

底摩擦优化的杭州湾垂直基准转换模型构建

王恒¹, 孙月文², 赵福玺¹, 丁加豪¹, 阳凡林¹

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 浙江省水利河口研究院(浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州 310020)

摘要:杭州湾区域受钱塘江强涌潮与舟山群岛复杂地貌的共同影响,水位变化剧烈,水动力环境复杂,基准转换工作困难。本研究基于有限体积海岸和海洋模型(FVCOM)潮波数值模拟,结合海面地形与精化大地水准面模型开展研究。针对潮汐模型中底摩擦系数对潮波传播特性的敏感性,提出一种基于代价函数优化底摩擦系数的改进方法。与传统潮汐数值模拟中普遍采用的常数型底摩擦设定不同,该方法结合实测水位数据构建代价函数,得到空间分布的底摩擦系数,更真实地反映潮波传播过程。对比结果表明,常数底摩擦系数条件下FVCOM潮汐模拟四个主要分潮的平均绝对误差为5.7 cm,优化后降至3.4 cm,精度提升40%。在此基础上,建立杭州湾区域的无缝深度基准面模型,经过订正后,深度基准面中误差由18.6 cm降至7.8 cm,基准转换模型中误差为11.21 cm,满足国际海道测量组织规范中对水深测量中垂向不确定度的要求,为之后河口水域垂直基准转换模型的构建提供了参考。

关键词:杭州湾;水动力模型;底摩擦系数;垂直基准转换;潮波数值模拟

中图分类号:P229

文献标志码:A

Vertical datum transformation modeling in Hangzhou Bay with optimized bottom friction coefficients

WANG Heng¹, SUN Yuewen², ZHAO Fuxi¹, DING Jiahao¹, YANG Fanlin¹

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary(Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310020, China)

Abstract: Due to the combined effects of the Qiantang River's powerful tidal bore and the intricate topography of the Zhoushan Archipelago, the Hangzhou Bay region experiences intense water level fluctuations and complex hydrodynamic conditions, making datum conversion challenging. Finite volume community ocean model (FVCOM) tidal wave numerical simulation, integrated with sea surface topography and a refined geoid model, was employed to carry out the study. To address the sensitivity of bottom friction coefficients to tidal wave propagation characteristics in tidal models, an improved method for optimizing bottom friction coefficients based on a cost function was proposed. Unlike the constant bottom friction setting commonly used in traditional tidal simulations, this method constructed a cost function using measured water level data to derive spatially distributed bottom friction coefficients, which more accurately reflected the process of tidal wave propagation. Comparison results indicate that the mean absolute error of the four major tidal constituents decreased from 5.7 to 3.4 cm after optimization, with an increase of approximately 40% in accuracy. Based on this, a seamless bathymetric datum model for the Hangzhou Bay region was established. After correction, the mean error in the bathymetric datum decreased from 18.6 to 7.8 cm, while the mean error in the datum transformation model was

收稿日期:2025-09-13

基金项目:青岛市自然科学基金项目(24-8-4-zrjj-2-jch)

作者简介:王恒(2001—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事海洋潮汐分析相关研究工作。

阳凡林(1974—),男,湖北荆州人,教授,博士,主要从事海底地形测量和海洋定位导航方面的研究,本文通信作者。E-mail: yang723@163.com

11.21 cm. These results meet the vertical uncertainty requirements for bathymetric measurements specified in the regulations of International Hydrographic Organization (IHO), providing a reference for subsequent development of vertical datum transformation models in estuarine waters.

Key words: Hangzhou Bay; hydrodynamic model; bottom friction coefficient; vertical datum transformation; wave numerical simulation

随着我国海洋强国战略的推进,水深测量在海洋测绘、港口建设、风电和跨海通道等工程中的作用日益突出,其精度依赖于统一的深度基准面。该基准面通常由分潮调和常数推算,反映一定时期内最低海面。由于区域差异,深度基准面的定义并不统一,因此陆海高程与深度基准的转换尤为关键。美国国家海洋和大气管理局(national oceanic and atmospheric administration, NOAA)开发了 VDatum (vertical datum transformation)工具,可支持 30 余种垂直基准转换,解决跨部门、跨区域的数据差异^[1]。加拿大提出的 HyVSEP(hydrographic vertical separation surfaces)系列产品,利用潮位观测、卫星测高和地球物理跟踪技术实现海图基准与椭球面转换^[2];澳大利亚和英国则构建了区域性垂直基准转换方案^[3-4]。上述方法在常规近岸及外海区域效果良好,但在强潮河口仍面临挑战。

早期,在潮汐变化平缓、验潮站密集区域多采用空间插值构建海潮模型。20 世纪中期,基于流体动力学方程的数值模型兴起,结合卫星测高资料显著提升了潮汐模拟能力。目前,潮汐数值模拟可在给定海底地形和开边界条件下有效再现潮波传播,对缺乏观测的区域尤为重要。

潮汐模拟基于潮汐动力学理论,能够有效刻画潮高、潮流在水深变化、天文引潮力、科氏力、底摩擦以及岸线边界条件等因素共同作用下的演变过程,已广泛应用于不同类型海域与问题的研究。在区域尺度上,国内学者^[5-6]利用有限体积海岸和海洋模型(finite volume community ocean model, FVCOM),在广西北部湾和福建连江海域建立了三维潮汐潮流模型,系统揭示了潮汐和余流环流特征,并通过与验潮站资料对比验证了模型的可靠性。在风暴潮事件中,任成才等^[7]利用 MIKE21 模拟了飓风“桑迪”期间纽约长岛的风暴潮过程,进一步研究地形与天文潮共同作用下的增水分布差异。国外学者^[8]利用高分辨率 FVCOM 模型对加拿大海域进行数值实验,结果显示模型能较好再现近岸潮流特征,并探讨了淡水径流输入对模拟精度的影响。对于更大尺度的海域,陈昌刚等^[9]通过不同初始场与开边界条件设置,开展了黄海及东中国海的敏感性试验,验证了外部强迫对流场结构具有显著影响;黄新禹等^[10]利用灵活性全球大气-海洋-陆地系统模式(flexible global ocean-atmosphere-land system model grid-point version 3, FGOALS-g3)耦合模式模拟全球海洋正压潮,付庆军等^[11]利用普林斯顿海洋模型(princeton ocean model, POM)对全球 M_2 正压潮波开展数值实验,两者均通过不同模式体系验证了大尺度正压潮模拟方法的可靠性与适用性。

在基准转换研究方面,柯灏等^[12]曾在长江口开展垂直基准转换建模试验,并验证了模型精度,说明数值模拟方法不仅是潮汐动力研究的重要工具,也可为深度基准面的构建与转换提供有效支撑。然而,与长江口相比,杭州湾受到强烈涌潮影响,涌潮前后潮位、流速和流量发生突变^[13-15],使得现有潮汐模型在水位模拟和参数化方面面临更大挑战。因此,在杭州湾开展深度基准面的构建研究,不仅有助于检验和拓展数值模拟方法在强潮河口条件下的适用性,加深对涌潮主导型河口潮汐动力过程的认识,也对该区域高精度测深、海洋测绘及工程建设等具有重要的应用价值。

在模型参数中,底摩擦系数对潮波传播特性与模拟精度的影响尤为显著。传统模型多采用谢才公式(Chezy formula)计算底摩擦系数,但与实际存在差异;在引入与水深相关的曼宁公式(Manning formula)后,模拟效果显著提升。滕飞等^[16]在渤、黄、东海研究中证实了曼宁(Manning)型优于谢才(Chezy)型;Zhang 等^[17]利用卫星测高数据结合伴随同化方法反演黄渤海底摩擦分布,提升了模型精度,但近岸分辨率不足。因此,底摩擦系数的优化仍是近岸复杂区域潮汐建模的关键问题。

本研究在前人研究基础上,利用 FVCOM 开展三维潮波数值模拟,优化研究区域随空间变化的底摩擦系数,结合水位数据构建代价函数,得到空间分布的曼宁系数,进而得到精细化的杭州湾区域深度基准面模型与基准转换模型。

1 垂直基准转换的方法与原理

受潮汐引力的影响,瞬时水深是一个随时间变化的量。为规范水深测量值,需要确定一个稳态的基准面并将水深测量成果转换到该基准面上,即深度基准面,其与平均海平面的距离由当地的潮差大小决定。

图 1 为海域中各基准面之间的空间相对关系。其中, H_{MSS} 表示平均海面(mean sea surface, MSS)基于参考椭球面的大地高; L 表示理论最低潮面在平均海面下的距离; ζ 表示平均海面与大地水准面之间的差异,称为海面地形; N 表示高程异常,即大地水准面与参考椭球面的距离。区域内基于平均海面、大地水准面、深度基准面和椭球面基准的高程均可通过 L 、 ζ 、 N 三个值相互转换。对于河口区域而言,由于水动力条件复杂,水位变化剧烈,使得基准面之间的转换关系不稳定,从而给高程基准转换模型的构建带来了更大的困难。

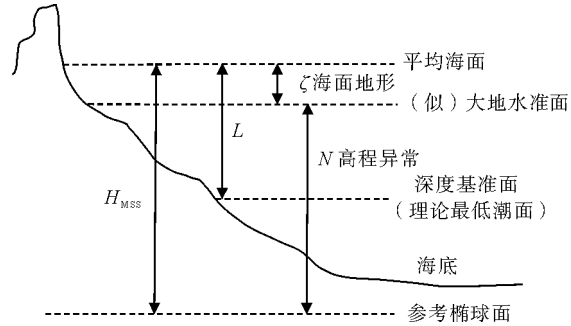


图 1 海域各垂直基准面空间关系示意图

Fig. 1 Spatial relationship of each vertical datum in sea area

1.1 潮汐模型构建与底摩擦优化方法

本研究采用基于 FVCOM 的潮汐数值模拟方法,结合高分辨率地形、开边界及实测潮汐资料,开展潮汐模型构建。在常规的潮汐数值模拟中,底摩擦系数通常被简化为全域常数,以降低参数设置的复杂性。然而,实际海域中底摩擦作用受地形起伏、沉积物粒径及局地水动力条件等因素的共同控制,表现出显著的空间差异。采用单一常数往往难以准确再现复杂区域的潮波传播过程,从而影响模拟精度。为分析底摩擦参数对模型性能的影响,设置两组对比方案:第一组采用常数底摩擦系数,其数值由后文推导公式计算得到;第二组采用随空间变化的底摩擦系数,通过模型优化方法反演得到。

对于底摩擦系数的计算,根据阻力平方定律,底部摩擦应力 $\bar{\tau}_b$ 计算方法如下:

$$\bar{\tau}_b = \rho_0 c_d \bar{u}_b |\bar{u}_b| \quad (1)$$

式中: ρ_0 是水体密度; c_d 是底托曳力系数; $\bar{u}_b$ 是为底部之上(水平方向)流速,对于二维计算而言,即为垂向平均的水平流速。

在 FVCOM 中,底摩擦系数表示为 C_f 与 c_d ,在物理意义上等价,均用于表征底边界动量交换的强度。其表达式为:

$$C_f = \max \left[\kappa^2 / \ln \left(\frac{z_{ab}}{z_0} \right)^2, 0.0025 \right] \quad (2)$$

式中: κ 为卡门常数,一般取值为 0.4; z_{ab} 表示海水最底部水层的厚度,由模型内部计算公式通过海水深度计算得到(一般取垂向分层中底层厚度的一半); z_0 为海底粗糙高度,取值一般与海底泥沙粒径有关;式(2)中设置下限值 0.0025,以防止因底摩擦系数过小导致数值不稳定。因此在模型水深确定的基础上,海底摩擦系数仅与海底粗糙高度有关,该计算公式主要应用于大洋等大陆架以外、水深较大、泥沙颗粒较大的海域。

对于不同底质的海床, C_f 值相差较大,对于淤泥质海床,底摩擦系数远小于 0.0025,不能采用此式计算^[18]。黄学智^[18]利用 FVCOM 分析渤海多组实验中不同底摩擦系数对模拟结果的影响,并引入曼宁系数,建立海底粗糙高度 z_0 与曼宁系数之间的关系表达式:

$$C_f = \frac{1}{\left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\Delta z_b}{z_0} \right) \right]^2} \quad (3)$$

$$z_0 = m k_s \quad (4)$$

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \quad (5)$$

式中: m 为常数, 一般取值为 $1/30$; k_s 是海底糙率尺寸, 与海底粒径特征相关; Δz_b 为最底部水层厚度; M 为曼宁系数, 单位为 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$, 是底摩擦的经验参数形式, 可与 C_f 相互转换。因此优化曼宁系数可实现对底摩擦参数的优化, 并可推导得到底摩擦设置常数。

为优化底摩擦系数, 在模型构建过程中, 将水深数据、开边界条件及初始底摩擦输入潮波模式, 并以验潮站观测调和常数作为约束建立代价函数。通过迭代更新调整矩阵, 逐步修正曼宁系数, 最终得到随地形变化的空间分布式曼宁参数模型。代价函数为:

$$J(M) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\zeta_i^{\text{mod}}(M) - \zeta_i^{\text{obs}}]^2 \quad (6)$$

式中: $\zeta_i^{\text{mod}}(M)$ 为模型在曼宁系数 M 下的模拟潮位, ζ_i^{obs} 为观测潮位, N 为观测点总数。通过最小化该代价函数, 更新底摩擦结果, 并通过迭代优化得到空间分布的曼宁系数。

1.2 连续深度基准面构建方法

深度基准面计算方法有很多, 我国目前普遍采用弗拉基米尔斯基算法, 通过潮位调和常数推算理论最低潮面。然而, 该方法依赖离散验潮站资料, 易受观测时段差异及空间分布不均的影响, 导致计算结果误差较大, 相邻测区难以实现无缝衔接, 从而影响测深与制图的一致性。几何拟合虽在一定程度上缓解了这一问题, 但缺乏潮汐物理约束, 难以保持深度基准面的理论一致性。针对上述不足, 基于潮汐数值模拟结果构建连续的 L 值模型, 使其更全面地反映强潮河口区域的潮汐变化特征, 显著提高深度基准面的连续性与合理性。与传统几何拟合方法相比, 基于水动力过程驱动的构建方式能够体现径流对水位的调制作用, 从而为深度基准面的构建提供更具物理机制约束的解决方案。

1.3 海面地形与大地水准面模型构建方法

海面地形是指海平面相对于大地水准面的高度差, 能够反映海洋表面的细微起伏。针对河口区域, 基于验潮站潮位数据构建海面地形模型。通过预处理观测数据并采用空间插值方法, 将离散潮位推广至数值网格。在杭州湾这类地形平缓的区域, 验潮站数据具有代表性, 插值结果精度较高。最终生成的海面地形场与数值网格结合, 并通过独立站点验证其准确性与适用性。

大地水准面采用 EGM2008(earth gravitational model 2008) 进行计算。该模型由美国国家地理空间情报局发布, 基于 WGS84(world geodetic system-1984) 椭球, 分辨率 $5' \times 5'$, 融合了 GRACE(gravity recovery and climate experiment) 卫星跟踪、卫星测高和地面重力数据, 具有较高的精度水平^[19]。本研究采用 EGM2008 计算大地水准面, 并结合已有控制点进行区域精化, 以提升其在杭州湾的适用性和精度。

2 杭州湾陆海无缝垂直基准转换模型构建

2.1 数据准备

选取杭州湾作为研究对象, 主要基于其典型性: 一方面, 从地貌特征角度分析, 杭州湾作为钱塘江入海形成的喇叭形河口湾, 地形结构“外宽内窄”, 岸线曲折, 并受舟山群岛岛链屏障影响, 构成复杂地形系统, 从而显著影响潮波在湾内的传播路径、振幅放大及相位变化过程; 另一方面, 水动力环境方面, 该海域同时承受长江与钱塘江两大流域的径流注入, 在河流与潮汐共同作用下形成典型河口动力环境。如图 2 所示, 该区域受非线性潮波变形、潮滞效应及径流的共同作用, 潮位剧烈波动, 对基准面构建与转换提出了更高要求。

研究前期已收集杭州湾区域的岸线、水深及水位等基础资料, 其中岸线和部分水深数据来自浙江省水利河口研究院。水位资料包括开边界潮位强迫与沿岸验潮站观测数据两类。开边界强迫潮位来自全球潮汐模型 FES2014(finite elements solution 2014), 分辨率为 $(1/16)^\circ \times (1/16)^\circ$, 已有研究表示, FES2014 模型相较于其他潮汐模型在杭州湾区域的精度更高^[20]。验潮站资料包括杭州湾及其周边共 23 个长期潮位观测站点, 为模型验证提供了可靠依据。

此外, 杭州湾受钱塘江入海口径流影响显著, 需考虑钱塘江流量对水位的影响, 钱塘江径流流量数据采用上游富春江大坝实测逐日平均流量, 时间为 2019 年 1 月 1 日至 12 月 31 日, 如图 3 所示。

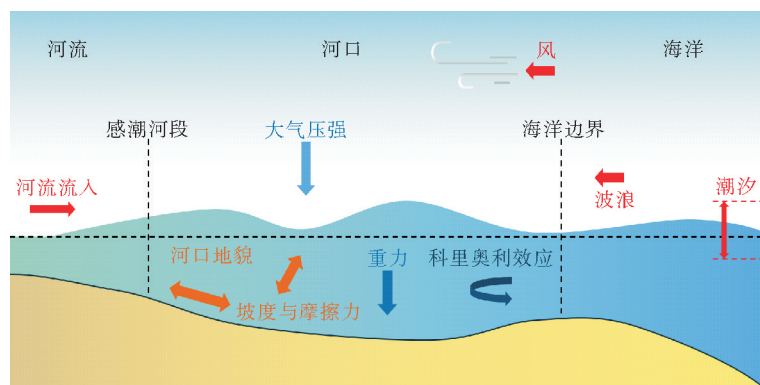


图2 影响河口水位变化的动力机制图解

Fig. 2 Illustration of dynamic mechanisms affecting water level variations in estuarine regions

2.2 底摩擦系数优化与潮汐模型构建

在底摩擦系数优化方面,依据式(3)~(5)建立了粗糙高度 z_0 与曼宁系数之间的关系式。该关系式利用网格点处的水深与海底粗糙高度计算摩擦系数,并在地形确定后,通过粗糙高度控制底摩擦。根据前人^[21]研究,杭州湾泥沙粒径为0.01 mm,属黏土质粉砂,岸线类型为淤泥质海岸,推导得到曼宁系数常数为 $54.44 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ 。

为优化底摩擦系数,通过最小化式(6)的代价函数,使模型输出与观测结果的偏差尽可能减小,反演得到随空间分布的曼宁系数(取值范围20~90)。

对两组曼宁系数模拟对比,同时考虑振幅与迟角的误差对比,绝对误差为:

$$\Delta = |\Delta H| \cdot \cos |\Delta G| + |\Delta H| \cdot \sin |\Delta G| \quad (7)$$

式中: ΔH 和 ΔG 分别表示振幅误差与迟角误差。

结果表明(图4),采用第二组曼宁系数时,模型模拟精度明显优于第一组,其中半日分潮的改进尤为显著,验证了杭州湾底摩擦是潮能耗散的主要原因。尽管在第一组中有个别验潮站点表现更优,但整体上以第二组模型精度更高,说明合理的底摩擦分布能够有效提升潮波系统的模拟性能。当底摩擦系数设为常数时,四分潮的绝对平均误差为5.7 cm;采用随地形变化的底摩擦系数后,四分潮的绝对平均误差降至3.4 cm,精度提升40%。

模拟实验设置上,模型采用内外模分离的计算方式,外模时间步长为2 s,内模时间步长为10 s,内外模步长比为1:5;采用笛卡尔坐标系,垂向方向采用3层 σ 坐标分层,陆地边界处的流速设为0。非同化模型以冷启动方式运行,初始温度和盐度分别设为10℃和18 psu。模拟时段为2019年1月1日—4月1日,开边界条件由非同化模型输出的潮位与流速分量提供。为提升运行效率,在模型边界和强迫项中同时施加 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 S_1 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 M_4 、 MS_4 和 M_6 共11个主要分潮的调和分量,而非分别针对单一分潮进行独立计算。

对模拟结果进行中期调和分析,得到研究区域各网格点11个主要分潮的调和常数。网格采用不规则三角形剖分,开边界处网格分辨率为10 km;岸线分辨率50~1 000 m,在岛屿及岸线变化复杂区域加密处理,整体分辨率500 m。对于长周期 S_a 和 S_{sa} 分潮,由于其空间分布较均匀,可利用长期验潮站资料进行调和分析,并通过反距离加权插值方法推算至各网格点,最终获得杭州湾区域13个主要分潮的调和常数。

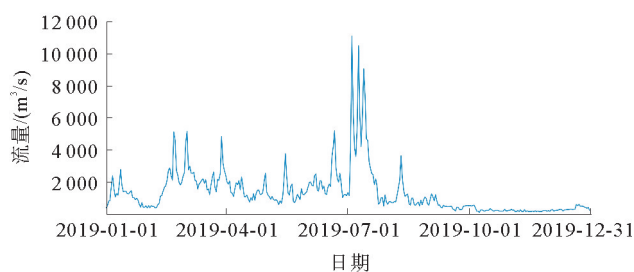


图3 2019年富春江大坝实测逐日平均流量

Fig. 3 Measured daily average discharge of Fuchun River Dam in 2019

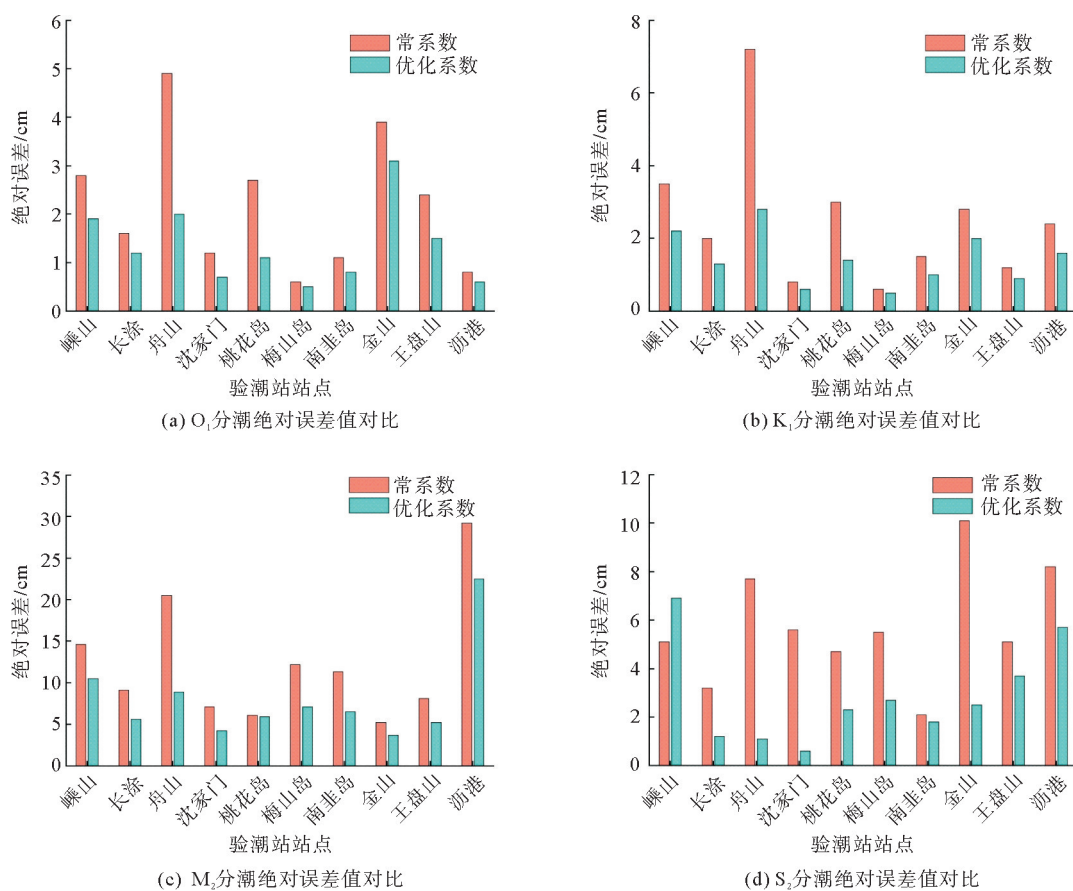


图 4 两组不同底摩擦系数对比结果

Fig. 4 Comparison results of two groups with different friction coefficients at the bottom

2.3 深度基准面模型构建

在构建杭州湾区域潮汐模型后,根据《海道测量规范》^[22-23]对于深度基准面确定的标准计算 L 值。构建杭州湾区域空间分布连续的深度基准面模型(图 5),其分辨率与 FVCOM 模拟时的三角形网格有关,约为 500 m。

2.4 海面地形与大地水准面模型构建

根据海道测量规范要求,杭州湾区域的大戟山、大洋、定海、岱山、海中平台、滩浒山、王盘山、芦潮港、金塘和澈浦 10 个长期验潮站均具备 2 年以上的连续水位观测数据,通过计算每小时水位的平均值求取各站的平均海面,并将其潮位零点统一归算至 1985 国家高程基准。利用这些验潮站的平均海面数据,采用反距离加权方法进行空间插值,构建杭州湾区域的海面地形模型(图 6)。

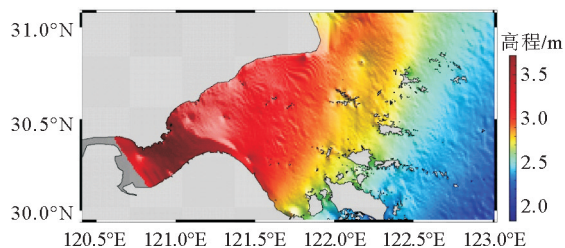


图 5 基于 FVCOM 建立的杭州湾连续深度基准模型

Fig. 5 Benchmark model of continuous depth of Hangzhou Bay based on FVCOM

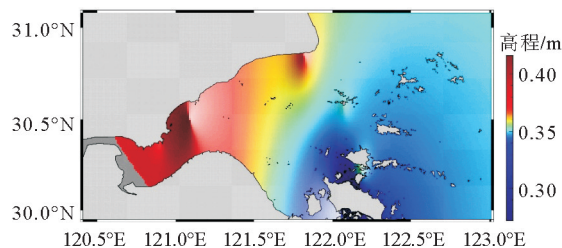


图 6 杭州湾区域海面地形模型

Fig. 6 Sea surface topography model of Hangzhou Bay region

基于上述方法,构建杭州湾区域深度基准与高程基准之间的转换模型。该模型通过计算各网格点的深度基准与 85 高程基准差值,实现水深测量数据与高程数据的转换。

该区域的大地水准面模型选择“移去-拟合-恢复”法构建,该方法利用重力场模型 EGM2008 和数学拟合方法计算,并联合部分全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)控制点水准数据资料,通过计算得到各点位的水准面的高程异常,经过二次曲面拟合,得到区域内的高程异常,实现对大地水准面模型的精化,如图 7 所示。该区域的大地水准面变化趋势较为简单,由河口内向河口外逐渐递增。

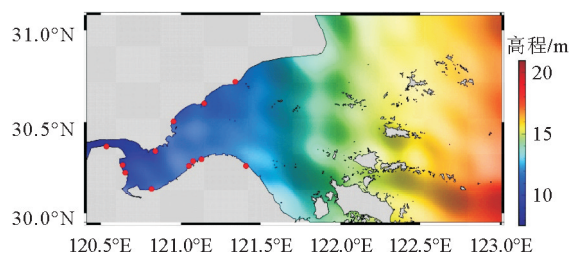


图 7 杭州湾区域大地水准面模型及部分控制点位置

Fig. 7 Geoid model of Hangzhou Bay region and location of some control points

3 模型精度评估

3.1 L 值模型评估

在完成模型构建后,为验证所建立的深度转换模型的可靠性和适用性,对 L 值模型、海面地形与大地水准面模型计算结果进行精度评估。计算得到各网格点 L 值后,与杭州湾区域 14 个长期验潮站的已有基准成果进行对比,如表 1 所示,以海军航保部长期实测统计成果为真值,分析本研究方法计算所得 L 值及其偏差。

表 1 参与计算的 14 个验潮站海军 L 值与计算 L 值对比

Table 1 Comparison of navy L -values and calculated L -values for the 14 participating tide gauge stations

验潮站	纬度/°N	经度/°E	海军 L 值/m	计算 L 值/m	L 值误差绝对值/m
嵎山	30.717	122.800	2.58	2.450	0.130
长涂	30.250	122.300	2.38	2.616	0.236
舟山	29.950	122.300	2.52	2.326	0.194
沈家门	29.947	122.319	2.52	2.363	0.157
桃花岛	29.827	122.227	2.10	2.229	0.129
梅山岛	29.806	122.028	2.34	2.413	0.073
南韭岛	29.427	122.187	2.60	2.488	0.112
金山	30.733	121.371	3.11	3.273	0.163
王盘山	30.502	121.334	3.20	3.378	0.178
沥港	30.077	121.848	2.05	2.178	0.128
乍浦	30.600	121.129	3.56	3.557	0.003
海盐	30.460	120.641	3.92	3.354	0.566
高亭	30.238	122.200	2.30	2.581	0.281
绿华山	30.820	122.608	2.63	2.576	0.054

总体来看,计算 L 值与海军 L 值具有较好一致性,平均误差为 0.172 m,中误差为 0.186 m,表明模型精度较高,误差分布相对集中。绝对误差最大值出现在海盐站,大多数站点误差绝对值在 0.2 m 以内,表明本研究方法在绝大部分区域具有良好的适用性,尤其在外海区域表现更稳定。

与主流全球潮汐模型 FES2014、FES2022、EOT20 (Empirical Ocean Tide 2020)、TPXO10.2 (TOPEX/Poseidon Cross-Over global tidal model version 10.2) 对比,本研究基于水动力模型方法构建的区域水动力模型在多数验潮站的 L 值优于主流全球潮汐模型,平均绝对误差最小,整体精度更高(图 8)。特别是在舟山、沈家门、嵊山等站点,FVCOM 模拟方法的误差明显小于全球模型,具有较强的区域适应性和对复杂海岸地形的适应能力。

以离散验潮站的 L 值误差作为依据,对各网格点的 L 值进行反距离加权订正,订正后的结果如图 9 所示。

对于订正后的 L 值模型,可根据经纬度坐标得到区域内任一点的 L 值,为确保订正后得到正确的 L 值模型,并验证订正的效果与精度,选取滩浒、岱山和澈浦 3 个未参与订正计算的验潮站作为验证站,对比海军航保部已有成果和订正后结果,对比订正前与订正后的误差绝对值,结果如表 2 所示。结果表明,滩浒、岱山和澈浦 3 个验潮站的深度基准在订正后与海军航保部成果更为接近,其精度得到明显改善,滩浒站 L 值误差由 0.376 m 减小到 0.132 m,提升 64.9%,表明订正可有效减小误差;岱山站由 0.282 m 减小到 0.029 m,提升 89.7%;澈浦站由 0.593 m 减小到 0.059 m,提升 90.1%,整体平均误差为 0.073 m,提升 70%,订正后的结果更接近真实值,深度基准面中误差为 7.8 cm。

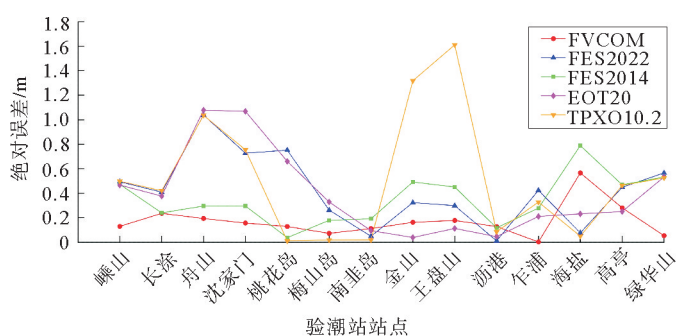


图 8 验潮站处潮汐模型与本研究方法 L 值计算结果对比

Fig. 8 L -value comparison between tidal model and this study at tide gauge stations

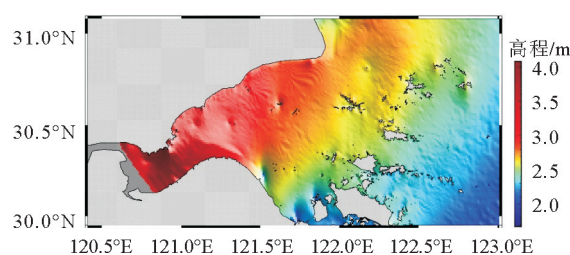


图 9 订正后杭州湾深度基准 L 值模型

Fig. 9 Revised depth datum L -value model of Hangzhou Bay

表 2 验证站海军 L 值与计算 L 值及订正后结果对比表

Table 2 Comparison of verification station naval L -values, calculated L -Values, and revised results

验潮站	纬度/°N	经度/°E	海军 L 值/m	计算 L 值/m	订正后 L 值/m	订正前误差绝对值/m	订正后误差绝对值/m
滩浒	30.617	121.617	2.76	3.136	2.892	0.376	0.132
岱山	30.233	122.200	2.30	2.582	2.329	0.282	0.029
澈浦	30.376	120.914	4.14	3.578	4.081	0.563	0.059

3.2 海面地形与大地水准面模型评估

对于海面地形模型,通过验潮站水位数据均值插值得到模型,与 L 值模型类似,使用滩浒、岱山、澈浦 3 个验潮站检验,得到的误差分别为 5.84、1.44、3.63 cm,选择其中的最大误差 5.84 cm 作为杭州湾区域海面地形的模型中误差。EGM2008 模型在全球海域的精度为 5.8~6.1 cm,而在本研究区,结合 GNSS 控制点评估,大地水准面模型最大误差为 11.75 cm,平均误差为 4.72 cm,模型中误差为 5.54 cm。根据误差传播定律,由深度基准面、海面地形和大地水准面 3 个模型的中误差,计算整体垂直基准转换模型的中误差估值为 11.21 cm。

国际海道测量组织(international hydrographic organization, IHO)在其发布的《IHO 标准 S-44:水深测量标准》中,对不同测量等级的水深测量精度提出具体要求^[22]。IHO 将水深测量分为多个等级,不同等级对应不同的测量目标和应用场景。其中,对于测深的精度要求为垂向不确定度(total vertical uncer-

tainty, TVU), 数学表达式为 $T_{\text{vu}_{\max}} = \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2}$, 其中 a 为固定误差, 与测量系统的系统误差相关, b 为深度相关误差的比例因子, d 为水深。杭州湾区域水深范围在 10~70 m, 符合一级的水深测量精度要求, 参数 a 与 b 的取值分别为 0.5 m 和 0.013, 据此计算垂向不确定度的范围为 51.7~103.8 cm。由此可见, 本研究所构建的垂直基准转换模型的误差远小于 IHO 的规范要求, 具有实际应用价值, 为河口区域后续基准转换研究提供参考价值。

4 结论

1) 在杭州湾强潮河口区域, 常数底摩擦系数条件下 FVCOM 潮汐模拟 4 个主要分潮的平均绝对误差为 5.7 cm; 采用基于代价函数优化得到的空间分布式曼宁系数后, 平均绝对误差降至 3.4 cm, 精度提升 40%, 表明底摩擦系数优化对提高潮汐模拟精度具有显著作用。

2) 基于优化后的潮汐模拟结果构建杭州湾区域连续深度基准面模型, 并结合验潮站成果进行订正后, 深度基准面 L 值模型中误差为 7.8 cm, 相较订正前显著降低, 在空间连续性和精度水平上均得到明显改善。

3) 在深度基准面模型、海面地形模型及精化大地水准面模型基础上, 建立杭州湾区域陆海无缝垂直基准转换模型, 其综合中误差为 11.21 cm, 远小于国际海道测量组织的垂向不确定度要求, 具备实际工程应用可行性。验证结果表明, 基于底摩擦系数优化的水动力模型在舟山、沈家门、嵊山等典型站点的 L 值计算精度明显优于主流全球潮汐模型, 表明该方法在复杂岸线和强潮河口区域具有更强的区域适应性。

综合分析表明, 通过引入观测约束对关键水动力参数进行优化, 可有效提升强潮河口区域潮汐模拟精度, 并进一步提高深度基准面及垂直基准转换模型的可靠性, 为类似河口海域的垂直基准构建提供可行的技术路径。

参考文献:

- [1] PARKER B, MILBERT D, HESS K, et al. National VDatum: The implementation of a national vertical datum transformation database[C]//Proceedings of the US Hydrographic Conference, Biloxi, Mississippi, Mar. 23-27, 2003: 24-27.
- [2] ROBIN C, NUDDS S, MACAULAY P, et al. Hydrographic vertical separation surfaces (HyVSEPs) for the tidal waters of Canada[J]. Marine Geodesy, 2016, 39(2): 195-222.
- [3] ILIFFE J C, ZIEBART M K, TURNER J F, et al. Accuracy of vertical datum surfaces in coastal and offshore zones[J]. Survey Review, 2013, 45(331): 254-262.
- [4] KEYSERS J H, QUADROS N D, COLLIER P A. Vertical datum transformations across the Australian littoral zone[J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31(1): 119-128.
- [5] 韦聪, 陈波. 北部湾三维潮汐潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(增1): 1-10.
WEI Cong, CHEN Bo. Numerical simulation of 3-D tide and tidal current in the Beibu Gulf[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(S1): 1-10.
- [6] 于寒, 刘桂梅, 纪棋严, 等. 基于 FVCOM 的福建连江海域潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 1-12.
YU Han, LIU Guimei, JI Qiyang, et al. Numerical simulation of tide and tidal current in Lianjiang sea area of Fujian province based on FVCOM[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(6): 1-12.
- [7] 任成才, 沈瑞杰, 屠泽杰, 等. 台风“桑迪”登陆期间纽约长岛附近海域风暴潮数值模拟[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 13-20.
REN Chengcai, SHEN Ruijie, TU Zejie, et al. Numerical simulation of storm surge in Long Island, New York during Hurricane Sandy's landfall[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(2): 13-20.
- [8] RUTHERFORD K, BIANUCCI L, FLOYD W. A simple approach to represent precipitation-derived freshwater fluxes into nearshore ocean models: An FVCOM4.1 case study of Quatsino Sound, British Columbia[J]. Geoscientific Model Development, 2024, 17(15): 6083-6104.
- [9] 陈昌刚, 丁扬, 姚志刚, 等. 基于 FVCOM 多种定解条件的数值分析与评估[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(3): 397-411.
CHEN Changgang, DING Yang, YAO Zhigang, et al. Numerical analysis and evaluation based on multiple definite solu-

- tion conditions of FVCOM[J]. *Advances in Marine Science*, 2023, 41(3): 397-411.
- [10] 黄新禹, 王彩霞, 魏吉林, 等. 耦合模式 FGOALS-g3 对全球海洋潮汐的模拟评估[J]. *海洋学报*, 2024, 46(8): 63-73.
HUANG Xinyu, WANG Caixia, WEI Jilin, et al. An assessment of global ocean tide simulation by a coupled climate model FGOALS-g3[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(8): 63-73.
- [11] 付庆军, 林磊, 谭伟, 等. 基于 POM 的全球 M_2 正压潮数值模拟[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(3): 31-40.
FU Qingjun, LIN Lei, TAN Wei, et al. Simulation of global M_2 barotropic tide based on POM[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2024, 43(3): 31-40.
- [12] 柯灏, 赵建虎, 周丰年, 等. 联合大地水准面、海面地形和潮波运动数值模拟的长江口陆海垂直基准转换关系[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(5): 731-737.
KE Hao, ZHAO Jianhu, ZHOU Fengnian, et al. Establishment of sea-land vertical datum transformation for hydrography combining with geoid, sea surface topography and numerical simulation of tidal wave motion in the Yangtze estuarine waters[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(5): 731-737.
- [13] 劳聪聪, 曾剑, 夏军强, 等. 径流与涌潮对钱塘江尖山潮滩演变的影响分析[J]. *水科学进展*, 2024, 35(3): 463-474.
LAO Congcong, ZENG Jian, XIA Junqiang, et al. Evolution of tidal flats influenced by tidal bores and runoff in the Qiantang Estuary, China[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(3): 463-474.
- [14] 潘存鸿, 郑君, 胡成飞, 等. 钱塘江涌潮影响因素研究[J]. *泥沙研究*, 2023, 48(1): 13-20.
PAN Cunhong, ZHENG Jun, HU Chengfei, et al. Study on the impact factors of tidal bore on the Qiantang River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(1): 13-20.
- [15] 黄婷, 张怀, 石耀霖. 基于 Boussinesq 型方程的钱塘江涌潮数值模拟[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(1): 79-95.
HUANG Ting, ZHANG Huai, SHI Yaolin. Numerical simulation of the tidal bore in the Qiantang River based on Boussinesq-type equations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(1): 79-95.
- [16] 滕飞, 方国洪, 魏泽勋, 等. Chezy 型和广义 Manning 型摩擦关系在渤、黄、东海陆架潮汐模拟中的应用[J]. *海洋与湖沼*, 2016, 47(4): 696-705.
TENG Fei, FANG Guohong, WEI Zexun, et al. Tidal simulation in Chezy-type and generalized Manning-type friction for Chinese eastern shelf seas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(4): 696-705.
- [17] ZHANG J C, CHEN H B. Semi-idealized study on estimation of partly and fully space varying open boundary conditions for tidal models[J/OL]. *Abstract and Applied Analysis*, 2013. DOI:10.1155/2013/282593.
- [18] 黄学智. 基于 FVCOM 的黄渤海潮汐潮流的数值模拟[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016.
HUANG Xuezhi. Numerical simulation of tide and tidal current in the Bo Sea and Yellow Sea based on the FVCOM [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2016.
- [19] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008(EGM2008)[J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B4). DOI:10.1029/2011JB008916.
- [20] 周东旭, 孙维康, 付海德, 等. 三种最新全球海潮模型在中国沿海的精度评估[J]. *海洋科学进展*, 2023, 41(1): 54-63.
ZHOU Dongxu, SUN Weikang, FU Haide, et al. Accuracy assessment of three latest global ocean tide models in coastal areas of China[J]. *Advances in Marine Science*, 2023, 41(1): 54-63.
- [21] 周琦林. 基于 FVCOM 模拟钱塘江河口围涂工程对杭州湾水动力及水质的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
ZHOU Qilin. Numerical simulation on the influence of Qiantang Estuary reclamation on the hydrodynamics and water quality of Hangzhou Bay based on FVCOM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2023.
- [22] International Hydrographic Organization. IHO standards for hydrographic surveys; S-44 edition 6. 1. 0[S]. Monaco: International Hydrographic Organization, 2022.
- [23] 中国人民解放军海军参谋部. 海道测量规范: GB 12327—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

(责任编辑: 高丽华)