

三峡库区大宁河库湾水体混合过程中的营养盐行为

张佳磊^{1,2}, 郑丙辉^{1,2}, 刘录三¹, 王丽婧^{1,2}, 吴光应³

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012;
2. 中国环境科学研究院国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 北京 100012; 3. 巫山县环境监测站, 重庆 404700)

摘要:为研究不同水文期不同水体混合模式下大宁河库湾的营养盐行为, 基于2012年大宁河的现场监测数据, 分析营养盐时空分布特征, 采用箱式模型对不同水文期营养盐的收支量进行计算, 以期制定大宁河富营养化和水华控制策略提供理论依据。试验及计算结果表明: 在泄水期, 干流水体通过表层逆向进入库湾, 而支流水体通过底层潜流向河口运输; 在汛限期和蓄水期, 干流水体主要通过中上层逆向进入库湾, 而支流水体通过底层潜流向河口运输。干流对支流的逆向顶托作用常年存在, 泄水期、汛限期、蓄水期干流对支流的贡献率分别为70.38%、28.42%和59.56%。在水体混合过程中, 库湾上游来水以及干流顶托来水的混合作用是控制库湾水化学组成的主要物理因素。

关键词:三峡水库; 水体混合过程; 营养盐; 大宁河库湾

中图分类号: P342⁺.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2013)06-0066-05

Behaviors of nutritive salt during water body mixing process in Daning Bay of Three Gorges Reservoir//ZHANG Jialei^{1,2}, ZHENG Binghui^{1,2}, LIU Lusan¹, WANG Lijing^{1,2}, WU Guangying³ (1. *State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China*; 2. *State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China*; 3. *Environmental Monitoring Station of Wushan, Chongqing 404700, China*)

Abstract: To investigate the behaviors of nutrients in the Daning Bay of the Three Gorges Reservoir under different modes of water body mixing in different seasons, the spatial-temporal distribution of nutrients was analyzed based on field data collected from the Daning Bay in 2012. The seasonal variations of nutrients were calculated using the box model, which was expected to provide a theoretical basis for the formulation of a strategy for controlling the eutrophication and algal bloom in the Daning Bay. Experimental and calculated results show that during the discharge period, the mainstream water flowed into the Daning Bay upwardly through the upstream surface current, while the tributary water flowed to the estuary through the bottom density current. During the flood and storage periods, the mainstream water flowed into the Daning Bay upwardly through the upstream surface and middle-layer currents, while the tributary water flowed to the estuary through the bottom density current. The function of the mainstream water body against the flow from tributary perennially exists. The contribution rates of the mainstream to the tributary during the discharge period, flood period, and storage period were 70.38%, 28.42%, and 59.56%, respectively. During the water mixing process, the interaction of the water from the Daning Bay upstream and the water from the mainstream was the main physical mechanisms to control the chemical composition of the Daning Bay.

Key words: Three Gorges Reservoir; water mixing process; nutritive salt; Daning Bay

三峡大坝蓄水成库后水文情势的改变对该水域生态系统中生源要素(碳、氧、氢、氮和磷等)的地球化学过程产生了显著影响。一方面, 受长江回水顶托的影响, 干流氮、磷的输入导致支流库湾污染加重^[1-2], 对库湾的营养盐分布产生显著影响; 另一方面, 蓄水成库后对支流库湾原有的物理、化学和生物特性产生显著影响^[3], 水流变缓, 颗粒物携带营养盐沉积效应加强, 水体透明度增加, 浮游植物生物量升高, 导致水体中营养盐的浓度显著降低, 营养盐在库湾中产生显著的滞留效应^[4-5]。目前关于三峡库区富营养化的研究主要集中在以下3个方面: ①在确定三峡库区典型支流营养盐时空分布的基础上,

分析三峡水库支流库湾氮、磷等生源要素的输入特点^[1-2, 6-7];②从确定三峡水库支流水文水动力特征(多重异重流)入手,从宏观上定性研究水动力学特征对营养盐输移的影响^[8-11];③在确定库湾迁移转化规律的基础上,从水文生物学、地球化学角度,定量研究水体混合过程中营养盐的行为特征^[4, 8-9]。

中国环境科学研究院、三峡大学和中国海洋大学等科研单位在确定干流对支流逆向影响和库湾滞留效应的基础上,研究了三峡水库试验性蓄水阶段的营养盐收支量,并指出水动力学因素是影响营养盐迁移转化量的关键因素,“双重营养盐消减”是控制三峡库区支流富营养化的主要策略。

2008年11月4日三峡水库水位蓄至172.8 m,标志着三峡库区三期试验性蓄水完成,三峡库区由动态生态系统转为稳定生态系统。此时水流的改变导致水体滞留时间延长,试验性蓄水前后水生态系统的物理、化学和生物因素有所不同,因此正式蓄水阶段的水文学特征对营养盐的输入迁移和支流效应的影响与试验性蓄水阶段差异显著。在未对“后三峡”(三峡建成后的正常运行阶段)生态系统中营养盐的行为特征进行重新认识的前提下,前期研究结果能否应用于新的生态系统仍有待商榷。

本文基于2012年不同水文期现场监测数据,分析三峡库区进入正常运行阶段(稳定生态系统)后不同水文期不同水体混合模式下营养盐的分布特征,从而确定不同水文期库湾混合过程中的营养盐行为,为后期探讨“后三峡”水文学特征背景下水华消机理提供基础数据,为“后三峡”水环境演变过程和水华控制策略研究提供理论依据。

1 样品采集与分析

1.1 样点布设

从大宁河河口(大宁河与长江交汇处)至其上游分别设置S5(大宁河出水口)、S2(回水区)、S3(回水区)、S4(回水区)和S1(上游区)5个采样点,具体位置如图1所示。调查采样时间为2012年4月27日—2012年9月28日,其中2012年4月27日、2012年5月17日和2012年6月9日代表泄水期(一般为每年的5—7月,水位下降较为集中);以2012年7月7日和2012年8月14日代表汛限期(一般为每年的7—9月,维持低水位运行);以2012年9月9日、2012年9月17日和2012年9月28日代表蓄水期(一般为9—11月,水位上升比较集中)。泄水期、汛限期和蓄水期的水位分别在146.82~163.26 m、152.44~153.55 m和158.85~167.75 m之间波动。

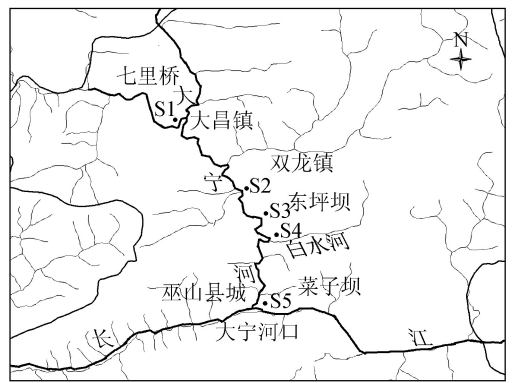


图1 三峡库区大宁河采样点分布

1.2 现场采样和室内分析

调查采样期间水域平均水深为56.64 m,电导率(SPC)和叶绿素 chl-a 质量浓度使用多参数水质检测仪(Hydro lab DS5X)现场测定,从水体表面至水体底层每隔1 m测量1次。采用5 L的Niskin采水器依次在水下0.5 m、2 m、5 m、10 m以及水体中层和底层分层采集水样,带回实验室测定营养盐(总氮TN和总磷TP)的质量浓度。采样及室内分析方法参照《水和废水监测分析方法》^[12]。

2 试验结果与分析

2.1 电导率分布特征

相关研究表明,电导率具有相对保守的性质,因此可以表征水体的混合过程^[13]。在调查期间,电导率变化范围为209.7~402.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。图2为调查区域内电导率的垂向分布。由图2可见,电导率在大宁河库湾垂向浓度分层和纵向梯度特征明显:在泄水期,从河口至上游电导率呈递减趋势;在汛限期,从河口至上游电导率呈递增趋势;在蓄水期,从河口至上游电导率呈先递减,后递增,最后趋向同一性的趋势。电导率垂向分布特征表明:在泄水期,干流水体通过表层逆向进入库湾,而支流上游水体通过底层潜流向河口运输;在汛限期和蓄水期,干流水体主要通过中上层逆向进入库湾,而支流上游水体通过底层潜流向河口运输。由此可以得出:在大宁河与长江的交汇处有一个明显的从河口向上的浓度梯度。受不同水体密度差的影响,混合水体分为三部分,一部分是长江顶托水(从中上层进入),另一部分是上游底层来水,还有一部分是支流水。

2.2 叶绿素分布特征

在调查期间,叶绿素质量浓度的变化范围为0.12~44.29 mg/m^3 。在时间分布上,叶绿素质量浓度最高值出现在水位稳定的汛限期,最低值出现在水位上升的蓄水期。在空间分布上,呈现回水区叶绿素质量浓度较高、干流和上游较低的趋势,并且主

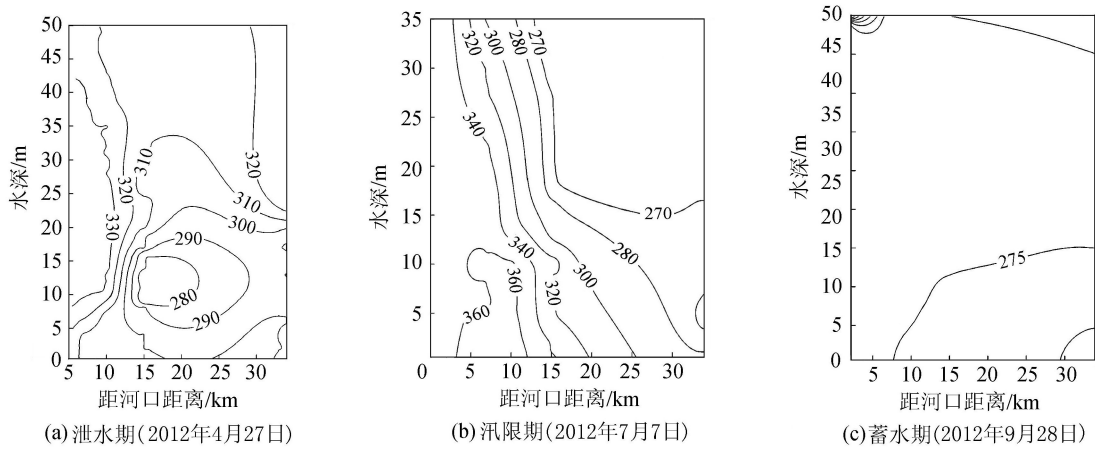


图2 大宁河电导率分布特征(单位: $\mu\text{S}/\text{cm}$)

要聚集在表层水体(0~5 m)中。2012年4月27日、7月7日、9月28日大宁河叶绿素质量浓度分布特征如图3所示。

2.3 营养盐分布特征

调查期间, TN 质量浓度的变化范围为 0.84 ~ 2.88 mg/L, 在时间分布上, 蓄水期和汛期期显著高于泄水期。图4反映了调查期间 TN 质量浓度的时空分布, 由图4可见, 从河口至上游 TN 质量浓度表现为逐渐降低的趋势, 在垂向分布上表现为随着水深的增加逐渐升高的趋势。

图5反映了调查期间 TP 质量浓度的分布, TP 质量浓度的变化范围为 0.11 ~ 0.28 mg/L。由图5可见, 在时间分布上, 蓄水期和汛期期略低于泄水期; 在空间分布上, 从河口至上游 TP 质量浓度逐渐降低, 在垂向分布上, TP 质量浓度随着水深的增加逐渐升高。在不同调查期, 水体中 TP 质量浓度的纵向变化特征和 TN 略有不同, 高浓度值普遍出现在水体底层, 推测是由于泥沙沉降携带 TP 所致。

综合电导率以及叶绿素、TN、TP 质量浓度时空分布规律分析得出: 在水体混合过程中, 营养盐的时

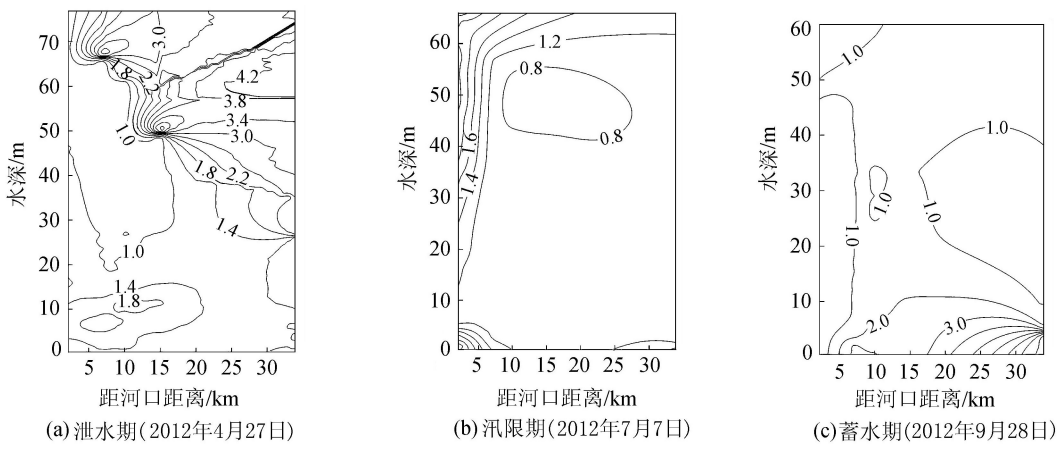


图3 大宁河叶绿素质量浓度分布特征(单位: mg/m^3)

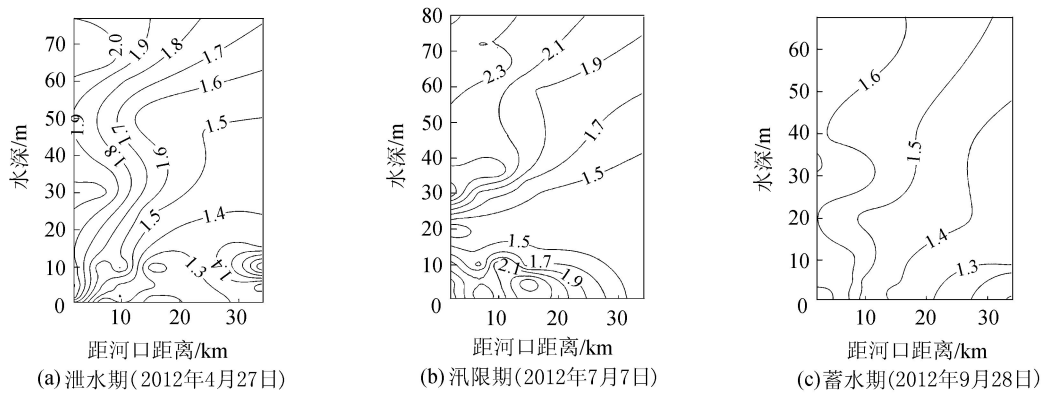


图4 大宁河 TN 质量浓度分布特征(单位: mg/L)

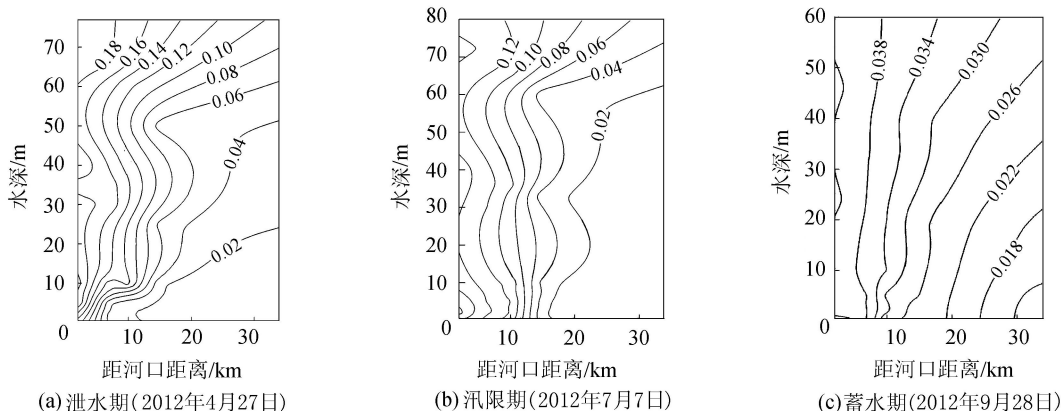


图5 大宁河 TP 质量浓度分布特征 (单位:mg/L)

空分布受到生物、物理、化学过程的共同作用,调查期间叶绿素浓度较低,因此生物因素并不是主要控制因素。库湾上游来水以及干流顶托来水的混合作用是控制库湾水化学组成的主要物理因素。

2.4 水体混合过程 and 不同水文期营养盐收支量的对比分析

通常认为,电导率和常量离子在河流输入过程中表现出化学保守行为,可以作为不同水体来源的指标^[13-14]。根据箱式模型和物质守恒定律可以计算库湾不同水体的组成,计算公式如下:

$$xU + (1 - x)C = T \quad (1)$$

式中: x 为支流上游来水对库湾水体的贡献率; $1-x$ 为河口库湾水体的贡献率; U 为支流上游来水的电导率; C 为河口水体的电导率; T 为支流库湾内的电导率。

根据式(1)计算得出不同水文期上游和干流对库湾水体的贡献率,在泄水期、汛限期和蓄水期干流对支流的贡献率分别为 70.38%、28.42% 和 59.56%。

3 讨论

a. 在大宁河支流,电导率和常量离子有明显的分层现象,沿水流方向呈现明显的梯度变化特征。前期相关研究中指出:由于干支流表层、底层温差显著,干支流间存在显著的密度差,支流上游来水与库湾回水间存在明显的水温差和密度差,从而导致干流以倒灌异重流的形式进入库湾,上游来水常以底部异重流流出库湾^[8,10-11]。本文的研究结果直接验证了这一结论。在泄水期,大宁河干流水体通过表层逆向进入库湾,而支流水体通过底层潜流向河口运输;在汛限期和蓄水期,干流水体主要通过中上层逆向进入库湾,而支流水体通过底层潜流向河口运输。本文结果在支持前期分层异重流结果的同时,也明确了不同水文期异重流的潜入深度和潜入距离。

b. 造成水库内库湾营养盐浓度等参数变化的

因素主要有水库因素和非水库因素,其中非水库因素包括流域地质环境、人文环境等,环境的差异致使不同支流的营养盐水平不一,进而导致干流水体混合后营养盐水平的差异;水库因素主要是支流回水区受大坝影响程度的差异^[4-5, 9, 15]。由图 2 可以看出,在泄水期和汛限期,大宁河出水口(S5)垂向断面的表层有一个明显的从河口至上游递减的梯度;在上游区(S1)垂向底层,有一个明显的从上游至河口递增的梯度。由于这种“顶托作用”,大宁河水体被分为三部分:支流水体、长江顶托水和上游来水。这种水体的混合过程使得长江干流水体的理化参数发生了显著变化。相关研究表明,不同水文期不同的水文情势和不同的水动力学条件对营养盐的贡献率不同,水体混合过程和不同水文期营养盐收支量计算结果有效地支持了这一规律在大宁河的普适性。电导率、叶绿素浓度和营养盐浓度的时空分布结果表明,在水位急剧变动的泄水期和蓄水期,长江的逆向顶托作用是控制水体理化性质的主要因素,这种干流的逆向顶托和上游来水的混合作用是影响支流生源要素分布的重要因素。

c. 相关研究表明:分层异重流的存在所导致的干支流的交换作用可改变支流的水流特性、营养盐浓度分布、光学特性及水文分层等,从而改变支流的富营养化和水华情势^[4-5, 9, 13-17]。三峡水库蓄水前期,普遍认为蓄水之后水流变缓是诱使水华暴发的主要原因,不少学者试图通过寻找藻类生长同流速之间的相互关系以阐明支流水华暴发机制^[18-19]。从藻类生理生态角度来说,流速并没有直接影响藻类的生长增殖^[20-21]。因此,有学者指出混合水体携带的营养盐净通量是水华暴发的重要营养盐基础^[22]。本文的研究结果表明:叶绿素浓度时空分布差异显著,回水区较高,干流和上游较低,并且主要聚集在表层水体(0~5 m)中。一方面是干流和支流间的水体混合携带了大量营养盐进入,为藻类的

生长繁殖提供了营养基础;另一方面,回水区流速较低,更有利于藻类吸收消耗营养盐从而大量生长繁殖,在藻类死亡分解后营养盐又被滞留在回水区,对水体中的营养盐浓度起到补充作用。

d. 基于长期的野外监测数据得出:大宁河基本处于贫~中营养状态,时空差异显著,从干流至上游富营养化程度逐渐降低;汛限期富营养指数最高,泄水期和蓄水期次之,高水位运行期最低^[23]。结合营养盐收支量的计算结果可以得出,正是由于干支流间的交换影响水体间营养盐的输移状态,从而对水体的营养盐时空分布产生显著影响。

4 结 论

a. 大宁河电导率存在明显的分层现象:在泄水期,干流水体通过表层逆向进入库湾,而支流水体通过底层潜流向河口运输;在汛限期和蓄水期,干流水体主要通过中上层逆向进入库湾,而支流水体通过底层潜流向河口运输。这和试验性蓄水阶段的水体混合特性研究结论一致。

b. 干流对支流的逆向顶托作用常年存在,并非只出现在蓄水期,并且不同水文期贡献率不同,贡献率的最大值出现在泄水期和蓄水期,而最小值出现在水位较稳定的汛限期。在水体混合过程中,营养盐的时空分布受到生物、物理化学过程的共同作用,但是库湾上游来水以及干流顶托来水的混合作用是控制库湾水化学组成的主要物理因素。

参考文献:

[1] 曹承进,秦延文,郑丙辉,等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学,2008,29(2):310-315. (CAO Chengjin, QIN Yanwen, ZHENG Binghui, et al. Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science,2008,29(2):310-315. (in Chinese))

[2] 郑丙辉,曹承进,秦延文,等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学,2008,29(1):1-6. (ZHENG Binghui, CAO Chengjin, QIN Yanwen, et al. Analysis of nitrogen distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science,2008,29(1):1-6. (in Chinese))

[3] RICHARD S. Three Gorges Dam: into the unknown[J]. Science,2008,321:628-632.

[4] 冉祥滨,陈洪涛,姚庆祯,等. 三峡水库小江库湾水体混合过程中营养盐的行为研究[J]. 水生态学杂志,2009,2(2):21-27. (RAN Xiangbin, CHEN Hongtao, YAO Qingzhen, et al. Characteristics of nutrients in the Xiaojiang Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal

of Hydroecology,2009,2(2):21-27. (in Chinese))

[5] 冉祥滨,姚庆祯,巩瑶,等. 蓄水前后三峡水库营养盐收支计算[J]. 水生态学杂志,2009,2(2):1-6. (RAN Xiangbin, YAO Qingzhen, GONG Yao, et al. Nutrient budget of Three Gorges Reservoir pre and post impoundment[J]. Journal of Hydroecology,2009,2(2):1-6. (in Chinese))

[6] 张晟,宋丹,张可,等. 三峡水库典型支流上游区和回水区营养状态分析[J]. 湖泊科学,2010,22(2):201-207. (ZHANG Sheng, SONG Dan, ZHANG Ke, et al. Trophic status analysis of the upper stream and backwater area in typical tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences,2010,22(2):201-207. (in Chinese))

[7] 张晟,郑坚,刘婷婷,等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学,2009,30(1):58-63. (ZHANG Sheng, ZHENG Jian, LIU Tingting, et al. Seasonal variation and output of nutrient in tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science,2009,30(1):58-63. (in Chinese))

[8] LIU Liu, LIU Defu, JOHNSON D, et al. Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir; implications for management[J]. Water Research,2012,46:2121-2130.

[9] 罗专溪,朱波,郑丙辉,等. 三峡水库支流回水河段氮磷负荷与干流的逆向影响[J]. 中国环境科学,2007,27(2):208-212. (LUO Zhuanxi, ZHU Bo, ZHENG Binghui, et al. Nitrogen and phosphorus loadings in branch backwater reaches and the reverse effects in the main stream in Three Gorges Reservoir [J]. China Environmental Science, 2007, 27 (2): 208-212. (in Chinese))

[10] JI Daobin, LIU Defu, YANG Zhengjian, et al. Hydrodynamic characteristics of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir[J]. Science China: Physics, Mechanics & Astronomy,2010,40(1):101-112.

[11] YANG Zhengjian, LIU Defu, JI Daobin, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay [J]. Science China: Technological Sciences 2010,53(4):1114-1125.

[12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[13] TURCQ P, SEYLER P, GUYOT J, et al. Characteristics of organic matter in the mixing zone of the Rionegro and Riosolimoes of the Amazon River [J]. Hydrological Processes,2003,17(7):1393-1404.

[14] JARVIE H P, NEAL C, LEACH D V, et al. Major ion concentrations and the inorganic carbon chemistry of the Humber Rivers [J]. Science of the Total Environment, 1997(194/195):285-302.

(下转第79页)

参考文献:

[1] 戴杨春. 天生桥一级水电站大坝面板 L3、L4 坝块混凝土破损修复处理报告[R]. 兴义:杭州国电大坝安全工程有限公司,2003.

[2] 冯业林. 天生桥一级水电站面板局部破损原因分析及处理措施[R]. 兴义:国家电力公司昆明勘测设计研究院,2003.

[3] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

[4] 姚武,郑欣. 配合比参数对混凝土热膨胀系数的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(1):11-17. (YAO Wu, ZHENG Xin. Effect of mix proportion on coefficient of thermal expansion of concrete[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(1):11-17. (in Chinese))

[5] 包亚军,周庆东,刘春. 天生桥一级水电站大坝体检大坝安全监测分析报告[R]. 兴义:天生桥一级水电开发有限责任公司水力发电厂,2008.

[6] 张文正,帅方生,苏立峰. 天生桥混凝土面板堆石坝二维及三维的应力变形分析[C]//岩土力学数值方法的工程应用:第二届全国岩石力学数值计算与模型实验学术

研讨会论文集. 上海:同济大学出版社,1990:470-475.

[7] 朱伯芳. 论微膨胀混凝土筑坝技术[J]. 水力发电学报, 2000, 19(3):1-12. (ZHU Bofang. On construction of dams by concrete with gentle volume expansion [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2000, 19(3):1-12. (in Chinese))

[8] 阿拉亚. 2000 年混凝土面板堆石坝、导流洞和溢洪道监测及运行年报[R]. 兴义:南方水电工程联合有限公司,2000.

[9] 李承木. 不同试验温度条件下 MgO 混凝土的自生体积变形研究[J]. 水电工程研究, 1998(3):1-9. (LI Chengmu. Study on autogenous volume deformation of MgO concrete under different test temperature conditions [J]. Hydropower Engineering Research, 1998(3):1-9. (in Chinese))

[10] 李承木. 掺 MgO 混凝土自生体积变形的温度效应[J]. 水电站设计, 1999, 15(2):96-100. (LI Chengmu. Temperature effect for autogenous deformation of concrete mixed with MgO [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1999, 15(2):96-100. (in Chinese))

(收稿日期:2012-12-13 编辑:骆 超)

(上接第 70 页)

[15] 吉小盼,刘德富,黄钰铃,等. 三峡水库泄水期香溪河库湾营养盐动态及干流逆向影响[J]. 环境工程学报, 2010, 4(12):2687-2693. (JI Xiaopan, LIU Defu, HUANG Yuling, et al. Dynamic characteristics of nutrients in Xiangxi Bay and converse impact from mainstream in drainage period of the Three Gorges Reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(12):2687-2693. (in Chinese))

[16] KELLY V J. Influence of reservoirs on solute transport: a regional-scale approach [J]. Hydrobiological Processes, 2001, 15:1227-1249.

[17] 郭胜,李崇明,郭劲松,等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. 环境科学, 2011, 32(5):1266-1272. (GUO Sheng, LI Chongming, GUO Jingsong, et al. Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three Gorges Reservoir after its impoundment [J]. Environmental Science, 2011, 32(5):1266-1272. (in Chinese))

[18] 黄程,钟成华,邓春光,等. 三峡水库蓄水初期大宁河回水区流速与藻类生长关系的初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2):453-457. (HUANG Cheng, ZHONG Chenghua, DENG Chunguang, et al. Preliminary study on correlation between flow velocity and algae along Daning River's backwater region at sluice initial stages in the

Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(2):453-457. (in Chinese))

[19] 龙天渝,蒙国湖,吴磊,等. 水动力条件对嘉陵江重庆主城段藻类生长影响的数值模拟[J]. 环境科学, 2010, 31(7):1498-1503. (LONG Tianyu, MENG Guohu, WU Lei, et al. Numerical simulation for effects of hydrodynamic condition on algae growth in Chongqing reaches of Jialing River [J]. Environmental Science, 2010, 31(7):1498-1503. (in Chinese))

[20] REYNOLDS C S, BELLINGER E G. Patterns of abundance and dominance of the phytoplankton of Roster Mere, England: evidence from an 18-year data set [J]. Aquatic Sci-Res Across Boundaries, 1992, 54(1):10-36.

[21] REYNOLDS C. The ecology of freshwater ecology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

[22] 秦伯强,胡维平,高光,等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式[J]. 科学通报, 2003, 48(17):1822-1831. (QIN Boqiang, HU Weiping, GAO Guang, et al. Lake sediments suspended in the dynamic system and a conceptual model of endogenous release [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(17):1822-1831. (in Chinese))

[23] 张佳磊. 三峡库区大宁河富营养化和水华研究[D]. 上海:华东师范大学,2012.

(收稿日期:2013-05-14 编辑:骆 超)