

广州市典型中小型水库营养状态与蓝藻种群特征

江启明, 侯伟, 顾继光, 彭亮, 雷腊梅*

暨南大学水生生物研究所, 广东 广州 510632

摘要: 中小型水库是广州市供水的重要水源地和后备水源地, 为了解这类水库的富营养化特征以及蓝藻种群的动态, 于 2010 年的枯水期、丰水期对广州市 6 座典型的中小型水库进行了采样与分析。结果表明: 梅州水库、芙蓉嶂水库为贫-中营养型, 三坑水库、百花林水库、和龙水库为中-富营养型, 洪秀全水库为富营养型, 水库营养状态指数季节变化差异不显著。在同一座水库中, 水力滞留时间越长, 营养状态指数越高; 在不同水库之间, 营养状态指数与集雨区内人类活动影响有关。6 座水库蓝藻生物量的季节变化明显, 受水温和水体稳定性的影响, 枯水期蓝藻生物量在 $0.14\sim 171.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 占浮游植物总生物量的 $0.1\%\sim 10.0\%$; 丰水期蓝藻生物量在 $0.013\sim 32.8 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 占浮游植物总生物量的 $6.5\%\sim 97.0\%$ 。不同营养状态的水库之间蓝藻的生物量和种类差异明显, 受营养盐和水力滞留时间的影响, 梅州水库、芙蓉嶂水库蓝藻生物量在 $0.1\sim 16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 主要种类为泽丝藻(*Limnothrix redekei*)、卷曲鱼腥藻(*Anabaena pertuthate*)、水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*)、粘球藻(*Gloeocapsa sp.*); 三坑水库、百花林水库、和龙水库蓝藻生物量在 $0.057\sim 32.8 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 主要优势种为拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)、泽丝藻、假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*); 洪秀全水库蓝藻生物量在 $0.107\sim 2.637 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 主要优势种为阿氏颤藻(*Oscillatoria agardhii*)、水华微囊藻、卷曲鱼腥藻。

关键词: 富营养化; 蓝藻; 中小型水库; 水力滞留时间

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 10-2461-07

富营养化是水体中由于营养盐(一般为氮、磷)的增加而导致藻类和水生植物生产力的增加、水质下降等一系列的变化过程^[1]。除了营养盐负荷外, 水体的水动力学条件(水温、水量)也能在很大程度上影响富营养化的表现^[2]。蓝藻的大量出现被普遍认为是水体富营养化的重要标志, 大量的蓝藻不仅会导致水体感官恶化, 而且许多蓝藻代谢过程中分泌的各种藻毒素^[3], 对饮用水造成严重影响, 所以对水中蓝藻种群动态变化的研究一直都是富营养化研究的热点^[4-6]。

中小型水库库容一般在 $10^6\sim 10^8 \text{m}^3$ 之间, 相对于大型水库和湖泊, 集雨面积小, 水滞留时间短, 自净能力有限, 对人为活动敏感, 但这类水库在我国供水中起着举足轻重的作用。广州市没有天然湖泊, 水库是主要的淡水蓄水体。全市有大型水库 1 座, 中小型水库 322 座, 这些水库是广州市供水的重要水源地和后备水源地。近年来, 随着经济建设、城乡建设和人口的增长, 大幅度地增加了用水量, 人类活动影响加剧, 中小型水库受到不同程度的污染, 个别水库已经面临富营养化与蓝藻水华问题。目前, 关于广州市中小型水库富营养化和蓝藻水华发生现状的资料与研究均很少。本文以广州市 6 座水库为研究对象, 分别在 3—4 月(枯水期)、7

—8 月(丰水期)进行采样, 对水库的富营养化状态进行评价, 分析蓝藻的组成及季节变化特征, 探讨主要环境因子对蓝藻种群动态的影响, 为广州市中小型水库富营养化和蓝藻水华的预防及水质管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 水库概况

根据水库的地理位置(图 1)、功能、类型的差别, 选择了 6 座水库(表 1)。和龙水库($23^{\circ}17' \text{N}$, $113^{\circ}22' \text{E}$)位于广州市郊, 百花林水库($23^{\circ}18' \text{N}$, $113^{\circ}47' \text{E}$)位于增城市, 三坑水库($23^{\circ}27' \text{N}$, $113^{\circ}03' \text{E}$)、芙蓉嶂水库($23^{\circ}29' \text{N}$, $113^{\circ}13' \text{E}$)、洪秀全水库($23^{\circ}26' \text{N}$, $113^{\circ}11' \text{E}$)位于广州市花都区, 梅州水库(广州市属)($23^{\circ}36' \text{N}$, $113^{\circ}58' \text{E}$)位于惠州市龙门县。其中洪秀全水库是座引蓄结合的小型水库, 其它 5 座水库为天然蓄水的中型水库。

1.2 样品采集与分析

于 2010 年 3—4 月(枯水期)和 2010 年 7—8 月(丰水期)对广州市 6 座中小型水库进行定点采样, 在每座水库选择湖泊区设置 3 个采样点。用 YSI-85 型水质仪现场测定水体表层温度(T), pH, 萨氏盘测定透明度(SD)。水化指标总磷(TP)、总氮(TN)、正磷酸盐磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^{-}\text{-N}$)、亚硝酸盐

基金项目: 广东省水利厅科技项目(中小型水库蓝藻); 国家 863 项目(2008AA06A413)

作者简介: 江启明(1984 年生), 男, 硕士研究生, 主要从事水域生态学研究。E-mail: qiemanjiang@163.com

*通讯作者: E-mail: tleilam@jnu.edu.cn

收稿日期: 2010-09-15



图1 6座水库在广州市的具体位置

Fig.1 The specific location of six reservoirs in Guangzhou

氮(NO_2^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、悬浮物(SS)按照国家水质标准方法进行测定^[7];叶绿素 a (Chl. a)用 0.45 μm 的纤维滤膜抽滤,反复冻融-浸提,运用丙酮萃取方法进行测定^[8]。浮游植物定量样品在距表层 0.5 m 处取 1 L 水样,用福尔马林固定,质量浓度为 4%。浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网(64 μm)于垂直方向和水平方向进行拖网,同样用福尔马林固定,质量浓度为 4%。浮游植物定性、定量样品均在显微镜 (OLYMPUS BX51) 下进行鉴定和计数。

浮游植物种类鉴定主要参照《中国淡水藻类 - 系统、分类及生态》^[9]。生物量由浮游植物近似几

何体积直接换算,浮游植物的密度为 $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[10]。

1.3 营养状态指数计算与数据分析方法

根据修正的 Carlson 营养状态指数(TSI)评价水库的富营养化水平^[11],包括总氮、总磷、叶绿素 a 和透明度在内 4 个水质变量。计算公式如下:

- (1) $\text{TSI}_M(\text{chl})=10(2.5+1.086 \ln \text{chl})$
- (2) $\text{TSI}_M(\text{TP})=10(9.436+1.624 \ln \text{TP})$
- (3) $\text{TSI}_M(\text{TN})=10(5.453+1.694 \ln \text{TN})$
- (4) $\text{TSI}_M(\text{SD})=10(5.118-1.94 \ln \text{SD})$

式中:叶绿素 a (chl. a)单位为 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,透明度 SD 单位为 m;其它指标单位均为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。相关加权综合营养状态指数计算公式为:
 $\text{TSI}(\Sigma)=\Sigma W_j \times \text{TSI}_M(j)$ 。式中:TSI(Σ)表示综合营养状态指数;TSI $_M(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数; W_j 第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。Chl. a 和 TN、TP、SD 的相关系数参考广东省 20 座大中型水库的调查结果^[12]。TSI(Σ)<30 为贫营养型,TSI(Σ)在 30~40 为贫中营养型,TSI(Σ)在 40~50 为中富营养型,TSI(Σ)>50 为富营养型。数据处理和统计分析采用统计软件 SPSS 17.0。

2 结果和分析

2.1 水库的营养状态及理化特征

在调查期间,芙蓉嶂水库和梅州水库的营养状态指数 TSI(Σ)<30,属于贫-中营养型;百花林水库、三坑水库、和龙水库的 TSI(Σ)在 30~50 之间,属于中-富营养型;洪秀全水库 TSI(Σ)>50,为富营养型(表 2)。

6 座水库总氮质量浓度在 $0.59\sim 4.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之

表1 广州市 6 座水库的特征参数和用途

Table 1 Main characteristics and use of six reservoirs in Guangzhou

水库名称	最大库容/ 10^4 m^3	集雨面积/ km^2	平均水深/m	水力滞留时间/d		建库时间	主要功能
				枯水期	丰水期		
和龙水库	1 824	24.8	12.5	197	160	1974 年	灌溉、养鱼
百花林水库	1 084	17.4	10.5	62	57	1958 年	灌溉、旅游
三坑水库	2 376	19.18	9.4	228	261	1956 年	灌溉
芙蓉嶂水库	2 206	22.6	13.1	180	105	1958 年	灌溉、饮用水源、旅游
洪秀全水库	400	-	4.5	76	12	1959 年	灌溉、饮用水源
梅州水库	7 860	133	15.6	47	40	1984 年	灌溉、饮用水源

“-”表示数据缺失

表2 2010 年广州市 6 座水库的理化指标

Table 2 Physical and chemical variables of six reservoirs in Guangzhou in dry season and wet season of 2010

	梅州水库		百花林水库		三坑水库		和龙水库		洪秀全水库		芙蓉嶂水库	
	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期
w(TN)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.7±0.12	0.9±0.09	1.5±0.14	1.2±0.05	1.4±0.02	3.3±0.03	2.4±0.07	1.8±0.04	4.2±0.06	2.4±0.03	1.2±0.08	1.8±0.01
w(TP)/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.01±0.001	0.01±0.002	0.04±0.003	0.02±0.001	0.02±0.001	0.03±0.002	0.05±0.001	0.04±0.001	0.26±0.004	0.07±0.001	0.01±0.001	0.01±0.001
Chl. a /($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)	3.7±0.38	1.5±0.001	50.9±4.6	26.1±0.4	17±0.21	44.1±4.6	28.3±0.4	34±3.35	173±3.85	70±0.62	6.8±0.86	2.5±0.19
SD/m	1.5±0.03	2.5±0.03	0.8±0.007	0.9±0.02	1±0.02	0.5±0.01	1.1±0.02	0.9±0.03	0.5±0.007	0.6±0.03	1.9±0.06	2.5±0.03
pH	7.6±0.02	8.2±0.09	9.0±0.06	9.5±0.03	7.3±0.02	9.4±0.06	8.6±0.09	8.2±0.003	7.9±0.07	7.2±0.06	7.4±0.045	7.4±0.003
TSI(Σ)	26.8±0.5	25.3±0.4	42.7±0.6	39±0.07	37±0.11	44±0.52	42±0.18	41.7±0.26	56±0.14	47.5±0.05	30±0.77	24.8±1.04

间；总磷质量浓度在 $0.004\sim 0.255\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间，除了梅州水库、芙蓉嶂水库较低外(平均值小于 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，其他水库都较高。从季节看，6 座水库中百花林水库、和龙水库和洪秀全水库的总氮质量浓度枯水期都比丰水期高，而其它 3 座水库则相反；总磷质量浓度除了梅州水库、三坑水库水库外，其他水库都是枯水期高于丰水期。pH 值在 6 座水库中都显碱性，季节变化不明显；温度在 6 座水库之间差异不大，但季节变化明显($P<0.05$)，丰水期($28.8\sim 31.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)高于枯水期($17.7\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)，而且丰水期水体表层与底层温度不一致，有热分层的现象，枯水期水体温度表层与底层一致。梅州水库和芙蓉嶂水库透明度较高，而且丰水期明显高于枯水期，但其他几座水库透明度一直都较低。

2.2 蓝藻的种类组成及季节变化

共检测到蓝藻 22 属，其中，三坑水库丰水期种类最多，检测到 17 种，芙蓉嶂水库枯水期最低，只检测到 4 种。在调查的 6 座水库中，常见属为：蓝纤维藻属(*Dactylococcopsis*)、微囊藻属(*Microcystis*)、假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*)、拟柱孢藻属(*Cylindrospermopsis*)、色球藻属(*Chroococcus*)、泽丝藻属(*Limnothrix*)、鱼腥藻属(*Anabaena*)。

从蓝藻的优势种看，不同营养类型的水库，蓝藻优势种不同，而且优势种会随着季节变化而变化。在营养水平较低水体中(梅州水库和芙蓉嶂水库)，蓝藻为非优势藻类，主要种类有泽丝藻(*Limnothrix redekei*)、卷曲鱼腥藻(*Anabaena per-tuthate*)、水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*)、粘球藻(*Gloeocapsa sp.*)，季节变化如图 2，生物量一直低于 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在营养水平较高的水体中(百花林水库、三坑水库、和龙水库、洪秀全水库)，在枯水期，主要种类有泽丝藻、假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)、卷曲鱼腥藻、蓝纤维藻(*Dactylococcopsis acicularis*)、微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*)、拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)，优势种的生物量都很低，最高的是和龙水库的假鱼腥藻为 $89.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ；在丰水期，主要种类有拟柱孢藻、泽丝藻、阿氏颤藻(*Oscillatoria agardhii*)，在水体中占

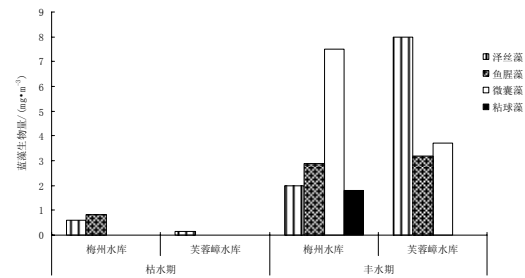


图2 贫-中营养型水库蓝藻优势种的季节变化

Fig.2 Seasonal changes in biomass of dominant cyanobacterial species in the olig- mesotrophic reservoirs

绝对优势，最高的为三坑水库的拟柱孢藻 $31.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，占蓝藻生物量的 98.2%(图 3)。

2.3 蓝藻生物量的季节变化

6 座水库的浮游植物生物量处于 $0.2\sim 33.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，除了梅州水库外，芙蓉嶂水库、百花林水库、三坑水库、和龙水库、洪秀全水库的浮游植物生物量丰水期明显高于枯水期。从浮游植物组成来看，6 座水库枯水期以硅藻和绿藻为主，蓝藻占总生物量的比例在 $0.1\%\sim 10\%$ 之间；丰水期以蓝藻为主，蓝藻占总生物量的 $6.5\%\sim 97.0\%$ (图 4)。

梅州水库、芙蓉嶂水库蓝藻生物量季节变化不太明显(图 5)，全年都很低，在 $0.1\sim 16\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间，占浮游植物总生物量比例在 $0.1\%\sim 8.5\%$ 之间。百花林水库、三坑水库、和龙水库蓝藻季节变化明显，枯水期在 $56.7\sim 171.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间，占总浮游植物生物量的 $5\%\sim 10\%$ ，而在丰水期蓝藻生物量巨增，达到 $2.85\sim 32.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，占总浮游植物生物量的 $82\%\sim 97\%$ 。洪秀全水库蓝藻生物量枯水期为 $0.107\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，丰水期 $2.637\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，分别占浮游植物总生物量的 3% 和 48% 。

2.4 蓝藻的生物量与环境因素的相关性

6 座水库的蓝藻生物量与 TN、TP、pH 呈显著正相关($P<0.05$)，与悬浮物呈极显著正相关($P<0.01$)，与透明度呈极显著负相关($P<0.01$)(表 3)。

3 讨论

3.1 富营养化特征

中小型水库由于在城市供水、水产养殖、农业

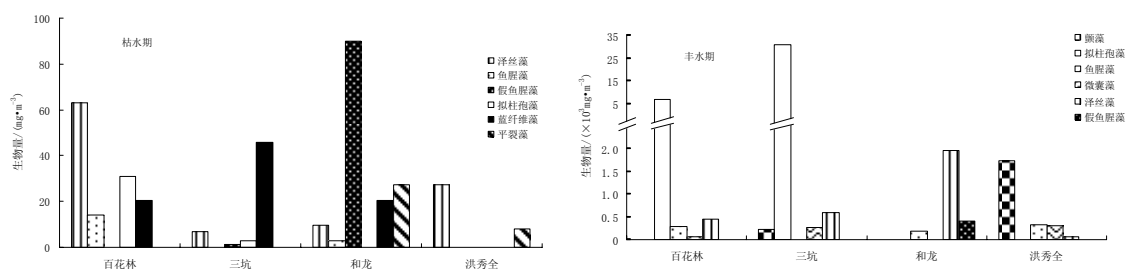


图3 中-富营养型水库蓝藻优势种的季节变化

Fig.3 Seasonal changes in biomass of dominant cyanobacterial species in the mesotrophic and eutrophic reservoirs

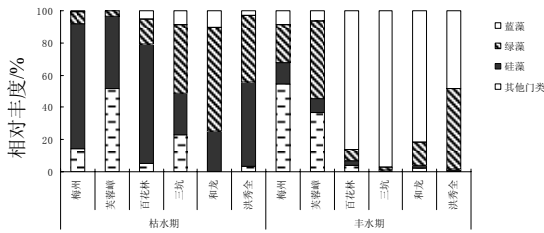


图 4 水库中浮游植物组成的季节性变化

Fig. 4 Seasonal changes in relative abundance of phytoplankton communities in reservoirs

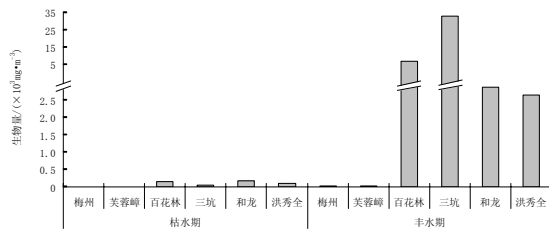


图 5 蓝藻生物量的季节变化

Fig.5 Seasonal changes in cyanobacterial biomass in six reservoirs

灌溉、旅游娱乐等方面发挥着越来越重要的作用，因此水质的好坏也越来越受到人们关注。2001 年朱爱民等^[13]对山东、福建、广东和海南 4 个省的水库营养类型进行了分类，在 184 座中小型水库中，中营养水平以下的占 7.6%，中等营养水平的占 35.3%，中-富营养型以上的占 57.1%，此结果表明中小型水库的富营养化已经非常严重。本文所调查的广州市典型中小型水库富营养化的结果与上述结果一致，6 座水库中，4 座已经达到了中-富营养水平以上。这些水库的富营养化主要体现在水体中的营养盐含量和浮游植物结构上。

水库中营养盐的负荷主要与入库水量有关，入库水量很大程度上代表水库营养物质外源输入的水平^[14]，所以丰水期的营养盐入库量高于枯水期。但在不同水库中，营养盐负荷除了与入库水量有关，还与集雨区内污染源和绿化面积相关。水库集雨内的污染源和绿化面积都与人类活动密切相关，

人类活动对水库水质影响很大^[15]。芙蓉嶂水库、梅州水库集雨区域内主要为山区，森林覆盖率高，人为干扰强度小，营养盐负荷低。百花林水库、和龙水库、三坑水库虽然集雨区主要也为山区，但集雨区山上的大部分土地都被开垦或破坏，而且三坑水库和百花林水库周围建起大面积的度假山庄，对水库水质干扰很大。洪秀全水库不同于其它水库，处于城乡交界处，受到的人为活动的影响大，水库集雨区内的生活污水、工业污水和农业污染均通过排洪渠进入水库，这也是导致水库富营养化的主要原因。除了地表径流带入营养盐外，水库水产养殖投入的饵料也是营养盐来源的一个方面。因为中小型一般都兼顾水产养殖的功能，向水体投入的饵料只有 25%~35%用于增加鱼体质量，65%~78%的饵料直接或间接造成水体污染^[16]。本研究中百花林水库、和龙水库、三坑水库、洪秀全水库建库后长时期兼顾养殖功能(目前已禁止养鱼)，已经受到了不同程度上的污染，而梅州水库和芙蓉嶂水库没有。

浮游藻类是水生态系统的初级生产者，它对水体营养状态的变化能迅速做出响应，可以根据藻类群落组成特征来评定水体营养状态^[17]。有研究^[18]表明：水体中的浮游藻类生物量 $<1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为贫营养型，生物量 $1.5\sim 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为中营养型，生物量 $5\sim 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为富营养型。根据此标准，梅州水库和芙蓉嶂水库的藻类生物量在 $0.15\sim 0.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，属于贫营养型；其他 4 座水库生物量 $>5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 达到了中-富营养水平，其中三坑水库丰水期生物量为 $33.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，达到了超富营养水平。此结果与通过理化指标判定水库的营养水平结果相一致。从藻类种群结构看，金藻门的大量出现往往表示水体为贫营养；隐藻门代表贫、中营养水体；甲藻门代表中营养水体；硅藻门和绿藻门代表富营养水体；蓝藻门和绿藻门代表超富营养水体。本研究调查的 6 座水库藻类组成如图 4，梅州水库和芙蓉嶂水库中主要是一些代表贫中营养型的藻类；其他 4 座水库枯水期主要以绿藻门和硅藻门为主，丰水期以蓝藻门为

表 3 6 座水库蓝藻生物量与环境因素的相关系数

Table 3 Correlation coefficients among cyanobacterial biomass and environmental factors in the six reservoirs

	TN	TP	DIN	PO ₄ ³⁻ -P	pH	SD	SS	生物量
TN	-----							
TP	0.75**	-----						
DIN	0.89**	0.48	-----					
PO ₄ ³⁻ -P	0.68*	0.46	0.71**	-----				
pH	0.11	0.21	-0.17	-0.11	-----			
SD	-0.72**	-0.79**	-0.46	-0.66*	-0.29	-----		
SS	0.69*	0.76**	0.5	0.71*	0.24	-0.95**	-----	
生物量	0.62*	0.61*	0.37	0.44	0.59*	-0.72**	0.73**	-----

**表示 $P<0.01$ (双尾检验)，*表示 $P<0.05$ (双尾检验)；样本数 $n=12$ ；DIN 表示溶解性无机氮

主,表明4座水库水体已经达到中-富营养水平,并且丰水期的富营养化程度高于枯水期。此结果再次验证了6座水库真实的营养水平。

此外,水体的富营养化还与水体的稳定性和水力滞留时间有关。本文研究的6座水库位于北回归线附近,受季风气候的影响,枯水期(冬、春季)与丰水期(夏季)的水体稳定性差异明显。枯水期水库库容小,水体浅,水体表层与底层的温度一致,水体一直处于垂直混合状态,底层的营养盐被带入表层,导致这一时期的营养盐质量浓度较高;丰水期的库容明显大于枯水期,水深也随之增加,再加上丰水期的强日照,丰水期水体容易出现热分层现象,底层营养盐不能被带入表层,此时营养盐质量浓度相对较低。梅州水库、芙蓉嶂水库、百花林水库、和龙水库营养状态的季节变化与此有关。另外,有研究表明水力滞留时间越长,就意味着有更多地营养盐被沉淀或被浮游植物吸收而滞留下来^[19],而中小型水库水体较浅,属于多混合水体,被沉淀下的营养盐很容易被带入表层。本研究所调查的6座水库营养状态的变化正是如此,在同一座水库中水力滞留时间越长,营养状态就越高。

3.2 蓝藻种群的动态

蓝藻在丰水期和枯水期的巨大差异主要与水温、水的稳定性有关^[20-21]。在枯水期,6座水库水体温度在17.7~20℃之间,而且水体处于混合状态,此水体最适合硅藻的生长^[22],且蓝藻并不占优势(图4)。此时,水体中主要的蓝藻种类为2类:一类是不具伪空泡的蓝纤维藻、假鱼腥藻、平裂藻;另一类是具伪空泡,能耐混合水体的泽丝藻、拟柱孢藻^[23]。在丰水期,6座水库水体温度在28.8~31.6℃之间,与枯水期的水温差异是显著的($P<0.01$)。25~35℃时是蓝藻生长的最适水温^[24],丰水期的高水温有利于蓝藻的生长,蓝藻的生物量在浮游植物中的占得比例都很高(图4,图5)。在丰水期,除了洪秀全水库,其他水库在丰水期都有不稳定的热分层现象,水体中的蓝藻也主要以具有伪空泡的种类为主,如拟柱孢藻、泽丝藻、颤藻、微囊藻、鱼腥藻。具伪空泡的蓝藻在分层的水体中能够利用其悬浮机制来获取更多的营养和光照,使其在水体中更具竞争力^[25]。

蓝藻空间异质性主要与水库的营养盐水平、水力滞留时间有关^[20]。有研究表明蓝藻生长在溶解性无机氮(DIN)质量浓度超过100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水体中时将不受氮限制,可溶性活性磷质量浓度超过10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 将不受磷限制^[6]。在调查的6座水库中DIN的质量浓度在440~3040 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,已经远远超过了100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,不受氮的限制; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的质量浓度在

1.3~45.9 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,除了三坑水库的丰水期以及洪秀全水库的丰、枯水期外,其他样点都低于10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,说明所调查水库蓝藻的生长主要受磷的限制。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度高的水体,蓝藻生物量相应的也高,如三坑水库,但是当 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度大于10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,磷不再是蓝藻生长的限制因子,影响蓝藻生物量的主要原因是水力滞留时间,水力滞留时间是集中反映水体的动力学变化的一个指标^[19,26],也是反映平流损失率的一个重要参数^[27]。洪秀全水库虽然营养盐质量浓度在6座水库中最高,但水力滞留时间短(丰水期只有12 d),水体不分层,蓝藻在此水体中并不具有优势,再加上平流损失,使得蓝藻生物量不是很高。蓝藻的种类也会随水库营养状态、水力滞留时间不同而有所变化。6座水库中氮质量浓度都很高,所以具有固氮功能的蓝藻并不具优势,而磷质量浓度低,除了洪秀全水库,其他5座水库都是磷限制型水库,使得具有悬浮机制和高的细胞贮磷能力的蓝藻更具优势^[28],如泽丝藻、拟柱孢藻、鱼腥藻、微囊藻、假鱼腥藻。洪秀全水库营养盐质量浓度很高,水力滞留时间短,水流速度较快,一些小的单细胞或群体容易随水流飘走,留在水体中蓝藻主要是以大群体或长的丝状体为主,如颤藻、微囊藻。

蓝藻种群动态还受悬浮物的影响。悬浮物的多少决定了水体的透明度,进而决定了太阳光照在水下的分布和浮游植物对光照的利用。蓝藻自身对低光照的敏感性及其悬浮生长机制能够促其在上层水体大量生长,并在藻类群落中占优势。同时,由于悬浮物与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸附作用,悬浮物高的水体, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度通常也较高^[14]。这时,适当的悬浮物有助于蓝藻在水体与其它浮游植物的竞争。在所调查的水库中,蓝藻生物量与悬浮物呈显著正相关($P<0.01$)。不同水体中占优势的蓝藻种类不同,主要与不同蓝藻对光强度的需求有关,泽丝藻、拟柱孢藻、颤藻、假鱼腥藻能够忍受高度的光限制,所以在透明度不高的水体具有优势^[29](图3)。

另外,蓝藻的动态还与其他一些环境因子有关,如pH、浮游动物的牧食等,高pH能够促进蓝藻的生长,浮游动物则对蓝藻形成一定的牧食压力。pH在6座水库中都呈碱性,枯水期和丰水期无显著差异,与蓝藻生物量的呈正相关关系($P<0.05$)。6座中小型水库中,鱼类的产量相对较高,浮游动物数量低且以小型种类占优势,对浮游植物及蓝藻的控制能力小。

4 结论

(1) 在所调查的6座水库中,梅州水库、芙蓉嶂水库为贫-中营养型水库,三坑水库、百花林水库、

和龙水库为中-富营养型水库,洪秀全水库为富营养型水库。6座水库营养状态指数季节差异不显著;在同一座水库中,水力滞留时间越长,营养状态指数越高;在不同水库之间,水库受人为活动干扰越大,富营养化程度越高。

(2) 蓝藻生物量季节变化明显,丰水期明显高于枯水期;蓝藻种类也呈现季节变化,枯水期以蓝纤维藻、平裂藻、假鱼腥藻、泽丝藻、拟柱孢藻为主,丰水期主要以拟柱孢藻、泽丝藻、阿氏颤藻、水华微囊藻、卷曲鱼腥藻为主。

(3) 6座水库之间蓝藻的生物量和种类差异明显,梅州水库、芙蓉嶂水库蓝藻生物量最低,在 $0.1\sim 16\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,主要种类为泽丝藻、卷曲鱼腥藻、水华微囊藻、粘球藻;洪秀全水库蓝藻生物量在 $0.107\sim 2.637\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,主要优势种为阿氏颤藻、水华微囊藻、卷曲鱼腥藻;三坑水库、百花林水库、和龙水库蓝藻生物量在 $0.057\sim 32.8\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,主要优势种为拟柱孢藻、泽丝藻、假鱼腥藻。

参考文献:

- [1] OECD. Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control [C]//Final Report, OECD Cooperative Program on Monitoring of Inland Waters (Eutrophication Control), Environment Directorate, Paris: OECD, 1982: 154.
- [2] SCHINDLER D W. Recent advances in the understanding and management of eutrophication[J]. *Limnology & Oceanography*, 2006, 51(1): 356-363.
- [3] CHRORUS I, BARTRAM J. Toxic Cyanobacteria in Water, A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management[M]. London and New York: E&FN Spon, 1999.
- [4] DOKULIL M T, TEUBNER K. Cyanobacterial dominance in lakes[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 438: 1-12.
- [5] PAERL H W, FULTON R S, MOISANDER P H, et al. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria[J]. *The Scientific World*, 2001, 1: 76-113.
- [6] OLIVER R L, GANF G G. Freshwater blooms[C]//WHITTON B A, POTTS M. The Ecology of Cyanobacteria. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000, 149-194.
- [7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
SEPA. Monitoring and analysis method of water and waste water [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.
- [8] 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 improvement on the extraction method for chlorophyll *a* in phytoplankton[J]. *Ecologic Science*, 2005, 24: 9-11.
- [9] 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.
- [10] ROTT E. Some results from phytoplankton counting intercalibrations[C]//SCHWEIZ Z. *Hydrobiologia*, 1981, 43: 34-62.
- [11] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
Jin Xiangcan, Tu Qingying. The standard methods in lake eutrophication investigation [M]. 2th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [12] 林秋奇, 胡韧, 韩博平, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物的响应[J]. *生态学报*, 2003, 23(6): 1101-1108.
LIN Qiuqi, HU Ren, HAN Boping, et al. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(6): 1101-1108.
- [13] 朱爱民, 陈郁敏. 福建省 4 省水库营养类型的分类[J]. *水利渔业*, 2001, 21(4): 6-8.
ZHU Aiming, CHEN Yumin. Classification of trophic types of reservoirs in 4 provinces[J]. *Reservoir Fisheries*, 2001, 21(4): 6-8.
- [14] THORNTON K W. Perspectives on Reservoir Limnology. In: THORNTON K W, KIMMEL B L, PAYNEEDS F E. Reservoir limnology: ecological perspectives[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [15] 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*, 2008, 13: 257-269.
- [16] 叶元土. 年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. Annual loss in aquaculture feed and analysis[J]. *Inland Fisheries*, 2001, 8: 17-18.
- [17] REYNOLDS C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status?[J]. *Hydrobiologia*, 1998, 369/370: 11-26.
- [18] 沈治蕊, 卞小红, 赵燕, 等. 南京煦园太平湖富营养化及其防治[J]. *湖泊科学*, 1997, 12(4): 377-380.
SHEN Zhirui, BIAN Xiaohong, ZHAO Yan, et al. Taiping lake in Xuyuan park, Nanjing: eutrophication, treatment & prevention [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 12(4): 377-380.
- [19] SUCHOWOLEC T, GORNIK A. Riverine water transformation during retention in small lowland reservoirs[J]. *Oceanography and Hydrobiology*, 2009, 38(4): 103-108.
- [20] REYNOLDS C S, OLIVER R L, WALSBY A E. Cyanobacterial dominance: the role of buoyancy regulation in dynamic lake environment [J]. *Marine and Freshwater Research*, 1987, 21: 379-390.
- [21] 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.
- [22] RICHARDSON T L, GIBSON C E, HEANEY S I. Temperature, growth and seasonal succession of phytoplankton in Lake Baikal, Siberia [J]. *Freshwater Biology*, 2000, 44: 431-440.
- [23] PADISAK J, REYNOLDS C S. Selection of phytoplankton associations in Lake Balaton, Hungary, in response to eutrophication and restoration measures, with special reference to the cyanoprokaryotes[J].

- Hydrobiologia, 1998, 384: 41-53.
- [24] REYNOLDS C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton[M]. New York: Cambridge University Press, 1984: 384.
- [25] REYNOLDS C S. Cyanobacterial water-blooms[C]/CALLOW J A. Advances in Botanical Research. London: Academic Press, 1987, 13: 67-143.
- [26] 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[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(2): 245-252.
- [27] STRASKRABA M. Retention time as a key variable of reservoir limnology[C]/TUNDISI T G, STRASKRABA M. Theoretical Reservoir Ecology and its Applications. International Institute of Ecology. Brazil: Brazilian Academy of Sciences and Backhuys publishers, 1999: 385-410.
- [28] SOMMER U. Comparison between steady state and non-steady state competition: experiments with natural phytoplankton[J]. Limnology & Oceanography, 1985, 30(2): 335-346.
- [29] HAVENS K E, PHILIPS E J, CICHRA M F, et al. Light availability as a possible regulator of cyanobacteria species composition in a shallow subtropical lake[J]. Freshwater Biology, 1998, 39: 547-556.

Nutritional status and population characteristics of Cyanobacteria in small and medium sized reservoirs in Guangzhou, southern China

JIANG Qiming , HOU Wei, GU Jiguang, PENG Liang, LEI Lamei*

Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract : The small and medium sized reservoirs are important sources or backup sources for water supply in Guangzhou, southern China. In order to understand the characteristics of the reservoir eutrophication and population dynamics of cyanobacteria, phytoplankton of six small and medium sized reservoirs were sampled and analyzed in dry season (March to April) and wet season (July to August) of 2010. The results showed that Meizhou and Furongzhang reservoirs were oligo-mesotrophic; Sankeng, Baihualin and Helong reservoirs were meso-eutrophic, and Hongxiuquan reservoir was eutrophic. Their trophic state indices showed a little seasonal change. The trophic status indices were related to human activities in the catchments, increasing with hydraulic retention time. Affected by water temperature and water stability, cyanobacterial biomass had a marked seasonal variation. The biomass of cyanobacteria in the dry season ranged from 0.14-171.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, accounting for the total biomass of phytoplankton of 0.1%-10.0%, the biomass of cyanobacteria in the wet season ranged from 0.013-32.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, contributing 6%-97.0% of total phytoplankton biomass. Due to low nutrient loading, biomass of cyanobacteria in Meizhou and Furongzhang reservoirs ranged from 0.1-16 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, dominated by *Limnothrix redekei*, *Anabaena pertuthate*, *Microcystis flos-aquae* and *Gloeocapsa sp.*. The biomass of cyanobacteria in Sankeng, Baihualin and Helong reservoirs ranged from 0.057-32.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, dominated by *Cylindrospermopsis raciborskii*, *Limnothrix redekei* and *Pseudanabaena limnetica*. The biomass of cyanobacteria in Hongxiuquan reservoir ranged from 0.107 to 2.637 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, dominated by *Oscillatoria agardhii*, *Microcystis flos-aquae* and *Anabaena pertuthate*.

Key words : eutrophication; cyanobacteria; small and medium sized reservoirs; hydraulic retention time