

## 一座新建水库——广东剑潭水库浮游植物动态特征\*

李莹<sup>1</sup>, 肖利娟<sup>1</sup>, 林秋奇<sup>1\*\*</sup>, 李传红<sup>2</sup>, 谭镇<sup>2</sup>

(1:暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

(2:广东省惠州市环境科学研究所, 惠州 516001)

**摘要:** 剑潭水库是珠江水系东江下游新建水库, 2006年10月开始蓄水, 2007年6月蓄水完毕. 该水库属直流型水库, 2008年水力滞留时间为0.46-3.62d. 2006-2008年调查了该水库浮游植物的动态特征. 结果表明, 调查期间浮游植物丰度为182-6267 cells/ml, 从空间变化看, 在调查期间, 浮游植物丰度由上游向下游呈上升趋势. 从年间变化看, 蓄水后第一年坝区浮游植物丰度不仅明显高于蓄水前和蓄水期间, 并且浮游植物最高丰度出现在蓄水后第一年的枯水期(12月). 与此同时, 在蓄水过程中, 浮游植物群落结构也逐渐发生了变化, 蓝藻相对丰度明显上升, 绿藻相对丰度呈下降趋势. 水力滞留时间、透明度和总磷是影响剑潭水库浮游植物时空变化的重要因素. 高的平流损失率和低的透明度使得浮游植物现存量与水库氮、磷水平并不相符. 相对较长的水力滞留时间、较高的透明度和总磷导致了浮游植物在蓄水后第一年(2008年)的枯水期出现一个峰值.

**关键词:** 剑潭水库; 水力滞留时间; 浮游植物

## Phytoplankton community in a newly constructed reservoir—Jiantan Reservoir, South China

LI Ying<sup>1</sup>, XIAO Lijuan<sup>1</sup>, LIN Qiuqi<sup>1</sup>, LI Chuanhong<sup>2</sup> & TAN Zhen<sup>2</sup>

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

(2: *Research Institute of Environmental Science of Huizhou, Huizhou 516001, P. R. China*)

**Abstract:** Jiantan Reservoir was newly constructed in 2006, and it took eight months to fill the reservoir from October 2006 to June 2007. The reservoir is a through-flowing reservoir with retention time varying from 0.46 to 3.62 d in 2008. Phytoplankton in the reservoir, was investigated to analyze early variation of water quality from 2006 to 2008. Phytoplankton abundance varied from 182 to 6267 cells/ml, and was predominated by Chlorophyta. During the investigation, phytoplankton abundance generally increased from the upstream to downstream. After impoundment, both phytoplankton abundance and the relative abundance of Cyanophyta were much higher than those before impoundment or during filling at the dam site. Water retention time, secchi disk depth and total phosphorus were the three possible factors controlling the temporal and spatial variations of phytoplankton abundance and community structure. High advective loss rate and low secchi disk depth made the standing crop of phytoplankton being lower than that in those reservoirs with the same trophic state but longer water retention time. In December, 2008, the first year after filling, the relatively longer water retention time, higher secchi disk depth and total phosphorus concentration resulted in the “upsurge” of phytoplankton abundance.

**Keywords:** Jiantan Reservoir; water retention time; phytoplankton

河流筑坝形成水库之后, 由于理化环境发生了剧烈的变化, 浮游生物群落相应发生了变化, 而且一般要经过4-10年的波动后, 群落结构才趋于稳定<sup>[1-3]</sup>. 对于浮游生物而言, 它们首先要面临的是生境由河流向水库过渡后水力滞留时间的剧烈变化所带来的影响. 水力滞留时间与稀释和平流损失率密切相关<sup>[4,5]</sup>. 但是, 在不同水库, 由于水库蓄水前后水力滞留时间变化幅度不同, 浮游生物对水力滞留时间变化的响应程度有

\* 广东省科技攻关项目(2005B360001085)和教育部博士点基金新教师类项目(20094401120009)联合资助. 2009-11-12收稿; 2009-12-09收修改稿. 李莹, 女, 1986年生, 硕士研究生; E-mail: liying860@yahoo.com.cn.

\*\* 通讯作者; E-mail: tlinqq@jnu.edu.cn.

所不同.其次,在水库蓄水之后,随着被覆植被腐烂降解及土壤中有机质和营养盐的释放,水库通常出现一个“营养上升”期<sup>[2,6]</sup>,导致浮游植物生产率和现存量的大幅度上升.由于流域的气候、植被、库盆形态特征以及水库运转模式等的不同,不同地区水库在蓄水初期浮游生物动态过程可能会表现出不同的特征<sup>[3]</sup>.本文调查了我国亚热带地区新建水库——剑潭水库在蓄水前后的3年里浮游植物群落结构动态变化特征,分析了水力滞留时间、营养盐和透明度等因素对浮游植物群落结构动态变化的影响.

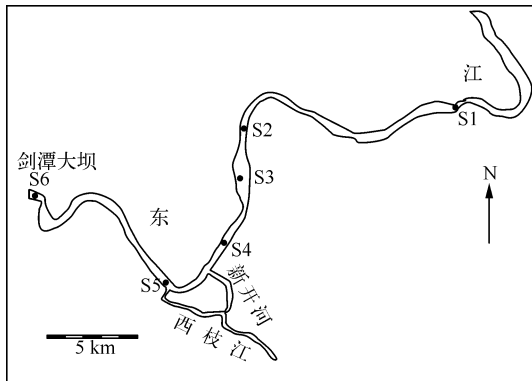


图1 剑潭水库采样点示意图

Fig. 1 Sampling sites of Jiantan Reservoir

磷营养盐浓度远高于东江干流,导致了位于西枝江与东江干流汇合处下游的S5样点氮、磷营养盐浓度明显高于其它样点<sup>[7]</sup>(图1).

## 1.2 研究方法

依水流方向,由上游至大坝共设6个采样点(图1).其中,S1采样点位于水库回水区的上游,其它5个采样点均位于水库之内.在2006-2008年期间,每年的4月、8月和12月初进行采样,分别代表丰水期初期、丰水期和枯水期.用萨氏盘测定透明度;在表层0.5m处各采1L水,用饱和碳酸镁固定并现场置冰箱4℃保存,按林少君等<sup>[8]</sup>的方法测定叶绿素a浓度(Chl. a);浮游植物定量样品用采水器在表层0.5m处采水1L,现场用福尔马林固定,最终浓度为4%,带回实验室浓缩计数;浮游植物定性样品用30μm浮游生物网于垂直方向和水平方向进行拖网,用4%福尔马林固定.分析浮游植物群落结构的季节性变化时,先计算各季节浮游植物的Pearson相关系数,然后采用类间平均链锁法的聚类分析对各季节浮游植物群落结构进行聚类.

## 2 结果与分析

### 2.1 水动力学特征

在调查的3年期间,水库水位的变化可明显的分为三个阶段:频繁波动阶段、上升阶段和稳定阶段.在2006年10月10日水库开始下闸蓄水之前,水位波动比较频繁,并且水位的高低与入库流量密切相关(图2).在下闸蓄水之前,枯水期由于流量比较低,水位相应比较低,在3-5m间波动;在丰水期,随着流量的增加,水位相应上升,最高时为11.4m.2006年10月10日至2007年6月10日是水库下闸蓄水期间,在该时期,水位逐渐上升,并于2007年6月10日达到10m左右.此后,水库水位一直维持在10.5m左右,入库流量与出库流量基本上保持一致.

在剑潭水库开始正常运行之前,水力滞留时间取决于入库流量和水位;在正常运行之后,水位一般维持在10.5m左右,也就是库容基本上保持不变,水力滞留时间取决于入库流量.在剑潭水库开始正常运行的2008年,各月份的水力滞留时间变幅为0.46-3.62d,12月份水力滞留时间最长,6月份水力滞留时间最短.在丰水期的6月、7月和8月,水力滞留时间均不超过1d,而在枯水期,最长水力滞留时间也只有3.62d(图3).也就是说,剑潭水利枢纽是一个河流型水库.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究概况

东江是广东省最重要的饮用水源之一,但是,自20世纪90年代以来,由于东江河道无序采沙严重,中、下游河道普遍下切,造成枯水期水位急剧下降,严重影响到中游河段各供水工程的正常蓄水.位于东江干流中游的大型水利枢纽工程——剑潭大坝的修建,不仅抬高了中游河段的水位,从根本上解决了上述问题,而且还兼顾发电.剑潭大坝于2005年4月开始修建,2006年10月10日开始下闸蓄水.剑潭水库正常运行后,水库水位维持在10.5m左右,相应库容为 $11640 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,水面面积 $46 \text{ km}^2$ ,回水影响的河段长度约31.7km.西枝江是东江中游最大的支流,由于其上游受工、农业污染严重,氮、

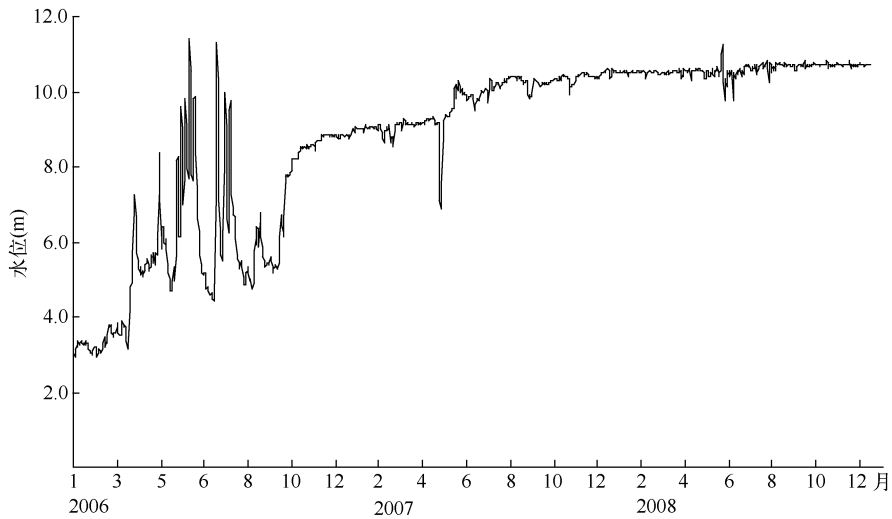


图2 2006-2008年期间水位变化  
Fig. 2 Water level fluctuation during 2006-2008

## 2.2 种类组成

调查期间共检测到浮游植物 160 种, 其中绿藻 97 种, 硅藻 34 种, 蓝藻 15 种. 常见属有绿藻门的胶网藻 (*Dictyosphaerium*)、十字藻 (*Crucigenia*)、栅藻 (*Scenedesmus*)、纤维藻 (*Ankistrodesmus*)、衣藻 (*Chlamydomonas amydomonas*)、多芒藻 (*Golenkinia*)、绿球藻 (*Chlorococum*)、月牙藻 (*Selenastrum*) 等; 硅藻门的针杆藻 (*Synedra*)、小环藻 (*Cyclotella*)、舟形藻 (*Navicula*)、直链藻 (*Melosira*)、桥弯藻 (*Cymbella*) 和异极藻 (*Gomphonema*) 等; 蓝藻门的平裂藻 (*Merismopedia*)、假鱼腥藻 (*Pseudoanabaena*)、隐球藻 (*Aphanocapsa*) 和色球藻 (*Chroococcus*) 等.

## 2.3 浮游植物丰度与叶绿素 a

在调查期间, 浮游植物丰度变幅为 182-6267 cells/ml, 最高丰度出现在 2006 年 4 月的东江与西枝江交汇处 (S5), 最小丰度出现在 2006 年 4 月的 S4 样点 (图 4). 从年际变化看, S5 样点在剑潭大坝下闸蓄水后 (2007 和 2008 年) 浮游植物丰度明显低于蓄水前的 2006 年; 在剑潭大坝处 (S6), 2006、2007 和 2008 年的 4 月份浮游植物丰度差别不大 (图 4), 但是, 在 8 月和 12 月, 2008 年浮游植物丰度明显高于前两年 (图 4); 在回水区上游 (S1), 蓄水后的 2007 和 2008 年 4 月浮游植物丰度明显高于 2006 年 4 月, 但是, 在 8 月和 12 月, 蓄水前的 2006 年浮游植物丰度明显高于蓄水后的 2007 和 2008 年.

从季节性变化看, 在剑潭大坝 (S6), 在水位逐渐上升的 2007 年, 浮游植物最高丰度出现在丰水期初期的 4 月份, 在水位基本维持不变的 2008 年, 浮游植物最高丰度均出现在水力滞留时间最长的 12 月份 (枯水期); 东江干流与西枝江交汇处 (S5) 浮游植物在蓄水前的 2006 年最高丰度出现在丰水期初期的 4 月份, 但是在开始蓄水后的 2007 和 2008 年, 浮游植物最高丰度反而出现在水力滞留时间最短的 8 月份 (丰水期); 回水区上游 (S1) 浮游植物在蓄水前的 2006 年最高丰度出现在 12 月份, 但是, 在开始蓄水后的 2007 和 2008 年, 浮游植物最高丰度反而出现在 4 月份. 从空间变化看, 在枯水期的 12 月份, 2008 年浮游植物最高丰度出现在剑潭大坝 (S6), 而且浮游植物丰度由上游向下游基本呈上升趋势; 2006 和 2007 年最高浮游植物丰度出

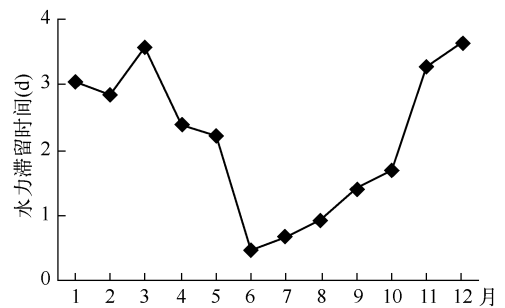


图3 2008年各月份平均水力滞留时间

Fig. 3 Seasonal variation of water retention time in 2008

现在东江干流与西枝江交汇处(S5), 剑潭大坝(S6)浮游植物丰度也明显高于上游其它几个样点. 在丰水期(4月和8月), 下游两个样点(S5和S6)浮游植物丰度明显高于上游的S2、S3和S4样点.

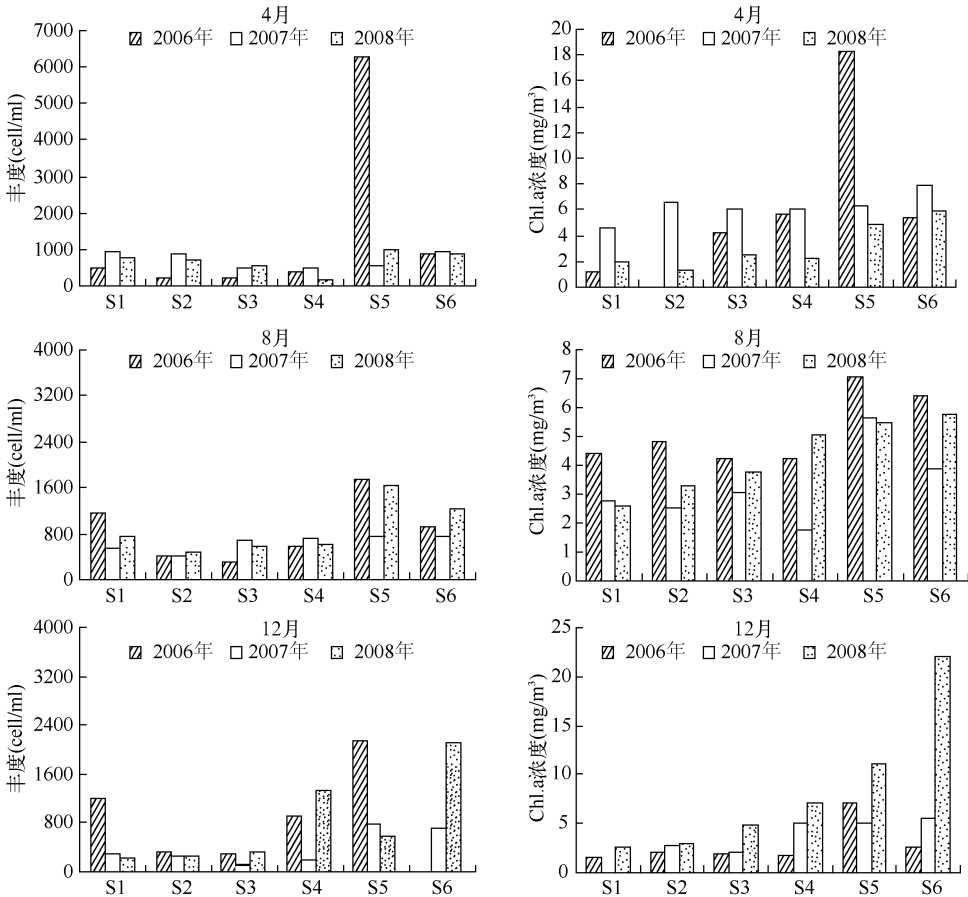


图4 2006-2008年4月、8月和12月各采样点浮游植物丰度和叶绿素a浓度变化  
Fig. 4 Spatial and annual variations of phytoplankton abundance and chlorophyll-a in April, August and December during 2006-2008

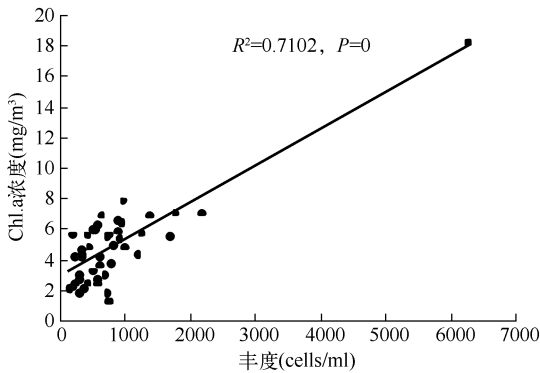


图5 浮游植物丰度与叶绿素a浓度相关关系  
Fig. 5 Relationship between phytoplankton abundance and chlorophyll-a

在调查期间, 叶绿素a浓度变幅为1.3-22.1mg/m³, 最高浓度出现在2008年12月的剑潭大坝处(S6), 最小浓度出现在2008年4月的S2样点(图4). 叶绿素a浓度与浮游植物丰度呈显著正相关, 也就是说, 叶绿素a浓度可以在一定程度上反映浮游植物的生物量, 而且叶绿素a浓度的时空变化特征与浮游植物丰度基本上是一致的(图5). 从年际变化看, 在剑潭大坝处(S6), 4月和8月份叶绿素a浓度在2006、2007和2008年三年间差别不是太大(图4), 但是, 在12月, 叶绿素a浓度逐年上升, 尤其在水位基本维持不变的2008年, 叶绿素a浓度增幅相当大. 从季节性变化看, 剑潭大坝(S6)在水位逐渐上升的2007年, 最高叶

绿素 a 浓度出现在 4 月份,在水位基本维持不变的 2008 年,最高叶绿素 a 浓度出现在水力滞留时间最长的 12 月份.从空间变化看,在水位基本维持不变的 2008 年,各月份叶绿素 a 浓度均由上游向下游呈上升趋势;在水位逐渐上升的 2007 年,4 月和 12 月份叶绿素 a 浓度均由上游向下游呈上升趋势,8 月份则最高叶绿素 a 浓度出现在 S5 样点处;在大坝下闸蓄水之前的 2006 年,各月份最高叶绿素 a 浓度均出现在 S5 样点处.

影响浮游植物生长的非生物因素包括温度、光照、营养盐和水力滞留时间(平流损失率)等<sup>[9]</sup>.在营养盐、光照和水温都比较合适的情况下,浮游植物的生长速率可以保持在一个比较高的水平上.但是,在水流流速比较快的水体中,如河流或水库,即使在浮游动物牧食压力很低,高的浮游植物生长速率也不一定导致高的现存量,因为高的平流损失率大大抵消了浮游植物的生长速率<sup>[10]</sup>.水体水力滞留时间是反映平流损失率的一个重要参数.Kawara 等<sup>[11]</sup>认为水力滞留时间影响浮游植物增长速率的阈值为 14d.在温带地区,温度和光照是引起水体浮游植物季节性变化的主要因素之一<sup>[9]</sup>.在热带地区,由于温度的季节性变化没有温带地区那么显著,水库浮游植物群落季节性变化更大程度上与流域水文的季节性变化相关<sup>[12-13]</sup>.水库营养盐、悬浮颗粒物和水利滞留时间与流域水文循环密切相关.对水库浮游植物来说,营养盐主要是外源性的,依靠流域径流输送,并取决于流域地质、土地利用和降雨地表径流强度等<sup>[14-15]</sup>.因流域径流量的季节性和短期性变化,流域营养盐和悬浮颗粒物输送量相应出现季节性和短期性变化,影响了浮游植物的生长<sup>[16]</sup>.与此同时,水库是一种介于河流和湖泊的人造水体,具有明显的入库和出库水流,水流流速比同等水面面积的湖泊要快得多,水流流速的季节性和短期性变化也是控制水库浮游植物生物量的重要因素之一<sup>[2,16]</sup>.

表 1 浮游植物与环境变量偏相关分析\*

Tab. 1 Partial correlation between phytoplankton and environmental variables

环境变量	控制:SD 和 TP		控制:Ret 和 SD		控制:Ret 和 TP	
	Ret		TP		SD	
	R	P	R	P	R	P
Chl. a 浓度	0.834	0.010	0.845	0.008	-0.687	0.044
绿藻丰度	0.809	0.026	0.783	0.033	-0.647	0.082
硅藻丰度	0.919	0.005	0.841	0.018	-0.719	0.054

\* Ret 表示水力滞留时间.

由于剑潭水库水力滞留时间、营养盐和透明度的动态变化与水文循环密切联系在一起,它们相互间的内在联系通常影响了直观判断分析它们各自与浮游植物的本质联系.为了分析这三个因素各自对浮游植物的影响,采用偏相关分析方法,控制其中两个因素,分析另外一个因素与浮游植物的相关性.在剑潭大坝,叶绿素 a 浓度、绿藻丰度和硅藻丰度均与水力滞留时间和总磷浓度呈显著正相关关系;叶绿素 a 浓度与透明度呈显著负相关关系,而绿藻丰度和硅藻丰度与透明度也呈负相关关系,但不显著(表 1).在蓄水前后,由于水力滞留时间、营养盐和悬浮颗粒物发生了一定程度的变化,浮游植物现存量相应发生了变化.在剑潭水库正常运行后的 2008 年 12 月,坝区营养盐正处于“营养上升”期,水力滞留时间是调查期间最长,悬浮颗粒物比较低,透明度相对比较高<sup>[7]</sup>,导致了剑潭大坝处浮游植物现存量出现一个峰值.透明度( $R=0.62, P=0.021$ )和营养盐浓度( $R=0.802, P=0.01$ )的空间差异是导致浮游植物现存量空间差异的主要非生物因素.剑潭大坝(S6)和东江与西枝江交汇处(S5)相对较高的透明度以及 TN 和 TP 浓度导致了浮游植物现存量明显高于上游的 S2、S3 和 S4 样点.

#### 2.4 浮游植物组成特征

在 4 月份,各采样点基本上都以绿藻为第一优势类群,硅藻为第二优势类群,蓝藻为第三优势类群(图 6).从空间变化看,在 2006 和 2007 年,下游的东江干流与西枝江交汇处(S5)和剑潭大坝(S6)绿藻优势度明显高于上游的 4 个采样点,硅藻优势度则相反,下游 2 个采样点明显低于上游 4 个采样点;在 2008 年,下游的剑潭大坝绿藻优势度低于上游的 S2、S3 和 S5 采样点,与 S1 采样点差别不大,但蓝藻优势度明显高于上游 5 个采样点,并且成为第二优势类群.从年际变化看,在 S6 采样点,在水位基本维持不变的 2008 年,绿藻优势度比前两年有所降低,但蓝藻优势度明显上升.

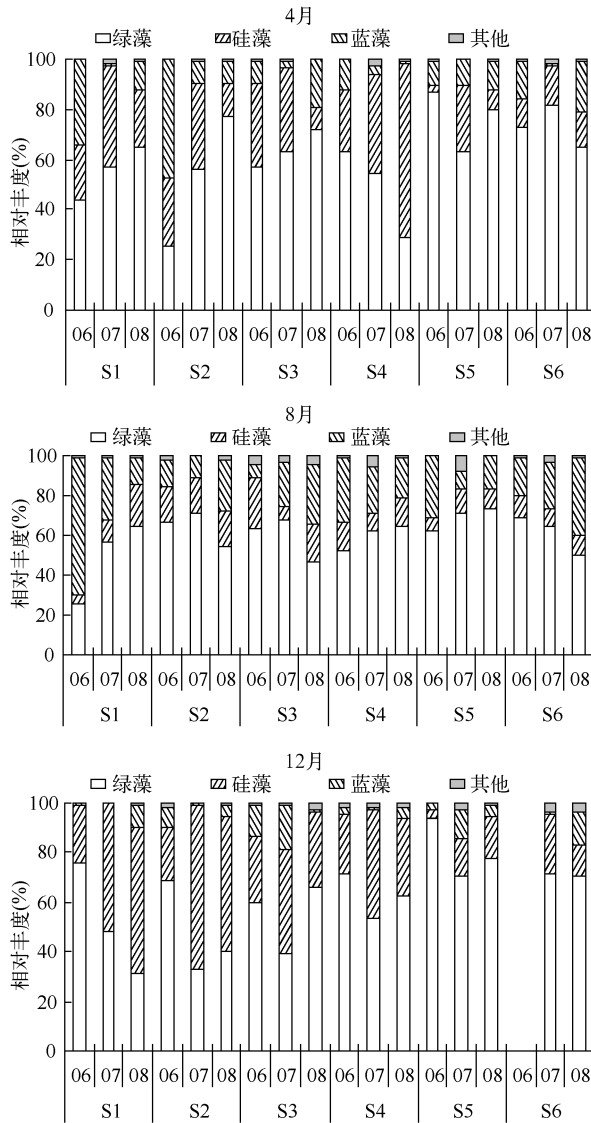


图 6 2006 - 2008 年 4 月、8 月和 12 月份各采样点浮游植物组成特征 (06、07、08 分别代表 2006 年、2007 年、2008 年)

Fig. 6 Spatial and annual variations of phytoplankton composition in April, August and December during 2006 - 2008

在 8 月份,在多数情况下,各采样点以绿藻为第一优势类群,蓝藻为第二优势类群,硅藻为第三优势类群,蓝藻优势度明显高于同年的 4 月和 12 月(图 6).从空间变化看,在 2006 和 2007 年,剑潭大坝(S6)绿藻优势度高于回水区上游的 S1 采样点,而蓝藻优势度则明显低于回水区上游的 S1 采样点;在水位基本维持不变的 2008 年,剑潭大坝绿藻优势度低于回水区上游的 S1 采样点,而蓝藻优势度高于回水区上游的 S1 采样点.从年际变化看,S6 采样点在水位基本维持不变的 2008 年,绿藻优势度比前两年有所降低,但蓝藻优势度明显上升.

在 12 月份,下游的 4 个采样点各年份均以绿藻为第一优势类群,硅藻为第二优势类群,蓝藻为第三优势类群;上游的 2 个采样点在 2006 年以绿藻为第一优势类群,硅藻为第二优势类群,但在 2007 和 2008 年,以

硅藻为第一优势类群,绿藻为第二优势类群.从空间变化看,下游2个采样点绿藻优势度明显高于上游4个采样点,硅藻优势度则低于上游4个采样点.从年际变化看,剑潭大坝在水位基本维持不变的2008年,硅藻优势度比2007年有所降低,但蓝藻优势度明显上升;在回水区上游的S1采样点,绿藻优势度逐年下降,而硅藻优势度逐年上升.

尽管多数蓝藻种类对水流流速很敏感<sup>[17]</sup>,但是,即使在流速比较急的河流中,仍然存在诸如色球藻、假鱼腥藻、*Planktothrix*和颤藻等蓝藻种类的分布,而且一旦水力滞留时间延长,它们的种群密度可以大大升高<sup>[18-19]</sup>.在剑潭大坝正常运行后的2008年12月,水力滞留时间是调查期间最长,总磷浓度相对比较高,悬浮颗粒物比较低,透明度相对比较高<sup>[7]</sup>,导致了剑潭大坝处蓝藻丰度和优势度均明显高于2006和2007年.

为了分析大坝下闸蓄水前后S6采样点浮游植物群落结构的变化,对S6采样点在调查三年期间的浮游植物组成进行聚类分析(图7),在Pearson相关系数0.75的水平上,各月份浮游植物组成可分为五类.第一类为2006年的4月和8月、2007年的4月和8月,绿藻优势度明显高于2008年的4月和8月,并且以胶网藻和栅藻为优势种类,它们的总优势度为50%左右.其中,2006和2007年4月以绿藻门中的胶网藻为第一优势种,栅藻为第二优势种;而2006和2007年8月以栅藻为第一优势种,胶网藻为第二优势种,假鱼腥藻为第三优势种类.第二类为2008年4月,绿藻优势度比2006和2007年4月明显降低,以胶网藻为第一优势种,栅藻为第二优势种,但栅藻优势度明显低于前两年,与此同时,十字藻的优势度明显上升,成为第三优势种类.第三类为2008年8月,绿藻优势度继续下降,以蓝藻门的隐球藻成为第一优势种,平裂藻为第二优势种类,假鱼腥藻为第三优势种类.第四类为2007年12月,胶网藻的相对优势度高达50%,为绝对优势种类.第五类为2008年12月,优势种类为绿藻门中具鞭毛的种类,其中衣藻为第一优势种类,实球藻为第二优势种类.由以上分析可知,在4月份,水位基本维持不变的2008年比水位尚未稳定的2006和2007年绿藻优势度下降,十字藻优势度上升;在8月份,浮游植物群落由2006和2007年以绿藻门的栅藻和胶网藻为主要优势种类演变为2008年以隐球藻和平裂藻等蓝藻种类为主要优势种;在12月份,浮游植物由2006和2007年以胶网藻为绝对优势演变为2008年以衣藻和实球藻占优势.

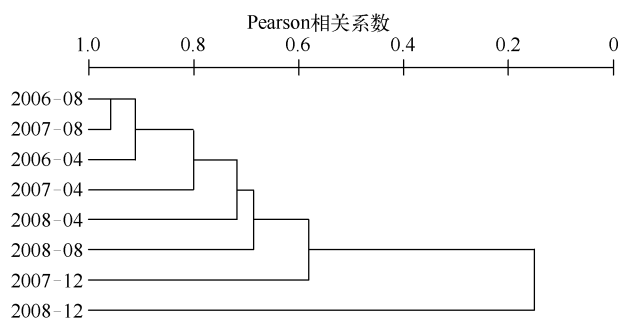


图7 S6采样点浮游植物群落结构聚类分析

Fig. 7 Cluster analysis of S6 sampling site based on phytoplankton composition

### 3 参考文献

- [ 1 ] Ioriya T, Inoue S, Haga M *et al.* Change of chemical and biological water environment at a newly constructed reservoir. *Wat Sci Tech*, 1998, **37**(2): 187-194.
- [ 2 ] Straskraba M, Tundisi JG, Duncan A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management. In: Straskraba M, Tundisi JG, Duncan A eds. *Comparative reservoir limnology and water quality management*. The Netherlands; Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [ 3 ] 林秋奇,赵帅营,韩博平. 新建水库(飞来峡水库)蓄水初期轮虫和甲壳类浮游动物动态. *生态学杂志*, 2006, **25**: 270-276.
- [ 4 ] Dimberger JM, Threlkeld ST. Advective control of reservoir zooplankton abundance and dispersion. *Freshwater Biology*, 1986, **16**: 387-396.

- [ 5 ] Threldeid ST. Water renewal effects on reservoir zooplankton communities. *Can Water Res*, 1982, **7**: 151-167.
- [ 6 ] Straskraba M, Tundisi JG. Reservoir water quality management. International Environment committee, 1999.
- [ 7 ] 刘 静, 李 莹, 韩博平等. 剑潭大坝蓄水前后东江惠州河段营养盐动态. 水文, 2009 (已接收, 待发表).
- [ 8 ] 林少君, 贺立静, 黄沛生等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进. 生态科学, 2005, **24**(1): 9-11.
- [ 9 ] Reynolds CS. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [ 10 ] 林秋奇, 韩博平. 热带直流水库蓝藻季节变化特征. 热带亚热带植物学报, 2007, **15**(2): 152-159.
- [ 11 ] Kawara O, Yura E, Fujii S *et al.* A study on the role of hydraulic retention time in eutrophication of the Asahi River Dam Reservoir. *Wat Sci Tech*, 1998, **37**(2): 245-252.
- [ 12 ] Cleber CF, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2001, **445**: 165-174.
- [ 13 ] Nogueira MG. Phytoplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Parapanema River), Sao Paulo, Brazil. *Hydrobiologia*, 2000, **431**: 115-128.
- [ 14 ] Kimmel BL, Lind OT, Paulson LJ. Reservoir primary production. In: Thornton KW, Kimmel BL, Payne FE eds. Reservoir limnology: Ecological perspectives. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [ 15 ] 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**: 1034-1040.
- [ 16 ] 林秋奇, 胡 轲, 韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响. 生态学报, 2003, **23**: 2278-2284.
- [ 17 ] Reynolds CS, Huszar V, Kruk C *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research*, 2002, **24**(5): 417-428.
- [ 18 ] Reynolds CS, Descy JP. The production, biomass and structure of phytoplankton in large rivers. *Archiv für Hydrobiologie (Supplement)*, 1996, **113**: 161-187.
- [ 19 ] Wehr J, Descy JP. Use of phytoplankton in large river management. *Journal of Phycology*, 1998, **34**: 741-749.