

本文引文格式:彭丹杏,汪宏莉.大气颗粒物暴露及体力活动与我国中老年人心血管疾病的  
关联性研究[J].右江民族医学院学报,2023,45(4):552-556,576.

【论著与临床报道】

## 大气颗粒物暴露及体力活动与我国中 老年人心血管疾病的关联性研究

彭丹杏,汪宏莉

(广西师范大学体育与健康学院,广西 桂林 541006)

**摘要:**目的 探讨大气颗粒物(PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>)暴露及体力活动与我国中老年人心血管疾病的关联性。方法 数据来源于2018年中国健康与养老追踪调查(CHARLS),共纳入19432名45岁以上中老年人作为研究对象。大气颗粒物暴露数据来自我国生态环境部。根据国际体力活动量表(IPAQ)采集个体每周进行体力活动的强度、频率、时间,划分为低、中、高体力活动。使用Logistic回归探讨颗粒物暴露及体力活动与我国中老年人心血管疾病的关联性。结果 在纳入的研究对象中,男性为47.68%,年龄为(62.21±10.17)岁。PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>年平均暴露浓度为(44.76±14.39) μg/m<sup>3</sup>和(81.69±27.70) μg/m<sup>3</sup>。相关分析表明,每增加10 μg/m<sup>3</sup> PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>,心血管疾病患病风险为(OR=1.056,95%CI:1.013~1.100)和(OR=1.052,95%CI:1.031~1.073);中、高体力活动与心血管疾病患病风险降低相关(OR=0.961,95%CI:0.839~1.100)、(OR=0.838,95%CI:0.720~0.976)和(OR=0.963,95%CI:0.841~1.103)、(OR=0.840,95%CI:0.722~0.979)。大气颗粒物暴露及体力活动对我国中老年人心血管疾病的联合作用分析表明,与低浓度颗粒物暴露合并高体力活动组相比,颗粒物暴露浓度增加及体力活动降低均与心血管疾病患病风险增加相关。结论 低浓度大气颗粒物暴露与高强度体力活动是我国中老年人心血管疾病患病的保护因素,增加颗粒物暴露和降低体力活动对我国中老年人心血管疾病有联合作用。

**关键词:**颗粒物;体力活动;心血管疾病;联合作用

中图分类号:R54 文献标识码:A 文章编号:1001-5817(2023)04-0552-06

doi:10.3969/j.issn.1001-5817.2023.04.002

### Correlation of atmospheric particulate matter exposure and physical activity with cardiovascular disease among middle-aged and older adults in China

Peng Danxing, Wang Hongli

(College of Physical Education and Health, Guangxi Normal  
University, Guilin 541006, Guangxi, China)

**Abstract:** **Objective** To explore the relationship between exposure to atmospheric particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) as well as physical activity and cardiovascular diseases in middle-aged and elderly people in China. **Methods** Data were obtained from the 2018 China Health and Retirement Longitudinal Study (CHARLS), which included a total of 19 432 middle-aged and elderly individuals over 45 years old. Information on atmospheric particulate matter exposure was obtained from the Ministry of Ecology and Environment of China. The intensity, frequency and duration of weekly physical activity of the subjects were collected using the

基金项目:国家社会科学基金项目(19XTY011)

第一作者简介:彭丹杏(1997-),女,在读硕士研究生,研究方向:特殊环境与运动,E-mail:pengdx123@163.com

通讯作者简介:汪宏莉(1968-),女,博士,教授,博士、硕士研究生导师,研究方向:健康促进,运动与健康,E-mail:whongli2004@163.com

International Physical Activity Questionnaire (IPAQ) and categorized into low, medium and high physical activity levels. Logistic regression was used to investigate the correlation between particulate matter exposure as well as physical activity and cardiovascular disease in this population. **Results** Among the included subjects, 47.68% were males with an average age of (62.21±10.17) years. The annual mean exposure concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> were (44.76±14.39) μg/m<sup>3</sup> and (81.69±27.70) μg/m<sup>3</sup>, respectively. Correlation analysis showed that for each increase of 10 μg/m<sup>3</sup> PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, the risk of cardiovascular disease increased by (OR = 1.056, 95% CI :1.013~1.100) and (OR = 1.052, 95% CI :1.031~1.073), respectively. Moderate and high physical activity were associated with a reduced risk of cardiovascular disease with odds ratios of (OR = 0.961, 95% CI :0.839~1.100), (OR = 0.838, 95% CI :0.720~0.976) and (OR = 0.963, 95% CI :0.841~1.103), (OR = 0.840, 95% CI :0.722~0.979), respectively. Analysis of the combined effects of atmospheric particulate matter exposure and physical activity on cardiovascular disease in middle-aged and elderly people in China showed that increased particulate matter exposure and decreased physical activity were associated with an increased risk of cardiovascular disease compared to the low particulate matter exposure and high physical activity group. **Conclusion** Low concentration atmospheric particulate matter exposure and high intensity physical activity are protective factors against cardiovascular diseases in middle-aged and elderly people in China. The combined effect of increased particulate matter exposure and decreased physical activity is associated with higher risk of cardiovascular diseases in this population.

**Key words:** particulate matter; physical activity; cardiovascular disease; combined effect

心血管疾病是全球人类死亡的原因之一,其危险因素众多,包括吸烟、不合理膳食、体力活动不足、超重和肥胖等<sup>[1]</sup>。近年来,越来越多研究发现空气污染暴露会增加心血管疾病发病及死亡风险<sup>[2-3]</sup>,给国家带来巨大疾病负担<sup>[4]</sup>。大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 是指空气中空气动力学当量直径≤2.5 μm 和 10 μm 的颗粒物,此类污染物能深入肺部,进入血液,影响免疫、心血管系统和器官<sup>[5-7]</sup>。规律的体力活动是预防、治疗和康复心血管疾病的重要措施,研究发现增加中、高强度体力活动能降低中老年人心血管患病风险<sup>[8-9]</sup>。然而,近年来我国空气污染形势严峻,在大气颗粒物暴露下进行体力活动会增加每分通气量进而导致更多污染物在肺部沉积。已有研究表明,进行体力活动时吸入呼吸系统的沉积物比静息状态高 4.5 倍<sup>[10]</sup>。有关体力活动是否可抵消由空气污染对心血管健康造成损害的观点仍存在争议<sup>[11-13]</sup>,且研究局限在发达国家,在暴露水平更高的低、中收入国家较为缺乏。此外,少有研究深入揭示长期颗粒物暴露影响心血管疾病,以及和体力活动的联合作用对心血管疾病的影响。因此,本研究探讨了长期颗粒物暴露(PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub>)及体力活动与我国中老年人心血管疾病的相关性。

## 1 对象与方法

1.1 资料来源 本研究数据来源于北京大学国家发展研究院开展的 CHARLS 项目。该项目采用分层、多阶段、与人口规模大小成比例的概率抽样方法,覆盖全国 28 个省(自治区、直辖市)的 150 个县、450 个社区(村),选取 19 817 名居民作为调查对象。本研究将

45 岁以下、体力活动等信息缺失的受访者剔除后,最终纳入 19 432 名研究对象。CHARLS 为公开数据库,北京大学伦理审查委员会已批准了其研究方案。

1.2 数据提取 CHARLS 项目使用的是国际体力活动量表(IPAQ),该量表采集了个体一周内进行体力活动的强度、频率、时间信息。本研究将达到每周 3 d 及 3 d 以上高强度体力活动界定为高体力活动,达到每周 3 d 及 3 d 以上中强度体力活动界定为中体力活动,否则为低体力活动。颗粒物污染年平均暴露浓度根据研究对象居住地匹配我国生态环境部空气污染数据获取,根据 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 年平均暴露浓度中位数 44.58 μg/m<sup>3</sup> 和 76.08 μg/m<sup>3</sup>,PM<sub>2.5</sub> 划分为低浓度暴露(15.25~44.58) μg/m<sup>3</sup> 和高浓度暴露(44.58~76.50) μg/m<sup>3</sup>,PM<sub>10</sub> 划分为低浓度暴露(31.25~76.08) μg/m<sup>3</sup> 和高浓度暴露(76.08~222.08) μg/m<sup>3</sup>。根据问卷中“是否有医生曾经告诉过您有心脏病如心肌梗塞、冠心病、心绞痛、充血性心力衰竭和其他心脏病?”判定是否有心血管疾病。根据中国统计年鉴三大经济带划分标准,地区划分为东部、中部和西部。

1.3 统计学方法 使用 R 4.2.1 软件进行统计分析。定量资料以( $\bar{x} \pm s$ )表示,定性资料以百分比(%)表示,分别使用独立样本 *t* 检验或  $\chi^2$  检验对连续变量和分类变量进行组间比较。使用 Logistic 回归分析颗粒物暴露(PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub>)或体力活动与心血管疾病的相关性,以及 PM<sub>2.5</sub> 或 PM<sub>10</sub> 和体力活动的联合作用对心血管疾病的影响。检验水准  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

2.1 研究对象的基本特征 在纳入的 19 432 名研究对象中,男性共 9 266 例,占 47.68%,年龄为(62.21±10.17)岁;患心血管疾病共 1 357 例,占 6.98%;PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>年平均暴露浓度分别为(44.76±14.39)

μg/m<sup>3</sup>和(81.69±27.70) μg/m<sup>3</sup>;低、中、高体力活动人群分别占 46.29%、27.31%、26.40%;患高血压、血脂异常和糖尿病分别占总人群的 11.18%、9.70%、5.37%;地区、城乡、教育水平、吸烟史、饮酒史等特征,见表 1。

表 1 研究对象基本特征

特征	总人群 (n=19432)	无心血管疾病 (n=18075)	有心血管疾病 (n=1357)	t/χ <sup>2</sup>	P
PM <sub>2.5</sub> /(μg·m <sup>-3</sup> )	44.76±14.39	44.64±14.31	46.43±15.27	-4.187	<0.001
PM <sub>10</sub> /(μg·m <sup>-3</sup> )	81.69±27.70	81.31±27.39	86.73±31.12	-6.227	<0.001
年龄/岁	62.21±10.17	62.08±10.17	63.98±9.89	-6.659	<0.001
性别				18.622	<0.001
男	9266(47.68)	8696(48.11)	570(42.00)		
女	10166(52.32)	9379(51.89)	787(58.00)		
地区				29.752	<0.001
东	7756(39.91)	7261(40.17)	495(36.48)		
中	7480(38.49)	6865(37.98)	615(45.32)		
西	4196(21.60)	3949(21.85)	247(18.20)		
城乡				10.666	0.001
城市	7813(40.21)	7210(39.89)	603(44.44)		
农村	11619(59.79)	10865(60.11)	754(55.56)		
教育水平				6.151	0.046
小学及以下	12744(65.58)	11859(65.61)	885(65.22)		
初中	4233(21.78)	3959(21.90)	274(20.19)		
高中及以上	2455(12.64)	2257(12.49)	198(14.59)		
体力活动				30.046	<0.001
低	8995(46.29)	8292(45.88)	703(51.80)		
中	5307(27.31)	4929(27.27)	378(27.86)		
高	5130(26.40)	4854(26.85)	276(20.34)		
吸烟史				23.565	<0.001
从不吸烟	11371(58.52)	10539(58.31)	832(61.31)		
以前吸烟	2819(14.51)	2588(14.32)	231(17.02)		
现在吸烟	5242(26.97)	4948(27.37)	294(21.67)		
饮酒史				29.321	<0.001
从不饮酒	12866(66.21)	11882(65.74)	984(72.51)		
少于 1 月 1 次	1463(7.53)	1364(7.54)	99(7.30)		
多于 1 月 1 次	5103(26.26)	4829(26.72)	274(20.19)		
高血压				151.360	<0.001
是	2173(11.18)	1883(10.42)	290(21.37)		
否	17259(88.82)	16192(89.58)	1067(78.63)		
血脂异常				200.430	<0.001
是	1885(9.70)	1604(8.87)	281(20.71)		
否	17547(90.30)	16471(91.13)	1076(79.29)		
糖尿病				94.078	<0.001
是	1043(5.37)	892(4.93)	151(11.13)		
否	18389(94.63)	17183(95.07)	1206(88.87)		

注:表内计量资料数据以( $\bar{x}\pm s$ )表示;计数资料数据用[n(%)]表示

2.2 不同浓度颗粒物暴露(PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>)及体力活动水平与心血管疾病的相关性 在校正年龄、性别、地区、城乡、教育水平、体力活动、吸烟史、饮酒史、高血压、血脂异常、糖尿病后,高浓度 PM<sub>2.5</sub>暴露(OR = 1.238,95% CI :1.099~1.395)和高浓度 PM<sub>10</sub>暴露(OR = 1.347,95% CI :1.200~1.512)是我国中老年

人心血管疾病的危险因素。在校正年龄、性别、地区、城乡、教育水平、吸烟史、饮酒史、高血压、血脂异常、糖尿病后,分别校正 PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>,高体力活动(OR = 0.838,95% CI :0.720~0.976)、(OR = 0.840,95% CI :0.722~0.979)是我国中老年人心血管疾病的保护因素,如表 2 所示。

表 2 颗粒物暴露(PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>) 或体力活动和心血管疾病的 Logistic 回归分析

变量	$\beta$	SE	Wald	P	OR (95% CI)
PM <sub>2.5</sub> <sup>a</sup>					
低					1.000
高	0.214	0.061	12.412	<0.001	1.238(1.099~1.395)
PM <sub>2.5</sub> 每升高 10/( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) <sup>a</sup>	0.054	0.021	6.620	0.010	1.056(1.013~1.100)
PM <sub>10</sub> <sup>a</sup>					
低					1.000
高	0.298	0.059	25.583	<0.001	1.347(1.200~1.512)
PM <sub>10</sub> 每升高 10/( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) <sup>a</sup>	0.051	0.010	25.432	<0.001	1.052(1.031~1.073)
体力活动 <sup>b</sup>					
低					1.000
中	-0.040	0.069	0.332	0.565	0.961(0.839~1.100)
高	-0.176	0.078	5.418	0.023	0.838(0.720~0.976)
体力活动 <sup>c</sup>					
低					1.000
中	-0.038	0.069	0.298	0.585	0.963(0.841~1.103)
高	-0.174	0.078	5.018	0.025	0.840(0.722~0.979)

注:是否有心血管疾病(是=1,否=0)为因变量;a:校正了年龄、性别、地区、城乡、教育水平、体力活动、吸烟史、饮酒史、高血压、血脂异常和糖尿病;b:校正了年龄、性别、地区、城乡、教育水平、吸烟史、饮酒史、高血压、血脂异常、糖尿病和 PM<sub>2.5</sub>;c:校正了年龄、性别、地区、城乡、教育水平、吸烟史、饮酒史、高血压、血脂异常、糖尿病和 PM<sub>10</sub>。

2.3 颗粒物(PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>) 暴露及体力活动联合作用对心血管疾病的影响 以低浓度 PM<sub>2.5</sub>暴露合并高体力活动为对照组,低浓度 PM<sub>2.5</sub>暴露合并中体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.072, 95% CI : 0.846~1.358),低浓度 PM<sub>2.5</sub>暴露合并低体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.142, 95% CI : 0.923~1.412),高浓度 PM<sub>2.5</sub>暴露合并高体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.140, 95% CI : 0.888~1.465),高浓度 PM<sub>2.5</sub>暴露合并中体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.393, 95% CI : 1.110~1.750),高浓度 PM<sub>2.5</sub>暴露合并低体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.422, 95% CI : 1.155~

1.752)。以低浓度 PM<sub>10</sub>暴露合并高体力活动为对照组,低浓度 PM<sub>10</sub>暴露合并中体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.106, 95% CI : 0.867~1.411),低浓度 PM<sub>10</sub>暴露合并低体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.188, 95% CI : 0.954~1.480),高浓度 PM<sub>10</sub>暴露合并高体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.320, 95% CI : 1.031~1.690),高浓度 PM<sub>10</sub>暴露合并中体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.556, 95% CI : 1.235~1.959),高浓度 PM<sub>10</sub>暴露合并低体力活动的心血管疾病患病风险为(OR = 1.576, 95% CI : 1.275~1.947)。如表 3 所示。

表 3 颗粒物(PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>) 暴露及体力活动和心血管疾病的 Logistic 回归分析

颗粒物	高体力活动		中体力活动		低体力活动	
	OR (95% CI)	P	OR (95% CI)	P	OR (95% CI)	P
PM <sub>2.5</sub>						
低	1.000		1.072(0.846~1.358)	0.564	1.142(0.923~1.412)	0.222
高	1.140(0.888~1.465)	0.304	1.393(1.110~1.750)	0.004	1.422(1.155~1.752)	<0.001
PM <sub>10</sub>						
低	1.000		1.106(0.867~1.411)	0.417	1.188(0.954~1.480)	0.123
高	1.320(1.031~1.690)	0.028	1.556(1.235~1.959)	<0.001	1.576(1.275~1.947)	<0.001

注:是否有心血管疾病(是=1,否=0)为因变量;模型校正了年龄、性别、地区、城乡、教育水平、吸烟史、饮酒史、高血压、血脂异常和糖尿病。

### 3 讨论

近年来我国空气污染形势严峻,已成为最大健康威胁之一<sup>[14]</sup>。最近流行病学研究表明,长期颗粒物暴露与心血管疾病的发病率和死亡率呈正相关,PM<sub>2.5</sub>每增加 10 μg/m<sup>3</sup> 心血管疾病发病风险(HR=1.03,95% CI:1.02~1.04)和死亡风险(HR=1.05,95% CI:1.03~1.08)增加<sup>[15]</sup>。此外,体力活动不足严重危害心血管健康,有研究表明每减少 1 单位代谢当量(MET)体力活动,心血管疾病患病风险增加(OR=1.04,95% CI:1.01~1.07)<sup>[16]</sup>。因此,探讨长期颗粒物暴露和体力活动对我国中老年人心血管疾病的影响具有重大意义。

本研究发现 2018 年我国地区 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 平均浓度超过《中国空气质量》二级标准,即 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 年平均浓度 >35 μg/m<sup>3</sup> 和 70 μg/m<sup>3</sup>。结果显示 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度每增加 10 μg/m<sup>3</sup>,我国中老年人心血管疾病患病优势比为 1.056 和 1.052。与 JALALI S 等<sup>[17]</sup> 研究相比,PM<sub>2.5</sub> 每增加 10 μg/m<sup>3</sup> 心血管患病优势比为 1.030,本研究结果高于 JALALI S 等<sup>[17]</sup> 的研究结果,可能是人群、地域差异所致。此外,体力活动是心血管疾病的保护因素,不少研究表明积极通勤,增加步行、体力活动时间和强度均可降低心血管疾病患病风险<sup>[18-20]</sup>。

从颗粒物暴露和体力活动对心血管疾病的联合作用分析发现,以低浓度 PM<sub>2.5</sub> 或 PM<sub>10</sub> 暴露合并高体力活动为对照组,增加颗粒物暴露或降低体力活动均导致心血管患病风险增加,且两者对心血管疾病有联合作用,与 KIM S R 等<sup>[21]</sup> 和 TU R Q 等<sup>[22]</sup> 研究结论一致。在另一项研究中发现超过 35.3 μg/m<sup>3</sup> 的高浓度 PM<sub>2.5</sub> 暴露下增加体力活动带来的健康效益超过由空气污染导致的健康危害<sup>[13]</sup>,和本研究研究结论有差异,可能是由于本研究暴露水平高于该研究。然而,也有不少研究表明在高浓度暴露下增加体力活动将加剧对心血管的危害。例如,CHOI D 等<sup>[23]</sup> 对 18 846 名癌症幸存者的长期 PM<sub>2.5</sub> 暴露和体力活动对心血管疾病综合影响的研究发现,在 19.8~25.6 μg/m<sup>3</sup> 的 PM<sub>2.5</sub> 暴露时,每周进行 5 次及以上的中高体力活动可降低癌症幸存者心血管疾病患病风险(HR=0.77,95% CI:0.60~0.99),而在更高浓度暴露时增加体力活动与心血管疾病患病风险呈正相关。该研究 PM<sub>2.5</sub> 平均暴露浓度为 26.2 μg/m<sup>3</sup>,符合我国空气质量推荐标准,但由于研究对象为易感人群,可能造成研究结论与本结论不一致。LIN Y 等<sup>[24]</sup> 研究也表明,在高浓度 PM<sub>2.5</sub> 暴露下积极通勤和增加体力活动反而对心血管健康不利。可见,不同人群、地域、暴露浓度和体力活动形式均可能造成研究结论不一致。

综上所述,本研究发现长期高浓度 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 暴露和体力活动不足是我国中老年人心血管疾病的危险因素,两者对心血管疾病有联合作用,建议在大气颗粒物暴露严重时可选择空气质量良好的室内场地进行运动,以继续保持良好的运动习惯。

#### 参考文献:

- [1] BAYS H E, TAUB P R, EPSTEIN E, et al. Ten things to know about ten cardiovascular disease risk factors[J]. Am J Prev Cardiol, 2021, 5: 100149.
- [2] AMSALU E, WANG T Q, LI H B, et al. Acute effects of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) on hospital admissions for cardiovascular disease in Beijing, China: a time-series study[J]. Environ Health, 2019, 18(1): 70.
- [3] KIM S, LEE J T. Short-term exposure to PM<sub>10</sub> and cardiovascular hospitalization in persons with and without disabilities; invisible population in air pollution epidemiology[J]. Sci Total Environ, 2022, 848: 157717.
- [4] 何敏, 齐金蕾, 殷鹏, 等. 1990 年与 2019 年中国归因于室外 PM<sub>2.5</sub> 暴露的心血管疾病负担分析[J]. 中国循环杂志, 2021, 36(5): 488-493.
- [5] WANG C, FENG L, CHEN K. The impact of ambient particulate matter on hospital outpatient visits for respiratory and circulatory system disease in an urban Chinese population[J]. Sci Total Environ, 2019, 666: 672-679.
- [6] ZHANG L L, WILSON J P, ZHAO N, et al. The dynamics of cardiovascular and respiratory deaths attributed to long-term PM<sub>2.5</sub> exposures in global megacities[J]. Sci Total Environ, 2022, 842: 156951.
- [7] LIN C Y, CHEN W L, CHEN T Z, et al. Lipid changes in extrapulmonary organs and serum of rats after chronic exposure to ambient fine particulate matter[J]. Sci Total Environ, 2021, 784: 147018.
- [8] RAMAKRISHNAN R, DOHERTY A, SMITH-BYRNE K, et al. Accelerometer measured physical activity and the incidence of cardiovascular disease: evidence from the UK Biobank cohort study [J]. PLoS Med, 2021, 18(1): e1003487.
- [9] DEMPSEY P C, STRAIN T, KHAW K T, et al. Prospective associations of accelerometer-measured physical activity and sedentary time with incident cardiovascular disease, cancer, and all-cause mortality[J]. Circulation, 2020, 141(13): 1113-1115.
- [10] DAIGLE C C, CHALUPA D C, GIBB F R, et al. Ultra-fine particle deposition in humans during rest and exercise[J]. Inhal Toxicol, 2003, 15(6): 539-552.
- [11] KIM S R, CHOI S, KIM K, et al. Association of the combined effects of air pollution and changes in physical activity with cardiovascular disease in young adults[J]. Eur Heart J, 2021, 42(25): 2487-2497.

(下转第 576 页)

- [J]. *Oncogene*, 2021, 40(15): 2667-2681.
- [15] WANG D D, JIN X Y, LEI M X, et al. USF<sub>1</sub>-ATRAP-PBX<sub>3</sub> axis promote breast cancer glycolysis and malignant phenotype by activating AKT/mTOR signaling[J]. *Int J Biol Sci*, 2022, 18(6): 2452-2471.
- [16] 徐伟鑫, 王春芳, 罗艳红. 松花粉对于肝癌细胞株 SMMC-7721 的生物学作用及与  $\alpha$ -烯醇酶及其下游 PI3K/AKT 信号通路蛋白的关联作用[J]. *右江民族医学院学报*, 2023, 45(1): 15-21.
- [17] CHEN S, TAO Y H, WANG Q, et al. Glucose induced-AKT/mTOR activation accelerates glycolysis and promotes cell survival in acute myeloid leukemia[J]. *Leuk Res*, 2023, 128: 107059.
- [18] SUN Y, LIU W J, ZHAO Q Y, et al. Down-Regulating the expression of miRNA-21 inhibits the glucose metabolism of A549/DDP cells and promotes cell death through the PI3K/AKT/mTOR/HIF-1 $\alpha$  pathway[J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 653596.
- [19] LIN S J, CHEN C, OUYANG P, et al. SELENOM knockout induces synaptic deficits and cognitive dysfunction by influencing brain glucose metabolism[J]. *J Agric Food Chem*, 2023, 71(3): 1607-1619.
- 收稿日期: 2023-04-05; 修回日期: 2023-05-08
- 
- (上接第 556 页)
- [12] RAZA W, KRACHLER B, FORSBERG B, et al. Air pollution, physical activity and ischaemic heart disease: a prospective cohort study of interaction effects[J]. *BMJ Open*, 2021, 11(4): e040912.
- [13] SUN S E, CAO W N, QIU H, et al. Benefits of physical activity not affected by air pollution: a prospective cohort study[J]. *Int J Epidemiol*, 2020, 49(1): 142-152.
- [14] GENG G N, ZHENG Y X, ZHANG Q, et al. Drivers of PM<sub>2.5</sub> air pollution deaths in China 2002-2017[J]. *Nat Geosci*, 2021, 14(9): 645-650.
- [15] XI Y Z, RICHARDSON D B, KSHIRSAGAR A V, et al. Effects of short-term ambient PM<sub>2.5</sub> exposure on cardiovascular disease incidence and mortality among U. S. hemodialysis patients: a retrospective cohort study[J]. *Environ Health*, 2022, 21(1): 33.
- [16] NAGATA J M, VITTINGHOFF E, GABRIEL K P, et al. Physical activity from young adulthood to middle age and premature cardiovascular disease events: a 30-year population-based cohort study[J]. *Int J Behav Nutr Phys Act*, 2022, 19(1): 123.
- [17] JALALI S, KARBAKHS M, MOMENI M, et al. Long-term exposure to PM<sub>2.5</sub> and cardiovascular disease incidence and mortality in an Eastern Mediterranean country: findings based on a 15-year cohort study[J]. *Environ Health*, 2021, 20(1): 112.
- [18] PETERMAN J E, BASSETT D R, FINCH W H, et al. Associations between active commuting and cardiovascular disease in the United States[J]. *J Phys Act Health*, 2021, 18(12): 1525-1531.
- [19] DEL POZO CRUZ B, AHMADI M N, LEE I M, et al. Prospective associations of daily step counts and intensity with cancer and cardiovascular disease incidence and mortality and all-cause mortality[J]. *JAMA Intern Med*, 2022, 113: e224000.
- [20] LÄANSITIE M, KANGAS M, JOKELAINEN J, et al. Cardiovascular disease risk and all-cause mortality associated with accelerometer-measured physical activity and sedentary time—a prospective population-based study in older adults[J]. *BMC Geriatr*, 2022, 22(1): 729.
- [21] KIM S R, CHOI S, KEUM N, et al. Combined effects of physical activity and air pollution on cardiovascular disease: a population-based study[J]. *J Am Heart Assoc*, 2020, 9(11): e013611.
- [22] TU R Q, HOU J, LIU X T, et al. Physical activity attenuated association of air pollution with estimated 10-year atherosclerotic cardiovascular disease risk in a large rural Chinese adult population: a cross-sectional study[J]. *Environ Int*, 2020, 140: 105819.
- [23] CHOI D, CHOI S, KIM K H, et al. Combined associations of physical activity and particulate matter with subsequent cardiovascular disease risk among 5-year cancer survivors[J]. *J Am Heart Assoc*, 2022, 11(9): e022806.
- [24] LIN Y, YANG X L, LIANG F C, et al. Benefits of active commuting on cardiovascular health modified by ambient fine particulate matter in China: a prospective cohort study[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2021, 224: 112641.
- 收稿日期: 2023-04-05; 修回日期: 2023-06-08