

不同径流条件下钱塘江突发性水污染事故影响的预测模拟

邬越民¹, 李若华², 袁和忠³

(1. 浙江省钱塘江安全应急中心, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 3. 南京大学 生命科学学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 采用二维潮流水质模型对钱塘江河口突发性水污染事故对水质的影响进行了模拟预测。分析结果表明: 随着上游径流流量加大, 污水团输移的速度明显加快, 最大浓度也有所降低。同时随着污染物在输移过程中稀释扩散, 超标总历时沿程逐渐增大, 污染物最大浓度沿程逐渐降低。模拟及计算结果显示: 突发污染事故后, 加大上游的下泄流量, 对加快污染团下移、稀释污染团从而降低污染物浓度的作用非常明显, 模拟结果可为处理突发性水污染事故提供重要的理论依据。

关键词: 水污染; 突发水污染事故; 二维潮流水质模型; 钱塘江

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)04-0189-06

Forecast and simulation of influence of emergency water pollution accident occurred in Qiantang River under different runoff conditions

WU Yuemin¹, LI Ruohua², YUAN Hezhong³

(1. Qiantang River Emergency - response Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China;

2. Zhejiang Provincial Institute of Estuarial and Coastal Engineering, Hangzhou 310016, China;

3. School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The 2-D tide water quality model was adopted to simulate and forecast the impact of emergency water pollution accident occurred in Qiantang River on water quality. The result showed that the transport velocity of polluted water distinctly increased with the increase of runoff and the maximum concentration also decreased. In the same time, with the dispersion and dilution of pollution in the process of transport, the total duration increase and the maximum concentration decreased gradually along the river. The result of simulation and calculation revealed that the increase of discharged flow at the upstream of river plays a very important role in accelerating the polluted water to move downward and diluting the pollutant body so as to lower the pollutant concentration when the emergency water pollution accident occurred. The result can provide an important theoretical basis for the treatment of unexpected water pollution emergency.

Key words: water pollution; unexpected water pollution emergency; 2-D tide water quality model; Qiantang River

钱塘江河口地区位于长江三角洲南翼, 富春江电站至三堡船闸河段为杭州重要的饮用水源保护区。杭州市几百万居民中, 主城区的 85% 和桐庐(大部分地区)、富阳、萧山等地的饮用水均取自钱塘江水系^[1-3]。由于供水水源单一, 且备用水量不足, 钱塘江突发水污染事故将严重威胁杭州市的正常供水^[4-8]。河流中污染物质泄漏、排污口事故性排放等突发水污染事故必将污染下游河道, 给下游

生活、生产及生态用水带来严重影响^[9-10]。模拟突发水污染事故中污染物在河流中的迁移扩散过程, 评估对重要水源地的影响程度有着重要意义^[11-13]。

近年来, 计算机技术的高速发展, 为水质数学模型的使用奠定了坚实的基础, 国内外许多学者已开展了大量的研究工作。张波采用一维水质模拟的系统动力学模型对松花江水污染事故中特征污染物硝基苯浓度的变化进行模拟仿真^[14]; 赵棣华根据长江

收稿日期: 2013-04-17; 修回日期: 2013-05-07

作者简介: 邬越民(1971-), 男, 浙江杭州人, 高级工程师, 从事水环境应急管理工作。

通讯作者: 袁和忠(1981-), 男, 江苏扬州人, 理学博士, 工程师, 研究方向: 水资源及水环境。

江苏感潮河段水流、水质及地形特点,对长江江苏段进行了二维水流-水质模拟^[15]。河口水质数学模型是研究水体随时间、空间运动和水质变化的重要手段^[16],本文采用二维潮流水质数学模型对钱塘江感潮河段进行水质模拟计算,有助于决策部门了解污染带的迁移状况和污染物在时间、空间上的变化,掌握污染物对下游水体造成的污染影响,从而对事故的发展做出及时、准确的应急响应。

1 平面二维潮流水质数学模型的构建

1.1 基本方程

溶解性污染物进入钱塘江感潮河段水体后,在稀释扩散作用下,与水体充分混合,可采用平面二维潮流水质数学模型进行研究。该水质模型的基本方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (huv) \\ = -gh \left(\frac{\partial z_0}{\partial x} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 h} \right) + W_x + fhv + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(2h\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h\nu_t \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} (huv) \\ = -gh \left(\frac{\partial z_0}{\partial y} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C_z^2 h} \right) + W_y - fhu + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(2h\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h\nu_t \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hc}{\partial t} + \left(\frac{\partial huc}{\partial x} + \frac{\partial hvc}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(h\varepsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(h\varepsilon_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: h 为水深; u 、 v 分别为垂线平均流速; z_0 为河床高程; c 为盐度或者水质浓度; ν_t 为水平粘滞系数; ε_x 、 ε_y 分别为 x 、 y 方向上的扩散系数。

为便于数值离散控制方程及建立时间显式求解数值格式,对方程进行重新推导,统一写成散度形式,然后采用基于近似黎曼解的 Roe 格式算法向数值对流通量。为了得到一个高阶且稳定的计算格式,采用类似 MUSCL 方法将空间一阶精度提高到二阶。同时采用限制水深的方法处理平面二维潮流数值模拟中动边界。

1.2 研究范围及计算域概化

本次钱塘江研究区域见图 1,萧山取水口、九溪

取水口、南星桥取水口为杭州市的重要水源地。为更好地拟合钱塘江河口曲折的岸线边界,水质模型进行网格剖分时,采用三角形网格,使网格尽可能精确地拟合钱塘江复杂的河道边界,完整准确的反映固壁边界的情况。并在取水口区域进行网格加密处理,计算网格最小网格步长约为 30 m,各代表取水口离富春江电站的距离统计见表 1。

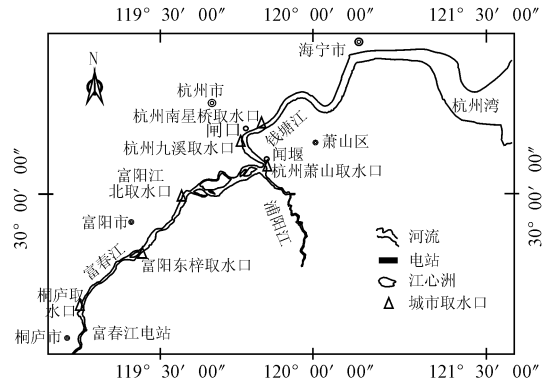


图 1 研究区范围及取水口位置

表 1 取水口离富春江电站的距离 km

| 编号 | 取水口 | 所在河段 | 距电站的距离 |
|----|---------|------|--------|
| 1 | 桐庐取水口 | 富春江 | 6.4 |
| 2 | 东梓取水口 | 富春江 | 30.2 |
| 3 | 富阳江北取水口 | 富春江 | 50.1 |
| 4 | 萧山取水口 | 钱塘江 | 76.4 |
| 5 | 九溪取水口 | 钱塘江 | 86.3 |
| 6 | 南星桥取水口 | 钱塘江 | 94.3 |

1.3 模型参数率定及验证

因不同物质理、化特性差异较大,本次研究对溶解性污染物统一简化为持久性污染物,不考虑其迁移过程总的沉淀、悬浮、降解等作用。为率定模型参数,检验模型的合理性和正确性,分别对 2007 年 10 月实测水文测验资料进行潮流以及盐度的验证,验证计算原则上采用同时期水下地形资料,缺乏同期资料的区域采用临近时间的地形资料。测验点位验证图见图 2。高、低潮位计算误差小于 0.1 m,各个站点盐度的计算值和实测值基本接近,趋势基本一致。验证结果表明,本文所采取计算方法是适用和可靠的,模型所选用的参数也是合理的,可以用于本次水环境影响预测研究。

2 数值模拟结果分析

采用二维潮流水质模型对钱塘江河口事故性排放条件下的水质影响进行模拟,计算分析在不同径

流条件下的事故影响范围与程度,模拟预测污水团的演进过程,分析突发性污染事故对水源地取水口的水质影响,包括到达时间、浓度、影响历时等,模拟结果见图3。

钱塘江杭州段闸口以下选用平均江道地形、污染物排放时段选择在小潮汛,假定电站附近发生事故,30 t(车船单次运输最大量)溶解性污染物在2 h内排入富春江,随着电站下泄径流流量的不同,污染物到达下游各取水口的时间和浓度也不同。不同径流量下污水团经过各取水口的浓度过程线如图3。以事故发生时间为0时刻算起,影响到各取水口的时间统计见表2。

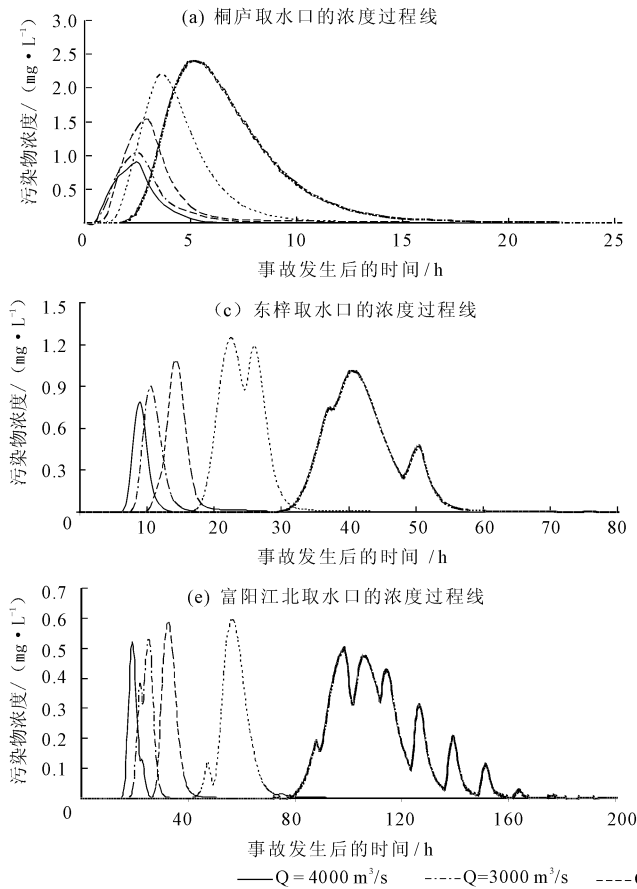


图3 不同径流条件下电站附近发生事故后各取水口的浓度过程线

表2 不同径流量时污染事故发生后影响到

| 径流量 | 各取水口的时间 | | | | | |
|------|---------|-------|---------|-------|-------|--------|
| | 桐庐取水口 | 东梓取水口 | 富阳江北取水口 | 萧山取水口 | 九溪取水口 | 南星桥取水口 |
| 4000 | 0.5 | 6.5 | 15 | 26 | 29 | 32 |
| 3000 | 1 | 7.5 | 18 | 31 | 35 | 39 |
| 2000 | 1 | 10 | 26.5 | 41 | 50.5 | 54.5 |
| 1000 | 1.5 | 16.5 | 41.5 | 69.5 | 82.5 | 92 |
| 500 | 2 | 29.5 | 71.5 | 134 | 157 | 171 |

以污染物浓度0.001 mg/L作为阈值,超过该值认为取水口受到了污染物的影响。

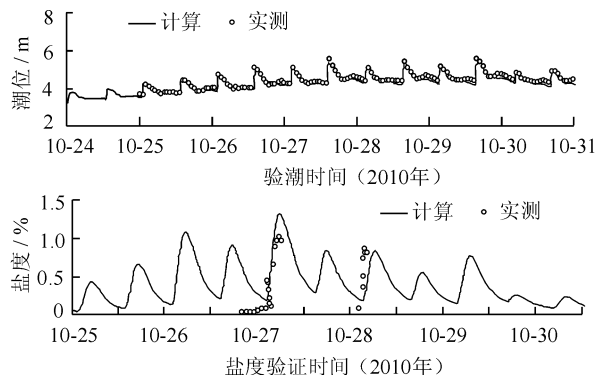
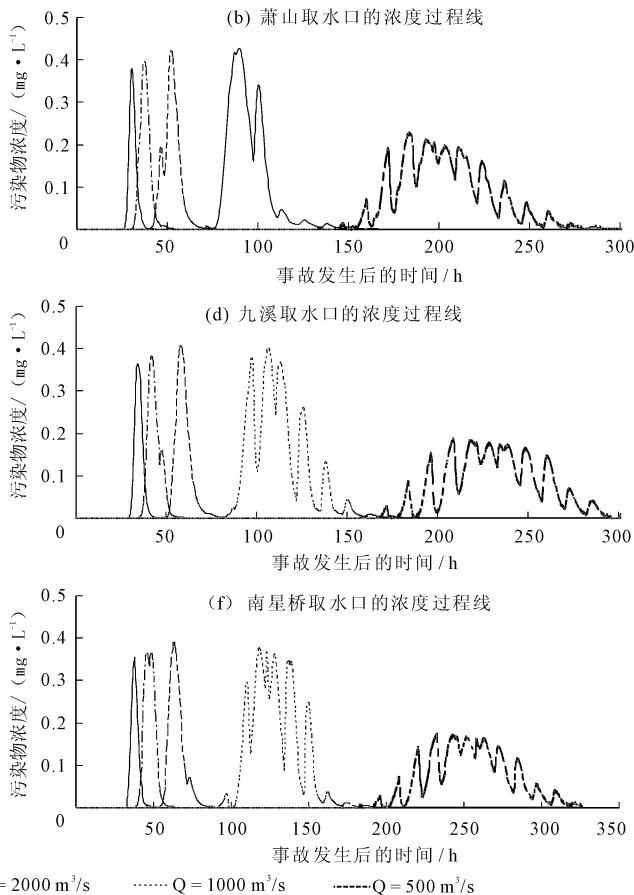


图2 2010年10月水文测验潮流及盐度验证



由图3可见,随着污水团的下移,污染物逐渐稀释扩散,峰值浓度也逐渐降低,时间跨度增加。表2为污染事故发生后径流量500~4000 m³/s时污水团影响到各取水口的时间。由表可见,随着径流量的增大,污水团下移的速度明显加快,以污水团影响到萧山取水口为例,径流量500 m³/s时需要134 h,2000 m³/s时仅需要41 h,而4000 m³/s时仅需要26 h。当电站下泄流量1000 m³/s时,污染物到达桐庐取水口、东梓取水口、富阳江北取水口、萧山取

水口、九溪水厂取水口以及南星桥水厂取水口的时间依次约1.5、16.5、41.5、69.5、82.5、92 h。

以杭州段重要水源地萧山取水口为例,统计了污水团经过萧山取水口的演进过程,包括影响到、最大浓度到达、离开闸堰的时间和经过闸堰的最大浓度等指标,污水团经过萧山取水口的演进过程见表3。由表可见,随着径流量的增大,影响到、最大浓度到达、离开时间均大幅缩短,且流量越大,污水团经过取水口的时间越短,4 000、3 000、2 000、1 000、500 m^3/s 时经过取水口的时间依次为19.0、24.5、34.5、95.5、121.5 h。同时也可看到,当径流量大于1 000 m^3/s 时,萧山取水口的最大峰值浓度基本接近,随着流量的增大略有所减小;而径流量为500 m^3/s 时,最大浓度则大幅降低。由图3可看出,在大流量(如大于1 000 m^3/s)时萧山取水口的污染物浓度仅出现1~2个峰,而在流量500 m^3/s 时则出现了多峰,这是因为该河段受径流和潮汐的共同作用影响造成,径流和潮汐相互消长,径流量大时,则潮汐作用弱,反之,则潮汐作用大。流量500 m^3/s 时,受潮汐影响较大,污染物受潮汐影响,在萧山取水口来回运动,逗留时间长,因稀释扩散的作用浓度相对较低。

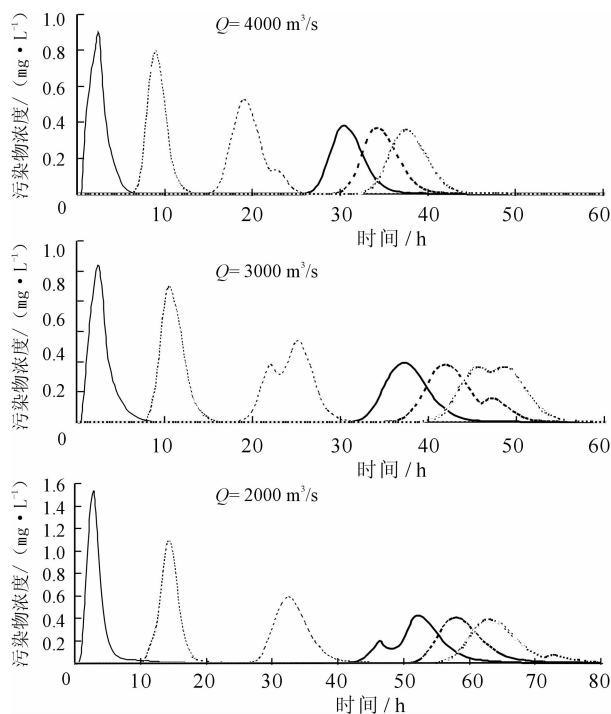


图4 不同径流量条件下电站附近发生事故后各取水口的浓度过程线

表4表明桐庐取水口离富春江电站较近,且受潮汐影响较小,在各种流量下污染物浓度仅出现一

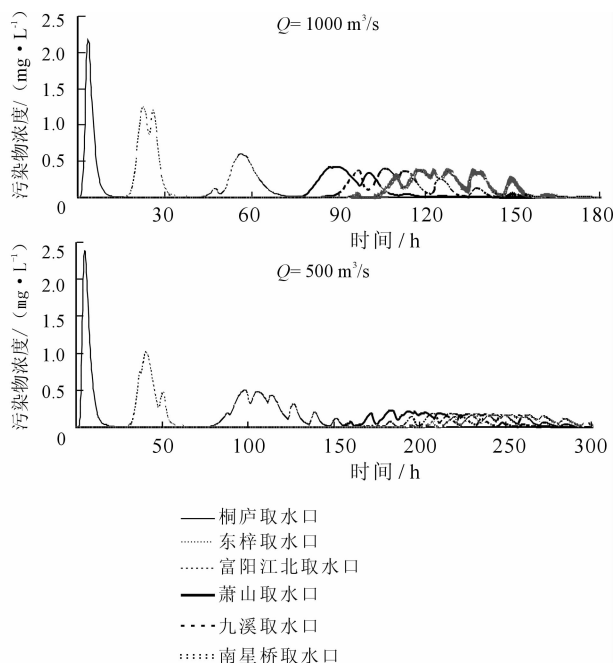
表3 污染事故发生后后到达萧山取水口的

| 流量 | 时间及浓度统计 | | | |
|------|---------|-------|------|-------|
| | T_1 | T_3 | C | T_2 |
| 4000 | 26.5 | 31 | 0.38 | 45.5 |
| 3000 | 31.5 | 38 | 0.39 | 56 |
| 2000 | 42 | 53 | 0.42 | 76.5 |
| 1000 | 71 | 91.5 | 0.43 | 166.5 |
| 500 | 144.5 | 184.5 | 0.22 | 266 |

注: T_1 为影响到取水口的时间; T_2 为离开的时间; T_3 为最大浓度到达的时间; C 为最大浓度。

3 不同径流冲污效益分析

借助构建的平面二维潮流水质数学模型,河口段采用平均地形,计算了不同径流量下富春江电站位置发生事故后污染团的演进过程,并以污染物浓度0.001 mg/L作为阈值,分析各取水口的浓度过程受径流影响的情况,不同流量下各取水口的浓度过程线见图4,由图可见,流量加大,污水团输移的速度明显加快,超标总历时也明显缩短,最大浓度也有所降低。同时随着污染物在输移过程中稀释扩散,超标总历时沿程逐渐增大,污染物最大浓度沿程逐渐降低。



个峰就输移至下游,受水体稀释的影响,随流量的增大污染物最大浓度明显降低。

表4 不同流量条件下电站发生事故后污染物经过桐庐取水口的过程 m^3/s , h, mg/L

| 流量 | T_1 | T_2 | T | T_3 | C |
|------|-------|-------|------|-------|------|
| 4000 | 0.5 | 7.5 | 7 | 2.5 | 0.89 |
| 3000 | 1 | 9.5 | 8.5 | 2.5 | 1.03 |
| 2000 | 1 | 21 | 20 | 3 | 1.52 |
| 1000 | 1.5 | 40 | 38.5 | 3.5 | 2.16 |
| 500 | 2 | 57.5 | 55.5 | 5 | 2.39 |

注: T 为超标总历时($T = T_2 - T_1$)。

东梓取水口的污染物最大浓度较桐庐取水口有所降低,但超标总历时有所增加。同时受潮汐的影响,在径流量为1 000、500 m^3/s 时污染物浓度出现了两个峰,且由于稀释扩散的影响,径流量500 m^3/s 时的最大浓度小于径流量1 000 m^3/s 时的最大浓度,但超标时间大幅增加(表5)。

表5 不同流量条件下电站发生事故后经过东梓取水口的过程 m^3/s , h, mg/L

| 流量 | T_1 | T_2 | T | T_3 | C |
|------|-------|-------|------|-------|------|
| 4000 | 6.5 | 14.5 | 8 | 9 | 0.79 |
| 3000 | 7.5 | 18 | 10.5 | 10.5 | 0.90 |
| 2000 | 10 | 31 | 21 | 14.5 | 1.07 |
| 1000 | 16.5 | 60.5 | 44 | 22.5 | 1.24 |
| 500 | 29.5 | 105.5 | 76 | 40.5 | 1.00 |

富阳江北取水口的污染物最大浓度随着污染物的输移逐渐降低,但超标总历时也逐渐增加。同时受潮汐的影响,在径流量500 m^3/s 时污染物浓度出现了多个峰,超标总历时达到94 h,且最大浓度小于径流量1 000 m^3/s 时的最大浓度(表6)。

表6 不同流量条件下电站发生事故后经过富阳取水口 m^3/s , h, mg/L

| 流量 | T_1 | T_2 | T | T_3 | C |
|------|-------|-------|------|-------|------|
| 4000 | 15 | 26.5 | 11.5 | 19 | 0.52 |
| 3000 | 18 | 32.5 | 14.5 | 25 | 0.53 |
| 2000 | 26.5 | 51 | 24.5 | 32.5 | 0.58 |
| 1000 | 41.5 | 94.5 | 53 | 56.5 | 0.59 |
| 500 | 71.5 | 165.5 | 94 | 98.5 | 0.50 |

闻堰-南星桥为杭州市最重要的取水河段,分布着萧山和杭州市主城区众多的取水口,该河段受潮汐、径流的影响均较大。影响到的时间和超标总历时明显较上游的取水口延长,九溪取水口、南星桥取水口在径流量500、1 000 m^3/s 均出现了多个峰。同时也可看到,不同流量对该段污染物下移速度的影响较大。如南星桥取水口在径流量4 000 m^3/s 时

超标总历时为20.5 h,径流量500 m^3/s 时超标总历时达143.5 h(表7~9)。

表7 不同流量条件下电站发生事故后经过萧山(闻堰)取水口的过程 m^3/s , h, mg/L

| 流量 | T_1 | T_2 | T | T_3 | C |
|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 4000 | 26.5 | 45.5 | 19 | 31 | 0.38 |
| 3000 | 31.5 | 56 | 24.5 | 38 | 0.39 |
| 2000 | 42 | 76.5 | 34.5 | 53 | 0.42 |
| 1000 | 71 | 166.5 | 95.5 | 91.5 | 0.43 |
| 500 | 144.5 | 266 | 121.5 | 184.5 | 0.22 |

表8 不同流量条件下电站发生事故后经过九溪取水口的过程 m^3/s , h, mg/L

| 流量 | T_1 | T_2 | T | T_3 | C |
|------|-------|-------|-----|-------|------|
| 4000 | 29 | 49 | 20 | 34 | 0.36 |
| 3000 | 35 | 60 | 25 | 42 | 0.38 |
| 2000 | 50.5 | 82.5 | 32 | 58 | 0.40 |
| 1000 | 82.5 | 189.5 | 107 | 106 | 0.40 |
| 500 | 157 | 290 | 133 | 208.5 | 0.18 |

表9 不同流量条件下电站发生事故后经过南星桥取水口的过程 m^3/s , h, mg/L

| 流量 | T_1 | T_2 | T | T_3 | C |
|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 4000 | 32 | 52.5 | 20.5 | 37.5 | 0.36 |
| 3000 | 39 | 64 | 25 | 48.5 | 0.36 |
| 2000 | 54.5 | 89 | 34.5 | 63 | 0.39 |
| 1000 | 92 | 202 | 110 | 117.5 | 0.37 |
| 500 | 171 | 314.5 | 143.5 | 220.5 | 0.14 |

自东梓取水口以下,各取水口的超标时间在径流量500 m^3/s 时较1 000 m^3/s 时大幅增加,受稀释扩散的影响,径流量500 m^3/s 时的最大浓度小于径流量1 000 m^3/s 时的最大浓度,出现了小流量低峰值浓度的现象。

4 结 语

采用构建的二维潮流水质模型,对钱塘江河口突发性水污染事故排放条件下的水质影响进行了模拟预测,分析结果表明,随着上游径流流量加大,污水团输移的速度明显加快,超标总历时也明显缩短,最大浓度也有所降低。同时随着污染物在输移过程中稀释扩散,超标总历时沿程逐渐增大,污染物最大浓度沿程逐渐降低。

模拟及计算结果表明,突发污染事故后,加大上游的下泄流量,对加快污染团下移、稀释污染团、降低污染物浓度的作用非常明显。钱塘江河口上游建

有新安江电站和富春江电站,增加上游下泄流量对加快污染团下移、稀释污染团、降低污染物浓度有着积极的作用。同时也应注意到,由于加快了下移速度,应急准备时间也相应缩短,应急决策时应考虑这一因素。

参考文献:

- [1] 吴洁,虞左明,钱天鸣. 钱塘江干流杭州段水体氮污染特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(6): 552-556.
- [2] 沈小东,申开丽,杨强,等. 钱塘江富阳-杭州段沉积物磷的赋存形态分析[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(9): 678-681.
- [3] Huang Fang, Wang Xiaoquan, Lou Liping, et al. Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques [J]. Water Research, 2010, 44(5): 1562-1572.
- [4] 王亚红,劳国民,黄志珍. 钱塘江流域水环境容量研究[J]. 水资源保护, 2008, 24(Z1): 30-33.
- [5] 韩曾萃,程杭平,史英标,等. 钱塘江河口咸水入侵长历时预测和对策[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 232-240.
- [6] Zhou Rongbing, Zhu Lizhong, Kong Qingxia. Levels and distribution of organochlorine pesticides in shellfish from Qiantang River, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(3): 1192-1200.
- [7] 陈红英,吕永哲,王增长. 钱塘江入海河口碱性高锰酸

盐指数测定的影响因素[J]. 浙江工业大学学报, 2010, 38(1): 95-97, 106.

- [8] 毛献忠,韩曾萃. 钱塘江江心排污的数值模拟[J]. 水科学进展, 1996, 7(3): 200-206.
- [9] 田旭东,汪小泉. 钱塘江流域污染负荷及水环境容量研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(7): 74-77, 81.
- [10] 蒋新新,李鸿. 突发水污染事故风险预测中数学模型的研究[J]. 环境科技, 2008, 21(Z2): 6-8.
- [11] 常蒲婷,杨侃,侯学勇,等. 突发性水污染事件模拟分析研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 38-41, 51.
- [12] 陈丽萍,蒋军成,殷亮. 突发性危险化学品水污染扩散过程的模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(6): 761-765.
- [13] 徐礼强,童杨斌,楼章华,等. 钱塘江枯水期主要污染物水环境模拟[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2682-2687.
- [14] 张波,王桥,李顺,等. 基于系统动力学模型的松花江水污染事故水质模拟[J]. 中国环境科学, 2007, 27(6): 811-815.
- [15] 赵棣华,李褪来,陆家驹. 长江江苏段二维水流水质模拟[J]. 水利学报, 2003, 34(6): 72-77.
- [16] Fang Xiaobo, Zhang Jianying, Chen Yingxu, et al. QUAL2K model used in the water quality assessment of Qiantang River, China [J]. Water Environment Research, 2008, 80(11): 2125-2133.

(上接第 188 页)

- [8] 韩娜娜. 山西桑干河流域水环境承载力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [9] 付学功,李瑞森,李娜,等. 白洋淀水环境承载能力计算及保护措施探讨[J]. 水资源保护, 2007, 23(1): 35-39.
- [10] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 230-232.
- [11] 李翀,彭静,赵奎霞,等. 保定市水环境承载可持续性分析[J]. 水资源保护, 2007, 23(1): 49-56.
- [12] 金菊良,王文圣,洪天求,等. 流域水安全智能评价方法的理论基础探讨[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 918-925.
- [13] 张德丰,等. MATLAB神经网络应用设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2009. 1.
- [14] 崔东文. 基于BP神经网络的文山州水资源承载能力评价分析[J]. 长江科学院报, 2012, 29(5): 9-15.
- [15] 崔东文,郭荣. 基于GRNN模型的区域水资源可持续利用评价:以云南文山州为例[J]. 人民长江, 2012, 43

(5): 26-31.

- [16] 崔东文. 几种神经网络模型在湖库富营养化程度评价中的应用[J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 12-18.
- [17] MATLAB中文论坛. MATLAB神经网络30个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010. 4.
- [18] 刘永霞,冯仲科,杜鹏志. Elman动态递归神经网络在树木生长预测中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6): 99-103.
- [19] 符利勇,何铮,刘应安. 基于改进Elman神经网络的林隙大小预测模型[J]. 南京林业大学学报, 2011, 35(3): 28-32.
- [20] 崔东文. Matlab神经网络在湖库营养状态评价中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, 32(5): 11-15.
- [21] 文山州水利电力勘测设计院. 文山壮族苗族自治州水资源综合规划报告[R]. 2009. 6.
- [22] 文山州水务局. 文山州水资源公报[Z].