# 胶州湾微塑料迁移分布特性数值模拟研究

# 赵 越, 周春艳, 许春阳

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京210098)

摘 要:塑料污染是突出的海洋环境问题之一。目前,对海洋微塑料的研究主要以室内实验和现场实测为主,而对其迁移分布的数值模拟研究相对较少。本文以胶州湾为例,考虑风流共同作用对微塑料的影响,采用 MIKE3 三维水动力模块耦合 ECO Lab 模块和 ABM 模块,研究了胶州湾漂浮微塑料和悬浮 微塑料的迁移分布特征,以及围填海导致的岸线演变对胶州湾微塑料迁移分布的影响。结果表明,漂 浮微塑料在胶州湾东北部、前礁水道、黄岛前湾和海西湾大量聚集且不易随涨、落潮输运出湾外。黄岛前湾、海西湾和胶州湾湾口有多个悬浮微塑料高浓度聚集区。在近 50 年围填海导致的岸线演变影响下,胶州湾中部和湾口、前礁水道、黄岛前湾、海西湾以及大港附近的漂浮和悬浮微塑料浓度均不断上升。 关键词:胶州湾;漂浮微塑料; 悬浮微塑料; 岸线演变; MIKE3

中图分类号:X143;X55 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2024)02-0217-10

# Numerical study on migration and distribution characteristics of microplastics in Jiaozhou bay

ZHAO Yue, ZHOU Chunyan, XU Chunyang

(College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Plastic pollution is one of the most prominent marine environmental problems. At present, the research on marine microplastics is mainly based on laboratory experiments and field measurements, while there is relatively little numerical simulation research on their migration distribution. This paper uses MIKE3 three-dimensional hydrodynamic module coupled with ECO Lab module and ABM module in order to simulate the migration and distribution characteristics of floating and suspended microplastics in Jiaozhou bay under both wind and current, then the impact of reclamation-induced coastline evolution on the distribution of microplastics is investigated. The results show that the floating microplastics accumulate in large quantities in the northeast of Jiaozhou bay, Qianjiao waterway, Huangdaoqian bay and Haixi bay, and are not easy to be transported out of the bay along with flood and ebb current. For suspended microplastics, there are multiple high-concentration areas in Huangdaoqian bay, Haixi bay and near the Jiaozhou bay mouth. Under the influence of reclamation in the past 50 years, the concentration of both floating and suspended microplastics in the central and near the mouth of Jiaozhou bay, Qianjiao waterway, Huangdaoqian bay, Haixi bay and Dagang has been continuously increasing.

Key words: Jiaozhou bay; floating microplastics; suspended microplastics; coastline evolution; MIKE3

收稿日期: 2023-06-23, 修订日期: 2023-11-20

基金项目:国家自然科学青年基金项目(41606042)

作者简介:赵 越(1997-),男,江苏南通人,硕士研究生,主要从事海洋污染物迁移研究,E-mail: zhaoyue9708@163.com 通信作者:周春艳(1985-),女,副教授,硕士生导师,主要从事海洋潮流和泥沙输运研究,E-mail: cyzhou@hhu.edu.cn

微塑料是具有聚合物结构的微尺度颗粒,一般尺寸范围为1µm至5mm<sup>[1-2]</sup>。海洋塑料污染 是最突出的海洋环境问题之一,近年来成为国际 研究热点<sup>[3]</sup>。目前有关海洋微塑料研究主要集 中在理化性质和环境影响等方面<sup>[4]</sup>,对其迁移分 布特征的数值模拟研究尚不丰富。

海洋微塑料的迁移输运非常复杂,包括漂 浮、悬浮、沉降和再悬浮等过程。计算海洋水动 力场并耦合粒子追踪模型,进而模拟漂浮粒子的 运动轨迹、分布情况并预测可能的积聚区是目 前研究海洋微塑料迁移过程的主流方法之一。 Howell 等<sup>[5]</sup>和 Maximenko等<sup>[6]</sup>提出,海洋中漂 浮塑料的运输过程主要取决于动力条件,如风和 地转环流。现有的海洋微塑料迁移模型大多假 定微塑料漂浮在海表面不下沉或标定沉速,主要 关注风、浪、流作用下微塑料的水平漂移过程, 并未直接体现其沉降和再悬浮的完整过程。

Eriksen 等<sup>[7]</sup>和 Cózar 等<sup>[8]</sup>发现,海洋表层观 测到的微塑料浓度与预期浓度之间存在差异。 Kukulka 等<sup>[9]</sup>指出,中等以上强度的风能增强微 塑料的垂向混合,使海表面拖网监测的微塑料浓 度偏低,此类现象促进了对微塑料垂向分布的研 究。Law 等<sup>[10]</sup>指出,海洋整个水体中普遍存在 塑料碎片。Zhang 等<sup>[11]</sup>研究发现,长江口附近海 域的漂浮微塑料和悬浮微塑料呈现不同的迁移 特征,且与风流作用以及污染源位置高度相关。 因此,仅考虑海面漂浮微塑料的建模过于保守, 合理地描述垂向输运过程对探究海洋微塑料的 迁移分布机制具有重要意义。

青岛胶州湾为半封闭海湾,是鱼、虾、贝生 长的优良海域。经历了大规模的人工围填海后, 胶州湾水交换能力不断减弱<sup>[12]</sup>。胶州湾接收了 来自沿岸入海河流和多个污水处理厂的生活污 水和工业污水,以及港区、航道和养殖区的大量 污染物,生态环境受人类影响较大。胶州湾已有 大量的生物、化学和生态系统调查成果,为微塑 料污染研究打下了良好基础<sup>[13-16]</sup>。目前胶州湾 微塑料污染研究主要涉及微塑料海水表层浓度 和沉积分布情况<sup>[17]</sup>、浮游动物摄入情况<sup>[18]</sup>、鱼类 和贝类摄入情况<sup>[19-20]</sup>等。微塑料是有害污染物 的载体,会严重影响海洋生态的可持续发展和海 洋经济。微塑料会吸附有机污染物、重金属或 致病微生物,所以经过食物链最终富集到人体的 微塑料会危害人体健康<sup>[21-22]</sup>。因此,基于已有的 胶州湾微塑料实测数据<sup>[17]</sup>,结合微塑料三维数值 模型探讨胶州湾微塑料输运迁移规律,可为预测 胶州湾微塑料分布并进行有效治理提供理论支撑。

本文使用 MIKE3 建立胶州湾三维水动力数 值模型, 耦合 ABM 模块和 ECO Lab Xenobiotics 异源物质模块, 分别研究风、流共同作用下胶州 湾漂浮微塑料和悬浮微塑料的迁移规律, 并分析 了胶州湾岸线演变对微塑料分布的影响。

## 1 材料与方法

#### 1.1 模型简介

MIKE3作为三维水动力和水环境软件,被 广泛应用于解决海湾和沿海地区的水生态问题。该模型基于三维不可压缩雷诺平均的 N-S 方程,服从 Boussinesq 和静水压的假设,满足 连续性方程和动量方程。ECO Lab 是 MIKE 中 的生态数值模拟模块,其中的异源物质模块 (Xenobiotics)可用于描述和模拟悬浮物的沉降、 对流扩散、沉积和再悬浮过程,可以在简化的海 洋悬浮微塑料物理运输过程(悬浮--沉降--沉积-再悬浮)<sup>[23]</sup>的基础上,将原有的通用悬浮物运动 公式模板修改率定为符合现有海洋悬浮微塑料 输运过程的公式模板。ABM 模块可以在水环境 动力学模型中搭建基于介质的模型,即将拉格朗 日粒子运动模型与基于过程的 ECO Lab 框架结合。

### 1.2 研究区域岸线和水深

根据史经昊<sup>[12]</sup>的研究,20世纪30年代以 后,胶州湾岸线在人类影响下变化剧烈,水动力 条件发生了显著改变。1966—1986年,胶州湾东 北、西北侧盐田养殖区进一步向海延伸,在此期 间独立的黄岛因为填海造陆与陆地接壤;1986— 2005年,胶州湾岸线普遍向海推进并总体趋向 平直,黄岛开发区沿岸变化较大;2005年以后, 变化主要为黄岛前湾和海西湾的填海造陆; 2018年以后,胶州湾禁止围填海,岸线基本不 变。因此,胶州湾岸线在人工干预下剧烈变化的 关键时间节点为1966年、1986年、2005年和 2018年。 本文收集了胶州湾上述4个年份的海图(水 深和岸线),参照各年的遥感影像对岸线进行了 修正。由于时间跨度大,胶州湾海图的投影不 同,所以将收集到的海图投影统一转换为 UTM51投影。由于不同时期海图使用的潮汐数 据时间间隔和长度不同,深度基准的位置也不 同,因此需要统一深度基准。因为平均海平面相 对稳定,所以根据海图中基准与海平面的相互关 系对所有深度基准进行了校正。

1.3 模型建立与验证

#### 1.3.1 胶州湾三维水动力模型

本文主要计算区域为胶州湾及其附近海域, 2018年具体地形、水深如图1所示。经过网格 尺寸敏感性分析后,将各时期胶州湾网格的数量 均控制在30000~40000,湾内网格最小分辨率 为200m左右,在该尺度下计算时间合理。由于 胶州湾入口狭窄,湾内的波浪通常较弱,故不考 虑波浪影响。模型设置干、湿边界,规定干水深 临界值为0.005m,湿水深临界值为0.1m,淹没 水深临界值为0.05m。底床糙率采用粗糙高度, 根据水深线性插值,插值范围为0.01~0.05m。 通过设置点源以流量的方式考虑大沽河等8条 典型入海河流的径流影响。使用 MIKE Global Tide Model 预测生成开边界潮位。风场数据使 用国家海洋科学数据中心提供的小麦岛站观测 数据。



Fig. 1 Overview of Jiaozhou bay

胶州湾水动力模型已经在 Xu 等<sup>[24]</sup>的前期工 作中得到了验证,模拟潮位与实测数据基本一致, 体现了胶州湾正规半日潮的特征;流速和流向的 模拟值与实测值也吻合较好,说明搭建的胶州湾 水动力模型可以较好地模拟胶州湾水动力过程。 1.3.2 胶州湾漂浮微塑料模型

基于胶州湾水动力模型,使用 MIKE3 ECO Lab ABM 模块在投放点于模型模拟时间 2012 年 10 月低潮和高潮两个典型时刻投放单个粒 子,追踪其 25 h 的轨迹。由于表面风和流是漂 浮微塑料粒子水平迁移的主要驱动力,参照 Critchell 等<sup>[25]</sup>使用风拖曳系数描述漂浮物体扩 散模型的风阻方面的研究,本文设置风拖曳系数 为 0.01,风漂移角为 28°,并且设定漂浮微塑料密 度小于海水密度,规定沉速为-1 m/s,即漂浮微 塑料始终漂浮于海面之上。

将模拟轨迹与冯依蕾等<sup>[26]</sup>的浮标实验结果 进行对比,结果如图2所示。低潮时刻释放,粒 子先随涨潮流向湾北运动,再随落潮流向湾口运 动;高潮时刻释放反之。可见本文的漂浮微塑料 粒子追踪模型具有较好的模拟精度。



图 2 模拟轨迹与浮标实验轨迹对比

Fig. 2 Comparison of trajectories between simulation and buoy experiments

#### 1.3.3 胶州湾悬浮微塑料模型

悬浮微塑料经历了大气沉降-水平扩散-垂 向输运(悬浮-沉降-沉积-再悬浮)等复杂的物理 过程<sup>[23]</sup>。本文将水动力模块与ECOLabXenobiotics 异源物质模块相结合,编写悬浮微塑料三维输运 公式模拟其迁移分布,并与实测资料<sup>[17]</sup>进行对 比验证。异源物质模块中对悬浮物的运动过程 表达式见表1。将胶州湾微塑料污染源设定为 胶州湾多条典型入海河流和河流下游的污水处 理厂,每条河流和河流下游对应的污水处理厂合 并为一个污染源。模型中微塑料源强采用郑依 璠<sup>[17]</sup>研究中的实测值(入海河流河口的微塑料 浓度)作为参考,微塑料表层浓度采用其在胶州 湾 15 个采样点的实测值验证。根据实测结果, 选取胶州湾占主导数量的微塑料——平均半径 15 μm、成分为聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的 纤维状微塑料进行研究。

Tab.1Parameter settings for suspended solids			
定义	表达式	单位	参数说明
MPSS	dMPSS/dt = prss - sessv + ressv	mg/L	MPSS: 悬浮物质量密度, prss: 单位体积大气沉降率, sessv: 单位体积沉降率, ressv: 单位体积高器浮率
MPSED	dMPSED/dt = sessa - ressa	g/m <sup>2</sup>	MPSED: 沉积物质量密度, sessa: 单位面积沉降率, ressa: 单位面积再悬浮率
rhograin	$dds \times 1000/(1 - pors)$	g/m <sup>3</sup>	rhograin: 沉积物颗粒密度, dds: 沉积物干密度, pors: 沉积物孔隙率
porw	1 - MPSS/rhograin	m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O/m <sup>3</sup> Bulk	porw:单位体积含水率
bssmx	IF porw > porsTHEN 1 ELSE 0	on/off	bssmx: 悬浮物是否达到最大值
dzs	$MPSED/(dds \times 1000)$	m	dzs: 沉积物层厚, dds: 沉积物干密度
cspd2	$cspd \times depth/(depth - dzs)$	m/s	<i>cspd2</i> : 沉积物堆积后调整流速, <i>cspd</i> : 当前流速, <i>depth</i> : 总水深
bresu	IFcspd2 > ucritTHEN 1 ELSE 0	on/off	bresu:是否再悬浮,ucrit:临界悬浮速度
prss	IFbsmmx == 1 THENparpro/dzELSE 0	$g DW/(m^3 \cdot d)$	parpro:大气微塑料沉降率, dz: 垂向划分层高
sessa	IFbresu == 0 THEN vsm×86400×MAX(0,MPSS)ELSE 0	$g DW/(m^2 \cdot d)$	vsm: 沉降速度
sessv	sessa/dz	$g DW/(m^3 \cdot d)$	
	$IFbsmmx \times bresu == 1THENMIN$		
ressa	$\left[resrat, MAX\left(0, MPSED \times 10^{-4}\right)/dt \times 86400\right]$	$g DW/(m^2 \cdot d)$	resrat: 最高再悬浮率
	ELSE 0		
ressv	ressa/dz	$g DW/(m^3 \cdot d)$	

表1 悬浮物参数设置

注:(1)根据本文选定研究的微塑料类型,结合郑依璠<sup>[17]</sup>研究中关于纤维状微塑料重量的计算公式,可将微塑料的质量密度(MPSS)单位mg/L转换为数量浓度items/m<sup>3</sup>,下文悬浮微塑料浓度单位统一使用items/m<sup>3</sup>;(2)根据胶州湾地质资料,胶州湾表层沉积物为淤泥质软土,平均天然孔隙比为1.57,平均天然重度为17.9 kN/m<sup>3</sup>,平均天然含水量为57.8%,因此取沉积物孔隙率(pors)为0.61,沉积物干密度(dds)为1160 kg/m<sup>3</sup>;(3)结合模型率定临界悬浮速度(ucrit)为0.35 m/s;(4)根据田媛等<sup>[27]</sup>的研究,在确定了大气微塑料沉降数量级后,取大气微塑料沉降率(parpro)为2.7×10<sup>-4</sup> g DW/(m<sup>2</sup>·d);(5)根据本文选定的微塑料研究对象和Waldschläger等<sup>[28]</sup>建立的纤维状微塑料沉降速度经验公式,取沉降速度(vsm)为0.01 m/s;(6)根据目前胶州湾的微塑料实测情况,微塑料含量尚未饱和,因此最高再悬浮率(resrat)取保守大值1000 g DW/(m<sup>2</sup>·d);(7)其他参数由模型实时计算给出

图 3 给出了模型运行稳定后 B2、D2 和 E1 采样点悬浮微塑料浓度随时间的变化,可见各采 样点表层悬浮微塑料浓度随潮流强弱上下波 动,中心值较稳定,这是涨落潮以及大小潮造成 的,因此通过对比实测值和模拟平均值来验证 模型。

图 4 给出了各采样点 30 d 模拟的表层浓度 平均值与实测值的对比。可以看出, 各采样点悬 浮微塑料的模拟基本符合实测情况, 其中 B3 和 C1 采样点模拟值偏小的原因可能是所处位置为 水产养殖区,且B3附近有休闲渔村和海鲜市场, 污染源较多;C4模拟值偏小的原因可能是位于 沧口水道,有往来船只的船源污染。D2和E1因 为位置接近湾口,在潮周期内流速变化较大,导 致悬浮微塑料浓度波动较大(图3)。在D2和 E1处进行测量时,悬浮微塑料浓度可能处于较 低水平,与模型结果相比(模型结果为月平均浓 度值)较小(图4)。对比结果表明,本文的悬浮 微塑料模型能较好地描述悬浮微塑料的迁移 过程。



图 3 B2、D2、E1 采样点表层悬浮微塑料浓度随时间的变化

Fig. 3 Times series of surface concentration of suspended microplastics at B2, D2 and E1 sample points





Fig. 4 Comparison between measured and simulated surface concentration of suspended microplastics

#### 2 结果与讨论

- 2.1 胶州湾微塑料分布特征
- 2.1.1 胶州湾漂浮微塑料分布特征

使用经过验证结果较好的水动力数值模型 和编写的漂浮、悬浮微塑料 ECO Lab 模板, 对胶 州湾微塑料分布特征进行研究。在海水表面漂 浮的微塑料通常由风和流共同影响,风会引起海 表流速的变化,此外还会对微塑料有直接的拖曳 作用,使其在风漂移角转向的方向产生加速,因 此在模型中设置漂浮微塑料表面风加速度参数 (风拖曳系数为0.01,风漂移角为28°),同时考虑 摩擦阻力,对胶州湾2018年9月漂浮微塑料的 分布进行模拟,风场数据来源与上文相同。模型 运行步长为 15 min, 参照 Yin 等<sup>[29]</sup>的研究, 在所 有污染源释放漂浮微塑料粒子,每个步长连续释 放1个粒子团,每个粒子团质量为1×10<sup>-6</sup>g。在 该排放量下胶州湾内的漂浮微塑料浓度分布层 次较为分明,具有较好的指示性。使用漂浮微塑 料粒子在海表面分布的质量浓度(µg/m²)来表征 漂浮微塑料浓度。

胶州湾漂浮微塑料在 30 d 内的浓度分布 (图 5)表明,在初期受涨潮影响,漂浮微塑料在 各个河口附近聚集,不易扩散到湾内。第6d湾 内漂浮微塑料分布(图 5b)已初具规模,可明显 看出多个污染源(如洋河、大沽河)排放的漂浮 微塑料迁移路径。第18d后(图5d-图5f)漂浮 微塑料浓度稳定在 0~1 ug/m<sup>2</sup>,且在沧口湾附 近、前礁水道附近、黄岛前湾和海西湾始终存在 高浓度漂浮微塑料聚集区。连续 30 d 的模拟结 果表明,墨水河和白沙河位于胶州湾东北部,距 离湾口较远,排放的漂浮微塑料受胶州湾涨、落 潮周期较短的影响,大部分在沧口湾附近回荡, 另外,排放的漂浮微塑料受红岛岸线阻挡,向湾 口迁移受阻, 仅部分能沿沧口水道向湾口迁移; 镰湾河排放的漂浮微塑料由于黄岛前湾出口狭 窄,向外迁移受阻;其余河口排放的漂浮微塑料 均能较顺利地向胶州湾内部扩散,然后受涨、落 潮和风向影响继续迁移。

胶州湾漂浮微塑料浓度在风流共同作用下的周期性变化如图 6 所示。其中,图 6a-图 6c 为漂浮微塑料在涨潮期间的浓度分布。在涨潮 期间,已经迁移出湾口的部分漂浮微塑料随涨潮 流方向返回湾内,并在黄岛前湾和海西湾产生聚 集(图 6b),胶州湾西侧的漂浮微塑料向西岸聚 集(图 6c),同时沧口湾附近聚集的漂浮微塑料向 胶州湾东北角移动并形成高浓度片区。图 6d-图 6f 为漂浮微塑料在落潮期间的浓度分布。落 潮期间风向与潮流方向相同,加大了漂浮微塑料 向湾口的扩散速度,漂浮微塑料整体向湾口方向 迁移。胶州湾西侧的漂浮微塑料受岸线阻挡,不 易从湾口输运到外海,沧口湾附近高浓度聚集的 漂浮微塑料在往湾口输运的过程中大量聚集于



胶州湾漂浮微塑料在第1d、6d、12d、18d、24d、30d的浓度分布

Fig. 5 Concentration distribution of floating microplastics in Jiaozhou bay on the  $1^{st}$ ,  $6^{th}$ ,  $12^{th}$ ,  $18^{th}$ ,  $24^{th}$  and  $30^{th}$  day

120.12° 120.23° 120.34° 120.45° E

沧口水道,少部分从团岛西侧沿岸迁移出湾口 (图 6f)。黄岛前湾和海西湾的漂浮微塑料由于 岸线闭塞基本无法迁移出湾口。

120.12° 120.23° 120.34° 120.45° E

图 5

2.1.2 胶州湾悬浮微塑料分布特征

由胶州湾涨、落潮期间悬浮微塑料的浓度分布(图 7)可见,胶州湾内悬浮微塑料浓度为 0~ 190 items/m<sup>3</sup>,大港区域高达 200~600 items/m<sup>3</sup>。 悬浮微塑料在湾内均有分布,且在湾口有多个聚 集区,在黄岛前湾和大港累积了大量的悬浮微 塑料。

120.12° 120.23° 120.34° 120.45° E

由悬浮微塑料质量密度微分表达式(表1)可 见,当流速大于临界悬浮速度时沉积微塑料开始 启动再悬浮,此时悬浮微塑料浓度升高。在涨、 落潮时期,胶州湾湾口附近的流速远大于湾顶和 胶州湾东北、西北两侧流速,会产生较明显的微 塑料再悬浮过程,因此湾口附近悬浮微塑料浓度



图 6 涨、落潮期间漂浮微塑料的浓度分布

Fig. 6 Concentration distribution of floating microplastics during flood and ebb tide



图 7 涨、落潮期间悬浮微塑料的浓度分布



较高。但胶州湾的悬浮微塑料分布并不与流速 完全正相关,在大港、中港和小港内部和其他内 陷豁口处虽然流速较低,但是由于岸线闭塞,此 处的悬浮微塑料不易迁移出去也会产生大量聚 集,这与漂浮微塑料的规律相似。Ren 等<sup>[30]</sup>指 出,余流特征是污染物净输运的指标,悬浮微塑 料在胶州湾湾口及其附近外海存在明显的高浓 度区,这与湾口附近存在多个欧拉余流涡旋<sup>[24]</sup> 的位置一致。

图 7a-图 7c、图 7d-图 7f 分别显示了悬浮 微塑料在涨潮、落潮期间的浓度分布。在涨潮 期间大量悬浮微塑料向湾内迁移,胶州湾中部、 西北沿岸附近、沧口水道、沧口湾和红岛之间以 及各个污染源处的浓度相对较高。大港附近、 黄岛前湾和海西湾湾内悬浮微塑料大量聚集。 落潮期间胶州湾湾内悬浮微塑料随着落潮方向 向湾口聚集,入海河道悬浮微塑料浓度较高,因 为此处相比附近的浅滩水深更深,并且水动力较 弱,从河口排放的悬浮微塑料不易向浅滩扩散; 沧口水道靠近海泊河和李村河污染源,悬浮微塑 料浓度也高于附近区域。大港附近、黄岛前湾 和海西湾的水交换情况较差,悬浮微塑料浓度很 高。胶州湾落潮期间悬浮微塑料浓度分布(图7f) 可以较明显地显示出悬浮微塑料从河口向湾内 的扩散路径,除镰湾河口的悬浮微塑料因岸线闭 塞难以排出黄岛前湾外,其余污染源河口的悬浮 微塑料均沿水道向胶州湾湾内输运。

2.1.3 胶州湾漂浮微塑料和悬浮微塑料分布特征比对

对比图 6 和图 7 可见,漂浮微塑料和悬浮微 塑料的分布特征不尽相同。漂浮微塑料的主要 聚集区为胶州湾东北部的沧口湾附近、西南部 的前礁水道附近以及胶州湾东、西两侧岸线,而 悬浮微塑料的主要聚集区为湾口附近以及大 港、中港和小港。相比悬浮微塑料,漂浮微塑料 受风的拖曳作用,更容易向胶州湾岸线附近迁 移,而悬浮微塑料分布特征与欧拉余流分布有直 接关联。在黄岛前湾、海西湾和一些内陷豁口 处,由于岸线闭塞及由其导致的水交换变差等原 因,此类区域成为漂浮微塑料和悬浮微塑料的共 同高浓度聚集区。

2.2 岸线演变对胶州湾微塑料迁移的影响2.2.1 胶州湾岸线演变数值模型设置

为了探讨岸线演变对胶州湾微塑料迁移的 影响,设置了多个数值模型,分别模拟胶州湾 1966年、1986年和2005年9月的漂浮微塑料和 悬浮微塑料迁移分布情况。由于缺乏历史数据, 本节基于现有的胶州湾微塑料排放量和排放位 置条件进行计算。风场、潮位边界和模型参数 设置与2018年的模型设置相同。此处设置多个 数值模型的目的不是模拟之前年份的实际微塑 料迁移分布,而是研究岸线演变及其引起的水动 力变化对微塑料迁移的影响。

2.2.2 岸线演变对胶州湾漂浮微塑料迁移的 影响

沿用上文的胶州湾污染源位置,在所有污染 源每个步长释放质量为1×10<sup>-6</sup>g的微塑料粒子, 探究在漂浮微塑料污染源位置和源强保持不变 时,胶州湾岸线演变对湾内漂浮微塑料迁移的影 响。在1966年、1986年、2005年和2018年9月 的岸线条件下,各模型运行1个月后的结果表 明,1986年黄岛西侧围垦完成后(图8a—图8b), 胶州湾西北部和前礁水道的漂浮微塑料受黄岛 岸线的阻隔,向湾口迁移受阻,使得黄岛北侧前 礁水道附近和胶州湾中部的漂浮微塑料开始聚 集(图 8c 中 Ι 区和 ΙΙ 区)。2005 年,黄岛前湾和 海西湾进一步围垦使得岸线闭塞(图 8d),导致 高浓度的漂浮微塑料较难输运出两湾湾口(图 8c 中 ΙΙ 区)。同时,红岛围垦使得胶州湾东北侧缩 窄,加剧了此处漂浮微塑料的聚集。2018 年黄 岛前湾和海西湾海域面积继续缩小(图 8e),进一 步加剧了漂浮微塑料的聚集(图 8c 中 ΙΙ 区),胶 州湾西侧海岸线向海推进,前礁水道附近的漂浮 微塑料向胶州湾口迁移路径进一步受阻,使得此 处浓度显著提高,最高可达 0.98 μg/m<sup>2</sup>(图 8c 中 Ι 区、图 8e)。



图 8 1966年、1986年、2005年和 2018年胶州湾漂浮微塑料的浓度分布和变化趋势

Fig. 8 Concentration distribution and trend changes of floating microplastics in Jiaozhou bay in 1966, 1986, 2005 and 2018

2.2.3 岸线演变对胶州湾悬浮微塑料迁移的 影响

沿用上文胶州湾悬浮微塑料污染源设置,探 究在悬浮微塑料污染源位置和源强保持不变时, 胶州湾岸线演变对湾内悬浮微塑料迁移和分布 的影响。各模型在1966年、1986年、2005年和 2018年9月的岸线条件下运行1个月后的结果 表明,随着1986年黄岛围垦并与陆地连接(图9a-图9b),以及2005-2018年黄岛前湾和海西湾围 垦相继结束(图9c-图9d),黄岛前湾和海西湾 水域面积进一步缩小。Xu等<sup>[24]</sup>指出,2005年以 后,胶州湾西南部大规模围垦导致胶州湾湾口束 窄,湾口附近欧拉余流涡旋增强,且黄岛前湾形 成了逆时针欧拉余流涡旋,黄岛前湾和海西湾在 围垦后水交换能力明显变差,导致 2005-2018 年胶州湾湾口附近悬浮微塑料浓度变高,海 西湾和黄岛前湾悬浮微塑料大量聚集(图 9e)。 大港附近由于岸线更加封闭,也逐渐富集悬 浮微塑料,且近 20年来较为显著,从 2005年的 50 items/m<sup>3</sup>左右增加到 2018年的 200 items/m<sup>3</sup> 左右。1966年胶州湾尚有大面积潮滩,大部分 位于湾顶和黄岛西部,流速较小,潮滩上的物质 不易与水体交换,所以模拟结果中有悬浮微塑料 聚集带(图 9a)。



图 9 1966 年、1986 年、2005 年和 2018 年胶州湾悬浮微塑料的浓度分布和部分变化趋势

Fig. 9 Concentration distribution and partial trend changes of suspended microplastics in Jiaozhou bay in 1966, 1986, 2005 and 2018

#### 3 结论

(1)本文基于 MIKE3 搭建了胶州湾水动力 模型、漂浮微塑料模型和悬浮微塑料模型,对胶 州湾微塑料迁移、分布特性进行了数值模拟研 究。结果表明,胶州湾漂浮微塑料在胶州湾东北 部沧口湾附近、西南前礁水道及附近沿岸、黄岛 前湾和海西湾大量聚集且不易随涨、落潮迁移 出湾外。

(2)胶州湾悬浮微塑料在流速较大区域一般 浓度较高,湾口附近有多个高浓度聚集区。与漂 浮微塑料相同,悬浮微塑料在黄岛前湾和海西湾 也存在高浓度聚集区。

(3)在近50年人工围填海导致的岸线演变 影响下,胶州湾中部和前礁水道的漂浮微塑料浓 度升高;黄岛前湾和海西湾的水域面积不断减 小,漂浮微塑料和悬浮微塑料在此持续富集;胶 州湾湾口附近欧拉余流涡旋增强,悬浮微塑料浓 度持续变高;大港附近由于岸线闭塞,悬浮微塑 料浓度近年也显著变高。

#### 参考文献:

- HORTON A A, BARNES D K A. Microplastic pollution in a rapidly changing world: implications for remote and vulnerable marine ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2020, 738: 140349.
- [2] DANOPOULOS E, TWIDDY M, ROTCHELL J M. Micro-

plastic contamination of drinking water: A systematic review[J]. PLoS One, 2020, 15(7): e0236838.

- [3] 王金平, 吴秀平, 曲建升, 等. 国际海洋科技领域研究热点及 未来布局[J]. 海洋科学, 2021, 45(2): 152-160.
- [4] CHUBARENKO I, BAGAEV A, ZOBKOV M, et al. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 108 (1/2): 105-112.
- [5] HOWELL E A, BOGRAD S J, MORISHIGE C, et al. On North Pacific circulation and associated marine debris concentration[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 65(1/2/3): 16-22.
- [6] MAXIMENKO N, HAFNER J, NIILER P. Pathways of marine debris derived from trajectories of Lagrangian drifters
  [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 65(1/2/3): 51-62.
- [7] ERIKSEN M, LEBRETON L C M, CARSON H S, et al. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea[J]. PLoS One, 2014, 9(12): e111913.
- [8] CÓZAR A, ECHEVARRÍA F, GONZÁLEZ-GORDILLO J I, et al. Plastic debris in the open ocean[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(28): 10239-10244.
- [9] KUKULKA T, PROSKUROWSKI G, MORÉT-FERGUSON S, et al. The effect of wind mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(7): L07601.
- [10] LAW K L. Plastics in the Marine Environment[J]. Annual Review of Marine Science, 2017, 9: 205-229.
- [11] ZHANG Z W, WU H, PENG G Y, et al. Coastal ocean dynamics reduce the export of microplastics to the open ocean[J].

Science of the Total Environment, 2020, 713: 136634.

- [12] 史经昊. 胶州湾演变对人类活动的响应[D]. 青岛: 中国海洋 大学, 2010.
- [13] LIU T, ZHAO Y F, ZHU M L, et al. Seasonal variation of micro- and meso-plastics in the seawater of Jiaozhou Bay, the Yellow Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 152: 110922.
- [14] SUN S, LI Y H, SUN X X. Changes in the small-jellyfish community in recent decades in Jiaozhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2012, 30(4): 507-518.
- [15] WANG W C, SUN S, SUN X X, et al. Spatial patterns of zooplankton size structure in relation to environmental factors in Jiaozhou Bay, South Yellow Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 150: 110698.
- [16] XING J W, SONG J M, YUAN H M, et al. Fluxes, seasonal patterns and sources of various nutrient species (nitrogen, phosphorus and silicon) in atmospheric wet deposition and their ecological effects on Jiaozhou Bay, North China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 617-627.
- [17] 郑依璠. 胶州湾内微塑料的分布特征与沉积规律研究[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2020.
- [18] ZHENG S, ZHAO Y F, LIU T, et al. Seasonal characteristics of microplastics ingested by copepods in Jiaozhou Bay, the Yellow Sea[J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 145936.
- [19] OUYANG W, ZHANG Y, WANG L, et al. Seasonal relevance of agricultural diffuse pollutant with microplastic in the bay[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 396: 122602.
- [20] ZHANG K N, LIANG J H, LIU T, et al. Abundance and characteristics of microplastics in shellfish from Jiaozhou Bay, China[J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2022, 40(1): 163-172.
- [21] MATO Y, ISOBE T, TAKADA H, et al. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment[J]. Environmental Science & Technology, 2001,

35(2): 318-324.

- [22] MASÓ M, GARCÉS E, PAGÈS F, et al. Drifting plastic debris as a potential vector for dispersing Harmful Algal Bloom (HAB) species[J]. Scientia Marina, 2003, 67(1): 107-111.
- [23] KOUTNIK V S, LEONARD J, ALKIDIM S, et al. Distribution of microplastics in soil and freshwater environments: Global analysis and framework for transport modeling[J]. Environmental Pollution, 2021, 274: 116552.
- [24] XU C Y, ZHOU C Y, MA K, et al. Response of water environment to land reclamation in Jiaozhou Bay, China over the last 150 Years[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 750288.
- [25] CRITCHELL K, LAMBRECHTS J. Modelling accumulation of marine plastics in the coastal zone; what are the dominant physical processes?[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 171: 111-122.
- [26] 冯依蕾, 张学庆, 于金珍. 基于拉格朗日方法的胶州湾物质 输运特征研究[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 106-113.
- [27] 田 媛,涂 晨,周 倩,等.环渤海海岸大气微塑料污染时 空分布特征与表面形貌[J].环境科学学报, 2020, 40(4): 1401-1409.
- [28] WALDSCHLÄGER K, SCHÜTTRUMPF H. Effects of particle properties on the settling and rise velocities of microplastics in freshwater under laboratory conditions[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(4): 1958-1966.
- [29] YIN M C, CAO H J, ZHAO W L, et al. Tide-driven microplastics transport in an elongated semi-closed bay: A case study in Xiangshan Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 846: 157374.
- [30] REN L, YANG L N, PAN G W, et al. Characterizing residual current circulation and its response mechanism to wind at a seasonal scale based on high-frequency radar data[J]. Remote Sensing, 2022, 14(18): 4510.

(本文编辑:胡莹莹)