

基于国产操作系统的海湾污染物扩散输运预报系统 ——以象山港为例

朱宇航, 陈勤思, 徐一凯, 胡松

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘 要: 在国产操作系统 openEuler 上构建了一个基于三维非结构网格水动力模型的污染物扩散输运预报系统。该系统采用操作系统、模型计算和数据可视化三层架构设计, 提供了潮位和潮流模拟、选择站点释放污染物、污染物扩散输运预报、预报结果可视化等功能, 并以象山港为例进行测试。结果表明: 目前主流的非结构海洋模型可以成功移植到国产操作系统 openEuler 中, 系统能正常运行且稳定可靠, 可为海湾治理和污染预报提供参考, 也可为后续数字地球提供海洋预报业务化平台。

关键词: 国产操作系统; openEuler; 海湾; 污染物预报

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)05-0048-12

1 引言

海湾是我国近岸海域最典型的地理单元之一, 具有丰富的滨海旅游、海洋渔业和港口运输等海洋资源^[1]。在国家海洋生态文明建设的大背景下, 美丽海湾的保护与建设已成为我国“十四五”期间海洋生态环境保护的主线和载体^[2]。近年来, 随着沿港经济的发展, 海湾区域的海岸工程和工业活动日益增加, 近海尤其是海湾的水环境受到围填海开发和污染物排放等的破坏, 出现了水质下降和生态退化等诸多问题。污染物的扩散和输运预报以及污染物的溯源, 是海湾生态与环境保护工作中经常遇到的问题。美丽海湾的景观建成后, 需要通过能够快速预报污染物质扩散和输运的预报系统来维持海湾的景观和生态环境。

在近海海洋生态与环境研究中, 可以通过现场观测和数值模式的方法对污染物扩散问题进行分析, 其中, 海洋数值模型可以模拟由潮波^[3-5]、环流^[6]、风^[7]和径流^[8]等驱动引起的污染物运动情况。非结构有限体积法海洋模式 (Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM) 能够很好地拟合复杂地形

并保证质量守恒^[9], 在海湾的研究中取得较好成效^[10-11], 特别适合中国近海的潮波和潮流模拟。胡松^[12]为 FVCOM 开发的 DYE 示踪物模块, 在提供污染物扩散和输运轨迹^[13-15]、估算海湾水体交换速率^[16-18]以及规划海洋工程和保护近海环境^[19-21]等方面具有广阔的应用空间, 因此在近岸和区域海洋的生态环境研究中被广泛采用。然而, 目前基于海洋模型构建的业务化平台^[22-26]多数在 CentOS、Red Hat 等国外主流操作系统环境下运行, 很少有构建在自主操作系统下的海洋模型平台。

2021年9月, 华为公司正式发布了国产化服务器开源操作系统 openEuler, 有望成为国产服务器端 Linux 的主流^[27-28]。openEuler 是以国家数字基础设施为目标建立的操作系统, 可以为构建地球模型提供一个可靠、安全、自主的平台。本文率先以 openEuler 操作系统为平台, 编译和构建了非结构水动力海洋模型, 并成功运行了象山港海湾污染物扩散输运预报系统。测试结果表明, 目前主流的非结构海洋模型可以成功地移植到国产操作系统 openEuler 上, 为后续数字地球提供海洋预报业务化平台。

收稿日期: 2021-10-30; 修回日期: 2021-12-30。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3101702)。

作者简介: 朱宇航(1998-), 男, 硕士在读, 主要从事物理与海洋生态环境的相互作用研究。E-mail: 15349834397@126.com

通讯作者: 胡松(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事物理与海洋生态环境的相互作用研究。E-mail: shu@shou.edu.cn

2 基于 openEuler 的污染物预报系统

2.1 系统简介

本系统基于最新发布的国产操作系统 openEuler,在表1所示的开发环境下对FVCOM海洋数值模式进行移植。为提升预报系统的用户体验,系统对污染物的模型设置进行了可视化界面简

表1 预报系统开发环境

Tab.1 Developing environment of prediction system

功能	选用软件	版本
操作系统	openEuler	20.03(LTS-SP2)
桌面环境	UKUI for openEuler	3.0
C语言编程	gcc	7.3.0
Fortran编译	gfortran	7.3.0
代码组装	make	4.3
并行库	MPICH	3.2.1
区域分解库	METIS	4.0.1
海洋动力学模型	FVCOM	3.1
数据存储类型	NetCDF	4.7.4
交互界面	Python	3.8.1
可视化工具	Visit	3.1.2

化。用户可以在交互界面设置污染物示踪的初始参数,包括释放的位置、时间(北京时,下同)和释放量等(见图1),通过并行软件包MPICH进行多进程并行计算以提高预报计算的时效性。结果以NetCDF格式输出,可通过Visit可视化软件实时展示,也可通过系统的Python程序后处理包将输出结果绘制成发布图。

该系统的实现主要有3个难点:现行 openEuler 不主动提供桌面环境,需额外安装; openEuler 缺少 Visit 安装所需的关键依赖库,需从第三方安装; FVCOM 源代码主要在 Intel 编译器下调试,对 openEuler 自带的开源 GNU 编译器兼容性差。本研究修改了 FVCOM 源代码,使之能够在 GNU 编译器下顺利编译,从而成功构建了该系统。

2.2 系统架构及流程

预报系统采用3层架构设计,均在 openEuler 系统上进行开发,其设计原理流程见图2。系统分为操作系统层、模型计算层和数据可视化层。各层功能如下:

操作系统层:安装 openEuler 系统并进行环境编译配置,使该系统能承载 FVCOM 水动力模型并成功运行。



图1 象山港污染物扩散输运预报系统互动界面

Fig.1 GUI of pollutant diffusion and transport prediction system of Xiangshan Bay

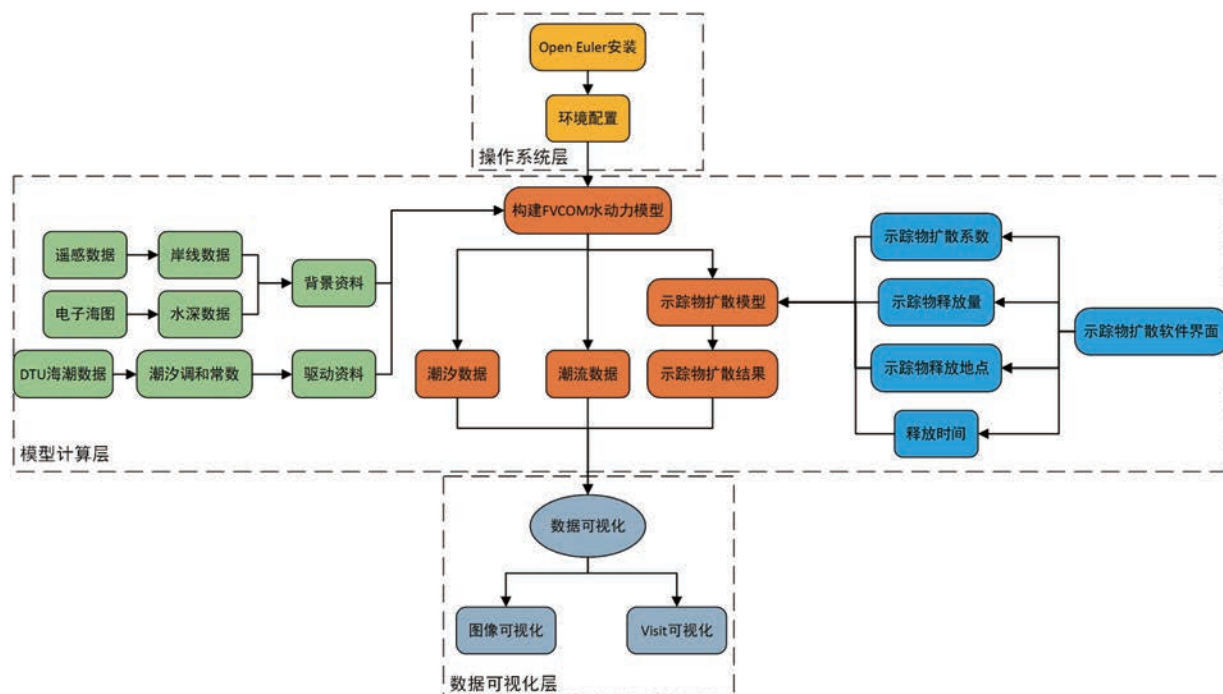


图2 系统设计原理流程图

Fig.2 Flow chart of system design

模型计算层:该层为本系统的核心层,能够实现用户交互。在该层中,用户可输入相关信息,该层即会自动输出用户所需的预报数据。

数据可视化层:该层主要为用户提供数据可视化界面,以使用户更加直观地查看系统的模拟结果。

2.3 系统功能

系统主要功能如下:

(1)用户可以凭借实际情况或实验情况,自定义输入示踪物的释放位置、释放时间和释放量。

(2)系统自动在线计算并生成潮汐数据、潮流数据和示踪物扩散数据,用户可以直接根据计算输出的 NetCDF 格式文件进行研究区域内潮汐、潮流及示踪物扩散相关的研究。例如,示踪物轨迹可用于评估潮流驱动下污染物的扩散和输运情况,也可用于评估海湾水体交换率。

(3)本系统提供实时 Visit 可视化和 Python 自动脚本绘制图像的可视化结果,将这两套预报数据作为成果进行展示,用户可以选取合适的可视化途径,以获取示踪物扩散信息。

2.4 操作系统层

操作系统层基于国产操作系统 openEuler 建立。openEuler 是继华为“鸿蒙”系统之后的又一全新国产自主开发的操作系统,它的诞生体现了我国操作系统自主研发能力的增强。openEuler 作为高效且稳定的开源操作系统,支持多设备操作,应用一次开发覆盖全场景,其内核源于 Linux,支持鲲鹏和其他多种处理器。openEuler 在编译系统网络和文件系统等方面进行了改进与优化,是性能卓越的操作系统平台,可以满足高负载的客户业务需求,也适用于数据库和人工智能等先进的应用场景;同时,openEuler 面向全球的操作系统开源社区,鼓励社区合作,这可以使得 openEuler 一直走在时代的前沿,很好地满足我们构建业务化海洋模型的需要^[16]。

2.5 模型计算层

模型计算层主要基于 FVCOM 动力模块和 DYE 模块建立^[11]。FVCOM 海洋模式中的示踪物 DYE 方程与水温方程相似,最初为 HU 等^[29]为了研究乔治浅滩的营养盐输运而研发,随后在世界各地

的海湾研究中得到广泛应用。方程如下:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \mu \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} + w \frac{\partial N}{\partial z} = \frac{\partial N}{\partial x} (A_h \frac{\partial N}{\partial x}) + \frac{\partial N}{\partial y} (A_h \frac{\partial N}{\partial y}) + \frac{\partial N}{\partial z} (A_z \frac{\partial N}{\partial z}) \quad (1)$$

式中: N 为污染物浓度; μ 、 v 和 w 分别为笛卡尔坐标下的 x 、 y 和 z 方向流速; A_z 为垂向湍流混合系数, A_h 为水平湍流混合系数, 两个系数分别由 Mellor-Yamada 2.5 模型^[30-31]和 SMAGORINSKY 方案^[32]确定。污染物扩散输运预报系统中的标准化释放量即为污染物浓度 N , 水平扩散系数即为水平湍流混合系数 A_h 。

$$A_h = \frac{0.5C\Omega}{P_r} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2} \quad (2)$$

式中: Ω 是单个示踪控制元的面积; C 是恒定参数; P_r 是普朗克常量。

2.6 数据可视化层

本系统中的数据可视化层主要是集成 Visit 和 Python 工具进行潮位数据、潮流数据及污染物扩散结果的可视化展示。Visit 可实时读取 NetCDF 格式的模式输出结果, 以自带的可视化界面进行展示。Python 后处理包可以自动化批量绘制潮位、潮流和示踪物扩散包络线等平面分布图。

3 美丽海湾污染物预报系统测试及初步验证——以象山港为例

3.1 模型网格设置

预报系统以象山港区域为案例进行了网格设置和运行。象山港地处浙江沿海中部, 宁波市东南部, 经纬度范围为 $29.38^\circ \sim 29.77^\circ \text{N}$, $121.41^\circ \sim 122.00^\circ \text{E}$ 。象山港是一个狭长的半封闭型海湾, 整体呈东北—西南走向, 主要包括与外海相连的佛渡水道、牛鼻水道以及主体部分的象山港峡湾。海湾全长约 70 km, 多数水深在 10~15 m, 常年波浪较小, 适合避风避浪。

象山港岸线蜿蜒曲折, 峡湾内分布有许多大小不一的岛屿。为了较准确地模拟象山港潮水运动, 本文在佛渡水道及牛鼻水道分别设置了两条水道的开边界。计算模型采用三角形网格(见图3), 由

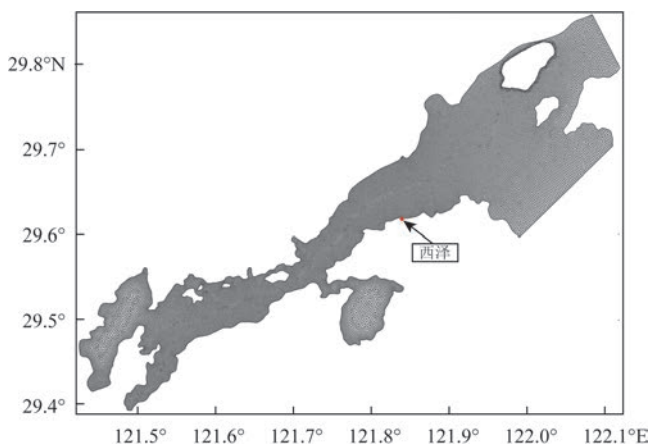


图3 象山港网格

Fig.3 Model grid in Xiangshan Bay

于在地形变化剧烈的地区海水运动较为复杂, 本文在岛屿和岸边界等地形复杂区域进行了岸线加密。计算区域共分成 18 391 个节点, 35 081 个三角元, 最小网格精度在 100 m 以内, 垂向 σ 坐标分 11 层。

3.2 模型参数设置

模型采用高精度岸线数据和水深数据, 由潮波驱动。

(1) 岸线和水深数据

本系统以象山港为例。为较好地模拟象山港水动力的真实情况, 系统利用遥感数据, 通过 Canny 算子提取了较为精准的象山港岸线, 同时利用电子海图通过 MapInfo 数值化软件将象山港区域的水深数据进行数字化。通过 SMS 软件将水深数据插值到象山港网格并得到水深图(见图4)。象山港水深在佛渡水道较大, 约为 25 m, 在象山港峡湾口门处减少为 10 m 左右, 进入峡湾后, 水深增加, 在峡湾中段达到 25~30 m, 临近湾顶处衰减为 5~10 m。总体水深分布呈现湾顶和口门地区较小、峡湾中段较大的特点, 其中 3 个支港(黄墩港、铁港和西沪港)内水深较小, 约为 0~5 m, 峡湾中段有一较深点, 水深超过 45 m。

(2) 开边界潮波设置

模型的外海潮波开边界通过给出 8 个主要天文分潮(M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 K_2 、 P_1 和 Q_1) 的调和常数计算的水位进行驱动。水位计算公式为:

$$h(t) = h_0 + \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos[a_i t + v_{0i} + u_i - g_i] \quad (3)$$

式中: $h(t)$ 为任何时刻的潮水高度; h_0 为余水位 (这里设为 0); f_i 为交点因子; H_i 为振幅; a_i 为角频率; u_i 为交点订正角; $v_{0i} + u_i$ 表示初相角; g_i 为迟角。

模型使用的调和常数, 即 H_i 和 g_i 的数值来源于基于 DTU10 模式下的全球潮汐调和常数资料, 由丹麦科技大学 (Technical University of Denmark) 研发, 分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。

3.3 模型验证

象山港海水运动主要受到潮波引起的潮流影响, 其物质扩散和输运过程也主要由潮流驱动, 因此, 本研究初步验证了预报系统的潮位预报准确度。图 5 为西泽站点 (位置见图 3, $29^\circ 36' 34.53''\text{N}$, $121^\circ 49' 56.91''\text{E}$) 的预报潮位及潮流与实测资料的对比, 实测资料来自朱军政等^[33]2002 年 8 月 16 日

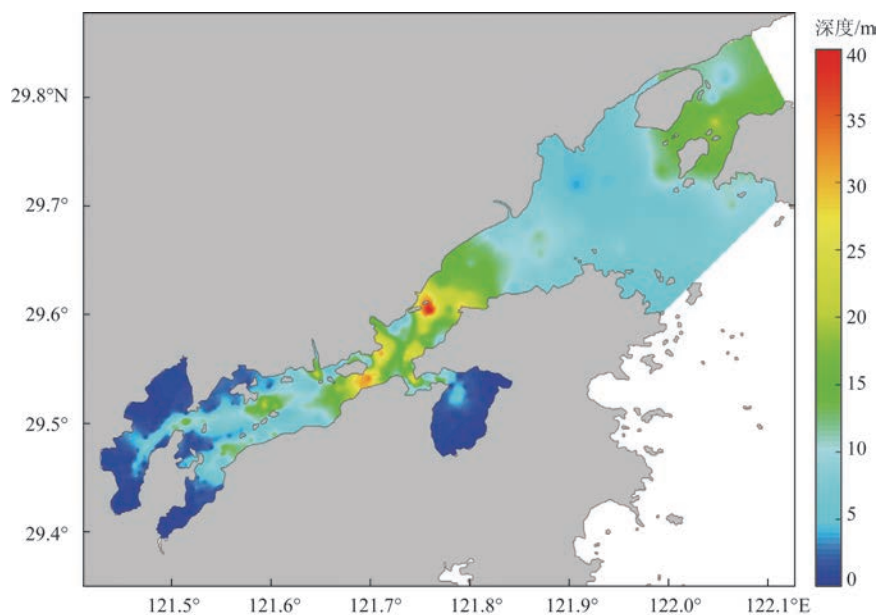


图 4 象山港插值水深

Fig.4 Model bathymetry in Xiangshan Bay

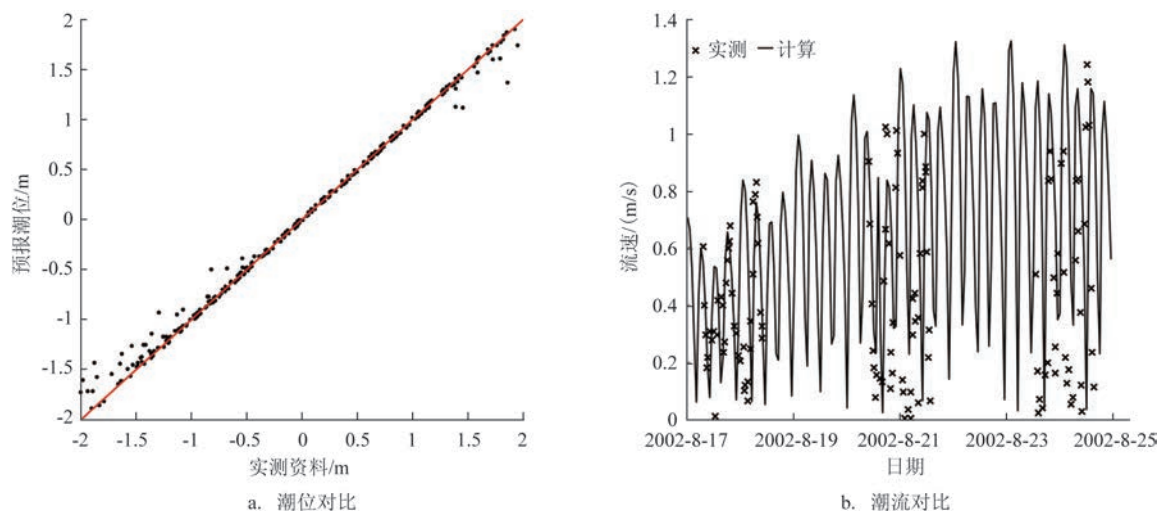


图 5 预报潮位及潮流和实测资料对比

Fig.5 Comparison of forecast tide levels and currents with measured data

0:00—8月30日23:00的实测数据。如图5所示,预报系统基本上拟合了西泽站点的水位及潮流变化。本文根据SPITZ等^[34]的方法,使用相对平均误差和相关系数来进行误差评估,得到潮位的相对平均误差为2.13%,潮流的相对平均误差为5.42%,相关系数接近1。

3.4 潮位和潮流结果分析

本文对潮位的模拟结果进行潮汐调和和分析,得

到象山港 M_2 分潮的同潮图(见图6)。象山港是典型的半日潮港,其中, M_2 分潮在潮位中占主导地位,浅水分潮也十分明显^[35]。象山港内 M_2 分潮的振幅均在1 m以上,佛渡水道和牛鼻水道的振幅约为1.1 m。在峡湾内,随着峡湾的深入,振幅由口门处的1.1 m不断递增,当分潮传入黄墩港和铁港后,振幅达到1.4 m,口门处 M_2 分潮的迟角与峡湾中段相差 10° 左右。

图7为模拟结果的象山港 M_2 分潮表层潮流椭圆图,椭圆的长半轴和短半轴分别代表该点分潮的

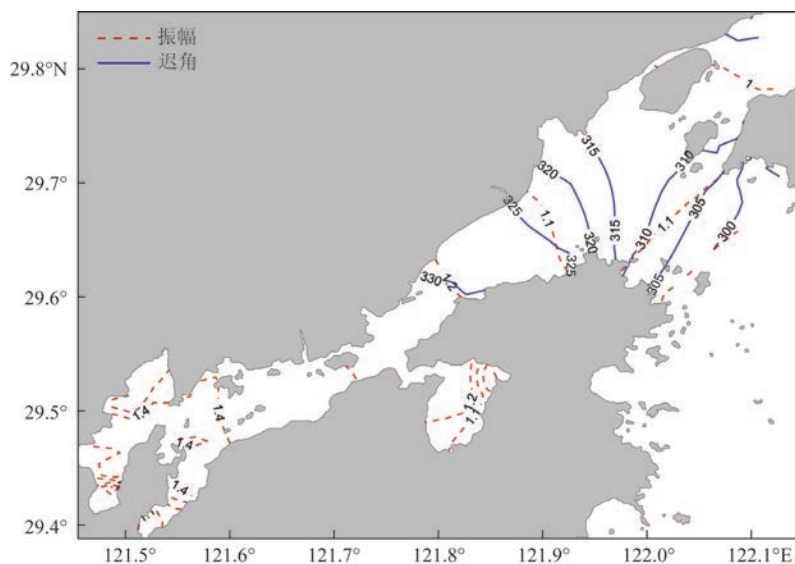


图6 象山港 M_2 分潮同潮图

Fig.6 M_2 Co-tidal chart in Xiangshan Bay

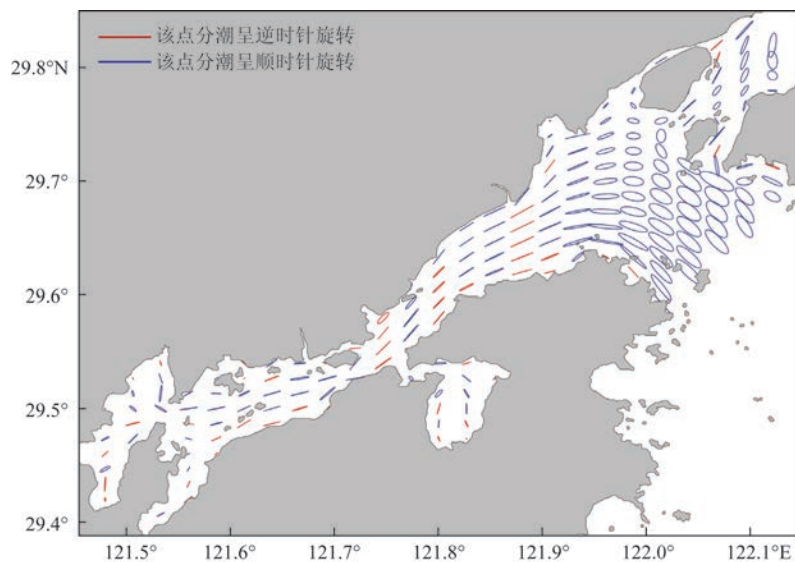


图7 象山港 M_2 分潮表层潮流椭圆图

Fig.7 M_2 tidal current ellipse in Xiangshan Bay

最大流速和最小流速。 M_2 分潮潮流椭圆长轴在牛鼻水道—狭湾口门之间较大,椭圆率介于0.2~0.4,且均为顺时针旋转,呈旋转流特征。进入峡湾后,由于水道变窄, M_2 分潮潮流逐渐减弱,椭圆率骤减至0~0.1,并且顺时针流与逆时针流交替出现,呈往复流特征。狭湾口门—湾顶的椭圆长轴不断减小,在黄墩港和铁港附近达到最小,这与前人的研究结论^[33-36]基本一致。

以X1(121.9°E, 29.7°N)为基准站,图8a—d展示了大潮期间(2021年6月12日0—24时)表层落急、落憩、涨急和涨憩4个典型时刻的流场(表层—底层流场特征类似,仅流速逐渐变小)。除铁港、黄墩港和西沪港外,象山港内潮流普遍很强,且潮流流向与岸线方向基本一致。牛鼻水道及佛渡水道

的潮流比峡湾内潮流强,其中,牛鼻水道附近的流速为全港最大值。以峡湾内潮流来看,随着峡湾的深入,流速从口门处开始逐渐减小,在湾顶处达到最小。由落急和涨急时刻的流速可以看出,涨潮流速大于落潮流速。涨潮时,外海潮流经牛鼻山水道和佛渡水道汇集在象山港峡湾口门后,沿岸线向湾内传播,在峡湾中段到达西沪港港口处时有一支分潮流流入港内;经过西沪港口后,由于峡湾中段岛屿众多,潮流被分流成多路且流速有所增加;经过众多岛屿后,潮流汇集成一股,并在临近湾顶附近分成两支,分别进入黄墩港和铁港。落潮时,黄墩港、铁港和西沪港的分潮流汇入峡湾后,在峡湾口门处流速达到最大值,随后通过牛鼻山水道和佛渡水道退出象山港并进入外海。

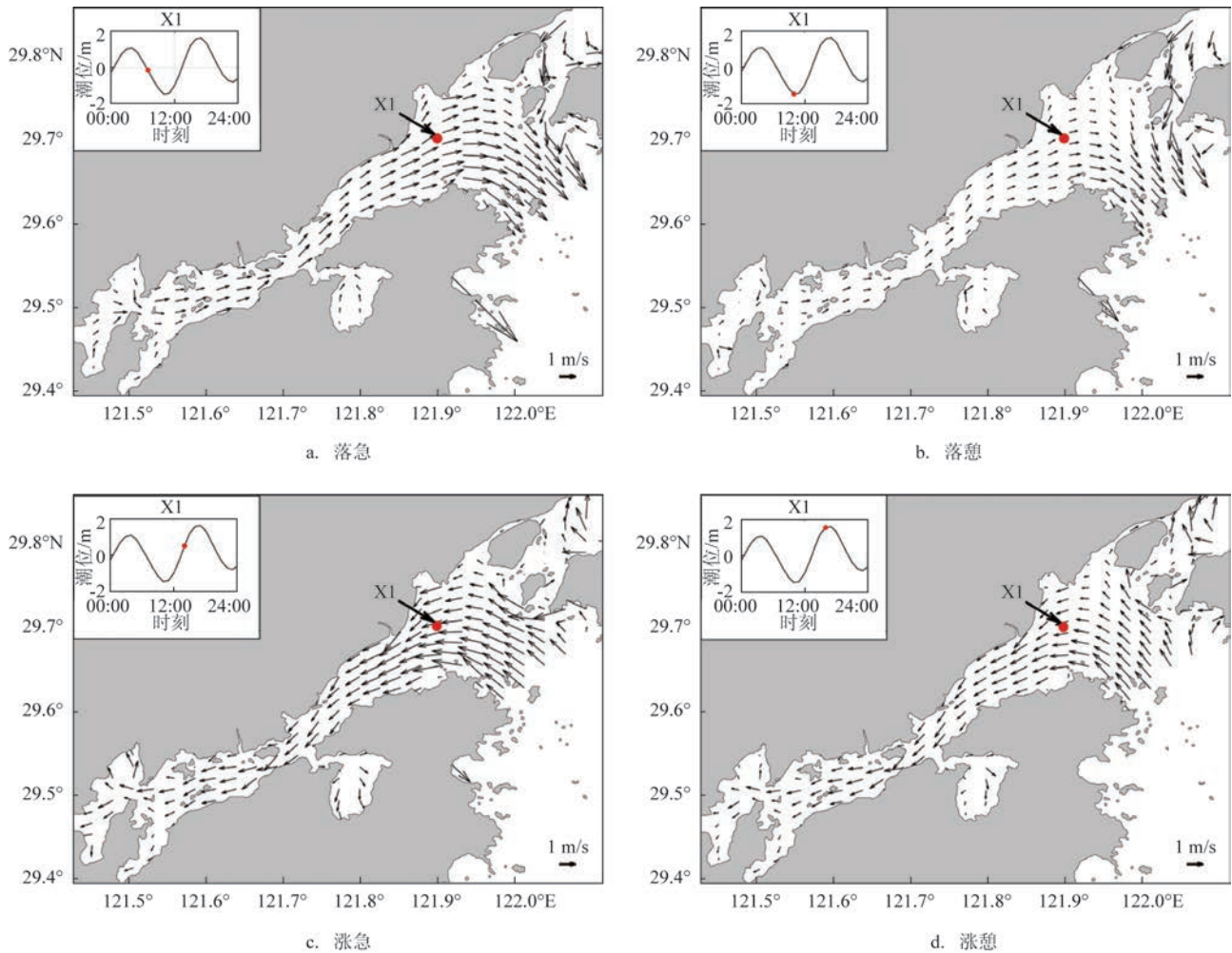


图8 象山港潮流模拟结果

Fig.8 Modelled tidal currents in Xiangshan Bay

3.5 污染物扩散分析

选取图8中象山港口门处的基准站点X1连续释放污染物进行扩散模拟计算,起始时间设置为2021年6月1日,标准化扩散量和扩散系数为默认

设置。两个完整的潮周期期间污染物浓度的分布如图9所示。根据计算结果,设置X2(121.85°E, 29.65°N)和X3(121.95°E, 29.65°N)两个基准站点,两个完整潮周期期间的污染物浓度随时间变化特征如图10所示。

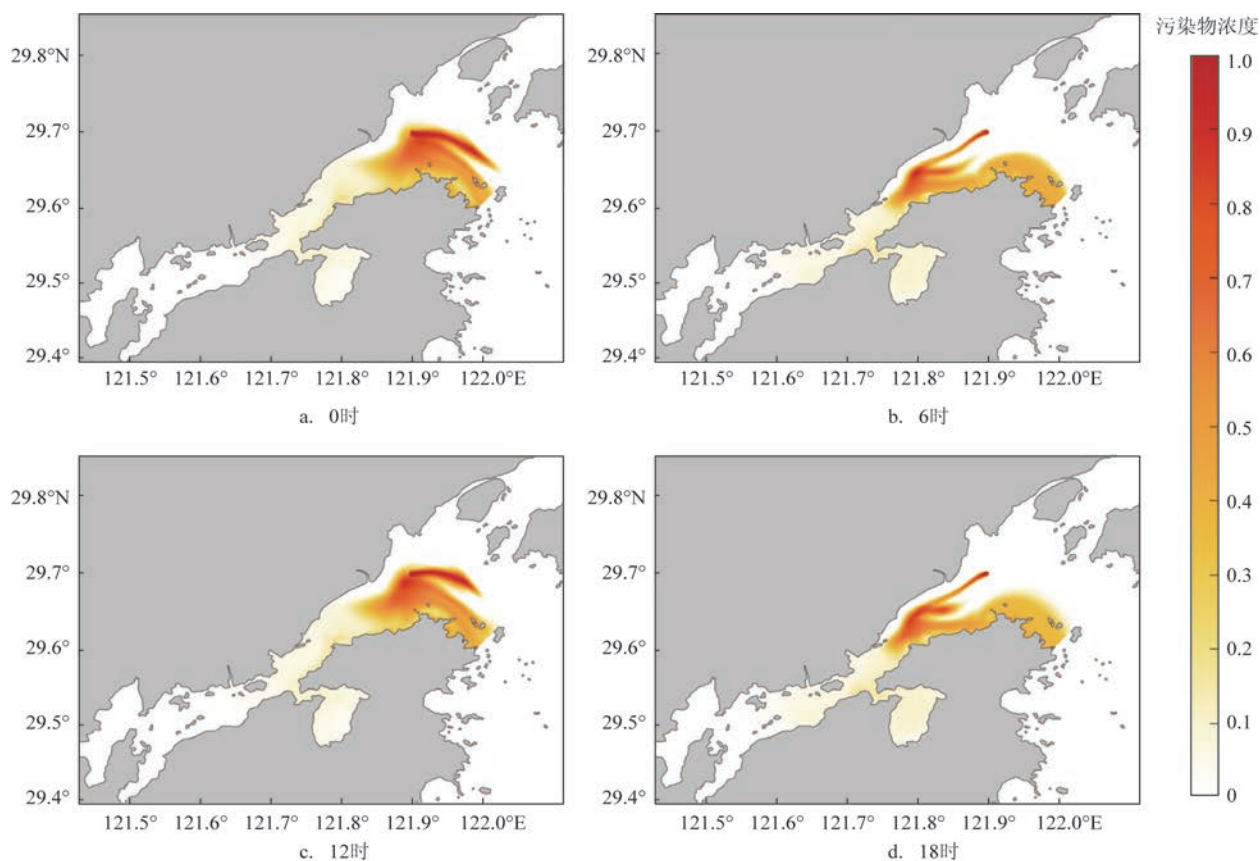


图9 污染物扩散输运案例图

Fig.9 Examples of pollutant diffusion and transport

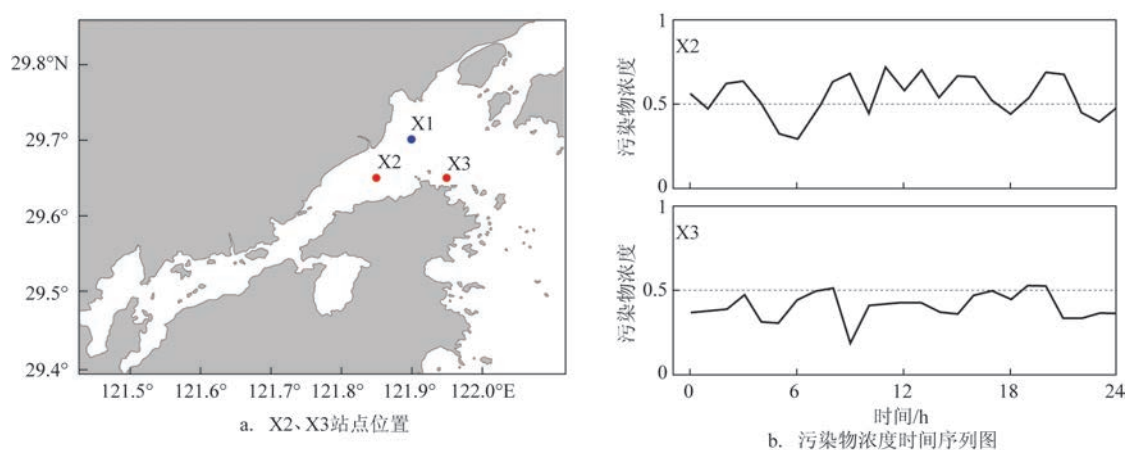


图10 污染物浓度随时间变化图

Fig.10 Graph of the change of pollutant concentration with time

由图9可知,整个过程中污染物被强烈的潮流驱动。涨潮时,污染物沿岸线向湾顶移动,污染物浓度由中心向四周衰减扩散,由于水道变窄,污染物扩散范围被压缩。落潮时,污染物随水流向峡湾外运动,随着时间的推移,污染物在岸线周边沿牛鼻水道向外海推移。由于污染物的影响水域与外界干净的海水会不断地进行水体交换,污染物水团由外向内被稀释。由图10可知,X2位于象山港峡湾内,受涨落潮的影响,污染物浓度变化较为剧烈,

而X3位于牛鼻水道附近,水域相对宽广,污染物浓度变化相比于峡湾内更平稳。

本文选取图8中象山港口门处的基准站点X1连续释放污染物来测试系统的稳定性,起止时间设置为2021年1月1日—12月30日,按月输出计算结果,其余为默认设置。各月月末的最后1h污染物的扩散分布如图11所示。由图可见,海湾污染物扩散运输预报系统能正常运行且稳定可靠,可以较好地展示污染物在运输过程中的扩散过程,并给出特

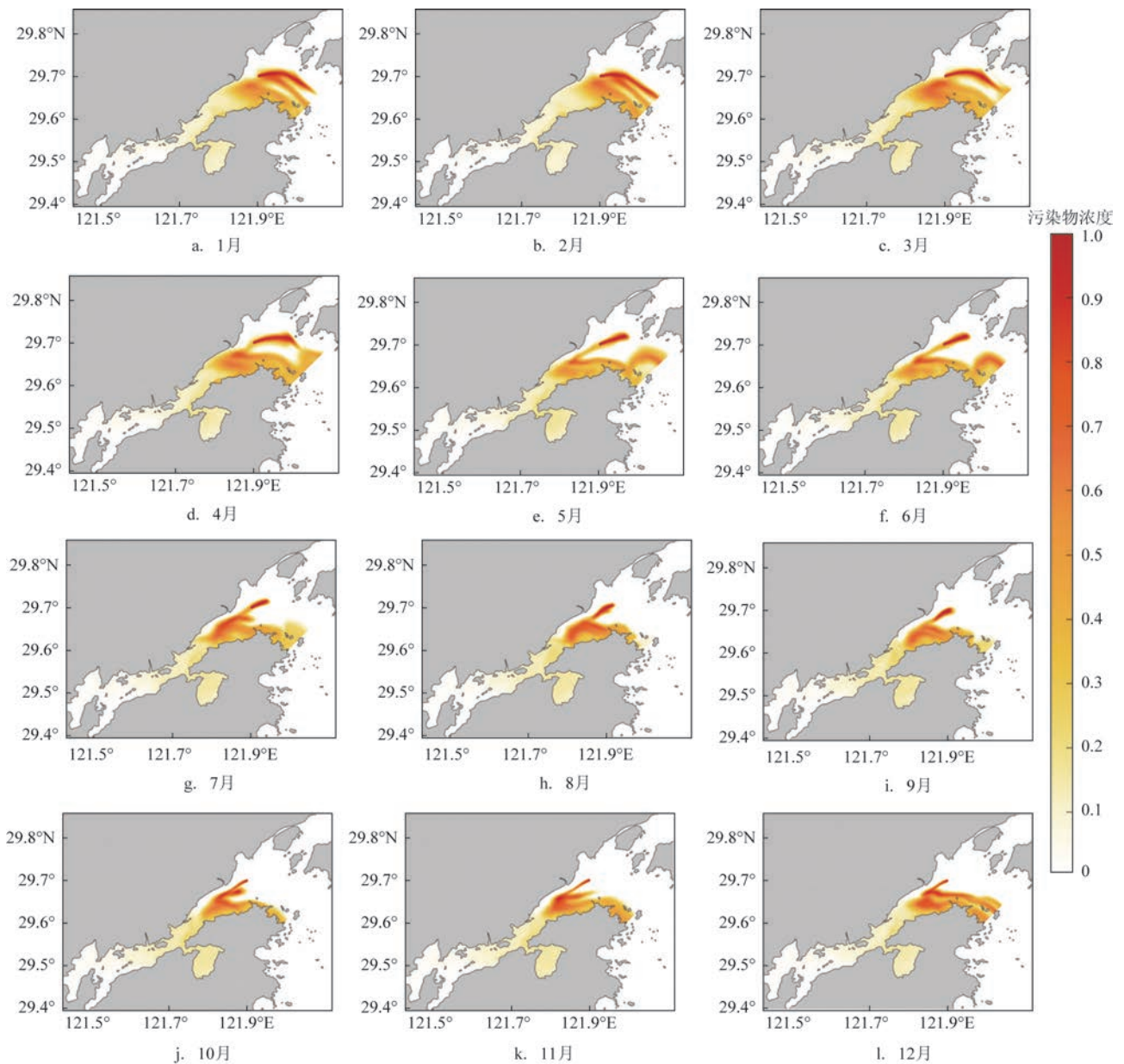


图11 系统稳定性测试结果图

Fig.11 System stability test results

定时刻的污染物浓度和包络线,为污染物的评估和预防提供参考。

4 结论和展望

本文基于国产操作系统 openEuler 构建了一个基于 FVCOM 的海湾污染物扩散输运预报系统,并以象山港为例对整个系统进行测试和检验。结论与展望如下:

(1) openEuler 作为华为自主研发的新系统,具有广阔的应用潜力和前景。

(2) 本文首次成功将基于 FVCOM 的污染物预报系统及其附带的可视化后处理系统移植到国产操作系统 openEuler 中,并以象山港为例进行了测试。这套方法及其成功经验可以推广应用到其他海湾。

(3) 未来研究可以考虑将大气海洋耦合模式以及生态和水质耦合模式移植到 openEuler 系统,应用于美丽海湾的生态环境保护。

参考文献:

- [1] 黄发明, 黄玲, 姚鑫悦. 加快推进海域综合整治 建设“五位一体”美丽海湾[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(1): 99-103.
HUANG F M, HUANG L, YAO X Y. Accelerate the comprehensive improvement of sea areas and build a “five-in-one” beautiful bay[J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(1): 99-103.
- [2] 李方. 建设人海和谐的美丽海湾[J]. 环境经济, 2021(9): 60-63.
LI F. Build a beautiful bay where people and the sea are harmonious[J]. Environmental Economy, 2021(9): 60-63.
- [3] 叶安乐, 梅丽明. 渤黄东海潮汐波数值模拟[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.
- [4] 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. Numerical simulations of tide and tidal current in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(5): 1-10.
- [5] 万振文, 乔方利, 袁业立. 渤、黄、东海三维潮汐运动数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 611-616.
WAN Z W, QIAO F L, YUAN Y L. Three-dimensional numerical modelling of tidal waves in the Bohai, Yellow and East China Seas [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(6): 611-616.
- [6] 吕玉麟, 赖国璋. 近海浅水环流问题的数值模拟[J]. 大连工学院学报, 1981, 20(1): 39-52.
LV Y L, LAI G Z. The mathematical modelling of near coast shallow water circulation[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1981, 20(1): 39-52.
- [7] 范聪慧. 多因素对海洋上混合层深度影响的数值模拟[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2007.
FAN C H. Numerical simulation of the ocean surface mixed layer depth influenced by the multi-factors[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [8] 郑静静, 刘桂梅, 高姗, 等. 风和径流量对长江口缺氧影响的数值模拟[J]. 海洋学报, 2018, 40(9): 1-17.
ZHENG J J, LIU G M, GAO S, et al. The impact of river discharge and wind on the hypoxia off the Changjiang Estuary: a numerical modeling study[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(9): 1-17.
- [9] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G, et al. An unstructured grid, finite-volume community ocean model FVCOM user manual[M]. New Bedford: University of Massachusetts-Dartmouth, 2013.
- [10] 陶小琴. 基于 FVCOM 的厦门湾台风风暴潮数值模拟[D]. 厦门: 厦门大学, 2015.
TAO X Q. FVCOM-based numerical simulation of storm surge in the Xiamen Bay[D]. Xiamen: Xiamen University, 2015.
- [11] 郑淑贤. 基于 FVCOM 的琼州海峡潮汐潮流数值模拟与研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
ZHENG S X. Numerical simulation of tide and tidal currents in the Qiongzhou Strait based on FVCOM[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [12] 胡松. 非结构有限体积法海洋模式垂向计算的一种改进方法 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26(4): 430-436.
HU S. Improved vertical algorithm for finite volume coastal and ocean model with unstructured-grid[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(4): 430-436.
- [13] 徐国怀, 潘增弟, 张昊飞, 等. 基于 FVCOM 的宁波-舟山海域溶解型危化品泄漏扩散模拟[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(4): 543-552.
XU G H, PAN Z D, ZHANG H F, et al. Diffusion simulation of leakage of dissolved hazardous chemicals in Ningbo-Zhoushan waters based on FVCOM[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(4): 543-552.
- [14] 余东, 张民生, 林建国, 等. 罗源湾水体重金属现场调查与浓度数值模拟分析[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(2): 248-252.
YU D, ZHANG M S, LIN J G, et al. Heavy metal concentration site monitor and numerical simulation in Luoyuan Bay[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(2): 248-252.
- [15] 朱冬琳, 陈波, 牙韩争, 等. 广西近海污染物输运模拟研究[J]. 广西科学, 2019, 26(6): 669-675.
ZHU D L, CHEN B, YA H Z, et al. Study on numerical simulation of pollutant transport in Guangxi coastal waters[J].

- Guangxi Sciences, 2019, 26(6): 669-675.
- [16] 姜恒志, 崔雷, 于大涛, 等. 普兰店湾水体交换数值模拟研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 43-47, 55.
- JIANG H Z, CUI L, YU D T, et al. Numerical study of water exchange in the Pulandian Bay[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(1): 43-47, 55.
- [17] 陈妍宇, 宋德海, 鲍献文, 等. 胶州湾跨海大桥对海湾水体交换的影响[J]. 海洋与湖沼, 2019, 50(4): 707-718.
- CHEN Y Y, SONG D H, BAO X W, et al. Impact of the cross-bay bridge on water exchange in Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2019, 50(4): 707-718.
- [18] 李希彬, 孙晓燕, 牛福新, 等. 半封闭海湾的水交换数值模拟研究[J]. 海洋通报, 2012, 31(3): 248-254.
- LI X B, SUN X Y, NIU F X, et al. Numerical study on the water exchange of a semi-closed bay[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(3): 248-254.
- [19] 李希彬, 牛福新, 王鲁宁, 等. 未来大规模海岸工程对渤海湾潮动力环境影响的模拟研究[J]. 海洋通报, 2018, 37(3): 320-327.
- LI X B, NIU F X, WANG L N, et al. Simulation study on the impact of future large-scale reclamation projects on tidal hydrodynamic environment in the Bohai Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2018, 37(3): 320-327.
- [20] 于华明, 鲍献文, 李希彬, 等. 利用有限体积模型对狭长海湾填海优选方案的研究[J]. 海岸工程, 2009, 28(2): 9-24.
- YU H M, BAO X W, LI X B, et al. Study on optimum scheme for reclamation in a narrow bay using a finite volume model[J]. Coastal Engineering, 2009, 28(2): 9-24.
- [21] 高冠东, 鲍献文, 于华明. 潮汐电站建坝对乳山湾水动力环境影响的数值模拟研究[J]. 海洋技术, 2012, 31(3): 74-78.
- GAO G D, BAO X W, YU H M. Effects of tidal power station damming on the hydrodynamic environment of the Rushan Bay [J]. Ocean Technology, 2012, 31(3): 74-78.
- [22] 孙明华. 一个集合海浪预报系统及其初步试验[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 673-680.
- SUN M H. An ensemble ocean wave forecast system and preliminary experiment[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(6): 673-680.
- [23] 王辉, 万莉颖, 秦英豪, 等. 中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应用[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1090-1104.
- WANG H, WAN L Y, QIN Y H, et al. Development and application of the Chinese global operational oceanography forecasting system[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1090-1104.
- [24] 方长芳, 张翔, 尹建平. 21 世纪初海洋预报系统发展现状和趋势[J]. 海洋预报, 2013, 30(4): 93-102.
- FANG C F, ZHANG X, YIN J P. Development status and trends of ocean forecasting system in the 21st Century[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(4): 93-102.
- [25] 孙玉娟, 乔方利, 王关锁, 等. MASNUM 海浪数值模式业务化预报与检验[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(3): 281-294.
- SUN Y J, QIAO F L, WANG G S, et al. Forecast operation and verification of MASNUM surface wave numerical model[J]. Advances in Marine Science, 2009, 27(3): 281-294.
- [26] 杨永增, 孙玉娟, 王关锁, 等. 基于 MASNUM 海浪预报系统的北印度洋波浪特征模拟与预报分析[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(1): 1-9.
- YANG Y Z, SUN Y J, WANG G S, et al. Analyses for modeling and forecast of sea waves in the North Indian Ocean by means of MASNUM wave forecast system[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(1): 1-9.
- [27] 倪光南, 胡浩, 宋志平, 等. 持续构筑科技、经济相融合的发展生态[J]. 科技导报, 2021, 39(16): 35-38.
- NI G N, HU H, SONG Z P, et al. Continue to build a development ecology that integrates technology and economy[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(16): 35-38.
- [28] 程宇, 滕滨, 董少杰. 自主可控操作系统的探索与研究[J]. 通信世界, 2021(9): 40-41.
- CHENG Y, TENG B, DONG S J. Exploration and research of autonomous controllable operating system[J]. Communications World, 2021(9): 40-41.
- [29] HU S, TOWNSEND D W, CHEN C S, et al. Tidal pumping and nutrient fluxes on Georges Bank: a process-oriented modeling study[J]. Journal of Marine Systems, 2008, 74(1-2): 528-544.
- [30] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 851-875.
- [31] GALPERIN B, KANTHA L H, HASSID S, et al. A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1988, 45(1): 55-62.
- [32] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [33] 朱军政, 曹颖. FVCOM 模型在象山港三维潮流盐度计算中的应用[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(6): 899-903.
- ZHU J Z, CAO Y. Application of FVCOM for computation of 3D tidal flow and salinity in Xiangshan Bay[J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(6): 899-903.
- [34] SPITZ Y H, KLINCK J M. Estimate of bottom and surface stress during a spring-neap tide cycle by dynamical assimilation of tide gauge observations in the Chesapeake Bay[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1998, 103(C6): 12761-12782.
- [35] 徐鹏. 象山港潮及其余流的数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- XU P. A model study of tide and its residual current in Xiangshan Bay, East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [36] 王平, 陈伟斌, 邹文峰, 等. 象山港潮流余流结构及水体半交换时间数值研究[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(1): 107-115.

WANG P, CHEN W B, ZOU W F, et al. Numerical study of the tidal residual current structure and the water half-exchange time

in Xiangshangang bay[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(1): 107-115.

Pollutant diffusion and transport prediction system in a bay based on domestic operating system—a case study of Xiangshan Bay

ZHU Yuhang, CHEN Qinsi, XU Yikai, HU Song

(College of marine science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A pollutant diffusion and transport prediction system based on three-dimensional unstructured grid hydrodynamic model is constructed on the domestic operating system openEuler. The system is designed a three-layer architecture of operating system, model calculation and data visualization, and provides functions such as tidal level and tidal current simulation, pollutant release at selected stations, pollutant diffusion and transport prediction, visualization of prediction results, which is tested with Xiangshan Bay as an example for testing, providing functions such as tide and tide simulation, pollutant release from selected stations, pollutant diffusion and transport forecast, and visualization of forecast results, and is tested with Xiangshan Port as an example. The results show that the current mainstream unstructured ocean model can be successfully transplanted into the domestic operating system openEuler, and the forecast system can run normally, stably and reliably, which could provide a reference for the governance and pollution forecast of bay and also provide an operational platform of marine forecasting for the Digital Earth in the future.

Key words: domestic operating system; openEuler; bay; pollutant forecast