

突发水污染事件对长江澄通段水源地影响

——以 2012 年苯酚泄漏为例

杨柳俊¹，丁宏伟²，张 云¹，陈海峰¹，徐振山²，陈永平²

(1. 江苏省水文水资源勘测局南通分局, 江苏 南通 226006;
2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

摘要:针对突发水污染事件所带来的潜在风险,基于 Delft3D 软件建立了长江澄通河段的二维水动力-水质模型,研究了苯酚泄漏事件对澄通河段狼山和长青沙 2 个主要水源地的影响。在模型率定和验证的基础上,设计了 4 种不同径潮组合下苯酚泄漏事件的计算工况。结果表明:上游径流的增强将有助于污染物更快流往下游,扩大了污染扩散范围使下游受影响范围也相应加大;潮流的往复运动能增强污染团稀释效果,但也会增加水质超标影响时间。对比研究发现,枯季大潮期间发生的突发性水污染事件对澄通河段 2 个主要水源地影响最大。

关键词:水质模型;Delft3D;感潮河段;突发性水污染;径潮组合;水源地保护

中图分类号:X522 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2019)10-0001-08

Impact of sudden water pollution on water source in Chengtong Section of Yangtze river ——a case study of phenol leakage in 2012

YANG Liujun¹, DING Hongwei², ZHANG Yun¹, CHEN Haifeng¹, XU Zhenshan², CHEN Yongping²

(1. Nantong Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Nantong 226006, Jiangsu;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, Jiangsu)

Abstract: Aiming at the potential risks caused by sudden water pollution events, a two-dimensional hydrodynamic and water quality model of Chengtong Section of the Yangtze river was established based on Delft3D software, and the effects of phenol leakage on the two main water sources in Chengtong Section of Wolf mountain and Changqing-sha were studied. On the basis of model calibration and verification, the calculation conditions of phenol leakage events under four different runoff and tide combinations were designed. The results showed that the enhancement of the upstream runoff would help the pollutant flow to the downstream more quickly and expanded the pollution diffusion area and the affected area of the downstream. The back and forth movement of tidal current could enhance the dilution effect of pollution group, but also increase the influence time of water quality exceeding the standard. The comparative study found that the sudden water pollution incidents during the dry season have the greatest impact on the two major water sources in the Chengtong Section.

Key words: water quality model; Delft3D; tidal reach; sudden water pollution; combination of runoff and tide; water source protection

收稿日期:2019-02-28
基金项目:江苏省水利科技项目(2017048)
作者简介:杨柳俊(1968—),男,高级工程师,主要从事水环境监测评价与管理工作。

0 引言

长江澄通河段上起江阴,下至徐六泾,受径流和潮汐双重作用,具有河道宽阔弯曲、河道众多、水沙动力条件复杂、河道冲淤多变等特点^[1]。作为长江黄金水道中极其重要的一环,该河段承担着巨大的航运压力,具有一定的突发水污染事件风险。同时,南通市主要饮用水源地也分布在澄通河段,其中狼山水源地供水规模 200 万 m³/d,长青沙水源地供水规模 60 万 m³/d。因此,研究意外泄露的污染物在水体中的迁移扩散规律对于保证饮用水质量,保护人民群众生命财产安全具有重要的现实意义。

目前,在水资源保护方面主要借助水质监测和数值模拟等手段开展工作。随着检测技术的日益发展,越来越多的先进仪器和先进理念被引入水质监测工作中,如无线传感器网络技术^[2]和光纤探针^[3]等。但是,由于化学检测成本较高,可获得的水质实测资料始终是有限的^[4]。

与现场监测相比,数值模拟也是研究水源地水质问题的有效手段。通过求解考虑污染物变化的对流扩散方程得到一维或多维的污染物时空分布,水质模型在预警预报方面有着较高的应用价值。现代计算机技术和数值模拟手段的快速发展衍生出了多套适用于河湖水体中的水质模型^[5],如 QUAL^[6]、WASP^[7]、MIKE^[8]、EFDC^[9]、Delft3D^[10]等。

本文拟采用由荷兰 Delft 水利研究所开发的 Delft3D 软件包建立长江感潮河段的二维水动力-水质模型,模拟 2012 年镇江李长荣码头苯酚泄漏事故期间南通河段挥发酚含量的变化过程,在此基础上,通过不同径潮动力的组合,研究突发性水污染事件对南通水源地造成的可能影响。

1 研究区域

澄通河段(如图 1 所示)位于长江江苏段,全长约 90 km,是典型落潮占优的感潮河段。该河段所处的长江口区域位于我国华东地区,气候上属于亚热带季风气候,雨水丰沛,四季分明。冬季西北风盛行具有冷而干燥的特征,夏季主要是东南风暖而潮湿^[11]。年内平均气温在 15℃ 左右,其中 1 月平均气温低至 0℃ 而 7 月平均气温可达 31℃。受季风影响,降水年内分配不均匀,6~9 月的汛期降水量占全年总量的一半以上。总体上来说,澄通河段夏季丰水期温度高、降水量大、上游径流作用较强,而

冬季枯水期径流作用相对较弱。

2 模型设置

本文借助于开源软件 Delft3D 的 FLOW 与 WAQ 模块建立澄通河段的二维水动力-水质模型。其中 FLOW 模块基于浅水方程,用于模拟感潮河段水体运动,为苯酚的扩散输运提供水动力条件。考虑到澄通河段的复杂动力,本文将计算区域适当扩大,上游开边界取至长江潮区界大通站,下游开边界取至外海,从而在模型边界处将径潮作用分离。WAQ 模块基于质量守恒原理,在每个计算单元内考虑了水体的对流扩散作用与污染物本身的物理化学过程,得到污染物在计算区域内的时空分布特点。

2.1 水动力模型

基于二维浅水方程,水动力模型采用交替隐式差分方法对相应坐标系下的控制方程进行离散求解,为污染物对流扩散过程提供基础的水动力资料,其输运方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v_x \frac{\partial C}{\partial x} - D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} - D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = S + f_R(C, t) \quad (1)$$

式中, C —污染物浓度; t —时间; x, y —平面二维坐标; v_x, v_y — x, y 方向流速分量; D_x, D_y — x, y 方向扩散系数; S —源汇项; f_R —污染物本身的物理化学变化。

在地形水深设置上,本文采用贴体正交曲线网格覆盖长江地形,网格尺度 300~5000 m,河段上游精度较高,长江口及外海区域精度较低,澄通河段网格分辨率为 300 m×600 m,如图 1 所示。模型中的水深数据由 2015 年的实测水深点采用三角插值方法得到。

在边界处理上,考虑到侧壁边界对长江内水体运动影响较小,因此模型的陆地边界均采用无滑移模式。上游开边界给定大通站日均实测流量,下游开边界采用东中国海模型,考虑了东中国海八大主要分潮,给定各点的潮位数据作为边界条件,点与点之间插值补充。

水动力模型中主要物理参数及取值见表 1。

2.2 水质模型

本研究主要针对突发苯酚泄露对水源地的影响,考虑有机污染物的物理化学过程。在一个时间步长内,各计算单元均遵守质量守恒方程:

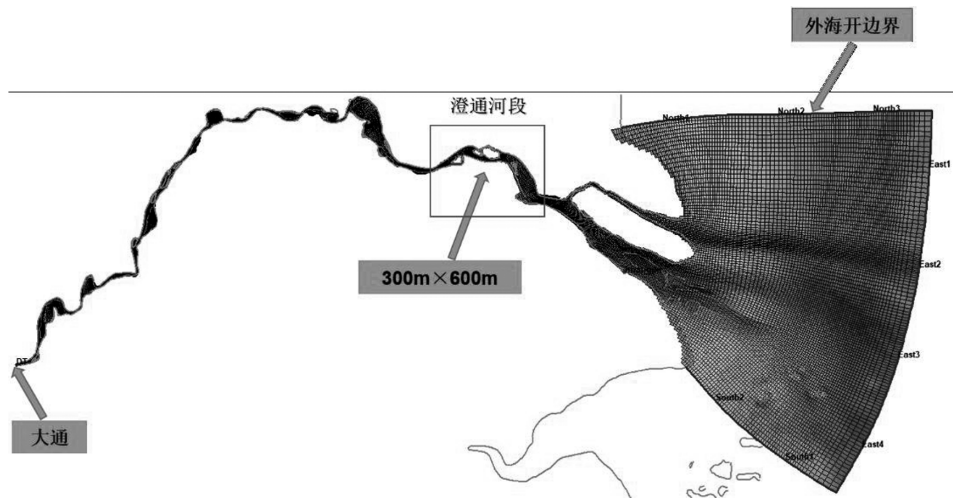


图 1 计算区域网格划分示意图

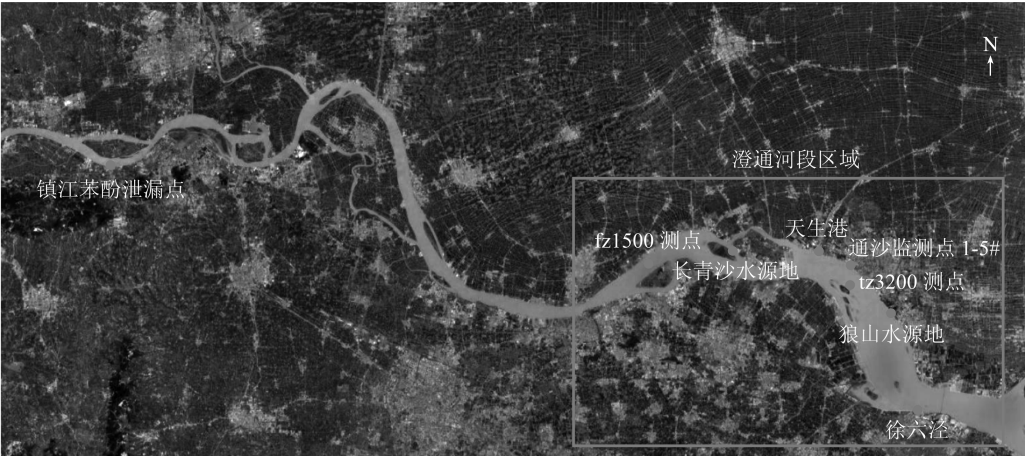


图 2 澄通河段地理位置示意图

表 1 水动力模型主要参数表

参数	取值	单位
风拖曳力系数(0 ~ 10 m/s)	0.001	—
风拖曳力系数(10 ~ 50 m/s)	0.008	—
风拖曳力系数(>50 m/s)	0.012	—
曼宁系数	0.012 ~ 0.020 + 0.01/H	—
涡粘系数	10	m ² /s
水平扩散系数	100	m ² /s

$$M_i^{t+\Delta t} = M_i^t + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr} + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_p + \Delta t \times \left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_s$$

(2)

式中, Δt —时间步长; M_i^t 、 $M_i^{t+\Delta t}$ —1 个时间步

长的开始、结束时刻的物质质量; $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_{Tr}$ —对流扩散作用引起的物质质量变化; $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_p$ —污染物本身的物理、化学生物过程引起的物质质量变化; $\left(\frac{\Delta M}{\Delta t}\right)_s$ —源项引起的物质质量变化,即污染源强度。

对流扩散作用的影响由水动力模型计算得到,源项的影响由污染物排放强度得到,因此水质模型中最主要考虑的是有机污染物苯酚的物理化学过程。苯酚的动力学分布主要受水体及底泥中有机物质的吸附以及自身降解作用的影响。为了简化模型,暂不考虑底泥的影响,仅研究水体中有机质对苯酚的吸附作用,主要通过线性分配系数来计算得到。而苯酚降解过程较为复杂,这里仅简化为与温度相关的总体降解过程。

水质模型中主要的计算参数如表 2 所示。结合突发性水污染事件的特点,模型中的温度根据不同季节取为常数。

表 2 水质模型主要参数表

参数	取值	单位
衰减通量	0.0012	$\text{g}/\text{m}^3/\text{d}$
一阶衰减率	0.04	$1/\text{d}$
温度降解系数	1.07	—
环境水体温度	10(洪季)/28(枯季)	$^{\circ}\text{C}$
一阶氧化率	0.04	$1/\text{d}$
酚-POC 对数分配系数	2.27	$1/\text{kgC}$
酚-PHYT 对数分配系数	1.90	$1/\text{kgC}$
水中溶解氧含量	11	g/m^3

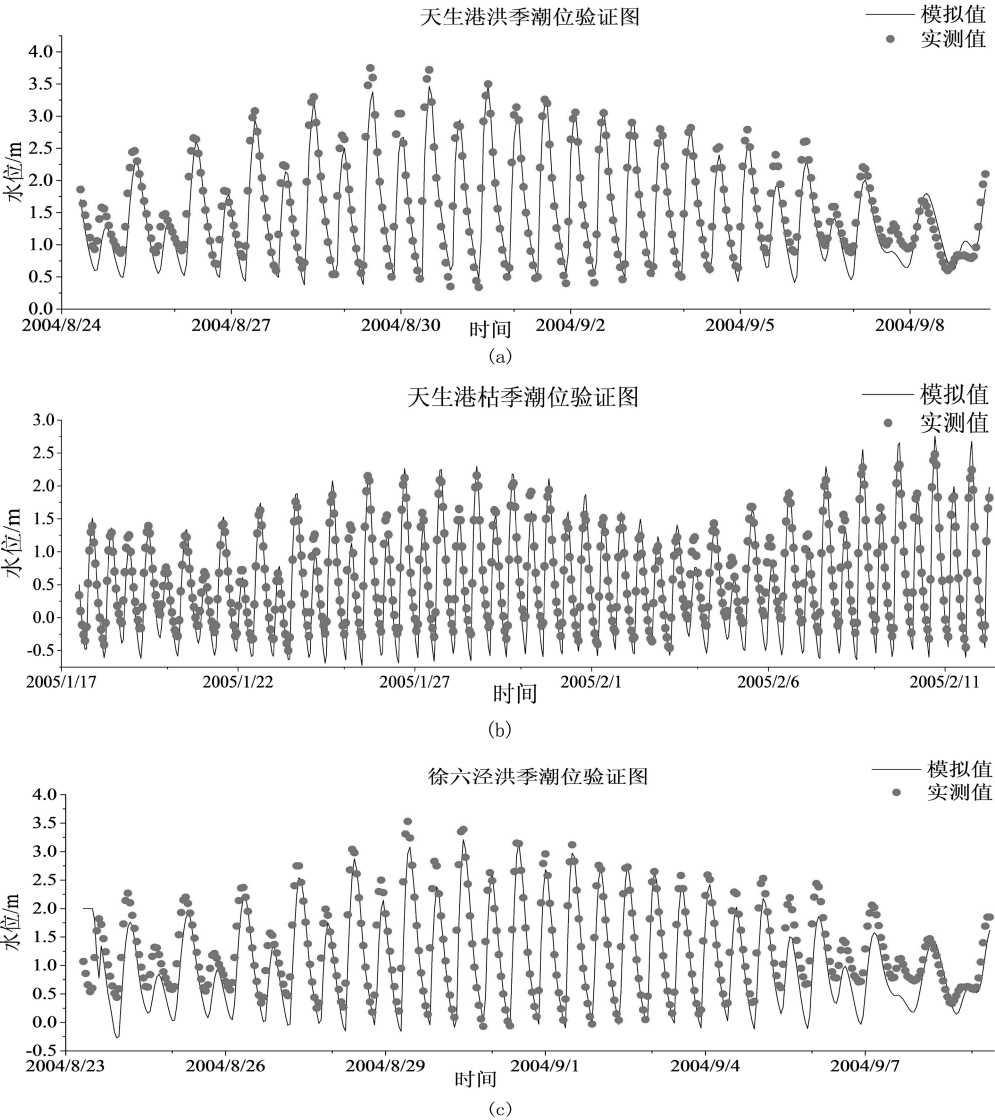
在突发性水污染事件发生期间,受影响区域污染物浓度要远高于其他区域,因此模型设置中将除

了泄露点以外的区域初始浓度均设置为 0。本文主要模拟的对象是 2012 年镇江李长荣化工码头苯酚大量泄露事故,期间共计约 46 t 苯酚排入江中,对下游的水源地造成了一定程度的影响。因此模型中在李长荣化工厂位置设置了 1 个苯酚排放点,其源强及排放时长均根据实际情况做了一定简化处理。

3 分析与讨论

3.1 模型率定及验证

本文采用澄通河段 2004 年洪季和 2005 年枯季实测水位、流速流向数据率定水动力模型。验潮站及流速流向测点如图 2 所示。水动力模拟时间超过 3 周,保证覆盖 1 个潮周期。模型计算值与实测值的对比如图 3~5 所示。结果显示,水动力模型能够较好复演洪枯季澄通河段的水体运动情况。



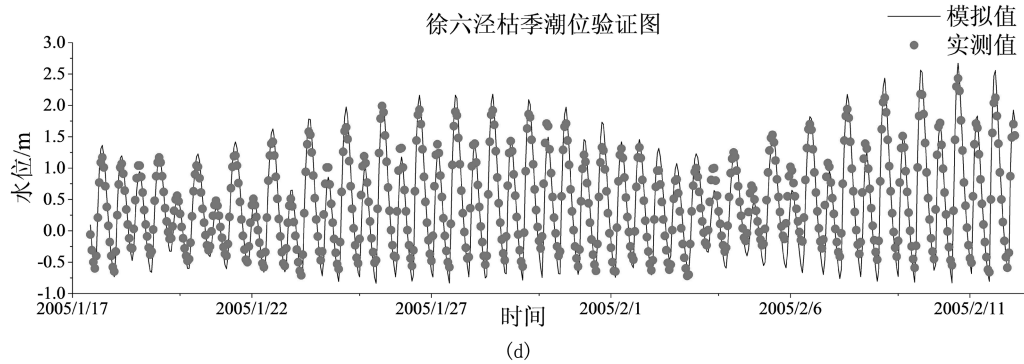


图 3 洪、枯季典型验潮站潮位验证图

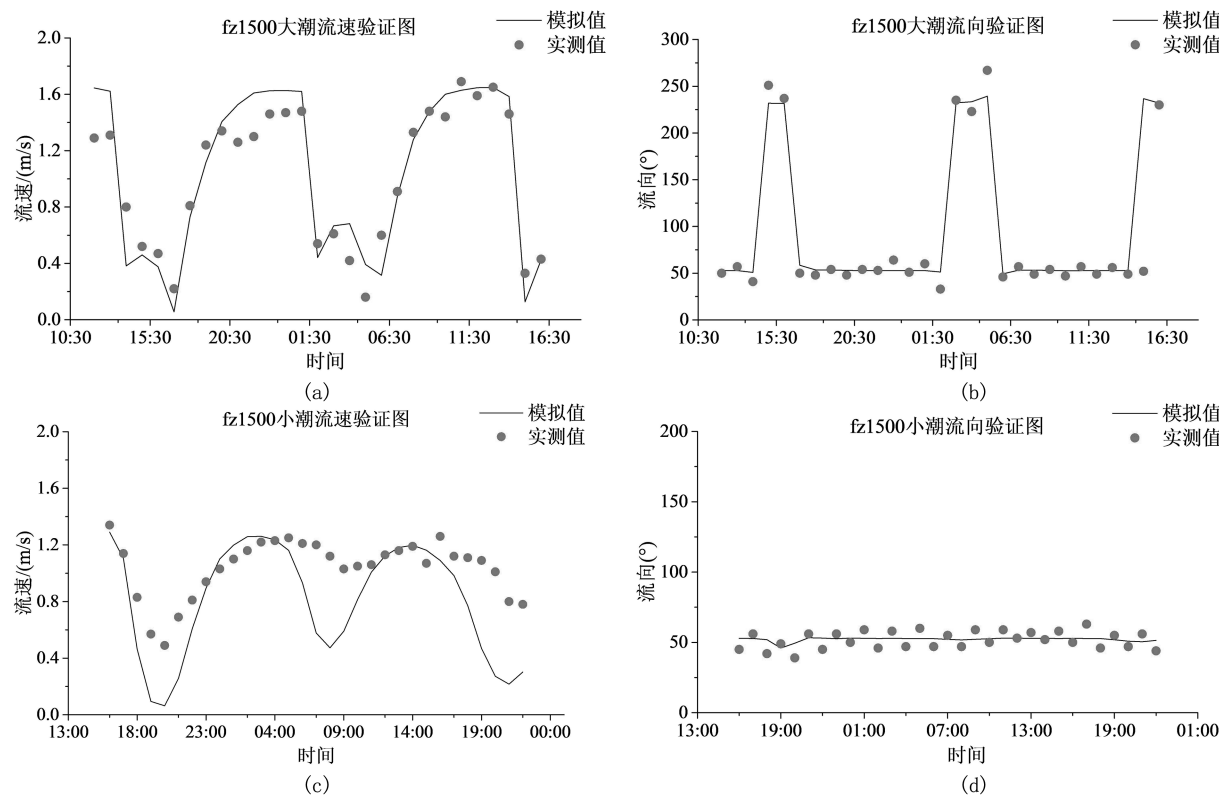


图 4 洪季大、小潮期间典型测点流速和流向验证图

2012 年 2 月初,镇江李长荣化工码头突发大量苯酚泄露事故,对澄通河段水质情况造成了一定影响。泄漏点如图 2 所示。本文水质模型模拟时间段为 2 月 1 日至 2 月 20 日,模拟结果如图 6 所示。由于实测资料有限,无法完全反映出当地苯酚浓度的变化规律。但通过数值模拟手段得到的测点苯酚浓度过程线,在最大浓度以及苯酚到达时间等方面能够较好复演苯酚泄漏期间的污染物扩散输运情况。

3.2 苯酚沿程衰减规律

澄通河段水动力条件复杂,极大影响了苯酚的沿程变化规律。为了讨论点源污染物在不同径潮动力组合下的扩散输运特点,本文设置了 4 种典型

工况,排放点均位于镇江李长荣化工码头,源强也与 2102 年相同。4 种工况苯酚排放时刻如表 3 所示。

表 3 典型工况苯酚排放时刻表

典型工况	月份	排放时间
枯季大潮期间	2012 年 1 月至 2 月	1 月 29 日 23 时
枯季小潮期间	2012 年 1 月至 2 月	2 月 3 日 16 时
洪季大潮期间	2012 年 8 月至 9 月	8 月 7 日 10 时
洪季小潮期间	2012 年 8 月至 9 月	8 月 13 日 7 时

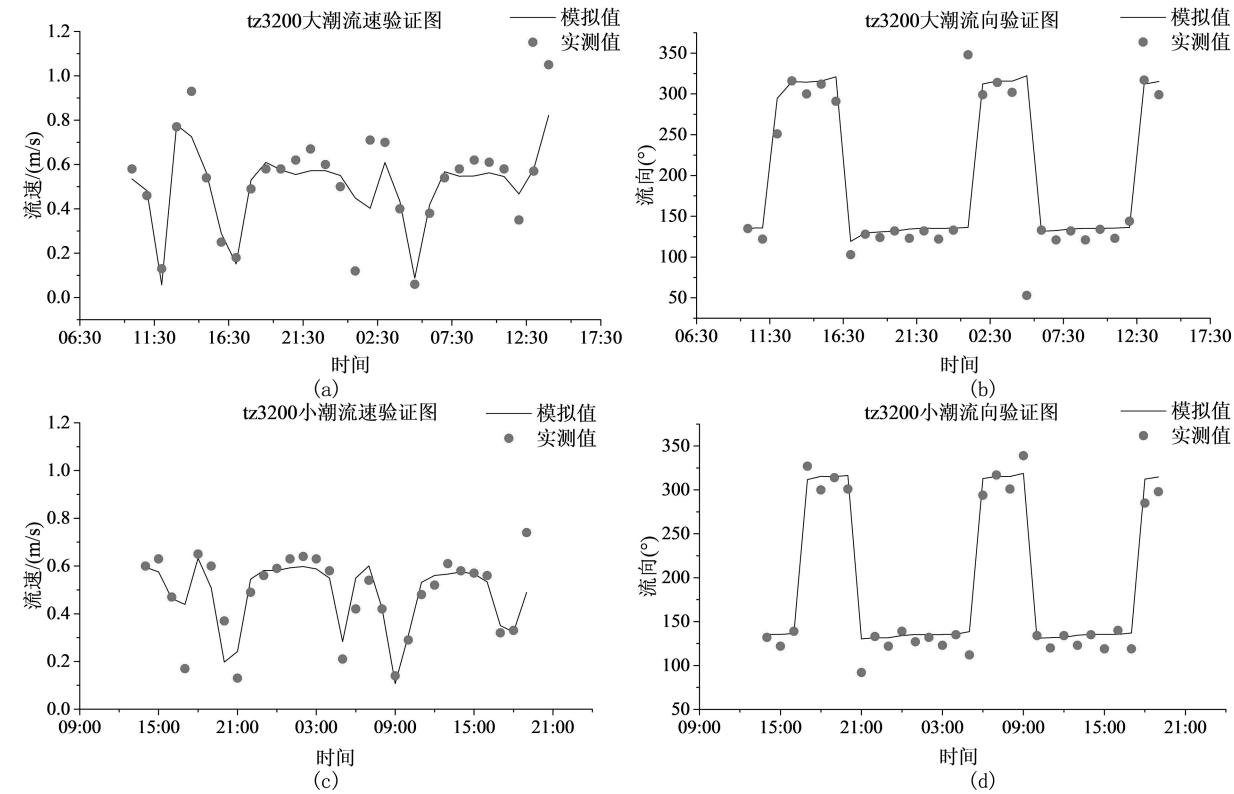


图 5 枯季大、小潮期间典型测点流速和流向验证图

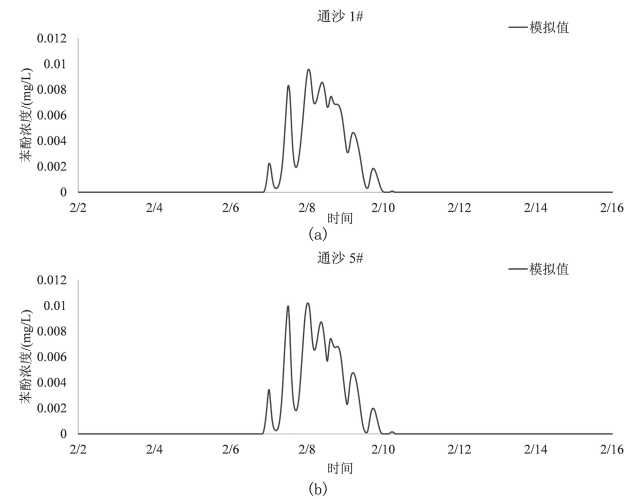


图 6 苯酚浓度模拟图

为了方便研究苯酚的沿程衰减规律,本文主要关注不同时刻污染团最大浓度变化情况,定义每一时刻最大浓度点连线为污染团轨迹线。根据数值模拟结果可以绘制出 4 种工况苯酚浓度沿轨迹变化对比图(如图 7 所示),其中横坐标为大地横坐标,模型所用坐标系为北京 54 坐标系,中心经度 123°。饮用水源地附近水体需保持为Ⅲ类水,根据《地表水环境质量标准》(GB 838—2002),Ⅲ类水体中挥发酚浓度值应不高于 0.005mg/L。

从图 7 可以看出,洪季苯酚的传播距离明显长

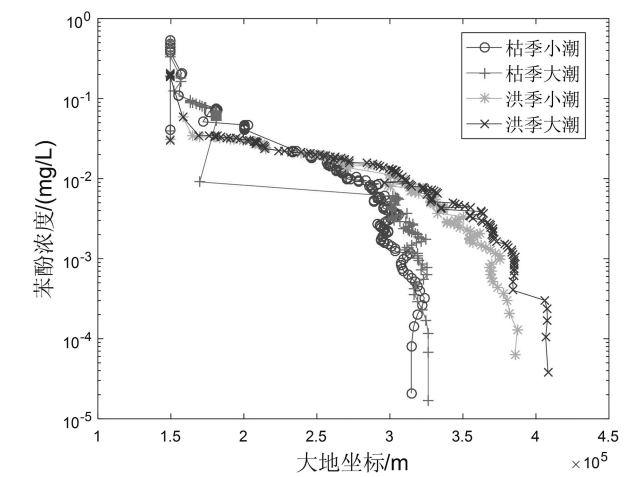


图 7 不同典型工况下苯酚沿程衰减对比图

于枯季,说明洪季上游流量增加会加大下游污染物影响范围。但是在靠近污染源的区域,洪季泄露的苯酚衰减速度却快于枯季,这说明上游流量增加有助于加快污染源附近区域的扩散稀释效果,但是由于水流速度增加,污染物被更快带往下游,导致苯酚稀释时间较短,传播距离更长,下游受影响范围加大。

潮流作用主要体现为周期性的流速流向变化。澄通河段属于落潮主导区域,污染物整体上会在潮流影响下向下游输运,但是潮水的周期性运动会使

得污染团在运动过程中向上下游来回振荡,这将增加污染物在水体中的稀释时间。如图 7 所示,4 种工况的苯酚沿程衰减曲线均在下游靠近长江口的强潮区域出现了小周期的抖动现象,枯季的计算工况这一现象尤为明显,这就是污染物在潮流作用下的振荡。此外,可以看到大潮时刻的污染物影响范围要略大于小潮时刻,这主要是因为大潮时刻周期平均流速更大,传播距离较远。而在上游靠近污染源的区域,由于径流的主导作用,大小潮时刻的污染物沿程变化规律区别不大。

澄通河段是径潮流共同作用的区域,相互影响剧烈,因此枯季小潮时刻该区域污染物影响范围最小,稀释效果最好,而洪季大潮时刻稀释效果最差,下游受影响范围最大。

3.3 不同工况对水源地的影响

突发性水污染事件对水源地的影响主要可以用 3 个主要参数来衡量,分别是最大水质超标倍数、水质超标影响时间及污染团到达时间^[12]。最大水质超标倍数(MEM)表示污染严重程度,定义为:

$$MEM = \frac{C_0 - C_{lim}}{C_{lim}} \quad (3)$$

式中,C₀—事故期间水源地最大污染物浓度;C_{lim}—污染物浓度限值,这里取为 0.005 mg/L。

水质超标影响时间定义为水源地污染物浓度高于规定限值的时间,体现了对水源地供水的影响,也是评估事故对水源地影响应当着重考虑的参数。而污染团达到时间则指泄漏事件刚发生至水源地污染物浓度刚达到限值的时间,主要反映了事故紧急程度,需要结合水源地应急反应能力予以考虑。

狼山水源地是南通市区主要的饮用水供给源之一,本文给出了 4 种典型工况下狼山水源地苯酚浓度变化曲线,如图 8 所示。比较不同工况下的苯酚浓度变化曲线可以看出,洪季狼山水源地浓度变化曲线只有 1 个峰值,而枯季由于径流影响减弱,潮流影响加强,污染物振荡现象明显,浓度变化曲线呈现出多个峰值的特点,且洪季浓度最大值大于枯季浓度最大值。此外枯季大小潮时刻最大浓度差值明显大于洪季,说明枯季潮流作用对污染物的稀释效果影响更大。

表 4 列出了不同条件下狼山和长青沙 2 个水源地的 3 种水污染评价指标量值。从中可以看出,对于洪季出现的突发性水污染事件,应急反应时间短、污染物浓度相对较高是其最大特点,但是污染

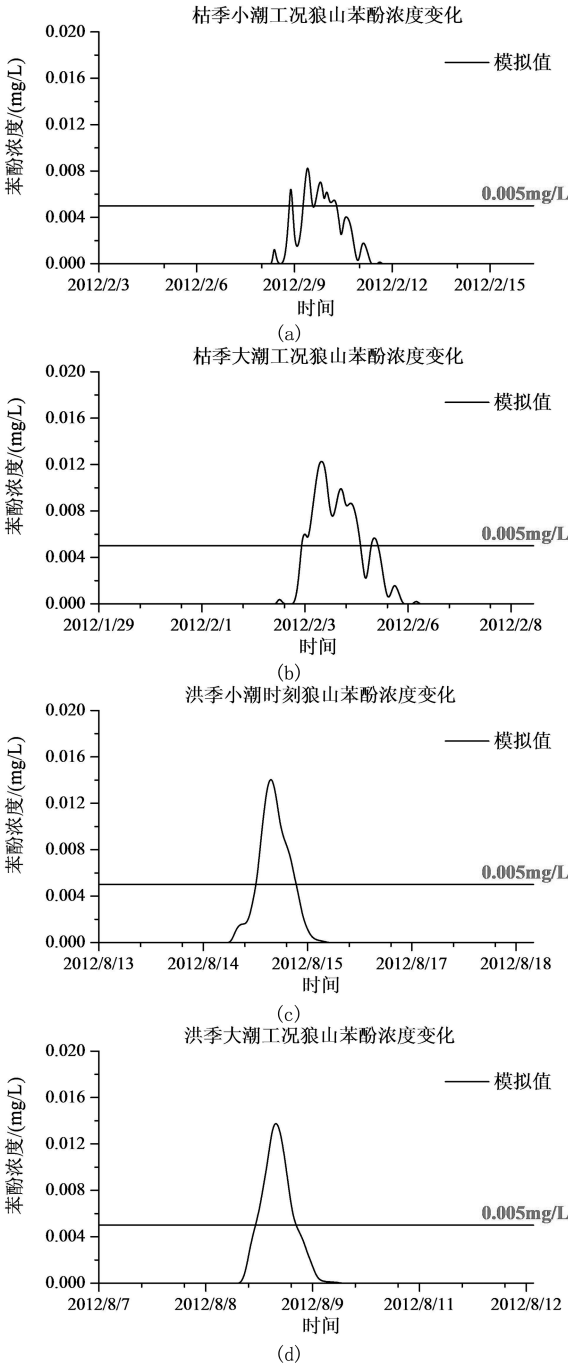


图 8 不同工况下狼山水源地苯酚浓度变化

团在水源地附近滞留时间短,对于供水的影响相对比枯季的情况小。而枯季的突发性水污染事件尽管引起的最大浓度不高,污染团到达时间更长,但污染物在水源地附近滞留时间较长,对供水的影响相对更大。虽然洪季的污染物应急反应时间短、浓度高,但其影响时间不长。相反,枯季大潮时刻排放的苯酚污染物最大浓度略低于洪季,而水质超标影响时间却远大于洪季,对城市供水造成的破坏相对更明显。因此,可以认为对澄通河段水源地影响最大的水污染事件为枯季大潮期间出现的突发性

水污染事件。

表 4 不同工况的突发性水污染事件
对南通水源地的影响程度

计算工况	水源地	污染团 到达时间 (h)	水质超标 影响时间 (h)	最大水质 超标倍数
洪季大潮	狼山	41.83	13.83	1.76
	长青沙	36.33	13.03	2.52
洪季小潮	狼山	45.30	10.95	1.8
	长青沙	35.62	14.55	2.56
枯季大潮	狼山	117.80	45.62	1.46
	长青沙	97.70	28.60	2.34
枯季小潮	狼山	140.13	34.33	0.6
	长青沙	115.30	37.12	1.6

4 结论

基于 Delft3D 软件建立了长江南通段的水动力-水质模型,对短时、点源排放的突发性水污染事件展开研究,重点模拟 2012 年镇江苯酚泄露事件对南通狼山水源地、长青沙水源地的影响。

(1)水动力模型采用 2004 年洪季及 2005 年枯季的实测潮位、流速、流向数据进行率定及验证,结果显示该模型能够较好模拟澄通河段的水动力条件;水质模型采用 2012 年苯酚事故期间南通通沙汽渡附近的实测挥发酚浓度进行率定,能够较好复演苯酚在长江感潮区域的迁移转化情况。

(2)为了讨论不同径潮组合对苯酚扩散迁移的影响,本文设计了 4 个典型计算工况模拟苯酚泄露对南通 2 个水源地的影响。结果显示,加大上游径流可以将污染物更快带往下游,扩大了下游污染范围,而潮流作用使得污染团在水体中来回振荡,增强了稀释效果,但也导致水质超标的影响时间增加。

(3)经过比较不同工况的最大水质超标倍数、水质超标影响时间和污染团到达时间等评价指标,发现枯季大潮期间爆发的突发性水污染事件对南通 2 个水源地影响最大。

参考文献:

[1] 苏长城,叶健. 关于长江澄通河段综合整治规划要点的思考[J]. 江苏水利, 2008(7):11-12.

[2] Pule M, Yahya A, Chuma J. Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality[J]. Journal of Applied Research and Technology, 2017, 15(6):562-570.

[3] Obrovski B, Bajic J, Mihajlovic I, et al. Colorimetric fiber optic probe for measurement of chemical parameters in surface water[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2016, 228:168-173.

[4] Murray K E, Thomas S M, Bodour A A. Prioritizing research for trace pollutants and emerging contaminants in the freshwater environment[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(12):3462-3471.

[5] Cox B A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers[J]. Science of The Total Environment, 2003:314-316+335-377.

[6] FAN C, KO C, WANG W. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(5):1824-1832.

[7] Wool T A, Davie S R, Rodriguez H N. Development of three-dimensional hydrodynamic and water quality models to support total maximum daily load decision process for the Neuse River Estuary, North Carolina[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2003, 129(4):295-306.

[8] Vanderborgh J P, Folmer I M, Aguilera D R, et al. Reactive-transport modelling of C, N, and O2 in a river-estuarine-coastal zone system: Application to the Scheldt estuary[J]. Marine Chemistry, 2007, 106(1):92-110.

[9] LEE I, HWANG H, LEE J, et al. Modeling approach to evaluation of environmental impacts on river water quality: A case study with Galing River, Kuantan, Pahang, Malaysia[J]. Ecological Modelling, 2017, 353:167-173.

[10] Lee J, Qu B. Hydrodynamic tracking of the massive spring 1998 red tide in Hong Kong[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(5):535-550.

[11] 吴志钢. 长江径流变化对澄通河段水动力过程影响研究[D]. 南京:河海大学, 2014.

[12] 逢勇,徐秋霞. 水源地水污染风险等级判别方法及应用[J]. 环境监控与预警, 2009, 1(2):1-4.