

doi: 10.3969/j.issn.1003-2029.2026.01.009

温州海域示踪物扩散空间差异性研究

刘明远¹, 姜菁秋², 陈勤思^{1,3}, 胡松¹

(1. 上海海洋大学海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 中国环境科学研究院生态环境部河口与海岸带重点实验室, 北京 100012; 3. 生态环境部太湖流域东海海域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 上海 200125)

摘要: 基于 MIKE 21 构建了高精度二维水动力数值模型, 对温州海域各岸段示踪物扩散输移规律进行了讨论。综合考虑温州海域复杂海底地形、潮汐特征和多条河流入海等多重因素, 重点分析了温州海域不同岸段示踪物扩散的空间差异性。结果表明: 温州海域不同岸段的示踪物输移扩散能力存在显著差异。总体上, 示踪物在三个河口区域的扩散能力最强, 乐清湾内最弱。扩散稳定后, 示踪物在瓯江口北侧影响范围最大, 在鳌江口南侧岸段次之。瓯江口南侧岸段由于水深较浅且流量偏弱, 扩散输移能力相对较弱。

关键词: 温州海域; MIKE 21; 数值模拟; 示踪物

中图分类号: P76; X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2026) 01-0075-10

温州海域位于浙江省东南沿海, 涵盖乐清湾这一半封闭式海湾, 以及瓯江、飞云江、鳌江等主要入海河流, 还包括灵昆岛、大门岛、洞头岛等近海岛屿 (图 1)。区域多变的海底地形导致复杂的潮汐动力过程^[1], 海域潮汐类型多为不正规半日潮, 最大潮差可达 7.2 m^[2]。气候方面, 温州海域属于亚热带季风气候, 夏季多东南风, 冬季多西北风。外海环流受东海陆架流影响, 夏季有台湾暖流分支沿浙江沿岸北上, 冬季受浙闽沿岸流影响。

温州海域是浙江省重要的经济发展区域, 港口资源丰富。然而, 随着经济的快速发展, 该区域的海洋环境保护工作也面临着巨大挑战, 存在海水富营养化、滩涂生态资源退化等问题^[3]。近年来, 温州市高度重视温州海域的环境保护, 通过制定并实施主要入海河流总氮和总磷浓度控制计划, 开展入海排污口监测与整治等工作, 加强了对温州湾及乐清湾等海域的污染防治^[4]。营养物质从陆地向海洋的输入是引发海水富营养化的重要驱动因素^[5]。温州海域不同岸段因其水动力条件与地形特征等环境

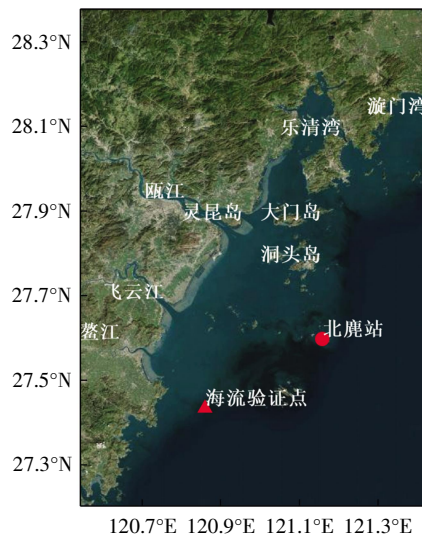


图 1 研究区域和验潮站地理位置示意图

注: 红色圆点是验潮站; 红色三角形是海流验证点 W1。

因素的差异, 表现出显著不同的环境自净能力。因此, 深入研究该海域各岸段污染物输移扩散的空间分异规律, 对科学制定海洋环境保护策略、优化海洋资源开发利用格局及保障区域生态安全具有重要

收稿日期: 2025-06-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFC3101702); 中央院所基金资助项目 (2024YSKY-04)

作者简介: 刘明远 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋生态环境研究。E-mail: lmy11234@foxmail.com

通信作者: 胡松 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事物理海洋学研究。E-mail: shu@shou.edu.cn

的现实意义。

众多学者从不同角度对温州海域的污染进行了深入探讨。在污染物滞留时间方面,李谊纯等^[6]通过示踪物漂流技术发现,瓯江下游河段的潮差对污染物滞留时间的影响显著大于上游河段,这为理解污染物在不同河段的停留规律提供了重要依据。针对乐清湾水环境变化的原因,卓明等^[7]通过对沿岸主要污染物排放进行调查,指出水动力结构的改变可能是导致乐清湾整体水环境变化的更主要原因。在污染程度分布上,姚开雪等^[8]利用营养盐单因子指数评价方法分析得出,乐清湾湾口污染程度小于湾顶和湾中部的主要原因是水体交换能力的差异。在污染物扩散模拟领域,学者们也开展了大量工作。王弋等^[9]利用 Delft3D 模型模拟分析了淮河近海的污染物输移扩散能力;热汗古丽·依米提^[10]采用 MIKE 21 开展水质模拟,探讨了榆树沟水库的水质影响特征;何齐齐等^[11]采用 Delft3D 构建三门湾的水动力环境,并分析其污染物输移扩散规律;胡亚伟等^[12]使用 MIKE 11 构建黄河下游灌区的水动力-水质耦合模型,分析其水环境变化效应。这些研究从污染物滞留、水环境变化原因、污染程度分布及污染物扩散模拟等多个方面,为温州湾区域的环境保护和治理提供了科学依据和技术支持。

然而,以往对温州海域污染的研究存在局限性:一是局限于单一河段或海湾,难以反映全域污染物扩散的整体格局;二是缺乏不同岸段扩散能力的定量对比。为弥补这些不足,本文采用 MIKE 21 模型构建高精度二维数值模型,对温州海域各岸段示踪物扩散输移规律进行了讨论。模型考虑了温州海域复杂的海底地形、潮汐特征及河流入海等多因素的综合作用,从而更精准地揭示示踪物在不同岸段的扩散规律。该研究结果将为温州海域水污染治理提供科学依据,助力优化污染防治策略,提升区域海洋环境管理水平。

1 温州海域水动力数值模拟

1.1 模型设置

本文使用 MIKE 21 模型,构建了包括乐清湾、瓯江、飞云江及鳌江在内的整个温州海域的水动力环境物理模型。模型边界采用干湿网格处理技术。水

动力模型选择从鳌江以南到漩门湾北部的大致直角弯作为外海开边界条件。径流边界考虑了瓯江、飞云江及鳌江三条河流的径流输入。由于温州湾三条主要河流多年平均径流年际变幅相对有限,潮动力对示踪物输运起主导作用,径流量数据选择多年平均河流径流量。该数据由中国环境科学研究院生态环境部河口与海岸带重点实验室提供。模型采用“冷启动”方式,即水位和潮流的初始条件均设为 0。模拟总时长为 8 760 h,计算结果每小时输出一次。

在模型计算参数设置方面,依据 MIKE 软件手册^[13]设置面曼宁系数为经验常数 $M = 32$,涡旋系数采用 Smagorinsky 常系数,取值为 $0.28 \text{ m}^2/\text{s}$ 。干湿边界根据经验值设置,水深小于 0.05 m 视为旱区域,大于 0.5 m 视为水区域。水平扩散系数采用尺度化涡黏系数,取常数值为 1。潮汐边界通过 MIKE 21 模型预测的潮位驱动,而示踪物扩散模型的边界条件设为零。本文聚焦于评估不同岸段示踪物扩散的空间差异性,为此设定了一个虚拟示踪物“Q”,在模型中为保守示踪物,并理想化假设其降解系数为零,不考虑温度和盐度的影响。模型采用正压模型,未考虑蒸发、降水和地下水等对水动力场的影响。

根据研究区域的范围,采用平面化二维水动力模型,采用非结构三角网格进行离散。模型区域南北长约 133 km ,东西长约 122 km ,网格数共 18 209 个,三角元数 34 397 个,如图 2 所示。潮流场计算时间步长最小 0.01 s ,最大 30 s ,柯朗-弗里德里希斯-列维条件 (Courant-Friedrichs-Lewy con-

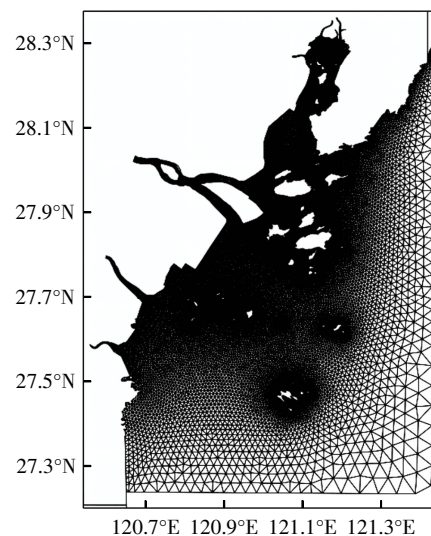


图 2 研究区域网格

dition, CFL) 数设置为 0.8。

本文模拟模型采用 MIKE 21 二维模型的水动力模块和对流扩散模块。

在 MIKE 21 模型中, 控制方程基于平面二维数学模型, 用于模拟和预测物质在宽浅水体中垂向均匀混合的扩散与输移过程。二维非恒定浅水方程组^[4]如下。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial x} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{sy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial y} + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = & -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_\alpha}{\partial y} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中, t 为时间; $h = \eta + d$ 为总水深, η 为水位, d 为静止水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速; f 为科氏系数; g 为重力加速度; ρ_0 为参考密度; ρ 为水的密度; ρ_α 为密度偏差; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} 分别为辐射应力分量; τ_{sx} 、 τ_{sy} 分别为表面风应力在 x 、 y 方向的分量; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为底部应力在 x 、 y 方向的分量; T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yy} 分别为黏性应力分量; u_s 、 v_s 分别为物质在 x 、 y 方向的运动速度; S 为辐射应力源项。

在 MIKE 21 水质模型中, 对流扩散模块被用于求解示踪物的输移扩散过程。对流扩散方程综合考虑了污染物在水流作用下的对流输移及由浓度梯度引起的扩散输移。对于自由表面的二维水体, 示踪物的对流扩散输移过程可以通过以下方程描述。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (4)$$

式中, c 为物质浓度; D_x 、 D_y 为扩散系数。

1.2 模型潮位流场

图 3 为 2022 年 10 月 4 个典型潮位涨落急的流场矢量图。在涨潮期间, 如图 3(a)和图 3(b)所示, 潮流整体由外海向河口方向运动, 近岸处因存在大

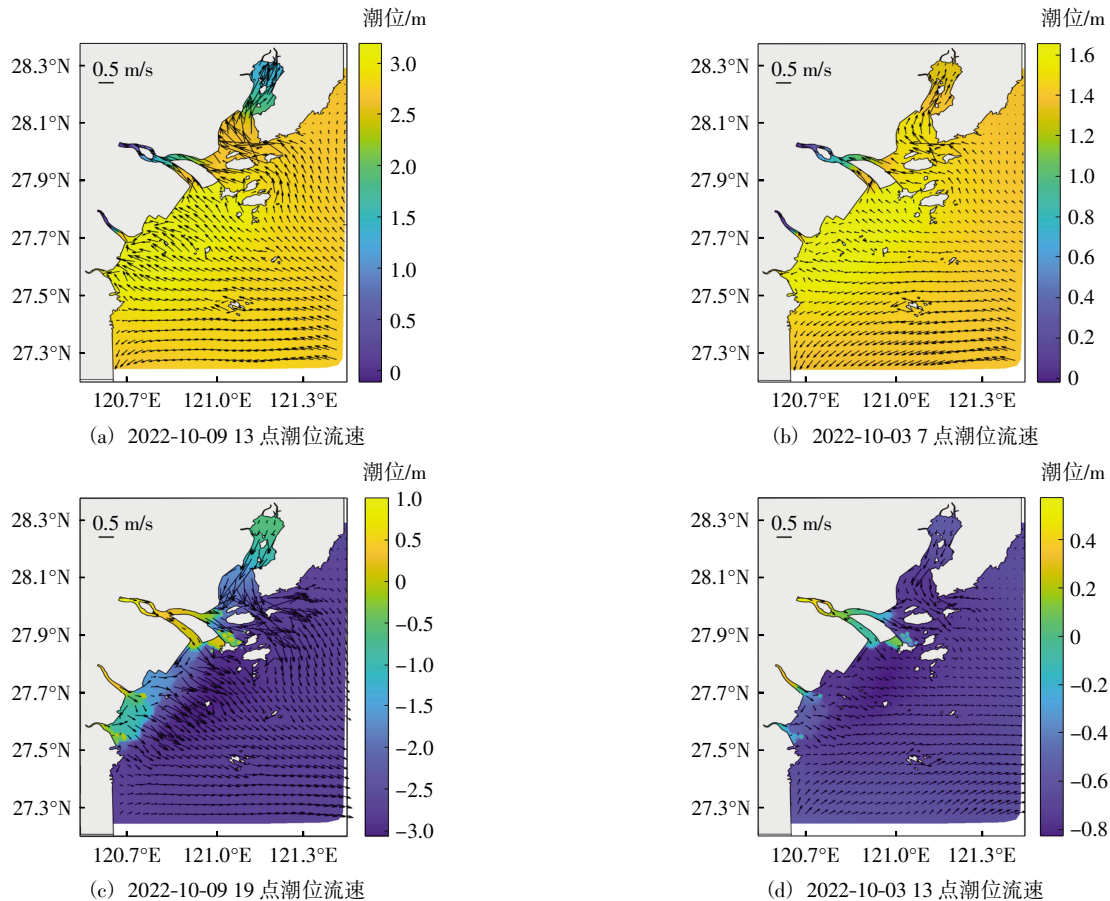


图 3 模型潮位流场

量的浅水地形和漫滩,导致流速下降。在落潮期间,如图3(c)和图3(d)所示,主要是瓯江、飞云江和鳌江的水流,使得河口处的流速和水位明显较高。温州湾三条江中瓯江流量最大,所以瓯江河口处的流速尤其突出。瓯江口的水流一部分向东流过大门岛直奔外海,另一部分向北流入乐清湾。

图4展示了温州湾海域的余流分布状况。该余流场呈现出显著的区域性特征,其空间格局主要受到复杂地形、密集分布的岛屿及瓯江、飞云江、鳌江等主要河流径流入海的综合影响。余流在湾内空间分布不均,乐清湾区域为余流的高值区,流速较强,且整体呈从湾内向湾外输运的趋势。此外,在瓯江入海口的北侧、飞云江出海口及鳌江出海口附近,由于河流淡水径流的持续输入与扩散,也观测到显著的余流存在。岛屿之间的狭窄水道区域,由于地形束窄效应增强了水流的汇聚,形成了余流强度相对较大的区域。整体而言,温州湾余流显著区域的余流流速为0.02~0.2 m/s。

1.3 验潮站潮位验证

模型模拟时间段为2022-01-01 00:00:00—2023-01-01 00:00:00,即一整年的时间。选取北

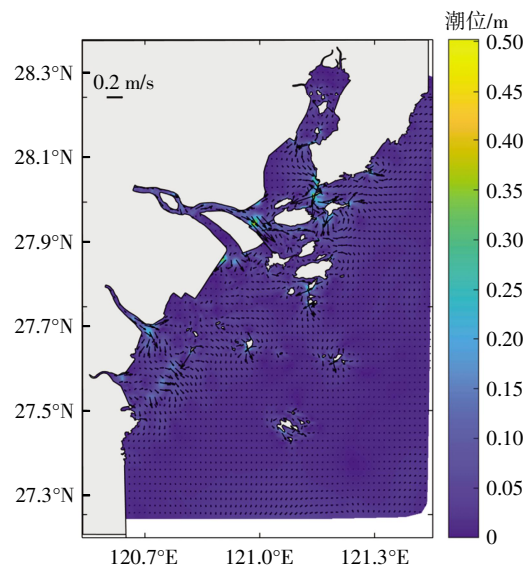


图4 余流分布

麂站(27.62°N, 121.18°E)进行潮位验证,潮位验证的时间区段选择2022-10-01 00:00:00—2022-10-31 23:00:00。具体对比结果见图5,模型模拟的潮位平均误差为0.22 m,均方根误差为0.29 m,相关系数 R 为0.98。潮位模拟结果与实测站点数据较为吻合,最高和最低潮位结果与实测数据接近。

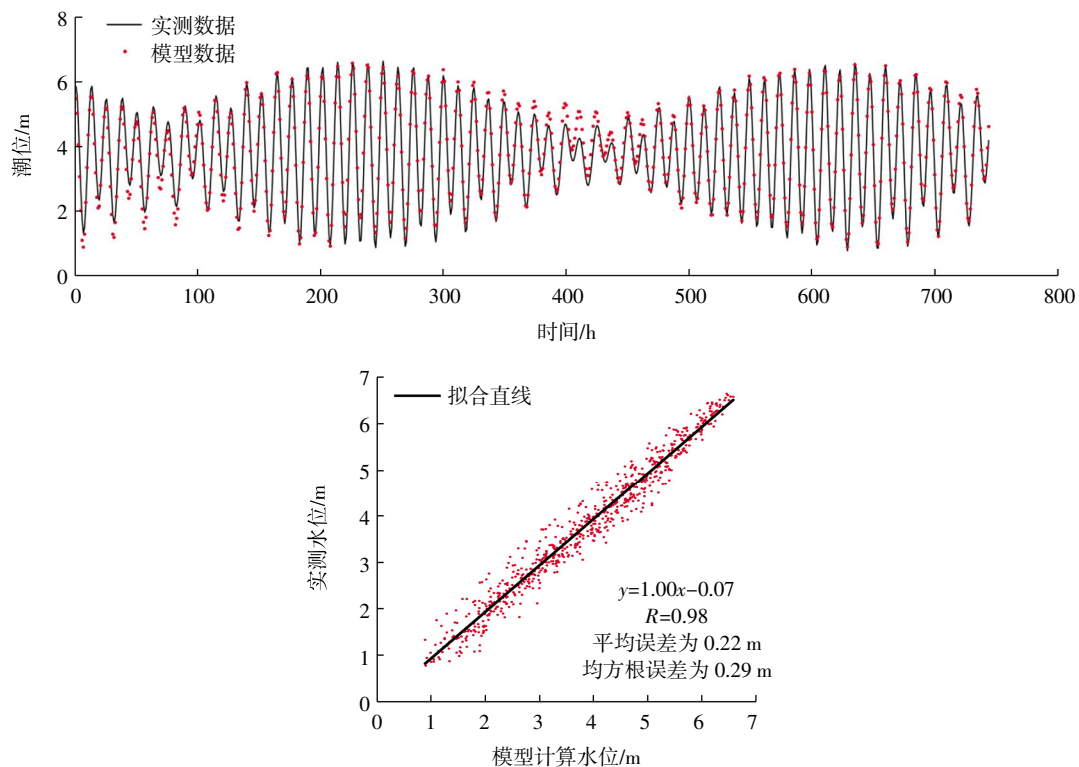
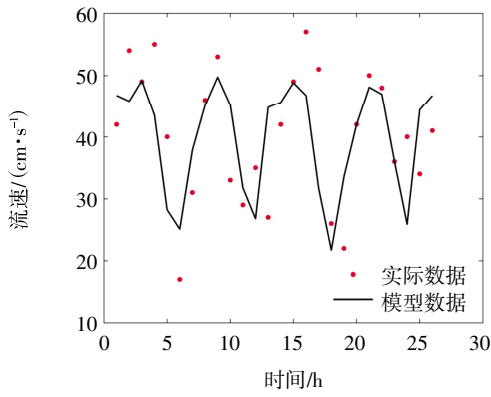


图5 潮位对比

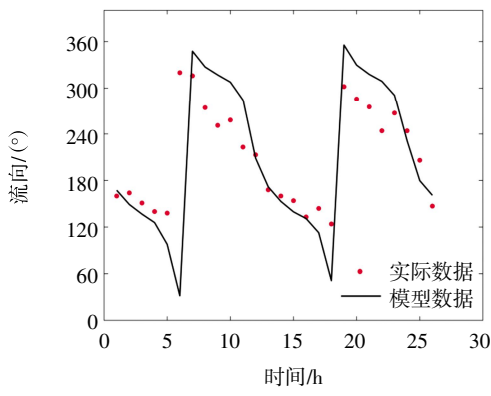
注:潮位数据已补正基础潮位3.29 m。

1.4 流速流向验证

选取站位 W1 (27.46° N, 120.86° E) 作为海流验证点, 验证时段为 2022 年 9 月 27 日 11: 00 至 9 月 28 日 12: 00, 观测时间间隔为 1 h, 共 26 组数据。将实测值与模型结果进行对比, 如图 6 所示, 模拟流速、流向与观测值变化趋势一致, 能够准确再现潮周期内潮流的转向及幅度变化。



(a) 流速对比



(b) 流向对比

图 6 潮流验证

为剥离实际污染源排放强度、排放方式 (如连续源、瞬时源) 等非环境因素的干扰, 纯粹考察不同岸段示踪物扩散的空间差异, 在乐清湾顶至鳌江口南侧的代表性岸段 (图 7 及表 1), 均匀布设了 7 个虚拟的理想点源污染源 (S1 至 S7)。这些点位的选择综合考虑了以下关键环境因素: 覆盖温州海域主要地貌单元, 包括封闭性较强的乐清湾内湾、相对开阔的瓯江口及飞云江-鳌江口区域; 反映与主要河流入海口的相对位置关系, 包含靠近瓯江口、飞云江口、鳌江口的岸段。在完全相同的排放条件下 (恒定流量为 10 m³/s, 初始浓度为 1 mg/L, 降解系数为 0), 分别独立模拟每个点源的示踪物扩散过程, 确保观测到的扩散模式差异主要源于各岸段固有的水动力环境 (如地形开敞度、邻近河流径流强度及潮动力特征) 的空间异质性, 而非源强或排放特征的差异。

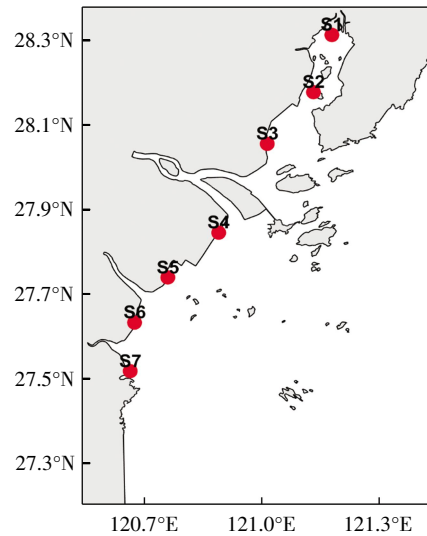


图 7 污染源分布

注: 红色圆点为 7 个恒定排放点源。

表 1 污染源经纬度及所属岸段

污染源	位置	所属岸段
S1	(121.132°E, 28.18°N)	乐清湾内湾
S2	(121.179°E, 28.315°N)	乐清湾中段
S3	(121.014°E, 28.058°N)	瓯江口-乐清湾段
S4	(120.89°E, 27.848°N)	瓯江口-飞云江口北段
S5	(120.76°E, 27.742°N)	瓯江口-飞云江口南段
S6	(120.675°E, 27.634°N)	飞云江口-鳌江口段
S7	(120.664°E, 27.519°N)	鳌江口南段

2 结果与讨论

2.1 示踪物扩散模拟方法与污染源设置

模拟研究聚焦于比较温州湾沿岸各岸段示踪物扩散的空间差异。温州海域是一个复杂的海洋环境, 其海底地形、潮汐特征及多条主要河流的入海共同作用, 显著影响着示踪物的输移和扩散规律。为系统评估不同岸段固有的物理环境对示踪物扩散能力的差异性影响, 本文选择乐清湾顶到鳌江口南侧的区域作为研究对象。这一区域涵盖了温州海域的主要地貌单元和岸段类型, 能够全面反映温州海域水动力环境的空间分异特征。

2.2 示踪物扩散的总体空间分布特征

在温州海域各岸段内, 每个预设的理想实验污

污染源均施放示踪物, 水动力模块中所设定的排放流量为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$, 示踪物浓度设为 1 mg/L 。模拟达一年后, 扩散过程达到稳定, 示踪物的空间分布状态如图 8 所示。

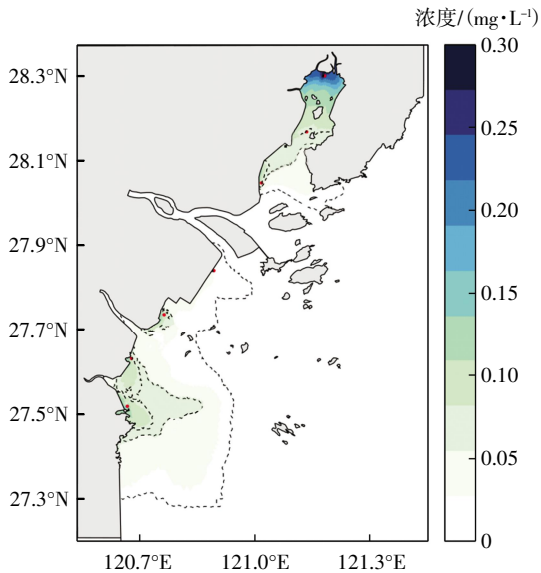


图 8 污染物总体分布

示踪物整体分布在近岸及乐清湾内, 浓度 0.01 mg/L 的等值线最远达到离岸线 30 km 的位置。浓度为 $0.08\sim 0.3 \text{ mg/L}$ 的示踪物主要集中在乐清湾湾顶, 面积约 136.64 km^2 的范围内。整个乐清湾的示踪物浓度均超过了 0.01 mg/L , 并呈现出从湾顶向湾口浓度递减的趋势, 这与实际潮汐混合及水体交换特性相符。除乐清湾外, 污染物主要聚集在温州湾飞云江和鳌江河口, 局部最高浓度可达 0.08 mg/L 。除河流冲刷导致河口浓度较低外, 污染物整体分布表现为由近岸向外海递减。该区域浓度高于 0.08 mg/L 的面积约为 65.43 km^2 , 而浓度处于 $0.06\sim 0.08 \text{ mg/L}$ 范围内的面积超过 220.8 km^2 。相较之下, 瓯江口岸段的示踪物浓度较低, 基本没有区域超过 0.06 mg/L 。

示踪物的输移扩散能力与其分布范围呈负相关, 即示踪物分布范围越广、浓度越低的岸段, 其输移扩散能力越强。总体分布表明, 河口附近的区域表现出较强的扩散特性, 其中瓯江口岸段尤为突出, 其次为飞云江和鳌江区域, 而乐清湾区域的扩散能力相对较弱。

2.3 各岸段扩散特征

为进一步探讨温州海域不同岸段的输移扩散空

间差异, 本文对每个岸段 (S1 至 S7) 分别进行了独立模拟, 并对各自的示踪物空间分布进行了定性分析, 见图 9。图中红色标记点用于指示具体的污染源位置。

在乐清湾顶岸段, 即 S1 (图 9(a)), 模拟结果显示示踪物浓度呈现明显的局部集中现象。浓度达到或超过 0.15 mg/L 的区域主要集中在距离污染源约南北 1 km 、东西 3 km 的范围内, 形成一个面积约为 33 km^2 的区域。浓度为 0.08 mg/L 的等值线距离污染源约 5 km 。整体来看, 几乎整个乐清湾的示踪物浓度均超过 0.01 mg/L , 并呈现出从湾顶向外湾浓度依次递减的趋势。在乐清湾中, 示踪物的分布特征较大程度上受到潮汐作用的影响。乐清湾潮汐为规则半日潮型, 从湾口至湾顶潮汐作用逐渐增强, 半日潮类型潮汐增强作用更为明显, 浅水分潮强度增大, 湾口浅水分潮振幅明显。潮汐作用使中间区域与潮水混合更为充分, 示踪物被更有效地分散和带走, 因此, 乐清湾中间污染物浓度相对较低^[15]。

S2 (图 9(b)) 位于乐清湾中段岸线。在此区域释放示踪物时, 示踪物浓度最高点并非位于污染源处, 而是位于源上方的湾顶区域, 示踪物浓度同样呈现从湾顶到外湾逐渐降低的分布状态。这一现象与 S1 情况类似, 均是受到乐清湾潮汐作用的影响。与 S1 不同的是, S2 更接近外湾, 水体交换能力相对较强, 导致示踪物浓度整体较低。浓度为 0.03 mg/L 的示踪物等值线呈“S”形, 其西侧偏南, 东侧偏北。这也显示出乐清湾整体示踪物浓度是西侧偏高于东侧。浓度为 0.01 mg/L 的等值线几乎超出了乐清湾的范围, 这表明乐清湾内所有区域的浓度均超过了 0.01 mg/L 。这和 S1 的分布状态一致。

温州海域西侧岸段示踪物扩散主要受径流-潮汐控制, 但背景环流仍可产生潜在影响: 夏季台湾暖流分支和冬季浙闽沿岸流可额外驱动示踪物离岸或沿岸输移, 可能降低局部滞留浓度。本文采用纯潮汐边界, 未解析陆架环流, 后续工作将耦合实时风-压场以进一步评估其贡献。S3 (图 9(c)) 是位于瓯江口北侧, 紧邻乐清湾的岸段, 该区域释放的示踪物受到河流的冲刷作用, 向东漂流, 导致整体浓度较低。在污染源附近, 最大浓度出现在不超过

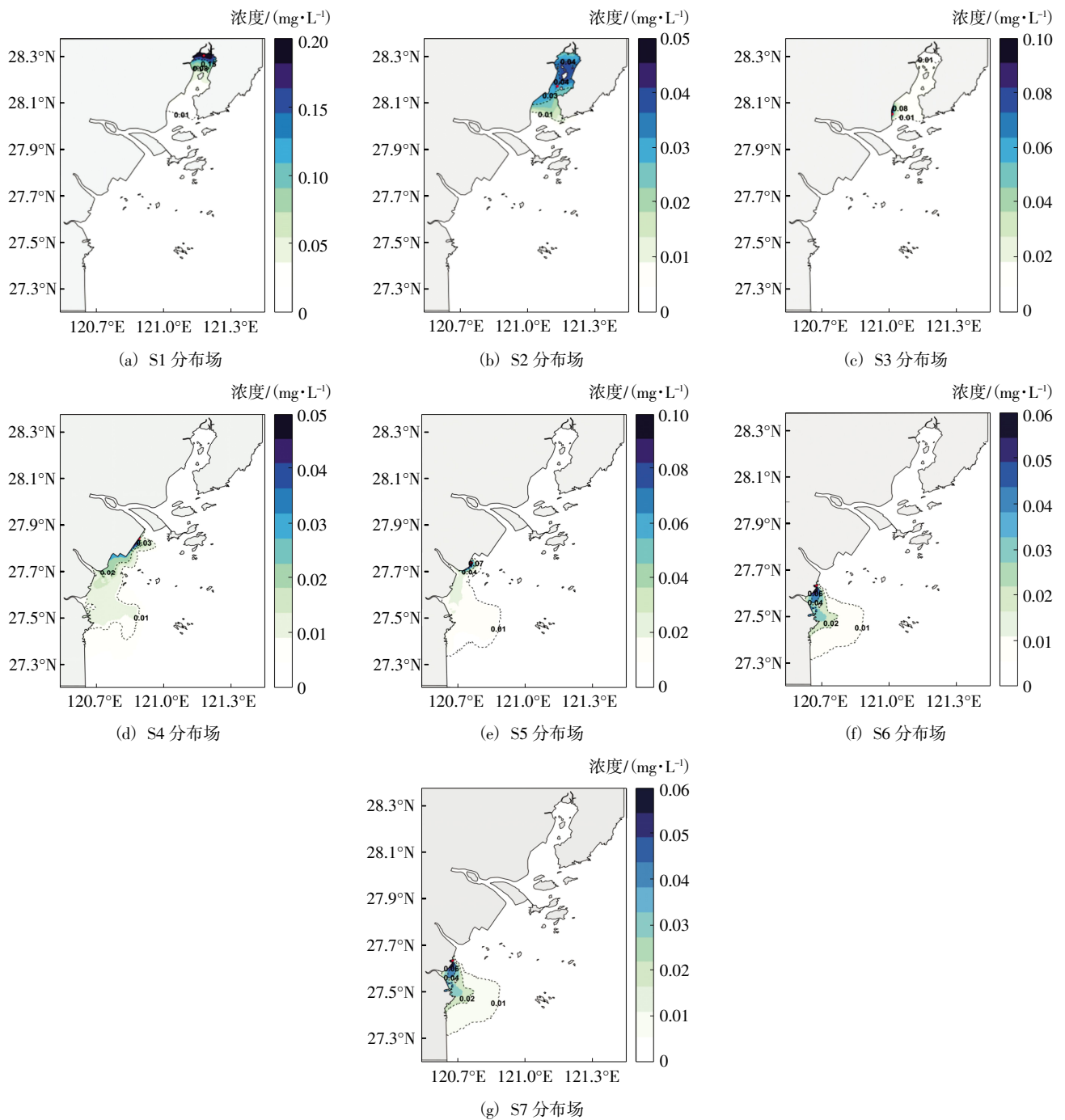


图 9 各岸段污染物分布

注: 红色圆点为排放点。

3 km 的范围内, 且浓度值略高于 0.08 mg/L。示踪物的分布特征更多地表现为向北涌入乐清湾中, 且由于向北水流速度较快, 一小部分示踪物呈现出向北的突进状态。随后, 示踪物主要沿西岸分布于乐清湾, 乐清湾中西侧的浓度稍高于东侧。整个湾中的浓度基本为 0.01 mg/L, 且湾顶几乎没有示踪物。0.01 mg/L 的浓度等值线与 S1、S2 的情况接近一致。

在分析 S1、S2 和 S3 区域的示踪物扩散情况

时, 观察到 0.01 mg/L 的浓度等值线在这些区域呈现出高度一致的范围和形态。这主要归因于瓯江强劲径流与洞头岛等地形的协同作用。瓯江径流驱动形成显著的离岸输运流, 而洞头岛等地貌则有效约束了示踪物的扩散路径。二者共同导致低浓度示踪物在瓯江口外及乐清湾南部海域形成连片分布区域。

相较于北部的岸段, 靠南的区域受河流径流的影响更为显著。在 S4 (图9(d)) 区域, 即瓯江-飞

云江北侧岸段,示踪物扩散受瓯江径流和飞云江径流的共同影响。由于瓯江径流强于飞云江径流,示踪物主要向南扩散。大部分示踪物向东排向外海,受到沿岸向外海地形水深逐渐变深的影响,整体分布面积表现为南北方向长于东西方向。此外,瓯江口灵昆岛北部的水流冲刷作用限制了示踪物向北扩散至乐清湾。示踪物的最高浓度达到 0.05 mg/L,仅存在于污染源附近偏南侧约 0.6 km² 的范围内。0.02 mg/L 浓度的等值线几乎紧贴着瓯江-飞云江岸段,呈现出长约 23.15 km、宽约 4 km 的长方形。0.01 mg/L 浓度的等值线最远离岸 23 km,在飞云江和鳌江河口处相对离岸较远。

在瓯江-飞云江南侧岸段,即 S5 (图 9(e)) 区域,示踪物的扩散模式与 S4 区域相比,更显著地受到飞云江径流的影响。飞云江作为瓯江的重要邻近水系,在入海口附近与瓯江径流相互作用,导致示踪物在岸段南侧的聚集更加明显。虽然部分示踪物会向南扩散,但总体扩散范围有限。最高浓度达到 0.07 mg/L,分布在污染源附近约 1 km² 的范围内,其分布形态呈长轴沿岸线稍偏外海的椭圆形。0.01 mg/L 的等值线较 S4 更向南偏移。

在飞云江-鳌江岸段,即 S6 (图 9(f)) 区域,潮汐和河流径流在示踪物扩散过程中起到了关键作用,影响了示踪物的传输路径和分布范围。示踪物从污染源出发,随着潮汐和河流向外海扩散,形成了一个较为广泛的浓度分布区域。在示踪物附近,达到最高浓度 0.06 mg/L,影响范围约为 4.56 km²。浓度为 0.02 mg/L 的等值线覆盖了从飞云江南段到鳌江的所有岸线及近岸海域。浓度为 0.01 mg/L 的等值线距离污染源约 32.3 km,覆盖了整个飞云江口和鳌江口区域。浓度为 0.02 mg/L 的等值线所包围的面积大约为 164.8 km²。

在鳌江口南侧区域,即 S7 (图 9(g)) 区域,示踪物的扩散动态受到鳌江口余流的显著影响。由于鳌江口的余流几乎完全向东流动,这一水流模式导致向北扩散的示踪物受到向东的水流作用,进而流入外海。因此,较高浓度的示踪物主要聚集在南侧区域,其中最高浓度达到 0.06 mg/L。浓度为 0.01 mg/L 的等值线向南延伸,最远离污染源有

23.9 km,而向北则较近,甚至未达到飞云江,这主要是受到飞云江径流的影响。与 S6 区域相比,S7 区域 0.01 mg/L 浓度等值线整体向南移动,所覆盖的面积约为 464.5 km²。

2.4 示踪物留存量估算

在进行示踪物扩散分析时,本文通过计算稳定状态下模拟区域内示踪物的总留存量来间接反映其扩散能力,留存量越低表明示踪物被输移出海或稀释扩散的效率越高。具体而言,选定 0.01 mg/L、0.02 mg/L、0.04 mg/L、0.07 mg/L、0.15 mg/L、0.2 mg/L 六个浓度等级,这些浓度等级覆盖了从低浓度到高浓度的范围,能够全面反映示踪物的分布情况。为简化计算并便于比较,对于每个浓度等级,假设其等值线包络区域内示踪物的浓度均匀等于该等值线浓度值,则该等级污染物总量近似等于等值线包络面积乘以该浓度值。各岸段示踪物留存量估算值见表 2。

表 2 示踪物留存量估算值

岸段	示踪物留存量/(km ² ·mg·L ⁻¹)
S1	14.201
S2	6.727
S3	3.426
S4	7.221
S5	8.909
S6	7.734
S7	6.42

理论上,示踪物的输移扩散能力与其在区域内的留存量呈负相关,即留存量越小代表扩散更充分。基于此,本文以示踪物留存量的倒数作为各岸段扩散能力的定量指标,并在图 10 中进行了分析对比。

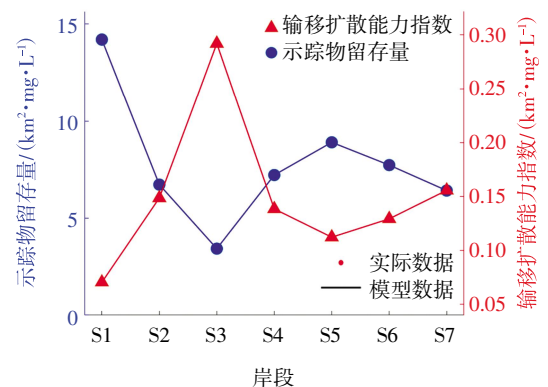


图 10 各岸段输移扩散能力对比

3 结 论

通过对温州海域各岸段示踪物空间上输移扩散的数值模拟和定量分析, 得出以下结论。

(1) 河口区域扩散能力优于内湾区域。在温州海域各岸段中, 河口区域的扩散输移能力显著强于乐清湾内湾区域。其中, 瓯江口北侧与鳌江口南侧最为突出。

(2) 瓯江口北侧区域表现出较强的扩散能力, 主要归因于瓯江径流作用。大量淡水和示踪物在入

海口形成明显的输运和扩散作用, 从而提高了示踪物扩散效率。瓯江口南侧受限于较浅的水深和偏弱的流量, 加之瓯江径流主要沿灵昆岛北侧入海, 导致该区域示踪物扩散受限, 局部浓度相对较高。

(3) 鳌江口南侧岸段表现出较强的扩散能力, 主要源于两大因素: 一是该区域海域相对开阔, 为示踪物扩散提供了充足的空间; 二是附近向南余流持续驱动, 有效促进了示踪物的离岸输运。二者的协同作用使示踪物得以在更大范围内扩散, 显著降低了局部浓度, 避免了过度堆积。

参考文献:

- [1] 姚炎明, 陈吉余, 陈永平, 等. 温州湾水流及其与地形的关系[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1998, 2: 61-68.
- [2] 冯曦, 周雨晨, 孙凤明, 等. 温州湾海域潮形偏态时空分布特征研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 25-36.
- [3] 张艺. 依生态而建的“海岛乐园”却在破坏生态[EB/OL]. (2024-05-17)[2025-06-27]. <https://news.qq.com/rain/a/20240517-A03CG600>.
- [4] 温州市人民政府. 温州市生态文明建设规划(2021—2030年)[Z]. 温州: 温州市人民政府公报, 2023.
- [5] 杨超琼, 方继红, 李锟, 等. 珠三角内湾营养盐分布特征及入海通量研究[J]. 环境生态学, 2024, 6(11): 61-67, 82.
- [6] 李谊纯, 李庆, 林振良. 正规半日潮海域潮汐不对称性及量化[J]. 海洋工程, 2019, 37(6): 86-93.
- [7] 卓明, 谭映宇, 刘瑜, 等. 乐清湾沿岸主要污染物排放现状调查[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 834-837.
- [8] 姚开雪, 印瑞, 王洋, 等. 乐清湾海域营养盐时空分布特征及其富营养化评价[J]. 海洋开发与管理, 2024, 41(9): 121-132.
- [9] 王弋, 王俊, 冯慕华, 等. 灌河淮河近海污染物扩散数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2025, 45(7): 3954-3967.
- [10] 热汗古丽·依米提. 基于 MIKE21 的榆树沟水库水质特征影响变化研究[J]. 地下水, 2023, 45(6): 90-92.
- [11] 何齐齐, 宋丹, 许雪峰, 等. 三门湾海域污染物扩散数值研究[J]. 海洋通报, 2018, 37(1): 63-73.
- [12] 胡亚伟, 常东明, 高子乐, 等. 黄河下游引黄灌区水系连通条件下水环境变化效应模拟[J]. 人民黄河, 2023, 45(8): 1-5.
- [13] Danish Hydraulic Institute. MIKE zero: Preprocessing & postprocessing user guide, generic editors and viewers[Z]. Copenhagen: Danish Hydraulic Institute, 2013.
- [14] 王愿珠, 葛长成. 基于 MIKE21 模型的鸭绿江支流排污口水质影响分析[J]. 湿地科学与管理, 2024, 20(5): 59-64.
- [15] 罗锋, 廖光洪, 盛建明, 等. 乐清湾海洋环境季节特征及水交换过程研究[J]. 水资源保护, 2012, 28(5): 48-51.

Study on the Spatial Heterogeneity of Tracer Dispersion along Coastal Segments in Wenzhou Sea Area

LIU Mingyuan¹, JIANG Jingqiu², CHEN Qinsi^{1,3}, HU Song¹

(1. College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Ministry of Ecology and Environment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 3. Research Center for Monitoring and Environmental Sciences, Taihu Basin & East China Sea Ecological Environment Supervision and Administration Authority, Ministry of Ecology and Environment, Shanghai 200125, China)

Abstract: In this study, a high-resolution 2D hydrodynamic numerical model was established based on MIKE 21 to conduct detailed simulations of tracer dispersion and transport patterns in the Wenzhou sea area and along its various coastal segments. By comprehensively considering multiple factors including the complex seabed topography of Wenzhou sea area, tidal characteristics, and inflows from multiple rivers, special focus was placed on analyzing the spatial heterogeneity in tracer dispersion along different coastal segments of the bay. The results indicate there is a significant spatial heterogeneity in the tracer transport and dispersion capacity along the coastal segments of Wenzhou sea area. Overall, the dispersion capacity was strongest in the three estuarine areas and weakest within the Yueqing Bay. After reaching a steady state, the tracers exhibited the largest affected area north of the Oujiang River Estuary, followed by the southern segment of the Aojiang River Estuary. In contrast, the southern segment of the Oujiang River Estuary showed relatively weaker dispersion and transport capacity due to its shallower water depth and weaker flow.

Keywords: Wenzhou sea area; MIKE 21; numerical simulation; tracer