

两座抽水型水库蓝藻种群与微囊藻毒素的比较分析

辛艳萍, 韩博平, 雷腊梅, 林秋奇*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要: 2008年每隔两月调查1次广东省两座抽水型水库: 凤凰山水库和南屏水库的蓝藻组成与微囊藻毒素分布特征。结果共检测到蓝藻有14属, 主要为丝状体和群体种类, 常见的有假鱼腥藻属(*Pseudanabaena*)、蓝纤维藻属(*Dactylococcopsis*)、湖丝藻属(*Limnothrix*)、拟柱孢藻属(*Cylindrospermopsis*)和色球藻属(*Chroococcus*)。两座水库的蓝藻细胞密度为 $119 \sim 137373 \text{ cells mL}^{-1}$, 微囊藻毒素浓度为 $0 \sim 2.26 \mu\text{g L}^{-1}$ 。凤凰山水库的全年微囊藻毒素浓度均低于国家安全标准($1 \mu\text{g L}^{-1}$), 最高浓度出现在3月份; 南屏水库在丰水期微囊藻毒素浓度高于凤凰山水库, 最高浓度出现在7月($2.26 \mu\text{g L}^{-1}$)。长水力滞留时间的凤凰山水库的蓝藻细胞密度比短水力滞留时间的南屏水库高出1个数量级。两座水库蓝藻细胞密度的峰值都出现在枯水期的3月, 这主要与温度和调水量变化引起的营养盐季节性变化有关。假鱼腥藻、湖丝藻和拟柱孢藻是凤凰山水库的优势蓝藻种类, 大多数情况下相对丰度超过50%。在南屏水库, 枯水期蓝藻以丝状体种类为优势, 丰水期则以群体种类为优势。温度和调水量的季节性变化引起的营养盐季节性变化可能是引起南屏水库不同生活类型优势蓝藻种类季节演替的主要因素。

关键词: 抽水型水库; 蓝藻; 微囊藻毒素; 水力滞留时间

中图分类号: Q948.881.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)03-0224-07

Comparative Analysis of Cyanobacteria Populations and Microcystin in Two Pumped Storage Reservoirs, South China

XIN Yan-ping, HAN Bo-ping, LEI La-mei, LIN Qiu-qi*

(Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The distribution of cyanobacteria and microcystin in two pumped storage reservoirs, Fenghuangshan Reservoir and Nanping Reservoir in Guangdong Province was bimonthly investigated in 2008. Fourteen genera were identified, and most of them were filamentous and colonial ones, such as *Pseudanabaena*, *Limnothrix*, *Dactylococcopsis*, *Cylindrospermopsis* and *Chroococcus*. Cyanobacteria abundance in two reservoirs ranged from 119 to 137373 cells mL⁻¹, and microcystin concentration from 0 to 2.26 μg L⁻¹. In Fenghuangshan Reservoir with relatively long retention time (160 d), microcystin concentration was lower than the national standard for drinking water of 1 μg L⁻¹ throughout the year, which the maximum was in March. In the short retention time (60 d) reservoir, Nanping Reservoir, the concentration of microcystin was higher than that in Fenghuangshan reservoir in the flood season with the maximum in July. In Fenghuangshan Reservoir, the abundance of cyanobacteria was one order higher than that in Nanping reservoir. Maximal abundance occurred in dry season (March) in both the reservoirs, and nutrient loading related to pumping strategy and temperature were two possible factors in seasonal variation of cyanobacteria abundance. In Fenghuangshan Reservoir, *Pseudanabaena*, *Limnothrix* and *Cylindrospermopsis* were dominant in cyanobacteria and contributed more than 50% of the total abundance at most of time. In Nanping Reservoir, cyanobacteria was dominated by filamentous species in dry season and by colonial species in flood season. The temperature and nutrient loading related to pumping strategy seemed to key

收稿日期: 2009-08-19 接受日期: 2010-01-14

基金项目: 国家 863 高新技术项目(2008AA06A413)资助

作者简介: 辛艳萍, 女, 硕士研究生, 藻类生物技术方向, email: xiny1985@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, email: tlinqq@jnu.edu.cn

factors inducing cyanobacteria seasonally dominated by different ecotypes of species in Nanping Reservoir.

Key words: Pumped storage reservoir; Cyanobacteria; Microcystin; Hydraulic retention time

蓝藻是广泛分布于不同类型水体中的原核藻类,在多数富营养化水体中成为优势浮游植物类群^[1],这是多个环境因子综合作用的结果^[2-5],如高的营养盐输送量、低的 N/P。而富营养化程度较高的水体通常可以满足这两个条件,另外还提供了合适的水动力学条件^[6-7]。不同种类的蓝藻对环境条件如光照和水体稳定性的适应能力不同,因此,不同水体中蓝藻的优势种类不同^[5,8-11]。根据生活形态及产毒的可能性,可将蓝藻分为 5 种生态类型:不产毒单细胞种类、不产毒群体种类、可能产毒群体种类、不产毒丝状种类和可能产毒丝状种类^[1],后 3 种生态型蓝藻一旦成为优势种,可能对水生态系统的结构和功能产生影响^[12]。微囊藻等具有浮力调控机制的种类容易在热垂直分层明显的水体中成为优势蓝藻种类^[13];假鱼腥藻和湖丝藻等对光照要求不高的种类则容易在透明度不高,光限制比较明显的浅水水体中成为优势蓝藻种类^[14]。水库是一类水动力学过程受人为调节的水体,抽水型水库更为明显。抽水型水库是指通过抽调河流水增加供水能力的水库,这类水库的调入水源通常抽自邻近的河流,河水的营养盐浓度通常高于水库自产水,加速了水库的富营养化进程^[10]。这类水库通常具备蓝藻成为优势种类的营养盐条件,但调水会影响水库的水温条件和理化因子,如水位波动、水滞留时间等,这些多变的水动力学条件对蓝藻影响明显^[15]。本文对广东省两座较为典型的抽水型水库的蓝藻组成、数量及微囊藻毒素进行了监测,结合水体条件分析和比较两座水库中蓝藻组成动态及微囊藻毒素浓度的分布与差异,为该地区抽水型富营养化水库的管理与供水保障提供基础数据。

1 水库概况

凤凰山水库和南屏水库均位于珠海市区,其中凤凰山水库建于 1992 年 11 月,是一座中型水库,其水源来自自然集水和西江下游河水(经大镜山水库进入凤凰山水库)。集水区面积 9.28 km²,调入水量约为集水区自产水量的 1/3,水库水力滞留时间为 160 d。南屏水库建于 1993 年,集水区面积为 2.36 km²,是一座小型水库,与附近的竹仙洞水库相连通,是澳门特别行政区的主要供水水源之一。

南屏水库水源主要来自西江下游(由泵站抽水入库),调入水量约为集水区自产水量的 3 倍,水库水力滞留时间为 60 d。由于调入河水的营养盐浓度高于水库集水区自产水,目前,两座水库都处于富营养水平。

2 采样与藻类计数

于 2008 年 1~12 月每隔两个月对水库的坝区进行定点采样。浮游植物定量样品用采水器在水体表层 0.5 m 处采水 1 L,现场用 4% 甲醛溶液固定,带回实验室静置沉淀后浓缩。浮游植物定性采样采用 64 μm 的 25 号筛绢网,于垂直方向和水平方向进行多次拖网,所获水样现场用 4% 甲醛溶液固定。浮游植物的定性和定量样品均在 Olympus 显微镜下进行鉴定和计数,定性样品在 10×40 倍下直接鉴定,定量样品在 10×40 倍计数。分别采取表层水(水深 0.5 m) 1 L 带回实验室,采用林少君等的改进方法^[16]测定叶绿素含量,采用 ELISA 测定微囊藻毒素含量。现场用 YSI-85 型水质仪测定表层水温,用萨氏盘测定透明度(Secchi Disk Depth, SD)。

3 结果和分析

3.1 蓝藻组成

在 2008 年的 6 次调查中共检测到蓝藻 14 属,其中单细胞类型 2 属:蓝纤维藻(*Dactylococcopsis*)和尖头藻(*Raphidiopsis*);多细胞群体类型 6 属:微囊藻(*Microcystis*)、色球藻(*Chroococcus*)、平裂藻(*Merismopedia*)、隐球藻(*Aphanocapsa*)、腔球藻(*Coelosphaerium*)和隐杆藻(*Aphanothece*);丝状体类型 6 属:假鱼腥藻(*Pseudanabaena*)、颤藻(*Oscillatoria*)、鞘丝藻(*Lyngbya*)、鱼腥藻(*Anabaena*)、拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis*)和湖丝藻(*Limnothrix*)。两座水库的蓝藻种类组成比较相似,均以丝状体和群体种类为主,其中丝状体种类假鱼腥藻在每次采样中均能检测到。热带和亚热带地区广泛分布的拟柱孢藻在两座水库均有分布,并在凤凰山水库全年均有分布。腔球藻和尖头藻只在凤凰山水库检测到,但不常见;隐杆藻、隐球藻、颤藻和鱼腥藻只在南屏水库检测到,也不是常见种。

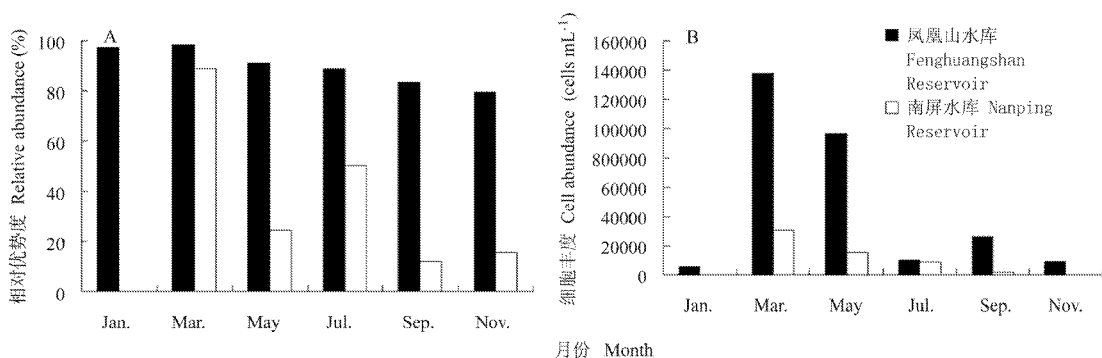


图 1 两个水库蓝藻的相对优势度(A)及细胞丰度(B)

Fig. 1 The relative abundance and cell abundance of cyanobacteria in two reservoirs

3.2 蓝藻的数量动态

由图 1A 可见,蓝藻是凤凰山水库 2008 年全年的浮游植物的优势类群,优势度均在 80% 以上,其中 3 月的相对丰度更达到 99%,成为绝对优势类群;而南屏水库的蓝藻优势度相对较低,除 3 月和 7 月超过 50% 外,其它月均低于 30%。

2008 年的 6 次采样中,两座水库蓝藻细胞密度丰度为 $119 \sim 137373 \text{ cells mL}^{-1}$ (图 1B)。凤凰山水库的蓝藻细胞密度春季(3~5 月)较高,3 月达到 $137372 \text{ cells mL}^{-1}$,以后逐渐下降,9 月出现小幅回升,3 月的细胞密度是最低月(1 月)的 23 倍。南屏水库的蓝藻细胞密度变化趋势大致相同,最大值($30577 \text{ cells mL}^{-1}$)也出现在 3 月。凤凰山水库全年的蓝藻细胞密度均明显高于南屏水库,其最大值是南屏水库最大值的 4.5 倍。

3.3 不同生态类型蓝藻季节分布特征

两座水库中,不产毒单细胞种类主要是蓝纤维藻;不产毒群体种类主要是色球藻和平裂藻;可能产毒群体种类为微囊藻;不产毒丝状蓝藻主要是假鱼腥藻和湖丝藻;可能产毒丝状蓝藻则主要为拟柱孢藻。假鱼腥藻、蓝纤维藻、湖丝藻、拟柱孢藻和色

球藻是凤凰山水库的常见种类。不产毒丝状蓝藻(假鱼腥藻和湖丝藻)全年存在于水体中,除 7 月和 11 月外,在蓝藻中的相对丰度均超过了 52%,其中 1 月达到 80.7%(图 2),是该月的绝对优势种类。不产毒单细胞种类蓝纤维藻是凤凰山水库的另一优势种类,除 1 月外,其丰度均大于 20%,7 月达到 70.6%,成为蓝藻中的绝对优势种。在热带亚热带水体中比较常见的可能产毒丝状藻拟柱孢藻也是凤凰山水库的常见种,11 月其相对丰度为 58.1%,是蓝藻中的优势种。典型富营养化水体中的优势种类微囊藻只在 3 月和 5 月出现,且其相对丰度不超过 1%。

南屏水库,假鱼腥藻和湖丝藻等丝状体种类枯水期(3 月和 11 月)的相对丰度在 90% 以上,为绝对优势蓝藻种。微囊藻、色球藻和平裂藻等群体种类则在丰水期(5 月、7 月和 9 月)占绝对优势,相对丰度大于 50%。丰水期的群体蓝藻种类以不产毒种类为优势,而能产毒的微囊藻仅 7 月丰度较高(56.2%),成为绝对优势蓝藻种。拟柱孢藻在南屏水库也有分布,但细胞密度极低,不超过 $10 \text{ filaments mL}^{-1}$ 。

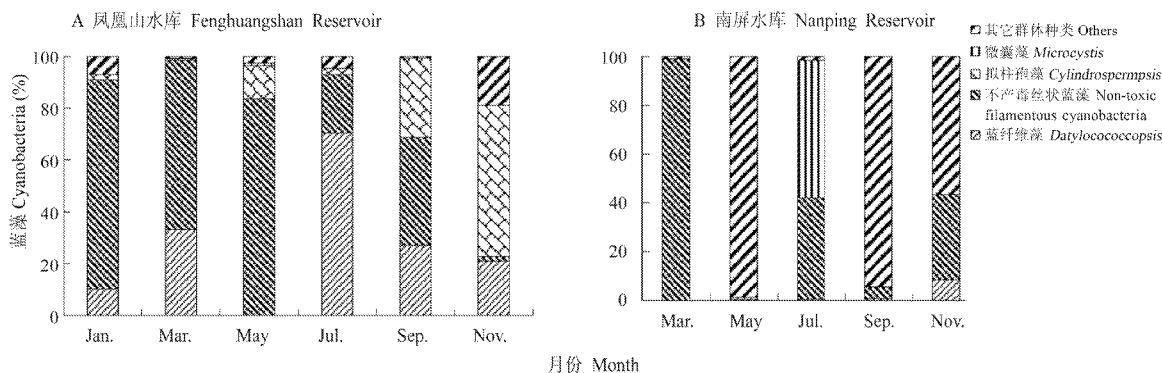


图 2 5 种生态类型蓝藻的组成与季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of five ecological types of cyanobacteria

丝状蓝藻容易在富营养化的浅水湖泊中成为优势类群^[15,17-18]。在两座水库中,假鱼腥藻和湖丝藻的细胞密度为 $40 \sim 89731 \text{ cells mL}^{-1}$,季节性变化

趋势基本一致,最高密度均出现在3月,但凤凰山水库假鱼腥藻和湖丝藻的细胞密度全年均高于南屏水库。

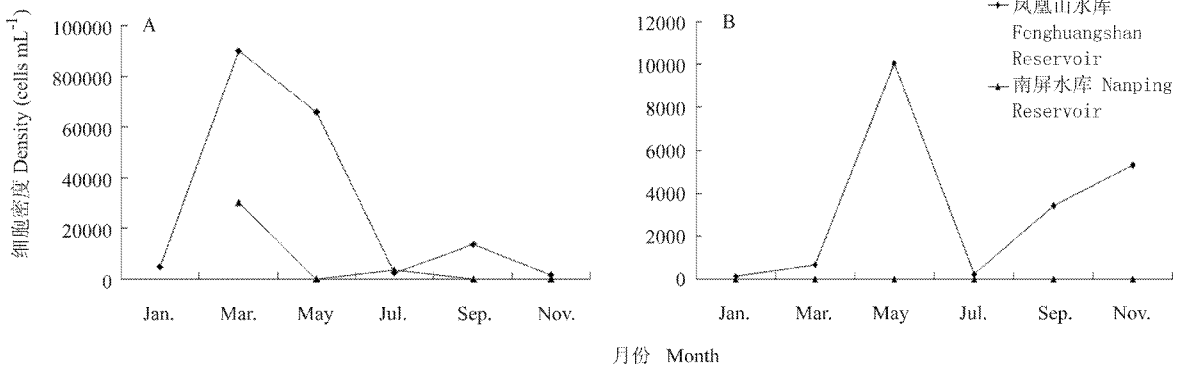


图3 假鱼腥藻和湖丝藻(A)及拟柱胞藻(B)细胞密度季节性变化

Fig. 3 Seasonal changes of *Pseudanabaena* and *Limnothrix* (A) and *Cylindrospermopsis* (B) cell densities

拟柱胞藻是一种适应能力比较强并能产毒的丝状蓝藻。凤凰山水库拟柱胞藻的季节性分布呈双峰型,最高密度在5月($10058 \text{ filaments mL}^{-1}$),但相对丰度只有10.4%,并不是优势蓝藻。其11月的细胞密度为 $5318 \text{ filaments mL}^{-1}$,相对丰度达58.1%,是该月的优势蓝藻。南屏水库的拟柱胞藻虽也有分布,但丰度不超过 $10 \text{ filaments mL}^{-1}$ 。

$0 \sim 0.36 \mu\text{g L}^{-1}$,低于我国饮用水源中微囊藻毒素浓度的安全标准,其中7月和9月未检测到,最高浓度出现在5月;南屏水库微囊藻毒素浓度为 $0 \sim 2.26 \mu\text{g L}^{-1}$,其中1月、3月和11月未检测到,7月份则大大超过 $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 。凤凰山水库可能产生毒素的蓝藻有微囊藻和拟柱胞藻,微囊藻毒素浓度最大值出现在3月,但微囊藻和拟柱胞藻细胞最高密度均出现在5月(图3和4);1月和11月没有检测到微囊藻,因此微囊藻毒素主要来自拟柱胞藻。南屏水库可能产毒的蓝藻种类主要是微囊藻。南屏水库微囊藻毒素浓度的最大值出现在微囊藻细胞密度同样最大的7月,此时微囊藻细胞密度达到 $4771 \text{ cells mL}^{-1}$,超过了蓝藻丰度的50%,在没检测到微囊藻毒素的月份,同样没有检测到微囊藻(图4)。

微囊藻是两座水库最主要的可能产毒蓝藻种类,其细胞密度为 $0 \sim 4771 \text{ cells mL}^{-1}$ 。凤凰山水库仅在3月和5月检测到微囊藻,且相对丰度低于1%。南屏水库仅在5月和7月检测到,7月达到最大密度($4771 \text{ cells mL}^{-1}$),相对丰度达到56.2%,成为优势蓝藻种类。

3.4 微囊藻毒素浓度

由图4可见,凤凰山水库微囊藻毒素浓度为

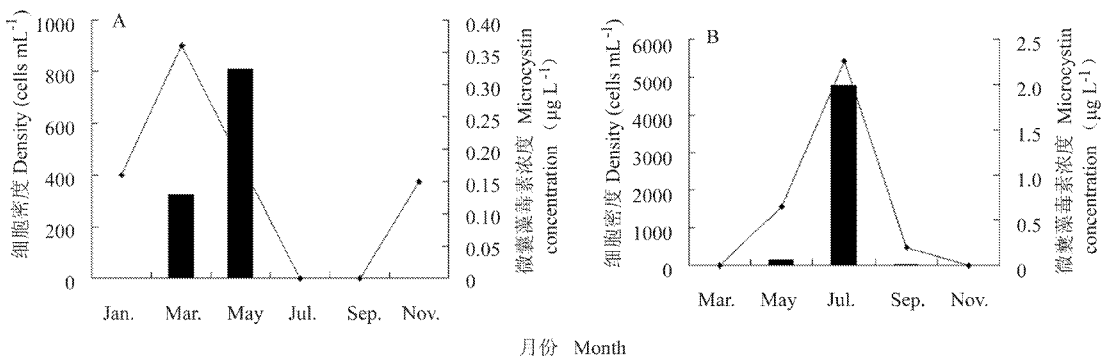


图4 凤凰山水库(A)和南屏水库(B)微囊藻毒素浓度与微囊藻和鱼腥藻细胞密度季节性变化

Fig. 4 Seasonal changes of microcystin concentration and *Microcystis* and *Anabaena* density in Fenghuangshan (A) and Nanping (B) Reservoirs

■:微囊藻和鱼腥藻密度 *Microcystis* and *Anabaena* density; ◆微囊藻毒素浓度 Microcystin concentration.

4 讨论

4.1 两座水库蓝藻丰度差异的比较

浮游植物种群能否净增长取决于其优化获取并高效利用资源的能力以及将损失减少到最低程度的能力^[17]。一种浮游植物在特定水体中能形成优势说明其具有在特定环境条件下最大化种群净增长率的能力^[17]。蓝藻在水体中形成优势的基本条件是高的营养盐水平和合适的水动力学条件^[15,18-19]。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较高的水平。但是,在水流流速比较快的水体中,高的浮游植物生长速率不一定能导致高的现存量,因为高的平流损失率大大抵消了浮游植物的生长速率。水体水力滞留时间是反映平流损失率的一个重要参数^[20]。Kawara 等认为水力滞留时间影响浮游植物增长速率的阈值为 14 d^[7]。大多数蓝藻种类对水流流速很敏感^[15],高流速不仅影响蓝藻的细胞分裂,而且增加平流损失率,导致蓝藻生物量很低。凤凰山水库和南屏水库均为富营养化水库,N、P 营养盐含量较高,都能满足蓝藻成为浮游植物优势类群的关键条件。水力滞留时间的差异是造成两座水库蓝藻丰度和优势度出现差异的主要原因。南屏水库水力滞留时间比较短(60 d),相对较高的平流损失率使得蓝藻细胞密度并不高,而且蓝藻只是在个别月份为优势类群;凤凰山水库水力滞留时间长达 160 d,水流的平流损失对蓝藻细胞密度的影响不大,导致蓝藻细胞密度明显高于南屏水库,而且蓝藻全年均是优势浮游植物类群。

两座水库蓝藻最高丰度均出现在枯水期末期的 3 月份,这可能与温度以及水库抽调高营养盐河水量的季节性变化有关。两座水库位于热带地区,季风气候明显,80% 以上的降水量集中在 4~9 月的丰水期。在枯水期,由于集水区自产水量很少,为了满足供水需求,需要从西江下游大量调入河水,但是,调入河水营养盐浓度远高于集水区自产水营养盐浓度,导致了枯水期末期营养盐浓度比较高;在丰水期,自然降水充足,调水入库水量大量减少,导致外源性的营养盐负荷减少,对水库营养盐浓度有所降低。此外,在枯水期末期的 3 月份,表层水温在 20~25℃ 间波动,比较适合浮游植物的生长。对于喜高营养盐、高温的蓝藻来说,3 月份相对较高的营养盐浓度和合适的温度导致了蓝藻

丰度出现最高值。

4.2 两座水库不同生态型蓝藻分布的差异

两座水库位于同一地区,受气候和季节的影响大致相同,温度变化基本相同。但是,在凤凰山水库,蓝藻全年均以丝状种类为优势;在南屏水库,枯水期蓝藻以丝状体种类为优势,丰水期则以群体种类为优势。

假鱼腥藻、湖丝藻和拟柱孢藻细胞中辅助捕光色素(如藻胆体)含量较高,能够耐受高的光限制^[21],但对水流的平流冲刷较敏感^[15],易在平流冲刷率较低的富营养化的浅水水体中成为优势种^[1]。富营养化的凤凰山水库水力滞留时间长达 160 d,水流的平流冲刷率很低,且全年透明度均低于 2 m,比较适合假鱼腥藻等丝状种类的生长,导致假鱼腥藻等丝状种类全年成为优势蓝藻种类。

在南屏水库,枯水期相对较高的水流平流冲刷率不利于假鱼腥等丝状蓝藻的生长,但是大量调入高营养盐、高悬浮颗粒物的河水使得水库呈现高营养盐低透明度的特征,使得适宜在此种环境条件下生长的假鱼腥藻等丝状蓝藻种类在与群体蓝藻种类的竞争中仍然占据优势。丰水期的自然降水充足,调水入库水量大量减少,外源性的营养盐负荷减少,水库营养盐浓度有所降低,有利于群体种类的生长并成为优势蓝藻类群。微囊藻具有浮力调控机制,对热垂直分层明显的水体具有较好的适应性,适合在光照强度较大的富营养化环境下生长并取得竞争优势^[1]。由于大量抽调河水,南屏水库的水力滞留时间相对较短,水体分层不稳定,不利于微囊藻在水体中的积累。但是,在丰水期,由于抽调河水量比枯水期大为减少,再加上抽水和用水的非连续性,部分时间内水库的水力滞留时间较长,水体的稳定性暂时提高,水体出现短时间的垂直分层现象,为微囊藻这类喜在较高水温、热垂直分层明显的条件下生长并具有竞争优势的种类提供了适宜条件,因而在丰水期个别月份微囊藻可成为优势蓝藻种类。

4.3 微囊藻毒素浓度的差异

微囊藻毒素主要以细胞结合态、溶解态和吸附于悬浮物或沉积物 3 种形式存在于水体中^[22]。水体中蓝藻的生长和毒素合成是受物理、化学、生物因素共同作用的结果^[22-23]。水体中微囊藻毒素浓度主要取决于产毒藻类的细胞密度和产毒能力。

南屏水库微囊藻主要分布在丰水期,7月份较高的微囊藻细胞密度($4771 \text{ cells mL}^{-1}$)使得水库微囊藻毒素浓度明显高于我国饮用水源中微囊藻毒素浓度的安全标准($1 \mu\text{g L}^{-1}$),而其它月份尽管产毒能力较强,但细胞密度较低,微囊藻毒素浓度远低于 $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 。蓝藻细胞产毒能力与环境因子密切相关,尤其是营养盐浓度。Watanabe 和 Oishi 报道微囊藻的产毒能力主要受磷控制,且其细胞内毒素随磷浓度的减少而减少^[24]。Sivonen 对两株阿氏颤藻(*Plankthrix agardhii*)的研究表明,当磷浓度为 $0.1 \sim 0.4 \text{ mg L}^{-1}$,微囊藻毒素的含量随磷浓度的增加而增加,但更高的磷浓度对促进微囊藻毒素产生的效果不明显^[25]。凤凰山水库微囊藻毒素浓度最大值出现在3月,而微囊藻和拟柱孢藻细胞密度最大值出现在5月,可能与水体中磷浓度相关。3月份为枯水期,水库大量抽水入库,使得水体营养盐浓度增大,微囊藻和拟柱孢藻的产毒能力增大,毒素浓度增大。5月为丰水期,抽水减少,外源性营养盐输入减少,水体营养盐浓度降低,微囊藻和拟柱孢藻产毒能力下降,毒素浓度降低。另外,吴和岩等^[26]的室内实验表明,铜绿微囊藻的最佳生长条件并不等同于其最佳产毒条件。

5 结论

水力滞留时间和调水模式是影响两座抽水型水库蓝藻密度和群落结构的重要因素。在长水力滞留时间的凤凰山水库,蓝藻细胞密度与水库的营养水平基本相符,并且全年均以丝状蓝藻种类为优势。产毒蓝藻种类的产生微囊藻毒素能力相对较低,尽管细胞密度比较高,但水库微囊藻毒素浓度低于国家饮用水安全标准。在南屏水库,较短的水力滞留时间不利于蓝藻细胞的累积,蓝藻现存量与水库的氮、磷营养水平不相符合,枯水期频繁调水入库使水库呈现高营养盐、低透明度特征,蓝藻以丝状种类为优势;丰水期集水区自产水量大幅度上升,调水入库量减少,水库呈现相对较低的营养盐和较高的透明度的特征,蓝藻以群体种类为优势,且7月份以微囊藻为优势,使水库微囊藻毒素浓度超过国家饮用水安全标准。

参考文献

- [1] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 438: 1-12.
- [2] Horn H. The relative importance of climate and nutrients in controlling phytoplankton growth in Saldenbach Reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 504: 159-166.
- [3] Gonzalez E J. Nutrient enrichment and zooplankton effects on the phytoplankton community in microcosms from El Andano reservoir (Venezuela) [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 434: 81-96.
- [4] Lin Q Q(林秋奇), Lei L M(雷腊梅), Han B P(韩博平). Cyanophyta in south subtropical reservoirs with different trophic levels [J]. *Chin J Ecol(生态学杂志)*, 2007, 26(7): 1027-1033.(in Chinese)
- [5] Zhao M X(赵孟绪), Han B P(韩博平). Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China) [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2005, 25(7): 1554-1561.(in Chinese)
- [6] Lin Q Q(林秋奇), Han B P(韩博平). Seasonal fluctuation of cyanobacteria population in tropical through-flowing reservoirs [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2007, 15(2): 152-159.(in Chinese)
- [7] 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 Sci Technol*, 1998, 37(2): 245-252.
- [8] Li Q H(李秋华), Han B P(韩博平). Dynamics and structure of phytoplankton community in spring in a southern subtropical pumped-water reservoir [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2007, 15(4): 294-300.(in Chinese)
- [9] Zhao M X(赵孟绪), Lei L M(雷腊梅), Han B P(韩博平). Seasonal change in phytoplankton communities in Tangxi Reservoir and the effecting factors [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2005, 13(5): 386-392.(in Chinese)
- [10] Liu L(刘蕾), Lei L M(雷腊梅), Han B P(韩博平). Variation of the phytoplankton community in the pumped storage reservoirs and the non-pumped storage reservoirs in Zhuhai [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2009, 17(1): 54-61.(in Chinese)
- [11] Hu R(胡初), Lin Q Q(林秋奇), Wang Z H(王朝晖), et al. Phytoplankton composition and distribution in typical reservoirs of Guangdong Province [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2002, 22(11): 1939-1944.(in Chinese)
- [12] Ghadouani A, Pinel-Alloul B, Prepas E E. Effects of experimentally induced cyanobacterial blooms on crustacean zooplankton communities [J]. *Freshwater Biol*, 2003, 48: 363-381.
- [13] McGregor G B, Fabbro L D. Dominance of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Nostocales, Cyanoprokaryota) in Queensland tropical and subtropical reservoirs: Implications for monitoring and management [J]. *Lakes Reservoirs Res Manage*, 2000, 5: 195-205.
- [14] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, et al. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *J Plankton Res*, 2002, 24(5): 417-428.
- [15] Han B P(韩博平), Feng Y C(冯远船), Liu Z W(刘正文). Ecology and Water Quality Management of Dajingshan Reservoir in Guangdong Province [M]. Guangzhou: Guangdong Science Technology Press, 2006: 1-5.(in Chinese)
- [16] Lin S J(林少君), He L J(贺立静), Huang P S(黄沛生), et al. Comparison and improvement on the extraction method for

- chlorophylla in phytoplankton [J]. *Ecol Sci*(生态科学), 2005, 24: 9-11.(in Chinese)
- [17] Oliver R L, Granf G G. Freshwater blooms [M]// Whitton B A, Potts M. *The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000: 95-107.
- [18] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 438: 1-12.
- [19] Elser J J. The pathway to noxious cyanobacterial blooms in lakes: The food web as the final turn [J]. *Freshwater Biol*, 1999, 42: 537-543.
- [20] Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management [M]// Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993: 234-259.
- [21] Gliwicz Z M, Pijanowska J. The role of predation in zooplankton succession [M]// Sommer U. *Plankton Ecology: Succession in Plankton Communities*. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 120-134.
- [22] Vezie C, Rapala J, Vaitomaa J, et al. Effect of nitrogen and phosphorus on growth of toxic and nontoxic *Microcystis* strains and on intracellular microcystin concentration [J]. *Microbiol Ecol*, 2002, 43: 443-454.
- [23] Chen G Y(陈国永), Yang Z B(杨振波), Tao M X(陶茂萱), et al. Effects of nitrogen and phosphorus on growth of *Microcystis aeruginosa* strains [J]. *Environ Health*(环境与健康杂志), 2007, 27(9): 675-679.(in Chinese)
- [24] Watanabe M F, Oishi S. Effects of environmental factors on toxicity of a cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* under culture conditions [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1985, 49: 1342-1344.
- [25] Sivonen K. Effects of light, temperature, nitrate, orthophosphate and bacteria on growth and hepatotoxin production by *Oscillatoria agardhii* strains [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1990, 56: 2658-2666.
- [26] Wu H Y(吴和岩), Su J(苏瑾), Shi W(施玮). Study on growth and toxic production of *Microcystis aeruginosa* strain under different conditions [J]. *Environ Health*(环境与健康杂志), 2006, 23(4): 304-307.(in Chinese)