



PM_{2.5}及其化学组分长期暴露对中老年人衰弱发生的影响: 一项前瞻性队列研究*

陈坤^{ID}, 刘倩, 吴晨晨, 杨力华, 林小军^{ID}[△]

四川大学华西公共卫生学院/四川大学华西第四医院 卫生政策与管理学系(成都 610041)

【摘要】目的 探讨PM_{2.5}及其化学组分长期暴露对中老年人衰弱发生风险的影响。**方法** 基于2011–2020年中国健康与养老追踪调查和大气成分近实时追踪数据集开展前瞻性队列研究。采用衰弱指数评估衰弱状况,运用时间依赖的Cox比例风险模型分析PM_{2.5}及其化学组分(黑碳、有机化合物、硫酸盐、硝酸盐、铵盐)长期暴露对衰弱发生风险的影响。**结果** 研究共纳入9603名受访者。在调整混杂因素后,受访者过去一年平均暴露于PM_{2.5}质量浓度每增加一个四分位距,衰弱发生风险升高10.0%[风险比(hazard ratio, HR)=1.100, 95%置信区间(confidence interval, CI): 1.015 ~ 1.193]。在具体化学组分方面,有机化合物、黑碳、铵盐、硫酸盐、硝酸盐等长期暴露浓度每增加一个四分位距,衰弱风险分别升高14.2%(HR=1.142, 95%CI: 1.055 ~ 1.236)、13.1%(HR=1.131, 95%CI: 1.041 ~ 1.229)、9.8%(HR=1.098, 95%CI: 1.010 ~ 1.194)、8.8%(HR=1.088, 95%CI: 0.996 ~ 1.187)和8.1%(HR=1.081, 95%CI: 0.996 ~ 1.172)。**结论** PM_{2.5}及黑碳、有机化合物、铵盐等化学组分长期暴露是中老年人衰弱发生的风险因素。建议在环境政策制定中优先加强对黑碳及有机气溶胶排放的控制,以降低空气污染对人口老龄化背景下的公共卫生负担。

【关键词】 衰弱 细颗粒物 公共卫生 前瞻性研究

Effect of Long-term Exposure to PM_{2.5} and Its Chemical Components on Frailty Incidence in Middle-aged and Older Adults in China: A Prospective Cohort Study

Chen Kun^{ID}, Liu Qian, Wu Chenchen, Yang Lihua, Lin Xiaojun^{ID}[△]. Department of Health Policy and Management, West China School of Public Health and West China Fourth Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China

[△] Corresponding author

This study was supported by National Science and Technology Major Project (No. 2024ZD0523900, 2024ZD0523901).

[Abstract] Objective To investigate the effect of long-term exposure to PM_{2.5} and its chemical components on frailty risk among middle-aged and older adults in China. **Methods** A prospective cohort study was conducted using data from the China Health and Retirement Longitudinal Study (CHARLS) collected between 2011 and 2020 and the Tracking Air Pollution (TAP) dataset. The frailty status of the participants was assessed using the frailty index. A time-dependent Cox proportional hazards model was applied to examine the associations between frailty risk and long-term exposure to PM_{2.5} and its chemical components, including black carbon, organic matter, sulfate, nitrate, and ammonium. **Results** A total of 9603 participants were included in the analysis. After adjusting for potential confounders, each interquartile range increase in the average PM_{2.5} concentration during the preceding year was associated with a 10.0% higher risk of frailty (hazard ratio [HR] = 1.100, 95% CI: 1.015-1.193). For individual chemical components, each interquartile range increase in the one-year average concentrations of organic matter, black carbon, ammonium, sulfate, and nitrate, the participants were exposed to was associated with a 14.2% (HR = 1.142, 95% CI: 1.055-1.236), 13.1% (HR = 1.131, 95% CI: 1.041-1.229), 9.8% (HR = 1.098, 95% CI: 1.010-1.194), 8.8% (HR = 1.088, 95% CI: 0.996-1.187), and 8.1% (HR = 1.081, 95% CI: 0.996-1.172) higher risk of frailty, respectively. **Conclusion** Long-term exposures to PM_{2.5} and its chemical components, particularly black carbon, organic matter, and ammonium, were associated with a higher risk of frailty among middle-aged and older adults in China. Priority should be given to strengthening emission control of black carbon and organic aerosols to mitigate the public health burden of air pollution in the context of an aging society.

[Key words] Frailty Fine particulate matter Public health Prospective study

* 国家科技重大专项(No. 2024ZD0523900, No. 2024ZD0523901)资助

[△] 通信作者

出版日期: 2026-07-20

衰弱是一种与慢性疾病患病情况、日常生活活动能力和心理健康密切相关的临床综合征^[1-2],表现为个体的稳态储备减少,对内源性压力的易感性增强。全球范围内,有数百万老年人患有衰弱^[1],2021年大约24%的人口处于衰弱状态^[3],其高患病率所造成的个人医疗保健支出及社会经济负担不容小觑。流行病学证据表明,衰弱可使住院死亡率升高6倍,住院时间增加55%,住院费用增加29%^[4]。经济负担分析显示,衰弱个体月均超额医疗支出达457美元,其中住院费用占75%^[5],且医疗保健支出占总护理费用的40%~76%^[6]。值得注意的是,衰弱使发生灾难性医疗支出(自付费用 $\geq$ 家庭支付能力40%)的风险显著增加3.19倍^[7],这对医疗保障体系形成严峻考验。寻找并控制衰弱的驱动因素,对降低老龄化社会疾病负担具有重要战略意义。

衰弱的发生发展涉及遗传-环境-疾病的复杂交互作用,其中空气污染的致病机制近年来备受关注^[8-9]。流行病学研究表明,PM_{2.5}作为非传染性疾病的重要环境风险因子,2019年在全球范围内共导致超过420万人过早死亡^[10]。大气颗粒物致病机制的相关研究发现,PM_{2.5}能通过诱导系统性氧化应激及慢性低度炎症,引发血管内皮功能障碍^[11]、代谢紊乱^[12],以及神经退行性病变^[13],进而加速多器官功能衰退,与衰弱的核心病理特征(肌力下降、平衡失调及认知受损)存在显著关联^[14-15]。颗粒物化学组分相关研究发现,PM_{2.5}及其关键组分(碳质气溶胶、二次无机离子等)可通过诱导呼吸系统的氧化应激、炎症和微生物生态失调,促进慢性阻塞性肺疾病的发病^[16]。尽管我国近年来加强空气污染治理,但PM_{2.5}空气污染问题依然突出,其长期暴露对中老年人群衰弱发生风险的影响亟需精准评估。

本研究利用2011–2020年中国健康与养老追踪调查(China Health and Retirement Longitudinal Study, CHARLS)的数据,结合大气成分近实时追踪数据集(Tracking Air Pollution, TAP)中的PM_{2.5}及化学组分数据,分析PM_{2.5}及其化学组分[黑碳(black carbon, BC)、有机化合物(organic matter, OM)、硫酸盐(sulfate, SO₄²⁻)、硝酸盐(nitrate, NO₃⁻)、铵盐(ammonium, NH₄⁺)]长期暴露与中老年人群衰弱发生风险的关联,并进一步揭示污染物暴露的人口学异质性,为识别易感人群及制定靶向性环境健康干预策略提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源

CHARLS是针对我国45岁及以上中老年人家庭和个

人的追踪调查,覆盖28个省(自治区、直辖市)、150个县、450个社区(村),约1万户家庭中的1.7万人。CHARLS于2011年进行全国基线调查,分别于2013年、2015年、2018年和2020年进行了4轮追踪随访调查。该调查经北京大学伦理委员会批准(IRB00001052-11015)成立,所有参与者签署知情同意书。空气污染暴露数据来源于TAP数据集^[17]。该数据集构建了自2000年以来具有长期历史记录并持续动态更新的PM_{2.5}及其化学组分全覆盖数据,空间分辨率为10 km。依据各化学组分对PM_{2.5}总质量的相对贡献,对污染物浓度进行组分划分,量化了碳质气溶胶(以BC为代表)、二次无机气溶胶(以SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺为主要组分)以及有机物(OM,包括有机碳及微量多环芳烃、烷烃等)等主要成分的浓度水平。验证结果显示,TAP数据集中PM_{2.5}及其化学组分浓度与地面监测数据具有较高一致性,相关系数介于0.67~0.80之间。气象因素数据(温度及相对湿度)来源于中国区域地面气象要素驱动数据集2.0版本。该数据集融合了欧洲中期天气预报中心的ERA5再分析数据与地面气象站观测数据,并结合人工智能技术进行数据融合,时间分辨率为3 h,水平空间分辨率为0.1°,时间跨度长达74年(1951—2024年)^[18]。

1.2 研究对象

本研究基于CHARLS 2011年基线调查数据构建前瞻性队列,整合4轮随访数据,获取研究对象的基本人口学特征及衰弱状态相关信息。研究对象的纳入标准为:①基线年龄 $\geq$ 45岁;②至少参加两轮调查的受访者。排除标准:①基线调查时发生衰弱状况者(衰弱定义见“1.3 衰弱测量”部分);②随访期间衰弱状况评估次数不足2次者;③在任意轮次随访过程中缺失关键研究协变量者;④因居住地区空气污染暴露数据缺失而无法完成暴露匹配的受访者。最后,本研究共计纳入9603名受访者(图1)。

1.3 衰弱测量

本研究依据健康相关赤字累积的标准程序构建衰弱指数(frailty index, FI),以评估受访者的衰弱状况,结合CHARLS问卷结构及既往研究经验,筛选了32项多维健康指标(12项慢性病史、10项日常活动能力、7项身体功能、抑郁状态、认知功能 and 自我报告健康状况)用于构建FI^[19],详见网络资源附件附表1。其中,31项为二分类变量(0表示无赤字,1表示存在赤字),认知功能指标作为连续变量,标准化至0.00~1.00区间,数值越低代表认知能力越好。个体FI值通过累积赤字数除以总指标数标准化为0.00~1.00之间的连续变量,数值越高表明衰弱状态越严重。依据既往研究定义,当FI $\geq$ 0.25时判定为衰弱状态^[1]。

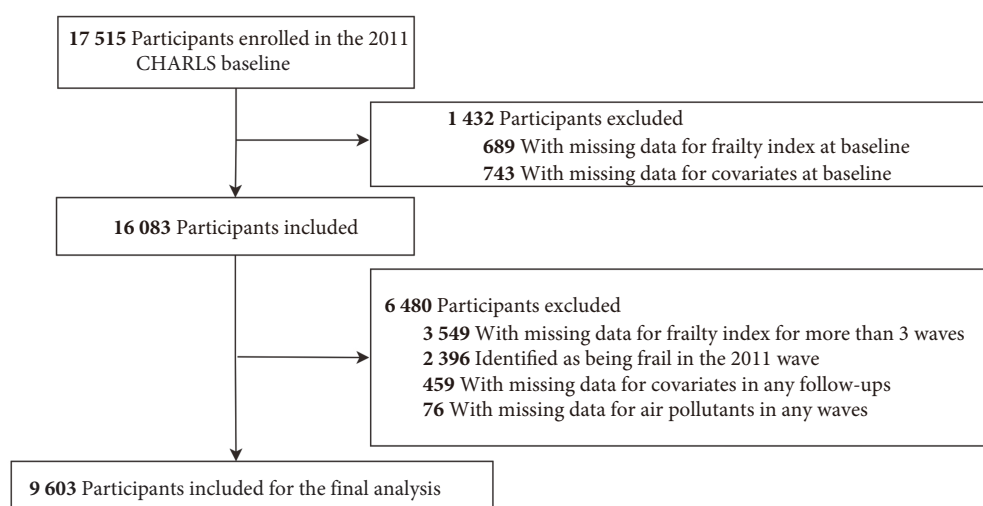


图1 受访者纳入排除流程图

Fig 1 Flowchart for the inclusion and exclusion of participants

本研究采用统一标准计算受访者在基线及随访期间各时间点的FI, 据此判断其在随访过程中是否发生衰弱。

1.4 空气污染暴露测量

使用TAP数据集2008年1月1日–2020年12月31日期间的PM_{2.5}及其化学组分质量浓度数据, 依据CHARLS问卷中受访者居住的地级市信息和调查时间对受访者进行空气污染暴露水平评估。由于空气污染暴露存在滞后效应, 本研究将受访者前1年PM_{2.5}及其化学组分(BC、NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺和OM)的平均暴露质量浓度作为其长期空气污染暴露的水平。同时, 研究评估了受访者前2年和前3年平均PM_{2.5}及其化学组分的暴露水平, 并进行了敏感性分析。

1.5 协变量

基于既往研究^[14, 19–20], 本研究纳入多项社会人口学特征及健康行为变量作为协变量。社会人口学变量包括性别、年龄、居住地类型(城市/农村)、婚姻状况(已婚同居、分居/离异/丧偶/未婚)、受教育水平(小学及以下、中学、大学及以上)、工作与否(是、否)、收入水平(依据家庭人均支出的三分位数分别定义为较低、中等、较高水平)以及医疗保险(无医疗保险、城镇职工基本医疗保险、城镇居民基本医疗保险、新型农村合作医疗以及其他医疗保险)。健康行为变量包括吸烟状况(从不吸烟、戒烟及正在吸烟)、饮酒状况(从不饮酒、戒酒及正在饮酒)。此外, 考虑到气象因素可能的混杂影响, 本研究在所有回归模型中均调整了受访者前1年其所在地级市的平均气温(℃)和平均相对湿度(%)。

1.6 统计学方法

在描述性分析中, 连续型变量以中位数和四分位距(interquartile range, IQR)描述, 分类变量以频数和百分比

表示。本研究构建时间依赖的Cox比例风险回归模型评估空气污染长期暴露与衰弱发生风险的关联。在模型中, 采用限制性立方样条方法对PM_{2.5}及其化学组分浓度, 以及环境温度和相对湿度进行建模, 评估PM_{2.5}及其化学组分与衰弱发生风险之间的剂量-反应曲线。空气污染物效应的非线性特征通过似然比检验进行评估。此外, 依据性别、年龄、居住地类型等协变量划开展亚组分析, 探讨长期PM_{2.5}及其化学组分暴露与不同特征中老年人衰弱发生风险的差异化影响。所有统计检验均为双侧检验, 显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。所有统计分析均在R软件(version 4.4.2)中完成。

2 结果

2.1 一般情况

本研究共纳入2011年基线加入队列的受访者9 603人。在随访期间内, 衰弱累积发生率为33.1%(3 183例)。附表2展示了2011年基线时的研究人群基本特征。研究人群的年龄中位数为56岁, 女性占比52.2%。37.7%的受访者居住于农村地区, 大部分受访者(91.4%)为已婚同居状态。在受教育水平方面, 38.1%受访者接受了完整的小学教育。在健康行为方面, 30.7%及26.1%的受访对象在基线时仍存在吸烟或饮酒行为。在空气污染暴露水平方面, 受访对象的PM_{2.5}平均暴露质量浓度为45.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, BC、OM、SO₄²⁻、NH₄⁺以及NO₃⁻等化学组分的平均暴露质量浓度分别为2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、11.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、8.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、10.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和7.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。附表2见网络资源附件。

2.2 PM_{2.5}及其化学组分长期暴露与衰弱发生风险的关联

表1展示了PM_{2.5}及其化学组分长期暴露与衰弱发生风险的关联。在调整社会人口学特征、健康行为及气象

表 1 Cox回归分析结果表 (n=9603)

Table 1 Results of Cox proportional hazards regression analysis (n = 9603)

Exposure	IQR/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Model 1 ^a			Model 2 ^b			Model 3 ^c		
		HR	95% CI	P	HR	95% CI	P	HR	95% CI	P
PM _{2.5}	31.472	1.040	0.960-1.127	0.338	1.109	1.023-1.203	0.012	1.100	1.015-1.193	0.020
BC	1.227	1.081	0.995-1.174	0.066	1.140	1.049-1.238	0.002	1.131	1.041-1.229	0.004
OM	6.574	1.092	1.009-1.181	0.029	1.150	1.063-1.245	< 0.001	1.142	1.055-1.236	0.001
SO ₄ ²⁻	5.818	1.024	0.939-1.118	0.590	1.097	1.005-1.197	0.038	1.088	0.996-1.187	0.060
NO ₃ ⁻	8.460	1.020	0.941-1.106	0.628	1.089	1.004-1.181	0.039	1.081	0.996-1.172	0.062
NH ₄ ⁺	5.273	1.040	0.956-1.130	0.364	1.107	1.018-1.204	0.017	1.098	1.010-1.194	0.029

PM_{2.5}: particulate matter with a $\leq 2.5 \mu\text{m}$ aerodynamic diameter; BC: black carbon; OM: organic matter; SO₄²⁻: sulphate; NO₃⁻: nitrate; NH₄⁺: ammonium; IQR: interquartile range; HR: hazard ratio. ^a Model 1 is adjusted for sex, age, temperature, and relative humidity; ^b Model 2 is controlled for the same risk factors as Model 1 with the addition of residence, marital status, educational attainment, medical insurance, employment status, and income group; ^c Model 3 includes all covariates in Model 2, with the addition of smoking and drinking behaviors.

因素等协变量后(Model 3), PM_{2.5}平均暴露质量浓度每上升一个IQR(31.472 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 中老年人衰弱发生风险升高10.0%[95%置信区间(confidence interval, CI): 1.015 ~ 1.193]。其中, OM及BC平均暴露质量浓度与衰弱发生的关联较为突出, OM质量浓度每上升1个IQR, 衰弱发生风险增加14.2%(95%CI: 1.055 ~ 1.236)。其次为BC[风险比(hazard ratio, HR) = 1.131, 95%CI: 1.041 ~ 1.229]

和NH₄⁺(HR= 1.098, 95%CI: 1.010 ~ 1.194)。相比之下, SO₄²⁻以及NO₃⁻长期暴露与衰弱发生风险的关联无统计学意义。

2.3 PM_{2.5}及其化学组分长期暴露与衰弱发生风险的剂量-效应关系

PM_{2.5}及其化学组分平均暴露质量浓度与衰弱发生风险间的剂量-效应曲线整体均呈现递增趋势(图2), 提示

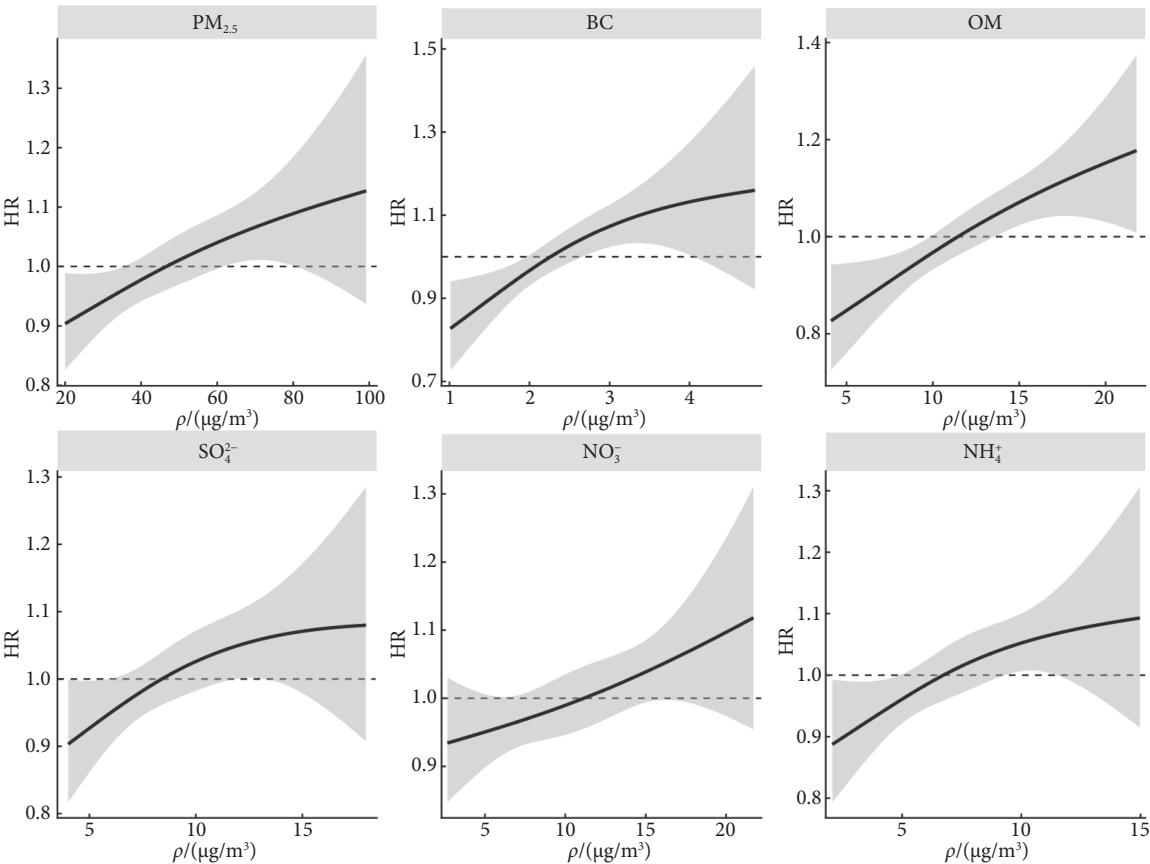


图 2 PM_{2.5}及化学组分长期暴露与衰弱发生风险的限制立方样条图

Fig 2 Restricted cubic spline plot for the association between long-term exposure to PM_{2.5}/chemical components and the risk for frailty

The abbreviations are explained in the note to Table 1.

随着PM_{2.5}及其化学组分平均暴露质量浓度升高, 中老年人群的衰弱发生风险相应升高。非线性检验结果显示, PM_{2.5}及其化学组分与衰弱风险间的前瞻性关联均是线性的(所有 P -nonlinear>0.05)。

2.4 亚组分析

亚组分析结果表明, PM_{2.5}及其化学组分平均暴露质量浓度与衰弱发生风险之间的关联在不同人群特征中存在显著的人口学异质性(图3)。其中, 高龄老年人群(≥75岁)较45~54岁群体表现出更强的PM_{2.5}暴露敏感性, 受其影响导致衰弱的风险显著增强(45~54岁: HR=1.006,

95%CI: 0.958~1.057; ≥75岁: HR=1.117, 95%CI: 1.011~1.235; P -interaction<0.001); 类似的趋势亦在其化学组分(NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、OM)的前瞻性分析中被观察到, 且相关交互作用检验结果均具有统计学意义(均 P -interaction<0.001)。同时, PM_{2.5}及其化学组分暴露与衰弱发生风险间的关联在不同性别、居住地类型等亚组间均未观察到差异有统计学意义。

2.5 敏感性分析

结果见表2。为检验研究结果的稳健性, 本研究分别采用受访者前2年和3年的空气污染物平均暴露质量浓度

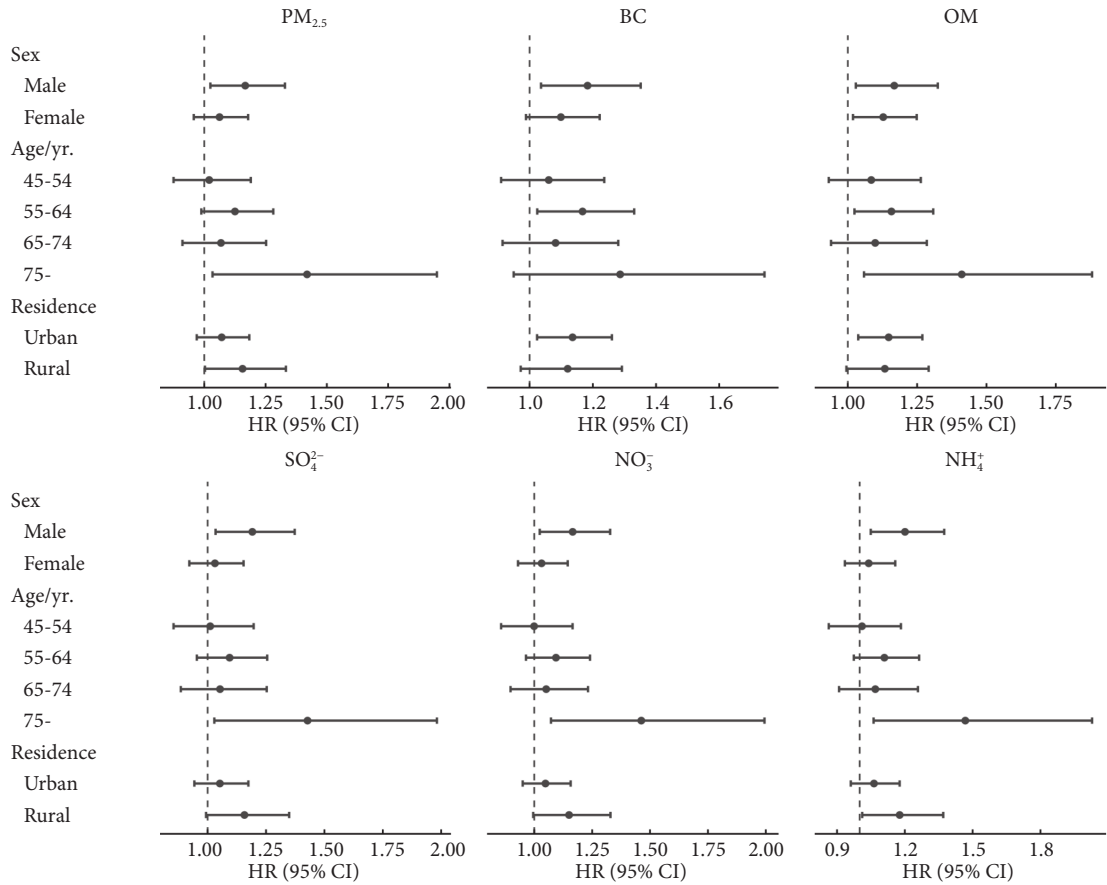


图 3 不同亚组中长期PM_{2.5}及其化学组分暴露浓度对衰弱发生风险的影响

Fig 3 Subgroup analysis of the impact of long-term exposure to PM_{2.5} and its chemical components on frailty risk

Abbreviations are the same as in Table 1.

表 2 敏感性分析结果表 (n=9603)
Table 2 Sensitivity analysis results (n = 9603)

Exposure	Average pollutant concentration in the past 2 years			Average pollutant concentration in the past 3 years		
	IQR/(μg/m ³)	HR (95% CI)	P	IQR/(μg/m ³)	HR (95% CI)	P
PM _{2.5}	34.545	1.095 (1.006-1.191)	0.035	34.938	1.105 (1.016-1.202)	0.019
BC	1.352	1.126 (1.033-1.229)	0.007	1.369	1.134 (1.041-1.235)	0.004
OM	6.997	1.132 (1.045-1.225)	0.002	7.058	1.137 (1.051-1.230)	0.001
SO ₄ ²⁻	6.201	1.079 (0.988-1.180)	0.092	6.252	1.081 (0.991-1.179)	0.050
NO ₃ ⁻	8.635	1.070 (0.988-1.159)	0.095	8.815	1.082 (0.998-1.173)	0.055
NH ₄ ⁺	5.437	1.089 (1.002-1.183)	0.045	5.316	1.097 (1.013-1.188)	0.023

The abbreviations are explained in the note to Table 1. All models are adjusted for all covariates including sex, age, marital status, educational attainment, income group, medical insurance, employment status, residence, smoking and drinking behaviors, temperature, and relative humidity.

作为替代暴露指标,重新评估空气污染暴露与衰弱发生风险之间的关联。结果显示,不同暴露窗口下,PM_{2.5}及其化学组分长期暴露与衰弱发生风险间的关联总体保持稳健。具体而言,2年内PM_{2.5}平均暴露质量浓度每上升1个IQR,衰弱发生风险上升至原来的1.095倍(95%CI: 1.006 ~ 1.191, $P=0.035$);而3年内PM_{2.5}平均暴露质量浓度每上升一个IQR,衰弱发生风险增加至1.105倍(95%CI: 1.016 ~ 1.202, $P=0.019$)。此外,在对5种PM_{2.5}化学组分的敏感性分析中,均观察到与表1主分析方向一致的正向关联。

3 讨论

本研究基于CHARLS调查数据和TAP数据集,发现PM_{2.5}及其化学组分长期暴露与衰弱发生风险间均呈现正向关联。其中,PM_{2.5}年平均暴露质量浓度每升高1个IQR,衰弱风险增加10.0%,且OM、BC、NH₄⁺等化学组分对衰弱发生的贡献较为突出。剂量-效应曲线进一步揭示了污染物暴露质量浓度与衰弱发生风险之间整体递增的剂量-效应关系。亚组分析探索了空气污染物暴露与衰弱发生风险关联在不同特征中老年人群中的人口学异质性,识别出高龄老年人群是PM_{2.5}及其化学组分长期暴露的易感人群。且多时间窗口暴露的敏感性分析结果总体一致,表明研究结论具有较好的稳健性。上述发现为识别衰弱易感人群及制定靶向干预策略提供了重要流行病学证据,进一步凸显了长期空气污染防控对促进健康老龄化的关键意义。

本研究结果与既往相关研究总体一致,并在PM_{2.5}组分特异性风险方面提供了新的证据。既往多项纵向队列研究^[14,21]一致证实PM_{2.5}及其不同粒径颗粒物的长期暴露与中老年人群衰弱水平、慢性病负担及多重共病风险显著相关,该关联受人口统计学因素(如性别、年龄)和社会环境梯度(如城乡居住、社会经济地位)的显著调节^[22-23]。Cai等^[24]研究发现长期暴露于环境PM_{2.5}中的特定化学组分(尤其黑碳、有机物和硫酸盐)是影响中国脑卒中住院患者死亡率的重要危险因素,这些组分主要源于燃煤、交通排放等人为燃烧。本研究进一步发现,PM_{2.5}的主要化学组分均独立贡献于衰弱风险,提示不同组分可能通过差异化生物学途径共同推动衰弱进展。同时,OM、BC、NH₄⁺等化学组分平均暴露质量浓度上升对于中老年人衰弱发生风险具有正向的前瞻性影响。既往研究表明,BC可通过诱导系统性炎症反应,进而驱动多器官功能障碍的发生;此外,其健康效应还可能与脂质代谢相关基因的高甲基化等表观遗传调控机制有关^[11,25]。同时,无机组分(硝酸盐、硫酸盐及铵盐等)与有机组分(多环芳烃及正构烷烃等)均可介导氧化应激和细胞因子释放,从而加剧机体功能衰退^[26]。

亚组分析结果显示,PM_{2.5}及其化学组分长期暴露与衰弱发生风险间关联在不同年龄组之间存在显著的人口异质性。值得注意的是,在性别以及居住地类型等其他亚组中,未观察到显著的效应修饰作用。相较于45~54岁人群,高龄组(≥ 75 岁)表现出更强的暴露敏感性(HR: 1.117 vs. 1.006, P -interaction <0.001),与既往研究中结论一致^[27],其机制可能与年龄增长相关的免疫功能减退、生理储备下降及慢性疾病累积有关,使老年人群对环境应激因素的耐受能力进一步降低^[20],因而应优先加强对于易感人群的保护措施。然而,高龄人群中较高的慢性病检出率及更频繁的健康服务利用,亦可能在一定程度上引入监测偏倚,提示未来研究需进一步综合考虑医疗可及性因素对衰弱评估的潜在影响^[28]。

本研究亦存在若干局限性。首先,由于调查数据限制,本研究的空气污染暴露评估仅能精确至市级尺度单位,且未能区分个体的室内与室外暴露水平,可能无法充分反映市域内部空间差异及个体实际暴露水平,进而引入暴露测量误差;其次,由于自我报告评估的约束性,可能会导致回忆偏倚,从而低估或高估空气污染物对衰弱的影响;最后,虽然本研究在模型分析中已调整了诸多可能的混杂因素,但某些未测量的混杂因素(例如膳食行为、健康素养等)可能仍对结果造成影响。尽管如此,依托大样本、长期随访队列及多污染物分析框架,本研究仍为理解PM_{2.5}及其化学组分长期暴露与中老年人衰弱发生风险之间的关联提供了具有参考价值的流行病学证据。

从公共卫生政策视角来看,本研究针对PM_{2.5}及其化学组分特异性风险评估,为精准环境健康干预制定提供了重要切入点。研究结果提示,应优先加强对黑碳(交通/生物质燃烧源)及有机物(工业/二次有机气溶胶)的控制。针对高龄老年人等易感人群,在健康中国战略背景下,有必要整合多部门(环境、卫生、城市规划)数据,构建组分-人群-空间多维风险评估体系,制定靶向性暴露干预方案,如重点区域老年友好型绿化建设、室内空气净化设备支持政策。此外,PM_{2.5}多组分健康危害效应的证实,提示现行以质量浓度为核心的空气质量标准有必要向化学组分调控和健康效应导向转变,并将衰弱等功能性健康指标纳入长期环境健康监测及动态评估机制。

* * *

作者贡献声明 陈坤负责论文构思、数据审编、正式分析、调查研究、研究方法、可视化、初稿写作和审读与编辑写作,刘倩负责正式分析、调查研究、研究方法、可视化、初稿写作和审读与编辑写作,吴晨晨负责调查研究、验证、可视化、初稿写作和审读与编辑写作,杨力华负责研究项目管理、验证和审读与编辑写作,林小军负责论文构思、数据审编、正式

分析、经费获取、提供资源、监督指导和审读与编辑写作。所有作者已经同意将文章提交给本刊,且对将要发表版本进行最终定稿,并同意对工作的所有方面负责。

Author Contribution Chen Kun is responsible for conceptualization, data curation, formal analysis, investigation, methodology, visualization, writing--original draft, and writing--review and editing. Liu Qian is responsible for formal analysis, investigation, methodology, visualization, writing--original draft, and writing--review and editing. Wu Chenchen is responsible for investigation, validation, visualization, writing--original draft, and writing--review and editing. Yang Lihua is responsible for project administration, validation, and writing--review and editing. Lin Xiaojun is responsible for conceptualization, data curation, formal analysis, funding acquisition, resources, supervision, and writing--review and editing. All authors consented to the submission of the article to the Journal. All authors approved the final version to be published and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Declaration of Conflicting Interests All authors declare no competing interests.

参 考 文 献

- [1] Hoogendijk E O, Afilalo J, Ensrud K E, *et al.* Frailty: implications for clinical practice and public health[J]. *Lancet*, 2019, 394(10206): 1365-1366. DOI: [10.1016/S0140-6736\(19\)31786-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)31786-6).
- [2] Ma X, Piao X, Oshio T. Impact of social participation on health among middle-aged and elderly adults: evidence from longitudinal survey data in China[J/OL]. *BMC Public Health*, 2020, 20: 502. <https://bmcpubhealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12889-020-08650-4>.
- [3] O'caimh R, Sezgin D, O'donovan M R, *et al.* Prevalence of frailty in 62 countries across the world: a systematic review and meta-analysis of population-level studies[J]. *Age Ageing*, 2021, 50(1): 96. DOI: [10.1093/ageing/afaa219](https://doi.org/10.1093/ageing/afaa219).
- [4] Kwak M, Digbeu B, Des Bordes J, *et al.* The association of frailty with clinical and economic outcomes among hospitalized older adults with hip fracture surgery[J]. *Osteoporos Int*, 2022, 33(7): 1480-1481. DOI: [10.1007/s00198-021-06215-8](https://doi.org/10.1007/s00198-021-06215-8).
- [5] Toson B, Edney L C, Haji Ali Afzali H, *et al.* Economic burden of frailty in older adults accessing community-based aged care services in Australia[J]. *Geriatr Gerontol Int*, 2024, 24(9): 942. DOI: [10.1111/ggi.14955](https://doi.org/10.1111/ggi.14955).
- [6] Alkhodary A, Aljunid S M, Ismail A, *et al.* The economic burden of frailty among elderly people: a review of the current literature[J]. *Malaysian J Public Health Med*, 2020, 20(2): 228. DOI: [10.37268/mjphm/vol.20/no.2/art.304](https://doi.org/10.37268/mjphm/vol.20/no.2/art.304).
- [7] Jing Z, Li J, Fu P P, *et al.* Catastrophic health expenditure among single empty-nest elderly with multimorbidity in rural Shandong, China: the effect of co-occurrence of frailty[J/OL]. *Int J Equity Health*, 2021, 20: 23. <https://link.springer.com/article/10.1186/s12939-020-01362-6>.
- [8] Clegg A, Young J, Iliffe S, *et al.* Frailty in elderly people[J]. *Lancet*, 2013, 381(9868): 752-753. DOI: [10.1016/S0140-6736\(12\)62167-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)62167-9).
- [9] 郭怡婷, 高宁, 赵梦苗, 等. PM_{2.5}和O₃暴露对中国中老年人衰弱发生的影响[J]. *中国环境科学*, 2026, 46(4): 2178-2179. DOI: [10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20260107.002](https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20260107.002).
- [10] Murray C J L, Aravkin A Y, Zheng P, *et al.* 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): 1233. DOI: [10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2).
- [11] Kuntic M, Kuntic I, Cleppien D, *et al.* Differential inflammation, oxidative stress and cardiovascular damage markers of nano- and micro-particle exposure in mice: Implications for human disease burden[J/OL]. *Redox Biol*, 2025, 83: 103644. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2025.103644>.
- [12] Chen X, Han Y, Chen W, *et al.* Respiratory inflammation and short-term ambient air pollution exposures in adult Beijing residents with and without prediabetes: a panel study[J/OL]. *Environ Health Perspect*, 2020, 128(6): e67004. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7263737/>. DOI: [10.1289/EHP4906](https://doi.org/10.1289/EHP4906).
- [13] Newbury J B, Stewart R, Fisher H L, *et al.* Association between air pollution exposure and mental health service use among individuals with first presentations of psychotic and mood disorders: retrospective cohort study[J]. *Br J Psychiatry*, 2021, 219(6): 681-682. DOI: [10.1192/bjp.2021.119](https://doi.org/10.1192/bjp.2021.119).
- [14] Lin J, Zhang Y, Wang K, *et al.* Long-term impact of PM_{2.5} exposure on frailty, chronic diseases, and multimorbidity among middle-aged and older adults: insights from a national population-based longitudinal study[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2024, 31(3): 4100. DOI: [10.1007/s11356-023-31505-5](https://doi.org/10.1007/s11356-023-31505-5).
- [15] Guo Z, Xue H, Fan L, *et al.* Differential effects of size-specific particulate matter on frailty transitions among middle-aged and older adults in China: findings from the China Health and Retirement Longitudinal Study (CHARLS), 2015-2018[J]. *Int Health*, 2024, 16(2): 185-186. DOI: [10.1093/inthealth/ihad033](https://doi.org/10.1093/inthealth/ihad033).
- [16] Wang Q, Liu S. The effects and pathogenesis of PM_{2.5} and its components on chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis*, 2023, 18: 495-496. DOI: [10.2147/COPD.S402122](https://doi.org/10.2147/COPD.S402122).
- [17] Liu S, Geng G, Xiao Q, *et al.* Tracking daily concentrations of PM_{2.5} chemical composition in China since 2000[J]. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 16517. DOI: [10.1021/acs.est.2c06510](https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06510).
- [18] 何杰, 阳坤, 李新, 等. 中国区域地面气象要素驱动数据集v2.0 (1951-2024)[DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心 (2024-10-23) [2025-12-20]. <https://doi.org/10.11888/Atmos.tpcd.302088>. <https://cstr.cn/18406.11.Atmos.tpcd.302088>.
- [19] He J, Yang K, Li X, *et al.* China meteorological forcing dataset v2.0 (1951-2024)[DS/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center (2024-10-23) [2025-12-20]. <https://doi.org/10.11888/Atmos.tpcd.302088>. <https://cstr.cn/18406.11.Atmos.tpcd.302088>.
- [20] 吕放, 王紫微, 李行, 等. 中国中老年人婚姻状况与衰弱进展的关系[J]. *武汉大学学报 (医学版)*, 2025, 46(6): 795. DOI: [10.14188/j.1671-8852.2024.0079](https://doi.org/10.14188/j.1671-8852.2024.0079).
- [21] Lü F, Wang Z W, Li H, *et al.* Association between marital status and the progression of frailty among middle-aged and older adults in China[J]. *Medical Journal of Wuhan University*, 2025, 46(6): 795. DOI: [10.14188/j.1671-8852.2024.0079](https://doi.org/10.14188/j.1671-8852.2024.0079).
- [22] 王霁一, 冯星琳. 我国中老年人慢性病共患病率的变化趋势及影响因素分析[J]. *医学与社会*, 2024, 37(7): 42-43. DOI: [10.13723/j.xysh.2024.07.007](https://doi.org/10.13723/j.xysh.2024.07.007).
- [23] Wang J Y, Feng X L. Analysis on trends and influencing factors of prevalence of multimorbidity of chronic diseases among middle-aged and elderly people in China[J]. *Medicine and Society*, 2024, 37(7): 42-43. DOI: [10.13723/j.xysh.2024.07.007](https://doi.org/10.13723/j.xysh.2024.07.007).
- [24] Wu D, Guo Z, Xue H, *et al.* Association between city-level particulate matter exposure and frailty among middle-aged and older adults in China[J]. *Gerontology*, 2024, 70(10): 1074. DOI: [10.1159/000539517](https://doi.org/10.1159/000539517).
- [25] Wang S, Gao S, Li S, *et al.* Strategizing the relation between urbanization and air pollution: empirical evidence from global countries[J/OL]. *J Clean Prod*, 2020, 243: 118615. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619334857>. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.118615](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118615).
- [26] Zhang X, Pan T, Mcpake B. Re-examining the reversal hypothesis: a

- nationwide population-based study of the association between socioeconomic status, and NCDs and risk factors in China[J/OL]. *SSM Popul Health*, 2023, 21: 101335. <https://doi.org/10.1016/j.ssmph.2022.101335>.
- [24] Cai M, Lin X, Wang X, *et al.* Long-term exposure to ambient fine particulate matter chemical composition and in-hospital case fatality among patients with stroke in China[J/OL]. *Lancet Reg Health West Pac*, 2023, 32: 100679. <https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2022.100679>.
- [25] 莫少彩. 大气 PM_{2.5}组分暴露与我国中老年人代谢综合征的纵向关联分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023: 38-39. DOI: [10.27380/d.cnki.gwkju.2023.000672](https://doi.org/10.27380/d.cnki.gwkju.2023.000672).
Mo S C. Longitudinal association between exposure to PM_{2.5} components and metabolic syndrome among middle-aged and older adults in China[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2023: 38-39. DOI: [10.27380/d.cnki.gwkju.2023.000672](https://doi.org/10.27380/d.cnki.gwkju.2023.000672).
- [26] Zhao K, Zhang Y, Shang J, *et al.* Impact of Beijing's "Coal to Electricity" program on ambient PM(2.5) and the associated reactive oxygen species (ROS)[J]. *J Environ Sci (China)*, 2023, 133: 97-98. DOI: [10.1016/j.jes.2022.06.038](https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.06.038).
- [27] Lin X, Cai M, Pan J, *et al.* PM_{2.5} chemical components are associated with in-hospital case fatality among acute myocardial infarction patients in China[J/OL]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2024, 284: 116898. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116898>.
- [28] Zhao Y, Atun R, Oldenburg B, *et al.* Physical multimorbidity, health service use, and catastrophic health expenditure by socioeconomic groups in China: an analysis of population-based panel data[J/OL]. *Lancet Glob Health*, 2020, 8(6): e840. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30127-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30127-3).
- (2025-07-19收稿, 2026-02-11修回)
- 编辑 余琳
-  **开放获取** 本文使用遵循知识共享署名—非商业性使用 4.0 国际许可协议(CC BY-NC 4.0), 详细信息请访问 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>。
- OPEN ACCESS** This article is licensed for use under Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (CC BY-NC 4.0). For more information, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.
- © 2026 《四川大学学报(医学版)》编辑部
Editorial Office of *Journal of Sichuan University (Medical Sciences)*

本刊征稿启事

《四川大学学报(医学版)》(原《华西医科大学学报》)是由教育部主管、四川大学主办的综合性医药类学术刊物,以报道医学相关学科的科研成果为主。主要阅读对象为从事医药卫生工作的科研人员及高等医药院校的师生。2021年起,本刊设有专家笔谈、专家共识、指南解读、医学教育、中医药·中西医结合、论著、临床研究及新技术新方法等栏目。

创刊以来,本刊曾荣获各级部门颁发的数次荣誉称号,如全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖提名奖、国家期刊奖百种重点期刊奖、教育部中国高校精品科技期刊、中国国际影响力优秀学术期刊、中国高校编辑出版质量优秀科技期刊、中国高校百佳科技期刊等。现已被中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)、中国科学引文数据库(CSCD)(核心版)、北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》、中国学术期刊网全文数据库(CNKI)、美国《医学索引》(IM/MEDLINE)、美国生物医学全文数据库PubMed Central(PMC)、美国EBSCO学术数据库、美国《生物学文摘》(BA)、美国《化学文摘》(CA)、荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)、Embase数据库、开放获取期刊目录(DOAJ)、西太平洋地区医学索引数据库(WPRIM)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)等检索系统收录。

凡属于国家重点研发计划、国家自然科学基金及其他部省级以上科研基金资助的来稿或具有创新性、实用性等的来稿,编辑部将优先发表。欢迎积极投稿!

本刊在线投稿网址: <https://ykxb.scu.edu.cn>

地址: 四川省成都市人民南路三段17号《四川大学学报(医学版)》编辑部

邮政编码: 610041

联系电话: (028)85501320, (028)85500106

E-mail: scuxbyxb@scu.edu.cn

《四川大学学报(医学版)》编辑部