

DOI: 10.3969/j.issn.1005-8982.2025.23.013
文章编号: 1005-8982(2025)23-0090-07

临床研究·论著

空气污染物、重金属暴露与妊娠糖尿病发生风险的关系及机制研究*

顾梦薇, 丁丽娟, 钱丽

(无锡市人民医院 产科, 江苏 无锡 214000)

摘要: 目的 探讨空气污染物、重金属暴露与妊娠糖尿病(GDM)发生风险的关系, 以及可能的作用机制。
方法 本研究采用巢式病例对照研究设计, 纳入2021年1月—2023年12月无锡市人民医院120例GDM孕妇为研究组, 以年龄和口服糖耐量试验孕周为匹配条件1:1匹配120例健康孕妇为对照组。通过收集研究对象的居住地址, 结合无锡市环保局的空气质量监测数据, 评估孕期暴露于PM_{2.5}、NO₂、SO₂、CO等空气污染物的浓度。同时, 采用原子吸收分光光度法测定孕妇血液中的铅、汞、镉等重金属水平。采用多因素逐步Logistic回归分析评估GDM发生的危险因素。**结果** 两组孕妇建册年龄、建册孕周、身高、产次构成、孕妇文化程度构成比较, 差异均无统计学意义($P > 0.05$)。两组孕妇在建册时的体质量指数、收缩压、舒张压、葡萄糖激发试验、空腹血糖、1 h 血糖、2 h 血糖、糖尿病家族史率比较, 差异均有统计学意义($P < 0.05$)。研究组PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、铅、镉、砷和汞水平均高于对照组($P < 0.05$)。多因素逐步Logistic回归分析结果表明, PM_{2.5}水平高[$\hat{OR} = 1.148$ (95% CI: 1.005, 1.311)]、PM₁₀水平高[$\hat{OR} = 1.081$ (95% CI: 1.004, 1.165)]、SO₂水平高[$\hat{OR} = 1.357$ (95% CI: 1.049, 1.756)]、NO₂水平高[$\hat{OR} = 1.107$ (95% CI: 1.009, 1.216)]、CO水平高[$\hat{OR} = 34.509$ (95% CI: 2.207, 539.556)]、铅水平高[$\hat{OR} = 1.083$ (95% CI: 1.004, 1.167)]、镉水平高[$\hat{OR} = 6.658$ (95% CI: 2.195, 20.192)]、砷水平高[$\hat{OR} = 1.878$ (95% CI: 1.343, 2.626)]、汞水平高[$\hat{OR} = 2.595$ (95% CI: 1.389, 4.848)]均是孕妇发生GDM的危险因素($P < 0.05$)。研究组的胰岛素抵抗的稳态模型评估指数、C反应蛋白、丙二醛水平均高于对照组($P < 0.05$)，超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶水平均低于对照组($P < 0.05$)。**结论** 空气污染物和重金属暴露显著增加妊娠糖尿病的发生风险, 可能通过加重胰岛素抵抗、促进系统性炎症反应及增强氧化应激反应等机制发挥作用。

关键词: 妊娠糖尿病; 空气污染; 重金属暴露; 胰岛素抵抗; 氧化应激; 炎症反应

中图分类号: R587.1

文献标识码: A

The relationship between air pollutants and heavy metal exposure and the risk of gestational diabetes mellitus, and the potential mechanisms*

Gu Meng-wei, Ding Li-juan, Qian Li

(Department of Obstetrics, Wuxi People's Hospital, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: Objective To investigate the relationship between exposure to air pollutants and heavy metals and the risk of gestational diabetes mellitus (GDM), as well as the potential underlying mechanisms, in order to provide scientific evidence for the prevention and treatment of GDM. **Methods** A nested case-control study design was employed, including 120 pregnant women with GDM from Wuxi People's Hospital between January 2021 and

收稿日期: 2025-06-27

*基金项目: 江苏省妇幼保健科研项目(No: F202302); 江苏省妇幼保健协会科研项目(No: FYX202304)

[通信作者] 钱丽, E-mail: 148312593@qq.com; Tel: 15861576529

December 2023. Each GDM case was matched 1:1 with a healthy pregnant woman based on age and gestational week at the time of the oral glucose tolerance test. The residential addresses of the participants were collected, and the concentrations of air pollutants (PM2.5, NO₂, SO₂, CO, etc.) during pregnancy were assessed using air quality monitoring data from the Wuxi Environmental Protection Bureau. Heavy metals such as lead, mercury, and cadmium in the blood of the pregnant women were measured using atomic absorption spectroscopy. Multivariate logistic regression analysis was performed to evaluate the association between exposure to air pollutants and heavy metals and the risk of GDM, and to further explore the potential biological mechanisms. **Results** No statistically significant differences were found between the study group and control group in terms of registration age, gestational week at registration, height, parity distribution, or maternal education level ($P > 0.05$). Statistically significant differences were observed between the two groups in BMI at registration, systolic blood pressure, diastolic blood pressure, GCT, fasting plasma glucose, 1-hour postprandial plasma glucose, 2-hour postprandial plasma glucose and family history of diabetes ($P < 0.05$). Comparisons of PM2.5, PM10, SO₂, NO₂, CO, lead, cadmium, arsenic and mercury levels between the study group and control group all showed statistically significant differences ($P < 0.05$), with the study group demonstrating higher levels of these pollutants than the control group. Multivariate logistic regression analysis indicated that elevated levels of PM2.5 [$\hat{OR} = 1.148$ (95% CI: 1.005, 1.311)], PM10 [$\hat{OR} = 1.081$ (95% CI: 1.004, 1.165)], SO₂ [$\hat{OR} = 1.357$ (95% CI: 1.049, 1.756)], NO₂ [$\hat{OR} = 1.107$ (95% CI: 1.009, 1.216)], CO [$\hat{OR} = 34.509$ (95% CI: 2.207, 539.556)], lead [$\hat{OR} = 1.083$ (95% CI: 1.004, 1.167)], cadmium [$\hat{OR} = 6.658$ (95% CI: 2.195, 20.192)], arsenic [$\hat{OR} = 1.878$ (95% CI: 1.343, 2.626)], and mercury [$\hat{OR} = 2.595$ (95% CI: 1.389, 4.848)] were all risk factors for GDM ($P < 0.05$). Significant differences were also found between the two groups in HOMA-IR, CRP, MDA, SOD and GSH-Px levels ($P < 0.05$). The study group showed higher HOMA-IR, CRP and MDA levels, but lower SOD and GSH-Px levels compared to the control group. **Conclusion** Exposure to air pollutants and heavy metals significantly increases the risk of GDM, likely through mechanisms such as exacerbating insulin resistance, promoting systemic inflammation, and enhancing oxidative stress.

Keywords: gestational diabetes mellitus; air pollution; heavy metal exposure; insulin resistance; oxidative stress; inflammation response

妊娠糖尿病(gestational diabetes mellitus, GDM)是孕期常见的代谢紊乱疾病,其发病率在全球范围内呈逐年上升趋势,成为威胁孕妇和胎儿健康的重要公共卫生问题^[1]。GDM不仅增加妊娠期并发症的风险,如妊娠高血压疾病、早产和巨大儿等,还与产后母婴患2型糖尿病、肥胖及心血管疾病的长期风险相关^[2-3]。因此,探讨GDM的病因及其危险因素,对预防和控制该疾病具有重要意义。近年来,随着工业化和城市化进程的加速,空气污染和重金属暴露问题日益严重,对人体健康的潜在威胁引起了广泛关注。已有研究表明,空气污染物(如PM2.5、NO₂、SO₂等)和重金属(如铅、汞、镉等)不仅可导致多种慢性疾病,还可能对妊娠结局产生不良影响^[4-6]。尤其是在妊娠期这一特殊的生理阶段,环境污染物可能通过加重胰岛素抵抗、诱导系统性炎症反应和氧化应激等途径,增加GDM的发病风险^[7]。然而,目前关于空气污染物和重金属暴露与GDM发生之间的关联研究仍较为有限,特别是在其潜在生物学机制方面尚缺乏明确的系

统性证据。本研究以巢式病例对照研究设计为基础,探讨孕期空气污染物和重金属暴露与GDM发生风险的关系,并通过分析胰岛素抵抗、炎症因子和氧化应激指标,进一步揭示其可能的致病机制,旨在为GDM的防治提供科学依据,同时也为制订孕期环境暴露控制策略提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

本研究采用巢式病例对照研究设计。研究对象为2021年1月—2023年12月在无锡市人民医院就诊的孕妇。本研究经无锡市人民医院医学伦理委员会审查批准[No: (2025)科研伦审第(KY25012)号]。根据患者的糖耐量试验结果和妊娠周数,从上述队列中筛选出发生GDM孕妇为研究组;采用风险集抽样的方法,为每位患者在同一队列中、在患者发病时仍未患GDM的孕妇里,以年龄和口服糖耐量试验孕周为匹配条件1:1匹配120例健康孕妇为对照组。基于预期的空气污染物和重

金属暴露与GDM发生风险的关系,假设相关性为中等效应,采用二项回归模型计算所需样本量,确定研究组和对照组均为120例,以确保研究结果具有统计学显著性和临床意义。纳入标准:①孕周<14周时在本院建册;②年龄25~35岁;③孕妇为无锡市常住居民,能够提供完整的环境暴露信息(居住地址和污染暴露历史);④所有参与者知情同意自愿参与本研究。排除标准:①妊娠前或妊娠期患有1型糖尿病或2型糖尿病史;②孕期合并有严重并发症(如妊娠高血压、先兆子痫、胎盘早剥等),影响妊娠结局和糖代谢;③孕妇有未控制的内分泌疾病(如甲状腺功能异常)或其他代谢性疾病(如多囊卵巢综合征)。

1.2 方法

1.2.1 基本资料收集 包括孕妇的年龄、体重、身高、孕期初诊的体格检查、孕期葡萄糖激发试验(glucose challenge test, GCT)、口服糖耐量试验(oral glucose tolerance test, OGTT)等。为确保数据的准确性,所有资料由经验丰富的临床研究人员进行收集和审核。

1.2.2 环境暴露评估 ①空气污染物暴露:根据每位孕妇的居住地址,匹配无锡市环保局提供的空气质量监测站点数据,获取研究期间的PM2.5、二氧化氮NO₂、二氧化硫SO₂、一氧化碳CO等空气污染物的月均浓度,进而估算其整个孕期的平均暴露浓度。②重金属暴露:收集孕妇血样,通过原子吸收分光光度法检测血液中的铅、汞镉、砷、汞等重金属含量。选择孕期的第2、3次产前检查时的血样,确保样本代表性和暴露时间的准确性。

1.2.3 GDM诊断 所有孕妇均接受标准的OGTT,用于评估糖代谢情况。依据《妊娠合并糖尿病诊治指南(2014)》^[8]的诊断标准:妊娠24~28周进行OGTT,空腹血糖≥5.1 mmol/L,1 h血糖≥10.0 mmol/L,2 h血糖≥8.5 mmol/L即为GDM。

1.2.4 生物学机制指标 ①胰岛素抵抗:采用胰岛素抵抗的稳态模型评估(homeostatic model assessment of insulin resistance, HOMA-IR)指数评估,HOMA-IR=(空腹胰岛素×空腹血糖)/22.5。空腹血糖通过全自动生化分析仪(AU5800,美国贝克曼库尔特公司)进行测定,空腹胰岛素使用人空腹胰岛素酶联免疫分析试剂盒(ml060484,上海酶

联生物科技有限公司)进行检测。②氧化应激:丙二醛(Malondialdehyde, MDA)水平采用硫代巴比妥酸(TBA)分光光度法检测,试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司(BC0020),采用分光光度计测定532 nm波长处的吸光度值;超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性采用微量邻苯三酚自氧化法检测,试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司(BC0175)。③炎症反应:C反应蛋白(C-reactive protein, CRP)水平采用胶乳增强免疫比浊法检测,试剂盒购自南京建成生物工程研究所有限公司(E023-1-1)。④抗氧化防御功能:谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)活性采用比色法检测,试剂盒购自南京建成生物工程研究所有限公司(A005-1-2)。以上检测均在孕妇的第2、3次产前检查时采集,以保证数据的时效性和代表性。

1.3 统计学方法

数据分析采用SPSS 26.0统计软件。计数资料以构成比或率(%)表示,比较用χ²检验;计量资料以均数±标准差(̄x±s)表示,比较用t检验;影响因素的分析用多因素逐步Logistic回归模型。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组孕妇基线资料比较

两组孕妇的建册年龄、建册孕周、身高、产次构成、孕妇文化程度构成比较,经t/χ²检验,差异均无统计学意义(P>0.05)。两组孕妇建册时的BMI、收缩压、舒张压、GCT、空腹血糖、1 h血糖、2 h血糖、糖尿病家族史率比较,经t/χ²检验,差异均有统计学意义(P<0.05)。见表1。

2.2 两组孕妇空气污染物与重金属暴露水平比较

两组孕妇PM2.5、PM10、SO₂、NO₂、CO、铅、镉、砷和汞水平比较,经t检验,差异均有统计学意义(P<0.05);研究组PM2.5、PM10、SO₂、NO₂、CO、铅、镉、砷和汞水平均高于对照组。见表2。

2.3 空气污染物、重金属暴露与GDM发生风险的多因素逐步Logistic回归分析

以孕妇是否发生GDM作为因变量(否=0,是=1),以PM2.5、PM10、SO₂、NO₂、CO、铅、镉、砷、汞为自变量(均赋值为实测值),采用多因素逐步Logistic

表1 两组孕妇基线资料比较 (n=120)

组别	建册年龄/(岁, $\bar{x} \pm s$)	建册孕周 ($\bar{x} \pm s$)	身高/(cm, $\bar{x} \pm s$)	建册BMI/(kg/m ² , $\bar{x} \pm s$)	建册收缩压/(mmHg, $\bar{x} \pm s$)	建册舒张压/(mmHg, $\bar{x} \pm s$)				
研究组	29.31 ± 2.79	10.13 ± 2.12	163.26 ± 3.74	24.35 ± 2.05	108.56 ± 10.36	66.25 ± 6.91				
对照组	29.47 ± 2.84	10.09 ± 2.25	164.12 ± 3.97	22.42 ± 1.65	103.56 ± 10.58	70.35 ± 7.49				
t / χ^2 值	0.440	0.142	1.727	8.034	3.699	4.407				
P 值	0.660	0.887	0.085	0.000	0.000	0.000				
组别	GCT/(mmol/L, $\bar{x} \pm s$)	OGTT/(mmol/L, $\bar{x} \pm s$)			产次/例	糖尿病家族史/例	文化程度/例			
		空腹血糖	1 h 血糖	2 h 血糖	初产妇	经产妇	有	无	高中及以下	大学及以上
研究组	9.46 ± 2.16	7.17 ± 0.38	12.81 ± 0.41	10.03 ± 0.40	105	15	18	102	36	84
对照组	6.14 ± 1.05	4.41 ± 0.23	8.82 ± 0.35	7.72 ± 0.24	108	12	5	115	40	80
t / χ^2 值	15.143	68.067	81.080	54.247	0.376		8.127		0.308	
P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.540		0.004		0.579	

表2 两组孕妇空气污染物与重金属暴露水平比较 (n=120, $\bar{x} \pm s$)

组别	PM2.5/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ /($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ /($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO/(mg/m^3)
研究组	40.03 ± 6.15	65.62 ± 12.53	12.78 ± 3.30	45.82 ± 9.25	1.25 ± 0.31
对照组	35.16 ± 5.24	60.85 ± 10.72	10.15 ± 2.95	40.32 ± 8.17	1.02 ± 0.23
t 值	6.603	3.169	6.509	4.882	6.527
P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
组别	铅/($\mu\text{g}/\text{L}$)	镉/($\mu\text{g}/\text{L}$)	砷/($\mu\text{g}/\text{L}$)	汞/($\mu\text{g}/\text{L}$)	
研究组	60.35 ± 12.07	2.11 ± 0.82	15.36 ± 3.27	7.32 ± 1.51	
对照组	50.18 ± 10.59	1.04 ± 0.51	10.65 ± 2.11	5.62 ± 1.04	
t 值	6.938	12.138	13.258	10.157	
P 值	0.000	0.000	0.000	0.000	

回归分析(引入水准为0.05, 排除水准为0.10), 结果显示: PM2.5 水平高 [$\hat{\text{OR}} = 1.148$ (95% CI: 1.005, 1.311)]、PM10 水平高 [$\hat{\text{OR}} = 1.081$ (95% CI: 1.004, 1.165)]、SO₂ 水平高 [$\hat{\text{OR}} = 1.357$ (95% CI: 1.049, 1.756)]、NO₂ 水平高 [$\hat{\text{OR}} = 1.107$ (95% CI: 1.009, 1.216)]、CO 水平高 [$\hat{\text{OR}} = 34.509$ (95% CI: 2.207,

539.556)]、铅水平高 [$\hat{\text{OR}} = 1.083$ (95% CI: 1.004, 1.167)]、镉水平高 [$\hat{\text{OR}} = 6.658$ (95% CI: 2.195, 20.192)]、砷水平高 [$\hat{\text{OR}} = 1.878$ (95% CI: 1.343, 2.626)]、汞水平高 [$\hat{\text{OR}} = 2.595$ (95% CI: 1.389, 4.848)] 均是孕妇发生GDM的危险因素($P < 0.05$)。见表3。

表3 空气污染物、重金属暴露与GDM发生风险的多因素逐步Logistic回归分析参数

因素	b	S_b	Wald χ^2 值	P 值	$\hat{\text{OR}}$ 值	95% CI	
						下限	上限
PM2.5	0.138	0.068	4.131	0.042	1.148	1.005	1.311
PM10	0.078	0.038	4.240	0.039	1.081	1.004	1.165
SO ₂	0.306	0.131	5.417	0.020	1.357	1.049	1.756
NO ₂	0.102	0.048	4.573	0.032	1.107	1.009	1.216
CO	3.541	1.403	6.372	0.012	34.509	2.207	539.556
铅	0.080	0.038	4.306	0.038	1.083	1.004	1.167
镉	1.896	0.566	11.216	0.001	6.658	2.195	20.192
砷	0.630	0.171	13.589	0.000	1.878	1.343	2.626
汞	0.954	0.319	8.947	0.003	2.595	1.389	4.848

2.4 两组孕妇的生物学机制指标比较

两组孕妇的 HOMA-IR、CRP、MDA、SOD、GSH-Px 水平比较,经 *t* 检验,差异均有统计学意义(*P*<

表 4 两组孕妇生物学机制指标比较 (*n*=120, $\bar{x} \pm s$)

组别	HOMA-IR	CRP/(mg/L)	MDA/(μmol/L)	SOD/(U/mL)	GSH-Px/(U/L)
研究组	2.51 ± 0.62	2.53 ± 1.06	3.06 ± 0.87	101.85 ± 15.13	0.82 ± 0.31
对照组	1.53 ± 0.51	1.04 ± 0.52	2.01 ± 0.67	126.70 ± 23.53	1.04 ± 0.21
<i>t</i> 值	13.372	13.824	10.475	9.731	6.436
<i>P</i> 值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3 讨论

本研究通过对 120 例 GDM 孕妇和 120 例健康孕妇的比较,发现空气污染物和重金属的暴露与 GDM 的发生密切相关,GDM 孕妇空气污染物和重金属的暴露水平均高于健康孕妇。这一结果与已有研究^[9-10]一致,说明环境污染物在 GDM 发生中有重要作用。本研究多因素逐步 Logistic 回归分析结果显示,PM2.5、PM10、SO₂、NO₂、CO、铅、镉、砷、汞水平均是孕妇发生 GDM 的危险因素,这一结果提示环境污染物可能通过直接或间接的途径干扰胰岛素的分泌和作用,从而影响孕期糖代谢,促进 GDM 的发生。

近年来,关于空气污染物对妊娠期妇女健康影响的研究不断增多,尤其是 PM2.5 作为细颗粒物,因其粒径极小,能够进入呼吸道并通过血液循环影响全身多个器官系统^[11-13]。PM2.5 中的有害物质,如重金属、有机污染物、微生物等,均能够直接通过呼吸系统进入体内,引起免疫和代谢紊乱。ZHANG 等^[14]研究发现,PM2.5 通过激活氧化应激、炎症反应及胰岛素信号传导途径,导致胰岛 β 细胞功能障碍和胰岛素抵抗,从而提高 GDM 的风险。氧化应激是指体内产生过多的活性氧(reactive oxygen species, ROS)物质,而这些 ROS 会破坏细胞膜、蛋白质及 DNA,导致细胞功能损伤,特别是胰岛 β 细胞的功能^[15]。研究表明,PM2.5 的暴露可引发系统性炎症反应,提高促炎性细胞因子(如 TNF-α、IL-6)的水平,这些因子能够干扰胰岛素的作用,导致胰岛素敏感性下降,最终促发 GDM 的发生^[16-17]。此外,NO₂ 和 SO₂ 作为主要的大气污染物,其长期暴露同样与 GDM 的发生密切相关。NO₂ 和 SO₂ 主要来源于机动车排放和工业

0.05);研究组 HOMA-IR、CRP、MDA 水平均高于对照组,SOD、GSH-Px 水平均低于对照组。见表 4。

污染,研究显示,这些污染物通过诱导肺部和全身的炎症反应,激活氧化应激通路,进一步影响胰岛素的分泌和作用^[18-19]。NO₂ 可通过损伤肺部的内皮细胞,激活免疫细胞,诱导全身性炎症反应,这些反应不仅损害呼吸系统,还可能通过血液循环系统影响胰腺功能和胰岛素的分泌。SO₂ 则通过增加体内氧化压力和促炎性细胞因子的产生,影响胰腺的胰岛 β 细胞,降低其胰岛素分泌能力。CO 作为一种无色无味的有毒气体,长期高浓度暴露可导致中枢神经系统和内分泌系统的损害。CO 通过结合血红蛋白形成碳氧血红蛋白,减少血氧供应,导致内分泌腺的功能障碍。研究发现,CO 暴露可通过影响胎盘血流和内分泌系统,进而影响胰腺的功能,导致胰岛素分泌的异常,进而导致血糖水平的升高,增加 GDM 的发生风险^[20-21]。重金属如铅、汞和镉的暴露与多种健康问题相关,包括代谢性疾病和心血管疾病。尤其是对于孕妇来说,重金属的暴露不仅会影响其代谢功能,还可能通过胎盘影响胎儿的发育,造成长期健康影响。重金属能够通过不同途径影响胰岛素的分泌、胰岛素作用以及胰岛 β 细胞的功能,从而导致胰岛素抵抗的发生,增加 GDM 的风险^[22-23]。铅是已知的环境污染物,长期暴露于铅中会影响胰岛素的分泌和作用。铅通过增加氧化应激和炎症反应,直接损伤胰岛 β 细胞,抑制其正常分泌胰岛素的功能。铅暴露还通过干扰胰岛素信号传导途径,导致胰岛素抵抗,最终增加 GDM 的发生率。研究还发现,铅可能通过改变脂质代谢,干扰胰岛素的分泌过程,进一步加剧糖代谢紊乱^[24]。汞和镉同样与胰岛素抵抗及糖代谢异常相关。汞的暴露能够通过影响胰岛 β 细胞的功能,抑制胰岛素的分泌。汞还通过激活氧化应激通路和抑制抗氧

化酶的活性, 进一步加剧胰岛素的抵抗作用。此外, 汞和镉对胰腺的损伤, 不仅影响胰岛素的分泌, 还可能通过改变脂肪代谢、糖代谢等多个途径, 导致GDM的发生。氧化应激和炎症反应在GDM的发生过程中起着关键作用。氧化应激是指ROS水平的过度升高, ROS能够损伤细胞膜、蛋白质及DNA, 诱发胰岛 β 细胞的损伤, 导致胰岛素抵抗。氧化应激通过激活红细胞内的抗氧化系统, 如SOD、GSH-Px等酶系统, 来维持体内的平衡。然而, 当氧化应激反应过于剧烈时, 抗氧化系统可能无法有效清除体内的ROS, 导致胰岛素的作用受到抑制, 进而引发GDM。MDA作为氧化应激的标志物, 其水平升高提示体内氧化损伤的加剧。炎症反应是机体对外界刺激的免疫反应, 但长期的慢性低度炎症反应可能是GDM的一个重要致病机制。CRP是体内慢性低度炎症的标志物之一, XIU等^[25]研究表明, CRP的升高与胰岛素抵抗和GDM的发生密切相关。慢性低度炎症通过促炎性细胞因子的作用, 抑制胰岛素的信号传导, 导致胰岛素敏感性下降, 进一步促发GDM。氧化应激和炎症反应的相互作用可能是空气污染物和重金属暴露导致GDM的关键机制。

综上所述, 空气污染物和重金属暴露是GDM的重要环境风险因素, 氧化应激和炎症反应可能是其作用机制之一。这一发现为GDM的早期预防和干预提供了新的思路。鉴于空气污染和重金属暴露对孕妇及胎儿健康的潜在危害, 政府和公共卫生部门应加强对环境污染的监测与控制, 尤其是在城市化进程加速的背景下, 应采取有效措施减少孕妇对污染物的暴露。然而, 本研究仅根据孕妇所在的居住地址获取空气污染物的月均浓度, 未考虑孕妇在孕期可能存在工作地点污染暴露。对于某些在污染较重地区工作的孕妇而言, 孕期工作地点的空气污染物浓度可能对孕妇的整体污染暴露水平产生重要影响。未来的研究应进一步探索孕妇工作地点的空气污染暴露, 结合居住地和工作地的污染水平进行综合评估, 以更全面地揭示环境污染对GDM发生风险的影响, 并为制订孕期环境暴露精准控制策略提供更为详细的依据。

参 考 文 献 :

- [1] 李莉, 马梅, 黄欣欣, 等. 妊娠期糖尿病早孕期相关影响因素及基于早孕期孕妇糖脂相关生化指标与人口学资料的4种机器学习算法构建妊娠期糖尿病预测模型的临床价值[J]. 中华妇幼临床医学杂志(电子版), 2024, 20(1): 105-113.
- [2] SOKOU R, MOSCHARI E, PALIOURA A E, et al. The impact of gestational diabetes mellitus (GDM) on the development and composition of the neonatal gut microbiota: a systematic review[J]. Microorganisms, 2024, 12(8): 1564.
- [3] BELSTI Y, MORAN L, DU L, et al. Comparison of machine learning and conventional logistic regression-based prediction models for gestational diabetes in an ethnically diverse population; the Monash GDM Machine learning model[J]. Int J Med Inform, 2023, 179: 105228.
- [4] REN Z L, YUAN J Y, LUO Y, et al. Association of air pollution and fine particulate matter (PM2.5) exposure with gestational diabetes: a systematic review and meta-analysis[J]. Ann Transl Med, 2023, 11(1): 23.
- [5] ZHOU M Q, PENG L Q, WANG J M, et al. Cadmium exposure and the risk of GDM: evidence emerging from the systematic review and meta-analysis[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2022, 29(51): 77253-77274.
- [6] NAZARPOUR S, RAMEZANI TEHRANI F, VALIZADEH R, et al. The relationship between air pollutants and gestational diabetes: an updated systematic review and meta-analysis[J]. J Endocrinol Invest, 2023, 46(7): 1317-1332.
- [7] 朱荣英, 朱艳芳, 习静. 亲环素A在GDM中的表达及其与氧化应激、炎症反应和妊娠结局的关系研究[J]. 天津医药, 2022, 50(5): 548-551.
- [8] 中华医学会妇产科学分会产科学组, 中华医学会围产医学分会妊娠合并糖尿病协作组. 妊娠合并糖尿病诊治指南(2014)[J]. 中华妇产科杂志, 2014, 49(8): 561-569.
- [9] ZHANG H H, WANG Q, HE S M, et al. Ambient air pollution and gestational diabetes mellitus: a review of evidence from biological mechanisms to population epidemiology[J]. Sci Total Environ, 2020, 719: 137349.
- [10] ONAT T, DEMIR CALTEKIN M, TURKSOY V A, et al. The relationship between heavy metal exposure, trace element level, and monocyte to HDL cholesterol ratio with gestational diabetes mellitus[J]. Biol Trace Elem Res, 2021, 199(4): 1306-1315.
- [11] 沈贝贝, 汤玉佩, 付奎, 等. 短期不同水平PM_{2.5}暴露对早卵泡期降调节方案助孕患者妊娠结局的影响[J]. 中华生殖与避孕杂志, 2023, 43(11): 1153-1157.
- [12] 罗理, 鹿茸, 旷聃, 等. 2015-2022年成都市大气PM_{2.5}中金属元素污染特征及慢性健康风险评估[J]. 预防医学情报杂志, 2024, 40(11): 1416-1421.
- [13] 谢志磊, 谢非, 苏益娴, 等. 内蒙古自治区PM_{2.5}中金属元素的地球化学特征及其健康风险[J]. 环境化学, 2024, 43(11): 3760-3776.
- [14] ZHANG M Z, WANG X, YANG X, et al. Increased risk of gestational diabetes mellitus in women with higher prepregnancy ambient PM_{2.5} exposure[J]. Sci Total Environ, 2020, 730: 138982.
- [15] ZHENG Z X, FENG X, ZHUANG L J. The effect of oxidative stress and antioxidants treatment on gestational diabetes mellitus

- outcome: a scoping review[J]. Cell Biochem Biophys, 2024, 82(4): 3003-3013.
- [16] ZHU H H, WU Y L, KUANG X Y, et al. Effect of PM_{2.5} exposure on circulating fibrinogen and IL-6 levels: a systematic review and meta-analysis[J]. Chemosphere, 2021, 271: 129565.
- [17] VISIEDO F, VÁZQUEZ-FONSECA L, ÁBALOS-MARTÍNEZ J, et al. Maternal elevated inflammation impairs placental fatty acids β-oxidation in women with gestational diabetes mellitus[J]. Front Endocrinol (Lausanne), 2023, 14: 1146574.
- [18] SEPEHRI B, DARBANI R, MEGARI-ABBASI M, et al. The effects of short-time air pollution, SO₂, and ozone on biochemical, histo-pathological, oxidative stress, and carcinogenesis related genes expressions in the liver of the rats[J]. Hum Exp Toxicol, 2024, 43: 9603271241263569.
- [19] LU C, WANG F M, LIU Q, et al. Effect of NO₂ exposure on airway inflammation and oxidative stress in asthmatic mice[J]. J Hazard Mater, 2023, 457: 131787.
- [20] TANG X Y, ZHOU J B, LUO F Q, et al. Air pollution and gestational diabetes mellitus: evidence from cohort studies[J]. BMJ Open Diabetes Res Care, 2020, 8(1): e000937.
- [21] BAI W, LI Y Y, NIU Y L, et al. Association between ambient air pollution and pregnancy complications: a systematic review and meta-analysis of cohort studies[J]. Environ Res, 2020, 185: 109471.
- [22] HE S T, JIANG T T, ZHANG D Y, et al. Association of exposure to multiple heavy metals during pregnancy with the risk of gestational diabetes mellitus and insulin secretion phase after glucose stimulation[J]. Environ Res, 2024, 248: 118237.
- [23] SONG J J, WU Y H, MA Y B, et al. A prospective cohort study of multmetal exposure and risk of gestational diabetes mellitus[J]. Sci Total Environ, 2024, 947: 174568.
- [24] 柏璐, 常海霞, 王霞, 等. 金属硫蛋白联合纳米碳酸钙治疗铅中毒患儿对其智力及血清 IgE、IGF-1 的影响[J]. 疑难病杂志, 2023, 22(7): 740-744.
- [25] XIU X Y, LIN Y Y, CHEN Z W, et al. Serum parameters of inflammatory markers as prognostic biomarkers with maternal-neonatal outcome in patients with GDM[J]. Front Med (Lausanne), 2024, 11: 1406492.

(张蕾 编辑)

本文引用格式: 顾梦薇, 丁丽娟, 钱丽. 空气污染物、重金属暴露与妊娠糖尿病发生风险的关系及机制研究[J]. 中国现代医学杂志, 2025, 35(23): 90-96.

Cite this article as: GU M W, DING L J, QIAN L. The relationship between air pollutants and heavy metal exposure and the risk of gestational diabetes mellitus, and the potential mechanisms[J]. China Journal of Modern Medicine, 2025, 35(23): 90-96.