

太湖流域典型水源水库藻类水华的促发条件*

吕翔宇^{1,2}, 朱梦圆^{2**}, 马永山^{1**}, 邹伟², 徐天宇³, 张志斌¹, 朱广伟²

(1: 山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250101)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(3: 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058)

摘要: 藻类异常增殖引发的水华是威胁我国水源地水库的主要生态问题之一。探究水源水库中藻类异常增殖的促发因素是防控藻类水华水质问题的前提。本文以太湖流域两个大(II)型中营养水库为例,通过周年浮游植物细胞密度、生物量及相关环境因子逐月监测,分析影响水库有害藻类生物量季节性异常增殖特征及其促发条件。结果表明,地处亚热带季风区的两个水源水库均存在蓝藻和硅藻阶段性异常增殖的风险,老石坎水库5月暴发了以曲壳藻为绝对优势种的重度硅藻水华现象,硅藻细胞密度达到 6232×10^4 cells/L,赋石水库则在6和9月均出现了蓝藻细胞数达到水华级别的异常增殖现象。冗余分析表明,总磷、水温和水位是影响水库硅藻、蓝藻异常增殖的关键因素。非线性回归等统计分析表明,两个水库中水体总磷浓度显著影响藻类异常增殖强度的临界值为0.024 mg/L,而水温高于16℃时,硅藻水华事件可能发生,硅藻水华发生的最佳温度为22℃;水温高于20℃时,蓝藻水华事件可能发生,蓝藻水华发生的最佳温度为30℃;持续低水位或水位快速波动过程中藻类水华暴发的风险较高。研究表明,太湖流域中营养水源水库藻类异常增殖或藻类水华的发生往往是营养盐与水文气象因素共同促发的结果,在水源水库藻类水华风险防控方面,除了加强营养盐外源输入控制力度外,还应密切关注极端天气现象,充分发挥水文调度、食物链调控及应急处置等技术手段。

关键词: 水源水库;蓝藻水华;硅藻水华;极端天气;中营养;磷;水文过程

Driving factors of algal blooms in drinking-water reservoirs in Lake Taihu Basin*

Lv Xiangyu^{1,2}, Zhu Mengyuan^{2**}, Ma Yongshan^{1**}, Zou Wei², Xu Tianyu³, Zhang Zhibin¹ & Zhu Guangwei²

(1: School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P.R.China)

Abstract: Algal bloom, caused by abnormal proliferation of algae, is one of the major ecological disasters threatening the safety of many drinking water resource reservoirs in China. Investigating the driving factors of algal proliferation in drinking water resource reservoirs is a prerequisite for preventing and controlling algal blooms and water quality problems. To investigate the driving factors of algal blooms in reservoirs, the cell density and biomass of phytoplankton and related environmental factors were analysed during 12 months from Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir in the Taihu Basin. The results showed that reservoirs in the subtropical monsoon region were at risk of proliferation of cyanobacteria and diatoms. A severe diatom bloom dominated by *Achnanthes* occurred in Laoshikan Reservoir in May, and the corresponding cell density of diatom reached 6232×10^4 cells/L. Cyanobacterial blooms occurred in June and September in Fushi Reservoir. The result of redundancy analysis indicated that total phosphorus, water temperature and water level were key factors influencing the variation of phytoplankton community structure in reservoirs. A total phosphorus concentration higher than 0.024 mg/L could promote algal proliferation. The risk of cyanobacteria and diatom blooms increased

* 2022-09-13 收稿;2023-01-09 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2022YFC3203605)、国家自然科学基金项目(42271080,41830757)和中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW036)联合资助。

** 通信作者;E-mail: myzhu@niglas.ac.cn, mlosh@sdjzu.edu.cn。

significantly when the water temperature was higher than 20°C and 16°C respectively, while the best water temperature for cyanobacteria and diatom blooms was 30°C and 22°C respectively. Low or drastic fluctuations in water level could be beneficial for algal blooms. Our results indicate that the abnormal proliferation of phytoplankton in mesotrophic drinking water reservoirs is influenced by nutrient, hydrological and meteorological factors. External nutrient loading should be reduced to prevent and control algal blooms in such mesotrophic reservoirs, and extreme weather events, hydrological processes and food chain regulation should also be considered.

Keywords: Drinking water source reservoir; cyanobacterial bloom; diatom bloom; extreme weather; mesotrophic; phosphorus; hydrological process

水库是人工筑坝形成的人工湖泊,在保障人类社会水资源需求、防洪抗旱等方面发挥重要社会与经济价值^[1]。但是水库的蓄水、供水等过程具有典型的反季节调控特点,导致水库生态系统中的物理、化学和生物过程与天然湖泊相比有很大差异^[2]。近几十年来,由于人类活动和气候变化影响,我国天然湖泊数量与面积有所减少而水库数量迅速增多,水库蓄水量已达湖泊的3倍^[3]。由于湖泊面临的污染问题更为复杂,湖泊供水水质的安全风险较高,随着城市蓄水量的不断增加,我国城市对水库供水的依赖性提高^[4],对水源型水库生态安全的关注也日益增高^[5]。目前我国水源地水库安全的主要威胁有富营养化、异味物质超标^[6]、藻类水华^[7]、藻毒素^[8]以及底层缺氧^[9]等。其中,藻类水华是最为普遍的威胁,也是世界水库水源地的主要生态挑战^[10-11]。

影响湖库藻类水华的环境因子包括营养盐、温度、降雨、风速、光照、水动力条件^[12-13]。但相关研究主要集中于湖泊^[14-15],对水库关注较少。水库由于其独特的水文特征,藻类水华的发生特征与机制往往与一般湖泊有所不同,主要表现在:(1)水库水华的藻类类型更加多样,除常见于浅水湖泊中的蓝藻水华外^[16],硅藻水华在水库中也十分普遍^[17-18];(2)分层异重流、水力停留时间等水文水动力过程往往对水华形成及其发生区域起到关键作用^[19];(3)水华形成更具突发性,在适宜的环境条件下往往几天内即形成水华^[20]。因此,深入开展水源水库藻类异常增殖及水华条件与机制研究意义重大。

太湖流域是我国经济发展的热点区域,城市水源严重依赖湖泊和水库。除了太湖本身的水源地功能外,太湖流域还有众多水库水源地保障区域社会经济发展,包括天目湖(沙河水库、大溪水库)、横山水库、赋石水库、老石坎水库、老虎潭水库、对河口水库等。这些水库多为中营养、中-富营养^[21-22],与太湖本身的水生态系统结构、水文水动力特征显著不同。已有研究表明,太湖流域的多个水库受到藻类季节性异常增殖威胁^[23-25]。

赋石水库和老石坎水库是太湖流域两个典型的山区水源水库,流域植被覆盖度高,水位波动大,发生过季节性藻类水华现象。两个水库流域地貌及气候背景类似,但流域人类活动方式、水库库容及水文过程特征、水质及藻类状况等有所差别,水库藻类对环境变化的响应可能不同。本文通过对两个水库浮游植物群落结构及水质、水文气象因子的周年观测与分析,试图探究太湖流域中营养水源水库中藻类水华的特点与驱动因素,为太湖流域水库型饮用水源地水质安全保障提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 区域概况

赋石水库(简称FS)位于太湖水系西苕溪支流西溪上游,总库容为 $2.18 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大水深28 m,集水面积 331 km^2 ,平均换水周期约为233 d,其中山地丘陵占总面积的85%,植被覆盖率较高。老石坎水库(简称LSK)位于太湖水系西苕溪支流南溪上游,总库容为 $1.14 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大水深为20 m,集水面积 272 km^2 ,平均换水周期约为148 d。两水库均具有饮用水源地的功能,兼具防洪、灌溉、发电和渔业养殖等功能。

1.2 采样布设及分析方法

根据水库的水位、水面面积等,在赋石水库布设了6个采样点位,在老石坎水库布置了3个采样点位(图1)。自2020年1月—2021年1月(其中2020年2月因疫情影响未采样),逐月监测水库水环境指标、水体理化指标并采集浮游植物样品。

现场用直径20 cm的赛氏盘测定透明度(SD),用YSI多参数水质仪测定水温(WT)与溶解氧(DO)。

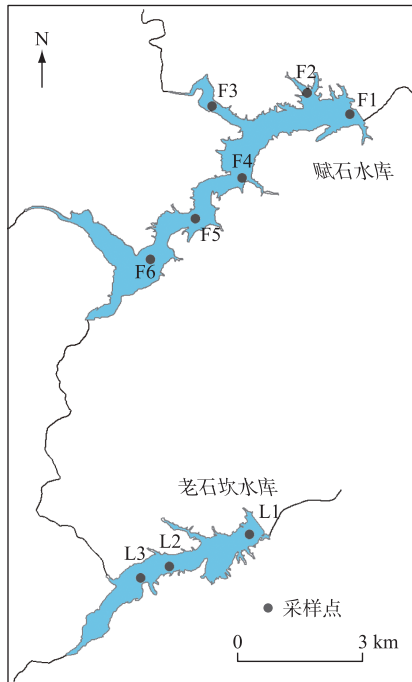


图1 赋石水库与老石坎水库采样点分布
Fig.1 Sampling sites in Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir

于水体表层 0.5 m 处采集 1.5 L 水样用于营养盐、悬浮物等水质指标分析,水样采集后立即用过滤孔径约 0.7 μm 的 GF/F 膜 (英国 Whatman 公司) 过滤,并于 2~4 h 内送达实验室。现场同步采集 1 L 水样,用鲁戈试剂固定后带回实验室浓缩,进行浮游植物群落结构的定量鉴定。

总氮 (TN)、溶解性总氮 (DTN)、总磷 (TP)、溶解性总磷 (DTP) 和高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 的测定参考《水和废水监测分析方法》,叶绿素 a (Chl. a) 测定采用热乙醇提取一分光光度法^[26]。固定后的浮游植物定量样品经沉淀浓缩后取 0.1 mL 浓缩样品用光学显微镜进行鉴定与计数,获得单位体积中浮游植物数量,再根据近似几何图形测量长、宽、厚,并通过求积公式计算出生物体积,并换算成单位体积的生物量。浮游植物的主要鉴定方法参考《中国淡水藻类——系统、分类及生态》^[27],生物量计算方法参考《淡水浮游生物研究方法》^[28]。水华判别依据为:浮游植物细胞密度在 $1 \times 10^6 \sim 10 \times 10^6$ cells/L 之间为轻度水华,在 $10 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6$ cells/L 之间为中度水华,大于 20×10^6 cells/L 为重度水华^[29]。

为比较两个水库的藻类群落结构差异性,选用种类相似性指数 (Jaccard 指数) 进行数据分析,计算公式为:

$$\text{Jaccard 指数} = \frac{c}{a+b+c} \quad (1)$$

式中, a 为样品 A 的种类数, b 为样品 B 的种类数, c 为 A 和 B 共有种类数。当 $0 < \text{Jaccard 指数} < 0.25$ 时,两组样品藻类群落结构极不相似;当 $0.25 \leq \text{Jaccard 指数} < 0.50$ 时,两组样品藻类群落结构中等不相似;当 $0.50 \leq \text{Jaccard 指数} < 0.75$ 时,两组样品藻类群落结构中等相似; $0.75 \leq \text{Jaccard 指数} < 1.00$ 时,两组样品藻类群落结构极相似。

根据湖泊富营养化评价方法及分级标准^[30],赋石水库与老石坎水库的综合营养状态指数 $TLI(\Sigma)$ 计算依据水体 TN、TP、Chl. a 、 COD_{Mn} 、SD 进行。具体计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \times TLI(j) \quad (2)$$

式中, $TLI(j)$ 代表第 j 种参数的营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重。 $TLI(\Sigma) < 30$ 时为贫营养; $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$ 时为中营养; $TLI(\Sigma) > 50$ 时为富营养。

1.3 水文气象数据来源

2020 年 1 月—2021 年 1 月逐日平均气温 (AT)、降水量 (RF) 数据由国家气候中心获得,同期的赋石水库与老石坎水库逐日水位 (WL) 数据由水库管理局提供。

1.4 数据处理

使用 Excel 2019、Origin 9.0 软件进行数据处理和图表绘制,使用 SPSS 26.0 软件计算浮游植物生物量与环境因子间的 Pearson 相关系数,使用 Canoco 5.0 软件对浮游植物各门类生物量与环境因子 (TN、DTN、TP、DTP、SD、DO、WT、WL、AT、RF) 进行 RDA 分析,对这些环境因子进行共线性分析,删除共线性环境因子 TN、DTP、AT、RF,对剩余环境因子采用向前引入法 (forward selection) 和蒙特卡罗置换检验进行筛选,最终确定 DTN、TP、WT、WL 4 个环境因子进行分析。分析前对物种数据和所有环境因子进行 $\lg(x+1)$ 转化。

2 结果与分析

2.1 藻类群落结构周年变化及异常增殖特征

调查期间,赋石水库与老石坎水库浮游植物细胞密度和生物量变化如图 2 所示。赋石水库共检出浮游

植物 6 门 53 种,老石坎水库共检出浮游植物 7 门 48 种,两水库藻类相似性系数为 0.74,总体上为中等相似。但就藻类丰度而言,调查期间赋石水库与老石坎水库浮游植物群落发生了明显的季节演替现象,不同时期优势种有所不同:赋石水库浮游植物月均密度为 $33 \times 10^4 \sim 1702 \times 10^4$ cells/L,最低值出现在 2020 年 1 月,高值出现在 2020 年 6 和 9 月,其中 6 月以微囊藻(*Microcystis* sp.)和束丝藻(*Aphanizomenon* sp.)为优势,9 月以长孢藻(*Dolichospermum* sp.)、平裂藻(*Merismopedia* sp.)和束丝藻占优势;老石坎水库浮游植物月均密度为 $77 \times 10^4 \sim 6252 \times 10^4$ cells/L,最低值出现在 2020 年 9 月,最高值出现在 2020 年 5 月,其中硅藻细胞密度达 6232×10^4 cells/L,优势种为曲壳藻(*Achnanthes* sp.),占比达 99.23%。

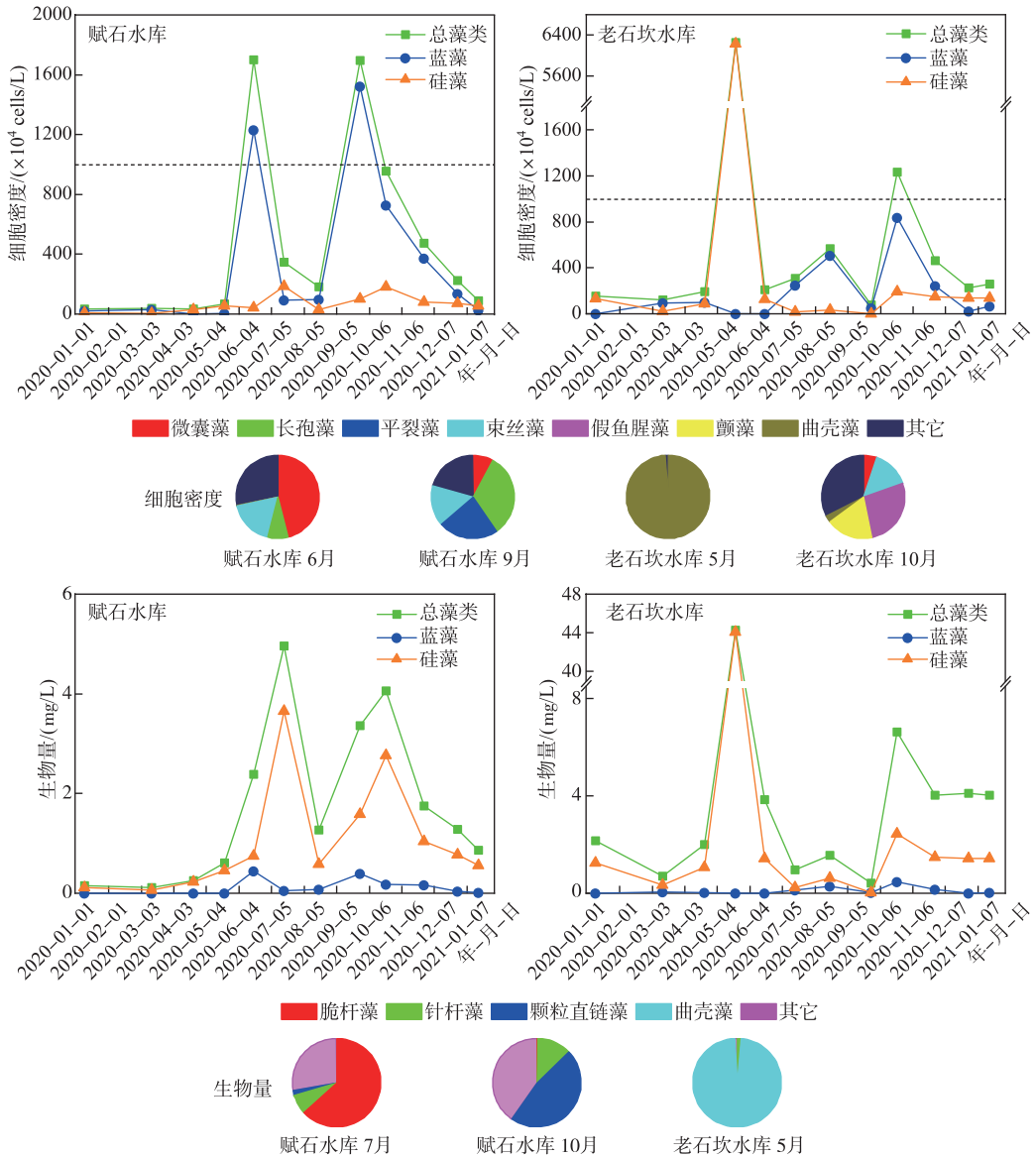


图 2 赋石水库和老石坎水库藻类细胞密度和生物量变化

Fig.2 Variations of cell density and biomass of phytoplankton in Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir

由于不同种属藻类细胞的大小差异巨大,浮游植物的生物量变化特征与细胞密度有较大的差异(图 2)。

赋石水库浮游植物月均生物量为 0.11~4.96 mg/L,最低值出现在 2020 年 3 月,最高值和次高值分别出现在 2020 年 7 和 10 月,其中 7 月以脆杆藻(*Fragilaria* sp.)为主,10 月以颗粒直链藻(*Melosira granulata*)和针杆藻(*Synedra* sp.)为主。老石坎水库浮游植物月均生物量为 0.42~44.27 mg/L,最低值出现在 2020 年 9 月,最高值出现在 2020 年 5 月,硅藻生物量达 44.07 mg/L,以曲壳藻为绝对优势种,2020 年 10 月生物量有所回升,以假鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)、颤藻(*Oscillatoria* sp.)和束丝藻为主。

周年观测期间,两个水库各发生 2 次水华事件,水华优势种多变:(1)赋石水库 6 和 9 月均出现了中度蓝藻水华,分别以微囊藻和长孢藻为主;(2)老石坎水库 5 月暴发重度硅藻水华,以曲壳藻为绝对优势种,10 月出现接近中度水平的蓝藻水华,优势种为假鱼腥藻和颤藻。

2.2 水库理化指标特征

赋石水库和老石坎水库 TN 浓度范围分别为 0.60~1.35 和 0.64~1.32 mg/L,年均值分别为 0.89 和 0.97 mg/L,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)属于Ⅲ类水。春季 TN 浓度较高,夏秋季浓度较低,冬季 TN 浓度开始回升,这可能与春季流域营养盐输入有关。赋石水库与老石坎水库 DTN 浓度范围分别处于 0.52~1.23 和 0.49~1.12 mg/L,年均值分别为 0.76 和 0.80 mg/L,变化趋势与 TN 浓度相似(图 3)。

赋石水库与老石坎水库 TP 浓度范围分别为 0.017~0.031 mg/L 和 0.021~0.055 mg/L,年均值分别为 0.025 和 0.032 mg/L,分属Ⅱ类水和Ⅲ类水。2020 年春季老石坎水库磷浓度相对较高。赋石水库与老石坎水库 DTP 浓度分别为 0.006~0.018 和 0.009~0.021 mg/L,年均值均为 0.014 mg/L。

赋石水库与老石坎水库 Chl.*a* 年均值分别为 11.33 和 20.81 $\mu\text{g/L}$ 。其中赋石水库 6、7、10 月 Chl.*a* 超过 20 $\mu\text{g/L}$;老石坎水库 5 月硅藻水华暴发,Chl.*a* 浓度异常高,全库平均含量达到 99 $\mu\text{g/L}$ 。

赋石水库与老石坎水库 COD_{Mn} 年均值均为 1.53 mg/L,基本处于Ⅰ类水,其高值出现月份与藻类异常增殖时间同步,表明藻类生物量是水体 COD_{Mn} 的主要贡献者。赋石水库与老石坎水库 SD 年均值分别为 2.03 和 1.29 m,在藻类生物量较低的 3 和 8 月,水库透明度较高。两水库 DO 浓度全年处于Ⅰ类水,春夏季分层现象明显。赋石水库与老石坎水库 WT 最高值均出现在 8 月,分别为 32.28 和 33.95 $^{\circ}\text{C}$,WT 最低值均出现在 2021 年 1 月,分别为 8.20 和 7.48 $^{\circ}\text{C}$;春夏季表、底层 WT 出现明显分异,赋石水库 7 月因长时间降雨导致 WT 降低,热分层明显被破坏。赋石水库与老石坎水库 TLI(Σ) 年均值分别为 38 和 42,总体来看均处于中营养水平,其中老石坎水库 5 月已达富营养水平。

综合来看,两水库水质理化指标大部分无显著差异,但是 TP 显著不同($P<0.05$),赋石水库的 TP 浓度显著低于老石坎水库。

2.3 水文气象因子变化特征

2020 年 1 月—2021 年 1 月期间两个水库的逐日水位及区域气温、降水量日变化如图 4 所示。

安吉县逐日气温范围为-3.9~33.1 $^{\circ}\text{C}$,最高气温出现在 2020 年 8 月 1 日,最低气温出现在 2021 年 1 月 8 日。降水量呈现明显的季节性变化,主要集中在夏季,夏季降水量达 897.3 mm,占 2020 年总降水量的 49.5%;其次为春季,季节累积降水量达 368.7 mm;秋冬季降水相对较少。

赋石水库水位变化范围为 72.83~80.85 m,平均值为 73.81 m。老石坎水库水位变化范围为 16.01~27.92 m,平均值为 19.56 m。两水库水位变化趋势与降水量相似。春季日降水量分布不均,水位上下波动幅度较大;夏季降水量骤增时水位快速上升;秋冬季降水稀少,水位降低并保持在低值。

2.4 藻类生物量与环境因子的关系

分别对赋石水库和老石坎水库浮游植物各门生物量数据进行去趋势分析(DCA),得出排序轴最大梯度长度为 1.5 和 2.1(均小于 3),因此选择冗余分析(RDA)进行藻类生物量的影响因素分析,分析结果如图 5 所示。在赋石水库的 RDA 分析结果中,环境因子变量总共解释了 33.3%的浮游植物变化数据,第 1 排序轴和第 2 排序轴的特征值分别为 0.31 和 0.02,两轴累计解释了 98.03%的物种与环境之间的关系。老石坎水库的 RDA 分析结果显示,环境因子总共解释了 63.0%的物种变化,第 1 排序轴和第 2 排序轴的特征值分别为 0.59 和 0.04,两轴累计解释了 98.83%的物种与环境之间的关系。赋石水库中浮游植物群落结构变化的主要相关环境因子是 WT 和 DTN($P<0.01$),其次是 TP($P<0.05$);老石坎水库中浮游植物群落结构变化的主要相关环境因子是 DTN 和 WL($P<0.01$),其次是 TP($P<0.05$)。

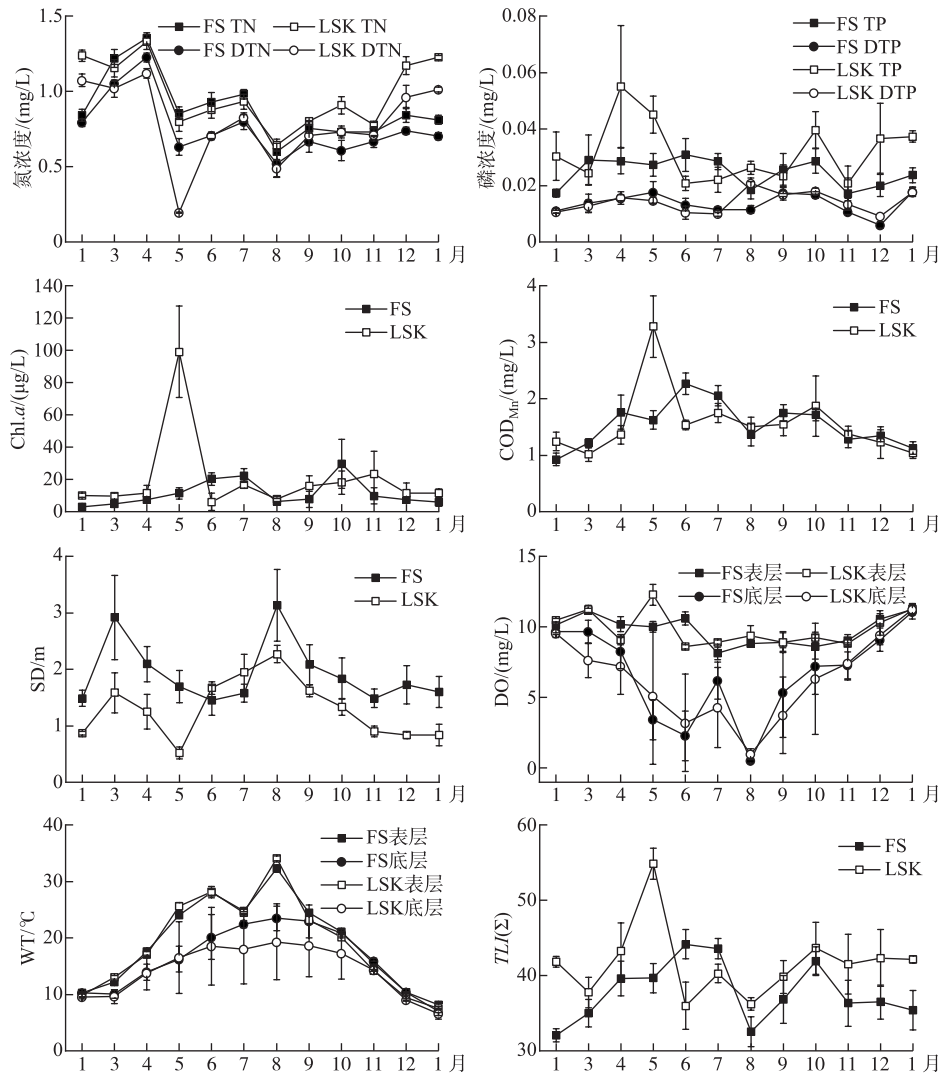


图3 赋石水库和老石坎水库水环境指标逐月变化

Fig.3 Monthly variations of water environmental indicators of Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir

3 讨论

3.1 影响水库硅藻与蓝藻生物量变化的关键因素

赋石水库与老石坎水库的 Pearson 相关性分析结果如表 1 所示。赋石水库蓝藻生物量与 WT 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 TP 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。老石坎水库蓝藻生物量与 DTP 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 WT 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。由此看出两水库蓝藻增殖主要受水温 and 磷浓度的影响。由于水温很大程度是区域气候背景自然变化的因素, 说明两个水库中蓝藻的异常增殖主要受磷补给的影响, 同时受春、夏季等温暖季节短期气象条件的影响。

赋石水库硅藻生物量与 WT、WL 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 TP 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。这表明赋石水库硅藻增殖在受磷供给的影响外, 更多受到温度及水位波动等气象水文条件变化的影响。老石坎水库硅藻生物量与 SD 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与 COD_{Mn} 、DO 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),

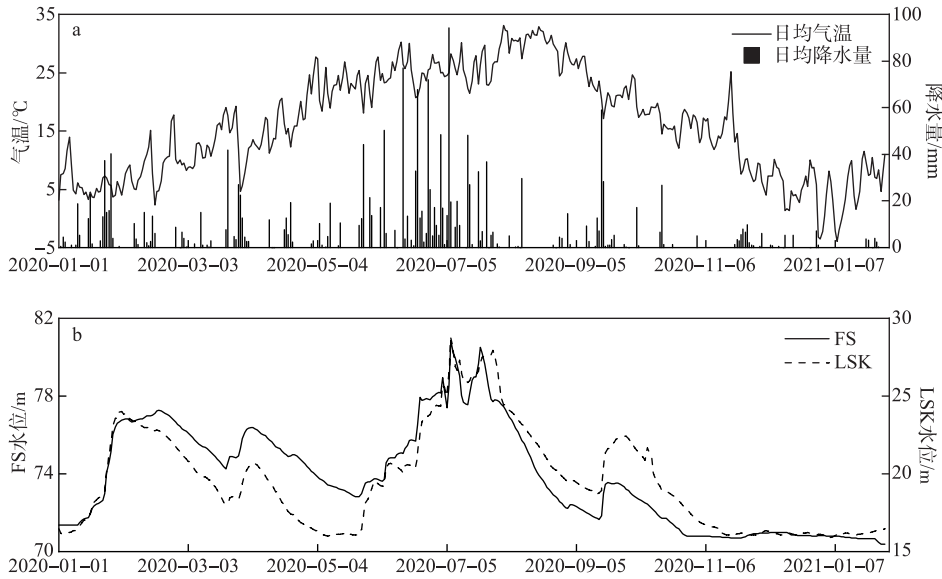


图 4 赋石水库与老石坎水库区域气温和降水量及水位日变化

Fig.4 Daily variations of air temperature and rainfall and water level in Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir

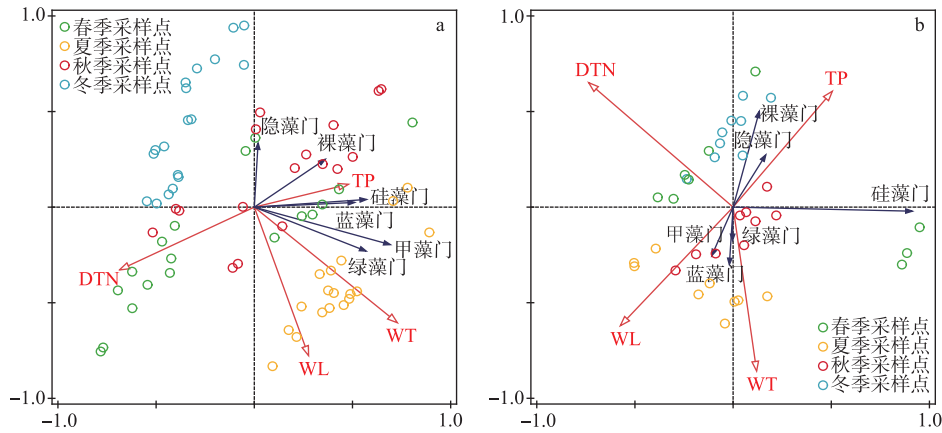


图 5 赋石水库 (a) 与老石坎水库 (b) 浮游植物与环境因子的 RDA 排序图

Fig.5 RDA ordination of phytoplankton species with environmental variables in Fushi Reservoir (a) and Laoshikan Reservoir (b)

表 1 赋石水库与老石坎水库浮游植物生物量与环境因子的 Pearson 相关性分析

Tab.1 The Pearson correlation between phytoplankton biomass and environmental factors in Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir

水库	浮游植物	TN	DTN	TP	DTP	COD _{Mn}	DO	WT	SD	WL
赋石水库	硅藻门	-0.214	-0.313 **	0.303 *	0.07	0.505 **	-0.582 **	0.322 **	-0.306 **	0.331 **
	蓝藻门	-0.260 *	-0.352 **	0.259 *	0.125	0.506 **	-0.096	0.421 **	-0.182	0.111
老石坎水库	硅藻门	-0.251	-0.685 **	0.311	0.062	0.835 **	0.600 **	0.246	-0.457 **	-0.301
	蓝藻门	-0.413 *	-0.229	-0.023	0.460 **	0.103	-0.338 *	0.347 *	0.306	0.213

* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, 双尾检验。

而其中 DO、SD 变化更可能是藻类异常增殖的结果,而非原因;COD_{mn}与硅藻生物量呈显著正相关,表明生活污水排放、河流有机质含量偏高等污染状况对硅藻的异常增殖有促发作用,如春季大量有机肥的投放,在降雨径流携带下进入水库,有可能是促发硅藻异常增殖的因素。

已有研究表明,影响湖库中浮游植物群落结构季节演替的环境因子差异较大^[31-32],本研究进一步表明了山区水库藻类水华机制的复杂性。RDA 结果显示(图 5),藻类生物量的季节性差异较大,不同环境因子对各点位藻类的影响存在差别,某些因子的异常变化,可能会显著改变藻类群落结构的演替行为。赋石水库蓝藻门与 WT、WL 和 TP 呈正相关,与 DTN 呈负相关;老石坎水库蓝藻门与 WT 和 WL 呈正相关,与 TP 呈负相关,营养盐、温度、水文过程是蓝藻异常增殖的关键促发因子。赋石水库硅藻门与 WT、WL 和 TP 呈正相关,与 DTN 呈负相关;老石坎水库硅藻门与 TP、WT 呈正相关,与 DTN 和 WL 呈负相关,表明氮磷营养盐、水温和水位同样是影响水库硅藻生物量变化的重要因素。多因子协同驱动,是山区中营养水库藻类水华的基本特点。

3.2 营养盐对藻类水华影响的临界值分析

氮与磷是浮游植物生长繁殖所必需的营养元素,营养盐也被普遍认为是浮游植物群落结构变化的重要因素^[25,33-34]。Pearson 相关性分析结果显示,两水库蓝藻和硅藻生物量与 TN 和 DTN 均呈负相关关系;RDA 分析结果同样显示出蓝藻和硅藻与 DTN 间的负相关关系。许海等^[35]通过实验发现 TN 浓度高于 0.70 mg/L 时便不会限制藻类生长,而赋石水库和老石坎水库除 8 月外 TN 浓度均高于 0.70 mg/L(图 3)。这表明两水库的氮能够满足藻类生长,并不是影响两水库藻类生长的主要限制因子,与生物量的负相关关系只能说明未能起到限制作用,但同时受季节因素的影响。所以,对于临界值的分析,重点考虑磷的限制临界值。

对两水库蓝藻和硅藻总生物量与总磷作非线性回归分析(图 6)可知,当水体 TP 浓度大于 0.024 mg/L 后,回归曲线值明显上升;当水体 TP 浓度达到 0.032 mg/L 时,回归曲线也达到最大值。当 TP 浓度低于 0.032 mg/L 时,蓝藻和硅藻生物量与 TP 浓度呈显著正相关($P < 0.01$),表明藻类生物量对磷浓度变化敏感,磷浓度的增加将显著影响藻类的生物量,磷是藻类生物量或者藻类异常增殖、藻类水华强度的关键影响因子。而当 TP 浓度高于 0.032 mg/L 时,蓝藻和硅藻与 TP 浓度的相关性并不显著($P = 0.95$),此时蓝藻和硅藻的生长并未受到磷的限制,并且能够满足硅藻水华暴发的需求,蓝藻或者硅藻的异常增殖强度主要受到其它环境条件,如水力停留时间、光照、温度、食物链下行效应等的影响。因此,可以将 TP 浓度 0.024 mg/L 作为两水库控制蓝藻或硅藻水华的临界值。目前赋石水库、老石坎水库的 TP 年均值分别为 0.025 和 0.032 mg/L,特别是在 4—5 月的春耕期(图 3),表明进一步控制流域磷负荷是两个水库藻类水华防控的重点。至于氮,赋石水库和老石坎水库的月最低值分别为 0.60 和

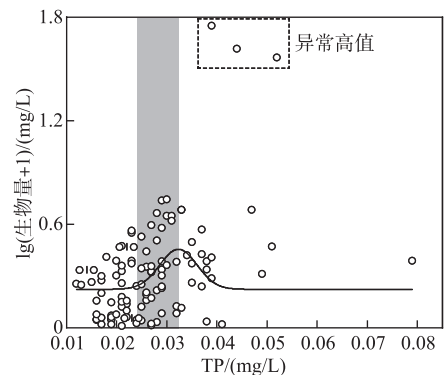


图 6 赋石水库和老石坎水库蓝藻和硅藻生物量总和与总磷的关系

Fig.6 Relationship between total phosphorus and total biomass of cyanobacteria and diatom in Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir

0.64 mg/L,均未对藻类生物量变化产生显著影响,因此推测调查期间未出现明显的氮限制作用。若想通过氮浓度的控制来防治藻类水华出现,氮的控制临界值应低于 0.60 mg/L,并需要更多的研究予以确定。

3.3 温度对藻类水华的影响阈值分析

温度能直接影响浮游植物的生长速率,从而影响浮游植物群落的演替^[36]。不同浮游植物的最适生长温度不同,直接影响了不同季节浮游植物的群落结构。赋石水库和老石坎水库蓝藻和硅藻生物量与水温的关系如图 7 所示。由图 7 可知,在水温 20℃ 以上,蓝藻生物量随温度升高而明显上升,峰值出现在 30℃ 左右,而在 30℃ 之后,蓝藻生物量随水温上升而降低。这表明 20℃ 以上,蓝藻水华的风险就存在,而且随着温度升高,风险增加,30℃ 左右是蓝藻异常增殖的高度敏感温度。这与文献报道的蓝藻生长的最适温度在 25~35℃ 之间且适宜温度高于硅藻的现象吻合^[37]。当处于蓝藻最适生长温度时,其它真核藻类的生长速度会随

随着温度升高而下降^[38]。本研究中发现蓝藻生物量在大于 30℃ 后出现下降的现象,可能是同期其它非温度因素发生限制的结果。30℃ 主要出现在 8 月,同期较低的氮、磷营养盐供给可能是蓝藻生物量随温度上升反而下降的原因(图 3)。这表明,在寡-中营养型水体中,一旦营养盐能满足藻类异常增殖的需求时,高温的联合作用能大大增加蓝藻水华的发生概率^[39],因此,在营养盐充足与持续高温情况下,应当加强对中营养水库蓝藻水华风险的关注。

从图 7 可以看出,与蓝藻相比,硅藻生物量峰值出现时的温度与蓝藻有所不同。硅藻生物量在 16℃ 后即开始明显上升,峰值出现在 22℃。笄文怡等^[40]的研究指出,由于硅藻不同属之间存在较大的生物学差异,能够适应不同季节较大范围的环境因素变化形势,因此硅藻门能在更多的月份占据生物量方面的优势。朱广伟等^[41]对太湖流域水库的研究表明,曲壳藻相比杆状藻具有更加宽泛的生长时间以及更高的最适生长温度。因此,老石坎水库 4 月藻类生物量较低而在 5 月暴发曲壳藻水华,温度适宜也可能是关键因素之一。5 月平均水温(26℃)相比 4 月(17℃)更适宜曲壳藻的生长。因此,在太湖流域的中营养水平水库中,硅藻水华风险先于蓝藻水华,在春末夏初风险最高。而夏季蓝藻水华风险明显升高。由于全球变暖,更频繁且持续时间更长的热浪事件可能增加蓝藻水华暴发的风险^[42]。总体而言,4—9 月均应警惕水源水库的藻类水华威胁。

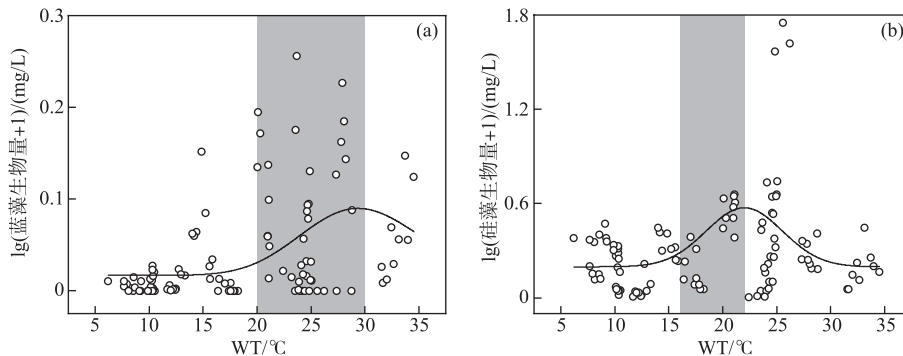


图 7 赋石水库和老石坎水库蓝藻(a)和硅藻(b)生物量与水温的关系

Fig.7 Relationship between water temperature and biomass of cyanobacteria (a) and diatom (b) in Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir

3.4 水文条件变化对藻类水华的影响

水库的水利调度势必造成水库较大的水文条件波动,对水库浮游植物生长产生重要影响^[43-45]。水位波动是水库水量变化、水力停留时间变化的表征指标。而水量变化则可以通过稀释效应,影响水体物理化学环境,影响养分吸收、生长速率等生理水平来调控浮游植物的动态变化^[46]。与天然湖泊相比,水库往往会发生较大的水位波动现象^[47]。调查期间两水库水位变化呈现相似的趋势(图 4),但水位变化的幅度相对于水深的占比则有所不同。通常认为,月水位变化连续两个月超过 2 m/月时可被认为发生了强烈的水位波动^[48]。赋石水库和老石坎水库水位剧烈波动期主要集中在春季至秋季,其中老石坎水库水位较低,水位波动幅度显著大于赋石水库。

图 8 表明,藻类水华事件的发生往往出现在极端水位或剧烈波动期。赋石水库于 9—10 月,老石坎水库于 5 和 10 月均发生了藻类异常增殖现象,均处于水库水位下降的低水位时期,特别是在老石坎水库,硅藻生物量与水位变化间呈负相关(图 5)。其机制可能是水位持续降低及其导致的低水位为藻类的异常增殖创造了条件。Fuentes 等报道了低水位对蓝藻增殖的促发作用^[49]。低水位会导致水体营养盐浓度因浓缩而上升^[50],并且水位较低的水库在水体混合过程中易引发底泥营养盐向水体的释放^[51],这些因素均有利于藻类群落结构突变,硅藻或者蓝藻中的优势种异常增殖。对于老石坎水库而言,由于还存在巨大的库尾浅水区,低水位会导致消落带沿岸土壤及库底的大量裸露,降雨对土壤的冲刷所产生的营养盐负荷也会有所提高,底栖硅藻也可能因光照充足而大量滋生,然后随降雨大量进入水体,进而引发水库水体硅藻水华事件的发

生。同时,水库处于低水位时期意味着较低的降水与换水率,低换水率能为硅藻提供稳定的生长环境^[52]。对曲壳藻来说,其往往于频繁搅动的、浑浊的浅水区大量滋生。因此,春季干旱导致的长期低水位可能为老石坎水库5月硅藻水华暴发创造了有利条件。进入夏季,随着降水量以及水位的快速升高,藻类群落结构发生演替,硅藻水华迅速消退。

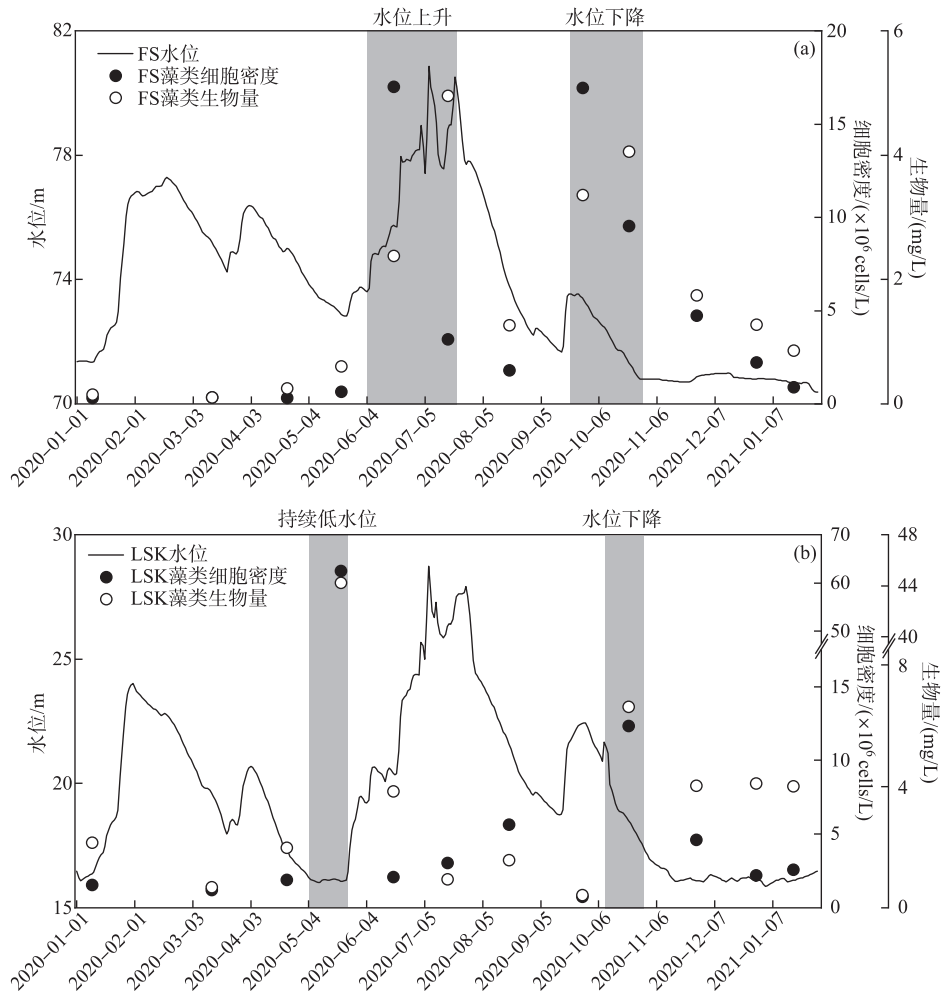


图8 赋石水库和老石坎水库浮游植物与水位的关系

Fig.8 Relationship between water level and phytoplankton in Fushi Reservoir and Laoshikan Reservoir

与老石坎水库相比,赋石水库库容更大,换水周期更长,水体流速较缓,水温分层更为稳定,更适宜蓝藻的增殖及生物量累积。赋石水库在水位上升期和高水位期藻类细胞密度与生物量相对更高,可能有两方面原因:一是赋石水库水位较高,水位变化对藻类生长的影响较弱,营养盐与温度的影响力更大;二是强降雨导致的水位上升期,营养盐补给快速而强烈,创造了更适宜硅藻繁殖的水体环境。

秋季的水位快速下降期,两个水库均再次出现了藻类峰值。一般认为,水深较浅的湖库生态系统更为脆弱,更易受到外部因素变化的冲击。在相同的水位波动范围内,浅水体相比深体会受到更大的影响^[53]。本研究中,水浅的老石坎水库藻类水华现象更明显,而库容、水深更大且缓冲能力更强的赋石水库藻类异常增殖程度较弱并对水位降低的响应存在滞后现象,也进一步证实了这一点。此外,水位快速下降期水体稳定性下降,内源释放强度增大可能也是藻类群落结构突变的促发原因。王远飞等^[54]认为,较低的水温与水

体热分层被破坏的共同作用可能会引发硅藻的大量繁殖,因为热分层会导致具有沉重硅质细胞壁的硅藻下沉,这可能是两个水库在10月又出现硅藻生物量升高的原因之一。

总而言之,低水位是诱发赋石水库和老石坎水库藻类异常增殖的促发因素之一,而高水位时期大量来水产生的冲刷作用能够抑制水体藻类的积累。Ye等^[46]的研究显示水位上升能够显著降低浮游植物水华期间叶绿素 a 浓度。从水库管理角度来看,根据当地降水量变化合理调节水库出入水量,在旱季维持水库在高水位运行是预防水源水库藻类水华暴发的一种有效手段。

致谢:感谢赋石水库、老石坎水库管理局在野外调查中提供的帮助与支持,感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所史鹏程、叶小锐、吴天浩、段文秀、赵锋、唐伟、郑清、胡春华、刘莉等在样品采集及水质测定中提供的帮助,感谢国超旋、张萍等在数据分析与论文修改中提供的帮助。

4 参考文献

- [1] Rangel LM, Silva LHS, Rosa P *et al.* Phytoplankton biomass is mainly controlled by hydrology and phosphorus concentrations in tropical hydroelectric reservoirs. *Hydrobiologia*, 2012, **693**(1): 13-28. DOI: 10.1007/s10750-012-1083-3.
- [2] Katsiapi M, Moustaka-Goumi M, Michaloudi E *et al.* Phytoplankton and water quality in a Mediterranean drinking-water reservoir (Marathonas Reservoir, Greece). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **181**(1): 563-575. DOI: 10.1007/s10661-010-1851-3.
- [3] Yang XK, Lu XX. Drastic change in China's lakes and reservoirs over the past decades. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 6041. DOI: 10.1038/srep06041.
- [4] Han BP. Reservoir ecology and limnology in China: A retrospective comment. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 151-160. DOI: 10.18307/2010.0201. [韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 151-160.]
- [5] Duan WX, Zhu GW, Liu JJ *et al.* An evaluation method for ecological security of water resource reservoirs. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 4135-4145. [段文秀, 朱广伟, 刘俊杰等. 水源地形水库水生态安全评价方法探索. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 4135-4145.]
- [6] Shi PC, Zhu GW, Yang WB *et al.* Occurrence and influencing factors of odorous compounds in reservoirs used as drinking water resources in Jiangsu Province. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4000-4008. [史鹏程, 朱广伟, 杨文斌等. 江苏水源地形水库异味物质发生风险及影响因素. 环境科学, 2019, **40**(9): 4000-4008.]
- [7] Xu H, Qin BQ, Pael HW *et al.* Environmental controls of harmful cyanobacterial blooms in Chinese inland waters. *Harmful Algae*, 2021, **110**: 102127. DOI: 10.1016/j.hal.2021.102127.
- [8] Li HM, Du GS, Jiang SJ *et al.* The correlation of microcystins and water environment factors in Guanting Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(5): 1322-1327. [李慧敏, 杜桂森, 姜树君等. 官厅水库的微囊藻毒素及其与水环境的相关性. 生态学报, 2010, **30**(5): 1322-1327.]
- [9] Jiang X, Zhu L, Xu SG *et al.* Effects of seasonal stratification and suspended sediment behaviors on the mobilization of manganese and iron in a drinking water reservoir—A case of Biliuhe Reservoir, Liaoning Province. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 375-385. DOI: 10.18307/2019.0207. [姜欣, 朱林, 许士国等. 水源水库季节性分层及悬浮物行为对铁锰迁移的影响——以辽宁省碧流河水库为例. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 375-85.]
- [10] Yang M, Zhang S, Hu ZY. Characteristics and preliminary regulating factors of cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2014, **26**(3): 371-378. DOI: 10.18307/2014.0306. [杨敏, 张晟, 胡征宇. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华暴发特性及成因探析. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 371-378.]
- [11] Fernández C, Estrada V, Parodi ER. Factors triggering cyanobacteria dominance and succession during blooms in a hypereutrophic drinking water supply reservoir. *Water Air & Soil Pollution*, 2015, **226**(3): 73. DOI: 10.1007/s11270-014-2290-5.
- [12] Pael HW, Otten TG. Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 2013, **65**(4): 995-1010. DOI: 10.1007/s00248-012-0159-y.
- [13] Chen N, Mo Q, Kuo YM *et al.* Hydrochemical controls on reservoir nutrient and phytoplankton dynamics under storms. *Science of the Total Environment*, 2018, **619/620**: 301-310. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.216.
- [14] Shan K, Song L, Chen W *et al.* Analysis of environmental drivers influencing interspecific variations and associations among bloom-forming cyanobacteria in large, shallow eutrophic lakes. *Harmful Algae*, 2019, **84**: 84-94. DOI: 10.1016/j.hal.2019.02.002.
- [15] Richardson J, Feuchtmayr H, Miller C *et al.* Response of cyanobacteria and phytoplankton abundance to warming, extreme rainfall events and nutrient enrichment. *Global Change Biology*, 2019, **25**(10): 3365-3380. DOI: 10.1111/gcb.14701.
- [16] Yao LA, Zhao XM, Zhou GJ *et al.* Preliminary regulating factors of spring cyanobacteria bloom in Gaozhou Reservoir, Guangdong Province. *J Lake Sci*, 2011, **23**(4): 534-540. DOI: 10.18307/2011.0407. [姚玲爱, 赵学敏, 周广杰等. 广东省高州水库春季蓝藻水华成因初步探讨. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 534-540.]

- [17] Ren J, Zhou T, Zhu GW *et al.* Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the south of Jiangsu Province, China and its control factors. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1742-1753. DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.019. [任杰, 周涛, 朱广伟等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素. 环境科学, 2016, **37**(5): 1742-1753.]
- [18] Hu E, Wang WK, Zhang ZW *et al.* Characteristics and influencing factors of diatom bloom in Lin Hekou Reservoir. *Journal of Biology*, 2020, **37**(4): 58-61. [胡恩, 王文科, 张振文等. 蕲河口水库硅藻水华特征及影响因素研究. 生物学杂志, 2020, **37**(4): 58-61.]
- [19] Liu DF, Yang ZJ, Ji DB *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454. [刘德富, 杨正健, 纪道斌等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.]
- [20] Huang QF, Guo CX, Li N *et al.* Characteristics of summer heat waves and potential effect on algal blooms in Fuchunjiang Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(2): 530-539. [黄群芳, 国超旋, 李娜等. 富春江库区高温热浪变化特征及对藻类水华潜在影响研究. 环境科学研究, 2022, **35**(2): 530-539.]
- [21] 左文蕊, 丁新新. 老虎潭水库水体富营养化现状及防治措施. 安徽农业科学, 2015, **43**(19): 214-216, 265.
- [22] Liu M, Chen KN, Sun SY *et al.* The water quality variation tendency of Reservoir Daxi and the cause analysis for the water pollution. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(7): 2514-2523. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0459. [刘淼, 陈开宁, 孙淑云等. 大溪水水库水质变化趋势及污染成因解析. 环境科学学报, 2017, **37**(7): 2514-2523.]
- [23] Yang XH, Chang YC, Cai Z *et al.* Phytoplankton community composition and biodiversity variation in Laohutan Reservoir. *Environ Sci Technol*, 2013, **36**(S1): 66-68. [杨晓红, 常艳春, 蔡桢等. 老虎潭水库浮游植物群落组成及多样性变化. 环境科学与技术, 2013, **36**(S1): 66-68.]
- [24] Cui Y, Zhu GW, Li HY *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of water quality in Shahe Reservoir within Tianmu Reservoir and its relationship with phytoplankton community. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(3): 10-18. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2014.03.004. [崔扬, 朱广伟, 李慧赟等. 天目湖沙河水库水质时空分布特征及其与浮游植物群落的关系. 水生态学杂志, 2014, **35**(3): 10-18.]
- [25] Wang Q, Huang W, Chen KN *et al.* Phytoplankton community structure and trophic status evaluation in Reservoir Daxi. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1286-1297. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0497. [汪琪, 黄蔚, 陈开宁等. 大溪水水库浮游植物群落结构特征及营养状态评价. 环境科学学报, 2020, **40**(4): 1286-1297.]
- [26] Chen YW, Chen KN, Hu YH. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-*a* concentration analysis using hot-ethanol extraction method. *J Lake Sci*, 2006, **18**(5): 550-552. DOI: 10.18307/2006.0519. [陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 *a* 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 550-552.]
- [27] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [28] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991.
- [29] Zheng JJ, Zhong CH, Deng CG. Discussion on definition of algal bloom. *Water Resources Protection*, 2006, (5): 45-47, 80. [郑建军, 钟成华, 邓春光. 试论水华的定义. 水资源保护, 2006, (5): 45-47, 80.]
- [30] Wang MC, Liu XQ, Zhang JH. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, (5): 47-49. [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, (5): 47-49.]
- [31] Wei JL, Cao PF, Hu WR *et al.* Seasonal succession of planktonic diatom community and its relationship with environmental factors in Nansi Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(8): 1209-1218. [韦洁琳, 曹鹏飞, 胡文容等. 南四湖浮游硅藻季节性演替及其与环境因子的相关性. 环境科学研究, 2015, **28**(8): 1209-1218.]
- [32] Deng JM, Salmaso N, Jeppesen E *et al.* The relative importance of weather and nutrients determining phytoplankton assemblages differs between seasons in large Lake Taihu, China. *Aquatic Sciences*, 2019, **81**(3): 48. DOI: 10.1007/s00027-019-0645-0.
- [33] Zhou M, He L, Huang JM *et al.* Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Zhushu Lake of Poyang Lake. *Ecological Science*, 2021, **40**(4): 36-46. DOI: 10.18307/2020.0319. [周懋, 何亮, 黄建美等. 鄱阳湖-珠湖浮游植物群落结构时空变化特征与环境因子的关系. 生态科学, 2021, **40**(4): 36-46.]
- [34] Zhang T, Wang JB, Chen C *et al.* Community characteristics of phytoplankton and its environment factors relationships in Puding Reservoir. *Environ Sci Technol*, 2021, **44**(S1): 8-19. [张婷, 王佳兵, 陈稼等. 普定水库浮游植物群落及环境因子关系研究. 环境科学与技术, 2021, **44**(S1): 8-19.]
- [35] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Determining critical nutrient thresholds needed to control harmful cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 1051-1059. DOI: 10.1021/es503744q.
- [36] Fang LJ, Liu DF, Yang ZJ *et al.* Effects of water temperature on the phytoplankton community structure. *Environ Sci Technol*, 2014, **37**(S2): 45-50. [方丽娟, 刘德富, 杨正健等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究. 环境科学与技术, 2014, **37**(S2): 45-50.]
- [37] Wang L, Li L, Liu XC *et al.* Analysis of the seasonal succession of phytoplankton and its influencing factors in Shankouyan Reservoir. *Environ Sci Technol*, 2021, **44**(S2): 284-291. [王玲, 李林, 刘小昌等. 山口岩水库浮游植物季节演替及影响因子分析. 环境科学与技术, 2021, **44**(S2): 284-291.]

- [38] Paerl HW, Gardner WS, Havens KE *et al.* Mitigating cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems impacted by climate change and anthropogenic nutrients. *Harmful Algae*, 2016, **54**: 213-222. DOI: 10.1016/j.hal.2015.09.009.
- [39] Chen WQ, Meng YY, Shan YG *et al.* The driving forces of sporadic cyanobacterial blooms in oligo-meso trophic waters: A case study of Fangbian Reservoir, Nanjing. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1452-1460. DOI: 10.18307/2022.0504. [陈文权, 孟洋洋, 单延功等. 寡-中营养型水体偶发性蓝藻水华的驱动因素分析——以南京方便水库为例. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1452-1460.]
- [40] Da WY, Zhu GW, Li YX *et al.* High-frequency dynamics of water quality and phytoplankton community in inflowing river mouth of Xin'anjiang Reservoir, China. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 713-727. DOI: 10.13227/j.hjlx.201906143. [笄文怡, 朱广伟, 黎云祥等. 新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化. 环境科学, 2020, **41**(2): 713-727.]
- [41] Zhu GW, Jin YW, Ren J *et al.* Characteristics of diatom blooms in a reservoir-water supply area and the countermeasures in Taihu Basin, China. *J Lake Sci*, 2016, **28**(1): 9-21. DOI: 10.18307/2016.0102. [朱广伟, 金颖薇, 任杰等. 太湖流域水库型水源地硅藻水华发生特征及对策分析. 湖泊科学, 2016, **28**(1): 9-21.]
- [42] Huang Q, Li N, Li Y. Long-term trend of heat waves and potential effects on phytoplankton blooms in Lake Qiandaohu, a key drinking water reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(48): 68448-68459. DOI: 10.1007/s11356-021-15414-z.
- [43] Zhang SS, Pei HY, Wei JL *et al.* The seasonal and spatial variations in diatom communities and the influence of environmental factors on three temperate reservoirs in Shandong Province, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(24): 24503-24515. DOI: 10.1007/s11356-019-05480-9.
- [44] Yang J, Lv H, Yang J *et al.* Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2016, **557/558**: 445-452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.094.
- [45] Valeriano-Riveros M, Vilaclara G, Castillo-Sandoval F *et al.* Phytoplankton composition changes during water level fluctuations in a high-altitude, tropical reservoir. *Inland Waters*, 2014, **4**(3): 337-348. DOI: 10.5268/iw-4.3.598.
- [46] Ye L, Tan L, Wu X *et al.* Nonlinear causal analysis reveals an effective water level regulation approach for phytoplankton blooms controlling in reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**(Pt 4): 150948. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150948.
- [47] Zohary T, Ostrovsky I. Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes. *Inland Waters*, 2011, **1**(1): 47-59. DOI: 10.5268/IW-1.1.406.
- [48] Yang JR, Lv H, Isabwe A *et al.* Disturbance-induced phytoplankton regime shifts and recovery of cyanobacteria dominance in two subtropical reservoirs. *Water Research*, 2017, **120**: 52-63. DOI: 10.1016/j.watres.2017.04.062.
- [49] Fuentes EV, Petrucio MM. Water level decrease and increased water stability promotes phytoplankton growth in a mesotrophic subtropical lake. *Marine and Freshwater Research*, 2015, **66**(8): 711. DOI: 10.1071/mf14110.
- [50] Haldna M, Milius A, Laugaste R *et al.* Nutrients and phytoplankton in Lake Peipsi during two periods that differed in water level and temperature. *Hydrobiologia*, 2008, **599**(1): 3-11. DOI: 10.1007/s10750-007-9208-9.
- [51] Zhang Y, Hu R, Xiao LJ *et al.* Comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(1): 107-117. [张怡, 胡韧, 肖利娟等. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 107-117.]
- [52] Ren J, Zhu GW, Jin YW *et al.* Combined effects of water exchange rate and nutrient on diatom proliferation in Hengshan Reservoir, Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2017, **29**(3): 604-616. DOI: 10.18307/2017.0309. [任杰, 朱广伟, 金颖薇等. 换水率和营养水平对太湖流域横山水库硅藻水华的影响. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 604-616.]
- [53] Bakker ES, Hilt S. Impact of water-level fluctuations on cyanobacterial blooms: Options for management. *Aquatic Ecology*, 2016, **50**(3): 485-498. DOI: 10.1007/s10452-015-9556-x.
- [54] Wang YF, Zhou CT, Zhao ZH *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton and its relationship with the environmental factors in subtropical reservoirs. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(10): 4010-4022. DOI: 10.5846/stxb201911182498. [王远飞, 周存通, 赵增辉等. 亚热带水库浮游植物季节动态及其与环境因子的关系. 生态学报, 2021, **41**(10): 4010-4022.]