

基于SCHISM的中国近海潮汐二维数值模拟

付慧卿^{1,2}, 吴伦宇^{1,2}, 季轩梁^{1,2}, 李云^{1,2*}, 张苗茵^{1,2}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 基于非结构半隐式跨尺度海洋模式 SCHISM 构建了中国及临近海域的二维潮汐模型, 针对多源资料开展了模型验证工作并进行系列数值实验。经潮汐调和得到 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 的调和常数和对应同潮图, 并将无潮点位置同前人研究结果进行比较, 与沿海 114 个验潮站和 FES2014 潮汐模型的调和常数进行验证, 并与部分现场实测水位序列进行对比, 结果表明该模型能较好地模拟中国海域的潮汐特征。本文还定量评估了自吸-负荷潮对数值模拟的影响, 其中 M_2 分潮受其影响最大, 其振幅在浙闽一带可达 20 mm 以上; 提升区域分辨率与添加浅水分潮等敏感性实验结果表明, 当局地分辨率由 3 km 提升至 100 m 后, 模拟精度可提高约 30%, 而添加浅水分潮后, 部分区域的模拟精度最大可提高约 8%。

关键词: 中国近海; 潮汐; 数值模拟; 底摩擦

中图分类号: P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)05-0001-14

0 引言

潮汐是由太阳、月球的引力及地球自转而形成的海水周期性涨落现象, 与人类的生活生产有深刻紧密的联系。在渔业领域, 潮汐的周期性变化直接影响着海洋生物的繁殖行为^[1], 因此主管部门常基于幼鱼种类的组成和季节分布特征对渔民捕捞进行管控。在工业领域, 沿海地区的工业设施(如水力发电站等)布局需考虑到潮汐对水流的影响以提高发电效率^[2]。此外, 由潮汐引起的水深变化直接影响船舶的进出港^[3]。在极端天气(如台风袭击)下, 风暴潮增水和潮汐的高潮叠加会导致沿海地区水位显著增高从而引发灾害性洪水^[4]。研究潮汐的运动规律有利于推动我国经济增长并预防极端天气下的海洋灾害。潮汐研究可追溯到近代十七世纪, 牛顿于 1687 年根据万有引力定律对潮汐现象进行解释并提出了平衡潮理论, 该理论在后续几十年经由伯努利、欧拉等人不断完善发展, 然而这一静

力学理论尚未能完全解释潮汐中涉及的动力学现象; 随后, 拉普拉斯提出了潮汐动力学理论, 建立了拉普拉斯潮汐方程, 并引入了地转偏向力, 对几种理想海洋进行近似求解; 随着对潮汐理论的深入研究, 如何解决潮汐运动涉及的众多复杂数学模型和人工难以处理的大量数据计算成为了一项复杂且具有挑战性的问题。

20 世纪 50 年代, 随着高性能计算机技术的迅猛发展, 许多海洋数值模式被开发出来, 以深入研究潮汐动力学过程在不同空间尺度上的特征, 并揭示潮汐的季节变化和规律。沈育疆^[5]利用边值法对东中国海潮波进行了数值计算并对其传播规律进行了深入分析。叶安乐等^[6]考虑了非线性球面潮波方程, 对渤海海的潮波运动进行模拟, 得出 4 个主要分潮同潮图和潮流椭圆。赵保仁等^[7]对东中国海的全日和半日潮汐潮流进行了数值计算, 并证实了若干圆流点的存在。随着卫星观测资料的累积以及计算机性能的提高, 数值同化和精细化网格被逐渐应

收稿日期: 2023-12-17。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3105102)。

作者简介: 付慧卿(2000-), 女, 硕士在读, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: vivian20001002@163.com

*通信作者: 李云(1981-), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事海洋防灾减灾、海上突发事件应急预报技术及海洋工程预报保障技术研究和业务工作。E-mail: liyun@nmefc.cn

用于潮汐数值模拟研究中。FANG等^[8-9]对南海附近区域主要潮汐成分展开了较以往更精确的模拟并证实了两个双侧旋系统的存在,通过10年的卫星高度计资料绘制了东中国海经验同潮图。杨万康等^[10]采用高分辨率网格对南海北部的潮汐潮流特征进行了精细刻画。蒋志婷^[11]考虑了复杂地形对于潮流耗散的影响,陈倩^[12]利用网格嵌套技术对浙江海区潮汐潮流进行三维数值模拟。随着对潮汐规律研究的深入,一些学者提出进行大区域潮汐数值模拟时考虑自吸-负荷效应的必要性,姜锦东等^[13]在数值模拟中引入了内潮耗散与自吸-负荷潮效应,证实该因素在潮汐模拟中产生的影响是不可忽视的。然而,传统的结构网格对大区域进行空间跨尺度数值模拟时往往存在计算成本高、耗时长等问题,因此,人们迫切需要一种可变分辨率的非结构网格来解决计算时间和计算成本等问题。近年来,随着对数值模型开发与研究的不断深入,一种基于非结构网格的半隐式跨尺度海洋模式(Semi-implicit Cross-scale Hydrosceince Integrated System Model, SCHISM)逐渐发展完善并应用于海洋研究领域。相较于传统的结构网格,非结构网格的灵活性可以很好地模拟诸如河口等复杂地形岸线,在进行大区域的跨尺度模拟时可实现近岸—远海从高分辨率到低分辨率的自然过渡,在保证计算稳定准确的同时,兼顾了计算成本与效率。KERR等^[14]使用先进环流模型(Advanced Circulation Model, ADCIRC)、有限体积沿海海洋模型(Finite Volume Coastal Ocean Model, FVCOM)以及半隐式欧拉-拉格朗日有限元模型(Semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite Element, SELFE),在相似的模型配置下,利用美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的59个观测站对模型进行评估,结果表明3个模型对潮汐模拟的总体精度相似,但SELFE在较低的内核计数下表现最好;相较于其他模型, SCHISM的另一优点是使用半隐式时间步进,不受克朗条件(Courant-Friedrichs-Lewy Condition, CFL)限制,在网格分辨率较高的情况下仍可以使用较大的时间步长,从而提高计算效率。当前,基于非结构网格的跨尺度模型SCHISM在海洋研究领域逐渐取得进展。涂成东^[15]基于SCHISM模型对全球潮波展开模拟,朱子瑞等^[16]通

过SCHISM建立了南海三维流场模型并比较了3种不同的垂向坐标。罗志发等^[17]以台风“山竹”为例,探讨了珠江河口风暴潮与径流的相互作用。然而,中国近海地域南北跨度约12个纬度,东西约16个经度,太平洋潮波经由两路传入东中国海,一路向西北和北方向传入东海、黄海、渤海,另一路向西南方向途经巴士海峡进入南海,因其受地转效应形成逆时针旋转的潮波系统,导致各海区潮差特征差异明显,具体表现为沿岸潮差较大,外海较小,沿潮波传播方向的右岸潮差大于左岸。渤海湾顶部潮差相对较大,黄海潮差东岸大于西岸,而东海则相反,潮差呈现由西向东逐渐增大的特点,这与东海为开阔的边缘海有关,南海潮差较小,北部湾潮差由湾口向北逐渐增大。地形对潮汐运动的传播和幅度也会产生至关重要的影响,东中国海岸线漫长且复杂,特别在舟山群岛等地形岸线复杂的岛屿及其他海峡、河口地区,若要更全面地了解各个区域之间的影响联系,需进行大范围的整体性研究。当前基于SCHISM模型开发的中国近海潮汐模型尚有欠缺。此外,天文潮、海浪、风暴潮之间存在复杂的非线性耦合作用^[18-19],潮位(水深)的变化是影响浅水海浪和风暴潮模拟的关键因素,因此,建立一个准确且快速的二维潮汐预报模型是进一步开展三者耦合计算的基础。由于风暴潮属于较大尺度的海洋运动,易形成沿中国海大陆架传播,需要同时考虑外海台风形成的涌浪传播,因此本文拟建立覆盖整个中国海及临近海区的二维潮汐动力模型,并考察影响其预报准确度的关键因子。

本文接下来将对SCHISM模式做出详细介绍,并开展模型的建立与检验,通过数值实验对模拟结果进行讨论分析,最终给出结论并作进一步展望。

1 模式介绍与参数设置

1.1 模式介绍

SCHISM是一个由SELFE模型发展而来的基于非结构网格的三维无缝跨尺度模型^[20],采用基于欧拉-拉格朗日算法的半隐式有限元法和有限体积法求解纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程,半隐式时间离散方法不受CFL约束,其数值算法合理地将高阶方法和低阶方法相结合,在提高计算效率的同

时又保证了精确度,能够高效、准确地对海洋中广泛的物理和生物过程做出解释。SCHISM模型在水平方向上使用非结构网格,可模拟复杂岸线并有针对性地对重点区域进行加密,解决了结构网格加密后计算量剧增的问题。此外,不同于其他的传统海洋模型,SCHISM模型不需要对水深进行平滑处理,且在非涡流区域对低质量网格有很高的适应性。目前,SCHISM模型包含了海浪、溢油、水质、生态、湍流等多个模块^[21],随着模型的不断完善与发展,它已被成功应用于全球一系列跨尺度数值模拟,涵盖了海洋、海湾、河口等多个区域,包括了风暴潮、溢油、泥沙输运、波流耦合等多方面的案例研究^[22-25]。

1.2 基本方程

SCHISM模式的动量方程为:

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) - g \nabla \eta + \mathbf{f} \quad (1)$$

3D和2D深度积分形式的连续性方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u} dz = 0 \quad (3)$$

式中: $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$; D/D_t 为物质导数; (x, y) 为水平笛卡尔坐标, z 为垂直坐标(向上为正); t 为时间; $\eta(x, y, t)$ 为自由表面高度; $h(x, y)$ 为水深(从固定基准测量); u 为水平速度, w 为垂向速度; f 为动量中的其他强迫项(斜压梯度、水平黏度、科氏力、潮汐势、大气压、辐射应力); g 为重力加速度; ν 为垂直涡动黏性系数。

二维模型的底摩擦系数 C_f 根据MAYO等^[26]提出的Manning公式得出:

$$C_f = \frac{gn^2}{H^{1/3}} \quad (4)$$

式中: H 为水深,浅水区水深不足3 m处按照3 m处理; n 为Manning粗糙度系数,它被定义为多种类型的水流阻力,无法被直接测量,本文取 n 为0.02,后续根据需求对底摩擦进行局部调整。

SCHISM的引潮势为:

半日潮(M_2, S_2, N_2, K_2):

$$\hat{\psi}(\phi, \lambda, t) = Cf \cos^2 \phi \cos \left(\frac{2\pi t}{T} + 2\lambda + v \right) \quad (5)$$

全日潮(K_1, O_1, P_1, Q_1):

$$\hat{\psi}(\phi, \lambda, t) = Cf \sin^2 \phi \cos \left(\frac{2\pi t}{T} + \lambda + v \right) \quad (6)$$

式中: $\hat{\psi}$ 为引潮势; λ 为地理经度; ϕ 为地理纬度; C 为分潮振幅; v 为分潮迟角; T 为分潮周期; f 为交点因子。这里要特别提出的是,由于研究区域较大,在进行潮汐数值模拟时应额外考虑自吸-负荷效应,万国洪等^[27]的研究结果表明,海洋潮汐的自吸与负荷作用可共同改变引力场,进而影响引潮力。与引潮力相似,自吸-负荷效应引起的附加位势通常也用对应的平衡潮高表示,称为自吸-负荷平衡潮,简称自吸-负荷潮。

考虑自吸-负荷潮后的水平引潮力 \mathbf{F} 可表达为:

$$\mathbf{F} = -g \nabla (\zeta - \zeta_{EQ} - \zeta_{SAL}) \quad (7)$$

式中: ζ 为海洋潮汐高度; ζ_{EQ} 为考虑了地球体潮后的平衡潮潮高。 ζ_{EQ} 的计算公式为:

$$\zeta_{EQ} = (1 + k_2 - h_2) \Phi / g \quad (8)$$

式中: k_2, h_2 为洛夫数^[28]; ζ_{SAL} 为考虑了自吸-负荷效应的平衡潮潮高; Φ 为引潮势。自吸-负荷潮振幅和相位由全球潮汐模型(Finite Element Solution 2014, FES2014)提供。

1.3 模型配置

本文的研究范围为 $12.5^\circ \sim 41.5^\circ \text{N}$, $105.5^\circ \sim 142.5^\circ \text{E}$,包括整个中国近海及其邻近海域,模拟时间跨度为2022年3月20日—7月1日,对最后90 d的结果进行调和分析并绘制同潮图,其中2022年4月10—30日的模拟结果用来与验潮站实测水位序列进行比较。模型设定了3条海洋开边界(见图1a,序号1处为第一条海洋开边界,序号2—4处为第二条海洋开边界,序号5处为第三条海洋开边界)以及长江、钱塘江、甬江、白马河4个河流开边界,其余为闭边界。模式水深数据由全球海洋水深数据集(General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO)提供,其分辨率为15',洞头区附近水深采用电子海图水深数据,分辨率可达100 m。低分辨率网格岸线数据主要来源于航海保障部最新海图数字化岸线(网址:<https://www.dhbb.org.cn>)及美国国家地理数据中心(网址:<https://ngdc.noaa.gov/sitemap/>)

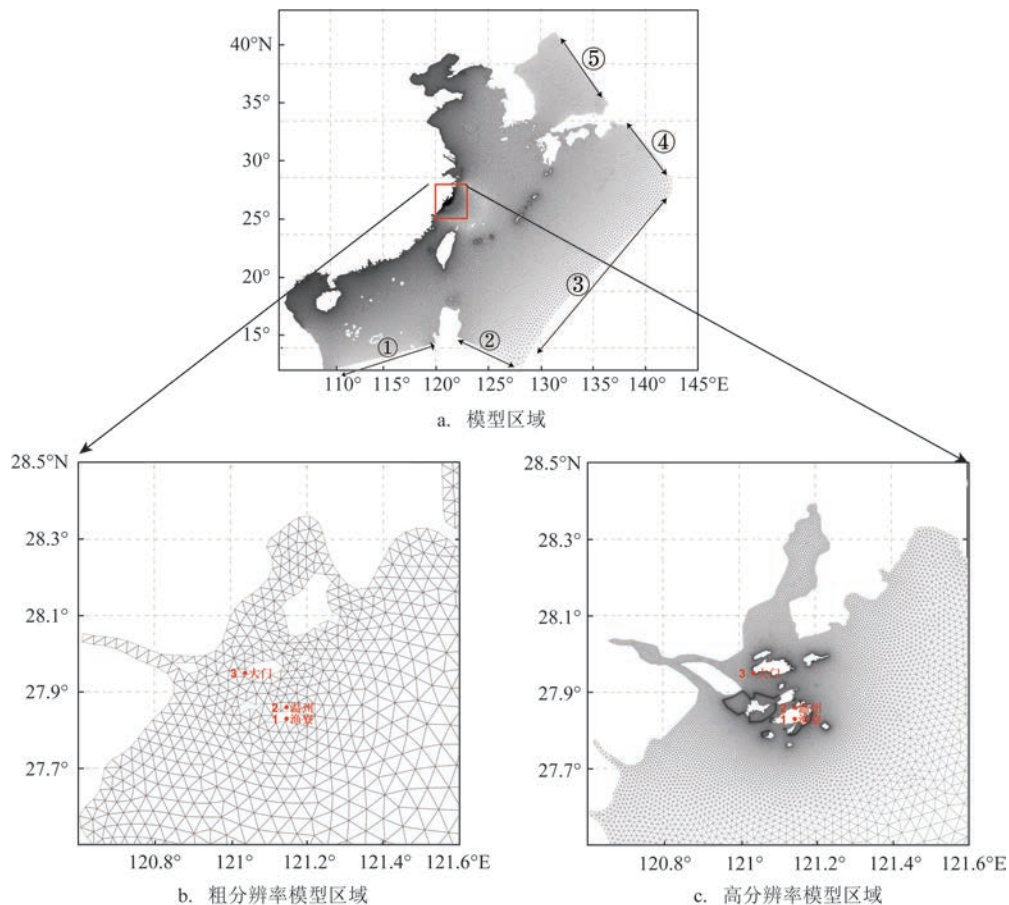
sitemap.html)发布的精度为1:250 000的岸线数据。高分辨率洞头区岸线数据来源为Google Earth(网址: <https://earth.google.com/web/>),精度为100 m,最高精度可达50~60 m。潮汐边界的调和常数由FES2014(网址: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data>)提供,该模型是法国潮汐小组(French Tidal Group, FTG)基于流体动力模型研发的一种同化海潮模型,空间分辨率为 $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ 。模型计算时采用正压模式,不考虑河流及海表面风场影响,时间步长设置为120 s。图1为由地表水模型系统(Surface Water Model System, SMS)生成的三角网格,包括109 427个三角形单元和57 505个节点。近岸分辨率为3 km,远海分辨率为30 km。图1红框标注区域为温州市洞头区,网格分辨率在该区域提高至100 m,其他区域的分辨率保持不变。经细化后的整个区域网格包括169 220个三角形单元和

87 645个节点。为验证模型潮汐模拟结果,在温州市洞头区附近选取了大门、温州、鱼寮3个验潮站。此外,选取了中国近海沿岸及岛屿的114个验潮站的调和常数与模拟结果进行对比分析,验潮站调和常数由FANG等^[8-9]所使用的验潮站调和常数以及对10年的卫星高度计数据进行调和分析得到的调和常数提供。图2为区域水深与114个验潮站站位分布。

2 模拟结果分析

2.1 同潮图

利用潮汐调和分析工具包T_tide^[29]对模式结果进行调和分析以获取各格点的 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 的振幅值与迟角值,从而得到等振幅线和同潮时线,图3为各分潮在中国近海的同潮图。



注:图b的地图轮廓较为概略,仅用于研究对比,岸线、岛屿地形以图c为准。

图1 模型计算区域及网格设置

Fig.1 Model calculation area and grid settings

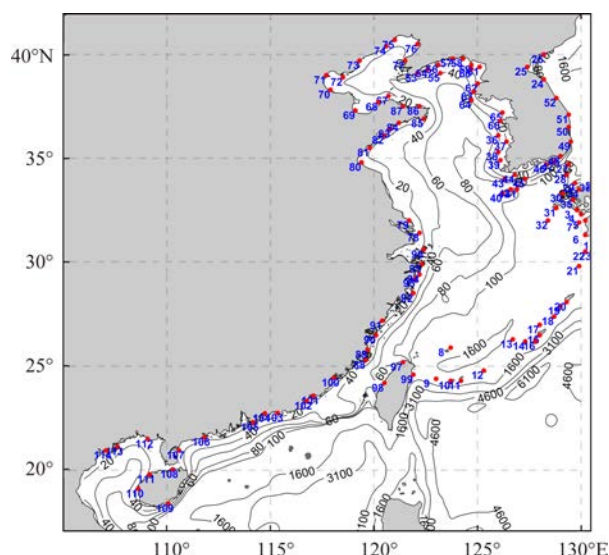


图2 水深及站点分布示意图(单位:m)

Fig.2 Bathymetric and station distribution diagram (unit: m)

从图中可以观察到,太平洋潮波在进入中国近海时大致分为两路,一路经日本九州和中国台湾岛进入东海、黄海、渤海,另一路经吕宋海峡进入南海。传播中的振幅大体遵循向岸及向各大湾顶增大、汇聚的趋势,由于岸界反射等原因,形成若干无潮点,其中半日分潮 M_2 、 S_2 同潮图分布基本一致,全日分潮 K_1 、 O_1 分布基本一致。为验证无潮点位置模拟是否准确,本文进一步将模拟的东中国海4个半日潮无潮点和2个全日潮无潮点位置与前人研究结果进行对比验证,结果见表1。

根据FANG等^[8]的研究,渤海、黄海、东海共存在4个半日潮无潮点,分别位于北黄海($123^{\circ}18'E$, $37^{\circ}30'N$)、南黄海($121^{\circ}18'E$, $34^{\circ}50'N$)与秦皇岛附近($120^{\circ}01'E$, $39^{\circ}55'N$)。此外,两个全日分潮无潮点分别位于($122^{\circ}48'E$, $34^{\circ}12'N$)、($120^{\circ}42'E$, $38^{\circ}11'N$)。无潮点距离较大误差出现在渤海及北黄海附近,最大距离误差出现在秦皇岛附近,为38.22 km,该处水深为19 m,其次是渤海中部,距离误差为31.24 km,该处水深为25 m,第三为北黄海附近,距离误差为26.20 km,该处水深为58 m。误差较小的点出现在黄海中南部及黄海南部,最小距离误差出现在南黄海,为8.55 km,该处水深为34 m,其次是黄海中南部,距离误差为9.31 km,该处水深为73 m。通过分析误差可以发现,影响本文无潮点模拟准确度的关键因素主要是水深与地形,在水深较

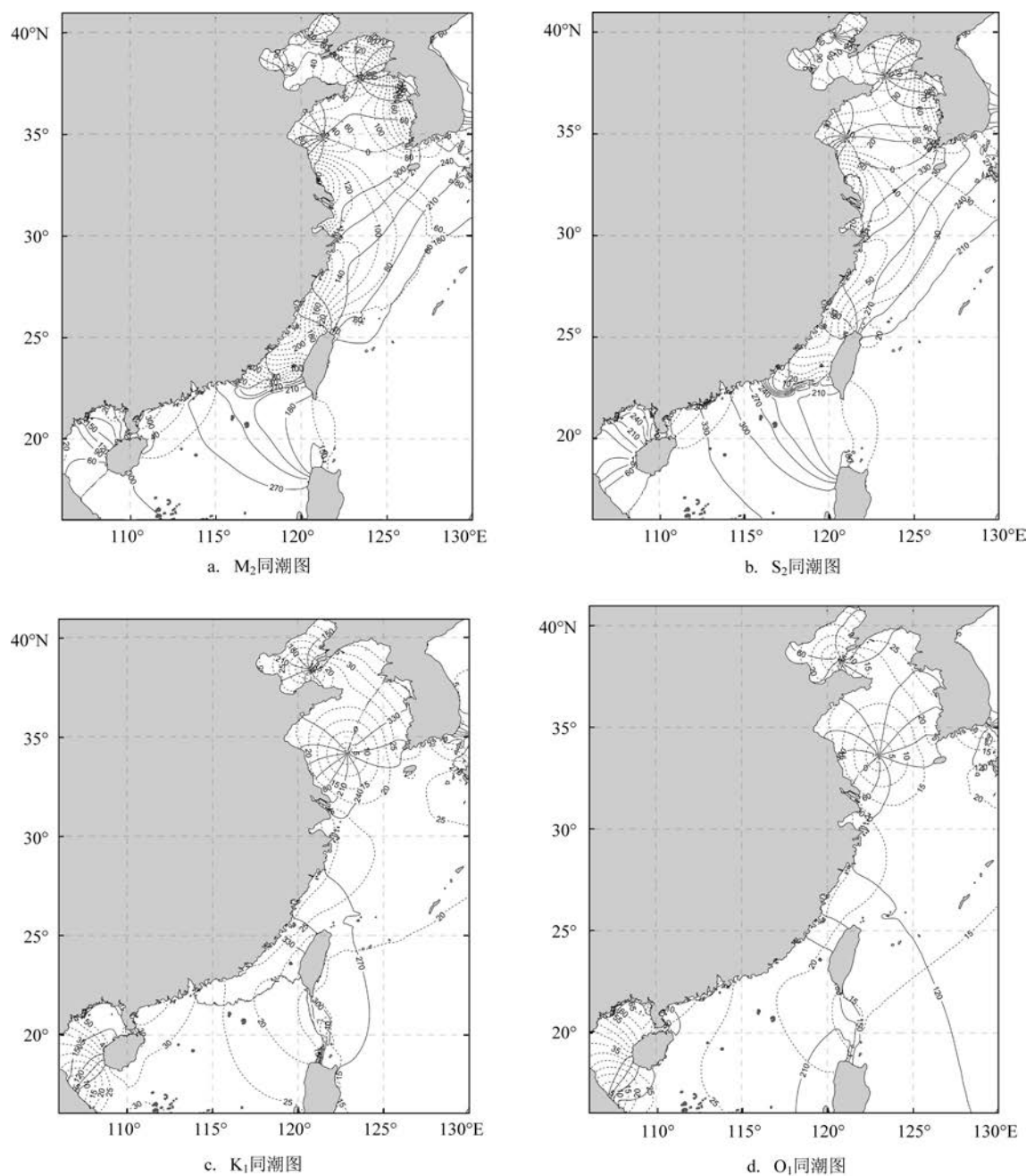
浅的渤海海区,误差易偏大,并且当无潮点存在于类似渤海湾的半封闭海湾内时,模拟的误差更大。推测是因为在进行潮汐模拟时水深不够精确,尤其在水深较浅的渤海海区进行无潮点模拟时会出现较大误差。但整体而言,本研究模拟出的全日及半日分潮在中国近海的无潮点位置以及等振幅线和同潮时线的走向与前人研究基本一致,进一步表明了本文构建的二维潮汐模型是可靠和准确的。

2.2 自吸-负荷效应对模拟结果的影响

方国洪等^[27]指出,尽管自吸-负荷潮的振幅显著小于引力平衡潮的振幅,但在进行潮汐模拟时依然有必要将其纳入考虑范围内,这是因为自吸-负荷潮本身波长较短,所引起的水平梯度力可能与引潮力水平分量相似甚至更大。姜锦东等^[13]在对南海潮波进行数值模拟时,发现引入内潮耗散与自吸-负荷潮并配以较高的模式分辨率可以明显改进模拟结果。本研究通过对引入自吸-负荷效应前后的模拟结果进行比较,定量评估自吸-负荷效应对各个海区的影响。首先考虑自吸-负荷效应对整体潮位的影响,取2022年4月1—30日进行模拟研究,取考虑自吸-负荷效应前后模拟结果的差异最大值绘于图4。

通过图4可以发现,自吸-负荷效应对潮位的影响一般在1~10 cm,并且在靠近岸边与振幅较大的海区时这种影响会被放大,例如在浙闽一带,最大影响可达100 mm。这也表明在进行近岸潮汐模拟尤其是在对潮差较大的强潮海区进行模拟时,考虑自吸-负荷效应是十分必要的。接下来,本文对考虑自吸-负荷效应前后的潮位模拟结果进行调和与分析,将两种方式下得到的 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 分潮振幅进行差值计算并绘制于图5,以此来分析自吸-负荷效应在各分潮与不同海区的显著性和差异性。由于相位差异影响过小,基本不超过 1° ,因此在图中不作展示。

观察图5中的振幅,除 M_2 分潮外,其他分潮受自吸-负荷效应的影响较小,振幅变化不超过5 mm,与之前得到的自吸-负荷效应对潮位影响的规律类似。自吸-负荷效应对于振幅本身较大的 M_2 分潮的影响更为显著,最大振幅差异出现在浙江外海,可达20 mm以上,该处振幅线也更密集,代表了在自吸-负荷效应影响下浙闽一带的振幅差异梯度更



注:虚线为振幅,单位:cm;实线为北京时迟角,单位:(°)

图3 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 分潮同潮图

Fig.3 The cotidal charts of M_2 、 S_2 、 K_1 and O_1

大,并且该效应在近岸较远海更明显。从图中可以观察到,由东向西、自远海至近海的振幅差值越来越大,并且在接近 M_2 无潮点时,差异值也会明显随着振幅的减小而减小。总的来说,自吸-负荷效应在各个海区的作用程度取决于海区的振幅大小以及振幅线走向,并且这种作用趋向于使各个分潮振

幅的调和常数增大1~30 mm。尽管看上去差异并不显著,但在进行潮汐模拟时,这种效应对潮位的影响是十分明显的。经过对潮位差异最大值的统计来看,自吸-负荷效应可使潮位前后差异达到1~10 cm,所以在进行潮汐模拟时,将自吸-负荷效应的影响引入模型中考虑是十分必要的。接下来,

表1 各海区无潮点位置与前人研究对比

Tab.1 Comparison of non-tidal point locations in this study with previous studies

分潮	海区	FANG等 ^[8]	本文	距离/km	水深/m
M_2	北黄海	123°18'E	123°11'E	26.20	58
		37°30'N	37°43'N		
	南黄海	121°18'E	121°23'E	8.55	34
		34°50'N	34°52'N		
	秦皇岛附近	120°01'E	119°56'E	38.22	19
		39°55'N	39°35'N		
K_1	黄海中南	122°48'E	122°50'E	9.31	73
		34°12'N	34°17'N		
	渤海中部	120°42'E	120°40'E	31.24	25
		38°11'N	38°28'N		

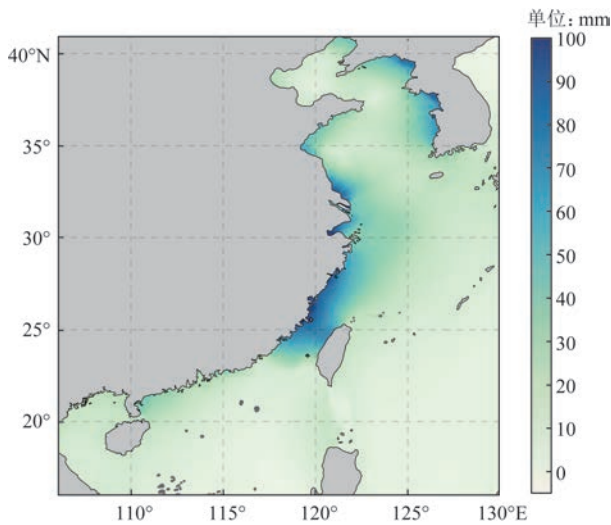


图4 自吸-负荷效应对各海区潮位最大影响

Fig.4 Influence of the self-attraction load effect on tidal level in each sea area

本文将使用考虑自吸-负荷效应后的模型对研究区域进行潮汐数值模拟,并进行调和常数的验证。

2.3 调和常数验证

为评估模型刻画的潮汐的准确度,本文选取了中国近海及毗邻海区沿岸及岛屿的114个验潮站(见图2)的 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 调和常数与模式结果进行验证,计算了4个分潮的模式结果与观测值的振幅(H)平均绝对误差 H_{MAE} ,相位(g)平均绝对误差 g_{MAE} 。计算公式为:

$$H_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_{m,n} - H_{o,n}| \quad (9)$$

$$g_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |g_{m,n} - g_{o,n}| \quad (10)$$

式中: N 代表验潮站总数; o 代表观测值; m 代表模式值; n 代表第 n 个验潮站。这一验证方法可以定量化评估模型在模拟潮汐振幅和相位方面的准确度,但考虑到潮汐成分中4个分潮占比的程度不同,振幅大小差异较大,不能用平均绝对误差一概而论。

汪一航等^[30]在进行调和常数的误差分析时指出,当振幅 H 较小时,计算和观测的相位 g 都不大稳定,并且 g 的误差对潮高的误差影响也较小,因此式(10)中不考虑 H 的差别而将所有迟角的差值进行平均绝对误差计算的方式具有很大的偶然性,尤其是在无潮点附近,迟角容易出现较大误差。为了更全面地考虑误差,引入观测与模拟潮高之差的均方根(Root Mean Square, RMS),这种方法可以更有效地评估模型与观测之间的差异。

对于 N 个点,潮高的RMS为:

$$RMS_h = \left[\frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N H_{m,n}^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

对于 N 个点,观测潮高和模式潮高之差的RMS_d为:

$$RMS_d = \left\{ \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N [(H_{o,n} \cos g_{o,n} - H_{m,n} \cos g_{m,n})^2 + (H_{o,n} \sin g_{o,n} - H_{m,n} \sin g_{m,n})^2] \right\}^{1/2} \quad (12)$$

相对偏差 r 为:

$$r = RMS_d / RMS_h \quad (13)$$

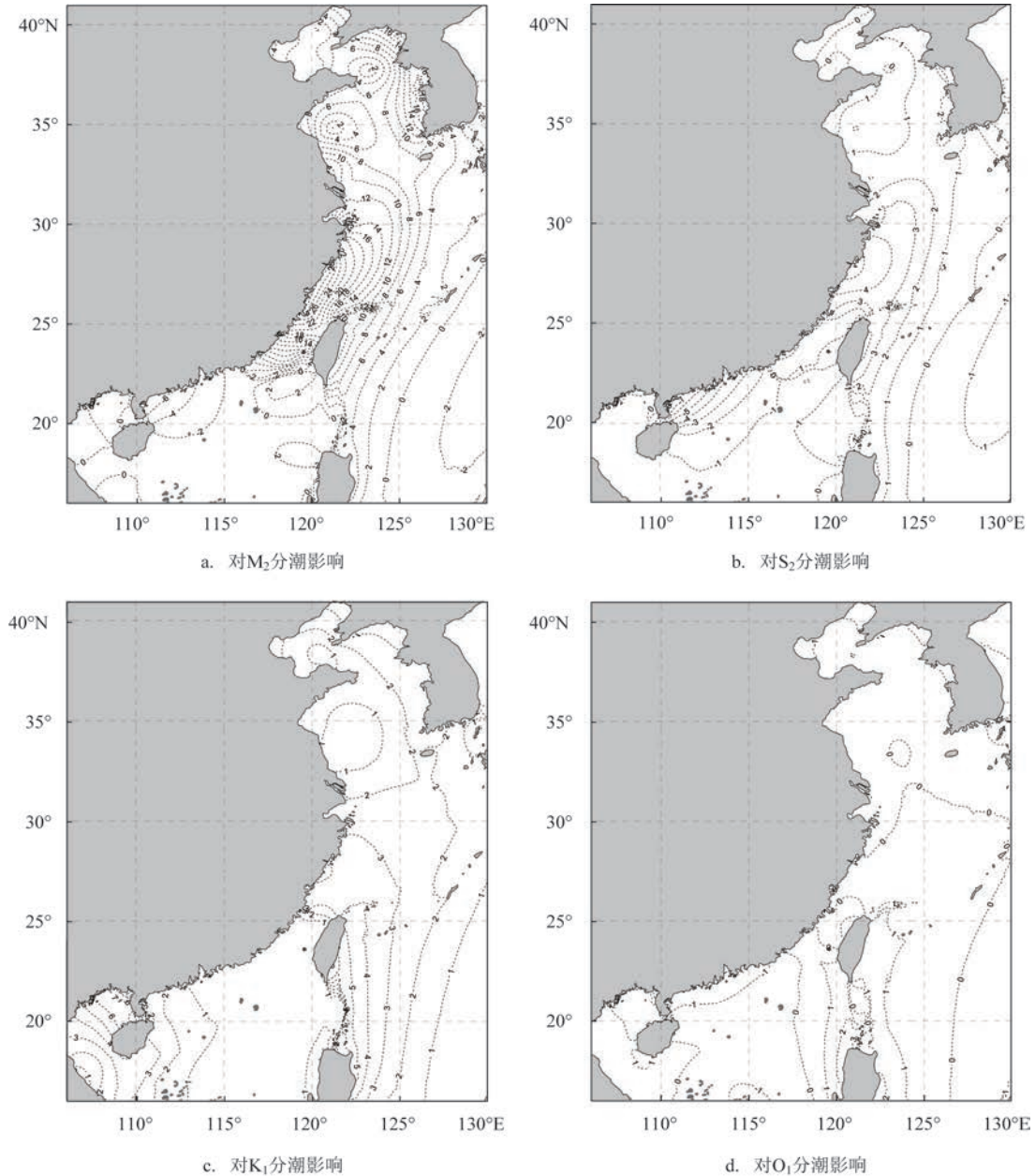


图5 自吸-负荷效应对 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 分潮振幅(单位:mm)的影响

Fig.5 Influence of the self-attraction load effect on M_2 、 S_2 、 K_1 and O_1 (unit: mm)

进一步比较考虑自吸-负荷效应后模型的模拟值与观测值,分别计算模拟结果的振幅、相位调和常数,并与沿海114个验潮站以及FES2014潮汐模型的调和常数进行误差对比。 H_{MAE} 、 g_{MAE} 、 RMS_d 、114个验潮站与模式结果的相对偏差 r_1 、FES2014与模式结果的相对偏差 r_2 的结果见表2。

从表2中114个站点与模拟结果的相位误差统计结果来看, M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 的 g_{MAE} 为 10.89° 、 12.83° 、

9.31° 、 10.17° ,均在 $9^\circ \sim 13^\circ$,其中 S_2 相位模拟结果误差最大,为 12.83° , K_1 误差最小,为 9.31° 。从114个站点与模拟结果的振幅误差统计结果来看, M_2 的 H_{MAE} 最大,为9.25 cm,这符合 M_2 分潮在潮汐中所占比重最大的特点, RMS_d 为18.67 cm, r_1 为0.25。相比之下, S_2 、 K_1 、 O_1 的 H_{MAE} 约为3~4 cm, RMS_d 为5~9 cm,尽管3个分潮相对于 M_2 分潮所占比重偏小,但 r_1 的统计表明3个分潮的偏差程度较 M_2 偏高, r_1

表2 调和常数误差统计表

Tab.2 Statistical table of harmonic constant errors

分潮	114 验潮站		FES2014		114 验潮站	FES2014	模式	114 验潮站	FES2014
	H_{MAE}/cm	$g_{MAE}/(^{\circ})$	H_{MAE}/cm	$g_{MAE}/(^{\circ})$	RMS_d/cm	RMS_d/cm	H_m/cm	r_1	r_2
M_2	9.25	10.89	10.03	12.14	18.67	24.52	74.11	0.25	0.33
S_2	3.62	12.83	3.09	10.76	8.08	6.55	27.33	0.29	0.24
K_1	3.59	9.31	3.21	8.80	6.10	5.79	21.18	0.29	0.27
O_1	3.40	10.17	3.08	8.98	5.88	5.67	17.56	0.33	0.32

均在0.3左右。从FES2014调和常数与模拟结果的相位误差统计结果来看, M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 的 g_{MAE} 为 12.14° 、 10.76° 、 8.80° 、 8.98° , 均在 $8^{\circ} \sim 13^{\circ}$, 其中 M_2 相位的模拟结果误差最大, 为 12.14° , K_1 最小, 为 8.80° 。从FES2014调和常数与模拟结果的振幅误差统计来看, 结果与验潮站类似, M_2 的 H_{MAE} 最大, 为 10.03 cm , RMS_d 为 24.52 cm , r_1 为 0.33 。相比之下, S_2 、 K_1 、 O_1 的 H_{MAE} 约为 3 cm , RMS_d 为 $5 \sim 7 \text{ cm}$, r_2 分别为 0.24 、 0.27 、 0.32 。从 r_2 结果来看, M_2 分潮的模拟结果更偏向于114个验潮站数据, 而 S_2 、 K_1 、 O_1 分潮的模拟结果更偏向于FES2014数据。本次模拟结果的相对偏差在合理范围内, 但误差依然较大, 推测该误差可能源于网格分辨率不足以刻画复杂地形, 从而影响了分潮整体的模拟效果, 误差统计结果表明模型仍有进一步优化空间。为进一步提升模型的模拟精度, 本文拟通过两种方式对模型进行优化, 其一为提高网格分辨率, 更精确地描绘与反映复杂的岸线地形, 通过增加网格密度来更准确地捕捉潮汐特征; 其二为在模型开边界处添加浅水分潮, 以更全面地考虑外部因素对潮汐模拟的影响。以温州市洞头区为例, 分别进行两组敏感性实验, 一组为仅提高网格分辨率, 另一组为保持网格原分辨率, 仅在开边界处添加浅水分潮, 对比两组实验结果探讨其对潮汐模拟的潜在改善效果。

2.4 实测潮位序列验证

为验证模型结果与实测数据的一致性, 模拟时考虑了8个主要分潮(M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 N_2 、 Q_1 、 K_2), 选取温州市洞头区温州、鱼寮、大门3个验潮站(位置见图1)2022年4月11—30日的潮位数据与模型

结果进行比对, 计算二者的相关系数与平均绝对误差。由于3个验潮站均在岸线较为复杂的舟山群岛附近, 因此模拟结果更能较好地检验模型结果的可靠性。图6展示了网格加密前的模型结果与3个验潮站实测数据的对比情况, 相关系数均在0.9以上, $H_{MAE} < 0.2 \text{ m}$, 其中大门验潮站的模拟结果与实测数据的MAE为 16.56 cm , 温州验潮站为 14.75 cm , 鱼寮验潮站为 16.54 cm , 3个验潮站的误差均在合理范围内, 印证了该模型在较为复杂的海洋地形下可以较准确地模拟潮位变化。接着以3个验潮站为例, 通过提高网格分辨率与添加浅水分潮两种方式改善模型模拟效果, 并将误差结果进行对比, 评估模型模拟效果的提升程度。

2.5 网格分辨率对模拟结果的影响

洞头区附近海域存在众多岛屿与岛礁, 因此形成了许多狭窄的水道, 该地形结构会对潮汐和潮流传播产生很大影响。洞头区附近整体水深较浅, 西侧紧接瓯江口, 北侧毗邻乐清湾。乐清湾是一个半封闭海湾, 水深由湾口接近湾顶时逐渐变浅, 平均水深为 10 m 左右, 湾内实测潮差最大可达 8 m , 是典型的强潮海区^[31]。由于洞头区附近整体地形复杂, 前人在进行潮汐模拟时, 更多的是对潮汐、潮流的基本特征进行研究, 数值模拟的空间分辨率相对较低($\sim 1 \text{ km}$), 而本文在进行整个中国近海模拟时的网格分辨率为 3 km , 尽管这种分辨率已足够刻画整个中国海域, 并可达到较为接近的模拟结果, 但该分辨率对于模拟洞头区这种地形复杂、岛屿众多的海域是远远不够的, 因此在对洞头区进行潮汐模拟时, 对模型网格分辨率的要求更加严格。原始的 3 km 分辨率网格可能无法充分捕捉到舟山群岛附

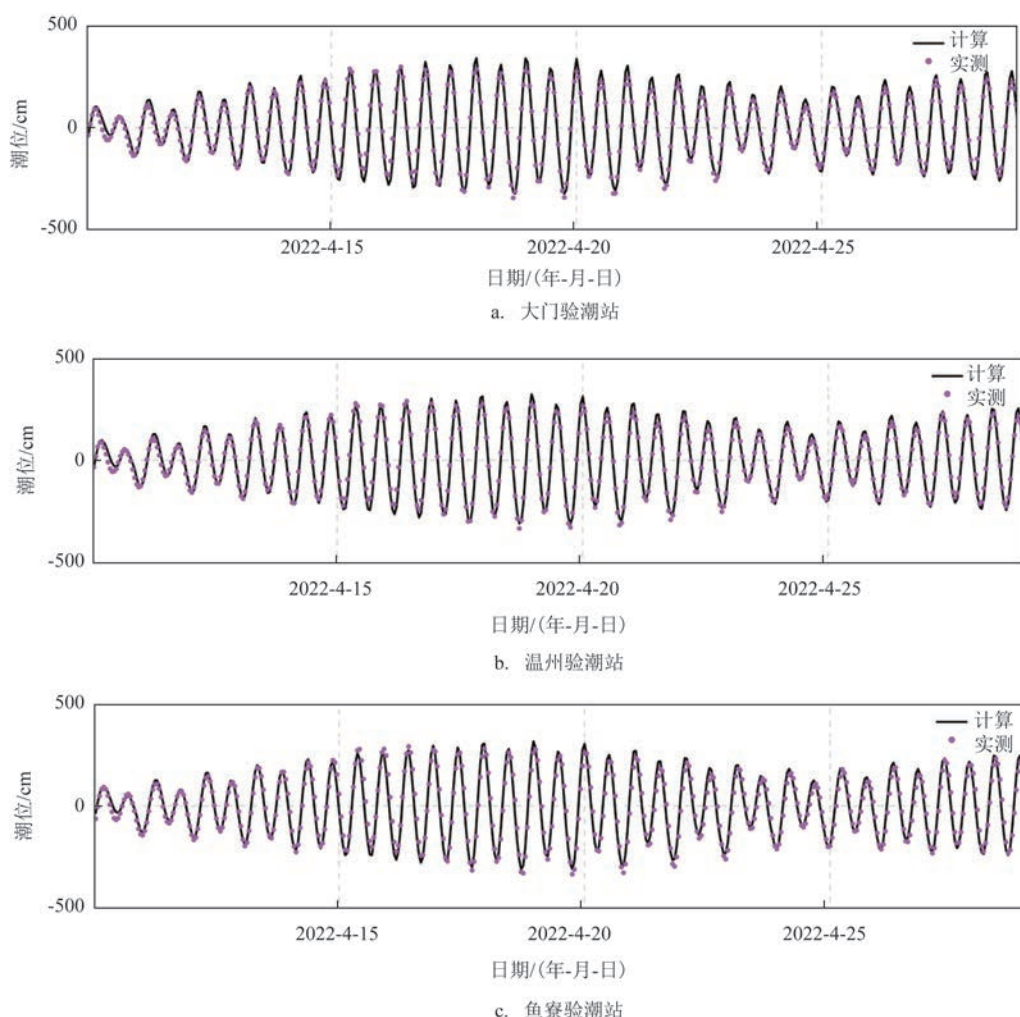


图6 验潮站与模式对比情况

Fig.6 Comparison between tide measuring stations and models

近复杂的地形特征,网格岸线较真实岸线简略,未能准确描画出岛屿形状、河道走向,甚至忽略了一些岛屿的存在,因此在针对如洞头区这类地形复杂的海域时,低分辨率的网格显然会对模拟结果产生较大影响。为比较岸线与网格分辨率对于模拟结果的影响,针对浙江海区附近特别是洞头区域进行了网格加密实验,将原有的3 km网格分辨率提升至100 m,并将该区域岸线数据替换为Goole Earth精度为100 m的高分辨率岸线,最高分辨率区域可达50~60 m,以求模拟更真实的地形岸线状况,并使用高精度网格捕捉潮汐运动时的细节变化。对调整前后的模拟结果进行对比,表3为网格精度变化对误差影响的统计结果。网格分辨率提高前后的误差统计结果表明,网格分辨率的提高会显著改善

表3 网格精度影响误差统计表

Tab.3 Statistical table of influence error of mesh precision

误差类别	温州验潮站	鱼寮验潮站	大门验潮站
原网格 H_{MAE}/cm	14.75	16.54	16.56
网格加密 H_{MAE}/cm	10.62	11.34	12.27
调整前后相对偏差减小率/%	28.0	31.4	25.9

模拟结果的精度。分辨率提高后,温州验潮站潮位预报的 H_{MAE} 降低至10.62 cm,相对偏差减小了28.0%,鱼寮验潮站的 H_{MAE} 降低至11.34 cm,相对偏差减小了31.4%,大门验潮站的 H_{MAE} 降低至12.27 cm,相对偏差减小了25.9%。

从网格分辨率提升前后的模拟结果来看,其对于模型模拟效果的贡献是很大的,通过提升网格分辨率,相对偏差均可减少20%以上,其中鱼寮验潮站调整前后最大相对偏差可减小31.4%。这说明网格分辨率的改善可以帮助模型更准确地捕捉河口区域及岛屿的细微特征以及模拟局部潮汐效应,其中鱼寮、温州两个验潮站的模拟效果提升更大,推测是由于其位于多个岛屿之间,水道狭窄,而此前网格并未将这些岛屿刻画完整,而大门验潮站位于开阔的大陆边缘,周围几乎没有岛屿,通过提升网格分辨率得到的模拟效果改善主要是先前部分岸线缺失的缘故。

2.6 添加浅水分潮对模拟结果的影响

洞头区海域附近水深较浅,潮波传播至此容易产生能量聚集并形成较大的潮差,同时受地形影响, M_2 分潮在传播至近岸过程中会受到非线性作用导致发生形变,且各分潮之间会因相互作用与影响而产生浅水分潮。为探究浅水分潮对于模拟效果的影响,在保持原有网格精度不变的情况下,在开边界处添加了FES2014数据中4个浅水分潮(MF 、 MS_4 、 M_4 、 M_6)的调和常数,通过比较前后差异以判断添加浅水分潮后SCHISM对于潮汐的模拟能力是否有进一步的改善。表4为添加浅水分潮前后验潮站与模型的误差统计。从表中可以看到,在添加浅水分潮后,温州验潮站的 H_{MAE} 由14.75 cm降至14.64 cm,相对偏差减小0.8%,表明在开边界添加浅水分潮对于该站点的模拟效果几乎没有提高。然而,鱼寮验潮站的 H_{MAE} 降至15.17 cm,相对偏差减小8.3%,大门验潮站的 H_{MAE} 降至15.88 cm,相对偏差减小4.1%,表明在开边界添加浅水分潮对鱼寮、大

门两个站点的模拟效果均有一定程度的改善。尽管温州站与其他两站相距较近,但模拟效果受到的影响却相对较小,推测是因为浅水分潮波长较短,因此在短距离内潮汐变化较大导致的。

3 结论

本文基于非结构网格SCHISM模式,建立了中国海二维潮汐预报模型。结论如下:

①模拟的 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 分潮同潮图振幅、相位以及无潮点分布与前人结果较为一致。定量考虑自吸-负荷效应的必要性,发现该效应对于模拟近岸潮汐尤其是浙闽一带的强潮海区有着不可忽视的作用,其对实际潮位的最大影响可达10 cm以上。

②为进一步了解自吸-负荷效应对于各分潮在各个海域产生的影响,对考虑自吸-负荷效应前后的潮汐模拟结果进行调和分析,结果表明该效应对于预报模型分潮的模拟结果整体影响较小,对 M_2 分潮影响稍大,浙闽一带 M_2 分潮振幅调和常数的差异值可达20 mm。自吸-负荷效应对于中国近海潮汐模拟的影响主要取决于两个因素,即离岸远近和当地潮差大小。

③在考虑自吸-负荷效应后,本文使用114个验潮站和FES2014潮汐模型的调和常数对模拟结果进行检验,通过对比相对偏差可以发现,模型模拟的 M_2 分潮更接近114个验潮站的调和常数, S_2 、 K_1 、 O_1 更接近FES2014潮汐模型的调和常数。

④为进一步优化模型,本文从提高模型分辨率和添加浅水分潮两个角度出发,针对浙江省洞头附近海区的水位实测资料开展相关敏感性实验。结果表明提高网格分辨率可使模型的模拟能力明显改善,这是由于低分辨率网格对洞头区附近岸线和岛屿的刻画简略甚至缺失,而高分辨率网格能更加细致地捕捉地形、更真实地反映岸线情况,且提升网格分辨率比在开边界添加浅水分潮更能提升预报准确度,说明本模型在对洞头区等复杂地形下进行潮汐近岸模拟时,对岸线以及网格精度的要求更加严格。

⑤使用高分辨率网格存在计算成本高、计算时间长的问題。本研究的高分辨率网格采用48核进行并行计算,用时为25 min,时间约为低分辨率网格

表4 添加浅水分潮影响误差统计表

Tab.4 Statistical table of error of influence of including shallow moisture tide

误差类别	温州验潮站	鱼寮验潮站	大门验潮站
8个主要分潮 H_{MAE}/cm	14.75	16.54	16.56
12个分潮 H_{MAE}/cm	14.64	15.17	15.88
调整前后相对偏差减小率/%	0.8	8.3	4.1

的两倍,但模拟的准确度却显著提高。以3个验潮站为例,潮位预报的相对偏差均减少25%以上,这对于后续风暴潮模拟准确度的提升是有重要意义的。因此,模型在进行近岸潮汐模拟时,可以通过利用非结构网格的灵活性,在保持大范围网格密度不变的情况下进行局部加密,从而进一步提升局部的模拟精度,以兼顾模拟的准确性和模型的计算效率;其次,通过在开边界处添加浅水分潮,部分地区模型模拟的准确度小幅度提升,但对其他近距离地区的影响有限,推测由于浅水分潮的非线性特点及较短波长所致,因添加浅水分潮后的空间差异性较大,应仔细考察其对研究海区的影响。

本文建立的基于SCHISM的二维区域海洋模型可以有效地对中国海的潮汐进行快速模拟和预测。天文潮是造成近岸水位和海流变化的主要因子,准确的天文潮模拟是近岸风暴潮与海浪预报的基础,在极端天气过程中,风暴潮往往伴随巨浪,此时若叠加天文高潮位,就可能产生越浪、漫堤等灾害性的影响。SCHISM模式具备风暴潮、海浪等计算模块,未来可进一步开展天文潮-风暴潮-海浪耦合预报模型的开发,为海洋防灾减灾提供有力的科学工具。

参考文献:

- [1] 张家旭,左涛,左明,等.基于生计渔业调查的黄河口西南侧潮间带渔业生物多样性及其季节变化[J].渔业科学进展,2023,44(2): 10-19.
ZHANG J X, ZUO T, ZUO M, et al. Seasonal biodiversity of fishery resources by set net in the intertidal zone to the southwest of the Yellow River estuary[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(2): 10-19.
- [2] 刘凯.潮汐原理及其潮汐能的利用[J].智库时代,2018(29): 202-209.
LIU K. Tidal principles and utilization of tidal energy[J]. Think Tank Era, 2018(29): 202-209.
- [3] 李岸.不同潮位和浪高条件对30万吨级油船靠泊作业安全的影响[J].港口科技,2019(11): 23-28.
LI A. Different tidal levels and wave heights impact on the safety of 300,000-ton oil tanker berthing operations[J]. Port Science & Technology, 2019(11): 23-28.
- [4] 李亮,郭俊丽,时连强,等.历史时期江苏沿海风暴潮灾害时空分布特征[J].古地理学报,1-14.
LI L, GUO J L, SHI L Q, et al. Historical period spatiotemporal distribution characteristics of storm surges in coastal areas of Jiangsu[J]. Journal of Paleogeography, 1-14.
- [5] 沈育疆.东中国海潮汐数值计算[J].山东海洋学院学报,1980,10(3): 26-35.
SHEN Y J. Numerical computation of tides in the East China Sea [J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1980, 10(3): 26-35.
- [6] 叶安乐,梅丽明.渤黄东海潮波数值模拟[J].海洋与湖沼,1995,26(1): 63-70.
YE A L, MEI L M. Numerical modelling of tidal waves in the Bohai sea, the Huanghai sea and the East China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(1): 63-70.
- [7] 赵保仁,方国洪,曹德明.渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟[J].海洋学报,1994,16(5): 1-10.
ZHAO B R, FANG G H, CAO D M. Bohai, Yellow, East China Sea tidal current numerical simulation[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(5): 1-10.
- [8] FANG G H, WANG Y G, WEI Z X, et al. Empirical cotidal charts of the Bohai, Yellow, and East China Seas from 10 years of TOPEX/Poseidon altimetry[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109(C11): C11006.
- [9] FANG G H, KWOK Y K, YU K J, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand[J]. Continental Shelf Research, 1999, 19(7): 845-869.
- [10] 杨万康,尹宝树,杨德周,等.基于FVCOM的南海北部海域潮汐潮流数值模拟[J].海洋科学,2013,37(9): 10-19.
YANG W K, YIN B S, YANG D Z, et al. Application of FVCOM in numerical simulation of tide and tidal currents in the northern South China Sea[J]. Marine Sciences, 2013, 37(9): 10-19.
- [11] 蒋志婷.舟山群岛海域潮汐动力的数值模拟研究[D].舟山:浙江海洋大学,2018.
JIANG Z T. Numerical simulation of tidal dynamics in the Zhoushan archipelago waters[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2018.
- [12] 陈倩.浙江近海潮汐潮流的三维数值模拟[D].杭州:浙江大学,2002.
CHEN Q. Three-dimensional simulation of tides and tidal currents in the seas adjacent to Zhejiang[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [13] 姜锦东,方国洪,滕飞,等.内潮耗散与自吸-负荷潮对南海潮波影响的数值研究[J].海洋与湖沼,2018,49(3): 457-470.
JIANG J D, FANG G H, TENG F, et al. Dissipation and self-attraction-and loading of internal tides: impact on the tidal waves in the South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(3): 457-470.
- [14] KERR P C, DONAHUE A S, WESTERINK J J, et al. U.S. IOOS coastal and ocean modeling testbed: inter-model evaluation of tides, waves, and hurricane surge in the Gulf of Mexico[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013, 118(10): 5129-

- 5172.
- [15] 涂成东. 全球及东中国海高分辨率潮汐数值模拟[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2021.
- TU C D. High-resolution numerical simulation of tidal waves in the global and East China Sea[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2021.
- [16] 朱子瑞, 张文静, 朱首贤, 等. 南海SCHISM模式不同垂向坐标研究[J]. 海洋通报, 2022, 41(2): 147-155.
- ZHU Z R, ZHANG W J, ZHU S X, et al. Contrastive study on different vertical coordinate settings of SCHISM model in the Nanhai Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2022, 41(2): 147-155.
- [17] 罗志发, 谭超, 黄本胜, 等. 珠江河口风暴潮对径流的敏感性研究: 以台风“山竹”为例[J]. 热带气象学报, 2022, 38(4): 521-528.
- LUO Z F, TAN C, HUANG B S, et al. Effect of runoff on storm surge in Pearl River estuary[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2022, 38(4): 521-528.
- [18] 尹宝树. 波浪和风暴潮潮汐耦合作用的研究与发展[Z]. 2007.
- YIN B S. Wave and storm surge tide coupling research and development[Z]. 2007.
- [19] 尹宝树, 莎日娜, 杨德周, 等. 海浪和潮汐风暴潮耦合过程的数值研究(英文)[J]. 海洋科学集刊, 2006, 47(1): 1-15.
- YIN B S, SHA R N, YANG D Z, et al. Numerical study of wave-tide-surge coupling processes[J]. Studia Marina Sinica, 2006, 47(1): 1-15.
- [20] ZHANG Y L, BAPTISTA A M. SELFE: a semi-implicit eulerian-lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation [J]. Ocean Modelling, 2008, 21(3-4): 71-96.
- [21] ZHANG Y J, YE F, STANEV E V, et al. Seamless cross-scale modeling with SCHISM[J]. Ocean Modelling, 2016, 102: 64-81.
- [22] YOO H J, KIM D H, PARK M H, et al. Economic sediment transport control with sediment flushing curves for sea dike gate operation: case study in Saemangeum Basin, Korea[J]. Journal of Coastal Research, 2021, 114(sp1): 161-165.
- [23] CHIU C M, HUANG C J, WU L C, et al. Forecasting of oil-spill trajectories by using SCHISM and X-band radar[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 137: 566-581.
- [24] NAHON A, IDIER D, BERTIN X, et al. Modelling the contribution of wind waves to Cap Ferret's updrift erosion[J]. Coastal Engineering, 2022, 172: 104063.
- [25] FORTUNATO A B, MEREDITH E P, RODRIGUES M, et al. Near-future changes in storm surges along the Atlantic Iberian coast[J]. Natural Hazards, 2019, 98(3): 1003-1020.
- [26] MAYO T, BUTLER T, DAWSON C, et al. Data assimilation within the Advanced Circulation (ADCIRC) modeling framework for the estimation of Manning's friction coefficient[J]. Ocean Modelling, 2014, 76: 43-58.
- [27] 方国洪, 徐晓庆, 魏泽勋, 等. 渤、黄、东海垂向位移负荷潮和自吸-负荷潮[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(2): 163-170.
- FANG G H, XU X Q, WEI Z X, et al. Vertical displacement loading tides and self-attraction and loading tides in the Bohai, Yellow, and East China Seas[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(1): 63-70.
- [28] WAHR J M. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth[J]. Geophysical Journal International, 1981, 64(3): 677-703.
- [29] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [30] 汪一航, 方国洪, 魏泽勋, 等. 基于卫星高度计的全球大洋潮汐模式的准确度评估[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4): 353-359.
- WANG Y H, FANG G H, WEI Z X, et al. Accuracy assessment of global ocean tide models base on satellite altimetry[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(4): 353-359.
- [31] 单慧洁. 温州近海建设工程环境影响潮汐潮流数值模拟[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.
- SHAN H J. The construction project's environmental impact of numerical simulation of tide and tidal current in Wenzhou offshore [D]. Ningbo: Ningbo University, 2014.

Two-dimensional numerical simulation of tides in the coastal waters of China based on SCHISM

FU Huiqing^{1,2}, WU Lunyu^{1,2}, JI Xuanliang^{1,2}, LI Yun^{1,2*}, ZHANG Miaoyin^{1,2}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model (SCHISM), a series of numerical experiments are carried out with multi-source data. Using tidal harmonic analysis method, the harmonic constants for four constituents (M_2 , S_2 , K_1 , and O_1), and their relative cotidal charts are generated. The

location of the no-tide point is compared with previous studies. The results obtained through the comparison against harmonic constants from 114 tide gauge stations and the FES2014 tidal model suggest that the tidal model can effectively simulate tidal characteristics in the China seas. Moreover, the influence of self-attraction loading (SAL) tides on tidal simulation is further quantitatively examined, the findings demonstrate that the SAL effect significantly influences the M_2 component tide, resulting in an amplitude impact exceeding 20 mm in both the Zhejiang and Fujian regions. In addition, this study includes sensitive experiments investigating the effects of altering resolution and incorporating shallow water constituents by validating the model using three tide gauge stations near Dongtou District in Wenzhou. It's found that improving model resolution from 3 km to 100 m can enhance simulation accuracy by approximately 30%, whereas the inclusion of shallow water constituents only results in an improvement of up to about 8% in certain areas.

Key words: offshore China; the tides; numerical simulation; bottom friction