

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.01.009

陈维, 匡翠萍, 顾杰, 等. 长江口盐水入侵对海平面上升的响应特征[J]. 水利水运工程学报, 2018(1): 58-65. (CHEN Wei, KUANG Cuiping, GU Jie, et al. Responses of saline water intrusion to sea level rise in the Yangtze Estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(1): 58-65. (in Chinese))

长江口盐水入侵对海平面上升的响应特征

陈 维¹, 匡翠萍², 顾 杰³, 贺露露⁴

(1. 浙江海洋大学 港航与交通运输工程学院, 浙江 舟山 316022; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 4. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 基于 MIKE3 软件建立了潮流作用下长江口三维水动力及盐度输运数学模型, 采用实测潮位、流速、流向以及盐度资料对模型进行了验证。运用验证好的数学模型对海平面上升后长江口枯季盐水入侵进行了模拟, 从而分析海平面上升条件下长江口枯季盐水入侵的响应特征, 得出以下结论: 海平面上升 1 m 后, 北支上段、南支、南北港以及南北槽的盐度均上升, 南支平均盐度均超过 0.45 psu, 北支中下段的盐度却明显减小; 海平面上升后潮汐的作用更强, 北支下段底层层化现象减弱, 北支径流动力增强, 表层层化现象增强, 表层 Richardson 数达 150; 南槽 Richardson 数底部减小, 表层增大, 但垂直结构趋势变化不明显。

关 键 词: 长江口; 盐水入侵; 海平面上升; MIKE3; Richardson 数

中图分类号: P343.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2018)01-0058-08

盐水入侵是河口的一种普遍现象, 盐水入侵将改变水体的理化特性, 对河口水流结构、泥沙输运有重要影响, 同时对淡水资源利用来说是一种海洋灾害^[1]。因此研究盐水入侵既具有重要的科学价值, 又具有实际应用价值。

长江口年径流量大, 潮汐中等, 其盐淡水混合特征属于缓混合型。河口盐水入侵主要受径流量和潮汐的影响^[2], 还受地形、风应力、科氏力以及口外陆架环流等的作用^[3]。长三角地区经济发达, 人口稠密, 需要大量淡水资源, 长江口有 4 个主要水库: 陈行、宝钢、青草沙以及东风西沙 (见图 1)。当水库盐度超过 0.25 g/L 时 (约 0.45 psu), 水源地应停止取水。2014 年中国海平面公报统计显示: 1980—2014 年中国沿海海平面平均上升速率为 3.0 mm/a^[4]。海平面上升将导致更多高密度盐水入侵河口地区, 河口淡水资源将受到更严重的威胁。国外学者就海平面上升对河口区域的盐水入侵进行了相关研究: 海平面上升 1 m 可以使孟加拉国的 Gorai 河盐度增加约 1.5 psu^[5], 使美国的 James 河枯季取水口的平均盐度增加 5 psu^[6]。随着海平面上升, 美

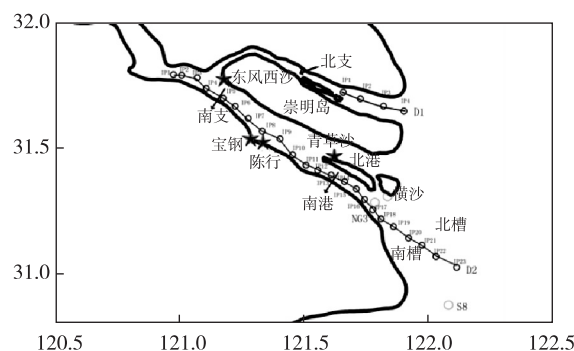


图 1 站点及断面位置

Fig. 1 Positions of stations and sections

收稿日期: 2017-03-30

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2012CB957704); 浙江海洋大学科研启动经费项目

作者简介: 陈 维 (1987—), 女, 湖南常德人, 讲师, 博士, 主要从事港口、海岸及近海工程研究。

E-mail: chenwei_112233@163.com 通信作者: 匡翠萍 (E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn)

国 Chesapeake 湾的平均盐度、盐水入侵距离以及盐度分层都将增加^[7]。许多学者对长江口盐水入侵方面做了深入的研究:朱建荣等研究了陈行^[8]、青草沙^[9]和东风西沙^[10]水库的盐水入侵和人类活动(三峡工程^[11]、南汇边滩围垦工程^[12]以及北支新村沙围垦^[13])对长江口盐水入侵的影响;张二凤等^[14]采用实测资料研究北支盐水入侵的规律及影响因素,研究表明径流量小、潮差大以及强偏北风三者的叠加是导致强盐水入侵的主要原因;戴志军等^[15]研究了2006年特枯水文年汛期情景对淡水资源的影响,研究结果表明:北支倒灌南支严重,导致陈行、宝钢水库不存在淡水资源。结合海平面上升对长江口盐水入侵方面的研究比较少;杨桂山等^[16]通过相关性分析法分析了海平面上升对吴淞和高桥盐度的影响,分析结果表明海平面上升0.8 m情形下,只有当径流量达到15 000 m³/s时盐度才不受海平面上升的影响。裘诚^[3]采用通量机制分解方法分析了海平面上升对长江口盐水入侵的影响,研究表明海平面上升导致垂向环流加强,增强了垂向分层结构。

然而海平面上升对长江口盐水楔的影响,至今未见报道。因此本文基于 MIKE3 建立了长江口三维水力及盐度输运数学模型,分析长江口枯季盐水入侵对海平面上升的响应特征。

1 模型建立与验证

丹麦水力学研究所(DHI)研发的 MIKE3 模型,主要模拟海洋、河口、河流、湖泊及海岸的水流、波浪、泥沙及环境变化,为海洋管理和规划以及工程应用提供了完备、快捷、有效的设计环境。MIKE3 FM 属三维潮流模型,根据静水压力假设、Boussinesq 假设、浅水条件和适定边界条件,采用控制体积法求解 Navier-Stokes 方程概化的浅水方程^[17]。

1.1 模型区域和网格

为了更好地模拟冲淡水的影响,模型模拟范围东至长江口口外200多千米,北到吕泗,南到象山以南,西到长江江阴以及钱塘江仓前,包括整个长江口和杭州湾区域(图2)。长江口三级分汊、四口入海的格局以及舟山众多岛屿导致岸线特别曲折,三角形网格更贴合岸线,因此模型采用 SMS 构造三角形网格,模型共有18 006个节点,33 656个单元。空间步长在130~29 880 m 的范围内。

1.2 边界条件和参数设置

模型中的底部切应力由公式 $\tau_b = \rho g |u_b|$

$u_b / \left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\Delta z_b}{m k_s} \right) \right)$ 计算,其中: κ 为冯卡门常数,取0.4,

m 为系数取1/30, k_s 为糙率高度,其值为0.000 27~0.001 6 m, u_b 为距离海床 Δz_b 处的流速,垂向采用 σ 坐标,均匀分为5层。水平扩散和垂直扩散均采用 scaled eddy viscosity 公式,水平扩散比例因子为1,垂直扩散比例因子为0.01。紊流采用标准 $k-\varepsilon$ 模型计算,垂直涡黏性系数 $\nu_t = c_\mu k^2 / \varepsilon$,经验系数 c_μ 取0.09, k 为紊动能, ε 为紊动能耗散率。模型采用干湿动边界处理技术,模型中干点临界水深取0.005 m,湿点临界水深取0.05 m。模型的计算时间步长在0.1~30.0 s 的范围内自行调节,从而保证模型计算过程中始终满足克朗数(CFL)小于1。模型的水平涡黏性系数采用 Samagorinsky 亚网格尺度模型来计算,其中 Samagorinsky 系数取为常数0.28。初始流速和潮位分别为1 m/s 和0.5 m。盐度初始采用计算稳定后(冷启动,6个月后)的场值,江阴和仓前的盐度取为0,外海边界盐度根据实测资料插值给定。

模型验证时江阴边界采用大通站实测流量过程控制,仓前取多年平均流量1 000 m³/s^[18],风应力采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的海面10 m 以上处测量间隔为6 h 的风场资料来计算。

1.3 模型验证

采用长江口实测潮位、流速、流向以及盐度资料对模型进行了验证,潮位实测资料时间为2005年8月

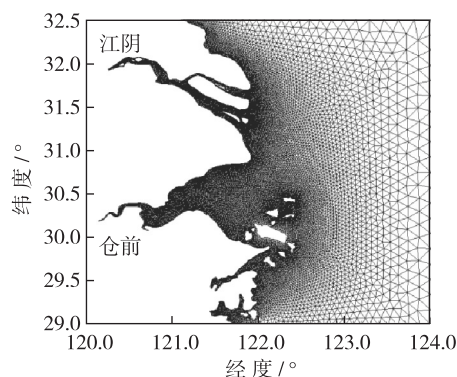


图2 计算区域及网格

Fig. 2 Computational region and grid

14—24 日^[19];流速流向实测资料时间为 2004 年 5 月 5—6 日^[19];盐度实测资料时间为 2003 年 2 月 17 日 11:00(大潮)—18 日以及 2 月 23 日 14:00—24 日 13:00(小潮)^[20]。实测站点见图 1,潮位、流速流向以及盐度验证过程分别见图 3~5。验证结果表明,潮位计算值与实测值基本吻合,潮流计算值在大小及相位上与实测值大体一致,模拟的盐度过程基本能体现涨落潮规律。因此本模型可以用于计算分析海平面上升对长江口盐水入侵的影响。

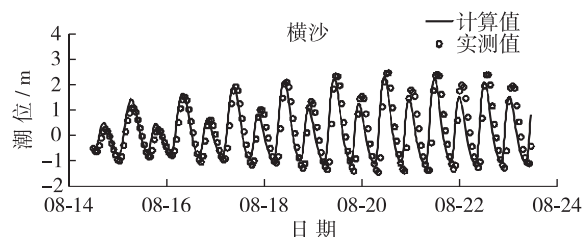


图 3 潮位验证过程

Fig. 3 Verification of tidal level

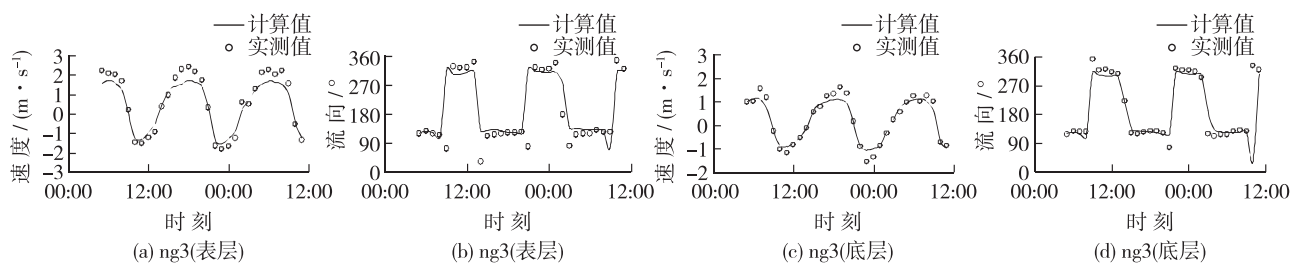


图 4 流速流向验证

Fig. 4 Verification of flow magnitude and direction

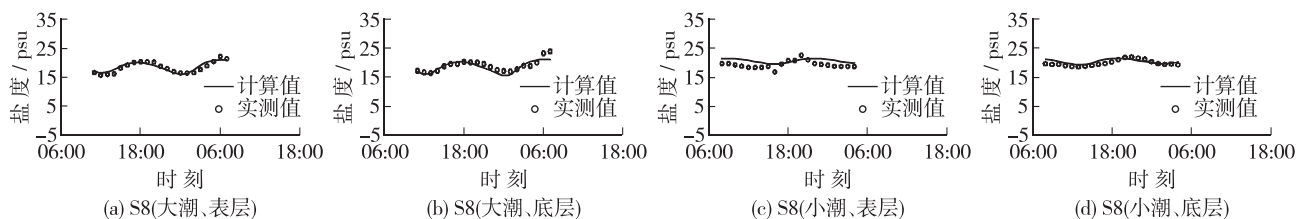


图 5 盐度验证

Fig. 5 Verification of salinity

2 径流量和海平面上升值的选取

预测分析海平面上升对长江口盐水入侵影响时,为了模拟长江口盐水入侵最严重情形,绘制 1950—2011 年大通 1 月流量累计频率曲线,径流量的丰、平、少年际变化是根据流量点绘累积频率曲线来判断,频率小于 25% 为丰水年,大于 75% 为少水年,25%~75% 之间为平水年,因此江阴采用大通枯季 1 月 75% 频率的流量,即 $8\,900\text{ m}^3/\text{s}$,仓前边界采用钱塘江多年平均枯季流量 $600\text{ m}^3/\text{s}$ 。

海平面上升是一种缓发性灾害,其长期的累积效应会淹没滨海低地等,对沿海地区的经济发展构成威胁。海平面上升速率主要根据验潮站和卫星高度计资料获得,因此海平面上升速率随着研究区域及时间范围不一样相差较大。2007 年第 4 次 IPCC 报告指出^[21],1961—2003 年期间的验潮站资料分析显示全球海平面上升平均速率为 $1.3\sim 2.3\text{ mm/a}$,而 1993—2003 年平均上升速率为 3.1 mm/a 。2013 年第五次 IPCC 报告指出^[22],1901—2010 年全球海平面上升速率为 1.7 mm/a 。2014 年中国海平面公报显示:1980—2014 年中国沿海海平面上升速率为 3.0 mm/a 。研究海平面上升对河口盐水入侵的影响,需要预测未来实际的河势情况,要给出相对海平面上升,即在绝对海平面上升的基础上,还需要考虑地面沉降。刘毅和龚士良^[23]在上海地面沉降长期预测研究的实际经验基础上,预测长江口未来地面沉降速率在 $1.82\sim 6.73\text{ mm/a}$ 。为了研究海平面上升最不利的影响,按海平面上升速率 3.1 mm/a 和地面沉降速度 6.73 mm/a 计算未来 100 年后相

对海平面可能上升值, 即约 1 m。因此, 本文计算原海平面和海平面上升 1 m 情形下的长江口盐度输运, 以此分析海平面上升对长江口盐水入侵的影响。为了取得稳定值, 模型采用热启动, 模型模拟时间为 2004 年 10 月 1 日到 2005 年 1 月 31 日, 平均盐度取 2005 年 1 月份的计算结果进行分析, 选取小潮涨急时刻的盐度垂直结构进行分析。

3 海平面上升引起的盐度平面变化

河口地区的盐水随涨潮流向上游运动, 随落潮流向口外运动, 往往涨憩时刻盐水向上游入侵最远, 落憩时刻向口外海岸退得最远。图 6 为原海平面及上升 1 m 情形下涨憩时刻盐度的平面分布。原海平面情形下, 南北支交界处, 北支盐水倒灌南支, 使得崇头出现小部分高盐水体 (0.45~2.00 psu), 南支的月平均盐度大部分都小于 0.45 psu, 未超过国家饮用水的标准, 适合取水。北港的月平均盐度相对较高, 为 0.45~2.00 psu, 横沙通道是北港和北槽水体交换的重要通道, 北港盐水入侵除来自自身通道外还来自横沙通道, 因此北港南部盐度比北部高。

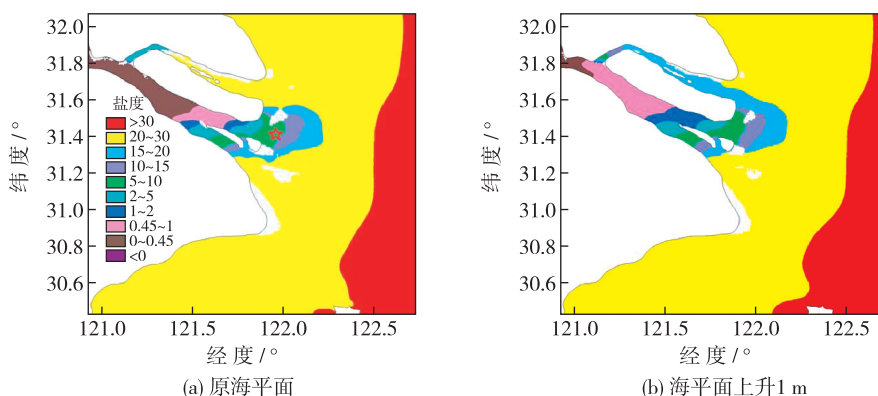


图 6 原海平面及上升 1 m 情形下涨憩时刻盐度的平面分布 (单位: psu)

Fig. 6 Depth-averaged salinity at flood slack at primary sea level (PSL) and 1 m of sea level rise (SLR) scenarios (unit: psu)

海平面上升 1 m 情形下, 北支倒灌进入南支的水体盐度增大, 而且影响范围也增大, 南支水域的平均盐度均超过 0.45 psu, 南港水域的平均盐度为 2.00~20.00 psu, 北港水域的盐度为 0.45~10.00 psu。北支中下段的盐度减小, 是由于海平面上升使得北支分流比增大^[24], 北支下段常年被高盐水包围, 涨潮动力的增强对高盐水包围的北支下段影响较小, 反而北支落潮分流比的增加使得北支中下段盐度减小。九段沙、横沙东滩以及崇明东滩地区滩地边缘高程小于 1 m 区域被淹没, 使得滩地被盐水覆盖的面积增大。

4 盐水楔对海平面上升的响应

当径流注入中等或弱潮河口时, 由于海水密度较淡水密度大, 淡水将从表层泄入海中, 海水从底部侵入, 呈“楔状”, 故称为盐水楔。选取枯季小潮涨急时刻盐度垂直结构分析海平面上升对长江口盐水楔的影响。涨急时刻以图 6(a) 中五角星位置处为参考点。为了进一步了解海平面上升引起的湍流混合和层化现象的变化规律, 可通过“梯度 Richardson 数”来衡量: $R_i = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^{-2}$, 其中 $\frac{\partial \rho}{\partial z}$ 和 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 分别为某一水层的密度差 (kg/m^3) 和流速差 (m/s), ρ 为垂向平均密度 (kg/m^3), ∂z 为某一水层的水深 (m)。数学模型垂直分为 5 层, 垂直间隔比较大, 计算的 Richardson 数不能反映小于 1 m 水层中的混合程度, 本文根据文献[25]采用比理论 Richardson 数 0.25 更大的临界值 1 来判别海平面上升对水体的层化和混合影响, 当 Richardson 数小于 1 时, 水体是混合的; 当 Richardson 数大于 1 时, 水体出现层化现象, 且 Richardson 数越大, 层化现象越明显。

在北支和南支深槽布置两条纵剖面 D1 和 D2 (位置见图 1), 图 7 为原海平面及上升 1 m 情形下北支下

段河道纵剖面(D1)上的盐度垂向分布,由于北支的径流分流比非常小(小于1%),导致盐水入侵严重,盐度比较高,还将倒灌南支。图8为原海平面及上升1 m情形下北支下段AA1点(位置见图7(a))的Richardson数垂向分布。水体中是否会产生层化的现象,取决于河口环流和潮汐应变的能量和潮汐搅动能量是否相互平衡。原海平面情形下,北支有部分径流注入,出现盐水楔现象,表层Richardson数为2左右(大于1),中间层Richardson数达到60,而底层小于1,说明中上层有层化现象,且中层远大于表层,底层则是混合较好;海平面上升1 m情形下,北支下段等盐线更稀疏,盐水楔变缓并减弱,层化现象上移,表层Richardson数达150。海平面上升一定高度使得北支盐水楔现象增强,主要原因是因为海平面上升增加了北支上段的落潮流,使得表层盐度减小,从而加剧北支下段的盐水楔。

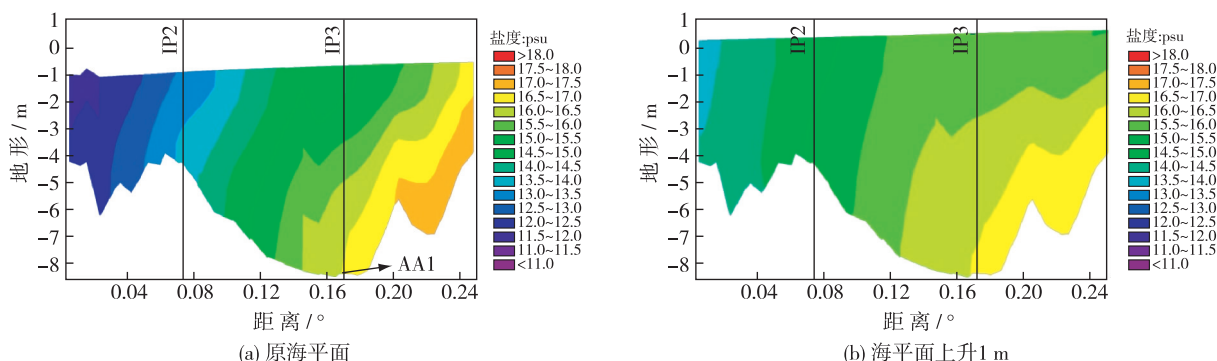


图7 原海平面及上升1 m情形下北支下段河道纵剖面(D1)上的盐度垂向分布

Fig. 7 Vertical salinity of the North Branch at PSL and 1 m of SLR scenarios

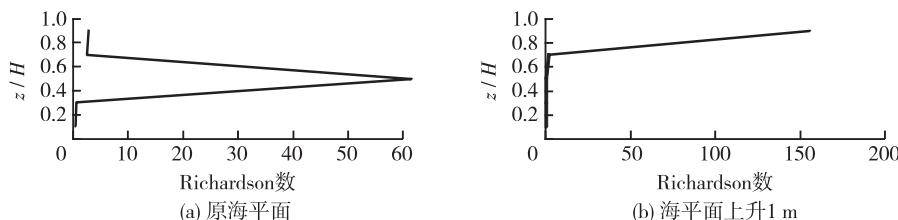


图8 原海平面及上升1 m情形下北支下段AA1点的Richardson数垂向分布

Fig. 8 Vertical Richardson number at point AA1 of the North Branch at PSL and 1 m of SLR scenarios

图9为原海平面及上升1 m情形下南支、南港和南槽河道纵剖面(D2)上的盐度垂向分布,南支和南港不与外海直接相连,且主要受淡水的控制,盐度均小于0.45 psu,盐度表底层差异不明显。

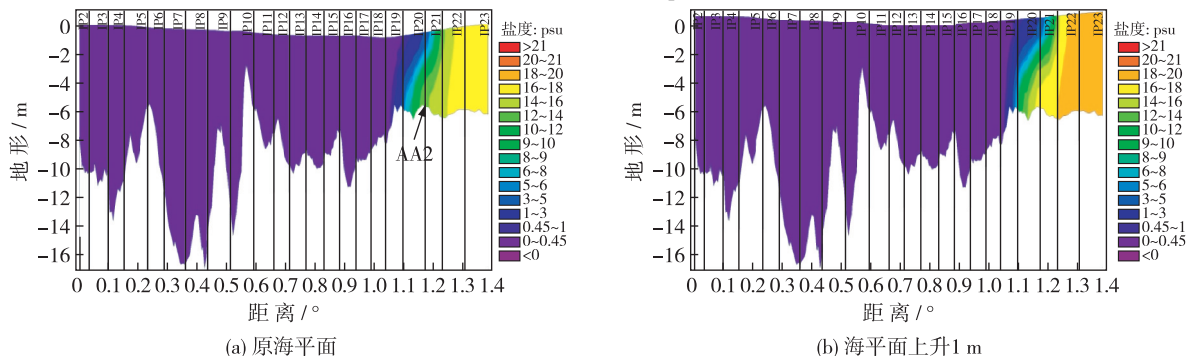


图9 原海平面及上升1 m情形下南支、南港和南槽河道纵剖面(D2)上的盐度垂向分布

Fig. 9 Vertical salinity of the South Branch, South Channel and South Passage at PSL and 1 m of SLR scenarios

图 10 为原海平面及上升 1 m 情形下 AA2 点的 Richardson 数垂向分布。原海平面情形下, 在 IP1~IP18 段, 垂向分层不明显, 无明显盐水楔发育, 盐水楔出现在 IP19~IP22 段, 即南槽的中下段, 而在 IP22~IP23 段, 由于径流作用较弱, 表底层水体盐度无差异, 也无明显盐水楔发育, AA2 点的 Richardson 数说明层化现象上层>底层>中层; 海平面上升 1 m 情形下, 盐水楔整体向上游移动较小距离, 等盐线更密集, AA2 点的 Richardson 数底部减小约 2~4, 顶部增大 16。

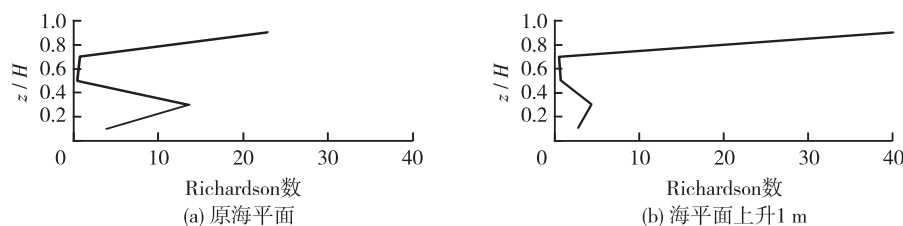


图 10 原海平面及上升 1 m 情形下南槽 AA2 点的 Richardson 数垂向分布

Fig. 10 Vertical Richardson number at point AA2 of the South Passage at PSL and 1 m of SLR scenarios

5 结 语

本文利用 MIKE3 软件建立了长江口三维水动力及盐度输运数学模型, 分析盐水入侵最不利的影响, 基于 1950—2011 年大通 1 月流量累计频率曲线, 采用大通枯季 1 月 75% 频率的流量 $8\,900\text{ m}^3/\text{s}$, 计算了海平面上升对长江口枯季盐水入侵的影响, 得到了如下主要结论:

(1) 海平面上升后, 北支上段、南支、南北港以及南北槽的盐度都明显上升, 南北支水体交换增强, 更多南支低盐水进入北支中下段, 使得北支中下段盐度明显减小; 北支倒灌进入南支的高盐水更多使得南支盐度增大。

(2) 海平面上升 1 m 后, 北支下段盐度层化现象减弱并由中间层移向表层, 表层 Richardson 数达 150, 这是由于潮汐增强, 搅动作用增强, 层化现象减弱, 但是北支径流增大, 表层盐度减小, 会使得表层层化增强。

(3) 海平面上升 1 m 后, 南槽盐水楔上移较小距离, 底部 Richardson 数减小 2~4, 顶部增大 16, 但垂向变化趋势不明显。

参 考 文 献:

- [1] 陈吉余. 21 世纪的长江河口初探[M]. 北京: 海洋出版社, 2009. (CHEN Jiyu. Yangtze River Estuary in 21st century[M]. Beijing: Ocean Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 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): 1-8. (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): 1-8. (in Chinese))
- [3] 裘诚. 长江河口盐水入侵对气候变化和重大工程的响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. (QIU Cheng. The response of saltwater intrusion to climate change and major projects in the Changjiang River Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014. (in Chinese))
- [4] 国家海洋局. 2014 年国家海平面公报[M]. 北京: 国家海洋局, 2015. (State Oceanic Administration. China sea level bulletin in 2014[M]. Beijing: State Oceanic Administration, 2015. (in Chinese))
- [5] BHUIYAN M J A N, DUTTA D. Assessing impacts of sea level rise on river salinity in the Gorai river network, Bangladesh[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2012, 96: 219-227.
- [6] RICE K C, HONG Bo, SHEN Jian. 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, 2012, 111: 61-69.
- [7] HONG B, SHEN J. Responses of estuarine salinity and transport processes to potential future sea-level rise in the Chesapeake Bay

- [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2012, S104-105: 33-45.
- [8] 申一尘, 李路, 朱建荣. 陈行水库在长江河口咸潮入侵期间的取水调和库内氯度分布[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2012(1): 27-36. (SHEN Yichen, LI Lu, ZHU Jianrong. Chlorinity distribution and water intake operation of the Chenhang Reservoir during saltwater intrusions in the Yangtze Estuary[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2012(1): 27-36. (in Chinese))
- [9] 陈泾, 朱建荣. 长江河口青草沙水库盐水入侵来源[J]. 海洋学报(中文版), 2014, 36(11): 131-141. (CHEN Jing, ZHU Jianrong. Sources for saltwater intrusion at the water intake of Qingcaosha Reservoir in the Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 131-141. (in Chinese))
- [10] 朱建荣, 吴辉. 长江河口东风西沙水库最长连续不宜取水天数数值模拟[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013(5): 1-8, 26. (ZHU Jianrong, WU Hui. Numerical simulation of the longest continuous days unsuitable for water intake in the Dongfengxisha reservoir of the Changjiang Estuary[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2013(5): 1-8, 26. (in Chinese))
- [11] QIU C, ZHU J R. Influence of seasonal runoff regulation by the Three Gorges Reservoir on saltwater intrusion in the Changjiang River Estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 71(6): 16-26.
- [12] 朱建荣, 吴辉. 长江口南汇边滩围垦工程对流场和盐水入侵的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013(5): 1-8. (ZHU Jianrong, WU Hui. Impacts of the reclamation project of Nanhui tidal flat on the currents and saltwater intrusion in the Changjiang Estuary[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2013(5): 1-8. (in Chinese))
- [13] 陈泾, 朱建荣. 长江河口北支新村沙围垦工程对盐水入侵的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2014(4): 163-172. (CHEN Jing, ZHU Jianrong. Impact of the reclamation project of Xincunsha on the saltwater intrusion in the North Branch of the Changjiang Estuary[J]. *Journal of East China Normal University(Natural Science)*, 2014(4): 163-172. (in Chinese))
- [14] 张二凤, 陈沈良, 刘小喜. 长江口北支异常强盐水入侵观测与分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(5): 491-496. (ZHANG Erfeng, CHEN Shenliang, LIU Xiaoxi. Observation and analysis of abnormal strong saltwater intrusion in the North Branch of the Yangtze Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(5): 491-496. (in Chinese))
- [15] 戴志军, 李为华, 李九发, 等. 特枯水文年长江河口汛期盐水入侵观测分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 835-840. (DAI Zhijun, LI Weihua, LI Jiufa, et al. Analysis of the saltwater intrusion in the Changjiang Eestuary during the flood season in extreme drought year[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 835-840. (in Chinese))
- [16] 杨桂山, 朱季文. 全球海平面上升对长江口盐水入侵的影响研究[J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(1): 69-76. (YANG Guishan, ZHU Jiwen. Impacts of future sea level rise on salt water intrusion in the Changjiang River Estuary[J]. *Science in China(SerB)*, 1993, 23(1): 69-76. (in Chinese))
- [17] HYDRAULICS D. Mike 21 & Mike 3 flow model hydrodynamic and transport module scientific documentation[R]. Demark: DHI Water & Environment, 2009.
- [18] 孙浙英. 钱塘江饮用水源地盐水入侵及数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (SUN Zheyang. Analysis and numerical simulation of saltwater intrusion at drinking water source in Qiantang River[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [19] 孙波. 三峡与南水北调工程对长江口盐水楔影响的数值研究[D]. 上海: 同济大学, 2009. (SUN Bo. Numerical study on the impact of Three Gorges and South-Branch water transfer project on saline wedge of the YRE[D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese))
- [20] 陈吉余, 何青. 2006 年长江特枯水情对上海淡水资源安全的影响[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 57-65. (CHEN Jiyu, HE Qing. The influence of low discharge of Yangtze River on the freshwater resources security in Shanghai[M]. Beijing: Ocean Press, 2009: 57-65. (in Chinese))
- [21] 政府间气候变化专门委员会. 气候变化 2007: 综合报告(决策者摘要)[R]. 日内瓦: IPCC, 2007. (Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). *Climate Change 2007: Synthesi report(Abstract)*[R]. Geneva: IPCC, 2007. (in Chinese))
- [22] 政府间气候变化专门委员会. 气候变化 2013: 综合报告. 政府间气候变化专门委员会第五次评估报告第一、第二、第三和第四工作组的报告(决策者摘要)[R]. 斯德哥尔摩: IPCC, 2013. (Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013: Cambridge University Press, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[R]. Stockholm: IPCC, 2013. (in Chinese))
- [23] 刘毅, 龚士良. 上海市地面沉降泊松旋回长期预测[J]. 中国地质灾害与防治学报. 1998, 9(2): 77-82. (LIU Yi, GONG Shiliang. A long-term prediction of the poisson cycle on Shanghai land subsidence[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(2): 77-82. (in Chinese))

- [24] KUANG C, CHEN W, GU J, et al. Numerical assessment of the impacts of potential future sea-level rise on hydrodynamics of the Yangtze River estuary, China[J]. *Journal of Coastal Research*, 2014, 30(3): 586-597.
- [25] 李霞. 长江口北槽枯季湍流混合、层化与潮汐应变: 资料分析与数学模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2013. (LI Xia. Turbulent mixing, stratification and tidal straining within the north passage of the Changjiang River Estuary in the dry season: data analysis and mathematical modeling[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013. (in Chinese))

Responses of saline water intrusion to sea level rise in the Yangtze Estuary

CHEN Wei¹, KUANG Cuiping², GU Jie³, HE Lulu⁴

(1. *College of Port and Transportation Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China*; 2. *College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 3. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 4. *College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China*)

Abstract: A 3D numerical model of hydrodynamic and salinity transport of the Yangtze Estuary under the influence of tide is established based on MIKE3 software. This model is validated with the field measured tidal level, flow velocity, flow magnitude and salinity. The validated model is used to simulate the saline water intrusion caused by sea level rise (SLR) in the Yangtze Estuary in the dry season. The responses of saline water intrusion to SLR in the Yangtze Estuary are analyzed. The results indicate that: the salinity in the upper reach of the North Branch, the South Branch, the North Channel, the South Channel, the North Passage and the South Passage obviously increase due to 1 meter of the SLR, especially when the average salinity of the South Branch entirely exceeds 0.45 psu, however it decreases significantly in the lower reach of the North Branch. This is induced by the increased flow split ratio of the North Branch due to SLR. The greater flood tidal current and flow split ratio of the North Branch due to SLR make stratification phenomenon of salinity increase with the Richardson number reaching 150 in the surface layer. For the South Passage, the bottom stratification phenomenon is weakened and the surface stratification phenomenon is enhanced, however the vertical trend is not apparent.

Key words: the Yangtze Estuary; saline water intrusion; sea level rise; MIKE3 software; Richardson number