

# 钦州湾与上游河流的微塑料时空分布及影响因素分析

邓明月<sup>1,2</sup>, 朱静敏<sup>1,2</sup>, 王薛平<sup>2,3</sup>, 厉国梁<sup>2</sup>,  
张超文<sup>1</sup>, 鲁栋梁<sup>2</sup>

(1.浙江海洋大学 水产学院, 浙江 舟山 316022; 2.北部湾大学 海洋学院 广西北部湾海洋环境变化与灾害研究重点实验室, 广西 钦州 535011; 3.广东生态工程职业学院, 广东 广州 510520)

**摘要:**本研究在中国南方养殖海湾钦州湾及其上游河流钦江和茅岭江开展了 4 个季度的微塑料污染调查, 范围覆盖了从河流上游偏远地区到经济较发达的沿海城市。研究结果显示, 钦江和茅岭江的微塑料年平均丰度分别为 3.94 个/L、1.63 个/L, 钦州湾河口区域(茅尾海)和外湾的微塑料年平均丰度分别为 1.76 个/L 和 1.50 个/L。微塑料全年平均污染水平从高到低依次为钦江、茅尾海、茅岭江、外湾。钦州湾微塑料丰度的季节差异显著, 其中钦江尤为明显 ( $p < 0.01$ ), 冬季丰度是夏季的 5 倍; 外湾的微塑料丰度受季节影响最小。冬季, 钦江流域的微塑料丰度高于其他区域; 夏季, 外湾流域的微塑料丰度偏高; 而在春、秋季, 钦江中游的微塑料丰度偏高。上游河流中微塑料的颜色主要为蓝色, 而河口和外湾中的微塑料颜色主要是透明色。微塑料的聚合物类型以人造丝和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 为主。值得注意的是, 微塑料的丰度并未沿河流从上游至下游明显增加, 而是与沿岸的人口数量呈一定的正相关关系。钦州湾流域的微塑料主要来自沿岸居民的日常生活以及流域内的渔业活动, 同时可能受到地表径流和降雨等环境因素的影响。

**关键词:**微塑料; 钦州湾; 河流; 时空分布; 影响因素

中图分类号: X171.5; X55

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)01-0010-07

## Spatiotemporal distribution and influencing factors of microplastics in Qinzhou bay and upstream rivers

DENG Mingyue<sup>1,2</sup>, ZHU Jingmin<sup>1,2</sup>, WANG Xueping<sup>2,3</sup>, LI Guoliang<sup>2</sup>,  
ZHANG Chaowen<sup>1</sup>, LU Dongliang<sup>2</sup>

(1.School of fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2.Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Change and Disaster in the Beibu Gulf, College of Marine Sciences, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China; 3.Guangdong Eco-Engineering Polytechnic, Guangzhou 510520, China)

**Abstract:** This study conducted a four-quarter survey of microplastic pollution in Qinzhou bay, a farming bay in southern China, and its upstream rivers, ranging from remote areas in the upper reaches of the river to economically developed coastal cities. The annual average abundance of microplastics in the Qin river and Maoling river was 3.94 particles per liter and 1.63 particles per liter respectively. In the estuarine area of

收稿日期: 2024-03-24, 修订日期: 2024-04-28

基金项目: 国家青年科学基金项目 (42106149, 41907320); 广西北部湾海洋环境变化与灾害研究重点实验室自主项目 (2020ZD02)

作者简介: 邓明月 (1999-), 女, 贵州兴仁人, 硕士研究生, 主要研究方向为养殖海域微塑料与弧菌复合毒性效应, E-mail: 2372698792@qq.com

通信作者: 朱静敏 (1991-), 女, 河南濮阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向为海洋生态毒理, E-mail: jmzhu@zjou.edu.cn

王薛平 (1984-), 男, 江西高安人, 副教授, 博士, 主要研究方向为环境地理和灾害地理, E-mail: 119613756@qq.com

Qinzhou bay and the outer bay, the annual average abundance of microplastics was 1.76 particles per liter and 1.50 particles per liter respectively. The annual average microplastic pollution intensity was ranked in the order of Qin river, Maowei sea, Maoling river, Outer bay. Significant seasonal differences occurred, notably in Qin river ( $p < 0.01$ ), with winter abundance five times higher than summer; outer bay showed least seasonal effect. In winter, microplastic abundance in the Qin river was higher than in other areas; in summer, microplastic abundance in the outer bay was higher; and in spring and autumn, microplastic abundance in the middle reaches of the Qin river was higher. The predominant color of microplastics in upstream rivers was blue, while those in estuaries and the outer bay were mainly transparent. The main types of microplastic polymers were rayon and PET. It is noteworthy that microplastic abundance did not significantly increase from upstream to downstream rivers but showed a positive correlation with the coastal population. Microplastics in the Qinzhou bay watershed mainly originate from the daily activities of coastal residents and fisheries activities within the watershed, while they may also be influenced by environmental factors such as surface runoff and rainfall.

**Key words:** microplastics; Qinzhou bay; river; spatiotemporal distribution; factors

塑料制品由于具有成本低、质量轻、可塑性强等良好的经济性能和理化性能,被广泛应用于日常生活及工农业产品中。然而,塑料的难降解性导致其在陆地和海洋环境中不断积累<sup>[1]</sup>。Jambeck 等估计,2010 年 192 个沿海国家产生了 2.75 亿吨塑料垃圾,其中 480 万吨至 1270 万吨最终进入海洋,在缺乏适当管理措施的情况下,到 2025 年海洋塑料碎片将增加一个数量级<sup>[2]</sup>。海洋中的微塑料来源主要有两种:一是原始制造的塑料微珠或颗粒,称为初级微塑料;二是大塑料通过紫外线照射、风浪破坏和生物降解逐渐分解成尺寸小于 5 mm 的微塑料<sup>[3-5]</sup>。目前微塑料已在各地海水<sup>[6-8]</sup>、海洋沉积物<sup>[9-11]</sup>和海洋生物<sup>[12-14]</sup>中被发现,遍布地球上的各个海域<sup>[15]</sup>。

大量研究表明,海洋中的微塑料来自陆地<sup>[16-17]</sup>,河流是陆地向海洋输送微塑料的主要途径<sup>[18]</sup>。近年来,关于世界各地河流、湖泊、河口微塑料的报道逐渐增加<sup>[19]</sup>。据相关调查报告,长江<sup>[20]</sup>、珠江<sup>[21]</sup>、鄱阳湖<sup>[22]</sup>等水域中的微塑料污染不容忽视。微塑料的溯源研究表明,淡水环境中的微塑料主要来自污水处理厂的排放<sup>[23]</sup>、水环境中塑料废物的风化<sup>[24]</sup>和降解以及土壤侵蚀和地表径流的输入<sup>[25]</sup>。河流是陆地和海洋的纽带,承载着来自多个源头的污染物,并将其释放至海洋。目前对河流微塑料的调查往往局限于大河口或特定区域的某一河段,而缺乏对小河口及整个流域的调查。

海水养殖也是海洋中微塑料的重要来源之一<sup>[26]</sup>。近年来,随着海水养殖业的快速发展,大

量的养殖设施和频繁的养殖活动都给养殖区带来了塑料污染<sup>[27-28]</sup>。养殖设施中的绳索、泡沫等会随海浪的侵蚀逐渐磨损,释放微塑料到海水之中,养殖人员的日常活动也会向海水中排放塑料垃圾。一些养殖型海湾,由于其内部结构复杂,又相对封闭,微塑料的检出浓度通常高于其他海域<sup>[29-31]</sup>。养殖型海湾的微塑料来源复杂多样,受到来自陆地、河流和海洋多源污染输入的影响,该区域内微塑料的迁移分布规律尚不明确。

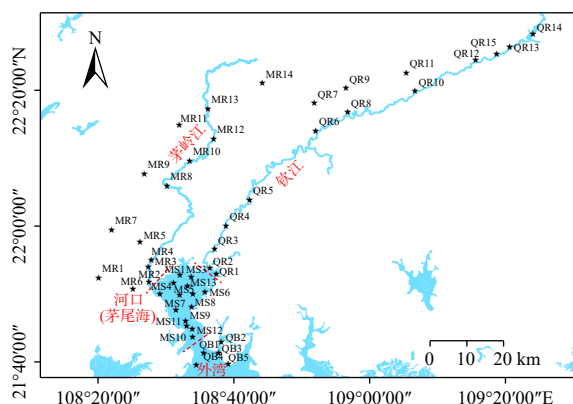
本研究分别在春、夏、秋、冬 4 个季节调查了钦州湾及其上游河流钦江和茅岭江的微塑料空间分布、季节变化和理化特征,同时收集了该流域的环境因子、社会经济活动和污染排放源信息,在此基础上,分析了社会经济活动与微塑料污染可能存在的关联。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

钦州湾是我国典型的小型养殖海湾,位于南海北部湾海域的最北端,隶属于广西钦州市。钦州湾的上游河流包括钦江和茅岭江,它们在汇入河口区域茅尾海后,通过一条狭窄的水道与北部湾相连(图 1)。广西在建的平陆运河是新中国成立以来建设的第一条运河,连通西江航运干线与北部湾海域,起于广西南宁平塘江口,沿着钦州钦江进入北部湾。钦江是钦州市的母亲河,流域面积 2457 km<sup>2</sup>,在钦州市尖山镇汇入茅尾海。茅岭江在防城港市的茅岭乡汇入茅尾海,流域面积 2959 km<sup>2</sup>,是广西重要的入海河流之一。茅尾

海是一个半封闭式内海,是中国著名的牡蛎养殖基地,受到港口、入海径流和高密度养殖活动的影响,微塑料污染较为严重<sup>[32]</sup>。钦州湾外湾与北部湾相通,是典型的亚热带河口型半封闭海湾。随着广西北部湾经济区国家战略的实施,大规模临海工业、滨海城市群等迅速扩张,大量污染物通过河流进入海湾。据统计,2002—2012年河流携带污染物的入海总量占污染物总入海量的65%~99%<sup>[33]</sup>。河流污染物俨然成为广西近海水质下降、生态环境恶化<sup>[34-35]</sup>的重要影响因素。



钦江: QR1-QR15; 茅岭江: MR1-MR14; 茅尾海: MS1-MS14;  
外湾: QB1-QB5

图1 采样站点地理位置

Fig. 1 Geographic location of sampling sites

## 1.2 样品采集

本研究于2020年9月(秋季)、2021年1月(冬季)、2021年4月(春季)和2021年7月(夏季)在钦州湾及上游河流共开展了4次表层水体微塑料调查。根据钦州湾及其上游河流的水文环境特征,设置了48个站点,包括上游河流钦江(QR)15个站点、茅岭江(MR)14个站点、承接两条入海河流的茅尾海(MS)14个站点、钦州湾外湾(QB)5个站点(图1)。每个采样站点选用地理信息系统的GCL-02坐标系统进行定位,在各采样站点使用有机玻璃式采水器采集水样50 L,并记录水体的实时流速。采样后,水样被运送至实验室,在4℃环境下存放,在1~2 d内进行后续处理和分析。

## 1.3 样品处理

使用孔径30 μm的钢筛(绍兴市上虞圣超仪器设备有限公司,中国)对采集的水样进行初步

过滤,以去除藻类等大体积杂质,润洗钢筛后保留滤后水样用以进行后续微塑料的分离和鉴定。利用抽滤装置(GAST DOA-P504-BN,美国),使用孔径20 μm、直径47 mm的滤膜(PALL,美国)对预处理后的水样进行真空抽滤。抽滤完毕后收集滤膜保存于直径75 mm的干净玻璃培养皿中,并使用封口膜(Parafilm,美国)封口。少数滤膜表层附着较多的有机物等杂质,可能影响后续微塑料的分离和鉴定。本研究采用以下方法对滤膜表层的颗粒物进行消解:使用10% KOH溶液(天津大茂化学试剂厂,中国)于60℃、120 rad/min条件下,在恒温摇床(SHZ-82,上海皓庄仪器有限公司,中国)上持续消解48~60 h。

## 1.4 微塑料的统计与鉴定

使用配备有成像系统的体式显微镜(型号SZ680,重庆奥特光学仪器有限公司)对样品滤膜上的颗粒进行形貌采集,并进行尺寸和颜色信息的统计。在显微镜下,滤膜从左到右呈“Z”字形移动,借助镊子挑选和鉴别微塑料样品。从4个流域、4个季节中随机抽取共16个站点样品,利用配备MCT检测器的傅里叶变换显微红外光谱仪(μ-FTIR)在透射模式下对其微塑料的化学成分进行测定。通过比对所得的光谱图与数据库的标准图谱,确定聚合物的类型,并将匹配率达到70%以上的成分确定为目标物质。根据微塑料形态,将微塑料分为薄膜、碎片、颗粒、纤维及不规则形态<sup>[30]</sup>。

## 1.5 数据分析

利用SPSS 22.0(IBM,美国)对数据进行分析,并借助GraphPad Prism 8绘制图表。采用单因素方差分析(Oneway ANOVA)检验不同区域的采样结果是否存在显著性差异。利用ArcGIS Pro基于逆距离加权插值对采样区域微塑料丰度在不同季节的空间分布进行空间格局模拟,采用几何间隔分类法对数据区间进行优化。阅读相关文献,收集并汇总各影响因子数据<sup>[36-40]</sup>,利用Origin 2021分析微塑料污染特征与环境因子及社会经济活动之间的Spearman等级相关系数。最后,利用Canoco 5进行冗余分析,研究监测区域微塑料污染特征与环境因子及社会经济活动之间的影响变化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 全流域微塑料丰度的区域分布

在所有采样站点的表层水体中均检出了微塑料, 其中钦江、茅岭江、茅尾海和外湾的全年微塑料丰度均值分别为 3.94 个/L、1.63 个/L、1.76 个/L 和 1.50 个/L(图 2)。钦江流域不同站点的年均微塑料丰度跨度较大(1.49~6.51 个/L), 外湾的微塑料丰度分布较集中(1.14~1.71 个/L)。钦江流域的微塑料整体水平高于钦州湾其他区域( $p<0.05$ ), 是全流域均值的 1.78 倍。

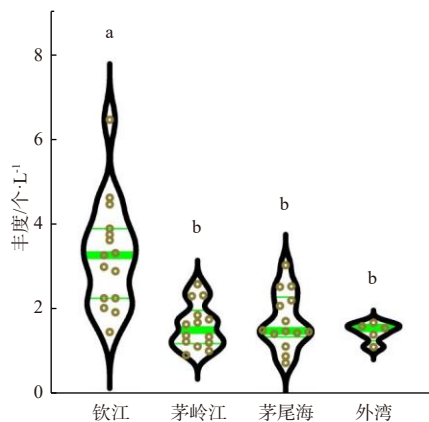


图 2 钦州湾及其上游河流表层水体中微塑料丰度的区域分布

Fig. 2 Regional distribution difference of microplastics abundances in Qinzhou bay and its rivers

### 2.2 全流域微塑料污染的季节变化特征

钦江与茅岭江的微塑料丰度呈现显著的季节性差异( $p<0.01$ ), 其中冬季的微塑料丰度最高, 其次是春季、秋季, 夏季最低(图 3)。茅尾海与钦州湾不同季节的微塑料丰度差异不明显, 冬季丰度略高于其他季节。

钦江的微塑料丰度整体高于茅岭江, 约是茅岭江的 2.42 倍。钦江微塑料丰度的最高值出现在冬季的上游河段 QR12 站点, 达到了 14.56 个/L, 最低值出现在夏季的河口区 QR3 站点, 仅为 0.12 个/L。相关研究显示, 微塑料污染的影响因素包括人为活动<sup>[41]</sup>、渔业养殖<sup>[42]</sup>、污水排放<sup>[43]</sup>和地表径流输入等<sup>[44-45]</sup>。QR12 站点位于灵山县城附近, 周围有高新科技园、学校等, 人口比较密集。春季, 钦江 QR8 站点的微塑料丰度明显高于钦州湾的其他站点。QR8 站点所在的河段蜿蜒穿过

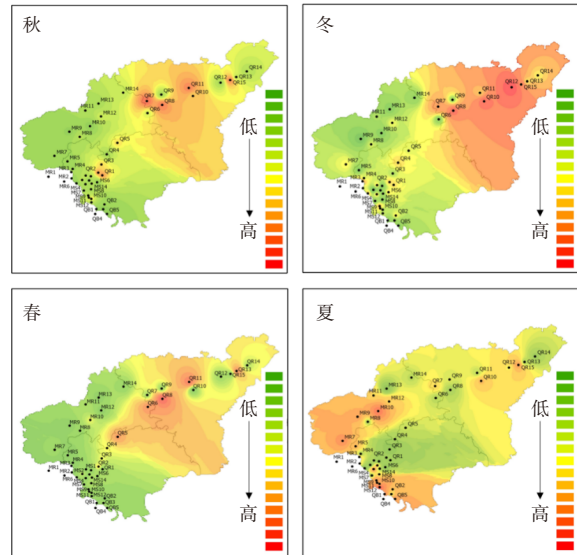


图 3 钦州湾及其入海河流表层水体中微塑料丰度的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of microplastics in surface water samples from Qinzhou bay and its rivers

灵山县陆屋镇, 是一个旅游景区, 春季气候宜人, 是人类活动频繁的时段。与我国其他河流相比, 钦江与茅岭江存在较为严重的微塑料污染。据李高俊等<sup>[46]</sup>的调查, 海南省南渡江水体微塑料的平均丰度为 0.41 个/L; 王睿涵<sup>[47]</sup>对天津近岸水域的调查显示, 微塑料丰度范围为 1.31~9.83 个/L。

在秋季、冬季和春季, 茅尾海和外湾的微塑料丰度明显低于上游河流, 而这种差异在夏季明显缩小。夏季的强降雨可能导致河流中微塑料丰度被稀释, 从而减少了上游河流与海湾之间的微塑料丰度差异。茅尾海和钦州湾作为北部湾典型的养殖水域, 渔业养殖、捕捞和各类渔业设备运行均会产生微塑料污染。茅尾海牡蛎养殖浮筏附近(MS9)和航道附近(MS12)的微塑料丰度偏高, 分别是茅尾海微塑料均值的 1.46 倍和 1.75 倍。茅尾海的微塑料污染水平接近我国其他养殖海域的水平。王帅等<sup>[48]</sup>对陵水新村湾养殖区表层海水进行调查, 微塑料丰度为 3.4~8.4 个/L, 平均值为 5.2 个/L。张钦洲等<sup>[49]</sup>对海南东部养殖区水域进行调查, 水体中的微塑料丰度范围为 1.15~9.65 个/L。

### 2.3 钦州湾及其上游河流微塑料的理化特征

钦州湾不同区域间的微塑料粒径无明显差异, 其中 1~5 mm 粒径的平均占比最高, 为 33.27%

(图 4A)。上游河流中的微塑料呈现多种颜色,其中蓝色占比最多,平均占比高达 57%,其次是透明色和黄色;在茅尾海和外湾中,微塑料的主要颜色为透明色,占比分别为 48.38% 和 42.30%,其次是蓝色(图 4B)。在钦江和茅岭江中,纤维状微塑料的占比分别高达 97.63% 和 97.49%;在茅尾海和外湾中,纤维状微塑料的占比分别高达 96.95% 和 97.05%(图 4C)。不同季节钦州湾各流域抽检样品的聚合物结果显示,人造丝(Rayon)的占比最大,为 66.67%;然后依次是聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、非塑料材质、聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)。人造丝主要用于衣物纺织,是纤维状微塑料的主要来源,其污染源可能来自衣物洗涤的生活污水<sup>[50]</sup>。PET 主要用于薄膜片材、包装瓶、电子电器、汽车配件、机械设备、塑料瓶、零件等<sup>[51]</sup>。PE 和 PP 多用于渔网、养殖塑料绳和农业覆盖膜等, PET、PE、PP 也常用于个人护理产品(如牙膏、化妆品等)<sup>[52-54]</sup>。纤维状微塑料主要来自纺织品的分解,如手套、衣物和包装袋等<sup>[40, 55-56]</sup>。此外,海水养殖渔具的磨损也会产生塑料纤维<sup>[40]</sup>。微塑料碎片可能来源于塑料制品的风化和破碎<sup>[57]</sup>。

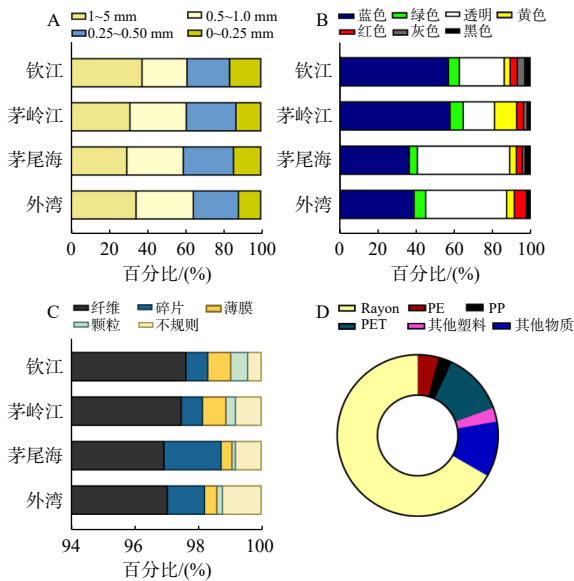


图 4 钦州湾及其入海河流表层水中微塑料的粒径、形状、颜色以及聚合物类型特征

Fig. 4 Size, shape, color and polymer composition of microplastics in surface water of Qinzhou Bay and its rivers

2.4 社会经济活动与微塑料污染特征的关系

为了分析钦州湾及其上游河流微塑料污染的控制因素,本研究对流域内微塑料污染特征(包括纤维丰度、非纤维丰度、大粒径占比和主要颜色占比)与环境因子以及社会经济活动数据的相关性进行了分析(图 5)。结果显示,微塑料丰度与集雨面积呈现一定程度的正相关关系,但缺乏统计学意义。除了自然环境因素外,流域内的人类活动和经济发展水平差异也可能影响河流水体中微塑料的丰度。结果显示,微塑料丰度与钦州湾流域内人口数量、乡镇数量呈正相关关系,与生活废水排放量呈负相关关系,但同样缺乏统计学意义。河流微塑料丰度与流域内经济发展水平的相关性表现为:与水产养殖产量呈正相关关系,与船舶排污排放量、工业废水排放量呈负相关关系,但同样缺乏统计学意义。根据上述相关性分析结果,钦州湾流域的微塑料可能主要来自沿岸居民的日常生活以及流域内的渔业活动。

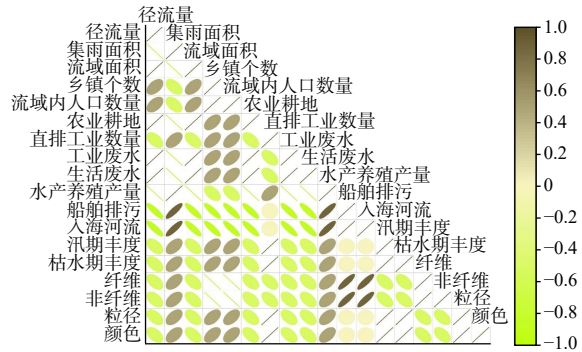


图 5 社会经济活动与微塑料性状的 Spearman 等级相关系数

Fig. 5 Spearman rank correlation coefficient between human social activities and microplastic traits

本研究通过冗余分析进一步研究了流域内社会经济活动对微塑料污染特征的影响(图 6)。

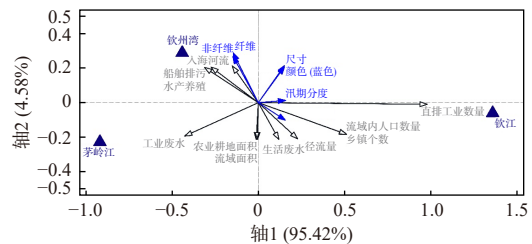


图 6 社会经济活动与微塑料特征的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis of socio-economic activities and microplastic characteristics

结果显示,流域的人口数量、乡镇数量、工业直排数量与微塑料丰度(汛期丰度、枯水期丰度)呈正相关关系,而与微塑料的形状分布(纤维丰度和非纤维丰度)呈显著负相关关系。

### 3 结论

(1)钦州湾流域的微塑料丰度范围为0.28~14.56个/L,根据污染水平从高到低依次为钦江、茅尾海、茅岭江、外湾。在这些流域中,钦江流域的微塑料丰度跨度最大,而外湾流域的微塑料丰度相对较为集中。

(2)钦江与茅岭江的微塑料丰度呈现显著的季节性差异,根据污染水平从高到低依次为冬季、春季、秋季、夏季。茅尾海与钦州湾的微塑料丰度未表现出明显的季节性差异,冬季微塑料丰度略高于其他季节。钦州湾流域的微塑料丰度可能受到地表径流和降雨等环境因素的影响。

(3)钦州湾流域的纤维状微塑料占据绝对优势,以人造丝和PET为主要聚合物类型。同时,钦州湾及其入海河流的微塑料分布呈现出靠近居民区和养殖区的站点丰度较高的趋势。微塑料丰度与流域内的人口数量、乡镇数量呈一定的正相关关系。钦州湾流域的微塑料主要来源于沿岸居民的日常生活以及流域内的渔业活动。

### 参考文献:

- [1] ANDRADY A L. Microplastics in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1596-1605.
- [2] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6223): 768-771.
- [3] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838.
- [4] RYAN P G, MOORE C J, VAN FRANEKER J A, et al. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 1999-2012.
- [5] FOK L, CHEUNG P K. Hong Kong at the Pearl River Estuary: a hotspot of microplastic pollution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99(1/2): 112-118.
- [6] LUSHER A L, TIRELLI V, O'CONNOR I, et al. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 14947.
- [7] IMHOF H K, SIGL R, BRAUER E, et al. Spatial and temporal variation of macro-, meso- and microplastic abundance on a remote coral island of the Maldives, Indian Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 116(1/2): 340-347.
- [8] 黄磊,李芊,徐向荣,等.西沙群岛海域表层海水中微塑料的组成与分布特征[J].*科学通报*, 2020, 65(24): 2627-2635.
- [9] VAN CAUWENBERGHE L, VANREUSEL A, MEES J, et al. Microplastic pollution in deep-sea sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 495-499.
- [10] PENG G Y, ZHU B S, YANG D Q, et al. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 283-290.
- [11] 刘启明,梁海涛,锡桂莉,等.厦门湾海滩微塑料污染特征[J].*环境科学*, 2019, 40(3): 1217-1221.
- [12] DESFORGES J P W, GALBRAITH M, ROSS P S. Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 69(3): 320-330.
- [13] NEVES D, SOBRAL P, FERREIRA J L, et al. Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(1): 119-126.
- [14] WANG Q, ZHU X P, HOU C W, et al. Microplastic uptake in commercial fishes from the Bohai Sea, China[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 127962.
- [15] KUKULKA T, PROSKUROWSKI G, MORÉ-T-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.
- [16] PENG L C, FU D D, QI H Y, et al. Micro- and nano-plastics in marine environment: source, distribution and threats—A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134254.
- [17] 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.
- [18] WAGNER M, SCHERER C, ALVAREZ-MUÑOZ D, et al. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2014, 26(1): 12.
- [19] LI C R, BUSQUETS R, CAMPOS L C. Assessment of microplastics in freshwater systems: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 135578.
- [20] ZHAO S Y, ZHU L X, WANG T, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(1/2): 562-568.
- [21] LIN L, ZUO L Z, PENG J P, et al. Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou city, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 375-381.
- [22] YUAN W K, LIU X N, WANG W F, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China[J]. *Ecotoxicology and En-*

- vironmental Safety, 2019, 170: 180-187.
- [23] BROWNE M A. Sources and pathways of microplastics to habitats[M]//BERGMANN M, GUTOW L, KLAGES M. Marine Anthropogenic Litter. Cham: Springer, 2015: 229-244.
- [24] EERKES-MEDRANO D, THOMPSON R C, ALDRIDGE D C. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs[J]. Water Research, 2015, 75: 63-82.
- [25] HORTON A A, SVENDSEN C, WILLIAMS R J, et al. Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK—Abundance, sources and methods for effective quantification[J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 114(1): 218-226.
- [26] 薛颖昊, 张明明, 徐志宇, 等. 水环境中微塑料的来源分布及对鱼类的生态毒性效应 [J]. 水产科学, 2023, 42(6): 1081-1090.
- [27] 林琳, 钟仕花, 陈纯, 等. 近海海域养殖源微塑料的环境赋存丰度、生物积累与生态风险 [J]. 科学通报, 2022, 67(23): 2762-2781.
- [28] ZHANG X N, LI S Q, LIU Y N, et al. Neglected microplastics pollution in the nearshore surface waters derived from coastal fishery activities in Weihai, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 144484.
- [29] XIA B, SUI Q, SUN X M, et al. Microplastic pollution in surface seawater of Sanggou Bay, China: occurrence, source and inventory[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 162: 111899.
- [30] ZHU J M, ZHANG Q, LI Y P, et al. Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 62-68.
- [31] 程姣姣, 郭献军, 李艳芳. 黄海北部四十里湾微塑料污染特征研究 [J]. 海洋环境科学, 2021, 40(1): 1-7.
- [32] ZHU J, ZHANG Q, LI Y, et al. Microplastic pollution in the Maowei Sea, a typical mariculture bay of China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 658: 62-68.
- [33] 赖春苗, 李凤华, 陈兰, 等. 广西近岸海域水环境质量变化及保护对策研究报告 [R]. 北海: 广西海洋环境监测中心站, 2013.
- [34] 陈兰, 蒋清华, 石相阳, 等. 北部湾近岸海域环境质量状况、环境问题分析及环境保护建议 [J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(6): 28-32.
- [35] 陈宪云, 陆海生, 陈波. 广西海岸带海洋环境污染现状及防治对策 [J]. 广西科学, 2014, 21(5): 555-560.
- [36] 陈群英, 洗萍, 蓝文陆. 茅岭江流域入河污染源问题诊断及防治对策研究 [J]. 环境科学与管理, 2016(4): 37-42.
- [37] 孙辰琛. 茅尾海海水环境质量响应人为活动变化的研究 [D]. 桂林: 广西师范学院, 2015.
- [38] 张栋. 钦州湾营养盐时空变化的影响因素与陆源 TDN 的量化减排研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [39] 广西水利水电欧 J. 钦江流域土地开发与水环境保护建议 [J]. 1996 (2): 37-40.
- [40] 刘俊勇. 茅尾海及其入海河流钦江中微塑料的分布特征 [D]. 桂林: 广西师范大学, 2020.
- [41] KAPP K J, YEATMAN E. Microplastic hotspots in the snake and lower Columbia rivers: a journey from the greater Yellowstone ecosystem to the Pacific Ocean[J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 1082-1090.
- [42] SONG Y K, HONG S H, JANG M, et al. Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(8): 4368-4376.
- [43] MASON S A, GARNEAU D, SUTTON R, et al. Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent[J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 1045-1054.
- [44] 张胜, 林莉, 潘雄, 等. 汉江(丹江口坝下—兴隆段)水体中微塑料的赋存特征 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(5): 1203-1210.
- [45] NITHIN A, SUNDARAMANICKAM A, SATHISH M. Seasonal distribution of microplastics in the surface water and sediments of the Vellar estuary, Parangipettai, southeast coast of India[J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 174: 113248.
- [46] 李高俊, 熊雄, 詹晨熙, 等. 南渡江水体微塑料污染现状研究 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 205-212.
- [47] 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.
- [48] 王帅, 史云峰, 王慧, 等. 陵水新村湾水产养殖区表层海水微塑料赋存特征 [J]. 海南热带海洋学院学报, 2021, 28(5): 24-31.
- [49] 张钦洲, 刁晓平, 谢嘉, 等. 海南东部海水养殖区水体、沉积物中微塑料的分布特征 [J]. 海南大学学报(自然科学版), 2020, 38(2): 159-165.
- [50] BROWNE M A, CRUMP P, NIVEN S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(21): 9175-9179.
- [51] 张婉晴. 辽西海洋垃圾和微塑料时空分布特征与来源分析 [D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
- [52] 王兆清, 张玉兰, 康世昌, 等. 全球河流微塑料污染研究进展 [J]. 自然杂志, 2021, 43(4): 251-258.
- [53] 冯三三, 卢宏伟, 姚天次, 等. 青藏高原典型区微塑料分布特征及来源分析 [J]. 地理学报, 2021, 76(9): 2130-2141.
- [54] LIU S, CHEN H, WANG J Z, et al. The distribution of microplastics in water, sediment, and fish of the Dafeng River, a remote river in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 228: 113009.
- [55] DRIS R, GASPERI J, SAAD M, et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?[J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 104(1/2): 290-293.
- [56] LIU K, WANG X H, FANG T, et al. Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai[J]. Science of the Total Environment, 2019, 675: 462-471.
- [57] 何文宣, 李垒, 李久义, 等. 密云水库中微塑料的污染特征及生态风险评估 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(12): 122-135.