

三峡水库水环境与水生生态研究的进展与展望*

蔡庆华¹ 孙志禹^{1 2}

(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: 中国长江三峡集团公司科技环保部, 北京 100038)

摘要: 伴随着举世瞩目的三峡工程全面竣工, 三峡水库于 2010 年正式进入年水位落差达 30 m 的正常运行阶段. 水库湖沼学可为环境友好型大坝建设和水库可持续管理提供科学依据. 本文在三峡成库 8 a 以来生态系统长期监测与研究的基础上, 对三峡水库水环境现状进行了归纳和总结, 分析了水环境动态的时空异质性、水库纵向分区与群落组成、垂向分布及藻类水华的成因和动态, 并对三峡水库藻类水华预警与生态-水文调控机制展开了论述. 最后, 本文尝试给出以下两方面的展望: 1) 大型水库湖沼学观测研究应有长期的策略; 2) 近期研究应重点关注水华暴发水动力学机制的量化和水华预警模型及生态水力调度平台的耦合.

关键词: 水库湖沼学; 时空异质性; 长期观测; 藻类水华; 水动力学机制; 预警模型; 生态调度; 三峡水库

Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China: progress and prospects

CAI Qinghua¹ & SUN Zhiyu^{1 2}

(1: *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China*)

(2: *Department of S & T and Environment Protection, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, P. R. China*)

Abstract: As the final completion of the world-famous Three Gorges Project, the Three Gorges Reservoir (TGR) came into a normal operation stage since the year 2010, with an annual water level fluctuation of 30 m. Reservoir limnology can provide a scientific basis for environment-friendly dam construction and reservoir sustainable management. On the basis of long-term monitoring and investigation on the TGR ecosystem for 8a, this paper described the current status of aquatic environment in the reservoir, and elaborated the spatial-temporal heterogeneity of water environmental dynamics, longitudinal zonation and biological community structure, vertical distribution, and forming and tendency of algal bloom of the TGR. The early warning of algal bloom and eco-hydrological regulation mechanism were also analyzed. Two perspectives of ecological research on TGR were finally pointed out in the paper: 1) Limnological observation and research in the large reservoir should have a long-term strategy; 2) Research in near future should focus on the quantification of hydrodynamics mechanism on algal bloom, and the coupling of early warning models of algal bloom and eco-hydraulic regulation platform.

Keywords: Reservoir limnology; spatial-temporal heterogeneity; long-term observation; phytoplankton blooms; hydrodynamic mechanism; forecasting model; eco-hydraulic regulation; Three Gorges Reservoir

三峡水利枢纽工程规模宏大, 举世瞩目, 是开发治理长江的骨干工程, 具有巨大的防洪、发电、航运等综合效益, 同时也对库区的生态与环境产生了显著的影响. 三峡工程分别于 2003 年 6 月、2006 年 10 月和 2008 年 11 月完成了首次成库、二期蓄水和三期“175 m 试验性蓄水”, 并于 2010 年 10 月 26 日首次到达 175 m 水位的设计目标. 三峡水库首次蓄水成库后即出现了以富营养化和藻类水华暴发为代表的水环境问题, 引起

* 国家自然科学基金项目(40671197)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-427)、国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07528-003-04-01)和国家重点实验室专项经费项目(Y15B021F01)联合资助.
2011-12-07 收稿; 2011-12-13 收修改稿. 蔡庆华, 男, 1964 年生, 博士, 研究员; E-mail: qhcai@ihb.ac.cn.

国内外广泛关注. 随着工程的全面竣工, 三峡水库已正式进入年水位落差达 30 m 的正常运行阶段, 如媒体所说的“后三峡时代”. 本文以中国科学院/中国长江三峡集团公司三峡水库香溪河生态系统实验站对三峡成库 8 a 来生态系统长期监测与研究为基础, 对三峡水库水环境和水生态研究进行综述与分析, 以期对三峡水库生态系统管理和充分发挥三峡工程的综合效益提供决策参考.

1 三峡水库水环境现状

三峡成库以来, 虽然环保力度不断加强, 但废水排放量依然巨大, 水污染态势依旧, 特别是来自于城镇生活污水方面的压力超过了工业废水而成为主要的污染源(表 1).

表 1 三峡入库污染物统计*
Tab. 1 Annual statistics of pollutants into Three Gorges Reservoir

年份	废水排放量/($\times 10^8$ t)			COD 排放量/($\times 10^4$ t)			氨氮排放量/($\times 10^4$ t)		
	合计	工业	生活	合计	工业	生活	合计	工业	生活
2009	11.09	4.86	6.23	16.34	7.57	8.77	1.87	0.57	1.30
2008	11.51	5.58	5.93	16.36	7.70	8.66	1.50	0.57	0.93
2007	9.52	4.74	4.78	16.74	7.48	9.26	1.60	0.67	0.93
2006	11.24	6.28	4.96	18.38	8.11	10.27	1.66	0.64	1.02
2005	9.83	5.74	4.09	16.97	7.71	9.26	1.52	0.58	0.94

* 资料来源: 环境保护部. 长江三峡工程生态与环境监测公报 2006 - 2010.

采用营养状态指数(TSI)法对 2011 年春季长江干流及主要支流库湾的营养状态进行评价, 并与 2005 年^[1]和 2009 年^[2]进行比较, 结果表明湖北库区的 4 条支流库湾均为富营养和超富营养状态, 变化不大, 而重庆库区自三期蓄水后各支流库湾均为富营养和超富营养状态(其中超富营养比例由 2009 年的 9% 上升到 2011 年的 38%), 相较于 2005 年春季有 25% 的中营养和贫营养状态, 恶化趋势明显(图 1). 特别值得注意的是 2005 年长江干流为中营养状态, 而 2009 年和 2011 年上升为富营养状态, 即营养状态 2011 年 > 2009 年 > 2005 年. 总体而言, 支流库湾和长江干流的富营养化趋势更为严重.

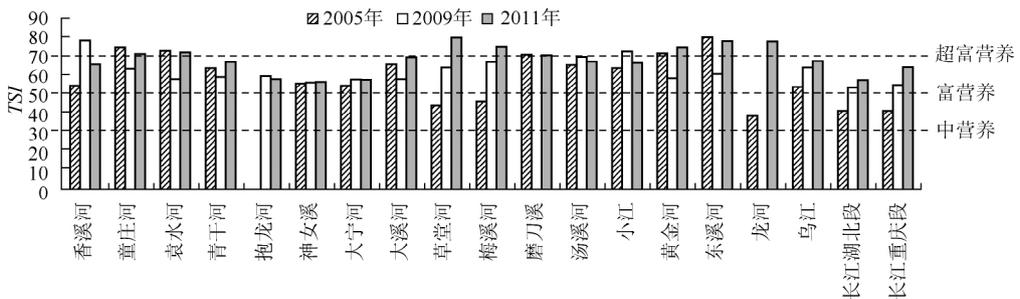


图 1 三峡水库部分支流库湾及长江干流营养状态比较

Fig. 1 Comparison of trophic status between some tributary bays and the mainstream of Three Gorges Reservoir

香溪河库湾(30°57'~31°17'N, 110°41'~110°50'E)是三峡水库坝首最大的支流库湾, 一直是水环境管理部门的重点监测对象, 也是相关研究开展最多的库湾. 据此, 本文以该库湾为分析案例. 从浮游植物功能群的角度, 采用 Q 指数, 即同时考虑功能群在总生物量中的相对比例及与水体类型有关的因子得分, 依此划分水体生态状况为 5 个等级^[3-4]: 较差(Q: 0~1)、可接受(Q: 1~2)、中等(Q: 2~3)、良好(Q: 3~4)和很好(Q: 4~5). 对香溪河库湾 2008 年 3 月至 2010 年 2 月水体生态状况进行周次评价. 结果表明 Q 指数^[4]的均值为 2.17, 即总体上香溪河库湾生态状态为中等. 生态状况较差的时期是 2008 年 6-7 月中旬(大范围暴发了微囊藻水华^[5-6]), 可接受的时期大致是 2008 年 5 月中下旬、7 月中下旬-8 月上旬、2009 年 5-9 月和

2010年2月,而生态状况达到良好的时期较少,均值最高为3.39(2009年4月24日)(图2)。

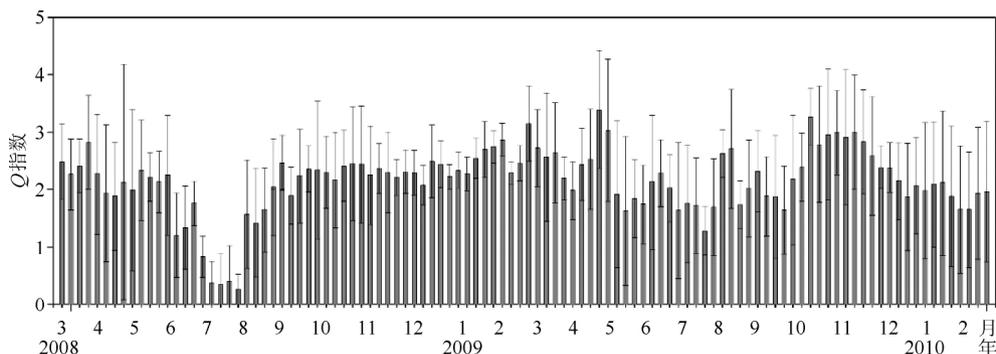


图2 香溪河库湾生态状态的时间变化

Fig.2 Temporal variations of ecological status in Xiangxi Bay

基于连续5年的监测数据,估算三峡水库香溪河库湾氮磷营养盐的入库通量,并分析氮磷营养盐浓度及其通量的逐月动态^[7]。研究发现,每年大约有1623.49 t 总氮(TN)和331.85 t 总磷(TP)汇入香溪河库湾,其中香溪河干流贡献了68.5%的TN和91.74%的TP。可溶性无机氮是氮主要存在形式,氮通量表现为夏季7月份偏高、春秋季次之、冬季较低的规律,面源污染是氮进入河道的主要途径,而磷酸盐是香溪河磷的主要存在形式,高岚河的磷酸盐含量则较低;香溪河磷通量的月均波动较为平缓,高岚河磷通量的高峰期出现在春末和夏季,高岚河的磷主要通过面源途径进入河道,而香溪河的磷则存在点源污染;氮磷通量更大程度上和流量有关;水土流失可能是香溪河流域面源污染的主要来源,磷矿和磷化工厂的排污可能是磷点源污染的主要途径。从保护三峡水库香溪河库湾的生态学角度考虑,应重点控制香溪河磷的点源污染。

进一步分析香溪河库湾底泥中TN、TP含量的时空分布特征及其影响因素^[8]。结果表明:底泥中TN、TP含量均表现为“中间高,两头低”的空间分布规律,TN含量按秋季、冬季、春季的顺序依次降低,从春季到夏季则大幅上升,夏季达最高值;TP含量的季节波动较小,以春季最高。底泥中TN、TP含量的年际差异均达显著水平。香溪河库湾底泥中TN、TP含量的空间分布主要受水体中悬浮物^[9]、水华过程^[10-11]及沉积率等的影响,沉积率较高区域的TN、TP含量较高;TN含量的季节波动主要受上游来水量季节变化的影响,而TP含量的季节变化主要源于点源污染。

2 三峡水库水环境动态的时空异质性

时空异质性是生态学研究的重要主题,生态系统的时空异质性可归结为局部驱动力(内部因素)和区域驱动力(外部因素)共同作用的结果^[12],其技术手段包括同步性(Synchrony)理论或时间相干性(Temporal coherence)学说等^[13-14]。水库因具有独特的时空异质性而成为理想的研究对象之一,其干支流水力条件、环境和生态状态的差异等是研究重点。

三峡水库干流与香溪河库湾水力学特征的差异是驱动其水环境动态的关键因素^[15-16]。研究发现^[17]: 1) 三峡水库首次成库后干流水体在5-11月仍属河流型水体(A类),在其它月份则属于过渡型水体(B类);香溪河库湾个别月份属湖泊型水体(C类),在绝大多数月份属于B类。这意味着三峡水库首次成库后香溪河库湾水体类型比干流更趋于稳定。2) 三峡水库二期、三期蓄水后水库干流与香溪河库湾水体滞留时间均进一步延长,特别是非汛期的库湾,已有较多月份属于湖泊型水体,水华暴发的风险增大。三峡水库首次成库后干流和香溪河库湾悬浮物组成、季节动态同步性及其对水力学特征的响应差异性研究表明^[15,18]: 1) 悬浮物浓度及其无机含量所具有的空间梯度主要体现在水库干流大多数样点高于香溪河库湾样点,意味着以无机悬浮物组分为主的外源性输入在三峡水库干流比起香溪河库湾更占主导。2) 水库干流内部悬浮物高度的同步性意味着其季节动态受到区域性因素高度一致的主导控制;香溪河库湾悬浮物低的时间相干性意味着其季节动态受到样点所在微生境内部因素的作用更为重要;水库干流与库湾之间悬浮物动态的异步性表明二者悬浮物季节动态的调控因素不同,可能分别与各自的水域类型及流域特征有关。3) 在河流型的水库

干流、悬浮物动态和水域水力学特征在流域内区域水文因素的控制下表现出紧密的关系;而在过渡型或湖泊型的香溪河库湾,水动力学特征较为稳定,在很大程度上削弱了流域内水文因素对悬浮物动态的影响。

基于 Carlson 营养状态指数及其二维坐标差值评价方法并运用时间相干性学说,对三峡水库干流与香溪河库湾营养状态受内外驱动力控制的相对强度进行解析^[19]。结果表明水库干流样点 $TSI_{CHL} - TSI_{SD}$ 的值通常小于香溪河库湾的样点,意味着香溪河库湾营养状态受到非藻类浊度的限制程度低于水库干流;而水库干流样点 $TSI_{CHL} - TSI_{TN}$ 和 $TSI_{CHL} - TSI_{TP}$ 通常也小于香溪河库湾的样点,意味着水库干流氮、磷营养盐的富余程度大于香溪河库湾;非藻类浊度的限制程度在水库干流的季节动态受到区域性水文因素的主导,对流域水文影响下的水动力学特征具有同步的季节性响应^[20];香溪河库湾大多数样点非藻类浊度限制程度对水动力学特征的季节性响应均很弱,与水库干流的响应特征不一致。

浮游植物从干流到香溪河库湾季节波动的异步性格局结果表明^[21]: 1) 在所选择的尺度上,藻类密度动态和群落结构的演替均出现异步性格局,意味着区域性的因素不能同步驱动浮游植物季节演替。2) 在河流型的干流浮游植物具有高度的同步性,意味着外部水文的强烈扰动使得生境条件和浮游植物被同质化;而趋于湖泊型水体的香溪河库湾,浮游植物的演替格局出现的分化取决于样点局部生境。3) 干流的快速交换引起藻类缺乏演替以及库湾藻类演替分化,共同导致了从干流到库湾浮游植物波动出现异步性格局。

3 三峡水库水环境的纵向分区与生物群落动态

通常,一个水库在纵向上存在截然不同的三个生态区,即沿着入库水流的方向,依次为河流区、过渡区和湖泊区^[22-23];从河流区到湖泊区,由于水动力条件差异,影响了水体理化参数和水生生物群落的分布,导致这些指标沿着水库纵轴的空间梯度变化^[22]。目前三峡水库的富营养化问题最集中的体现不在干流,而在其大小不同的各个库湾。虽然对库湾的监测、研究已有很多,但多限于空间梯度的描述,未从理论上和实际上确定库湾的分区^[24]。郑丙辉等^[25]在探讨三峡水库营养状态评价标准时,采用一维水力模型和水文数据,曾对库湾的分区进行了划分,指出水库库首的库湾主要以湖泊型为主,位于库尾的库湾多以河流型和过渡型为主。这种划分未考虑库湾本身的空间差异,而研究证实,库湾内水华的暴发也存在着明显的空间差异^[10-11]。此外,库湾可被认为是没有“坝”的水库^[24],本身也应该存在分区。

大型底栖动物因迁移能力较弱,被视为水库生态系统分区的理想对象。通过对三峡成库后香溪河库湾大型底栖动物长期监测^[26-27]并与湖北库区其它库湾(袁水河、青干河及童庄河)进行比较,Shao 等^[24]发现,受到水库干流的影响,一个典型的库湾应包括四个分区——比水库一般纵向分区增加了一个分区。这个分区被称为“干流区(mainstream zone)”,这是因为干流区受到水库干流的干扰。相比于湖泊区,干流区的底栖动物群落更不稳定;和水库的纵向分区一样,库湾只有在足够长时才能形成湖泊区,并且库湾的纵向分区是动态变化的,在某种程度上受到库湾年龄和季节变化的影响^[28]。相比之下,干流水动力学因子与大型无脊椎动物的关系有所不同^[29]:受水文节律的影响,干流大型底栖动物群落结构呈现了明显的季节性差异:低入库流量和高的水体滞留时间对底栖动物总密度具有较高的贡献率,得益于低流量时较高的水体透明度有利于干流底栖动物优势类群——仙女虫科的生存;在干流水体滞留时间的波动范围内,水体滞留时间越长,底栖动物多样性越高,这也充分表明了过强的水体扰动不利于大部分底栖动物的生存。

对香溪河库湾浮游生物的研究^[4,30]也发现了类似规律:1) 香溪河库湾浮游植物在空间分布上具有较弱的异质性;相对生物量上,蓝藻和绿藻呈大体均匀的分布,硅藻呈现出从河口至库尾减少的趋势,而隐藻和甲藻则相反。2) 香溪河库湾浮游植物大于总生物量 5% 的优势种有 85 种,分属 17 个功能群。X2、Y、P、B、D 和 Lo 组是香溪河库湾最重要的 6 个功能群。X2、Y、Lo 组在库尾的比例相对河口区域较高;而 P、B 和 D 组在河口区域的比例高于库尾。3) 以藻类叶绿素 a、透明度和相对水柱稳定性 3 个指标从纵向上对整个库湾进行聚类分析,可将香溪河库湾总体上分为干流区、湖泊区、过渡区和河流区 4 个区域,但这些区的位置及长度随水库运行的不同时期而有所不同,并且不同区域内藻类叶绿素 a、透明度和相关水柱稳定性之间的相关性亦表现出差异^[31];4) 主成分分析表明浮游轮虫群落结构在纵轴上存在显著的异质性,聚类分析显示轮虫群落亦可如上分区^[32];主成分分析和冗余分析表明,浮游植物主要受限于混合层的控制,且水位波动对混合层深度及水柱稳定性具有显著相关性^[33];5) 由于纵向差异,河流区的群落结构与其它区域显著不同,表明上游的入库通量对香溪河库湾影响很大。而在管理上,应主要加强对香溪河库湾干流区、湖泊区和过渡区水华暴发的防治管理工作^[34]。

4 三峡水库水环境垂向分布及藻类水华成因、动态

水温是水库物理特征的重要指标,以各种潜在形式影响水库的多种水动力、理化和生物过程。在温带深水湖泊,生长季节的开端受热分层条件的驱动,热分层减缓了浮游生产者在表层所受的光限制并阻断向更深水层的热量损失^[35]。除水温外,光、DO、pH、氧化还原电位等理化条件也呈现垂向梯度,共同影响了大型深水水体的生态过程。浮游植物空间异质性的主轴是在垂向上;浮游植物的垂向分布影响了初级生产和向更高营养等级的能量传递^[36]。

春季藻类水华形成机制的相关核心理论是临界深度理论(Critical Depth Theory),该理论所关注的焦点是水柱垂直混合与临界深度的关系以及由此引起的水柱光合作用产量与呼吸作用消耗的平衡^[37]。理论上,这些关系在春季藻类水华生消过程大致有前、中、后三种基本模式^[15]。随着气候变化的生态系统效应问题日益突出,春季藻类水华由于对海洋和湖泊等水域生态系统具有深远的影响,其对气候条件的响应在临界深度理论的基础上备受关注。包括水温上升、温分层出现和太阳辐射增加在内的物理因素,均被视为深水水体春季藻类水华的主导因素,而这些因素恰恰与气候因素的季节性变化有关^[38]。

在海洋和深水湖泊(水库)中,鞭毛藻的昼夜垂直迁移是普遍存在的生态学现象。垂直迁移是水华鞭毛藻生存能力的体现,如:白天垂直向上迁移吸收更多的光进行光合作用,晚上向下垂直迁移吸收营养。比起其它藻类,鞭毛藻的昼夜垂直迁移使其在水华过程中具有较强的竞争优势。倪氏拟多甲藻(*Peridiniopsis niei*)是三峡水库支流库湾甲藻水华的绝对优势种^[39]。研究发现^[40],在没有温跃层的水域,该物种昼夜垂直迁移格局与绝大多数鞭毛藻相类似;而在温跃层出现的水域,该物种夜间向下迁移受到了一定程度的限制,这与来自贫营养水体的鞭毛藻水华昼夜垂直迁移格局不一致。这意味着,在类似于香溪河库湾这类富营养化水体,鞭毛藻可能不必越过温跃层的障碍以吸收水体下层的营养;只有当水体上层营养出现匮乏时才需要越过障碍移到水体下层吸收营养。

对单个样点的逐日观察研究发现^[41]:在春季温度的驱动下,以硅藻占绝对优势的藻类水华使得水体溶解性二氧化硅被大量消耗,水环境特征出现了5个阶段的转变,并且浮游植物群落出现了具有极为类似的转变规律。在微囊藻占优势的夏季蓝藻水华期间,微囊藻原位生长速率均值为 0.14 d^{-1} ,营养因子、水温、藻类叶绿素 a 等是显著的影响因子,而磷更容易成为藻类生长的限制因素^[42]。此外,这期间浮游植物在白天倾向于聚集分布,在夜间则倾向于均匀分布;分析表明,光辐射和相对水柱稳定性对微囊藻水华期间浮游植物垂向分布模式具有重要影响,而风速的影响不显著^[43]。研究进一步表明,所有轮虫随着浮游植物呈一种聚集分布,主要集中在表层(0.5~5.0 m),尤其在水华暴发期^[44-47]。从无水华期到水华期,轮虫密度、轮虫优势种、Shannon-Wiener多样性指数和Margalef's多样性指数均显著升高,但轮虫分布均匀度则显著降低。NMDS排序将非水华期和水华期样点显著区分,这意味着硅藻水华的暴发对香溪河库湾轮虫群落有着显著影响。此外,除了夏季的广布多肢轮虫表现出逆向的迁移外,其他轮虫并未表现出昼夜垂直迁移,其原因可能是低丰富度的竞争者和捕食者以及高密度的表层食物资源所致^[30, 45]。

根据同步性理论进一步就香溪河库湾2005年春季两个样点的同步观测数据进行分析^[48],结果表明在温度同步升高和溶解性二氧化硅被同步消耗的背景下,藻类水华特别是藻类群落结构出现了异步的转变。而基于香溪河库湾2006年春季15个样点的同步观测数据的格局分析发现^[49],该库湾藻类水华动态存在异步分区格局;文中还构建了环境异质性系数与藻类叶绿素 a 异步性参数的关系,定量地解释了藻类水华动态异步性的形成原因。上述研究从单个样点水华的阶段性到库湾水华的异步性,以及从异步性现象到形成原因的定量解释,较为系统地认识了香溪河库湾春季藻类水华的动态规律,从而在一定程度上较好地厘清了“春季水华气候驱动论”的争议。

5 三峡水库藻类水华预警与生态-水文调控

构建藻类水华预警模型,对水华暴发进行提前预警,可为有关部门争取时间采取有效措施,如水利调度、人工扰动等,控制或减缓水华的暴发,减轻对水生态系统的影响,也可避免因严重水华暴发而引起的水生态安全问题,具有重要的理论意义和应用价值。

基于气象、水文、水质等参数,利用反馈神经网络(Recurrent Artificial Neural Network)构建了三峡水库香

溪河库湾藻类水华实时预测和提前7 d 藻类动态预警模型^[50]. 通过校正 模型在实时和提前7 d 的藻类动态预测中均取得较好的结果. 其中在实时预测中(图3a) 模型预测的叶绿素 *a* 动态与实际观测值高度吻合 (R^2 分别为 0.85 和 0.89). 从提前7 d 预警的结果来看(图3b) 模型预测的叶绿素 *a* 浓度也与实际观测值较符合 (R^2 分别为 0.68 和 0.66).

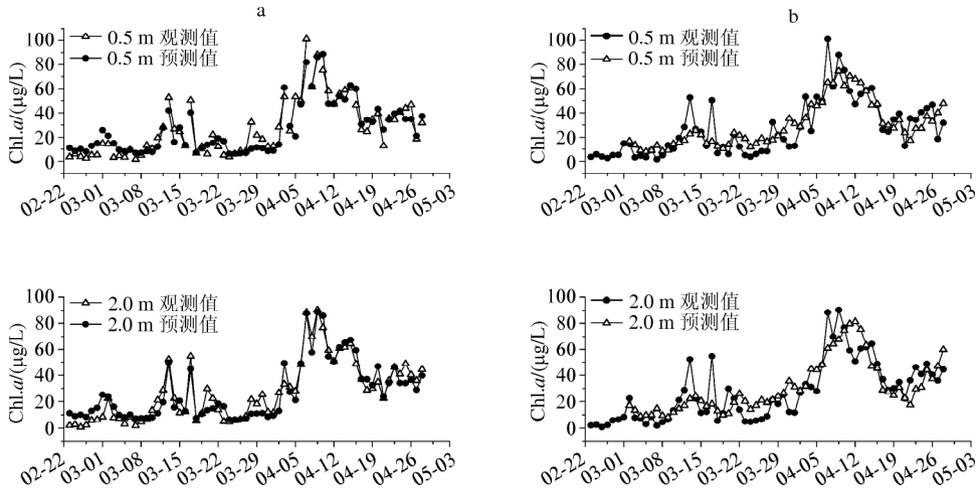


图3 香溪河库湾藻类水华期间叶绿素 *a* 浓度预测结果(a: 实时 b: 提前7 d)

Fig. 3 Comparison of predicted and observed chlorophyll-*a* concentrations in Xiangxi Bay during a spring phytoplankton bloom period(a: 0-day-ahead, b: 7-day-ahead)

监测结果表明,当三峡水库水位以每天0.1~0.2 m速度下降时,对库湾藻类叶绿素 *a* 浓度并无明显的影响. 为研究香溪河口水位变化对库湾叶绿素 *a* 浓度的影响,在三峡实际库水位过程线基础上,设计库水位以0.5 m/d速度快速下降方案,并假定上游兴山水文站来流量、沿岸污染源及高岚河汇流等因素均不变,取兴山水文站至河口32 km为计算对象,建立富营养化模型研究香溪河库湾叶绿素 *a* 浓度在新的库水位降落过程中的分布. 结果表明,随着坝前水位的线性下降,香溪河沿程流速变大,河宽、断面面积、水深等物理量也随之变小,表明在库水位下降过程中,库湾河道特征逐渐加强,藻类生长速率下降,叶绿素 *a* 浓度也随之下降. 因此,水库若能以较大幅度进行水位调节,可对水华发生起到抑制作用^[51-53].

对实际观测数据的分析表明,水库水位以0.3 m/d的速度变化或日内0.5 m水位变化可以削弱叶绿素 *a* 频率从而改善水华状况^[4]. 此外,分析2005-2009年水环境因子、水动力条件与藻类水华的关系可知,水位平稳期藻类水华较为严重,而水位较大幅度持续下降时香溪河库湾绝大多数水域藻类水华将出现消退的现象.

研究库湾浮游植物主要功能群与包括水位波动、光和营养等多种环境因子的相关关系结果表明^[33],虽然大部分功能群表现出与水体理化因子(如 NO_3^- -N、水体混合深度等)有更强的相关关系,而与水位波动间直接的相关关系并不强,然而,水位波动与水体混合深度、相对水柱稳定性之间以及许多理化因子之间都存在显著相关关系. 研究表明,水位波动通过影响水动力条件、各种水体理化因子,对浮游植物功能群产生直接或间接的影响^[4, 33].

有研究表明^[54],三峡水库所有支流库湾均存在倒灌异重流现象,其潜入深度、厚度、运行距离等受水位及其变幅、流量等水文因素的显著影响;干、支流水温差是导致倒灌异重流发生的主要因素,泥沙是次要因素;分层异重流能增大支流表层水体水平流速,进而缩小支流库湾的水体滞留时间,因此可能对库区水环境变化具有一定影响;支流库湾异重流具有一定的可调控性,即可采用先涨水后降水的方式控制.

值得指出的是,水动力条件的强弱不仅可以用流速,还可以用水体的紊动动能或垂向扩散系数来衡量. 从这个意义上说,水体的局部振荡及水体在立面上的循环都可以视为水动力条件良好的标记. 从理论研究的角度来说,对库湾水体进行二维及三维数值精细模拟,研究水体紊动动能或垂向扩散系数与藻类叶绿素 *a* 浓度的相关性,将是极有意义的工作^[51-53, 55].

与此同时,要从水资源安全的战略高度认识三峡水库水环境保护,从流域层次开展水污染的综合治理,

从生态系统角度研究水污染防治的机理^[56], 结合流域生态学^[57-58]和流域水生态功能分区的理论、方法^[59-61], 在三峡库区气候变化^[62]背景下科学布局, 积极推进, 从不同尺度上深入开展气候/气象-水文/水力-水环境/水生态间关系的研究, 全面发挥三峡工程防洪、发电、航运、生态等综合效益。

6 小结与展望

有别于已有雄厚研究积累的湖泊生态系统, 大型水库的生态学研究在国际湖沼学领域一直不足, 在我国尤为如此。特别是三峡水库这样的亚热带巨型复杂系统, 与一般水库相比, 水域类型和水生生物更多样, 生态系统结构与功能、格局和过程更复杂, 流域影响和人为干扰更复杂多样。如前文所述, 干流与库湾之间水动力学的差异引起悬浮物、营养状态和浮游生物等环境与生物组成具有高度的时空异质性; 由于受干流的干扰, 库湾底栖生物和浮游生物群落出现了更复杂的生态纵向分区, 与一般水库具有明显的不同; 库湾水环境纵向格局的复杂性, 同时使得以浮游生物垂直迁移与藻类水华动态为代表的重要生态学过程异常多样。因此, 就三峡水库这类复杂的水生态系统而言, 开展包括富营养化与藻类水华在内的生态监测、研究和预测的难度更大, 水环境保护对策的制定和实施更加复杂。不过, 也正因为这一生态系统的复杂性和多样性, 继续对其开展长期的生态学监测与研究, 不仅能够继续服务于三峡水库生态系统管理的科学实践, 同时也有望在理论层面上拓展国际湖沼学的研究范畴。

就目前而言, 水华暴发的动力学机制依然是包括三峡水库在内的水域生态与环境研究中重点和难点问题。藻类水华与水动力条件之间存在着非常强的相关关系, 但是, 水动力条件有诸多指标, 包括流速、水位波动等。有关流速对藻类水华的影响大部分为定量研究, 如对香溪河库湾上游流速的模拟定量分析了其对叶绿素 *a* 浓度的影响; 而水位波动的影响则大部分尚为定性描述或半定量分析, 前述从浮游植物功能群动态角度分析水位波动的影响, 为库湾湖泊区水华暴发的动力学机制研究提供了基础。与此同时, 已有研究给出了可引起藻类叶绿素 *a* 显著下降的水位波动范围, 具有非常重要的科学价值和实践意义。从藻类水华防控的角度来看, 采取物理杀藻、人工捕捞或者化学控藻等方法, 需耗费大量的人力、物力和财力, 而采取水动力措施控藻是国际湖沼学研究的热点方向, 因此, 结合水库运行调度的“生态水文”调控措施以控制或减缓藻类水华暴发, 可节约采取其它措施所需成本, 并可避免可能带来的二次污染, 具有良好的环境、生态、经济、社会效益。结合野外实时自动监测系统, 利用更易获得的数据(如水文、气象参数等)对水华暴发进行更短时间的准确预警, 并与水库“生态调度”平台耦合, 将是下一步研究的技术重点。

7 参考文献

- [1] 蔡庆华, 胡征宇. 三峡水库富营养化问题与对策研究. 水生生物学报, 2006, 30(1): 7-11.
- [2] 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. 湿地科学, 2010, 8(4): 331-338.
- [3] Wang L, Cai Q, Tan L *et al.* Phytoplankton development and ecological status during a cyanobacterial bloom in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2011, 409: 3820-3828.
- [4] 王岚. 三峡水库香溪河库湾浮游植物时空动态及藻类水华过程与模型研究[学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [5] 王岚, 蔡庆华, 张敏等. 三峡水库香溪河库湾夏季藻类水华的时空动态及其影响因素. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1940-1946.
- [6] 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. 湿地科学, 2009, 7(3): 230-236.
- [7] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋等. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态. 生态学报, 2008, 28(5): 2073-2079.
- [8] 张敏, 徐耀阳, 邵美玲等. 三峡水库香溪河库湾底泥中总氮、总磷含量的时空分布. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2799-2805.
- [9] 徐耀阳, 王岚, 韩新芹等. 三峡水库香溪河库湾春季水华期间悬浮物动态. 应用生态学报, 2009, 20(4): 963-969.
- [10] Ye L, Han X, Xu Y *et al.* Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 127: 135-145.
- [11] Ye L, Cai Q. Spring phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three-Gorges Reservoir: spatiotemporal dynamics across sharp nutrient gradients. *Journal of Freshwater Ecology*, 2011, 26(1): 11-18.

- [12] Baines S, Webster K, Kratz T *et al.* Synchronous behavior of temperature, calcium, and chlorophyll in lakes of northern Wisconsin. *Ecology*, 2000, **81**(3): 815-825.
- [13] Lansac-Tóha F, Bini L, Velho L *et al.* Temporal coherence of zooplankton abundance in a tropical reservoir. *Hydrobiologia*, 2008, **614**(1): 387-399.
- [14] Rusak J, Yan N, Somers K. Regional climatic drivers of synchronous zooplankton dynamics in north-temperate lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2008, **65**(5): 878-889.
- [15] 徐耀阳. 基于生态同步性概念的大型水库富营养化与春季藻类水华研究——以三峡水库为例[学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [16] Xu Y, Shao M, Cao M *et al.* Using temporal coherence to determine the responses of water clarity to hydrological processes in a giant subtropical canyon-shaped reservoir(China). *Quaternary International*, 2010, **226**: 151-159.
- [17] Xu Y, Zhang M, Wang L *et al.* Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China. *Quaternary International*, 2011, **244**: 272-279.
- [18] Xu Y, Cai Q, Shao M *et al.* Seasonal dynamics of suspended solids in a giant subtropical reservoir(China) in relation to internal processes and hydrological features. *Quaternary International*, 2009, **208**: 138-144.
- [19] Xu Y, Shao M, Han X *et al.* Temporal asynchrony of trophic status between mainstem and tributary bay with a giant dendritic reservoir: the role of local-scale regulators. *Water, Air and Soil Pollution*, 2011, **219**: 271-284.
- [20] Xu Y, Cai Q, Han X *et al.* Factors regulating trophic status in a large subtropical reservoir, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **169**: 237-248.
- [21] Xu Y, Cai Q, Shao M *et al.* Patterns of asynchrony for phytoplankton fluctuations from reservoir mainstream to a tributary bay in a giant dendritic reservoir(Three Gorges Reservoir, China). *Aquatic Science*, 2011(DOI: 10.1007/s00027-011-0221-8).
- [22] Straškraba M, Tundisi J. Guidelines of lake management(Volume 9): reservoir water quality management. International-Lake Environment Committee, 1999.
- [23] Wetzel RG. Limnology: Lakes and river ecosystems: 3rd ed. California: Academic Press, 2001.
- [24] Shao M, Xu Y, Cai Q. Effects of reservoir mainstream on longitudinal zonation in reservoir bays. *Journal of Freshwater Ecology*, 2010, **25**(1): 107-117.
- [25] 郑丙辉, 张远, 富国等. 三峡水库营养状态评价标准研究. *环境科学学报*, 2006, **26**: 1022-1030.
- [26] Shao M, Xie Z, Han X *et al.* Macroinvertebrate community structure in Three-Gorges Reservoir, China. *International Review of Hydrobiology*, 2008, **93**(2): 175-187.
- [27] Shao M, He L, Han X *et al.* Seasonal patterns of sedimentation and their associations with benthic communities in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2008, **23**(1): 151-160.
- [28] 邵美玲. 水库群底栖动物生态学研究——以三峡水库湖北段和香溪河流域为例[学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [29] Zhang M, Shao M, Xu Y *et al.* Effect of hydrological regime on macroinvertebrate community in Three-Gorges Reservoir, China. *Quaternary International*, 2010, **226**: 129-135.
- [30] 周淑婵. 香溪河水系浮游动物生态学研究[学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [31] Wang L, Cai Q, Zhang M *et al.* Longitudinal patterns of phytoplankton distribution in a tributary bay under reservoir operation. *Quaternary International*, 2011, **244**: 280-288.
- [32] Zhou S, Huang X, Cai Q. Temporal and spatial distributions of rotifers in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir, China. *International Review of Hydrobiology*, 2009, **94**(5): 542-559.
- [33] Wang L, Cai Q, Xu Y *et al.* Weekly dynamics of phytoplankton functional groups under high water level fluctuations in a subtropical reservoir-bay. *Aquatic Ecology*, 2011, **45**(2): 197-212.
- [34] Wang L, Cai Q, Tan T *et al.* Longitudinal differences of phytoplankton community during a period of small water level fluctuations in a subtropical reservoir bay(Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir, China). *International Review of Hydrobiology*, 2011, **96**(4): 381-396.
- [35] Berger SA, Diehl S, Stibor H *et al.* Water temperature and stratification depth independently shift cardinal events during plankton spring succession. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 1954-1965.
- [36] Mellard JP, Yoshiyama K, Litchman E *et al.* The vertical distribution of phytoplankton in stratified water columns. *Journal of Theoretical Biology*, 2011, **269**: 16-30.

- [37] Platt T, Bird D, Sathyendranath S. Critical depth and marine primary production. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1991, **246**: 205-217.
- [38] Sommer U, Lengfellner K. Climate change and the timing, magnitude, and composition of the phytoplankton spring bloom. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 1199-1208.
- [39] 徐耀阳, 蔡庆华, 黎道丰等. 香溪河库湾拟多甲藻昼夜垂直分布初步研究. *武汉植物学研究*, 2008, **26**(6): 608-612.
- [40] Xu Y, Cai Q, Wang L *et al.* Diel vertical migration of *Peridiniopsis niei*, Liu *et al.*, a new species of dinoflagellates in an eutrophic bay of Three-Gorge Reservoir, China. *Aquatic Ecology*, 2010, **44**(2): 387-395.
- [41] Xu Y, Cai Q, Ye L *et al.* Spring diatom blooming phases and their characters in a representative eutrophic bay of the Three-Gorge Reservoir, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2009, **24**(2): 191-198.
- [42] Wang L, Cai Q, Zhang M *et al.* Studies on *in situ* growth rate and its influencing factors of *Microcystis* in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir, China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2010, **19**(8): 1576-1581.
- [43] Wang L, Cai Q, Zhang M *et al.* Vertical distribution patterns of phytoplankton in summer *Microcystis* bloom period of Xiangxi Bay, Three Gorges Reservoir, China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2011, **20**(3): 553-560.
- [44] Zhou S, Cai Q, Xu Y *et al.* Daily and vertical dynamic of rotifers under the impacts of diatom blooms in the Three Gorges Reservoir, China. *Hydrobiologia*, 2011, **675**: 29-40.
- [45] Zhou S, Huang X, Cai Q. Vertical distribution and migration of planktonic rotifers in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2007, **22**(3): 441-449.
- [46] 孔令惠. 三峡水库香溪河库湾浮游轮虫群落动态及其与水环境关系[学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院 2010.
- [47] 孔令惠, 蔡庆华, 王 岚等. 香溪河库湾春季水华期间浮游轮虫昼夜垂直分布及迁移的研究. *湿地科学*, 2008, **6**(4): 512-517.
- [48] Xu Y, Cai Q, Ye L *et al.* Asynchrony of spring phytoplankton response to temperature driver within a nutrient gradient bay of Three-Gorges Reservoir, China. *Limnologica*, 2011, **41**: 174-180.
- [49] Xu Y, Wang L, Cai Q *et al.* Temporal coherence of chlorophyll *a* during a spring phytoplankton bloom in Xiangxi Bay of Three-Gorges Reservoir, China. *International Review of Hydrobiology*, 2009, **94**(6): 656-672.
- [50] Ye L, Cai Q. Forecasting daily chlorophyll *a* concentration during the spring phytoplankton bloom period in Xiangxi Bay of the Three-Gorges Reservoir by means of a recurrent artificial neural network. *Journal of Freshwater Ecology*, 2009, **24**(4): 609-617.
- [51] 王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 香溪河水动力因子与叶绿素 *a* 分布的数值预测及相关性研究. *应用基础与工程科学学报*, 2009, **17**(5): 652-658.
- [52] 王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 香溪河生态调度方案的数值模拟. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2009, **37**(4): 111-114.
- [53] 王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 河道型水库支流库湾富营养化数值模拟研究. *四川大学学报: 工程科学版*, 2009, **41**(2): 18-23.
- [54] 纪道斌. 三峡水库典型支流分层异重流特性及其水环境效应[学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [55] 余真真, 王玲玲, 戴会超等. 水温分层对水体中悬浮颗粒物垂向输运影响的研究. *四川大学学报: 工程科学版*, 2011, **43**(1): 64-69.
- [56] 蔡庆华. 中国水污染综合治理的生态学思考. *环境保护*, 2007, (7): 46-48.
- [57] Cai Q, Chen Y, King L. Why Watershed Ecology? A new approach for research and protection of aquatic ecosystems. In: King L, Metzler M, Jiang T eds. Flood risks and land use conflicts in the Yangtze Catchment, China and at the Rhein River, Germany—Strategies for a sustainable flood management. Frankfurt: Peter Lang, Europaeischer Verlag der Wissenschaften, 2011: 21-42.
- [58] 蔡庆华, 吴 刚, 刘建康. 流域生态学: 水生态系统多样性研究和保护的一个新途径. *科技导报*, 1997, (5): 24-26.
- [59] 孟 伟, 张 远, 郑丙辉. 水生态区划方法及其在中国的应用前景. *水科学进展*, 2007, **18**(2): 293-300.
- [60] 孟 伟, 张 远, 郑丙辉. 辽河流域水生态分区. *环境科学学报*, 2007, **27**(6): 911-918.
- [61] 唐 涛, 蔡庆华. 水生态功能分区中的几个基本问题. *生态学报*, 2010, **30**(22): 6255-6263.
- [62] 蔡庆华, 刘 敏, 何永坤等. 长江三峡库区气候变化影响评估报告. 北京: 气象出版社, 2010.