

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.01.005

海平面变化背景下三大河口咸潮入侵 特征及变化浅析

左常圣¹, 王慧¹, 李文善¹, 黄清泽², 张建立¹, 刘秋林¹

(1. 国家海洋信息中心, 天津 300171; 2. 宁德海洋环境监测中心站, 福建 宁德 352000)

摘 要: 基于 2009—2019 年实测资料分析研究我国三大河口咸潮入侵的特征及变化规律。研究表明: 2009 年以来, 珠江口每年都会受到咸潮入侵的威胁, 2019 年咸潮入侵程度为近 8 年来最为严重的一年, 全禄水厂超标时间超过 210 h; 钱塘江口除 2014 年外均发生较强咸潮入侵, 其中 2019 年咸潮入侵程度为近 9 年最为严重的一年, 南星水厂超标时间超过 550 h; 长江口咸潮入侵程度整体呈下降趋势, 2015 年后咸潮入侵次数明显减少, 平均每年 < 3 次, 主要原因为长江口北支倒灌影响, 2019 年咸潮入侵程度为近 5 年最为严重的一年, 青草沙水库超标时间超过 470 h。对河口咸潮入侵影响最大的因素为径流, 其次是潮汐和海平面变化; 受潮周期影响, 咸潮入侵具有日变化和半月变化周期; 受径流影响, 咸潮入侵具有明显的季节变化和年际变化规律, 我国三大河口咸潮入侵机制共性和差异性并存。海平面上升和风暴潮增水会加剧磨刀门咸潮入侵灾害, 在高海平面期及风暴潮多发期需格外注意咸潮入侵灾害, 做好预警应对。

关键词: 河口; 海平面; 风暴潮; 咸潮入侵

中图分类号: P731.23

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2021)01-0037-07

Characteristics and changes of salt-tide intrusion in three estuaries under the background of sea level change

ZUO Changsheng¹, WANG Hui¹, LI Wenshan¹, HUANG Qingze², ZHANG Jianli¹, LIU Qiulin¹

(1. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China,

2. Ning De Marine Environmental Monitoring Center, Ningde 352000, China;)

Abstract: Based on the measured data from 2009 to 2019, this paper analyzes the characteristics and variation of salt-tide intrusion in three estuaries in China. The results show that the Pearl River Estuary has been threatened by salt tide invasion every year since 2009, with the most severe invasion happened in 2019, when the Quanlu water plant exceeded 210 hours. Except for 2014, strong salt tide invasion occurred in the Qiantang River. In 2019, the degree of salt tide invasion was the most serious, and the exceeding time of Nanxing Water Plant was 550 hours. Since 2015, the number of salt tide invasions in the Yangtze Estuary has been significantly reduced, with an average of less than three times a year. The main reason is back irrigation in the northern branch of the Yangtze Estuary. In 2019, the degree of salt tide invasions was the most severe in the past five years, with the Qingcaosha reservoir exceeding the standard for 470 hours. Runoff was the most important factor influencing the intrusion of saltwater in estuaries, followed by tidal and sea level changes. Under the influence of tidal cycle, salt tide invasion has diurnal variation and semilunar variation period of 15 days. Under the influence of runoff, the salinity tide invasion has obvious seasonal and interannual variation. Sea level rise and storm surge increase aggravate the salt tide invasion disaster. The common and different mechanisms of saltwater intrusion in the three estuaries coexist in China. In the period of high sea level and frequent storm surge, salt tide invasion disaster deserves special attention and early warning and response need to be made.

Keywords: estuary; sea level; storm surge; intrusion of tidal saltwater

收稿日期: 2020-03-30; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604902)

作者简介: 左常圣 (1989—), 硕士, 助理工程师, 主要从事气候与海平面变化及其影响、咸潮入侵研究。电子邮箱: changshengzuo@126.com

通讯作者: 黄清泽, 硕士, 助理工程师。电子邮箱: 1562097720@qq.com

咸潮入侵是枯水季发生在河口地区的常见自然灾害,在潮水可以达到的河口区段,在河流流量较小的情况下,特别是涨潮时段,高盐水团沿河口的潮汐通道上溯,并在河水中扩散,造成咸淡水混合,上游河水变咸,即为咸潮。当海水上溯距离远,入侵的持续时间过长时,就会影响河口地区沿岸居民的生产生活用水以及生态环境,引发咸潮灾害(茅志昌等,2000)。

长期以来,我国沿海的三大河口(珠江口、长江口、钱塘江河口)地区屡遭咸潮侵袭(高时友等,2016;黄洪城等,2014)。受全球气候变化影响,我国咸潮入侵情况也出现了新变化,近年来海平面逐渐上升(左军成,2015;王慧等,2011),使得咸潮活动频繁,持续时间增加,上溯影响范围扩大,强度趋于严重(宋志尧等,2002;Rice et al, 2012;孙志林等,2017)。另外随着全球气候变暖,袭击我国沿海的台风在频次与强度上都有所增加(齐庆华等,2019),若在枯水期遭遇较大的风暴潮增水,将产生严重的咸潮入侵。李素琼等(2000)根据 Ippen 和 Harlomen 的扩散理论和方法推算,分析了未来海平面上升 0.4~1 m 对珠江口咸潮入侵的影响。孔兰等(2010)基于数学模型研究了海平面上升对咸潮上溯的影响,发现随着海平面上升,咸潮上溯界线向上游方向移动显著。鲁海燕等(2013)研究了杭州湾沿海海平面分别上升 0.5 m 和 1 m 两种情景下杭州湾盐度场的变化,结果表明,海平面上升会加剧杭州湾咸潮入侵。这些研究都通过统计方法或者数学模型科学推演了未来海平面上升对咸潮入侵的影响,但缺少海平面变化影响咸潮事实佐证。

本文根据实测资料,分析了 2009—2019 年我国河口咸潮变化的特征,探讨海平面变化以及风暴潮已对我国三大河口咸潮入侵造成的影响,为研究海平面上升对咸潮入侵的影响以及科学应对咸潮入侵提供参考和依据。

1 数据来源

河口的咸潮入侵次数、上溯距离、氯度、径流资料来源于中国沿海海平面变化影响调查业务化成果,时间序列长度为 2009—2019 年。

潮位数据来源于自然资源部以及地方海洋站观

测数据,包括崇明站、澈浦站和三灶站,时间序列长度为 2009—2019 年。海平面数据来源于中国海平面公报。

2 河口咸潮入侵的规律分析

河口区域处于河流与海洋的交汇地带,受二者双重作用,咸潮入侵的程度与径流、潮汐动力和海平面变化密切相关,同时也受河口地形、气象条件以及人类活动等因素的影响。

2.1 咸潮入侵日变化

河口咸潮监测站含氯度日变化过程曲线与潮位过程线基本类似。与潮位在一天有两高两低相对应,含氯度在一天中也出现两高两低且具有明显的日不等现象(图 1,图 2)。

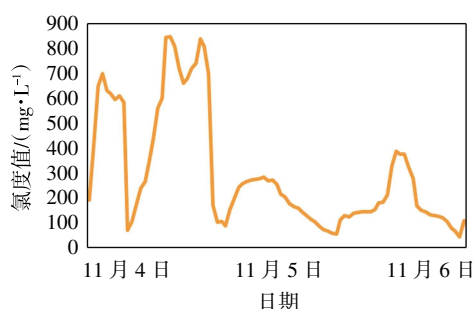


图 1 2017 年 1 月 4—6 日南星水厂站氯度变化图

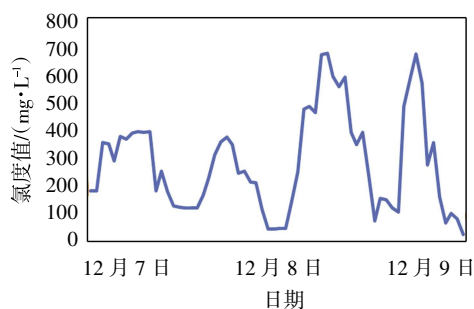


图 2 2019 年 12 月 7—9 日青草沙站氯度变化图

2.2 咸潮入侵月相变化

选取 2017 年 11 月至 2018 年 3 月磨刀门枯水期氯度数据开展谱分析,得出磨刀门水道咸潮入侵具有约 15 d 的周期,与潮汐周期一致。2019 年钱塘江口自 9 月 28 日开始,连续 6 次天文大潮期(每次相差 15 d 左右)发生咸潮入侵(氯度值超过 250 mg/L),长江口发生严重咸潮入侵亦是在天文大潮,可见氯化物含量的半月变化主要与潮汐大

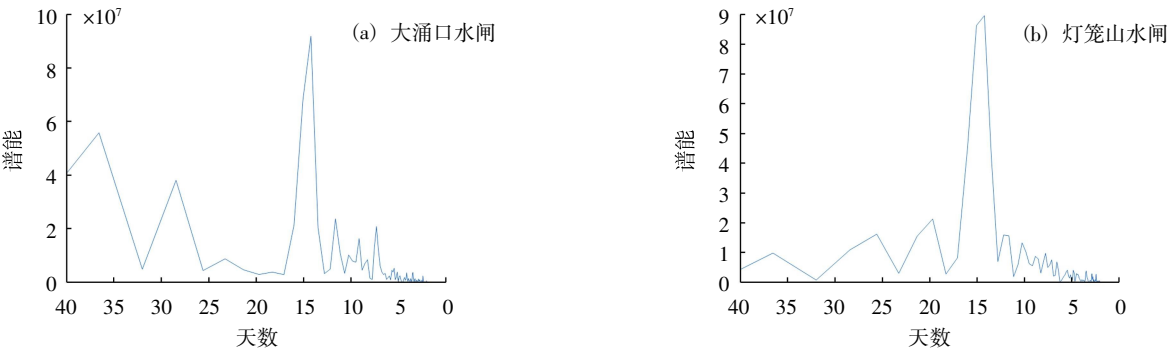


图3 磨刀门咸潮入侵周期性分析

小潮半月周期有关 (图 3)。

图 4 为珠江 2018 年 2 月 20 日—3 月 6 日咸潮入侵最远上溯距离的变化过程。咸潮运动具有半月周期性，在一个半月周期中，盐水经历了一个完整的上溯与回落的过程。咸界最远上溯距离反映出咸潮在该周期中影响的范围。咸潮入侵在 2 月 24—26 日上溯最远，到达全禄水厂，且持续到 26 日，期间最高氯度值达 1 756 mg/L，长时间在上游停留，导致了严重的咸潮灾害。

需要指出的是，虽然三大河口咸潮入侵都具有

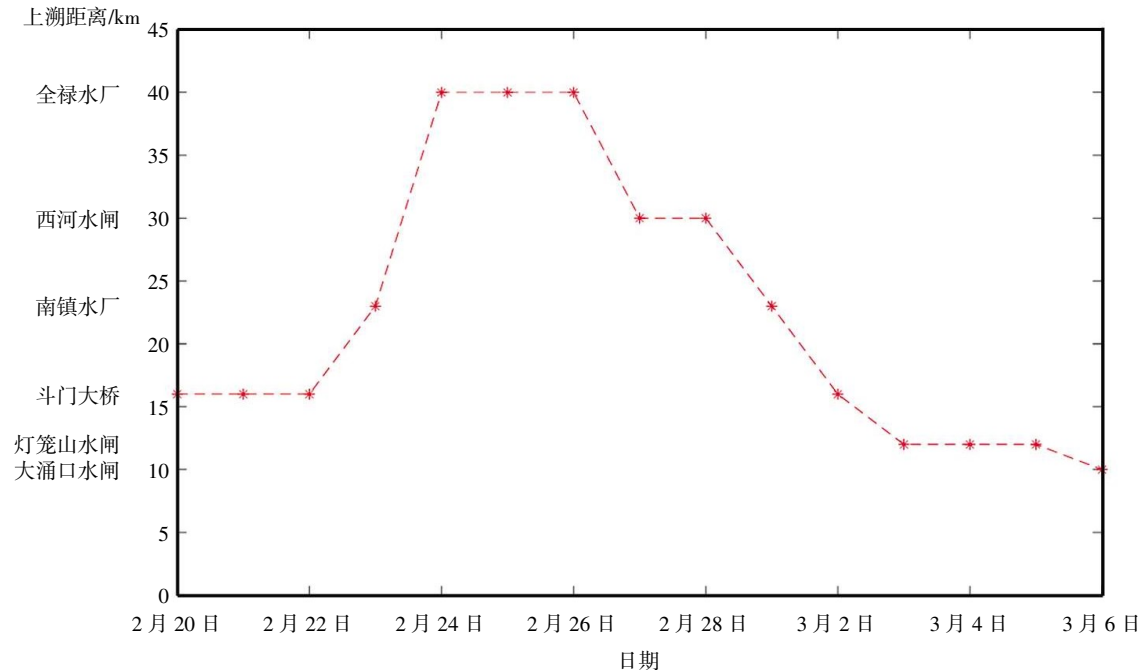


图4 咸潮上溯距离半月潮周期变化图

半月周期特征 (胡溪 等, 2012; 杨兴果, 2014), 但亦有不同之处, 长江口、钱塘江口咸潮最严重的时间往往处于天文大潮期, 而珠江口不是, 这可能与珠江复杂的水系有关。

2.3 咸潮入侵季节变化

根据实测资料统计, 长江口咸潮入侵季节变化特征明显, 一般在每年的 9 或 10 月至翌年 5 月出现咸潮入侵的现象, 2 月、3 月和 11 月入侵次数较多。每年的 8—11 月份钱塘江处于枯水季, 同期潮差大, 海平面高, 易发生咸潮入侵, 其中 9—10 月最为严重。珠江口的咸潮入侵一般出现在 10 月至次年的 3 月, 严重年份 4 月和 9 月份亦会发生咸潮入侵, 其中 12 月至次年 2 月份咸潮入侵最为严重 (图 9)。

由图 9 可以看出, 各监测站月平均盐度与月平均流量呈良好的负相关。每年的枯水季节易发生咸潮入侵 (闻平等, 2007; 张二凤等, 2014), 若同时叠加高海平面将发生严重的咸潮入侵, 我国三大

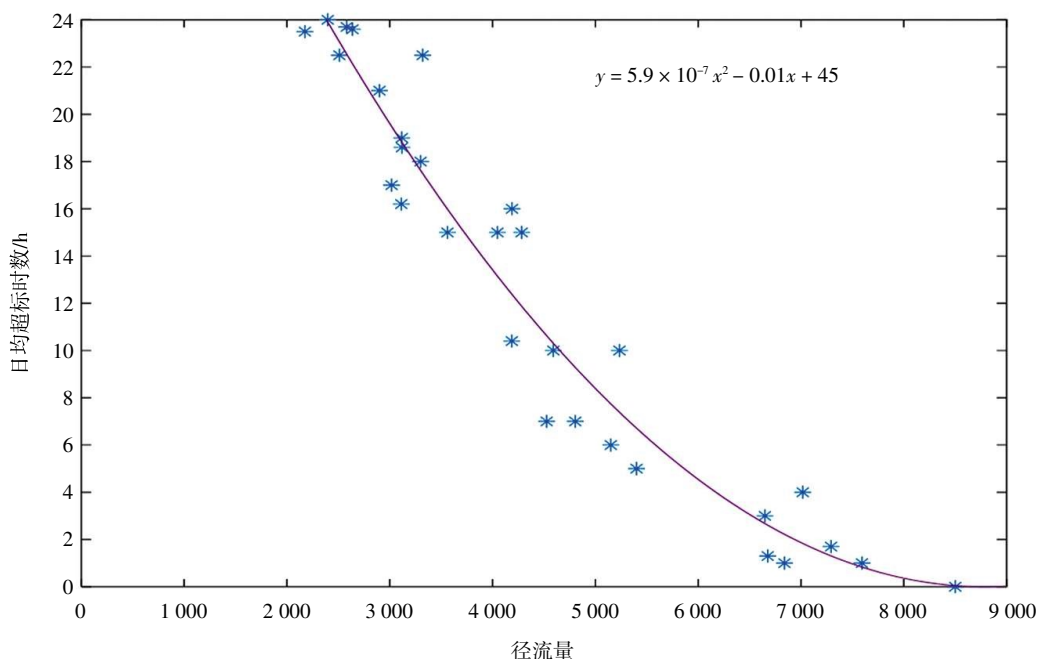


图5 珠江咸潮入侵逐日超标历时与流量的关系

河口每年的季节性高海平面期在9月、10月左右,会在一定程度上促使咸潮入侵提前发生。

为定量分析流量对咸潮入侵的影响,现以磨刀门水道大涌口水闸为研究对象,采用2014—2016年枯水期30个潮周期的逐日氯度超标时间数据。径流量取梧州水文站与石角水文站流量之和,潮差代表站选取三灶站。统计分析中的潮周期定为从一个潮差小于相邻两天之日开始(包括此日),到下一个潮差小于相邻两天之日结束(不包括此日),以15 d作为基本潮周期天数。

从图5中可知,逐日超标历时与梧州+石角径流量高度相关,相关系数为-0.95。因此,可以参考1个潮周期日均超标历时相对于梧州+石角径流量的回归曲线方程,估算出上游不同设计流量条件下,观测点1个潮周期的日均超标历时数据;当西江+北江潮周期平均流量在2500 m³/s以上,大涌口水闸才有取淡水机会。

2.4 咸潮入侵年际变化

河口咸潮入侵的年际变化与径流量有良好的对应关系,丰水年咸潮入侵较轻,枯水年入侵严重。

2009—2019年,长江口咸潮入侵次数整体呈下降趋势。2015年后咸潮入侵次数明显减少,平均每年<3次,主要原因为长江口北支倒灌影响。长江口南支咸潮入侵灾害明显减小的主要原因是上

游水利工程的蓄水作用,在丰水季节蓄水、枯水季节放水的调节功能对长江的入海径流量有较大的影响,尤其在2013年以后长江口枯水季节径流量较往年明显增加。这在一定程度上缓解了枯水季节长江口的咸潮入侵灾害,图3中大通站流量和咸潮入侵次数负相关达到0.87。2019年,长江口青草沙水库监测到3次较强的咸潮入侵过程,咸潮持续时间和最大氯度值均大于2018年。9月,长江口沿海处于季节性高海平面期,9月22—28日发生咸潮入侵,期间又恰逢台风“塔巴”影响长江口,海平面较常年(1993—2011年)高325 mm,加剧了咸潮入侵程度,青草沙水库氯度超标144 h,最大氯度值达1533 mg/L。

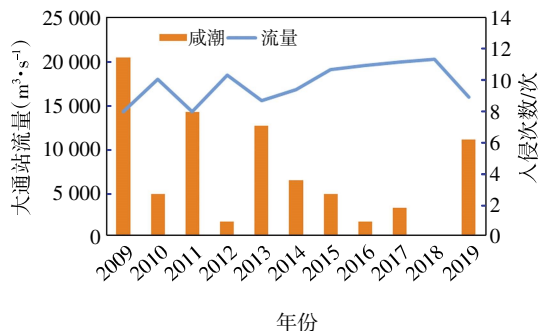


图6 2009—2019年长江口咸潮入侵次数年际变化

2014—2018 年钱塘江口咸潮入侵整体上较 2011—2013 年有所减轻,尤其是入侵历时,但南星水厂最高氯度值依然能达到 800 mg/L 以上。近 4 年,钱塘江河口咸潮入侵有加重的趋势,在径流量较小的年份,若高海平面期叠加天文大潮将造成严重的咸潮入侵,对沿岸居民日常生活生产用水造成严重影响。2019 年 9 月 28 日—12 月 15 日,连续 6 次天文大潮期间均发生较强的咸潮入侵过程,咸潮入侵次数、持续时间和最大氯度值较 2018 年均有所增加。9 月,杭州湾沿海处于季节性高海平面期,9 月 28 日—10 月 2 日,发生咸潮入侵,期间又恰逢台风“米娜”影响杭州湾,海平面较常年高约 450 mm,加剧了咸潮入侵程度,南星水厂氯度超标 41 h,最大氯度值达 776 mg/L。

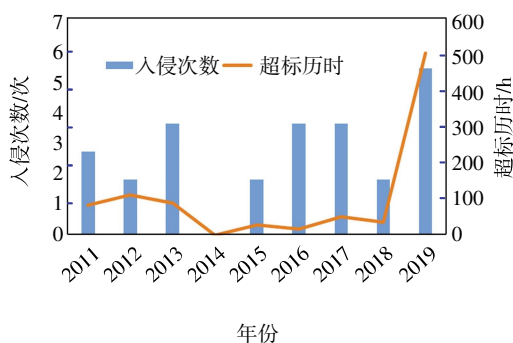


图 7 2009—2019 年南星水厂咸潮历时及入侵次数年际变化图

珠江口每年都会受到咸潮入侵的威胁,在径流量较大的情况下咸潮上溯距离较短。2015 年枯水季各月平均径流量都在 3 000 m³/s 以上,咸潮入侵灾害较轻,磨刀门上溯距离为 33 km,2009—2019 年磨刀门历年入侵距离多在 50 km 以上,全禄水厂平均氯度超标天数超过 15d,最大氯度值超过 3 000 mg/L。2019 年,珠江口全禄水厂共监测到 5 次咸潮入侵过程,咸潮入侵次数和强度均较 2018 年有所增加。

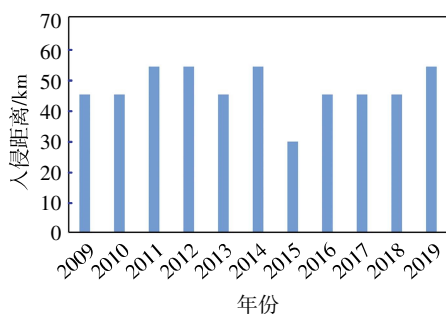


图 8 2009—2019 年珠江口磨刀门咸潮入侵最远上溯距离变化图

12 月,珠江口沿海海平面较常年高 174 mm,12 月上旬遭受严重咸潮入侵,为 2012 年以来最强,上溯距离超过 60 km,全禄水厂氯度超标 150 h,最大氯度值 5 090 mg/L,严重影响沿线水厂供水。

3 海平面上升和风暴潮对咸潮入侵的影响

3.1 海平面上升对咸潮入侵影响浅析

根据 2019 年中国海平面公报,气候变暖背景下,全球平均海平面呈持续上升趋势。1980—2019 年,中国沿海海平面上升速率为 3.4 mm/a,高于同时段全球平均水平。

海平面持续上升使得沿程各潮位站高、低潮位均有所抬升,潮差增大,增大了向陆斜压力,促进了高盐水的向陆运动,进而加剧咸潮入侵。2009 年以来我国三大河口因海平面异常变化及季节性高海平面加剧咸潮入侵的事件多有发生。

图 9b 清晰刻画了高海平面对长江口咸潮入侵的影响。长江口咸潮入侵的主要影响因素为径流量,2014 年 1 月和 2 月经流量相当,但 2 月份海平面明显高于 1 月份,导致当年 2 月发生严重咸潮入侵,自 2 月 4 日开始,持续入侵时间超过 23 d,是自 1993 年以来最长的一次,青草沙水库和宝钢水库取水口最大氯度值分别达到 5 000 mg/L 和 1 129 mg/L,上海城市供水受到严重影响。

图 9c 清晰刻画了钱塘江径流、海平面两个影响咸潮入侵的关键因素的年变化情况,钱塘江 8 月份径流量相对较低(高于 1、2 月),但季节性高海平面抬升了基础水位,增大了向陆斜压力,直接加剧咸潮入侵,在这种情况下,钱塘江每年 8 月份就开始受到咸潮入侵的威胁。

图 9d 为珠江口全禄水厂咸潮入侵年变化图,由图可以看出在 10 月份珠江流量(西江和北江流量之和)平均达到 5 998 m³/s,根据前文的回归分析,在不考虑海平面影响情况下,这种径流条件全禄水厂站是不易发生咸潮入侵的,但珠江口 10 月正处于高海平面期,抬高了水位,导致 10 月份也发生了咸潮入侵,且历时大于平均流量比 10 月小的 3 月份。

3.2 风暴潮对河口咸潮入侵的影响

2018 年 8 月,第 14 号台风“摩羯”登陆浙江沿海,受其影响,钱塘江河口出现风暴潮,期间钱

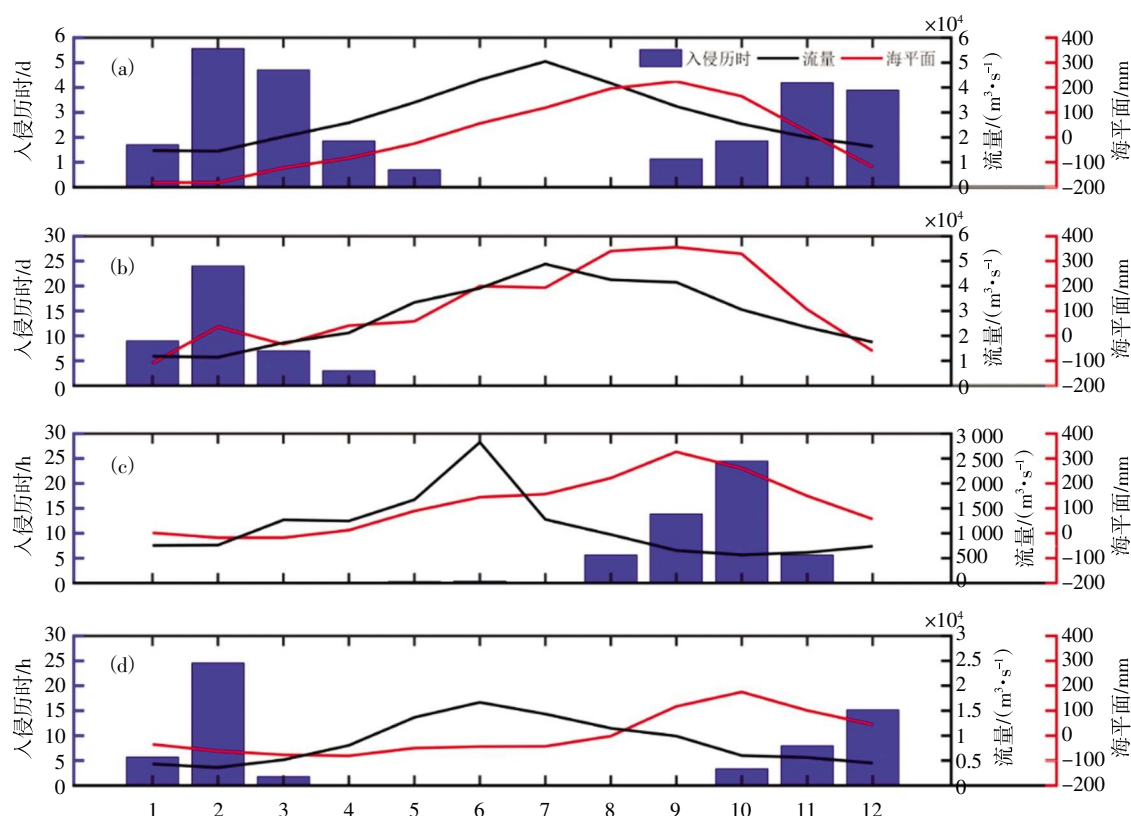


图9 河口咸潮入侵历时年变化图

注：(a) 2009—2019 年长江口青草沙；(b) 2014 年长江口青草沙；(c) 2009—2019 年钱塘江南星；(d) 2014—2019 年珠江全禄

塘江口滩浒站增水 47 cm，8 月 12—13 日钱塘江口发生咸潮入侵，南星水厂氯度超标 9 h，最大氯度值达 544 mg/L。2018 年 9 月，第 22 号台风“山竹”登陆广东沿海，受其影响，珠江河口出现风暴潮，期间珠江口赤湾站增水达 287 cm，9 月 16—17 日珠江口发生咸潮入侵，平岗泵站氯度超标 12 h。

2019 年 9 月，第 17 号台风“塔巴”影响长江口沿海，受其影响，长江河口出现风暴潮，期间长江口余山站增水 115 cm，9 月 22—28 日长江口发

生咸潮入侵，青草沙水库氯度超标 144 h，最大氯度值达 1 533 mg/L。2019 年 10 月，第 18 号台风“米娜”登陆浙江沿海，受其影响，钱塘江河口出现风暴潮，期间钱塘江口滩浒站增水 111 cm，9 月 28 日—10 月 2 日钱塘江口发生咸潮入侵，南星水厂氯度超标 41 h，最大氯度值达 776 mg/L。

在季节性高海平面期，我国三大典型河口若同时遭遇台风风暴潮增水和天文大潮，会进一步加剧咸潮入侵灾害，影响水厂取水安全（表 1）。

表 1 2018 年、2019 年热带气旋影响期间海平面及咸潮入侵情况

位置	名称	影响期间	天文大潮期	季节性高海平面期	影响
钱塘江口	摩羯	2018 年 8 月 12—13 日	是	是	南星水厂氯度超标 8 h
珠江口	山竹	2018 年 9 月 16—17 日	否	是	南镇水厂氯度超标 12 h
长江口	塔巴	2019 年 9 月 22—28 日	是	是	青草沙水库氯度超标 144 h
钱塘江口	米娜	2019 年 9 月 28 日—10 月 2 日	是	是	南星水厂氯度超标 41 h

4 结论

本文为掌握我国河口咸潮入侵规律以及在气候

变暖背景下的变化特征，基于 2009—2019 年实测资料，系统分析研究我国三大典型河口咸潮入侵的规律以及海平面上升对咸潮入侵的影响，得到如下主要结论。

长江口一般在每年的 9 或 10 月至翌年 5 月出现咸潮入侵的现象, 2 月、3 月和 11 月入侵次数较多, 2009—2019 年, 长江口咸潮入侵程度整体呈下降趋势, 2015 年至今咸潮入侵次数明显减少, 平均每年 < 3 次, 主要原因是长江口北支倒灌影响; 每年的 8—11 月份钱塘江易发生咸潮入侵, 其中 9 月、10 月最为严重, 近 10 年钱塘江口咸潮入侵较往年有所减轻, 但 2014 年后, 咸潮有逐年加重的趋势。珠江口的咸潮入侵一般出现在 10 月至次年的 3 月, 严重年份 4 月和 9 月份亦会发生咸潮入侵, 其中 12 月至次年 2 月份咸潮入侵最为严重。2009—2019 年, 珠江口每年都会受到咸潮入侵的威胁, 入侵距离多在 50 km 以上, 全禄水厂平均氯度超标天数超过 15 d, 最大氯度值超过 3 000 mg/L。

受潮周期影响, 河口咸潮入侵具有日变化和 15 d 的半月变化周期, 受径流影响, 咸潮入侵具有明显的季节变化和年际变化规律, 当径流量约小于一定临界值时, 河口即发生严重咸潮入侵现象。海平面上升和风暴潮增水会加剧河口咸潮入侵灾害。海平面异常变化作为一个重要的变化因素, 会加大准确预报河口咸潮入侵程度的困难, 故需加大海平面异常变化及对咸潮影响的研究, 以便准确预报, 科学应对河口咸潮入侵。

三大河口咸潮入侵都受径流、潮汐、海平面等因素的影响, 但又各有特点。长江口的咸潮入侵程度与水利工程对长江的径流控制有很大关系, 钱塘江口的天文大潮对咸潮入侵的加剧作用尤其明显, 而珠江口咸潮入侵最严重的时间并非是在天文大潮期, 认识三大河口入侵机制的差异对于科学应对我国咸潮入侵具有重要意义, 需继续深入研究。

参 考 文 献

- 高时友, 陈子桑, 2016. 珠江口磨刀门水道枯季咸潮上溯与盐度输运机理分析[J]. 海洋通报, 35(6): 625–631.
- 黄洪城, 匡翠萍, 顾杰, 等, 2014. 河口咸潮入侵研究进展[J]. 海洋科学, 38(9): 109–115.
- 胡溪, 毛献忠, 2012. 珠江口磨刀门水道咸潮入侵规律研究[J]. 水利学报, 43(5): 529–536.
- 孔兰, 陈晓宏, 杜建, 等, 2010. 基于数学模型的海平面上升对咸潮上溯的影响[J]. 自然资源学报, (7): 1097–1104.
- 李素琼, 敖大光, 2000. 海平面上升与珠江口咸潮变化[J]. 人民珠江, (6): 42–44.
- 鲁海燕, 潘存鸿, 史英标, 2013. 海平面上升对杭州湾盐水入侵的影响[C]全国水动力学研讨会暨全国水动力学学术会议.
- 茅志昌, 沈焕庭, 徐彭令, 2000. 长江河口咸潮入侵规律及淡水资源利用[J]. 地理学报, 67(2): 243–250.
- 孙志林, 李光辉, 许丹, 等, 2017. 海平面上升对钱塘江河口盐水入侵影响的预测研究[J]. 中国环境科学, (10): 284–292.
- 宋志尧, 茅丽华, 2002. 长江口盐水入侵研究[J]. 水资源保护, (3): 27–30, 69.
- 齐庆华, 蔡裕硕, 颜秀花, 2019. 气候变化与我国海洋灾害风险治理探讨[J]. 海洋通报, 38(4): 361–367.
- 王慧, 范文静, 张建立, 等, 2011. 中国沿海近 31 年冬季海平面变化特征[J]. 海洋通报, (6): 637–643.
- 闻平, 陈晓宏, 刘斌, 等, 2007. 磨刀门水道咸潮入侵及其变异分析[J]. 水文, 27(3): 65.
- 杨兴果, 2014. 钱塘江河口咸潮入侵预警研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 张二凤, 陈沈良, 刘小喜, 等, 2014. 长江口北支异常强盐水入侵观测与分析[J]. 海洋通报, 33(5): 491–496.
- 左军成, 2015. 近十年我国海平面变化研究进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, (43): 449.
- RICE K C, HONG B, SHEN J, 2012. Assessment of salinity intrusion in the James and Chickahominy Rivers as a result of simulated sea-level rise in Chesapeake Bay, East Coast, USA[J]. Journal of Environmental Management, 111(none): 61–69.

(本文编辑: 王少朋)