

# 鹤地水库浮游植物群落的结构与动态

邹红菊, 胡 韧, 韩博平\*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

**摘要:** 鹤地水库位于雷州半岛北部(21°42'~22°22'N, 109°54'~110°25'E), 是一座中营养化的大型水库。为了研究其浮游植物群落的结构与变化特点, 在水库设置 5 个采样点, 并于 2003 年 2、7、9、12 月对其采样。鹤地水库浮游植物生物量变化为 0.156~2.548 mg L<sup>-1</sup>, 主要由蓝藻和硅藻组成。5 个采样点的浮游植物生物量具有明显的季节变化, 且变化趋势相同, 即丰水期的生物量高于枯水期, 主要是由于丰水期水温较高以及入库河水带入的营养盐。5 个采样点的浮游植物生物量从主要入库河流至大坝区呈下降趋势, 与磷浓度的降低直接相关。浮游植物优势种主要以热带代表性种类为主, 且有明显的季节变化, 枯水期主要为硅藻的根管藻(*Rhizosolenia* sp.)、小环藻(*Cyclotella* sp.)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)以及模糊直链藻(*Melosira ambigua*)等。丰水期为蓝藻的拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)、湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)等, 浮游植物优势种类的变化主要受磷浓度的影响。浮游植物前 8 个优势种的生物量占浮游植物群落生物量的 85%~92%, 显著低于温带地区浮游植物群落结构稳定的湖泊。

**关键词:** 浮游植物; 群落结构; 中营养; 大型水库; 热带

中图分类号: Q948.881.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)02-0196-07

## Structure and Dynamics of Phytoplankton Community in Hedi Reservoir, South China

ZOU Hong-jü, HU Ren, HAN Bo-ping\*

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

**Abstract:** Hedi Reservoir, located in the north of Leizhou Peninsula (21°42'~22°22'N, 109°54'~110°25'E), is a large and mesotrophic reservoir. To understand the structure and variation of phytoplankton community in the reservoir, phytoplankton was sampled at five sites in February, July, September and December of 2003. Total phytoplankton biomass ranged from 0.156~2.548 mg L<sup>-1</sup>, mainly contributed by cyanobacteria and diatom. The structures of phytoplankton community at five sites varied markedly and seasonally from spring to winter, and the dynamic pattern of phytoplankton community was quite similar among the five sampling sites. The phytoplankton biomass in flood season was higher than that in dry season. The phytoplankton benefited from high temperature in flood season and nutrient input with inflow. Phytoplankton biomass showed a spatial gradient from riverine zone to lacustrine zone, corresponding to a decrease in phosphorus concentration. Phytoplankton species was dominated by thermophilous species in tropics, and the dominant species in dry season were markedly different from those in flood season. The dominant phytoplankton species in dry season were *Rhizosolenia* sp., *Cyclotella* sp., *Melosira granulata* and *Melosira ambigua*, while *Cylindrospermopsis raciborskii*, and *Pseudanabaena limnetica* in flood season. Phosphorus was the main factor regulating the variation of the dominant phytoplankton species in flood season. The biomass of first eight dominant species contributed 85%~92% of total biomass, significantly less than that in the temperate lakes with steady structure of phytoplankton community.

收稿日期: 2009-04-28

接受日期: 2009-08-03

基金项目: 广东省水利科技创新项目(GDWR0604)和国家自然科学基金重点项(U0773007)资助

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

**Key words:** Phytoplankton; Community structure; Mesotrophic; Large reservoir; Tropic

浮游植物群落结构是指其种类与数量的组成形式,对于数量组成可以采用丰度或者生物量表征。浮游植物群落的生物量可由叶绿素 a 的浓度表示。浮游植物群落由大量的不同种类构成,不同种类和大小的细胞中叶绿素 a 的含量差别很大<sup>[1]</sup>,对于季节性变化的浮游植物群落,其生物量的变化与浮游植物叶绿素 a 浓度的不一致性普遍存在<sup>[2-3]</sup>。作为一类特殊的水体,水库由人筑坝形成,其来水与用水方式与湖泊有很大的差别。水库浮游植物群落结构不仅体现在沿入库河流至大坝的空间异质性,水文水动力学过程上的差别也会在群落结构上得到反映<sup>[4]</sup>。浮游植物属于微型生物(micro-organisms),对水体条件变化的响应灵敏,是水质监测的重要生物类群。对贫营养型与富营养型水体,浮游植物群落种类组成与数量结构有着明显的差别<sup>[5]</sup>。中营养型水体是一种过渡类型,相对而言,浮游植物群落结构要复杂得多。

鹤地水库是位于广东省湛江地区的一座大型水库(北纬 21°42'~22°22'、东经 109°54'~110°25'),北起文官、南至渠首,坝址位于雷州半岛北部的廉江市境内九洲江干流的中游,库区跨越广西陆川、博白和广东廉江、化州等县,是广东省 5 个大型饮用水源地之一。该水库是粤西地区的供水保障关键水源,已进行了大量的环境与水质监测工作<sup>[6-9]</sup>,是一个中度营养化的水体<sup>[9]</sup>。其最大库容量达  $1.187 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,有效库容  $7.67 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,水库集雨面积  $1496 \text{ km}^2$ ,库长  $21.6 \text{ km}$ ,最大库面宽  $4.78 \text{ km}$ ,最大水深  $28 \text{ m}$ ,平均水深  $10.1 \text{ m}$ 。水库流域的年均降雨量为  $1735 \text{ mm}$ ,主要集中在汛期(6~9 月)。本文从鹤地水库浮游植物细胞大小与组成的角度,对浮游植物群落的生物量结构进行分析,探讨了这座中营养型的大型热带水库浮游植物群落结构组成与稳定性,为水库的合理开发利用和保护提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 水库概况与采样点设置

根据鹤地水库的库盆特点,并结合支流位置,从上游入水口至大坝,依次设置了石角、高朗、丹兜河口、兰山河口和大坝 5 个采样位点(图 1)。于 2003 年 2 月、7 月、9 月和 12 月进行采样。



图 1 鹤地水库采样点设置

Fig. 1 Sampling sites in Hedi Reservoir

### 1.2 研究方法

用 YSI 现场测定表层下 0.5 m 处水温,用塞氏罗盘测定透明度(Secchi disk depth, SD)。在表层下 0.5 m 处采集 1 L 水样,带回实验室分析总磷(Total phosphorus, TP)、总氮(Total nitrogen, TN)和叶绿素 a (Chl a)等指标。总磷(TP)、总氮(TN)均按照国家水质标准方法 GB3838-200 测定,叶绿素 a 采用改进后的反复冻融-浸提法测定<sup>[10]</sup>。

浮游植物定性样品用 25 号浮游生物网在不同方向和深度拖取,并用 5% 福尔马林固定,带回实验室镜检;定量样品在表层下 0.5 m 处采 1 L 水,用 5% 福尔马林固定,带回实验室静置沉淀,浓缩镜检计数。

藻类生物体积按各藻种近似几何形状的公式计算<sup>[11]</sup>,假定浮游植物的密度为  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ ,则其生物量( $\text{mg L}^{-1}$ ) = 浮游植物丰度( $\text{cells L}^{-1}$ ) × 浮游植物体积( $\mu\text{m}^3$ ) ×  $1.0 \text{ mg L}^{-1}$ 。

理化数据和藻类数据分析方法为 SPSS 统计学软件中的方差分析(ANOVA)和相关性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 理化因子

鹤地水库全年水温为  $18 \sim 34^\circ\text{C}$ ,7 月水温最高,平均  $32.8^\circ\text{C}$ ,2 月最低,平均  $19.4^\circ\text{C}$ 。透明度为  $0.55 \sim 3.4 \text{ m}$ ,平均  $1.52 \text{ m}$ 。水体中 TP 的浓度波动

较大(0.01~0.06 mg L<sup>-1</sup>),平均 0.036 mg L<sup>-1</sup>。TN 浓度比较稳定,为 0.78~2.14 mg L<sup>-1</sup>,平均 1.12 mg L<sup>-1</sup>,最低值和最高值分别出现在 12 月大坝区和石角的水样,其他采样点均在 1.0 mg L<sup>-1</sup>下波动。叶绿素浓度为 1.16~20.67 mg m<sup>-3</sup>,平均 6.78 mg m<sup>-3</sup>。鹤地水库全年的平均水力滞留时间在 120 d 左右,但在枯水期与丰水期有明显的差别。

## 2.2 浮游植物的主要种类及细胞大小

4 次采样中,共鉴定出浮游植物 88 种,其中绿藻门 51 种,硅藻门 14 种,蓝藻门 16 种,其它 7 种。丰度优势种包括蓝藻门的铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*)、细

小平裂藻(*Merismopedia minima*)、湖泊假鱼腥藻(*Pseudanabaena limnetica*)、拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)、粘球藻(*Gloeocapsa* sp.)、针状蓝纤维藻(*Dactylococcopsis acicularis*)以及硅藻门的模糊直链藻(*Melosira ambigua*)、根管藻(*Rhizosolenia* sp.)、小环藻(*Cyclotella* sp.);生物量优势种包括蓝藻门的拟柱孢藻,硅藻门的根管藻、小环藻、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、模糊直链藻,以及甲藻门的飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella*)。多数优势种类为丝状或群体种类,不同种类的细胞大小(体积)相差较大(表 1)。

表 1 浮游植物优势种类的细胞大小

Table 1 Cell size of dominant phytoplankton species

浮游植物 Phytoplankton	形状 Shape	直径 Diameter (μm)	高度 Height (μm)	体积 Biovolume (μm <sup>3</sup> )
拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	圆柱体 Cylinder	75.9 ± 30.33	2.5 ± 0.12	372.38 ± 148.79
湖泊假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i>	圆柱体 Cylinder	1.69 ± 0.37	6.63 ± 2.43	15.33 ± 7.98
小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>	半球体 Half sphere	1.96 ± 0.48		2.29 ± 1.53
微囊藻 <i>Microcystis</i> spp.	球体 Sphere	3.5 ± 0.73		25.43 ± 16.27
粘球藻 <i>Gloeocapsa</i> sp.	球体 Sphere	5.89 ± 1.11		117.91 ± 67.53
针状蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis acicularis</i>	椭球体 Prolate spheroid	1 ± 0.21	24.5 ± 8.64	13.51 ± 7.85
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>	圆柱体 Cylinder	9 ± 3.54	25.18 ± 5.7	1990.1 ± 1867.4
模糊直链藻 <i>Melosira ambigua</i>	圆柱体 Cylinder	7.44 ± 1.66	7.37 ± 1.09	338.87 ± 187.44
根管藻 <i>Rhizosolenia</i> sp.	圆柱体 Cylinder	4.44 ± 0.91	87.3 ± 21.3	1434.19 ± 641.5
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	圆柱体 Cylinder	8.82 ± 2.6	5.03 ± 1.94	333.85 ± 203.7
飞燕角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>	1 个圆台	d: 2.38 ± 0.16	82.1 ± 12.10	53296 ± 22166
	One truncated cone	D: 8.52 ± 1.69		
	3 个圆锥 Three cones	9.89 ± 2.68	35.7 ± 15.2	
	1 个椭球体 One prolate spheroid	43.33 ± 9.44	54.6 ± 5.57	

## 2.3 浮游植物生物量动态

鹤地水库浮游植物生物量约为 0.156 ~ 2.548 mg L<sup>-1</sup>,最小值出现在 12 月的兰山河口(接近大坝区的敞水区),最大值出现在 7 月的石角(河区)(图 2)。同一采样点浮游植物的生物量在不同季节有显著性差异( $P < 0.05$ ),但采样点间无显著性差异( $P > 0.05$ ),即 5 个采样点的浮游植物生物量具有相似的季节变化,枯水期(2 和 12 月)较低,丰水期(7 和 9 月)较高,7 月最高。其中,兰山河口、丹兜河口 12 月的生物量明显低于 2 月的,而石角、高朗、大坝 12 月的生物量稍高于 2 月的,总体上以 7 月 > 9 月 > 2 月 > 12 月。由相关性分析方法可见,

浮游植物生物量的季节变化与水温有极显著的相关性( $r = 0.861, P = 0 < 0.01, n = 20$ )。5 个采样点的浮游植物生物量变化总体上为高朗 > 石角 > 丹兜河口 > 兰山河口 > 大坝,但 2 月与 7 月的生物量变化不同。石角和高朗的生物量在 2 月较低,而丹兜河口的最高;兰山河口和大坝的生物量在 7 月较高,而丹兜河口的最低。由相关性分析可见,不同采样点的生物量变化与总氮浓度没有显著相关性( $r = -0.171, P = 0.541, n = 15$ ),与总磷浓度有极显著相关性( $r = 0.661, P < 0.01, n = 15$ )。鹤地水库浮游植物生物量与叶绿素浓度没有显著相关性( $r = 0.376, P = 0.102, n = 20$ )。

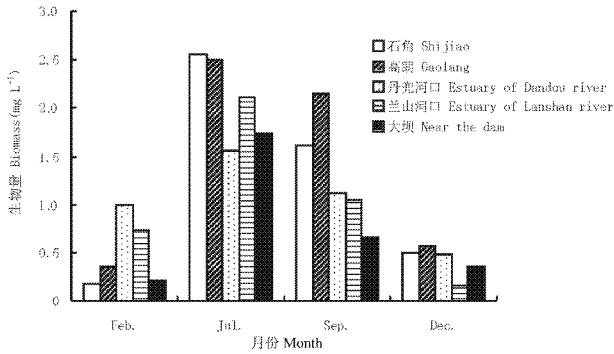


图 2 鹤地水库浮游植物生物量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of phytoplankton biomass in Hedi Reservoir

### 2.4 浮游植物生物量组成

鹤地水库 5 个采样点之间的浮游植物生物量组成没有显著差异( $P > 0.05$ ) (图 3)。其浮游植物生物量组成属于蓝藻-硅藻-绿藻-甲藻型,其他(裸藻门、金藻门和隐藻门)所占比例非常低。蓝藻是丰水期浮游植物生物量组成的优势类群,7 月占有绝对的优势(77% 以上),9 月仍是主要的优势类群,但

是优势度比 7 月有所降低(30%~56%)。全年中,蓝藻的生物量与总生物量有极显著相关性( $r = 0.936, P = 0, n = 20$ ),与水温有极显著相关性( $r = 0.88, P = 0 < 0.01, n = 20$ )。硅藻在枯水期(2 月和 12 月)浮游植物生物量组成中占有绝对的优势(60% 以上)。全年中,硅藻的生物量与总生物量没有显著相关性( $r = 0.197, P = 0.406, n = 20$ ),与水温无显著相关性( $r = -0.129, P = 0.589, n = 20$ )。绿藻在 5 个采样点浮游植物生物量组成中所占比例相对较低但全年变化不大,由于受体积较大的鼓藻属(*Cosmarium*)和角星鼓藻属(*Staurastrum*)数量的影响,其生物量在 2 月的高朗和 9 月的兰山河口占有较高的比例(25% 以上)。甲藻在全年 5 个采样点的生物量组成中比例均很低,由于有体积较大的飞燕角甲藻,因此其生物量在 2 月的丹兜河口和兰山河口以及 9 月的高朗和大坝占有较高的比例(17% 以上),尤其是 9 月的大坝水样中其优势度超过蓝藻成为第一优势类群。

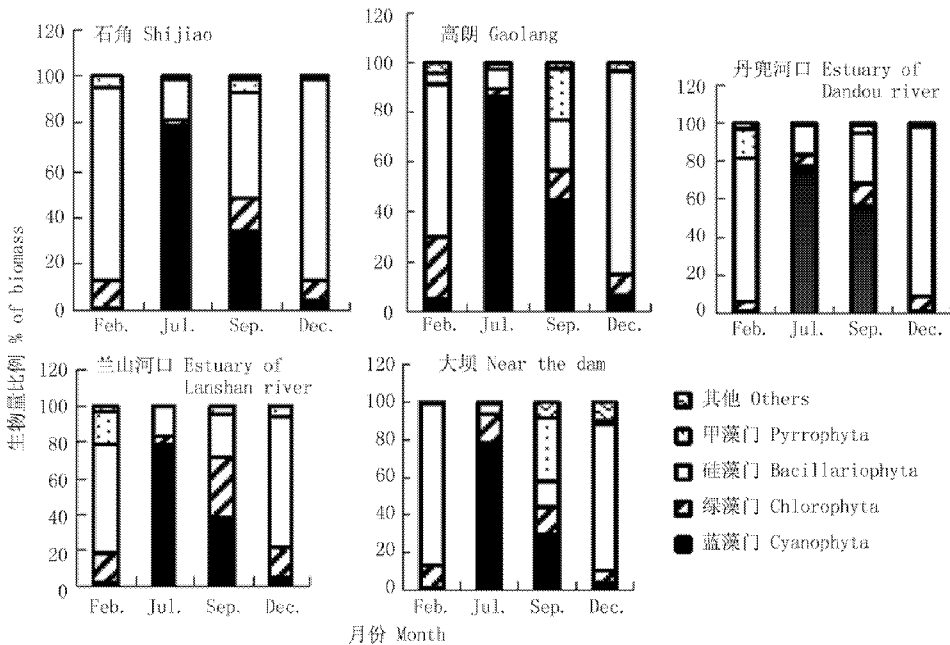


图 3 浮游植物的生物量组成与变化

Fig. 3 Composition and variation of phytoplankton biomass

### 2.4 浮游植物优势种的种类变化

鹤地水库的浮游植物生物量优势种组成有明显的季节变化,以丹兜河口和大坝两个采样点的变化较为典型。丹兜河口 2、7、9 和 12 月的主要生物量优势种分别为:根管藻、模糊直链藻、飞燕角甲藻;拟柱孢藻、模糊直链藻;拟柱孢藻、小环藻;根管藻、小环藻、颗粒直链藻。而大坝水域的优势种分

别为:根管藻、模糊直链藻、小环藻;拟柱孢藻;飞燕角甲藻、拟柱孢藻;小环藻、根管藻、颗粒直链藻。其中,拟柱孢藻对总生物量影响较大,其在 7 月与 9 月占总生物量的平均比例分别为 75.4%、31.7%,该种的生物量变化与当时的总磷浓度有较高的相关性( $r = 0.602, P = 0.065$ )。丹兜河口和大坝水域中前 8 个优势种占总生物量的比例达 92% 以上,9 月

略低(约 80%)(图 4)。不同月份和采样点浮游植物群落的前 8 个优势种的种类不同,丹兜河口在各月的共同优势种为小环藻和根管藻,其他 6 个优势种随季节不同,2 月为模糊直链藻、飞燕角甲藻、近缘鼓藻(*Cosmarium connatum*)、舟形藻(*Navicula* spp.)、多甲藻(*Peridinium* sp.)、隐藻(*Cryptomonas* spp.); 7 月为拟柱孢藻、模糊直链藻、水华微囊藻、项圈鼓藻(*Cosmarium moniliforme*)、角星鼓藻、隐藻; 9 月为水华微囊藻、湖泊假鱼腥藻、拟柱孢藻、奇异角星鼓藻(*Staurastrum paradoxum*)、颗粒直链藻、薄甲藻(*Glenodinium*), 12 月为颗粒直链藻、模糊直链藻、项圈鼓藻、曲壳藻(*Achnanthes* sp.)、厚变浮游角星鼓

藻(*Staurastrum dorsidentiferum*)、薄甲藻。大坝区各月的共同优势种为小环藻,其他优势种在 2 月为根管藻、模糊直链藻、近缘鼓藻、舟形藻、卵囊藻(*Oocystis* spp.)、美丽网球藻(*Dictyosphaerium pulchellum*)、曲壳藻; 7 月为拟柱孢藻、湖泊假鱼腥藻、近缘角星鼓藻(*Staurastrum connatum*)、模糊直链藻、奇异角星鼓藻、项圈鼓藻、厚变浮游角星鼓藻; 9 月为拟柱孢藻、湖泊假鱼腥藻、粘球藻、奇异角星鼓藻、厚变浮游角星鼓藻、颗粒直链藻、飞燕角甲藻; 12 月为拟柱孢藻、四集藻(*Palmella* sp.)、颗粒直链藻、模糊直链藻、根管藻、隐藻、裸藻(*Euglena* spp.)。

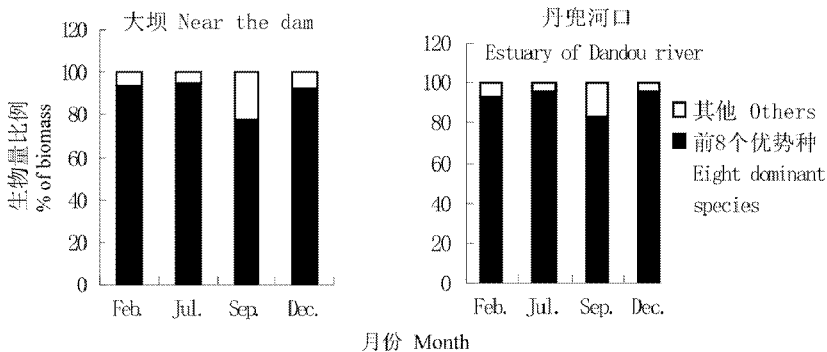


图 4 丹兜河口和大坝的浮游植物优势种的组成与变化

Fig. 4 Composition and variation of dominant phytoplankton species near the dam and the estuary of Dandou river

鹤地水库生物量优势种类与丰度优势种类略有差别,主要是由于细胞大小不同所导致的,以丹兜河口处最为典型(表 2)。蓝藻门的针状蓝纤维藻、湖泊假鱼腥藻、水华微囊藻以及细小平裂藻体积较小,所以其丰度优势明显时,其生物量比例却

很低(6%以下)。蓝藻门的拟柱孢藻与硅藻门的小环藻、模糊直链藻、颗粒直链藻和根管藻体积较大,所以其生物量优势较明显。甲藻门的飞燕角甲藻体积最大,所以其丰度很小时,生物量优势仍较明显。

表 2 丹兜河口的丰度优势种类与生物量优势种类的季节变化

Table 2 Seasonal variation of dominant phytoplankton species in biomass and abundance in the estuary of Dandou river

	2月 February		7月 July		9月 September		12月 December	
	丰度 Abundance (%)	生物量 Biomass (%)	丰度 Abundance (%)	生物量 Biomass (%)	丰度 Abundance (%)	生物量 Biomass (%)	丰度 Abundance (%)	生物量 Biomass (%)
小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.					5	14.5	45.7	37
颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>							6.3	23.1
模糊直链藻 <i>Melosira ambigua</i>	23.3	14.9	10.2	12.5				
根管藻 <i>Rhizosolenia</i> sp.	15.3	54					3.6	20.1
水华微囊藻 <i>Microcystis flos-aquae</i>			11.8	1.1				
细小平裂藻 <i>Merismopedia minima</i>					29.1	2.5	10.1	0.25
湖泊假鱼腥藻 <i>Pseudanabaena limnetica</i>					35	5.7	11.1	0.51
针状蓝纤维藻 <i>Dactylococcopsis acicularis</i>	24.9	0.93						
拟柱孢藻 <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>			55.4	74.8	11.1	44.5		
飞燕角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>	0.1	10.8						

## 3 讨论

### 3.1 浮游植物生物量的组成与变化

鹤地水库浮游植物生物量的季节变化非常明显,表现为枯水期较低,丰水期较高,与水温有显著相关性,这与其生物量组成有关。鹤地水库是一个中营养化水体,其浮游植物生物量主要由蓝藻和硅藻组成,蓝藻在丰水期占优势,硅藻在枯水期占优势。但蓝藻生物量与总生物量有极显著相关性,硅藻与总生物量没有显著相关性,即硅藻在全年浮游植物生物量中贡献量要低于蓝藻,则很大程度上蓝藻决定着浮游植物的总生物量。硅藻与蓝藻都是对水温相对敏感的种类,蓝藻能够适应较高的水温<sup>[12-13]</sup>,硅藻对低水温有很好的适应性<sup>[14]</sup>。鹤地水库中蓝藻生物量与水温的相关性极显著,硅藻生物量与水温无显著相关性,这与流溪水库的情况相似<sup>[15]</sup>,即水温通过影响蓝藻生物量的季节变化而影响鹤地水库浮游植物生物量的季节变化。

鹤地水库浮游植物生物量总体上从主要入水口石角至大坝区依次降低,但高朗稍高于石角,这与水体中营养盐浓度有关<sup>[16-17]</sup>。鹤地水库主要由九州江、丹兜河、兰山河三条支流汇入,流入石角处的九州江是最大也是最主要的支流。九州江在广西境内受污染非常严重,导致石角入水口营养盐浓度非常高,水体透明度较低;随着水流的深入,透明度逐渐升高,营养盐浓度降低。鹤地水库5个采样点的总磷浓度变化较大,总氮水平较稳定,平均N/P为31,说明浮游植物的生长强烈受磷限制。总氮与生物量没有显著相关性,总磷和生物量有极显著相关性,可见总磷浓度决定其浮游植物生物量的变化。在丹兜河口和兰山河口,水域的营养盐浓度和环境条件不仅受九州江上游来水的影响,同时还分别受丹兜河和兰山河来水的影响,其浮游植物生物量的变化相对复杂。7月丹兜河口浮游植物生物量较低,兰山河口浮游植物生物量较高,是由于此时丹兜河口总磷浓度较低(低于检测限 $0.01 \text{ mg L}^{-1}$ ),兰山河口的总磷浓度较高( $0.061 \text{ mg L}^{-1}$ )。

### 3.2 浮游植物的优势种

在温带浮游植物群落结构稳定的湖泊中,前3~5个优势种的生物量占总生物量的95%以上<sup>[18]</sup>,叶绿素a的含量往往与生物量有显著相关性<sup>[19]</sup>。鹤地水库2、7和12月的前8个优势种生物量占总生物量的92%以上,但9月只有80%左右,且叶绿

素a和生物量没有显著相关性。尽管鹤地水库的浮游植物群落全年结构变化相对稳定,但稳定性低。鹤地水库地处热带北缘,全年的水温变幅小,但夏季风带来的集中降水和水库特殊的运行模式,导致水库水文与水动力学过程与湖泊不同。另一方面,水库平均水深10 m,介于浅水和深水水库之间。在枯水期,水温较低,光照较弱,水体不发生分层,则小环藻,颗粒直链藻,模糊直链藻,根管藻在丰度和生物量上均占优势。这些硅藻比重较大,在水流紊乱的环境易成为优势种,且具有很强的捕获光能力,对外界光照强度的改变能做出迅速反应,有很强的光合作用能力<sup>[18]</sup>。在丰水期,水温较高,水力滞留时间均小于100 d,导致水体分层较弱<sup>[20]</sup>,适于在混合较弱的水力条件中生存的拟柱孢藻和湖泊假鱼腥藻成为绝对丰度优势种,在垂直分层水体中占有优势的水华微囊藻成为次优势种。拟柱孢藻是典型的热带种类<sup>[21-23]</sup>,生长温度为 $15 \sim 35^\circ\text{C}$ ,最适为 $29 \sim 31^\circ\text{C}$ <sup>[24]</sup>,常生活在磷含量较高的环境中<sup>[25]</sup>,且在混合的水体中占优势<sup>[26]</sup>。7月鹤地水库平均水温 $32.8^\circ\text{C}$ ,总磷浓度较高(平均为 $0.052 \text{ mg L}^{-1}$ ),有利于拟柱孢藻生长(丰度占55%以上),湖泊假鱼腥藻和水华微囊藻成为丰度次优势种。拟柱孢藻在丰度的绝对优势以及相对较大的体积使之成为5个采样点的浮游植物生物量的绝对优势种(75%以上)。9月水温平均为 $29^\circ\text{C}$ ,总磷浓度大幅度下降(平均为 $0.028 \text{ mg L}^{-1}$ ),拟柱孢藻丰度下降至7月的10%~43%。7月和9月的拟柱孢藻生物量与总磷浓度有较高的相关性。随着拟柱孢藻丰度的下降,7月份的次优势种湖泊假鱼腥藻和水华微囊藻,以及细小平裂藻等小型体积藻种在9月大量繁殖,这类小型藻具有较高的表面积与体积比例,对营养盐有较高的吸收,对弱光具有强的捕获能力,易在透明度较低的水体中成为优势种<sup>[27]</sup>。但由于其体积较小,生物量在9月并不占有优势,而拟柱孢藻的较大体积以及相对较高的丰度使其成为生物量的优势种,但是优势度比7月下降。此时,飞燕角甲藻凭借其较大的体积在浮游植物生物量上占了较大的比例。可见,鹤地水库浮游植物群落中的优势种类主要为一些热带典型种类,这些种类对中等水力滞留时间具有较好的适应能力。优势种类的全年变化中,枯水期水温较低,优势种类为硅藻;丰水期水温较高,优势种类为蓝藻,磷浓度影响着蓝藻中各种类的变化。

## 参考文献

- [1] Vörös L, Pádisák J. Phytoplankton biomass and chlorophyll-a in some shallow lakes in central Europe [J]. *Hydrobiologia*, 1991, 215: 111-119.
- [2] Hu R(胡韧), Lin Q Q(林秋奇), Wang Z H(王朝辉), et al. Phytoplankton and eutrophication of reservoirs in Guangdong Province [C]// Han B P(韩博平), Li T(李铁), Lin X D(林旭翎). *Actuality and Controlling Management of Eutrophication in Large and Mediumsized Reservoirs in Guangdong Province*. Beijing: Science Press, 2003: 55-61.(in Chinese)
- [3] Wang W(王伟), Gu J G(顾继光), Han B P(韩博平). Analysis of factors affecting chlorophyll a concentration in small reservoirs in South China [J]. *Chin J Appl Environ Biol(应用与环境生物学报)*, 2009, 15(1): 64-71.(in Chinese)
- [4] Komarkova J, Hejzlar J. Summer maxima of phytoplankton in the řimov Reservoir in relation to hydrologic parameters and phosphorus loading [J]. *Arch Hydrobiol*, 1996, 136(2): 217-236.
- [5] 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)
- [6] Lin G H(林桂花), Han B P(韩博平). Analysis of plankton and eutrophication in Hedi Reservoir, Guangdong Province [J]. *Ecol Sci(生态科学)*, 2002, 21(3): 208-212.(in Chinese)
- [7] Li Q H(李秋华), Lin Q Q(林秋奇), Han B P(韩博平). Conductivity distribution of water supply reservoirs in Guangdong Province [J]. *Ecol Environ(生态环境)*, 2005, 14(1): 16-20.(in Chinese)
- [8] Wang Z H(王朝辉), 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)
- [9] Hu R(胡韧), Han B P(韩博平), Li H Q(黎红秋), et al. Evaluation of phytoplankton characteristic and eutrophication in Hedi reservoir [C]// Han B P(韩博平), Shi Q C(石秋池), Chen W X(陈文祥). *Research of Reservoir Ecology and Water Management, China*. Beijing: Science Press, 2006: 361-376.(in Chinese)
- [10] 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 chlorophyll a in phytoplankton [J]. *Ecol Sci(生态科学)*, 2005, 24: 9-11.(in Chinese)
- [11] Hillebrand H, Dürselen C D, Kirschtel D, et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae [J]. *J Phycol*, 1999, 35: 403-424.
- [12] 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)
- [13] Hunt R J, Matveev V, Jones G J, et al. Structuring of the cyanobacterial community by pelagic fish in subtropical reservoirs: Experimental evidence from Australia [J]. *Freshwater Biol*, 2003, 48: 1482-1492.
- [14] 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)
- [15] Lin Q Q(林秋奇), Hu R(胡韧), Han B P(韩博平). Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2003, 23(11): 2278-2284.(in Chinese)
- [16] Thornton K W, Kennedy R H, Carrol J H, et al. Reservoir sedimentation and water quality — An heuristic model [C]// Stefan H G. *Proceedings of the Symposium on Surface Water Impoundments*. New York: Amer Soc Civil Engr, 1981: 654-664.
- [17] Lin Q Q(林秋奇), Han B P(韩博平). Reservoir limnology and its application in water quality management: An overview [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2001, 21(6): 1034-1040.(in Chinese)
- [18] Reynolds C S. *The Ecology of Phytoplankton* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006: 362-389.
- [19] Vörös L, Pádisák J. Phytoplankton biomass and chlorophyll-a in some shallow lakes in central Europe [J]. *Hydrobiologia*, 1991, 215: 111-119.
- [20] Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. State of the art of reservoir limnology and water quality management [C]// Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. *Comparative Reservoir Limnology and Water Management*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993: 213-288.
- [21] Istvánovics V, Shafik H M, Présing M, et al. Growth and phosphate uptake kinetics of the cyanobacterium, *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanophyceae) in throughflow cultures [J]. *Freshwater Biol*, 2000, 43: 257-275.
- [22] Pádisák 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.
- [23] 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 Manag*, 2000, 5: 195-205.
- [24] Briand J F, Le Boulanger C, Humbert J F. *Cylindrospermopsis raciborskii* (Cyanobacteria) invasion at mid-latitudes: Selection wide physiological tolerance, or global warming? [J] *J Phycol*, 2004, 40: 231-238.
- [25] Pádisák 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.
- [26] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 438: 1-12.
- [27] Mischke U. Cyanobacteria associations in shallow polytrophic lakes: Influence of environmental factors [J]. *Acta Oecol*, 2003, 24: S11-S23.