

长江口盐水入侵对径流变异和海平面变化的响应

徐志¹,戴会超¹,高希超²,刘志武¹,闫龙²,董义阳¹,陈鼎新³

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院,北京 100038;
2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100038; 3. 天津大学建筑工程学院,天津 300072)

摘要:基于1960—2019年长序列实测径流、潮位资料,采用Mann-Kendall检验和Theil-Sen估计分析了长江口径流变异和海平面变化趋势,结合MIKE21水动力模型和蒙特卡罗方法,提出了计算盐度超标率的方法,并对长江口盐水入侵风险进行了评估。结果表明:径流对数值的年方差和平均海平面高度分别呈显著下降和上升趋势;预计到2060年和2100年径流对数值的年方差分别减小30%和60%,平均海平面高度分别上升0.2 m和0.4 m;海平面上升增大了长江口盐度超标率,河口中段的盐度超标率增幅相对明显;随着径流变异性的减小,长江口沿线盐度超标率呈交错增减变化;2060年和2100年长江口平均盐度超标率将从46.9%增大到52.2%和54.9%,其中海平面变化对长江口盐水入侵的影响显著大于径流变异。

关键词:盐水入侵;径流变异;海平面;MIKE21;蒙特卡罗方法;长江口

中图分类号:P731 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0015-07

Response of saltwater intrusion to runoff variability and sea level change in Yangtze River Estuary//XU Zhi¹, DAI Huichao¹, GAO Xichao², LIU Zhiwu¹, YAN Long², DONG Yiyang¹, CHEN Dingxin³(1. *Science and Technology Research Institute, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China*; 2. *Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 3. *School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: Based on the measured runoff and tide level data of the long series from 1960 to 2019, Mann-Kendall test and Theil-Sen estimation were used to analyze the runoff variability of the Yangtze River Estuary and the trend of sea level change. In combination with MIKE21 hydrodynamic model and Monte Carlo method, a method for calculating the over standard rate of salinity was proposed, and the risk of saltwater intrusion into the Yangtze River inlet was assessed. The results show that the annual variance of runoff logarithms and the average sea level height show a significant downward and upward trend, respectively. It is estimated that the annual variances of runoff logarithms will decrease by 30% and 60% respectively by 2060 and 2100, and the average sea level height will increase by 0.2 m and 0.4 m respectively. The sea level rise increases the over standard rate of salinity at the Yangtze River Estuary, which is relatively obvious in the middle section of the estuary. With the decrease of runoff rheological anisotropy, the over standard rate of salinity along the Yangtze River Estuary rises and falls alternately. In 2060 and 2100, the over standard rate of the average salinity in the Yangtze River Estuary will increase from 46.9% to 52.2% and 54.9% respectively, in which the influence of sea level change on the saline intrusion in the Yangtze River Estuary is significantly greater than that of runoff variation.

Key words: saltwater intrusion; runoff variability; sea level; MIKE21; Monte Carlo method; Yangtze River Estuary

河口地区往往人口密集,经济发达,对淡水资源需求量大,作为河流和海洋的过渡地带,河口地区水体盐度处在变化状态。入海径流伴随季节变化,盐水入侵现象时有发生,对人们生活、生产用水和生态用水造成影响。河口以复杂的自然和人类环境为特征,河口水体盐度通常受到地形、海平面、入海径流

和风应力等各种过程的影响^[1],其中,入海径流和潮位是影响盐水入侵的最重要因素^[2]。很多学者通过统计和数值模拟等方法对河口水体盐度、径流和海平面的定量关系做了大量研究^[3-7]。总体看,河口水体盐度和盐水入侵距离与径流大小呈负相关关系,与海平面高度呈正相关关系。此外,随着入海径

基金项目:国家自然科学基金(U2040212);中国长江三峡集团有限公司科研项目(202103429,202003251)
作者简介:徐志(1990—),男,工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: xu_zhil@ctg.com.cn
通信作者:高希超(1988—),男,工程师,博士,主要从事城市水文和水文模型研究。E-mail: 999gaoxichao@163.com

的随机数,作为累积频率。然后根据径流的累积频率分布,得到一组对应于随机数的 10 000 个径流值,并模拟日径流的频率分布。

2.2 水动力学模型构建

2.2.1 模型设置

采用 MIKE21 模型进行长江口水动力和盐度扩散模拟,该模型多用于模拟河流、湖泊、河口、海洋及海岸的水流、波浪、泥沙及环境变化,具体建模过程可参考文献[5]。

模型上游边界为江苏省的江阴水文站,离长江口徐六泾约 200 km,下游边界分别取南、北、东 3 个开边界,范围为东经 120.0°~124.5°、北纬 29.5°~32.5°,面积 93 185 km²。陆地河道采用 2000 年实测地形资料,外海区域采用海图数字化水下地形。模型包括 92 771 个网格,54 243 个网格节点,其中外海的最大网格间距为 8 000 m,河口最小网格为 200 m,外海到河口的网格尺寸逐渐变小。陆地边界采取“不可入,可滑移”条件^[19],即沿闭边界法向水流速度为 0。开边界在外海区域,通过潮波模型推算,本文选择全球潮波模型 TPX06.2 推算外海北、东、南 3 条边界潮位。

因江阴水文站仅有水位资料,而江阴水文站径流量和大通水文站径流量基本相等^[17],模型的江阴边界流量采用大通水文站 2002 年 2 月 11 日至 2002 年 3 月 13 日逐日流量进行驱动,钱塘江仓前边界因为流量极小且对研究区影响很小,作为陆地边界处理。江阴边界浅滩处采用干湿网格判别技术处理。

模型上游盐度为 0,外海盐度边界根据有关研究结果^[19]确定,南边界由西至东采用 1.5%~3.0% 盐度线性插值确定,外海东边界由南至北采用 3.0%~3.5% 盐度线性插值确定,北边界盐度由西至东采用 2.5%~3.5% 盐度线性插值确定。根据模拟范围,从初始盐度为 0 开始,连续模拟 90 d 得到的盐度场作为模型的初始盐度场。

时间步长 $\Delta t = 30\text{ s}$,利用 Smagorinsky 公式计算水平黏度系数,根据速度梯度估算涡流黏度。糙率场对潮汐潮率和潮差有很大影响,本文根据不同地区的深度反复标定糙率,取值范围为 0.0 105~0.0 200。盐度水平扩散系数对长江口盐度场有一定的影响,扩散系数越大,盐度扩散越快,扩散范围越大,根据重复计算和校准,盐度扩散系数是一个常数值,为 100 m²/s。

2.2.2 模型验证

选取崇明洲头、南门潮位站 2002 年 3 月 1—9 日大、中、小潮全潮观测资料进行潮位验证,验证结果如图 3 所示。两潮位站实测值与计算值较吻合,模拟结果基本反映了长江口从口门至河口涨潮历时

缩短、落潮历时延长的潮波变化。

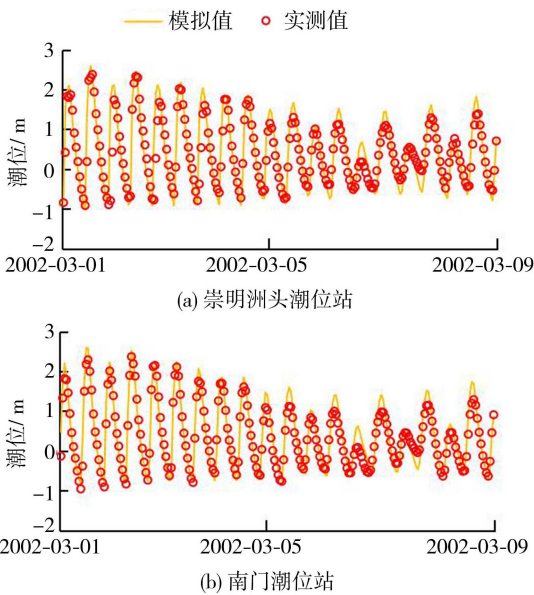


图 3 潮位验证

选取与潮流同期的 Y4、Y8 盐度站(图 1)大、中、小潮盐度测验资料进行盐度验证。盐度实测结果为氯度,采用 Knudsen 盐度公式^[20]进行转换,验证结果见图 4。采用 skill 模型^[21]检验模拟拟合程度,当 skill 值为 1 时表示模型结果和实测值保持完美一致,在[0.65,1)区间表示极好,在[0.5,0.65)区间表示好,在[0.2,0.5)区间表示较好,低于 0.2 表示较差。检验结果见表 1。

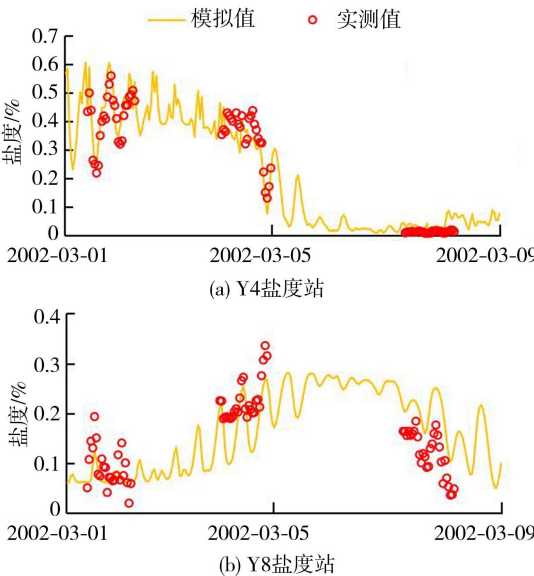


图 4 盐度验证

表 1 均方根误差和 skill 值

潮位和盐度站	RMSE	skill 值
崇明洲头	0.51	0.94
南门	0.61	0.95
Y4	0.68	0.79
Y8	0.63	0.77

由表1可知,潮位验证 skill 值都在0.9以上,拟合效果很好;盐度验证 skill 值略低于潮位拟合结果,这是因为小潮时,部分盐度站盐度极低,对水流的敏感性很强。Y4 盐度站 2002 年 3 月 5 日附近的实测盐度值高于模拟值,这是因为低流量状态下,该站点受南支盐水和北支倒灌盐水影响加剧,造成一定的模拟偏差。

2.2.3 盐度-径流曲线获取

通过设置不同的径流和海平面高度边界条件,MIKE21 模型可以模拟盐度的时空分布,通过计算模拟过程中长江口沿线测点的平均盐度,确定盐度-径流关系曲线。

2.3 情景设置

长江口年平均径流长期没有明显变化,而径流变异和海平面分别有下降和上升的显著趋势。由此,设置如表2所示的7个情景来研究径流变异和海平面对盐水入侵的影响。

表 2 情景设置

编号	情景	入海径流	平均海平面
M0	基准线(2019 年)	现有径流变异	现有海平面高度
M1	改变 $S^2(\ln q)$	$S^2(\ln q)$ 减小 30%	现有海平面高度
M2	改变 $S^2(\ln q)$	$S^2(\ln q)$ 减小 60%	现有海平面高度
M3	只改变海平面高度	现有径流变异	上升 0.2 m
M4	只改变海平面高度	现有径流变异	上升 0.4 m
M5	同时改变 $S^2(\ln q)$ 和海平面高度(2060 年)	$S^2(\ln q)$ 减小 30%	上升 0.2 m
M6	同时改变 $S^2(\ln q)$ 和海平面高度(2100 年)	$S^2(\ln q)$ 减小 60%	上升 0.4 m

图5为M0、M1、M2情景下径流的概率密度函数。随着 $S^2(\ln q)$ 的减小,均值(24 343 m³/s)附近(15 500 ~ 37 500 m³/s)的概率密度增大,大径流(>37 500 m³/s)和小径流(<15 500 m³/s)减小。相应地,24 343 m³/s 以下的累积频率减小,24 343 m³/s 以上的累积频率增大。

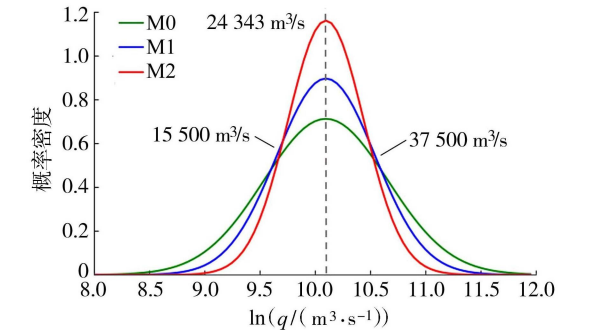


图5 不同径流变异情景下径流对数值的概率密度函数

2.4 蒙特卡罗方法量化盐水入侵风险

根据 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》,当河口盐度超过0.045%时,认为发生咸潮入侵,对供水安全、生态安全产生影响,以此作为盐度超标标

准^[22]。使用与每个随机数对应的一组径流值,模拟不同情景下的日径流分布,基于盐度-径流曲线和蒙特卡罗模拟^[23],统计计算这组径流值下盐度超过0.045%的概率。盐度超标率用于量化盐水入侵的风险:

$$P_s = n_s/n \tag{3}$$

式中: P_s 为某一地点的盐度超标率; n_s 为某个地点径流模拟的平均盐度超过0.045%的次数; n 为随机数的数量。

3 结果与分析

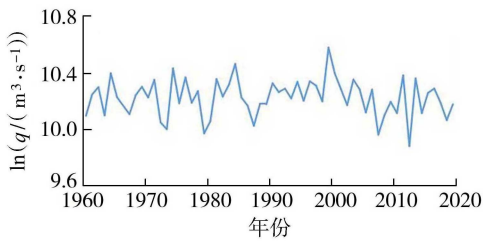
3.1 径流和海平面变化趋势分析

根据 1960—2019 年的大通水文站实测径流和吴淞潮位站潮位资料,进行年径流对数平均值 $\overline{\ln q}$ 、年方差 $S^2(\ln q)$ 和平均海平面高度 $\bar{h}$ 的趋势分析,结果见图6。 $\overline{\ln q}$ 和 $S^2(\ln q)$ 年变化趋势分别为 0.000 3 m³/s 和 -0.002 m⁶/s²。根据 Mann-Kendall 检验结果, $\overline{\ln q}$ 的 UF 曲线保持在±0.05 显著性水平范围内,说明变化趋势不显著。 $S^2(\ln q)$ 的 UF 曲线在 2003 年后超过了-0.05 的显著性水平,呈显著的下降趋势,长江流域建设的水利工程,一定程度上降低了年内径流变异。对于平均海平面高度,其年变化率为 0.000 4 m,UF 曲线在 1990 年完全超过+0.05 的显著性水平,表明长期以来有显著的上升趋势,这与 Xu 等^[24] 预测相符。总体而言,长江口年平均径流长期没有显著变化,而径流变异和海平面高度分别呈下降和上升的显著变化趋势。

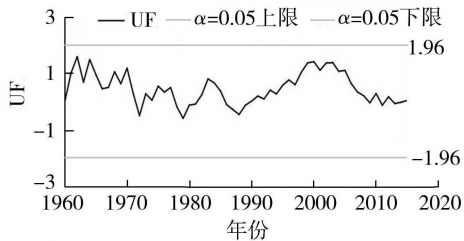
根据图6趋势分析结果,预计到2060年和2100年时, $S^2(\ln q)$ 分别为 0.198 m⁶/s² 和 0.118 m⁶/s²,减幅分别为 30% 和 60%;平均海平面高度分别上升 0.2 m 和 0.4 m。

3.2 径流变异的影响

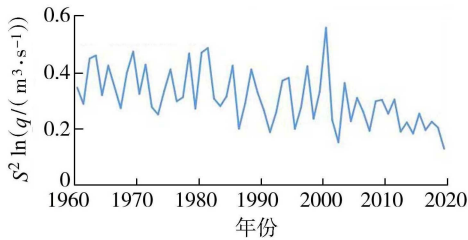
采用 M0、M1 和 M2 这 3 个情景研究径流变异对长江口盐水入侵的影响。通过 MIKE21 模型对不同径流下的平均盐度进行数值模拟,得到长江口沿线 6 个不同测点(位置见图1)的盐度-径流曲线如图7所示,其中测点 SB1、SB2、SB3、SB5、SC1、S1 到长江口口门距离分别为 90 km、74 km、54 km、37 km、20 km 和 0 km。随着径流增大,潮汐作用减弱,长江口盐度降低,6 个测点盐度超标的临界流量分别为 10 000 m³/s、34 000 m³/s、18 500 m³/s、25 000 m³/s、26 250 m³/s 和 30 000 m³/s。根据生成的盐度-径流曲线,结合蒙特卡罗方法得到长江口沿程的盐度超标率如图8所示,在径流变异减小的情况下,距离口门 79.3 km、61.5 km、43.0 km 的 A、B、C 处的盐度超标率保持不变,因为这3处对应的临界流量为24343 m³/s,



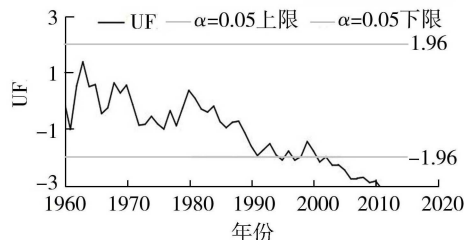
(a) 年径流对数平均值变化趋势



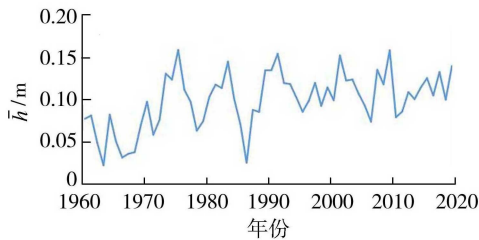
(b) 年径流对数平均值 Mann-Kendall 检验



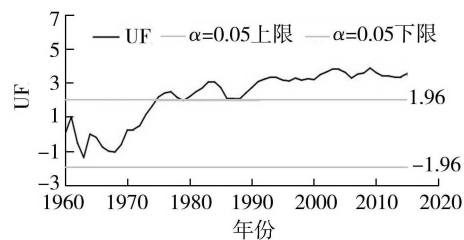
(c) 年方差变化趋势



(d) 年方差 Mann-Kendall 检验



(e) 平均海平面高度变化趋势



(f) 平均海平面高度 Mann-Kendall 检验

图 6 年径流对数平均值、年方差和平均海平面高度变化趋势与 Mann-Kendall 检验

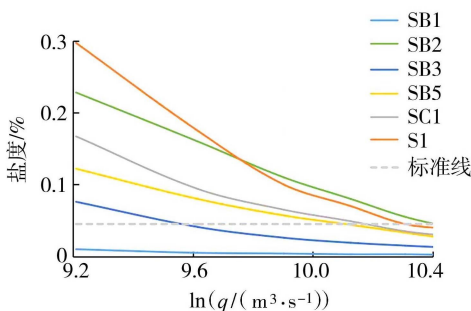


图 7 长江口不同测点的盐度-径流曲线

即对应正态分布中的均值。长江口北支海水倒灌导致南支中段盐度增大,盐度超标率增大,因此随着到口门距离的增大,盐度超标率呈“减—增—减”规律变化。在径流变异减少的情况下,以 A、B、C 处为转折点,从口门到上游,盐度超标率呈“增—减—增—

减”的规律变化。从整个河口来看,当 $S^2(\ln q)$ 分别减小 30% 和 60% 时,平均盐度超标率将从 46.9% (M0) 略微增大到 47.6% 和 48.2%。

3.3 海平面的影响

图 9 为 SB5 测点在不同海平面处的盐度-径流曲线。随着海平面的升高,外海的潮汐效应和盐度超标率均增大,并且临界径流也增大。从长江口到上游,受北支盐水倒灌影响,盐度超标率变化呈“减—增—减”变化趋势。在 SB5 测点,当海平面上升 0.2 m 和 0.4 m 时,临界径流分别达到约 27 600 m³/s 和 30 400 m³/s。海平面上升增大了整个长江口的盐度超标率,图 10 显示,从整个河口来看,当海平面高度上升 0.2 m 和 0.4 m 时,平均盐度超标率将从 46.9% (M0) 增大到 50.2% 和 52.4%。总之,海平面上升加剧了盐水入侵,尤其是在河口中段。

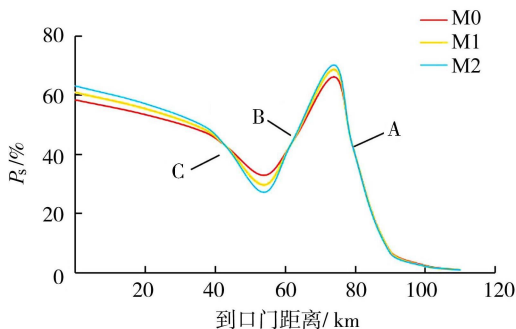


图 8 不同径流变异情景下的盐度超标率

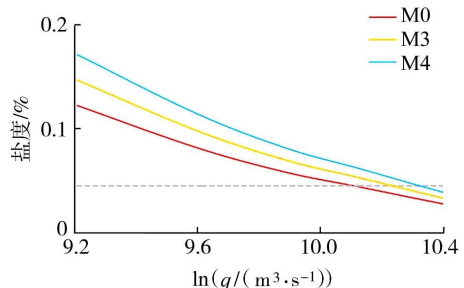


图 9 不同海平面情景下 SB5 测点的盐度-径流曲线

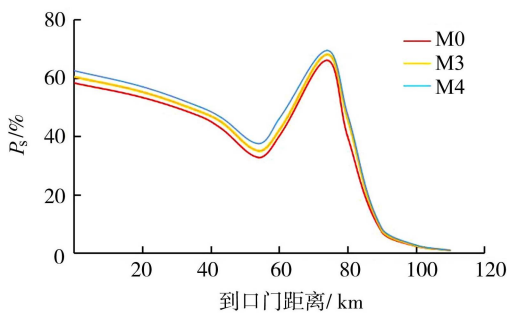


图 10 不同海平面情景下的盐度超标率

3.4 2060 年和 2100 年盐水入侵风险分析

图 11 为径流变异和海平面变化对 2060 年 (M5) 和 2100 年 (M6) 长江口盐水入侵风险的影响, 径流变异减小和海平面上升情景下, 盐度超标率曲线总体呈上升变化。从整个长江口来看, 2060 年和 2100 年平均盐度超标率将从 46.9% (M0) 增大到 52.2% 和 54.9%。较高的海平面会增大整个长江口的盐度超标率, 而在年方差减小的情况下, 长江口的盐度超标率以 A、B、C 处为转折点, 呈交错增减的变化。为了确定径流变异和海平面对盐水入侵的相对贡献, 分析 M0→M2 和 M0→M4 情景盐度超标率变化比例, 结果见图 12, 由径流变异和海平面变化引起的盐度超标率变化比例的面积比值为 0.81, 这表明后者的影响比前者更显著。

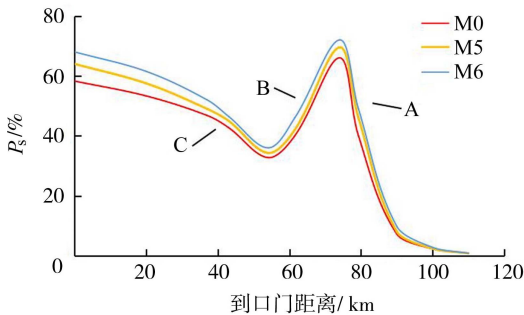


图 11 2060 年和 2100 年长江口沿线的盐度超标率

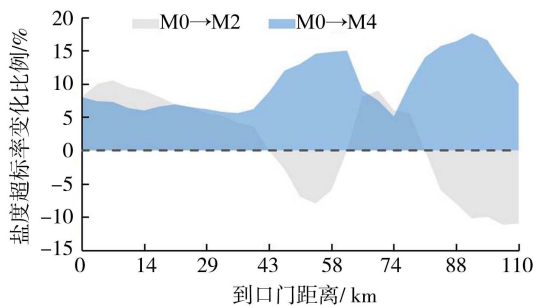


图 12 2100 年径流变异和海平面影响的比较

4 结 论

a. 利用 1960—2019 年大通水文站实测径流数据和吴淞潮位站潮位资料, 确定了径流变异和海平面高度分别呈显著下降和显著上升趋势。预计

2060 年和 2100 年年方差减小 30% 和 60%, 平均海平面高度将上升 0.2 m 和 0.4 m。

b. 在径流变异减小的情况下, 距离长江口口门 79.3 km、61.5 km、43.0 km 的 A、B、C 处为转折点, 从口门到上游, 盐度超标率呈“增—减—增—减”的变化。

c. 海平面上升增大了整个长江口的盐度超标率, 当海平面上升 0.2 m 和 0.4 m 时, 平均盐度超标率将从 46.9% 增大到 50.2% 和 52.4%。

d. 在径流变异减小和海平面上升的共同作用下, 2060 年和 2100 年长江口平均盐度超标率分别增大到 52.2% 和 54.9%。海平面变化对长江口盐水入侵的影响比径流变异更为显著。

参考文献:

- [1] YANG Zhaoqing, WANG Taiping, VOISIN N, et al. Estuarine response to river flow and sea-level rise under future climate change and human development [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 156 (1): 19-30.
- [2] ZHOU Wei, WANG Dongxiao, LUO Lin. Investigation of saltwater intrusion and salinity stratification in winter of 2007/2008 in the Zhujiang River Estuary in China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31 (3): 31-46.
- [3] 郑晓琴, 肖文军, 于芸等. 基于径流和潮汐的长江口盐水入侵统计预测研究 [J]. 海洋预报, 2014, 31 (4): 18-23. (ZHENG Xiaoqin, XIAO Wenjun, YU Yun, et al. Statistical prediction study of runoff and tide on Changjiang River saltwater intrusion [J]. Marine Forecasts, 2014, 31 (4): 18-23. (in Chinese))
- [4] 王彪, 朱建荣, 吕爱琴. 珠江河口磨刀门枯水期盐度统计模型 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (1): 42-48. (WANG Biao, ZHU Jianrong, LYU Aiqin. Salinity statistical model for Modaomen of Pearl River Estuary during dry season [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 42-48. (in Chinese))
- [5] 徐志, 马静, 王浩, 等. 长江口影响水资源承载力关键指标与临界条件 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2019, 59 (5): 364-372. (XU Zhi, MA Jing, WANG Hao, et al. Key indicator and critical condition for the water resource carrying capacity in the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59 (5): 364-372. (in Chinese))
- [6] 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))

- Chinese))
- [7] XU Zhi,MA Jing,WANG Hao,et al. River discharge and saltwater intrusion level study of Yangtze River Estuary, China[J]. Water,2018,10(6):683-704.
 - [8] ZHU Yuxin,ZHOU Bin,ZHAO Junjie. Research on the Salinity distribution and the influence of saltwater intrusion in Yangtze River [J]. Advances in Environmental Protection,2014, 4(1):25-33.
 - [9] QIU Cheng,ZHU Jianrong. Assessing the influence of sea level rise on salt transport processes and estuarine circulation in the Changjiang River Estuary[J]. Journal of Coastal Research: An International Forum for the Littoral Sciences,2015,31(3):661-670.
 - [10] CHEN Xinjian. A sensitivity analysis of low salinity habitats simulated by a hydrodynamic model in the Manatee River Estuary in Florida, USA [J]. Estuarine Coastal and Shelf Science,2012,104(1):80-90.
 - [11] 陈鹤翔,金光球,谢天云,等. 陆源淡水流量对海岸水库海水入侵的影响[J]. 水利水电科技进展,2021,41(4): 29-34. (CHEN Hexiang, JIN Guangqiu, XIE Tianyun,et al. Effects of inland fresh water discharge on seawater intrusion in coastal reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4):29-34. (in Chinese))
 - [12] 李国平,朱建荣. 2015—2017 年枯季长江河口青草沙水库盐水入侵分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2018, 198(2): 160-169. (LI Guoping, ZHU Jianrong. Analyses of saltwater intrusion at the water intake of Qingcaosha Reservoir in the Changjiang Estuary in dry season from 2015 to 2017[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2018, (2): 160-169. (in Chinese))
 - [13] GU Chaojun,MU Xingmin,ZHAO Guangju,et al. Changes in stream flow and their relationships with climatic variations and anthropogenic activities in the Poyang Lake Basin,China[J]. Water,2016,8(12):564-582.
 - [14] 袁菲,杨清书,杨裕桂,等. 珠江口东四口门径流动力变化及其原因分析[J]. 人民珠江,2018,39(2):26-29. (YUAN Fei, YANG Qingshu, YANG Yugui, et al. Study on runoff dynamic changes of Four Eastern Outlets in the Pearl River Estuary and its causes[J]. Pearl River,2018, 39(2):26-29. (in Chinese))
 - [15] 袁杰,李弘义,李胜军. 松花江流域径流变化特征及趋势分析[J]. 海水水利,2013,183(5):33-36. (YUAN Jie, LI Hongyi, LI Shengjun, et al. Characteristics and trend analysis of runoff change in Songhua River Basin [J]. Haihe Water Resources,2013,183(5):33-36. (in Chinese))
 - [16] XIA Junqiang,LI Xiaojuan,ZHANG Xiaolei,et al. Recent variation in reach-scale bankfull discharge in the Lower Yellow River[J]. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group,2014,39(6):723-734.
 - [17] 夏雪瑾,徐健,冯文静,等. 长江入海流量趋势及大通-徐六泾流量关系探讨[J]. 中国水运,2016,37(6):71-73. (XIA Xuejin, XU Jian, FENG Wenjing, et al. Discussion on the trend of Yangtze River discharge into the sea and the relationship between Datong Xuliujing discharge[J]. China Water Transport,2016,513(6):71-73. (in Chinese))
 - [18] 刘惠英,丁文峰,张平仓. 香溪河流域 1965—2010 年径流的变化趋势及突变分析[J]. 长江科学院院报,2014, 31(4): 12-16. (LIU Huiying, DING Wenfeng, ZHANG Pingcang. Variation trend and mutation analysis of runoff in Xiangxi River Watershed from 1965 to 2010 [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014,31(4):12-16. (in Chinese))
 - [19] 龚政,张长宽,金勇,等. 长江口斜压诊断模式三维流场数值模拟[J]. 水科学进展,2004,15(3):300-306. (GONG Zheng, ZHANG Changkuan, JIN Yong, et al. 3-D current numerical model for the Yangtze River Estuary with baroclinic-diagnosis mode [J]. Advances in Water Science,2004,15(3):300-306. (in Chinese))
 - [20] 吴辉,朱建荣. 长江河口北支倒灌盐水输送机制分析[J]. 海洋学报,2007,29(1):17-25. (WU Hui, ZHU Jianrong. Analysis of the transport mechanism of the saltwater spilling over from the North Branch in the Changjing Estuary in China [J]. Acta Oceanologica Sinica,2007,29(1):17-25. (in Chinese))
 - [21] WILLMOTT C J. On the validation of models[J]. Physical Geography,1981,2(2):184-194.
 - [22] XU Zhi,MA Jing,HU Yajie. Saltwater intrusion function and preliminary application in the Yangtze River Estuary, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2019,16(1):118-136.
 - [23] RIVA M, GUADAGNINI A, DELL' OCA A. Probabilistic assessment of seawater intrusion under multiple sources of uncertainty[J]. Advances in Water Resources,2015,75(1):93-104.
 - [24] XU Yao,ZHOU Bin,YU Zhifeng,et al. Spatial-temporal analysis of sea level changes in China seas and neighboring oceans by merged altimeter data [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017,52(1):012065.

(收稿日期:2022-06-06 编辑:熊水斌)