

Li D M, Song G F, Tian C M, *et al.* Research progress on water bloom in tributary of the three gorges reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(10): 102517. [李丹敏, 宋高飞, 田楚铭, 等. 三峡水库支流水华研究进展 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(10): 102517.]

综述

三峡水库支流水华研究进展

李丹敏^{1,2} 宋高飞¹ 田楚铭^{1,3} 方灵超^{1,2} 万 栋¹ 米武娟¹ 毕永红¹

(1. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 哈尔滨师范大学生命科学与技术学院, 黑龙江省水生生物多样性研究重点实验室, 哈尔滨 150025)

摘要: 三峡水库自2003年蓄水以来, 支流水华问题成为备受关注的主要生态环境问题。文章综述了三峡水库蓄水运行二十年来浮游植物群落演替规律及支流水华的研究进展, 确认蓄水后三峡水库支流浮游植物群落以蓝藻、绿藻、硅藻为主; 群落演替显示显著的空间差异和季节特征; 水华优势种类包括隐藻、甲藻、硅藻、绿藻和蓝藻等, 优势种类随水库蓄水运行阶段而改变, 当前的主要优势种类为蓝藻和硅藻, 微囊藻、假鱼腥藻、小环藻等水华类型多见; 支流水华主要发生在春夏季, 消落期和汛期是水华高发期; 重庆库区水华频次高于湖北库区, 2015年后水华发生频次呈下降趋势; 水动力、温度和营养盐是影响水华生消的主要因子; 针对三峡支流水华研发的物理、化学、生物等防控技术, 在水华防控中发挥了重要作用。鉴于支流水华对三峡生态环境的严重威胁, 未来需要在智能监测预警、高效防控技术等方面开展深入研究, 以保障三峡水库生态环境安全及其可持续利用。

关键词: 三峡水库; 浮游植物; 水华; 防控技术; 生态调度

中图分类号: Q178.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2025)10-102517-12

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0015 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0015



三峡工程是当今世界上最大的水利工程, 其在防洪、蓄水、发电、航运等方面发挥着重要功能^[1,2]。自2003年三峡水库蓄水后, 水位升高, 流速减缓, 水体紊动扩散能力减弱, 污染物滞留时间延长, 导致生态环境发生改变^[3-7], 在此背景下, 主要一级支流频繁暴发水华。三峡水库支流水华的频繁发生严重影响了库区的正常生产生活, 危害水环境安全和水生态系统健康^[8]。因此, 把脉三峡水华规律、找到水华驱动因子、阐明三峡水华生消机理、研发有效防控技术是一段时间内三峡水库迫切需要解决的关键问题。

三峡蓄水迄今已逾二十年, 二十多年来, 专家学者在水库生态环境演变研究中倾注了大量心血,

尤其是对三峡水华的生消动态、演变规律、成因及发展趋势等开展了卓有成效的工作, 获得了一批有价值的成果。为全面把握三峡支流水华的研究进展, 梳理存在的问题和不足, 认清三峡水华未来的研究方向, 本文综述了三峡蓄水运行以来支流水华研究的国内外成果, 并指出了未来的研究方向, 以期为本领域的相关研究人员提供参考。

1 文献计量分析

为把脉三峡水库蓄水二十年水华的研究走向及发展趋势, 以中国知网及Web of Science作为文献数据来源, 以三峡水库、浮游植物及水华作为关键词对国内外的核心文献进行统计, 利用VOSviewer

收稿日期: 2025-01-09; 修订日期: 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金长江水科学研究联合基金(U2040210)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China-Yangtze River Water Science Joint Research Fund(U2040210)]

作者简介: 李丹敏(1997—), 女, 博士; 研究方向为藻类生态学。E-mail: lidanmin@ihb.ac.cn

通信作者: 毕永红(1974—), 男, 博士, 研究员; 研究方向为水域生态学。E-mail: biyh@ihb.ac.cn

科学计量知识图谱可视化分析技术及Excel分析软件,对统计到的文献进行分析,绘制发文量趋势图及关键词共现网络图,对高频关键词进行统计,了解三峡水库水华的研究现状及趋势。

1.1 发文总体趋势

对Web of Science和中国知网有关三峡水库水华研究文献进行统计,分析近年以“三峡水库水华”为主题的文献发文量,如图1所示,国内外相关研究呈现出波动变化趋势。2003年三峡水库蓄水运行后,关于三峡水库水华的研究文献逐渐增加,但135—175 m蓄水水位阶段的国外发文量整体较少,低于15篇/年;175 m水位运行阶段的发文量高,国外发文量在2022年达到最大值,为37篇,国内在2012年达到最大值,为36篇。

1.2 关键词共现网络

本文选取了Web of Science (表1)和中国知网(表2)中与三峡水库水华相关文献中排名前10的关键词,其中三峡水库(the Three Gorges Reservoir)、浮游植物(Phytoplankton)、水华(Algal bloom)和富营养化(Eutrophication)在中英文文献中出现频次最多,但出现时间不同。在英文高频关键词中“Xiangxi Bay”出现频率较高,说明三峡水库水华的相关研究以香溪河库湾为主要研究对象进行了较为深入的研究。

通过VOSviewer文献计量学软件对收集到的中英文文献进行分析,生成关键词共现网络图(图2)。图中每一个节点对应一个关键词,节点的大小对应关键词在文献中出现的相对频率,节点间的连线对应二者的共现关系。其中英文文献中排名前五的关键词为“Phytoplankton”“Water Bloom”“Xiangxi Bay”“Eutrophication”“Water Quality”;中文文献排名前五的关键词为“浮游植物”“水华”“富营养化”“群落

结构”“香溪河库湾”。结合关键词共现网络图谱分析,三峡水库水华领域的研究热点包括:三峡水库支流水华的暴发机制;生态调度对三峡水库水动力及水华生消的影响;三峡水库及其重点支流(香溪河、小江)的浮游植物群落结构及其功能群的时空变化特征;三峡水库蓄水以来的长期生态影响,特别是对浮游植物群落和水环境的长期监测。这些研究为三峡水库的生态保护和管理提供了重要的科学依据。

2 浮游植物群落及其演替

2.1 浮游植物群落

三峡水库蓄水前后,营养盐及局地气候条件均未发生本质改变^[8],但三峡蓄水深刻改变了长江的水文情势;三峡水库采用“冬蓄夏排”的运行方式,使其成为典型的河道型反季节调节水库,此外,狭长形的三峡水库兼具河流与水库的双重特点;故而,浮游植物群落变化规律与其他水库明显不同^[9]。水库蓄水运行后,水流减缓、横向扩散速率减小、水力滞留时间延长、支流水位逐渐抬高等所形成的新生境为喜静水藻类的生长增殖提供了有利条件^[5, 10, 11]。三峡建坝蓄水前,不论干流还是支流,浮游植物均无明显优势种。蓄水后干支流浮游植物群落结构和细胞密度显示出明显差异^[4, 12—14]。蓄水1年后,浮游植物种类数由79种增至151种;干流和支流细胞密度分别达到 3.85×10^6 和 2.01×10^7 ind./L,较蓄水前增加41.2%和92.6%^[13]。硅藻丰富度在蓄水后显著下降,绿藻丰富度增加^[12, 13],蓄水营造的新生境导致了浮游植物群落的显著改变,不同水域均出现明显的优势种,个别水域以拟多甲藻和小环藻为主要优势种^[4, 13, 14]并迅速形成水华。物种丰富度及其细胞密度的改变是浮游植物对大坝蓄水运

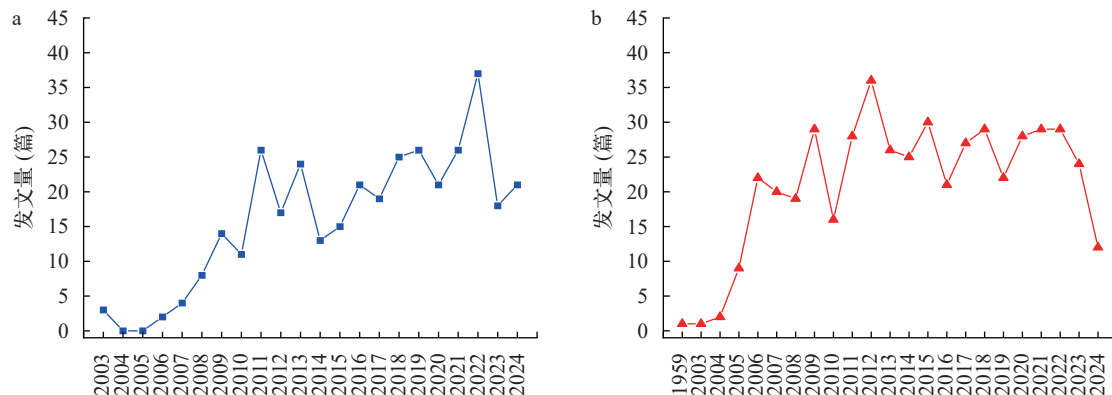


图1 国内外有关三峡水库水华研究的发文量趋势图

Fig. 1 Trend of publication on water bloom research in the Three Gorges Reservoir: Domestic and International

a. Web of Science数据库; b. 中国知网数据库

a. Web of Science database; b. China National Knowledge Infrastructure database

植物群落经历了由硅藻占主导到以蓝藻为主要优势种的转变,这是水体从河流向湖泊演变的标志和象征。

2.2 浮游植物群落演替的影响因子

三峡水库蓄水运行后,江面变宽,水流速度进一步减缓,泥沙沉积,水体自净能力下降^[9]。建坝前,长江干流平均流速为2.66 m/s,横向扩散系数为0.121 m²/s,年径流量达 9.8×10^{11} m³,年内水位变幅最大可达50 m^[13, 22, 23]。三峡建坝蓄水后,坝前库区的沙含量由筑坝前的0.578下降到了0.155 kg/m³,库区平均水位升高了65 m。干流水流流速下降到0.38 m/s^[13],支流断面平均水流速度从135 m蓄水位的0.04 m/s下降到156 m蓄水位的0.01 m/s,175 m蓄水位的平均流速只有不到0.01 m/s^[24]。水位提高造成水体流速改变,水力滞留时间延长,水位变化影响光照、水温、营养盐等理化因子的变化,从而影响浮游植物群落结构。蓄水后支流回水区水力滞留时间明显大于干流;水体中颗粒物易沉降,透明度增加,水表层的光通透性能提高,库区表层水温升高,加上水体中本身较高的营养盐本底值,导致浮游植物细胞密度增加,群落结构发生改变^[15, 25, 26]。水库热分层现象是水库水文重要特征,热分层会直接影响水体的密度分布,从而影响浮游植物物种组成与数量的变化、优势种演替等^[27, 28]。三峡水库支流库湾存在明显的季节性热分层现象,水动力条件的改变和季节变化会影响水体热分层状态,进而影响浮游植物获取光照和营养条件。香溪河和神农溪水体热分层的季节性发育和消失是影响浮游植物群落演替和生物量变化的主要原因^[29, 30]。温度通过影响酶系统的活性在浮游植物光合作用能力、呼吸速率和生长速率等代谢活动中发挥重要作用,不同浮游植物最适生长温度范围不同^[31]。三峡水库不同支流所处的地理位置以及具体的地形地貌不同,受太阳辐射和季节变化的影响浮游植物群落组成和密度变化具有明显的季节性特征^[17, 29]。

水体中充足的氮磷是浮游植物生长的必要条件。由于三峡水库蓄水前营养盐本底值较高,已远超国际公认的富营养化阈值^[32]。多项研究表明氮磷是影响三峡水库干支流浮游植物细胞密度和物种组成的主要环境因子^[33—35]。光照条件通过影响浮游植物的光合效率来影响浮游植物的生长和在水体中的垂直分布^[36]。香溪河浮游植物功能群的变化与拟多甲藻昼夜迁移行为分别受真光层深度和光照强度变化的影响^[7, 37]。

降雨的变化会直接影响水温、流速和养分含量等水质参数以及水体混合状态,从而影响浮游植

物的分布和生长^[38—40]。三峡水库浮游植物群落物种组成和生物量在丰水期和枯水期具有显著差异,降雨与浮游植物多样性指数之间存在显著相关性,降雨对三峡水库浮游植物物种组成和群落稳定性具有重要作用^[41]。

水库调度运行会改变水体的营养状态、环境条件和物理化学特性,对浮游植物群落结构产生显著影响。已有大量研究表明三峡水库生态调度能够增强库区水体扰动、破坏水温分层、抑制藻类聚集,最终缓解库区支流水体富营养化和水华^[5, 42, 43]。泥沙调度能够调节三峡水库的库容,维持三峡水库的蓄水能力,同时也会影响库区支流浮游植物群落更替速率,导致支流浮游植物群落分化,干支流浮游植物群落混合以及生物量减少^[44]。利用水库短时间的水位抬升和下降来实现对生境的适度扰动、增大干流与支流间的水体交换、破坏库湾水体分层状态等机制来影响浮游植物生物量和物种组成^[45]。

总体来看,三峡水库浮游植物群落演替与诸多因子存在密切的关联关系,但由于具体微生境的差异,每个特定水域中不同生态因子对群落演替的贡献率并不相同,需要基于具体实际情况开展针对性的分析,以提供对特定水域生态环境保护的决策依据和支撑。

3 水华特征与成因

3.1 水华特征

自2003年6月三峡坝前发生水华以来,大宁河、香溪河^[46]、神农溪和小江^[6]等支流均发生过水华现象^[10]。截至2023年末,三峡库区支流共发生水华200余次,且水华暴发频率高,分布广。三峡支流水华问题已成为三峡大坝蓄水运行以来最为严重的水生态环境问题^[8]。水华发生总频次、严重水华发生次数在2015年最高,2015年之后出现整体下降的趋势,典型水华在2010年最高,之后一直下降并呈波动变化(图 3a)。湖北库区和重庆库区在不同蓄水阶段水华发生频次的变化略有差异,湖北库区和重庆库区分别在2010和2006年为水华暴发高发期^[47, 48]。水华暴发水域随蓄水水位变化发生迁移,呈现随蓄水水位的升高而向河流上游发展的趋势;水位抬高后支流上新增的库湾成为水华暴发的敏感区域。

对于重点支流水域(如小江和香溪河)水华发生频次仍较高,仍存在较高的水华发生风险(图 3b)。截止到2023年末,水华发生的敏感区域主要集中在小江、香溪河、磨刀溪、竺溪河等支流。2011—

2023年香溪河和小江水华集中暴发时间存在差异, 香溪河水华大多发生在6—9月, 而小江主要发生在4—6月, 这可能与不同支流所在的地理位置有关。香溪河水华优势种多以小环藻、微囊藻、假鱼腥藻和空球藻为主, 有时出现拟多甲藻和隐藻, 复合型水华较为常见; 小江则以微囊藻、假鱼腥藻、长孢藻、角甲藻和空球藻为主, 偶有盘星藻和束丝藻。此外, 同一河流不同河段出现多种优势种共存的现象, 表现出水华的空间复杂性。三峡水库支流水体生态环境复杂, 支流不同区域和形态特征以及倒灌异重流的存在导致支流水华暴发具有各自的特点, 且回水区上游更易发生高强度水华, 水温和水动力条件的差异是造成不同支流水华优势种存在差异的原因^[49]。

支流水华大多发生在春夏两个季节, 主要集中在3—9月, 峰值主要出现在3和6月, 温度较低的冬天不常见水华暴发^[5, 8]。三峡水库支流水华具有明显的季节性特征, 春季以硅藻(小环藻、美丽星杆藻)、甲藻(多甲藻、拟多甲藻)、隐藻(隐藻、斜结隐藻)为优势种, 夏季以绿藻(实球藻、空球藻)、蓝藻(微囊藻、长孢藻、束丝藻、假鱼腥藻)为优势种, 秋季以绿藻、硅藻、隐藻为优势种, 冬季则以硅藻(小环藻)为优势种。水华在年内呈现显著的季节变化, 与不同季节和调度状态下的生境条件有关^[11]。从135 m蓄水水位到175 m蓄水水位, 水华优势种类经历了由“河流型水华”向“湖泊型水华”的演替, 水华主要优势种类经历了由河流型水华(甲藻、硅藻水华)到过渡型水华(甲藻、硅藻、隐藻、绿藻、蓝藻水华)再到湖泊型水华(绿藻、蓝藻水华)的演变。2014年之后水华优势种以硅藻、蓝藻或两种及两种以上优势种类共存的水华为主(图4)^[5, 11, 50]。

总体而言, 支流水华优势种群显示出由硅-甲藻(春季)向蓝-绿藻(夏季)转变的年内变化和由河流型向湖泊型转变的年际变化特点。蓄水位的抬升造成支流流速的降低、水体分层逐渐明显可能是造成水华优势种类随着蓄水位升高变化的原因。近年来蓝藻水华发生频次占比较高, 蓝藻水华已成为需要重点关注的三峡生态环境问题。水华优势种类的多样性和水华类型演替的多变性反映了三峡水库水环境的复杂性。

从水库运行阶段来看, 高水位运行期虽偶有水华的发生但持续的时间相对较短; 而消落期和汛期是典型水华的高发期^[25]。根据三峡水库水华监测结果, 从2011到2023年, 重庆段发生水华的频次高于湖北段支流。三峡水库蓄水运行20年来, 支流水环境状况逐渐趋于稳定, 水库支流水华态势总体趋缓, 但部分支流如香溪河和小江仍是水华敏感水域。由于三峡水库水域宽阔和地理位置的复杂多样性, 水华暴发的覆盖面积差异极大, 某些水华暴发的水域面积相当惊人, 而某些水华暴发的水域面积则很小, 甚至不足 0.0001 km^2 。2016—2023年三峡支流水华的覆盖面积逐渐减少, 由覆盖整个河段或全河减少到部分河段或小面积水域, 水华持续时间从几天-十几天-几十天不等。从生物量方面看, 水华暴发期间以Chl. *a*含量为指标的藻类生物量的变动范围在 $15.0—300.0 \mu\text{g/L}$, 由此来看水华暴发的强度差异极大。

3.2 水华成因

三峡水库不同支流水华成因各异, 即使同一支流的不同断面水华发生机制也不尽相同^[51]。多项研究表明, 三峡水库水华暴发的原因之一是水动力条件的改变^[42, 52, 53]。水流速降低使原有的水体混

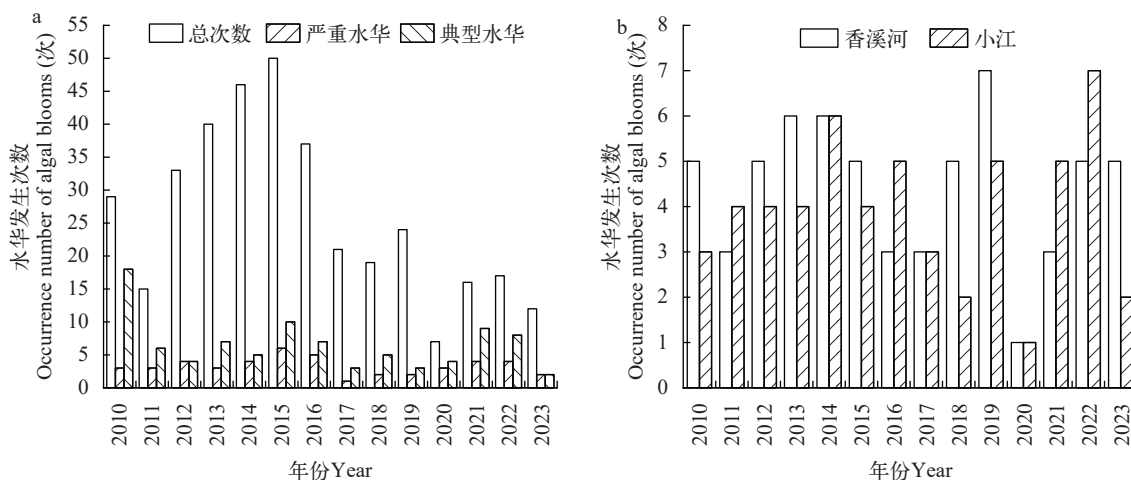


图3 2010—2023年三峡水库支流(a)、香溪河和小江(b)水华发生情况

Fig. 3 Occurrence of algal blooms in the tributaries of the Three Gorges Reservoir (a), Xiangxi River and Xiaojiang River (b) from 2010 to 2023

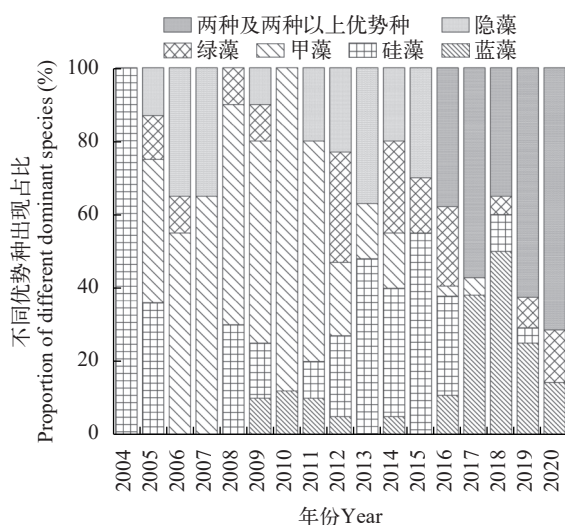


图4 2004—2020年三峡水库支流不同水华优势种类出现频率所占比例

Fig. 4 Proportion of dominant species of different algal blooms in TGR tributaries from 2004—2020

合和扰动停止,让特定藻类有了一个稳定的生存状态;另外,低流速有利于喜静水藻类的生长^[52]。三峡水库支流水体呈现出复杂、特殊的水动力现象,如分层异重流、水流振荡。一方面,分层异重流改变了支流库湾的分层状态,为水华暴发提供了有利的水动力条件;另一方面,倒灌异重流携带干流营养盐对支流库湾进行补充,不同支流受干流倒灌的影响不同,如小江表现为表层倒灌,香溪河则表现为中层倒灌。另外,水体流速的降低使得泥沙沉降导致水体透明度的增加,临界层深度增加。在温度、光照、营养盐适宜的情况下,一旦支流库湾水体混合层深度(Z_m)小于临界层深度(Z_{Cr}),藻类大量繁殖并形成水华,反之则水华消失^[49, 54, 55]。有研究基于此提出了判定三峡水库水华生消的混合层与真光层比值(Z_m/Z_e)的阈值,即 $Z_m/Z_e > 2.8$ 对支流水华有抑制作用^[56]。三峡水库特殊的水动力是影响支流水华生消的关键因子,深入认识水动力的演替规律和特征,对研究三峡水库水华生消原因具有重要意义。

由于三峡水库蓄水后被淹没土壤中释放出来的营养盐,泥沙淤积及工农业污染造成水体营养盐含量的上升;加上支流流速变缓,水体滞留时间长,水体的交换能力弱,营养盐更容易滞留,滞留的营养盐造成藻类的快速增长^[25, 26, 57]。三峡水库蓄水后,支流水体营养水平总体加重,水体整体由蓄水前的贫中营养水平为主转变为以中富营养水平为主^[57]。近十三年来,水体富营养化断面占比波动变化,且重庆段富营养化断面所占比例高于湖北段

(图5)。从2003—2021年,三峡水库氮磷含量变化范围分别为0.49—3.27和0.03—0.35 mg/L,通过构建水质指数(WQI)显示三峡整体水质状况为良好,并在蓄水后逐渐改善^[58]。总体而言,三峡水库营养盐远超过国际公认的富营养化阈值,一直具备水华暴发条件。近年来,随着长江上游梯级水库的兴建运行,上游来水来沙情况发生显著改变,三峡水库的营养状况也随之发生了显著改变,水体营养负荷有显著的降低,这对于三峡水华状况具有积极深远的影响。

温度和光照强度在水华的发生和发展过程中起着重要作用。不同水华优势藻种发生爆发性增殖的温度不同;且在一定的光照强度和温度范围内,藻类增长率随光照强度增大而增大^[59, 60]。三峡支流水华大多发生在天气温暖、日照充足的春夏秋三个季节^[5, 8]。适宜的温度和良好的光照条件也为水华的维持提供了条件。典型硅藻水华分别发生在3—5月,蓝藻水华则主要集中在6—9月。这表明三峡库区藻类水华具有明显的季节性特征^[46]。此外,三峡不同支流发生水华的时间与当地的气候条件有关。多项研究表明,三峡水库支流水华主要受水文情势和水动力,温度、光照和养分负荷的影响^[5, 61]。蓄水后改变的水文情势及其主导下的水下光照、营养及水体相对稳定性的变化,进而影响浮游植物的时空分布^[14]及其演替,并导致不同的水华生消动态(图6)。

4 支流水华防控

为有效应对三峡严峻的水华态势,相关部门采取的应急处置技术主要包括人工打捞、机械除

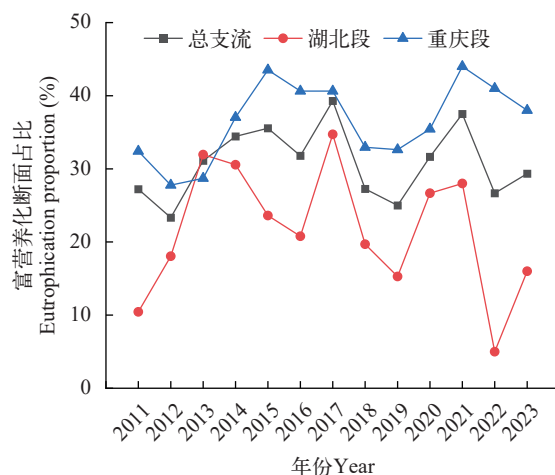


图5 2011—2023年库区支流富营养化断面占比年际变化

Fig. 5 Interannual changes of eutrophication proportions in TGR tributaries area from 2011 to 2023

藻、黏土除藻、人工造流抑藻、化学除藻等措施^[62]。其中,中国科学院水生生物研究所研究团队研发的人工造流、船舶拖网采收和除藻平台工程设备、气浮隔离拦截带,结合微藻沉降技术的超声波除藻设备等治理方法省时高效,运作灵活,可快速控制水华范围,效果显著^[8]。

为长效防控水华而开展的控源截污工作包括建设污水处理厂和垃圾处理厂,整改或关停污染严重的企业^[5];调整农业结构,推广使用有机肥,建立库区沿江绿化隔离带,恢复消落带植被^[63]。另外,针对水华防控的长效防控对策包括构建浮床、人工湿地、投放鲢鳙鱼种及种植挺水植物,这类方法可有效吸收削减水体中的营养盐负荷,逐步恢复提升生态系统的自我调节与自净能力^[64](表 3)。这些

工作的具体实施对于水华态势的缓解有着重要的作用。

需要重点提及的是,化学处置措施因可能产生二次污染而无法在三峡水库大面积使用^[8],而生物操纵控藻技术已在三峡水库证明了其有效性,中国科学院水生生物研究所在中国三峡集团的支持下利用滤食性鱼类在三峡库区支流进行生物控藻研究,该方法具有良好的藻类群落调控及水华抑制作用,且能在削减水体营养负荷、抑制藻类水华的同时,收获优质水产品满足库区人民高品质生活的需要,是未来值得大力推广的有效预防性技术。

此外,随着遥感技术和无人机的的发展,卫星监测和无人机监测作为水华有效监测技术,可为水华监测预警提供有价值的科学数据。遥感卫星能够

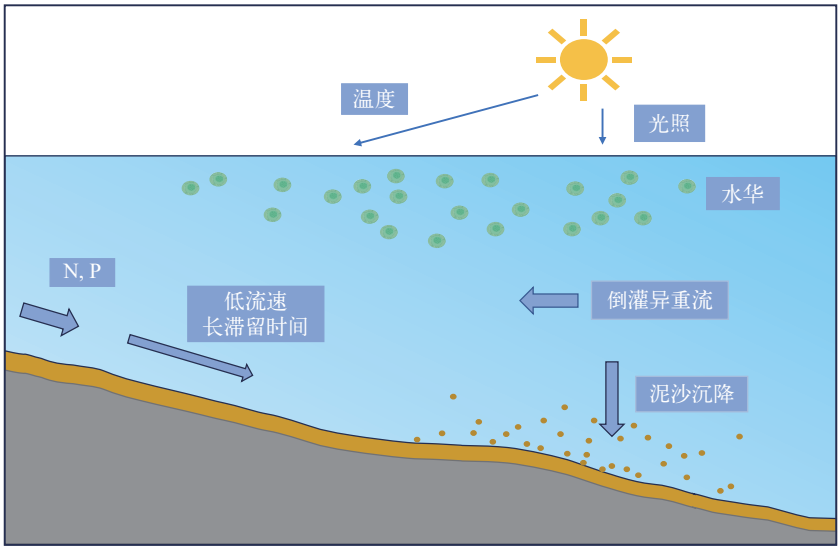


图 6 三峡水库蓄水前后水文和水生态过程对藻华的影响示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the influence of hydrological and aquatic ecological processes on algal bloom in the TGR before and after impoundment

表 3 水华处置措施适用范围及优缺点^[62, 65—67]

Tab. 3 The scope of application and advantages and disadvantages of water bloom management measures^[62, 66—68]

方法分类 Method classification	处置方法 Disposal method	适用范围 Scope of application	优缺点 Advantage and disadvantage
物理方法 Physical method	机械方法除藻	有明显水华堆积的近岸水域, Chl.a >500 μg/L	优点: 见效快, 无二次污染, 不会引起外来生物入侵
	超声波控藻	适用于湖泊、水源地、游泳池、池塘、污水处理厂等	缺点: 对处理设备要求严格, 劳动强度大, 经济成本高
	水动力调控控藻	适用于表层水体, 有藻类和温度垂直分层的水体, 与外界水环境交换困难的闭锁性水域	
化学方法 Chemical method	絮凝剂控藻	小水体或局部水域, Chl.a >1500 μg/L, 常与其他技术联用	优点: 省时高效, 短期效果明显
	化学药剂杀藻	小型水体、景观水体	缺点: 有二次污染风险
生物方法 Biological method	生物操纵技术	面积较小水体或试验水域, 水华暴发初期, Chl.a <50 μg/L	优点: 安全, 经济成本低, 长期效果明显
	水生植物抑藻技术	富营养化程度低、藻细胞密度较低的水体, 藻密度低于 3000 万个/L	缺点: 控制效果慢, 应急效果较差, 后续潜在的生态风险高
	抑藻微生物菌剂	小型水体或试验水体, 藻华暴发初期, Chl.a <200 μg/L	

提供大范围、高频率的监测数据,无人机监测能够提供更高的空间分辨率和灵活性,并对特定区域进行详细调查。结合叶绿素反演技术,可以精确估算水体中叶绿素的浓度,评估浮游植物密度和分布,从而预警水华的发生。同时,构建在线监测系统,通过多源数据整合分析,提供全面、实时的水华监测信息,方便研究人员和相关管理者能够快速掌握信息,为水华的防控和水体生态环境的保护提供科学依据和技术支持。

除此之外,水库生态调度作为改善库区支流水环境的手段之一,逐渐受到重视^[68]。生态调度作为一种操作简单、影响面广、见效快、负面效应较小的原位处理方法,被认为是改善流域生态环境和抑制藻类水华的理想方法^[8, 69],生态调度在水华防控中既可以作为预防性对策,也可以作为应急处置措施。生态调度能够调节生物地球化学循环,加速污染物的自然沉降,且适宜水位能够促进水生植被的恢复^[65],调控水生生物的时空分布格局。近年来,通过三峡水库生态调度改善支流水流条件进而控制支流富营养化及水华已经被越来越多研究人员所接受^[45, 69, 70]。但在正常运行情况下,水库水位变幅对Chl. *a*产生显著影响的范围较小。受防洪发电、生产生活等其他功能的限制,水库以更大水位变幅进行生态调度的可能性极小;相关研究者提出了防控支流水华的“潮汐式”生态调度方法^[50]。“潮汐式”调度目前仍处于理论探究阶段,实际效果如何还有待进一步验证。客观上,三峡水库生态调度是一个复杂的系统工程,需综合考虑三峡水库的防洪、发电、通航等综合经济效益,还需考虑具体调度规程及其发挥生态效应的边界条件,并通过必要的实证试验,以摸清情况,满足三峡水库的生态经济功能和水华防控的目的。

5 问题与展望

三峡水库作为特大型水库,与一般水库相比,其生境类型、水生生物、生态系统结构与功能、格局和过程更加复杂多样。不同支流的生境差异及具体水华演变特性的差别,使得每条支流的具体水华防控和生态环境保护对策制定时需要具体问题具体分析,因此,进一步深入的支流水华暴发机理研究仍然是当前的迫切需求。这方面要关注新情况和新动向,尤其是国家加大截污减排力度的背景下,随着三峡库区污水处理设施逐步完善,工业结构的调整,农业面源污染的有效控制,水体营养盐含量得到一定程度的控制,藻类过度增殖受到抑制引起水华发生频率和强度减小。同时,长江上游

梯级水库的建成运行造成下泄到三峡水体的泥沙含量锐减,营养盐结构(如氮磷比)显著改变,进而影响群落和水华优势种演替,叠加在气候变暖的全球化背景下,水华暴发规律可能发生改变。预计在其他水华类型的暴发频率和强度下降的情况下,蓝藻水华可能出现暴发频次增加,持续时间延长、强度增大等,因此,三峡支流蓝藻水华暴发规律及其生态风险防控是未来一段时间内需要面对的主要问题。

水华暴发机理的研究离不开客观真实数据,实时快捷、真实有效的水华大数据是开展三峡水华深入研究所需要的,目前的三峡水华监测仍然停留在以人工采样和实验室分析监测为主、卫星遥感监测以及在线监测技术为辅的阶段。为全面深入认识三峡水华的动态与规律,有必要构建智慧化水华监测体系。将新兴的监测检测技术,如无人机遥感、无人船巡测、原位往复式高频数据采集等应用于支流水华监测中,实现对水华的全方位和全过程监测,获得不同维度上实时全面的水华动态数据信息,有助于全面客观认识三峡水华的动态特征、演变规律,增强应对水华事件的能力,为水华防控提供更加有力的支持。

另一方面,鉴于水华对社会生产生活和流域生态系统的巨大影响力和破坏力,开展水华预测预警非常必要。精准的水华预警是水库生态调度防控水华的前提。关于三峡支流水华预测预警的研究还较为有限,受监测数据和模型适用性的影响,预测结果的精度和准确性还有待提高。未来需要加强三峡水库支流水华预测预警研究,从不同水华的适用预测模型、预警体系构建、精准预报能力等诸多方面加强研究,为支流水华的高效处置和三峡水库的可持续利用提供必要的技术支撑。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Bi Y H, Zhu K X, Hu Z Y, *et al.* The effects of the Three Gorges Dam's (TGD's) experimental impoundment on the phytoplankton community in the Xiangxi River, China [J]. *International Journal of Environmental Studies*, 2010, 67(2): 207-221.
- [2] Li Y, Fang L C, Wang Y Z, *et al.* Anthropogenic activities accelerated the evolution of river trophic status [J]. *Ecological Indicators*, 2022(136): 108584.
- [3] Zhou G J, Kuang Q J, Liu G X, *et al.* Investigation on algal water-blooms in the Three Gorges Reservoir and its toxicological study [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, 30(1): 37-41. [周广杰, 况琪军, 刘国祥, 等. 三峡库区藻类水华调查及其毒理学研究 [J]. *水生生物学报*, 2006,

- 30(1): 37-41.]
- [4] Wang S T, Lei J S, Jia H Y, *et al.* Characteristics of phytoplankton community and Eutrophication evaluation of the Three Gorges Reservoir [J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2020, **5**(1): 32-41. [王顺天, 雷俊山, 贾海燕, 等. 三峡水库浮游植物群落特征及水体富营养化评价 [J]. 三峡生态环境监测, 2020, **5**(1): 32-41.]
- [5] Yao J Z, Fan X J, Yang X, *et al.* Current situation, causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, **16**(6): 2041-2048. [姚金忠, 范向军, 杨霞, 等. 三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策 [J]. 环境工程学报, 2022, **16**(6): 2041-2048.]
- [6] Zhang L, Xia Z Q, Zhou C, *et al.* Unique surface density layers promote formation of harmful algal blooms in the Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Freshwater Science*, 2020, **39**(4): 722-734.
- [7] Wang L, Cai Q H, Tan L, *et al.* Phytoplankton development and ecological status during a cyanobacterial bloom in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(19): 3820-3828.
- [8] Yang Z J, Yu Y, Chen Z, *et al.* Mechanism of eutrophication and phytoplankton blooms in Three Gorges Reservoir, China: A research review [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, **50**(4): 507-516. [杨正健, 俞焰, 陈钊, 等. 三峡水库支流库湾水体富营养化及水华机理研究进展 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, **50**(4): 507-516.]
- [9] Chen Y, Duan X B, Liu S P, *et al.* Community structure of the phytoplankton in the Three Gorges Reservoir after the third period of sluice [J]. *Freshwater Fisheries*, 2009, **39**(1): 10-15. [陈勇, 段辛斌, 刘绍平, 等. 三峡水库三期蓄水后浮游植物群落结构特征初步研究 [J]. 淡水渔业, 2009, **39**(1): 10-15.]
- [10] Su X R, Yu P, You Q M, *et al.* Phytoplankton community structure and water ecological assessment in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(2): 493-507. [苏新然, 于潘, 尤庆敏, 等. 三峡库区浮游植物群落结构特征及水生态评价 [J]. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 493-507.]
- [11] Zeng H, Song L R, Yu Z, *et al.* Distribution of phytoplankton in the Three-Gorge Reservoir during rainy and dry seasons [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**(2-3): 999-1009.
- [12] Zhou G J, Kuang Q J, Hu Z Y, *et al.* Study on the succession of algae and the trend of water-blooms occurred in Xiangxi Bay [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2006, **30**(1): 42-46. [周广杰, 况琪军, 胡征宇, 等. 香溪河库湾浮游藻类种类演替及水华发生趋势分析 [J]. 水生生物学报, 2006, **30**(1): 42-46.]
- [13] Kuang Q J, Bi Y H, Zhou G J, *et al.* Study on the phytoplankton in the Three Gorges Reservoir before and after sluice and the protection of water quality [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2005, **29**(4): 353-358. [况琪军, 毕永红, 周广杰, 等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析 [J]. 水生生物学报, 2005, **29**(4): 353-358.]
- [14] Wang S B, Geng H, Wu L Y. Research advances of phytoplankton after impounding in the Three Gorges Reservoir region [J]. *Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2013, **32**(4): 19-23. [王松波, 耿红, 吴来燕. 三峡水库蓄水后库区浮游植物研究进展 [J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2013, **32**(4): 19-23.]
- [15] Shen H L. Succession of phytoplankton communities in multi reservoirs-Hubei portion of Three Gorges Reservoir as examples [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2014: 47-52. [申恒伦. 水库群浮游植物群落演替研究—以三峡水库湖北段为例 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2014: 47-52.]
- [16] Zhu A M, Wu G B, Liang Y Q, *et al.* Spatial and temporal dynamic of phytoplankton community in tributary Tongzhuang River estuary after 156 m impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, **30**(2): 101-106. [朱爱民, 吴广兵, 梁银铨, 等. 156 m蓄水后三峡水库支流童庄河河口段浮游植物群落的时空动态 [J]. 水生态学杂志, 2009, **30**(2): 101-106.]
- [17] Guo J S, Chen J, Li Z, *et al.* Investigation of phytoplankton and assessment of algal diversity on backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir after its initiate impounding to the water level of 156 m in spring [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(10): 2710-2715. [郭劲松, 陈杰, 李哲, 等. 156m蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价 [J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2710-2715.]
- [18] Fang L J, Liu D F, Zhang J L, *et al.* Phytoplankton community structure of Xiangxi Bay before and after the 175 m impoundment of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(3): 1-9. [方丽娟, 刘德富, 张佳磊, 等. 三峡水库175m蓄水前后香溪河库湾浮游植物的群落结构 [J]. 水生态学杂志, 2014, **35**(3): 1-9.]
- [19] Xiao Y, Li Z, Guo J S, *et al.* Succession of phytoplankton assemblages in response to large-scale reservoir operation: a case study in a tributary of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(3): 153.
- [20] Tian C M, Qi Q S, Zhang C, *et al.* Characteristics of phytoplankton community structure and water environment assessment in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2024, **70**(1): 75-86. [田楚铭, 齐青松, 张弛, 等. 三峡水库浮游植物群落结构特征及其水环境评价 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2024, **70**(1): 75-86.]
- [21] Wang J Y. Spatiotemporal dynamics and affecting factors of phytoplankton in the Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2016: 45-61. [王静雅. 三峡水库浮游植物群落结构时空动态及其影响因子研究 [D]. 武汉, 中国科学院水生生物研究所, 2016: 45-61.]
- [22] Zhu K X. Studies on phytoplankton community dyna-

- mics and eutrophication in the Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2013: 15-16. [朱孔贤. 三峡水库浮游植物群落动态与富营养化研究 [D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2013: 15-16.]
- [23] Beardsley R C, Limeburner R, Yu H, *et al.* Discharge of the Changjiang into the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, **4**(1-2): 57-76.
- [24] Zhang J, Ye D, Zhu H T, *et al.* Characteristics of spring algal blooms under different impounded levels in tributaries of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(4): 884-891. [张静, 叶丹, 朱海涛, 等. 在不同蓄水位下三峡库区春季水华特征及趋势分析 [J]. *水生生物学报*, 2019, **43**(4): 884-891.]
- [25] Wang L J, Li H, Yang Z J, *et al.* Four effects of water environment evolution in early period (2003-2012) after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1109-1118. [王丽婧, 李虹, 杨正健, 等. 三峡水库蓄水运行初期(2003—2012年)水环境演变特征的“四大效应” [J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(5): 1109-1118.]
- [26] Tan L, Cai Q H, Xu Y Y, *et al.* Survey of spring eutrophication status after 175 m experimental impoundment of Three Gorges Reservoir and comparison [J]. *Wetland Science*, 2010, **8**(4): 331-338. [谭路, 蔡庆华, 徐耀阳, 等. 三峡水库175 m水位试验性蓄水后春季富营养化状态调查及比较 [J]. *湿地科学*, 2010, **8**(4): 331-338.]
- [27] Forsström L, Sorvari S, Korhola A, *et al.* Seasonality of phytoplankton in subarctic Lake Saanajärvi in NW Finnish Lapland [J]. *Polar Biology*, 2005, **28**(11): 846-861.
- [28] Becker A, Herschel A, Wilhelm C. Biological effects of incomplete destratification of hypertrophic freshwater reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **559**(1): 85-100.
- [29] Tian Z B, Liu D F, Yao X J, *et al.* Effect of water temperature stratification on the seasonal succession of phytoplankton function grouping in Xiangxi Bay [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(5): 700-707. [田泽斌, 刘德富, 姚绪姣, 等. 水温分层对香溪河库湾浮游植物功能群季节演替的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(5): 700-707.]
- [30] Wang Y Y, Xu T, Cui Y J, *et al.* Seasonal thermal stratification in Shennong Bay and its effect on algae blooms [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(4): 19-26. [王耀耀, 徐涛, 崔玉洁, 等. 神农溪水体季节热分层特征及其对水华影响 [J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(4): 19-26.]
- [31] Richard D R, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration and growth rates of bloom-forming cyanobacteria [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1987, **21**(3): 391-399.
- [32] Zhang G Y. Mechanism of algal bloom in the tributaries of Three Gorges Reservoir: progress and control suggestions [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, **29**(10): 48-56. [章国渊. 三峡水库典型支流水华机理研究进展及防控措施浅议 [J]. *长江科学院院报*, 2012, **29**(10): 48-56.]
- [33] Zheng B H, Zhang J L, Wang L J, *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton and related environmental factors in the Daning River during sensitive period of algal blooms [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(3): 641-648. [郑丙辉, 张佳磊, 王丽婧, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 641-648.]
- [34] Zhang J L, Zheng B H, Liu L S, *et al.* Seasonal variation of phytoplankton in the DaNing River and its relationships with environmental factors after impounding of the Three Gorges Reservoir: A four-year study [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010(2): 1479-1490.
- [35] Zhou G J, Zhao X M, Bi Y H, *et al.* Phytoplankton variation and its relationship with the environment in Xiangxi Bay in spring after damming of the Three-Gorges, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **176**(1-4): 125-141.
- [36] Chen Y C, Yu Q, Zhu D J, *et al.* Possible influencing factors on phytoplankton growth and decay in rivers: Review and perspective [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, **33**(4): 186-195. [陈永灿, 俞茜, 朱德军, 等. 河流中浮游藻类生长的可能影响因素研究进展与展望 [J]. *水力发电学报*, 2014, **33**(4): 186-195.]
- [37] Xu Y Y, Cai Q H, Li D F, *et al.* Preliminary report on diel vertical distribution patterns of peridiniopsis in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2008, **26**(6): 608-612. [徐耀阳, 蔡庆华, 黎道丰, 等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻昼夜垂直分布初步研究 [J]. *武汉植物学研究*, 2008, **26**(6): 608-612.]
- [38] Liu M, Zhang Y L, Shi K, *et al.* Effects of rainfall on thermal stratification and dissolved oxygen in a deep drinking water reservoir [J]. *Hydrological Processes*, 2020, **34**(15): 3387-3399.
- [39] Li Z X, Gao Y, Wang S Y, *et al.* Phytoplankton community response to nutrients along lake salinity and altitude gradients on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2021(128): 107848.
- [40] Pritsch H, Schirpke U, Jersabek C D, *et al.* Plankton community composition in mountain lakes and consequences for ecosystem services [J]. *Ecological Indicators*, 2023(154): 110532.
- [41] Qi Q S, Xiao Q W, Tian C M, *et al.* Precipitation determines the dynamic and network stability of phytoplankton communities in the Three Gorges Reservoir [J]. *Ecological Indicators*, 2024(167): 112682.
- [42] Liu L, Liu D F, Johnson D M, *et al.* Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: Implications for management [J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2121-2130.
- [43] Ji D B, Wells S A, Yang Z J, *et al.* Impacts of water level rise on algal bloom prevention in the tributary of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Ecological Engineering*, 2017(98): 70-81.
- [44] Peng C R, Zou, W X, Li, D H, *et al.* Distinct effects of sediment regulation on phytoplankton community assem-

- bly in the tributaries and mainstream of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022(368): 133082.
- [45] Li R, Tang X Q, Liu X B, *et al.* Impact and mechanism of medium and small flood regulation in the Three Gorges Reservoir on the phytoplankton in tributary bays [J]. *Environmental Science*, 2024, **45**(9): 5308-5317. [黎睿, 汤显强, 刘新波, 等. 三峡水库中小洪水调度对支流库湾浮游植物的影响及机制 [J]. 环境科学, 2024, **45**(9): 5308-5317.]
- [46] Yang M, Zhang S, Hu Z Y. Characteristics and preliminary regulating factors of cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(3): 371-378. [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 [J]. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 371-378.]
- [47] Li B, Lu W, Yan H. Yangtze River Three Gorges Reservoir area Hubei sections of water blooms context and causes analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(S1): 214-216. [李斌, 卢伟, 闫海. 长江三峡库区湖北段水华发生情况及成因分析 [J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(S1): 214-216.]
- [48] Li L, Yu H, Liu H, *et al.* Current situation of water bloom in tributaries of Three Gorges Reservoir area and its prevention and control measures [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, **47**(3): 64-66. [李礼, 喻航, 刘浩, 等. 三峡库区支流“水华”现状及防控对策 [J]. 安徽农业科学, 2019, **47**(3): 64-66.]
- [49] Huang Y N, Ji D B, Long L H, *et al.* The variance analysis of characteristics and blooms of the typical tributaries of the Three Gorges Reservoir in spring [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(3): 461-470. [黄亚男, 纪道斌, 龙良红, 等. 三峡库区典型支流春季特征及其水华优势种差异分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(3): 461-470.]
- [50] Liu D F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 443-454. [刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流库区水华机理及其调控技术研究进展 [J]. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.]
- [51] Luo X J, Zhang X, Huang W, *et al.* Severity differences and mechanisms of algal blooms among sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 282-292. [罗晓佼, 张钊, 黄伟, 等. 三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 [J]. 环境科学, 2023, **44**(1): 282-292.]
- [52] Xiong C J, Liu D F, Zheng B H, *et al.* The Influence of hydrodynamic conditions on algal bloom in the Three Gorges Reservoir tributaries [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013(295-298): 1981-1990.
- [53] Yang Z J, Xu P, Liu D F, *et al.* Hydrodynamic mechanisms underlying periodic algal blooms in the tributary bay of a subtropical reservoir [J]. *Ecological Engineering*, 2018(120): 6-13.
- [54] Long L H, Huang Y B, Guan W H, *et al.* The mechanism of the algal bloom disappearance driven by hydrodynamic processes in the Pengxi River of the Three Gorges Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2025, **45**(6): 3245-3255. [龙良红, 黄宇攀, 关文海, 等. 水动力过程驱动的三峡水库澎溪河水华消退机制 [J]. 中国环境科学, 2025, **45**(6): 3245-3255.]
- [55] Long L H, Huang Y B, Xu H, *et al.* Research on hydrodynamic characteristics and its water eco-environment effects in Three Gorges Reservoir in recent 20 years: Review and prospect [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, **35**(2): 383-399. [龙良红, 黄宇攀, 徐慧, 等. 近20年来三峡水库水动力特性及其水环境效应研究: 回顾与展望 [J]. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 383-399.]
- [56] Yang Z J, Wei C Y, Liu D F, *et al.* The influence of hydraulic characteristics on algal bloom in three gorges reservoir, China: A combination of cultural experiments and field monitoring [J]. *Water Research*, 2022(211): 118030.
- [57] Yang Z J, Cheng B, Xu Y Q, *et al.* Stable isotopes in water indicate sources of nutrients that drive algal blooms in the tributary bay of a subtropical reservoir [J]. *Science of the Total Environment*, 2018(634): 205-213.
- [58] Sang C, Tan L, Cai Q H, *et al.* Long-term (2003—2021) evolution trend of water quality in the Three Gorges Reservoir: An evaluation based on an enhanced water quality index [J]. *Science of the Total Environment*, 2024(915): 169819.
- [59] Liccardo A, Fierro A, Iudicone D, *et al.* Response of the deep chlorophyll maximum to fluctuations in vertical mixing intensity [J]. *Progress in Oceanography*, 2013(109): 33-46.
- [60] Liu Y S, Han M, Liang Z B, *et al.* Influence of light intensity, temperature and nutrients on the growth of Microcystis in water of Dianchi Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1995, **8**(6): 7-11. [刘玉生, 韩梅, 梁占彬, 等. 光照、温度和营养盐对滇池微囊藻生长的影响 [J]. 环境科学研究, 1995, **8**(6): 7-11.]
- [61] Xu H, Yan M, Long L H, *et al.* Modeling the effects of hydrodynamics on thermal stratification and algal blooms in the Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021(8): 610622.
- [62] Cao J, Yuan J, Zhao L, *et al.* Development, application and prospect of cyanobacteria blooms control technology in lakes and reservoirs [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, **14**(2): 487-500. [曹晶, 袁静, 赵丽, 等. 湖库蓝藻水华控制技术发展、应用及展望 [J]. 环境工程技术学报, 2024, **14**(2): 487-500.]
- [63] Tan S D, Wang Y, Zhang Q F. Environmental challenges and countermeasures of the water-level-fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, **17**(S1): 101-105. [谭淑端, 王勇, 张全发. 三峡水库消落带生态环境问题及综合防治 [J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(S1): 101-105.]
- [64] Luo H, Chen H X, Chen W L, *et al.* Ecological treatment of cyanobacteria in reservoir and its effectiveness evaluation

- tion [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power* (Natural Science Edition), 2018, **39**(4): 51-55. [罗欢, 陈华香, 陈文龙, 等. 水库蓝藻生态治理措施及效果评估 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, **39**(4): 51-55.]
- [65] Hao Y, Yang X, Long M, *et al.* Research status and prospect of emergency treatment technology for cyanobacteria bloom in lakes and reservoirs [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2023, **12**(3): 226-237. [郝越, 杨霞, 龙萌, 等. 湖库蓝藻水华应急治理技术研究现状与展望 [J]. 水资源研究, 2023, **12**(3): 226-237.]
- [66] Shi X L, Yang J S, Chen K N, *et al.* Review on the control and mitigation strategies of lake cyanobacterial blooms [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(2): 349-375. [史小丽, 杨瑾晟, 陈开宁, 等. 湖泊蓝藻水华防控方法综述 [J]. 湖泊科学, 2022, **34**(2): 349-375.]
- [67] Wang M, Liu H, Wang J N, *et al.* Research progress on the biological control of cyanobacterial blooms [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, **12**(1): 92-99. [王敏, 刘浩, 王江南, 等. 生物法治理蓝藻水华研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2022, **12**(1): 92-99.]
- [68] Li G H, Yang X, Chen H C, *et al.* Preliminary study on hydrodynamic regulation of algal bloom in Xiangxi River Bay [J]. *Yangtze River*, 2017, **48**(10): 18-23. [李光浩, 杨霞, 陈和春, 等. 三峡水库香溪河库湾水华水动力调控初步研究 [J]. 人民长江, 2017, **48**(10): 18-23.]
- [69] Wang L, Cai Q H, Xu Y Y, *et al.* Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay [J]. *Aquatic Ecology*, 2011, **45**(2): 197-212.
- [70] Wang L L, Dai H C, Cai Q H. Numerical simulation of the ecological operation schedule in Xiangxi River [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology* (Natural Science Edition), 2009, **37**(4): 111-114. [王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 香溪河生态调度方案的数值模拟 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, **37**(4): 111-114.]

RESEARCH PROGRESS ON WATER BLOOM IN TRIBUTARY OF THE THREE GORGES RESERVOIR

LI Dan-Min^{1,2}, SONG Gao-Fei¹, TIAN Chu-Ming^{1,3}, FANG Ling-Chao^{1,2}, WAN Dong¹,
MI Wu-Juan¹ and BI Yong-Hong¹

(1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Aquatic Biodiversity Research in Heilongjiang Province, College of Life Sciences and Technology, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir (TGR) in 2003, its ecosystems have changed significantly, and water bloom in the tributary has become a major ecological and environmental issue of great concern. This paper reviews the research progress on the succession pattern of phytoplankton community and tributary water bloom over the past 20 years since the impoundment. It has been confirmed that the phytoplankton community in the tributaries of TGR is dominated by Chlorophyta, Cyanophyta, and Bacillariophyta, with distinct spatial variations and seasonal characteristics observed across different tributaries. The dominant bloom species include Cryptophyta, Bacillariophyta, Dinophyta, Chlorophyta, and Cyanophyta. The dominant species changed with the reservoir storage operation stage, and the current dominant species are Cyanophyta and Bacillariophyta, with *Microcystis*, *Pseudanabaena*, *Cyclotella* being prevalent. The water bloom in tributaries mainly occur in the spring and summer, with peak occurrence during flood season and drawdown period. In addition, the frequency of tributary water bloom in Chongqing area is higher than that in Hubei area, and the total frequency of water bloom show a decreasing trend after 2015. Hydrodynamics, temperature, and nutrients are the main factors influencing the water blooms. A comprehensive prevention and control technology system, encompassing physical, chemical, and biological approaches, has been developed and implemented for the TGR tributary water bloom. This system has played a pivotal role in mitigating water blooms and has achieved significant results. However, given the serious ecological and environment threats posed by the tributary water bloom, future research should focus on intelligent monitoring and early warning systems, as well as efficient prevention and control strategies, so as to provide theoretical basis and technical support for safeguarding the ecological environment safety and sustainable utilization of the TGR.

Key words: The Three Gorges Reservoir; Phytoplankton; Water bloom; Control measurements; Ecological regulation