



厦门大学学报(自然科学版)
Journal of Xiamen University(Natural Science)
ISSN 0438-0479,CN 35-1070/N

《厦门大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 福建近海漂移物漂移轨迹分析及模拟
作者: 曾银东, 郭民权, 方许闻, 江毓武, 郑祥靖
收稿日期: 2021-11-15
网络首发日期: 2022-04-25
引用格式: 曾银东, 郭民权, 方许闻, 江毓武, 郑祥靖. 福建近海漂移物漂移轨迹分析及模拟[J/OL]. 厦门大学学报(自然科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20220425.1323.006.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

福建近海漂移物漂移轨迹分析及模拟

曾银东^{1,2}, 郭民权², 方许闻^{3✉}, 江毓武³, 郑祥靖²

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 福建省海洋预报台, 福建福州 350003; 3. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361102)

*通信作者 xwfang@xmu.edu.cn

摘要 漂移物运动主要受海流、风以及湍流所造成的随机运动影响。本文通过在福建近岸海域的浮子实验, 选取了兴化湾、厦门湾与近岸海域浮子的运动轨迹, 对研究海域的表面流进行分析, 得到近岸浮子轨迹主要是外海环流驱动, 有沿等深线迁移趋势, 并受到潮过程作用局部形成回流。同时本研究在业务化三维海洋动力模型基础上, 结合拉格朗日粒子追踪法, 建立了福建近海海上目标物漂移轨迹预测模式。利用浮子漂移实验对漂移模式在福建近岸海域的适用性进行了验证, 并分析不同海域漂移轨迹预测误差来源。同时浮子实验还说明了 FES 潮流模型在海峡有较高的准确度, 而湾内欠佳。未来湾内轨迹模拟需从提高潮流模拟的精度入手。

关键词 福建近海; 浮子漂移实验; 拉格朗日追踪法; 漂移轨迹预测

中图分类号 X 834 文献标志码 A DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202111019

Analysis and simulation of drift trajectory in the coast of Fujian province

ZENG Yindong^{1, 2}, GUO Minquan², FANG Xuwen^{3✉}, JIANG Yuwu³, ZHENG Xiangjing²

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Marine Forecasts Center of Fujian Province, Fuzhou 350003, China; 3. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract The movement of drifters is mainly driven by ocean currents, wind and turbulence. Based on the float experiment in the coastal waters of Fujian province, the trajectories of the floats in Xinghua Bay, Xiamen Bay and the coastal waters are selected. The surface currents in the studied area are analyzed. The trajectories of the coastal floats are mainly driven by the circulation of the outer sea, therefore there is a tendency to migrate along the depth contours. Meanwhile the oscillation is formed under the action of the tidal process. This research establishes a prediction model for the drift trajectory of offshore targets in the Fujian coastal waters based on the operational three-dimensional ocean dynamic model, combined with the Lagrangian particle tracking method. The real floater drift was used to verify the drift model in the coastal waters of Fujian, and analyze the sources of drift trajectory prediction errors in different sea areas. The float trajectory also shows that the FES tidal current model has high accuracy in the Taiwan strait, but no reasonable in the bay. The simulated trajectories have higher accurate in nearshore than those in the bay.

Key words Fujian offshore; float drift; Lagrangian-tracking; drift trajectory prediction

台湾海峡及其邻近海域由于自然条件及生产活动的原因, 船只事故时有发生, 造成人员落水、海上溢油, 加上近年频发的有毒赤潮, 这些事件对近海海洋经济发展、环境安全造成严重危害, 并导致巨大的经济损失。因此, 在台湾海峡及其邻近海域建立漂移轨迹预报模式, 对落水人员、溢油、赤潮等漂浮物的运动轨迹进行及时的模拟和可靠的预测, 能为开展有效的搜救、防控、拦截以及影响评估、减轻生态灾害损失, 保障海洋生态环境安全等提供决策支持。

影响漂移运动的海表动力环境主要包括海面的风、浪、流等因素, 漂移物主要是随海流运动。浮子漂移实验能够捕捉研究海域表面海流的特征, 基于 GPS 浮子具有高精度 (2~50 m) 与采样频率等

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1407502、2017YFC1404804), 国家自然科学基金 (41876004)。

网络首发时间: 2022-04-25 19:12:05 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20220425.1323.006.html>

特点,常被运用于近岸海域的浮子漂移实验^[1]。Lin 等^[2]于 2018 年 1 月在大亚湾开展了 SUCE (Surface Current Experiment) 浮子实验,通过比较浮子实验计算的流速与广东沿海已有的再分析数据,认为浮子实验结果能够反映出表层海流的特征。2020 年 Gao 等^[3]等分析部署在大亚湾海域的 120 个浮子的实测资料,认为漂流浮子总体上能够捕捉到表面流(潮流与余流)特征。随着互联网以及通信定位技术的发展,漂流浮子的成本更低,体积更小,漂流浮子已成为观测近岸海域的表层海流的重要工具。

目前国外海事发达国家对于目标漂移轨迹预测模型基本已形成较成熟的业务化预报体系,如英国的 SARIS^[4]、美国的 HACSALV^[5]、挪威的 LEEWAY^[6]等。国内方面也开展了不少相关的研究,胡志武等^[7]基于实测海流和水文图表,以遇难船舶为对象,研究了在风、浪、流共同作用下船舶的漂移轨迹,认为考虑波浪作用后并未提高预测精度。近年来,部分研究均采用数值模式,肖文军等^[8]利用中尺度气象模式 WRF (Weather Research and Forecasting Model)、无结构网格近岸海洋模式 FVCOM (Finite-Volume Coastal and Ocean Model) 和基于蒙特卡洛随机统计理论的海上搜救目标漂移轨迹模式 Leeway,建立了长江口及邻近海域海上搜救物漂移轨迹预测模型系统。大部分研究工作都不考虑波浪对物体的作用,不过部分学者认为波浪的作用不可忽略。徐江玲等^[9]基于海上大型浮标(直径 10 m)脱离锚定(跑位)后的漂移轨迹实测数据,对比了只考虑风和流的漂移轨迹和增加波浪作用后的漂移轨迹,认为波浪作用引起的漂移速度随波陡或浮在海面上的体积增大而增加。

目前关于台湾海峡浮子漂移实验研究的报告较少,且局限于平潭等部分海域^[10],本文通过覆盖福建近岸海域的浮子实验,分析了研究海域的表面流特征,讨论了 FES 潮流模型在福建近岸海域的适用性。并采用已在台湾海峡业务化运行的具有港湾分辨率的三维海洋动力模型,在对港湾海流模拟的基础上,结合拉格朗日粒子追踪方法,建立了福建近海海上目标物漂移轨迹预测模式,利用浮子漂移实验对漂移模型在福建近岸海域的适用性进行了较全面的验证,并分析不同海域漂移轨迹预测误差来源。

1 漂移物漂移轨迹预报模式

1.1 拉格朗日追踪法理论

漂移是一个连续变化的过程,但在实际处理中认为漂移物在某时间段内的速度不变。假定初始位置为 \vec{S}_0 ,经过一定的时间步长 Δt 后漂移到了新的位置,根据拉格朗日追踪法可得^[11]:

$$\vec{S} = \vec{S}_0 + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \vec{V}_t dt + \Delta\alpha \quad (1)$$

式中: \vec{S}_0 为漂移物的初始位置; \vec{V}_t 为 t 时刻的物体漂移速度,是各个环境因子作用所产生速度的综合; $\Delta\alpha$ 为湍流涡动造成的随机运动距离。

本文认为海上漂移物受海面风和流的作用,即 \vec{V}_t 主要由风导漂移和海表流场两个分速度构成,风与流产生的漂移物漂流速度可采用下式计算^[10]:

$$\vec{V}_t = k \times \vec{V}_{\text{wind}} + \vec{V}_{\text{current}} \quad (2)$$

式中, \vec{V}_{wind} 为海面风速, \vec{V}_{current} 为海表流速, k 为风导系数,其值受漂移物种类、漂移物沉浸状态等因素影响,当漂移物为船舶和浮标时, $k=0.01\sim 0.05$,对于浮子本文取 $k=0.02$ 。

漂移物在湍流涡动作用下的随机运动距离可以由以下公式计算^[12]:

$$\Delta\alpha = R\sqrt{6K_a\Delta t} \quad (3)$$

式中, $\Delta\alpha$ 为 α 方向上的随机运动距离(α 代表 x 、 y 或 z 方向), R 为 $[-1, 1]$ 之间的均匀分布随机数, K_a 为 α 方向上的扰动系数。

1.2 流场模型

ROMS 模型是一个自由表面、静水力学和三维非线性斜压原始方程模型,由罗格斯大学和加利福尼亚大学洛杉矶分校两校共同开发完成^[13],此模型可以预测不同尺度的运动,本文在“十二五”福建省

已研发的大小网格嵌套精细化三维温、盐、流数值预报模式基础上，采用最新的水深、地形等基础数据，利用全球模型提供边界条件，采用大小网格嵌套的曲线正交网格方案，其中西北太平洋区为大网格区，厦门湾、兴化湾等重点港湾为小网格区；不断优化完善，建立了具有港湾分辨率的重点海域三维海洋动力模型。

1.2.1 嵌套模型与网格分布

本模型用大小区域单向嵌套方法进行，大区域网格计算的结果进行插值后作为小网格的边界条件；小区域网格的环流参数，如水位、温盐、环流由大网格提供，潮汐参数（潮位、潮流）由调和常数计算，如图 1 所示。

水平网格：大网格区为 $95^{\circ} \sim 147.9^{\circ} \text{ E}$ ， $9^{\circ} \text{ S} \sim 44.01^{\circ} \text{ N}$ 。大区域网格开边界网格距 15 km，到台湾海峡西岸为 2 km。小区域网格在厦门湾口、兴化湾等海域达到 100 m 的分辨率。在模型计算中，与大洋资料相一致，取最大水深为 5 500 m。

垂向网格：大区域网格垂向均取 30 层，最小水深为 10 m。小区域网格垂向取 10 层，并考虑潮汐漫滩过程，临界水深为 0.5 m。本模型采用对数形式进行垂向分层，不同水深区域，不同层次的间隔不一致。在海表分层较密，以反映海表混合层及温、盐跃层的复杂直结构；在海底分层较疏。

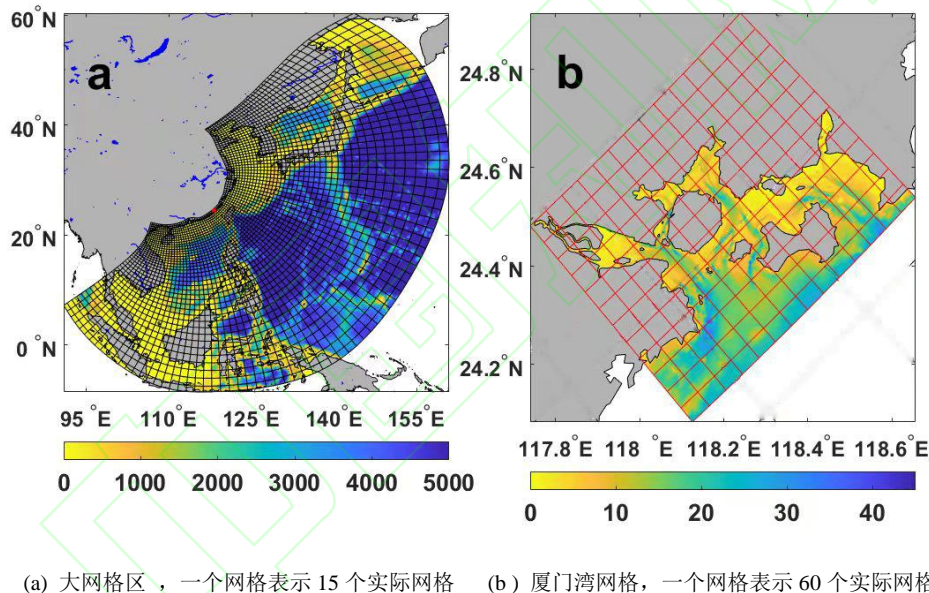


图 1 模型计算区域范围和水深分布
Fig. 1 Modelling domain and bottom topography

1.2.2 开边界控制条件

大网格水动力的开边界采用欧洲 myocean 的业务化产品，包括海表高度、温、盐和流 (<https://www.copernicus.eu/en/myocean>)。海表的净热通量、水气通量和动量通量则采用福建省海洋预报台每日业务化运行的气象研究与预报 (Weather Research and Forecasting, WRF) 模式的预报产品进行计算。模型计算中的江河输入均以《中国海湾志》的主要河流各月多年平均流量代入模型计算，入海盐度取 0。开边界潮汐所引起的水位与潮流过程采用 FES2014 潮汐模型 (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes.html>) 的天文潮调和常数，包含 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 P_1 、 K_2 、 Q_1 、 M_1 、 J_1 、 $2N_2$ 、 Mu_2 、 Nu_2 、 L_2 和 T_2 ，共计 15 个分潮。模型设定详细方案可参考文献^[14]。小网格开边界来源于大网格的滤潮计算结果，并加上潮汐调和常数所计算的潮位及潮流。

已有的研究工作^[14]已利用福建近岸海洋监测系统数据评估了模型性能,并以平均偏差、相关系数、均方根误差等指标比较了模型结果与观测数据,认为模型能较为准确模拟台湾海峡海流状态,本文不再详述。

2 浮子实验结果与讨论

2.1 漂移浮子实验与时段选取

本文漂移浮子实验的浮子内置 GPS 定位模块(含 GSM 通讯模块),能定时将浮子的运动轨迹坐标信息发回服务器,内置锂电池的电量理论上在连续运动状态可供 5 d 以上续航时间,外部采用密闭性塑料瓶安装保证不进水。同时会在浮子内部装有适量沙子,使浮子在海水中离出水面的部分不超过 2 cm,这样便可减少风对浮子运动的直接影响。浮子结构见图 2。

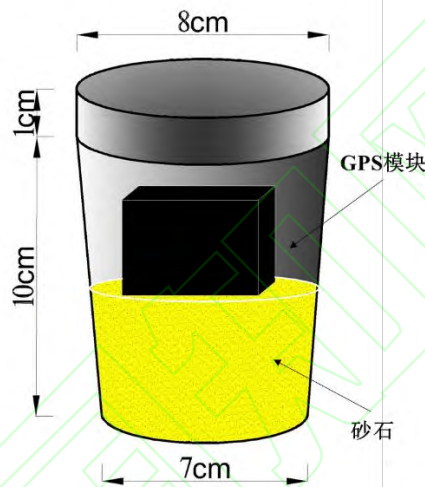


图2 漂移浮子结构图
Fig. 2 float diagram

2019年6月至2021年6月间,福建省海洋预报台共在福建近岸海域开展了17个航次调查,期间共释放245个漂移浮子,获取漂移点信息42万个,累计1600多天,累计漂移距离4.2万km。

浮子在漂移过程中存在搁浅、信号中断、定位数据异常、搁浅后重新漂移等情况,因此在选取漂移浮子过程时,通过判读漂移数据的连续性,选取连续漂移时段>24 h的漂移过程段,最终获得273个漂移过程段,图3为遴选出的浮子漂移轨迹图(部分)。可以看出:对于湾内的浮子,如厦门湾与兴化湾海域,主要受潮流作用,在湾内呈往复运动,并有流出湾外的趋势。对于湾外的浮子,则主要是沿着福建海岸运动,在春季、秋季东北风盛行时节,在各河口淡水形成的浮力推动下^[15],沿福建近海南下的沿岸流势力较强,所以浮子主要是沿岸向南运动,并具沿等深线运动的趋势;而在夏季西南风盛行时节,同时在南高北低的水位条件下^[16],沿福建近海以北向流为主,并有跨等深线向外海运动的趋势,这主要是与上升流有关的离岸运动造成。

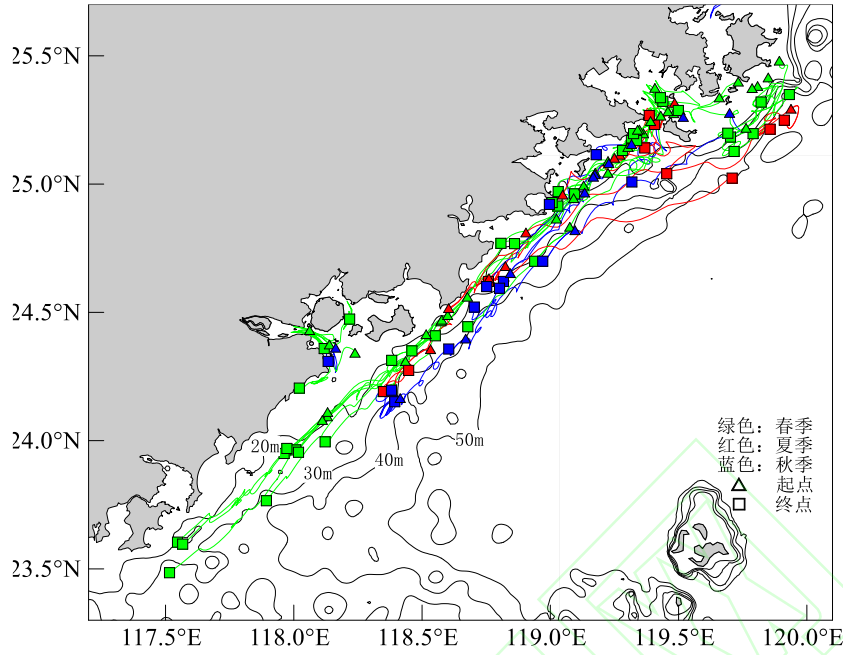


图3 福建近岸海域浮子漂移轨迹图（部分）
Fig. 3 Float drift trajectory map in Fujian coastal waters (part)

2.2 浮子实验结果分析

综合统计分析福建近海预测时段内浮子的漂移主要有 3 种形态：第一种，受涨落潮作用，浮子在一段时间内在某一海域往复运动，这主要发生在福建沿岸的强潮海湾内；第二种，受长时间的季风和海流的作用，浮子一段时间内沿一个方向持续运动，这主要在沿岸近海区域，也会受离岸流的作用跨岸迁移；第三种是前两种的结合，主要是河口区，如九龙江河口区等。

针对不同漂移形态，本文从北至南选取 3 种特征浮子进行分析（图 4）：1 号浮子为兴化湾内往复运动，运动时间段为 2021 年 3 月 30 日 18:00 至 2021 年 4 月 1 日 6:00；2 号浮子为沿福建近岸海域往南运动，运动时间段为 2019 年 10 月 24 日 8:00 至 2019 年 10 30 日 0:00；3 号浮子为厦门湾内往复运动，运动时间段为 2021 年 3 月 28 日 8:00 至 2021 年 3 月 29 日 20:00。

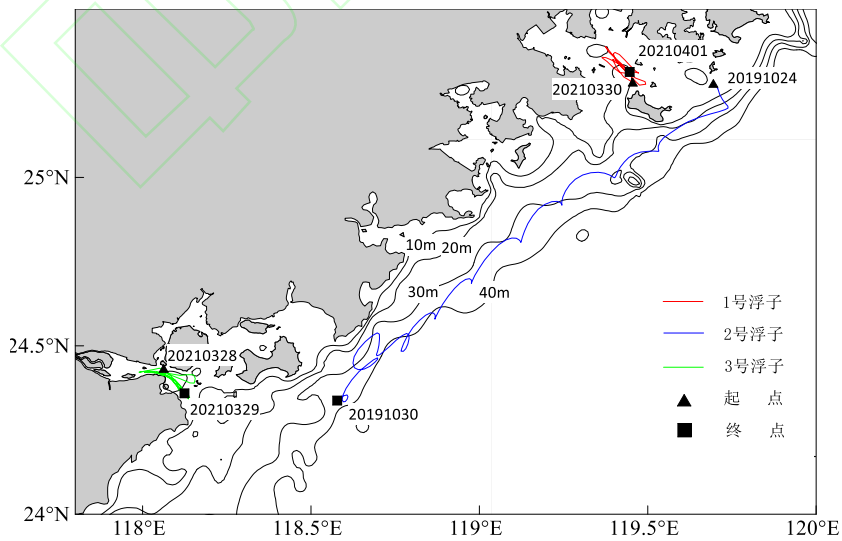


图4 特征浮子轨迹图
Fig. 4 Typical float trajectory

2.2.1 海湾内浮子运动轨迹分析

1) 兴化湾 1 号浮子

兴化湾海域整体呈长方形, 无大河流直接流入, 仅在湾顶附近有木兰溪和荻芦溪 2 条小溪, 与湾外台湾海峡相连的有南日水道和兴化水道。兴化湾的潮流为正规半日潮, 湾内涨落潮流是由南日水道、兴化水道两股水流所形成, 流路稳定, 呈现往复流, 水流流向与深槽轴线基本一致^[17]。

从图 5 可以看出, 1 号浮子运动海域为兴化湾海域南日水道与兴化水道的交汇处, 从浮子的运动轨迹可以看出, 浮子主要在湾内兴化水道呈往复运动, 流向与深槽轴线基本一致。浮子在海域漂移速度最大为 0.87 m/s, 浮子在转向时流速最小。流速大小与流速方向均呈周期性变化。

FES 是基于有限元流体动力模型的同化海潮模型, FES2014 是 FES 系列海潮模型的最新版本, 空间分辨率分别为 $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ ^[18]。而福建沿海海域为正规半日潮, S_2 分潮振幅差不多刚好是 M_2 分潮的一半, N_2 、 K_2 分潮则要小的多^[19], M_2 分潮占主导。本文从 FES 模型获取 15 个分潮的调和常数, 图 5 为根据 M_2 分潮调和常数计算得到的 M_2 分潮潮流椭圆图, 其最大流速为 0.45 m/s, 与郭玉臣等^[20]利用实测数据调和与分析得出 0.47 m/s 基本一致, 可以看出浮子的运动方向基本是与 M_2 分潮最大流速方向基本一致。

余流是海流分离出潮流后的水体运动, 具有单向流动特性, 因此与近海的物质输运密切相关。在余流非线性作用比较弱的海域, 拉格朗日余流可以代表长期平均水量传输速度。拉格朗日余流可以使用 Awaji 等^[21]提出的近似算法进行计算。假设 X_t 是浮子在 t 时刻的位置, X_{t+T} 是在一个潮周期 T (本文取 12 h) 之后的位置, 则拉格朗日余流流速 V_L 可以用下式进行计算:

$$V_L = \frac{X_{t+T} - X_t}{T} \quad (4)$$

本文利用上述公式, 将实测海流分离成余流与潮流, 同时利用从 FES 模型获取 15 个分潮的调和常数计算潮流, 将模型结果与实测潮流结果对比。计算结果图 6 可以看出, 兴化湾内的海流是主要以潮流为主, 拉格朗日余流较小, 最大值为 0.13 m/s, 略大于郭玉臣等^[20]利用实测数据调和与分析得出兴化湾最大余流为 0.10 m/s。基于 FES 模型调和常数计算得到的潮流与浮子计算得到的潮流存在一定差别, 流速约小 0.20 m/s, 且转向时间约延迟 1 h。这是由于兴化湾海域虽然 M_2 分潮占主导, 但浅海分潮影响明显^[19], 同时 FES2014 作为全球潮汐数据可能在沿岸港湾的准确性不足, 故振幅与相位存在一定偏差。

综上, 兴化湾内径流影响较小, 浮子在兴化湾内的运动主要受潮流作用, 浮子的运动轨迹也与该区域的潮流运动一致。

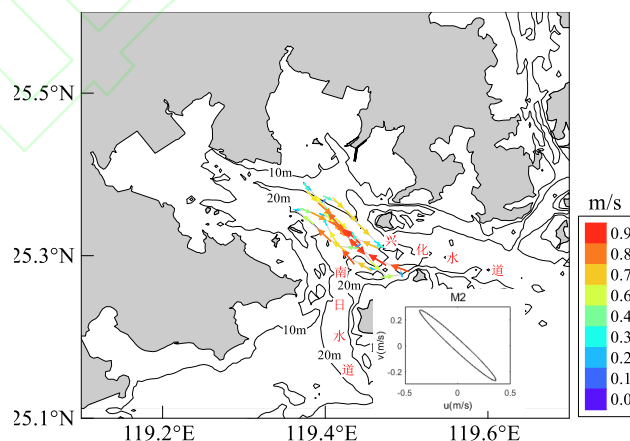


图 5 1 号浮子漂移轨迹
Fig.5 Trajectory of float No. 1

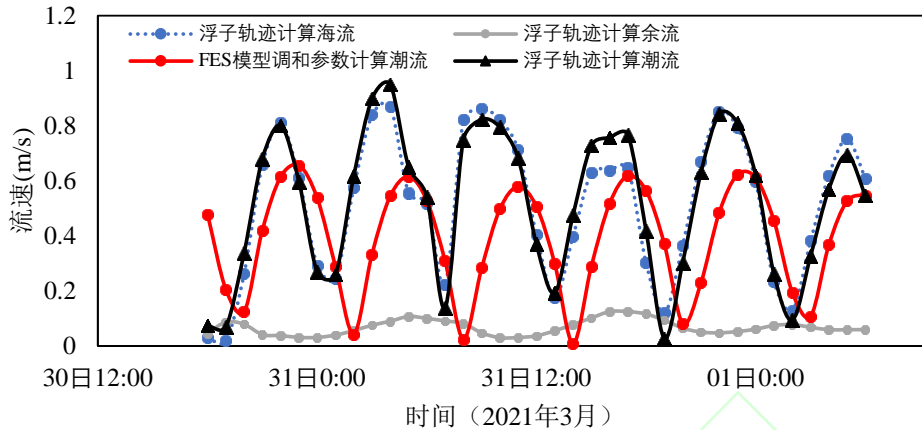


图 6 调和常数计算潮流流速与 1 号浮子轨迹计算海流组成
 Fig. 6 Tidal velocity from harmonic constant and corresponding velocity from No. 1 float trajectory

(2) 厦门湾 3 号浮子

厦门湾位于台湾海峡西岸南口，是一个半封闭型海湾，属半日潮流，往复流，厦门湾海域主要是受河流径流与海洋潮流的相互作用。九龙江是流入厦门湾海域的最大河流，年平均径流量为 150 亿 m^3 [22]。

如图 7 所示，3 号浮子运动海域为九龙江口海域以及青屿水道，在部分时间，浮子也会发生偏移，流向厦门东侧水道。浮子在海域漂移速度最大为 1.39 m/s，出现在九龙江河口处，从整体移动轨迹上看，浮子呈往复运动，涨落行程约 15 km。

此处将实测海流分离成余流与潮流，同时也从 FES 模型由 15 个分潮的调和常数计算潮流，结果见图 8。FES 模型 M_2 分潮，其最大流速为 0.11 m/s，远小于靖春生等[23]和綦梦楠[24]在厦门湾的研究结果（最大流速约 0.48 m/s）。同时根据图 8 可以看出，基于 FES 模型调和常数计算得到的潮流与浮子计算得到的潮流存在很大差别，基于 FES 模型调和常数计算得到的潮流流速均小于 0.2 m/s，远小于浮子所得到的潮流，因此对于九龙江口-厦门湾海域，FES 模型数据并不适用。图 8 表明研究海域的拉格朗日余流最大值为 0.25 m/s，平均为 0.15 m/s，出现在九龙江口海域，方向为流出河口区，这主要体现的是九龙江的径流的作用。我们还注意到对于浮子轨迹计算的潮流，可以看出并不像 1 号浮子一样呈现周期性变化，这是由于浮子运动所属海域在河口区及厦门港交汇区，流场较为复杂，九龙江河口区的转流时刻落后于高、低潮，而厦门港海域转流时刻确超前了 20~40 min[25]。

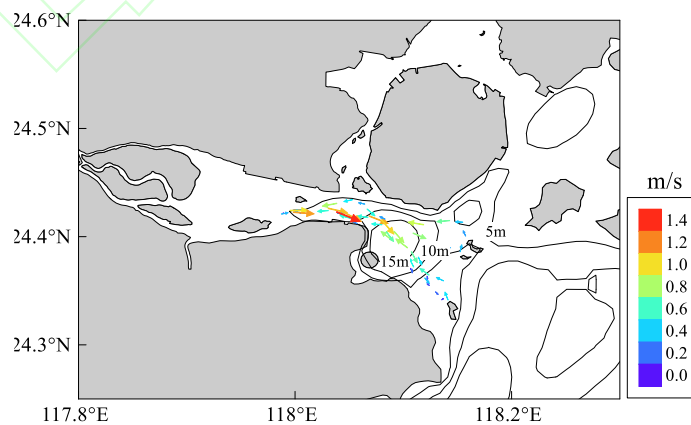


图 7 3 号浮子漂移轨迹及流速
 Fig. 7 Drift trajectory of float No. 3

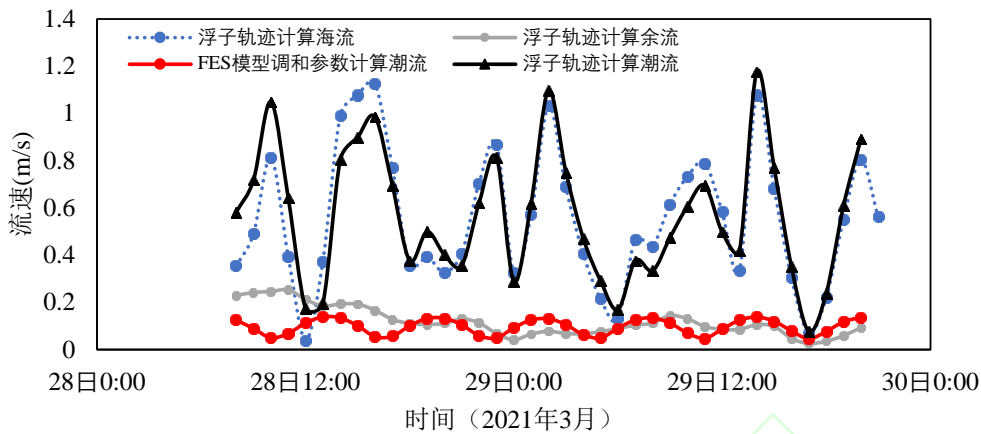


图 8 调和常数计算潮流流速与 3 号浮子轨迹计算海流组成
Fig. 8 Tidal velocity from harmonic constant and corresponding velocity from No. 3 float trajectory

2.2.2 海湾外浮子运动轨迹分析

2 号浮子运动轨迹分布在福建近岸海域, 从图 9 中 2 号浮子的运动轨迹可以看出, 浮子运动轨迹是受潮流与沿岸流的共同作用: 沿岸流导致的沿岸向南运动以及潮流导致周期性往复运动。浮子起点为兴化湾湾口附近, 沿着海岸向南漂移, 每移动一段时间后, 浮子漂移方向会发生改变, 向岸移动一段距离。在到达厦金海域附近时, 浮子会改变路径, 沿岸向北运动一段距离, 回旋形成一个椭圆, 然后接着继续向南运动。根据图 9 中的近岸海域基于 FES 模型数据计算的 M_2 分潮潮流椭圆分布图可以看出, 在兴化湾南部海域, 潮流椭圆扁率接近 1, 为旋转流特征, 因此浮子轨迹运动表现为垂直向岸、离岸运动与沿岸向南运动的组合。到了泉州厦门附近海域, 潮流椭圆长轴方向为沿岸方向, 涨落潮流较大, 因此浮子轨迹受潮流影响, 可以回旋形成一个椭圆, 浮子的漂移轨迹与潮流椭圆有一致性。

此处将实测海流分离成余流与潮流, 同时利用从 FES 模型获取 15 个分潮的调和常数计算潮流, 将模型结果与实测潮流结果对比。根据图 10 可以看出, 福建近岸海域的拉格朗日余流较大, 最大值为 0.56 m/s, 平均值为 0.31 m/s, 方向主要沿岸向南, 10 月 28 日, 余流流速减小为 0.2 m/s 左右, 10 月 29 日后余流流速开始增加, 此时浮子位于厦金海域附近, 余流的减小, 潮流作用效果明显, 因此该海域的浮子回旋距离较远这与前文浮子轨迹基本一致。根据 FES 模型调和常数计算的潮流与浮子轨迹计算潮流基本一致, 说明在外海开阔海域, 浮子的实测数据分离出来的潮流数据能较好体现潮流运动, 同时 FES 模型能较好的模拟近海潮波运动。从图 11 的余流场图与风场图可以看出: 浮子运动这段时间, 10 月份东北风盛行, 南下的沿岸流增强。文章将余流流速与风场速度投影到 30 m 等深线方向, 并计算得两组数据的相关系数为 0.37, 判断浮子的余流主要受沿岸流与风的作用。

综上, 浮子秋季在福建近海的运动主要受潮流、风与沿岸流的共同作用, 浮子的运动轨迹也显现了潮流作用的周期性以及风与沿岸流作用的均一性。当沿岸流较弱, 且潮流现较强往复流时, 浮子可呈现回旋轨迹。反之浮子具有沿等深线南下趋势。

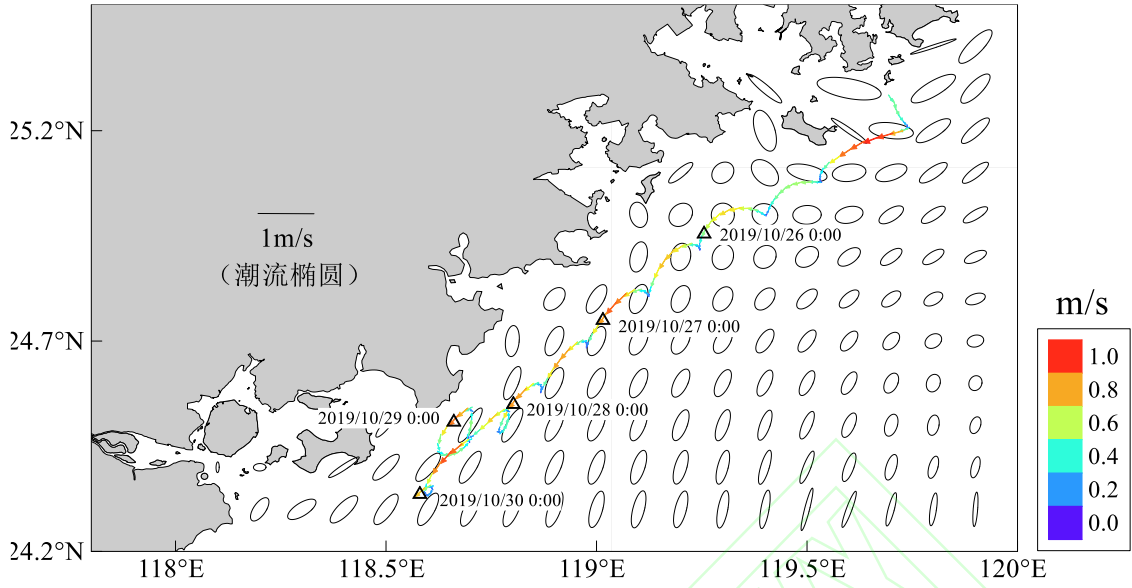


图 9 2 号浮子漂移轨迹与 M_2 潮流椭圆图
 Fig. 9 Drift trajectory of No. 2 float and M_2 tidal current ellipse

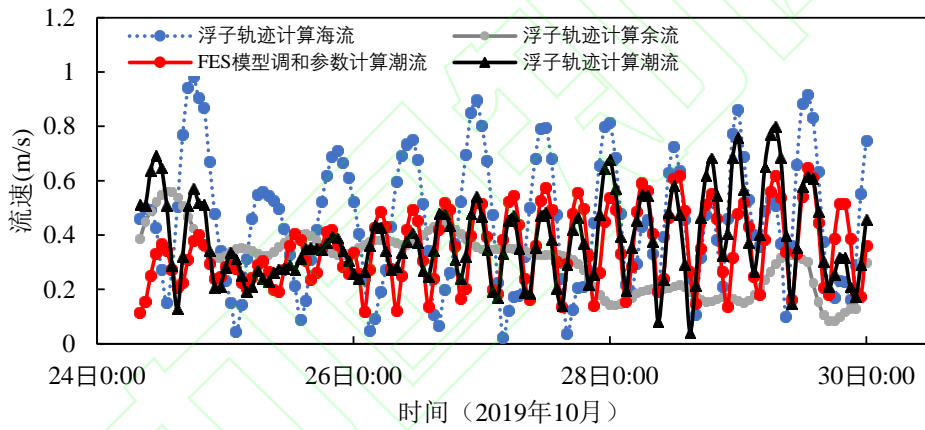


图 10 调和常数计算潮流流速与 2 号浮子轨迹计算海流组成
 Fig. 10 Tidal velocity from harmonic constant and corresponding velocity from No. 2 float trajectory

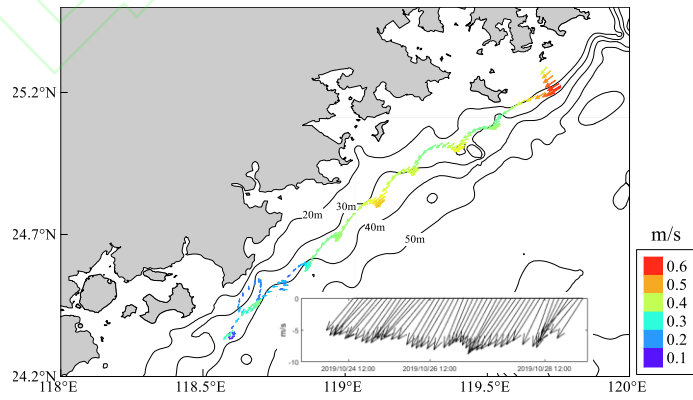


图 11 2 号浮子余流场与风场图
 Fig. 11 Residual flow from the trajectory of No. 2 float and corresponding wind

2.3 预测模式计算结果与分析

本文用漂移轨迹平均距离误差随时间和漂移距离两种形式对漂移轨迹预测准确性进行评判(图12)。从漂移浮子中,选取273个有效漂移过程进行评估,累计预测天数570 d,进行24和48 h的漂移预测次数分别为273次和181次。根据误差统计,得到24和48 h距离误差率分别为17.3%和12.5%。而在120 km的模拟范围内,距离平均误差多小于20%。说明本预测模式在台湾海峡海域及港湾区总体具有较高的准确性。

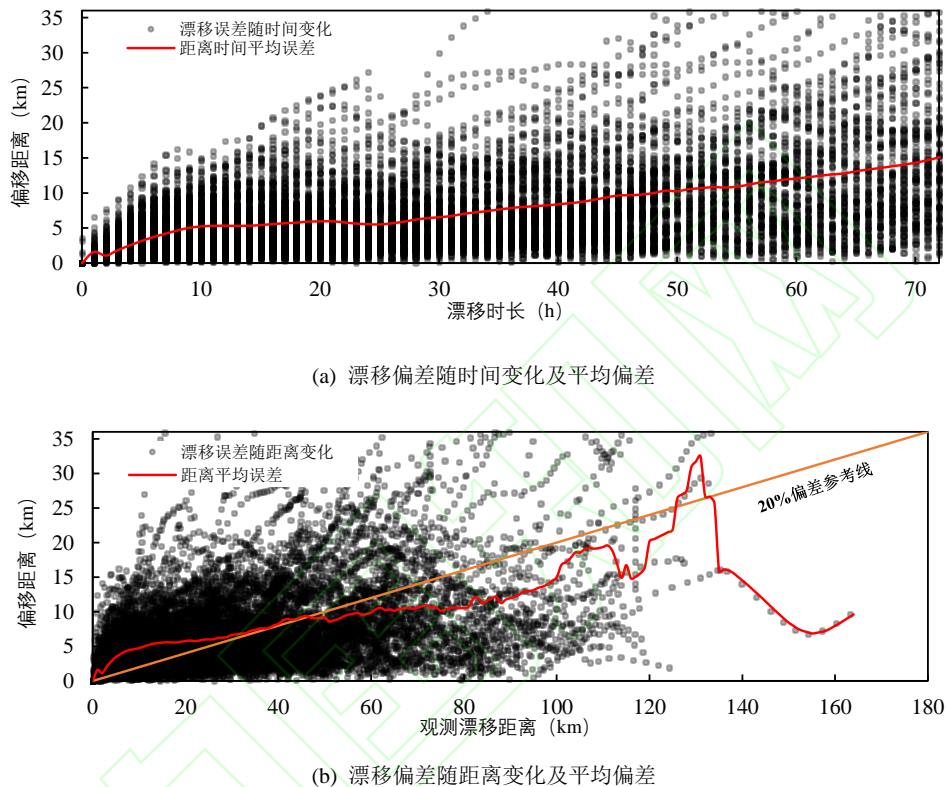


图12 漂移偏差随时间和距离变化及平均偏差

Fig. 12 Distance bias with travelling time (a) and trajectory (b), respectively.

图13为湾内(受潮流作用为主)、湾外(受潮流、环流共同作用)的距离平均误差,可以看出湾外浮子的距离平均误差小于湾内浮子。因此,相对于港湾区域,本轨迹预测模式对于福建近岸海域环流的模拟有更高精确度。选取前文的3个特征浮子进行分析,从图14中3个浮子的运动轨迹可以看出,模式预测轨迹总体与实测浮子轨迹趋势基本一致。对于1号浮子与3号浮子,预测浮子在湾内呈往复运动,且最大往复距离基本一致;对于2号浮子,受潮流与沿岸流的共同作用,预测浮子沿福建沿岸南下运动并在离岸线方向往复漂移,虽然在垂直岸线方向的距离存在偏差,但总的迁移方向和距离基本一致。因此模拟结果能够再现浮子实际漂移特点。

图15为特征浮子预报轨迹与实测轨迹的偏差从模拟的偏差来看,湾内主要受潮流作用,厦门湾与兴化湾湾内潮流往复流特征,因此模拟轨迹的漂移距离并非单调增加。1号浮子最大漂移距离偏差约11.6 km,这是由于浮子在转向时间上存在差别,导致出现较大误差,所以对于湾内主要受潮流作用的海域,对于潮流的模拟准确性会极大影响预测模式的结果。2号浮子主要受潮流与沿岸流作用,与湾内浮子相比,偏差具有单调增加的趋势,其最大漂移距离偏差约7.2 km。

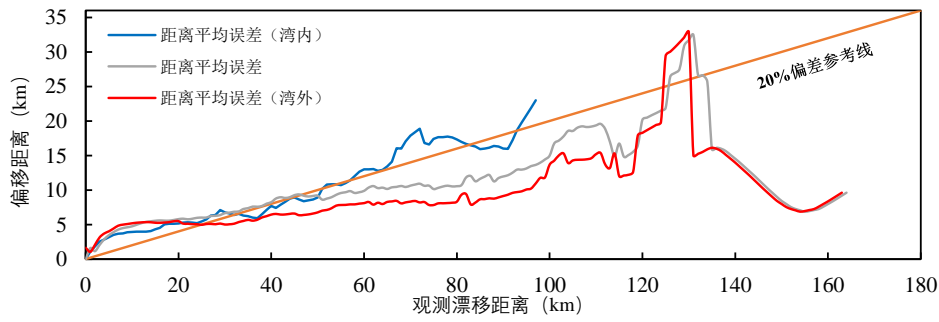


图 13 距离平均误差图
Fig. 13 Distance bias with travelling trajectory.

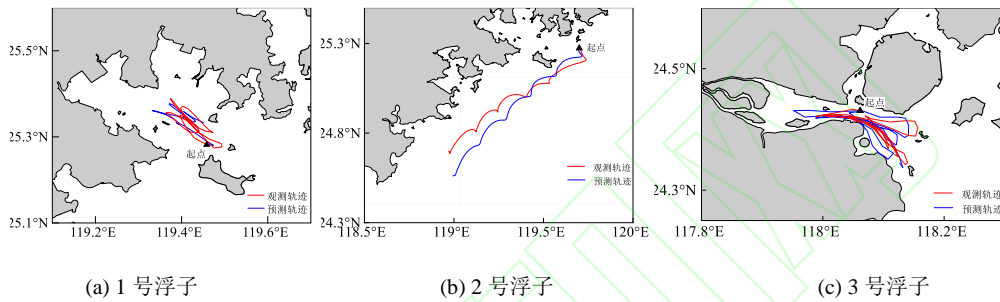


图 14 特征浮子实测与模拟轨迹对比图
Fig. 14 Comparison of observed and simulated trajectory of three floats, a, b, c are No 1, 2, 3 floats, respectively.

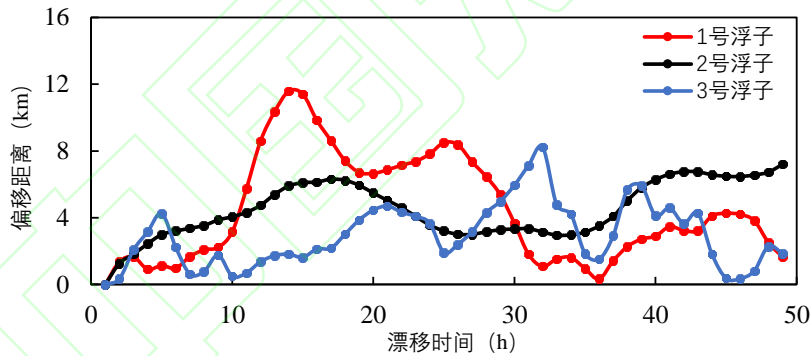


图 15 预报轨迹与实测轨迹的偏差
Fig. 15 Bias of modelling float drift from the observation

3 结 论

本文采用风场数值模型和业务化海流数值模型，结合拉格朗日追踪法，建立了福建近海海上漂移物漂移轨迹预测模式，模拟并分析实测浮子轨迹数据。得到了以下结论：

对不同海域的浮子，浮子在兴化湾内的运动主要受潮流作用，其运动轨迹也与该区域的潮流运动一致，呈现往复运动的趋势；而外海的浮子运动主要受潮流与沿岸流的作用，在外流环流的驱动下有沿等深线运动的趋势，受到潮流作用下可能局部形成回旋轨迹；在厦门湾内的浮子运动主要受潮流与径流的共同作用。分析结果可以看出浮子实验能够捕捉到研究海域表面海流的潮流、沿岸流及径流共同作用的特征。结果也表明 FES2014 全球潮汐数据在近海区有较高的准确性，而在港湾区准确性差。福建近岸海域海上浮子漂移实验表明，本模式模拟结果与浮子漂移结果基本一致；相对湾内的轨迹预报，福建近海的模拟有更高的可信度。这与浮子得到的潮流和余流（环流）分析结果是一致的，

提高未来湾内轨迹的模拟需从潮流的更准确模拟入手。

参考文献:

- [1] CENTURIONI L R. Drifter technology and impacts for sea surface temperature, sea-level pressure, and ocean circulation studies[M]. Cham: Springer International Publishing, 2018: 37-57
- [2] LIN H Y, SUN Z Y, CHEN Z Z, et al. Wintertime Guangdong coastal currents successfully captured by cheap GPS drifters[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(1): 166-170.
- [3] GAO Y, HUANG Y X, LIN H Y, et al. Surface currents measured by GPS drifters in Daya Bay and along the eastern Guangdong coast[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2020, 14(2): 376-383.
- [4] BMT CODAH. Search and Rescue Information System [EB/OL]. [2021-11-29]. <https://www.bmt.org/industrye-s/coastal-infrastructure/search-and-rescue/>.
- [5] ALLEN A A. Leeway Divergence [R]. Groton: US Coast Guard Research and Development Center, 2005.
- [6] BREIVIK Ø, ALLEN A A. An operational search and rescue model for the Norwegian Sea and the North Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 69: 99-113.
- [7] 胡志武, 张秋荣, 顾维国. 遇难船舶漂流轨迹预测技术[J]. *航海技术*, 2007(3): 18-21.
- [8] 肖文军, 堵盘军, 龚茂珣, 等. 上海沿海海上搜救预测模型系统的研究和应用[J]. *海洋预报*, 2013, 30(4): 79-86.
- [9] 徐江玲, 高松, 葛勇, 等. 波浪对海上漂浮物漂移轨迹作用分析[J]. *防灾科技学院学报*, 2017, 19(2): 75-79.
- [10] 翁怡婵, 杨金湘, 江毓武. 台湾海峡漂浮物运动轨迹的数值模拟[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2009, 48(3): 446-449.
- [11] 娄安刚, 王学昌, 孙长青, 等. 胶州湾海面溢油轨迹的数值模拟[J]. *黄渤海海洋*, 2001(1): 1-8.
- [12] 张存智, 窦振兴, 韩康, 等. 三维溢油动态预报模式[J]. *海洋环境科学*, 1997(1): 26-33.
- [13] 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.
- [14] LIN X, YAN X H, JIANG Y, et al. Performance assessment for an operational ocean model of the Taiwan Strait[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 102: 27-44.
- [15] WU R, WU H, WANG Y. Modulation of Shelf Circulations Under Multiple River Discharges in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(4).
- [16] YANG J Y. An Oceanic Current against the Wind: How Does Taiwan Island Steer Warm Water into the East China Sea[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2007, 37(10):2563-2569.
- [17] 李孟国, 时钟, 范文静. 潮流数学模型在兴化湾深水航道研究中的应用[J]. *水运工程*, 2004(7): 59-62.
- [18] 范长新. 全球海潮模型最新进展及在中国沿海精度评估[J]. *大地测量与地球动力学*, 2019, 39(5): 476-481.
- [19] 方国洪, 郑文振, 陈宗铺, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 135-137.
- [20] 郭玉臣, 王庆业, 陈建军, 等. 兴化湾及周边海域潮流动力特征与数值模拟研究[J]. *海洋通报*, 2012, 31(3): 262-267.
- [21] AWAJI T, IMASATO N, KUNISHI H. Tidal exchange through a strait: a numerical experiment using a simple model basin[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1980, 10(10): 1499-1508.
- [22] 季杜鑫. 厦门湾三维潮流数值模拟研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2006: 35-37.
- [23] 靖春生, 朱学明, 鲍献文, 等. 基于 FVCOM 的厦门湾及其周边海域三维潮流数值模拟[J]. *台湾海峡*, 2011, 30(1): 103-113.
- [24] 綦梦楠. 厦门湾及邻近海域潮汐潮流数值模拟与预报研究[D]. 中国海洋大学, 2014: 23-32.
- [25] 陈金泉, 傅子琅, 何发祥, 等. 厦门湾潮、余流及其对泥沙、污染物质迁移的影响[J]. *台湾海峡*, 1985(1): 16-20.