

DOI: 10.14188/j.1671-8852.2025.0050

文章编号 1671-8852(2026)05-0678-06

微塑料暴露对胎儿及儿童生长发育影响的研究进展

杨轶童 石翌玲

陕西中医药大学第二附属医院儿科 陕西 咸阳 712000

摘要 微塑料(MPs)作为一种新型污染物近年来广泛受到国内外关注,并已成为重要的环境污染问题之一。孕期、婴儿期和儿童期是环境暴露的敏感窗口期,近期研究发现 MPs 暴露广泛存在于孕期与儿童生长发育的过程中,在胎盘、婴儿粪便、母乳和婴儿配方奶粉等物质中都检测出了 MPs 存在,MPs 在体内的积累会对儿童生长发育产生不可忽视的影响。且儿童自身去除 MPs 的能力较低,其所受 MPs 危害的潜在风险更大。本文综述了 MPs 在孕期与儿童生长发育过程中的影响的最新研究结果,发现多项研究已证实儿童生长发育的各个时期都处于 MPs 暴露的风险之下,因此 MPs 作为影响儿童健康的重要因素之一应当被人们所重视,以从 MPs 污染角度对保护儿童生命健康提供参考。

关键词 微塑料;塑料污染;胎儿;儿童生长发育;儿童健康

中图分类号 R729

文献标识码 A

Research advance on the effects of microplastics exposure on the growth and development of fetus and children

YANG Yitong, SHI Zhaoling

Department of Pediatrics, The Second Affiliated Hospital of Shaanxi University of Chinese Medicine,
Xianyang 712000, Shaanxi, China

Abstract

As a new type of pollutant, microplastics (MPs) have received widespread attention both domestically and internationally in recent years, and have become one of the important environmental pollution problems. Pregnancy and early childhood are sensitive windows for environmental exposure. Recent studies have found that MPs exposure is widespread during pregnancy and child growth and development, and MPs have been detected in the placenta, infant feces, breast milk, and infant formulas and so on. Accumulation of MPs in children's bodies can have a significant impact on their growth and development. Since children's ability to remove MPs is low, they face a higher risk of MP exposure. In this article, we review the latest research on the effects of MPs during pregnancy and children's growth and development, and we find that children are at risk of MP exposure throughout their growth and development. Thus, MPs should be considered as one of the key factors affecting children's health. This paper aims to provide a reference for protecting children's health from the perspective of MP pollution.

Key Words Microplastics; Plastic Pollution; Fetus; Child Growth and Development; Child Health

课题来源:国家自然科学基金资助项目(编号:82205188,82474575);秦创原中医药产业创新聚集区项目(编号:L2024-QCY-ZYYYJQ-253)。
作者简介:杨轶童,男,1998—,医学硕士,主要从事儿童心血管基础疾病研究,E-mail:221020921476@sntcm.edu.cn。
通信作者:石翌玲,E-mail:1563450@sntcm.edu.cn。

由于工业急速发展,我国已经成为世界塑料的生产大国。据国家统计局统计,2023年全年我国塑料制品行业产量已达到7 488.5万吨,同比增长3.0%,塑料制品已与我们的日常生活密不可分。然而,只有少部分塑料被回收利用,大部分塑料废弃物会通过各种途径直接排放到环境中,最终以微小且肉眼不可见的塑料颗粒形式释放,并在环境中潜在积累,这些因为各种物理、化学和生物活动而被分解的塑料碎片被统称为微塑料(microplastics, MPs)^[1-2]。MPs尺寸微小且性质相对稳定,能够在环境中长期存在,容易被生物体摄入^[3-4]。MPs可长时间在食物链中积累,其表面能够吸附污染物或微生物,最终在人体体内富集并进入全身循环,对各个系统的正常生理功能产生不可忽视的影响^[5-6]。孕期、婴儿期和儿童期是环境暴露的敏感窗口期,值得注意的是,近期研究不但在人类胎盘中发现了MPs积累,并且MPs积累同样广泛存在于儿童生长发育的过程中^[7-8]。因此,MPs对妊娠和后代健康的生物影响已逐渐成为研究者们关心的重要问题。

本文通过采用计算机检索及人工检索中英文数据库(Pubmed、Web of Science、中国知网)文献,不设定语言限制,检索时间为2019年1月后。以微塑料、孕期、胎儿、儿童为检索词,检索方式为主题词配合自由词检索,分别从研究对象、标本数量、检测方法、检测结果等方面逐一综合评定后纳入综述。本文探讨了MPs对妊娠和儿童健康的影响,旨在从防治MPs污染角度为保护儿童的生命健康提供新的参考。

1 MPs污染及对人体的危害

1.1 MPs的定义 自20世纪50年代以来,全球塑料产量呈现爆炸式增长。塑料制品凭借其质量轻、化学性质稳定、耐久性高以及成本低等优势,广泛应用于人们日常生活的各个领域,极大地便利了我们的生活^[9]。迄今为止,我们的生活已很难与塑料制品脱离。塑料具有诸多优点,但其不可生物降解

的特性使其已成为人类环境的一大威胁^[10]。生活中使用完的塑料制品只有极少部分会被回收利用,大部分会通过各种方式成为塑料废物并直接排放到环境中,最终以微小且难以察觉的塑料颗粒形式释放并在环境中潜在积累^[11]。作为一种新型污染物,这些尺寸<5 mm的微小塑料颗粒被称为MPs,在自然条件下,MPs甚至可进一步降解为纳米级,其颗粒直径微小的特点正是其与“白色污染”塑料相比对于环境危害程度更深的原因^[12]。

MPs依据化学组成成分可分为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、聚酰胺(PA),依据来源可分为初生微塑料与次生微塑料,依据形状可分为纤维状微塑料与颗粒状微塑料(见表1)。MPs能够在环境中长期存在,其在食物链中逐渐积累的同时极易被生物体摄入。塑料本身具有吸附特性,可吸附污染物或微生物并使其富集在表面。MPs由于尺寸更小,具有更高的比表面积,因此其吸附污染物的能力更强,且其会与环境中已存在的持久性有机污染物(如多氯联苯、双酚A等)结合,形成危害性更大的有机污染球体^[13-14]。在食物链的富集作用下,处于顶端的人类会累积大量MPs,这些难以消化的塑料颗粒会对人体产生难以预计的危害^[15]。综上所述,MPs污染与我们的生活息息相关,会对人体的各个系统产生不可忽视的影响,并且由于人类摄入的MPs数量远高于其他生物,因此MPs对人类健康的潜在威胁亟需引起更多关注和重视。

1.2 MPs的摄入方式 MPs主要通过经口摄入、吸入摄入与皮肤接触等途径在人体内累积^[16-17]。经口摄入是人体摄入MPs的最主要途径,据报道^[18-20]人们在日常接触饮用水、食物、塑料容器的过程中都会不可避免的摄入不同数量的MPs,经口摄入的MPs首先会与肠黏膜接触,然后穿过肠道屏障,并可导致消化道机械磨损,引发肠道炎症、肠道菌群失调、代谢障碍和免疫功能紊乱,最终进入全身循环,对人体的各个系统产生影响。吸入摄入同样是

表1 微塑料的分类特征

分类方法	类别和特征
化学组成	聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、聚酰胺(PA)
来源	初生微塑料:指经过河流、污水处理厂等而排入水环境中的塑料颗粒工业产品,如化妆品等含有的微塑料颗粒或作为工业原料的塑料颗粒和树脂颗粒 次生微塑料:由大型塑料垃圾经过物理、化学和生物过程造成分裂和体积减小而成的塑料颗粒
形状	纤维状微塑料:主要来源于合成纺织品的微塑料,其来源包括合成纺织品、垃圾填埋场废物和工业排放物 颗粒状微塑料:多为球形、椭圆形或不规则颗粒状,具有尺寸微小、吸附性强、难降解、易迁移的特性

人体摄入 MPs 的重要途径,塑料会因紫外线降解产生大小形状不一的 MPs 并释放在空气中,而颗粒直径小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒可以通过呼吸道吸入并在肺部深处沉积,并且可以快速通过肺部进入体循环,引发肺部和全身炎症反应^[21]。而日常与我们皮肤直接接触的外用化妆品、护肤品及外用药物等物品也会导致人体摄入 MPs,由皮肤接触到的 MPs 会通过大小依赖的方式在皮肤组织和表皮细胞中持续渗透和富集,皮肤长期慢性 MPs 的暴露会诱导炎症反应、促进氧化应激并导致皮肤细胞毒性^[22]。

1.3 MPs 对人体的危害 多项研究显示 MPs 在体内的积累会对人体多个系统产生影响。(1)心血管系统:MARFELLA 等^[23]检测了 304 名动脉粥样硬化患者的颈动脉斑块,在 58.4% 的患者斑块中检测到了 $(21.7\pm 24.5)\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 斑块的 MPs,并且检测到 MPs 的颈动脉斑块患者在 34 个月随访时比未检测到 MPs 的患者有更高的心肌梗死、卒中或任何原因死亡的复合风险。(2)呼吸系统:AMATO-LOURENÇO 等^[24]通过对 20 例人肺组织进行检测,在 13 例组织中观察到直径 $<5.5\text{ }\mu\text{m}$ 的 PE 和 PP 的存在,并发现 MPs 类污染物吸入后对人体健康的危害与吸入后其在呼吸系统内的异质性有关。(3)消化系统:IBRAHIM 等^[25]在 11 例人类结肠切除标本中均检出了 MPs,每个标本平均高达 331 个,提示 MPs 在人类结肠中无处不在。(4)生殖系统:JIN 等^[26]发现 MPs 暴露可以导致睾丸组织学改变、精子发生异常及干扰小鼠血清激素分泌,并可以通过下调 LHR/cAMP/PKA/StAR 通路诱导睾酮水平降低,提示 MPs 的慢性暴露可导致男性生殖系统毒性。(5)神经系统:XIE 等^[27]在 28 例正常或中枢神经系统感染的人类脑脊液标本中都发现了多种类型的 MPs 存在,表明 MPs 具备进入人类中枢神经系统的能力,且其中 PE 和 PP 的浓度与脑脊液白蛋白指数呈正相关,提示血脑屏障受损后 MPs 更易穿透中枢神经系统。综上所述,MPs 的暴露可以对多个系统造成难以估计的损害,从而对人体健康产生不利后果,然而目前 MPs 的致病机制尚不明确,仍需进一步研究。

2 MPs 在孕期的影响

2.1 MPs 在胎盘中的积累 妊娠是胚胎和胎儿在母体内生长发育的过程,成熟卵子受精是妊娠的开始,胎儿及其附属物自母体排出是妊娠的终止,妊

娠是非常复杂而变化极为协调的生理过程并受多种因素影响。值得注意的是,近期研究在妊娠过程和胎盘中也发现了 MPs 的积累,并且 MPs 会对后续胎儿的生长发育产生不可忽视的影响^[28-29]。2021 年,研究者们首次报道了人类胎盘中检测出了 MPs 的存在,RAGUSA 等^[30]通过拉曼光谱显微镜分析了 6 个人类胎盘,共发现 12 个大小为 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 的球形或不规则形 MPs,通过对检测出的 MPs 形态和化学成分进行表征,其中 3 个被鉴定为染色的聚丙烯热塑性聚合物,而其他 9 个只能鉴定出颜料,这些颜料都被用于人造涂料、粘合剂、石膏、手指漆、聚合物、化妆品和个人护理产品。ZHU 等^[31]采用激光直接红外光谱(LD-IR)技术对 17 例胎盘中 MPs 的存在及其特征进行了评估,并在所有胎盘标本中全部检测出了粒径范围为 $20.34\sim 307.29\text{ }\mu\text{m}$ 的 MPs,共鉴定出了 11 种聚合物类型,主要成分为聚氯乙烯(PVC,43.27%)、聚丙烯(PP,14.55%)和聚丁二酸盐(PBS,10.90%),为人类胎盘中 MPs 的形状、大小和性质提供了更清晰的认识。

2.2 MPs 对胎儿的影响 不容忽视的是,MPs 不但会通过多种方式在妊娠期通过母体进入胎盘内积累,而且会对母体、胎儿及妊娠结局产生不良的影响。HU 等^[32]将聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)暴露于 C57BL/6 交配的 BALB/c 小鼠中,发现在植入期暴露于 $10\text{ }\mu\text{m}$ PS-MP 颗粒可提高胚胎吸收率,减少子宫动脉数量和直径并导致子宫血供减少,并引起细胞因子分泌向免疫抑制状态转变,表明 PS-MPs 有可能通过免疫紊乱对妊娠结局产生不良影响。FOURNIER 等^[33]将纳米聚苯乙烯微球暴露于妊娠 19 d 的 Sprague Dawley 大鼠气管内,并通过分离胎盘灌注将已知浓度的纳米聚苯乙烯注入子宫动脉,对母胎组织和孕妇及胎儿的排出物进行检测,结果发现母亲暴露后 24 h,胎儿和胎盘的重量显著低于对照组,母胎肺、心脏和脾脏中均检测到纳米聚苯乙烯颗粒。在胎盘、胎儿肝、肺、心、肾和脑中也观察到聚苯乙烯纳米颗粒,提示在妊娠晚期,母体肺部的 MPs 会移位至胎儿组织。AMERREH 等^[34]发现胎儿宫内生长受限(intrauterine growth restriction, IUGR)孕妇胎盘中的 MPs 含量显著高于正常孕妇,并且 IUGR 孕妇胎盘中的 MPs 含量与婴儿的出生体质量、身长、头围与 Apgar 评分均呈负相关,且关联模式显示出非线性或非单调的剂量反应。LIU 等^[35]通过调查了健康分娩妇女的使用塑料容器和塑料包装食品消费的情况,并对胎盘、胎粪、婴儿粪便、母乳和婴

儿配方奶粉进行 MPs 分析,令人惊讶地发现,在这些样本中均可检出多达 16 种 MPs,聚酰胺和聚氨酯占所有 MPs 颗粒的 65% 以上,研究发现了饮用水、磨砂洁面膏与牙膏可能是孕妇潜在的接触来源,母乳喂养和使用奶瓶以及塑料玩具可能是哺乳期婴儿潜在的 MPs 接触来源,并且暴露于 MPs 可能会对胎盘和胎粪微生物群落造成不良影响。

以上数据表明,母体摄入的 MPs 会在妊娠期于胎盘中积累并转移至胎儿的多个脏器,并会影响妊娠,对胎儿的生长发育及后续的健康状况产生影响。MPs 应当成为影响正常妊娠过程的重要因素之一被人们所重视,母体应在妊娠前后避免接触到过多塑料制品导致大量 MPs 摄入影响胎儿生长发育与健康。

3 MPs 暴露在儿童日常生活中广泛存在

MPs 暴露的风险已存在于人们生活中的各个方面,儿童在长发育过程中不可避免的会接触到各种各样的塑料制品,而儿童期同样是环境暴露的重要敏感窗口期,有研究^[36]发现 MPs 在婴儿粪便中普遍存在,颗粒数更是成人的 10~20 倍。目前越来越多的证据证实儿童已广泛暴露于 MPs 污染的风险之中,MPs 暴露已成为影响儿童健康的重要因素并应被人们所重视。HUSSAIN 等^[37]发现当包装婴儿食品的塑料容器在微波炉中加热时会释放出大量 MPs,在微波加热的 3 min 内,一些容器可以从一平方厘米的塑料区域释放多达 422 万个 MPs 颗粒和 21.1 亿个纳米塑料颗粒。并且冷藏和室温储存 6 个月以上的塑料容器也会释放出数百万到数十亿的 MPs 颗粒,而 PE 食品袋会比聚丙烯塑料容器释放更多的 MPs 颗粒。在饮用微波水的婴儿和饮用聚丙烯容器中的微波乳制品的幼儿中,MPs 的最高日摄入量更是分别达到了 20.3 和 22.1 ng·kg⁻¹。2020

年,LI 等^[38]的一项研究调查了婴儿对由聚丙烯制成的婴儿奶瓶制备的配方奶粉中微塑料的潜在暴露情况,研究发现聚丙烯奶瓶释放的 MPs 高达每升 1.62×10⁷ 个,具体原因是聚丙烯奶瓶在灭菌处理以及日常使用中常暴露于高温水中,而高温环境会显著加速微塑料颗粒从奶瓶表面的释放。值得注意的是,不但使用塑料奶瓶会增加儿童 MPs 暴露的风险,婴幼儿配方奶粉中同样检测出了 MPs 的存在。KADAC-CZAPSKA 等^[39]通过分离塑料颗粒和光谱技术对 30 种配方奶粉产品进行了 MPs 检测,在所有奶粉样本中均检出了 MPs 的存在,最常见的 MPs 聚合物为 PA、PE、PP 和对苯二甲酸乙二酯,结果显示纯婴儿配方奶粉喂养的儿童每日摄入的 MPs 约为(49±32) 个,婴儿日常不可或缺的奶粉也已不再“安全”。KE 等^[40]发现学龄前儿童饮食途径和奶瓶的使用可能是儿童出现 MPs 积累的重要原因,研究者们通过收集 69 例学龄前儿童的粪便样本进行 MPs 检测和肠道菌群分析,结果发现 85.5% 的粪便样本中检测出了多种 MPs 的存在,奶类的摄入可能是影响学龄前儿童粪便中 MPs 浓度重要因素,奶瓶的使用可能是 MPs 污染的特定来源。此外,当孩子们饮食的时间更长时,粪便中的聚氯乙烯浓度也更高,并且 MPs 在体内的积累会影响人类肠道微生物群中的重要益生菌副拟杆菌属和另枝菌属,进一步引起肠道菌群紊乱、影响儿童肠道健康。

综上所述(见表 2),儿童比成人更多地暴露在 MPs 威胁之中,儿童自出生起在生长发育过程中接触到的奶瓶、奶粉及塑料制品等物品都会释放 MPs 影响儿童身体健康。并且由于儿童各个系统的发育尚不成熟,抵御 MPs 影响的能力更差,人们必须重视 MPs 污染在儿童生长发育中的影响,进一步寻求措施保障儿童生命健康。

表 2 微塑料暴露在儿童日常生活中广泛存在

研究来源	检测物品	主要研究结果
HUSSAIN 等 ^[37]	塑料容器	微波加热 3 min 内,1 cm ² 的塑料区域可释放多达 422 万个微塑料和 21.1 亿个纳米塑料颗粒,饮用微波水的婴儿和饮用聚丙烯容器中的微波乳制品的幼儿的微塑料的最高日摄入量可达到 20.3 和 22.1 ng·kg ⁻¹
LI 等 ^[38]	聚丙烯(PP) 婴儿喂养瓶	聚丙烯婴儿喂养瓶释放的微塑料高达 1.62×10 ⁷ 个·L ⁻¹ ,原因是聚丙烯奶瓶灭菌和暴露都会处于高温水中,这会显著增加微塑料的释放
KADAC-CZAPSKA 等 ^[39]	婴幼儿配方奶粉	30 例样本中均检出微塑料,最常见的聚合物是聚酰胺、聚乙烯、聚丙烯和对苯二甲酸乙二酯,纯婴儿配方奶粉喂养的儿童每日摄入的微塑料微粒约为(49±32) 个
KE 等 ^[40]	儿童粪便	69 例样本中 85.5% 的粪便样本中检测出聚氯乙烯、聚对苯二甲酸乙二酯、聚乙烯和聚酰胺 6 存在,其浓度分别为 317.4 (152.0, 491.9)、299.0 (196.1, 619.9)、206.2 (154.1, 240.3)、17.9(13.4, 18.6) μg·g ⁻¹ ,且当孩子们吃饭的时间更长时,粪便中的聚氯乙烯浓度也更高

4 总结与展望

MPs 污染已被列入环境与生态科学研究领域的第二大科学问题,成为与全球气候变化、臭氧耗竭等并列的重大全球环境问题,并且由于对人类健康的潜在风险,MPs 正成为全球紧密关注的科学问题^[41-42]。孕期、婴儿期和儿童期是环境暴露的敏感窗口期,这些阶段与儿童的生长发育密切相关。多项研究已证实,这些关键时期均面临 MPs 暴露的风险。MPs 已被检测出存在于胎盘、婴儿粪便、母乳以及婴儿配方奶粉等多种与儿童健康直接相关的物质中。由于儿童尚未发育成熟的代谢酶系统,其去除 MPs 的能力相对较弱,同时他们还拥有高度敏感的靶器官,这使得 MPs 对儿童的潜在风险更为显著。因此,MPs 应当被视为影响儿童健康的重要因素之一,引起人们的高度重视。

为了降低 MPs 暴露的风险,不仅孕妇在妊娠期间应尽量减少与塑料制品的接触,而且在儿童的生长发育过程中,也应持续关注并减少 MPs 的暴露,避免儿童接触到较高水平的 MPs。值得注意的是,虽然目前多项研究已经在儿童生长发育的过程中发现了 MPs 的存在,但目前研究者们对 MPs 的研究还处于起步阶段,MPs 进入人体体内累积后的具体致病机制尚不清楚,后续应深入研究 MPs 引起机体损伤的具体病理机制,为探究防治 MPs 暴露影响儿童生长发育的措施提供科学支撑。



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

参考文献

- [1] DICK VETHAAK A, LEGLER J. Microplastics and human health[J]. *Science*, 2021, 371(6530): 672-674.
- [2] XU S, MA J, JI R, et al. Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 703: 134699.
- [3] WARDANI I, HAZIMAH MOHAMED NOR N, WRIGHT S L, et al. Nano- and microplastic PBK modeling in the context of human exposure and risk assessment[J]. *Environ Int*, 2024, 186: 108504.
- [4] TAO S Y, LI T H, LI M Y, et al. Research advances on the toxicity of biodegradable plastics derived micro/nanoplastics in the environment: A review[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 916: 170299.
- [5] HIRT N, BODY-MALAPEL M. Immunotoxicity and intestinal effects of nano- and microplastics: A review of the literature[J]. *Part Fibre Toxicol*, 2020, 17(1): 57.
- [6] SCHWABL P, KÖPPEL S, KÖNIGSHOFER P, et al. Detection of various microplastics in human stool: A prospective case series[J]. *Ann Intern Med*, 2019, 171(7): 453-457.
- [7] KANNAN K, VIMALKUMAR K. A review of human exposure to microplastics and insights into microplastics as obesogens[J]. *Front Endocrinol*, 2021, 12: 724989.
- [8] SRIPADA K, WIERZBICKA A, ABASS K, et al. A children's health perspective on nano- and microplastics[J]. *Environ Health Perspect*, 2022, 130(1): 15001.
- [9] LI Y N, ZHANG Q, BAARTMAN J, et al. The plastic age: River pollution in China from crop production and urbanization[J]. *Environ Sci Technol*, 2023, 57(32): 12019-12032.
- [10] VERED G, SHENKAR N. Plastic pollution in a coral reef climate refuge: Occurrence of anthropogenic debris, microplastics, and plasticizers in the Gulf of Aqaba[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 905: 167791.
- [11] LIN L, HUANG Y X, WANG P, et al. Environmental occurrence and ecotoxicity of aquaculture-derived plastic leachates[J]. *J Hazard Mater*, 2023, 458: 132015.
- [12] MIAO C H, ZHANG J H, JIN R X, et al. Microplastics in aquaculture systems: Occurrence, ecological threats and control strategies[J]. *Chemosphere*, 2023, 340: 139924.
- [13] LIANG J, JI F, ABDULLAH A L B, et al. Micro/nano-plastics impacts in cardiovascular systems across species[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 942: 173770.
- [14] YANG T, WANG J. Exposure sources and pathways of micro- and nanoplastics in the environment, with emphasis on potential effects in humans: A systematic review[J]. *Integr Environ Assess Manag*, 2023, 19(6): 1422-1432.
- [15] PENG Y Y, HE Q. Reproductive toxicity and related mechanisms of micro(nano)plastics in terrestrial mammals: Review of current evidence[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 279: 116505.
- [16] ZURI G, KARANASIOU A, LACORTE S. Microplastics: Human exposure assessment through air, water, and food[J]. *Environ Int*, 2023, 179: 108150.
- [17] KASEKE T, LUJIC T, CIRKOVIC VELICKOVIC T. Nano- and microplastics migration from plastic food packaging into dairy products: impact on nutrient digestion, absorption, and metabolism[J]. *Foods*, 2023, 12(16): 3043.
- [18] LI Z M, HUANG Y J, ZHONG Y Z, et al. Impact of food matrices on the characteristics and cellular toxicities of ingested nanoplastics in a simulated digestive tract[J]. *Food Chem Toxicol*, 2023, 179: 113984.
- [19] DIBBON K C, MERCER G V, MAEKAWA A S, et al. Polystyrene micro- and nanoplastics cause placental dysfunction in mice[J]. *Biol Reprod*, 2024, 110(1): 211-218.

- [20] LIN Z Y, LI Z J, JI S Q, et al. Microplastics from face mask impairs sperm motility[J]. *Mar Pollut Bull*, 2024, 203: 116422.
- [21] BORGATTA M, BREIDER F. Inhalation of microplastics-a toxicological complexity[J]. *Toxics*, 2024, 12(5): 358.
- [22] 龚赞, 刘华东. 微塑料/纳米塑料的暴露途径及对心血管系统影响的研究进展[J]. *中国心血管病研究*, 2023, 21(10): 903-908.
- GONG Y, LIU H D. Research progress on exposure pathways of microplastics/nanoplastics and their effects on cardiovascular system[J]. *Chin J Cardiovasc Res*, 2023, 21(10): 903-908.
- [23] MARFELLA R, PRATTICIZZO F, SARDU C, et al. Microplastics and nanoplastics in atheromas and cardiovascular events[J]. *N Engl J Med*, 2024, 390(10): 900-910.
- [24] AMATO-LOURENÇO L F, CARVALHO-OLIVEIRA R, JÚNIOR G R, et al. Presence of airborne microplastics in human lung tissue[J]. *J Hazard Mater*, 2021, 416: 126124.
- [25] IBRAHIM Y S, TUAN ANUAR S, AZMI A A, et al. Detection of microplastics in human colectomy specimens[J]. *JGH Open*, 2020, 5(1): 116-121.
- [26] JIN H B, YAN M H, PAN C, et al. Chronic exposure to polystyrene microplastics induced male reproductive toxicity and decreased testosterone levels *via* the LH-mediated LHR/cAMP/PKA/StAR pathway[J]. *Part Fibre Toxicol*, 2022, 19(1): 13.
- [27] XIE J, JI J L, 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.
- [28] FARLAND L V, PRESCOTT J, SASAMOTO N, et al. Endometriosis and risk of adverse pregnancy outcomes[J]. *Obstet Gynecol*, 2019, 134(3): 527-536.
- [29] SHARMA R K, KUMARI U, KUMAR S. Impact of microplastics on pregnancy and fetal development: A systematic review[J]. *Cureus*, 2024, 16(5): e60712.
- [30] RAGUSA A, SVELATO A, SANTACROCE C, et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta[J]. *Environ Int*, 2021, 146: 106274.
- [31] ZHU L, ZHU J Y, ZUO R, et al. Identification of microplastics in human placenta using laser direct infrared spectroscopy[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 856: 159060.
- [32] HU J N, QIN X L, ZHANG J W, et al. Polystyrene microplastics disturb maternal-fetal immune balance and cause reproductive toxicity in pregnant mice[J]. *Reprod Toxicol*, 2021, 106: 42-50.
- [33] FOURNIER S B, D'ERRICO J N, ADLER D S, et al. Nanopolystyrene translocation and fetal deposition after acute lung exposure during late-stage pregnancy[J]. *Part Fibre Toxicol*, 2020, 17(1): 55.
- [34] AMERREH F, AMJADI N, MOHSENI-BANDPEI A, et al. Placental plastics in young women from general population correlate with reduced foetal growth in IU-GR pregnancies[J]. *Environ Pollut*, 2022, 314: 120174.
- [35] LIU S J, GUO J L, LIU X Y, et al. Detection of various microplastics in placentas, meconium, infant feces, breastmilk and infant formula: A pilot prospective study[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 854: 158699.
- [36] LIU S J, LIU X Y, GUO J L, et al. The association between microplastics and microbiota in placentas and meconium: The first evidence in humans[J]. *Environ Sci Technol*, 2023, 57(46): 17774-17785.
- [37] HUSSAIN K A, ROMANOVA S, OKUR I, et al. Assessing the release of microplastics and nanoplastics from plastic containers and reusable food pouches: Implications for human health[J]. *Environ Sci Technol*, 2023, 57(26): 9782-9792.
- [38] LI D Z, SHI Y H, YANG L M, et al. Microplastic release from the degradation of polypropylene feeding bottles during infant formula preparation[J]. *Nat Food*, 2020, 1(11): 746-754.
- [39] KADAC-CZAPSKA K, JUTRZENKA TRZEBIA-TOWSKA 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.
- [40] KE D D, ZHENG J H, LIU X Y, et al. Occurrence of microplastics and disturbance of gut microbiota: A pilot study of preschool children in Xiamen, China[J]. *EBio-Medicine*, 2023, 97: 104828.
- [41] 侯聪, 邵红琪, 毕艳孟, 等. 微塑料污染防治国际实践及对我国的启示[J]. *环境监控与预警*, 2024, 16(3): 99-104.
- HOU C, SHAO H Q, BI Y M, et al. International practices of microplastics pollution prevention and their enlightenments to China[J]. *Environ Monit Forewarning*, 2024, 16(3): 99-104.
- [42] FOX S, STEFÁNSSON H, PETERNELL M, et al. Physical characteristics of microplastic particles and potential for global atmospheric transport: A meta-analysis[J]. *Environ Pollut*, 2024, 342: 122938.

(2025-01-13 收稿)

编辑 张峻