

广东红树林保护区典型植被沉积物微塑料赋存特征与分异机制

李禄鹏, 邱楚媛, 白浩祥, 徐沛卓, 陈磊, 伍一宁

东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年4月14日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

研究以粤港澳大湾区典型的福田与淇澳红树林保护区为对象, 通过系统采样与分析, 探讨了不同植被区沉积物中微塑料的赋存特征、空间分异及其驱动机制。结果显示, 两地存在普遍的微塑料污染并且整体丰度相近。但物理化学特征迥异: 福田保护区的微塑料以聚乙烯(PE) (19.0%)和聚丙烯(PP)(17.8%)为主, 形态主要是颗粒(40.9%)、纤维(29.8%), 说明其污染主要源于高度城市化背景下的包装与日用消费品; 淇澳保护区则以聚酰胺(PA)(16.7%)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET) (16.3%)为主, 且纤维形态占据绝对主导(>65%), 这与当地渔业及纺织活动排放密切相关。空间分布上, 微塑料丰度遵循“原生红树林 > 排污口 \approx 入侵红树林 > 无植被滩涂”的规律, 证实了红树林植被对微塑料显著的截留效应, 且该效应与输入源特征存在交互作用。冗余分析与相关性分析表明, 土壤基础理化性质对微塑料分布无显著影响。人类活动强度与微塑料的组成特征(如碎片、PE、PP占比)呈显著正相关, 但与其绝对丰度无显著相关性。这表明, 微塑料的最终赋存状态是“源特征”(由人类活动类型决定)与“汇过程”(如植被截留、水动力迁移)共同作用的结果。研究揭示了红树林微塑料污染特征的局地分异性, 强调污染管控需结合区域主导人类活动类型, 并为评估红树林生态系统的“减污”功能提供了科学依据。

关键词

微塑料, 红树林, 沉积物, 赋存特征, 空间分异

Microplastic Occurrence Characteristics and Differentiation Mechanisms in Typical Vegetation Sediments of Mangrove Reserves in Guangdong Province

Lupeng Li, Chuyuan Qiu, Haoxiang Bai, Peizhuo Xu, Lei Chen, Yining Wu

College of Wildlife and Protected Area, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

文章引用: 李禄鹏, 邱楚媛, 白浩祥, 徐沛卓, 陈磊, 伍一宁. 广东红树林保护区典型植被沉积物微塑料赋存特征与分异机制[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(5): 925-938. DOI: 10.12677/aep.2026.165092

Abstract

This study investigated the occurrence characteristics, spatial differentiation, and driving mechanisms of microplastics in sediments from different vegetation zones in the typical Futian and Qi'ao mangrove reserves in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area through systematic sampling and analysis. The results showed that microplastic pollution was prevalent in both areas, with similar overall abundance. However, their physicochemical characteristics differ significantly: In the Futian Nature Reserve, microplastics are mainly polyethylene (PE) (19.0%) and polypropylene (PP) (17.8%), primarily in the form of particles (40.9%) and fibers (29.8%), indicating that the pollution mainly originates from packaging and daily consumer goods in a highly urbanized environment. In the Qi'ao Nature Reserve, microplastics are mainly polyamide (PA) (16.7%) and polyethylene terephthalate (PET) (16.3%), with fibers dominating (>65%), closely related to emissions from local fisheries and textile activities. Spatially, microplastic abundance follows the pattern of "native mangroves > sewage outlets \approx invasive mangroves > unvegetated mudflats," confirming the significant interception effect of mangrove vegetation on microplastics, and this effect interacts with the characteristics of the input sources. Redundancy and correlation analyses show that the basic physicochemical properties of the soil have no significant impact on microplastic distribution. The intensity of human activities showed a significant positive correlation with the compositional characteristics of microplastics (e.g., the proportion of fragments, PE, and PP), but no significant correlation with their absolute abundance. This indicates that the final state of microplastics is the result of the combined effects of "source characteristics" (determined by the type of human activity) and "sink processes" (e.g., vegetation interception and hydrodynamic migration). This study reveals the local differentiation of microplastic pollution characteristics in mangroves, emphasizing that pollution control needs to be combined with the dominant human activity type in the region, and provides a scientific basis for assessing the "pollution reduction" function of mangrove ecosystems.

Keywords

Microplastics, Mangrove, Sediment, Occurrence Characteristics, Spatial Differentiation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

微塑料(Microplastics, MPs)作为一种新兴全球性污染物,通常指粒径小于5毫米的塑料碎片,包括初生源(如化妆品和个人护理产品中的塑料微粒)和次生源(如大尺寸塑料废弃物通过物理、化学及生物降解形成的碎片)[1]。

由于其尺寸小、比表面积大、化学稳定性高及强吸附能力[2],微塑料通过吸附重金属和有机污染物,在食物链中呈现生物放大效应,威胁生态与人体健康。近年来,微塑料污染在海洋、淡水及土壤环境中均被广泛检出,甚至在人迹罕至的极地和深海区域也有发现[3],成为环境科学与生态研究的焦点。

红树林生态系统作为热带和亚热带海岸带关键的蓝碳生态系统[4],具有极高的碳汇能力、生物多样性维护[5]、食物供给、渔业支持以及海岸防护功能[6]。然而,由于位于陆海交错带,红树林易受陆源污

染物输入的影响,成为微塑料的重要“汇”[4]。研究表明,红树林沉积物通过根系截留和潮汐作用能有效富集微塑料[5],丰度可达数十至数千个/千克。

当前,微塑料在红树林中的研究多集中于丰度、分布及形态特征描述。国外研究发现,全球红树林生态系统普遍面临严重的塑料污染问题:沉积物中微塑料平均浓度达 (1122.98 ± 150.17) items/kg,超出安全阈值两倍。尽管保护区沉积物微塑料浓度因保护措施降低了45.5%,但生物体内微塑料积累仍显著(如腹足类达 (148.76 ± 19.34) items/个体)[7]。此外,全球红树林沉积物微塑料丰度呈现显著空间异质性——东南亚地区污染尤为突出,而中国沿海红树林(如钦州湾、深圳湾)丰度跨度达42.9~3656 items/kg[3]。当前研究仍存在地域分布不均(以东南亚为主)、方法标准差异大及微塑料对红树林生态影响机制不明确等问题。

然而,现有研究多关注表层(0~10 cm)微塑料丰度统计,对垂直迁移机制及环境因子交互作用缺乏深入探讨。因此,此次研究的科学问题如下:1)以广东福田和淇澳红树林保护区为例,系统分析典型植被区沉积物中微塑料的赋存特征(包括丰度、尺寸、形状、颜色及聚合物组成)及其空间分异机制;2)结合环境因子(如沉积物TOC、TN、粒度)和人类活动参数,探讨微塑料的来源、迁移规律及生态风险。研究成果旨在为红树林的区域微塑料研究提供新的见解,为红树林生态保护、污染管控及碳汇功能维护提供科学依据,助力于实现“减污增汇”的协同治理目标。

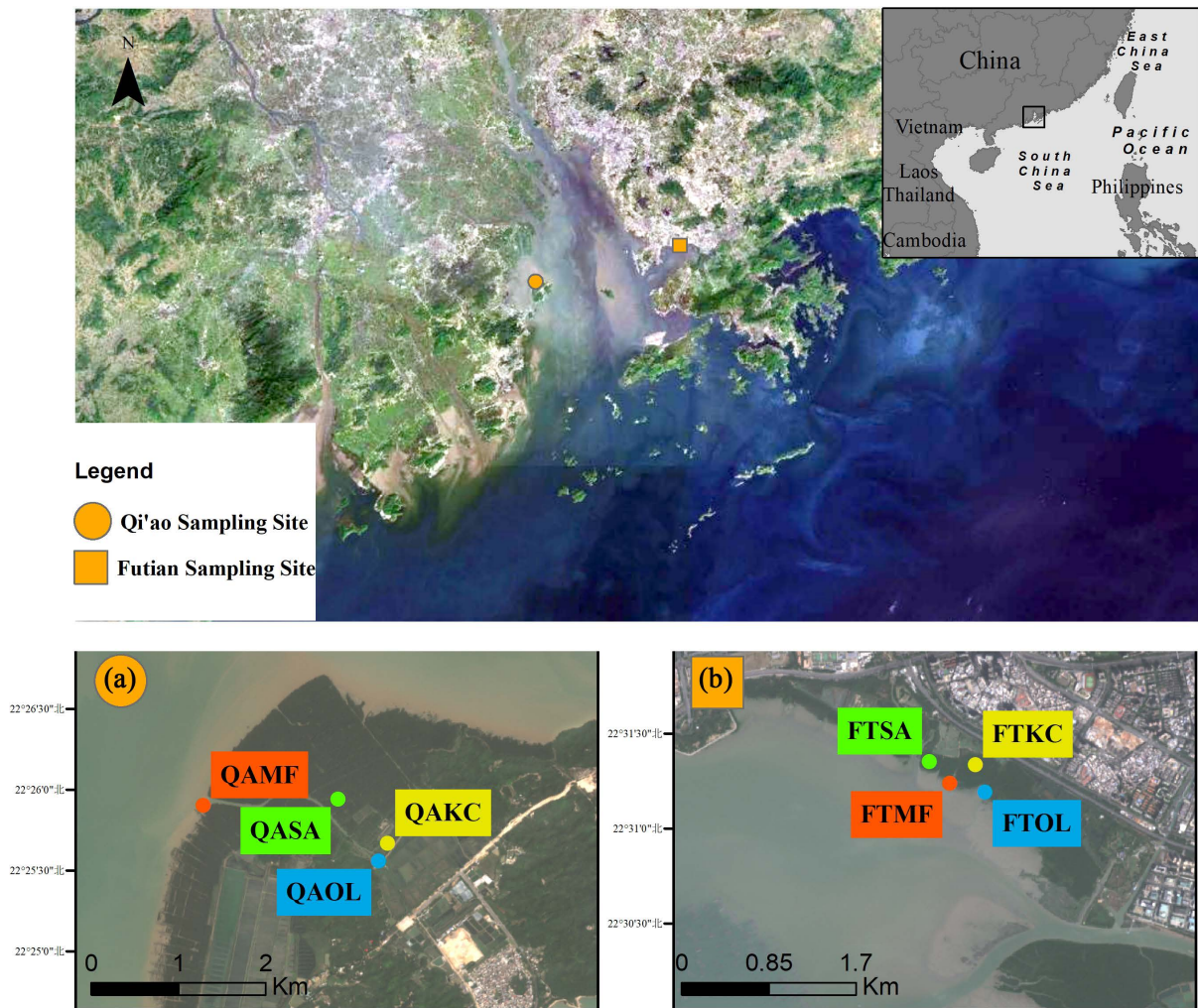
2. 材料和方法

2.1. 研究区域和采样

位于珠海市淇澳岛、担杆岛及二洲岛的淇澳红树林保护区,是中国重要的湿地生态系统、候鸟及猕猴原生地研究基地。因丰富的生物多样性和独特的地理位置,其已成为粤港澳大湾区生态文明建设的重要组成部分。保护区主要保护对象为红树林湿地、猕猴、鸟类及海岛生态环境,当前正面临城市化带来的环境污染与生态破坏压力。深圳市福田保护区作为广东内伶仃岛-福田国家级自然保护区的一部分,是粤港澳大湾区红树林类型自然保护区的关键代表。作为我国唯一位于城市腹地的国家级自然保护区,它拥有9公里长的红树林“绿色长城”、独特的水文地质条件及候鸟栖息繁殖功能,却也因城市化进程承受土地开发与环境污染的双重压力。二者同为大湾区生态文明建设的核心载体,肩负着生态资源保护与生物多样性维护的重任,亟待加强建设管理以应对人类活动威胁。

选取位于淇澳自然保护区($22^{\circ}23' \sim 22^{\circ}27'N$, $113^{\circ}36' \sim 113^{\circ}40'E$)和福田自然保护区($22^{\circ}30' \sim 22^{\circ}32'N$, $113^{\circ}56' \sim 114^{\circ}03'E$)的两片红树林[8]。这两个保护区位于中国南部的大湾区,属亚热带季风气候(年均温 $22^{\circ}C \sim 24^{\circ}C$,年降水1800 mm),分别占地 23.8 km^2 和 921.6 hm^2 ,以滨海盐碱草甸沼泽土为主[9],原生植被以秋茄(*Kandelia candel*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)和白骨壤(*Avicennia marina*)为核心,其中淇澳因人工种植无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)使红树林面积扩至 600 hm^2 ,福田则保留倒卵秋茄(*K. obovata*)及少量引进种[10]。研究选取四类典型生境样地:1)原生红树林样地:主体植被为秋茄(简称KC)。这一群落保持了较为原始的自然状态,是研究自然生态条件下土壤与微生物相互关系的理想场所。其下的土壤微生物群落可能展现出对污染的一定耐受性和恢复潜力。2)入侵红树林样地:主体植被为无瓣海桑(简称SA)。由于无瓣海桑的入侵,这一区域的生态系统结构和功能可能发生显著变化,为研究外来物种对土壤原生生物群落的影响提供了重要样本。其微生物群落特征可能与原生红树林有所不同,进一步丰富了研究的多样性。3)无植被滩涂样地(简称MF):这一区域缺乏植被覆盖,土壤直接暴露于环境之中。作为研究土壤污染和生态恢复初期阶段土壤生物群落特征的对照,它有助于理解土壤基础生态过程。4)河流径流排污口样地(简称OL):这一区域受到河流径流带来的污染物直接排放影响,是

研究人为污染对土壤原生生物群落结构与功能影响的关键样地，为研究提供了极端污染环境下的微生物群落响应模式(图 1)。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1669 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 1. Geographical location of the study area and spatial distribution of sampling sites. Map of southeastern China showing the locations of the two mangrove nature reserves (Qi'ao and Futian) in the Pearl River Estuary. Enlarged satellite images of the Qi'ao (a) and Futian (b) reserves, detailing the spatial arrangement of the four habitat-specific sampling sites within each reserve. QAKC and FTKC: native *Kandelia candel* mangrove forest; QASA and FTSA: non-native *Sonneratia apetala* mangrove forest; QAMF and FTMF: unvegetated mudflat; QAOL and FTOL: riverine runoff outlet

图 1. 研究区域地理位置及采样点空间分布图。中国东南部地图，显示了珠江口两个红树林自然保护区(淇澳岛和福田)的位置。淇澳岛(a)和福田(b)保护区的放大卫星影像，详细展示了每个保护区内四个生境特异性采样点的空间布局。QAKC 和 FTKC：乡土种秋茄(*Kandelia candel*)红树林；QASA 和 FTSA：外来种无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)红树林；QAMF 和 FTMF：无植被覆盖的泥滩；QAOL 和 FTOL：河流径流出口

每样地重复采集 5 次 10 cm 深土样，经 2 mm 筛去除残余组织后分装，4℃ 保存用于理化分析(容重、有机碳等)，-20℃ 保存用于微塑料的提取以解析其赋存特征和分布差异。

2.2. 土壤理化性质

本研究中土壤理化性质的测定参照了《土壤农业分析》。运用司笃克斯定律原理，通过吸管法将土

壤结构划分为砂粒(50~2000 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒(<2 μm)。土壤 pH 值的测定是将土壤与水按 1:5 的比例混合制成悬浮液,搅拌后静置,并使用 Mettler Toledo FE20 pH 计(Hach Company, Loveland, CO, USA)基于电位法进行测量。土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)的测定,将土壤样品过 0.2 mm 筛后, SOC 含量通过 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化法进行测定[11]。使用 C/N 分析仪测定总氮(TN, g/kg^{-1}) (Elementar, Langensfeld, Germany) [12]。土壤全磷(TP)的测定采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 溶液消化土壤样品后,使用分光光度计(7200, UNICO, Franksville, WI, USA)测定总磷(TP, g/kg^{-1}) [13]。

2.3. 微塑料提取与分析

2.3.1. 微塑料提取方法

将铝罐内存放的土壤样本加入到干净玻璃烧杯 A (500 ml)中,并加入 $1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$ NaCl 溶液,用玻璃棒充分震荡之后静置 24 h。静置之后用干净烧杯 B (500 ml)收集上清液 150 ml,再向烧杯 A (500 ml)中加入 NaCl 溶液(饱和)搅拌之后再次静置,得到上清液再倒入烧杯 B (500 ml)中,共收集三次(450 ml)。将上述步骤收集得到的上清液,通过隔膜真空泵,用 $0.45 \mu\text{m}$ 的玻璃纤维薄膜进行抽滤。抽滤完成后,立即把每张载有样品的滤膜取出,放入干净干燥的玻璃培养皿中,置于烘干机内风干。处理完的滤膜放在干净的封闭空间,直到所有的显微镜检查完成。

2.3.2. 微塑料分析方法

1) 微塑料的物理检测:本次研究使用搭配数字摄像头和计算机连接的蔡司显微镜(SteREO Discovery V12)进行检验,对滤纸上的 MPs 初步记录和识别。镜检过程中,为了增加微塑料识别的准确性,使用“热针”来有针对性地挑选。滤膜在显微镜下以从左到右的 Z 字形镜检,以便减小误差[14]。微塑料的识别是根据形状、大小和颜色进行分类。尺寸按具体数值详细记录;形状分为纤维、薄膜、碎片和颗粒四种类型;颜色则划分为白色、黑色、蓝色、黄色、红色、绿色、紫色、透明及其他共九个类别。在三个不同的保护区都选择 80 个 MPs 样本进行聚合物分析,所选样本具有代表性,涵盖所有尺寸、颜色及形状。

2) 微塑料的化学检测:微塑料粒径小于 5 mm 的采用傅里叶纤维变换红外光谱(Micro-FTIR, Nicolet iN10, Thermo, USA)进行测定[15],因为考虑到部分塑料不是透明的,本研究选择了 ATR-FTIR 模式(衰减全反射)。塑料粒径大于 5 mm 的采用傅里叶变换红外光谱(FTIR, Nicolet iS10, Thermo, USA)的附件金刚石进行透射测定,具有波数准确、重复性好等优点。用仪器自带的 Spectrum IMAGE 软件记录测量样品的光谱,其程序设置为:光圈大小为 $150 \times 150 \mu\text{m}$,在透射模式下扫描 128 次,光谱分辨率为 2 cm^{-1} ,光谱范围为 $650\text{--}4000 \text{ cm}^{-1}$ 。获取以上聚合物的红外光谱图通过 OMNIC 软件中的光谱库进行比较,以确定微塑料的聚合物组成,当所测光谱与标准光谱数据库匹配度至少达到 80%时可确定聚合物类型。

2.4. 统计方法

本研究的全部统计分析均在 R 环境中完成。采用 Kruskal-Wallis H 检验及 Dunn 事后检验比较不同生境间微塑料丰度的差异。通过主成分分析(PCA)和置换多元方差分析(PERMANOVA)解析微塑料组成结构的空间分异。运用 Spearman 相关分析和一元线性回归探究微塑料指标与环境因子及人类活动强度的关系。通过双因素方差分析评估植被类型与城市化梯度对微塑料赋存特征的交互影响。

3. 结果

3.1. 微塑料整体赋存特征

在福田(FT)与淇澳(QA)两个红树林保护区的所有沉积物样品中均检出微塑料(MPs)。整体上,两保护

区微塑料丰度处于同一水平(FT: (0.000662 ± 0.000320) items/g; QA: (0.000680 ± 0.000270) items/g), 福田保护区的空间变异性(变异系数 CV: 48.3%)高于淇澳保护区(CV: 39.7%) (图 2)。

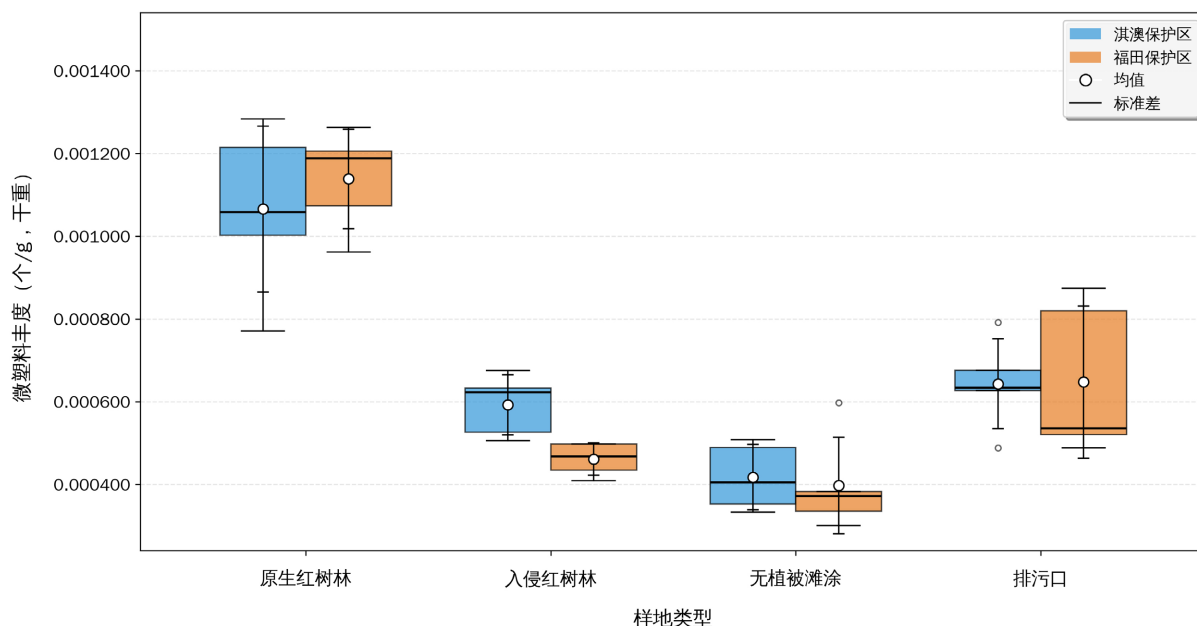


Figure 2. Comparison of microplastic abundance in sediments among different plot types in Futian and Qi'ao Mangrove Reserves, Guangdong

图 2. 广东福田、淇澳红树林保护区不同样地类型沉积物微塑料丰度对比

微塑料的形态、颜色与聚合物组成在两保护区之间存在差异。在形态上, 福田保护区的微塑料包括颗粒和纤维等, 其中在原生红树林中颗粒占比为 48.5%, 在无植被滩涂中纤维占比为 55.2%。淇澳保护区的微塑料以纤维形态为主, 在各生境中占比范围为 65.0%至 100.0% (图 3(a))。

颜色组成上, 福田保护区的微塑料白色(30.7%)和透明色(26.9%)为主, 淇澳则以黑色(28.5%)和透明色(26.4%)为主, 其中白色微塑料占比仅 $9.82\% \pm 3.45\%$, 显著低于福田($P < 0.05$) (图 3(b))。

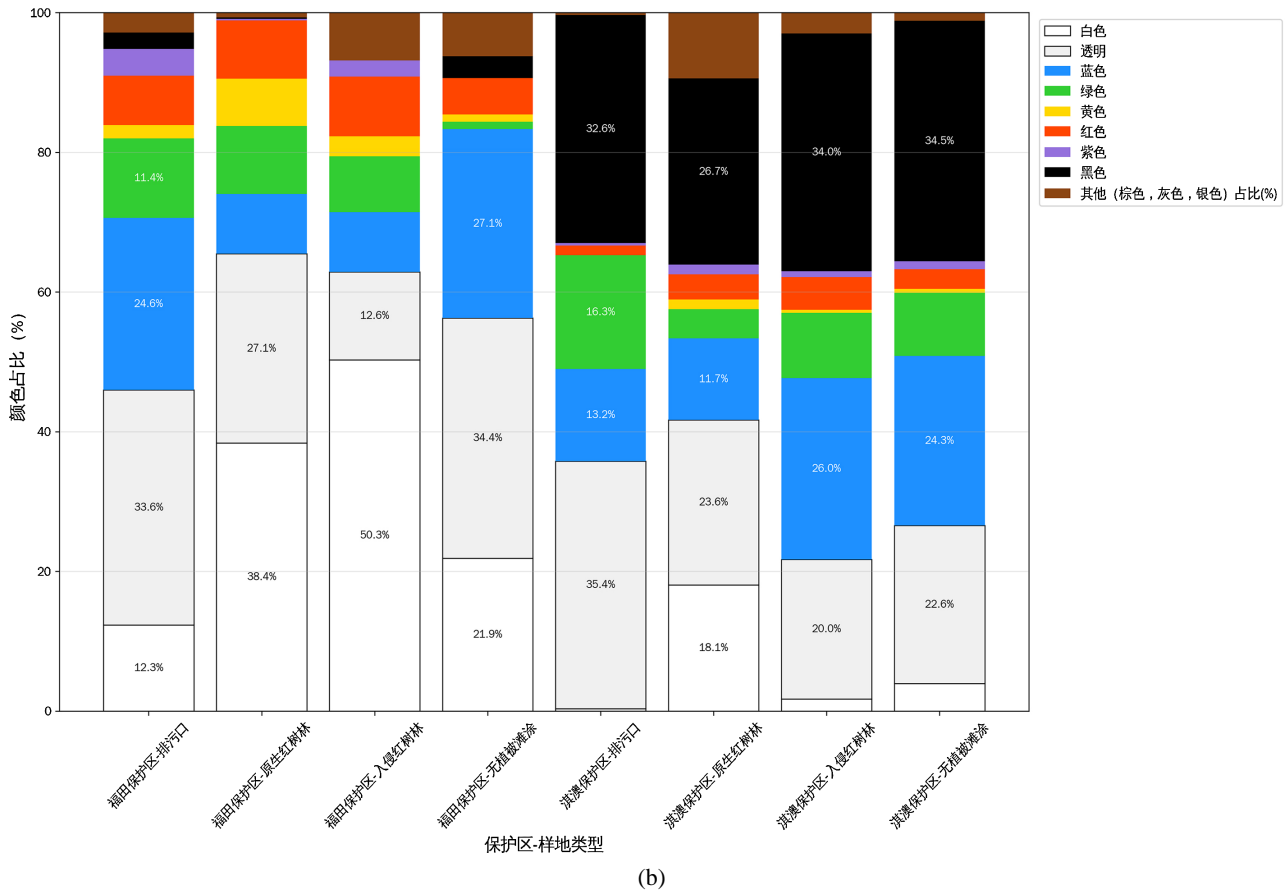
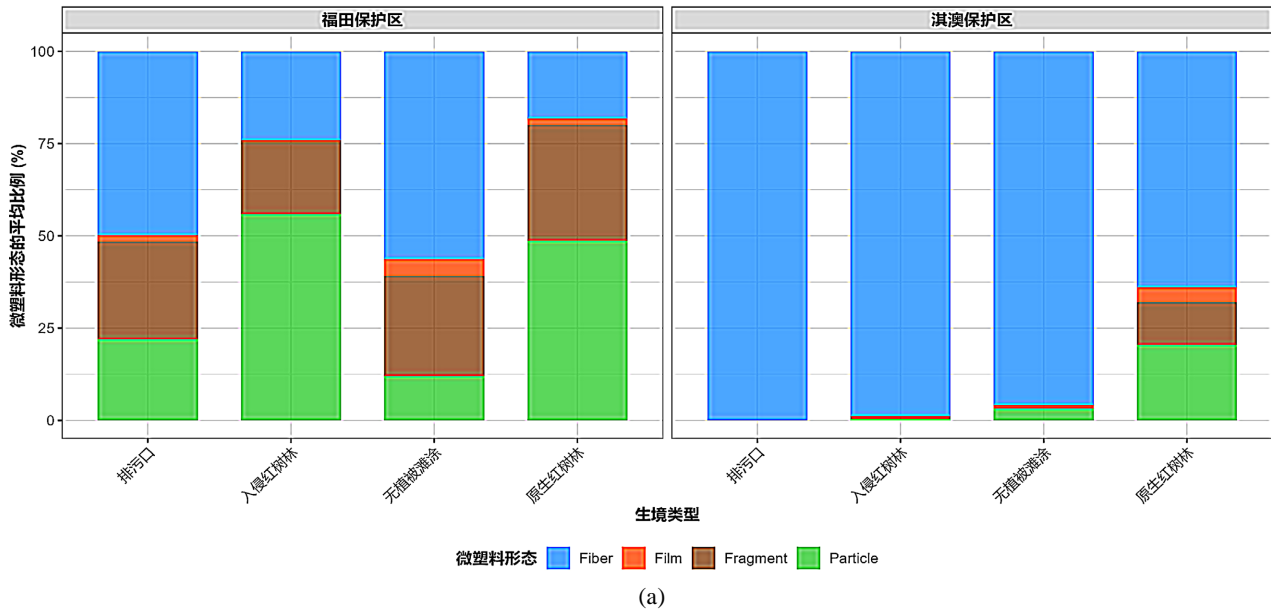
聚合物分析显示, 福田保护区的优势聚合物为聚乙烯(PE, 19.0%)和聚丙烯(PP, 17.8%), 聚酰胺(PA)占比为 $9.09\% \pm 2.13\%$; 淇澳保护区的优势聚合物为聚酰胺(PA, 16.7%)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET, 16.3%), 其次 PE 占比为 $12.34\% \pm 1.89\%$, PP 占比为 $15.02\% \pm 1.17\%$ (图 3(c))。

粒径分布特征显示, 在相同累积百分比下, 福田保护区对应的微塑料粒径小于淇澳保护区(图 4(a)), 同时福田保护区粒径小于 $100 \mu\text{m}$ 的微塑料平均占比为 43.0%, 在红树林生境中该比例分别为 65.7%(FT1)和 71.8%(FT2); 淇澳保护区粒径大于 $500 \mu\text{m}$ 的微塑料平均占比为 56.5%, 在排污口(QA4)该比例达 70.8% (图 4(b))。幂律拟合结果显示, 8 个样地的粒径分布拟合优度(R^2)介于 0.484 至 0.940 之间。淇澳保护区各生境的 b 值分别为: 排污口(QA4)为 1.54, 入侵红树林(QA2)为 1.01; 福田保护区各生境的 b 值分别为: 入侵红树林(FT2)为 0.71, 原生红树林(FT1)为 0.67, 无植被滩涂(FT3)为 0.53(图 4(c))。

3.2. 微塑料污染的空间分异特征

在福田保护区, 各生境微塑料赋存特征如下: 原生红树林的赋存量为 443 items, 丰度为 1.14 items/g; 入侵红树林为 175 items 和 0.46 items/g; 无植被滩涂为 96 items 和 0.38 items/g; 排污口为 211 items 和 0.63 items/g。平均粒径以无植被滩涂最大($477.9 \mu\text{m} \pm 546.8 \mu\text{m}$), 入侵红树林最小($201.8 \mu\text{m} \pm 419.5 \mu\text{m}$)。

形态上,原生红树林和入侵红树林均以颗粒为主导,占比分别为 48.5%和 58.3%;无植被滩涂与排污口则以纤维为主,占比分别为 55.2%和 48.3%。聚合物组成方面,各生境的优势聚合物均为 PE,占比范围为 18.5%至 20.4%。



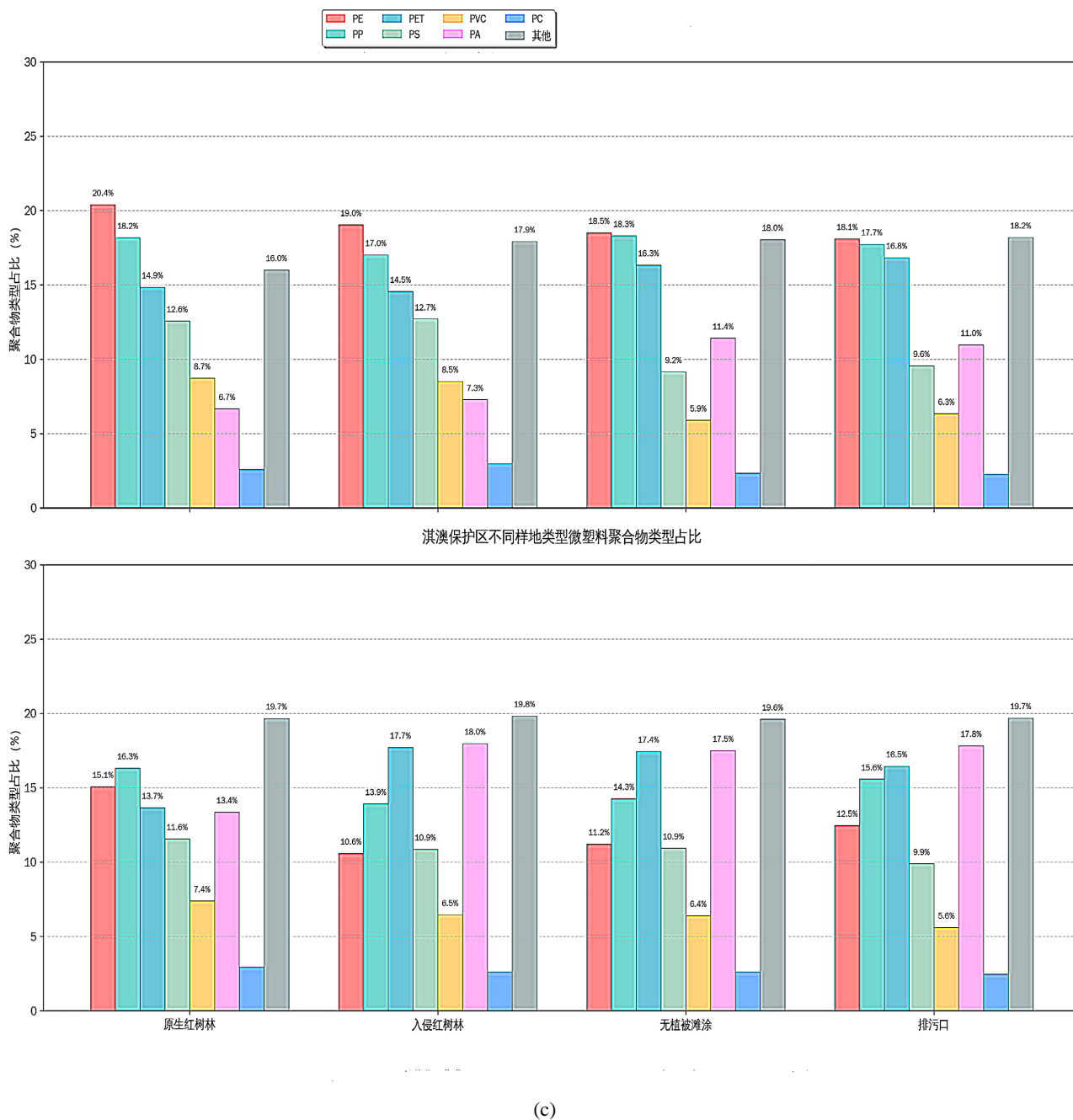
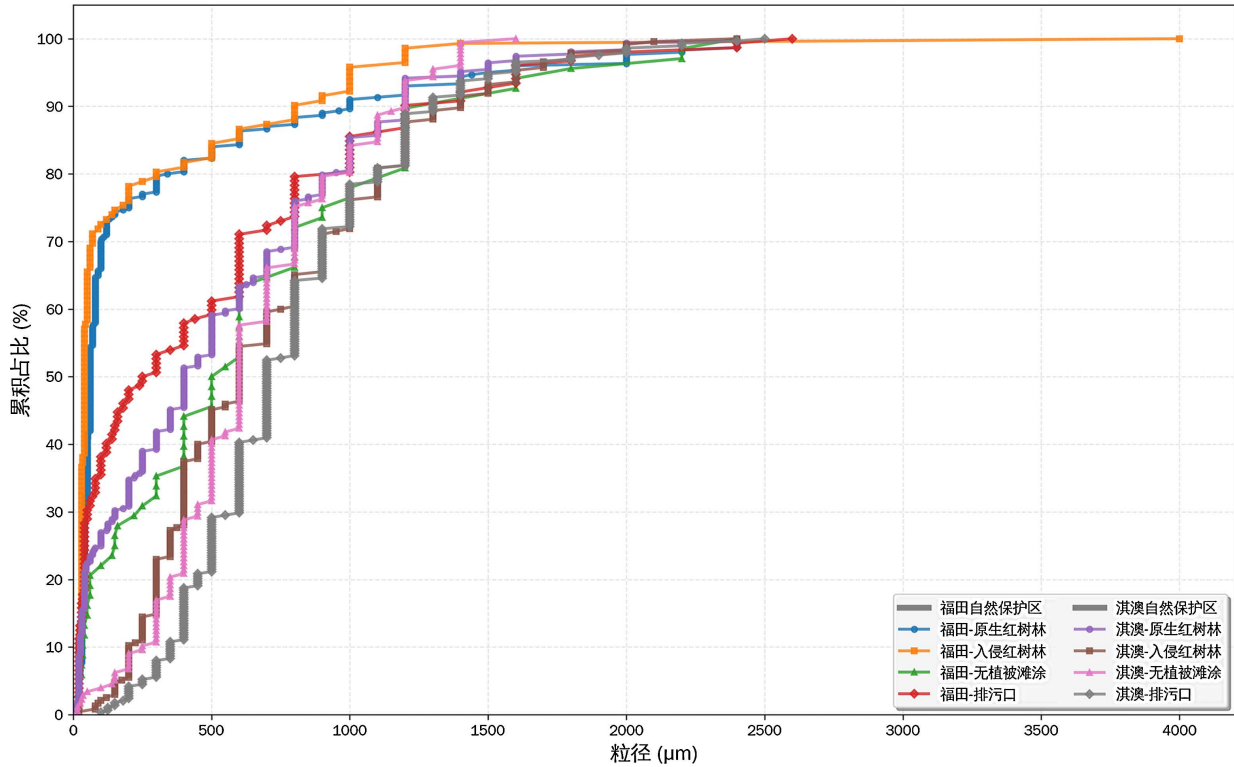


Figure 3. Spatial heterogeneity of microplastic characteristics in different mangrove forest reserves in Guangdong: comparison of morphological composition, sediment content and polymer types. (a) Cross-regional comparison of microplastic morphology in different plots of Guangdong Mangrove Reserves. (b) Distribution of microplastic proportions in sediments from different plots of Guangdong Mangrove Reserves. (c) Proportions of microplastic polymer types in different plot types of Futian Reserve (top) and Qi'ao Reserve (bottom)

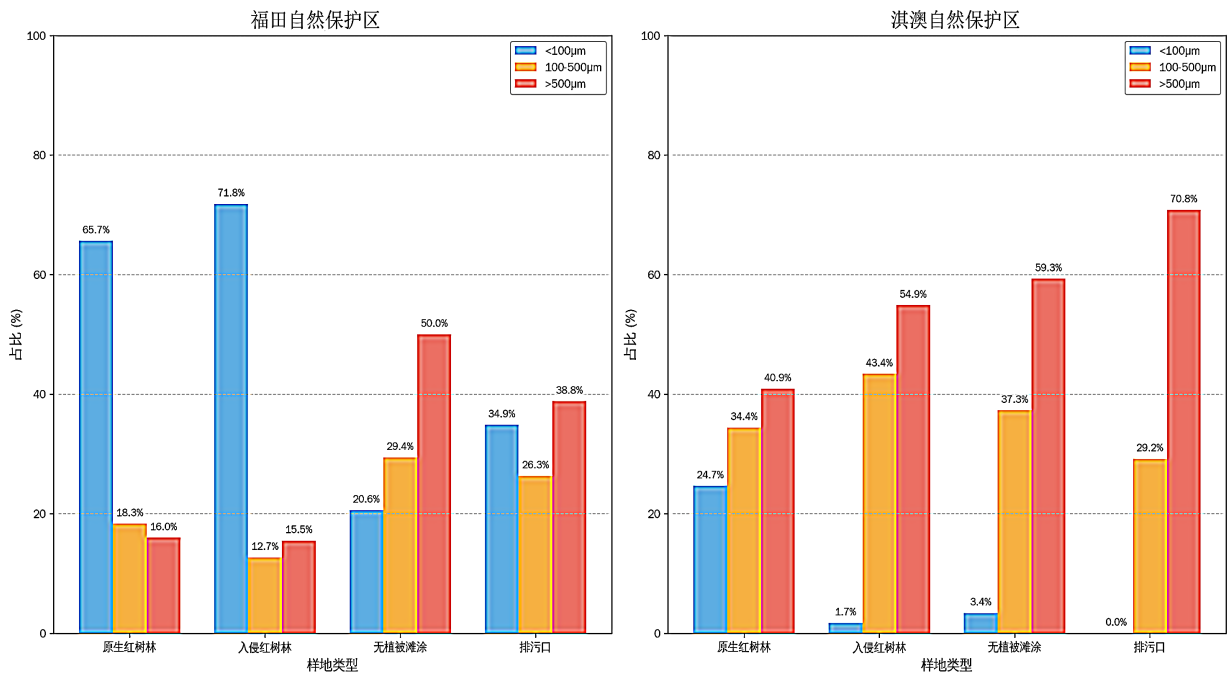
图 3. 广东红树林保护区不同样地微塑料特征的空间异质性：形态组成、沉积物占比及聚合物类型对比。(a) 广东红树林保护区不同样地微塑料形态跨区域对比；(b) 广东红树林保护区不同样地沉积物微塑料占比分布；(c) 福田保护区与淇澳保护区不同样地类型微塑料聚合物组成差异(上：福田保护区；下：淇澳保护区)

在淇澳保护区，微塑料赋存量与丰度分别为：原生红树林(360 items, 1.06 items/g)、入侵红树林(235 items, 0.59 items/g)、无植被滩涂(177 items, 0.42 items/g)、排污口(288 items, 0.64 items/g)。平均粒径排序

为：排污口($794.9 \mu\text{m} \pm 411.9 \mu\text{m}$) > 入侵红树林($719.0 \mu\text{m} \pm 482.1 \mu\text{m}$) > 无植被滩涂($652.9 \mu\text{m} \pm 338.7 \mu\text{m}$) > 原生红树林($470.2 \mu\text{m} \pm 462.8 \mu\text{m}$)。形态上，所有生境均以纤维为主导，占比范围为 65.0% 至 100.0%。聚合物组成方面，各生境的“其他”聚合物(如 PS、PA 等)占比为 19.6% 至 19.8%。



(a)



(b)

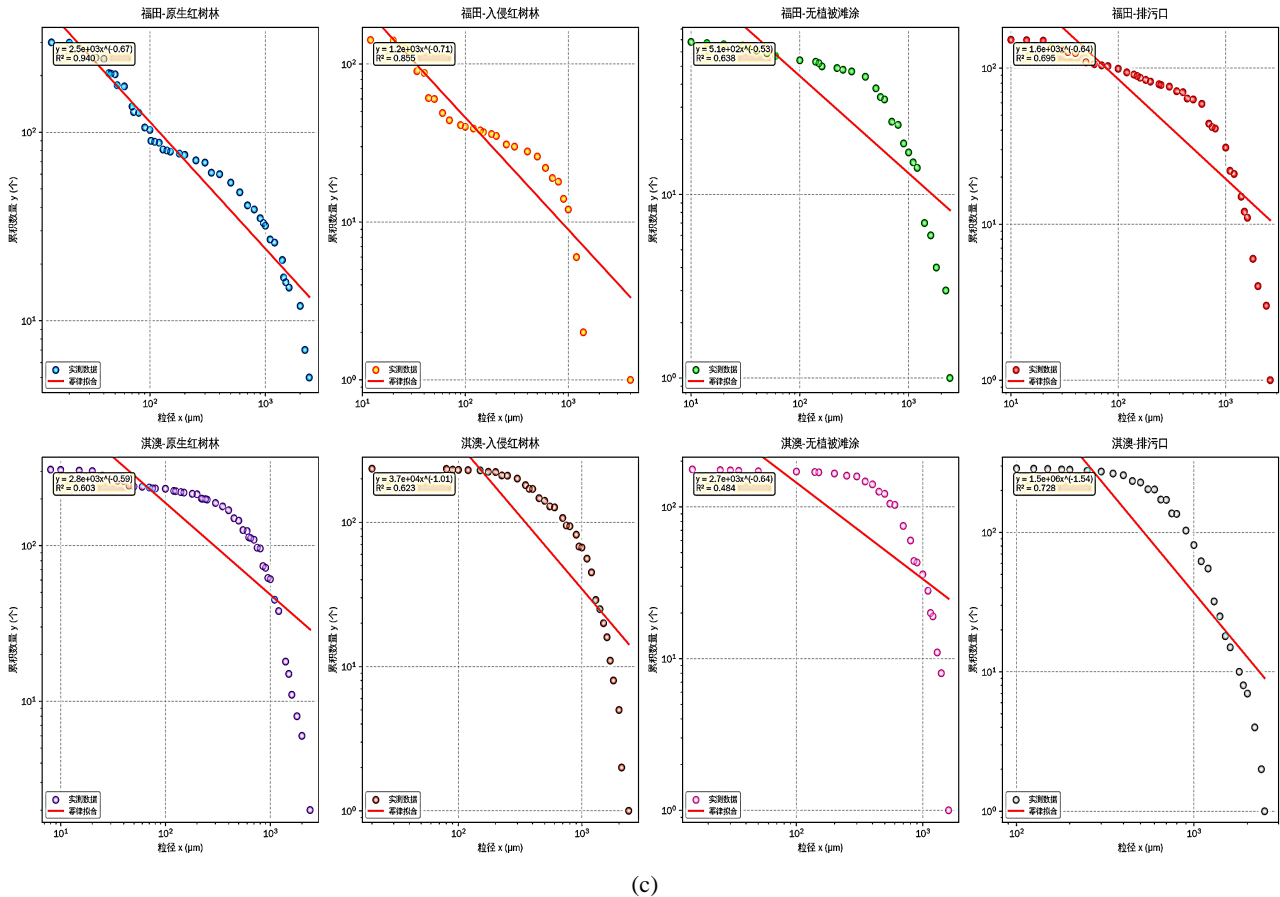


Figure 4. Microplastic particle size distribution characteristics and scale law: cumulative frequency curve, graded proportion and power law fitting analysis. (a) Cumulative frequency curve of microplastic particle size. (b) Proportions of microplastic particle size fractions in Futian Nature Reserve (left) and Qi'ao Nature Reserve (right). (c) Logarithmic-scale particle size spectrum of microplastics and power-law fitting

图 4. 微塑料粒径分布特征及其尺度规律：累积频率曲线、分级占比及幂律拟合分析。(a) 微塑料粒径累积频率曲线；(b) 福田自然保护区(左)与淇澳自然保护区(右)微塑料粒径分级占比；(c) 微塑料对数坐标粒径谱及幂律拟合结果

Kruskal-Wallis H 检验表明，生境类型对微塑料丰度的影响具有统计学显著性($H = 31.0185, p < 0.001$)。Dunn 事后检验结果显示，在两个保护区内，各生境微塑料丰度的排序一致：原生红树林(福田： $1.14 \text{ items/g} \pm 0.12 \text{ items/g}$ ；淇澳： $1.06 \text{ items/g} \pm 0.20 \text{ items/g}$)高于排污口(福田： $0.63 \text{ items/g} \pm 0.18 \text{ items/g}$ ；淇澳： $0.64 \text{ items/g} \pm 0.11 \text{ items/g}$)和入侵红树林(福田： $0.46 \text{ items/g} \pm 0.10 \text{ items/g}$ ；淇澳： $0.59 \text{ items/g} \pm 0.13 \text{ items/g}$)，后者又高于无植被滩涂(福田： $0.38 \text{ items/g} \pm 0.11 \text{ items/g}$ ；淇澳： $0.42 \text{ items/g} \pm 0.08 \text{ items/g}$)。其中，原生红树林的丰度显著高于无植被滩涂(淇澳： $P = 0.0122$ ；福田： $P = 0.0031$)及入侵红树林(福田： $P = 0.0246$)。

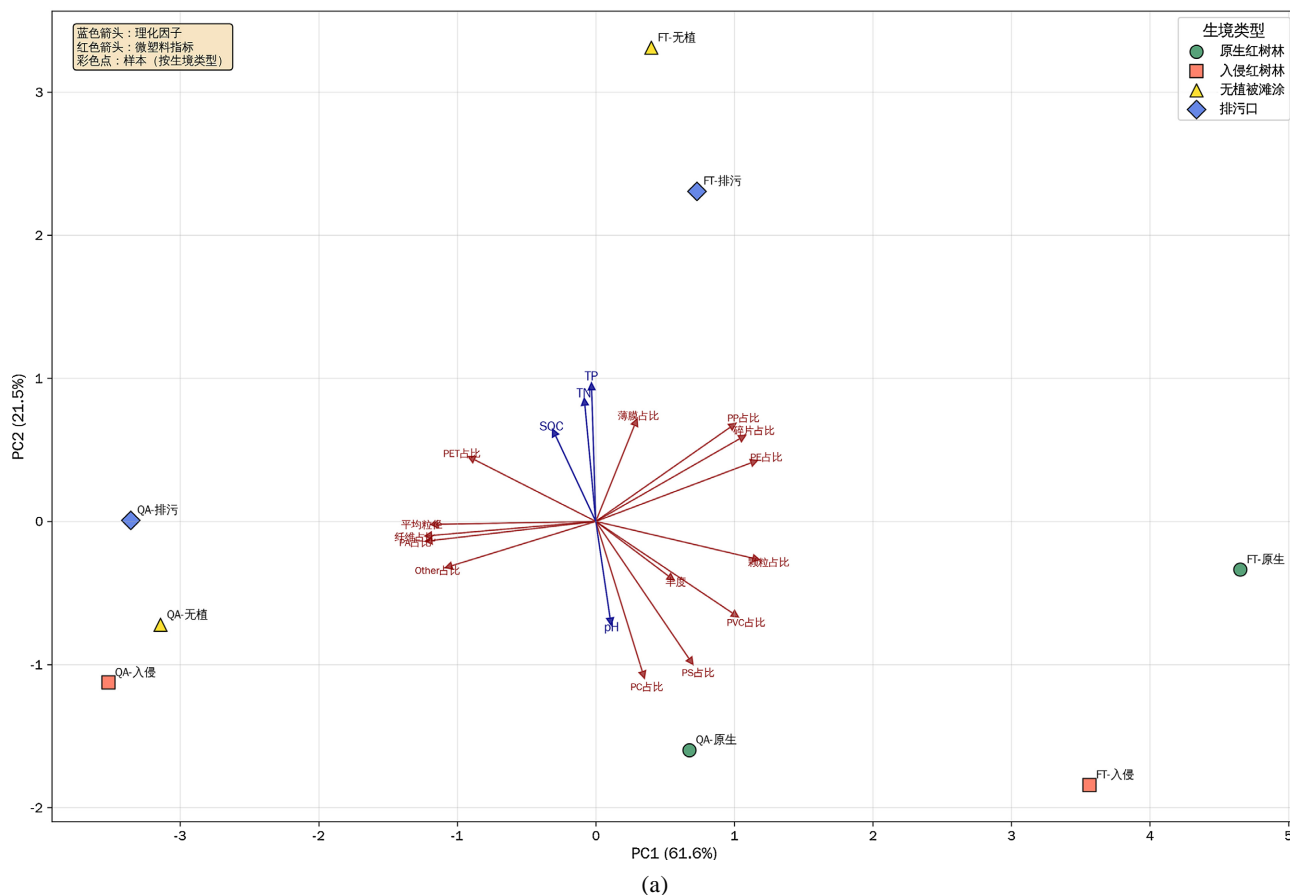
对比同一生境类型，福田保护区的微塑料丰度并非普遍高于淇澳保护区。在原生红树林生境中，福田的微塑料赋存量与丰度(443 items , 1.14 items/g)高于淇澳(360 items , 1.06 items/g)。但在入侵红树林、无植被滩涂和排污口生境中，淇澳保护区的赋存量(分别为 235 、 177 、 288 items)均高于福田同类型样地(分别为 175 、 96 、 211 items)。在组成特征上，两保护区存在差异：福田保护区的微塑料形态包括颗粒和纤维等，淇澳保护区的微塑料在所有生境中均以纤维为主(占比 $\geq 65\%$ ，排污口为 100%)；聚合物组成上，福田保护区以 PE (19.01%)和 PP (17.81%)为主，淇澳保护区以 PA (16.67%)和 PET(16.32%)为主；粒径方面，福田保护区粒径小于 $100 \mu\text{m}$ 的微塑料平均占比为 43.0% ，高于淇澳保护区，而淇澳保护区粒径大于 $500 \mu\text{m}$ 的微塑料平均占比为 56.5% ，在排污口达 70.8% 。

3.3. 植被类型对微塑料截留的特异性效应

在两个保护区内, 入侵红树林的微塑料赋存量与丰度均低于原生红树林。两者截留的微塑料平均粒径存在差异: 在福田保护区, 入侵红树林截留的微塑料平均粒径($201.8 \mu\text{m} \pm 419.5 \mu\text{m}$)小于原生红树林($296.6 \mu\text{m} \pm 477.6 \mu\text{m}$); 在淇澳保护区, 入侵红树林截留的微塑料平均粒径($719.0 \mu\text{m} \pm 482.1 \mu\text{m}$)大于原生红树林($470.2 \mu\text{m} \pm 462.8 \mu\text{m}$), 且纤维占比为 98.7%。描述性数据显示, 植被类型对赋存量与丰度的影响在两个保护区方向一致(原生红树林 > 入侵红树林)。然而, 其对平均粒径的影响方向相反: 在福田保护区, 入侵红树林截留的微塑料粒径更小; 在淇澳保护区, 入侵红树林截留的微塑料粒径更大。

3.4. 土壤理化性质对微塑料分布的影响分析

为探究土壤环境因子与微塑料赋存特征的关系, 本研究对土壤 pH、有机碳(SOC)、总氮(TN)、总磷(TP)与微塑料的丰度、粒径及聚合物占比等指标进行了相关性分析和冗余分析(RDA), 相关性热图显示, 所测定的土壤理化因子与微塑料各指标之间未呈现出统计学上显著的相关性($P > 0.05$)。其中, 总磷(TP)与聚苯乙烯(PS)占比的相关系数 r 约为-0.65, pH 值与 PS 占比的相关系数 r 约为 0.55, 但均未达到显著水平。土壤有机碳(SOC)和总氮(TN)与微塑料丰度之间未发现明显的相关关系(图 5(a))。冗余分析(RDA)结果显示, 置换检验的 P 值为 0.2280 (> 0.05)。RDA 排序图的第一轴(PC1)和第二轴(PC2)共解释了 83.1% 的变量关系($61.6\% + 21.5\%$)。不同生境的样本点(原生红树林、入侵红树林、无植被滩涂、排污口)在排序图上有一定的空间分离(图 5(b))。



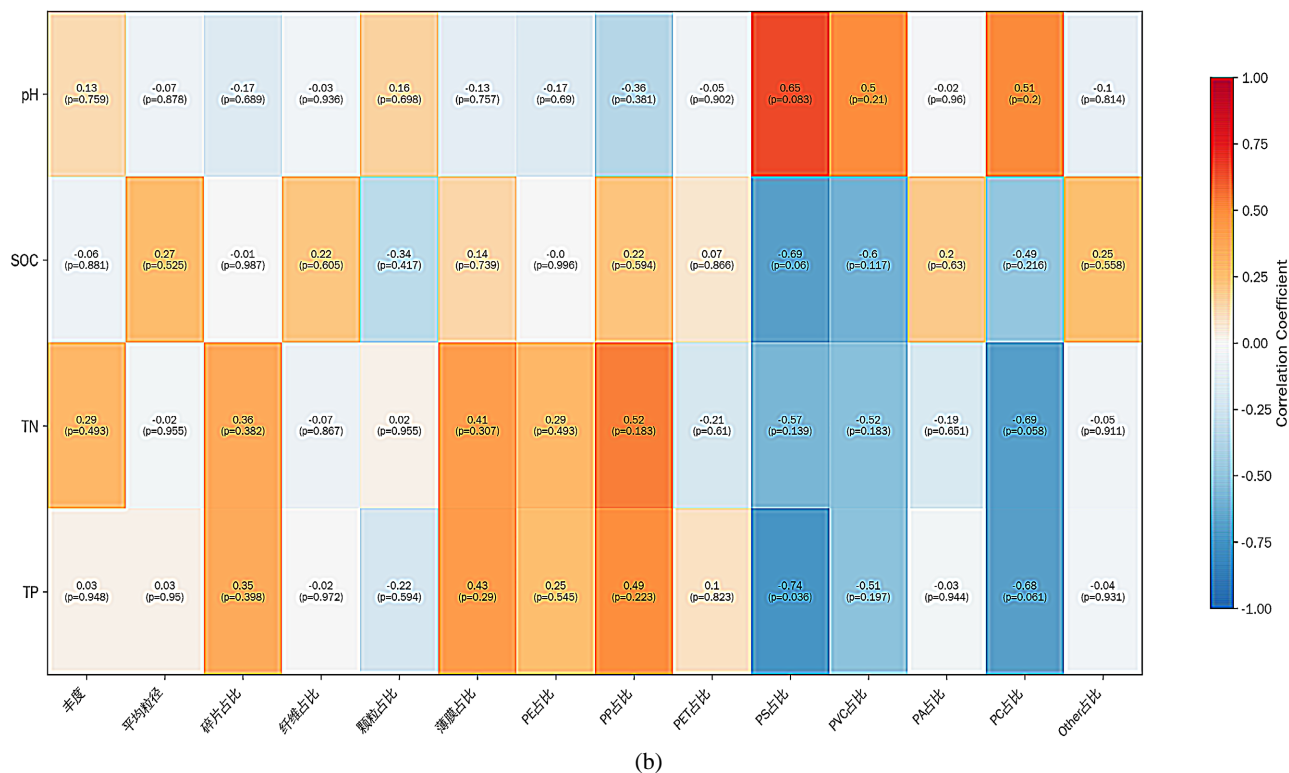


Figure 5. Multivariate association analysis of soil physicochemical factors and microplastic characteristics: correlation heatmap and RDA ordination results. (a) Correlation heatmap between soil physicochemical factors and microplastic indicators. (b) RDA ordination diagram of soil physicochemical factors and microplastic indicators (approximate)

图 5. 土壤理化因子与微塑料特征的多变量关联分析：相关性热图与 RDA 排序结果。(a) 土壤理化因子与微塑料指标相关性热图；(b) 土壤理化因子与微塑料指标冗余分析(RDA)排序图(近似)

3.5. 人类活动对微塑料赋存特征的驱动作用

基于 Spearman 等级相关分析，本研究评估了城市 GDP、人口密度和海岸线开发强度三个人类活动因子与 13 个微塑料指标之间的关联性。在 39 个变量组合中，共有 21 个组合达到显著相关水平($p < 0.05$)，其中 18 个为极显著相关($p < 0.01$)。形态指标方面：碎片占比与人类活动因子呈极显著正相关($r = 0.878$, $p < 0.01$)；纤维占比呈极显著负相关($r = -0.873$, $p < 0.01$)；颗粒占比呈显著正相关($r = 0.764$, $p < 0.05$)；薄膜占比无显著相关性。聚合物组成方面：PE 占比($r = 0.873$, $p < 0.01$)和 PP 占比($r = 0.873$, $p < 0.01$)与人类活动因子呈极显著正相关；PA 占比($r = -0.873$, $p < 0.01$)和 Other 占比($r = -0.873$, $p < 0.01$)呈极显著负相关。PET、PS、PVC 和 PC 等聚合物类型与人类活动因子无显著相关性。微塑料丰度与人类活动因子之间未发现显著相关性($r = -0.109$, $p = 0.797$)。

通过一元线性回归分析，建立了人类活动因子(以城市 GDP 为代表)与各微塑料指标的定量关系模型。模型结果显示，碎片占比($R^2 = 0.875$)、PE 占比($R^2 = 0.858$)、PP 占比($R^2 = 0.764$)、PA 占比($R^2 = 0.778$)、纤维占比($R^2 = 0.757$)和 Other 占比($R^2 = 0.745$)与 GDP 的线性关系具有较高的拟合度。颗粒占比的模型拟合度为 $R^2 = 0.526$ 。

福田与淇澳保护区的区域对比进一步显示：形态组成上，福田保护区的碎片占比(26.1%)和颗粒占比(35.8%)均高于淇澳保护区(分别为 3.0% 和 6.0%)，而淇澳保护区的纤维占比(89.8%)高于福田保护区(36.0%)；聚合物组成上，福田保护区的 PE 占比(19.0%)和 PP 占比(17.8%)高于淇澳保护区(分别为 12.3% 和 15.0%)，淇澳保护区的 PA 占比(16.7%)高于福田保护区(9.1%)。

4. 讨论

本研究在广东福田与淇澳红树林保护区的沉积物中均检出微塑料，证实了其作为陆源污染物“汇”的功能。然而，两地微塑料在物理化学特征、空间分布及驱动机制上呈现出显著差异，揭示了人类活动类型与生态系统过程对污染格局的复合调控。

福田与淇澳微塑料在组成上迥然不同，直接指示了其主导污染源的差异。福田保护区以聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)为主，形态上颗粒与碎片占比高，这与深圳高度城市化的背景相符，主要源于包装材料、日用塑料制品等消费后的破碎。相反，淇澳保护区以聚酰胺(PA)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)为主，且纤维形态占据绝对主导，这强烈指向纺织废水、渔业活动(如渔网、绳索)相关的排放，与其周边的产业特征吻合。粒径分布进一步提供了环境过程信息：福田小粒径微塑料占比较高，暗示其污染历史较长或存在初级微塑料输入；而淇澳以大粒径为主且排污口样地的幂律分布 b 值最高，表明其接收的可能是近期输入、正处于活跃破碎阶段的大尺寸塑料废弃物。

在空间分布上，微塑料丰度呈现出“原生红树林 > 排污口 \approx 入侵红树林 > 无植被滩涂”的清晰规律。这凸显了红树林植被，尤其是根系结构复杂的原生红树林(如秋茄)，通过减缓水流、促进沉降，对微塑料具有显著的截留和富集作用。一个有趣的发现是，植被截留效应与城市化背景存在交互：在污染源以消费塑料为主的福田，入侵红树林(无瓣海桑)更倾向于截留小粒径微塑料；而在污染源以渔网纤维为主的淇澳，入侵红树林则截留了更大粒径的微塑料。这暗示植被的截留功能可能存在“粒径选择性”，其表现受输入微塑料的初始物理特征调控。

对于驱动机制的分析得出了关键结论。首先，土壤基础理化性质(pH、SOC、TN、TP)对微塑料分布的影响不显著，说明局部环境条件并非主导因素。更重要的是，人类活动强度(以GDP为代表)与微塑料的组成特征(如碎片、PE、PP的占比)呈显著正相关，这证实了人类活动类型直接塑造了污染的“源指纹”。然而，微塑料的绝对丰度却与宏观人类活动指标无显著相关性。这一发现至关重要，它表明沉积物中的最终赋存量并非由污染源输入强度单一决定，而是受到水动力搬运、植被截留、再悬浮输出以及生物扰动等多重环境过程复杂调控后的“源-汇”平衡结果。

综上，本研究表明粤港澳大湾区红树林普遍受到微塑料污染，但其赋存特征存在明显的空间分异，由区域主导的人类活动类型(城市消费与渔业纺织)所塑造。红树林植被，特别是原生群落，是有效的微塑料截留器。然而，其截留效能和赋存特征受输入源属性与植被类型的共同影响。管理策略应更具针对性：对福田这类城市型红树林，需强化生活垃圾和塑料制品管理；对淇澳这类受渔业活动影响的红树林，则应聚焦于渔港垃圾管理和污水处理。保护原生红树林，不仅是保护生物多样性与固碳功能，也是维护海岸带生态安全、阻截陆源塑料污染向海洋扩散的重要自然屏障。

基金项目

黑龙江省科技厅“十四五”重点研发计划(创新基地)项目资助(项目号:S202510225165)、2572025AW22中央高校基本科研业务费专项资金资助。

参考文献

- [1] 周浩然, 何涛, 彭恋, 等. 长江流域重要水源地微塑料赋存特征及生态风险评估[J]. 生态环境学报, 2026, 35(3): 345-351.
- [2] 宋佃星, 马莉, 王全九. 宝鸡地区典型农田土壤中微塑料赋存特征及其环境效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(2): 170-175.
- [3] 黄玮钰, 叶匡旻, 黄敏敏, 等. 海南岛沙滩和红树林表层沉积物微塑料的污染特征[J]. 环境保护科学, 2025, 51(5): 140-149.

- [4] 梁秀琼. 广西北海小冠沙红树林潮滩沉积物中微塑料的空间分布及其影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2024.
- [5] 杨斌彬, 王晓静, 陈方舟, 等. 污染物排放对红树林碳汇影响的研究进展及展望——以福田红树林为例[J]. 广东化工, 2024, 51(7): 123-126.
- [6] Curnick, D.J., Pettorelli, N., Amir, A.A., Balke, T., Barbier, E.B., Crooks, S., *et al.* (2019) The Value of Small Mangrove Patches. *Science*, **363**, 239-239. <https://doi.org/10.1126/science.aaw0809>
- [7] Deakin, K., Porter, A., Osorio Baquero, A. and Lewis, C. (2025) Plastic Pollution in Mangrove Ecosystems: A Global Meta-Analysis. *Marine Pollution Bulletin*, **218**, Article 118165. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.118165>
- [8] 牛安逸, 高一飞, 徐颂军. 重金属污染对珠江口红树林表层沉积物碳含量的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8549-8558.
- [9] 王震, 陈卫军, 管伟, 等. 珠海市淇澳岛主要红树林群落特征研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 86-91.
- [10] Jiang, Z., Guan, W., Xiong, Y., Li, M., Chen, Y. and Liao, B. (2019) Interactive Effects of Intertidal Elevation and Light Level on Early Growth of Five Mangrove Species under *Sonneratia Apetala* Buch. Hamplantation Canopy: Turning Monocultures to Mixed Forests. *Forests*, **10**, Article 83. <https://doi.org/10.3390/f10020083>
- [11] Lu, R. (1999) Soil and Agro-Chemical Analytical Methods. China Agricultural Science and Technology Press.
- [12] Rayment, G. and Higginson, F. (1992) The Australian Handbook of Soil and Water Chemical Methods. Inkata Press Pty Ltd.
- [13] Adeloju, S.B., Bond, A.M. and Briggs, M.H. (1984) Critical Evaluation of Some Wet Digestion Methods for the Stripping Voltammetric Determination of Selenium in Biological Materials. *Analytical Chemistry*, **56**, 2397-2401. <https://doi.org/10.1021/ac00277a031>
- [14] Kapp, K.J. and Yeatman, E. (2018) Microplastic Hotspots in the Snake and Lower Columbia Rivers: A Journey from the Greater Yellowstone Ecosystem to the Pacific Ocean. *Environmental Pollution*, **241**, 1082-1090. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.033>
- [15] Fan, C., Huang, Y., Lin, J. and Li, J. (2021) Microplastic Constituent Identification from Admixtures by Fourier-Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy: The Use of Polyethylene Terephthalate (PET), Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), Polyvinyl Chloride (PVC) and Nylon (NY) as the Model Constituents. *Environmental Technology & Innovation*, **23**, Article 101798. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101798>