



文章栏目：流域水环境整治与修复

DOI 10.12030/j.cjee.202112199 中图分类号 X522 文献标识码 A

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. [YAO Jinzhong, FAN Xiangjun, YANG Xia, 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.]

三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策

姚金忠, 范向军, 杨霞[✉], 黄宇波

中国三峡集团流域枢纽运行管理中心, 宜昌 443133

摘要 自 2003 年 6 月三峡水库蓄水以来, 库区支流富营养化和水华问题备受关注。对库区 12 条重点支流 2010—2020 年的水质、水华监测数据进行了统计分析, 结果表明: 12 条重点支流均发生过典型水华, 近几年水华发生次数减少; 水华主要发生在 3—9 月, 以蓝藻和硅藻水华为主。暴发水华的根本原因是水体营养盐充足。支流监测数据表明, 水体均处于中营养状态及以上。适宜的温度、光照和缓慢的水动力条件则是暴发水华的重要原因。目前, 开展营养盐削减是控制三峡库区重点支流库湾水华的根本途径; 通过物理方法、化学方法和生物操控方法消除水华的应用尚且较少; 而通过水库生态调度抑制水华为可行方法。

关键词 三峡水库; 库区支流; 水华; 富营养化

三峡工程是迄今为止世界上规模最大的水利枢纽工程, 其在防洪、发电、航运、水资源利用等方面发挥了巨大的经济、社会和生态效益。自 2003 年三峡水库蓄水以来, 库区支流与支流回水区的水文及水环境条件均出现了较为明显的变化, 其中部分支流回水段多次出现了富营养化现象^[1]。水体富营养化会破坏水体生态平衡、降低生物多样性, 导致水生态功能退化, 严重时还会引发大面积“水华”^[2]。

水华暴发会引起一系列水环境问题。一是威胁生态系统安全, 藻类死亡后残体分解会消耗大量溶解氧, 引起需氧生物窒息死亡; 二是部分藻类产生藻毒素, 对饮用水水质产生影响, 威胁人畜安全; 三是堵塞自来水厂滤池, 增加自来水厂处理成本; 四是水体异味, 水色感观变差, 降低水域景观价值^[3-5]。三峡工程是举世瞩目的“国之重器”, 三峡水库也是我国战略性淡水资源库, 水库生态系统健康至关重要。而支流库湾藻类水华, 威胁水库生态安全和水质安全, 已成为国内外学者关注的焦点^[6]。针对三峡水库水华的研究较多, 为过去近 20 年的水华防控起到重要支撑作用。然而, 针对三峡库区支流水华整体状况尚缺乏全面的认识与分析, 有必要对过去 10 a 水华发生动态、防控措施效果进行总结梳理。

本文根据三峡库区 12 条重点支流 2011—2020 年的水华监测数据, 分析了三峡库区 175 m 蓄水以后水华发生特征, 剖析水华发生原因, 梳理近 10 a 来水华防控措施及其效果, 并提出进一步防控三峡库区重点支流库湾水华的对策建议, 以期为三峡库区重点支流的水华防控工作提供参考。

收稿日期: 2021-12-29; 录用日期: 2022-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U2040220, U2040210)

第一作者: 姚金忠 (1965—), 男, 硕士, 高级工程师, yao_jinzhong@ctg.com.cn; [✉]通信作者: 杨霞 (1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 2219574230@qq.com

1 三峡库区水华发生现状

1.1 水华发生区域

中国三峡集团从2010年开始对库区12条重点支流开展了专项监测工作,根据监测数据统计了12条重点支流的水华发生次数(见图1)。所监测的12条重点支流均发生过典型水华(三峡库区支流典型水华一般指肉眼可见的藻类聚集持续时间7d以上、影响范围超过2 km河段的水华)。其中,重庆库段芩溪河、小江发生典型水华次数较多,分别为19次和14次;湖北库段香溪河、神农溪典型水华发生次数均为5次以上;其余支流典型水华发生次数相对较少,如汤溪河仅在2010年发生过1次典型水华,梅溪河在2010年和2014年发生过2次典型水华,草堂河在2010年和2016年发生过2次典型水华,青干河在2010年和2013年发生过2次典型水华。

1.2 水华发生时段

近10 a三峡库区重点支流典型水华发生次数统计结果见图2。2010—2016年水华发生次数较多,其中2010年水华发生次数最多(18次),2015年次之(9次)。而近几年(2017—2020年)水华发生的频次有所减少,每年发生3次,且主要集中在香溪河、小江和芩溪河。

三峡库区重点支流典型水华发生次数的年内时段统计结果见图3。三峡库区各重点支流的水华一般发生在3—9月。按照三峡水库调度时期划分,水库消落期(1—5月)发生典型水华34次,汛期(6—9月)发生典型水华31次,蓄水期(10月)发生典型水华1次。这表明消落期和汛期是典型水华的高发期(由于典型水华持续时间相对较长,文中统计典型水华发生时间为水华开始发生的时间)。各支流水华发生情况见表1。

1.3 水华优势藻种

三峡库区支流水华优势藻种有硅藻、甲藻、隐藻、绿藻和蓝藻。其中,蓝藻和硅藻是主要优势藻种,出现频率分别为35.8%和31.1%。绿藻和隐藻其次,而甲藻出现频率相对较低。通过对比2010—2020年12条重点支流水华优势藻种的出现频率发现:2010—2014年,库区以硅藻水华为主;2015年以后则以蓝藻水华为主(见图4)。重点支流水华类型由河流型水华(硅藻、甲藻)向湖泊型水华(蓝藻、绿藻)演变。

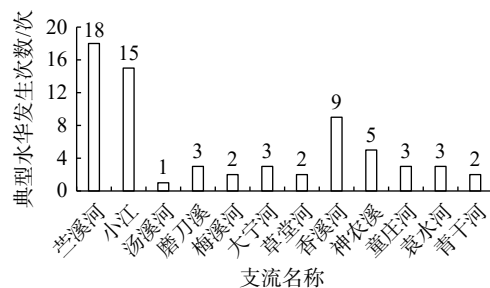


图1 2010—2020年三峡库区重点支流典型水华发生次数

Fig. 1 Number of typical water blooms in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2010 to 2020

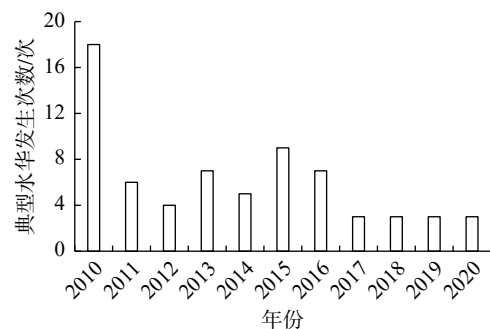


图2 2010—2020年三峡库区不同年份典型水华发生次数

Fig. 2 Number of typical water blooms in the different year from 2010 to 2020

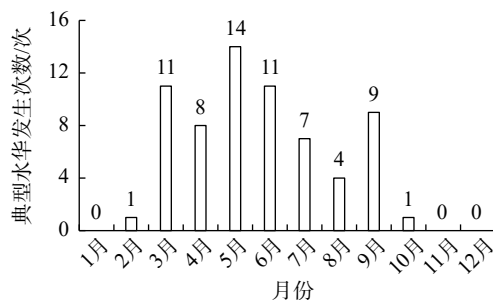


图3 2010—2020年三峡库区重点支流典型水华发生月份

Fig. 3 Typical bloom occurrence months in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2010 to 2020

表 1 2010—2020 年三峡库区典型水华发生时间
Table 1 Typical bloom occurrence time in the Three Gorges Reservoir area from 2010 to 2020

年份	支流	发生时间	年份	支流	发生时间	年份	支流	发生时间
2010	芘溪河	3—7月	2011	童庄河	3月中下旬	2015	神农溪	9月
2010	芘溪河	9—10月	2012	芘溪河	3—9月	2015	香溪河	8月
2010	小江	5月上旬—7月	2012	小江	5月中下旬	2015	香溪河	9月
2010	小江	9月下旬	2012	大宁河	6月下旬—7月	2016	芘溪河	3—5月
2010	汤溪河	5月底	2012	神农溪	6月	2016	芘溪河	6月
2010	磨刀溪	5月下旬—6月上旬	2013	芘溪河	2月下旬—4月	2016	芘溪河	7—9月
2010	磨刀溪	9月下旬	2013	芘溪河	6—9月	2016	小江	5月
2010	梅溪河	3月中旬—4月	2013	芘溪河	10月	2016	小江	6月
2010	草堂河	5月下旬	2013	小江	4月下旬	2016	草堂河	5月
2010	神农溪	7月—8月中旬	2013	大宁河	9—10月	2016	童庄河	3月
2010	青干河	6月中下旬	2013	神农溪	4月	2017	芘溪河	7月
2010	袁水河	3月中下旬—4月	2013	青干河	9—10月	2017	小江	6月
2010	袁水河	6月	2014	芘溪河	4—5月	2017	香溪河	7—9月
2010	袁水河	8月	2014	芘溪河	7—9月	2018	小江	4—5月
2010	童庄河	3月底—4月中旬	2014	小江	5月	2018	香溪河	5月中下旬
2010	香溪河	3—4月	2014	梅溪河	8月	2018	香溪河	7月上中旬
2010	香溪河	6月中旬	2014	神农溪	6—7月	2019	小江	3月中下旬
2010	香溪河	7月下旬—8月上旬	2015	芘溪河	4月	2019	小江	5月上旬—8月
2011	芘溪河	3—7月	2015	芘溪河	5月	2019	香溪河	8月中下旬
2011	芘溪河	9—10月	2015	芘溪河	7—9月	2020	芘溪河	5月中旬—6月中旬
2011	小江	4月下旬	2015	小江	4—6月	2020	小江	5月中旬—6月中旬
2011	小江	4月下旬—7月中旬	2015	大宁河	9月	2020	香溪河	6月
2011	磨刀溪	4月下旬及6月下旬	2015	神农溪	6月			

2 三峡库区重点支流水华成因

2.1 充足的营养盐

水体中充足的氮、磷等营养条件是藻类生长的物质基础，也是发生水华的根本性因素。本文采用原国家环境保护总局推荐的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》中的综合营养状态指数法对库区支流营养状态进行分析评价^[7]。以叶绿素 *a*(Chl-*a*)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})为富营养化评价指标，计算综合营养状态指数 TLI(Σ)，并根据计算结果把水体分为贫营养、中营养、轻度富营养、中度富营养和高度富营养 5 种营养状态。2010—2020 年典型水华发生频次与支流富营养化状态呈现出同步规律。库区 12 个重点支流整体年均 TLI(Σ) 呈现“降低-增加-降低-增加”的变化趋势(见图 5)。各支流水华发生次数也表现为“减少-增加-减少-增加”的趋势(见图 2)。

分不同支流统计的 TLI(Σ) 值见表 2。芘溪河因河口与长江交汇处建有调节坝，长期与长江干

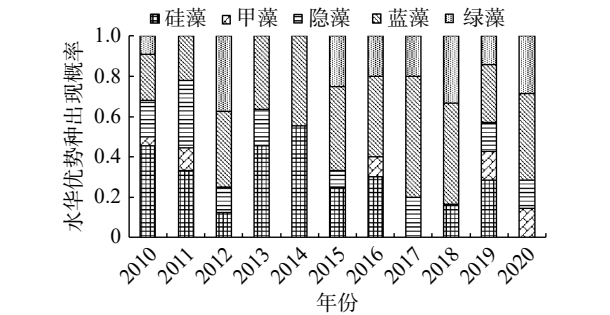


图 4 2010—2020 年库区支流水华优势藻种出现频率
Fig. 4 The frequency of the dominant species in the tributaries of the Three Gorges Reservoir from 2010 to 2020

流处于隔绝状态,为非天然河流,其在上述监测年限中,均处于中度富营养状态,多年TLI(Σ)均值为62.3。其余支流除小江外,多年平均TLI(Σ)均小于50,为中营养状态。磨刀溪、梅溪河、草堂河、袁水河、童庄河、香溪河有个别年份TLI(Σ)超过50,达到轻度富营养化状态,具备了发生水华的营养盐条件。从区域上统计,重庆库段7条支流多年TLI(Σ)均值为49.5,略高于湖北库段5条支流的46.9。

2.2 适宜的温度

三峡库区典型水华藻类的生长特点为:

表2 2010—2020年库区12个重点支流营养状态指数评价结果

Table 2 Eutrophication status results of the key tributaries in Three Gorges Reservoir from 2010 to 2020

支流	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	多年平均值
芈溪河	64.2	62.6	61.4	63.2	62.2	64.6	61.7	62.2	60.9	60.5	61.3	62.3
小江	51.7	49.0	46.9	47.5	52.1	53.0	48.2	53.6	48.7	48.3	52.2	50.3
磨刀溪	48.4	45.7	45.3	44.4	47.4	47.4	46.7	50.9	44.4	44.9	48.5	47.1
汤溪河	52.0	45.1	43.2	45.2	47.3	46.7	46.8	49.5	43.5	42.0	44.6	45.9
梅溪河	49.1	45.0	43.7	47.6	49.9	49.1	46.8	55.2	46.9	48.5	47.4	48.5
草堂河	50.6	45.0	43.7	47.6	49.9	49.1	46.8	55.2	46.9	48.5	47.4	48.7
大宁河	44.9	44.3	41.6	42.1	41.5	47.4	41.8	48.5	43.1	39.1	39.7	43.5
神农溪	44.6	45.1	43.6	43.8	47.2	46.0	41.7	54.3	41.8	40.9	42.4	45.6
青干河	51.2	43.1	44.1	47.5	46.6	45.9	44.9	44.3	45.6	41.2	43.1	44.9
袁水河	47.1	49.8	46.3	50.7	50.9	47.4	47.7	50.0	47.3	45.5	47.7	48.7
童庄河	50.5	48.4	45.9	46.9	49.5	47.2	50.1	46.2	45.3	44.7	44.5	47.2
香溪河	51.0	47.6	45.6	49.7	52.6	49.3	47.4	49.8	46.5	46.7	46.7	48.4

春、夏季节为藻密度高峰;秋、冬季节为藻密度低谷期。藻类水华的多发期与生长峰期基本一致,多在春、夏季。温度在水华形成与发展过程中起着重要作用,不同水华优势藻种发生暴发性增殖的温度不同。以三峡库区重点支流水华优势种硅藻和蓝藻(蓝绿藻)为例,硅藻适应的温度范围较广,在15~35℃时生长良好^[8],而蓝藻水华往往发生在相对较高的温度条件下,一般适合在25~35℃条件下生长^[8]。监测数据表明,三峡库区重点支流硅藻水华发生在气温开始逐渐转暖、日照充足的春季。随着温度的升高,当超出硅藻生长的最适温度范围时,硅藻水华逐渐消退,适合较高温度的蓝藻水华开始出现。图6为典型支流香溪河硅藻、蓝藻水华随水温变化的演替过程。典型硅藻水华分别发生在3、4、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季节性特征十分明显。

2.3 适宜的透明度

在一定光照强度范围内,藻类增长率会随着其增大而增大^[9]。通常,当光强由1 000 lx增加到4 000 lx时,藻类数量增加较快;光强大于4 000 lx后则渐趋平缓,并在5 000 lx时基本达到最大值。在相同温度下,1 000~5 000 lx的光强与藻类数量的增加可用半对数或指数方程来表示。在15℃时,藻类数量与光强呈指数关系,说明在温度较低时光强对藻类生长的影响很显著,且有一定补偿作用^[9]。硅藻门小环藻实验结果表明:当光强低于2 000 lx时,硅藻细胞仍可正常繁殖,而光强为200~5 000 lx时生长最佳。三峡水库175 m蓄水后,各支流流速降低。这有利于泥沙沉淀及

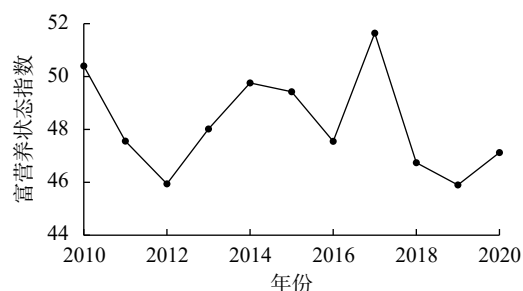


图5 2010—2020年库区12个重点支流年均营养状态指数变化

Fig. 5 Changes of average annual nutrient status index of the 12 key tributaries from 2010 to 2020

透明度增加(见图7),水体光照条件变得更加优良,因而有利于藻类的生长与繁殖,为三峡水库各支流库湾水华发生创造了条件^[10]。

2.4 缓慢的水动力条件

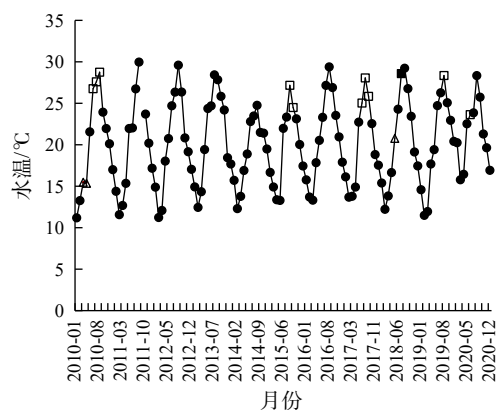
三峡水库 175 m 蓄水以后,库水位抬升约 30 m,形成了很长的回水区及库湾,导致长江水面坡降减小,水文情势和水流状态发生较大变化。特别是在枯水期,库区上游来水量减少,坝前水位的升高,库区受回水顶托影响的干支流与天然河流相比流速大为减小。流速条件对于水体中藻类生长有重要影响,随着流速的增加,水体中叶绿素含量先增大后减小,即较大的流速和较小的流速均不适于藻类生长。当流速为 $0.05\sim 0.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,藻类生长的水平较高^[11]。在相同流量下,自库尾至坝前流速逐渐减缓:枯水期(1—4月)水库高水位运行时,流速一般为 $0.1\sim 0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;汛期低水位(6—9月)运行时,库内流速随着流量的增大而增大,但坝前流速一般低于 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此,枯水期(1—4月)较缓的流速也为藻类的大量生长提供了机会^[12]。

3 三峡库区水华防控对策与建议

3.1 加强支流富营养化治理

防控三峡库区水华,最根本途径是削减流域内的营养盐。关于三峡库区富营养化控制与治理,国内相关研究较多,主要分为外源和内源污染控制 2 个方面^[13-14]。外源污染方面,对于工业排放、生活污水等点源污染应加强监管和治理力度^[15]。如香溪河应重点关注磷矿企业废水排放;小江则应重点关注城集镇生活污水排放;童庄河重点关注养殖污染。在各主要支流推行河长制,严格按照污染物水环境容量实施水质目标管理。对于面源污染可采取农业结构调整、建立库区沿江绿化隔离带^[16]、恢复消落带植被等措施^[17]。针对农业面源治理,在保证粮食生产稳定的前提下,逐渐压减三峡库区玉米和大豆的种植面积,适当增加烟草、蔬菜、水果和茶的种植面积;并在农作物生产过程中大力推广清洁生产技术,扩大测土配方施肥面积,提倡农作物有机种植。针对隔离带建设和消落带恢复,宜以小流域为基本单元进行水土流失综合治理,坚持工程措施和生物措施相结合,山、水、林、田、路统一规划。基于水库水位变动规律,进行植被重建分区设计。选择芦苇、千屈菜、垂柳、枫杨、桑、中山杉等耐淹耐能力强的物种构建植物群落,并利用生态护坡、生态混凝土构建等措施对土壤基质进行加固,以减轻水流侵蚀,并提供稳定、可靠的植被恢复立地条件。

在内源污染方面,可采用沉水植物^[18]、浮水植物^[19]和人工浮岛^[20]进行控制,对于富营养化严重的区域可采取底泥疏浚工程措施。在水生植被修复方面,可选择苦草、竹叶眼子菜和黑藻等沉水植物,莲、茭笋等挺水植物,满江红、凤眼莲等漂浮植物进行水生植物的恢复与重建。人工浮岛的构建应包括浮床单元及固定装置,建议采用水陆两栖浮岛的护岸构建方法,将浮岛固定在水库消落区的最高水位线处,并在浮岛上种植挺水植物,如美人蕉、风车草、菖蒲等。底泥疏浚过程中,应尽量采用环保疏浚方式,在传统的绞吸式疏浚工艺基础上,采用钝化剂降低淤泥的再悬浮和污染物的释放,并对疏浚设备进行改进,实现疏浚后底泥污染物释放量最小化。富营养化治



注: 曲线上三角、方框图标分别代表硅藻、蓝藻水华发生的月份及对应水温。

图6 典型支流香溪河水温变化及藻类优势种情况

Fig. 6 Temperature variation and dominant species of water blooms in Xiangxi River

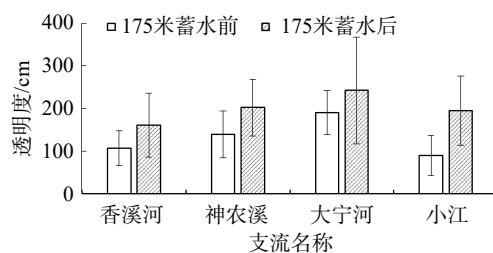


图7 重点支流 175 m 蓄水前后透明度变化对比图

Fig. 7 Comparison map of transparency change before and after impoundment of key tributaries at 175 m

理虽然是解决水华问题的根本途径,但因三峡库区流域面积较大,富营养化防治工作将会是一个较长期的过程,因此,作为应急处置策略,还需要采取其他对策与措施,如控藻和水库生态调度。

3.2 建立水华监测预警体系

一是发展自动化、智能化的监测预警手段^[21]。在现有的固定式的水质自动监测站和浮标站的基础上,进一步加大三峡库区水质自动监测能力建设,实时监控库区重点支流水华;发挥卫星遥感监测范围广、速度快,无人机高时效性、高机动性,自动监测高时效性、高连续性,建立地面监测和卫星遥感相结合的“空天地”一体化立体监测体系,实现梯级水库水华快速识别和状态监测。二是加强现场巡查力度。确保每月至少完成3次库区支流水华现场巡查,发现支流水色水质异常应及时加密巡查。对水华发生风险较高的重点支流,包括芄溪河、小江、香溪河、神农溪等,可定期开展无人机巡查。三是提高预警能力。深化水华与水文、气象、水质等环境要素的响应关系研究,结合常规和自动监测数据,构建三峡库区重点支流水华预警模型,实现水华暴发风险分级预警。

3.3 健全控藻措施体系

水华暴发以后,需采取措施尽快消除水华。常见的控藻措施有物理控藻、化学控藻和生物操纵。物理控藻主要有机械除藻、过滤除藻、黏土除藻和气浮除藻等方法^[22]。机械除藻设备可采用垂直射流机及水平射流机,既可对水华发生时的藻类进行打捞和收集,又可对水体进行机械扰动,改变水体的水动力条件,控制水华的进一步发展。水华较为严重时,可先进行收集打捞,过滤低密度的含藻水,并根据藻细胞大小更换不同孔径的筛网,实现对多种藻类的收集打捞。可在藻华风险较高的芄溪河、小江、香溪河、神农溪等区域配备成套除藻设备,如应急除藻船、移动除藻平台等。

化学控藻主要是喷撒除藻剂,因其容易造成二次污染,实际很少使用。近年来,比较热门且无二次污染的纳米材料光催化杀藻技术正在兴起。如熊勤等^[23]使用纳米杀藻布在水华发生现场小试,结果表明,处理1 d可使水体Chl-*a*浓度下降76%;刘军等^[24]使用固载TiO₂的光催化反应器在景观喷泉水体进行杀藻中试,结果表明,12 d内可使水体Chl-*a*浓度下降89.8%。在水华暴发的重点区域开展试点,优选除藻剂类型并确定最佳使用参数。根据试点结果,在应急除藻设备和平台储备除藻剂,与物理除藻措施联合使用。

生物操纵是通过水生动物对藻类的摄食达到除藻的目的,分为经典生物操纵和非经典生物操纵^[25]。其中,非经典生物操纵中的鲢、鳙控藻在国内应用较多。刘建康等^[26]认为,武汉东湖蓝藻水华的突然消失,是鲢、鳙的大量放养起着决定性作用;洱海近几年来水华发生频率降低,实施鲢、鳙控藻是重要原因之一^[27]。针对生物操纵控藻,三峡库区已经开展了一些试点研究。为探究滤食性鱼类对水华的控制效果,中国三峡集团在三峡库区二级支流高岚河放流了滤食性鱼类 1.2×10^6 尾,其中鲢鱼 1.1×10^6 尾、鳙鱼 1.0×10^5 尾。结果表明,生物操纵技术在高岚河水域具有良好的藻类群落调控和水华抑制作用。放流后,该水域年均仅发生小规模短时水华1次,水华强度明显降低,水体藻类群落结构亦发生了显著改变(优势藻种由蓝藻向甲藻、硅藻转变)。建议在已有试点成果和经验基础上,逐步扩大生物操纵范围,为库区水华防控提供支撑。

3.4 水库生态调度

国内学者针对三峡库区支流水华问题,通过室内实验、现场实测和数值模拟等方法提出了一些关于抑制支流水华的调度策略和调度方案。许可^[28]、周建军^[29]等建立了基于日调节过程的非汛期生态调度模型,提出在非汛期进行大规模日调节,以增强库区水体扰动、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。水位日变幅是影响藻类群落结构的重要因素,可直接影响藻类增殖或改变藻类生长环境来影响藻类生物量(稀释作用、水质因子的改变等)。姚烨^[30]以香溪河为例,构建了流速-藻类生长速率的垂向二维富营养化模型,揭示了温差剪切分层流对水华藻类的作用机理,提出了基于抑制非汛期支流水华的生态调度方式和准则。刘德富^[31-32]等根据“临界层理论”提出水华发生的“光混比”阈值条件,并根据水华预测模型提出了抑制

水华发生的“潮汐式”水库调度方式,即通过短时间内水位波动,实现对浮游植物生境的扰动。

中国三峡集团于2019年首次开展了主动防控支流水华的生态调度实践。2019年7月,三峡水库一级支流香溪河发生蓝藻水华,7月18日—8月6日,库水位从145.71 m抬升至155.13 m,又逐步降低至146.05 m,水位日变幅约1 m,持续时间共计20 d。监测结果表明,通过水库水位“抬升-稳定-下降”过程,支流香溪河水体叶绿素 a 浓度由7月13日 $800\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至23日的 $60\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,直至7月31日水华现象消失。水库生态调度有效抑制了香溪河水华的持续发生,取得了积极效果。在富营养化治理难以短期见效的情况下,通过水库生态调度控制支流库湾水华是较为可行、且覆盖面最广的途径。

建议在保障防洪、航运、供水和大坝安全的前提下,优化三峡水库调度方案,通过“潮汐式”生态调度增加水位波动,达到控制水华的目的。春季及夏季初期,改变三峡水库单向消落的调度方式,当入库流量条件允许时,可通过“消落-反蓄”方式实施生态调度;夏季结合中小洪水调度,根据水华监测预警信息,当支流水体中的Chl- a 浓度超过一定阈值时启动水位“上升-下降”周期性生态调度;秋季蓄水期,可适当提前蓄水,延长蓄水时间,通过“蓄水-加泄”的方式开展生态调度。

4 结论

1) 2010—2020年,三峡库区12条重点支流均发生过典型水华,重庆库段苕溪河、小江发生典型水华次数较多,为19次和14次;湖北库段香溪河、神农溪典型水华发生次数均达5次以上。三峡库区支流水华一般发生在3—9月,库区消落期和汛期是典型水华高发期。蓝藻和硅藻是三峡库区水华主要优势藻种,绿藻和隐藻其次。

2) 充足的营养盐是三峡库区水华暴发的根本原因,库区重点支流除夏季(6月、7月和8月)处于轻度富营养状态以外,其余月份均处于中营养状态,但氮、磷营养盐均已满足水华发生条件。富营养化水平呈现夏季最高、冬季最低的特点。2010年至2020年库区重点支流整体年均营养状态指数呈现“降低-增加-降低-增加”的变化趋势,2010年和2017年达到峰值,处于轻度富营养化水平,其余年份为中营养状态。适宜的温度、透明度和缓慢的水动力条件是水华发生的重要原因。

3) 流域水污染和富营养化治理是控制水华的根本途径,应长期不懈加强重点支流,特别是水华发生频率较高的支流富营养化治理。因物理法、化学法和生物操纵法难以针对大范围水华开展治理,可作为应急措施。相较而言,水库生态调度具有影响范围大、可操作性强、见效快等特点,可作为抑制水华的首选途径,与水华预测预警相结合,既可开展水华的控制调度,也可尝试实施水华的预防调度。

参 考 文 献

- [1] 叶麟. 三峡水库香溪河库湾富营养化及春季水华研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2006.
- [2] ANDERSON D M, GLIBERT P M, BURKHOLDER J M. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences[J]. *Estuaries*, 2002, 25(4): 704-726.
- [3] 周云龙, 于明. 水华的发生、危害和防治[J]. *生物学通报*, 2004, 39(6): 11-14.
- [4] 秦伯强, 王小冬, 汤祥明, 等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 896-906.
- [5] 谢平. 蓝藻水华及其次生危害[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(4): 1-13.
- [6] 辛小康, 尹炜, 叶闯. 水动力调控三峡库区支流水华方案初步研究[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(7): 16-18.
- [7] 张辉, 杨雄. 综合营养状态指数法在巢湖水体富营养化评价中的应用[J]. *安徽农业通报*, 2018, 24(9): 84-87.
- [8] 易绍兴. 重庆双龙湖藻类组成变化及影响因素[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [9] 沈东升. 平原水网水体富营养化的限制因子研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2002, 28(1): 94-97.
- [10] 潘俊敏, 张宪孔. 洪湖水体生物生产力综合开发及湖泊生态环境优化研究[J]. 北京: 海洋出版社, 1991: 81-84.
- [11] 徐宁, 陈菊芳, 王朝晖, 等. 广东大亚湾藻类水华的动力学分析(II)——藻类水华与营养元素的关系研究[J]. *环境科学学报*, 2001, 21(4): 400-404.
- [12] 李锦秀, 廖文根. 三峡库区富营养化主要诱发因子分析[J]. *科技导报*, 2003, 21(9): 49-52.
- [13] 秦延文, 赵艳民, 马迎群, 等. 三峡水库氮磷污染防治政策建议: 生态

- 补偿 污染控制 质量考核[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 1-8.
- [14] 肖铁岩, 许晓毅, 付永川, 等. 三峡库区次级河流富营养化及其生态治理[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2009, 15(1): 5-8.
- [15] 赵冰, 汤敏, 闻学政, 等. 三峡库区富营养化现状及其控制探讨[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(7): 4127-4128, 4131.
- [16] 邓春光, 任照阳. 浅谈植物修复技术在三峡库区富营养化修复中的应用[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(5): 1479-1480.
- [17] 戴方喜, 许文年, 刘德富, 等. 对构建三峡库区消落带梯度生态修复模式的思考[J]. 中国水土保持, 2006(1): 34-36.
- [18] 张宇, 王圣瑞, 李重祥, 等. 沉水植物对富营养化水体的修复作用及其研究展望[J]. 草原与草业, 2009, 21(4): 17-21.
- [19] 汪怀建, 丁雪杉, 谭文津, 等. 浮水植物对富营养水体的作用研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24): 10654-10656.
- [20] 林雪兵, 王培风. 人工浮岛在富营养化水体修复中的应用[J]. 浙江水利水电学院学报, 2010, 22(4): 27-29.
- [21] 许川, 舒为群, 曹佳, 等. 三峡库区消落带富营养化及其危害预测和防治[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(4): 440-444.
- [22] 刘玥, 李毅. 富营养化水体除藻方法的研究[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(S1): 76-78.
- [23] 熊勤, 刘治华, 张一卉, 等. 纳米杀藻布杀藻效果研究[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 715-719.
- [24] 刘军, 江栋, 胡和平, 等. 固载型TiO₂光催化反应器对富营养水体杀藻作用研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(3): 41-45.
- [25] 吴翔, 吴正杰. 利用生物操纵技术控制藻类研究进展[J]. 山东化工, 2020, 49(10): 255-256.
- [26] 刘建康, 谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(3): 85-92.
- [27] 易春龙. 利用鲢鳙控制蓝藻的太湖研究及洱海实践[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [28] 许可, 周建中, 顾然, 等. 基于日调节过程的三峡水库生态调度研究[J]. 人民长江, 2010, 41(10): 56-58.
- [29] 周建军. 关于三峡电厂日调节调度改善库区支流水质的探讨[J]. 科技导报, 2005, 23(10): 8-12.
- [30] 姚焯. 基于抑制近坝支流华华的三峡水库非汛期优化调度研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [31] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流华华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 443-454.
- [32] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 防控支流库湾水华的三峡水库潮汐式生态调度可行性研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(12): 48-50.
- (责任编辑: 靳炜)

Current situation, causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir

YAO Jinzhong, FAN Xiangjun, YANG Xia*, HUANG Yubo

China Three Gorges Corporation Operation and Administration Center for River Basin Hysro Complex, Yichang 443133, China

*Corresponding author, E-mail: 2219574230@qq.com

Abstract Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir in June 2003, the problems of eutrophication and water blooms of the tributaries have attracted much attention. The monitoring data of water quality and bloom in 12 key tributaries of the reservoir area from 2010 to 2020 were analyzed statistically. The results showed that typical water blooms occurred in 12 key tributaries, and the frequency of water blooms decreased in recent years. Water blooms mainly occurred from March to September, and the dominant species were cyanobacteria and diatoms. The root cause of the outbreak of water bloom was the sufficient nutrients in water. The monitoring data of tributaries showed that the tributaries were all in medium nutrient state or above. Appropriate temperature, light and slow hydrodynamic conditions are important causes of the outbreak of water blooms. At present, nutrients reduction is the fundamental solution to reduce water blooms in the tributaries of the Three Gorges Reservoir area. Physical, chemical and biological methods are rarely used to reduce water blooms. It is feasible to control water bloom through reservoir ecological operation.

Keywords Three Gorges Reservoir; the key tributaries; water blooms; eutrophication