

水库调度抑制库湾水华研究进展

刘倩¹ 周猛²

1. 武汉艾信科技有限公司; 2. 中工武大设计集团有限公司

摘要: 水华的发生与营养盐、光照、温度、流速和生物因素等有关, 而流速的改变又会影 响水体中的营养盐分布、光照强度、水温以及藻类群落的演替。本文重点从藻类结构、营养盐分布、水体温度分层和光照强度这四个方面探讨流速对藻类生长的影响, 并提出临界流速的概念, 分析临界流速的影响因素及对水华的抑制效果, 论述国内外抑制水华藻类的调度方式, 最后提出水动力抑制香溪河库湾水华的可能途径, 为发挥三峡工程生态效益、缓解三峡库区支流库湾水华提供科学依据。

关键词: 水华; 香溪河库湾; 流速变化; 临界流速; 水库调度

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.01.079

一、引言

香溪河流经湖北省兴山县和秭归县, 是峡谷型河道, 沿岸磷矿资源丰富, 是全国第三大富磷矿区。香溪河是湖北省内最大的支流, 也是距三峡大坝最近的一条支流, 因此受三峡大坝蓄放水的影响最为明显, 其流域下垫面条件、水环境变化特征、河流水动力条件在三峡库区具有典型性和代表性。自2003年三峡水库蓄水以来, 香溪河与长江交汇的河口至昭君大桥形成回水淹没库湾, 当水位蓄至135m时, 回水范围约24km, 蓄至156m时, 回水范围约32.3km, 蓄至175m时, 回水范围到达古夫附近, 约40km。库湾内多次发生水华^[1]。其中2003年至2011年间水华爆发优势藻种见表1。

表1 2003-2011年香溪河水华爆发优势藻种

年份	优势藻种
2003	首次爆发水华
2004	硅藻
2005	硅藻、甲藻、蓝藻、绿藻
2006	硅藻、甲藻、蓝藻、隐藻
2007	硅藻、甲藻、绿藻、隐藻、蓝藻
2008	甲藻、硅藻、蓝藻
2009	硅藻、甲藻、绿藻、隐藻、蓝藻
2010	硅藻、绿藻、甲藻、蓝藻
2011	硅藻、绿藻、隐藻

关于水华发生机制的研究国内外已有大量研究, 目前多数观点认同藻类水华的形成受藻类自身的生理特性

及营养盐、光照、温度、水动力条件(流速条件)等因素的综合影响。众所周知, 控制营养盐是控制水华的根本途径, 目前已使用的措施如化学法、生物法等。化学法是指向富营养化水体中加入铜的络合物或者其他的杀藻剂、絮凝剂, 该方法可有效降低富营养水体中N、P含量, 但是容易造成二次污染, 一些试剂在水生生物体内富集、残留而存在远期危害; 生物法是指向水体中放养吞食藻类和浮游生物的水生生物如鲢鱼、鳙鱼等, 或种植香根草等吸收营养物质的高等植物, 然而该方法也存在不足, 如破坏生物链、引起其他生态污染问题等。因此利用水利工程改变流速条件抑制水华成为国内外研究的焦点, 本文从水动力抑制水华的机理、抑制水华的临界流速以及有效的调度方式三个方面进行综述, 最后提出水动力抑制香溪河水华的可能途径, 为发挥三峡工程生态效益、缓解三峡库区支流库湾水华提供借鉴。

二、流速对水华影响的机理

水动力条件主要包括流速、水深、流量、水体滞留时间以及垂向扰动等因素, 其中流速是水动力条件的表征, 因此目前大多数学者致力于研究流速对藻类生长的影响。廖平安应用潜水推流技术证明增加水体流速可在一定程度上抑制水华。焦世珺通过室外实验发现流速对藻类生长有延缓、加速、抑制、促进四个阶段的作用。因此, 本文着重从水流流速的角度, 分别从藻类自身结构、营养盐的分布、水体温度及光照强度等四个方面探讨流速变化对库湾水华的抑制机理。

(一) 破坏藻类结构

三峡水库蓄水后, 香溪河库湾水华由原先的河道型水华优势藻种^[2]如硅藻(小环藻)、甲藻(拟多甲藻)向湖泊型水华优势藻种^[3]如蓝藻(铜绿微囊藻)、绿藻(小球藻)转变。其中, 小环藻由于自身无鞭毛结构, 其藻类密度和水体密度相接近, 因此向上迁移的速度小; 而拟多甲藻自身具有鞭毛结构, 因此有明显的昼夜垂直迁移特性, 白天为吸收足够的光照进行光合作用而聚集于水表面, 夜间沉入水下, 水面的Chl-a浓度昼夜变化较大; 铜绿微囊藻在形成水华前产生伪空泡并聚集成团, 其细胞密度远小于水体密度, 因此细胞向上迁移的速度较大且能够悬浮于水中, 因此可以漂浮于表层以获得充足的光照或迁移到营养盐浓度较大的地方以增大

对营养盐的吸收等等。金相灿通过扰动含有微囊藻的水体发现扰动可以使微囊藻生长滞后，其原因是阻碍了微囊藻的垂直迁移。刘德富^[4]等人研究发现水流过快时对藻类的聚集不利，而且较大程度的破坏了藻类自身的垂直迁移特性以及藻类形成水华的生物学条件。

（二）改变营养盐分布

藻细胞生长离不开氮和磷这两种营养元素。氮是组成藻细胞的元素，磷直接参与藻细胞的光合与呼吸作用、酶系统活化和能量转化等过程。水体的混合程度对营养盐的垂向分布及输移有较大的影响，进而影响着不同藻类在动态水体中对营养盐的选择性吸收、藻类生长以及藻类群落演替过程^[5]。刘德富^[4]等人研究发现，流速变化影响了小环藻对营养盐的吸收过程，从而影响其生长。

（三）改变水体温度分层

水温是水生态系统中必不可少的因素。藻类进行光合作用、营养物质运输与转换的酶系统活性都和温度有着直接的关系，水温直接或间接的影响着水华藻类的新陈代谢、繁殖能力、群落分布及演替^[6]。适宜的水温能够促进藻细胞的光合作用，增大酶的活性，加速酶促反应，促使藻类大面积生长繁殖并爆发水华^[7]。随着研究的深入，一些专家学者们发现水温的变化会影响藻类的生长，并导致藻类的演替。Gary等人研究发现水温分层会导致水库底部溶解氧浓度降低、营养物质在垂向的交换减弱以及因水体底层缺氧而导致底泥中营养盐的释放加速，而且水体中的浮游植物会根据自身需要生长在不同的水温层，不同藻种随着水温层中的温度改变而进行相应的上浮或下沉，完成藻类的演替，从而加快藻类的繁殖^[6]。而流速的增大可以减弱水体分层，使得藻类的演替受阻，藻类的呼吸作用和光合作用减慢，吸收氮磷等营养盐的速度变缓，从而延缓或抑制藻类的生长。

（四）减少光照强度

在营养盐较为丰富的水体中，适宜的光照是水华爆发的诱发因素。光作为水生态系统中不可或缺的因素之一，很大程度上影响着浮游植物生长、光合作用、光吸收特性以及营养盐吸收、同化等。已有研究表明^[4]，水下光照是决定水体藻类生长的重要因子。Sverdrup理论一般用 Z_{eu} （真光层深度）/ Z_{mix} （混合层深度）的比值来判别光照在垂向的分布以及水体在垂向上的掺混与浮游植物生长之间的相互关系。对于具有分层状态的水体，若真光层深度较大，则浮游植物会因水体表层充足的光照而迅速的生长繁殖，最终形成水华；若混合层深度较大，则混合水体会将浮游植物带入真光层以下，使浮游

植物因没有足够的光照进行光合作用而生长受阻。由此可见，通过水体垂向掺混来抑制藻类的生长在理论上是可行的。另外，垂向掺混也会将河床底部的泥沙携带入水体中，使水体浑浊而阻碍藻类进行光合作用，并且部分藻细胞也会因为被泥沙吸附沉降而死亡。

流速的大小对水华藻类生长有着紧密的关系，其影响不是单单对藻类自身结构、营养盐分布、水温及光照强度中某一种因素的影响，而是对以上四种因素的综合影响。因藻类生长特性不同，每种因素对藻类生长影响的权重值的差异等等，这些都有待进一步的研究。

三、临界流速的研究

为了从流速的角度对水华抑制开展实际工程提供操作建议，需要确定可达到抑制水华效果的流速值。黄钰铃、颜润润等人通过模拟试验发现，不论是单一藻种还是混合藻类，流速低于0.4m/s或小范围扰动水体时对藻类的生长繁殖有利，而流速继续增大就会导致Chl-a浓度先增后减。因此，流速存在一个抑制水华效果的临界点，该临界点称之为临界流速。廖平安等人在流速对藻类生长的试验研究中发现增加水体流速对抑制藻类生长、延缓水华发生是行之有效的，同时也提出了临界流速的概念。

不同的藻类成分对流速的敏感程度不同，因此抑制水华爆发的临界流速也不同。Poff等人研究发现消除河流岸壁藻类所需最小流速为0.3~0.4m/s，Mitrovic等人在对Barwon-Darling river研究发现项圈藻在临界流速0.05m/s时会爆发水华，Escatin等人通过室内试验研究发现，水流流速达到0.1m/s会破坏藻群结构。焦世珺通过室内和室外双重实验研究，发现小球藻和纤维藻生长的临界流速分别约为0.05m/s、0.01m/s，栅藻、鱼腥藻的生长速度与流速的关系不明显。水体中浮游植物的种群组成与总氮总磷比（TN：TP）关系较为明显，当TN：TP<29时，会形成以蓝藻为优势藻种的水华^[8]。张毅敏对铜绿微囊藻的水动力模拟实验研究表明，营养状态与临界流速有直接关系，当N/P为4.5：1时，临界流速值约为0.5m/s；当N/P为2.7：1时，临界流速约为0.3m/s。刘德富等人研究发现，不同的N/P水平下，微囊藻生长有显著差异，不同的N/P对蓝藻水华爆发有显著的影响。

四、水库调度方案研究

国内外研究表明，在水华爆发时期，通过调整水库的调度运行方式，加快支流水体流速，破坏藻类生长繁殖的缓流条件，可以有效抑制库湾水华的爆发。

Nandalal K. D. W通过改变入库径流量和出库泄流量

来改善水库水质。Michael Mc Killip通过数值模拟发现通过调整库区水体的滞留时间可改善库区的水质和鱼类的生长。Webster通过对澳大利亚的Weir水库研究发现,增大大坝的出库泄流量可打破水体的温度分层、减少水体的滞留时间,从而消除有毒的鱼腥藻水华。在国内,马超、刘东等人研究表明,三峡水库调度对支流库湾水动力条件的改变以及水华分布的范围和强度均有很大的影响。三峡水库通过蓄水可将水库干流水体以倒灌异重流的形式进入支流库湾,打破水体分层并稀释Chl-a浓度;水库通过泄水可缩短库湾水体滞留时间,将高Chl-a浓度的营养水体排出库湾,减少库湾水体中氮、磷等营养元素,从而抑制库湾水华。周建军、王雅萍等人认为可以通过改善三峡水库调度、增大电厂日调节幅度来达到控制库湾水华的情况。三峡电厂日调节昼夜之间发电和下泄流量具有周期性,而周期性的下泄会对支流形成类似潮汐的作用,“潮汐”可带动支流水体运动,减少支流富营养化水体的滞留时间,加大水流的掺混,稀释藻类密度,从而抑制藻类生长。此外,辛小康^[9]等人研究发现通过单独采用三峡水库降低坝前水位,来增加支流香溪河河口水深平均流速的效果并不理想,然而通过联合香溪河支流水库来增加泄流对提高香溪河口断面平均流速的效果相当显著,且研究还表明枯水期需联合调度三峡上游梯级水库才能达到较好的抑制支流库湾水华的效果。

五、香溪河库湾水华的调度建议

(一) 从季节上考虑调度方案

三峡水库不同调度时期有不同的调度方案。结合三峡水库自身调度运行方案,从抑制库湾水华生长繁殖的角度,建议每年的3~5月,采用春季“潮汐式”水位调度方案,即在2~3天内将水位抬升3~6m,日均抬升约1.5~2m,三峡水库从155m(枯季最低水位)开始下泄,之后根据水量平衡原理结合实际情况增大大坝的下泄流量。每年的8~9月,采用夏季“潮汐式”调度方案,即在2~3天内将水位抬升4~6m,但不超过上限水位156m,日均抬升2m左右,水库水位先保持在145m(汛限水位)不变,之后根据水量平衡方程增大大坝的下泄流量,如在3~4天内将水位迅速降低4~6m,但不低于死水位145m。每年的9~10月,采用秋季“提前蓄水”调度方案,即9月初开始蓄水,9月中下旬蓄至156m水位,蓄水过程采用“先快后慢”的方式,即初期蓄水4~5日时,日均抬升水位1.0~1.5m,后期日均抬升水位约0.4m;10月份水库水位由156m蓄至175m,蓄水过程同样采用“先快后慢”的方式。

(二) 干支流水库群联合调度

单独调控三峡水库坝前水位对香溪河库湾流速影响效果不大,而增加香溪河支流水库调度对库湾有显著的影响。而在枯水期时,仅依靠坝前水位变动和支流水库联合调度不足以影响库湾水流,须结合三峡水库上游水库群联合调度。

(三) 加强调度试验和跟踪监测

要达到抑制库湾水华的效果,不仅要有理论的支持,还需具有实际的可行性,即根据工况的设计制定实际的水库调度措施。此外,加强实时的跟踪监测有利于调度效益的发挥。

改善香溪河库湾水华,依靠水库调度调控的作用是有限的,需从根本上对排入库湾的污水进行源头控制,如控制周边点源和面源污染物的排放。此外,采用水库调度的方法对库湾水华进行改善的同时,需考虑防洪、发电及灌溉等调度需求,如何通过调度最优化综合效益仍需进一步研究。

参考文献

- [1]唐涛,黎道丰,潘文斌,等.香溪河河流连续统计特征研究[J].应用生态学报,2004(01):141-144.
 - [2]姚绪姣,刘德富,杨正健,等.三峡水库香溪河库湾冬季甲藻水华生消机理初探[J].环境科学研究,2012,25(06):645-651.
 - [3]张敏,蔡庆华,王岚,等.三峡水库香溪河库湾蓝藻水华生消过程初步研究[J].湿地科学,2009,7(003):230-236.
 - [4]刘德富,黄钰铃,继道斌,等.三峡水库支流水华与生态调度[M].中国水利水电出版社,2013.
 - [5]林启才.硅藻水华生消机制的模拟试验研究[D].宜昌:三峡大学,2008.
 - [6]刘健康.高级水生生物学[M].北京科学出版社,2000.
 - [7]Y R G, Gotham I J. The effect of environmental factors on phytoplankton growth: temperature and the interactions of temperature with nutrient limitation[J].1981,26(04):635-648.
 - [8]Schindler D W. Evolution of phosphorus limitation in lakes[J].1977,195:260-262.
 - [9]辛小康,尹炜,李迎喜.水动力调控三峡支流库湾水华初步研究方案,2011[C].
- 作者简介:刘倩(1992-),女,湖北武汉人,硕士,主要从事水文水资源、水环境方面的研究。