

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.021

基于解析解的珠江口虎门盐度扩散特性研究

周苑^{1,2}, 徐龔文^{1,2}, 张蔚^{1,2}, 唐苏轩², 王子杰²

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要: 基于盐度对流扩散方程,在盐度纵向对流扩散系数恒定与沿程变化两种假设条件下,构建了珠江口虎门盐水入侵定常扩散系数解析模型和变常扩散系数解析模型,结合现场实测径流与盐度数据,模拟复演盐水入侵过程,对比分析了盐度纵向对流扩散系数时空变化规律,探讨了虎门盐度扩散特性。结果表明:虎门盐度纵向对流扩散系数变化幅度较小,盐水入侵过程曲线呈现钟形过渡形态,表现为下游外凸、上游内凹的特征,盐度梯度沿上游方向先逐渐增大后减小;虎门下游水道的盐度扩散特征受东江来水影响显著,呈明显区段特征;大、小潮期间,受东江影响的虎门下游水道盐度纵向对流扩散系数时空平均值为 $1785\text{ m}^2/\text{s}$,而虎门上下游水道的整体时空平均值为 $2649\text{ m}^2/\text{s}$;黄埔右站为虎门水道的分段特征站点,相较于综合考虑上下游扩散特征的取值方式,解析模型采用黄埔右站下游水道率定得到的盐度纵向对流扩散系数,可提高模型对东江影响河段纵向盐度分布变化的预测精度,但会在一定程度上低估虎门盐水入侵的实际长度。

关键词: 盐水入侵;解析方法;盐度纵向对流扩散系数;珠江口;虎门

Study on salinity dispersion characteristics in Humen of the Pearl River Estuary based on analytical solutions

Zhou Yuan^{1,2}, Xu Yanwen^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Tang Suxuan², Wang Zijie²

(1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: Based on the salinity advection-dispersion equation, constant-dispersion-coefficient and variable-dispersion-coefficient analytical models for saltwater intrusion in Humen of the Pearl River Estuary were constructed under two assumptions of a constant longitudinal salinity advection-dispersion coefficient and a spatially varying longitudinal salinity advection-dispersion coefficient. With field measured runoff and salinity data, the saltwater intrusion process was simulated and reproduced; the spatiotemporal variation laws of the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient were comparatively analyzed, and the salinity dispersion characteristics in Humen were explored. The results indicate that the variation range of the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient in Humen is small, and the saltwater intrusion process curve presents a bell-shaped transition form, characterized by convexity in the downstream reach and concavity in the upstream reach; the salinity gradient gradually increases and then decreases along the upstream direction. The salinity dispersion characteristics of the downstream waterway in Humen are significantly affected by the incoming water from the Dongjiang River, showing obvious segmented features. During spring and neap tides, the spatiotemporal average of the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient in the downstream waterway of Humen affected by the Dongjiang River is $1785\text{ m}^2/\text{s}$, while the overall spatiotemporal average of the upstream and downstream waterways of Humen is $2649\text{ m}^2/\text{s}$. Huangpuyou Station is a segmented characteristic station of the Humen Waterway. Compared with the value assignment method that comprehensively considers the upstream and downstream dispersion characteristics, adopting the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient calibrated for the waterway downstream of Huangpuyou Station in the analytical model can improve the prediction accuracy of the model for longitudinal salinity distribution changes in the reach affected by the Dongjiang River but underestimates the actual length of saltwater intrusion in Humen to a certain extent.

Key words: saltwater intrusion; analytical approach; the longitudinal salinity advection-dispersion coefficient; the Pearl River Estuary; Humen

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001000);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B240201003);国家自然科学基金项目(42006155)

作者简介: 周苑(2001—),女,硕士研究生,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:577420193@qq.com

通信作者: 徐龔文(1988—),女,副教授,博士,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:yanwenxu@hhu.edu.cn

近年来,随着河口三角洲地区工业和农业生产力的快速增长,盐水入侵已逐步演变为全球性河口生态灾害问题^[1]。珠江三角洲为典型的复合型三角洲,上游西江、北江、东江三江汇流,下游八口入海;区域河网密布,各汉道径流量与潮汐强度差异显著,各水道口门水动力条件分异明显^[2-3]。其中,虎门纳潮量位居珠江三角洲八大口门首位,潮动力呈逐年增强趋势,为珠江三角洲盐水入侵最为严重的区域之一^[4]。

河口盐水入侵机制与盐度分布规律一直是陆海相互作用领域的研究热点,国内外学者已围绕河口盐水入侵开展了大量理论与实际应用。盐水入侵的研究方法主要包括实测资料统计分析、数值模拟、物理模型和解析分析等^[5]。数值模拟能够模拟任意水动力组合工况,特别适用于大型工程规划应用,但模型构建与运行过程通常较为复杂,物理机理表征的间接性较为突出。相比之下,解析分析虽需要基于较多假设条件建立模型,但作为经典的物理机制分析工具,通过解析盐水入侵控制方程的数学关系,能够直观反映各主要物理参数之间的相互作用,有助于更深入地理解河口盐度扩散的物理过程。

20 世纪 60 年代,Ippen 等^[6]依托系统试验与理论分析,得出了影响盐度瞬时纵向分布的主要影响因子;此后,Fischer 等^[7-8]利用大型室内水槽开展物理试验,建立了盐水入侵长度与河口动力过程相关模型,以研究棱柱形河口的盐水入侵问题;Prandle^[9-10]通过理论推导构建模型,强调了河道横断面面积变化率在确定盐度空间分布中的重要性;Savenije^[5]利用指数函数表征喇叭形河口形态,建立了喇叭形河口盐度分布预测模型,假设冲积河口可以简化为理想河口^[11],河宽与河道横断面面积呈指数减小,在涨憩和落憩两种平衡条件下,该模型有效地预测了世界上许多河口的盐水入侵长度和纵向盐度分布规律,如湄公河河口^[12]和长江口^[13]。

盐水入侵解析法是研究河道盐度纵向扩散的一种简单有效的分析方法,以实测数据为基础,从盐度对流扩散方程入手,能够直观反映盐度输运的物理过程^[6]。盐度对流扩散方程通过盐度纵向对流扩散系数涵括盐水入侵的扩散机理,进而构建河口盐水入侵解析模型。盐度纵向对流扩散系数是构建河口盐水入侵解析模型的重要参数,其确定方法通常采用两种假设^[14]:①将其视为沿程不变的参数,称作定常扩散系数;②假设其从口门处向上游不断衰减,其值与径流以及到河口的距离相关,称作变常扩散系数。

本文基于珠江口虎门实测数据,结合上述两种不同的盐度纵向对流扩散系数假设条件,构建虎门盐水入侵解析模型,分析虎门盐度纵向扩散特征,并探讨不同扩散系数对模型模拟虎门盐度扩散过程的影响。

1 研究区概况

珠江径流量充沛,多年平均入海水量约为 3 319.1 亿 m³,平均流量约为 10 524.8 m³/s,入海径流量仅次于长江,位居我国第二位。珠江口门呈喇叭形状水平展开,沿河口主轴方向,从北到南全长约 70 km,水域宽度从北部的 15 km 向口门逐渐增加,到口门处达 35 km。

珠江三角洲是一个典型的复合型三角洲,由西北江三角洲与东江三角洲及潭江等小河组成。西北江三角洲是以思贤滘、崖门、虎门三地为顶点的三角形区域,东江三角洲则以石龙、黄埔、虎门为顶点形成三角形格局。珠江径流通过八大口门分流入海,东四口门自东向西依次为虎门、蕉门、洪奇门、横门,汇入伶仃洋;西四口门中,磨刀门、鸡啼门单独入海,虎跳门和崖门则汇入黄茅海(图 1)。

虎门位于东莞市沙角,其入海径流包含东江的全部、西、北江的部分以及上游流溪河的来水。淡水补给主要源自东江、流溪河与西、北江,其中流溪河年径流量远小于其余两大水源。虎门外为喇叭形伶仃洋河口湾,口门宽度约 4 km。珠江八大口门中,虎门潮差最大,最大潮差达 3.66 m,平均潮差为 1.70 m^[4]。

本文采用的实测数据来源于 2005 年西北江三角洲网河区枯水期同步水文测验,该成果是近年来珠江三角洲网河区较为完整、系统的枯水期同步水文和盐度资料^[15]。沿虎门水道共选取 9 个监测站,布设如图 1 所示,口门控制站为大虎,自口门向上游依次为泗盛濠、漳澎、麻涌、大盛、黄埔右、大石、沙洛围及浮标厂。选用 2005 年 1 月 21 日至 2 月 3 日的盐度、水位和流量实测资料作为基础数据,并分别选取 1 月 24—25 日、1 月 27—28 日和 1 月 30—31 日作为大潮期、中潮期和小潮期的代表时段。为了探究虎门盐水入侵最严重状态下河口盐度的分布特征,重点分析虎门涨憩时刻盐度沿程扩散过程。由于日盐度最大值与涨憩时刻盐度值接近^[13],采用现场测量的日最大盐度数据代替涨憩时刻盐度。

2 盐水入侵解析模型

在一维模型概化过程中,本文充分考虑了河口盐水入侵过程的实际动力情况。盐、淡水的混合与径流、

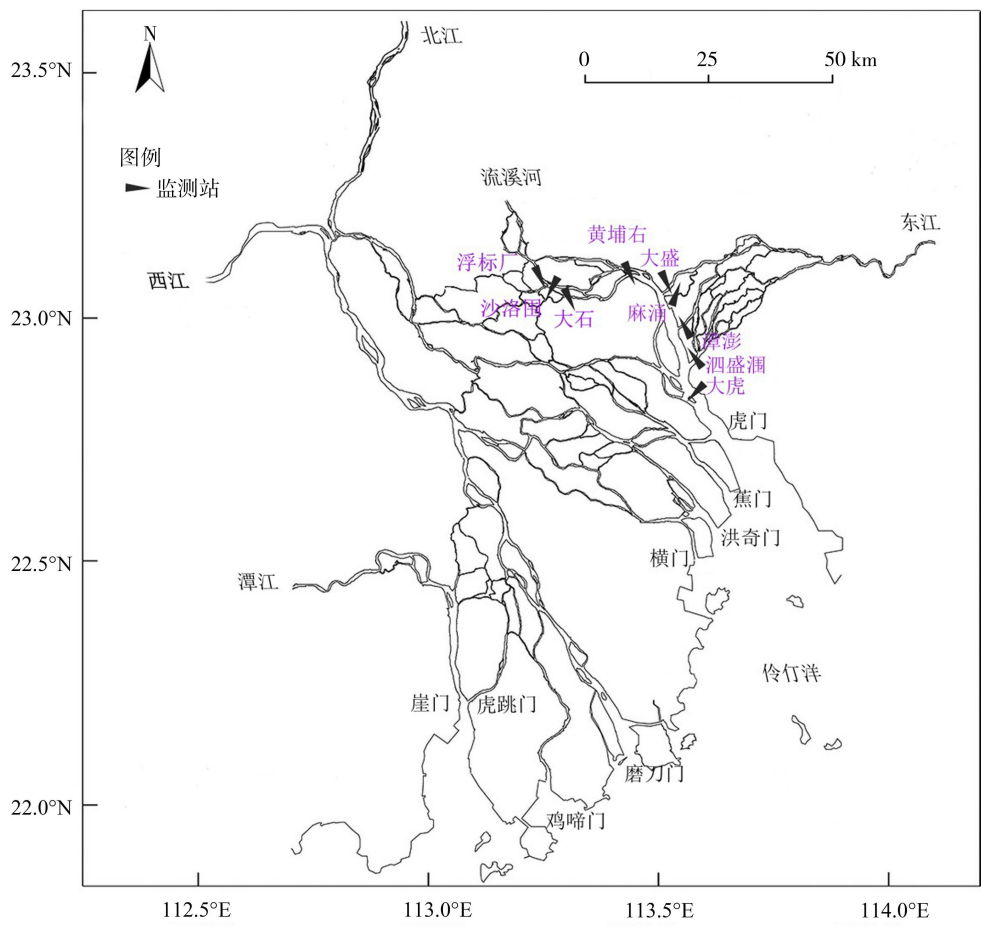


图 1 珠江口监测站布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monitoring station layout of the Pearl River Estuary

潮汐动力相关,径流越强,河口盐、淡水分层现象越显著^[16],因而,枯季强潮河口整体呈现完全混合状态^[17],盐度扩散纵向一维特性显著。本文聚焦于河口盐水入侵的纵向变化规律,是强潮河口典型的一维动力特性。

2.1 基本方程

不考虑时间效应的稳态解析模型是研究盐度扩散空间分布规律、预测盐水入侵距离的常用工具。忽略时间项,一维盐度对流扩散方程可以表示为:

$$\frac{d(Aus)}{dx} = \frac{d}{dx} \left(AD_x \frac{ds}{dx} \right) \tag{1}$$

式中: A 为河口断面面积; s 为断面平均盐度; x 为纵向坐标轴,原点在口门处,向海方向为负值,因而计算中径流值为负值,潮流值为正值; D_x 为纵向对流扩散系数; u 为断面平均流速,可分解为潮流流速 u_t 和径流流速 u_f 。稳态状况下,如涨憩或落憩时刻, u_t 为 0^[5],所以式(1)中 u 可简化为 u_f ,也可看作径流量与河口横断面面积之比。对式(1)进行积分可得:

$$\frac{ds}{s} = \frac{Q_f}{AD_x} dx \tag{2}$$

式中: Q_f 为径流量。

河口形态对盐度扩散与分布具有至关重要的影响^[18], Nguyen 等^[12]通过大量现场观测研究证实,冲积河口断面面积向上游方向在自然状态下呈现指数收敛变化形态。基于该结论,河口断面面积可表示为:

$$A = A_0 \exp \left(- \frac{x}{a} \right) \tag{3}$$

式中: A_0 为口门处($x=0$)断面面积; a 为断面面积收敛长度。

2.2 定常扩散系数解析模型

在河口盐度的定常扩散系数解析模型中,盐度的 D_x 取为常数,即 D_x 与 x 无关。式(2)中 D_x 沿程不变,可用口门纵向对流扩散系数 D_0 代替 D_x ,即 $D_x = D_0$ 。将式(3)代入式(2),等式两边积分后可得:

$$\ln \frac{s}{s_0} = - \frac{a}{\alpha_0 A_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \tag{4}$$

其中

$$\alpha_0 = - \frac{D_0}{Q_f}$$

式中: s_0 为口门平均盐度; α_0 为口门盐度混合系数。

研究表明,盐度函数 $\ln(s/s_0)$ 与距离函数 $\exp(x/a)$ 之间存在绝对的线性关系^[19],其斜率表达式为 $k = aQ_f/(D_0A_0)$,因而, D_0 与 α_0 可以基于实测盐度值通过回归分析的方法确定。将 α_0 代入式(4),则河口盐度扩散分布可表示为:

$$s = s_0 \exp\left\{ \frac{aQ_f}{D_0A_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \right\} \tag{5}$$

根据式(5)可得到盐水入侵长度 x_L 为:

$$x_L = a \ln \left[1 + \frac{A_0D_0}{aQ_f} \ln\left(\frac{s}{s_0}\right) \right] \tag{6}$$

2.3 变常扩散系数解析模型

在河口盐度的变常扩散系数解析模型中,盐度的 D_x 假设与径流相关,且沿水道向上游沿程变化,可表示为^[20]:

$$\frac{dD_x}{dx} = K \frac{Q_f}{A} \tag{7}$$

式中: K 为范登伯格系数,数值在 0~1 之间变化。考虑断面面积沿程呈指数收敛,将式(3)代入式(7),方程两边积分可得到 D_x 与 D_0 的相对关系表达式, D_0 和 K 可用经验分析方法确定^[5]:

$$\frac{D_x}{D_0} = 1 - \frac{Ka}{\alpha_0 A_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \tag{8}$$

$$K = 0.2 \times 10^{-3} \left(\frac{E}{H}\right)^{0.65} \left(\frac{E}{C^2}\right)^{0.39} (1 - \delta b)^{-2.0} \left(\frac{b}{a}\right)^{0.58} \left(\frac{Ea}{A_0}\right)^{0.14} \tag{9}$$

式中: E 为河口潮程值; H 为河口潮差; C 为谢才系数; δ 为潮差的沿程衰减率; b 为河口宽度收敛长度。涨憩(HWS)时刻, D_0 的经验表达式为^[21]:

$$D_{0,HWS} = 1400 \left(\frac{E_0 v_0 h_0}{a}\right) N_R^{0.5} \tag{10}$$

式中: v_0 为口门潮流流速振幅; h_0 为口门潮周期平均水深; N_R 为河口理查德系数。冲积河口潮程可视为沿程不变,即 $E = E_0$ 。假设潮流流速振幅沿程不变,则 N_R 可通过口门相关物理参数确定:

$$N_R = \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{g\bar{h}}{v_0^2} \frac{Q_f T}{E_0 A_0} \tag{11}$$

式中: $\Delta\rho$ 为虎门水道纵向密度差; ρ 为虎门口门密度; g 为重力加速度; $\bar{h}$ 为河口潮周期平均水深; T 为潮周期。尽管经验分析方法(式(9)~(11))是确定 D_x 的常用方法,但在实际河口应用中发现,由于经验分析方法的计算精度较差,导致部分河口盐水入侵预测结果出现较大的偏差^[5]。因而,在实际河口应用变常扩散系数解析模型时,通常会结合实测盐度数据,通过率定方法确定 K 及 α_0 。

将式(7)代入式(2),可得:

$$\frac{ds}{s - s_f} = \frac{1}{K} \frac{dD_x}{D_x} \tag{12}$$

等式两边积分,可得:

$$\frac{s - s_f}{s_0 - s_f} = \left(\frac{D_x}{D_0}\right)^{\frac{1}{K}} \tag{13}$$

式中: s_f 为上游盐度的边界值。因此,在变常扩散系数解析模式中,纵向盐度分布可表达为:

$$s = s_f + (s_0 - s_f) \left\{ 1 - \frac{Ka}{\alpha_0 A_0} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \right\}^{1/k}$$

(14)

根据式(14)可得到在涨憩时的盐水入侵长度为:

$$x_L = a \ln \left\{ \left[1 - \left(\frac{s - s_f}{s_0 - s_f} \right)^k \right] \frac{\alpha_0 A_0}{Ka} + 1 \right\}$$

(15)

3 虎门盐度扩散解析

3.1 虎门形态特征参数

珠江三角洲是冲积型三角洲,其河口断面面积向上游方向表现为指数收敛的变化特征。如图 2 所示,图中曲线代表基于式(3)进行指数拟合的计算值, R^2 为 0.92,拟合良好。 $A_0 = 37\,822\text{ m}^2$,由式(3)计算可得 $a = 16.7\text{ km}$ 。 A_0 较大,而 a 较小,准确反映出虎门水道宽口门、河道迅速收窄的喇叭形河口特征。

3.2 定常扩散系数解析

假设盐度的 D_x 沿水道保持不变,通过式(5)可构建虎门盐水入侵定常扩散系数解析模型,其中 D_x 的确定是求解该模型的关键。 D_x 与径流、潮流等动力条件密切相关。当径流增加时,淡水输入量随之增多,河口区域盐度整体降低,对盐水上溯形成抑制,并改变盐度梯度和流速结构,从而影响盐度纵向输移过程及 D_x 的等效取值。潮流强度及其周期性变化同样会影响盐度在河口的混合与分布。涨潮时,潮流推动盐水向上游输移;落潮时,径流与落潮流共同促进盐水向下游输送。潮周期内的往复输移和混合作用使盐水入侵过程呈现动态变化,进而影响定常扩散系数解析模型中 D_x 的确定。

基于式(4),可采用相对盐度与相对距离函数的线性回归拟合方法求解盐度的 D_x 。模型盐度的 D_x 通过沿程 6 个站点(大虎、泗盛濠、漳澎、麻涌、大盛、黄埔右)的大潮、小潮实测盐度数据确定。图 3 为虎门盐度函数与距离函数线性关系,4 组散点分别代表 6 个站点 1 月 24、25、30、31 日的实测盐度值,直线代表 $\ln(s/s_0)$ 与 $\exp(x/a)$ 的线性拟合方程,其斜率即为 $aQ_f/(D_0A_0)$ 的值。拟合结果表明,相对盐度与相对距离两个变量的直线拟合效果较好,因此,可基于拟合斜率进一步确定 α_0 和 D_0 。

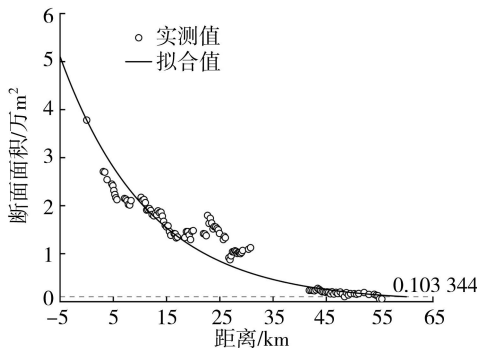


图 2 虎门沿程实测断面面积及拟合趋势线

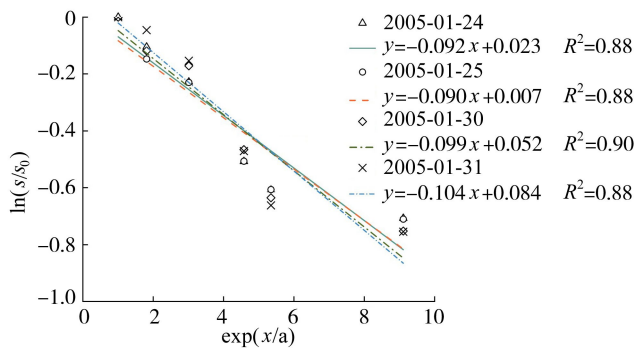


图 3 虎门盐度函数与距离函数的线性关系

Fig. 2 Measured along-channel cross-sectional area and fitted trend line in Humen

Fig. 3 Linear relationship between salinity function and distance function in Humen

定常扩散系数解析模型相关系数计算结果如表 1 所示,其中 Q_h 为虎门入海流量^[4],大潮期间 Q_h 为 $500 \sim 550\text{ m}^3/\text{s}$,小潮期间为 $600 \sim 700\text{ m}^3/\text{s}$,整体变幅较小; K 同样波动不大; R^2 平均值为 0.89,表明拟合精度较高、效果良好。虎门盐水入侵的 α_0 平均值为 4.60 m^{-1} ,标准差约为 0.26 m^{-1} ,大潮期间相较小潮期间 α_0 高出约 10%。

基于式(5)并结合表 1,构建虎门盐水入侵定常扩散系数解析模型。选取 1 月 24、30 日的计算结果,分别表征大潮、小潮期间虎门纵向盐度分布情况,如图 4 所示,图中三角形散点代表从口门向上游沿程 8 个监测站点的实测盐度值。通过对比计算值与实测值的偏离度,可见虎门盐水入侵的定常扩散系数解析模型能够较好地反演盐水入侵过程中盐度沿程的空间分布。大潮期间虎门口门盐度约为 21‰ ,而小潮期间约为 17‰ ;相较而言,小潮期间虎门口门盐度更低,大潮期间盐水入侵更为严重。大、小潮情况下盐水入侵距离均

超过 60 km,影响范围可直达广州河段。

表 1 定常扩散系数解析模型参数

Table 1 Parameters of constant-dispersion-coefficient analytical model

时间	$Q_h/(\text{m}^3/\text{s})$	K	α_0/m^{-1}	R^2
2005-01-24	-525	-0.092	4.80	0.88
2005-01-25	-537	-0.090	4.91	0.88
2005-01-30	-626	-0.099	4.46	0.90
2005-01-31	-663	-0.104	4.25	0.88

河口盐度扩散过程曲线形态受地形、地貌与气候条件的共同影响而呈现不同的区域特征。河口水动力过程虽会影响盐水入侵的距离,但不会改变盐度分布的变化趋势,即曲线形态基本保持不变。通常情况下,冲积型河口的盐水入侵为沿程逐渐衰减的过程。由图 4 进一步分析可知,虎门盐度扩散过程曲线呈现典型的钟形过渡特征,表现为口门处收敛段较短、上游收敛段较长。这是由于虎门的喇叭形态使其纳潮量较大,下游受强潮控制,导致口门盐度梯度偏小,盐度扩散变化相对平缓;随着盐水向上游不断扩散,盐度梯度先逐渐增大后减小,曲线相应呈现下游外凸、上游内凹的变化特征。与之相比,径流控制型河口的盐度扩散过程多表现为较典型的内凹衰减分布特征^[22]。

3.3 变常扩散系数解析

假设盐度的 D_x 沿程变化,可通过式(14)构建虎门盐水入侵变常扩散系数解析模型。模型的计算精度主要受 K 与 α_0 两个关键参数控制。其中,对于同一河口, K 一般不随时间变化,可视为反映河口自然特征的参数,主要与河口几何形态特征、河道糙率等因素有关。 K 为无量纲参数,是影响盐水入侵过程曲线形状的重要参数。

与之不同, α_0 可随水动力条件的变化而变化,主要受潮汐条件和河流径流量的共同影响。相较于 K 对盐水入侵过程曲线形状的控制作用, α_0 更多反映口门附近盐度扩散能力的强弱,并直接影响盐水入侵的长度。

确定 K 与 α_0 的常用方法包括经验公式法和实测数据率定法,两种方法已在国内外众多河口研究中得到广泛应用,但其计算效果并不一致^[19]。本文采用经验公式法和实测数据率定法分别构建虎门盐水入侵的变常扩散系数解析模型,通过对比经验公式法和实测数据率定法模拟虎门盐度沿程扩散分布的效果,优选出适用于虎门水动力特征的参数确定方法及模型参数组合。

3.3.1 经验公式法

依据式(9)~(11)推求虎门 K 与 α_0 的经验值,进而构建变常扩散系数解析模型,模型计算结果如图 5 所示。选用 2005 年 1 月 24、30 日实测资料,分别代表大潮与小潮期间虎门纵向盐度分布情况。可以看出,经验公式法构建的模型虽能准确描绘盐度扩散过程曲线的变化形态,即钟形过渡特征,但在预测盐水入侵距离时存在明显的低估现象。究其原因,虎门受东江、西江、北江、流溪河等多条河流影响,尤其在黄埔右站以下河段,而上游河段仅受西江、北江与流溪河的影响,径流量明显小于下游,而经验公式法难以精准反映该河段沿程径流动力的差异化演变特征。

3.3.2 实测数据率定法

由于 K 主要由河口固有属性决定,首先通过

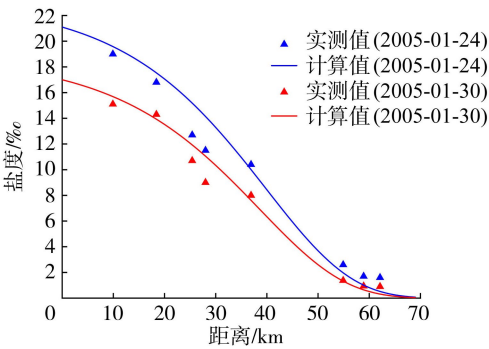


图 4 定常扩散系数解析模型计算值与实测值对比
Fig. 4 Comparison of calculated and observed values for constant-dispersion-coefficient analytical model

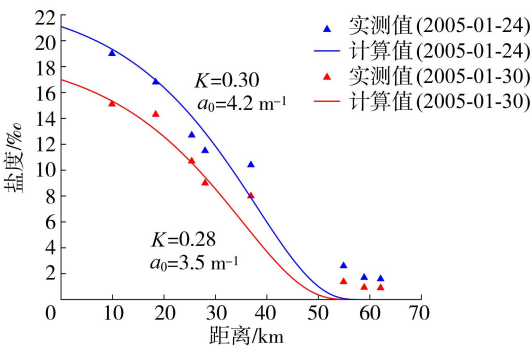


图 5 经验公式模式下变常扩散系数解析模型计算值与实测值对比
Fig. 5 Comparison of calculated and observed values for variable-dispersion-coefficient analytical model under empirical-formula mode

式(14)及盐水入侵过程曲线的形状确定虎门 K 值;再结合实测数据,利用最小二乘法确定 α_0 。选用大虎、泗盛濶、漳澎、麻涌、大盛、黄埔右站点 1 月 24—25 日、30—31 日的实测盐度数据进行参数率定,结果如表 2 所示。可见, α_0 平均值为 4.7 m^{-1} ,标准差约为 0.15 m^{-1} 。

将基于实测数据率定所得 K 值与 α_0 代入式(14),建立基于实测数据率定法的虎门盐水入侵变常扩散系数解析模型。如图 6 所示,该模型虽与实测值存在一定误差,但相较于经验公式法,模拟精度得到了显著提升。对盐水入侵距离的预测更准确,且与定常扩散系数解析模型得出的入侵距离较为接近。预测精度的提升主要归因于基于实测数据率定法综合考虑了虎门上、下游的径流动力差异;率定过程上、下游兼顾,在一定程度上改善了计算结果。因此,采用基于实测数据率定法构建的变常扩散系数解析模型更适用于虎门盐水入侵的模拟。

4 讨 论

4.1 盐水入侵解析方法比较

研究结果表明,虎门属性决定 K 取值为 0.1, α_0 在大、小潮期间变化虽不大,但呈现从大潮向小潮逐渐减小的趋势。虎门盐水入侵的定常扩散系数解析模型和变常扩散系数解析模型均基于大潮和小潮的实测数据进行率定和构建。为进一步验证这两个模型模拟虎门盐水入侵过程的适用性,选取大潮和小潮的混合系数平均值作为模型验证的理论混合系数,并基于中潮的实测盐度数据,对比分析定常扩散系数解析模型与变常扩散系数解析模型的模拟结果及差异特征。

虎门盐水入侵的变常扩散系数解析模型确定 $K=0.1$, α_0 取平均值 4.7 m^{-1} 。相比之下,定常扩散系数解析模型构建更为简便,只需率定 α_0 ,可通过回归分析快速确定,其 α_0 取平均值 4.60 m^{-1} 。

基于虎门中潮期间的实测盐度数据,代入 α_0 分别开展定常扩散系数解析模型和变常扩散系数解析模型模拟计算,结果如图 7 所示。可以看出,定常扩散系数解析模型和变常扩散系数解析模型的计算结果与实测值均存在一定的误差,尤其在距离口门较远的上游区域。为进一步量化定常扩散系数解析模型与变常扩散系数解析模型在虎门盐水入侵模拟中的差异,采用卡方检验法对计算值和实测值的相似度进行比较。经计算,定常扩散系数解析模型的卡方检验值为 11.19,而变常扩散系数解析模型的卡方检验值为 34.77。从数值比较来看,定常扩散系数解析模型的模拟结果与实测数据更为接近,模拟精度更高。因此,定常扩散系数解析模型在虎门的

表 2 变常扩散系数解析模型参数

Table 2 Parameters of variable-dispersion-coefficient analytical model

时间	$Q_h/(\text{m}^3/\text{s})$	K	α_0/m^{-1}
2005-01-24	-525	0.1	4.9
2005-01-25	-537	0.1	4.8
2005-01-30	-626	0.1	4.7
2005-01-31	-663	0.1	4.5

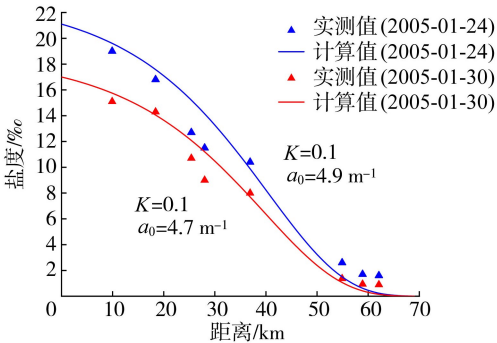


图 6 率定模式下变常扩散系数解析模型计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of calculated and observed values for variable-dispersion-coefficient analytical model under calibration mode

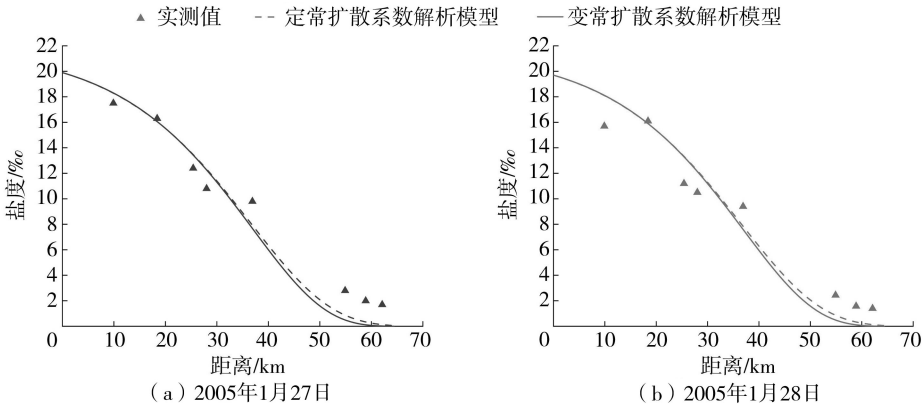


图 7 虎门中潮盐水入侵过程解析模型模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of simulation results of analytical models for saltwater intrusion process in Humen during moderate tide

应用中展现了更优的模拟效果,且模型的率定和构建过程相对简单,适合作为盐水入侵的快速预测工具。

4.2 东江对虎门盐度扩散特征的影响

虎门上、下游盐度变化显著,其差异性主要受西江、北江和东江等多源径流的共同作用影响。其中,东江径流主要影响虎门下游水域,直接导致盐度沿程扩散呈现明显分段特征,对虎门水道盐度扩散特征的分析具有关键作用。为此,基于定常扩散系数解析模型,并结合 2005 年 1 月 21 日至 2 月 3 日虎门的实测径流和盐度数据,进一步探讨东江对虎门水道盐度纵向扩散特征的影响。

由图 1 可知,黄埔右站以上的水道几乎不受东江径流的影响,因此选取黄埔右站作为虎门水道分段的特征站点。基于该特征站点,设置两组工况进行比较,以评估东江流量对定常扩散系数解析模型预测虎门水道盐度扩散过程及盐水入侵长度的影响。工况 1 采用大虎、泗盛濠、漳澎、麻涌、大盛 5 个下游站点的相关数据;工况 2 在工况 1 的基础上增加了黄埔右站的实测盐度数据,以确定虎门水道的盐度对流扩散系数,率定结果见表 3。 Q_h 平均值为 $-576\text{ m}^3/\text{s}$; H 平均值为 2.03 m。

表 3 不同工况参数率定结果

Table 3 Parameter calibration results under different scenarios

日期	$Q_h/(\text{m}^3/\text{s})$		H/m		K		R^2		α_0/m^{-1}		$D_0/(\text{m}^2/\text{s})$	
	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2	工况 1	工况 2
2025-01-21	-383	-383	1.73	1.73	-0.137	-0.091	0.99	0.89	3.22	4.85	1234	1858
2025-01-22	-446	-446	1.97	1.97	-0.139	-0.093	0.99	0.90	3.18	4.75	1417	2118
2025-01-23	-498	-498	2.28	2.28	-0.139	-0.093	0.97	0.88	3.18	4.75	1582	2364
2025-01-24	-525	-525	2.42	2.42	-0.142	-0.092	0.99	0.88	3.11	4.80	1632	2520
2025-01-25	-537	-537	2.50	2.50	-0.137	-0.090	0.99	0.88	3.22	4.91	1731	2635
2025-01-26	-580	-580	2.53	2.53	-0.143	-0.095	0.95	0.87	3.09	4.65	1791	2696
2025-01-27	-486	-486	2.27	2.27	-0.137	-0.092	0.98	0.89	3.22	4.80	1566	2332
2025-01-28	-584	-584	2.51	2.51	-0.140	-0.091	0.93	0.85	3.15	4.85	1842	2834
2025-01-29	-667	-667	2.26	2.26	-0.147	-0.100	0.95	0.88	3.00	4.42	2003	2945
2025-01-30	-626	-626	2.05	2.05	-0.141	-0.099	0.96	0.90	3.13	4.46	1960	2792
2025-01-31	-663	-663	1.68	1.68	-0.154	-0.104	0.95	0.88	2.87	4.25	1901	2815
2025-02-01	-705	-705	1.43	1.43	-0.140	-0.100	0.86	0.85	3.15	4.42	2223	3113
2025-02-02	-655	-655	1.38	1.38	-0.131	-0.095	0.94	0.90	3.37	4.65	2208	3044
2025-02-03	-705	-705	1.36	1.36	-0.164	-0.103	0.95	0.84	2.69	4.29	1898	3022

选取 2005 年 1 月 21 日至 2 月 3 日整个大、小潮期间的实测盐度值,工况 1 条件下, R^2 平均值为 0.96,拟合结果良好; D_0 平均值为 $1785\text{ m}^2/\text{s}$,与大潮相比,小潮期间虎门 D_0 整体增加,增幅约为 23%。工况 2 R^2 平均值为 0.88, D_0 平均值为 $2649\text{ m}^2/\text{s}$ 。与工况 1 相比, D_0 平均值显著增大;与工况 1 类似,小潮期间 D_0 平均值高于大潮期间,但两者之间的差距缩小。考虑上、下游 6 个站点数据的情况下,率定得到小潮 D_0 增量为 18%。

通过对比两种工况率定的解析模型在实际应用中的表现,可更直观地揭示东江对虎门水道上、下游盐度扩散特征的影响。图 8 为虎门盐水入侵长度与入海流量变化关系。在扩散系数解析模型中, s_0 取大、小潮周期口门盐度平均值,为 19‰,并选取 2‰作为判定盐水入侵长度的盐度阈值。

如图 8 所示,相较工况 1 的计算结果,工况 2 率定模型预测的盐水入侵长度与实测数据表现出更高的一致性。这是因为工况 2 模型取用的 D_x 时空平均值为 $2649\text{ m}^2/\text{s}$,较好地表征了虎门上下游的综合扩散特征,有效提高了对上游低盐度咸水界的预测精度。而工况 1 模型采用的 D_x 较小,时空平均值为 $1785\text{ m}^2/\text{s}$,体现了东江对虎门下游水道盐度扩散的直接影响。图 9 为不同工况下虎门盐度沿程分布模拟结果对比。可见,相较于工况 2,工况 1 率定的解析模型在下游站点的计算结果与实测数据更为接近,尤其在东江影响下,工况 1 模型对虎门水道盐度扩散的预测更为精准。然而,工况 1 模型可能低估虎门上游的低盐度值,并对盐水入侵的实际长度有所低估。因此,在选择使用工况 1 或工况 2 率定的解析模型进行虎门盐度扩散预测时,应慎重考虑各模

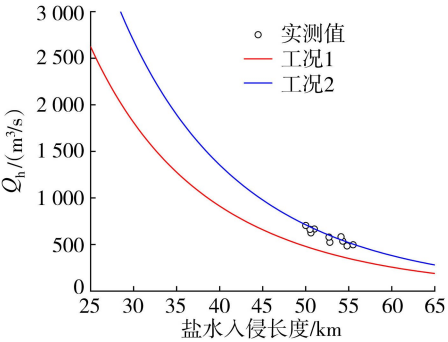


图 8 虎门盐水入侵长度与入海流量关系
Fig. 8 Relationship between seaward discharge and saltwater intrusion length in Humen

型的局限性。

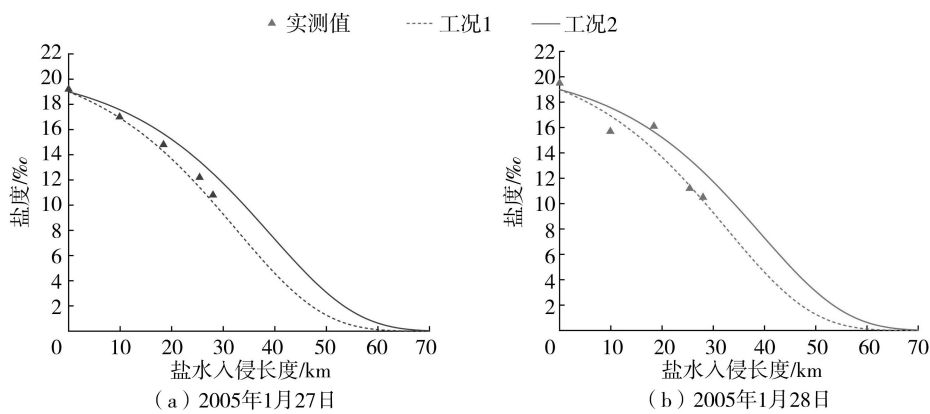


图 9 不同工况下虎门盐度沿程分布模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of simulated results of longitudinal salinity distributions in Humen under different scenarios

5 结 论

- a. 珠江口虎门由于纳潮量大,下游通常受潮汐影响显著,口门附近盐度梯度较小,盐度沿程变化较为平缓。盐度梯度向上游逐渐增大,并在盐水入侵末端附近再次减小,形成下游外凸、上游内凹的钟形过渡形态盐度沿程变化特征。范登伯格系数 K 是影响盐水入侵过程曲线形状的重要参数,而口门盐度混合系数 α_0 更多表征口门盐度扩散能力的强弱,并对盐水入侵长度具有直接影响。
- b. 两种解析模型均能较好模拟虎门盐度沿程分布并预测盐水入侵距离,但综合考虑计算精度和模型简便性,定常扩散系数解析模型在虎门盐度沿程分布模拟中更具适用性。东江来水对虎门水道盐度扩散具有显著影响,并呈现分区段变化特征。模型取用黄埔右下游水道的扩散特征,可显著提高其对东江影响河段纵向盐度分布变化的预测精度,但可能低估虎门盐水入侵的实际长度。

参考文献:

[1] 杨芳,陈文龙,卢陈,等. 粤港澳大湾区咸潮综合防控体系研究[J]. 水资源保护,2023,39(1):32-41. (Yang Fang, Chen Wenlong, Lu Chen, et al. Research on comprehensive prevention and control system of saltwater intrusion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):32-41. (in Chinese))

[2] 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 saltwater intrusion in three-dimensional idealized estuary to changes in runoff-tide forcing[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(3):96-102. (in Chinese))

[3] Gong Wenping, Maa J P Y, Hong Bo, et al. Salt transport during a dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta, China [J]. Ocean & Coastal Management,2014,100:139-150.

[4] Xu Yanwen, Zhang Wei, Zhu Yuliang, et al. Analytical solution for salt intrusion in multiple-freshwater-source estuaries: application to Humen Estuary[J]. Environmental Earth Sciences,2017,76(19):661.

[5] Savenije H H G. Salinity and tides in alluvial estuaries[M]. Amsterdam:Elsevier,2005:197.

[6] Ippen A T, Harleman D R F. One-dimensional analysis of salinity intrusion in estuaries [R]. Vicksburg: Army Engineer Waterways Experiment Station,1961.

[7] Fischer H B. Discussion of minimum length of salt intrusion in estuaries[J]. Journal of the Hydraulics Division,1974,100(5):708-712.

[8] Rigger B P. Minimum length of salt intrusion in estuaries[J]. Journal of the Hydraulics Division,1973,99(9):1475-1496.

[9] Prandle D. Salinity intrusion in estuaries[J]. Journal of Physical Oceanography,1981,11(10):1311-1324.

[10] Prandle D. On salinity regimes and the vertical structure of residual flows in narrow tidal estuaries[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1985,20(5):615-635.

[11] Matsoukis C, Amoudry L O, Bricheno L, et al. Investigating how river flow regimes impact on river delta salinization through idealized modeling[J]. Frontiers in Marine Science,2023,10:1075683 .

[12] Nguyen D, Savenije H H G. Salt intrusion in multi-channel estuaries;a case study in the Mekong Delta, Vietnam[J]. Hydrology & Earth System Sciences,2006,10(5):743-754.

[13] Zhang Erfeng,Savenije H H G,Wu Hui,et al. Analytical solution for salt intrusion in the Yangtze Estuary,China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2011,91(4):492-501

[14] Savenije H H G. A one-dimensional model for salinity intrusion in alluvial estuaries[J]. Journal of Hydrology,1986,85:87-109.

[15] 吴志勇,白博宇,何海,等. 珠江流域 1981—2020 年水文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):1-9. (Wu Zhiyong,Bai Boyu,He Hai,et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(1):1-9. (in Chinese))

[16] Biemond B,De Swart H,Dijkstra H A,et al. Estuarine salinity response to freshwater pulses [J]. Journal of Geophysical Research-Oceans,2022,127(11):e2022JC018669.

[17] 林中原,胡晓张,邹华志,等. 磨刀门咸潮上溯对河口拦门沙地形变化的响应研究[J]. 水资源保护,2024,40(5):104-111. (Lin Zhongyuan,Hu Xiaozhang,Zou Huazhi,et al. Study on the response of saltwater intrusion to morphological changes of estuarine bar in the Modaomen Estuary[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):104-111. (in Chinese))

[18] Hendrickx G G,Kranenburg W M,Antol3nez J A A,et al. Sensitivity of salt intrusion to estuary-scale changes:a systematic modelling study towards nature-based mitigation measures,estuarine[J]. Coastal and Shelf Science,2023,295:108564.

[19] Brockway R,Bowers D,Hoguane A,et al. A note on salt intrusion in funnel-shaped estuaries:application to the Incomati estuary, Mozambique[J]. Estuaries, Coastal and Shelf Science,2006,66:1-5.

[20] Van den Burgh P. Ontwikkeling van een methode voor het voorspellen van zoutverdelingen in estuaria,kanalen en zeeen[R]. Deltadienst;Rijkswaterstaat,1972.

[21] Savenije H H G. Rapid assessment technique for salt intrusion in alluvial estuaries [D]. Delft:International Institute for Infrastructure,1992.

[22] Xu Yanwen,Zhang Wei,Chen Xiuhua,et al. Comparison of analytical solutions for salt intrusion applied to the Modaomen estuary [J]. Journal of Coastal Research,2015,31(3):735-741.

(收稿日期:2024-10-17 编辑:胡新宇)

(上接第148页)

[14] 雷小途,陈联寿. 热带气旋风场模型构造及特征参数估算[J]. 地球物理学报,2005,48(1):25-31. (Lei Xiaotu,Chen Lianshou. A method to construct tropical cyclone wind distribution models and estimate its characteristic parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics,2005,48(1):25-31. (in Chinese))

[15] 江志辉. 热带气旋模型风场改进及其在 LAGFD-WAM 中的应用[D]. 青岛:国家海洋局第一海洋研究所,2007.

[16] Zhao Lin,Lu Anping,Zhu Ledong,et al. Radial pressure profile of typhoon field near ground surface observed by distributed meteorologic stations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2013,122:105-112.

[17] Fang Pingzhi,Ye Gengjiao,Yu Hui. A parametric wind field model and its application in simulating historical typhoons in the Western North Pacific Ocean[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2020,199:104-131.

[18] Hu Kelin,Chen Qin,Kimball S K. Consistency in hurricane surface wind forecasting:an improved parametric model[J]. Natural Hazards,2012,61(3):1029-1050.

[19] Wei C C. Study on wind simulations using deep learning techniques during typhoons:a case study of Northern Taiwan[J]. Atmosphere,2019,10(11):684.

[20] Chen Cheng,Lin Hongkun,Guan Dawei. Enhancing typhoon wave hindcasting with random forests and BP neural networks in the SWAN model[J]. Frontiers in Marine Science,2024,11:1472047.

[21] 宫崎正卫,Jelesnianski C P. 台风风暴潮预报技术手册[M]. 北京:海洋出版社,1982.

[22] Zhuo Jingyi,Tan Zhemin. Physics-augmented deep learning to improve tropical cyclone intensity and size estimation from satellite imagery[J]. Monthly Weather Review,2021,149:2097-2113.

[23] Willoughby H E,Rahn M E. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I:observations and evaluation of the Holland (1980) model[J]. Monthly Weather Review,2004,132(12):3033-3048.

[24] 江志辉,华锋,曲平. 一个新的热带气旋参数调整方案[J]. 海洋科学进展,2008,26(1):1-7. (Jiang Zhihui,Hua Feng,Qu Ping. A new scheme for adjusting the tropical cyclone parameters [J]. Advances in Marine Science,2008,26(1):1-7. (in Chinese))

[25] Fang Genshen,Zhao Lin,Song Lili,et al. Reconstruction of radial parametric pressure field near ground surface of landing typhoons in Northwest Pacific Ocean[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2018,183:223-234.

(收稿日期:2024-12-27 编辑:胡新宇)