

亚热带水库浮游植物群落季节 变化及其影响因素分析 —以汤溪水库为例

赵孟绪, 雷腊梅, 韩博平

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要: 通过调查汤溪水库 2003 年水文、水质和浮游植物数据, 分析了浮游植物群落季节变化的影响因素。结果表明, 汤溪水库浮游植物丰度与群落结构具有明显季节变化。丰水期浮游植物丰度明显高于枯水期, 并以 7 月份最高 ($>10^4$ cells ml^{-1})。全年中, 蓝藻(Cyanophyta)与硅藻(Bacillariophyta)比例变化较大, 二者呈相反的变化趋势。1 月份硅藻占较高比例(63.1%), 蓝藻较低($<20\%$); 3、5、7 月份蓝藻比例较高(分别为 45.6%、55.9%、87.7%), 而硅藻较低(30.1%、25.9%、1.1%); 11 月份硅藻与绿藻比例相当(各占 40%), 蓝藻低于 20%; 12 月份硅藻与蓝藻比例分别为 25.6% 与 38.2%。3 月份和丰水期浮游植物优势种主要为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、假鱼腥藻(*Pseudoanabaena*)和线形粘杆藻(*Gloeothece linearis*)等蓝藻种类, 枯水期的 1 月、11 月和 12 月主要以曲壳藻类(*Achnanthes*)、模糊直链藻(*Melosira ambigua*)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)和梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)等硅藻种类为优势种。枯水期营养盐可能对浮游植物生长形成限制, 但相关性分析表明, 营养盐并不是汤溪水库浮游植物群落季节变化的主要影响因素。汤溪水库全年水体较稳定, 在全年范围内水动力学对浮游植物群落季节变化没有明显影响, 但丰水期 5 月份至 7 月份优势种的变化可能主要受水动力学的影响。水温与蓝藻丰度呈显著正相关, 与硅藻呈显著负相关, 表明水温可能是引起汤溪水库浮游植物群落季节变化的主要因素。

关键词: 浮游植物; 季节变化; 影响因素; 汤溪水库; 广东

中图分类号: Q948.881

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2005)05-0386-07

Seasonal Change in Phytoplankton Communities in Tangxi Reservoir and the Effecting Factors

ZHAO Meng-xu, LEI La-mei, HAN Bo-ping

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

Abstract: Hydrological conditions, water quality and the distribution of phytoplankton assemblage were surveyed in Tangxi Reservoir, Yaoping County (Guangdong Province), in 2003, to analyze the effecting factors on seasonal changes in phytoplankton growth. Results demonstrated that phytoplankton abundance in flood season, with the highest in July ($>10^4$ cells ml^{-1}), was significantly higher than that in dry season. In January, Bacillariophyta was the dominant alga (63.1%), while Cyanophyta was less than 20%. In March, May and July, Cyanophyta was the dominant one, with high proportions of 45.6%, 55.9% and 87.7%, respectively, whereas the proportions for Bacillariophyta decreased to 30.1%, 25.9%, and 1.1%, respectively. In November, proportions for Bacillariophyta and Chlorophyta were equivalent, 40% each, and the Cyanophyta composed below 20%. In December, Bacillariophyta made up 25.6% and Cyanophyta 38.2%. In March, May and July, dominant species of Cyanophyta

收稿日期: 2004-11-05 接受日期: 2005-05-20

基金项目: 教育部优秀青年教师资助计划; 国家自然科学基金项目(39900022); 广东省水文局重点项目(SWZ20031)资助

were *Microcystis aeruginosa*, *Pseudoanabaena*, and *Gloeothece linearis*. In dry January, November and December, species of Bacillariophyta were dominated by *Achnanthes* sp., *Melosira ambigua*, *Melosira granulata* and *Cyclotella meneghiniana*. No close correlation was found between nutrient concentrations in reservoir and seasonal change of phytoplankton community throughout the year. In flood season (from May to July), obvious variation of dominant species seemed influenced mainly by temporal change of hydrodynamics. Water temperature was positively related to the abundance of Cyanophyta, but negatively to that of Bacillariophyta. It is indicated that water temperature seemed to be the main factor affecting seasonal change of phytoplankton community in Tangxi reservoir.

Key words: Phytoplankton; Seasonal change; Effecting factors; Tangxi Reservoir; Guangdong

浮游植物群落是水生态系统的重要组成部分, 浮游植物种类组成与丰度的季节变化是浮游植物群落动态的重要特征。温带和寒带地区, 年降水量少, 丰水期与枯水期降水量差相对热带地区小, 温度和光照是引起浮游植物季节变化的主要非生物因子^[1,2]。在热带与亚热带地区, 温度与光照季节性变化不如温带地区显著, 水动力学的季节变化通常引起浮游植物群落季节变化^[3-5]。

汤溪水库位于广东省饶平县境内的黄冈河中游, 位于东经 116°35', 北纬 23°28'–24°14' 之间, 属亚热带水库, 是饶平县生活用水和工农业供水的主要来源。汤溪水库集水面积 667 km², 总库容 3.81 × 10⁸ m³, 最大水深 37 m, 供水人口约 67 万人。自 1997 年来, 汤溪水库多次发生大规模蓝藻水华^[6]。该水库在 2003 年 7 月份发生大规模的蓝藻水华。本文考察了汤溪水库 2003 年浮游植物群落的季节变化特征, 分析了水温、水动力学及营养盐等因素对这种变化的影响, 为研究浮游植物种群动力学和季节变化机制提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 采样点设置与采样时间

根据汤溪水库由上游两河进水的特征, 共设 6 个采样点: 溪头入水口(S1)、溪头侧(S2)、新桥入水口(S3)、新桥侧(S4)、汇水处(S5)和大坝(S6)。具体分布见图 1。

2003 年 1 月、3 月、5 月、7 月、9 月、11 月、12 月对采样点进行采样, 其中 9 月 2 日采样恰逢第十三号台风在广东省沿海登陆, 未能完成。

1.2 采样与分析方法

用 YSI85 型水质分析仪现场测定水温, 用透明度盘测定透明度。自水面 0.5 m 深处采集水样, 带回

实验室按标准方法测总磷(Total phosphorus, TP)、总氮(Total nitrogen, TN)等化学指标。浮游植物定性采样采用网孔直径为 64 μm 的 25 号筛绢网, 在水体水平与垂直方向多次拖网, 所获水样加福尔马林液固定。浮游植物定量采样在表层 0.5 m 深处采水样 1 L, 加福尔马林液固定, 沉淀浓缩后计数。2003 年汤溪水库的降水、水位及入库流量数来源于汕头水文局和汤溪水库水文站。数据的相关性分析采用 SPSS11.0 工具计算。

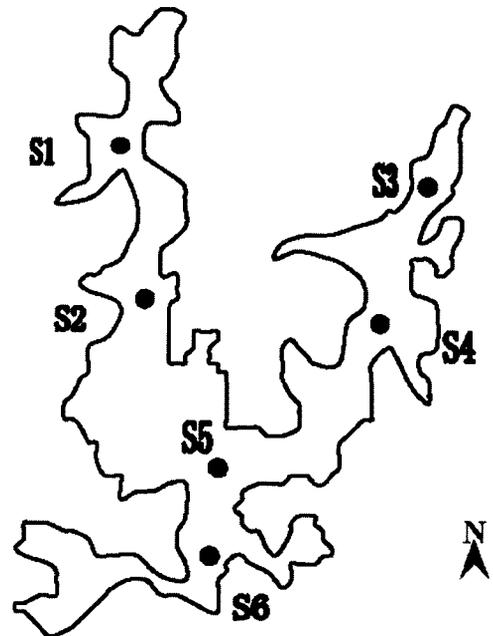


图 1 汤溪水库采样点

Fig. 1 Sampling sites in Tangxi Reservoir

2 结果和分析

2.1 水库水文特征

2003 年总降水量为 1 345.5 mm, 仅为广东省 10 年来年平均降水量的 76.0%, 属枯水年。4–9 月为丰

水期,降水量占全年的 95.6%,但丰水期 7 月份降水量仅为 64 mm; 最高月降水量出现在 9 月份,达 295.5 mm; 12 月份没有降水(图 2)。

水库理论水滞留时间(water retention time)为水库库容与单位时间出库流量之比,水滞留时间越

长水体稳定性越高。汤溪水库全年平均理论水滞留时间为 247 d; 各月份理论水滞留时间为 113–973 d, 丰水期理论水滞留时间短于枯水期,7 月份理论水滞留时间在丰水期月份中最高,达到 322 d (图 2)。

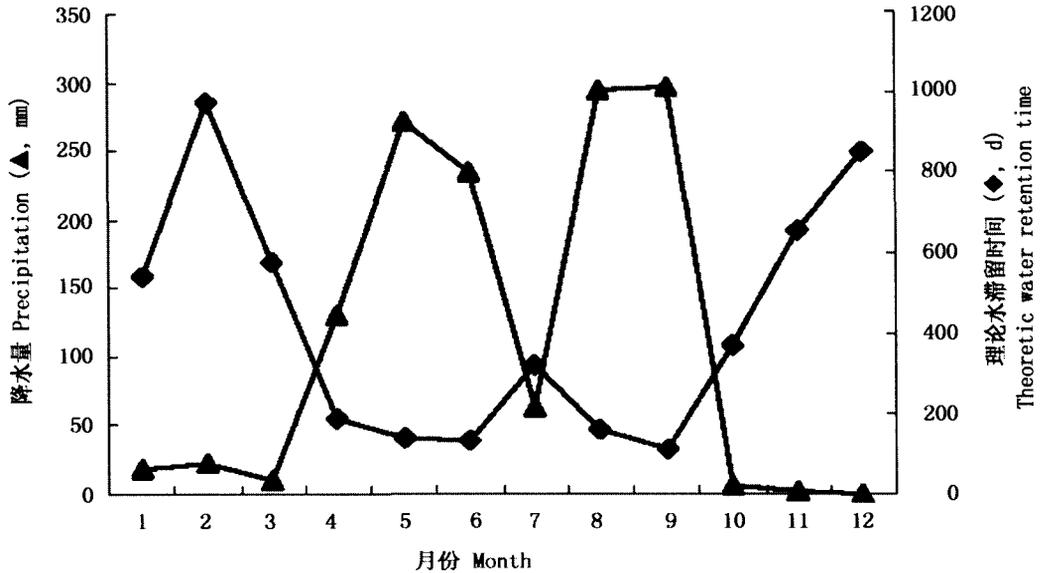


图 2 2003 年汤溪水库降水量与理论水滞留时间

Fig. 2 Precipitation and theoretical water retention time in Tangxi Reservoir in 2003

2003 年水位变幅为 43.82–50.57 m, 最大落差 6.75 m, 最低与最高水位分别出现于 4 月 15 日和 9 月 26 日; 各次采样前 7 日内的水位变化不大, 水位变化最大值出现在 5 月份, 为 0.52 m, 最小值为 1 月份的 0.06 m。

水库表层水温呈单峰变化, 从 1 月份到 7 月份

水温值升高, 7 月份到 12 月份稳定下降。水温最高月份(7 月)各采样点平均值为 33.9℃, 最低月份(1 月)平均值为 16.6℃。3 月份, 水体即开始发生明显热分层现象, 分层现象出现在包括河流区在内的整个库区(图 3)。

2.2 水库水质动态

采样时间 TP 浓度为 6.0–400.0 μg L⁻¹。5 月份明显高于其它采样月份, 1、3、7、11、12 月份 TP 浓度为 6.0–47.0 μg L⁻¹ (表 1)。TN 浓度为 550–1 700 μg L⁻¹, 丰水期(5、7 月)高于枯水期(1、3、11、12 月), 5 月份各采样点 TN 均超过 1 100 μg L⁻¹ (表 1)。

2.3 浮游植物动态

调查期间, 共鉴定出浮游植物 94 种, 其中大部分为绿藻 (Chlorophyta)(56 种), 其次为蓝藻 (Cyanophyta)(17 种)、硅藻(Bacillariophyta)(13 种)、甲藻(Pyrrophyta)(3 种)、裸藻(Euglenophyta)(3 种)、金藻(Chrysophyta)(1 种)、隐藻(Cryptophyta)(1 种)。

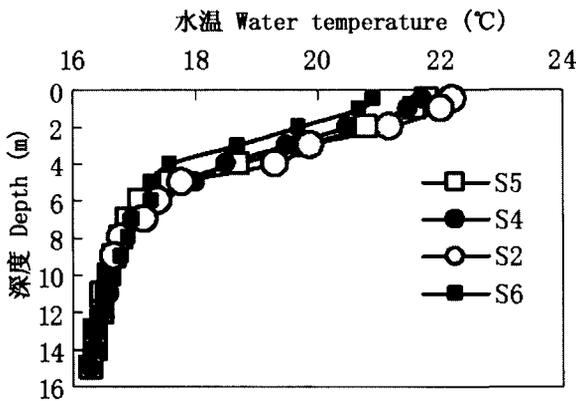


图 3 2003 年 3 月份汤溪水库水温垂直分布

Fig. 3 Thermal stratification of the water column in Tangxi Reservoir in March, 2003

表 1 采样时间的 TP、TN 动态

Table 1 Changes in concentrations of total phosphorus (TP) and total nitrogen (TN) in sampling months

月份 Month	TP ($\mu\text{g L}^{-1}$)						TN ($\mu\text{g L}^{-1}$)					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Jan.	18.5	10.9	10.9	10.9	18.5	7.1	950	900	900	910	1030	850
Mar.	46.9	32.2	9	6.4	10.1	6	1300	680	740	680	940	/
May	58.4	120.7	400	148.3	130	48.5	1430	1240	1190	1240	1700	1140
Jul.	23.7	29.8	31.4	29.8	23.7	31.4	820	1130	770	1140	920	720
Nov.	21	26.6	16.6	21	16.6	18.6	610	680	580	670	550	580
Dec.	21.7	15.8	23.7	18.5	28	12.6	700	590	860	660	690	1000

图 4 所示,各采样月份浮游植物丰度为 489–37 845 cells ml⁻¹, 最低值出现在 11 月份新桥入水口,最高值出现在 7 月份的汇水处。丰水期(5 月、7 月)浮游植物丰度明显高于枯水期。各采样月份浮游植物丰度依次为 7 月 > 5 月 > 3 月 > 1 月 > 12 月 > 11 月,7 月份各采样点均值最高,达到 24 782 cells ml⁻¹,为其它月份的 3.2–28.9 倍。

浮游植物优势种季节变化明显。1 月份优势种主要为模糊直链藻(*Melosira ambigua*) (其丰度占浮游植物总丰度的 20.4%)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)(13.9%)和梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)(8.3%)。3 月份优势种主要为模糊直链藻(11.1%)、假鱼腥藻(*Pseudoanabaena*) (10.3%)、梅尼小环藻(6.8%)、铜绿微囊藻(*Microcystis*

aeruginosa) (6.6%)、粘球藻(*Gloeocapsa* sp.)(6.6%)、蓝纤维藻(*Dactylococcopsis* sp.)(6.3%)和水华束丝藻(*Aphanizomenon flo-aquae*)(6.1%)。5 月份主要为假鱼腥藻(35.4%)和曲壳藻(*Achnanthes* sp.)(21.9%)。7 月份主要优势种为铜绿微囊藻(48.9%)和线形粘杆藻(*Gloeotheca linearis*)(27.1%)。11 月份优势种为曲壳藻类(*Achnanthes*)(11.1%)、梅尼小环藻(9.1%)和模糊直链藻(6.0%)。12 月份优势种为模糊直链藻(11.1%)、铜绿微囊藻(10.7%)、蹄形藻(*Kirchneriella lunaris*) (10.7%)、梅尼小环藻(9.0%)和颗粒直链藻(8.1%)。总体上看,枯水期的 1 月、11 月和 12 月优势种多为硅藻种类,3 月份和丰水期优势种主要为蓝藻种类。

汤溪水库大部分水体分布在溪头河流区和下

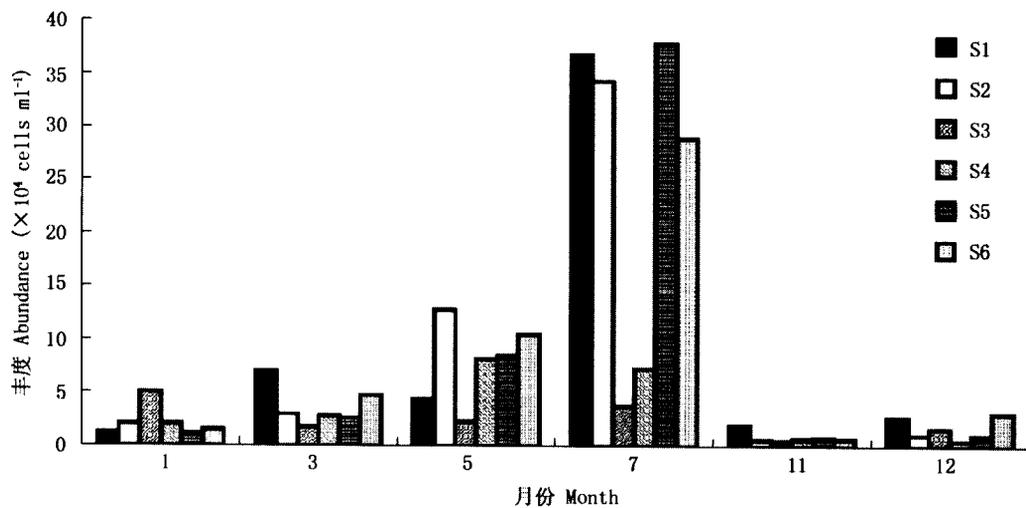


图 4 汤溪水库 2003 年浮游植物丰度时空分布

Fig. 4 Temporal and spatial distribution of phytoplankton abundance in Tangxi Reservoir in 2003

游湖泊区。就分布在上述两个区域 4 个采样点的蓝藻、硅藻比例来看,硅藻在 1 月和 11 月份占较高的比例 (63.1%、39.1%),此时蓝藻比例较低 (<20%);蓝藻在 3 月、5 月和 7 月份占较高比例 (45.6%、55.9%、87.7%),而硅藻较低 (30.1%、25.9%、1.1%);12 月份硅藻与蓝藻比例分别为 25.6%与 38.2%,相差不显著。绿藻比例除在 11 月份达到 40.8%外,其余时间多处于较低水平 (<30%),且变化幅度较小。

可见,汤溪水库浮游植物群落结构具有明显季节变化,且主要反映在蓝藻丰度与硅藻丰度比例在全年中的变化,即蓝藻比例与硅藻比例的季节变化幅度大,且二者变化趋势相反。

2.4 相关性分析

经回归分析,溪头入水口、溪头侧、汇水处和大坝的蓝藻丰度与水温呈正相关关系 ($R^2 = 0.75, 0.50, 0.71, 0.59$),其中溪头入水口与汇水处的蓝藻丰度与水温的相关关系具有显著性 ($P < 0.05$) (图 5)。

汇水处、溪头入水口的浮游植物丰度与水温具有显著正相关关系 ($P < 0.05$) (图 6),溪头侧及大坝浮游植物丰度与水温相关性不显著,但相关系数仍较高 ($R^2 = 0.58; R^2 = 0.49$)。

对所有采样点进行相关性分析的结果显示,水温与浮游植物丰度具有显著相关性 ($R^2 = 0.49, P < 0.01, n = 36$),且水温与蓝藻丰度也具有显著相

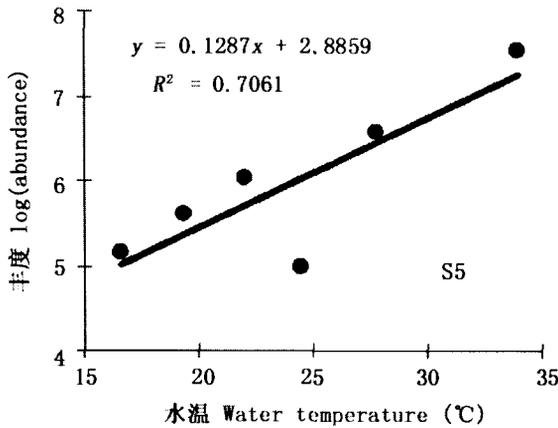


图 5 蓝藻丰度与水温的关系

Fig. 5 Correlation between Cyanophyta abundance and water temperature

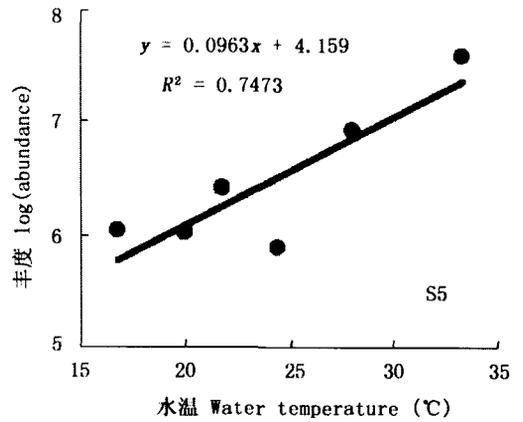


图 6 浮游植物丰度与水温的关系

Fig. 6 Correlation between phytoplankton abundance and water temperature

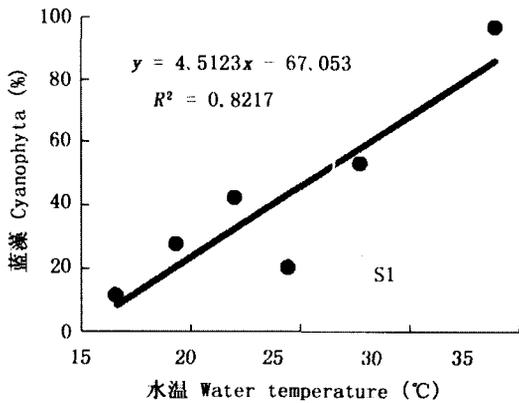


图 7 蓝藻比例与水温的关系

Fig. 7 Correlation between Cyanophyta proportion and water temperature

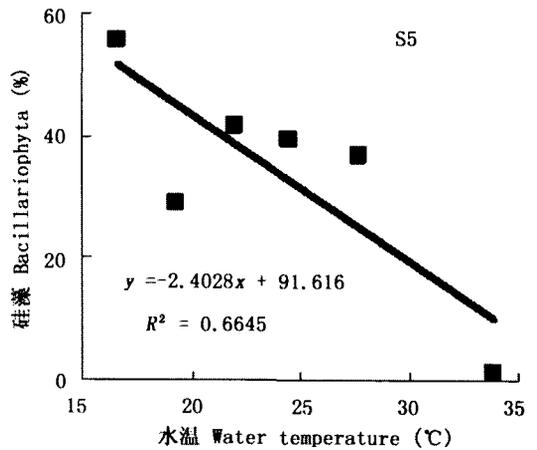


图 8 硅藻比例与水温的关系

Fig. 8 Correlation between Bacillariophyta proportion and water temperature

关性 ($R^2 = 0.42, P < 0.01, n = 36$)。

溪头入水口水温与蓝藻比例呈显著正相关关系 ($R^2 = 0.82, P < 0.05$) (图 7), 溪头侧、汇水处、大坝处的水温与蓝藻比例的关系虽不显著, 但也呈明显的正相关关系 ($S2, R^2 = 0.57; S5, R^2 = 0.63; S6, R^2 = 0.59$)。与蓝藻相反, 硅藻比例随水温的升高而降低, 汇水处硅藻比例与水温呈显著负相关关系 ($P < 0.05$) (图 8), 其它多数采样点也呈不同程度的负相关关系 ($S1, R^2 = 0.60; S2, R^2 = 0.65; S6, R^2 = 0.36$)。除了 11 月份外, 汤溪水库绿藻比例在全年都处于相对较低的水平, 随水温的变化不明显。

3 讨论

3.1 水动力学对浮游植物季节变化的影响

稳定水体适合蓝藻形成竞争优势, 而硅藻由于在稳定水体中具有较高的沉降损失, 不易形成积累。通过水体混合的方法能降低蓝藻优势度, 从而改变浮游植物群落的种类组成^[7-10], 因此, 水动力学的季节变化能影响浮游植物群落季节变化。

汤溪水库 2003 年降水量偏小, 较低的降水量导致全年理论水滞留时间达 247 d, 9 月份的最短, 为 113.4 d。水滞留时间大于 100 d 的水体极易发生明显分层^[11], 汤溪水库水体在全年中的大部分时间 (3-11 月) 处于热分层状态。又由于水库上游河流区较深 (>10 m), 除大坝与库中外, 分层现象也在河流区出现 (图 3)。可见, 汤溪水库全年当中整体上具有较强水体稳定性。

从浮游植物对水体稳定性的响应来看, 溪头入水口、溪头侧、汇水处和大坝的浮游植物丰度及优势种相近, 蓝藻、硅藻比例的季节变化趋势相似。这反映出河流区和湖泊区水体流速差异对浮游植物群落空间分布的影响并不显著, 即水动力学对汤溪水库浮游植物生长影响不大。

不稳定的水体中一般难以形成单一优势种群, 生物多样性较高; 水库水体稳定性增加, 容易导致浮游植物多样性降低^[12], 水位波动较大时浮游植物多样性相对增加^[9]。广东省流溪河水库与汤溪水库所处纬度相近, 流溪河水库在 2001 年降水量为 2 550 mm, 对其 2001 年浮游植物多样性与水位波动进行分析发现, 二者具有显著正相关性 ($R^2 = 0.45$)^[9]。汤溪水库 2003 年降水量仅为流溪河水库 2001 年降水量的 53.0%, 其浮游植物 Shanon-

Wiener 指数为 0.49-1.30。就枯水期与丰水期比较看, 水位波动较大的 5 月与 7 月份浮游植物多样性低于水位波动较小的枯水期, 在全年范围内多样性变化与水位波动并不呈正相关关系。就丰水期的 5 月份与 7 月份比较来看, 5 月份蓝藻优势种主要为假鱼腥藻, 7 月份主要为微囊藻。这种差异可能是由于降水量的变化而引起: 7 月份由于降水量反常偏低 (64 mm), 水体稳定性强, 适合微囊藻的悬浮机制这一竞争优势的发挥, 从而形成微囊藻水华; 5 月份水温与营养盐虽然均较高, 但由于降水量大 (271.5 mm), 水体稳定性弱, 蓝藻优势种为没有悬浮机制的假鱼腥藻。可见, 水动力学不是汤溪水库浮游植物群落全年变化的主要影响因素, 但对丰水期浮游植物优势种的分布具有一定影响。

3.2 氮、磷元素对浮游植物季节变化的影响

氮、磷元素长期以来被认为是与浮游植物生长密切相关的营养物质, 其中磷被广泛认为是淡水浮游植物生长的限制因子。根据“最小限制因子”定义, 营养盐浓度相对浮游植物生长不足时才成为限制因子。在 7 月份发生蓝藻水华时, 汤溪水库 TP 浓度超过 $20 \mu\text{g L}^{-1}$, TN 浓度超过 $700 \mu\text{g L}^{-1}$, 说明 TP、TN 浓度分别达到 $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 与 $700 \mu\text{g L}^{-1}$ 时已可供浮游植物大量生长。6 次采样中, 除 1 月份外, 其他采样时间的 TP、TN 浓度均出现高于 7 月份的情况, 但相应采样点的浮游植物丰度远低于 7 月份。因此, 虽然少数月份 (特别是 1 月份) 部分采样点的营养盐能对浮游植物生长形成限制, 但营养盐并非汤溪水库浮游植物季节变化的主要影响因素。

3.3 水温对浮游植物季节变化的影响

由于蓝藻的 DNA 与光合作用系统的热稳定性等形成了高温适应机制^[13], 蓝藻对高温的耐受能力强于其它藻类。相对于其它浮游植物种类, 蓝藻生长需要更高的温度, 其最适温度为 $25-35^\circ\text{C}$ ^[14-16], 15°C 以下其生长会受到限制^[17], 难以成为优势种。汤溪水库全年水温 $16-35^\circ\text{C}$ ($>15^\circ\text{C}$), 均适合蓝藻生长。1 月份水温 16°C 左右, 此时蓝藻竞争优势低, 而硅藻丰度与比例较高; 5 月份与 7 月份水温分别为 27.8°C 与 33.9°C , 此时蓝藻在汤溪水库具有较高的丰度。在 7 月份, 由于具备了充足的营养盐和适合蓝藻水华发生的水温条件, 以及该月份反常偏低的降水量所导致的较强的水体稳定性, 蓝藻水华在

该月份发生。

蓝藻丰度、浮游植物丰度、蓝藻比例及硅藻比例与水温之间较高的相关性表明,水温对汤溪水库浮游植物群落季节变化影响较大(图 5-8)。

对所有采样点的浮游植物丰度与水温进行相关性分析的结果显示,相对于水动力学,水温是影响浮游植物丰度季节变化的主要因素。

综上分析,营养盐与水动力学对汤溪水库浮游植物季节变化影响较小。在枯水期,较低的营养盐浓度可能对浮游植物的生长形成限制;丰水期 5 月份至 7 月份优势种的变化可能主要受水动力学的影响。水温在全年中与浮游植物关系密切,是影响汤溪水库浮游植物群落季节变化的主要因素,且水温主要通过对蓝藻与硅藻种群增长的控制来实现对浮游植物群落变化的影响。

参考文献

- [1] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984. 277-328.
- [2] Richardson T L, Gibson C E, Heaney S I. Temperature, growth and seasonal succession of phytoplankton in Lake Baikal, Seberia [J]. Freshwater Biol, 2000, 44:431-440.
- [3] Nogueira M G. Phytoplankton composition, dominance and abundance as indicators of environmental compartmentalization in Jurumirim Reservoir (Parapanema River), Sao Paulo, Brazil [J]. Hydrobiologia, 2000, 431:115-128.
- [4] Cleber C F, Giani A. Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir [J]. Hydrobiologia, 2001, 445:165-174.
- [5] 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)
- [6] Zhao S Y(赵帅莹), Lin Q Q(林秋奇), Hu R(胡韧), et al. Current eutrophication in Tangxi Reservoir of Guangdong Province [J]. Ecol Sci(生态科学), 2002, 21(4):316-319.(in Chinese)
- [7] Imteaz M A, Asaeda T. Artificial mixing of lake water by bubble plume and effects of bubbling operations on algal bloom [J]. Water Res, 2000, 34(6):1919-1929.
- [8] An K G, Jones J R. Factor regulating bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon [J]. Hydrobiologia, 2000, 432(1-3):37-48.
- [9] Beyruth Z. Periodic disturbances, trophic gradient and phytoplankton characteristics related to cyanobacterial growth in Buarapiranga Reservoir, São Paulo State, Brazil [J]. Hydrobiologia, 2000, 424:51-65.
- [10] Jungo E, Visser P M, Stroom J, et al. Artificial mixing to reduce growth of the blue-green alga *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, Amsterdam: an evaluation of 7 years of experience [J]. Water Sci Techn: Water Supply, 2001, 1(1):17-23.
- [11] Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. State of the Art of Reservoir Limnology and Water Quality Management [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993. 213-288.
- [12] Connel J. Diversity in tropical rain forest and coral reefs [J]. Science, 1978, 199:1304-1310.
- [13] Zheng W F(郑维发), Zeng Z Q(曾昭琪). High temperature adaptation of fresh water cyanobacterium [J]. J Lake Sci(湖泊科学), 1994, 4:356-363.(in Chinese)
- [14] Konopka A, Brock T D. Effect of temperature on blue-green algae (Cyanobacteria) in Lake Mendota [J]. Appl Environ Microbiol, 1978, 36(4):572-576.
- [15] Lin Y X(林毅雄), Han M(韩梅). The study growth factor of the *Microcystis aeruginosa* Kütz during eutrophication of Dianchi Lake [J]. Adv Environ Sci(环境科学进展), 1998, 6(3):82-87.(in Chinese)
- [16] Nalewajko C, Murphy T P. 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, 2:45-48.
- [17] Robarts R D, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria [J]. Mar Freshwater Res, 1987, 21:391-399.