

doi: 10.19969/j.fxcsxb.21073009

# 微塑料在食品中的来源及其检测技术研究进展

胡佳玲<sup>1</sup>, 张天龙<sup>2,3</sup>, 陈杰<sup>2</sup>, 林勤保<sup>1\*</sup>, 钟怀宁<sup>2\*</sup>, 穆景利<sup>4</sup>

- (1. 暨南大学包装工程研究所, 广东普通高校产品包装与物流重点实验室, 广东 珠海 519070;  
2. 广州海关技术中心, 国家食品接触材料检测重点实验室(广东), 广东 广州 510623;  
3. 昆士兰大学, 布里斯班 4072; 4. 闽江学院 海洋研究院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 为促进食品中微塑料的治理, 该文从食品中微塑料的来源、提取和分析方法等方面展开了系统综述, 并针对食品中微塑料的规范分析提出了相关建议。研究表明从食品原料到生产加工过程及食品包装材料, 都可能成为食品中微塑料污染的潜在来源。消解法是食品中微塑料提取的主要方法。目前, 对食品中微塑料进行鉴别以及定量的主流方法有目检法、傅里叶变换-红外光谱、拉曼光谱、扫描电子显微镜、热裂解/气相色谱-质谱联用法等。今后, 建议开展食品中微塑料检测的标准方法研究, 开发纳米级微塑料的光谱鉴别和定量技术。同时, 面对食品中越来越严重的微塑料污染情况, 应加强微塑料在食品生产过程中的溯源分析和控制技术研究, 加快新型材料的开发速度。

**关键词:** 微塑料; 食品安全; 傅里叶变换-红外光谱; 拉曼光谱; 扫描电子显微镜; 热裂解/气相色谱-质谱  
**中图分类号:** O657.7; O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2021)11-1672-09

## Research Progresses on Source of Microplastics in Food and Their Identification Technology

HU Jia-ling<sup>1</sup>, ZHANG Tian-long<sup>2,3</sup>, CHEN Jie<sup>2</sup>, LIN Qin-bao<sup>1\*</sup>, ZHONG Huai-ning<sup>2\*</sup>, MU Jing-li<sup>4</sup>

- (1. Key Laboratory of Product Packaging and Logistics of Guangdong Higher Education Institutes, Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai 519070, China; 2. National Reference Laboratory for Food Contact Material(Guangdong), Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou 510623, China;  
3. University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia; 4. Institute of Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In this paper, the sources, extraction and analysis methods of microplastics in food were systematically reviewed, and the related countermeasures were proposed for the research of microplastics to promote the treatment of microplastics in food. Research has shown that food raw materials, processing and packaging are all potential sources of microplastics, while digestion is the primary method to extract microplastics in food. At present, the main methods for the identification and quantification of microplastics in food include visual method, Fourier transform infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, scanning electron microscopy, pyrolysis/gas chromatography-mass spectrometry, etc. In the future, it is suggested that study on standard test method for microplastics in food should be carried out, and the spectral identification and quantitative techniques for nanoscale microplastics should be developed. Meanwhile, confronting more and more serious microplastics pollution in food, the traceability analysis and control technology research of microplastics pollution in the process of food production should be strengthened, and the development of new materials should be speeded up.

**Key words:** microplastics; food safety; Fourier transform-infrared spectroscopy; Raman spectroscopy; scanning electron microscopy; pyrolysis/gas chromatography-mass spectrometry

塑料由于密度较低、种类繁多、价格低廉以及透明性良好等, 被广泛应用于多个领域, 给人们带

收稿日期: 2021-07-30; 修回日期: 2021-08-27

\* 通讯作者: 林勤保, 博士, 研究员, 研究方向: 食品与药品包装, E-mail: 7899966@qq.com

钟怀宁, 硕士, 研究员, 研究方向: 食品接触材料检测及安全评估, E-mail: Marco\_zhong@iqtc-fcm.com

来方便的同时,也给环境造成了严重的污染,微塑料污染就是其中一类新污染。2004年,英国研究者首次提出微塑料的概念,它是指直径小于5 mm的塑料颗粒,具有不同的形态(如颗粒、泡沫、碎片、薄膜和纤维状等)和颜色(如透明、红色、黑色、蓝色等)<sup>[1-2]</sup>。Tufenkji等<sup>[3]</sup>提出直径在100 nm~5 mm之间的塑料颗粒可称为微塑料,而直径 $\leq$ 100 nm的塑料可定义为纳米塑料。该定义与环境纳米学术界对纳米材料的定义一致<sup>[4]</sup>。天然环境中发现的微塑料种类繁多、形态多样且数量庞大<sup>[5]</sup>。根据产生的途径不同,可将微塑料分为原生微塑料和次生微塑料。原生微塑料是指在人工生产过程中直接产生并最终释放到环境中的5 mm以下的塑料,如去角质皮肤清洁剂、眼影、牙膏、钢笔和塑料工业中使用的树脂颗粒等;而次生微塑料是指大尺寸的塑料产品或塑料废弃物在物理、化学和生物等作用下破碎并形成的5 mm以下的颗粒<sup>[6-7]</sup>。研究表明,一个粒径为200 mm的塑料碎片可逐步碎裂成62 500个粒径约为0.8 mm的微塑料<sup>[8]</sup>。

全球微塑料污染状况日益严峻,据估计,到2030年或2060年,亚热带汇聚区的微塑料将比现在增加2倍或者4倍<sup>[9]</sup>。目前针对微塑料的大部分研究仍集中于生态环境污染方面,如微塑料在海洋、河流、沉积物、土壤等环境下的累积,但食品中的微塑料与食品安全及人类的健康关系更为紧密。Cox等<sup>[10]</sup>的研究表明,美国人每年通过食物链和吸入途径消耗的微塑料颗粒为74 000至211 000个,研究者在人类的粪便中也发现了微塑料<sup>[11]</sup>,说明微塑料已经在食物链中沉积。微塑料对生物健康造成的危害主要体现在3个方面,首先是微塑料本身,其次是吸附在微塑料上的持久性有机污染物的释放,最后是塑料添加剂的浸出<sup>[12]</sup>。研究表明,微塑料被动物摄入体内后可以堵塞肠道,阻止食物通过,并会使动物产生饱腹感,导致生物营养不良,影响其成长、存活并造成肠道损伤<sup>[13]</sup>。微塑料具有较大的比表面积和较高的疏水性,比一般大粒径塑料更容易吸附有毒有害物质,是众多疏水性有机污染物和重金属的理想载体<sup>[14]</sup>。再者,塑料生产过程中使用的添加剂如邻苯二甲酸、双酚A、多溴联苯等均为对人体有害的物质,当微塑料进入食物链被人类食用时,上述物质也将会被释放进人体内,对人体产生毒性<sup>[15]</sup>。微塑料可能会导致诸多不良影响,如癌症、生殖功能受损、免疫反应减弱以及动物和人类的畸形<sup>[7]</sup>。因此,对食品中微塑料的研究是食品安全研究的迫切需求。为了更系统、更全面地了解食品中微塑料的特征及污染现状,本文综述了食品中微塑料的来源、提取方法及其分析方法。

## 1 食品中微塑料的来源

微塑料已经在人类世界无处不在,广泛分布。食品从原料到生产加工后经过包装供人类直接使用或摆放在货架上售卖的过程中均可能带来微塑料污染。本小节将从食品原料、食品加工生产过程以及食品包装材料3个方面探讨食品中微塑料的来源。

### 1.1 食品原料

食品原料中夹杂的微塑料是食品中微塑料的来源之一,研究者已经在数种食品原料中检测出微塑料。Cózar等<sup>[16]</sup>的研究表明,微塑料在大洋中广泛存在,多种海洋生物体内微塑料的研究在近些年呈指数上升,鱼、虾、蟹、贝作为人们日常食用的四大水产品均被证实存在微塑料污染问题<sup>[17-18]</sup>。Rochman等<sup>[19]</sup>在美国和印度尼西亚供人食用的鱼和贝类海产品中发现微塑料颗粒和纤维。同时水体中的微塑料也被频繁检出。水是食品制作不可或缺的原料,研究表明,自来水、瓶装水、饮用水、地下水中均含有微塑料<sup>[20]</sup>。其中,每升瓶装水中含有几十至几百个微塑料颗粒<sup>[21]</sup>。研究人员在全球94%的盐产品中发现微塑料,据估计,人类的盐消耗量为平均每人3.75 kg/年,仅从盐中摄入的微塑料颗粒一年即达到几百个<sup>[22]</sup>。科学家甚至在啤酒、牛奶、苹果、梨、胡萝卜、蜂蜜、糖和海菜中也发现了微塑料的存在<sup>[23-28]</sup>。

### 1.2 食品加工生产过程

食品在加工生产过程中也可能引入微塑料,如生产加工设备产生、大气环境中存在的微塑料等。加工制作食品的很多生产部件由塑料制成,在生产过程中会因摩擦、撕裂等机械作用以及紫外辐照等产生微塑料,并由加工过程带入食品中。Shruti等<sup>[27]</sup>的研究表明,牛奶在加工过程中会因超滤膜和微滤膜的磨损引入砷族聚合物。另外,大气环境中存在的微塑料也值得关注,大气中微塑料的来源包含道路灰尘(如轮胎)和合成纺织品中的纤维(如工人的衣物、工厂室内装潢等)<sup>[29]</sup>,研究者在德国汉堡、中

国上海、东莞等城市的大气沉降物中检测到微塑料<sup>[30-31]</sup>。由于质量很轻, 这些塑料微粒以“城市尘埃”的形式悬浮在空气中并通过大气沉降在食品加工或者食用过程中降落至食品表面<sup>[32]</sup>。Liebezeit 等<sup>[24]</sup>研究发现, 沉降至花朵上的大气中的微塑料是蜂蜜中微塑料的来源之一。

### 1.3 食品包装材料

近年的研究发现, 食品包装材料也会给食品造成微塑料污染<sup>[3, 21, 33]</sup>。塑料质量轻, 价格低廉, 可以承装并保护食品, 使食品在整个流通过程中免受外界空气、水分、光照、微生物等影响, 避免食品在运输、贮藏过程中因受外力挤压、冲击等导致破损、变形<sup>[34]</sup>, 在食品包装材料领域应用广泛。但在食品运输及使用过程中, 食品包装材料在保护食品的同时, 自身须承受一定的物理、化学作用, 这些因素会加剧食品包装材料产生微塑料, 其机理见图 1。目前已经确定奶瓶<sup>[35]</sup>、茶包<sup>[3]</sup>、一次性纸杯<sup>[33]</sup>、聚乙烯托盘<sup>[22]</sup>等常见的食品包装材料会在使用过程中产生并向食品中释放微塑料。Bacchetta 等<sup>[36]</sup>的研究表明, 一次性水瓶的瓶颈和瓶盖会产生聚对苯二甲酸乙二酯(Polyethylene terephthalate, PET)、高密度聚乙烯(High density polyethylene, HDPE)微塑料颗粒, 人们摄入微塑料的数目会随着打开以及扣紧一次性水瓶的次数而增加, 每打开以及扣紧水瓶 100 次, 整个瓶盖最多可产生 1 225 500 个微塑料颗粒。

综上所述, 从食品原料到生产加工过程以及食品包装材料, 都可能是食品中微塑料的来源。但从目前的研究来看, 有关食品中微塑料溯源分析的相关研究较为匮乏, 对食品中微塑料的管控应着重开展该方面的研究。

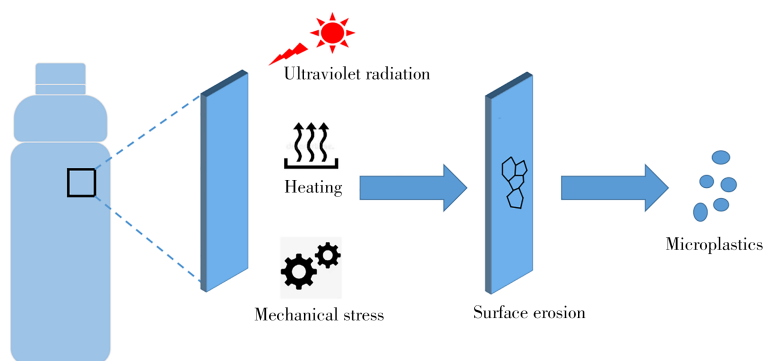


图 1 食品包装材料产生微塑料的机理图

Fig. 1 The mechanism diagram of food packaging materials producing microplastics

## 2 食品中微塑料的提取方法

食品种类繁多, 对于基质较单一的食品, 如: 饮用水、牛奶、啤酒<sup>[26-27, 36]</sup>等, 可直接取样, 无需净化处理即可检测。但对于基质复杂的食品, 如海产品和果蔬类等, 微塑料很容易隐藏在这些生物的组织中, 不易在检测过程中被发现。同时, 富集在微塑料上的食品成分会对检测仪器的信号造成干扰, 降低检测准确性。为了避免出现上述不良现象, 应根据微塑料的种类、密度、大小等选择合适的提取方法, 降低样品基质干扰。目前, 消解法是食品中微塑料提取的主要方法, 特别在提取海产品中的微塑料时应用极为广泛。

消解法通常使用酸、碱、氧化剂或酶等进行组织消解<sup>[37]</sup>。常用的酸性溶剂有 HCl、HNO<sub>3</sub>、HClO 和混合酸<sup>[38]</sup>。Desforges 等<sup>[38]</sup>在消解磷虾样品时, 使用的酸性消解溶剂为 HCl、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、HCl 与 HNO<sub>3</sub> 混合液、HCl 与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 混合液, 结果表明, 室温下, 单一溶剂均未能达到消解作用, 但在加热条件下, HNO<sub>3</sub> 可以完全溶解磷虾组织, 而混合酸溶剂则可使磷虾的组织破碎, 表明消解条件不同会产生不同的消解效果。Foekema 等<sup>[39]</sup>使用含 10% KOH 的碱性溶液提取鱼肠道内的微塑料, 经过 2~3 周发现鱼的肠道可被消解。Yang 等<sup>[40]</sup>在检测中国市场收集的 15 种食用盐时, 使用 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 将食用盐在 65 °C 下消解 24 h, 并在室温下消解 48 h 后, 可有效去除有机杂质。Cole 等<sup>[41]</sup>对比了不同浓度的酸(HCl)、碱(KOH)、酶(蛋白酶-K)对浮游动物的消解情况。结果表明, 蛋白酶-K 可在不破坏微塑料的情况下进行有效提取。

消解法是一种操作简单、成本低廉的微塑料提取方法, 但较为耗时, 消解过程中也可能引入其它

杂质, 如反应产物<sup>[17]</sup>。此外, 不同样品具有不同的耐化学性, 在消解时应根据样品的差异性选择合适的消解溶剂、温度和时间, 同时还要注意所选消解条件应尽量不要破坏样品中的微塑料。

### 3 食品中微塑料的分析方法

目前, 对食品中微塑料进行鉴别以及定量的主流方法有目检法、傅里叶变换-红外光谱法、拉曼光谱法、扫描电子显微镜法、热裂解/气相色谱-质谱联用法等, 如表 1 所示。

表 1 微塑料检测技术

Table 1 Detection technologies of microplastics

Detection method	Advantage	Disadvantage	Particle size in length
Visual method <sup>[42-44]</sup>	Easily operate, low cost	Easily produce errors and cause misjudgment	Can detect microplastic particle of 1-5 mm with the naked eye, plastic particle in micron level need to be viewed with a microscope
Fourier transform - infrared spectroscopy <sup>[3, 17, 45]</sup>	Non-destructive method and the sample can be qualitative	Long detection time, water, carbon dioxide and organic impurities may affect the results	Greater than 20 $\mu\text{m}$
Raman spectroscopy <sup>[46-49]</sup>	Non-destructive method, not obvious interference with water	Long detection time, may have fluorescent interference, may result in polymer degradation	Greater than 1 $\mu\text{m}$
Scanning electron microscopy <sup>[17, 50]</sup>	High resolution, can see the surface morphology of the sample	Non-qualitative method	Greater than 20 nm
Pyrolysis/gas chromatography - mass spectrometry <sup>[37, 42, 51-54]</sup>	Direct injection, low injection amount, can determine the concentration and type of surface attachments and chemical additives for microplastics	Destructive method, highly demand the experimental conditions, cannot obtain the number and size distribution of microplastics	No specific requirements, too small particle may lead to misjudgment

#### 3.1 目检法

目检法是指通过肉眼或者借助光学显微镜放大来观察的方法, 主要依据微塑料的透明性、颜色、形状和硬度等特征进行鉴别并分类<sup>[42]</sup>。粒径 1~5 mm 范围内的微塑料可以通过肉眼筛选, 尺寸为微米级的则需要借助显微镜进行观察<sup>[43]</sup>。目检法是微塑料分析最简单、成本最低的办法, 能在短时间内统计出微塑料的总体含量情况。对于粒径较大的微塑料(0.3~5 mm), 使用类型、形状和颜色作为标准进行视觉分类是最常用的方法之一。

另外, 通过荧光染色法对微塑料进行染色标记, 使其具有荧光特性, 再借助荧光显微镜进行观察计数, 可使计数更加容易<sup>[55]</sup>。尼罗红是一种脂溶性荧光染料, 可作为微塑料定性和定量的染色剂。这种标记法操作便捷、简单, 但由于尼罗红会同时标记天然有机物, 易造成误判, 导致统计数目偏高。因此, 尼罗红标记法不能单独使用, 使用前需对样品进行前处理, 排除杂质干扰<sup>[46]</sup>。

目检法虽然简单、易操作, 但其准确度不高, 无法对样品进行准确定性。该方法受限于微塑料粒径大小, 观察错误率达 70%, 且误差随着塑料微粒尺寸的减小而增大<sup>[44]</sup>。该方法中, 形态特征(如形状、颜色和表面纹理)是确定可疑颗粒是否为微塑料的主要依据, 方法准确度较低, 存在诸多不可靠性, 易因观察者的视觉误差而造成误判。

因此, 目检法在检测过程中经常与傅里叶变换-红外光谱、拉曼光谱法或热裂解/气相色谱-质谱法结合进行分析, 以提高微塑料鉴定的准确性。

#### 3.2 傅里叶变换-红外光谱法(FT-IR)

傅里叶变换-红外光谱法(Fourier transform - infrared spectroscopy, FT-IR)是最普遍的微塑料光谱分析方法。红外光谱技术通过分子间的振动来识别分子结构, 当未知物质被一束具有连续波长的红外光照射时, 特定频率的红外光将被吸收。由于材料不同, 各个分子间作用力以及官能团所具有的特征吸收峰均不一致, 不同物质表现出不同的红外光谱, 因此红外光谱可以作为微塑料识别的指纹图谱<sup>[37]</sup>。

FT-IR 具有不破坏样品、前处理简单、能够准确定性聚合物的优点, 因此被广泛应用于微塑料的检测。FT-IR 有反射、透射和衰减全反射(Attenuate total reflection, ATR)3 种模式, 三者均可用

于微塑料的检测。应用透射模式可以得到高质量的红外光谱,但需要红外滤光片<sup>[47,56]</sup>,分析材料需足够透明、轻薄,使得红外光能将其穿透;而反射模式可以高效地分析具有一定厚度和不透明的样品,但不规则样品可能会由于折射误差产生不可解释的红外光谱图<sup>[57]</sup>。ATR利用塑料的特异性红外光谱进行识别,适用于不规则微塑料的鉴定,可对大于100 μm的微塑料样品进行有效分析<sup>[58]</sup>。Tufenkji等<sup>[3]</sup>使用FT-IR发现一个塑料茶包在95℃水下浸泡可释放出约116亿的微塑料以及31亿的纳米塑料。

如前文所述,在食品的微塑料检测中,经常会出现需要在大量未知颗粒中筛选微塑料的情况,为了应对这种检测需求,快速的颗粒筛选及光谱采集方法越来越引起研究者的重视。随着检测技术的不断发展,基于焦平面阵列的显微傅里叶变化-红外光谱法(Micro-Fourier transform-infrared spectroscopy, Micro-FT-IR)也逐渐被应用于微塑料鉴定。这种技术通过一次测量既能快速采集一个区域内的上千个光谱,极大地缩短了分析时间。将显微镜与红外光谱仪耦合,能够更好地提高空间分辨率,实现在采集场内景物图像的同时获得每个像元的红外光谱图<sup>[59]</sup>,测定到的塑料颗粒最小粒径可达10 μm,适合检测微塑料样品。Micro-FT-IR允许在反射、透射以及ATR模式下检测微塑料,可以更准确地评估样品中单个颗粒的光谱,该方法可对整个检测区域的微塑料进行详细且准确的高通量筛选<sup>[17,59]</sup>,也可以代替肉眼对微塑料进行定量分析,极大地提高了检测的准确性<sup>[37]</sup>。

但红外信号易受水分及有机杂质影响,进行红外分析的样品必须为干样品。且FT-IR只适用于分析有红外吸收的物质,不适用分析粒径小于20 μm的微塑料。对于粒径小于20 μm的粒子,其红外信号易受周围粒子或者环境的干扰,从而影响定性效果。

### 3.3 拉曼光谱法(Raman)

拉曼光谱法(Raman)是另一种检测微塑料的光谱技术。该方法是一种基于光的非弹性散射的振动技术,以振动光谱的形式提供系统分子振动的信息<sup>[37]</sup>。当激发光照射到样品上时,分子振动使激发光发生非弹性散射并产生拉曼位移,从而得到物质的特征拉曼光谱<sup>[17]</sup>,将得到的拉曼光谱图与谱库中的标准谱图进行比较即可确定物质的类型。激发波长越短,拉曼光谱的空间分辨率越高,在检测微塑料时激发光的波长选择紫外-可见波段可使分辨率提高到微米级别<sup>[47]</sup>。

与Micro-FT-IR类似,显微拉曼(Micro-Raman)是将拉曼光谱和显微镜结合在一起,利用塑料的特征拉曼光谱对其进行识别的技术<sup>[21]</sup>。显微拉曼可以绘制整个样品区域图像,从而快速确定微塑料的尺寸及数目,并对聚合物进行定性分析<sup>[43]</sup>。

在分析微塑料时,拉曼光谱具有无破坏性、对水的干扰不明显、可分析深色不透明颗粒等显著优势,因此应用广泛<sup>[46]</sup>。对拉曼光谱的深入研究将会极大推动微塑料检测技术的发展。与FT-IR相比,拉曼光谱显示出更好的空间分辨率,其最低检出限可达到1 μm,而FT-IR的最低检出限为10~20 μm<sup>[47,49,60-61]</sup>。虽然两者在检测20 μm以上的微塑料时准确度相近,但FT-IR检测11~20 μm范围内的微塑料时有40%的误差,对于5~10 μm范围内的微塑料则几乎检测不到<sup>[43]</sup>。

拉曼光谱主要的缺点是有荧光特性的杂质会产生干扰,影响样品的检测结果<sup>[48]</sup>。由于该方法使用激光作为光源会导致样品温度升高,造成聚合物降解,因此在检测过程中应优化仪器参数,从低激光功率开始扫描以避免该情况的发生。同时,拉曼光谱不能高效鉴定纤维以及有色素的粒子<sup>[62]</sup>。除此之外,拉曼光谱还有测量时间相对较长以及信噪比低等不足。

### 3.4 扫描电子显微镜法(SEM)

扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)可通过聚焦电子束扫描表面产生微塑料图像,获得高清晰度和高放大倍数的微塑料表面特征图像,从而为区分微塑料及类似物提供极大的便利<sup>[17]</sup>。SEM的分辨率更高,成像比传统的光学显微镜更加清晰,最小检测粒径可至20 nm<sup>[50]</sup>。虽然可借助SEM观察微塑料的表面形貌,但单纯使用SEM无法获得样品的颜色信息,并且扫描电镜在早期制备中需要其他涂层,可能导致对微塑料表面纹理和颜色的识别不准确<sup>[63]</sup>。此外,SEM不能对微塑料进行定性分析,很容易产生误判。将扫描电子显微镜与能量色散X射线(Scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer, SEM-EDS)耦合使用,可有效避免这种弊端。SEM-EDS的优点是可以分析微小区域的目标物质,适用于微塑料的定性分析。SEM-EDS也可基于微塑料表面被激发后发射

出特征 X 射线的衍射和反射，在观察材料微观形貌的同时，快速分析材料表面微区的元素分布情况<sup>[51, 64]</sup>。

### 3.5 热裂解/气相色谱 – 质谱联用法 (pyr/GC – MS)

热裂解/气相色谱 – 质谱 (Pyrolysis/gas chromatography – mass spectrometry, pyr/GC – MS) 联用是分析聚合物成分的常用技术<sup>[65]</sup>。pyr/GC – MS 是在程序控制温度下测量样品的性质随温度或时间变化的一类技术<sup>[66]</sup>，其原理是在惰性环境中以可预测的方式分解聚合材料，将生成的聚合物片段根据其大小和极性差异进行色谱分离，并在气相色谱柱出口串联质谱检测器进行分析<sup>[37]</sup>。对于食品样品等复杂成分，该技术的高分离度及灵敏度可以实现样品中微塑料成分的准确鉴定。pyr/GC – MS 可在对样品中的微塑料进行定性和定量的同时，识别其它的聚合物种类和相关的有机塑料添加剂的类型，具有样品用量少、可直接进样等优点<sup>[51-52]</sup>，但方法具有破坏性，实验条件控制要求高<sup>[42]</sup>，且不能得到微塑料的数目和尺寸分布信息。与其它方法相比，pyr/GC – MS 方法可直接得到化合物的浓度，适用于鉴定聚合物及其降解产物，也有利于微塑料与添加剂的分离，从而进一步识别微塑料的添加剂成分以及吸附物<sup>[37, 51, 53-54]</sup>。

## 4 总结及展望

检测微塑料时需重点考虑两方面因素，一是物理特性即颜色、尺寸和形状，二是化学特性即聚合物的化学类型<sup>[43]</sup>。现有的微塑料检测技术各有千秋，不能使用单一方法对微塑料进行全面表征。目检法是检测微塑料成本最低、最易操作的方法，但由于食品中微塑料的粒径较小，使用这种方法会产生很大误差，容易造成误判或漏判，因此，该方法不适于单独分析食品中的微塑料，应与其它仪器配合使用增加检测的准确性。

傅里叶变换 – 红外光谱法、拉曼光谱法、扫描电子显微镜法等虽然可以实现微塑料物理特性的表征，但无法对微塑料的添加剂以及附着物进行定性分析。热裂解/气相色谱 – 质谱联用法能够对样品及其添加剂进行化学表征，但具有破坏性且无法获得微塑料的物理特征。因此对于食品中微塑料的检测，应将多种方法有机结合，准确测定微塑料的物理和化学特性。

目前国内外关于微塑料方面的研究方兴未艾，食品中微塑料的研究仍有许多问题亟待解决。未来关于食品中微塑料的研究应重点关注以下几个方面，包括：

(1) 建立检测食品中微塑料的标准方法。国内外对于微塑料的研究大部分集中于海洋、河流、沉积物、土壤等方面，食品中微塑料的检测至今没有公认的准确方法，这导致各项研究之间没有对比性，同一样品的研究结果差异较大，给相关部门监管食品中的微塑料污染带来巨大挑战。食品中微塑料的检测关乎人类健康，因此，在今后应根据微塑料的形状、颗粒大小、成分等建立统一的定量及分析鉴定方法。

(2) 加强微塑料在食品生产过程中的溯源分析。从目前的研究来看，食品原料、食品生产加工过程以及食品包装都可能会导致微塑料污染，但是关于食品中微塑料溯源分析的研究很匮乏。因此，今后的研究也应着重关注食品微塑料的来源，以控制食品中微塑料的数量。

(3) 加强纳米塑料的鉴别、定量方法的研究。现行检测微塑料的光谱法的最小可定性粒径仅为 1  $\mu\text{m}$ ，但微塑料在生物降解、机械摩擦、化学风化、热作用力等各种外力作用下会不断被破碎为更细小的颗粒，最终形成纳米塑料<sup>[16]</sup>。有研究表明，在检测化妆品和海水中的纳米级微塑料时，可先采用动态光散射法确定样品中存在的纳米粒子，再利用傅里叶变换红外光谱和热裂解/气相色谱 – 质谱联用法实现定性分析，但在检测前需对样品进行浓缩、纯化，只有在较高浓度的基础上才能获得可靠的定性结果<sup>[67-68]</sup>。在食品领域，对纳米微塑料进行成功定性的研究罕有报道，因此，应大力推进与纳米塑料尺寸相符的分析方法。

(4) 加快新型材料的开发速度。塑料制品是微塑料的唯一来源，为了减少微塑料的产生，各国应当严格控制塑料制品的使用量，加快开发绿色材料，如：植物纤维制品。植物纤维原料在使用后可完全自然降解，具有代替石油基塑料产品的潜能<sup>[69-71]</sup>。因此，研究者应投入更多的精力来开发新型环保材料，使用这些材料代替塑料制品，从源头上杜绝微塑料的产生。

## 参考文献:

- [1] Wagner M, Scherer C, Alvarez-Munoz D, Brennholt N, Bourrain X, Buchinger S, Fries E, Grosbois C, Klasmeier J, Marti T, Rodriguez-Mozaz S, Urbatzka R, Vethaak A D, Winther-Nielsen M, Reifferscheid G. *Environ. Sci. Eur.*, **2014**, 26(1): 1-9.
- [2] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, Davis A, Rowland S J, John A W, Mcgonigle D, Russell A E. *Science*, **2004**, 304(5672): 838.
- [3] Hernandez L M, Xu E G, Larsson H C E, Tahara R, Maisuria V B, Tufenkji N. *Environ. Sci. Technol.*, **2019**, 53(21): 12300-12310.
- [4] OECD. Nanosafety at the OECD: The First Five Years 2006-2010. [2021-7-10]. <https://nanopinion.archiv.zsi.at/en/reading-material/nanosafety-oecd-first-five-years-2006-2010.html>.
- [5] Zeng Y P. *Introduction to Environmental Microplastics*. Beijing: Science Press(曾永平. 环境微塑料概论. 北京: 科学出版社), **2020**: 5.
- [6] Peng L C, Fu D D, Qi H Y, Lan C Q, Yu H M, Ge C J. *Sci. Total Environ.*, **2020**, 698: 134254.
- [7] Auta H S, Emenike C U, Fauziah S H. *Environ. Int.*, **2017**, 102: 165-176.
- [8] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, Thiel M, Moore C J, Borerro J C, Galgani F, Ryan P G, Reisser J. *PLOS ONE*, **2014**, 9(12): e111913.
- [9] Isobe A, Iwasaki S, Uchida K, Tokai T. *Nat. Commun.*, **2019**, 10(1): 1-13.
- [10] Cox K D, Covernton G A, Davies H L, Dower J F, Juanes F, Dudas S E. *Environ. Sci. Technol.*, **2019**, 53(12): 7068-7074.
- [11] Schwabl P, Köppel S, Königshofer P, Bucsics T, Trauner M, Reiberger T, Liebmann B. *Ann. Intern. Med.*, **2019**, 171(7): 453-457.
- [12] Bouwmeester H, Hollman P C H, Peters R J B. *Environ. Sci. Technol.*, **2015**, 49(15): 8932-8947.
- [13] von Moos N, Burkhardt-Holm P, Köhler A. *Environ. Sci. Technol.*, **2012**, 46(20): 11327-11335.
- [14] Shen M C, Zhu Y, Zhang Y X, Zeng G M, Wen X F, Yi H, Ye S J, Ren X Y, Song B. *Mar. Pollut. Bull.*, **2019**, 139(2): 328-331.
- [15] Teuten E L, Saquing J M, Knappe D R U, Barlaz M A, Jonsson S, Björn A, Rowland S J, Thompson R C, Galloway T S, Yamashita R, Ochi D, Watanuki Y, Moore C, Viet P H, Tana T S, Prudente M, Boonyatumanond R, Zakaria M P, Akkhavong K, Ogata Y, Hirai H, Iwasa S, Mizukawa K, Hagino Y, Imamura A, Saha M, Takada H. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **2009**, 364(1526): 2027-2045.
- [16] Cózar A, Echevarria F, Gonzalez-Gordillo J I, Irigoien X, Ubeda B, Hernandez-Leon S, Palma A T, Navarro S, Garcia-De-Lomas J, Ruiz A, Fernandez-De-Puelles M L, Duarte C M. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **2014**, 111(28): 10239-10244.
- [17] Wang C, Zhang D J, Huang H, Zhang L L, Zhang C F, Shao Q J. *J. Food Saf. Qual.* (王超, 张德钧, 黄慧, 张雷蕾, 章春芳, 邵庆均. 食品安全质量检测学报), **2018**, 9(11): 2678-2683.
- [18] Xu C N, Zhang Y, Yuan Q, Jiang M, Zheng L, Sui Y M, Mu J L, Wang Y L, Wang C H. *Mar. Fish.* (许彩娜, 张悦, 袁骥, 蒋玫, 郑亮, 隋延鸣, 穆景利, 王云龙, 王翠华. 海洋渔业), **2019**, 41(5): 631-640.
- [19] Rochman C M, Tahir A, Williams S L, Baxa D V, Lam R, Miller J T, Teh F, Werorilangi S, Teh S J. *Sci. Rep.*, **2015**, 5(1): 14340.
- [20] Lehner R, Weder C, Petri-Fink A, Rothen-Rutishauser B. *Environ. Sci. Technol.*, **2019**, 53(4): 1748-1765.
- [21] Schymanski D, Goldbeck C, Humpf H, Fürst P. *Water Res.*, **2018**, 129: 154-162.
- [22] Lee H, Kunz A, Shim W J, Walther B A. *Sci. Rep.*, **2019**, 9(1): 10145.
- [23] Liebezeit G, Liebezeit E. *Pol. J. Food Nutr. Sci.*, **2015**, 65(2): 143-147.
- [24] Liebezeit G, Liebezeit E. *Food Addit. Contam. A*, **2013**, 30(12): 2136-2140.
- [25] Oliveri C G, Ferrante M, Banni M, Favara C, Nicolosi I, Cristaldi A, Fiore M, Zuccarello P. *Environ. Res.*, **2020**, 187: 109677.
- [26] Liebezeit G, Liebezeit E. *Food Addit. Contam. A*, **2014**, 31(9): 1574-1578.
- [27] Kutralam-Muniasamy G, Pérez-Guevara F, Elizalde-Martínez I, Shruti V C. *Sci. Total Environ.*, **2020**, 714: 136823.
- [28] Li Q P, Feng Z H, Zhang T, Ma C Z, Shi H H. *J. Hazard. Mater.*, **2020**, 388: 122060.

- [29] Conkle J L, Báez Del Valle C D, Turner J W. *Environ. Manage.*, **2018**, 61(1): 1–8.
- [30] Klein M, Fischer E K. *Sci. Total Environ.*, **2019**, 685: 96–103.
- [31] Liu C G, Li J, Zhang Y L, Wang L, Deng J, Gao Y, Yu L, Zhang J J, Sun H W. *Environ. Int.*, **2019**, 128: 116–124.
- [32] Zhang J J, Chen Y H, Wang X X, Ni X H, Liu D S, Li L X, Zou G Y. *Chin. J. Eco-Agric.* (张佳佳, 陈延华, 王学霞, 倪小会, 刘东生, 李丽霞, 邹国元. 中国生态农业学报), **2021**, 29(6): 937–952.
- [33] Ranjan V P, Joseph A, Goel S. *J. Hazard. Mater.*, **2021**, 404(B): 124118.
- [34] Fu L Y, Wang R, Zhang Y L. *Packag. Food Mach.* (付露莹, 王锐, 张有林. 包装与食品机械), **2018**, 36(1): 51–55.
- [35] Li D Z, Shi Y H, Yang L M, Xiao L W, Kehoe D K, Gun Ko Y K, Boland J J, Wang J J. *Nat. Food*, **2020**, 1(11): 746–754.
- [36] Winkler A, Santo N, Ortenzi M A, Bolzoni E, Bacchetta R, Tremolada P. *Water Res.*, **2019**, 166: 115082.
- [37] Zhou D Q, Lü S W, Liu N, Li N. *Chin. Fish. Qual. Stand.* (周德庆, 吕世伟, 刘楠, 李娜. 中国渔业质量与标准), **2020**, 10(3): 60–68.
- [38] Desforgues J P, Galbraith M, Ross P S. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **2015**, 69(3): 320–330.
- [39] Foekema E M, De Gruijter C, Mergia M T, van Franeker J A, Murk A J, Koelmans A A. *Environ. Sci. Technol.*, **2013**, 47(15): 8818–8824.
- [40] Yang D Q, Shi H H, Li L, Li J N, Jabeen K, Kolandhasamy P. *Environ. Sci. Technol.*, **2015**, 49(22): 13622–13627.
- [41] Cole M, Webb H, Lindeque P K, Fileman E S, Halsband C, Galloway T S. *Sci. Rep.*, **2015**, 4(1): 1–8.
- [42] Luo Y M. *Methods for the Collection, Separation, and Analysis of Microplastics in Oceans and Coasts*. Beijing: Science Press(骆永明. 海洋和海岸中微塑料的采集、分离和分析方法. 北京: 科学出版社), **2019**: 45.
- [43] Wang J H, Liang R N, Qin W. *Mar. Sci. Bull.* (王俊豪, 梁荣宁, 秦伟. 海洋通报), **2019**, 38(6): 601–612.
- [44] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, Thiel M. *Environ. Sci. Technol.*, **2012**, 46(6): 3060–3075.
- [45] Wang J Y, Zhang W W, Mu J L, Zhang S F, Qu L, Wang Y. *Bull. Chin. Acad. Sci.* (王菊英, 张微微, 穆景利, 张守锋, 曲玲, 王莹. 中国科学院院刊), **2018**, 33(10): 1031–1041.
- [46] Li J Y, Liu H H, Chen P J. *Water Res.*, **2018**, 137: 362–374.
- [47] Huppertsberg S, Knepper T P. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2018**, 410(25): 6343–6352.
- [48] Cole M, Lindeque P, Fileman E, Halsband C, Goodhead R, Moger J, Galloway T S. *Environ. Sci. Technol.*, **2013**, 47(12): 6646–6655.
- [49] Wagner M, Lambert S. *Freshwater Microplastics: Emerging Environmental Contaminants?* Cham: Springer Open, **2018**: 51–67.
- [50] Wang K, Lin K D, Yuan D X. *Environ. Chem.* (王昆, 林坤德, 袁东星. 环境化学), **2017**, 36(1): 27–36.
- [51] Fries E, Dekiff J H, Willmeyer J, Nuelle M, Ebert M, Remy D. *Environ. Sci.: Processes Impacts*, **2013**, 15(10): 1949–1956.
- [52] Fischer M, Scholz-Böttcher B M. *Environ. Sci. Technol.*, **2017**, 51(9): 5052–5060.
- [53] Nuelle M, Dekiff J H, Remy D, Fries E. *Environ. Pollut.*, **2014**, 184: 161–169.
- [54] Dekiff J H, Remy D, Klasmeier J, Fries E. *Environ. Pollut.*, **2014**, 186: 248–256.
- [55] Erni-Cassola G, Gibson M I, Thompson R C, Christie-Olea J A. *Environ. Sci. Technol.*, **2017**, 51(23): 13641–13648.
- [56] Ojeda J J, Romero-González M E, Banwart S A. *Anal. Chem.*, **2009**, 81(15): 6467–6473.
- [57] Harrison J P, Ojeda J J, Romero-González M E. *Sci. Total Environ.*, **2012**, 416: 455–463.
- [58] Schymanski D, Oßmann B E, Benismail N, Boukerma K, Dallmann G, von der Esch E, Fischer D, Fischer F, Gil-liland D, Glas K, Hofmann T, Käßler A, Lacorte S, Marco J, Rakwe M E, Weisser J, Witzig C, Zumbülte N, Ivleva N P. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2021**, doi: 10.1007/s00216-021-03498-y.
- [59] Tagg A S, Sapp M, Harrison J P, Ojeda J J. *Anal. Chem.*, **2015**, 87(12): 6032–6040.
- [60] Käßler A, Fischer D, Oberbeckmann S, Schernewski G, Labrenz M, Eichhorn K, Voit B. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2016**, 408(29): 8377–8391.
- [61] Klein S, Dimzon I K, Eubeler J, Knepper T P. *Analysis, Occurrence, and Degradation of Microplastics in the Aqueous Environment*, in: Wagner M, Lambert S. *Freshwater Microplastics*. Cham: Springer, **2018**: 51–67.



- [62] Dehaut A, Hermabessiere L, Duflos G. *Trends Anal. Chem.*, **2019**, 116: 346–359.
- [63] Shim W J, Hong S H, Eo S E. *Anal. Methods*, **2017**, 9(9): 1384–1391.
- [64] Sun J, Dai X H, Wang Q L, van Loosdrecht M C M, Ni B J. *Water Res.*, **2019**, 152: 21–37.
- [65] Tsuge S, Ohtani H, Watanabe C. *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **2012**, 96: 1.
- [66] Zhang Y K, Fan L, Xie F, Zhou M Y, Guan J, Gao G L. *Sichuan Environ.* (张宇恺, 樊丽, 谢帆, 周明远, 关杰, 高桂兰. 四川环境), **2021**, 40(2): 246–253.
- [67] Ter Halle A, Jeanneau L, Martignac M, Jardé E, Pedrono B, Brach L, Gigault J. *Environ. Sci. Technol.*, **2017**, 51(23): 13689–13697.
- [68] Hernandez L M, Yousefi N, Tufenkji N. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2017**, 4(7): 280–285.
- [69] Liu C, Luan P C, Li Q, Cheng Z, Sun X, Cao D X, Zhu H L. *Matter*, **2020**, 3(6): 2066–2079.
- [70] Lynd L R, Weimer P J, van Zyl W H, Pretorius I S. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, **2002**, 66(3): 506–577.
- [71] Yin F W, Sun X L, Zhang P, Shen B X, Fu Y Q. *Chin. J. Bioprocess Eng.* (尹丰伟, 孙小龙, 张平, 沈宝星, 付永前. 生物加工过程), **2021**, 19(4): 1–8.

(责任编辑: 盛文彦)