



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.018

任朋, 武永新, 蒋书伟, 等. 城市供水河道抵御突发性水污染事故水利调控措施[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 122-126. REN Peng, WU Yongxin, JIANG Shuwei, et al. Water regulation measures for sudden water pollution accidents in urban water supply channels[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 122-126. (in Chinese)

# 城市供水河道抵御突发性水污染事故水利调控措施

任朋, 武永新, 蒋书伟

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 城市建设的过程中, 要加强供水河道抵御突发性污染事故的能力。以南渡江下游的海口市供水河道为例, 建立突发性水污染事故的水动力水质模型, 分析污染物到达龙塘取水口的时间及影响历时。提出在龙塘取水口上游建立节制闸和应急渠道, 将上游突发水污染事故产生的污染物云团引排到应急渠道中的措施。水动力水质模拟结果表明, 该措施可以有效减少南渡江河流中的污染物总量, 使突发性水污染事故不会对供水河道的供水产生影响。

**关键词:** 城市供水河道; 突发性污染事故; 水动力模型; 水质模型; 水利调控措施

**中图分类号:** X522    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0122-05

## Water regulation measures for sudden water pollution accidents in urban water supply channels

REN Peng, WU Yongxin, JIANG Shuwei

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In the process of urban construction, it is necessary for water supply channels to strengthen their ability to withstand sudden pollution accidents. Taking the water supply channels of Haikou city in the lower reaches of Nandu River as an example, we established a hydrodynamic and water quality model and used it to analyze the arrival time and impact duration of pollutants. We proposed that check sluices and emergency channels should be built ahead of the Longtang intake to guide the pollution clouds generated from accidents in the upper reaches into the emergency channel. According to the simulation results of the hydrodynamic and water quality model, this measure could reduce effectively the amount of pollutants in Nandu River and prevent sudden water pollution accidents from affecting the water supply of the channels.

**Key words:** urban water supply channel; sudden water pollution accident; hydrodynamic model; water quality model; water regulation measure

近年来, 我国城市供水河道水源地突发性水污染事件日益增加, 严重威胁到城市供水系统的安全<sup>[1]</sup>。河道突发性水污染事故作为破坏河道生态的一种潜在威胁, 其具有不确定性, 高频性以及极强的破坏性<sup>[2,3]</sup>。故在城市建设过程中, 需要对城市供水河道突发性水污染事故进行研究。对此, 许多学者针对水污染事故发生状况进行大量的模拟研究<sup>[4]</sup>, 于磊等<sup>[5]</sup>利用 MIKE21FM 模型, 对位于交通节点

附近的大宁水库库尾进行突发性水污染事故模拟, 并研究了在不同情境下污染物的扩散规律; 张波等<sup>[6]</sup>以 2006 年松花江发生的水事故为例, 运用一维河流水质系统动力学模型对特征污染物硝基苯浓度的时空变化进行了动态仿真模拟; 王浩等<sup>[7]</sup>为加强南水北调中线工程突发性水污染事故的应急防治与管理, 建立“数值模拟-评价诊断-溯源预测-应急调控-污染处理”五大环节于一体的突发水污染应

收稿日期: 2016-06-07    修回日期: 2016-07-20    网络出版时间:

网络出版地址:

作者简介: 任朋(1991-), 男, 山东临沂人, 主要从事水工结构工程方面研究。E-mail: 1217263738@qq.com

通讯作者: 武永新(1962-), 男, 天津人, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 主要从事水工结构工程方面研究。E-mail: 13502054115@163.com

急调控与处理技术。在应对水污染突发事件的措施研究中,陶亚<sup>[8]</sup>等通过对设定的一起模拟事故采取不同应急措施进行定量模拟与讨论,得出各种措施的影响效果:活性炭吸附>聚合氯化铝絮凝沉淀>引水冲污;吴辉明<sup>[9]</sup>等针对淮河干流段突发水污染事故应急措施进行模拟分析,认为利用引水对污染物进行稀释的方法加快了污染云团向下游移动的速度,在初始时刻也加大污染物纵向离散长度,留给下游敏感区域的应急时间将减少;同样,马小雪<sup>[10]</sup>等模拟了盐城蟒蛇河突发性水污染事故中不同调水方案下的污染物运移过程,定量模拟了突发性水污染事故发生后,不同引排水流量对污染物下移的影响。

通过对以往的研究总结可知:引水冲污措施只是加快污染物云团向下游的移动,缩短了对下游取水口的影响历时,也稀释了污染物,当下游存在水利枢纽时,需进行排水换水,造成大量水体流失;对于一些物理化学措施,往往会对水体产生二次污染。为实现城市供水河道在发生突发性污染事故时其供水不受影响,本文根据南渡江下游河道基础资料,建立水动力水质模型,预测污染物云团在南渡江河道的传输规律以及到达龙塘取水口的时间,并根据水动力水质模型预测的污染物云团的传输规律确定合理的闸门启闭时间。

## 1 研究地域概况

南渡江主干流长 334 km,是海南岛第一大河流,其中在海口市境内长约 75 km。河道平均坡降 0.72‰,总落差 703 m,流域形态呈狭长形,平均宽度 21 km<sup>[11]</sup>。龙塘水利枢纽位于南渡江下游段,距离入海口 26 km,是海口市重要的供水枢纽,每日的供水量为  $4.7 \times 10^5$  t。近年来,随着城市的发展,从永发镇公路桥到龙塘水利枢纽之间,南渡江两岸建立起许多工厂,且两岸存在永发镇镇政府排污口和安定县污水处理厂排污口两大排污口(见图 1),存在发生突发性水污染事故的潜在隐患<sup>[12]</sup>。

## 2 模型原理

### 2.1 水动力方程

河道非恒定流的基本控制方程采用圣·维南(Saint-Venant)方程组<sup>[13-14]</sup>,描述如下:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: $A$ 为过水断面面积( $\text{m}^2$ ); $Q$ 为流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $x$ 为距离坐标( $\text{m}$ ); $t$ 为时间坐标( $\text{s}$ ); $z$ 为水位( $\text{m}$ ); $q$ 为旁侧入流流量( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $C$ 为谢才系数; $n$ 为河床糙率系数; $R$ 为水力半径( $\text{m}$ ); $g$ 为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ )。



图 1 南渡江龙塘水利枢纽上游段河道

Fig. 1 Upper reaches of Nandu River ahead of Longtang water conservancy hub

### 2.2 水质方程

水质方程采用对流扩散方程<sup>[15-17]</sup>,其基本方程为:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_2q \quad (3)$$

式中: $x$ 为空间坐标( $\text{m}$ ); $t$ 为时间坐标( $\text{s}$ ); $C$ 为物质浓度( $\text{mg}/\text{L}$ ); $D$ 为纵向扩散系数( $\text{m}^2/\text{s}$ ); $A$ 为横断面面积( $\text{m}^2$ ); $K$ 为线性衰减系数( $\text{d}^{-1}$ ); $C_2$ 为源/汇浓度( $\text{mg}/\text{L}$ ); $q$ 为河道单位长度上的源或汇流量( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

## 3 模型运用

### 3.1 模型率定与验证

本次的模型计算运用 MIKE11 软件的 HD 模块和 AD 模块进行耦合求解。水动力方程采用了六点隐式差分格式求解,数值计算采用传统的追赶法,即双扫算法<sup>[18]</sup>。同样水质模型方程也采用隐式差分法进行离散求解。

本次模型概化以南渡江干流来水为主,区间的最大支流龙洲河,概化为点源汇流处理。本模型上游为永发镇公路桥,海口市水务局曾统计了 2008 年、2010 年某次洪水实测洪峰流量,分别为  $4.800 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6.190 \text{ m}^3/\text{s}$ ,龙洲河对应的汇流流量为  $900 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.150 \text{ m}^3/\text{s}$ ,并在永发镇公路桥到龙塘水利枢纽这区间内,对洪峰流量所对应的水位进行多断面

测量。下游边界为龙塘水利枢纽,该处有龙塘水文站,模型采用由其实测的水位作为下边界条件。

水动力模型计算中,本文依据<sup>[19]</sup>南渡江 2008 年实测洪峰流量水面线,采用试错法率定<sup>[20]</sup>河槽和岸滩糙率。率定结果为:人工护砌段河道主槽糙率为 0.015~0.025,天然河道主槽糙率为 0.025~

0.045;人工护砌段河道滩地糙率为 0.015~0.040,天然滩地糙率为 0.040~0.065。采用 2010 年实测洪峰流量水面线进行验证,模拟水位与实测值吻合较好,能很好地反映研究水域的流场特征,可为水质计算提供流场条件。率定水面线和实测水面线对比见图 2。

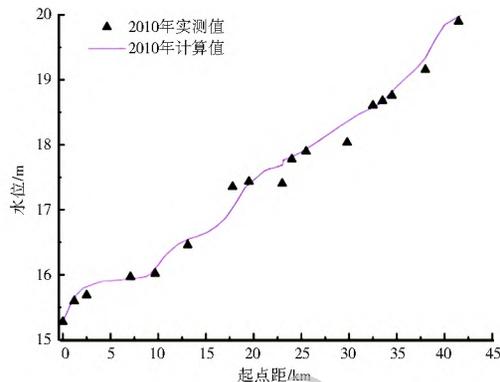
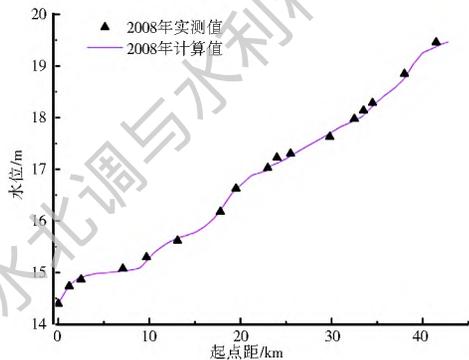


图 2 水动力模型率定与验证结果

Fig. 2 Water level calibration and verification results of hydrodynamic model

水质模型计算中根据《海南省水资源保护规划》,NH<sub>3</sub>-N 的衰减系数取为 0.15 d<sup>-1</sup>。对于河道纵向离散系数,采用经验公式进行估算:

$$E_d = \gamma \frac{u_* A^2}{H^3}$$

式中:γ 为经验系数,取值范围为 0.5~0.6;u<sub>\*</sub> 为摩阻流速,u<sub>\*</sub> = √gHJ (m<sup>2</sup>/s);J 为水力坡度;A 为过水断面面积(m<sup>2</sup>);H 为平均水深(m)。

上游采用定安水文站对水质的监测值作为上游的水质边界条件,将沿岸的排污口作为点源处理,污水排放量根据污水处理厂 2013 年的具体统计量进行确定。利用龙塘站 2013 年 2 月份实测 NH<sub>3</sub>-N 数值资料,在相应的水动力边界条件下,进行验证所取的衰减系数与河道纵向扩散系数的合理性。水中 NH<sub>3</sub>-N 浓度的模拟值与实测值对比图(见图 3)。据图 3 可知,模拟值的最大误差为 11%,整体效果较好。

### 3.2 突发性水污染事故设定及应急措施模拟

假设在枯水期来流流量状态下,南渡江上永发镇公路桥断面附近发生一起严重的污染物泄漏事故,持续泄漏某类浓度为 500 mg/L 的不可降解污染物(NO<sub>x</sub>) 6 h。上文所建立的水动力水质模型对于不可降解污染物(NO<sub>x</sub>) 同样适用,只是衰减系数取为 0 即可。

本文采用如下方法模拟南渡江龙塘水利枢纽上游段突发水污染事故后污染物迁移过程。

(1) 启动上文所建立的枯水期水动力水质模拟系统,模拟永发镇公路桥断面一定规模污染物 NO<sub>x</sub> 泄漏事故,按照设定的上、下游边界条件,计算出河段内污染物 NO<sub>x</sub> 浓度沿里程的变化情况。

(2) 根据计算结果,分析污染物到达距离龙塘取水口上游 5 km 断面处及龙塘取水口处的时刻,并确定污染云团对龙塘取水口的影响历时和距离取水口上游 5 km 断面的影响历时。

(3) 假设在距离龙塘取水口上游 5 km 断面处存在节制闸和应急渠道,根据污染物到达距离龙塘取水口上游 5 km 断面处的时刻及对其影响历时,采取关闭节制闸门,开启应急渠道闸门,将携带污染物云团的水引排到应急渠道中,水闸的运行调控历时为污染物云团对此断面的影响历时,然后再恢复到原状态的措施进行模拟。分析在此措施下,龙塘取水口处污染物 NO<sub>x</sub> 浓度变化值。以事故发生时刻为起始时间 0 点。

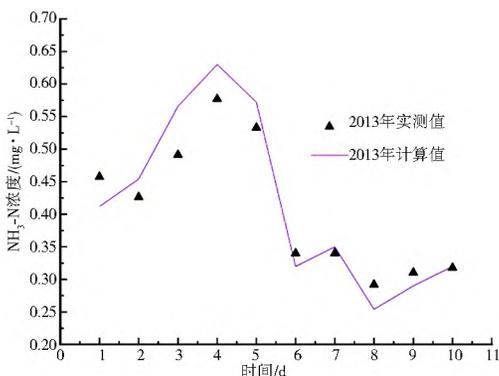


图 3 龙塘取水口 NH<sub>3</sub>-N 验证结果

Fig. 3 NH<sub>3</sub>-N validation results at Longtang intake

### 3.3 结果分析

当上游发生污染事故之后,根据已有的水动力水质模型进行定量模拟,通过分析具体结果可得(具体结果见图4-图6):

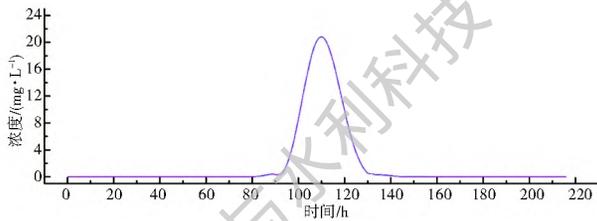


图4 突发状况下距龙塘取水口5 km处污染物浓度变化

Fig. 4 NO<sub>x</sub> concentration at a site 5 km away from Longtang intake during an accident

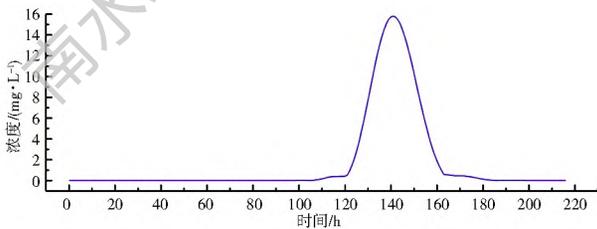


图5 突发状况下龙塘取水口处污染物浓度变化

Fig. 5 NO<sub>x</sub> concentration at Longtang intake during an accident

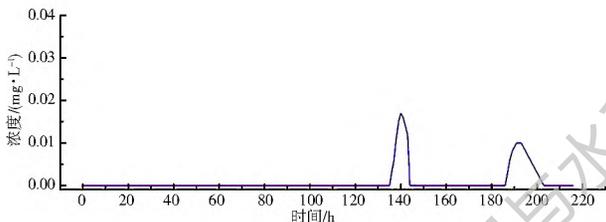


图6 应急措施情况下龙塘取水口污染物浓度变化

Fig. 6 NO<sub>x</sub> concentration at Longtang intake after emergency measures are taken

(1) 在枯水期时,当永发镇公路桥发生水污染事故,污染物云团到达距龙塘取水口上游5 km处的时间为3.9 d,在此断面停留1.5 d;污染物云团到达龙塘取水口的时间为5 d,在此断面停留1.7 d。通过对比距龙塘取水口上游5 km断面处和龙塘取水口断面处的污染物浓度变化,可见随着时间的推移,污染物整体浓度降低,污染云团影响时间变长。

(2) 当采取应急调控措施时,污染物被导流到应急渠道中。河流中的污染物总量减少,到达下游取水口处的浓度变小,对取水口取水不会产生影响。在取水口处,出现两个污染物浓度高峰,第一个高峰是由于在节制闸关闭之前,有小部分污染物已流到下游;第二个高峰是因为节制闸开启之后,水中仍有存留的小部分污染物造成的。并且采取措施后的第二个污染物浓度峰值相对于没有采取措施的污染物浓度变化,出现时间延迟现象,这是由于在关闭开启

节制闸的过程中,河道下泄流量变小,从而使第二个污染物浓度峰值出现的时间延迟。但是其浓度峰值的很小,故不会对龙塘取水口取水产生影响。

(3) 对比龙塘取水口在突发污染物状况下和采取应急措施状况下污染物的浓度,可得出在应急措施状况下,污染物浓度很小,将不会对龙塘取水口取水产生影响。

## 4 结论

本文所建立的海口市南渡江龙塘水利枢纽上游段的水动力水质模型可模拟污染物的运移、扩散过程,并可用于预测突发水污染事故发生后,南渡江下游不同地点处污染物到达的时间和影响历时。因此,提出在取水口上游建立节制闸和应急渠道的水利调控应急措施,并根据污染物到达断面的时间和影响历时,确定闸门的启闭时间,应对上游突发水污染事故。之后,运用水动力水质模型进行定量模拟此项应急措施的应急效果,证明其可有效保护龙塘水利枢纽的水体。这一应急措施为城市供水河道抵御突发性水污染事故提供一种新思路,可广泛运用于城市供水河道及河道水利枢纽水体的保护建设中。

### 参考文献(References):

- [1] 张楚天,杨勇,杨中华,等.江河突发性水污染事故动态模拟与预警—以长江武汉段为例[J].长江流域资源与环境,2013(10):1363-1368. (ZHANG Chutian, YANG Yong, YANG Zhonghua, et al. Early warning and dynamic simulation of river sudden water pollution accident—A case study in Wuhan section of the Changjiang River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013(10):1363-1368. (in Chinese))
- [2] 左其亨,刘子辉,窦明,等.闸坝对河流水质水量影响评估及调控能力识别研究框架[J].南水北调与水利科技,2011,9(2):18-21,40. (ZUO Qiheng, LIU Zhihui, DOU Ming, et al. Research framework of assessment of dams' impact on water quality and quantity and identification of regulation ability [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 18-21, 40. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.02018
- [3] 徐小钰,朱记伟,李占斌,等.国内外突发性水污染事件研究综述[J].中国农村水利水电,2015(6):1-5,11. (XU Xiaoyu, ZHU Jiewei, LI Zhanbin, et al. An overview of the domestic and foreign research on accidental water pollution events [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(6): 1-5, 11. (in Chinese))
- [4] Garnacho E, Law R J, Schallier R, et al. Targeting European R&D for accidental marine pollution [J]. Marine Policy, 2010, 34: 1068-1075.
- [5] 于磊,顾华,楼春华,王国强.基于MIKE21FM的北京市南水

- 北调配套工程大宁水库突发性水污染事故模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 67-71. (YU Lei, GU Hua, LOU Churhua, et al. Simulation of accidental water pollution in Daining Reservoir of Beijing South to North Water Diversion Project based on MIKE12FM [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 67-71. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.01067
- [6] 张波, 王桥, 孙强, 等. 基于SD-GIS的突发水污染事故水质时空模拟[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, 34(3): 348-351. (ZHANG Bo, WANG Qiao, SUN Qiang, et al. Spatiotemporal simulation of water quality based on SD-GIS accidental water pollution [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(3): 348-351. (in Chinese))
- [7] 王浩, 郑和震, 雷晓辉, 等. 南水北调中线干线水质安全应急调控与处置关键技术研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2016(2): 1-6. (WANG Hao, ZHENG He zhen, LEI Xiaohui, et al. Study on key technologies of emergency regulation and treatment to ensure water quality safety of the main canal of Middle Routes of South to North Water Diversion Project [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2016(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.02.001
- [8] 陶亚, 任华堂, 夏建新. 突发水污染事故不同应对措施处置效果模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013(2): 203-213. (TAO Ya, REN Huatang, XIA Jianxin. Effect analysis of different emergency measures for accidental water pollution [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013(2): 203-213. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2013.02.002
- [9] 吴辉明, 雷晓辉, 廖卫红, 等. 淮河干流突发性水污染事故预测模拟研究[J]. 人民黄河, 2016(1): 75-78, 84. (CHEN Feng, MENG Faisheng, WANG Yeyao et al. Application of multivariate statistical analysis in the source apportionment of surface water [A2] [J]. Yellow River, 2016(1): 75-78, 84. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-1379.2016.01.020
- [10] 马小雪, 杨军, 毛媛媛, 等. 平原河网区突发性水污染事件应急调水数值模拟分析[J]. 中国农村水利水电, 2015(4): 47-50, 59. (MA Xiaoxue, YANG Jun, MAO Yuanyuan, et al. A numerical simulation and analysis of emergency water transfer for sudden water pollution accident in the plain river [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(4): 47-50, 59. (in Chinese))
- [11] 天津大学, 海口市水务局. 南渡江龙塘坝下游至出海口江水综合利用研究[R]. 2007. (Tianjin University, Haikou Water Conservancy Bureau. Study on comprehensive utilization of river water between the Longtan Dam and estuary of Nandu River [R]. 2007. (in Chinese))
- [12] 天津大学, 海口市水务局. 海南省河湖纳污能力核定与限制排污方案报告[R]. 2013, 10. (Tianjin University, Haikou Water Conservancy Bureau. Report on verification of pollutant carrying capacity of rivers and lakes in Hainan and control scheme for pollution discharge [R]. 2013, 10. (in Chinese))
- [13] 修海峰, 吴联志. 基于MIKE0的平原河网洪水演进水动力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(6): 151-154. (XIU Haifeng, WU Lianzhi. Hydrodynamic research of flood routing in the plain river network based on MIKE11 [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(6): 151-154. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.06151
- [14] 孔达奇, 包为民, 张小琴, 等. 考虑潮汐驱动力的感潮河段一维水动力学模型研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(8): 77-79. (KONG Daqi, BAO Weimin, ZHANG Xiaojin, et al. Study on one dimensional hydrodynamic model of tidal reach considering tidal wave driving force [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(8): 77-79. (in Chinese))
- [15] 宋亚净, 刘立华, 石兆英, 等. 长距离调水对沿线及受纳水体水环境的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 11(3): 98-102, 136. (SONG Yajing, LIU Lihua, SHI Zhaoying, et al. Environmental impact of long distance water transfer on the water conveyance line and receiving water body [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 11(3): 98-102, 136. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.03098
- [16] 董飞, 刘晓波, 彭文启, 等. 水功能区水质响应系数计算研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 10-17. (DONG Fei, LIU Xiaobo, PENG Wenqi, et al. Calculating the water quality response coefficient of water functional zone [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 10-17. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2016.01.002
- [17] 房彦梅, 张大伟, 雷晓辉, 等. 南水北调中线干渠突发性水污染事故应急控制策略[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 133-136. (FANG Yanmei, ZHANG Dawei, LEI Xiaohui, et al. Emergency control strategy for sudden water pollution accident in the main channel of Middle Route of South to North Water Diversion Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 133-136. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.031
- [18] TANG Hongwu, XIN Xiaokang, DAI Weihong, et al. Parameter identification for modeling river network using a genetic algorithm [J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(2): 246-253.
- [19] 蒋书伟, 武永新. 基于MIKE 11与HEG-RAS的南渡江防洪能力对比分析[J]. 中国农村水利水电, 2014(2): 46-49. (JIANG Shuwei, WU Yongxin. A comparison and analysis of flood control capacity of the Nandu River based on MIKE 11 and HEC-RAS model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(2): 46-49. (in Chinese))
- [20] 陈弘扬, 任华堂, 徐世英, 等. 淮南市水厂取水口水质指标预警研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2012(3): 469-474. (CHEN Hongyang, REN Huatang, XU Shiyong, et al. Water quality early warning research of water intakes in Huainan [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012(3): 469-474. (in Chinese)) DOI: 10.13209/j.0479-8023.2012.063