

食品中微/纳米塑料检测的基质差异化问题及 对策研究进展

肖金林, 苏宇*

(环境医学工程教育部重点实验室, 东南大学 公共卫生学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 微/纳米塑料(MNPs)已在多类食品中检出, 其膳食暴露及潜在健康风险备受关注。食品基质差异明显, 易干扰MNPs分离分析, 影响检测结果可靠性与暴露评估准确性。该文系统梳理了食品MNPs检测中样品消解、分离富集、鉴定定量等关键流程, 比较了饮用水与饮料、水产品、乳制品、植物源性食品、食盐及加工食品等典型基质的干扰特征及检测策略。分析表明, 食品MNPs检测的难点在于平衡基质去除与颗粒回收; 目前研究仍以微米级颗粒为主, 纳米塑料的富集、识别和定量仍是主要瓶颈。未来应建立基于基质成分的组合式前处理体系, 完善标准品、空白控制、回收率评价和规范化报告, 为来源解析、膳食暴露评估和健康风险评估提供方法支撑。

关键词: 微/纳米塑料; 食品基质; 样品前处理; 鉴定与定量; 膳食暴露

中图分类号: O657; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)07-0001-09

Research Progress on Matrix-specific Challenges and Analytical Strategies for the Detection of Micro- and Nanoplastics in Food

XIAO Jin-lin, SU Yu*

(School of Public Health, Southeast University, Key Laboratory of Environmental Medicine and Engineering, Ministry of Education, Nanjing 210009, China)

Abstract: Micro- and nanoplastics (MNPs) have been detected in a wide range of food products, raising concerns about dietary exposure and potential risks to human health. Their analysis in food remains challenging because food matrices vary greatly in composition and complexity. Proteins, lipids, carbohydrates, minerals, pigments, and natural particles may interfere with particle separation, polymer identification, and quantification, thereby affecting the reliability and comparability of analytical results as well as the accuracy of exposure assessment. This review summarizes the key procedures for MNPs detection in food, including sample digestion, separation and enrichment, identification, quantification, and quality control. It further compares matrix-specific interferences and analytical strategies for representative food categories, such as drinking water and beverages, aquatic products, dairy products, fruits, plant-derived food, salt, and processed food. Current evidence indicates that the main challenge in food MNP analysis is to balance efficient matrix removal with satisfactory particle recovery while minimizing contamination and analytical bias. At present, most studies still focus on micrometer-sized particles, whereas the enrichment, identification, and quantification of nanoplastics remain major bottlenecks. Future efforts should develop combined pretreatments based on matrix composition, improve reference materials, blank controls, recovery evaluation, and standardized reporting, and thereby provide methodological support for source apportionment, dietary exposure assessment, and health risk evaluation of MNPs in food.

Key words: micro- and nanoplastics; food matrices; sample pretreatment; identification and quantification; dietary exposure

微/纳米塑料(MNPs)因粒径小、环境迁移性强且结构相对稳定, 被认为是一类新型持久性污染物^[1-2]。此类污染物广泛存在于水体、土壤和空气等介质中, 并可通过环境迁移、生物摄取和食物链传

收稿日期: 2026-05-05; 修回日期: 2026-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42477413, 42177377)

* 通讯作者: 苏宇, 博士, 研究员, 研究方向: 微/纳米塑料分析方法与环境暴露过程, E-mail: yusu@seu.edu.cn

递等途径污染食品^[3-4]。因此,准确检测食品中的 MNPs,是评估食品污染状况和膳食暴露风险的基础。食品中 MNPs 污染具有多来源、多环节叠加的特征。农业生产中的地膜残留、灌溉、污泥施用及塑料包膜肥料使用等,可使塑料颗粒进入土壤,并进一步附着于农作物表面或被植物吸收^[5-9];饮用水、饮料和水产品中的 MNPs 则与水体污染及养殖、包装接触等过程密切相关^[9-12]。在加工、储运和消费环节,塑料包装、餐盒及厨具等在高温或磨损条件下老化也会释放 MNPs^[13-18]。由于不同食品的原料来源、加工方式和接触材料差异较大, MNPs 污染水平、粒径分布、形貌特征和聚合物类型可能存在明显差异。此外,食品样品本身复杂的基质组成也进一步增加了 MNPs 准确检测的难度。

食品基质中的脂肪、蛋白质、膳食纤维、色素和无机组分等含量差异明显。这些成分可能通过包埋颗粒、堵塞滤膜、产生背景信号或干扰光谱识别等方式影响 MNPs 的分离、识别和定量。因此,食品中 MNPs 检测的关键在于在去除基质干扰的同时,尽可能保持颗粒形貌、粒径和聚合物组成信息的完整性^[19-20]。这也要求前处理方法应依据不同食品基质特征进行选择和优化。目前,相关研究在样品量、消解体系、分离富集方式、最小识别粒径、空白控制和结果报告方式等方面差异较大,限制了数据可比性和膳食暴露评估的准确性^[21-24]。已有综述主要关注膳食暴露^[4]、环境行为^[5]、水产品污染^[10]、食品接触材料释放^[19]及形成转化机制^[25]等方面,而针对不同食品基质检测适配性和偏差来源的系统比较仍显不足。基于此,本文围绕食品中 MNPs 检测面临的基质干扰与方法差异,系统梳理其检测流程、前处理策略和质量控制要求,分析不同食品基质中的典型干扰因素,并比较各类检测方法的适用性与局限性,以为食品中 MNPs 检测方法优化和标准化监测提供参考。

1 食品中 MNPs 检测常规流程与关键步骤

不同食品基质组成差异显著,使得食品中 MNPs 检测尚难形成适用于所有样品的统一方案,但其分析流程总体相似。食品中 MNPs 检测通常包括样品消解、颗粒分离富集及聚合物鉴定与定量环节(图 1)。其中,样品前处理直接影响基质的去除效果和目标颗粒的回收效率,是决定检测结果可靠性的关键^[26]。食品中的蛋白质、脂肪、糖类、色素和无机组分等可能干扰 MNPs 的提取与识别,而过强的消解条件也可能造成颗粒损失、形貌改变或聚合物结构损伤。因此,实际研究中需根据食品基质特征优化消解、分离和富集策略,以兼顾基质去除效率和颗粒信息保真性。

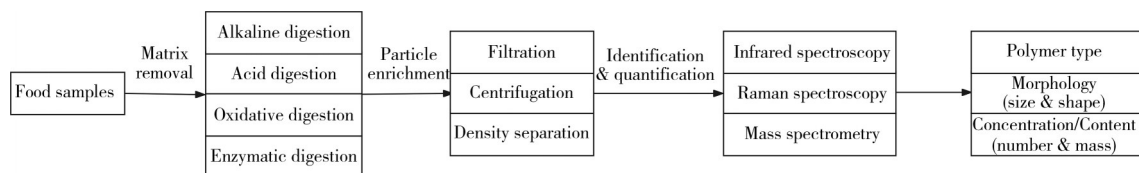


图 1 食品中 MNPs 检测的主要操作流程

Fig. 1 Main workflow for the detection of MNPs in food

1.1 食品基质中 MNPs 的提取方法

对于饮用水、食盐、白砂糖等基质简单的食品,样品前处理可不经消解,而采用溶解、稀释、过滤和富集等较温和方式完成。但多数食品由于含有蛋白质、脂肪、糖、色素及无机颗粒等复杂组分,仍需通过适当消解去除基质干扰。常用方法包括采用碱、酸、氧化剂或酶进行消解,不同方法在基质去除效果和聚合物保护方面各有优缺点。碱消解法常用于去除蛋白质和脂类,但对几丁质、纤维素等成分作用有限,且聚酯类 MNPs 可能发生碱性水解^[26-27]。酸消解法可用于溶解无机成分及去除部分有机组分,但强酸条件下聚酰胺类 MNPs 可能发生降解^[27-28]。氧化法适用于去除脂质、色素和软组织等有机基质,但反应过程中产生的气泡、热量和自由基可能导致颗粒损失或表面改性^[28]。酶解法条件较温和、选择性较强,对聚合物保护性通常较好,但成本较高且耗时较长^[29]。因此,复杂食品样品通常难以依赖单一消解方法完成前处理,需根据基质组成对消解和分离步骤进行组合或分步优化。

复杂食品样品经消解后,还需结合过滤、离心或密度分离等方法对 MNPs 进行回收和富集,以满足后续检测要求。对于微塑料分析,过滤常用于将目标颗粒截留于滤膜表面,以便后续显微观察和光谱表征;而在纳米塑料(NPs)分析中,过滤还常用于去除大于 1 μm 的塑料颗粒或基质碎片,并收集滤液以开展进一步提取和分析。常用滤膜包括玻璃纤维膜、聚碳酸酯膜、氧化铝膜、银膜、硅膜和不锈钢

钢滤网等^[30-31]。需要注意的是，当分析滤膜截留颗粒时，滤膜孔径主要决定颗粒的理论截留范围，而实际可鉴定的粒径下限仍受红外或拉曼光谱空间分辨率、滤膜背景信号等因素限制；当分析滤液中的颗粒时，滤膜孔径则在理论上限定了粒径上限，但仍可能受颗粒聚集状态的影响。对于含无机颗粒或矿物杂质较多的样品，可采用离心或密度分离降低非目标颗粒干扰，其分离效果取决于分离液密度与目标塑料密度之间的匹配关系。低密度分离液(如NaCl)适合浮选聚乙烯、聚丙烯等低密度塑料，但对聚氯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯等高密度塑料的回收效率有限；NaI、ZnCl₂等高密度分离液可提升高密度塑料的回收率，但成本较高，且存在腐蚀性、毒性和废液处理困难等问题。

1.2 食品中MNPs的鉴定与定量方法

食品中MNPs污染水平评估不仅依赖有效的样品前处理，还取决于后续鉴定与定量方法的准确性。目前，食品中MNPs检测主要依赖光谱和质谱两类技术^[30-38]，各有优势与局限。其中，光谱技术是实现MNPs颗粒水平确证的重要手段，应用较多的包括显微拉曼光谱(μ Raman)、显微傅里叶变换红外光谱(μ FTIR)和激光红外成像(LDIR)^[30,35]。近年来，光学光热红外光谱(O-PTIR)和表面增强拉曼光谱(SERS)等技术在食品NPs分析中也显示出应用潜力^[32-33,37]。这些红外/拉曼光谱技术可提供颗粒数量、形貌、粒径及聚合物类型等信息，但其表征结果易受最小可检粒径、天然有机颗粒干扰、荧光背景及谱图匹配准确性等因素影响。质谱法通过检测塑料聚合物的热转化产物对MNPs进行间接分析，可用于聚合物组成鉴定和质量浓度/含量测定。例如，热裂解-气相色谱-质谱联用(Py-GC-MS)主要检测塑料热裂解标志物^[30-34]，热脱附-质子转移反应质谱(TD-PTR-MS)则测定塑料加热释放的特征挥发性产物^[36]。这些质谱方法均属于破坏性分析，不能提供颗粒数量、形貌和粒径分布等信息，且食品基质产生的热裂解产物可能干扰目标聚合物(如脂类裂解产物影响对聚乙烯塑料的准确测定)^[38]。因此，将光谱和质谱技术结合使用，有助于更可靠地揭示食品MNPs污染水平。

2 饮用水及饮料中MNPs的检测

饮品较早成为食品MNPs研究的重点对象，主要包括饮用水、瓶装水、茶饮、果汁、啤酒、葡萄酒、碳酸饮料及其他即饮饮品。此类样品适合采用过滤富集MNPs，但不同饮品间的基质差异较大。饮用水和瓶装水的有机质含量低、悬浮组分少，通常无需消解即可完成颗粒富集；果汁、茶饮、酒类和碳酸饮料常含有糖类、色素、多酚、蛋白胶体或气泡，易导致滤膜堵塞、颗粒包埋及光谱背景增强。由此，饮用水或瓶装水及饮料样品的检测难点呈现出明显分化(表1)。对于饮用水和瓶装水，关键在于低丰度条件下的背景污染控制，以及区分水源本底、灌装过程和包装材料迁移等不同来源^[39]；对于复杂饮品，重点在于去除有色组分和胶体物质对MNPs分离与识别的干扰。因此，低有机质饮品一般可直接过滤富集，以尽量减少操作引入的外源污染；而果汁、茶饮或发酵饮品等复杂样品，则常需结合脱气、稀释、离心、预过滤或温和净化等步骤，以改善分离效率和识别质量^[40-42]。不同饮料样品前处理方法的差异，主要源于主导干扰物不同。例如，含糖碳酸饮料前处理需去除糖分以免干扰颗粒计数^[40]，葡萄酒则需抑制多酚和色素引起的荧光背景^[41]。在检测方法上，饮用水和饮料样品常用 μ FTIR、 μ Raman或LDIR进行微塑料识别^[43-44]，以获得颗粒数量、形貌、尺寸分布和聚合物组成等信息；O-PTIR和SERS可补充NPs颗粒赋存信息^[45-46]，热分析质谱方法还可进行验证并提供质量浓度信息^[47]，其检测结果需结合塑料包装颗粒迁移进行解释。

表1 饮用水及饮料中微/纳米塑料的检测策略

Table 1 Strategies for detecting micro-and nanoplastics in drinking water and beverages

Food category	Matrix feature	Pretreatment	Filter membrane type (Pore size)	Detection method (Test sample)
Bottled water	Low organic content	Filtration; ethanol transfer	Silver membrane(3 μ m)	LDIR
		Filtration; H ₂ O ₂ digestion, thermal desorption	Glass fiber membrane (0.22 μ m)	ATD-GC/MS (Particles on membranes)
		Filtration, drying	Al-coated polycarbonate membrane(0.4 μ m)	μ Raman
Carbonated beverages	Acidity, foamy; sugar interference	Filtration; water washing (sugar removal); ethanol elution	Etched polycarbonate membrane(1 μ m)	Nile Red staining + μ FTIR NTA + Py-GC-MS + SEM-EDS(Filtrate)

(续表 1)

Food category	Matrix feature	Pretreatment	Filter membrane type (Pore size)	Detection method (Test sample)
White wine	Polyphenols; fluorescence interference	Direct filtration	Al ₂ O ₃ membrane(0.1 μm)	μRaman

3 水产品中 MNPs 的检测

水产品兼具环境暴露指示和膳食摄入评价双重意义,是食品 MNPs 研究的重要对象^[48]。现有研究主要涉及鱼类、贝类、虾蟹和头足类等,但不同水产品的食用方式和可食用部位不同,检测结果的暴露指向也存在差异。例如,贝类通常整体食用,其软组织和消化腺中 MNPs 与人体暴露关系更为直接;鱼类则需区分胃肠道、鳃、肌肉和肝脏等部位,其中胃肠道检出更多反映的是环境暴露水平,而肌肉等可食部位结果更接近膳食摄入风险^[49-50]。因此,水产品 MNPs 检测应先明确样品可食部位及其基质特征。水产品组织富含蛋白质、脂肪和结缔组织,部分甲壳类或贝类样品还含有几丁质、碳酸盐或其他矿物结构,易造成消解不完全、颗粒包覆及过滤困难。针对上述基质特点,现有研究多采用 KOH、H₂O₂、酶解或复合消解体系(表 2)。软组织样品需重点去除蛋白质和消化残留^[51],高脂样品需加强脂质去除^[52],甲壳类样品还需兼顾几丁质和无机组分的处理^[53-54]。由此可见,即使同属水产品,不同组织基质对颗粒释放和背景去除的要求不同,前处理方法也需相应优化。

在检测方面,水产品中的微塑料通常采用 μFTIR、μRaman 或 LDIR 进行分析^[55-56],以获取颗粒数量、尺寸分布及聚合物类型等信息;尼罗红染色可用于快速筛查,但易受脂质和生物残留干扰^[57]。在需要补充质量含量数据时,还可结合 Py-GC-MS、TD-PTR-MS 等热分析质谱方法^[36, 58]。相较于其他食品,水产品中 MNPs 的检测需明确样品部位及其可食属性,这不仅影响前处理方法的选择,也决定了检测结果的暴露指向。

表 2 水产品中微/纳米塑料的检测策略

Table 2 Detection strategies for micro- and nanoplastics in aquatic products

Food category	Matrix feature	Pretreatment	Filter membrane type (Pore size)	Detection method (Test sample)
Bivalves	Connective tissue membrane	Digestion with 10% KOH	Glass fiber membrane(0.7 μm)	Stereomicroscope + μFTIR
		Fenton digestion; potassium formate flotation	Nylon membrane(1 μm)	FTIR + Scanning electron microscope
		KOH + H ₂ O ₂ digestion; cascade filtration	Cascade filtration membranes (0.02-2.2 μm)	TD-PTR-MS (Particles on membranes)
		Digestion with 10% KOH; Nile Red staining	Glass fiber membrane(1.6 μm)	μRaman
Fish	High-fat interference	Digestion with 30% H ₂ O ₂	Whatman filter paper(2.5 μm)	FTIR + GC-MS(Extract)
		Digestion with 10% KOH; pressurized solvent extraction	Glass fiber membrane(2.7 μm)	Py-GC-MS(Extract)
Crustaceans	High chitin content; digestion resistance	Digestion with 1 mol/L NaOH	Glass fiber membrane(0.7 μm)	LDIR
		Pepsin digestion + 10% KOH hydrolysis	Glass fiber membrane(1.2 μm)	Py-GC-MS + μRaman (Particles on membranes)
		Corolase enzymatic hydrolysis + lipase digestion	PTFE membrane(1 μm), PTFE membrane(0.1 μm)	NTA(Filtrate)

4 乳制品中 MNPs 的检测

乳制品中 MNPs 的检测难点主要源于其复杂的乳化体系、凝胶结构及高固形物基质。液态乳、酸奶、奶酪、黄油、奶粉及婴幼儿配方乳粉虽同属乳制品,但在水分含量、脂肪含量与分散状态、蛋白质结构及产品形态上差异明显。乳制品富含蛋白质、脂肪和乳糖, MNPs 易被脂肪球、酪蛋白胶束或凝胶网络包覆,导致颗粒释放不完全、滤膜堵塞和光谱背景增强。因此,乳制品中 MNPs 检测的前处理重点不仅在于去除有机基质干扰,更在于破坏乳化体系或凝胶/固态结构,以充分释放被蛋白-脂质网络包埋的颗粒。此外,乳制品中的 MNPs 既可能来自原料乳,也可能在挤奶、输送、均质、灌装、干燥及包装过程中引入,因此检测结果需结合加工链条加以解释。

不同乳制品前处理方法的差异主要取决于产品形态和基质结构特征(表 3)。液态乳含水量高、流

动性较好,通常可通过稀释、离心、破乳或温和消解降低脂肪和蛋白质干扰^[59-60]。酸奶和奶酪具有较强的凝胶结构和较高的脂肪、蛋白质含量, MNPs更易嵌入酪蛋白网络或脂质相中,因而常需采用酶-碱、酶-氧化剂或酶-碱-络合剂联合处理,以提高颗粒释放效率^[61-63];对于高负荷样品,还可结合压力辅助过滤以改善过滤效率^[64]。奶粉和婴幼儿配方乳粉属于高固形物样品,其检测需优化复溶条件以促进颗粒释放,并通过后续消解、脱脂等步骤去除基质干扰,还应控制复溶用水、冲调容器和包装材料带来的外源污染^[65]。由此可见,乳制品前处理方法的选择是对不同产品形态、乳化状态和基质结构强度的适配。

在检测方面,乳制品样品多采用 μ FTIR和 μ Raman对微塑料进行识别^[59-62]。由于蛋白和脂质残留可能覆盖颗粒表面并降低光谱匹配质量,即使完成前处理后,仍需尽量控制有机基质残留。热分析质谱可补充聚合物质量浓度/含量信息,但需注意乳脂和蛋白热裂解产物的潜在干扰^[66]。由此可见,乳制品中 MNPs检测的核心在于破坏乳化体系和凝胶结构,并根据不同产品形态调整处理强度与检测路径。

表3 乳制品中微/纳米塑料的检测策略

Table 3 Detection strategies for micro- and nanoplastics in dairy products

Food category	Matrix feature	Pretreatment	Filter membrane type (Pore size)	Detection method (Test sample)
Liquid milk	High-calcium protein-induced membrane clogging	H ₂ O ₂ digestion	Nitrocellulose membrane (8 μ m)	FTIR
Fermented dairy products	Gel-like matrix	Enzymatic hydrolysis + alkaline hydrolysis	Silicon membrane (5 μ m)	μ Raman
		Enzymatic hydrolysis + alkaline hydrolysis	Glass fiber membrane (0.22 μ m)	μ Raman
Cheese/Powdered milk	High fat and protein	KOH + EDTA digestion	Silver membrane (3 μ m)	ATR-FTIR
		Trypsin + KOH + EDTA	Silver membrane (3 μ m)	ATR-FTIR
		Enzymatic, alkaline, and oxidative digestion combined with pressure-assisted filtration	Glass fiber membrane (1 μ m)	Fluorescence imaging (Particles on membranes)

5 植物源性食品中 MNPs 的检测

植物源性食品中的 MNPs可能来自土壤、灌溉水、大气沉降及采后加工、包装等环节^[67]。不同植物性食品的污染特征存在差异:叶菜类表面积大,易受大气沉降和灌溉水污染;根茎类长期接触土壤,常伴随矿物颗粒和农膜老化碎片;水果表皮和蜡质层易吸附环境颗粒或包装迁移颗粒^[68]。不同污染路径可能导致 MNPs呈表面附着或组织内分布,因此检测前应明确颗粒赋存位置,并选择相应前处理方法(表4)。表面附着型 MNPs可通过水洗、溶剂洗脱或振荡-超声提取后过滤检测,以评价外源污染水平^[69];组织内 MNPs则需经酶解破坏细胞壁和纤维结构,以释放包埋颗粒^[70-72]。同类植物样品中碱解和酸解并存,主要反映了主导干扰物的不同:碱解多用于去除果胶等有机残留,酸解则用于降低土壤颗粒或矿物组分的干扰。

表4 果蔬及其他植物源性食品中微、纳米塑料的检测策略

Table 4 Detection strategies for micro- and nanoplastics in fruits, vegetables, and other plant-based foods

Food category	Matrix features	Pretreatment	Filter membrane type (Pore size)	Detection method (Test sample)
Vegetables (Internalization)	Cellulose interference and NP extraction difficulty	Alkali hydrolysis; ethanol precipitation of cellulose; ultrasonic washing with DCM	-	Py-GC-MS(Extract)
		Filtration; HNO ₃ digestion; organic extraction	-	Py-GC-MS(Extract)
Vegetables (Adhering to leaves)	Leaf surface wax interference and particle adhesion	Peroxide digestion; Rose Bengal staining	Cellulose filter paper (11 μ m)	Stereomicroscope
		Water-mediated ultrasonic extraction	-	SERS(Extract)
Fruits	Fruit skin smoothness and particle adhesion	Digestion with 65% HNO ₃ , extraction with dichloromethane	-	SEM-EDX(Extract)
		Surface washing; H ₂ O ₂ digestion	Nitrocellulose membrane (1.2 μ m)	Stereomicroscope + SEM-EDX
Grains	Starch matrix viscosity and particle separation difficulty	NaCl flotation; 10% KOH digestion	Polyethersulfone membrane (0.45 μ m)	μ FTIR
		Direct imaging without pretreatment	-	O-PTIR + μ Raman

在检测方法上,植物源性样品可采用Py-GC-MS、 μ FTIR、 μ Raman或SERS等技术分析MNP^[70-76]。需要注意的是,植物荧光背景会降低拉曼识别准确性,淀粉、纤维等残留物易增加误判风险^[77]。因此,植物源性样品应尽量在前处理阶段降低色素和组织残留,并结合光谱匹配、显微形貌和空白对照综合判断。对于NPs或组织内迁移研究,荧光标记/共聚焦荧光成像或热分析质谱可作为补充手段^[78-79],其在真实样品中的定量可靠性仍需验证。

6 食盐及典型加工食品中MNP_s的检测

食盐的主要成分为NaCl,通常可通过溶解-过滤实现颗粒富集,必要时辅以温和氧化以去除少量有机残留(表5)^[80-82]。其前处理难点并非基质去除,而是高盐结晶可能干扰显微观察和光谱识别^[81-82]。因此,通常采用 μ FTIR、 μ Raman等显微光谱方法进行颗粒识别^[80, 82],检测流程相对容易标准化。食盐中的MNP_s既可能来自原料环境,也可能来自制盐、干燥和包装过程,结果解释仍需结合来源解析。相比之下,加工食品的基质组成和污染来源更为复杂。即食食品、肉制品、调味酱料、烘焙食品、方便食品 and 外卖食品常含有蛋白质、脂肪、淀粉、糖类、盐分、色素等多种组分,其中的MNP_s既可能来自原料,也可能源于加工设备、输送带、包装膜、餐盒及其他塑料接触环节。相应前处理需围绕主导基质进行设计:高蛋白样品多采用酶解去除蛋白残留^[83],高脂样品常结合碱解、脱脂及必要的络合处理以降低油脂干扰^[84],高淀粉或高糖样品则需控制胶化和黏附对颗粒分离的不利影响。对于罐装、腌制或高脂水产加工品,还需根据含油量和色素背景增加油脂预分离或温和漂白步骤^[85]。检测方面,此类食品仍以显微光谱法进行颗粒确证,也可结合Py-GC-MS补充聚合物质量信息。加工食品相较于食盐更难形成统一的前处理流程,其分析更依赖对主导基质类型和加工接触环节的综合判断。

表5 食盐及加工食品中微/纳米塑料的检测策略

Table 5 Detection strategies for micro- and nanoplastics in salt and processed foods

Food category	Matrix feature	Pretreatment	Filter membrane type (Pore size)	Detection method (Test sample)
Salt products	Low organic content	H ₂ O ₂ digestion	Glass fiber membrane (2.7 μ m)	FTIR
		Dissolution in ultrapure water; H ₂ O ₂ digestion	Glass fiber membrane (0.45 μ m)	Stereomicroscope + FTIR
		H ₂ O ₂ digestion	Filter membrane (0.22 μ m)	μ Raman
High-precision machined products	High fat and protein content	Digestion with 20% KOH; sieving and grading	Stainless steel sieves (125 μ m, 45 μ m, grading retention)	Raman + μ -FT-IR
		Digestion with cellulase, trypsin, KOH, and EDTA	Silver film (3 μ m)	ATR-FTIR
		Digestion with 10% KOH; oil product pre-separation	Glass fiber membrane (1.6 μ m), hydrophobic membrane (4-10 μ m)	μ FTIR

7 结论与展望

综上所述,食品中的MNP_s检测不宜按食品类别简单套用固定流程,而需根据基质组成特征,建立相应的前处理-检测方法体系。其核心难题在于,既要充分去除复杂基质以降低背景干扰、提高分离和鉴定可靠性,又要避免过度消解、转移和净化造成颗粒损失,或改变其粒径、形貌及表面特征。因此,食品中MNP_s检测的关键不仅仅是提高仪器灵敏度或分辨率,而是围绕不同基质特征,在干扰去除、颗粒保持和回收控制之间取得合理平衡。这一问题在NPs分析中更为突出。与微塑料相比,NPs的粒径更小、比表面积更大,更易与蛋白质、脂质、多糖及天然胶体颗粒发生吸附、包埋或团聚,导致其在提取、转移和分离过程中难以有效释放和稳定富集,同时也更容易与食品中天然纳米/亚微米颗粒信号混淆。因此,食品中NPs的分析困难本质上并非单纯源于检测技术不足,而是复杂基质对颗粒行为和方法回收率的放大影响。当前研究仍主要建立在微塑料证据基础上,NPs的可靠富集、识别和定量仍是方法学上的关键瓶颈,亟需发展新的技术。

未来食品中的MNP_s检测应围绕方法适配、质量控制、智能解析和来源识别系统推进。一方面,应由按食品类别建立方法转向按基质成分构建策略,以蛋白质、脂肪、多糖、纤维、色素和无机盐等组分为依据,形成可组合的前处理与分离富集方案。另一方面,应加快建立适用于典型食品基质的MNP_s标准品和质量控制体系,用于方法校准、回收率评价、空白控制和结果比对,并规范区分“疑似

颗粒”和“确证MNP”，同步报告数量浓度、质量浓度、粒径范围、聚合物组成和空白校正方式。此外，AI/机器学习可用于复杂光谱和成像数据的自动解析，以提高颗粒识别、背景扣除、谱图分类和高通量筛查效率。未来还需加强食品接触塑料包装在实际使用/储存条件下的MNP释放研究，为食品MNP来源解析、膳食暴露评估和健康风险评价提供理论依据。

参考文献:

- [1] Sharma B, Mangla S, Aery S, Sharma C, Kaushik A, Kumar S, Chaudhary G R. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2026**, 347: 103716.
- [2] Thakur R, Joshi V, Sahoo G C, Jindal N, Tiwari R R, Rana S. *Toxicol. Rep.*, **2025**, 14: 102013.
- [3] Zhang C, Xiao L W, Wang J J, Miao S. *Food Res. Int.*, **2026**, 227: 118160.
- [4] Heo S J, Moon N, Kim J H. *Rev. Environ. Health*, **2025**, 40(2): 371-392.
- [5] Kaya C, Ashraf M, Sarkar B, Bolan N, Rinklebe J, Ahmad P. *Environ. Pollut.*, **2026**, 395: 127723.
- [6] Galahitigama H, Sandamali P, Jayapra T, Abesinghe N, Senavirathna M D H J, Diola M B L, Tanchuling M A. *Environ. Monit. Assess.*, **2025**, 197(4): 404.
- [7] D'Angelo S. *Sustainability*, **2026**, 18(6): 2817.
- [8] Li Y, Zhang J J, Xu L, Li R Q, Zhang R, Li M X, Ran C M, Rao Z Y, Wei X, Chen M L, Wang L, Li Z, Xue Y N, Peng C, Liu C G, Sun H W, Xing B S, Wang L. *Nature*, **2025**, 641(8063): 666-673.
- [9] Lazăr N N, Călmuc M, Milea S A, Georgescu P L, Iticescu C. *Heliyon*, **2024**, 10(6): e28291.
- [10] Woh P Y, Shiu H Y, Fang J K H. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 480: 136350.
- [11] Bai Y R, Zhang J J, Bai R H, Liu Q, He W Q, Bai W B, Chen Y H. *Environ. Sci.* (白业冉, 张佳佳, 白润昊, 刘琪, 何文清, 白文波, 陈延华. 环境科学), **2025**, 46(2): 1155-1167.
- [12] Akhbarizadeh R, Dobaradaran S, Schmidt T C, Nabipour I, Spitz J. *J. Hazard. Mater.*, **2020**, 392: 122271.
- [13] Tang Q, Meng D S, Zhang Y. *J. Dairy Sci. Technol.* (唐琪, 孟德尚, 张岩. 乳业科学与技术), **2024**, 47(1): 42-46.
- [14] Ma H W, Xu X F, Wang J, Ren K, Gao W J, Hao R X, Ge X S. *China Dairy*(马宏伟, 许孝峰, 王静, 任魁, 高文杰, 郝瑞霞, 葛旭升. 中国乳业), **2025**, (4): 89-96, 103.
- [15] Liu Q R, Fang J K, Liu Z T, Chen Y L, Chen Q W, Chen Z, Yuan S F, Yu H, Yao W R. *Food Chem.*, **2025**, 478: 143691.
- [16] Su Y, Yang C Q, Wang S F, Li H M, Wu Y Y, Xing B S, Ji R. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58(24): 10764-10775.
- [17] Su Y, Hu X, Tang H J, Lu K, Li H M, Liu S J, Xing B S, Ji R. *Nat. Nanotechnol.*, **2022**, 17(1): 76-85.
- [18] Su Y, Wang B, Tong X, Peng S C, Liu S J, Xing B S, Ji R. *J. Environ. Sci.*, **2024**, 136: 161-171.
- [19] Zimmermann L, Geueke B, Parkinson L V, Schür C, Wagner M, Muncke J. *npj Sci. Food*, **2025**, 9(1): 111.
- [20] Huang Z K, Dong Z, Liang R Q, Cao J, Yuan B. *J. Food Saf. Qual.* (黄志康, 董喆, 梁瑞强, 曹进, 袁彪. 食品安全质量检测学报), **2025**, 16(18): 258-264.
- [21] Khan A L, Zaidi A A. *J. Xenobiot.*, **2025**, 15(5): 154.
- [22] Primpke S, Christiansen S H, Cowger W, De Frond H, Deshpande A, Fischer M, Holland E B, Meyns M, O'Donnell B A, Ossmann B E, Pittroff M, Sarau G, Scholz-Böttcher B M, Wiggin K J. *Appl. Spectrosc.*, **2020**, 74(9): 1012-1047.
- [23] Hossain R, Sahajwalla V. *Environ. Sci.: Nano*, **2026**, 13: 122-149.
- [24] Zhang Q, Xu E G, Li J N, Chen Q Q, Ma L P, Zeng E Y, Shi H H. *Environ. Sci. Technol.*, **2020**, 54(7): 3740-3751.
- [25] Song W W, Zhang J, Ling C, Zhao Y, Ji R, Su Y, Xing B S. *Environ. Health*, **2026**, 4: 826-842.
- [26] Bornt K, Linge K, How J, de Lestang S, Hovey R, Langlois T. *Mar. Pollut. Bull.*, **2024**, 206: 116709.
- [27] Bianchi J, Valente T, Scacco U, Cimmaruta R, Sbrana A, Silvestri C, Matiddi M. *Mar. Pollut. Bull.*, **2020**, 154: 111050.
- [28] Jaafar N, Musa S M, Azfaralariff A, Mohamed M, Yusoff A H, Lazim A M. *Chemosphere*, **2020**, 260: 127649.
- [29] Thiele C J, Hudson M D, Russell A E, Saluveer M, Sidaoui-Haddad G. *Sci. Rep.*, **2021**, 11(1): 2045.
- [30] Yang Y, Wu Y X, Pan W, Zhang Z Y, An L H, Gao J M. *China Environ. Sci.* (杨颖, 吴玉暄, 潘巍, 张子晔, 安立会, 高俊敏. 中国环境科学), **2025**, 45(7): 4012-4020.
- [31] Li D Z, Sheerin E D, Shi Y H, Xiao L W, Yang L M, Boland J J, Wang J J. *Environ. Sci. Technol.*, **2022**, 56(17): 12158-12168.
- [32] Jamison H M N, Lenhart J J. *Sci. Total Environ.*, **2026**, 1011: 181148.
- [33] Xing F Y, Duan W M, Tang J X, Zhou Y, Guo Z J, Zhang H, Xiong J, Fan M K. *Anal. Chem.*, **2025**, 97(4): 2293-2299.
- [34] Li P, Lai Y J, Zheng R G, Li Q C, Sheng X Y, Yu S J, Hao Z N, Cai Y Q, Liu J F. *Environ. Sci. Technol.*, **2023**, 57(32): 12010-12018.

- [35] Xu C, Liang Y, Zhu X Y, Dong B, Su Q Z, Wang X H, Li D, Zhong H N. *J. Instrum. Anal.* (徐灿, 梁约, 朱晓艳, 董犇, 苏启枝, 王小慧, 李丹, 钟怀宁. 分析测试学报), **2025**, 44(12): 2649–2656.
- [36] Fraissinet S, De Benedetto G E, Malitesta C, Holzinger R, Materić D. *Commun. Earth Environ.*, **2024**, 5(1): 128.
- [37] Winkler A, Fumagalli F, Cella C, Gilliland D, Tremolada P, Valsesia A. *Water Res.*, **2022**, 222: 118848.
- [38] Taylor S E, Pearce C I, Sanguinet K A, Hu D, Chrisler W B, Kim Y M, Wang Z, Flury M. *Environ. Sci.: Nano*, **2020**, 7(7): 1942–1953.
- [39] Hussain K A, Dong H, Tamayo–Aguilar A, Kim S, Gomez P C A, Foss S, Fernandez–Ballester L, Lu Y F, Li Y S. *Water Res.*, **2026**, 295: 125569.
- [40] Chen Y L, Xu H Y, Luo Y L, Ding Y T, Huang J G, Wu H H, Han J N, Du L J, Kang A Q, Jia M Y, Xiong W P, Yang Z H. *Water Res.*, **2023**, 242: 120243.
- [41] Prata J C, Paço A, Reis V, da Costa J P, Silva F A J, Mendes da Costa F, Duarte A C, Rocha–Santos T. *Food Chem.*, **2020**, 331: 127323.
- [42] Zanuttin F, Gurian E, Ignat I, Fornasaro S, Calabretti A, Bigot G, Bonifacio A. *Talanta*, **2019**, 203: 99–105.
- [43] Nizamali J, Mintenig S M, Koelmans A A. *J. Hazard. Mater.*, **2023**, 441: 129942.
- [44] Oßmann B E, Sarau G, Holtmannspötter H, Pischetsrieder M, Christiansen S H, Dicke W. *Water Res.*, **2018**, 141: 307–316.
- [45] Macairan J R, Saherwala A, Li F, Monteil–Rivera F, Tufenkji N. *Environ. Sci. Technol.*, **2025**, 59(30): 15612–15622.
- [46] Li Z H, Ding Z, Yan Z L, Han K H, Zhang M F, Zhou H Y, Sun X, Sun H, Li J H, Zhang W, Liu X H. *Talanta*, **2025**, 281: 126877.
- [47] Zheng H Y, Wu Z X, Li Q W, Yang Y, Wang M X, An L H, Wang F F. *J. Environ. Eng. Technol.* (郑涵云, 武志鑫, 李全威, 杨颖, 王慢想, 安立会, 王菲菲. 环境工程技术学报), **2024**, 14(3): 758–763.
- [48] Obayomi O V, Dokouhaki M, Obayomi K S. *Food Biosci.*, **2026**, 75: 108185.
- [49] Sun X X, Meng L J, Liang J H, Li Q J, Du J, Zhu M L, Zhao Y F, Zheng S. *Environ. Sci. Technol.*, **2025**, 59(33): 17393–17402.
- [50] Lou T T, Huang L, Su Y Z, Liu J, Li H T, Zhao P Y. *Chin. J. Chromatogr.* (娄婷婷, 黄琳, 栗有志, 刘俊, 李海涛, 赵品瑶. 色谱), **2025**, 43(8): 881–893.
- [51] Ding J F, Li J X, Sun C J, He C F, Jiang F H, Gao F L, Zheng L. *Chin. J. Anal. Chem.* (丁金凤, 李景喜, 孙承君, 何昌飞, 蒋风华, 高丰蕾, 郑立. 分析化学), **2018**, 46(5): 690–697.
- [52] Huang H, Wu Z, Song K. *Acta Oceanol. Sin.* (黄辉, 吴桢, 宋凯. 海洋学报), **2025**, 47(1): 123–132.
- [53] Süßmann J, Krause T, Martin D, Walz E, Greiner R, Rohn S, Fischer E K, Fritsche J. *Food Control*, **2021**, 125: 107969.
- [54] Chang Y S, Chou S H, Jhang Y J, Wu T S, Lin L X, Soo Y L, Hsiao I L. *Sci. Total Environ.*, **2022**, 814: 152675.
- [55] Justino A K S, Ferreira G V B, Fauvelle V, Schmidt N, Lenoble V, Pelage L, Lucena–Frédou F. *Mar. Pollut. Bull.*, **2023**, 192: 115087.
- [56] Irmidayanti Y, Soegianto A, Ramdhany F A, Afifudin A F M, Payus C M, Hartl M G J. *Mar. Pollut. Bull.*, **2025**, 214: 117818.
- [57] Yao M Z, Liu J Q, Chen Y, Shen H, Zhang Y M. *J. Fish. Sci. China* (姚梦竹, 刘吉强, 陈翊, 沈浩, 张宜明. 中国水产科学), **2024**, 31(6): 718–730.
- [58] Ribeiro F, Okoffo E D, O’Brien J W, Fraissinet–Tachet S, O’Brien S, Gallen M, Samanipour S, Kaserzon S, Mueller J F, Galloway T, Thomas K V. *Environ. Sci. Technol.*, **2020**, 54(15): 9408–9417.
- [59] Santonicola S, Volgare M, Cocca M, Colavita G. *Ital. J. Food Saf.*, **2025**, 14(2): 13523.
- [60] Da Costa Filho P A, Andrey D, Eriksen B, Peixoto R P, Carreres B M, Ambühl M E, Descarrega J B, Dubascoux S, Zbinden P, Panchaud A, Poitevin E. *Sci. Rep.*, **2021**, 11(1): 24046.
- [61] Ling X, Cheng J, Yao W R, Qian H, Ding D Z, Yu Z L, Xie Y F, Yang F W. *Toxics*, **2024**, 12: 330.
- [62] Visentin E, Manuelian C L, Niero G, Benetti F, Perini A, Zanella M, Pozza M, De Marchi M. *J. Dairy Sci.*, **2024**, 107: 5393–5401.
- [63] Visentin E, Niero G, Benetti F, O’Donnell C, De Marchi M. *npj Sci. Food*, **2025**, 9(1): 135.
- [64] Süßmann J, Walz E, Hetzer B, Greiner R, Fischer E K, Rohn S, Fritsche J. *J. Consum. Prot. Food Saf.*, **2025**, 20(2): 141–154.
- [65] Sirin M, Mutlu T, Eryasar A R, Gedik K. *Food Control*, **2026**, 182: 111872.
- [66] Rauert C, Pan Y, Okoffo E D, O’Brien J W, Thomas K V. *J. Environ. Expo. Assess.*, **2022**, 1: 13.
- [67] Edirisingha I P, Undugoda L J S, Manage P M, Lankasena N, Patabendige C, Nugara R N, Macreadie P I, Bhadury P. *Food Biosci.*, **2025**, 74: 107929.
- [68] Liu Y X, Liu H, Wang W M, Dong S N, Zhang X J, Qi Z R. *J. Plant Nutr. Fert.* (刘亚莹, 刘慧, 王为木, 董姝楠, 张晓瑾, 齐张蓉. 植物营养与肥料学报), **2025**, 31(9): 1862–1876.
- [69] Kousheh S, Hajikhani M, Asgari S, Lin M. *Microchim. Acta*, **2024**, 191(12): 755.

- [70] Li C J, Gao Y, He S, Chi H Y, Li Z C, Zhou X X, Yan B. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2021**, 8(8): 633–638.
- [71] Ye Q Y, Wu Y X, Liu W R, Ma X R, He D C, Wang Y T, Li J F, Wu W C. *Chemosphere*, **2024**, 354: 141689.
- [72] Canha N, Jafarova M, Grifoni L, Gamelas C A, Alves L C, Almeida S M, Loppi S. *Sci. Rep.*, **2023**, 13(1): 14278.
- [73] Oliveri C G, Ferrante M, Banni M, Favara C, Nicolosi I, Cristaldi A, Fiore M, Zuccarello P. *Environ. Res.*, **2020**, 187: 109677.
- [74] Nassar S, Tatan B, Mortula M M, Fattah K P, Atabay S. *Microplastics*, **2025**, 4(3): 61.
- [75] Zhang B, Zhu L, Zhang R, Guo B Y. *Environ. Prot. Sci.* (张冰, 朱琳, 张蕊, 郭宝元. 环境保护科学), **2024**, 50(5): 113–118, 133.
- [76] Shi Y Z, Yi L, Du G R, Hu X, Huang Y. *Sci. Total Environ.*, **2023**, 862: 160714.
- [77] Yu C X, Takhistov P, Alocilja E, de Corcuera J R, Frey M W, Gomes C L, Mao Y J, McLamore E S, Lin M S, Tsyusko O V, Tzeng T R J, Yoon J Y, Zhou A H. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2022**, 414(16): 4591–4612.
- [78] De-la-Torre G E, Bapp C, Forero-López A D, Dobaradaran S. *Curr. Opin. Chem. Eng.*, **2025**, 48: 101134.
- [79] Marín-Sáez J, López-Rodríguez E, Garrido Frenich A, Romero-González R. *Trends Environ. Anal. Chem.*, **2026**, 49: e00297.
- [80] Kim J S, Lee H J, Kim S K, Kim H J. *Environ. Sci. Technol.*, **2018**, 52(21): 12819–12828.
- [81] Chen Y Y, Li X C, Zhao G Q, Tan Y H, Zhao L, Jiang Y. *J. Food Saf. Qual.* (陈媛媛, 李学茶, 赵国强, 谭奕宏, 赵利, 江勇. 食品安全质量检测学报), **2024**, 15(23): 208–214.
- [82] Zhang Q, Song G C, Huang K L, Luo Y B, Cheng N. *J. Chin. Inst. Food Sci. Technol.* (张琪, 宋光春, 黄昆仑, 罗云波, 程楠. 中国食品学报), **2024**, 24(12): 323–331.
- [83] Milne M H, De Frond H, Rochman C M, Mallos N J, Leonard G H, Baechler B R. *Environ. Pollut.*, **2024**, 343: 123233.
- [84] Visentin E, Niero G, Benetti F, Perini A, Zanella M, Pozza M, De Marchi M. *Meat Sci.*, **2024**, 217: 109626.
- [85] Duman S, Doyen P, Merveillie P, Andersson N, Bayeuil R, Grard T, Dehaut A, Duflos G. *Food Control*, **2023**, 154: 110029.

(责任编辑: 丁 岩)