和枯水期的溶解态氮、磷营养盐浓度

Tab. 1 The concentrations of dissolved nitrogen and phosphorus in dry season and wet season during sampling period

环境变量	洪水前		洪水后	
	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期
硝态氮/(mg/L)	0.29 ± 0.10	0.23 ± 0.14	0.47 ± 0.12	0.53 ± 0.06
铵态氮/(mg/L)	0.11 ± 0.10	0.06 ± 0.02	0.08 ± 0.07	0.15 ± 0.10
磷酸盐磷/(mg/L)	0.006 ± 0.006	0.006 ± 0.002	0.002 ± 0.002	0.003 ± 0.002

高州水库总磷浓度为0.003~0.075 mg/L,平均为0.018 mg/L.洪水前,4个监测点总磷浓度的季节变

化不一致,且呈现大坝处略大于其他各点的特征,枯水期和丰水期没有明显的差异;洪水后,4个监测点总磷浓度的变化趋势相一致,呈现出河流入水口高于其他各点且大坝处相对较低的特征,同时低水位的枯水期总磷浓度也低于丰水期的浓度(图5)。洪水后磷酸盐磷浓度明显低于洪水前的浓度(表1)。

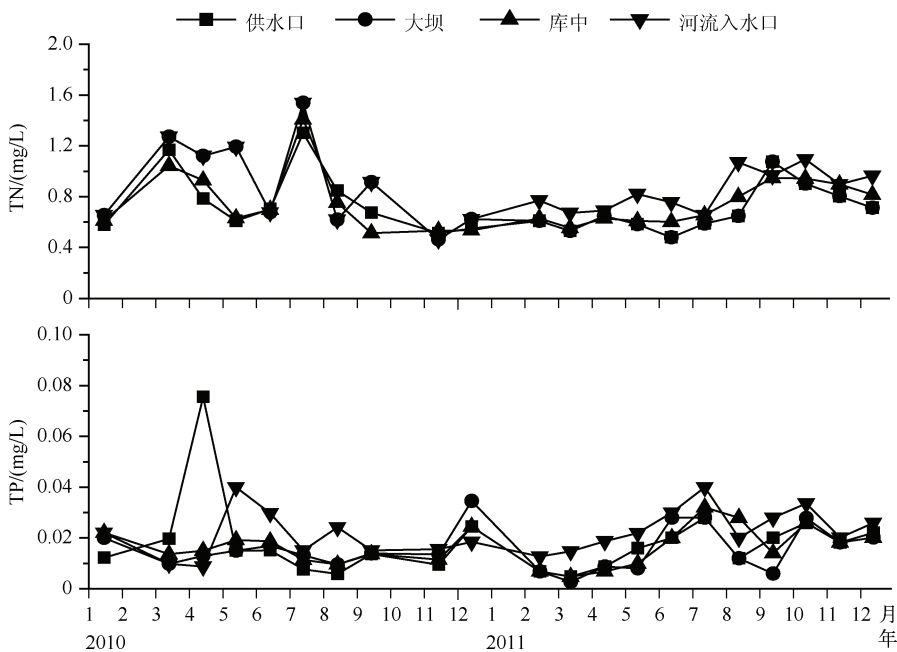


图5 高州水库总氮和总磷的时空变化

Fig.5 Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus concentrations in Gaozhou Reservoir

2.4 表层沉积物定性

对高州水库沉积物分析的结果表明,洪水后,高州水库沉积物表层被一层红色的土壤颗粒覆盖,其下层是偏黑色的淤泥,该结果说明“921 特大洪水”带进大量的流域内红壤,经过沉淀作用覆盖在原有的以有机物为主的沉积表层,形成厚厚的覆盖层将原有沉积物覆盖(图6)。



图6 高州水库的沉积物

Fig.6 Sediment in Gaozhou Reservoir

2.5 浮游植物群落动态变化与演替

2.5.1 浮游植物生物量的动态变化 高州水库浮游植物生物量在 0.12 ~ 7.26 mg/L 之间变化,平均为 1.51 mg/L。洪水前,枯水期低水位时期(3—4 月)河流区的浮游植物生物量相对于其他各点低,而丰水期高

水位时期(8—10月)河流区的浮游植物生物量相对较大,全年浮游植物空间差异较明显.洪水后,浮游植物生物量明显降低,且空间差异减小.虽然洪水前后浮游植物的季节变化都呈现类似的“三峰”现象,即在3月、8/9月、11/12月出现浮游植物生物量的峰值,但是其变化幅度洪水后远低于洪水前(图7).

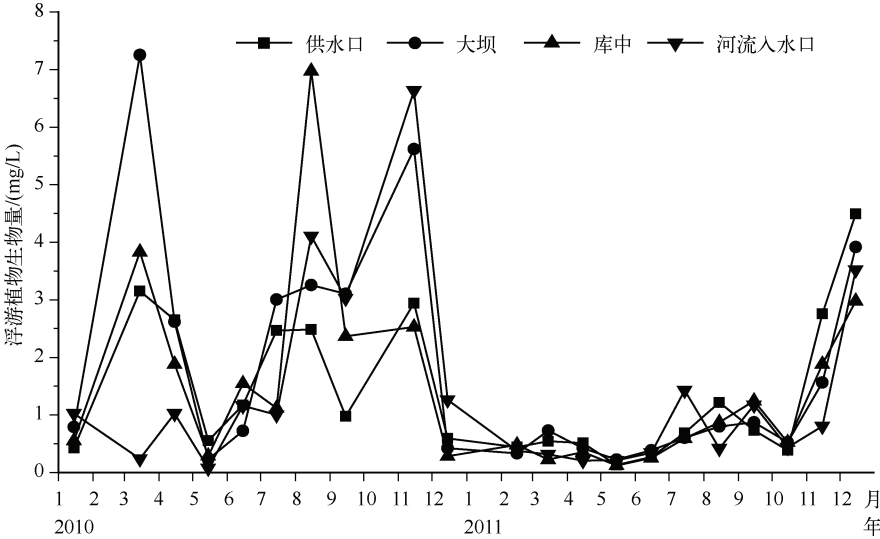


图7 浮游植物生物量的时空变化

Fig. 7 Spatio-temporal variation of phytoplankton biomass

2.5.2 浮游植物优势种的演替 调查期间,在高州水库样品中共鉴定出161种(属)浮游植物,隶属于29种浮游植物功能类群.调查期间浮游植物优势功能类群有A、B、C、F、G、H<sub>1</sub>、J、L<sub>0</sub>、N、N<sub>A</sub>、P、T和W<sub>1</sub>,主要优势功能类群有A、H<sub>1</sub>、N<sub>A</sub>、B和L<sub>0</sub>.4个采样点的浮游植物功能类群的优势度呈极显著正相关( $r>0.809$ ,  $P<0.01$ ),差异不显著( $P>0.05$ ).功能类群结构的演替序列为A+H<sub>1</sub>→H<sub>1</sub>→H<sub>1</sub>+N<sub>A</sub>→N<sub>A</sub>→A→A+B→B+L<sub>0</sub>→B→A+B.

A功能类群是扎卡四棘藻(*Attheya zachariasii*)和长刺根管藻(*Rhizosolenia longiseta*)等大型中心纲浮游硅藻类,是2010年1月和2011年高州水库枯水期的主要优势功能类群.2010年蓝藻水华期间A功能类群优势度降低甚至难以检测到.然而,洪水后春季水体中A功能类群是主要优势功能类群.B功能类群浮游植物以小细胞个体的小环藻(*Cyclotella* sp.)和圆筛藻(*Coscinodiscus* sp.)为主,洪水前高州水库丰水期和枯水期的B功能类群生物量均相对较低,绝大多数样品中B功能类群的优势度低于10%.然而,洪水后枯水期B功能类群浮游植物的优势度与洪水前的差异极显著( $P<0.01$ ),优势度均大于10%,夏季成为第一优势功能类群.粘质鱼腥藻(*Anabaena mucosa*)是高州水库H<sub>1</sub>功能类群的唯一浮游植物种类,是2010年春季蓝藻水华的主要功能类群.洪水后,未检测到H<sub>1</sub>功能类群浮游植物.薄甲藻(*Glenodinium* sp.)、加顿多甲藻(*P. gatunense*)和飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella*)是高州水库L<sub>0</sub>功能类群的主要浮游植物种类,洪水后,水体L<sub>0</sub>功能类群的优势度明显增加.N<sub>A</sub>功能类群主要由扁鼓藻(*Cosmarium depressum*)、项圈鼓藻(*C. moniliforme*)、史密斯角星鼓藻(*Staurostrum smithii*)和多棘鼓藻(*Xanthidium* sp.)组成,主要出现在夏季水体分层时期,洪水后N<sub>A</sub>功能类群的生物量明显低于洪水前该时期,但由于洪水后浮游植物总生物量降低,洪水后仍占一定的优势(图8).总体上,洪水过后浮游植物的群落结构有较明显的改变,藻相由洪水前的蓝藻-绿藻型转变为硅藻-甲藻型.

3 讨论

3.1 洪水对水体理化环境的影响

水库的营养盐的来源可概括为两条途径:外源输入和内源输入.由于入库径流在从河流区到水库湖泊

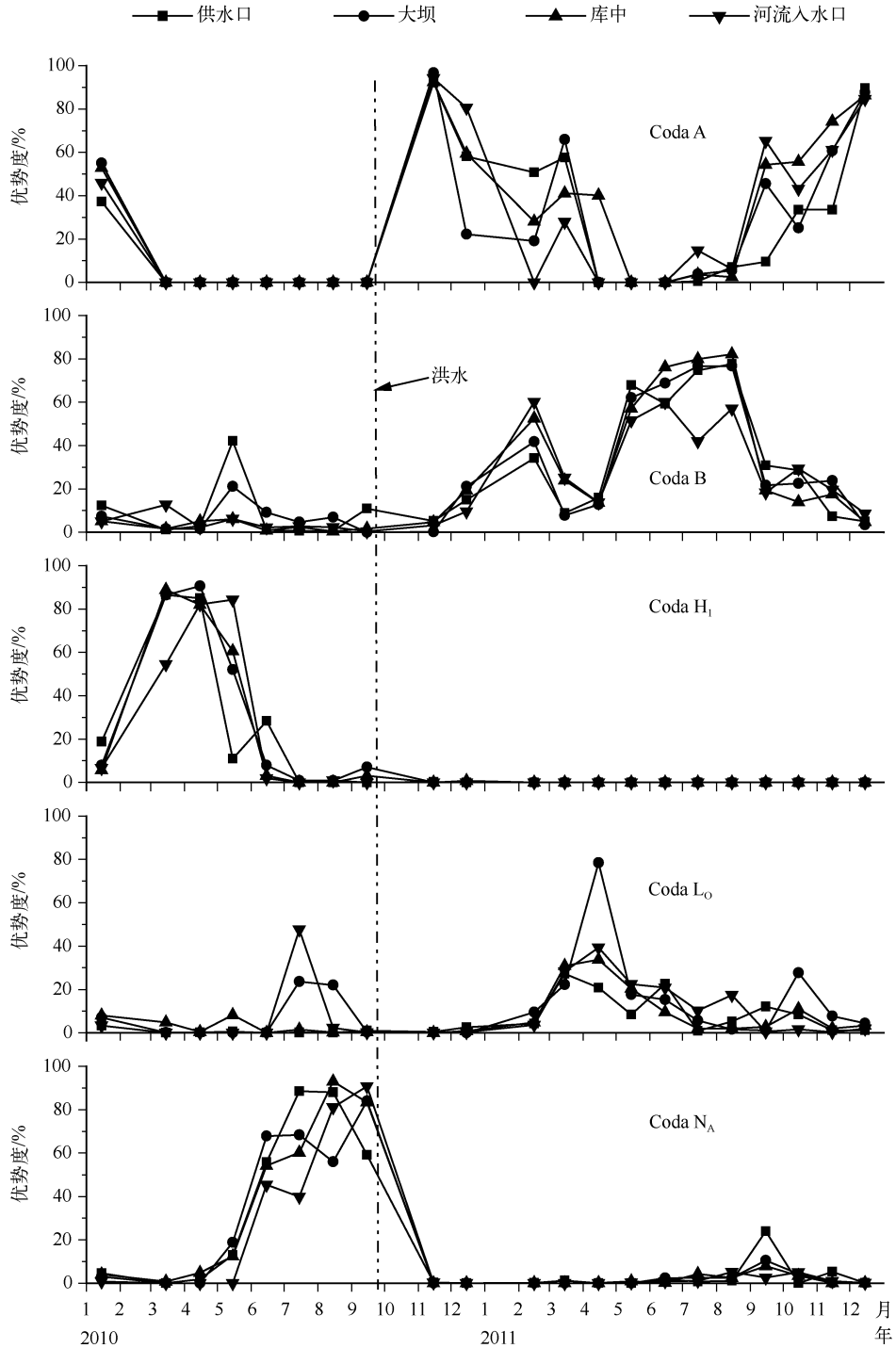


图 8 主要优势功能群优势度的时空变化

Fig. 8 Spatio-temporal variation of major dominant phytoplankton functional groups

区的方向上,流速不断降低,水体深度不断增加,通过沉降作用,水体中径流输入的悬浮物和营养盐在水库

的纵向梯度上往往呈现逐渐递减的趋势<sup>[19]</sup>. 内源营养释放在底泥中营养含量高的潜水水体或上下水层混合较好的水体中更容易发生<sup>[19]</sup>. 高州水库的营养盐外源输入主要通过入库河流的径流输入, 内源输入主要是沉积物中营养盐的释放. 在时间上, 枯水期(1—3月和11—12月)对应水体弱分层或混合时期, 而丰水期(4—9月)对应于水体稳定性较高的分层时期, 因此, 高州水库的营养盐内源输入在枯水期更容易发生, 而在丰水期外源输入对于上层水体营养盐的补充更重要. 洪水前, 在枯水期的水体混合时期(1月), 高州水库水体总磷和总氮浓度空间差异较小, 且大坝处的浓度略高于河流区, 同时在水体弱分层的3、4月大坝处的总氮浓度相对于其他采样点更高, 这些特征表明, 内源循环对于水体营养盐的补充有重要的作用; 洪水后, 枯水期(2—4月)营养盐的空间分布改变, 库区营养浓度下降明显, 河流区的营养盐浓度最大, 同时对高州水库沉积物的观察表明, 洪水后原有的含有机物较多的深色沉积物被新的含黄泥泥沙较多的沉积物所覆盖, 说明枯水期内源营养释放受到限制, 导致库区营养盐浓度降低, 尤其是总磷浓度. 在丰水期, 洪水前4个采样点的总氮、总磷浓度空间差异不显著, 而洪水后河流区总氮、总磷浓度明显高于其他各点, 而且从河流区到大坝也呈现逐渐递减的空间趋势, 因此可以判断洪水后外源径流对水体营养的补充有更重要的作用.

透明度是衡量水下光场的重要参数, 影响水体透明度的主要是水体中的悬浮物, 悬浮物含量高水体透明度低, 悬浮物含量低则透明度高<sup>[20]</sup>. 水体中悬浮物包括无机颗粒(泥沙等)和有机颗粒(浮游植物、腐殖质等). 由于河流径流中往往携带大量的泥沙, 因此透明度较低, 河流径流量大的水库河流区透明度也往往较低<sup>[19]</sup>. 若水体泥沙等无机颗粒较少但藻类等有机颗粒较多, 水体透明度也会降低. 高州水库透明度在枯水期空间差异小而在丰水期空间差异大且河流入水口明显高于其他点, 说明水体透明度受河流径流的影响较明显, 同时也说明河流径流带入的悬浮颗粒物对水库悬浮物的空间分布有明显的影响. 影响水体中悬浮物的垂直分布的因素有两方面: 无机悬浮颗粒物受重力沉降作用的影响; 而藻类等有机悬浮物主要取决于其生物量的积累量<sup>[1, 19-20]</sup>. 在“921特大洪水”后, 高州水库透明度明显升高且此时浮游植物生物量也明显降低, 因此2010年9月透明度的升高与藻类的减少有关; 但在接下来的12月, 库区(库中、大坝和供水口)水体透明度突然下降且此时藻类生物量也显著降低, 水体中无机悬浮物增加是造成透明度降低的主要原因, 此时属于枯水期水体混合时期, 降雨较少, 河流径流减少, 水体稳定性最弱, 因此判断增加的无机悬浮物主要来源于深层水体的无机物再悬浮. 随后的2—3月水体分层开始, 有利于无机悬浮物沉降, 水体透明度增加. 这种状况的出现, 与洪水期间洪水携带大量的泥沙入库有关. 总体上, 2011年水库的透明度明显低于2010年, 同时2011年浮游植物生物量也低于2010年, 由此表明, 浮游植物的减少是水体透明度升高的重要原因.

### 3.2 洪水对浮游植物群落结构的影响

浮游植物群落结构的变化主要受水体中可获得性资源的状况所决定, 即水体中溶解性营养盐和光照条件是影响浮游植物群落组成的重要因素<sup>[14]</sup>. 洪水前后高州水库水体溶解态氮的变化不大, 甚至洪水后还略高于洪水前, 但洪水后水体中溶解态磷明显降低, 且往往低于0.01 mg/L, 甚至低于对于大多数藻类都属于限制性浓度(0.003 mg/L)的水平<sup>[1]</sup>. 低磷环境有利于耐低磷或具有自主运动能力的藻类获得竞争优势. 而且洪水事件导致的透明度的变化说明洪水事件对水下光场也有较大的影响. 透明度的升高有利于增加喜高光浮游植物的竞争能力.

浮游植物功能类群是根据浮游植物生理和生态特征以及所适应的环境条件归纳出来的浮游植物集群, 每个代码代表一类浮游植物<sup>[12]</sup>. 高州水库浮游植物功能类群的组成结构在洪水前后有较大的变化. 洪水前以群体蓝藻和大个体绿藻( $H_1$ 和 $N_A$ 功能类群)为优势类群, 洪水后以中心纲浮游硅藻和甲藻(A、B和 $L_0$ 功能类群)为优势类群.

在水体分层较弱的枯水期(2—4月和9—11月), 洪水前以 $H_1$ 功能类群为主, 而洪水后以A功能类群为主,  $H_1$ 功能类群主要由粘质鱼腥藻组成, A功能类群由扎卡四棘藻和长刺根管藻组成. 粘质鱼腥藻有伪空泡, 能够通过伪空泡的调节在光照条件较差的环境中获得竞争优势<sup>[21]</sup>, 同时该种类对低氮环境有更好的适应性, 但是该种类不适应水体营养水平太低尤其是溶解态磷太低的水体, 同时 $H_1$ 功能类群不耐受低磷环境<sup>[22]</sup>. A功能类群多出现在清洁、深水贫营养水体中, 此外扎卡四棘藻和长刺根管藻对低光和低营养盐的环境有较好的适应性<sup>[22]</sup>. 本次洪水事件导致高州水库营养盐的降低, 尤其是溶解态磷的降低是导致枯水期 $H_1$ 功能类群被A功能类群取代的主要原因.

在水体分层的丰水期,洪水前以  $N_A$  功能类群为主,而洪水后以  $L_0$  和 B 功能类群为主. 高州水库  $N_A$  功能类群主要由扁鼓藻、项圈鼓藻、史密斯角星鼓藻和多棘鼓藻组成,这些藻类均耐受低营养条件、具有较大的个体且具有较好的反牧食能力<sup>[7,23-24]</sup>;  $N_A$  功能类群适宜生长的生境较广,贫营养至富营养水体均有分布,水体分层减弱不利于  $N_A$  功能类群的浮游植物种类生长<sup>[22-24]</sup>. 此外,较高的水温有利于鼓藻的生长<sup>[23-24]</sup>.  $L_0$  功能类群的生境分布较广,主要适应于分层的水体营养盐被分隔的水体,不适应于较强混合的水体. 薄甲藻、加顿多甲藻和飞燕角甲藻是高州水库  $L_0$  功能类群的主要浮游植物种类. 甲藻细胞个体较大,且具有运动能力,能耐受低营养条件,尤其是在低磷水体中有较强的竞争能力<sup>[19,22]</sup>. B 功能类群浮游植物以小细胞个体的小环藻和圆筛藻为主,这些藻类细胞体积较小,能耐受低营养环境,繁殖速度比大细胞更快,但是其反牧食能力较差<sup>[7]</sup>. 水体分层是这些功能类群该时期成为优势类群的前提条件,而且这些功能类群均能耐受低营养条件,但  $L_0$  和 B 功能类群对低磷条件有更好的适应性<sup>[19,22]</sup>. 洪水后水体磷浓度的降低是导致  $L_0$  和 B 功能类群取代  $N_A$  功能类群的重要原因. 此外小个体藻类(B 功能类群)的增加可能与洪水事件导致浮游动物群落的变化有关,但是由于本次研究没有对浮游动物进行分析,因此无法获得更多的信息.

## 4 结论

1) 特大洪水事件能够将流域内大量泥沙颗粒带入水库,改变水体沉积物的状态,影响水体营养循环过程,降低枯水期低水位时期内源营养的释放,降低内源营养循环的重要性,导致水体中外源营养输入成为主要的营养来源.

2) 洪水过后总氮浓度和溶解态磷明显降低,水体的营养水平降低.

3) 洪水带入的颗粒物影响水体的透明度和浮游植物生物量,洪水过后,接下来的水体混合导致悬浮物质的再悬浮,降低了水体透明度的同时也减少了浮游植物生物量,但在水体稳定度较高的分层时期,水体透明度升高.

4) 水体理化条件的改变导致浮游植物群落结构的改变,高州水库浮游植物群落由洪水前的蓝藻-绿藻型转变为洪水后的硅藻-甲藻型,浮游植物优势功能类群由洪水前的  $H_1$  和  $N_A$  功能类群转变为洪水后的 A、B 和  $L_0$  功能类群,发生的蓝藻水华消失.

致谢:感谢鉴江流域管理局提供良好的采样条件和相关数据资料!

## 5 参考文献

- [1] Reynolds CS. Ecology of phytoplankton. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [2] Naselli-Flores L. Phytoplankton assemblages in twenty-one Sicilian reservoirs: relationships between species composition and environmental factors. *Hydrobiologia*, 2000, **424**(1/2/3): 1-11.
- [3] Padiśák J, Hajnal E, Naselli-Flores L *et al.* Convergence and divergence in organization of phytoplankton communities under various regimes of physical and biological control. *Hydrobiologia*, 2010, **639**(1): 205-220.
- [4] Naselli-Flores L, Barone R. Phytoplankton dynamics and structure: a comparative analysis in natural and man-made water bodies of different trophic state. *Hydrobiologia*, 2000, **438**(1/2/3): 65-74.
- [5] Sokal MA, Hall RI, Wolfe BB. The role of flooding on inter-annual and seasonal variability of lake water chemistry, phytoplankton diatom communities and macrophyte biomass in the Slave River Delta (Northwest Territories, Canada). *Ecohydrology*, 2010, **3**(1): 41-54.
- [6] Godlewska M, Mazurkiewicz-Boroń G, Pocięcha A *et al.* Effects of flood on the functioning of the Dobczyce reservoir ecosystem. *Hydrobiologia*, 2003, **504**(1): 305-313.
- [7] Naselli-Flores L, Padiśák J, Albay M. Shape and size in phytoplankton ecology: do they matter? *Hydrobiologia*, 2007, **578**(1): 157-161.
- [8] Kiedrzyńska E, Kiedrzyński M, Zalewski M. Flood sediment deposition and phosphorus retention in a lowland river floodplain: impact on water quality of a reservoir, Sulejów, Poland. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2008, **8**(2): 281-289.
- [9] Vincon-Leite B, Bournet PE, Gayte X *et al.* Impact of a flood event on the biogeochemical behaviour of a mesotrophic alpine lake: Lake Bourget (Savoie). *Hydrobiologia*, 1998, **373/374**: 361-377.

- [10] Ibañez MSR. Phytoplankton composition and abundance of a central Amazonian floodplain lake. *Hydrobiologia*, 1997, **362** (1): 79-83.
- [11] García de Emiliani MO. Effects of water level fluctuations on phytoplankton in a river-floodplain lake system (Parana River, Argentina). *Hydrobiologia*, 1997, **357**(1): 1-15.
- [12] Padišák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates. *Hydrobiologia*, 2009, **621**(1): 1-19.
- [13] 郭跃华, 陈修康, 张建林等. 广东省高州水库水华过程中蓝藻群落的动态特征. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 527-533.
- [14] 姚玲爱, 赵学敏, 周广杰等. 广东省高州水库春季蓝藻水华成因初步探讨. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 534-540.
- [15] 国家环境保护局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [17] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [18] Hillebrand H. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. *Journal of Phycology*, 1999, **35**(2): 403-424.
- [19] Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE. Reservoir limnology: ecological perspectives. Wiley-Interscience, 1990.
- [20] 张运林, 秦伯强, 陈伟民等. 太湖水体透明度的分析变化及相关分析. 海洋湖沼通报, 2003, **2**(2): 30-36.
- [21] 成慧敏, 邱保胜. 蓝藻的伪空泡及其对蓝藻在水体中垂直分布的调节. 植物生理学通讯, 2006, **42**(5): 974-980.
- [22] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 4-17.
- [23] Coesel PFM. A method for quantifying conservation value in lentic freshwater habitats using desmids as indicator organisms. *Biodiversity and Conservation*, 2001, **10**(2): 177-187.
- [24] Coesel PFM, Wardenaar K. Growth responses of planktonic desmids species in a temperature-light gradient. *Freshwater Biology*, 1990, **23**(3): 551-560.