
舟山水产市场海产品中微塑料的污染特征分析

吕莹^{1, 2} 杨晓敏^{1, 2} 陈思^{2, 3} 谢超¹ 张小军^{2, 3¹}

(1. 浙江海洋大学, 浙江 舟山 316022;

2. 浙江省海洋水产研究所, 浙江 舟山 316021;

3. 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室

农业部重点渔场渔业资源科学观测实验站, 浙江 舟山 316021)

【摘要】: 为探索舟山海域微塑料在海洋生物体内的分布状况和累积特征, 调查了舟山水产市场 23 种常见海洋生物(蟹类、贝类、鱼类)的消化道、鳃和软组织内微塑料的污染状况。结果显示, 鱼类鳃、鱼类消化道、蟹类及贝类软组织的平均单位组织微塑料重量丰度分别为 0.30 ± 0.51 个/g、 0.28 ± 0.35 个/g、 0.70 ± 0.39 个/g、 1.50 ± 1.43 个/g, 物种间丰度存在一定差异; 在上述海洋生物中, 仅发现了碎片和纤维状微塑料, 其中纤维状微塑料是主要部分; 各组织摄入微塑料的平均尺寸大小关系为: 贝类>鱼类消化道>鱼类鳃>蟹类, 聚醚砜树脂是主要的聚合物成分。

【关键词】: 微塑料 海洋生物 污染

【中图分类号】 X55 **【文献标识码】** A

微塑料(Microplastics, MPs)在海洋环境中广泛、长期存在和在海洋生物中的蓄积、分布的情况不容小觑, 而其通过海洋生物食物链的传递作用已被证实, 给人类健康造成了潜在的威胁。为此, 对海洋生物中 MPs 进行监测十分必要。目前对微塑料的污染调查多见于某个区域的同类型生物, 很少有对该区域多种生物进行横向调查, 因此不能较为全面反应不同生物栖息环境下微塑料的污染情况。本研究将对舟山水产市场上常见的 15 种鱼类、6 种蟹类、2 种贝类的微塑料污染状况进行调查, 对微塑料的颜色、形状、尺寸和化合物成分等进行表征, 研究不同栖息环境下生物对微塑料的摄取是否存在差异, 以期当地生态风险的评估提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品收集与预处理

作者简介: 吕莹 (1996-), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向: 水产品质量与安全。
陈思 (1984-), 女, 浙江杭州人, 助理研究员, 博士, 研究方向: 生物毒素检测技术开发及应用。
基金项目: 浙江省农业农村厅科技项目 (水产品中危害因子的新型快速精准检测技术开发)

本次调查使用到的鱼类分别为银鲳、龙头鱼、鲩鱼、马鲛鱼、黑鲷、东海带鱼、星鳗、四指马鲛、鳓鱼、半滑舌鳎、鲥鱼、赤鲱、黄鳍棘鲷、远东拟沙丁鱼、弹涂鱼；蟹类分别为锈斑蟊、日本蟊、细点圆趾蟹、红星梭子蟹、拟穴青蟹、三疣梭子蟹；贝类分别为缢蛏、紫贻贝。上述生物购自舟山东河水产市场，每种生物样 3 个平行 (n=3)。

上述生物样品在室温下解冻、洗净、沥干后进行生物学测量。蟹类测量头胸甲宽，贝类测量软组织重量，鱼类测量体长，体长精确到 0.01cm。解剖生物样品，取出个体软组织(鱼类取鳃、胃肠道，其中鳃去除鳃骨，保留鳃弓；贝类去壳后取全部软组织；蟹类取头胸部软组织)，使用精密电子天平测量其湿重，精确到 0.01g，蟹类、贝类、鱼类生物学信息指标见表 1、表 2 和表 3。

表 1 6 种蟹类生物学指标

种类	体重(g/只)	体宽(cm/只)	软组织重量(g/只)
锈斑蟊	137.57±5.42	11.37±1.13	6.92±1.23
日本蟊	94.46±6.88	8.79±1.12	5.78±0.46
细点圆趾蟹	75.37±3.24	6.53±0.79	4.73±0.39
红星梭子蟹	158.43±9.67	12.38±1.36	13.65±1.83
拟穴青蟹	146.79±8.12	11.96±1.48	13.3±2.04
三疣梭子蟹	169.36±11.58	13.79±1.64	14.23±1.92

表 2 2 种贝类生物学指标

种类	体重(g/只)	体长(cm/只)	软组织重量(g/只)
缢蛏	12.35±2.49	6.58±0.48	7.25±1.36
紫贻贝	5.84±1.23	4.63±0.51	2.05±0.32

1.2 微塑料的分离

上述组织用剪刀剪碎后，按照 1:3 料液比加入 10%KOH(m/v)溶液，并用铝箔纸覆盖烧杯口以防止污染和溶液蒸发；将烧杯置于恒温培养摇床中消解 12~48h，消解温度 55℃，震荡速度 80r/min。待生物组织消解完全后，根据消解液体积大小加入 NaI 固体(添加量 $\rho=1.6\text{gNaI/mL}$ 消解液)，磁力搅拌 2min(500rpm/min)使其溶解，混合溶液密度达到 1.6g/mL。将锥形瓶置于玻璃收集杯中，55℃下 500r/min 磁力搅拌(宁波群安实验仪器有限公司)30min 后，缓慢加入 55℃的 NaI 溶液($\rho=1.6\text{g/mL}$)直至上层悬浮液完全溢出，用超纯水冲洗锥形瓶外壁。将收集的溢出液及冲洗液合并，合并液使用真空抽滤装置(宁波群安实验仪器有限公司)过滤至 5 μm 混合纤维素滤膜(直径 47mm, Millipore)，并用超纯水反复冲洗过滤器和膜上的盐。取下滤膜后，置于洁净的玻璃培养皿中，贴好标签并置于 50℃烘箱中烘干。

表 3 15 种鱼类生物学指标

种类	体长(cm/只)	体重(g/只)	消化道重量(g/只)	鳃重量(g/只)
银鲳	21.88±2.15	147.22±14.56	8.76±0.89	6.27±0.58
龙头鱼	22.64±1.98	69.75±11.79	6.39±1.92	3.23±0.41
鲷鱼	42.11±1.34	462.36±43.79	31.47±8.22	32.79±5.39
马鲛鱼	47.75±1.24	512.87±17.26	39.68±6.93	25.42±3.11
黑鲷	23.28±1.54	314.38±28.41	24.23±1.95	22.24±2.76
东海带鱼	48.68±3.57	149.43±10.42	7.25±1.21	3.02±0.14
星鳎	52.68±6.02	614.76±38.55	33.84±6.82	4.87±1.20
四指马鲛	32.75±0.85	423.50±1.77	14.67±1.44	10.66±1.85
鳓鱼	40.31±1.64	483.88±8.95	21.04±3.57	18.87±2.89
半滑舌鳎	30.73±0.39	149.68±2.76	3.88±0.26	2.37±0.14
鲚鱼	36.56±1.26	564.26±20.78	20.98±2.87	24.16±3.20
赤鲱	36.23±2.50	421.18±22.45	24.40±3.24	12.65±2.54
黄鳍棘鲷	19.67±1.34	158.43±7.84	10.76±1.08	9.22±1.43
远东拟沙丁鱼	10.23±1.30	45.88±4.96	2.83±0.24	2.15±0.19
弹涂鱼	14±2.11	38.55±3.75	2.67±0.31	1.85±0.23

1.3 微塑料的鉴定

使用体式显微镜(蔡司, DiscoveryV8)对干燥后滤膜上疑似的微塑料进行观察、计数和拍照。观察过程中, 滤膜在显微镜下以从上到下的Z字形镜检, 以便能够对整张滤膜进行观察。计数时记录疑似微塑料的样品的类型、颜色, 根据类型划分为4类: 纤维、碎片、薄膜、微球。最后对样品进行拍照, 使用软件统计其尺寸, 以其最长边来计算, 并将尺寸分为4类: 5~200 μm、200~500 μm、500~1000 μm、1mm~5mm。使用傅里叶变换显微红外光谱仪(赛默飞, Nicolet iN10)对上述样品进行成分鉴定, 选择反射模式, 光谱范围 4000~675cm⁻¹、光谱分辨率 8cm⁻¹、采集时间 3s、扫描次数 16 次的条件下进行测定。将获得的样品光谱图同自带的标准谱图库进行比对, 匹配率 70%以上表示置信度高, 为成分确定的聚合物。

1.4 质量控制

实验所用实验器具均为玻璃和不锈钢材质, 采用超纯水冲洗 3 遍, 将其烘干后使用。在实验过程中, 穿戴纯棉实验服和丁腈手套; 同时, 保持门窗关闭, 以减少空气流动。所有实验溶液均采用 5 μm 聚四氟乙烯滤膜(直径 47mm, 上海兴亚)过滤后使用, 所有敞口容器均用铝箔纸覆盖。另外每次实验设定 3 个程序性空白, 以检测实验过程中的微塑料污染状况。

2 结果

2.1 海洋生物微塑料丰度

通过消解、浮选及定性后发现，上述 25 种生物除 2 种鱼类外，均受到微塑料的污染，海洋生物微塑料的摄入率达 85.71%，其单位个体丰度和单位质量丰度如图所示。

鱼类单位个体微塑料丰度和单位组织质量丰度如图 1、图 2、图 3 所示。15 种鱼类中，鳎鱼和赤鲢未检出微塑料，其余 13 种鱼类中，东海带鱼单位个体中含有微塑料数量最高，达 9.33 ± 1.53 个/个体。东海带鱼、鳎鱼、黄鳍棘鲷单位个体微塑料数量显著高于其他鱼类 ($p < 0.05$)。对鱼类不同组织进行微塑料的检测，发现赤鲢、鲟鱼、鳎鱼和龙头鱼的消化道未检出微塑料，而远东拟沙丁鱼、赤鲢、鳎鱼、四指马鲛、星鳗、银鲳的鳃未检出微塑料。远东拟沙丁鱼消化道微塑料丰度最高，为 1.06 ± 0.35 个/g，远东拟沙丁鱼、半滑舌鳎、东海带鱼单位消化道重量微塑料丰度显著高于赤鲢、鲟鱼、鳎鱼、星鳗、黑鲷、马鲛鱼和龙头鱼 ($p < 0.05$)。东海带鱼鳃中微塑料丰度最高，为 1.77 ± 0.19 个/g，同半滑舌鳎、弹涂鱼单位鳃重量微塑料丰度显著高于其他鱼类 ($p < 0.05$)。此外，同种鱼类消化道、鳃组织的微塑料总体呈现一定的相关性，如东海带鱼单位个体中含有微塑料数量在 15 种鱼类中最高，其消化道、鳃组织与其他鱼类相比，单位组织重量微塑料丰度相对丰富，还有半滑舌鳎，单位个体中含有微塑料数量仅次于东海带鱼，其消化道、鳃组织单位组织重量微塑料丰度在同类中位居第二；然而远东拟沙丁鱼则不符合相关性，其消化道微塑料丰度为所有鱼类中最丰富，但在其鳃中丰度为 0。

蟹类单位个体微塑料丰度和单位组织质量丰度如图 4、图 5 所示。6 种蟹类中均检测出微塑料，锈斑蟳单位个体中含有微塑料数量最高，达 7.00 ± 2.00 个/个体，各蟹类单位个体微塑料丰度无显著性差异；日本蟳软组织单位重量含有微塑料数量最高，达 1.10 ± 0.10 个/g，显著高于红星梭子蟹、拟穴青蟹、三疣梭子蟹 ($p < 0.05$)；贝类单位个体微塑料丰度和单位组织质量丰度如图 6、图 7 所示。2 种贝类中，紫贻贝单位个体丰度和单位质量丰度均高于缢蛏。

鱼类、蟹类、及贝类的平均单位个体微塑料丰度分别为 3.71 ± 3.12 个/个体、 5.44 ± 1.42 个/个体、 3.67 ± 2.34 个/个体，鱼类鳃、鱼类消化道、蟹类、及贝类的平均单位组织微塑料重量丰度分别为 0.30 ± 0.51 个/g、 0.28 ± 0.35 个/g、 0.70 ± 0.39 个/g、 1.50 ± 1.43 个/g。

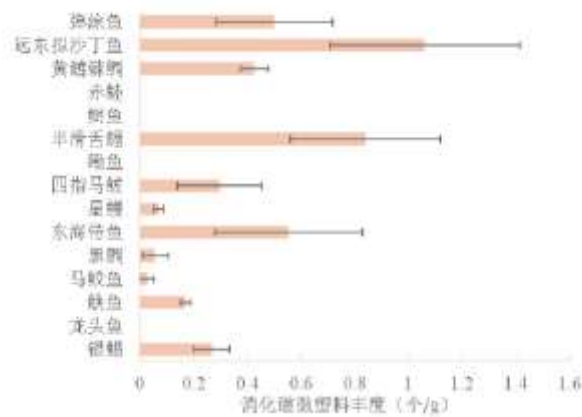


图 1 鱼类消化道单位质量微塑料丰度

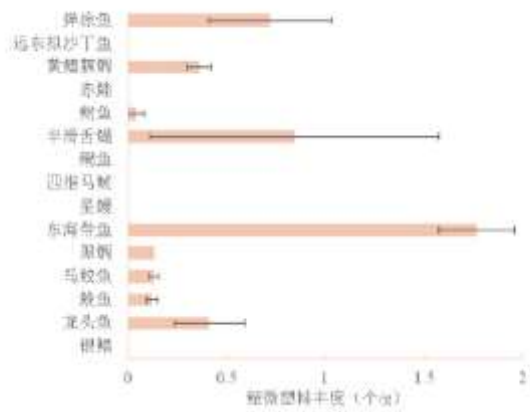


图2 鱼类鳃单位质量微塑料丰度

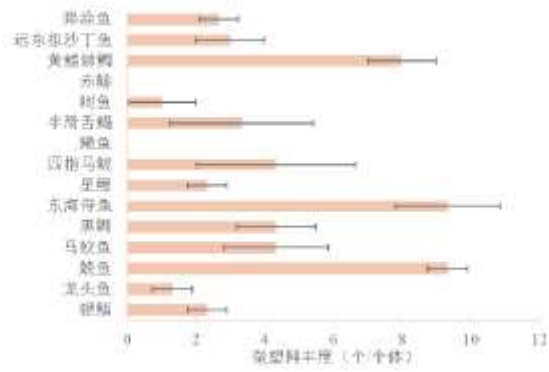


图3 鱼类个体微塑料丰度

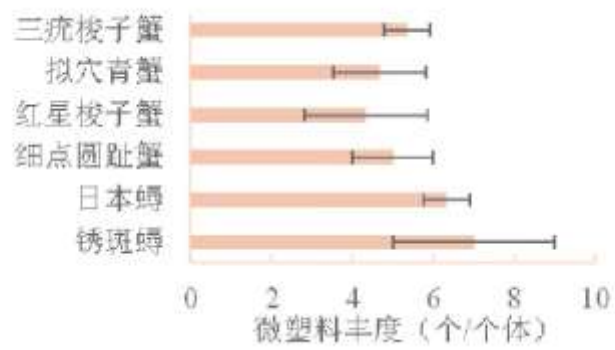


图4 蟹类个体微塑料丰度

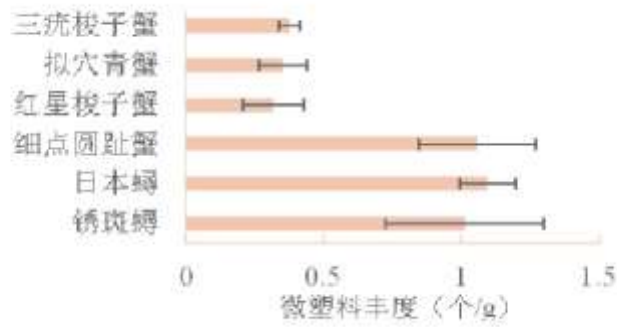


图 5 蟹类软组织单位重量的微塑料丰度



图 6 贝类个体微塑料丰度

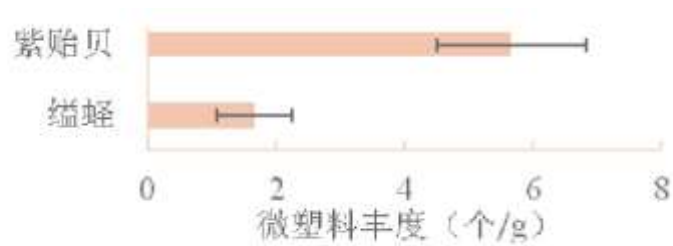


图 7 贝类软组织单位重量的微塑料丰度

2.2 海洋生物微塑料形状、颜色

在上述海洋生物中，仅发现了碎片和纤维状微塑料。碎片和纤维在鱼类中分别占 20.75%、79.25%，在蟹类中分别占 41.94%、58.06%，在贝类中分别占 0、100.00%，说明纤维状微塑料更容易在生物体内蓄积，且停留时间更长。在不同生物中分布比例也有所不同，本研究中，贝类体内纤维微塑料丰度最高，鱼类次之，蟹类最低。

此外，上述海洋生物中检出的微塑料的颜色有 4 类：黑色、白色(透明)、黄色(褐色)、蓝色，不同颜色微塑料在生物体内的分布比例如图 8 所示。其中黑色微塑料数量最多，占总量的 34.38%，白色和黄色微塑料次之，均为 31.25%，蓝色微塑料为 3.13%，仅出现在鱼类样品。特别的是，贝类体内微塑料均为黄色，且形状为纤维。海洋生物样品中纤维微塑料的颜色主要为白色和黄色，碎片微塑料的颜色主要是黑色。



图 8 海洋生物体内不同颜色微塑料的比例

2.3 海洋生物微塑料尺寸

使用粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 混合纤维素滤膜收集微塑料，部分微塑料照片如图 9 所示。 $5\ \mu\text{m}\sim 5\text{mm}$ 范围内，鱼类鳃组织摄入的微塑料粒径范围在 $53.16\sim 1347.52\ \mu\text{m}$ ，平均粒径大小为 $288.05\pm 288.24\ \mu\text{m}$ ，其中，尺寸小于 $200\ \mu\text{m}$ 的微塑料最为常见，占鱼类鳃组织微塑料总量的 54.05% ，尺寸在 $200\sim 500\ \mu\text{m}$ 的微塑料次之，占 24.32% ，尺寸在 $500\ \mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 的微塑料占 18.92% ，尺寸大于 1mm 的微塑料占 2.7% ；鱼类消化道摄入的微塑料粒径范围在 $22.39\sim 1728.42\ \mu\text{m}$ ，平均粒径大小为 $396.02\pm 321.62\ \mu\text{m}$ ，其中，尺寸在 $200\sim 500\ \mu\text{m}$ 的微塑料最为常见，占鱼类消化道微塑料总量的 37.50% ，尺寸在 $500\ \mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 的微塑料次之，占 31.25% ，尺寸小于 $200\ \mu\text{m}$ 的微塑料占 28.13% ，尺寸大于 1mm 的微塑料占 3.13% 。鱼类消化道、鳃体内不同尺寸微塑料的比例如图 10 所示。另外，比较鱼类鳃和消化道组织发现，其对于不同尺寸微塑料的蓄积具有差别，在鳃中检测到的微塑料平均尺寸比消化道小。

$5\ \mu\text{m}\sim 5\text{mm}$ 范围内，蟹类所摄入的微塑料粒径范围在 $38.56\sim 667.37\ \mu\text{m}$ ，平均粒径大小为 $255.52\pm 197.23\ \mu\text{m}$ ，其中，尺寸小于 $200\ \mu\text{m}$ 的微塑料最为常见，占蟹类微塑料总量的 29.73% ，尺寸在 $200\sim 500\ \mu\text{m}$ 的微塑料次之，占 27.03% ，尺寸在 $500\sim 1\text{mm}$ 的微塑料占 16.21% ，尺寸大于 1mm 的微塑料未检出。

$5\ \mu\text{m}\sim 5\text{mm}$ 范围内，贝类所摄入的微塑料粒径范围在 $112.88\sim 1135.27\ \mu\text{m}$ ，平均粒径大小为 $426.26\pm 337.76\ \mu\text{m}$ ，其中，尺寸在 $200\sim 500\ \mu\text{m}$ 的微塑料最为常见，占贝类微塑料总量的 57.14% ，尺寸小于 $200\ \mu\text{m}$ 的微塑料次之，占 28.57% ，尺寸大于 1mm 的微塑料占 14.29% ，尺寸在 $500\ \mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 的微塑料未检出。鱼类、蟹类、贝类体内不同尺寸微塑料的比例如图 11 所示。

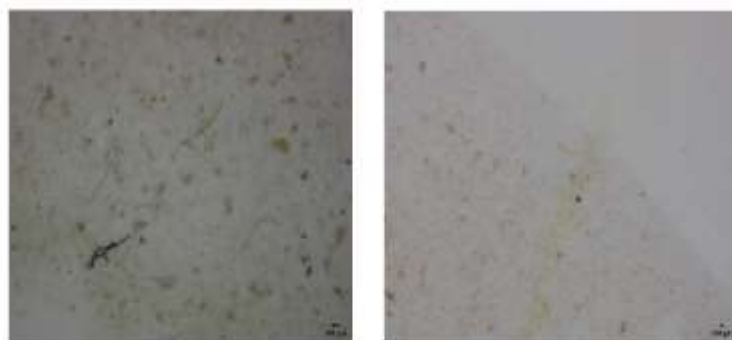


图 9 贻贝体内不同微塑料形状的外形

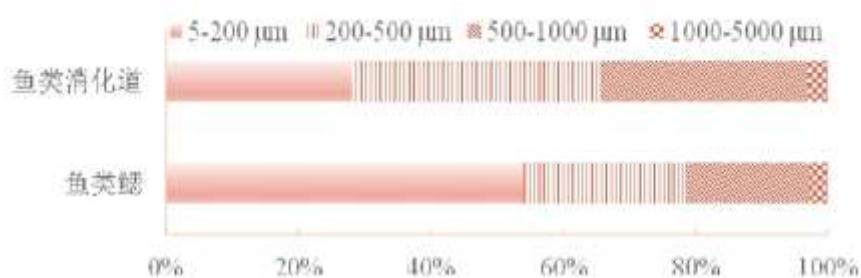


图 10 鱼类消化道、鳃体内不同尺寸微塑料的比例

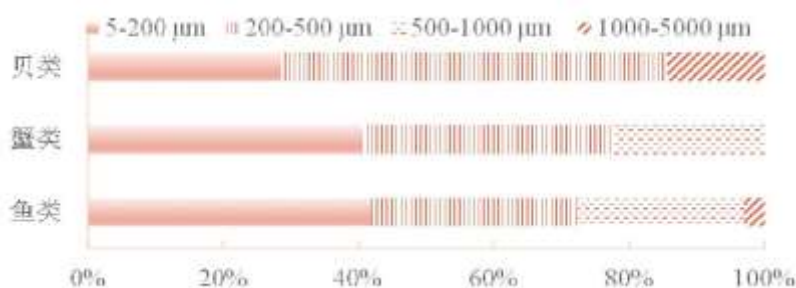


图 11 鱼类、蟹类、贝类体内不同尺寸微塑料的比例

2.4 海洋生物微塑料类型

对上述海洋生物进行微塑料检测，发现了 5 种聚合物类型的微塑料，分别为尼龙、聚砜、聚醚砜树脂、聚乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯。不同类型微塑料的数量高低顺序表现为：PES>Nylon>PSF>PET>PE。PES 微塑料在鱼类、蟹类中含量最高，而贝类样品中未检出 PES，仅检出 Nylon 和 PE 两种聚合物，Nylon 微塑料在鱼类、蟹类中含量较 PES 次之，在贝类样品中为含量最高。PET 聚合物仅出现在鱼类鳃组织中，占鳃组织微塑料总量的 6.06%，PE 聚合物在鱼消化道和贝类样品中被发现，分别占微塑料总量的 2.94%和 14.29%。

3 讨论

上述海洋生物微塑料单位个体丰度为蟹类>鱼类>贝类，说明在舟山海域，上述海洋生物比较普遍地受到了微塑料的污染，张文广等人 2018 年对舟山海域海产品微塑料污染进行调查，也在鱼类、贝类和虾类体中检测到微塑料。而海洋生物体内微塑料的丰度与海水、底泥沉积物的污染程度密切相关：李佳娜对中、英两国海域的海水和紫贻贝进行微塑料污染调查和对比，发现收集的海水和紫贻贝的微塑料的丰度、形状及聚合物成分趋于一致。

分别对鱼类鳃和消化道组织进行微塑料的检测后，上述海洋生物微塑料单位组织重量丰度中贝类>蟹类>鱼类鳃>鱼类消化道。鱼类在水环境中通过鳃丝摄取和排出物质，因此能够直接摄入微塑料，最终在鳃丝中蓄积，而有的研究对于统计鱼体微塑料丰度时，仅解剖消化道进行消解，这无疑会使降低鱼类体内微塑料丰度水平。贝类是一种底栖生物，也是海洋生态系统里的低级消费者，Farrell 等人使用经微塑料暴露后的贻贝饲喂滨蟹，21d 后取样发现蟹胃、肝胰腺、卵巢、鳃等组织检测到了荧光聚苯乙烯微球，表明微塑料可以以食物链的方式进入捕食者体内，再通过血液、淋巴在生物体内转移。通常来说，相同水域下，高级消费者(如鱼类)除了从通过呼吸、过滤的生理行为从水环境中直接摄取微塑料，还可以通过捕食的方式进食体内蓄积微塑

料的低级消费者生物, 因食物链传递作用使其体内微塑料丰度增大, 在本研究中海洋生物微塑料单位组织重量丰度却与此相反, 即低级消费者(贝类)微塑料丰度显著高于高级消费者(鱼类); 东海带鱼、鲷鱼和黄鳍棘鲷为鱼类中微塑料丰度较高的3种鱼类, 生活习性均为中下层鱼类, 与贝类接近, 但其主要捕食小型鱼类而不是贝类。说明一些高级消费者体内微塑料丰度的高低不以栖息环境有关, 而与其对食物的选择性具有较大联系。

Zhang 等人在 2019 年调查了舟山嵊泗群岛海水、底泥沉积物和鱼类微塑料污染情况, 调查结果显示纤维是上述样品中微塑料的主要形状, 与他在 2018 年对东海 17 个站点底泥沉积物微塑料调查结果相似。相关研究也报道了纤维是微塑料污染的主要部分, 也是鱼类和底栖生物中主要摄入的微塑料形状。在本研究中, 上述海洋生物体内仅发现了碎片和纤维状微塑料, 其中纤维是主要形状, 占微塑料总量的 79.25%, 贝类体内纤维微塑料丰度最高, 鱼类次之, 蟹类最低, 与上述结果类似。

4 结论

本研究调查了舟山水产市场常见的 23 种海洋生物体内微塑料污染特征, 发现微塑料形状和聚合物成分分别以纤维状和 PES 为主, 总体上检出的微塑料尺寸小于 1mm。鱼类鳃和消化道组织中微塑料的尺寸、形状有所差异; 另外生物体内微塑料的丰度与栖息环境和食物链有关。

参考文献:

- [1] Farrell P, Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 177:1-3.
- [2] 张文广, 李乃成, 唐志杰, 等. 微塑料在舟山海域海产品中的污染状况分析 [J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(11):61-65.
- [3] 李佳娜. 贻贝中微塑料的污染特征及其与典型污染物的复合毒性效应 [D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [4] Abidli S, Lahbib Y, Trigui E, Menif N. Microplastics in commercial molluscs from the lagoon of Bizerte (Northern Tunisia) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 142:243-252.
- [5] Zhang C, Zhou H, Cui Y, et al. Microplastics in offshore sediment in the yellow Sea and east China Sea, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 244:827-833.
- [6] Zhang D, Cui Y, Zhou H, et al. Microplastic pollution in water, sediment, and fish from artificial reefs around the Ma' an Archipelago, Shengsi, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703:134768.
- [7] Güven O, Gökdağ K, Jovanovic B, et al. Microplastic litter composition of the Turkish territorial waters of the Mediterranean Sea, and its occurrence in the gastrointestinal tract of fish [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 223:286-294.
- [8] 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.
- [9] Wang J, Wang M, Ru S, et al. High levels of microplastic pollution in the sediments and benthic organisms of the South Yellow Sea, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 651:1661-1669.