

 方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王莹燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响

邹亚丹, 徐擎擎, 张哥, 李富云, 李锋民*

(中国海洋大学环境科学与工程学院, 近海环境污染控制研究所, 海洋生态与环境教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 微塑料污染已经成为全球性的环境问题, 引起了人们的广泛关注, 为了评估微塑料的生物效应, 对生物体内微塑料进行准确定量成为了亟待解决的问题. 在已有的微塑料研究中, 利用荧光强度进行生物体内微塑料定量是较为常用的方法, 而对生物样品进行消解则是重要的前处理方法. 然而, 消解可能会对微塑料产生破坏, 影响微塑料的荧光强度, 导致微塑料浓度的测定值与真实值存在巨大偏差. 目前关于消解对微塑料荧光强度影响的研究比较匮乏, 而荧光强度直接影响微塑料定量结果的准确性. 因此本文研究了文献中常用的6种消解剂, 分别为 KOH、NaOH、H₂O₂、HNO₃、HNO₃:HCl 和 HNO₃:HClO₄, 探究了不同消解方法对微塑料荧光强度和表面形态的影响, 并选出最合适的微塑料消解方法. 结果表明在6种不同消解方法中, KOH 消解法 (100 g·L⁻¹, 60℃) 对微塑料的荧光强度影响最小, 且对微塑料的表面形态没有明显影响. 而另外5种消解法都不同程度地降低了微塑料的荧光强度, 并造成了微塑料表面损伤, 主要包括团聚、气泡、轻划痕以及深凹陷等. 此外, 利用 KOH 消解法对生物样品中的微塑料进行提取效率评估, 回收率高达 96.3% ± 0.5%, 表明 KOH 消解法是一种合适的生物样品中荧光微塑料的提取方法.

关键词: 微塑料; 定量; 消解; 荧光强度; 生物样品

中图分类号: X830.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0496-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804072

Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity

ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, LI Fu-yun, LI Feng-min*

(Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Institute of Coastal Environmental Pollution Control, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Microplastic pollution has become a global environmental problem and is a cause of great concern. To evaluate the biological effects of microplastics, microplastics in organisms need to be accurately quantified. The quantification of microplastics in organisms using the fluorescence intensity is common; the digestion of biological samples is an important pretreatment method. However, the microplastics may be destroyed by digestion, which affects the fluorescence intensity of the microplastics and results in large deviations between measured and true values. In this study, six commonly used digestive agents were studied: KOH, NaOH, H₂O₂, HNO₃, HNO₃:HCl, and HNO₃:HClO₄. The effect of different digestion methods on the fluorescence intensity and surface morphology of microplastics was studied and the most suitable protocol was selected. The results show that, among the six different digestion methods, KOH digestion (100 g·L⁻¹, 60℃) has the least influence on the fluorescence intensity of the microplastics and does not affect their surface morphology. The other five digestion methods lead to different degrees of reduction of the fluorescence intensity of microplastics and damage the microplastics' surface (aggregation, bubbles, scratches, and depressions). In addition, the KOH digestion method was used to extract microplastics from biological samples. The recovery rate was ≥96.3% ± 0.5%, indicating that the KOH digestion method is suitable for fluorescent microplastics in biological samples.

Key words: microplastic; quantification; digestion; fluorescence intensity; biological sample

近年来, 微塑料污染问题越来越严重, 在全球范围内引起了广泛关注. 塑料垃圾被丢弃进入环境中, 在各种自然和人为作用下裂解成更小的碎片, 经过不断风化形成粒径小于 5mm 的塑料碎片或颗粒, 被定义为微塑料^[1]. 环境中的微塑料有碎块状、纤维状和颗粒状等不同形态, 主要来源于大型塑料的风化^[2, 3] 以及一些个人洗护用品中添加的塑料微珠^[4]. 这些塑料制品在使用后随着污水处理厂的尾水排放到各种水体环境中, 包括江河、湖泊以及海洋^[5, 6]. 微塑料由于粒径小, 分布广泛, 容易被许多生物当作食物摄入体内, Naidu 等^[7] 的研究

发现印度洋西南海岸的底栖无脊椎动物体内含有微塑料. 有研究对南非的城市河流中摇蚊幼虫进行采样分析^[8], 发现超过 75% 的摇蚊幼虫样品中含有微塑料. 除了在无脊椎动物体内发现有微塑料的摄入, 在一些脊椎动物如鱼体内也发现有微塑料存

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378480); 国家自然科学基金委员会-山东省联合资助海洋科学研究中心项目(U1406403); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2015CB453301)

作者简介: 邹亚丹(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微塑料的生物效应, E-mail: yadanzou@163.com

* 通信作者, E-mail: lifengmin@ouc.edu.cn

在, Alomar 等^[9]对地中海海域的黑口锯尾鲨进行采样分析, 发现有 16.8% 的样本含有微塑料. 有研究表明微塑料可能通过食物链在生物间进行传递并在生物体内进行富集^[10~12], 因此对生物体内微塑料的分布和污染水平进行研究十分必要.

已有研究中常使用荧光微塑料研究生物对微塑料的摄入情况, 以及微塑料在生物体内的分布和转移规律^[13~15]. 可以通过组织切片和荧光显微镜观察相结合的方法对生物体内微塑料进行定量^[16], 但是这种观察方法操作复杂, 且易受观察者的主观影响, 定量不准确. 有研究表明^[14], 通过荧光强度进行定量是一种简单可行的方法, 在实验中可以用微塑料的荧光强度作为定量研究的一个依据. 测定荧光强度前需要去除生物组织, 因此在荧光定量分析之前对生物样品进行消解是重要前处理步骤. 目前主要的前处理方法有酸消解(如 HCl、HNO₃ 和 HClO₄)^[17, 18]、碱消解(如 NaOH 和 KOH)^[18] 和氧化剂消解(H₂O₂)^[17, 19].

由于对生物样品微塑料检测的前处理方法不同, 导致研究结果差异很大, 如 Cole 等^[18] 的研究发现使用酸和碱消解对微塑料的回收率相差较大, 其中 HCl 消解回收率近 72.1% ± 9.2%, 而 NaOH 回收率可达 91.3% ± 0.4%, Avio 等^[20] 的研究发现使用硝酸消解微塑料的回收率仅 4.0% ± 3.0%,

Phuong 等^[21] 使用 KOH 对贻贝组织进行消解, 得到微塑料的提取效率高达 99.9%. 为了探究不同消解方法对生物样品中微塑料提取效率的影响, 本文选用前人研究中使用的 6 种不同的消解方法对实验中常用的荧光聚苯乙烯微球进行消解, 评价每种方法对荧光聚苯乙烯微球荧光强度和表面形态产生的影响, 并选用其中最佳的消解方法对生物样品中微塑料进行提取. 优选出生物组织消解效果好、对微塑料荧光影响小的消解方法, 以期后续研究提供方法支持.

1 材料与方法

1.1 微塑料处理

实验所用荧光聚苯乙烯微球(FMP)购买自天津市倍思乐色谱技术开发中心, 实验所用微塑料先在超声振荡仪中超声 10 min(120 W), 以确保微塑料更好地在体系中分散. 取 1.0 mg 荧光微塑料放入 10 mL 或 100 mL 的带盖玻璃瓶中, 加入一定体积消解溶液, 盖好盖子防止污染, 然后将样品放入恒温水浴锅中进行消解, 具体实验条件见表 1. 未经任何处理的原始荧光聚苯乙烯微球和消解后的荧光聚苯乙烯微球样品用超纯水稀释至最终体积为 100 mL, 用荧光分光光度计(F-4600, Hitachi, 日本)测定荧光强度.

表 1 6 种消解方法提取荧光聚苯乙烯微球的具体实验参数

Table 1 Details about the six selected digestion protocols for the extraction of FMPs

消解剂	浓度	体积/mL	温度/°C	消解时间/h	文献
KOH	100 g·L ⁻¹	40.0	60	24	[22]
NaOH	10 mol·L ⁻¹	40.0	60	24	[18]
H ₂ O ₂	30% (质量分数)	40.0	65	24	[19]
HNO ₃	69% (质量分数)	1.0	70	2	[14, 23]
HNO ₃ : HCl	1:1 (体积比)	1.0	80	1/2	[24]
HNO ₃ : HClO ₄	4:1 (体积比)	1.0	20/90 ¹⁾	12/(1/6) ¹⁾	[25]

1) 20°C 条件下消解 12 h, 然后将温度升至 90°C 消解 10 min

1.2 荧光聚苯乙烯微球样品的表征

消解完成后, 取一部分荧光聚苯乙烯微球溶液, 使用血球计数板在荧光显微镜(FEICA DM-2500)20 × 放大倍数下观察消解处理的荧光聚苯乙烯微球的荧光强度变化. 剩余部分荧光聚苯乙烯微球溶液过 0.45 μm 混合纤维膜, 将过滤后附有微塑料的滤膜冷冻干燥 3 d. 干燥后的微塑料样品通过扫描电子显微镜(SEM, JSM-6390LV, JEOL, Japan)进行表面形态的测定.

1.3 最佳消解条件的确定

根据荧光强度的变化和扫描电镜结果, 选出一种对微塑料荧光强度和表面形态影响最小

的消解剂, 研究消解液体积、消解温度和消解时间这 3 种因素对微塑料荧光强度的影响, 并筛选出最佳消解条件. 微塑料处理方法如 1.1 节所述. 消解完成后, 用上述方法测定消解处理的荧光聚苯乙烯微球的荧光强度. 消解条件如表 2 所示, 具体实验设置为: ①消解剂体积对荧光强度的影响: 消解剂体积为 10 ~ 60 mL, 在 60°C 条件下消解 24 h; ②消解温度对荧光强度的影响: 加入 60 mL KOH 溶液, 温度设置为 20 ~ 90°C, 消解时间 24 h; ③消解时间对荧光强度的影响: 加入 60 mL KOH 溶液, 消解温度为 60°C, 消解时间为 1/6 ~ 72 h.

表 2 KOH 消解荧光微塑料实验条件

Table 2 Details of the conditions used for the FMPs digestion

消解剂	浓度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	体积/mL	温度/ $^{\circ}\text{C}$	消解时间/h
KOH	100	10, 20, 40, 60	20, 40, 50, 60, 70, 80, 90	1/6, 1/2, 2, 24, 48, 60, 72

1.4 生物样品中微塑料的回收率

根据前面的实验得出一种对荧光聚苯乙烯微球的荧光强度、形态结构影响最小的消解法确定为最佳消解方法,使用这种方法对生物样品中的微塑料进行消解,并通过计算微塑料的回收率来验证该方法的可信度.

选用大型溞 (*Daphnia magna*) 和斑马鱼作为受试生物,实验开始前 24 h 不喂食.回收率实验分两组进行:①原始荧光聚苯乙烯微球受试生物直接混合测定回收率.主要处理方法为,将 100 只大型溞或 1 条斑马鱼 ($20 \text{ mg} \pm 5 \text{ mg}$) 处死并进行组织匀浆,加入到装有 2 mg 原始荧光聚苯乙烯微球的玻璃烧杯中,用 KOH 法 ($100 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 60°C) 进行消解,每组 3 个平行,用荧光分光光度计测定荧光强度并通过标准曲线计算含量记为 Q_m ,计算荧光聚苯乙烯微球回收率 R_m ;②生物体内荧光微塑料的回收率测定.100 只大型溞或 1 条斑马鱼饥饿 24 h 后随机加入装有 40 mL 超纯水和 2 mg 荧光聚苯乙烯微球的 100 mL 烧杯中,每组设置 3 个平行,放置在恒温光照培养箱 (25°C , 光照:黑暗 = 12:12) 培养 24 h 后,取出摄入了荧光聚苯乙烯微球的生物个体,用超纯水冲洗 3 次以除去表面粘附的微塑料,处死并进行组织匀浆,用 KOH 消解法处理生物样品,用荧光分光光度计测定荧光强度,计算得出聚苯乙烯微球含量记为 Q_{i-1} ,同时测定烧杯中剩余的未消解的荧光聚苯乙烯微球荧光强度,计算含量记为 Q_{i-2} ,通过下列公式计算荧光聚苯乙烯微球回收率 R_i .

生物样品中荧光聚苯乙烯微球回收率 (%) 计算方法如下:

$$R_m = Q_m / Q_s \times 100\% \quad (1)$$

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2} \quad (2)$$

$$R_i = Q_i / Q_s \times 100\% \quad (3)$$

式中, R_m (%) 为直接混合时荧光聚苯乙烯微球回收率, Q_m 为直接混合时测定的荧光聚苯乙烯微球含量; R_i (%) 为暴露培养时荧光聚苯乙烯微球回收率, Q_i 为暴露培养时测定的荧光聚苯乙烯微球含量, Q_{i-1} 为生物体内摄入的荧光聚苯乙烯微球含量, Q_{i-2} 为培养体系中剩余荧光聚苯乙烯微球含量, Q_s 为初始加入的荧光聚苯乙烯微球含量.

1.5 数据处理

使用 SPSS 20.0 进行数据分析与比较,采用单

因素方差分析 (ANOVA) 各影响因素之间的显著性差异, $P < 0.05$ 表示处理组之间存在显著差异,使用 Excel 2016 进行绘图.

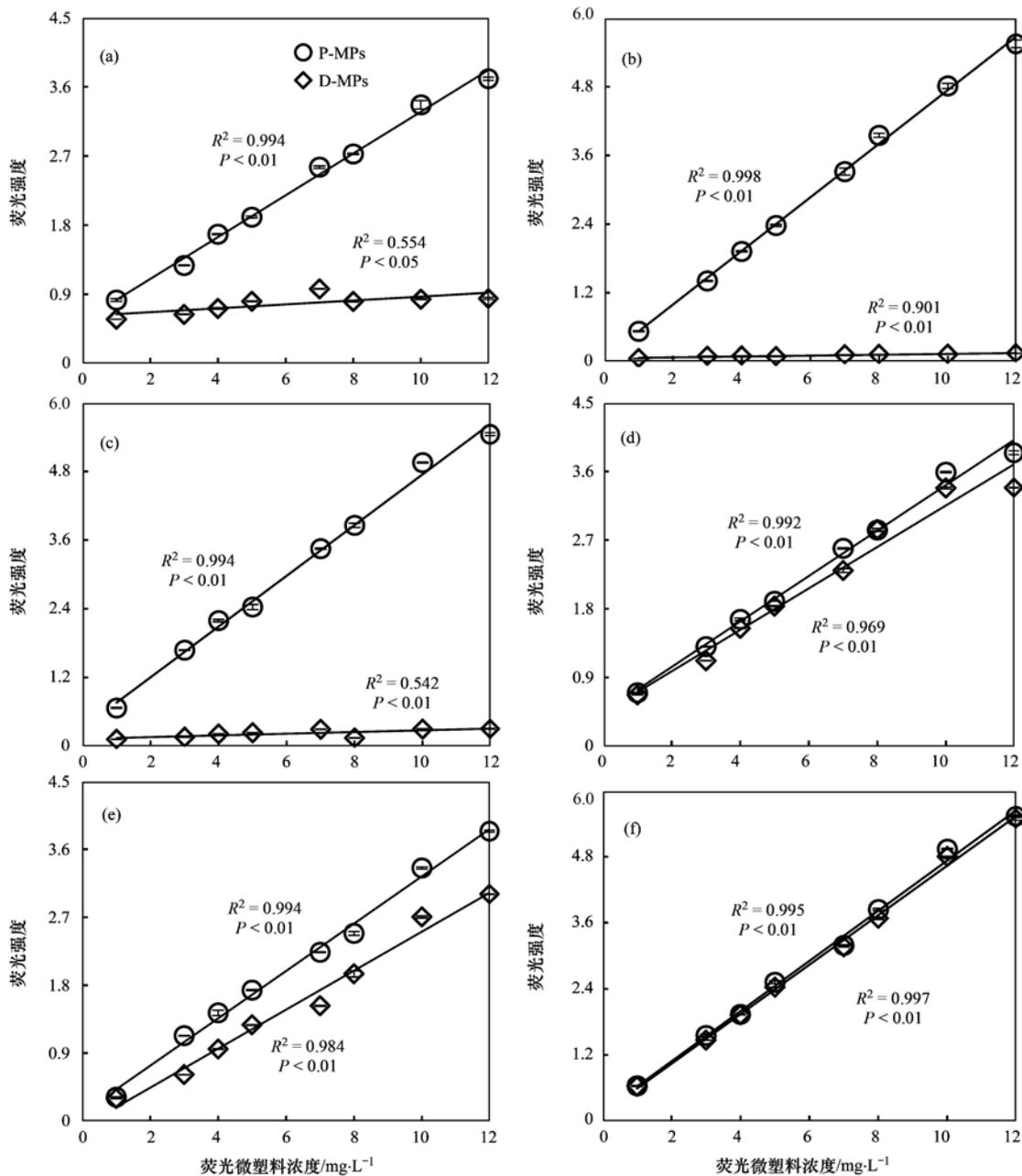
2 结果与分析

2.1 6 种消解方法对荧光聚苯乙烯微塑料荧光强度的影响

图 1 为采用 6 种消解方法对荧光聚苯乙烯微球进行消解后得到的荧光强度变化结果.从中可知, HNO_3 、 $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ 和 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ 消解后的微塑料荧光强度出现明显降低,其中 HNO_3 消解高浓度微塑料 ($12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时导致荧光强度降低了 77.1%, $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ 和 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ 消解处理的微塑料荧光几乎消失.当微塑料浓度较高时 ($\geq 7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 荧光强度降低了 94.0% ~ 97.4% [图 1 (a) ~ 1 (c)]. 图 1 (d) 和图 1 (f) 表明 H_2O_2 和 KOH 处理对荧光聚苯乙烯微球荧光强度影响较小,其中 H_2O_2 处理低浓度微塑料溶液 ($< 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时荧光聚苯乙烯微球荧光强度几乎没有变化,而在对高浓度微塑料溶液 ($\geq 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 进行消解时荧光强度降低 11.2%,对荧光强度造成一定影响. NaOH 处理后,荧光聚苯乙烯微球荧光强度仍与微塑料浓度呈现很好地线性相关,但荧光强度在一定程度上有所降低,为 0.3% ~ 21.0%,其中最低的荧光强度出现在 $7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微塑料浓度组,微塑料浓度较低 ($\leq 5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时,荧光强度减弱了 5.8% ~ 21.0%,微塑料浓度 $\geq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时荧光强度降低 8.3% ~ 16.7% [图 1 (e)]. KOH 处理后的荧光聚苯乙烯微球与消解前相比没有明显差异,与消解前的微塑料荧光强度十分接近,降低程度低于 5.4%.与酸消解相比,双氧水和碱消解对微塑料荧光强度的影响较小,其中 KOH 消解对荧光聚苯乙烯微球的荧光强度影响最小.

2.2 6 种消解方法对荧光聚苯乙烯微塑料表面形态的影响

不同消解方法对荧光聚苯乙烯微塑料表面荧光和形态的影响如图 2 和图 3 所示.图 2 为荧光显微镜下拍摄的荧光聚苯乙烯微塑料照片,图 2 (a) 为未经任何处理的微塑料,可以看出其表面荧光很均匀,并且微塑料能够很好地分散.经过 HNO_3 [图 2 (b)]、 $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ [图 2 (c1) ~ 2 (c2)] 和 $\text{HNO}_3:$



P-MPs 和 D-MPs 分别为初始微塑料和消解后的微塑料; (a) HNO₃, (b) HNO₃: HCl, (c) HNO₃: HClO₄, (d) H₂O₂, (e) NaOH, (f) KOH

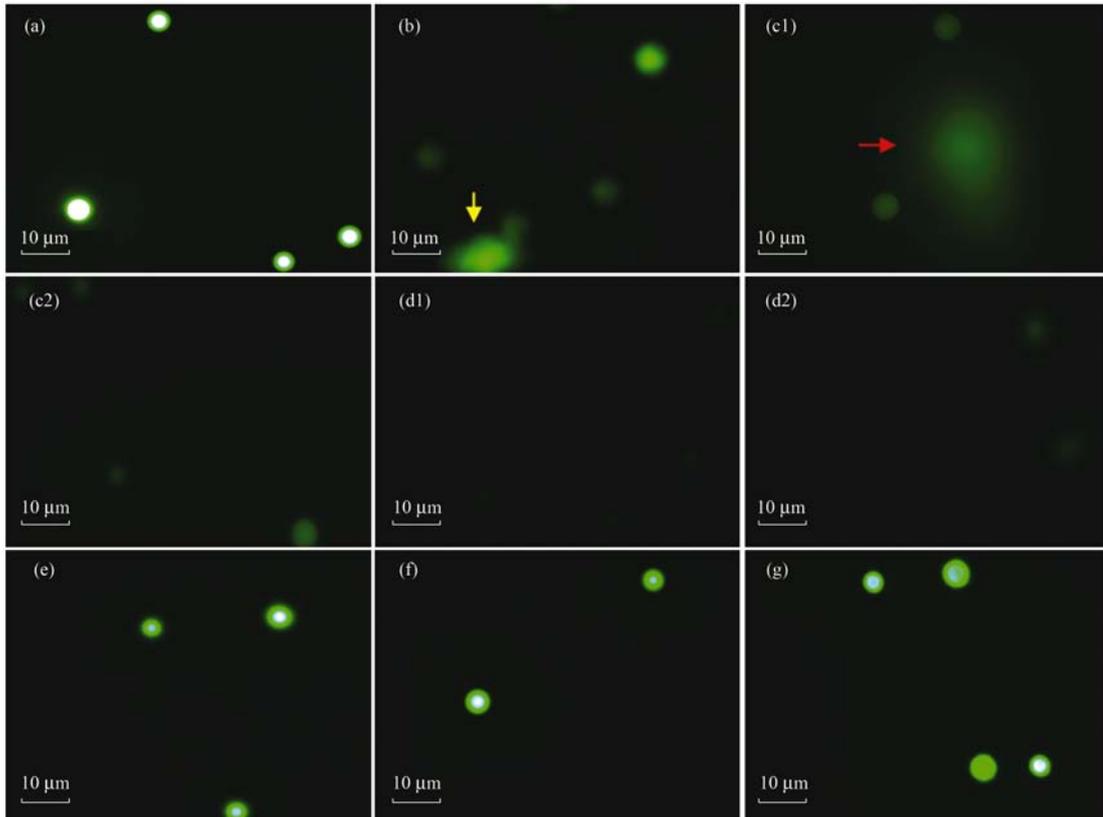
图 1 6 种不同消解方法对荧光聚苯乙烯微球荧光强度的影响

Fig. 1 Effect of the six digestion methods on the fluorescence intensities of the FMPs

HClO₄[图 2(d1) ~ (d2)]这 3 种酸消解后的微塑料表面荧光强度与初始微塑料相比明显降低, 其中 HNO₃: HClO₄消解后的微塑料在荧光显微镜下很难观察到荧光, 并且微塑料出现了明显的团聚现象(黄色箭头所示), 部分微塑料表面的荧光出现了脱落现象(红色箭头所示). 相反, 强氧化剂 H₂O₂[图 2(e)]以及两种碱 NaOH[图 2(f)], KOH[图 2(g)]消解法对微塑料荧光强度影响较小, 荧光聚苯乙烯微球表面荧光仍比较均匀, 并且能够较好的分散, 没有出现明显的团聚现象.

利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察不同消解方

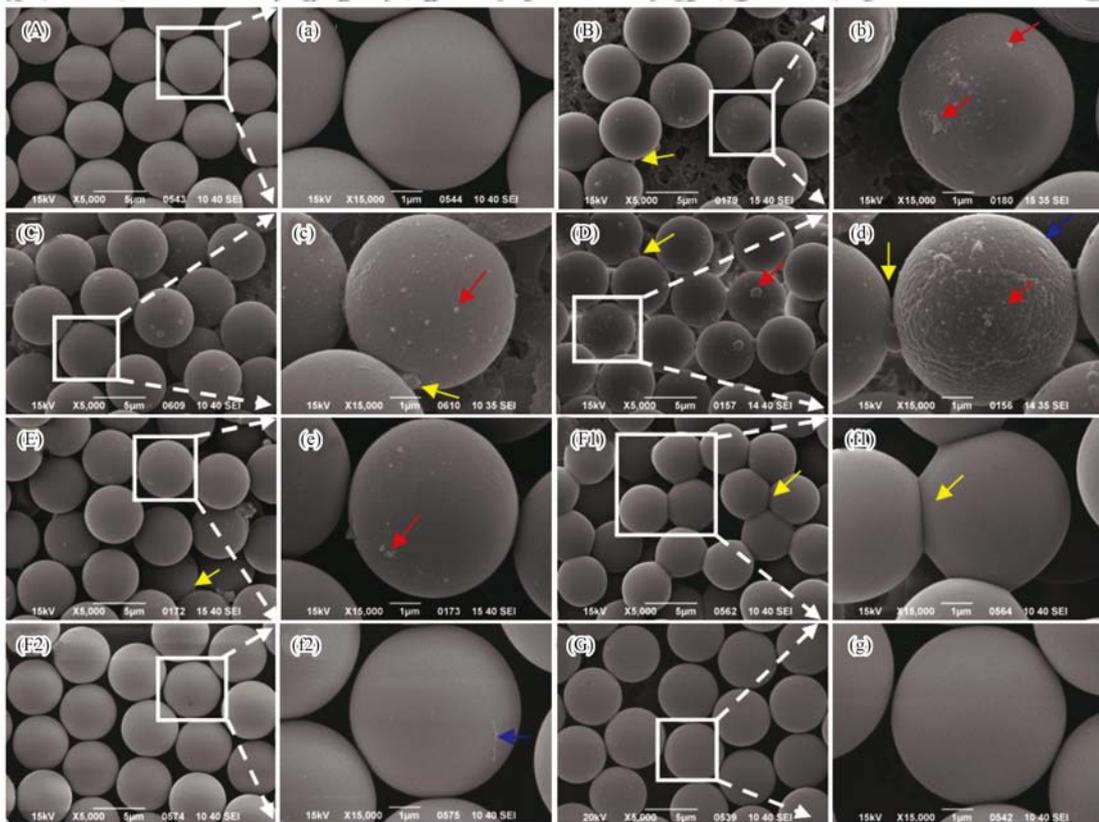
法处理后微塑料的表面形态, 结果如图 3 所示. 可以看出未经处理的微塑料(初始荧光聚苯乙烯微球)分散性好, 且塑料微球表面十分光滑[图 3(A)]. 与初始荧光聚苯乙烯微球相比经过 HNO₃[图 3(B)], HNO₃: HCl[图 3(C)]和 HNO₃: HClO₄[图 3(D)]这 3 种酸消解后的微塑料表面出现了不同程度的损伤, 包括出现气泡(红色箭头所示)、轻微的划痕以及较深的表面凹陷(蓝色箭头所示), 此外, 聚苯乙烯微球之间还出现了明显的粘连现象(黄色箭头所示). 其中, HNO₃消解后的微塑料损伤最轻, 仅在表面出现了少量的气泡. 而 HNO₃:



(a) 初始荧光聚苯乙烯微球; (b) HNO_3 ; (c) $\text{HNO}_3:\text{HCl}$; (d) $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$; (e) H_2O_2 ; (f) NaOH ; (g) KOH

图 2 不同消解方法处理后微塑料的荧光显微镜照片

Fig. 2 Fluorescence microscope photographs of microplastics treated with different digestion methods



(A) 初始荧光聚苯乙烯微球; (B) HNO_3 ; (C) $\text{HNO}_3:\text{HCl}$; (D) $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$; (E) H_2O_2 ; (F) NaOH ; (G) KOH

图 3 不同消解方法处理后微塑料的扫描电镜照片

Fig. 3 SEM images of the microplastics treated with different digestion methods

HClO₄ 消解处理后的微塑料损伤最严重, 从图 3(D) 可以看出, 消解后的微塑料出现明显的融化粘结, 导致微塑料之间大面积地团聚, 且微球表面有明显的皱缩. 强氧化剂 H₂O₂ 消解后的微塑料表面出现了少量的气泡[图 3(E)和 3(e)], 没有发现明显团聚和划痕. 而 NaOH 消解导致微塑料出现明显的团聚现象[图 3(F1)和 3(f1)]和轻微划痕[图 3(F2)和 3(f2)]. 相比之下, KOH 消解后的聚苯乙烯荧光微球仍处于均匀分散状态, 没有出现明显表面损伤、团聚等现象, 与图 3(A) 未经处理的微塑料没有明显差别.

2.3 消解液体积、温度和时间对荧光聚苯乙烯微球荧光强度变化的影响

通过前述实验结果得出 KOH 消解法是最佳消解方法, 对聚苯乙烯荧光微球的荧光强度和表面形态影响最小, 通过设置不同的消解液体积, 消解温度和消解时间进行最佳条件的筛选, 实验结果如图 4 和图 5 所示. 从图 4 可以看出在微塑料浓度较低($\leq 8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时, 荧光聚苯乙烯微球荧光强度随着消解液体积的增加稍有降低, 当微塑料浓度较高时($\geq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 不同消解液体积对荧光强度的影响没有显著差异. 随着消解温度的升高, 荧光强度先保持基本不变, 而当温度高于 70℃, 荧光强度有所降低[图 5(a)]. 温度为 50~60℃时, 消解后的聚苯乙烯荧光微球的荧光

强度仅降低了 0.3%, 与聚苯乙烯荧光微球的初始荧光强度相比几乎没有改变, 而当温度高于 70℃ 时, 荧光强度迅速降低, 相比初始荧光强度减少 3.2%~33.7%. 消解时间对荧光聚苯乙烯微球荧光强度没有显著影响[图 5(b)], 随着消解时间的延长, 荧光强度没有显著变化, 与初始荧光聚苯乙烯微球荧光强度接近, 荧光强度降低程度低于 4.9%. 在消解过程中, 温度越高反应进行越快, 同时为了使实际样品中的其他生物质能够消解完全, 故选用消解液体积 60 mL, 消解温度为 60℃ 为最佳消解条件.

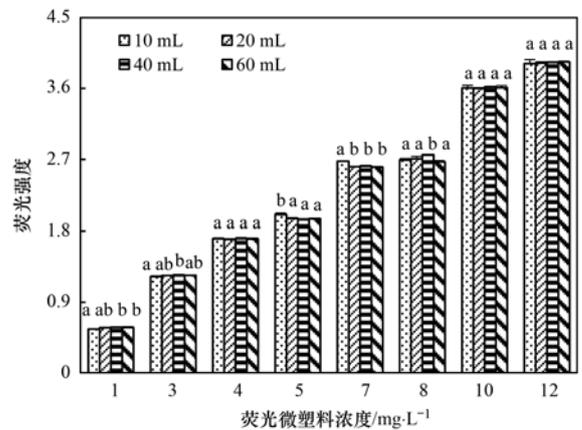


图 4 消解液体积对荧光聚苯乙烯微球荧光强度的影响
Fig. 4 Effect of the amount of the digestion reagent on the fluorescence intensities of the FMPs

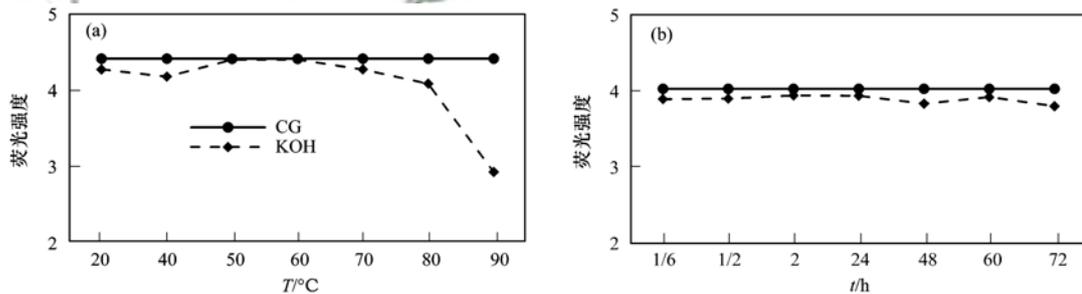


图 5 消解温度和消解时间对荧光聚苯乙烯微球荧光强度的影响

Fig. 5 Effect of the digestion temperature and duration time on the fluorescence intensities of the FMPs

2.4 KOH 消解法对生物样品中荧光聚苯乙烯微球的回收率

使用 6 种消解方法中最佳的 KOH 消解法 (60℃, 72h) 对实验室培养斑马鱼和大型蚤体内的荧光微塑料进行提取. 结果显示 KOH 可以将斑马鱼和大型蚤组织消解完全, 且对生物体内的荧光微塑料具有很高的提取效率, 提取效率分别高达 $96.3\% \pm 0.5\%$ 和 $95.6\% \pm 0.7\%$, 说明 KOH 消解法能够很好地应用于生物组织中微塑料的提取, 是一种高效可行的消解方法.

3 讨论

3.1 不同消解方法对荧光聚苯乙烯微球表面形态的影响

本研究选用了 6 种消解方法对聚苯乙烯荧光微球进行消解, 其中 KOH 消解法对微塑料的表面形态[图 3(G)]的影响最小, 而其余 5 种消解法都在一定程度上引起塑料表面损伤[图 3(B)~3(F)], 特别是在酸消解条件下, 聚苯乙烯荧光微球表面出现气泡、轻微划痕和褶皱等情况[图 3(B)~3(D)], 且颗粒之间出现明显的粘连, 可能是因为

强酸具有强氧化性和腐蚀性^[26]。Avio 等^[20]用硝酸消解鱼组织得到的微塑料提取率仅为 $4\% \pm 3\%$ ，Dehaut 等^[22]研究了不同消解方法对海产品中微塑料的提取发现使用 HNO_3 会导致微塑料出现明显降解；Claessens 等^[27]的研究发现将聚苯乙烯微塑料直接放入 HNO_3 消解液中，微塑料出现明显的融合现象，这与本研究实验现象相符合[图 3(B)~3(D)]。因此用酸进行生物样品消解时，会导致测定的微塑料含量偏低，表明酸消解不利于对生物样品中微塑料污染状况进行准确评价。已有研究使用碱性溶液包括 NaOH 和 KOH 对生物样品中的微塑料进行回收^[22, 28]，但是， NaOH 消解法对微塑料还是会造成一定的损伤，如 Cole 等^[18]的研究发现 NaOH 消解导致尼龙纤维部分损伤，并引起聚苯乙烯的融化变形，这可能是由于 NaOH 的强腐蚀性导致；Rist 等^[29]使用 NaOH ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 在 60°C 条件下消解 24 h 发现，聚苯乙烯微球出现了大量团聚现象。这与本研究的实验结果相吻合[图 3(F1)]。相反，利用 KOH 消解对微塑料的表面形态没有明显的影响，进一步证明了 KOH 消解法在对生物样品中微塑料进行定性和定量测定时的可行性和可靠性，Dehaut 等^[22]的实验结果也证实了这一点，他们发现 $100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KOH 在 60°C 条件下消解 24 h 能够有效去除生物质，而对微塑料不产生显著地影响。本研究中，生物样品中微塑料回收率实验结果同样表明 KOH 消解法是从生物样品中提取和定量荧光聚苯乙烯微球的最佳消解方法，回收率高达 $96.3\% \pm 0.5\%$ 。

3.2 不同消解方法对荧光聚苯乙烯微球荧光强度的影响

实验中聚苯乙烯荧光微球的荧光染料为 4-氯-7-硝基苯并-2-氧杂-1, 3-二唑 (NBD-Cl)，是一种常用的荧光染料，其本身不发荧光，但与胺类物质反应后会产生荧光。为了保持荧光的稳定性，一般工业生产中会将荧光染料包裹在塑料外壳的内部，以防止染料脱落。El-Emam 等^[30]的研究发现 NBD-Cl 与赖诺普利 [N -{ N -[(S)-1-羧基-3-苯丙基]- L -赖氨酸}- L -脯氨酸，含有氨基] 在碱性培养基中会产生黄色荧光物质。因此经过消解处理后的荧光聚苯乙烯微球荧光发生猝灭有以下两种可能原因：①是由于强酸 (HNO_3 , HCl 和 HClO_4)、强氧化剂 (H_2O_2) 和强碱 (NaOH) 消解法破坏了微塑料的表面结构 [图 3(B)~3(F)]，使得包裹在微塑料外壳下的荧光物质泄漏，从而降低荧光强度；②NBD-Cl 和胺类反应会生成 C—N 键，是荧光产生的基础，而有研究表明 C—N 键易受强酸的破坏，在 HNO_3 的作用

下容易发生断裂，造成荧光强度降低或者淬灭^[31]，因此使用 HNO_3 ， $\text{HNO}_3 \cdot \text{HCl}$ 和 $\text{HNO}_3 \cdot \text{HClO}_4$ 消解时可能与微塑料表面荧光物质中的 C—N 键发生反应，使得荧光减弱。

3.3 消解温度和时间对荧光聚苯乙烯微球荧光强度的影响

温度在化学实验中起着重要作用，随着温度的升高，反应物的性质会发生一些变化，从而影响实验结果^[32]。在本研究中，当温度低于 80°C 时， KOH 消解对聚苯乙烯荧光微球的荧光强度几乎没有影响 (图 5)，前人的研究中也有结果表明，使用碱在 60°C 条件下能够将生物组织消解完全，并且对微塑料产生的影响较小^[22]，与本实验的结果相一致。但当温度超过 70°C 时，荧光聚苯乙烯微球的荧光强度急剧降低，可能是由于消解温度太高，接近塑料的玻璃化温度 (95°C)，导致塑料颗粒变软并出现融合现象^[17]，使得其内部包裹的荧光染料流出，荧光强度降低。实验结果显示消解时间对 KOH 消解的荧光聚苯乙烯微球荧光强度没有明显的影响，说明 KOH 消解不受时间的影响，因此在实际应用中主要根据具体情况考虑生物组织是否消解完全来选择消解的时间。

4 结论

选取了 6 种不同消解剂对荧光聚苯乙烯微塑料进行消解，通过分析比较消解后的荧光聚苯乙烯微球荧光强度和表面形态的变化，发现 KOH 消解法效果最佳，对聚苯乙烯荧光微球影响最小，其余 5 种消解方法在不同程度上降低了聚苯乙烯荧光微球的荧光强度，不利于生物样品中微塑料的检测分析。通过控制变量对 KOH 消解法实验条件进行探究，分析不同影响因素对消解的影响，结果表明 KOH 消解法对微塑料荧光强度和表面形态影响最小，消解液体积和消解时间对 KOH 消解荧光聚苯乙烯微球没有显著影响，消解温度过高会降低荧光聚苯乙烯微球荧光强度， 60°C 为最佳消解温度。本文所研究的 6 种消解方法中 KOH 消解法对生物样品中微塑料的提取效率高达 $96.3\% \pm 0.5\%$ ，是对生物样品中微塑料进行定量化分析最合适的消解方法。

参考文献:

- [1] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304(5672): 838-838.
- [2] Margolis D, Bushman F. Persistence by proliferation? [J]. Science, 2014, 345(6193): 143-144.
- [3] 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.
- [4] Hernandez E, Nowack B, Mitrano D M. Polyester textiles as a source of microplastics from households; a mechanistic study to understand microfiber release during washing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 7036-7046.
- [5] Eriksen M, Liboiron M, Kiessling T, *et al.* Microplastic sampling with the AVANI trawl compared to two neuston trawls in the Bay of Bengal and South Pacific [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **232**: 430-439.
- [6] Gündoğdu S, Çevik C. Micro-and mesoplastics in Northeast Levantine coast of Turkey: the preliminary results from surface samples[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **118**(1-2): 341-347.
- [7] Naidu S A, Rao V R, Ramu K. Microplastics in the benthic invertebrates from the coastal waters of Kochi, Southeastern Arabian Sea [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(4): 1377-1383.
- [8] Nel H A, Dalu T, Wasserman R J. Sinks and sources: assessing microplastic abundance in river sediment and deposit feeders in an Austral temperate urban river system[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 950-956.
- [9] Alomar C, Deudero S. Evidence of microplastic ingestion in the shark *Galeus melastomus* Rafinesque, 1810 in the continental shelf off the western Mediterranean Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 223-229.
- [10] Setälä O, Fleming-Lehtinen V, Lehtiniemi M. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **185**: 77-83.
- [11] Chae Y, Kim D, Kim S W, *et al.* Trophic transfer and individual impact of nano-sized polystyrene in a four-species freshwater food chain [J]. *Scientific Reports*, 2018, **8** (1): 284.
- [12] Farrell P, Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **177**: 1-3.
- [13] Cole M, Lindeque P, Fileman E, *et al.* Microplastic ingestion by zooplankton [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(12): 6646-6655.
- [14] 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.
- [15] Jeong C B, Won E J, Kang H M, *et al.* Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-JNK and p-P38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreanus*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50** (16): 8849-8857.
- [16] Batel A, Linti F, Scherer M, *et al.* Transfer of benzo[*a*]pyrene from microplastics to *Artemia nauplii* and further to zebrafish via a trophic food web experiment: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016, **35**(7): 1656-1666.
- [17] Karami A, Golieskardi A, Choo C K, *et al.* A high-performance protocol for extraction of microplastics in fish [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 485-494.
- [18] Cole M, Webb H, Lindeque P K, *et al.* Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms [J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 4528.
- [19] Li J N, Yang D Q, Li L, *et al.* Microplastics in commercial bivalves from China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **207**: 190-195.
- [20] Avio C G, Gorbi S, Regoli F. Experimental development of a new protocol for extraction and characterization of microplastics in fish tissues; first observations in commercial species from Adriatic Sea [J]. *Marine Environmental Research*, 2015, **111**: 18-26.
- [21] Phuong N N, Zalouk-Vergnoux A, Kamari A, *et al.* Quantification and characterization of microplastics in blue mussels (*Mytilus edulis*): protocol setup and preliminary data on the contamination of the French Atlantic coast [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25** (7): 6135-6144.
- [22] Dehaut A, Cassone A L, Frère L, *et al.* Microplastics in seafood; benchmark protocol for their extraction and characterization [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **215**: 223-233.
- [23] Van Cauwenberghe L, Janssen C R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **193**: 65-70.
- [24] 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.
- [25] De Witte B, Devriese L, Bekaert K, *et al.* Quality assessment of the blue mussel (*Mytilus edulis*): comparison between commercial and wild types [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **85**(1): 146-155.
- [26] Lusher A L, Welden N A, Sobral P, *et al.* Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates [J]. *Analytical Methods*, 2017, **9**(9): 1346-1360.
- [27] Claessens M, Van Cauwenberghe L, Vandegehuchte M B, *et al.* New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, **70**(1-2): 227-233.
- [28] Karami A, Golieskardi A, Choo C K, *et al.* A high-performance protocol for extraction of microplastics in fish [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 485-494.
- [29] Rist S, Baun A, Hartmann N B. Ingestion of micro-and nanoplastics in *Daphnia magna*-quantification of body burdens and assessment of feeding rates and reproduction [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **228**: 398-407.
- [30] El-Emam A A, Hansen S H, Moustafa M A, *et al.* Determination of lisinopril in dosage forms and spiked human plasma through derivatization with 7-chloro-4-nitrobenzo-2-oxa-1,3-diazole (NBD-Cl) followed by spectrophotometry or HPLC with fluorimetric detection [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2004, **34**(1): 35-44.
- [31] Dang W R, Kubouchi M, Yamamoto S, *et al.* An approach to chemical recycling of epoxy resin cured with amine using nitric acid [J]. *Polymer*, 2002, **43**(10): 2953-2958.
- [32] Munno K, Helm P A, Jackson D A, *et al.* Impacts of temperature and selected chemical digestion methods on microplastic particles [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2018, **37**(1): 91-98.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)