

# 大气微塑料：监测分析与环境过程及健康风险的研究进展

张翔宇

哈尔滨师范大学地理科学学院，黑龙江 哈尔滨

收稿日期：2026年2月9日；录用日期：2026年3月11日；发布日期：2026年3月19日

## 摘要

大气微塑料已成为新兴环境污染物研究热点，其可通过再悬浮与长程输送在区域乃至全球尺度迁移，并通过干湿沉降进入陆地与水体环境，最终造成人群吸入暴露风险。本文围绕“来源 - 监测 - 过程 - 风险”的主线，综述近年大气微塑料的主要排放途径(纺织纤维、交通磨损、城市尘土再悬浮及海岸再释放等)，梳理主动采样与沉降采样的适用场景与局限，重点比较显微傅里叶变换红外(micro-FTIR)、拉曼与热解析(Py-GC/MS)等鉴定定量方法在粒径下限、输出指标(颗粒数/质量浓度)与质量控制方面的差异。进一步总结边界层混合、再悬浮、干湿沉降及气象条件对时空分布的影响，并讨论吸入沉积、炎症与氧化应激等潜在健康效应证据及其不确定性。最后提出未来研究应加强标准化与空白控制、建立多介质通量闭合与长期观测网络，并推进纳米塑料检测与暴露 - 效应关联研究。

## 关键词

大气微塑料，监测分析，输运沉降，源解析，吸入暴露

# Atmospheric Microplastics: Research Progress on Monitoring, Environmental Processes, and Health Risks

Xiangyu Zhang

School of Geographical Sciences, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: February 9, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 19, 2026

## Abstract

Atmospheric microplastics have become a research hotspot among emerging environmental pollutants. They can migrate on regional to global scales through resuspension and long-range transport,

and enter terrestrial and aquatic environments via dry and wet deposition, ultimately posing inhalation exposure risks to humans. Following the “sources-monitoring-processes-risks” framework, this review summarizes recent advances in major emission pathways of atmospheric microplastics (e.g., textile fibers, traffic-related abrasion, resuspension of urban dust, and coastal re-release). It further outlines the applicable scenarios and limitations of active air sampling and deposition sampling, with an emphasis on comparing identification and quantification techniques such as micro-Fourier transform infrared (micro-FTIR), Raman spectroscopy, and thermal analysis (Py-GC/MS) in terms of particle-size detection limits, reported metrics (particle number vs. mass concentration), and quality assurance/quality control. In addition, we synthesize current understanding of how boundary-layer mixing, resuspension, dry/wet deposition, and meteorological conditions shape spatiotemporal patterns, and discuss evidence for potential health effects—such as respiratory deposition, inflammation, and oxidative stress—along with associated uncertainties. Finally, we highlight future priorities, including strengthened standardization and blank control, the establishment of multi-compartment mass-flux closure and long-term observation networks, and methodological advances for nanoplastics detection and exposure-effect linkage studies.

## Keywords

Atmospheric Microplastics, Monitoring and Analysis, Transport and Deposition, Source Apportionment, Inhalation Exposure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

自 20 世纪 50 年代以来，塑料的大规模生产已成为全球工业的重要组成部分。塑料因其轻质、强可塑性、耐腐蚀及阻燃等特性，广泛应用于包装、纺织、建筑等领域，极大地改变了现代生活方式。然而，塑料的不可降解性导致塑料废弃物通过物理磨损与化学风化作用逐渐破碎成粒径小于 5 毫米的微塑料 (Microplastics, MPs)，成为持久性生态威胁。大气微塑料 (atmospheric microplastics, MPs) 是近年持续受到关注的新型颗粒污染物。相较水体与土壤，大气更具空间连通性：MPs 可随气溶胶在边界层内再悬浮并跨区域输送，随后通过干沉降及降水/降雪清除进入陆地与海洋环境。海域观测显示，大气沉降可贡献不可忽视的海洋输入通量，且常呈纤维占优、粒径偏小等特征[1]；跨半球观测进一步证实 MPs 能够远距离输送至南极等偏远地区，形态对输送效率具有关键影响[2]。机制层面，实验与模型研究指出纤维的非球形几何会显著降低沉降速度，从而延长滞留时间并增强长程传播潜势[3]。此外，超细微/纳塑料已可在 PM<sub>2.5</sub> 中以质量浓度被定量，并提示其可能携带疏水污染物，带来复合暴露风险[4]。

目前主要瓶颈包括：采样装置、粒径下限与谱库判别差异导致结果可比性不足；光谱法多输出“颗粒数浓度”，而 Py-GC/MS 等热解析方法多输出“质量浓度”，缺乏统一换算与报告口径；同时外源纤维污染与实验室空白控制困难，易引入偏差。建立标准化流程、强化 QA/QC 并发展可用于排放-运输-沉降的过程模型，被认为是提升该领域可信度与机制解释力的关键方向[5]。

## 2. 来源与排放

### 2.1. 城市生活源与工业源

城市大气微塑料的持续“底噪”很大程度来自生活活动与工业过程的连续排放，其中以合成纤维微

纤维最为常见：衣物穿着摩擦、家居软装(地毯、窗帘等)磨损、清扫/通风引发的再悬浮，会使室内微塑料进入室外空气并参与城市边界层交换。工业端则以纺织生产链尤为典型，工序扰动可形成高强度排放与沉降通量。以纺织工业区的实地观测为例，厂内沉降通量显著高于厂外，且以纤维形态为主，提示生产过程本身可构成强源，并带来工人职业暴露问题[6]。除纺织外，城市常见的塑料制品磨损(包装、建材、涂层等)与固废处置环节也可能贡献碎片型颗粒，但其排放强度受材料类型、机械扰动与管理水平影响显著；因此在综述与实证研究中，通常需要将“生活源/工业源”进一步细分为居民活动-工业工序-废弃物管理等子类，并结合空气/沉降/道路尘介质实现证据闭环。

## 2.2. 交通相关源

交通非尾气排放被认为是城市大气微塑料的重要来源之一，核心包括轮胎磨损颗粒(tire wear particles, TWP)及其与路面材料、道路尘混合形成的复合颗粒。道路环境研究表明，TWP 及其他交通相关颗粒在路缘尘中含量较高，且可进入空气颗粒物；更关键的是，空气中相关颗粒的浓度随远离道路距离增加而降低，反映道路交通是近地层的主要排放与再悬浮驱动[7]。此外，最新大气研究也强调道路轮胎磨损是空气中微塑料的重要来源之一，并指出其与黑色碳质颗粒等共同出现，使识别与归因更复杂[8]。因此，交通源评估往往需要结合道路类型、交通流量、季节(如冬季钉胎/融雪剂因素)与再悬浮强度，避免将“道路尘二次源”误判为独立的一次排放[7][8]。需要注意的是，交通源往往与城市施工扬尘、土壤尘混合共存，且道路尘可在“沉降-再悬浮”循环中充当二次源，使得仅凭单次短期观测难以稳定刻画排放强度；因此建议在交通走廊与背景点位开展分季节、多高度、并行采样，以增强源解析的可解释性。

## 2.3. 典型源解析思路与不确定性

大气微塑料的源解析通常采用“形态/粒径-聚合物指纹-气象输送证据”的多证据耦合路径：形态(纤维/碎片等)与聚合物鉴定用于指向潜在活动源，后向轨迹与风场用于解释区域输送，必要时引入受体模型(如 PMF)进行贡献拆分。以哈尔滨为例，研究对悬浮大气微塑料进行了空间分布与源解析，给出了不同下垫面条件下的贡献特征，体现了受体模型在城市尺度归因中的可用性[9]。但该领域不确定性仍突出：一是不同研究在粒径下限、识别阈值与“颗粒数浓度/质量浓度”报告口径上不一致，导致跨研究对比困难；二是再悬浮、湿沉降与老化会改变粒子形态与表面特征，弱化“形态-来源”的直接对应；三是纤维类样品极易受采样与实验室外源污染影响，空白扣除与回收率评估不足会造成系统偏差。因此，在给出源解析结论时，应同时报告关键方法学边界条件(采样体积、粒径窗口、空白控制、判别规则)，并对模型假设与参数敏感性进行透明呈现。

## 3. 监测与分析方法

### 3.1. 采样：主动采样与被动沉降采样

大气微塑料采样可分为“主动采样”与“被动沉降采样”。主动采样多用中/高流量采样器配合石英纤维、玻纤或 PTFE 滤膜，可换算为颗粒数或质量浓度(如  $\text{items}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ )；优势是时间分辨率高、可与 PM 2.5/PM 10 同步，但小粒径颗粒易穿透/嵌入滤材，且滤膜本底与系统二次污染会抬高检出下限[10]-[14]。针对粒径分级需求，可叠加撞击式分级器/级联撞击器获取不同空气动力学粒径段样品，但会带来更高的壁面损失与操作复杂度[14]-[16]。被动沉降采样(漏斗/沉降盒、干湿分离装置等)更适于评估地表输入通量( $\text{items}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )，但受风场、雨滴飞溅与采样口再悬浮影响，且难与空气体积分数直接对应[11][14][16]。因此，若目标是暴露评估与源解析，宜优先主动采样并报告采样体积与粒径范围；若目标是通量闭合与跨介质输入，需并行布设沉降采样并明确干/湿沉降口径[11][16]。

### 3.2. 预处理

空气滤膜/沉降样常混有机质、矿尘与生物碎屑，预处理需在“去杂”与“保塑”之间平衡。常用策略包括：温和氧化( $H_2O_2$  或 Fenton 体系)去除有机物；对高矿尘样可辅以密度分离(饱和  $NaCl$ 、 $ZnCl_2$  等)降低无机干扰；随后再过滤/浓缩并转移至惰性载片用于光谱鉴定[12][14]。防污染贯穿全流程：优先玻璃/金属器皿，尽量避免塑料耗材；设置现场空白与程序空白；在洁净环境中操作并记录/校正衣物纤维与实验室空气沉降背景[10][12][14]。尤其对粒径  $< 50 \mu m$  样品，空白水平可能与真实信号同量级，回收率与空白扣除应作为方法学报告的必备内容[10][14][16]。

### 3.3. 鉴定定量

鉴定定量层面常见三类口径：颗粒计数、聚合物确认与质量定量。 $\mu FTIR$  (含 FPA 成像、点测)适于中大粒径颗粒的聚合物判别，可面扫描并输出粒径、形状与聚合物类型；但分辨率与散射限制使其对十几微米及更小颗粒覆盖不足，滤膜材质亦会影响光谱背景与匹配阈值[12][14]。拉曼显微分辨率更高，可扩展到更小粒径，适合对疑似颗粒精细确认；但荧光背景、激光热损伤及表面老化会导致谱图失真，需要基线校正与数据处理降低误判[13][14]。热裂解/热解析质谱(如 Py-GC/MS)为破坏性方法，可用特征裂解产物实现聚合物质量定量；对气溶胶有机基底需评估基体干扰与标样曲线，优势是质量口径易与传统气溶胶化学对接，但无法提供颗粒形态信息[12][15]。建议采用“显微筛选 + 光谱确认”构建颗粒数口径，并以 Py-GC/MS 对代表性样品补充质量口径，以支撑源解析与暴露模型的颗粒数 - 质量换算[14]-[16]。大气微塑料常用鉴定定量方法比较见表 1。

**Table 1.** Comparison of common methods for identifying and quantifying atmospheric microplastics  
**表 1.** 大气微塑料常用鉴定定量方法比较

方法	适用粒径/检出特征	预处理与基底要求	主要输出	优势	局限
$\mu FTIR$ (点测/成像)	对微米级颗粒适用； 下限受光学分辨率与 基底影响	需红外兼容基底； 常需消解/密度 分离/过滤浓缩以 降低基体干扰	颗粒数口径(聚合物 分类) + 粒径/形态 统计；可据形状 假设估算质量	可面扫描，适合 构建“形态 - 聚合物”数据库 与源解析；谱图 判别相对稳健	小粒径端覆盖 不足；基底/滤膜 背景、谱库阈值与 空白污染影响 可比性
Raman (显微拉曼)	可覆盖更小粒径端； 受荧光与信噪比约束	基底兼容性较强； 需控制荧光、热 损伤与颗粒固定	颗粒数口径(聚合物 确认) + 细粒径颗粒 的形态/尺寸	高空间分辨率， 适合小粒径颗粒 与疑难颗粒复 核；与 $\mu FTIR$ 互补	荧光干扰、激光 热效应、谱处理 策略差异引入 不确定性；通量 相对较低
Py-GC/MS (热裂解/热解析)	不受粒径下限约束； 受质量检出限与基体 干扰影响	需严格控制方法 空白与基体干扰； 为破坏性分析	质量口径(聚合物 质量浓度/组成贡献)	直接给出质量贡 献，便于与 PM 质量收支对接； 可用于“数 - 质”转化校准	不提供粒径/形态/ 颗粒数；裂解指纹 重叠与基体效应 可能导致定量偏差

### 3.4. 质量控制与可比性

为提升不同研究间结果的可比性与可复用性，建议在“监测与分析方法”中建立颗粒数浓度( $items \cdot m^{-3}$ )与质量浓度( $ng \cdot m^{-3}$ )之间的可追溯转化框架。具体而言，可对经  $\mu FTIR$ /拉曼确认的颗粒按聚合物类型赋值密度  $\rho_{p(i)}$ ，并基于形态假设进行体积估算：纤维近似圆柱  $V = \pi(D^2/4)L$ ，碎片/颗粒近似球/椭球  $V \approx \pi d^3/6$

(或  $abc\pi/6$ )，薄膜近似薄片  $V = LWT$ ，从而得到单颗粒质量  $m_i = \rho_{p(i)}V_i$ ，并累加至样品质量浓度。对于纤维直径或薄膜厚度缺失的情形，可采用显微测得宽度或文献给定的合理范围，并通过蒙特卡洛传播不确定性，输出质量估计的置信区间；同时以 Py-GC/MS 的聚合物质量定量对换算结果进行交叉校准，形成“数-质”双口径闭环[12][14]。在此基础上，提出可操作的“四段式 QA/QC 流程”[14][15]：① 现场采样：设置现场/运输空白(每批  $\geq 1$ )并记录采样体积/口径与气象；② 实验室预处理：程序空白、试剂过滤，优先玻璃/金属器皿并在洁净条件下操作；③ 鉴定定量：加标回收(标粒/标纤维)、重复测定，明确谱库匹配阈值与最小可识别粒径；④ 结果报告：统一空白扣除规则，完整报告回收率、LOD/LOQ、粒径/形态分箱及单位，并尽可能提供颗粒清单或汇总统计以支持再分析[5][10][11][15]。

## 4. 运输与沉降过程

### 4.1. 边界层混合与再悬浮

大气微塑料从源区进入空气后，其“能走多远、在近地面累积到什么水平”，很大程度取决于行星边界层(PBL)的混合能力与下垫面再悬浮过程。白天受地表加热与湍流增强影响，PBL 高度升高、垂直混合加强，微塑料更易在更厚的混合层内被稀释并向上输送；夜间稳定层结与逆温抑制混合，近地面更容易出现浓度升高的情形[11][17]。同时，城市道路尘、建筑扬尘、土壤与地膜碎化颗粒等“地表库”可在车辆扰动、阵风或干燥条件下发生再悬浮，形成显著的二次输入，使得大气微塑料呈现“排放-沉降-再悬浮-再沉降”的循环特征[11][17]。由于纤维类颗粒密度低、形态细长、空气动力学等效直径小，其在弱风或低湍流下仍可能维持一定悬浮时间；而碎片、薄膜等在粒径增大或表面附着污染物后，沉降与近源滞留倾向增强。

### 4.2. 干沉降与湿沉降

沉降过程决定了大气微塑料从空气向地表与水体的净通量，可概括为干沉降与湿沉降两条路径。干沉降主要包括重力沉降、湍流扩散下的表面吸收、惯性碰撞与拦截等机制，其效率受粒径、形态(纤维/碎片/薄膜)、密度与表面粗糙度影响：一般而言，粒径更大或更“厚重”的碎片更易通过重力沉降去除，而细长纤维则更依赖湍流输送与地表粗糙元拦截[11][17]。观测层面，不同城市与功能区的沉降通量差异明显：例如宜昌市被动采样研究给出平均沉降通量约为  $(4400 \pm 474) \text{ n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ，并结合后向轨迹指出以周边地区短距离输送影响为主，体现了“区域背景 + 近地面循环”的叠加效应[18][19]。在环渤海海岸带，多城市对比结果显示年尺度沉降通量可在  $10^4$  量级范围内变化，提示海岸带受城市源强、海陆风环流与地表类型共同控制，空间异质性突出[18]。

湿沉降则通过雨滴/雪粒的冲刷清除(云下清除)与云内凝结/并合携带(云内清除)实现快速下传，常造成“降水事件驱动”的通量脉冲[11][17]。以高海拔背景区为例，泰山降水样品中检出微塑料丰度  $0 \sim 858 \text{ L}^{-1}$ (平均约  $178 \text{ L}^{-1}$ )，表明降水可有效将悬浮颗粒从大气柱中移除并输入地表环境，凸显湿沉降在区域通量闭合中的重要性[20]。

### 4.3. 长程输送与典型区域现象

在更大尺度上，大气环流可将微塑料从源区向下风向地区输送，形成跨城市群、跨流域甚至跨海陆界面的迁移[11][17]。典型现象之一是城市-郊区梯度：源区排放强、再悬浮频繁，叠加夜间稳定层结，容易出现近地面富集；郊区或背景区则更多反映区域传输与沉降平衡。另一类现象是海岸-内陆差异：一方面海岸带受海陆风、湿沉降与高湿环境影响，可能增强清除；另一方面海面飞沫、海岸带沉积物扰动与沿海城市活动又可能提供再释放/再悬浮途径，使得海岸带既可能是“稀释区”，也可能在特定条件

下成为“输入增强区”[18]。对于具体个例，宜昌研究的后向轨迹结果更强调短距离输送主导[19]，提醒我们：长程输送并非处处占优，其贡献应结合气象形势、下垫面类型与观测高度，通过“观测(浓度/通量)-轨迹/模式-沉降参数化”的联合框架定量分解[17]。

## 5. 暴露与健康风险研究

### 5.1. 吸入暴露与呼吸道沉积

相较于水体与土壤，大气微塑料(AMPs)对人群最直接的意义在于吸入暴露：颗粒/纤维可随呼吸进入上、下呼吸道，其沉积部位高度依赖粒径(更准确说是空气动力学当量粒径)、形态(纤维/碎片/薄膜)与密度等特征[21]-[23]。国内基于沉降通量与呼吸参数的估算研究表明，不同功能区人群的每日吸入摄入量(EDI)存在显著差异，提示城市活动强度、下垫面尘源与气象条件共同决定了暴露水平[19]。但需要强调：现有监测对小粒径端(尤其是纳米塑料)存在系统性低估，导致“环境浓度-吸入剂量-沉积分数”的链条仍带有较大不确定性。

在沉积机制上，计算模拟与综述研究指出，微塑料进入呼吸道后的沉积可概括为鼻咽部惯性碰撞、气道分叉处沉降/截留以及肺泡区扩散沉积等过程；而纤维状颗粒因长径比大、姿态变化与再悬浮特性，可能表现出与等效球形颗粒不同的沉积分布与清除动力学[24]。因此，暴露评价不仅要报告“颗粒数/质量浓度”，也应尽可能补充粒径谱、形态与聚合物类型，以便与沉积模型耦合，实现更可比的人体剂量估算[24]。

### 5.2. 潜在健康效应证据

关于健康效应，目前证据主要来自体外细胞实验、模式动物实验以及有限的人体样本检出报告。综述性研究总结显示，微/纳塑料暴露可诱导炎症反应、氧化应激、免疫与代谢紊乱等毒性终点；粒径更小的颗粒更可能穿透细胞膜并引发 ROS 与 DNA 损伤等细胞毒性表现，但这些结果受颗粒类型、剂量、表面性质与实验体系影响显著[21]。动物方面，吸入暴露研究仍较少，但已有实验以 100 nm 聚苯乙烯纳米塑料短时吸入暴露 SD 大鼠，随后在肝、肾、心等组织检测到聚苯乙烯信号，提示其可能经肺泡进入循环并发生肺外分布(仍需更多实验重复与剂量-时间-组织动力学刻画)[23]。

需要谨慎的是：“检出”不等于“致病因果”。人体呼吸道相关样本(如肺组织、灌洗液、痰液等)中检出微塑料的报道，受采样/实验室空白、空气纤维污染与鉴定下限影响较大；目前缺乏足够的流行病学证据将环境 AMPs 暴露与特定疾病结局稳健关联，更合理的表述是“存在潜在风险线索与生物学可解释性，但因果链条未闭合”[21][22][25]。未来应优先推进：标准化暴露指标、可重复的吸入剂量表征，以及与人群健康队列或职业暴露场景结合的证据积累。

### 5.3. 复合风险

大气环境中微塑料往往并非“单一颗粒”暴露，而是与 PM 组分、PAHs 及多种半挥发/持久性有机污染物共存，带来复合风险讨论。其一，微塑料本身可能含有或释放增塑剂、阻燃剂与单体残留等化学添加剂；其二，微塑料表面比表面积大、疏水性强，可能吸附并携带 POPs、金属等污染物，在呼吸道表面发生再释放或改变生物可利用性[21][25]。在真实大气颗粒体系中，有研究在城市 PM 2.5 中分析到细微微/纳塑料组分，并讨论其与多环芳烃(PAHs)的关系，提示“同源排放/共载体迁移”的可能性，但仍需进一步区分相关性与因果机制，并评估在肺内环境(表面活性物质、蛋白冠形成)下的真实解吸与毒性贡献[4]。

因此，复合风险的研究重点不应停留在“载体假说”，而应通过：① 同时测定聚合物 + 添加剂/共

污染物谱；② 构建吸入后呼吸道“模拟肺液”条件下的释放实验；③ 用多端点毒理学方法区分“颗粒效应”与“化学效应”。这也将反过来指导大气微塑料风险管理从“颗粒控制”走向“颗粒-化学协同控制”。

## 6. 结论与展望

总体来看，大气微塑料来源呈“生活-交通-工业复合”的城市特征，纤维状颗粒常占优势，并可在沉降与再悬浮循环中维持近地层背景负荷。大气既是跨介质迁移通道，也可能重塑海陆环境的输入通量格局。监测层面，主动采样便于获得体积分数与时间序列，被动沉降采样更适于刻画通量；但粒径下限、空白污染与判别阈值差异显著，导致研究间可比性不足。过程层面，边界层混合控制近地面富集/稀释，干湿沉降决定向地表与水体的净输出；半球尺度观测已证实微塑料可长程输送至偏远海域与南极地区，且形态影响输送效率。风险层面，当前证据主要来自暴露估算与毒理学线索，提示吸入沉积及炎症、氧化应激等潜在效应，但人群因果证据仍缺乏。

制约该领域的核心问题是“标准化缺失”与“量纲不统一”。不同采样介质、预处理与光谱匹配规则会改变检出限与形态统计，纤维外源污染若空白扣除不足易造成系统偏高。同时， $\mu$ FTIR/拉曼多报告颗粒数浓度，而 Py-GC/MS 更易给出质量浓度，两类指标缺少可追溯换算框架，使源解析与健康剂量评估难以互相映射；纳米塑料检测能力有限与数据共享不足进一步放大不确定性[22]。

未来应以“通量闭合”为牵引：在城市-郊区-海岸剖面同步获取浓度与沉降通量，结合轨迹/模式分解排放、输运与沉降收支，并与典型城市实测数据互证[]。同时建设长期监测网络，统一最小信息集(粒径范围、单位、空白、回收率、谱库规则)，推动原始光谱/颗粒清单开放。方法学上发展面向纳米塑料的低空白、高通量技术，并在肺液模拟条件下评估“颗粒效应-添加剂-共污染物吸附”的综合暴露[21][25]。健康研究宜从职业/高暴露场景切入，逐步与队列随访结合，在“One Health”框架下形成从环境到健康结局的证据链[25]。

## 参考文献

- [1] Ding, Y., Zou, X., Wang, C., Feng, Z., Wang, Y., Fan, Q., *et al.* (2021) The Abundance and Characteristics of Atmospheric Microplastic Deposition in the Northwestern South China Sea in the Fall. *Atmospheric Environment*, **253**, Article 118389. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118389>
- [2] Chen, Q., Shi, G., Revell, L.E., *et al.* (2023) Long-Range Atmospheric Transport of Microplastics across the Southern Hemisphere. *Nature Communications*, **14**, Article 7898.
- [3] Tatsii, D., Bucci, S., Bhowmick, T., Guettler, J., Bakels, L., Bagheri, G., *et al.* (2023) Shape Matters: Long-Range Transport of Microplastic Fibers in the Atmosphere. *Environmental Science & Technology*, **58**, 671-682. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c08209>
- [4] Kirchsteiger, B., Materić, D., Happenhofer, F., Holzinger, R. and Kasper-Giebl, A. (2023) Fine Micro- and Nanoplastics Particles (PM<sub>2.5</sub>) in Urban Air and Their Relation to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Atmospheric Environment*, **301**, Article 119670. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119670>
- [5] Luo, X., Wang, Z., Yang, L., Gao, T. and Zhang, Y. (2022) A Review of Analytical Methods and Models Used in Atmospheric Microplastic Research. *Science of The Total Environment*, **828**, Article 154487. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154487>
- [6] Tanjil, R.H., Islam, M.S., Islam, Z., Roy, S., Nahian, S. and Salam, A. (2025) Atmospheric Microplastic Pollution in Textile Industrial Areas: Source, Composition, and Health Risk Assessment. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **114**, Article No. 51. <https://doi.org/10.1007/s00128-025-04021-0>
- [7] Järslkog, I., Jaramillo-Vogel, D., Rausch, J., Gustafsson, M., Strömvall, A. and Andersson-Sköld, Y. (2022) Concentrations of Tire Wear Microplastics and Other Traffic-Derived Non-Exhaust Particles in the Road Environment. *Environment International*, **170**, Article 107618. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107618>
- [8] Reynolds, R.L., Molden, N., Kokaly, R.F., Lowers, H., Breit, G.N., Goldstein, H.L., *et al.* (2024) Microplastic and Associated Black Particles from Road-Tire Wear in the Atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **129**,

e2024JD041116.

- [9] Liu, S., Bai, F., Men, Z., Gu, X., Wang, F., Li, Y., *et al.* (2023) Spatial Distribution, Source Apportionment and Potential Ecological Risk Assessment of Suspended Atmosphere Microplastics in Different Underlying Surfaces in Harbin. *Science of The Total Environment*, **901**, Article 166040. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166040>
- [10] 杜明月, 张厚勇, 谢璇, 王婷, 葛璇. 大气微塑料样品的采集、分析方法研究进展[J]. 塑料科技, 2024, 52(6): 132-137.
- [11] 罗犀, 张玉兰, 康世昌, 高坛光. 大气微塑料研究进展[J]. 自然杂志, 2021, 43(4): 274-286.
- [12] 卢琦园, 马艳, 陈思帆, 郑晶, 任明忠, 于云江. 环境中微塑料检测方法的研究进展[J]. 环境化学, 2024, 43(7): 1-16.
- [13] 杨思节, 冯巍巍, 蔡宗岐, 王清. 基于拉曼光谱技术的海水微塑料快速识别技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2469-2473.
- [14] Azari, A., Vanoirbeek, J.A.J., Van Belleghem, F., Vleeschouwers, B., Hoet, P.H.M. and Ghosh, M. (2023) Sampling Strategies and Analytical Techniques for Assessment of Airborne Micro and Nano Plastics. *Environment International*, **174**, Article 107885. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107885>
- [15] Gregoris, E., Gallo, G., Rosso, B., Piazza, R., Corami, F. and Gambaro, A. (2023) Microplastics Analysis: Can We Carry Out a Polymeric Characterisation of Atmospheric Aerosol Using Direct Inlet Py-GC/MS? *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **170**, Article 105903. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105903>
- [16] Shao, L., Li, Y., Jones, T., Santosh, M., Liu, P., Zhang, M., *et al.* (2022) Airborne Microplastics: A Review of Current Perspectives and Environmental Implications. *Journal of Cleaner Production*, **347**, Article 131048. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131048>
- [17] 徐力波, 胡敏, 贾薇茜, 等. 大气环境中微塑料分布与迁移及生态环境影响研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(30): 3565-3579.
- [18] 田媛, 涂晨, 周倩, 等. 环渤海海岸大气微塑料污染时空分布特征与表面形貌[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1401-1409.
- [19] 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂. 宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源[J]. 环境科学, 2023, 44(6): 3152-3164.
- [20] 徐鑫淼, 甄洁博, 姜雨倩, 等. 泰山大气降水中微塑料的特征与来源解析[J]. 山东大学学报(理学版), 2023, 58(3): 121-126.
- [21] 孙香莹, 庄银, 王玉邦, 许秋瑾, 王成. 微塑料环境暴露与人体健康效应研究进展[J]. 环境科学研究, 2023, 36(5): 1020-1031.
- [22] 谢颖, 杨波, 刘琳豆, 董小艳, 阮鸿洁, 唐宋, 王琼. 微塑料的人体内外暴露现状及其检测技术进展[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(10): 778-787.
- [23] 董小艳, 杨波, 谢颖, 等. 吸入暴露途径下纳米塑料在SD大鼠体内的富集特征研究[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(3): 764-768.
- [24] Saha, S.C. and Saha, G. (2024) Effect of Microplastics Deposition on Human Lung Airways: A Review with Computational Benefits and Challenges. *Heliyon*, **10**, e24355. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24355>
- [25] Borgatta, M. and Breider, F. (2024) Inhalation of Microplastics—A Toxicological Complexity. *Toxics*, **12**, Article 358. <https://doi.org/10.3390/toxics12050358>