第28卷第2期
2017年 4月
水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering
Vol. 28 No. 2
Apr. ,2017

DOI:10. 11705/j. issn. 1672 -643X. 2017. 02. 06

基于 Delft3D 的三峡水库不同工况下香溪河水动力水质模拟

黄庆超[1], 石巍方[1], 刘广龙[1], 王雨春[2], 周怀东[2], 朱端卫[1]

(1. 华中农业大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

摘　要: 三峡大坝高水位运行对库区支流水环境的影响一直是备受关注的问题。以三峡库区支流香溪河上游河段为例,基于 Delft3D 模型,进行水动力水质模拟研究。首先,采用模型中的 Flow 模块对研究水域构建了水动力模型,对研究河段 2013 年汛期和蓄水期的水动力时空特征进行模拟;然后利用 Waq 模块构建了水质模型,模拟了 NH_4^+ 在大量排放之后的流动分布规律。模拟结果表明: 香溪河在汛期呈现“河相”,流速较大;在蓄水期香溪河的“湖相”化趋势明显,流速低,形成涡旋;在蓄水期,由于三峡库区水位抬升,造成香溪河流速缓慢,其水动力特征对污染物分布中起了决定性的作用,使污染物表现出明显的回水污染特征,威胁香溪河水质安全。研究结果可为三峡库区支流的区域化管理提供决策参考。

关键词: 水动力模拟; 水质模拟; Delft3D; 三峡水库; 香溪河

中图分类号:TV143; X824　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1672- 643X(2017)02- 0033- 07

Modeling the hydrodynamics and water quality of Xiangxi River under different working conditions of Three Gorges Reservoir Based on Delft3D

HUANG Qingchao[1], SHI Weifang[1], LIU Guanglong[1], WANG Yuchun[2], ZHOU Huaidong[2], ZHU Duanwei[1]

(1. *College of Resources and Environment*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*;
2. *The Department of Water Environment*, *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: The impacts of high water level running of three gorges dam on the reservoir water environment has always been a concerned problem. Taking Xiangxi River upstream of three gorges reservoir area as an example, the hydrodynamic and water quality of Xiangxi River would be simulated in this paper based on the mathematical model of Delft3D. First, the flow module was used to construct the hydrodynamic model in the study area, and the spatialtemporal hydrodynamic characteristics in flood season and storage period of 2013 were simulated. Second, the water quality model was built by using Waq module and NH_4^+ distribution was simulated after discharge of a large number of its emission. The modeling results showed that Xiangxi River in flood season was in a typical state of “River phase”, with a high flow rate. In the water storage period of the Three Gorges Reservoir, Xiangxi River is in a state like “lake phase”, the flow rate became very low and vortex was shaped. During the water storage period of the reservoir, the water level increased which caused slow river flow rate, and the hydrodynamic characteristics of Xiangxi River played a decisive role in the pollutant distribution. The water pollution characteristics of pollutants showed obvious flow back characteristics, which threatened Xiangxi river water quality. The study results can help provide support information for the management of the tributaries of the Three Gorges Reservoir area.

Key words: hydrodynamics simulation; water quality simulation; Delft3D; Three Gorges Reservoir; Xiangxi River

---

收稿日期:2016- 09- 20;　**修回日期**:2016- 11- 29
基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103 -001)
作者简介:黄庆超(1989-),男,山东莱芜人,硕士研究生,研究方向为流域污染控制。
通讯作者:刘广龙(1984-),男,山东青岛人,博士,副教授,研究方向为水环境污染控制与修复。

1 研究背景

三峡大坝的修建和运行在带来了防洪、发电、航运等巨大经济效益的同时,也产生了一些水环境方面的问题。水库蓄水后,部分支流富营养化问题严重,频繁爆发水华现象[1-2]。随着大坝水位的不断提升,这一问题日益严重,逐渐成为直接影响三峡库区的水环境质量与生态安全的关键因素。三峡水库蓄水后,上游水动力场特性发生明显改变,以香溪河库湾为例,根据三峡大学三峡库区水生态与环境野外观测站长期监测发现,香溪河和长江的水体交换活动明显,1 年内大部分时间都存在分层异向流动,其对库湾的水质及水体富营养化进程有着直接影响[3]。因此,研究三峡水库不同需水位下对香溪河水动力及其相关水质的影响,对深入理解香溪河水质的变化过程具有重要意义。

香溪河是三峡水库湖北库湾的最大支流,同时也是最靠近三峡大坝的较大支流。三峡水库 2010 年蓄水至 175 m 后,支流回水区的水文情势发生了显著变化,部分支流受回水顶托,营养物质大量富集,成为富营养化的敏感水域,香溪河首当其冲,已引起相关学者的注意。王玲玲等[4]采用一维水质生态模型模拟了香溪河水华的生消过程,发现水华期间的叶绿素浓度与水流流速有明显的相关关系,这说明流速对河流水华影响显著。徐国宾等[5]采用非恒定流二维水动力模型对三峡水库调峰运行下的香溪河水动力过程进行后模拟认为,通过三峡水库的运行方式可以显著地改变库区干支流水动力条件。别玉静等[6]采用三维水动力场数学模型探讨了三峡水库春季调度对香溪河水动力场的影响,结果表明水库水位对香溪河水体分层流动具有很大的影响。余真真等[7]采用三维水温模型模拟了香溪河水温分层现象,表明香溪河口存在明显的立面环流。然而,这些研究或侧重于水文模拟,或侧重于水质模拟。就香溪河而言,因其距三峡大坝较近而成为水动力特性受三峡调峰影响的敏感区域,水动力与水质的耦合研究极为重要。因此,选择一个集水动力和水质模拟预测于一体的模型来模拟研究香溪河的水环境问题,将使模拟结果更好的接近真实情形,有利于为三峡库区的水环境管理提供决策支持。

目前国际上使用较多的模型主要有 Delft3D[8]、EFDC[9]、DHI[10]等模型。其中,Delft3D 模型内置的水流与水质模块可实现无缝结合,在水文水质耦合模拟方面具有较大优势;此外,模型强大的前处理功能有利于模型的快速构建,而其强大的后处理和可视化功能更是为模拟结果的呈现与分析带来极大便利。为此,本研究以 Delft3D 模型为基础,结合大量监测数据,分析香溪河上、中、下游的水文水动力特性,继而利用观测资料,成功实现了香溪河供试河段的水动力、水质过程的动态数值模拟,探讨了在三峡水库运行影响下的香溪河相关区域水动力条件和水中营养物质的时空演变过程,取得了一定的结果。

2 Delft3D 模型简介

Delft3D 是由荷兰 Delft 大学 WL Delft Hydraulics 开发的一套功能强大的软件包,主要应用于自由地表水环境。该软件的框架十分灵活,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,是目前国际上最为先进的水动力-水质模型之一。

Delft3D 模型系统总共有 7 个模块构成,分别是水动力模块(Delft3D-FLOW)、水质模块(Delft3D-WAQ)、波浪模块(Delft3D-WAVE)、颗粒跟踪模块(Delft3D-RT)、泥沙运输模块(Delft3D-SED)、生态模块(Delft3D-ECO)、动力地貌模块(Delft3D-MOR)。这些模块不仅可以根据需要进行单独模拟,不同模块之间也可以进行耦合模拟。该模型的主要特点是采用正交曲线网格,计算稳定,精度高,能处理潮间带及滩槽交换的复杂地形,可用于模拟二维或三维非恒定流及其输移性质。本文用到的是 Flow 和 Waq 模块,其中,Flow 模块是 Delft3D 的心脏,它是一个多维的(2D 或 3D)水动力(或运输)模拟程序,这个程序用来计算由于潮汐和气象对曲线的边界拟合网格或球面坐标系施加强迫性所造成的非稳定流动和运输现象。水动力模块综合考虑潮汐、气压、风、密度差(由温度和盐度引起)、紊流、波浪以及潮滩的干湿交替。水动力模块的输出结果可直接被其它模块均采用水动力模块。其数学原理主要建立在 Navier-Stoke 方程基础上,在正交曲线坐标系下,由描述三维湍流瞬时量变化规律的微分方程,通过雷诺分解和平均,引入梯度模拟进行封闭处理,最后采用交替方向法对控制方程组进行离散求解[11]。

3 研究区域概况

香溪河位于湖北省西北部,发源于湖北省神农架,流经兴山、秭归两县向南至香溪汇入长江干流。香溪河干流长 94 km,流域包括整个兴山县以及秭

归县和神农架林区的一部分,总流域面积 3 099 km^2。香溪河入江口距三峡大坝大约 32 km。与源头高差 2 995 m,平均坡降为 14.2%[12],其流域水系如图 1 所示。

本研究模拟区域的上游起于香溪河的南阳水文监测站以及支流的古夫水文监测站,下游至兴山(二)水文监测站。这段区域长 6 km 左右,宽在 80 ~250 m 之间,距离长江干流 32 km,处于香溪河回水区的末端。数据的来源主要为工程的地形资料和来自南阳水文监测站、兴山(二)水文监测站、古夫水文监测站的 2012 –2013 年的水文水质实测资料。

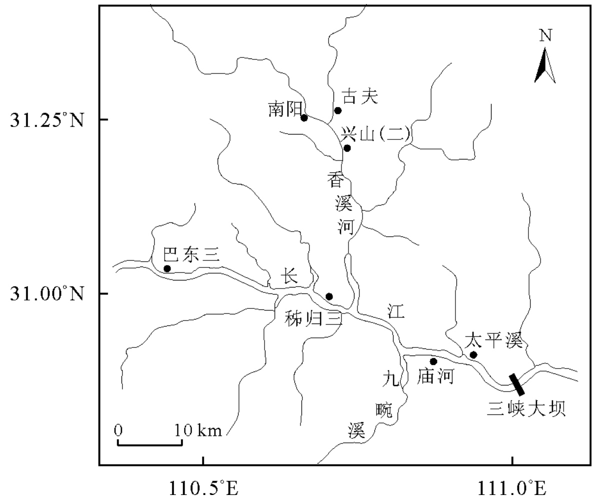

图 1 香溪河流域水系及南阳、古夫及兴山(二)等 3 个水文监测站的位置图

4　模型构建

4.1　模拟区域网格化

香溪河模拟河段的网格化处理借助 Delft3D 模型中的 Grid 模块完成[13],划分网格时采用正交曲线网格(网格划分结果见图 2),在网格划分时,网格角度的余弦值越小越好,其中靠近岸边网格的余弦值应小于 0.02,在局部区域可略大,最后生成的贴体网格数 14 100 个,网格精度为 M 方向的网格长度 9 ~12 m,N 方向的网格长度 5 ~12 m。

水下地形的生成是在 Quickin 模块中将地形散点文件导入,因网格节点数多于散点数,所以采用三角插值方法进行插值,再选择内部扩散,使每一个网格点都能得到相应的地形值。

4.2　初始条件与边界条件

初始条件选择上下游水位的中间值,这样可以加快模型的收敛速度,在本研究中水位为 165 m。边界条件中,上游进口为给定流量时间序列,下游出口为给定水位时间序列。

污染物进入水体后,一方面随水流迁移扩散,另一方面在迁移中受到水力、水文、物理、化学、人为等因素的影响,产生稀释以及物理、化学、生物等方面的变化,所以在水流流动过程中产生的污染范围也随着时间变化。本研究拟采用二维水质模型[14]分析污染物随着时间在河段上的分布情况。在模拟河段两条支流最上游分别设置一个排污点,中心排入河道,污染物设为 NH_3—N,排放流量为 50 m^3/s,模拟的质量浓度为 100 mg/L,每天排放 12 h。对于氨氮的影响因子主要考虑水文作用和硝化作用。

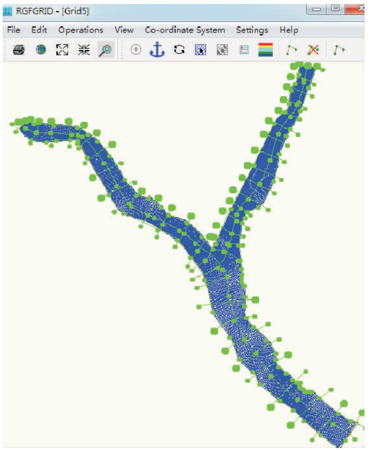

图 2　香溪河模拟区域网格划分

4.3　模型参数设置

物理参数中的常量值重力加速度为 9.81 m/s^2,底部糙率根据搜集的资料,取为曼宁糙率[15], $U = V = 0.034$。水的水平紊动黏性系数取为 1 m^2/s,时间步长设为 1 min。

4.4　模型验证

为验证模型的准确性,用 2013 年的水位数据进行验证运行,计算时间为 2013 年 7 月 1 号到 8 月 30 号,计算的时间步长为 1 min。图 3 为兴山(二)断面水位数值模拟计算值与实测资料插值结果,由此可以看出,二值大体相对吻合,模拟的最大水位差位于 25d 左右。总体来看,该模型具有一定的精度,可以进行后续计算。

推测水位模拟结果不是很好的原因:选取研究的河道干流在中游有一股较大支流进入,使得断面形态发生变化,造成了水文场的复杂,使结果存在一定误差;边界的网格划分不很精确;部分参数有待进一步优化。

同时在水质模拟方面,采用 2013 年 3 月到 2013 年 6 月水质监测数据进行验证。表 1 列出了模型参

数验证过程中香溪河模拟河段上、中、下游 NH_3—N 浓度的模拟值和实测值的及两者的相对误差，上、中、下游 NH_3—N 模拟值平均相对误差分别为 18.19%、29.22%、24.28%，总的平均相对误差为 23.89%。从模拟结果看，模拟值与实测值吻合度尚可，上游模拟结果稍优于中、下游。

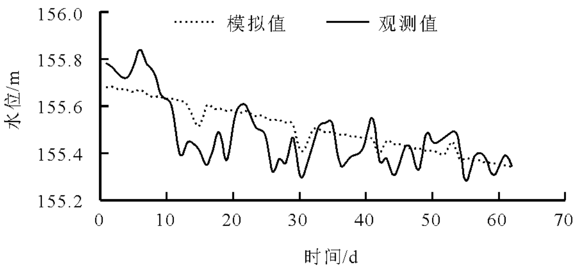

图3 2013-07-01－2013-08-30 期间香溪河兴山(二)断面水位模拟值与实际值的比较

推测 NH_3—N 浓度模拟效果不是很好的原因：本研究中对氮类指标模拟不完全对 NH_3—N 模拟影响较大；从实测数据可以看出，NH_3—N 浓度沿河道有明显降低趋势且入口浓度最高，说明 NH_3—N 的主要来源为上游来水，面源污染负荷是造成该现象直接原因。李兴[16]在研究乌梁素海时 NH_3—N 相对误差也在 20%～30%。

表1 2013-03－2013-08 期间香溪河水中 NH_3—N 浓度相对误差分析 %

监测日期	相对误差		
	上游	中游	下游
2013-03-16	9.24	19.83	17.35
2013-04-08	15.46	26.87	29.64
2013-05-10	25.67	38.49	16.19
2013-06-20	22.37	31.69	33.92

5 模拟结果分析

5.1 水动力模拟

采用建立的模型对香溪河模拟河段 2013 年汛期(7 月 1 日到 8 月 31 日)水流动力过程进行了模拟，考察的过程共 62 d，时间步长取为 1 min。模拟河段 2013 年汛期某时刻平面流场分布见图 4。

经查资料，该时刻，兴山二断面的水位是156.24 m，而三峡大坝的坝前水位为 149.2m，此时香溪河与坝前的水位差为 +7.04 m，处于汛期阶段。从图 4 可看出，在汛期，模拟河段的流速为 0.4～2 m/s，其中上游区域的流速在 1.2～2 m/s 之间；中游区域的流速在 0.6～1.2 m/s 之间；下游区域的流速在 0.4～0.6 m/s 之间。分析表明，此时期，香溪河沿河道流速较大，流速从上游到下游逐渐减小，最大流速出现在进口束窄段，河道顺直部分的流速比较均匀，下游河段保持较大的均衡流速。因此，汛期的香溪河完全符合天然河流的特征，香溪河呈现“河相”[17]。

在研究汛期水动力过程的同时，本文也对香溪河供试河段 2013 年蓄水期的水动力过程进行了模拟，模拟时间从 2013 年 9 月 20 日到 10 月 20 日，共 31 d，时间步长取为 1 min。供试河段 2013 年蓄水期某时刻平面流场分布见图 5。

经查资料，该时刻，兴山断面的水位是 164.86 m，而三峡大坝的坝前水位为 166.84 m，此时香溪河与坝前的水位差为 -1.98 m。在蓄水期，这是受库区水位抬升影响，香溪河主干道的水位在逐渐升高，上游来水的流量波动变小。从图 5 可以看出，供试区域的流速基本都在 0.04 m/s 以下，上游、中游、下游区域的流速都很低。值得注意的是，在下游，河道平面上水流出现了“涡旋”，每隔一段距离就会出现，此时水流停滞不前，形成了回水区，汇入长江的水流流速已几乎为零，普遍小于 0.02 m/s，这是受长江水位抬升影响，支流入江受阻，水流变得十分缓慢。这时，香溪河处于趋向静止的状态，形成了回水区。在蓄水期香溪河“河相”已不明显，具有了“湖相”的特征[18]。

5.2 水质模拟

水质模拟在蓄水期阶段进行，先让模拟排污点稳定排放 NH_3—N 一段时间(每天 12 h)，再停止排放。三峡水库蓄水时期模拟河段 NH_3—N 浓度分布的模拟结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出，在模拟的 NH_3—N 停止排放后的短时间内，虽然污染物的影响范围大，但是整个河段的 NH_3—N 浓度并不高，说明稀释速度快，这是因为从河道中心排放，中心流速快，上中游的河道相对较深，而河道宽度不太大，上游来水充沛，这有利于污染物的稀释和河流的自净。

整个河段的污染物浓度随着时间的推移在逐渐降低，但是在排污停止 4 h 后，下游断面的 NH_3—N 浓度突然出现了升高的现象，升高的范围逐步向上游缓慢上溯，且上溯的速度越来越慢，至 48h 后变化幅度已然很小。出现这种现象，可能是因为下游河道变宽，以及三峡水库蓄水带来的河水顶托作用，导致水流流速急剧降低，甚至在原地徘徊，使得污染物扩散不出去，稀释变慢，河流自净能力下降。前面水文模拟中香溪河的下游水流流速变得极为缓慢，水流停滞不前，在河流水平面上出现了“涡旋”和水流

形成回水区的情况也恰好说明了这一点。结合水文和水质的模拟结果进行分析,可以认为,水动力条件是导致 NH_3—N 不能及时向下游扩散,反而往回上溯现象的主要原因。

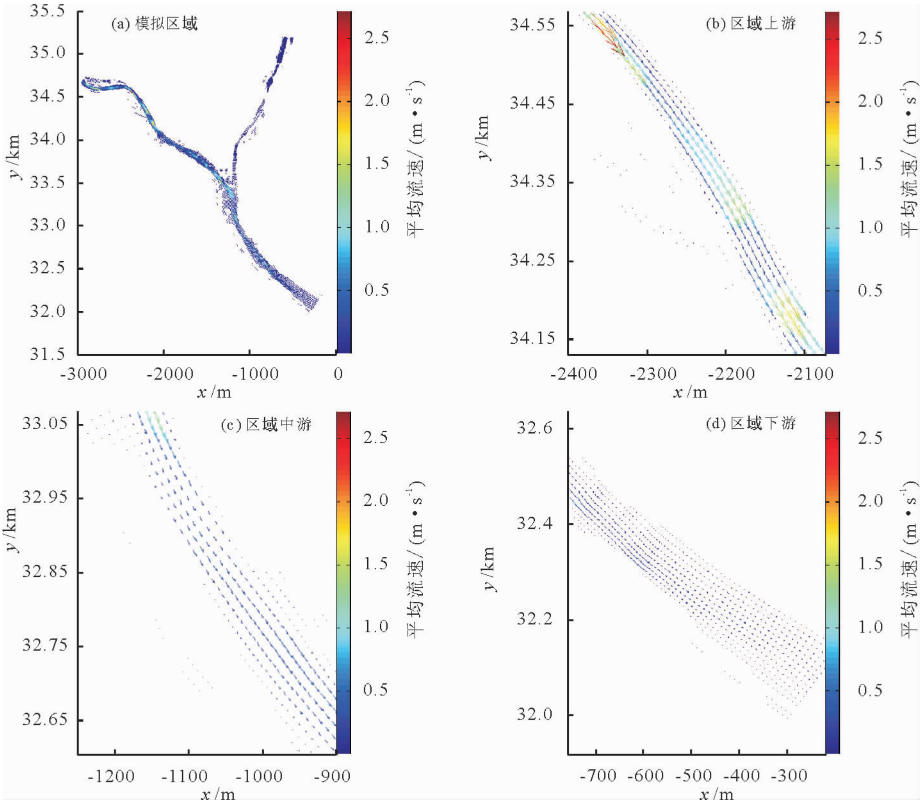

图 4　香溪河模拟河段 2013 年汛期某时刻平面流场分布图

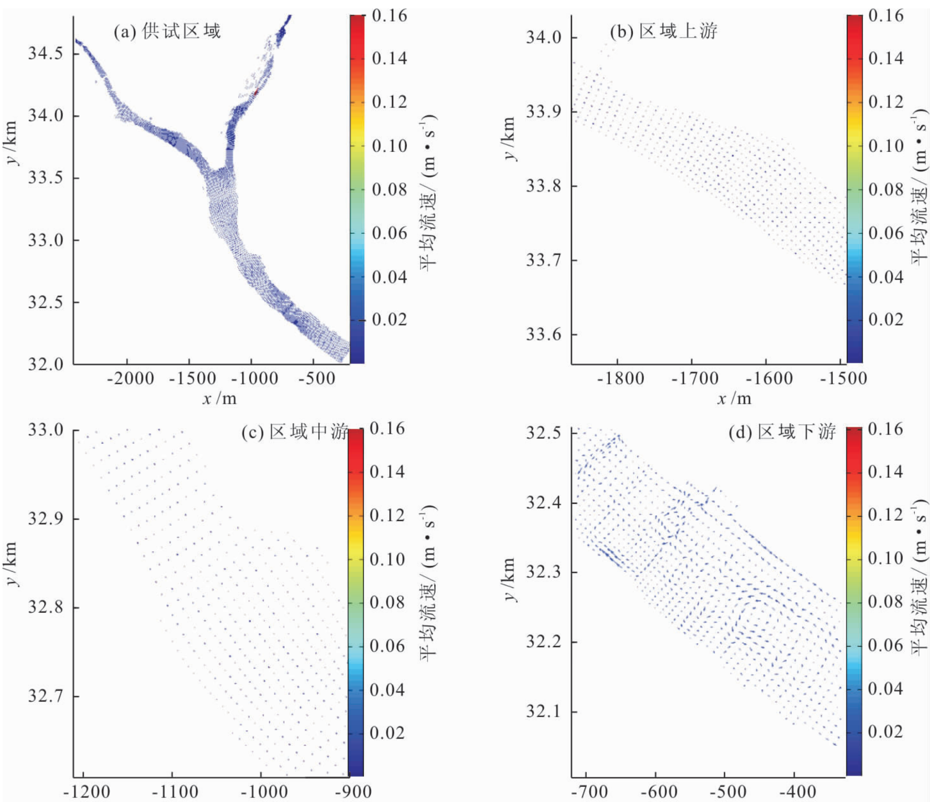

图 5　香溪河供试河段 2013 年蓄水期某时刻平面流场分布图

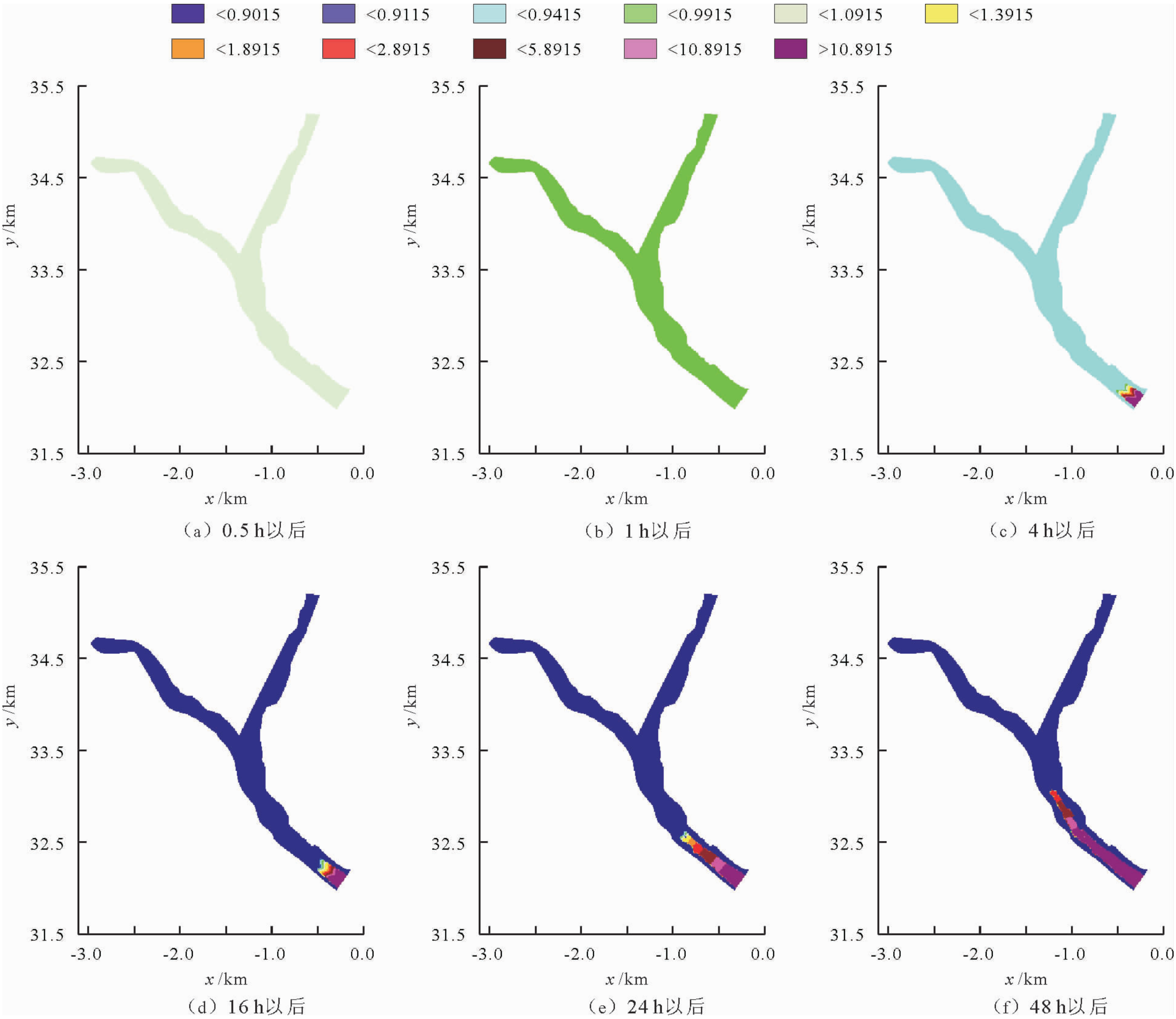

图 6 供试河段模拟 NH_3—N 排污结束后不同时间的污染物分布图(单位:mg/L)

6 结 论

(1)基于 Delft3D 构建的模型较好地反映了香溪河模拟河段的水动力与水质状况,其模拟结果可以呈现三峡库区的不同工况下模拟河段水动力与水质的总体变化趋势。

(2)在汛期,香溪河呈现典型的“河相”,流速较大,下游河段保持较大的均衡流速。此时香溪河流速沿河道递减,符合天然河流的特征。

(3)在蓄水期,香溪河的“湖相”化趋势明显。受长江水位抬升影响,支流入江受阻,水流变得十分缓慢,流速在 0.04 m/s 以下,在下游河道平面上水流出现了多个“涡旋”,此时水流停滞不前,形成回水区。

(4)香溪河的水动力条件对水质状况影响巨大,在三峡水库蓄水期,由于香溪河水流速度极其缓慢,极大地影响 NH_3—N 随水流的扩散过程,污染物容易停留在回水区。

参考文献:

[1] 叶 绿. 三峡库区香溪河水华现象发生规律与对策研究[D]. 南京:河海大学, 2006.

[2] 徐 刚. 长江三峡工程蓄水后的环境变化研究[C]//. 中国地理学会 2013 年学术年会·西南片区会议. 2013.

[3] 张 宇,刘德富,纪道斌,等. 干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2621－2627.

[4] 王玲玲,戴会超. 河道型水库富营养化模型开发及应用[C]//. 庆祝中国力学学会成立 50 周年暨中国力学学会学术大会2007 论文摘要集(下). 2007.

[5] 徐国宾,王雅萍,马 超. 三峡水库调峰运行下的香溪河水动力二维数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(4): 87－91.

[6] 别玉静,杨 乐,唐梦君,等. 三峡水库春季调度对香溪河水动力场的影响[J]. 人民黄河, 2013, 35(7): 63 - 65.
[7] 余真真,王玲玲,戴会超,等. 三峡水库香溪河库湾水温分布特性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 84 - 89.
[8] 申宏伟. Delft3D 软件在水利工程中的数值模拟[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(7): 440 - 441.
[9] 王 翠,孙英兰,张学庆. 基于 EFDC 模型的胶州湾三维潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008,38(5):833 - 840.
[10] 李 洋, 潘明祥, 陈 燕. 数值模型在长江流域一级河网中的模拟应用[J]. 环境科学与技术, 2010,33(12F): 531 - 534.
[11]廖庚强. 基于 Delft3D 的柳河水动力与泥沙数值模拟研究[C]//. 清华大学水利水电工程系硕士毕业生论文集,北京: 清华大学水利系, 2013.
[12] 叶 麟,黎道丰,唐 涛,等. 香溪河水质空间分布特性研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1959 - 1962.
[13] 范翻平. 基于 Delft3D 模型的鄱阳湖水动力模拟研究[D]. 南昌:江西师范大学, 2010.
[14] Huybrechts N, Villaret C, Lyard F. Optimized predictive two-dimensional hydrodynamic model of the Gironde Estuary in France [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2012, 138(4): 312 - 322.
[15] Park S S, Lee Y S. A multiconstituent moving segment model for the water quality predictions in steep and shallow streams [J]. Ecological Modelling, 1996, 89(1 - 3): 121 - 131.
[16] 李 兴. 内蒙古乌梁素海水质动态数值模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009.
[17] 卢士强,徐祖信. 平原河网水动力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护, 2003, 19(3): 5 - 9.
[18] Parinet B, Lhote A, Legube B. Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management - application to a tropical lake system [J]. Ecological Modelling, 2004, 178(3 - 4): 295 - 311.

(上接第 32 页)

[43] Ostlund C, Flink P, Strömbeck N, et al. Mapping of the water quality of Lake Erken, Sweden, from imaging spectrometry and Landsat Thematic Mapper[J]. Science of the Total Environment,2001,268(1 - 3):139 - 154.
[44] 曾银东,商少凌,张彩云,等. 南海东北部基于标准经验算法的遥感叶绿素 a 反演结果比较分析[J]. 海洋科学,2004,28(8):14 - 18.
[45] 施 坤,李云梅,刘忠华,等. 基于半分析方法的内陆湖泊水体总悬浮物浓度遥感估算研究[J]. 环境科学, 2011,32(6):1571 - 1580.
[46] 吕 恒,江 南,李新国. 内陆湖泊的水质遥感监测研究[J]. 地球科学进展,2005,20(2):185 - 192.
[47] 李 渊. 基于数据同化的太湖叶绿素浓度遥感估算[D]. 南京:南京师范大学,2014.
[48] 李云梅,黄家柱,陆皖宁,等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测[J]. 海洋与湖沼,2006,37(2):171 - 177.
[49] Kim W, Moon J E, Park Y, et al. Evaluation of chlorophyll retrievals from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) for the North - East Asian region[J]. Remote Sensing of Environment,2016,184:482 - 495.
[50] 包 颖,田庆久,陈 旻,等. 基于 GOCI 影像分类的太湖水体叶绿素 a 浓度日变化分析[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(8):2562 - 2567.
[51] 程慧荣,张晓阳,孙 坦,等. 基于 Web of Science 的本体研究论文定量分析[J]. 现代图书情报技术,2006,(11):46 - 50.