

南亚热带城市中小型水库蓝藻种类组成及其群落季节动态*

陈飞 唐鹊辉 肖利娟 彭亮** 林小涛

暨南大学水生生物研究所 广州 510632

摘要 南亚热带中小型水库是城市重要的水源地和后备水源地。为了解南亚热带地区中小型水库蓝藻的分布情况,于2011年7月(丰水期)和2012年3月(枯水期)调查了该地区25座中小型水库,分析了水库的蓝藻种类组成与群落季节动态特征。25座水库的总氮(TN)浓度范围为0.51-9.37 mg/L;总磷(TP)浓度范围为0.01-0.72 mg/L,富营养水体占80%。本次调查共检出蓝藻20属,蓝纤维藻、泽丝藻、假鱼腥藻和拟柱孢藻为优势丝状蓝藻,细小平列藻、色球藻、粘球藻和隐杆藻为优势球形蓝藻,其中泽丝藻为绝对优势属。丰水期蓝藻生物量为 $3.19 (\pm 4.87)$ mg/L,枯水期为 $0.83 (\pm 1.06)$ mg/L,丝状蓝藻全年占优。多元方差分析(MANOVA)表明蓝藻群落季节差异显著($P < 0.05$),方差分析(ANOVA)显示枯水期蓝藻及丝状蓝藻生物量显著低于丰水期($P < 0.05$),球形蓝藻生物量季节变化不明显。多元回归分析表明,丰水期透明度是影响蓝藻生物量的重要原因,枯水期则为TP与pH;冗余分析表明温度、透明度、硝氮与电导率为蓝藻群落季节差异的重要解释变量,其中电导率为丰水期蓝藻分布的重要解释变量;电导率与硝氮为枯水期重要解释变量。整体而言,中小型水库丰水期高温和高营养盐是蓝藻生物量相对较高的主要原因,但由于水体扰动剧烈,导致丝状蓝藻占据优势;温度降低是枯水期蓝藻生物量降低的重要原因。(图4 表3 参36)

关键词 南亚热带;中小型水库;蓝藻;种类组成;群落动态;季节动态

CLC Q178.14

Species composition and seasonal community dynamics of cyanobacteria in small- and medium-sized reservoirs in subtropical cities of southern China*

CHEN Fei, TANG Quehui, XIAO Lijuan, PENG Liang** & LIN Xiaotao

Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract Small- and medium-sized reservoirs are important water sources in the subtropical zone of southern China. Cyanobacterial species dominate throughout the year in most reservoirs in or around cities. In order to investigate the cyanobacterial community structure and seasonal variation of these reservoirs, physical-chemical parameters, nutrients, biomass, and abundance of cyanobacteria were investigated in twenty-five reservoirs in Dongguan city in July 2011 (flood season) and March 2012 (dry season). The results showed that total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) ranged from 0.51 to 9.37 mg/L and 0.01 to 0.72 mg/L, respectively. Eighty percent of these reservoirs were in a eutrophic status. During the observation period, 20 genera of cyanobacteria were observed. *Dactylococcopsis*, *Limnothrix*, *Pseudanabaena*, and *Cylindrospermopsis* were common filamentous cyanobacteria genera, and *Merismopedia*, *Chroococcus*, *Gloeocapsa*, and *Aphanothece* were common spherical cyanobacteria; *Limnothrix* was the predominant genus. Cyanobacterial biomass was $0.19 (\pm 4.87)$ mg/L in the flood season and $0.83 (\pm 1.06)$ mg/L in the dry season. Filamentous cyanobacteria dominated throughout the year. A MANOVA showed that there was significant seasonal variation in the cyanobacterial community ($P < 0.05$); meanwhile, the cyanobacterial biomass and filamentous cyanobacterial biomass in the dry season were significantly lower than they were in the flood season ($P < 0.05$, ANOVA). The multivariate regression analysis showed that transparency in the flood season and TP and pH in the dry season were the important explanatory variables for the seasonal variation of cyanobacterial biomass. A redundancy analysis indicated that temperature, transparency, NO_3^- , and conductivity were important explanatory variables for seasonal variation in cyanobacterial biomass and that conductivity was an important explanatory variable for the flood season and NO_3^- and conductivity for the dry season. High temperatures and nutrient concentrations resulted in high cyanobacterial biomass in the

收稿日期 Received: 2017-08-15 接受日期 Accepted: 2017-09-07

*国家自然科学基金项目(41403061)和广东省水利科技创新项目(2016-29)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41403061) and the Guangdong Innovation Project of Hydraulic Science and Technology (2016-29)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: tpengliang@jnu.edu.cn)

flood season in small- and medium-sized reservoirs. Filamentous cyanobacteria achieved a competitive advantage under fierce perturbation, and, in addition, cyanobacterial biomass decreased with temperature in the dry season.

Keywords southern China; small and medium-sized reservoirs; cyanobacteria; species composition; community dynamics; season dynamics

一般而言,温度、光照和营养盐是影响浮游植物生长的主导因子^[1-2]。对于水库这类半人工水体,水库调度导致的水动力学变化也是影响浮游植物群落的重要因素^[3-4]。南亚热带地区全年温度较高,光照充足,且季节性变化不如温带地区显著,而流域内营养盐输入和汛期强降水导致的水文变化可能成为决定浮游植物群落的季节性变化的重要因素^[5]。水体富营养化有利于蓝藻形成竞争优势甚至发生水华^[5]。大多数淡水水体属于磷限制,蓝藻对磷的高效利用机制是其形成竞争优势的重要生物学基础^[7]。此外,部分丝状蓝藻具有异形胞,能固氮,在低氮环境下增加了其竞争能力^[8]。蓝藻在高pH条件下对低CO₂仍有较强的吸收能力^[9]。在富营养化水体中,蓝藻的光合生产量很高,导致水体的CO₂浓度下降,pH值上升,使蓝藻更具竞争能力。除叶绿素之外,蓝藻还含藻胆蛋白,对光的吸收和利用能力较强^[10]。此外,一些水华蓝藻种类具有伪空胞,能调节浮力,使其能适应在光限制水体,当水华发生时,水体的透明度下降,大大抑制了其他种类的生长,更有利于蓝藻的生长^[11]。

在南亚热带地区,大型深水水库丰水期其湖泊区一般存在稳定的热分层,温跃层阻碍了湖下层营养盐向湖上层的扩散,蓝藻生长可能受营养盐的限制,生物量较低。枯水期水体混合深度增加,有利于内源营养盐的持续供应。同时水柱的平均光强随混合层深度的增加而降低,部分耐低光的丝状蓝藻取得竞争优势,藻类生物量较高^[12]。与大型深水水库相比,中小型水库全年无稳定热分层,水体稳定性易受降水、流域冲刷、水库调水等影响。丰水期降雨频繁,水体剧烈扰动与大量外源营养物质输入,水柱可获得性平均光强较低;枯水期水体扰动小,水柱可获得性光强增加,再加上南亚热带地区常年高温,中小型水库的这些湖沼学特征为浮游植物特别是蓝藻的群落演替提供了充分的生态学基础^[13]。常见水华蓝藻一般喜好高温、高营养盐,对水流冲刷敏感,但部分丝状蓝藻能耐受一定的水体扰动与低光条件,这些生理特征都有助于蓝藻形成竞争优势^[14]。蓝藻水华通过产生次生代谢物质、死亡分解耗氧和破坏正常的食物网威胁到生态系统健康,甚至能通过饮用水、食物链等途径威胁到人类健康^[15]。自2007年太湖水危机事件以来,水源地蓝藻水华的监控不断加强。近年来,随着城市的发展,中小型水库作为重要的水源或后备水源的重要性愈发凸显。相比于大型水库,中小型水库库容较小,对外来污染的缓冲能力低,富营养化程度较高,蓝藻水华问题更突出。目前,能形成水华的蓝藻主要包括球形的微囊藻(*Microcystis*)和以鱼腥藻(*Anabaena*)、束丝藻(*Aphanizomenon*)、拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis*)等为代表的丝状蓝藻,这两类蓝藻在水华形成原因、形成过程和表现形式上存在较大差异^[16]。其中丝状蓝藻在我国南亚热带地区长期形成优势,表现出较强的地区特点,但对该地区这类蓝藻对水体生态环境的响应过程研究相对薄弱。

了解南亚热带地区中小型水库蓝藻种类组成特征和群落季节动态,我们选取广东省东莞市25座中小型水库为研究对象,于丰水期(2011年7月)和枯水期(2012年3月)分别调查了水库浮游植物群落组成、生物量和常规水质指标,分析了丝状蓝藻和球形蓝藻的季节动态,探讨导致不同类型蓝藻群落季节变化的原因,以期热带亚热带中小型水库蓝藻水华风险分类管控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象

东莞市(113°31'-114°15'E, 22°39'-23°09'E)位于广东省南部、珠江口东岸、珠江三角洲东江中下游,地处北回归线以南。全年平均气温23.3℃,平均降水量2 042.6 mm,降雨量主要集中在4-9月。本次调查对象为东莞市内25座中小型水库(图1),其中松木山水库、茅寮水库、契岭石水库、横岗水库、同沙水库、黄牛埔水库和雁田水库库容大于1 000万m³,为中型水库,其余水库均为小型水库。所调查座水库均存在一定富营养化程度^[17](表1)。

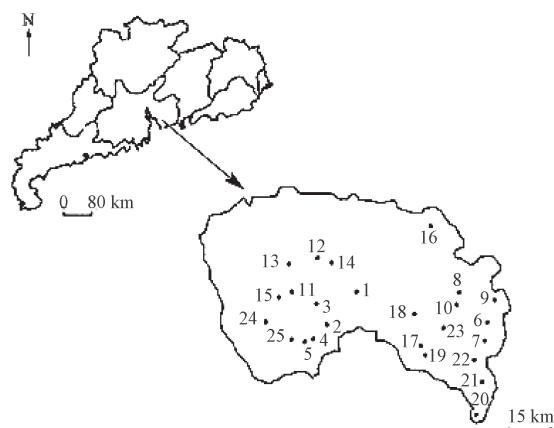


图1 东莞市25座水库分布图。

Fig. 1 Location of the 25 investigated reservoirs in Dongguan City.

1.2 研究方法

于丰水期(2011年7月)和枯水期(2012年3月),对25座水库分别进行了采样,采样点设置于水库大坝处,采集表层0.5 m水样。透明度(SD)用萨氏盘进行现场测量,表层水温(ST)、电导率(Con)、溶解氧(DO)和pH值用YSI-85型水质分析仪现场测定。水体理化指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、硝氮(NO₃⁻-N)、亚硝氮(NO₂⁻-N)和可溶性正磷酸盐(PO₄³⁻-P),均按照国家标准方法进行测定。浮游植物定量样品采取表层0.5 m处原水,现场分别加1%甲醛和鲁哥试剂固定,带回实验室静置沉淀,浓缩后在光学显微镜下进行分

表1 东莞市25座水库类型与营养状态

Table 1 Types and nutritional status of the 25 reservoirs in Dongguan city

编号 Number	水库 Reservoir	简称 Abbreviation	水库大小 Size	营养状态* Trophic status*
1	松木山	SMS	中 Medium	H
2	莲花山	LHS	小 Small	E
3	金鸡咀	JJZ	小 Small	M
4	五点梅	WDM	小 Small	H
5	马尾	MW	小 Small	H
6	茅寮	MF	中 Medium	M
7	契爷石	QYS	中 Medium	E
8	箭竹排	LZP	小 Small	M
9	上南	SN	小 Small	M
10	石鼓	SG	小 Small	E
11	横岗	HG	中 Medium	E
12	同沙	TS	中 Medium	E
13	水濂山	SLS	小 Small	E
14	佛岭	FL	小 Small	E
15	三丫陂	SYP	小 Small	E
16	东丫湖	DYH	小 Small	H
17	清泉	QQ	小 Small	E
18	黄牛埔	HNP	中 Medium	E
19	虾公岩	XGY	小 Small	E
20	雁田	YT	中 Medium	E
21	官井头	GJT	小 Small	E
22	黄洞	HD	小 Small	E
23	塘坑边	TKB	小 Small	H
24	白坑	BK	小 Small	H
25	芦花坑	LHK	小 Small	H

*H: 超富营养; E: 富营养; M: 中营养。

*H: Hypertrophic; E: Eutrophic; M: Mesotrophic.

析鉴定。生物量则按照Hillebrand的近似体积公式法^[18]计算。

1.3 数据分析

通过方差分析 (ANOVA) 比较蓝藻 (丝状蓝藻和球形蓝藻) 生物量差异及其季节动态, 多元逐步回归法筛选出对蓝藻生物量有显著影响的环境变量。通过多元方差分析 (MANOVA) 比较不同类型蓝藻群落结构的季节差异, 冗余分析 (RDA) 中使用前向选择去除自相关变量后筛选得到对蓝藻群落有显著影响的环境变量。在方差分析中, 通过Q-Q图检验理化因子与蓝藻生物量数据均符合正态分布与近似正态分布, 且方差同质性检验为齐性。在多元回归分析中对蓝藻生物量开算术平方根处理, 冗余分析中对蓝藻群落数据Hellinger转化, 环境因子标准化处理。数据分析与作图在R语言程序与Origin 9.1中完成, R语言调用的程序包包括vegan、MASS。

表2 蓝藻分类与编号

Table 2 Code and classification of cyanobacteria

蓝藻 Cyanobacteria	代码 Code	分类 Classification	蓝藻 Cyanobacteria	代码 Code	分类 Classification
蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis</i>	sp1	F	鱼腥藻 <i>Anabeana</i>	sp11	F
泽丝藻 <i>Limnotherix</i>	sp2	F	微囊藻 <i>Microcystis</i>	sp12	S
尖头藻 <i>Raphidiopsis</i>	sp3	F	细小平裂藻 <i>Merismopedia</i>	sp13	S
颤藻 <i>Oscillatoria</i>	sp4	F	色球藻 <i>Chroococcus</i>	sp14	S
席藻 <i>Phormidium</i>	sp5	F	粘球藻 <i>Gloeocapsa</i>	sp15	S
鞘丝藻 <i>Planktolyngbya</i>	sp6	F	隐球藻 <i>Aphanocapsa</i>	sp16	S
浮丝藻 <i>Planktothrix</i>	sp7	F	隐杆藻 <i>Aphanothece</i>	sp17	S
螺旋藻 <i>Spirulina</i>	sp8	F	小雪藻 <i>Snowella</i>	sp18	S
拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis</i>	sp9	F	腔球藻 <i>Coelosphaerium</i>	sp19	S
假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i>	sp10	F	束球藻 <i>Gomphosphaeria</i>	sp20	S

F: 丝状蓝藻; S: 球形蓝藻。F: Filamentous cyanobacteria; S: Spherical cyanobacteria.

2 结果与分析

2.1 理化指标

丰水期和枯水期表层水体平均温度分别为31.2℃和21.6℃, 均高于20℃。丰水期透明度范围为0.23-1.50 m, 枯水期为0.30-2.30 m, 平均值分别为0.72 m和0.96 m。不同水库间电导率差异较大, 丰水期电导率范围为32.8-413.5 μS/cm, 枯水期为34.1-541.0 μS/cm, 平均值分别为170.9和176.2 μS/cm。丰水期pH范围为8.57-10.80, 枯水期为6.99-9.61, 平均值分别为9.68和8.51, 水体均呈弱碱性, 丰水期pH显著高于枯水期 ($P < 0.05$, ANOVA)。丰水期TN浓度范围为0.51-5.55 mg/L, 枯水期为0.59-9.38 mg/L, 平均值分别为1.93 mg/L和2.63 mg/L。丰水期TP浓度范围为0.01-0.29 mg/L, 枯水期为0.01-0.72 mg/L, 平均值分别为0.11 mg/L和0.15 mg/L, 丰水期略低于枯水期。丰水期硝氮浓度范围为0.07-1.91 mg/L, 枯水期为0.16-5.80 mg/L, 平均值分别为0.48 mg/L和1.10 mg/L。丰水期可溶性磷浓度范围为0.001-0.014 mg/L, 枯水期为0.01-0.13 mg/L, 平均值分别为0.006 mg/L和0.01 mg/L (图2)。多元方差分析 (MANOVA) 表明, 环境因子在季节间差异极显著 ($F = 178.15, N = 1, P < 0.01$)。方差分析 (ANOVA) 表明硝氮浓度在季节间差异显著 ($F = 4.48, N = 1, P < 0.05$), 枯水期高于丰水期。水温 ($F = 591.67, N = 1, P < 0.001$)、pH ($F = 40.80, N = 1, P < 0.01$) 和溶解氧 ($F = 90.89, N = 1, P < 0.01$) 在季节间差异均极显著。丰水期水温和pH值均高于枯水期, 枯水期溶解氧含量高于丰水期 (图2)。

2.2 蓝藻种类数量与分类

共鉴定出蓝藻20属, 其中丝状蓝藻11属, 球形蓝藻9属。丝状蓝藻单个细胞为圆柱形或条形丝状, 球形蓝藻单个细胞为球形或椭圆形 (表2)。

2.3 蓝藻生物量季节动态

25座中小型水库中, 在丰水期有14座水库蓝藻占浮游植物生物量均超过50%, 枯水期蓝藻优势降低, 除黄牛埔水库外, 其余水库蓝藻占浮游植物生物量比例均低于50%, 与绿藻硅藻等共同占据优势。蓝藻生物量在不同水库间差异较大, 丰水期蓝藻生物量最小值出现在清泉水库为 2.1×10^{-3} mg/L, 最大值出现在塘坑边水库为19.46 mg/L; 枯水期蓝藻生物量最小值出现在箭竹排水库, 为 1.3×10^{-3} mg/L, 最大值出现在五点梅水库, 为4.57 mg/L。丰水期蓝藻占浮游植物生物量比例范围为0.8%-97.3%, 有20座水库中丝状蓝藻生物量

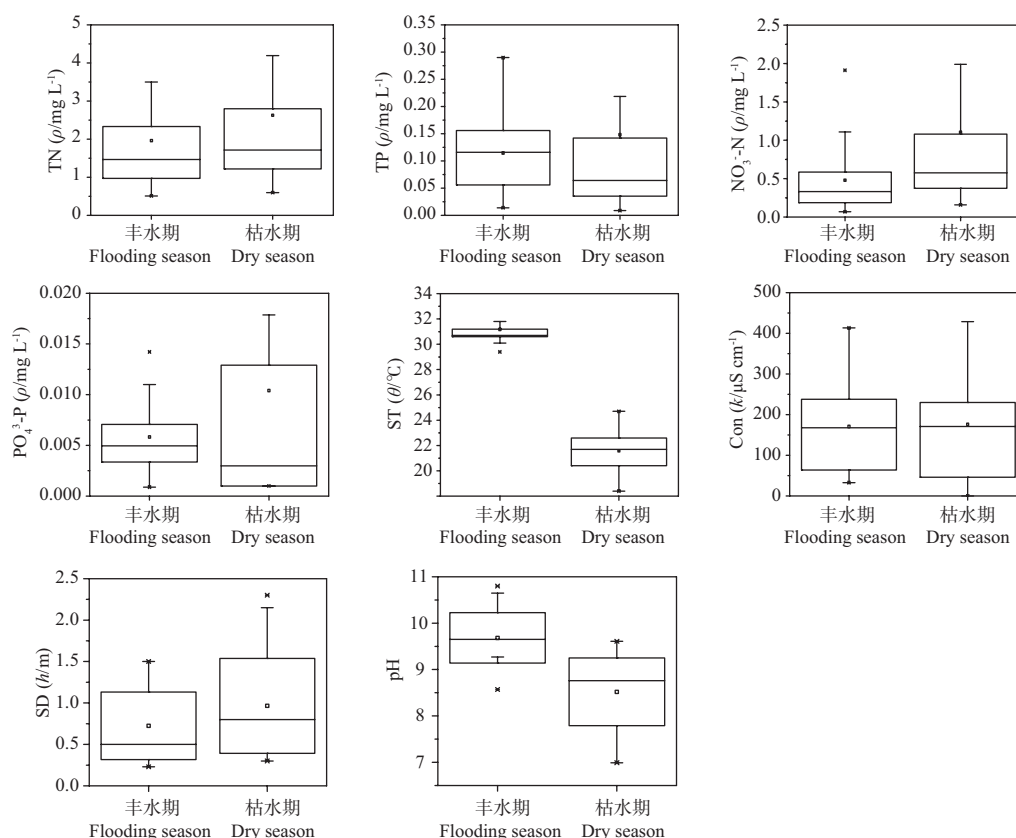


图2 主要理化因子季节差异。TN: 总氮; TP: 总磷; ST: 表层水温; Con: 电导率; SD: 透明度。

Fig. 2 Seasonal variation of major physical and chemical factors. TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; ST: Surface temperature; Con: Conductivity. SD: Secchi depth.

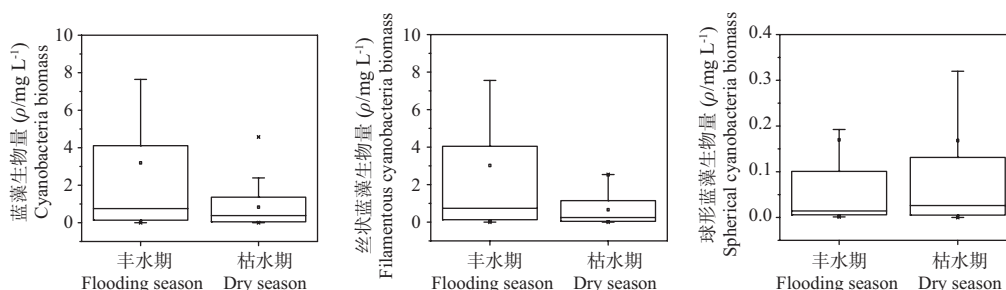


图3 蓝藻生物量季节差异。

Fig. 3 Seasonal variation of cyanobacterial biomass.

占蓝藻生物量比例均超过70%;在枯水期蓝藻占浮游植物生物量比例范围为0.2%-64.9%,有19座水库蓝藻生物量比例超过70%。方差分析(ANOVA)表明两类蓝藻生物量差异极显著($F = 10.27, N = 1, P < 0.01$),丝状蓝藻生物量显著高于球形蓝藻。蓝藻生物量季节差异显著($F = 5.37, N = 1, P < 0.05$),其中丝状蓝藻生物量从丰水期到枯水期降低($F = 5.65, N = 1, P < 0.05$),而球形蓝藻生物量变化不显著(图3)。

对蓝藻生物量与环境因子进行多元回归分析,发现影响蓝藻生物量的环境因子具有季节性差异。丰水期,透明度与电导率是影响蓝藻生物量的主要环境因子,枯水期则以TP和硝氮营养因子和pH为主。其中蓝藻生物量与硝氮、透明度和pH有关;球形蓝藻生物量与透明度和TP有关;丝状蓝藻生物量与透明度、硝氮和pH有关(表3)。

2.4 蓝藻群落与环境因子关系

多元方差分析(MANOVA)表明,蓝藻群落在中小型水库间均无显著差异,而主要表现为季节差异,其中蓝藻群落($F = 2.21, N = 1, P < 0.05$)与丝状蓝藻群落($F = 2.30, N = 1, P < 0.05$)季节差异显著。在冗余分析中,环境因子对蓝藻群落的累积解释率为39.78%,显著的环境因子分别为温度($R^2 = 0.12, P < 0.01$)、电导率($R^2 = 0.08, P < 0.01$)、硝氮($R^2 = 0.03, P < 0.05$)与透明度($R^2 = 0.03, P < 0.05$)。在丰水季节,环境因子累计解释率为48.35%,其中显著的环境因子为电导率($R^2 = 0.18, P < 0.01$);在枯水季节,环境因子累计解释率为39.78%,其中显著的环境因子分别为电导率($R^2 = 0.10, P < 0.01$)和硝氮($R^2 = 0.08, P < 0.05$)(图4)。硝氮、电导率与轴1呈正相关,透明度与轴1呈负相关,轴2左侧与水温

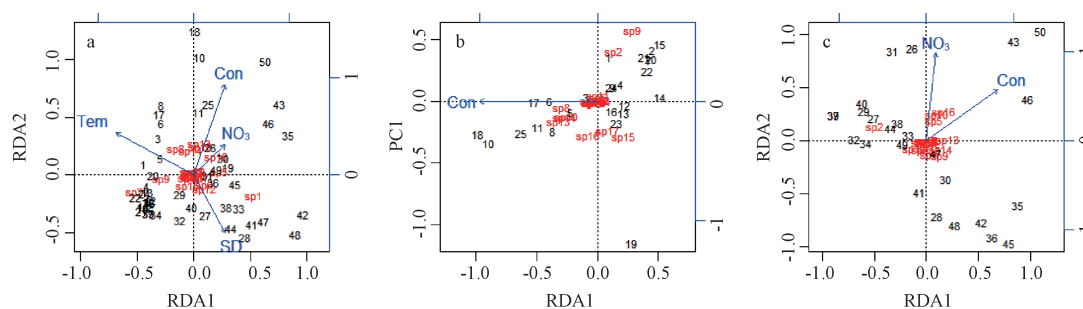


图4 蓝藻群落不同季节的RDA分析。a: 蓝藻群落; b: 丰水期蓝藻群落; c: 枯水期蓝藻群落; 1-25: 丰水期水库编号; 26-50: 枯水期水库编号。Tem: 温度; Con: 电导率; SD: 透明度。

Fig. 4 RDA analysis of cyanobacteria community in different seasons. a: Cyanobacteria community; b: Cyanobacteria community in flooding season; c: Cyanobacteria community in dry season; 1-25: Reservoirs number in flooding season; 26-50: Reservoirs number in dry season. Tem: Temperature; Con: Conductivity; SD: Secchi depth.

表3 蓝藻生物量与环境因子逐步回归

Table 3 Step regression between environmental factors and cyanobacterial biomass

采样时间 Sampling time	回归模型 Regression model	N	Adj-R ²	P
丰水期 Flooding season	C = 0.90** - 0.88log (SD)*	23	0.13	< 0.05
	S = -1.38** - 0.18log (TP)* + 0.25 log (Con)***	22	0.40	< 0.01
枯水期 Dry season	C = -2.76** - 0.19log (NO ₃)* - 0.53 log (SD) + 0.39 pH**	21	0.57	< 0.01
	F = -2.47** - 0.19log (NO ₃)* - 0.46 log (SD)** + 0.35 pH**	21	0.53	< 0.01
	S = 0.69*** + 0.17 log (TP)**	23	0.32	< 0.01
总计 Total	C = 0.48** - 0.40log (NO ₃)** - 0.74 log (SD)***	47	0.33	< 0.01
	F = 0.42* - 0.42log (NO ₃)** - 0.66 log (SD)**	47	0.31	< 0.01
	S = 0.18*** - 0.26 log (SD)***	48	0.23	< 0.01

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$. C: 蓝藻生物量; F: 丝状蓝藻生物量; S: 球形蓝藻生物量。

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$. C: Cyanobacterial biomass; F: Filamentous cyanobacterial biomass; S: Spherical cyanobacterial biomass.

表现为正相关,表明绿丝藻(sp2)、螺旋藻(sp8)、拟柱孢藻(sp9)与水温呈显著正相关,蓝纤维藻(sp1)与透明度呈显著正相关,粘球藻(s15)、隐球藻(s16)等与电导率与硝氮呈显著正相关。尖头藻(sp3)、席藻(sp5)、鞘丝藻(sp6)、浮丝藻(sp7)、隐杆藻(sp17)、小雪藻(sp18)、束球藻(sp20)等蓝藻生物量较低,在图中集中在中心点附近。

3 讨论

3.1 水库环境因子季节特征

中小型水库水力滞留时间相对较短,水位波动大^[19]。本次所调查的25座水库主要分布在东莞市城区和城郊,受人类活动影响较大,水库富营养化问题严峻,其中富营养化水库达到20座^[17]。丰水期降雨带来的营养盐大量汇入水库,枯水期虽然外源营养盐输入较少,但水体混合导致高营养的底部水层不断与上层水交流,致使整个水体的营养盐浓度都较高。高营养盐为蓝藻生长和繁殖提供了重要的物质基础,这可能是蓝藻在这些水库长期形成优势的重要原因^[20]。温度和

光照强度是影响浮游植物生长的重要因素,亚热带地区温度与光照的季节性变化均不如温带地区显著,25座水库常年温度较高,丰水期和枯水期的平均温度分别为31.2℃和21.6℃,是蓝藻适应甚至喜好的温区^[21]。亚热带地区中小型水库全年无稳定热分层,丰水期降雨频繁,水体剧烈扰动,混合层深度增加,同时大量外源营养物质输入导致透明度有所降低,水柱可获得性平均光强较低。枯水期外源营养物质输入减少,水体扰动小,稳定性较高,透明度升高,水柱可获得性光强增加,这一时期往往是蓝藻水华发生的高危期^[22]。自然水体中,pH值主要受CO₂溶解平衡的影响,蓝藻具有高效的CO₂浓缩机制^[9],故而在蓝藻占优甚至发生水华的水体中,pH一般都较高^[23]。本次调查发现,大多数水库pH均呈弱碱性,且丰水期pH高于枯水期,这可能与丰水期蓝藻生物量高于枯水期相关。

3.2 蓝藻群落组成与季节变化

在温带与寒带地区水体中,浮游植物季节性分布非常明显。Sommer等认为浮游植物群落季节演替表现为从冬春的隐藻和硅藻转变为夏季的绿藻,到夏末秋初则是蓝藻占优势,秋季时硅藻数量再次上升^[24]。而在亚热带地区,常年温度较高,适合蓝藻生长的季节长,基本不存在蓝藻越冬期,故而该地区冬春季依然存在蓝藻水华发生的风险。

本次调查期间,共观察到蓝藻20种,蓝藻生物量分布范围为 1.3×10^{-3} -19.46 mg/L。蓝藻种类组成中以蓝纤维藻、绿丝藻、假鱼腥藻和拟柱孢藻为主的丝状蓝藻,以及以细小平列藻、色球藻、粘球藻和隐杆藻为主的球形蓝藻,其中丝状蓝藻生物量贡献了主要的蓝藻生物量。丝状蓝藻种类中,颤藻目绿丝藻与假鱼腥藻是优势种,且绿丝藻在大部分水库中均占据绝对优势地位。颤藻目蓝藻种类细胞中的辅助捕光色素含量比较高,能耐高度的光限制,容易在透明度低、水体不太稳定的富营养化水体形成优势^[25]。黄亨辉等对浮游植物功能群的研究发现蓝纤维藻、绿丝藻、拟柱孢藻和假鱼腥藻等组成的S₁与S_N功能群易在水体透明度较低,较高的营养盐、水温,受光限制条件下竞争获得优势^[26]。Reynolds等对富营养化浅水湖泊浮游植物功能群调查发现,蓝藻一般以丝状种类占优势,而且夏季优势蓝藻种类一般是来自颤藻目^[10, 27]。蓝纤维藻是一种广营养型的种类,一般混生于其他藻类

中,在南亚热带的大中型水库都常有出现^[28]。拟柱孢藻作为热带地区常见水华蓝藻种类,现已逐渐向亚热带与温带地区扩散,并在我国南方水库形成优势且发生水华^[29]。细小平列藻、色球藻、粘球藻和隐杆藻为主要球形蓝藻种类,适于生长在营养盐水平较高的水体,也是广东省水库出现频率较高的蓝藻种类^[30]。在两个季节丝状蓝藻均贡献了主要的蓝藻生物量,方差分析表明从丰水期到枯水期丝状蓝藻生物量显著降低,而球形蓝藻生物量没有显著变化。丰水期与枯水期的蓝藻种类组成差异不大,因此,蓝藻种群动态主要表现为丰水期和枯水期的蓝藻种群数量变化,蓝藻种群数量的变化又主要体现在丰水期和枯水期的蓝藻生物量差异,这与本研究对蓝藻群落进行多元方差分析的结果一致。

多元回归分析表明,影响蓝藻生物量与群落的环境因子具有季节差异。在丰水期,透明度是影响蓝藻生物量的主要环境因子,透明度对浮游植物的生长会产生间接的影响,水体中的悬浮颗粒对光照有较强的散射作用,能降低光照透射深度,影响浮游植物生长繁殖^[31]。丰水期基于防汛考虑,水库一般低水位运行,频繁降雨和排水带来的扰动,加之昼夜温差较小,使得表层水体处于完全混合状态,透明度受外源物质输入影响有所降低,水柱光照可获得性降低^[12]。加上充足的营养盐、较高的水温条件使得能承受光限制的泽丝藻、假鱼腥藻、蓝纤维藻和拟柱孢藻等丝状蓝藻占据优势^[26-27]。在枯水期,TP与pH对蓝藻生物量有重要影响。在淡水水体中,磷通常是初级生产者的限制性营养盐,也是生产力的决定因素^[32]。降雨带来的流域外来营养输入减少,N/P进一步升高,平均值达到70.1,磷限制作用增强,蓝藻生物量与TP显著正相关。一般而言,蓝藻能高效利用CO₂,pH值升高更利于蓝藻形成竞争优势^[9]。An等认为pH > 8.5时有利于蓝藻的生长^[23],这与本研究结果一致。此外,枯水期水库供水量减少,且大部分水库作为备用水源,高水位运行,几乎不向外排水,此时水力滞留时间较长,水体稳定性较高,丝状蓝藻相对球形蓝藻竞争优势不明显,其相对优势较丰水期显著降低。

冗余分析表明水温、电导率、硝氮和透明度是影响蓝藻群落的重要环境因子,其中电导率是影响丰水期蓝藻群落的重要环境因子,枯水期则为电导率与硝氮。水温是蓝藻水华爆发的主要驱动因子之一^[34],Temponeras等对Doirani湖的研究发现,水温与藻类生物量呈显著的相关关系^[1]。不同的浮游植物都有自身生长的最适温度,蓝藻最适的生长温度为25-35℃,枯水期较低的水温致使蓝藻的生长繁殖速率受到一定限制,其优势度和生物量较丰水期有所下降。电导率的变化在一定程度上反映水库的富营养程度,而且水库氮、磷营养盐水平的上升是水库电导率上升的重要因素^[35]。除以上一些主要的环境因素外,水库的运行管理也会对生境造成短期外在干扰,如改变水库的水位、水力滞留时间等水文条件以及相关的理化因子,可能间接导致浮游植物群落的更替与演替^[36]。

4 结论

中小型水库浮游植物组成以蓝藻为主,丰水期蓝藻占据

绝对优势,枯水期蓝藻优势度有所降低;中小型水库蓝藻群落存在显著季节变化特征,从丰水期到枯水期丝状蓝藻生物量显著降低,而球形蓝藻生物量季节变化不显著;透明度、pH与TP为蓝藻生物量的重要环境因子,温度、透明度、硝氮与电导率为蓝藻群落季节差异的重要解释变量,其中电导率为丰水期蓝藻季节动态的重要解释变量;电导率与硝氮为枯水期重要解释变量。南亚热带地区水体中小型水库蓝藻生物量较高,其中丝状蓝藻全年占据优势。丝状蓝藻个体长,水厂处理过程中容易堵塞滤孔,影响供水。总体而言,加强蓝藻特别是丝状蓝藻的监测、控制流域外源污染、调整水厂取水方式和处理工艺、通过工程措施控藻是水库水质管理的主要内容。

参考文献 [References]

- 1 Temponeras M, Jørgen K, Maria MG. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece [J]. *Troph Spectr Revis*, 2000, **424**: 109-122
- 2 Cetinić I, Viličić D, Burić Z, Olujć G. Phytoplankton seasonality in a highly stratified karstic estuary (Krka, Adriatic Sea) [J]. *Mar Biodiver*, 2006, **555**: 31-40
- 3 Gomes LC, Miranda LE. Hydrologic and climatic regimes limit phytoplankton biomass in reservoirs of the Upper Paraná River Basin, Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2001, **457**: 205-214
- 4 Heidemarie H. The relative importance of climate and nutrients in controlling phytoplankton growth in Saldenbach Reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **504**: 159-166
- 5 孔义军, 杨浩文, 林少君, 雷腊梅, 韩博平. 南亚热带城市浅水湖泊富营养化与浮游植物群落的时空特征:以肇庆星湖为例[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, **15** (2):153-160 [Kong YJ, Yang HW, Lin SJ, Lei LM, Han BP. Eutrophication and phytoplankton community structure of Xinghu Lake, a shallow urban lake in South China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2009, **15** (2): 153-160]
- 6 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 朱广伟, 张路, 陈宜瑜. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用 [J]. *科学通报*, 2006, **51**(16): 1857-1866 [Qing BQ, Yang LY, Chen FZ, Zhu GW, Chen YY. Eutrophication mechanism and control technology and its application in lakes [J]. *Chin Sci Bull*, 2006, **51**(16): 1857-1866]
- 7 Kromkamp J, Barranguet C, Peene J. Determination of microphyto-benthos PSII quantum efficiency and photosynthetic activity by means of variable chlorophyll fluorescence [J]. *Mar Ecol Prog Series*, 1998, **162**: 45-55
- 8 周云龙. 异形胞与蓝藻的固氮. *生物学通报*, 1994, **29** (11): 5-6 [Zhou YL. Cyanobacteria nitrogen fixation with heterocyst. *Bull Biol*, 1994, **29** (11): 5-6]
- 9 邱保胜, 高坤山. 蓝藻浓缩二氧化碳的机制. *植物生理学通讯*, 2001, **37** (5): 385-92 [Qiu BS, Gao KS. Carbon dioxide concentrating mechanism in blue-green algae [J]. *Plant Physiol J*, 2001, **37** (5): 385-92]
- 10 Oliver RL, Ganf GG. Freshwater blooms: the ecology of cyanobacteria [M]. US: Springer, 2002: 149-194
- 11 张永生, 孔繁翔, 于洋, 张民, 史小丽. 蓝藻伪空胞的特性及浮力调节机制. *生态学报*, 2010, **30** (18): 5077-5090 [Zhang YS, Kong FX, Yu

- Y, Zhang M, Si XL. The characteristics and buoyancy regulations of cyanobacterial gas vesicles [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (18): 5077-5090]
- 12 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 BP, Li T, Lin XD. Eutrophication status and control countermeasures of large and medium-sized reservoirs in Guangdong province [M]. Beijing: Science Press, 2003]
- 13 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 韩博平. 淡水浮游植物功能群的概念, 划分方法和应用[J]. 湖泊科学, 2015, **27** (1): 11-23 [Hu R, Lan YQ, Xiao LJ, Han BP. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups [J]. *J Lake Sci*, 2015, **27** (1): 11-23]
- 14 Kruk C, Huszar VL, Peeters ET, Bonilla S, Costa L, Lüring M, Reynolds CS, Scheffer M. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton [J]. *Freshwat Biol*, 2010, **55** (3): 614-627
- 15 Paerl HW, Hall NS, Calandrino ES. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change [J]. *Sci Total Environ*, 2011, **409** (10): 1739-1745
- 16 Paerl HW, Otten TG. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. [J]. *Microb Ecol*, 2013, **65** (4): 995-1010
- 17 罗概, 马茵茵, 蓝于倩, 黄汉超, 庾建星, 彭亮. 东莞市25座水库的营养现状与水质管理对策[J]. 水生态学杂志, 2014, **5**:006 [Luo G, Ma YY, Lan YQ, Huang HQ, Yu JX, Peng L. Eutrophication and water quality management of reservoirs in Dongguan City [J]. *J Hydroecol*, 2014, **5**: 006]
- 18 Hillebrand H, Dürselen CD, Kirschtel D, Pollinger U, Zohary T. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae [J]. *J Phycol*, 1999, **35** (2): 403-424
- 19 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[J]. 生态学报, 2001, **21** (6): 1034-1040 [Lin QQ, Han BP. Reservoir limnology and its application in water quality management: an overview [J]. *Acta Ecol Sinica*, 2001, **21** (6): 1034-1040]
- 20 O'neil JM, Davis TW, Burford MA, Gobler CJ. The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change [J]. *Harmf Algae*, 2012, **14**: 313-334
- 21 Nalewajko C, Murphy TP. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of *Anabaena* and *Microcystis* in Lake Biwa, Japan: an experimental approach [J]. *Limnology*, 2001, **2** (1): 45-48
- 22 Kawara O, Yura E, Fujii S, Matsumoto T. 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
- 23 An KG, John RJ. Factors regulating bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **432**: 37-48
- 24 Sommer U, Gliwicz ZM, Lampert W, Duncan A. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. *Arch Hydrobiol*, 1986, **106** (4): 433-471
- 25 Nixdorf B, Mischke U, Riicker 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** (1): 111-121
- 26 黄享辉, 胡韧, 雷腊梅, 彭亮. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征[J]. 生态环境学报, 2013, **22** (2): 311-318 [Huang XH, Hu R, Lei LM, Peng L. Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern China [J]. *Ecol Environ*, 2013, **22** (2): 311-318]
- 27 Reynolds CS, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *J Plankton Res*, 2002, **24** (5): 417-428
- 28 胡韧, 雷腊梅, 韩博平. 南亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变[J]. 生态学报, 2008, **28** (10): 4652-4664 [Hu R, Lei LM, Han BP. Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophic Xinfengjiang reservoir in southern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (10): 4652-4664]
- 29 雷腊梅, 雷敏婷, 赵莉, 阮紫曦, 于婷, 彭亮, 韩博平. 入侵蓝藻——拟柱胞藻的分布特征及生理生态研究进展[J]. 生态环境学报, 2017, **26** (3): 531-537 [Lei LM, Lei MT, Zhao L, Ruan ZX, Yu T, Peng L, Han BP. Review of the distribution and ecophysiology of an invasive cyanobacterial species, *Cylindrospermopsis raciborskii* [J]. *Ecol Environ*, 2017, **26** (3): 531-537]
- 30 王朝晖, 林秋奇, 胡韧, 范春雷, 韩博平. 广东省水库的蓝藻污染状况与水质评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2004, **12** (2): 117-123 [Wang ZH, Lin QQ, Hu R, Fan CL, Han BP. Pollution by blue-green algae (cyanophyta) in reservoirs of Guangdong province and water quality evaluation [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2004, **12** (2): 117-123]
- 31 李一平, 逢勇, 徐秋霞. 动水条件下太湖水体透明度及其影响因子模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, **37** (6): 625-30 [Li YP, Pang Y, Xu QX. Simulation of transparency and its factors in Taihu Lake under hydrodynamic conditions [J]. *J Hehai Univ (Nat Sci)*, 2009, **37** (6): 625-30]
- 32 Christer B, Lars-Anders H. The biology of lakes and ponds [M]. Oxford: Oxford University Press, 2005: 36-50
- 33 Padisák J, Crossetti LO, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **621** (1): 1-9
- 34 孔繁翔, 曹焕生, 谭啸. 水华蓝藻复苏的研究进展与水华预测[J]. 环境监控与预警, 2010, **1**: 1-4 [Kong FX, Cao HS, Tan X. Development of research on recruitment of bloom forming cyanobacteria and bloom forecast [J]. *Environ Monit Forew*, 2010, **1**: 1-4]
- 35 李秋华, 林秋奇, 韩博平. 广东大中型水库电导率分布特征及其受N, P营养盐的影响[J]. 生态环境, 2005, **14** (1): 16-20 [Li QH, Lin QQ, Han BP. Conductivity distribution of water supply reservoirs in Guangdong province [J]. *Ecol Environ*, 2005, **14** (1): 16-20]
- 36 Hoyer AB, Moreno-Ostos E, Vidal J, Blanco JM, Palomino-Torres RL, Basanta A, Escot C, Rueda FJ. The influence of external perturbations on the functional composition of phytoplankton in a Mediterranean reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **636** (1): 49-64