

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20240923002

http://www.yykxjz.cn/

刘国顺, 赵信国, 孙雪梅, 朱琳, 隋琪, 魏曼曼, 夏斌. 原位探究海水养殖浮漂破碎形成微塑料的特征. 渔业科学进展, 2025, 46(2): 237-247

LIU G S, ZHAO X G, SUN X M, ZHU L, SUI Q, WEI M M, XIA B. *In situ* exploration of the characteristics of microplastics formed by the fragmentation of floating floats in seawater aquaculture. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(2): 237-247

原位探究海水养殖浮漂破碎形成微塑料的特征*

刘国顺^{1,2} 赵信国^{2,3} 孙雪梅^{2,3} 朱琳^{2,3}
隋琪^{2,3①} 魏曼曼¹ 夏斌^{2,3}

(1. 青岛科技大学生物工程学院 山东 青岛 266061;

2. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室(中国水产科学研究院黄海水产研究所) 山东 青岛 266071;

3. 青岛海洋科技中心海洋生态与环境科学功能实验室 山东 青岛 266237)

摘要 随着塑料制品在各个领域广泛应用, 废弃塑料所形成的微塑料污染已成为全球性环境问题。在海洋环境中, 微塑料污染尤为突出, 特别是在海水养殖区。塑料海水养殖设施长期暴露在紫外线照射、波浪冲击、微生物侵蚀等因素下, 逐渐破碎形成微塑料。尽管已有大量研究关注微塑料对海洋生物和生态系统的影响, 但针对自然环境下塑料海水养殖设施破碎形成微塑料的规律研究较少。本研究通过自制的塑料破碎原位收集装置, 监测并分析了海水养殖浮漂在自然环境下的破碎情况。结果显示, 在37 d内, 无浮漂组装置中微塑料丰度为(307.09±16.37)个/kg, 浮漂组装置中微塑料丰度为(392.72±27.22)个/kg; 收集的微塑料尺寸以小于0.5 mm为主, 形状以纤维状为主, 颜色以透明色为主。海水养殖浮漂在此过程中生成约(136.41±10.59)个微塑料, 浮漂生成的微塑料形状以薄膜状为主, 颜色以黑色为主。其中, 有薄膜状微塑料(85.75±6.06)个, 颗粒状(46.74±3.32)个, 泡沫状(2.77±0.21)个, 纤维状(1.16±0.96)个; 黑色(95.42±6.87)个, 透明色(40.10±3.46)个, 其他颜色最少, 有(0.90±0.22)个。该装置对海水养殖浮漂破碎形成的微塑料具有良好的收集效果。研究结果为评估和预测养殖浮漂对微塑料的生成、迁移及其生态风险提供基础数据和理论支持。

关键词 微塑料; 海水养殖浮漂; 原位研究; 微塑料形成

中图分类号 X834 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)02-0237-11

微塑料是指尺寸小于5 mm的塑料碎片(Thompson *et al.*, 2004), 广泛存在于全球各大洋和海域, 因其体积小、难以降解而成为环境关注的焦点(Eriksen *et al.*, 2014)。海洋漂浮着大量塑料颗粒, 数量高达数十亿个, 总重量超过数十万吨, 其中90%以上是微塑料(Eriksen *et al.*, 2014; Van Sebille *et al.*, 2015)。微塑料可

分为初生微塑料和次生微塑料(Wang *et al.*, 2018), 初生微塑料指在工业生产过程中直接生产的小尺寸塑料, 如化妆品中的磨砂微珠等; 次生微塑料则是由大塑料制品经物理、化学和生物过程逐渐破碎而成(Cooper *et al.*, 2010; 李道季, 2019; 夏斌等, 2019)。微塑料可通过洋流、大气沉降等进行长距离迁移, 已成

* 山东省重点研发计划(2022CXPT013)、海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室开放课题(BRESG202309)、国家自然科学基金(U2106213)、山东省泰山学者专项(tsqn202211267)和中国水产科学研究院黄海水产研究所基本业务费(20603022024014)共同资助。刘国顺, Email: 1945263605@qq.com

① 通信作者: 隋琪, Email: suiqi@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2024-09-23, 收修改稿日期: 2024-11-25

为全球性环境问题(Thiel *et al.*, 2003)。

2016 年全球有 1 900–2 300 万 t 塑料垃圾进入了水生生态系统, 预计到 2030 年, 这一数字将增加至 5 300 万 t (Borrelle *et al.*, 2020; Geyer *et al.*, 2017)。在不同的自然条件下, 塑料垃圾会破碎并释放出微塑料 (Sorasan *et al.*, 2022; Priya *et al.*, 2022; Manzoor *et al.*, 2022)。研究表明, 紫外辐射、机械磨损会使塑料降解速度更快, 产生更小尺寸的微塑料; 水的存在会增强塑料表面的裂纹延展(Sun *et al.*, 2022; Julienne *et al.*, 2019)。除此之外, 生物也可能加速塑料破碎, Zheng 等(2023)发现, 穴居无脊椎动物导致白色泡沫浮子产生约 4.1×10^8 个微塑料, 表明生物侵蚀在塑料破碎中起重要作用。目前, 环境因素影响微塑料形成的研究主要集中于室内实验, 且环境因素较为单一, 但在自然环境中塑料制品破碎生成微塑料的规律尚不清楚。因此, 进行原位研究尤为重要。

当前, 海水养殖严重依赖塑料设施, 如渔网、绳索、浮力材料和网箱, 这些养殖设施在海洋中长期使用会破碎形成大量微塑料颗粒, 导致海水养殖区微塑料的丰度远高于远海区(Su *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2019)。研究表明, 桑沟湾表层海水中微塑料丰度为 (20.06 ± 4.73) 个/L, 总储量约为 96.15 kg, 约有 62.76% 来源于海水养殖设施; 沉积物中微塑料丰度为 $(1\ 674 \pm 526)$ 个/kg, 总储量约为 183.73 t, 约有 57.72% 来源于塑料海水养殖设施(Sui *et al.*, 2020; Xia *et al.*, 2021); 象山湾养殖区表层海水中的微塑料丰度为 (8.9 ± 4.7) 个/ m^3 , 沉积物中的微塑料丰度为 $(1\ 739 \pm 2\ 153)$ 个/kg (Chen *et al.*, 2018); 四十里湾养

殖区表层海水中的微塑料丰度为 (5.2 ± 1.6) 个/L, 沉积物中的微塑料丰度为 (499.76 ± 370.07) 个/kg (程姣姣等, 2021; Zhang *et al.*, 2019)。塑料养殖设施在自然环境下的老化和破碎是微塑料产生的重要来源。但是, 针对自然环境下塑料海水养殖设施破碎形成微塑料规律的原位研究还未系统展开。因此, 应尽快开展塑料海水养殖设施在自然环境下老化破碎形成微塑料规律的原位研究, 这对于理解微塑料污染的形成具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本研究选取的实验地点为青岛市琅琊港外海, 地理位置为 $119^{\circ}56' E$, $35^{\circ}38' N$ (见图 1)。琅琊湾岸线长 6.46 km, 面积 $14.53 km^2$, 属于正规半日潮, 近海平均水深约 10 m, 沿岸流向南, 沉积物类型为粉砂质。

1.2 装置研制

探究自然环境中塑料破碎规律的关键是成功收集塑料破碎形成的微塑料, 为此, 本研究设计了一种适用于海水环境的塑料破碎原位收集装置, 用于收集海水养殖浮漂产生的微塑料。装置使用的材质为聚甲基丙烯酸甲酯, 俗称亚克力。装置的设计要求满足以下条件: ①浮漂可以通过绳子固定在装置中心且与装置上表面处于同一水平面; ②原位收集装置放入水中时要刚好浸没到海水中, 便于维持浮漂在水中的形态, 使其与正常放置的海水养殖浮漂形态相同; ③原位收集装置应维持稳定的深度, 不受海浪或潮汐的

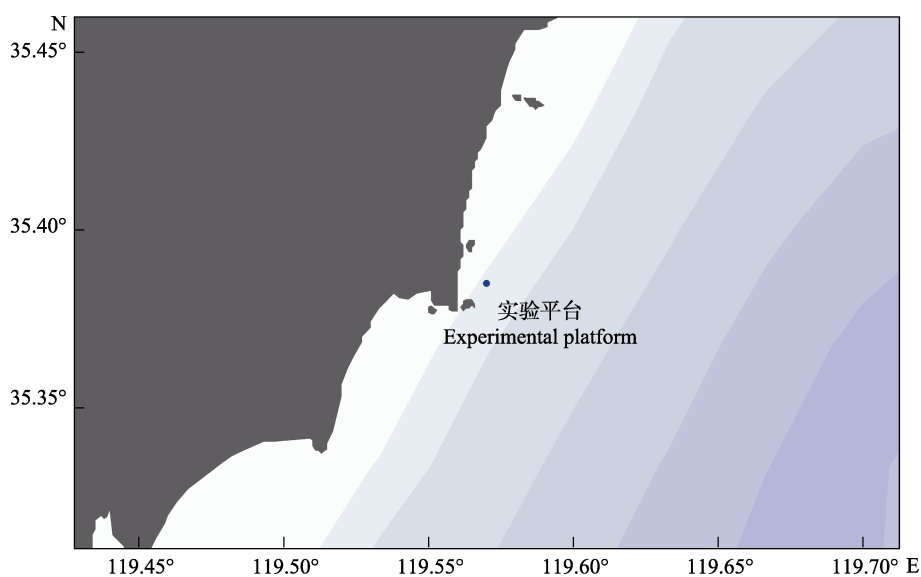


图 1 实验平台位置

Fig. 1 Location of experimental platform

影响; ④原位收集装置加装铅坠, 在使用过程中保持平衡及稳定, 具有一定的抗风浪能力; ⑤原位收集装置尽可能收集塑料浮漂产生的所有小尺寸塑料; ⑥装置底部安有盖子便于沉积物的取出。具体参数如下:

装置上半部分台柱面的直径范围为 0.8~1.2 m, 高度为 0.3 m; 装置下半部分的收集器直径为 0.15m, 高度为 0.6 m; 底部盖子直径为 0.05 m; 铅坠重量为 10 kg。根据以上要求设计出塑料破碎收集装置(见图 2)。

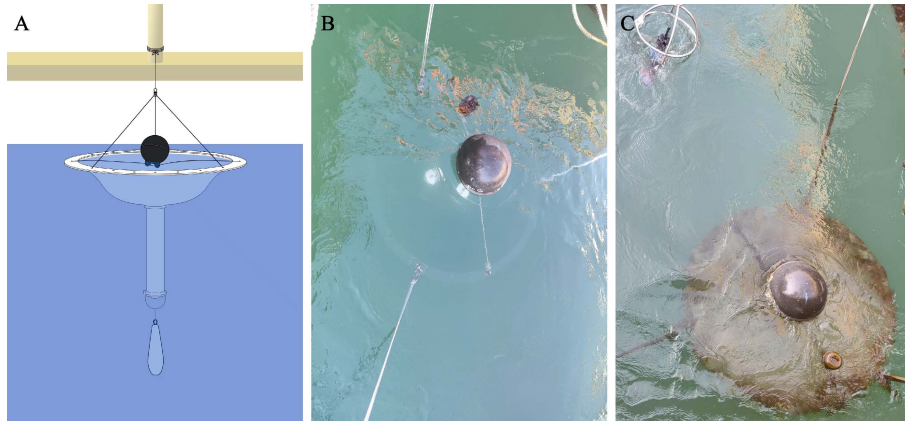


图 2 塑料破碎收集装置(A: 示意图; B: 第 0 天; C: 第 37 天)

Fig.2 Plastic crushing collection device (A: Schematic diagram; B: Day 0; C: Day 37)

1.3 样品采集

2023 年 9 月 22 日, 将 2 组自制塑料破碎收集装置放置在青岛琅琊港外海的实验平台上, 浮漂组放置已使用 1 年的传统海水养殖浮漂, 主要成分为聚乙烯 (polyethylene, PE), 颜色为黑色。无浮漂组不放置浮漂。共进行 37 d 原位实验。研究表明, 进入海洋的塑料会吸附细菌、重金属、有机污染物等, 从而增加密度, 最终沉降到沉积物中(Koelmans *et al*, 2017)。因此, 浮漂破碎产生的塑料碎片可直接沉降到收集装置中。2023 年 10 月 29 日, 收集装置底部的沉积物。本研究检测的微塑料尺寸范围为 30 μm ~5 mm。

1.4 环境参数

紫外辐照和物理损伤会加速塑料破碎形成微塑料(Sorasan *et al*, 2022), 此外, 研究发现, 温度与微塑料的释放量之间紧密相关, 在温度升高时, 释放的微塑料会大大增加(Li *et al*, 2020)。因此, 本研究采用 YSI EXO2 多参数水质分析仪、Nortek AS Aquadopp 单点海流计、紫外辐照测试仪、ST-86LA-2 屏幕亮度计, 测量实验水域的主要环境参数, 包括紫外线强度、流速、温度、溶解氧和压强等(见附表 1), 温度监测时间为 37 d, 由于受实验条件限制, 其他环境参数检测时间为 24 h。

1.5 微塑料提取

根据 Zhu 等(2018)的方法提取沉积物中的微塑

料。收集的沉积物样品放入烧杯中干燥并称重, 后加入 500 mL 饱和氯化钠溶液, 搅拌 30 min, 以确保微塑料悬浮。沉降 24 h 后, 取上清液通过 30 μm 钢筛过滤, 将钢筛上的截留物用饱和氯化钠溶液冲入烧杯中, 以上步骤至少重复 3 次。将包含截留物的烧杯烘干, 加入 30%过氧化氢和 0.05 mol/L 硫酸亚铁溶液。盖上表面皿, 将烧杯移至 60 $^{\circ}\text{C}$ 电热板加热, 直至无可见有机质。使用真空抽滤装置将烧杯中的溶液抽滤到滤膜上, 并用超纯水多次冲洗滤膜。将滤膜转移到培养皿中, 待自然风干后, 进行后续鉴定。

1.6 观察和鉴别

将滤膜放置在光学显微镜(Nexcope NSZ818, 中国)下进行观察, 并记录疑似微塑料的数量、尺寸、形状和颜色。将微塑料按尺寸分为 <0.5 mm、0.5~<1.0 mm、1.0~<2.0 mm、2.0~<3.0 mm、3.0~<4.0 mm、4.0~<5.0 mm; 形状分为纤维状、颗粒状、泡沫状和薄膜状(见图 3); 颜色分为黑色、透明色以及其他颜色。使用傅里叶变换红外显微镜(PerkinElmer Spectrum Spotlight 400, 美国)对疑似微塑料的成分进行鉴定。每个塑料的红外光谱记录范围为 4 000~750 cm^{-1} , 分辨率为 8 cm^{-1} , 采集时间为 3 s, 共扫描 16 次。将每个光谱与 OMNIC 标准光谱库进行比对, 匹配度高于 70%时, 疑似微塑料可确认为微塑料。根据红外光谱分析结果, 重新计算微塑料数量。

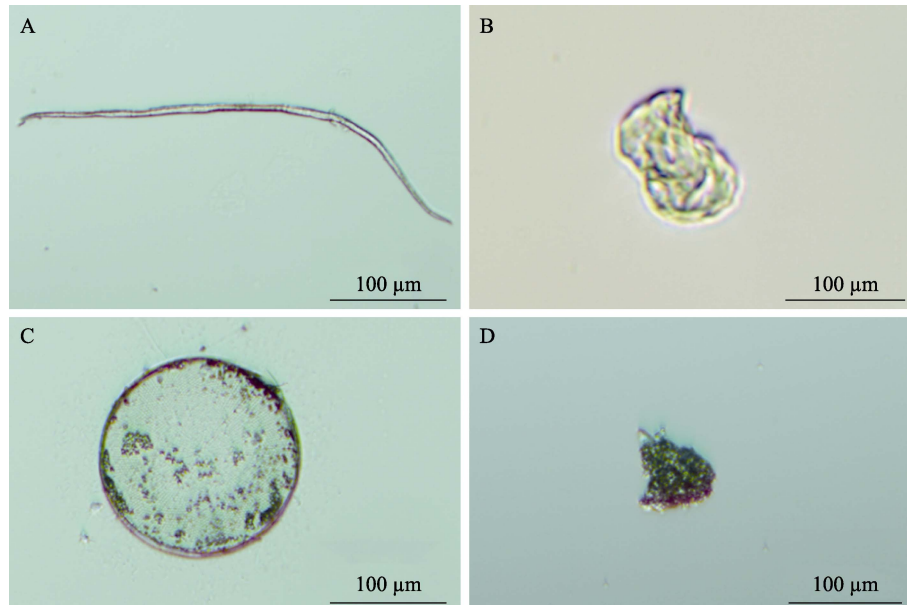


图3 微塑料的显微表征

Fig.3 Microscopic characterization of microplastics

A: 纤维状; B: 颗粒状; C: 泡沫状; D: 薄膜状。

A: Fiber; B: Granule; C: Foam; D: Film.

1.7 质量控制

在样品采集、提取和分析过程中,采取了多项预防措施,以避免样品受到外部塑料的污染。所有的玻璃容器均用稀盐酸浸泡过夜,再用去离子水冲洗3次。所有的化学试剂在使用前均通过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤。在密闭的实验室内进行显微镜观察,并限制人员走动,以减少空气中塑料纤维污染。在分析过程中,实验人员穿戴棉质衣物、丁腈手套及纯棉口罩,以避免外部合成纤维污染。设置空白组(去离子水)在相同的条件下进行实验,以确保在分析过程中无塑料污染。

1.8 数据分析

对收集的样品进行3次重复实验,微塑料丰度值用平均值 \pm 标准差(SD)表示,单位为每千克沉积物中微塑料数量(个/kg)。使用 Ocean Data View 软件绘制实验位置图,使用 Microsoft Excel 2010 对观察的微塑料尺寸、数量、形状、颜色等进行记录,使用 Origin 2021 做数据分析图,使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 装置中微塑料的丰度

空白组未检测到微塑料,不需要进行空白校正。在无浮漂组中,共收集(206.40 \pm 11.00)个微塑料,丰度范围为289.25~321.38个/kg,平均丰度为(307.09 \pm

16.37)个/kg;在浮漂组中,共收集到微塑料(329.34 \pm 22.83)个,丰度范围为364.30~418.55个/kg,平均丰度为(392.72 \pm 27.22)个/kg(见图4A)。青岛近岸水体中微塑料丰度为1.44~16.87个/L,沉积物中微塑料的丰度为221.00~453.00个/kg(尹诗琪等,2021;黄六一等,2022;张莹等,2024)。无浮漂组收集到的微塑料丰度与青岛近岸沉积物中的微塑料丰度相近,表明无浮漂组得到的微塑料丰度与实验所处环境中沉积物的微塑料丰度相符。此外,浮漂组中收集到的微塑料比无浮漂组多(122.93 \pm 11.95)个,说明浮漂破碎形成了微塑料并且塑料破碎收集装置对浮漂产生的微塑料有良好的收集能力。理想状态下的浮漂组与无浮漂组差值即为浮漂破碎形成微塑料的数量,但在现实环境中相同位置收集到的微塑料数量也会有所差异;因此,该差值并不能代表浮漂破碎形成微塑料的数量。

2.2 装置中微塑料的粒径

无浮漂组中微塑料尺寸范围为33.79~4365.19 μm ,平均粒径为(422.56 \pm 829.15) μm ;浮漂组中微塑料尺寸范围为38.48~4321.82 μm ,平均粒径为(450.55 \pm 621.92) μm 。如图4B所示,在无浮漂组中,微塑料尺寸主要以 $<0.5\ \text{mm}$ 为主,占比最高为67.13%; $0.5\sim<1.0\ \text{mm}$ 粒径的微塑料占比18.98%; $1.0\sim<2.0\ \text{mm}$ 占比5.76%; $2.0\sim<5.0\ \text{mm}$ 占比8.13%。在浮漂组中,微塑料尺寸 $<0.5\ \text{mm}$ 占比60.53%; $0.5\sim<1.0\ \text{mm}$ 占比

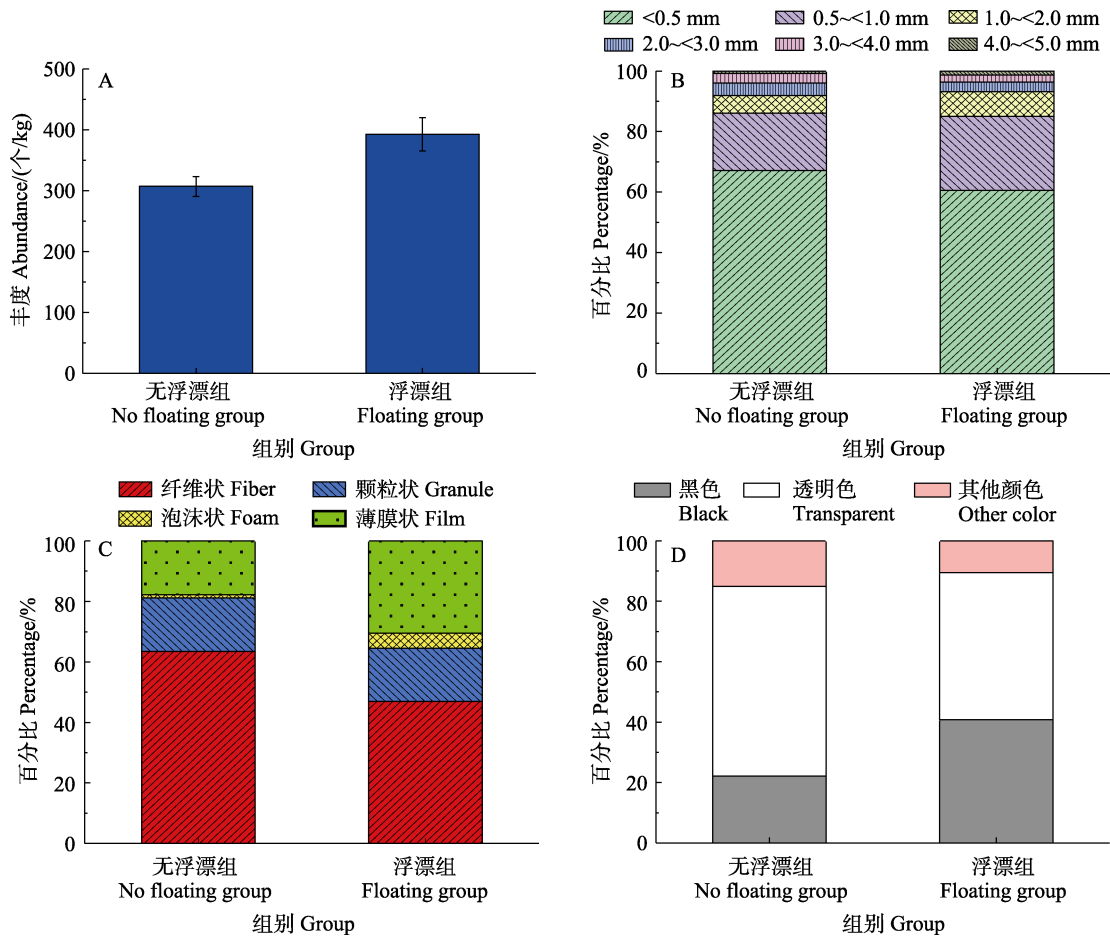


图 4 装置中的微塑料特征: 丰度(A)、粒径分布(B)、形状分布(C)和颜色分布(D)

Fig.4 Characteristics of microplastics in the device: Abundance (A), particle size distribution (B), shape distribution (C), and color distribution (D)

24.51%; 1.0~<2.0 mm 占比 8.17%; 2.0~<5.0 mm 占比 6.79%。浮漂组中, 0.5~<2.0 mm 的微塑料占比高于无浮漂组, 而尺寸<0.5 mm 和 2.0~<5.0 mm 的微塑料占比低于无浮漂组。2 组微塑料尺寸主要集中于<2 mm, 占比均超过 90%。研究表明, 渤海水体的微塑料尺寸主要以<1.0 mm 为主, 黄海水体的微塑料尺寸主要以<0.5 mm 为主, 东海水体则以>0.5 mm 为主(陈永平等, 2023)。因此, 无浮漂组的微塑料的尺寸分布与黄海水体的特征较为一致。浮漂组中尺寸>0.5 mm 的微塑料占比 39.47%, 而无浮漂组中为 32.87%。这可能是由于浮漂会首先破碎形成尺寸较大的微塑料, 导致浮漂组中>0.5 mm 的微塑料占比增加。

2.3 装置中微塑料的形状

无浮漂组中收集的微塑料主要为纤维状, 占比 63.44%; 其次为颗粒状和薄膜状, 占比分别为 17.65% 和 17.76%; 泡沫状微塑料占比最低, 为 1.15%; 而在浮漂组中, 纤维状和薄膜状微塑料占比分别为 46.91% 和 30.53%; 其次为颗粒状, 占 17.59%; 泡沫状占比最少, 为 4.97%(图 4C)。黄海南部和胶州湾水

域中沉积物的微塑料形状主要以纤维状为主(Zhao *et al*, 2018; Zheng *et al*, 2019), 无浮漂组中收集的微塑料形状也以纤维状为主, 与本研究结论基本一致。然而, 浮漂组中纤维状微塑料减少, 薄膜状微塑料显著增多, 这可能是由于浮漂破碎后产生的微塑料形状多为薄膜状。

2.4 装置中微塑料的颜色

无浮漂组中收集的微塑料颜色主要为透明色, 占比 62.79%; 其次为黑色, 占比 22.09%; 其他颜色占比最低, 为 15.12%。浮漂组中, 透明色和黑色分别占 48.68% 和 40.79%; 其他颜色占比 10.53%(图 4D)。本研究中收集的微塑料颜色以透明色为主, 多数研究表明海洋中的微塑料颜色以透明色为主(Chen *et al*, 2021; Firdaus *et al*, 2020; Peng *et al*, 2017; Zhao *et al*, 2018; Zheng *et al*, 2019), 这种现象可能是由于塑料在破碎和分解过程中受光辐射等影响而褪色所致; 此外, 透明状微塑料与浮游动物外形相似, 易被水生生物误食(Costa *et al*, 2010; Peters *et al*, 2017)。在浮漂组中, 黑色微塑料占比显著增加, 而透明色和其他颜色

占比有所下降,这可能由于海水养殖浮漂释放了更多黑色微塑料。

2.5 装置中微塑料的成分

无浮漂组和浮漂组中鉴定出7种塑料成分(图5),包括聚乙烯(PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)、纤维素(cellulose)、玻璃纸(cellophane)、聚酰胺(polyamide, PA)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)。无浮漂组中,72%的疑似微塑料被鉴定为微塑料,其中PE占比33.33%,PP占比29.17%,玻璃纸占比20.83%,纤维素占比13.89%,PS占比2.78%(图6)。浮漂组中PE占比62.31%,PP占比17.69%,玻璃纸占比9.23%,纤维素占比6.15%,PS占比3.08%,同时检测出少量PA和PET(共占比0.77%)。无浮漂组中的PE、PP、玻璃纸含量较高,总占比超过80%,纤维素和PS含量较低;浮漂组中,PE和PP含量最高,总占比超过80%,其余3种成分含量低于20%。国内各水域的微塑料材质多为PE和PP(Zhu *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2018; Tsang *et al.*, 2017; Frère *et al.*, 2017);而无浮漂组中收集到的微塑料材质也为PE和PP,与上述研究相同。实验选取的浮漂材质为PE,与无浮漂组相比,浮漂组中PE的含量明显升高,可能是由于浮漂破碎产生PE微塑料增多导致的。

2.6 浮漂破碎形成的微塑料

通过成分分析,海水养殖浮漂的主要成分为PE(匹配度94.37%)。在浮漂组和无浮漂组中,分别共收集到(205.21±14.22)个和(68.79±3.67)个成分为PE的

微塑料。因此,浮漂组中有(136.41±10.59)个微塑料可能来源于海水养殖浮漂的破碎。通过颜色分析,浮漂组和无浮漂组中分别共有(134.34±9.31)个和(45.59±2.43)个黑色微塑料,表明浮漂组中有(88.74±6.90)个微塑料可能是由海水养殖浮漂破碎所形成,成分和颜色的分析结果存在差异。出现这种差异可能是由于海洋生物错误摄取食物或者海水养殖浮漂破碎形成微塑料后,受各种环境因素影响导致其褪色成透明色或其他颜色。Peters等(2017)研究发现,一些海洋生物会错误的捕食一些与食物颜色相近的微塑料;此外,Chen等(2021)发现,塑料样品在长时间的暴露下会发生形状、颜色的改变。因此,为准确追踪微塑料来源,应该优先通过成分分析。

研究表明,聚苯乙烯泡沫在户外风化过程中容易破碎形成薄膜状微塑料,这与其多孔蜂窝状结构密切相关(Song *et al.*, 2020)。此外,聚苯乙烯在自然环境中暴露时间较长后,其表面颜色会逐渐变深(Chen *et al.*, 2021)。本研究中,浮漂破碎形成微塑料的形态特征与之前的研究结果相似。然而,本研究中透明色微塑料占比较高,可能是由于塑料在破碎、分解成微塑料的过程中受光照和其他环境因素的影响而逐渐褪色。在浮漂脱落生成的(136.41±10.59)个微塑料中,形状以薄膜状[(85.75±6.06)个,占比62.86%]和颗粒状[(46.74±3.32)个,占比34.26%]为主,泡沫状[(2.77±0.21)个,占比2.03%]和纤维状[(1.16±0.96)个,占比0.85%]占比最小。颜色主要为黑色[(95.42±6.87)个,占比69.95%]和透明色[(40.10±3.46)个,占比29.39%],其他颜色最少[(0.90±0.22)个,占比0.66%]。本研究结

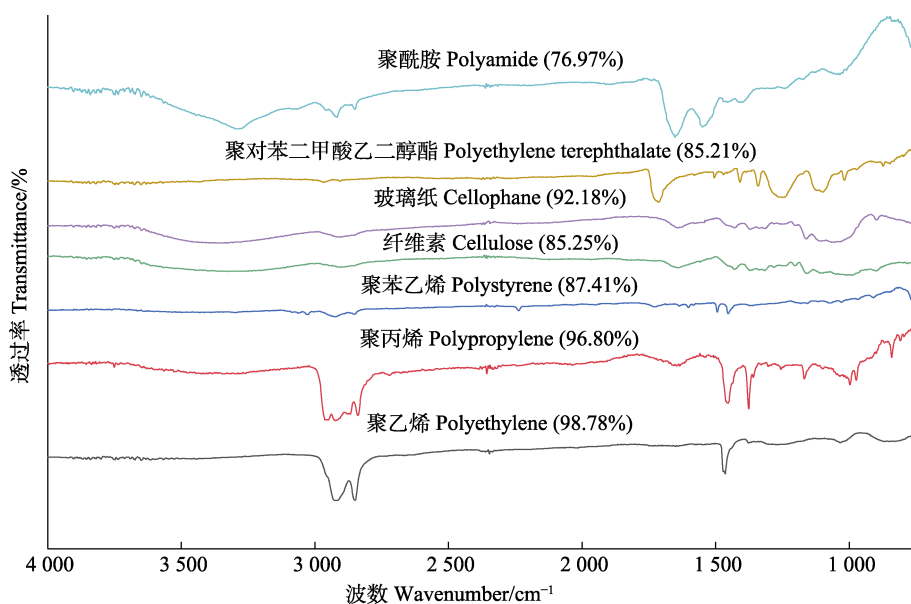


图5 装置中微塑料显微傅里叶红外光谱图

Fig.5 Microscopic Fourier transform infrared spectroscopy of microplastics in the device

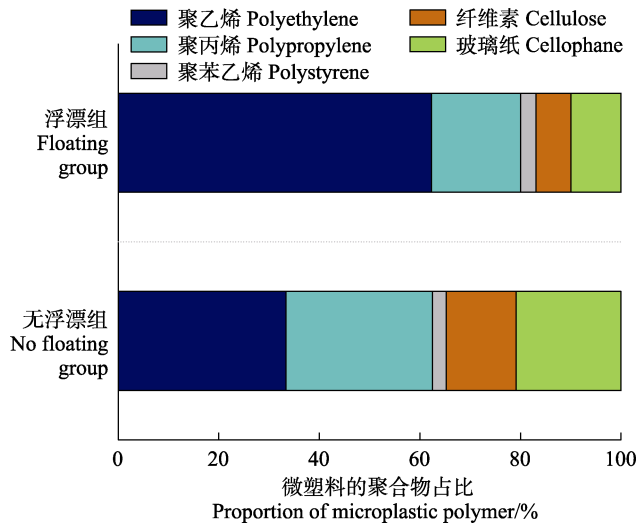


图 6 装置中微塑料的聚合物占比

Fig.6 Proportion of microplastic polymer in the device

果显示,传统海水养殖浮漂 37 d 可破碎形成 (136.41 ± 10.59) 个微塑料颗粒,由此可以估算,传统海水养殖浮漂使用 1 年后,可能会破碎形成 $(1\,345.76 \pm 104.47)$ 个微塑料。根据《威海市人民政府办公室 关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》可知,截止 2021 年底全市更新生态环保材质浮漂不低于 500 万个,这会使威海市附近水域 1 年约减少 6.73×10^9 个微塑料的释放。这些结果表明,传统海水养殖浮漂导致微塑料污染的情况不可忽视,通过改进养殖材料和减少传统浮漂的使用,可以有效控制微塑料的源头排放。这为海洋环境保护政策的制定提供了科学依据,有助于降低微塑料污染对全球海洋环境的负面影响。通过这一研究,未来可进一步探索更环保的海水养殖方式和新型材料,减轻微塑料污染的风险,促进渔业绿色高质量发展。

3 结论与展望

通过塑料破碎收集装置成功收集到浮漂产生的微塑料。无浮漂组和浮漂组装置中微塑料的平均丰度分别为 (307.09 ± 16.37) 个/kg 和 (392.72 ± 27.22) 个/kg。收集的微塑料尺寸以 <0.5 mm 为主,形状多为纤维状、颗粒状、薄膜状,颜色以透明色、黑色为主。无浮漂组装置共收集微塑料 (206.40 ± 11.00) 个,其中成分为 PE 的微塑料共有 (68.79 ± 3.67) 个;浮漂组装置共收集微塑料 (329.34 ± 22.83) 个,其中成分为 PE 的微塑料共有 (205.21 ± 14.22) 个。因此,黑色海水养殖浮漂在 37 d 内共破碎收集到微塑料颗粒 (136.41 ± 10.59) 个;其中,有薄膜状的微塑料 (85.75 ± 6.06) 个,颗粒状 (46.74 ± 3.32) 个,泡沫状 (2.77 ± 0.21) 个,纤维状占比最

少,有 (1.16 ± 0.96) 个。颜色主要为黑色和透明色,分别有 (95.42 ± 6.87) 个和 (40.10 ± 3.46) 个,其他颜色最少,有 (0.90 ± 0.22) 个。此外,根据估算可知,一个传统海水养殖浮漂 1 年大约可以破碎形成 $(1\,345.76 \pm 104.47)$ 个微塑料,在各地的养殖区均存在大量的传统海水养殖浮漂,这些浮漂破碎所产生的微塑料都将汇入海洋,这将对海洋生态系统带来巨大的潜在风险。

未来,可以结合装置探究不同类型海水养殖设施产生微塑料的差异性、微塑料在海洋生态系统中的迁移转化规律以及微塑料对海洋生物的毒性效应等。这有助于我们了解不同类型海水养殖设施在自然环境下破碎形成微塑料的过程,从而为评估和预测塑料垃圾对微塑料生成、迁移及其生态风险提供基础数据和理论支持。

参 考 文 献

- BORRELLE S B, RINGMA J, LAW K L, *et al.* Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science*, 2020, 369(6509): 1515–1518
- CHEN M, JIN M, TAO P, *et al.* Assessment of microplastics derived from mariculture in Xiangshan Bay, China. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 1146–1156
- CHEN X, XU M, YUAN L M, *et al.* Degradation degree analysis of environmental microplastics by micro FT-IR imaging technology. *Chemosphere*, 2021, 274: 129779
- CHEN Y P, JIANG L, XU C Y, *et al.* Distribution characteristics and sources of microplastics in surface seawater of the East China Sea. *Marine Environmental Science*, 2023, 42(2): 315–325 [陈永平, 姜璐, 许春阳, 等. 东中国海表层海水微塑料分布特征及其来源综述. *海洋环境科学*, 2023, 42(2): 315–325]
- CHENG J J, GUO X J, LI Y F. The characteristics of microplastics pollution in Sishili Bay of the North Yellow Sea. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(1): 1–7 [程姣姣, 郭献军, 李艳芳. 黄海北部四十里湾微塑料污染特征研究. *海洋环境科学*, 2021, 40(1): 1–7]
- 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. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(5): 650–654
- COSTA M F, IVAR DO SUL J A, SILVA-CAVALCANTI J S, *et al.* On the importance of size of plastic fragments and pellets on the strandline: A snapshot of a Brazilian beach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 168(1/2/3/4): 299–304
- 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. *PLoS One*, 2014, 9(12): e111913

- FIRDAUS M, TRIHADININGRUM Y, LESTARI P. Microplastic pollution in the sediment of Jagir Estuary, Surabaya City, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 110790
- FRÈRE L, PAUL-PONT I, RINNERT E, *et al.* Influence of environmental and anthropogenic factors on the composition, concentration and spatial distribution of microplastics: A case study of the Bay of Brest (Brittany, France). *Environmental Pollution*, 2017, 225(17): 211–222
- GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L, *et al.* Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782
- HUANG L Y, HUANG J H, YOU X X, *et al.* Seasonal distribution characteristics and correlation of microplastics in wild oysters and beach sediments in Qingdao. *Fishery Modernization*, 2022, 49(6): 67–76 [黄六一, 黄杰鸿, 尤鑫星, 等. 青岛近岸野生牡蛎及海滩沉积物中的微塑料季节性分布特征及其关联性. *渔业现代化*, 2022, 49(6): 67–76]
- JULIENNE F, DELORME N, LAGARDE F. From macroplastics to microplastics: Role of water in the fragmentation of polyethylene. *Chemosphere*, 2019, 236: 124409
- KOELMANS A A, KOOI M, LAW K L, *et al.* All is not lost: deriving a top down mass budget of plastic at sea. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(11): 114028
- LI D J. Research advance and countermeasures on marine microplastic pollution. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(2): 197–202 [李道季. 海洋微塑料污染状况及其应对措施建. *环境科学研究*, 2019, 32(2): 197–202]
- LI D Z, SHI Y H, YANG L M, *et al.* Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation. *Nature Food*, 2020, 1(11): 746–754
- MANZOOR S, NAQASH N, RASHID G, *et al.* Plastic material degradation and formation of microplastic in the environment: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56(P6): 3254–3260
- PENG G Y, ZHU B S, YANG D Q. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 283–290
- PETERS C A, THOMAS P A, RIEPER K B, *et al.* Foraging preferences influence microplastic ingestion by six marine fish species from the Texas Gulf Coast. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(1): 82–88
- PRIYA K, RENJITH K R, JOSEPH C J, *et al.* Fate, transport and degradation pathway of microplastics in aquatic environment — A critical review. *Regional Studies in Marine Science*, 2022, 56: 102647
- SONG Y K, SANG H H, SOEUN E, *et al.* Rapid production of micro- and nanoplastics by fragmentation of expanded polystyrene exposed to sunlight. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54(18): 11191–11200
- SORASAN C, EDO C, GONZÁLEZ-PLEITER M, *et al.* Ageing and fragmentation of marine microplastics. *The Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154438
- SU L, SHARP S M, PETTIGROVE V J, *et al.* Superimposed microplastic pollution in a coastal metropolis. *Water Research*, 2020, 168: 115140
- SUI Q, ZHANG L J, XIA B, *et al.* Spatiotemporal distribution, source identification and inventory of microplastics in surface sediments from Sanggou Bay, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 138064
- SUN J X, ZHENG H Y, XIANG H, *et al.* The surface degradation and release of microplastics from plastic films studied by UV radiation and mechanical abrasion. *Science of the Total Environment*, 2022, 838(P3): 156369
- THIEL M, HINOJOSA I, VÁSQUEZ N, *et al.* Floating marine debris in coastal waters of the SE-Pacific (Chile). *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46(2): 224–231
- THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, *et al.* Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*, 2004, 304(5672): 838
- TSANG Y Y, MAK C W, LIEBICH C, *et al.* Microplastic pollution in the marine waters and sediments of Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1/2): 20–28
- VAN SEBILLE E, WILCOX C, LEBRETON L, *et al.* A global inventory of small floating plastic debris. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(12): 124006
- WANG J, LU L, WANG M, *et al.* Typhoons increase the abundance of microplastics in the marine environment and cultured organisms: A case study in Sanggou Bay, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 667: 1–8
- WANG T, HU X G, ZHOU Q X. The research progress in migration, distribution, biological effects and analytical methods of microplastics. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(4): 385–395
- XIA B, DU Y S, ZHAO X G, *et al.* Research progress on microplastics pollution in marine fishery water and their biological effects. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(3): 178–190 [夏斌, 杜雨珊, 赵信国, 等. 微塑料在海洋渔业水域中的污染现状及其生物效应研究进展. *渔业科学进展*, 2019, 40(3): 178–190]
- XIA B, SUI Q, SUN X M, *et al.* Microplastic pollution in surface seawater of Sanggou Bay, China: Occurrence, source and inventory. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 162: 111899
- YIN S Q, JIA F L, LIU X Y, *et al.* The distribution of microplastics and their influence factors in surface seawater and tidal flat sediments in Qingdao coast. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(4): 1410–1418 [尹诗琪, 贾芳丽, 刘筱因, 等. 青岛近岸表层海水和潮滩沉积物中微塑料的分布及其影响因素. *环境科学学报*, 2021, 41(4): 1410–1418]
- ZHANG B, WU D, YANG X, *et al.* Microplastic pollution in the surface sediments collected from Sishili Bay, North Yellow

- Sea, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 141: 9–15
- ZHANG Y, ZHAO X G, SUI Q, *et al.* Distribution characteristics of microplastic pollution in the surface sediments of the Laoshan coastal area of Qingdao. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, 45(2): 61–69 [张莹, 赵信国, 隋琪, 等. 青岛崂山近岸海域表层沉积物中微塑料的污染特征. *渔业科学进展*, 2024, 45(2): 61–69]
- ZHAO J, RAN W, TENG J, *et al.* Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 640/641: 637–645
- ZHENG Y F, LI J X, CAO W, *et al.* Distribution characteristics of microplastics in the seawater and sediment: A case study in Jiaozhou Bay, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 674: 27–35
- ZHENG Y F, ZHU J G, LI J J, *et al.* Burrowing invertebrates induce fragmentation of mariculture Styrofoam floats and formation of microplastics. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 447: 130764
- ZHOU Q, ZHANG H B, FU C C, *et al.* The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Geoderma*, 2018, 322(1): 201–208
- ZHU L, BAI H Y, CHEN B J, *et al.* Microplastic pollution in North Yellow Sea, China: Observations on occurrence, distribution and identification. *Science of the Total Environment*, 2018, 636(1): 20–29

(编辑 马瑾艳)

***In Situ* Exploration of the Characteristics of Microplastics Formed by the Fragmentation of Floating Floats in Seawater Aquaculture**

LIU Guoshun^{1,2}, ZHAO Xinguo^{2,3}, SUN Xuemei^{2,3}, ZHU Lin^{2,3}, SUI Qi^{2,3}^①, WEI Manman¹, XIA Bin^{2,3}

(1. College of Bioengineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;

2. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute,

Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Marine Ecology and Environmental Science Laboratory,

Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China)

Abstract With the widespread application of plastic products in various fields, microplastic pollution caused by waste plastics has become a global environmental problem. Microplastic pollution is notably prevalent in marine environments, particularly in aquaculture areas. Marine aquaculture plastic facilities are subject to prolonged exposure to ultraviolet radiation, wave impact, and microbial erosion, gradually breaking down and forming microplastics. Although extensive studies have been conducted on the impact of microplastics on marine organisms and ecosystems, studies on the laws of microplastic formation from float debris in marine aquaculture in natural environments are limited. This study used a self-made plastic crushing *in-situ* collection device to monitor and analyze the fragmentation of seawater aquaculture float in natural environments. The results showed that after 37 days, the abundance of microplastics in the no float group device was (307.09±16.37) items/kg, whereas the abundance of microplastics in the float group device was (392.72±27.22) items/kg. The collected microplastics were predominantly fibrous and measured < 0.5 mm, with most being transparent in color. During seawater aquaculture, approximately (136.41±10.59) ind. microplastics were generated by float, primarily in the form of thin films with predominantly black color. There were (85.75±6.06) ind. film-shaped microplastics, (46.74±3.32) ind. granular microplastics, (2.77±0.21) ind. foam-shaped microplastics, and (1.16±0.96) ind. fibrous microplastics. Additionally, there were (95.42±6.87) ind. black colored microplastics, and (40.10±3.46) ind. transparent microplastics, with other colors being the least prevalent at (0.90±0.22) ind.. This device effectively collects microplastics generated by the fragmentation of float in marine aquaculture. The study results

① Corresponding author: SUI Qi, Email: suiqi@ysfri.ac.cn

provide basic data and theoretical support for evaluating and predicting the generation, migration, and ecological risks of microplastics caused by aquaculture floats.

Key words Microplastics; Marine aquaculture float; *In situ* research; Microplastics formation

附表:

附表 1 实验地点环境参数
Appendix Tab.1 Experimental site environmental parameters

时间 Time	光强 Light intensity /(cd/m ²)	紫外 254 UV 254 /(μW/cm ²)	紫外 297 UV 297 /(μW/cm ²)	流速 Velocity /(m/s)	温度 Temperature /°C	溶解氧 DO /(mg/L)	压强 Pressure /kPa
0 h	0	0	0	0.188	23.149	6.81	19.16
1 h	0	0	0	0.089	23.128	6.79	19.13
2 h	0	0	0	0.402	23.259	6.92	19.15
3 h	0	0	0	0.423	23.354	6.95	19.11
4 h	0	0	0	0.323	23.404	6.94	19.16
5 h	0	0	0	0.219	23.298	6.86	19.13
6 h	0	0	0	0.024	23.223	6.83	19.16
7 h	4.69	1.134	0.106	0.214	23.209	6.86	19.12
8 h	12.31	0.825	0.194	0.418	23.248	6.87	19.18
9 h	6.18	0.995	0.245	0.606	23.393	6.88	19.54
10 h	10.41	2.841	0.651	0.343	23.473	6.92	19.51
11 h	9.69	1.603	0.489	0.302	23.403	6.91	19.45
12 h	9.64	1.571	0.447	0.086	23.312	6.87	19.34
13 h	8.57	1.214	0.341	0.022	23.311	6.91	19.26
14 h	5.59	0.814	0.214	0.312	23.523	7.06	19.29
15 h	2.83	0.343	0.092	0.294	23.511	6.97	19.25
16 h	1.53	0.218	0.047	0.153	23.437	6.92	19.26
17 h	0.38	0.043	0	0.047	23.391	6.88	19.25
18 h	0	0	0	0.082	23.331	6.87	19.22
19 h	0	0	0	0.353	23.359	6.88	19.21
20 h	0	0	0	0.324	23.303	6.91	19.26
21 h	0	0	0	0.414	23.338	6.92	19.25
22 h	0	0	0	0.383	23.316	6.92	19.21
23 h	0	0	0	0.338	23.205	6.85	19.19
1 d	—	—	—	—	23.1	—	—
2 d	—	—	—	—	20.5	—	—
3 d	—	—	—	—	20.5	—	—
4 d	—	—	—	—	21.4	—	—
5 d	—	—	—	—	21.9	—	—
6 d	—	—	—	—	22.6	—	—
7 d	—	—	—	—	22.7	—	—
8 d	—	—	—	—	24.0	—	—
9 d	—	—	—	—	20.8	—	—
10 d	—	—	—	—	20.2	—	—
11 d	—	—	—	—	22.7	—	—

续表附表 1

时间 Time	光强 Light intensity /(cd/m ²)	紫外 254 UV 254 /(μW/cm ²)	紫外 297 UV 297 /(μW/cm ²)	流速 Velocity /(m/s)	温度 Temperature /°C	溶解氧 ODO /(mg/L)	压强 Pressure /kPa
12 d	—	—	—	—	20.2	—	—
13 d	—	—	—	—	21.3	—	—
14 d	—	—	—	—	21.5	—	—
15 d	—	—	—	—	21.4	—	—
16 d	—	—	—	—	20.8	—	—
17 d	—	—	—	—	20.2	—	—
18 d	—	—	—	—	20.8	—	—
19 d	—	—	—	—	20.5	—	—
20 d	—	—	—	—	20.3	—	—
21 d	—	—	—	—	20.5	—	—
22 d	—	—	—	—	20.5	—	—
23 d	—	—	—	—	20.2	—	—
24 d	—	—	—	—	20.3	—	—
25 d	—	—	—	—	21.1	—	—
26 d	—	—	—	—	20.5	—	—
27 d	—	—	—	—	20.8	—	—
28 d	—	—	—	—	20.2	—	—
29 d	—	—	—	—	20.5	—	—
30 d	—	—	—	—	20.5	—	—
31 d	—	—	—	—	20.2	—	—
32 d	—	—	—	—	20.2	—	—
33 d	—	—	—	—	20.3	—	—
34 d	—	—	—	—	20.2	—	—
35 d	—	—	—	—	20.5	—	—
36 d	—	—	—	—	20.2	—	—
37 d	—	—	—	—	20.5	—	—