

钱塘江河口抗咸流量预报模式及其检验

李若华^{1,2}, 史英标², 张舒羽²

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘要:钱塘江河口咸水入侵的影响因素有径流、潮汐、江道地形、取水量等,其中径流和潮汐的相互作用是取水口盐度是否超标的决定因素。基于咸水入侵的主要影响因素,分析抗咸流量预报的关键点,建立了取水口盐度超标时间与径流、潮差的定量响应关系,构建了抗咸流量预报模式,给出了模式中各参数的计算方法。将该预报模式应用于钱塘江河口2012—2014年的最小抗咸流量模拟预报,经实践检验,按照预报值调度下泄流量,可满足杭州市抗咸要求。抗咸实践表明,不仅大潮期需保证足够的抗咸流量,中、小潮期泄放流量也不得小于预报流量。

关键词:抗咸流量;咸水入侵;径流;预报模式;钱塘江河口;潮汐

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)05-0075-06

Prediction model of salinity-resisting discharge in Qiantang Estuary and its validation//LI Ruohua^{1,2}, SHI Yingbiao², ZHANG Shuyu²(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Runoff, tides, riverbed morphology, and water intake influence saltwater intrusion in the Qiantang Estuary. Of these factors, runoff and tides are the decisive factors that determine whether the salinity at the intake exceeds the standard. Based on the main factors in saltwater intrusion, key issues in predicting the salinity-resisting discharge were analyzed, and a quantitative relationship regarding the response of the standard-exceeding time to the runoff and tidal range was established. A model for predicting the salinity-resisting discharge was built, and computational methods for parameters in the model were proposed. The prediction model was applied in the prediction of minimum salinity-resisting discharge in the Qiantang Estuary from 2012 to 2014. The validation results show that reservoir operation based on the predicted discharge can satisfy the salinity-resisting demand of Hangzhou City, and a discharge sufficient to resist saltwater intrusion must be guaranteed not only during spring tides but also during mid-and neap tides.

Key words: salinity-resisting discharge; saltwater intrusion; runoff; prediction model; Qiantang Estuary; tide

咸水入侵是潮汐河口普遍存在的一种自然现象,我国许多潮汐河口如长江口^[1]、珠江口^[2]、钱塘江口^[3]等的周边城镇供水经常受咸潮灾害的威胁,为保证供水,上游水库的压咸调度是河口地区抵御咸水入侵以保证供水的主要措施之一。杭州市约85%的供水取自钱塘江河口段,每年的7—11月都要受到咸水入侵的威胁,主要通过新安江水库和富春江水库的联合调度以增大下泄流量来抗咸,抗咸流量由从事多年抗咸工作的老专家根据以往抗咸经验进行预报,没有固定的预报模式,这不利于此项预报技术的推广,因此建立普适的抗咸流量预报模式非常必要。

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,咸水入侵规律极其复杂。对于钱塘

江河口的咸水入侵规律研究,20世纪80年代以来已开展了许多工作,取得了大量的研究成果^[4-7]。模拟咸水入侵的数学模型从短历时的定床模型^[8]和可考虑涌潮作用的定床模型^[9],发展到可进行长历时盐度预报的动床模型^[10],并提出了“大潮多放、小潮少放”(相差±25%)^[11]的径流调度方式。然而,抗咸预报不是预报取水口处的盐度,而是预报为保证取水口盐度达标所需的抗咸流量,是盐度预报问题的反问题,需要根据潮汐及咸水入侵规律,基于当年的江道形势、咸水入侵程度、抗咸目标等约束条件进行预报。因预报涉及因素众多,且多个因素是未知数,目前抗咸流量靠经验预报,尚未建立固定化的预报模式,对该预报技术的推广是非常不利的。本文从咸水入侵的影响因素着手,推导抗咸流量预报

需要的参数,建立预报模式,给出模式中各参数的计算方法,并应用于杭州抗咸的最小流量预报,结合抗咸实际效果检验模式的适用性。

1 咸水入侵影响因素及抗咸期

1.1 钱塘江河口概况

钱塘江河口是一个典型的强潮河口,浦阳江口—澉浦为河口段(图1),受径流和潮汐共同作用。钱塘江河口多年平均径流流量约 $952\text{ m}^3/\text{s}$,洪汛期3—6月的径流量占全年的60%以上。径流不仅年内变化大,年际变化也很大,年最大径流量可达年最小径流量的4倍以上。潮汐受M2分潮控制,一天两涨两落,澉浦站最大潮差可达9m以上,澉浦以上潮差逐渐减小。钱塘江河口段水体含沙量大,泥沙以粉砂为主,河床易冲易淤。因潮流强急,河口受咸水入侵影响严重,枯水大潮期咸水可随潮上溯至浦阳江口,其中闸口—仓前段咸、淡水掺混最为剧烈,而杭州市取水口就布置在闸口河段。

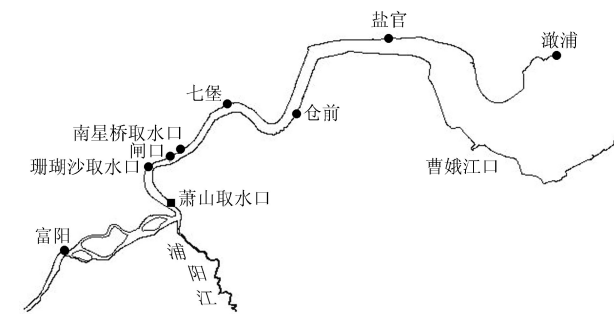


图1 钱塘江河口段示意图

1.2 影响因素分析

咸水入侵受诸多因素的影响,包括径流、潮汐、江道地形和沿程取水量等,其中径流和潮汐是决定性的因素,取水口盐度是否超标主要取决于短时间内径流和潮汐的相互作用。钱塘江河口咸水入侵的影响因素分述如下:

a. 径流。径流对咸水入侵的影响反映在不同时间尺度的变化上。从年尺度讲,年均径流量大,则江道容积大,潮汐动力强,为保证取水口盐度达标则需要更大的径流流量;从季节尺度讲,径流分两个层面,洪汛前及洪汛期的径流总量决定汛后秋季大潮汛期的江道地形,进而决定下半年河口段的潮汐强弱及咸水入侵程度,大潮汛期的径流流量则决定咸水上溯的距离及取水口盐度超标的情况以及江道淤积量,进而影响潮汐强度。同时河口段是一个敏感的小系统,初始盐度的影响可在数天内消除,根据以往抗咸经验,3日径流流量的调整即会引起咸水入侵的明显差异,这也是保障钱塘江河口御咸调度及时性的自然基础。

b. 潮汐。潮汐对咸水入侵的影响主要反映在季节间潮汐大小的变化,以及一个潮汛期(15 d)内大小潮的差异等,涨潮前期的强涌潮可促使咸水入侵加剧,盐分快速升高。此外,即时径流和江道地形又决定了取水口河段的潮汐强度及咸水入侵程度,取水口河段的潮汐强度可由下游七堡站的逐月最大潮差代表,该站潮差对该河段咸水入侵程度起控制作用。

c. 江道地形。江道地形对河口咸水入侵的影响主要反映在江道冲淤及尖山河湾走直、走弯河势对咸水入侵的影响,一般而言,江道容积大,河势走直,潮汐上溯能力强,则有利于咸水入侵,反之则不利于咸水入侵。江道地形的变化对咸水入侵的影响可同步反映在潮差大小上,即江道地形的变化带来的影响可由七堡站潮差代表。

d. 取水流量。在下半年的枯水大潮期,上游来水较少,而此时高温干旱,两岸农业、环境用水等需求量大,占径流量的比重较高,因此取水流量亦会对咸水入侵产生明显影响。根据浙江省水利厅制定的《钱塘江河口水资源配置工程调度办法(试行)》,抗咸期间富春江流量在 $450\text{ m}^3/\text{s}$ 以下时,沿线允许取水总量不超过 $50\text{ m}^3/\text{s}$,该调度办法限制了抗咸期间的无序取水,从而使得取水量对咸水入侵的影响减弱。

e. 前期盐度。前期盐度指大潮之前累积在取水口下游的咸水,若咸水盐分较高,在大潮来临时将随着潮流强劲上溯,造成取水口盐度超标,但若中小潮期保证了足够的抗咸流量,则可以将咸水输送至下游,避免盐度在河口段累积。

1.3 抗咸期

通常情况下,钱塘江河口1—3月河床淤积,且外海天文潮小,潮流上溯能力弱;4—6月降水量增多并进入梅雨季,径流量大,从而压制了咸水入侵,因此上半年河口段沿程盐度均较小,咸潮一般不会影响取水口的正常取水。在7—11月这段时间,一方面雨量骤减,又适逢夏秋之际的高温期,农业灌溉用水、环境用水和生活用水量猛增,径流量较小,因而压制咸潮的能力减弱;而另一方面又恰遇秋季大潮汛,外海盐度较高的水体随潮上溯,因此这段时间是取淡水最不利的时期。11—12月,虽然降雨量不多,但灌溉用水、环境用水和居民生活用水明显减少,更主要的是径流的减小导致下游河道淤积,潮汐上溯强度减弱,咸水入侵程度减轻。因此抗咸期主要为7—11月。

枯水年洪汛期水量小,虽然新安江水库在洪汛期储存的用于下半年抗咸的水量少,但汛后江道容积

小,下半年咸水入侵力度弱,抗咸形势反而比较乐观,丰水年洪汛期的大水量冲开了江道,导致下半年潮汐上溯能力大幅加强,咸水入侵加剧,抗咸形势比较严峻。因此,丰水年的7—11月是抗咸的重点时期。

2 抗咸流量预报模式

2.1 抗咸流量预报模式示意图

据 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》,当江水含氯度超过 250 mg/L 时定为超标。由前述可知,取水口盐度是否超标主要取决于径流和潮汐的相互作用,为达到抗咸目标,可根据潮汐强度(可由七堡站潮差代表)下泄相应的径流量压潮拒咸,因此需建立取水口盐度超标时间(即抗咸目标)与径流、潮汐之间的定量响应关系,同时为确定抗咸流量需预测出下半年的潮汐强度;因外海潮汐年际变化较小,取水河段的潮汐强弱年际变化主要由江道地形决定,梅汛期后 7 月的江道地形对下半年咸水入侵程度起到至关重要的作用,因此为得到下半年的潮汐强度需预测出梅汛期后的江道地形;钱塘江河口每年汛前 4 月进行一次大范围的水下地形测验,因此汛后江道形势可根据汛前水下地形和汛期径流量通过一定的计算方法估算。根据上述分析,可设计抗咸流量预报模式如图 2 所示。

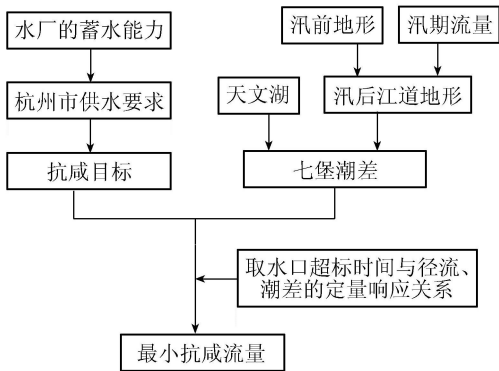


图 2 抗咸流量预报模式示意图

2.2 抗咸目标

受咸水入侵影响的保护目标主要为沿线的取水口。杭州市九溪、南星桥、清泰、赤山埠 4 个取水口位于钱塘江闸口河段,与之相应的水厂的总制水量约 140 万 m^3/d ,占杭州市总制水量的 85%。珊瑚沙水库位于闸口上游,为避咸蓄淡调节水库,总库容近 190 万 m^3 ,当外江盐度超标时,可经输水渠道直接供给相应的水厂。综合珊瑚沙水库的库容及各水厂的蓄水量,杭州市水业集团根据供水要求,提出抗咸目标为:①南星桥取水口盐度连续超标时间不大于 2 d;②珊瑚沙水库取水口盐度连续超标不超过 0.5 d。该抗咸目标可根据蓄水能力和供水要求改变。

2.3 抗咸目标与径流、潮汐的关系

借助考虑涌潮作用下的平面二维盐度数学模型^[9],进行多组径流和潮汐的组合计算,得到南星桥、珊瑚沙取水口盐度超标时间与净径流、潮汐的定量响应关系曲线如图 3 所示(图中潮差为七堡站潮差)。由图 3 可见,当七堡站潮差为 2.8 m 时,大潮期径流流量需大于 320 m^3/s ,叠加沿线总取水量 50 m^3/s 后,得到最小抗咸流量为 370 m^3/s 。因此,若已知七堡站最大潮差,则可根据图 3 预报大潮期的最小净抗咸流量,然后再根据“大潮多放 25% 流量、小潮少放 25% 流量”的调度方式,叠加沿线取水量,预报出中、小潮期的最小抗咸流量。

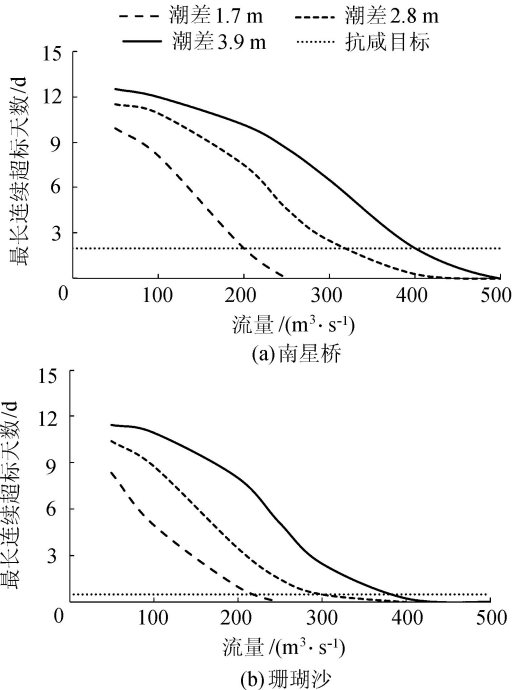


图 3 南星桥、珊瑚沙取水口盐度超标时间对径流流量、潮差的响应

为提升关系曲线的应用价值,对图 3 曲线通过回归分析进行拟合,构建相关函数关系。当七堡站潮差为 3.9 m 时,南星桥、珊瑚沙取水口盐度超标时间对净径流、潮汐的响应关系分别为

$$y = 2.491 \times 10^5 x^3 - 2.315 \times 10^4 x^2 + 303.94x + 11.338 \quad (R^2 = 0.9977) \quad (1)$$

$$y = 3.95 \times 10^5 x^3 - 2.932 \times 10^4 x^2 + 263.74x + 10.868 \quad (R^2 = 0.9942) \quad (2)$$

式中: y 为取水口最长连续超标时间, d; x 为径流流量, m^3/s 。

2.4 七堡站月最大潮差预测

据多年研究经验,七堡站月最大潮差与闸口—盐官河段吴淞高程 7 m 下的江道容积相关关系较好,将多年的江道容积与同期的七堡站月最大潮差数据点绘在图上,连成曲线后如图 4 所示^[11]。因

此,若已知汛后的江道容积,则可根据图 4 预测出下半年七堡站的月最大潮差。

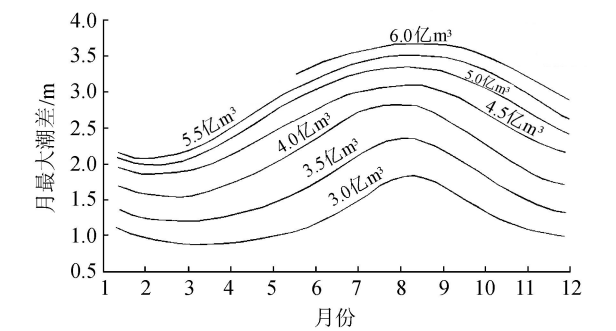


图 4 不同江道容积条件下七堡站月最大潮差预报曲线

2.5 汛后江道容积预测

钱塘江盐官以上河段冲淤规律是洪冲潮淤,即丰水期盐官以上河段冲刷,冲起的泥沙被带至下游河段淤积,闸口—盐官河段的江道容积增大,潮汐强度增强;枯水期则相反,潮流将下游的泥沙带至盐官以上河段淤积,江道容积减小,潮汐强度减弱。一般情况下,钱塘江河口段每年都要经历淤积—冲刷—淤积的自然演变的过程。钱塘江河口河床在径、潮流的作用下,冲淤幅度大、速度快,尤其是汛期的大流量造床作用非常强。决定下半年潮汐强度的汛后江道容积可根据下式^[11]计算:

$$V_b = V_i - (5.76 - 1.11\ln\bar{Q} + 0.43V_i) \quad (3)$$

式中: V_b 为吴淞高程 7 m 条件下汛后 7 月的江道容积; $\bar{Q}$ 为汛期 4—7 月的平均径流流量; V_i 为吴淞高程 7 m 条件下汛前 4 月的江道容积。据实测资料验证,该式相关系数可达 0.93。

此外,也可以借助动床数学模型^[7],在 4 月江道地形的基础上,输入汛期的逐日径流流量,计算出汛后 7 月的江道地形,然后统计出闸口—盐官河段吴淞高程 7 m 下的江道容积。因泥沙冲淤的复杂性,目前动床模型计算结果的精度并不比经验公式算出的结果高,但工作量却大幅增加。

3 预报模式的检验

3.1 2012 年抗咸过程模拟预报

钱塘江河口径流基本以 10 年为周期进行丰、枯水文年的转换^[12]。2009 年之前的 10 年,以枯水年为主,汛后江道容积大多小于 4 亿 m^3 ;2010 年径流转丰后,江道容积大幅增加,2010 年、2011 年汛后江道容积分别达 5.47 亿 m^3 和 5.23 亿 m^3 ,已经属于丰水江道。

2012 年汛前江道容积为 4.78 亿 m^3 ,属丰水江道,汛期平均径流流量为 1980 m^3/s ,采用式(3)算出汛后江道容积为 5.39 亿 m^3 。根据预测的汛后江道容积,对照图 4 插值可得 2012 年 7—12 月的七堡站

月最大潮差(表 1),其中 8 月潮差最大,为 3.5 m。预测的 2012 年汛后江道容积比 2011 年(5.23 亿 m^3)略大,2011 年下半年七堡站实测最大潮差为 3.28 m,实测日径流流量为 886 m^3/s 。若径流量较小,则潮差会更大,因此模拟预测的 2012 年下半年七堡站月最大潮差 3.5 m 是基本合理的。根据七堡站月最大潮差预报值,对照图 3,结合不同潮差时取水口超标时间对净径流的响应关系,得到各月大潮期最小抗咸径流量模拟预报值(表 1)。

表 1 2012 年 7—12 月七堡站月最大潮差与最小抗咸径流流量

月份	月最大潮差/m	最小抗咸径流流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
7	3.3	350
8	3.5	380
9	3.4	370
10	3.2	340
11	2.8	320
12	2.6	300

根据 2012 年杭州湾天文潮预报,控制河口段短期潮汐规律的澉浦站下半年望(农历月半)潮略高于朔(农历月初)潮,如农历七月十六(9 月 1 日)、七月初四(8 月 20 日)澉浦月最高潮位预报值分别为 6.76 m 和 6.67 m。结合天文潮的月内分布及各月大潮期最小抗咸流量,基于“大潮多放 25% 流量,小潮少放 25% 流量”的调度方式,对逐日的抗咸流量进行分配,并统一叠加沿线总取水量 50 m^3/s ,模拟预报出 2012 年下半年最小抗咸流量如图 5 所示。由图 5 可知,下半年(7—12 月)抗咸共需要最少 51.6 亿 m^3 径流量,其中 8—9 月抗咸径流量较大,大潮时最大为 430 m^3/s ,小潮时最小为 260 m^3/s 。

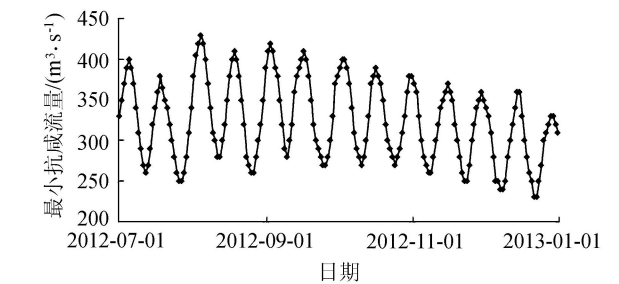


图 5 2012 年下半年逐日最小抗咸径流流量

根据相关水厂的记录,2012 年南星桥取水口、珊瑚沙取水口最长连续超标时间分别为 19.25 h、7.50 h,勉强满足抗咸要求,大潮期间预报与实际下泄流量对比及抗咸情况列于表 2。由表 2 可见,盐度超标时间主要出现在 10 月中旬,大潮期实际下泄流量略大于模拟预报流量,但 15 d 平均流量比预报流量小 10%,中、小潮期实际流量比预报流量平均小 96 m^3/s ,平均相差幅度达 30.8% (表 3)。大潮期过后,河口段累积的盐分在径流的作用下逐步移到

下游,咸水在小潮期被推送到最远,小潮期过后的中潮期盐分又逐渐上移累积,因此中、小潮期也必须保证足够的抗咸流量,以免造成盐分累积而导致下一个大潮期盐度超标影响取水。由此可见,2012 年最小抗咸流量模拟预报成果是比较准确的,只要按照预报调度下泄流量,则可以保证抗咸要求,调度流量小于预报流量,即使是中小潮期,也会造成盐度超标。

表 2 2012 年大潮期间下泄流量及顶潮拒咸情况

日期	七堡站 潮差/m	预报流量/ 实际流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		连续超标时间/h	
				南星桥	珊瑚沙
8 月 1 日	2.62	380	818	0	0
8 月 2 日	3.08	400	728	0	0
8 月 3 日	3.35	410	605	0	0
8 月 4 日	3.47	420	437	0	0
8 月 5 日	3.40	420	403	0	0
8 月 6 日	3.12	400	613	0	0
9 月 15 日	2.29	390	1 040	0	0
9 月 16 日	2.70	400	848	0	0
9 月 17 日	3.14	410	675	0	0
9 月 18 日	3.00	400	601	0	0
9 月 19 日	3.10	380	728	0	0
9 月 20 日	3.10	350	433	0	0
10 月 14 日	2.25	370	456	1.50	0
10 月 15 日	2.80	410	454	10.50	2.50
10 月 16 日	3.00	420	427	12.50	7.00
10 月 17 日	3.23	420	373	10.00	5.00
10 月 18 日	2.90	390	452	19.25	7.50
10 月 19 日	2.82	350	380	7.50	2.50
11 月 13 日	1.45	360	468	0	0
11 月 14 日	2.59	380	420	4.00	0
11 月 15 日	2.50	380	467	4.50	0
11 月 16 日	2.42	370	355	3.75	0
11 月 17 日	2.38	350	372	0	0
11 月 18 日	2.27	320	491	0	0

表 3 2012 年 10 月中小潮期径流实际流量与预报流量差异

日期	实际流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	预报流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	差值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	差幅/%
5 日	287	380	-93	-24.5
6 日	0.3	340	-340	-99.9
7 日	128	310	-182	-58.7
8 日	168	290	-122	-42.1
9 日	172	280	-108	-38.6
10 日	209	260	-51	-19.6
11 日	235	270	-35	-13.0
12 日	311	340	-29	-8.5
13 日	448	350	98	28.0
平均	218	313	-96	-30.8

3.2 2013—2014 年抗咸模拟预报

2013 年的抗咸实践中,10 月上旬也出现了较长时间的盐度超标,南星桥取水口、珊瑚沙取水口最长连续超标时间分别为 30.5 h、4 h,虽然在抗咸目标要求范围内,但已经造成了杭州水厂的紧张,其原因是在大潮期前的中、小潮期下泄的抗咸流量不足,实际流量比预报流量平均小 164 m^3/s ,相差幅度为

53.4%。由此可见,不仅在大潮期需要保证足够的抗咸流量,中小潮期的抗咸流量也必须保证。

2014 年抗咸期间,大、中、小潮期均保证了足够的抗咸流量,南星桥、珊瑚沙取水口均没有出现盐度超标的情况。

4 结 论

a. 影响钱塘江河口段取水口盐度的主要因素有径流、潮汐、江道地形、取水流量、前期盐度等,径流减小、潮汐增强、江道容积增加、取水流量加大、大潮前期盐度较高都将加剧咸水入侵,其中影响咸水入侵最重要的因素是径流和潮汐的相互作用。

b. 基于咸水入侵的影响因素,分析了抗咸流量预报的关键,构建了抗咸预报模式,并采用数学模型建立了取水口盐度超标时间与径流、潮差的定量响应关系,在整合前人研究成果的基础上,给出了预报模式中各参数的计算方法。

c. 应用预报模式对 2012—2014 年的抗咸流量进行了模拟预报,结果表明,按照预报流量调度下泄径流,可满足杭州市抗咸要求。抗咸实践表明,不仅需在大潮期保证足够的抗咸流量,中、小潮期也必须保证足够的泄放流量。

参考文献:

[1] 吴继伟,刘新成,潘丽红. 长江口北支咸潮倒灌控制工程水动力数值模拟[J]. 水利水电科技进步,2006,26(4): 43-45. (WU Jiwei, LIU Xincheng, PAN Lihong. Hydrodynamic simulation of control project on saltwater intrusion from north branch of Yangtze River Estuary[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006,26(4): 43-45. (in Chinese))

[2] 方神光,崔丽琴. 磨刀门水道枯季咸潮入侵特性及规律[J]. 水利水电科技进步,2015,35(4): 14-18. (FANG Shenguang, CUI Liqin. Characteristics and rules of seawater intrusion during dry season in Modaomen Waterway[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(4): 14-18. (in Chinese))

[3] 尤爱菊,韩曾萃,史英标,等. 浙北引水对钱塘江河口段主要水环境的影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(2): 152-156. (YOU Aiju, HAN Cengcui, SHI Yingbiao, et al. Impact of water diversion from Xinanjiang Reservoir to North Zhejiang Province on water environment at Qiantang Estuary [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2006, 34(2): 152-156. (in Chinese))

[4] 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.

- [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] 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))
- [7] 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))
- [8] 韩曾萃,程杭平. 钱塘江江水含盐度计算的研究[J]. 水利学报,1981,12(6): 46-50. (HAN Zengcui, CHENG Hangping. Study on the salinity calculation of the Qiantang Estuary[J]. Journal of Hydraulics Engineering,1981,12(6): 46-50. (in Chinese))
- [9] 潘存鸿,张舒羽,史英标,等. 涌潮对钱塘江河口盐水入侵影响研究[J]. 水利学报,2014,45(11): 1301-1309. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yinbiao, et al. Study on saltwater intrusion in Qiantang Estuary affected by tidal bore[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(11): 1301-1309. (in Chinese))
- [10] 史英标,李若华,姚凯华. 钱塘江河口一维盐度动床预报模型及应用[J]. 水科学进展,2015,26(2): 212-220. (SHI Yingbiao, LI Ruohua, YAO Kaihua. 1-D movable bed numerical forecast model of salinity of the Qiantang River Estuarine Reach and its application[J]. Advances in Water Science,2015,26(2): 212-220. (in Chinese))
- [11] 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. (HAN Zengcui, CHENG Hangping, SHI Yingbiao, et al. Long-term predictions and countermeasures of saltwater intrusion in the Qiantang Estuary[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(2): 232-240. (in Chinese))
- [12] 曾剑,孙志林,潘存鸿,等. 钱塘江河口径流长周期特性及其对河床的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(8): 1584-1588. (ZENG Jian, SUN Zhilin, PAN Cunhong, et al. Long periodic feature runoff and its effect on riverbed in Qiantang Estuary[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2010,44(8): 1584-1588. (in Chinese))

(收稿日期:2015-09-07 编辑:郑孝宇)

(上接第54页)

- [11] 高学平,张少雄,张晨. 糯扎渡水电站多层进水口下泄水温三维数值模拟[J]. 水力发电学报,2012,31(1): 195-201. (GAO Xueping, ZHANG Shaoxiong, ZHANG Chen. 3-D numerical simulation of water temperature released from the multi-level intake of Nuozhadu Hydropower Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(1): 195-201. (in Chinese))
- [12] 史莹,江春波,陈正兵,等. 弯曲河道对水流流态影响数值模拟[J]. 水利学报,2013,44(9): 1050-1057. (SHI Ying, JIANG Chunbo, CHEN Zhengbing, et al. Numerical simulation of flow pattern in meandering rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(9): 1050-1057. (in Chinese))
- [13] 轩晓博,逢勇,李一平,等. 金属矿区重金属迁移对水体影响的数值模拟[J]. 水资源保护,2015,31(2): 30-35. (XUAN Xiaobo, PANG Yong, LI Yiping, et al. Numerical simulation of influence of heavy metal migration on water in metallic mining areas[J]. Water Resources Protection,2015,31(2): 30-35. (in Chinese))
- [14] 王流通,刘凌,钱宝,等. 盐城大纵湖疏浚前后沉积物-水界面环境化学变化[J]. 水资源保护,2013,29(2): 33-37. (WANG Liutong, LIU Ling, QIAN Bao, et al. Changes in environmental chemistry at water-sediment interface before and after dredging of Dazong Lake in Yancheng City[J]. Water Resources Protection,2013,29(2): 33-37. (in Chinese))
- [15] 沈乐. 重污染河道疏浚对菹草水生态环境的影响[J]. 水资源保护,2012,28(3): 32-37. (SHEN Le. Impacts of dredging of seriously polluted rivers on water ecological environment of Potamogeton crispus[J]. Water Resources Protection,2012,28(3): 32-37. (in Chinese))
- [16] 王兴奎,邵学军. 河流动力学基础[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.
- [17] 金腊华,徐峰俊. 水环境数值模拟与可视化技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [18] ZOU R, CARTER S. Integrated hydrodynamic and water quality modeling system to support nutrient total maximum daily load development for Wissahickon Creek, Pennsylvania[J]. Journal of Environmental Engineering,2006,32(4): 555-566.
- [19] FU G B, BARBER M E, CHEN Shulin. Impacts of climate change on regional hydrological regimes in the Spokane River Watershed[J]. Journal of Hydrologic Engineering,2007,12(5): 452-461.

(收稿日期:2015-09-22 编辑:骆超)