DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.003

丁磊,陈黎明,高祥宇,等. 长江口水源地取水口盐度对径潮动力的响应[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 14-23. (DING Lei, CHEN Liming, GAO Xiangyu, et al. Response of salinity at water source intakes to runoff and tidal dynamics of Yangtze River estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 14-23. (in Chinese))

# 长江口水源地取水口盐度对径潮动力的响应

丁磊1,陈黎明1,高祥宇1,缴健1,胡静2

(1. 南京水利科学研究院 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室,水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210029;2. 南京市水利规划设计院股份有限公司,江苏南京 210006)

**摘要:**上海市饮用水的 80%来自长江口三大水源地——陈行水库、青草沙水库和东风西沙水库。枯季盐水入 侵一直是长江口水源地安全面临的最大威胁。作为河口区域的主要动力,有必要进一步研究径流和潮汐对长 江口水源地盐水入侵的影响。通过建立长江口平面二维潮流盐度数学模型,对长江口盐水入侵进行模拟,分析 了水源地取水口盐度过程与潮位过程的关系,探讨了北支盐水倒灌对水源地的影响。研究结果表明:三大水源 地因位置不同,盐度过程线特征也不相同。水源地取水口盐度过程线与潮位过程线的关系可作为受北支倒灌 盐水和正面入侵盐水影响程度的重要依据。北支盐水倒灌发生时,东风西沙水库、陈行水库、青草沙水库水源 地分别在大潮、中潮及小潮时受倒灌盐水影响最为严重。随着径流增大,水源地受盐水入侵影响的时间会提 前,但是盐度则随径流的增大而减弱。

**关 键 词:**盐水入侵;长江口;水源地;径流;潮汐;北支盐水倒灌

中图分类号: P731.2; P343.5 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2018)05-0014-10

长江河口是我国最大的河口,上起徐六泾,在平面上呈三 级分汊、四口入海的河势格局。崇明岛将长江口分为北支和 南支,长兴岛和横沙岛将南支分为北港和南港,九段沙将南港 分为北槽和南槽(图1)。长江口水量丰沛,水体自净能力强, 为沿岸居民提供了丰富的淡水资源。从1883年开始,上海市 取水口位于黄浦江。由于黄浦江处于太湖流域下游,随着时 间推移,上游污染影响下水质较差且不稳定性的问题日益凸 显。因此,有必要寻找新水源地。从20世纪90年代开始,长 江口三大水源地——陈行水库、青草沙水库和东风西沙水库 相继建成(图1),目前供水规模已达上海市的80%左右。因 此长江口水源地安全对上海市经济发展和人民生活产生重要 影响。



图 1 长江口水源地位置 Fig. 1 Positions of water sources in Yangtze River estuary

由于三大水源地取水口均位于河口地区,枯季盐水入侵成为水源地安全最主要的威胁。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)及相关规范要求,盐度超过0.45%。时不可作为饮用水。径流和潮汐是影响河口盐水入侵的主要因素,20世纪80年代初的研究即已经涉及径流和潮汐对盐度分布的影响<sup>[1]</sup>。安徽大

收稿日期: 2018-01-09

- **基金项目:** 国家 重 点 研 发 计 划 资 助 项 目 (2017YFC0405400, 2017YFC0405406); 中 央 分 成 水 资 源 费 项 目 (1261530210283); 南京水利科学研究院基本科研业务费专项资金资助项目(Y217010)
- **作者简介:** 丁 磊(1993—),男,江苏盐城人,助理工程师,硕士,主要从事港口海岸及近海工程方面研究。 E-mail: lding@nhri.com

通水文站距离长江口 600 多千米,是距离长江口最近且不受潮汐影响的水文站,因此大通的径流量可表示长 江口径流特征<sup>[2]</sup>。罗小峰等<sup>[3]</sup>通过不同径潮组合的数值模拟表明,径流直接影响盐水入侵距离、潮汐影响 盐水回荡范围。侯成程等<sup>[4]</sup>研究了长江口盐水入侵对大通枯季径流量变化的响应时间。Qiu 等<sup>[5]</sup>研究了涨 落潮、大小潮以及潮汐季节变化对长江口盐水入侵影响。长江口三级分汊四口入海的河势格局又使得盐水 入侵的时空分布更为复杂<sup>[6]</sup>,Qiu 等<sup>[5]</sup>认为不同的潮汐强度会使各汊道分流比发生改变,进一步影响盐度的 空间分布。北支的盐水倒灌是长江口盐水入侵的一个重要特征。因北支分流比低于 5%而进潮量占整个长 江口的 25%左右,因此北支是长江口盐水入侵最严重的汊道。北支高浓度盐水在径流较小、潮动力较强时 会倒灌进入南支。丁磊等<sup>[7]</sup>对 2013,2014 年南北支分汊口处盐度实测资料进行分析,研究了北支盐水倒灌 的影响因素及下泄路径。Wu 等<sup>[8]</sup>研究了径潮动力对北支倒灌盐通量的影响。陈敏建等<sup>[9]</sup>研究了南支盐度 超标面积与径流、潮差的函数关系。孙昭华等<sup>[10]</sup>将潮差关系与农历日期建立联系,提出了一种仅需知道大 通流量就可快速估算北支盐水倒灌影响下南支特定水域盐度的方法。

东风西沙水库和陈行水库取水口位于南支水域,青草沙水库取水口位于北港水域,均会不同程度受到北 支盐水倒灌的影响。关于北支盐水倒灌物理过程的表征,以往是通过基于盐度场的等值线图或是纵剖面盐 度图进行表示<sup>[11]</sup>,该方法能够从场的角度形象体现盐水倒灌的平面过程,但无法刻画盐度随时间的连续变 化。而实际上测点盐度过程线和潮位过程线的关系也可反映盐水来源,此前鲜有这方面的详细分析。同时, 倒灌盐水团对三大水源地影响时间的研究也较少。因此,本文通过建立数学模型对长江口水-盐动力特性 进行模拟,对不同径潮动力下长江口水源地受盐水入侵的影响展开研究。研究结果可作为长江口淡水资源 利用及水源地安全研究的依据,为其他河口水源地建设和运行调度提供参考。

1 长江口水文情势

长江口地区水资源总量为42.33亿m<sup>3</sup>,其中地表水资源量38.00亿m<sup>3</sup>。长江入海水量年内分配不均匀,基本表现为洪季(5—10月)流量大,枯季(11月至次年4月)流量小。

根据大通站 1950—2016 年资料统计,大通站多年平均流量 28 300 m<sup>3</sup>/s,1954 年 8 月 1 日出现最大流量 92 600 m<sup>3</sup>/s,1979 年 1 月 31 日出现最小流量为4 620 m<sup>3</sup>/s。三峡工程使得长江流量的年内分布发生改变, 枯季流量总体增加。2003 年三峡水库蓄水后各年最小流量如图 2 所示。最小流量不会低于5 000 m<sup>3</sup>/s,尤 其是到试验性蓄水运行期(2008 年汛后开始)时,仅 2014 年出现低于10 000 m<sup>3</sup>/s 的流量。

长江口为中等潮差河口,中竣站年平均潮差 2.66 m,最大潮差 4.62 m。河口口门处总进潮量为 13 亿 m<sup>3</sup>(枯季小潮)~53 亿 m<sup>3</sup>(洪季大潮)。潮汐受外 海潮波控制,口外潮汐为正规半日潮,口内潮汐为非正 规浅海半日潮。东海前进波系统在本区域 M2 分潮为 主,起支配作用;其次还受到黄海旋转潮波影响,以 K1 和 O1 分潮较显著。潮波进入长江口区域后,受边界条 件和上游径流影响,潮波发生变形,既非典型的前进波, 也非典型的驻波。



Fig. 2 Annual minimum runoff of Datong station

2 模型的建立与验证

目前能搜集到的长江口高精度盐度资料主要来源于同步全潮水文测验,优点是精度高且为多点同步测量,缺点是成本高因而缺乏连续性。因此建立数学模型并用实测资料进行验证是较为常用的研究手段。长江口枯季大部分区域盐淡水混合类型为缓混合型,北支为强混合型,盐度垂线差异较小,盐水楔不明显,因此采用平面二维数学模型可以对长江口的盐水入侵进行较好模拟,国内学者有较为成功的经验<sup>[3,12]</sup>。但因长江口人类活动明显,局部地形变化较快,盐水入侵会因此受到影响,采取不同地形会使研究结果产生差异。

因此建立采用较新实测地形的数学模型和利用最近的实测资料对模型进行验证较为必要。

#### 2.1 模型介绍

利用 Delft3D 软件建立长江口大范围平面二维潮流盐度数学模型对盐度输运进行模拟。Delft3D 是由 荷兰 Delft 水力研究院开发的,是目前较为先进的水动力、水质、泥沙等模型系统之一。Delft3D 由 6 个模块 组成,各模块既独立又相互联系,能较精确地进行大尺度水流(Flow)、水动力(Hydro-dynamics)、波浪 (Waves)、泥沙(Morphology)、水质(Waq)和生态(Eco)计算。Delft3D 模型的计算稳定性强,采用干湿动边界 处理技术,对河口海岸区域有较好适应性,可快速解决网格绘制、水深参数插值等问题,并具有强大的后处理 功能。主要利用其中的 Flow 模块对长江口盐度输运过程进行模拟研究。

水动力计算的浅水方程基于 Navier-Stokes 方程。控制方程如下: 连续性方程,

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \sqrt{G_{\eta\eta}} \left\{ \frac{\partial \left[ \sqrt{G_{\eta\eta}} \left( d + \zeta \right) u \right]}{\partial \xi} + \frac{\partial \left[ \sqrt{G_{\xi\xi}} \left( d + \zeta \right) v \right]}{\partial \eta} \right\} = Q \tag{1}$$

$$Q = H \int_{-1}^{0} (q_{\rm in} - q_{\rm out}) \,\mathrm{d}\sigma + P - E \tag{2}$$

式中: $\zeta$  为参考基面上自由表面高程,d 为参考基面下的水深(m); $\sqrt{G_{\xi\xi}}, \sqrt{G_{\eta\eta}}$  为直角坐标系(x, y)与正交曲 线坐标系( $\xi, \eta$ )的转换系数, $G_{\xi\xi} = x_{\xi}^{2} + y_{\xi}^{2}, G_{\eta\eta} = x_{\eta}^{2} + y_{\eta}^{2}; u, v$  为 $\xi, \eta$ 方向上的垂向平均速度(m/s);Q 为 由排水、引水、降水、蒸发等引起的单位面积水量变化(m/s); $q_{in}, q_{out}$ 表示单位面积体积内的源和汇;P, E 表 示单位面积的蒸发量和降水量。

水平动量方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv = -\frac{P_{\xi}}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} + F_{\xi} + M_{\xi}$$
(3)

$$-\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial v}{\partial\xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial v}{\partial\eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial\eta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial\eta} + fu = -\frac{P_{\eta}}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} + F_{\eta} + M_{\eta}$$
(4)

式中:f为科里奧利参数(1/s); $\rho_0$ 为水体密度(kg/m<sup>3</sup>); $P_{\xi}$ ,  $P_{\eta}$ 为 $\xi$ , $\eta$ 方向的静水压力梯度(kg/(m<sup>2</sup> · s<sup>2</sup>));  $F_{\xi}$ ,  $F_{\eta}$ 为 $\xi$ , $\eta$ 方向的紊动动量通量(m/s<sup>2</sup>); $M_{\xi}$ ,  $M_{\eta}$ 为 $\xi$ , $\eta$ 方向的动量源或汇(m/s<sup>2</sup>)。

在 Delft 3D-FLOW 模块中,物质输运采用对流扩散方程进行模拟。输运方程以守恒形式呈现:

$$\frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial \left[ \sqrt{G_{\eta\eta}} \left( d+\zeta \right) uc \right]}{\partial \xi} + \frac{\partial \left[ \sqrt{G_{\xi\xi}} \left( d+\zeta \right) vc \right]}{\partial \eta} \right\} = \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ D_{\mathrm{H}} \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right\} + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[ D_{\mathrm{H}} \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right] \right\}$$
(5)

式中:c为盐度; $D_{\rm H}$ 为水平扩散系数(m/s<sup>2</sup>)。

模型采用正交曲线网格,且可以使网格线最大程度地贴合边界线,避免"阶梯"边界导致发散。模型基于有限差分数值方法。时间项的离散采用 ADI 差分格式,将1个时间步长分成2步,每一步为半个时间步长,前、后半个步长分别对不同方向进行隐式处理。

#### 2.2 模型建立

计算范围及网格如图 3 所示,包括长江口、杭州湾及邻近海域。北边界位于北纬 34.67°,南边界最远位 于北纬 29.33°,东边界最远位于东经 124.24°,东、南、北开边界采用水位边界,由主要分潮调和分析所得。 上游边界取在大通,为流量控制,验证时使用大通站逐时实测流量。横向网格 1 431 个,纵向 163 个。外海 处网格尺寸最大达到 2 km×2 km,长江口区域进行了局部加密处理,最小网格尺寸为 70 m×60 m。

江阴以下至长江口地形为 2011 年实测地形, 江阴至大通为 2006 年实测地形。外海由海图数字化得到。

坐标为高斯-克吕克坐标,高程统一为 85 高程系统。根据柯朗数(Courant number)原则,时间步长取 15 s。 模型糙率由谢才系数提供,根据地形情况采用不同的数值,范围为 80~200 m<sup>1/2</sup>/s。模型初始流速和初始水 位设为 0。外海边界盐度为 35‰,长江口内根据实测资料进行插值,大通边界盐度为 0,大通至徐六泾的盐 度由线性插值得到。扩散系数为 250 m<sup>2</sup>/s。模型计算运行 4 个月(8 个完整的半月周期)作为初始场进行 验证。



图 3 模型整体和局部网格 Fig. 3 Entire and local model grids

#### 2.3 模型验证

模型采用 2016 年 1 月长江口大范围全潮同步水文测验进行水动力与盐度的验证。本次测验共布置 10 条垂线,基本覆盖了长江口水域,同时还搜集了测验期间连兴港、青龙港、崇头、徐六泾、白茆、六滧(南)、高桥等潮位(图 4)。



图 4 水文测验测点及潮位站 Fig. 4 Hydrological test vertical lines and tidal stations

对大、中、小潮水位、流速、流向及盐度进行了验证。鉴于篇幅关系仅给出大潮时崇头、六滧潮位验证及 Z1,Y8 流速、流向和盐度验证结果(图 5)。可以看出,该模型能较好地模拟长江口水动力及盐度输运。



Fig. 5 Results of model verification

### 3 盐度与潮位过程关系

#### 3.1 边界条件

数学模型计算时,上游采用恒定流。潮汐方面,取验证时的完整半月周期闭合循环计算。模型计算运行 4 个月(8 个完整的半月周期)作为初始场。分析时间为 16 d,包含 1 个完整的半月周期,从最大潮差出现前 4 d 开始,再到最小潮差出现后 4 d 结束。

#### 3.2 水源地取水口盐度过程

长江口水源地取水口盐度会随涨落潮变化,若落潮时盐度上升,涨潮时盐度下降,该现象表明该处盐水 来源于取水口上游,即受北支倒灌盐水影响;若涨潮时盐度上升,落潮时盐度下降,则表明该处盐水来源于取 水口下游,为外海盐水正面影响或已经下泄到取水口下游的盐水团随涨潮流上溯所致。不同径流下,水源地 取水口盐度大小不同,但盐度过程变化特征较为相似。以大通径流为12 500 m<sup>3</sup>/s(接近1月径流 50%频率) 为例<sup>[13-14]</sup>,分析3个水源地取水口盐度过程特征。对不同水源地而言,因受北支倒灌盐水和正面入侵盐水 程度不同,盐度过程也有着不同的特征。

3.2.1 东风西沙水库 东风西沙水库取水口在半月周期中,盐度过程与水位过程的关系根据潮差大小,表现出两种不同的特征(图6(a))。潮差较大时,盐度过程1d内出现4个极大值。涨潮时盐度上升,落潮时盐度短暂下降后再次上升,且落潮时出现的盐度极大值比涨潮时大得多(图6(b))。随着潮差减小,盐度过程整体呈下降趋势。潮差小到一定程度时,落潮时的盐度极大值消失,除了涨潮时盐度有较小的上升外,盐度总体呈下降趋势(图6(c)),即该阶段北支不再出现盐水倒灌。最小潮出现以后,落潮时盐度极大值又逐渐出现,表现为图6(b)所示特征。对日平均盐度进行计算,发现半月周期中日均盐度最大值出现在大潮当天,较高盐度持续到大潮后的中潮,日均盐度上升时间略高于下降时间。



图 6 东风西沙水库取水口盐度过程与水位过程 Fig. 6 Salinity and water level hydrograph in Dongfengxisha reservoir intake

3.2.2 陈行水库 陈行水库取水口盐度过程没有出现单一的周期振动规律。在半月周期中,盐度过程与水 位过程的关系表现出了4种不同的特征(图7(a))。大潮前的中潮后期及大潮期,盐度在1d内表现为两涨 两落,涨潮时盐度降低,落潮时盐度升高。盐度总体呈上升趋势,且逐渐变缓(图7(b))。此后,有半天盐度 特征发生改变,落潮时盐度上升后,涨潮时并没有立即下降,该阶段盐度变化较小且稳定在一个较高的值,直 到落潮的后期(落急以后)盐度又明显下降(图7(c))。此后盐度又恢复1d内两涨两落,但仍然表现为涨潮 时盐度上升落潮时下降,盐度总体呈下降趋势(图7(d))。该特征一直持续到小潮后的中潮,盐度总体下降 到一定程度后不再下降,且出现新的特征。落潮时再次出现盐度升高,且越来越明显,1d内出现4个盐度峰 值(图7(e))。日均盐度最大值出现在大潮后的中潮,较高盐度持续到小潮,且从最小值上升到最大值持续 时间与最大值下降到最小值基本相同。



Fig. 7 Salinity and water level hydrograph in Chenhang reservoir intake

3.2.3 青草沙水库 青草沙水库取水口盐度过程表现出 4 种不同特征(图 8)。如图 8(a) 所示,小潮后期 至大潮后期,涨潮时盐度上升,落潮时盐度下降,日盐度变化幅度在四种特征中最大。大潮后期及大潮后的 中潮盐度日变化不再为两涨两落,1 d 内出现 4 个盐度峰值,除涨潮时盐度上升外,落潮时盐度在短暂下降后 也会有上升。盐度总体趋势为波动中上升(图 8(b)),振幅相对前一阶段减小。这种现象持续 2 d 后再次发 生改变,盐度过程再次表现为1d内两涨两落,但与第一阶段不同的是,涨潮时盐度下降而落潮时盐度上升。 涨潮时的盐度峰值消失而第二阶段中出现的落潮峰值继续出现。盐度总体趋势仍为波动中上升(图8(c))。该阶段持续3d左右又发生改变,涨潮时盐度不再下降,而是保持在一个相对固定的值,该现象持续1d左右,在落潮时盐度再次下降(图8(d)),此时为小潮,盐度过程再次表现为第一阶段的特征。日均盐度最大值出现在小潮,较高盐度持续到小潮后的中潮,表现出了明显的盐度下降时间长于上升时间。



Fig. 8 Salinity and water level hydrograph in Qingcaosha reservoir intake

## 4 北支盐水倒灌对水源地取水口的影响

大通流量高于20 000 m³/s时几乎不会有盐水倒灌现象。模型上游流量取 8 000~20 000 m³/s时,每 500 m³/s设置 1 个工况进行计算。表 1 给出了不同大通流量条件下,半月周期中崇头、东风西沙水库、陈行 水库以及青草沙水库最大日平均盐度出现时间。受正面入侵盐水影响时,表现为大潮盐水入侵强,小潮盐水 入侵弱。若南支以下水域半月周期中盐度最大值出现在大潮后的其他时段,则为北支盐水倒灌的影响<sup>[6]</sup>。 水源地取水口日平均盐度最大值出现时间与崇头日平均盐度最大值出现时间的差值可以表示北支倒灌最高 浓度盐水团运动到水源地取水口所需要的时间。

大通流量 Q 范围	日平均盐度最大值出现时间					
$(m^3/s)$	崇头	东风西沙	陈行	青草沙		
8 000≤ <i>Q</i> <8 500	第5d(大潮)	第6d(大潮)	第9d(大潮后中潮)	第14 d(小潮后中潮)		
8 500≤ <i>Q</i> <10 000	第5d(大潮)	第6d(大潮)	第9d(大潮后中潮)	第13 d(小潮)		
$10\ 000 \leq Q < 12\ 000$	第5d(大潮)	第6d(大潮)	第8d(大潮后中潮)	第12d(小潮)		
12 000≤Q<14 500	第5d(大潮)	第6d(大潮)	第8d(大潮后中潮)	第11d(小潮)		
14 500≤Q≤20 000	第6d(大潮)	第7d(大潮后中潮)	第8d(大潮后中潮)	第11 d(小潮)		

	表 1	日平均盐度最大值出现时间	
Tab. 1	Occurrence ti	me for maximum value of daily average salinit	v

流量小于14 500 m³/s时,崇头日平均盐度最大出现在分析的第5 d,即最大潮差出现当天。流量大于

14 500 m<sup>3</sup>/s时,崇头最大盐度出现在分析的第6d,即最大潮出现的后1天。虽然北支分流比小,但随着流量增大会使得进入北支的径流量增大,对盐水上溯起到了顶托作用,使得最大盐度出现时间延迟。

东风西沙水库附近水域盐水来源主要为北支的倒灌,最大盐度出现时间均比崇头滞后1d。说明倒灌盐 水团从崇头运动到东风西沙水库取水口需要1d时间,取水口在大潮时受北支倒灌盐水团影响最严重。

陈行水库日平均盐度最大值出现时间比东风西沙水库滞后,但随着流量增大,滞后时间逐渐变短。流量 Q<10 000 m<sup>3</sup>/s 时滞后 3 d; 10 000 m<sup>3</sup>/s ≤ Q<14 500 m<sup>3</sup>/s 时滞后 2 d; Q≥14 500 m<sup>3</sup>/s 时滞后 1 d。倒灌盐 水团从崇头运动到陈行水库取水口需要 2~4 d,取水口在大潮后的中潮时受北支倒灌盐水团影响最为严重。

青草沙水库日平均盐度最大值出现时间比东风西沙水库滞后,且长于陈行水库的滞后时间。随着流量的增大,滞后时间也逐渐变短,对径流的响应比陈行水库更为敏感。当大通流量 Q<8 500 m<sup>3</sup>/s 时,青草沙水 库取水口最大盐度出现时间比东风西沙水库取水口滞后 8 d; 8 500 m<sup>3</sup>/s < Q<10 000 m<sup>3</sup>/s 时滞后 7 d; 10 000 m<sup>3</sup>/s < Q<12 000 m<sup>3</sup>/s 时滞后 6 d; 12 000 m<sup>3</sup>/s < Q<14 500 m<sup>3</sup>/s 时滞后 5 d; Q > 14 500 m<sup>3</sup>/s 时滞后 4 d。倒灌盐水团从崇头运动到青草沙水库取水口需要 5~9 d,取水口在小潮时受北支倒灌盐水团影响最为 严重。

径流量的增大使得北支倒灌水体进入南支后下泄 速度加快,因此陈行水库与青草沙水库附近水域均表现 出随大通流量的增大,受倒灌盐水团影响时间提前的特 点。图9为水源地取水口在半月周期中日均盐度的最 大值与流量的关系。如图所示,径流越大,盐水入侵程 度越弱,受倒灌盐水团影响的程度也越弱。以往的研究 指出流量与盐度呈指数关系,而本文进一步研究时发 现,当流量在一定范围内时,盐度与径流表现出很好的 线性关系:

东风西沙水库: *y* = -0.000 4*x* + 7.5(8 000 ≤ *x* ≤ 18 000)

陈行水库:y=-0.000 4x+6.0(8 000≤x≤14 000) 青草沙水库:y=-0.000 3x+4.9(8 000≤x≤ 16 000)

#### 5 结 语

基于 Delft3D 建立长江口平面二维潮流盐度数学模型。利用 2016 年长江口大范围同步全潮水文测验资料对测验期间大、中、小潮的流速、流向、水位、盐度进行验证。验证效果良好,可以对长江口的水-盐动力特性进行模拟,对径潮动力影响下长江口水源地取水口盐度进行研究,得出如下结论:

长江口枯季盐水入侵会威胁水源地安全。北支盐水倒灌是南支、北港水源地安全威胁的重要来源。三 大水源地因位置不同,盐度过程线特征也不相同。若落潮时盐度上升,涨潮时盐度下降,表明该处盐水来源 于取水口上游,即受北支倒灌盐水影响;若涨潮时盐度上升,落潮时盐度下降,则表明该处盐水来源于取水口 下游,为外海盐水正面影响或已经下泄到取水口下游的盐水团随涨潮流上溯所致。水源地取水口盐度过程 线与潮位过程线的关系可作为受北支倒灌盐水和正面入侵盐水影响程度的重要依据。

从南北支分汊口处崇头开始计算,北支倒灌盐水团影响到东风西沙水库、陈行水库、青草沙水库取水口 分别需要1,2~4和5~9d。水源地分别在大潮、大潮后的中潮以及小潮时受倒灌盐水影响最为严重。随着 径流增大,水源地受盐水入侵影响的时间会提前,但是盐度随径流增大而直线下降。







#### 参考文献:

- [1] 韩乃斌. 长江口南支河段氯度变化分析[J]. 水利水运科学研究, 1983(1): 74-81. (HAN Naibin. Analysis of chlorinity change in South Branch of Yangtze Estuary [J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1983(1): 74-81. (in Chinese))
- [2] 丁磊, 窦希萍, 高祥宇, 等. 北支建闸对长江口水源地盐水入侵影响研究[C]//中国海洋学会海洋工程分会. 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下), 2017. (DING Lei, DOU Xiping, GAO Xiangyu, et al. The influence of construction of tidal gate in the North Branch on water sources salinity intrusion in the Yangtze Estuary[C]// China Ocean Engineering Academy. The 18th China Ocean and Coast Engineering Symposium(volume two), 2017. (in Chinese))
- [3] 罗小峰, 陈志昌. 长江口水流盐度数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2004(2): 29-33. (LUO Xiaofeng, CHEN Zhichang. Numerical simulation of salinity in Yangtze River Estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004(2): 29-33. (in Chinese))
- [4] 侯成程,朱建荣.长江河口盐水入侵对大通枯季径流量变化的响应时间[J].海洋学报(中文版), 2013, 35(4): 29-35.
  (HOU Chengcheng, ZHU Jianrong. The response time of saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary to the change of river discharge in dry season[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 2013, 35(4): 29-35. (in Chinese))
- [5] QIU C, ZHU J R, GU Y L. Impact of seasonal tide variation on salinity intrusion in the Changjiang River Estuary [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(2): 342-351.
- [6] 丁磊, 窦希萍, 高祥宇, 等. 长江口盐水入侵研究综述[C]//中国海洋工程学会. 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论 会论文集(下)中国海洋工程学会, 2015. (DING Lei, DOU Xiping, GAO Xiangyu, et al. The research of saltwater intrusion in Yangtze Estuary[C]// China Ocean Engineering Academy. The 17th China Ocean and Coast Engineering Symposium(volume two), 2015. (in Chinese))
- [7] 丁磊, 窦希萍, 高祥宇, 等. 长江口 2013 年和 2014 年枯季盐水入侵分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 47-53.
  (DING Lei, DOU Xiping, GAO Xiangyu, et al. Analyses of saltwater intrusion in Yangtze estuary in dry season of 2013 and 2014
  [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 47-53. (in Chinese))
- [8] WU H, ZHU J R, CHEN B R, et al. Quantitative relationship of runoff and tide to saltwater spilling over from the North Branch in the Changjiang Estuary: A numerical study[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, 69: 125-132.
- [9] 陈敏建, 胡雅杰, 马静, 等. 长江口咸潮入侵扩散响应函数及初步应用[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 203-212. (CHEN Minjian, HU Yajie, MA Jing, et al. Diffusion response function and preliminary application of saltwater intrusion in the Yangtze River Estuary[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 203-212. (in Chinese))
- [10] 孙昭华, 严鑫, 谢翠松, 等. 长江口北支倒灌影响区盐度预测经验模型[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 213-222. (SUN Zhaohua, YAN Xin, XIE Cuisong, et al. An empirical predictive model for saltwater intrusion in the South Branch influenced by tidal flow from the North Branch in the Yangtze River Estuary[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 213-222. (in Chinese))
- [11] 唐建华,徐建益,赵升伟,等. 基于实测资料的长江河口南支河段盐水入侵规律分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(6): 677-684. (TANG Jianhua, XU Jianyi, ZHAO Shengwei, et al. Research on saltwater intrusion of the South Branch of the Changjiang Estuary based on measured date[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(6): 677-684. (in Chinese))
- [12] GU J, HUANG J, HAN B, et al. Numerical study to choose the optimum narrowing schemes for protecting water source in the South Branch of the Changjiang Estuary [C] // 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, IEEE, Eng in Medicine and Biology Society of USA, 2009.
- [13] DING L, DOU X P, GAO X Y, et al. Response of salinity intrusion to winds in the Yangtze Estuary [C] // 5th International Conference on Hydraulic Engineering, Hydraulic Engineering V of P.R. China, 2017.
- [14] DING L, GAO X Y, DOU X P, et al. Research of the influence of salinity intrusion on Qingcaosha water source [C] // 5th IAHR World Congress-Managing Water for Sustainable Development, Learning from the Past for the Future IAHR of Malaysia, 2017.

# Response of salinity at water source intakes to runoff and tidal dynamics of Yangtze River estuary

DING Lei<sup>1</sup>, CHEN Liming<sup>1</sup>, GAO Xiangyu<sup>1</sup>, JIAO Jian<sup>1</sup>, HU Jing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Port, Waterway and Sedimentation Engineering of the Ministry of Transport, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210006, China)

Abstract: The Chenhang reservoir, Qingcaosha reservoir and Dongfengxisha reservoir are the three major water sources at the Yangtze River estuary. 80% of the Shanghai's drinking water comes from the three major water sources. The intrusion of the salt water in the low flow seasons is always a great threat to the water source safety at the Yangtze River estuary. As the two main dynamics forces of the estuarine area, it is necessary to further study the influences of runoff and tide on the salt water intrusion to the water sources in the Yangtze River estuary. A two-dimensional salt transport numerical model is developed to simulate the flow-salt dynamic processes. And the relationship between the salinity hydrograph and the tidal line can be taken as an important basis for analyzing the influences of the northern branch on the water sources. The analyses of the model results show that the characteristics of the salinity duration lines are different because of the different locations of the three water sources. The relationship between the salinity and water level duration can indicate the degree affected by saltwater spilling over from the north branch and saltwater directly from the sea. While the salt water spilling over from the north branch and saltwater directly from the sea. While the salt water spilling over from the north branch and saltwater directly from the sea. While the salt water spilling over from the north branch and saltwater directly from the sea. While the salt water spilling over from the north branch and saltwater directly form the sea. While the salt and lower tides respectively. With the increase of runoff volume, the time affected by saltwater intrusion will advance, but the salinity will decrease with the increase of the runoff.

Key words: salinity intrusion; the Yangtze estuary; water source; runoff; tide; saltwater spilling over from the north branch