

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.105

长江重庆主城区段突发水污染事故模拟研究

龙天渝, 屈 瑶

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:因重庆山城特殊的地势,主城区沿长江和嘉陵江两岸建有多种形式的排水干管,一旦发生管道破裂将危及下游水厂取水口的水质安全。在三峡水库蓄水至 175 m 水位后,针对长江重庆主城区段可能发生的突发水污染事故,基于实测地形、水文等数据,构建二维水动力水质耦合模型,采用优化反演法率定河道糙率,借助有限元法分别模拟河流在丰、枯水期管道破裂事故发生后在 24 h 或 48 h 完全修复的情况下,各类污染物(五日生化需氧量 BOD_5 、化学需氧量 COD、总氮 TN、总磷 TP)质量浓度随时间和空间的变化。模拟结果可为重庆主城突发排水干管破裂的应急预案优化提供科学依据。

关键词:排水干管;长江重庆段;突发事故;取水口;模拟

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)10-090-14

Simulation of an emergent water pollution accident in the portion of the Yangtze River running through the main urban areas of Chongqing

LONG Tianyu, QU Yao

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Due to the special terrain of Chongqing City, various types of drainage trunks have been built along the Yangtze River and the Jialing River. Once a pipeline bursts, it will endanger the water quality of downstream water intake. Aiming at the establishment of a management system for sudden water pollution risk that may occur in the Chongqing Section of the Yangtze River after the impoundment of the Three Gorges Reservoir up to 175 m, a two-dimensional hydrodynamic water quality coupling model was built based on the measured topographic and hydrological data, and optimal inversion method was used to determine the roughness. The finite element method was applied to simulating the temporal and spatial variations of pollutant concentrations including the five-day biochemical oxygen demand (BOD_5), the chemical oxygen demand (COD), the total nitrogen (TN), and the total phosphorus (TP) under the condition that the fractured pipeline be completely repaired after 24 h or 48 h in the high and low water periods. The simulation results can provide a scientific basis for the optimization of the emergency plan in case of a sudden drain pipe rupture in Chongqing.

Keywords: main drainage pipe; Chongqing section of the Yangtze River; sudden accidents; water intake; simulation

收稿日期:2019-07-02 **网络出版日期:**2020-06-05

基金项目:重庆市科技计划项目(cstc2017jcyjAX0025)。

Supported by Chongqing Science and Technology Program (cstc2017jcyjAX0025).

作者简介:龙天渝(1960—),女,教授,博士生导师,主要从事水污染控制与水环境模拟研究,(Email) longty128@cqu.edu.cn。

重庆位于长江上游,是中国西南地区重要的水陆交通枢纽,其主城区河段集中分布着港客货码头。三峡库区建成蓄水后,水动力学条件发生巨大变化,主要表现在长江、嘉陵江流速减缓,水面抬高,泥沙淤积,对重庆主城区河段的航运、防洪、市政基础设施造成了重大影响。根据长江水利委员会发布的 2018 年《长江泥沙公报》显示,自 2003 年 6 月三峡水库蓄水以来库区淤积泥沙累计 $1.773 3 \times 10^9 \text{ t}^{[1]}$ 。

由于重庆特殊的地势,主城沿长江和嘉陵江两岸建设的排水干管形式多样,有埋管、顶管、架空箱涵等。受三峡库区蓄水影响,水面抬高,致使来往船舶极易碰撞排水干管;而且两江四岸作为城区开发热点区域,常因建筑施工造成干管断裂。这类事故的发生具有时空不确定性,一旦发生则直接导致排水干管断裂,引发市政污水直排长江的重大污染事故。

长江水体的水质安全具有十分重要的意义,不少学者采用数值模拟方法对长江的水质进行了研究,如孙志林等^[2]针对长江口和杭州湾的水体交汇,建立大范围二维潮流数学模型,研究了交汇处保守物质质量浓度的时间变化;李文杰^[3]利用 MIKE 三维数值模型,建立长江口及附近水域大尺度数值模型,分析了北支中束窄工程对附近水域水动力、盐度及水质的影响;熊亚^[4]应用二维稳态混合衰减模式和计算流体力学水质模型,研究了陈家山闸排放口污染物对白沙洲水厂取水水质的影响。值得一提的是,由于上游地形复杂,基础数据相对不足,现有研究更多集中于长江中下游河段,而针对长江重庆主城区段以及长江上游的研究不多,特别是三峡水库 175 m 蓄水以来的重庆段有关水质模拟鲜见报道。自 175 m 蓄水以来,长江重庆段与蓄水前以及中下游段水力学条件差异十分显著。在此条件下,针对重庆段的水质模拟可弥补以往长江上游河段模拟研究的空缺,具有重要的理论和实际意义。重庆地区水资源相对匮乏,时空分布不均匀,空间上呈现东部多,西部少的特点。重庆水利局 2017 年水资源公报显示,2017 年全市地表水资源量 $6.561 464 \times 10^{10} \text{ m}^3$,地下水资源量 $1.161 378 \times 10^{10} \text{ m}^3$,而长江、嘉陵江及其支流等过境水资源十分丰富,其中长江多年平均年径流量 $3.434 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ^[5]。因此长江、嘉陵江及其支流成为重庆市重要的饮用水源,给水厂大多沿江分布。一旦长江、嘉陵江等河段发生水污染事件,将严重威胁市区供水安全,进而影响社会生活和生产活动。

笔者主要针对排水管网破裂引发污水直排长江的突发性污染事故,从建立突发污染事故应急响应体系出发,以长江重庆主城区河段作为研究区域,分别在丰、枯水期不同水动力条件、不同工况下模拟事故发生时各类污染物(BOD₅、COD、TN、TP)迁移扩散过程^[6-8],并考虑嘉陵江汇流影响,采用优化反演法对糙率进行优化选择,预测各给水厂取水口处污染物质量浓度变化规律,研究成果可为应急抢险方案的优化提供科学依据。

1 数学模型

1.1 研究河段及河床标高

研究区域为长江重庆主城区河段,包括长江干流大渡口至铜锣峡长约 40 km、嘉陵江井口至朝天门长约 20 km。重庆主城区河道在平面上呈连续弯曲的形态,弯道段与顺直过渡段长度所占比例约为 1:1(图 1)。

结合地理信息系统软件(ArcGIS 10.2)读取长江水利委员会于主城区河段布设的 60 个断面测量控制点及沿程测量控制点数据,利用克里金插值法生成 DEM 数字高程图层^[9-10]。主要断面的位置和名称见表 1。

表 1 长江重庆主城区河段部分断面布设信息

Table 1 Water-quality monitoring sections and their locations in the portion of the Yangtze River running through the main urban areas of Chongqing City

断面名称	位置	断面名称	位置	断面名称	位置	断面名称	位置	断面名称	位置
CY01	铜锣峡	CY11	大佛寺	CY21	猪儿石	CY31	九堆子	CY41	江北嘴
CY02	唐家沱	CY12	塔子山	CY22	海棠溪	CY32	九堆子	CY42	金沙碛
CY03	唐家沱	CY13	青草坝	CY23	南纪门	CY33	九龙坡	CY43	金沙碛
CY04	鸡冠石	CY14	弹子石	CY24	珊瑚坝	CY34	鱼背	CY44	金沙碛
CY05	土地滩	CY15	沙嘴	CY25	菜园坝	CY35	军渡	CY45	黄花园
								CY51	忠恕沱
								CY52	土湾
								CY53	中渡口
								CY54	高家花园
								CY55	磁器口

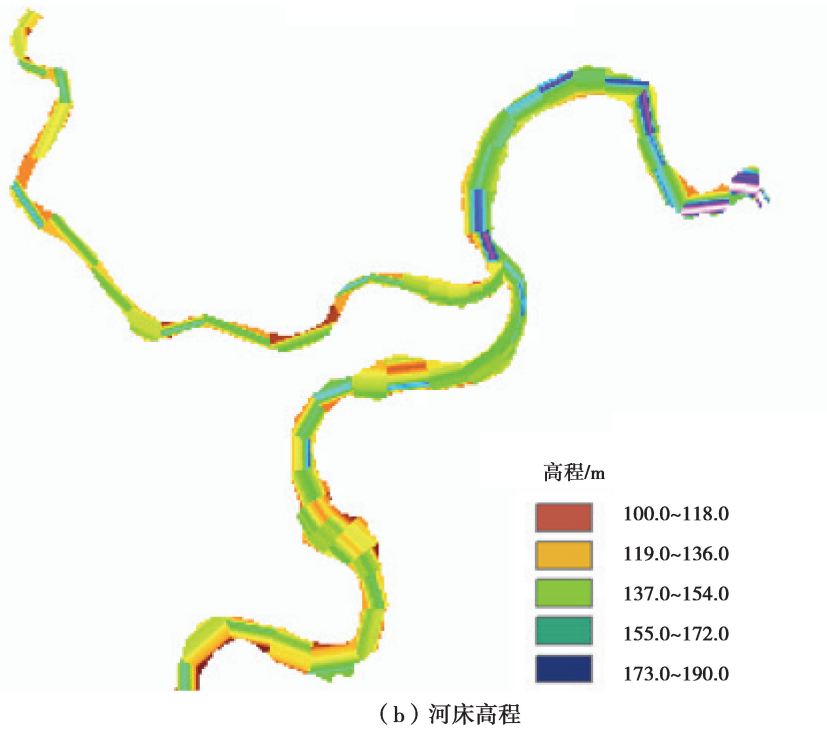
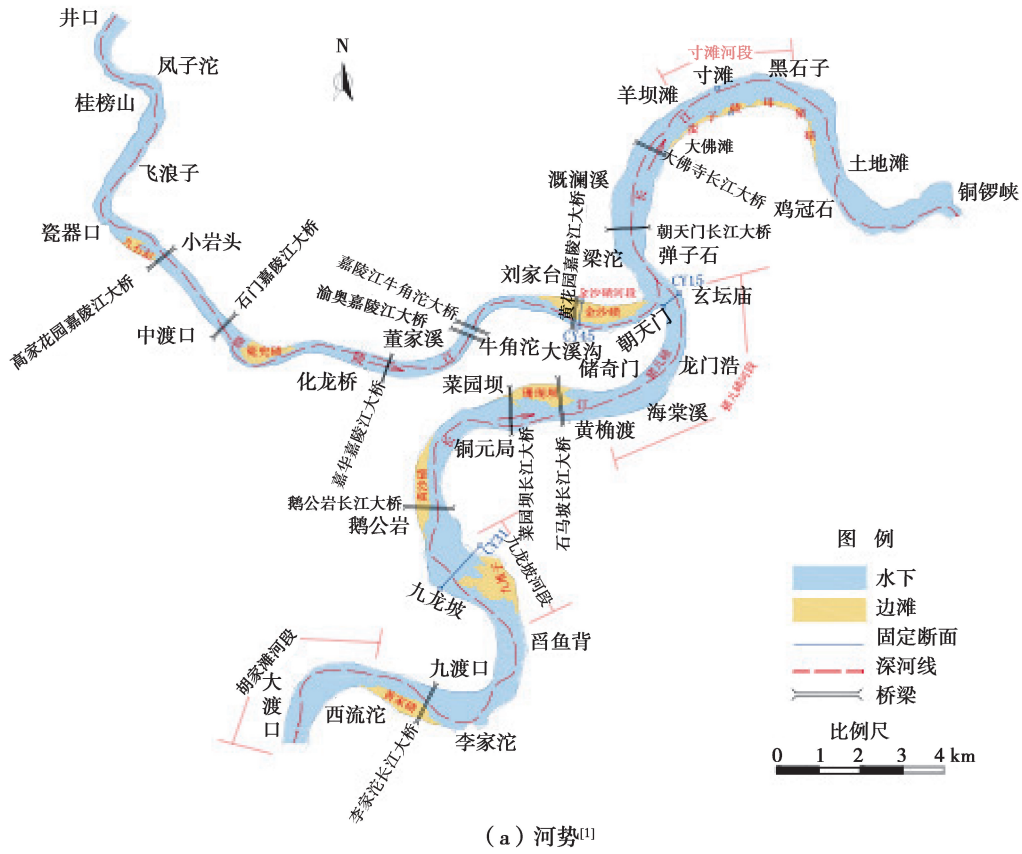


图 1 长江重庆主城区段河势及河床高程

Fig. 1 River regime and riverbed elevation of the portion of the Yangtze River running through the main urban areas of Chongqing City

1.2 水动力方程

研究河段较长,河长远大于水深,因此采用水深平均的二维水动力方程组^[11-12]。方程组包括连续性方程和动量方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{gun^2}{h^{\frac{1}{3}}} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} - \xi V_a^2 \cos \Psi - 2h\nu\omega \sin \Phi = 0; \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{gun^2}{h^{\frac{1}{3}}} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} - \xi V_a^2 \cos \Psi - 2h\nu\omega \sin \Phi = 0. \quad (3)$$

式中: h 为水深; x 、 y 为笛卡尔直角坐标系坐标; t 为时间; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速分量; ρ 为流体密度; E_{xx} 、 E_{xy} 、 E_{yx} 、 E_{yy} 分别为 x 轴的法线方向、 y 轴的法线方向、 xy 表面上的切线方向和 yx 表面上的切线方向的涡动黏滞系数; g 为重力加速度; a 为河床高程; n 为曼宁糙率系数; ξ 为风应力系数; V_a 为风速; Ψ 为风向; ω 为地球自转角速度; Φ 为当地纬度。

1.3 水质方程

假定污染物沿水深方向完全混合,采用水深平均的二维水质方程。

$$\frac{\partial (hc)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (huc) + \frac{\partial}{\partial y} (hvc) = \frac{\partial}{\partial x} \left(hD_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hD_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + S_i + S_o, \quad (4)$$

式中: c 为污染物断面平均质量浓度; D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向的扩散系数; S_i 为相关污染物的反应项; S_o 为污染物衰减造成的源和汇项。

1.4 初始条件与边界条件

初始条件:本研究中采用鸡冠石污水处理厂和唐家沱污水处理厂的监测数据作为管道破损处的污染物质量浓度。根据重庆市近年来水资源年度公报显示,长江干流及嘉陵江重庆评价河段全年期水质为 II 类,排水管网破损处泄漏的污染物质量浓度远高于江水中的质量浓度,因此在本研究中设定两江水体污染物的本底质量浓度值为 0,并且污水在排水管道内质量浓度均匀。

边界条件:模型选取朱沱站水文数据作为长江上游控制边界,北碚站水文数据作为嘉陵江上游控制边界,寸滩站水文数据作为长江下游控制边界。

2 模型参数率定及验证

2.1 参数率定

涡动黏滞系数通过设置 Smagorinsky 系数来自动调整,查阅 Smagorinsky 系数参考表,其取值范围为 0.094~0.200,通过反复试算校核最终取值 0.15^[11];扩散系数通过实测水文数据直接设置,取值 30 m²/s;根据查阅相关文献成果及参照类似河道,BOD₅、COD 衰减系数值变化范围小于等于 0.35 d⁻¹、TN 的衰减系数可取 0.15~0.57 d⁻¹、TP 的衰减系数与 TN 相似,其衰减系数分别取值为 0.35 d⁻¹、0.35 d⁻¹、0.25 d⁻¹、0.20 d⁻¹^[13-15]。

河道糙率受到流量、水深等水力要素的影响,三峡水库蓄水至 175 m 水位后,水动力的变化将会导致河道糙率的变化,而河道糙率的精度对模拟结果影响很大,因此,本研究采用优化反演方法确定糙率。根据原有的糙率值,确定其范围,结合各段水文站流量、水位等实测数据利用曼宁公式反推糙率。经过对实际糙率数据的分析发现,糙率的变化随着水深增加而减小。

2.2 模型验证

借助 SMS(surface-water modeling system)软件,采用有限元方法对研究河段的水动力和水质进行数值模拟。

分别选取 2012 年朱沱站、北碚站和寸滩站丰、枯水期流量和水位数据的均值,对 2012 年 8 月、11 月寸滩

站逐日水位模拟数据进行验证。结果表明,模拟值与实测值吻合度较高(见图 2),能够较好地反映研究区域流场特征;水动力的良好模拟为水质模拟奠定了可靠的水动力条件。

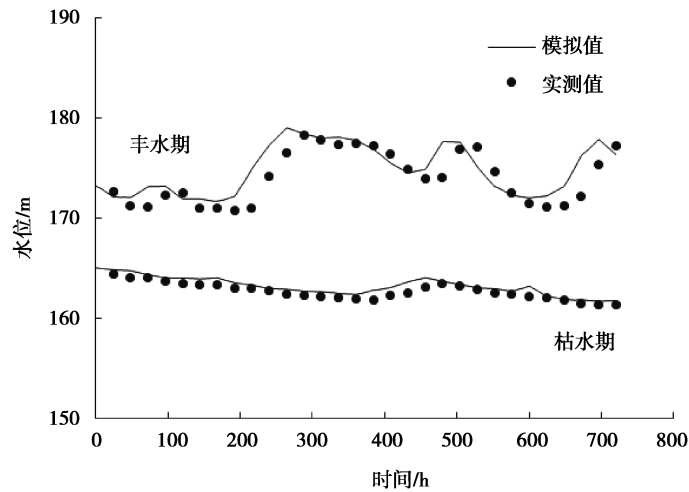


图 2 寸滩站水动力模型验证

Fig. 2 Hydrodynamic model verification of Cuntan Station

3 排水管破裂对下游取水口水质的影响

3.1 工况设置

目前长江嘉陵江河段两岸部分区域排水主干管外置裸露,仅设有简单的混凝土护栏,保护结构单一,抗冲击能力弱。在汛期受水位上涨及地理位置影响,管段易受到风浪拍打、船舶撞击等外力作用,导致管段破裂。根据相关部门提供的资料及实地调研,确定 4 个易撞位置,分别位于寸滩码头、李子坝、九滨路和南滨路。选取南滨路作为此次突发水污染事故发生地(位置见图 3)进行模拟,分别针对丰水期(5 月—10 月)、枯水期(11 月—来年 4 月)不同水动力条件,对各水厂取水口处污染物质量浓度的时空分布进行数值模拟。在每个水期,设定 2 种工况。工况一:事故发生 24 h 后,排水箱涵破裂处瞬时完全修复;工况二:事故发生 48 h 后,排水箱涵破裂处瞬时完全修复^[16-18]。



图 3 事故发生区域示意

Fig. 3 Indication of accident area

水动力边界条件分别取朱沱站、北碚站、寸滩站 2012 年流量和水位数据的均值,丰水期为 $14\,785\text{ m}^3$ 、 $4\,255\text{ m}^3$ 、 168.67 m ,枯水期为 $4\,091.67\text{ m}^3$ 、 829.17 m^3 、 160.70 m ;箱涵断裂处污染物 BOD_5 、 COD 、 TN 、 TP 质量浓度取鸡冠石污水处理厂检测值均值,丰水期分别为 117.84 mg/L 、 333.29 mg/L 、 39.48 mg/L 、 4.54 mg/L ,枯水期分别为 128.42 mg/L 、 305.46 mg/L 、 35.24 mg/L 、 4.92 mg/L ;污染物泄漏量取 $1.66\text{ m}^3/\text{s}$ 。

根据《重庆市饮用水源保护区划分规定》,长江、嘉陵江重庆段沿岸区县(自治县、市)城市(镇)集中式饮用水源保护区一级保护区水域卫生防护带范围为:给水厂取水口上游 $1\,000\text{ m}$,下游 100 m 的同侧江水水域(以中泓为界)^[19]。饮用水源一级保护区水质执行国家《地面水环境质量标准》(GB 3838—2002)II 类标准^[20],并符合国家《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—85)的要求^[21]。在本研究中选取 II 类水质标准作为临界值,即: $\text{BOD}_5\ 3\text{ mg/L}$, $\text{COD}\ 15\text{ mg/L}$, $\text{TN}\ 0.2\text{ mg/L}$, $\text{TP}\ 0.02\text{ mg/L}$ 。

3.2 丰水期模拟结果及分析

丰水期水动力流场如图 4,不同工况下排水管破裂突发水污染事故下游各给水厂取水口污染物质量浓度的模拟结果如图 5 和 6 所示^[22-25]。

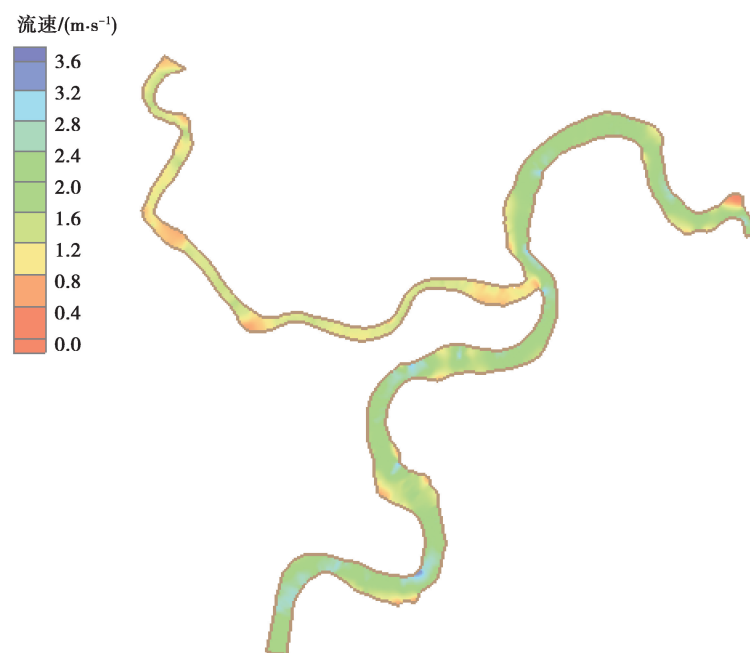


图 4 丰水期水动力流场

Fig. 4 Hydrodynamic flow field during the high water period

分析各取水口污染物质量浓度变化曲线得知:污染事故发生后,距事故发生地最近的黄桷渡水厂取水口约在 8.5 h 后 BOD_5 、 COD 、 TN 、 TP 等污染物质量浓度超过临界值 II 类水体标准;玄坛庙水厂取水口约在 14.5 h 后 BOD_5 、 TN 、 TP 质量浓度超过临界值, COD 未超标;合成水厂由于相距较远,约在 27.5 h 后 TN 、 TP 质量浓度超过临界值, BOD_5 、 COD 未超标。因在运移扩散的过程中得到充分的稀释,各取水口处污染物质量浓度峰值随距离的增大而减小。

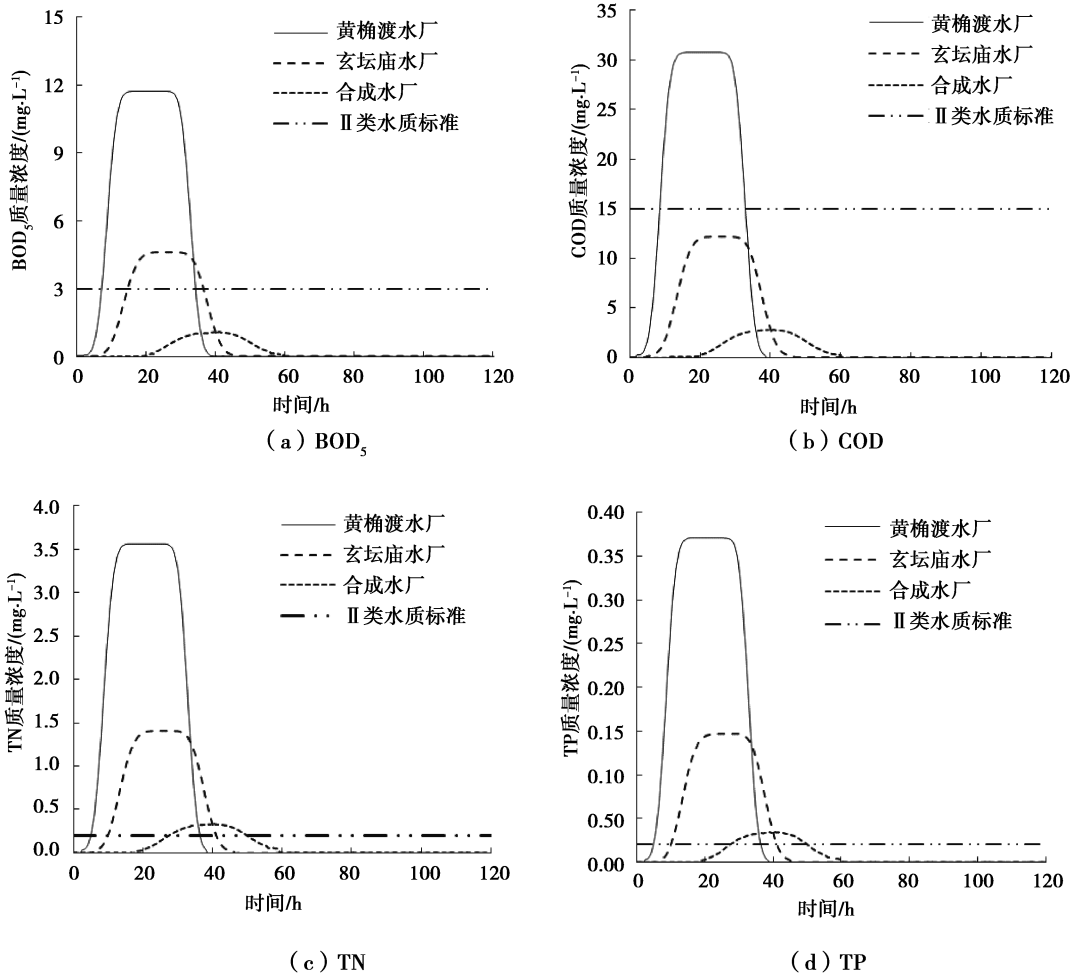
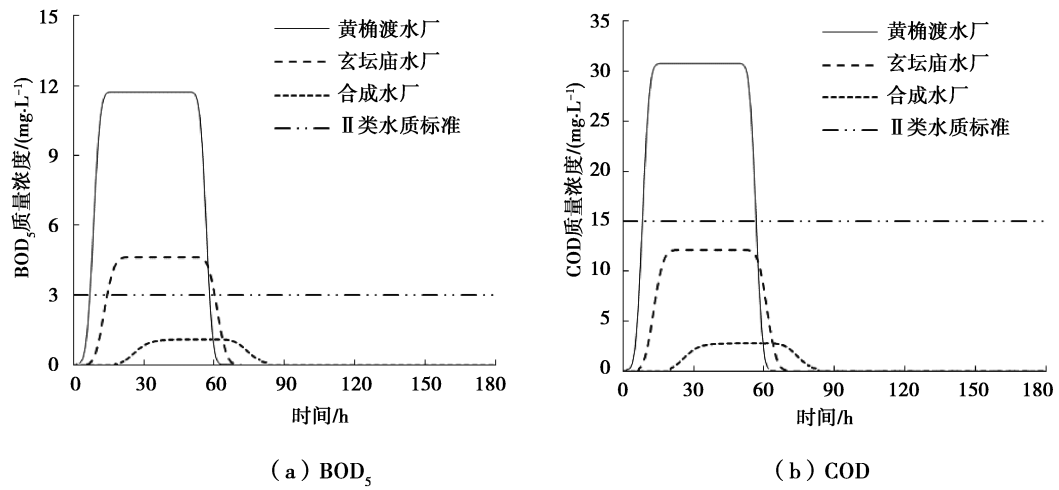


图 5 丰水期工况一情境下各取水口污染物质量浓度变化

Fig. 5 Changes of pollutant concentrations concentrations at different intakes in working condition 1 of high water period



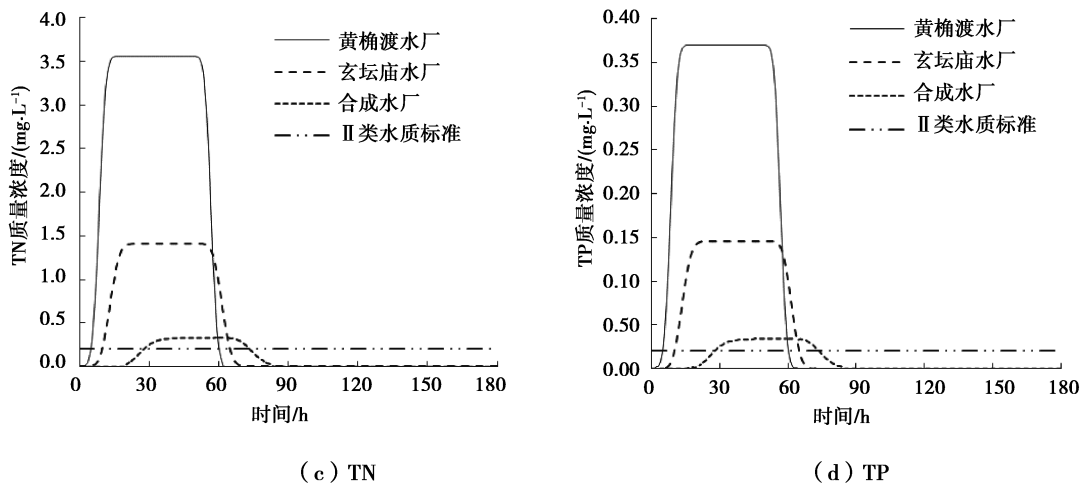


图 6 丰水期工况二情境下各取水口污染物质量浓度变化

Fig. 6 Changes of pollutant concentrations at different intake in working condition 2 of high water period

在工况一:箱涵 24 h 后完全修复情况下,黄桷渡水厂、玄坛庙水厂、合成水厂取水口污染物质量浓度分别约在 36.5,41.2,50.0 h 后降到临界值以下;在工况二:箱涵 48 h 后完全修复情况下,黄桷渡水厂、玄坛庙水厂、合成水厂取水口污染物质量浓度分别约在 60.2,64.9,73.5 h 后降到临界值以下。各水厂取水口分类污染物质量浓度特征值如表 2 和 3 所示。

表 2 丰水期工况一情境下各水厂分类污染物时间特征值

Table 2 Time characteristic values of classified pollutants by each water plant in working condition 1 of high water period

水厂	水质指标	事故应急响应时间/h	恢复时间/h
黄桷渡水厂	BOD ₅	7.0	34.0
	COD	8.5	33.0
	TN	5.0	36.5
	TP	4.8	36.3
玄坛庙水厂	BOD ₅	14.5	36.5
	COD		
	TN	10.0	41.2
	TP	9.8	41.0
合成水厂	BOD ₅		
	COD		
	TN	27.5	50.0
	TP	27.3	50.0

表 3 丰水期工况二情境下各水厂分类污染物时间特征值

Table 3 Time characteristic values of classified pollutants by each water plant in working condition 2 of high water period

水厂	水质指标	事故应急响应时间/h	恢复时间/h
黄桷渡水厂	BOD ₅	7.0	58.0
	COD	8.5	56.8
	TN	5.0	60.2
	TP	4.8	60.2
玄坛庙水厂	BOD ₅	14.5	60.0
	COD		
	TN	10.0	64.9
	TP	9.8	64.9
合成水厂	BOD ₅		
	COD		
	TN	27.5	73.7
	TP	27.3	73.5

3.3 枯水期模拟结果及分析

枯水期水动力流场如图 7, 不同工况下排水管破裂突发水污染事故下游各给水厂取水口污染物质量浓度的模拟结果如图 8 和 9 所示。

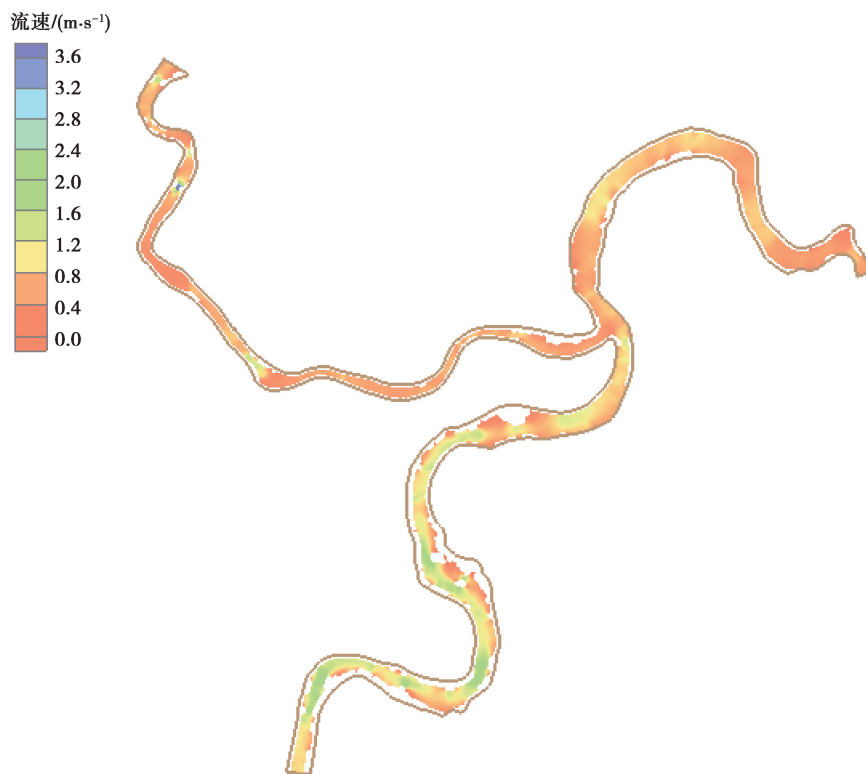


图 7 枯水期水动力流场

Fig. 7 Hydrodynamic flow field during the low water period

分析各取水口污染物质量浓度变化曲线得知:污染事故发生后,黄桷渡水厂取水口约在 19.4 h 后 BOD₅、COD、TN、TP 等污染物质量浓度超过临界值 II 类水体标准;玄坛庙水厂取水口约在 33.5 h 后 BOD₅、TN、TP 质量浓度超过临界值,COD 未超标;合成水厂约在 74.6 h 后 TN、TP 质量浓度超过临界值,BOD₅、COD 未超标。

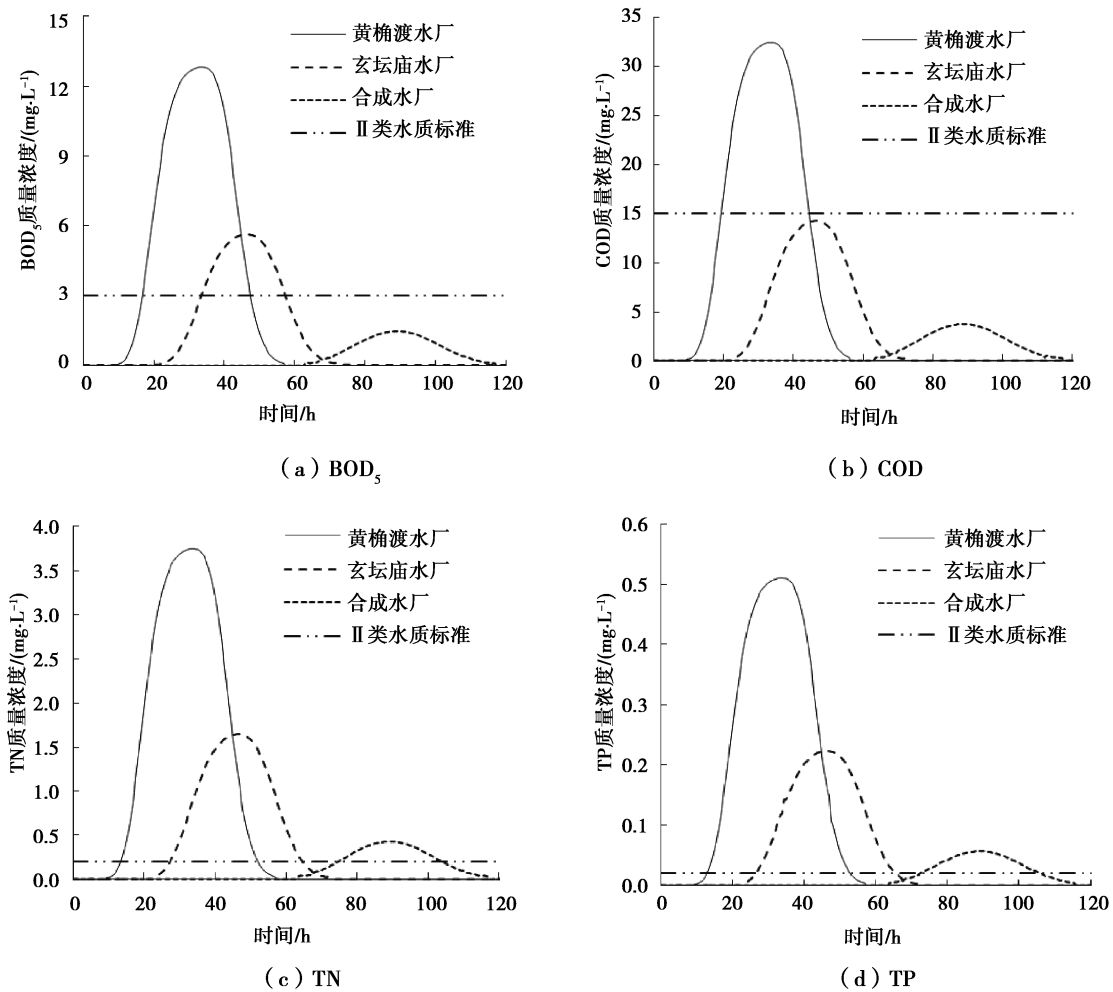
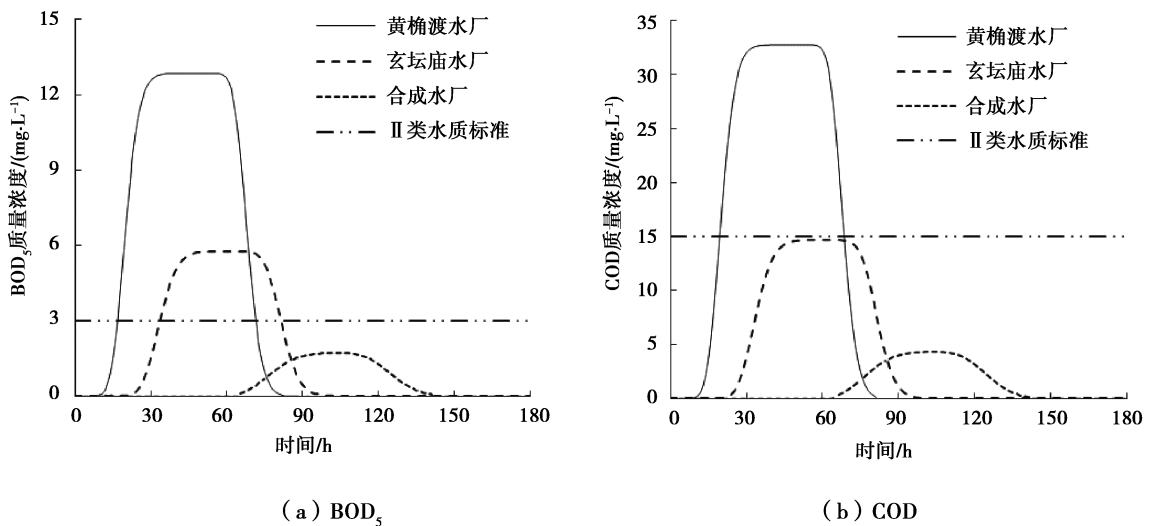


图 8 枯水期工况一情境下各取水口污染物质量浓度变化

Fig. 8 Changes of pollutant concentrations at different intakes in working condition 1 of low water period



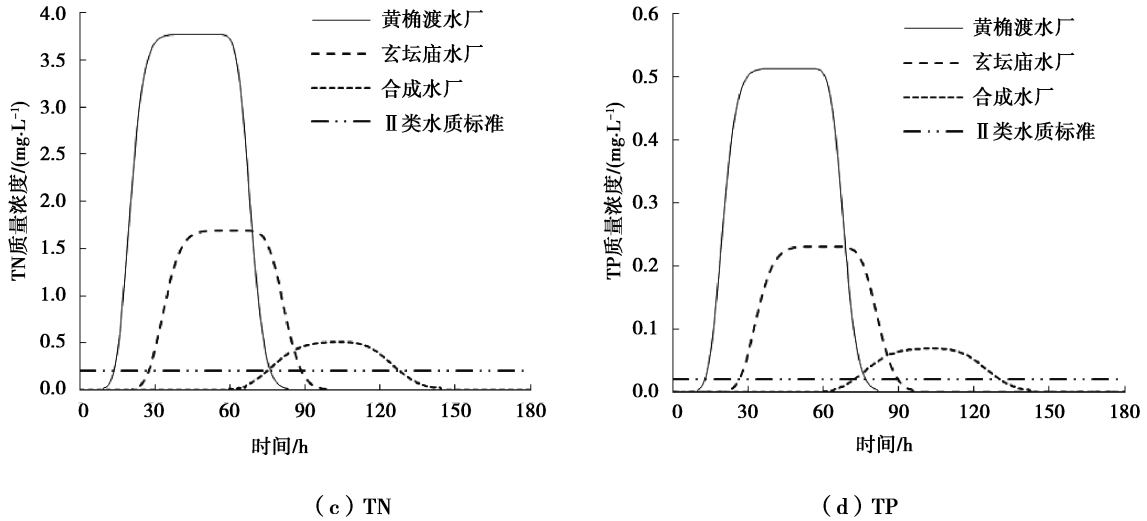


图 9 枯水期工况二情境下各取水口污染物质量浓度变化

Fig. 9 Changes of pollutant concentrations at different intakes in working condition 2 of low water period

在工况一:箱涵 24 h 后完全修复情况下,黄桷渡水厂、玄坛庙水厂、合成水厂取水口污染物质量浓度分别约在 52.7 h、65.8 h、106.4 h 后降到临界值以下;在工况二:箱涵 48 h 后完全修复情况下,黄桷渡水厂、玄坛庙水厂、合成水厂取水口污染物质量浓度分别约在 76.9 h、89.7 h、130.5 h 后降到临界值以下。各水厂取水口分类污染物质量浓度特征值如表 4 和表 5 所示。

表 4 枯水期工况一情境下各水厂分类污染物时间特征值

Table 4 Time characteristic values of classified pollutants by each water plant in working condition 1 of low water period

水厂	水质指标	事故应急响应时间/h	恢复时间/h
黄桷渡水厂	BOD ₅	16.8	47.4
	COD	19.4	44.6
	TN	13.5	52.0
	TP	12.8	52.7
玄坛庙水厂	BOD ₅	33.5	57.6
	COD		
	TN	27.5	64.6
	TP	26.7	65.8
合成水厂	BOD ₅		
	COD		
	TN	74.5	103.7
	TP	72.5	106.4

表 5 枯水期工况二情境下各水厂分类污染物时间特征值
 Table 5 Time characteristic values of classified pollutants by each water plant in working condition 2 of low water period

水厂	水质指标	事故应急响应时间/h	恢复时间/h
黄桷渡水厂	BOD ₅	16.8	71.5
	COD	19.4	68.7
	TN	13.5	76.2
	TP	12.8	76.9
玄坛庙水厂	BOD ₅	33.5	81.6
	COD		
	TN	27.5	88.8
	TP	26.7	89.7
合成水厂	BOD ₅		
	COD		
	TN	74.5	128.1
	TP	72.5	130.5

4 结 论

长江、嘉陵江作为重庆主城区重要饮用水源地,其水体水质安全直接影响供水安全,对维持正常的社会生产生活意义重大。笔者借助 SMS 地表水模型,建立长江重庆主城区段水动力水质模型,分别在丰、枯水期不同水文条件下对不同工况(断裂箱涵 24 h、48 h 后完全修复)下污染物运移扩散过程进行模拟,定量预测污染物在各给水厂取水口处质量浓度变化,可为应急抢险和水质安全保障提供决策支持。

模拟结果表明,丰水期由于上游来水流量及流速较大,黄桷渡水厂、玄坛庙水厂、合成水厂取水口处的污染物质量浓度在较短的时间内超过临界值(II 类水),分别为 8.5, 14.5, 27.5 h,而在不同工况下恢复临界值以下时间大致接近,分别在完全修复后约 12.5, 17.2, 26.0 h 后恢复;在枯水期因上游流量及流速较小,导致污染物迁移较慢,各给水厂取水口处污染物质量浓度超过临界值的时间较丰水期晚,分别为 19.4, 33.5, 74.5 h,且持续时间及完全修复后水质恢复时间较长,分别约为 28.9, 41.8, 82.5 h。

通过分析发现突发水污染事故在枯水期对给水厂影响更为严重,建议相关部门针对丰、枯水期不同水文特点,分别制定适合的应急抢险措施,并加强给水厂应急能力,确保饮用水源安全,维护社会生产生活稳定。

参考文献:

- [1] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2018[M]. 武汉:长江出版社, 2019.
Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Changjiang sediment bulletin 2018[M]. Wuhan: Changjiang Publishing House, 2019.(in Chinese)
- [2] 孙志林, 杜利华, 龚玉萌, 等. 长江口和杭州湾污染物稀释扩散及交汇数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2019, 37(2): 68-75.
SUN Zhilin, DU Lihua, GONG Yumeng, et al. Numerical simulation of contaminant dilution and diffusion and convergence in Yangtze River estuary and Hangzhou Bay[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(2): 68-75.(in Chinese)
- [3] 李文杰. 长江口北支中束窄工程对周边水动力和水质影响的数值模拟研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2017.
LI Wenjie. Numerical simulation of effects on hydrodynamic and water quality of the north branch middling narrowing in Yangtze estuary[D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2017.(in Chinese)
- [4] 熊亚. 陈家山闸出水对白沙洲水厂取水水质影响模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

- XIONG Ya. Simulation study of the effect of effluent of Chenjiashan gate on source water quality of baishizhou waterworks [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.(in Chinese)
- [5] 重庆市水利局. 重庆市水资源公报 2017 [EB/OL]. [2019-03-25]. [https:// max. book118. com/html/2019/0208/6151215134002005.shtm](https://max.book118.com/html/2019/0208/6151215134002005.shtm).
- Chongqing Water Conservancy Bureau. Chongqing water resources bulletin 2017 [EB/OL]. [2019-03-25]. [https:// max. book118. com/html/2019/0208/6151215134002005.shtm](https://max.book118.com/html/2019/0208/6151215134002005.shtm). (in Chinese)
- [6] Shi S G, Cao J C, Feng L, et al. Construction of a technique plan repository and evaluation system based on AHP group decision-making for emergency treatment and disposal in chemical pollution accidents[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 276: 200-206.
- [7] Xin X K, Yin W, Wang M. Reservoir operation schemes for water pollution accidents in Yangtze River[J]. Water Science and Engineering, 2012, 5(1): 59-66.
- [8] Grifoll M, Jordà G, Espino M, et al. A management system for accidental water pollution risk in a harbour: the Barcelona case study[J]. Journal of Marine Systems, 2011, 88(1): 60-73.
- [9] 丁贤荣, 徐健, 姚琪, 等. GIS 与数模集成的水污染突发事件时空模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(2): 203-206.
- DING Xianrong, XU Jian, YAO Qi, et al. GIS and numerical model integrated for space-time simulation of sudden water pollution[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31(2): 203-206.(in Chinese)
- [10] Rui Y, Shen D, Khalid S, et al. GIS-based emergency response system for sudden water pollution accidents [J]. Physics and Chemistry of the Earth: Parts A/B/C, 2015, 79/80/81/82: 115-121.
- [11] 马莉. 淮河水系风台至淮南主城区段水动力学及水质数学模型研究[D]. 安徽淮南: 安徽理工大学, 2012.
- MA Li. On hydrodynamic and water quality mathematical of Huaihe river between Fengtai to Huainan urban section [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2012.(in Chinese)
- [12] Zhou J Z, Song L X, Kursan S, et al. A two-dimensional coupled flow-mass transport model based on an improved unstructured finite volume algorithm[J]. Environmental Research, 2015, 139: 65-74.
- [13] 张亚丽, 申剑, 史淑娟, 等. 淮河支流污染物综合降解系数动态测算[J]. 中国环境监测, 2015, 31(2): 64-67.
- ZHANG Yali, SHEN Jian, SHI Shujuan, et al. Dynamic change of the river pollutions' composite degradation coefficient in Huaihe river's tributary[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(2): 64-67.(in Chinese)
- [14] 陶威, 刘颖, 任怡然. 长江宜宾段氨氮降解系数的实验室研究[J]. 污染防治技术, 2009, 22(6): 8-9, 20.
- TAO Wei, LIU Ying, REN Yiran. Study on ammonia nitrogen degradation coefficient in Yibin section of Yangtze River [J]. Pollution Control Technology, 2009, 22(6): 8-9, 20.(in Chinese)
- [15] 王晓青. 三峡工程蓄水对澎溪河回水区 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 综合衰减系数的影响[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 325-329.
- WANG Xiaoqing. Effect of the three-gorge project impoundment on the COD_{Mn} , $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP fall coefficients[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 325-329.(in Chinese)
- [16] 陶亚, 雷坤, 夏建新. 突发水污染事故中污染物输移主导水动力识别: 以深圳湾为例[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 888-897.
- TAO Ya, LEI Kun, XIA Jianxin. Main hydrodynamic factors identification for pollutant transport in sudden water pollution accident in Shenzhen Bay[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6): 888-897.(in Chinese)
- [17] 张婷, 王学雷, 耿军军, 等. 基于 MIKE21 和灰色模式识别模型的洪湖水质模拟与评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(9): 2090-2100.
- ZHANG Ting, WANG Xuelei, GENG Junjun, et al. Application of the MIKE21 and grey-mode identification model to monitor and assess water quality for Honghu lake[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(9): 2090-2100.(in Chinese)
- [18] Zhang T, Ban X, Wang X L, et al. Analysis of nutrient transport and ecological response in Honghu Lake, China by using a mathematical model[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 418-428.
- [19] 重庆市人民政府. 重庆市人民政府关于印发重庆市饮用水源保护区划分规定的通知[J]. 重庆市人民政府公报, 2002 (23): 15-21.
- Chongqing Municipal People's Government. Notice of the Chongqing Municipal People's Government on printing and

- distributing the provisions on the classification of drinking water source protection areas in Chongqing [J]. Gazette of Chongqing Municipal People's Government, 2002 (23): 15-21.(in Chinese)
- [20] 中华人民共和国环境保护部.地面水环境质量标准: GB 3838-2002 [S/OL]. [2019-03-25]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%9C%B0%E9%9D%A2%E6%B0%B4%E7%8E%AF%E5%A2%83%E8%B4%A8%E9%87%8F%E6%A0%87%E5%87%86/628661?fr=aladdin>.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental quality standard for surface water: GB 3838-2002 [S/OL]. [2019-03-25]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%9C%B0%E9%9D%A2%E6%B0%B4%E7%8E%AF%E5%A2%83%E8%B4%A8%E9%87%8F%E6%A0%87%E5%87%86/628661?fr=aladdin>. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国卫生部.生活饮用水卫生标准: GB 5749-2006 [S/OL]. [2019-03-25]. <https://baike.baidu.com/item/%E7%94%9F%E6%B4%BB%E9%A5%AE%E7%94%A8%E6%B0%B4%E5%8D%AB%E7%94%9F%E6%A0%87%E5%87%86/9867259?fr=aladdin>.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality: GB 5749-2006 [S/OL]. [2019-03-25]. <https://baike.baidu.com/item/%E7%94%9F%E6%B4%BB%E9%A5%AE%E7%94%A8%E6%B0%B4%E5%8D%AB%E7%94%9F%E6%A0%87%E5%87%86/9867259?fr=aladdin>. (in Chinese)
- [22] Ban X, Yu C, Pan B Z, et al. Application of the CWQII method and a 2D water quality model to assess diversion schemes for East Lake (Donghu), Wuhan, China[J]. Lake and Reservoir Management, 2014, 30(4): 358-370.
- [23] Quinn N W T, Yang Z L. Review of Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries by Zhen-Gang Ji. Second edition[J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 115: 211-212.
- [24] 刘璐瑶, 冯民权, 张茜. 引汉济渭工程水源区突发水污染事故模拟研究[J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(6): 130-136. LIU Luyao, FENG Minquan, ZHANG Qian. Simulation of water pollution diffusion in the water source area of Hanjiang-to-Weihe river water diversion project[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2018, 41(6): 130-136.(in Chinese)
- [25] 舒长莉, 李林, 冯韬. 基于 MIKE21 的河道饮用水源地突发污染事故模拟: 以赣江南昌段为例[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 73-77. SHU Changli, LI Lin, FENG Tao. Simulation of emergent water pollution accident in river-type drinking water sources based on MIKE 21: case of Nanchang reach of Ganjiang River[J]. Yangtze River, 2019, 50(3): 73-77.(in Chinese)

(编辑 罗 敏)