

· 专论与综述 ·

环境中微塑料检测分析方法研究进展

万青云¹, 黄燕平^{2,3}, 秦嘉³, 蓝公仆^{2,3}, 安林³, 谭海曙², 许景江^{2,3*}

(1. 佛山科学技术学院机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528000; 2. 佛山科学技术学院物理与光电工程学院粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 广东 佛山 528000; 3. 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队, 广东唯仁医疗科技有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 概述了目前较为常见的微塑料检测方法, 包括目检法、光谱分析法和热分析法, 归纳分析了各种方法的技术进展、研究成果及优缺点, 指出微塑料形状、大小、聚合物种类等方面的定性、定量分析尤为重要, 能够为微塑料污染防治、溯源和影响评估提供依据。通过对现有方法的调研总结, 提出多种检测分析方法联用将成为研究微塑料的发展方向, 未来仍需要改进现有技术或者开发新的检测方法, 结合图像处理、深度学习、计算机视觉等手段, 缩短识别时间, 提高检测精度, 进而为微塑料污染防治工程提供技术支撑。

关键词: 微塑料; 检测方法; 物理表征; 化学分析; 环境污染

中图分类号: X502

文献标志码: A

文章编号: 1006-2009(2024)02-0001-06

Research Progress on Detection Methods for Microplastics in the Environment

WAN Qingyun¹, HUANG Yanping^{2,3}, QIN Jia³, LAN Gongpu^{2,3}, AN Lin³, TAN Haishu², XU Jingjiang^{2,3*}

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China; 2. Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory for Intelligent Micro-Nano Optoelectronic Technology, School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China; 3. “The Pearl River Talents Plan” of Guangdong Province for Innovation and Entrepreneurship Teams Introduction, Guangdong Weiren Meditech Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: Common microplastics detection methods, including visual inspection, spectral analysis and thermal analysis were summarized, the technical progress, research achievements, advantages and disadvantages of various methods were analyzed. It was pointed out that the qualitative and quantitative analysis of the shape, size and polymer types of microplastics were particularly important, which could provide a basis for the prevention and control of microplastic pollution, traceability and impact assessment. Through the research and summary of existing methods, it was proposed that the combination of multiple detection methods would become the development direction of microplastics research. In the future, it was still necessary to improve existing technologies or develop new detection methods, combine image processing, deep learning, computer vision and other means to reduce recognition time and improve detection accuracy, and then provide technical support for microplastic pollution prevention and control projects.

Key words: Microplastics; Detection method; Physical characterization; Chemical analysis; Environmental pollution

塑料制品由合成聚合物制成, 由于重量轻、携带方便和易于运输, 被广泛应用于各种消费、护理等产

收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2024-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62005045, 81771883, 81801746, 61975030); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2019A1515010805, 2021A1515011981); 广东省教育厅科研基金资助项目(2022ZDZX2055, 2020KTSCX130); 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队基金资助项目(2019ZT08Y105); 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室基金资助项目(2020B1212030010)

作者简介: 万青云(1998—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 研究方向为图像处理。

* 通信作者: 许景江 E-mail: xujingjiang25@qq.com

品中,成为人们日常生活的重要组成部分。然而,对塑料制品缺乏有效的收集和管理,加之其难以降解的特性,导致大量塑料垃圾被遗弃在陆地或海洋生态系统中,演变为越来越严重的环境问题。在太阳辐射、机械力和微生物等自然系统作用下,塑料垃圾会被分解成更小的颗粒——微塑料(Microplastics, MPs)。相较于大的塑料碎片,微塑料由于丰度高、降解速度慢、吸附性强、流动速度快、分布范围广,甚至可被生物摄食从而在食物链中传递,因而具有持续性的危害。根据欧洲塑料协会数据^[1],2015年全球塑料垃圾年产量为 6.0×10^7 t ~ 9.9×10^7 t,预计到2060年,该数值还将增长两倍甚至更多。累积产生的海量塑料制品造成的微塑料污染已经成为一个重要的全球性问题,直接影响地区生态环境与生物健康,微塑料污染检测分析需求也日益增长。今系统概述目前应用较为广泛的微塑料检测分析方法,对比其技术原理、研究成果和优缺点,并提出今后的研究方向,以期对微塑料污染防治提供支撑。

1 微塑料概述

微塑料的概念于2004年首次提出,其在科学上被定义为粒径 < 5 mm的塑料聚合物^[2],可分为一级微塑料颗粒(工业塑料颗粒产品或树脂颗粒)和二级微塑料颗粒(经过物理、化学等过程降解形成的塑料聚合物)^[3]。微塑料进入环境后,经过长时间的自然环境、微生物等作用,其大小、形状、颜色、颗粒密度会发生改变,作为微观水平上的存在,该非生物可降解物质会对生物和生态环境系统造成严重的危害。研究发现,人们日常接触使用的塑料食品包装上会残留可直接侵入人体或危害环境的微塑料颗粒,经测算,每吨塑料食品包装会残留 22.9 g ~ 291.3 g微塑料颗粒,以约 8.2×10^6 t的塑料食品包装年产量推算,每年至少有188 t微塑料颗粒通过食品包装被人类误食或直接排入环境中^[4]。在沙土中掺入微塑料,研究其对小麦生长的影响,发现当微塑料占比超过44.6%时,会对小麦的生长和品质产生显著影响^[5]。荷兰阿姆斯特丹自由大学的研究还发现,抽检的22份人体血液样本中有80%检出微塑料,其在血液中不仅种类多样,而且浓度存在差异^[6]。上述研究均直接或间接表明,微塑料的检测分析对于人体健康和环境保护具有重要意义。针对不同的目标需求,采用适当的检测分析方法,可以为各种环境基质中微塑

料的监测研究,以及探究其环境污染状况、生命体存活状态等热点问题提供可靠的科学信息。

2 环境中微塑料的检测分析方法

环境微塑料样品的检测分析步骤通常包括提取、分离、鉴定和定量分析。在传统检测方法中,基于肉眼视觉的人工分类法常被用于识别、分拣 2 mm ~ 5 mm范围的较大微塑料。小体积微塑料在环境中的广泛存在会诱发不良的生态效应,其特征信息难以凭借肉眼观察直接获取,需要借助多种技术手段进一步量化分析,以便能够有效地开展生态环境评估和健康监测。一般来说,微塑料的检测分析包括物理表征和化学分析两个方面,目前的主流方法有目检法、光谱分析法和热分析法。目检法利用显微镜、扫描电子显微镜(SEM)等成像技术直接识别和分析微塑料^[7];光谱分析法主要包括傅里叶变换红外光谱法(FTIR)^[8]、拉曼光谱法^[9]和高光谱成像法^[10];热分析法以热解气相色谱-质谱法^[11]为主。

2.1 目检法

2004年科研人员通过简单的人工观察筛选,首次记录并分析了夏威夷海滩上广泛分布的小型塑料碎片(1 mm ~ 15 mm),证实塑料碎片已大量存在于海洋环境中,从而引发了对水体环境塑料污染问题的关注^[12]。早期科研人员通过肉眼观察和采用镊子等工具,对尺寸较大的微塑料直接进行人工分选和鉴定,在短时间内培训志愿者完成检测任务,为大型微塑料的视觉分类和鉴定提供了一种相对简单的方法。然而,对于粒径 < 2.5 mm的颜色和形状各异的微塑料,肉眼分选常受到大量有机物或无机物的干扰。为提高肉眼分选的正确率,往往采用显微镜辅助分选,显微镜放大图像的功能有助于分析微粒表面的纹理和结构等信息,尤其是针对具有独特结构的微塑料。研究者利用复合光学显微镜分析了6组不同类群的130个浮游生物个体,平均每组检测到1个塑料颗粒,并发现此类塑料颗粒属于被检测类群最常摄入的微塑料类型^[13]。还有研究利用微塑料经尼罗红溶液染色后在荧光显微镜下会发出绿色荧光的特性,直接识别微塑料^[14]。目前的研究表明,使用显微镜对类塑料颗粒的错误识别率一般超过20%,对透明微塑料的误识率高达70%^[15-16]。外观类似微塑料的颗粒仅靠显微镜很难区分,部分特别的微塑料样品可采用

附加其他功能的先进显微镜观测。例如,扫描电子显微镜和能量色散 X 射线能谱仪联用 (SEM-EDS) 可以分析悬浮在灰尘中的微塑料元素组成信息^[17];多色相干反斯托克斯拉曼散射显微镜 (CARS) 能够使活细胞中形状、大小难以区分的微塑料和脂滴分别振动成像,同时获得聚苯乙烯 (PS) 和脂质的特异性 CARS 图像,可被应用于微塑料的细胞运输和细胞毒性研究^[18]。

与较大体积微塑料相比,小体积微塑料更需要人工干预才能精确分类。依靠人力对微塑料进行识别、分类和筛选非常耗时且低效,而且人类的肉眼视觉识别极易产生偏差,错误率高达 70%^[19]。为减少样品处理时间,全自动化工具开发方面的研究逐年增多。基于图像分析的自动识别方法对部分类型颗粒的计数、分类和测量非常有效,相关分析软件 (如 ZooImage 等) 已被成功开发^[20-22]。目前,在微塑料形态学分析中,最常见的方法是根据颗粒的大小和形态 (如纤维、颗粒状等) 进行视觉计数和分选^[22-23]。研究人员利用机器视觉和深度学习的方法^[24],结合微塑料的特征训练分类器,鉴定微塑料类别 (线性、颗粒等) 的错误率低于 4%,完成相同任务耗时不到人工分选时间的 1/2^[25]。基于研究者对微塑料样本形态特征的分类和量化,可以对其分布及产生的影响开展更加精准、客观的建模和评估^[26-28]。

2.2 光谱分析法

FTIR 是一种比较成熟的光谱分析方法,主要有 4 种不同的采样方式,即透射、漫反射、镜面反射和衰减全反射 (ATR),被应用于气、液、固等多种状态的物质分析。FTIR 实质上是测量样品的红外吸收光谱,通过与光谱数据库对比,从而区分微塑料与其他有机或无机颗粒。常规的 FTIR 仪只能获取并分析样品的红外光谱信息,而 micro-FTIR 则将 FTIR 与光学显微镜组合,对微塑料表面不同点位的红外光谱进行检测并实现可视化成像,该方法能够记录上千个被测微塑料样品的光谱,用于生成样品的化学图像^[29]。在不影响空间分辨率的情况下,基于焦平面阵列 (FPA) 和 FTIR 技术的反射成像方法可以迅速扫描更大范围的微塑料样品 (150 μm ~ 250 μm) 并提供识别结果,生成 180 万个单光谱,通过光谱相关性优化生成高质量的图像数据,再结合商业图像分析软件成功分析沙水混合样本中的微塑料^[8,30]。采用 FTIR 技术鉴定样品

时,由于样品杂质在谱图中显示的假谱带影响较大,一般要求样品纯度在 98% 以上,测定之前需要将样品提纯^[31]。此外,待测样本需要在完全干燥的环境中制备,样本中的水蒸气对红外光谱有强吸收特性,会造成微塑料中其他官能团的光谱吸收峰难以观测,导致出现误判^[32]。

拉曼光谱基于光的非弹性散射原理,属于非接触式分析方法,可以保证微塑料样品及其环境的完整性,以便开展后续分析。对于可食用样本,可利用拉曼光谱法的优点实现微塑料的非接触式检测。有调查使用该方法成功检测出 17 种不同商业食盐中的微塑料含量,而误食微塑料则可能引发不孕不育、过度肥胖、癌症等健康问题^[33-34]。拉曼光谱法激光束直径的聚焦部位通常为 0.2 mm ~ 2 mm,通过显微镜的物镜将激光束进一步聚焦至 20 μm 甚至更小,可用来检测粒径 < 20 μm 的微塑料样品^[35-36]。有研究使用拉曼光谱法检测发现,在青岛海洋沉积物中粒径 10 μm ~ 150 μm 范围的微塑料占有所有微塑料的 76%,其中粒径 < 50 μm 的颗粒数占总颗粒数的 56%^[37]。拉曼光谱法也存在一定的局限性,其信号通常较弱,易受添加剂和色素类化学物质荧光背景信号的干扰,难以准确识别掺有上述物质的微塑料^[38]。

高光谱成像是一种采集并处理包含大量不同波长信息图像的技术,其将光谱技术与成像技术相结合,通过分析空间区域内不同材料独特的光谱特征,可以检测肉眼无法辨别的物质。高光谱成像系统采集的图像涵盖宽广的波长光谱,可被细分成数十甚至数百个波段,既能获取微塑料样品的空间特征成像,也能利用不同材料的光谱指纹分析微塑料的成分^[39]。多项研究利用高光谱成像技术分析了含有微塑料、鲜叶、枯叶、岩石和干枝等不同材料的土壤样品,获得了 400 nm ~ 1 000 nm 波长范围的高光谱图像,结合使用支持向量机 (SVM)、马氏距离 (MD) 等监督分类算法,可以实现不同微塑料的识别检测^[40-41]。由于高光谱相机的目标对象为部分稍大的物体,为了更好地分析微塑料,还应提高其空间分辨率^[42]。此外,高光谱图像中含有大量冗余且相关度高的光谱信息,鉴别微塑料聚合物类型的难度较大^[10]。

2.3 热分析法

热分析法主要利用聚合物的热稳定性观测其物理和化学变化,常被用于微塑料的鉴定^[43-45]。

在无氧条件下,规定温度下产生的降解产物(热解,Py)经气相色谱(GC)分离后生成与聚合物相对应的热解色谱图,在分子层面利用质谱(MS)可以检测挥发性降解产物^[46-48]。差示扫描量热法(DSC)是一种常见的高分子材料热性能研究方法,可用来识别聚乙烯、聚丙烯等类型的微塑料颗粒^[49],通过程序控制温度,分析输入样品和参比物的功率差与温度的关系,可以识别样品中的微塑料杂质^[50]。热裂解-气相色谱/质谱联用法(Py-GC/MS)可从沉积物样本中分离出潜在的塑料颗

粒,包括且不限于聚氯乙烯、聚丙烯等^[51-52]。热分析法不仅能检测多种聚合物混合微粒,而且在定性分析纳米级塑料方面具有很大潜力。然而,该方法是一种不可逆的破坏性检测方法,无法提供被测样品数量、大小、形状等特征信息,在样品后续量化分析和回收方面存在一定的局限性。

综上所述,目前环境中微塑料的检测分析方法各有利弊,其优缺点比较见表1。单一方法难以准确鉴定微塑料的形态、尺寸、种类等多个参数,多种分析方法组合联用更加可靠。

表1 微塑料检测分析方法比较

Table 1 Comparison of detection methods for microplastics

方法	优点	局限性
显微镜	应用较为普遍,可记录微塑料的形状特征和丰度,能结合图像算法使用	耗时耗力,无法确定微塑料的成分
FTIR	可形成全面的聚合物数据库,并能结合多种优化技术,如 FPA-FTIR、micro-FTIR 等	难以分析含水量大的样品,制备检测样品时要求环境干燥
拉曼光谱	可检测尺寸 < 10 μm 的微塑料,空间分辨率达到亚微米级 (< 1 μm),在某些情况下低至 500 nm	易受微生物、有机物等污染物的荧光干扰
高光谱成像	样品不需要预处理,可快速分析土壤表面的微塑料	须提高成像分辨率,光谱信息冗余或相关度高
热分析	不受微塑料颗粒大小的影响,样品不需要预处理,能分析聚合物中多种成分	检测手段不可逆,样品无法回收,不能用于样品的物理表征

3 结语与展望

系统概述了环境中微塑料的检测分析方法,比较了目检法、光谱分析法、热分析法的优点和不足之处。微塑料的定性、定量分析包括物理特征(大小、颜色、形状)和化学特征(聚合物组成)两个方面,单一检测技术很难客观、准确地评估微塑料的整体特征。显微镜作为物理特征评估的一个重要工具,能够对大粒径的微塑料直接分析,而对粒径小至几十微米的微塑料则可以考虑结合光谱分析法或热分析法进行功能性分类。光谱分析法和热分析法虽然适用于已知特征产物和光谱的实验室样品检测,但对于复杂环境中的微塑料样本,存在检测成本高、操作难度大、耗时长等劣势。

毫米级尺度的较大型微塑料目前已有可靠的识别方法,随着其尺寸减小,识别难度加大,耗时也增加。针对微米甚至纳米级别的微塑料,可以考虑多种分析方法联用,从多方面定性、定量研究其特性,包括表面积、粗糙度、颜色等物理特征,为生物健康影响和生态系统风险评估提供参考数据。为进一步了解微塑料污染物对生态环境产生的影响,实现其来源追踪和科学防治,应改进现有方法或开

发新方法,缩短识别时间,提高检测准确率。此外,结合图像处理、深度学习、计算机视觉获得微塑料物理特征和化学性质的半自动或全自动分析方法,也为微塑料检测分析提供了一个新的方向。

[参考文献]

- [1] LEBRETON L, ANDRADY A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal [J]. Palgrave Communications, 2019, 5(1): 1-11.
- [2] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. Science, 2004, 304(5672): 838.
- [3] 李一璠, 毕然, 赵普晖, 等. 红树林环境中微塑料污染分布特征及生态风险研究进展 [J]. 生态学杂志, 2022, 41(9): 1835-1844.
- [4] FADARE O O, WAN B, GUO L H, et al. Microplastics from consumer plastic food containers: Are we consuming it? [J]. Chemosphere, 2020, 253: 126787.
- [5] QI Y L, YANG X M, PELAEZ A M, et al. Macro- and microplastics in soil-plant system: Effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*) growth [J]. Science of the Total Environment, 2018, 645: 1048-1056.
- [6] LESLIE H A, VAN VELZEN M J M, BRANDSMA S H, et al.

- Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood[J]. *Environment International*, 2022, 163: 107199.
- [7] WANG Z M, WAGNER J, GHOSAL S, et al. SEM/EDS and optical microscopy analyses of microplastics in ocean trawl and fish guts [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 603: 616–626.
- [8] CHEN Y Y, WEN D S, PEI J C, et al. Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: Current status and future prospects[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2020, 18: 14–19.
- [9] ZADA L, LESLI H A, VETHAAK A D, et al. Fast microplastics identification with stimulated Raman scattering microscopy [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2018, 49(7): 1136–1144.
- [10] SHAN J J, ZHAO J B, ZHANG Y T, et al. Simple and rapid detection of microplastics in seawater using hyperspectral imaging technology[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2019, 1050: 161–168.
- [11] ZHONG Y Y, BAO Q B, YUAN L F, et al. Analysis of microplastics in aquatic shellfish by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry after alkali digestion and solvent extraction[J]. *Polymers*, 2022, 14(18): 3888.
- [12] MCDERMID K J, MCMULLEN T L. Quantitative analysis of small-plastic debris on beaches in the Hawaiian archipelago [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(7): 790–794.
- [13] AMIN M R, SOHAIMI E S, ANUAR S T, et al. Microplastic ingestion by zooplankton in Terengganu coastal waters, southern South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 150: 110616.
- [14] 邓延慧, 万冰洲, ADYEL T M, 等. 自然环境中微塑料样品的采集与分离方法 [J]. *环境监测管理与技术*, 2020, 32(4): 1–4.
- [15] SONG Y K, HONG S H, JANG M, et al. A comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 93(1): 202–209.
- [16] HO N H E, NOT C. Selective accumulation of plastic debris at the breaking wave area of coastal waters [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 245: 702–710.
- [17] ABBASI S, KESHAVARZI B, MOORE F, et al. Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 244: 153–164.
- [18] CHOI D S, LIM S, PARK J-S, et al. Label-free live-cell imaging of internalized microplastics and cytoplasmic organelles with multi-color CARS microscopy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(5): 3045–3055.
- [19] HIDALGO-RUZ V, GUTOW L, THOMPSON R C, et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(6): 3060–3075.
- [20] BELL J L, HOPCROFT R R. Assessment of ZooImage as a tool for the classification of zooplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 2008, 30(12): 1351–1367.
- [21] DI MAURO R, CEPEDA G, CAPITANIO F, et al. Using ZooImage automated system for the estimation of biovolume of copepods from the northern Argentine Sea [J]. *Journal of Sea Research*, 2011, 66(2): 69–75.
- [22] HANVEY J S, LEWIS P J, LAVERS J L, et al. A review of analytical techniques for quantifying microplastics in sediments[J]. *Analytical Methods*, 2017, 9(9): 1369–1383.
- [23] GAUCI A, DEIDUN A, MONTEBELLO J, et al. Automating the characterisation of beach microplastics through the application of image analyses [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 182: 104950.
- [24] LORENZO-NAVARRO J, CASTRILLÓN-SANTANA M, SÁNCHEZ-NIELSEN E, et al. Deep learning approach for automatic microplastics counting and classification [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 142728.
- [25] LORENZO-NAVARRO J, CASTRILLÓN-SANTANA M, SANTE-SARTI E, et al. SMACC: A system for microplastics automatic counting and classification [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 25249–25261.
- [26] IWASAKI S, ISOBE A, KAKO S I, et al. Fate of microplastics and mesoplastics carried by surface currents and wind waves: A numerical model approach in the Sea of Japan [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 121(1/2): 85–96.
- [27] YU X B, LADEWIG S, BAO S W, et al. Occurrence and distribution of microplastics at selected coastal sites along the southeastern United States [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613: 298–305.
- [28] UZUN P, FARAZANDE S, GUVEN B. Mathematical modeling of microplastic abundance, distribution, and transport in water environments: A review [J]. *Chemosphere*, 2022, 288: 132517.
- [29] LEVIN I, BHARGAVA R. Fourier transform infrared vibrational spectroscopic imaging: Integrating microscopy and molecular recognition[J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2005, 56: 429–474.
- [30] PRIMPKE S, LORENZ C, RASCHER-FRIESENHAUSEN R, et al. An automated approach for microplastics analysis using focal plane array (FPA) FTIR microscopy and image analysis[J]. *Analytical Methods*, 2017, 9(9): 1499–1511.
- [31] 李娟, 季超, 张芹, 等. 海洋生物微塑料检测方法 & 污染现状研究进展 [J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(6): 1242–1252.
- [32] 高洪影, 申河清. 环境样品中塑料颗粒检测技术研究进展 [J]. *中国公共卫生*, 2022, 38(1): 122–128.
- [33] PEIXOTO D, PINHERIRO C, AMORIM J, et al. Microplastic pollution in commercial salt for human consumption: A review [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 219: 161–168.
- [34] KARAMI A, GOLIESKARDI A, CHOO C K, et al. The presence of microplastics in commercial salts from different countries [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 46173.
- [35] ARAUJO C F, NOLASCO M M, RIBEIRO A M P, et al. Identifi-

- cation of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects [J]. *Water Research*, 2018, 142: 426–440.
- [36] LYU L L, HE L, JIANG S Q, et al. In situ surface-enhanced Raman spectroscopy for detecting microplastics and nanoplastics in aquatic environments [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728: 138449.
- [37] LIU J, ZHANG X, DU Z F, et al. Application of confocal laser Raman spectroscopy on marine sediment microplastics [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, 38(5): 1502–1516.
- [38] VAN CAUWENBERGHE L, VANREUSEL A, MEES J, et al. Microplastic pollution in deep-sea sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 495–499.
- [39] AI W J, LIU S L, LIAO H P, et al. Application of hyperspectral imaging technology in the rapid identification of microplastics in farmland soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 151030.
- [40] JAISWAL A, BABU A R, ZADEH M Z, et al. A survey on contrastive self-supervised learning [J]. *Technologies*, 2021, 9(1): 2.
- [41] SHAN J J, ZHAO J B, LIU L F, et al. A novel way to rapidly monitor microplastics in soil by hyperspectral imaging technology and chemometrics [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 121–129.
- [42] FALTYNKOVA A, JOHNSEN G, WAGNER M. Hyperspectral imaging as an emerging tool to analyze microplastics: A systematic review and recommendations for future development [J]. *Microplastics and Nanoplastics*, 2021, 1(1): 13.
- [43] MANS A R, ZOU S. Thermogravimetric analysis of microplastics: A mini review [J]. *Environmental Advances*, 2021, 5: 100117.
- [44] MAJEWSKY M, BITTER H, EICHE E, et al. Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC) [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 507–511.
- [45] DÜMICHEN E, BARTHEL A-K, BRAUN U, et al. Analysis of polyethylene microplastics in environmental samples, using a thermal decomposition method [J]. *Water Research*, 2015, 85: 451–457.
- [46] FABBRIO D, TROMBINI C, VASSURA I. Analysis of polystyrene in polluted sediments by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatographic Science*, 1998, 36(12): 600–604.
- [47] FABBRIO D, TARTARI D, TROMBINI C. Analysis of poly(vinyl chloride) and other polymers in sediments and suspended matter of a coastal lagoon by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, 413(1): 3–11.
- [48] FABBRIO D. Use of pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry to study environmental pollution caused by synthetic polymers: a case study: the Ravenna Lagoon [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2001, 58/59: 361–370.
- [49] SOROLLA-ROSARIO D, LLORCA-PORCEL J, PÉREZ-MARTÍNEZ M, et al. Study of microplastics with semicrystal-line and amorphous structure identification by TGA and DSC [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(1): 106886.
- [50] TSUKAME T, EHARA Y, SHIMIZU Y, et al. Characterization of microstructure of polyethylenes by differential scanning calorimetry [J]. *Thermochimica Acta*, 1997, 299(1): 27–32.
- [51] FRIES E, DEKIFF J H, WILLMEYER J, et al. Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, 15(10): 1949–1956.
- [52] GOMIERO A, ØYSÆD K B, AGUSTSSON T, et al. First record of characterization, concentration and distribution of microplastics in coastal sediments of an urban fjord in south west Norway using a thermal degradation method [J]. *Chemosphere*, 2019, 227: 705–714.

· 简讯 ·

生态环境部发布 2024 年六五环境日主题

6 月 5 日是新修订的《中华人民共和国环境保护法》规定的环境日。日前,生态环境部正式发布 2024 年六五环境日主题——“全面推进美丽中国建设”。习近平总书记在 2023 年全国生态环境保护大会上强调“把建设美丽中国摆在强国建设、民族复兴的突出位置”。2024 年 1 月,《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》正式发布,对新时代新征程全面推进美丽中国建设作出系统部署。2024 年六五环境日以“全面推进美丽中国建设”为主题,旨在深入学习宣传贯彻习近平生态文明思想,引导全社会牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,动员社会各界积极投身建设美丽中国、实现人与自然和谐共生的现代化的伟大实践。2024 年六五环境日国家主场活动在广西壮族自治区南宁市举办,将通过多种形式展示新时代生态环境保护工作突出成就,培育弘扬生态文化,更广泛地动员社会各界参与生态环境保护、践行绿色生产生活方式,为全面推进美丽中国建设奠定坚实的社会基础。

2024 年 1 月,联合国环境规划署 (UNEP) 发表声明,表示 2024 年世界环境日主题活动将聚焦“土地修复、荒漠化和干旱韧性”。

摘自 <http://sthjt.jiangsu.gov.cn> 2024-03-06