

· 中国学生体质与健康调研 ·

# 大气污染物 PM<sub>2.5</sub> 及其组分暴露与中国 9~18 岁儿童青少年心理困扰的关联研究

张奕 陈力 蒋家诺 马涛 刘婕妤 袁雯 郭桐君 陈曼曼 王若琳 董彦会  
宋逸 马军

北京大学公共卫生学院/北京大学儿童青少年卫生研究所, 北京 100191

通信作者: 马军, Email: majunt@bjmu.edu.cn

**【摘要】** 目的 分析中国 9~18 岁在校儿童青少年暴露于大气污染物 PM<sub>2.5</sub> 及其组分 [硫酸盐 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、硝酸盐 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、铵盐 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、有机物 (OM)、黑碳 (BC)] 与心理困扰的关联。方法 基于 2019 年全国学生体质与健康调研数据, 纳入 130 808 名 9~18 岁儿童青少年, 根据凯斯勒心理困扰量表 (K10) 进行评分和判定高心理困扰, 根据调查地点和时间匹配污染物年均暴露数据, 采用基于 logistic 回归的限制性立方样条方法对 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OM 及 BC 组分浓度和心理困扰关联进行拟合; 采用多因素 logistic 回归模型对不同年龄、性别、BMI 和身体活动亚组进行分析, 估计不同亚组暴露于高污染浓度污染物和高心理困扰的关联。结果 我国儿童青少年高心理困扰率为 30.4%, 女生高心理困扰率高于男生, 分别为 31.6% 和 29.1%, 差异有统计学意义 (P<0.05)。暴露于 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、OM 和中国 9~18 岁儿童青少年高心理困扰存在非线性正向关联, 当 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OM 和 BC 浓度较高时, 随着浓度继续上升, 高心理困扰发生风险的增加有所减缓甚至达到平台期; 而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 则表现为较低浓度时, 心理困扰风险变化不大, 但浓度较高时, 风险持续上升。PM<sub>2.5</sub> 及其组分暴露和体力活动不足组心理困扰有统计学关联, 和体力活动充足组无统计学关联; 与 13~15 岁、16~18 岁学生相比, 9~12 岁学生中, 高浓度污染物和高心理困扰关联更强。结论 大气污染物 PM<sub>2.5</sub> 及其组分与我国 9~18 岁儿童青少年心理困扰相关, 在体力活动不足的儿童青少年中, 高污染物暴露是高心理困扰的危险因素, 且 PM<sub>2.5</sub> 及其组分和心理困扰的关联存在年龄差异。

**【关键词】** 空气污染; 细颗粒物; 心理困扰; 儿童; 青少年

基金项目: 全国学生体质与健康调研

## Research on the association between ambient PM<sub>2.5</sub> and its components and psychological distress among Chinese children and adolescents aged 9-18 years

Zhang Yi, Chen Li, Jiang Jianuo, Ma Tao, Liu Jieyu, Yuan Wen, Guo Tongjun, Chen Manman, Wang Ruolin, Dong Yanhui, Song Yi, Ma Jun

Institute of Child and Adolescent Health, Peking University/School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China

Corresponding author: Ma Jun, Email: majunt@bjmu.edu.cn

**【Abstract】 Objective** To analyze the association between exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> and its components [sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), organic matter (OM), and black carbon (BC)] and psychological distress among school children and adolescents aged 9 to 18 years in China. **Methods** Based on data from the 2019 Chinese National Survey on Students' Constitution

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20230504-00276

收稿日期 2023-05-04 本文编辑 万玉立

引用格式: 张奕, 陈力, 蒋家诺, 等. 大气污染物 PM<sub>2.5</sub> 及其组分暴露与中国 9~18 岁儿童青少年心理困扰的关联研究[J]. 中华流行病学杂志, 2023, 44(10): 1575-1582. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20230504-00276.

Zhang Y, Chen L, Jiang JN, et al. Research on the association between ambient PM<sub>2.5</sub> and its components and psychological distress among Chinese children and adolescents aged 9-18 years[J]. Chin J Epidemiol, 2023, 44(10): 1575-1582. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20230504-00276.



and Health, 130 808 children and adolescents aged 9 to 18 years were included. Scoring and determination of higher psychological distress were based on the Kessler Psychological Distress Scale (K10), and annual average exposure data for air pollution were matched by survey location and time. We used a restricted cubic spline approach based on logistic regression to fit the associations between  $PM_{2.5}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ , organic matter, black carbon concentrations, and psychological distress. Logistic regression models were used to analyse different age, gender, BMI and physical activity subgroups to estimate the association between exposure to high levels of pollution and high levels of psychological distress in different subgroups. **Results** The proportion of children and adolescents with high levels of psychological distress in China was 30.4%, with girls being higher than boys at 31.6% and 29.1%, respectively ( $P < 0.05$ ). A non-linear positive association existed between exposure to  $PM_{2.5}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$  and organic matter concentrations and higher psychological distress. As  $PM_{2.5}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ , organic matter, and black carbon concentrations continued to rise, the increase in the risk of higher psychological distress slowed, while  $SO_4^{2-}$  showed little change in the OR of psychological distress at lower concentrations but continued to rise at higher concentrations.  $PM_{2.5}$  and its components were statistically associated with psychological distress in the physically inactive group but not in the physically active group. The association between high levels of pollutants and high psychological distress was stronger among students aged 9 to 12 years compared with students aged 13 to 15 years and 16 to 18 years. **Conclusions** The ambient pollutant  $PM_{2.5}$  and its components are associated with psychological distress in children and adolescents aged 9 to 18 years in China. High pollutant exposure is a risk factor for high psychological distress among physically inactive children and adolescents, and there are age differences in the association between  $PM_{2.5}$  and components and psychological distress.

**【Key words】** Air pollution; Particular matters; Psychological distress; Children; Adolescents

**Fund program:** Chinese National Survey on Students' Constitution and Health

空气污染已经成为一个全球性的环境健康问题,大气污染物  $PM_{2.5}$  及其组分对于心理健康的影响在近年来受到越来越多的关注<sup>[1]</sup>,儿童青少年处于身心发展的重要阶段,同时也是受环境污染影响最大的群体之一。 $PM_{2.5}$  是多种污染物组成的复杂混合物,其主要组分包括有机物(OM)(有机碳、多环芳烃等)、无机化合物[硫酸盐( $SO_4^{2-}$ )、硝酸盐( $NO_3^-$ )、铵盐( $NH_4^+$ )等]和生物成分(细菌、真菌和病毒)等<sup>[2]</sup>,不同组分对健康结局的影响各异。总体而言,由化石燃料驱动的严重空气污染带来的影响可以贯穿青春期一直延续到成年期,2016 年全球归因于  $PM_{2.5}$  的死亡人数达到了 290 万<sup>[2]</sup>。空气污染物会损害心血管、呼吸系统、神经系统以及其他器官系统,也影响儿童青少年的社会心理健康和精神障碍的发生,同时,气候变化带来的焦虑也是儿童健康的一大威胁<sup>[3]</sup>。心理困扰可以定义为与正常情绪波动相关的一系列精神痛苦和身体症状<sup>[4]</sup>,包括抑郁、焦虑和压力等,这可能是重度抑郁、焦虑症、精神分裂症、躯体化障碍或各种其他临床疾病的开始。当前国内常用的评价儿童心理健康的量表有自尊量表、SCL-90 抑郁量表、中学生心理健康量表以及凯斯勒心理困扰量表(K10)等<sup>[5]</sup>。其中,K10 能够广泛评估心理困扰即与正常情绪波

动相关的精神痛苦和身体症状<sup>[6]</sup>,并且可以筛查大规模人群的心理困扰情况,目前在儿童青少年、成年人和老年人中都有广泛应用<sup>[7-8]</sup>。

既往研究表明,空气污染和儿童青少年心理健康问题如焦虑、抑郁等心理困扰密切相关<sup>[9]</sup>,此外,与全球气候危机包括空气污染有关的焦虑影响了全球很大一部分 16~25 岁青少年<sup>[10]</sup>,10 个国家的儿童青少年调查显示超过半数的青少年面对环境气候问题具有心理困扰如焦虑、愤怒、无助或内疚中的 1 种负面情绪<sup>[3]</sup>,并且严重的空气污染对心理健康产生的影响可表现出长时间跨度,有纵向研究表明,12 岁受到的污染暴露和 18 岁抑郁症的发生显著相关<sup>[11]</sup>,多项研究中以年平均浓度评估发生心理结局前污染暴露水平<sup>[11-15]</sup>,而短期污染物浓度则一般用来评估污染物急性暴露对短期健康状态的影响,如心肌梗死发作等急性心血管疾病、呼吸系统急性感染等<sup>[16-17]</sup>。污染物导致负性心理包括抑郁、焦虑障碍、厌食、疲劳和认知改变等可能的机制:细颗粒物污染物的多种组分能够穿过血脑屏障引起神经炎症、先天免疫反应改变<sup>[15]</sup>,并有动物模型和实验研究支持炎症反应和氧化应激与精神病理学之间存在关联<sup>[18]</sup>。既往研究多关注各组分对成年人肺功能影响表现出的毒性差异,而对组分与心理健

康关联的研究很少,国内尚缺乏关于PM<sub>2.5</sub>及其组分污染物与儿童青少年心理困扰的大样本研究。本研究基于2019年全国的横断面抽样调查数据,探索PM<sub>2.5</sub>组分污染暴露和心理困扰的相关性,分析全国9~18岁儿童青少年长期暴露于空气中PM<sub>2.5</sub>及其组分污染与心理困扰的关联,为促进和提升儿童青少年心理健康提供证据。

## 对象与方法

1. 研究对象:来自2019年全国学生体质与健康调研数据,该调研采用多阶段分层整群抽样的方法,具体方法见文献[19],本研究对全国30个省(自治区、直辖市)(未包括西藏自治区)9~18岁儿童青少年进行分析,剔除心理问卷缺失(12 748名)、K10所有题目得分相同(33 039名)的儿童青少年,共纳入有效样本130 808名。

环境污染物暴露资料来自于中国大气成分近实时追踪数据集[20],根据调研日期和学校地点为每个研究对象匹配10 km分辨率的PM<sub>2.5</sub>及其组分浓度数据,以调研日期倒推过去一年的平均浓度作为个体暴露数据。

2. 主要指标与判定标准:暴露指标为研究对象调查时间前1年的PM<sub>2.5</sub>及其组分[SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OM、黑碳(BC)]年均浓度(μg/m<sup>3</sup>),根据环境空气质量标准中对PM<sub>2.5</sub>年平均时间二级浓度限制[21],以35 μg/m<sup>3</sup>为截断值,<35 μg/m<sup>3</sup>定义为低PM<sub>2.5</sub>污染,≥35 μg/m<sup>3</sup>定义为高PM<sub>2.5</sub>污染;根据PM<sub>2.5</sub>=35 μg/m<sup>3</sup>在研究人群中的百分位数(P<sub>33</sub>)估计各组分数据的高低污染截断值分别为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 6.0 μg/m<sup>3</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 7.1 μg/m<sup>3</sup>,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 4.8 μg/m<sup>3</sup>,OM 8.5 μg/m<sup>3</sup>,BC 1.7 μg/m<sup>3</sup>。

结局指标为心理困扰,采用K10进行评估,K10内容:“你是否经常无缘无故地感觉到疲累”“你是否经常感到紧张”“你是否经常紧张得没有什么事情可以使你平静下来”“你是否经常感到无助”“你是否经常感到休息不好且很不安”“你是否经常感到坐立不安”“你是否经常感到沮丧”“你是否经常感到任何事情都很困难”“你是否经常感到任何事情都不能激起你的兴趣”“你是否经常感到没有什么价值”。以上10个问题可以评估填表人在近4周内经历的焦虑和压力水平等状况发生的频率[7]。每条题目采用1~5分计分法(1分=几乎没有,2分=偶尔,3分=有些时候,4分=大部分时间,

5分=所有时间),量表所有题答分相同的问卷不纳入分析以避免隐瞒或随意填写造成干扰,将10条题目累加求和,总分分值越高表示心理困扰程度越严重。K10在已有研究中表现出了良好的信度[22-23]、效度且心理测量特性较好,适用于大规模人群研究[8]。K10总分≤19、20~、25~、≥30分别表示无、轻度、中度、重度心理困扰[24]。本研究以<25定义为低心理困扰,≥25定义为高心理困扰。

协变量包括一般人口学指标、身体测量指标和生活方式指标。一般人口学变量包括年龄、父/母文化程度和是否独生子女,身体测量指标包括身高、体重、BMI和血压水平(包括SBP和DBP),生活方式指标包括平均每日在校体育锻炼时间、体力活动水平、户外活动时间、视屏时间、睡眠时长是否充足。其中BMI根据《学龄儿童青少年超重与肥胖筛查》分为正常/消瘦、超重/肥胖[25],血压根据《7岁~18岁儿童青少年血压偏高筛查界值》分为正常、正常高值和偏高[26]。睡眠时间依据教育部《关于进一步加强中小学睡眠管理工作的通知》,定义小学生每日睡眠时间达到10 h、初中生达到9 h、高中生达到8 h为睡眠充足,反之为睡眠不足[27]。身体指标测量均按照统一的要求完成,由经过专业培训的人员进行测量,并由全国、省、市、县多级监督人员对调研过程进行质量控制。

3. 统计学分析:采用全国学生体质与健康调研专用录入软件进行数据录入,采用R 4.2.2软件进行统计学分析。用构成比表示计数资料,用 $\bar{x} \pm s$ 表示连续型资料,K10评分用 $\bar{x} \pm s$ 进行描述,采用 $\chi^2$ 检验分析基本情况差异。以心理困扰为因变量,以环境污染为自变量,采用基于logistic回归的限制性立方样条(RCS)对PM<sub>2.5</sub>及其组分与中国9~18岁儿童青少年心理困扰的非线性关联进行分析。在回归模型中加入交互项进行分析并结合既往文献中的分组变量选择亚组分析变量,采用调整协变量的logistic回归模型对不同体力活动、性别、年龄、BMI的儿童青少年亚组进行环境污染与心理困扰的关联分析。双侧检验,检验水准 $\alpha=0.05$ 。

## 结 果

1. 基本情况:研究对象年龄(14.20±2.77)岁,男生63 881名(48.84%),女生66 927名(51.16%)。K10评分为21.37±7.41,高心理困扰率为30.4%,女生K10评分(21.54±7.39)略高于男生(21.18±7.42),



女生高心理困扰报告发生率也高于男生,分别为31.6%和29.1%,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。纳入人群所在点校调查日期前1年的 $PM_{2.5}$ 年均浓度为( $40.35\pm 10.81$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $SO_4^{2-}$ 年均浓度为( $6.54\pm 1.69$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $NO_3^-$ 年均浓度为( $8.38\pm 2.98$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $NH_4^+$ 年均浓度为( $5.40\pm 1.72$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , OM 年均浓度为( $9.83\pm 2.43$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , BC 年均浓度为( $1.84\pm 0.41$ )  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2. 不同特征9~18岁儿童青少年心理困扰情况: $PM_{2.5}$ 及其组分高污染暴露人群中高心理困扰率高于低污染暴露人群,差异有统计学意义(均 $P<0.001$ );不同年龄组、血压、是否独生子女、父母文化程度、平均每日在校体育锻炼时间、中高强度身体活动时间、户外活动时间、视屏时间以及睡眠时长是否充足的儿童青少年高心理困扰率不同,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。见表1。

3.  $PM_{2.5}$ 及其组分与高心理困扰的非线性关联研究:基于logistic回归的RCS结果显示, $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、OM浓度和高心理困扰均呈非线性正相关( $P<0.05$ ),而 $NH_4^+$ 和BC虽然也表现出正相关趋势,但非线性拟合结果无统计学意义( $NH_4^+$ : $P=0.131$ , BC: $P=0.110$ )。当 $PM_{2.5}$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ 、OM和BC浓度较高时,随着浓度继续上升,风险增加有所减缓甚至达到平台期;而 $SO_4^{2-}$ 表现为较低浓度时,心理困扰风险变化不大,浓度较高时,风险持续上升。见图1。

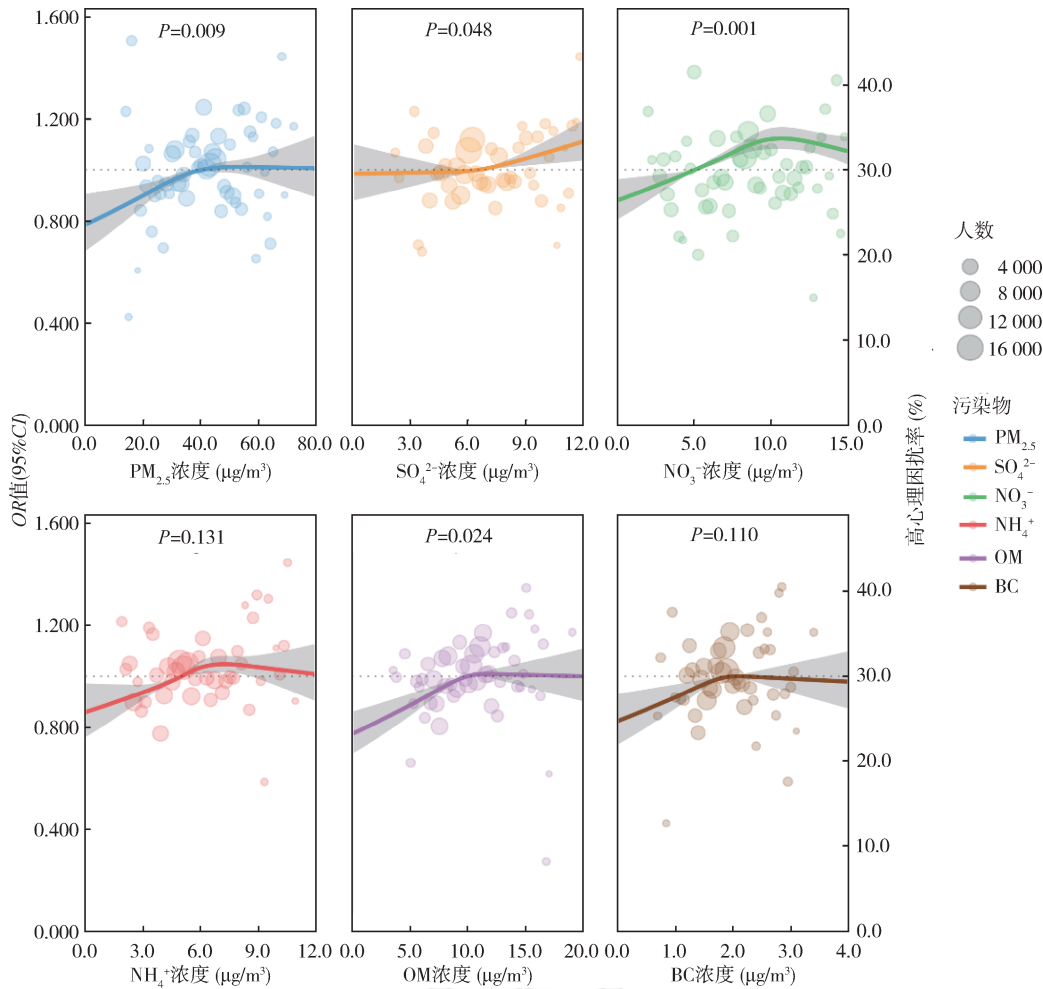
4. 性别、年龄与 $PM_{2.5}$ 及其组分对心理困扰的相互作用:交互作用分析结果显示, $PM_{2.5}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、OM和性别之间可能存在交互作用( $P<0.05$ ), $PM_{2.5}$ 及其组分和年龄段之间可能存在交互作用( $P<0.05$ )。见表2。

以 $PM_{2.5}$ 及其组分低污染组为参照,调整混杂因素的回归模型显示,在体力活动不足的儿童青少年中,高污染物暴露是高心理困扰的危险因素( $P<0.001$ )。 $PM_{2.5}$ 及其组分污染和体力活动充足组心理困扰无统计学关联( $P>$

表1 不同特征9~18岁儿童青少年心理困扰情况( $n=130\ 808$ )

特征	人数 (构成比,%)	高心理困扰 人数(率,%) <sup>a</sup>	$\chi^2$ 值	P值
$PM_{2.5}$			24.10	<0.001
低污染	43 414(33.2)	12 808(29.5)		
高污染	87 394(66.8)	26 943(30.8)		
$SO_4^{2-}$			53.95	<0.001
低污染	43 490(33.2)	12 640(29.1)		
高污染	87 318(66.8)	27 111(31.0)		
$NO_3^-$			31.17	<0.001
低污染	43 513(33.3)	12 785(29.4)		
高污染	87 295(66.7)	26 966(30.9)		
$NH_4^+$			34.03	<0.001
低污染	43 515(33.3)	12 766(29.3)		
高污染	87 293(66.7)	26 985(30.9)		
OM			28.49	<0.001
低污染	43 578(33.3)	12 824(29.4)		
高污染	87 230(66.7)	26 927(30.9)		
BC			25.64	<0.001
低污染	43 315(33.1)	12 766(29.5)		
高污染	87 493(66.9)	26 985(30.8)		
年龄组(岁)			2 139.46	<0.001
9~	49 332(37.7)	11 288(22.9)		
13~	41 152(31.5)	14 020(34.1)		
16~18	40 324(30.8)	14 443(35.8)		
血压 <sup>b</sup>			54.68	<0.001
正常	89 123(68.5)	26 582(29.8)		
正常高值	24 960(19.2)	8 041(32.2)		
偏高	16 044(12.3)	4 959(30.9)		
BMI分组			0.86	0.650
正常/消瘦	99 889(76.4)	30 310(30.3)		
超重	18 665(14.2)	5 726(30.7)		
肥胖	12 254(9.4)	3 715(30.3)		
独生子女 <sup>b</sup>			119.34	<0.001
是	49 978(39.6)	14 373(28.8)		
否	76 359(60.4)	24 171(31.7)		
父亲文化程度 <sup>b</sup>			562.43	<0.001
初中及以下	59 396(48.9)	19 932(33.6)		
高中/大专及以上	62 031(51.1)	16 932(27.3)		
母亲文化程度 <sup>b</sup>			558.94	<0.001
初中及以下	63 962(52.6)	21 298(33.3)		
高中/大专及以上	57 671(47.4)	15 603(27.1)		
平均每日在校体育锻炼时间(h) <sup>b</sup>			1 141.85	<0.001
<1	77 143(59.0)	26 208(34.0)		
$\geq 1$	53 652(41.0)	13 539(25.2)		
平均每日中高强度身体活动时间(h) <sup>b</sup>			8.41	0.004
<1	124 345(95.6)	37 889(30.5)		
$\geq 1$	5 787(4.4)	1 659(28.7)		
平均每日户外活动时间(h) <sup>b</sup>			133.66	<0.001
<2	121 620(95.4)	37 293(30.7)		
$\geq 2$	5 920(4.6)	1 396(23.6)		
平均每日视屏时间(h) <sup>b</sup>			1 287.24	<0.001
$\leq 2$	94 637(72.6)	26 102(27.6)		
>2	35 793(27.4)	13 538(37.8)		
平均每日睡眠时长 <sup>b</sup>			51.27	<0.001
充足	24 096(18.6)	6 825(28.3)		
不足	105 625(81.4)	32 400(30.7)		

注:<sup>a</sup>分母为各特征分组人数;<sup>b</sup>数据有缺失,构成比以实际人数进行计算; $SO_4^{2-}$ :硫酸盐; $NO_3^-$ :硝酸盐; $NH_4^+$ :铵盐;OM:有机物;BC:黑碳



注:实线为OR点估计值;阴影部分为95%CI;散点为不同污染物浓度下高心理困扰率(%);回归模型调整年龄、性别、BMI分组、是否高血压、是否独生子女、父/母文化程度、平均每日在校体育锻炼时间、身体活动水平、户外活动时间、睡眠是否充足;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:硫酸盐;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:硝酸盐;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>:铵盐;OM:有机物;BC:黑碳

图1 基于逻辑回归的限制性立方样条估计PM<sub>2.5</sub>及其组分与中国9~18岁儿童青少年心理困扰的非线性关联

0.05);PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>高污染为男生、女生心理困扰的危险因素,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OM和BC在女生组中表现为危险因素(均P<0.05);和正常/消瘦学生相比,在超重/肥胖群体中,高浓度的PM<sub>2.5</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OM、BC和高心理困扰关联更强;与13~15岁、16~18岁学生相比,9~12岁学生中,高浓度污染物和高心理困扰关联更强。见表3。

## 讨论

本研究基于2019年全国学生体质与健康调研的全国代表性数据分析中国9~18岁儿童青少年长期暴露于大气PM<sub>2.5</sub>及其组分污染物和心理困扰的关联,研究结果显示,大气污染物PM<sub>2.5</sub>及其组分SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、OM浓度和高心理困扰均存在非线性正向关联,随着污染物暴露水平的增加,高心理困扰

发生风险升高;而体力活动充足时,PM<sub>2.5</sub>及其组分污染和心理困扰的关联均不显著,表明体力活动可能是调节PM<sub>2.5</sub>污染物和心理困扰关联的关键因素之一;青春期开始之前(9~12岁),污染和心理困扰的关联比初高中阶段(13~18岁)更强。

近年来相关研究多集中于成年人空气污染暴露与抑郁症之间的关联<sup>[28]</sup>,对于人群的广泛非病理诊断的心理困扰研究较少。与本研究结果一致的是,既往研究支持空气污染暴露对心理健康相关问题包括焦虑、抑郁等典型症状有不利影响<sup>[29]</sup>,比如一项大样本横断面研究表明PM<sub>2.5</sub>每增加10 μg/m<sup>3</sup>,成年人出现神经紧张、焦虑和抑郁相关症状的风险增加2.31倍<sup>[12]</sup>;既往也有文献支持空气污染会增加儿童青少年情感障碍和大脑功能改变的风险<sup>[30]</sup>,居住在PM<sub>2.5</sub>浓度较高地区的青少年对社会压力可能表现出更大的自主神经反应性(β=0.27)<sup>[31]</sup>;研究也

表2 性别、年龄与PM<sub>2.5</sub>及其组分对心理困扰的交互作用分析

Table with 3 columns: 污染物(交互项), β值, P值. Rows include Model 1 (Female), Model 2 (Age 13-15), and Model 2 (Age 16-18) for various pollutants like PM2.5, SO4 2-, NO3 -, NH4 +, OM, BC.

注:模型1和模型2分别调整性别、年龄、身体活动、BMI、血压、是否独生子女、父/母文化程度、视屏时间和睡眠时间中除交互项之外的其他变量;性别以男性为参照;年龄以9~12岁组为参照;SO4 2-:硫酸盐;NO3 -:硝酸盐;NH4 +:铵盐;OM:有机物;BC:黑碳;°可能存在交互作用

表明无论污染类型如何,在成年人中,身体活动可以减轻空气污染对心理健康的不利影响,PM2.5对低活动水平的成年人心理健康损伤影响更高[14,32]。与本研究不完全相同的是,对14种颗粒物成分的研究显示,与精神疾病入院相关风险关联最强的颗粒成分是SO4 2-和铅,与NO3 -、有机碳的关联则较小[31],还有回归性队列研究发现BC暴露和抑郁症状相关但与焦虑症状无关[13],这可能由于不同研究所在地的PM2.5组分来源和比例不同,相关的心理健康效应也不同。本研究中PM2.5及其组分对于女生心理困扰的影响更显著,这可能是由于青少年期女生心理困扰情绪相对于男生而言更容易受到外界环境的影响[33],在既往颗粒物与抑郁情绪研究中也发现了类似特征[14]。总PM2.5和4种组分对9~15岁儿童青少年的心理困扰影响显著,对16~18岁影响则不显著,原因可能是小学生和初中生的心理状态尚不如高中阶段稳定和成熟,既往研究发现,年龄越小的学生心理应激反应越强烈[34]。本研究

表3 PM2.5及其组分与心理困扰关联的亚组分析

Large table with columns for 性别 (男/女), 年龄组(岁) (9~13, 16~18), 身体活动 (不足/超重/肥胖), and BMI分类 (正常/消瘦/超重/肥胖). Rows list PM2.5 and its components with OR values and P values.

注:°以二级污染限值标准35 μg/m³划分为低PM2.5组和高PM2.5组,以PM2.5截断值在人群中所占百分位(P33)为参照,将组分污染物也分别分为低污染组和高污染组,参照组均为低污染组;体力活动充足指平均每日中高强度水平及以上身体活动时间≥1 h,分别调整性别、年龄、BMI、血压、是否独生子女、父母文化程度、平均每日视屏时间和平均每日睡眠时间中除分组变量之外的其他变量;SO4 2-:硫酸盐;NO3 -:硝酸盐;NH4 +:铵盐;OM:有机物;BC:黑碳;°有统计学意义



中总 PM<sub>2.5</sub> 和 5 种组分对于正常/消瘦的儿童比对于超重/肥胖的儿童心理影响更显著,可能由于超重/肥胖学生的心理压力调节和正常/消瘦学生存在差异,这与既往认为的超重/肥胖人群对大气污染物带来的不良健康结局易感性如高血压、代谢异常和呼吸系统疾病不同<sup>[35]</sup>。

虽然多个国家、多个队列研究探索了 PM<sub>2.5</sub> 和心理健康问题之间的关联,并且也有研究认为 PM<sub>2.5</sub> 的不同成分可能与其导致的健康效应结果有关<sup>[36]</sup>,但目前关于各个组分独立或协同发挥作用的效应大小和具体机制差异尚无统一定论。本研究中总体 PM<sub>2.5</sub> 和 5 种组分分别反映了所有组分的共同效应和主要组分的独立效应,共同效应与独立效应方向一致,总体 PM<sub>2.5</sub> 及其组分(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OM 和 BC)均与心理困扰得分正相关。目前很少有毒理学研究支持 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 或 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和健康结局风险之间的因果关系,但有研究认为与之结合的金属离子或多环芳烃可能是导致结局的重要原因<sup>[37]</sup>。相关研究多数认为总体细颗粒物空气污染导致心理健康损害的最常见和基本机制可以总结为炎症反应和氧化应激<sup>[36,38]</sup>,虽然导致神经炎症受到多种环境因素的影响,但空气污染是环境中诱发神经炎症的最普遍来源,并且炎症反应在精神类疾病诊断中被认为可起到关键作用<sup>[11]</sup>;动物研究则表明,超细颗粒沉积在额叶皮质和皮质下等区域以及沉积区域的炎症反应和血管病理等过度表达可能是空气污染对神经心理发育和损伤影响的功能和结构基础<sup>[39]</sup>。细颗粒物可以通过血脑屏障引发神经炎症<sup>[15]</sup>,青少年正处在身心的持续发育中,暴露于细颗粒物可能会产生比成年人更大的影响。

本研究基于全国学生体质与健康调研数据,结果具有代表性,并根据地址和调查时间匹配了所有样本的 PM<sub>2.5</sub> 组分暴露数据,采用了非线性模型更贴近实际。本研究存在局限性。第一,本研究基于全国学生体质与健康调研数据,未对非学生的儿童青少年群体进行分析;第二,使用横断面数据无法进行因果推断;第三,污染物分辨率较低,以学校周围 10 km 范围年平均污染物浓度粗略评估了暴露水平,个体暴露与之可能存在一定误差,未来需要更准确地评估个体暴露水平并延伸至纵向调查。

综上所述,本研究结果提示,PM<sub>2.5</sub> 及其组分暴露与中国 9~18 岁儿童青少年高心理困扰存在非线性正向关联,并且积极的体力活动和锻炼以及充足的睡眠等行为方式可能在其中起到调节作用以保

护儿童青少年心理健康,控制 PM<sub>2.5</sub> 污染在国家标准的二级限值之下是应对其带来的负面健康效应的重要办法。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突

**作者贡献声明** 张奕:实施研究、数据处理、统计分析、撰写论文;陈力、蒋家诺:实施研究、分析/解释数据;马涛、刘婕妤、袁雯、郭桐君、陈曼曼、王若琳:内容审阅、资料查阅、论文修改;董彦会、宋逸:内容审阅、论文修改、指导;马军:酝酿/设计、内容审阅、指导

## 参 考 文 献

- [1] Helldén D, Andersson C, Nilsson M, et al. Climate change and child health: a scoping review and an expanded conceptual framework[J]. *Lancet Planet Health*, 2021, 5(3):e164-175. DOI:10.1016/S2542-5196(20)30274-6.
- [2] Liang CS, Duan FK, He KB, et al. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM<sub>2.5</sub>[J]. *Environ Int*, 2016, 86: 150-170. DOI:10.1016/j.envint.2015.10.016.
- [3] Hickman C, Marks E, Pihkala P, et al. Climate anxiety in children and young people and their beliefs about government responses to climate change: a global survey[J]. *Lancet Planet Health*, 2021, 5(12): e863-873. DOI: 10.1016/S2542-5196(21)00278-3.
- [4] American Psychological Association. APA dictionary of psychology[EB/OL]. [2023-05-01]. <https://dictionary.apa.org/psychological-distress>.
- [5] 祁双翼, 西英俊, 马辛. 中国人心理健康研究综述[J]. *中国健康心理学杂志*, 2019, 27(6):947-953. DOI:10.13342/j.cnki.cjhp.2019.06.037.
- [6] Qi SY, Xi YJ, Ma X. A review of Chinese research on mental health[J]. *China J Health Psychol*, 2019, 27(6): 947-953. DOI:10.13342/j.cnki.cjhp.2019.06.037.
- [7] Andrews G, Slade T. Interpreting scores on the Kessler psychological distress scale (K10) [J]. *Aust N Z J Public Health*, 2001, 25(6):494-497. DOI: 10.1111/j.1467-842x.2001.tb00310.x.
- [8] 徐凌忠, 王建新, 孙辉, 等. Kessler 10 在我国的首次应用研究及其重要意义[J]. *卫生软科学*, 2005, 19(6):410-412, 421. DOI:10.3969/j.issn.1003-2800.2005.06.013.
- [9] Xu LZ, Wang JX, Sun H, et al. Researching the application of Kessler 10 for the first time and it's important significance[J]. *Soft Science of Health*, 2005, 19(6): 410-412, 421. DOI:10.3969/j.issn.1003-2800.2005.06.013.
- [10] 于晓霞, 姬艳博, 乔建红, 等. 简易心理状况评定量表 Kessler10 的应用现状及展望[J]. *齐鲁护理杂志*, 2017, 23(2):57-59. DOI:10.3969/j.issn.1006-7256.2017.02.029.
- [11] Yu XX, Ji YB, Qiao JH, et al. Current status and perspectives of the application of the Kessler10, a brief psychological condition rating scale[J]. *J Qilu Nurs*, 2017, 23(2):57-59. DOI:10.3969/j.issn.1006-7256.2017.02.029.
- [12] Suades-González E, Gascon M, Guxens M, et al. Air pollution and neuropsychological development: a review of the latest evidence[J]. *Endocrinology*, 2015, 156(10): 3473-3482. DOI:10.1210/en.2015-1403.
- [13] Sampaio F, Sequeira C. Climate anxiety: trigger or threat for mental disorders?[J]. *Lancet Planet Health*, 2022, 6(2): e89. DOI:10.1016/S2542-5196(22)00008-0.
- [14] Roberts S, Arseneault L, Barratt B, et al. Exploration of NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> air pollution and mental health problems using high-resolution data in London-based children from a UK longitudinal cohort study[J]. *Psychiatry Res*, 2019, 272:8-17. DOI:10.1016/j.psychres.2018.12.050.
- [15] Hao G, Zuo L, Xiong P, et al. Associations of PM<sub>2.5</sub> and road traffic noise with mental health: Evidence from UK Biobank[J]. *Environ Res*, 2022, 207:112221. DOI:10.1016/

- j.envres.2021.112221.
- [13] Shen MX, Gu XY, Li SX, et al. Exposure to black carbon is associated with symptoms of depression: A retrospective cohort study in college students[J]. *Environ Int*, 2021, 157:106870. DOI:10.1016/j.envint.2021.106870.
- [14] Wang RY, Liu Y, Xue DS, et al. Cross-sectional associations between long-term exposure to particulate matter and depression in China: the mediating effects of sunlight, physical activity, and neighborly reciprocity[J]. *J Affective Disord*, 2019, 249:8-14. DOI:10.1016/j.jad.2019.02.007.
- [15] Calderón-Garcidueñas L, Solt AC, Henríquez-Roldán C, et al. 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  $\beta$ -42 and  $\alpha$ -Synuclein in children and young adults[J]. *Toxicol Pathol*, 2008, 36(2):289-310. DOI:10.1177/0192623307313011.
- [16] Xu L, Taylor JE, Kaiser J. Short-term air pollution exposure and COVID-19 infection in the United States[J]. *Environ Pollut*, 2022, 292: 118369. DOI: 10.1016/j.envpol. 2021. 118369.
- [17] de Bont J, Jaganathan S, Dahlquist M, et al. Ambient air pollution and cardiovascular diseases: an umbrella review of systematic reviews and meta-analyses[J]. *J Intern Med*, 2022, 291(6):779-800. DOI:10.1111/joim.13467.
- [18] Danese A, Baldwin JR. Hidden wounds? Inflammatory links between childhood trauma and psychopathology[J]. *Annu Rev Psychol*, 2017, 68: 517-544. DOI: 10.1146/annurev-psych-010416-044208.
- [19] 中国学生体质与健康研究组. 2019 年中国学生体质与健康调研报告[M]. 北京:高等教育出版社, 2022. Research Group on Physical Fitness and Health of Chinese Students. Reports on the physical fitness and health surveillance of Chinese school students[M]. Beijing: Higher Education Press, 2022.
- [20] Liu SG, Geng GN, Xiao QY, et al. Tracking daily concentrations of PM<sub>2.5</sub> chemical composition in China since 2000[J]. *Environ Sci Technol*, 2022, 56(22): 16517-16527. DOI:10.1021/acs.est.2c06510.
- [21] 生态环境部. 环境空气质量标准[EB/OL] (2016-01-01) [2023-08-08]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqjzlbz/201203/t20120302\\_224165.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqjhjbh/dqjzlbz/201203/t20120302_224165.shtml).
- [22] 陈芸, 王丹, 侯雅楠, 等. 基于 Kessler 10 量表的中学生家庭环境与心理健康关系分析[J]. *中国儿童保健杂志*, 2019, 27(9):967-970. DOI:10.11852/zgetbjzz2019-0436. Chen Y, Wang D, Hou YN, et al. Analysis of the relationship between family environment and mental health of middle school students based on Kessler 10 Scale[J]. *Chin J Child Health Care*, 2019, 27(9):967-970. DOI:10.11852/zgetbjzz 2019-0436.
- [23] Chan SM, Fung TCT. Reliability and validity of K10 and K6 in screening depressive symptoms in Hong Kong adolescents[J]. *Vulnerable Child Youth Stud*, 2014, 9(1): 75-85. DOI:10.1080/17450128.2013.861620.
- [24] Gray NS, O'Connor C, Knowles J, et al. The influence of the COVID-19 pandemic on mental well-being and psychological distress: impact upon a single country[J]. *Front Psychiatry*, 2020, 11: 594115. DOI: 10.3389/fpsy. 2020.594115.
- [25] 国家卫生健康委员会. 学龄儿童青少年超重与肥胖筛查[EB/OL] (2018-03-30)[2023-05-04]. <http://www.nhc.gov.cn/wjw/pqt/201803/a7962d1ac01647b9837110bfd2d69b26.shtml>.
- [26] 国家卫生健康委员会. 7 岁~18 岁儿童青少年血压偏高筛查界值[EB/OL]. (2018-07-04)[2023-05-04]. <http://www.nhc.gov.cn/wjw/pqt/201807/6cee88c1d050493ab50a411a2978f901.shtml>.
- [27] 中华人民共和国教育部. 教育部办公厅关于进一步加强中
- 小学生睡眠管理工作的通知[EB/OL]. (2021-03-30) [2023-05-04]. [http://www.moe.gov.cn/srcsite/A06/s3321/202104/t20210401\\_523901.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A06/s3321/202104/t20210401_523901.html).
- [28] Gu XL, Guo TJ, Si YQ, et al. Association between ambient air pollution and daily hospital admissions for depression in 75 Chinese cities[J]. *Am J Psychiatry*, 2020, 177(8): 735-743. DOI:10.1176/appi.ajp.2020.19070748.
- [29] Khosrorad R, Aval HE, Najafi ML, et al. The association of exposure to air pollution and depression in women: a cross-sectional study of a middle-income country[J]. *Environ Res*, 2022, 215: 114266. DOI: 10.1016/j. envres. 2022.114266.
- [30] Xie HS, Cao Y, Li JF, et al. Affective disorder and brain alterations in children and adolescents exposed to outdoor air pollution[J]. *J Affective Disord*, 2023, 331: 413-424. DOI:10.1016/j.jad.2023.03.082.
- [31] Miller JG, Gillette JS, Manczak EM, et al. Fine particle air pollution and physiological reactivity to social stress in adolescence: the moderating role of anxiety and depression[J]. *Psychosom Med*, 2019, 81(7):641-648. DOI: 10.1097/PSY.0000000000000714.
- [32] Ju K, Lu LY, Wang W, et al. Causal effects of air pollution on mental health among Adults—An exploration of susceptible populations and the role of physical activity based on a longitudinal nationwide cohort in China[J]. *Environ Res*, 2023, 217: 114761. DOI: 10.1016/j. envres. 2022.114761.
- [33] 张朝. 初中学生心理健康状况调查[J]. *中国公共卫生*, 2006, 22(8): 911-912. DOI: 10.3321/j. issn: 1001-0580. 2006.08.009. Zhang C. A survey on the mental health status of junior high school students [J]. *Chin J Public Health*, 2006, 22(8): 911-912. DOI:10.3321/j.issn:1001-0580.2006.08.009.
- [34] 黄盈, 马丽莉, 梁宝勇. 中学生应激事件和困扰症状[J]. *中国心理卫生杂志*, 2002, 16(8): 529-530, 545. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6729.2002.08.007. Huang Y, Ma LL, Liang BY. Life stress and distress of middle school students[J]. *Chin Ment Health J*, 2002, 16(8): 529-530, 545. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6729. 2002.08.007.
- [35] 郭新彪, 李陆一, 邓芙蓉. 关注肥胖人群对大气污染健康影响的易感性[J]. *兰州大学学报: 医学版*, 2022, 48(5):1-4. DOI:10.13885/j.issn.1000-2812.2022.05.001. Guo XB, Li LY, Deng FR. Attention to the susceptibility of obese people to the health effects of air pollution[J]. *J Lanzhou Univ: Med Sci*, 2022, 48(5):1-4. DOI:10.13885/j. issn.1000-2812.2022.05.001.
- [36] 彭仁祯, 李周洲, 徐燕意. 大气细颗粒物不同组分的毒理学效应及其分子作用机制研究进展[J]. *中华预防医学杂志*, 2022, 56(5): 645-651. DOI: 10.3760/cma. j. cn112150-20210516-00471. Peng RZ, Li ZZ, Xu YY. Advances on the toxicology and molecular mechanisms of different components of ambient fine particulate matter[J]. *Chin J Prev Med*, 2022, 56(5):645-651. DOI:10.3760/cma.j.cn112150-20210516-00471.
- [37] Reiss R, Anderson EL, Cross CE, et al. Evidence of health impacts of sulfate- and nitrate-containing particles in ambient air[J]. *Inhal Toxicol*, 2007, 19(5): 419-449. DOI: 10.1080/08958370601174941.
- [38] Block ML, Calderón-Garcidueñas L. Air pollution: mechanisms of neuroinflammation and CNS disease[J]. *Trends Neurosci*, 2009, 32(9): 506-516. DOI: 10.1016/j. tins.2009.05.009.
- [39] Guxens M, Sunyer J. A review of epidemiological studies on neuropsychological effects of air pollution[J]. *Swiss Med Wkly*, 2012, 142:w13322. DOI:10.57187/smw.2012. 13322.