

钱塘江河口七堡段氯度时空变化及与水文的关系

李若华^{1,2}, 夏冬梅¹, 姚凯华¹

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

摘要:对 10 多年钱塘江河口七堡段大量的氯度、水文、地形等实测资料进行了统计、分析和比较, 结果表明: 在径流、潮流此消彼长的影响下, 河口闸口—仓前河段咸淡水掺混最为强烈, 径流大则氯度低, 潮汐强则氯度高, 但氯度垂向分布比较均匀, 横向差异小, 主槽氯度大于边滩; 连续丰水年、连续枯水年, 盐水入侵均较弱, 径流从丰转枯的第一年, 盐水入侵较强; 大潮期受潮波变形和涌潮等影响, 涨潮动力显著大于落潮, 易发生盐水入侵; 潮差是潮动力的重要指标, 潮动力决定盐水入侵强度, 潮差对河口的盐水入侵具有重要的指示作用。

关键词: 盐水入侵; 氯度; 潮差; 径流; 钱塘江河口

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)02-0021-05

Temporal and spatial variation of chlorinity and its relationship with hydrology in Qibao Section of Qiantang Estuary//LI Ruohua^{1,2}, XIA Dongmei¹, YAO Kaihua¹ (1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the statistics, analysis and comparison of the salinity, hydrology and terrain data in the Qibao Reach of Qiantang Estuary in more than 10 years, the results show that due to the influence of runoff and tidal currents, the most intensive mixing of salt-water and fresh water occurs in the reach from Zhakou to Cangqian. Strong runoff corresponds to lower chlorinity while higher chlorinity is accompanied by strong tides. The vertical and lateral distribution of chlorinity is relatively uniform, but the concentration in the main channel is greater than that in the marginal bank. Saltwater intrusion is weak in continuous wet years and continuous dry years, but it is strong in the first year of the runoff transition from abundant to dry. In spring tide, influenced by tidal wave deformation and tidal bores, flood tidal force is greater than ebb tidal force and saltwater intrusion is tend to occur. Tidal range is an important indicator of tidal power, which determines the strength of saltwater intrusion. Tidal range has indicative impacts on salt-water intrusion in estuaries.

Key words: saltwater intrusion; chlorinity; tidal range; runoff; Qiantang Estuary

钱塘江河口潮强流急, 涌潮汹涌, 山潮水比值仅为 0.01, 是典型的强涌潮河口, 在极端枯水条件下, 盐水可上溯至离杭州湾口 207 km 处的闻家堰以上, 其盐水入侵长度和强度远大于一般潮汐河口^[1]。盐水入侵对河口的水动力、水质和生态具有重要影响^[2], 会影响河口地区的取用水^[3], 同时盐度作为保守的示踪剂, 还经常用于研究河口的水循环和混合过程^[4]。因此, 盐水入侵研究具有重要学术意义和应用价值, 一直是河口研究的热点^[5-9]。

从 20 世纪 60 年代开始, 不少学者研究了钱塘江河口的盐水入侵规律。毛汉礼等^[10]分析了钱塘江河口沿程月平均氯度, 认为其符合 Aron 和 Stommel 混合长度理论。韩曾萃等^[11]首次采用一维水流盐度数值模型研究了钱塘江河口盐水入侵规律, 预测了钱塘江水体含氯度, 在此基础上建立了钱

塘江河口盐水入侵中长期动床预报数值模型, 并将该模型应用于富春江水库每年枯季泄水流量调度^[4], 同时还分析了新安江建库、河口治江缩窄对河口盐水入侵的影响^[12]。史英标等^[13]采用钱塘江河口段长历时实测水文、氯度资料, 分析了强潮作用下盐水入侵的时空变化特征。潘存鸿等^[1,14]通过实测资料及数学模型分析, 研究了径流、潮汐、涌潮等对钱塘江河口盐水入侵的影响。

钱塘江河口是一个强冲淤的河口, 其盐水入侵强度及盐度在河口的时空分布不仅受上游径流和海外海潮汐控制, 还深受河床冲淤的影响, 这也是钱塘江河口的盐水入侵规律较其它河口更加复杂的原因所在。随着现场观测资料和研究成果的累积, 钱塘江河口的盐水入侵规律研究也逐渐深入。钱塘江河口七堡河段是杭州市最重要的水源地, 本文基于多年

的水文、地形、氯度等实测资料及现有研究成果,结合盐水入侵与水文之间的关系特性,分析钱塘江河口七堡河段盐水入侵的一些新规律。

1 氯度空间分布特征

1.1 纵向分布特征

钱塘江河口长期观测氯度的水文站有闸口、七堡、仓前、盐官、澉浦5个站(图1),每日采用滴定法观测日最大、最小氯度(氯离子的质量浓度),已积累了近50年的资料。本文采用尖山河湾治江缩窄后的2000—2015年年均氯度资料,统计钱塘江河口沿程各站多年氯度特征值如表1所示,这16年中包括了丰、平、枯水年,具有较好的代表性。表2为1953年以来钱塘江河口各站潮汐特征值。

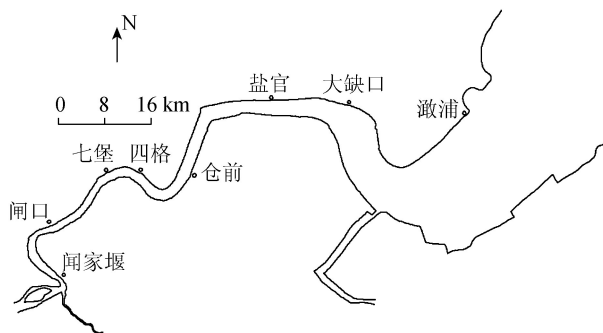


图1 钱塘江河口形势图及站点位置

表1 钱塘江河口2000—2015年沿程各站氯度特征值

站点	氯度/(g·L ⁻¹)				变异系数
	最大	最小	多年平均	标准差	
闸口	0.07	0.02	0.03	0.01	0.46
七堡	0.43	0.04	0.11	0.09	0.83
仓前	0.85	0.16	0.37	0.21	0.57
盐官	2.97	0.47	1.62	0.56	0.35
澉浦	6.49	2.25	4.29	1.09	0.25

注:变异系数为标准差与均值之比;采用的河床容积为闸口—盐官河段吴淞高程7m以下的年均河床容积,下同。

表2 钱塘江河口各站潮汐特征值

站点	多年平均潮差/m	平均涨潮历时/h	平均落潮历时/h
闸口	0.56	1.53	10.88
七堡	0.79	1.42	11.00
仓前	1.52	1.77	10.65
盐官	3.28	2.35	10.07
澉浦	5.64	5.47	6.95

表3 2009年9月大潮定点实测氯度

站点	深槽					浅滩				横向差异系数	
	最大氯度/(g·L ⁻¹)				分层系数	最大氯度/(g·L ⁻¹)					分层系数
	表层	中层	底层	平均		表层	中层	底层	平均		
闸口	0.03	0.07	0.06	0.05	0.51	0.03	0.05	0.05	0.04	0.43	0.20
七堡	1.67	1.67	1.95	1.76	0.16	1.58	1.60	1.72	1.63	0.08	0.07
四格	2.42	2.43	2.52	2.46	0.04	1.97	2.00	2.24	2.07	0.13	0.16
大缺口	6.61	6.48	6.55	6.55	-0.01	6.32	6.26	6.12	6.23	-0.03	0.05
澉浦	8.16	8.08	8.51	8.25	0.04	7.55	7.54	7.52	7.54	0.00	0.09

注:分层系数为底层盐度差与垂线平均盐度之比;横向差异系数为深槽平均和浅滩平均之差与深槽平均之比。

由表1、表2可见,澉浦以上河段潮差快速减小,涨潮历时大幅缩短,至七堡后多年平均潮差由澉浦的5.64m减小至0.79m,平均涨潮历时也由澉浦的5.47h缩短至1.42h,说明潮汐在河口上溯过程中潮汐能量快速减弱;与此相对应的是年平均氯度也由澉浦的4.29g/L减小至0.11g/L,表明盐水在上溯过程中,潮量逐渐减小,受下泄淡水径流的稀释作用逐渐增强,氯度逐渐降低;同时还可以看到,越往上游,氯度的变异系数越大,其中闸口—仓前河段变异系数较大,七堡达到最大,表明闸口—仓前河段是径流、潮流势力彼消此长的区域,淡水、盐水掺混强烈,径流大则可有效压制盐水。杭州的多个取水口布置在闸口—七堡河段,该特点为杭州在秋季大潮期调度上游水库加大下泄流量抗咸提供了可行性^[15]。

1.2 横向及垂向分布特征

钱塘江河口虽属强潮河口,但不同河段的混合程度仍有所差别,尤其是仓前上游的杭州段,处于河口段的上游,山潮水比值逐渐增大,涌潮逐渐消失,潮流速减小,水体紊动掺混作用较中、下游弱,加之在复式河槽中浅滩与深槽的水深相差较多,还有弯道环流的影响等,导致横向流速分布不均匀,致使氯度在江道断面横向分布上不一致。一般认为,因深槽水流流速大,盐度随潮流运动的速度较快,在涨憩前后,深槽的盐度大于浅滩,且深槽与浅滩水深之比越大越显著^[16]。

表3为2009年9月大潮定点实测氯度情况,由表3可见,钱塘江河口在一个潮中的最大氯度,上、下游均呈现出深槽大于浅滩的现象,总体趋势是下游差异小,上游差异大,但横向差异最大的闸口断面的横向差异系数也小于0.3。同时可以看到,七堡—澉浦河段氯度分层差异也较小,分层系数均在0.16以下,闸口氯度已低于0.25g/L的饮用水标准,可看作为淡水。因此,钱塘江河口氯度的差异基本在0.3以内,属强混合型河口^[17]。

2 氯度时间变化特征

2.1 年际变化

以仓前站为例,由表1可知,其年均氯度最大可达0.85 g/L,最小仅0.16 g/L,同时也可看到影响盐水入侵的径流量及河床容积变化也很大。绘制仓前站年均氯度与年均径流量、潮差、河床容积的关系如图2~4所示。

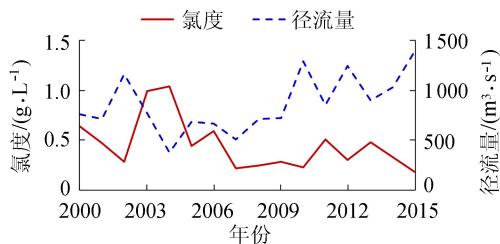


图2 仓前站年均氯度与年均径流量

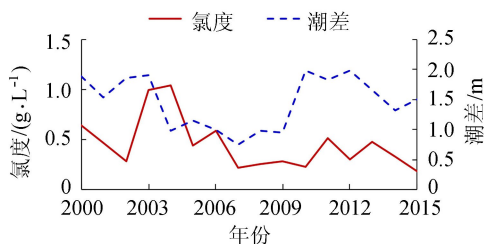


图3 仓前站年均氯度与年均潮差

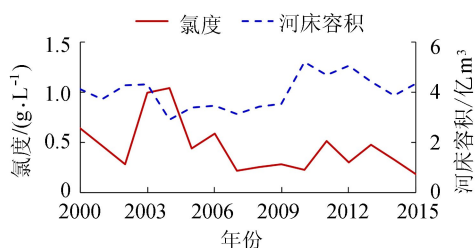


图4 仓前站年均氯度与年均河床容积

由图2~4可见,丰水年(2002年、2010年、2012年和2015年)时河道冲刷,河床容积和潮差大,但因径流量大压制了盐水入侵,仓前站氯度较小;连续枯水年(2005—2009年)后,河床淤高容积变小,潮差小,潮流上溯能力弱,虽然此时径流量小,但仓前站氯度也较小;径流从丰转枯的第一年(2003年),虽径流量大幅减小,因河床容积和潮差还较大,氯度也较高。同时也可看到,潮差与河床容积的变化趋势基本是一致的,河床容积大,则潮流上溯能力强,导致潮差大,由此可见,潮差大小可在一定程度上反映河床的冲淤程度。

2.2 季节变化

因径流和潮汐的季节性变化,导致钱塘江河口氯度在年内变化十分明显。统计2000—2015年各月平均日最大氯度,绘制各月氯度与月均径流、潮差、河床容积(钱塘江河口每年4月、7月、11月进行

3次地形测验)的关系见图5~7。从图5~7可见,3—7月为丰水期,径流较大,且潮汐相对较弱,氯度较小;8—11月径流大幅减小,平均不足丰水期的一半,对盐度的稀释能力大幅减弱,且河床经过汛期的强烈冲刷,河床容积较4月大幅增加,另外秋季是大潮期,外海潮汐较强,故河口段潮流上溯能力大幅增强,导致氯度较大;12月至次年2月虽为枯水期,径流量较小,但河口段的河床经过秋季大潮期4个月的回淤,容积大幅减小,潮流上溯能力弱,河口进潮量将大幅减少,氯度也较小。

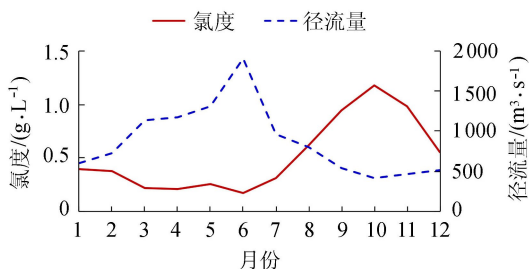


图5 仓前站多年月均日最大氯度与月均径流量

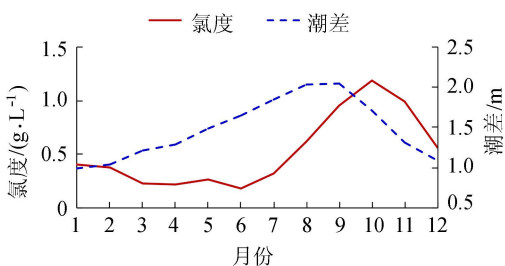


图6 仓前站多年月均日最大氯度与月均潮差

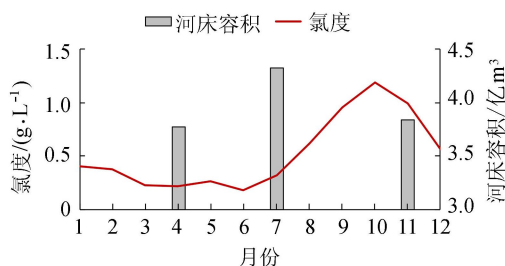


图7 仓前站多年月均日最大氯度与河床容积

2.3 月相变化

2007年10—11月,在七堡断面进行了连续半个月逐时的氯度、潮位、潮流观测,其结果如图8所示。由图8可见,小潮期潮位低,潮差小,随着小潮期向大潮期过渡,潮差逐渐增大,高、低潮位均逐渐抬升,10月23—29日低潮位抬升1.3 m,高潮位抬升2.1 m,表明潮差同步增大了0.8 m。小潮时氯度很低,水体为淡水,进入大潮期后,氯度快速升高,10月26—30日氯度波动剧烈,最高氯度达到1.3 g/L。大潮期过后,氯度又恢复至低值。由此可见,七堡河段的盐水入侵主要集中在大潮期的这几天,其他时间基本不受盐水入侵的影响。

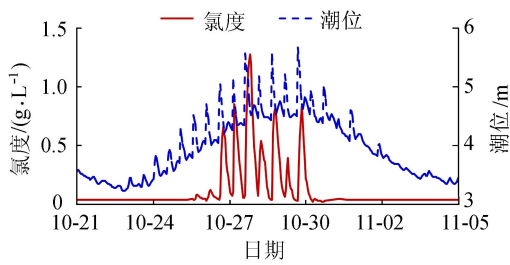


图8 2007年七堡断面氯度和潮位月相变化

3 大潮期氯度变化与潮位、流速的关系

由上述分析可知,钱塘江河口盐水入侵主要发生在大潮期。图9~11展示了2007年10月25—29日大潮期间七堡断面的潮位、垂线平均流速(设定涨潮流速为正,落潮流速为负)、垂线平均氯度的变化。由图9~10可见,由于涌潮的存在^[18],涨潮初期潮位急剧抬高,同时水流迅速从落潮流转为涨潮流,并在半小时内涨潮流速达到极值,大潮期间涨潮最大流速可以达到1.8 m/s,而落潮最大流速仅0.8 m/s,由此可见,该河段涨潮历时虽然小于落潮历时,但涨潮期的水动力远大于落潮期的水动力。同时可看到,因盐分需由下游随水流带至上游,故氯度抬升滞后于潮位和流速,高潮位和涨潮最大流速过后氯度才出现最大值,而泥沙含量基本与潮流同

步达到最大值^[19],这是因为泥沙不仅可被涨潮流从下游带至上游,本地河床的泥沙还会被涌潮掀起悬浮,这也是钱塘江河口盐度和泥沙输运特征不同的主要机制之一。由图11可见,在前5个潮(约60 h)期间,该河段处于蓄潮阶段,潮平均水深逐渐增加,潮位、潮差、涨落潮流速逐渐增大,氯度也逐渐增大。在第5个潮,高潮位、潮差、涨潮最大流速、氯度均达到最大值。之后低潮位基本保持不变,高潮位呈现一高一低交替的现象,相应的潮平均水深、潮差和涨潮最大流速也呈现一大一小交替的现象。在前60 h内,每个潮周期的氯度峰值逐渐升高,60 h后氯度出现最大值,为1.28 g/L,之后与高潮位(或潮差)对应,每个潮周期的氯度峰值呈现一高一低交替的现象,但氯度峰值逐渐减小。整个大潮期间每个潮周期的最小氯度基本相同,约0.05 g/L,说明该河段在落潮后期已为淡水。

4 结论

a. 闸口—仓前河段是径流、潮流势力彼消此长的区域,淡水、盐水掺混强烈,径流对盐水入侵有较好的压制作用。氯度垂向分布比较均匀,横向差异小,主槽氯度大于边滩。

b. 受年际、年内的径流,潮汐,地形的影响,年际、年内氯度差异较大,径流从丰转枯的第一年,每年的8—11月,盐水入侵较强。

c. 河口段的潮差和氯度不仅在大、小潮期间差异大,大潮期间波动也较大,且氯度变化滞后于潮位的变化。

d. 潮差是钱塘江河口潮动力的重要指标,也是盐水入侵强度的重要指标,咸潮入侵强度与潮差呈现显著的正相关。

e. 大潮期的前期,河口处于蓄潮阶段,盐度快速升高,此时应快速加大上游的下泄流量,抵御咸潮入侵。大潮期的后期,因潮位和氯度仍较高,此时仍应保持较大的下泄流量,避免受咸潮入侵影响用水。

参考文献:

[1] 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 Yingbiao, 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))

[2] YE R H, SONG Z Y, ZHANG C M. et al. Analytical model for surface saltwater intrusion in estuaries [J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(3):712-719.

[3] ALI A, LEMCKERT C J, DUNN R J K. Salt fluxes

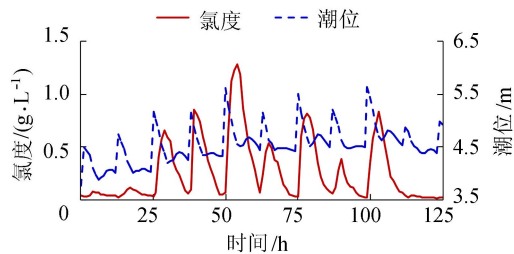


图9 大潮期七堡断面氯度与潮位的关系

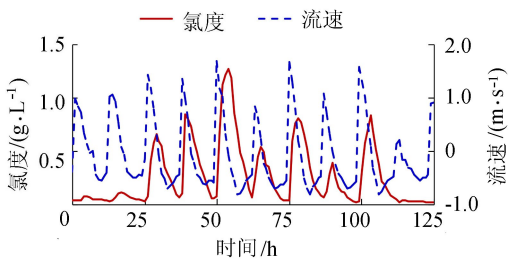


图10 大潮期七堡断面氯度与流速的关系

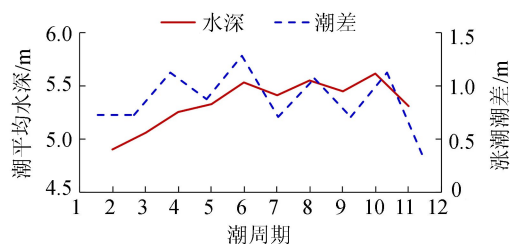


图11 大潮期七堡断面水深与潮差的关系

- within a very shallow subtropical estuary[J]. Journal of Coastal Research, 2010, 26(3), 436-443.
- [4] 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))
- [5] 沈焕庭,茅志昌,朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 北京:海洋出版社,2003.
- [6] SAVENIJE H H G. Salinity and tides in alluvial estuaries [M]. Amsterdam:Elsevier Press,2005.
- [7] 陈水森,方立刚,李宏丽,等. 珠江口咸潮入侵分析与经验模型[J]. 水科学进展,2007,18(5): 751-755. (CHEN Shuisen, FANG Ligang, LI Hongli, et al. Saltwater intrusion analysis and experiential model for Pearl River estuary [J]. Advances in Water Science, 2007,18(5):751-755. (in Chinese))
- [8] DUC N A. Salt intrusion, tides and mixing in multi-channel estuaries [M]. Amsterdam: Taylor & Francis Group, 2008.
- [9] 方神光,崔丽琴. 磨刀门水道枯季咸潮入侵特性及规律[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4): 14-18. (FANG Shengguang, 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))
- [10] 毛汉礼,甘子钧,沈鸿书. 杭州湾潮混合的初步研究 I:上湾区[J]. 海洋与潮沼,1964,6(2):121-134. (MAO Hanli, GAN Zijun, SHEN Hongshu. A preliminary study of the tidal flushing in Hangzhou Bay I: Upper Estuary [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1964,6(2):121-134. (in Chinese))
- [11] 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 Hydraulic Engineering, 1981,12(6):46-50. (in Chinese))
- [12] HAN Zengcui, PAN Cunhong, YU Jiong, et al. Effect of large-scale reservoir and river regulation/reclamation on saltwater intrusion in Qiantang Estuary [J]. Science in China(Ser B),2001, 44(Sup1):221-229.
- [13] 史英标,潘存鸿,程文龙,等. 钱塘江河口段盐水入侵的时空变化及预测模型[J]. 水科学进展,2012, 23(3):409-418. (SHI Yingbiao, PAN Cunhong, CHENG Wenlong, et al. Temporal-spatial variation of salt water intrusion in the estuarine reach of Qiantang River and its numerical simulation [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3):409-418. (in Chinese))
- [14] 潘存鸿,张舒羽,史英标,等. 钱塘江河口盐水入侵影响因素及数值预报[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 13-19. (PAN Cunhong, ZHANG Shuyu, SHI Yingbiao, et al. Factors and numerical forecast of saltwater intrusion in Qiantang River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6):13-19. (in Chinese))
- [15] 李若华,史英标,张舒羽. 钱塘江河口抗咸流量预报模式及其检验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(5):75-80. (LI Ruohua, SHI Yingbiao, ZHANG Shuyu. Prediction model of salinity-resisting discharge in Qiantang Estuary and its validation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(5): 75-80. (in Chinese))
- [16] 曹勇. 长江口南汇东滩近岸水域淡水资源开发利用研究[D]. 上海:华东师范大学,2005.
- [17] 韩曾萃,潘存鸿,史英标,等. 人类活动对河口咸水入侵的影响[J]. 水科学进展, 2002, 13(3):333-339. (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):333-339. (in Chinese))
- [18] PAN C H, LIN B Y, MAO X Z. Case study: numerical modeling of the tidal bore on the Qiantang River, China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 133(2): 130-138.
- [19] PAN C H, HUANG W R. Numerical modeling of suspended sediment transport affected by tidal bore in Qiantang Estuary [J]. Journal of Coastal Research, 2010, 26(6): 1123-1132.

(收稿日期:2018-03-12 编辑:郑孝宇)

· 简讯 ·

第8届水资源与环境研究国际会议 将在河海大学召开

由河海大学主办的第8届水资源与环境研究国际会议(ICWRER 2019)将于2019年6月14—18日在南京河海大学召开,届时将就水文、生态、社会系统之间复杂的交互关系进行广泛的交流探讨。会议主要议题有:水文生态与水生态保护,水资源管理与绿色发展,水资源经济,气候变化对水资源的影响,地表水与地下水污染控制,水资源高效开发利用,水利工程建设与运营,水灾害预防与治理,水资源公平配置,水资源冲突与决策,跨流域调水,水环境风险管理,智慧水务,河湖管理的制度创新,河湖健康评估与管理,海洋经济与管理等。

(本刊编辑部供稿)