

· 调查报告与分析 ·

社区老年人群个体、室内及室外 PM_{2.5} 暴露特征及与健康风险评估关联性

康淑玲^{1,2}, 林馨^{1,2}, 林侃^{1,2}, 刘宝英³, 吴传城³, 向建军³, 陈静文³, 周权^{1,2}

1. 福州市疾病预防控制中心, 福州 350004;
2. 福建医科大学附属福州市疾病预防控制中心, 福州 350004;
3. 福建医科大学公共卫生学院, 福州 350122
通信作者: 周权, E-mail: 359520709@qq.com

【摘要】目的 分析福州市某社区老年人群细颗粒物 PM_{2.5} 个体、室内、室外的暴露特征及与健康风险评估的关联。**方法** 以福州市某社区为现场, 在夏冬季分别对 140 名和 107 名老年人进行连续 3 日的个体、室内和室外 PM_{2.5} 暴露测量, 同时开展环境因素及健康状况问卷调查。采用美国环保局推荐的健康风险评估模型评估健康风险。**结果** 福州市社区老年人群个体、室内和室外 PM_{2.5} 日均暴露浓度分别为 61.83、41.37、32.00 μg/m³, 呈现个体 > 室内 > 室外浓度。个体 PM_{2.5} 浓度夏季高于冬季 (71.78 μg/m³ vs. 50.72 μg/m³), 室内外 PM_{2.5} 浓度夏季低于冬季 (室内: 38.43 μg/m³ vs. 49.76 μg/m³, 室外: 32.00 μg/m³ vs. 34.53 μg/m³)。室内外 PM_{2.5} 浓度较低时 (室内: < 57.95 μg/m³, 室外: < 49.38 μg/m³), 个体浓度明显高于室内外浓度; 室内外 PM_{2.5} 浓度较高时, 个体浓度近似于室内外浓度。多环芳烃 (PAHs) 和金属组分的暴露健康风险呈现个体高于室内外、冬季高于夏季。PAHs 对个体具有潜在致癌风险 (冬季: 12.74 × 10⁻⁶, 夏季 1.673 × 10⁻⁶); 金属元素 Mn, As 和 Cd 具有非致癌风险 (均 HQ > 1); As, Ni, Cd 和 Pb 对个体具有潜在致癌风险, 其中 As 具有致癌风险 (夏季: 128.272 × 10⁻⁶, 冬季: 226.214 × 10⁻⁶)。**结论** 室内外 PM_{2.5} 浓度较低时, 采用室内外浓度代替个体浓度会低估个体真实的暴露水平; 室内外 PM_{2.5} 浓度较高时, 采用室内外浓度可近似于个体暴露水平。基于精准个体 PM_{2.5} 及其组分暴露水平进行健康风险评估, 可减少因暴露评估不准确而导致的人群健康效应偏差。

【关键词】 PM_{2.5}; 老年人群; 暴露特征; 风险评估; 关联性

Indoor, outdoor, and personal exposure to PM_{2.5} and associated health risk in community-dwelling elderly residents in Fuzhou city, 2021: a cross-sectional study

KANG Shuling^{1,2}, LIN Xin^{1,2}, LIN Kan^{1,2}, LIU Baoying³, WU Chuancheng³, XIANG Jianjun³, CHEN Jingwen³, ZHOU Quan^{1,2} (1. Fuzhou Center for Disease Control and Prevention, Fuzhou 350004, China; 2. Fuzhou Center for Disease Control and Prevention, Affiliated to Fujian Medical University, Fuzhou 350004, China; 3. School of Public Health, Fujian Medical University, Fuzhou 350122, China)

Corresponding author: ZHOU Quan, E-mail: 359520709@qq.com

【Abstract】 Objective To investigate personal total, indoor, outdoor exposure to particulate matter less than 2.5 μm in aerodynamic diameter (PM_{2.5}) and health risks associated with the exposure among community-dwelling elderly in Fuzhou city. **Methods** A total of 247 residents (≥ 60 years of age, living at the current residence for at least 3 years, without serious respiratory/circulatory disease and without disability) were recruited from a community in Fuzhou city, Fujian province, using random sampling stratified by residential floor. Three-day continuous sampling of PM_{2.5} was performed by using a personal particulate sampler, a constant-temperature, constant-flow particulate sampler in the living room, and an automatic outdoor particulate sampler within 2 km of the participants' homes during the winter season for 140 participants and during the summer season for 107 participants in 2021. All participants were interviewed with a questionnaire on demographics, living conditions, health status, lifestyle behaviors, and activities during the PM_{2.5} sampling period. PM_{2.5} concentration was measured with the weighing method; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and metal elemental components in collected PM_{2.5} were determined by ultra-high performance liquid chromatography and inductively coupled plasma mass spectrometry. The health risk associated with PAHs and metals in PM_{2.5} was assessed by using the health risk assessment model recommended by the United States Environmental Protection Agency. **Results** The mean daily exposure concentrations of PM_{2.5} for the participants were 61.83 μg/m³ for personal exposure, 41.37 μg/m³ for indoor exposure, and 32.00 μg/m³ for outdoor exposure, with descending order of personal, indoor, and outdoor exposure concentrations. The total personal PM_{2.5} exposure concentration was higher in summer than in winter (71.78 μg/m³ vs. 50.72 μg/m³), while the personal indoor and outdoor PM_{2.5} exposure concentrat-

开放获取: CC BY-NC-ND 4.0 DOI: 10.11847/zgggws1144319

基金项目: 福建省自然科学基金(2021J01722); 福州市科技计划项目(2022-S-087); 福建省卫健委科技计划项目(2023QNA083); 福州市科技计划项目(2023-S-030)

第一作者: 康淑玲(1990-), 主管医师, 硕士, 研究方向: 环境卫生。

收稿日期: 2024-03-01 修回日期: 2024-07-21 录用日期: 2024-09-05 责任编辑: 温娟

利益冲突: 不存在 伦理审查: 免除审查 出版授权: 全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议



ions were lower in summer than in winter (indoor: $38.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs. $49.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, outdoor: $32.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vs. $34.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$). When personal indoor and outdoor $\text{PM}_{2.5}$ concentrations were low (indoor $< 57.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, outdoor $< 49.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$), the total personal exposure concentrations were significantly higher than the personal indoor and outdoor exposure concentrations; when personal indoor and outdoor $\text{PM}_{2.5}$ concentrations were high, the total personal exposure concentration was close to the personal indoor and outdoor exposure concentrations. The health risks of exposure to PAHs and metal constituents in $\text{PM}_{2.5}$ were higher for total personal exposure than for personal indoor and outdoor exposure, and higher in winter than in summer. Exposure to PAHs in $\text{PM}_{2.5}$ posed a potential carcinogenic risk to the participants, with excess lifetime cancer risks (ELCRs) of 12.74×10^{-6} and 1.673×10^{-6} for winter and summer exposure, respectively. Exposure to manganese, arsenic, and cadmium in $\text{PM}_{2.5}$ posed non-carcinogenic risks to the participants, all with health quotients greater than 1. Exposure to arsenic, nickel, cadmium, and lead in $\text{PM}_{2.5}$ posed potential carcinogenic risks to the participants, with ELCRs of 128.272×10^{-6} and 226.214×10^{-6} for summer and winter arsenic exposure, respectively.

Conclusions When indoor and outdoor $\text{PM}_{2.5}$ concentrations are low, taking indoor and outdoor concentrations as a surrogate for total personal exposure concentrations will underestimate actual personal exposure; when indoor and outdoor $\text{PM}_{2.5}$ concentrations are high, using indoor and outdoor concentrations may approximate total personal exposure. Health risk assessment based on accurate personal exposure to $\text{PM}_{2.5}$ and its constituents can reduce the bias in population health effects caused by inaccurate exposure assessment.

【Keywords】 $\text{PM}_{2.5}$; elderly population; exposure characteristics; risk assessment; association

细颗粒物 (particulate matter less than $2.5 \mu\text{m}$ in aerodynamic diameter, $\text{PM}_{2.5}$) 暴露与心血管系统、呼吸系统、免疫系统和癌症等多种不良健康影响之间呈显著关联^[1-4]。老年人为各种疾病的易感人群, 承受着更高的颗粒物暴露健康风险^[5]。目前大多数流行病学研究使用室外大气固定监测站点数据作为个体 $\text{PM}_{2.5}$ 实际暴露水平的替代^[6-7], 这可能会将暴露水平错误分类, 且不能充分反映暴露与健康的关联强度^[8]。迄今为止, 国内针对低浓度暴露地区老年人群个体、室内、室外 $\text{PM}_{2.5}$ 的暴露水平特征与健康风险相关性尚不清楚。本研究通过对福州市某社区老年人群 $\text{PM}_{2.5}$ 的个体暴露的测量, 结合室内外环境监测和个体时间-活动模式进行调查, 分析老年人群 $\text{PM}_{2.5}$ 的暴露水平特征及与健康风险的相关性。

1 对象与方法

1.1 对象 选取福州市某社区 (共有 4 个住宅小区) 为调查现场, 对社区中所有老年人进行编号, 按楼层高低分层 (高: > 3 层, 低: ≤ 3 层), 采用简单随机抽样中的随机数表法, 在高低楼层中分别随机抽取调查对象。调查对象纳入与排除标准: (1) 纳入标准: 年龄 ≥ 60 周岁; 常住本社区 3 年以上; 生活作息规律、活动范围较固定; 如患慢性病, 近 3 个月疾病状态稳定。(2) 排除标准: 患有严重心肺系统疾病; 认知功能障碍; 生活能力不能自理。本调查共招募了 247 名老年人。

1.2 调查方法 分别于 2021 年 7 月 19 日—8 月 29 日 (夏季) 和 2021 年 12 月 31 日—2022 年 1 月 25 日 (冬季) 对调查对象个体和住宅内的 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露水平连续 3 日 (72 小时) 采样; 同时记录调查对象每日的时间-活动模式, 并开展环境因素及健康状况问卷调查。同期在社区 2 km 内的监测点进行室外环境 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露水平采样。所有调查对象的个体暴露测量均有相匹配的室内外暴露监测。采用称重法测量 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, 应用超高

效液相色谱法和电感耦合等离子体质谱法测定 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃和金属元素组分。

1.2.1 样品采集

1.2.1.1 个体 $\text{PM}_{2.5}$ 采集 采用个体暴露颗粒物采样器 (型号: 美国 UPAS V2) 测量个体暴露, 采样流量为 1 L/min。调查对象在佩戴采样器的同时进行日常活动; 睡觉和洗澡时, 可将采样器置于身边 1 m 内, 其余时间均应佩戴。

1.2.1.2 室内 $\text{PM}_{2.5}$ 采集 采用恒温恒流大气颗粒物采样器 (青岛明华: MH1205 型) 测量室内暴露, 采样流量为 40 L/min。采样器放于客厅内, 距地面约 1.5 m、距墙约 1 m。

1.2.1.3 室外 $\text{PM}_{2.5}$ 采集 采用智能颗粒物采样器 (型号: HY-100WSD) 测量室外暴露, 采样器置于福州市被调查社区范围 (采样高度 15 m), 采样流量为 100 L/min。

1.2.2 问卷调查 采样期间对调查对象开展“环境因素与健康状况问卷”调查。调查问卷的主要内容包括个人基本情况、居住环境情况、健康状况和个人生活习惯等。问卷设计根据中国疾病预防控制中心下发的《城市室内环境健康影响调查与防护措施效果评估》方案的问卷内容, 同时查阅和参考相关研究的问卷调查信息进行修改、逻辑纠错和完善, 并进行了小规模人群预调查和校验。

1.2.3 健康风险评估方法 本研究采用美国环境保护局 (The United States Environmental Protection Agency, US EPA) 推荐的健康风险评估模型, 结合实际调查的人群时间-活动模式暴露参数, 对老年人群 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学组分暴露的健康风险进行评估^[9-12]。由于 $\text{PM}_{2.5}$ 主要通过呼吸途径进入人体, 因此本研究着重考虑呼吸途径的健康风险。

1.3 质量控制 根据中国疾病预防控制中心下发的《城市室内环境健康影响调查与防护措施效果评估》方案, 开展 $\text{PM}_{2.5}$ 室内监测和个体暴露测量质量控制。采样前对所有不同型号采样器进行

一致性校验,避免测量偏倚。采样前后的滤膜,称量两次,每次间隔 1 h,2 次均值 $< 0.0001 \text{ mg}$;称量天平室保持恒温恒湿;称量前保证滤膜经过平衡处理。问卷调查后,对所有变量进行逻辑核查,同时采用 EpiData 3.1 软件进行问卷的双录入和一致性检验。

1.4 统计学分析 采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析,定量变量采用 $\bar{x} \pm s$ 或 M (四分位间距)描述,定性变量采用例数(百分比)描述;采用 Friedman M 检验或 Mann-Whitney U 检验比较 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的差异性;采用 Spearman 相关性分析评价个体与室内外暴露浓度之间的相关性;采用非线性回归分析个体 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度/室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系和个体 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度/室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与室

外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系。采用 t 检验比较符合正态分布的 2 组定量变量间的差异,采用非参数检验比较偏态分布的定量变量间的差异。采用 χ^2 检验或确切概率法比较定性变量间的差异。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般情况 本研究采用分季节调查,夏季调查 140 人,调查对象平均年龄为 (69.8 ± 6.4) 岁,58.6% 为女性,12.1% 目前吸烟;冬季调查 107 人,平均年龄为 (69.7 ± 6.0) 岁,54.2% 为女性,15.0% 目前吸烟(见表 1)。年龄经 t 检验、其他变量经 χ^2 检验分析,结果显示,夏冬季调查对象的人口学特征、居住环境及生活习惯差异均无统计学意义(均 $P > 0.05$)。

表 1 调查对象基本特征

Table 1 Mean age, number and proportion of community residents surveyed in summer and winter in Fuzhou city, 2021 – by gender, education, current smoking, residential floor (third floor and below or above), residential area, residential years, and residential north-south natural ventilation

变量	分类	夏季($n = 140$)	构成比(%)	冬季($n = 107$)	构成比(%)	χ^2 值	P 值
性别	男	58	41.4	49	45.8	0.471	0.493
	女	82	58.6	58	54.2		
文化程度	高中以下	81	57.9	58	54.2	0.329	0.566
	高中及以上	59	42.1	49	45.8		
目前吸烟	否	123	87.9	91	85.0	0.414	0.520
	是	17	12.1	16	15.0		
居住楼层(层)	低(≤ 3)	74	52.9	63	58.9	0.890	0.345
	高(> 3)	66	47.1	44	41.1		
住宅面积(m^2)	小户型(≤ 90)	0	0.0	5	4.7	0.593 ^a	
	中小户型($91 \sim 144$)	128	91.4	94	87.8		
	大户型(> 144)	12	8.6	8	7.5		
居住年限(年)	≤ 10	38	27.1	31	29.0	0.101	0.751
	> 10	102	72.9	76	71.0		
是否南北通透	否	4	2.9	0	0.0	0.135 ^a	
	是	136	97.1	107	100.0		

注:a 使用 Fisher 确切概率法。

2.2 个体、室内、室外 $\text{PM}_{2.5}$ 的暴露特征(表 2) 研究期间社区老年人群个体、室内、室外 $\text{PM}_{2.5}$ 日均暴露浓度分别为 61.83 、 41.37 和 $32.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$;夏季分别为 71.78 、 38.43 和 $32.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$;冬季分别为 50.72 、 49.76 和 $34.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$,不同季节,个体、室内和室外的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差异均有统计学意义

(均 $P < 0.001$),个体呈现夏季浓度 $>$ 冬季,而室内和室外呈现冬季浓度 $>$ 夏季。同一季节,夏($\chi^2_{\text{F}} = 180.700$)冬($\chi^2_{\text{F}} = 25.121$)季个体、室内、室外 $\text{PM}_{2.5}$ 日均暴露浓度的差异有统计学意义(均 $P < 0.001$),呈现个体浓度 $>$ 室内 $>$ 室外。

表 2 福州社区老年人群夏冬季个体、室内和室外 $\text{PM}_{2.5}$ 日均暴露浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Table 2 Number of samples and medians (25th/75th percentiles) of total/indoor/outdoor personal daily $\text{PM}_{2.5}$ exposure concentration in summer-winter/summer/winter seasons for community-dwelling elderly in Fuzhou city, 2021

监测项目	夏冬季		夏季		冬季		U	P 值 ^b
	N	中位数(P_{25}, P_{75})	N	中位数(P_{25}, P_{75})	N	中位数(P_{25}, P_{75})		
个体	247	61.83(44.80, 78.88)	140	71.78(57.89, 90.90)	107	50.72(31.27, 61.42)	3 399.000	< 0.001
室内	247	41.37(30.95, 50.61) ^a	140	38.43(28.77, 5.88) ^a	107	49.76(32.06, 70.42)	5 318.000	< 0.001
室外	247	32.00(25.09, 39.50) ^a	140	32.00(22.10, 34.71) ^a	107	34.53(26.22, 47.00) ^a	5 172.000	< 0.001

注:a 采用 Friedman M 检验,对同一季节内个体、室内、室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行组间比较;以个体 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度为参照,两两比较采用 q 检验, $P < 0.001$; b 采用 Mann-Whitney U 检验比较季节间差异。

2.3 个体、室内和室外 PM_{2.5} 相关性分析

2.3.1 两两相关性(表3) 夏冬季个体与室外 PM_{2.5} 浓度之间相关系数分别为 0.594 和 0.224, 关联具

有统计学意义($P=0.042$ 和 $P=0.015$)。此外, 冬季室内与室外 PM_{2.5} 浓度之间相关系数为 0.265, 关联具有统计学意义($P=0.004$)。

表3 夏冬季个体、室内和室外 PM_{2.5} 浓度的 Spearman 相关性分析

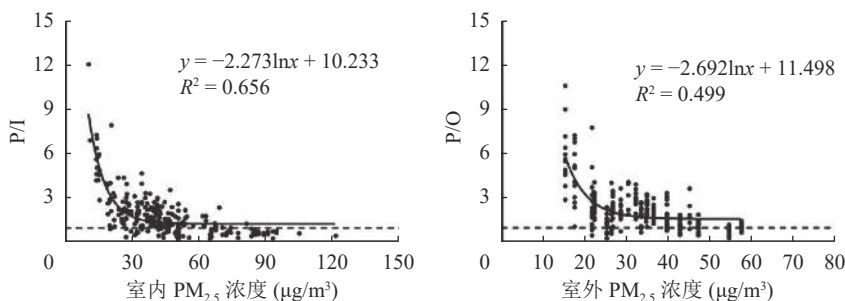
Table 3 Correlation coefficients for daily PM_{2.5} concentrations of total/indoor/outdoor personal exposure in summer-winter/summer/winter seasons for community-dwelling elderly in Fuzhou city, 2021: Spearman correlation analysis

监测项目	夏冬季		夏季		冬季	
	<i>r</i>	<i>P</i> 值	<i>r</i>	<i>P</i> 值	<i>r</i>	<i>P</i> 值
个体与室内	-0.056	0.378	0.294	0.354	0.156	0.093
个体与室外	-0.041	0.523	0.594	0.042 ^a	0.224	0.015 ^a
室内与室外	0.248	<0.001 ^a	0.473	0.120	0.265	0.004 ^a

注: a $P < 0.05$ 。

2.3.2 个体与室内/室外 PM_{2.5} 浓度比值随室内/室外 PM_{2.5} 浓度的变化趋势(图1) 个体 PM_{2.5} 浓度与室内浓度比值(*P/I*)与室内浓度呈显著的对数函数关系, 拟合方程为 $y = -2.273 \ln x + 10.233$, $R^2 = 0.656$ 。根据拟合结果, 当室内 PM_{2.5} 浓度较低时, 个体暴露浓度普遍高于室内浓度, 且比值波动较大; 当室内浓度升高时 ($\geq 57.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 个

体 PM_{2.5} 暴露浓度接近或略低于室内浓度。个体 PM_{2.5} 浓度与室外浓度比(*P/O*)与室外浓度也呈显著的对数函数关系, 拟合方程为 $y = -2.692 \ln x + 11.498$, $R^2 = 0.499$ 。根据拟合结果, 当室外 PM_{2.5} 浓度较低时, 个体暴露浓度普遍高于室外浓度; 当室外浓度升高时 ($\geq 49.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 个体 PM_{2.5} 暴露浓度接近或略高于室外浓度。



注: *P/I* 表示个体与室内 PM_{2.5} 浓度比, 虚线表示 *P/I* = 1; *P/O* 表示个体与室外 PM_{2.5} 浓度比, 虚线表示 *P/O* = 1

图1 个体与室内/室外 PM_{2.5} 浓度比值随室内/室外 PM_{2.5} 浓度的变化趋势

Fig. 1 Fitted correlation curves between ratios of total versus indoor (left)/outdoor (right) personal daily PM_{2.5} exposure concentration and daily indoor (left)/outdoor (right) concentration for community-dwelling elderly in Fuzhou city, 2021 (The dashed lines indicate the ratio value of 1)

2.4 风险评估

2.4.1 PM_{2.5} 中多环芳烃对社区老年人群健康风险评估(表4) 按季节分层, 评估福州市社区老年人群长期暴露于 PM_{2.5} 中多环芳烃的致癌风险, 夏冬季个体 *ECR* 均超过 US EPA 推荐致癌阈值 (1×10^{-6}), 提示存在潜在致癌风险, 致癌风险值分

别为 1.673×10^{-6} 和 12.744×10^{-6} ; 夏冬季个体 *ELCR* 均未超过 US EPA 推荐致癌阈值。夏冬季之间 *ECR* 与 *ELCR* 的差异具有统计学意义 ($P < 0.05$), 冬季致癌风险大于夏季。同一个季节, 夏季 PAHs 的 *ECR* 呈现个体 > 室内 > 室外, 冬季呈现个体 > 室外 > 室内。

表4 福州市社区老年人 PM_{2.5} 中多环芳烃夏冬季的致癌风险

Table 4 Summer/winter-specific medians of total/indoor/outdoor personal toxic equivalent and associated excess cancer risk, average daily dose and associated excess lifetime cancer risk from exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} for community-dwelling elderly in Fuzhou city, 2021

指标(中位数)	分类	TEQ(ng/m ³)	ECR($\times 10^{-6}$)	ADD(ng/m ³)	ELCR($\times 10^{-6}$)
夏季	个体	0.192	1.673 ^b	0.031	0.098
	室内	0.172	1.493 ^b	0.021	0.065
	室外	0.153	0.133	0.004	0.013
冬季	个体	1.465 ^a	12.744 ^{a,b}	0.239 ^a	0.751 ^a
	室内	0.395 ^a	3.433 ^{a,b}	0.056 ^a	0.175 ^a
	室外	0.890 ^a	7.739 ^{a,b}	0.013 ^a	0.041 ^a

注: a 表示夏冬两季比较, $P < 0.05$; b 表示致癌风险超出推荐阈值 (1×10^{-6})。TEQ, 总毒性当量; ECR, 超额致癌风险; ADD, 日均暴露量; ELCR, 终生超额致癌风险。

2.4.2 PM_{2.5} 中金属元素对社区老年人群健康风险评估(表 5) 按季节分层,在非致癌风险方面,夏季个体、室内 Mn 和 As 的慢性非致癌风险较高(HQ > 1),室外所有元素的慢性非致癌风险均较低(HQ < 1);冬季个体、室内 Mn、As 和 Cd 的慢性非致癌风险较高(HQ > 1),室外所有元素的慢性非致癌风险均较低(HQ < 1)。在致癌风险方面,夏季个体和室内 As 的 ILCR 值 > 1 × 10⁻⁴,表明具有致癌风险,致癌风险值为分别为 138.804 × 10⁻⁶ 和 128.272 × 10⁻⁶(即按照当前的 As 浓度暴露 70 年,由此引起的癌症发病率约分别为 139/100 万和 128/100 万);个体和室内 Ni, Cd 和 Pb 的 ILCR 值均处于 1 × 10⁻⁶~1 × 10⁻⁴,具有潜在致癌风险;室外 As 和 Cd 的 ILCR 值均处于 1 × 10⁻⁶~1 × 10⁻⁴,具有潜在致癌风险。冬季个体和室内 As 的 ILCR 值 > 1 × 10⁻⁴,表明具有致癌风险,致癌风险值分别为 226.214 × 10⁻⁶ 和 220.547 × 10⁻⁶(即按照当

前的 As 浓度暴露 70 年,由此引起的癌症发病率约分别为 226/100 万和 221/100 万);个体和室内 Ni, Cd 和 Pb 的 ILCR 值均处于 1 × 10⁻⁶~1 × 10⁻⁴,具有潜在致癌风险;室外 As 和 Cd 的 ILCR 值均处于 1 × 10⁻⁶~1 × 10⁻⁴,具有潜在致癌风险。同一个季节, Ni, As, Cd 和 Pb 的致癌风险呈个体 > 室内 > 室外。不同季节, As 个体(U = 11 294.500)和室内(U = 11 148.000)、Cd 个体(U = 10 728.500)和室内(U = 10 606.000)的非致癌风险夏冬季间差异有统计学意义(均 P < 0.05),冬季非致癌风险 > 夏季; Ni 个体(U = 6 395.000)和室内(U = 5 095.500), As 个体(U = 11 294.500)和室内(U = 7 928.000), Cd 个体(U = 10 728.500)和室内(U = 8 098.000)、Pb 个体(U = 11 310.500)和室内(U = 6 614.000)的终生增量致癌风险夏冬季间差异有统计学意义(均 P < 0.05),呈现冬季致癌风险 > 夏季(个体 Ni 除外)。

表 5 福州市社区老年人群 PM_{2.5} 中金属元素夏冬季的健康风险评估(M)

Table 5 Summer/winter-specific medians of health quotient associated with total/indoor/outdoor personal exposure to 9 metals (beryllium, aluminum, manganese, nickel, arsenic, selenium, cadmium, antimony, and mercury) and excess lifetime cancer risk associated with personal exposure to 5 metals (beryllium, nickel, arsenic, cadmium, and lead) in PM_{2.5} for community-dwelling elderly in Fuzhou city, 2021

指标	非致癌风险(HQ)									终生增量致癌风险(ILCR)(1 × 10 ⁻⁶)					
	Be	Al	Mn	Ni	As	Se	Cd	Sb	Hg	Be	Ni	As	Cd	Pb	
夏季	个体	0.018	0.368	5.203 ^b	0.587	2.152 ^b	0.001	0.762	0.509	0.004	0.864	13.734 ^b	138.804 ^b	32.918 ^b	2.470 ^b
	室内	0.004	0.177	5.047 ^b	0.228	1.989 ^b	0.001	0.688	0.051	0.003	0.178	5.337 ^b	128.272 ^b	12.382 ^b	2.389 ^b
	室外	0.002	0.042	0.801	0.042	0.340	0.001	0.087	0.009	0.001	0.072	0.988	21.922 ^b	1.564 ^b	0.446
冬季	个体	0.018	0.291	6.133 ^{ab}	0.542	3.507 ^b	0.002	1.202 ^b	0.472 ^a	0.004 ^a	0.864	12.686 ^b	226.214 ^b	51.944 ^b	3.898 ^b
	室内	0.005 ^a	0.189 ^a	6.572 ^{ab}	0.281	3.419 ^b	0.001	1.240 ^b	0.061	0.004	0.260 ^a	6.575 ^b	220.547 ^b	22.326 ^b	3.445 ^b
	室外	0.001	0.019	0.690	0.029	0.396 ^a	0.001 ^a	0.122 ^a	0.007 ^a	0.001	0.029	0.670	25.568 ^{ab}	2.193 ^{ab}	0.416 ^{ab}

注:a 夏冬两季比较差异无统计学意义(P > 0.05),其余差异均有统计学意义(P < 0.05); b 致癌风险超出推荐阈值(1 × 10⁻⁶)。

3 讨论

本研究结果表明,福州市社区老年人群夏冬季个体、室内和室外 PM_{2.5} 日均浓度未超过我国标准(日均浓度限值 75 μg/m³),但部分个体和室内 PM_{2.5} 日均浓度超标,且个体 PM_{2.5} 日均浓度超标率高于室内;PM_{2.5} 日均浓度呈现个体高于室内、室内高于室外,个体 PM_{2.5} 日均浓度呈夏季高于冬季,表明个体、室内和室外 PM_{2.5} 的暴露特征不同。与国内外其他城市相比,福州市社区老年人个体 PM_{2.5} 暴露浓度高于上海^[13]、美国底特律^[14]等城市老年人群个体暴露水平。总体上,相对于室内和室外浓度,福州市社区老年人群个体 PM_{2.5} 暴露浓度更高,呈现个体高于室内、室内高于室外浓度。与美国 Weisel 等^[15] 在新泽西州伊丽莎白市、得克萨斯州休斯敦市和加利福尼亚州洛杉矶市进行室内、室外和个体空气污染之间关系的研究结果一致。本研究发现个体与室外 PM_{2.5} 浓度相关,

当室外 PM_{2.5} 浓度较低时,个体暴露浓度普遍高于室外浓度;当室外浓度升高时,个体 PM_{2.5} 暴露浓度接近或略高于室外浓度。说明当室外固定监测点 PM_{2.5} 浓度较低时,个体 PM_{2.5} 暴露水平与室外固定监测点的浓度差异较大。这是因为个体 PM_{2.5} 暴露水平还受所处室内微环境以及个人行为活动的影响^[16-18],当室外固定监测点 PM_{2.5} 浓度较低时,室内微环境和个人行为活动的影响成为主导因素,仅使用室外环境浓度估计来自室外源的人群暴露会引入测量误差^[19]。当室外固定监测点浓度较高时,个体暴露水平与固定监测点的浓度相关性较高,且个体 PM_{2.5} 暴露水平接近室外固定监测点的浓度。一项在哈尔滨市、济南市、石家庄市和成都市 4 个地区开展的个体 PM_{2.5} 暴露水平监测的研究结果表明,个体暴露水平与大气 PM_{2.5} 污染程度具有较好的一致性^[20]。在缺乏精准个体暴露测量的情况下,当大气 PM_{2.5} 污染较严重时,根据研究人群的居住地址,选择距离

居住地最近的固定监测点数据拟合人群暴露水平,可相对较好地评估人群污染物的暴露水平。

本研究采用 US EPA 推荐的健康风险评估模型,评估福州市社区老年人群经呼吸途径吸入 PM_{2.5} 中的 PAHs 和金属元素的远期健康风险,结果显示,大气 PM_{2.5} 中 PAHs 和金属元素对老年人具有致癌风险(其中 As 致癌风险最高),且致癌风险呈现个体高于室内或室外、冬季高于夏季的特点,与个体大气 PM_{2.5} 浓度季节变化特征呈夏季浓度高于冬季的表现不一致。这种不一致可能表明,大气细颗粒物对人群的健康风险主要是由其化学组分决定。在气温较低时,大气 PM_{2.5} 结合的多环芳烃可能沉淀到地面空气中,导致人群大量吸入,这种情况常发生在冬季寒潮、雾霾和沙尘暴天气时,可解释本研究得出的冬季致癌风险更大的结论^[21]。

本研究结果提示,As 的致癌风险最高,夏冬季个体和室内 As 的致癌风险均高于可接受水平(LLCR 值 $> 1 \times 10^{-4}$)。As 主要来源于燃煤^[22],根据本研究环境因素问卷调查结果,冬季有 30.8% 的调查对象主要烹饪燃料是煤气,因此,本研究中居民烹饪使用煤气可能是造成冬季 As 浓度升高的主要原因。此外,北方冬季燃煤供暖,而福州冬季主要为偏北风,来自北方的污染物可能通过季风飘落到福州^[23],也会导致冬季大气 PM_{2.5} 中 As 的浓度升高。本研究结果提示,目前个体暴露的 As 浓度仍对居民有一定的致癌风险,应引起高度重视;建议使用更清洁能源代替煤气烹饪,以减少个体暴露水平。

本研究分析了福州市社区老年人群 PM_{2.5} 及其组分的暴露特征及健康风险评估的结果,有效减少了因暴露评估不准确而导致的健康效应偏差。但因社区老年人群代表性有限,结果外推受限,结论还需在更大规模人群中验证。此外,健康风险评估仅考虑了经呼吸道途径吸入的 PM_{2.5} 暴露风险水平,可能存在一定的风险估算偏差。

参考文献

- [1] Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis[J]. *Environment International*, 2020, 143: 105974.
- [2] Chen RJ, Yin P, Meng X, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality: a nationwide analysis in 272 Chinese cities[J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2017, 196(1): 73–81.
- [3] Liu C, Chen RJ, Sera F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities[J]. *The New England Journal of Medicine*, 2019, 381(8): 705–715.
- [4] Pun VC, Kazemiparkouhi F, Manjourides J, et al. Long-term PM_{2.5}

- exposure and respiratory, cancer, and cardiovascular mortality in older US adults[J]. *American Journal of Epidemiology*, 2017, 186(8): 961–969.
- [5] Chen TY, Chen F, Wang K, et al. Acute respiratory response to individual particle exposure (PM_{1.0}, PM_{2.5} and PM₁₀) in the elderly with and without chronic respiratory diseases[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271: 116329.
- [6] Laden F, Schwartz J, Speizer FE, et al. Reduction in fine particulate air pollution and mortality: extended follow-up of the Harvard Six Cities Study[J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2006, 173(6): 667–672.
- [7] Jalali S, Karbakhsh M, Momeni M, et al. Long-term exposure to PM_{2.5} and cardiovascular disease incidence and mortality in an eastern mediterranean country: findings based on a 15-year cohort study[J]. *Environmental Health*, 2021, 20(1): 112.
- [8] Lim S, Bassey E, Bos B, et al. Comparing human exposure to fine particulate matter in low and high-income countries: a systematic review of studies measuring personal PM_{2.5} exposure[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 833: 155207.
- [9] 杜艳君, 莫杨, 李滔滔. 环境健康风险评估方法第四讲 暴露评估(续三)[J]. *环境与健康杂志*, 2015, 32(6): 556–559.
- [10] 孙庆华, 杜宗豪, 杜艳君, 等. 环境健康风险评估方法第五讲 风险特征(续四)[J]. *环境与健康杂志*, 2015, 32(7): 640–642.
- [11] 张迎建, 刘仲, 于志刚, 等. 济南市空气污染严重区域 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征及慢性健康风险评估[J]. *环境卫生学杂志*, 2018, 8(3): 204–211.
- [12] Yu ZG, Wang H, Zhang X, et al. Long-term environmental surveillance of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Jinan, China (2014–2020): health risk assessment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 425: 127766.
- [13] 陈天一, 陈非凡, 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.
- [14] Rodes CE, Lawless PA, Thornburg JW, et al. DEARS particulate matter relationships for personal, indoor, outdoor, and central site settings for a general population[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(11): 1386–1399.
- [15] Weisel CP, Zhang JF, Turpin BJ, et al. Relationship of indoor, outdoor and personal air (RIOPA) study: study design, methods and quality assurance/control results[J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2005, 15(2): 123–137.
- [16] Dons E, Int Panis L, Van Poppel M, et al. Impact of time-activity patterns on personal exposure to black carbon[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(21): 3594–3602.
- [17] Shang J, Khuzestani RB, Tian JY, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} personal exposure of two cohorts living in urban and suburban Beijing[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 225–236.
- [18] Zhang ZZ, Gao Y, Yuan Q, et al. Effects of indoor activities and outdoor penetration on PM_{2.5} and associated organic/elemental carbon at residential homes in four Chinese cities during winter[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 739: 139684.
- [19] Hussein T, Glytsos T, Ondráček J, et al. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(23): 4285–4307.
- [20] 王彦文, 方建龙, 杜宗豪, 等. 不同地区室外大气及个体暴露 PM_{2.5} 浓度的关联性研究[J]. *环境与健康杂志*, 2017, 34(12): 1035–1038.
- [21] Chanyshev AD, Litasov KD, Furukawa Y, et al. Temperature-induced oligomerization of polycyclic aromatic hydrocarbons at ambient and high pressures[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7889.
- [22] Zhang Y, Wang SG, Zhang XL, et al. Temperature modulation of the adverse consequences on human mortality due to exposure to fine particulates: a study of multiple cities in China[J]. *Environmental Research*, 2020, 185: 109353.
- [23] 易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 等. 福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1252–1257.