

# 粤北三座典型中型水库富营养化与浮游植物群落特征

侯伟, 黄成, 江启明, 雷腊梅, 胡韧\*

暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632

**摘要:** 于 2010 年丰水期(8 月)和枯水期(12 月)采集粤北地区 3 座中型水库(沐溪、苍村和赤石迳水库)的水和浮游植物, 分析植物群落与水质, 以考察季节性温度差异与鱼类养殖对水库水质和浮游植物群落结构的影响。结果表明, 3 座水库分别属富营养、中营养和中营养水平, 营养盐质量浓度丰水期高于枯水期。共鉴定浮游植物 7 门 56 种(属), 群落组成以蓝藻、绿藻和硅藻为主。沐溪水库丰枯两季均以蓝藻为优势类群, 其浮游植物丰度和生物量明显高于其余两座水库( $p < 0.01$ ); 苍村和赤石迳水库丰水期优势门类均为蓝藻, 枯水期均为硅藻。3 座水库浮游植物丰度均表现为丰水期高于枯水期, 生物量则枯水期高于丰水期, 但均无显著性差异( $p > 0.05$ )。RDA(冗余分析)结果表明, 透明度、总氮和悬浮物是影响浮游植物群落结构的主要因素; 其中, 沐溪水库的营养盐和悬浮物与浮游植物群落正相关, 苍村和赤石迳水库浮游植物群落则与水深和透明度正相关; 温度对浮游植物群落的影响主要体现在种类组成的季节差异上。营养盐和优势种类的季节差异造成了浮游植物丰度和生物量在丰水期和枯水期的不一致。聚类分析将不同季节的 3 座水库分为 2 个类区, 非养鱼水库苍村和赤石迳水库为第一类区, 养鱼的沐溪水库为第二类区。沐溪水库库区内发展鱼类养殖业为浮游植物提供了高质量浓度营养盐(尤其是总磷), 即使在温度较低的冬季仍支持蓝藻种类的优势性。

**关键词:** 韶关; 营养盐; RDA; 聚类分析; 鱼类养殖

**中图分类号:** X173

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2011) 05-0913-07

富营养化是由水体中营养盐(一般为氮、磷)浓度过高引起的, 往往会导致水华和水体缺氧等现象, 是当前水环境的主要问题之一<sup>[1]</sup>。浮游植物作为水生态系统的主要初级生产者之一是食物链的重要组成部分, 为水体提供溶解氧, 对维持水生态系统健康具有重要作用<sup>[2]</sup>。在不同营养类型水体中, 浮游植物的种类组成和数量变化有明显差异<sup>[3-4]</sup>; 富营养化水体中通常以蓝藻为优势种类, 而中营养水体的浮游植物群落更具多样性。在广东省, 75%的供水由水库提供, 但其水质不容乐观。2000年, 对广东省 19 座水库进行了营养现状和浮游植物种群的调查研究<sup>[5-6]</sup>, 发现多数水库属于中富营养水平, 浮游植物常年多以蓝藻门种类为优势类群。目前, 对广东省水库富营养化和浮游植物群落的研究主要集中在珠三角以及粤西地区<sup>[7-9]</sup>, 对粤北地区水库的研究和资料比较少, 粤北山区水库的营养状况、浮游植物群落结构的动态变化及其影响因素并不清楚。韶关市位于中国亚热带南缘, 地处农业比较发达的粤北山区。与广东南部及西部沿海地区相比, 粤北山区季节变化明显, 丰枯两季温差和降雨量有明显差异。因此, 与南部和西部沿海地区的水库相比, 该地区水库的浮游植物群落结构可能受季节性温差影响更大。该地区的部分中小型水库鱼类

养殖普遍, 而鱼类养殖通常是导致水体富营养化的重要因素<sup>[10-11]</sup>; 但在粤北山区水库具有较大的季节性温差, 人类活动导致的富营养化对浮游植物群落结构的影响可能与北回归线以南的水库有所不同。

我们分别在丰水期(8 月)和枯水期(12 月)对粤北地区 3 座典型的受人类影响程度不同的中型水库的水质特点和浮游植物群落进行研究分析, 以考察气候引起的季节性温度差异和鱼类养殖对水库水质和浮游植物群落结构的影响, 为当地水库水质管理工作提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 水库特征参数

以韶关市沐溪(N 24°46', E 113°29')、苍村(N 24°40', E 113°39')和赤石迳水库(N 25°06', E 113°39')为调查对象, 分别于 2010 年丰水期(8 月)和枯水期(12 月)进行调查研究。3 座水库均为天然蓄水的中型水库, 受人类活动影响依次减弱; 其中沐溪水库库区内多年发展鱼类养殖业, 不作为饮用水源地; 苍村水库属新建水库。表 1 列举了所调查水库的主要特征参数。

### 1.2 采样方法与样品处理

在 3 座水库敞水区各设 3 个采样点, 每个采样点相隔 30~50 m, 于 2010 年 8 月(丰水期)和 12 月(枯

**基金项目:** 广东省水利厅科技创新项目(2009-22)

**作者简介:** 侯伟(1984 年生), 女, 博士研究生, 主要从事水域生态学研究。E-mail: jiawei0926@163.com

\*通信作者: 胡韧。E-mail: thuren@jnu.edu.cn

**收稿日期:** 2011-04-20

表1 沐溪、苍村、赤石迳水库的特征参数  
Table 1 Characteristic parameters of three reservoirs

水库	沐溪	苍村	赤石迳
建库时间	1975	2007	1958
库容(以 $10^6$ 计)/ $m^3$	11	61	12
集雨面积/ $km^2$	16.5	93.8	14.1
平均水深/m	14.1	42.4	21.3
功能	养鱼, 灌溉, 饮用, 工业	灌溉, 饮用, 发电	

水期)进行了野外采样调查。

用 YSI-85 水质监测仪现场测定水温(WT)、电导率、溶解氧(DO)、pH; 用赛氏盘测定透明度(SD)。化学指标总磷(TP)、总氮(TN)、正磷酸盐磷( $PO_4^{3-}-P$ )、硝酸盐氮( $NO_3^- -N$ )、亚硝酸盐氮( $NO_2^- -N$ )、氨氮( $NH_4^+ -N$ )、悬浮物(SS)用国家标准方法测定<sup>[12]</sup>。叶绿素 a 质量浓度的测定采用改进的反复冻融-解冻丙酮萃取的方法<sup>[13]</sup>。本文采用总磷、总氮、透明度和叶绿素 a 4 种参数综合评定水库营养状态<sup>[6]</sup>。浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网(64  $\mu m$ )于垂直方向和水平方向进行拖网; 定量样品于 0.5 m 水深处取 1 L 水样, 定性定量样品均在现场用 4% 的福尔马林固定, 回到实验室后在显微镜(OLYMPUS BX51)下进行鉴定和计数。

### 1.3 数据分析

用 CANOCO 4.5 软件进行除趋势对应分析(DCA), 梯度长度为 3.4, 选择冗余分析(RDA)分析浮游植物的群落结构与环境因子之间的关系。为使浮游植物的生物量和环境因子的数据获得正态分布, 将其进行  $\log(x+1)$  转换<sup>[14]</sup>。分层聚类分析采用 SPSS 16.0 软件, 以欧式距离平方作为距离测度方法, 以组间连接方法进行聚类<sup>[15]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 理化因子及营养状态

沐溪、苍村和赤石迳水库丰水期(8月)的降雨量分别为 162、62 和 74 mm, 在枯水期(12月)均无降雨; 且温度有明显的季节差异( $p < 0.01$ ), 丰水期和枯水期的平均温度分别为 32.2 和 20.3  $^{\circ}C$ 。苍村和赤石迳水库透明度相对较高, 采样期间均高于 2 m, 而沐溪水库的透明度均低于 1 m。3 座水库 pH 均呈

表2 3座水库的理化参数  
Table 2 Variables of water quality in three reservoirs

	沐溪水库		苍村水库		赤石迳水库	
	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
降雨量/ $mm^*$	162	0	62	0	74	0
水温/ $^{\circ}C$	33.5	19.9	31.9	21.5	31.3	19.4
透明度/m	0.7	0.7	2.6	3.1	3.1	2.4
pH	9.10	8.52	9.19	7.60	8.26	7.49
$\rho(SS)/(mg \cdot L^{-1})$	8.07	5.2	2.25	0.2	0.71	1.6
$\rho(TP)/(mg \cdot L^{-1})$	0.038	0.09	0.007	0.025	0.002	0.017
$\rho(TN)/(mg \cdot L^{-1})$	0.37	1.04	0.52	0.49	0.68	0.47
$\rho(Chl a)/(\mu g \cdot L^{-1})$	21.4	66.0	3.0	4.7	1.7	4.4
TSI( $\Sigma$ )	47	53	34	34	30	35

\*降雨量数据由广东省水利厅水资源管理处提供

碱性, 范围在 7.49~9.19。沐溪水库的悬浮物质量浓度明显高于其他两座水库, 总体在 0.2~8.07  $mg \cdot L^{-1}$ 。

3 座水库 TP 质量浓度在 0.002~0.09  $mg \cdot L^{-1}$ , 沐溪水库和苍村水库的 TP 质量浓度均超过发生富营养化的质量浓度阈值(0.02  $mg \cdot L^{-1}$ ), 赤石迳水库 TP 质量浓度最低, 平均为 0.01  $mg \cdot L^{-1}$ 。TN 质量浓度在 0.37~1.04  $mg \cdot L^{-1}$  之间, 最低值和最高值分别出现在沐溪水库丰水期和枯水期, 其他两座水库 TN 质量浓度在时间上相差不大。沐溪水库的叶绿素 a 质量浓度明显高于其他两座水库, 最高达 66  $\mu g \cdot L^{-1}$  (枯水期), 苍村和赤石迳水库均低于 5  $\mu g \cdot L^{-1}$ 。3 座水库的 TSI 在 30~53 之间, 沐溪水库明显高于苍村和赤石迳水库; 时间上, 沐溪和赤石迳水库的 TSI 枯水期要高于丰水期, 而苍村水库的营养状态指数在时间上无差异。通过营养状态指数计算, 沐溪水库平均为 50, 属富营养型水库, 苍村水库和赤石迳水库分别为 34 和 32.5, 均属中营养型水体。

水体中叶绿素 a 质量浓度能够反映浮游植物生物量的高低, 体现了水体初级生产力和富营养化水平<sup>[16]</sup>。通过叶绿素 a 和 TP、TN 质量浓度以及水温的相关性分析(表3)发现, 在全年水平上, 3 座水库的叶绿素 a 质量浓度与 TP 质量浓度显示极显著的正相关关系( $p < 0.01$ ), 与水温都显示极显著的负相关关系( $p < 0.01$ ); 表明在粤北山区的水库中, TP 质量浓度和温度都会影响浮游植物的生长和季节变化。而

表3 沐溪、苍村和赤石迳水库叶绿素质量浓度和氮磷质量浓度、水温的相关性  
Table 3 Correlation between Chlorophyll a and nitrogen and phosphorus concentrations

	沐溪水库	苍村水库	赤石迳水库
Chl a 质量浓度-TP 质量浓度	Chl a = -10.497 + 849.006TP $r = 0.998, p < 0.01, n = 6$	Chl a = 2.215 + 105.45TP $r = 0.953, p < 0.01, n = 6$	Chl a = -10.497 + 849.006TP $r = 0.940, p < 0.01, n = 6$
Chl a 质量浓度-TN 质量浓度	Chl a = -1.564 + 64.050TN $r = 0.968, p < 0.01, n = 6$	Chl a = 8.372 - 8.863TN $r = 0.442, p > 0.05, n = 6$	Chl a = 7.175 - 7.218TN $r = 0.772, p > 0.05, n = 6$
Chl a 质量浓度-水温(WT)	Chl a = 130.804 - 3.264WT $r = 0.997, p < 0.01, n = 6$	Chl a = 8.16 - 1.61WT $r = 0.968, p < 0.01, n = 6$	Chl a = 8.854 - 0.229WT $r = 0.967, p < 0.01, n = 6$

在广东珠海的大镜山水库，叶绿素的质量浓度虽然与温度呈负相关，但没有达到显著性水平 ( $p>0.05$ )<sup>[8]</sup>，表明南部沿海的水库的水温对浮游植物生长和数量积累的季节动态影响不如粤北山区的明显。苍村和赤石迳水库的叶绿素质量浓度与TN质量浓度并没有显著的相关关系 ( $p>0.05$ )。从氮磷比来看，苍村和赤石迳水库的氮磷摩尔比分别为109和371，均属于磷限制水体，浮游植物生物量更容易受到磷质量浓度的影响，而TN对浮游植物的影响减弱甚至出现较弱的负相关关系。

2.2 浮游植物种类组成

共检出浮游植物56种，其中绿藻门种类最多，有25种；蓝藻门13种，硅藻门9种，裸藻门4种，甲藻门3种，金藻门和隐藻门各1种。沐溪水库浮游植物种类最多，达35种；其次是赤石迳水库32种；苍村水库25种。该3座水库均位于亚热带地区，年均水温较高，浮游植物主要以适应高温的蓝、绿藻为主，绿藻在种类上占绝对优势<sup>[17]</sup>。图1列出了水库浮游植物种类组成。结果显示，丰水期蓝藻种类要比枯水期多；但绿藻、硅藻、裸藻等浮游植物的种类在枯水期要比丰水期多。在调查的3座水库中，常见属有：蓝纤维藻属(*Dactylococcopsis*)、假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*)、拟柱孢藻属(*Cylindropermopsis*)、色球藻属(*Chroococcus*)和泽丝藻属(*Limnothrix*)。

2.3 浮游植物丰度及生物量

3座水库中，沐溪水库浮游植物的丰度最高，丰水期和枯水期分别为  $71.8 \times 10^6$  和  $59.3 \times 10^6$  cells·L<sup>-1</sup>(图 2)。苍村水库丰水期和枯水期浮游植物丰度分别为  $1.28 \times 10^6$  和  $0.37 \times 10^6$  cells·L<sup>-1</sup>；赤石迳

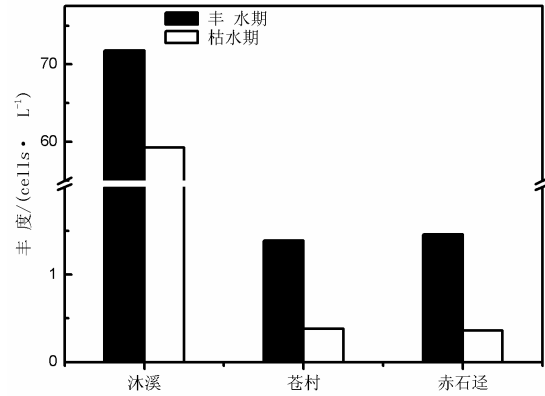


图2 沐溪、苍村、赤石迳水库丰水期和枯水期浮游植物丰度  
Fig.2 Phytoplankton abundance in flood and dry season for three reservoirs

水库浮游植物丰度和苍村水库相近。3座水库浮游植物丰度均表现为丰水期高于枯水期，但无显著性差异 ( $p>0.05$ )。在浮游植物相对丰度上，沐溪水库的蓝藻在丰水期和枯水期都占绝对优势，分别达到99%和98%，丰水期和枯水期的优势种分别为假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)和泽丝藻(*Limnothrix redekei*)；苍村和赤石迳水库的优势门类有季节变化，丰水期为蓝藻门的假鱼腥藻和蓝纤维藻(*Dactylococcopsis acicularis*)，相对丰度分别为68%和89%；枯水期均为硅藻，相对丰度分别为86%和40%(图3)，优势种分别是根管藻(*Rhizosolenia* sp.)和模糊直链藻(*Melosira ambigua*)。与养鱼水库沐溪水库相比，苍村和赤石迳水库的浮游植物群落结构更复杂。

3座水库中，浮游植物生物量均表现为枯水期高于丰水期(图4)，但无显著性差异 ( $p>0.05$ )。其中

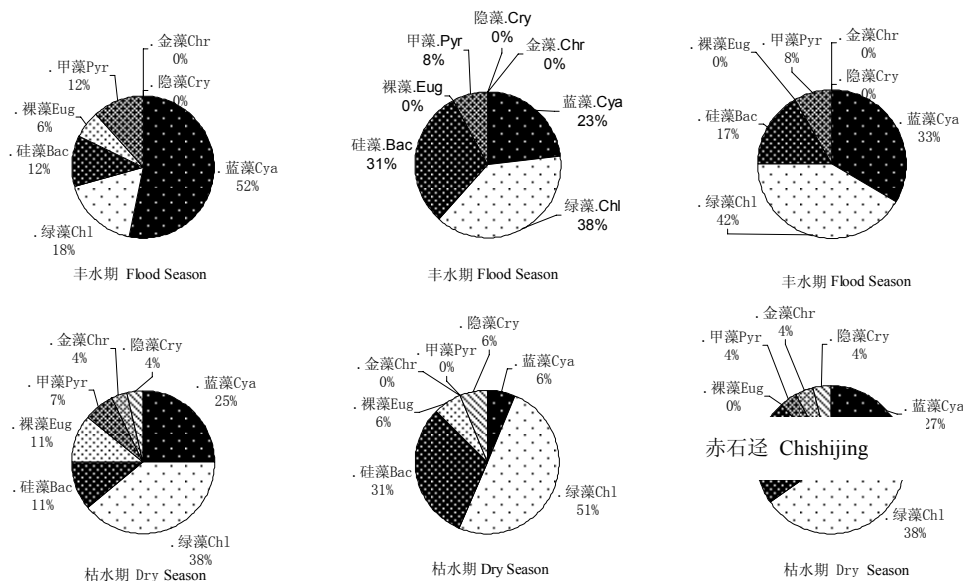


图1 3座水库浮游植物种类组成  
Fig.1 Species of phytoplankton in the three reservoirs

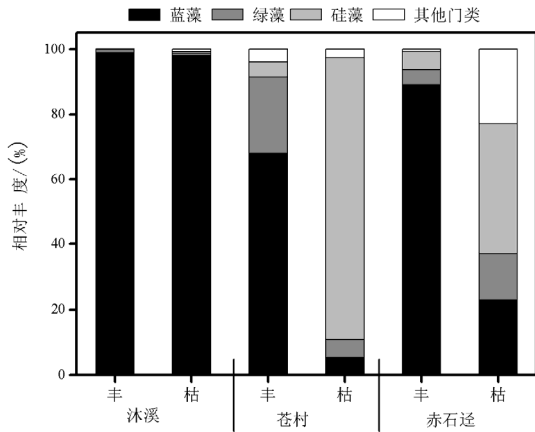


图3 沐溪、苍村、赤石迳水库丰水期和枯水期浮游植物相对丰度  
Fig.3 Relative abundance of phytoplankton in flood and dry seasons

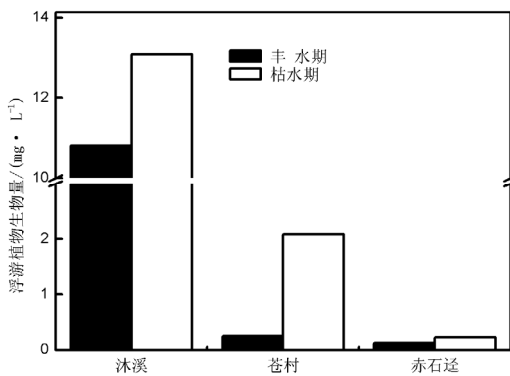


图4 沐溪、苍村、赤石迳水库丰水期和枯水期浮游植物生物量  
Fig.4 Phytoplankton biomass in Muxi, Cangcun and Chishijing reservoirs

沐溪水库枯水期浮游植物生物量最高, 达 13.1 mg·L<sup>-1</sup>, 而最低值出现在赤石迳水库丰水期, 为 0.13 mg·L<sup>-1</sup>。浮游植物生物量的季节变化与丰度相反, 表明季节变化一定程度上会影响浮游植物个体大小(见 3.2)。

2.4 浮游植物群落与环境因子关系的 RDA 分析

3座水库浮游植物群落与环境因子的RDA分析结果见表4和图5。表4列出了浮游植物群落A分析的统计信息。从表4可以看出, 在排序图中, 轴1和轴2的特征值分别为0.716和0.203; 在物种与环境因子之间的相关系数中, 环境因子轴与种类排序轴之间的相关系数均为1。RDA排序图反映出9个种的浮游植

表4 浮游植物群落RDA统计结果

Table 4 Summary of redundancy analysis (RDA) of phytoplankton community for the first two axes

轴	特征值	物种变异累积百分数/%	物种与环境因子相关性的累积百分数/%	物种与环境因子的相关系数
轴1	0.716	71.6	71.6	1.000
轴2	0.203	91.9	91.9	1.000
轴3	0.080	99.9	99.9	1.000
轴4	0.001	100.0	100.0	1.000

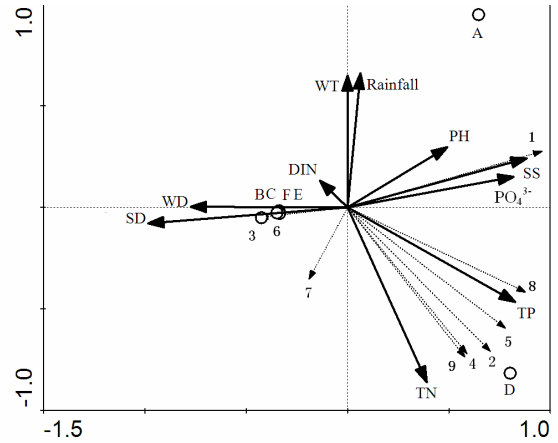


图5 主要浮游植物与环境因子的 RDA 排序图  
Fig.5 RDA ordination map of the main phytoplankton and environmental factors

物对环境条件的不同适应特点(图5)。在由轴1和轴2构成的平面中, 环境因子用带有箭头的线段表示, 样方用○标出, 种类在图中以带箭头的虚线标出。A-F分别表示丰水期和枯水期的沐溪、苍村和赤石迳水库。RDA排序分析中的浮游植物种(属)名编号为: 1. 假鱼腥藻(*Pseudanabaena* sp.), 2. 泽丝藻(*Limnithrix* sp.), 3. 纤维藻(*Ankistrodesmus* sp.), 4. 衣藻(*Chlamydomonas* sp.), 5. 小环藻(*Cyclotella meneghiniana*), 6. 根管藻(*Rhizosolenia* sp.), 7. 颗粒直链藻(*Melosira granulata*), 8. 二角多甲藻(*Peridinium bipes*), 9. 隐藻(*Cryptomonas* sp.)。排序结果表明, 3座水库影响浮游植物群落结构的因素主要为透明度( $p < 0.01$ )、总氮( $p > 0.05$ )和悬浮物( $p > 0.05$ )。透明度与RDA第一排序轴呈最大负相关( $r = 0.98$ ), 总氮和总磷分别与第二排序轴呈较大负相关和正相关关系( $r = -0.86, r = 0.65$ ), 而悬浮物、总磷和正磷均与第一排序轴呈最大正相关( $r = 0.88, r = 0.83, r = 0.82$ )。假鱼腥藻与悬浮物和正磷呈正相关; 在枯水期沐溪水库出现的泽丝藻、衣藻、小环藻、二角多甲藻和隐藻与总氮、总磷和溶解氧呈正相关, 而与可溶性无机碳(DIN)呈负相关; 纤维藻、根管藻主要在苍村和赤石迳水库分布, 与水深(WD)和透明度呈正相关关系; 颗粒直链藻与水深和降雨量呈负相关关系。

2.5 分层聚类分析

本文通过理化指标及浮游植物丰度等数据分时期(丰水期和枯水期)对沐溪、苍村和赤石迳水库进行了聚类分析(图5), 将变量特点相同的水库归为一类。分析结果将不同时期的3座水库分为两类: 丰水期和枯水期的苍村和赤石迳水库(均为非养鱼水库)为第一类区, 第二类区为丰水期和枯水期的沐

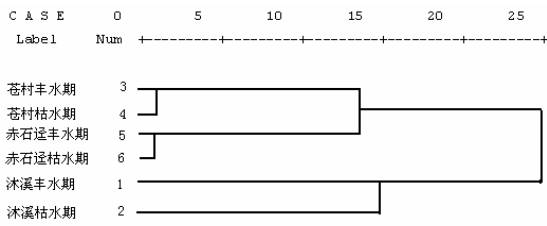


图6 沐溪、苍村和赤石迳水库丰水期和枯水期分层聚类分析结果  
Fig.6 Clustering analysis of Muxi, Cangcun and Chishijing Reservoirs  
in flood and dry seasons

溪水库(养鱼水库)。

### 3 讨论

韶关市的供水水源主要是水库和河流,近年来随着人口增长和经济发展,该地区的一些河流受到不同程度的污染<sup>[18]</sup>,因此水库的水质情况也越来越受到人们的关注。水库的水质主要体现在营养盐水平以及浮游植物群落结构上。

#### 3.1 粤北水库浮游植物群落特征和粤南沿海地区的差异

广东省南部沿海和珠三角地区属于亚热带气候,丰水期和枯水期水温差异较小,浮游植物群落组成的季节性差异也相应较小。无论在丰水期还是枯水期,蓝藻门的席藻是契斧石水库浮游植物的绝对优势类群<sup>[19]</sup>。此外,胡韧等还发现对澳门供水的竹仙洞水库丰枯两季浮游植物种类组成均为绿藻—硅藻的混合优势模式<sup>[20]</sup>。对不同富营养程度的水库研究发现,富营养化程度较高的珠江三角洲地区石岩和大镜山水库的浮游植物群落组成全年均以蓝藻为优势<sup>[21]</sup>。本文研究的粤北山区水库中,浮游植物种类组成的季节差异较大。丰水期主要是耐低光、喜在有热分层的富营养化水体中生长的蓝藻门和绿藻门种类;而在枯水期,蓝藻门种类减少,绿藻门种类增多(图1),一些适应低温和水体扰动的硅藻门种类出现,浮游植物群落结构更复杂;并且中营养水体中的浮游植物种类更具多样性。

3座水库的浮游植物丰度均表现为丰水期高于枯水期。蓝藻在沐溪水库占绝对优势,其相对丰度在丰水期和枯水期分别达到99%和98%。该结果与Smith<sup>[22]</sup>的研究结果相似,即总氮与总磷的质量比小于29:1(沐溪水库平均为11:1)时,蓝藻门种类更容易成为优势种。苍村和赤石迳水库的蓝藻门种类在丰水期成为优势种主要得益于较高的透明度、水温以及其在热分层水体中的漂浮机制;两座水库在枯水期出现较多的硅藻门种类,并且硅藻门浮游植物的相对丰度在枯水期也有明显优势。在枯水期低温低光照的情况下,水体不分层,在风力和水温的作用下产生扰动,硅藻能在湖上层的湍流中保持悬浮以及硅藻对低温的适应性而成为优势

类群<sup>[23]</sup>。RDA分析表明,沐溪水库的浮游植物群落主要受营养盐的影响,包括总氮,总磷和可溶性无机氮;苍村和赤石迳水库浮游植物群落结构与水深和透明度有正相关关系,在赤石迳水库生物量较高的颗粒直链藻则与降雨量和水温呈负相关关系,这也反映了季节变化较明显的亚热带地区中营养水库浮游植物的生态学特征。与广东沿海地区的水库(常年以蓝藻为优势)相比<sup>[19,24]</sup>,粤北山区位于亚热带地区,丰枯季节变化明显,温差更大,水体稳定性较热带沿海地区差,进而影响到水体浮游植物的群落特征。对于贫营养或中营养的水体,冬季以适应低温和保持悬浮的硅藻为优势类群;而对于富营养化的水体(沐溪水库),冬季温度虽然降低了,其营养盐仍支持蓝藻的优势性。

与丰度的季节变化相反,浮游植物生物量在枯水期高于丰水期;尤其是苍村水库,枯水期浮游植物生物量比丰水期高8.4倍。由于丰水期水体中营养盐水平低,小个体浮游植物密度较高,这样可增大其比表面积吸收更多营养盐;而枯水期水体中的营养盐水平足以维持浮游植物的大个体,而使浮游植物生物量增大。从优势种类上看,丰水期多以小个体的蓝绿藻为主,枯水期则出现了个体较大的硅藻门、金藻门及甲藻门种类,例如根管藻、锥囊藻和飞燕角甲藻等。优势种类的差别也造成了浮游植物丰度和生物量在丰水期和枯水期的不一致。张民等<sup>[25]</sup>通过分析云贵高原湖泊的浮游植物群落结构发现,营养状态可以影响浮游植物数量和种类组成。潘继征等<sup>[26]</sup>通过研究抚仙湖浮游植物群落指出,浮游植物的种类和数量的增加与水体营养水平升高有关。总之,与广东南部沿海地区水库相比,粤北山区水库的浮游植物群落结构季节差异较大,受水深,透明度,降雨和水温的综合影响;但对于富营养水库,即使在低温环境下,高质量浓度营养盐仍可维持蓝藻的优势性。

#### 3.2 水库流域特征和养鱼对浮游植物结构的影响

水体中的营养盐质量浓度容易受流域特征和外源性营养盐主要是大气干湿沉降的影响<sup>[27-28]</sup>。在丰水期,水库中的营养盐主要来自降雨和地表径流带来的非点源污染;在枯水期,则主要由大气干沉降和水体扰动引起的内源营养盐所贡献。沐溪水库地处市区,流域人口密度大,且库区多年发展鱼类养殖业,营养盐主要来自生活污水、工业用水及鱼饵饲料;在枯水期,营养盐来源除了以上几个来源外,水库周边工业园的干沉降贡献了大量的氮营养盐,导致枯水期水体中TN质量浓度远高于丰水期;而且,枯水期的降雨量远低于蒸发量,对营养盐有浓缩作用。此外,在枯水期,水温和风力作用使水

体发生垂直混合, 水体底层的营养盐通过扰动进入表层, 导致营养盐质量浓度增加; 尤其在较浅的富营养化水体(沐溪水库)中更加明显。苍村和赤石迳水库集雨区为山区, 周围自然林覆盖率高, 水土保持较好, 人为干扰强度小, 所以丰水期的营养盐水平较低。在枯水期, 远离生活区和工业区的苍村和赤石迳水库来自干沉降和人类活动的营养盐很少; 枯水期营养状态指数升高主要是水体混合将底部的P带入表层水体的结果, 并导致叶绿素质量浓度升高。RDA排序反映了浮游植物与具体环境因子之间的对应关系, 但本质上仍是对库区鱼类养殖作用的解析。根据RDA分析, 在丰水期沐溪水库, 鱼饵饲料所贡献的高质量浓度悬浮物降低了透明度, 从而对浮游植物群落结构产生影响; 在营养盐质量浓度较高, 透明度较低的情况下, 浮游植物的生长将受到光辐射的限制<sup>[29-30]</sup>。

通过分层聚类分析, 非养鱼水库苍村和赤石迳水库分布在第一类区。前者集雨面积最大, 库内营养盐水平主要受周围农业活动以及地表径流的影响, 但由于建库时间较晚(2007年), 受人类活动影响时间短, 水质相对较好; 在时间上, 丰水期和枯水期水质没有明显差别。赤石迳水库虽然投入使用时间已超过50 a, 但所处地区经济较为落后, 人口较少, 受人类活动影响较小, 其营养盐负荷在丰水期主要来自少量的地表径流, 所以其营养盐质量浓度较低。第二类区中, 沐溪水库属于富营养化的养鱼水库。该水库地处市区, 受到人类活动的影响较大, 流域内大量的生活、工农业污水随雨水和地表径流进入水库; 除了降雨和地表径流带来的营养负荷以外, 沐溪水库多年发展网箱养鱼, 复合饲料和鱼类排泄物长期在水体中积累, 增加了水体中N、P等营养盐的负荷, 悬浮物浓度也明显高于其他两座水库。叶元士<sup>[31]</sup>指出, 鱼饵饲料中仅有25%~35%被鱼体用于增加其体重, 而高达65%~75%的饲料物质留存于水体中。范林君<sup>[32]</sup>在研究网箱养殖对水库水质影响时发现, 网箱养殖增加了水体中磷的有机污染负荷, 从而使水体有富营养化的趋势。由此可见, 库区内发展鱼类养殖业对水库水质影响很大, 并间接地影响了浮游植物的群落结构。其次, 沐溪水库没有农业灌溉和提供饮用水的功能, 水力滞留时间长, 水体自净能力差加剧了营养盐在水体中的积累; 并且相对稳定的水体也有利于蓝藻种群的积累。

#### 4 结论

(1) 与广东南部沿海地区水库相比, 粤北山区的季节性温差对浮游植物群落分布特征的影响较大; 温度对浮游植物群落结构的影响主要体现在种类组成的季节差异上。粤北山区丰枯两季降雨量和

水温差异较大, 在中营养的苍村和赤石迳水库, 冬季以硅藻为优势类群; 而对于网箱养鱼导致富营养化的沐溪水库, 即使在温度较低的冬季, 高营养盐水平仍支持蓝藻的优势。

(2) 3座水库受人类活动的影响程度不同。根据营养状态指数TSI计算, 沐溪水库为富营养型水库, 苍村和赤石迳水库为中营养型水库。富营养化程度差异主要取决于流域中外源营养盐的输入和水库内养鱼带来的内源污染。

#### 参考文献:

- [1] CARPENTER S R. Eutrophication of aquatic ecosystems: Biostability and soil phosphorus. *Proceeding of National Academy of Sciences* [J]. 2005, 102(29): 10002-10005.
- [2] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. LIU Jiankang. *Advanced Hydrobiology* [M]. Beijing: Science Press, 1999: 176-197.
- [3] PROULX M, PICK F, MAZUMDER A, et al. Experimental evidence for interactive impacts of human activities on lake algal species richness[J]. *Oikos*, 1996, 6: 191-195.
- [4] 林秋奇, 胡 韧, 段舜山. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. *生态学报*, 2003, 23(6): 1101-1108. LIN Qiuqi, HU Ren, DUAN Shunshan. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1101-1108.
- [5] 胡 韧, 林秋奇, 王朝晖, 等. 广东省典型水库浮游植物组成与分布特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(11): 1939-1944. HU Ren, LIN Qiuqi, WANG Zhaohui, et al. Phytoplankton Composition and Distribution in Typical Reservoirs of Guangdong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1939-1944.
- [6] 韩博平, 李铁, 林旭钿. 广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究[M]. 北京: 科学出版社, 2003. HAN Boping, LI Tie, LIN Xudian. Trophic status and countermeasures of large and medium-scale reservoirs in Guangdong Province [M]. Beijing: Science press, 2003.
- [7] 邹红菊, 胡韧, 韩博平. 鹤地水库浮游植物群落的结构与动态[J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(2): 196-202. ZOU Hongju, HU Ren, HAN Boping. Structure and Dynamics of Phytoplankton Community in Hedi Reservoir, South China [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2010, 18(2): 196-202.
- [8] 张华俊, 李秋华, 韩博平. 南亚热带典型调水水库-广东大镜山水库的富营养化特征分析[J]. *湖泊科学*, 2010, 2(2): 291-299. ZHANG Huajun, LI Qiuqiu, HAN Boping. Eutrophication of a typical pumped storage reservoir, Dajingshan Reservoir, subtropical China [J]. *Journal of lake sciences*, 2010, 2(2): 291-299.
- [9] 江启明, 侯伟, 顾继光, 等. 广州市典型中小型水库营养状态与蓝藻种群特征[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(10): 2461-2467. JIANG Qiming, HOU Wei, GU Jiguang, et al. Nutritional status and population characteristics of Cyanobacteria in small and medium sized reservoirs in Guangzhou, southern China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2461-2467.
- [10] ALONGI D M, CHONG V C, DIXON P, et al. The influence of fish cage aquaculture on pelagic carbon flow and water chemistry in tidally dominated mangrove estuaries of peninsular Malaysia [J]. *Marine Environmental Research*, 2003, 55: 313-333.
- [11] GUO L, LI Z. Effects of nitrogen and phosphorus from fish cage-culture on the communities of a shallow lake in middle Yangtze River basin of China [J]. *Aquaculture*, 2003, 226: 201-212.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4th ed. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. SEPA. Monitoring and analysis method of water and waste water [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] 林少君, 贺立静, 韩博平, 等. 浮游植物叶绿素 a 的提取方法比较与改进[J]. *生态科学*, 2005, 24: 9-11. LIN Shaojun, HE Lijing, HAN Boping, et al. Comparison and im-

- provement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton[J]. *Ecologic Science*, 2005, 24: 9-11.
- [14] LEPSŠ J, ŠMILAUER P. *Multivariate Analysis of Ecological Data using CANOCO* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003:282.
- [15] 周丰, 郭怀成, 黄凯, 等. 基于多元统计方法的河流水质空间分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 544-551.  
ZHOU Feng, GUO Huaicheng, HUANG Kai, et al. Multivariate statistical technique for spatial variation in river water quality[J]. *Advances in water science*, 2007, 18(4): 544-551.
- [16] VÓRÓS L, PADISÁK J. Phytoplankton biomass and chlorophyll-a in some shallow lakes in central Europe [J]. *Hydrobiologia*, 1991, 215: 111-119.
- [17] 胡鸿钧, 魏印心. *中国淡水藻类-系统, 分类及生态*[M]. 北京: 科学出版社, 2006, 23-203.  
HU Hongjun, WEI Yinxin. *The Freshwater Algae of China-Systematics, Taxonomy and Ecology*[M]. Beijing: Science Press, 2006: 23-203.
- [18] 窦明, 马军霞, 毕宏伟, 等. 北江突发镉污染事故的健康危害评价[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(6): 655-659.  
DOU Ming, MA Junxia, BI Hongwei, et al. Health hazard assessment of emergent cadmium pollution accidents in Beijiang River[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2009, 37(6): 655-659.
- [19] 董丽华, 胡韧, 林秋奇, 等. 广东典型小型供水水库—契斧石水库浮游生物与富营养化特征分析[J]. *生态科学*, 2002, 21(2): 147-151.  
DONG Lihua, HU Ren, LIN Qiuqi, et al. Analysis of plankton and eutrophication in a typical small reservoir in Guangdong Province: Qiyeshi reservoir[J]. *Ecological science*, 2002, 21(2): 147-151.
- [20] 胡韧, 熊江霞, 韩博平. 具有短水力滞留的小型富营养化水库浮游植物群落结构与动态[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1319-1326.
- [21] 赵孟绪, 林秋奇, 章群, 等. 广东石岩、大镜山和大桥三座水库的富营养现状[J]. *生态科学*, 2002, 21(4): 333-337.  
ZHAO Mengxu, LIN Qiuqi, ZHANG Qun, et al. Eutrophication in Shiyuan reservoir, Dajingshan reservoir and Dashuiqiao reservoir, Guangdong Province[J]. *Ecological science*, 2002, 21(4): 333-337.
- [22] SMITH V H. Low Nitrogen to Phosphorus Ratios Favor Dominance by Blue-Green Algae in Lake Phytoplankton [J]. *Science*, 1983, 221: 669-671.
- [23] REYNOLDS C S. *The Ecology of Phytoplankton*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 362-389.
- [24] 林秋奇, 雷腊梅, 韩博平. 南亚热带不同营养水平水库的蓝藻组成与动态[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(7): 1027-1033.  
LIN Qiuqi, LEI Lamei, HAN Boping. Cyanophyta in south subtropical reservoirs with different trophic levels [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(7): 1027-1033.
- [25] 张民, 于洋, 钱善勤, 等. 云贵高原湖泊夏季浮游植物组成及多样性[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 829-836.  
ZHANG Min, YU Yang, QIAN Qinshan et al. Phytoplankton community structure and biodiversity in summer Yunnan Guizhou Plateau Lakes [J]. *Journal of lake science*, 2010, 22(6): 829-836.
- [26] 潘继征, 熊飞, 李文朝, 等. 抚仙湖浮游植物群落结构、分布及其影响因子[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5377-5385.  
PAN Jizheng, XIONG Fei, LI Wenchao, et al. Structure, distribution and its impact factors of phytoplankton community in Fuxian Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5377-5385.
- [27] KALFF J. *Limnology: Inland Water Ecosystems*[M]. McGill University Press, 2002.
- [28] SOARES M C S, MARINHO M M, HUSZAR V L M, et al. The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil[J]. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2008, 13: 257-269.
- [29] HAVENS K E, JAMES R T, THERESE L E, et al. N: P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution[J]. *Environmental Pollution* 2003, 122: 379-390.
- [30] RHEE G-Y, GOTHAM I J. The Effect of Environmental Factors on Phytoplankton Growth: Light and the Interactions of Light with Nitrate Limitation [J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(4): 649-659.
- [31] 叶元土, 林仕梅, 罗莉, 等. 水产养殖的饲料损失量及原因分析[J]. *内陆水产*, 2001, 8: 17-18.  
YE Yuantu, LIN Shimei, LUO Li, et al. Annual loss in aquaculture feed and analysis [J]. *Inland Fisheries*, 2001, 8: 17-18.
- [32] 范林君. 网箱养鱼对红光水库和百丈水库水质影响的研究[D]. 西南大学, 2006.  
FAN Linjun. Effects of the fish cage culture on the water quality of Hongguang reservoir [D]. Xinan University, 2006.

## Eutrophication and phytoplankton community of three typical meso-sized reservoirs in Guangdong province, China

HOU Wei, HUANG Cheng, JIANG Qiming, LEI Lamei, HU Ren\*

Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

**Abstract:** A survey of water quality and phytoplankton communities of three typical reservoirs (Muxi, Cangcun and Chishijing Reservoirs) was carried out in the flood season (August) and the dry season (December) in Shaoguan city, north of Guangdong province. The trophic state level was 50 in Muxi Reservoir, 34 and 32.5 mesotropical waterbody in Cangcun and Chishijing Reservoirs, respectively. Totally, 56 species of phytoplankton were identified, composed mainly of Chlorophyta. *Pseudanabaena limnetica* and *Dactylococcopsis acicularis* were the dominant species in Muxi Reservoir in flood season, *Limnothrix* sp. and *Pseudanabaena limnetica* dominate in the dry season, and phytoplankton abundance was significantly higher than the other two reservoirs ( $p < 0.01$ ). In Cangcun and Chishijing reservoirs, phytoplankton was dominated by cyanobacteria in the flood season, by diatom in the dry season. Phytoplankton abundance was higher in the flood season than that in the dry season in all the three reservoirs without significant difference ( $p > 0.05$ ). The results of redundancy analysis (RDA) indicated that transparency, TN and suspended substance (SS) affected phytoplankton community significantly. Cluster analysis revealed that the phytoplankton samples could be grouped into two representative groups: Group I consists of samples collected in Cangcun and Chishijing reservoirs, while group II contains the samples collected in Muxi reservoir where fish-culture have been developed for tens years. In winter, high nutrient concentration derived from fish-culture supported the highest biomass of phytoplankton in Muxi reservoir, which indicated that nutrient concentration affected the phytoplankton community in a greater extent.

**Key words:** Shaoguan city; eutrophication; phytoplankton community; RDA; clustering analysis; fish farming