

厦门海域落水集装箱漂移路径的数值模拟

任律珍¹, 孙锐¹, 杨金湘², 林建伟³

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 自然资源部厦门海洋中心, 福建 厦门 361008;
3. 福建省水产研究所, 福建 厦门 361012)

[摘要] 对落水集装箱的受力和进水淹没过程进行分析, 细化落水集装箱风致漂移系数与淹没率的线性关系。并以“SITC PYEONGTAEK”轮落水集装箱为例, 结合区域海洋模式模拟的海流数据, 用拉格朗日法和蒙特卡洛随机扩散相结合的粒子追踪法建立集装箱追踪模型模拟集装箱的漂移轨迹, 再利用网格化统计方案对零散分布的粒子进行概率统计, 分析掉落集装箱的漂移位置。通过实际案例中集装箱落水后的漂移轨迹对模型进行验证, 表明该模型模拟得到的轨迹点与海上发现的漂浮集装箱点位基本吻合, 说明该模型有助于快速锁定漂移区域, 减少由落水集装箱带来的风险, 增加航行单位对落水集装箱漂移轨迹的预测准确性, 为集装箱落水港区及周边水域的通航安全提供保障。

[关键词] 集装箱; 落水漂移轨迹; 预测; 区域海洋模式系统; 蒙特卡洛方法; 风致漂移系数

[中图分类号] U 698.6

Numerical Modeling Study of Drifting Trajectory of Falling Containers in Xiamen Sea Area

REN Lüzhēn¹, SUN Rui¹, YANG Jinxiang², LIN Jianwei³

(1. School of Navigation, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Marine Center, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361008, China;

3. Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361012, China)

Abstract: With the continuous development of maritime economy, China's container transport demand is growing steadily. Under the changeable marine transportation environment, the potential danger to sea navigation brought by containers falling off ships gradually emerges. Based on the analysis of the immersed process of the falling container, the linear relationship between the coefficient of the wind drift and the immersed ratio of the falling container is proposed. Taking the container ship "SITC PYEONGTAEK" in the Xiamen sea area as an example, a container tracking model was established based on the particle tracking method combined with Lagrange and Monte Carlo random diffusion to simulate the trajectory of the containers. A grid-discrete statistical scheme was used to analyze the drift positions of the falling container. The model was verified by using the drift track of containers after falling into water in practical cases, which showed that the track points simulated by the model were basically consistent with the floating container points found at sea after the accident. The model has certain application value, which is conducive to quickly locking the drift area and reducing the risk caused by falling containers. This helps to increase the accuracy of shipping companies' prediction on the drift track of containers falling into water, and to ensure navigation safety in the port area with falling containers and its adjacent waters.

[收稿日期] 2023-11-14

[作者简介] 任律珍(1965—), 副教授, 从事交通运输规划与管理、海上交通安全方向研究。Email: lzren@jmu.edu.cn

http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb

Keywords: container; drift trajectory; prediction; regional ocean model system; Monte Carlo method; wind drift coefficient

0 引言

由于自然因素(天气、海况)和人为操作不当,每年有数千只集装箱掉落海中。集装箱掉落,因箱内的载荷不同,入海后的状态也不一样。承载密度较大的箱体很快沉没,而承载密度较小的物体,如塑料、木材等可能会长时间漂浮于海面。空的集装箱,由于箱体存在通风孔,落水后会从孔口进水,直至完全淹没沉底。这些落水的箱体不仅对海上航行安全产生了严重的威胁,还可能对海洋生态环境产生影响。发生集装箱落水变故后,海事主管部门会采取相关的探测和打捞措施,但往往由于应急时间较长,海域范围太大,集装箱落海后的运动路线难以把握,实际的打捞和探测效果不尽理想。

2021年8月5日,因受9号热带风暴“卢碧”影响,“SITC PYEONGTAEK”轮从厦门港象屿码头离泊,在前往锚地避风途中,在小金门岛南侧约3.6 nmile处(GPS船位为:24.3483°N, 118.2528°E;北京时间大约2021年8月5日03:00),发生集装箱落水事故,落水集装箱共有12个。事故发生后,“SITC PYEONGTAEK”轮返回厦门港4#锚地抛锚,落水集装箱随风、流漂移,对水域通航环境有一定的影响,给厦门港区及周边水域的通航安全带来一定风险。因此,建立海上集装箱落水漂移模型,对于集装箱落水后的搜寻和打捞具有应用研究价值。

在建立海上漂浮物漂移扩散模型方面,国内外学者已开展过大量的研究^[1-2]。波浪^[3]、潮流和风生流^[4]对漂流速度系数、集装箱漂移区域也会产生影响。考虑多种因素的影响,肖方兵等^[5]提出一种搜寻矩形分配矩阵;吴中鼎等^[6]开发了海上漂浮物漂移轨迹追踪软件;黄娟等^[7]确立了搜救模型的中海流和风应力的参数。落海后除了受到海流的拖曳作用外,由于集装箱的体积较大,受风的拖曳作用也不能忽视,因此有学者提出结合风、水流、波浪及漂移物的浸没比例等因素进行建模分析^[8],并引入蒙特卡洛方法和风压差翻转率计算方法^[9-11]。国外学者将水动力模型与风压差理论结合^[12],同样利用蒙特卡洛法确定最优搜救区域。近期出现一些采用不同的方法研究海上漂移问题,例如:Allen等^[13]用随机轨道模型探讨了浸没程度和阻力系数对搜索区域的影响程度;Zhu等^[14]基于次网格尺度的流场模型,建立海上偏移物集成轨迹预测模型;Tu等^[15]基于现场试验估算Leeway漂移模型的漂移系数;Xiang等^[16]利用计算流体力学工具OpenFAM研究自由落水的水平圆柱体的运动;Breivik等^[12]发现海上漂浮集装箱的漂移轨迹对集装箱的淹没度及拖曳系数十分敏感。

尽管针对环境因素的不确定性、漂移物的特征、模型的漂移系数等方面开展了大量研究,然而集装箱落水后,由于其水体从通风孔涌入,造成集装箱随风和海流漂移过程中淹没比会发生变化。为了提高模型的精度,本文以“SITC PYEONGTAEK”轮落水集装箱为例,在经典的Leeway漂移模型基础上,研究箱体进水过程对集装箱漂移轨迹的影响,为其他海域的集装箱落水事件的追踪和搜寻提供科学参考依据。

1 集装箱落水运动状态及过程分析

集装箱箱长12.192 m、宽2.438 m、高2.896 m,毛重约4.1 t。通风窗外观205 mm×50 mm,侧板通风口由9个圆孔组成,呈正方形排列,圆孔直径10 mm。由于集装箱存在通风孔,集装箱落水后,在风和海流的作用下,海水会由通风孔进入,并最终使得箱体沉没。“SITC PYEONGTAEK”轮落水集装箱处于空箱状态,根据阿基米德原理,测算集装箱落海后淹深约15 cm,箱体在海面的初始状态为空箱漂浮状态。不同于一般的落海物(人或货物),由于集装箱的体积大,落海后除了受到海流的拖曳作用外,受风的拖曳作用也不能忽视,会出现风致漂移。集装箱掉落前期受到风力的推移作用影响较大,而随着箱体不断进水下沉,受到风力的作用逐渐减小,海流的控制则逐步占主导。

结合集装箱通风口的开孔大小资料, 集装箱进水流量和时间的估算采用静态情况下孔口出流的计算公式: $q_t = C_r A_h \sqrt{2gh_t}$ 。其中: A_h 为孔口的面积; h_t 为孔口的淹深; C_r 为流量系数, 对于薄壁孔口取 0.62; q_t 为孔口进流的流量。由于集装箱沉没前, 一直处于漂浮或悬浮状态, 根据阿基米德浮力原理可以得到 $q_t \times t \times \rho_{\text{sea}} + m_0 = \rho_{\text{sea}} \times A \times h_t$ 。其中: ρ_{sea} 为海水密度; A 为淹没部分的箱体的水平面积; m_0 为空箱质量; t 为进水时间。

尽管箱体落水后, 入水状态无法确定, 可能出现如下三种状态: 1) 单侧通风孔淹没; 2) 双侧通风孔同时淹没; 3) 双侧通风孔都位于水面上方。由于事发海域的风浪较大, 在风力和浪的作用下, 箱体在海面会出现翻滚的情况, 即在箱体掉落时, 可能会反复出现各种状态, 而其中第一种状态出现的概率最大。为将问题简化, 本研究按第一种状态, 计算出箱体落海后的进水淹没时间约 11 h。若考虑箱体掉落时的碰撞使结构破坏, 以及落水后受压变形等因素, 实际淹没时间会远小于 11 h。

2 观测资料与数值模型构建

2.1 气象与水文观测资料

模型的风场数据来源于现场船载风速仪记录的风场数据, 以及金门料罗湾浮标记录的风速记录。海流数据来源于离事故发生地较近的金门料罗湾内的浮标实测的海流记录, 时间范围为 2021 年 8 月 5 日 3 时—8 月 7 日 3 时。根据事发船载电子海图风速记录仪和金门浮标数据 (见表 1), 事发海域的风力达 6 级, 瞬间最大风速可达 15 m/s 以上, 事发前后以东南偏东方向的风向为主。

表 1 8 月 5 日船载和金门浮标风速、风向记录

Tab. 1 Wind speed and direction recorded by ship and Kinmen buoy on August 5

时刻	船		浮标		时刻	船		浮标	
	风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风向/($^{\circ}$)	平均风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风向		风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风向/($^{\circ}$)	平均风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	风向
02:00	10.6	113	7.5	东南东	06:00	15.9	80	9.2	东
02:30	14.3	116			06:30	17.0	72		
03:00	9.4	177	9.3	东南东	07:00	15.8	96	10.2	东
03:30	12.7	118			07:30	14.8	99		
04:00	12.5	107	9.1	东南东	08:00	14.0	104	9.8	东
04:30	12.8	100			08:30	14.3	95		
05:00	14.4	109	9.1	东南东	09:00	12.2	96	9.5	东
05:30	13.2	83			09:30	13.4	100		
					10:00	15.9	95	9.3	东

2.2 海流数值模型

本文所采用的物理模式为美国 Rutgers 大学等研发的区域海洋模式系统^[18]。模型的模拟区域为整个厦门湾区域 (见图 1), 外接台湾海峡, 从泉州市围头角至龙海市的镇海角连线以西、九龙江河口紫泥镇以东海域, 包括厦门西港、九龙江河口湾、厦门南部海域、厦门东部海域、同安湾、大嶝海域、安海湾、围头湾等八个主要海域, 范围为 24.1972°N — 24.7063°N , 117.8357°E — 118.6282°E , 模型的网格分辨率为 80 m, 时间步长为 1 s。鉴于事发时间, 模

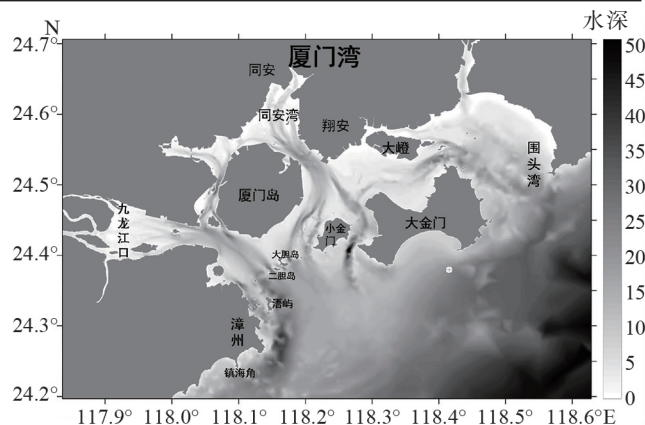


图 1 模型模拟区域及水深分布

Fig.1 Model domain and topography

型从2021年8月3日0时起冷启动2 d后,计算2021年8月5—7日的潮流过程用于集装箱落水后轨迹的追踪实验。

2.3 海流模型验证

首先对模型模拟的海流形态进行验证分析。由图2可以看出,集装箱于8月5日3时落水后,经历了中潮期的低平潮、涨急、高平潮和落急四个潮时。涨急时刻,台湾海峡潮波分别从东侧的围头湾和漳州-金门间水道进入厦门湾内。由围头湾进入的潮水,通过大嶼-金门水道,流入翔安南部海域,部分由刘五店航道进入同安湾。由漳州-金门间水道进入的潮流,在漳州、大担岛、小金门和大金门之间沿水道分为3股进入厦门西南和东南海域。从漳州-大担岛水道的潮流,与部分通过大担岛-小金门水道进入的潮流,通过厦门岛南部进入厦门西海域和九龙江口。通过大担岛-金门岛间进入的潮流,绕过小金门与金门岛北部的潮流,在翔安南部海域汇合,流入同安湾。落潮时,潮水分别从围头湾和漳州-金门岛间水道流出。九龙江和西海域潮流在厦门岛南部汇流后通过漳州-大担岛间水道流向镇海角。同安湾潮流沿厦门岛东侧南下,通过大担岛-小金门水道流向镇海角,大嶼岛-大金门间出现潮流辐散线,部分潮水通过小金门-大金门水道流出,部分通过围头湾流出。该涨落潮形态与其他研究所报道的形态基本一致。

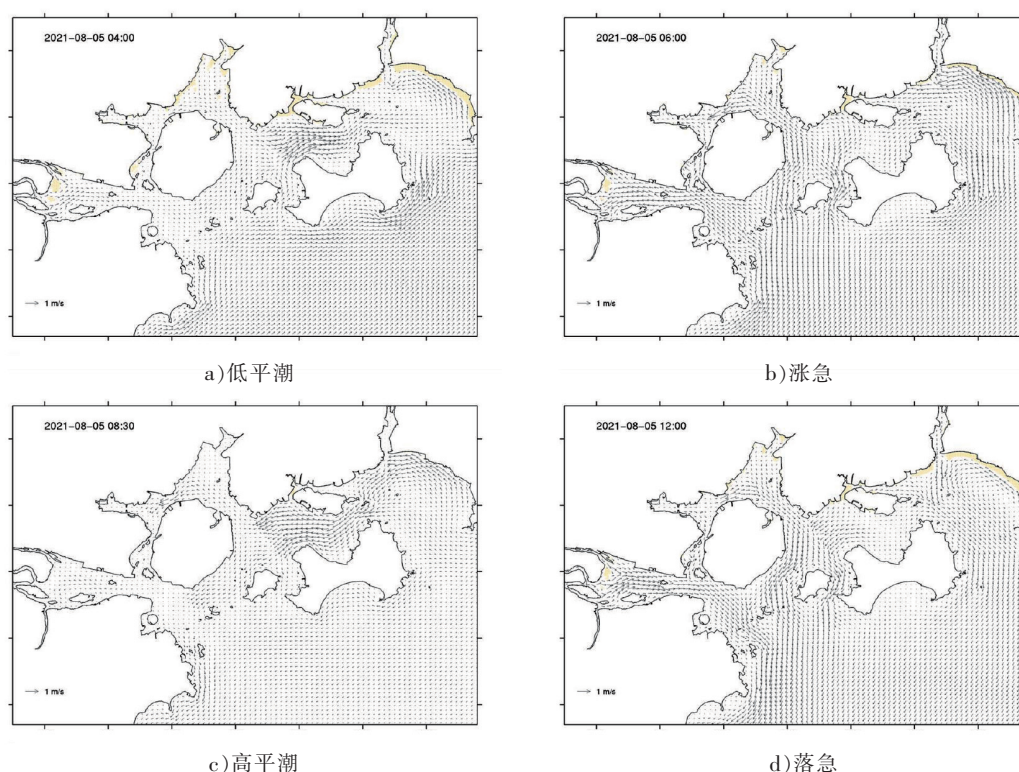


图2 集装箱落水后流场分布
Fig.2 Current distribution after the incident

利用料罗湾浮标实测的2021年8月5日3时—8月7日3时的海流速度对模型进行验证,如图3所示。模拟结果与观测流速吻合较好,模型能够较为准确地模拟出浮标处的海流随潮流变化。需要指出的是浮标的流速为表层流速,而模型流速为垂向平均流速,因此对比结果会出现一定的偏差,尤其在风速较大的情况下。除此之外,模型的数值误差、驱动条件的误差和观测误差都会对验证结果产生一定的影响。

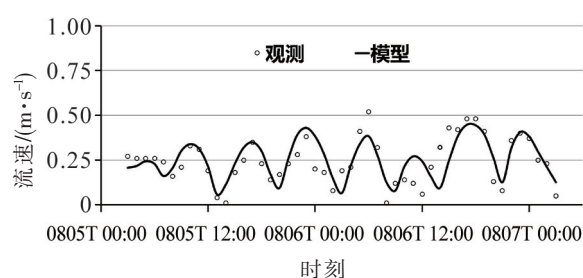


图3 金门浮标站观测与模拟流速比较
Fig.3 Comparison of observed and simulated current speed at Kinmen buoy location

2.4 集装箱漂移模型

在海流的拖曳下,模型采用拉格朗日法和蒙特卡洛随机扩散相结合的粒子追踪法模拟集装箱的漂移轨迹,同时还考虑风致漂移作用,集装箱的漂移轨迹可以写为:

$$\frac{dS}{dt} = u_s + u_r + K u_{wind}$$

其中: u_s 为海流流速; u_r 为随机扰动速度,采用蒙特卡洛随机扩散方法计算; u_{wind} 为风速; K 为风致漂移系数。

考虑风对集装箱的拖曳作用随集装箱下沉深度增加而减小,本文提出了风致漂移系数与箱体淹没比之间的线性函数 $K = K_{max}(1 - I_r)$, 其中 I_r 为淹没百分比。即当 $I_r = 0$ 时, $K = K_{max}$; 当 $I_r = 100\%$ 时, $K = 0$ 。参考 Krauss 等^[19] 统计分析风对海洋漂流浮标的风致漂移系数(约 0.025),并考虑 $\pm 100\%$ 的偏差,分别进行不同定常风致漂移系数($K_{max} = 0.01$ 、 0.02 、 0.03 、 0.04 和 0.05) 的数值实验。利用实验结果与掉落初期观测的漂移位置进行比对,以确定最合适的风致漂移系数。

考虑到掉落的 12 个集装箱的体积较大,且具体落水位置不明,根据集装箱掉落时船舶位置和时间,在该处设置直径为 100 m 的圆形范围,范围内间隔 10 m 布放粒子,进行追踪模拟。根据有关船只报告,2021 年 8 月 5 日 07:15 左右在大担岛东南侧发现漂移集装箱,2021 年 8 月 5 日 10:35 左右在 4 号锚地附近发现漂浮集装箱(见图 4 中的红色散点标记)。通过与过往船只现场发现漂移集装箱的时间、位置对比,发现当 $K_{max} = 0.05$ 时,集装箱的漂移轨迹在 07:15 离船只发现的地点最为接近,部分轨迹点与发现地点重合(见图 4),在 10:35 模拟的轨迹点出现离散,但分散在北部的轨迹点与船舶发现的地点接近;而 K_{max} 取值小于 0.05 时,2 个观测时刻的模拟轨迹与观测发现地点的位置偏差均较大。由于事发时受台风影响,海上风力较大,风对集装箱拖曳效应更加显著,该最大风致漂移系数的取值合理。因此漂移模型中 K_{max} 取值为 0.05。

确定了最大风致漂移系数,本研究在模型中引入风致漂移系数随集装箱淹没率的变化过程,因此提高了模拟的精度。

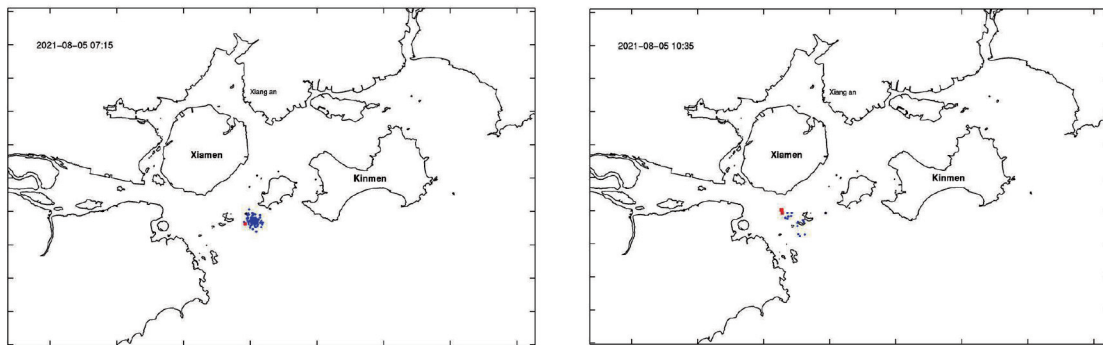


图 4 模拟轨迹(蓝色点)和事发后海上发现漂浮集装箱点(红色点)

Fig.4 Simulated trajectories (blue dots) and the observed floating containers (red dots) after the incident

3 模拟结果

为了减小随机效应和数值误差对结果的影响,利用网格化的方法对零散分布的集装箱进行概率统计分析,统计网格的分辨率为 2 km,为初始集装箱间隔分辨率的 100 倍。集装箱漂移位置的可能性

(p) 的计算方法为: $p = \frac{n_i}{\sum n_i} \times 100\%$, 其中 n_i 为网格中集装箱的个数。

集装箱掉落,可能存在碰撞损坏或无损坏,以及长时间处于半潜浮状态的极端情形。为全面考虑集装箱可能出现的情形,本文分别按集装箱无损坏、集装箱损坏、集装箱无损坏且长时间处于半潜

浮状态(极端情况)3种情形进行模拟研究。

3.1 集装箱无损坏情况下的漂移轨迹

首先模拟集装箱落水后,无损坏时,海水通过集装箱的通风孔流入的情况下,集装箱的漂移轨迹。0~15 h内间隔3 h的模拟粒子的可能性分布情形见图5。由图5可以看出,由于事发处于低平潮期间,集装箱在事发后3 h仍相对集中在事发地附近海域;然后受到涨潮流和风的作用,第6小时集装箱大多聚集在大担岛东侧;第9小时部分集装箱移至二担岛西侧水域,第12小时移至二担岛南侧海域,经过15 h漂浮或悬浮过程,触底沉在大担、二担周边2~4 km范围的可能性最大,在厦门岛东南侧近岸水域出现的概率很小。

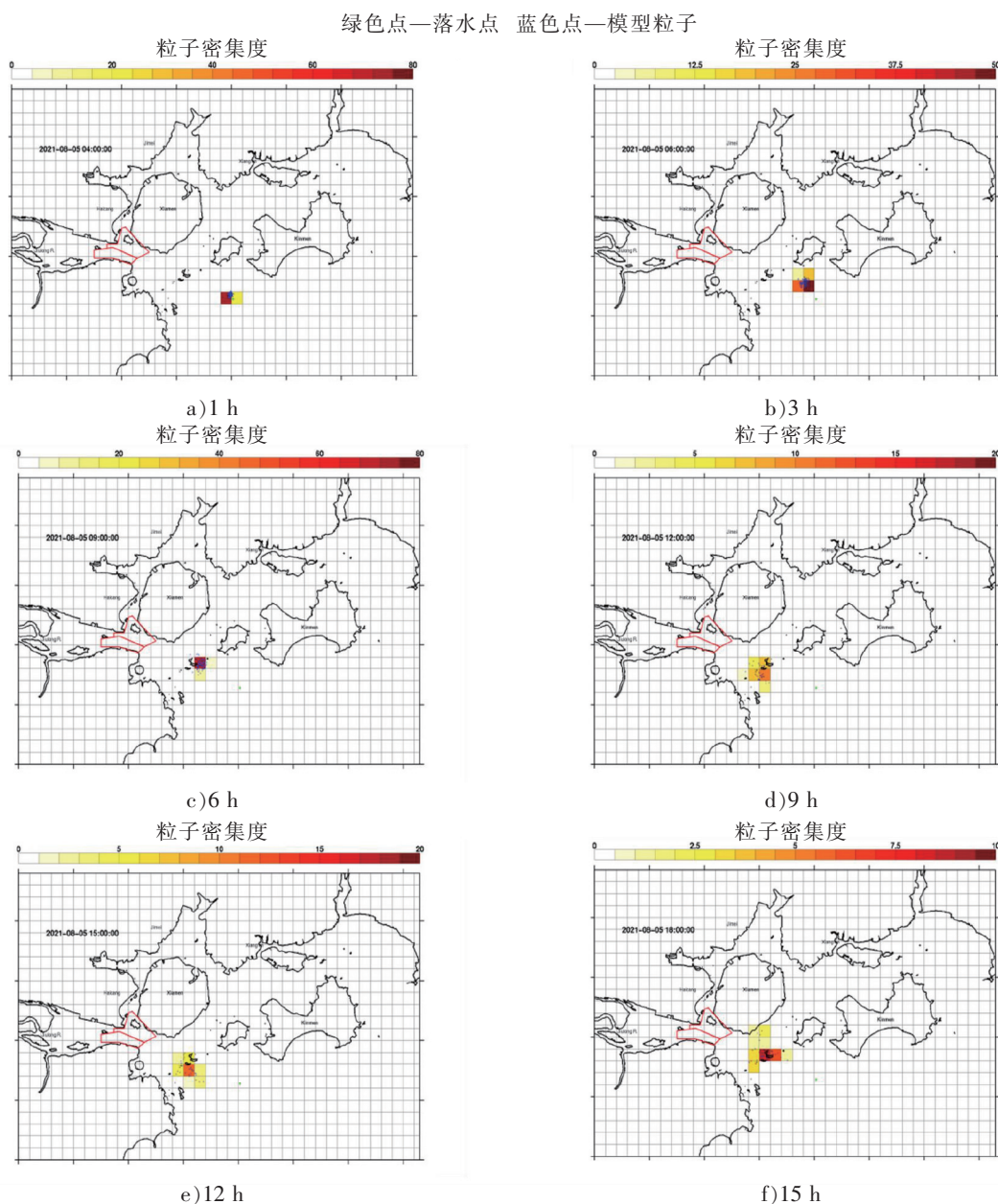


图5 模拟集装箱无损坏情况下0~15 h漂移位置可能性分布

Fig.5 Simulated probability distribution of the undamaged containers within 0~15 h after the incident

模型模拟集装箱落海后0~15 h逐时的漂移轨迹分布如图6所示,其中粒子的颜色代表不同的时间。由图6可以看出,集装箱落海后在海流和风的作用下,0~6 h向西北偏西方向漂移,这时主要受

到风的控制;而 6~15 h 期间,集装箱出现了南向的偏转,这主要是因为随着海水的流入,集装箱的淹没率增加,箱体以受到潮流的控制为主。根据图 6 中事发后的扫海资料,扫海范围内底部并未发现沉没的集装箱,可以推测集装箱未在强风的作用下一直向西漂移,这与模型预测的结果一致。

3.2 集装箱损坏情况下的漂移轨迹

若集装箱落水时受到损坏,由于进水快、下沉速度快,考虑集装箱主要随海流漂移,可以采用风致漂移系数为 0 的方案进行模拟。由于集装箱淹没后在数十秒内会下沉,落水后 2 h 内每间隔 0.5 h 的漂移轨迹的可能性分布结果如图 7 所示。图 7 显示事发时处于低平潮,因此落水后 2 h 内,集装箱集中在落水点临近 2~4 km 范围内。淹没后,集装箱在数十秒内会下沉,因此推测其沉降地点与模拟轨迹位置偏差不大,位于临近落水点 2~4 km 范围内。

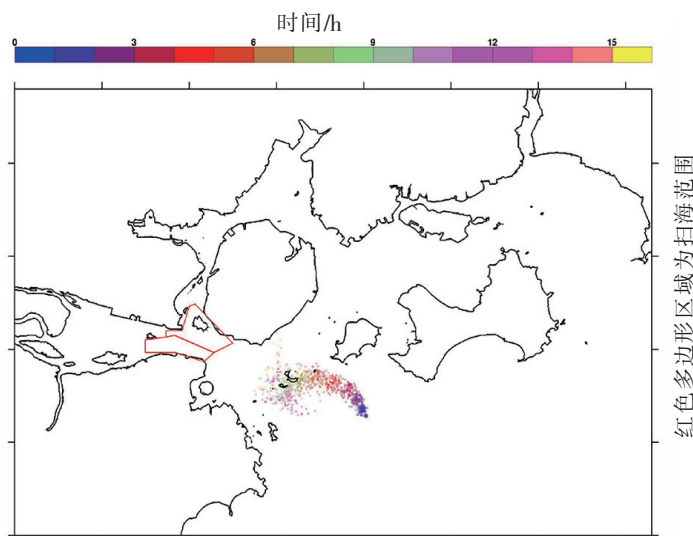


图 6 模型集装箱无损坏情况下 0~15 h 逐时轨迹分布
Fig.6 Hourly trajectories of the undamaged containers within 0-15 h after the incident

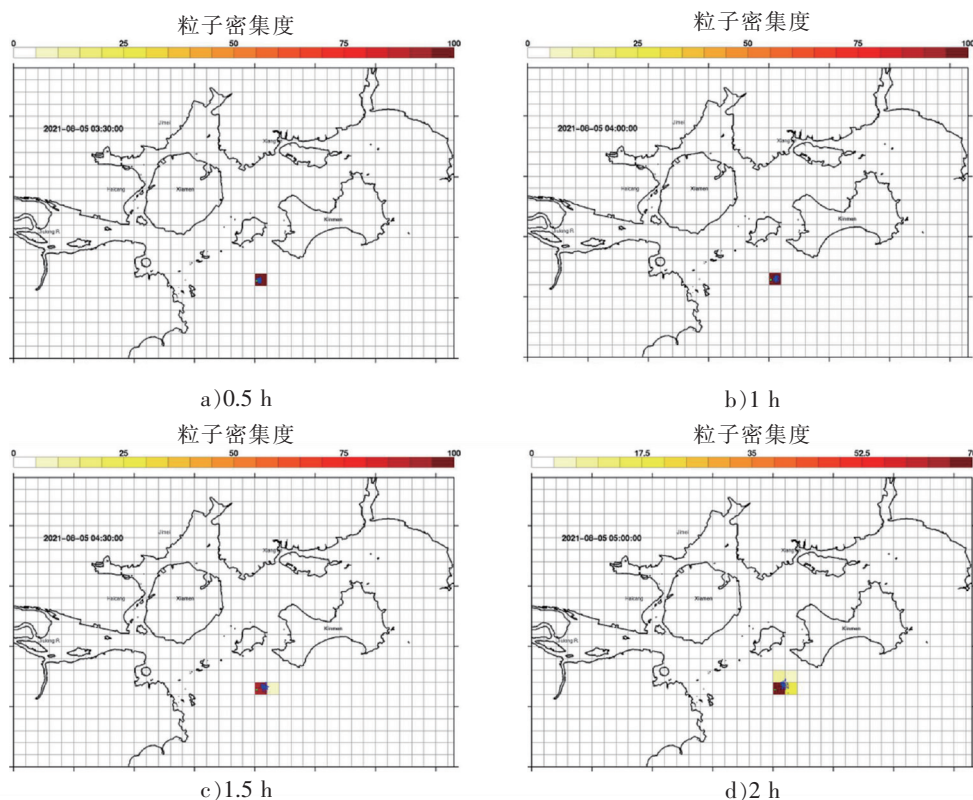


图 7 模拟集装箱损坏情况下 2 h 漂移位置的可能性分布
Fig.7 Simulated probability distribution of the damaged containers within 2 hours after the incident

3.3 极端情况下的集装箱漂移轨迹

对于可能出现的特殊情形,即集装箱落水时无损坏且长时间处于半潜浮状态,采用风致漂移系数设置常数 $k=0.05$ 的方案进行模拟。该方案下模拟的 0~48 h 内每间隔 6 h 的集装箱漂移轨迹可能性

分布见图8。由图8可以看出, 24 h内集装箱位于事发海域附近随潮流摆动, 但随后逐渐呈条带状分布并逐渐向漳州市海角方向移动, 48 h后随退潮流沿浯屿-镇海角外海向南流。

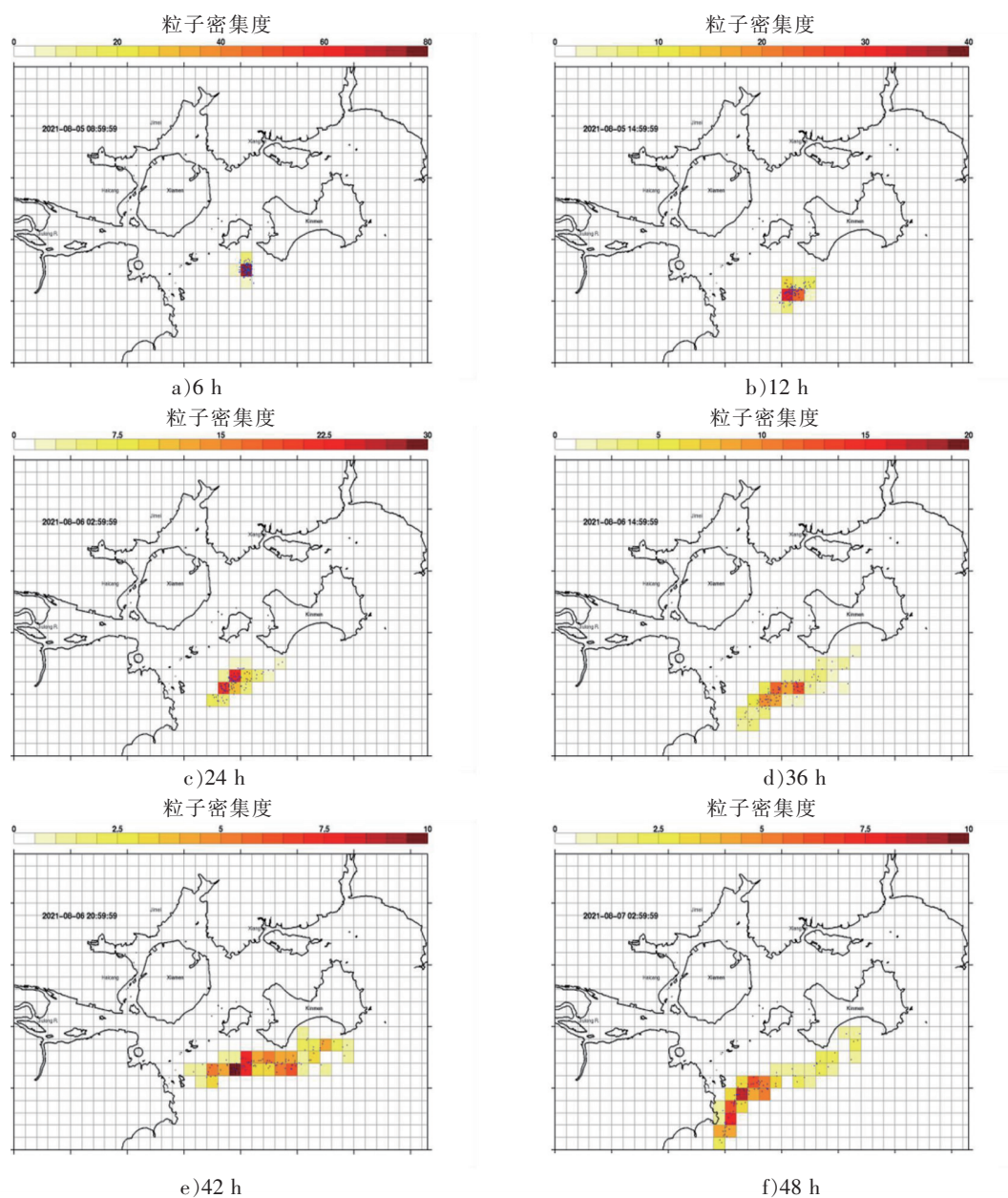


图8 模拟极端情况下集装箱0~48 h漂移位置的可能性分布

Fig.8 Simulated probability distribution of the containers within 0–48 hours under extreme conditions

4 结论

本文通过对集装箱受力运动及淹没过程进行分析, 根据区域海洋模式模拟事发海域的海流状态, 用拉格朗日法和蒙特卡洛随机扩散相结合的粒子追踪法建立集装箱追踪模型, 模拟集装箱的漂移轨迹。在对模拟结果进行验证后可以看出, 本模拟所得到的轨迹点与事发后海上发现的漂浮集装箱的地点十分接近, 本文提出的落水集装箱沉降过程的漂移轨迹模拟分析模型的准确度较高, 具有一定的实际使用价值和参考意义。

尽管本文建立的海上集装箱漂移模型考虑了集装箱的沉降过程, 但对海上存在的其他不确定性因

素考虑不周,例如海浪对集装箱漂移的影响。在接下来的研究工作中将会进一步探讨更多影响漂移的因素并和现有模型动态结合起来,提升轨迹模拟精度,节省搜寻的人力资源和时间成本,为搜寻工作提供更可靠的理论依据。

[参考文献]

- [1] 潘伟. 遇险船舶搜寻区域的选取优化[D]. 大连:大连海事大学,2016.
- [2] 欧阳. 海上失控船舶漂移模型研究[D]. 大连:大连海事大学,2008.
- [3] 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,2007,28(3):18-21.
- [4] 董显利,张吉平,尹建川,等. 落海集装箱漂移区域浅析[J]. 中国水运(下半月),2016,16(11):32-34.
- [5] 肖方兵,尹勇,金一丞,等. 基于随机粒子仿真的海上搜寻区域确定[J]. 中国航海,2011,34(3):34-39.
- [6] 吴中鼎,钱成春,孙芳. 海洋环境信息在海上搜救中的应用[J]. 海洋测绘,2008,28(5):23-27.
- [7] 黄娟,徐江玲,高松,等. 基于海上试验对海上漂移物运移轨迹影响因素的分析[J]. 海洋预报,2014,31(4):97-104.
- [8] 谭鹏,谭乐祖,张峥,等. 海上自由物体漂移轨迹预测方法[J]. 计算机与数字工程,2021,49(1):105-110.
- [9] 姜华林,孙昭晨,李黎,等. 基于蒙特卡洛方法的海上搜寻区域确定模型[J]. 水道港口,2011,32(4):285-290.
- [10] 郑宏喆,赵怀慈,王立勇. 基于风压差翻转漂移模型的海上搜寻区域确定[J]. 中国航海,2016,39(4):102-107.
- [11] BREIVIK Ø, ALLEN A A, MAISONDIEU C. et al. The leeway of shipping containers at different immersion levels[J]. Ocean Dynamics,2012, 62:741-752.
- [12] DANIELI P, JAN G, CABILOC F, et al. Drift modeling of cargo containers[J]. Spill Science & Technology Bulletin,2002,7(5/6):279-288.
- [13] ALLEN A, PLOURDE J V. Review of leeway, field experiments and implementation[R]. Coast Guard Rep: CG-D-08-99, Washinton U. S., 1999.
- [14] ZHU K, MU L, XIA X. An ensemble trajectory prediction model for maritime search and rescue and oil spill based on sub-grid velocity model[J]. Ocean Engineering,2021,236:109513.
- [15] TU H, XIA K, MU L, et al. Predicting drift characteristics of life rafts: case study of field experiments in the South China Sea [J]. Ocean Engineering,2022,262:112158.
- [16] XIANG G, WANG S, SOARES C G. Study on the motion of a freely falling horizontal cylinder into water using OpenFOAM [J]. Ocean Engineering,2020,196:106811.
- [17] SHCHEPETKIN A F, MCWILLAMS 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.
- [18] KRAUSS W, DENG J, HINRICHSSEN H H. The response of drifting buoys to currents and wind[J]. Journal of Geophysical Research,1989,94(C3):3201-3210.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)