DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 14

珠江口盐度预测统计模型

王 青[1],叶荣辉[2],汪玉平[1],张梦茹[1],孔 俊[1]

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098; 2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510611)

摘要:采用自回归模型,建立日均流量、日最大潮差和日均盐度的统计模型,实现咸潮日特征值的预报,并且在模型中引入伽马分布函数表征历史盐度的记忆效应,通过重要性系数来描述连续单调衰减趋势。预测结果令人满意,实测值与预测日均盐度值的拟合优度指数达到 0. 842 1。模型中采用的伽马分布函数较好地反映历史盐度的贡献,表征盐度的时间延迟现象,对提高盐度预测精度有很好的作用。

关键词:咸潮;预测模型;自回归模型;伽马分布函数;珠江口

中图分类号:P731. 12 **文献标志码**:A **文章编号**:1004 - 6933(2018)06 - 0082 - 06

Statistical model for salinity prediction in Pearl River Estuary

WANG Qing[1], **YE Ronghui**[2], **WANG Yuping**[1], **ZHANG Mengru**[1], **KONG Jun**[1]

(1. *College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing* 210098, *China*;
2. *Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou* 510611, *China*)

Abstract: The autoregressive model was used to establish the statistical model of daily average discharge, daily maximum tidal difference and daily average salinity. The daily characteristic value of saline tide was predicted. Gamma distribution function was introduced to characterize the memory effect of historical salinity in the model, and the continuous monotone attenuation trend was described by the importance coefficient. The prediction result is satisfactory, and the goodness of fit index of the measured and predicted daily mean salinity reaches 0. 842 1. The gamma distribution function used in the model reflects the contribution of historical salinity and the time delay phenomenon of salinity, which has a good effect on improving the precision of salinity prediction.

Key words: salt tide; prediction model; autoregressive model; Gamma distribution function; Pearl River Estuary

咸潮是河口地区常见的自然现象,造成严重的生态危害,直接影响到生活用水、工业用水以及农作物灌溉,严重制约经济发展,因而如何做到准确预测咸潮,特别是预测满足取水指标的低盐过程一直是个科学难题。咸潮的早期研究主要采用实测分析、物理模型试验和数值解析方法。Savenije[1]基于大量实测河口咸潮上溯曲线,总结出“递降”“铃型”“拱型”和“驼背”4 种类型的上溯曲线,用来模拟河口的咸潮;Grigg 等[2]开展物理水槽实验,对咸潮的紊动混合强度及盐度时空分布对不同地形的响应情况进行了分析;Schijf 等[3]在盐水楔理论的基础上,推算了咸潮距离的解析解。随着科技的进步,遥感反演、数值模拟、数理统计的方法也被广泛用于咸潮研究中。Bowers 等[4]根据水体中黄色物质与盐度呈负相关关系,提出了黄色物质反演水体盐度的遥感算法;数值模拟方法是目前研究咸潮问题最普遍的方法,使用较广泛的河口海洋水动力数值模型包括结构网格模式,如 Princeton Ocean Model (POM)[5]、Estuarine, Coastal and Ocean Model (ECOM)[6]、Tidal, Residual, Inter-tidal Mudflat

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18_0612);中央高校基本科研业务费专项(2018B646X14);水利部公益性行业科研专项(201501010);江苏省六大人才高峰培养项目(HYGC-004)

作者简介:王青(1993—),女,硕士研究生,研究方向为河口海岸水动力学。E-mail:wangqing199399@126. com

(TRIM)[7]、Regional Oceanic Modeling System (ROMS)[8] 等，以及无结构网格模式，如 Unstructured TRIM Model (UNTRIM)[9]、Finite Volume Community Ocean Model (FVCOM)[10-11]、Eulerian-Lagrangian Circulation Model (ELCIRC)[12]、Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-element Model (SELFE)[13] 等；Qiu 等[14] 利用卢萨哈奇河近 20 年的测量资料进行多元回归分析，建立盐度预报模型，通过对时间序列的分析，研究淡水径流、降雨和潮汐水面高程导致的盐度变化。然而已有研究主要关注咸潮上溯距离[15-18]，而对关注具体地点的盐度变化的研究比较少。

本文以珠江口为研究对象，基于统计学方法，考虑历史盐度过程的记忆效应，构建预测日均盐度的关系函数。通过分析上游径流和外海潮差对盐度的影响，结合统计回归模型，建立日均流量、日最大潮差、记忆盐度和日均盐度的关系函数，以期为河口地区取水提供参考依据。

1 研究区概况

珠江口是水系结构、动力特性、人类活动都较为复杂的河口之一，具有“三江汇流、八口入海”的水系特征，地理位置见图 1，其中上游流量测站为马口站和三水站，外海潮位测站为三灶站，盐度测站为平岗站。为了简化计算，对马口站和三水站的流量值进行相加，用相加得到的流量和进行研究。上游流量、外海潮位和盐度资料都为 2011 年 9 月至 2013 年 12 月的每小时实测数据。本文的预测模型研究的是日均盐度值，因此对上游流量和盐度数据处理得到日均流量和日均盐度，对外海潮位处理得到日最大潮差。

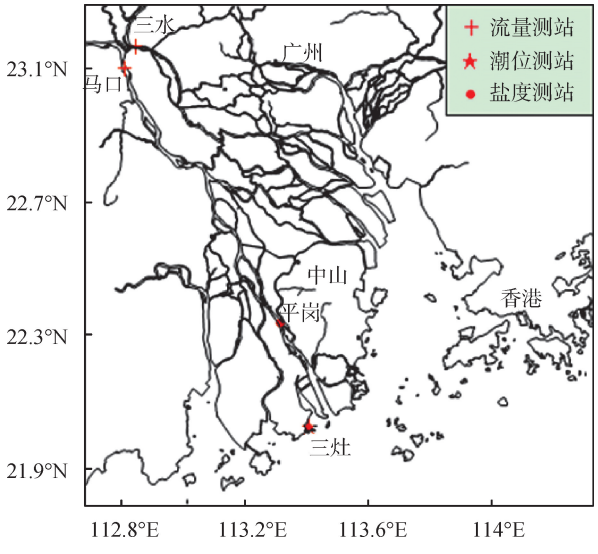

图 1 研究区地理位置

2 模型建立

2.1 咸潮影响因子分析

淡水径流和潮汐动力作用是影响咸潮的主要因素，同时风力风向、海平面上升以及地形等因素也对咸潮有影响。Neubauer 等[19] 提出在径流占主导的河口，高径流量可以抑制咸潮，反之，低径流量下，咸潮上溯的距离更远。魏雪静等[20] 基于 ECOMSED 三维海洋水动力模型，着重模拟和分析潮差对盐度影响，指出随着潮差的减小，表层和底层的盐度差增大，盐水分层现象更明显，即小潮期更容易出现盐水楔现象。潘存鸿等[21] 基于长系列的实测水文和地形资料，指出钱塘江口咸潮上溯受到径流、潮汐和河床地形的影响。丁磊等[22] 通过分析长江口 2013 和 2014 年枯季数据指出长江口咸潮上溯受地形地貌、径流、潮流和风因素共同影响。Ou 等[23] 指出径流、近岸海流和风对珠江口盐度分布有明显影响，不同形态的盐度锋主要是通过表层平流运动形成。Scully 等[24] 基于约克河实地观测结果提出风对盐度分层有重要影响，顺河口向上游的风会减弱分层，一定强度的顺河口向下游的风会增加分层，而过强的顺河口向下游的风却减弱分层，并提出了风应变理论解释风对河口盐度分层的作用。近年来随着全球气候变暖，海平面上升伴随着盐水上涌，进一步加剧了咸潮的影响态势，Hilto 等[25] 在美国的切萨皮克湾观测到了海平面上升导致盐锋上溯的现象。Zhang 等[26] 指出珠江口咸潮上溯除了受到径流、风和地形的影响，还受到海平面上升的影响。刘祖发等[11] 基于 FVCOM 模型，发现珠江口海平面上升加剧咸潮上溯程度。

本文主要分析上游径流和外海潮差两个因素对咸潮的影响。采用上游日均流量代表上游径流，根据相关文献[14,27-28]，考虑用指数函数和幂函数来研究流量和盐度之间的关系，其中指数函数形式对应的拟合优度指数为 0.29，幂函数形式对应的拟合优度指数为 0.27，可见采用指数函数形式较好。图 2 和图 3 分别为日均流量和日最大潮差与日均盐度的关系。由图 2 和图 3 可见，当日均流量较大时，日均盐度基本被日均流量所控制，此时潮汐动力基本不会对日均盐度产生任何影响，但是影响盐度的各种因素并不是孤立存在和单独发挥作用的，而是相互耦合作用，考虑到日均流量和日最大潮差共同作用时可能出现特殊情况，将日最大潮差代替潮汐动力作为一个影响因素。

2.2 统计模型的构建

首先建立传统的盐度预测模型，仅考虑日均流

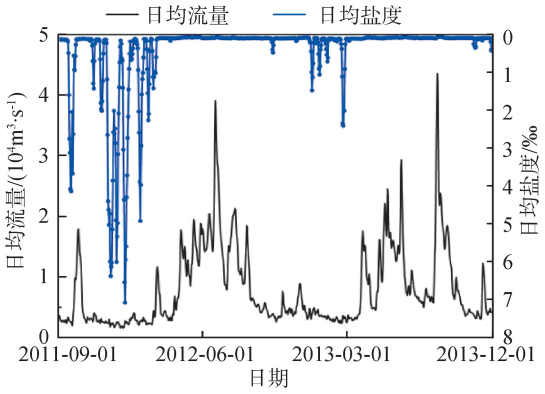

图 2　日均流量与日均盐度关系

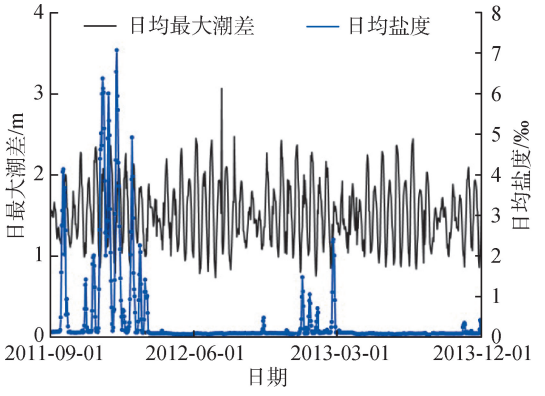

图 3　日最大潮差与日均盐度关系

量和日最大潮差对日均盐度的影响，命名模型 1，采用如下的函数形式：

$$S_1 = a_1\exp(-b_1Q_{t+1}) + cH_{t+1} + e_1 \tag{1}$$

式中：S_1为模型 1 的第 $t+1$ 天的日均盐度预测值；Q_{t+1}为第 $t+1$ 天的日均流量实测值；H_{t+1}为第 $t+1$ 天的日最大潮差实测值；a_1、b_1、c_1为拟合系数；e_1为常数项。a_1、b_1、c_1和 e_1的率定值分别为 17.4789、0.0011、0.4490 和 0.3819。

为改进传统盐度预测模型，引入自回归模型，考虑过去盐度的记忆效应的影响，自回归模型为

$$S_t = F(S_{t-1}, S_{t-2}, S_{t-3}) \tag{2}$$

式中：S_t为第 t 天的日均盐度实测值；S_{t-i}为第 $t-i$ 天的日均盐度实测值。

采用两种不同的方案进行对比分析。

方案 a：采用动态模型，日均盐度预测公式为

$$S_{t+1} = \phi_1S_t + \phi_2S_{t-1} + \phi_3S_{t-2} \tag{3}$$

式中：S_{t+1}为方案 a 的第 $t+1$ 天的日均盐度预测值；ϕ_1、ϕ_2、ϕ_3 为拟合系数。

方案 b：引入伽马分布函数[29]表征盐度的记忆效应：

$$\omega_{t-i} = \beta^{\alpha}\frac{1}{\Gamma(\alpha)}i^{\alpha-1}\exp(-\beta i) \tag{4}$$

$$S^*_{t-i} = \omega_{t-i}S_{t-i} \tag{5}$$

式中：ω_{t-i}为重要性系数；α 为形状参数；β 为尺度参数；S^*_{t-i}为考虑重要性系数的第 $t-i$ 天的日均盐度实测值。因此，考虑重要性系数的日均盐度预测公式为

$$S^*_{t+1} = \varphi_1S^*_t + \varphi_2S^*_{t-1} + \varphi_3S^*_{t-2} \tag{6}$$

式中：S^*_{t+1}为方案 b 的第 $t+1$ 天的日均盐度预测值；φ_1、φ_2、φ_3 为拟合系数。

图 4 为方案 a 和方案 b 的日均盐度预测值与实测值对比，图 5 为方案 a 和方案 b 的日均盐度预测峰值与实测峰值对比。由图 4、5 可以看出，方案 b 预测的日均盐度值明显小于方案 a，更加接近实测值，预测值和实测值的拟合优度指数由方案 a 的 0.6355 提高到方案 b 的 0.8201，而且方案 a 中的预测峰值不能实现和实测峰值的相互对应，存在明显的滞后性，说明引入伽马分布函数后能够很好地减弱滞后效应，方案 b 能更准确地预测日均盐度。

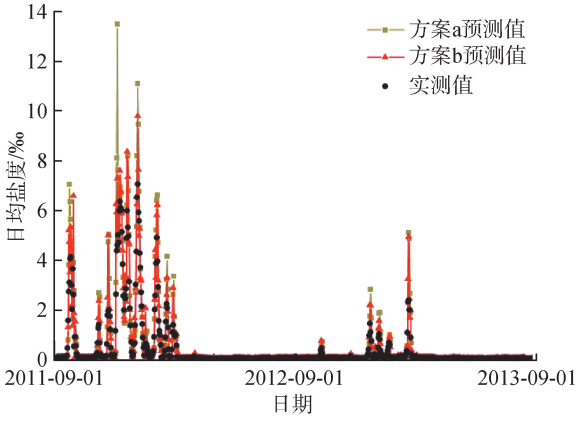

图 4　方案 a 和方案 b 的日均盐度预测值与实测值对比

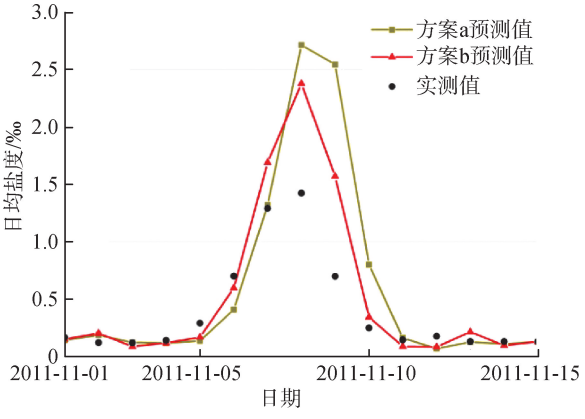

图 5　方案 a 和方案 b 的日均盐度预测峰值与实测峰值对比

综合考虑各项因素，建立一种新的盐度预测统计模型，命名模型 2，预测方程为

$$S_2 = a_2\exp(-b_2Q_{t+1}) + c_2H_{t+1} + d_2S^*_{t+1} + e_2 \tag{7}$$

式中：S_2为模型 2 的第 $t+1$ 天的日均盐度预测值；a_2、b_2、c_2、d_2为拟合系数；e_2为常数项。

3 敏感性分析

3.1 径流强度敏感性分析

径流是影响咸潮最为敏感的因素之一，也是一定程度上可以受人为调控的因素。考虑不同径流大小对咸潮的影响，在上一节建立的模型的基础上，设置日均流量增大50%和减小50%两种试验，其他条件与上一节建立的模型相同，对比不同情况下上游径流对咸潮的影响。令

$$S_Q = a_2 \exp(-b_2 Q_{t+1}) \tag{8}$$

式中 S_Q 为模型2中流量贡献的日均盐度预测值。

图6为流量不变、减小50%和增大50%情况下 S_Q 和 S_2 的变化情况。由图6可见，当日均流量减少50%时，所对应的 S_Q 显著增大，增幅基本在3倍以上，绝大部分在4~6倍，少数达到10倍，所对应的 S_2 增大幅度也比较明显；当日均流量增大50%时，所对应的 S_Q 变化幅度不大，大多数不变化，少数减少4倍，所对应的 S_2 减少幅度不明显，基本没有变化。由此可知上游径流是影响咸潮的关键因素，当上游流量比较大时，盐度对上游流量的变化不是很敏感，而当上游流量比较小时，盐度对上游流量的变化比较敏感。

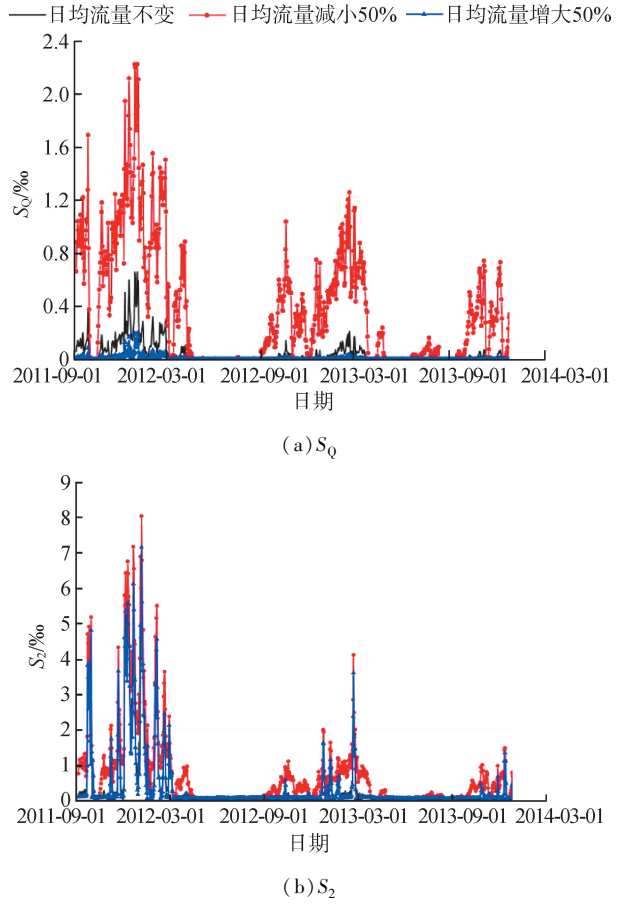

图6 日均流量不变、减小50%和增大50%情况下 S_Q 和 S_2 变化

3.2 潮汐强度敏感性分析

选取2011年9月至2013年12月的实测数据进行拟合，发现日最大潮差的系数 b_2 仅有0.006，说明本文情况下日最大潮差对日均盐度的影响基本可以忽略不计。因此对盐度预测模型进行进一步的改进，命名为模型3，改进后的预测方程为

$$S_3 = a_3 \exp(-b_3 Q_{t+1}) + d_3 S_{t+1}^* + e_3 \tag{9}$$

式中：S_3 为模型3的第 $t+1$ 天的日均盐度预测值；a_3、b_3、d_3 为拟合系数；e_3 为常数项。

4 模型的验证

选取2011年9月至2012年8月的实测数据利用模型3进行拟合并率定系数，得到 a_3、b_3、d_3 和 e_3 的率定值分别为7.50，0.001 53，0.73和0.001，拟合结果见图7(a)，预测值和实测值的拟合优度指数为0.9094。对比模型1、模型3的日均盐度预测值和实测值可见，模型1的拟合优度指数仅为0.3031，远小于模型3。而模型3的日均盐度预测值无论在丰水期还是枯水期都与实测值误差很小，说明引入伽马分布函数表征盐度的记忆效应能够显著提高预测的准确度，同时，利用重要性系数减弱了滞后效应带来的影响。利用模型3，选取2012年9月至2013年12月的实测数据进行模型验证，结果见图7(b)。由图7(b)可见，除了个别数值相差较大，其余预测值和实测值的相差很小，拟合优度指数为0.8421，

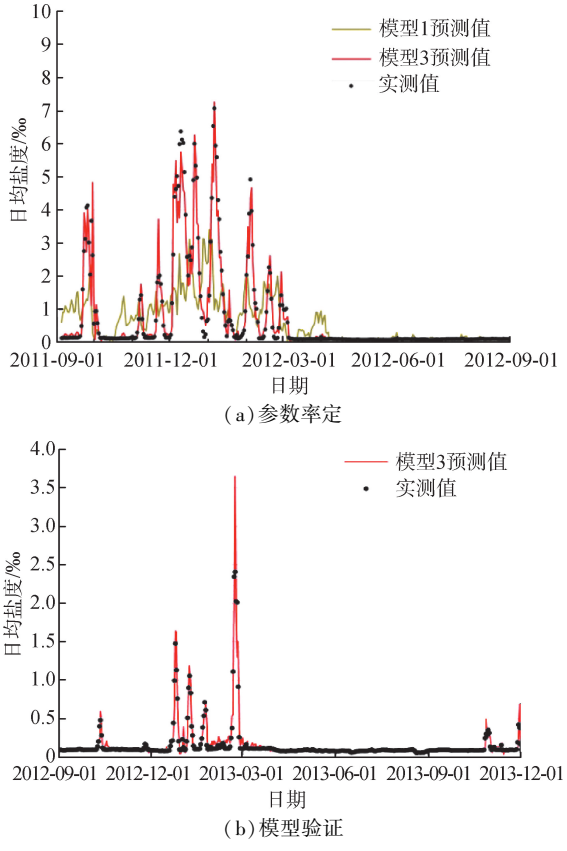

图7 参数率定和模型验证结果

校验结果比较理想,说明本文提出的盐度预测统计模型能够准确地预测珠江口的盐度。

5 结 论

a. 珠江河口上游径流对盐度的影响显著,日均流量和日均盐度之间可用指数函数进行拟合;外海潮差对盐度的影响不显著,在综合考虑各项因素后,略去了外海潮差的影响。

b. 比较两种日均盐度的动态预测方案,发现引入伽马分布函数表征盐度的记忆效应能够显著提高预测的准确度。同时,利用重要性系数减弱了滞后效应带来的影响。

c. 模型拟合优度指数为0.8421,校验结果比较理想,说明提出的盐度预测统计模型能够准确地预测珠江口的盐度。

参考文献:

[1] SAVENIJE H H G. Rapid assessment technique for salt intrusion in alluvial estuaries [J]. Civil Engineering & Geosciences,1992(1):111-121.

[2] GRIGG N J,IVEY G N. A laboratory investigation into shear-generated mixing in a salt wedge estuary [J]. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics,1997,85(1/2):65-95.

[3] SCHIJF J B,SCHÖNFLED J C. Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water [J]. American Society of Civil Engineers,1953,81(15):321-333.

[4] BOWERS D G,BRETT H L. The relationship between CDOM and salinity in estuaries: an analytical and graphical solution[J]. Journal of Marine Systems,2008,73(1):1-7.

[5] BLUMBERG A F,MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model[J]. Three-Dimensional Coastal Ocean Models,1987,4:1-16.

[6] BLUMBERG A F. A primer for ECOM-si[J]. Technical report of HydroQual,1994,66:221-232.

[7] CASULLI V,CHENG R T. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,1992,15(6):629-648.

[8] SHCHEPETKIN A F,MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model [J]. Ocean Modelling,2005,9(4):347-404.

[9] CASULLI V,WALTERS R A. An unstructured grid,three-dimensional model based on the shallow water equations [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids,2015,32(3):331-348.

[10] CHEN C,LIU H,BEARDSLEY R C. An unstructured grid,finite-volume,three-dimensional,primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2003,20(1):159-186.

[11] 刘祖发,施宁宁,关帅,等. 基于 FVCOM 的磨刀门水道盐水入侵三维数值模拟[J]. 水动力学研究与进展,2016,31(3):286-294. (LIU Zufa,SHI Ningning,GUAN Shuai,et al. Three-dimensional numerical simulation of saltwater intrusion in Modaomen estuary based on FVCOM [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2016,31(3):286-294. (in Chinese))

[12] ZHANG Y,BAPTISTA A M,MYERS E P. A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. formulation and skill assessment [J]. Continental Shelf Research,2004,24(18):2187-2214.

[13] ZHANG Y,BAPTISTA A M. A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation[J]. Ocean Modelling,2008,21(3):71-96.

[14] QIU C,WAN Y. Time series modeling and prediction of salinity in the Caloosahatchee River Estuary[J]. Water Resources Research,2013,49(9):5804-5816.

[15] 周慧芳,谭红兵,高将,等. 南通地区地下水咸化机理分析及改良措施[J]. 水资源保护,2015,31(4):70-76. (ZHOU Huifang,TAN Hongbing,GAO Jiang,et al. Analysis of salinization mechanism of groundwater in Nantong area and its improvement measures[J]. Water Resources Protection,2015,31(4):70-76. (in Chinese))

[16] 吴光红,李金中,李学菊. 天津滨海地区城市供水调节水库水质咸化原因与改善途径[J]. 水资源保护,2010,26(1):29-31,35. (WU Guanghong,LI Jinzhong,LI Xueju. Cause and prevention countermeasures of water salinization of city water supply reservoir in the coastal region of Tianjin[J]. Water Resources Protection,2010,26(1):29-31,35. (in Chinese))

[17] 官明开,蒋齐嘉,徐龑文,等. 基于一维盐度模型的珠江河网咸潮上溯距离分析[J]. 水运工程,2016(11):66-71. (GUAN Mingkai,JIANG Qijia,XU Yanwen,et al. Saltwater intrusion lengths in the Pearl River networks based on one-dimension salinity model [J]. Port & Waterway Engineering,2016(11):66-71. (in Chinese))

[18] 王青,吕紫君,孙杰,等. 基于水幕方法的珠江河口抑咸对策[J]. 水资源保护,2018,34(5):50-56. (WANG Qing,LYU Zijun,SUN Jie,et al. Study on measures of saline water intrusion control to Pearl River Estuary based on water curtain method[J]. Water Resources Protection,2018,34(5):50-56. (in Chinese))

[19] NEUBAUER S C,CRAFT C B. Global change and tidal freshwater wetlands: scenarios and impacts [J]. Tidal Freshwater Wetlands,2009,18(5):353-366.

[20] 魏雪静,郝瑞霞. 基于 ECOMSED 的非恒定流水域盐水入侵数值模拟[J]. 人民长江,2017,48(15):30-34. (WEI Xuejing,HAO Ruixia. 3-D Numerical analysis of saltwater intrusion in unsteady-flow water area based on

ECOMSED[J]. Yangtze River,2017,48(15):30-34. (in Chinese))

[21] 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))

[22] 丁磊,窦希萍,高祥宇,等. 长江口 2013 年和 2014 年枯季盐水入侵分析[J]. 水利水运工程学报,2016(4):47-53. (DING Lei, DOU Xiping, GAO Xiangyu. Analysis of saltwater intrusion into Yangtze estuary during dry seasons of 2013 and 2014[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4):47-53. (in Chinese))

[23] OU S, ZHANG H, WANG D. Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River Estuary in summer [J]. Environmental Fluid Mechanics,2009,9(5):471-492.

[24] SCULLY M E, FRIEDRICHS C, BRUBAKER J. Control of estuarine stratification and mixing by wind-induced straining of the estuarine density field[J]. Estuaries and Coasts,2005,28(3):321-326.

[25] HILTON T W, NAJJAR R G, ZHONG L, et al. Is there a signal of sea-level rise in Chesapeake Bay salinity? [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113 (C9):566-578.

[26] ZHANG X F, DENG J Q. Affecting factors of salinity intrusion in Pearl River Estuary and sustainable utilization of water resources in Pearl River Delta: sustainability in food and water[M]. Netherlands Springer,2010:11-17.

[27] 诸裕良,闫晓璐,林晓瑜. 珠江口盐水入侵预测模式研究[J]. 水利学报,2013,44(9):1009-1014. (ZHU Yuliang, YAN Xiaolu, LIN Xiaoyu. Study on prediction model of saline intrusion in Pearl River delta[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(9):1009-1014. (in Chinese))

[28] PARSA J, ETEMAD-SHAHIDI A. An empirical model for salinity intrusion in alluvial estuaries [J]. Ocean Dynamics,2011,61(10):1619-1628.

[29] XIN P, WANG S J, ROBINSON C, et al. Memory of past random wave conditions in submarine groundwater discharge [J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41 (7):2401-2410.

(收稿日期:2017-11-07　编辑:王　芳)

(上接第 81 页)

[16] IMAM Y E, LAVAL B E. The effect of non-uniform depth on the baroclinic response to wind in elongated basins [J]. Environmental Fluid Mechanics,2013,13(2):101-123.

[17] 宫攀,孙即霖,公延华. 黄海大风日数长期变化特征研究[J]. 现代农业科技,2013(12):185-187. (GONG Pan, SUN Jilin, GONG Yanhua. Long-term change characteristics of gale days on the Yellow Sea[J]. Modern Agricultural Sciences,2013(12):185-187. (in Chinese))

[18] 王高正,朱江平. 堵港蓄淡工程小流量机组群抽水排咸技术及效益分析[J]. 浙江水利科技,1997(3):23-25. (WANG Gaozheng, ZHU Jiangping. The technology and benefit analysis of discharging salt water using small flow unit group in estuarine reservoirs [J]. Zhejiang Hydrotechnics,1997(3):23-25. (in Chinese))

[19] MCGUIRE S, CURRIE D J. Factors related to the variation in mixing depth among meromictic lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 1993, 50(6): 1338-1342.

[20] 高增文,李宇浩,赵全升,等. 海湾水库沉积物对水体咸化影响的时间尺度[J]. 水科学进展,2015,26(2):221-226. (GAO Zengwen, LI Yuhao, ZHAO Quansheng, et al. Time scale for effects of sediment on water salinization of estuary reservoirs[J]. Advances in Water Science,2015, 26(2):221-226. (in Chinese))

[21] 徐詠岗,李敏中. 沿海滩涂水库排咸研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1998, 26(3): 76-80. (XU Yonggang, LI Minzhong. Study on desalinization of coastal area reservoirs[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),1998,26(3):76-80. (in Chinese))

[22] 姜翠玲,裴海峰. 天津市北塘水库水质咸化原因和防治对策[J]. 湖泊科学,2007,19(4):428-433. (JIANG Cuiling, PEI Haifeng. Reasons of water salinization and it prevention measures in Beitang Reservoir, Tianjin City [J]. Journal of Lake Science,2007,19(4):428-433. (in Chinese))

[23] 叶清华,李煜,王文,等. 底泥盐分释放影响下的滨海水库水体盐度变化过程数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(6):14-19. (YE Qinghua, LI Yu, WANG Wen, et al. Numerical simulation of water salinity change process in coastal reservoir influenced by sediment salt release [J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2015,43(6):14-19. (in Chinese))

[24] 王娟,高增文,赵全升. 库底排咸沟对控制海湾水库库水咸化的效应[J]. 环境科学与技术,2010(增刊 2): 33-35. (WANG Juan, GAO Zengwen, ZHAO Quansheng. Effects of draining interstitial water on the water salinization in polder reservoirs [J]. Environmental Science & Technology, 2010 (Sup2): 33-35. (in Chinese))

[25] 高增文,郑西来,吴俊文. 海湾水库蓄水初期底质与淡水盐分交换的试验研究[J]. 水科学进展,2006,17(2): 170-175. (GAO Zengwen, ZHENG Xilai, WU Junwen. Experimental studies on salt exchange between fresh water and sediments in a polder reservoir [J]. Advances in Water Science,2006,17(2):170-175. (in Chinese))

(收稿日期:2017-12-12　编辑:王　芳)