



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230187

数字出版日期: 2024-06-21; 数字出版网址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20240620.1539.006>

基于 OpenDrift 模型的渤海微塑料分布与运输数值模拟

许敬波, 袁承仪

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 本研究基于 OpenDrift 模型对渤海漂浮微塑料的分布特征、运输规律和不同季节的主控动力因素进行数值模拟研究。与现场观测数据的比对和校验结果显示, 数值模拟结果能够较好地反映渤海内微塑料丰度的空间分布特征。在分布方面, 莱州湾大部、辽东湾东北部、渤海湾西北部存在微塑料的主要搁浅区, 辽东湾内部、渤海湾湾口北部、黄河口外海存在漂浮微塑料的重要聚集区。在渤海中部海区, 粒子春季、夏季主要受海流的影响, 秋季主要受斯托克斯漂流和风的影响, 冬季受到以上 3 种动力因素的共同影响; 在渤海湾和渤海海峡区域, 粒子受到海流的影响大; 在莱州湾区域, 粒子冬季主要受斯托克斯漂流和风的影响, 夏季受海流的影响, 春季、秋季受到 3 种动力因素的共同影响; 在辽东湾区域, 各动力因素对微塑料丰度分布均有影响。

关键词: 海洋微塑料; 质点追踪; 运输; 渤海

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2024)06-0038-11

Numerical Simulation of Microplastic Distribution and Transport in the Bohai Sea Based on OpenDrift Model

XU Jingbo, YUAN Chengyi

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In the current study, the OpenDrift model was used to numerically simulate the distribution characteristics, transport patterns, and key driving forces of the floating microplastics in the Bohai Sea for different seasons. Comparison and validation with field observation data indicated that the numerical simulation results could effectively capture the spatial distribution characteristics of microplastic abundance in the Bohai Sea. Regarding distribution, the major accumulation areas for microplastics were identified in the majority of the Laizhou Bay, the northeast part of the Liaodong Bay, and the northwest part of the Bohai Bay. In the Liaodong Bay, the northern part of the Bohai Bay mouth, and offshore of the Yellow River estuary were recognized as significant aggregation zones for the floating microplastics. In the central Bohai Sea region, particle distribution was primarily influenced by ocean currents in spring and summer, by Stokes drift and wind in autumn, and by a combination of these three factors in winter. In the Bohai Bay and Bohai Strait areas, particles were strongly influenced by ocean currents. In the Laizhou Bay, particle distribution was mainly influenced by the Stokes drift and wind in winter and the ocean currents in summer, respectively. In spring and autumn, it was affected by a combination of all three factors. In the Liaodong Bay, all driving forces had discernible impacts on the microplastic abundance distribution.

Key words: marine microplastics; particle tracking; transport; the Bohai Sea

引文格式:

许敬波, 袁承仪. 基于 OpenDrift 模型的渤海微塑料分布与运输数值模拟[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(6): 38-48.

XU J B, YUAN C Y. Numerical simulation of microplastic distribution and transport in the Bohai Sea based on OpenDrift

收稿日期: 2023-10-13; 修回日期: 2024-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41606028); 天津市科技计划项目(14JCQNJ09900)

作者简介: 许敬波(1997—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生; 通信作者: 袁承仪, 副教授, cyuan@tust.edu.cn

model[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(6): 38–48.

微塑料(microplastics)是直径小于 5 mm 的塑料颗粒^[1]。近几十年来,海洋微塑料污染问题得到了海洋研究者与环境管理部门的广泛关注。海洋微塑料对海洋生态环境造成了严重的破坏,其易吸附有机污染物(如多氯联苯)和重金属(如镉、铅等),还可以叠加自身溶出污染物,这样的微塑料易被海洋生物误食,引发生物富集,危害生物健康,这些污染物通过食物链传递,最终危及人类自身^[2-3]。

微塑料丰度是衡量海区内微塑料污染程度的重要指标,渤海在中国近海中属于微塑料丰度水平较高的区域^[4]。当前已有少量观测航次在渤海开展微塑料的现场考察,但由于缺少充足的观测数据,渤海微塑料的时空分布与运输规律尚不清楚,为海洋微塑料污染的评估和管控带来困难。

当前数值模拟已广泛应用于微塑料相关研究,在运输方面,质点追踪模型能够模拟微塑料粒子的运输轨迹及其所在位置的水动力环境^[5-7],可以更好地评估微塑料的污染程度;在机制方面,质点追踪模型能够模拟不同动力因素(海流、潮汐、波浪、风拖曳等)对微塑料运输的影响^[8-10],并对特定海区内各因素的贡献大小进行比较。因此,数值模拟方法可以辅助了解渤海微塑料的运输特征并分析其影响机制。

为了了解渤海微塑料的分布、运输规律及其影响因素,本文基于 OpenDrift 模型配置了渤海区域内的拉格朗日质点追踪模型,重点模拟渤海漂浮微塑料聚集和搁浅的分布特征和运输特点。将近年来的渤海大面观测研究和在各海湾开展的实地考察进行整理和汇总,将得到渤海表层微塑料的丰度分布情况作为模型校验的参考,最终以敏感性实验评估各动力过程对微塑料运输的影响,明确各海区各季节的主控动力过程。本研究对渤海微塑料污染的预测与防控有现实意义。

1 模式与方法

1.1 研究区域

渤海是典型的半封闭内海,面积约 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均水深约 18 m,有黄河、海河、辽河、滦河等陆地径流,与黄海仅通过渤海海峡进行水交换。《2021 年中国海洋生态环境状况公报》显示,渤海监测断面海面漂浮微塑料丰度为 0.74 个/ m^3 ^[11]。微塑料在中国近海的分布特点为渤海>黄海>东海>南海,污染情

况相对严重。为综合考虑渤海和渤海海峡区域的微塑料运输情况,本研究的具体研究区域选定在 $117^\circ\text{E}—123^\circ\text{E}$, $37^\circ\text{N}—42^\circ\text{N}$ 。

1.2 模型方法

1.2.1 OpenDrift 模型介绍

本研究采用拉格朗日质点追踪模型 OpenDrift 模拟了海洋漂浮微塑料的分布和运输规律^[12]。该模型是挪威气象研究所(Norwegian Meteorological Institute)基于 Python 语言开发的拉格朗日质点追踪模型,已广泛应用于针对海洋或大气中颗粒物(鱼卵、溢油等)分布和运输的数值模拟^[13-15]。在 OpenDrift 模型中可通过打开或关闭风拖曳、海流、浪致斯托克斯漂流等模块进行动力学诊断和敏感性实验。

1.2.2 核心动力模块和数据来源

OpenDrift 模型的核心模块(如溢油、搜救、鱼卵和幼鱼的追踪等模块)可以根据具体的用途进行配置。从模块内包含的物理过程来看,不同模块在海流运输和风拖曳等配置上存在显著差异(表 1^[12])。为了全面地包含各动力因素对模拟粒子运输的影响,本研究选择水平动力过程(包含海流、斯托克斯漂流和风拖曳)和垂向动力过程(包含垂直混合)的动力模块 PlastDrift(参数设置见表 2),该模块适用于渤海微塑料的数值模拟研究。为了保证模拟结果的可靠性,本研究采用高分辨率强迫场(包括风、海流、斯托克斯漂流等),这有助于还原渤海的真实动力情况。各强迫场数据与模型地理数据来源见表 3。

表 1 各动力模块包含的平流过程以及垂向运动过程
Tab. 1 Advection process and vertical motion process of each dynamic module

模块名称	是否包含海流运输	是否包含风拖曳	是否包含斯托克斯漂流	是否包含垂向动力过程
OceanDrift	是	是(可选项)	是	是
OpenOil	是	是(可选项)	是	是
Leeway	是	是(经验公式计算)	包含在风模块	否
PelagicEgg	是	否	是	是
PlastDrift	是	是(可选项)	是	是
OpenBerg	是	是	包含在风模块	否

1.3 模型强迫场校验

由于缺少大面的实测数据支撑,因此本研究通过对选用的海流、风、波高再分析数据进行多年的平均处理,与实测站点数据进行气候态比较验证,以此证明选用数据的准确性,提高后续模型处理结果的可信度,感谢国家科技资源共享服务平台国家海洋科学数据

据中心 (<http://mds.nmdis.org.cn/>) 提供的数据支撑。

表2 部分 PlastDrift 模块调用参数的名称、可配置的选项或范围以及选用的配置方案

Tab. 2 Names of some PlastDrift module call parameters, configurable options or ranges, and chosen configuration scheme

调用参数名称	可配置的选项或范围	最终配置方案
'vertical_mixing:mixingmodel' (垂直混合模型)	'randomwalk', 'analytical'	'randomwalk' (随机游走方案)
'environment:constant:ocean_vertical_diffusivity' (垂直扩散系数)	0 ~ 1 m ² /s	混合层上方设为 0.1 m ² /s, 混合层下方设为 0.02 m ² /s
'drift:advection_scheme' (平流方案)	'euler', 'runge-kutta', 'runge-kutta4'	'runge-kutta' (龙格-库塔方法)
'drift:horizontal_diffusivity' (水平扩散系数)	0 ~ 1 m ² /s	0.01 m ² /s
'general_coastline_action' (碰撞到岸线后粒子的运动)	'none', 'stranding', 'previous'	根据后续实验选择 'stranding' (搁浅) 或 'none' (不搁浅)
'terminal_velocity' (沉降速度)	0 ~ 0.1 m/s	0.021 m/s
'drift:wind_drift_factor' (风拖曳系数)	0 ~ 0.1	0.001
'drift:wind_drift_depth' (风影响深度)	0 ~ 100 m	夏半年: 7.0 m; 冬半年: 数值等于渤海各位置水深

表3 各强迫场数据与模型地理数据来源

Tab. 3 Sources of forcing field data and model geographic data

模块名称	数据来源	时间分辨率/h	空间分辨率/(°)
风	ECMWF 提供的全球气候的第五代大气再分析数据集 (ERA5) ^[16]	1	0.25
海流	CMEMS 提供的全球海洋物理分析与预报数据集 (GLORYS12v1) (https://doi.org/10.48670/moi-00016)	6	1/12
斯托克斯漂流	CMEMS 提供的全球海浪再分析数据集 (WAVERYs) (https://doi.org/10.48670/moi-00022)	3	0.2
有效波高	CMEMS 提供的全球海浪再分析数据集 (WAVERYs) (https://doi.org/10.48670/moi-00022)	3	0.2
水深	NOAA 提供的 Smith & Sandwell 海底地形数据 ^[17]	—	0.05
岸线	NOAA 提供的 GSHHG 矢量海岸线数据 ^[18]	—	—

研究范围内的流场、风场、有效波高的气候态检验结果如图 1—图 3 所示, 其中流场数据来自国家海洋信息中心提供的 2013—2017 年 2 月和 8 月的秦皇岛海洋站准实时数据, 风场数据来自该站点的 2013—2022 年夏季 (6 月、7 月、8 月) 和冬季 (12 月、1 月、2 月) 的准实时数据, 波浪数据来自该站点的

2013—2022 年全年的准实时数据。模型强迫场中的流场数据来自 GLORYS12v1 实时全球海洋再分析数据, 时间分辨率为 6 h; 风场数据来自欧洲中期天气预报中心提供的 ERA5 数据集, 时间分辨率为 1 h, 有效波高数据来自 WAVERYs 全球海浪再分析数据集, 时间分辨率为 3 h。

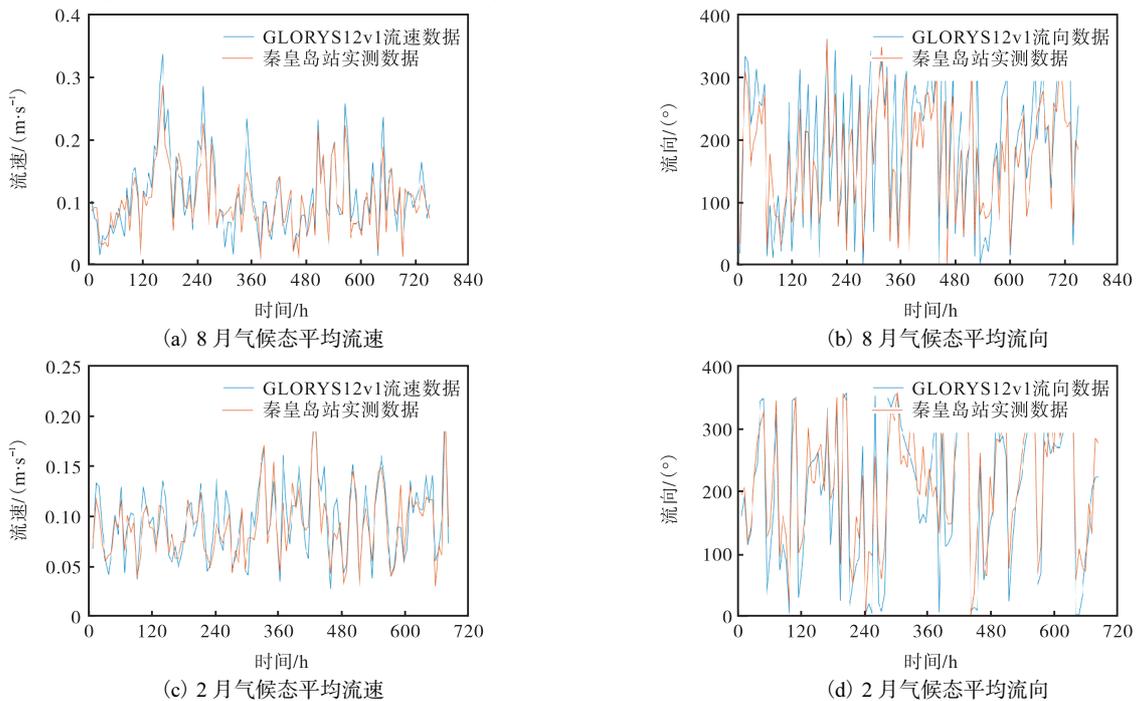


图1 流场气候态检验结果

Fig. 1 Test results of climate state of flow field

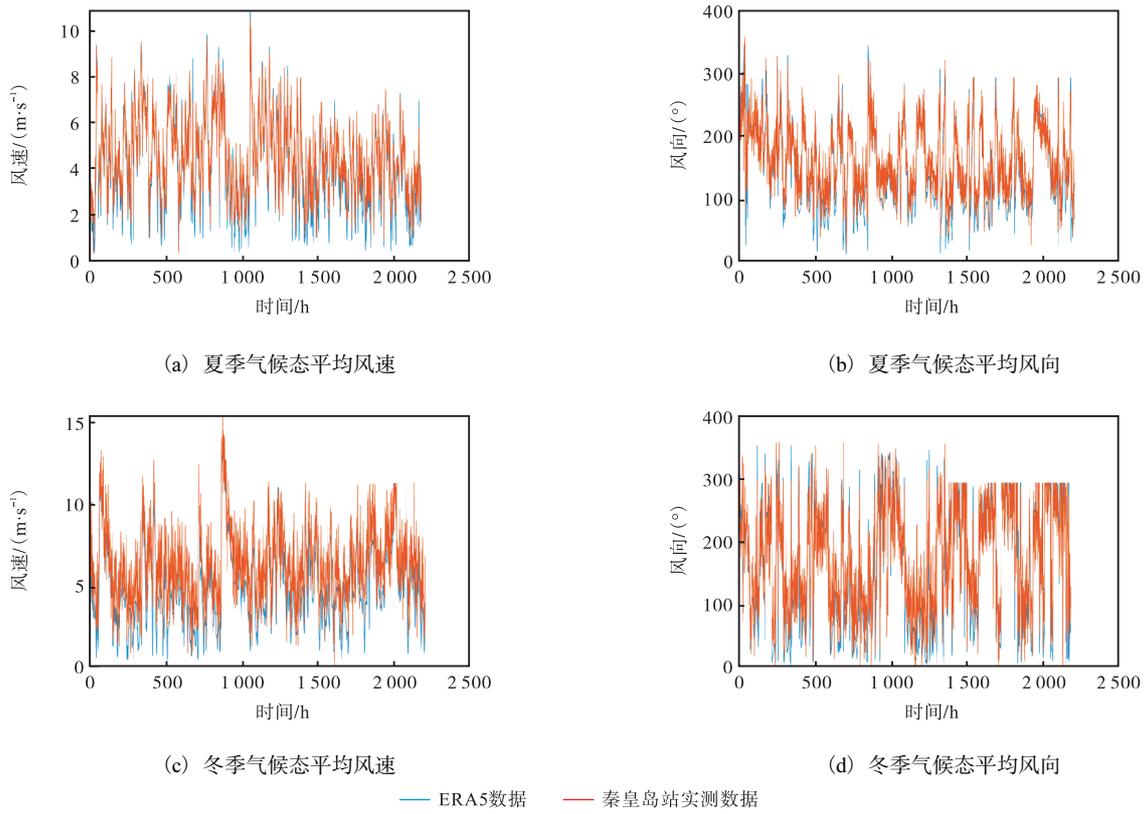


图 2 风场气候态检验结果

Fig. 2 Test results of climate state of wind field

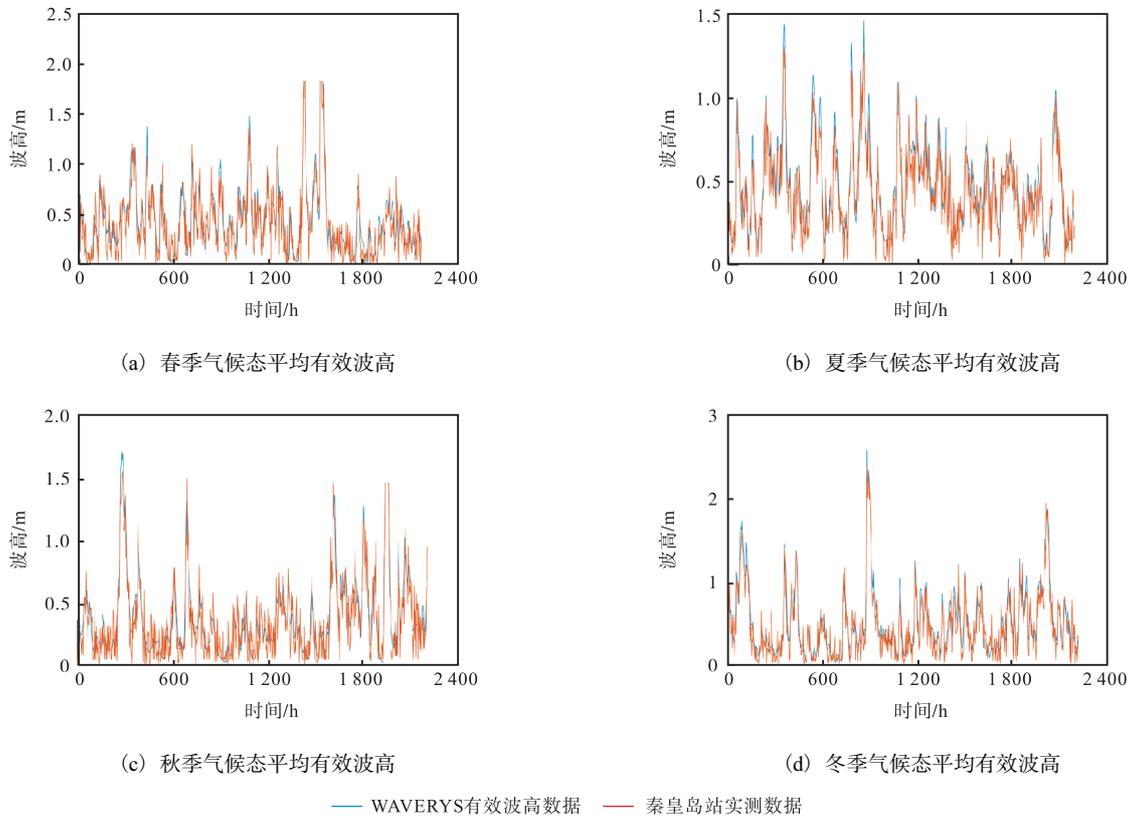


图 3 有效波高气候态检验结果

Fig. 3 Test results of climate state of significant wave height

对秦皇岛站的上述数据分别进行平均气候态处理、二维网格数据插值,计算每一组再分析数据和实测数据的相关系数 r ,其相关系数数值见表 4。从表 4 可以发现,相关系数均超过 0.80,因此认为本研究选用的模型强迫数据能反映研究范围内的动力环境。为保证数据的可靠性,研究过程中在塘沽站和大连站也进行相同实验,相关系数结果列在表 4 中,并得出了与秦皇岛站数据分析相同的结论,这表明模型强迫数据的准确性和代表性。

表 4 秦皇岛站、大连站、塘沽站气候态验证的相关系数
Tab. 4 Correlation coefficients of climate state verification at Qinhuangdao Station, Dalian Station and Tanggu Station

物理量	相关系数 r		
	秦皇岛站	大连站	塘沽站
8 月流速	0.92	0.89	—
2 月流速	0.87	0.87	—
8 月流向	0.88	0.89	—
2 月流向	0.91	0.83	—
夏季风速	0.94	0.82	0.95
冬季风速	0.88	0.89	0.85
夏季风向	0.91	0.90	0.90
冬季风向	0.92	0.91	0.93
春季有效波高	0.89	0.88	0.82
夏季有效波高	0.82	0.82	0.87
秋季有效波高	0.89	0.9	0.85
冬季有效波高	0.92	0.92	0.87

1.4 参数化方案

通过 PlastDrift 模块将水动力过程和风场对模拟粒子的影响参数化。将数值的平流方案设置为龙格-库塔方法,选用此方案对漂浮微塑料颗粒的位移进行计算^[19];水平扩散系数基于 Taylor 湍流扩散理论结合渤海实测流资料得到,为 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ^[20]。

在垂直方向上,根据浮力和湍流扩散率混合粒子,其中通过沉降速度反映浮力大小,该速度根据实测微塑料颗粒的密度和粒径大小计算得到,为 0.021 m/s ^[21];湍流混合的垂直粒子位移使用随机游走方案计算^[22],并根据该方案研究上层混合层垂直分布的一维模型计算湍流扩散系数^[23-24],混合层上方为 $0.10 \text{ m}^2/\text{s}$,混合层下方为 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}$ 。在风场方面,选用渤海海面以上 10 m 高空处的风场,风拖曳系数根据该风场强度计算得到,量值为 0.001 ^[25];风拖曳从海表面开始线性递减,夏半年(4 月—9 月)到海水表层 7.0 m 以下递减为 0,冬半年(10 月—来年 3 月)到海底递减为 0^[26]。

模拟粒子的位移计算公式为

$$X(t + \Delta t) = X(t) + \int_t^{t+\Delta t} v_i dt \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 为微塑料在 t 时刻的位置; v_i 为 t 时刻微塑料的速度,由 PlastDrift 模型计算得到。

在模拟粒子的设计方面,根据渤海微塑料现场观测得到的塑料粒子数量组成和密度情况(表 5^[27-28]),聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯分别占总数的 50%、29%、16%,三者共占微塑料总数的 95%,进行加权平均后,计算得到渤海微塑料粒子的密度约为 0.946 g/cm^3 ,将模拟粒子的密度统一设置为该值。以上模型配置方案能较为真实地反映渤海的水文动力环境,从而保障了微塑料模拟实验的合理性。

表 5 在渤海进行实地采样得到的微塑料样本中的塑料类型及其数量和密度

Tab. 5 Types, quantity and density of plastics in microplastics samples obtained from field sampling in the Bohai Sea

塑料类型	数量	数量占比/%	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
聚乙烯	810	50	0.94
聚丙烯	458	29	0.90
聚苯乙烯	261	16	1.05
其他类型	76	5	—

注:表中数量数据来自文献[27]中实测航次实验室分离数据,不同塑料的密度引用文献[28]中的数据。

1.5 实验设计

为探究渤海微塑料的空间分布特征和输运特点,进行 3 个模拟实验。均匀粒子释放实验和河口粒子释放实验用于探究空间分布特征,两者的差异体现在粒子释放点位的选择;敏感性实验用于探究各季节各海区的粒子输运机制。

1.5.1 均匀粒子释放实验

使用 OpenDrift 模型的 PlastDrift 模块,在选定范围内,均匀地释放漂浮微塑料粒子,释放的点位共 45 个(图 4),每月月初于每个点位释放 20 个漂浮微塑料粒子,释放粒子的位移积分时间均为 1 年。该实验(以下均称为实验一)假定渤海的漂浮微塑料在近几十年来长期积累,从而广泛地分布在海区内,通过在时间域上的积分,使该漂浮微塑料场在渤海真实动力条件的强迫下重新分布。实验目的是考察现有动力条件下微塑料聚集区与搁浅区的分布特征,从而佐证模型配置的合理性。

实验之前,为保证海区内有足够的漂浮微塑料粒子,在真实的水动力与大气强迫下先运行 1 年作为模型热启动,即以 2021 年 12 月 31 日的微塑料分布场作为实验一的初始场。在本实验方案中,为了测试运

动到岸界处的微塑料是否搁浅对整体微塑料分布的影响, 设置无搁浅和有搁浅的对比实验。在无搁浅实验中, 粒子随着水动力环境变化有机会重新被运输; 在有搁浅实验中, 粒子靠岸后停止漂移, 不再考虑其后续运动情况。

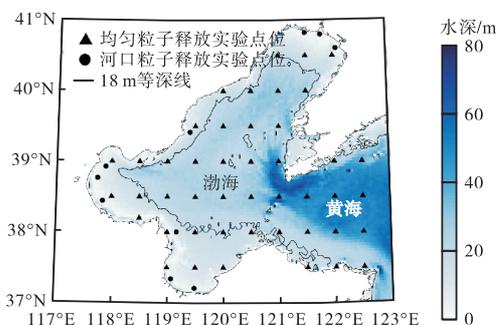


图 4 模拟实验的粒子释放点位

Fig. 4 Locations of particle releasing in the simulation experiment

1.5.2 河口粒子释放实验

本实验同样选用 PlastDrift 模块, 在渤海沿岸的河口海域, 从选定的 10 条陆地径流入海口逐月连续地释放漂浮微塑料粒子, 释放粒子的个数与入海径流

表 6 河口粒子释放实验中 10 条选定入海径流的每月释放粒子数

Tab. 6 Numbers of particles released by ten specific rivers to the Bohai Sea during each month for the estuary microplastic particle releasing experiment

月份	释放粒子数									
	黄河	淮河	小清河	辽河	大辽河	大凌河	海河	子牙新河	马颊河	滦河
1 月	350	3	8	13	15	2	52	46	24	7
2 月	324	8	13	25	34	8	55	50	30	8
3 月	382	22	18	74	42	2	66	69	34	7
4 月	420	14	16	19	33	5	51	52	29	4
5 月	435	15	14	0	12	0	51	56	23	4
6 月	527	22	19	170	211	15	79	73	28	11
7 月	1 107	65	52	344	200	74	311	344	328	32
8 月	1 000	74	68	613	267	112	187	189	118	34
9 月	2 183	136	159	902	269	193	178	279	317	25
10 月	2 914	34	104	394	468	65	138	354	302	25
11 月	857	16	27	79	142	21	80	94	53	12
12 月	432	5	10	52	37	3	57	61	29	8

2 结果与分析

2.1 模型结果校验

实验一和实验二得到了在两个不同初始条件下模拟粒子的最终空间分布情况, 该模拟结果需要得到微塑料实测分布数据的验证, 以此证明模型的可靠性和模拟的准确性。渤海实测微塑料分布情况是本研

究根据采样方法、采样装置和测量方法等观测方法的不同, 统计并整理实测数据, 分为浓缩样本法和大本样本法^[27-38]进行比较后得到的。

1.5.3 粒子输运机制探究实验

上述实验只反映了各水动力强迫共同作用下粒子的最终漂移位置, 为了更好地探究各单一动力过程在各季节对粒子输运和空间分布特征的相对贡献, 设置了敏感性实验 (以下均称为实验三): 在渤海湾 (118.3°E, 38.7°N)、辽东湾 (121.4°E, 40.4°N)、莱州湾 (119.5°E, 37.5°N)、渤海中部 (120°E, 39°N) 及海峡口区域 (121°E, 38.5°N) 的 5 个点位, 于 3 月 1 日、6 月 1 日、9 月 1 日、12 月 1 日各释放 500 个粒子; 每个季节 (即 3 个月) 积分一次, 以探究不同季节微塑料输运路径的差异; 分别依次进行单一海流、风拖曳、斯托克斯漂流强迫下的粒子追踪模拟, 将其与完整强迫场影响下的粒子输运路径进行对比, 得出该季节的主控动力因素。

实验一中关于是否搁浅对微塑料输运影响的模拟结果如图 5 所示, 显然两者存在差异, 即搁浅这一环节对微塑料整体分布存在影响。由于在没有搁浅的实验条件下, 模拟粒子靠岸后继续运动, 不利于本研究的输运路径分析工作, 且有搁浅的模式可以模拟

得到预测的搁浅区域,所以本研究在所有后续实验中均选择有搁浅的模式。

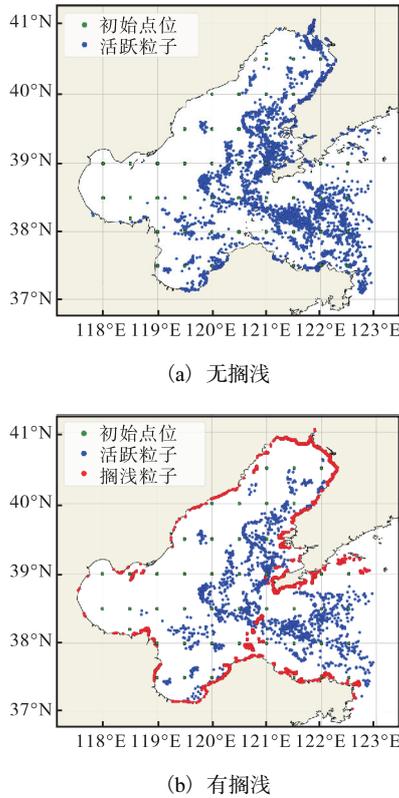


图5 设置是否有搁浅后粒子的分布情况
Fig. 5 Distribution of particles after setting whether there is stranding

实验一所得的模拟微塑料粒子情况如图6所示,其中图6(a)为模型热启动,图6(b)为粒子分布。微塑料的主要搁浅区分布在辽东半岛西部、辽东湾北部和莱州湾的部分区域,海上漂浮微塑料的聚集区主要集中在辽东湾、渤海海峡北部和莱州湾东部,与实测微塑料丰度数据的分布情况(后文图8)相比,有相同的丰度较高的区域,但总体与实测丰度数据分布高值区的对应情况有差异,且过于低估渤海湾的模拟粒子的搁浅和聚集情况。实验二所得的模拟微塑料粒子情况如图7所示,其中图7(a)为模型热启动,图7(b)为粒子分布。该模拟结果清晰地展示了渤海3个海湾的微塑料丰度明显高于中部海区的分布特点,各海湾沿岸都出现大量的搁浅情况,微塑料的搁浅区主要集中在莱州湾大部、辽东湾东北部以及渤海湾西北部;海上漂浮微塑料的聚集区位于辽东湾大部、渤海湾湾口以及黄河口附近,这些高值区域与实测高值点位一致(莱州湾 $4.74 \text{ 个}/\text{m}^3$ ^[34]、辽东湾 $1.33 \text{ 个}/\text{m}^3$ ^[36]、黄河口 $11600 \text{ 个}/\text{m}^3$ ^[37]),说明该实验模拟效果良好,能更合理地反映渤海实际微塑料的分布情况。

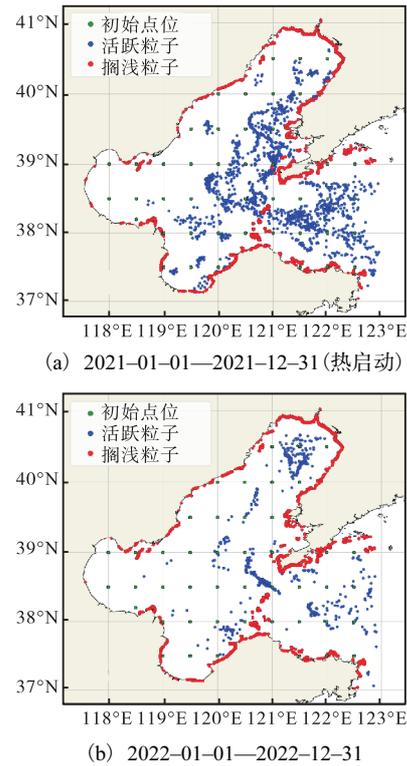


图6 均匀释放漂浮微塑料粒子后粒子的分布情况
Fig. 6 Distribution of particles after uniform release of floating microplastic particles

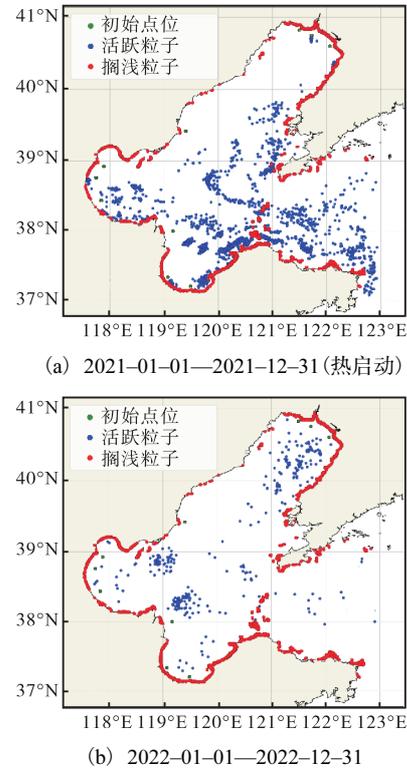


图7 在渤海主要径流入口释放模拟微塑料粒子后粒子的分布情况
Fig. 7 Distribution of particles after the release of floating microplastic particles in the main runoff estuary of the Bohai Sea

实验一和实验二中,渤海内的模拟粒子均有向东迁移的趋势,由渤海海峡进入黄海,仅有少量粒子自黄海进入渤海。模拟结果显示,在渤海的真实水动力作用下,微塑料粒子在各海湾处大量搁浅,造成明显的微塑料搁浅区;部分微塑料继续漂浮在海上,形成微塑料粒子海上聚集区;只有少数微塑料粒子运输离开渤海范围,从黄海运输进入渤海的模拟微塑料粒子极少,符合渤海半封闭的海区特点。

2.2 空间分布特征

本研究对实测航次的渤海漂浮微塑料丰度数据进行归纳和筛选。归纳方法的第一步是所有收集到的实测数据按照采样方法分为基于浓缩样本法的观测和基于大样本法的观测。原因有两方面:一方面在于这两类方法统计得到的丰度数量级存在巨大差距,无法跨类别比较,只能内部对比;另一方面在于使用这两种方法的研究区域有着明显区别,在渤海的中部海区多使用的是浓缩样本法,在渤海的沿岸,特别是在各径流入海口区域,多使用大样本法。归纳方法的第二步是选择合适的采样装置。本研究在综合对比大量渤海实测微塑料丰度数据后,在浓缩样本法的研究中统一筛选 330 μm 左右孔径的各式拖网的研究,将这些研究的数据作为海区中央大面数据模拟的参

考依据;在大样本法的研究中,统一筛选 50 μm 左右孔径的各式采水器的研究,将这些研究的数据作为径流入海数据模拟的参考依据。归纳方法的第三步是对不同水深位置的微塑料丰度进行区分,由于实测数据的局限性,对渤海中层、底层等进行微塑料丰度统计较少,所以本研究选用的丰度数据均从海水表层获得,其他数据仅供参考,并将单位统一为个/ m^3 ,得到筛选后的观测数据,制图后完成实测数据处理工作。

渤海漂浮微塑料丰度分布情况^[27-28]如图 8 所示。图 8(a)为基于浓缩样本法的微塑料丰度分布情况。本研究将丰度水平进行 5 个范围的划分,具体范围如图 8(a)的图例所示。《2021 年中国海洋生态环境状况公报》公布的渤海微塑料丰度为 0.74 个/ m^3 ,但“0.5 ~ 1.0 个/ m^3 ”在其他中国近海已经是高值标准,所以渤海需要更详细的划分才能展现污染情况。本研究将其他研究航次中塑料丰度为“>1.0 个/ m^3 ”和“0.5 ~ 1.0 个/ m^3 ”这两个范围数据所在区域定义为渤海微塑料的高值区,高值区分布在渤海湾湾口北部、黄河入海口附近和辽东湾湾顶附近海域。低值区塑料丰度为“<0.05 个/ m^3 ”,低值区分布在渤海中部和辽东湾西部沿海区域。

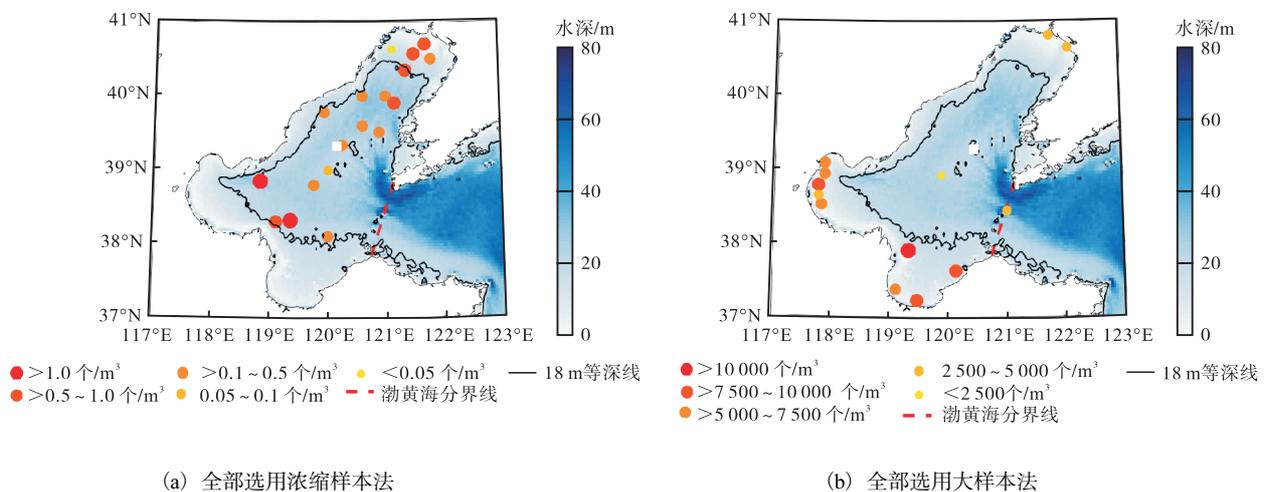


图 8 渤海漂浮微塑料丰度分布情况

Fig. 8 Distribution of the abundance of floating microplastics in the Bohai Sea

图 8(b)为基于大样本法的微塑料丰度分布情况,从中明显看到渤海近岸区微塑料丰度值普遍较高,其中最高值出现在黄河入海口附近,最低值出现在渤海中部。在 3 个海湾中,渤海湾和莱州湾沿岸丰度较高,明显受黄河和海河等陆地径流影响较大;辽东湾的沿岸丰度较低,这与图 8(a)中的分布特点有所不同,后文会对其原因进行探究。

总体来说,无论是观测数据的积累还是模拟实验二的结果〔图 8 和图 7(b)〕,都说明渤海微塑料搁浅区域主要集中在莱州湾大部、辽东湾东北部和渤海湾西北部,海上微塑料模拟丰度的高值区域出现在辽东湾、渤海湾湾口和黄河口,微塑料丰度低值区位于渤海中部。对比实验一,实验二证明了渤海微塑料的空间分布更受陆地径流输入等陆源因素影响,该模拟

多地受到海流模块的影响,这与黄河入海口附近海流场的强度高有关。只有在夏季,其他模块的影响会使漂移距离缩短,同时在渤海湾湾口形成了微塑料丰度高值区。在渤海海峡区域,漂移特点与渤海湾非常接近,同样由海流主控,整体输运方向为从渤海输运至黄海。

在莱州湾区域,各模块的强度多变,春季和秋季时,3条轨迹与控制实验轨迹的DTW距离比较接近,3个动力模块影响均衡;夏季时,轨迹a与控制实验轨迹的DTW距离较小,受海流影响大;冬季时,轨迹b、轨迹c与控制实验轨迹的DTW距离较小,受斯托克斯漂流和风模块主导;夏季时,微塑料粒子漂向黄河口,其他季节向南漂移形成大规模的搁浅区。

在辽东湾区域,全年轨迹a与控制实验轨迹的DTW距离较大,说明受海流的作用相对较小;轨迹b、轨迹c与控制实验轨迹的DTW距离较小,说明斯托克斯漂流和风在此区域影响力相对其他海区较大,这导致粒子输运距离较短,使该区域更容易出现微塑料聚集区和搁浅区。至此,在2.2节模拟得到的3个海上粒子聚集区(辽东湾、渤海湾湾口和黄河口)的形成原因也在此部分均得到了解释和验证。

表7 根据实验三轨迹图(图9)计算的渤海各区域、各季节的轨迹a、b、c与控制实验轨迹的DTW距离

Tab. 7 DTW distance between trajectories a, b and c in each region and season of Bohai Sea, and the standard trajectories calculated according to the trajectory diagram of Experiment 3 (Fig. 9)

位置	与控制实验轨迹的DTW距离			
	春季	夏季	秋季	冬季
渤海湾	0.14(轨迹a)	0.17(轨迹a)	0.13(轨迹a)	0.05(轨迹a)
	0.62(轨迹b)	0.83(轨迹b)	0.52(轨迹b)	0.42(轨迹b)
	0.95(轨迹c)	0.87(轨迹c)	0.65(轨迹c)	0.45(轨迹c)
莱州湾	0.25(轨迹a)	0.04(轨迹a)	0.26(轨迹a)	0.51(轨迹a)
	0.32(轨迹b)	0.43(轨迹b)	0.23(轨迹b)	0.29(轨迹b)
	0.45(轨迹c)	0.37(轨迹c)	0.30(轨迹c)	0.25(轨迹c)
辽东湾	0.31(轨迹a)	0.18(轨迹a)	0.21(轨迹a)	0.32(轨迹a)
	0.20(轨迹b)	0.19(轨迹b)	0.23(轨迹b)	0.21(轨迹b)
	0.02(轨迹c)	0.22(轨迹c)	0.15(轨迹c)	0.15(轨迹c)
渤海海峡	0.14(轨迹a)	0.01(轨迹a)	0.16(轨迹a)	0.04(轨迹a)
	0.40(轨迹b)	0.93(轨迹b)	0.45(轨迹b)	0.33(轨迹b)
	0.41(轨迹c)	0.95(轨迹c)	0.47(轨迹c)	0.35(轨迹c)
渤海中部	0.02(轨迹a)	0.11(轨迹a)	0.79(轨迹a)	0.24(轨迹a)
	0.47(轨迹b)	0.53(轨迹b)	0.23(轨迹b)	0.32(轨迹b)
	0.51(轨迹c)	0.59(轨迹c)	0.12(轨迹c)	0.38(轨迹c)

3 结论与展望

数值模拟结果显示:在入海口按径流量大小确定

释放粒子数目的实验模拟结果明显优于在渤海均匀释放粒子的实验,更能反映渤海真实微塑料场的分布特点,证明了渤海微塑料分布与输运更受陆源(径流输入等)因素影响;在渤海的莱州湾大部、辽东湾东北部、渤海湾西北部更容易出现微塑料粒子搁浅;在辽东湾、渤海湾湾口、黄河口有比较稳定的海上漂浮微塑料聚集区,以上模拟结果均符合实测微塑料丰度情况分布。

输运机制分析方面,各动力因素中,海流在大部分时间占主导地位,斯托克斯漂流和风也在秋季、冬季的辽东湾等区域对渤海微塑料漂移起重要作用。在辽东湾,由于全年各动力因素影响相对稳定且强度较弱,因此形成了一个海上微塑料丰度高值区;在渤海湾和莱州湾,由于季节差异,只有夏季存在较为明显的利于微塑料聚集的输运情况,但也解释了模拟和实测数据均显示渤海湾湾口和黄河入海口附近丰度高的原因,证明了本模拟实验的可靠性。

OpenDrift模型可以模拟渤海漂浮微塑料的分布与输运规律,模拟结果比较可靠。今后可以对其中的模拟粒子设计和强迫场设置继续优化,例如将实验一、实验二各自的优势结合,得到更准确的粒子初始场;将模拟结果与最新的实测丰度数据进行比较,以增加模型的可靠性。通过对OpenDrift模型的进一步优化,能够更好地将该模型应用于微塑料污染监测过程中。

参考文献:

- [1] BARNES D K A, GALGANI F, THOMPSON R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments[J]. Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences, 2009, 364(1526): 1985-1998.
- [2] 高园园,温志良,孔露露,等. 海洋环境中微塑料污染:来源、分布及风险[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(6): 875-880.
- [3] 黄辉. 微塑料在中国近海的污染现状及其生物毒性和防控建议[J]. 海岸工程, 2023, 42(3): 207-217.
- [4] 陈永平,姜璐,许春阳,等. 东中国海表层海水微塑料分布特征及其来源综述[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(2): 315-325.
- [5] HUSERBRÄTEN M B O, HATTERMANN T, BROMS C, et al. Trans-polar drift-pathways of riverine European microplastic[J]. Scientific reports, 2022, 12(1): 3016.
- [6] HERMAN A, WĘŚLAWSKI J M. Typical and anomal-

- ous pathways of surface-floating material in the Northern North Atlantic and Arctic Ocean[J]. *Scientific reports*, 2022, 12(1): 20521.
- [7] KAWASAKI T, MATSUMURA Y, HASUMI H. Deep water pathways in the North Pacific Ocean revealed by Lagrangian particle tracking[J]. *Scientific reports*, 2022, 12(1): 6238.
- [8] ONINK V, WICHMANN D, DELANDMETER P, et al. The role of Ekman currents, geostrophy, and stokes drift in the accumulation of floating microplastic[J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 2019, 124(3): 1474–1490.
- [9] DRIVDAL M, BROSTRÖM G, CHRISTENSEN K H. Wave-induced mixing and transport of buoyant particles: application to the Statfjord A oil spill[J]. *Ocean science*, 2014, 10(6): 977–991.
- [10] KUKULKA T, PROSKUROWSKI G, MORÉTFERGUSON S, et al. The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris[J]. *Geophysical research letters*, 2012, 39(7): L07601.
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 2021年中国海洋生态环境状况公报[J]. *环境保护*, 2022, 50(11): 59–67.
- [12] DAGESTAD K F, RÖHRS J, BREIVIK Ø, et al. Open-Drift v1.0: a generic framework for trajectory modeling[J]. *Geoscientific model development*, 2018, 11(4): 1405–1420.
- [13] BREKKE C, ESPESETH M M, DAGESTAD K F, et al. Integrated analysis of multisensor datasets and oil drift simulations: a free-floating oil experiment in the open ocean[J]. *Journal of geophysical research: oceans*, 2021, 126(1): e2020JC016499.
- [14] MELSOM A, KVILE K Ø, DAGESTAD K F, et al. Exploring drift simulations from ocean circulation experiments: application to cod eggs and larval drift[J]. *Climate research*, 2022, 86: 145–162.
- [15] DE AGUIAR V, DAGESTAD K F, HOLE L R, et al. Quantitative assessment of two oil-in-ice surface drift algorithms[J]. *Marine pollution bulletin*, 2022, 175: 113393.
- [16] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 2020, 146(730): 1999–2049.
- [17] SMITH W H F, SANDWELL D T. Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings[J]. *Science*, 1997, 277(5334): 1956–1962.
- [18] WESSEL P, SMITH W H F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database[J]. *Journal of geophysical research: solid earth*, 1996, 101(B4): 8741–8743.
- [19] 王晶, 赵骞, 邢传玺. 渤海微塑料输运过程的数值模拟研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(2): 58–66.
- [20] 匡国瑞, 陈伯海, 钱成春, 等. 浅海水域水平扩散系数的推算研究[J]. *海洋湖沼通报*, 1992(2): 1–8.
- [21] KOWALSKI N, REICHARDT A M, WANIEK J J. Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors[J]. *Marine pollution bulletin*, 2016, 109(1): 310–319.
- [22] VISSER A W. Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column[J]. *Marine ecology progress series*, 1997, 158: 275–281.
- [23] SUNDBY S. A one-dimensional model for the vertical distribution of pelagic fish eggs in the mixed layer[J]. *Deep sea research part A: oceanographic research papers*, 1983, 30(6): 645–661.
- [24] STRAND K O, HUSERBRÅTEN M, DAGESTAD K F, et al. Potential sources of marine plastic from survey beaches in the Arctic and Northeast Atlantic[J]. *Science of the total environment*, 2021, 790: 148009.
- [25] 王秀芹, 钱成春, 王伟. 风应力拖曳系数选取对风暴潮数值模拟的影响[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2001, 31(5): 640–646.
- [26] 郭世安, 张海彦, 魏皓, 等. 2013—2019年渤海夏季高温现象及机制分析[J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(2): 269–277.
- [27] ZHANG W W, ZHANG S F, WANG J Y, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China[J]. *Environmental pollution*, 2017, 231: 541–548.
- [28] 代振飞. 渤海微塑料分布及其影响因素研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2018.
- [29] XU L L, CAO L, HUANG W, et al. Assessment of plastic pollution in the Bohai Sea: abundance, distribution, morphological characteristics and chemical components[J]. *Environmental pollution*, 2021, 278: 116874.
- [30] LI Y F, WOLANSKI E, DAI Z F, et al. Trapping of plastics in semi-enclosed seas: insights from the Bohai (下转第 65 页)

- 余寿命预测方法[J]. 天津科技大学学报, 2023, 38(6): 62-68.
- [8] 崔鹏飞, 亚森江·加入拉, 许晨星, 等. 基于元学习聚合分类器的流程工业故障诊断[J]. 制造技术与机床, 2024(5): 27-34.
- [9] 张传雷, 武孟艳, 可婷, 等. 基于最优间隔分布的最小二乘支持向量机[J]. 天津科技大学学报, 2023, 38(2): 56-62.
- [10] XIAO M H, ZHANG W, WEN K, et al. Fault diagnosis based on BP neural network optimized by beetle algorithm[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2021, 34: 119.
- [11] WANG J, WANG W C, HU X X, et al. Black-winged kite algorithm: a nature-inspired meta-heuristic for solving benchmark functions and engineering problems[J]. Artificial intelligence review, 2024, 57(4): 98.
- [12] 马乐杰, 邹德旋, 李灿, 等. 融合差分进化和 Sine 混沌的改进粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(19): 80-96.
- [13] ZHANG Q Q, WANG D Q, GAO L F. Research on the inverse kinematics of manipulator using an improved self-adaptive mutation differential evolution algorithm[J]. International journal of advanced robotic systems, 2021, 18(3): 17298814211014413.
- [14] 刘涛, 蒙学强. 改进麻雀搜索算法的入侵检测特征选择[J]. 计算机工程与设计, 2024, 45(4): 989-996.
- [15] 李雨恒, 高尚, 孟祥宇. 基于精英引导的改进哈里斯鹰优化算法[J]. 计算机工程与科学, 2024, 46(2): 363-373.
- [16] 李嘉诚, 任磊, 秦岭, 等. 直流微电网 Buck 变换器输出电容的故障诊断[J/OL]. 电源学报, 1-15[2024-06-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20231220.0931.004.html>.
- [17] DU Q X, GAO L, LIU W, et al. Diode open-circuit fault research on the parallel-connected 24-pulse rectifier with DC-side passive harmonic reduction circuit[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2021, 37(1): 485-497.
- [18] ZHANG M Y, ZHANG Z B, LI Z, et al. A unified open-circuit-fault diagnosis method for three-level neutral-point-clamped power converters[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2022, 38(3): 3834-3846.

责任编辑: 周建军

(上接第 48 页)

- Sea, China[J]. Marine pollution bulletin, 2018, 137: 509-517.
- [31] 王睿涵. 天津近岸海域海水微塑料分布特征研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
- [32] TENG J, ZHAO J M, ZHANG C, et al. A systems analysis of microplastic pollution in Laizhou Bay, China[J]. Science of the total environment, 2020, 745: 140815.
- [33] 陈宏伟, 陈燕珍, 刘宪华, 等. 天津入海排污口微塑料分布特征[J]. 海洋通报, 2020, 39(4): 514-520.
- [34] 李江南, 凌玮, 沈茜, 等. 双台子河与大辽河表层水体微塑料特征与分布研究[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(3): 192-199.
- [35] 王旭. 大辽河入海微塑料分布特征、来源及通量研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [36] 吴楠. 渤海湾近岸微塑料的污染分布特征及其与微生物相互作用研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [37] 杨泽川, 胡泓, 王秀海, 等. 莱州湾入海河流的微塑料输入特征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(5): 73-81.
- [38] ZHANG W W, ZHANG S F, ZHAO Q, et al. Spatio-temporal distribution of plastic and microplastic debris in the surface water of the Bohai Sea, China[J]. Marine pollution bulletin, 2020, 158: 111343.

责任编辑: 周建军