

汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析

赵孟绪, 韩博平*

(暨南大学水生生物研究所, 广州 510632)

摘要: 汤溪水库位于北回归线附近的热带地区, 是广东省东部的大型供水水库。1997 年来该水库频繁在 10~11 月份发生蓝藻水华, 但在 2003 年, 蓝藻水华提前在 7 月份发生。对影响蓝藻水华发生的主要因子进行了分析, 探讨了 2003 年蓝藻水华提前发生的原因。汤溪水库的营养物质主要来源于流域降水形成的地表径流, 其中 5 月份降水多, 水库营养盐输入量大; 该水库浮游植物生长基本不受 N、P 营养盐限制, 具备蓝藻水华发生的 N、P 营养盐基础。在 4~11 月份, 水库表层水温为 25~35℃, 适合蓝藻水华的发生, 水温与蓝藻、微囊藻的丰度具有显著相关性, 较高的水温是蓝藻水华发生重要条件之一。在具备充分营养盐与适合水温条件下, 水体稳定性是控制汤溪水库蓝藻水华发生时间的关键因子。2003 年全年的降水仅为多年平均值的 76.8%, 且汛期 7 月份降水量只有 64mm, 远小于往年的同期降水量, 汛期反常的水体稳定性导致了蓝藻水华的提前发生。

关键词: 水华; 水温; 水体稳定性; 汤溪水库

文章编号: 1000-0933(2005)07-1554-08 **中图分类号:** Q143, Q178 **文献标识码:** A

Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China)

ZHAO Meng-Xu, HAN Bo-Ping* (*Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou, 510632, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1554~1561.

Abstract: Tangxi Reservoir, located in the east of Guangdong Province, China, near latitude 23.5 degrees north, is an important drinking-water reservoir for local people. From latter 1990's, Tangxi reservoir has been in an unhealthy eutrophic state, and cyanobacteria bloom was frequently observed. As climatic characteristics in the latitude Tangxi reservoir located, suitable water temperature for the occurrence of cyanobacteria bloom (25~35℃) was always observed from April to November, and generally, flood season, during which weak water column stability due to high precipitation did not offer the occurrence of cyanobacteria bloom suitable physical condition, occurred from April to September. Thus, controlled by both water temperature and precipitation, cyanobacteria bloom in Tangxi reservoir was most likely to occur in October or November. From 1997 to 2002, cyanobacteria blooms in Tangxi reservoir occurred during every October or November. While in 2003, cyanobacteria bloom was observed in July. In this study, water pH value, nutrients, water temperature and water column stability were discussed as important factors affecting cyanobacteria bloom, and the critical factor that cause the earlier cyanobacteria bloom occurrence was determined. Results demonstrated that, pH values through 2003 ranged from 8.4 to 9.5, and these values may favor the competition advantage of cyanobacteria. In the period of mass cyanobacteria bloom, significant positive correlation between pH values and the cyanobacteria abundances indicated that high pH values and the growth of Cyanobacteria may promote mutually. Nutrients in upper layer of the water column, mainly loaded by land runoff, had close positive correlation with precipitation. N and P concentrations in the reservoir were heavy enough for occurrence of

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

收稿日期: 2004-11-10; **修订日期:** 2005-04-10

作者简介: 赵孟绪(1978~), 男, 山东招远人, 博士生, 主要从事水库生态学研究。E-mail: szhaomx@jnu.edu.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: tbphan@jnu.edu.cn

致谢: 本文的野外与实验室测定工作得了汕头水文局支持和帮助, 暨南大学水生生物研究所相关老师与同学也参与了野外工作, 在此一并致谢

Foundation item: The Chinese Education Ministry Grant, National Natural Science Foundation of China (No. 39900022) and National Science Foundation of Hydrology Department of Guangdong Province (No. SWZ20031)

Received date: 2004-11-10; **Accepted date:** 2005-04-10

Biography: ZHAO Meng-Xu, Ph. D. candidate, mainly engaged in reservoir limnology. E-mail: szhaomx@jnu.edu.cn

cyanobacteria bloom. Up-layer water temperature, ranging from 16°C to 35°C through the study period, had significant correlation with abundance of phytoplankton or cyanobacteria, indicating that water temperature was an important factor affecting cyanobacteria bloom. Compared to the past three years (from 2000 to 2002), total annual precipitation in 2003, which was only 65.0% of that for 2000, was much lighter. Thermal stratification of the water column was found from March to November due to light annual precipitation and high water temperature through the year. More abnormally, precipitation distributed in July 2003 was only 64mm, which was only 18.6% of that for the same periods in 2000 and close to values for October or November in the past three years. Light precipitation in July 2003 led to strong water column stability and long water retention time. Based on adequate N, P and suitable water temperature in the flood season, strong water column stability induced by abnormally light precipitation in July 2003 may be the cause of earlier occurrence of cyanobacteria bloom in the Tangxi Reservoir.

Key words: bloom; water temperature; water column stability; Tangxi Reservoir

目前,蓝藻水华已成为世界范围的环境灾害。国际上关于蓝藻水华发生的机制已开展不少研究,这些研究主要集中在影响水华发生的藻类生物学和种群动力学两方面因素,分别强调水华蓝藻在富营养化条件下获得优势的内因和外因。多数研究认为影响水华发生的主要内、外因子有营养盐(主要为 N、P)、水温、水体稳定性、pH 及蓝藻悬浮机制等^[1]。

汤溪水库位于粤东饶平县黄冈河中游,建于 1964 年,集水面积 667km²,总库容 3.81×10⁸m³,最大水深 37m,供水人口约 67 万人,是饶平县生活用水和工农业供水的主要来源。在 1997~2002 年期间,该水库多次在枯水期的 10~11 月份发生大规模蓝藻水华,但在 2003 年蓝藻水华提前在 7 月份发生,在水华发生时,整个库区水面漂浮微囊藻群体形成约 2~3mm 的薄层,并散发出异味。曾在 2000 年对汤溪水库进行过富营养化调查^[2],但由于数据有限,未能对水华发生的原因进行分析。本文通过 2003 年对汤溪水库的浮游植物及主要水质指标的监测,结合气象与水文数据探讨了 2003 年水华提前发生的原因。

1 材料与方

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点,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),大坝(S6)。采样点具体分布见图 1。

于 2003 年 1、3、5、7、9、11、12 月份进行采样,其中 9 月 2 日采样恰逢第 13 号台风在广东省沿海登陆,未能完成。

1.2 采样与分析方法

汤溪水库上游入库水流温度高于水库表层水温(图 4),入库水流所携带营养盐主要输入水库表层,且蓝藻种类主要生活在表层水体,因此,与水质、浮游植物相关的采样在水面 0.5m 深处进行。

温度用 YSI85 型水质分析仪现场测定,用透明度盘测定透明度。采集水样,带回实验室按标准方法测 TP、PO₄-P、TN、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N 等化学指标。采水样 500~1 000 ml,当场用微孔滤膜过滤,放入冰壶保存,带回实验室测叶绿素浓度。浮游植物定性采样采用网孔直径为 64μm 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,采水样 1L,加福尔马林液固定,于实验室沉淀浓缩并计数;由于 7 月份微囊藻群体较多,故采取了估算群体细胞数目平均值,以均值乘群体个数的方法计算微囊藻丰度。2003 年的降水、水位、入库流量数据来源于汕头水文局以及汤溪水库水文站。

2 结果与分析

2.1 水库水文特征

2003 年总降水量为 1345.5mm,为当地多年平均降水量的 76.8%,属典型的枯水年。受亚热带海洋性季风影响,4~9 月份为丰水期,降水量占全年 95.6%,但出现丰水期 7 月份降水量仅为 64mm 的反常现象;最高月降水量为 9 月份的 295.5mm,12

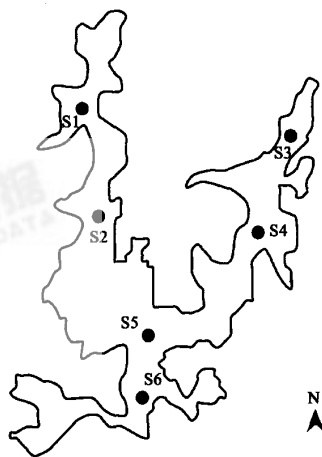


图 1 汤溪水库采样点

Fig. 1 Sampling sites in Tangxi Reservoir

S1: 溪头入水口 Xitou entrance; S2: 溪头侧 Xitou riverine zone; S3: 新桥入水口 Xinqiao entrance; S4: 新桥侧 Xinqiao riverine zone; S5: 汇水处 Middle site; S6 大坝 Dam

月份没有降水(图 2a)。

水库水滞留时间(water retention time)的理论值为水库库容与出库流量的比值。汤溪水库全年平均水滞留时间理论值为 247d;各月份水滞留时间理论值为 113~973d,丰水期的水滞留时间短于枯水期,7 月份由于降水量少,其水滞留时间理论值在丰水期中最高,达 322d(图 2b)。

2003 年库容变化范围为 $1.048\times10^8\sim1.938\times10^8\text{m}^3$,丰水期的 5、9 月份以及 10 月份的库容较大,7、8 两个月份由于 7 月份降水量低而库容较小。

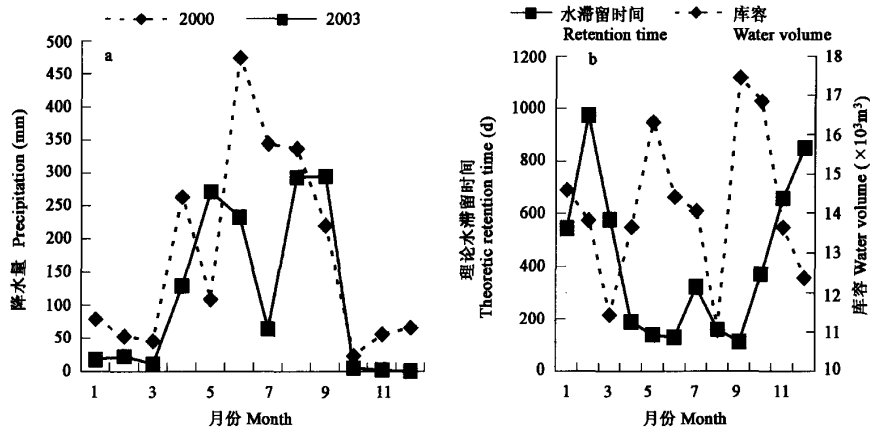


图 2 2000 年与 2003 年汤溪水库降水量分布 (a) 及 2003 年水滞留时间与库容动态 (b)

Fig. 2 Variation of precipitation in 2000 and 2003 (a) and variation of water retention time and water volume in 2003 (b)

采样月份水库表层水温呈单峰变化。水温最高月份(7 月份)各采样点平均值为 33.9°C ,最低月份(1 月份)各采样点平均水温为 16.6°C (图 3)。3 月份始,水体发生明显热分层现象(图 4)。

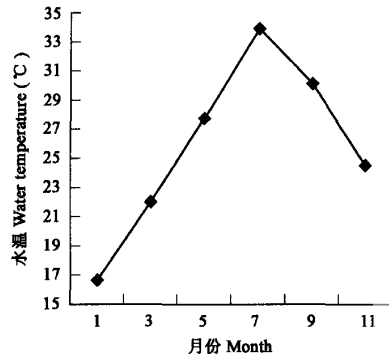


图 3 采样时期水库水温变化

Fig. 3 Variation of water temperature

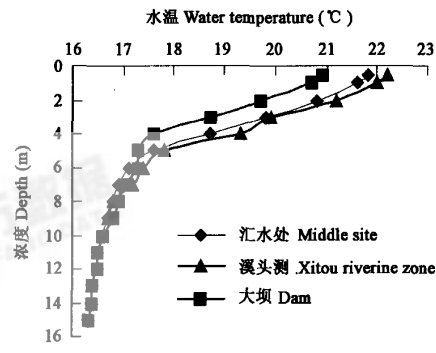


图 4 3 月份汤溪水库水温垂直分布

Fig. 4 Thermal stratification in March

2.2 水库水质动态

图 5 所示,6 次采样中 TP 浓度变幅为 $6.0\sim400.0\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,5 月份明显高于其它采样月份。6 次采样中 TN 浓度为 $550\sim1700\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,具有较明显的季节变化,丰水期(5、7 月份)高于枯水期(1、3、11、12 月份),5 月份各采样点 TN 超过 $1100\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度季节变化明显,丰水期多处于 $10.0\sim40.0\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,枯水期多数情况下 $<10\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 DIN 浓度在 5 月份最高,各采样点为 $1000\sim1100\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;1、3、11、12 月份多为 $450\sim600\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;7 月份除新桥入水口为 $407\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其它采样点均低于 $300\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

各次采样期间水体 pH 较高,大坝处均超过 8.40,同一采样月份的各采样点空间差异不大,7 月份大坝 pH 值达到了 9.45。

2.3 浮游植物动态

共鉴定出浮游植物 94 种,其中大部分为绿藻(56 种),其次为蓝藻(17 种)、硅藻(13 种)、甲藻(3 种)、裸藻(3 种)、金藻(1 种)、隐藻(1 种)。

全年中,浮游植物丰度为 $489\sim37845\text{ cells}\cdot\text{ml}^{-1}$,丰水期(5、7 月份)明显高于枯水期。各采样月份依次为 7 月 $>$ 5 月 $>$ 3 月 $>$ 1 月 $>$ 12 月 $>$ 11 月,7 月份各采样点均值为 $24.78\times10^3\text{ cells}\cdot\text{ml}^{-1}$,为其它月份 3.2~28.9 倍。

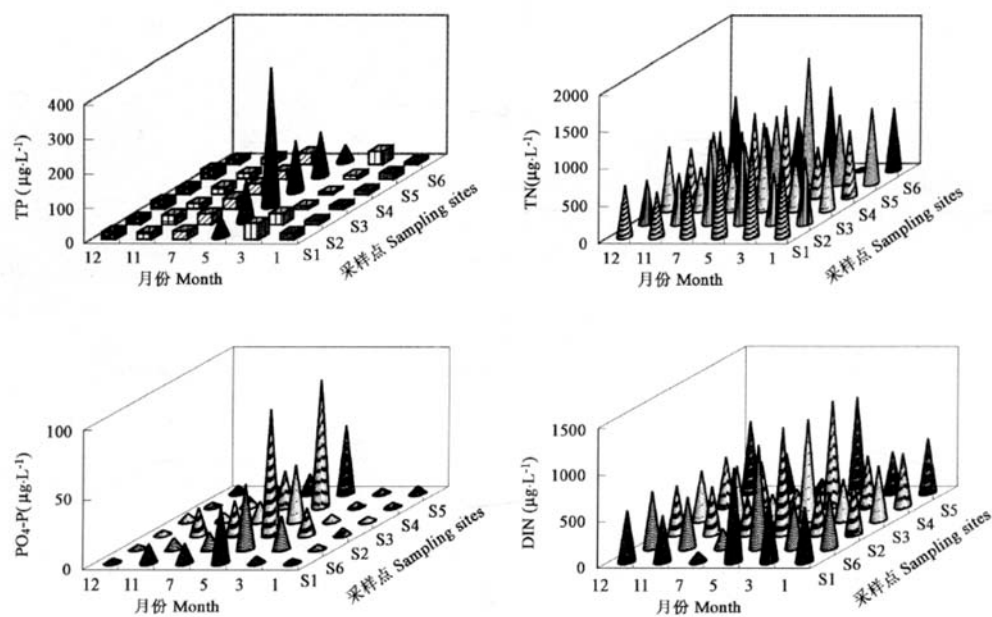


图 5 2003 年汤溪水库 TP、TN、PO₄ 和 DIN 动态

Fig. 5 Distributions of concentrations of TP、TN、PO₄-P and DIN in Tangxi Reservoir in 2003

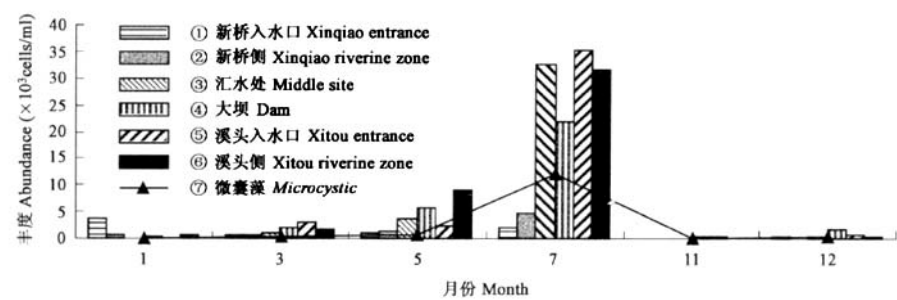


图 6 蓝藻丰度及微囊藻的时空分布

Fig. 6 Distributions of abundances of cyanobacteria and *Microcystis* in Tangxi Reservoir

图 6 所示,蓝藻丰度季节变化与浮游植物丰度变化趋势一致,7 月份同样远高于其它月份,为其他月份的 5.5~137.9 倍。铜绿微囊藻为形成蓝藻水华的优势种,其丰度在 5 月和 7 月份较高,最高值出现在 7 月份的溪头入水口,为 $22.44\times10^3\text{ cells}\cdot\text{ml}^{-1}$ 。

蓝藻与硅藻分别在不同季节占有优势,且二者占浮游植物总丰度的比例呈相反的变化趋势(图 7)。1 月、11 月和 12 月优势种多为硅藻种类,如曲壳藻(*Achnanthes* sp.)、模糊直链藻(*Melosira ambigua*)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)。3 月份和丰水期优势种主要为蓝藻种类,有铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、线形粘杆藻(*Gloeotheca linearis*)、假鱼腥藻(*Pseudo anabaena*)等。

2.4 叶绿素 a (chl a)

图 8 所示,采样时期叶绿素 a 浓度变化范围为 $2.24 \sim 33.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,最低值出现在 1 月份溪头侧,最高值出现在 7 月份溪头入水口。36 个水样中,有 7 个叶绿素 a 浓度超过 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其中 4 个出现在 7 月份,2 个出现在 3 月份,1 个出现在 5 月份。枯水期的 1 月、11 月和 12 月份的叶绿素 a 浓度多为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。

2.5 相关性分析

图 9f 所示,在发生大规模水华的 7 月份,各采样点的蓝藻丰度与 pH 呈显著的正相关关系 ($R^2=0.92$, $p<0.01$)。

温度与浮游植物的生长关系密切。蓝藻、微囊藻和浮游植物丰度及叶绿素 a 浓度均与水温具有显著的正相关关系,相关系数分别为 $R^2=0.61$ ($p<0.001$), $R^2=0.77$ ($p<0.001$), $R^2=0.61$ ($p<0.001$), $R^2=0.63$ ($p<0.01$) (图 9a-d)。除浮游植物的绝对

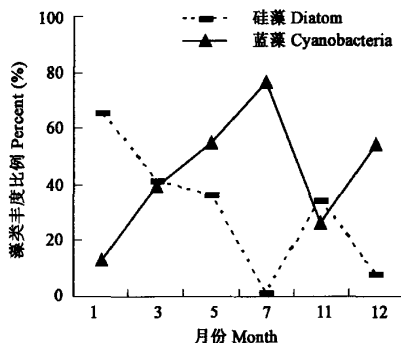


图 7 蓝藻与硅藻比例动态

Fig. 7 Variations of percent for cyanobacteria and diatom

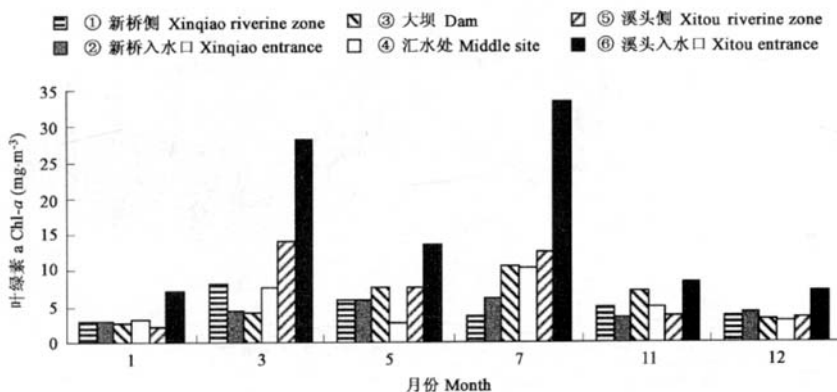


图 8 叶绿素 a 时空分布

Fig. 8 Spatial and temporal distributions of chl-a concentrations

丰度外,水温与蓝藻优势度(蓝藻占浮游植物丰度的比例)有显著正相关关系 ($R^2=0.63$, $p<0.001$) (图 9e)。

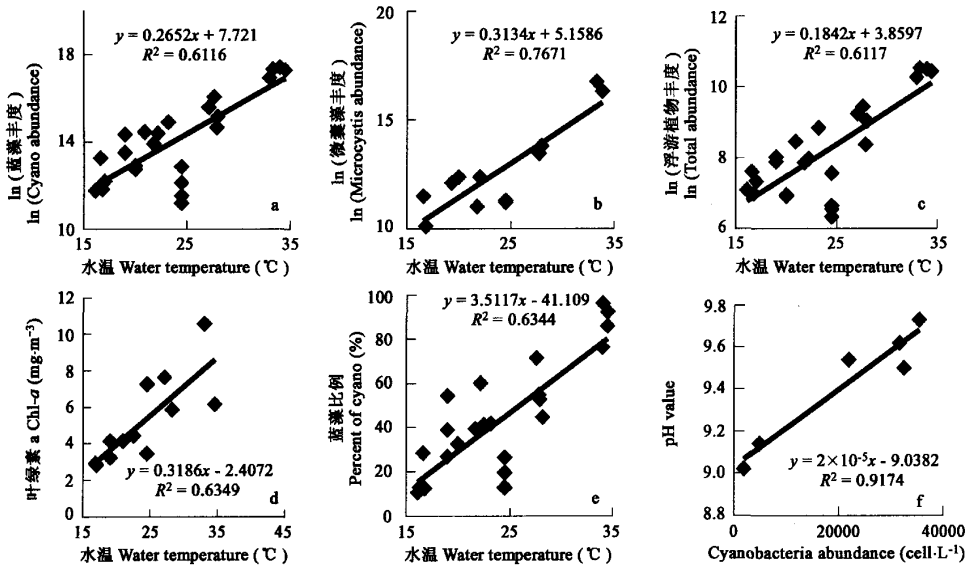
3 讨论

3.1 pH 值对水库水华的影响

在浮游植物丰度较高的水体中,较强的光合作用消耗水体中大量 CO_2 ,因此蓝藻水华发生时伴随了 CO_2 浓度降低与 pH 上升。An 等人对 Taechung 水库 1994 年夏季蓝藻生长的研究表明, $\text{pH}>8.5$ 时有利于蓝藻的生长^[3]。在 $\text{pH}>9$ 时,微囊藻借助悬浮机制在水体表面形成水华后有利于吸收“空气-水”界面的 CO_2 ,而其它没有悬浮机制的藻类,由于缺乏赖以维持较高光合作用速率的 CO_2 而在竞争上处于劣势^[4]。汤溪水库各次采样期间的水体 pH 处于 $8.4 \sim 9.5$ 范围。在 7 月份,各采样点 $\text{pH}>9.0$,且各采样点的蓝藻丰度与 pH 呈显著的正相关关系(图 9f),表明在发生水华时,较高的蓝藻丰度对水体 pH 具有明显影响,且 pH 处于适合微囊藻生长的范围,而此时其它藻类可能由于缺乏 CO_2 难以形成优势种。

3.2 氮、磷浓度对水库水华的影响

氮、磷是影响浮游植物生长的最主要的营养元素,当浮游植物生长受到营养盐限制时,体内碳水化合物积累、光合作用产物的产量均受到影响。Sas 等人对欧洲的 18 个水体进行分析过程中设定,浮游植物生长在可溶性活性磷浓度超过 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水体中将不受 P 限制,无机氮浓度超过 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 将不受 N 限制^[4]。受降水量年内分布的影响,汤溪水库枯水期 1 月份与 12 月份各采样点 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度低于 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,3 月份和 11 月份各有 2 个采样点超过 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,丰水期 5 月份和 7 月份各采样点高于 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,因此,除 1 月份与 12 月份外,浮游植物生长多数情况下不受磷限制。就 DIN 来看,各次采样时期 DIN 浓度变幅为 $109 \sim 1147 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,按上述标准,各次采样时期浮游植物生长不受氮限制。



* Cyano=Cyanobacteria

图9 浮游植物与水温、pH 相关性分析

Fig. 9 Correlations between phytoplankton and water temperature or pH value

美国环境保护署(EPA)在其《湖泊与水库技术指导手册-营养盐标准》中指出*,在湖泊与水库中,TP 与 TN 浓度分别超过 $10\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $150\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时即有可能发生蓝藻水华。在汤溪水库,除 1 月份的大坝和 3 月份的新桥入水口、新桥侧采样点,其他各采样时期采样点的 TP 浓度均 $>10\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。就 TN 浓度来看,各采样时期 TN 浓度 $>550\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此,汤溪水库在各采样时期均具备发生蓝藻水华的营养盐基础。

磷浓度高时有利于能够形成蓝藻水华的种类成为优势种^[5]。而氮的浓度对于蓝藻的竞争优势,并不一定是越高越有利,Blomqvist 等指出^[6], $\text{NO}_3\text{-N}$ 在 $<200\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时才有利于蓝藻成为优势种类。7 月份,在蓝藻丰度较高的溪头入水口、溪头侧、汇水处和大坝 4 个采样点的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度均 $<100\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

3.3 水温对水库水华的影响

由于蓝藻的 DNA 与光合作用系统的热稳定性等生理功能形成的高温适应机制^[7],蓝藻对高温的耐受能力强于其它藻类。室内与野外试验证明,多数蓝藻生长的最适温度范围为 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ ^[8~10],较高的水温有利于蓝藻成为优势种群和蓝藻水华发生^[11,12], 15°C 以下时蓝藻的生长会受到限制^[13]。各次采样时期汤溪水库水温处于 $16 \sim 35^\circ\text{C}$ 范围,水温条件均适合微囊藻生长,其中 4~11 月份期间水库水温处于 $25 \sim 35^\circ\text{C}$ 之间,适合蓝藻生长和水华发生。回归分析表明,浮游植物丰度、蓝藻丰度、微囊藻丰度及叶绿素 a 浓度均与水温具有显著的正相关关系(图 9),表明水温对汤溪水库蓝藻生长具有明显控制。

3.4 水体稳定性对水华发生的影响

Steinberg 等对大量水体分析后指出^[14],在 TP 浓度超过 $10\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,蓝藻的生长很大程度上受物理因子的影响,尤其是水体稳定性。上述有关营养盐的分析表明,汤溪水库在各次采样时期尤其是丰水期,具备了蓝藻水华发生的营养盐基础,因此,水体的稳定性对汤溪水库蓝藻水华发生的影响更为重要。

微囊藻的悬浮机制与水体稳定性紧密相关。悬浮机制是指部分蓝藻(如微囊藻)能通过改变单位细胞体积中的碳水化化合物的比例而改变细胞密度,从而调节在水体中的上浮与沉降^[15]。水体中光照强度、温度和营养盐随水体深度的变化而分布不同,浮游植物的生长速度受其在水体中所处的位置影响。微囊藻借助悬浮机制置身于水体中有利自身生长的物理、化学环境和透光层^[16,17],且微囊藻悬浮机制的作用在水体发生分层时会表现得更为显著^[9],当水体发生垂直混合时微囊藻的悬浮机制优势则丧失^[18],通过混合的方式降低水体稳定性则能抑制微囊藻水华的发生^[17,19,20]。Bonnet 等对法国 Villereest 水库进行模拟研究的结果表明,悬浮机制是铜绿微囊藻在该水库中占优势的一个主要因子,且悬浮机制的作用在水体发生分层时会表现得更为显

著^[21]。铜绿微囊藻为汤溪水库水华优势种,在7月份,铜绿微囊藻占浮游植物丰度的61%。因此,在具备较强水体稳定性情况下,微囊藻悬浮机制可能是蓝藻水华发生的重要生物学内因。

水体分层能够大大降低水体的垂直混合程度,增加水体稳定性。汤溪水库大坝处最大水深为37m,河流区平均深度约10m,较深的水体易于发生热分层。2003年汤溪水库降水量小,入库流量低,同样有利于发生热分层。Straskraba等认为,水滞留时间大于100d的水库比较容易出现分层^[22]。汤溪水库的全年水滞留时间理论值达247d,3月份即开始发生水体热分层。从2003年3月份水温垂直分布也可以看出(图4),除湖泊区外,过渡区和河流区同样发生明显热分层。

3.5 2003年水华发生提前的原因分析

汤溪水库地处热带,1~3月份及12月份水温一般低于20℃,不具备蓝藻水华发生的水温条件,从水体稳定性来看,虽然12月份、1月份及2月份的降水量低,水体稳定性较高,但这3个月份的水体已发生垂直混合,水体分层消失,不利于微囊藻悬浮机制的发挥。4~9月份属于丰水期,降水量大,虽然水体发生热分层,但表层水体稳定性差,通常难具备蓝藻水华发生的水动力学条件。在10~11月份,水温接近25℃,降水量较低,水体分层仍存在,且表层水体稳定性强,这时期既具备了蓝藻水华发生的水温条件,又具备了水动力学条件,因此蓝藻水华通常在这个时期发生。

2003年汤溪水库蓝藻水华发生提前,该年特殊的降水特征及其所决定的水库水体稳定性条件可能是导致水华提前的关键因子。2003年汤溪水库降水量仅为以往多年平均降水量的76.8%,为2000年降水量的65.0%,入库流量低,全年水体稳定性高,有利于蓝藻获得竞争优势和水华提前发生。

此外,汤溪水库2003年年内降水量分布有异于往年。比较2003年与2000年的降水分布可以看出(图2a),2000年丰水期月降水量均较高(108.8~474.4mm),10月份与11月份降水量分别为23.6mm和53.6mm;但2003年丰水期的7月份降水量仅有64mm,为2000年7月份降水量的18.6%,而与2000年枯水期的10月份与11月份(水华发生阶段)降水量相当。由于月降水量低,7月份理论水滞留时间达到322d,同样与2000年10月份理论水滞留时间(370d)相当。可见,汤溪水库在2003年7月份与2000年10~11月份具有相似的水动力学条件。

在具备充分的营养盐和较高水温的前提下,汤溪水库在2003年7月份的降水量异常偏低,该月份较强的水体稳定性是导致大规模蓝藻水华相对于往年提前发生的关键因子。

References:

- [1] Ahn C Y, Chung A S and Oh H M. Rainfall, phycocyanin, and N:P ratio related to cyanobacterial blooms in a Korean large reservoir. *Hydrobiologia*, 2002, **474**:117~124.
- [2] Zhao S Y, Lin Q Q, Hu R, *et al.* Current eutrophication in Tangxi Reservoir of Guangdong Province. *Ecologic Science*, 2002, **21**(4): 316~319.
- [3] An K G, Jones J R. Factor regulating blue-green dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia*, 2000, **432**:37~48.
- [4] Oliver R, Ganf G. Freshwater Blooms. In: Whitton B A, Potts M, eds. *The Ecology of Cyanobacteria*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2000. 149~194.
- [5] Reynolds C S, Oliver R L, Walsby A E. Cyanobacterial dominance: the role of buoyancy regulation in dynamic lake environments. *Marine & Freshwater Research*, 1987, **21**: 379~390.
- [6] Blomqvist P, Pettersson A, Hyenstrand P. Ammonium-nitrogen: A key regulatory factor causing dominance of non-nitrogen-fixing cyanobacteria in aquatic system. *Archiv für Hydrobiologia*, 1994, **132**:141~164.
- [7] Zheng W F, Zeng Z Q. High temperature adaptation of fresh water Cyanobacterium. *Journal of Lake Science*, 1994, **6**(4):56~363.
- [8] Ha K, Cho E A, Kim H W, *et al.* Microcystis bloom formation in the lower Nakdong River, South Korea: importance of hydrodynamics and nutrient loading. *Marine and Freshwater Research*, 1999, **50**(1):89~94.
- [9] 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. *Limnology*, 2001, **2**:45~48.
- [10] Lin Y X, Han M. The study growth factor of the *Microcystis aeruginosa* Kütz during eutrophication of Dianchi Lake. *Advances in Environmental Science*, 1998, **6** (3): 82~87.
- [11] Chen Y W, Qin B Q, Gao X Y. Prediction of blue-green algae bloom using stepwise multiple regression between algae & related environmental factors in Meiliang Bay, Lake Taihu. *Journal of Lake Science*, 2001, **13**(1):63~71.
- [12] Wang W, Fang Z F, Yu W D. Research on restricted factors of Cyanophyceae density in Qian-dao Lake. *Heilongjiang Environmental Journal*, 2003, **27** (2):60~63.

- [13] Roberts R D, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *Marine and Freshwater Research*, 1987, **21**:391~399.
- [14] Steinberg C E W, Hartmann H M. Plankton bloom-forming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers. *Freshwater Biology*, 1988, **20**:279~287.
- [15] Oliver R L. Floating and sinking in gas-vacuolate cyanobacteria. *Journal of Phycology*, 1994, **30**:161~173.
- [16] Wallace B B, Bailey M C, Hamilton D P. Simulation of vertical position of buoyancy regulating *Microcystis aeruginosa* in a shallow eutrophic lake. *Aquatic Sciences*, 2000, **62**:320~333.
- [17] Jungo E, Visser P M, Stroom J, *et al.* Artificial mixing to reduce growth of the blue-green alga *Microcystis* Lake Nieuwe Meer, Amsterdam; an evaluation of 7 years of experience. *Water Science & Technology: Water Supply*, 2001, **1**(1):17~23.
- [18] Visser P M, Ibelings B W, Van Der Veer B, *et al.* Artificial mixing prevents nuisance blooms of the cyanobacterium *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, the Netherlands. *Freshwater Biology*, 1996, **36**:435~450.
- [19] Imteaz M A, Asaeda T. Artificial mixing of lake water by bubble plume and effects of bubbling operations on algal bloom. *Water Resource*, 2000, **34**(6):1919~1929.
- [20] Beyruth Z. Periodic disturbances, trophic gradient and phytoplankton characteristics related to cyanobacterial growth in Buarapiranga Reservoir, São Paulo State, Brazil. *Hydrobiologia*, 2000, **424**:51~65.
- [21] Bonnet M P, Poulin M. Numerical modeling of the planktonic succession in a nutrient-rich reservoir; environmental and physiological factors leading to *Microcystis aeruginosa* dominance. *Ecological Modelling*, 2002, **156**:93~112.
- [22] Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A. State of the art of reservoir limnology and water quality management. In: Straskraba M, Tundisi J G, Duncan A, eds. *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1993. 213~288.

参考文献:

- [2] 赵帅营, 林秋奇, 胡初, 等. 汤溪水库富营养化现状研究. *生态科学*, 2002, **21**(4): 316~319.
- [7] 郑维发, 曾昭琪. 淡水蓝藻的高温适应. *湖泊科学*, 1994, **6**(4): 356~363.
- [10] 林毅雄, 韩梅. 滇池富营养化的铜绿微囊藻生长因素的研究. *环境科学进展*, 1998, **6**(3): 82~87.
- [11] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测. *湖泊科学*, 2001, **13**(1): 63~71.
- [12] 王伟, 方志发, 余卫东. 千岛湖蓝藻密度制约因素分析. *黑龙江环境通报*, 2003, **27**(2): 60~63.