

陈志和,陈款佳.基于运输路径特征的珠江口微塑料时空演化格局(2019—2025)[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

基于运输路径特征的珠江口微塑料时空演化格局(2019—2025)

陈志和,陈款佳

(中山大学土木工程学院,广东 珠海 519082)

摘要:微塑料污染已成为全球海洋环境的重要问题,但河口区域微塑料的长期时空演化及运输特征仍缺乏系统研究。珠江口作为陆源微塑料入海的重要通道,其污染在2019—2025年呈现显著的空间非均匀性和动态演化特征。因此,识别微塑料高浓度聚集区及其运输路径,对理解河口微塑料的迁移和空间分布具有重要意义。为揭示微塑料的时空分布与迁移特征,基于月尺度浓度反演数据,采用DBSCAN算法识别高浓度聚集区,并结合浓度加权重心与标准差椭圆模型追踪重心的年际位移,同时利用核密度估计识别微塑料的长期运输路径。结果显示,高值聚集区在伶仃洋西侧航道呈连续带状结构,东侧为零散斑块;微塑料浓度重心偏移累计约73 km,运输路径的连续性随时间减弱,局部回流与旋涡增多;污染峰值(P95)于2024年达到研究期最高,超过200 mg/L(较2020年增长约57%)。研究结果量化了珠江口微塑料的空间分布和迁移演化特征,可为未来的污染监测和管理策略提供支持。

关键词:微塑料;时空演化;运输路径;空间聚类;珠江口

中图分类号: **文献标识码:** **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-12

河口区作为陆源污染物向海洋运输的关键过渡带,是微塑料从陆地进入海洋生态系统的主要通道^[1]。珠江口作为中国南方最大河口之一,受高强度人类活动、密集城市群和复杂水动力条件影响,表现出显著的高输入和高汇聚特征^[2-3]。微塑料在河口水体的空间分布受季节性径流、潮汐、沿岸流及人类活动等多重因素调控,呈现明显的时空异质性^[4-5]。因此,系统揭示珠江口微塑料的长期时空演化格局与运输通道特征,对于理解其年际动态、入海通量与区域风险防控具有重要意义。

近年来,河口区域的微塑料污染时空分布规律已成为研究热点,尤其是关于季节性差异与径流影响的研究逐渐增多。以珠江口为例,已有研究通过丰水期与枯水期对比采样发现,微塑料丰度在雨季显著高于旱季,表明河口微塑料分布存在明显季节性波动^[6]。在空间分布方面,珠江口近岸监测结果

显示,靠近入海口及城市岸线的微塑料丰度显著高于远岸海域^[7-8]。在长江口的观测中也发现类似趋势,即近岸与河口区丰度高于远海区域,空间差异显著^[9]。但现有研究中,揭示河口微塑料在季节与空间尺度上的分布差异多基于单年度或有限季节采样,缺乏跨年度连续观测资料,对长期演变趋势的认识仍相对不足。

同时,河口微塑料的研究不仅关注分布模式,也逐步转向迁移路径与动态运输解析。例如,Cardoso-Mohedano等通过入河口的现场数据与三维粒子追踪模型,揭示微塑料沿河海交界的运输路径及其季节响应^[10]。Genc等指出,基于水动力结合潮汐环流模型可有效重现微塑料运输路径和累积点^[11]。此外,基于密度的聚类方法(DBSCAN)可以通过时空数据挖掘对监测数据进行空间分析^[12],也可以辅助判断潜在的运输路径与汇聚中心。但目

基金项目:国家自然科学基金(51879291)

收稿日期:2026-02-26 修回日期:2026-03-22

作者简介:陈志和(1976—),男,教授,主要研究方向为环境泥沙及河流动力学、水资源水生态等。

前的研究多停留在微塑料聚集区识别层面,缺乏对迁移机制的深入解析。

总体而言,尽管近年来河口微塑料研究揭示了分布格局与阶段性差异,但在长时间尺度、迁移机制分析、多维指标综合评价方面仍存在明显缺口。在时间尺度方面,多数研究缺乏跨年度、月尺度连续观测,难以刻画多年背景下的动态演化过程^[13]。其次,在迁移机制方面,现有成果虽有讨论潮汐与水动力对微塑料运输的影响,但是否存在相对稳定的长期运输通道,仍缺乏定量论证与模型支撑^[14]。

针对上述问题,本研究基于2019—2025年珠江口的微塑料的月尺度反演数据,系统分析珠江口微塑料的空间分布格局与年际演化特征,旨在从多维指标和运输机制层面揭示污染结构与风险演变规律。①应用DBSCAN算法识别高密度聚集区,并结合浓度加权质心与标准差椭圆(SDE)模型,追踪微塑料聚集区重心的年际迁移;②结合核密度估计(KDE)方法,识别珠江口微塑料的长期稳定运输通道及其空间结构特征;③引入峰值浓度(P95)指标与变异系数(CV)等统计量,对污染负荷的极端演化趋势进行定量评价,从而构建多尺度、多维度的综合分析框架。

1 数据与方法

1.1 数据获取与预处理

研究基于 Google Earth Engine(GEE)平台获取2019—2025年珠江口区域的 Sentinel-2 L2A 影像数据,并结合 Cloud Score+数据进行云掩膜处理,设置云概率阈值为0.7进行筛选,以去除云及薄云干扰。随后按月尺度对有效影像进行中位数合成,降低短期噪声对时间序列分析的影响,提高月尺度数据的稳定性。研究区域为珠江口及近岸海域(112.94°~113.95°E,21.65°~22.71°N)。

微塑料浓度反演基于前期实验构建的指数模型。实验室通过高光谱测量获取不同浓度条件下微塑料水体的光谱特征,并将光谱数据按 Sentinel-2 波段进行重采样处理,筛选与微塑料光谱变化敏感性较高的红边波段(B5)与短波红外波段(B11)构建

模型。模型参数由实验数据拟合获得,并应用于遥感影像进行反演计算。模型表达式为:

$$y = 109.45 \cdot e^{0.071 \cdot (\frac{B5}{B11})} + 21209.38 \cdot e^{0.93 \cdot (\frac{B5}{B11})} \quad (1)$$

式中: y 为微塑料质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;B5与B11分别为重采样后的 Sentinel-2 红边与短波红外波段反射率。模型参数由实验室高光谱样本构建,遥感反演结果与同期27个采样点的水样验证一致性良好($R^2=0.81$,RMSE=0.29 mg/L)。为后续空间聚类 and 路径分析,研究选择每月微塑料浓度中前10%的像元作为高浓度样本,减少背景低浓度像元的干扰,确保分析聚焦于高浓度区域的迁移与聚集特征。

为验证模型对珠江口微塑料浓度反演的适用性,本研究在方法设计上充分考虑了珠江口微塑料的特征。前期已完成了月尺度反演,为评估模型在不同水文条件下的适用性提供了充分依据。其次,模型中采用蒙特卡洛方法将微塑料丰度转换为质量浓度,所使用的参数(颗粒尺寸、形状因子、聚合物密度及数量分布)均来源于珠江口同期采样数据^[15]。样本覆盖主要微塑料类型(PP、PS、PE等)及常见颗粒形态(颗粒、纤维等),能较好反映实际水体中微塑料的特征,并增强模型对不同微塑料类型及浓度范围的适用性。

同时,模型仍存在一定的不确定性。首先,红边波段(B5)与短波红外波段(B11)可能受水体背景(如悬浮泥沙、溶解有机质DOM、底质反射等)干扰。其次,实验中所采用的微塑料类型和粒径范围有限,而实际水体中的微塑料组成更加复杂,可能导致光谱响应差异。但该方法整体上能够稳定反映珠江口微塑料的空间分布,为后续空间聚类与路径分析提供可靠基础。

1.2 空间聚类与路径预测

1.2.1 DBSCAN空间聚类

为识别高浓度微塑料的空间聚集与分布,研究采用 DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)算法,以量化其规模与结构演变特征。DBSCAN已广泛应用于环境数据和水环境空间结构研究,可识别污染斑块、密集区域及空

间异常模式^[16]。该算法通过邻域半径 ε 和最小样本数 MinPts (Minimum Points) 识别高密度区域, 并将孤立点标记为噪声^[17], 因此适用于不规则空间分布的微塑料聚类。

为保证空间距离计算的准确性, 将经纬度坐标转换至 Web Mercator 投影坐标系 (EPSG: 3857)。综合考虑珠江口尺度以及高值聚集区的空间连续性, 通过多组参数测试确定邻域半径为 2 km、最小样本数为 30。研究采用月尺度分析, 将时间距离转换为空间距离后进行聚类, 以提高聚集区识别的稳定性。最终统计独立聚类数量作为高浓度聚集区指标, 用于后续路径追踪与环境载量分析。

1.2.2 浓度重心与标准差椭圆(SDE)

为表征微塑料空间分布形态与主导方向, 研究根据浓度加权重心反映污染核心位置, 并引入标准差椭圆(SDE)量化空间分布的方向性与离散程度。SDE 基于协方差矩阵特征值分解, 可表征分布的指向性、拉伸形态和空间离散度。该方法在污染物扩散与生态风险空间结构分析中应用广泛^[18-19]。

标准差椭圆基于重心坐标的协方差矩阵构建, 通过特征值分解获得椭圆的长轴、短轴, 用于表征微塑料空间分布的主导扩散方向与离散程度。椭圆尺度采用 1 倍标准差范围, 用于表征高浓度区域的稳定结构。通过比较不同年份标准差椭圆的面积及方向变化, 分析微塑料空间分布形态的演化特征。

1.2.3 路径预测与核密度估计(KDE)

基于年度浓度加权重心序列构建迁移路径, 为识别微塑料的长期运输通道结构与稳定性, 采用核密度估计(KDE)生成运输通道的概率密度分布。KDE 是一种非参数概率密度估计方法, 通过高斯核函数对离散质心进行平滑处理, 生成连续的密度表面, 从而识别高概率密度区域作为潜在运输通道^[20]。

研究对 2019—2025 年所有月尺度质心进行空间概率密度分析, 通过带宽参数控制密度场的空间扩散尺度。综合珠江口区域尺度及质心分布特征, 带宽参数设定为 0.15, 以保证通道的连续性与可辨

识度。为增强通道识别的稳定性, 对结果进行归一化处理, 并以 0.05 为密度阈值提取高密度区域作为主导运输通道。该方法将离散的质心迁移数据转换为连续的概率密度结构, 从而表征微塑料的运输路径, 为聚类分布的分析提供可靠的基础。

1.3 统计评价指标

为量化珠江口微塑料污染强度与空间分布波动特征, 本研究采用年度第 95 百分位峰值浓度 (P95) 和变异系数 (CV) 作为评价指标。

峰值浓度 (P95) 用于表征高负荷水平。相比最大值, P95 能够减少极端异常值对统计趋势的干扰, 更稳定地反映高浓度区污染强度。在本研究中, P95 基于每月反演浓度值计算, 用于分析年度微塑料空间分布的极端强度和变化趋势。

变异系数 (CV) 用于衡量空间分布的离散和波动强度, 其定义为标准差与均值之比:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

式中: σ 为浓度标准差; μ 为平均浓度。CV 值越高, 表示微塑料在空间上的分布越不均匀, 可能存在明显聚集或极端高值区域; CV 越低, 则表明空间分布相对均匀。

2 结果与分析

2.1 珠江口微塑料空间分布的基本格局

珠江口作为陆源微塑料入海的关键节点, 其污染在长期尺度上表现出显著的空间非均匀性^[2]。2019—2025 年微塑料高值聚集区覆盖累积分布表明, 高频出现的污染聚集区主要在伶仃洋中西侧水域, 并沿主航道向西南侧海域延伸, 形成连续的带状高值区, 该区域微塑料高值平均出现频次较东侧区域高出约 2 倍。相比之下, 东侧深圳近岸及香港大屿山北侧微塑料高值出现频次多低于 15 次, 且表现为零散分布的局地高值斑块 (图 1)。

这一分布格局反映了珠江口微塑料的空间分布长期受河口动力结构和运输方向控制。西侧高频聚集区连续性强、年际稳定, 可能是微塑料向外海运输的主要通道; 东侧高值区受岸线形态与局地

环流影响,微塑料更容易滞留。这种空间异质与已有研究吻合,水流强弱和边界条件不同,微塑料的聚集行为也不同^[21]。根据珠江口微塑料观测数据,珠江河口及广州城市段水体均存在微塑料,其中河

口区域微塑料相对集中,而向外海逐渐降低,城市支流可能作为微塑料的滞留系统,使得微塑料在河口及近岸区域累积^[22]。

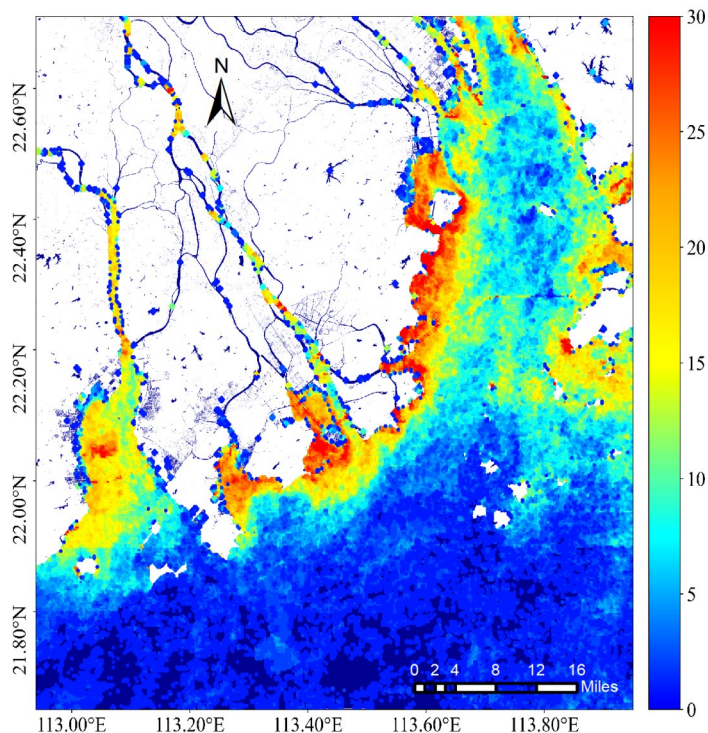


图1 2019—2025年微塑料高值聚集区覆盖累积分布

Fig. 1 Cumulative spatial distribution map of high-value microplastic accumulation zones (2019 - 2025)

2024年微塑料污染负荷处于研究期高位,适合用来检验上述格局在不同水动力条件下是否稳定。图2为2024年丰水期和枯水期的反演结果(图2)。珠江口陆海交互作用,环流运动活跃,因此冬季和夏季季节性特征显著^[23]。丰水期时,微塑料高浓度区向外海扩展,西侧带状分布明显拉长,部分区域浓度可达 $180\sim 200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;枯水期时,高值区收缩至河口内缘和近岸,浓度峰值多在 $100\sim 120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远离河口处迅速降至 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。已有研究表明,珠江河口水体的微塑料丰度显著高于外海,约为外海的4倍^[6]。但无论丰水期还是枯水期,西侧带状高值区与东侧斑块型分布的空间结构都没有改变。这表明该格局具有较强的水文适应性,是珠江口微塑料分布的稳定特征。

2.2 微塑料分布重心迁移轨迹与空间演化特征

在上述空间格局的基础上,引入浓度加权重心与标准差椭圆方法,对2019—2025年微塑料高浓度核心的空间迁移进行定量分析(图3)。结果表明,重心在年际尺度上存在一定南北摆动,但整体呈由河口内侧向西南方向推进的趋势。2019—2025年重心累计偏移 73.25 km ,年际平均约 12 km ,说明高浓度核心持续发生空间调整。

具体来看,2019—2021年重心位置相对偏北,标准差椭圆范围较大,长轴约 $70\sim 79\text{ km}$,短轴约 $35\sim 39\text{ km}$,椭圆面积约 $2\,088\sim 2\,188\text{ km}^2$,分布形态较为离散,受多源输入和季节波动影响明显。自2022年起,重心逐步向西南方向偏移,椭圆中心趋向伶仃洋中西部,同期椭圆面积收缩至 $1\,467\sim 2\,139\text{ km}^2$ (2022—2024年),较前期阶段下降约13%(表

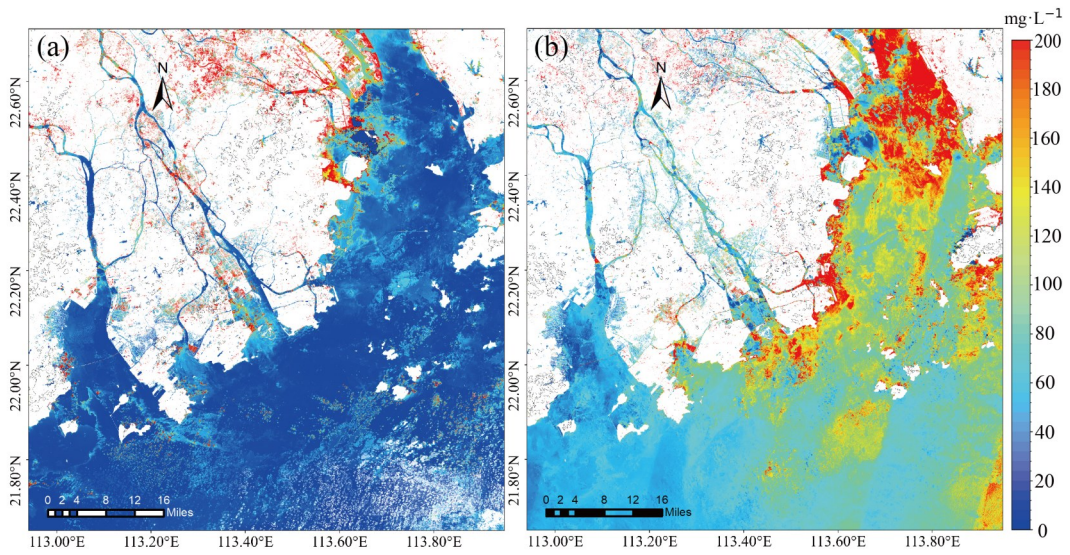


图2 2024年枯水期与丰水期微塑料浓度(a)枯水期;(b)丰水期

Fig. 2 Microplastic concentrations during the dry and wet seasons in 2024

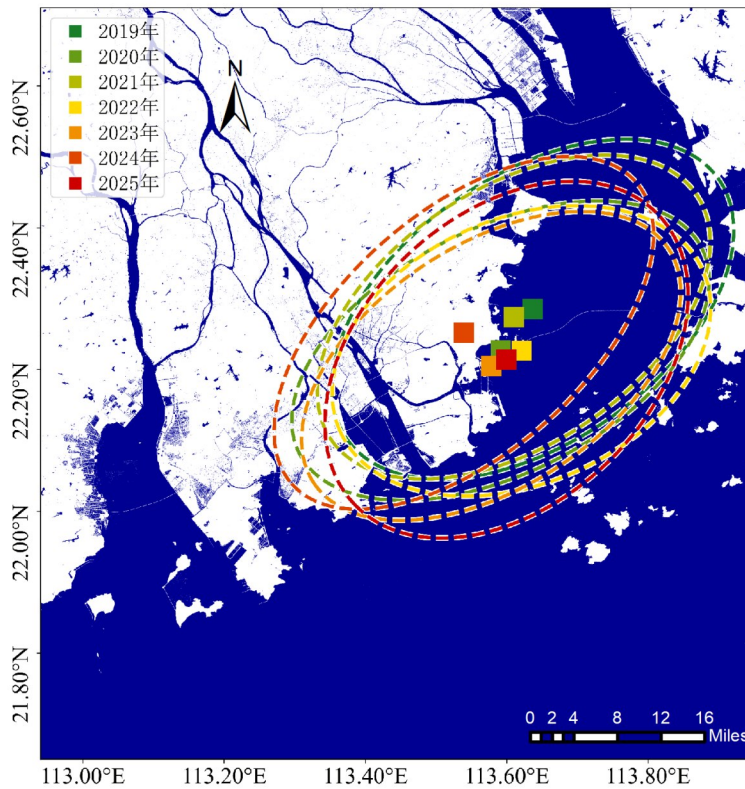


图3 2019—2025年微塑料浓度重心迁移轨迹

Fig. 3 Trajectory of the centroid migration of microplastic concentrations (2019 - 2025)

1)。这一变化表明,微塑料的主要分布区域有明确的方向性。

进一步结合微塑料高浓度聚集面积与变异系数(CV)的统计结果,2022年后聚集面积明显扩大,

2023—2025年总面积稳定在约11 000~12 000 km²区间,较2022年的最低点(约9 000 km²)增加约20%~30%;同期高浓度聚集面积的空间变异系数CV从2020年的最低点1.1左右持续攀升,至2025

表1 2019—2025年微塑料分布重心迁移轨迹及椭圆参数

Tab. 1 Trajectory of the migration of the centroid of microplastic distribution and associated ellipse parameters (2019 - 2025)

年份	重心经度	重心纬度	年际偏移距离/km	长轴/km	短轴/km	椭圆面积 /km ²
2019	113.654	22.275	—	70.5	38.6	2 137
2020	113.597	22.167	13.3	79.2	35.2	2 188
2021	113.671	22.305	17	71.5	37.2	2 088
2022	113.701	22.188	13.3	59.4	37	1 726
2023	113.635	22.207	7.1	56.8	32.9	1 467
2024	113.53	22.223	10.9	76.2	34.1	2 040
2025	113.641	22.213	11.5	63.6	43.9	2 192

年达 1.95,整体上升幅度约 77%(图 4),反映了浓度在空间上的不均匀性增强。总体来看,在重心向西南迁移的过程中,微塑料分布从早期的局部集中逐

渐转为范围扩展,高浓度区域的空间离散程度明显增加。

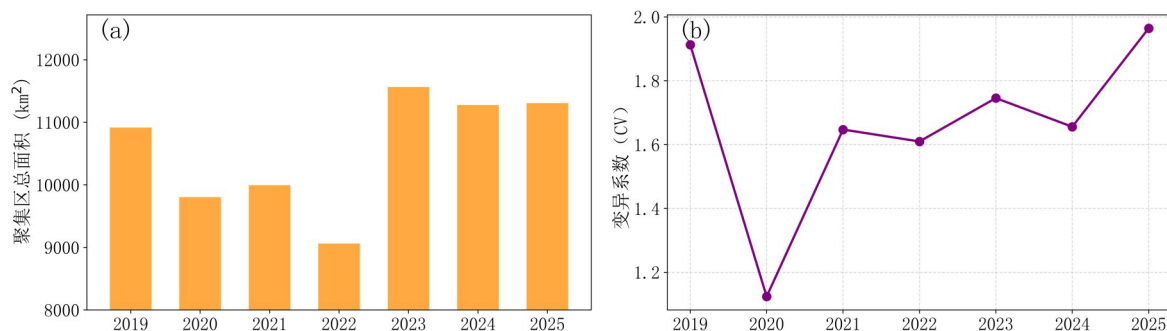


图4 2019—2025年高浓度微塑料聚集面积与变异系数

Fig. 4 Area of high-concentration microplastic aggregation and coefficient of variation (2019 - 2025).

2.3 输运路径识别及其对空间聚类分布的作用

整合 2019—2025 年月尺度高浓度聚集区的权重重心,并基于核密度估计(KDE)构建长期输运通道分布(图 5)。结果显示,珠江口存在稳定的微塑料输运通道,整体由多个河口汇入伶仃洋中西部,并沿西侧向西南方向延伸,呈弧形带状结构。

该密度通道与珠江口西侧深水槽走向基本一致,通道宽度相对稳定,表明该区域长期承担微塑料向外海输送的功能。相比之下,东侧核密度分布呈现为零散状,连续性较弱,说明该区域更易形成短期聚集,而难形成稳定的输运路径。

为验证该输运通道与实际高浓度聚集区之间

的空间关系,选取 2019、2021、2023 和 2025 年的对应路径预测图与空间聚类结果进行对比分析(图 6、7)。

不同阶段的微塑料输运路径在长度与形态上存在明显差异,这直接影响了空间聚类结构的形成方式。研究早期输运路径较长且连续,月份覆盖可达 6 个月,且多沿河口主轴方向延伸,交叉与回旋现象较少,表现为以定向输运为主的特征。2022 年以后,路径长度明显缩短,月份覆盖多为 3~5 个月,远距离输运减弱,但路径形态趋于复杂。河口内部及近岸出现更多旋涡与局地回流轨迹,2025 年出现约 4 处明显回流,表明微塑料局地滞留增强、整体迁移

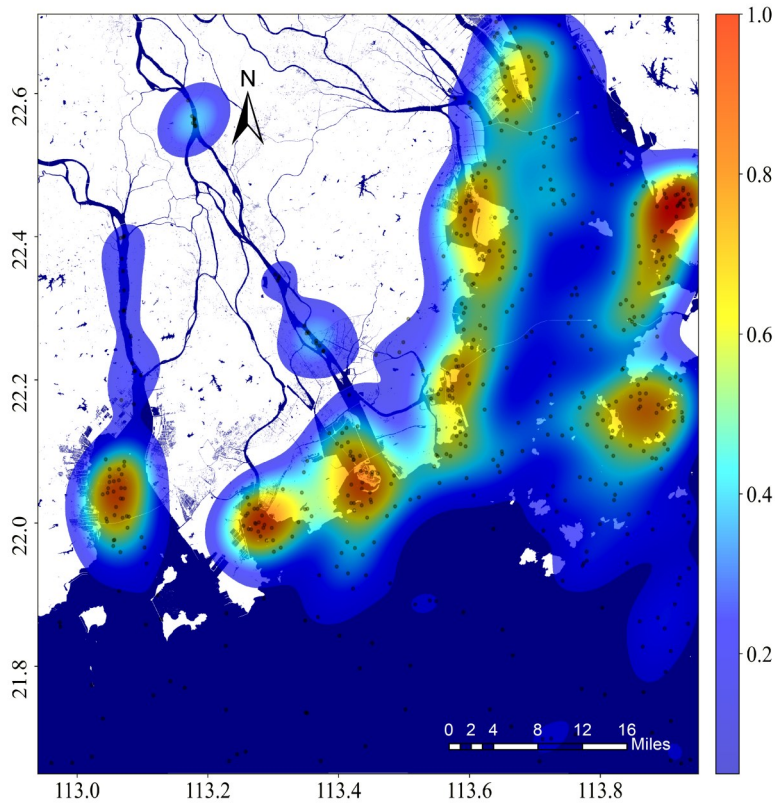


图5 2019—2025年KDE运输通道密度

Fig. 5 Kernel density estimation (KDE) map of microplastic transport pathways (2019–2025).

效率降低。其中,珠海、澳门沿岸出现的漩涡结构与王国槐等在该研究区得出的微塑料运输方向结果基本一致^[3]。

结合珠江口流场研究可以发现,这种路径特征具有明确的水动力机制。基于三维数值水动力模式和漂浮物追踪分析,流场中的潮流、密度流和风力等水动力因素共同塑造了物质运输和滞留的空间结构。Gu等^[24]通过拉格朗日漂浮物模拟发现,珠江口的潮流和密度流与风力耦合作用使绝大多数漂浮碎片(约85%)滞留在河口及近岸水域,这说明水动力条件能够显著增强局部滞留和回流。同时,从水体聚集的拉格朗日分析来看,潮流与径流等流场梯度控制了不同水域的粒子累积区和路径模式,当径流弱、潮流主导时更易在近岸和河口内部形成流场收敛区,从而形成更复杂、局地化的运输路径^[25]。

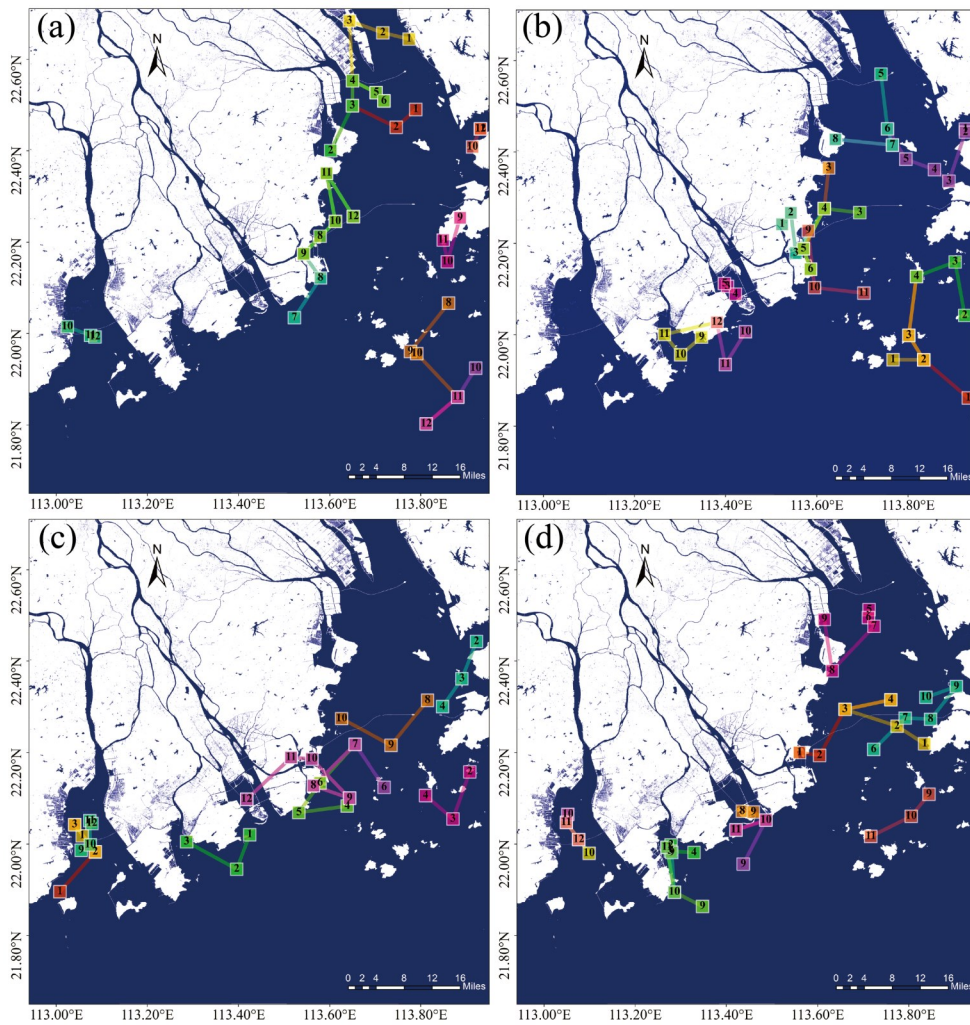
运输路径结构的变化进一步影响了空间聚类格局(图7)。早期连续路径促进聚类沿主通道扩

展,使高浓度聚类数量较少但强度高、距河口中心渐增的过渡型聚类增多,整体分布相对均匀且影响尺度较大;中后期路径长度缩短、局部旋涡增多导致微塑料在近岸及河口内停留时间延长,聚类分布向局地化转变,因此整体不均性加剧,出现更多中小规模、斑块状分布。

综合来看,早期连续路径促进聚类沿通道方向扩展和形成较大影响范围,而后期局地化、复杂化的路径则增强了关键地区的聚集与滞留。微塑料运输路径的形态变化一定程度上影响空间聚类格局的形成与稳定性^[26],这也解释了重心向西南偏移、西侧通道稳定及东侧斑块化增强的时空特征。

2.4 环境载量年度响应特征与极端风险评估

综合2019—2025年微塑料空间聚类数量与峰值浓度(P95)的变化,结果表明珠江口微塑料的环境载量呈现出明显的阶段性特征,空间聚类数量趋于稳定,而峰值浓度呈先升后降的趋势(图8)。



注:颜色用于区分不同运输路径,同一颜色表示同一条路径,数字标注表示月份序列。

图6 典型年份微塑料运输路径预测(a)2019年;(b)2021年;(c)2023年;(d)2025年。

Fig. 6 Predicted transport pathways of microplastics in representative years

微塑料高浓度聚集区数量早期快速增长,至2021年达到峰值8个,此后进入相对平稳期。峰值浓度(P95)自2020年起逐步上升,至2024年超过200 mg/L,较2020年增长约57%。2024年峰值浓度的升高可能与降雨条件下的河流径流增强相关。已有研究表明,降雨和径流过程能显著增强陆源微塑料向河口输送,从而在短时间内提高局地污染水平^[27]。此外,河口复杂的水动力结构也可能增强微塑料在近岸区域的滞留与累积效应,从而放大局部浓度峰值。该结果表明污染聚集区范围扩张趋缓,但聚类内部污染强度增强。2025年峰值浓度明显回落,表明极端载量在达到峰值后可能进入阶段性

调整。

结合前期高浓度聚集面积的变化(图4a),高浓度聚集区总面积自2019年起持续扩张,并在2023—2025年维持较高水平。这表明,尽管空间聚类数量在2021年后趋于稳定,微塑料污染的空间覆盖并未收缩,而是在较大范围持续存在。整体来看,污染演化由早期“范围扩展、聚类增加”逐步转向“范围稳定、强度增加”。2024年峰值浓度反映了长期累积作用下的极端响应,而2025年浓度的回落则可能预示区域环境载量进入了阶段性的自我调节。从极端风险角度来看,该载量变化具有一定持续性和波动性。西侧运输通道作为主要运输路径,稳定性

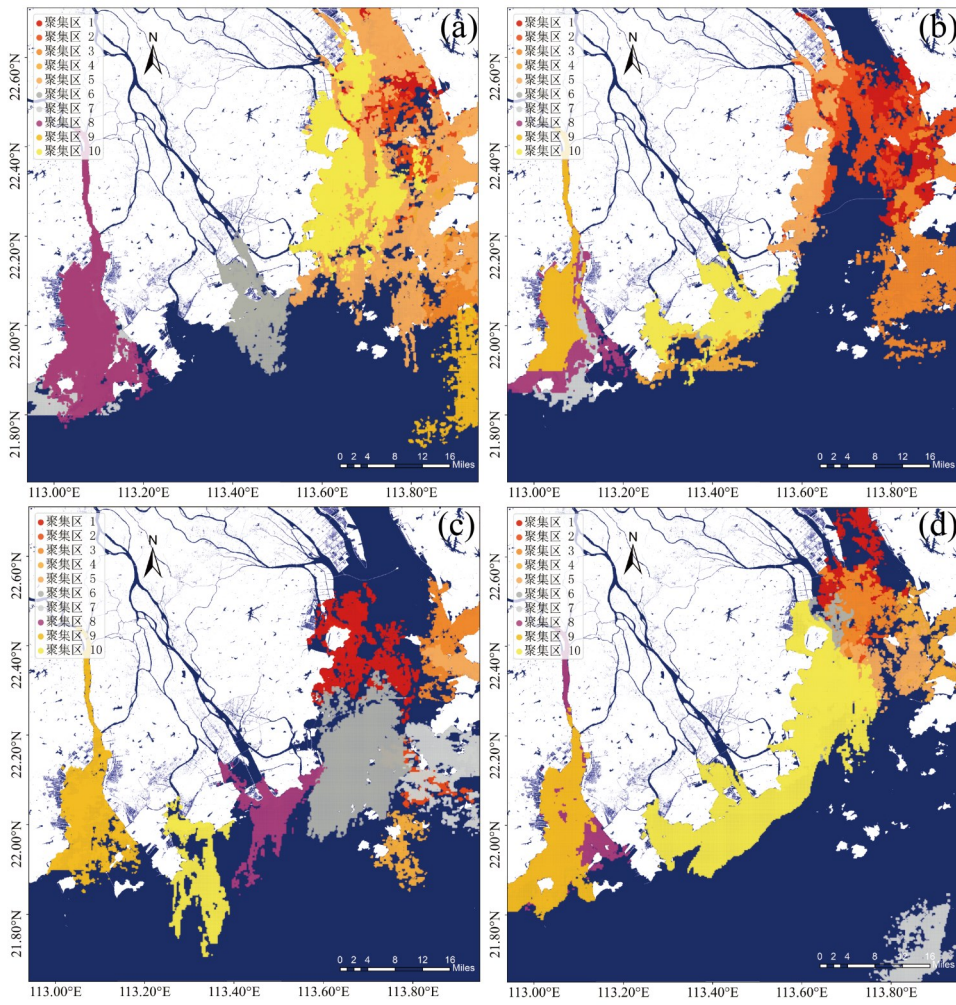


图7 典型年份微塑料空间聚类分布(a)2019年;(b)2021年;(c)2023年;(d)2025

Fig. 7 Spatial clustering of microplastics in representative years

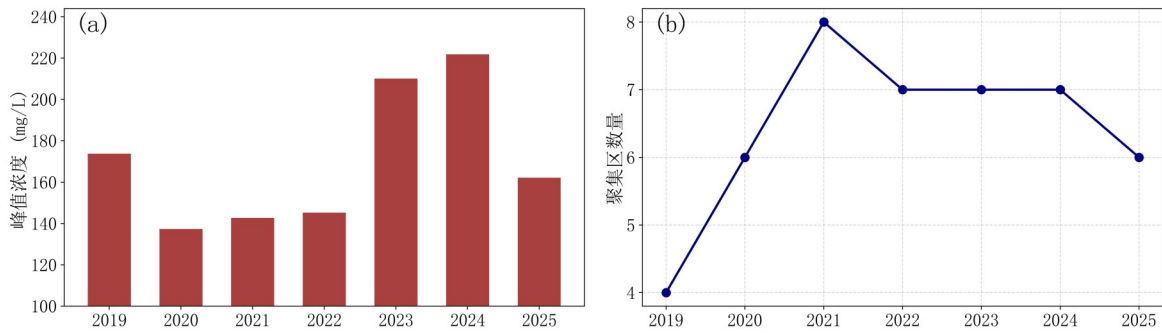


图8 2019—2025年微塑料峰值浓度(P95)与空间聚类数量统计

Fig. 8 Statistics of peak microplastic concentrations (P95) and the number of spatial clusters (2019—2025)

强,易形成持续高浓度带并向外海扩散;东侧近岸区域受地形与局部环流影响,聚集较离散,但浓度波动明显,局部极端风险更高。

3 结论

本研究基于2019—2025年珠江口微塑料浓度的月尺度反演数据,分析了其时空演化格局、运输

路径特征及环境载量响应规律,主要结论如下。

a)珠江口微塑料的空间分布呈现稳定的异质格局。2019—2025年,高浓度聚集区主要沿伶仃洋中西部主航道形成连续带状结构,高值平均出现频次约为东侧的2倍;东侧受岸线形态和局地环流影响,高浓度区呈零散分布。

b)微塑料浓度重心在年际尺度上持续向西南推进。浓度加权重心累计偏移约73 km,根据标准化椭圆形态可知,早期的微塑料分布较分散,后期分布趋于集中和稳定。

c)输运路径演化驱动聚类空间格局变化。早期预测路径连续,月份覆盖可长达6个月,高浓度聚类沿河口核心区线性延伸;后期路径缩短、局部回流与旋涡增多,月份覆盖为3~5个月,空间离散化显著增强。

d)微塑料污染负荷达到极端峰值并呈风险累积趋势。P95峰值在2024年超过200 mg/L,比最低谷增长约57%,2025年出现回落。

参考文献:

- [1] Laurent C. M. Lebreton, Joost van der Zwet, Damsteeg Jan-Willem, et al. River plastic emissions to the world's oceans [J]. *Nature communications*, 2017, 8 (1). DOI: 10.1038/ncomms15611.
- [2] 陈鸿展, 区暉, 叶四化, 等. 珠江广州段水体微塑料的时空分布特征及生态风险评估 [J]. *生态环境学报*, 2023, 32(9): 1663-1672.
Chen Hongzhan, Ou Hui, Ye Sihua, et al. Spatiotemporal Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Guangzhou Section of the Pearl River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(9): 1663-1672. (in Chinese)
- [3] 王国槐, 梁昊, 赵卫, 等. 珠江口南部海域表层沉积物中微塑料的空间分布及运移机制 [J]. *中国地质调查*, 2024, 11(3): 76-82.
Wang Guohuai, Liang Hao, Zhao Wei, et al. Spatial Distribution and Transport Mechanisms of Microplastics in Surface Sediments of the Southern Pearl River Estuary [J]. *China Geological Survey*, 2024, 11(3): 76-82. (in Chinese)
- [4] 杨壹珺, 王帅兵, 叶长兵, 等. 我国水环境中的微塑料污染状况 [J]. *环境保护前沿*, 2024, 2024, 14(1): 51-56.
Yang Yijun, Wang Shuaibing, Ye Changbing, et al. Microplastic Pollution in Aquatic Environments in China [J]. *Advances in Environmental Protection*, 2024, 14(1): 51-56. (in Chinese)
- [5] 王少露, 吴思怡, 谢福武, 等. 海南万泉河入海河口微塑料赋存特征及风险评价 [J]. *中国无机分析化学*, 2024, 14(8): 1099-1108.
Wang Shaolu, Wu Siyi, Xie Fuwu, et al. Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in the Estuary of the Wanquan River, Hainan [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2024, 14(8): 1099-1108. (in Chinese)
- [6] Li Siyang, Wang Yilin, Liu Lihong, et al. Temporal and spatial distribution of microplastics in a coastal region of the Pearl River Estuary, China [J]. *Water*, 2021, 13 (12). DOI: 10.3390/w13121618.
- [7] Hu Jiyan, Li Chengliang, Deng Lichi, et al. Spatial Distribution, Key Influencing Factors, and Ecological Risk of Microplastics in Pearl River Estuary Water and Sediments [J]. *Water*, 2025, 17(17). DOI: 10.3390/w17122572.
- [8] 刘冰洁, 区晓敏, 叶匡旻, 等. 广东省近岸海域微塑料赋存特征与风险评估 [J]. *环境科学*, 2024, 45(7): 3911-3918.
Liu Bingjie, Ou Xiaomin, Ye Kuangmin, et al. Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in the Coastal Waters of Guangdong Province [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 3911-3918. (in Chinese)
- [9] Ji Xiao, Yan Shuaishuai, He Yanlong, et al. Distribution characteristics of microplastics in surface seawater off the Yangtze River estuary section and analysis of ecological risk assessment [J]. *Toxics*, 2023, 11(11). DOI: 10.3390/toxics11110889.
- [10] Cardoso-Mohedano J, Ruiz-Fernández A, Ontiveros-Cuadras J F, et al. Microplastics transport in a low-inflow estuary at the entrance of the Gulf of California [J]. *Sci Total Environ*, 2023, 870. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161825.
- [11] Asli Numanoglu Genc, Nilufer Vural, Lale Balas. Modeling transport of microplastics in enclosed coastal waters: A case study in the Fethiye Inner Bay [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 110747. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110747.
- [12] Birant Derya, Kut Alp. ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial-temporal data [J]. *Data & knowledge engineering*, 2007, 60(1): 208-221.
- [13] Nyadjro Ebenezer S, Cebrian Just, Cox T Erin, et al. Gaps and Pathways Towards Standardized, FAIR Microplastics Data Harmonization: A Systematic Review [J]. *Microplastics*, 2026, 5

- (1): 11. DOI: 10.3390/microplastics5010011.
- [14] Kaimathuruthy Betty John, Jalón-Rojas Isabel, Sous Damien. Modelling microplastic dynamics in estuaries: a comprehensive review, challenges, and recommendations [J]. *Geoscientific Model Development*, 2025, 18(20): 7227 – 7255.
- [15] 李震, 袁冰, 陈志和. 珠江河口多类型海滩沉积物中微塑料的空间分布特征 [J]. *人民珠江*, 2024, 45(5):55–64.
Li Zhen, Yuan Bing, Chen Zhihe. Spatial Distribution Characteristics of Microplastics in Multiple Types of Beach Sediments in the Pearl River Estuary [J]. *Pearl River*, 2024, 45(5):55–64. (in Chinese)
- [16] Fauzan Achmad, Fadillah Ganjar, Fitria Annisa, et al. Cluster Mapping of Waste Exposure Using DBSCAN Approach: Study of Spatial Patterns and Potential Distribution in Bantul Regency [J]. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 2024, 8(2): 751 – 759.
- [17] Ester Martin, Kriegel Hans-Peter, Sander Jörg, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise [Z]. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Portland, Oregon; AAAI Press. 1996, 96(34): 226 – 231.
- [18] Feng Ziyu, Shi Runhe. Spatio-temporal Features and the Association of Ground-level PM_{2.5} Concentration and Its Emission in China [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2021, 23(7): 1221 – 1230.
- [19] 郑德凤, 郝帅, 孙才志, 等. 中国大陆生态效率时空演化分析及其趋势预测 [J]. *地理研究*, 2018, 37(5): 1034 – 1046.
Zheng Defeng, Hao Shuai, Sun Caizhi, et al. Spatiotemporal Evolution and Trend Prediction of Ecological Efficiency in Mainland China [J]. *Geographical Research*, 2018, 37(5): 1034 – 1046. (in Chinese)
- [20] Zheng Minxue, Xie Xintong, Jiang Yutao, et al. Optimizing Kernel Density Estimation Bandwidth for Road Traffic Accident Hazard Identification: A Case Study of the City of London [J]. *Sustainability*, 2024, 16(16). DOI: 10.3390/su16166969.
- [21] Summers E J. Modelling Transport and Pathways of Microplastics in Estuarine and Coastal Waters [D], 2024.
- [22] Yan Muting, Nie Huayue, Xu Kaihang, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China [J]. *Chemosphere*, 2019, 217: 879 – 886.
- [23] 黄春华, 刘晓建, 郭辉群, 等. 珠江河口环流季节性变化特征分析 [J]. *人民珠江*, 2023, 44(7):48–54.
Huang Chunhua, Liu Xiaojian, Guo Huiqun, et al. Analysis of Seasonal Variations of Circulation in the Pearl River Estuary [J]. *Pearl River*, 2023, 44(7):48–54. (in Chinese)
- [24] Gu Jintao, Zhang Yu, Sui Yi, et al. Lagrangian study of floating debris transport around the Pearl River Estuary in summer [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2025, 211. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.117494.
- [25] Li Mingyu, Alessandro Stocchino, Cai Zhongya, et al. Exploring water accumulation dynamics in the Pearl River estuary from a Lagrangian perspective [J]. *Ocean Science*, 2024, 20(4): 931 – 944.
- [26] Hamidiaala Shahrzad, Babajamaaty Golnoosh, Mohammadian Alireza, et al. Identification of Microplastic Accumulation Zones in a Tidal River: A Case Study of the Fraser River, British Columbia, Canada [J]. *Sustainability*, 2025, 17(19). DOI: 10.3390/su17198591.
- [27] Matthew S Ross, Alyssa Loutan, Tianna Groeneveld, et al. Estimated discharge of microplastics via urban stormwater during individual rain events [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1090267.

Spatiotemporal Evolution Patterns of Microplastics in the Pearl River Estuary Based on Transport Path Characteristics (2019—2025)

CHEN Zhihe, CHEN Kuanjia

(School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Microplastic pollution has emerged as a pervasive environmental concern in marine ecosystems worldwide. However, the long-term spatiotemporal evolution and transport dynamics of microplastics in estuarine environments remain inadequately constrained. As a major conduit for terrestrial inputs to the ocean, the Pearl River Estuary experiences intense anthropogenic pressures and highly complex hydrodynamic regimes, making it a critical natural laboratory for investigating the accumulation, migration, and redistribution of microplastics. Elucidating the spatial configuration of high-concentration zones and their associated transport

pathways is therefore essential for advancing process-level understanding and informing targeted pollution management. In this study, monthly inversion-derived microplastic concentration data from 2019 to 2025 were analyzed to characterize the spatiotemporal distribution and migration patterns of microplastics in the Pearl River Estuary. High-concentration aggregation zones were delineated using the density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) algorithm. The annual displacement of microplastic concentrations was quantified via concentration-weighted centroid analysis, while directional trends and spatial dispersion were further evaluated using the standard deviation ellipse model. Additionally, kernel density estimation (KDE) was employed to identify persistent transport pathways and to assess their structural evolution over time. The results reveal pronounced spatial heterogeneity and distinct temporal variability in microplastic distributions. High-concentration zones predominantly formed a continuous belt along the western channel of Lingdingyang, whereas the eastern region exhibited a more fragmented pattern characterized by dispersed patches. Over the study period, the centroid of microplastic concentration exhibited a cumulative displacement of approximately 73 km, indicating substantial migration of pollution hotspots. Concurrently, the coherence of transport pathways progressively weakened, accompanied by enhanced local recirculation and the emergence of vortex-like structures, suggesting increasing complexity in estuarine transport processes. Peak concentrations, represented by the 95th percentile (P95), were observed in 2024, exceeding $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ —approximately 57% higher than levels recorded in 2020. Overall, this study provides a quantitative assessment of the long-term spatiotemporal evolution of microplastic pollution in the Pearl River Estuary. By integrating concentration inversion, spatial clustering, centroid tracking, and kernel density analysis, the results elucidate not only the distributional characteristics of microplastic hotspots but also their migration trajectories and transport evolution under dynamic estuarine forcing. These findings advance the mechanistic understanding of microplastic accumulation in estuarine systems and provide a robust scientific basis for future monitoring, risk assessment, and the development of region-specific management strategies. Moreover, the methodological framework established herein is readily transferable to other estuarine environments subject to similar land – sea interactions and anthropogenic influences.

Keywords: Microplastics; Spatiotemporal Evolution; Transport Paths; Spatial Clustering; Pearl River Estuary

(责任编辑:李泽华)