

论著 DOI: 10.16369/j.oher.issn.1007-1326.2025.240770

· 调查研究 ·

# 铅暴露工人心律失常及其危险因素研究

龚雅君<sup>1,2</sup>, 胡佩霞<sup>2,3</sup>, 张王剑<sup>4</sup>, 农骐郢<sup>2</sup>, 黄永顺<sup>1,2</sup>

1. 南方医科大学公共卫生学院, 广东 广州 510515; 2. 广东省职业病防治院, 广东 广州 510300;  
3. 山西医科大学公共卫生学院, 山西 太原 030001; 4. 中山大学公共卫生学院, 广东 广州 510080

**摘要:**目的 评估职业铅暴露与其他职业因素的交互作用对工人心律失常的影响, 识别潜在的危险因素, 保护铅暴露工人的职业健康。方法 以广东省2021年重点职业病监测中2 943名职业铅暴露工人为研究对象, 采集其人口学特征和体检数据, 进行横断面研究。采用混合效应 logistic 回归模型评估铅暴露对心律失常的影响, 进一步进行交互作用分析和亚组分析, 探索潜在的易感人群。结果 研究对象血铅水平范围为(14.14 ~ 582.23)  $\mu\text{g/L}$ , 血铅水平异常915人(占30.09%), 患有心律失常392人, 患病率为13.32%。男性、小型企业、私营经济企业、制造业企业的工人, 年龄 > 37岁、工龄 > 36个月、接触粉尘、接触噪声以及有心律失常的工人人数在血铅水平异常组的占比更高, 差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。混合效应 logistic 回归分析结果显示: 控制其他混杂因素后, 血铅水平每升高1个四分位数间距(IQR), 工人患心律失常的风险增加40.6%(OR = 1.406,  $P < 0.001$ )。亚组分析结果显示: 血铅水平每升高1个IQR, 无粉尘暴露工人心律失常的风险增加43.9%(OR = 1.439,  $P < 0.001$ ); 无硫酸及三氧化硫暴露的工人患心律失常的风险增加46.2%(OR = 1.462,  $P < 0.001$ ), 非噪声暴露的工人患心律失常的风险增加37.5%(OR = 1.375,  $P < 0.001$ )。在私营企业工作的工人中, 血铅水平每升高1个IQR, 心律失常患病风险增加41.3%(OR = 1.413,  $P < 0.001$ ); 在外商投资企业工作的工人中, 血铅水平每升高1个IQR, 心律失常患病风险增加82.8%(OR = 1.828,  $P < 0.001$ )。结论 血铅水平与工人心律失常患病风险之间存在正向关联, 且这种关联受经济类型及其他职业病危害因素影响。

**关键词:** 铅暴露; 心律失常; 血铅水平; 危险因素; 交互作用; 亚组分析

中图分类号: R131 文献标志码: A 文章编号: 1007-1326(2025)03-0310-07

引用: 龚雅君, 胡佩霞, 张王剑, 等. 铅暴露工人心律失常及其危险因素研究[J]. 职业卫生与应急救援, 2025, 43(3): 310-315; 394.

**Study on arrhythmia and its risk factors of lead-exposed workers** GONG Yajun<sup>1, 2</sup>, HU Peixia<sup>2, 3</sup>, ZHANG Wangjian<sup>4</sup>, NONG Qiyong<sup>2</sup>, HUANG Yongshun<sup>1, 2</sup> (1. School of Public Health, Southern Medical University, Guangzhou, Guangdong 510515, China; 2. Guangdong Institute of Occupational Disease Control, Guangzhou, Guangdong 510300, China; 3. School of Public Health, Shanxi Medical University, Taiyuan, Shanxi 030001, China; 4. School of Public Health, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510080, China)

**Abstract: Objective** To evaluate the effect of the interaction of occupational lead exposure with other occupational factors on arrhythmia in workers, identify potential risk factors, and protect the occupational health of lead-exposed workers.

**Methods** A cross-sectional study was conducted with 2 943 occupationally lead-exposed workers from the program of key occupational disease surveillance in Guangdong Province in 2021. Demographic characteristics and physical examination data were collected. A mixed-effects logistic regression model was used to evaluate the effect of lead exposure on arrhythmia. Further interaction analysis and subgroup analysis were conducted to explore potential susceptible populations.

**Results** The blood lead levels of these study subjects ranged from 14.14 to 582.23  $\mu\text{g/L}$ . There were 915 individuals (30.09%) with abnormal blood lead levels. A total of 392 individuals had arrhythmia, with a prevalence of 13.32%. Males, workers in small-sized enterprises, private enterprises, and manufacturing industries; those aged > 37 years, with working time > 36 months, exposed to dust, exposed to noise, and with a history of arrhythmia accounted for a higher proportion of workers in the group with abnormal blood lead levels, and the differences were all statistically significant (all  $P < 0.05$ ). Mixed effects logistic regression analysis showed that the risk of arrhythmia increased by 40.6% in workers for every one interquartile range (IQR) increase in blood lead level (OR = 1.406,  $P < 0.001$ ) after controlling for other confounding

基金项目: 广东省自然科学基金面上项目(2023A1515012756); 广东省职业病防治院领军人才项目(Z2024-03)

作者简介: 龚雅君(1997—), 女, 硕士在读

通信作者: 黄永顺, E-mail: gdpec2006@126.com

factors. Subgroup analysis revealed that for every one IQR increase in blood lead level, the risk of arrhythmia increased by 43.9% (OR = 1.439,  $P < 0.001$ ) in workers without dust exposure; the risk of arrhythmia increased by 46.2% (OR = 1.462,  $P < 0.001$ ) in workers without sulfuric acid and sulfur trioxide exposure; and the risk of arrhythmia increased by 37.5% (OR = 1.375,  $P < 0.001$ ) in workers without noise exposure. Among workers in private enterprises, the prevalence risk of arrhythmia increased by 41.3% (OR = 1.413,  $P < 0.001$ ) for every one IQR increase in blood lead level. Among workers in foreign-invested enterprises, the prevalence risk of arrhythmia increased by 82.8% (OR = 1.828,  $P < 0.001$ ) for every one IQR increase in blood lead level. **Conclusions** There was a significant positive association between blood lead level and the risk of arrhythmia among lead-exposed workers, and this association was influenced by economic type and other occupational hazard factors.

**Keywords:** lead exposure; arrhythmia; blood lead level; risk factors; interaction; subgroup analysis

心律失常是一种常见的心血管疾病,主要表现为心脏冲动的节律、频率、传导速度或激动次序等的异常<sup>[1]</sup>。心律失常与心肌病、心力衰竭、脑卒中等疾病密切相关,接近90%的心脏病引起的急性死亡可归因于心律失常<sup>[2]</sup>。另外,严重的心律失常还会导致心源性猝死<sup>[3]</sup>。据统计,我国约有2 000万心律失常患者,每年超过50万的心源性猝死中有80%以上是由恶性心律失常引起的<sup>[4-5]</sup>。

流行病学研究<sup>[6-8]</sup>已经证实,铅暴露能增加心血管疾病发生风险,职业性铅暴露可能与心电图异常结果相关<sup>[9]</sup>。心律失常作为临床上最常见的心血管不良事件之一,可能会导致心脏衰竭,甚至诱发猝死<sup>[10-11]</sup>。目前关于铅的职业暴露与心律失常之间关系的研究较少,土耳其一项研究<sup>[12]</sup>结果表明铅暴露的工人患房性和室性心律失常的风险高于对照组;国内一项研究<sup>[13]</sup>比较了不同血铅水平工人的心电图异常情况,结果表明血铅水平超标情况越严重,对心电图异常的影响越大。这些研究虽然在一定程度上反映了铅暴露水平与心律失常的关系,但均受到样本量的限制,统计效能不足。另外,以往研究往往只关注铅暴露等单一职业因素对心律失常的影响,而忽略了铅暴露与其他职业因素的交互作用。基于此,本研究拟利用广东省2021年重点职业病监测的数据,评估大样本人群职业铅暴露对心律失常的影响,识别潜在的危险因素,为预防和控制铅暴露对工人健康的影响提供科学依据。

## 1 对象与方法

### 1.1 对象

本研究是基于2021年广东省重点职业病监测数据而开展的一项横断面研究。研究对象来自广东省21个地级市开展了非岗前体检的所有职业铅暴露工人( $n = 12\ 561$ )。排除标准:(1)血铅指标缺失的人群( $n = 9\ 325$ );(2)未进行心电图检查的人群

( $n = 114$ );(3)年龄、工龄等变量缺失的人群以及既往有明确的因其他因素引起的心血管疾病的人群( $n = 142$ );(4)有重复体检记录的人群保留最新的记录( $n = 37$ )。最终有2 943名工人被纳入本次研究。研究已经获得广东省职业病防治院医学伦理委员会批准。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 血铅的检测

在进行职业健康检查的过程中,由职业健康检查机构采集工人空腹血样并进行血铅检测。根据国家职业卫生标准GBZ/T 316.1—2018《血中铅的测定 第1部分:石墨炉原子吸收光谱法》<sup>[14]</sup>测定调查对象血铅水平,取100  $\mu\text{L}$ 全血样本,并将其转移至含有400  $\mu\text{L}$ 体积分数为0.1%的Triton X-100的稀释液中,采用一系列已知浓度的铅单元标准溶液(0~100  $\mu\text{g/L}$ ),在相同条件下进行处理与稀释。随后,在原子吸收光谱仪上选择283.3 nm波长处测定各标准溶液及样品溶液中的铅含量,通过标准曲线法计算血铅水平。定量下限为20  $\mu\text{g/L}$ 。低于定量下限的血铅水平在统计分析中按14.14  $\mu\text{g/L}$ 进行计算。《世界卫生组织铅暴露临床管理指南》<sup>[15]</sup>指出,血铅水平达到100  $\mu\text{g/L}$ 即可对成人的心血管健康产生影响,因此本研究根据血铅水平把研究对象分为 $< 100 \mu\text{g/L}$ 组(血铅正常)和 $\geq 100 \mu\text{g/L}$ 组(血铅异常)。

#### 1.2.2 研究结局

本次研究结局为心律失常。由具备国家医师资格的专业医务人员根据研究对象的心电图检查结果,通过分析波形和心率等诊断心律失常的类型。心律失常类型主要包括心动过缓、心动过速、心律不齐、传导阻滞、房性期前收缩、室性期前收缩、心房颤动等亚类<sup>[16]</sup>。出现这些心律失常亚类中任何一种情况均被定义为心律失常。其中,成人窦性心律的频率超过100次/min为窦性心动过速;成人窦性

心律的频率低于 60 次/min 为窦性心动过缓; 窦性心律不齐是指不同 PP 间期的差异 > 0.12 s, 但心律仍在正常范围内; 窦房传导阻滞是指窦房结冲动传导至心房时发生延缓或阻滞<sup>[17]</sup>。

### 1.2.3 协变量定义

本次研究将性别, 年龄, 经济类型, 工龄, 噪声、粉尘和硫酸及三氧化硫暴露情况等作为协变量。其中年龄根据中位数划分为 ≤ 37 岁、> 37 岁 2 类; 工龄根据中位数划分为 ≤ 36 个月、> 36 个月 2 类; 企业规模根据《统计上大中小微型企业划分办法(2017)》<sup>[18]</sup> 划分; 经济类型根据《关于划分企业登记注册类型的规定》<sup>[19]</sup> 进行分类, 分为国有经济、私营经济、外商投资和其他经济类型; 行业分类根据 GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》<sup>[20]</sup> 大类划分; 职业病危害信息根据 GBZ/T 229《工作场所职业病危害作业分级》<sup>[21-23]</sup> 进行定义, 由企业上报至广东省重点职业病监测平台。

### 1.2.4 统计学分析

使用 R 4.4.1 软件对数据进行统计分析。满足正态分布的计量资料以均数 ± 标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 描述, 2 组差异比较采用独立样本 *t* 检验; 不服从正态分布的计量资料采用中位数(第 25 百分位数, 第 75 百分位数)[ $M(P_{25}, P_{75})$ ] 表示, 组间差异采用秩和检验; 计数资料以频数、百分比描述, 组间比较采用  $\chi^2$  检验。考虑到不同企业规模之间的福利、环境设施和监管力度不同, 这些差异可能导致企业间的异质性, 从而影响血铅水平与心律失常关联的估计, 因此把企业规模作为水平 2 单位(随机效应), 把个体作为水平 1 单位(固定效应), 构建了混合效应 logistic 回归模型来分析血铅水平与心律失常之间的关联。为了评估血铅与心律失常之间的关联在不同职业因素亚组之间的差异, 再分别加入血铅与职业因素的交互项, 采用似然比检验进行交互作用分析, 并进一步根据职业因素进行了亚组分析, 以评估职业因素在血铅与心律失常关联中的修饰作用。检验水准  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 研究对象的基本特征

2 943 名研究对象中, 男性 1 779 人(占 60.45%), 女性 1 164 人(占 39.55%); 年龄的  $M(P_{25}, P_{75})$  为 37(30, 43.5) 岁, 工龄为 36(14, 96) 个月; 工人主要集中在小型企业和大型企业, 分别有 1 020 人(占 34.66%) 和 1 173 人(占 39.82%); 以私营企业工人为主, 共 1 571 人(占 53.38%); 大部分来自制造业,

2 743 人(占 93.20%)。除铅暴露外, 还有 196 人暴露于生产性粉尘(占 6.66%), 438 人暴露于噪声(占 15.88%), 178 人暴露于硫酸及三氧化硫(占 6.05%)。

研究对象血铅水平范围为 14.14 ~ 582.23  $\mu\text{g/L}$ ,  $M(P_{25}, P_{75})$  为 40.97(14.14, 142.97)  $\mu\text{g/L}$ 。血铅水平异常 915 人(占 30.09%), 血铅水平正常 2 028 人(占 68.91%)。患有心律失常的 392 人, 患病率为 13.32%。

年龄、工龄、性别、企业规模、企业类型、行业不同的工人, 以及粉尘暴露、噪声暴露、心律失常等情况不同的工人在血铅水平正常组和血铅水平异常组之间的分布差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。具体表现为: 男性、小型企业、私营经济企业、制造业企业的工人, 年龄 > 37 岁、工龄 > 36 个月、接触粉尘、接触噪声以及有心律失常的工人人数在血铅水平异常组中的占比更高。具体情况见表 1。

表 1 不同特征研究对象血铅水平差异

[例数(占比/%)]

特征	合计	血铅水平		$\chi^2$ 值	P 值
		正常 <i>n</i> = 2 028 ( $< 100 \mu\text{g/L}$ )	异常 <i>n</i> = 915 ( $\geq 100 \mu\text{g/L}$ )		
性别				38.211	$< 0.001$
男	1 779(60.45)	1 150(56.71)	629(68.74)		
女	1 164(39.55)	878(43.29)	286(31.26)		
企业规模				704.759	$< 0.001$
微型	123(4.18)	123(6.07)	0(0)		
小型	1 020(34.66)	409(20.17)	611(66.78)		
中型	615(20.90)	595(29.34)	20(2.19)		
大型	1 172(39.82)	888(43.79)	284(31.04)		
不详	13(0.44)	13(0.64)	0(0)		
经济类型				239.728	$< 0.001$
国有	324(11.01)	191(9.42)	133(14.54)		
私营	1 571(53.38)	930(45.86)	641(70.05)		
外商投资	1 009(34.28)	868(42.80)	141(15.41)		
其他	39(1.33)	39(1.92)	0(0)		
行业				93.727	$< 0.001$
制造业	2 743(93.20)	1 829(90.19)	914(99.89)		
非制造业	200(6.80)	199(9.81)	1(0.11)		
年龄/岁				234.417	$< 0.001$
≤ 37	1 547(52.57)	1 258(62.03)	289(31.58)		
> 37	1 396(47.43)	770(37.97)	626(68.42)		
工龄/月				25.887	$< 0.001$
≤ 36	1 492(50.70)	1 092(53.85)	400(43.72)		
> 36	1 451(49.30)	936(46.15)	515(56.28)		
粉尘暴露				13.570	$< 0.001$
是	196(6.66)	112(5.52)	84(9.18)		
否	2 747(93.34)	1 916(94.48)	831(90.82)		

表 1(续)

特征	合计	血铅水平		$\chi^2$ 值	P 值
		正常 ( $< 100 \mu\text{g/L}$ ) <i>n</i> = 2 028	异常 ( $\geq 100 \mu\text{g/L}$ ) <i>n</i> = 915		
噪声暴露				77.786	$< 0.001$
是	438(14.88)	223(11.00)	215(23.50)		
否	2 505(85.12)	1 805(89.00)	700(76.50)		
硫酸及三氧化硫暴露				0.050	0.823
是	178(6.05)	124(6.11)	54(5.90)		
否	2 765(93.95)	1 904(93.89)	861(94.10)		
心律失常				16.947	$< 0.001$
是	392(13.32)	235(11.59)	157(17.16)		
否	2 551(86.68)	1 793(88.41)	758(82.84)		

### 2.2 血铅水平与心律失常的关联

为了评估血铅水平与心律失常之间的关联,采用序贯建模的方式,以血铅水平为预测变量,心律失常为响应变量,构建了混合效应 logistic 回归模型。变量的分类和赋值情况见表 2。

表 2 变量赋值表

赋值变量	赋值说明
血铅水平/ $(\mu\text{g/L})$	连续变量
心律失常	0 = 否; 1 = 是
性别	0 = 男; 1 = 女
年龄/岁	0 = $\leq 37$ ; 1 = $> 37$
经济类型	1 = 国有经济; 2 = 私营经济; 3 = 外商经济与其他
工龄/月	1 = $\leq 36$ ; 2 = $> 36$
粉尘暴露	0 = 否; 1 = 是
噪声暴露	0 = 否; 1 = 是
硫酸及三氧化硫暴露	0 = 否; 1 = 是

回归分析结果显示:血铅水平升高与心律失常患病风险增加有关。具体如下:在只考虑企业规模作为随机效应而不调整任何协变量的粗模型(模型 0)中,血铅水平每升高 1 个四分位数间距(interquartile range, IQR),工人患心律失常的风险增加 40.8% ( $\text{OR} = 1.408, P < 0.001$ )。在调整性别和年龄后(模型 1),血铅与心律失常的关联增强 ( $\text{OR} = 1.466, P < 0.001$ )。在进一步调整经济类型、行业、工龄等职业因素后(模型 2),血铅与心律失常关联比较稳健,仍然呈现正向关联 ( $\text{OR} = 1.441, P < 0.001$ )。再进一步调整是否暴露于粉尘、噪声和硫酸及三氧化硫等因素后(模型 3),血铅水平每升高 1 个 IQR,工人患心律失常的风险增加 40.6% ( $\text{OR} = 1.406, P < 0.001$ )。从不同模型的结果可以看出,血铅与心律失常的关联在不同协变量调整下,均有统计学意义

( $P < 0.001$ ),且效应量变化不大,说明血铅与心律失常的关联相对稳健。见表 3。

表 3 血铅水平与心律失常之间的关联

模型	$\beta$ 值	SE 值	Wald $\chi^2$ 值	P 值	OR(95%CI)值
模型 0	0.002 66	0.000 53	25.447	$< 0.001$	1.408(1.233 ~ 1.609)
模型 1	0.002 97	0.000 55	28.617	$< 0.001$	1.466(1.274 ~ 1.686)
模型 2	0.002 84	0.000 58	24.345	$< 0.001$	1.441(1.247 ~ 1.667)
模型 3	0.002 65	0.000 59	20.380	$< 0.001$	1.406(1.213 ~ 1.630)

注:模型 0 为只考虑企业规模作为随机效应而不调整任何协变量的粗模型;模型 1 在模型 0 的基础上调整了性别、年龄;模型 2 在模型 1 的基础上调整了经济类型、行业、工龄等职业因素;模型 3 在模型 2 的基础上调整了粉尘、噪声、硫酸及三氧化硫暴露等其他职业病危害因素。

### 2.3 血铅水平与心律失常关联的亚组分析

基于模型 3,本研究进一步分析各预测变量和血铅水平的交互作用对心律失常的影响,并利用亚组分析评估这些因素在血铅水平与心律失常关联中的修饰作用。在亚组分析中,调整了除分层因素以外的其他协变量。例如,在对性别进行亚组分析时,调整了除性别和血铅水平以外的所有预测变量的影响。结果显示:(1)粉尘暴露以及硫酸和三氧化硫暴露与血铅水平的交互作用均有统计学意义 ( $P_{\text{交互}} < 0.05$ ),表明血铅水平对心律失常的影响在粉尘暴露以及硫酸和三氧化硫暴露情况不同的人群中是不同的。进一步的亚组分析结果显示,与暴露于粉尘、硫酸及三氧化硫的研究对象相比,无粉尘暴露和无硫酸及三氧化硫暴露的研究对象与血铅水平的交互作用对心律失常有更强的影响:血铅水平每升高 1 个 IQR,无粉尘暴露的工人患心律失常的风险增加 43.9% ( $\text{OR}$  值为 1.439,  $P < 0.001$ ),无硫酸及三氧化硫暴露的工人患心律失常的风险增加 46.2% ( $\text{OR} = 1.462, P < 0.001$ )。(2)除此之外,虽然性别、年龄、经济类型、工龄和噪声暴露与血铅水平的交互作用没有统计学意义 ( $P > 0.05$ ),也就是说,尚无足够的统计学证据表明血铅水平对心律失常的影响在以上不同特征的人群中是不同的,但进一步的亚组分析结果显示:无论男性还是女性,  $\leq 37$  岁还是  $> 37$  岁,工龄  $\leq 36$  个月还是  $> 36$  个月,血铅水平升高都与患心律失常的风险增加相关(均  $\text{OR} > 1$ )。而不同经济类型和噪声暴露情况与血铅水平的交互作用对心律失常的关联并不一致:非国有经济和非噪声暴露的工人的心律失常患病风险更容易受到血铅水平的影响。具体来说,在私营企业工作的工人中,血铅水平每升高 1 个 IQR,心律失常患病风险增加 41.3% ( $\text{OR} = 1.413, P <$

0.001);在外商投资企业工作的工人,血铅水平每升高1个IQR,心律失常患病风险增加82.8%(OR = 1.828,  $P < 0.001$ );在非噪声暴露的工人中,血铅水平每升高1个IQR,出现心律失常的风险增加37.5%(OR = 1.375,  $P < 0.001$ )。见表4。

表4 血铅水平与心律失常关联的亚组分析

亚组	$\beta$ 值	SE值	Wald $\chi^2$ 值	P值	OR(95%CI)值	$P_{交互}$ 值
性别						0.994
男	0.002 01	0.000 64	9.869	0.002	1.296 (1.102, 1.524)	
女	0.002 46	0.001 07	5.276	0.022	1.373 (1.048, 1.800)	
年龄/岁						0.151
≤ 37	0.003 12	0.000 85	13.568	< 0.001	1.494 (1.207, 1.851)	
> 37	0.001 54	0.000 78	3.910	0.048	1.220 (1.002, 1.486)	
经济类型						0.102
国有经济	0.000 98	0.002 32	0.178	0.673	1.134 (0.632, 2.036)	
私营经济	0.002 69	0.000 67	15.926	< 0.001	1.413 (1.193, 1.675)	
外商投资	0.004 68	0.001 55	9.089	0.003	1.828 (1.235, 2.707)	
工龄/月						0.313
≤ 36	0.001 80	0.000 82	4.853	0.028	1.260 (1.026, 1.548)	
> 36	0.002 63	0.000 80	10.956	< 0.001	1.404 (1.148, 1.716)	
粉尘暴露						0.001
是	-0.003 21	0.002 93	1.203	0.273	0.661 (0.316, 1.385)	
否	0.002 82	0.000 62	20.736	< 0.001	1.439 (1.230, 1.683)	
噪声暴露						0.225
是	0.001 38	0.001 40	0.960	0.327	1.194 (0.838, 1.702)	
否	0.002 47	0.000 65	14.577	< 0.001	1.375 (1.168, 1.620)	
硫酸及三氧化硫暴露						0.002
是	-0.002 16	0.003 73	0.335	0.562	0.757 (0.296, 1.940)	
否	0.002 95	0.000 61	23.561	< 0.001	1.462 (1.254, 1.704)	

注:  $P$ 值为不同亚组中血铅与心律失常关联的  $P$ 值;  $P_{交互}$ 值反映血铅水平与不同因素对心律失常的交互作用。

### 3 讨论

铅是一种工业中常见的重金属污染物,广泛应用于铅蓄电池制造、油漆生产、金属冶炼等行业<sup>[24]</sup>。这些行业的工人相比其他行业工人,可能会暴露于更高浓度的铅且暴露时间更长。有研究<sup>[25]</sup>表明,最低水平的铅暴露也会对人体健康产生不良影响。

本次研究发现,在血铅异常者中,男性的比例

高于女性,这可能与男性工人吸烟、饮酒、不勤换洗衣物等个人行为习惯有关<sup>[26]</sup>。而血铅异常者中,年龄 > 37岁、工龄 > 36个月的工人比例更高,可能是由于长期铅作业导致铅在体内蓄积<sup>[27]</sup>。另外,小型、私营企业工人的占比较高,可能与不同类型的作业环境、防护措施和监管力度等不同有关。小型企业和私营企业劳动者的健康保护意识相对较低,防护措施相对不足,从而可能导致更高浓度的铅暴露<sup>[28]</sup>。

本次研究评估了职业铅暴露工人血铅水平升高与心律失常患病风险的关联,发现血铅水平升高与心律失常患病风险呈现正向关联。因此采取有效的防护措施、降低工作场所的铅暴露对保护工人的心血管健康、预防心律失常的发生有着重要意义。本研究与既往研究结果不完全一致,一项横断面研究<sup>[12]</sup>表明,即使没有明显的心脏病,铅暴露工人患心律失常的风险也高于未暴露组;一项前瞻性队列研究<sup>[29]</sup>显示,与胫骨铅水平处于最低三分位数的人相比,胫骨铅水平处于最高三分位数的人QT间期延长和JT间期延长的风险也会增加,表明低水平的累积铅暴露与心电图传导障碍有关。然而,国内一项横断面研究<sup>[30]</sup>探索了累积铅暴露对儿童心率的影响,并未发现两者之间有明显的关联。导致研究结果不一致的原因可能是研究人群和铅暴露的浓度不同。

已有研究<sup>[31]</sup>表明,心脏是铅毒性作用的重要靶器官。然而,铅暴露导致心律失常的潜在生物学机制目前还不明确,一般认为可能与氧化应激有关。有研究<sup>[32]</sup>表明,急性暴露于细胞外的  $Pb^{2+}$ 通过阻断电压门控钙通道中的Cav1.2通道的电流,降低心脏收缩力和改变心脏的兴奋性等途径影响心脏收缩,从而导致心律失常。另外,随着血铅水平升高,铅诱导的氧化应激产生活性氧(reactive oxygen species, ROS)<sup>[33]</sup>,过量的ROS会导致线粒体损伤,促进细胞凋亡、坏死和纤维化,从而导致心律失常<sup>[34]</sup>。

进一步的交互作用分析和亚组分析中,本研究结果提示未暴露于粉尘、噪声或硫酸及三氧化硫的工人比暴露于粉尘、噪声或三氧化硫的工人心律失常的患病风险更高。分析认为,这可能是由于长期暴露于这些职业病危害因素的工人,可能通过自主神经系统的调节,逐渐适应外界刺激,从而减少心律失常的发生。也可能在有更多职业病危害因素暴露的岗位中,企业采取了额外的健康监测和防护装备等,从而降低了职业危害对心脏的影响。另外,粉尘、噪声和化学物质可能需要长期累积暴露才会显著增加心律失常的风险。

本次亚组分析结果还发现非国有经济企业的铅暴露工人有更高的心律失常患病风险。在日常工作中,防护措施是保障工人身体健康、减少职业病危害因素暴露的一项重要措施。以往的职业健康调查结果表明,国有企业的管理更规范,更重视生产安全,而在非国有企业中,有不少企业缺乏有效的防护措施<sup>[35]</sup>,如长春市一项包含135家企业的研究<sup>[36]</sup>结果表明,外商企业的疑似职业病与职业禁忌证的检出率均高于私营企业和国有、集体企业,这反映了外商投资企业也存在防护措施不到位、监管力度不足等情况,这可能是包括外商投资企业在内的非国有经济企业的工人接触更高浓度的危害因素从而导致心律失常的重要原因。因此,为了保护铅暴露工人的身体健康,工人应穿戴防尘口罩、防护服等个人防护用品,降低铅颗粒从呼吸道、皮肤等途径进入人体的风险。企业要改善工作环境,采用湿式作业、加强通风等措施,减少工作场所中的铅烟、铅尘等。另外,还应该对工人进行健康教育,提高其安全生产的意识。

本研究还存在一定的局限性。首先,本研究是一项横断面研究,其因果推断的能力有限。其次,没有或者仅部分收集到关于工人生活习惯、家族史、疾病史等因素的相关资料,所以无法完全排除家族史、疾病史等因素带来的偏倚,从而对研究结果造成一定的影响。综上,未来还需要收集更准确的个体暴露数据,以及研究对象的疾病史、行为习惯等更全面的数据,通过深入分析混杂因素、延长研究的时间跨度、增加样本量、细化分组、重复验证等研究方法,探索各种有害因素联合暴露与心律失常关联的生物学机制。

**作者声明** 本文无实际或潜在的利益冲突

#### 参考文献

- [1] WANG T, STREETER H, WANG X, et al. A network pharmacology study of the multi-targeting profile of an antiarrhythmic Chinese medicine Xin Su Ning [J]. *Front Pharmacol*, 2019, 10: 1138.
- [2] CHEN Z, LIU J, ZHOU F, et al. Nonalcoholic fatty liver disease: an emerging driver of cardiac arrhythmia [J]. *Circ Res*, 2021, 128(11): 1747-1765.
- [3] GRUNE J, YAMAZOE M, NAHRENDORF M. Electroimmunology and cardiac arrhythmia [J]. *Nat Rev Cardiol*, 2021, 18(8): 547-564.
- [4] 刘思思, 幸超群, 幸小亮, 等. 连接蛋白43在常见心脏疾病中的作用研究进展 [J]. *中国医学创新*, 2024, 21(25): 176-179.
- [5] 庞舜予, 张雅琪, 罗佳欣, 等. 中药单体抑制心律失常的离子通道机制研究进展 [J]. *中草药*, 2022, 53(15): 4853-4861.
- [6] YAN Y Z, HU Y H, GUO H, et al. Burden of cardiovascular disease attributable to dietary lead exposure in adolescents and adults in China [J]. *Sci Total Environ*, 2022, 838 (Pt 3): 156315.
- [7] WAN H, CHEN S, CAI Y, et al. Lead exposure and its association with cardiovascular disease and diabetic kidney disease in middle-aged and elderly diabetic patients [J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2021, 231: 113663.
- [8] RUIZ-HERNANDEZ A, NAVAS-ACIEN A, PASTOR-BARRIUSO R, et al. Declining exposures to lead and cadmium contribute to explaining the reduction of cardiovascular mortality in the US population, 1988-2004 [J]. *Int J Epidemiol*, 2017, 46(6): 1903-1912.
- [9] XIE J, DU G, ZHANG Y, et al. ECG conduction disturbances and ryanodine receptor expression levels in occupational lead exposure workers [J]. *Occup Environ Med*, 2019, 76(3): 151-156.
- [10] 潘东升, 王三龙, 张颖丽, 等. 药物诱导的心律失常非临床体外评价研究进展 [J]. *中国药理学杂志*, 2020, 55(13): 1053-1059.
- [11] 张颖. 多普勒超声在评价心律失常患者消化功能与心室功能中的应用 [J]. *中国现代医生*, 2021, 59(4): 98-101.
- [12] KARAKULAK U N, YILMAZ O H, TUTKUN E, et al. Comprehensive electrocardiographic analysis of lead exposed workers: an arrhythmic risk assessment study [J]. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 2017, 22(2): e12376.
- [13] 郑志女, 梁有明, 邹永东. 油漆职业人群血铅水平与心电图改变的相关研究 [J]. *疾病监测与控制*, 2019, 13(2): 155-157.
- [14] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 血中铅的测定 第1部分: 石墨炉原子吸收光谱法: GBZ/T 316.1—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [15] World Health Organization. WHO guideline for the clinical management of exposure to lead [R]. Geneva: World Health Organization, 2021.
- [16] 叶芬, 秦薇. 高龄孕产妇异常心电图和心律失常发病情况及其对妊娠结局的影响 [J]. *中国妇幼保健*, 2022, 37(18): 3344-3347.
- [17] 葛均波, 徐永健, 王辰. 内科学 [M]. 9版. 北京: 人民卫生出版社, 2018: 182-205.
- [18] 国家统计局. 统计上大中小微型企业划分办法 (2017) [EB/OL]. (2017-12-28) [2024-12-27]. [https://www.stats.gov.cn/sj/tjzb/gjtjbz/202302/t20230213\\_1902763.html](https://www.stats.gov.cn/sj/tjzb/gjtjbz/202302/t20230213_1902763.html).
- [19] 中华人民共和国国家统计局, 国家工商行政管理总局. 关于划分企业登记注册类型的规定: 国统字〔2011〕86号 [A]. 2011-09-30.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 国民经济行业分类: GB/T 4754—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] 中华人民共和国卫生部. 工作场所职业病危害作业分级 第1部分: 生产性粉尘: GBZ/T 229.1—2010 [S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- [22] 中华人民共和国卫生部. 工作场所职业病危害作业分级 第4部分: 噪声: GBZ/T 229.4—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

(下转第394页)

## 参考文献

- [1] 肖华. 某烟厂 2013—2015 年接触噪声作业人员职业健康状况研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [2] 谢庆堂, 陈开, 罗健, 等. 职业性噪声作业工人双耳高频平均听阈与耳鸣的关系[J]. 中国医药指南, 2020, 18(21): 28-30.
- [3] NSERAT S, AL-MUSA A, KHADER Y S. Blood pressure of Jordanian workers chronically exposed to noise in industrial plants[J]. Int J Occup Environ Med, 2017, 8(4): 217-223.
- [4] 周安寿. 其他职业病及诊断鉴定管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 76-77.
- [5] 潘庆春, 米雪芹, 李蓓, 等. 职业噪声暴露人群额叶脑网络功能连通性研究[J]. 中国听力语言康复科学杂志, 2024, 22(3): 264-269.
- [6] MENON B. Towards a new model of understanding—the triple network, psychopathology and the structure of the mind[J]. Med Hypotheses, 2019, 133: 109385.
- [7] DZHAMBOV A M, LERCHER P. Road traffic noise exposure and depression/anxiety: an updated systematic review and meta-analysis [J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(21): 4134.
- [8] 林明庆, 刘春元, 王志浩, 等. 基于 Cadna/A 的校园声环境模拟计算及分析[J]. 应用技术学报, 2023, 23(2): 137-143.
- [9] 赵艳飞, 杜红燕, 周耀权, 等. Cadna/A 软件在某拟建核设施环境影响评价中的应用[J]. 科技视界, 2021(32): 1-4.
- [10] 陈晓琳. 基于 Cadna/A 软件的特高压变电站噪声影响研究[J]. 四川电力技术, 2017, 40(2): 31-33.
- [11] 李丽珍, 刘辉. Cadna/A 噪声预测软件在火电厂工程环评中的应用[J]. 环境与可持续发展, 2015(4): 106-108.
- [12] 阮学云, 张馨月, 魏浩征, 等. 燃煤发电厂锅炉岛的噪声治理研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(6): 208-215.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 工作场所物理因素测量 第 8 部分: 噪声: GBZ/T 189.8—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] 国家技术监督局. 声学 户外声传播的衰减 第 2 部分: 一般计算方法: GB/T 17247.2—1998[S]. 北京: 中国标准出版社.
- [15] 中华人民共和国生态环境部. 环境影响评价技术导则声环境: HJ 2.4—2021[S]. 北京: 中国环境出版社, 2021.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 工业企业噪声控制设计规范: GB/T 50087—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [17] 中华人民共和国卫生部. 工业企业设计卫生标准: GBZ 1—2010[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- [18] 周新祥. 噪声控制技术及其新进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 100-102.
- [19] 收稿日期: 2025-02-08
- 
- (上接第 315 页)
- [23] 中华人民共和国卫生部. 工作场所职业病危害作业分级 第 2 部分: 化学物: GBZ/T 229.2—2010[S]. 北京: 人民卫生出版社, 2010.
- [24] WU Y, HUANG H, WU J, et al. Lead activates neutrophil degranulation to induce early myocardial injury in mice [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2023, 268: 115694.
- [25] ETTINGER A S, EGAN K B, HOMA D M, et al. Blood lead levels in U.S. women of childbearing age, 1976—2016 [J]. Environ Health Perspect, 2020, 128(1): 17012.
- [26] 王芳芳, 赵俊君. 2022 年濮阳市铅酸蓄电池作业工人职业健康检查结果分析[J]. 河南医学高等专科学校学报, 2023, 35(4): 437-440.
- [27] LONG X, WU H, ZHOU Y, et al. Preventive effect of Limosilactobacillus fermentum SCHY34 on lead acetate-induced neurological damage in SD rats [J/OL]. Front Nutr, 2022, 9: 852012.
- [28] 荣幸, 廖阳, 周海林, 等. 广州市重点职业病危害作业工人职业健康状况及职业病发病风险研判[J]. 职业卫生与应急救援, 2024, 42(5): 605-610.
- [29] EUM K D, NIE L H, SCHWARTZ J, et al. Prospective cohort study of lead exposure and electrocardiographic conduction disturbances in the department of veterans affairs normative aging study[J]. Environ Health Perspect, 2011, 119(7): 940-944.
- [30] FU Y, LIU Y, LIU Y, et al. Relationship between cumulative exposure to metal mixtures and heart rate among Chinese preschoolers[J]. Chemosphere, 2022, 300: 134548.
- [31] MITRA P, SHMRMA S, PUROHIT P, et al. Clinical and molecular aspects of lead toxicity: an update [J]. Crit Rev Clin Lab Sci, 2017, 54(7-8): 506-528.
- [32] FERREIRA D M G, COSTA C, SAVIO F, et al. Lead poisoning: acute exposure of the heart to lead ions promotes changes in cardiac function and Cav1.2 ion channels [J]. Biophys Rev, 2017, 9(5): 807-825.
- [33] QU W, DU G L, FENG B, et al. Effects of oxidative stress on blood pressure and electrocardiogram findings in workers with occupational exposure to lead[J]. J Int Med Res, 2019, 47(6): 2461-2470.
- [34] WANG X, YU Q, LIAO X, et al. Mitochondrial dysfunction in arrhythmia and cardiac hypertrophy[J]. Rev Cardiovasc Med, 2023, 24(12): 364.
- [35] 赵卫华. 农民工职业病的现状、困境与对策[J]. 国家行政学院学报, 2012(6): 89-93.
- [36] 吴昊. 2019 年长春市 135 家企业在岗职工职业健康检查结果分析[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [37] 收稿日期: 2025-03-21