

# 空气中微塑料污染危害、防治对策与研究展望

张平 邵娅婷 黄慧 石映凤 李晓艳 韩静

鄂尔多斯市生态环境监测监控中心

DOI:10.32629/eep.v9i7.3277

**[摘要]** 空气中微塑料污染已成为全球性环境与健康问题,其来源广泛、颗粒微小、数量巨大,且在大气环境中已普遍存在。微塑料可通过大气扩散远距离传输,具有全球污染特性。室外以纳米级塑料碎片为主,室内以微米级条状纤维为主且室内浓度远高于室外。人类已无可避免地主动或被动摄入微塑料,越来越多的证据表明其对人体健康产生巨大危害性。结合国家战略,我们提出一个多维度框架性防治对策,并构想了未来该领域研究方向,旨在为遏制微塑料污染与排放、保障公众健康安全提供参考。

**[关键词]** 环境空气; 微塑料; 污染危害; 防治措施; 研究展望

中图分类号: X51 文献标识码: A

## Hazards, Control Strategies, and Research Prospects of Airborne Microplastic Pollution

Ping Zhang Yating Shao Hui Huang Yingfeng Shi Xiaoyan Li Jing Han

The Ordos Ecological Environment Monitoring and Control Center

**[Abstract]** Airborne microplastic pollution has emerged as a global environmental and health concern. With diverse sources, minute particle sizes, and vast quantities, microplastics are now ubiquitous in the atmospheric environment. They can undergo long-range transport via atmospheric dispersion, exhibiting characteristics of global pollution. In contrast to the nano-scale fragments that dominate outdoors, indoor microplastics are primarily micron-scale fibers with concentrations substantially exceed those outdoors. Modern humans inevitably ingest microplastics, both intentionally and unintentionally. Growing evidence indicates their adverse hazards on human health. In alignment with national strategies, we propose a multi-dimensional framework for prevention and control countermeasures and provide an outlook on future research directions in this field, aiming to curb microplastic pollution and emissions, thereby safeguarding public health and safety.

**[Key words]** Ambient air; Microplastics; Pollution hazards; Prevention and control measures; Research prospects

## 引言

塑料制品的大量使用伴随着严重的环境污染和健康危害<sup>[1]</sup>。被列入新四大污染物之一的微塑料(MPs),指的是直径小于5毫米的塑料碎片和颗粒,由英国汤普森等人在《科学》杂志上首次提出<sup>[2]</sup>,从此推动了全球对微塑料污染的关注。据报道,城市废水处理厂气溶胶中微塑料丰度为0.83-28.03个/立方米<sup>[3]</sup>,瓶装水中微塑料浓度可达 $2.4 \pm 1.3 \times 10^5$ 颗/升<sup>[4]</sup>,用塑料杯饮用热饮时人体每公斤体重/天可摄入 $0.03 \pm 0.025$ 毫克微塑料<sup>[5]</sup>。微塑料的危害体现在它直径微小上,这是其对环境及其中生物个体危害程度更深的原因<sup>[6]</sup>。微塑料可通过皮肤渗入、食道摄入和呼吸道吸入进入人体,其中通过呼吸道吸入微塑料的量多且可吸入微塑料和纳米塑料颗粒直接对人体产生吸入毒性<sup>[7]</sup>,危及人类健康。本文综述了空气中微塑料污染与健康危害,以提高全民的防范意识,结合实际提出防治建议,并对未来研究方向

提出新展望。

## 1 空气中微塑料污染

### 1.1 主要来源

根据排放方式,空气中微塑料分为初级来源和次级来源。前者主要是人类生产生活中直接产生的,包括工业源、农业源、建筑源、交通源、生活源等:如塑料制品及工业原料颗粒生产、污水处理厂释放、农用地膜分解、农药微塑料载体、城市粉尘(建筑涂料等)、轮胎与道路摩擦的释放、合成纺织品磨损脱落、化妆品和牙膏里塑料微珠等<sup>[8-11]</sup>。后者主要是陆地和水体中的塑料垃圾经风化、光氧化、机械作用等降解后,通过风力作用进入空气中<sup>[12-13]</sup>。

### 1.2 分布与循环

目前在城市、沿海和偏远地区(如比利牛斯山脉)的空气中都已检测到不同浓度的微塑料,证实其可通过大气广泛扩散,具

有远距离传输能力<sup>[14]</sup>。Chen等首次在南大洋和南极洲内陆发现并测量了微塑料浓度,研究表明微塑料纤维的传输效率高于微塑料碎片,说明形态小的微塑料更易扩散,且微塑料可以跨越海洋到达极地,揭示了微塑料的全球性污染特性,颠覆了以往学术界对于微塑料“局部污染”的认知<sup>[15]</sup>。

微塑料可以在陆海空之间循环传输。陆地上的塑料微粒通过风蚀作用进入到大气的,在大气环境中受到其形态、风力、风向和降水等因素的影响,可发生悬浮、沉降和扩散等迁移过程。Evangelidou等研究发现,亚微米级微塑料可通过大气环流停留数周并跨大陆传输<sup>[16]</sup>。微塑料可以随着降雨沉降到陆地和海洋中,Zhao等测算出每年通过大气输入胶州湾的微塑料质量达4-10吨左右<sup>[17]</sup>。海浪破碎产生的海洋飞沫又会将海洋中的微塑料释放到大气中,形成“海洋-大气循环”的海洋飞沫效应,Allen等测算出每年会有数十万吨的微塑料以海浪飞沫的形式从海洋排放到环境空气中<sup>[18]</sup>。

### 1.3 浓度与粒径差异

环境空气中微塑料浓度差异很大,与其它大气污染物一样,城市地区显著高于空气易扩散的偏远地区。在通风不畅条件下,室内空气明显高于室外,浓度可达室外的2-5倍<sup>[19]</sup>。复旦大学研究团队利用热裂解气相色谱-质谱(Py-GC/MS)对上海大气中PM<sub>2.5</sub>携带的微塑料进行定量分析,并比较了室内/室外暴露差异。结果表明室外微塑料浓度为0.69±0.58微克/立方米,而室内浓度为2.27±2.31微克/立方米。而室内微塑料主要受通风条件影响,开窗时浓度可降低37%<sup>[20]</sup>。法国科学家分析了巴黎地区室内外空气中微塑料浓度,结果显示室内空气中浓度为35.3颗/立方米,室外为2.1颗/立方米,室内塑料颗粒水平比之前估计的高出许多倍。该研究还强调,人们每天有90%的时间在室内度过,而室内空气是微塑料暴露的重要来源<sup>[21]</sup>,揭示了人们长期暴露于室内微塑料的潜在健康风险。

近期研究发现,亚微米级塑料颗粒在上海大气环境中占主导地位,纳米塑料在大气微塑料质量浓度中占比为36.3%,且其数量浓度达99.97%,是微米级颗粒的3055倍<sup>[22]</sup>。这项研究也说明,室外多数情况下人体是暴露在更微小的纳米塑料环境中。Farrow等研究指出,室内空气中微塑料浓度为1-60根/立方米,主要以纤维为主(占比90%),粒径在20微米以上<sup>[23]</sup>,说明纤维纺织用品脱落是室内环境中微塑料的主要来源,在室内多数情况下人体是暴露在微米级塑料环境中。

## 2 健康危害

人体血液<sup>[24]</sup>、肺脏<sup>[25-26]</sup>、胎盘<sup>[27]</sup>、肝脏<sup>[28]</sup>、肾脏<sup>[28]</sup>、大脑<sup>[28]</sup>等多器官样本已检出微塑料并论证了其与健康风险相关性<sup>[29][30]</sup>。Nicholas等报道微塑料对人类生殖、消化和呼吸系统有潜在健康危害,并可能与结肠癌和肺癌有关<sup>[31]</sup>。Xu等阐明哺乳动物体外暴露纳米微塑料(MNPs)后的不良健康影响,包括细胞毒性、氧化应激、炎症反应、遗传毒性、胚胎毒性、肝毒性、神经毒性、肾毒性甚至致癌性,而啮齿动物体内模型则证实了MNPs在肝脏、脾脏、肾脏、大脑、肺和肠道中的生物累积,

表现出不同层面的不良影响<sup>[32]</sup>。本文查阅最新文献资料,加以佐证。

### 2.1 物理损伤

微塑料碎片多呈不规则型,可吸入微塑料的尖锐形态可引起呼吸道黏膜机械损伤。Zhang报道了聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)会导致模型小鼠肺上皮细胞损伤<sup>[33]</sup>,引起肺部出现不同程度纤维化<sup>[33]</sup>。进入血液循环的微塑料还会迁移、沉积、集聚,以堵塞血管、细胞膜上反应通道等。小鼠暴露于0.5微米粒径大小的微塑料,会导致其过度积聚,并在脾脏、肾脏、心脏、肺和肝脏引起更严重的炎症和机械损伤<sup>[34]</sup>。Nihart等<sup>[28]</sup>利用热解气相色谱-质谱法、衰减全反射傅里叶变换红外光谱法和带能量色散光谱的电子显微镜法联合检测,发现肝脏和大脑样本中的微塑料碎片浓度随时间增加而增加,在痴呆症死者脑血管壁和免疫细胞中沉积显著。

### 2.2 化学毒性

长期暴露于聚乳酸(PLA)微塑料的模式小鼠表现出明显的生殖毒性。大量PLA-MP衍生的纳米颗粒能够穿透血睾屏障并定位于生精微环境中,损害精子线粒体功能,导致小鼠精子浓度和活力降低,精子畸形率增加,性激素水平紊乱<sup>[35]</sup>;Marfella对304例患者进行了为期34个月的随访和跟踪调查,与对照组相比,检测到微/纳米塑料的颈动脉斑块患者发生心肌梗死、中风的死亡风险更高<sup>[36]</sup>;通过对小鼠肠道、粪便、鼻腔、肺、肝和血液样本进行多组学分析,空气传播的PLA-MNP会损害肝功能,破坏血清抗氧化活性,并引起肝脏病理变化<sup>[37]</sup>;Huang等采用高深度成像技术,在活体状态下研究小鼠大脑中的微塑料,发现循环中的微塑料被吞噬并阻塞大脑皮层毛细血管,形成的血栓导致小鼠血流量减少和神经系统异常<sup>[38]</sup>。

### 2.3 复合污染

因表面粗糙且具有吸附性,微塑料可成为细菌、病毒等病原体的载体,使其具备更远距离的传播能力、更久的存活能力和更强的入侵性<sup>[39]</sup>。作为污染物的载体,微塑料还可吸附重金属和多环芳烃等有机污染物<sup>[20]</sup>,通过“特洛伊木马效应”(Trojan Horse)进入细胞,它们联合作用会导致毒性倍增<sup>[40][41][42]</sup>。Huvet研究发现法国布雷斯特湾漂浮微塑料表面吸附了多种多环芳烃及部分多氯联苯和农药,且微塑料可显著提升有机污染物的环境持久性和生物可利用性,增加人类的致癌风险<sup>[43]</sup>。同时暴露于聚苯乙烯微塑料和镉的小鼠,会导致更严重的毒性作用,表现为体重增长减缓、结肠长度缩短以及结肠和肝脏炎症反应增加<sup>[44]</sup>。

## 3 污染防治

新污染物治理刻不容缓。目前我国已把微塑料治理纳入“十五五”开局的核心任务。在建设美丽中国、健康中国的新征程上,我国的策略是“先控源头、再治存量、科技支撑、久久为功”。我们建议从以下几个方面开展工作:

### 3.1 国际合作

鉴于微塑料的全球污染特征,需加强国际交流与合作,达成

国际共识。借鉴应对气候变化经验做法,从源头减排,各国协同防治。

### 3.2顶层设计

国家层面应出台更为严格的《限塑令》,逐步减少塑料制品的生产、消费和使用,直至颁布《禁塑令》,让塑料退出历史舞台。

### 3.3统一标准

加快环境、食药、农业、卫生等行业的检测、监测方法标准和质量标准的起草与发布,《环境空气质量标准》增加微塑料限值,制定饮用水、食品中微塑料安全与健康标准等。

### 3.4部门协同

各相关部门应齐抓共管,建立执法联动、数据联动、考核联动的常态化联动机制,形成监管合力。

### 3.5考核问责

将微塑料污染防治纳入污染防治攻坚战常态化任务进行考核,将突出问题纳入中央生态环保督察进行问责。

### 3.6财税调控

加大竹制、棉制、纸制、不锈钢制、瓷质等商品生产厂商的财政补贴力度,降低使用成本。同时严格控制塑料制品的生产量,并提高相关企业的税收标准。

### 3.7科技支撑

一方面加大科研攻关力度,鼓励高校、科研院所、高新企业研发降解塑料的技术,使其变废为宝,以消化环境中现有塑料垃圾,减少微塑料的次级排放;另一方面加快更为经济、低碳、环保、耐用的塑料替代品研制步伐。

### 3.8宣传引领

加强科普宣传,利用电视、报纸、网络及新媒体平台及科技协会、环保协会等公益组织广泛宣传微塑料的来源、危害及防范措施,提升居民环保、健康和防控意识。

### 3.9全民参与

引导人们逐步改变生活方式和习惯,减少对塑料制品的依赖和使用。倡导不使用一次性塑料制品,户外佩戴环保口罩,减少外卖、瓶装水等消费,不用塑料容器加热食物等。

## 4 展望与挑战

随着科技的进步,在共创无塑绿色生活,共享健康可持续未来的道路上,微塑料污染防治与健康研究领域充满期待与挑战。

### 4.1从颗粒毒性转向生态毒性

未来研究不应仅关注微塑料本身,而应更多关注其表面形成的特异微生物群落。微塑料作为病原体和抗性基因的“移动航母”,其跨介质(空气-水-土壤-人体)传播所引发的协同健康风险,可能远大于颗粒物自身的物理化学毒性。

### 4.2大气微塑料的“气候-健康”耦合循环

气载微塑料可作为冰核或云凝结核,影响区域降水与辐射平衡。这种气候效应可能通过改变气温、雾霾和过敏原分布,间接恶化呼吸道和心血管疾病负担,形成塑料-气候-健康的级联灾难。

### 4.3生物可降解塑料的隐形风险

目前所谓的可降解塑料在环境中会更快产生大量纳米尺寸碎片,其降解中间产物可能具有内分泌干扰活性。因此,“可降解”不等于“生态安全”,未来需重新定义塑料的全生命周期安全终点。

### 4.4纳米塑料的“量子化”生物学效应

未来需突破检测极限,探索其能否像病毒或蛋白质一样,通过内存、跨细胞运输甚至改变蛋白质构象,诱发非炎症性、低剂量但高生物活性的神经退行性病变或自身免疫反应。

### 4.5母-胎与跨代遗传印记

微塑料是否通过诱导父母生殖细胞(精子/卵子)的表观遗传修饰,导致子代出现不直接接触塑料的健康缺陷,如代谢紊乱或免疫缺陷。

## [参考文献]

- [1]Geyer R,Jambeck J,Law K.Production,use,and fate of all plastics ever made[J].Science Advances,2017,3(7):e1700782.
- [2]Thompson R,Olsen Y,Mitchell R,et al.Lost at Sea:Where Is All the Plastic?Science,2004,304(5672):838.
- [3]Xu S,Guo X,Zhu Y,et al.Aerosols Generated in the Wastewater Treatment Process Are a Potential Source of Airborne Microplastics[J].Environ Sci Technol,2025,59(19):9620-9631.
- [4]Qian N,Gao X,Lang X,et al.Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRS microscopy.Proc Natl Acad Sci USA.2024,121(3):e2300582121.
- [5]Joseph A,Parveen N,Ranjan V,et al.Drinking hot beverages from paper cups: Lifetime intake of microplastics. Chemosphere,2023,317:137844.
- [6]Kiran B,Kopperi H,Venkata M.Micro/nano-plastics occurrence, identification,risk analysis and mitigation: Challenges and perspectives[J].Reviews in Environmental Science and Bio/Technology,2022:27,2735.
- [7]Pironti C,Ricciardi M,Motta O,et al.Microplastics in the environment: intake through the food web,human exposure and toxicological effects[J].Toxics,2021,9(9):224.
- [8]Derraik J.The pollution of the marine environment by plastic debris: A review[J].Marine Pollution Bulletin,2002,44(9):842-852.
- [9]Akhbarizadeh R,Dobaradaran S,Amoueitorkmahalleh M, et al.Suspended fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>),microplastics(MPs),and polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)in air: Their possible relationships and health implications[J].Environmental Research,2021,192:110339.
- [10]Salvador C,Turra A,Baruque-Ramos J.Synthetic fibers as microplastics in the marine environment:A review fr

om textile perspective with a focus on domestic washings [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 598: 1116–1129.

[11] Napper I, Thompson R. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 112(1/2): 39–45.

[12] Nazima H, Saif U, Scott W, et al. Microplastics in the atmosphere: A review [J]. *J Environ Expo Assess*, 2022, 1(6): 1–20.

[13] Brdlik P, Boruvka M, Behalek L, et al. Biodegradation of poly(lactic acid) biocomposites under controlled composting conditions and freshwater biotope [J]. *Polymers*, 2021, 13(4): 594.

[14] Allen S, Allen D, Phoenix V, et al. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(5): 339–344.

[15] Chen Q, Shi G, Revel L, et al. Long-range atmospheric transport of microplastics across the southern hemisphere [J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 7898.

[16] Evangeliou N, Grythe H, Klimont Z, et al. Atmospheric transport is a major pathway of microplastics to remote regions [J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1): 3381.

[17] Zhao C, Liang J, Zhu M, et al. Occurrence, characteristics, and factors influencing the atmospheric microplastics around Jiaozhou Bay, the Yellow Sea [J]. *Mar Pollut Bull*, 2023, 196(11): 115568.

[18] Allen S, Allen D, Moss K, et al. Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics [J]. *Public Library of Science One*, 2020, 15(5): e0232746.

[19] Rachid D, Johnny G, Cécile M, et al. A first overview of textile fibers, including microplastics, indoor and outdoor environments [J]. *Environ Pollut*, 2017, 221(2): 453–458.

[20] Wang Y, Zhang X, Li T, et al. Quantitative Analysis of Microplastics in Shanghai Atmospheric PM<sub>2.5</sub> and Revealing Their Indoor–Outdoor Exposure Discrepancy by Py–GC/MS [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 245–254.

[21] Ramírez–Muñoz A, Le Bihanic F, Gressier C, et al. Occurrence and human exposure assessment of microplastics in indoor and outdoor air from various areas in the Paris region. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(35): 15447–15459.

[22] Chen Y, Shu J, Li C, et al. Size Distribution of Micro–/Nanoplastic Particles and Their Chemical Speciation in the Atmosphere of Shanghai, China. *Environ Sci Technol*. 2025, 59(25): 12833–12842.

[23] Farrow A, Santillo D. Microplastic fibres and fragme

nts in a composite sample of indoor and outdoor air, Geneva, Switzerland, July 2025. Greenpeace Research Laboratories, 2025, 8: 1–13.

[24] Rotchell J, Jenner L, Chapman E, et al. Detection of microplastics in human saphenous vein tissue using  $\mu$ FTIR: A pilot study [J]. *Public Library of Science One*, 2023, 18(2): e0280594.

[25] Amato–Lourenço L, Carvalho–Oliveira R, Júnior G, et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 126124.

[26] Lauren C, Jeanette M, Robert T, et al. Detection of microplastics in human lung tissue using  $\mu$ FTIR spectroscopy. *Sci Total Environ*, 2022, 20(831): 154907.

[27] Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta [J]. *Environment International*, 2021, 146: 106274.

[28] Nihart A, Garcia M, El Hayek E, et al. Bioaccumulation of microplastics in decedent human brains. *Nat Med*, 2025(31): 1114–1119.

[29] 范姿, 卞倩. 气载微塑料对呼吸系统的影响及机制研究进展 [J]. *环境化学*, 2023, 42(6): 1792–1802.

[30] Vattanasit U, Kongpran J, Ikeda A. Airborne microplastics: A narrative review of potential effects on the human respiratory system [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 9(4): 166745.

[31] Nicholas C, Courtney B, Garret B, et al. Effects of Microplastic Exposure on Human Digestive, Reproductive, and Respiratory Health: A Rapid Systematic Review [J]. *Environ Sci Technol*, 2024, 58(52): 22843–22864.

[32] Xu J, Lin X, Wang J, et al. A review of potential human health impacts of micro– and nanoplastics exposure [J]. *Sci Total Environ*, 2022, 10(851): 158111.

[33] Zhang J, Du J, Liu D, et al. Polystyrene microplastics induce pulmonary fibrosis by promoting alveolar epithelial cell ferroptosis through cGAS/STING signaling [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 1(277): 116357.

[34] Zhang Z, Chen W, Chan H, et al. Polystyrene microplastics induce size–dependent multi–organ damage in mice: Insights into gut microbiota and fecal metabolites [J]. *J Hazard Mater*. 2024, 5(461): 132503.

[35] Zhao Q, Fang Z, Wang, et al. Polylactic Acid Micro/Nanoplastic Exposure Induces Male Reproductive Toxicity by Disrupting Spermatogenesis and Mitochondrial Dysfunction in Mice [J]. *ACS Nano*, 2025, 19(5): 5589–5603.

[36] Marfella R, Prattichizzo F, Sardù C, et al. Microplastic and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events

[J].N Engl J Med,2024,390(10):900–910.

[37]Zha H,Han SY,Tang RQ,et al.Polylactic acid micro / nanoplastic-induced hepatotoxicity:Investigating food and air sources via multi-omics[J].Environ Sci Ecotechnol,2024,3(21):100428.

[38]Huang HP,Hou JQ,Li MX,et al.Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to neurobehavioral abnormalities[J].Sci Adv,2025,11(4):8243.

[39]Zhao H,Hong X,Chai J,et al.Interaction between microplastics and pathogens in subsurface system: What we know so far[J].Water,2024,16(3):499.

[40]程媛,迟元彤,张伯雷,等.微塑料与其他环境污染物的相互作用及复合效应[J].海洋环境科学,2024,43(2):201–213.

[41]Liu B,Zhao S,Qiu T,et al.Interaction of microplastics with heavy metals in soil: Mechanisms, influencing factors and biological effects[J].Sci Total Environ,2024,3(25)9

18:170281.

[42]Chen Q,Zhao H,Liu Y,et al.Factors Affecting the Adsorption of Heavy Metals by Microplastics and Their Toxic Effects on Fish[J].Toxics,2023,11:490.

[43]Huvet A,Frère, L,Lacroix C,et al. Microplastics as sorption materials of herbicides, persistent organic pollutants (POPs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a coastal bay[J].Marine Pollution Bulletin,2024,133:578–589.

[44]Hu L,Feng X,Lan Y,et al.Co-exposure with cadmium elevates the toxicity of microplastics: Trojan horse effect from the perspective of intestinal barrier[J].J Hazard Mater,2024,15(466):133587.

#### 作者简介:

张平(1982—),男,锡盟太仆寺旗人,硕士研究生,副高级工程师,主要从事生态环境保护 and 生态环境监测工作。