

王亚新, 范江涛, 贡艺, 等. 大洋性头足类胃和肠道中的微塑料——以秘鲁外海茎柔鱼为例. 应用生态学报, 2022, 33(1): 255–260

Wang Y-X, Fan J-T, Gong Y, et al. Microplastics in the stomach and intestine of pelagic squid: A case study of *Dosidicus gigas* in open sea of Peru. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 255–260

大洋性头足类胃和肠道中的微塑料 ——以秘鲁外海茎柔鱼为例

王亚新¹ 范江涛² 贡艺^{1,3,4,5*} 牛成功¹ 陈新军^{1,3,4,5}

(¹上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; ²农业农村部外海渔业开发重点实验室, 广州 510300; ³大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; ⁴国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; ⁵农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306)

摘要 海洋动物摄入微塑料已得到广泛证实, 但对于大洋性头足类动物仍存在较大空白。茎柔鱼是头足类商业捕捞中产量最高的物种, 在东太平洋生态系统占主导地位。本研究以秘鲁外海茎柔鱼成体为对象, 定量分析胃和肠道内微塑料的丰度与组成, 并探究微塑料在组织和性别间的潜在差异。结果表明: 茎柔鱼雌、雄个体相同组织内存在相似的微塑料丰度与组成。组织间比较发现, 茎柔鱼胃中微塑料的丰度和粒径均高于肠道, 胃单位组织重量的丰度低于肠道。胃和肠道中微塑料形状均以纤维为主(占比>94.3%), 颜色以蓝色和黑色为主(总占比>79.5%)。聚合物类型主要是密度大于海水的聚碳酸酯(占比74.4%)和聚丙烯酸(占比11.0%)。这些微塑料在下沉过程中可能被白天栖息在深海的茎柔鱼所摄入, 初步反映了秘鲁渔场水体中的微塑料分布特征。研究结果有助于了解大洋性头足类的微塑料污染现状, 并为进一步研究微塑料对头足类的生态效应提供基础。

关键词 茎柔鱼; 微塑料; 胃; 肠道

Microplastics in the stomach and intestine of pelagic squid: A case study of *Dosidicus gigas* in open sea of Peru. WANG Ya-xin¹, FAN Jiang-tao², GONG Yi^{1,3,4,5*}, NIU Cheng-gong¹, CHEN Xin-jun^{1,3,4,5} (¹College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; ²Key Laboratory of Open-Sea Fishery Development, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China; ³Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; ⁴National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; ⁵Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China).

Abstract: Microplastic (MP) ingestion by marine animals has been well documented, but less being known about pelagic squid. Jumbo squid *Dosidicus gigas* supports the world's largest cephalopod fishery and plays an important ecological role in the Eastern Pacific Ocean. In this study, *D. gigas* taken from the open sea of the Peruvian Exclusive Economic Zone were selected as research objects. We estimated the abundance and characteristics of MPs in the stomach and intestine of *D. gigas* and investigated the differences between tissues and sexes. Similar abundance and characteristics of MPs were observed in the same tissue of females and males. However, the stomach had a higher abundance of MPs with larger size than the intestine, while the MP abundance by stomach wet weight was lower than that of the intestine. The MPs were predominantly fiber-shaped, with blue or black color. The most frequent polymers were high-density cellophane and polyacrylic acid. These polymers could sink into deeper sea layers and were available for *D. gigas* living there during the daytime. Our findings revealed the distribution pattern of MPs in the waters of the Peruvian fishing ground. This study could improve our understanding of the MP contamination level in pelagic squid, and have implications for evaluating the ecological effects of MP on cephalopods.

Key words: *Dosidicus gigas*; microplastic; stomach; intestine.

本文由国家重点研发计划项目(2019YFD0901404)、国家自然科学基金项目(31900333)和农业农村部外海渔业开发重点实验室开放基金项目(LOF 2020-03)资助。

2021-03-31 收稿, 2021-10-27 接受。

* 通讯作者 E-mail: ygong@shou.edu.cn

海洋中的塑料垃圾经物理磨碎、化学作用、光氧化和生物降解等过程会形成粒径小于 5 mm 的塑料碎片、颗粒或薄膜等,称为微塑料(micropastic) [1-2]。大量研究证明,微塑料在海洋生态系统中广泛存在,且数量保持上升趋势 [3]。微塑料粒径小,易被浮游动物、腐食性和滤食性等低营养级海洋动物摄食 [4-6],并会通过食物链转移至高营养级海洋动物体内 [7]。例如海龟、海豚、金枪鱼和鲨鱼的消化系统中均有检测到微塑料 [8-10]。胃和肠道是海洋动物消化系统的重要组成部分,也是微塑料富集和进入体内循环的通道,常用于评估海洋动物的微塑料污染水平 [8-10]。

头足类是海洋生态系统特有的软体动物,具有独特的生物学特性和生活史过程,是人类开发的重要海洋生物资源。目前国内外针对头足类的微塑料研究局限于乌贼(*Sepia officinalis*)、杜氏枪乌贼(*Uroteuthis duvaucelii*)等近海种类 [11-12],而对于高营养级的大洋性头足类还未见报道。茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)广泛分布在东太平洋,是头足类商业捕捞中产量最高的物种 [13]。已有研究发现,在采集自加拿大和厄瓜多尔周边海域的茎柔鱼胃含物中存在塑料垃圾,但两项研究未对微塑料进行分析 [14-15]。室内暴露试验发现,生物体内的微塑料会产生一系列生态毒理学效应,如摄食率和生长率下降、氧化损伤、行为异常等 [16-17]。因此对茎柔鱼体内微塑料的研究有助于了解大洋性头足类的微塑料污染现状,并为进一步研究微塑料对头足类的生态效应提供科学依据。本研究以秘鲁外海茎柔鱼为对象,定量分析了胃和肠道内微塑料的丰度和组成,并探究了这些微塑料特征在组织和雌、雄个体间的差异。

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

样品由秘鲁外海捕捞作业的鱿钓船采集,时间为2019年10—11月,采样范围为 $81^{\circ}17' - 82^{\circ}19' W$, $16^{\circ}35' - 20^{\circ}52' S$ (图1)。茎柔鱼在 $-20^{\circ}C$ 冷冻运回实验室。室温解冻后进行生物学测定,包括胴长和体重。解剖后鉴定性别,挑选胴长和体重相近的茎柔鱼雌、雄个体各10尾。在金属托盘中,使用超纯水清洗后的剪刀和镊子取出胃和肠道,用铝箔纸包裹, $-20^{\circ}C$ 冷冻存放。

1.2 微塑料提取

从铝箔纸中取出胃和肠道,使用超纯水冲洗表面,测量和记录湿重。放置于烘箱中 $60^{\circ}C$ 干燥

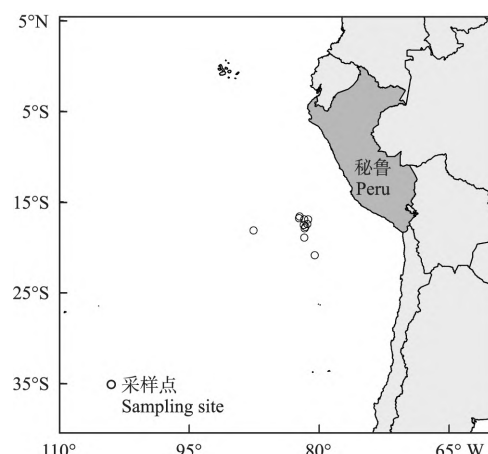


图1 茎柔鱼采样点

Fig.1 Sampling sites of *Dosidicus gigas*.

24 h 称量干重后放入 500 mL 锥形瓶中,根据干重每克加入 20 mL 的 KOH 溶液(10%)进行消解,铝箔纸密封瓶口防止污染。锥形瓶置于水浴恒温振荡器中,温度设置为 $60^{\circ}C$,转速设置为 $130 r \cdot min^{-1}$ 。待样品消解完全后,取出锥形瓶,消解液使用玻璃纤维滤膜(孔径 $2.7 \mu m$,直径47 mm,GF/F Whatman)进行真空抽滤,每张滤膜都转移至干净的培养皿中暂存。

1.3 微塑料观察与鉴定

利用体视显微镜(SZX2-FOF, Olympus)对滤膜进行观察,结合颗粒的物理及形态特征,挑选疑似微塑料,记录形状和颜色。使用数码相机(U-TV 0.63XC, Olympus)拍摄照片,并使用 ImageJ Version 1.50软件测量粒径。利用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iN10, Thermo Fisher Scientific)对获得的疑似微塑料颗粒进行成分分析,确定高聚物组分。红外光谱仪选用反射模式,波数范围为 $455 \sim 4000 cm^{-1}$,分辨率 $8 cm^{-1}$ 。将图谱与标准品谱库中的谱图进行检索对比,结合官能团的特征峰确定微塑料的类型。

1.4 污染控制

在试验过程中,实施了严格的防污染措施。所有的试验用具如剪刀、镊子和锥形瓶等都使用超纯水冲洗3遍以上,烘干之后备用。实验人员均穿着棉质实验服和乳胶手套。所有试验过程均在通风橱内操作完成,关闭门窗以减少空气流动造成的潜在污染。

1.5 数据处理

微塑料丰度以每尾茎柔鱼组织中的疑似微塑料个数(个 \cdot 尾 $^{-1}$)和单位组织湿重的疑似微塑料个数(个 $\cdot g^{-1}$)表示。使用单因素方差分析(ANOVA)检

验数据组间差异($\alpha=0.05$)。绘图使用软件 Origin-Pro 2021。数据结果以平均值 \pm 标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 茎柔鱼生物学指标

本研究选取茎柔鱼雌、雄个体各 10 尾。雌性茎柔鱼胴长范围为 30.90~63.90 cm, 平均为 (55.62 ± 9.19) cm, 体重范围为 1147.00~7245.00 g, 平均为 (5480.10 ± 1746.42) g; 雄性胴长范围为 29.80~64.10 cm, 平均为 (52.57 ± 10.47) cm, 体重范围为 1640.00~7222.00 g, 平均为 (4528.00 ± 1819.63) g。ANOVA 分析结果显示 雌、雄个体的胴长($F_{1,18}=0.57$, $P=0.46$)和体重($F_{1,18}=1.80$, $P=0.20$)均无显著差异。

雌性茎柔鱼胃重量为 9.66~66.04 g, 平均为 (35.47 ± 19.31) g, 肠道重量为 1.36~13.09 g, 平均为 (6.03 ± 3.33) g; 雄性胃重量为 10.35~107.73 g, 平均为 (52.98 ± 28.63) g, 肠道重量为 3.19~14.87 g, 平均为 (6.61 ± 3.51) g。ANOVA 分析结果显示 雌、雄个体的胃重量($F_{1,17}=2.49$, $P=0.13$)和肠道重量($F_{1,18}=0.14$, $P=0.71$)均无显著差异。

2.2 茎柔鱼体内微塑料丰度

20 尾茎柔鱼体内均观察到疑似微塑料, 即每尾茎柔鱼至少有一个组织中存在微塑料。胃中微塑料的检出率为 85.0% (17/20), 雌性 9 尾, 雄性 8 尾。胃中共发现 150 个微塑料, 雌、雄个体分别为 80 和 70 个。雌性茎柔鱼胃中微塑料平均丰度为 (8.0 ± 4.6) 个 \cdot 尾 $^{-1}$ 和 (0.4 ± 0.3) 个 \cdot g $^{-1}$, 雄性为 (7.0 ± 5.4) 个 \cdot 尾 $^{-1}$ 和 (0.3 ± 0.2) 个 \cdot g $^{-1}$ 。比较发现 雌、雄个体胃中微塑料丰度无显著差异($F_{1,18}=0.20$, $P=0.66$; $F_{1,18}=1.69$, $P=0.21$)。

17 尾茎柔鱼(85.0%)的肠道样品中观察到疑似微塑料, 其中雌性 8 尾, 雄性 9 尾。共发现 88 个微塑料, 雌、雄个体分别为 47 和 41 个。每尾茎柔鱼肠道中微塑料丰度为 (4.7 ± 3.8) 个(雌性)和 (4.1 ± 3.8) 个(雄性)。单位肠道重量的微塑料丰度为雌性 (1.1 ± 1.0) 个 \cdot g $^{-1}$, 雄性 (0.7 ± 0.6) 个 \cdot g $^{-1}$ 。比较发现 雌、雄个体肠道中微塑料丰度无显著差异($F_{1,18}=0.12$, $P=0.73$; $F_{1,18}=1.30$, $P=0.27$)。

组织间对比发现, 茎柔鱼胃和肠道中微塑料丰度差异显著。每尾茎柔鱼胃中微塑料的丰度 (7.5 ± 4.3) 个显著高于肠道 (4.4 ± 3.7) 个($F_{1,38}=5.03$, $P=0.03$), 而胃单位组织重量的丰度 (0.3 ± 0.3) 个 \cdot g $^{-1}$ 显著低于肠道 (0.9 ± 0.8) 个 \cdot g $^{-1}$ ($F_{1,38}=8.06$, $P<0.01$)。

2.3 茎柔鱼体内微塑料粒径

胃中微塑料的粒径范围为 113.33~4511.09 μ m (1347.99 ± 978.14 μ m), 而肠道内微塑料粒径范围在 90.00~2496.82 μ m (924.51 ± 569.03 μ m)。胃中微塑料粒径显著高于肠道($F_{1,236}=13.75$, $P<0.01$)。尽管如此, 胃和肠中微塑料的主要粒径均低于 1500.00 μ m, 分别占 72.7%和 85.2%。对比雌、雄个体发现, 同一组织中的微塑料粒径无显著差异(胃: $F_{1,148}=0.24$, $P=0.62$; 肠道: $F_{1,86}=0.17$, $P=0.68$), 仅发现雌性胃内微塑料粒径变化范围大于雄性, 而肠道内则相反(图 2)。

2.4 茎柔鱼体内微塑料形状与颜色

微塑纤维是本研究微塑料的主要形状, 在胃和肠道样品中所占比例分别为 99.3%和 94.3%, 其次是碎片, 未发现塑料薄膜和颗粒。这些微塑料主要分为 5 种颜色。胃中占比较高的颜色是蓝色(47.3%)和黑色(42.0%), 红色、绿色和黄色的比例均低于 10.0%。而在肠道中最常见的是黑色(48.9%),

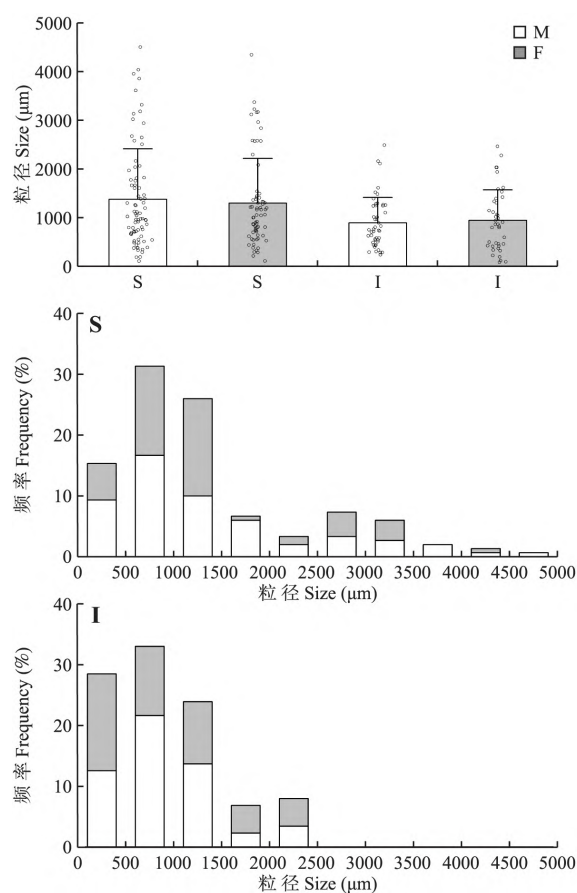


图 2 茎柔鱼胃和肠道中微塑料粒径分布

Fig.2 Size distribution of microplastics in stomach and intestine of jumbo squid *Dosidicus gigas*.

M: 雄性 Male; F: 雌性 Female. S: 胃 Stomach; I: 肠道 Intestine. 下同 The same below.

其次是蓝色(30.7%)、红色、绿色和黄色的比例均低于10.0%。此外,肠道中发现了1个彩色微塑料碎片(图3),未用于颜色组成的统计分析。雌、雄个体肠道中的颜色组成相似,但雌性胃中黑色微塑料较多,而雄性为蓝色(图4)。

2.5 茎柔鱼体内微塑料化学组成

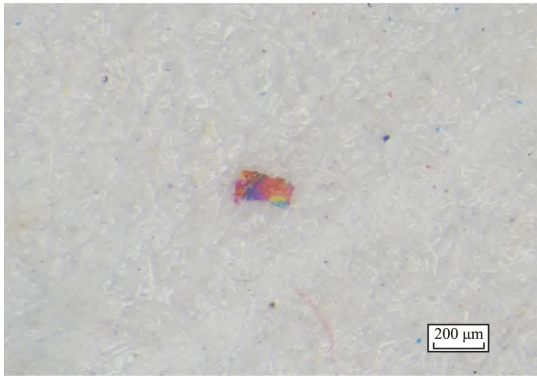


图3 茎柔鱼肠道内彩色醇酸树脂微塑料碎片

Fig.3 A multicolor alkyd fragmented microplastic in intestine of jumbo squid *Dosidicus gigas*.

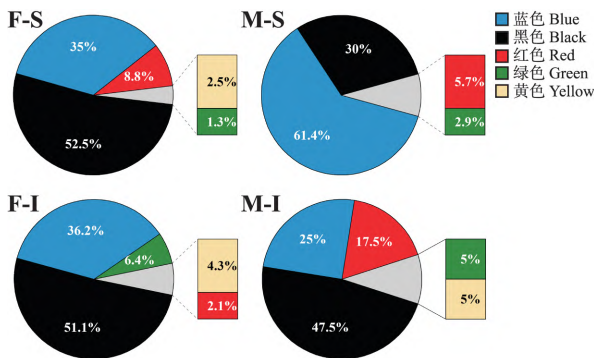


图4 茎柔鱼胃和肠道内微塑料的颜色组成

Fig.4 Color composition of microplastics in stomach and intestine of jumbo squid *Dosidicus gigas*.

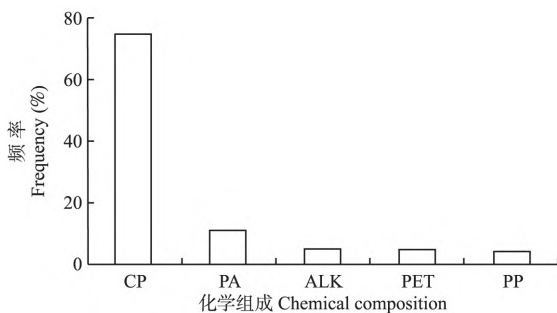


图5 茎柔鱼胃和肠道内微塑料的化学组成

Fig.5 Chemical composition of microplastics in stomach and intestine of jumbo squid *Dosidicus gigas*.

CP: 赛璐酚 Cellophane; PA: 聚丙烯酸 Polyacrylic acid; ALK: 醇酸树脂 Alkyd resin; PET: 聚对苯二甲酸乙二醇酯 Polyethylene terephthalate; PP: 聚丙烯 Polypropylene.

对观察到的微塑料进行傅里叶变换红外显微光谱分析,可以确定其中68.5%颗粒的聚合物类型(图5)。茎柔鱼胃、肠道中微塑料的主要类型是赛璐酚(占比74.8%)和聚丙烯酸(占比11.0%),其他成分所占比例均低于5.0%,包括醇酸树脂、聚对苯二甲酸乙二醇酯和聚丙烯。

3 讨论

作为一种大洋性头足类,茎柔鱼食性泛化,饵料生物包括中上层鱼类、甲壳类和头足类等^[18-21],并具有明显的同类相食现象^[22]。虽然对茎柔鱼饵料生物的微塑料研究还未见报道,但鱼类、甲壳类和头足类体内存在微塑料的结果已得到广泛验证^[7,9-12]。因此,茎柔鱼可能会通过捕食体内含有微塑料的饵料生物而摄入微塑料^[23]。对茎柔鱼开展的摄食生态学研究已发现其雌、雄个体的食性存在差异。例如,秘鲁外海茎柔鱼内壳的氨基酸稳定同位素分析结果显示营养模式的性别差异,与雄性茎柔鱼相比,雌性会摄食同种饵料生物中的较大个体^[24]。另一项对智利海域茎柔鱼的研究也发现,雌、雄个体胃含物组成具有差异,并与二者同类相食的程度有关^[25]。这种食性差异可能会影响茎柔鱼雌、雄个体胃和肠道中微塑料的丰度与组成。本研究对比发现,虽然茎柔鱼雌、雄个体胃中微塑料的颜色组成有一定差别(图4),但黑色和蓝色仍占主导地位,而相同组织中微塑料的丰度、粒径和形状均无性别差异。也就是说,茎柔鱼雌、雄个体胃和肠道中存在相似的微塑料。这在其他海洋捕食者的研究中也发现。Novillo等^[9]对地中海西部采集的条纹原海豚(*Stenella coeruleoalba*)消化道内微塑料研究表明,微塑料的丰度、颜色、形状没有性别差异。Parton等^[10]对英国周边海域多种底栖鲨鱼胃和消化道中的微塑料进行分析发现,微塑料丰度与性别无关,但会随体型大小发生变化。此外,本研究发现的大量蓝色和黑色微塑料可能与采样海域水体中的微塑料颜色有关,并通过食物链传递到茎柔鱼体内。蓝色和黑色微塑料在不同海域和海洋动物体内均有发现,且为主要颜色。例如,对东北大西洋海水中的微塑料调查发现,蓝色所占比例最高(37.7%)^[26]。在北冰洋地区水体中也发现了大量蓝色(占比29.0%)和黑色(占比45.0%)微塑料^[3]。Zhang等^[5]在黄海野生蟹类体内发现了超过60%的黑色和蓝色微塑料。Parton等^[10]在鲨鱼体内检测到的微塑料也主要为黑色和蓝色。此外,本研究在肠道

中发现了 1 个彩色塑料碎片(图 3),化学成分为醇酸树脂,可能来自采样海域船只的涂料^[27]。

对胃和肠道中微塑料对比发现,每尾茎柔鱼胃中微塑料个数及粒径均高于肠道,但是单位组织重量个数低于肠道。这可能是因为茎柔鱼胃的体积较大,其所能容纳的微塑料数量及粒径也可能较高,但相应的胃重量也较高,使得单位胃重量个数较低。Cau 等^[28]对挪威龙虾(*Nephrops norvegicus*)研究表明,微塑料进入胃以后,只有粒径较小的微塑料颗粒可以进入肠道,较大粒径的微塑料会在胃齿臼(gastric mill)作用下破碎成小粒径颗粒再进入肠道。茎柔鱼可能也有类似的消化过程。

纤维是茎柔鱼胃和肠道中微塑料的主要形状,这与其他学者对头足类体内微塑料的研究结果相符。Oliveira 等^[11]研究发现,野生和养殖乌贼消化系统中的微塑料约有 90.0%呈纤维状。在其他种类海洋动物的微塑料研究中也观察到纤维是主要形状^[8]。例如,爱尔兰海域挪威龙虾胃和肠道内 98.1%的微塑料为纤维^[29]。Parton 等^[10]在多种底栖鲨鱼胃和消化道中发现了 379 个微塑料,其中 95.0%为纤维状。有研究发现,渔网、绳索和渔线等塑料渔具在使用时易产生纤维状微塑料,造成捕捞作业海域微塑料污染^[5]。本研究中茎柔鱼样品采集自秘鲁渔场,作为全球规模最大的渔场之一,该海域可能存在较高丰度的微塑料纤维。这些纤维与浮游生物形状相似,易被低营养级鱼类和甲壳类误食,并会在摄食过程中进入高营养级海洋动物体内,这可能是导致茎柔鱼胃、肠道中存在大量微塑料纤维的主要原因^[10 23]。

赛璐酚是茎柔鱼胃和肠道中最常见的聚合物类型,是一种以棉浆、木浆等天然纤维为原料,用胶黏法制成的薄膜状塑料制品,广泛用于食品包装、制造业、工业等^[5 30]。赛璐酚进入海洋后会逐渐裂解,并最终形成微塑料。研究发现,密度高于海水($1.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)的聚合物进入水体后会下沉^[31]。因此,较高密度的赛璐酚($1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)会在水体中下沉,被栖息在深水层或海底的海洋动物摄入,例如底栖鲨鱼^[11]、海胆^[30]、蟹类^[5]等。茎柔鱼具有昼夜垂直洄游的特性,其大部分时间栖息在几百米水深的低氧环境中^[32],这可能是导致茎柔鱼摄入大量赛璐酚的原因。

4 结 论

本研究结合显微镜观察和傅里叶变换红外显微

光谱分析技术,对秘鲁外海茎柔鱼胃和肠道内微塑料的丰度和组成进行了定量分析,以明确雌、雄个体胃和肠道内微塑料的相似性。在组织间,微塑料的丰度和粒径存在显著差异,而形状和颜色相似。这些结果反映了茎柔鱼体内微塑料的分布特征,为进一步研究微塑料对大洋性头足类的生态效应提供了数据支撑。本研究只采集了秘鲁外海常见体型大小的茎柔鱼,在生活史过程中其所能摄入的微塑料也可能随食性和栖息地转变而变化。在后续研究中应开展不同个体大小茎柔鱼胃、肠道内微塑料丰度与组成的比较研究,结合采样海域水体中微塑料的分析结果,深入探究茎柔鱼体内微塑料污染水平的变动机制。

参考文献

- [1] Andrady AL. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**: 1596–1605
- [2] Frias JPGL, Otero V, Sobral P. Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters. *Marine Environmental Research*, 2014, **95**: 89–95
- [3] Lusher AL, Tirelli V, Connor IO, et al. Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific Reports*, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep14947
- [4] Goldstein MC, Goodwin DS. Gooseneck barnacles (*Lepas* spp.) ingest microplastic debris in the north Pacific subtropical gyre. *PeerJ*, 2013, **1**, doi: 10.7717/peerj.184
- [5] Zhang T, Sun Y, Song K, et al. Microplastics in different tissues of wild crabs at three important fishing grounds in China. *Chemosphere*, 2021, **271**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129479
- [6] Li J, Lusher AL, Rotchell JM, et al. Using mussel as a global bioindicator of coastal microplastic pollution. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 522–533
- [7] Zhang F, Wang X, Xu J, et al. Food-web transfer of microplastics between wild caught fish and crustaceans in East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **146**: 173–182
- [8] Duncan EM, Broderick AC, Fuller WJ, et al. Microplastic ingestion ubiquitous in marine turtles. *Global Change Biology*, 2019, **25**: 744–752
- [9] Novillo O, Raga JA, Tomás J. Evaluating the presence of microplastics in striped dolphins (*Stenella coeruleoalba*) stranded in the Western Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **160**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111557
- [10] Parton KJ, Godley BJ, Santillo D, et al. Investigating the presence of microplastics in demersal sharks of the North-East Atlantic. *Scientific Reports*, 2020, **10**, doi: 10.1038/s41598-020-68680-4
- [11] Oliveira AR, Sardinha-Silva A, Andrews PLR, et al.

- Microplastics presence in cultured and wild-caught cuttlefish, *Sepia officinalis*. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **160**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111553
- [12] Daniel DB, Ashraf PM, Thomas SN, *et al.* Microplastics in the edible tissues of shellfishes sold for human consumption. *Chemosphere*, 2021, **264**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128554
- [13] 陈新军. 世界头足类资源开发现状及我国远洋鱿钓渔业发展对策. 上海海洋大学学报, 2019, **28**(3): 321–330
- [14] Braid HE, Deeds J, DeGrasse SL, *et al.* Preying on commercial fisheries and accumulating paralytic shellfish toxins: A dietary analysis of invasive *Dosidicus gigas* (Cephalopoda Ommastrephidae) stranded in Pacific Canada. *Marine Biology*, 2012, **159**: 25–31
- [15] Rosas-Luis R. Description of plastic remains found in the stomach contents of the jumbo squid *Dosidicus gigas* landed in Ecuador during 2014. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **113**: 302–305
- [16] 张晨, 简敏菲, 陈宇蒙, 等. 聚苯乙烯微塑料对黑藻生长及生理生化特征的影响. 应用生态学报, 2021, **32**(1): 317–325
- [17] Jeong CB, Won EJ, Kang HM, *et al.* Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-JNK and p-38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreanus*). *Environmental Science and Technology*, 2016, **50**: 8849–8857
- [18] Alegre A, Ménard F, Tafur R, *et al.* Comprehensive model of jumbo squid *Dosidicus gigas* trophic ecology in the northern Humboldt current system. *PLoS One*, 2014, **9**, doi: 10.1371/journal.pone.0085919
- [19] Pardo-Gandarillas MC, Lohrmann KB, George-Nascimento M, *et al.* Diet and parasites of the jumbo squid *Dosidicus gigas* in the Humboldt Current System. *Molluscan Research*, 2014, **34**: 10–19
- [20] Rosas-Luis R, Chompoy-Salazar L. Description of food sources used by jumbo squid *Dosidicus gigas* (D'Orbigny, 1835) in Ecuadorian waters during 2014. *Fisheries Research*, 2016, **173**: 139–144
- [21] 高小迪, 贡艺, 陈新军, 等. 东太平洋赤道海域茎柔鱼的营养生态位和肠道微生物组成. 应用生态学报, 2021, **32**(3): 1087–1095
- [22] Villanueva R, Perricone V, Fiorito G. Cephalopods as predators: A short journey among behavioral flexibilities, adaptations, and feeding habits. *Frontiers in Physiology*, 2017, **8**, doi: 10.3389/fphys.2017.00598
- [23] Hipfner JM, Galbraith M, Tucker S, *et al.* Two forage fishes as potential conduits for the vertical transfer of microfibres in Northeastern Pacific Ocean food webs. *Environmental Pollution*, 2018, **239**: 215–222
- [24] Gong Y, Ruiz-Cooley RI, Hunsicker ME, *et al.* Sexual dimorphism in feeding apparatus and niche partitioning in juvenile jumbo squid *Dosidicus gigas*. *Marine Ecology Progress Series*, 2018, **607**: 99–112
- [25] Bruno C, Cornejo CF, Riera R, *et al.* What is on the menu? Feeding, consumption and cannibalism in exploited stocks of the jumbo squid *Dosidicus gigas* in south-central Chile. *Fisheries Research*, 2021, **233**, doi: 10.1016/j.fishres.2020.105722
- [26] Lusher AL, Burke A, Connor IO, *et al.* Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **88**: 325–333
- [27] Ory N, Chagnon C, Felix F, *et al.* Low prevalence of microplastic contamination in planktivorous fish species from the southeast Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **127**: 211–216
- [28] Cau A, Avio C, Dessi C, *et al.* Benthic crustacean digestion can modulate environmental fate of microplastics in the deep sea. *Environmental Science and Technology*, 2020, **54**: 4886–4892
- [29] Hara J, Frias J, Nash R. Quantification of microplastic ingestion by the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* from Irish waters. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **152**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.110905
- [30] Feng Z, Wang R, Zhang T, *et al.* Microplastics in specific tissues of wild sea urchins along the coastal areas of northern China. *Science of the Total Environment*, 2020, **728**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138660
- [31] Woodall LC, Sanchez-Vidal A, Canals M, *et al.* The deep sea is a major sink for microplastic debris. *Royal Society Open Science*, 2014, **1**, doi: 10.1098/rsos.140317
- [32] Stewart JS, Field JC, Markaida U, *et al.* Behavioral ecology of jumbo squid (*Dosidicus gigas*) in relation to oxygen minimum zones. *Deep-Sea Research Part II*, 2013, **95**: 197–208

作者简介 王亚新, 女, 1995年生, 硕士研究生。主要从事环境生物学研究。E-mail: m190200534@st.shou.edu.cn

责任编辑 肖红