

一种用于模拟饲料污染物在流场运输的粒子追踪模型

李晓乐, 陈红希

(哈尔滨工程大学 数学科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为预测饲料污染物在流场中的运输和最终归宿, 本文基于拉格朗日粒子追踪模型考虑固体沉降、风的作用以及岸线吸附等损耗过程, 建立了饲料污染物的三维运输模型, 并使用 FVCOM 模式模拟出的水动力场作为背景场, 进行了饲料污染物运输的模拟实验。实验结果显示: 风通过增加浅水层污染物的运动来促进其扩散; 饲料密度决定了污染物在水体中的垂直分布; 扩散过程增加了污染物在水平和垂直方向的扩散范围, 使得污染物能在更广泛的水域中混合和运输; 岸线吸附则会限制污染物在水域中的扩散范围, 导致污染物在岸线附近聚集。本研究可为选择饲料的密度、投放位置和时间提供科学依据, 有助于减轻饲料污染物的影响。

关键词: 饲料污染物; 拉格朗日粒子追踪模型; 三维运输模型

中图分类号: X55

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)03-0421-13

A particle tracking model for simulating the drift of feed contaminants

LI Xiaole, CHEN Hongxi

(College of Mathematical Sciences, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to predict the transport and final fate of feed contaminants in the flow field, this paper establishes a three-dimensional transport model of feed contaminants based on the Lagrangian particle tracking model considering the loss processes such as solid settling, wind action, and shoreline adsorption, and carries out simulation experiments of feed contaminant transport using the hydrodynamic field simulated by the FVCOM model as the background field. The experimental results showed that: wind promotes the dispersion of pollutants in the shallow water layer by increasing their movement; forage density determines the vertical distribution of pollutants in the water column; diffusion processes increase the range of pollutant dispersion in the horizontal and vertical directions, allowing pollutants to be mixed and transported in a wider range of waters; and shoreline adsorption restricts the range of pollutant dispersal in the waters, leading to the aggregation of pollutants near the shoreline. This study can provide a scientific basis for selecting the density, location and timing of feed placement, which can help to mitigate the effects of feed pollution.

Key words: feed contaminants; Lagrangian particle tracking model; 3D transport model

近年来, 随着水产养殖业的迅速发展, 人类对水产品的需求不断上升, 在近岸海域广泛开展了水产养殖活动。多年来, 我国海水养殖产量一

直占据世界总产量的一半以上。随着养殖规模的持续扩大, 为了满足养殖鱼类和贝类的生长和生存需求, 大量的饲料被使用, 一部分饲料不可

收稿日期: 2024-04-10, 修订日期: 2024-06-10

基金项目: 崂山实验室自主海洋与多圈层耦合模式体系发展及应用专项资金项目 (LSKJ202202100)

作者简介: 李晓乐 (1990—), 男, 河南信阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向为海洋环境数值模拟、高精度保结构算法研究, E-mail: lixiaole@hrbeu.edu.cn

通信作者: 陈红希 (2002—), 女, 河南驻马店人, 本科, 主要研究方向为数学与应用数学, E-mail: 1130556226@qq.com

避免地会被浪费或未被鱼类摄食而漂浮或沉积在水体中。这种未被利用的饲料可导致水体富营养化,引起水质恶化,严重时甚至会导致养殖生态系统的失衡、紊乱甚至崩溃^[1]。然而,与石油和微塑料等传统污染物相比,饲料污染物受到的关注较少,其分布和输运也难以直接观察。

有关污染物输运的模型,国内外研究学者基于不同的理论提出了多种数学模型,主要包括箱式模型、对流扩散方程模型、拉格朗日粒子追踪模型等^[2]。箱式模型又称容积模型和有限单元模型,遵循箱体内物质均匀混合、反应充分的假定,具有建模简单、计算内存需求小、能较大程度揭示主要的物理过程的优点,常被应用于模拟水体和大气的质量与污染控制^[3]。对流扩散方程模型是通过建立和求解对流扩散方程确定污染物空间分布的方法,比较适合保守污染物(污染物自身不发生化学变化,物质的总量保持恒定)的输运模拟。拉格朗日粒子追踪模型是通过观察单个粒子在空间中随时间的移动在混沌流中找到或多或少主要的结构,进而模拟、跟踪、记录和分析海洋中水团的起源和历史^[4]。

对于非保守污染物,学者更偏向于使用拉格朗日粒子追踪模型。例如,郑向阳等^[5]基于粒子追踪模型对绿潮生态动力学进行了初步研究。Rowe等^[6]利用FVCOM中的拉格朗日粒子模块模拟了浮力微囊藻群落的垂直分布和三维平流。余康等^[7]将传统二维浅水模型与三维粒子追踪结合起来建立了适用于天然河流鱼卵漂流的欧拉-拉格朗日模型。Periáñez等^[8]在HYCOM水循环背景下基于拉格朗日原理建立了模拟核事故后西地中海放射性核素输运的数值模型。Wang等^[9]采用拉格朗日粒子追踪方法建立了黄海典型污染物的输运模型,分析了黄海常见污染物鱼饲料的输运轨迹。在非保守污染物输运的建模上,学者更偏向于使用拉格朗日粒子追踪模型,其主要原因是污染源更容易用拉格朗日方法表示,拉格朗日粒子追踪模型能够在比欧拉网格分辨率更小的空间尺度上解决问题,同时能够纳入更多的耗散机制过程^[10]。

饲料污染物作为一种典型的非保守污染物,在漂移扩散过程中会经历岸线吸附、被捕食、溶

解以及沉积等多种损耗过程。本研究将基于拉格朗日粒子追踪模型,并且考虑固体沉降、风的效应以及岸线吸附等损耗过程,对饲料污染物在流场中的输运过程进行建模并数值模拟,以帮助预测污染物的空间分布和归宿,为减轻水产养殖污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 饲料颗粒的定义

水产养殖饲料的密度因其成分和具体配方而异,通常为1000~1050 kg/m³。常见的饲料类型,如颗粒饲料或片状饲料,其直径通常为1~8 mm。为了便于研究,本文将饲料颗粒理想化为微小球体,并采用平均直径为4.5 mm、方差为1 mm²的正态分布来描述饲料颗粒的直径。

1.2 饲料污染物输运建模

饲料污染物在流场中平流和扩散的同时还受到多种损耗过程的作用,如岸线吸附、溶解、被捕食以及与沉积物的交换等。这些损耗过程会改变饲料颗粒的状态,因此,对饲料污染物输运过程的研究至关重要,它有助于预测污染物的最终去向,并为决策制定、清理方法的选择以及损害评估提供有力支持。基于这些考虑,本文采用拉格朗日粒子追踪模型,建立了饲料污染物的三维输运模型。在此模型中,将饲料污染物视为大量颗粒,先考虑每个颗粒在特定流场中受水流和风的影响而产生的平流和扩散过程,再考虑颗粒随水流动的特性,在模型中纳入颗粒被岸线吸附、溶解或被捕食以及与海底沉积物交换等损耗过程。本研究特别关注那些尚未溶解于水的饲料颗粒在流场中的动态和归宿。图1为饲料污染物的输运模型。

1.3 三维运动控制方程

饲料颗粒在流场中的运动由以下关系控制,其中涉及的各项参数将在后续部分详细阐述:

$$\frac{d\vec{X}_p}{dt} = \vec{U}_c + u_{wx}\vec{i} + u_{wy}\vec{j} + U_s\vec{k} + \vec{U}_d \quad (1)$$

式中: $\vec{X}_p = (x, y, z)$ 代表饲料的位移向量; $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 是水平方向上的单位向量; $\vec{k}$ 是垂直方向上的单位向量。

在方程(1)中, $\vec{U}_c = (u_{cx}\vec{i}, u_{cy}\vec{j}, u_{cz}\vec{k})$ 代表饲

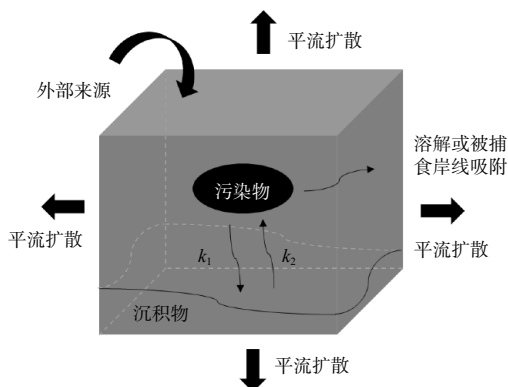


图1 饲料污染物的输运模型

Fig.1 Transport modeling of feed contaminants

料颗粒随水流运动的平流速度。水体中的污染物分为溶解性和非溶解性两类。当模拟对象为溶解性污染物时, 污染物质点随水流运动的平流速度与流体速度相同, 即 $\vec{U}_c = \vec{U}$ ($\vec{U}$ 是流体速度); 当模拟对象为非溶解性污染物且颗粒细小时, 污染物质点随水流运动的平流速度可近似等于流体流速, 即 $\vec{U}_c \approx \vec{U}$; 当模拟对象为非溶解性污染物且颗粒较大时, 污染物质点随水流运动的平流速度不等于流体流速, 而是 $\vec{U}_c \approx \vec{U} \cdot \beta$ (β 是速度系数)^[11-12]。鉴于本研究中的饲料颗粒尺寸较小, 可假定污染物质点随水流运动的平流速度与流体速度近似相等, 即 $\vec{U}_c \approx \vec{U}$ 。

在方程 (1) 中, $\vec{U}_w = (u_{wx} \vec{i}, u_{wy} \vec{j})$ 表示风力作用于饲料颗粒的额外的漂移速度, 又称风阻速度。由于水的缓冲作用, 假设只有浅水层的饲料颗粒受到风力作用。根据风阻效应的经验公式^[13], $\vec{U}_w(u_{wx} \vec{i}, u_{wy} \vec{j})$ 可表示为:

$$\vec{U}_w = \alpha \times \vec{W} \quad (2)$$

式中: α 表示风阻系数, 是与物体特性相关的经验参数; $\vec{W}$ 是在海平面以上 10 m 高度的风速。

在方程 (1) 中, U_s 是沉降速度, U_s 的表达式可通过牛顿第二定律推导得出。饲料颗粒在主流区所受的压力梯度力、附加质量力、Magus 力、Saffman 力和 Basset 力的作用都很小^[14-15], 因此本文只考虑有效重力和拖曳力的作用, 来推导 U_s 满足的公式。饲料颗粒的有效重力 W 为:

$$W = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g \quad (3)$$

水流拖曳力沿垂向的合力 F_D 为:

$$F_D = \frac{\pi}{8} C_D \rho_f d_p^2 |u_f - u_p| (u_f - u_p) \quad (4)$$

式中: ρ_f 为海水密度; ρ_p 为饲料颗粒密度; d_p 表示饲料颗粒直径; u_f 为垂向水流速度; u_p 表示饲料颗粒的垂向速度; g 为重力加速度; C_D 为饲料颗粒的垂向拖曳力系数。

根据以上受力分析, 利用牛顿第二定律 $F = ma$, 可列出饲料颗粒的运动方程为:

$$\frac{\pi}{6} \rho_p d_p^3 \frac{du_p}{dt} = \frac{\pi}{8} C_D \rho_f d_p^2 |u_f - u_p| (u_f - u_p) + \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho_f) g \quad (5)$$

假设饲料颗粒的初始释放深度为 z_0 , $t = 0$ 时刻饲料颗粒垂向初始速度为 u_{cz0} , 则饲料颗粒垂向运动的初始条件可表达为:

$$u_p|_{t=0} = u_{cz0} \quad (6)$$

根据 Morsi 等^[16] 提出的圆球拖曳力系数的分段拟合公式, C_D 可表示为如下通用形式:

$$C_D = m_1 + \frac{m_2}{\text{Re}_D} + \frac{m_3}{\text{Re}_D^2} \quad (7)$$

式中: $\text{Re}_D = \frac{\rho_f d_p}{\mu} |u_f - u_p|$ 为饲料颗粒的雷诺数; μ 是海水动态黏度; m_1, m_2, m_3 分别为根据 Re_D 的不同区间给出拟合常数, 见表 1。

表1 不同雷诺数 Re_D 下式 (7) 中拟合常数 m_1, m_2, m_3 取值^[16]

Tab.1 Fitting constants m_1, m_2, m_3 in Eq. (7) for different Reynolds numbers Re_D			
Re_D	m_1	m_2	m_3
$\text{Re}_D < 0.1$	0	24	0
$0.1 < \text{Re}_D < 1.0$	3.6900	22.7300	0.0903
$1.0 < \text{Re}_D < 10.0$	1.2220	29.1667	-3.8889
$10.0 < \text{Re}_D < 100.0$	0.6167	46.5000	-116.6700
$100.0 < \text{Re}_D < 1000.0$	0.3644	98.3300	-2778.0000
$1000.0 < \text{Re}_D < 5000.0$	0.3570	148.6200	-47500.0000

将公式 (7)、 Re_D 的表达式分别代入公式 (5), 并令 $U = u_f - u_p$, 可将公式 (5) 及其初始条件简化整理为如下形式:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = AU^2 + BU + C \\ U|_{t=0} = u_f - u_{cz0} \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$A = -\frac{3\rho_f m_1}{4\rho_p d_p}, B = -\frac{3\mu m_2}{4\rho_p d_p^2},$$

$$C = -\frac{3\mu^2 m_3}{4\rho_p \rho_f d_p^3} - \frac{(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_p}$$

则本文饲料颗粒的垂向运动问题可简化为 Riccati 常微分方程的求解问题。当 $0.1 < \text{Re}_D < 5000.0$ 时(通常情况下饲料颗粒的雷诺数 Re_D 都处于该区间), 可求得公式 (8) 的解析解为:

$$U = u_f - u_p$$

$$= \frac{\frac{\mu}{\rho_f d_p} \frac{\eta - m_2}{2m_1} \left[\frac{2m_1 \text{Re}_{D0} + m_2 - \eta}{2m_1 \text{Re}_{D0} + m_2 + \eta} \frac{m_2 + \eta}{m_2 - \eta} e^{-\frac{3}{4} \frac{\mu \eta t}{\rho_p d_p^2}} - 1 \right]}{\frac{2m_1 \text{Re}_{D0} + m_2 - \eta}{2m_1 \text{Re}_{D0} + m_2 + \eta} e^{-\frac{3}{4} \frac{\mu \eta t}{\rho_p d_p^2}} - 1} \quad (9)$$

式中:

$$\eta = \sqrt{m_2^2 - 4m_1 m_3 + m_1 \phi}, \phi = -\frac{16\rho_f (\rho_p - \rho_f) d_p^3 g}{3\mu^2},$$

$$\text{Re}_{D0} = \frac{\rho_f d_p (u_f - u_{cz0})}{\mu}$$

当 $\text{Re}_D < 0.1$ 时, 公式 (8) 退化为:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = BU + C \\ U|_{t=0} = u_f - u_{cz0} \end{cases} \quad (10)$$

其解析解为:

$$U = \left(u_f - u_{cz0} - \frac{4(\rho_p - \rho_f) d_p^2 g}{3\mu m_2} \right) e^{-\frac{3}{4} \frac{\mu m_2 t}{\rho_p d_p^2}} + \frac{4(\rho_p - \rho_f) d_p^2 g}{3\mu m_2} \quad (11)$$

将 $m_2 = 24$ 代入公式 (11) 可得:

$$U = \left(u_f - u_{cz0} - \frac{1}{18} \frac{(\rho_p - \rho_f) d_p^2 g}{\mu} \right) e^{-\frac{18\mu t}{\rho_p d_p^2}} + \frac{1}{18} \frac{(\rho_p - \rho_f) d_p^2 g}{\mu} \quad (12)$$

从公式 (9)、公式 (12) 的表达式可以看出, 饲料颗粒与水流的相对速度 U 为时间 t 的函数, 且具有渐近趋势, 当 t 趋于无穷时, 可得下式:

$$U_s|_{t \rightarrow \infty} = -U|_{t \rightarrow \infty}$$

$$= \begin{cases} -\frac{1}{18} \frac{(\rho_p - \rho_f) d_p^2 g}{\mu} & \text{Re}_D < 0.1 \\ -\frac{\mu}{\rho_f d_p} \left[\frac{\eta - m_2}{2m_1} \right] & 0.1 < \text{Re}_D < 5000 \end{cases} \quad (13)$$

$$\vec{U}_d = (u' \vec{i}, v' \vec{j}, w' \vec{k})$$
 表示湍流扩散速度, 假

设水平扩散系数是各向同性的, 那么湍流扩散速度采用随机游走法^[17]表示为:

$$(u', v', w') = \sqrt{\frac{1}{\Delta t}} ([R]_0^1 \sqrt{12K_h} \cos \theta, [R]_0^1 \sqrt{12K_h} \sin \theta, [R]_{-1}^1 \sqrt{6K_v}) \quad (14)$$

式中: $[R]_{-1}^1$ 表示 $[-1, 1]$ 均匀分布的随机数; $[R]_0^1$ 表示 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数; Δt 表示时间步; K_h 是水平扩散系数; K_v 为垂向扩散系数。

1.4 污染物输运过程中的损耗过程

1.4.1 岸线吸附过程

饲料颗粒在输运过程中可能会到达陆地边界, 尤其是在一些浅水区域, 污染物会被岸线吸附, 而由于水流的卷带作用会有一部分污染物重新回到水里。本文使用随机方法来表示岸线吸附的影响, 饲料颗粒到达岸线被岸线吸附的概率由 0 到 1 的一个值表示, 称为黏滞概率 P_v 。当一个颗粒最终到达陆地边界时, 如果随机生成的数 $R[0, 1]$ 不大于指定的黏滞概率, 则将其视为被吸附而不再返回水中, 因此不再进行进一步的计算; 当随机数大于给定的黏滞概率时, 颗粒将会被反射回水中。因此, 当污染物颗粒与海岸线接触时,

$$\begin{aligned} R \leq P_v &: \text{被岸线吸附} \\ R > P_v &: \text{反射} \end{aligned} \quad (15)$$

1.4.2 溶解或被捕食过程

考虑方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\lambda c \quad (16)$$

式中: c 表示污染物浓度, λ 是溶解或捕食系数。这个方程可以用随机方法来处理^[18], 如果假设在每个时间步去除一个污染物颗粒的概率为 p_d , 则

$$p_d = 1 - e^{-\lambda \Delta t} \quad (17)$$

在实际操作中, 在每个时间步长上, 每个颗粒都生成一个随机数 $R[0, 1]$ 。如果 $R \leq p_d$, 则颗粒从计算中移除。需要指出的是, 当污染物颗粒的数量足够多时, 公式 (16) 和公式 (17) 是等价的, 这一结论可在文献 [18] 中看到。公式 (16) 描述的是污染物整体的浓度变化, 通过公式 (17) 将其转化为单个颗粒的状态变化, 这种转化更适合粒子追踪方法。

1.4.3 水和沉积物之间的污染物吸收和释放过程

使用类似溶解或被鱼类捕食过程的随机方法来求解水和沉积物之间污染物的吸收和释放过程, 动力学系数 k_1 控制吸附, 系数 k_2 控制脱附。那么, 水中的饲料颗粒被沉积物吸附的概率为:

$$p_a = 1 - e^{-k_1 \Delta t} \quad (18)$$

如果新生成的独立随机数 $RAN \leq p_a$, 则颗粒被沉积物吸附。固定在沉积物上的颗粒被释放到水中的概率为:

$$p_r = 1 - e^{-k_2 \phi \Delta t} \quad (19)$$

如果新生成的独立随机数 $RAN \leq p_r$, 则颗粒被释放到水中。 ϕ 是一个校正因子, 它考虑了部分沉积物表面被周围沉积物隐藏的事实, 这部分不与水发生相互作用。

吸附速率 k_1 由沿海水域的解吸系数 k_2 和污染物分布系数 k_d 求得。 k_d 为平衡后沉积物中的污染物浓度与水中污染物浓度之比, 可写成如下形式:

$$k_d = \frac{1}{m} \frac{k_1}{k_2} \quad (20)$$

式中: m 为沉积物浓度, 可理解为网格单元中海底沉积物的质量除以可以与其相互作用的水量。

与海底相互作用的厚度为 H 的水层中海底沉积物浓度 m 定义如下:

$$m = \frac{\rho_b L}{H} \quad (21)$$

式中: L 为与水相互作用的沉积层厚度; ρ_b 是沉积物堆积密度, 其计算公式为 $\rho_b = \rho_m (1 - por)$, ρ_m 为沉积物的密度, por 为沉积物孔隙度。在实际计算中, k_1 可通过 $k_1 = k_d k_2 \phi m$ 计算得到, k_2 的值可由实验得到。

1.5 各层污染物浓度

每个粒子对应的释放单位数 R , 是由模拟中的粒子数 NP 和释放量 M 推导出来的:

$$R = \frac{M}{NP} \quad (22)$$

各网格单元表面水层污染物浓度 $c_{surf}(i, j)$ 可表示为:

$$c_{surf}(i, j) = \frac{RN_{surf}(i, j)}{\Delta x \Delta y d_{pic}} \quad (23)$$

式中: $\Delta x \Delta y$ 是网格面积; $N_{surf}(i, j)$ 是网格 (i, j) 表层的污染物粒子数; d_{pic} 是浅水层厚度。

深水层污染物浓度由下式给出:

$$I_{deep}(i, j) = \frac{RN_{deep}(i, j)}{\Delta x \Delta y} \quad (24)$$

式中: $N_{deep}(i, j)$ 是深度大于 d_{pic} 的网格 (i, j) 的污染物粒子数。

沉积物中的污染物浓度为:

$$c_{sed}(i, j) = \frac{RN_{sed}(i, j)}{\Delta x \Delta y L \rho_b} \quad (25)$$

式中: $N_{sed}(i, j)$ 是网格 (i, j) 的底泥中污染物粒子数。

2 结果与讨论

2.1 FVCOM 水动力背景场模拟

2.1.1 计算区域介绍

采用 FVCOM 模型对水动力背景场进行模拟计算。研究区域设定在渤海湾 (117.5°E—119°E, 37°N—39.5°N), 水深信息来源于 etopo5 卫星数据, 并结合中国航海保证部发布的海图和实地测量数据进行局部调整。在渤海湾东侧海域, 设定了一个开边界, 该边界处的潮位值由中国海洋大学开发的 China Tide 潮汐预报软件提供。模型区域由 16553 个节点和 32547 个单元组成, 在垂直方向上划分为 10 个 σ 层。水陆地交界面采用闭边界条件, 并在 FVCOM 模型中启用了干湿判别法, 以处理动边界内部网格节点的干湿变化情况。模型采用冷启动方式运行, 模拟时间范围设定为 2020 年 1 月 1 日 0:00 至 2 月 1 日 0:00。选择渤海湾内的 A、B、C、D、E 五个位点进行潮位观测数据的收集, 并将这些数据用于验证 FVCOM 模拟结果。这些位点的具体位置见表 2。

表 2 验潮站 A、B、C、D、E 的位置

Tab.2 Location of tide gauge stations A, B, C, D and E

验潮站	经度/°E	纬度/°N
A	117.7	38.5
B	118	38.3
C	117.9	38.7
D	118.4	38.6
E	118.2	38.9

2.1.2 FVCOM 模拟结果验证

使用验潮站 A、B、C、D、E 的潮位观测数据进行潮位验证, 验证时间段为 2020 年 1 月 30 日

0:00 至 2 月 1 日 0:00。如图 2 所示, 潮位验证结果显示模拟值与验潮站观测值总体上保持了良好的一致性, 但仍存在一定误差。

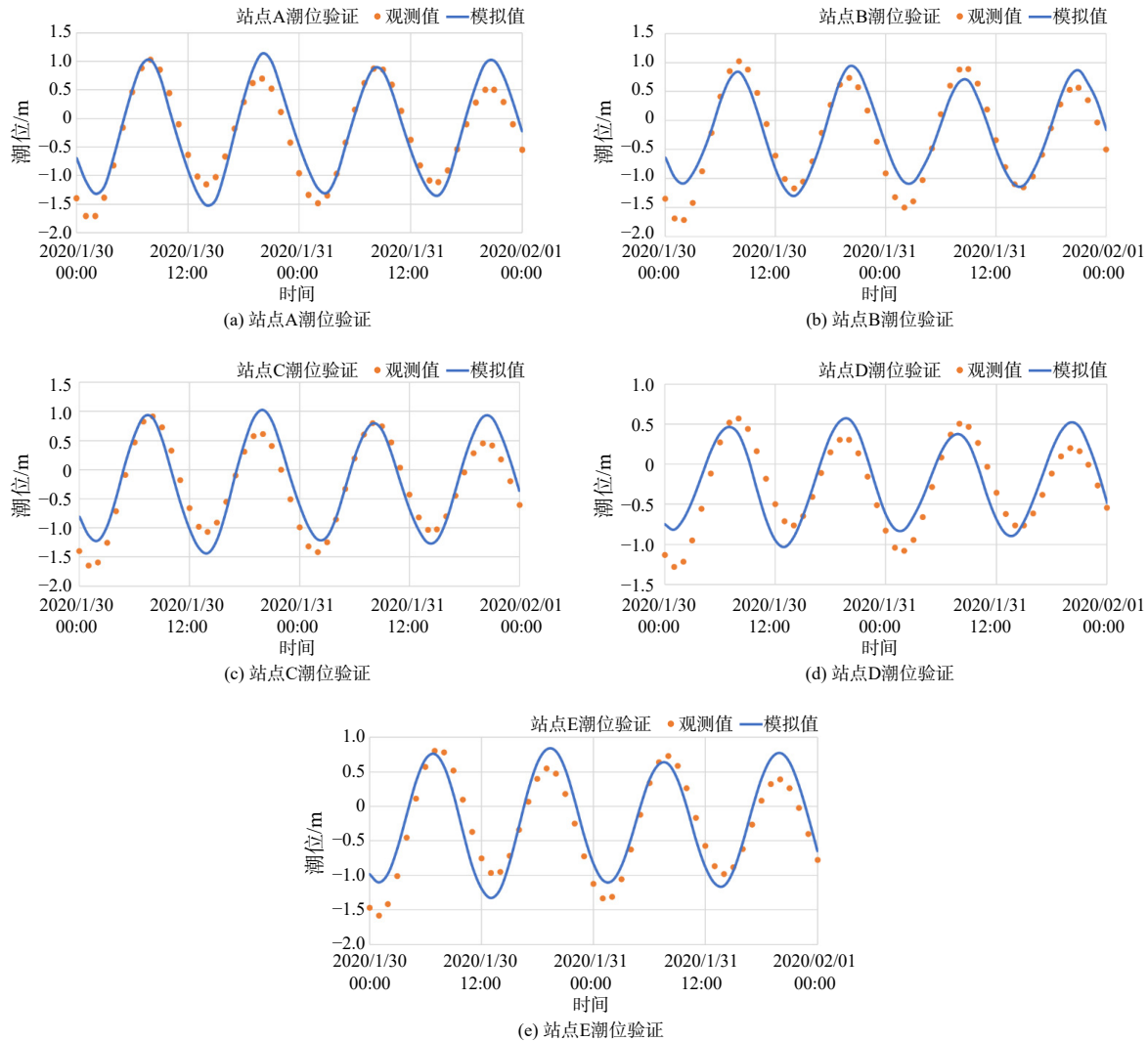


图 2 潮位验证

Fig. 2 Tide level verification

选取 2 个半日分潮(M2、S2)和 2 个全日分潮(O1、K1), 对 2020 年 1 月 3 日至 1 月 31 日的短期潮位进行准调和分析, 近似得到主要分潮的调和常数。模拟值和实测值的调和常数对比结果见表 3-6。结果表明, 渤海湾的潮汐以半日分潮为主, 振幅的相对误差的绝对平均值低于 9%, 迟角的相对误差的绝对平均值低于 4%。

验证结果表明, FVCOM 的模拟值与潮位观测值之间存在一定程度的偏差。偏差可能源于多个方面: 一方面, 模型采用了冷启动, 未完全捕

捉初始时刻的潮位动态; 另一方面, 实际海流受多种因素影响, 如风、径流等, 在 FVCOM 模拟中未考虑, 导致无法准确模拟海水流动。尽管 FVCOM 的模拟值与潮位观测值存在偏差, 但这不会对后续饲料污染物输运模型的模拟结果产生显著影响。

2.1.3 水动力模拟结果分析与讨论

图 3 展示了研究区域内涨、落潮流的流场分布。在涨潮期间, 潮波自东边界传入并向西传播; 而在落潮阶段, 潮流的运动方向与涨潮时相

表 3 O1 分潮调和常数验证
Tab.3 Validation of the O1 fractional tidal harmonization constant

站点	振幅			迟角		
	实测/m	计算/m	相对误差/(%)	实测/°	计算/°	相对误差/(%)
A	0.302	0.2809	-7	117.55	119.91	2
B	0.2972	0.2709	-9	119.6	125.82	5
C	0.3004	0.2774	-8	115.54	120.46	4
D	0.2726	0.2578	-5	114.88	116.64	2
E	0.2926	0.2638	-10	110.39	113.75	3

表 4 K1 分潮调和常数验证
Tab.4 Validation of the K1 fractional tidal harmonization constant

站点	振幅			迟角		
	实测/m	计算/m	相对误差/(%)	实测/°	计算/°	相对误差/(%)
A	0.3916	0.3461	-12	173.36	162.69	-6
B	0.3803	0.3459	-9	175.93	164.89	-6
C	0.3826	0.3429	-10	172.44	162.06	-6
D	0.348	0.2921	-16	171.84	161.49	-6
E	0.3797	0.3318	-13	168.34	160.27	-5

表 5 M2 分潮振幅和迟角数据分析
Tab.5 Validation of the M2 fractional tidal harmonization constant

站点	振幅			迟角		
	实测/m	计算/m	相对误差/(%)	实测/°	计算/°	相对误差/(%)
A	1.0961	1.241	13	110.73	115.87	5
B	1.0849	1.0408	-4	112.3	118.88	6
C	1.0135	1.0622	5	106.24	108.38	2
D	0.7104	0.7534	6	102.16	106.53	4
E	0.9334	1.044	12	93.95	100.12	7

表 6 S2 分潮振幅和迟角数据分析
Tab.6 Validation of the S2 fractional tidal harmonization constant

站点	振幅			迟角		
	实测/m	计算/m	相对误差/(%)	实测/°	计算/°	相对误差/(%)
A	0.3534	0.3842	9	186.49	190.41	2
B	0.3222	0.3164	-2	192.82	194.31	1
C	0.3326	0.3586	8	182.2	183.99	1
D	0.2026	0.2298	13	175.64	177.97	1
E	0.3113	0.3224	4	171.02	174.62	2

反, 即从西向东排出渤海湾。渤海湾内部的潮流整体呈现为往复运动, 但在靠近岸线的水域, 由于岸线的阻挡作用, 涨、落潮流表现出旋转流动的特征。具体而言, 涨潮流的旋转方向为顺时针, 而落潮流则为逆时针。根据这一水动力背景场, 可以初步推测, 在涨潮期间, 污染物可能会被

水流携带向岸线方向迁移,而在落潮期间则可能被带出湾口,紧邻岸线的水域潮流的旋转流动特性可能会进一步复杂化污染物的输运路径。

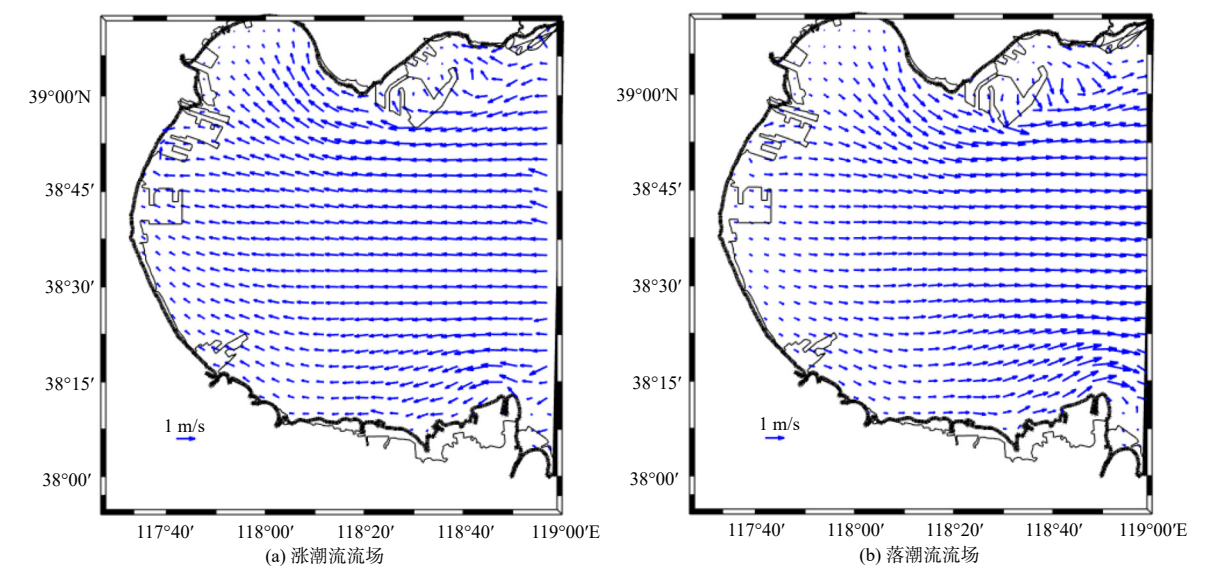


图 3 涨、落潮流场

Fig. 3 Rising and falling rapids flow field

2.2 饲料污染物输移扩散模拟

2.2.1 计算流程

图 4 详细展现了模拟饲料污染物输运的计算流程,该流程分为三个部分。第一部分为输入数据,所需输入的数据包括计算网格、局部风场、水动力场,这些数据由 FVCOM 水动力模型提供。此外,还需要输入污染物的相关参数,如释放信息(位置、时间、初始浓度),以及描述污染物性质(大小、溶解系数、沉降系数等)。第二部分为污染物输运过程模拟,具体包括模拟污染

物的平流和扩散过程以及被岸线吸附、溶解或被捕食、水与沉积物中的污染物交换过程。第三部分为输出内容,包括污染物在各层的浓度和分布以及饲料污染物输运过程可视化图。

2.2.2 实验设计

在海岸附近(坐标为 117.90°E,38.42°N)的位置瞬时释放饲料,释放时间设定为 2020 年 1 月 30 日 0:00,模拟时长为 2 天。释放饲料污染物的总量被任意固定为 1.0×10^{15} 个单位。在此,提供了七个基于假设的模型性能示例情景,以展示不

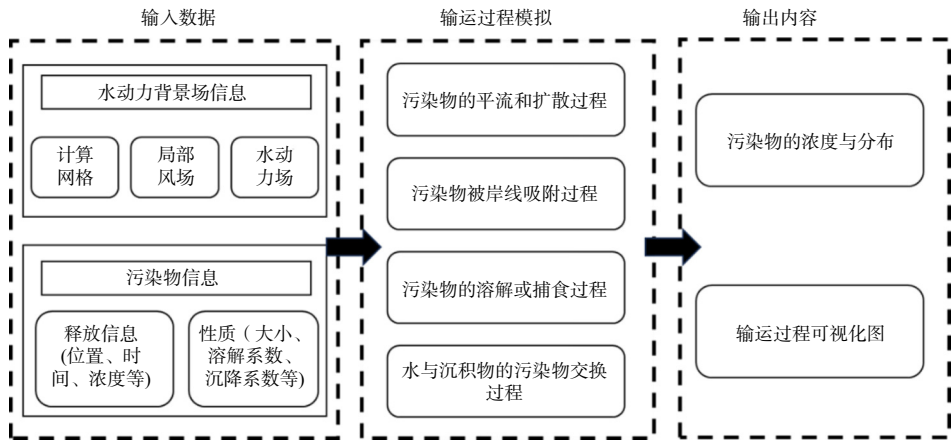


图 4 模型计算流程

Fig. 4 Model calculation process

同条件下的模拟结果。

情景一: 在无风条件下, 将饲料密度设置为 1024 kg/m^3 。

情景二: 在有风条件下(风速 5 m/s , 方向向东, 时间为模拟的第一天), 将饲料密度设置为 1024 kg/m^3 。

情景三: 在无风条件下, 将饲料密度设置为 1000 kg/m^3 。

情景四: 在无风条件下, 将饲料密度设置为 1040 kg/m^3 。

情景五: 在无风条件下, 忽略扩散效应, 将饲料密度设置为 1024 kg/m^3 。

情景六: 在无风条件下, 将饲料密度设置为 1024 kg/m^3 , 投放位置为 117.80°E , 38.30°N 。

情景七: 在有风条件下(风速 5 m/s , 方向向东, 时间为模拟的第一天), 将饲料密度设置为 1024 kg/m^3 , 投放位置为 117.80°E , 38.30°N 。

这些情景设计旨在考察风速、饲料密度、扩散效应以及岸线吸附等因素对污染物运输的影响。在 FVCOM 模式提供的水动力背景场中, 对上述七个情景进行饲料污染物的运输模拟, 并详细记录了相关参数(表 7)。

2.2.3 探讨风对污染物运输的影响

图 5(a) 和图 5(b) 展示了情景一饲料释放 2 天后的平面分布和垂向分布(垂向分布为饲料颗粒在水深剖面上的投影, 下同), 图 6(a) 和图 6(b) 展示了情景二饲料释放 2 天后的平面分

表 7 饲料污染物的基本参数输入

Tab.7 Basic parameter inputs for feed contaminants

参数	取值
释放个数	20000
释放量	1.0×10^{15}
释放时间	2020年1月30日 0:00
模拟时间	2天
释放深度	2 m
海水密度	1024 kg/m^3
污染物溶解或被捕食系数 λ	1.0×10^{-5}
污染物分布系数 k_d	4.0
浅水层厚度 d_{pic}	1 m
解吸系数 k_2	2.32×10^{-5}
校正因子 φ	0.1
沉积物堆积密度 ρ_b	1040 kg/m^3
与水相互作用的沉积层厚度 L	0.05 m
黏滞概率 P_v	0.7

布和垂向分布。在无风条件下, 饲料污染物在水中表现出较小的漂移。然而, 在有风条件下, 风对浅水层的饲料污染物运输具有显著影响。风能够明显加速污染物的漂移, 导致其扩散面积显著增大。此外, 不论在何种情景下, 饲料污染物的总体运输趋势都呈向北偏移的特点。深入分析渤海湾的潮汐涨落情况可以发现, 饲料的初始释放位置的潮流速度具有向北的分量, 这表明水流是携带饲料污染物运动的主要因素, 而风则加速了污染物的混合与扩散。

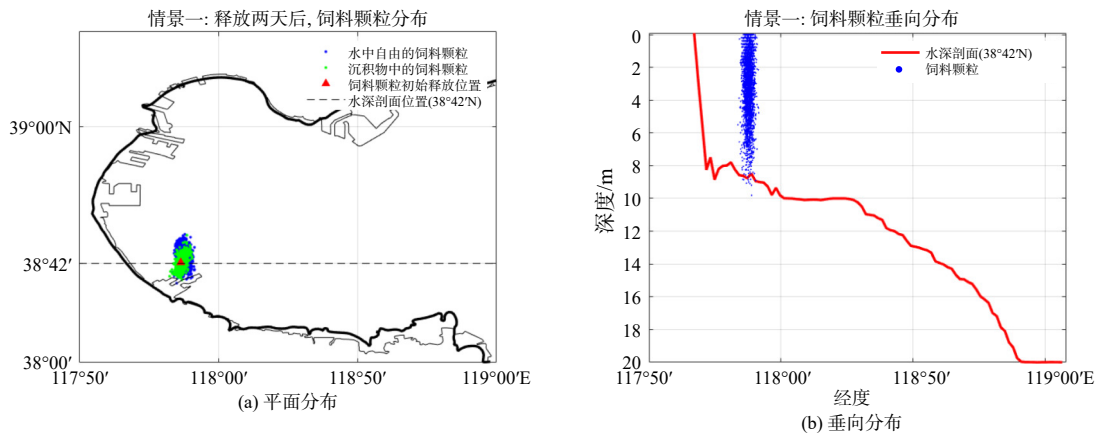


图 5 情景一输运模拟结果

Fig. 5 Scenario 1 transport simulation results

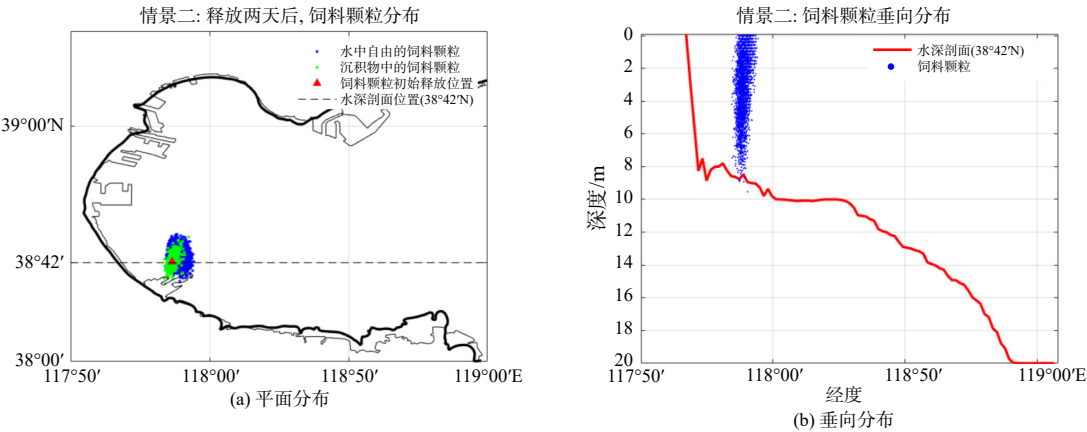


图 6 情景二输运模拟结果

Fig. 6 Scenario 2 transport simulation results

2.2.4 探讨饲料密度对污染物输运的影响

图 7(a) 和图 7(b) 展示了情景三饲料释放 2 天后的平面分布和垂向分布, 图 8(a) 和图 8(b)

展示了情景四饲料释放 2 天后平面分布和垂向分布。对比情景一、情景三和情景四中的饲料颗粒分布, 可以发现: 当饲料密度小于海水密度

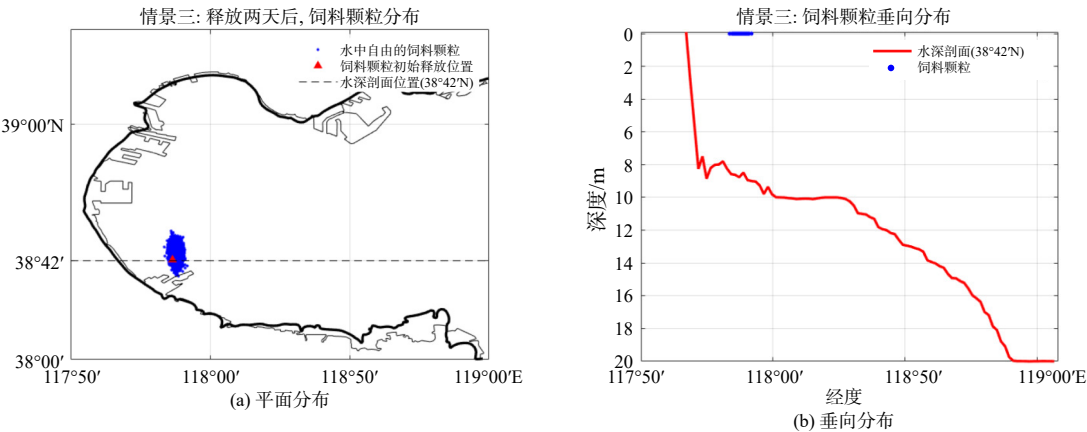


图 7 情景三输运模拟结果

Fig. 7 Scenario 3 transport simulation results

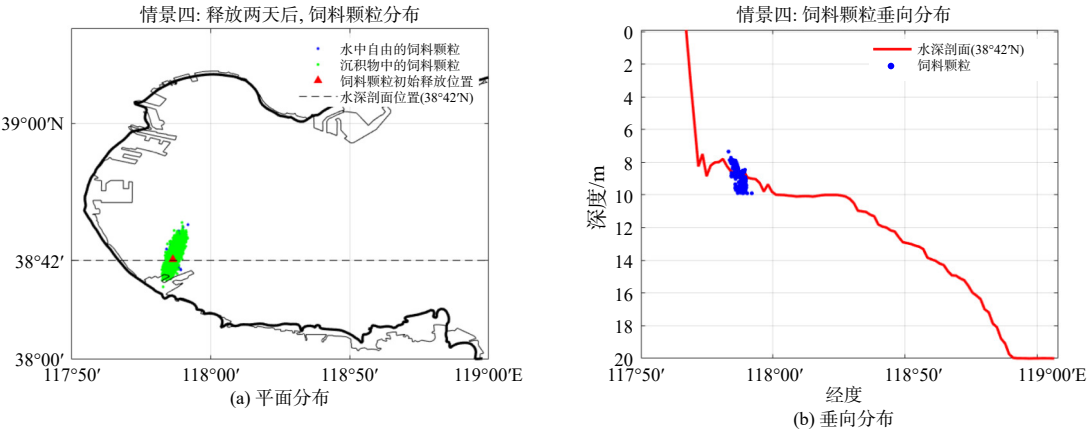


图 8 情景四输运模拟结果

Fig. 8 Scenario 4 transport simulation results

时(情景三), 饲料污染物主要分布在海水表面, 而沉积物中几乎没有污染物。当饲料密度大于海水密度时(情景四), 饲料污染物主要分布在海洋底部, 沉积物中的饲料颗粒增多。当饲料密度等于海水密度时(情景一), 由于海水垂向速度较小, 饲料颗粒沉降速度几乎为零, 主要在垂向上扩散, 因此其垂向分布较为均匀。

2.2.5 探讨扩散过程对污染物输运的影响

传统的拉格朗日粒子追踪模型仅考虑了污染物在水体中的平流过程, 而本文提出的模型

同时考虑了污染物的平流和扩散过程。对比情景一和情景五饲料释放2天后的平面分布[图5(a)和图9(a)]、垂向分布[图5(b)和图9(b)]以及饲料颗粒的输运轨迹[图10(a)和图10(b)], 可以发现这两种模型对污染物输运的影响有所不同。当仅考虑饲料污染物随水流平流运动时, 饲料颗粒随水流漂移, 其输运路径呈线性传播趋势。而当引入扩散过程后, 污染物的扩散和混合过程明显加速, 导致污染物的扩散范围显著增大。

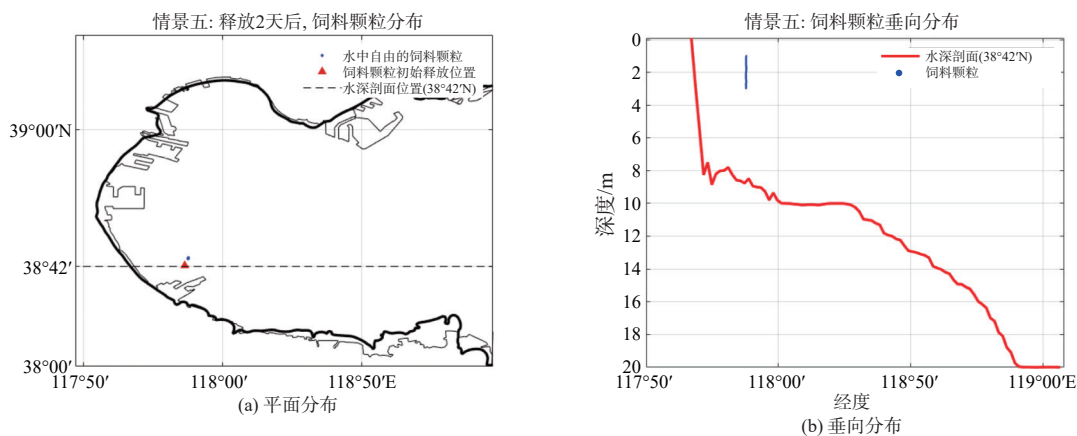


图9 情景五输运模拟结果

Fig. 9 Scenario 5 transport simulation results

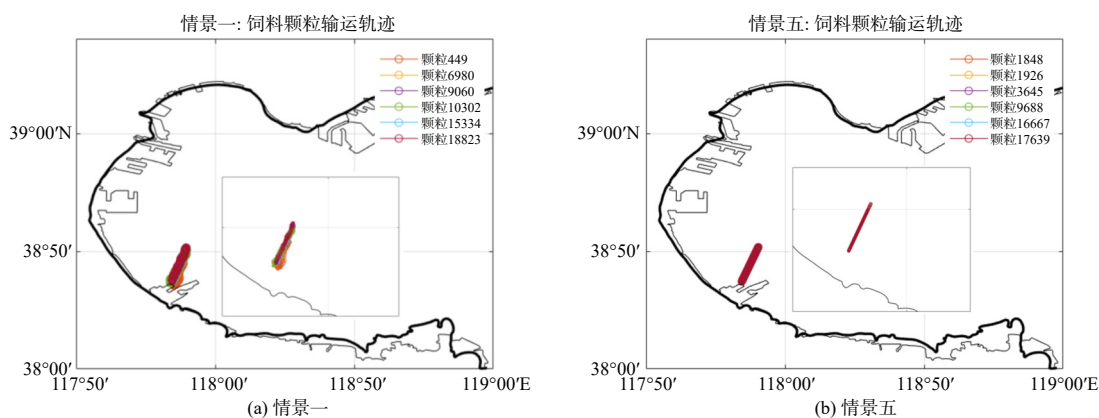


图10 情景一和情景五的输运轨迹

Fig. 10 Transport trajectories for scenario 1 and scenario 5

2.2.6 探讨岸线吸附对污染物输运的影响

图11(a)和图11(b)展示了情景六饲料释放2天后平面分布和垂向分布, 图12(a)和图12(b)展示了情景七饲料释放2天后平面分布和垂向分布。在情景六和情景七中, 由于岸线吸附作用

的限制, 污染物呈现较为局部化的分布。相比之下, 在情景一中, 由于初始释放点远离岸线, 没有受岸线吸附的影响, 污染物在水域中的扩散更为自由且分布更为均匀。比较情景六和情景七可以发现, 情景六中饲料污染物在水域中受岸线吸

附作用的损耗率为 1.35%,而在情景七中,这一损耗率为 0.49%。上述分析表明,风能改变饲料颗粒

的运输和沉积行为,从而加速其在水域中的扩散。进一步地,我们归纳了上述实验结果见表 8。

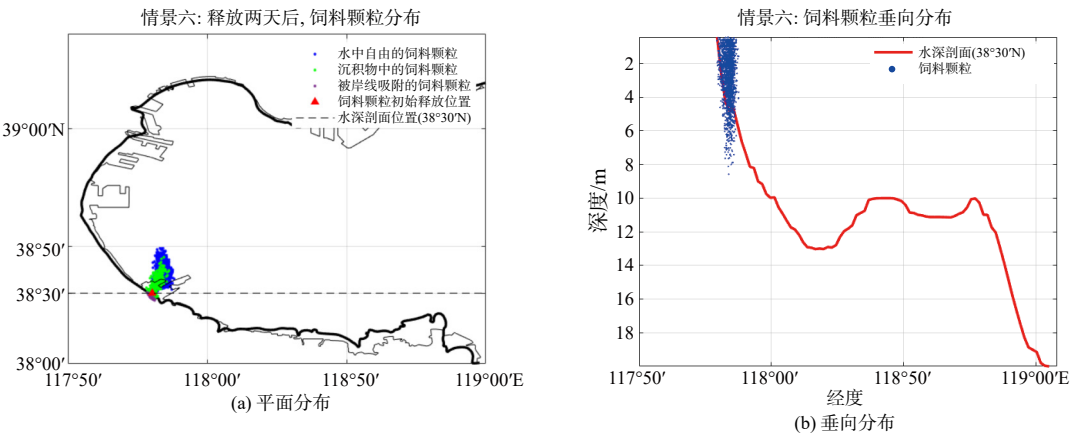


图 11 情景六运输模拟结果

Fig. 11 Scenario 6 transport simulation results

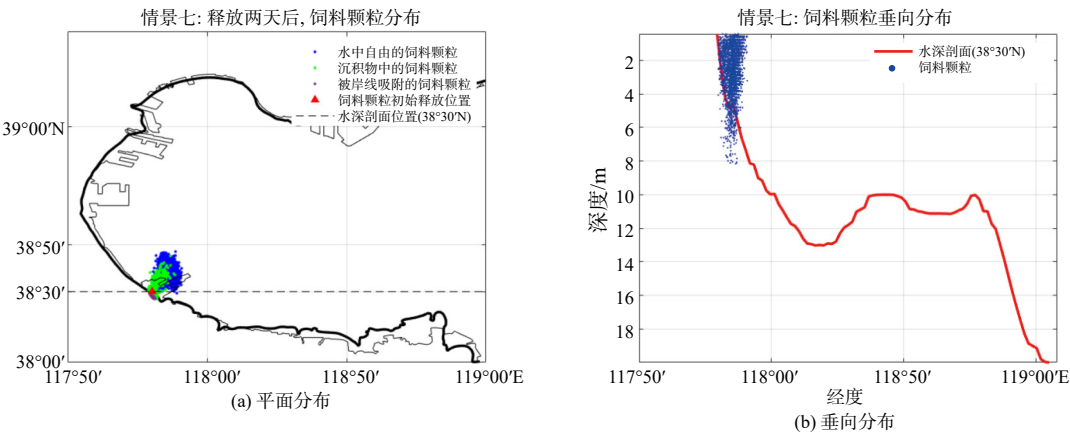


图 12 情景七运输模拟结果

Fig. 12 Scenario 7 transport simulation results

表 8 实验结果汇总

Tab.8 Summary of experimental results

实验目的	对比情景	结论
探讨风对污染物运输的影响	情景一、情景二 情景六、情景七	风对浅水层污染物的运输较为明显,使得污染物发生漂移,扩散面积明显增大 风可以改变饲料颗粒的运输和沉积行为
探讨饲料密度对污染物运输的影响	情景一、情景三、情景四	当饲料密度小于海水密度时,饲料污染物主要分布在海水表面,而沉积物中几乎没有污染物。当饲料密度大于海水密度时,饲料污染物主要分布在海洋底部,沉积物中的污染物增多。当饲料密度等于海水密度时,饲料污染物主要在垂向进行扩散,导致垂向分布较为均匀
探讨湍流扩散对污染物运输的影响	情景一、情景五	当仅考虑饲料污染物随水流平流运动时,饲料颗粒随水流漂移,其运输路径呈现线性传播趋势。而当引入扩散过程后,污染物的扩散和混合过程明显加速,导致污染物的扩散范围显著增大
探讨岸线吸附对污染物运输的影响	情景一、情景六	在情景六中,由于岸线吸附作用的限制,污染物呈现出较为局部化的分布。相比之下,在情景一中,由于初始释放点远离岸线,没有受岸线吸附的影响,污染物在水域中的扩散更为自由且分布更为均匀

3 结论

本研究以渤海湾的水动力场作为背景场,进行饲料污染物的输运实验。实验结果表明:风通过增加浅水层污染物流动来促进污染物扩散;饲料密度决定污染物在水体中的垂直分布;扩散过程增加了污染物的水平和垂直扩散范围,使得污染物在更广泛的水体中混合和传播;岸线吸附作用会限制污染物在水域中的扩散范围,从而使污染物在岸线附近聚集。在实际应用中,需要考虑饲料密度、风等因素,合理选择饲料投放位置和时间,以降低饲料颗粒被岸线吸附的损耗率,提高饲料利用效率。

参考文献:

- [1] 宋志文,王 玮,赵丙辰,等.海水养殖废水的生物处理技术研究进展[J]. *青岛理工大学学报*, 2006, 27(1): 13-17.
- [2] 郑诗豪.考虑污染物输移扩散特性的人工岛内重点水域水交换优化研究[D].天津:天津大学,2020: 3-4.
- [3] STOMMEL H M. Thermohaline convection with two stable regimes of flow[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1961, 13(2): 224-230.
- [4] VAN SEBILLE E, GRIFFIES S M, ABERNATHEY R, et al. Lagrangian ocean analysis: fundamentals and practices[J]. *Ocean Modelling*, 2018, 121: 49-75.
- [5] 郑向阳,邢前国,李 丽,等.2008年黄海绿潮路径的数值模拟[J]. *海洋科学*, 2011, 35(7): 82-87.
- [6] ROWE M D, ANDERSON E J, WYNNE T T, et al. Vertical distribution of buoyant *Microcystis* blooms in a Lagrangian particle tracking model for short-term forecasts in Lake Erie[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(7): 5296-5314.
- [7] 余 康,陈永灿,林俊强,等.鱼卵漂流的欧拉-拉格朗日模型与产卵量估算[J]. *水力发电学报*, 2019, 38(6): 56-68.
- [8] PERIÁÑEZ R, CORTÉS C. A numerical model to simulate the transport of Radionuclides in the western Mediterranean after a nuclear accident[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(1): 169.
- [9] WANG N, CAO R C, LV X Q, et al. Research on the transport of typical pollutants in the Yellow Sea with flow and wind fields[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(9): 1710.
- [10] DIMOU K N, ADAMS E E. A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaries and coastal waters[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1993, 37(1): 99-110.
- [11] 韩龙喜,陈丽娜.可降解的地表水污染物随机游走改进模式[J]. *水科学进展*, 2009, 20(5): 689-694.
- [12] 韩龙喜.三峡大坝施工期水环境三维数值预测方法[J]. *水科学进展*, 2002, 13(4): 427-432.
- [13] PÄRN O, MOY D M, STIPS A. Determining the distribution and accumulation patterns of floating litter in the Baltic Sea using modelling tools[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 190: 114864.
- [14] 胡春宏,惠遇甲.水流中跃移颗粒的受力分析[J]. *水利学报*, 1993, 25(1): 11-20.
- [15] 李 嘉,张永泽,李克峰.剪切紊流中颗粒运动的数学模型和实验研究[J]. *水利学报*, 1998, 29(6): 7-13.
- [16] MORSI S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 55(2): 193-208.
- [17] PEREZ L J, HIDALGO J J, DENTZ M. Reactive random walk particle tracking and its equivalence with the advection-diffusion-reaction equation[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(1): 847-855.
- [18] PERIÁÑEZ R, ELLIOTT A J. A particle-tracking method for simulating the dispersion of non-conservative radionuclides in coastal waters[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, 58(1): 13-33.

(本文编辑:曲丽梅)