

基于 EFDC 的咸潮上溯对闽江下游水源地的影响

潘红澈^{1a}, 逢勇^{1a,1b}, 罗缙^{1a,1b}, 张鹏^{1a}, 谢蓉蓉²

(1. 河海大学 a. 环境学院; b. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 福建师范大学 环境科学与工程学院, 福建 福州 350007)

摘要: 为保障咸潮上溯情况下闽江下游水源地供水安全, 建立基于 EFDC 的二维水环境数学模型, 利用 2013 年 12 月同步监测资料进行参数率定, 模拟不同流量条件下咸潮上溯的距离以及对水源地的影响。结果表明: 咸潮上溯距离与下泄流量成负相关关系; 咸潮上溯距离的增加将延长下游水源地的不宜取水时间。为减缓咸潮上溯对闽江下游水源地的影响, 建议优化水口水库调度方式, 加大下泄流量。

关键词: 咸潮入侵; 环境流体力学模型; 水源地; 不宜取水时间

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)06-0071-06

Influence of saltwater intrusion on water source land in downstream of Minjiang River based on EFDC

PAN Hongche^{1a}, PANG Yong^{1a,1b}, LUO Jin^{1a,1b}, ZHANG Peng^{1a}, XIE Rongrong²

(1. a. Environment College; b. Key Laboratory for Integrated Regulation and Resources Exploitation on shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to insure the water safety of water source affected by saltwater intrusion in the downstream of Minjiang River, the paper established a two-dimensional numerical model based on environmental fluid dynamics code (EFDC). It calibrated the parameters of the model by using synchronous data in December 2013 and simulated the distance of salinity intrusion and the impact on water source land under the condition of different flows. Results indicate that the range of salinity intrusion is negatively correlated with the discharged; the increase of saltwater intrusion distance will extend the unsuitable water intake time of water source in the downstream of Minjiang River. In order to mitigate the impact of saltwater intrusion on water source, the paper recommended that it is necessary to optimize the operation ways of Shuikou reservoir and increase discharged.

Key words: saltwater intrusion; environmental fluid dynamic code (EFDC); water source; unsuitable water intake time

闽江下游是指水口水库以下河段, 位于福州市内, 具有供水、防洪抗旱、养殖、航运等多种功能。闽江口为强潮陆相河口, 潮型为半日潮, 河口区是咸淡水交汇区, 其盐度受潮汐强度、径流的影响^[1]。近年来, 随着河道过度采砂、调水工程的实施, 以及南港航道多次疏浚整治, 使得河道水文情势和河床演变发生较大改变, 导致福州市内多个水源地水质氯化物超标现象频繁出现, 尤其以长乐炎山水厂、马尾

闽江备用水源地最为严重。资料表明, 在 1994、2003、2009 年枯水大潮期, 闽江均出现较严重的咸潮上溯现象。其中, 2003 年城门水厂氯化物最大监测值为 296.5 mg/L; 在 2009 年 2-3 月初, 水口水库平均下泄流量 333 m³/s 时, 马尾青州大桥(白岩潭断面下游 2km 处)于 2009 年 3 月 3 日平均 Cl⁻ 浓度为 951 mg/L, 最大值达到 1 300 mg/L; 城门水厂在 2009 年 2 月 26 日 Cl⁻ 浓度最大达到 443 mg/L,

收稿日期: 2015-06-20; 修回日期: 2015-07-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-010); 江苏高校优势学科建设工程项目; 2015 年福建省中青年教育科研项目(JA15141)

作者简介: 潘红澈(1990-), 男, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要从事环境规划与影响评价研究。

不宜取水时间长达7 h左右^[2-3]。

环境流体动力学模型^[4] (Environmental Fluid Dynamics Code,以下简称EFDC)是集水动力模块、泥沙输运模块、污染物运移模块和水质预测模块于一体,可以用于模拟地表水系统一维、二维和三维流场、物质传输和生物化学过程,其模拟范围包括河流、湖泊、河口、水库、湿地、近岸海域。近年来该模型已在国内外广泛使用。谢锐等^[5]基于公开代码的EFDC建立了长江口及相邻海域三维水流模型。刘宝超等^[6]基于EFDC建立长江口及邻近海域三维数值模型,模拟风对夏季长江冲淡水扩散影响。Jeong S等^[7]运用EFDC对韩国锦江下游的海水入侵特征进行模拟。

本文基于EFDC模型建立闽江干流下游水环境模型,并利用2013年12月(大潮期)闽江下游河道

全潮潮位、流量、盐度同步监测对模型各项参数进行率定验证。通过模拟水口水库90%水文保证率481 m³/s、95%水文保证率404 m³/s和最小下泄生态流量308 m³/s,分别计算咸潮对闽江下游水源地的影响,为保障区域供水安全提供理论依据。

1 研究区域概况

研究区域范围为闽江水口电站—金刚腿(图1),沿江分布众多水源地,自上而下分布有:闽江北港的西北区水厂、东南区水厂、马尾备用水源地;闽江南港的飞凤山取水口、义序水厂、城门水厂、闽江调水工程以及长乐炎山水厂等8处水源地。其中供水规模最大是西北区水厂,现状供水量为75万t/a,占福州市区总供水的71%。

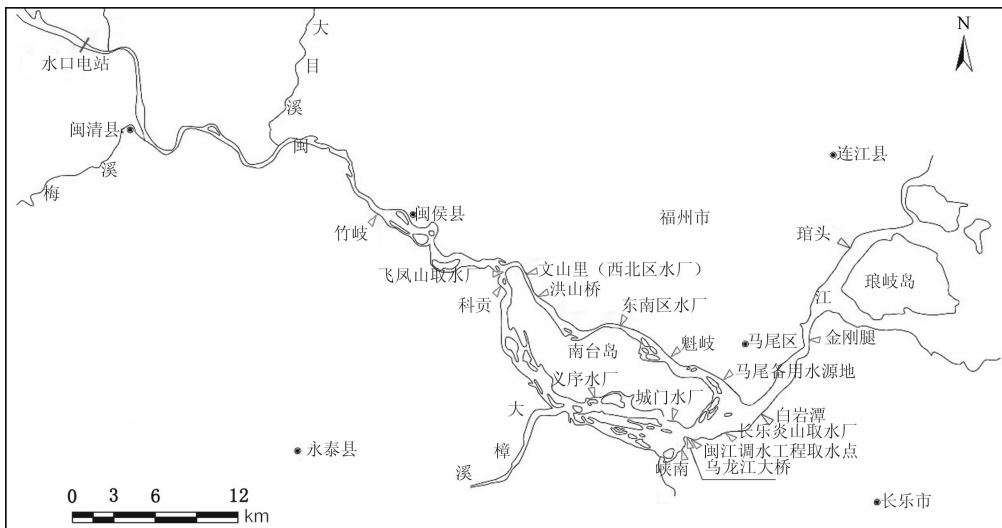


图1 闽江下游河道及水源地位置图

2 水环境数学模型

2.1 基本方程

(1) 动量方程:

$$\partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHuu) + \partial_y(m_xHvu) + \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hv = -m_y H\partial_x(g\xi + p) - m_y(\partial_x h - z\partial_x H)\partial_z P + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z u) + Q_u \quad (1)$$

$$\partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \partial_z(mwv) - (mf + v\partial_x m_y - u\partial_y m_x)Hu = -m_x H\partial_y(g\xi + p) - m_x(\partial_y h - z\partial_x H)\partial_z P + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_z v) + Q_v \quad (2)$$

$$\partial_t(m\xi) = -gH(\rho - \rho_0)\rho_0^{-1} \quad (3)$$

(2) 连续方程:

$$\partial_t(m\xi + \partial_x(m_yHu) + \partial_y(m_xHv) + \partial_z(mw)) = 0 \quad (4)$$

$$\partial_t(m\xi + \partial_x(m_yH\int_0^1 u dz) + \partial_y(m_xH\int_0^1 v dz)) = 0 \quad (5)$$

(3) 状态方程:

$$\rho = \rho(P, S_a, T) \quad (6)$$

(4) 温度和盐度输移方程为:

$$\partial_t(mHT) + \partial_x(m_yHuT) + \partial_y(m_xHvT) + \partial_z(mwT) = \partial_z(mH^{-1}K_v\partial_z T) + Q_T \quad (7)$$

$$\partial_t(mHS_a) + \partial_x(m_yHuS_a) + \partial_y(m_xHvS_a) + \partial_z(mwS_a) = \partial_z(mH^{-1}K_s\partial_z S_a) + Q_s \quad (8)$$

式中: u 、 v 、 w 分别是边界拟合正交曲线坐标 x 、 y 、 z 方向上的速度分量; m_x 、 m_y 分别为水平坐标变换因子; m 为度量张量行列式的平方根, $m = m_x m_y$; A_v 为垂向紊动黏滞系数; K_v 为垂向紊动扩散系数; f 为科里奥利系数; ρ 为混合密度; ρ_0 是参考密度, kg/m³; H 为总水深; h 为未扰动的 z 坐标原点以下的水深; P 为压力; S_a 为盐度; T 为温度; ξ 为自由的势能; Q_u 和 Q_v 为动量在 x 和 y 方向的源汇项; Q_T

是温度的源汇项^[6]。

2.2 地形概化

利用 2011 年闽江下游区域水口坝下至金刚腿实测地形图建立水口坝下一金刚腿段水环境模型,其中模型全长 99 km。EFDC 模型采用二阶精度的空间有限差分格式求解控制方程,变量布置采用交错网格。网格边长约 200 m,宽 100 m,共划分 5 241 个网格,模型计算时间步长 $t = 10$ s。

2.3 参数率定

2.3.1 二维水动力模型

由于闽江处在半日潮地区,二维水动力模型参数采用 2013 年 12 月大潮期实测水深、流量和盐度资料进行率定。模型初始条件取初始潮位值,由 2013 年 12 月各测站逐时实测

潮位,初始流速值设为 0。模型边界条件主要有上边界下泄流量、下边界潮位、支流大樟溪流量及风场,上边界下泄流量为水口水库逐时下泄流量实测值;下边界为同期金刚腿断面潮位逐时实测值;支流边界为大樟流永泰站实测流量;风场资料采用福州市内实测日均风速、风向作为输入条件。

潮位、流量率定断面如图 1 所示,率定结果(图 2、图 3)表明:模型计算结果变化趋势与实测一致,潮位率定最大误差为洪山桥 20 cm,最小误差为白岩潭 11 cm;流量率定科贡为 23%,文山里为 22%。率定得到主要参数如下:河道主槽部分糙率的取值范围定为 0.010~0.015;水平涡粘 Smagorinsky 系数为 0.12;风拖曳系数在 0.001~0.0015 之间。

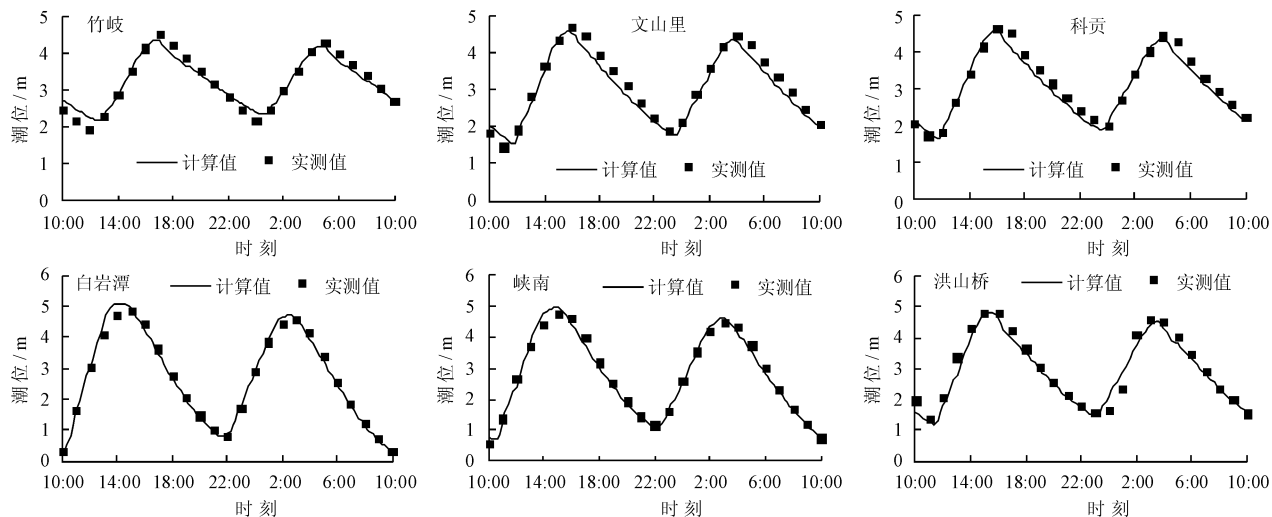


图 2 2013 年 12 月潮位率定结果

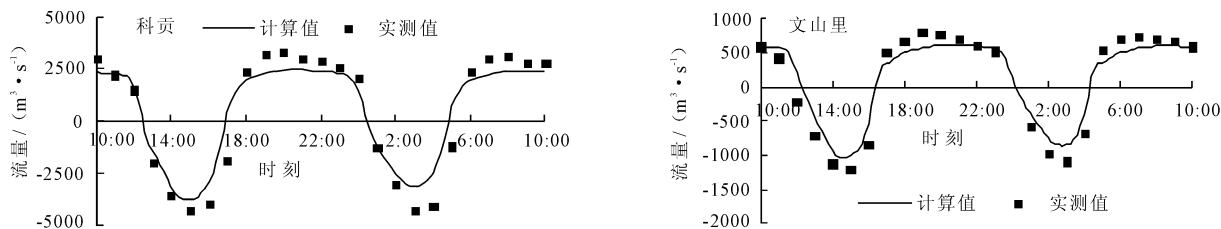


图 3 2013 年 12 月流量率定结果

2.3.2 二维盐度模型

上边界水口下泄流量和大樟溪盐度值均为 0.06 ppt(监测仪器最低检测线);下边界为金刚腿断面逐时盐度实测值。初始盐度场从金刚腿的 0.36 逐渐过渡到竹岐 0.06 ppt,盐度初始场如图 4 所示。对模型扩散系数进行率定,由结果(图 5)可以看出,魁岐的相对误差为 19.46%,乌龙江大桥的相对误差为 16.07%,模型的扩散参数取值合理,计算结果可信,可以较好地对该区域的盐度扩散进行模拟。

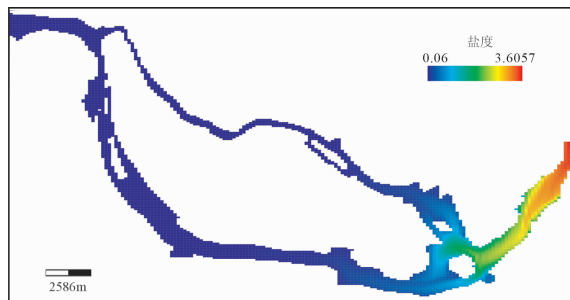


图 4 盐度初始条件(单位:ppt)

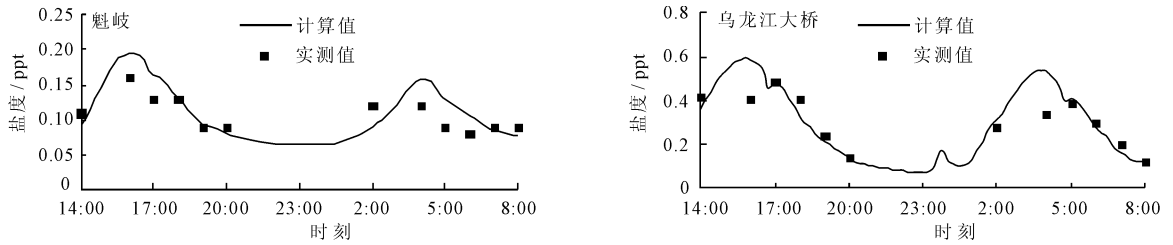


图5 2013年12月盐度率定结果

3 计算结果与分析

3.1 计算条件

由水口水库下泄流量系列数据分析,水口水库90%水文保证率流量为 $481 \text{ m}^3/\text{s}$ (2013年12月15日),95%水文保证率流量为 $404 \text{ m}^3/\text{s}$ (2010年1月5日)。以水口水库下泄流量 481 、 404 、 $308 \text{ m}^3/\text{s}$ (最小生态流量,选择2009年1月15日)分别为上边界。由于下游潮位和盐度受上游下泄流量的影响,下游计算潮位条件利用Pawlowicz等^[8]提出的T_tide1.3程序对白岩潭和瑄头2011年和2012年的逐时潮位资料进行调和,得到白岩潭和瑄头的调和常数;根据地理插值法中两点法内插出金刚腿的调和常数,并利用T_predic.m对金刚腿的潮位进行预测。下游盐度边界根据多次监测资料的类比得到。风场资料取相应时间的福州市内实测日均风速、风向。

3.2 咸潮上溯距离预测

由现状资料可知,闽江下游南港咸潮已到达乌龙江大桥上游 2.5 km 处,北港咸潮已影响到魁岐断面。按照生活饮用水标准,氯化物浓度超过 250 mg/L 后不能饮用,相应的盐度值为 0.45 ppt ,取 0.45 ppt 盐度值为咸潮界,取水源地盐度值大于 0.45 ppt 的时间为不宜取水时间^[9]。根据模型计算结果(表1,图6)分析可知:

(1)在最小生态流量 $308 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,咸潮上溯距离最大,北港咸潮界越过魁岐断面并上溯 0.65 km ,南港咸潮界位于义序水厂下游 1.38 km ;在下泄流量 $481 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,北港咸潮界位于魁岐下游 3.5 km ,南港咸潮界位于下游 5.4 km 。

(2)水口水库下泄流量减少 $77 \text{ m}^3/\text{s}$,北港咸潮上溯距离增加 0.732 km ,而南港咸潮上溯距离增加 1.617 km ;水口水库下泄流量减少 $96 \text{ m}^3/\text{s}$,北港咸潮上溯距离增加 3.42 km ,而南港上溯距离增加 2.4 km 。

分析上述可知,在水口水库下泄流量变幅相同时,南北港咸潮上溯的距离增量存在差异;但在水口水库下泄流量变幅不断增加时,南港咸潮上溯距离的增量基本不变,而北港咸潮上溯距离的增量随着流量增大而减小。由于受南北港分流比的影响,造成进入南、北港流量不同,且分流比随着水口水库下泄流量的变化而改变,从而导致咸潮上溯距离的增量存在差异。

表1 不同流量情况下咸潮上溯距离结果

| 水口水库 下泄流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 涨潮/km | | 落潮(白 岩潭断 面)/km |
|---|--------------|----------------|----------------------|
| | 北港(魁 岐断面) | 南港(义序 水厂断面) | |
| 308 | -0.65 | 1.38 | -1.28 |
| 404 | 2.77 | 3.78 | 2.06 |
| 481 | 3.50 | 5.40 | 3.60 |

注:沿水流方向为正,逆流为负。

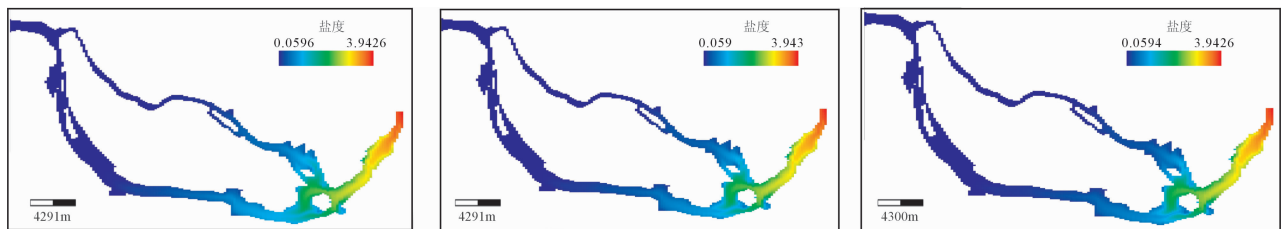
流量 $308 \text{ m}^3/\text{s}$ 涨潮(大潮)工况流量 $404 \text{ m}^3/\text{s}$ 涨潮(大潮)工况流量 $481 \text{ m}^3/\text{s}$ 涨潮(大潮)工况

图6 不同流量情况下咸潮上溯(涨潮)计算结果同时,统计分析(盐度单位:ppt)

3.3 咸潮对水源地影响分析

根据计算结果,分析咸潮上溯对南港城门水厂、

闽江调水工程取水口、长乐炎山水厂和北港马尾闽江备用水源地水质造成影响。图7为模型计算受咸

潮影响各水源地单日盐度变化过程线,可见水源地盐度具有随涨落变化的半日变化,同时统计分析受咸潮影响的水源地单不宜取水时间(表 2)。由表 2 可知:当水口下泄流量为 308 m³/s,城门水厂大约有 8.2 h 不宜取水;闽江调水工程水源地大约 12.8 h 不宜取水;长乐炎山水厂和马尾闽江备用水源地不宜取水时间均超过 18 h;当水口水库下泄流量为 481 m³/s 时,城门水厂不宜取水时间 0.8 h,闽江调水工程不宜取水时间为 6.8 h,长乐炎山水厂和马尾备用水源地不宜取水时间均大于 11 h。

闽江下游水源地不宜取水时间与水口水库^[10-11]、河床演变^[1]有关,特别是河道无序超量挖

沙工程和航道疏浚工程。水口水库的建设导致闽江年悬移质输沙量减少 65.9%^[10];水口水库日均流量变幅较大,在 2011-2014 年中有 12 d 下泄流量低于 308 m³/s。闽江下游无序超量采沙活动和航道数据工程导致河道下切^[12],水位下降,并引起南北港分流比的改变,潮区界上溯距离不断增大。历史资料分析,闽江干流竹岐站 2004 年比 1992 年河床平均下切达 8.25 m,该站同一枯水流量,水位降低达 3.50 m^[12],而潮区界已由 1979 年的洪山桥(古桥)和侯官附近上溯到 2005 水口坝址^[3]。另外,闽江调水工程的实施和极端天气的变化也对水源地取水时间有一定的影响。

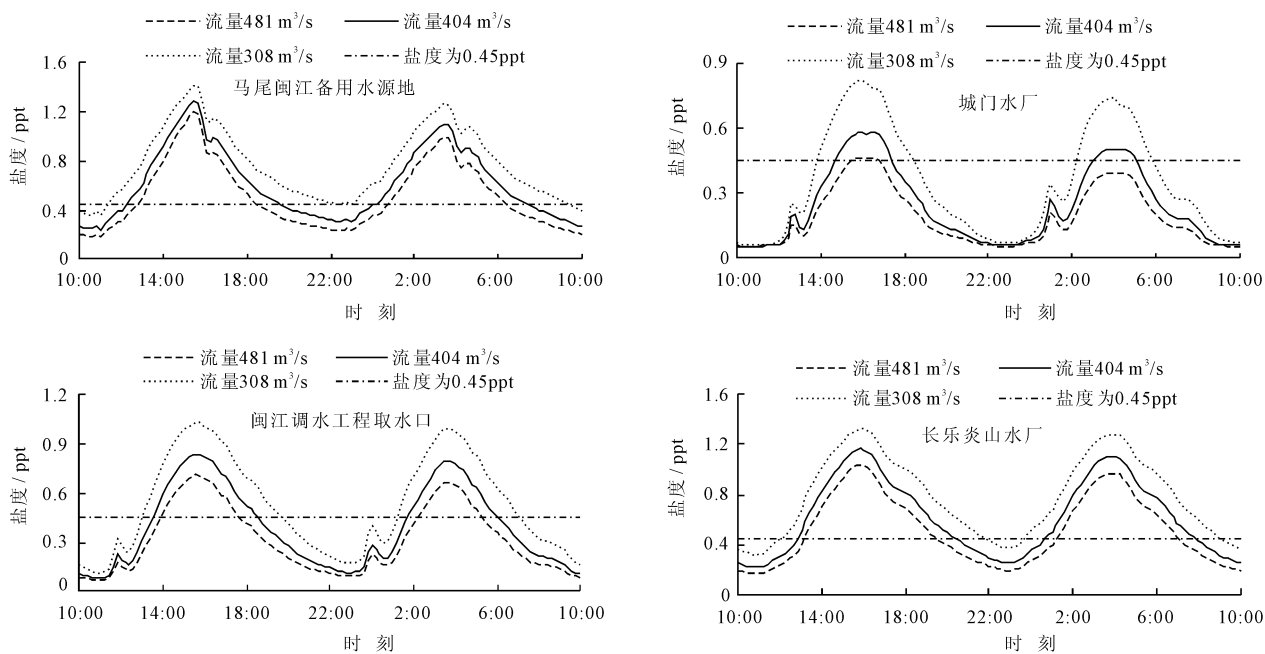


图 7 不同流量情况下水源地单日盐度变化过程线

表 2 不同流量情况下水源地单不宜取水时间结果

| 水口水库 下泄流量/ (m ³ ·s ⁻¹) | 城门 水厂/ h | 闽江调 水工程 水源地/h | 长乐炎 山水厂/ h | 马尾闽 江备用 水源地/h |
|---|----------------|---------------------|------------------|---------------------|
| 308 | 8.2 | 12.8 | 18.7 | 22.0 |
| 404 | 6.7 | 8.6 | 14.8 | 14.7 |
| 481 | 0.8 | 6.8 | 11.8 | 11.2 |

4 结 语

利用 EFDC 建立闽江下游二维非稳态水环境模型,利用 2013 年 12 月同步监测数据对模型参数进行验证,表明建立的 EFDC 模型能够较好模拟闽江下游盐度变化过程,继而预测不同径流条件下咸潮

界的变化和水源地取水口单不宜取水时间。主要结论为:

(1) 根据模型结果分析,咸潮上溯距离与水口水库下泄流量成负相关关系,但受分流比影响咸潮上溯距离在南北港河道存在差异。水口水库下泄流量每减小 96 m³/s,南港咸潮上溯距离增大约 2.4 km;但北港咸潮上溯距离增量随着水口下泄流量的减少而增大。

(2) 目前,咸潮上溯导致城门水厂、闽江调水工程取水点、长乐炎山水厂、马尾备用水源地 4 个水源地的正常取水时间缩短。在水口水库 90% 水文保证率基础上,水口水库下泄流量每减小 10 m³/s,长乐炎山水厂和马尾备用水源地不宜取水时间增加约 0.4 h,城门水厂不宜取水时间增加 0.75 h 左右,闽

江调水工程不宜取水时间增加 0.25 h 左右。

(3) 为减缓咸潮上溯对闽江下游水源地的影响, 建议采取优化水口水库调度方式, 同时开展闽江咸潮入侵预警工作。

参考文献:

- [1] 王世场, 程永隆, 戴枫勇. 闽江下游河床演变咸潮影响数值模拟[J]. 水利科技, 2010(4): 33-35.
- [2] 黄永福. 闽江下游河床演变与咸潮影响研究[C]// 华东七省(市)水利学会协作组第二十三次学术研讨会论文集厦门. 2010: 478-485.
- [3] 黄永福. 闽江下游咸潮变化趋势及对策研究[J]. 水利科技, 2010(3): 1-3.
- [4] Hamrick J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects[M]. Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, 1992.
- [5] 谢锐, 吴德安, 严以新, 等. EFDC 模型在长江口及相邻海域三维水流模拟中的开发应用[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2010, 25(2): 165-174.
- [6] 刘宝超, 李建平, 冯立成. 风影响夏季长江冲淡水扩展的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(1): 25-37.
- [7] Jeong S, Yeon K, Hur Y, et al. Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(6): 934-939.
- [8] Pawlowicz R, Beardsley B, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [9] 朱建荣, 顾玉亮, 吴辉. 长江河口青草沙水库最长连续不宜取水天数[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(5): 1138-1145.
- [10] 游小文. 闽江下游河床变迁与饮水安全预警[J]. 引进与咨询, 2006(9): 69+72.
- [11] 江传捷. 再论闽江下游河床演变及其水力条件的变化[J]. 水利科技, 2006(2): 7-9.
- [12] 程永隆. 闽江下游河床下切对水资源利用的影响[J]. 水利科技, 2005(1): 12-14.
-
- (上接第 70 页)
- [4] 王德丽, 殷淑燕, 王海燕, 等. 近 50 年陕北地区的气候变化[J]. 干旱区研究, 2011, 28(2): 262-267.
- [5] 王涛, 于冬雪, 杨强. 陕北黄土高原地区降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(6): 24-28+33.
- [6] 王心睿, 刘登峰, 陈娜, 等. 渭河流域径流系数的演变规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 138-142.
- [7] 张珏, 王义民, 黄强, 等. 汉江上游石泉和安康水文站径流规律分析[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 18-20.
- [8] 刘晓黎, 黄强, 吕玉洁, 等. 洮河流域径流变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 97-101.
- [9] 曹辉, 黄强, 畅建霞, 等. 黑河径流时空演变规律分析[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(5): 69-72.
- [10] 李保敏, 张俊芝, 吴旭, 等. 基于 Mann-Kendall 法和有序聚类法的径流变化特征研究[J]. 河海水利, 2012(2): 37-38+44.
- [11] 杨东, 刘洪敏, 郭盼盼, 等. 1956-2008 辽宁省近 53 年的降水量变化[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 96-101.
- [12] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 1960-2008 年吉林省降水量的时空演变特征[J]. 中国农业气象, 2010, 31(3): 344-352.