

上海市区老年人群细颗粒物个体暴露评估及其影响因素

陈天一^{1a}, 陈非儿², 王侃^{1b}, 马学东³, 魏新萍⁴, 宋彩霞³, 张华^{5a}, 蔡云飞^{5b}, 夏昭林^{1b, 6}, 赵卓慧^{1a, 6}

1. 复旦大学公共卫生学院 a. 环境卫生教研室 b. 职业卫生与毒理学教研室, 上海 200032
2. 上海市疾病预防控制中心环境卫生科, 上海 200336
3. 复旦大学附属古美社区卫生服务中心, 上海 201102
4. 上海市闵行区梅陇社区卫生服务中心, 上海 201100
5. 上海市环境监测中心 a. 大气环境监测室 b. 综合管理与统计部, 上海 200235
6. 公共卫生安全教育部重点实验室, 国家卫生健康委员会卫生技术评估重点实验室 (复旦大学), 上海 200032

摘要：

[背景] 全球疾病负担研究表明颗粒物对老年人群危害重大, 因此基于精准暴露评估发现暴露风险因素并提出保护措施, 至关重要。

[目的] 评估上海市区老年人群细颗粒物 (PM_{2.5}) 个体暴露水平和四季变化特征, 与室外监测站进行同步比较, 探讨个体暴露的影响因素。

[方法] 本研究采用固定群组重复随访的研究设计, 在上海市闵行区古美社区卫生服务中心招募老年志愿者 83 名, 分别在四个季节完成 4 次随访, 每次随访间隔三个月。每次随访研究对象需要完成连续 7 d 的个体 PM_{2.5} 暴露测量、个体环境温度和相对湿度测量及活动模式和家居问卷调查, 并收集同期国控监测站点 (3 km 以内) 的大气颗粒物浓度数据。

[结果] 随访一年中, 所有研究对象个体 PM_{2.5} 暴露的日均值为 38.0 μg·m⁻³, 高于同期室外大气监测站点 PM_{2.5} 的日均值 (35.7 μg·m⁻³, $P < 0.05$)。春、夏、秋三个季节个体暴露高于室外大气监测站, 但冬季的个体 PM_{2.5} 暴露低于室外大气监测站 (35.3 μg·m⁻³ vs. 41.3 μg·m⁻³)。经线性混合效应模型分析, 室外 PM_{2.5} 浓度、个体环境温度、日均做饭次数与个体 PM_{2.5} 暴露水平呈正向关联 ($P < 0.05$), 而每日居家时间与个体 PM_{2.5} 暴露水平呈负向相关 ($P < 0.05$)。个体 PM_{2.5} 暴露在四个季节的上午和下午用餐时间段, 均呈现暴露高峰区段。进一步逐小时的多因素回归分析发现, 室外大气 PM_{2.5} 在凌晨到中午 12 时之间对个体 PM_{2.5} 暴露的影响最大 (室外 PM_{2.5} 每升高 1 μg·m⁻³, 个体 PM_{2.5} 暴露增加 0.6~0.8 μg·m⁻³), 而其他时间段的影响较小 (室外 PM_{2.5} 每升高 1 μg·m⁻³, 个体 PM_{2.5} 增加 0.4~0.6 μg·m⁻³)。

[结论] 上海市区老年人群的个体 PM_{2.5} 暴露水平在春、夏、秋季高于室外大气 PM_{2.5} 水平。冬季低于室外大气 PM_{2.5} 水平。室外 PM_{2.5} 浓度高、个体环境温度高、日均做饭次数多可增加个体 PM_{2.5} 暴露水平, 每日居家时间长可降低个体 PM_{2.5} 暴露水平。

关键词：PM_{2.5}；个体暴露；老年人；大气污染

Individual exposure assessment of fine particulate matters and influencing factors in the elderly in urban area of Shanghai CHEN Tianyi^{1a}, CHEN Fei'er², WANG Kan^{1b}, MA Xuedong³, WEI Xinping⁴, SONG Caixia³, ZHANG Hua^{5a}, CAI Yunfei^{5b}, XIA Zhaolin^{1b, 6}, ZHAO Zhuohui^{1a, 6} (1.a.Department of Environmental Health b.Department of Occupational and Toxicological Health, School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China; 2.Department of Environmental Health, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China; 3.Shanghai Minhang District Gumei Community Health Center Affiliated to Fudan University, Shanghai 201102, China; 4.Shanghai Minhang District Meilong Community Health Center, Shanghai 201100, China; 5.a.Department of Ambient Air Monitoring b.Department of Management and Statistics, Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235, China; 6.Key Laboratory of Public Health Safety of the Ministry of Education, NHC Key Laboratory of Health Technology Assessment (Fudan University), Shanghai 200032, China)

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.20375

基金项目

科技部十三五国家重点研发计划 (2017YFC0702700); 上海市人才发展资金项目 (2019104); 国家重点基础研究项目 (973) (2015CB553404)

作者简介

陈天一 (1994—), 女, 硕士生;
E-mail: 18211020015@fudan.edu.cn

通信作者

赵卓慧, E-mail: zhzhao@fudan.edu.cn

伦理审批 已获取

利益冲突 无申报

收稿日期 2020-08-20

录用日期 2020-12-07

文章编号 2095-9982(2021)01-0001-09

中图分类号 R12

文献标志码 A

►引用

陈天一, 陈非儿, 王侃, 等. 上海市区老年人群细颗粒物个体暴露评估及其影响因素 [J]. 环境与职业医学, 2021, 38 (1): 1-9.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20375

Funding

This study was funded.

Correspondence to

ZHAO Zhuohui, E-mail: zhzhao@fudan.edu.cn

Ethics approval Obtained

Competing interests None declared

Received 2020-08-20

Accepted 2020-12-07

►To cite

CHEN Tianyi, CHEN Fei'er, WANG Kan, et al. Individual exposure assessment of fine particulate matters and influencing factors in the elderly in urban area of Shanghai[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(1): 1-9.

►Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20375

Abstract:

[Background] The global disease burden studies show that particulate matters seriously affect the elderly population. Therefore, it is critical to identify risk factors and propose protective measures accordingly based on accurate exposure risk assessment.

[Objective] This study assesses the individual exposure levels of fine particulate matters ($PM_{2.5}$) in the elderly in Shanghai, and explore the potential influencing factors by comparing with concurrent ambient $PM_{2.5}$.

[Methods] We implemented a panel study with four repeated follow-ups in four seasons (once in a season with three months of interval) in 2017-2018, respectively. A total of 83 elderly volunteers were recruited in the Gumei Community Health Center Affiliated to Fudan University in Minhang District, Shanghai. In each follow-up, seven consecutive days of measurements on individual $PM_{2.5}$ exposure, individual ambient temperature, and relative humidity were collected. Information on time activity patterns and household environment was also collected by questionnaire. Outdoor $PM_{2.5}$ levels were retrieved from the closest fixed-site monitoring station (less than 3 km).

[Results] The daily average concentration of individual $PM_{2.5}$ was $38.0 \mu g \cdot m^{-3}$ in the study year, higher than that of ambient $PM_{2.5}$ ($35.7 \mu g \cdot m^{-3}$, $P < 0.05$) by the fixed-site monitoring station in Shanghai during the same time period. The individual $PM_{2.5}$ levels were higher than those in ambient air in spring, summer, and autumn, but lower in winter ($35.3 \mu g \cdot m^{-3}$ vs. $41.3 \mu g \cdot m^{-3}$). The linear mixed-effect regression model results showed that ambient $PM_{2.5}$, individual ambient temperature, and home cooking frequency were positively associated with individual $PM_{2.5}$ exposure level ($P < 0.05$), while the time spent indoors was inversely associated ($P < 0.05$). By analyzing the hourly variation, individual $PM_{2.5}$ showed peak levels during lunch and dinner periods in four seasons. The multiple regression analysis results found that ambient $PM_{2.5}$ had a higher impact on individual $PM_{2.5}$ between dawn and noon (an increase of $0.6-0.8 \mu g \cdot m^{-3}$ of individual $PM_{2.5}$ per $1 \mu g \cdot m^{-3}$ increase of ambient $PM_{2.5}$), compared with other time periods in a day (an increase of $0.4-0.6 \mu g \cdot m^{-3}$ of individual $PM_{2.5}$ per $1 \mu g \cdot m^{-3}$ increase of ambient $PM_{2.5}$).

[Conclusion] In conclusion, the individual $PM_{2.5}$ exposure levels have different seasonal variation patterns in comparison with ambient $PM_{2.5}$ levels in the elderly people in Shanghai. Higher ambient $PM_{2.5}$, higher individual ambient temperature, more frequent cooking indoors might increase the individual $PM_{2.5}$ exposure levels, while more time spent indoors might have a decreasing effect.

Keywords: $PM_{2.5}$; individual exposure; elderly; air pollution

全球疾病负担研究在2017年发布了195个国家和地区的84项个体行为、环境和职业以及新陈代谢等危险因素造成的疾病负担,其中颗粒物暴露导致的疾病负担排名第四^[1]。大量研究表明,颗粒物对于人类健康的危害效应随着粒径的减小而增大^[2-4]。由于 $PM_{2.5}$ 具有极强的穿透性和诱导炎症的能力,可以导致心血管系统^[5-6]、呼吸系统^[7-8]等疾病的加剧。尽管与2013年相比,2017年我国大气 $PM_{2.5}$ 的浓度在京津冀、长三角地区、珠三角地区分别下降了39.6%、34.3%和27.7%,但与世界卫生组织发布的年均 $10 \mu g \cdot m^{-3}$ 的指导值相比,仍有很大差距^[9]。

城市人口平均有80.0%~90.0%的时间是在室内度过的,老年人群更是如此^[10]。目前国内外大量的研究常常基于室外监测站获得暴露数据,或以此进行健康效应与空气污染物之间的关联分析^[11-13]。一方面,这种暴露评估方法不能准确反映个体真实的污染物暴露水平^[14-15];另一方面,由于个体生活方式和习惯的不同,无法开展精细污染物源分析^[16-17]。便携式检测仪可以对个体暴露水平进行精细实时测量,反映人在室内和室外不同空间和时间的暴露变化,从而为精确的暴露评估、健康风险评估和流行病学研究提供可靠的数据和信息^[18-19]。既往研究表明,个体 $PM_{2.5}$ 暴露与室外监测站的测量值之间存在差异^[20-21];横断面研

究结果也显示,个体与监测站 $PM_{2.5}$ 暴露之间存在差异^[22-23];但基于纵向的研究设计可更好地反映二者之间的动态关联^[24-25]。采用固定群组随访研究,一方面可以节约大型队列研究的成本,另一方面可以很好地控制随时间变化而无法测量的混杂因素。

老年人群的身体机能逐渐衰退,新陈代谢降低,对于空气颗粒物暴露更加易感^[26-28]。本研究拟采用固定群组重复测量的研究设计,从不同时间尺度上评估上海市区老年人群的个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平、季节特征及其影响因素,为老年人群的空气细颗粒物暴露精准评估,进而为提出更加精确的防护措施奠定数据基础。

1 对象与方法

1.1 对象

本研究采用固定群组重复测量的研究设计,在上海市闵行区古美社区卫生服务中心招募老年人作为研究对象。通过参考类似研究的样本量^[29-31],并使用PASS 15.0软件进行样本量估算($n_1=n_2$, $\delta=5$, $\sigma=10$, $r=0.6$, $\alpha=0.05$),确定至少需要纳入76名研究对象。研究对象的纳入标准:(1)年龄 ≥ 60 岁且 <75 岁;(2)最近三个月没有发生呼吸系统、心血管系统疾病等急性事件;(3)其他慢性疾病状况稳定。研究对象的排

除标准：(1) 非上海本地居民；(2) 未签署知情同意书；(3) 不能长期参加随访。研究开始时，有177名研究对象入组，其中，94名研究对象仅参加了一次随访，83名研究对象参加了至少两次随访（平均随访次数3.1次）。经分析，仅参加过一次随访的94名对象在基线人口统计学信息、居住环境及生活习惯等，与参加了至少两次随访的83名研究对象之间差异没有统计学意义（见补充材料<http://www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20375>）。因此，对至少参加两次随访的83名（满足样本量需求）研究对象进行个体暴露水平及多因素线性回归分析，以探索纵向时序变化对个体暴露的影响。

本研究方案通过了复旦大学附属中山医院伦理委员会的审批（B2013-033），研究招募的志愿者均签署了知情同意书。

1.2 研究内容与方法

本研究在2016年8月启动招募，第一次随访的时间为2017年1月，之后每三个月开展1次随访，共完成了4次随访。每次随访分为三批，每批研究对象需要完成连续7d的个体PM_{2.5}暴露测量，及本次随访期间研究对象的活动模式和家居问卷调查。按照上海本地的气象特征，以3—5月为春季，6—8月为夏季，9—11月为秋季，12月—次年2月为冬季，分别安排随访：第一次随访是冬季（2017年1月），之后依次完成了春季（2017年4月）、夏季（2017年7月）和秋季（2017年10月）的随访，整个研究包含了完整的四个季节。

1.2.1 PM_{2.5} 测量 (1) 个体PM_{2.5}暴露和温湿度测量。个体PM_{2.5}暴露测量使用便携式空气传感器测试仪，内置PM_{2.5}激光传感器（Plantower PMS 7003，北京攀藤科技有限公司，中国），通过激光散射法测量PM_{2.5}数量浓度，基于颗粒物的数量浓度和分布特征转换为质量浓度（后称浓度）。该检测仪的精确性和准确性，在前期的室外路边和室内环境（相对湿度范围32.0%~98.0%）条件下，分别与标准方法微量振荡天平法做了比对和校验，并基于内置的温度和湿度值，在输出的颗粒物测量结果中予以湿度因素的调整和校验^[32]。在本研究准备阶段，分别进行了个体检测仪和微量振荡天平法的独立比对，并获得了每台个体采样仪与微量振荡天平法测量值之间的校验方程。每次随访期间，研究对象须连续7d在室内和室外活动中佩戴个体监测仪。本研究测量结果的准确度可与室外监测

站的数据相比，且适用于测试室内空气和室外大气环境^[32]。(2) 室外大气PM_{2.5}数据采集。收集距离招募社区最近（3km以内）的大气国控监测站点的逐小时PM_{2.5}测量数据（锥形元件振荡微量天平测量方法），作为研究对象所在区域的室外大气PM_{2.5}测量值，以此与个体暴露值对比分析。

1.2.2 活动模式和家居问卷 研究对象在随访期间填写的问卷内容包括三部分。第一部分为研究对象的基本信息：入组编号、年龄、性别、吸烟史、教育水平（仅在第一次随访中填写）；第二部分为生活习惯及住宅环境特征：冬季供暖、烹饪主要能源、房屋面积、房屋建成年份、住宅所在楼层、玻璃窗层数；第三部分为个人活动模式：住宅烹饪油烟暴露、固体燃料暴露、日均做饭次数、家庭空气净化器使用情况、每日居家时间、近一个月室外锻炼频率、每次室外锻炼时间。

1.3 质量控制

在研究开展前，首先对个体PM_{2.5}采样仪器进行严格的平行性比对和校验，去除在相同环境中测量值偏离平均测试值±15.0%的仪器；调查员参加了统一的专业培训；开展宣讲会，对研究对象进行培训（仪器使用以及保持常规生活模式等）。在整个研究过程中加强随访互动，测试期间研究对象无法知晓个体暴露的测试结果（设备没有直接显示测试结果的屏幕）。在研究结束后，研究人员对暴露数据进行下载和数据清洗（排除因仪器或其他不可预期的因素造成的缺失和异常值）；建立问卷数据库，使用独立双录入模式保证数据录入的准确性。

1.4 统计学分析

对研究对象在整个随访期间的个体PM_{2.5}浓度、室外大气PM_{2.5}浓度、个体环境温湿度进行汇总描述，并分季节进行比较，同时对整个随访期间个体和室外PM_{2.5}浓度进行相关性分析。对常态变量（人口学特征和住宅建筑特征）进行描述性统计，组间比较个体PM_{2.5}暴露水平；对动态变量（时间活动模式、污染物和个体气象因素）进行单因素回归分析，确定对个体PM_{2.5}暴露有显著影响的变量，单因素结果纳入多因素回归的入选标准为 $P < 0.05$ ；再通过多因素线性混合效应模型，调整混杂因素后，进一步探讨影响个体PM_{2.5}暴露的因素。多因素回归分析将个体PM_{2.5}测量结果作为应变量，将研究对象的基本信息（年龄、性别、吸烟史）、活动模式（每日居家时间、日均做饭次数、每次室外锻炼时间、家庭空气净化器使用情况）、

污染物和气象因素（室外大气PM_{2.5}浓度、个体环境温度）作为固定效应，将研究对象的个体差异作为随机效应纳入。本研究使用EpiData 3.0.0.1进行活动模式和家居问卷的双录入，使用Excel (Version 2010) 将研究对象暴露数据进行汇总和整理，使用R 3.6.1软件的lme4程序包进行线性混合效应模型的构建和分析。

2 结果

2.1 个体PM_{2.5}暴露、个体温湿度和室外大气PM_{2.5}浓度的总体特征

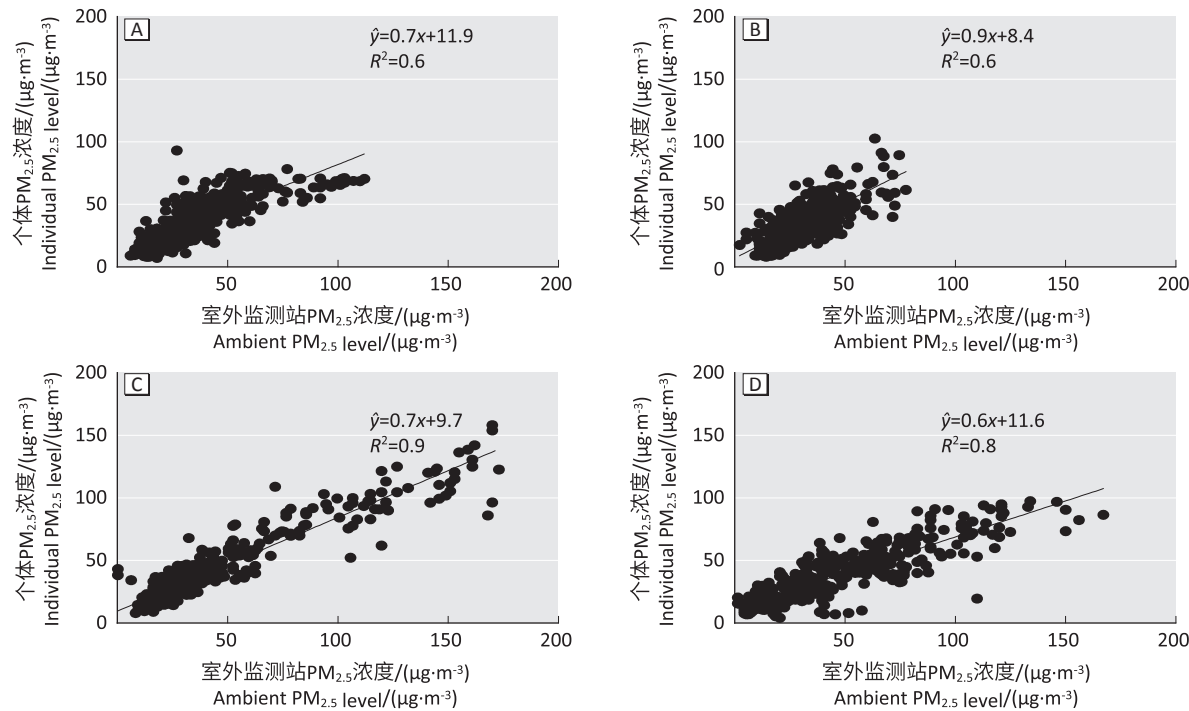
本研究共纳入83名研究对象，其个体PM_{2.5}暴露

日均值±标准差为(38.0±20.5) μg·m⁻³，室外大气监测站PM_{2.5}日均值±标准差为(35.7±21.3) μg·m⁻³，二者差异具有统计学意义(表1)。个体环境温度和相对湿度在整个研究期间日均值±标准差为(23.2±6.8) °C和64.5%±12.3%。以上4种监测指标在四个季节的测量值之间差异均具有统计学意义(P<0.05)。在春、夏和秋季的随访期间，个体PM_{2.5}暴露的日均浓度高于对应季节的室外大气PM_{2.5}日均值(P<0.05)，而在冬季，个体PM_{2.5}暴露的日均值低于室外大气监测站PM_{2.5}的日均值。个体PM_{2.5}暴露和室外大气PM_{2.5}具有较强的正向关联(图1)，四个季节的回归系数大于等于0.6。

表1 随访期间个体PM_{2.5}暴露、个体温湿度和室外监测站大气PM_{2.5}日均值($\bar{x}\pm s$)
Table 1 Daily averages of individual PM_{2.5}, meteorological factors, and ambient PM_{2.5} during follow-up periods ($\bar{x}\pm s$)

监测项目 Index	随访期间 During follow-up (n=83)	春季 Spring (n=65)	夏季 Summer (n=60)	秋季 Autumn (n=71)	冬季 Winter (n=60)	P
个体PM _{2.5} 浓度/(μg·m ⁻³) Individual PM _{2.5} level/(μg·m ⁻³)	38.0±20.5*	38.0±17.3*	35.4±15.4*	42.2±34.7*	35.3±20.7*	0.012
大气PM _{2.5} 浓度/(μg·m ⁻³) Ambient PM _{2.5} level/(μg·m ⁻³)	35.7±21.3	36.6±19.9	30.3±12.9	40.7±27.9	41.3±31.4	0.000
个体环境温度/°C Individual environment temperature/°C	23.2±6.8	23.1±4.4	28.3±6.2	21.7±4.7	15.0±5.4	0.000
个体湿度/% Individual humidity/%	64.5±12.3	60.5±11.7	74.7±10.0	62.4±8.6	59.5±12.7	0.000

[注] *: 同一个时间段或季节，与大气PM_{2.5}比较，P<0.05。
[Note] *: Significant differences between individual PM_{2.5} and ambient PM_{2.5} in the same follow-up period and in the same seasons, P<0.05.



[注] 图中的点为四次随访期间，所有受试者每次连续7 d的个体PM_{2.5}和监测站大气PM_{2.5}的小时均值(n=7 d×24 h×每次随访实际参加人数)。A：春季；B：夏季；C：秋季；D：冬季。
[Note] The dots in the figure refer to the hourly averages of individual PM_{2.5} and ambient PM_{2.5} in seven consecutive days in each follow-up visit (n=7 d×24 h×actual number of participants in each visit). A: Spring; B: Summer; C: Autumn; D: Winter.

图1 四个季节四次随访期间个体PM_{2.5}暴露和室外监测站大气PM_{2.5}小时均值的散点图

Figure 1 Scatter plot of the hourly means of individual PM_{2.5} exposure against ambient PM_{2.5} in four follow-ups in each season, respectively

2.2 个体PM_{2.5}暴露与人口学特征、居住环境和生活习惯的单因素分析

研究对象年龄(66.0±6.1)岁, 61.4%为女性, 16.9%为既往吸烟人群(所有的研究对象当前均不吸烟), 57.8%为高中及以上学历水平, 74.7%的研究对象家中冬季使用供暖(含空调、电暖器等), 94.0%的家庭烹饪主要能源为天然气。住宅建筑特征方面, 住宅面积≤90 m²者占50.6%, 房屋建成年份在2000—2005年者占44.6%, 居住楼层在3层以上者占49.4%, 住宅的窗户为单层玻璃者占63.9%(表2)。结果并未显示不同人口学特征和住宅建筑特征的个体PM_{2.5}暴露水平之间差异存在统计学意义。

表2 个体PM_{2.5}暴露与研究对象人口学特征、建筑特征的单因素对比分析

Table 2 Associations between individual PM_{2.5} exposure and the demographic characteristics and architecture characteristics by univariate analysis

变量 Variable	频数 / 构成比 Frequency/ proportion (n/%)	个体PM _{2.5} 浓度 / (μg·m ⁻³) ($\bar{x} \pm s$) Individual PM _{2.5} concentration/ (μg·m ⁻³) ($\bar{x} \pm s$)	P
年龄 / 岁 (Age/years)			0.620
≤ 66	33 (39.8)	36.9±21.4	
>66	50 (60.2)	34.6±21.3	
性别 (Gender)			0.280
男性 (Male)	32 (38.6)	31.8±18.9	
女性 (Female)	51 (61.4)	38.1±22.4	
退休状态 (Retired)			0.276
是 (Yes)	77 (92.8)	33.5±15.0	
否 (No)	6 (7.2)	27.6±11.7	
既往吸烟 (Ever smokers)			0.133
是 (Yes)	14 (16.9)	32.5±16.7	
否 (No)	66 (79.5)	37.3±23.0	
教育水平 (Education background)			0.955
高中以下 (Below high school)	32 (38.6)	37.0±21.9	
高中及以上 (High school and above)	48 (57.8)	36.8±21.8	
冬季供暖 (Heating in winter)			0.594
有 (Yes)	62 (74.7)	36.4±19.1	
无 (No)	18 (21.7)	35.5±22.0	
烹饪主要能源 (Cooking fuel)			0.413
天然气 (Natural gas)	78 (94.0)	35.4±21.4	
煤气 (Gas)	2 (2.4)	47.1±24.5	
房屋面积 (Home size)			0.522
小户型 (≤90m ²) [Small (≤90m ²)]	42 (50.6)	36.5±22.3	
中大户型 (>90m ²) Medium and large (>90m ²)	35 (42.2)	34.7±19.6	
房屋建成年份 (Year built)			0.184
2000年以前 (Before 2000)	26 (31.3)	37.7±19.6	
2000—2005年 (Between 2000 and 2005)	37 (44.6)	35.9±23.0	
2005年以后 (After 2005)	11 (13.3)	29.4±15.8	
住宅所在层数 (Residential floor)			0.200
低层 (≤3层) [Low (≤Floor 3)]	37 (44.6)	39.0±23.0	
高层 (>3层) [High (>Floor 3)]	41 (49.4)	32.7±20.0	
玻璃窗层数 (Window glazing)			0.600
单层 (Single glaze)	53 (63.9)	36.7±22.0	
双层 (Double glaze)	24 (28.9)	33.1±19.6	

[注] 由于基线调查问卷中部分变量存在缺失, 故分层汇总的百分比合计可能小于100%。

[Note] Due to the missing data in the baseline questionnaire, the sum of the percentages in strata of certain variables could be less than 100%.

针对生活习惯和室内环境暴露相关的变量开展单因素线性混合效应回归分析, 结果显示, 研究对象日均做饭次数高(≥3次 vs. ≤1次)、每次室外锻炼持续时间久(>30 min vs. ≤30 min), 其个体PM_{2.5}暴露水平升高($P<0.05$); 研究对象每日居家时间越长(>20 h vs. ≤10 h)、家庭使用空气净化器(与不使用空气净化器相比), 其个体PM_{2.5}暴露水平降低($P<0.05$)。研究对象中有烹饪油烟暴露、有固体燃料暴露、近一个月室外锻炼频率高者与个体PM_{2.5}暴露的关系不具有统计学意义(表3)。

表3 个体PM_{2.5}暴露与研究对象生活习惯和室内环境暴露的单因素线性混合效应回归分析

Table 3 Associations between individual PM_{2.5} exposure and selected life habits and indoor environment exposure by linear mixed-effect regression analysis

变量 Variable	频数 / 构成比 Frequency/ proportion (n/%)	个体PM _{2.5} 浓度 / (μg·m ⁻³) ($\bar{x} \pm s$) Individual PM _{2.5} concentration/ (μg·m ⁻³) ($\bar{x} \pm s$)	b
住宅烹饪油烟暴露 Cooking fume exposure			
无暴露 (No)	108 (42.2)	39.6±20.3	
有暴露 (Yes)	136 (53.1)	40.4±19.4	2.20
固体燃料暴露 Solid fuel exposure			
无暴露 (No)	246 (96.1)	39.5±19.6	
有暴露 (Yes)	10 (3.9)	47.3±22.3	4.76
日均做饭次数 / 次 Daily cooking frequency/time			
≤ 1	46 (18.0)	29.1±19.5	
2	97 (37.9)	34.3±20.3	5.90
≥ 3	104 (40.6)	40.2±22.8	12.00*
家庭空气净化器 Air cleaner			
否 (No)	187 (73.0)	37.4±22.9	
是 (Yes)	60 (23.4)	31.0±16.2	-7.80*
每日居家时间 / h Time spent indoors/h			
≤ 10	19 (7.4)	48.2±24.5	
>10~20	118 (46.1)	39.9±20.3	-7.90
>20	94 (36.7)	38.7±18.5	-12.00*
近一个月室外锻炼频率 / (次·d ⁻¹) Frequency of physical exercise outdoors in the past month / (time·d ⁻¹)			
<1	92 (35.9)	39.5±19.6	
≥ 1	140 (54.7)	40.4±20.5	0.40
每次室外锻炼时间 / min Outdoor physical exercise time/min			
≤ 30	78 (30.5)	37.9±19.0	
>30	154 (60.2)	41.2±20.6	9.90**

[注] *: $P<0.05$, **: $P<0.01$ 。由于随访调查问卷中部分变量存在缺失, 故分层汇总的百分比合计可能小于100%。

[Note] *: $P<0.05$, **: $P<0.01$. Due to the missing data in the follow-up questionnaires, the sum of the percentages in strata of certain variables could be less than 100%.

2.3 影响个体PM_{2.5}暴露水平的多因素回归分析

多因素线性混合效应模型结果显示, 室外PM_{2.5}浓度高 ($P<0.001$)、个体环境温度高 ($P=0.005$)、日均做饭次数 ≥ 3 次 ($P=0.014$) 与个体PM_{2.5}暴露水平升高呈正向关联, 而每日居家时间 >20 h与个体PM_{2.5}暴露水平呈负向关联 ($P=0.019$), 其他因素没有达到统计学意义 (表4)。

表4 影响个体PM_{2.5}暴露水平的多因素线性混合效应回归关联分析

Table 4 Multiple linear mixed-effect regression analysis on individual PM_{2.5} exposure levels

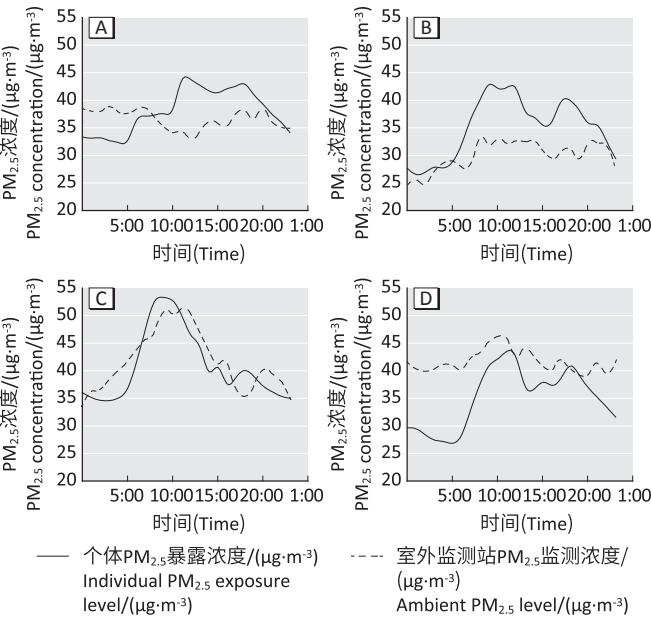
变量 Variable	<i>b</i>	<i>S_b</i>	<i>v</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
年龄 >66 岁 (参照: ≤ 66 岁) Age >66 years (Ref: ≤ 66 years)	-0.65	2.72	60.40	-0.24	0.813
女性 (参照: 男性) Female (Ref: male)	5.63	2.92	66.54	1.93	0.058
吸烟 (参照: 不吸烟) Smoking (Ref: No)	-1.82	2.47	178.90	-0.74	0.463
室外监测站PM _{2.5} / ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) Ambient PM _{2.5} / ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	0.72	0.05	170.63	14.15	<0.001
个体温度/ $^{\circ}\text{C}$ Individual temperature/ $^{\circ}\text{C}$	0.48	0.17	166.18	2.82	0.005
每日居家时间10~20h (参照: ≤ 10 h) Daily 10-20h spent indoors (Ref: ≤ 10 h)	-9.31	5.27	85.90	-1.77	0.081
每日居家时间 >20 h (参照: ≤ 10 h) Daily >20 h spent indoors (Ref: ≤ 10 h)	-12.62	5.30	96.89	-2.38	0.019
每次室外锻炼时间 >30 min (参照: ≤ 30 min) Outdoor physical exercise >30 min (Ref: ≤ 30 min)	1.89	2.64	121.03	0.72	0.475
日均做饭次数2次 (参照: 1次) Daily cooking 2 times (Ref: 1 time)	2.45	3.75	74.90	0.65	0.516
日均做饭次数 ≥ 3 次 (参照: 1次) Daily cooking ≥ 3 times (Ref: 1 time)	8.96	3.56	84.62	2.52	0.014
使用家庭空气净化器 (参照: 不用) Air cleaner (Ref: No)	-2.65	2.86	103.29	-0.93	0.357

2.4 个体PM_{2.5}暴露和室外监测站大气PM_{2.5}数据的逐时关联分析

针对四个季节分别完成的4次随访, 以小时为单位, 计算研究对象全天个体PM_{2.5}暴露和室外大气PM_{2.5}监测数据的逐小时平均值 (图2)。结果显示, 除春季外, 个体PM_{2.5}暴露与室外大气PM_{2.5}的逐时浓度变化的总体趋势一致, 即每日早晨5时起, 个体PM_{2.5}暴露浓度开始上升; 下午6时以后, 个体PM_{2.5}暴露浓度开始回落。春季个体PM_{2.5}暴露浓度在8—14时出现与室外大气PM_{2.5}暴露浓度反向的变化趋势。从每日个体暴露的峰值变化看, 夏、秋两季, 个体PM_{2.5}暴露的第一个早高峰出现在上午8—10时, 明显早于冬、春两季第一个早高峰出现的上午10—12时, 而晚高峰在四季均为下午17—19时。春、夏、秋季个体PM_{2.5}浓度总体超过室外大气PM_{2.5}浓度。冬季个体PM_{2.5}浓度总体低于室外大气PM_{2.5}浓度。

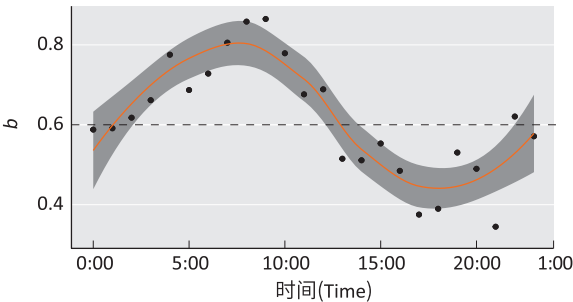
针对室外大气PM_{2.5}浓度与个体PM_{2.5}暴露水平,

进一步开展逐小时的多因素回归分析。结果显示, 在控制混杂因素后, 室外PM_{2.5}每升高 $1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 个体PM_{2.5}浓度平均升高 $0.4\sim 0.8\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图3), 且上午 (12时之前, 室外PM_{2.5}每升高 $1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 个体PM_{2.5}增加 $0.6\sim 0.8\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的影响强于下午和晚上 (13时之后, 室外PM_{2.5}每升高 $1\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 个体PM_{2.5}增加 $0.4\sim 0.6\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。



[注] A: 春季; B: 夏季; C: 秋季; D: 冬季。
[Note] A: Spring; B: Summer; C: Autumn; D: Winter.

图2 全部研究对象四次随访 (分别四个季节) 期间个体PM_{2.5}暴露和室外监测站大气PM_{2.5}浓度的每日逐小时变化趋势
Figure 2 The variations of hourly averages of individual and ambient PM_{2.5} concentrations in each follow-up in four seasons



[注] 图中的点为多因素回归中室外大气PM_{2.5}与个体PM_{2.5}暴露的关联系数。曲线和阴影部分为全部系数平滑后得到的均值和95%可信区间范围。虚线是可信区间变化范围的辅助分割线。
[Note] The dots in the figure refer to the coefficients of ambient PM_{2.5} in association with individual PM_{2.5} in the multiple regression analyses. The curve and the shaded part are the mean values and 95% confidence intervals obtained after all coefficients are smoothed. The dashed line is the auxiliary dividing line of the variation range of the confidence intervals.

图3 采用逐小时的多因素回归分析室外大气PM_{2.5}浓度对个体PM_{2.5}暴露水平的回归系数 (95%可信区间)
Figure 3 The coefficient (95% confidence interval) of ambient PM_{2.5} in association with individual PM_{2.5} in the multiple hourly regression analysis

3 讨论

本研究采用固定群组重复随访的研究设计,对上海闵行古美社区的老年人进行了个体 $PM_{2.5}$ 测量和室内外环境影响因素分析。结果发现,个体 $PM_{2.5}$ 暴露浓度在春、夏和秋季的日均值高于室外大气 $PM_{2.5}$ 的日均值,但在冬季却低于室外大气 $PM_{2.5}$ 的日均值。多因素线性混合效应回归分析显示,室外 $PM_{2.5}$ 浓度高、个体环境温度高、日均做饭次数多可增加个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平,而每日居家总时间长可降低个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平。其中, $PM_{2.5}$ 个体暴露水平受大气 $PM_{2.5}$ 波动的影响,这与部分气态污染物(如臭氧等)很不相同,且每日上、下午不同时间段的影响存在差异,这为提出针对老年人群的精细化颗粒物防护措施,奠定了数据基础。

本研究发现整个随访期间个体 $PM_{2.5}$ 暴露平均水平高于监测站大气 $PM_{2.5}$ 的浓度,与既往的研究是一致的^[29, 33-35]。这说明,个体暴露评估,作为更精准的暴露测试和评估方法,无法直接用相邻的室外大气监测站的数据代替。个体暴露来自两部分,一部分是室外暴露,另一部分是室内暴露^[22],而室内暴露对个体每天的总暴露水平产生直接影响^[36],因为人们有80%以上的时间在室内度过。本研究的研究对象为老年人群,其中36.7%的研究对象每日居家时间>20h,所以住宅室内活动和潜在暴露源对总的个体暴露的影响不容忽视。

个体 $PM_{2.5}$ 的暴露水平有明显的季节性特征^[37],但与室外大气 $PM_{2.5}$ 水平的季节性特征不同。个体 $PM_{2.5}$ 的暴露水平呈现秋季>春季>夏季>冬季,而室外大气 $PM_{2.5}$ 浓度在冬季高,其次为春、秋季,夏季最低。二者相较,个体 $PM_{2.5}$ 的暴露水平在春、夏、秋季均高于室外大气 $PM_{2.5}$,而在冬季却明显低于室外大气水平。同时,本研究也显示,冬季个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平与室外大气 $PM_{2.5}$ 浓度之间的回归系数最小($b=0.60$),进一步说明冬季室外大气污染对于个体暴露水平的影响降低。这可能与老年人群在冬季更多地停留于室内环境,较少直接停留于室外环境有关。本研究的对象在冬季的每日居家时间>20h的比例约为60.0%,而其他三个季节为30.0%~40.0%,差异具有统计学意义(见补充材料<http://www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20375>)。此外,冬季每次室外锻炼时间大于30min的人群所占的比例为30.0%,其他三个季节为60.0%~70.0%,差异也具有统计学意义;加之

冬季室外大气污染严重,室内使用空气净化器的行为也较其他季节更加频繁(尽管差异未见统计学意义),进一步降低了个体 $PM_{2.5}$ 的暴露水平。

除室外大气 $PM_{2.5}$ 对个体 $PM_{2.5}$ 暴露的影响以外,个体环境温度、日均做饭次数与个体 $PM_{2.5}$ 呈正向关联,每日居家时间与个体暴露之间呈负向关联。研究发现,烹饪可以提升室内颗粒物的水平,尤其是 $PM_{2.5}$,相比无烹饪活动时间段,烹饪活动可以使其提升90倍^[38]。烹饪等加热活动还会引起室内温度的升高和颗粒物浓度的增加,进一步引起研究对象的个体温度的升高和个体 $PM_{2.5}$ 浓度的增加。不同的烹饪方式,产生的 $PM_{2.5}$ 浓度有所不同^[39-40]。一项中国37城市的研究显示,中国居民平均每天在室内停留时间为14.23~20.77h,且烹饪和室内燃烧活动是住宅室内颗粒物的主要来源,停留于住宅室内的时间是评估个体室内 $PM_{2.5}$ 的关键因素之一^[41]。考虑到国内女性烹饪多于男性的情况,这也间接解释了女性个体 $PM_{2.5}$ 高于男性的可能原因。

个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平和室外大气 $PM_{2.5}$ 浓度的逐时关联分析显示,个体暴露在一天之中的两个暴露峰值均落在了烹饪和用餐时间段^[42]。个体环境温度和每日居家时间与个体 $PM_{2.5}$ 暴露之间的相关性,可能与季节性的变化特征密切相关。在冬季,人群停留于室内的时间更长,阻挡了来自室外的高浓度颗粒物污染,引起个体暴露的降低。同时,年龄大于66岁的人群,可能因居家时间更长(47.0% vs. 30.0%, $P<0.01$) (见补充材料<http://www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20375>),导致平均的个体 $PM_{2.5}$ 暴露量更低。

本研究的优势在于:①采用固定群组研究设计,减少了个体间和个体内的暴露差异混杂;②使用经过比对校验后的个体采样器进行个体暴露水平的测量,更加精准地反映暴露水平;③本研究对老年人群进行了暴露测量,补充了现有研究中对老年人群个体暴露测量评估较为缺乏的现状。当然,本研究也存在一定的局限性;首先,本研究只随机调查了上海市区中的一个社区,得到的结论需要在大规模的人群中进行验证,且人群中绝大多数为退休的老年人,无法代表仍在工作的同龄老年人的暴露水平,在结论适用人群的外推上,需要谨慎;其次,本研究的活动模式和居家问卷设计还可以基于每日小时值的活动记录需要,做进一步的细化和信息收集;最后,本研究缺乏关于二手烟暴露的调查,需要进一步探索。

综上所述,基于个体测量的精准暴露评估可以更好地反映人群的真实暴露水平。上海市区老年人群的个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平与室外大气 $PM_{2.5}$ 污染水平的季节性变化特征不同,个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平在冬季低于室外大气 $PM_{2.5}$ 。室外 $PM_{2.5}$ 浓度高、个体环境温度高、日均做饭次数多可增加个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平,而每日居家时间长可降低个体 $PM_{2.5}$ 暴露水平。本研究揭示了准确评估老年群体个体空气污染暴露水平的必要性,为提出精准的人群大气污染的防护措施,特别是针对老年易感人群降低其细颗粒物污染暴露的措施,提供了科学依据。

(志谢:感谢所有参与测试志愿者的配合和支持。)

参考文献

- [1] GBD 2017 Risk Factor Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017 [J]. *Lancet*, 2018, 392 (10159): 1923-1994.
- [2] KAN H. The smaller, the worse? [J]. *Lancet Planet Health*, 2017, 1 (6): E210-E211.
- [3] CHEN R, ZHAO Z, SUN Q, et al. Size-fractionated particulate air pollution and circulating biomarkers of inflammation, coagulation, and vasoconstriction in a panel of young adults [J]. *Epidemiology*, 2015, 26 (3): 328-336.
- [4] ATKINSON RW, FULLER GW, ANDERSON HR, et al. Urban ambient particle metrics and health: a time-series analysis [J]. *Epidemiology*, 2010, 21 (4): 501-511.
- [5] WANG C, TU Y, YU Z, et al. $PM_{2.5}$ and cardiovascular diseases in the elderly: an overview [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2015, 12 (7): 8187-8197.
- [6] COMBES A, FRANCHINEAU G. Fine particle environmental pollution and cardiovascular diseases [J]. *Metabolism*, 2019, 100S: 153944.
- [7] XIA X, QIU H, KWOK T, et al. Time course of blood oxygen saturation responding to short-term fine particulate matter among elderly healthy subjects and patients with chronic obstructive pulmonary disease [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 723: 138022.
- [8] PUN V C, KAZEMIPARKOUHI F, MANJOURIDES J, et al. Long-term $PM_{2.5}$ exposure and respiratory, cancer, and cardiovascular mortality in older us adults [J]. *Am J Epidemiol*, 2017, 186 (8): 961-969.
- [9] YANG J, SIRI J G, REMAIS J V, et al. The Tsinghua-Lancet commission on healthy cities in china: unlocking the power of cities for a healthy China [J]. *Lancet*, 2018, 391 (10135): 2140-2184.
- [10] SIMONI M, JAAKKOLA M S, CARROZZI L, et al. Indoor air pollution and respiratory health in the elderly [J]. *Eur Respir J*, 2003, 21 (40): 15s-20s.
- [11] GORDON T, BALAKRISHNAN K, DEY S, et al. Air pollution health research priorities for India: perspectives of the Indo-U.S. Communities of Researchers [J]. *Environ Int*, 2018, 119: 100-108.
- [12] LIN Z, GU Y, LIU C, et al. Effects of ambient temperature on lung function in patients with chronic obstructive pulmonary disease: a time-series panel study [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 619-620: 360-365.
- [13] WU S, NI Y, LI H, et al. Short-term exposure to high ambient air pollution increases airway inflammation and respiratory symptoms in chronic obstructive pulmonary disease patients in Beijing, China [J]. *Environ Int*, 2016, 94: 76-82.
- [14] ALLEN RW, ADAR SD, AVOL E, et al. Modeling the residential infiltration of outdoor $PM_{2.5}$ in the multi-ethnic study of atherosclerosis and air pollution (MESA Air) [J]. *Environ Health Perspect*, 2012, 120 (6): 824-830.
- [15] CHEN X C, CHOW J C, WARD T J, et al. Estimation of personal exposure to fine particles ($PM_{2.5}$) of ambient origin for healthy adults in Hong Kong [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 654: 514-524.
- [16] HSU S I, ITO K, KENDALL M, et al. Factors affecting personal exposure to thoracic and fine particles and their components [J]. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2012, 22 (5): 439-447.
- [17] BRINKMAN G L, MILFORD J B, SCHAUER J J, et al. Source identification of personal exposure to fine particulate matter using organic tracers [J]. *Atmos Environ*, 2009, 43 (12): 1972-1981.
- [18] JAHN H J, KRAEMER A, CHEN X C, et al. Ambient and personal $PM_{2.5}$ exposure assessment in the Chinese megacity of Guangzhou [J]. *Atmos Environ*, 2013, 74: 402-411.
- [19] LI Z, CHE W, FREY H C, et al. Characterization of $PM_{2.5}$ exposure concentration in transport microenvironments using portable monitors [J]. *Environ Pollut*, 2017, 228: 433-442.
- [20] SARNAT S E, KLEIN M, SARNAT J A, et al. An examination of exposure measurement error from air pollutant spatial

- variability in time-series studies [J]. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2010, 20 (2) : 135-146.
- [21] RICHMOND-BRYANT J, LONG T C. Influence of exposure measurement errors on results from epidemiologic studies of different designs [J]. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2020, 30 (3) : 420-429.
- [22] MENG QY, TURPIN BJ, KORN L, et al. Influence of ambient (outdoor) sources on residential indoor and personal PM_{2.5} concentrations : analyses of RIOPA data [J]. *J Expo Anal Environ Epidemiol*, 2005, 15 (1) : 17-28.
- [23] OGLESBY L, KÜNZLI N, RÖÖSLI M, et al. Validity of ambient levels of fine particles as surrogate for personal exposure to outdoor air pollution—results of the European EXPOLIS-EAS Study (Swiss Center Basel) [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2000, 50 (7) : 1251-1261.
- [24] RHOMBERG LR, CHANDALIA JK, LONG CM, et al. Measurement error in environmental epidemiology and the shape of exposure-response curves [J]. *Crit Rev Toxicol*, 2011, 41 (8) : 651-671.
- [25] SARNAT JA, KOUTRAKIS P, SUH HH. Assessing the relationship between personal particulate and gaseous exposures of senior citizens living in Baltimore, MD [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2000, 50 (7) : 1184-1198.
- [26] TANG CS, CHUANG KJ, CHANG TY, et al. Effects of personal exposures to micro- and nano-particulate matter, black carbon, particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons, and carbon monoxide on heart rate variability in a panel of healthy older subjects [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16 (23) : 4672.
- [27] MAR TF, KOENIG JQ, JANSEN K, et al. Fine particulate air pollution and cardiorespiratory effects in the elderly [J]. *Epidemiology*, 2005, 16 (5) : 681-687.
- [28] SULLIVAN JH, SCHREUDER AB, TRENGA CA, et al. Association between short term exposure to fine particulate matter and heart rate variability in older subjects with and without heart disease [J]. *Thorax*, 2005, 60 (6) : 462-466.
- [29] JOHANNESSON S, GUSTAFSON P, MOLNÁR P, et al. Exposure to fine particles (PM_{2.5} and PM₁) and black smoke in the general population : personal, indoor, and outdoor levels [J]. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, 2007, 17 (7) : 613-624.
- [30] WALLACE L, WILLIAMS R. Use of personal-indoor-outdoor sulfur concentrations to estimate the infiltration factor and outdoor exposure factor for individual homes and persons [J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39 (6) : 1707-1714.
- [31] EVANGELOPOULOS D, KATSOUYANNI K, KEOGH RH, et al. PM_{2.5} and NO₂ exposure errors using proxy measures, including derived personal exposure from outdoor sources : a systematic review and meta-analysis [J]. *Environ Int*, 2020, 137 : 105500.
- [32] WANG K, CHEN F E, AU W, et al. Evaluating the feasibility of a personal particle exposure monitor in outdoor and indoor microenvironments in Shanghai, China [J]. *Int J Environ Health Res*, 2019, 29 (2) : 209-220.
- [33] LAI HK, KENDALL M, FERRIER H, et al. Personal exposures and microenvironment concentrations of PM_{2.5}, VOC, NO₂ and CO in Oxford, UK [J]. *Atmos Environ*, 2004, 38 (37) : 6399-6410.
- [34] SØRENSEN M, LOFT S, ANDERSEN HV, et al. Personal exposure to PM_{2.5}, black smoke and NO₂ in Copenhagen : relationship to bedroom and outdoor concentrations covering seasonal variation [J]. *J Expo Anal Environ Epidemiol*, 2005, 15 (5) : 413-422.
- [35] LEI X, XIU G, LI B, et al. Individual exposure of graduate students to PM_{2.5} and black carbon in Shanghai, China [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, 23 (12) : 12120-12127.
- [36] MENDELL MJ. Indoor residential chemical emissions as risk factors for respiratory and allergic effects in children : a review [J]. *Indoor Air*, 2007, 17 (4) : 259-277.
- [37] NERRIERE E, ZMIROU-NAVIER D, BLANCHARD O, et al. Can we use fixed ambient air monitors to estimate population long-term exposure to air pollutants? The case of spatial variability in the Genotox ER study [J]. *Environ Res*, 2005, 97 (1) : 32-42.
- [38] HUSSEIN T, GLYTSOS T, ONDRÁČEK J, et al. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house [J]. *Atmos Environ*, 2006, 40 (23) : 4285-4307.
- [39] LU F, SHEN B, YUAN P, et al. The emission of PM_{2.5} in respiratory zone from Chinese family cooking and its health effect [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 654 : 671-677.
- [40] WANG L, ZHENG X, STEVANOVIC S, et al. Characterization particulate matter from several Chinese cooking dishes and implications in health effects [J]. *J Environ Sci (China)*, 2018, 72 : 98-106.
- [41] DU Y, WANG Y, DU Z, et al. Modeling of residential indoor PM_{2.5} exposure in 37 counties in China [J]. *Environ Pollut*, 2018, 238 : 691-697.
- [42] TORKMAHALLEH MA, GOLDASTEH I, ZHAO Y, et al. PM_{2.5} and ultrafine particles emitted during heating of commercial cooking oils [J]. *Indoor Air*, 2012, 22 (6) : 483-491.

(英文编辑：汪源；责任编辑：汪源)