



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

## 《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：舟山海域微塑料时空分布及溯源分析  
作者：陶玉婕，许莉，赵兴贵，刘宪斌，邓邦平，刘力嘉  
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20250069  
收稿日期：2025-04-07  
网络首发日期：2026-01-29  
引用格式：陶玉婕，许莉，赵兴贵，刘宪斌，邓邦平，刘力嘉. 舟山海域微塑料时空分布及溯源分析[J/OL]. 天津科技大学学报.  
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250069>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



DOI: 10.13364/j.issn.1672-6510.20250069

## 舟山海域微塑料时空分布及溯源分析

陶玉婕<sup>1</sup>, 许莉<sup>3</sup>, 赵兴贵<sup>1</sup>, 刘宪斌<sup>1</sup>, 邓邦平<sup>2</sup>, 刘力嘉<sup>2</sup>

(1. 天津市海洋环境保护与修复技术工程中心, 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室, 上海 201206; 3. 国家海洋技术中心战略与规划研究室, 天津 300112)

**摘要:** 作为海洋环境中广泛存在的新型污染物, 微塑料的分布特征研究日益受到重视。为揭示舟山海域表层海水中微塑料的时空分布特征, 通过春夏双季采样及实验室消解浮选处理、目视鉴别以及聚合物成分鉴定等方法, 探究微塑料污染的时空分布规律, 进而对可能的输入途径进行溯源解析。结果表明, 海域微塑料丰度介于 1.45~7.30 个/L 之间, 且春季丰度显著高于夏季。从微塑料特征来看, 微塑料以纤维状为主, 人造丝(Rayon)是主要类型, 粒径以小于 0.5 mm 为主, 颜色以透明占主导地位。研究揭示了舟山海域微塑料时空分布特征, 为该海域微塑料污染监测、风险评估及防控策略制定提供基础数据。

**关键词:** 微塑料; 时空分布; 溯源分析; 主成分分析

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)00-0000-00

### Analysis of the Spatiotemporal Distribution and Influencing Factors of Microplastics in the Zhoushan Sea Area

TAO Yujie<sup>1</sup>, XU Li<sup>3</sup>, ZHAO Xinggui<sup>1</sup>, LIU Xianbin<sup>1</sup>, DENG Bangping<sup>2</sup>, LIU Lijia<sup>2</sup>

(1. Tianjin Marine Environmental Protection and Restoration Technology Engineering Center, College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, MNR, Shanghai 201206, China; 3. Department of Strategic Planning Research, National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

**Abstract:** As a new type of pollutant widely existing in the marine environment, the research on the distribution characteristics of microplastics has been increasingly valued. To reveal the spatiotemporal distribution characteristics of microplastics in the surface seawater of Zhoushan sea Area, sampling was conducted in both spring and summer, followed by laboratory digestion and flotation treatment, visual identification, and polymer component analysis. The aim was to explore the spatiotemporal distribution patterns of microplastic pollution and further trace the possible input pathways. The results showed that the abundance of microplastics in the sea area ranged from 1.45 to 7.30 items/L, with a significantly higher abundance in spring than in summer. In terms of microplastic characteristics, fibers were the dominant form, with rayon being the main type. The particle size was mainly less than 0.5 mm, and transparent color was dominant. This study revealed the spatiotemporal distribution characteristics of microplastics in Zhoushan sea Area, providing basic data for the monitoring, risk assessment, and prevention and control strategy formulation of microplastic pollution in this sea area.

**Key words:** microplastics; spatiotemporal distribution; source apportionment analysis; principal component analysis

微塑料(microplastics, MPs)是粒径小于 5 mm 的塑料碎片, 微塑料具有环境持久性、生物累积性和

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-10-13

基金项目: 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室研究基金项目(MEMRT202311)

作者简介: 陶玉婕(2000—), 女, 河南人, 硕士研究生; 通信作者: 刘宪斌, 教授, 1xb0688@tust.edu.cn

生态毒性,已成为全球性海洋环境问题之一<sup>[1]</sup>。全球每年约 2.75 亿吨塑料垃圾进入自然环境<sup>[2]</sup>,其中大量微塑料通过水循环进入海洋。近岸海域因人类活动密集而成为微塑料污染的重点区域。

水文气候是影响海洋微塑料分布的重要因素之一。不同季节的风向、海流、水温等环境因素的变化,都会对微塑料的漂移、沉降和分解等过程产生影响,从而导致微塑料在海洋中的分布和数量发生变化。例如,丰水期地表径流增强,陆源塑料垃圾破碎后随河流的输入量激增<sup>[3-4]</sup>;而台风频发的夏季可能加剧海面悬浮微塑料的扩散与再分布<sup>[5]</sup>。

舟山海域地处长江入海口与东海交汇处,是中国重要的渔业基地和航运枢纽,其独特的地理位置使其面临陆源与海源污染的双重压力。研究表明,长江等大型河流是微塑料向海洋输送的主要通道<sup>[6]</sup>,而舟山海域作为长江冲淡水的首要承接区,可能成为微塑料的“汇”与“源”。尽管近年来已有一些研究在舟山开展了微塑料的考察和监测工作,但这些研究大多集中在河流及微塑料的空间分布等方面<sup>[7-11]</sup>,对舟山海域表层海水微塑料的时空对比特征研究仍显不足。

本文以舟山海域表层海水中的微塑料为研究对

象,基于野外考察数据,通过对比舟山海域表层海水在不同季节的微塑料丰度、颜色、形状和粒径等特征,揭示微塑料在该海域的时空变化规律和潜在影响因素,初步解析了舟山海域微塑料的来源。为舟山海域微塑料分布特征提供科学依据,促进该海域生态环境保护和可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区域位于浙江省舟山市周边海域,海域径流量有明显的季节变化,丰水期集中于 5—10 月,其径流量占该区域全年总量的 55%~65%,其中 6 月达到径流峰值;枯水期则分布于 11 月至次年 4 月<sup>[12]</sup>。研究区域的地理范围为 29.86°N~30.87°N、121.50°E~122.50°E。研究区域辐射长江口、杭州湾和甬江口等重要河口及邻近海域,且涉及用海活动频繁的四类海洋功能区。共布设 7 个采样站位,采样站位的位置、位置特征和功能定位见表 1。采样时间包括春季(2024 年 4 月)和夏季(2024 年 7 月)。

表 1 采样站位的位置、位置特征和功能定位

Tab. 1 Location, geospatial characteristics, and functional positioning of the sampling stations

| 站位号 | 经度       | 纬度      | 位置特征和功能定位                |
|-----|----------|---------|--------------------------|
| E   | 122.13°E | 30.87°N | 毗邻长江河口南侧海域               |
| I1  | 122.13°E | 30.37°N | 邻近岱山西北,功能定位为工业与城镇用海区     |
| I2  | 121.50°E | 30.35°N | 位于杭州湾南岸海域,功能定位为工业与城镇用海区  |
| P1  | 122.00°E | 30.75°N | 位于洋山港区,功能定位为港口航运区        |
| P2  | 121.75°E | 30.08°N | 位于镇海港区,邻甬江河口,功能定位为港口航运区  |
| T   | 122.42°E | 29.86°N | 位于普陀区东侧近岸海域,功能定位为旅游休闲娱乐区 |
| A   | 122.50°E | 30.83°N | 位于嵊泗县以北海域,功能定位为农渔业区      |

### 1.2 样品采集

使用 5 L 不锈钢采水器采集深度 5~10 cm 的表层海水,每个站位采集海水体积为 20 L。在水样采集之前,先用原位海水将 20 L 储水桶清洗 3 次并冲洗不锈钢采水器。每个站位采样开始前,需要重复以上步骤,避免交叉污染。用蠕动泵抽取海水,蠕动泵进水口一侧连接不锈钢采水器,出水储存在 20 L 储水桶中,通过孔径为 50  $\mu\text{m}$ 、直径为 20 cm 的不锈钢筛网进行过滤。不锈钢筛网上的残留物质用去离子水冲洗 3 次,储存至 500 mL 棕色无菌玻璃瓶中低温保存。

### 1.3 样品处理

将采集的上述经过滤冲洗后的水样进行过滤,过滤至孔径为 50  $\mu\text{m}$ 、直径为 6 cm 的不锈钢筛网上,不锈钢筛网置于烧杯中并加入 100 mL 体积分数 30% 的  $\text{H}_2\text{O}_2$  溶液进行 24 h 以上的消解,加入 0.05 mol/L  $\text{FeSO}_4$  溶液作为催化剂。考虑到  $\text{H}_2\text{O}_2$  被持续消耗可能造成的局部或整体浓度不足进而导致反应不充分,故进行二次添加,至溶液不冒气泡为止,确保消解充分。为了加快反应速率且避免杂质进入,用铝箔包裹烧杯仅预留一个出气口。消解完成后用超纯水多次冲洗烧杯内的筛网。针对个别不锈钢筛网上微塑料冲洗不掉的情况,对筛网进行 1 min 的超声处理,确保筛网上样品全部转移至烧杯。将烧杯中

液体通过不锈钢筛网进行过滤,并多次使用超纯水冲洗烧杯,使烧杯内壁附着物转移至筛网表面。随后用密度为 1.8 g/mL 的碘化钠溶液对筛网截留物进行冲洗,使其全部转移至烧杯内,向烧杯中补加相同密度的碘化钠溶液进行浮选。静置至澄清后收集上清液进行过滤,滤膜选用孔径 50  $\mu\text{m}$ 、直径 25 mm 的银滤膜,收集抽滤后的滤膜,转移到带盖玻璃培养皿中密封保存,待滤膜表面水分风干后开展下一步检测分析。

#### 1.4 微塑料计数与表征分析

使用 SZX7 型体视显微镜(日本 Olympus 公司)对滤膜进行观察,对观察到的微塑料以及疑似的微塑料进行记录,包括数量、颜色、形状、大小等信息,使用照相软件对所观察到的微塑料进行图像记录。利用 Spotlight 400 型傅里叶变换红外光谱化学成像系统(美国 PerkinElmer 公司)对滤膜上的所有颗粒进行无差别扫描与分析,以期实现聚合物成分的全面鉴定。扫描范围为 600~4000  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为 4  $\text{cm}^{-1}$ ,扫描次数为 16 次。将样品产生的红外光谱谱图与标准图库进行对比,确定微塑料的类型,样品谱图匹配度在 75% 以上的为可信数据。

#### 1.5 质量控制与数据处理

在野外采样和实验室分析阶段,所有工具和容器均使用超纯水彻底清洗 3 次,玻璃器皿烘干后用铝箔包裹;实验人员全程穿纯棉实验服并戴丁腈手套。实验前用乙醇擦拭超净台 3 次,限制人员流动并关闭门窗;所有样品处理步骤均在超净台内进行。设置 3 个全程序空白(使用超纯水代替海水)同步分析,根据空白实验结果,证实实验过程中未发生微塑料污染。

研究中表层水体的微塑料丰度用每升水中平均微塑料的数量(个/L)表示。基于 Origin 2025 进行数据统计分析并生成专业图表,同时结合 Microsoft Excel 2021 完成基础数据处理及可视化分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微塑料的时空分布特征

#### 2.1.1 微塑料的丰度水平

舟山海域表层海水中所有采样站点的水体样品都能检出微塑料,微塑料的时空分布特征如图 1 所示。分析结果表明,舟山海域采样站位的表层海水中的微塑料丰度为 1.45~7.30 个/L,春季微塑料丰度为 2.10~7.30 个/L,平均值为(4.49 $\pm$ 1.68) 个/L;夏季微塑料丰度为 1.45~3.00 个/L,平均值为(2.02

$\pm$ 0.63) 个/L。

相较于国内外其他海域的研究,舟山海域表层海水的微塑料丰度为中等水平,高于东海杭州湾((1.4 $\pm$ 0.37) 个/L)<sup>[13]</sup>、南海北部湾((0.67 $\pm$ 1.09) 个/L)<sup>[14]</sup>。与国外海域相比,高于印度中西部沿岸((0.06~0.18) 个/L)<sup>[15]</sup>,远低于韩国沿岸((20~4280) 个/L)<sup>[16]</sup>和波罗的海((100~10000) 个/L)<sup>[17]</sup>。

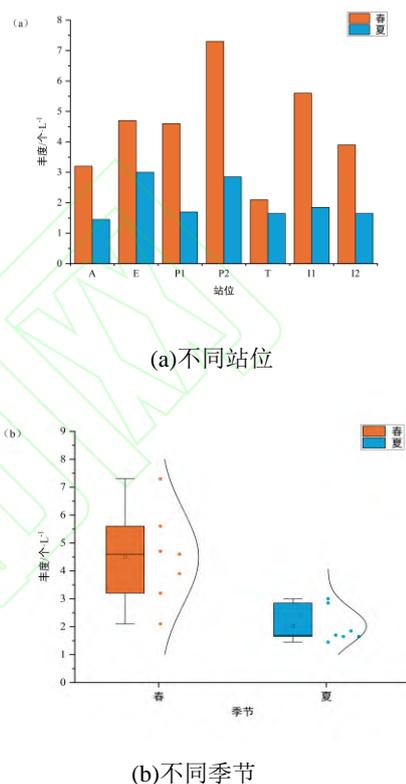


图 1 舟山海域微塑料的时空分布特征

Fig. 1 Spatial and temporal distribution characteristics of microplastics in the Zhoushan sea area

#### 2.1.2 微塑料的时空变化特征

舟山海域表层海水中微塑料丰度的季节变化明显,其中 P2、I1、P1 站位差异较大,T 站位的季节差异最小。春季时,P2 站位的丰度最高,其次是 I1 和 E 站位,T 站位的丰度最低。不同站位间的丰度差异也较大,反映了微塑料分布的空间异质性。夏季时,所有站位丰度分布较均匀,E 站位和 P2 站位丰度相对较高。E 站位和 P2 站在春夏季均展现出显著的高丰度特征,T 站位及 A 站位丰度相对较低。河口位于河流和海洋生态系统的交汇处,且受到人类活动、水流冲刷和潮汐作用,成了微塑料聚集的热点区域<sup>[18]</sup>。位于长江口南侧的 E 站位和位于甬江口北侧的 P2 站位,属于典型的受河海交互作用影响的区域。

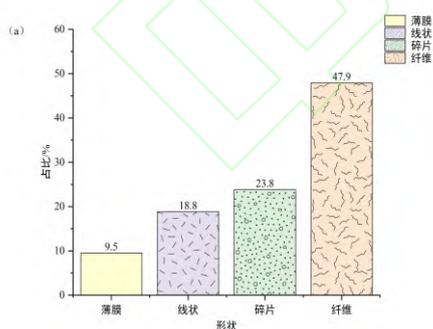
春季的微塑料丰度普遍高于夏季的,这与季节

变化导致的微塑料来源和分布差异有关。舟山海域受到季风影响,春季多西北风,夏季多东南风<sup>[19]</sup>。在春季,河流的水动力环境趋于稳定,且在风力作用下,近岸高浊度水体产生东向表层输运,导致多数微塑料颗粒富集于表层水体。夏季降水过程频发降水引发的湍流不仅使微塑料难以聚集,还促进水相与底泥之间的物质交换过程,致使表层微塑料丰度呈现下降趋势,而且夏季风向转东南风,外海的水体在潮流主导下向西北流动。尽管降水引入部分大气中的微塑料及陆源微塑料,但该时期充沛的径流输入具有显著稀释效应<sup>[20]</sup>。有研究<sup>[21]</sup>对黄海水体微塑料污染的季节动态特征进行分析,揭示微塑料丰度在枯水期(1月)较丰水期(8月)呈现显著升高趋势,本研究观测结果与该结论一致。类似的研究<sup>[22]</sup>发现,葡萄牙河流域旱季水体微塑料丰度较雨季呈现显著升高趋势。然而,珠江口区域同类研究却呈现反向变化,由于该巨型河口区域人类活动密集,降水将巨量陆源微塑料输入河口,其输入强度足以掩盖稀释效应,枯水期微塑料丰度(2月)低于丰水期丰度(7月)<sup>[23]</sup>。因此,研究微塑料污染的时空分布特征有助于系统掌握其污染水平。

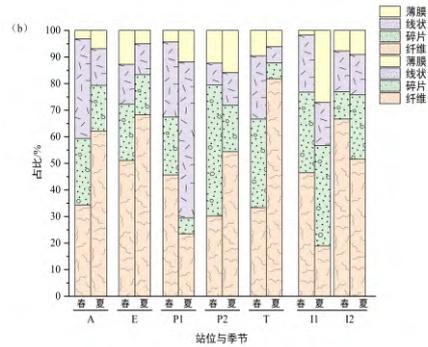
## 2.2 微塑料的形态及化学组成

### 2.2.1 微塑料的形状特征

舟山海域微塑料形状分布特征如图2所示。由图2可知:纤维状微塑料在所有站位中均占据一定比例,总占比为47.9%,其次为碎片状的微塑料,占到23.8%。线状和薄膜状的微塑料则分别占比18.8%和9.5%。



(a)微塑料的总形状组成



(b)各站位微塑料的形状组成

图2 舟山海域微塑料的形状分布特征

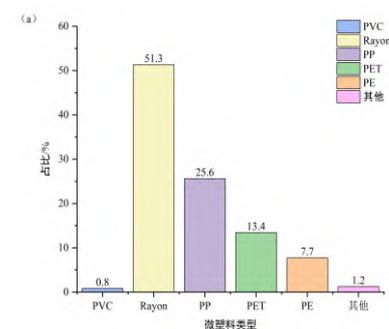
Fig. 2 Shape distribution characteristics of microplastics in the Zhoushan sea area

已有研究<sup>[24]</sup>表明,纤维状微塑料在海洋和淡水系统中的占比较大,约占所有检测到微塑料总量的52%。水体中纤维状微塑料的主要来源包括日常生活中的衣物洗涤、水产养殖作业以及渔业生产活动<sup>[25]</sup>。这类纤维状微塑料呈现细长的形态,在相同体积下比其他形状的塑料颗粒更难下沉,因此能够长时间漂浮在海水表层<sup>[26]</sup>。其广泛存在对海水生态安全构成显著威胁,其细长的物理特性更易被水生生物误食并产生生物累积效应<sup>[27-29]</sup>。除纤维状微塑料外,碎片状微塑料也是水体中常见的微塑料类型。农业生产中会广泛使用塑料地膜和大棚覆盖材料,这些塑料废弃物在日晒雨淋下逐渐老化碎裂,最终分解成细小的碎片状塑料进入河流、湖泊等水体<sup>[30]</sup>。由图1可知:季节和海洋功能区类型显著影响微塑料的分布特征。夏季径流量增大致使陆源输入增加<sup>[31]</sup>,进而导致夏季纤维状微塑料的数量在多数站位中有所增加,特别是在E站位增加幅度较大。碎片状微塑料在春季的占比明显更高,这尤其体现在港口航运区(如站位P1、P2)。这主要是因为春季航运活动频繁,导致了固体废弃物的增加<sup>[32-33]</sup>。同时,薄膜类微塑料在不同季节的占比则变化不大。

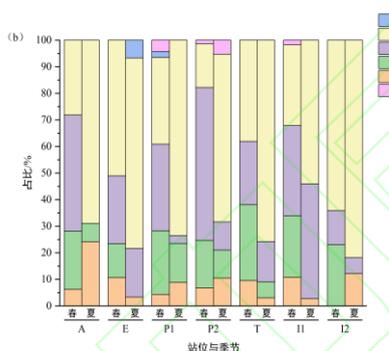
### 2.2.2 微塑料的化学组成特征

舟山海域微塑料的类型分布特征如图3所示,4种主要微塑料样品的红外光谱图及匹配度如图4所示。经鉴定,本次考察共检出10种微塑料(所有计算总种数),主要包括人造丝(rayon)、聚氯乙烯(PVC)、聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET);此外,还有聚氨基甲酸酯(PU)、尼龙(PA)、聚苯乙烯(PS)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚乙烯醇(PVA),这些塑料每种数量不超过2个,本文将其归为其他类。

由图3可知: 舟山海域表层海水中以 Rayon (51.3%)为主, 这与前人<sup>[34]</sup>在广州近岸海域的研究结果类似, 其次为 PP(25.6%)。人造丝在春季和夏季都占据主导地位, 夏季数量较春季有所增加, PP、PET 的占比在部分站位有所减少, 而 PE 的占比在部分站位有所增加, 其他成分的数量仍然较少。表层海水中微塑料以 PP、PE 等低密度类型为主导<sup>[21]</sup>, 而 PVC 等较高密度聚合物的检出率相对较低。这一现象主要是因为较大密度的微塑料在重力影响下会逐渐下沉并滞留于沉积物中, 从而限制了其在水体中的水平扩散能力<sup>[35]</sup>。



(a)微塑料的总类型组成



(b)各站位微塑料的类型组成

图3 舟山海域微塑料的类型分布特征

Fig. 3 Distribution characteristics of microplastic types in the Zhoushan sea area

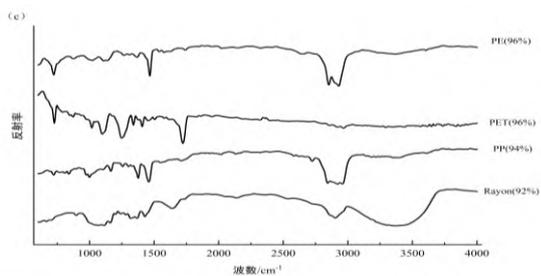


图4 4种主要微塑料样品的红外光谱图及匹配度

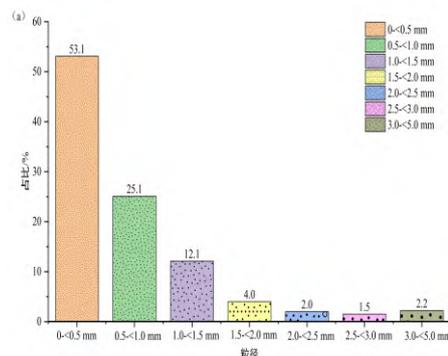
Fig. 4 FTIR spectra and matching rates of the four main types of microplastic samples

人类活动是微塑料的重要来源。rayon 主要源自

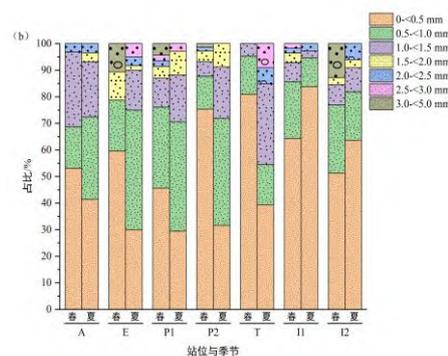
纺织品、衣物等的破裂磨损, 通过日常清洗衣物进入水体<sup>[36]</sup>。PET 广泛应用于纺织工业(如聚酯纤维衣物、地毯及家居纺织品)<sup>[37]</sup>和包装领域(如矿泉水瓶)<sup>[38]</sup>, 其非降解特性导致纺织品洗涤过程中释放的微纤维及环境风化后破碎的塑料瓶碎片成为水体中 PET 类微塑料的重要来源。PE、PP 因其低密度及经济性优势, 成为农用覆盖膜、温室大棚、包装袋等的材料。这种材料在自然环境中呈现显著的非降解性, 导致微塑料碎片在水体和土壤中长期赋存, 成为微塑料污染的重要人为输入源<sup>[39]</sup>。PP、PE 也常用于制作渔线、渔网等<sup>[40]</sup>。大约 70% 的 PVC 产品用于建筑行业, 主要用作门窗型材、供水和污水管道、电缆绝缘层、地板衬里和屋顶膜<sup>[41]</sup>。微塑料的生态风险与其化学组分密切相关, PVC 即使低丰度暴露也可能表现出比高丰度 PP 和 PE 更强的生物毒性, 在风险评估中需重点关注此类高毒性塑料<sup>[42]</sup>。

### 2.2.3 微塑料粒径特征

舟山海域微塑料的粒径分布特征如图5所示。本研究将微塑料尺寸划分为7个类别, 0~<0.5 mm 的微塑料占比最大, 达到 53.1%, 其次是 0.5~<1.0 mm 和 1.0~<1.5 mm 的微塑料, 占比分别为 25.1% 和 12.1%; 1.5~<2.0 mm、2.0~<2.5 mm、2.5~<3.0 mm 和 3.0~5.0 mm 的微塑料合计仅占 9.7%。由此可见, 随着粒径的增大, 微塑料丰度呈现降低的趋势。



(a)微塑料的总粒径组成



(b)各站位微塑料的粒径组成

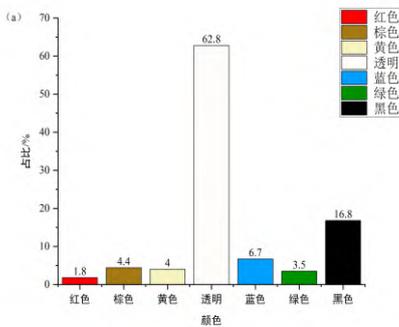
图5 舟山海域微塑料的粒径分布特征

Fig. 5 Size distribution characteristics of microplastics in the Zhoushan sea area

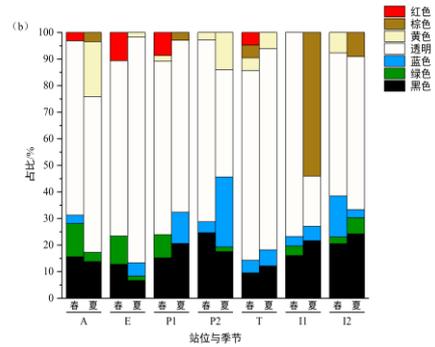
研究<sup>[43]</sup>表明,在紫外线引发的光氧化降解、水力机械摩擦及波浪剪切力等多重环境应力协同作用下,大尺寸塑料制品逐步分解破碎,最终形成粒径小于5.0 mm的次生微塑料。根据数据分析,春季和夏季各粒径范围微塑料的总占比呈现显著季节性差异:相较于春季,夏季0~<0.5 mm粒径的微塑料占比减少;同时中等颗粒占比大幅提升(如T站位),反映出夏季水流增强促进小粒径微塑料的扩散及中等颗粒输入。

2.2.4 微塑料颜色特征

舟山海域微塑料的颜色分布特征如图6所示,本次考察共观察到7种微塑料颜色,颜色类别中的“透明”特指未着色或呈浅灰白色的微塑料,下文均统一简称为“透明”。透明微塑料在春季和夏季均占主导(分别占总量的58.0%和67.2%),其次为黑色微塑料(春季占15.9%,夏季占17.5%),彩色微塑料(红色、黄色、棕色、蓝色和绿色)分别占春夏季总体的26.1%和15.3%。此次考察以透明微塑料为主,与此前在长江口水域开展的同类考察结果<sup>[44]</sup>具有一致性,原因可能是因为在紫外线、温度等环境因素的作用下发生老化,通过化学键断裂及污染物吸附等过程,可引起颜色向透明转变或变黄、黑化<sup>[45]</sup>。夏季彩色微塑料占比更高,可能由于微塑料来源更广泛。微塑料的颜色特性对其被水生生物误食的概率具有显著影响,但不同研究结论存在争议。有研究<sup>[46]</sup>表明透明微塑料更易被牡蛎、鱼类等生物误认为是猎物而摄入,然而,Aliabad等<sup>[47]</sup>通过实验发现,彩色微塑料在海洋生态系统中表现出更高的误食率。



(a)微塑料的总颜色组成



(b)各站位微塑料的颜色组成

图6 舟山海域微塑料的颜色分布特征

Fig. 6 Color distribution characteristics of microplastics in the Zhoushan sea area

2.3 微塑料潜在来源分析

通过主成分分析(PCA)对表层海水中微塑料的赋存形态进行研究,综合分析了丰度、粒径、形状、类型和颜色等变量之间的关系,结果如图7所示。PCA将多维变量降维为两个主成分(PC1和PC2),PC1(横轴)解释了总方差的43.4%,PC2(纵轴)解释了24.5%,累计解释总方差的67.9%。绿色、棕色、2.0~3.0 mm的粒径与丰度呈负相关,其余都与丰度呈现正相关。

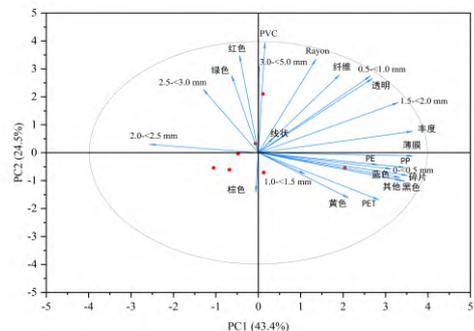


图7 舟山海域微塑料形态特征的主成分分析

Fig. 7 Principal component analysis of morphological characteristics of microplastics in the Zhoushan sea area

海洋微塑料污染中约80%的陆源污染与人类密集活动相关<sup>[48]</sup>。舟山海域毗邻长江三角洲经济带,周边分布着长江、钱塘江等入海河流,使其成为典型陆源微塑料输入海域<sup>[49]</sup>。纤维和rayon相关性高,生活污水特别是衣物洗涤废水是纤维状微塑料的重要污染源,这类废水中含有大量脱落的纺织纤维<sup>[36]</sup>,这些纤维主要经由位于长江口E站位的径流输入及位于工业与城镇用海区I站位的生活污水。同时,环境中的聚丙烯(PP)和聚乙烯(PE)类微塑料与薄膜具有显著相关性,在邻近河口的E、P2站位处含量较

高,其主要来源包括农业生产中使用的覆盖地膜、温室大棚塑料膜以及各类货物塑料包装膜等材料的破碎和风化之后的径流输入<sup>[39]</sup>。

海洋活动产生的塑料污染是海源微塑料输入的主要途径<sup>[50]</sup>。碎片状与PP相关性强,碎片状及PP微塑料在港口航运区P1和P2站位微塑料丰度更高,其主要来源与船舶排放的塑料碎片有关<sup>[32]</sup>。纤维状与PP、PE有相关性,在站位A,农渔业区纤维占比高,PP、PE含量较高,符合渔业活动特征,其来源为渔业活动的渔网、渔线<sup>[40]</sup>。渔业常用的合成绳索和渔网正是由PP和PE制成,它们在使用和废弃过程中会因磨损而释放大量纤维。位于旅游休闲娱乐区的T站位及位于工业与城镇用海区的I站位中碎块、PE、PET占比显著。碎块状的PE和PET来自近岸休闲活动中产生的包装袋和饮料瓶等塑料废弃物<sup>[39]</sup>,它们在岸线经过紫外线辐射脆化和物理挤压后,易破碎形成不规则碎块。

### 3 结 论

(1)相较于国内外其他海域,舟山海域表层海水存在中等水平的微塑料污染。该海域表层海水微塑料丰度为1.45~7.30个/L,春季平均丰度达(4.49±1.68)个/L,显著高于夏季的(2.02±0.63)个/L。位于长江口南侧的E站位和位于甬江口北侧的P2站位,受河海交互作用影响较大,在春夏季均展现出显著的高丰度特征。从污染特征来看,微塑料以纤维状结构为主,类型以人造丝(rayon)成分为主,粒径以小于0.5mm为主,颜色以透明占主导地位。

(2)结合微塑料的物理特征及区域条件分析,污染源主要来自两个方面:一是通过径流输入的陆源微塑料,主要源自纺织品和衣物的磨损,通过日常生活洗衣废水等途径进入水体;二是海源微塑料输入,港口航运活动和渔业活动是海洋源塑料污染的直接来源。研究揭示了舟山海域微塑料时空分布特征,为该海域微塑料污染监测、风险评估及防控策略制定提供基础数据。

#### 参考文献:

[1] ROCHMAN C M. Microplastics research: from sink to source[J]. *Science*, 2018, 360(6384): 28–29.  
 [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] 李海燕, 杨小琴, 简美鹏, 等. 城市水体中微塑料的来源、赋存及其生态风险研究进展[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(2): 407–420.  
 [4] SCHMIDT L K, BOCHOW M, IMHOF H K, et al. Multi-temporal surveys for microplastic particles enabled by a novel and fast application of SWIR imaging spectroscopy: study of an urban watercourse traversing the city of Berlin, Germany[J]. *Environmental pollution*, 2018, 239: 579–589.  
 [5] STANTON T, JOHNSON M, NATHANAIL P, et al. Freshwater microplastic concentrations vary through both space and time[J]. *Environmental pollution*, 2020, 263: 114481.  
 [6] WU P F, FAN Y C, ZHANG X X, et al. Seasonal dynamics, tidal influences, and anthropogenic impacts on microplastic distribution in the Yangtze River estuary: a comprehensive characterization and comparative analysis[J]. *Journal of hazardous materials*, 2024, 476: 135167.  
 [7] GE X Y, XU F, LI B, et al. Unveiling microplastic distribution and interactions in the benthic layer of the Yangtze River estuary and East China Sea[J]. *Environmental science and ecotechnology*, 2024, 20: 100340.  
 [8] CAO L, CHEN W, WANG Y D, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of microplastics and their influencing factors in the Lincheng River, Zhoushan City, China[J]. *Processes*, 2023, 11: 1136.  
 [9] 王若琪, 古海玲, 于建民, 等. 舟山近海表层水微塑料污染状况调查与评估[J]. *中国水运(下半月)*, 2019, 19(18): 124–126.  
 [10] DUAN Y Y, GAO H Y, LIU Y Q, et al. Microplastics pollution in aquaculture areas and the synergistic effects with antibiotics and heavy metals: a case study in Zhoushan, China[J]. *Regional studies in marine science*, 2025, 104281.  
 [11] 周筱田, 赵雯璐, 李铁军, 等. 浙江省近岸海域表层水体中微塑料分布与组成特征[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47(3): 371–379.  
 [12] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.  
 [13] WANG T, HU M H, SONG L L, et al. Coastal zone use influences the spatial distribution of microplastics in Hangzhou Bay, China[J]. *Environmental pollution*, 2020, 266(2): 115167.  
 [14] ZHU Z H, WEI H H, HUANG W, et al. Occurrence of

- microplastic pollution in the Beibu Gulf, the northern South China Sea[J]. *Frontiers in marine science*, 2022, 8: 821008.
- [15] GUPTA P, SAHA M, RATHORE C, et al. Spatial and seasonal variation of microplastics and possible sources in the estuarine system from central west coast of India[J]. *Environmental pollution*, 2021, 288: 117665.
- [16] JUNG J W, PARK J W, EO S, et al. Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep sea waters with a consideration of environmentally relevant size and shape[J]. *Environmental pollution*, 2020, 270: 116217.
- [17] GOROKHOVA E. Screening for microplastic particles in plankton samples: how to integrate marine litter assessment into existing monitoring programs?[J]. *Marine pollution bulletin*, 2015, 99(1/2): 271–275.
- [18] CHEUNG P K, FOK L, HUNG P L, et al. Spatio-temporal comparison of neustonic microplastic density in Hong Kong waters under the influence of the Pearl River estuary[J]. *Science of the total environment*, 2018, 628: 731–739.
- [19] 赵鑫, 孙志林, 王珊珊, 等. 舟山大、小鱼山岛海域水沙特征及影响因素[C]//长江水利委员会长江科学院. 第十届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 武汉:中国水利学会泥沙专业委员会, 2017: 602–606.
- [20] WANG G L, LU J J, LI W J, et al. Seasonal variation and risk assessment of microplastics in surface water of the Manas River Basin, China[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2021, 208: 111477.
- [21] JIANG Y, ZHAO Y N, WANG X, et al. Characterization of microplastics in the surface seawater of the South Yellow Sea as affected by season[J]. *Science of the total environment*, 2020, 724: 138375.
- [22] RODRIGUES M O, ABRANTES N, GONÇALVES F J M, et al. Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal)[J]. *Science of the total environment*, 2018, 633: 1549–1559.
- [23] MALLI A, CORELLA-PUERTAS E, HAJJAR R, et al. Transport mechanisms and fate of microplastics in estuarine compartments: a review[J]. *Marine pollution bulletin*, 2022, 177: 113553.
- [24] XUE B M, ZHANG L L, LI R L, et al. Underestimated microplastic pollution derived from fishery activities and “Hidden” in deep sediment[J]. *Environmental science & technology*, 2020, 54(4): 2210–2217.
- [25] BURNS E E, BOXALL A B A. Microplastics in the aquatic environment: evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps[J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2018, 37(11): 2776–2796.
- [26] WANG Z F, SU B B, XU X Q, et al. Preferential accumulation of small (<300 μm) microplastics in the sediments of a coastal plain river network in eastern China[J]. *Water research*, 2018, 144: 393–401.
- [27] WEINSTEIN J E, ERTEL B M, GRAY A D. Accumulation and depuration of microplastic fibers, fragments, and tire particles in the eastern oyster, *Crassostrea virginica*: a toxicokinetic approach[J]. *Environmental pollution*, 2022, 308: 119681.
- [28] GRAY A D, WEINSTEIN J E. Size- and shape-dependent effects of microplastic particles on adult daggerblade grass shrimp (*Palaemonetes pugio*)[J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2017, 36(11): 3074–3080.
- [29] QIAO R X, DENG Y F, ZHANG S H, et al. Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish[J]. *Chemosphere*, 2019, 236: 124334.
- [30] 李思敏, 赵瑞雪, 孟鑫, 等. 漳河邯郸段水体微塑料分布特征及影响因素[J]. *环境化学*, 2025, 44(4): 1155–1168.
- [31] LIMA A R A, COSTA M F, BARLETTA M. Distribution patterns of microplastics within the plankton of a tropical estuary[J]. *Environmental research*, 2014, 132: 146–155.
- [32] GAYLARDE C C, NETO J A B, DA FONSECA E M. Paint fragments as polluting microplastics: a brief review[J]. *Marine pollution bulletin*, 2021, 162: 111847.
- [33] ALMEIDA E, DIAMANTINO T C, DE SOUSA O. Marine paints: the particular case of antifouling paints[J]. *Progress in organic coatings*, 2007, 59(1): 2–20.
- [34] LI Y Z, ZHANG Y D, CHEN G L, et al. Microplastics in surface waters and sediments from Guangdong coastal areas, South China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(5): 2691.
- [35] ERNI-CASSOLA G, ZADJELOVIC V, GIBSON M I, et al. Distribution of plastic polymer types in the marine environment; a meta-analysis[J]. *Journal of hazardous materials*, 2019, 369: 691–698.
- [36] 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.

- [37] LUO S, WU H N, XU J F, et al. Effects of lakeshore landcover types and environmental factors on microplastic distribution in lakes on the Inner Mongolia Plateau, China[J]. *Journal of hazardous materials*, 2024, 465: 133115.
- [38] 赵镭, 韦存茜, 吴亚平, 等. 液相色谱串联质谱法测定聚对苯二甲酸乙二醇酯矿泉水瓶中 2-氨基苯甲酰胺迁移量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(15): 5309–5312.
- [39] NIHEI Y, OTA H, TANAKA M, et al. Comparison of concentration, shape, and polymer composition between microplastics and mesoplastics in Japanese river waters[J]. *Water research*, 2024, 249: 120979.
- [40] 尹诗琪, 贾芳丽, 刘筱因, 等. 青岛近岸表层海水和潮滩沉积物中微塑料的分布及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(4): 1410–1418.
- [41] LEWANDOWSKI K, SKORCZEWSKA K. A brief review of poly(vinyl chloride) (PVC) recycling[J]. *Polymers*, 2022, 14(15): 3035.
- [42] PENCİK O, MOLNAROVA K, DURDAKOVA M, et al. Not so dangerous? PET microplastics toxicity on freshwater microalgae and cyanobacteria[J]. *Environmental pollution*, 2023, 329: 121628.
- [43] 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.
- [44] HE D, CHEN X J, ZHAO W, et al. Microplastics contamination in the surface water of the Yangtze River from upstream to estuary based on different sampling methods[J]. *Environmental research*, 2021, 196: 110908.
- [45] LIU N N, YU F, WANG Y Y, et al. Effects of environmental aging on the adsorption behavior of antibiotics from aqueous solutions in microplastic-graphene coexisting systems[J]. *Science of the total environment*, 2022, 806: 150956.
- [46] LI H X, MA L S, LIN L, et al. Microplastics in oysters *Saccostrea cucullata* along the Pearl River estuary, China[J]. *Environmental pollution*, 2018, 236: 619–625.
- [47] ALIABAD M K, NASSIRI M, KOR K. Microplastics in the surface seawaters of Chabahar Bay, Gulf of Oman (Makran Coasts)[J]. *Marine pollution bulletin*, 2019, 143: 125–133.
- [48] MANI T, HAUK A, WALTER U, et al. Microplastics profile along the Rhine River[J]. *Scientific reports*, 2016, 5: 17988.
- [49] 张启龙, 王凡, 赵卫红, 等. 舟山渔场及其邻近海域水团的季节特征[J]. *海洋学报*, 2007, 29(5): 1–9.
- [50] RYBERG M, LAURENT A, HAUSCHILD M Z. Mapping of global plastic value chain and plastic losses to the environment: with a particular focus on marine environment[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2018.