

南亚热带大型贫营养水库浮游植物群落结构与季节变化 ——以新丰江水库为例

胡 韧, 雷腊梅, 韩博平*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要:新丰江水库是我国第四大的水库,也是广东省最大的水库和重要的水源地。于 2004 ~ 2005 年 2 月一次调查了新丰江水库水文、水质和浮游植物分布,分析了浮游植物群落季节动态特征。新丰江水库浮游植物生物量比较低,在 $0.037 \sim 1.497 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化。浮游植物种类较多,11 次采样共检测到 158 种。在丰度上,水库浮游植物主要以小环藻、蓝纤维藻、小球藻和纤维藻等优势种为主,而在生物量上则以微小多甲藻为优势。浮游植物组成随季节变化而不同,春季以硅藻、甲藻和绿藻为优势类群;夏季以蓝藻、绿藻和硅藻为优势类群;秋季蓝、绿藻减少而硅藻和甲藻增加。2004 年的浮游植物季节性变化更为明显,有从硅藻-绿藻优势(2 月和 4 月份),到蓝藻-绿藻优势(6 月和 8 月份),到混合优势(10 月份)和金藻优势(12 月份)这样一个变化过程。2005 年硅藻的相对丰度比 2004 年高出很多。两年浮游植物组成的差异与两年的降水量有关。水动力学对丰水期(6 ~ 8 月份)浮游植物组成结构有较大影响,导致硅藻和绿藻相对丰度的增加。与温带贫营养型水库相比,新丰江水库的浮游植物群落具有春季和秋季种类多、夏季的蓝藻种类丰富的特点。从细胞大小分布上看,小于 $20 \mu\text{m}$ 浮游植物是生物量的主要贡献者,其次是大于 $45 \mu\text{m}$ 的浮游植物。在粒径小于 $20 \mu\text{m}$ 的浮游植物中,微小多甲藻是最主要的贡献者。浮游植物群落的大小分布受水动力学条件和营养盐浓度动态的影响。

关键词:浮游植物群落;季节变化;大型贫营养水库;南亚热带

文章编号:1000-0933(2008)10-4652-13 中图分类号:Q145, Q178, Q179, X171.1 文献标识码:A

Phytoplankton assemblage and seasonal dynamics in the large oligotrophic Xinfengjiang reservoir in southern China

HU Ren, LEI La-Mei, HAN Bo-Ping*

Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4652 ~ 4664.

Abstract: Xinfengjiang reservoir is the largest reservoir in Guangdong Province and an important regulator of regional water resource. In the years 2004 to 2005, phytoplankton (species composition and total biomass) and environmental variables were monitored in this oligotropical water body every two months. The phytoplankton biomass varied from $0.037 \sim 1.497 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and 158 species were observed. Dominant phytoplankton were *Cyclotella meneghiniana*, *Dactylococcopsis raphidioides*, *Chlorella vulgaris* and *Ankistrodesmus* sp., but *Peridinium pusillum* was the greatest contributor to biomass. The specific composition of phytoplankton community displayed a seasonal pattern. Diatoms, and Dinoflagellates dominated in the early spring and together with Chlorophyta, they dominated in late spring. Cyanophyta, Chlorophyta and

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30670345);国家教育部优秀回国人员基金资助项目

收稿日期:2007-06-11; 修订日期:2007-12-29

作者简介:胡韧(1975 ~),男,湖南湘潭人,博士生,主要从事浮游植物生态学研究. E-mail: thuren@jnu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tbphan@jnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30670345); Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry

Received date: 2007-06-11; **Accepted date:** 2007-12-29

Biography: HU Ren, Ph. D. candidate, mainly engaged in phytoplankton ecology. E-mail: thuren@jnu.edu.cn

Bacillariophyta dominated in summer. In autumn, the abundance of blue-green and green algae decreased while diatoms and dinoflagellates increased. The seasonal variation of dominant phytoplankton groups was greater in 2004 than in 2005. Diatom and green algae dominated in February and April; Cyanobacteria and green algae dominated in June and August; diatom, Cyanobacteria and green algae were abundant in October, and *Dinobryon* in Chrysophyta dominated in December. There existed a recognizable annual difference in phytoplankton community. Relative abundance of diatoms was much higher in 2005 than in 2004. It is likely the difference in yearly precipitation levels accounted for the differences in yearly phytoplankton abundance and biomass patterns; Hydrodynamics especially in the flood season (June to August) is likely the cause of the increase in diatoms and green algae. Phytoplankton species having a diameter less than 20 μm were the main contributors to total biomass, and those having a diameter greater than 45 μm were the secondary contributors. *Peridinium pusillum* was the dominant species when diameters were less than 20 μm . Xinfengjiang Reservoir can be characterized as having more cyanobacteria species (*Microcystis* and *Psuedanabeana*) than other oligotrophic temperate reservoirs. Biomass sized composition of the phytoplankton community displayed a seasonal dynamics following hydrodynamics and nutrients.

Key Words: phytoplankton assemblage; seasonal dynamics; large oligotrophic reservoir; southern China

在贫营养水体中,水体的叶绿素浓度一般不超过 $4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,浮游植物生长主要受营养盐的限制^[1]。由于细胞体积较小的浮游植物具有较大的比表面积,在获取营养盐上具有明显的优势,贫营养水体中的浮游植物群落通常由一些细胞较小的种类占优势^[2,3]。同时,浮游植物在水体的沉降速度、被捕食的几率等也与其细胞大小大小有关系,因此在一个水体中,浮游植物群落的种类组成和细胞大小组成都是分析浮游植物动态的重要内容^[4,5]。新丰江水库是广东省大型供水水库,营养盐浓度很低,年平均总磷浓度为 $0.014 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总氮浓度为 $0.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相应的生物量也很低,年平均叶绿素浓度仅为 $1.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[6]。这样一座大型贫营养盐水体中浮游植物群落结构有什么样的特点?与高纬度地区的大型贫营养水体是否存在明显的差异?其细胞大小分布是否也是以小型种类为主?在影响浮游植物群落动态的因子中,水文过程可能起着关键的作用。Gaedke 发现影响德国温带大型深水湖泊——Constance 湖浮游植物大小变化的主要因素之一是外部天气条件对水体的扰动^[2]。新丰江水库位于北回归线附近的南亚热带地区,水力滞留时间长(2a),水温较高;水库流域的降水丰富,年际和年内的降水也不均匀。那么在气候条件和水文过程的影响下,新丰江水库的浮游植物种类组成和丰度在年内和不同的年份间是否有不同呢?目前对南亚热带大型贫营养水体的研究和报道不多,新丰江水库是一座典型的大型贫营养水体,有关该水库研究主要集中在水质^[7,8]和富营养化方面^[6,9,10]。目前大型水库($>0.5 \text{ km}^3$)的蓄水占了全球平均径流量的 20% 左右,对其生态学和管理的研究越来越引起人们的重视。本文通过对新丰江水库两年的浮游植物的采样,分析该水库浮游植物种群结构、丰度和细胞大小组成,了解南亚热带地区大型贫营养水库浮游植物群落结构和季节变化的生态学特征。

1 材料与方法

1.1 水库和采样点设置

新丰江水库位于东经 $114^{\circ}15' \sim 114^{\circ}50'$,北纬 $23^{\circ}40' \sim 24^{\circ}10'$,地处北回归线附近,珠江水系东江上游,位于广东省中部东江流域。新丰江水库是我国第四大水库,也是华南地区最大的水库,总库容达 139 亿 m^3 ,水库集雨面积 5730 km^2 ,水库面积为 364 km^2 。水库多年平均水深 28.7 m,最大水深 93 m。流域以丘陵和山地为主。新丰江水库的水力滞留时间长达 2a,平均径流量 $194 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。库区属南亚热带季风气候,年平均气温 20.8°C ,年均降雨量为 1974.7 mm(最大 2857.5 mm,最小 1261.2 mm),主要集中在 4~9 月份。水库水质达地表水 I 类标准,是珠江三角洲地区、香港等地的重要供水水源。在水库的湖泊区共设两个采样点(图 1),第 1 个样点在大坝(N $23^{\circ}43' 42.7''$,E $114^{\circ}38' 43.6''$)处;另外一个样点选在旅游码头(N $23^{\circ}47' 02.5''$,E $114^{\circ}37' 19.0''$)。

1.2 采样方法

从2004年2月~2005年12月,每2个月进行1次采样,其中2005年2月因故未能采集。水样为5L采水器采集水面0.5m处水样5次共25L,混合后取样。透明度用赛氏盘进行测量,水温现场测定。水化指标:总磷、总氮和可溶性正磷酸盐均按标准方法^[11]测定。叶绿素a用采水器在水表面下约0.5m处采水1L,当场过滤到孔径为0.45 μm 的醋酸纤维膜上,置4℃冰箱内保存,其浓度根据林少君等改进的方法^[12]测定。浮游植物定性样品用25号浮游生物网(64 μm)拖取,定量样品(1L),带回实验室静置沉淀,浓缩后在光学显微镜下进行分析鉴定(定量样品固定方法使用鲁哥氏液而非甲醛溶液,可以有效地沉淀蓝藻)。生物量按照Hillebrand的方法计算,其中假设浮游植物的密度均为 $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[13]。

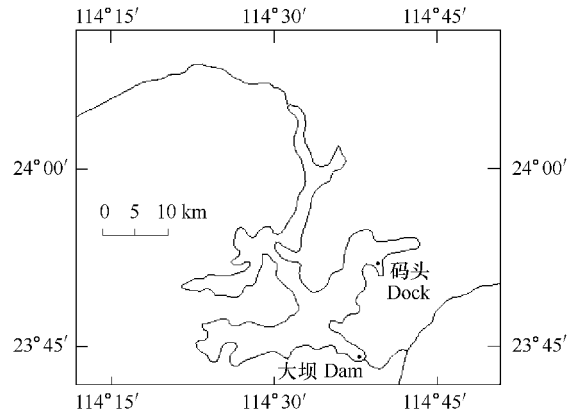


图1 新丰江水库采样位点示意图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Xinfengjiang reservoir

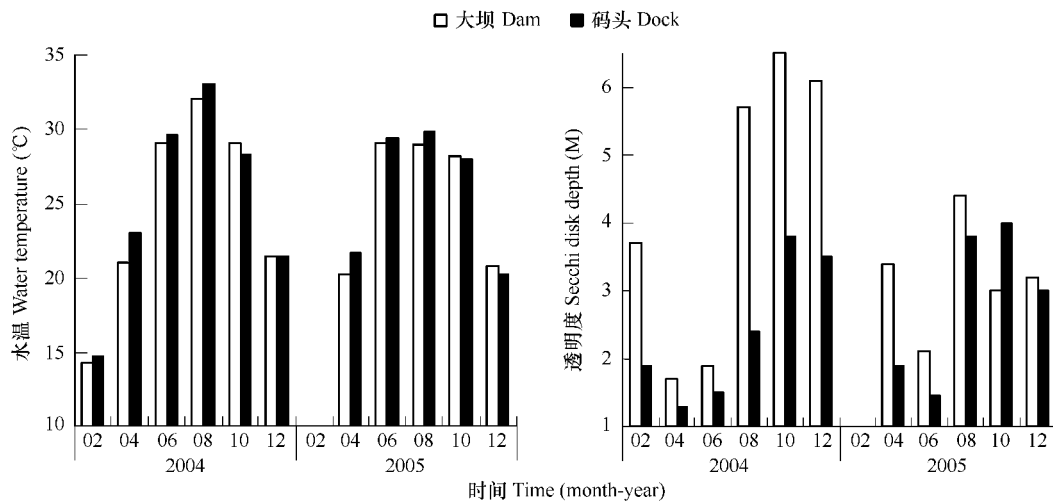


图2 新丰江水库表层(0.5m)水温和透明度(2004~2005年)

Fig. 2 Surface water temperature (0.5m) and Secchi Disk depth in Xinfengjiang reservoir

2 结果与分析

新丰江水库的水温明显分为高温期(6~10月份)和低温期(12~4月份)两个阶段。高温期水温约在29℃左右,而低温期水温约在20℃左右。夏季最高水温为33℃,冬季最低水温为14.3℃。4~6月份透明度相对较低,8~12月份透明度较高。2004年4月份的透明度最低,为1.3m;2004年10月份透明度最高,为6.5m。在大坝采样点处,2004年的透明度明显高于2005年。

新丰江水库的总磷(TP)浓度较低,采样期总磷的浓度处于 $0.004 \sim 0.042 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。从采样点看,码头的总磷浓度高于大坝,一定程度上反映出码头的营养盐输入高于大坝。从时间上看,4月、8月和10月的总磷浓度比较高。由图3可知,不论是码头还是大坝,新丰江水体中正磷酸盐浓度很低,其浓度在 $0.001 \sim 0.011 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。两个采样点的年平均正磷酸盐浓度差别不大,但2004和2005年的10月份,码头的正磷酸盐浓度都高出大坝数倍(图3)。随着降雨带来流域中的营养盐输入,每年丰水期6月份前后,正磷酸盐的浓度相对较高;而枯水期的12月、2月份和4月份的正磷酸盐浓度比较低。

新丰江水库总氮(TN)的浓度在 $0.06 \sim 1.224 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(图4)。总氮(TN)在2005年6月份的码头点最高,为 $1.224 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;2004年8月份最低,不超过 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,2005年甚至未检出。氨氮的浓度在 $0.006 \sim$

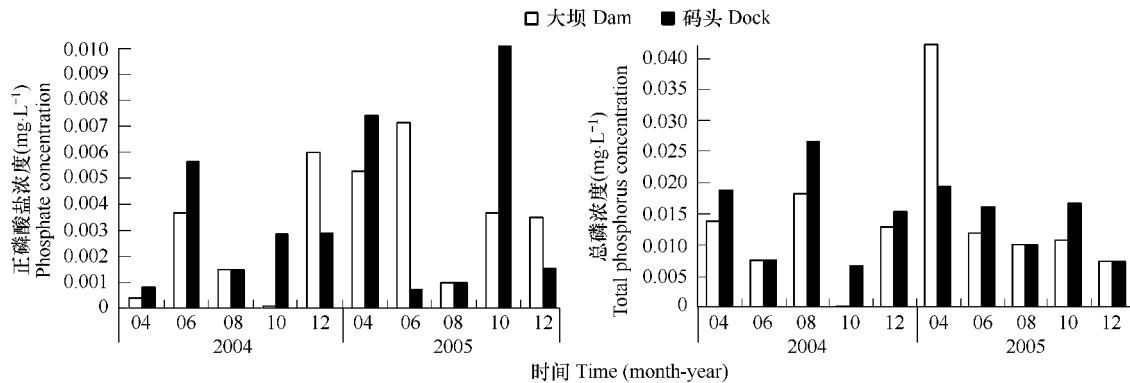


图3 新丰江水库总磷和正磷酸盐浓度的季节变化(2004 ~ 2005 年)

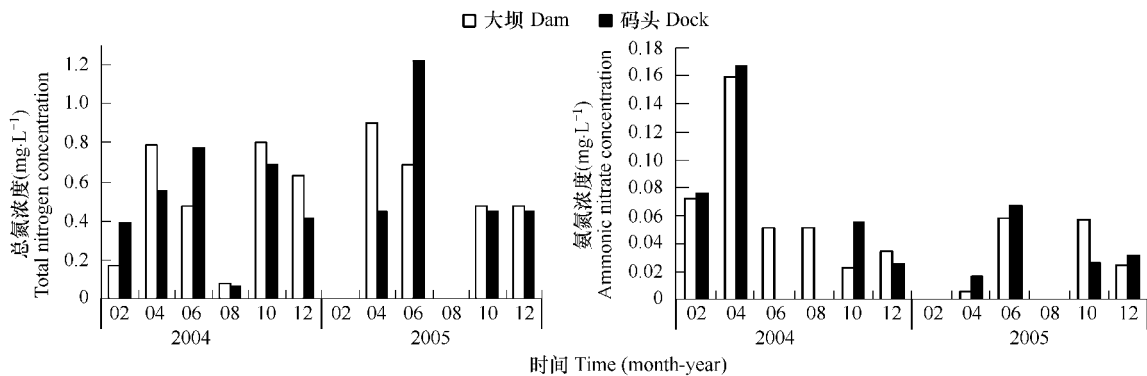
Fig. 3 Seasonal changes in TP and PO₄-P concentrations in Xinfengjiang Reservoir (2004 ~ 2005)

图4 新丰江水库总氮和氨氮浓度的季节变化(2004 ~ 2005 年)

Fig. 4 Seasonal changes in TN and ammonia concentrations in Xinfengjiang Reservoir (2004 ~ 2005)

0.167 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间(图4)。氨氮在2004年4月份最高,大坝和码头的浓度都超过了 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 2005年8月份最低,大坝和码头点都未检出。

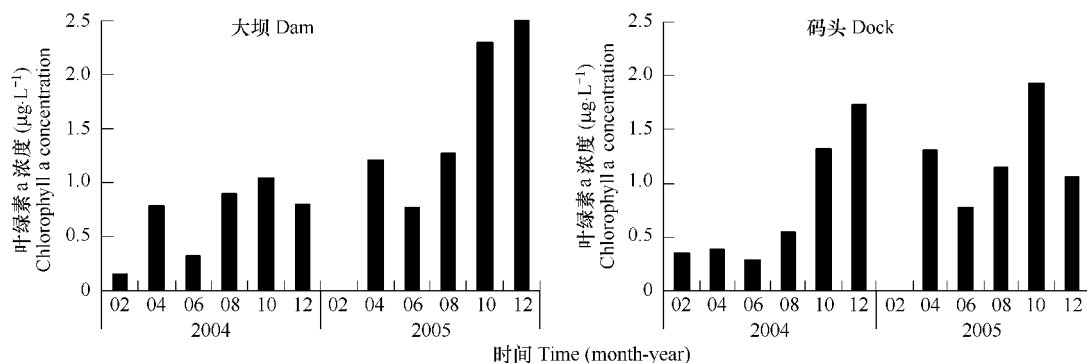


图5 新丰江水库的叶绿素 a 浓度季节变化(2004 ~ 2005 年)

Fig. 5 Seasonal dynamics of chlorophyll a concentration in Xinfengjiang Reservoir (2004 ~ 2005)

新丰江水库叶绿素 a 浓度很低,多年平均叶绿素 a 浓度大坝为 $1.09 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 码头为 $0.98 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从大坝叶绿素 a 水平的年平均值来看,2005 年比 2004 年略有增加。在同一年度内 6 月份的叶绿素 a 浓度较低。

2.2 浮游植物群落种类组成

2 年采样共检出 7 个门 99 属的 158 种浮游植物。其中绿藻门最多,有 79 种;硅藻门 39 种;蓝藻门 22 种;

裸藻门 9 种;甲藻门 4 种;金藻门 3 种和隐藻门 2 种。在新丰江水库的浮游植物中,常见的种属有梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、蓝纤维藻 (*Dactylococcopsis acicularis*)、假鱼腥藻属 (*Pseudanabeana* Lauterborn)、微囊藻属 (*Microcystis* Kutzing)、直链藻属 (*Melosira* spp.)、飞燕角甲藻 (*Ceratium hirundinella*)、二角多甲藻 (*Peridinium bipes*)、微小多甲藻 (*Peridinium pusillum*)、布朗葡萄藻 (*Botryococcus braunii*)、角星鼓藻属 (*Staurastrum* Mey.)、纤维藻 (*Ankistrodesmus* sp.)、栅藻属 (*Scenedesmus* Mey.)、针杆藻属 (*Synedra* spp.)、分歧锥囊藻 (*Dinobryon divergens*) 等。每次采样均出现的种属有:蓝藻门的蓝纤维藻属、色球藻属 (*Chroococcus*)、硅藻门的小环藻属,绿藻门的小球藻属 (*Chlorella*)。

表 1 给出了采样期间浮游植物的种类数量和组成。2004 年和 2005 年 6 月份和 8 月份以及 2005 年的 10 月份种类较多,均超过 45 种;2 月份和 4 月份种类较少,平均不到 40 种。在种类组成上,蓝藻和绿藻的种类数较多,每次采样出现的种类变化较大,它们的变化是导致浮游植物种类数量与组成变化的主要原因。蓝藻种类在 6 月份和 8 月份的样品中出现较多,最多时有 13 种,明显高于其它月份;2 月、4 月和 12 月份的蓝藻种类数都低于 10 种。绿藻种类数量在 2004 年 8 月份最高,有 22 种。2005 年绿藻种类数量高于 2004 年,其中 10 月最高,为 34 种。

表 1 新丰江水库浮游植物组成的变化

Table 1 Numbers of phytoplankton Species and their dynamics in Xinfengjiang reservoir from 2004 ~ 2005

时间 Time (Year-month)	种数 Number of species							总数 Total
	蓝藻 Cyanophyta	绿藻 Chlorophyta	硅藻 Diatom	甲藻 Pyrrophyta	金藻 Chrysophyta	隐藻 Cryptophyta	裸藻 Euglenophyta	
2004-02	7	18	9	3	1	1	0	39
2004-04	8	19	9	3	2	2	0	43
2004-06	12	18	8	3	2	2	0	45
2004-08	12	22	9	3	1	2	0	49
2004-10	6	11	7	3	1	0	0	28
2004-12	9	17	9	3	3	2	2	45
2005-04	6	13	11	3	1	1	2	37
2005-06	13	21	11	2	1	0	1	49
2005-08	10	26	12	2	1	0	1	52
2005-10	11	34	7	3	1	1	1	58
2005-12	6	17	10	3	1	1	2	40

2.3 浮游植物丰度和生物量

新丰江水库浮游植物的细胞丰度不高,2004 年平均大坝点为 19.2×10^4 cells·L⁻¹;码头点比大坝点稍高,为 23.8×10^4 cells·L⁻¹。2004 年浮游植物丰度以 8 月份码头点最高,为 64.97×10^4 cells·L⁻¹,4 月份的大坝点最低,仅 4.71×10^4 cells·L⁻¹。2005 年浮游植物丰度明显高于 2004 年,2005 年平均大坝点为 46.3×10^4 cells·L⁻¹,码头点低于大坝点,为 36.5×10^4 cells·L⁻¹。2005 年浮游植物丰度也是在 8 月份最高,大坝点为 94.97×10^4 cells·L⁻¹,6 月份的大坝点最低,为 11.64×10^4 cells·L⁻¹。

新丰江水库浮游植物的生物量也比较低,2004 年浮游植物生物量大坝点平均为 0.685 mg·L⁻¹,码头为 0.448 mg·L⁻¹。2004 年 4 月码头点浮游植物生物量达 1.497 mg·L⁻¹,为采样期间的最高值;2 月份的码头点最低,为 0.038 mg·L⁻¹(图 6)。2004 年的浮游植物生物量有 2 个峰值,其中最高值出现在春季的 4 月;次高峰在秋季的 10 月出现,生物量为 0.68 mg·L⁻¹。2005 年浮游植物生物量比 2004 年低,大坝点平均为 0.534 mg·L⁻¹,码头为 0.103 mg·L⁻¹。从季节上看 2005 年的浮游植物 10 月份的大坝点最高,为 0.712 mg·L⁻¹(图 6)。

浮游植物丰度和生物量的数量变化情况不完全一致(图 6)。如新丰江码头 2004 年 8 月浮游植物的丰度多达 65.0×10^4 个·L⁻¹,生物量仅 0.215 mg·L⁻¹,而 10 月的丰度只有 22.4×10^4 个·L⁻¹,生物量却有 0.614

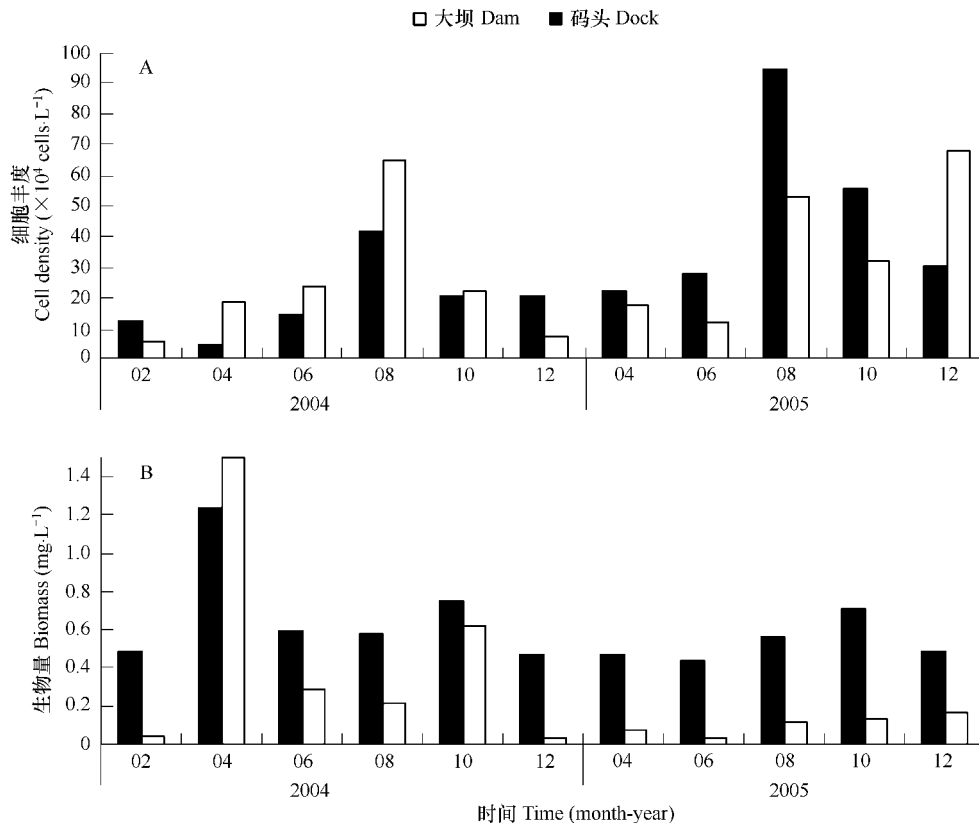


图6 新丰江水库浮游植物细胞丰度(A)和生物量(B)的变化(2004~2005年)

Fig. 6 The variations of abundance and biomass of phytoplankton in Xinfengjiang Reservoir

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图6)。其原因可能是不同月份浮游植物个体大小组成上存在差异。一些体积较大的藻类,如:二角多甲藻、飞燕角甲藻在4月和10月,布朗葡萄藻在2004年6月成为优势种(图7),这些月份的浮游植物生物量也会相应增加。从不同门类上看,蓝藻年平均丰度达到 8.25×10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$,但其年平均生物量只有 $0.0017 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;甲藻年平均丰度仅 1.38×10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$,而其年平均生物量却为 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。8月虽有一定丰度个体细胞较大的绿藻和硅藻,但绝大多数则为个体细胞较小的蓝藻等组成;而10月的浮游植物中,虽然蓝藻丰度的大量下降使总浮游植物丰度减少很多,但众多个体较大的甲藻和硅藻的出现,使得生物量相对较高。

在丰度组成上,2004年新丰江的浮游植物组成中以蓝藻最多,其次为绿藻和硅藻,其年平均丰度依次为 8.25×10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ 、 7.48×10^4 cells $\cdot \text{L}^{-1}$ 和 4.55×10^4 cells $\cdot \text{L}^{-1}$,分别占浮游植物年平均总数的35.4%、32.1%和19.5%。其他门的藻类丰度均较低,尤其是裸藻,为 0.0056×10^4 cells $\cdot \text{L}^{-1}$,仅占0.024%(图7)。2005年新丰江的浮游植物从细胞丰度上来看以硅藻为主,其次为绿藻和蓝藻,其年平均丰度依次为 23.69×10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ 、 10.29×10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ 和 9.0×10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$,分别占浮游植物年平均总数的52.8%、22.9%和20.06%。其他各门的藻类丰度均较低,隐藻没有发现,裸藻门为 0.0316×10^4 个 $\cdot \text{L}^{-1}$,仅占0.07%(图7)。

在生物量的组成中,2004年浮游植物年平均生物量(以湿重表示)以甲藻居首位,为 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,占浮游植物年平均总数的87.8%;其次为绿藻,生物量为 $0.033 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,占浮游植物年平均总数的9%;裸藻最低,年平均生物量仅为 $3.54 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,占浮游植物年平均总数的0.01%(图7)。2005年浮游植物年平均生物量仍以甲藻最高,为 $0.062 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,占浮游植物年平均总数的49.7%,其次为硅藻,生物量为 $0.032 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,占浮游植物年平均总数的25.8%,裸藻最低,年平均生物量仅为 $4.37 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,占浮游植物年平均总数的0.35%(图7)。

2.4 优势浮游植物种类及其动态

新丰江水库不同月份的优势种有蓝藻门的微囊藻,甲藻门的多甲藻、角甲藻,硅藻门的曲壳藻(*Achnanthes*

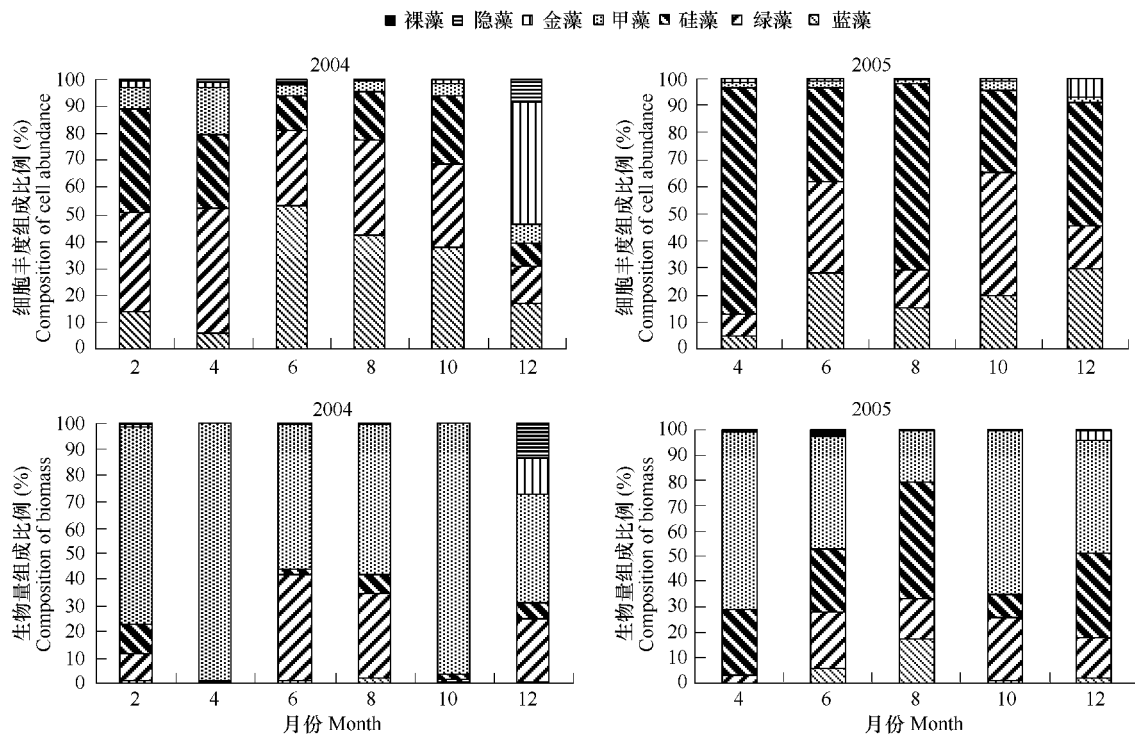


图7 浮游植物的丰度和生物量的组成比例

Fig. 7 The composition of phytoplankton abundance and biomass

裸藻 Euglenophyta; 隐藻 Cryptophyta; 金藻 Chrysophyta; 甲藻 Pyrrophyta; 硅藻 Diatom; 绿藻 Chlorophyta; 蓝藻 Cyanophyta

gracillina)、针杆藻,绿藻门的葡萄藻和金藻门的锥囊藻等。4月和10月的甲藻较多。如2004年4月码头的多甲藻细胞丰度达到了 $3.23 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 由于其个体较大,生物量高达 $1.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 2005年10月大坝的飞燕角甲藻细胞丰度为 $0.081 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 而多甲藻达到了 $2.163 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 两者的生物量为 $0.269 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 占了该采样点生物量的83%以上。蓝藻中的微囊藻和假鱼腥藻则在6月份为优势种, 如2004年6月, 大坝点的铜绿微囊藻和惠氏微囊藻分别为 $3.84 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $3.76 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; 码头采样点的假鱼腥藻和粘球藻也是优势种, 分别为 $4.234 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.986 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水温较低的12月份和2月份, 其它藻类的丰度较低, 硅藻和金藻较易成为优势种。如2004年12月份大坝处的样品中, 硅藻门的曲壳藻和针杆藻分别为 $0.306 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.289 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 金藻门的分歧锥囊藻的丰度更高, 为 $7.752 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。6月的优势种多为绿藻, 如大坝采样点的葡萄藻在2004年6月份为 $0.32 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物量相当于 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

根据细胞丰度, 新丰江水库常年的浮游植物优势种主要有蓝藻门的蓝纤维藻, 硅藻门的小环藻以及绿藻门的小球藻和纤维藻等4个种(表2)。它们丰度的变化如图8所示。从优势度上看, 小环藻 > 小球藻 > 蓝纤维藻 > 纤维藻。小环藻是优势种中丰度最高的种类, 每年都是8月的丰度最高, 其丰度在两年中的差异也最大, 2005年比2004年高出了4~9倍。蓝纤维藻属于蓝藻门中最广营养型的种类^[1], 它是新丰江水库蓝藻最主要的种类, 常年出现。蓝纤维藻的丰度在2004年8月份有一个明显的峰值。小球藻的丰度在8月到10月份比较高, 12月和2月份最低。纤维藻在6~8月份的丰度比较高, 2月和4月份的丰度较低。

从生物量的组成来看, 甲藻是新丰江水库浮游植物中的优势类群。新丰江水库的甲藻主要由微小多甲藻、二角多甲藻和飞燕角甲藻等3个种组成。其中, 微小多甲藻细胞直径小于 $20 \mu\text{m}$, 二角多甲藻和飞燕角甲藻的细胞直径都大于 $50 \mu\text{m}$ 。它们的在采样期间的数量变化如图9所示。

微小多甲藻是2004年浮游植物生物量的主要贡献者。2004年微小多甲藻的生物量在4月和10月份均

有一个峰值。

表 2 新丰江水库 2004 ~ 2005 年浮游植物优势种和主要门类的组成变化

Table 2 Dominant phytoplankton groups in Xinfengjiang Reservoir from 2004 to 2005

月份 Month	2004	2005
2 月 February	绿藻: 小球藻 硅藻: 小环藻 其它: 多甲藻	
4 月 April	绿藻: 小球藻, 双对栅藻 硅藻: 小环藻 其它: 多甲藻	硅藻: 小环藻
6 月 June	蓝藻: 铜绿微囊藻, 惠氏微囊藻, 假鱼腥藻*, 粘球藻* 绿藻: 小球藻, 纤维藻, 双对栅藻, 布朗葡萄藻 硅藻: 小环藻 其它: 多甲藻	蓝藻: 铜绿微囊藻*, 蓝纤维藻 绿藻: 纤维藻, 小球藻 硅藻: 小环藻
8 月 August	蓝藻: 蓝纤维藻, 铜绿微囊藻, 色球藻 绿藻: 小球藻, 平顶顶接鼓藻, 纤维藻, 卵囊藻, 并联藻 硅藻: 小环藻 其它: 多甲藻	蓝藻: 蓝纤维藻, 假鱼腥藻, 色球藻* 绿藻: 小球藻, 纤维藻, 肾形藻*, 卵囊藻 硅藻: 小环藻, 针杆藻 其它: 多甲藻
10 月 October	蓝藻: 铜绿微囊藻, 蓝纤维藻, 色球藻 绿藻: 小球藻, 纤维藻 硅藻: 小环藻, 模糊直链藻 其它: 多甲藻, 分歧锥囊藻	蓝藻: 色球藻, 蓝纤维藻 绿藻: 小球藻, 平顶顶接鼓藻, 纤维藻 硅藻: 小环藻, 针杆藻 其它: 多甲藻
12 月 December	蓝藻: 蓝纤维藻 绿藻: 小球藻 硅藻: 小环藻 其它: 分歧锥囊藻, 单鞭金藻, 多甲藻, 隐藻	蓝藻: 色球藻, 蓝纤维藻 绿藻: 小球藻, 具尾四角藻, 纤维藻 硅藻: 小环藻, 曲壳藻, 根管藻 其它: 分歧锥囊藻, 多甲藻

同一类中排列先后表示数量从多到少, * 仅码头点出现 * Means only examined at dock site

表中数据为: 蓝藻 Cyanophyta; 绿藻 Chlorophyta; 硅藻 Diatom; 其他 Other Phylum; 小球藻 *Chlorella* sp.; 小环藻 *Cyclotella* sp.; 多甲藻 *Peridinium* sp.; 双对栅藻 *Scenedesmus bijuga*; 铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa*; 惠氏微囊藻 *Microcystis wesenbergii*; 假鱼腥藻 *Pseudanabaena* sp.; 粘球藻 *Gloeocapsa* sp.; 纤维藻 *Ankistrodesmus* sp.; 布朗葡萄藻 *Botryococcus braunii*; 色球藻 *Chroococcus* sp.; 平顶顶接鼓藻 *Spondylium planum*; 卵囊藻 *Oocystis* sp.; 并联藻 *Quadrigula* sp.; 肾形藻 *Nephrocytium* sp.; 针杆藻 *Synedra* sp.; 模糊直链藻 *Melosira ambigua*; 分歧锥囊藻 *Dinobryon divergens*; 蓝纤维藻 *Dactylococcopsis* sp.; 单鞭金藻 *Chromulina* sp.; 具尾四角藻 *Tetraedron caudatum*; 曲壳藻 *Achnanthes minutissima*; 根管藻 *Rhizosolenia longiseta*

2005 年微小多甲藻生物量显著降低, 平均生物量只有 2004 年的 5%。二角多甲藻在 2004 年的定量样品中未检出, 而 2005 年的 4 月、10 月和 12 月均有检出, 2005 年 10 月最多, 其生物量为 $0.191 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。飞燕角甲藻分布的时空差异更明显, 其生物量峰值也多出现在 4 月和 10 月这两个月份, 但 2005 年飞燕角甲藻的最大生物量却出现在 12 月份的码头样点。

2.5 浮游植物生物量的粒径分布

从种类数上看, 新丰江水库 $20 \mu\text{m}$ 粒径以下的种类最多, 有 84 种, 大部分浮游植物都在这个范围内; 粒径处于 $20 \sim 45 \mu\text{m}$ 之间的浮游植物最少, 只有针杆藻、颗粒直链藻、裸藻、光角角星鼓藻、尖刺角角星鼓藻和胶网藻等 6 个种类; 粒径在 $45 \mu\text{m}$ 以上的浮游植物有二角多甲藻、飞燕角甲藻、六角角星鼓藻、纤细角星鼓藻、根管藻以及丝状蓝藻泽丝藻和浮鞘丝藻等 7 个种类。不同粒径的浮游植物生物量分布情况, 也与种类数的大小分布一致: 小于 $20 \mu\text{m}$ 粒径的浮游植物最多, 其次是大于 $45 \mu\text{m}$ 的浮游植物, 粒径处于 $20 \sim 45 \mu\text{m}$ 之间的浮游植物最少(图 10)。2 年 $45 \mu\text{m}$ 以上粒径的浮游植物季节性分布并不一致。2004 年 4 ~ 8 月大粒径的浮游植物分布较多; 2005 年则主要分布在 10 ~ 12 月份。

3 讨论

3.1 新丰江水库浮游植物的种类组成与动态

在温带和寒带地区的大型水体中, 温度与光照年内差异较大, 冬季水库常常有冰封期, 水体为双混合

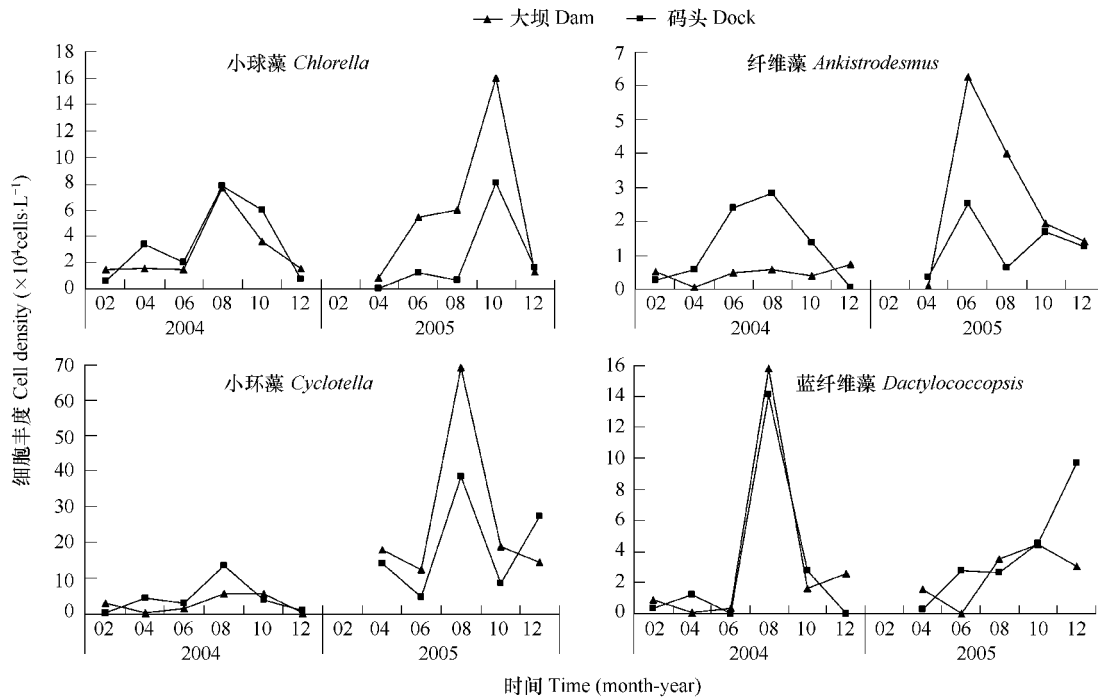


图8 浮游植物优势种的丰度变化

Fig. 8 Temporal variation of abundance for dominated species of Chlorophyta, Bacillariophyta and Cyanophyta

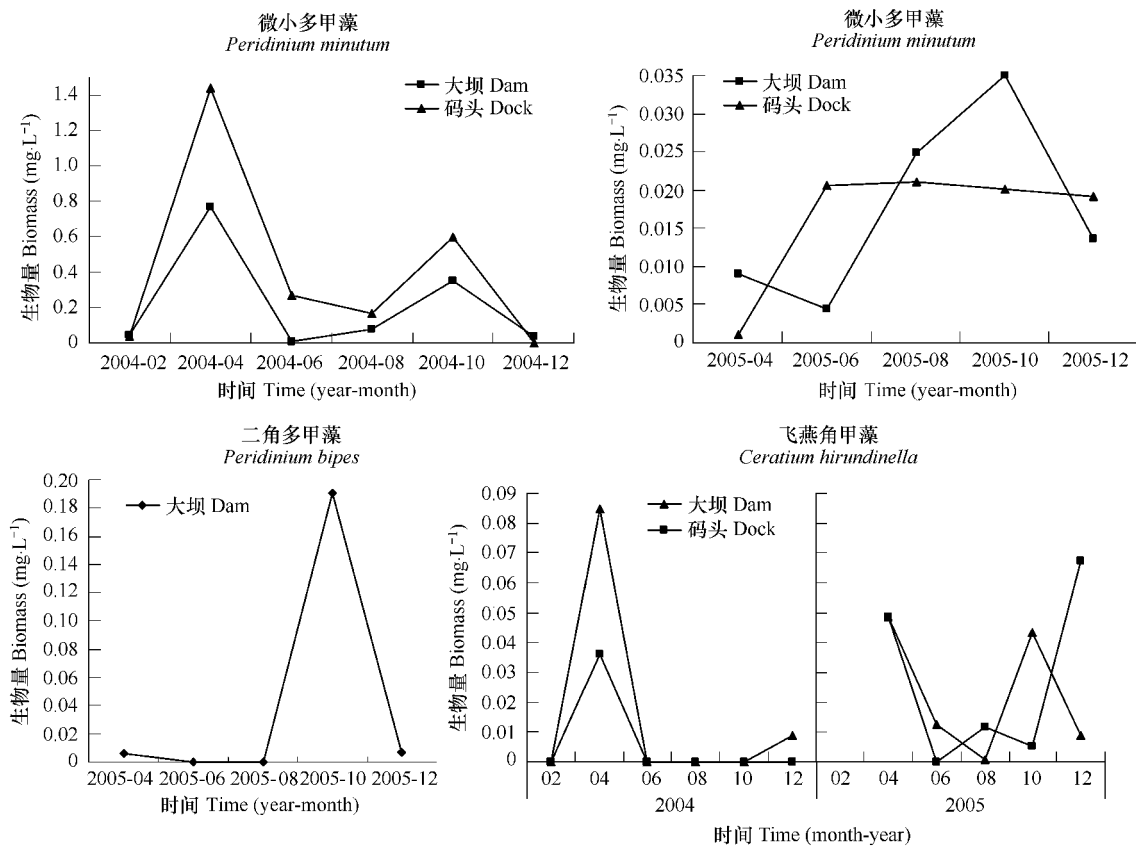


图9 甲藻的生物量变化动态

Fig. 9 Temporal variation of biomass for dominant dinoflagellate species

型^[14,15]。浮游植物季节性分布非常明显,春季的优势种多为一些耐受低温和混合型水体的小型硅藻,春末夏初为适应低光照和较稳定水体的隐藻与金藻门的小型鞭毛种类,而夏季则主要是一些纳米级的球形单细胞蓝藻^[16]。在低纬度的热带及亚热带的大型水体中,水温的年内差异没有前者明显,水体为单混合型的,浮游植物的种类组成和丰度常与水动力学因子有关^[1,17]。

在我国亚热带地区,全年的光照强、水温高,季节性变化小。因此,在贫营养的新丰江水库,水温和光照不是浮游植物生长的主要限制因子。与温带水库春季浮游植物几乎全部由耐低温的硅藻组成不同^[15,16],2004 年新丰江水库的春季浮游植物优势种还包括了绿藻门的小球藻和甲藻门的微小多甲藻(表 2)。温带水

体在春末夏初的温度仍然较低,但一些适应低温和低光照小型鞭毛种类开始增多:如 Baikal 湖中出现了较多甲藻门的裸甲藻和金藻门的锥囊藻^[15],Superior 湖中出现较多隐藻门的隐藻、金藻门的棕鞭藻、金色藻等^[16]。在新丰江水库,这一时期(6 月份)的蓝藻开始成为优势种的组成部分,包括蓝纤维藻、微囊藻、色球藻、粘球藻和假鱼腥藻等(表 2)。此时出现较多的还有绿藻门的大型群体——布朗葡萄藻,它是 2004 年 6 月的优势种类。在温带贫营养湖泊 Baikal 中,布朗葡萄藻也是夏季末期的优势种,因其适合生长在高光照、静止分层的水体,同时对低氮和磷浓度的水环境具有耐受能力而形成竞争优势^[15]。与新丰江夏季浮游植物组成类似的还有同属于低纬度地区的大型湖泊 Turkana,不过它在夏季的浮游植物先由群体绿藻组成,然后被鱼腥藻以及微囊藻替代^[1]。温带水库夏季的蓝藻主要是一些 pico 级($<2\ \mu\text{m}$)的蓝藻,如,聚球藻等^[16,18]。大型温带水库和热带水库在蓝藻种类和数量上的差别,说明在较高的温度下热带的贫营养水库可以由较低的营养盐支持更多数量的浮游植物生活。Lewis 在总结热带水体的特点时,也指出热带地区水库的浮游植物比温带水库对氮、磷营养盐的增加更敏感^[19]。到了秋季后,温带水库经历一个水柱重新混合带来的小的硅藻峰值后,浮游植物丰度随着温度的降低而迅速下降^[15]。地处我国亚热带的新丰江水库,10 月份的水温仍然比较高,小型的绿藻、硅藻和蓝藻种类仍然占据着较大的优势。但从整体上看,蓝藻和绿藻的丰度和优势种开始减少,而硅藻和甲藻相对增加。综上所述,新丰江水库作为一个亚热带的贫营养型大型水库,其浮游植物种类组成和特征与温带同类水库相比,具有下列特征:①春季水温较高,浮游植物优势种类数比温带水库更多,为甲藻-硅藻混合型;②夏季绿藻和蓝藻的种类增加开始时间更早,蓝藻优势种不是温带常见的 pico 级球型单细胞藻,而是微囊藻和假鱼腥藻等群体和丝状的种类;③秋季和冬季生物量仍然较高,小环藻、多甲藻和锥囊藻等杂色藻类的浮游植物常常会形成局部优势。12 月份生物量与夏季相比仍没有明显下降,而温带水库在冬季进入冰封期,浮游植物生物量显著降低。

新丰江水库水力滞留时间长(2a),水体较为稳定。一些需要稳定水体生长的种类,如:甲藻在新丰江的浮游植物生物量中占有较大比例。从生物量上来看,微小多甲藻是新丰江水库的第一优势种(图 9)。新丰江水库低营养盐浓度(图 3)是制约其它藻类生长而甲藻得以占据优势的最主要原因。研究表明,当磷缺乏时,甲藻更容易发生水华^[20]。新丰江水库的甲藻生物量峰值每年都出现在磷含量较低的枯水期(4 月或 10 月份),也说明了低磷有利于甲藻的繁殖。这一优势来自于甲藻的磷“饱餐机制”,即甲藻可以在磷充足时,可以在体内储存大量的磷供后续使用^[21]。在通常情况下,多甲藻“饱餐”磷之后,可以在无磷的培养水体中繁殖 3~4 代^[22]。在自然界水体中,甲藻可以通过昼夜垂直迁移至水体下层获取更多的营养盐,甲藻昼夜垂直迁移距离可以达到 14~20m^[23]。新丰江水库水体分层的温跃层一般在 13m 左右,这样甲藻就可以从温跃层吸收营养盐,再进入真光层进行光合作用,从而保证了甲藻生物量在低营养盐浓度的新丰江经常处于优势

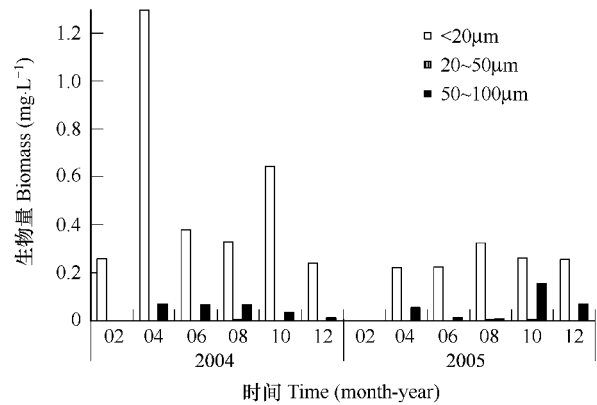


图 10 新丰江水库浮游植物生物量的粒径分布

Fig. 10 Phytoplankton biomass sized distribution in Xinfengjiang Reservoir

地位。

在另一方面,大型水库浮游植物常常由于开阔的水面带来的风力影响,种群组成密度会因此在不同水域发生改变^[24,25];广东省属于典型的亚热带海洋性气候,5~10 月份为丰水期,降雨量占全年的 84%,降雨导致水文过程的变化会影响浮游植物种群组成。风力和降雨等因子,都会使水库产生更多的适合小型种类的生态位,从而增加浮游植物的多样性。在丰水期 6 月份和 8 月份的样品中,浮游植物生物量的组成上硅藻和绿藻增加了很多,而适应稳定水体环境的甲藻大量减少(图 9)。在温带的水库中,许多较典型的贫营养型水库的群落组成都是以甲藻为主,如欧洲阿尔卑斯的 Traunsee 水库^[26]。在温带的湖泊中,甲藻数量最高季节是在水温较高的 8 月份,其它季节相对丰度较低^[27]。新丰江水库地处亚热带,一年中大部分时间水温都在 20℃ 以上(图 2),温度不是甲藻生长的限制因子,甲藻常年生物量相对较高。在水温较高的 6~8 月份丰水期,受水动力学影响甲藻生物量反而有所减少。

3.2 新丰江水库浮游植物种类丰度组成的年际差异

新丰江水库浮游植物的优势种类具有明显的年际差异,2004 年蓝藻和绿藻的平均丰度占浮游植物全年的比例最大,分别为 35% 和 32%,而硅藻仅占 19.5%;2005 年蓝藻和绿藻仅占 20% 和 23%,而硅藻的平均丰度在浮游植物中的比例占到了 53%,成为浮游植物相对丰度最高的类群(图 7)。广东省从 2002 年到 2004 年连续 3a 干旱,降水较少。而 2005 年则降雨丰富,6 月还发生了较大的洪水。降水引起了水体的明显扰动,而小环藻比较适应相对不稳定的水体环境^[17]。新丰江水库 2005 年浮游植物的丰度主要的增长是硅藻门的小环藻数量增多引起的,尤其是丰水期的 8 月份(图 8)。因此,2004 年和 2005 年降水差异造成的是造成两年浮游植物组成差异的最大因素。从年内看,2004 年的浮游植物经过了硅藻-绿藻优势(2 月份和 4 月份),到蓝藻-绿藻优势(6 月和 8 月份),到混合优势(10 月份)和金藻优势(12 月份)这样一个变化过程。2005 年没有这么明显的规律性变化,4 月、8 月和 12 月硅藻的相对丰度都较高,分别为 84%,69% 和 46%。但水温较高的 6 月和 10 月份蓝藻和绿藻也占据了较高的比例(图 7)。同样水温较高的 8 月份,硅藻比例明显高于去年同期,这可能与 6 月 23~27 日连续暴雨有关。不少文献也报道了流域的水文年际变化也可以引发浮游植物群落的优势种发生变化,例如:Gerald 和 Boavida 在对 Azibo 水库干、湿两年的浮游植物群落调查中就发现,降水较丰富的 2000 年冬季小环藻是优势种,而降水较少的 2001 年优势种为鱼腥藻^[28]。

3.3 新丰江水库浮游植物的粒径组成

浮游植物的生理和代谢过程直接与细胞大小有关,导致大小组成不同的浮游植物群落其生态功能不同。浮游植物的大小划分最初是在海洋生态系统中进行的,通常被划分为超微型(Pico, 0.2~3 μm)、微型(Nano, 3~20 μm)和小型浮游植物(Micro, 20~200 μm)^[29]。与海水中生物量谱分布相对较平均不同,在淡水水体中生物量谱的排列是参差不齐的^[2]。不同的生物量谱划分等级标准会导致不同的分析结果。在淡水生态系统中,浮游植物细胞直径大部分小于 100 μm,因此 Tadonlek 将 45 μm 以上的部分划为微型浮游植物^[14]。新丰江水库的浮游植物细胞比较小,pico 级的浮游植物难以在光学显微镜下进行到种的鉴定。综合考虑,我们将新丰江水库的浮游植物按照 2~20 μm、20~45 μm 和 45~200 μm 的标准分成 3 个等级。其中浮游动物主要利用 2~20 μm,45~200 μm 很难被滤食物性浮游动物所利用^[30]。

新丰江水库的小粒径的浮游植物占了绝大部分比例(图 10)。在温带的 Sep 水库,小粒径的浮游植物所面临的桡足类中型浮游动物的捕食压力比较大^[14]。但是新丰江水库,浮游动物的数量和生物量都很低^[30],对浮游植物的捕食压力要比温带低。作为贫营养型水库,新丰江水库的正磷酸盐浓度很低($<0.01\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),是浮游植物生长的限制因子。在寡营养的水域,小粒径浮游植物对正磷酸盐的吸收速率一般大于大粒径浮游植物,因此导致新丰江水库的浮游植物生物量谱主要由小粒径的浮游植物组成。Gaedke 发现在 Constance 湖中,随着营养盐浓度的增加,从春季到夏季浮游植物的大小也逐渐增加^[2]。与此类似,2004 年丰水期(6~8 月份)径流的增加带来流域中营养盐输入后,新丰江水库大粒径的甲藻生物量也增加了(图 10)。

粒径大于 45 μm 的浮游植物主要由二角多甲藻和飞燕角甲藻构成,甲藻的垂直迁移功能使其能在表层

水体营养盐缺乏的时候, 迁移至混合层获取营养盐, 因此能在贫营养的水体中占据优势。粒径大于 $45\ \mu\text{m}$ 的浮游植物在 2004 和 2005 年分布情况也不一样。2004 年 6~8 月新丰江水库降水较少, 水库在夏季高温作用下形成较为稳定的分层, 适合于稳定水体的大粒径甲藻具有较高的丰度。2005 年 6~8 月降水丰富, 适合静水环境的大型甲藻无法形成优势, 直到 10 月份降雨减少, 而水体分层仍然存在的情况下才有一个峰值。这就造成了两年浮游植物粒径分布的差异。

在寡营养的水域, 氨氮的浓度有时也会成为一些浮游植物种类的限制因子。在热带大型湖泊 Malawi 湖, 水体分层期的主要浮游植物优势种是能够固氮的鱼腥藻和拟柱孢藻, 它们占了浮游植物生物量的 50% 以上^[25]。对新丰江水库的甲藻和氨氮浓度进行回归, 存在显著的正相关关系: $Y = 7.0842X - 0.1711$ ($R = 0.8$, $n = 18$, $P < 0.01$)。这说明在贫营养水体的新丰江水库中, 氨氮可能是影响甲藻分布的重要因子。

4 结论

新丰江水库是个大型贫营养水库, 浮游植物的丰度、叶绿素含量和生物量均比较低。浮游植物组成有明显的季节性特征, 春季以硅藻、甲藻和绿藻为优势类群; 夏季以蓝藻、绿藻和硅藻为优势类群; 秋季蓝、绿藻减少而硅藻和甲藻增加。新丰江水库的浮游植物从丰度上看, 主要以小环藻、蓝纤维藻、小球藻和纤维藻等优势种为主, 而从生物量上看则以微小多甲藻为优势。

2004 年的浮游植物季节性变化明显, 有硅藻-绿藻优势(2 月和 4 月份), 到蓝藻-绿藻优势(6 月和 8 月份), 到混合优势(10 月份)和金藻优势(12 月份)这样一个变化过程。2005 年硅藻的相对丰度比 2004 年高出很多。两年浮游植物组成的差异与两年的降水不同有关。水动力学在丰水期(6~8 月份)对浮游植物结构造成较大影响, 增加了硅藻和绿藻的相对丰度。

从浮游植物生物量的粒径分布上看, 小于 $20\ \mu\text{m}$ 粒径的浮游植物最多, 其次是大于 $45\ \mu\text{m}$ 的浮游植物, 粒径处于 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 之间的浮游植物最少。水动力学条件和营养盐浓度是影响粒径分布的主要因子。

References:

- [1] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 535.
- [2] Gaedke U. The size distribution of plankton biomass in a large lake and its seasonal variability. Limnol. Oceanogr., 1992, 37:1202—1220.
- [3] Hein M, Riemann B. Nutrient limitation of phytoplankton biomass or growth rate: an experimental approach using marine enclosures. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1995, 188: 167—180.
- [4] Peters R H. The ecological implications of body size. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 329.
- [5] Han B P, Straskraba M. Size dependence of biomass spectra and population density I. The effects of size scales and size intervals. J theor Biol, 1998, 191:259—265.
- [6] Chen L F, Lin Q Q, Hu R, et al. Plankton community in a subtropical large reservoir (Xinfengjiang reservoir). Ecological Science, 2002, 21(2):104—107.
- [7] Zhong X Y, Yang H W, Chen L F, et al. Research on the eutrophication of Xinfengjiang reservoir. In: Han B P, et al, eds. Research on eutrophication status and comprehensive control countermeasures in middle and large reservoirs of Guangdong Province. Beijing: Science Press, 2003. 158—164.
- [8] Li F B, Wan H F, Li D Q, et al. The current eutrophication status of xinfengjiang Reservoir and Its comprehensive control countermeasure. Soil and Environmental Sciences, 1999, 8(1): 26—30.
- [9] Hu R, Lin Q Q, Wang Z H, et al. Phytoplankton composition and distribution in typical reservoirs of guangdong Province. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(11):1939—1944.
- [10] Bai Q S, Xu R L, Yu R Q, et al. Study on the zooplankton community structure in Xinfengjiang Reservoir, China. Supplement to the Journal of Sun Yatsen University, 1995, 1: 135—141.
- [11] Jin X C, Tu Q Y. Survey Criteria of Eutrophication for Lake. (2nd ed). Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [12] Lin S J, He L J, Huang P S, et al. Comparison and improvement on the extraction method for chlorophyll a in phytoplankton. Ecological Science, 2005, 24(1): 9—11.
- [13] Hillebrand H, Durselen C D, Kirschtel D, et al. Biovolume Calculation For Pelagic And Benthic Microalgae. Journal of Phycology, 1999, 35(2): 403—424.

- [14] Tadonleke R D, Thouvenot A, Gilbert D, *et al.* Size-fractionated phytoplankton and relationships with Metazooplankton in a Newly Flooded Reservoir, 2003, 88(6):614—634.
- [15] Popovskaya G I. Ecological monitoring of phytoplankton in Lake Baikal. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, 3:215—225.
- [16] Munawar M, Munawar I F. The seasonality of phytoplankton in the North American Great Lakes: a comparative synthesis. *Hydrobiologia*, 1986, 138: 85—115.
- [17] Lin Q Q, Hu R, Han B P. Effect of hydrodynamics on nutrient and phytoplankton distribution in Liuxihe Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11):2278—2284.
- [18] Nakano S I, Mitamura O, Sugiyama M, *et al.* Vertical planktonic structure in the central basin of Lake Baikal in summer 1999, with special reference to the microbial food web. *Limnology*, 2003, 4(3):155—160.
- [19] Lewis W M. Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2000, 5:35—48.
- [20] Reynolds C S. The ecology of freshwater ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [21] Elgavish G A, Halmann M, Berman T. Phosphorus utilization and storage in batch cultures of the dinoflagellate *Peridinium cinctum* f. *westii*. *Journal of Phycology*, 1980, 16: 626—633.
- [22] Serruya C, Berman T. Phosphorus, nitrogen and the growth of algae in Lake Kinneret. *Journal of Phycology*, 1975, 11:155—162.
- [23] Pollinger U. Freshwater armored dinoflagellates: Growth, reproduction strategies, and population dynamics. In: *Growth and reproduction strategies of freshwater phytoplankton*. Edited by Sandgren, C. D. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 441.
- [24] Carrick H J, Aldridge F J, Schelske C L. Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake. *Limnol. Oceanogr*, 1993, 38: 1179—1192.
- [25] Irvine K, Patterson G, Allison E H, Thompson A B, Menz A. The pelagic ecosystem of Lake Malawi, Africa: trophic structure and current threats. In: *The great lakes of the world (GLOW): food web, health and integrity*, (eds. M. Munawar and R. E. Hecky), Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 2001, 3—30.
- [26] Teubner K. Phytoplankton, pelagic community and nutrients in a deep oligotrophic alpine lake: ratios as sensitive indicators of the use of P-resources (DRP:DOP:PP and TN:TP:SRSi). *Water Resource*, 2003, 37(7): 1583—1592.
- [27] Flaim G, Rott E, Corradini F, *et al.* Long-term trends in species composition and diurnal migration of dinoflagellates in Lake Tovel (Trentino, Italy). *Hydrobiologia*, 2003, 502:357—366.
- [28] Geraldes A M, Boavida M J. Limnological variations of a reservoir during two successive years: One wet, another dry. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2004, 9:143—152.
- [29] Sieburth J M N, Smetacek V, Lenz J. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic components of the plankton and their relationship to plankton sizefractions. *Limnol Oceanogr*, 1978, 23: 1256—1263.
- [30] Zhao S Y, Han B P. Structural analysis of zooplankton community in a large deep oligotrophic reservoir-Xinfengjiang Reservoir, South China. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(3):305—314.

参考文献:

- [6] 陈丽芬,林秋奇,胡韧,等. 亚热带大型水库——新丰江水库的浮游生物群落特征. *生态科学*, 2002, 21(2): 104~107.
- [7] 钟秀英,杨浩文,陈丽芬,等. 新丰江水库富营养化现状研究. 见:韩博平等主编,广东省大中型水库富营养化现状与防治对策研究. 北京: 科学出版社, 2003. 158~164.
- [8] 李芳柏,万洪富,李定强,等. 新丰江水库富营养化现状及其综合防治对策. *土壤与环境*, 1999, 8(1): 26~30.
- [9] 胡韧,林秋奇,王朝晖,等. 广东省典型水库浮游植物组成与分布特征. *生态学报*, 2002, 22(11):1939~1944.
- [10] 白庆笙,徐润林,余日清,等. 新丰江水库浮游动物群落结构的研究. *中山大学学报论丛*, 1995, 1: 135~141.
- [11] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 第2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [12] 林少君,贺立静,黄沛生,等. 浮游植物中叶绿素 a 提取方法的比较与改进. *生态科学*, 2005, 24(1): 9~11.
- [17] 林秋奇,胡韧,韩博平. 流溪河水库水动力学对营养盐和浮游植物分布的影响. *生态学报*, 2003, 23(11): 2278~2284.
- [30] 赵帅营,韩博平. 大型深水贫营养水库——新丰江水库浮游动物群落分析. *湖泊科学*, 2007, 19(3):305~314.