

强涌潮河口潮汐对盐水入侵的影响机制

李若华¹, 张舒羽¹, 胡立芳²

(1. 浙江同济科技职业学院; 2. 中国计量大学能源环境与安全工程学院)

摘要:以钱塘江河口为例,采用平面二维涌潮盐度数学模型模拟了强涌潮河口的盐水入侵问题,通过改变模型下边界的潮位过程以反映外海潮汐变化,研究了高潮位、低潮位、潮差3个潮位特征值对河口区盐水入侵的影响机制。结果表明,外海潮汐变化主要通过高潮位变化影响河口的盐水入侵程度,低潮位变化影响甚微,故仅用潮差指标反映外海潮汐变化对河口盐水入侵的影响是不全面的;河口的盐水入侵对外海潮汐变化响应迅速,且可持续3个潮周期以上。

关键词:盐水入侵;潮位;潮差;数学模型;钱塘江河口

Influence mechanism of tides on saltwater intrusion in macrotidal estuary//Li Ruohua¹, Zhang Shuyu¹, Hu Lifang²
(1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology; 2. College of Energy Environment and Safety Engineering, China Jiliang University)

Abstract: Taking the Qiantang River Estuary as an example, this research employed a two-dimensional horizontal saltwater intrusion model capable of simulating tidal bore phenomena to investigate saltwater intrusion in a strong tidal bore estuary. By modifying the tidal level processes at the model's seaward boundary to represent variations in offshore tides, the study examined the influence mechanisms of three tidal characteristic parameters, high tidal level, low tidal level, and tidal range, on saltwater intrusion in the estuarine region. The results indicate that offshore tidal changes primarily affect the extent of saltwater intrusion through variations in high tidal levels, while changes in low tidal levels have minimal impact. Therefore, it is inadequate to only use the tidal range index to reflect the influence of offshore tidal variations on estuarine saltwater intrusion. In addition, estuarine saltwater intrusion responds rapidly to offshore tidal changes, with effects persisting for more than three tidal cycles.

Key words: saltwater intrusion; tidal level; tidal range; mathematical model; the Qiantang River Estuary

潮汐潮流是盐水与淡水混合的主要动力源,是河口盐水入侵的主要驱动力^[1]。在潮汐的周期作用下,盐水入侵的潮相变化具有日周期及半月(朔、望)周期的特点^[2]。河口地区经济发达、人口众多,为满足河口水资源利用对盐度的要求,一般根据潮汐变化特征避咸取淡^[3],或调度上游水库下泄流量压咸取淡^[4]。因此,研究潮汐变化对盐水入侵的作用机制及影响规律,对河口地区水资源利用具有重要意义。

强潮河口大、小潮汛的潮汐强度差异巨大,大潮汛期潮动力强、盐度垂向混合均匀、盐水上溯距离远^[5-6],故盐水入侵主要发生在大潮汛期^[7-9]。潮汐的特征参数包括高潮位、低潮位、潮差等,潮差是表征潮汐能大小的重要参数,故强潮河口的盐水入侵多基于潮差进行研究。罗小峰等^[10]、Qiu等^[11]分别构建长江口二维数学模型和三维数学模型探讨了外

海潮差变化对盐水入侵的影响,发现潮量和盐水入侵距离随潮差的增大而增大;李若华等采用机制分解法^[12]和数学模型^[4]的研究表明,钱塘江河口的盐度及向陆的盐分输运通量均与潮差呈显著正相关关系,故可将潮差作为盐水入侵程度及抗咸调度的指示指标;潘存鸿等采用实测资料^[13]和数学模型^[7]的研究表明,钱塘江江道冲刷后潮差和进潮量增大导致盐水入侵增强。

潮差是指相邻高、低潮位间的差值,高潮位抬高、低潮位降低或高低潮位同向变化但变化幅度不同均会导致潮差增大。因此,潮差可以表征潮位的变化,但无法体现高低潮位具体是如何变化的,因此难以准确解释其对盐水入侵的影响。有时候潮位发生变化但潮差没有改变也会导致盐水入侵发生变化,如气候变暖导致海平面升高,潮差可能不会发生明显变化,但多位学者研究表明海平面上升会明显

加剧河口的盐水入侵程度^[14-15]。由此可见,研究潮汐变化对盐水入侵的影响不仅需要关注潮差,还需要关注高潮位和低潮位的变化情况,以及它们对盐水入侵的影响规律等。

强潮河口是一类独特的河口,广泛分布于世界各地^[16]。我国浙江省六大河口均为强潮河口,钱塘江河口因潮差大、存在强涌潮而最为典型,同时是水资源供需矛盾最突出的河口。因此,本文以钱塘江河口为例,借助数学模型探讨高潮位、低潮位、潮差3个潮位特征值对强涌潮河口盐水入侵的影响机制。

1 研究区概况

钱塘江是浙江省第一大河,从富春江电站至杭州湾湾口之间长291 km的河段为感潮河段,称为钱塘江河口。根据水动力条件和河床演变特性的差异,钱塘江河口可分为3段^[17]:富春江电站至闻家堰站为河流段(长77 km),水动力以径流作用为主,河床较稳定,极少受咸潮影响;闻家堰站至激浦站为河口段(长116 km),受径流、潮汐共同作用,河床冲淤频繁,盐度变化剧烈,水资源供需矛盾突出,是本文研究的重点;激浦站至杭州湾湾口为潮流段(长98 km),主要受外海潮汐影响,河床相对稳定,盐度高但变化小。

钱塘江河口潮汐为非正规半日潮,一日两涨两落。激浦站多年平均潮差为5.66 m,实测最大潮差超过9 m,为我国潮汐河口之最^[17]。激浦断面宽16.5 km,向上游河宽逐渐缩窄,潮差逐渐减小,盐官、仓前、七堡断面宽分别约2.5、2.0、1.6 km,多年平均潮差分别为3.20、1.52、0.79 m。潮汐上溯过程中潮波发生变形,涨潮时间逐渐缩短,落潮时间逐渐延长,激浦站、盐官站、仓前站、七堡站的平均涨潮时间分别为5.5、2.4、1.8、1.4 h。钱塘江河口涌潮在激浦河段形成,至曹娥江口一带最大,之后强度逐渐减弱,强潮时涌潮潮头可上溯至闻家堰以上。

钱塘江每年的4—7月(或3—6月)为丰水期,径流量占全年的70%,其他月份为枯水期。受径流、潮汐及河床冲淤的影响,丰水期径流量大,盐水入侵弱;枯水期(8—11月)径流量较小,同时因丰水期江道刷深,潮流上溯动力强,盐水入侵严重;枯水期(12月至次年2月)径流量虽小,但因江道回淤导致潮汐上溯能力减弱,盐水入侵较弱^[2]。

2 模型构建及计算方案设置

2.1 模型构建

强潮河口潮强流急、水体掺混强烈,盐度垂向分布均匀,因此一般可建立垂向平均的平面二维数学

模型研究强潮河口的盐水入侵问题。因钱塘江河口存在强涌潮,为模拟涌潮对盐水入侵的影响,数学模型采用潘存鸿等^[18]研究开发的二维涌潮盐度数值模型,该模型可模拟涌潮导致的间断流现象,且在动量方程中考虑了盐度密度引起的压力项,以及取排水引起的水量、动量和盐度的变化等。模型所用的非恒定平面二维连续方程、动量方程和盐度对流扩散方程见文献^[18]。

综合考虑计算效率和开边界处的流量、潮位、盐度等资料,模型上边界设置在富春江电站,给定逐日流量;模型下边界设置在激浦断面,给定逐时潮位;沿程主要支流浦阳江上边界设置在不受潮汐影响的涓池,给定逐日流量。计算网格采用无结构三角形网格,以高度拟合钱塘江复杂的岸边界,三角形单元共11710个,节点共6973个,最小三角形单元边长约80 m,计算时间步长取3 s。模型范围及网格划分如图1所示。

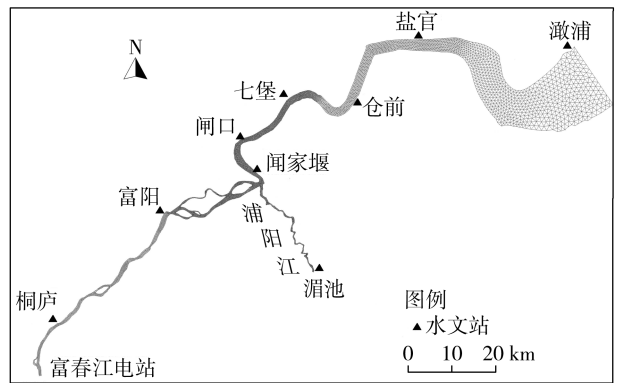


图1 数学模型计算范围及网格布置

分别采用2007年秋季和2023年秋季的水流、盐度资料进行模型率定和验证,部分率定和验证结果见图2和图3。由图2和图3可见,无论是潮水位过程还是高、低潮位及含氯度(河口一般以含氯度代表盐度)过程,计算值与实测值均吻合良好。实测值和计算值的误差统计表明,高、低潮位的绝对误差基本在0.2 m以内,其中误差在0.1 m以内的数据占80%;日最大含氯度和日最小含氯度的相对误差基本在20%以内,其中误差在10%以内的数据占70%。

2.2 计算方案设置

因激浦河段水动力主要受外海潮汐影响,故以激浦站的潮汐变化代表外海潮汐变化。为方便从机制上探讨潮汐变化对盐水入侵的影响,固定上游径流,仅改变激浦站潮位。激浦站盐度受流域径流丰、枯影响,不同季节变化较大,在枯水期随潮汐涨落盐度日变化较小,也采用恒定边界。上边界采用枯水期恒定径流量 $300 \text{ m}^3/\text{s}$,盐度采用恒定含氯度0.01‰,下边界采用恒定潮差6.98 m(大潮汛期激浦站平均

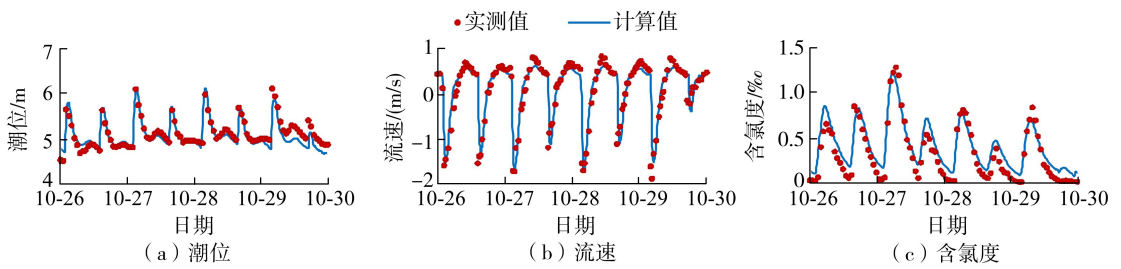


图2 2007年秋季七堡站潮位、流速、含氯度率定结果

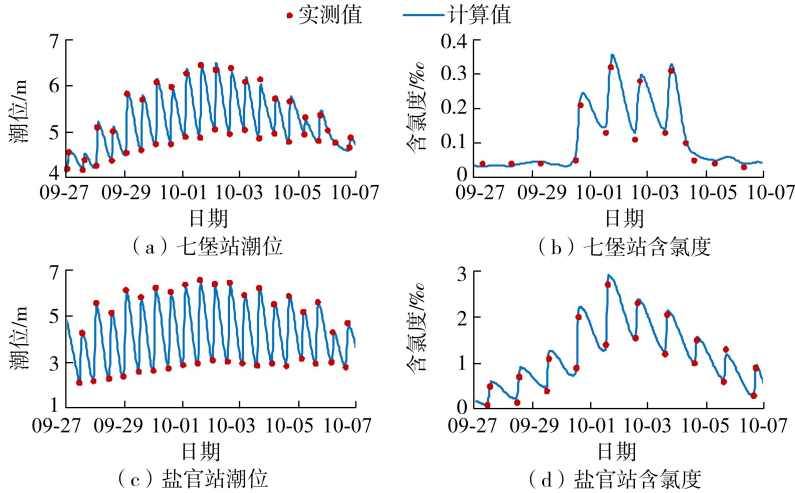


图3 2023年秋季潮位和含氯度验证结果

潮差)的潮位过程循环,盐度采用恒定含氯度4.9‰(8—11月淤浦站日最大含氯度的多年平均值^[7])。为便于统计和分析,仅改变第1天第2个潮周期的潮位,其中方案2将第1天第2个潮周期的涨潮潮差增大(高潮位抬高,低潮位降低),方案3仅抬高第1天第2个潮周期的高潮位,方案4仅降低第1天第2个潮周期的低潮位。在模型达到稳定的前提下,采用热启动模式进行方案计算。方案设置见表1。不同方案淤浦站的潮位边界过程线见图4。

表1 数学模型计算方案

方案编号	方案设置	淤浦站潮沙
1	背景方案	恒定潮差6.98 m
2	增大潮差	第1天第2个潮周期的潮差由6.98 m增大至7.98 m
3	仅抬高高潮位	第1天第2个潮周期的高潮位由4.13 m增大至4.72 m
4	仅降低低潮位	第1天第2个潮周期的低潮位由-2.85 m降低至-3.26 m

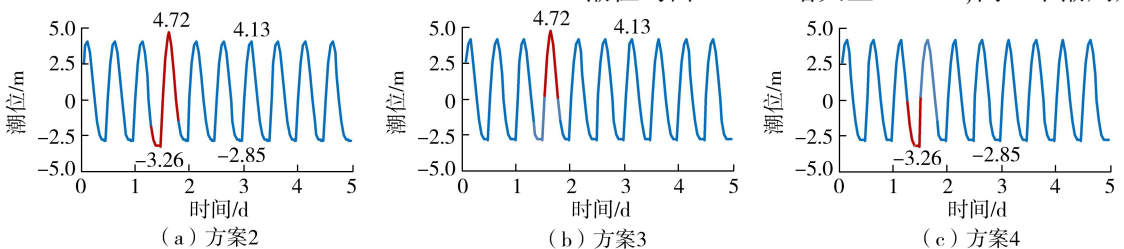


图4 不同方案淤浦站潮位边界过程线

3 结果与分析

图5和图6分别为七堡站和盐官站的潮位、流速、断面流量及含氯度变化。与背景方案相比,各方案对七堡站水文要素的影响统计如下:表2为潮位及潮差的变化幅度,表3为流速变化率,表4为断面潮周期涨、落潮量的变化率,表5为潮周期内含氯度最大值与最小值的变化率。由图5、6和表2~5可知,下游潮位变化后,上游水体的潮位、流速、断面流量及含氯度均在同一个潮周期内快速发生响应;下游仅一个潮周期的潮位发生变化,而方案2和方案3中上游潮位及含氯度等升高了3个潮周期以上才逐渐恢复;方案2和方案3对上游潮位、流速、断面流量及含氯度的影响特征、程度及时间几乎完全一致,而方案4对上游水体基本没有影响。以七堡站为例,方案2和方案3中第2个潮周期淤浦的高潮位均由4.13 m增大至4.72 m,同一个潮周期内七

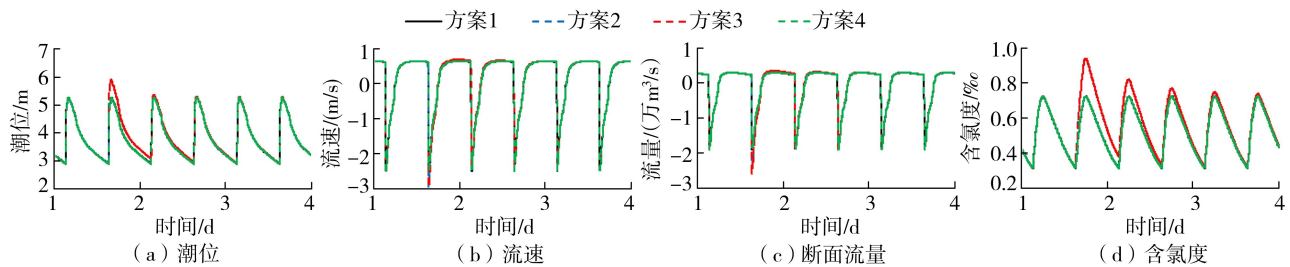


图5 不同方案七堡站潮位、流速、断面流量及含氯度变化

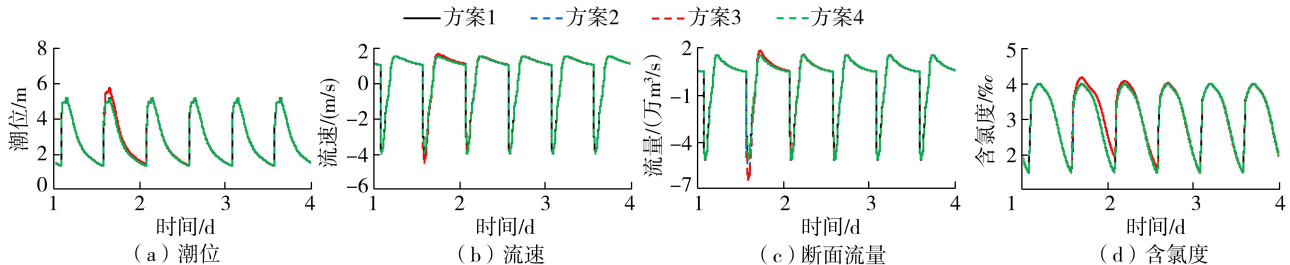


图6 不同方案盐官站潮位、流速、断面流量及含氯度变化

表2 下游潮汐改变前后七堡站潮位及潮差变化

单位:m

潮周期	方案2			方案3			方案4		
	高潮位	低潮位	潮差	高潮位	低潮位	潮差	高潮位	低潮位	潮差
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.63	0.00	0.63	0.63	0.00	0.63	-0.01	0.00	-0.01
3	0.08	0.17	-0.09	0.08	0.17	-0.09	0.00	0.00	0.00
4	0.03	0.06	-0.03	0.03	0.06	-0.03	0.00	0.00	0.00
5	0.01	0.02	-0.01	0.01	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表3 下游潮汐改变前后七堡站流速变化率

单位:%

潮周期	方案2		方案3		方案4	
	涨急	落急	涨急	落急	涨急	落急
1	0	0	0	0	0	0
2	21	6	21	6	0	0
3	-4	2	-4	2	0	0
4	-1	0	-1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0

表5 下游潮汐改变前后七堡站含氯度变化率

单位:%

潮周期	方案2		方案3		方案4	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
1	0	0	0	0	0	0
2	29	1	30	1	0	1
3	13	20	13	20	0	0
4	6	3	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0

表4 下游潮汐改变前后七堡断面潮量变化率

单位:%

潮周期	方案2		方案3		方案4	
	涨潮量	落潮量	涨潮量	落潮量	涨潮量	落潮量
1	0	0	0	0	0	0
2	34	15	34	15	2	0
3	-8	7	-8	7	0	0
4	-3	2	-3	2	0	0
5	-1	1	-1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0

堡站高潮位抬升了0.63 m,低潮位基本没变,即潮差增大了0.63 m,涨急流速增大了21%,落急流速增大了6%,涨、落潮量分别增大了34%、15%,最大含氯度升高29%,最小含氯度基本没变;第3个潮周期内七堡站高潮位抬升0.08 m,低潮位抬升0.17 m,即潮差减小了0.09 m,涨急流速减小4%、落急流速增大2%,涨潮量减小8%,落潮量增大7%,最大、最小含氯度分别升高了13%、20%,最小含氯度升高幅度大于最大含氯度;第4个潮周期内七堡站高、低潮位抬升幅度逐渐降低,潮差减小

0.03 m,流速和潮量变化逐渐减小,最大、最小含氯度升高幅度也逐渐降低。之后潮位、流速、含氯度等变化逐渐减小,第6个潮周期后基本恢复至初始状态。方案4中下游边界高潮位不变,仅降低低潮位,即下游边界潮差增大,但对上游的水动力和盐度几乎没有影响。

上述结果表明,方案2和方案3中下游高潮位抬高幅度相同,方案2因同时降低了低潮位,故其潮差增幅大于方案3,但方案2和方案3对上游的水动力及盐度的影响是一样的,而方案4仅降低了低潮位,虽然也增大了潮差,但对上游的水动力及盐度基本没有影响。由此可见,下游潮汐变化对钱塘江河口水动力及盐度的影响,主要是因为高潮位发生变化所导致的,而低潮位变化对上游水动力及盐度的影响甚微,因此仅用潮差指标反映下游潮汐变化对上游河口的影响是不全面的。上游水体及盐度对下游高潮位变化的响应极为迅速,且可以持续多个潮周期,其中在下游潮汐变化的同一个潮周期内响应最为强烈。

4 讨论

当外海潮位升高时,水体的势能增大,河口区涨潮流的上溯能力增强,涨潮流速和流量增大,高潮位抬升,因落潮时间显著长于涨潮时间,涨潮短期内带入的潮量在较长的落潮期间下泄,被较长的落潮时间匀化后,瞬时落潮流量变化较瞬时涨潮流量变化显著减小,故落潮流速变化较小,导致低潮位抬升幅度较高潮位小,从而造成河口内的潮差增大。外海潮位升高增强了潮流上溯能力,增大了涨潮量,从而将下游更多的高盐水推向上游,导致河口区盐度升高。数值模拟计算结果也表明,方案2和方案3抬高了外海高潮位,钱塘江河口的涨潮动力及盐水入侵显著增强。而方案4仅降低外海低潮位,虽然增大了潮差,但对河口的水动力和盐度几乎没有影响,结合钱塘江河口的实际情况,其原因可能包括:①低潮位时水深较浅,很多河段主槽水深不足2 m,曹娥江口以上河段更是出现大面积露滩,低潮位时水位变化引起的水波传播速度较慢;②低潮位时处于落潮阶段,由于潮波变形,河口区落潮时间显著长于涨潮时间,落潮流速显著小于涨潮流速,因河口下游的低潮位变化时间短,上游河口区的水流尚未发生反应,下游水位即已恢复至初始状态。由此可见,外海低潮位变化对河口的水动力及盐度影响甚微,而只有高潮位发生变化才会对河口区的盐度产生明显影响。由此可推理出,若海平面升高或风暴潮导致外海出现潮位升高现象,则会增强河口的盐水入侵

程度。

计算结果还表明,外海潮汐变化对河口区水动力及盐度影响迅速,且可持续几个潮周期。河口下游的高潮位抬升后,上游的水动力及盐度在同一个潮周期内响应最为剧烈,涨潮流速增大,潮位抬升,盐度升高,第2个潮周期的影响程度明显降低,第3个潮周期后影响逐渐消失。究其原因可能有:①大潮汛期潮强流急、涌潮汹涌,盐官、仓前、七堡3个站的涨急流速分别由4.0、3.3、2.4 m/s增大至4.5、3.9、3.0 m/s,在一个潮周期近3 h的涨潮时间内,河口段的水体整体向上游移动4~6 km,从而导致在下游高潮位抬升的同一个潮周期内,河口区内的盐度升高;②强潮河口虽然涨潮流速大,但涨潮时间远小于落潮时间,以七堡站为例,虽然其落急流速仅为0.7 m/s,但落潮时间可达涨潮时间的3~4倍,大多数潮周期的净余流及净盐度仍是流向下流的^[1],故河口区涨潮期间上溯的盐度经过两三个落潮期即又回到了河口下游。由此可见,当风暴潮导致河口出现高潮位增水现象时,河口区的盐度会迅速发生响应,当增水现象消失后,盐度也会在之后的几个潮周期内恢复正常。

5 结论

a. 外海潮汐仅当高潮位变化时显著影响河口的盐水入侵程度,低潮位变化对河口盐度的影响甚微,因此仅用潮差指标反映外海潮汐变化对河口盐水入侵的影响是不全面的。

b. 当外海潮位升高时水体势能增大,以潮波速度影响河口水动力条件,导致河口盐度对外海潮位变化的响应极为迅速,故当风暴潮等自然现象导致外海出现增水现象时,需密切关注河口的盐水入侵程度。

c. 外海潮汐仅低潮位变化时对河口区水动力及盐度影响甚微,可能与低潮位时水深浅、流速小、水波传播速度慢等有关,但其机理仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] Li Ruohua, Gao Liang, Pan Cunhong, et al. Detecting the mechanisms of longitudinal salt transport during spring tides in Qiantang Estuary [J]. Journal of Integrative Environmental Sciences, 2019, 16(1): 123-140.
- [2] 李若华, 夏冬梅, 姚凯华. 钱塘江河口七堡段氯度时空变化及与水文的关系[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 21-25. (Li Ruohua, Xia Dongmei, Yao Kaihua. Temporal and spatial variation of chlorinity and its relationship with hydrology in Qibao Section of Qiantang Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water

- Resources, 2019, 39(2): 21-25. (in Chinese))
- [3] 涂新军, 吴海鸥, 陈晓宏, 等. 滨海地区基于避咸蓄淡模式的供水安全临界流量研究: 以粤港澳大湾区珠澳供水为例 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 194-206. (Tu Xinjun, Wu Haiou, Chen Xiaohong, et al. Critical streamflow for water supply safety based on the withdrawal avoiding saltwater model in coastal areas: taking the water supply for Zhuhai and Macao in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as a case [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(1): 194-206. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] Azhikodan G, Yokoyama K. Sediment transport and fluid mud layer formation in the macro-tidal Chikugo river estuary during a fortnightly tidal cycle [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 202: 232-245.
- [6] Feng Xi, Li Zheng, Feng Hui, et al. Contributors to tidal duration asymmetry with varied coastline configurations on western shelf of Yellow Sea [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(1): 1-12.
- [7] 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))
- [8] 叶逾, 郭自来, 唐腾宇, 等. 潮汐作用下河口含水层咸水入侵数值模拟 [J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 278-284. (Ye Yu, Guo Zilai, Tang Tengyu, et al. Numerical simulation of saltwater intrusion in estuarine aquifers under tidal condition [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 278-284. (in Chinese))
- [9] 张钊汇, 危小艳, 张蔚. 三维理想河口盐水入侵对径潮驱动变化的响应 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52(3): 96-102. (Zhang Zhaohui, Wei Xiaoyan, Zhang Wei. Response of three-dimensional ideal estuarine salt intrusion to changes in river and tidal forcing [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 96-102. (in Chinese))
- [10] 罗小峰, 陈志昌. 径流和潮汐对长江口盐水入侵影响数值模拟研究 [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]. Coastal Engineering, 2005, 24(3): 1-6. (in Chinese))
- [11] Qiu Cheng, Zhu Jianrong, Gu Yuliang. Impact of seasonal tide variation on saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(2): 342-351.
- [12] 李若华, 马继侠, 张舒羽, 等. 强潮作用下钱塘江河口盐水入侵机制 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 37-44. (Li Ruohua, Ma Jixia, Zhang Shuyu, et al. Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River estuary under strong tide [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 37-44. (in Chinese))
- [13] 潘存鸿, 张舒羽, 唐子文. 钱塘江河口水流-河床相互作用及对盐水入侵的影响 [J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 535-542. (Pan Cunhong, Zhang Shuyu, Tang Ziwen. Interaction of flow-riverbed and its effects on saltwater intrusion in Qiantang River Estuary [J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 535-542. (in Chinese))
- [14] 徐志, 戴会超, 高希超, 等. 长江口盐水入侵对径流变异和海平面变化的响应 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 15-21. (Xu Zhi, Dai Huichao, Gao Xichao, et al. Response of saltwater intrusion to runoff variability and sea level change in Yangtze River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 15-21. (in Chinese))
- [15] 黄光玮, 匡翠萍, 顾杰, 等. 海平面上升对珠江口咸潮入侵的影响 [J]. 水动力学研究与进展, 2021, 36(3): 370-379. (Huang Guangwei, Kuang Cuiping, Gu Jie, et al. Impact of sea level rise on saltwater intrusion in the Pearl River Estuary [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(3): 370-379. (in Chinese))
- [16] 季荣耀, 陆永军. 强潮河口水沙动力过程研究进展 [J]. 水利水运工程学报, 2008(3): 64-74. (Ji Rongyao, Lu Yongjun. Advances in hydrodynamic and sedimentary processes of macrotidal estuary [J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(3): 64-74. (in Chinese))
- [17] 李若华, 葛路, 胡立芳. 钱塘江河口径流压咸效果及作用时间研究 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(4): 54-59. (Li Ruohua, Ge Lu, Hu Lifang. Study on effect and operational duration of runoff in suppressing saltwater intrusion at the Qiantang River Estuary [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(4): 54-59. (in Chinese))
- [18] 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))

(收稿日期: 2024-05-08 编辑: 俞云利)