

• 综 述 •

室内环境对儿童认知功能发展的影响 及其生物学机制

张云枫¹, 徐慧琼², 万宇辉^{1,3}

1. 安徽医科大学公共卫生学院健康促进与行为科学系 安徽 合肥 230032; 2. 安徽医学高等专科学校公共卫生与健康管理学院预防医学教研室; 3. 安徽医科大学公共卫生学院儿少卫生与妇幼保健学系

摘要: 室内环境对儿童认知功能发展的潜在影响日益受到关注。现有研究提示,室内环境暴露可能通过血脑屏障损伤、神经炎症及氧化应激等通路影响儿童认知功能发展。本文从物理、化学和生物环境 3 个维度梳理相关证据,对室内环境因素与儿童认知功能发展的研究进展进行综述,并进一步概述其可能的生物学机制。总体而言,尽管相关研究不断增加,但证据仍存在一定局限,未来研究应加强前瞻性队列和干预研究,深入探讨室内环境因素与儿童认知功能之间的关联,为儿童身心健康发展提供实证支持。

关键词: 室内环境; 认知功能; 生物学机制; 儿童

中图分类号: R179

文献标识码: A

文章编号: 1008-6579(2026)07-0808-07

doi: 10.11852/zgetbjzz2025-0622

Impact of indoor environment on children's cognitive development and its biological mechanisms

ZHANG Yunfeng¹, XU Huiqiong², WAN Yuhui^{1,3}

1. Department of Health Promotion and Behavioral Sciences, School of Public Health, Anhui Medical University, Hefei, Anhui 230032, China; 2. Department of Preventive Medicine, School of Public Health and Health Management, Anhui Medical College; 3. Department of Maternal, Child & Adolescent Health, School of Public Health, Anhui Medical University

Corresponding author: WAN Yuhui, E-mail: wyhayd@163.com

Abstract: The potential impact of the indoor environment on children's cognitive development has attracted increasing attention. Existing studies suggest that indoor environmental exposures may affect the development of children's cognitive function through mechanisms such as blood-brain barrier disruption, neuroinflammation, and oxidative stress. This review summarizes recent research on the relationship between indoor environmental factors and children's cognitive development from the perspectives of physical, chemical, and biological environments, and further discusses the possible underlying biological mechanisms. Overall, although the number of related studies has increased, the existing evidence remains limited. Future research should strengthen prospective cohort studies and intervention studies to clarify the association between indoor environmental factors and children's cognitive function, thereby providing evidence to support children's healthy development.

Keywords: indoor environment; cognitive function; biological mechanisms; children

童年期是个体成长与发展的基石阶段,同时也是认知功能构建与行为模式形成的关键时期^[1]。学校和家庭作为儿童主要的居住活动场所,室内环境对其认知功能发展尤为重要。既往研究多聚焦于家庭和学校物质与社会环境对儿童认知功能的影响,诸如家庭结构类型、社会经济地位以及教养方式等因素^[2-3],构建了主流研究范式。尽管现有研究在室

内环境因素与儿童认知功能关系的结论上尚不一致,其潜在生物学机制亦有待进一步阐明,但系统梳理相关证据有助于深化对家庭与学校室内环境在儿童成长中作用的认识。因此,本文对室内环境因素与儿童认知功能发展的研究进行综述,并归纳其可能的生物学机制,以期为优化儿童成长环境、促进其认知与行为健康发展提供参考。

基金项目: 国家自然科学基金(82273652);安徽省高校自然科学基金项目(2024AH050859);安徽医学高等专科学校高层次人才科研启动基金项目(2024RC004)

作者简介: 张云枫(2000—),女,硕士学位,主要研究方向为儿童青少年健康促进。

通信作者: 万宇辉, E-mail: wyhayd@163.com

1 室内环境对儿童认知功能发展的影响

当前有关室内环境对儿童认知功能与神经发育影响的研究主要从多层面因素来考察家庭和学校室内环境的关联作用,这些因素可大致分为物理环境、化学环境和生物环境 3 个维度。

1.1 物理环境因素与儿童认知功能发展的关联

Nair 等^[4]研究指出,家庭室内灯光颜色及温度会影响儿童的情绪和行为发展。Hartstein 等^[5]研究发现,在较高色温条件下,儿童任务切换反应时间平均缩短 147ms,持续性错误次数减少约 2.5 次,提示光环境的“非视觉效应”可能在早期认知加工过程中即已呈现。一项研究表明,教室内复合噪声水平对儿童注意力、记忆及反应时间等有不影响,提示室内噪声暴露与认知功能下降之间存在关联^[6]。此外,基于课堂连续监测与标准化测试成绩的多层模型研究显示,室内温度每升高 1℃,学生数学测试成绩平均下降约 13 分,提示室内高温可能对儿童认知产生不良影响^[7]。Twardella 等^[8]通过整群随机交叉试验发现,室内空气质量改善与儿童认知表现存在剂量反应关系,其教室 CO₂ 浓度每降低 100ppm,数字划消任务正确率提升 0.8%,反应时间缩短 3.2ms,集中度评分提高 0.22 分,证实室内通风与认知表现存在关联。随机交叉试验显示,在教室内增设便携式空气净化设备,可使每学年 PM_{2.5} 平均浓度下降约 39.9%,显著降低室外颗粒物向室内的渗透,为降低儿童颗粒物暴露、改善学习环境提供了可操作的干预路径^[9]。

1.2 化学环境因素与儿童认知功能发展的关联

Madaniyazi 等^[10]通过采集为期一周的室内空气数据,发现挥发性有机化合物(total volatile organic compounds, TVOC)与 3 岁儿童认知得分呈显著负相关。一项队列研究发现暴露于不洁烹饪燃料与儿童发育迟缓相关(OR=1.28),被动吸烟暴露与儿童问题解决领域发育迟缓相关(OR=1.71),该研究进一步指出,1~2 岁儿童以及持续暴露≥12 个月儿童对污染物更敏感,认知受损程度更显著^[11]。Brabhukumr 等^[12]研究发现家庭室内使用固体燃料与使用液化石油气的儿童相比,其在算数部分智力水平明显较低。一项尼泊尔社区儿童的研究也报告暴露于室内生物质燃料环境的儿童,其 5 岁时韦氏学前儿童智力量表得分平均水平较低^[13]。Zou 等^[14]研究显示,室内 TVOC 浓度每增加 1 个四分位数间距(IQR),儿童认知发展得分下降 5.1%,且该关联主要见于女童,男童未见显著关联;室内焚香与儿童认

知发展呈负相关($\beta=-9.59$),男童中该关联更明显;此外,室内烟草相关化学暴露负荷增加也可能对儿童长期认知与行为健康带来潜在风险^[15]。目前已有研究从公共健康角度提示家庭清洁能源转型能够降低室内污染带来的健康负担,这类改善可能通过减少燃料污染暴露而间接有利于儿童认知发展,但对其认知功能的直接证据仍需更多前瞻性研究加以验证^[16]。

1.3 生物环境因素与儿童认知功能发展的关联

一项出生队列结果显示,室内可见霉菌(OR=1.2)、养宠物(OR=1.4)与儿童心理行为异常评分增加相关^[17]。Jedrychowski 等^[18]同样指出产后暴露于室内霉菌污染环境儿童认知功能得分存在负向关联,提示霉菌相关暴露可能是早期认知发育的不利因素之一。Casas 等^[19]进一步从家庭微生物环境角度展开研究,指出霉菌、潮湿状况与儿童认知发展可能呈负向关联。Dockx 等^[20]研究发现,真菌 Shannon 多样性指数每增加 1 个 IQR,儿童出现多动风险显著降低(OR=0.49),在认知任务(大/小圆测试)中,反应时间缩短 3.20%;相反,微生物负荷与认知评分和反应时间呈正关联。实验研究证实参与室内植物浇水组儿童相较于对照组表现出更放松的情绪及脑电波活动增强,间接支持室内植物参与可能会促进儿童认知功能的改善^[21]。室内环境因素暴露对儿童认知功能发展影响的流行病学研究见表 1。

2 室内环境对儿童认知功能发展影响的生物学机制

室内环境对儿童身心健康的影响具有多维度、多系统特征,不仅会作用于儿童生长发育,还会对免疫系统、神经系统等多个生理系统产生影响,同时也会塑造儿童健康状况和发展轨迹。

2.1 血脑屏障和大脑发育损伤 环境毒素透过血脑屏障可能致使儿童中枢神经系统(central nervous system, CNS)受损。暴露于浓缩环境颗粒物(concentrated ambient particles, CAPs)使 CNS 发育受损,关键神经化学物质的改变以及侧脑室扩张,在机制上与环境空气污染物暴露和人体不良神经发育结果紧密相关^[22]。早期低水平 CAPs 暴露可持续影响中枢神经系统,包括学习、短期记忆及行为障碍等变化,并存在性别差异,其对额叶皮质、嗅球、下丘脑等多巴胺及其代谢产物水平的影响亦有性别差异^[23]。此外,室内不完全燃烧可通过抑制大脑皮层活动和运动反应、升高血铅水平来影响儿童认知功能^[24]。二手烟雾中铅等有毒物质可干扰血红蛋白

表 1 室内环境因素暴露对儿童认知功能发展影响的流行病学研究-
Tab. 1 Epidemiological studies of the association between exposure to indoor environmental factors and cognitive development in children

作者	地区	研究设计	样本量(例)	环境暴露	测量方法	研究结果
Nair 等 ^[4] (2022)	印度	横断面	87	灯光颜色及温度	问卷评估室内光照条件, 观察儿童在不同条件下的情绪变化	强烈的光线和荧光灯会引起儿童焦虑; 灯光颜色为浅、柔和和中性色调有助于减少焦虑
Hartstein 等 ^[5] (2018)	美国	对照实验	38	低色温 高色温	持续注意力任务测试、认知灵活性任务测试评估认知功能	高色温条件下儿童在任务切换准确性显著高于低色温条件
Pittana 等 ^[6] (2025)	意大利	干预实验	131	环境噪声 诱导噪声	听力工作记忆、视觉空间注意力和言语噪声识别测试评估认知功能	噪声水平升高会导致儿童在认知测试中的表现显著下降; 诱导噪声与环境噪声在认知表现上存在负相关
Haverinen-Shaughnessy 等 ^[7] (2015)	美国	横断面	3 109	室内通风率 室内温度	监测 CO ₂ 浓度估算通风率; 室内温度; 基于标准化测试分数评估学习成绩	室内通风率每提升 1 个单位, 数学成绩平均提高 7 分; 室内温度每升高 1℃, 学生数学测试成绩平均下降约 13 分
Madaniyazi 等 ^[10] (2022)	日本	队列研究	5 017	室内污染物(PM _{2.5} 、O ₃ 、NO ₂ 、SO ₂ 等)	固定式空气采样器采集室内污染物浓度; ASQ-3 问卷评估儿童神经发育	m、p-二甲苯和 o-二甲苯与 ASQ 评分呈负相关; 每增加 1μg/m ³ 的浓度, ASQ 评分下降 0.72 分
Grippe 等 ^[11] (2023)	美国	队列研究	4 735	烹饪燃料 采暖燃料 被动吸烟	问卷评估室内环境暴露; ASQ-3 问卷评估儿童神经发育	不洁烹饪燃料与儿童神经发育迟缓相关(OR=1.28); 被动吸烟与问题解决能力发育迟缓相关(OR=1.71)
Brabhukumr 等 ^[12] (2020)	印度	横断面	108	固体生物质燃料 液化石油气	问卷评估室内燃料类型; MISIC 评估儿童智力水平	室内使用固体生物质燃料与儿童在算术部分的 IQ 得分呈负相关
Kvesta 等 ^[13] (2022)	尼泊尔	队列研究	533	固体生物质燃料	问卷评估室内燃料类型; 韦氏智力量表评估儿童认知功能	使用生物质燃料的儿童比不使用生物质燃料的儿童认知得分低 2.2 分
Zou 等 ^[14] (2023)	中国	横断面	2 000	TVOC 甲醛 (HCHO) 家庭环境因素	便携式空气质量监测仪器测量家庭室内的 TVOC 和甲醛浓度; 韦氏学前儿童智力量表评估儿童认知功能;	TVOC 每增加 1 个 IQR, 儿童认知发展得分下降 5.1%, 且女童关联显著; 甲醛水平较高的家庭, 儿童认知能力显著低于暴露较低的家庭
Casas 等 ^[17] (2013)	德国	队列研究	4 860	室内霉菌 潮湿 宠物暴露	问卷评估室内环境暴露; SDQ 评估儿童心理行为问题	暴露于霉菌的儿童在情绪症状维度得分显著较高; 潮湿与总难度得分呈显著相关; 宠物暴露增加儿童患心理行为问题风险
Jedrychowski 等 ^[18] (2011)	波兰	队列研究	277	室内霉菌	家访定期调查室内霉菌暴露; 韦氏儿童智力量表评估儿童认知水平	暴露于霉菌的儿童认知水平显著低于未暴露儿童; 长期暴露于霉菌的儿童患低智商的风险为 3.53 倍
Casas 等 ^[19] (2019)	德国	队列研究	226	室内细菌、 真菌多样性	Illumina Miseq 测序技术对尘土样本中的细菌和真菌进行测序; SDQ 评估儿童注意力缺陷和多动症状	较高的细菌丰富度与儿童 10 岁时较低的多动症或注意力缺陷症状相关; 较高的真菌丰富度与 10 岁时较高的多动症或注意力缺陷症状相关
Dockx 等 ^[20] (2023)	比利时	队列研究	172	室内微生物群落 (细菌、真菌多样性、 微生物负荷)	16S rRNA、ITS 基因测序评估细菌合真菌多样性, qPCR 技术测量微生物负荷; CANTAB 软件测试评估儿童认知功能	真菌 Shannon 多样性增加与大小圆测试反应时间减少(提高注意力和运动速度)相关; 细菌和真菌负荷增加与延迟样本匹配反应时间增加相关

注: 年龄与发育进程问卷第三版(Ages & Stages Questionnaires, Third Edition, ASQ-3); Malin's 印度儿童智力量表(Malin's Intelligence Scale for Indian Children, MISIC); 长处与困难问卷(Strengths and Difficulties Questionnaire, SDQ)。

合成, 导致大脑缺氧, 诱导神经行为障碍, 并干扰 CNS 正常发育进程^[25-26]。Qin 等^[27]发现长期暴露于 1,2-二氯乙烷(1,2-DCE)可能通过抑制 GAB-ABR2, 下调 cAMP-PKA-CREB 信号通路及其下游

基因,导致小鼠认知功能出现障碍。 $\text{PM}_{2.5}$ 穿透血脑屏障并于脑组织蓄积,诱发星形胶质细胞增生,神经元轻度丢失及小胶质细胞浸润,其在白细胞介素-1 β 和干扰素- γ 诱导下呈 M1 表型,并释放额外促炎介质和 NO_2 ,进一步加剧神经元损伤^[28]。暴露于含尼古丁蒸汽的小鼠焦虑样行为显著增多,并出现大脑皮层神经元减少、小胶质细胞增多及脑内促炎细胞因子表达增加^[29]。Zhang 等^[30]研究结果显示,亚慢性全氟辛烷磺酸暴露 6 个月可导致小鼠物体识别、学习及空间记忆能力下降,证实其可导致小鼠认知功能障碍;该机制可能与大脑皮层内质网应激诱导的神经元促凋亡通路的特异性激活密切相关。现有证据主要来自动物与体外研究,暴露情境与真实室内环境的低剂量、长期混合暴露可比性有限,结果外推至人群仍需谨慎。

2.2 神经炎症和氧化应激 免疫系统对儿童健康成长至关重要,其功能缺陷或过度激活均会影响认知功能发展。室内污染物主要通过诱发氧化应激、炎症反应及削弱免疫防御损害儿童免疫系统,包括上皮细胞损伤、免疫细胞迁移活化、促炎因子生成增加、巨噬细胞功能降低、免疫耐受干扰及 Th2 免疫反应增强^[31]。吸入杂色曲霉会触发神经免疫、胶质和神经肽转录变化,导致额叶、小脑、中脑、嗅球及海马等多脑区神经炎症反应,暴露次数及时间增加中脑炎症基因表达^[32]。此外,颗粒物(particulate matter, PM)暴露可通过炎症途径及空气污染诱发活性氧(reactive oxygen species, ROS)激活,对 CNS 产生不利影响^[33],凸显儿童在特定生理阶段对环境因素的高度敏感性,强调为其营造健康环境的重要性。Jin 等^[34]的研究结果显示慢性聚苯乙烯微塑料(poly-styrene microplastics, PS-MPs)暴露会破坏血脑屏障,导致小鼠学习记忆功能障碍并诱发神经毒性。此外,长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 的小鼠认知能力显著降低,还降低了血脑屏障中完整性紧密连接蛋白表达水平,其过程涉及从肺部炎症到神经元炎症的转变^[35]。尽管大量实验研究显示室内污染物可通过诱导神经炎症和氧化应激损害神经发育,但人群研究中炎症与氧化应激标志物多为间接指标,难以区分炎症是因果机制还是伴随反应。

2.3 下丘脑-垂体-肾上腺轴功能障碍 下丘脑-垂体-肾上腺(hypothalamic-pituitary-adrenal, HPA)轴功能障碍是室内空气污染物影响儿童心理健康和认知功能的重要机制。研究表明, $\text{PM}_{2.5}$ 暴露可诱导荷尔蒙变化激活 HPA 轴,其过度激活可进一步导致认知功能障碍^[36]。长期铅暴露也会引发 HPA 轴

功能障碍,导致激素分泌的基线水平和应激反应异常,与不良神经认知和心脏代谢结果相关,进而增加认知功能障碍的发生风险^[37]。HPA 轴调控糖皮质激素产生,其分泌过量或不足均可能会干扰正常发育,并导致 HPA 轴功能长期受损^[38]。HPA 轴在室内污染与儿童认知功能之间的作用证据仍较零散,较难刻画长期暴露窗口下 HPA 轴动态调节及其与认知结局的关联。

2.4 端粒缩短和肠道菌群紊乱 尽管端粒随年龄增加而逐渐缩短,但暴露于不同环境因素,会加剧机体内环境紊乱,从而加速端粒缩短^[39]。Leibel 等^[40]的研究发现,端粒长度与认知功能呈正相关。肠道微生物群和代谢物与认知表现也被证实存在因果关联^[41]。Li 等^[42]通过孟德尔随机化研究证实, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与神经发育障碍风险呈剂量反应关系,这与 $\text{PM}_{2.5}$ 导致肠道微生物群失调相关。 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露会导致秀丽隐杆线虫出现行为缺陷与神经元损伤,伴神经递质受体基因表达显著改变及维生素 B_{12} 含量降低;体内外模型结果显示,长期暴露会改变肠道微生物群结构,打破维生素 B_{12} 相关代谢途径平衡,进而诱发认知障碍^[43]。端粒长度与肠道菌群相关机制多基于关联分析或遗传推断,直接验证室内环境暴露与儿童认知结局的纵向人群证据仍有限,且多重机制间的相互作用尚未得到系统阐明。室内环境因素暴露对儿童认知功能发展影响的动物实验研究见表 2。

3 总结与展望

现有研究能够证实长期暴露于不良室内环境与儿童认知功能存在关联,但其潜在的生物学机制尚未被系统阐明,随着室内污染对儿童的不良影响不断加剧^[44],本文通过整合 3 个维度室内环境因素,揭示室内环境暴露与儿童认知功能障碍风险升高存在显著相关,具体机制可能涉及污染物暴露引发的神经炎症反应、氧化应激损伤及脑发育受阻等多重生物学通路。但目前的研究还存在以下不足:1)尽管队列研究相较于横断面研究具有一定优势,但受限于暴露测量时间代表性不足、室内环境评估方式、潜在混杂因素难以完全控制以及认知功能评价工具可比性有限等问题,后续研究应对其存在的因果关联进一步阐述。2)多数研究更多关注于室内空气污染与儿童认知功能和行为发展的关联研究,后续应开展多组学研究(暴露组-表观基因组-代谢组),解析环境-基因交互作用对神经发育的影响路径。3)今后的研究应采取针对性干预措施,包括清洁能源

表 2 室内环境因素暴露对儿童认知功能发展影响的动物实验研究

Tab. 2 Animal experiment studies of the association between exposure to indoor environmental factors and cognitive development in children

作者	实验对象	暴露物质及剂量	暴露时间	主要研究结果
Allen 等 ^[23] (2014)	小鼠	超细颗粒物(CAPS): 200 000 颗粒/cm ³ 96 μg/m ³	出生后的第 4~7d 出生后第 10~13d 每天暴露 4h 每周 4d	暴露于 CAPS 的小鼠表现脑室扩大;在新物体识别测试的短期记忆和行为灵活性显著下降;前额皮质和海马区的谷氨酸及多巴胺代谢发生显著变化
Wang 等 ^[26] (2022)	斑马鱼	铅(Pb): 0.1,0.25,0.5,1,2μm	受精后 2~120h	暴露后小鱼和成鱼的神经发育基因和神经递质相关基因表达发生变化,并与神经行为异常相关
Qin 等 ^[27] (2024)	雌性小鼠	1,2-二氯乙(1,2-DCE): 0.225,0.45,0.9g/m ³	每天暴露 3.5h 持续 8 周	暴露组小鼠的识别指数显著降低,逃逸潜伏期显著增加,目标象限停留时间减少;1,2-DCE 通过扰乱 GABA 代谢和 cAMP-PKA-CREB 信号通路导致小鼠认知下降
Kang 等 ^[28] (2021)	人类神经细胞 (神经元、星形胶质细胞和小胶质细胞)	PM _{2.5} (细颗粒物): 0.1~10μg/mL	9 周	PM _{2.5} 通过体外血脑屏障模型进入脑组织,在脑组织中积累,增加血脑屏障通透性;PM _{2.5} 暴露显著减少了神经元数目,指示神经退行性病变
Oliver 等 ^[29] (2025)	4 周龄雄性小鼠	第三手电子烟蒸汽: 每次 20 次喷雾产生电子 烟蒸汽每次 50mL	每天 2h 持续 4 周	0mg 尼古丁组小鼠的新物体识别测试得分低于 50%,短期记忆受损;0mg 和 18mg 尼古丁组小鼠在皮层区域的神经元数量显著减少
Zhang 等 ^[30] (2023)	10.5 月龄雄性小鼠	全氟辛酸磺酸(PFOS): 0.2,2.0 mg/(kg·day)	6 个月	高剂量组物体识别能力下降;暴露组小鼠在空间学习能力和记忆灵活性显著下降;高剂量组小鼠皮层神经元凋亡显著增加
Ladd 等 ^[32] (2021)	8 周龄小鼠	霉菌孢子: 3×10 ⁵ 孢子/次	1,2,4 周,2 次/周, 1h/次	长期暴露霉菌导致小鼠大脑前额叶等多个区域出现神经免疫反应;皮层区域的微胶质细胞体积显著增加
Ehsanifar 等 ^[33] (2024)	小鼠	空气污染纳米颗粒(NPs)	14d 每天暴露 8h	暴露于 NPs 的小鼠表现出记忆力和空间学习等认知能力受损;海马区域的微胶质细胞明显增加,导致神经炎症反应;暴露组小鼠的 GABA 和谷氨酸比值降低,可能抑制神经发育。
Jin 等 ^[34] (2022)	BALB/c 小鼠	聚苯乙烯微塑料(PS-MPs):100,1 000μg/L	180d	暴露组小鼠的血脑屏障结构受损;暴露组小鼠空间学习和短期记忆受损;暴露组小鼠海马区的凋亡相关基因表达显著增加,神经细胞死亡

替代传统燃料、室内绿植引入及空气净化技术应用,构建基于循证证据的室内环境健康标准。4)既往研究多聚焦于居住区绿地环境对儿童认知能力的促进作用(如绿色空间暴露与记忆力、注意力及智力水平呈正相关^[45]),室内微环境的特异性影响仍需深入探究,未来研究还需进一步探索明晰室内自然环境暴露与儿童认知功能发展所存在的性别或年龄段差异,以期更好促进儿童身心健康。

利益冲突声明 本文所有作者声明不存在利益冲突

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均已在参考文献列表中列出。

参考文献

[1] Ellwood-Lowe ME, Whitfield-Gabrieli S, Bunge SA. Brain network coupling associated with cognitive performance varies as a function of a child's environment in the ABCD study[J]. Nat Commun, 2021, 12(1): 7183.
[2] González L, Popovic M, Rebagliato M, et al. Socioeconomic position, family context, and child cognitive development

[J]. Eur J Pediatr, 2024, 183(6): 2571-2585.
[3] Crotty JE, Martin-Herz SP, Scharf RJ. Cognitive development[J]. Pediatr Rev, 2023, 44(2): 58-67.
[4] Nair AS, Priya RS, Rajagopal P, et al. A case study on the effect of light and colors in the built environment on autistic children's behavior[J]. Front Psychiatry, 2022, 13: 1042641.
[5] Hartstein LE, LeBourgeois MK, Berthier NE. Light correlated color temperature and task switching performance in preschool-age children: Preliminary insights[J]. PLoS One, 2018, 13(8): e0202973.
[6] Pittana I, Pavarin C, Pavanello I, et al. Influence of noise level and reverberation on children's performance and effort in primary schools[J]. Appl Sci, 2025, 15(24): 13213.
[7] Haverinen-Shaughnessy U, Shaughnessy RJ. Effects of classroom ventilation rate and temperature on students' test scores[J]. PLoS One, 2015, 10(8): e0136165.
[8] Twardella D, Matzen W, Lahrz T, et al. Effect of classroom air quality on students' concentration: Results of a cluster-randomized cross-over experimental study: Effect of classroom air quality on students' concentration[J]. Indoor Air, 2012, 22(5): 378-387.
[9] Simona SC, Bartell SM, Vieira VM. Classroom air quality in

- a randomized crossover trial with portable HEPA air cleaners [J]. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2025, 35(4): 644-648.
- [10] Madaniyazi L, Jung CR, Fook Sheng Ng C, et al. Early life exposure to indoor air pollutants and the risk of neurodevelopmental delays: The Japan Environment and Children's Study[J]. *Environ Int*, 2022, 158: 107004.
- [11] Grippo A, Zhu K, Yeung EH, et al. Indoor air pollution exposure and early childhood development in the upstate KIDS study[J]. *Environ Res*, 2023, 234: 116528.
- [12] Brabhukumr A, Malhi P, Ravindra K, et al. Exposure to household air pollution during first 3 years of life and IQ level among 6-8-year-old children in India - A cross-sectional study[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 709: 135110.
- [13] Kvestad I, Chandyo RK, Schwinger C, et al. Biomass fuel use for cooking in Nepalese families and child cognitive abilities, results from a community-based study[J]. *Environ Res*, 2022, 212(Pt C): 113265.
- [14] Zou ML, Huang HC, Chen YH, et al. Sex-differences in the effects of indoor air pollutants and household environment on preschool child cognitive development[J]. *Sci Total Environ*, 2023, 860: 160365.
- [15] Kassem NOF, Daffa RM, Liles S, et al. Children's exposure to secondhand and thirdhand smoke carcinogens and toxicants in homes of hookah smokers[J]. *Nicotine Tob Res*, 2014, 16(7): 961-975.
- [16] Li T, Yang DX. Can household clean energy transition reduce medical expenditures? Evidence from China[J]. *Front Public Health*, 2025, 13: 1524444.
- [17] Casas L, Tiesler C, Thiering E, et al. Indoor factors and behavioural problems in children: The GINIplus and LISAPLUS birth cohort studies [J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2013, 216(2): 146-154.
- [18] Jedrychowski W, Maugeri U, Perera F, et al. Cognitive function of 6-year old children exposed to mold-contaminated homes in early postnatal period. Prospective birth cohort study in Poland[J]. *Physiol Behav*, 2011, 104(5): 989-995.
- [19] Casas L, Karvonen AM, Kirjavainen PV, et al. Early life home microbiome and hyperactivity/inattention in school-age children[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 17355.
- [20] Dockx Y, Täubel M, Hogervorst J, et al. Association of indoor dust microbiota with cognitive function and behavior in preschool-aged children [J]. *Microbiome*, 2023, 11(1): 1.
- [21] Zhao Q, Hassan A. The power of plants: Physiological and psychological relaxation through horticultural activities in children[J]. *Child Indic Res*, 2025, 18(6): 2659-2675.
- [22] Allen JL, Liu X, Pelkowski S, et al. Early postnatal exposure to ultrafine particulate matter air pollution: Persistent ventriculomegaly, neurochemical disruption, and glial activation preferentially in male mice[J]. *Environ Health Perspect*, 2014, 122(9): 939-945.
- [23] Allen JL, Liu X, Weston D, et al. Developmental exposure to concentrated ambient ultrafine particulate matter air pollution in mice results in persistent and sex-dependent behavioral neurotoxicity and glial activation[J]. *Toxicol Sci*, 2014, 140(1): 160-178.
- [24] Hwang YH, Lin YS, Lin CY, et al. Incense burning at home and the blood lead level of preschoolers in Taiwan [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2014, 21(23): 13480-13487.
- [25] Mohamed NN, Loy SL, Lim PY, et al. Early life second-hand smoke exposure assessed by hair nicotine biomarker may reduce children's neurodevelopment at 2 years of age [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 610-611: 147-153.
- [26] Wang Z, Zhao H, Xu Y, et al. Early-life lead exposure induces long-term toxicity in the central nervous system: From zebrafish larvae to juveniles and adults[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 804: 150185.
- [27] Qin Y, Huang W, Wang Z, et al. 1,2-dichloroethane causes anxiety and cognitive dysfunction in mice by disturbing GABA metabolism and inhibiting the cAMP-PKA-CREB signaling pathway [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 279: 116464.
- [28] Kang YJ, Tan HY, Lee CY, et al. An air particulate pollutant induces neuroinflammation and neurodegeneration in human brain models[J]. *Adv Sci*, 2021, 8(21): 2101251.
- [29] Oliver BG, Wang J, Yarak RA, et al. Exposure to third hand e-cigarette vapour impairs cognitive function in young mice[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2025, 291: 117885.
- [30] Zhang H, Zhang C, Xu D, et al. Effects of subchronic exposure of perfluorooctane sulfonate on cognitive function of mice and its mechanism [J]. *Environ Pollut*, 2023, 329: 121650.
- [31] Dondi A, Carbone C, Manieri E, et al. Outdoor air pollution and childhood respiratory disease: The role of oxidative stress[J]. *Int J Mol Sci*, 2023, 24(5): 4345.
- [32] Ladd TB, Johnson JA, Mumaw CL, et al. Aspergillus versicolor inhalation triggers neuroimmune, glial, and neuropeptide transcriptional changes[J]. *ASN Neuro*, 2021, 13(1): 17590914211019886.
- [33] Ehsanifar M, Montazeri Z, Zavareh MS, et al. Correction to: Cognitive impairment, depressive-like behaviors and hippocampal microglia activation following exposure to air pollution nanoparticles[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2024, 31(37): 49932.
- [34] Jin H, Yang C, Jiang C, et al. Evaluation of neurotoxicity in BALB/c mice following chronic exposure to polystyrene microplastics [J]. *Environ Health Perspect*, 2022, 130(10): 107002.
- [35] Shou Y, Zhu X, Zhu D, et al. Ambient PM_{2.5} chronic exposure leads to cognitive decline in mice: From pulmonary to neuronal inflammation[J]. *Toxicol Lett*, 2020, 331: 208-217.
- [36] Li T, Fang J, Tang S, et al. PM_{2.5} exposure associated with microbiota gut-brain axis: Multi-omics mechanistic implications from the BAPE study [J]. *Innovation (Camb)*, 2022, 3(2): 100213.
- [37] McEwen BS. Neurobiological and systemic effects of chron-

- 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