

空气污染对多动症的影响及其内在机制

李香云, 韩 鑫, 田依凝

哈尔滨工程大学人文社会科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年11月23日; 录用日期: 2025年12月26日; 发布日期: 2026年1月6日

摘 要

多动症是儿童期常见的一种精神障碍, 包括注意力不集中、多动冲动和混合型三种亚型。大量研究证实, 多动症主要由生理、心理、环境三种因素所导致。文章主要针对空气污染这一因素对多动症的影响进行研究综述, 探讨空气中的悬浮颗粒物、氮氧化物、多环芳烃等物质对多动症的影响; 并论述空气污染物导致多动症的患病机制, 主要包括氧化应激、血脑屏障损伤、全身炎症等作用机制, 以期为多动症的预防和干预提供参考。

关键词

多动症, 空气污染, 影响机制

Effects of Air Pollution on ADHD and Its Internal Mechanism

Xiangyun Li, Xin Han, Yining Tian

School of Humanities and Social Sciences, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

Received: November 23, 2025; accepted: December 26, 2025; published: January 6, 2026

Abstract

Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD) is a common mental disorder in childhood, including three subtypes: inattentive, hyperactive-impulsive, and combined. Numerous studies confirm that ADHD is primarily caused by physiological, psychological, and environmental factors. This paper provides a review of research on the impact of air pollution on ADHD, exploring the effects of airborne particulate matter, nitrogen oxides, polycyclic aromatic hydrocarbons, and other substances on ADHD. It also discusses the mechanisms through which air pollutants contribute to the development of ADHD, including oxidative stress, blood-brain barrier damage, and systemic inflammation, with the aim of providing a reference for the prevention and intervention of ADHD.

Keywords

ADHD, Air Pollution, Impact Mechanism

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

空气污染作为最常见的环境污染种类之一, 污染成分复杂, 主要包括固态颗粒污染和气态污染, 会对人的身心健康造成极大危害(Bronte et al., 2023)。大量国内外研究表明, 空气污染与多种疾病的患病率相关, 如心血管疾病、肾脏疾病、骨骼疾病等(Liu et al., 2024; Min et al., 2024; Cheng et al., 2024); 并且妊娠期妇女、儿童和老人等人群更容易受到空气污染的危害, 多位学者提出空气污染对自闭症、多动症、痴呆症等疾病存在影响(Wang et al., 2024); 由于空气污染对疾病的影响存在滞后性和潜伏期, 因此需要更加精密的探测仪器和医学手段去发掘它们之间的关系(Zhang et al., 2024)。

多动症(Attention Deficit Hyperactivity Disorder, ADHD), 又叫注意力缺陷障碍, 是儿童期最为常见的一种精神障碍, 分为注意不集中型(Predominantly Inattentive)、多动冲动型(Predominantly Hyperactive-Impulsive)以及混合型(Combined Hyperactive-Impulsive and Inattentive)三种亚型(Retz et al., 2021)。美国疾病预防控制中心(Centers for Disease Control and Prevention, CDC) 2016~2019 年的数据显示, 美国儿童 ADHD 的患病率为 9.8%, 且男孩(13%)的患病比率高于女孩(6%)。患者不仅有注意力不集中和过分冲动等症状(Waldren et al., 2024; Young et al., 2013), 通常还会伴有常见的额外功能障碍, 如运动技能和认知功能受损(Myhre et al., 2018; Dalla et al., 2022)。虽然 ADHD 是一种儿童发育障碍疾病, 但有 65% 的患儿在成年之后依然会表现出 ADHD 症状(Biederman, 2005), 因此该疾病不仅会影响儿童的正常身心发育, 而且若没有经过良好的教育引导和治疗改善, 患者未来可能会出现更多的高风险或犯罪行为, 危害社会公共安全, 因此需要引起足够重视(Retz et al., 2021)。引发 ADHD 的因素有多种, 既有生理因素的影响, 如前额叶功能失调、脑神经介质异常(Retz et al., 2021), 也有心理社会因素的影响, 如早期的情感虐待、情感忽视(Young et al., 2013), 以及环境毒物暴露的影响, 如空气污染、水污染、环境噪声(Aghaei et al., 2019; Li et al., 2023; Biederman, 2005)。

近年来, 越来越多的研究者开始探究 ADHD 与空气污染之间的关系, 并分析和解释其中的患病机制。因此, 本文将具体阐述近年来正在研究的空气污染与 ADHD 之间的关系以及病因机制, 为 ADHD 病因学的探究提供参考, 并探讨可能的预防措施和应对路径。

2. 空气污染与 ADHD 之间的关系

2.1. 悬浮颗粒物(Particulate Matter, PM)

PM 是不同颗粒大小的含有化学或生物成分的非均匀混合物(Chen et al., 2024)。它可以根据颗粒大小分为粗颗粒物 PM_{10} (直径 $\leq 10 \mu m$)、细颗粒物 $PM_{2.5}$ (直径 $\leq 2.5 \mu m$) 以及超细颗粒物(Ultrafine Particulates, UFP) $PM_{0.1}$ (直径 $\leq 0.1 \mu m$) (Li et al., 2023; Block et al., 2012; Woodward et al., 2015; Block & Calderón-Garcidueñas, 2009)。关于 PM 与 ADHD 之间的关系, 已有许多研究得到了证实。Aghaei 等(2019)使用荟萃分析发现, 在 8 项 PM 暴露的研究中仅有两项显示 PM 暴露和 ADHD 之间无显著关系, 无显著结果的原因可能是污染暴露程度低和结果的统计力不足所导致, 这表明 PM 可能对儿童的认知发展产生负面影

响。Siddique 等(2011)测量印度某地区的 PM_{10} 、 NO_2 和 SO_2 的年暴露水平, 随后使用多因素 Logistic 回归分析, 发现 ADHD 患病率与 PM_{10} 相关程度最高。Sunyer 等(2015)以小学儿童为研究对象发现, 在 PM 、 NO_2 浓度较高的高污染学校就读的儿童, 其认知发展增长速度比低污染学校就读的儿童要慢, 即使在调整了其他影响认知发展的因素后仍然如此。Fuertes 等(2016)在德国 15 岁以下儿童中展开研究, 也发现了 $PM_{2.5}$ 的浓度和吸光度与儿童多动和注意力不集中症状显著相关。上述实验都采用了横向研究设计, 发现了 PM 与 ADHD 之间的关联, 但这无法进一步探究 PM 与 ADHD 之间更为确切的因果关系, 也不能确定生命各阶段暴露于 PM 是否对 ADHD 产生不同影响。所以, 有研究者采用了纵向追踪设计, 更深层次地探究 PM 对 ADHD 的影响。例如, Chen 等(2024)招募西班牙各地的妊娠期妇女进行追踪研究, 使用两阶段混合模型框架(Two-Stage Mixed Model Framework)来评估从受孕到早期儿童期间的居住地 $PM_{2.5}$ 暴露。研究发现, 孕期和出生后细颗粒物暴露与儿童注意力缺陷多动障碍症状的发生有关, 且存在特定的易感窗口, 妊娠中期和幼儿期可能是接触 $PM_{2.5}$ 对幼儿多动症状不利影响的易感时期。Chiu 等(2016)对西班牙的妊娠期妇女进行研究, 发现 $PM_{2.5}$ 在特定的产前窗口暴露与较低的智商得分、较差的记忆力和注意领域的功能有关, 这些功能还受到性别的影响。这进一步证明, 生命最初几年以及产前暴露于 PM 与后期儿童的 ADHD 症状有更强关联。但这并不能代表 PM 仅对儿童的认知发展产生不利影响, 因此, 也有研究者专门展开针对于青少年群体的研究设计, 例如, Li 等(2023)对荷兰 10 至 12 岁的儿童进行 16 年的纵向研究设计, 发现 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 暴露水平越高, ADHD 症状越严重, 但随着时间的推移, 这种影响逐渐减弱。Kicinski 等(2015)在青少年群体中也展开了此类实验, 发现随着 PM 暴露水平的增加, 青少年患 ADHD 的概率也随之增加。Park 等(2020)调查了短期污染暴露与韩国 ADHD 青少年住院数量之间的关联, 研究发现, PM_{10} 的浓度增加与 ADHD 相关的住院风险增加有关。

综上所述, 大多研究都证明了 PM 对 ADHD 症状存在负面影响, 还证明了产前和儿童早期是污染暴露的易感窗口; 虽然也有研究证实了 PM 在青少年 ADHD 群体中也存在影响, 但研究数量阙如, 研究手段落后, 未来需要展开更为详细的实验研究弥补相关结论。

2.2. 氮氧化物

氮氧化物也是最为常见的空气污染物之一, 并和 PM 一样多来自于交通污染环境中, 因此有较多学者展开氮氧化物对 ADHD 影响的研究。Park 等(2020)使用荟萃分析发现, 短期暴露于 NO_2 与 ADHD 相关的住院人数增加有关。Sentís 等(2017)在西班牙使用土地利用回归模型(Land-Use Regression Model, LUR)估计参与者在妊娠期间和怀孕后所在区域的 NO_2 暴露水平, 结果发现产前和产后期间 NO_2 暴露水平越高, 越容易损害儿童的注意功能。Wang 等(2009)以二年级和三年级的儿童为研究对象, 并测量泉州市某所学校的污染暴露水平, 发现 NO_2 暴露浓度高的学校儿童神经行为测试相关结果要差于低暴露学校的儿童。Li 等(2023)研究发现, 较高浓度的 NO_2 与 ADHD 显著相关, 但经多次校正后相关性不再显著。由此可知, 许多研究也都得出了氮氧化物与 ADHD 之间的显著相关。除此以外, 由于氮氧化物和 PM 都较多产自于交通环境污染, 并且交通环境暴露是最为常见的空气污染暴露, 所以很多学者针对交通环境暴露与 ADHD 之间的关系展开研究。例如, Min & Min (2017)对韩国儿童展开了长达 10 年的纵向追踪研究, 发现空气中 PM_{10} 和 NO_2 污染浓度高的地区儿童患 ADHD 的风险比低污染地区增加 2 到 3 倍。van Kempen 等(2012)探讨在家庭和学校环境下, 交通造成的空气污染(NO_2 和 PM_{10})和交通噪音对小学生认知能力的影响, 结果发现, 仅在学校环境下, 长期暴露在交通有关的空气污染和噪音中与小学生认知能力的下降有关。然而, 也有学者得出不同结论。Gong 等(2014)以瑞典双胞胎为研究对象, 发现怀孕期间和儿童出生后暴露于 PM 和氮氧化物对儿童的神经发育障碍没有影响, 可能是由于瑞典的空气污染水平相对较低以及得分高于某些神经发育结果分界值的儿童数量较低, 导致了风险估计的统计不确定性。

由此推论可知, 大多研究都得出氮氧化物与 ADHD 之间存在显著关系的结论, 但也有研究并没有发现二者之间的相关关系。因此, 未来还需进一步验证相关结论, 例如, 使用纵向研究设计, 在不同国家和地区展开实验, 增加结果的普遍性。

2.3. 其他

除了 PM 与氮氧化物外, 也有学者针对空气中其他污染物对 ADHD 的影响展开相关研究。例如, 黑炭(Black Carbon, BC)主要来源于汽车尾气, 会在空气中吸附有机和无机化学物质, 不仅会影响气候, 还会对人体健康造成危害(Cowell et al., 2015)。Cowell 等(2015)发现产前暴露于 BC 与出生后儿童注意力集中指数得分下降相关, 这一作用受到母亲产前压力和性别的调节作用。Chiu 等(2013)等探究美国马萨诸塞州 BC 暴露水平与 7~14 岁儿童注意力之间的关系。结果表明, BC 浓度较高的地区儿童注意力水平普遍较低, 并且在某些注意力领域, 男孩可能比女孩更容易受到交通相关空气污染的潜在影响。

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是在有机材料不完全燃烧过程中形成的一组普遍存在的环境污染物, 存在于各种媒介中, 包括香烟烟雾、炭烤食品以及化石燃料和生物质燃料燃烧产生的物质(Abid et al., 2014)。有研究证实暴露于 PAHs 与美国 ADHD 相关特殊教育需求的增加有关(Abid et al., 2014)。Mortamais 等(2017)探究 PAHs 暴露与西班牙儿童大脑结构和神经行为的关系。结果发现, 暴露于 PAHs, 特别是双酚 A(BPA)的儿童大脑结构发生了变化, 并且这种变化与 ADHD 症状有关。Perera 等(2012)评估产前 PAHs 暴露与美国 6~7 岁儿童行为之间的关系发现, 高 PAHs 暴露与儿童焦虑、抑郁与注意力不集中症状呈正相关。

除了上述提到的几种物质, 空气中还有很多其他物质也曾被证实对 ADHD 有影响。例如, 有少量学者对臭氧(O₃)、硫氧化物和重金属污染物展开相关研究。如 Li 等(2023)研究发现, O₃ 暴露水平越高, ADHD 症状越严重; Park 等(2020)发现短期暴露于 SO₂ 与 ADHD 住院风险增加有关; Alemany 等(2017)测量了学校室内和室外空气中的铜暴露水平, 发现铜暴露与儿童注意力不集中存在相关性, 并且 ATP7B 基因的多态性可能影响这种关联。

上述提到的污染大多都是室外空气污染, 而室内空气污染(Indoor Air Pollution, IAP)也是十分常见的空气污染种类之一, 虽然室外污染物可以渗透到室内环境, 但也有一些独特的室内空气污染来源, 如室内环境中的烹饪、装修、熏香、吸烟等行为会产生大量的有害物质, 并且由于室内环境的封闭性和空气流通性较差, 所以有时 IPA 浓度甚至高于室外, 从而对人体产生更大的危害(Chen et al., 2023)。Chen 等(2023)对 COFs、室内烧香、家庭装修、SHS 这 4 种室内空气污染物的暴露情况进行了评估, 计算出 IAP 暴露指数, 发现暴露于更多 IAP 种类儿童比未暴露于 IAP 的儿童有更高的 ADHD 患病率; Fang 等(2019)也得出类似结果。Dong 等(2018)使用荟萃分析研究发现, 母亲产前吸烟或暴露于烟雾环境中与儿童 ADHD 显著相关。也有研究者发现母亲妊娠期间暴露于二手烟会增加儿童患 ADHD 的概率(Lin et al., 2021; Braun et al., 2006)。

综上所述, 空气中多种污染物会对 ADHD 患病率产生影响, 所进行的实验研究大多得出了显著性的结论。但空气污染物导致 ADHD 的病因机制, 则需要采用医学的方法和检测手段进行深入探究。

3. 影响机制

对于空气污染物所导致 ADHD 的病因机制, 不同种类的空气污染物以及污染物在不同暴露窗口的作用途径有所不同, 且存在性别差异(Woodward et al., 2015; Bolton et al., 2012)。因此应该探究环境毒物在胎儿发育和出生后不同阶段的作用机制, 并注意探究其中可能存在的性别差异。多位学者采用动物和人类尸体展开研究, 探究空气污染物影响 ADHD 的作用机制。例如, Allen 等(2014)将小鼠暴露于浓缩颗粒

物环境中一段时间,随后实施安乐死并解剖其大脑,发现雄性小鼠出现侧脑室增宽现象,而雌性小鼠没有出现这种现象,仅出现一些神经炎症反应。这项研究表明,暴露于浓缩环境颗粒物的小鼠大脑结构会发生改变,出现神经毒性症状,并且存在性别差异,雄性小鼠对空气污染物的反应更加敏感。Calderón-Garcidueñas 等(2008)在空气污染严重的墨西哥城展开实验,该城市的空气污染物主要为 PM、O₃ 和各种有机化合物,随后研究人员对墨西哥城和对照城市意外死亡的人群进行神经病理学检查发现,长期空气污染暴露与神经炎症、血脑屏障破坏、肺部颗粒物沉积等症状有关,通过这些症状可以推测出空气污染作用于认知、神经等系统的可能路径。

3.1. 炎症反应

PM 是最常见的空气污染物之一,其所包含的生物成分与所携带的有毒物质可能与发育障碍和神经退行性疾病有关。由于 PM 大小不同,所以其作用方式和危险系数也存在差别,PM_{2.5} 或一些超细颗粒物既容易穿透肺部、肝脏等区域进入血液循环,也容易穿透鼻黏膜进一步影响大脑;而 PM₁₀ 相比于细颗粒物由于直径稍大不容易穿透外层组织,因此更容易沉积在肺部或鼻黏膜表面(Woodward et al., 2015; Oberdörster et al., 2004),诱导炎症反应增加患 ADHD 的易感性。

在妊娠早期和后期,胎盘壁较薄,因此胎盘更容易受到超细颗粒物的侵入,侵入的颗粒物可能会导致胎盘功能受损,受损的胎盘容易改变胎盘氧合和营养运输,对胎儿生长和大脑发育产生不利影响。并且暴露在空气污染中的孕妇可能会通过激活小胶质细胞等方式增加循环炎症细胞因子,从而经历严重的全身炎症反应,对胎儿发育产生不利影响(Woodward et al., 2015)。儿童若暴露在污染环境中,也可能诱发全身炎症反应,全身炎症反应容易破坏呼吸系统和血脑屏障,改变大脑先天免疫细胞的组成,损害中枢神经系统(Block & Calderón-Garcidueñas, 2009)。

3.2. 氧化应激

儿童早期,PM_{2.5} 可以通过嗅上皮进入大脑,也可以进入血脑屏障激活小胶质细胞,小胶质细胞过度 and 慢性的激活会释放自由基和促炎细胞因子,从而损害周围的神经元,导致细胞损伤,并通过诱导氧化应激等反应导致神经损伤(Block et al., 2012; Sunyer, 2008),最终增加 ADHD 的患病率。

由于 O₃ 的半衰期较短,因此 O₃ 可能不会像 PM 一样通过各种途径到达大脑,而是进入肺部发生各种反应最后影响神经功能。原因在于 O₃ 一旦进入肺部,就会与蛋白质和脂质相互作用,产生各种有毒化合物,通过激活肺部的巨噬细胞,不仅会导致肺部的免疫功能障碍,还会参与氧化应激、气道炎症等反应,其中 O₃ 参与的氧化应激反应可能与神经系统功能受损相关(Block & Calderón-Garcidueñas, 2009),这可能是 O₃ 导致 ADHD 的作用机制。

3.3. 神经系统损伤

在妊娠早期,在胎盘完全形成之前,PM_{2.5} 与重金属污染物等超细颗粒物很容易通过母体血液和胎盘屏障进入发育中的大脑,并造成神经发育影响(Myhre et al., 2018);儿童出生后,超细颗粒物可以通过循环从肺毛细血管转移到大脑或直接通过嗅觉神经进入大脑(Sentís et al., 2017; Oberdörster et al., 2004)。大脑中的小胶质细胞、细胞因子等激活会介导神经炎症,随后通过炎症反应以及大脑皮层神经元、胶质细胞和神经纤维在内的中枢神经系统细胞的损伤引起神经毒性,这可能是 PM 导致 ADHD 的机制(Park et al., 2020; Bolton et al., 2012)。

研究表明,环境毒素还可以通过改变 DNA 甲基化和组蛋白修饰等表观遗传学调控方式,影响基因的表达和功能,从而导致神经发育障碍的发生(Tran & Miyake, 2017; Calderón-Garcidueñas et al., 2010)。

并且, 儿童早期暴露于空气污染可能导致髓鞘形成和神经可塑性失调, 这也与多动症发病机制有关(Chen et al., 2024)。

针对室内环境中最为常见的空气污染物, 由吸烟产生的尼古丁和一氧化碳等物质被证明可以损害去甲肾上腺素系统, 降低脑葡萄糖代谢, 使脑发育迟缓。尼古丁在大脑发育过程中还能与胆碱能受体结合, 诱导细胞死亡, 使脑区域结构改变, 这同样能够损害神经系统, 成为 ADHD 的发病因素之一(Fang et al., 2019)。

3.4. 性别差异的可能机制

除此以外, 许多研究都发现空气污染对 ADHD 的影响存在性别差异, 主要表现为男生的患病率要高于女生(Chiu et al., 2013), 可能是由于性激素影响空气污染物作用于神经系统的过程。男性中枢神经系统中小胶质细胞的状态比女性更加活跃, 因此会释放更多的促炎因子, 使神经系统损害的程度更大(Bolton et al., 2012)。并且胎儿发育过程中神经内分泌系统和免疫系统相互作用时, 雄性和雌性神经元会对污染物做出不同的反应, 这种免疫反应的差异被一些学者认为可以解释性别在 ADHD 等精神疾病患病率上的差异(Chiu et al., 2016)。

总之, 空气污染是一种复杂的环境毒物混合物, 不同的污染物通过多种途径攻击中枢神经系统, 从而导致 ADHD 等认知相关疾病(Block & Calderón-Garcidueñas, 2009)。

4. 对策及建议

4.1. 易感人群靶向防护

针对产前与儿童早期敏感人群, 制定分级防护策略。妊娠期女性应避免长期暴露于交通主干道、工业区等污染高风险区域, 在 $PM_{2.5}$ 浓度较高时减少外出, 室内使用高效空气净化器; 儿童在污染高发时段(如早晚交通高峰、冬季供暖期)减少户外玩耍, 学校可在污染天调整体育课形式, 优先开展室内活动。

4.2. 污染暴露源头精准管控

针对 ADHD 关联显著的污染物, 强化源头治理。在儿童密集区域(如学校、居民区周边)严格限制高排放车辆通行, 推广电动校车与社区接驳车; 加强室内污染源管控, 出台家庭装修环保标准, 限制含甲醛、苯系物等污染物的建材使用, 倡导无烟家庭, 禁止在有孕妇或儿童的室内吸烟、烧香。

4.3. 营养干预与机制阻断

基于氧化应激机制, 建议易感人群(孕妇、儿童)适当补充抗氧化营养素(如维生素 C、维生素 E、花青素), 通过饮食干预减轻污染物诱导的氧化损伤; 对高污染区域儿童进行定期神经发育筛查(如采用 Conners 多动症指数结合认知功能测试), 早期发现注意力不集中等症状并及时干预。

4.4. 政策与技术协同保障

政府层面应将儿童神经健康保护纳入空气质量管控目标, 在学校、幼儿园周边设置专项监测点, 当 $PM_{2.5}$ 日均浓度超标时启动预警机制; 加大清洁能源替代力度, 重点推进居民区供暖和餐饮行业的煤改气、煤改电工程, 减少 PM、PAHs 等污染物排放; 同时支持污染神经毒性机制研究与防护技术研发, 推广低成本、易操作的个体防护设备(如儿童专用防 $PM_{2.5}$ 口罩、便携式甲醛检测仪)。

5. 结论与展望

空气污染是导致 ADHD 的患病因素之一且存在性别差异, 这一结果强调了社会环境下评估化学应激

源的重要性,还强调在研究神经认知和 ADHD 相关行为时,需要注意探讨性别的影响(Cowell et al., 2015; Chiu et al., 2013)。针对空气污染导致 ADHD 的患病机制,学者提出了种种研究假设和猜想并展开了临床学研究,但目前依然尚未明晰各种空气污染物导致 ADHD 的具体患病机制,仅仅是在解剖和临床所得结果中分析和推测污染物影响认知神经系统的可能路径。所以未来需要进一步展开空气污染物导致 ADHD 的病因机制,并将 ADHD 的风险增加与特定类型的空气污染物联系起来。基于本综述的具体发现,未来研究应突破现有通用框架,聚焦以下方向。

5.1. 污染物特异性与亚型关联研究

现有研究多关注污染物整体影响,未来需针对性分析不同污染物(如 PM_{2.5} 与 PAHs、NO₂ 与 BC)对 ADHD 不同亚型(注意力不集中型、多动冲动型、混合型)的差异化作用,明确哪种污染物更易诱发特定亚型症状,为病因精准定位提供依据。

5.2. 敏感窗口精细化与交互作用探究

在已识别的产前、儿童早期敏感窗口基础上,进一步细化时间节点(如妊娠早/中/晚期的周级划分、儿童 0~3 岁与 3~6 岁的阶段差异),同时探究不同窗口暴露的叠加效应;此外,需关注污染物与其他风险因素(如前额叶功能失调、早期情感忽视)的交互作用,明确空气污染在多因素致病模型中的权重。

5.3. 机制验证与生物标志物挖掘

结合动物实验与人类队列研究,深入验证环境污染物导致 ADHD 的因果链,重点关注男性易感的分子机制(如性激素与促炎因子的调控关系);同时筛选特异性生物标志物(如 PM 暴露相关的 DNA 甲基化位点、PAHs 代谢产物与神经递质水平的关联指标),为 ADHD 的早期筛查与污染暴露溯源提供工具(Aghaei et al., 2019)。

5.4. 室内外污染协同评估方法优化

针对室内外污染的协同效应,开发整合室外监测数据、室内渗透系数与个体活动模式的暴露评估模型,结合可穿戴设备实时监测个体在家庭、学校、交通场景中的动态暴露水平,替代现有单一环境监测或问卷评估方式,提升暴露数据的准确性。

空气污染对 ADHD 的影响具有复杂性、长期性与性别差异性,未来需通过特异性研究、精准化干预与政策保障的闭环体系,进一步明确因果关联、优化防护策略,为儿童神经健康保驾护航,减轻 ADHD 对家庭与社会的负担。

参考文献

- Abid, Z., Roy, A., Herbstman, J. B., & Ettinger, A. S. (2014). Urinary Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Metabolites and Attention/Deficit Hyperactivity Disorder, Learning Disability, and Special Education in U.S. Children Aged 6 to 15. *Journal of Environmental and Public Health*, 2014, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2014/628508>
- Aghaei, M., Janjani, H., Yousefian, F., Jamal, A., & Yunesian, M. (2019). Association between Ambient Gaseous and Particulate Air Pollutants and Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD) in Children; A Systematic Review. *Environmental Research*, 173, 135-156. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.030>
- Alemay, S., Vilor-Tejedor, N., Bustamante, M., Álvarez-Pedrerol, M., Rivas, I., Forns, J. et al. (2017). Interaction between Airborne Copper Exposure and ATP7B Polymorphisms on Inattentiveness in Scholar Children. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.10.010>
- Allen, J. L., Liu, X., Pelkowski, S., Palmer, B., Conrad, K., Oberdörster, G. et al. (2014). Early Postnatal Exposure to Ultrafine Particulate Matter Air Pollution: Persistent Ventriculomegaly, Neurochemical Disruption, and Glial Activation Preferentially in Male Mice. *Environmental Health Perspectives*, 122, 939-945. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307984>

- Biederman, J. (2005). Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: A Selective Overview. *Biological Psychiatry*, 57, 1215-1220. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2004.10.020>
- Block, M. L., & Calderón-Garcidueñas, L. (2009). Air Pollution: Mechanisms of Neuroinflammation and CNS Disease. *Trends in Neurosciences*, 32, 506-516. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2009.05.009>
- Block, M. L., Elder, A., Auten, R. L., Bilbo, S. D., Chen, H., Chen, J. et al. (2012). The Outdoor Air Pollution and Brain Health Workshop. *NeuroToxicology*, 33, 972-984. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2012.08.014>
- Bolton, J. L., Smith, S. H., Huff, N. C., Gilmour, M. I., Foster, W. M., Auten, R. L. et al. (2012). Prenatal Air Pollution Exposure Induces Neuroinflammation and Predisposes Offspring to Weight Gain in Adulthood in a Sex-Specific Manner. *The FASEB Journal*, 26, 4743-4754. <https://doi.org/10.1096/fj.12-210989>
- Braun, J. M., Kahn, R. S., Froehlich, T., Auinger, P., & Lanphear, B. P. (2006). Exposures to Environmental Toxicants and Attention Deficit Hyperactivity Disorder in U.S. Children. *Environmental Health Perspectives*, 114, 1904-1909. <https://doi.org/10.1289/ehp.9478>
- Bronte, O., García-García, F., Lee, D. J., Urrutia, I., Uranga, A., Nieves, M. et al. (2023). Impact of Outdoor Air Pollution on Severity and Mortality in COVID-19 Pneumonia. *Science of The Total Environment*, 894, Article 164877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164877>
- Calderón-Garcidueñas, L., Franco-Lira, M., Henríquez-Roldán, C., Osnaya, N., González-Maciél, A., Reynoso-Robles, R. et al. (2010). Urban Air Pollution: Influences on Olfactory Function and Pathology in Exposed Children and Young Adults. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 62, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.etp.2009.02.117>
- Calderón-Garcidueñas, L., Solt, A. C., Henríquez-Roldán, C., Torres-Jardón, R., Nuse, B., Herritt, L. et al. (2008). Long-Term Air Pollution Exposure Is Associated with Neuroinflammation, an Altered Innate Immune Response, Disruption of the Blood-Brain Barrier, Ultrafine Particulate Deposition, and Accumulation of Amyloid β -42 and α -Synuclein in Children and Young Adults. *Toxicologic Pathology*, 36, 289-310. <https://doi.org/10.1177/0192623307313011>
- Chen, W., Rector-Houze, A. M., Guxens, M., Iñiguez, C., Swartz, M. D., Symanski, E. et al. (2024). Susceptible Windows of Prenatal and Postnatal Fine Particulate Matter Exposures and Attention-Deficit Hyperactivity Disorder Symptoms in Early Childhood. *Science of the Total Environment*, 912, Article 168806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168806>
- Chen, Y. C., Gui, Z. H., Bao, W. W., Liang, J. H., Zhang, S. X., Zhao, Y., & Chen, Y. J. (2023). Chronic Exposure to Indoor Air Pollutants in Association with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Symptoms in Chinese Schoolchildren: A Cross-Sectional Study. *NeuroToxicology*, 94, 182-190. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2022.12.003>
- Cheng, B., Pan, C., Cai, Q., Liu, L., Cheng, S., Yang, X. et al. (2024). Long-Term Ambient Air Pollution and the Risk of Musculoskeletal Diseases: A Prospective Cohort Study. *Journal of Hazardous Materials*, 466, Article 133658. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133658>
- Chiu, Y. H. M., Bellinger, D. C., Coull, B. A., Anderson, S., Barber, R., Wright, R. O., & Wright, R. J. (2013). Associations between Traffic-Related Black Carbon Exposure and Attention in a Prospective Birth Cohort of Urban Children. *Environmental Health Perspectives*, 121, 859-864. <https://doi.org/10.1289/ehp.1205940>
- Chiu, Y. H. M., Hsu, H. H. L., Coull, B. A., Bellinger, D. C., Kloog, I., Schwartz, J., & Wright, R. J. (2016). Prenatal Particulate Air Pollution and Neurodevelopment in Urban Children: Examining Sensitive Windows and Sex-Specific Associations. *Environment International*, 87, 56-65. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.11.010>
- Cowell, W. J., Bellinger, D. C., Coull, B. A., Gennings, C., Wright, R. O., & Wright, R. J. (2015). Associations between Prenatal Exposure to Black Carbon and Memory Domains in Urban Children: Modification by Sex and Prenatal Stress. *PLOS ONE*, 10, e0142492. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142492>
- Dalla, M. D. B., Ayala, C. O., Castro, F. C. D. A. Q., Neto, F. K., Zanirati, G., Canon-Montanez, W., & Mattiello, R. (2022). Environmental Pollution and Attention Deficit Hyperactivity Disorder: A Meta-Analysis of Cohort Studies. *Environmental Pollution*, 315, Article 120351. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120351>
- Dong, T., Hu, W., Zhou, X., Lin, H., Lan, L., Hang, B. et al. (2018). Prenatal Exposure to Maternal Smoking during Pregnancy and Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder in Offspring: A Meta-Analysis. *Reproductive Toxicology*, 76, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2017.12.010>
- Fang, X. Y., Strodl, E., Liu, B. Q., Liu, L., Yin, X. N., Wen, G. M., & Chen, W. Q. (2019). Association between Prenatal Exposure to Household Inhalants Exposure and ADHD-Like Behaviors at around 3 Years of Age: Findings from Shenzhen Longhua Child Cohort Study. *Environmental Research*, 177, Article 108612. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108612>
- Fuertes, E., Standl, M., Forns, J., Berdel, D., Garcia-Aymerich, J., Markevych, I. et al. (2016). Traffic-Related Air Pollution and Hyperactivity/Inattention, Dyslexia and Dyscalculia in Adolescents of the German GINIplus and LISAplus Birth Cohorts. *Environment International*, 97, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.017>
- Gong, T., Almqvist, C., Bölte, S., Lichtenstein, P., Anckarsäter, H., Lind, T. et al. (2014). Exposure to Air Pollution from Traffic and Neurodevelopmental Disorders in Swedish Twins. *Twin Research and Human Genetics*, 17, 553-562. <https://doi.org/10.1017/thg.2014.58>

- Kicinski, M., Vermeir, G., Van Larebeke, N., Den Hond, E., Schoeters, G., Bruckers, L. et al. (2015). Neurobehavioral Performance in Adolescents Is Inversely Associated with Traffic Exposure. *Environment International*, 75, 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.028>
- Li, Y., Xie, T., Cardoso Melo, R. D., de Vries, M., Lakerveld, J., Zijlema, W. et al. (2023). Longitudinal Effects of Environmental Noise and Air Pollution Exposure on Autism Spectrum Disorder and Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder during Adolescence and Early Adulthood: The TRAILS Study. *Environmental Research*, 227, Article 115704. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115704>
- Lin, L. Z., Xu, S. L., Wu, Q. Z., Zhou, Y., Ma, H. M., Chen, D. H., & Dong, G. H. (2021). Association of Prenatal, Early Postnatal, or Current Exposure to Secondhand Smoke with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder Symptoms in Children. *JAMA Network Open*, 4, e2110931. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2021.10931>
- Liu, Y., Guo, M., Wang, J., Gong, Y., Huang, C., Wang, W. et al. (2024). Effect of Short-Term Exposure to Air Pollution on Hospital Admission for Cardiovascular Disease: A Time-Series Study in Xiangyang, China. *Science of the Total Environment*, 918, Article 170735. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170735>
- Min, J. Y., & Min, K. B. (2017). Exposure to Ambient PM₁₀ and NO₂ and the Incidence of Attention-Deficit Hyperactivity Disorder in Childhood. *Environment International*, 99, 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.022>
- Min, J., Kang, D. H., Kang, C., Bell, M. L., Kim, H., Yang, J., & Lee, W. (2024). Fluctuating Risk of Acute Kidney Injury-Related Mortality for Four Weeks after Exposure to Air Pollution: A Multi-Country Time-Series Study in 6 Countries. *Environment International*, 183, Article 108367. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108367>
- Mortamais, M., Pujol, J., van Drooge, B. L., Macià, D., Martínez-Vilavella, G., Reynes, C. et al. (2017). Effect of Exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on Basal Ganglia and Attention-Deficit Hyperactivity Disorder Symptoms in Primary School Children. *Environment International*, 105, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.04.011>
- Myhre, O., Låg, M., Villanger, G. D., Oftedal, B., Øvreivik, J., Holme, J. A. et al. (2018). Early Life Exposure to Air Pollution Particulate Matter (PM) as Risk Factor for Attention Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD): Need for Novel Strategies for Mechanisms and Causalities. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 354, 196-214. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2018.03.015>
- Oberdörster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W. et al. (2004). Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain. *Inhalation Toxicology*, 16, 437-445. <https://doi.org/10.1080/08958370490439597>
- Park, J., Sohn, J. H., Cho, S. J., Seo, H. Y., Hwang, I., Hong, Y. et al. (2020). Association between Short-Term Air Pollution Exposure and Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder-Related Hospital Admissions among Adolescents: A Nationwide Time-Series Study. *Environmental Pollution*, 266, Article 115369. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115369>
- Perera, F. P., Tang, D., Wang, S., Vishnevetsky, J., Zhang, B., Diaz, D. et al. (2012). Prenatal Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Exposure and Child Behavior at Age 6-7 Years. *Environmental Health Perspectives*, 120, 921-926. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104315>
- Retz, W., Ginsberg, Y., Turner, D., Barra, S., Retz-Junginger, P., Larsson, H. et al. (2021). Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD), Antisociality and Delinquent Behavior over the Lifespan. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 120, 236-248. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.11.025>
- Sentís, A., Sunyer, J., Dalmau-Bueno, A., Andiaarena, A., Ballester, F., Cirach, M. et al. (2017). Prenatal and Postnatal Exposure to NO₂ and Child Attentional Function at 4-5 Years of Age. *Environment International*, 106, 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.021>
- Siddique, S., Banerjee, M., Ray, M. R., & Lahiri, T. (2011). Attention-Deficit Hyperactivity Disorder in Children Chronically Exposed to High Level of Vehicular Pollution. *European Journal of Pediatrics*, 170, 923-929. <https://doi.org/10.1007/s00431-010-1379-0>
- Sunyer, J. (2008). The Neurological Effects of Air Pollution in Children. *European Respiratory Journal*, 32, 535-537. <https://doi.org/10.1183/09031936.00073708>
- Sunyer, J., Esnaola, M., Alvarez-Pedrerol, M., Forns, J., Rivas, I., López-Vicente, M. et al. (2015). Association between Traffic-Related Air Pollution in Schools and Cognitive Development in Primary School Children: A Prospective Cohort Study. *PLOS Medicine*, 12, e1001792. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001792>
- Tran, N. Q. V., & Miyake, K. (2017). Neurodevelopmental Disorders and Environmental Toxicants: Epigenetics as an Underlying Mechanism. *International Journal of Genomics*, 2017, 1-23. <https://doi.org/10.1155/2017/7526592>
- van Kempen, E., Fischer, P., Janssen, N., Houthuijs, D., van Kamp, I., Stansfeld, S. et al. (2012). Neurobehavioral Effects of Exposure to Traffic-Related Air Pollution and Transportation Noise in Primary Schoolchildren. *Environmental Research*, 115, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2012.03.002>
- Waldren, L. H., Leung, F. Y. N., Hargitai, L. D., Burgoyne, A. P., Licalalde, V. R. T., Livingston, L. A. et al. (2024). Unpacking the Overlap between Autism and ADHD in Adults: A Multi-Method Approach. *Cortex*, 173, 120-137. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2023.12.016>

-
- Wang, J., Hu, X., Yang, T., Jin, J., Hao, J., Kelly, F. J. et al. (2024). Ambient Air Pollution and the Dynamic Transitions of Stroke and Dementia: A Population-Based Cohort Study. *E Clinical Medicine*, 67, Article 102368. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.102368>
- Wang, S., Zhang, J., Zeng, X., Zeng, Y., Wang, S., & Chen, S. (2009). Association of Traffic-Related Air Pollution with Children's Neurobehavioral Functions in Quanzhou, China. *Environmental Health Perspectives*, 117, 1612-1618. <https://doi.org/10.1289/ehp.0800023>
- Woodward, N., Finch, C. E., & Morgan, T. E. (2015). Traffic-Related Air Pollution and Brain Development. *AIMS Environmental Science*, 2, 353-373. <https://doi.org/10.3934/envirosci.2015.2.353>
- Young, M. E., Galvan, T., Reidy, B. L., Pescosolido, M. F., Kim, K. L., Seymour, K. et al. (2013). Family Functioning Deficits in Bipolar Disorder and ADHD in Youth. *Journal of Affective Disorders*, 150, 1096-1102. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2013.04.027>
- Zhang, C., Wang, X., Sun, D., Li, Y., Feng, Y., Zhang, R. et al. (2024). Modification Effects of Long-Term Air Pollution Levels on the Relationship between Short-Term Exposure to Meteorological Factors and Hand, Foot, and Mouth Disease: A Distributed Lag Non-Linear Model-Based Study in Shandong Province, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 272, Article 116060. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116060>