

doi: 10.12452/j.fxcxb.26051702

植物体内微/纳塑料的成像、识别和量化技术研究进展与展望

迟美婷^{1,2#}, 杨杰^{2#}, 涂晨^{2,3}, 王译^{2,3}, 刘颖^{2,3}, 李瑞杰⁴, 吴春发¹,
刘子健², 骆永明^{1,2,3*}

(1. 南京信息工程大学 生态与应用气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 江苏 南京 211135; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450016)

摘要: 微/纳塑料(MNPs)是一类重要的新污染物, 已被证实能被植物根系吸收并经食物链传递, 对生态系统功能和农产品安全构成潜在风险。然而, 植物体内MNPs的精准检测始终是制约深入评估这一风险的方法学瓶颈。该文结合国内外最新研究进展, 以“成像-识别-定量”为检测技术框架, 从空间分布示踪成像、化学指纹识别、量化分析技术这3个方面, 系统总结了目前可用于植物体内MNPs检测分析技术的原理、制样过程、应用及其挑战。在此基础上, 提出未来应构建从宏观到纳米的多层级原位示踪成像体系, 实现对植物体内MNPs从毫米级器官架构到纳米级亚细胞定位的全尺度原位可视化; 优化植物体内MNPs提取与智能光谱识别方法, 以深度学习驱动的智能算法实现MNPs特征峰与植物基质信号的精准分离; 建立真实环境植物体内MNPs的精准量化方法, 为推动植物体内MNPs研究与农产品安全风险提供检测分析技术。

关键词: 微塑料; 纳塑料; 植物; 空间分布; 化学识别; 量化分析; 检测技术

中图分类号: O631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)07-0001-12

Advances and Perspectives in Imaging, Identification, and Quantification Technologies for Micro/nanoplastics in Plants

CHI Mei-ting^{1,2#}, YANG Jie^{2#}, TU Chen^{2,3}, WANG Yi^{2,3}, LIU Ying^{2,3}, LI Rui-jie⁴,
WU Chun-fa¹, LIU Zi-jian², LUO Yong-ming^{1,2,3*}

(1. School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of Henan Province, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Microplastics and nanoplastics (MNPs) represent an important class of emerging contaminants. It has been demonstrated that MNPs can be taken up by plant roots and transferred along the food chain, posing potential risks to ecosystem functions and agricultural product safety. However, the accurate detection of MNPs in plant tissues remains a critical methodological bottleneck that limits in-depth risk assessment. Drawing on the latest domestic and international research advances, this paper adopts "imaging, identification, and quantification" as the detection framework. From three key perspectives, namely morphological and spatial distribution imaging, chemical fingerprint identification, and quantitative analytical techniques, we systematically summarize the principles, sample preparation procedures, applications, and limitations of currently available methods for detecting MNPs in plants. On this basis, we propose three future research priorities. First, a multi-scale in situ imaging system spanning from the macroscopic to the nanoscopic level should be established, enabling full-scale in situ visualization of MNPs in plants, from millimeter-scale organ architectures

收稿日期: 2026-05-17; 修回日期: 2026-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(42530717, 42407514); 江苏省自然科学基金项目(BK20241704)

* 通讯作者: 骆永明, 博士, 研究员, 研究方向: 土壤污染过程与修复、土壤环境微塑料污染与管控, E-mail: ymluo@issas.ac.cn
共同第一作者

down to nanoscale subcellular localization. Second, extraction and intelligent spectral methods for MNP identification in plant tissues should be optimized by employing deep learning-based algorithms to precisely separate MNP characteristic peaks from plant matrix signals. Third, accurate quantification methods for MNPs in plants from real-world environments should be developed. These advances will collectively provide critical detection and analytical techniques for advancing MNP research in plants and for the rigorous risk assessment of agricultural product safety.

Key words: microplastics; nanoplastics; plants; spatial distribution; chemical identification; quantitative analysis; detection technology

微塑料(MPs, 粒径 $<5\text{ mm}$)具有极强的环境迁移能力, 可经大气等途径实现远距离输送^[1]。在环境中, MPs能在光氧化、机械磨损和生物作用等风化过程中进一步风化降解并形成纳塑料(NPs, 粒径 $<1\text{ }\mu\text{m}$)^[2-3]。土壤是微/纳塑料(MNPs)重要的汇集地, 塑料农膜残留、污水灌溉和污泥农用等农业活动持续加剧了MNPs在农田土壤中的积累^[4]。土壤中积累的MNPs可经根系和叶片吸收进入农作物体内, 进而沿食物链传递, 对生态环境和农作物安全构成潜在威胁^[5]。此前的研究表明, MNPs可通过植物新生侧根裂隙等途径进入植物体内^[6]。

对植物体内MNPs进行示踪成像、识别与定量是揭示其在植物体内转化机制和评估其植物毒性和食物链传递风险的基础^[7-8]。目前大多数研究采用不同尺寸和聚合物类型的功能化标记MNPs^[9], 来追踪其在植物体内的传输过程与分布特征^[8,10]。综合来看, 当前植物体内MNPs的检测分析方法可归为3类(图1): (1)原位成像技术: 主要利用显微镜等技术直接观测MNPs的形态、粒径与空间分布; (2)化学成分识别技术: 主要利用光谱等技术鉴定MNPs的聚合物成分; (3)定量分析技术: 主要利用质谱等技术量化植物体内的MNPs含量。

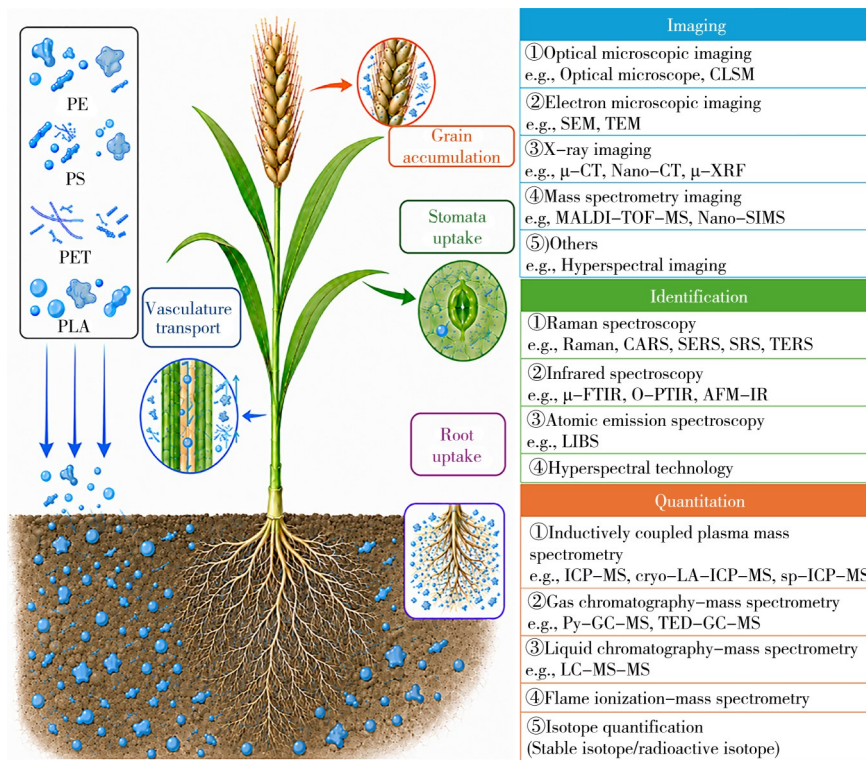


图1 植物体内微/纳塑料的成像、识别和量化分析技术

Fig. 1 Imaging, identification, and quantification technologies for micro/nanoplastics in plants

植物体内的叶绿素和代谢物等成分会对塑料聚合物的成像、识别和量化构成严重干扰^[9, 11], 这使得样品制备成为决定后续分析准确性的关键环节。制样方法因技术目标而异: 成像技术需将组织制备为薄片(冷冻/石蜡/树脂切片)或整体透明, 以保留原位空间信息; 识别技术可通过切片原位分析或消解提取颗粒后进行光谱等鉴定; 定量技术通常需将样品彻底消解或热解, 将聚合物转化为可检测的分子或元素。然而, 再精密的制样流程也需严格的质量控制来保障其可靠性, 以规避假阳性与假阴性结

果。具体而言, 针对受控暴露实验, 必须设置无 MNP_s 暴露的植物空白对照, 以扣除植物自身成分及环境本底的干扰; 对于真实环境样品, 其复杂的前处理过程则要求更严格的质控, 包括器皿预清洗与全流程空白对照。此外, 所有分析均应包含阳性对照, 以验证检测技术的可行性。这些技术在制样要求、空间分辨率及适用范围等方面各有不同, 如表 1 所述。实际研究中常联合使用, 以提高植物复杂基质中 MNP_s 检测结果的可靠性^[7,12]。

表1 植物体内微/纳塑料成像、识别和量化技术

Table 1 Imaging, identification and quantification technologies of micro/nanoplastics in plants

Category (类别)	Analytical technique (分析技术)	LOD(空间分辨率/检测限)	Sample preparation(样品制样过程)	Advantage(优势)	Limitation(局限性)	Reference (参考文献)
原位示踪成像技术	光学显微成像	约 100 nm, 适用于标记 MNP _s	(固定, 脱水), 石蜡、琼脂或 OCT 等包埋, 切片	可获得较清晰的二维分布; 适合分析根、茎、叶中 MNP _s 传输	需要合成标记的 MNP _s ; 深层组织穿透有限; 植物自发荧光易造成假阳性	[13-14]
	扫描电子显微镜 (SEM) 成像	纳米级, 通常可观察 > 10 nm 颗粒或团聚体	(固定, 脱水), 冷冻干燥或临界点干燥制样; 喷金/喷铂	分辨率高, 可观察 MNP _s 形貌、团聚和组织表面附着	制样可能改变原位状态; 视场有限; 仅凭形貌难以确认聚合物类型	[13-15]
	透射电子显微镜 (TEM) 成像	< 1 nm	化学固定; 脱水; 树脂包埋; 超薄切片; 铜网观察	可观察 NP _s 和细胞超微结构关系	制样复杂; 取样区域小	[14, 16]
	X 射线显微 CT (Micro-CT/Nano-CT) 成像	Micro-CT: 1 μm; Nano-CT: 50 nm	冷冻干燥或临界点干燥制样或通过 UV 胶等包埋鲜样	可进行三维无损或低损伤成像	普通无标记 MP _s 与植物组织衬度弱, 需高密度物质标记增强衬度; 无法对 NP _s 进行示踪	[17-18]
	显微 X 射线荧光成像 (μ-XRF)	约 1 μm; 适用于 Pd/Au 等元素标记 MNP _s 或其团聚体成像	冷冻切片 (30-50 μm), 冷冻干燥, 确保样品表面平整	可获得标记元素空间分布; 适合与高原子序数标记 MNP _s 联用	难以直接识别无标记单颗粒 NP _s ; 元素信号不一定完全来自 MNP _s	[19-20]
	基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱成像 (MALDI-TOF-MS)	约 120 nm~3 mm PS; PS MNP _s : LOD 25 mg/L	样品经分离/纯化后热处理, THF 溶解, 与基质和阳离子化试剂混合后点样分析	无需标记、高通量联用	样品量小、代表性有限; 基质干扰, 离子抑制效应, 仪器昂贵	[12, 21]
	纳米二次离子质谱成像 (NanoSIMS)	约 50 nm, 依赖金属或同位素标记的 MNP _s	化学固定, 脱水, 树脂包埋, 离子束超薄切片 (平整度要求高), 定位喷金/喷铂	空间分辨率高, 可进行同位素成像和定位	仪器昂贵; 样品制备复杂; 通常依赖标记颗粒	[22-23]
化学成分识别技术	共聚焦拉曼光谱识别 (Raman)	常规 μ-Raman 通常可识别 ≥ 1 μm MNP _s ; 优化条件下可分析约 300 nm NP _s	植物切片、压片或消解后观测	无需标记; 可提供聚合物化学指纹	受叶绿素、多酚、木质素荧光干扰明显; NP _s 信号弱	[12-13, 24-25]
	表面增强拉曼散射识别 (SERS)	可检测 100 nm 级 PS/PE/PP; 质量检出限约 40 μg/g, 400 nm PS 约 50 μg/g	在拉曼制样基础上, 向样品表面滴加或预沉积金/银纳米颗粒溶液, 干燥	灵敏度高, 可增强 Raman 信号	增强热点不均一; 基底重现性差; 定量可靠性不足	[12, 26-28]
	相干反斯托克斯拉曼散射 (CARS)/受激拉曼 (SRS)/针尖增强拉曼 (TERS) 等拉曼衍生技术	CARS: 约 0.4 μm PS beads; SRS: 约 1.4~12 μm; TERS: 约 20~30 nm	切片、透明化或确保平整基底	具有快速或纳米尺度无标记化学成像潜力	仪器复杂; 植物体内 MNP _s 应用仍有限; 通量低	[12, 29]
	光热红外光谱识别 (O-PTIR)	500 nm	冷冻切片或树脂包埋, 超薄切片 (< 1 μm), 也可以消解提取 MNP _s , 最后在平整基底	亚微米红外识别能力强; 受荧光干扰较小	在植物组织中应用少; 厚样品和复杂基质会影响信号解释	[12, 30]
	原子力显微镜红外光谱 (AFM-IR)	约 20~50 nm; 已用于约 170~180 nm PLA	冷冻切片或树脂包埋, 超薄切片, 也可以消解提取 MNP _s , 最后在平整基底	可同步获得纳米形貌和红外化学信息	视场小、速度慢; 样品表面平整度要求高; 难以高通量分析	[12, 31]

(续表 1)

Category (类别)	Analytical technique (分析技术)	LOD(空间分辨率/检测限)	Sample preparation(样品制样过程)	Advantage(优势)	Limitation(局限性)	Reference (参考文献)
	激光诱导击穿光谱识别(LIBS)	传统 LIBS: 25 μm 微透镜 LIBS: 约 500 nm	样品冻干, 切片, 常压下激光烧蚀	分析速度快, 可获得元素组成信息	缺乏完整聚合物指纹; 植物 K、Ca、Mg、Fe、P 等背景复杂	[32-34]
	纳米高光谱(HSI)识别	约 ≥ 100 nm	消解后颗粒悬液滴于载玻片上, 或植物切片直接置于暗场显微镜下观察, 建立散射光谱库	可结合散射光谱提高材料区分能力; 已用于植物中无标记 PS NPs 示踪	需自建光谱库; 植物基质散射复杂; 聚合物确认能力有限	[6, 35-36]
定量分析技术	电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析	已有植物研究使用 200 nm Eu 标记 PS	烘干, 酸消解, 定容过滤	灵敏度高; 不受植物荧光干扰; 适合痕量定量	依赖标记颗粒; 标记物可能浸出; 酸消解破坏空间信息	[14, 37]
	单颗粒 ICP-MS(sp-ICP-MS)分析	检出限约 1 μm , 已报道可检测 1.2-5 μm PS; 数量检出限可达 100 个/mL	烘干, 酸消解, 定容过滤, 稀释	可获得颗粒数浓度和粒径相关信息	植物消解液中盐分和有机质干扰; 传输效率校正复杂	[12, 14, 38]
	激光剥蚀 ICP-MS (LA-ICP-MS)分析	160 μm	冷冻或树脂切片, 激光剥蚀	可保留组织空间信息; 适合标记 MNPs 的元素成像	依赖金属/稀土标记; 难以直接用于无标记环境 MNPs	[19, 39]
	热裂解-气相色谱/质谱(Py-GC/MS)分析	LOD: 0.02-0.5 μg	冻干、研磨, 消解或溶剂处理, 热裂解	无需标记; 可进行聚合物质量定量	破坏性强; 无空间和粒径信息; 植物基质热裂解产物可能干扰	[12]
	热萃取/热脱附-GC/MS(TED-GC/MS)	PS NPs: 2.31~4.15 $\mu\text{g/g}$; PMMA NPs: 3.87~8.20 $\mu\text{g/g}$	冻干、研磨, 消解或溶剂处理, 热萃取/热脱附;	制样相对简化, 适合植物基质中 PS NPs 质量浓度探索	对高聚物本体定量能力受限; 易受基质和热稳定性影响	[9, 40]
	液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)分析	约 18.7 ng/g PLA MPs	碱辅助原位解聚/化学解聚, 中和或酸化, 离心/过滤	适合检测部分 MNPs、增塑剂、抗氧化剂、单体和降解产物	不能直接反映颗粒数、粒径和空间分布; 易受植物代谢物干扰	[41-42]
	火焰电离质谱(FIMS)分析	亚微克量级(<1 μg)	样品无需额外处理	分析时间短, 适合高通量筛查探索	定量精度和基质适用性仍需验证	[43]
	液体闪烁计数器分析	Bq 级; 对照组织<1 Bq/样品(<73 Bq/g DW)	干烧或湿氧化, 加入闪烁液, 避光静置, 计数	灵敏度极高, 适合痕量示踪; 不受植物自发荧光干扰	放射性管理严格; 依赖同位素标记的 MNPs; 缺少聚合物形貌和空间信息	[16, 44]
	同位素比质谱分析	$\mu\text{g/g}$ DW 级; 如 ^2H -PSNPs 在生菜叶片中定量至 0.73~15.6 $\mu\text{g/g}$ DW, 根部为 0.007~0.21 $\mu\text{g/g}$ DW	冻干, 研磨, 去除干扰组分	无放射性限制; 适合定量植物组织吸收和传输	设备要求高; 模型颗粒与环境真实颗粒仍有差异	[45]

综上所述, 当前植物体内 MNPs 分析虽已形成较为完整的技术体系, 但在制样标准化、基质干扰消除和质控等方面仍存在不足。构建从受控实验到真实环境均适用的稳定可靠分析方法已成为植物体内 MNPs 分析亟待突破的技术瓶颈。本综述系统梳理现有分析技术在植物 MNPs 研究中应用, 重点分析了不同技术的原理、制样过程、适用性及其在植物体内分析 MNPs 中的优势与局限性, 并在解析当前分析挑战的基础上, 展望未来的发展方向。

1 植物体内微/纳塑料的示踪成像技术

利用光学显微成像、电子显微成像、X 射线成像和质谱成像等原位示踪成像技术能够反映植物体内 MNPs 的传输和分布特征。样品通常需要通过化学固定、干燥、包埋和切片等制样流程后进行观测。

1.1 光学显微成像技术

光学显微成像技术主要是利用光学显微镜对植物切片进行观测, 根据成像原理等可分为宽场显微成像、共聚焦显微成像和光片显微成像等^[13]。植物组织存在强烈的光散射和吸收, 严重限制了光在组织中的穿透深度, 光学显微成像技术需要将厚实、不透明的植物组织处理成光可穿透的薄片或透明整

体,并尽可能抑制叶绿素等自发荧光干扰。为了使成像效果更佳,一般需要将植物组织样品包埋到琼脂或石蜡等包埋剂中并配合切片机进行切片观测^[13,46]。杨杰^[47]利用光学显微镜观测到聚苯乙烯(PS) MNPs暴露组植物茎部伤流液中的 MNPs,验证了植物根部暴露 MNPs后,能传输到地上部的茎叶之中。受阿贝衍射极限影响,标准光学显微镜空间分辨率有限,难以区分聚合物类型,且深层植物组织成像能力有限,对纳米级塑料颗粒的直接检测能力不足^[48-49]。近年来,近场扫描光学显微镜^[50]、双光子荧光显微镜^[51]以及微球辅助纳米成像^[52]等超分辨技术不断发展,在一定程度上提升了微/纳尺度颗粒的光学识别能力,其成像原理与传统光学显微成像存在本质区别。其中,Chen等^[52]利用远程微球纳米成像技术实现了23 nm特征结构的光学分辨。但这些技术在植物组织中的实际应用仍受自发荧光、散射背景、成像深度和化学确认能力等因素限制,未来需要进一步优化测试条件以使其适用于植物体内 MNPs的分析检测。

目前使用较多的是激光共聚焦显微镜,与宽场显微镜和光片显微镜不同,共聚焦显微成像利用激光点扫描,排除焦点之外的信号。当使用荧光标记物掺杂 MNPs时,共聚焦显微镜可通过识别荧光信号间接追踪 MNPs在植物体内的传输与分布,其空间分辨率约100 nm^[13,47]。已有研究通过筛选荧光染料、利用荧光寿命成像等方式规避叶绿素等植物组织的自发荧光干扰^[53]。Li等^[6]通过比较不同波长下植物的自发荧光情况,发现在488 nm波长下植物茎叶无自发荧光干扰,在635 nm波长下植物根部无自发荧光。镧系配位材料具有优异的长荧光寿命,Luo等^[37]将稀土铈配合物掺杂至200 nm的PS NPs,利用其所具有的时间分辨荧光特性减少背景荧光的干扰。此外,量子点(QDs)、碳点(CDs)、聚集诱导发光染料(AIE)和上转换纳米颗粒(UCNPs)等新型发光材料也被用于构建荧光标记 MNPs,以提高标记稳定性、降低染料泄漏风险并改善成像效果^[14,46,54-55]。其中,QDs和CDs标记 MNPs已被用于植物体内示踪研究^[14,46],AIE标记可缓解传统染料聚集猝灭和泄漏问题^[54],UCNPs标记颗粒则可利用近红外激发实现低背景成像^[55]。这些新型标记材料提高了荧光信号的稳定性和抗背景干扰能力,使共聚焦显微成像能够更清晰地追踪 MNPs在植物体内的空间分布。基于该类方法,已有研究在小麦(*Triticum aestivum* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)和玉米(*Zea mays* L.)等作物中观察到 MNPs可在根表富集,并进一步进入根部组织或向地上部传输^[56-58]。然而,荧光成像结果本质上依赖标记信号,仍可能受到标记物泄漏、颗粒表面性质改变和模式 MNPs颗粒环境代表性不足等因素影响。因此,荧光示踪结合共聚焦显微镜等显微成像技术仅适用于标记 MNPs,探究 MNPs在植物体内的吸收、传输和空间分布。

1.2 电子显微成像技术

电子显微成像利用高能量的电子束照射样品,收集样品反射或透射的电子信号,常见的有扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)。SEM和TEM分别观测样品表面和样品内部微观结构,凭借纳米级和原子级分辨率可清晰呈现 MNPs的组织黏附与胞内定位,但植物样品含水量高、导电性差和内部结构脆弱,因此电镜制样是关键环节。制备SEM样品一般需要将植物组织经液氮速冻后进行冷冻干燥或者临界点干燥,进一步将样品粘在载物台上进行喷金/铂以增强其导电性。冷冻扫描电镜可直接将植物组织快速投入液氮中并通过低温传输杆将样品送入电镜冷台,在低温下原位喷金/铂进行观测。制备TEM样品需要提前将样品通过戊二醛或者四氧化锇等化学试剂固定,用不同梯度的乙醇或丙酮脱水,使用树脂包埋剂进行包埋,在超薄切片机上用刀片修去多余树脂,暴露组织面,进一步放入铜网或镍网中进行观测。

已有研究利用SEM观察到PS NPs在甜菊(*Stevia rebaudiana* Bertoni.)叶片气孔附近和叶肉细胞间隙中的团聚分布^[59],也在狸藻(*Utricularia aurea* Lour.)捕虫囊和空心菜(*Ipomoea aquatica* Forssk.)根部组织中观察到 MNPs的局部滞留与粒径依赖性分布^[60-61]。然而,SEM和TEM主要提供形貌和局部定位信息,仅凭颗粒外观难以确认其聚合物类型。因此,电子显微成像通常需与能谱、光谱或质谱技术联用,以实现形貌观察、元素辅助判断、聚合物化学识别和含量定量之间的互补。常见的联用技术有扫描电镜-拉曼光谱和双束电镜(FIB-SEM)-飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS)等。

1.3 X射线成像技术

X射线成像技术为植物体内 MNPs的无损三维可视化提供了独特手段。其中,X射线显微CT(Micro-CT/Nano-CT)利用X射线穿透样品时,不同成分(如植物组织与 MNPs)对X射线的吸收程度存在

差异, 可通过旋转样品采集多角度投影, 经计算机重建获得样品内部的三维密度分布图。该技术可对活体或完整植物组织进行三维无损扫描, 直接重构标记 MNPs 等颗粒物在根、茎、叶内的空间分布, 其中 Micro-CT 的分辨率为 1 μm , Nano-CT 的分辨率为 50 nm, 该技术已成功用于表征纳米颗粒在植物根中的内化和传输过程^[17-18]。此外, 显微 X 射线荧光成像 ($\mu\text{-XRF}$) 也能够提供标记 MNPs 在植物体内的分布信息, 其原理是利用聚焦的 X 射线束逐点扫描样品表面, 激发出样品中元素的特征 X 射线荧光, 通过能谱分析特定标记元素的信号强度, 绘制出二维元素分布图。Del Real 等^[19]将小麦暴露于钯 (Pd) 掺杂的纳塑料中, 并结合同步辐射 $\mu\text{-XRF}$ 对根部 Pd 信号进行成像, 从而可视化 NPs 在根组织中的分布; 同时结合 ICP-MS 实现了植物体内纳塑料吸收和转运的定量分析。该方法需保持样品平整干燥, 无复杂制样过程, 能够实现非破坏性分析, 并可对同一活体样本进行长期追踪, 实现高灵敏的元素特异性成像^[19]。

1.4 质谱成像技术

质谱成像技术可以直接检测样品表面分子碎片的质荷比 (m/z) 或元素, 生成分布图像。可用于直接分析样品切面的大分子和元素分布, 也可用于分析稳定同位素标记 MNPs 的分布。典型的代表技术有基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱 (MALDI-TOF MS)、激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 和纳米二次离子质谱 (Nano-SIMS)。

MALDI-TOF MS 是一种“软电离”质谱技术, 需要将待测样品与过量的小分子基质 (如 α -氰基-4-羟基肉桂酸、2, 5-二羟基苯甲酸等) 混合, 干燥结晶后通过激光照射将能量传递给样品分子, 使其解吸电离, 样品分子被质子化 (获得 H^+) 或去质子化, 生成完整分子离子。其空间分辨率为 10 μm , 样品冷冻切片后可直接扫描, 并可观测到 MNPs 以及植物自身代谢物质的分布^[12]。Lin 等^[21]首次采用与 PS 存在特异性相关的 m/z 315.3 处的苯乙烯三聚体峰进行定量, 不同的电离行为使得 NMPs 产生不同的分子量, 得到的 PS MNPs 的检出限 (LOD) 为 25 $\text{ng}/\mu\text{L}$ 。但受植物组织干扰和离子抑制, 颗粒状 MNPs 与其他有机分子不同, 基质喷涂后不同粒径、不同形貌的塑料颗粒被激光解析的效率可能不同, 因此无法精准量化。

LA-ICP-MS 和 Nano-SIMS 是“硬电离”技术, 可实现对金属元素和稳定同位素的示踪成像和半定量分布, 空间分辨率分别为 160 μm 和 50 nm^[20, 62]。与 LA-ICP-MS 相比, Nano-SIMS 可能更适用于植物体内 MNPs 示踪成像研究。Nano-SIMS 使用非常小的 (50-150 nm) 主离子束光栅照射样品, 侵蚀样品的表层并产生二次离子, 然后将其输送到质谱仪中, 将大摩尔分子轰击成复杂的碎片^[22]。与 MALDI-TOF MS 类似, 由于 Nano-SIMS 存在对表层的二次离子进行识别以及基质干扰等问题, 其无法精确量化, 所得结果是半定量的, 主要分析的是局部样品中的分布和含量。Moore 等^[63]利用 Nano-SIMS 等探究了水稻组织中微量元素 (砷、铁和锌) 的不同细胞和亚细胞分布模式, 该技术对样品的平整度要求高, 厚样品必须首先切成更薄的薄片 (例如, 通过显微切片机或聚焦离子束切削样品)。

1.5 其他成像技术

除基于光学显微、电子显微、X 射线成像和质谱成像外, 利用光谱信号进行空间分布成像的光谱成像技术也被用于植物体内 MNPs 检测分析。拉曼光谱成像、红外光谱成像和高光谱成像技术通过逐点采集样品在特定波段的拉曼散射、红外吸收或弹性散射光谱, 将光谱强度或特征峰面积映射为二维或三维空间分布图像^[64]。这些成像技术为 MNPs 化学识别提供了空间定位基础, 其共同优势在于无需荧光标记即可获得图像, 但成像性能受制于光谱信号强度和基质背景干扰之间的平衡。此外, 核磁共振成像和光声成像等技术由于存在受水影影响严重、空间分辨率较低同时需借助外源标记才能产生可检测信号等不足, 在植物体内 MNPs 检测中的应用有限^[65]。

2 植物体内微/纳塑料的识别技术

对于植物体内 MNPs 的识别鉴定主要通过谱学技术实现, 依据信号来源可将该技术分为两类, 一是基于分子振动拉曼光谱、红外光谱, 通过探测化学键的振动指纹直接识别聚合物类型; 二是基于原子发射光谱的激光诱导击穿光谱 (LIBS), 通过检测目标元素组成区别不同类型的 MNPs^[66]。此外, 纳米高光谱成像技术则基于 MNPs 的局域表面等离子体共振或弹性散射特征, 提供了一种无需标记的快速识别途径^[48]。值得指出的是, 上述技术可对植物组织切片进行原位分析以同步获取化学信息与空间分

布,但植物基质的强烈干扰往往需要通过消解等前处理手段加以消除。常见的消解试剂有酸、碱、氧化试剂和酶。酸消解效率高,但可能会改变MNP尺寸和形貌,特别是PA和PET等对酸敏感的MNP;碱消解大多温和,常用于生物样品分析,但在植物样品中易形成沉淀包裹MNP影响后续分析;双氧水等氧化试剂对植物有机质去除效率高,但强氧化条件可能改变MNP的表面官能团;酶解最温和,但成本高、耗时长,对木质素等去除效率有限^[67]。对于植物体内MNP的识别,消解的核心目标是保证MNP的完整性并减少植物组织的干扰。

2.1 拉曼光谱识别技术

拉曼光谱是探测分子对单色光的非弹性散射,具有无需标记、非破坏性和高空间分辨率的优势,显微拉曼光谱的空间分辨率可达500 nm^[68]。常见的拉曼光谱的激发波长为532 nm和785 nm。拉曼光谱极易受到植物荧光的干扰,在制样过程中需要去除有机质并通过调节激发波长、功率、积分时间和累积次数等降低荧光产生的干扰。Tympa等^[24]利用共聚焦拉曼光谱对萝卜(*Raphanus sativus*)根部组织中的无标记ABS MP进行原位识别,证明Raman光谱可用于根菜类植物组织内MP的化学识别与空间定位;Zhi等^[25]使用相同的技术对玉米体内积累的无标记PS颗粒识别和定位,并联合SEM实现了形貌-化学双重验证。近年来,由拉曼衍生出的表面增强拉曼散射(SERS)、针尖增强拉曼光谱(TERS)、相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)和受激拉曼散射(SRS)也被应用于生物样品中MNP的分析,这些技术不仅提高了拉曼光谱的信号强度和分辨率,而且可以一定程度上规避植物自发荧光的干扰^[27-29,69-70]。SERS和TERS侧重于增强信号与突破衍射极限,CARS和SRS侧重于规避荧光干扰并提升成像速度。以SERS技术为例,Kousheh等^[27]利用Au@Ag核壳纳米颗粒增强的SERS方法,重点检测了生菜(*Lactuca sativa* L.)、菠菜(*Spinacia oleracea* L.)等叶菜表面残留的PS和聚乙烯(PE)MNP,实现了叶面MNP污染的快速识别与定量,该研究利用SERS对蔬菜表面MNP污染情况进行检测分析。Liu等^[28]采用核壳结构合成了NPs,其中金核标记拉曼报告分子4-巯基苯甲酸,而PS壳层则模拟塑料表面,实现了植物组织中NPs的SERS原位成像,并可通过ICP-MS进行定量分析,推动了SERS从单纯化学指纹识别向“成像-定量”联用方向的发展。

2.2 红外光谱识别技术

红外光谱探测的是分子对红外光的吸收,直接反映分子内部基团和化学键的振动能级跃迁^[10]。受限于光波长衍射极限的影响,传统显微傅里叶红外光谱的空间分辨率仅能达到10 μm,无法实现植物能够吸收和传输的更小尺寸MNP的分析^[12,71]。且红外光谱信号易受水分干扰,样品需要干燥彻底脱水后分析。光热红外光谱(O-PTIR)用一束可见光探针激光探测样品被红外激光照射后,因光热效应引起的局部折射率或表面形貌的微小变化^[30,72]。该技术在植物组织MNP检测分析中尚处空白,其亚微米分辨率与荧光耐受性有望填补植物体内MNP红外检测的空白。在纳米尺度上,原子力显微镜红外光谱(AFM-IR)通过探测红外吸收引发的光热膨胀,能够实现纳米级分辨率下的同步形貌与化学分布图谱分析,所得光谱与经典FTIR谱库高度吻合^[41]。该技术可用于识别根表面或最外层细胞内的单个纳米颗粒,空间分辨率达到10 nm,揭示了颗粒与植物组织间的相互作用机制。目前,AFM-IR已成功用于检测并定量尺寸小至20 nm的PS NPs,并对其氧化降解等物理化学特性进行分析^[73]。

2.3 激光诱导击穿光谱识别技术

与红外拉曼识别分子指纹不同,激光诱导击穿光谱(LIBS)分析的是单个原子的元素组成(如碳、氢、氧等),属于原子发射光谱。LIBS最常与LA-ICP-MS进行比较。这两种技术均采用激光烧蚀处理样品。尽管LA-ICP-MS具有极高的灵敏度(μg/kg级),可缩短样品制备时间、提高样品通量、减少元素和同位素干扰,常用于识别多数金属元素及其同位素,但该方法难以识别检测H、O等轻元素^[74]。LIBS通过检测聚合物参比光谱的光谱特征,可以对环境样品中的MPs与非塑料进行区分,并鉴定其基础聚合物类型^[32]。但传统LIBS空间分辨率低(仅为25 μm),限制了其在亚细胞尺度元素分布分析中的应用^[33],Meng等^[34]通过引入带有微透镜光纤的采样激光器,并结合双脉冲信号增强,将LIBS的烧蚀斑尺寸降低至500 nm,可视化了纳米颗粒在单细胞中的分布。对于碳氢聚合物(PE、PP和PS等)而言,其组成元素C和H是植物基质的主量元素。这使得LIBS在植物体内无标记MNP识别中面临基质干扰问题。

2.4 纳米高光谱识别技术

纳米高光谱成像识别技术是一种快速、无损、宽场光学表征技术,主要利用可见光-近红外(VNIR: 350~1 000 nm)以及短波红外(SWIR: 1 000~2 500 nm)波段植物体内微颗粒对光的弹性散射,示踪非标记的塑料颗粒^[61],通过暗场下散射光谱的差异区分不同材料、粒径和表面修饰的MNP_s。有研究利用纳米高光谱记录了200 nm无标记PS NPs的独特光谱特征,进而准确示踪了其在小麦幼苗中的分布特征^[48]。Li等^[41]利用纳米高光谱成像技术分别在玉米叶片内检测到了空气暴露的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET, 180 nm)和PS NPs(30 nm)及其随时间在叶片中的动态分布情况。尽管这项技术可以快速检测并获得谱图,但不同MNP_s在常用的可见光-近红外波段难以区分限制了其应用。针对不同MNP_s的识别,在分析的过程中需自建光谱库,且谱图易受到聚合物老化和表面污染等的影响,存在大量的数据和相关性冗余,随着数据维度的增加,数据分析和模型构建变得较为困难,难以识别环境样品中的MNP_s^[75]。

3 植物体内微/纳塑料的量化技术

植物体内MNP_s的量化主要包含MNP_s的颗粒浓度和质量浓度的分析。颗粒浓度的量化主要通过上述识别技术(红外光谱和拉曼光谱等)获得微塑料的尺寸、聚合物类型等特征后进行统计分析,计算出单个样品或单位质量下植物体内MNP_s的个数,目前对真实环境植物体内MNP_s颗粒浓度的分析较少。植物体内MNP_s质量浓度的量化技术主要是利用质谱等高灵敏仪器检测MNP_s热解产物或特征元素等实现高灵敏度定性定量^[76-77],主要包括电感耦合等离子体质谱、热裂解-气相色谱/质谱联用、液相色谱-质谱联用、火焰电离质谱、同位素比质谱、基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱、纳米二次离子质谱等。样品通常在清洗、干燥和研磨后根据仪器需求进行消解、过滤和制样等前处理过程(图2)。

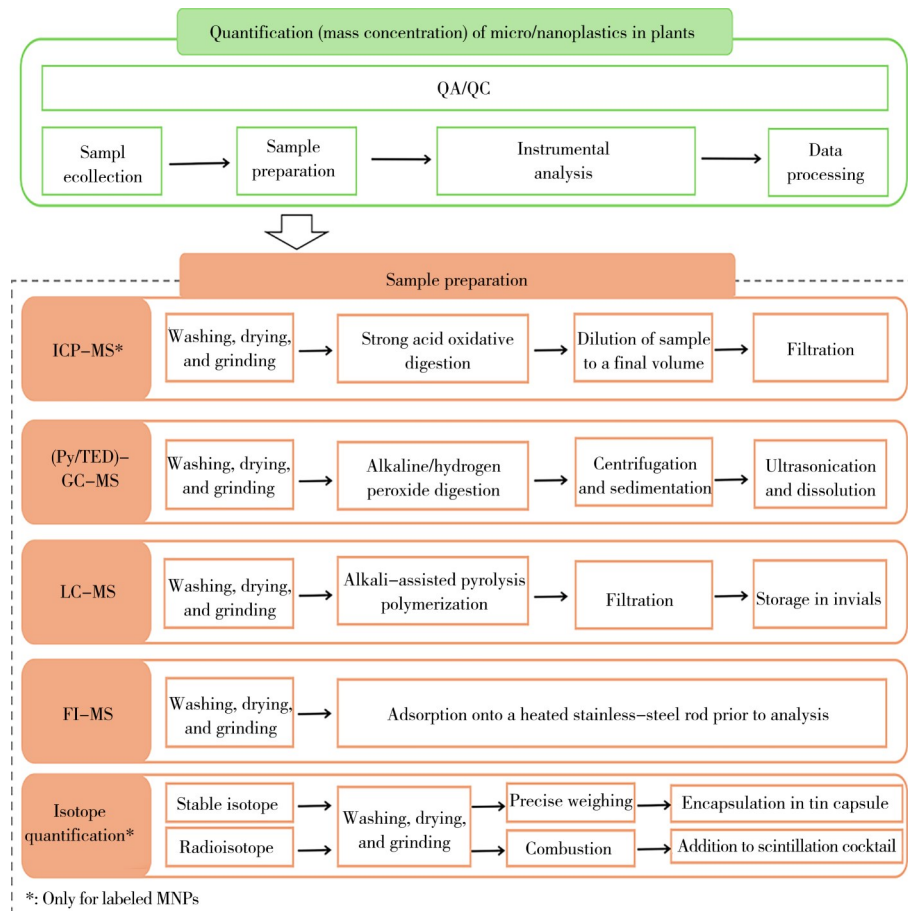


图2 植物体内微/纳塑料量化分析的前处理流程

Fig. 2 Analytical workflow for the quantification of micro- and nanoplastics in plants

3.1 电感耦合等离子体质谱技术

电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)是检测植物吸收金属标记微塑料的首选工具,通过测定金属元素

的量,间接量化植物吸收的金属标记MNP_s的含量,具有ng/kg级元素灵敏度^[78]。植物样品在干燥和消解定容过滤后可以使用ICP-MS进行分析。金属标记MNP_s的稳定性检测是ICP-MS应用的先决条件,在暴露实验前需对所用的金属标记微球进行稳定性检验。Luo等^[37]利用镧系稀土元素钬掺杂的PS,结合ICP-MS首次建立了植物体内NP_s的定量方法,证实MNP_s以根部积累为主,向地上部传输比例不足3%。Li等^[79]使用Pd标记的NP_s,结合ICP-MS对新鲜黄瓜(*Cucumis sativus* L.)中Pd掺杂的PS NP_s进行了量化、示踪和原位成像。为满足不同的分析条件,基于ICP-MS衍生出很多其他技术,如LA-ICP-MS、低温激光烧蚀电感耦合等离子体质谱(cryo-LA-ICP-MS)和单颗粒电感耦合等离子体质谱(sp-ICP-MS)等。Wang等^[39]使用cryo-LA-ICP-MS对新鲜黄瓜中Eu掺杂的PS NP_s进行了量化、示踪和原位成像。低温条件为新鲜黄瓜成像提供了稳定的条件,抑制了新鲜植株水分的蒸发,保持了植株的原始结构。

3.2 气相色谱-质谱技术

在MNP_s分析领域,几乎所有的气相色谱-质谱(GC-MS)方法都依赖热裂解、热萃取或热脱附作为前端进样手段,因为塑料聚合物分子量巨大,必须通过高温裂解成小分子后才能被气相色谱分离。常见的热分析GC-MS技术有热裂解-GC-MS(Py/GC-MS)和热萃取-热脱附-GC-MS(TED-GC-MS)等^[40]。Py/GC-MS是最成熟的无标记定量技术,通过检测聚合物特征裂解产物实现定性与定量,检出限达ng~μg/g级。Li等^[79]在黄瓜中建立了基于四甲基氢氧化铵消解-乙醇洗涤沉淀-二氯甲烷溶解的植物体内PS NP_s和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)NP_s的定量方法,PS和PMMA NP_s的检出限分别为2.31~4.15 μg/g和3.87~8.20 μg/g。该方法已拓展至土壤-植物-食物链体系中NP_s传递的定量研究,并成功追踪生菜到蜗牛(*Achatina fulica*)的食物链传递^[80]。此外,Alotaibi等^[40]将该技术拓展至添加剂共分析,发现增塑剂与抗氧化剂的释放速率远快于颗粒传输,提示添加剂积累风险可能先于颗粒本体。Zytowski等^[9]将TED-GC-MS用于小白菜(*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitam.)中PS NP_s的定量,进一步说明热分析-质谱技术可用于蔬菜基质中MNP_s的质量定量检测。热分析气质联用技术分析MNP_s具有破坏性,样品分析后无法回收,每次的进样量较小(0.1~0.5 mg),对样品均匀性和代表性要求高;植物基质热解产物(如苯乙烯)可能与塑料特征峰重叠,进而造成定性误判和定量偏差^[9,23,39]。

3.3 液相色谱-质谱技术

液相色谱-质谱(LC-MS)主要用于添加剂(双酚类、邻苯二甲酸酯等)或聚合物解聚单体检测,并反推出MNP_s的含量。该技术需要复杂的解聚(一般使用碱辅助热解聚法)和制样过程,不同聚合物解聚效率差异大,目前较为成熟的是针对PET、聚碳酸酯、聚乳酸(PLA)和聚酰胺等MNP_s的LC-MS分析方法。Li等^[41](2025)使用LC-MS/MS通过识别PET解聚产生的[TPA-EG]₃单体,量化了不同环境暴露下,玉米体内PET NP_s含量随时间的变化情况。Wang等^[42]将PLA MP_s高效解聚为乳酸,并通过LC-MS/MS检测,定量限为18.7 ng/g。该方法对环境样品中加标PLA MP_s的回收率达到93%。该技术适用于含原子的缩聚聚合物,不适用于纯碳氢聚合物。

3.4 火焰电离质谱技术

有别于传统气相色谱的火焰离子化检测器,火焰电离质谱(FI-MS)是一项将火焰热解与化学电离源直接耦合到质谱仪的新兴技术。Xiao等^[43]提出了使用FI-MS快速检测环境和生物样品中MNP_s的新颖方法,火焰的高温将干燥样品中的塑料聚合物瞬间裂解成小分子碎片,同时火焰中的反应物将这些碎片化学电离,电离后的特征离子被直接吸入高分辨质谱进行分析。FI-MS能够分解和电离不同环境介质(土壤、食品和生物组织)中的PET和PS,每个样品的分析最快可达10 s。与Py/GC-MS相比,FI-MS省去了色谱分离步骤,实现了超高通量筛查,但其对成分复杂的植物组织中微量MNP_s的准确定量与定性确认能力仍有待评估。

3.5 同位素量化技术

同位素对目标分子的生化特性几乎无影响,是研究生物过程的理想标记物。同位素量化技术是植物体内MNP_s精准定量的核心方法之一,根据同位素类型可分为稳定同位素标记和放射性同位素标记两类^[23]。稳定同位素标记(²H、¹³C)无放射性限制,已成为原位定量示踪的核心技术。样品需要冷冻干燥后研磨过筛,针对目标同位素去除干扰组分,如通过消解去除植物组织对¹³C标记的MNP_s的干扰。

氚标记 PS NPs (^3H -PS NPs) 结合同位素分析-同位素比质谱已被用于量化“生菜-蜗牛”食物链中 NPs 的传输,证实了 NPs 可经气孔进入叶肉组织并向根传输,传输效率低于 5%,叶片接触 ^3H -PS NPs 的浓度越高越能促进叶片中 ^3H -PS NPs 的积累,其浓度积累范围为 0.73~15.6 $\mu\text{g/g}$,但向根部的传输量有限(<5%)。蜗牛(*Bradybaena ravid*)在摄入含有 5 mg/L ^3H -PS NPs 污染的生菜叶片 14 d 后,体内积累量为 0.33~10.68 $\mu\text{g/kg}$,整体营养级转移动力学系数为 0.45,表明该食物链中存在营养级稀释现象^[45]。放射性同位素标记凭借极高灵敏度与无自发荧光干扰的优势,在痕量追踪中不可替代。针对 $^3\text{H}/^{14}\text{C}$ 标记的 MNPs,通常需要经过干烧法或者湿氧化法将暴露后的植物样品完成转化为水或者二氧化碳。Zhang 等^[81]利用 ^{14}C 标记的 PS NPs 结合液体闪烁计数,系统揭示了不同粒径 NPs (20 nm 和 100 nm) 在动物(大鼠)体内的排泄途径、组织分布特征及跨代转移规律。利用该技术,Clark 等^[16]首次实现了萝卜中 ^{14}C -PS NPs (粒径约 50 nm) 从根到可食组织的定量追踪:量化分析结果显示根部截留约 95%,约 25% 分布于肉质可食根、约 10% 传输至茎叶。类似的 ^{14}C 标记策略也被用于研究 NPs 在南瓜(*Cucurbita pepo* L.) 体内从根部向叶片和花器官的传输,结果显示 ^{14}C -PS NPs 能够在花器官中被检测到,并主要富集于花药,同时伴随花粉活力下降,提示 NPs 进入作物后可能对植物生殖过程及传粉者产生潜在影响^[44]。

4 展 望

植物体内微纳塑料的准确检测,是评估其粮食安全与生态风险的关键前提。本文系统综述了原位成像、化学识别与定量分析技术,指出了现有方法在远高于环境水平的暴露条件下验证、痕量适用性数据不足的局限,并凝练出以下核心挑战,包括:如何原位识别环境植物样品中 MNPs 的空间分布、聚合物类型和含量?如何在原位成像过程中避免植物组织中叶绿素等产生的自发荧光干扰?如何跨越纳米至微米尺度对植物体内的 MNPs 进行多层级定位?如何克服消解方法提取植物体内的 MNPs 时,因消解不彻底引发的分析结果不可靠以及原位识别分辨率受限问题?如何在质谱量化分析过程中减少纤维素与木质素等碳基成分热解产物与 MNPs 热解产物重叠而引起的对量化结果的影响。针对这些挑战,未来应重点研究:

(1) 从宏观到纳米的多层级原位成像体系的构建;突破当前单一成像技术在视场、分辨率与样品完整性之间的固有矛盾,在规避植物强散光和自发荧光的基础上,实现对植物体内 MNPs 从毫米级器官架构到纳米级亚细胞定位的全尺度原位可视化。

(2) 植物体内 MNPs 提取与智能光谱解混识别方法的优化;开展植物温和消解研究,提取植物体内 MNPs 的同时,最大限度保留塑料颗粒的原始形貌与聚合物指纹;建立开放共享的标准光谱数据库,覆盖不同聚合物类型、粒径、老化状态及典型植物基质背景光谱,多源数据融合并统一采集元数据规范,以深度学习驱动的智能算法实现 MNPs 特征峰与植物基质信号的精准分离。

(3) 真实环境中植物体内 MNPs 精准量化方法的建立;推动光热红外、纳米二次离子质谱和光声成像等原位无损先进分析技术在植物中的方法验证;利用纳米红外技术识别真实环境中植物样品体内 MNPs,借助人工智能实现多源数据融合与自动识别,以提高检测分析效率。

借助上述多维度突破,将植物体内 MNPs 研究从“可检测”走向“可验证”、从“受控实验样品”走向“真实环境样品”,构建标准化、高通量和高灵敏度的植物体内 MNPs 检测分析方法体系,为农田土壤-作物系统中 MNPs 类新污染物的环境行为研究和农产品安全风险提供先进而可靠的检测技术。

参考文献:

- [1] Jiang F, Gao C, Chan A W H, Topping D O, Zhang H, Li W, Coe H, Liu X, Ching J, Zheng Z. *Curr. Pollut. Rep.*, **2025**, 11(1): 53.
- [2] Yuan L, Yan Z Y, Hao F, Wang Z Y, Yuan X Z, Yang X F, Chen T, Yan X P. *J. Instrum. Anal.* (袁珑, 严诸颖, 郝放, 王震宇, 袁宪正, 杨晓帆, 陈涛, 严秀平. 分析测试学报), **2025**, 44(9): 1788-1800.
- [3] Wang J H, Li B, Hou Y Q, Wang L J, Wang J, Zhu L S. *J. Agro-Environ. Sci.* (王金花, 李冰, 侯宇晴, 王兰君, 王军, 朱鲁生. 农业环境科学学报), **2023**, 42(5): 951-965.
- [4] Yang J, Li L Z, Zhou Q, Li R J, Tu C, Luo Y M. *Acta Pedol. Sin.* (杨杰, 李连祯, 周倩, 李瑞杰, 涂晨, 骆永明. 土壤学报), **2021**, 58(2): 281-298.
- [5] Luo Y M, Tu C, Pan Y S, Yang J, Hao Z, Liu Y. *Acta Pedol. Sin.* (骆永明, 涂晨, 潘彦硕, 杨杰, 郝征, 刘颖. 土壤学报), **2026**, 63(2): 341-350.

- [6] Li L Z, Luo Y M, Li R J, Zhou Q, Peijnenburg W J G M, Yin N, Yang J, Tu C, Zhang Y C. *Nat. Sustain.*, **2020**, 3(11): 929–937.
- [7] Ashokkumar V, Chandramughi V P, Mohanty K, Gummadi S N. *J. Environ. Manage.*, **2025**, 381: 124995.
- [8] Marín-Sáez J, López-Rodríguez E, Garrido Frenich A, Romero-González R. *Trends Environ. Anal. Chem.*, **2026**, 49: e00297.
- [9] Zytowski E, Baldermann S. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, **2025**, 39(14): e10046.
- [10] Deng J Y, Zhang T T, Gao H R, Huang Z J, Yu H B, Li M J, Yan Y, Wei S, Li Q. *Plant Physiol. Biochem.*, **2026**, 232: 111172.
- [11] Donaldson L. *Molecules*, **2020**, 25: 2393.
- [12] Ivleva N P. *Chem. Rev.*, **2021**, 121(19): 11886–11936.
- [13] Hua Z D, Ma S R, Ouyang Z Z, Liu P, Qiang H, Guo X T. *TrAC Trends Anal. Chem.*, **2023**, 158: 116889.
- [14] Gopinath N, Karthikeyan A, Joseph A, Vijayan A S, Vandana S, Nair B G. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **2024**, 31: 49317–49329.
- [15] Zhang J J, Fu D D, Feng H, Li Y, Zhang S Y, Peng C, Wang Y D, Sun H W, Wang L. *TrAC Trends Anal. Chem.*, **2024**, 170: 117472.
- [16] Clark N J, Fischer A C, Carne D, Littlejohn G R, Durndell L J, du Plessis A, Thompson R C. *Environ. Res.*, **2025**, 284: 122687.
- [17] Avellan A, Schwab F, Masion A, Chaurand P, Borschneck D, Vidal V, Rose J, Santaella C, Levard C. *Environ. Sci. Technol.*, **2017**, 51(15): 8682–8691.
- [18] Lim S J, Lee K J, Nam H, Kim S H, Kim E, Lee S, Chung J. *Trends Anal. Chem.*, **2024**, 179: 117851.
- [19] Del Real A E P, Mitrano D M, Castillo-Michel H, Wazne M, Reyes-Herrera J, Bortel E, Hesse B, Villanova J, Sarret G. *J. Hazard. Mater.*, **2022**, 430: 128356.
- [20] Moore K L, Lombi E, Zhao F J, Grovenor C R M. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2012**, 402: 3263–3273.
- [21] Lin Y, Huang X, Liu Q, Lin Z, Jiang G B. *Talanta*, **2020**, 208: 120478.
- [22] Mayali X. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, **2020**, 12: 449–467.
- [23] Liu Z J, Tu C, Feng K, Yang J, Ma S Q, Zhang J, Liu Y, Ma Y N, Luo Y M. *Acta Pedol. Sin.* (刘子健, 涂晨, 丰凯, 杨杰, 马世琦, 张杰, 刘颖, 马旖旎, 骆永明. 土壤学报), **2026**, 63(2): 351–366.
- [24] Tympa L E, Katsara K, Moschou P N, Kenanakis G, Papadakis V M. *Materials*, **2021**, 14(9): 2329.
- [25] Zhi Z X, Li Y, Liu G, Ou Q H. *Sci. Total Environ.*, **2025**, 958: 178093.
- [26] Azeem I, Shakoor N, Chaudhary S, Adeel M, Zain M, Ahmad M A, Li Y B, Zhu G K, Shah S A A, Khan K, Khan A A, Xu M, Rui Y K. *Plant Physiol. Biochem.*, **2023**, 204: 108132.
- [27] Kousheh S, Hajikhani M, Asgari S, Lin M. *Microchim. Acta*, **2024**, 191: 755.
- [28] Liu M, Das A, Zuverza-Mena N, Musante C, White J C, Wang C, Guo H Y. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 500: 140520.
- [29] Dai H, Li H Y, Qiu W, Deng S H, Han J, Aminabhavi T. *TrAC Trends Anal. Chem.*, **2024**, 176: 117750.
- [30] Böke J S, Popp J, Krafft C. *Sci. Rep.*, **2022**, 12: 18785.
- [31] Pancani E, Mathurin J, Bilent S, Bernet C M F, Dazzi A, Deniset B A, Gre R. *Part. Part. Syst. Charact.*, **2018**, 35: 1700457.
- [32] Sommer C, Schneider L M, Nguyen J, Prume J A, Lautze K, Koch M. *Mar. Pollut. Bull.*, **2021**, 171: 112789.
- [33] Busser B, Moncayo S, Coll J L, Sancey L, Motto-Ros V. *Coord. Chem. Rev.*, **2018**, 358: 70–79.
- [34] Meng Y F, Gao C H, Lin Z, Hang W, Huang B L. *Nanoscale Adv.*, **2020**, 2(9): 3983–3990.
- [35] Zhang H J, Zhou H R, Pan W, Wang C, Liu Y Y, Yang L Y, Tsui M T K, Miao A J. *Environ. Int.*, **2023**, 179: 108134.
- [36] Nigmatzyanova L, Fakhrullin R. *Environ. Pollut.*, **2021**, 271: 116337.
- [37] Luo Y M, Li L Z, Feng Y D, Li R J, Yang J, Peijnenburg W J G M, Tu C. *Nat. Nanotechnol.*, **2022**, 17: 424–431.
- [38] Wightman R, Wallis S, Aston P. *Plants*, **2022**, 11(9): 1113.
- [39] Wang Y, Bai J J, Wei Y J, Zhao C X, Shao Z, Chen M L, Wang J H. *J. Hazard. Mater.*, **2024**, 465: 133029.
- [40] Alotaibi S A, Eshun G B, Sadik O A. *ACS Omega*, **2026**, 11(8): 13137–13148.
- [41] 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 W X, Xue Y N, Peng C, Liu C G, Sun H W, Xing B S, Wang L. *Nature*, **2025**, 641: 666–673.
- [42] Wang L, Peng Y W, Xu Y, Zhang J, Zhang T, Yan M Q, Sun H W. *Environ. Sci. Technol.*, **2022**, 56: 13029–13035.
- [43] Xiao M, Yang Y Q, Alahmadi H, Harbolic A, Moreno G M, Yu T, Liu J, Guo A, Warner G R, Stapleton P A, Chen H. *J. Hazard. Mater.*, **2025**, 493: 138322.
- [44] Piovesan A, Quartieri S, Faleri C, Bellingeri A, Nepi M, Al-Sid-Cheikh M, Corsi I. *Environ. Sci.: Nano*, **2026**, 13(2): 952–965.
- [45] Jiang X F, White J C, He E K, Van Gestel C A M, Cao X D, Zhao L, Xu X Y, Guo W B, Qiu H. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58(35): 15438–15449.

- [46] Liang J L, Cao G X, Zheng F Y, Li S X, Liu F J, Lin L X, Huang X G, Zhang Z H, Zheng J Y, Huang Q Y. *Chemosphere*, **2022**, 307: 136094.
- [47] Yang J. *Occurrence, Accumulation, and Wheat Uptake Processes of Microplastics in Agricultural Soils*. Nanjing: University of Chinese Academy of Sciences(杨杰. 农田土壤中微塑料的赋存、积累特征和小麦吸收过程研究. 南京: 中国科学院大学), **2023**.
- [48] Li R J, Tu C, Li L Z, Wang X Y, Yang J, Feng Y D, Zhu X, Fan Q H, Luo Y M. *J. Hazard. Mater.*, **2023**, 456: 131675.
- [49] Komis G, Šamajová O, Ovečka M, Šamaj J. *Trends Plant Sci.*, **2015**, 20(12): 834–843.
- [50] Meyns M, Dietz F, Weinhold C S, Züge H, Finckh S, Gerdts G. *Anal. Methods*, **2023**, 15(5): 606–617.
- [51] Mizuta Y. *Plant Cell Physiol.*, **2021**, 62(8): 1224–1230.
- [52] Chen L W, Zhou Y, Wu M X, Hong M H. *Opto-Electron. Adv.*, **2018**, 1: 170001.
- [53] Cho E, Ji S, Moon J, Koh H R. *Mol. Cell. Toxicol.*, **2025**, 21: 1015–1022.
- [54] Zhang L, Li G Z, Xin Q, Liu H N, Yang X Z, Liu Y. *Sens. Actuators B*, **2024**, 413: 135878.
- [55] Yakovenko N, Amouroux B, Albignac M, Collin F, Roux C, Mingotaud A F, Roblin P, Coudret C, Halle A T. *Environ. Sci. Nano*, **2022**, 9: 2453–2463.
- [56] Zhao X, Luo Q, Dai W, Deng Y, Yang N, Zhu X, Zheng Y, Li Y, Feng L. *Front. Plant Sci.*, **2026**, 17: 1718625.
- [57] Liu Y Y, Guo R, Zhang S W, Sun Y H, Wang F Y. *J. Hazard. Mater.*, **2022**, 421: 126700.
- [58] Li H B, Chang X, Zhang J K, Wang Y H, Zhong R Z, Wang L X, Wei J, Wang Y. *Chemosphere*, **2023**, 313: 137491.
- [59] Coman V, Scurtu V F, Coman C, Clapa D, Iancu S D, Leopold N, Leopold L F. *Plant Physiol. Biochem.*, **2023**, 197: 107634.
- [60] Zhou J Z, Cao Y, Liu X N, Jiang H S, Li W. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **2020**, 27: 32124–32131.
- [61] Zhao Y C, Hu C, Wang X F, Cheng H, Xing J F, Li Y S, Wang L, Ge T D, Du A, Wang Z B. *Agriculture*, **2024**, 14(2): 301.
- [62] Wu B, Chen Y X, Becker J S. *Anal. Chim. Acta*, **2009**, 633(2): 165–172.
- [63] Moore K L, Chen Y, van de Meene A M L, Hughes L, Liu W J, Geraki T, Mosselmans F, McGrath S P, Grovenor C, Zhao F J. *New Phytol.*, **2014**, 201(1): 104–115.
- [64] Käßler A, Fischer D, Oberbeckmann S, Schemewski G, Labrenz M, Eichhorn K J, Voit B. *Anal. Bioanal. Chem.*, **2016**, 408: 8377–8391.
- [65] Ishida N, Koizumi M, Kano H. *Ann. Bot.* **2000**, 86(2): 259–278.
- [66] Yang J, Tu C, Yuan X Z, Luo Y M. *Prog. Chem.* (杨杰, 涂晨, 袁宪正, 骆永明. 化学进展), **2025**, 37(1): 89–102.
- [67] Monteiro S S, Pinto da Costa J. *Trends Environ. Anal. Chem.*, **2022**, 33: e00151.
- [68] Jin N, Song Y, Ma R, Li J, Li G, Zhang D. *Anal. Chim. Acta*, **2022**, 1197: 339519.
- [69] Cole M, Lindeque P, Fileman E, Halsband C, Goodhead R, Moger J, Galloway T S. *Environ. Sci. Technol.*, **2013**, 47: 6646–6655.
- [70] Wang M, Huang Z L, Wu C, Yan S, Fang H T, Pan W, Tan Q G, Pan K, Ji R, Yang L Y, Wang P, Miao A J. *Environ. Sci. Technol.*, **2024**, 58(6): 2922–2930.
- [71] Maurizi L, Iordachescu L, Kirstein I V, Nielsen A H, Vollertsen J. *Heliyon*, **2023**, 9(9): e20119.
- [72] Prater C B, Kansiz M, Cheng J X. *APL Photonics*, **2024**, 9(9): 091101.
- [73] ten Have I C, Duijndam A J A, Oord R, van Berlo–van den Broek H J M, Vollmer I, Weckhuysen P B M, Meirer F. *Chem. Methods*, **2021**, 1(5): 205–209.
- [74] Willner J, Brunnbauer J, Quarles C D, Nelhiebel M, Larisegger S, Limbeck A. *J. Anal. At. Spectrom.*, **2023**, 38(10): 2028–2037.
- [75] 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.
- [76] Aynard A, Courrèges C, Jiménez–Lamana J, Raad A, Miquieu C, Grassl B, Reynaud S. *Environ. Pollut.*, **2023**, 323: 121229.
- [77] Yu S J, Huang N Y, Lai Y J, Wu Z, Li Q C, Liu R, Liu J F. *TrAC Trends Anal. Chem.*, **2025**, 192: 118408.
- [78] Zantis L J, Kazour M, Borch C, Agati R, Colpaert R, Gimbert F, Vijver M G, Peijnenburg W, Bosker T. *Sci. Total Environ.*, **2024**, 955: 176848.
- [79] Li C, Gao Y, He S, Chi H Y, Li Z C, Zhou X X, Yan B. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **2021**, 8(8): 633–638.
- [80] Li Y, Lin X, Wang J, Xu G, Yu Y. *Sci. Total Environ.*, **2023**, 897: 165383.
- [81] Zhang H J, Li S C, Wang X L, Zhang K D, Fang H T, Wu X, Huang Z Y, Jiang W, Yang L Y, Tan Q G, Pan B C, Ji R, Wang P, Xing B S, Miao A J. *Nat. Commun.*, **2026**, 17: 1116.