DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.05.25

三峡水库不同水位运行下大宁河水动力过程模拟

刘广龙1,余明星2,石巍方1,朱端卫1,王雨春3,周怀东3

(1. 华中农业大学 资源与环境学院 生态与环境工程研究室, 湖北 武汉 430070;

2. 长江流域水环境监测中心, 湖北 武汉 430010; 3. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所,北京 100038)

摘 要:三峡大坝的建成运行对库区支流水动力过程具有重要影响。以三峡库区支流大宁河为例,基于 Delft3D 模型,建立了大宁河大昌到长江口段平面二维水动力模型,并对三峡水库高水位和低水位运行条件下大宁河的水动力特征进行模拟计算,得到大宁河模拟区段水流流场的沿河分布。模拟结果表明:不管是三峡水库低水位或高水位运行,大宁河整体流速缓慢,均低于0.04 m/s;河流库湾区低水位时流速低于0.01 m/s,高水位时低于0.001 m/s,呈现明显的"湖相"特征,水体自净能力极大地削弱,易发"水华",影响大宁河水质安全。研究结果可为三峡库区支流的区域化管理提供决策参考。

Modeling the hydrodynamics of Daning River under different working condition of Three Gorges Reservoir based on Delft3D

LIU Guanglong¹, YU Mingxing², SHI Weifang¹, ZHU Duanwei¹, WANG Yuchun³, ZHOU Huaidong³

 Laboratory of Eco – Environment Engineering Research, College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
 Yangtze Valley Water Environment Monitoring Center, Wuhan 430010, China;
 China Water Conservancy and Hydropower Research Institute of Water Environment Research, Beijing 100038, China;

Abstract: The operation and construction of the Three Gorges Reservoir has an important influence on the hydrodynamic force of the tributaries of the reservoir. In this paper, Daning tributary of the Three Gorges Reservoir was used as an example, based on the Delft3D model, to establish a two-dimensional hydrodynamic model of Dachang of Daning River to Changjiang Estuary. The hydrodynamic characteristics of the Daning River under high water level and low water level operation of the Three Gorges Reservoir were simulated, and the distribution of water flow in the simulation section of Daning River was obtained. The simulation results show that the overall flow velocity of Daning River area is slow, which is less than 0.04 m/s when the Three Gorges Reservoir runs in high and low water level. The flow velocity of backwater regions of Daning River is less than 0.01 m / s at low water level and less than 0.001 m / s at high water level, which is prone to cause water bloom and affect the water quality of Daning river. Our results can provide support information for the management of the tributaries of the Three Gorges Reservoir area.

Key words: different working condition; Delft 3D model; hydrodynamics simulation; Three Gorges Reservoir; Daning River

1 研究背景

三峡水库自175 m 水位蓄水稳定运行后,库区及

其支流水位不断提升,对三峡库区干流和支流的水环 境产生了一定影响^[1-2]。以大宁河为例,大宁河位于 三峡库区的腹心地带,蓄水后河流流速大幅度减缓,

收稿日期:2017-04-18; 修回日期:2017-06-06

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2012ZX07104-001)

作者简介:刘广龙(1984-),男,黑龙江密山人,博士,副教授,主要研究方向为水环境污染控制与修复。

通讯作者:朱端卫(1956-),男,湖北大冶人,博士,教授,主要从事水环境污染控制与生态环境修复研究。

河面增宽,其回水段已成为水华发生的敏感区域。对 其水华发生的相关研究表明,水动力条件的改变是库 湾水华发生的主要原因^[3-4]。流速的变化能改变水 体的物理过程和营养盐浓度,也对藻类增殖、群落构 成及空间分布产生直接影响^[5-7]。因此,研究三峡水 库不同水位运行条件对大宁河水动力的影响,对深入 理解大宁河水质变化过程及对库区支流流域管理具 有重要意义。

目前,国内外对河流水动力过程模拟已经有了广 泛的研究,主要采用的模型有 Delft3D、EFDC、MIKE、 QUAL 系列等^[8-10]。针对三峡水库运行后,支流回水 区"湖相"趋势明显的特征,选取一个同时适用于河、 湖水动力模拟的模型对于三峡库区支流水动力研究 十分关键。Delft3D 作为一套集水流、泥沙、环境于一 体的程序包,能够模拟二维和三维的水流、水质、波 浪、生态、泥沙输移及床底地貌,以及各个过程之间的 相互作用,已经逐步应用于河流和湖泊水动力过程的 模拟^[11]。无论是枯水期还是丰水期,利用实测数据 对基于 Delft3D 模型的松花江哈尔滨段主干流的水动 力模拟结果进行验证表明,在计算水位和实测水位的 最大水位差为0.36 m 时能较好地呈现该江段的水动 力情况^[12]。根据实测资料设定模型的开边界条件及 模型参数,采用 Delft3D 模型中的水动力模块 Flow 和 水质模块 Wag, 对陆源入海河口处的示踪浮子运动轨 迹及近海流场、水质变化的模拟表明,在近岸海域的 流场驱动下,不同陆源入海河口处排放的污染物有着 较为规律的运动轨迹和相应的影响范围,表现出明显 的区域性污染特征的模拟分析结果与近岸海域实际 情况基本一致^[13]。

本研究以三峡库区支流大宁河为对象,针对三峡 大坝高水位运行和低水位运行的不同运行模式,利用 2013 年水文站点数据,基于 Delft 3D 模型对大宁河大 昌至长江口段在三峡大坝高、低水位运行模式下的水 动力过程进行模拟和预测,建立一套符合大宁河实际 情况的水动力模型,为三峡库区支流流域管理提供科 学依据。

2 研究区域概况与数据来源

2.1 大宁河概述

大宁河流域跨东经 108°44′~110°11′,北纬 31° 04′~31°44′,位于三峡库区腹心。大宁河是三峡水库 库中的一条典型支流,流域面积达 4 045 km²(图1), 年均温度为 16.6℃,年均降雨量为 1 124.5 mm,属湿 润的亚热带季风气候,呈四季分明,夏热伏旱,冬暖春 早,秋雨多,湿度大等特征。由于大宁河流域属于多 暴雨区,河沿岸以农业为主,多施化肥,如2014年巫 山农用化肥施用量(折纯)19624 t^[14]。三峡库区蓄 水后,大宁河于2003年6月,在双龙地区首次发生蓝 藻水华,接下来的多年间,大宁河回水区水华时有发 生^[15]。



图1 三峡库区及大宁河流域水系图

本研究模拟区段大宁河大昌水位站到巫峡口 26 km 河段位于三峡大坝上游约 125 km 处,受三峡水库 蓄水影响显著。在三峡水库蓄水前,该区段全部处于 天然状态,落差较大,水流速度较大;在三峡水库蓄水 后,该区段水文情况有较大的改变,受到长江回水顶 托影响,河水流速大大变缓,河面增宽,河道成葫芦连 接状。该区段流速处于准静止状态,是历年水华发生 的主要区段。

本文涉及数据均来自三峡水库各水文监测站的 监测数据。因研究区域在大宁河大昌到长江口这一 段,故主要采集的是大昌(二)水文站和下游巫山水文 站的监测数据,其 2011 – 2013 年的源数据分类详见 表1。

表 1 大宁河 2011-2013 年的源数据

分类		具体内容	
流量数据	2011 - 201	13年大昌(二)站日均流量	
	2011 - 201	13 年巫溪(二)站日均流量	
水位数据	2011 - 201	13 年大昌(二)站日均水位	
	2011 - 201	13 年巫山站日均水位	
特征值	2013 年大	宁河下游3个断面特征值	
大宁河地形图	dwg 格式带	带高程的地形图	

2.2 Delft3D 的网格创建

Delft3D - RGFGRID 网格生成模块可以使用笛卡 尔坐标系和球面坐标系,允许分步生成网格,并调整 其正交性。在整个创建过程中,运用 Splines 曲线勾 勒出的大宁河大昌到长江口段的边界见图 2(a)。对 于余弦值大于 0.02 的区域,进行手动调整,以使其正 交性得到改善。

图 2(b) 为优化调整后的网格, 图 2(c) 为局部网 格放大。

2.3 地形生成

在 QUICKIN 模块中将. xyz 文件导入后用 opera-

tion 中的平均插值选项(Grid Cell Averaging)对大宁 河大昌到长江口段的地形进行插值。具体过程是先 选择内部扩散(Internal Diffusion),使每一个网格点都 能到相应的地形值,然后进行散点插值。插值所获的 地形高程图及其三维效果图见图3。



3 结果与讨论

3.1 参数设置

在水动力模拟环节,主要是在加入高程后的网格 上,设置初始条件和底部粗糙率,然后编辑边界条件。 接着设置运行及输出时间选项,检查各种设置后便可 以进行初步的水动力模拟。

(1)初始条件和底部粗糙率设置:初始水位选择 中游的水位值,即160 m。对于大宁河流域的底部粗 糙率,没有现成资料数据,参照一般粗糙率范围^[16], 三峡库区大宁河相关断面间的粗糙率初始值设置为 0.035

(2)时间选项设置:水动力模拟过程中时间步长

的选取对数值计算的收敛性和稳定性有很重要的影 响,通过多次试验,本研究时间步长取为1 min;运行 时长为两个月,即从2012年7月1日开始,运行61 d;结果输出时间步长为1440 min。

(3)边界条件设置:根据大昌(二)站和巫山站的 日均水位,日均流量,以大昌(二)站的流量序列为输 入边界,巫山站的水位序列为流出边界。

3.2 模型验证

为验证模型的准确性,对研究河段 2013 年汛期 的水动力特征进行模拟验证分析,模拟时间为2013 年7月1号到8月31号,计算的时间步长为1min, 巫山站的水位模拟结果与实际观测值如图4所示。

由巫山站的实际观测水位可知,汛期大宁河下游

水位比较稳定,在巫山长江口的水位维持在155 m 左 右,对比巫山断面水位数值模拟计算值与实测结果, 可以看出,模拟与实测二者之间有一定误差,误差范 围在-0.43 ~ +0.18 m 之间,整体趋势吻合较好, 相对误差在-0.28% ~ +0.12%之间;大部分误差 位于模拟的中部时间段和中后时间段。总体来看,该 模型具有一定的精度,可以用于水动力模拟。



- 图4 大宁河水位值计算验证
- 3.3 水动力分析

25

20

15

10

5

0

5

y/km

3.3.1 2013 年低水位运行期 2013 年低水位期模

拟计算计算的时间从 5 月 1 日到 6 月 30 日,共 61 d,时间步长取为 1 min,通过 Quickplot 模块调出流场的地图文件进行水动力特征分析。该时刻巫山断面的水位是 152.74 m,而三峡大坝的坝前水位为152.62 m,此时大宁河巫峡口水位比坝前的水位高0.12 m。

从图 5(a)可以看出,2013 年 6 月 10 日大宁河 低水位期,上游来水流量大,但下游水位在 151 m 处 上下波动,变化幅度不大,同时通过 2013 年 6 月 11 日水深图 5(b)可见,这一段的水深还是较大,而且 水深沿河道逐渐增大,上游水深小于 20 m,中游水 深在 20~50 m,下游水深最深处则超过了 60 m。说 明,在低水位期,研究河段处于接入长江的汇水区, 上游来水流量大,而下游河道宽至 400 m 以上,河水 较深,同时下游河道还有几个大库湾,有较大的纳洪 能力,而长江干流此时处在低水位,便于支流向干流 的汇入。因此,此时大宁河水位变化幅度较小。







图 6 为大宁河低水位期的平面流场分布图。

从图 6 来看,在低水位期,整个河段的流速在 0.01~0.035 m/s之间。具体地,上游流速在 0.025 ~0.035 m/s之间,中游流速在 0.015~0.025 m/s 之间,下游流速在 0.015 m/s之下,流速沿河道逐渐 降低,且靠近河岸线的流速远低于河道中的流速。 从图 6 还可以看出,大宁河的几个库湾的流速十分 缓慢,均低于 0.01 m/s。

3.3.2 2013 年高水位运行期 2013 年高水位期模 拟计算的时间从1月15日到3月31日,共75d,时 间步长取为1min,模拟参数的设置在低水位期的模 型基础上做一定改变。该时刻巫山断面的水位是 166.76m,而三峡大坝的坝前水位为166.77m,此 时大宁河巫峡口水位比坝前的水位低 0.01 m。

图 7 为 2013 年大宁河高水位期 2 月 25 日某时 刻水位及水深图。从图 7(a)可以看出,在三峡库区 的高水位期,大宁河水位维持在 165~174 m 的高水 位,水位变化幅度很小,可以看到研究区域的水位相 差不大,说明研究区域都在支流回水区。通过图 7 (b)可以看到,研究区域的水深较大,而且水深沿河 道逐渐增大,上游水深在 20 m 左右,中游水深在 20 ~60 m,下游水深普遍在 60 m 以上甚至达到 80 m。 这一结果说明,在高水位期,大宁河的水位处在高水 平且变化不大,河道很深,是一段干流水体以倒灌异 重流形式进入库湾形成的水库型河道^[17]。

图 8 为大宁河高水位运行期流场图。









从图 8 来看,在高水位期,整个河段的流速在 0.001~0.008 m/s之间,水流十分缓慢,具体来看, 上游流速在 0.006~0.008 m/s之间,中游流速在 0.003~0.006 m/s之间,下游流速在0.003 m/s以下,流速沿河道逐渐降低,并且靠近岸线的流速低于河道中的流速。从图7还可以看到,大宁河的几个

库湾的流速更低,均低于 0.001 m/s。可以说明,在 高水位期,大宁河整体流速很低,均低于 0.01 m/s, 可以认为水流基本静止不动,沿河道流速降低,在库 湾地区,流速极其缓慢,小于 0.001 m/s。此时,水 体交换能力很差,这种情况下,水体的自净能力极大 地削弱^[18],一旦有污染物排放其中,基本得不到迅 速扩散,污染物在库湾地区逐渐积累,因而极易发生 "水华"。

4 结 论

本研究中基于 Delft3D 模型建立了大宁河大昌 到长江口段平面二维水动力模型,并对三峡水库高 水位和低水位运行条件下大宁河的水流流场沿河分 布进行了模拟分析。主要结论和展望如下:

(1)大宁河在三峡大坝低水位运行期水流已处于 缓慢状态,在与干流交汇处的库湾已具有湖库的典型 特征,水流趋于静止,水体的自净能力大大减小;

(2)大宁河在三峡大坝高水位运行期水流更为 缓慢,库湾回水区在整个高水位运行期都是典型湖 相库区,水流已接近静止状态,发生"水华"等水环 境事件的几率大大增加;

(3)鉴于水动力因素在大宁河库湾"水华"发生 过程中的重要影响,本文建议后期应进一步研究三 峡水库调度对库区支流回水区"水华"的抑制效果, 采用生态调度的模式减轻库区支流回水区的"水 华"频发问题。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周广杰,况琪军,胡征宇,等. 三峡库区四条支流藻类
 多样性评价及"水华"防治[J].中国环境科学,2006,26
 (3):337-341.
- [3] 王丽平,郑丙辉,张佳磊,等.三峡水库蓄水后对支流大 宁河富营养化特征及水动力的影响[J].湖泊科学, 2012,24(2):232-237.
- [4] 张佳磊,郑丙辉,刘录三,等. 三峡水库试验性蓄水前后 大宁河富营养化状态比较[J]. 环境科学,2012,33 (10):3382-3389.
- [5] Arhonditsis G B, Stow C A, Paerl H W, et al. Delineation of the role of nutrient dynamics and hydrologic forcing on

phytoplankton patterns along a freshwater – marine continuum [J]. Ecological Modelling, 2007, 208(2-4): 230 - 246.

- [6] Dong Jing, Zhou Weicheng, Song Lirong, et al. Responses of phytoplankton functional groups to simulated winter warming [J]. International Journal of Limnology, 2015, 51 (3):199-210.
- [7] Xu J, Yin K, Liu H, et al. A comparison of eutrophication impacts in two harbours in Hong Kong with different hydrodynamics [J]. Journal of Marine Systems, 2010,83(3 – 4):276-286.
- [8] Arifin R R, James S C, de Alwis Pitts D A, et al. Simulating the thermal behavior in Lake Ontario using EFDCO [J]. Journal of Great Lakes Research, 2016, 3(11):1-13.
- [9] Ma Liang, He Chunguang, Bian Hongfeng, et al. MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: Merits, applications, and challenges [J]. Ecological Engineering, 2016,96:137-149.
- [10] Noori R, Yeh H, Ashrafi K, et al. A reduced order based CE – QUAL – W2 model for simulation of nitrate concentration in dam reservoirs [J]. Journal of Hydrology, 2015,530:645 – 656.
- [11] 雷晓玲,袁廷,杨程,等.基于 Delft3D 模型的三峡航道 环保疏浚水质数值模拟研究[J].工业安全与环保, 2016,42(3):65-68.
- [12] 刘佳娇,齐少群,张羽威,等. 松花江哈尔滨段主干流 河网水动力模型构建及在城市防洪预警决策中的应用 [J]. 自然灾害学报,2015,24(2):172-177.
- [13] 陆仁强,何璐珂. 基于 Delfi3D 模型的近海水环境质量数值模拟研究[J],海洋环境科学,2012,31(6):877-880.
- [14] 巫山县统计局,国家统计局巫山调查队. 2014 年巫山 县国民经济和社会发展统计公报[R],2015-2-28.
- [15] 郑丙辉,曹承进,张佳磊,等. 三峡水库支流大宁河水 华特征研究[J]. 环境科学,2009,30(11):3218 -3226.
- [16] 罗茂盛,刘兴年,罗 宪,等.山区小流域坡面、沟道床面 粗糙度与糙率测量方法探讨[J].四川大学学报(工程 科学版),2008,40(6):57-62.
- [17] 纪道斌,刘德富,杨正健,等.三峡水库香溪河库湾水 动力特性分析[J].中国科学:(物理学力学天文学), 2010,40(1):101-112.
- [18] 袁德奎,李广,王道生,等. 围填海工程对渤海湾水交换能力影响的数值模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2015,48(7):605-613.