

钱塘江河口盐度数值模拟*

许丹 孙志林 祝丽丽 黄赛花

(浙江大学海洋学院 杭州 310058)

提要 强潮河口盐水入侵对饮用水源地危害极大。基于平面二维水动力盐度模型,对典型强潮河口—钱塘江的水动力及盐水入侵过程进行了数值模拟研究。结果表明枯水径流时盐度变化与潮位过程曲线类似,潮差对盐度大小影响显著,径流量的增加将逐渐减小其相似程度。当流量增加到一定程度后,继续增加的一定径流量所产生的抑咸效果减弱,水资源有效利用率降低,此时允许水源地盐度超标并改从蓄淡避咸水库取水可有效节约水资源。盐度平面分布显示,盐水入侵在强潮河口弯道处受涨潮流主流线影响明显,靠近主流线一岸的盐度大于对岸,单从盐水入侵角度考虑,强潮河口弯道段的取水口应设置在远离涨潮流主流线一岸。钱塘江河口盐度数值模拟对于研究减轻盐水入侵对水源地危害的措施具有指导意义。

关键词 盐度;数值模拟;钱塘江;强潮河口;弯道

中图分类号 P343

河口是连系河流与海洋水体的过渡地带,下泄淡水径流与随潮上溯的咸水在此交汇混合,引起河口水体盐度的沿程变化。盐度在河口的空间分布取决于流域径流量与海域进潮量的对比关系,径流量显示河口淡水水体及各种物质向海输移的动力强度,而上溯的潮流量则在一定程度上体现了盐水入侵的程度。在分层和部分混合型河口,径流与潮流共同作用下通常会形成河口特定的环流结构,上层较淡水体流向海洋、下游较咸水体流向内陆。钱塘江河口作为强混合型河口,径流量作用远小于潮流量,河口盐度的垂向分层不明显,盐度空间变化主要体现在二维平面上。

已有多种数值模型可用来模拟河口海岸的潮流。Hu(2004)提出一个二维水动力盐度模型来研究河口盐水入侵受径流量、潮汐及海平面上升等因素的影响,评估了建立径流量与盐度大小之间关系的可能性。Ji等(2007)开发了一个水动力模型来研究浅小河口的分层及输移过程,经过水位、流速、温度和盐度的率定验证应用于St. Lucie河口的水动力过程,发现径流

量大小对于河口的分层和冲刷的影响举足轻重。Meselhe等(2001)用三维有限差分水动力模型(H3D)模拟了Calcasieu-Sabine河口系统的水动力特性,经一年的水位和盐度实测数据对模型进行校准和验证,获得了理想的结果。Pinho(2007)基于二维水动力和物质输运模型研究了Iberian半岛西北部Lima河口的盐水入侵和多种工况下的河口环流,该模型已成为评价Lima河口盐度入侵的有力工具。此外,还有多种值得学习的盐水入侵模式研究可查(James *et al*, 1989; Hamilton, 1990; Jasinska *et al*, 1991; Mantz, 2001; Crowther J M *et al*, 2001; Sanders *et al*, 2002; Monismith Stephen, 2002; Wang, 2003; Navarrinal *et al*, 2007; Zeinoddini *et al*, 2009)。

钱塘江河口水动力特性极其复杂,各区段受到不同强度的径潮流交互作用。自然条件下其径流量主要由降水量主导,近年来受上游水库调度作用的影响显著。沿程的河宽、水深也由于径流之丰枯与潮汐强弱的变化,有明显的季节性变化和年际间变化。钱塘江河口在大潮汛期间特别容易受到随潮水上溯的盐水影响,但从现有实测资料无法直观的揭示出

* 国家水体污染控制与治理科技重大项目(2009ZX07424-001),国家自然科学基金资助项目(40776007)。许丹,助理研究员, E-mail: darrenxu@zju.edu.cn

通讯作者: 黄赛花, 副研究员, E-mail: ivyhuang21@163.com

收稿日期: 2011-09-22, 收修改稿日期: 2012-04-04

河口段盐水入侵的规律,数值模型则可在一定程度上解决这个问题。目前与钱塘江河口盐水入侵相关的研究重点大都针对杭州湾,关于河口过渡段上段水域盐度值变化的研究分析见诸于可查文献的极少。而杭州的水厂取水水源地——如珊瑚沙、南星桥等地均位于闻家堰到仓前的这一河口过渡段,因此着重研究这一河口段的盐水入侵情况对于保证饮用水水源地取水安全具有重大意义,关系到整个杭州的饮用水安全问题。本文基于不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程,建立二维数学模型来模拟钱塘江河口的盐水入侵情况。

1 研究方法

对基于 Boussinesq 本构关系、不可压缩假设下的雷诺平均 Navier-Stokes 方程整理如下:

连续性方程为:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x 和 y 方向上的两个动量方程分别为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = \\ f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) \\ \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = \\ f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 t 代表时间, x 、 y 和 z 属笛卡尔坐标系; η 是表面高程, d 代表静水深, $h = \eta + d$ 为总水深; \bar{u} 和 \bar{v} 是垂线平均流速在 x 和 y 方向的分量; $f = 2\Omega \sin \phi$ 是科里奥利参数 (Ω 是旋转角速度, ϕ 为地理纬度); g 表重力加速度; ρ 是水的密度; ρ_0 为参考水体密度; 横向应力 T_{ij} 包括层流摩擦、紊流摩擦以及不同的平流之间所存在的应力。使用基于平均深度的流速梯度涡粘度公式来计算这些值:

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y},$$

其中 A 代水平涡动粘质系数。

盐度的输运方程为:

$$\frac{\partial h\bar{s}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{s}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{s}}{\partial y} = hF_s + hs_s \quad (4)$$

其中 \bar{s} 代表垂向平均盐度, s_s 是源盐度;

$$F_s = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] \bar{s}$$

代表水平扩散项, 其中 $D_h = A/\sigma_T$, 为水平扩散系数; σ_T 是普朗特数 (Rodi, 1980)。

对以上(1)(2)(3)方程采用积分形式可统一表示为:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (U_x^I - U_x^J)}{\partial x} + \frac{\partial (U_y^I - U_y^J)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

其中, I 和 J 分别代表非粘性项和粘性项。

其中浅水方程各项定义如下:

$$\begin{aligned} H = \begin{bmatrix} h \\ h\bar{u} \\ h\bar{v} \end{bmatrix}, \quad U_x^I = \begin{bmatrix} h\bar{u} \\ h\bar{u}^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \\ h\bar{u}\bar{v} \end{bmatrix}, \\ U_x^J = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left(2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \\ hA \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \end{bmatrix}, \quad U_y^I = \begin{bmatrix} h\bar{v} \\ h\bar{v}\bar{u} \\ h\bar{v}^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \end{bmatrix}, \\ U_y^J = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \\ hA \left(2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial x} + f\bar{v}h - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + hu_s \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial y} + f\bar{u}h - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + hv_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

盐度输运方程各项定义如下:

$$H = h\bar{s}, \quad U^I = [h\bar{u}\bar{s}, h\bar{v}\bar{s}],$$

$$U^J = \left[hD_h \frac{\partial \bar{s}}{\partial x}, hD_h \frac{\partial \bar{s}}{\partial y} \right], \quad S = hs_s \quad (7)$$

对浅水方程采用有限体积法进行离散, 以 Roe 的近似黎曼解来求解, 具体解法可参见文献 (Roe P L, 1981; Sleigh P A *et al*, 1998)。对输运方程以 TVD-MUSCL 格式来保证计算的稳定性, 具体可见文献 (Hirsch, 1990; Jawahar *et al*, 2000; Darwish *et al*, 2003)。时间积分采用 Runge Kutta 法。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = G(H), \quad (8)$$

$$H_{n+\frac{1}{2}} = H_n + \frac{1}{2} \Delta t G(H_n),$$

$$H_{n+1} = H_n + \Delta t G \left(H_{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (9)$$

2 模型计算

2.1 研究地点及验证

因受到潮汐和径流的共同作用, 钱塘江河口从闻家堰至激浦的过渡段具有复杂的水动力特征, 较易受到随潮流上溯的盐水入侵影响。闻家堰至仓前作为钱塘江河口过渡段的上段, 在洪水期及小潮汛期间不会受到盐水入侵影响, 但在枯水期和大潮汛期间容易发生水域盐度超标, 对杭州有关水厂水源地具有重大影响, 属于一旦盐水入侵就会产生严重后果的区域。本文特选取该过渡段为研究区域, 见图 1。

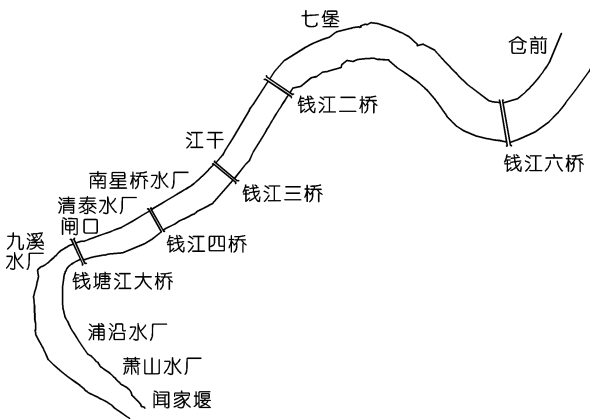


图 1 计算区域

Fig.1 The computation domain

本文中钱塘江河口系统模型的计算区域如图 1 所示, 以闻家堰上边界, 仓前为下边界, 由 62168 个三角形网格和 32041 个节点组成。地形数据及边界条件均由 2004 年 7 月的实测资料所给定, 其中上下游边界分别为径流量和潮位过程线所控制。模拟时间从 2004 年 7 月 4 日零时至 7 月 15 日 23 时, 采用的时间步长为 30s。底部糙率按空间变化而定, 上游大下游小, 具体在 0.011—0.018 之间。上下游边界的盐度条件由氯度的实测数据根据盐度与氯度关系 $S‰=1.8065Cl‰$ 获得。

潮位验证过程如图 2, 为七堡站潮位的实测资料与数值模拟计算数据的对比。图 3 为流速验证过程, 其中以落潮流速为正, 涨潮流速为负。盐度验证过程如图 4, 具体为七堡站盐度的实测资料与数值模拟计算所得盐度值的对比。可以看出, 计算结果与实测资料比较接近, 这为进一步研究该河口的流场结构以及在此基础上的盐水入侵情况提供了相对可靠的依据。

2.2 数值试验与分析

为使水厂取水水源符合饮用水取水标准, 研究水域的氯度必须控制在 250mg/L 以下, 按照 $S‰=1.8065Cl‰$, 即盐度需控制在 0.452 以下。由于下游潮位在短时间内难以被人为影响, 因此探求特定潮位下的盐度变化规律以及研究不同径流量对盐水入侵程度的影响对于保证特殊地段的饮用水取水安全

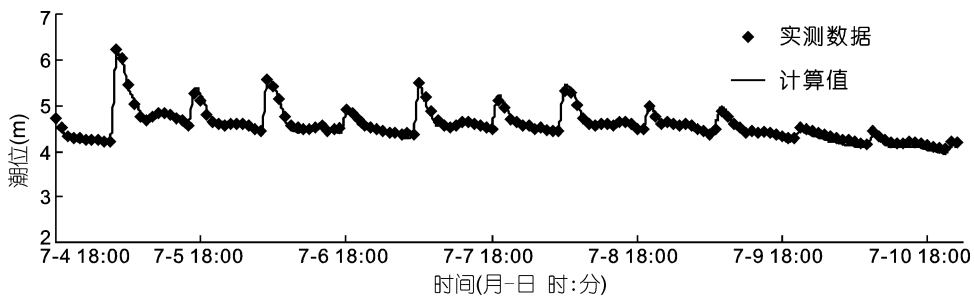


图 2 七堡站潮位计算值与实测数据的比较

Fig.2 Measurement and calculation result of tital level at Qibao Station

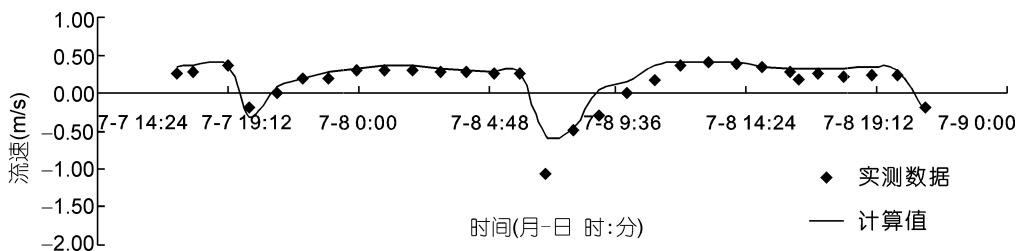


图 3 流速计算值与实测数据

Fig.3 Measurement and calculation result of flow speed at Qibao Station

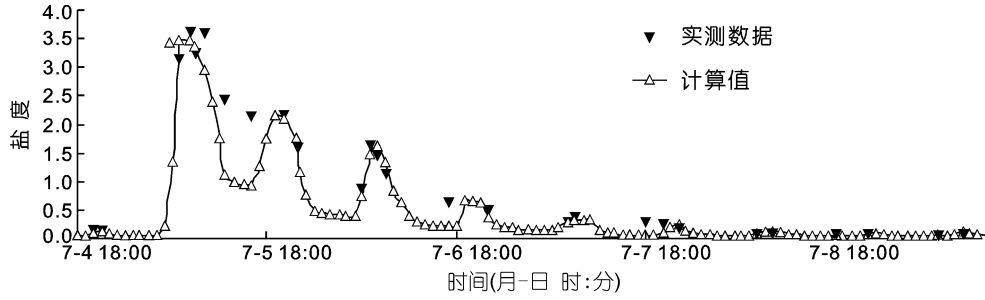


图 4 七堡站盐度计算值与实测数据的比较

Fig.4 Measurement and calculation result of salinity at Qibao Station

就具有关键性的作用，以下针对不同工况条件的研究主要通过改变上游边界的径流量来进行。其中 7 月 4 日到 15 日的实际流量在 $136\text{m}^3/\text{s}$ 到 $410\text{m}^3/\text{s}$ 之间，平均流量为 $291.5\text{m}^3/\text{s}$ ，小于年平均流量 $980\text{m}^3/\text{s}$ ，属枯水径流。

图 5 是在实际流量条件下七堡测站的计算盐度与潮位的关系，可以看出盐度变化在一定程度上与潮位关系相应，盐度变化曲线与潮位过程曲线相似，一天内两高两低，但存在相位差，在每个潮周期内盐度峰值的出现滞后于潮位峰值。分析高低潮时刻的盐度，发现潮差越大对应的最大盐度越大，从而盐水入侵对水源地的影响也越大。

保持下边界的潮位条件不变，上边界的流量减

小为实际流量的一半。图 6 为在实际流量条件下与在实际流量减半条件下计算所得盐度值的对比(曲线 A 代表实际流量条件下的盐度变化过程，曲线 B 代表实际流量减半条件下模拟得到的盐度变化过程)。从图中可以看出在两种流量下盐度变化情况类似，说明在该流量条件下盐度变化同样受潮位过程影响较大。同时在实际流量减半条件下的盐度值增加，最大盐度值比实际流量条件下增加了 0.48，盐度超标时间也增加到 44 小时，说明径流量减小势必加大盐水入侵的影响。

图 7 是七堡测站在实际流量条件下的盐度值与二倍实际流量条件下的盐度值变化情况对比(曲线 C 代表实际流量条件下的盐度变化过程，曲线 D 和 H

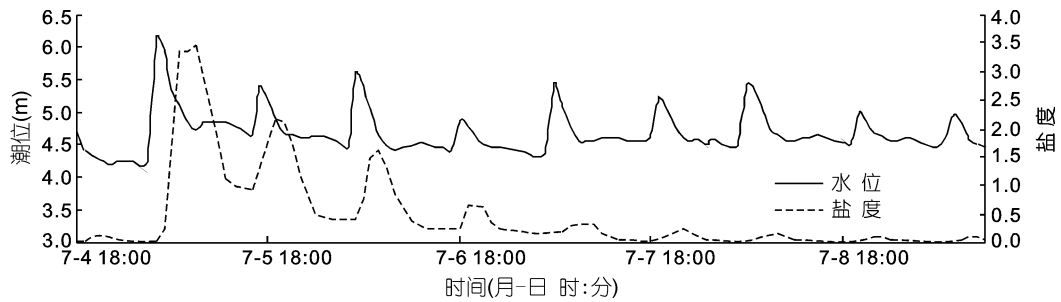


图 5 七堡随潮盐度变化

Fig.5 Variation of salinity with tide at Qibao Station

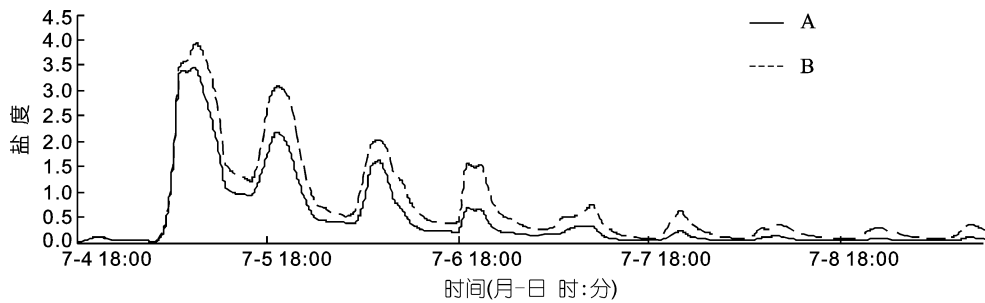


图 6 实际流量与一半实际流量条件下的盐度值对比

Fig.6 Comparison of salinity under actual discharge with that under the half of actual discharge

则分别代表在 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 和 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 的流量条件下模拟得到的盐度变化过程)。从图中可以看出二倍实际流量条件下的盐度值小于实际流量条件下的盐度值, 其中的最大盐度值减小了 0.36, 盐度超标时间减小到 21 小时, 说明径流量的增加减小了盐水入侵的影响, 使得受影响水域的盐度超标时间缩短, 这对水厂及时从水源地获取符合标准水质的水源是极为有利的。同时可以看到盐度的变化曲线仍与潮位过程曲线类似, 但与图 6 比较可发现, 曲线之间的类似程度在逐渐减小, 说明增加径流量在一定程度上不但直接影响盐度的大小, 也影响盐度的变化过程。

图 8 和图 9 分别实际流量条件与 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 流量及 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 流量条件下七堡的盐度值变化情况对比

(曲线 E 和 G 代表实际流量条件下的盐度变化过程, 曲线 D 代表在二倍的实际流量条件下模拟得到的盐度变化过程), 从图中可以看出七堡的盐度值明显随着径流量的增加而减小, 但盐度变化曲线与潮位过程曲线类似的程度已远不如前两种流量条件下的盐度变化曲线, 充分说明径流量越大, 潮位过程对盐度变化的影响程度也将减小。其中从实际流量到 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 流量, 最大盐度值减小了 0.98, 减小幅度为 28.4%, 盐度超标的总时间减少到 8 小时。流量从 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 的流量条件增至 $2000\text{m}^3/\text{s}$, 最大盐度减小了 0.35, 减小幅度为 14.1%, 盐度超标总时间为 7 小时。说明在下泄径流从实际流量到 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 的条件下, 盐度值呈不断减小的趋势, 但盐度值在流量条件从

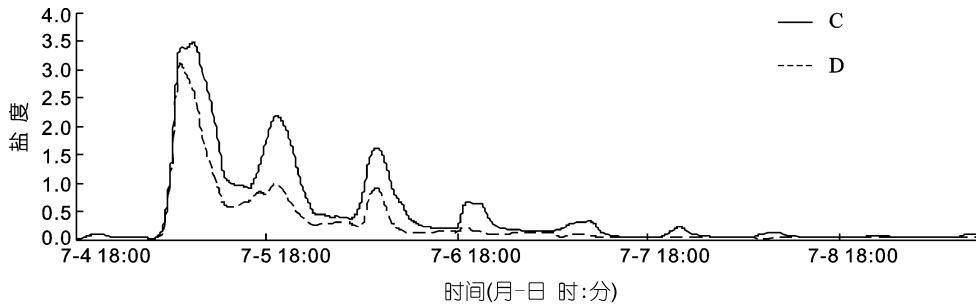


图 7 实际流量与二倍实际流量条件下的盐度值对比

Fig.7 Comparison of salinity under actual discharge with that of double actual discharge

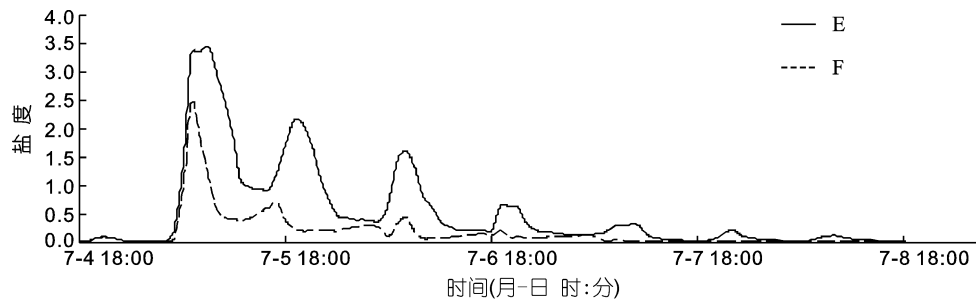


图 8 实际流量与 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 流量条件下的盐度值对比

Fig.8 Comparison of salinity under actual discharge at $1000\text{m}^3/\text{s}$

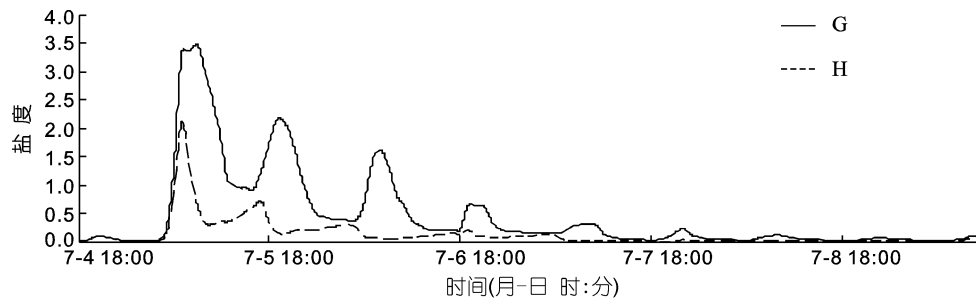


图 9 实际流量与 $2000\text{m}^3/\text{s}$ 流量条件下的盐度值对比

Fig.9 Comparison of salinity under actual discharge at $2000\text{m}^3/\text{s}$

表 1 盐度超标时间对比
 Tab.1 The time for the salinity beyond the standard

| 流量条件 | 一半实际流量 | 实际流量 | 二倍实际流量 | 1000m ³ /s | 2000m ³ /s |
|---------|--------|------|--------|-----------------------|-----------------------|
| 超标时间(h) | 44 | 28 | 21 | 8 | 7 |

1000m³/s 增大到 2000m³/s 之间的减小幅度小于从实际流量到 1000m³/s 流量条件下的减小幅度。从水资源有效利用的角度出发,说明径流量达到一定程度后再一味增大流量抑或对水资源的利用效率已不高,这时如果顾及到枯水期维持上游水库水量以保证可持续调节调度,则可以考虑放弃增加水库下泄流量的方法,选择在盐度超标的时间段内停止取水,改为从避咸水库取水,为蓄淡避咸水库建设提供了依据。

图 10、图 11、图 12 分别是在实际流量、一半实际流量以及 1000m³/s 流量条件下盐水入侵影响取水水源水质的最远距离。从图中可以直观看出径流量越大,盐水入侵的距离越短;径流量越小,盐水入侵影响的距离越长。盐度等值线形态受潮流影响较明显,不同河段的盐度在同一断面上的分布也存在差异。以七堡弯道为例,在弯道过渡段的断面上盐度分布接近于一致,但在弯道处盐度等值线呈明显的舌状分布,在弯道上游部分更加显著,这应该是由受涨潮流主流线影响所致。在七堡弯道在发展过程中,涨潮流主流线在弯道上游部分更靠近凹岸,由于七堡弯道上游部分的过渡段存在一个曲率较小的凹凸岸转换区域,此处主流线也相应靠近凸岸,受此影响盐度值也随主流线突出。因此,如果在七堡弯道上游部分设置取水口,若不考虑泥沙淤积而仅从盐水入侵的角度出发,选择在凹岸更为适宜。也即受涨潮流主流线控制,靠近主流线一侧的盐度大于对岸,此与泥沙

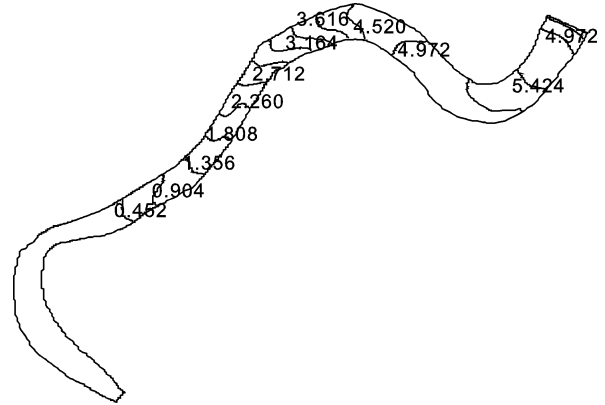


图 11 一半实际流量条件下盐水入侵影响的最远距离
 Fig.11 The longest distance of saltwater intrusion under half of the actual discharge

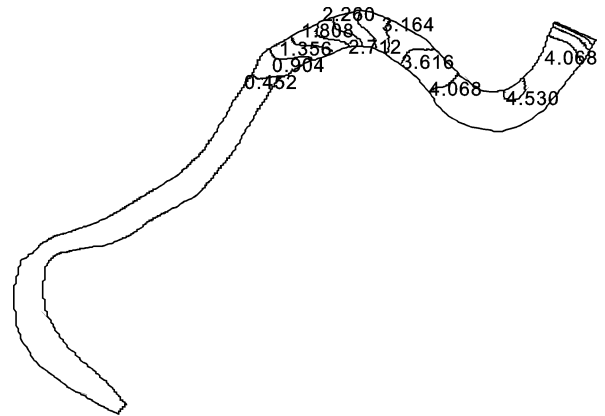


图 12 1000m³/s 流量条件下盐水入侵影响的最远距离
 Fig.12 The longest distance of saltwater intrusion under the discharge at 1000m³/s

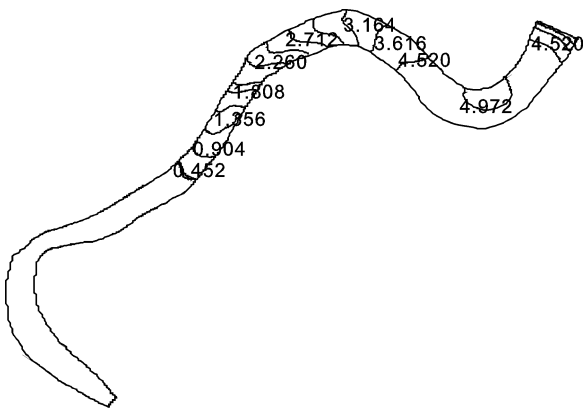


图 10 实际流量条件下盐水入侵影响的最远距离
 Fig.10 The longest distance of saltwater intrusion under actual discharge

淤积情况相反。所以对易受盐水入侵影响的强潮河口而言,在河口弯道处进行取水口选址,存在盐水入侵与泥沙淤积情况孰轻孰重的取舍问题,需根据实际情况进一步综合衡量。

3 结论

本文基于不可压缩、Boussinesq 本构关系假定下的雷诺平均 Navier-Stokes 方程,建立了钱塘江河口平面二维水动力和盐度数值模型,模拟了钱塘江河口的水动力及盐水入侵过程。通过对钱塘江河口水动力过程和盐度场的数值模拟并结合实测资料分析,

发现枯水径流时钱塘江河口盐度变化与潮位过程曲线类似, 盐度大小受潮差影响显著, 径流量的增加将减小盐度变化与潮位过程曲线的相似程度。当流量增加到一定程度后, 再增加流量对控制盐水入侵的效果减弱, 水资源的有效利用率降低, 因此此时允许水源地盐度超标, 在盐度超标的时间段内停止取水, 改为从避咸水库取水更为适宜, 从水资源综合效益的考量角度为蓄淡避咸水库的建设提供了技术依据。盐水入侵平面分布表明, 在潮汐河口弯曲河段, 盐水入侵受涨潮流主流线的影响明显, 盐度在靠近主流线的一岸大于对岸, 单从盐水入侵的角度考虑, 取水口应远离涨潮流主流线。本模型也为今后进一步研究钱塘江河口盐水入侵的机理提供了计算基础, 对于研究减轻盐水入侵对水源地危害的措施具有指导意义。

参 考 文 献

- Crowther J M, Chen F, 2001. A one-dimensional coupled hydrodynamic and salinity model of the Clyde Estuary. *Progress in Water Resources*, 83—96
- Darwish M S, Moukalled F, 2003. TVE schemes for unstructured grids. *Int J of Heat and Mass Transfor*, 46:599—611.
- Hamilton P, 1990. Modelling salinity and circulation for the Columbia River Estuary. *Progress In Oceanography*, 25(1—4): 113—156
- Hirsch C. 1990. *Numerical Computation of Internal and External Flows*, Computational Methods for Inviscid and Viscous Flows. Wiley, Newyork. p. 2
- Hu G G, 2004. Modeling study of saltwater intrusion in Ixohatchee river, Florida. *Proceedings of the International Conference on Estuarine and Coastal Modeling*, Monterey, 667—680
- James E J, Nambudripad K D, Ranganna G *et al*, 1989. Salinity intrusion studies in the estuaries of Malabar Coast, India. *Coastal Zone: Proceedings of the Symposium on Coastal and Ocean Management*, 3(3): 2784—2793
- Jasinska E, 1991. Salt intrusion in tideless estuaries. *Proceedings of 22nd Conference on Coastal Engineering*, Delft, 3: 2866—2879
- Jawahar P, Kamath H, 2000. A high-resolution procedure for Euler and Navier-Stokes computations on unstructured grids. *Comput Phys*, 164: 165—203
- Ji Z G, Hu G D *et al*, 2007. Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in the St. Lucie Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72(1—2): 188—200
- Mantz P A, 2001. Salinity modelling for the Sabine-Neches Estuary, Southeast Texas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water and Maritime Engineering*, 148(4): 245—262
- Meselhe E A, Noshi H M, 2001. Hydrodynamic and Salinity Modeling of the Calcasieu-Sabine Basin. *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*, Orlando, 1—10
- Monismith S G, Kimmerer W, Burau J R *et al*, 2002. Structure and flow-induced variability of the subtidal salinity field in northern San Francisco Bay. *Journal of Physical Oceanography*, 32(11): 3003—3019
- Navarrina F, Colominas I, Casteleiro M *et al*, 2007. A numerical model for the transport of salinity in estuaries. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 56: 507—523
- Pinho, J and Vieira J, 2007. Mathematical modelling of salt water intrusion in a northern Portuguese estuary. *Proceedings of the Fourth InterCeltic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*, Guimarães, 310: 277—288
- Rodi W. 1980. *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*. Taylor & Francis, Delft, Netherland. p. 5—12
- Roe P L, 1981. Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference-schemes. *Journal of Computational Physics*, 43: 357—372
- Sanders B F, Piasecki M, 2002. Mitigation of salinity intrusion in well-mixed estuaries by optimization of freshwater diversion rates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1): 64—77
- Sleigh P A, Gaskell P H, Berzins M *et al*, 1998. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries. *Computers & Fluids*, 27(4): 479—508
- Wang K, 2003. Three-dimensional hydrodynamic and salinity transport modeling in estuaries. *Environmental Fluid Mechanics: Theories and Applications*, 169—206
- Zeinoddini M, Tofighi M A, Vafae F, 2009. Evaluation of dike-type causeway impacts on the flow and salinity regimes in Urmia Lake, Iran. *Journal of Great Lakes Research*, 35(1): 13—22

NUMERICAL SIMULATION OF SALINITY IN QIANTANG RIVER ESTUARY

XU Dan, SUN Zhi-Lin, ZHU Li-Li, HUANG Sai-Hua

(Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou, 310058)

Abstract Saltwater intrusion into macrotidal estuary is harmful to the water quality of the drinking water source. Based on a two-dimensional hydrodynamic salinity model, the progresses of hydrodynamic and saltwater intrusion of typical macrotidal Qiantang River estuary were numerically simulated. It is found that salinity curve has a similar characteristic to the tide level curve at low water runoff, and the tidal range has a great impact on the salinity. However, increase of run-off reduces the similarity gradually. Once the run-off exceeds a certain amount, the impact on saltwater intrusion suppression by run-off increase is reduced, thus the effective rate of water resource utilization is reduced too. Meanwhile, chose a freshwater reservoir instead of Qiantang River as the water source, which could effectively save the water resource. Two-dimensional distribution of salinity shows that rising-tide mainstream line has a great effect on the saltwater intrusion in the bend of a macrotidal estuary. The river bank near the mainstream line has greater salinity than the other parts. Therefore, considering only saltwater intrusion, freshwater intake in river band of a macrotidal estuary should be located away from rising-tide mainstream. The Qiantang River salinity numerical simulation could provide a guide for research on reducing damage by saltwater intrusion to drinking-water source.

Key words salinity; numerical simulation; Qiantang River; macrotidal estuary; river bend