

• 综 述 •

婴幼儿照护过程中的微纳米塑料暴露及其毒性效应研究进展

孔晶晶, 陈曲, 赵丽华, 张庆丽, 臧传慧, 赵子鑫, 唐婷婷, 祝磊, 肖迪, 李海龙

青岛滨海学院医学院, 山东 青岛 266555

摘 要: 微纳米塑料污染问题日益严重, 其对人体健康, 尤其是婴幼儿健康的潜在威胁备受关注。研究表明, 婴幼儿照护过程中普遍存在微纳米塑料, 其主要来源包括塑料制品的使用和分解过程。微纳米塑料可通过口腔摄入、皮肤接触和吸入等途径进入儿童体内, 可能对儿童的生长发育、免疫系统、神经系统和内分泌系统产生不良影响。本文分析了微纳米塑料污染的来源、暴露途径及毒性效应, 并探讨了相应的预防和控制措施, 以期减少儿童微纳米塑料暴露及制定相应的防护策略提供科学依据。

关键词: 微纳米塑料; 养育照护; 毒性效应; 防控措施; 暴露; 健康风险; 婴幼儿

中图分类号: R179 文献标识码: A 文章编号: 1008-6579(2026)07-0798-05 doi: 10.11852/zgetbjzz2025-0222

Advances in micro/nanoplastics exposure and toxic effects during early childhood care

KONG Jingjing, CHEN Qu, ZHAO Lihua, ZHANG Qingli, ZANG Chuanhui, ZHAO Zichu, TANG Tingting,

ZHU Lei, XIAO Di, LI Hailong

Medical College, Qingdao Binhai University, Qingdao, Shandong 266555, China

Corresponding author: LI Hailong, E-mail: qd_lhl@163.com

Abstract: The escalating contamination of micro/nanoplastics (MNPs) has raised significant concerns regarding their potential threats to human health, particularly that of infants and toddlers. Evidence suggests that MNPs exposure is widespread during infant and toddler care, with major sources including the use and degradation of plastic-containing products. These particles can enter children's bodies via ingestion, dermal contact and inhalation, potentially exerting adverse effects on their physical growth, as well as their immune, nervous, and endocrine systems. This review analyzes the sources, exposure pathways, and toxicological effects of MNPs contamination. Furthermore, it explores corresponding prevention and control measures to provide a scientific basis for mitigating pediatric MNPs exposure and formulating effective protective strategies.

Keywords: micro/nanoplastics; nurturing care; toxic effects; prevention and control measures; exposure; health risk; infants and toddlers

随着塑料制品的广泛应用, 微纳米塑料污染已成为全球关注的环境问题。微塑料是指直径小于 5mm 的塑料颗粒, 纳米塑料则为直径小于 100nm 的塑料颗粒, 广泛存在于空气、水和土壤中, 目前科学家们已经在海水、淡水、鱼类、贝类、海盐甚至蜂蜜中都发现了微塑料^[1]。婴幼儿作为特殊群体, 其生理特点和行为习惯使其更容易受到微纳米塑料污染的影响。本文旨在综述婴幼儿照护过程中微纳米塑料污染的现状, 分析其来源、暴露途径及毒性效应研究进展, 并探讨相应的预防和控制措施, 为保护婴幼儿

健康提供参考。

1 婴幼儿接触微塑料的主要途径

母婴是微塑料传递的重要途径, 在胎盘、羊水、胎粪中均检测到有微塑料积累。研究者对 59 名产后妇女的母乳进行了微塑料检测, 发现其中 38.98% 的母乳样本 (23/59) 均有微塑料存在, 其中主要成分是聚丙烯、聚乙烯、聚苯乙烯和聚氯乙烯^[2]。市售的一次性母乳储存袋同样会释放微塑料, 主要成分为聚乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯和尼

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2022QD153, ZR2023MH098, ZR2024QH643); 青岛滨海学院科研创新平台支持计划 (PTK202501)

作者简介: 孔晶晶 (1993—), 女, 博士学位, 主要研究方向为环境微塑料检测及毒性效应。

通信作者: 李海龙, E-mail: qd_lhl@163.com

龙,根据婴儿喂养标准,因使用母乳储存袋而摄入的微塑料量为 0.61~0.89 mg/d^[3]。

微塑料在婴幼儿养护产品中普遍存在,主要来源于塑料制品的使用和分解。常见的含微塑料产品包括奶瓶、餐具、玩具、洗漱用品等。微纳米塑料对乳制品的污染可能发生在生产过程中的不同阶段,从奶牛生产到加工和包装的各个环节。有研究者对 30 种婴儿配方奶粉进行微塑料检测,结果发现所有奶粉样品中均检测到微塑料成分,主要包括聚酰胺、聚乙烯、聚丙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯。根据奶粉中微塑料的数量进行估计,纯喂养婴儿配方奶粉的婴幼儿每天通过奶粉摄入的微塑料约为(49±32)个^[4]。聚苯乙烯一次性食品容器中会释放聚苯乙烯微塑料和苯乙烯单体,在暴露于 pH 9、100℃ 6 小时后释放聚苯乙烯微塑料量最高,为 36 个微塑料/容器,同时会有 2.58 μg/L 苯乙烯单体迁移到液态食品模拟物中^[5]。家庭厨房中的器皿、设备和食物制备过程中也会有微纳米塑料暴露问题,如厨房工具的选择、储存、上菜、烹饪和清洁程序都会对微塑料的产生有重大影响。其中塑料砧板是微塑料的重要来源之一,估计每人每年暴露量约为 7g 微塑料(聚乙烯砧板)和 49.5g 微塑料(聚丙烯砧板)^[6]。饮用水中的微纳米塑料也不可忽视,丹麦一家饮用水厂以地下水为原料处理后的饮用水中微塑料含量平均为 1.4 个/L,相当于 4pg/L^[7]。而进一步加工产生的饮料中微塑料含量达到 7.2~10.4 个/L,相比成人而言,儿童的微塑料承受负荷更高^[8]。微纳米塑料在米面、水果、蔬菜、肉类等食材中广泛存在^[9]。

空气也是婴幼儿暴露于微纳米塑料的重要途径,即使在海拔偏远地区(青藏高原),大气中微塑料的浓度也达(4.07±2.37)个/m³^[10]。在对亚洲 13 个国家进行了 43 项空气中悬浮的微塑料研究后发现,室内悬浮空气中微塑料的范围为 0.93~8 865 个颗粒/m³,室外区域为 0.017~18 880 个颗粒/m³,主要成分为聚乙烯、聚丙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚氯乙烯和聚苯乙烯聚合物^[11]。其中,人造纤维材质的衣物是室内空气微塑料的重要来源之一,利用普通家用烘干机的“正常烘干”程序烘干蓝色聚酯羊毛毯,空气中会增加蓝色纤维的数量^[12]。即使佩戴口罩 5 天、平均每天 8h 后,佩戴者鼻灌洗液中的微塑料也与口罩材质无关,仅与空气中的微塑料相关^[13]。

此外,婴幼儿玩具中的塑料部件在磨损过程中也会产生大量微塑料,塑料积木(丙烯腈丁二烯苯乙烯、聚碳酸酯)在模拟游戏活动后每毫米会产生数千

个微塑料和数十万个纳米塑料^[14]。多数儿童游乐场所使用大量塑料制品来保障儿童游玩的安全性,但也导致了儿童游乐场所的微塑料含量要高于其他场所^[15]。疾病治疗过程中的静脉输注也是人类微塑料暴露的途径之一,研究者使用显微傅里叶变换红外光谱在输液产品中检测到微塑料成分,平均丰度为(2.91±3.91)个/L^[16]。

2 微纳米塑料暴露对婴幼儿的潜在影响

微纳米塑料对婴幼儿健康的潜在影响备受关注。研究表明,微纳米塑料可能对婴幼儿的生长发育、免疫系统和神经系统等造成不良影响^[17]。微纳米塑料及其吸附的有害物质可能干扰内分泌系统,影响儿童正常发育^[18]。此外,微纳米塑料还可能引起炎症反应,长期暴露于微纳米塑料环境可能增加儿童患过敏性疾病和代谢性疾病的风险^[19]。见图 1。



图 1 婴幼儿照护过程中的微纳米塑料暴露情况及毒性效应
Fig. 1 MNPs exposure and toxic effects in early childhood care environments

2.1 微纳米塑料对婴幼儿生长发育的影响 微纳米塑料可能通过干扰营养吸收和代谢过程影响婴幼儿的生长发育。从 26 例人体样本中检测发现胃内容物中提取了 97 个微塑料颗粒,以此预估每人每天微塑料的摄入量约为 32.2 个^[20]。微塑料在胃肠道中的积累会阻碍营养物质的吸收,然而,也有研究发现母体接触微塑料会改变后代的能量和脂质代谢,微塑料及其添加剂可能是潜在致肥胖因素^[21]。此外,微纳米塑料表面吸附的环境污染物,如重金属和

持久性有机污染物,可能进一步加剧这种干扰效应,影响营养物质的消化和吸收^[22]。人体角膜和结膜上皮细胞都可以吸收聚苯乙烯微塑料,而且微塑料会在细胞核周围积聚,具有细胞毒性,诱发氧化应激和炎症反应^[23]。虽然直接的人类研究数据有限,但长期暴露于微塑料环境可能导致婴幼儿发育异常,动物实验表明,微塑料暴露可导致体重增长减缓、骨骼发育异常等^[24]。

2.2 微纳米塑料对婴幼儿免疫系统的毒性效应

微纳米塑料可能通过诱导炎症反应和氧化应激对儿童免疫系统造成损害。研究表明,微塑料颗粒可被免疫细胞识别为外来物质,引发炎症反应^[25]。长期的低度炎症可能导致免疫系统功能紊乱,增加过敏性疾病和自身免疫性疾病的风险。此外,微塑料表面的污染物可能加剧氧化应激,进一步损害免疫细胞功能。双酚 A 和邻苯二甲酸酯作为塑料生产中常用的添加剂,两者均可通过调节不同的信号通路,包括雌激素、雄激素、过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 和芳烃受体途径等,影响免疫系统^[26]。微纳米塑料携带的污染物也会干扰婴幼儿的免疫系统,研究发现,微塑料可作为过敏原载体,增强过敏原的致敏性^[27]。同时,微塑料可能会干扰免疫耐受机制,这些效应在免疫系统尚未完全发育成熟的儿童中可能更为显著,增加了儿童罹患哮喘、湿疹等疾病的风险^[28]。

2.3 微纳米塑料对婴幼儿神经系统的毒性效应

纳米塑料可以通过血脑屏障进入中枢神经系统,对儿童神经发育产生不利影响。研究表明,纳米级微塑料颗粒能够穿过血脑屏障,聚苯乙烯、聚乙烯、聚丙烯和聚氯乙烯能够选择性地进入人类脑脊液和脑组织中^[29]。动物实验中微纳米塑料的暴露损伤神经元,并通过诱导氧化应激和炎症反应间接影响神经功能,孕期微塑料暴露可导致后代出现学习记忆障碍和行为异常^[30]。将星形胶质细胞、少突胶质细胞和神经元暴露于不同尺寸的聚苯乙烯微纳米塑料后发现,微纳米塑料均会引起神经细胞转录表达变化,且微塑料(500nm)毒性高于纳米塑料(50nm)^[31]。

2.4 微纳米塑料对婴幼儿内分泌系统的毒性效应

婴幼儿照护产品通常是由聚苯乙烯、聚乙烯、聚丙烯等常见塑料制成,在制备过程中通常会添加多种化学添加剂,包括增塑剂、稳定剂、阻燃剂、抗氧化剂等,其中许多物质具有内分泌干扰特性,如邻苯二甲酸酯、双酚 A、有机锡化合物和多溴联苯醚等。研究者对欧洲国际玩具零售商处购买的 84 种玩具进行筛查,发现其中 11 款玩具检出含有多溴联苯醚^[32]。

塑料玩具释放的内分泌干扰物表现出雄激素拮抗作用,将对男性生殖系统产生负面影响。聚苯乙烯微塑料的暴露引起大鼠血清睾丸激素、促黄体生成激素和促卵泡激素浓度下降,引起内分泌紊乱^[33]。微纳米塑料的比表面积大,具有疏水性,容易吸附疏水性有机物,一些修饰后微塑料表面带有电荷,可以通过静电作用吸附带电的有机污染物。由于内分泌干扰化学物质不与塑料共价键合,易脱吸附渗入牛奶、水和其他液体中,饮用后会影响哺乳动物的内分泌系统,干扰正常的激素受体,改变内分泌腺的激素分泌^[34]。微塑料也可能是性早熟的重要触发因素,收集 14 份中枢性性早熟女童和健康对照者的血清样本,检测到中枢性性早熟女童体内总微塑料浓度 $[(68.19 \pm 26.49) \text{ mg/kg}]$ 显著高于健康对照组 $[(36.94 \pm 13.22) \text{ mg/kg}]$,动物实验也表明与对照组相比,暴露于微塑料的雌性小鼠出现性早熟表现^[35]。

2.5 微纳米塑料对婴幼儿疾病进展的影响 有研究显示,89.6%呼吸系统疾病患儿支气管肺泡灌洗液中检测到微塑料成分,微塑料水平与年龄呈负相关,城市儿童微塑料水平相较于农村更高^[36]。微纳米塑料的暴露还会促进疾病进展,研究人员以 A549 细胞为研究对象,探究微塑料对甲型流感病毒感染宿主过程的影响,发现聚苯乙烯微塑料可以促进甲型流感病毒对细胞的感染,影响细胞先天抗病毒免疫系统^[37]。血液中的微塑料与动脉粥样硬化心血管疾病之间有一定关联,以聚苯乙烯微塑料真实血药浓度暴露后,人血管内皮 EA.hy926 细胞诱发氧化应激反应,引起细胞凋亡^[38]。聚苯乙烯微塑料的暴露通过影响免疫反应、氧化应激反应和细胞凋亡相关基因簇的表达,增加黏液量和炎症细胞浸润来加重模型小鼠哮喘症状^[39]。

3 影响微纳米塑料毒性效应的关键因素

微纳米塑料的物理化学特性是其毒性效应的重要影响因素。粒径较小的微塑料比表面积更大,更容易穿过生物屏障,进入组织和细胞。在血脑屏障模型实验中,0.2 μm 聚苯乙烯微塑料与 1.0 μm 聚苯乙烯微塑料相比,表现出更强的细胞摄取率和血脑屏障通透性^[40]。微塑料的老化同样对其毒性有重要影响,将聚苯乙烯、聚乙烯和聚酰胺进行紫外老化处理,比较老化前后微塑料对左氧氟沙星的吸附能力,结果发现,老化后聚苯乙烯吸附能力>老化后聚酰胺>老化后聚乙烯>聚酰胺>聚苯乙烯>聚乙烯^[41]。微纳米塑料的形状也影响其生物效应,纤维

状微塑料比微塑料碎片、球形颗粒更具毒性^[42]。此外,微纳米塑料的表面化学性质,如电荷和官能团,也会影响其与生物分子的相互作用,将 5 周龄的大鼠暴露于未修饰的聚苯乙烯微塑料、氨基修饰的聚苯乙烯微塑料和羧基修饰的微塑料环境中,与未修饰的微塑料相比,修饰后的微塑料会造成更严重的血压升高反应和心脏氧化损伤^[43]。

环境因素和暴露途径也会影响微纳米塑料的毒性效应。温度、pH 值等环境条件会改变微纳米塑料的性质和毒性。检测含有发泡聚苯乙烯珠粒的产品苯乙烯单体和其他化学物质的释放量,发现其表面苯乙烯单体、己烷、庚烷、甲苯、辛烷、二甲苯等物质释放量随着温度的升高而大幅增加^[44]。不同暴露途径(如经口、经皮或吸入)导致微纳米塑料在体内的分布和代谢不同,从而产生不同的毒性效应。不同的营养转移途径对微塑料的毒性效应具有不同的影响,食源性微纳米塑料能够导致小鼠肠道微生物群落失调、肠道代谢紊乱及肝损伤,而空气传播的纳米塑料会诱导鼻腔和肺微生物群落失调、肺代谢紊乱及肺损伤^[45]。婴幼儿的特殊行为习惯,如啃咬玩具、在地上爬行等,可能增加其微纳米塑料暴露的风险。

4 婴幼儿照护过程中微纳米塑料暴露的预防与控制

为减少婴幼儿微纳米塑料暴露,可采取以下预防和控制措施:1)政策法规和行业标准在控制微纳米塑料暴露方面发挥着重要作用。欧盟已禁止在化妆品中添加微塑料,并计划进一步扩大禁令范围。2)选择安全的替代材料,如玻璃、不锈钢、天然纤维等替代塑料制品。改进产品设计,减少塑料使用,提高产品耐用性。加强使用指导,如正确清洗和消毒塑料制品,避免高温使用等。3)控制微纳米塑料的暴露量,使用高质量的净水器,去除水中的微塑料颗粒,选择新鲜食材,减少塑料包装食品的摄入。彻底清洗水果、蔬菜和海鲜,减少表面附着的微塑料。使用高效空气净化器,减少室内空气中的微塑料颗粒。定期清洁地板、地毯和家具表面,减少微塑料的积累。指导婴幼儿监护人关注无塑化婴幼儿产品标准,选择无塑化、低塑化婴幼儿产品,母乳喂养过程中避免使用塑料储奶袋,避免塑料包装食品直接加热,以上举措可以在孕期及新生儿养育培训过程中宣传教育,增强养护人的健康意识。同时,幼儿应养成健康的生活习惯,勤洗手,减少微塑料通过手-口途径进入体内。4)开发有效的检测方法,监测环境和食品中的微纳米塑料含量。研究微纳米塑料对婴

幼儿健康的长期影响,制定安全暴露限值。研发高效的微塑料去除技术,如吸附、光催化降解及生物去除等方法。

综上,微纳米塑料作为一种新兴环境污染物,可以通过多种途径进入婴幼儿体内,对其健康造成潜在威胁。本文综述了微纳米塑料的暴露途径、对婴幼儿各系统的毒性效应及其作用机制。微纳米塑料可能通过物理损伤、氧化应激、炎症反应和内分泌干扰等机制对婴幼儿健康产生不利影响。然而,由于婴幼儿微纳米塑料暴露的长期追踪数据有限,毒性机制多基于动物或体外实验,此外,以往对微纳米塑料的研究标准(尺寸、成分等)不统一,且婴幼儿健康受多因素影响,难以单独评估微纳米塑料的毒性效应。未来研究应开展大规模的流行病学调查,深入研究微纳米塑料及其与其他环境污染物共暴露在婴幼儿体内的毒性效应,开发有效的微纳米塑料暴露评估方法,为制定相应的防护政策和措施提供科学依据。

利益冲突声明 本文不存在利益冲突

数据可用性声明 本研究未生成新的数据,对于纳入的每项研究已在参考文献列表中列出。

参考文献

- [1] Zhang Q, Xu EG, Li J, et al. A review of microplastics in table salt, drinking water, and air: Direct human exposure [J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(7): 3740-3751.
- [2] Saraluck A, Techarang T, Bunyapipat P, et al. Detection of microplastics in human breast milk and its association with changes in human milk bacterial microbiota [J]. *J Clin Med*, 2024, 13(14): 4029.
- [3] Liu LP, Zhang X, Jia PQ, et al. Release of microplastics from breastmilk storage bags and assessment of intake by infants: A preliminary study [J]. *Environ Pollut*, 2023, 323: 121197.
- [4] Kadam-Czapska K, Jutrzenka Trzebiatowska P, Mazurkiewicz M, et al. Isolation and identification of microplastics in infant formulas - A potential health risk for children [J]. *Food Chem*, 2024, 440: 138246.
- [5] Wang J, Lee J, Kwon EE, et al. Quantitative analysis of polystyrene microplastic and styrene monomer released from plastic food containers [J]. *Heliyon*, 2023, 9(5): e15787.
- [6] Yadav H, Khan MRH, Quadir M, et al. Cutting boards: An overlooked source of microplastics in human food? [J]. *Environ Sci Technol*, 2023, 57(22): 8225-8235.
- [7] Maurizi L, Iordachescu L, Kirstein IV, et al. Do drinking water plants retain microplastics? An exploratory study using Raman micro-spectroscopy [J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e17113.
- [8] Altunışık A. Prevalence of microplastics in commercially sold soft drinks and human risk assessment [J]. *J Environ*

- Manag, 2023, 336: 117720.
- [9] Ding JF, Ju P, Ran Q, et al. Elder fish means more microplastics? Alaska pollock microplastic story in the Bering Sea[J]. Sci Adv, 2023, 9(27): eadf5897.
- [10] Luo X, Zhang YL, Kang SC, et al. Atmospheric emissions of microplastics entrained with dust from potential source regions[J]. J Hazard Mater, 2025, 488: 137509.
- [11] Myat YN, Kongpran J, Vattanasit U, et al. Suspended airborne microplastics studies in Asia[J]. Environ Chem Lett, 2024, 22(6): 2887-2911.
- [12] O'Brien S, Okoffo ED, O'Brien JW, et al. Airborne emissions of microplastic fibres from domestic laundry dryers[J]. Sci Total Environ, 2020, 747: 141175.
- [13] Torres-Agullo A, Karanasiou A, Lacorte S. Nasal lavage technique reveals regular inhalation exposure of microplastics, not associated from face mask use[J]. Environ Int, 2023, 178: 108129.
- [14] Luo YL, Naidu R, Fang C. Toy building bricks as a potential source of microplastics and nanoplastics[J]. J Hazard Mater, 2024, 471: 134424.
- [15] Koutnik VS, Leonard J, El Rassi LA, et al. Children's playgrounds contain more microplastics than other areas in urban parks[J]. Sci Total Environ, 2023, 854: 158866.
- [16] Cui TF, Liu K, Zhu LX, et al. Is intravenous infusion an unrecognized route for internal microplastic human exposure? A general assessment[J]. J Hazard Mater, 2024, 480: 135769.
- [17] 张雪怡, 张亚昱, 李佳. 微塑料对新生儿健康影响的研究[J]. 中国儿童保健杂志, 2023, 31(4): 399-403.
Zhang XY, Zhang YY, Li J. Research progress in the impact of microplastics on newborn's health[J]. Chin J Child Health Care, 2023, 31(4): 399-403. (in Chinese)
- [18] Fabbri L, Garlantézec R, Audouze K, et al. Childhood exposure to non-persistent endocrine disrupting chemicals and multi-omic profiles: A panel study[J]. Environ Int, 2023, 173: 107856.
- [19] Wei HQ, Lu SR, Chen MQ, et al. Mechanisms of exacerbation of Th2-mediated eosinophilic allergic asthma induced by plastic pollution derivatives (PPD): A molecular toxicological study involving lung cell ferroptosis and metabolomics[J]. Sci Total Environ, 2024, 946: 174482.
- [20] Özsoy S, Gündoğdu S, Sezigen S, et al. Presence of microplastics in human stomachs[J]. Forensic Sci Int, 2024, 364: 112246.
- [21] 张淑磊, 崔瑞及, 闫灵均, 等. 微塑料在肥胖领域的研究进展[J]. 实用医学杂志, 2024, 40(14): 1908-1914.
Zhang SL, Cui RJ, Yan LJ, et al. Research progress of microplastics in the field of obesity[J]. J Pract Med, 2024, 40(14): 1908-1914. (in Chinese)
- [22] Cortés-Arriagada D, Miranda-Rojas S, Camarada MB, et al. The interaction mechanism of polystyrene microplastics with pharmaceuticals and personal care products[J]. Sci Total Environ, 2023, 861: 160632.
- [23] Zhou XP, Wang GL, An XY, et al. Polystyrene microplastic particles; *In vivo* and *in vitro* ocular surface toxicity assessment[J]. Environ Pollut, 2022, 303: 119126.
- [24] Sui YM, Zhang T, Yao XY, et al. Synthesized effects of medium-term exposure to seawater acidification and microplastics on the physiology and energy budget of the thick shell mussel *Mytilus coruscus*[J]. Environ Pollut, 2022, 308: 119598.
- [25] Choi D, Bang J, Kim T, et al. *In vitro* chemical and physical toxicities of polystyrene microfragments in human-derived cells[J]. J Hazard Mater, 2020, 400: 123308.
- [26] Segovia-Mendoza M, Nava-Castro KE, Palacios-Arreola MI, et al. How microplastic components influence the immune system and impact on children health: Focus on cancer[J]. Birth Defects Res, 2020, 112(17): 1341-1361.
- [27] Hu JQ, Wang CC, Ma RX, et al. Co-exposure to polyethylene microplastics and house dust mites aggravates airway epithelial barrier dysfunction and airway inflammation via CXCL1 signaling pathway in a mouse model[J]. Int Immunopharmacol, 2025, 146: 113921.
- [28] Yang SZ, Guo R, Meng XM, et al. AIM2 participates in house dust mite (HDM)-induced epithelial dysfunctions and ovalbumin (OVA)-induced allergic asthma in infant mice[J]. J Asthma, 2024, 61(5): 479-490.
- [29] Xie J, Ji JL, Sun Y, et al. Blood-brain barrier damage accelerates the accumulation of micro- and nanoplastics in the human central nervous system[J]. J Hazard Mater, 2024, 480: 136028.
- [30] Chen J, Yan LC, Zhang YP, et al. Maternal exposure to nanopolystyrene induces neurotoxicity in offspring through P53-mediated ferritinophagy and ferroptosis in the rat hippocampus[J]. J Nanobiotechnol, 2024, 22(1): 651.
- [31] Marcellus KA, Bugiel S, Nunnikhoven A, et al. Polystyrene nano- and microplastic particles induce an inflammatory gene expression profile in rat neural stem cell-derived astrocytes *in vitro*[J]. Nanomaterials, 2024, 14(5): 429.
- [32] Olisah C, Melymuk L, Audy O, et al. Extremely high levels of PBDEs in children's toys from European markets: Causes and implications for the circular economy[J]. Environ Sci Eur, 2024, 36(1): 183.
- [33] Amereh F, Babaei M, Eslami A, et al. The emerging risk of exposure to nano(micro)plastics on endocrine disturbance and reproductive toxicity: From a hypothetical scenario to a global public health challenge[J]. Environ Pollut, 2020, 261: 114158.
- [34] Ullah S, Ahmad S, Guo XL, et al. A review of the endocrine disrupting effects of micro and nano plastic and their associated chemicals in mammals[J]. Front Endocrinol, 2023, 13: 1084236.
- [35] Zang SL, Wang F, Ouyang Y, et al. Exposure to polyethylene and polyvinylchloride microplastics caused advanced puberty onset in females through promoting hypothalamic GnRH expression[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2025, 291: 117906.

- ic stress[J]. *Chronic Stress*, 2017, 1: 2470547017692328.
- [38] Sears CG, Liu Y, Lanphear BP, et al. Evaluating mixtures of urinary phthalate metabolites and serum per-/polyfluoroalkyl substances in relation to adolescent hair Cortisol: The HOME study [J]. *Am J Epidemiol*, 2024, 193 (3): 454-468.
- [39] Crocco P, De Rango F, Dato S, et al. Telomere length as a function of age at population level parallels human survival curves[J]. *Aging*, 2021, 13(1): 204-218.
- [40] Leibel DK, Shaked D, Beatty Moody DL, et al. Telomere length and cognitive function: Differential patterns across sociodemographic groups[J]. *Neuropsychology*, 2020, 34 (2): 186-198.
- [41] Cao W, Xing M, Liang S, et al. Causal relationship of gut microbiota and metabolites on cognitive performance: A Mendelian randomization analysis [J]. *Neurobiol Dis*, 2024, 191: 106395.
- [42] Li C, Chen H, Gu Y, et al. Causal effects of PM_{2.5} exposure on neuropsychiatric disorders and the mediation via gut microbiota: A Mendelian randomization study[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 275: 116257.
- [43] Zhu X, Xia Y, Wang H, et al. PM_{2.5} induced neurotoxicity through unbalancing vitamin B12 metabolism by gut microbiota disturbance [J]. *Gut Microbes*, 2023, 15 (2): 2267186.
- [44] Zhang X, Chen X, Zhang X. The impact of exposure to air pollution on cognitive performance[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2018, 115(37): 9193-9197.
- [45] Bijnens EM, Derom C, Thiery E, et al. Residential green space and child intelligence and behavior across urban, suburban, and rural areas in Belgium: A longitudinal birth cohort study of twins [J]. *PLoS Med*, 2020, 17 (8): e1003213.

收稿日期:2025-06-11 修回日期:2026-03-13 本文编辑:李少闻

(上接第 802 页)

- [36] Chen CZ, Liu F, Quan ST, et al. Microplastics in the bronchoalveolar lavage fluid of Chinese children: Associations with age, city development, and disease features[J]. *Environ Sci Technol*, 2023, 57(34): 12594-12601.
- [37] Wang C, Wu WJ, Pang ZF, et al. Polystyrene microplastics significantly facilitate influenza A virus infection of host cells[J]. *J Hazard Mater*, 2023, 446: 130617.
- [38] Chen YC, Chen KF, Andrew Lin KY, et al. Evaluation of toxicity of polystyrene microplastics under realistic exposure levels in human vascular endothelial EA. hy926 cells [J]. *Chemosphere*, 2023, 313: 137582.
- [39] Lu K, Lai KP, Stoeger T, et al. Detrimental effects of microplastic exposure on normal and asthmatic pulmonary physiology[J]. *J Hazard Mater*, 2021, 416: 126069.
- [40] Cho YS, Seo EU, Hwang KS, et al. Evaluation of size-dependent uptake, transport and cytotoxicity of polystyrene microplastic in a blood-brain barrier (BBB) model [J]. *Nano Converg*, 2024, 11(1): 40.
- [41] Shi YQ, Shi LP, Huang HXY, et al. Analysis of aged microplastics: A review[J]. *Environ Chem Lett*, 2024, 22 (4): 1861-1888.
- [42] Choi KM, Mun SH, Shin DJ, et al. The toxic effects of exposure to fibrous and fragmented microplastic in juvenile rockfish based on two omics approach[J]. *Chemosphere*, 2024, 367: 143541.
- [43] Du WT, Xu K, Wang SX, et al. Exposure to polystyrene microplastics with different functional groups: Implications for blood pressure and heart[J]. *Environ Pollut*, 2025, 372: 126009.
- [44] Iizuka A, Mizukoshi A, Noguchi M, et al. Emission fluxes of styrene monomers and other chemicals for products containing expanded polystyrene beads[J]. *PLoS One*, 2020, 15(10): e0239458.
- [45] Zha H, Li SJ, Zhuge AX, et al. Hazard assessment of airborne and foodborne biodegradable polyhydroxyalkanoates microplastics and non-biodegradable polypropylene microplastics[J]. *Environ Int*, 2025, 196: 109311.

收稿日期:2025-03-14 修回日期:2025-09-19 本文编辑:王悦