

# 水源水库水位波动对藻类叶绿素 a 浓度的影响

柯水洲<sup>1</sup>, 张丽薇<sup>1</sup>, 高静思<sup>2,3</sup>, 费世东<sup>4</sup>, 朱佳<sup>3</sup>, 梁栋<sup>4</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 哈尔滨工业大学<深圳> 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 3. 深圳职业技术学院 建筑与环境工程学院, 广东 深圳 518055;  
4. 深圳市水质检测中心, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 水位波动会对水库的物理、化学和生物作用产生影响,进而影响到藻类的生物量和分布。以深圳市石岩水库为研究对象,分析了水位波动与藻类叶绿素 a(Chl-a)浓度的关系,并进一步探讨了其内在的关联机制和通过水位波动调节进行藻类防控的可能性。结果表明,水库水位升高后藻类 Chl-a 浓度会明显降低,且提前分期蓄水水位升高后藻类 Chl-a 浓度降低更显著;水位有规律地交替抬高降低会降低藻类 Chl-a 浓度;在水位平稳期藻类 Chl-a 浓度会明显升高;藻类 Chl-a 浓度随水位日变幅的增大而降低。

**关键词:** 水库; 水位波动; 藻类; 叶绿素 a 浓度

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)13-0078-06

## Effect of Water Level Fluctuation on Algae Chl-a Concentration in Source Water Reservoir

KE Shui-zhou<sup>1</sup>, ZHANG Li-wei<sup>1</sup>, GAO Jing-si<sup>2,3</sup>, FEI Shi-dong<sup>4</sup>,  
ZHU Jia<sup>3</sup>, LIANG Dong<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology <Shenzhen>, Shenzhen 518055, China;  
3. School of Construction and Environmental Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China; 4. Shenzhen Water Quality Testing Center, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Water level fluctuation will affect the physical, chemical and biological functions of the reservoir, and then affect the biomass and distribution of algae. The relationship between algae biomass and water level fluctuation in Shiyan Reservoir was analyzed, and the inherent correlation mechanism and the possibility of algae control by water level fluctuation were further explored. The results showed that the algae Chl-a concentration decreased significantly after the reservoir water level rose, and the rising of water level caused by stair-type impounding could reduce the Chl-a concentration more obviously. Regular alternating rise and fall in water levels could reduce algal Chl-a concentration. The algae Chl-a concentration increased obviously in water level stationary phase, and decreased with the increase of the daily amplitude of water level.

**Key words:** reservoir; water level fluctuation; algae; Chl-a concentration

水位是水库重要的水文要素之一。水位波动不仅会影响湖库中生物的生长和分布,也在湖库的物理化学反应过程中起着重要作用<sup>[1]</sup>。近年来,国内很多水库都存在富营养化和藻类季节性暴发的问题,关于藻类生长限制因子和控制技术的研究有很多,但通过水位波动调节进行藻类控制的技术尚未见报道<sup>[2-3]</sup>。与其他藻类生长直接影响因素如光照、温度和营养盐等相比,水库水位对藻类产生的影响虽然以间接作用为主,但因其易于被人为调控同样具有重要的探讨价值。笔者以深圳市石岩水库为研究对象,系统地研究了水位波动与藻类 Chl-a 浓度之间的关系,分析了其内在关联机制,探讨了通过水位波动调节进行藻类防控的可能性,以期水库防控藻类暴发和日常管理提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究对象及数据来源

石岩水库位于深圳市宝安区的茅洲河干流上游,集雨面积为 44 km<sup>2</sup>,总库容为 3 200 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,是一座以供水为主、兼具防洪和调蓄等综合功能的中型水库。目前石岩水库的主要水源来自东江水源水工程,东江引水进入西丽水库,经涵洞到达铁岗水库,再经铁石泵站提水到石岩水库,入库量为 200 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,供水量达 145 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d。石岩水库处于梯级水库的末端,总体地形东高西低,呈狭长形,形状相对其他两个水库更规则,年内水位波动幅度变化明显,具有典型性<sup>[4-5]</sup>。

沿石岩水库输水线路方向依次设置了 8 个采样点(S01~S08),其中 S01 点为进水口,S05 点为库心,S08 点为取水口。每次采样采用 GPS 定位确定具体位置,采样时间为 6 月—次年 5 月,采样周期间隔为 2~4 周。水位数据从水库管理部门获得。

### 1.2 检测项目与方法

叶绿素 a 浓度:荧光法;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度:纳氏试剂比色法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度:紫外分光光度法;TN:碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TP:钼酸铵分光光度法。

## 2 结果与分析

### 2.1 水库水位与藻类 Chl-a 浓度的年际变化

水库库心与其他点位相比具有水深大、水位及流速变化显著、水体滞留时间短、水动力受来水流量影响大等特点,因此本研究主要选取 S05 点研究水位波动与藻类 Chl-a 浓度的关系。石岩水库水位与

藻类 Chl-a 浓度的年际变化如图 1 所示。可以看出,石岩水库水位年际变化较大,6 月中旬至 8 月中旬水位比较有规律地交替抬高和降低,此时藻类 Chl-a 浓度波动较大,6 月中旬最大值达到 70 μg/L 以上,水位波动后呈下降趋势;8 月下旬至 9 月初水位升高后,藻类 Chl-a 浓度下降;10 月水位下降,藻类 Chl-a 浓度下降至 20 μg/L 左右;11 月中旬至 12 月下旬水位波动平缓,维持在 35.04 m 左右,藻类 Chl-a 浓度增加;次年 4 月—5 月水位波动非常显著,藻类 Chl-a 浓度总体呈下降趋势。整体来看,次年汛期水位波动幅度明显高于当年,藻类 Chl-a 浓度总体上低于当年。

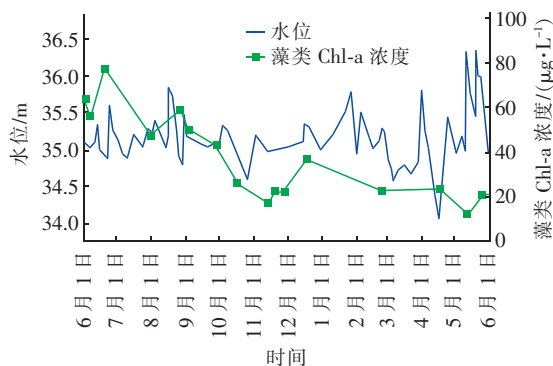


图1 石岩水库水位与叶绿素a浓度的年际变化

Fig.1 Annual variation of water level and Chl-a concentration in Shiyan Reservoir

### 2.2 水位波动与藻类 Chl-a 浓度的关联关系

为分析石岩水库不同类型不同时期的水位波动与藻类 Chl-a 浓度的关系,根据石岩水库 6 月—次年 5 月实际水库调度运行过程,分别选取水位抬高期、水位降低期、水位交替抬高降低期<sup>[6]</sup>、水位平稳期等不同情景的水位波动时段进行研究。

水位抬高期(快速蓄水):8 月 5 日—9 月 4 日。在较短时间内水位迅速抬升至某一峰值,流速在 0.2 m/d 以上,最大水位差接近 1 m。

水位抬高期(提前分期蓄水):次年 4 月 18 日—5 月 12 日。分两阶段蓄水,第 1 阶段蓄水后水位保持平稳,一段时间后进行第 2 阶段蓄水;此阶段的水位峰谷差值高于快速蓄水阶段,最大水位差达到 2 m。

水位降低期:10 月 7 日—11 月 1 日。调水进入石岩水库,同时泄水,泄水速度大于调水速度,水位降低。

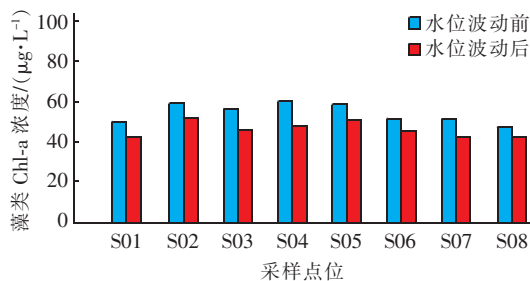
水位交替抬高降低期:6 月 20 日—7 月 30 日。

在一段时间内,水位抬升和下降过程交替进行,且抬升和下降幅度相当,平均水位差在 0.4 m 左右。

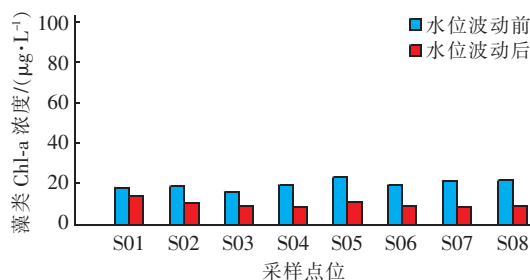
水位平稳期:11月12日—12月17日。水位波动幅度小,水位扰动影响小,水位波动幅度平均为 0.007 m/d。

### 2.2.1 水位波动前后藻类 Chl-a 浓度的变化

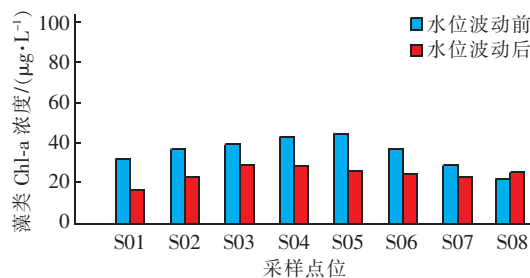
石岩水库各取样点在各典型时期的藻类 Chl-a 浓度变化如图 2 所示。可以看出,水位升高后 8 个取样点的藻类 Chl-a 浓度均明显下降,与快速蓄水相比,分期蓄水水位升高后藻类 Chl-a 浓度下降幅度更大,且藻类 Chl-a 浓度较低,在 20  $\mu\text{g/L}$  以下,水库藻类暴发风险更低;水位降低后,除 S08 点的藻类 Chl-a 浓度略有升高外,其余各点的藻类 Chl-a 浓度均明显降低;水位交替抬高降低后各点的藻类 Chl-a 浓度均明显降低,其中水位波动前藻类 Chl-a 浓度峰值接近 100  $\mu\text{g/L}$ ,水位波动后藻类 Chl-a 浓度峰值降至 80  $\mu\text{g/L}$  以下;水位平稳期各点的藻类 Chl-a 浓度均明显升高。



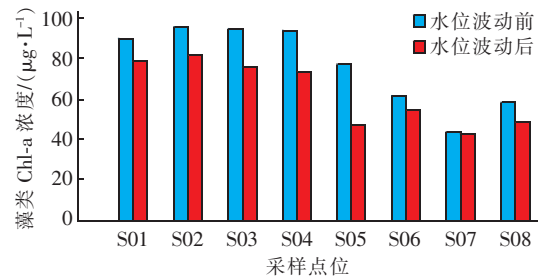
a. 水位抬升期(快速蓄水)



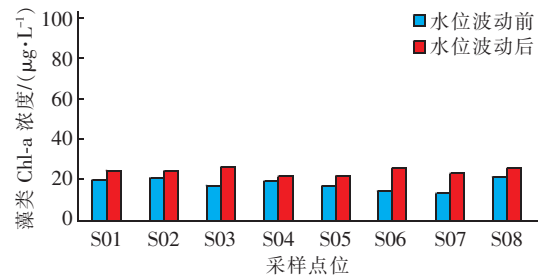
b. 水位抬升期(分期蓄水)



c. 水位降低期



d. 水位交替抬高降低期



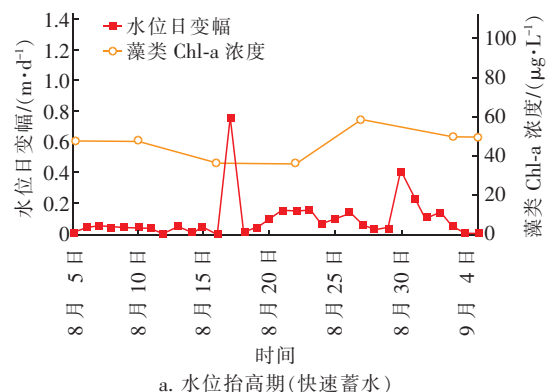
e. 水位平稳期

图2 水位波动前后藻类 Chl-a 浓度的变化

Fig. 2 Variation of chlorophyll-a concentration before and after water level fluctuation

### 2.2.2 水位日变幅与藻类 Chl-a 浓度的关系

水位日变幅为当天与前一天的水位差值,单位为 m/d,它反映了水位的波动强度。石岩水库 S05 点的水位日变幅与藻类 Chl-a 浓度变化的关系如图 3 所示。可以看出,在水位抬高期与水位交替抬高降低期,水位日变幅出现了明显的峰值,藻类 Chl-a 浓度在水位日变幅峰值处明显下降,然后随着水位日变幅的减小,藻类 Chl-a 浓度出现不同程度的增加;整体来看,5 月的藻类 Chl-a 浓度明显低于 6 月,这可能与 5 月水位日变幅峰值高于 6 月有关。水位降低期的水位日变幅均在 0.2 m/d 以下,基本保持不变,且未出现明显峰值,藻类 Chl-a 浓度基本维持在 30  $\mu\text{g/L}$  左右。水位平稳期的水位日变幅几乎为零,藻类 Chl-a 浓度出现上升趋势。



a. 水位抬升期(快速蓄水)

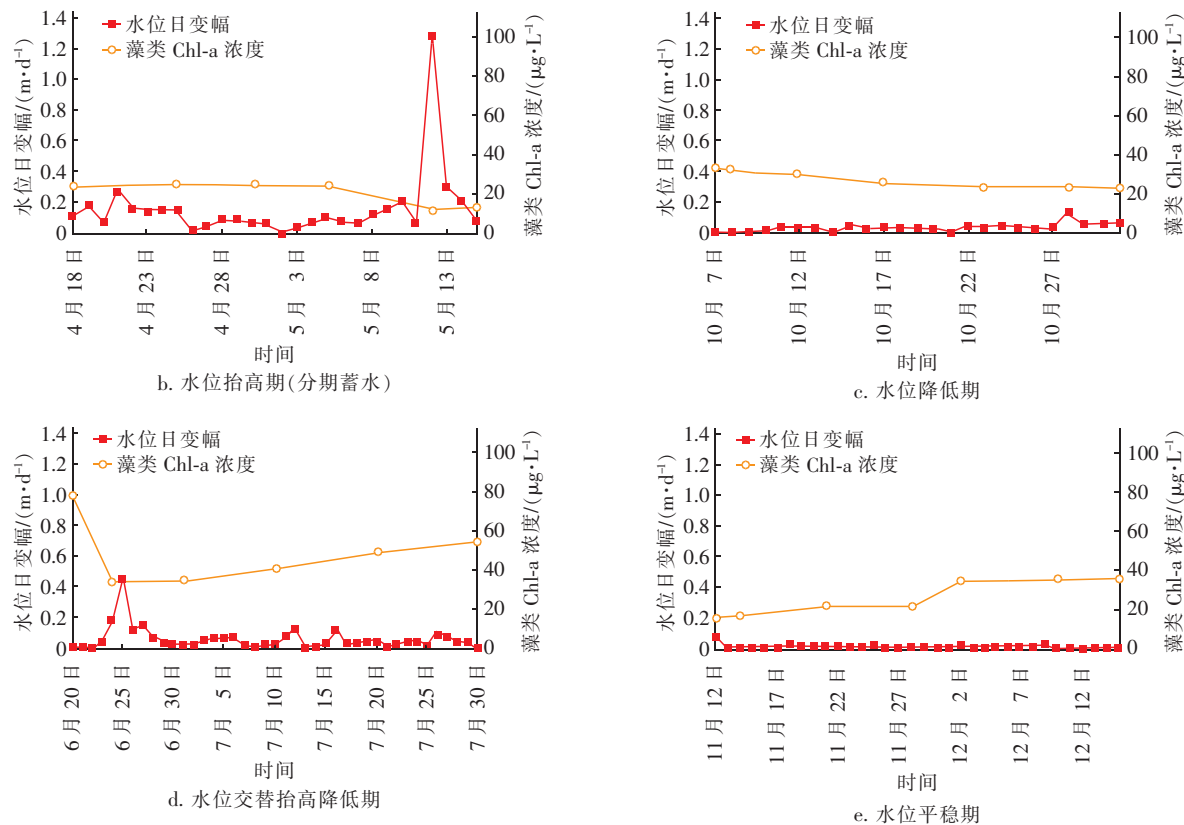


图 3 水位日变幅与叶绿素 a 浓度变化的关系

Fig. 3 Relationship between daily amplitude of water level and Chl-a concentration

3 讨论与分析

通过以上分析可知,水位波动与藻类 Chl-a 浓度存在一定的内在关联,考虑到水位波动影响藻类生长的最主要因素是营养盐和水滞留时间等,选取石岩水库 S05 点进行如下讨论与分析,探究水库水位波动与藻类生长关系的本质原因。

3.1 水位波动与营养盐、水滞留时间的关系

3.1.1 水位波动前后营养盐浓度的变化

石岩水库 S05 点水位波动前后营养盐浓度的变化见表 1。可知,在 5 个典型时期总氮浓度均高于国际提出的限制浓度(0.2 mg/L)<sup>[7]</sup>,因此 TN 浓度不

再是藻类生长的限制因子。水位升高后,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 浓度均降低;提前分期蓄水水位升高后 TP 浓度明显降低;快速蓄水水位升高后 TP 浓度升高,且此阶段的 TP 浓度高于国际提出的限制浓度(0.02 mg/L)<sup>[7]</sup>,因此 TP 不再是该阶段藻类生长的限制因子。水位降低后,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 浓度变化不明显,但 TP 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 浓度明显降低。当水位交替抬高降低后,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 和 TP 浓度均明显下降。在水位平稳期,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 和 TP 浓度均明显升高。以上表明,水库水位波动导致的营养盐浓度变化是影响藻类生长的主要诱因之一。

表 1 水位波动前后营养盐浓度的变化

Tab. 1 Variation of nutrients concentration before and after the water level fluctuation

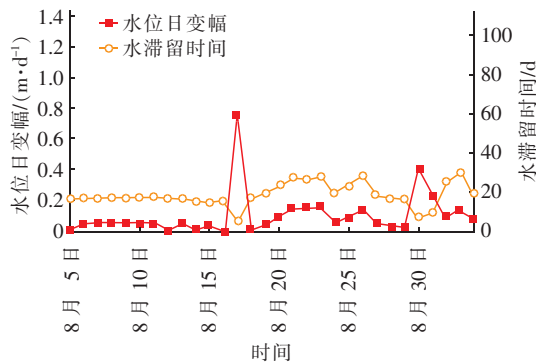
mg · L<sup>-1</sup>

项 目	波动前		波动后		$\Delta$ TN	$\Delta$ TP	$\Delta$ NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N	$\Delta$ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N
	TN	TP	TN	TP				
水位抬高期(快速蓄水)	1.78	0.023 6	1.54	0.031 6	-0.25	0.008 0	-0.10	-0.143
水位抬高期(提前分期蓄水)	2.35	0.012 9	1.97	0.009 4	-0.39	-0.003 5	-0.31	-0.003
水位降低期	1.49	0.014 7	1.22	0.003 4	-0.27	-0.011 2	-0.15	0.024
水位交替抬高降低期	2.07	0.022 7	1.55	0.018 1	-0.52	-0.004 6	-0.25	-0.215
水位平稳期	1.17	0.003 2	1.92	0.005 3	0.75	0.002 1	0.13	0.164

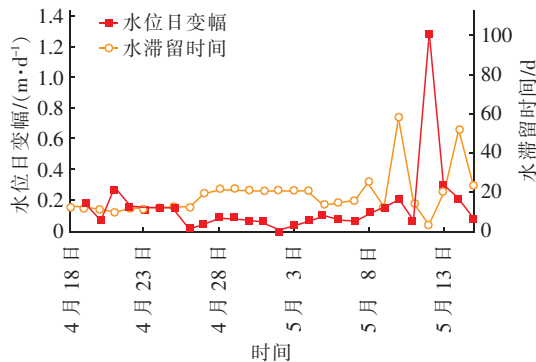


### 3.1.2 水位日变幅与水滞留时间的关系

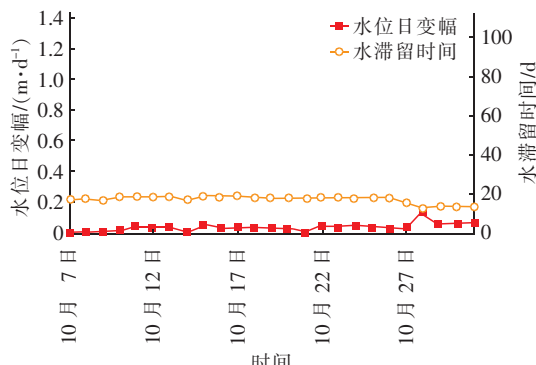
水库水位日变幅与水滞留时间的关系见图4。



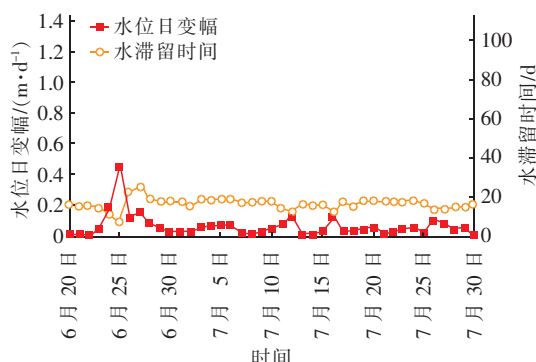
a. 水位抬高期(快速蓄水)



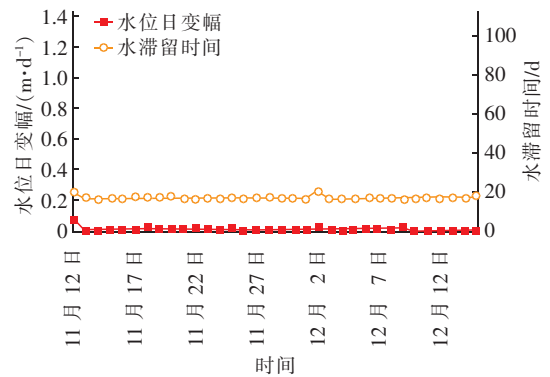
b. 水位抬高期(分期蓄水)



c. 水位降低期



d. 水位交替抬高降低期



e. 水位平稳期

图4 水位日变幅与水滞留时间的关系

Fig.4 Relationship between daily amplitude of water level and residence time

水滞留时间是反映水流与水质之间关系的重要参数<sup>[8]</sup>,计算公式为 $Tr = V/Q$ ,其中: $Tr$ 为水体滞留时间, $V$ 为水库库容, $Q$ 为入库总流量。由图4可以看出,在水位抬高期与水位交替抬高低期,水滞留时间在水位日变幅峰值处明显缩短;在水位降低期,水滞留时间与水位日变幅呈负相关,随其增加而缩短、随其减少而延长;在水位平稳期,水滞留时间维持在18 d左右。Straskrba等人研究世界各地的水库发现,当入库水流的营养盐浓度维持不变时,出库水流中该物质的输出负荷随滞留时间的增加而呈指数函数减少;Osmi等人对Asahi水库的研究发现,当水滞留时间超过2周时,浮游植物才能维持较高的种群数量;缩短水滞留时间能够有效减缓富营养化进程和水华发生频率<sup>[7]</sup>。据此可知,增加水库水位日变幅,能够缩短水滞留时间,进而降低藻类浓度,说明水库水位波动导致的水滞留时间改变是影响藻类生长的主要诱因之一。

### 3.2 水位波动对藻类的影响因素分析

① 水库水位波动导致的营养盐及水滞留时间等条件的改变是影响藻类生长的主要诱因,水库水位抬高在一定程度上对营养盐和藻类浓度具有稀释作用,在藻类生长所需的营养盐浓度降低后,藻类生长受到限制;尤其是提前分期蓄水后,影响藻类生长的最主要限制因子磷的浓度明显降低,因此藻类浓度降低更加明显。

② 水位交替抬高降低会破坏分层异重流导致的水体分层,增大水体交换<sup>[6]</sup>,有效防止水温分层,同时水库水位日变幅增大,缩短了水滞留时间,破坏了藻类繁殖和生存条件,进而会减缓富营养化和水

华发生的频率<sup>[7]</sup>。

③ 在水位平稳期,水流扰动缓慢,水滞留时间长,营养盐的输入和富集有利于藻类的生长和繁殖,因此容易暴发水华。

#### 4 结论与建议

水库水位升高后,藻类 Chl-a 浓度明显降低,且分期蓄水水位升高后藻类 Chl-a 浓度降低更显著;水位交替抬高降低会降低藻类 Chl-a 浓度;水位变化缓慢的平稳期会导致藻类 Chl-a 浓度明显增大,容易导致藻类暴发;藻类 Chl-a 浓度随水位日变幅的增大而降低。

水库水位长期稳定,藻类可能会大量生长,管理者需要重视或采取必要的抑制措施,例如在保证防汛安全的情况下,适当增大水位日变幅,在夏秋季实行提前分期蓄水抬高水位调度方法等,进而破坏藻类繁殖和生存条件,减缓藻类暴发的风险。

#### 参考文献:

- [1] Leira M, Cantonati M. Effects of water-level fluctuations on lakes: an annotated bibliography[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 613: 171–184.
- [2] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(3): 92–98.  
Zhao Yonghong, Deng Xiangzheng, Zhan Jinyan, *et al.* Progress on preventing and controlling strategies of lake eutrophication in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(3): 92–98 (in Chinese).
- [3] 秦伯强,杨柳燕,陈非洲,等. 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.  
Qin Boqiang, Yang Liuyan, Chen Feizhou, *et al.* Occurrence mechanism and control technology of lake eutrophication and its application [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(16): 1857–1866 (in Chinese).
- [4] 韩龙,秦华鹏,鲁南,等. 基于数字流域的水质综合管理决策支持系统——以深圳石岩水库流域为例[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(5): 196–201, 205.  
Han Long, Qin Huapeng, Lu Nan, *et al.* Decision support system for water quality integrated management based on digital watershed technology: a case study of Shiyen Reservoir in Shenzhen [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(5): 196–201, 205 (in Chinese).
- [5] 付贵萍,宁凯乐,张佳红,等. 深圳石岩、铁岗水库藻类及环境影响因子分析[J]. *深圳大学学报:理工版*, 2014, 31(4): 428–435.  
Fu Guiping, Ning Kaile, Zhang Jiahong, *et al.* Phytoplankton community and their correlative environmental factors in Shiyen Reservoir and Tiegang Reservoir in Shenzhen [J]. *Journal of Shenzhen University: Science & Engineering*, 2014, 31(4): 428–435 (in Chinese).
- [6] 杨正健. 分层异重流背景下三峡水库典型支流水华生态机理及其调控[D]. 武汉:武汉大学, 2014.  
Yang Zhengjian. Generation and Dissipation Mechanism and Regulation of Blooms in Typical Branches of Three Gorges Reservoir under the Background of Stratified Density Flow [D]. Wuhan: Wuhan University, 2014 (in Chinese).
- [7] 吴锋,战金艳,邓祥征,等. 中国湖泊富营养化影响因素研究——基于中国22个湖泊实证分析[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 94–100.  
Wu Feng, Zhan Jinyan, Deng Xiangzheng, *et al.* Influencing factors of lake eutrophication in China—A case study in 22 lakes in China [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(1): 94–100 (in Chinese).
- [8] 富国. 湖库富营养化敏感分级水动力概率参数研究[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(6): 80–84, 102.  
Fu Guo. Study of the hydrodynamic probability parameters on eutrophication sensitivity classification of lake and reservoirs [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(6): 80–84, 102 (in Chinese).



作者简介:柯水洲(1964—),男,湖北鄂州人,硕士,教授,主要研究方向为给水与废水处理技术、给排水系统优化。

E-mail: 1187013976@qq.com

收稿日期:2018-12-06