



· 综述 ·

微塑料染污及其对不同栖息地、不同食性海洋鱼类影响的研究进展

陆化杰^{1,2,3,4,5*}, 刘凯¹, 欧玉哲¹, 陈子越¹, 陈新军^{1,2,3,4,5}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;

4. 上海海洋大学, 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306;

5. 上海海洋大学, 农业农村部大洋渔业资源环境科学观测实验站, 上海 201306)

摘要: 随着微塑料在海洋环境和海洋生物中的发现, 海洋微塑料污染问题越来越受到关注。本文对海洋微塑料的来源、类型、分布规律、毒性以及不同栖息地、不同食性海洋鱼类对微塑料的摄取特性和受到影响进行了梳理, 对后续研究方向进行了分析和展望。结果显示, 微塑料来源广泛、种类繁多、分布在海洋的各个角落, 在海洋中垂直分布特点为底层沉积物含量较高, 其次为底层、上层水域, 中层水域较少; 水平方向上分布特点为河口区含量较高, 流场区次之, 大洋区较少, 微塑料毒性主要有自身毒性和联合毒性。海洋鱼类对微塑料的摄取具有一定的选择性, 不同栖息地、不同食性海洋鱼类对微塑料的摄取在种类和数量上均存在差异, 不同栖息地鱼类对微塑料的摄取在种类上主要与微塑料的密度相关, 数量上主要与水域中微塑料的分布特性有关; 不同食性鱼类对微塑料的摄取在种类和数量上都主要与其食性有关, 但与鱼类个体大小、口裂、滤水量也有一定相关性。微塑料会降低海洋鱼类的繁殖率, 增加其死亡率。研究表明, 经过长时间演变, 微塑料会在水体中重新分布, 微塑料污染在种类、数量上将呈现多样化, 后续的研究中应结合渔业生物、生态学, 物理海洋, 海洋化学等知识, 更全面地了解微塑料在海洋中的存在、分布、传递以及对海洋鱼类和其他海洋生物的影响。

关键词: 微塑料污染; 不同栖息地; 不同食性; 海洋鱼类; 影响

中图分类号: X 79; S 917.4

文献标志码: A

由于塑料的适用性和廉价性, 塑料产业发展迅猛, 自塑料被发明至今, 世界塑料总产量高达约 83 亿 t^[1]。每年大约有 10% 的塑料垃圾进入海洋, 约占海洋垃圾总数的 60%~80%, 局部海域高达 95%^[2], 塑料垃圾在海洋各个水层甚至

海底均有被发现^[3-5]。随着塑料制品需求的增加, 预计到 2025 年进入海洋的塑料垃圾将达 2.5×10^8 t^[6]。20 世纪 70 年代, 公海首次发现较小塑料微粒^[7], 直到 21 世纪初, Thompson 等^[8]首次使用“微塑料 (microplastics, MPs)”来描述海洋

收稿日期: 2020-12-03 修回日期: 2021-06-11

资助项目: 国家重点研发计划 (2019YFD090402); 国家自然科学基金 (41506184)

通信作者: 陆化杰 (照片), E-mail: hjlu@shou.edu.cn



环境中较小塑料微粒, 并指出应重视其对海洋生态系统的影响, 2008年第一届国际微塑料研讨会将微塑料定义为直径小于5 mm的塑料碎片^[9]。微塑料作为一种分布广^[10-11]、降解慢^[10-11]、毒理复杂^[11-13]的新型污染物已被证实对鱼类^[14-17]、虾类^[18]、贝类^[19-22]、藻类^[12]、桡足类^[23-26]、珊瑚^[27]以及海洋大型中上层滤食性动物如鲸鲨(*Rhincodon typus*)^[28], 哺乳类动物如座头鲸(*Megaptera novaeangliae*)^[29]和真喙鲸(*Mesoplodon mirus*)^[30]均会产生影响, 不同海洋生物对微塑料的摄取特性及所受的影响已经成为全球海洋研究的一个热点。海洋鱼类作为人类重要的蛋白质来源, 其对微塑料的摄取特性, 以及微塑料在其体内的聚集是否会对人类的生命健康造成威胁, 越来越受到人们的关注。本文综合国内外文献对海洋微塑料的来源、种类、分布、毒性以及不同栖息地、不同食性海洋鱼类对其的摄取特性和可能受到的影响进行了梳理和总结, 并在此基础上提出了未来的研究方向。

1 海洋微塑料污染情况

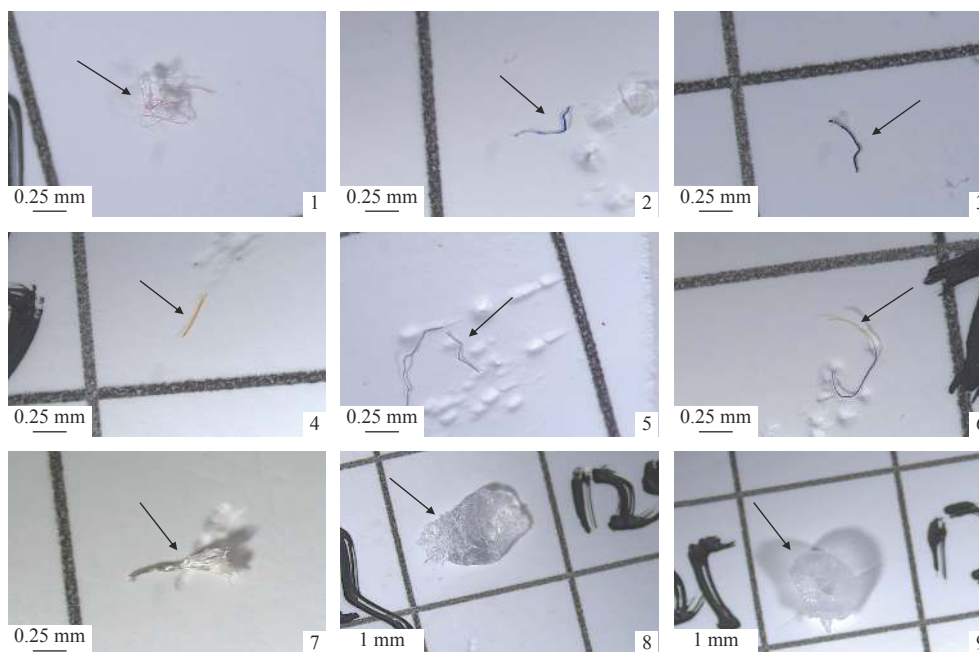
1.1 海洋微塑料的来源

根据形成等级不同微塑料可分为原生微塑

料和次生微塑料, 原生微塑料是指直接被生产成尺寸小于5 mm的塑料微粒, 例如护肤品、洗涤剂、牙膏、指甲油等添加的塑料微粒^[31-32]以及工业磨料和喷砂介质^[33]等。次生微塑料是指大块塑料经过物理、化学和生物作用分裂或降解形成的微塑料。海洋中微塑料的来源主要包括陆源输入、海上运输、滨海旅游和渔业活动等, 其中陆源输入是海洋微塑料的主要来源^[34]。此外, 由运输、旅游、渔业等活动而丢弃于沿岸和海洋中的大型塑料, 受海流、阳光和微生物等共同影响而老化、降解也是海洋微塑料的重要来源^[34]。

1.2 海洋微塑料的种类

微塑料材质种类繁多, 外形各异, 多为纤维、颗粒和薄膜形状, 其颜色以透明、白色、灰色、蓝色、红色、黄色和黑色为主^[11, 17](图版)。海洋中常见的微塑料主要有8种: 聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚碳酸酯(polycarbonate, PC)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)、聚酰胺(polyamide, PA)和丙烯腈—丁二烯—苯乙烯(acrylonitrile butadiene styrene copolymers, ABS)^[35-36](表1), 其中PE、PP和PVC含量较多^[37]。



图版 微塑料颜色、形状示意图

1.红色; 2.蓝色; 3.黑色; 4,6.黄色; 5.灰色; 7.白色; 8,9.透明; 1~7.纤维; 8.碎片; 9.微粒。黑色箭头指示微塑料

Plate Color and shape of microplastics

1.red; 2.blue; 3.black; 4,6.yellow; 5.gray; 7.white; 8,9.transparent; 1-7.fibers; 8.fragments; 9.particulates. Black arrows indicate microplastics

表 1 海洋生物对不同类型、形状微塑料的摄取情况

Tab. 1 Microplastic types, and shapes ingested by marine organisms

海域 sea area	生物类型 biotype	微塑料类型 types of microplastics	微塑料形状 microplastic shapes	参考文献 reference
北太平洋 North Pacific	浮游动物 Zooplankton		纤维Fibers、碎片Fragments	[38]
北太平洋中央环流 North Pacific central circulation	浮游鱼类 Planktonic fish		碎片Fragments (94%)、薄膜Films (4%)、纤维Fibers (<1%)	[39]
北海和波罗的海 North Sea and Baltic Sea	鱼类 Fish	PE, PA, PP, PS	碎片Fragments (>50%)	[40]
英吉利海峡 English Channel	鱼类 Fish	Rayon, PA, PE, PS, LDPE, acrylic	纤维Fibers (68%)、碎片Fragments (16%)、玻璃粉Glass powder (12%)	[41]
波斯湾穆萨河口 Musa Estuary, Persian Gulf	鱼类、甲壳类 Fish、Crustaceans		纤维Fibers、碎片Fragments	[42]
葡萄牙海岸 Portuguese coast	鱼类 Fish	PP, PE, alkyd resin, rayon, nylon, acrylic	纤维Fibers (65.8%)、碎片Fragments (34.2)	[43]
广东沿岸 Guangdong coast	鱼类 Fish		纤维Fibers、碎片Fragments	[17]
东海沿岸 East China Sea coast	鱼类 Fish	PE, PES, PP, cotton	纤维Fibers、碎片Fragments、薄膜Films	[44]
中国东海 East China Sea	鱼类、甲壳类 Fish、Crustaceans	PE, PET, PP, PS, PVC, nylon, acrylic, copolymer, tripolymer	纤维Fibers、碎片Fragments、薄膜Films、泡沫Styrofoam、小球Spheres	[45]
中国长江入海口 Changjiang Estuary	鱼类 Fish	Cellophane, PE, PET	纤维Fibers、碎片Fragments、小球Spheres、薄膜Films	[46]
南海北部湾 Beibu Gulf	鱼类 Fish	PET, nylon, PP, PE, acrylic	纤维Fibers (96%)、碎片Fragments (2%)、薄膜Films (2%)	[47]

1.3 海洋微塑料分布规律

由于微塑料质量轻、体积小,其在风力、洋流以及生物携带的作用下遍及海洋的各个角落,范围上从河口^[10-11, 16, 37]、潮滩^[10-11, 48]、大洋^[10-11, 16, 49]、赤道^[10-11]到南北极^[10-11, 50],深度上从海表到深渊均存在不同程度的微塑料污染。人类活动的影响使微塑料在滨海、河口、沙滩的浓度相对较高,此外在洋流交汇处微塑料浓度也相对较高^[16]。武芳竹等^[16]对全球微塑料污染状况进行了统计和分析,认为全球均受到不同程度的微塑料污染,其中亚洲、欧洲较为严重,两极中的北极地区污染也较为严重^[51-54],而非洲、美洲、大洋洲则相对较轻^[16]。一些学者通过沉积物分析总结了亚洲微塑料的污染情况,认为中国长江口、各沿岸海滩、渤海和韩国洛河河口微塑料含量较高^[55-58],同时韩国洛河河口雨后微塑料的浓度是雨前的3倍左右^[55];日本、新加坡等国沉积物和水体中微塑料含量较低^[59-61],而我国沉积物中微塑料含量比日本、新加坡等国高2~3个数量级^[56-58, 59-61]。相关研究也表明,中国长江口、闽

江口、椒江口和瓯江口水体中微塑料含量较高^[62-63],西太平洋黑潮暖流区域微塑料含量也较高^[64],相比之下中国东海微塑料含量要低3~4个数量级^[62]。

1.4 微塑料毒性来源

自身毒性 微塑料的成分主要由聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰胺(PA)、丙烯腈—丁二烯—苯乙烯(ABS)等构成^[35-36],这些成分本身就具有毒性,此外,塑料生产过程中加入的酞酸脂、多溴联苯醚(PBDE)、双酚A等有毒添加物^[65],使塑料本身又具有双重毒性。

联合毒性 微塑料的疏水性、表面积大等特点,使其具有吸附有害化学物质如多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)、滴滴伊(DDE solution, DDE)、全氟辛酸铵(perfluorooctanoic acid ammonium salt, PFOA)等^[65]和致病微生物(副溶血性弧菌)^[66]等特性,此外塑料在生产过程中往往会通过添加含有铅(Pb)、镉(Cd)、钡

(Ba)和锡(Sn)等有毒金属离子的稳定剂来提高塑料制品的稳定性,使其毒性增加^[67]。有研究表明,微塑料表面甚至会携带一定量的可以吸附重金属离子的电荷^[25],除自身添加的重金属外,还可积聚周围环境中的重金属^[68]。另有研究表明,微塑料能有效激化重金属的形态转化,使重金属在酸性消化道内被解吸并输送到组织中,从而对生物体的生长发育、新陈代谢造成影响,继而增强生态风险^[69-73]。如Browne^[74]等将蠕虫(*Arenicola marina*)暴露于含有吸附添加剂和污染物的微塑料中,结果显示添加剂和污染物均随着微塑料在肠道中的累积而不断积聚。Avio等^[22]通过对紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)的研究发现,芘(Pyrene)随着微塑料摄取被输送到消化道、淋巴和鳃中,并在所有含有微塑料的组织中均有明显的积聚现象,这些都表明污染物可随着微塑料的摄取进入生物体内,并和微塑料一起对生物体产生影响^[52-53,75]。微塑料的联合毒性研究表明,海洋中潜在有害污染物、致病微生物等可以通过在微塑料上的附着,在风力、洋流等的外力作用下可能传播到海洋的每个角落,有些微生物能够通过微塑料上的附着实现大范围、长距离传播,并可能导致生物入侵,其带来的危害还需进一步的探索研究^[69-70]。

2 不同栖息地、食性海洋鱼类微塑料的摄取情况

由于陆源输入的主导作用,沿岸食物网中的海洋鱼类比栖息于离岸的海洋鱼类更容易摄取微塑料^[76],同样,栖息于流隔区和深海沉积物中的海洋鱼类比生活在大洋环境中的海洋鱼类中更容易接触并摄取微塑料^[77-79]。海洋食物网中微塑料主要来源于生物的主动摄食,并依靠食物链进行传递^[72]。研究显示,在不同营养级水平海洋生物体内均有微塑料被发现^[80],尺寸微小是微塑料被海洋生物摄取的重要原因^[81-82]。

2.1 不同栖息地海洋鱼类微塑料摄取特性

不同栖息地海洋鱼类微塑料摄取的种类存在差异。海洋表层鱼类更可能摄取密度小的微塑料(如PP,PS,PE等),而底栖鱼类更可能受密度大的微塑料(如PET和PVC等)的影响^[83]。PS微塑料的密度介于 $1040\sim 1090\text{ kg/m}^3$,PE微塑料的密度介于 $910\sim 940\text{ kg/m}^3$ ^[84],PE较PS密度低,

在水体中也更容易暴露,对大洋性鱼类影响也更大^[81]。研究显示,大洋性鱼类PE微塑料含量较高,底栖鱼类和甲壳类则PS微塑料含量较高^[82]。Neves等^[83]通过对葡萄牙海岸经济鱼类的研究发现,大洋性鱼类体内微塑料主要以微粒为主,而底栖鱼类体内微塑料则以纤维为主,Zhang等^[17]的研究也发现球状微粒主要存在于中上层鱼类体内。微塑料的密度影响其在海洋中的分布,进而影响不同栖息地海洋鱼类对微塑料的摄取特性^[85]。但是,微塑料的分布特性并非固定不变,随着时间的推移,塑料在生物扰动、风暴、上升流等的作用下降解,表面积增加,微生物及其他浮游生物的附着能够改变粒子的密度、浮力和下沉率等,微塑料在水体中的分布也会改变^[86],间接表明了大洋性和底栖性鱼类均存在微塑料污染的风险。

不同栖息地鱼类微塑料摄取的数量存在差异。Zhang等^[17]通过对中国广东河口6种经济鱼类体内微量塑料含量的研究发现,在种类上,6种鱼类体内均含有微塑料,在数量上,在所采集的64尾样本中有62尾发现微塑料,占比达96.9%,其中底栖鱼类的少鳞鳕(*Sillago japonica*)体内微塑料含量最高,栖息于下层水域的褐蓝子鱼(*Siganus fuscescens*)和中上层水域的鲮鱼(*Mugil cephalus*)体内微塑料含量次之,而栖息于中层水域的短吻鲷(*Leiognathus brevirostris*)、斑鰩(*Konosirus punctatus*)和吉打副叶鲷(*Alepes djedaba*)体内微塑料含量则相对最少。该研究还表明,在食性相同的斑鰩、鲮鱼、褐蓝子鱼3种鱼类中,垂直栖息范围最广的褐蓝子鱼比仅栖息于近岸中上层的斑鰩和鲮鱼摄取的球状微塑料少;在均为肉食性的3种鱼(吉打副叶鲷、短吻鲷和少鳞鳕)中,生活在中上层的吉打副叶鲷微塑料摄取量小于生活在底层的短吻鲷和少鳞鳕^[17]。Bimali等^[47]通过研究发现,南海北部湾海域采集的24种鱼类中有12种鱼类体内发现微塑料,占全部种类的50%;在全部481尾样本中有236尾样本体内发现微塑料,占样本总数的49.1%,其中栖息于近海底层肉食性鱼类棕斑腹刺鲀(*Gastrophysus spadiceus*)微塑料摄取量高于相同食性但栖息于其它水层的鱼类;栖息于1~50m水深的杂食性鱼类沟蓝子鱼(*Siganus canaliculatus*)微塑料摄取量高于相同食性栖息于水深

45~120 m 砂泥底质海域的刺鲷 (*Psenopsis anomala*), 该研究还表明微塑料含量最大的为底层鱼类。Khalida 等^[46]通过研究发现, 在中国长江口采集的 21 种鱼类体内中均发现微塑料, 如按鱼类栖息环境将其种类分为近岸底栖性 (demersal)、底层性 (benthopelagic)、深海底栖性 (benthic) 和大洋性 (pelagic) 4 类, 微塑料的摄取量呈现近岸底栖性鱼类最高, 深海底栖性鱼类次之, 大洋性和底层性鱼类相对较少的特性。Su 等^[44]针对东海沿岸河口鱼类微塑料的摄取情况开展了研究, 结果显示 4 个采样点 (崇明岛东南方向海域、南汇嘴观海公园附近海域、洋山深水港西南方向海域和钱塘江入海口海天一洲景区附近海域) 所采集的 13 种鱼类体内均含有微塑料, 样本微塑料摄取量空间分布上从大到小依次为钱塘江入海口海天一洲景区附近海域、洋山深水港西南方向海域、南汇嘴观海公园附近海域和崇明岛东南方向海域, 且每个采样点不同栖息环境鱼类微塑料的摄取量均呈现底栖鱼类较高, 中上层鱼类较少的特点。Feng 等^[45]通过对东海舟山渔场海洋鱼类微塑料研究发现, 在所采集的 11 种鱼类中有 9 种鱼类体内发现微塑料, 占全部种类的 81.81%, 且样本中底栖鱼类体内微塑料含量较高, 其中早期为浮游鱼类、中后期为底栖鱼类的海鳗 (*Muraenesox cinereus*) 体内微塑料含量最高。Possatto 等^[87]通过研究发现, 巴西北部西南大西洋沿岸 3 种海鲶, 即赫氏沿海鲶 (*Sciaedes herzbergii*)、施氏俯海鲶 (*Cathorops spixii*) 和阿氏俯海鲶 (*Cathorops agassizii*) 的幼鱼、亚成鱼、成鱼体内均有微塑料发现, 发现率分别为 18%、18% 和 33%, 其中 Nylon 微塑料占主体, 并指出这与海鲶的生活史和栖息环境密切相关。Sajjad 等^[42]通过对波斯湾穆萨河口鱼类微塑料污染情况研究时也发现所调查的 4 种底栖鱼类体内均含有微塑料, 其中栖息于海底泥沙中的鲷鱼 (*Platycephalus indicus*) 体内微塑料含量最高。Christoph 等^[40]通过研究发现北海和波罗的海底栖性 [大西洋鳕 (*Gadus morhua*)、比目鱼 (*Platichthys flesus*)] 对微塑料的摄取量小于大洋性 [大西洋鲱 (*Clupea harengus*)、大西洋鲭 (*Scomber scombrus*)] 鱼类, 说明该海域底栖鱼类微塑料摄取概率小于大洋性鱼类。

2.2 不同食性鱼类对微塑料的摄取特性

不同食性鱼类微塑料摄取的种类存在差异

由于尺寸小、密度不同, 微塑料能够存在于沉积物中, 也能够悬浮于水体中, 还能够混合在相同尺寸范围的浮游生物中, 继而被不同食性的捕食者误食, 特别是滤食性海洋鱼类^[88-90]。Zhang 等^[17]研究发现, 鱼体内微塑料类型主要为纤维状、球状、碎片状、薄膜状 (表 1), 且纤维状微塑料含量最高。生活在同一水层不同食性鱼类对微塑料摄取也不同, 球状微塑料仅在杂食性鱼类斑鲷、鲷鱼和褐蓝子鱼中发现, 在肉食性鱼类吉打副叶鲷中并未发现, 此外, 以浮游生物和有机碎屑为食的小型中上层鱼类斑鲷的微塑料摄取的最大尺寸小于或等 2 mm, 其他鱼类微塑料摄取的最大尺寸则大于或等于 2 mm^[17]。

不同食性鱼类微塑料摄取的数量存在差异同一栖息环境的不同食性鱼类对微塑料的摄取特性不同。Bimali 等^[47]的研究显示, 杂食性鱼类沟蓝子鱼和肉食性鱼类长吻若鲷 (*Carangoides chrysophrys*) 虽然生活同一水层, 沟但蓝子鱼微塑料摄取量远高于长吻若鲷。Zhang 等^[17]研究结果也表明同一海域的中上层鱼类斑鲷和吉打副叶鲷对微塑料的摄取量不同, 其中以浮游动物和有机碎屑为食的斑鲷平均微塑料摄取量明显大于肉食性的吉打副叶鲷; 而在底层鱼类中, 肉食性鱼类微塑料摄取量略高于植食性鱼类。Khalida 等^[46]与 Su 等^[44]研究认为, 食物来源范围窄、营养级水平低的草食性鱼类塑料摄取量较低, 这也很好的解释了 Zhang 等^[17]的研究。此外, Khalida 等^[46]研究还显示, 以浮游动物、藻类为食的大洋性鱼类比大部分肉食性大洋性鱼类微塑料摄取量略高, 这与 Zhang 等^[17]的研究结果也相似。在近岸底栖性鱼类的研究中, 杂食性鱼类和其他肉食性鱼类微塑料摄取量相对处于中等位置, 这与 Su 等^[44]的研究结果相似。

2.3 海洋微塑料污染对不同栖息地、不同食性鱼类的影响

由于微塑料既有自身毒性又有和联合毒性^[35-36,65-67], 鱼类摄取微塑料后必会产生一定影响。研究表明海洋鱼类吞食的微塑料长时间在其肠胃中积累, 会造成消化道堵塞、产生虚假的饱腹感, 最终导致消化系统的机械损伤以及营养不良、生长缓慢等现象, 严重可导其死亡^[91-92]。研究还发现, 将欧洲鲈 (*Dicentrarchus labrax*) 暴露于粒径为 90 μm 浓度为 10000 个/ m^3 的聚苯乙烯

(PS)的环境下,其摄食会发生变化,生长速度会降低,繁殖率也下降了17%^[93]。此外,Mazurais等^[94]研究表明,将欧洲鲈仔鱼暴露于聚乙烯(PS)的水体中,随着微塑料浓度的升高(10~45 μm)样本的死亡率从11%增加到19%,其主要原因是微塑料阻碍其排泄。其他研究明小粒径微塑料可能进入组织和循环系统,从而对鱼类整个机体造成毒害作用^[11,13],Browne等^[88]认为,当微塑料粒径小于10 μm时可以进入贻贝的循环系统并产生毒理效应。由此可见微塑料浓度对鱼类的生存繁殖有着重要影响。

不同栖息地鱼类所受微塑料影响的大小与微塑料在海洋中的分布特点有直接关系,而相同栖息环境下的鱼类所受微塑料的影响主要与其食性相关。如有研究表明生活在滩涂^[10-11,16]、河口^[10-11,16,56,58-59]、海洋上层^[10-11,16]和底层鱼类^[10-11,16]受微塑料影响较大,滤食性、杂食性鱼类^[17,44,46-47]受微塑料影响较大。根据武芳竹^[16]对全球海洋微塑料污染状况统计可知,中国及世界各河口微塑料浓度大多超过10000个/m³,而这个浓度足以使欧洲鲈^[25]繁殖率下降17%。综上所述,海洋微塑料的污染情况会对沿岸和海洋渔业资源产生破坏,会降低海洋鱼类的繁殖率^[93],增加死亡率等^[94]。

3 讨论

3.1 总结

海洋微塑料污染情况 微塑料作为一种小型塑料污染物,来源广泛^[31-34]、种类多^[35-36]、分布在大洋各个角落^[10-11,16,48-50],其自身毒性和联合毒性对海洋食物网各个营养级均会产生不同程度的影响^[14-31,66,68,91-92],增强生态风险^[69-73]。

不同栖息地鱼类微塑料摄取特性 不同栖息地鱼类对微塑料摄取在种类和数量上均有所不同。垂直方向上中上层鱼类在种类上更易摄取小密度、微粒、球状微粒的微塑料,底栖鱼类更容易摄取大密度、纤维状微塑料^[83-85];数量上底栖鱼类更容易摄取更大数量的微塑料^[17,42,44-47,77],中层和中上层混合水域的鱼类次之,上层和底层的鱼类再次之^[17]。水平方向上底栖鱼类中习惯生活在泥沙之中鱼类微塑料摄取量最高^[45],滩涂环境中的鱼类微塑料摄取量次之^[44],近岸底层的鱼类微塑料摄取量更少^[46],近

岸上层的鱼类微塑料摄取量则最少^[47]。但是,上述这些规律并非一成不变,经过长时间演变,微塑料在生物、物理、化学等的作用下降解,使其形状、尺寸、密度发生变化在水体中重新分布^[87]。例如,Christoph等^[40]的研究显示底栖鱼类平均微塑料摄取量小于大洋性鱼类,也意味着不同栖息地鱼类微塑料污染在种类、数量上的多样化,研究时要针对不同海域具体分析。

不同食性鱼类微塑料的摄取特性 不同食性的鱼类对微塑料摄取在种类和数量上均存在差异。种类上,相同栖息水层下,杂食性鱼类通常比肉食性鱼类能够摄取更多的微粒状微塑料^[17],同时摄取微塑料的尺寸与鱼体大小、口裂也有关系^[17]。数量上,相同栖息水层下,滤食性鱼类摄取更高的微塑料^[46-47,88-89],杂食性鱼类通常比大部分肉食性鱼类微塑料摄取量高^[17,44,46-47],食物来源范围窄、营养级水平低的植食性鱼类微塑料摄取量较低^[17,44,46]。

不同栖息地鱼类微塑料摄取及其与微塑料分布的关系 海洋中微塑料垂直方向上分布特点为沉积物中最多^[10-11,16,37,57,60],海洋表层区域次之^[10-11,16],中层水域含量最少^[10-11,16];水平方向上,河口区域最多^[10-11,16,56,58-59],洋流区、流隔区、涡流区^[10-11,16]等有流场区域次之,平静大洋区含量最少^[10-11,16,49],这也导致了不同栖息环境鱼类微塑料摄取特点不同,且数量上与微塑料垂直分布特点基本一致^[17,42,44-47,87](表2)。由此可见,海洋微塑料的分布特性是影响鱼类对微塑料摄取的重要因素。此外,肉食性鱼类体内微塑料含量较高,也可能是微塑料通过食物网在高营养级不断聚集的结果^[45,95]。

不同栖息地、不同食性鱼类受海洋微塑料污染的影响 鱼类对微塑料的摄取对其整个机体造成不同程度的毒害作用^[11-13,88,91-94]。海洋中微塑料浓度,粒径的大小直接影响着不同栖息地、不同食性鱼类所受毒性大小^[16,88,93-94]。总体而言,滩涂^[10-11,16]、河口^[10-11,16,56,58-59]和底层^[10-11,16]海洋鱼类,尤其这些栖息环境内的滤食性、杂食性鱼类^[17,44,46-47]受微塑料影响较大,主要体现在降低其繁殖率^[93],提高其死亡率^[94],而大洋性鱼类所受微塑料污染影响相对较小^[10-11,16]。

3.2 展望

本文对海洋微塑料污染情况以及不同栖息

表 2 不同海域鱼类微塑料摄取情况

Tab. 2 Ingestion of microplastics by fishes in different sea areas

海域 sea area	总样本量 total sample size	总鱼种数 total fish species	含微塑料 样本量 sample size with microplastic	含微塑料 鱼种数 fish species with microplastic	高微塑料含量 鱼种栖息类型 habitat types of fish species with high microplastic content	高微塑料含量 鱼种食性 feeding habits of fish with high microplastic content	参考文献 reference
中国南海北部湾 Beibu Gulf	481	24	263	12	底栖鱼类 Benthic fish	肉食性 Carnivory、 杂食性 Omnivory	[47]
中国东海 East China Sea	193	11	111	9	底栖鱼类 Benthic fish	肉食性 Carnivory	[45]
中国沿岸河口 East China Sea coast	217	14		13	底栖鱼类 Benthic fish、 滩涂鱼类 Beach fish	肉食性 Carnivory	[44]
中国广东河口 Guangdong coast	64	6	62	6	底栖鱼类 Benthic fish	肉食性 Carnivory	[17]
中国长江入海口 Changjiang Estuary		21		21	底栖鱼类 Benthic fish	肉食性 Carnivory	[46]
西南大西洋沿岸 Southwest Atlantic coast		3		3	底栖鱼类 Benthic fish	肉食性 Carnivory	[87]
波斯湾穆萨河口 Musa Estuary, Persian Gulf	44	4	44	4	底栖鱼类 Benthic fish	肉食性 Carnivory	[42]
北海和波罗的海 North Sea and Baltic Sea	290		16		大洋性鱼类 Marine fishes	肉食性 Carnivory	[40]

地、不同食性鱼类对微塑料的摄取情况进行了总结和分析, 后续研究可以从以下二方面加以提升和完善。

研究内容上, 目前微塑料对海洋生物影响的研究样本主要集中于实验室中, 以人工饲养的方式进行, 对自然环境中海洋生物影响的研究相对较少, 后续可以从实验室内延伸到自然环境, 并将二者加以对比和验证。其次, 微塑料的毒性远不止于本身, 更重要的是微塑料对其它有毒污染物的吸附作用而产生的联合毒性, 但目前野外样本联合毒性的研究相对少见, 为后续研究提供了突破点。再次, 虽然部分研究证实微塑料广泛存在于从多种海洋鱼类体内, 但微塑料如何鱼类体内循环, 微塑料如何在高级海洋鱼类和食物网上的富集和传递仍不明朗, 海洋渔业资源的减少以及食物链结构的稳定性, 是否受与微塑料在海洋鱼类体内聚集程度有关, 还需进一步的探究。

研究方法上, 影响海洋鱼类微塑料摄取因素除了与食性和栖息环境外, 个体大小、口裂、滤水量也是重要因素, 而目前尚未见深入研究,

在今后研究可以模型化。微塑料的采样方法(非生物: 个/m², 个/m³, 个/L, 个/kg; 生物: 个/尾, mg/尾, mm/尾)和采样仪器(筛网孔径 5~4750 μm 不等)尚未完全标准化, 不利于科研成果的共享, 后续可以开展相关标准化研究。

总体而言, 对于海洋鱼类微塑料的研究, 应结合渔业生物、生态学, 物理海洋、海洋化学等知识, 采用标准化采样方法和仪器, 以更全面地开展微塑料在海洋中的存在、分布、传递以及对海洋鱼类和其它海洋生物的生态、毒理等效应的研究, 进而评估对人类健康造成的影响。

参考文献 (References):

- [1] 孙凯. 全球海洋塑料污染问题及治理对策[J]. 国家治理, 2021(15): 44-48.
Sun K. Global marine plastic pollution and countermeasures[J]. Governance, 2021(15): 44-48(in Chinese).
- [2] Moore C J. Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat[J]. *Environmental Research*, 2008, 108(2): 131-139.
- [3] Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo J I, et al.

- Plastic debris in the open ocean[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(28): 10239-10244.
- [4] Cannon S M E, Lavers J L, Figueiredo B. Plastic ingestion by fish in the Southern Hemisphere: a baseline study and review of methods[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 107(1): 286-291.
- [5] Lacerda A L D F, Rodrigues L D S, Sebillle E V, *et al.* Plastics in sea surface waters around the Antarctic Peninsula[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 3977.
- [6] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, *et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, 347(6223): 768-771.
- [7] 张娜, 周雅雯, 白玉, 等. 微塑料对肠道菌群影响作用的研究进展[J]. *中国塑料*, 2020, 34(3): 103-110.
Zhang N, Zhou Y W, Bai Y, *et al.* Research progress in effect of microplastics on intestinal flora[J]. *China Plastics*, 2020, 34(3): 103-110(in Chinese).
- [8] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: where is all the plastic?[J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838.
- [9] 杨璐, 许超, 张智力, 等. 微塑料的研究进展[J]. *绿色包装*, 2018(9): 63-66.
Yang L, Xu C, Zhang Z L, *et al.* Research progress of microplastics[J]. *Green Packaging*, 2018(9): 63-66(in Chinese).
- [10] 李道季. 海洋微塑料污染状况及其应对措施建议[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(2): 197-202.
Li D J. Research advance and countermeasures on marine microplastic pollution[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(2): 197-202(in Chinese).
- [11] 扈瀚文, 杨萍萍, 薛含含, 等. 环境微塑料污染的研究进展[J]. *合成材料老化与应用*, 2020, 49(1): 97-102.
Hu H W, Yang P P, Xue H H, *et al.* Research progress on environmental pollution of microplastics[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2020, 49(1): 97-102(in Chinese).
- [12] 王素春, 刘光洲, 张欢, 等. 微塑料对微藻的毒性效应研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(2): 192-197.
Wang S C, Liu G Z, Zhang H, *et al.* Toxicity research progress of microplastics on microalgae[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(2): 192-197(in Chinese).
- [13] 马乃龙, 程勇, 张利兰. 微塑料的生态毒理效应研究进展及展望[J]. *环境保护科学*, 2018, 44(6): 117-123.
Ma N L, Cheng Y, Zhang L L. Research progress and prospect of ecotoxicological effects of microplastic[J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(6): 117-123(in Chinese).
- [14] Digka N, Tsangaris C, Torre M, *et al.* Microplastics in mussels and fish from the Northern Ionian Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 135: 30-40.
- [15] 蔡亚云, 赵佳玥, 李文锋, 等. 不同粒径塑料微颗粒在斑马鱼腮组织中的积累及其对毒性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(6): 1154-1158.
Cai Y Y, Zhao J Y, Li W F, *et al.* Retention of polystyrene particles of different sizes in zebrafish gills and their effect on toxicity of anthracene to gill cells[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2017, 23(6): 1154-1158(in Chinese).
- [16] 武芳竹, 曾江宁, 徐晓群, 等. 海洋微塑料污染现状及其对鱼类的生态毒理效应[J]. *海洋学报*, 2019, 41(2): 85-98.
Wu F Z, Zeng J N, Xu X Q, *et al.* Status of marine microplastic pollution and its ecotoxicological effects on marine fish[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(2): 85-98(in Chinese).
- [17] Zhang C N, Wang S D, Pan Z K, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in commercial fishes from estuarine areas of Guangdong, South China[J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127656.
- [18] Murray F, Cowie P R. Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus, 1758)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(6): 1207-1217.
- [19] Li J N, Qu X Y, Su L, *et al.* Microplastics in mussels along the coastal waters of China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 177-184.
- [20] 冉文, 滕佳, 刘永亮, 等. 环渤海潮间带长牡蛎微塑料富集特征研究[J]. *海洋通报*, 2018, 37(5): 583-590.
Ran W, Teng J, Liu Y L, *et al.* Microplastic ingestion characteristics in the pacific oysters collected from the intertidal zone of the Bohai Rim[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(5): 583-590(in Chinese).
- [21] Santana M F M, Ascer L G, Custódio M R, *et al.* Microplastic contamination in natural mussel beds from a

- Brazilian urbanized coastal region: rapid evaluation through bioassessment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 106(1-2): 183-189.
- [22] Avio C G, Gorbi S, Milan M, *et al.* Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 198: 211-222.
- [23] 于娟, 许瑞, 魏逾杰, 等. 微塑料对海洋桡足类摄食、排泄及生殖的影响[J]. *中国海洋大学学报*, 2020, 50(3): 73-80.
- Yu J, Xu R, Wei Y J, *et al.* Effect of microplastics on feeding, excretion and reproduction of marine copepod[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(3): 73-80(in Chinese).
- [24] Cole M, Lindeque P, Fileman E, *et al.* The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 1130-1137.
- [25] Kim D, Chae Y, An Y J. Mixture toxicity of nickel and microplastics with different functional groups on *Daphnia magna*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21): 12852-12858.
- [26] Jeong C B, Kang H M, Lee M C, *et al.* Adverse effects of microplastics and oxidative stress-induced MAPK/Nrf2 pathway-mediated defense mechanisms in the marine copepod *Paracyclops nana*[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 41323.
- [27] 陆昊, 李卫东, 王沛政. 长时间微塑料环境暴露对肉软珊瑚的影响[J]. *海洋科学*, 2019, 43(11): 49-55.
- Lu H, Li W D, Wang P Z. Effects of long-term exposure to microplastics on *Sarcophyton trocheliophorum*[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(11): 49-55(in Chinese).
- [28] Fossi M C, Baini M, Panti C, *et al.* Are whale sharks exposed to persistent organic pollutants and plastic pollution in the Gulf of California (Mexico)? First ecotoxicological investigation using skin biopsies[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2017, 199: 48-58.
- [29] Besseling E, Foekema E M, Van Franeker J A, *et al.* Microplastic in a macro filter feeder: humpback whale *Megaptera novaeangliae*[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 95(1): 248-252.
- [30] Lusher A L, Hernandez-Milian G, O'Brien J, *et al.* Microplastic and macroplastic ingestion by a deep diving, oceanic cetacean: the true's beaked whale *Mesoplodon mirus*[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 199: 185-191.
- [31] Fendall L S, Sewell M A. Contributing to marine pollution by washing your face: microplastics in facial cleansers[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(8): 1225-1228.
- [32] 邹艳琴, 李钟瑞. 个人护理品和化妆品中塑料微珠的危害与法规要求[J]. *日用化学品科学*, 2015, 38(10): 1-4.
- Zou Y Q, Li Z R. Hazardous properties of microbeads and regulatory requirements in personal care and cosmetic products[J]. *Detergent & Cosmetics*, 2015, 38(10): 1-4(in Chinese).
- [33] 刘彬, 侯立安, 王媛, 等. 我国海洋塑料垃圾和微塑料排放现状及对策[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 174-182.
- Liu B, Hou L A, Wang Y, *et al.* Emission estimate and countermeasures of marine plastic debris and microplastics in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 174-182(in Chinese).
- [34] 孙承君, 蒋风华, 李景喜, 等. 海洋中微塑料的来源、分布及生态环境影响研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(4): 449-461.
- Sun C J, Jiang F H, Li J X, *et al.* The research progress in source, distribution, ecological and environmental effects of marine microplastics[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(4): 449-461(in Chinese).
- [35] Vianello A, Boldrin A, Guerriero P, *et al.* Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2013, 130: 54-61.
- [36] Andrady A L. Microplastics in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1596-1605.
- [37] 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 等. 长江口潮滩表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2067-2074.
- Zhu X T, Yi J, Qiang L Y, *et al.* Distribution and settlement of microplastics in the surface sediment of Yangtze

- Estuary[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2067-2074(in Chinese).
- [38] Desforges J P W, Galbraith M, Ross P S. Ingestion of microplastics by zooplankton in the northeast pacific ocean[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 69(3): 320-330.
- [39] Boerger C M, Lattin G L, Moore S L, *et al.* Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(12): 2275-2278.
- [40] Rummel C D, Löder M G J, Fricke N F, *et al.* Plastic ingestion by pelagic and demersal fish from the North Sea and Baltic Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 102(1): 134-141.
- [41] Lusher A L, McHugh M, Thompson R C. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 67(1-2): 94-99.
- [42] Sajjad A, Soltani N, Keshavarzi B, *et al.* Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf[J]. *Chemosphere*, 2018, 205: 80-87.
- [43] Neves D, Sobral P, Ferreira J L, *et al.* Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 101(1): 119-126.
- [44] Su L, Deng H, Li B W, *et al.* The occurrence of microplastic in specific organs in commercially caught fishes from coast and estuary area of east China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365: 716-724.
- [45] Zhang F, Wang X H, Xu J Y, *et al.* Food-web transfer of microplastics between wild caught fish and crustaceans in East China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 173-182.
- [46] Jabeen K, Su L, Li J N, *et al.* Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221: 141-149.
- [47] 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.
- [48] 刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 等. 厦门湾海滩微塑料污染特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(3): 1217-1221.
- Liu Q M, Liang H T, Xi G L, *et al.* Microplastic pollution of the beaches in Xiamen Bay, China[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(3): 1217-1221(in Chinese).
- [49] Santana M F M, Moreira F T, Turra A. Trophic transfer of microplastics under a low exposure scenario: insights on the likelihood of particle cascading along marine food-webs[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 121(1-2): 154-159.
- [50] 郭松峤. “雪龙”船一路南行边走边“拣”微塑料 [N]. *中国海洋报*, 2017-11-21(001).
- Guo S Q. The "Xue Long" picked up microplastics while walking southward to the Antarctica [N]. *China Ocean News*, 2017-11-21(001) (in Chinese).
- [51] Lusher A L, Tirelli V, O'Connor I, *et al.* Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14947.
- [52] Cincinelli A, Scopetani C, Chelazzi D, *et al.* Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): Occurrence, distribution and characterization by FTIR[J]. *Chemosphere*, 2017, 175: 391-400.
- [53] Munari C, Infantini V, Scoponi M, *et al.* Microplastics in the sediments of Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 122(1-2): 161-165.
- [54] Bergmann W, Wirzberger V, Krumpfen T, *et al.* High quantities of microplastic in arctic deep-sea sediments from the HAUSGARTEN observatory[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(19): 11000-11010.
- [55] Lee J, Hong S, Song Y K, *et al.* Relationships among the abundances of plastic debris in different size classes on beaches in South Korea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 77(1-2): 349-354.
- [56] Qiu Q X, Peng J P, Yu X B, *et al.* Occurrence of microplastics in the coastal marine environment: first observation on sediment of China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 98(1-2): 274-280.
- [57] Yu X B, Peng J P, Wang J D, *et al.* Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 722-730.
- [58] Peng G Y, Zhu B S, Yang D Q, *et al.* Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(19): 11000-11010.

- mental Pollution, 2017, 225: 283-290.
- [59] Nor N H M, Obbard J P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 79(1-2): 278-283.
- [60] Endo S, Takizawa R, Okuda K, *et al.* Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: Variability among individual particles and regional differences[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(10): 1103-1114.
- [61] 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.
- [62] Zhao S Y, Zhu L X, Wang T, *et al.* Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 86(1-2): 562-568.
- [63] Zhao S Y, Zhu L X, Li D J. Microplastic in three urban estuaries, China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 597-604.
- [64] Yamashita R, Tanimura A. Floating plastic in the Kuroshio current area, western North Pacific Ocean[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54(4): 485-488.
- [65] Li J N, Yang D Q, Li L, *et al.* Microplastics in commercial bivalves from China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 207: 190-195.
- [66] Kirstein I V, Kirmizi S, Wichels A, *et al.* Dangerous hitchhikers? evidence for potentially pathogenic *Vibrio* Spp. on microplastic particles[J]. *Marine Environmental Research*, 2016, 120: 1-8.
- [67] Imhof H K, Laforsch C, Wiesheu A C, *et al.* Pigments and plastic in limnetic ecosystems: a qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes[J]. *Water Research*, 2016, 98: 64-74.
- [68] Rochman C M, Hoh E, Kurobe T, *et al.* Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 3263.
- [69] 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 等. 鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 242-252.
- Li W H, Jian M F, Liu S L, *et al.* Occurrence relationship between microplastics and heavy metals pollutants in the estuarine sediments of Poyang lake and the Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1): 242-252(in Chinese).
- [70] 李文华, 简敏菲, 余厚平, 等. 鄱阳湖流域饶河龙口入湖段优势淡水鱼类对微塑料及重金属污染物的生物累积[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(2): 357-369.
- Li W H, Jian M F, Yu H P, *et al.* Bioaccumulation effects of microplastics and heavy metals pollutants in the dominant freshwater fish species in the Longkou entry of Raohe River, Lake Poyang Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(2): 357-369(in Chinese).
- [71] 尚晓迪, 何志强. 重金属在鱼体内积累作用的研究进展[J]. *河北渔业*, 2009(5): 44-45.
- Shang X D, He Z Q. Advances in heavy metal accumulation in fish[J]. *Hebei Fisheries*, 2009(5): 44-45(in Chinese).
- [72] 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.
- [73] Holmes L A, Turner A, Thompson R C. Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 160: 42-48.
- [74] Browne M A, Niven S J, Galloway T S, *et al.* Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity[J]. *Current Biology*, 2013, 23(23): 2388-2392.
- [75] 薄军, 陈梦云, 方超, 等. 微塑料对海洋生物生态毒理学效应研究进展[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(4): 594-600.
- Bo J, Chen M Y, Fang C, *et al.* Advance in the study on ecotoxicological effects of microplastics on marine organisms[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(4): 594-600(in Chinese).
- [76] Browne M A, Galloway T S, Thompson R C. Spatial patterns of plastic debris along Estuarine shorelines[J]. *Environmental science & technology*, 2010, 44(9): 3404-3409.
- [77] Van Cauwenberghe L, Vanreusel A, Mees J, *et al.* Microplastic pollution in deep-sea sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 495-499.
- [78] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, *et al.* Plastic pollution in the World's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250, 000 tons afloat at

- Sea[J]. *PLoS One*, 2014, 9(12): e111913.
- [79] Woodall L C, Sanchez-Vidal A, Canals M, *et al.* The deep sea is a major sink for microplastic debris[J]. *Royal Society Open Science*, 2014, 1(4): 140317.
- [80] Carbery M, O'Connor W, Thavamani P. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health[J]. *Environment International*, 2018, 115: 400-409.
- [81] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 483-492.
- [82] Sussarellu R, Suquet M, Thomas Y, *et al.* Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(9): 2430-2435.
- [83] Cole M, Galloway T S. Ingestion of nanoplastics and microplastics by Pacific oyster larvae[J]. *Environmental Sciences & Technology*, 2015, 49(24): 14625-14632.
- [84] Nizzetto L, Bussi G, Futter M N, *et al.* A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2016, 18(8): 1050-1059.
- [85] Browne M A, Galloway T, Thompson R. Microplastic-an emerging contaminant of potential concern?[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2007, 3(4): 559-561.
- [86] Rummel C D, Jahnke A, Gorokhova E, *et al.* Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 4(7): 258-267.
- [87] Possatto F E, Barletta M, Costa M F, *et al.* Plastic debris ingestion by marine catfish: an unexpected fisheries impact[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(5): 1098-1102.
- [88] Browne M A, Dissanayake A, Galloway T S, *et al.* Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13): 5026-5031.
- [89] Cole M, Lindeque P, Fileman E, *et al.* Microplastic ingestion by zooplankton[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(12): 6646-6655.
- [90] Farrell P, Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.)[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 177: 1-3.
- [91] Chen Q Q, Gundlach M, Yang S Y, *et al.* Quantitative investigation of the mechanisms of microplastics and nanoplastics toward zebrafish larvae locomotor activity[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 1022-1031.
- [92] Cedervall T, Hansson L A, Lard M, *et al.* Food chain transport of nanoparticles affects behaviour and fat metabolism in fish[J]. *PLoS One*, 2012, 7(2): e32254.
- [93] Lönnstedt O M, Eklöv P. Environmentally relevant concentrations of microplastic particles influence larval fish ecology[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1213-1216.
- [94] Mazurais D, Ernande B, Quazuguel P, *et al.* Evaluation of the impact of polyethylene microbeads ingestion in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae[J]. *Marine Environmental Research*, 2015, 112: 78-85.
- [95] Wang W F, Gao H, Jin S C, *et al.* The ecotoxicological effects of microplastics on aquatic food web, from primary producer to human: a review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 173: 110-117.

Research progress in the microplastics pollution and its effects on marine fishes with different feeding habits and habitats

LU Huajie^{1,2,3,4,5*}, LIU Kai¹, OU Yuzhe¹, CHEN Ziyue¹, CHEN Xinjun^{1,2,3,4,5}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. Scientific Observing and Experimental Station of Oceanic Fishery Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: As more and more microplastics are found in the marine environment and creatures, marine microplastics pollution has attracted more and more attentions. In this study, the types, distribution, toxicity and the ingestion characteristics of marine microplastics in marine fishes of different feeding habits and habitats were summarized, and the future research direction was expected. The results show that the distribution of microplastics was wide and of a great variety almost everywhere in the ocean, the vertical distribution characteristics of microplastics in the ocean was as follows: the sediment was the highest, followed by bottom and upper layers, and the middle layers were the least in the vertical direction, and the estuary zones were higher, the flow field zones were the second, oceanic zones were the least in the horizontal direction. The toxicity of microplastics mainly consists of self-toxicity and joint toxicity. Marine fishes had certain selectivity to ingest microplastics. The ingestion types and quantity of microplastics of different habitats and feeding habits marine fishes were different, and the ingestion of different habitats fishes in types were mainly related to the density of microplastics. The ingestion quantity is mainly related to the distribution of microplastics in the ocean. The ingestion of different feeding habits fishes in types and number were mainly related to the feeding habits, and it also has certain correlation with the size of fish, mouth slit and the amount of water filtrated. Microplastics could reduce the reproductive rate and increase the death rate of marine fishes. However, microplastic will be redistributed in the water after a long time of evolution, meaning the diversification of types and quantity of microplastic pollution. In the future, the fishery biology and fishery ecology, physical oceanography and marine chemistry could be combined to further understand the existence, distribution and transmission of microplastics in the ocean and its impact on marine fish and other marine creatures.

Key words: microplastic pollution; different habitats; different feeding habits; marine fishes; effects

Corresponding author: LU Huajie. E-mail: hjlu@shou.edu.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2019YFD090402); National Natural Science Foundation of China (41506184)