

汉江中下游突发性水污染事故 预测模型研究

董瑞瑞^{1,2}, 陈和春¹, 王继保¹, 辛小康²

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051)

摘要: 基于 MIKE11 模型的水动力模块、对流扩散模块, 建立了汉江中下游一维水动力水质预警预报模型, 对模型进行了率定和验证, 计算值与实测值吻合较好。应用该模型模拟了汉江典型断面襄阳和仙桃在枯水期发生突发水污染事故, 污染物高锰酸盐指数到达下游不同断面的时间和浓度值, 结果表明, 该模型能够较准确地模拟和预测突发水污染事故条件下污染物的影响程度和迁移过程, 可为汉江中下游突发水污染事故应急方案制定提供科学依据。

关键词: 水污染事故; 水动力水质模型; MIKE11; 汉江

Study on Prediction Model of Accidental Water Pollution in the Middle and Lower Reaches of Hanjiang River

DONG Ruirui^{1,2}, CHEN Hechun¹, WANG Jibao¹, XIN Xiaokang²

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;

2. Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, Hubei, China)

Abstract: Based on the hydrodynamic module and convection diffusion module of MIKE11, the model of one-dimensional hydrodynamic water quality prediction in the middle and lower reaches of Hanjiang River is established, and the model is calibrated and verified. The calculation values agree well with measured values. The arrival time and concentration of pollutant at different downstream sections of Hanjiang River are simulated by using the model when sudden water pollution accident occurred in Xiangyang and Xiantao during dry season. The results show that the model can accurately simulate and predict the influence degree and migration process of pollutants under the conditions of sudden water pollution accident. The results can provide scientific basis for the emergency plan of water pollution accident in the middle and lower reaches of Hanjiang River.

Key Words: water pollution accident; hydrodynamic and water quality model; MIKE11; Hanjiang River

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2017)12-0001-05

0 引言

长江流域幅员辽阔, 河流众多, 经济发达, 随之而来的突发水污染事故^[1]发生频率较高。据不完全统计, 1990年以来, 长江流域共发生水污染事故30余起。2014年4月, 汉江武汉段发生氨氮超标水污染事故, 导致汉阳片区水厂原水告急, 30余万人用水受到影响, 突出反映出当前突发水污染事故应急管理的重要性和紧迫性。而在水资源保护日常管理中, 需要运用数学模型对突发水污染事故风险进行识别与预判, 利用模型分析污染物的迁移状况和污染物浓度的时空变化规律, 确定污染物变化趋势

及速度, 以便能及时采取有效的应急措施, 将事故危害降到最低, 以保证生命财产和环境的安全。

汉江作为长江中下游的第一大支流, 分布着湖北省的重要产粮基地和工业基地, 人口聚集, 潜在风险源较多。本文利用 MIKE11^[2]建立汉江中下游水动力水质模型^[3], 模拟突发水污染事故, 分析污染物的时空变化规律, 计算污染物到达下游目标的时

收稿日期: 2017-07-24

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402207, 2016YFC0402204)

作者简介: 董瑞瑞(1990—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学; 辛小康(通讯作者)。

间和污染物的浓度分布,明确污染影响范围和程度,为突发水污染事故的应急处理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概化

本次建模范围为汉江干流黄家港至龙王庙总长 652 km 的河段,模型以黄家港和龙王庙为边界条件,并考虑南河、唐白河、蛮河、东荆河等支流的汇入与流出,支流全部当作点源处理。边界处同时加入汉江中下游干流沿岸入河共 60 个排污口调查实测数据,以保证模型的准确性。因河宽与水深相对河长小得多,污染物的传播主要靠纵向的混掺作用来实现,故采用 MIKE11 软件进行一维的概化模拟。本文基于圣维南方程组和对流扩散方程,采用合适的离散方法和数值计算模式,建立了汉江中下游一维水动力水质预警应急模型。汉江中下游流域范围及各水文站点的分布见图 1。

1.2 一维水动力模型

MIKE11 水动力模型^[4]采用隐式有限差分格式离散方程模拟河流的非稳定水流运动,能自适应河道内在时间和空间水流条件的数值计算方案,很好地描述河流的各种水流环境,本文选取 MIKE11 水动力模型模拟研究区域的水动力过程。模型构建收集

的基础数据包括河网资料、河道地形数据、实测水位流量数据、水文测站位置信息、边界条件等。河道非恒定流通常采用由连续性方程和动量方程组成的一维圣维南方程组描述。

1.3 一维水质模型

MIKE11 一维水质模型^[5]的基础是一维水动力模型,MIKE11 对流扩散模型主要用于模拟物质在水体中的传输扩散过程,利用水动力模型计算得到的水动力条件,采用对流扩散方程进行计算。

2 模型建立及验证

2.1 模型建立

以汉江中下游干流为研究对象,以高锰酸盐指数和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)为代表污染物,建立衰减型污染物河流水动力水质模型。根据河道形态和地形数据,汉江中下游 652 km 的河段被划分为 275 个断面,平均断面间距 2.5 km。根据研究区域的 GIS 数据和 DEM 数据建立河网文件和大断面文件。本次建模水位、流量按模拟开始时刻的水动力条件进行取值;水质模型初始条件采用高锰酸盐指数和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)2010 年 1 月浓度的平均值,汉江中下游一维水动力模型上游边界采用黄家港水文站 2010 年 1 月 1 日~2011 年 12 月 31 日共计 2 年的逐日流量过程,下游

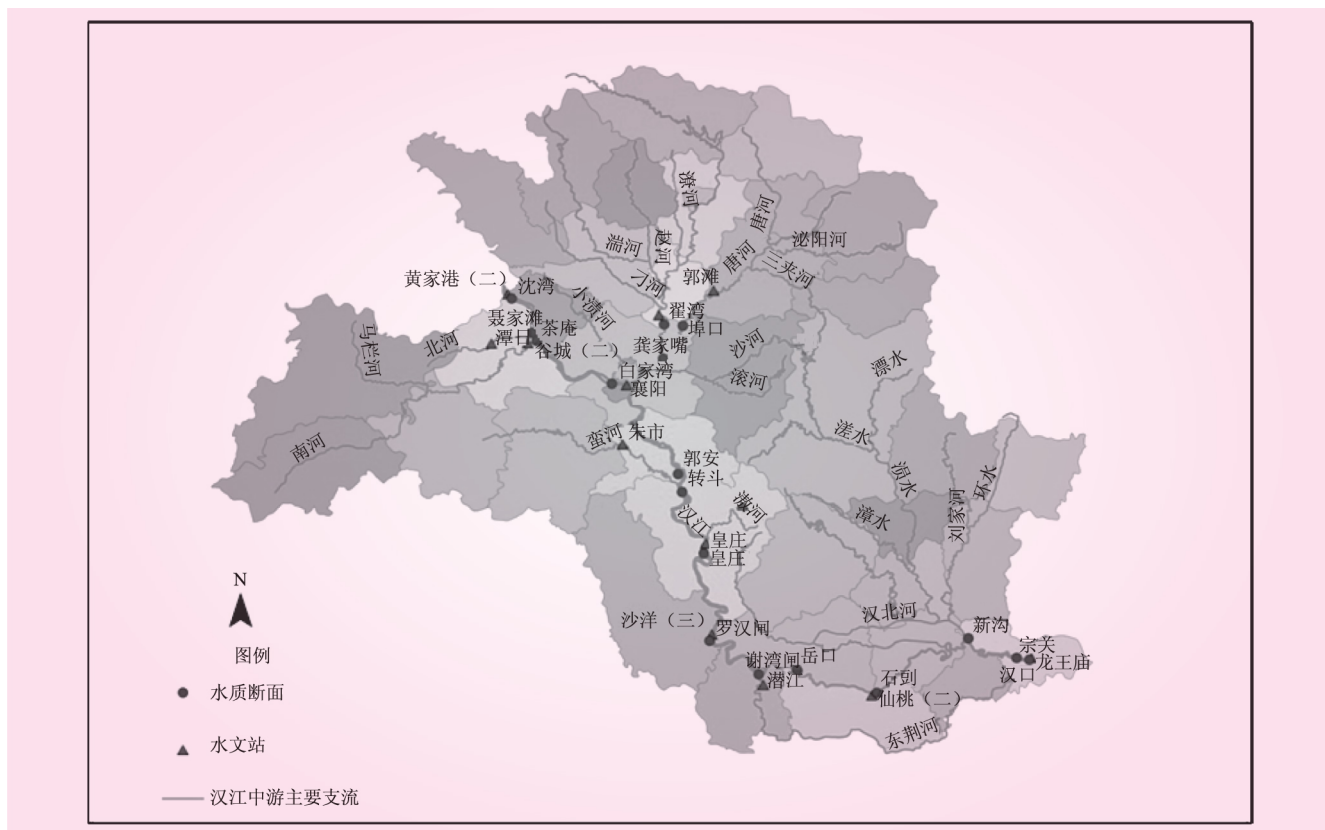


图1 汉江中下游流域范围示意

边界采用龙王庙水位站 2010 年 1 月 1 日~2011 年 12 月 31 日逐日水位过程。考虑主要河流南河、唐白河、蛮河等支流的入汇以及东荆河的分流,模型在各个边界处设有水质组分的浓度变化情况,并与水动力模型初始条件的设定保持一致;水质模型上游边界采用白家湾断面 2010 年 1 月~2011 年 12 月逐月高锰酸盐指数和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)实测数据,水质模型下游边界采用相同年限宗关断面逐月高锰酸盐指数和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)实测浓度数据。考虑主要点源的入汇,边界处同时加入汉江中下游沿岸入河排污口调查实测数据,以保证模型的准确性。考虑到模型的稳定性与计算时间,时间步长定为 1 min。

2.2 模型率定及验证

2.2.1 水动力模型

水动力模型率定主要是调整河床糙率。从黄家港水文站至武汉江段,汉江干流依次布有黄家港、皇庄、沙洋、潜江、仙桃、汉口水文站,利用 2010 年~2011 年 2 年的皇庄、沙洋、仙桃断面的逐日实测水位与流量数据对参数进行率定,参照相关成果,并根据计算值与实测值的校正,汉江中下游河段糙率采取分段取值的方法^[6],各段糙率取值为:汉江丹江口~襄阳段 0.018~0.028,襄阳~沙洋段 0.016~0.022,皇庄~沙洋段 0.015 2~0.020,汉江岳口~仙桃段 0.015 4~0.024,汉江汉川~龙王庙段 0.016~0.025,并将汉江中游皇庄、下游沙洋和仙桃水文站的实测流量值和水位值与模型计算值相比较,模型的计算精度采用如下公式

$$RE = \sum_{i=1}^n (q_i^{obs} - q_i) / \sum_{i=1}^n q_i^{obs} \quad (1)$$

式中, RE 为相对误差; q_i^{obs} 为实测值; q_i 为模拟值。

各断面水位验证结果见图 2。流量验证结果见图 3。从图 2、3 可以看出,水动力模型的计算结果与实测结果较吻合,3 个验证断面流量计算值与实测值平均相对误差为 11.38%,水位计算值与实测值平均相对误差为 3.13%。该模型具有较高的可靠性。

2.2.2 水质模型

水质模型上游边界采用白家湾断面 2010 年 1 月~2011 年 12 月逐月高锰酸盐指数和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)实测数据,水质模型下游边界采用宗关断面逐月高锰酸盐指数和氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)实测数据。考虑主要点源汇入情况,高锰酸盐指数综合衰减系数取 0.045/d, $\text{NH}_3\text{-N}$ 综合衰减系数取 0.025/d。模型选择仙人渡、皇庄、仙桃 3 个监测断面作为验证断面,以其 2010 年~2011 年 2 年的实测数据对模型进行验证,采用式(1)计算出 3 个断面高锰酸盐指数的平均相对误差为 14.5%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均相对误差为 20.19%。

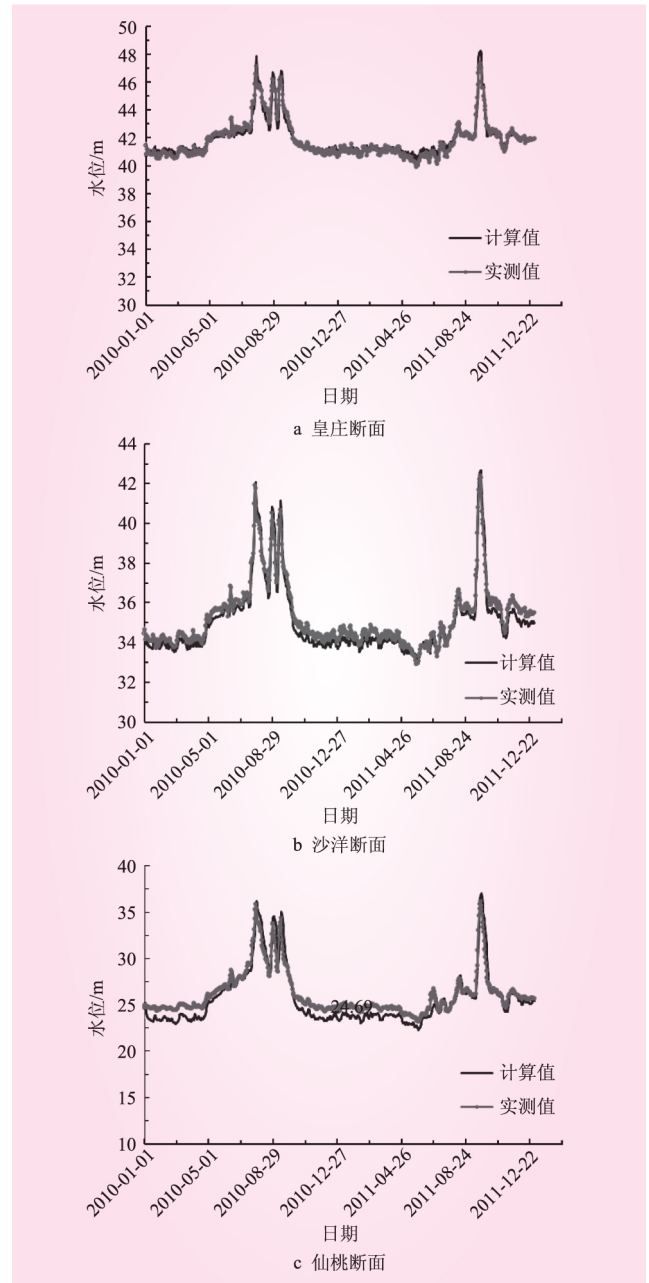


图 2 水位验证结果

$\text{NH}_3\text{-N}$ 验证结果见图 4,高锰酸盐指数验证结果见图 5。由于水质模型对实测水质数据、对应的污染源调查数据要求较高,本研究仍然只对水质和污染源数据进行了大致摸底,因此浓度计算值与实测值具有一定的误差,但是总体上能够反映污染物的分布规律和变化趋势,具有一定的精度,可应用于突发水污染事故应急预案模拟,以反映突发水污染事故发生后污染物的传输、降解规律。

3 突发水污染事故情景模拟

汉江是襄阳城市饮用水的唯一水源。根据排污口调查情况,汉江襄阳段内排污企业多,排污大户

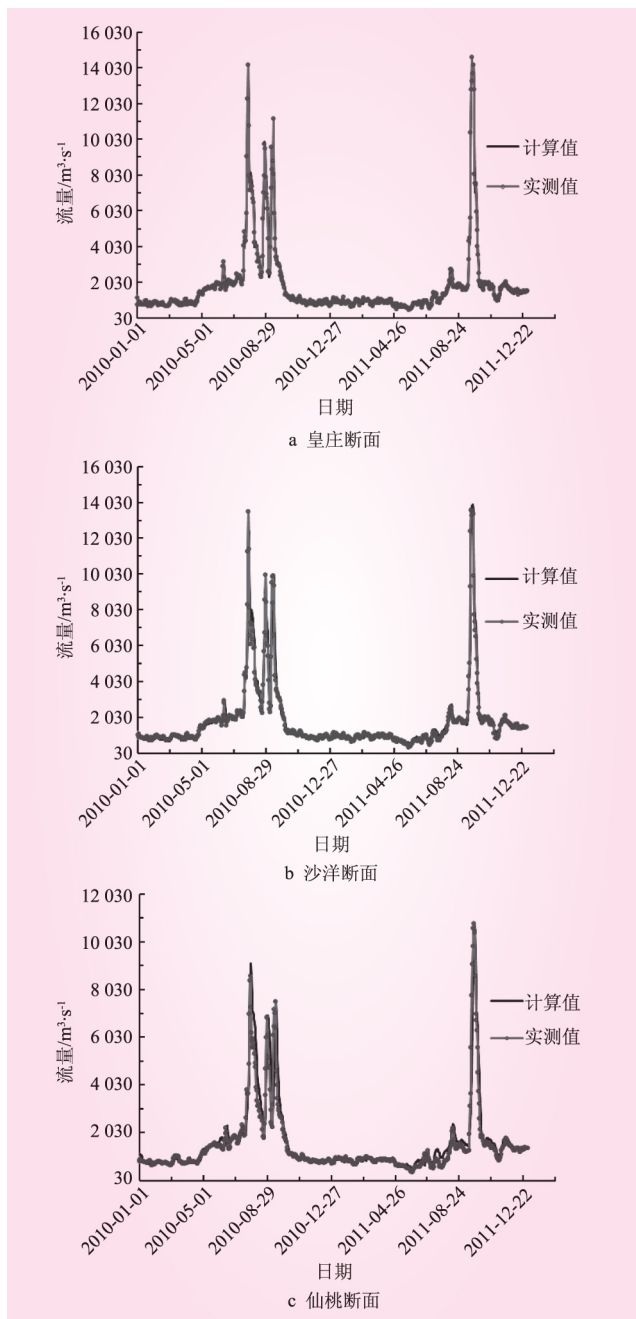


图3 流量验证结果

多,并直接排入汉江,加大了水污染事故发生的风险,而且一旦发生,后果严重。汉川、武汉江段布有多个水厂以及食品加工企业,排污口众多,本身水质较差,如果距离它较近的仙桃发生水污染事故,将会对武汉的饮用水产生影响。突发水污染事故瞬间排入河流的污染物浓度较大,利用所建立的一维水质预警预报模型可实现对污染物运移过程的模拟。现拟定2种工况,应用2011年数据,分别模拟襄阳、仙桃境内某污水处理厂在枯水期1月3日早8点发生的水污染事故,污染物就近流入汉江,高锰酸盐指数浓度为10 000 mg/L,排放流量 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$,衰减系

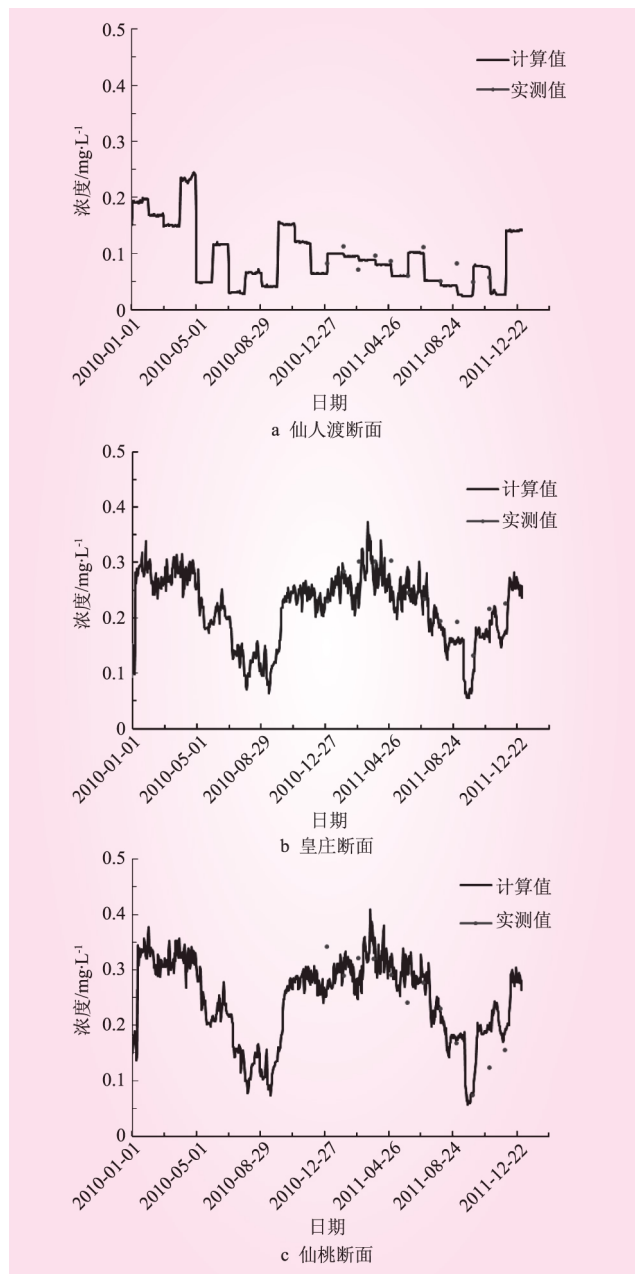


图4 $\text{NH}_3\text{-N}$ 验证结果

数 K 采用模型率定后的值 $0.045/\text{d}$ 。在事故河段加入1个突发水污染事故的点源,该处1月3日污染物浓度为10 000 mg/L,事故持续排放时间为1 d。

(1) 襄阳段1月突发水污染事故情景模拟。图6为发生水污染事故后1月3日~15日污染物沿程浓度变化。从图6可看出,发生水污染事故时,污水与汉江水混合后,襄阳段高锰酸盐指数浓度达到14 mg/L,为V类水质,由于水流的稀释与冲刷,污染物浓度逐渐降低,峰值也呈现下降趋势,但随后几天浓度峰值基本都维持在6~8 mg/L,为IV类水质。随着污染物的运移,在1月6日、9日和11日依次传播到皇庄、潜江、仙桃,而在1月15日,污染物



图 5 高锰酸盐指数验证结果

到达汉江河口流出汉江, 全过程历时 12 d, 此时的高锰酸盐指数降至 2.43 mg/L, 满足 III 类水标准, 即 15 日之后水质恢复正常。

(2) 仙桃段 1 月突发水污染事故情景模拟。图 7 为 1 月 3 日发生事故后污染物沿程浓度变化。从图 7 可看出, 污染团历时 4 d 后于 1 月 6 日移出汉江。污染团峰值浓度分别于 1 月 3 日、4 日、5 日和 6 日达到丹江口大坝下游 497 012、505 065、593 126 m 和 642 323 m 断面处。发生水污染事故后, 仙桃断面高锰酸盐指数峰值为 13.5 mg/L, 随着时间的推移, 污染团向下游迁移, 由于弥散作用和沿程流量入汇作用, 污染团峰值浓度有所降低, 但也均超过了 12 mg/L。

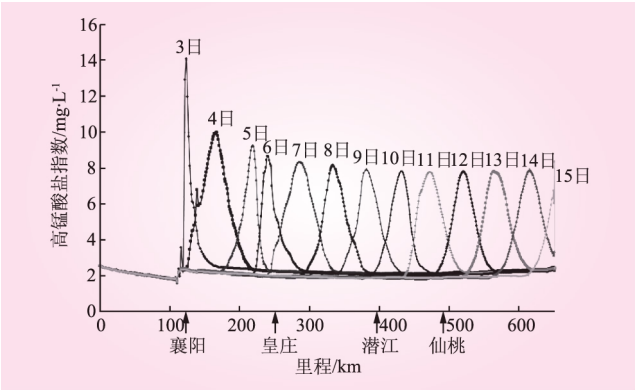


图 6 襄阳段 2011 年 1 月高锰酸盐指数沿程变化

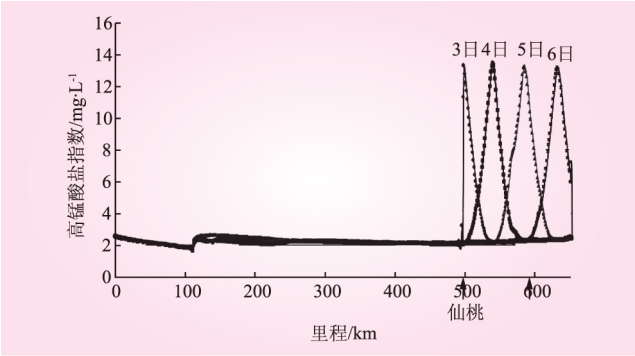


图 7 仙桃段 2011 年 1 月高锰酸盐指数沿程变化

4 结 语

本文通过 MIKE11 建立了汉江中下游一维水动力水质预警预报模型, 利用实测水位、流量、水质数据对模型进行了率定与验证。结果显示, 汉江中下游一维水动力水质预警预报模型能较好地模拟汉江中下游江段发生突发水污染事故时污染物的影响程度, 以及污染物到达不同监测断面处的时间和浓度值。该模型能较为准确地反映汉江中下游流域的水动力和水质情况, 为汉江中下游突发水污染事故的应急处理提供科学依据, 减少突发水污染事故带来的危害。

参考文献:

[1] 韩晓刚, 黄延林. 我国突发性水污染事件统计分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 84-86.

[2] 吴天蛟, 杨汉波, 李哲, 等. 基于 MIKE11 的三峡库区洪水演进模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 51-57.

[3] 王庆改, 赵晓宏, 吴文军, 等. 汉江中下游突发性水污染事故污染物运移扩散模型[J]. 水科学进展, 2008, 4(4): 500-504.

[4] 王领元. 丹麦 MIKE11 水动力模块在河网模拟计算中的应用研究[J]. 中国水运: 学术版, 2007, 7(2): 106-107.

[5] 朱茂森. 基于 MIKE11 的辽河流域一维水质模型[J]. 水资源保护, 2013, 29(3): 6-9.

[6] 陈君. 南水北调中线工程对汉江中下游的水质影响[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.

(责任编辑 杨 健)