

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.008

钱塘江河口一维盐度动床预报模型及应用

史英标^{1,2}, 李若华², 姚凯华²

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 杭州 310054; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要: 钱塘江河口为强涌潮、高含沙量、河床冲淤剧烈的河口, 其盐度输移时空变化受河床冲淤的反馈影响十分显著。建立了考虑河床冲淤变化的一维盐度动床数学模型, 耦合求解水沙运动、河床冲淤及盐度输移过程, 数值计算方法采用守恒性较好的有限体积法。验证结果表明: 河床冲淤对氯度的影响非常显著, 动床模型的结果与实测基本吻合, 在长历时盐度预报中采用动床模型是必要的。应用该模型分析了钱塘江河口咸水入侵对上游建库、治江缩窄工程等人类活动的响应, 探讨了杭州城市供水水源保证率。结果表明, 新安江水库、河口治理缩窄工程对改善河口淡水资源利用、保障杭州市供水安全显著; 供水保证率要达95%以上, 需采取上游水库泄水调度和新建备用水库等措施。

关键词: 盐度输移; 动床预报模型; 人类活动; 供水保证率; 钱塘江河口

中图分类号: TV 131.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)02-0212-09

河口是人口密集、经济发达的地区, 两岸城市的生活、工业、农业和环境用水取自河口, 取水口水质不同程度地受到盐水入侵的影响, 当江水的含氯度超过标准时(生活标准为0.25g/L, 农业、环境标准为0.35g/L), 不得不停止供水的事件时有发生, 需采取一系列的工程和非工程措施, 保障城市供水安全。河口盐度预报是一种重要的非工程措施, 可为上游水库泄水抑咸、避咸水库避咸等调度决策提供重要的依据。

在一个潮汛(15 d)的短历时盐度预报数学模型研究方面, 20世纪80年代以来已开展了许多工作, 取得了大量的卓有成效的研究成果^[1-6], 但多限于定床求解, 文献[7]虽用动床模型进行了河口长历时的盐度预报, 但在模拟涌潮方面具有一定的局限性, 未见水流、泥沙、盐度及河床变形等多因子耦合的动床盐度预报模型报道, 研究成果也相对较少。钱塘江河口是强涌潮、高含沙量、河床变形剧烈的游荡性河口, 枯水大潮汛期河床回淤量较大, 使得中后期潮差、涨潮量减小较多, 采用定床模型进行预报具有很大的局限性, 不能反映潮汐、径流及河床地形三者相互反馈作用对中长历时盐度输移的影响^[8], 这是钱塘江强涌潮河口中长历时盐度预报的难点之一, 这一特点不同于一般的弱潮河口^[9], 中长历时盐度预报需采用动床模型预报才能符合实际。本文在以往研究成果的基础上, 建立了考虑河床冲淤反馈影响的一维盐度动床数学模型, 耦合求解水流、泥沙运动、河床冲淤变形及盐度等多因子输移过程, 在对钱塘江河口实测资料验证的基础上, 应用于研究钱塘江河口咸水入侵对上游建库、治江缩窄工程等人类活动的响应和杭州城市饮用水源供水保证率。

1 一维盐度动床数学模型

1.1 控制方程及定解条件

钱塘江河口为强混合型河口, 断面或垂线上任意两点的氯度差异绝大多数在30%内, 可采用一维、平面

收稿日期: 2014-09-05; 网络出版时间: 2015-03-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150316.1453.008.html>

基金项目: 浙江省省属科研院所专项计划项目(2015F50010); 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201101056)

作者简介: 史英标(1967—), 男, 浙江嵊州人, 教授级高级工程师, 主要从事河口海岸水沙动力学及水环境方面的研究。

E-mail: shiyb@zjwater.gov.cn

二维数学模型来描述河口段的水流、泥沙及盐度等物质输移的宏观规律^[6]。考虑河床冲淤变形的盐度数值预报的控制方程除水量、动量、盐量守恒方程外, 还应包括不平衡泥沙输移和河床变形方程等进行耦合求解。模型控制方程为

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} = \mathbf{G}(\mathbf{U}) \quad (1)$$

其中, \mathbf{U} 、 $\mathbf{F}(\mathbf{U})$ 、 $\mathbf{G}(\mathbf{U})$ 为求解方程组的守恒变量、通量和源项的向量,

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \rho_m A \\ \rho_m Q \\ AS \\ AC \\ A_b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \rho_m Q \\ \frac{\rho_m Q^2}{A} + \rho_m g p \\ QS \\ QC \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} \frac{\omega B(T_2 S_* - T_1 S)\rho_m}{(1-e)\rho_s} + \rho_1 q_1 \\ \rho_m g \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_z - \frac{\rho_m g n^2 Q |Q| B^{\frac{4}{3}}}{A^{\frac{7}{3}}} \\ \omega B(T_2 S_* - T_1 S) + q_1 S_1 \\ q_1 C_1 + AD \frac{\partial C}{\partial x} \\ \frac{\omega B(T_1 S - T_2 S_*)}{(1-e)\rho_s} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A = \int_{z_0(x)}^z B(x, \eta) d\eta \quad (3)$$

式中 x 为沿流程坐标; t 为时间; Q 为断面流量; Z 为潮位; A 、 B 、 A_b 分别为过水面积、水面宽和河床冲淤面积; ρ_m 为浑水密度, 包括含沙量、盐度对密度的影响, $\rho_m = \rho_c + S \Delta \rho / \rho_s$, S 为断面平均含沙量, ρ_c 为盐水密度, $\rho_c = \rho + \alpha C$, $\Delta \rho = \rho_s - \rho$, ρ 为清水密度, ρ_s 为泥沙密度, C 为断面平均盐度, α 为系数; n 为曼宁系数; p 为作用在断面上的静水压力, $p = \int_{z_0(x)}^z (Z - \eta) B(x, \eta) d\eta$; q_1 、 S_1 和 C_1 分别为旁侧流量、含沙量和盐度; e 为泥沙孔隙率; T_1 、 T_2 分别为底部含沙量与垂线平均含沙量的比值和相应挟沙能力的比值; ω 为泥沙沉降速度; D 为盐度弥散系数, 钱塘江河口的潮波沿程传播过程中有涌潮, 氯度掺混强度比一般河流、河口大 2 个数量级, 可按文献[9]的钱塘江河口盐度公式给定; S_* 为水流挟沙能力。

求解方程(1), 需给定边界条件和初值条件:

上边界给定流量和氯度过程: $Q(0, t) = Q_0(t)$, 当 $Q(0, t) > 0$ 时, $S(0, t) = S_0(t)$, $C(0, t) = C_0(t)$ 。

下边界给定潮位和氯度过程: $Z(l, t) = Z_0(t)$, 当 $Q(l, t) < 0$ 时, $S(l, t) = S_1(t)$, $C(l, t) = C_1(t)$ 。

初始条件: $Z(x, 0) = Z^*(x)$, $Q(x, 0) = Q^*(x)$, $S(x, 0) = S^*(x)$, $C(x, 0) = C^*(x)$ 。

1.2 数值计算方法

数值求解方程(1)已有许多成熟的方法^[10], 但考虑到钱塘江河口存在涌潮, 对数值计算格式的守恒性、间断捕获、源项处理等要求高, 本文采用守恒变量 $\rho_m A$ 、 $\rho_m Q$ 、 AS 及 AC 对方程(1)进行有限体积法离散(控制体见图 1), 避免采用 A 、 Q 、 AS 及 AC 为守恒变量致动量方程新增斜压项、河床冲淤等源项离散困难。

守恒变量的求解格式为

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n) + \Delta t G_i^n \quad (4)$$

其中, U_i^n 、 G_i^n 为上一时刻第 i 个控制体内 U 、 G 的值; $F_{i+1/2}^n$ 为第 i , $i+1$ 个控制体之间界面上的数值通量; Δt 为时间步长; Δx 为空间步长; U_i^{n+1} 为当前时刻的值。

对河床变形 A_b 采用一般的差分格式求解, 求解格式为

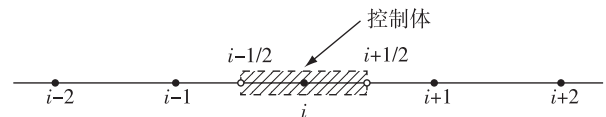


图 1 一维有限控制体

Fig. 1 One dimensional finite control element

$$A_{bi}^{n+1} = A_{bi}^n - \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\omega B(T_1 S - T_2 S_*)}{(1-e)\rho_s} \Big|_i^{n+1} + \frac{\omega B(T_1 S - T_2 S_*)}{(1-e)\rho_s} \Big|_i^n \right) \quad (5)$$

上述关键是控制体界面数值通量的确定,这是有限体积法核心问题之一,已有许多方法可采用。如 TVD 格式^[11]、MacCormack 格式^[12]、BGK 格式^[13]及 KFVS 格式^[14],本文采用基于近似黎曼解的 Roe 格式^[15]计算界面数值通量。首先求特征矩阵的特征值及特征向量。

特征值:

$$\lambda_1 = u + q, \lambda_2 = u - q, \lambda_3 = \lambda_4 = u.$$

特征向量:

$$\mathbf{r}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ u + q \\ S \\ \rho_m \\ C \\ \rho_m \end{pmatrix}, \mathbf{r}_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ u - q \\ S \\ \rho_m \\ C \\ \rho_m \end{pmatrix}, \mathbf{r}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ S \\ \rho_m \\ 0 \\ \rho_m \end{pmatrix}, \mathbf{r}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ C \\ \rho_m \end{pmatrix}$$

将断面平均流速 u 、含沙量 S 、盐度 C 及波速 q 按 Roe 格式进行平均,即

$$\bar{u} = \frac{Q_i/\sqrt{A_i} + Q_{i+1}/\sqrt{A_{i+1}}}{\sqrt{A_i} + \sqrt{A_{i+1}}}, \quad \bar{S} = \frac{S_i\sqrt{A_i} + S_{i+1}\sqrt{A_{i+1}}}{\sqrt{A_i} + \sqrt{A_{i+1}}}, \quad \bar{C} = \frac{C_i\sqrt{A_i} + C_{i+1}\sqrt{A_{i+1}}}{\sqrt{A_i} + \sqrt{A_{i+1}}}$$

$$\bar{q} = 0.5(\sqrt{gA_i/B_i} + \sqrt{gA_{i+1}/B_{i+1}}), \quad \bar{\rho}_m = \rho + \alpha\bar{C} + \beta\bar{S}$$

经推导可得单元界面的通量 F_n 的计算式为

$$F_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} (F(U_i^n) + F(U_{i+1}^n)) - \sum_{k=1}^4 |\bar{\lambda}_k| \bar{\beta}_k \bar{\mathbf{r}}_k \quad (6)$$

其中:

$$F(U_i^n) = \begin{pmatrix} \rho_m Q_i \\ \rho_m \left(\frac{Q_i^2}{A_i} + g p_i \right) \\ Q_i S_i \\ Q_i C_i \end{pmatrix}, \quad F(U_{i+1}^n) = \begin{pmatrix} \rho_m Q_{i+1} \\ \rho_m \left(\frac{Q_{i+1}^2}{A_{i+1}} + g p_{i+1} \right) \\ Q_{i+1} S_{i+1} \\ Q_{i+1} C_{i+1} \end{pmatrix}, \quad \bar{\beta}_1 = \frac{[\rho_m A]}{2} + \frac{[\rho_m Q] - [\rho_m A] \bar{u}}{2\bar{q}},$$

$$\bar{\beta}_2 = \frac{[A \rho_m]}{2} - \frac{[\rho_m Q] - [\rho_m A] \bar{u}}{2\bar{q}}, \quad \bar{\beta}_3 = \frac{[AS] \bar{\rho}_m}{\bar{S}} - [\rho_m A], \quad \bar{\beta}_4 = \frac{[AC] \bar{\rho}_m}{\bar{C}} - [\rho_m A], \quad [\rho_m A] = \rho_m A_{i+1} - \rho_m A_i,$$

$$[\rho_m Q] = \rho_m Q_{i+1} - \rho_m Q_i, \quad [AS] = A_{i+1} S_{i+1} - A_i S_i, \quad [AC] = A_{i+1} C_{i+1} - A_i C_i$$

这样可由已知的 A^n 、 Z^n 、 Q^n 、 S^n 、 C^n , 利用式(4)计算 $(\rho_m A)^{n+1}$ 、 $(\rho_m Q)^{n+1}$ 、 $(AS)^{n+1}$ 、 $(AC)^{n+1}$; 根据浑水密度关系可求得断面 A^{n+1} , 据此求得 Q^{n+1} 、 S^{n+1} 、 C^{n+1} ; 进而由式(3)计算 Z^{n+1} , 由式(5)计算变形 A_{bi}^n 。

1.3 模型验证

应用建立的一维盐度动床数学模型对钱塘江河口段半年以上历时的盐度输运过程进行了数值模拟。数值计算区域及水文验证点位参见图 2。模型的上边界在富春江水电站,下边界在钱塘江河口段的激浦断面,计算域全长 195 km,共划分 190 个计算断面,最小空间步长 100 m,时间步长 60 s。上边界条件采用电站日均流量过程和恒定氯度 0.01 g/L,下边界采用激浦站的实测潮位和氯度过程。

动床模型中的曼宁系数 n 一般随河床的冲淤变形和床沙粒径的粗细化会发生一定的变化,但钱塘江河口的床沙和悬沙粒径基本一致,河床冲淤过程对床沙粒径的变化不明显,因此,本文中的曼宁系数 n 根据文献[16]仅分涨潮和落潮糙率,在计算过程中保持不变,在空间上因河床形态、涌潮河段等给不同的值,通过实测水文资料率定得到,涌潮河段涨潮时取 0.005~0.010,落潮时取 0.010~0.012。对钱塘江河口 2007 年 7~12 月的水沙盐过程进行了验证,限于篇幅,本文重点列出七堡站的潮位、氯度过程和闸口至激浦河段河床累积冲淤量的验证结果。

图 3 为七堡潮位站 8 月 11~21 日大潮汛期潮位的验证结果。可见动床模型计算值与实测值基本吻合, 但在小潮汛期计算值偏低, 主要由于在枯水期, 河床淤积使低潮位有所抬升, 动床模型的计算精度还不能满足潮流计算精度的要求, 但总体上还是一致的, 表明模型所给定的曼宁系数基本合理。

分别采用动床和定床两种模式对氯度进行了模拟计算, 图 4 为七堡站 8 月 11~21 日、9 月 10~20 日大潮汛期计算与实测的比较。从图 4 明显可见长历时氯度的动床和定床计算的差异, 刚开始的第 1 个月(如 8 月)由于河床淤积量还不小, 动床和定床的结果差异还不十分明显, 但第 2 个月(如 9 月)动床和定床差异非常显著, 动床计算最大氯度值约 0.6 g/L, 与实测基本接近, 而定床计算的对应值可达 1.15 g/L, 相差达 1 倍左右, 原因是

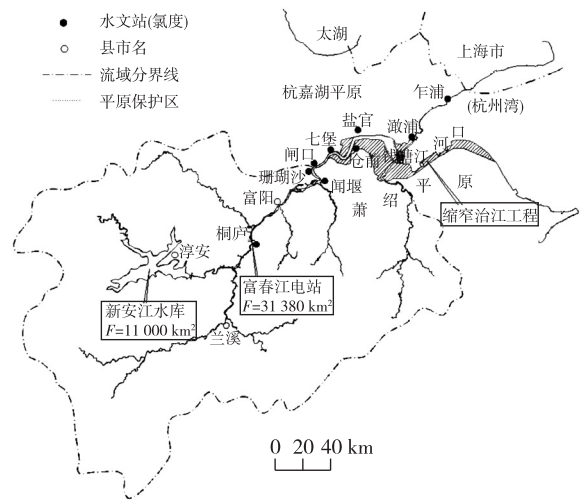


图 2 钱塘江流域概况

Fig. 2 Sketch map of the Qiantang River basin

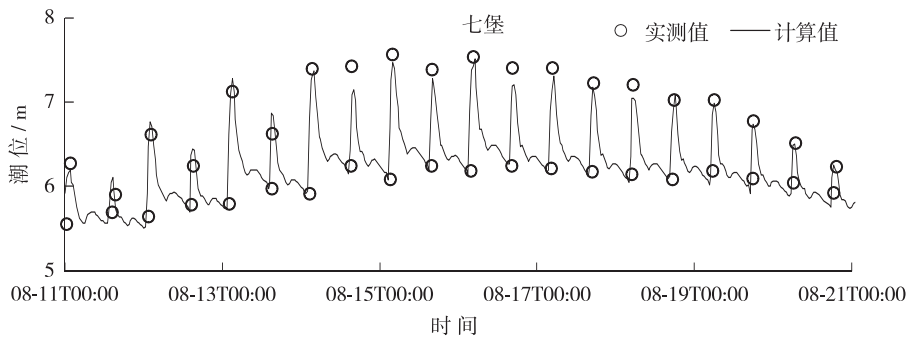


图 3 2007 年 8 月潮位计算值与实测值比较

Fig. 3 Comparison between the calculated and the measured tidal level in August, 2007

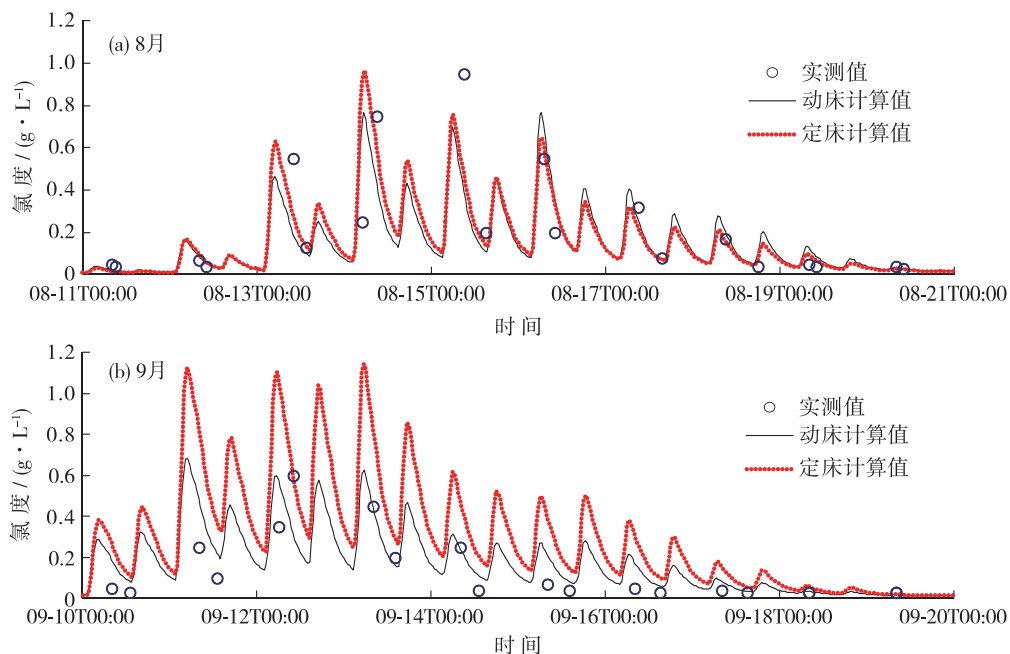


图 4 2007 年 8 月和 9 月氯度计算值与实测值比较

Fig. 4 Comparison between the calculated and the measured chloride in August and September, 2007

钱塘江河口为强冲积性河口，河床质为易冲易淤的细粉沙，径流的丰枯变化对河床的冲淤影响十分敏感，枯水的中后期河床发生显著淤积致进潮量和潮差减小，导致咸水入侵减弱，氯度减小，而定床模型则完全不能反映这种反馈影响，从而使模拟误差很大。因此，对于像钱塘江强涌潮河口的中长历时(半年以上)的盐度预报采用动床模型是必要的。

图 5 为钱塘江河口段闸口至激浦河段 8~12 月沿程累积淤积量的验证计算结果(图中纵坐标负值表示“淤积”，正值表示“冲刷”)。从图 5 可以看出，离电站 170 km 断面以上沿程累积淤积量增加，河床沿程淤积，累积淤积量至该断面达到最大，该断面以下河床发生冲刷，沿程累积淤积量逐渐减小。由此可见钱塘江河口段河床泥沙往复搬运非常显著，在枯水季节涌潮作用下河床呈“上淤下冲”的演变规律，动床数学模型基本能反映这一规律。验证结果表明，闸口至激浦河段淤积总量实测值为 0.26 亿 m^3 ，动床模型计算值为 0.16 亿 m^3 ，其中，闸口至仓前河段实测淤积量为 0.4 亿 m^3 ，计算值为 0.35 亿 m^3 ；仓前至曹娥江口河段实测淤积量为 0.29 亿 m^3 ，计算值为 0.47 亿 m^3 ，曹娥江口至激浦河段实测冲刷量为 0.43 亿 m^3 ，计算值为 0.66 亿 m^3 ，无论整个河段的淤积量还是分河段的冲刷量，计算与实测基本吻合，表明所建模型能较好地反映强涌潮作用下的水沙及盐度运动规律。

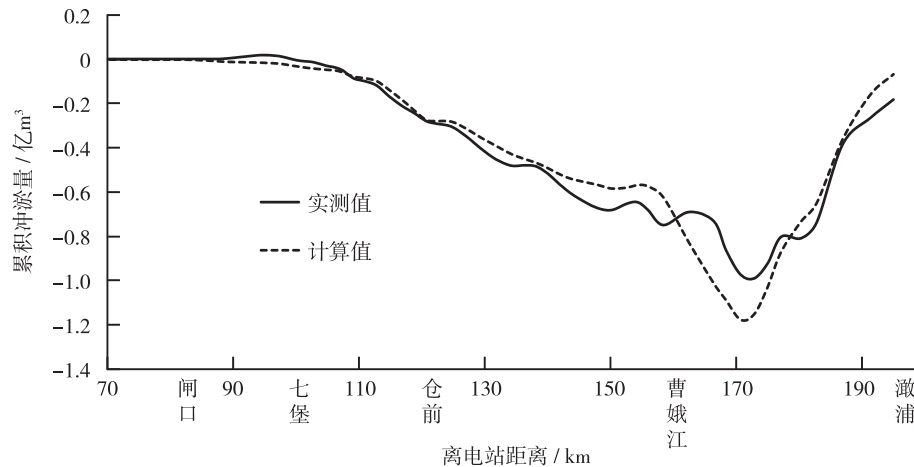


图 5 钱塘江河口闸口至激浦河段累积冲淤量计算与实测比较

Fig. 5 Comparison between the calculated and the measured amount of deposition/erosion in Qiantang River estuary

2 模型应用

2.1 人类活动对盐水入侵影响的数值分析

实测资料分析表明，影响钱塘江河口盐水入侵的主要因素是径流和潮汐^[6]。模型验证计算结果表明，河床冲淤对盐度的影响很大，河床淤积导致进潮量和潮差减小，而潮差减小使得盐度减小，反之，河床冲刷，导致进潮量和潮差增加，从而使盐度增大。因此，河床的冲淤变化对盐度的影响机理是通过潮汐的变化得以实现。钱塘江流域新安江建库及其综合利用改变了钱塘江河口径流的时空分布，且可以人为加以调控，增加了枯水流量，极大地改善了钱塘江河口区水资源的优化配置条件；钱塘江河口大规模的沿江缩窄，改变了河口段原来的平面摆动和大幅度冲淤变化的不稳定性，对盐水入侵产生许多有利的影响，文献[5-6]采用实测资料和定床数学模型对此进行过初步分析。本文利用建立的一维动床盐度数学模型进行数值分析。

2.1.1 新安江建库对钱塘江河口氯度的影响

新安江水库为多年调节水库，其调节库容系数到达 0.9 左右，调节性能很好，不仅可以对年内的丰、枯水期进行调节，而且对多年间及连续枯水年进行调节。经分析新安江建库前后径流的变化可知：1~3 月建库前后的径流基本不变；4~6 月为新安江水库的蓄水期，丰水年可蓄 500~850 m^3/s ，枯水年可蓄 100~250 m^3/s ；

7~9 月建库后可增加径流 100~200 m³/s, 10~12 月增加 120~300 m³/s。根据上述原则设计模拟计算的边界条件。钱塘江河口径流经新安江水库的调节增大了枯水径流, 不仅可减少盐水入侵长度和超标天数, 且可减少河床的淤积, 这是改善盐水入侵的主要因素。

新安江建库后, 数学模型的下边界条件采用 1995 年 7 月 1 日至 12 月 31 日的实测潮位及氯度过程, 上边界采用富春江电站对应时段的泄水流量过程及 0.01 g/L 恒定氯度值; 新安江建库前, 数学模型的下边界潮位及氯度过程不变, 对上边界的流量过程则应考虑新安江水库当时不具备流量的调节能力, 故比 1995 年流量小得多, 径流条件为: 7~10 月, 当 $Q < 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 减小 200~250 m³/s; 11~12 月, 平均减小 150~200 m³/s, 但保证最小流量大于 50 m³/s。

上述两种计算工况的初始地形均采用 1995 年 7 月的实测地形, 利用前面建立的动床模型分别模拟上述边界条件下钱塘江河口沿程的氯度过程, 对比两种计算结果, 分析新安江建库对钱塘江河口盐水入侵的影响。采用氯度瞬时最大值、月平均最大值及年平均值等指标进行分析。建库前、后沿程各站氯度特性值见表 1, 表 2 为建库前、后沿程各站氯度超标天数的对比。

表 1 建库前、后沿程各站氯度特性值

Table 1 Characteristic value of chlorinity before/after construction reservoir

站名	瞬时最大			月平均最大			年平均值		
	建库前/ (g·L ⁻¹)	建库后/ (g·L ⁻¹)	减少/%	建库前/ (g·L ⁻¹)	建库后/ (g·L ⁻¹)	减少/%	建库前/ (g·L ⁻¹)	建库后/ (g·L ⁻¹)	减少/%
闸口	3.82	1.84	51.9	2.50	1.06	57.6	0.32	0.09	71.2
七堡	5.48	4.04	26.4	4.33	3.16	27.1	0.91	0.46	49.6
仓前	6.21	5.36	13.6	5.39	4.69	13.0	1.72	1.14	33.6
盐官	6.81	6.49	4.7	6.22	5.96	4.3	3.19	2.67	16.0

由表 1、表 2 可知, 无论瞬时最大、月平均最大、年平均最大还是超标天数都是越上游减少的百分数越大, 原因是径流的增加首先是影响上游河段, 上游氯度及超标天数减小的幅度相当显著, 说明新安江建库对闸口及南星桥取水条件的改善相当明显, 仓前以下河段氯度值月平均值减小幅度在 15% 以下, 超标时间减小幅度在 10% 以下。关键问题为新安江水库是华东电力系统的调峰、事故备用的主力电站, 如何兼顾电力、供水安全, 需做好协调工作。近 10 年实践证明, 这一矛盾在浙江省防汛抗旱指挥办公室与电力系统间可以协调, 且已经基本解决。

表 2 新安江建库前、后沿程各站氯度超标天数

Table 2 Number of days exceeding standard of chlorinity before/after construction of Xin'anjiang reservoir

站名	建库前/d	建库后/d	减少/%
闻堰	20.9	2.2	89.0
闸口	43.3	17.0	61.0
南星桥	49.8	23.9	52.0
七堡	92.0	69.3	25.0
仓前	131.4	117.6	10.5

2.1.2 钱塘江河口段治江缩窄对盐水入侵的影响

为探明钱塘江河口治江缩窄工程对盐水入侵的影响, 分别计算了治江缩窄前、治江缩窄中期(盐官以上河段的全线缩窄)及后期(尖山河段的治理)等 3 种边界条件下的盐水入侵过程。

治江缩窄前: 采用 1956 年 6 月地形及岸边界, 下边界潮位和氯度采用 1956 年 7 月 1 日~12 月 31 日的实测潮位和氯度过程, 作为治江缩窄前的边界条件; 治江缩窄中期: 采用 1995 年 7 月地形及岸边界, 下边界潮位和氯度采用 1995 年 7 月 1 日~12 月的实测潮位和氯度过程, 作为缩窄中期的边界条件; 治江缩窄后期: 采用 2011 年 7 月地形及岸边界, 下边界激浦潮位和氯度采用 2011 年 7 月 1 日~12 月的潮位过程, 作为缩窄到位后的计算边界条件。3 种工况的上边界流量、氯度均采用 1995 年 7~12 月电站流量过程及氯度过程。

图 6 为代表站位氯度变化统计结果。由图 6 可知, 无论瞬时最大、月平均最大, 治江中期氯度值增大, 七堡以上河段增幅达 14%~55%, 主要因为治江缩窄中期是盐官以上河段缩窄, 引起七堡以上河段潮差及进潮量增加; 仓前站氯度增幅较小, 在 17% 以下。治江后期是尖山河段的治理, 形成弯曲河势, 进潮量和潮

差有所减小,主流线长度增加,与中期比较,沿程氯度总体有所减小,瞬时氯度值减小5%~47%,月平均最大值减小22%~47%,闸口站氯度减小幅度最大,表明尖山河段治江效果对改善河口淡水资源利用、保障杭州市供水安全十分明显。

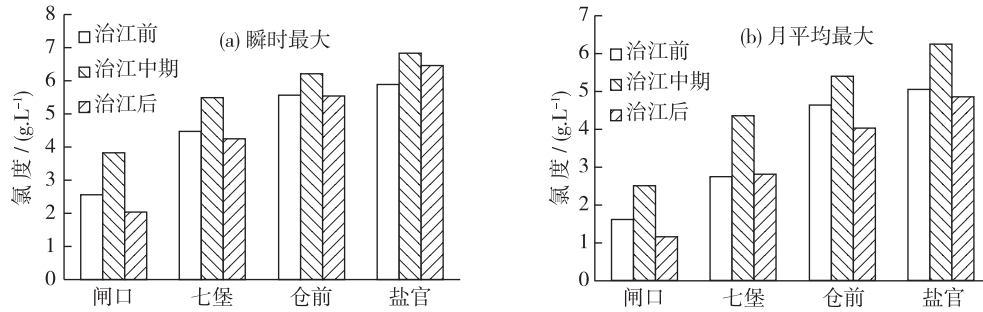


图6 治江缩窄工程对盐水入侵的影响

Fig. 6 Effect of the Qiantang estuary regulation engineering on saltwater intrusion

2.2 杭州市供水保证率研究

珊瑚沙取水口是杭州城市供水工程的重要取水口,在枯水大潮期间氯度经常超标,保证率较低。为此杭州市提出建应急备用水库,通过与珊瑚沙水库的联合优化调度,解决取水避咸和备用水源的问题。为此利用动床模型研究了取水口抗咸能力,包括氯度、超标时间。计算边界条件包括下泄径流 Q 、下边界激浦断面的潮位及含氯度以及沿程总取水流量 q ,其组合满足取水保证率95%要求。

从表3可知,天然条件下,杭州市供水保证率不到90%。要使达到保证率 $P=95\%$ 条件下,珊瑚沙取水口在45 d中有32.3 d超标,第1个潮汛连续超标时间1.9 d,不能满足目前杭州市的供水能力,故应急备用水库要有316万 m^3 的供水能力,要满足第2、第3个潮汛,除应急备用水库850万 m^3 外,还须靠新安江水库加大下泄流量到250~300 m^3/s ,总水量为3.8亿~8.0亿 m^3 ;或取水口上移至长安沙,其连续超标仅0.5 d以下,可用珊瑚沙水库解决。改虑到再增大新安江泄量,水量利用率仅10%,故也有直接从新安江水库引水的方案,目前正在探讨中。

表3 盐水入侵计算结果

Table 3 Computed results of saltwater intrusion

项目	平均氯度/($mg \cdot L^{-1}$)	最大氯度/($mg \cdot L^{-1}$)	连续超标时间/d	总超标时间/d	总超标天数/d	
珊瑚沙	第1个潮汛 15 d	413.8	1 778	1.9	7.5	
	第2个潮汛 15 d	850.6	2 572	8.9	12.2	32.3
	第3个潮汛 15 d	700.2	1 833	7.9	12.6	
长安沙	第1个潮汛 15 d	36.1	261.9	0	0	
	第2个潮汛 15 d	88.1	561.1	0.2	1.3	1.3
	第3个潮汛 15 d	55.9	261.8	0	0	

3 结 论

(1) 根据钱塘江河口水流、泥沙、盐度输移的实际情况,建立了考虑水流、泥沙盐度输移及河床变形等多因子耦合的一维盐度动床数学模型。利用实测水沙、盐度及河床变形资料对盐度输移过程和河床变形进行了验证,所建模型能够反映钱塘江河口水流、泥沙、盐度纵向输移规律,河床冲淤对中长历时盐度输移影响很大,对钱塘江河口中长历时盐度预报,采用动床模型是必要的。

(2) 应用所建模型对新安江建库、钱塘江河口治江缩窄工程等人类活动对盐水入侵的影响进行数值分析。结果表明,新安江水库、钱塘江河口尖山河段治江缩窄工程等显著改善了河口淡水资源利用,保障了杭

州城市供水安全。

(3) 杭州市供水保证率的研究表明,杭州城市饮用水源供水保证率不到90%,要使取水保证率达到95%,需通过新安江水库调度和新建备用水库、取水口上移等工程和非工程措施。

参考文献:

- [1] 韩曾萃,程杭平. 钱塘江江水含盐度计算的研究[J]. 水利学报,1981(6): 46-50. (HAN Zengcui, CHENG Hangping. Study on the salinity calculation of the Qiantang estuary [J]. Journal of Hydraulics Engineering, 1981(6): 46-50. (in Chinese))
- [2] HAN Zengcui, SHAO Yaqin. Salt water intrusion and counter measures in some coastal cities in China [J]. China Ocean Engineering, 1986, 3(2): 177-193.
- [3] 罗小峰,陈志昌. 径流和潮汐对长江口盐水入侵数值模拟研究[J]. 海岸工程, 2005,24(3): 1-6. (LUO Xiaofeng, CHEN Zhichang. Numerical simulation study of effect of runoff and tide on the Changjiang River mouth saltwater intrusion [J]. Chinese Coastal Engineering, 2005,24(3):1-6. (in Chinese))
- [4] 赵渭军,韩继静,史英标,等. 杭州市抗咸二期取水工程氯度研究[J]. 中国农村水利水电,2007,5:26-29. (ZHAO Weijun, HAN Jijing, SHI Yingbiao, et al. Study on the chlorinity of the second-stage salinity-resisting and water-intake project in Hangzhou city [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, 5: 26-29. (in Chinese))
- [5] 韩曾萃,潘存鸿,史英标,等. 人类活动对咸水入侵的影响[J]. 水科学进展,2002,13(3): 333-336. (HAN Zengcui, PAN Cunhong, SHI Yingbiao, et al. Impact of human activities on salt water intrusion in estuaries [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(3): 333-336. (in Chinese))
- [6] 史英标,潘存鸿,程文龙,等. 钱塘江河口段盐度时空分布与预测模型[J]. 水科学进展,2012,23(3):409-418. (SHI Yingbiao, PAN Cunhong, CHENG Wenlong, et al. Temporal-spatial variation and numerical forecast model of salt water intrusion of the Qiantang estuarine reach [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 419-428. (in Chinese))
- [7] 韩曾萃,程杭平,史英标,等. 钱塘江河口咸水入侵长历时预测、对策的实践检验[J]. 水利学报, 2012,43(2): 232-240. (HAN Zengcui, CHENG Hangping, SHI Yingbiao, et al. Long-term predictions and countermeasures of saltwater intrusion in the Qiantang estuary [J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 232-240. (in Chinese))
- [8] HAN Zengcui, SHI Yingbiao, YOU Aiju. Prediction and countermeasures of saltwater intrusion in the Qiantang estuary [J]. Advances in Water Resource and Protection, 2014, 2: 62-74.
- [9] 卢陈,袁丽蓉,高时友,等. 潮汐强度与咸潮上溯距离试验[J]. 水科学进展,2013,24(2):251-257. (LU Chen, YUAN Lirong, GAO Shiyu, et al. Experimental study on the relationship between tide strength and salt intrusion length [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 251-257. (in Chinese))
- [10] 史英标,徐有成,林炳尧. 钱塘江河口洪水特性及动床数值模拟[J]. 泥沙研究,2005(1): 7-14. (SHI Yingbiao, XU Youcheng, LIN Bingyao. Characteristic of the flood level in the Qiantang estuary and mobile bed model for forecast [J]. Journal of Sediment Research, 2005(1):7-14. (in Chinese))
- [11] HARTEN A. A high resolution scheme for the computation of weak solutions of hyperbolic conservation laws[J]. Journal of Comput Phys, 1983,49: 357-393.
- [12] MACCORMACK R W, PAULLAY A J. The influence of the computational mesh on accuracy for initial value problems with discontinuous or non-unique solutions [J]. Computers and Fluids, 1974, 2: 339-361.
- [13] 赖惠林,马昌凤. 二维对流扩散方程的格子 BGK 模拟[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2008,24(5): 15-18. (LAI Huilin, MA Changfeng. The lattice BGK model for simulating the two-dimensional convection-diffusion equation [J]. Journal of Fujian Teachers University: Natural Science, 2008, 24(5): 15-18. (in Chinese))
- [14] 潘存鸿,徐昆. 三角形网格下求解二维浅水方程的 KFVS 格式[J]. 水利学报, 2006,37(7): 858-864. (PAN Cunhong, XU Kun. Kinetic flux vector splitting scheme for solving 2-D shallow water equations with triangular mesh [J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(7): 858-864. (in Chinese))
- [15] ROE P L. Approximate Riemann solves parameter vector and difference[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 43: 357-372.
- [16] 陈耀登,闵锦忠,高玉芳. 涌潮河口底摩擦系数伴随资料同化研究[J]. 水科学进展,2011,22(3):400-407. (CHEN Yaodeng, MIN Jinzhong, GAO Yufang. Study of bottom friction coefficient in tidal bore affected estuaries using the adjoint method of data assimilation [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 400-407. (in Chinese))

1-D movable bed numerical forecast model of salinity of the Qiantang River estuarine reach and its application*

SHI Yingbiao^{1,2}, LI Ruohua², YAO Kaihua²

(1. Marine College of Zhejiang University, Hangzhou 310054, China;

2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The Qiantang River estuary is an alluvial estuary with strong tidal bore, high sediment concentration and easy changeable riverbed. The interaction between tide and fluvial feedback has great effects on saltwater intrusion. In this paper, a 1-D numerical forecast model of salinity has been developed in the light of riverbed deformation, and the process of water flow, sediment transport, river bed deformation and salinity are fully coupled solved. The governing equations of the model are solved by an explicit finite-volume method with good conservation performance. The verification results show that the riverbed deformation has great influence on chlorine, and the chlorine computed by the movable-bed numerical model agrees well with the measured. Therefore, it is necessary to adopt the movable-bed numerical model in long-duration salinity forecast. Finally, the model is used to investigate the response pattern of saltwater intrusion in the Qiantang River estuary to human activities, such as construction of Xin'anjiang-reservoir and the Qiantang River estuary narrowing regulation. And the problem of the water supply guarantee rate of Hangzhou city is also discussed. The results show that Xin'anjiang-reservoir and the Qiantang River estuary regulation engineering have a significant effect on improving the estuarine freshwater resources and ensuring the safety of water supply of Hangzhou city. In order to raise the water supply guarantee rate to 95%, the measures of scheduling release water discharge from the upstream reservoir and building a new backup reservoir should be taken.

Key words: salinity transport; movable bed numerical forecast model; human activities; guarantee rate of water supply; Qiantang River estuary

著作权使用声明

本刊所登论文的中、英文摘要或全文同时被有关文摘刊物、检索系统、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社等有关网上期刊转载、传播,作者将稿件交本刊登载的同时也将数字化汇编权、数字化复制权、数字化制品形式(包括光盘、互联网出版物)发行权、信息网络传播权等著作权授予本刊编辑部,作者著作权使用费随本刊稿酬一次性给付。凡有不同意见者,可另投他刊。2010年1月起,《水科学进展》许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社独家使用上述中文版著作权,任何其他第三方不得使用。

作者来稿文责自负,不得一稿多投。收到本刊收稿通知后3个月未收到稿件处理意见者,若无其他约定,可自行处理稿件。论文出版后,按国家有关规定酌付稿酬,并赠阅当期期刊两份。受编辑部人力所限,退稿稿件恕不返审稿意见,敬请谅解。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. 201101056).