

王梦宇, 张玉平, 朱礼鑫. 水产养殖环境中微塑料赋存特征、来源及生态毒性的文献计量分析[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(6): 1104-1115.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.06.003

水产养殖环境中微塑料赋存特征、来源及生态毒性的文献计量分析

王梦宇^{1,2}, 张玉平¹, 朱礼鑫²

(1.上海市水产研究所/上海市水产技术推广站, 上海 200433; 2.华东师范大学河口海岸全国重点实验室, 上海 200241)

摘要: 微塑料作为水产养殖环境中新兴污染物之一, 对生态系统稳定性及水产品质量安全构成潜在威胁。本文通过文献计量学方法对2012–2025年间中、英文数据库中水产养殖环境中微塑料相关研究论文进行分析, 结果表明, 该领域发文量呈增长趋势。水产养殖环境中聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)类微塑料检出率较高, 主要来源于养殖用水、塑料渔具及饲料等。近年来, 微塑料对水生生物代谢的影响及其毒性效应备受关注。微塑料不仅干扰水生生物的正常摄食行为, 还可能对水生生物消化系统、生长发育产生负面影响。基于上述分析结果, 未来研究需加强构建微塑料动态监测网络、完善微塑料生态风险评估体系、研发微塑料高效降解技术并推动政策与产业协同发展, 为微塑料污染的预防与控制, 保障水产品质量安全提供科学依据。

关键词: 微塑料; 水产养殖; 赋存特征; 生态毒性; 文献计量分析

中图分类号: X832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)06-1104-12

Bibliometric analysis of the occurrence characteristics, sources and ecotoxicity of microplastics in aquaculture environments

WANG Mengyu^{1,2}, ZHANG Yuping¹, ZHU Lixin²

(1. Shanghai Fisheries Research Institute/Shanghai Fisheries Technical Extension Station, Shanghai 200433, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Microplastics, as one of the emerging pollutants in aquaculture environments, pose potential threats to ecosystem stability and seafood quality and safety. Using bibliometric methods, this study analyzed research papers on microplastics in aquaculture environments indexed in Chinese and English databases from 2012 to 2025. The results showed an increasing trend in the number of publications in this field. Polypropylene (PP), polyethylene (PE), and polystyrene (PS) have relatively high detection rates in aquaculture environments, mainly originating from aquaculture water, plastic fishing gear, and feed. In recent years, the impacts of microplastics on the metabolism of aquatic organisms and their toxic effects

have attracted considerable attention. Microplastics not only interfere with the normal feeding behavior of aquatic organisms but may also adversely affect their digestive systems, growth, and development. Based on these findings, future research should strengthen the construction of dynamic monitoring networks, improve the ecological risk assessment system, develop efficient removal technologies, and promote the coordinated development of policies and industries, so as to provide a scientific basis for the prevention and control of microplastic pollution and the

收稿日期: 2026-01-06

基金项目: 国家重点研发项目(2024YFD2402200); 上海市农业科技创新项目(2024-02-08-00-12-F00027); 上海市水产研究所(上海市水产技术推广站)青年课题项目(QNKT-B-202501)

作者简介: 王梦宇(1996–), 女, 河北唐山人, 博士, 工程师, 研究方向为环境微塑料迁移特征。(E-mail) wangmy960918@163.com

通讯作者: 张玉平, (E-mail) zhangyp200433@163.com

guarantee of aquatic product quality and safety.

Key words: microplastics; aquaculture; occurrence characteristics; ecotoxicity; bibliometric analysis

近年来,塑料及其衍生制品因良好的抗降解性、耐用性和低成本而被广泛使用。据统计,全球塑料产量显著增长,从1950年的 1.50×10^6 t增长至2017年的 3.50×10^8 t^[1]。受使用量大以及管理不当等因素影响,仅有9%的塑料制品被有效回收,其余大多被留在垃圾填埋场或自然环境中^[2]。目前将直径 ≤ 5 mm的塑料颗粒定义为微塑料^[3]。自然环境中的微塑料既有原生型微塑料,即其原始制造尺寸 ≤ 5 mm,例如洗护用品中添加的塑料微珠等,也有次生微塑料,指的是大块塑料在环境中经物理磨损、化学辐射或生物降解过程破碎而形成^[4-5]。相较于大型塑料,环境中微塑料具有粒径小、耐生物降解和光降解等特性,从而富集于水体、沉积物或大气等多种环境介质,可持续存在数百年甚至上千年,对自然环境和人类健康产生深远影响^[6-7]。

水产养殖系统是受人类活动影响最为显著的水生生态系统类型之一,全球人工养殖水域总面积达 1.1×10^5 km²^[8]。联合国粮食及农业组织预测,2025年全球水产养殖总产量将达到 1.97×10^8 t,占全球水产品总产量的53%,是保障人类优质蛋白质供给的重要产业^[9-10]。与此同时,水产养殖生态系统正面临日趋严峻的微塑料污染挑战。一方面,水产养殖高度依赖天然水环境,各类养殖水源中均已不同程度检出微塑料污染物^[4,11-12];另一方面,养殖作业所用渔网、养殖桶等塑料制品经风化、老化裂解产生的内源微塑料,也是养殖环境微塑料污染的重要来源^[13]。此外,微塑料极易被鱼类、虾类、贝类等水生生物摄食并在体内富集^[14-15]。因此,水产养殖环境微塑料污染对水产品质量安全与水生生态健康均构成不容忽视的潜在风险。

文献计量分析是以数学与统计学为基础,对特定研究领域的文献资料开展定量分析,现已成为研判研究态势、识别研究热点、预测发展趋势的重要方法^[16]。为全面深入了解水产养殖环境中微塑料污染特征及其对水生生物的影响,本文基于文献计量学,借助CiteSpace和VOSviewer软件对2012年以来水产养殖环境中微塑料相关文献进行系统分析,明确该领域研究热点和趋势,总结微塑料污染现状及生态毒性,为水产养殖环境中微塑料的治理、预防与

控制等相关研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 文献检索与数据提取

为全面了解水产养殖环境中微塑料污染特征的研究现状,本文对2012–2025年该领域中文与英文文献分别进行检索。其中,中文文献源于中国知网(CNKI)数据库,文献类型为学术期刊,期刊来源为北大中文核心期刊和中国科学引文数据库(CSCD)。使用科睿唯安科学引文索引(WOS)核心数据库对该领域英文文献进行检索,文献类型为研究论文和综述论文。经软件及人工筛查剔除重复和无关文献后,最终得到85篇中文文献和1 119篇英文文献。

1.2 文献计量分析

利用OriginPro 2026、CiteSpace和VOSviewer文献计量分析软件,对85篇中文文献及1 119篇英文文献分别进行年度发文量、研究机构、关键词突现与关键词聚类可视化分析;对英文文献进一步开展国家及地区合作网络分析。

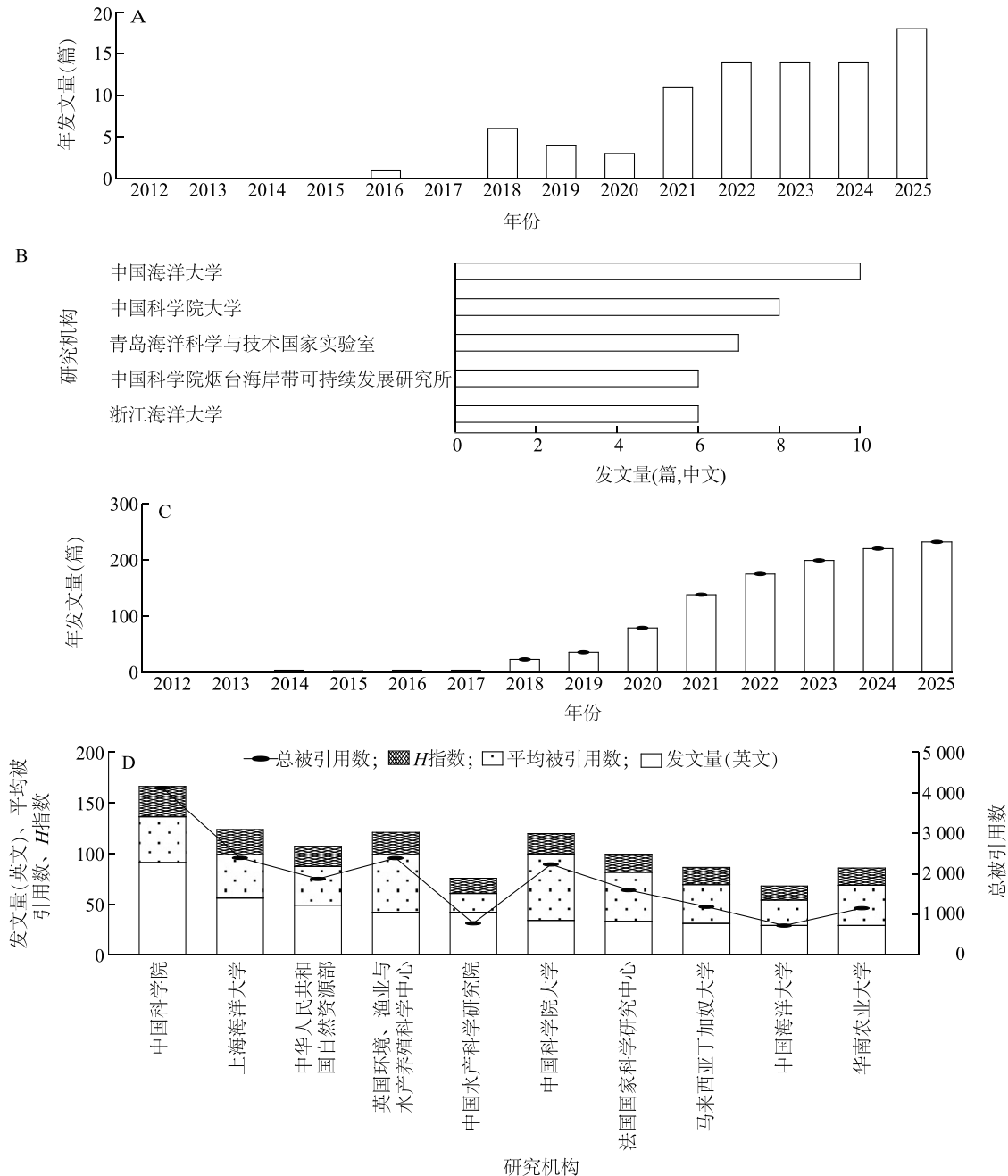
2 结果与分析

2.1 发文分布、演化趋势与研究热点

本文对2012–2025年水产养殖环境中微塑料研究现状进行分析(图1)。发文量可直接反映某研究领域的发展动态。从图1A可见,CNKI数据库中关于水产养殖环境微塑料的年度发文量相对较少,呈波动上升趋势。相比较而言,WOS数据库中该领域年度发文量具有明显的阶段性特征(图1C),2012–2017年为初步探索期,WOS的年发文量维持在较低水平,且主要聚焦于海洋环境中微塑料的丰度调查;2018–2025年为快速发展期,WOS的年发文量呈指数递增态势,研究方向从面源污染调查向来源解析、生态毒理等多学科交叉领域拓展。水产养殖环境微塑料相关研究的快速发展主要受全球微塑料污染研究热潮、水产养殖环境可持续发展需求以及水产品质量安全管控需求等多重因素的共同驱动^[16]。由于CNKI数据库中该领域文献相对较少,合作关系不显著,因此本文仅对WOS数据库进行发文国家和地区的可视化分析。全球共有113个国家

和地区开展了该领域的相关研究(图 2)。中国以 420 篇占据发文量首位, 占总发文量的 37.53%, 其次是印度(91 篇), 再次是英国(81 篇)。CNKI 数据库中发文量前 3 的机构为中国海洋大学、中国科学院大学和青岛海洋科学与技术国家实验室(图 1B)。

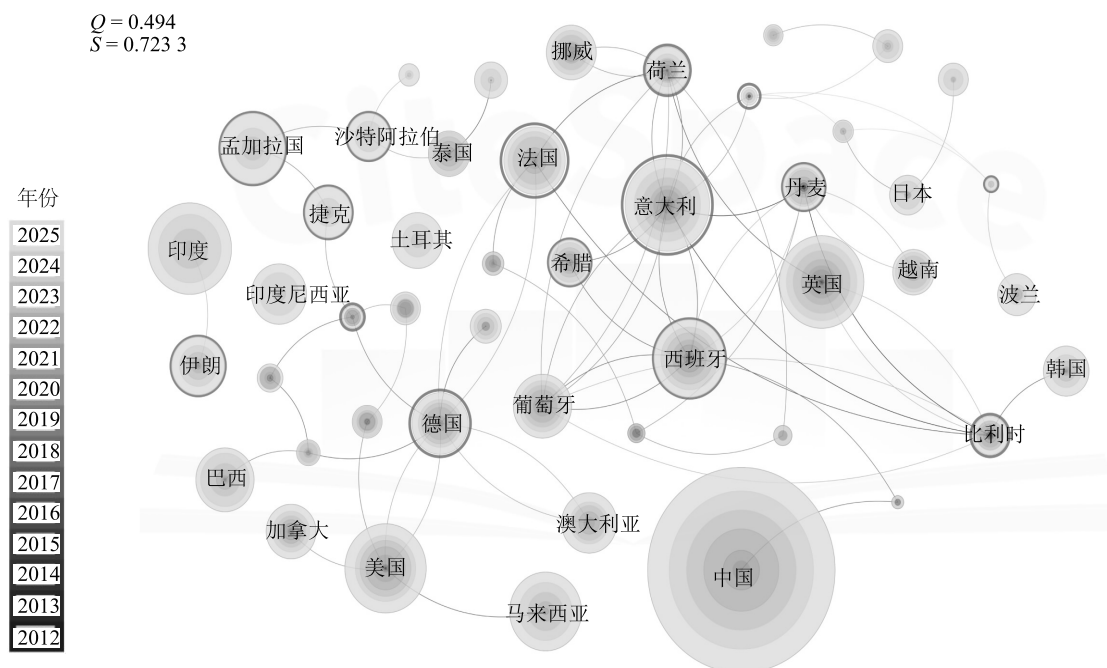
WOS 数据库中发文量前 10 的研究机构分别来自中国、英国、法国和马来西亚(图 1D), 其中以中国科学院(发文量 91 篇)为代表的中国研究机构占比较高, 侧面凸显了中国对水产养殖环境中微塑料研究的高度重视。



A: 中国知网数据库中有关微塑料研究论文年发文量; B: 中国知网数据库中有关微塑料研究论文位列前 5 机构的发文量; C: 科睿唯安科学引文索引(WOS)数据库中有关微塑料研究论文年发文量; D: 科睿唯安科学引文索引(WOS)数据库中有关微塑料研究论文发文量前 10 机构的发文量、总被引用数、平均被引用数及 H 指数。H 指数: 高被引指数。

图 1 2012–2025 年水产养殖环境中微塑料研究现状

Fig.1 Research status of microplastics in aquaculture environments from 2012 to 2025



节点的大小代表发文量的高低;节点颜色由中心至四周表示年份由远及近,连线表征合作时间;节点外圈粗外环表示该节点具有高中介中心度。 Q 值:聚类模块值; S 值:轮廓系数。

图2 科睿唯安科学引文索引(WOS)数据库中有关微塑料研究论文发文国家和地区及协作网络图

Fig.2 Countries/regions publishing microplastic-related research papers and their collaboration network based on Web of Science database

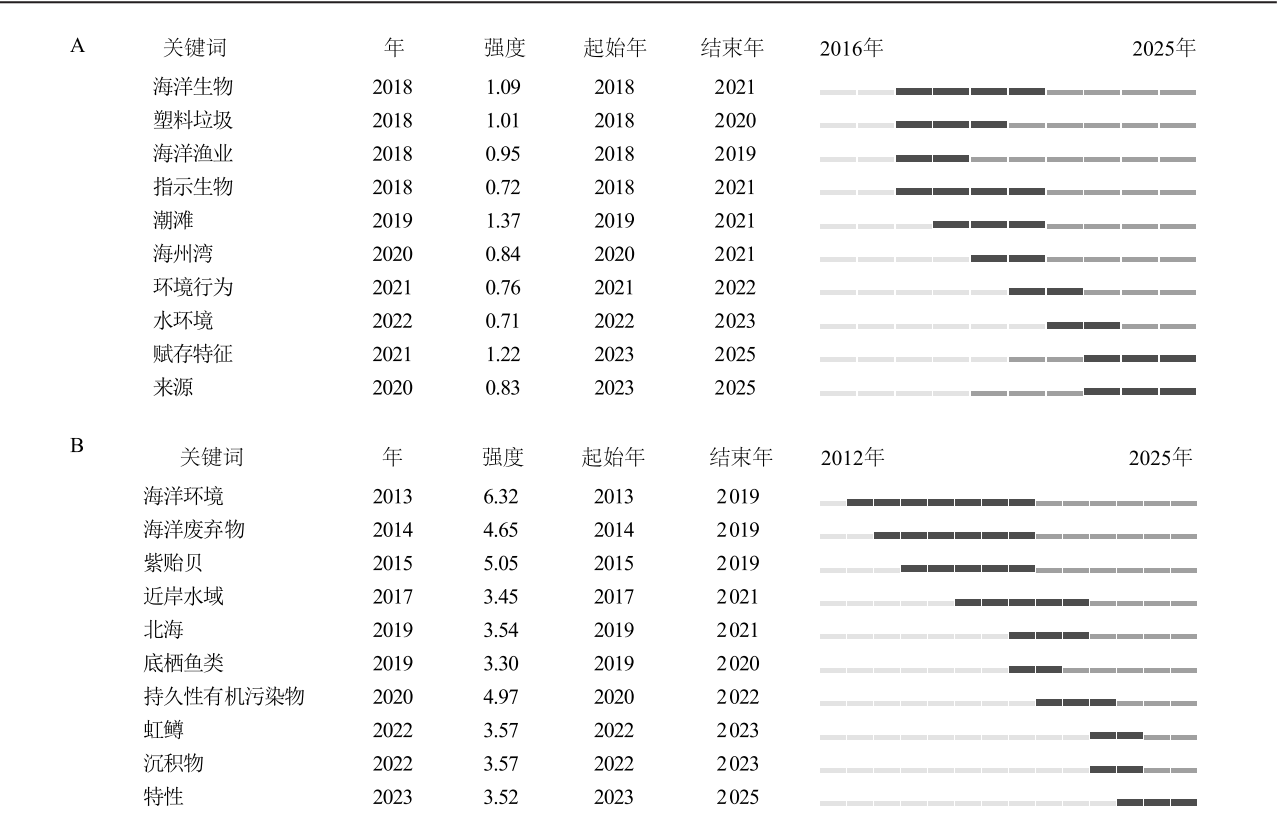
2.2 研究趋势

文献计量学中常用突现关键词表征某一时期某领域的研究热点,可直观揭示该领域研究前沿与演化趋势。图3按突现起始年份排序,分别列出CNKI数据库与WOS数据库中水产养殖环境中微塑料领域排名前10的突现关键词。通过CiteSpace软件分析,结果显示,CNKI和WOS 2个数据库聚类模块值(Q 值)分别为0.789 9和0.494 0(>0.300 0)、轮廓系数(S 值)分别为0.954 4和0.723 3(>0.700 0),表明聚类结构和效果可信。2012–2017年,该领域研究论文主要集中于WOS数据库,其突现关键词主要有海洋环境(Marine environment)、海洋废弃物(Marine debris)和紫贻贝(*Mytilus edulis* L.),侧面表明2012–2017年的研究侧重于近海水产养殖环境。2018年以来,CNKI和WOS 2个数据库中该领域的论文显著增加,突现关键词也相对较多,表明该领域研究逐渐向更全面、更深入的方向发展。指示生物、潮滩、持久性有机污染物(Persistent organic pollu-

tants)和底栖鱼类(Demersal fish)等突现关键词揭示了水产养殖环境研究中微塑料污染特征、微塑料生物毒性以及微塑料复合污染等研究方向。2022–2025年突现关键词包括水环境、来源、虹鳟(Rainbow trout)、沉积物(Sediment)和特性(Behavior)等,表明该领域的前沿热点正向微塑料环境迁移行为和水产品健康安全风险等方向发展。

2.3 研究热点

为精准且全面地展示水产养殖环境中微塑料研究的热点区域和主题特征,本文通过VOSviewer软件(词频 ≥ 15)进行关键词聚类分析(图4)。图中每个节点分别代表一个关键词,节点的尺寸与关键词的词频成正比,从图4可见,CNKI数据库和WOS数据库各生成了5个和4个聚类,主要概括为“水产养殖环境中微塑料赋存特征”(图4A中聚类1、聚类2和聚类4,图4B中聚类4)、“水产养殖环境中微塑料的来源解析”(图4A中聚类5,图4B中聚类3)和“微塑料的生态毒性”(图4A中聚类3,图4B中聚类1和聚类2)。



A:中国知网(CNKI);B:科睿唯安科学引文索引(WOS)。浅灰色线条表示该关键词未进入突现状态;黑色线条表示该关键词正在突现暴发期;深灰色线条表示该关键词突现已经结束。

图 3 水产养殖环境微塑料研究论文中的突现关键词
Fig.3 Bursting keywords in microplastic research papers in aquaculture environments

2.3.1 水产养殖环境中微塑料赋存特征 污染(Pollution)和丰度(Abundance)是文献中词频较高的关键词,揭示了研究人员对养殖环境中微塑料丰度、分布等特征的关注度。现有研究表明,近海、河流、湖泊等自然水域养殖环境和陆基水产养殖环境中均有不同程度的微塑料被检出,因此养殖环境中微塑料污染将对水产养殖绿色发展造成不容忽视的影响^[17-19]。表 1 和表 2 分别列举了部分地区海水和淡水养殖环境中微塑料的赋存特征。从微塑料材质类型来看,水产养殖环境中检出率较高的微塑料材质是聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS),其他常见微塑料材质类型有聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚氯乙烯(PVC)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚酰胺(PA)、聚醚砜(PES)等^[1,20]。

微塑料污染特征在不同养殖区域间呈现显著异质性:相较于开放水体,封闭或半封闭水环境中微塑料检出率更高。受陆基养殖池塘高蒸发量、高换水

量等因素驱动,其微塑料丰度显著高于河口等自然水域^[18-19,21]。进一步来看,即使在封闭或半封闭式养殖池塘内部,微塑料的空间分布也存在明显差异,进水区的微塑料丰度与种类均显著区别于出水区,且整体表现为进水区更高^[22]。值得注意的是,长期暴露于环境中的微塑料可能发生结构破坏,导致其中增塑剂、阻燃剂等添加剂从塑料基体中迁出^[23]。与此同时,微塑料具有较大的比表面积,可吸附抗生素和重金属等其他有害物质形成复合污染^[24-25]。相关研究结果表明,微塑料表面多环芳烃等化学污染物浓度是周边水环境的 6 倍^[26]。因此,为减少水产养殖环境中微塑料丰度,推动水产养殖业绿色发展,工厂化循环水等可持续养殖模式正在逐步落地实施。与传统水产养殖模式相比,工厂化循环水养殖模式中各环节可控性强且用水量较少,其微塑料丰度相对较低^[27]。此外,稻田综合种养模式中田埂隔绝了外部水源,所以其水环境中微塑料丰度普遍低于其他水产养殖环境^[28]。

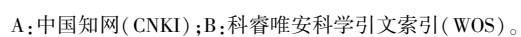


Fig.4 Results of keyword clustering analysis based on VOSviewer

同一水产养殖环境中水体和沉积物中微塑料材质类型大多具有一致性,印证了养殖水环境和沉积物中微塑料存在迁移过程(表 1 和表 2)^[29]。然而,也有部分微塑料材质类型仅存在于沉积物或水体中。通常情况下,密度是决定水产养殖环境中微塑料最终归宿的关键因素之一。较高密度微塑料更易积累于沉积物中,而较低密度微塑料则分布于不同深度水体中^[30]。因此,在沉积物中广泛观察到 PTFE 和 PET 等高密度微塑料^[13, 22]。值得注意的是,沉积物中也存在一定量的低密度微塑料,可能是因为微塑料表面附着的微生物膜增加了其自身密度,促进了其在水体中的沉降^[31]。除密度外,微塑料粒径也可显著影响

其沉降过程。Besseling 等^[32]研究发现,微塑料颗粒粒径介于 0.001~0.002 mm 的沉降速率随直径的增加而降低,而 0.002 mm 至 10.000 mm 的微塑料颗粒则呈相反趋势。此外,较小尺寸的微塑料(0.020~0.200 mm)更易被养殖生物误食,继而可能沉积于粪便颗粒中^[33]。这也解释了为什么沉积物中通常含有更高比例的小粒径微塑料颗粒。除此之外,相较于传统陆基池塘养殖周期中高频率的换水和排水,沉积物的清淤频率较低,这将不断增加沉积物中微塑料负荷^[34]。因此,水产养殖沉积物中常检出高丰度微塑料,也被认为是水产养殖环境中微塑料汇。

表 1 海水养殖环境中微塑料赋存特征

Table 1 Occurrence characteristics of microplastics in marine aquaculture environments

地区	养殖生物	微塑料				参考文献
		来源	丰度(个, 1 L 或个, 1 kg)	尺寸(mm)	微塑料材料类型	
中国珠江口海域	鱼	水体	10.3±60.5	<1.000	PP、PE	[18]
中国象山湾海域	虾、鱼	水体	3×10 ⁻⁵ ~7×10 ⁻⁴	1.600	PS、PE、PP、PVC	[35]
		沉积物	33.3~240.0	1.200	PP、PE、PET、PA	
中国新村湾海域	鱼、贻贝	水体	8.3×10 ⁻² ~2.3×10 ⁰	1.000~2.000	PS	[36]
中国连云港近海区	双壳类	水体	2.4±1.8	<1.000	PET、CP、PE、PP、PA、PVC	[19]
法国夏朗德河口海域	蓝贻贝、牡蛎	水体	8×10 ⁻³ ~1×10 ⁻²	0.032~0.035	PS、PC、PP、PA、PET	[37]
		沉积物	44.0~934.0			
马来西亚格迪尔河口海域	蟹	水体	1.3±0.2	0.050~0.500	PA、PE、PP、PS	[34]
		沉积物	47 500.0±11 880.0	1.000~5.000		
葡萄牙阿威罗河口海域	牡蛎	水体	0~5.3	0.100~0.500	PP、PE	[20]
		沉积物	15.5~114.6			

PP:聚丙烯;PE:聚乙烯;PS:聚苯乙烯;PA:聚酰胺;PVC:聚氯乙烯;PET:聚对苯二甲酸乙二醇酯;CP:丙酸纤维素;PC:聚碳酸酯。

表 2 淡水养殖环境中微塑料赋存特征

Table 2 Occurrence characteristics of microplastics in freshwater aquaculture environments

地区	养殖生物	微塑料				参考文献
		来源	丰度 (个, 1 L 或个, 1 kg)	尺寸(mm)	微塑料材质类型	
中国长江口水产养殖实验基地	蟹	水体	4.4~10.8	0.025~3.518	PE、PET、PP、PS	[13]
		沉积物	286.0~543.0	0.051~4.299		
中国太湖西北部、东南部及中心区域	河蚬	水体	3.4~25.8	0.100~1.000	Cellophane	[38]
中国鄱阳湖	鱼	水体	5.0~34.0	<0.500	PP、PE	[39]
中国广东省佛山市陆基养殖池塘	草鱼	水体	288.5±74.3	0.500~1.000	PES、PET	[40]
中国上海市崇明区、青浦区、奉贤区 稻渔共养实验区	鳊鱼、泥鳅、 小龙虾	水体	0.4±0.1	<1.000	PE、PP	[28]
中国湖北监利市稻渔共养实验区	克氏原螯虾	水体	2.5±0.1	<1.000	PP、PE、PET、 Cellophane、PSA	[41]
		沉积物	40.0±20.0			
匈牙利喀尔巴阡盆地水库	鱼	水体	3.5×10 ⁻³ ~3.2×10 ⁻²	<0.100	PP、PE、PS、PTFE、PES	[22]
		沉积物	0.5~1.6	/		
葡萄牙工厂化循环水养殖池塘	鲈鱼	水体	37.2±1.9	0.016~11.261	PET、PP、PAN	[27]

Cellophane:玻璃纸;PES:聚醚砜;PSA:聚苯乙烯-丙烯腈;PTFE:聚四氟乙烯;PAN:聚丙烯腈。PE、PET、PP、PS 见表 1 注。

2.3.2 水产养殖环境中微塑料的来源 水产养殖环境中微塑料的潜在来源与人类活动存在紧密联系(图5)。城市生产生活所产生的各种废弃物中均存在不同程度的微塑料污染,所以城市附近的河流、湖泊或河口海岸区域的微塑料丰度相对较高^[18, 42]。污水处理厂被认为是自然环境中微塑料的关键来源之一。尽管污水处理厂的三级处理工艺对微塑料(尺寸<0.500 mm)的去除率高达93%,但由于污水处理负荷较高,德国某地12座污水处理厂每天仍约有 6×10^7 个微塑料颗粒被排放到自然环境中^[43-44]。与此同时,人类产生的部分

塑料垃圾也可以直接暴露于环境中,如直接丢弃、填埋于垃圾填埋场等的塑料垃圾。这些暴露在环境中的塑料垃圾很可能经物理风化等过程破碎分解成微塑料,并随径流、降雨冲刷或养殖换水等过程进入水产养殖环境^[45-46]。此外,工业活动也将增加水产养殖环境中微塑料的暴露风险。Yu等^[35]研究发现,受内湾沿海地区每年生产大量塑料制品以及陆源塑料垃圾随河流输送至近海等因素影响,东海象山湾内湾海洋中微塑料丰度显著高于中央海湾海洋中微塑料丰度。

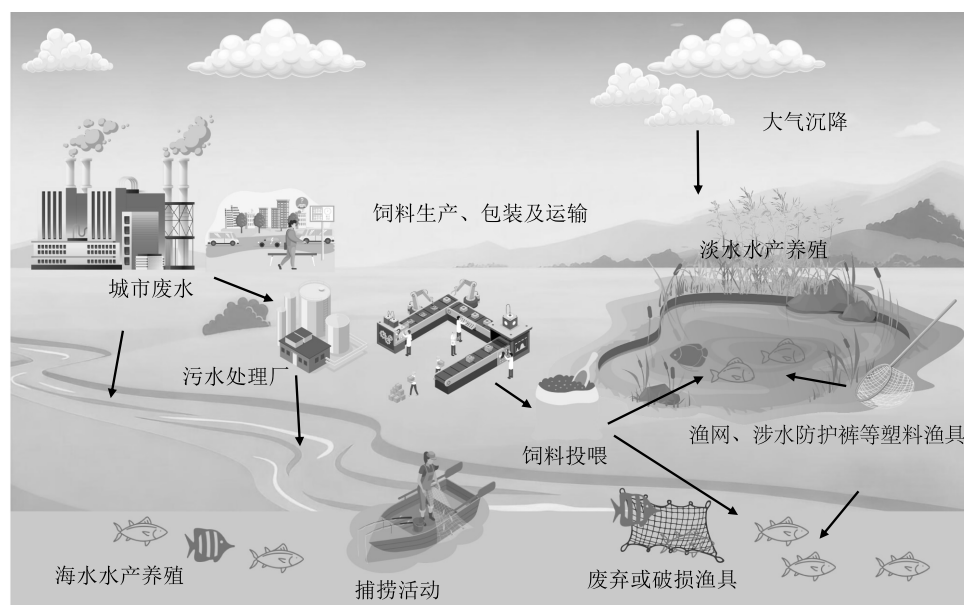


图5 水产养殖环境中微塑料的潜在来源

Fig.5 Potential sources of microplastics in aquaculture environments

受陆地尘埃影响,大气环境中也存在微塑料污染,因此大气中微塑料沉降是水产养殖系统中不可避免的微塑料来源^[47]。Ma等^[48]发现白洋淀养殖环境和水生生物中的微塑料丰度与降雨强度呈周期性变化,且在每年夏季达到峰值。Yu等^[13]研究发现,临近道路的养殖池塘微塑料污染水平更高,推测道路交通产生的轮胎磨损微塑料可借助大气湍流迁移,最终汇入养殖水环境。现阶段,有关大气沉降微塑料的定量研究仍较为有限,但该输入途径持续存在,会对水产养殖生态系统造成潜在污染风险。

相关研究结果表明,工厂化循环水养殖池塘的进水净化系统可显著减少养殖水源中微塑料丰度,但在养殖池中仍检测到了全新的微塑料^[49]。据此

推测,除水源和大气等外部来源外,水产养殖环境中微塑料污染源还可能来源于内部。随着水产养殖业的发展,泡沫填充浮球、网箱、塑料桶、塑料袋、渔网、绳索等塑料制品作为设备或包装被广泛应用。然而,受废弃物管理不善、安装磨损以及缺乏维护等因素影响,水产养殖中所使用的塑料制品会降解成更小的颗粒并释放至环境中^[1]。以湖泊及近海养殖为例,渔民通常采用塑料渔网进行捕鱼作业。更换下来的旧渔具若未得到妥善处置将被滞留在水环境中成为塑料垃圾^[50]。据统计,全球每年因废旧渔具产生的塑料污染量约13 607.77 t^[51]。相较于河流、湖泊以及海洋等开阔水域,陆基水产养殖池塘中人类活动频率和参与度更高,微塑料污染相对更加严

重,例如,水产养殖涉水防护裤便是池塘 PP 类微塑料的主要来源之一^[13]。

值得注意的是,部分原生微塑料也可以不同形式进入水产养殖环境中,如养殖所用商业饲料(鱼粉)。Wang 等^[52]调查发现,全球鱼粉中微塑料平均丰度为 1 g (5.5±1.6) 个。鱼粉在制作、加工、包装、储存和运输等环节都存在微塑料污染风险。凤尾鱼、沙丁鱼等海洋鱼类被用于加工鱼粉,调查发现这些鱼粉中均不同程度检出微塑料^[9, 53]。与此同时,PP 材质编织袋常作为鱼粉的包装^[54]。此外,稻渔综合种养等复合水产养殖环境中所用有机肥料也可能是微塑料污染的潜在来源之一^[28]。

2.3.3 微塑料的生态毒性 环境中的微塑料经历了不同的风化降解过程,其密度、形状、吸附性能以及生物膜形成能力等特性会在与周围环境的相互作用中发生改变^[55-56]。受疏水性较强和比表面积大等因素影响,微塑料已成为一种独特的微生物栖息地和运输载体^[14, 57]。与此同时,微塑料表面生物膜上蓝细菌、变形菌等微生物群落的物种丰富度与群落多样性显著高于周边水体^[40, 58-59]。伴随微塑料的沉降过程,微塑料生物膜上的微生物群落可通过调控底栖生物栖息环境与营养摄取条件,间接影响沉积物硝化、反硝化及有机质再矿化等生物地球化学循环过程^[60-61]。通过实验室暴露试验发现,相较于普通微塑料颗粒,附有生物膜微塑料更易被牡蛎等水生生物摄入,从而加剧其生物毒性,并随食物链积累和传递^[62]。Ma 等^[48]通过生态路径模型印证了食物网中微塑料的累积效应,其中最高营养级生物体内微塑料丰度是初始营养级生物的 3.97 倍。

现有研究结果表明,微塑料易富集于水生动物呼吸与消化器官,这与其摄食途径密切相关^[14]。甲壳类软体动物通过滤食水体悬浮颗粒物与浮游生物获取营养,对水环境中微塑料具有较强的富集能力,污染风险较高^[38]。鳃作为鱼类等水生动物重要呼吸与滤食器官,长期直接暴露于水体环境,是微塑料检出率较高的组织部位。此外,鱼类易将环境微塑料误认为饵料颗粒直接摄食,也可通过捕食低营养级生物发生间接富集。其中浮游食性鱼类因非选择性滤食策略,对微塑料的摄取风险更高^[63]。微塑料进入生物体内后可引发鱼类、甲壳类软体动物产生假性饱腹感,进而降低其摄食效率与能量转化效率^[13, 64]。同时,进入消化道内的微塑料易造成肠道

阻塞、黏膜机械损伤,并且会提升微塑料由肠道迁移至血液、淋巴及机体其他组织的潜在风险^[65]。

除影响肠道功能外,微塑料暴露还会导致水生动物出现氧化损伤、行为异常、基因表达改变、发育迟缓等^[66]。微塑料在鱼类体内累积可诱导活性氧自由基过量累积,超出机体抗氧化防御系统清除能力,进而引发氧化应激,并导致过氧化氢酶(CAT)活性代偿性升高^[67-68]。基于代谢组学分析,微塑料暴露会改变鱼类肝代谢特征,并干扰脂质和能量代谢平衡^[69]。也有研究发现,长期暴露于 PVC 微塑料环境中的鲈鱼红细胞核异常率显著提升,同时肝脏 PPAR- α 基因 mRNA 表达水平显著下调,提示微塑料暴露可对鱼类产生遗传毒性并造成 DNA 损伤效应^[68]。同样,Sun 等^[70]的研究结果也表明,长期微塑料暴露可显著上调淡水虾细胞凋亡相关基因的表达水平,从而降低幼虾孵化成功率及存活率。然而,也有试验发现,除肠道炎症外,暴露于微塑料环境中的鲈鱼并未出现任何生长性能改变^[71]。值得注意的是,随着水产养殖业的快速发展,水产类药物使用量也随之增加,微塑料可吸附养殖环境中残留的药物,并形成复合污染物,对水生生态系统构成潜在威胁。例如,PE 颗粒对抗生素具有较强吸附能力,可促进抗生素在水生生物体内富集,进而产生复合毒物联合毒性效应^[24]。此外,微塑料和非处方药的联合暴露能够显著增加斑马鱼肠道耐药基因的丰度^[72]。因此,水产养殖环境微塑料污染对水产品质量安全具有显著且不容忽视的负面影响。

3 结论

微塑料作为水产养殖环境中的新型污染物之一,对养殖环境和水产品质量安全具有复杂且持久的影响。本文通过文献计量分析发现,近 5 年中国知网(CNKI)和科睿唯安科学引文索引(WOS)数据库中水产养殖环境微塑料研究论文呈显著上升趋势,且中国研究机构在该领域占据重要地位。水产养殖环境中微塑料的材质类型以聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)为主,其来源与水体交换、塑料制品使用和鱼粉投喂等存在紧密联系。此外,微塑料通过水生生物摄食、代谢等途径在生物体累积,对水生生物的健康和安全造成潜在的毒性风险。近年来,水产养殖环境中微塑料污染特征研究、来源解析和生态风险评估均取得阶段性成果,但仍存在诸多问题亟待深入研

究。今后可从以下4点对微塑料污染进行科学监测、合理防范,促进水产养殖业的绿色可持续发展。

(1)构建长期、连续动态的监测网络。现有研究多依赖瞬时采样分析手段,未能系统揭示微塑料在渔具、养殖饲料、水体、沉积物以及生物体等多介质间的迁移转化特征。动态监测网络将为制订针对性的预防和控制措施提供数据支撑。

(2)完善生态风险评估框架。微塑料可对水生生物造成直接或间接毒性效应,也可与重金属等污染物耦合形成复合污染物。当前多数研究集中于实验室条件下高浓度单一微塑料急性暴露试验,与实际养殖环境中微塑料组分复杂、复合共存的真实环境特征差异显著。因此,综合考虑多重环境因子,对微塑料及其复合污染物开展系统性生态风险评估,对水产养殖生态环境安全具有重要意义。

(3)研发多维度、协同化微塑料治理技术。水产养殖环境中微塑料污染问题已备受关注,针对水产养殖生态系统的复杂性,需构建“物理分离-化学改性-生物降解”协同的无害化治理技术体系,为微塑料综合治理提供高效的治理技术。

(4)推动政策与产业协同发展。一方面,水产养殖环境中微塑料污染需从源头防范,因此应制定微塑料监测规范;另一方面,对养殖主体进行绿色生产意识宣传,鼓励其使用可降解渔具等绿色产品,共同推动水产养殖业绿色可持续发展。

参考文献:

- [1] FRED-AHMADU O H, AHMADU F O, ADEAPO A E, et al. Microplastics and chemical contamination in aquaculture ecosystems; the role of climate change and implications for food safety: a review[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2024, 36(1): 181.
- [2] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): 1700782.
- [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] COLE M, LINDEQUE P, HALSBAND C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(12): 2588-2597.
- [5] HORTON A A, WALTON A, SPURGEON D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 127-141.
- [6] STOLTE A, FORSTER S, GERDTS G, et al. Microplastic concentrations in beach sediments along the German Baltic coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99(1/2): 216-229.
- [7] WANG T, HU X G, ZHOU Q X. The research progress in migration, distribution, biological effects and analytical methods of microplastics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(4): 385-395.
- [8] YANG P, ZHANG Y F, YANG H, et al. Ebullition was a major pathway of methane emissions from the aquaculture ponds in south-east China[J]. *Water Research*, 2020, 184: 116176.
- [9] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022[M]. Rome: Sustainability in Action, 2024.
- [10] FAO. Perspectivas de cosechas y situación alimentaria[M]. Roma: FAO, 2025.
- [11] JIN T Y, TANG J C, LYU H H, et al. Activities of microplastics (MPs) in agricultural soil: a review of MPs pollution from the perspective of agricultural ecosystems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(14): 4182-4201.
- [12] HE L Y, LI Z B, JIA Q, et al. Soil microplastics pollution in agriculture[J]. *Science*, 2023, 379(6632): 547.
- [13] YU F, PEI Y Z, ZHANG X C, et al. Occurrence and distribution characteristics of aged microplastics in the surface water, sediment, and crabs of the aquaculture pond in the Yangtze River Delta of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 871: 162039.
- [14] LI W X, CHEN X F, LI M Q, et al. Microplastics as an aquatic pollutant affect gut microbiota within aquatic animals[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127094.
- [15] VON MOOS N, BURKHARDT-HOLM P, KÖHLER A. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(20): 11327-11335.
- [16] ZHANG Y, PU S Y, LV X, et al. Global trends and prospects in microplastics research: a bibliometric analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400: 123110.
- [17] XIONG X, WU C X, ELSER J J, et al. Occurrence and fate of microplastic debris in middle and lower reaches of the Yangtze River-From inland to the sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 659: 66-73.
- [18] MA J L, NIU X J, ZHANG D Q, et al. High levels of microplastic pollution in aquaculture water of fish ponds in the Pearl River Estuary of Guangzhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140679.
- [19] SONG K X, WANG R, YANG G, et al. Pollution concerns in mariculture water and cultured economical bivalves: occurrence of microplastics under different aquaculture modes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 406: 136913.
- [20] SILVA D C C, BORBA A, DE SOUSA H C, et al. Microplastic pollution in marine bivalves, surface water and sediments from an aquaculture in Portugal and possible intake by humans[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2025, 85: 104146.
- [21] YAN M T, NIE H Y, XU K H, et al. Microplastic abundance,

- distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China[J]. *Chemosphere*, 2019, 217: 879-886.
- [22] BORDÓS G, URBÁNYI B, MICSINAI A, et al. Identification of microplastics in fish ponds and natural freshwater environments of the Carpathian basin, Europe[J]. *Chemosphere*, 2019, 216: 110-116.
- [23] WIESINGER H, WANG Z Y, HELLWEG S. Deep dive into plastic monomers, additives, and processing aids[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(13): 9339-9351.
- [24] LI M Z, MA W H, FANG J K H, et al. A review on the combined toxicological effects of microplastics and their attached pollutants[J]. *Emerging Contaminants*, 2025, 11(2): 100486.
- [25] 赵永乐, 张妍. 水体中微塑料和抗生素相互作用及复合毒性的研究进展[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2026(1): 25-42.
- [26] TUMWESIGYE E, FELICITAS NNADOZIE C, C AKAMAGWUNA F, et al. Microplastics as vectors of chemical contaminants and biological agents in freshwater ecosystems: current knowledge status and future perspectives[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 330: 121829.
- [27] MATIAS R S, GOMES S, BARBOZA L G A, et al. Microplastics in water, feed and tissues of European seabass reared in a recirculation aquaculture system (RAS)[J]. *Chemosphere*, 2023, 335: 139055.
- [28] LV W W, ZHOU W Z, LU S B, et al. Microplastic pollution in rice-fish co-culture system: a report of three farmland stations in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1209-1218.
- [29] 刘恒, 李双双, 蔡铭灿, 等. 水产养殖环境中微塑料的赋存现状及去除技术研究进展[J]. *环境化学*, 2025, 44(2): 364-379.
- [30] MIAO C H, ZHANG J H, JIN R X, et al. Microplastics in aquaculture systems: occurrence, ecological threats and control strategies[J]. *Chemosphere*, 2023, 340: 139924.
- [31] YAN M Q, WANG L, DAI Y Y, et al. Behavior of microplastics in inland waters: aggregation, settlement, and transport[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 107(4): 700-709.
- [32] BESSELING E, QUIK J T K, SUN M Z, et al. Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: a modeling study[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 540-548.
- [33] 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.
- [34] HOSSAIN S, AHMAD SHUKRI Z N, WAIHO K, et al. Microplastics pollution in mud crab (*Scylla* sp.) aquaculture system: first investigation and evidence[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 329: 121697.
- [35] YU X, HUANG W, WANG Y J, et al. Microplastic pollution in the environment and organisms of Xiangshan Bay, East China Sea: an area of intensive mariculture[J]. *Water Research*, 2022, 212: 118117.
- [36] LIN F, ZHANG Q Z, XIE J, et al. Microplastics in biota and surface seawater from tropical aquaculture area in Hainan, China[J]. *Gondwana Research*, 2022, 108: 41-48.
- [37] LEREBOURS A, BATHIE M, KAZOUR M, et al. Spatio-temporal contamination of microplastics in shellfish farming regions: a case study[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 181: 113842.
- [38] SU L, XUE Y G, LI L Y, et al. Microplastics in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 711-719.
- [39] 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 Environmental Safety*, 2019, 170: 180-187.
- [40] LI W X, CHEN X F, CAI Z M, et al. Characteristics of microplastic pollution and analysis of colonized-microbiota in a freshwater aquaculture system[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 306: 119385.
- [41] ZHANG D D, FRASER M A, HUANG W, et al. Microplastic pollution in water, sediment, and specific tissues of crayfish (*Procambarus clarkii*) within two different breeding modes in Jianli, Hubei Province, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 115939.
- [42] MCCORMICK A, HOELLEIN T J, MASON S A, et al. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(20): 11863-11871.
- [43] MINTENIG S M, INT-VEEN I, LÖDER M G J, et al. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging[J]. *Water Research*, 2017, 108: 365-372.
- [44] ESTAHBANATI S, FAHRENFELD N L. Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water[J]. *Chemosphere*, 2016, 162: 277-284.
- [45] 焦萌, 曹秉帝, 张涛. 环境中的轮胎磨损颗粒: 从路面到海洋[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(12): 4263-4278.
- [46] 付宏煜, 李博闻, 卢琦园, 等. 不同污水处理厂微塑料排放特征及对受纳流域水体的生态风险[J]. *环境化学*, 2025, 44(5): 1565-1577.
- [47] CAI L Q, WANG J D, PENG J P, et al. Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(32): 24928-24935.
- [48] MA Y F, YOU X Y. Modelling the accumulation of microplastics through food webs with the example Baiyangdian Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 762: 144110.
- [49] EGEA-CORBACHO A, MARTÍN-GARCÍA A P, FRANCO A A, et al. Microplastic in industrial aquaculture: occurrence in the aquatic environment, feed and organisms (*Dicentrarchus labrax*)

- [J]. Science of the Total Environment, 2023, 904:166774.
- [50] DU S, ZHU R W, CAI Y J, et al. Environmental fate and impacts of microplastics in aquatic ecosystems: a review [J]. RSC Advances, 2021, 11(26):15762-15784.
- [51] LYNCH S. OpenLitterMap.com-open data on plastic pollution with blockchain rewards (littercoin) [J]. Open Geospatial Data, Software and Standards, 2018, 3(1):6.
- [52] WANG Q, LI J J, ZHU X P, et al. Microplastics in fish meals: an exposure route for aquaculture animals [J]. Science of the Total Environment, 2022, 807:151049.
- [53] KOLANDHASAMY P, SU L, LI J N, et al. Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: a novel way to uptake microplastics beyond ingestion [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610:635-640.
- [54] GÜNDOĞDU S, EROLDÖĞAN O T, EVLIYAĞLU E, et al. Fish out, plastic in: global pattern of plastics in commercial fishmeal [J]. Aquaculture, 2021, 534:736316.
- [55] ASTNER A F, HAYES D G, O'NEILL H, et al. Mechanical formation of micro- and nano-plastic materials for environmental studies in agricultural ecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2019, 685:1097-1106.
- [56] KALČÍKOVÁ G, SKALAR T, MAROLT G, et al. An environmental concentration of aged microplastics with adsorbed silver significantly affects aquatic organisms [J]. Water Research, 2020, 175:115644.
- [57] MAMMO F K, AMOAH I D, GANI K M, et al. Microplastics in the environment: interactions with microbes and chemical contaminants [J]. Science of the Total Environment, 2020, 743:140518.
- [58] JIA J, LIU Q, ZHAO E, et al. Biofilm formation on microplastics and interactions with antibiotics, antibiotic resistance genes and pathogens in aquatic environment [J]. Eco-Environment & Health, 2024, 3(4):516-528.
- [59] CHOLEWINSKA P, MONIUSZKO H, WOJNAROWSKI K, et al. The occurrence of microplastics and the formation of biofilms by pathogenic and opportunistic bacteria as threats in aquaculture [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(13):8137.
- [60] YAO P, ZHOU B, LU Y H, et al. A review of microplastics in sediments: spatial and temporal occurrences, biological effects, and analytic methods [J]. Quaternary International, 2019, 519:274-281.
- [61] SALAM M, LI H, WANG F Y, et al. The impacts of microplastics and biofilms mediated interactions on sedimentary nitrogen cycling: a comprehensive review [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 184:332-341.
- [62] FABRA M, WILLIAMS L, WATTS J E M, et al. The plastic Trojan horse: biofilms increase microplastic uptake in marine filter feeders impacting microbial transfer and organism health [J]. Science of the Total Environment, 2021, 797:149217.
- [63] SUN X X, MENG L J, LIANG J H, et al. Microplastic distribution patterns in fish and implications for safe consumption [J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(33):17393-17402.
- [64] WELDEN N A C, COWIE P R. Long-term microplastic retention causes reduced body condition in the langoustine, *Nephrops norvegicus* [J]. Environmental Pollution, 2016, 218:895-900.
- [65] 涂烨楠, 凌海波, 吴辰熙, 等. 淡水浮游动物摄食微塑料过程及影响研究 [J]. 环境科学与技术, 2018, 41(11):1-8.
- [66] 陈启晴, 杨守业, HENNER H, 等. 微塑料污染的水生生态毒性与载体作用 [J]. 生态毒理学报, 2018, 13(1):16-30.
- [67] 张 爱, 李珍珍, 庄铨涛, 等. 典型淡水养殖池塘微塑料的污染分布、毒性效应及其生态风险评价 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(10):11-19.
- [68] PEDÀ C, ROMEO T, PANTI C, et al. Integrated biomarker responses in European seabass *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758) chronically exposed to PVC microplastics [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 438:129488.
- [69] LU Y F, ZHANG Y, DENG Y F, et al. Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(7):4054-4060.
- [70] SUN S M, JIN Y T, LUO P H, et al. Polystyrene microplastics induced male reproductive toxicity and transgenerational effects in freshwater prawn [J]. Science of the Total Environment, 2022, 842:156820.
- [71] MONTERO D, RIMOLDI S, TORRECILLAS S, et al. Impact of polypropylene microplastics and chemical pollutants on European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) gut microbiota and health [J]. Science of the Total Environment, 2022, 805:150402.
- [72] YU Z Y, ZHANG L, HUANG Q S, et al. Combined effects of micro-/ nano-plastics and oxytetracycline on the intestinal histopathology and microbiome in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Science of the Total Environment, 2022, 843:156917.

(责任编辑:黄克玲)