

热带直流型水库蓝藻季节变化特征

林秋奇, 韩博平*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要: 于 2004 年调查了广东省飞来峡和深圳两座直流型水库的蓝藻季节分布特征。共检测到蓝藻 17 属, 绝大多数为丝状体种类。常见属有假鱼腥藻 (*Pseudanabaena*)、微囊藻 (*Microcystis*) 和蓝纤维藻 (*Dactylococcopsis*)。蓝藻细胞密度为 5-2 052 个细胞 ml⁻¹。深圳水库最高蓝藻细胞密度出现在 6 月, 其中丝状蓝藻的相对丰度在 75% 以上; 飞来峡水库最高蓝藻细胞密度出现在 12 月, 丝状蓝藻的相对丰度达到 90%。水动力学条件是限制蓝藻丰度和种类的主要环境因子。由于飞来峡水库的水力滞留时间变化较大, 所以蓝藻季节性变化受水动力学条件的影响比深圳水库的大。假鱼腥藻等丝状蓝藻更适合在水库中生长, 特别是在氮磷营养水平较高, 水力滞留时间明显增加时, 其细胞密度将大幅度上升。

关键词: 蓝藻; 季节变化; 水力滞留时间; 直流型水库

中图分类号: Q948.881

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2007)02-0152-08

Seasonal Fluctuation of Cyanobacteria Population in Tropical Through-flowing Reservoirs

LIN Qiu-qi, HAN Bo-ping*

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

Abstract: The seasonal fluctuation of cyanobacteria population in the through-flowing reservoirs of Shenzhen and Feilaixia in Guangdong Province was investigated in 2004. Seventeen genera of cyanobacteria composed mainly of filamentous ones were obtained. The common genera were *Pseudanabaena*, *Microcystis* and *Dactylococcopsis*. Cyanobacteria density ranged from 5 to 2 052 cells ml⁻¹. The maximum cell density was found in Shenzhen Reservoir in June with filamentous species abundance over 75%. The peak of cyanobacteria abundance was present in Feilaixia Reservoir in December with filamentous species occupying 90%. Cyanobacteria abundance and composition were limited mainly by hydraulic parameters. The seasonal fluctuation of cyanobacteria population was more affected in Feilaixia Reservoir than in Shenzhen Reservoir since the hydraulic retention time of Feilaixia Reservoir had a greater variation than that of Shenzhen Reservoir. Filamentous cyanobacterias, especially *Pseudanabaena*, are more suitable to the reservoirs than the other cyanobacteria species under high levels of nitrogen and phosphorus conditions. And their abundances will greatly increase when the retention time is prolonged.

Key words: Cyanobacteria; Seasonal fluctuation; Hydraulic retention time; Through-flowing reservoir

蓝藻(Cyanobacteria)广泛分布于不同类型的水体中,但其种类组成,细胞密度以及时空分布特征在不同水体中有所不同^[1]。大多数群体和丝状体蓝藻种类不仅营养价值低,而且能堵塞滤食性浮游动

物的滤食器官,影响滤食效率,有些种类甚至能产生毒素,对水生态系统的结构与功能影响甚大^[2-4]。蓝藻在水体中成为优势一般是由多个因子综合影响的结果^[5-7],如高的营养盐输送量和低的氮磷比,

收稿日期:2006-09-04 接受日期:2006-12-01

基金项目:广东省水文局重点项目(GDSW0302),广东省科技攻关项目(2KM06103S)资助

* 通讯作者 Corresponding author

而富营养化程度较高的水体通常可以满足上述两个条件。然而,在合适的营养条件下,还需要合适的水动力学条件^[8]。大多数蓝藻种类对水流流速很敏感^[9],高的水流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;相反,如果水流缓慢,湍流强度不大,这种环境条件有利于具有浮力调控机制的种类形成优势^[1]。由于水库水动力学受人为调节,在水库营养盐水平比较高,且外源营养盐的输入无法得到有效改善控制的情况下,通过对水体水动力学条件的控制,可在一定程度上控制蓝藻的生物量。本文调查了广东省两座不同营养水平的直流型水库蓝藻的季节变化特征,分析了水库滞留时间对蓝藻优势度的影响,为了解该地区富营养化水库通过改变水动力学条件控制蓝藻生物量的可能性提供基础数据。

1 研究概况

飞来峡水库位于广东省北江干流的中游,属大型水库,库容为 4.4 亿 m^3 ,平均水深 6 m,出水口在大坝处,主要用于防洪,兼有航运、发电等。飞来峡水库在运转过程中,水位一般维持不变,以确保航运,水库水力滞留时间比较短,年平均滞留时间为 14 d 左右(水库库容除以日平均入库流量)。从水库的氮磷营养水平看,水库属中营养型水库^[10]。深圳水库是一座中型水库,库容 0.35 亿 m^3 ,平均水深 10 m,出水口在大坝附近,在广东省东江供水工程中起着调蓄的作用。深圳水库自产水量很少,绝大部分水量来自东江,东江水经过多级泵站抽提经深圳水库库尾进入水库,在深圳水库经过短暂的停留后,最终输送到香港。水库水力滞留时间甚短,平均只有 7 d 左右。从水库的氮磷营养水平看,深圳水库属富营养化水库^[10]。根据水力滞留时间的长度^[11],这两座水库均属直流型水库。由于水力滞留时间非常短,两座水库全年均没有出现热分层现象,但水温均有明显的季节性变化,变幅为 18°C 左右,夏季水温可高达 32°C 左右。

2 研究方法

于 2004 年 2 月至 12 月每隔两个月对上述两座水库的坝区进行定点采样。定量样品用采水器在表层 0.5 m 处采水 1 L,现场用 4%福尔马林固定,

带回实验室浓缩计数。定性样品用 $30\ \mu\text{m}$ 浮游生物网于垂直方向和水平方向进行拖网,现场用 4%福尔马林固定。采取表层水(0.5 m) 1 L 带回实验室按国际标准方法测定总氮(TN)和总磷(TP)^[12]。

3 结果和分析

3.1 蓝藻种类组成

2004 年 6 次调查共检测到蓝藻 17 属(表 1),其中单细胞类型 1 属:蓝纤维藻(*Dactylococcopsis*);多细胞群体类型 6 属:微囊藻(*Microcystis*)、粘球藻(*Gloeocapsa*)、色球藻(*Chroococcus*)、平裂藻(*Merismopedia*)、隐球藻(*Aphanocapsa*)和腔球藻(*Coelosphaerium*);丝状体类型 10 属:假鱼腥藻(*Pseudanabaena*)、颤藻(*Oscillatoria*)、席藻(*Phormidium*)、鞘丝藻(*Lyngbya*)、螺旋藻(*Spirulina*)、鱼腥藻(*Anabaena*)、节球藻(*Nodularia*)、拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis*)、*Limnothrix* 和 *Planktolynghya*。两座水库的蓝藻种类组成较为相似,以丝状种类为主。蓝纤维藻、微囊藻和假鱼腥藻是每次采样均能检到的种类。广泛分布于热带和亚热带地区的拟柱孢藻^[13-14]和鱼腥藻只在飞来峡水库检测到,节球藻和螺旋藻只在深圳水库检测到。微囊藻在两座水库中检测到 3 种:水华微囊藻(*Microcystis fleis-quae*)、铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*)和惠氏微囊藻(*M. wesenbergii*),但以铜绿微囊藻最为常见。

3.2 浮游植物组成及数量

两座水库在 2004 年浮游植物细胞密度变幅为 62-3 942 个细胞 ml^{-1} (图 1)。深圳水库浮游植物细胞密度明显高于飞来峡水库(除 12 月份外)。在自然水体中,影响浮游植物现存量的因子是多方面

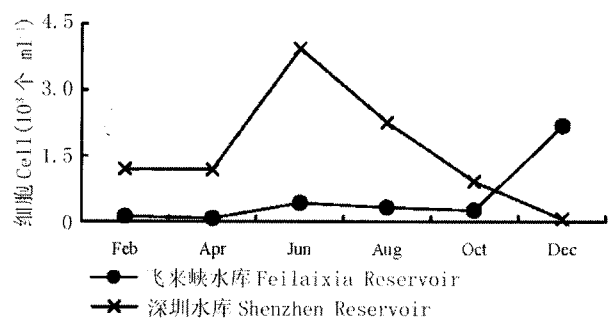


图1 深圳水库和飞来峡水库浮游植物细胞密度季节性变化
Fig. 1 Seasonal changes in phytoplankton abundance in Shenzhen Reservoir and Feilaixia Reservoir

表 1 2004 年飞来峡水库和深圳水库采样期间蓝藻组成
Table 1 Cyanobacteria composition in Feilaixia and Shenzhen Reservoirs in 2004

	飞来峡水库 Feilaixia Reservoir						深圳水库 Shenzhen Reservoir					
	2月 Feb	4月 Apr	6月 Jun	8月 Aug	10月 Oct	12月 Dec	2月 Feb	4月 Apr	6月 Jun	8月 Aug	10月 Oct	12月 Dec
蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
水华微囊藻 <i>Microcystis flos-queae</i>				+	+							
铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
惠氏微囊藻 <i>M. wesenbergii</i>			+									
粘球藻 <i>Gloeocapsa</i>				+	+	+						
色球藻 <i>Chroococcus</i>	+	+		+	+	+	+	+	+	+		
平裂藻 <i>Merismopedia</i>	+	+		+	+	+			+	+		
隐球藻 <i>Aphanocapsa</i>	+			+	+	+						
腔球藻 <i>Coelosphaerium</i>				+								
假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
颤藻 <i>Oscillatoria</i>	+	+	+	+	+	+				+	+	+
席藻 <i>Phormidium</i>	+	+	+		+	+				+		
鞘丝藻 <i>Lyngbya</i>	+	+			+	+				+		+
螺旋藻 <i>Spirulina</i>										+		
鱼腥藻 <i>Anabaena</i>			+	+		+						
节球藻 <i>Nodularia</i>										+		
拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i>			+	+	+							
<i>Limnothrix</i>	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
<i>Planktolyngbya</i>	+	+	+	+	+					+	+	+

的:如营养盐、光照、水温、浮游动物的牧食压力和水流引起的平流损失等等^[5]。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^[6]。Kawara 等^[7]认为水力滞留时间影响浮游植物增长速率的阈值为 14 d。由表 2 可见,虽然深圳水库氮、磷营养水平全年均维持在很高的水平上,达到富营养水平,但水力滞留时间只有 1 周左右,高的平流损失率使得浮游植物细胞密度并不显得特别高,而且比同地区中长滞留时间的富营养型和中-富营养型水库,如契谷石水库^[8]、石岩水库^[9]和汤溪水库^[20]要低几个数量级。飞来峡水库氮、磷营养水平明显低于深圳水库(表 2),除 12 月份外,浮游植物种群增长同样受水力滞留时间限制,细胞密度不超过 500 个细胞 ml⁻¹,不及深圳水库,也低于同地区相同氮、磷营养水平,但滞留时间长得多的水库,如:赤沙水库^[21]。但是,飞来峡水库在 12 月浮游植物的细胞密度上升至 2 182 个细胞 ml⁻¹,

不仅比其它月份高两个数量级,而且也比同月份的深圳水库高两个数量级(图 1)。12 月水温只有 14℃,光照强度是全年最低的月份之一,氮、磷营养盐水平也是全年最低的月份之一(表 2),而且远低于深圳水库。上述几个因素的季节性变化显然不是导致飞来峡水库 12 月份浮游植物细胞密度飙升的关键因素。以上分析表明,水力滞留时间是控制两座水库浮游植物现存量的主要因素。

浮游植物种群能否净增长取决于其优化获取资源并高效利用这些资源的能力以及将损失减少到最低程度的能力。一种浮游植物种类在特定水体中能形成优势说明其具有在该特定环境条件下能最大化种群净增长率的能力^[1]。由图 2 可见,两座水

表 2 两座水库的总磷和总氮季节性变化 (mg L⁻¹)
Table 2 Seasonal variation in total nitrogen and phosphorus in the two reservoirs (mg L⁻¹)

		2月 Feb	4月 Apr	6月 June	8月 Aug	10月 Oct	12月 Dec
飞来峡水库 Feilaixia Reservoir	TN	1.339	1.335	1.139	1.039	0.757	0.825
	TP	0.008	0.048	0.008	0.039	0.006	0.008
深圳水库 Shenzhen Reservoir	TN	5.537	2.845	1.699	2.012	3.583	1.794
	TP	0.125	0.106	0.078	0.105	0.143	0.104

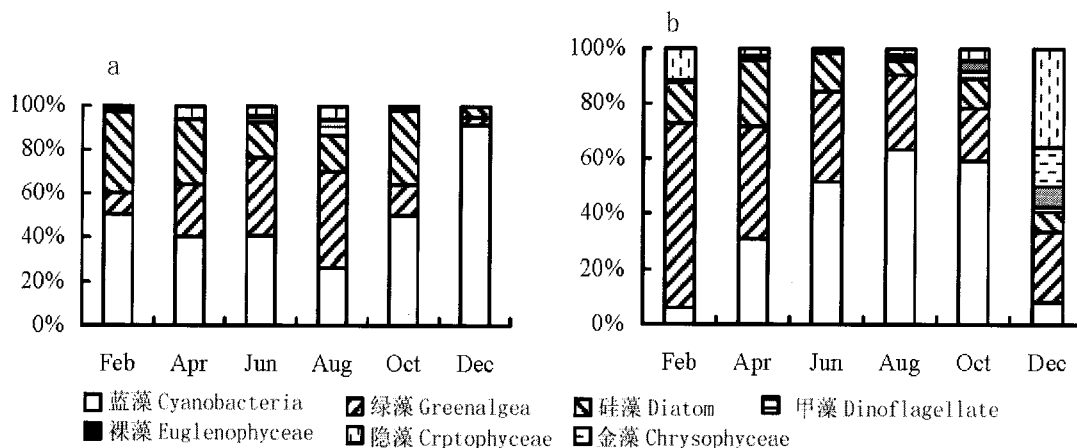


图 2 飞来峡水库(a)和深圳水库(b)浮游植物组成的季节性变化

Fig. 2 Seasonal changes in phytoplankton composition in Feilaixia Reservoir (a) and Shenzhen Reservoir (b)

库的浮游植物基本上以硅藻、绿藻和蓝藻为最主要的组成部分。尽管多数蓝藻种类对水流流速很敏感^[9],但是,即使在流速比较急的河流中,仍然存在诸如聚球藻(*Synechococcus*)、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幅度上升^[21-22]。在河流型的飞来峡水库和深圳水库,蓝藻同样占据一定的比例,甚至在某些月份成为绝对的优势类群。在飞来峡水库,大多数情况下,蓝藻的相对丰度在 30%~50%之间,但在 12 月蓝藻的相对丰度超过 90%,是绝对的浮游植物优势类群;深圳水库虽然在 2 月和 12 月蓝藻的相对丰度不到 10%,但在 6、8 和 10 月蓝藻的相对丰度达 50%以上,是绝对的浮游植物优势类群。

3.3 蓝藻的季节性变化

两座水库在 2004 年蓝藻细胞密度变幅为 5-2 052 个细胞 ml⁻¹。由图 3 可见,高营养水平的深圳水库蓝藻在 6、8 月份细胞密度相对比其它月份高得多;低营养水平的飞来峡水库,蓝藻在 12 月份细胞密度高达 1 969 个细胞 ml⁻¹,但其它月份蓝藻细胞密度要低 1 个数量级以上。在热带亚热带地区,由于光照和温度季节性变化幅度没有温带地区那么剧烈,在其它条件同样许可的情况下,蓝藻全年可均为优势类群^[1]。两座水库地处热带地区北缘,温度的季节性变幅虽然没有温带地区那么大,但水体表层温差也有 18℃左右。夏季相对较高的水温有利于一些蓝藻种类,如微囊藻等的生长,并形成优势。

但是,只有在深圳水库,蓝藻在夏季(6 月)细胞密度相对比较高,并成为浮游植物的优势类群;相反,在飞来峡水库,蓝藻在冬季(12 月)细胞密度的大幅度上升,成为绝对的浮游植物优势类群。

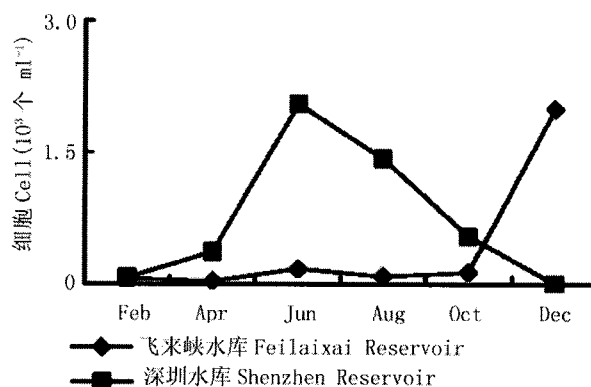


图 3 两座水库蓝藻细胞密度季节性变化

Fig 3 Seasonal changes in Cyanophyta cell densities in the two reservoirs

蓝藻在水体中成为优势类群是由多个因子综合影响的结果^[5-6]。其中,水体中较高的营养盐输送量是至关重要的,其次要有合适的水动力学条件^[5]。深圳水库虽然是一座富营养型水库,有高的营养盐输送量,但其平均水力滞留时间只有 7 d,低于影响浮游植物增长速率的阈值(14 d),高的平流损失率可能是导致蓝藻细胞密度远不及同地区中长滞留时间的富营养型和中-富营养型水库,如契斧石水库^[18]、石岩水库^[19]和汤溪水库^[20]的主要原因之一。深圳水库的主要功能是城市供水,自身流域产水量甚

少, 水量基本是通过多级泵站向其它流域调水, 调水量及出库流量取决于供水需求。水力滞留时间的季节性变化幅度不大, 全年水力滞留时间均低于 14 d。水库氮、磷营养水平有一定程度的波动, 但在 6 月份是全年最低。在这种情况下, 温度和光照强度的季节性变化可能是引起深圳水库蓝藻细胞密度季节性变化的两个重要因素, 从而导致最高蓝藻细胞密度出现在夏季。

飞来峡水库在 12 月蓝藻的细胞密度不仅比其它月份高 1 个数量级, 而且也比同月份的深圳水库高两个数量级。12 月水温只有 14℃, 光照强度是全年最低的月份之一, 氮、磷营养盐水平也是全年最低的月份之一(表 2), 而且远低于深圳水库, 上述几个因素的季节性变化显然不是导致飞来峡水库 12 月份蓝藻细胞密度陡升的关键因素。与深圳水库有所不同, 飞来峡水库在运转过程中, 水位一般维持不变, 以确保航运, 入库水量与出库水量基本上保持一致。由于 2004 年是干旱年, 入库水量在冬季的 12 月份大大减少, 在水库水位维持不变的情况下, 出库流量同样大大减少, 使得该月份水库水力滞留时间延长(30 d)。水力滞留时间超过 14 d(阈值), 平流损失率大为降低, 有利于蓝藻种群的累积, 尽管水温只有 14℃, 光照强度也不强, 蓝藻细胞密度仍然大幅度上升至 2 000 个细胞 ml⁻¹, 并且该月份浮游植物以蓝藻为绝对优势类群。在水力滞留时间都不超过 14 d 的情况下, 由于营养水平相对较低, 飞来峡水库蓝藻细胞密度不及深圳水库高, 但是在水力滞留时间比较长的 12 月份, 蓝藻的细胞密度与深圳水库夏季最高细胞密度差别不大。在水力滞留时间小于 14 d 的情况下, 虽然氮、磷营养水平不及 2、4 月份, 但蓝藻在 6 月(夏季)的细胞密度仍然要高于 2、4 月份。

从以上分析可知, 在众多影响蓝藻细胞密度的环境因子中, 对于深圳水库和飞来峡水库这两座直流型水库而言, 水力滞留时间是一个主要的非生物环境变量。在大多数情况下, 它们的水力滞留时间不超过 14 d(阈值), 高的平流损失率使这两座直流型水库的蓝藻细胞密度仍然处于比较低的水平, 尽管它们的氮、磷营养盐水平有利于蓝藻的生长。从深圳水库的氮、磷营养水平看, 蓝藻细胞密度有达到相当高的水平的潜势, 一旦水力滞留时间延长并超过 14 d, 蓝藻细胞密度有可能大幅度上升, 从

而对水生态系统的结构产生较大的影响。

3.4 不同生态类型蓝藻季节分布特征

根据生活形态及是否有产毒的可能性, 我们将蓝藻分为 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^[1,9]。其中, 后三种生态类型蓝藻种类一旦成为优势种, 对水生态系统的结构与功能可能会产生一定的影响^[2-4]。在两座水库中, 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粘球藻; 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; 可能产毒丝状蓝藻则主要来自拟柱孢藻。

假鱼腥藻、*Limnothrix* sp.、蓝纤维藻和微囊藻是深圳水库蓝藻的优势种类。不产毒丝状蓝藻(假鱼腥藻)在 6、8 和 10 月份占蓝藻总细胞密度的 75% 以上, 不产毒的单细胞种类, 蓝纤维藻则是 4 和 12 月份的优势蓝藻种类(图 4)。在飞来峡水库, 蓝藻以微囊藻、假鱼腥藻和蓝纤维藻为主要组成。不产毒丝状蓝藻假鱼腥藻的优势度相当明显, 尤其在 12 月份, 占总蓝藻细胞密度的 90% 以上; 可能产毒的微囊藻也占有相当的比例, 并且是 8 月份蓝藻的优势种类之一; 蓝纤维藻只在 4 月和 6 月有比较高的相对丰度, 并成为当时的优势蓝藻种类之一(图 4)。

微囊藻是两座水库最主要的可能产毒蓝藻种类, 微囊藻细胞密度变幅 0-153 个细胞 ml⁻¹, 最高细胞密度均出现在夏季(图 5)。微囊藻喜在较高水温、热垂直分层的富营养化条件下生长并具有竞争优势^[1,9], 但飞来峡水库和深圳水库均属直流型水库, 水力滞留时间短, 水体不出现热垂直分层现象, 全年处于完全混和状态, 不利于微囊藻这些喜在稳定水体中生长的种类的生长和大量聚集, 因此微囊藻细胞密度均处在相对比较低的水平上。拟柱孢藻是一种适应能力比较强, 并能产毒的丝状蓝藻种类^[13], 它是调查水库中仅次于微囊藻的另一种可能产毒种类, 但只出现于飞来峡水库, 拟柱孢藻在飞来峡水库只是在 6 月份相对有比较高的丰度, 但也不超过 5 个丝状体 ml⁻¹。

丝状蓝藻比较容易在富营养化的浅水湖泊中成为优势类群, 而且在夏季优势种类一般是来自颤藻目^[1,6,9,23]。丝状蓝藻即使不产毒, 但如果密度太高

的话,也能影响水体中某些滤食性的浮游动物,如溠属,进而影响浮游动物的群落结构^[24]。两座水库不产毒丝状蓝藻的细胞密度变幅为 1-1 794 个细胞 ml⁻¹。在深圳水库,不产毒丝状蓝藻在夏季相对有比较高的密度,是优势蓝藻类群,可能对某些滤食性浮游动物种类的滤食效率产生一定的影响,而在其它季节,丝状蓝藻的密度尚未达到影响滤食性浮游动物的滤食效率的水平(图 6)。在飞来峡水库,不产毒丝状蓝藻只是在水力滞留时间相对比较长的 12 月份密度比较高,达 1 794 个细胞 ml⁻¹,是该月份的绝对优势种类,并造成藻类密度远高于其它月份。两

座水库虽然受水力滞留时间的影响,蓝藻细胞密度相对比同等营养水平但长水力滞留时间的水库低,但从蓝藻组成看,仍然体现出富营养型浅水水体的一些特征,丝状蓝藻是最主要的蓝藻种群。

影响水体蓝藻群落结构的因素比较多,也比较复杂,目前来说,要确切地预测蓝藻群落结构对环境条件变化的响应是不太可能,只能在一定程度上判断某一特定环境条件可能有利于某一种蓝藻的生长。水体的热稳定性是影响蓝藻分布的一个重要因素。微囊藻通过控制伪空泡的数量来调控细胞密度^[4]。在热分层的水体中,一般来说,微囊藻可以利

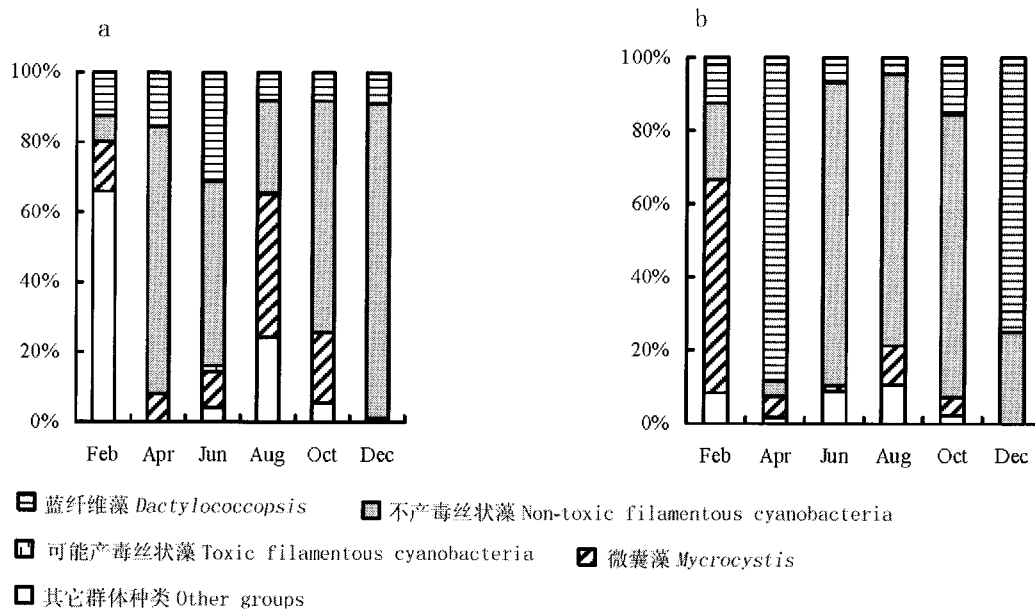


图 4 飞来峡水库 (a) 和深圳水库 (b) 蓝藻组成季节性变化

Fig. 4 Seasonal changes in Cyanobacteria composition in Feilaixia Reservoir (a) and Shenzhen Reservoir (b)

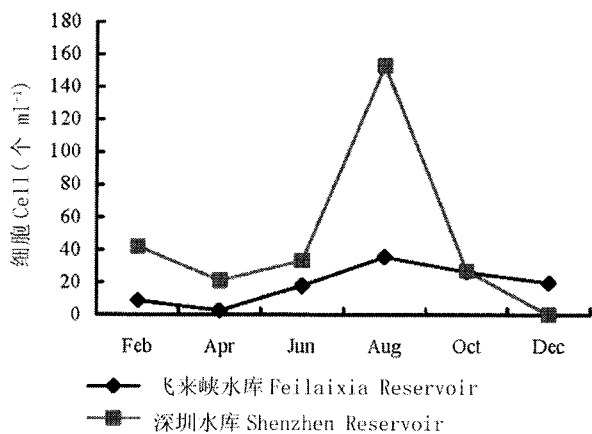


图 5 飞来峡水库和深圳水库微囊藻细胞密度的季节性变化

Fig 5 Seasonal changes in *Microcystis* density in Feilaixia and Shenzhen Reservoirs

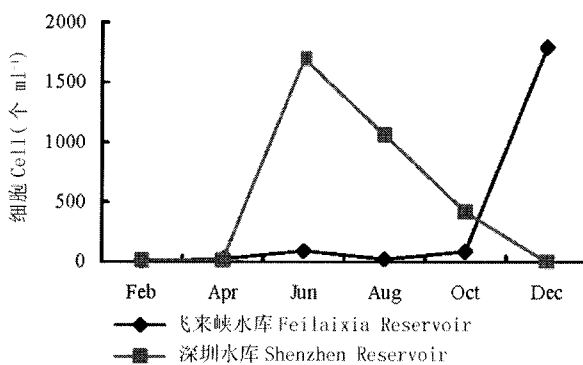


图 6 飞来峡水库和深圳水库不产毒有害丝状蓝藻细胞密度季节性变化

Fig. 6 Seasonal changes in non-toxic filamentous cyanobacteria densities in Feilaixia and Shenzhen Reservoirs

用其浮力调控机制在竞争中取得优势。但是,在完全混合的水体中,它的浮力调控优势难以有效发挥。深圳水库和飞来峡水库属直流型水库,水体全年处于完全混合状态,虽然两座水库的氮、磷营养水平,尤其是深圳水库达到相当高的水平,微囊藻的细胞密度一直维持在比较低的水平上,而且在大多数情况下优势度不及丝状蓝藻。对于不具备浮力调控机制的丝状蓝藻来说,水体的完全混合对它们影响程度相对较低,甚至某些种类喜在这种环境条件下生存^[9]。假鱼腥藻和 *Planktothrix* 等丝状蓝藻种类可以在水流流速比较急的河流中生存,而且一旦水流流速减缓,它们的种群密度可以大幅度上升^[20,21]。在深圳水库,假鱼腥藻在蓝藻细胞密度最高的夏季占有绝对优势;在飞来峡水库,假鱼腥藻同样是在蓝藻细胞密度大幅度上升的 12 月份占有绝对优势。对于深圳水库和飞来峡水库来说,尤其是深圳水库,它们的氮、磷营养盐水平相当有利于蓝藻的生长,但由于它们的水力滞留时间一般不超过 14 d (阈值),高的平流损失使它们的蓝藻现存量仍然处于比较低的水平。相对来说,假鱼腥藻等丝状蓝藻比微囊藻更适合在这两座水库中生长,而且由于两座水库的氮、磷水平比较高,一旦水力滞留时间超过 14 d,且水体仍然处于完全混合的状态下,假鱼腥藻细胞密度很有可能急剧上升,甚至对水生生态系统的结构与功能产生明显的影响。

4 结论

在两座直流型的水库中,蓝藻均以假鱼腥藻、微囊藻和蓝纤维藻等为常见。水库的氮、磷营养水平有利于蓝藻的生长,但比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。假鱼腥藻等丝状蓝藻更适合在这两座水库中生长,而且一旦水动力条件合适,它们的细胞密度可以大幅度上升,甚至对水生生态系统的结构与功能产生影响。控制水库水力滞留时间可作为广东省富营养化水库蓝藻水华控制的一种辅助手段。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Brett M T, Müller-Navarra D C. The role of highly unsaturated fatty acids in aquatic food web processes [J]. Freshwater Biol, 1997, 38:483-499.
- [3] Kilham S S, Kreeger D A, Goulden C E, et al. Effects of algal food quality on fecundity and population growth rates of *Daphnia* [J]. Freshwater Biol, 1997, 38:639-647.
- [4] 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.
- [5] Elser J J. The pathway to noxious cyanobacteria blooms in lakes: the food web as the final turn [J]. Freshwater Biol, 1999, 42:537-543.
- [6] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes [J]. Hydrobiologia, 2000, 438:1-12.
- [7] Vincent W F, Howard-williams C, Forsyth D J, et al. Forum on cyanobacterial dominance [J]. New Zealand J Mar Freshwater Res 1987, 21:509-513.
- [8] Mitrovic S M, Oliver R L, Rees C, et al. Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers [J]. Freshwater Biol, 2003, 48:164-174.
- [9] 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.
- [10] Lin Q Q(林秋奇), Hu R(胡韧), Duan S S(段舜山), et al. Reservoir trophic states and the response of plankton in Guangdong Province [J]. Acta Ecol Sin (生态学报), 2003, 23(6):1101-1108. (in Chinese)
- [11] Straskraba M, Tundisi J G. Guidelines of Lake Management (Vol. 9): Reservoir Water Quality Management [M]. Shiga: International Lake Environment Committee Foundation, 1999.
- [12] Song R Y(宋仁元), Zhang Y J(张亚杰), Wang W Y(王维一). Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. 15th ed. Beijing: China Architectural & Building Press, 1985.
- [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]. Lak Res: Res Manag, 2000, 5:195-205.
- [14] Pádisak J. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju, an expanding, highly adaptative cyanobacterium: worldwide distribution and review of its ecology [J]. Arch Hydrobiol Suppl, 1997, 107:563-593.
- [15] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [16] 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.
- [17] 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 Tech*, 1998, 37(2):245–252.
- [18] Dong L H (董丽华), Hu R (胡韧), Lin Q Q (林秋奇), et al. Analysis of plankton and eutrophication in a typical small reservoir in Guangdong Province: Qiyeshi Reservoir [J]. *Ecol Sci (生态科学)*, 2002, 21(2):147–151. (in Chinese)
- [19] Wang Z H (王朝晖), Lin Q Q (林秋奇), Hu R (胡韧), et al. Pollution by blue-green algae (Cyanophyta) in reservoirs of Guangdong Province and water quality evaluation [J]. *J Trop Subtrop Bot (热带亚热带植物学报)*, 2004, 12 (2):117–123. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] Reynolds C S, Descy J P. The production, biomass and structure of phytoplankton in large rivers [J]. *Arch Hydrobiol Suppl*, 1996, 113:161–187.
- [22] Wehr J, Descy J P. Use of phytoplankton in large river management [J]. *J Phycol*, 1998, 34:741–749.
- [23] Nixdorf B, Mischke U, Rů cker J. Phytoplankton assemblages and steady state in deep and shallow eutrophic lakes — an approach to differentiate the habitat properties of *Oscillatoriales* [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 502:111–121.
- [24] 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.