

桑晨,贺颖倩,贾佳,等.PM_{2.5}及其组分短期暴露对空腹血糖和血脂的影响[J].中国环境科学,2025,45(2):1118-1126.

Sang C, He Y Q, Jia J, et al. Effects of short-term exposure to PM_{2.5} and its constituents on fasting plasms glucose and blood lipids [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):1118-1126.

PM_{2.5}及其组分短期暴露对空腹血糖和血脂的影响

桑晨¹,贺颖倩²,贾佳¹,陈浩¹,王敏珍^{1*} (1.兰州大学公共卫生学院,流行病学与卫生统计学研究所,甘肃兰州730000; 2.重庆市渝中区疾病预防控制中心,重庆400000)

摘要:为探究PM_{2.5}及其组分(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM和BC)短期暴露对人群空腹血糖和血脂的影响,以“金昌队列”为研究平台,从中国大气成分近实时追踪数据集获取金昌市2011~2015年PM_{2.5}及其组分日均浓度数据.通过将研究对象家庭住址经纬度信息与污染物数据匹配,以评估个体污染物暴露水平.采用广义估计方程分析PM_{2.5}及其组分短期暴露对糖脂指标的影响.运用广义相加混合模型绘制暴露-反应关系曲线,并进行分层分析.结果显示,PM_{2.5}及其组分(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM和BC)对人群血糖和血脂水平的影响存在一定的滞后效应,随着PM_{2.5}、SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM浓度的升高,FPG、TC、HDL-C和LDL-C呈上升趋势,TG呈下降趋势.PM_{2.5}和SO₄²⁻对男性人群的空腹血糖水平影响更显著;PM_{2.5}及其五种组分对女性、年龄>60岁、超重或肥胖、处于糖尿病前期及患高血压人群的血脂水平影响更显著.因此,PM_{2.5}及其组分的短期暴露与人群血糖和血脂水平异常相关,不同高风险人群需加强自我防护措施.

关键词: PM_{2.5}及其组分; 2型糖尿病; 空腹血糖; 血脂; 队列研究

中图分类号: X503 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-1118-09

Effects of short-term exposure to PM_{2.5} and its constituents on fasting plasms glucose and blood lipids. SANG Chen¹, HE Ying-qian², JIA Jia¹, CHEN Hao¹, WANG Min-zhen^{1*} (1.Institute of Epidemiology and Statistics, School of Public Health, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2.Yuzhong District Center for Disease Control and Prevention, Chongqing 400000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(2): 1118~1126

Abstract: The effects of PM_{2.5} and its constituents (SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, OM, BC) on fasting blood glucose and lipid levels in the short-term were examined in the “Jinchang Cohort”. The daily average concentrations of PM_{2.5} and its constituents from 2010 to 2015 in Jinchang City were sourced from China's Near Real-Time Air Pollutants dataset. Individual exposure was determined by matching the study subjects' residential addresses with pollution data. Generalized estimating equations were used to analyze the short-term effects of PM_{2.5} and its constituents on glucose and lipid indicators. Generalized additive mixed models were used to create exposure-response curves and perform stratified analyses. The findings showed that PM_{2.5} and its constituents had delayed effects on blood glucose and lipid levels. Specifically, higher concentrations of PM_{2.5}, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, and OM correlated with increased levels of FPG, TC, HDL-C, and LDL-C, while TG showed a decrease. PM_{2.5} and SO₄²⁻ exhibited more pronounced effects on fasting blood glucose levels in males, whereas PM_{2.5} and its five components had more significant impacts on lipid levels in females, individuals aged 60 years or older, those who are overweight or obese, individuals in prediabetic stages, and those with hypertension. Therefore, short-term exposure to PM_{2.5} and its components correlates with abnormal blood glucose and lipid levels in the population. Thus, various high-risk groups should adopt self-protection measures accordingly.

Key words: PM_{2.5} and its constituents; Type 2 Diabetes Mellitus; Fasting plasma glucose; Blood lipids; Cohort study

甘肃省金昌市位于中国西北地区,紧邻腾格里沙漠,其地势与气候特点,易形成沙尘天气^[1],加之对其丰富矿产资源的开采、加工和生产过程中产生的大量粉尘,对空气造成严重污染,空气污染作为影响健康的主要环境风险因素不断威胁人民群众的身体,也成为我国重要的公共卫生问题^[2].大气细颗粒物(PM_{2.5})是我国最主要的空气污染物之一,也是我国首要大气污染物^[3],其空气动力学直径

≤2.5μm,具有较大的比表面积,表面容易附着多种毒性成分,例如硫酸盐(SO₄²⁻)、硝酸盐(NO₃⁻)、铵盐(NH₄⁺)、黑碳(BC)、有机碳化合物(OM)等,约占总质量的70%~80%^[4].

收稿日期: 2024-07-30

基金项目: 甘肃省杰出青年基金(23JRRA1019);河北省糖尿病基础医学研究重点实验室开放课题(KF2023-02)

* 责任作者, 副教授, wangmzh@lzu.edu.cn

糖尿病的发病机制复杂,除传统因素外(肥胖、遗传等),多项流行病学与实验室研究结果表明空气污染是糖尿病发生发展的又一类潜在危险因素^[5-7].有研究表明 PM_{2.5} 或更小的颗粒污染物暴露与糖尿病患病率、发病率和死亡率增加有关^[5,8].此外,丹麦的一项队列研究不仅发现 PM_{2.5} 每增加 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,糖尿病发病率风险比(HR)为 1.39(95%CI:1.04,1.86),还发现相较于其他环境污染物(NO₂和 PM₁₀),PM_{2.5}与糖尿病发病风险的关联更为密切^[9].糖尿病作为一种典型的慢性代谢性疾病,血糖和血脂水平异常与糖尿病发病密切相关^[10].因此从这两个方面探讨 PM_{2.5} 及其组分短期暴露对糖尿病影响的作用机制具有一定的生物学意义.我国有研究发现 PM_{2.5} 及其组分(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM、BC)暴露均与空腹血糖水平升高有关^[11];而 SCOPA 队列研究仅发现 PM_{2.5}、NO₃⁻、BC 和 OM 短期暴露能使 FPG 水平升高^[4];以色列的一项横断面研究发现,PM_{2.5} 中期暴露导致 TC、TG 和 LDL-C 升高,HDL-C 降低^[12];中国的一项多中心研究发现 PM_{2.5} 及其组分((SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺和 OM)暴露均与 TC 和 TG 水平升高有相关性,BC 仅与 TG 有关联,对 TC 的影响无统计学意义^[13].

目前 PM_{2.5} 化学组分对空腹血糖和血脂的潜在影响尚未得到充分证明,其研究相对有限,且多集中在我国中部地区.因此,在我国西部地区开展更深入、更大规模的流行病学研究显得尤为重要.因此本研究将依托于“金昌队列”平台,开展 PM_{2.5} 及其组分对人群血糖和血脂的影响研究,评估 PM_{2.5} 及其组分与空腹血糖和血脂之间的关联,筛选 PM_{2.5} 及其组分致糖尿病的高风险人群,为控制空气污染和预防糖尿病提供数据支持.

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究选择金昌队列^[14]2011~2015 年期间纳入的个体作为研究对象.该队列于 2011 年 6 月成立,2013 年 12 月完成基线调查,以后每两年进行一次随访,于 2015 年 12 月完成第一期随访.本研究以基线和完成第一期随访人群为研究对象,纳入流程如图 1 所示,剔除家庭住址信息不完整及糖脂代谢指标缺失者^[15],最终纳入 45988 人次,其中包含部分研

究对象的两次信息.本研究由兰州大学公共卫生学院伦理委员会批准(伦理批准代码:2017-01).

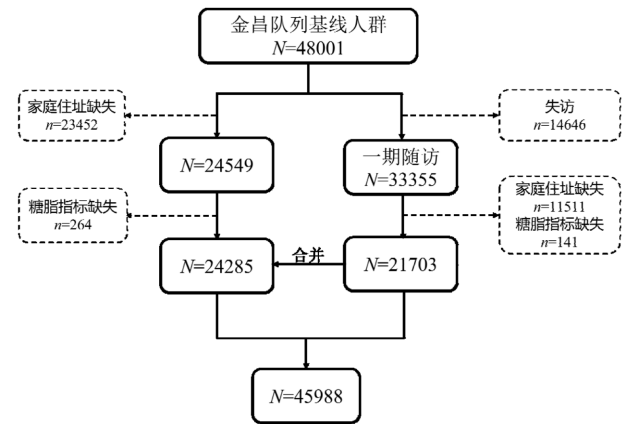


图 1 研究对象纳入流程

Fig.1 Flow chart of research object inclusion

1.2 现场调查

1.2.1 流行病学调查 由经过统一培训的调查员获得研究对象的知情同意后,使用自行设计的结构化调查问卷,以面对面的“一对一”访谈形式对研究对象进行调查.主要信息包括一般人口社会学特征(年龄、性别、职业、文化程度、家庭收入等)和生活行为方式(吸烟、饮酒、体育锻炼等),既往疾病史(心脑血管疾病史、癌症史和内分泌代谢性疾病史)及疾病家族史等.

1.2.2 健康体检与生化指标检测 由金川公司职工医院专业人员完成研究对象的体格检查(身高、体重、血压)与生化指标检测(血糖、脂蛋白).使用深圳双佳电子有限公司生产的电脑人体秤(型号:SK-X80/TCS-160D-W/H)测量身高和体重,测量结果精确到小数点后一位;采用韩国 AMPall 公司生产的电子血压计(型号:BP705)测量血压,记录连续两次测量结果的平均值.在体检当天采集研究对象空腹静脉血样本,并使用 Hitachi 日立公司全自动生化分析仪(型号:7600-020)对 FPG、TC、TG、LDL-C、HDL-C 指标进行检测.

1.3 环境数据来源

1.3.1 大气污染要素 通过中国大气成分近实时追踪数据集(Tracking Air Pollution in China,简称 TAP)^[16]官网,下载甘肃省金昌市 2011~2015 年间 PM_{2.5} 及其组分地面监测日均浓度数据,PM_{2.5} 组分数据主要包括碳质组分(OM、BC)以及水溶性离子

(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+)^[17].以研究对象的健康体检时间作为匹配变量,匹配体检时间前 7d $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分的平均值.

1.3.2 暴露评估 研究对象家庭住址的经纬度信息使用百度地图(<https://map.baidu.com>)获取,通过匹配来自 TAP 数据集的日均 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分数据来获得研究对象高精度的 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分暴露情况.研究短期(7d 内) $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分的单滞后(lag0-7d)和累积滞后(lag01-07)暴露效应,lag0-7 为前 0~7d 的污染物浓度,lag01-07 为前 0~7d 污染物浓度的滑动平均值.

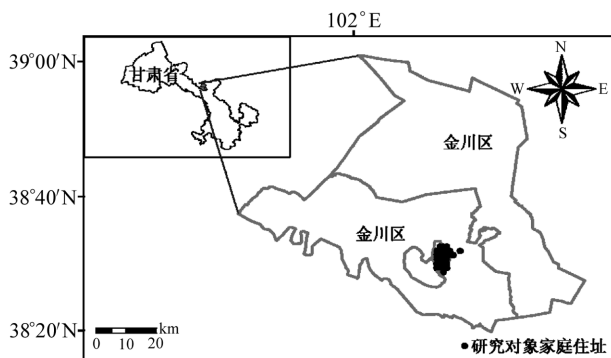


图2 研究对象家庭住址分布

Fig.2 Map of the home addresses of the study subjects

1.4 疾病诊断标准

(1)糖尿病:根据《中国 2 型糖尿病防治指南(2020 年版)》^[18]提供的诊断标准,2 型糖尿病定义为 $\text{FPG} \geq 126\text{mg/dL}$,和(或)自述临床诊断为 2 型糖尿病(患者需提供二级以上医院诊断证明),和(或)自述正在使用抗糖尿病药物.糖尿病前期定义为 $110\text{mg/dL} \leq \text{FPG} < 126\text{mg/dL}$.

(2)高血压:根据《中国高血压防治指南(2018 年修订版)》^[19]提供的诊断标准,高血压定义为收缩压(SBP) $\geq 140\text{mmHg}$ 和(或)舒张压(DBP) $\geq 90\text{mmHg}$,和(或)自述临床诊断为高血压(患者需提供二级以上医院诊断证明),和(或)自述正在使用降压药物.

(3)血脂异常:根据《中国成人血脂异常防治指南(2016 年修订版)》^[20]提供的诊断标准, $\text{TC} \geq 240\text{mg/dL}$, $\text{TG} \geq 200\text{mg/dL}$, $\text{LDL-C} \geq 160\text{mg/dL}$, $\text{HDL-C} < 40\text{mg/dL}$,自述临床诊断为血脂异常(患者需提供二级以上医院诊断证明),自述正在使用降脂药物.符合以上任

何一项即定义为血脂异常.

1.5 统计学分析

对研究对象的基线信息进行描述性统计分析.计量和计数资料分别采用均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm \text{SD}$)和例数和构成比 $n(\%)$ 描述,污染物数据以中位数和四分位数间距(IQR)表示.采用 Spearman 等级相关性检验评估 $\text{PM}_{2.5}$ 及其五种组分间的关联.采用广义估计方程(Generalized estimating equation model, GEE)^[21]纵向分析 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分短期暴露对糖脂指标的影响.模型中将研究对象的测量次序和唯一的队列编号作为随机效应项,再纳入年龄和性别、婚姻状况、文化程度、家庭人均月收入、职业、吸烟及饮酒状况、职业暴露状况、体育锻炼、高血压、BMI、蔬菜水果摄入情况、糖尿病家族史、血脂异常家族史、降脂(糖)药使用情况和 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分单日滞后(lag0-lag7d)和累积滞后(lag01-lag07d)浓度.鉴于污染物间相关性较高,仅纳入单个污染物构建单污染物模型.

根据赤池信息准则(Akaike's information criterion, AIC)^[22],选择暴露-反应关系曲线的最优节点,基于污染物对糖脂指标效应最大的滞后天数,在调整混杂因素后,运用广义相加混合模型(Generalized additive mixed model, GAMM),绘制 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分与血糖和血脂指标间的暴露-反应关系曲线^[23].最后,按照性别、年龄、BMI,糖尿病分期、是否患高血压进行分层分析.

2 结果

2.1 基线特征

如表 1 所示,本研究共纳入基线人群 24285 人,其中男性 13950 名(57.44%)、女性 10335 名(42.56%),平均年龄为 49.32 ± 8.60 岁,平均 BMI 为 $(24.22 \pm 6.09)\text{kg/m}^2$.职业为工人的人数占比最高(77.37%),主要工种有电工、钳工、皮带工、破碎工等;患高血压人群 7684 人(31.6%).表 2 中,FPG、TC、TG、LDL-C 和 HDL-C 水平在该人群中的平均值分别为 98.39, 185.00,171.13,53.06,113.72mg/dL.

2.2 2011~2015 年大气污染物的一般情况

如表 3 所示,2011~2015 年 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均水平为 $35.57\mu\text{g/m}^3$,略高于我国现行《环境空气质量标准》(GB3095-2012)中 $\text{PM}_{2.5}$ 年均二级浓度限值

(35μg/m³).研究期间 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM 和 BC 的平均值分别为 4.21,4.63,3.37,6.80,1.43μg/m³.如图 3,各组分与 PM_{2.5} 之间均存在正相关关系,且均具有统计学意义;在 PM_{2.5} 与各组分间,NO₃⁻与 NH₄⁺的相关性最强($r=0.95$),与 BC 的相关性最弱($r=0.34$);除 BC 外,PM_{2.5} 与其他组分的相关性均大于 0.50,存在中等强度相关。

表 1 基线人群的一般特征

Table 1 General characteristics of the baseline population

变量		N	%
		24285	
性别	男	13950	57.44
	女	10335	42.56
年龄(岁)(mean±SD)		49.32±8.60	
	≤60	19720	81.20
	>60	4565	18.80
BMI(kg/m ²)(mean±SD)		24.22±6.09	
	<18.5	740	3.04
	18.5~23.9	12226	50.34
	≥24	11319	46.62
家庭人均月收入(元)	<2000	12331	50.78
	2000-4999	11523	47.45
	≥5000	431	1.77
文化水平	初中及以下	11097	45.69
	高中/中专	7040	28.99
	本科及以上	6148	25.32
职业	干部	3246	13.37
	技术人员	799	3.29
	后勤	450	5.97
	工人	18790	77.37
糖尿病家族史	有	3374	13.89
	无	20911	86.11
高血压	是	7684	31.64
	否	16601	68.36
糖尿病分期	正常	17615	72.53
	糖尿病前期	4932	20.31
	糖尿病	1738	7.16

注:N,例数; \bar{x} ,平均数;SD,标准差;BMI,体质指数。

表 2 基线人群的糖脂水平情况

Table 2 The glucose and lipid levels of the baseline population

指标	$\bar{x} \pm SD$
FPG (mg/dL)	98.39±27.54
TC (mg/dL)	185.00±34.89
TG (mg/dL)	171.13±27.43
HDL-C (mg/dL)	53.06±14.50
LDL-C (mg/dL)	113.72±34.10

注: \bar{x} ,平均数;SD,标准差。

表 3 2011~2015 年金昌市 PM_{2.5} 及其组分分布特征(μg/m³)

Table 3 Distribution characteristics of PM_{2.5} and its constituents in Jinchang City from 2011~2015(μg/m³)

变量	\bar{x}	SD	Min.	P ₂₅	P ₅₀	P ₇₅	Max.	IQR
PM _{2.5}	35.57	9.34	16.00	28.29	34.71	41.86	80.57	13.57
SO ₄ ²⁻	4.21	1.67	0.72	3.03	4.10	5.17	11.85	2.14
NO ₃ ⁻	4.63	3.02	0.52	2.20	3.63	6.53	16.15	4.33
NH ₄ ⁺	3.37	1.76	0.51	1.96	3.07	4.37	10.66	2.41
OM	6.80	2.82	1.22	4.70	6.52	8.68	17.84	3.98
BC	1.43	0.56	0.28	1.04	1.36	1.74	4.89	0.70

注: $\bar{x} \pm SD$,均值±标准差;Min.,最小值;P₂₅,第25百分数;P₅₀,第50百分数;P₇₅,第75百分数;Max.,最大值;IQR,四分位数间距。

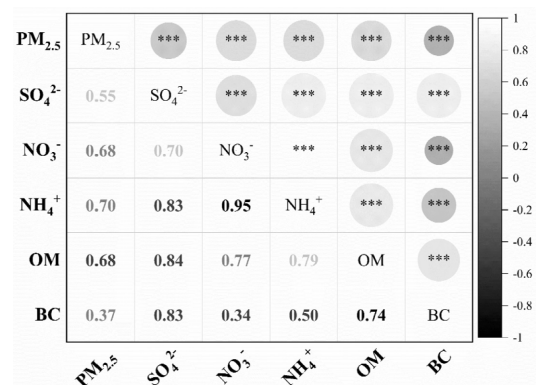


图 3 2011~2015 年金昌市 PM_{2.5} 及其组分间的相关性

Fig.3 Correlation between PM_{2.5} and its constituents in Jinchang City from 2011~2015

* $P<0.05$ ** $P<0.01$ *** $P<0.001$

2.3 PM_{2.5} 及其组分对血糖和血脂指标的影响

如图 4 所示,PM_{2.5}、NH₄⁺和 BC 短期暴露对人群 FPG 水平的滞后效应分别在 lag05、lag4 和 lag07 天最为显著($P<0.05$),PM_{2.5} 和 NH₄⁺浓度每增加一个 IQR, FPG 分别上升 0.44(95%CI:0.14,0.74)mg/dL 和 0.30 (95%CI:0.03,0.57)mg/dL, BC 浓度每增加一个 IQR, FPG 下降 0.75(95%CI:-1.16,-0.33)mg/dL;PM_{2.5} 及其五种组分对人群 TC、HDL-C 和 LDL-C 水平的滞后效应均在 lag07d 最为显著,其中 NO₃⁻对人群 TC、HDL-C 和 LDL-C 水平的影响最大,NO₃⁻每增加一个 IQR,TC、HDL-C 和 LDL-C 分别上升 3.51 (95%CI:3.05,3.97)mg/dL、1.09(95%CI:0.90,1.28) mg/dL、6.72(95%CI:6.28, 7.17)mg/dL;PM_{2.5}、SO₄²⁻和 NH₄⁺对 TG 水平的滞后效应分别在 lag07、lag4、lag3 天最为显著,PM_{2.5}、SO₄²⁻和 NH₄⁺浓度每增加一个 IQR,TG 水平分别降低 0.60 (95%CI:-0.89,-0.30) mg/dL、0.36(95%CI:-0.59,-0.14) mg/dL 和 0.32 (95%CI:-0.58,-0.06)mg/dL。

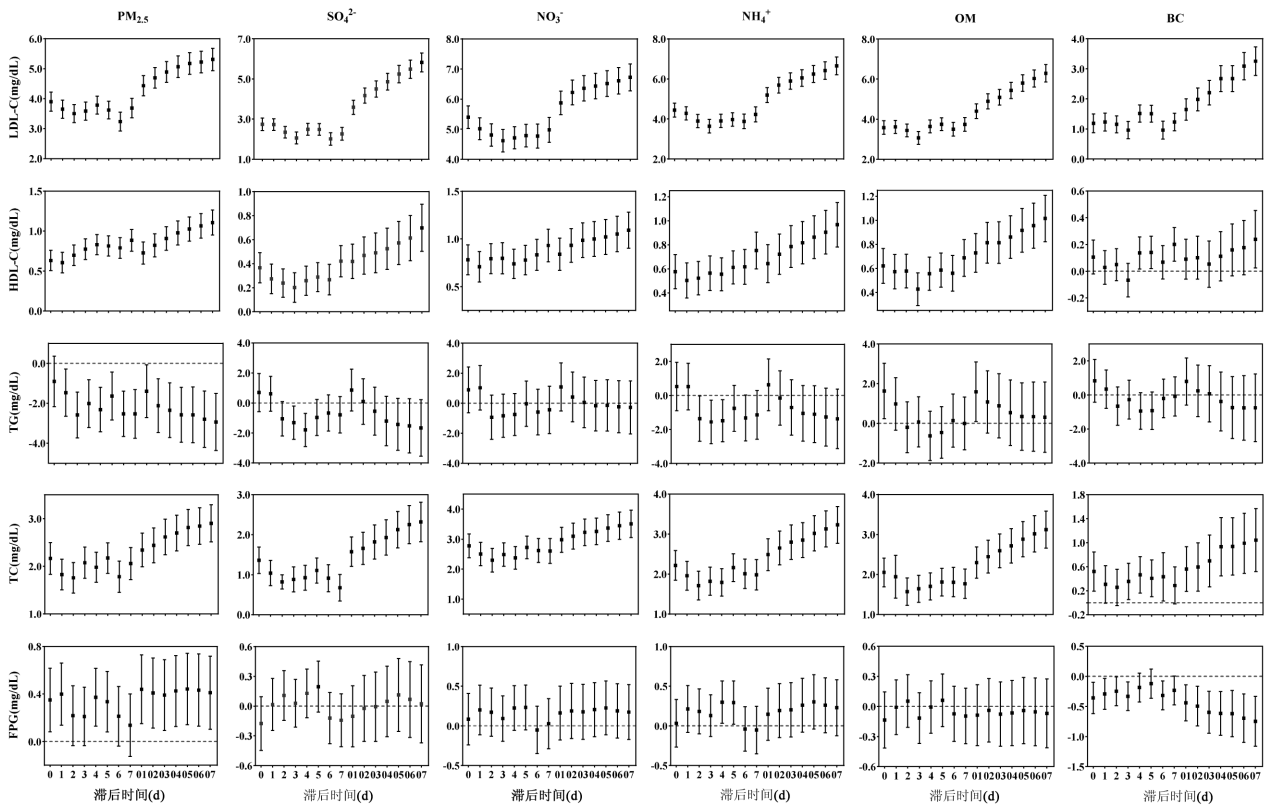


图 4 PM_{2.5}及其组分对人群血糖和血脂的影响

Fig.4 Effects of PM_{2.5} and its constituents on glucose and lipid in the population

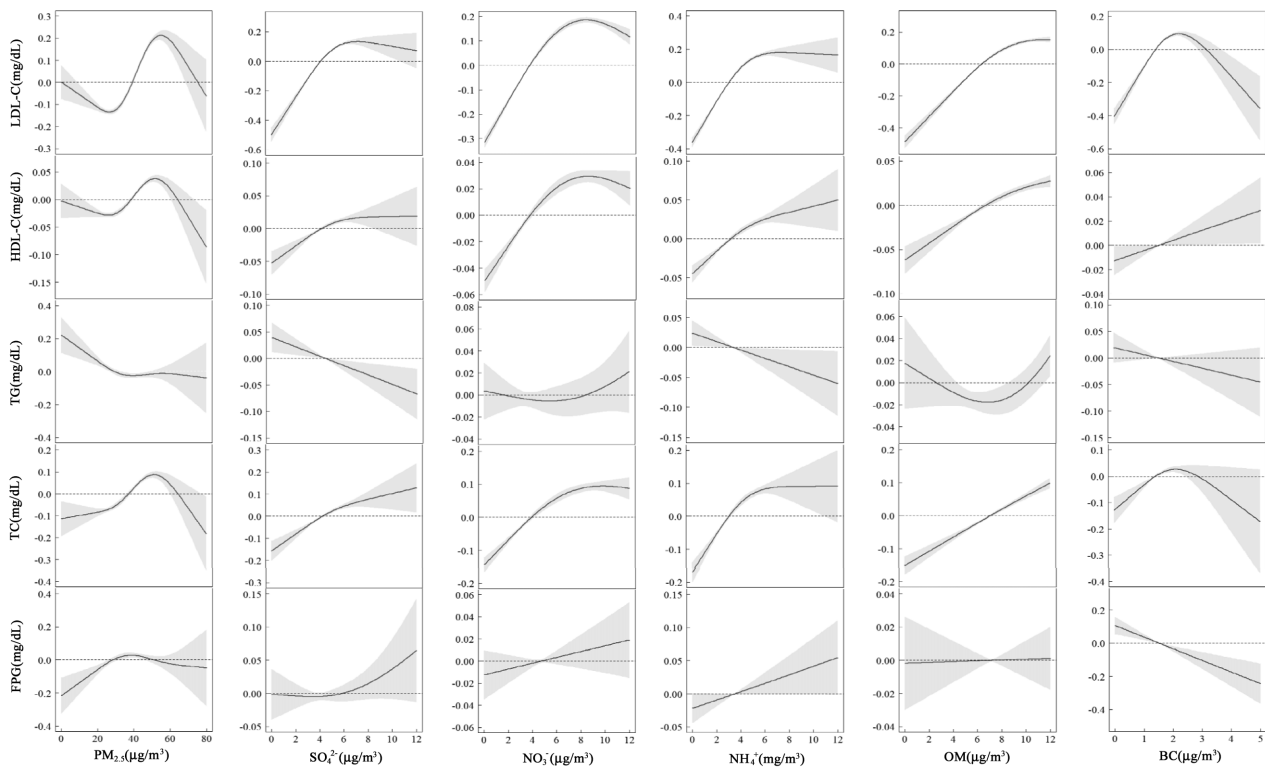


图 5 PM_{2.5}及其组分对糖脂指标的暴露反应曲线

Fig.5 Exposure response curve of PM_{2.5} and its constituents to glucose and lipid indicators

由图 5 所示,随着 PM_{2.5}、SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺和 OM 浓度的升高,FPG、TC、HDL-C 和 LDL-C 水平

呈上升趋势, TG 呈下降趋势, 其中 NO₃⁻和 NH₄⁺-FPG、OM-TC、SO₄²⁻和 NH₄⁺-TG 的暴露反应曲线均呈线性, 而 OM-FPG 的暴露反应曲线呈接近于“0”的直线。此外, 随着 BC 浓度的升高, TC、HDL-C 和 LDL-C 均呈上升趋势, FPG 和 TG 呈下降趋势, 且 BC-FPG、TG 和 HDL-C 的暴露反应曲线呈线性。

2.4 分层分析

如图 6 所示, PM_{2.5} 和 SO₄²⁻短期暴露对男性人群 FPG 水平升高有影响, 且 PM_{2.5} 对男性人群 FPG 水平升高的影响更显著, BC 暴露可降低女性、超重或肥胖人群 FPG 水平, 其组间差异具有统计学意义。PM_{2.5}、NO₃⁻、NH₄⁺和 OM 暴露对年龄<60 岁、患高血压人群 TC 水平升高有影响, 其组间差异具有统计学意义,

其中 NO₃⁻对该特征人群 TC 水平的影响最显著; PM_{2.5}、NO₃⁻和 NH₄⁺对女性、年龄≥60 岁人群 TG 水平降低有影响, 相较于血糖正常人群, SO₄²⁻、NH₄⁺和 BC 对糖尿病前期人群的 TG 水平影响更显著, 其中 SO₄²⁻对糖尿病前期人群的 TG 水平影响最显著; PM_{2.5}、SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺和 OM 对女性、年龄≥60 岁和患高血压人群 HDL-C 水平升高有影响, 相较于血糖正常人群, PM_{2.5}、SO₄²⁻和 BC 对糖尿病前期人群的 HDL-C 水平影响更显著, 其中 PM_{2.5}对糖尿病前期人群的 HDL-C 水平影响最显著; PM_{2.5}及其五种组分对女性、年龄≥60 岁、超重或肥胖、糖尿病前期和患高血压人群 LDL-C 水平升高有影响, 其中 NO₃⁻对该特征人群 LDL-C 水平升高影响最显著。

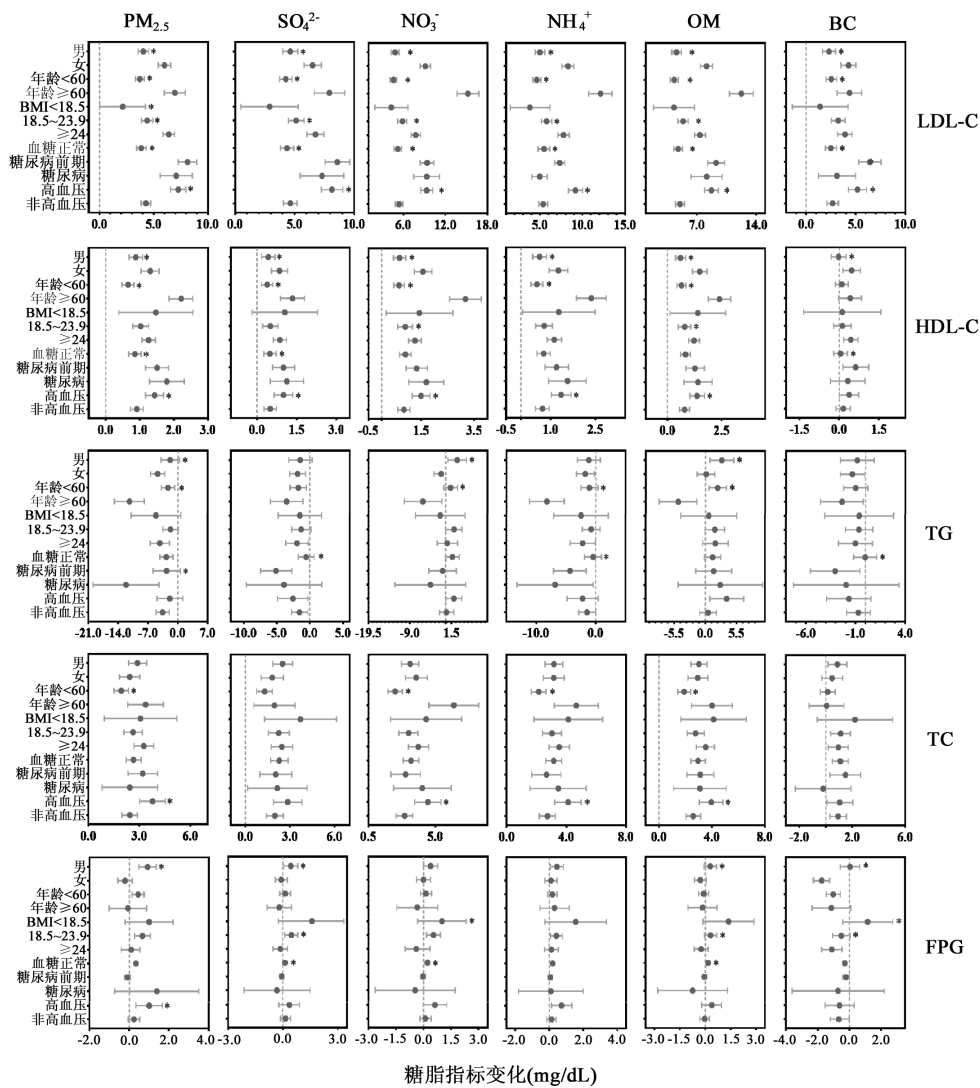


图 6 PM_{2.5}及其组分浓度每增加一个四分位间距与不同亚组人群血糖和血脂的关系

Fig.6 Association between an increase of one IQR in the concentrations of PM_{2.5} and its constituents and glucose and lipid levels across different subgroups

* 组间差异具有统计学意义, P<0.05

3 讨论

本研究基于金昌队列平台,采用纵向研究揭示了 PM_{2.5} 及其组分短期暴露可引起人群空腹血糖和血脂水平紊乱,其中 PM_{2.5}、SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 与 FPG 水平呈正相关、PM_{2.5} 及其五种组分与 TC、HDL-C 和 LDL-C 水平呈正相关,与 TG 水平呈负相关;男性人群 FPG 水平易受到 PM_{2.5} 和 SO₄²⁻ 的影响,女性、年龄 >60 岁、超重肥胖、处于糖尿病前期及患高血压人群血脂水平易受到 PM_{2.5} 及其组分的影响。

3.1 PM_{2.5} 及其组分可导致糖脂指标异常

我国一项基于空气污染亚临床结局 (Sub-Clinical Outcome of Polluted Air, SCOPA) 的多中心队列研究表明,PM_{2.5} 与空腹血糖水平升高相关,PM_{2.5} 浓度每增加一个 IQR,空腹血糖增加 0.35mmol/L(95%CI:0.25,0.46)^[24]。Zhou 等^[11]在我国中老年人中开展的研究发现 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM 和 BC 长期暴露能明显升高总人群和非糖尿病人群 FPG 水平。来自南印度的一项横断面研究发现住宅 PM_{2.5} 中的 BC 与较高的血糖水平呈负相关^[25],以上研究与本研究结果相似。

现有研究关于 PM_{2.5} 组分短期暴露对血脂影响的证据有限且关联结果多不一致。我国的一项对成年人开展纵向研究发现,PM_{2.5} 浓度越高,TC、LDL-C 越高,HDL-C 越低^[26]。美国的一项队列研究表明,PM_{2.5} 每增加 1mg/m³ 对应于 TC 增加 1.62% (95%CI: 1.13,2.11)、LDL-C 增加 1.70%(95%CI:1.02, 2.37),TG 和 HDL-C 变化无统计学意义^[27]。He 等^[28]研究发现 BC 短期暴露可使其 HDL-C 升高,SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 和 OM 对 HDL-C 的影响无统计学意义,未观察到五种组分(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM 和 BC) 与 TC、TG 和 LDL-C 间的关联。本研究发现 PM_{2.5} 暴露与 TG 水平呈负相关,原因可能是本研究对象在工作和休闲时间的体力活动水平较高,可降低 TG 水平,这与来自河南农村^[29]的一项队列研究结果一致,不同的暴露源和不同的生活方式会使研究对象 TG 水平与环境空气污染之间的关系更加复杂。美国一项对健康成年人进行的研究结果表明,PM_{2.5} 和 HDL-C 之间存在正向关系,PM_{2.5} 每增加 50μg/m³,HDL-C 就会增加 1.943mg/dL(P 值:0.012)^[30],与本研究结果一致。本研究发现 PM_{2.5} 暴露与 HDL-C 成正

相关的原因可能是研究对象均是居住在有“中国镍都”之称的甘肃省金昌市,可吸入镍组分含量高的空气污染物。一项动物实验发现,镍暴露与大鼠胆固醇降低有关^[31],且来自广州的一项小组研究发现,PM_{2.5} 中的镍和 HDL-C 之间呈正相关^[28]。PM_{2.5} 及其组分与糖脂水平之间的关联强度和影响幅度在各研究之间存在差异,可能与研究设计、不同地区及时期 PM_{2.5} 化学成分的差异,以及研究人群易感性不同等有关^[32-33]。

目前关于 PM_{2.5} 及其组分暴露引发糖脂代谢异常的潜在生物学机制仍尚待明确。普遍接受的假设是 PM_{2.5} 的可溶性成分可以通过气-血屏障进入血液循环并与其他组织和器官相互作用,从而引起自主神经系统失衡、氧化应激、全身性炎症、脂肪组织炎症和胰岛素抵抗,最终导致糖脂代谢异常^[34-35]。

3.2 PM_{2.5} 及其组分对血糖和血脂的影响在不同亚组人群中具有差异

男性 FPG 水平易受到 PM_{2.5} 和 SO₄²⁻ 的影响。本研究结果与大多数研究结果一致^[8,36-37],例如,一项全国性调查报告称,PM_{2.5} 暴露男性患 2 型糖尿病的患病率和空腹血糖变化的风险高于女性⁰;我国一项针对农村人口的队列研究发现 PM_{2.5} 和 SO₄²⁻ 暴露更易升高男人人群的 FPG 水平⁰;还有研究表明,男性比女性更容易发现 PM_{2.5} 与空腹血糖水平或死亡率的关联^[37]。

女性、年龄 >60 岁、超重肥胖、处于糖尿病前期及患高血压人群血脂易受到 PM_{2.5} 及其组分的影响。He 等^[28]的研究中发现 PM_{2.5} 成分与血脂的关联性在女性中比男性中更强。北美一项横断面研究发现,在老年人中观察到 PM_{2.5} 成分对血脂异常的影响更强^[38]。我国多项队列研究发现,女性、老年人群和超重和肥胖参与者的空气污染物和血脂之间存在更强的关联^[13,39-40],以上研究均于本研究结果一致。此外,有研究发现,相较于血糖正常人群,糖尿病前期人群易受到 PM_{2.5} 的影响且易发生血脂异常^[41-44]。这可能与 PM_{2.5} 及其组分对机体产生的氧化应激和全身炎症反应有关^[45-47],最终出现脂代谢紊乱,血脂水平升高^[48]。中国的一项多城市研究发现 PM_{2.5} 及其组分暴露对患高血压人群血脂水平的影响更显著^[49],这与本研究结果一致。通常,高血压伴随着由于代谢能力下降而导致的血脂增加^[50],另一项对高血压住

院患者的研究报告称,脂质成分[TG、TC、HDL-C、LDL-C]都可能易受到空气污染的影响^[51]。多数患高血压人群存在脂质异常,加之空气污染,可能会使人群脂质代谢异常加剧。

4 局限性

尽管本研究依托大型队列人群,探讨 PM_{2.5} 及其组分短期暴露对空腹血糖和血脂的影响,发现了有意义的研究结果,但仍存在一定的局限性,首先,由于缺乏金属的相关数据,无法评估 PM_{2.5} 质量中的金属对人群血糖和血脂的影响;其次,研究中未纳入 PM₁₀ 与 O₃ 作为混杂因素,忽略了污染物及其组分长期暴露对人群的影响,可能在一定程度上使结论产生偏差;第三,在本研究中缺乏研究对象时间-活动模式相关信息,忽略了职业暴露和户外活动暴露情况;第四,本研究 PM_{2.5} 及其组分浓度数据是使用多尺度空气质量模型模拟获得,与真实观测数据可能存在差异。

5 结论

5.1 PM_{2.5} 及其五种组分(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM 和 BC)对人群血糖和血脂水平的影响存在一定的滞后效应,随着 PM_{2.5}、SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、OM 浓度的升高,FPG、TC、HDL-C 和 LDL-C 呈上升趋势,TG 呈下降趋势。

5.2 男性人群的 FPG 水平对 PM_{2.5} 和 SO₄²⁻ 暴露较为敏感;女性、年龄≥60 岁、超重或肥胖、处于糖尿病前期及患高血压人群的血脂指标对 PM_{2.5} 及其五种组分暴露较为敏感。因此,金昌市需加强空气质量监测与信息公开,推广清洁能源的使用,减轻空气污染对人群的伤害,易感人群则需加强健康防护,以降低与环境污染相关的糖尿病患病率。

参考文献:

[1] 冉利群.金昌市人居环境空气质量评价及预测研究 [D]. 兰州:兰州大学, 2013.
Rang L Q. The assessment and prediction of living environmental air quality in Jinchang City [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.

[2] GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990~2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 [J]. *Lancet*, 2020,396(10258):1223-1249.

[3] 2021 年中国生态环境状况公报(摘录) [J]. *环境保护*, 2022,50(12): 61-74.

China Ecological Environment Status Bulletin 2021 (Excerpt) [J]. *Environmental Protection*, 2022,50(12):61-74.

[4] Tian Y, Fang J, Wang F, et al. Linking the Fasting Blood Glucose Level to Short-Term-Exposed Particulate Constituents and Pollution Sources: Results from a Multicenter Cross-Sectional Study in China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2022,56(14):10172-10182.

[5] Strak M, Janssen N, Beelen R, et al. Long-term exposure to particulate matter, NO₂ and the oxidative potential of particulates and diabetes prevalence in a large national health survey [J]. *Environment International*, 2017,108:228-236.

[6] Renzi M, Cerza F, Gariazzo C, et al. Air pollution and occurrence of type 2 diabetes in a large cohort study [J]. *Environment International*, 2018,112:68-76.

[7] Wang M, Jin Y, Dai T, et al. Association between ambient particulate matter PM₁₀ and incidence of diabetes in northwest of China: A prospective cohort study [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020,202:110880.

[8] Liu C, Yang C, Zhao Y, et al. Associations between long-term exposure to ambient particulate air pollution and type 2 diabetes prevalence, blood glucose and glycosylated hemoglobin levels in China [J]. *Environment International*, 2016,92-93:416-421.

[9] Hansen A B, Ravnskjaer L, Loft S, et al. Long-term exposure to fine particulate matter and incidence of diabetes in the Danish Nurse Cohort [J]. *Environment International*, 2016,91:243-50.

[10] Moro E, Gallina P, Pais M, et al. Hypertriglyceridemia is associated with increased insulin resistance in subjects with normal glucose tolerance: evaluation in a large cohort of subjects assessed with the 1999 World Health Organization criteria for the classification of diabetes [J]. *Metabolism*, 2003,52(5):616-619.

[11] Zhou P, Mo S, Peng M, et al. Long-term exposure to PM_{2.5} constituents in relation to glucose levels and diabetes in middle-aged and older Chinese [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 245:114096.

[12] Yitshak Sade M, Kloog I, Liberty I F, et al. The association between air pollution exposure and glucose and lipids levels [J]. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2016,101(6):2460-7.

[13] Lei R, Wang Z, Wang X, et al. Effects of long-term exposure to PM_{2.5} and chemical constituents on blood lipids in an essential hypertensive population: A multi-city study in China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022,242:113867.

[14] Bai Y, Yang A, Pu H, et al. Cohort profile: The China metal-exposed workers cohort study (Jinchang Cohort) [J]. *International Journal of Epidemiology*, 2017,46(4):1095-1096e.

[15] 贺颖倩,王敏珍,郑山,等.PM₁₀ 短期暴露对人群空腹血糖和血脂的影响 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(6):2911-2920.
He Y Q, Wang M Z, Zheng S, et al. Effects of short-term exposure to PM₁₀ on fasting plasma glucose and blood lipids [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(6):2911-2920.

[16] Geng G, Zhang Q, Tong D, et al. Chemical composition of ambient PM_{2.5} over China and relationship to precursor emissions during 2005~2012 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017,17(14): 9187-9203.

[17] Liu, S., Geng, G., Xiao, Q., et al. Tracking daily concentrations of PM_{2.5} chemical composition in China since 2000 [J]. 2022, *Environmental Science and Technology*, 56,16517-16527.

[18] 中华医学会糖尿病学分会.中国 2 型糖尿病防治指南(2020 版) [J]. *国际内分泌代谢杂志*, 2021,41(5):482-548.
Chinese Diabetes Society. Chinese guidelines for the prevention and treatment of type 2 diabetes mellitus (2020 edition) [J]. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*, 2021,41(5):482-548.

[19] 刘力生.中国高血压防治指南(2018 年修订版) [J]. *中国心血管杂志*, 2019,24(1):24-55.
Liu L S. Chinese guidelines for the prevention and treatment of

- hypertension (2018revision) [J]. Chinese Journal of Cardiology, 2019, 24(1):24-55.
- [20] 诸骏仁,高润霖,赵水平,等.中国成人血脂异常防治指南(2016年修订版) [J]. 中国循环杂志, 2016,31(10):937-953.
- Zhu J R, Gao R L, Zhao P L, et al. Chinese guidelines for the prevention and treatment of dyslipidemia in adults (2016 revision) [J]. Chinese Journal of Circulation, 2016,31(10):937-953.
- [21] Chen L, Zhou Y, Li S, et al. Air pollution and fasting blood glucose: A longitudinal study in China [J]. Science of the Total Environment, 2016;541:750-755.
- [22] Guo P, Feng W, Zheng M, et al. Short-term associations of ambient air pollution and cause-specific emergency department visits in Guangzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2018,613-614:306-313.
- [23] Zhang W, Wang Y, Li W, et al. The Association between the baseline and the change in neutrophil-to-lymphocyte ratio and short-term mortality in patients with acute respiratory distress syndrome [J]. Frontiers in Medicine, 2021,8:636869.
- [24] Du X, Zhang Y, Liu C, et al. Fine particulate matter constituents and sub-clinical outcomes of cardiovascular diseases: A multi-center study in China [J]. Science of the Total Environment, 2021,759:143555.
- [25] Curto A, Ranzani O, Milà C, et al. Lack of association between particulate air pollution and blood glucose levels and diabetic status in peri-urban India [J]. Environment International, 2019,131:105033.
- [26] Liu L, Zhang Y, Yang Z, et al. Long-term exposure to fine particulate constituents and cardiovascular diseases in Chinese adults [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,416:126051.
- [27] McGuinn L A, Schneider A, McGarrah R W, et al. Association of long-term PM_{2.5} exposure with traditional and novel lipid measures related to cardiovascular disease risk [J]. Environment International, 2019,122:193-200.
- [28] He Z Z, Guo P Y, Xu S L, et al. Associations of particulate matter sizes and chemical constituents with blood lipids: A panel study in Guangzhou, China [J]. Environmental Science and Technology, 2021, 55(8):5065-5075.
- [29] Mao S, Chen G, Liu F, et al. Long-term effects of ambient air pollutants to blood lipids and dyslipidemias in a Chinese rural population [J]. Environmental Pollution, 2020,256:113403.
- [30] O'Toole TE, Hellmann J, Wheat L, et al. Episodic exposure to fine particulate air pollution decreases circulating levels of endothelial progenitor cells [J]. Circulation Research, 2010,107(2):200-203.
- [31] Rehman K, Fatima F, Waheed I, et al. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences [J]. Journal of Cellular Biochemistry, 2018,119(1):157-184.
- [32] Kang J, Liao J, Xu S, et al. Associations of exposure to fine particulate matter during pregnancy with maternal blood glucose levels and gestational diabetes mellitus: Potential effect modification by ABO blood group [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020,198:110673.
- [33] Sielski J, Kaziród-Wolski K, Józwiak MA, et al. The influence of air pollution by PM_{2.5}, PM₁₀ and associated heavy metals on the parameters of out-of-hospital cardiac arrest [J]. Science of The Total Environment, 2021,788:147541.
- [34] Su T Y, Jeng H A, Hsu Y T, et al. Impact of heavy metals in ambient air on insulin resistance of shipyard welders in Northern Taiwan [J]. Sustainability, 2021,13.
- [35] Wang W, Zhou J, Chen M, et al. Exposure to concentrated ambient PM_{2.5} alters the composition of gut microbiota in a murine model [J]. Particle and Fibre Toxicology, 2018,15(1):17.
- [36] Kang N, Wu R, Liao W, et al. Association of long-term exposure to PM_{2.5} constituents with glucose metabolism in Chinese rural population [J]. Science of The Total Environment, 2023,859(Pt 2): 160364.
- [37] Zhou P, Hu J, Yu, et al. Short-term exposure to fine particulate matter constituents and mortality: case-crossover evidence from 32 counties in China [J]. Science China-life sciences, 2022,65(12):2527-2538.
- [38] Rajkumar S, Young B N, Clark M L, et al. Household air pollution from biomass-burning cookstoves and metabolic syndrome, blood lipid concentrations, and waist circumference in Honduran women: A cross-sectional study [J]. Environmental Research, 2019,170:46-55.
- [39] Yang S, Hong F, Li S, et al. The association between chemical constituents of ambient fine particulate matter and obesity in adults: A large population-based cohort study [J]. Environmental Research, 2023,231(Pt 2):116228.
- [40] Yang B Y, Bloom M S, Markevych I, et al. Exposure to ambient air pollution and blood lipids in adults: The 33 Communities Chinese Health Study [J]. Environment International, 2018,119:485-492.
- [41] 张芳娣,马玲娣,何继宏,等.糖尿病前期人群血脂异常及危险因素分析 [J]. 现代诊断与治疗, 2019,30(2):266-267.
- Zhang F D, Ma L D, He J H, et al. Analysis of dyslipidemia and risk factors in prediabetic patients [J]. Modern Diagnosis and Therapy, 2019,30(2):266-267.
- [42] 陶然,周金意,苏健,等.江苏省成年人血脂异常与糖尿病关系 [J]. 中国公共卫生, 2015,31(5):558-562.
- Tao R, Zhou J Y, Su J, et al. Relationship between dyslipidemia and diabetes mellitus among adult residents in Jiangsu province [J]. China Public Health, 2015,31(5):558-562.
- [43] 赵娅,万沁.糖尿病前期人群血脂特点及其对糖尿病前期转归的影响研究 [J]. 中国全科医学, 2016,19(1):54-58).
- Zhao Y, Wan Q. Characteristics of blood lipid level of prediabetes patients and its influence on patients' outcome [J]. Chinese General Practice, 2016,19(1):54-58.
- [44] Liang Z, Zhao L, Qiu J, et al. PM_{2.5} exposure increases the risk of preterm birth in pre-pregnancy impaired fasting glucose women: A cohort study in a Southern province of China [J]. Environmental Research, 2022,204(Pt D):112403.
- [45] Lucht S, Hennig F, Moebus S, et al. Heinz nixdorf recall study investigative group. Air pollution and diabetes-related biomarkers in non-diabetic adults: A pathway to impaired glucose metabolism? [J]. Environment International, 2019,124:370-392.
- [46] Ruckerl R, Hampel R, Breitner S, et al. Associations between ambient air pollution and blood markers of inflammation and coagulation/fibrinolysis in susceptible populations [J]. Environment International, 2014,70:32-49.
- [47] Li H, Cai J, Chen R, et al. Particulate matter exposure and stress hormone levels: A randomized, double-blind, crossover trial of air purification [J]. Circulation, 2017,136(7):618-627.
- [48] 龚全友,侯芳丽,刘华,等.2型糖尿病及前期患者血脂水平变化及其与胰岛素抵抗的关系 [J]. 中国合理用药探索, 2019,16(5):37-40.
- Gong Q Y, Hou F L, Liu H, et al. Changes of blood lipid levels in patients with Type 2Diabetes Mellitus and pre-diabetes mellitus and their relationship with insulin resistance [J]. Exploration of rational drug use in China, 2019,16(5):37-40.
- [49] Chen H, Vlahos R, Bozinovski S, et al. Effect of short-term cigarette smoke exposure on body weight, appetite and brain neuropeptide Y in mice [J]. Neuropsychopharmacology, 2005,30(4):713-719.
- [50] Zicha J, Kunes J, Devynck MA. Abnormalities of membrane function and lipid metabolism in hypertension: a review [J]. American Journal of Hypertension, 1999;12(3):315-331.
- [51] Xiao S, Liu R, Wei Y, et al. Air pollution and blood lipid markers levels: Estimating short and long-term effects on elderly hypertension inpatients complicated with or without type 2diabetes [J]. Environmental Pollution, 2016,215:135-140.

作者简介: 桑晨(2001-),女,新疆喀什人,兰州大学硕士研究生,主要从事于环境流行病学研究.sangch@lzu.edu.cn.