王兵帅,齐 杰,孟 鑫,等.白洋淀野生鱼类体内微塑料赋存特征及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):5254-5263.
Wang B S, Qi J, Meng X, et al. Occurrence characteristics and influencing factors of microplastics in wild fish in Baiyangdian Lake [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):5254-5263.

白洋淀野生鱼类体内微塑料赋存特征及影响因素

王兵帅[1,2],齐 杰[1,2],孟 鑫[1,2,3*],魏静凯[1,2] (1.河北工程大学,河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心,河北 邯郸 056038；2.河北工程大学能源与环境工程学院,河北 邯郸 056038；3.中国科学院生态环境研究中心,环境水质学国家重点实验室,北京 100085)

摘要：微塑料(MPs)污染作为全球性环境问题,已对水生生态系统和野生鱼类健康构成严重威胁.本研究分析了白洋淀 11 种野生鱼类体内微塑料(MPs)污染特征及影响因素.结果显示,在白洋淀 11 种野生鱼体内,微塑料的检出率为 100%,平均丰度为(26.54±3.69)个/条,检测出的微塑料大多数为尺寸<0.5mm 的透明和黑色纤维状,其聚合物成分多样化.白洋淀鱼类体内 MPs 的积累受多种因素的综合影响:水环境微塑料丰度决定摄入机率;鱼类体长、体重影响生物放大效应;摄食习性调控暴露概率;栖息地特征(水体中 MPs 垂直分布)制约暴露水平.这些因素的相互作用导致不同鱼类个体间 MPs 积累水平存在显著差异,揭示了 MPs 生物累积的复杂机制.本研究结果将为白洋淀鱼体内 MPs 污染现状和风险评估提供数据支撑.

关键词：微塑料；白洋淀；食性；野生鱼；影响因素
中图分类号：X524 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)09-5254-10

Occurrence characteristics and influencing factors of microplastics in wild fish in Baiyangdian Lake.

WANG Bing-shuai[1,2], QI Jie[1,2], MENG Xin[1,2,3*], WEI Jing-kai[1,2] (1.Hebei Technology Innovation Center of Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China；2.School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China；3.Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environment Science, Beijing, 100085, China). *China Environmental Science*, 2025,45(9)：5254~5263

Abstract：Microplastics (MPs) pollution, as a global environmental problem, has been recognized as a serious threat to aquatic ecosystems and the health of wild fish. The characteristics and influencing factors of microplastic pollution were analyzed in 11species of wild fish from Baiyangdian. The results indicated that the detection rate of MPs in these 11species was 100%, with an average abundance of (26.54±3.69) MPs per individual. The majority of the detected MPs were identified as transparent and black fibrous particles, with sizes predominantly less than 0.5mm, and their polymer composition was found to be diverse. The accumulation of MPs in Baiyangdian fish was influenced by multiple factors: the biological characteristics of the fish (body length and weight) were shown to determine the probability of MPs intake; the trophic level was observed to affect the biomagnification effect; feeding habits were found to regulate exposure probability; and habitat characteristics (such as the vertical distribution of MPs in the water column) were demonstrated to constrain exposure levels. The interaction of these factors resulted in significant variations in MPs accumulation among different fish individuals, revealing the complex mechanisms underlying MPs bioaccumulation. The findings of this study are expected to provide valuable data support for assessing the status and risks of MPs pollution in Baiyangdian fish populations.

Key words：microplastics；baiyangdian lake；feeding habits；wild fish；influencing factor

MPs 是一种粒径小于 5mm 的新型污染物[1],主要分为初生塑料和次生塑料颗粒[2-3],MPs 的来源主要包括大塑料进入环境后的降解和破碎[4],以及工业制备中产生的微米级初生塑料颗粒.MPs 作为一种新兴的全球性污染物,已广泛存在于水生生态系统中,并对野生鱼类的健康和生态平衡构成了严重威胁.研究表明,MPs 不仅存在于海洋表层和深海沉积物中,还通过食物链传递,影响从浮游生物到大型鱼类的整个生态系统[5].MPs 的积累不仅影响鱼类的生长发育、繁殖能力和生存率,还可能通过食物链传递,对更高营养级的生物产生潜在健康风险[6].MPs 对水生生物的生长活动、生命健康产生威胁,同时也对生态系统的功能产生影响[7].此外,MPs 还

收稿日期：2025-02-17
基金项目：河北省高等学校科学研究项目(CXZX2025065)资助
* 责任作者, 讲师, xinmeng@rcees.ac.cn

可能吸附其他有害化学物质,进一步加剧其毒性[8].因此,研究野生鱼类体内 MPs 的积累特征、影响因素及其潜在风险至关重要.

MPs 在鱼类体内的积累受到多种因素的综合影响,这些因素包括生物特征、MPs 特性、环境条件以及人类活动等[9-13];然而,在获得的结果中发现了很大的差异.有研究表明,嘴巴的大小会影响鱼类对 MPs 的摄入[14],另一方面,形态和栖息地偏好等摄食偏好以外的物种特征可能会影响鱼类摄入 MPs 的数量[15].有实验证明,鱼类的性格会影响它们对 MPs 的接触[16].还有实验结果表明,鱼类的游泳行为影响其摄入 MPs 纤维和颗粒,活跃的鱼类更有可能摄入 MPs[17].

本研究通过分析白洋淀水环境及多种鱼类中 MPs 的污染特征,旨在阐明鱼类体内 MPs 积累的主要影响因素(自身因素或环境来源).通过比较鱼类及其栖息地中 MPs 的特征差异,揭示鱼类从环境中富集 MPs 的机制.研究成果可为白洋淀野生鱼类 MPs 污染评估及渔业资源保护提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　样品采集

2023 年 10 月,采用渔船拖网法在白洋淀 9 个代表性点位采集野生鱼类样本(图 1),共获得 11 种 140 尾个体.基于当地鱼类生态资料,对样本的物种分类、食性特征及栖息环境进行系统鉴定(表 1).所有样本均为渔民当日捕获的新鲜野生个体,采集后立即用去离子水清洗体表附着物,进行物种标记并低温保存.每尾鱼的体长(±0.1cm)和体重(±0.1g)均经精确测量后,于零下 20℃冷冻保存,以备后续实验分析.

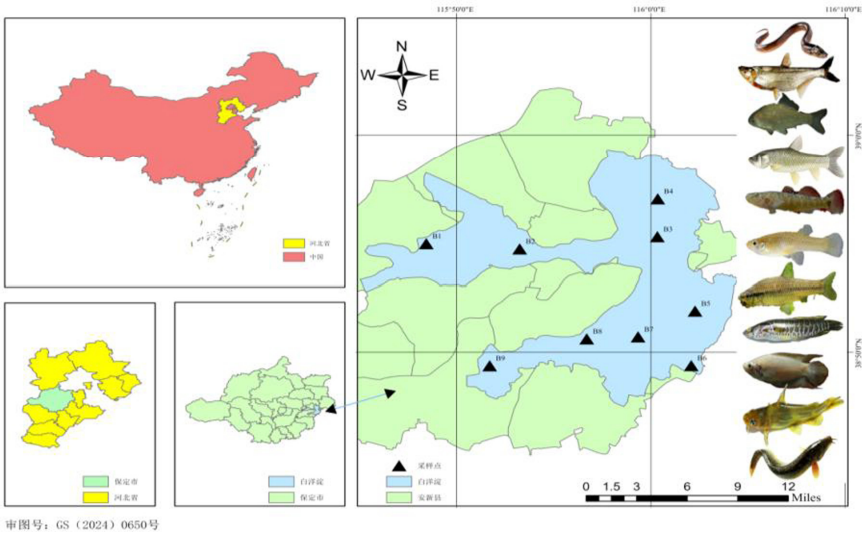


图 1　白洋淀采样点示意

Fig.1　Sampling point diagram of Baiyangdian Lake

表 1　鱼类形态参数

Table 1　Fish morphological parameters

鱼种	数量	体长(cm)	体重(g)	栖息水层	食性
乌鳢	11	18.56	59.09	底层	肉食性
翘嘴鲌	10	20.44	83.22	底层	肉食性
黄鳝	6	34.7	31.78	底层	肉食性
黄颡鱼	11	18.61	61.65	底层	杂食性
圆尾斗鱼	11	7.64	6.07	中下层	肉食性
虾虎鱼	10	8.24	5.3	中上层	杂食性
鲫	26	12.9	44.8	底层	杂食性
泥鳅	12	14.21	15.67	底层	杂食性
食蚊鱼	12	5.13	1.67	表层	杂食性
麦穗鱼	19	7.66	3.4	中上层	杂食性
草鱼	12	30.03	1162.14	中下层	草食性

1.2　样品的分离与提取

在解剖鱼类时,首先将鱼固定在解剖盘上,腹部朝上.从肛门处沿腹部中线向上剪开至鳃盖下方,小心分离内脏器官.依次取出鳃、胃肠道和肌肉.将鳃、胃肠道和肌肉分别清洗后称重,并记录数据.在每个样品中加入 1% SDS(十二烷基硫酸钠)溶液,随后将烧杯置于 55℃、125r·min^{-1} 的恒温培养箱中振荡消解 6h.消解完成后,将样品冷却至室温,用孔径为 0.012mm 的不锈钢筛网进行过滤,将残渣转移至新的烧杯中.接着,在烧杯中加入蛋白酶 K 和 Tris−HCl 缓冲溶液,将样品再次置于 55℃、125r/min 的恒温

培养箱中振荡消解 24h.消解完成后,将样品冷却至室温,用 0.012mm 的不锈钢筛网进行过滤.随后,用 10% KOH 溶液冲洗筛网,重复 3 次,将所有冲洗后的溶液收集到烧杯中,并加入适量的 10% KOH 溶液,将烧杯再次置于 55℃、125r/min 的恒温培养箱中振荡消解 6h.消解完成后,使用 NaCl + $MnSO_4$ 饱和混合溶液对样品进行浮选,重复 2~3 次.然后,用抽滤装置过滤上清液,将滤膜置于玻璃皿中烘干,以待后续观察.

1.3 质量控制

为了最大限度地减少实验过程中的污染,所有仪器在使用前均用去离子水冲洗三次[14].此外,所有液体溶液,包括自来水、盐水和 KOH 溶液,在使用前均通过玻璃超细纤维过滤器进行过滤[13].在实验过程中,实验人员全程佩戴手套和实验服,并在样品不使用时立即将其盖好,以防止外部污染.在 MPs 提取和检查过程中,同时进行了无样品的程序空白实验,以分析可能的空气污染[15],空白实验结果被重复测定,通过对比对照组数据,对解剖后的鳃、胃肠道和肌肉的称重数据进行校正,在后续各样品中计算 MPs 丰度时均减去相应空白实验的 MPs 丰度,从而确保实验结果的准确性和可靠性.

1.4 样品的鉴定分析

样品前处理完成后,进入 MPs 的分析鉴定阶段.鱼体内 MPs 的丰度以“个/条”表示.采用奥斯微体式显微镜(AOSVI T2-3M180,中国)对滤膜进行目检,挑拣出滤膜上的疑似 MPs 颗粒,并详细记录其颜色、粒径和形状特征.随后,利用傅立叶变换红外光谱仪(FTIR)对 MPs 的聚合物类型进行鉴定.鉴定过程中,将 MPs 的 FTIR 光谱与谱库中的标准光谱进行匹配.当匹配命中率高于 65%时,该数据被认定为有效.

1.5 MPs 生态风险计算

MPs 生态风险指数是一种用于评估 MPs 污染生态风险的量化指标.它基于不同塑料聚合物的毒性数据,通过综合考虑 MPs 的类型、毒性及其在环境中的占比,来量化 MPs 对生态系统的潜在危害[18-19].

MPs 生态风险指数计算公式如下:

$$H = \sum P_n \times S_n$$

式中:H 为 MPs 的风险指数;P_n 为水体中各类型 MPs 的质量分数;S_n 为各类 MPs 聚合物的危险评分,具体数值见表 2.

表 2 聚合物危害评分

Table 2 Polymer hazard score

聚合物名称	缩写	危害评分
聚乙烯	PE	11
聚丙烯	PP	1
聚苯乙烯	PS	30
聚酰胺	PA	47
聚丁烯	PB	6
乙烯-醋酸乙烯共聚物	EVA	9
聚氯乙烯	PVC	10551
聚对苯二甲酸乙二醇酯	PET	4
聚氨酯	PU	7384
聚碳酸酯	PC	1177

1.6 数据处理与分析

运用 ArcMap 10.8 进行采样点空间分布可视化,通过 Excel 2021 完成基础数据整理,利用 Origin 2022 绘制野生鱼体内 MPs 的粒径、颜色和形态组成分布图,并采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析以检验不同采样点间 MPs 丰度的显著性差异.为了更全面地了解鱼类生长状态对 MPs 积累的影响,鱼体内的 MPs 丰度和浓度分别以“个/条”和“个/g”为单位进行表示.这种双单位表示方法能够更准确地反映 MPs 在鱼类体内的积累情况,同时兼顾个体差异和生物量因素.本研究的 11 种鱼类,每种鱼类的样本量均不少于 10 个,以确保样本的代表性.

2 结果与讨论

2.1 白洋淀鱼体内 MPs 的积累特征

实验共分析了乌鳢、翘嘴鲌、黄鳝、黄颡鱼、圆尾斗鱼、虾虎鱼、鲫、泥鳅、食蚊鱼、麦穗鱼和草鱼共 11 个品种、140 条淡水鱼类,在 140 条鱼类样本体内均检测出 MPs 存在,检出率为 100%.与国内外其它研究相比,本研究高于珠三角河网野生鱼类的 84%[20]、漓江野生淡水鱼的 81%[21]和葡萄牙的蒙台哥河口野生鱼类的 38%[22],这表明白洋淀野生鱼类体内 MPs 检出率处于较高水平.如图 2(a)所示,统计了白洋淀不同种野生鱼体内 MPs 平均积累量情况.MPs 的检出数量范围在 5~87 个/条,平均丰度为 26.54 个/条,本研究与韩国汉江鱼类中 MPs 的检测结果(22.0±16.0)个/条[16]和苏必利尔湖 26 个/条[11]

相似.然而,这些值远高于湛江红树林湿地鱼类(2.83±1.84)个/条[15]和意大利南高山湖泊鲈(2.90±2.61)个/条[17].不同地区鱼类之间的MPs丰度差异显著,这可能与鱼类的栖息环境、食性和体型大小密切相关.总体来看,在白洋淀的几种常见淡水鱼中,均存在不同程度的 MPs 污染,乌鳢、黄鳝和黄颡鱼体内 MPs 的丰度与其他鱼类相比较高,麦穗鱼和食蚊鱼体内 MPs 的丰度最低.如图 2(b)所示,鱼体内每克组织中的 MPs 颗粒数随着体重的增加而递减,这表明体型较小、体重较轻的鱼类可能面临更高的 MPs 污染风险.这一发现与海南岛南渡河野生鱼体内 MPs 的积累特征相似[18].然而,MPs 颗粒数与生物体重之间的关系可能并不简单,这种关系可能因不同的生物种类和生态系统而异.

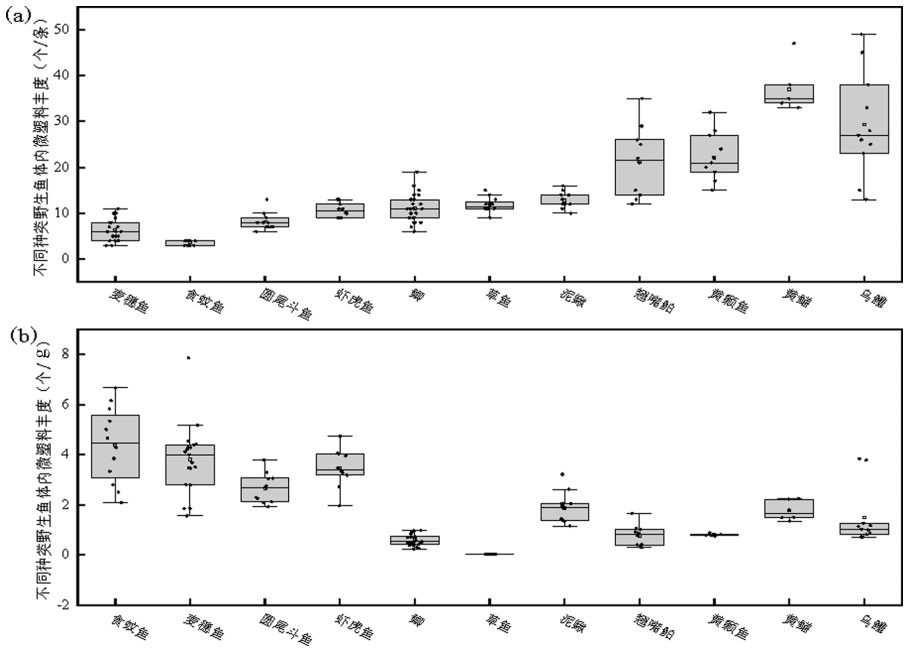


图 2　不同鱼类体内 MPs 丰度

Fig.2　Abundance of microplastics in different fish

2.1.1　MPs 在鱼类各组织器官中的累积规律　如图 3(a)所示, MPs 在不同种类野生鱼体内不同组织中的分布具有显著差异.鳃作为鱼类与水体直接接触的器官,MPs 含量因鱼种而异,如黄颡鱼鳃中 MPs 体内占比为33.58%,黄鳝仅为15.67%,这与鱼类的生活习性、栖息环境及鳃的过滤能力有关.胃肠道是鱼类摄食过程中 MPs 进入体内的主要途径[23],其 MPs 数量普遍高于鳃和肌肉,如黄鳝胃肠道中 MPs 占比高达 69.59%,远超鳃和肌肉,这表明鱼类摄食行为是 MPs 摄入的主要方式.肌肉中 MPs 数量相对较少,如虾虎鱼肌肉中 MPs 占比 10.92%,远低于胃肠道的 61.49%,说明 MPs 在鱼类体内的传输和积累受到限制.这一发现证实了 MPs 已广泛分布于白洋淀鱼类各组织,并存在于浅水湖泊食物网中[24-25].MPs 在鱼类体内呈消化道>鳃>肌肉的分布模式,主要经由摄食摄入,部分通过鳃吸收[26].这与大多研究结果一致,例如印度尼西亚渔民捕获的鱼类胃肠道中的 MPs 含量比鳃中的要高[27],马来西亚商业海鱼胃肠道中的 MPs 含量高于鳃中 MPs 含量[28].

MPs 在鱼体内的分布特征受到多种因素的影响,其中粒径是一个关键因素.研究表明,不同粒径的 MPs 在鱼体内的分布存在显著差异,这种差异体现在不同组织中[29].如图 3(b)所示,不同粒径的 MPs 在鱼体内的分布特征如下:总体来看,粒径在 0.5~1.5mm 的 MPs 在鳃、胃肠道和肌肉中的数量均最多,这可能是因为该粒径范围的 MPs 更容易被鱼类摄取和在体内传输.随着粒径的增大其在肌肉组织中的含量越来越少,鱼类摄食含有 MPs 的颗粒后,MPs 可能通过肠道壁进入血液循环并扩散至肌肉组织,小粒径的 MPs(尤其是 0.5~1.5mm)在鳃、胃肠道和肌肉中都占据了主导地位,且更容易通过某种机制从胃肠道转移到肌肉组织.50~200μmMPs(MPs)的

选择性积累可能源于其三重优势:该粒径范围既符合水生生物摄食偏好(50~200μm),又能以次级粒径(0.5~3μm)穿透肠道屏障,同时保持(5~10μm)的毛细血管迁移能力,从而实现高效生物积累[30].

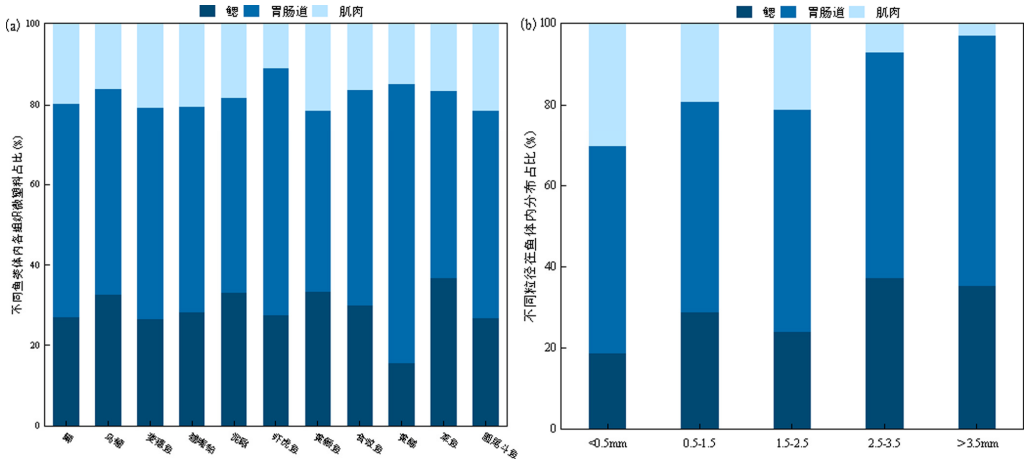


图 3 不同鱼类体内各组织丰度占比、分布特征

Fig.3 The abundance proportion and distribution characteristics of various tissues in different fish species

2.1.2 鱼体内 MPs 的形貌和组成特征 鱼类摄入的 MPs 呈现形态、粒径、颜色和组成的多样性,反映了水体中 MPs 的广泛分布特征[31].此外, MPs 的理化特性影响鱼类摄取,通过水体进入鱼体积累,威胁鱼类健康及生态系统安全[32].如图 4 所示,白洋淀淀区鱼类体内共检出 4 种形态 MPs,分别是纤维状、碎片状、膜状和颗粒状,4 种形态 MPs 占比分别为 97.12%、1.10%%、0.59%和 1.18%.粒径主要集中在 0.25~5mm 区间.粒径在小于 0.5mm 区间的数量占比最多,为 56.27%,其他粒径占比分别为:0.5~1.5mm(25.54%)、1.5~2.5mm(10.58%)、2.5~3.5mm (4.57%)和大于 3.5mm(3.04%).颜色共 7 种,分别是:透明、黑色、蓝色、红色、绿色、黄色和紫色.白洋淀野生鱼体内 MPs 以透明和黑色为主,占比分别为 32%和 25.65%.蓝色、绿色、红色、紫色、红色和黄色数量较少,占比分别为:13.46%、15.31%、4.44%、4.90%和 4.25%.MPs 的颜色可能会因紫外线辐射、风化和微生物降解而改变[4],这是透明 MPs 占比最高的原因之一.

通过傅里叶显微红外光谱共检测到 11 种主要聚合物类型,聚合物类型占比分别为:聚乙烯 PE(13.21%)、聚丙烯 PP(14.99%)、PS(4.10%)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 PET(19.70%)、聚氯乙烯 PVC(10.23%)、氯化聚乙烯 CPE(21.66%)、聚酰胺 PA(3.81%)、尼龙 NYLON(1.30%)、聚氨酯 PU (5.18%)、聚乙烯醇缩丁醛 PVB(3.68%)和乙烯-醋酸乙烯共聚物 EVA(2.13%).聚乙烯、聚酯、聚丙烯、聚酰胺和丙烯酸是湖泊最常见的聚合物类型[33],因为这些聚合物用于捕鱼,也可能被排放到废水中[34].检测出的 MPs 大多为尺寸小于 0.5mm 的透明和黑色纤维状颗粒,这与其他研究报道结果相似,小于 0.5mm 黑色和透明色的纤维状 MPs 在鱼类体内和水体中占比显著[35].

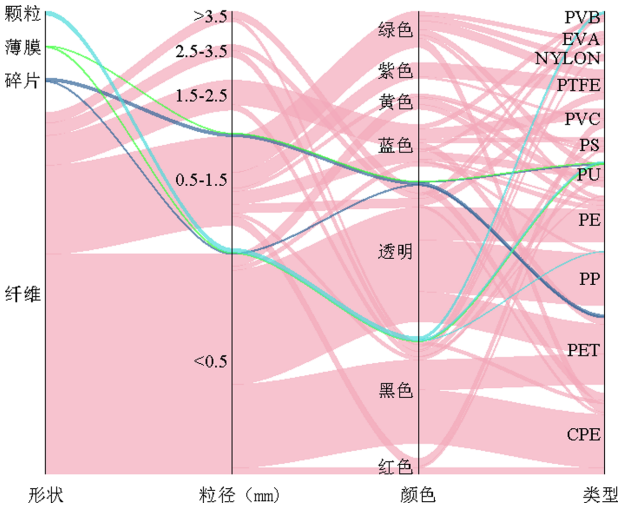


图 4 白洋淀淡水鱼体内 MPs 理化性质的相互关系

Fig.4 The interrelationship of physicochemical properties of MPs in freshwater fish from Baiyangdian

2.2 白洋淀鱼体内 MPs 积累影响因素分析

水环境中 MPs 的丰度对鱼类体内 MPs 积累的影响主要体现在以下几个方面:一是暴露机会,水环境 MPs 丰度越高,鱼类接触和摄取 MPs 的几率越大;二是摄食行为,鱼类可能直接摄食水中的 MPs,或通过食物链传递摄入;三是分布差异,MPs 在水体和沉积物中的分布不均,底栖鱼类更易摄取沉积物中的 MPs;四是粒径影响,较小粒径的 MPs 更容易进入鱼类内脏甚至血液循环;五是水动力和生物扰动,这些因素会导致沉积物中的 MPs 重新悬浮到水体中,增加鱼类的暴露风险.这些机制相互作用,共同决定了 MPs 在鱼类体内的分布和积累程度.

水环境(包括上覆水和沉积物)MPs 浓度作为关键驱动因子,与鱼类体内积累量呈显著正相关,这种剂量-效应关系在多个物种中均得到验证.例如,在某河流主流河段的研究中,鲫肠内的 MPs 积累量与水体中 MPs 浓度密切相关[36].由于鲫在白洋淀淀区 9 个采样点中均有捕获,因此选择鲫代表鱼类与水体和沉积物进行对比(图 5).从 MPs 丰度值的空间分布来看,白洋淀淀区水环境中的 MPs 与鱼类体内 MPs 存在一定的联系.在白洋淀淀区设置的 9 个采样点中,B2、B4、B5、B6、B7 和 B8 这 6 个采样点的环境中 MPs 丰度与鱼类体内 MPs 丰度呈现出基本一致性,表明 MPs 在生物与空间分布上存在显著的相关性[35].有研究也发现,在中国珠江口的僧帽牡蛎体内,其 MPs 丰度与周围水域的 MPs 污染水平呈正相关[37].随着水环境中 MPs 丰度的升高,鱼类在觅食、呼吸及游动过程中接触到 MPs 的概率显著增加.高浓度的 MPs 极大地提高了鱼类直接暴露于 MPs 的风险.

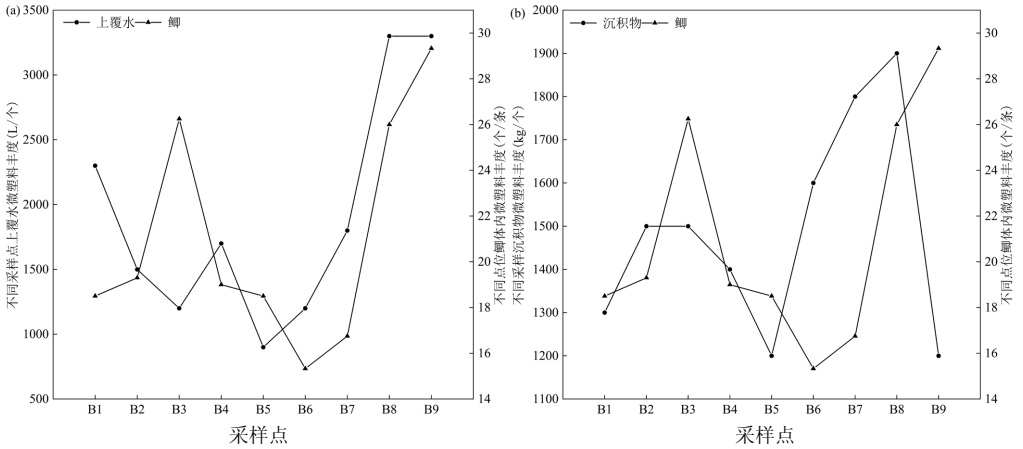


图 5　鲫体内 MPs 丰度与各采样点上覆水和沉积物丰度对比

Fig.5　Comparison of microplastic abundance in carassius auratus with overlying water and sediment abundance at each sampling point

研究证实,鱼类的体长和体重与其体内 MPs 积累量之间的关系存在一定的复杂性,不同研究得出的结论并不完全一致.在本研究中,我们采集了多种大小和重量的鱼类样本,通过对研究区域鱼类体内 MPs 含量和其对应的体长及体重做相关性分析(图 6),发现研究区域鱼类 MPs 含量与体长、体重均呈现极显著正相关关系(P<0.01),这一结果与韩国汉江鱼类的相关研究结论一致[38].吕泗渔场经济鱼类的研究表明 MPs 丰度与鱼类体长、体质量之间并无显著相关性(P>0.05)[39].不同研究的样本选择、采样区域和环境条件不同,可能导致研究结果的差异.例如,吕泗渔场的研究未发现显著相关性,而伊比利亚西北部鲽鱼的研究则发现了一定的负相关性[40].

鱼类的栖息水层是影响 MPs 积累的关键因素之一.如图 7(a)所示,不同栖息水层的野生鱼类体内 MPs 的丰度表现出显著差异.具体表现为底层野生鱼的 MPs 丰度最高,其次是中层野生鱼,而表层野生鱼的 MPs 丰度最低.这与湘江流域[41]和中国广东河口的研究的研究结果相似[42].底层鱼类主要生活在沉积物丰富的环境中,沉积物中 MPs 的含量通常较高,因此底层鱼类更容易摄入沉积物中的 MPs,而中上层鱼类主要摄食浮游生物,其摄食范围与 MPs 的分布区域重叠较少[43].然而在北部湾的研究中,中上层鱼类的 MPs 丰度相对较高[44].也有一些研究报告称,栖息地偏好与鱼类 MPs 摄入量无显著相关[45].这

些发现表明,鱼类的栖息地偏好是影响其 MPs 摄入量的一个重要因素.

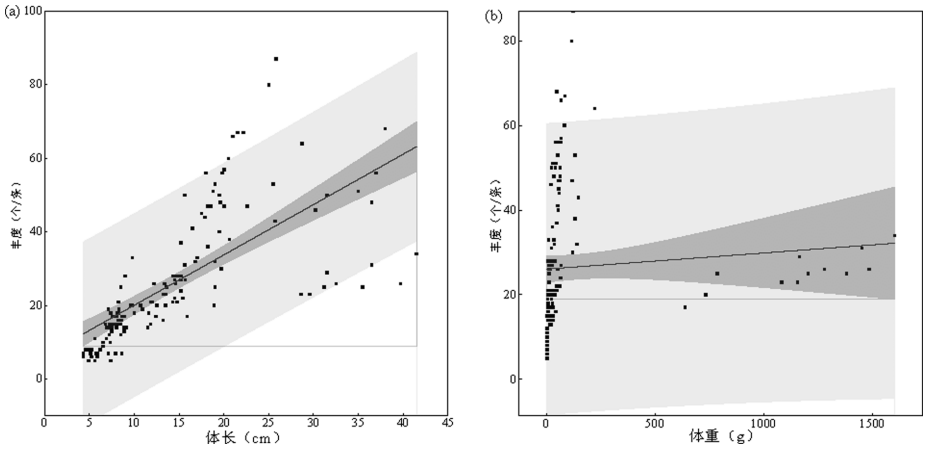


图 6 体长体重与野生鱼体内 MPs 丰度关系

Fig.6 Relationship between body length and weight and the abundance of microplastics in wild fish

研究表明,不同摄食习性的鱼类对 MPs 的摄入存在显著差异,这可能与其摄食行为和栖息环境密切相关[46].白洋淀肉食性野生鱼的 MPs 摄入量最高,其次是杂食性和草食性(图 7b).这一发现与欧洲无须鳕和红鳙鱼的研究结果[47]和吕泗渔场经济鱼类[46]的研究结果相似.肉食性鱼类更容易通过捕食含有 MPs 的猎物而摄入较高量的 MPs,杂食性鱼类摄食范围较广,既会摄取浮游生物,也会捕食小型鱼类和底栖生物.因此,其 MPs 的摄入量介于肉食性和草食性鱼类之间,主要以水生植物和藻类为食,其食物来源中 MPs 的含量相对较低,因此其体内 MPs 的摄入量也较少[48].

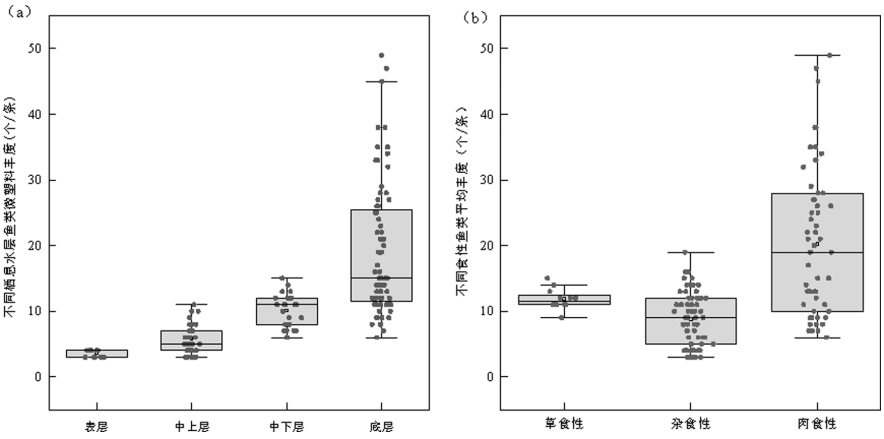


图 7 不同栖息水层、食性鱼类 MPs 丰度

Fig.7 The abundance of MPs in fish of different habitat water layers and feeding habits

MPs 的粒径和密度是影响其在环境中积累和迁移的关键特性.研究表明,小粒径和低密度的 MPs 更倾向于迁移和扩散,而大粒径和高密度的 MPs 则更容易在沉积物或生物体内积累[49].在珠江三角洲水域的研究中,发现鱼类体内的 MPs 主要集中在 0.25~1.00mm 区间[50],这与白洋淀野生鱼体内主要集中在小于 0.5mm 的结果相似.MPs 的形貌状同样会影响鱼类的摄食行为.研究表明,纤维状 MPs 是最常见的形态,并且更容易被鱼类摄取,这和本研究结果(97.12%)相似,国内外研究结果也是如此,比如海州湾 (98.0%)[51]、长山列岛海域鱼类胃肠道 (95.0%)[6]、泰国东海岸沿海底栖鱼类(88.89%)[52].这些特性不仅影响 MPs 在水生生态系统中的分布,还对鱼类健康和生态系统的稳定性构成潜在威胁.

2.3　白洋淀鱼体内 MPs 生态风险评价

采用 MPs 生态风险评价法对白洋淀鱼体内 MPs 污染造成的生态风险进行了评价.如图 8 所示,不同种类的野生鱼体内 MPs 的生态风险指数(*H*)存在显著差异.食蚊鱼的生态风险指数最低,为 5.15,风险等级为Ⅰ级(塑料污染负荷较低,对生态系统和生物的潜在危害较小,通常可以认为是安全的),表明其体内 MPs 的生态风险最小;而翘嘴鲌的生态风险指数最高,为 12.27,风险等级为Ⅱ级,表明其体内 MPs 的生态风险最大.其他鱼类的生态风险指数介于 6.05~12.19 之间,其中黄颡鱼的生态风险指数也较高,为 12.19.这一结果与国内外相关研究的发现相呼应,表明 MPs 对鱼类生态风险的大小不仅取决于其摄入量,还与鱼类的种类、摄食习性、栖息环境以及 MPs 的特性密切相关[53].白洋淀的 MPs 污染虽然存在,但总体处于较低水平.这可能与白洋淀的生态环境治理和保护措施有关,例如对周边污染源的控制、生态修复等,使得 MPs 的输入和积累相对较少.MPs 生态风险指数等级划分如表 3 所示.

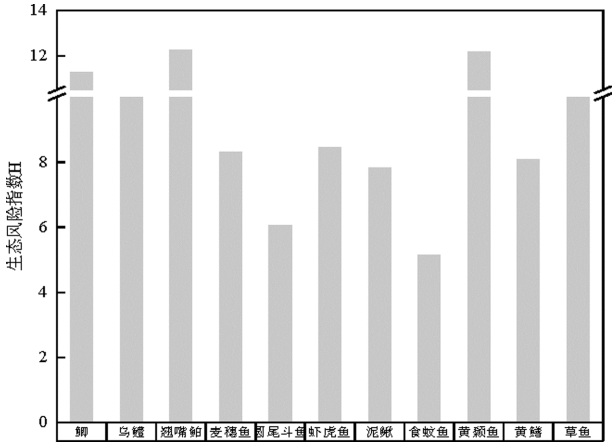


图 8　不同野生鱼体内 MPs 的生态风险指数(H)

Fig.8　Ecological risk index of microplastics in different wild fish (H)

表 3　MPs 生态风险指数等级划分(H)

Table 3　Classification of ecological risk index of microplastics

生态风险指数(H)	风险等级	风险描述
< 10	Ⅰ	低风险
10 ~ 100	Ⅱ	中低风险
100 ~ 1000	Ⅲ	中高风险
> 1000	Ⅳ	高风险

3　结论

3.1　MPs 在白洋淀鱼类体内不同组织广泛存在,MPs 的检出数量范围在 5~87 个/条,平均丰度为 26.54 个/条,尺寸小于 0.5mm 的透明和和黑色纤维状 MPs 是检测到的 MPs 的主要类型.其聚合物成分主要包括聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、氯化聚乙烯(CPE)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET).

3.2　MPs 在不同种类野生鱼体内不同组织中的分布具有显著差异,MPs 在鱼类体内呈消化道>鳃>肌肉的分布模式.当以每克组织的颗粒数为单位衡量 MPs 丰度时,体重较轻的鱼类往往表现出更高的 MPs 浓度.

3.3　白洋淀鱼类体内 MPs 的积累过程受多因素协同调控:首先,水环境中 MPs 的丰度直接决定了鱼类的摄入机率;其次,鱼类的体长和体重通过生物放大效应影响 MPs 的富集程度;此外,不同鱼类的摄食习性差异显著调控其暴露概率;最后,栖息地特征(特别是水体中 MPs 的垂直分布格局)进一步制约了鱼类的实际暴露水平.

3.4　在白洋淀生态系统中,不同种类的野生鱼体内 MPs 的生态风险指数(*H*)呈现出显著的差异性.并非仅由其摄入量决定,还与鱼类的种类、摄食习性、栖息环境以及 MPs 本身的特性等诸多因素密切相关.白洋淀的 MPs 污染水平处于较低的范围,尚未对生态系统构成严重的威胁.

参考文献:

[1] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, et al. Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification [J]. Environmental science & technology, 2012, 46(6):3060-3075.

[2] Silva a b, Bastos a s, Justino c i l, et al. Microplastics in the environment: Challenges in analytical chemistry - A review [J]. Analytica Chimica Acta, 2018,1017:1-19.

[3] Sun x-f, Zhang y, Xie m-y, et al. Calcite carbonate sinks low-density plastic debris in open oceans [J]. Nature Communications, 2024,15(1): 4837.

[4] Cooper d a, Corcoran p l. Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii [J]. Marine pollution bulletin, 2010,60(5):650-654.

[5] 吴文楠.海洋微塑料沿食物链传递特征研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2020.
Wu Wennan. Study on the transmitting characteristics of marine microplastics along the food chain [D]. Chongqing: Chongqing

University, 2020.

[6] 张国旗,孟 迪,夏 斌,等.长山列岛附近海域野生鱼类体内微塑料的分布特征研究 [J]. 渔业科学进展, 2024,45(2):50−60.
Zhang Gq, Meng d, Xia b, et al. Study on the distribution characteristics of microplastics in wild fish near Changshan Islands. [J]. Progress in Fishery Sciences, 2024,45(2):50−60.

[7] 张子琪,高淑红,康园园,等.中国水环境微塑料污染现状及其潜在生态风险 [J]. 环境科学学报, 2020,40(10):3574−3581.
Zhang Zq, Gao Sh, Kang Yy, et al. Current status of microplastics contamination in China's water environment and itspotential ecological risks [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(10):3574−3581.

[8] Yu Y, Zhou D, Li Z, et al. Advancement and challenges of microplastic pollution in the aquatic environment: A review [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2018,229:1−18.

[9] O'Connor J D, Murphy S, Lally H T, et al. Microplastics in brown trout (Salmo trutta Linnaeus, 1758) from an Irish riverine system [J]. Environmental Pollution, 2020,267:115572.

[10] Daniel D B, Ashraf P M, Thomas S N, et al. Microplastics in the edible tissues of shellfishes sold for human consumption [J]. Chemosphere, 2021,264:128554.

[11] Zhang j, Wang j, Wang x, et al. Evaluation of microplastics and microcystin−LR effect for Asian clams (*Corbicula fluminea*) by a Metabolomics Approach [J]. Marine Biotechnology, 2023,25(5):763−777.

[12] Kim s w, Chae y, Kim d, et al. Zebrafish can recognize microplastics as inedible materials: Quantitative evidence of ingestion behavior [J]. Science of the Total Environment, 2019,649:156−162.

[13] Nodehi r n, Hadi m, Hosseinzadeh a, et al. Comprehensive systematic review and meta−analysis of microplastic prevalence and abundance in freshwater fish species: the effect of fish species habitat, feeding behavior, and Fulton's condition factor [J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2024.

[14] Does the mouth size influence microplastic ingestion in fishes? [J].

[15] Siddique M A M, Shazada N E, Ritu J A, et al. Does the mouth size influence microplastic ingestion in fishes? [J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,198:115861.

[16] Chen y, Li w, Xiang l, et al. Fish personality affects their exposure to microplastics [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022,233:113301.

[17] Li B, Liang W, Fu S, et al. Swimming behavior affects ingestion of microplastics by fish [J]. Aquatic Toxicology, 2024,266:106798.

[18] 张 彦,窦 明,王飞宇,等.卫河流域新乡段土壤微塑料赋存特征及其生态风险评估 [J]. 环境科学, 2025,46(2):1168−1180.
Zhang Yan, Dou Ming, Wang Feiyu, et al. Occurrence characteristics and ecological risk assessment of soil microplastics in Xinxiang Section of Weihe River Basin [J]. Environmental Science, 2025,46(2):1168−1180.

[19] 张海强,高良敏,葛 娟,等.淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估 [J]. 环境科学, 2023,44(9):5036−5045.
Zhang Haiqiang, Gao Liangmin, Ge Juan, et al. Microplastics in Water andSediments of Anhui Section of Huaihe River Basin [J]. Environmental Science, 2023,44(9):5036−5045.

[20] 樊珂宇,高 原,赖子尼,等.珠三角河网鱼类微塑料污染特征研究 [J]. 生态环境学报, 2022,31(8):1590−1598.
Fan Keyu, Gao Yuan, Lai Zini, et al. Characteristics of microplastic pollution in fish in the Pearl River Delta [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022,31(8):1590−1598.

[21] 谢沅汕.污水处理厂对漓江流域环境中微塑料累积的影响 [D]. 桂林:广西师范大学, 2020.
Xie Yuanshan. Impact of wastewater treatment plant on the accumulation of microplastics in the environment of Lijiang River basin [D]. Guilin: Guangxi Normal University, 2020.

[22] Bessa f, Barría p, Neto j m, et al. Occurrence of microplastics in commercial fish from a natural estuarine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018,128:575−584.

[23] Wagner j, Wang z−m, Ghosal s, et al. Nondestructive extraction and identification of microplastics from freshwater sport fish stomachs [J]. Environmental Science & Technology, 2019,53(24):14496−14506.

[24] Yuan w, Liu x, Wang w, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019,170:180−187.

[25] Wang q, Chen m, Shan g, et al. Bioaccumulation and biomagnification of emerging bisphenol analogues in aquatic organisms from Taihu Lake, China [J]. Science of the Total Environment, 2017,598:814−820.

[26] Koongolla j b, Lin l, Pan y−f, et al. Occurrence of microplastics in gastrointestinal tracts and gills of fish from Beibu Gulf, South China Sea [J]. Environmental Pollution, 2020,258:113734.

[27] Nasution N, Tanjung M, Jumilawaty E. Microplastics analysis in the gills and gastrointestinal tract of fishermen's catch at Belawan River North Sumatera, Indonesia [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2024,1352(1): 012017.

[28] Jaafar n, Azfaralariff a, Musa s m, et al. Occurrence, distribution and characteristics of microplastics in gastrointestinal tract and gills of commercial marine fish from Malaysia [J]. Science of the Total Environment, 2021,799:149457.

[29] Long m, Moriceau b, Gallinari m, et al. Interactions between microplastics and phytoplankton aggregates: Impact on their respective fates [J]. Marine Chemistry, 2015,175:39−46.

[30] 包亚博,王成尘,彭吾光,等.微塑料的人体富集及毒性机制研究进展 [J]. 环境科学, 2024,45(2):1173−1184.
Bao Yabo, Wang Chengchen, Peng Wuguang, et al. Human accumulation and toxic effects of microplastics: A critical review [J]. Environmental Science, 2024,45(2):1173−1184.

[31] Ding J, Ju P, Ran Q, et al. Elder fish means more microplastics? Alaska pollock microplastic story in the Bering Sea [J]. Science advances, 2023,9(27):eadf5897.

[32] Emenike e c, Okorie c j, Ojeyemi t, et al. From oceans to dinner plates: The impact of microplastics on human health [J]. Heliyon, 2023,9(10):e20440.

[33] Uurasjärvi e, Hartikainen s, Setälä o, et al. Microplastic concentrations, size distribution, and polymer types in the surface waters of a northern European lake [J]. Water Environment Research, 2020,92(1):149−156.

[34] 刘千龙.东山湾微塑料污染特征及其生态风险评估 [D]. 厦门:厦门大学, 2021.
Liu Qianlong. Pollution characteristics of microplastics in Dongshan

Bay and itsecological risk assessment [D]. Xiamen: Xiamen University, 2021.

[35] 程昕煜,杨丽虎,宋献方.白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 [J]. 环境科学, 2023,44(8):4344−4352.
Cheng Xinyu, Yang Lihu, Song Xianfang. Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments [J]. Environmental Science, 2023,44(8):4344−4352.

[36] 常　娟,吴　雷,方　超.基于鱼类体内外微塑料积累量测定的水生态风险评价 [J]. 中国资源综合利用, 2024,42(12):213−218.
Chang Juan, Wu Lei, Fang Chao. Water Ecological Risk Assessment Based on Determination of Accumulation of Microplastics Inside and Outside Fish Bodies [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024,42(12):213−218.

[37] 王建军,王　昊,牟明杰,等.海产物种体内微塑料的赋存、来源及其潜在人体健康风险 [J]. 科学通报, 2025,70(2):223−239.
Wang J J, Wang H, Mou MJ,et al. Occurrence, sources and potential human health risk of microplastics in seafood species (in Chinese). [J]. Chin Sci Bull, 2025,70(2):223−239.

[38] Park t−j, Lee s−h, Lee m−s, et al. Occurrence of microplastics in the Han River and riverine fish in South Korea [J]. Science of the Total Environment, 2020,708:134535.

[39] 胡文博,张　硕,舒瑞霖,等.吕泗渔场经济鱼类的微塑料污染特征 [J]. 大连海洋大学学报, 2024,39(3):490−497.
Hu Wenbo, Zhang Shuo, Shu Rulin, et al. Characteristics of microplastics pollution of economic fish in Lüsi Fishing Ground [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2024,39(3):490−497.

[40] Filgueiras A V, Preciado I, Cartón A, et al. Microplastic ingestion by pelagic and benthic fish and diet composition: A case study in the NW Iberian shelf [J]. Marine pollution bulletin, 2020,160:111623.

[41] 王　威,陈　睿,邓新兰,等.湘江流域鱼体内的微塑料污染 [J]. 水生生物学报, 2025,49(2):66−75.
Wang Wei, Chen Rui, Deng Xinlan, et al. Microplastic Pollution In Fish From The Xiangjiang River Basin [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2025,49(2):66−75.

[42] 强丽媛,朱晓桐,程金平.微塑料在河口海岸环境的检测、分布、归趋以及生物和环境效应 [J]. 环境化学, 2023,42(3):832−842.
Qiang; Liyuan, Zhu Xiaotong, Cheng Jinping. Distribution, fate, and biological and environmental effects of microplastics in estuarine andcoastal environments [J]. Environmental Chemistry, 2023,42(3): 832−842.

[43] Filgueiras A V, Preciado I, Cartón A, et al. Microplastic ingestion by pelagic and benthic fish and diet composition: A case study in the NW Iberian shelf [J]. Marine pollution bulletin, 2020,160:111623.

[44] 李文菁,黄月群,黄亮亮,等.北部湾海洋鱼类微塑料污染特征及其风险评估 [J]. 生态环境学报, 2023,32(11):1913−1921.
Li Wenjing, Huang Yuequn, Huang Liangliang, et al. Distribution characteristics and risk assessment of microplastics in Beibu Gulf marine fish [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2023,32(11): 1913−1921.

[45] Chen y, Shen z, Li g, et al. Factors affecting microplastic accumulation by wild fish: A case study in the Nandu River, South China [J]. Sci Total Environ, 2022,847:157486.

[46] Aiguo Z, Di S, Chong W, et al. Characteristics and differences of microplastics ingestion for farmed fish with different water depths, feeding habits and diets [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022,10(2):107189.

[47] 王亚新,贡　艺,陈新军,等.海洋动物体内微塑料分布规律与变化特征 [J]. 海洋湖沼通报, 2023,45(3):147−154.
Wang Yaxin, Gong Yi, Chen Xinjun, et al. In vivo distribution of microplastics in marine animals [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023,45(3):147−154.

[48] Cáceres−Farias l, Espinoza−Vera m m, Orós j, et al. Macro and microplastic intake in seafood variates by the marine organism's feeding behaviour: Is it a concern to human health? [J]. Heliyon, 2023, 9(5):e16452.

[49] 李汶璐,王志超,杨文焕,等.微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 [J]. 环境科学, 2022,43(5):2606−2613.
Li Wenlu, Wang Zhichao, Yang Wenhuan, et al. Effects of microplastics on bacterial community composition and diversity in sediments [J]. Environmental Science, 2022,43(5):2606−2613.

[50] Wang S, Zhang C, Pan Z, et al. Microplastics in wild freshwater fish of different feeding habits from Beijiang and Pearl River Delta regions, south China [J]. Chemosphere, 2020,258:127345.

[51] Gao s, Yan k, Liang b, et al. The different ways microplastics from the water column and sediment accumulate in fish in Haizhou Bay [J]. Science of the Total Environment, 2023,854:158575.

[52] Phaksopa J, Sukhsangchan R, Keawsang R, et al. Presence and characterization of microplastics in coastal fish around the eastern coast of Thailand [J]. Sustainability, 2021,13(23):13110.

[53] Ganie z a, Mandal a, Arya l, et al. Assessment and accumulation of microplastics in the Indian riverine systems: Risk assessment and implications of translocation across the water−to−fish continuum [J]. Aquatic Toxicology, 2024,272:106944.

作者简介：王兵帅(1999−),男,河北邯郸人,河北工程大学硕士研究生,主要从事微塑料环境行为研究.2720203837@qq.com.