

曾贤刚,李康玮,王 琦.室内装修甲醛污染健康效应及经济影响评价 [J]. 中国环境科学, 2023,43(8):4370~4381.

Zeng X G, Li K W, Wang Q. Health effects and economic losses of formaldehyde pollution in interior decoration in China pollution [J]. China Environmental Science, 2023,43(8):4370~4381.

室内装修甲醛污染健康效应及经济影响评价

曾贤刚,李康玮*,王 琦 (中国人民大学环境学院 北京 100872)

摘要: 基于室内甲醛浓度质量守恒定律,构建包含室内温度、湿度和换气次数等参数的甲醛浓度动态质量平衡模型,运用美国环保署(US EPA)的健康风险评估模型对甲醛污染致癌风险进行评价,在估算装修比例的基础上测算了我国室内装修甲醛污染致癌人数及经济损失,并使用蒙特卡洛模拟进行不确定性与敏感性分析.结果表明:①2020 年全国室内装修后甲醛浓度平均值为 $146.89\mu\text{g}/\text{m}^3$,甲醛暴露致癌风险平均值为 9.07×10^{-4} ,两者呈现“北高南低”的空间分布特征,其中北方呈现“冬高春低”的季节分布特征,南方呈现“夏高冬低”的季节分布特征,新疆西部和内蒙古西部装修后甲醛浓度及致癌风险最高.②2020 年全国住宅装修比例为 14.4%,这导致甲醛污染致癌人数达 2548 人,占我国新增癌症人数的 0.06%,南方甲醛污染致癌人数高于北方,京津冀及周边地区、长三角地区甲醛暴露致癌人数高于其余城市群.③2020 年全国室内装修甲醛污染直接造成 DALY 达到 21656 人年,经济损失达 258.88 亿元,占全国 GDP 的 0.026%.④蒙特卡洛模拟表明,中国室内装修甲醛浓度与致癌风险均值与点估计基本保持一致,两者相对误差均保持在 5%左右,敏感性分析表明暴露时间、换气次数、甲醛释放速率是影响甲醛暴露健康风险的最重要因素.未来应进一步重视室内装修引起的甲醛致癌风险,居民应主要通过减少在装修环境下的暴露时间,增加室内换气次数和合理调节室内温、湿度上预防甲醛的危害.

关键词: 室内装修; 甲醛污染; 健康效应; 经济损失

中图分类号: X503 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)08-4370-12

Health effects and economic losses of formaldehyde pollution in interior decoration. ZENG Xian-gang, LI Kang-wei*, WANG Qi (School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China). *China Environmental Science*, 2023,43(8): 4370~4381

Abstract: Based on the mass conservation law of indoor formaldehyde concentration, a dynamic mass balance model of formaldehyde concentration including indoor temperature, humidity and air change times was constructed. The risk of carcinogenesis caused by formaldehyde pollution was evaluated using the health risk assessment model of the United States Environmental Protection Agency (EPA). On the basis of estimating the proportion of decoration, the number of carcinogens caused by formaldehyde pollution from indoor decoration in China and the economic loss were calculated, Monte Carlo simulation was used to analyze the uncertainty and sensitivity. The results show that: ① The average formaldehyde concentration after indoor decoration in 2020 was $146.89\mu\text{g}/\text{m}^3$, the average carcinogenic risk of formaldehyde exposure was 9.07×10^{-4} , the two showed the spatial distribution characteristics of "high in the north and low in the south", in which the north exhibited the seasonal distribution characteristics of "high in winter and low in spring", and the south exhibited the seasonal distribution characteristics of "high in summer and low in winter". The formaldehyde concentration and carcinogenic risk were highest in western Xinjiang and western Inner Mongolia after decoration. ② In 2020, the proportion of housing decoration nationwide was 14.4%, which led to 2548 people being carcinogenic due to formaldehyde pollution, accounting for 0.06% of the new cancer population in China. The number of people being carcinogenic due to formaldehyde pollution in the south was higher than that in the north. The number of people being carcinogenic due to formaldehyde exposure in Beijing-Tianjin-Hebei Urban agglomeration and the Yangtze River Delta were higher than that in other cities. ③ In 2020, DALY reaching 21656 person years and economic loss reaching 258.88 billion yuan, which accounted for 0.026% of the national GDP, were directly caused by formaldehyde pollution of indoor decoration in China. ④ The consistency between the average value and point estimation of formaldehyde concentration and carcinogenic risk in China's interior decoration was demonstrated by Monte Carlo simulation, and a relative error of approximately 5% was observed. It was demonstrated by sensitivity analysis that the health risk of formaldehyde exposure was most significantly impacted by exposure time, air exchange rate, and formaldehyde rate.

Key words: indoor decoration; formaldehyde pollution; health effects; economic loss

收稿日期: 2023-01-18

基金项目: 中国人民大学“中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金”资助项目(21XNL006)

* 责任作者, 博士, likangwei@ruc.edu.cn

中国经济的增长推动了建筑装饰行业的快速发展,导致严重的室内甲醛污染问题^[1-2]。人造板是室内装修的主要材料,使用以甲醛为主要成分的树脂作为胶黏剂,是室内甲醛的主要来源^[3]。甲醛的释放具有长期性,几乎所有人造板都会释放出持续数年至数十年的甲醛^[4]。流行病学大量研究表明,长期暴露在甲醛浓度较高的环境中可增加患癌风险^[4-6]。根据世界卫生组织的建议,甲醛的室内指导值为 $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ^[7],2022 年发布的中国室内空气质量标准(GB/T 18883-2022)^[8]使用了更严格的室内甲醛浓度限值 $0.08\text{mg}/\text{m}^3$ 。根据 1999~2006 年和 2001~2020 年的数据,我国不同城市住宅装修后甲醛浓度平均值分别为 $0.238, 0.172\text{mg}/\text{m}^3$ ^[6,9],超过国家规定的室内甲醛浓度限值。同时全国范围的暴露行为调查发现,中国人均每天超过 83%的时间都处于室内^[10-11],室内高浓度甲醛和人群较长的室内活动时间都增大了我国人群室内甲醛暴露的健康风险。

室内甲醛暴露浓度的测算方法主要包括现场监测法以及甲醛释放模型。但是现场监测并不能说明其长期的室内浓度水平,也不能反映室内通风和温度、湿度变化导致甲醛浓度产生的规律性变化^[12]。甲醛释放模型主要包括经验模型、基于传质理论的物理模型,经验模型直接来自甲醛排放实验数据或统计数据,包括一阶指数衰减模型^[1]、多元回归模型^[13]、灰色关联模型^[14]、非线性拟合模型^[15]等预测模型。但经验模型没有从甲醛扩散机理的本质出发,基于传质理论的物理模型则揭示了甲醛的扩散规律,模型包括影响人造板甲醛散发的 3 个特征参数,分别是可散发初始浓度 $C_{m,0}$ 、扩散系数 D_m 和分配系数 K ,而温度、湿度又是影响这 3 个特征参数的主要环境因素^[16],因此相关研究讨论温度、湿度与特征参数间的关系,并构建了包含温度、湿度等参数的甲醛释放模型^[16-17]。考虑到室内装修后甲醛浓度普遍较高,甲醛污染引起的健康风险已经引起了大量关注,研究方法主要是 US EPA 健康风险评价方法^[1,2,6]。现有研究表明中国不同城市住宅装修后终生癌症风险高于 US EPA 规定的癌症风险上限 1×10^{-6} ^[1,6],表明在中国所有地区,与甲醛相关的癌症风险较为严重。健康风险评价由于涉及到许多参数,导致存在很大程度的不确定性,现有研究多数基于蒙特卡洛模拟方法去处理健康风险评价中的不确定性问

题^[18-20],并对癌症健康风险参数进行敏感度分析,以得出针对性建议。

关于甲醛浓度的现有研究,经验模型缺乏甲醛扩散原理基础,且不考虑甲醛释放特征参数。而基于传质理论的人造板材甲醛释放模型,与建筑室内相脱离,很难直接运用到室内甲醛浓度测算中。这导致室内甲醛浓度的连续模拟研究尚属空白,揭示我国不同地区室内装修后甲醛浓度时空分布特征的研究鲜有报道。关于甲醛暴露健康风险的现有研究,多数研究主要聚焦于甲醛暴露引起的致癌风险,但是将甲醛致癌风险转化为致癌人数与经济损失的研究较少。暴露人口的测算是估算甲醛暴露致癌人数的关键,但是室内装修暴露人口的相关测算方法尚且缺乏。同时测算甲醛污染健康损失的研究有限,揭示我国不同地区室内装修甲醛污染健康经济损失的研究鲜有出现。就研究方法而言,将人造板甲醛释放速率转化为室内甲醛浓度的研究方法有待完善,缺乏将致癌风险转化为致癌人数与经济损失的定量模型,室内装修引起的暴露人口数量测算方法尚属空白,基于支付意愿法(WTP)测算甲醛污染健康损失的研究尚不多见。

综上,本文结合室内空气质量守恒原则和基于传质理论的人造板材甲醛释放模型,构建不同温度、湿度、装载率和换气次数条件的室内甲醛浓度动态质量平衡模型,揭示我国不同地区室内装修后甲醛浓度时空分布特征;运用 US EPA 健康风险评价方法测算我国室内装修甲醛污染致癌风险,基于住宅翻新周期概率分布测算装修引起的暴露人口数量,将我国室内装修甲醛致癌风险转化为室内装修甲醛致癌人数;使用 WTP 方法衡量甲醛健康效应的经济损失,揭示我国室内装修甲醛污染健康经济损失的空间分布特征;最后使用蒙特卡洛模拟方法分析健康风险评价中的不确定性问题与敏感性分析,以期为我国室内甲醛污染防治提供科学依据与理论支撑。

1 方法与数据来源

1.1 评估方法

1.1.1 室内甲醛浓度动态质量平衡模型 本研究以人造板作为室内甲醛释放源进行分析。根据质量守恒定律,室内甲醛浓度可表示为^[21]:

$$V \frac{dC_{in}}{dt} = qC_{out} - qC_{in} + E(t) \cdot A \quad (1)$$

式中: V 表示建筑物室内体积, m^3 ; C_{in} 表示室内甲醛浓度, $\mu g/m^3$; t 表示时间; q 表示通风量, m^3/h ; C_{out} 表示室外甲醛浓度, $\mu g/m^3$; $E(t)$ 表示人造板单位面积甲醛释放速率, $\mu g/(m^2 \cdot h)$; A 表示人造板的表面积, m^2 .

室外的甲醛浓度比室内低很多,尤其是在室内装修后,远小于室内甲醛的浓度^[9].因此本研究忽略室外甲醛浓度的影响.将式(1)两边同除以 V ,得:

$$\frac{dC_{in}}{dt} = \frac{E(t) \cdot A}{V} - \frac{q}{V} C_{in} \quad (2)$$

令 $\alpha = \frac{q}{V}$ 、 $L = \frac{A}{V}$, 结合上式可得:

$$\frac{dC_{in}}{dt} = LE(t) - \alpha C_{in} \quad (3)$$

式中: L 表示人造板装载度,即单位体积房间所使用人造板的表面积, m^2/m^3 ; α 是换气次数, h^{-1} . 当甲醛释放达到稳态时,可令式(3)左端项为 0,得到稳态条件下室内甲醛质量浓度关系式:

$$C_{in} = \frac{LE}{\alpha} \quad (4)$$

人造板的甲醛释放速率是可散发初始浓度 $C_{m,0}$ 、扩散系数 D_m 和分配系数 K 的函数,以上参数直接受到温度、湿度的影响,可表征为温度、湿度的定量模型.相关研究建立基于温度、相对湿度的甲醛释放速率模型^[6,17],纳入温度、相对湿度以及相关物理化学参数,模型如下:

$$E = E_1 T^{0.75} \exp\left(E_2 \cdot AH - \frac{E_3}{T}\right) \quad (5)$$

式中: E_1 、 E_2 和 E_3 是仅与人造板-空气污染物组合的物理和化学性质相关的正常数,与温度和湿度无关; T 表示室内温度, K ; AH 表示室内相对湿度, %.

对于给定的人造板材,可散发初始浓度 $C_{m,0}$ 、扩散系数 D_m 和分配系数 K 是固定的,即 E_1 、 E_2 和 E_3 也是固定的.本文考虑到中密度纤维板在中国广泛应用于家具、地板和装饰板^[22],选择中密度纤维板(MDF)作为典型人造板进行分析,即假设室内装修中的人造板(主要包括家具和地板)为中密度纤维板.Xiong 等^[17]基于中密度纤维板特征参数 $C_{m,0}$ 、扩散系数 D_m 和分配系数 K 与温度、湿度的实验数据,拟合回归确定了中密度纤维板 E_1 、 E_2 和 E_3 ,拟合优度 $R^2=0.98$,这为本研究提供依据:

$$E = 1.48 \times 10^{11} T^{0.75} \exp\left(2.78 \cdot AH - \frac{7450}{T}\right) \quad (6)$$

Nguyen 等^[23-25]对国内外代表性城市的实测数据表明,室内和室外温度具有显著的相关性,其中采暖期由于安装了集中供暖系统,室内温度保持稳定,参考以上研究将采暖期室内温度设定为 $20^\circ C$,其余时间采用文祥凤^[26]得到的定量模型(拟合优度 $R^2=0.92$)将室外温度转化为室内温度.室内湿度主要取决于室内温度和室内绝对湿度,和室外湿度相关性较弱,无显著的相关关系^[25].目前尚未有研究得出室内湿度与室内温度、绝对湿度的定量关系,考虑室内湿度具有明显的季节性和南北差异性,本研究基于中国不同气候区 8 个典型代表城市四季的相对湿度现场测量数据^[27-32],处理得到北方、南方的四季室内湿度分别为 42.4%、56.8%、51.4%、29.1%以及 50%、64.6%、50%、49.2%.

结合式(4)、(5)可得,稳态条件下室内甲醛质量浓度关系式:

$$C_{in} = \frac{L \cdot 1.48 \times 10^{11} T^{0.75} \exp\left(1.78 \cdot AH - \frac{7450}{T}\right)}{\alpha} \quad (7)$$

Liu 等^[33]对北京约 1500 户家庭的调查得出的装载率分布为 $Lnl \sim (0.42, 0.04^2)$,本研究取平均值 0.42.研究表明换气次数 α 主要受到建筑开窗行为影响^[34],不同地区换气次数 α 计算公式如下:

$$\alpha = t_{win-open} \cdot \alpha_{open} + t_{win-closed} \cdot \alpha_{infil} \quad (8)$$

式中: α_{open} 为窗户打开时的换气次数; α_{infil} 为窗户关闭时的换气次数; $t_{win-open}$ 、 $t_{win-closed}$ 分别为每天的开窗和关窗时间比例.Yao 等^[34]研究表明窗户关闭和打开时的换气次数呈对数正态分布,分别为 $Lnl \sim (0.30, 0.21^2)$ 、 $Lnl \sim (3.43, 3.12^2)$,本研究取平均值.

1.1.2 致癌风险评价方法 采用 US EPA 健康风险评价方法^[35],使用终生平均暴露浓度乘以呼吸致癌单位风险得到终生致癌风险来表示:

$$CR = EC \times IUR \quad (9)$$

$$EC = C_{in} \times \frac{ET \times EF \times ED}{AT} \quad (10)$$

式中: CR 为终生致癌风险; EC 为终生平均暴露浓度, $\mu g/m^3$; IUR 为吸入致癌单位风险.基于美国环保署的系统数据库(IRIS)提供的信息,甲醛吸入致癌单位风险为 $1.3 \times 10^{-5} m^3/\mu g$; ET 为每日居家时间, h/d ; EF 为每年居家天数, d ; ED 为暴露持续时间, α ,参考腾讯

研究院《2020 年中国国民休闲状况调查报告》和曾凡夫等^[36]的研究,居家时间为对数正态分布 $LnI \sim (14.38, 6.83^2)$, 每年居家天数为三角分布 ($a=250d, b=365d, c=350d$), 居家年数为三角分布 ($a=40a, b=70a, c=57.88a$), 本研究分别取 $14.38h/d$ 、 $350d$ 、 $57.88a$; AT 为终生时间, 按照 US EPA 健康风险评价默认值, 取 $25550d$ 。

1.1.3 致癌效应评估 为了量化本研究中室内装修甲醛污染对居民健康影响, 本文使用以下方法将甲醛导致的终生癌症风险转换为人群健康效应^[37]:

$$I = \frac{CR \times POP}{70}$$

(11)

式中: I 为室内甲醛浓度变化带来的居民健康效应变化量; POP 为暴露人口数量, 万人; “70” 为常用的预期寿命 $70a$, 是 US EPA 健康风险评价方法的默认值。癌症风险被列为终生风险, 即在 $70a$ 的生命周期中吸入污染物而导致癌症的风险, 因此使用 “70” 来计算每年因甲醛暴露产生的新增病例, 单位为癌症病例数/ a 。

由于本文估算的是室内装修后的甲醛污染致癌效应, 参照相关研究^[36], 将装修 $1a$ 内的住宅定义为新装修住宅。新装修住宅由新建住房、翻新的存量房组成, 因此暴露人口主要是新建、翻新的住宅所涉及的人口。暴露人口具体测算方法如下: 基于住宅装修面积占住宅总面积的比例, 以各市年末常住人口为基准, 估算住宅装修引起的暴露人口数量。在对住宅装修面积进行估算时, 基于文献研究对住宅装修特点做出以下假设: (1) 所有住宅在竣工后 $1a$ 内开展装修活动; (2) 由于装修装饰材料的使用寿命或住宅使用者需求改变, 住宅会进行定期翻新活动。基于以上假设, 参考吕双汝等^[38-39]住宅装修面积测算方法, 具体如下:

$$A_y = S_n + UA_y$$

(12)

$$UA_y = [A_{y-15} \cdots A_{y-4}] \times \begin{bmatrix} t_{15} \\ \vdots \\ t_4 \end{bmatrix}$$

(13)

式中: A_y 为第 y 年住宅装修面积, m^2 ; S_n 为第 y 年商品住宅的销售面积, m^2 ; UA_y 为第 y 年翻新住宅的面积, m^2 ; t_i 为翻新周期为 i 年的住宅分布概率; 吕双汝等^[38-39]基于北京、深圳的深度访谈和实地调研数据, 运用 Oracle Crystal Ball 软件进行蒙特卡罗模拟获

取了北京、深圳市住宅翻新周期分布, 两者均值分别为 8.73 、 8.82 , 较为接近, 使用 Sun 等^[39]估算的深圳市住宅翻新周期分布, 见表 1, 通过住宅翻新周期及分布概率可计算第 y 年翻新住宅面积。住宅总面积根据住建部发布的《2005 年城镇房屋概况统计公报》, 我国 2005 年全国城镇住宅建筑面积为 107.69 亿 m^2 , 以每年住宅类房屋竣工面积近似社会住宅存量增长规模, 可以得到我国隔年存量住宅面积。

表 1 住宅建筑翻新周期分布

Table 1 Distribution of renovation periods of residential buildings

项目	翻新周期(a)					
	4~6	7	8	9	10	11~15
分布概率(%)	17.4	22.2	21.6	18.3	10.1	10.4

1.1.4 健康损失评估 残疾调整生命年(DALYs) 通过将过早死亡造成的生命损失年数和残疾生活年数相加, 量化了由死亡率和发病率造成的总体疾病负担^[40]。为了量化本研究中人群甲醛暴露引起癌症的健康经济损失, 本文使用以下方法将甲醛致癌效应转换为 DALYs, 同时采用 WTP 方法衡量甲醛健康效应经济损失, 该 WTP 法的经济意义是为了降低癌症伤残死亡风险而愿意支出的货币值^[41]。

$$DALYs = POP \times \overline{DALY}$$

(14)

$$WTP = DALYs \times VSLY$$

(15)

$$VSLY = \frac{VSL}{[1 - (1 + r)^{-t}]/r}$$

(16)

式中: DALYs 为人群甲醛暴露造成的癌症健康影响总 DALY 数; $\overline{DALY}$ 是每个癌症病例对应的健康生命损失年数平均值, 采用美国 NATA 调查的不同类型癌症的平均 $DALY8.5a$ ^[37]。WTP 表示货币化价值, 元; VSLY 表征单位 DALY 的货币化价值, 元/ a ; VSL 表征统计生命价值, 以业界认可的美国人均生命价值(VSL)为基准, 通过美元的通货膨胀率及中美购买力平价指数进行换算^[42]; t 为被评价对象的期望寿命, 2020 年中国人口平均预期寿命为 77.9 岁, 平均年龄为 38.4 岁, 即预期剩余寿命为 39.5 岁; r 是效用贴现率, 取 4% ^[43]。

1.1.5 不确定性和敏感度分析 在以上计算过程中, 公式中的参数通常采用点估计方法, 以均值、最可能值等单个值作为总体数据的代表, 即把所有的

参数假设成一个确定性的值,进行最终结果的计算.而不确定性因素始终贯穿于甲醛污染健康效应的全过程,影响评价结果的准确性.为降低模型参数不确定性对健康风险评估的影响,提高风险评估的灵敏度,使用 Oracle Crystal Ball 软件对甲醛浓度分布与健康风险采用蒙特卡洛方法进行模拟计算^[2].计算中设定随机模拟迭代次数为 10000 次,置信水平为 95%.将每个暴露参数表示为一个概率分布函数,从而得到一个健康风险概率分布,灵敏度分析确定了暴露参数的贡献.

1.2 数据来源与处理

逐月平均室外温度数据来自各省气候中心,参考相关研究^[26]转化为室内温度数据,室内相对湿度数据根据相关文献处理得到^[27-32];居民每日通风时间数据来自《中国人群暴露参数手册(成人卷)》^[44],

以此为基准得到我国不同省份、不同季节的换气次数;各市年末常住人口数据来自第七次全国人口普查;住宅装修面积占比所需的住宅商品房销售面积、住宅类房屋竣工面积数据来自《中国统计年鉴》《中国房地产统计年鉴》.各市居民的人均生命价值,以我国人均生命价值为基准,通过该地区人均国内生产总值(GDP)与我国人均 GDP 的比值转换得到,人均 GDP 数据来自各省统计年鉴.人口平均预期寿命、平均年龄数据来自《中国统计年鉴》和国家统计局网站.

2 结果和讨论

2.1 中国室内装修甲醛浓度

基于式(6)-(8),得到我国 336 个地级及以上城市的室内装修甲醛浓度,如图 1、表 2 所示.

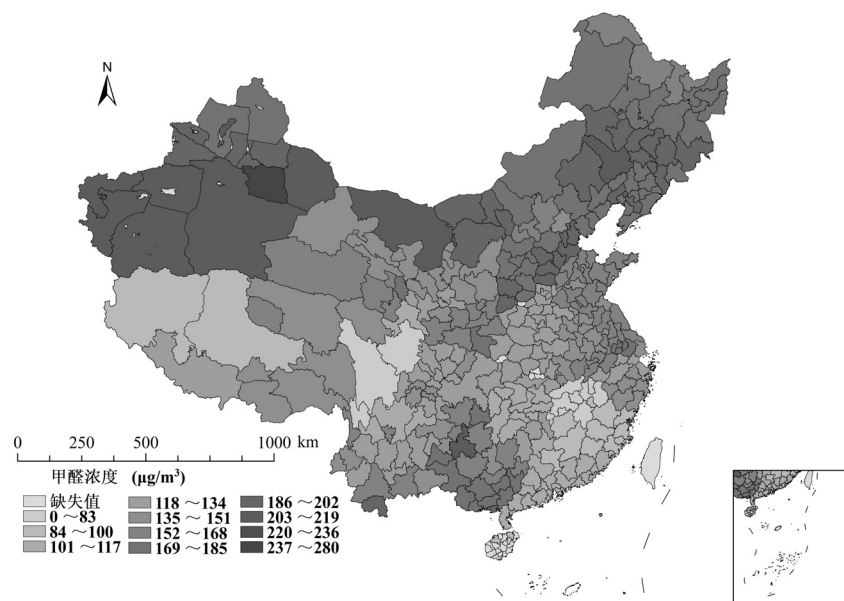


图 1 2020 年中国室内装修甲醛浓度空间分布

Fig.1 Spatial distribution of formaldehyde concentration in indoor decoration in 2020

审图号:GS(2019)1822 号

由图 1、表 2 可知,2020 年我国室内装修甲醛浓度中值、平均值分别为 146.64 、 $146.89\mu\text{g}/\text{m}^3$.Huang 等^[6]在分析 2002~2015 年发表的中国城市室内甲醛浓度相关文献基础上,得出翻修 1a 内的住宅室内甲醛浓度中值、平均值分别为 $154.198\mu\text{g}/\text{m}^3$.Liang 等^[1]分析 2000~2020 年发表的中国城市室内甲醛浓度的文献,得出翻修 1a 内的住宅室内甲醛浓度中值、平均值分别为 $127.172\mu\text{g}/\text{m}^3$.本文结果与以上研究较

为接近,证实了本研究结果的准确性与可信度.甲醛浓度的变化取决于甲醛释放速率、换气次数与装载度,基于式(6)所估算的甲醛释放速率结果显示,中国室内装修甲醛释放速率平均值为 $438.48\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,这与 Huang 等^[45]对中密度纤维板甲醛释放速率测算的均值 $422.08\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 接近,略低于李志生^[46]对常用家具材料甲醛散发速率估算的平均值 $504.06\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,同时本研究所测算的甲醛释放速率

均值 $438.48\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 符合欧洲对中密度纤维板甲醛释放量的量 E1 级限量规定 $3.5\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,也符合我国 GB/T11718-2009 中基于气体分析法对中密度纤维板甲醛释放量的限值 $3.5\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ^[47].基于式(8)所估算我国春、夏、秋、冬季的换气次数分别为 1.26,1.96,1.26,0.79h⁻¹,南北方平均换气次数比值为 1.63,温度升高是换气次数增加的最重要因素.

表 2 中国各省份不同季节甲醛浓度
Table 2 Formaldehyde concentration rate in different seasons in different provinces of China

地区	春季	夏季	秋季	冬季	平均($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
北京	119.65	110.97	150.01	159.22	134.96
天津	154.86	179.37	207.09	206.26	186.90
河北	150.32	188.37	189.44	206.26	183.60
山西	141.49	192.50	170.47	206.26	177.68
内蒙古	161.11	179.17	193.35	242.01	193.91
辽宁	129.33	174.97	175.52	242.01	180.46
吉林	137.81	155.55	180.71	292.76	191.71
黑龙江	112.27	133.88	145.31	292.76	171.05
上海	106.55	265.96	132.30	97.74	150.64
江苏	129.67	274.73	143.43	98.21	161.51
浙江	104.28	237.40	120.65	80.56	135.72
安徽	132.51	218.29	141.53	96.58	147.23
福建	79.97	138.15	96.00	76.14	97.56
江西	63.20	135.45	65.72	65.29	82.42
山东	126.59	123.68	178.37	206.26	158.73
河南	101.43	148.49	128.45	129.65	127.00
湖北	113.88	218.28	112.61	75.90	130.17
湖南	99.72	184.72	97.20	73.39	113.76
广东	94.11	136.98	106.01	87.97	106.27
广西	151.65	230.70	158.24	131.18	167.94
海南	73.00	131.35	70.01	76.41	87.69
重庆	98.45	188.29	89.02	95.86	117.90
四川	117.72	198.23	109.04	75.67	125.16
贵州	158.01	213.38	138.37	139.77	162.38
云南	119.80	194.06	120.21	94.55	132.16
西藏	90.82	206.02	108.98	102.20	127.01
陕西	132.74	171.77	160.49	159.22	156.05
甘肃	112.26	141.20	136.70	159.22	137.35
青海	120.02	141.67	160.33	206.26	157.07
宁夏	105.29	135.70	123.62	206.26	142.72
新疆	167.75	241.56	171.31	242.01	205.66
全国	120.91	181.63	138.18	146.84	146.89

分季节来看,我国室内装修后甲醛浓度春、夏、秋、冬季分别为 120.91,181.63,138.18,146.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,分布呈现出为夏冬高,春秋相差不大的季节特征.究其原因,一方面夏季较高的室内温度与湿度促使甲醛释放速率远高于其他季节,但其较高的换气次数稀释了甲醛释放量,另一方面冬季较低的换气次数

促使甲醛浓度进一步升高.但是值得注意的是,我国在建筑施工和供热政策方面被秦岭—淮河线分为南北两部分,北方寒冷季节供暖,南方不供暖,这导致南北冬季室内温度差异较大,导致室内甲醛浓度季节变化特征不同,南方和北方的合并数据可能会扰乱真实季节性趋势^[5].为了避免干扰,本研究分别对南方和北方室内装修后甲醛浓度季节性特征进行分析.南方四季甲醛浓度表现为夏季>秋季>春季>冬季,分别为 196.76,116.46,112.3,90.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,很明显南方的甲醛室内浓度的季节性特征主要取决于室内温度四季变化,较高的室内温度会导致甲醛释放速率增加进而促使浓度升高.但是北方四季甲醛浓度表现为冬季>夏季>秋季>春季,分别为 211.74,164.18,163.23,130.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.由于北方供热,导致冬季的室内温度远高于室外温度,同时由于较低的换气次数,这直接促使甲醛浓度远高于其它季节.

从全国范围来看,装修后甲醛浓度呈现明显的区域差异性,北方的室内甲醛年平均浓度高于南方,分别为 167.5、129.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.虽然南方的甲醛释放速率 500.21 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 高于北方 367.25 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,但南方换气次数为 1.60h⁻¹ 远高于北方的 0.98h⁻¹,导致其甲醛浓度低于北方.2020 年室内装修甲醛年均浓度最高值出现在新疆吐鲁番市达 272.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,最低值出现在四川阿坝藏族羌族自治州为 66.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,有 2 个区域浓度较高,分别是新疆西部和内蒙古西部,室内甲醛年均浓度分别为 205.66,203.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.有 2 个区域浓度较低,分别是四川北部和江西省,室内甲醛年均浓度分别为 67.56,82.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.考虑到我国主要城市群人口密度大、经济效益高,为突出甲醛健康效应区域差异性,以我国重点城市群为例进行分析.汾渭平原地区、京津冀及周边地区室内甲醛年均浓度最高,分别为 161.5,160.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,远高于成渝地区、长三角、长江中游城市群、珠三角,后 4 者室内甲醛年均浓度范围为 107.41~130.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.虽然珠三角地区的甲醛释放速率最高达 639.87 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,但是其换气次数也是最高为 2.39h⁻¹,这导致其室内的甲醛浓度不断降低.汾渭平原地区、京津冀及周边地区的甲醛释放速率虽然仅为 400 $\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 左右,但是其换气次数分别为 1.03,1.12h⁻¹,导致室内甲醛浓度较高.

2.2 中国室内装修甲醛污染健康效应与经济损失
基于室内装修甲醛浓度与暴露持续时间,得到

2020 年全国不同城市室内装修甲醛污染致癌风险,并结合室内装修比例,得到我国室内装修甲醛暴露引起的致癌人数及其经济损失的时空分布,如表 3、图 2 所示.

表 3 2020 年室内装修甲醛污染健康效应及经济影响
Table 3 Health effect and economic impact of formaldehyde pollution in indoor decoration in 2020

区域	致癌风险 (10^{-4})	致癌人数 (人)	DALY 损失 (人年)	经济损失 (亿元)
珠三角	6.63	106	902	17.47
长三角	9.19	449	3814	68.02
长江中游	7.09	144	1222	16.83
京津冀	9.88	648	5510	60.96
汾渭平原	9.97	104	881	8.47
成渝地区	8.07	165	1404	15.51
北方	10.34	1182	10048	103.76
南方	7.97	1366	11608	155.12
全国	9.07	2548	21656	258.88

由表 3、图 2 可知,2020 年全国室内装修甲醛污染引起的癌症风险平均值为 9.07×10^{-4} ,高于 US EPA 设定的终生致癌风险限值 1×10^{-6} ,因此需重视室内装修甲醛污染对健康的影响.本文所得装修后癌症风险与众多国内外研究保持一致,如 Huang 等^[6]研究发现中国 2002~2015 年翻修住宅室内甲醛污染引

起的癌症风险在北方为 8.2×10^{-4} ,在南方为 6.9×10^{-4} ,也与在北京^[2]、广州^[48]等地住宅装修后的致癌风险估算结果较为接近,两者终生致癌风险分别为 11.5×10^{-4} 与 7.81×10^{-4} ,这证明了本文结果的有效性和可信度.由于室内甲醛浓度直接影响癌症风险,因此甲醛暴露引起的癌症风险具有明显的季节特征和区域特征,四季甲醛暴露癌症风险表现为夏季>冬季>秋季>春季,分别为 11.22×10^{-4} 、 9.07×10^{-4} 、 8.53×10^{-4} 、 7.47×10^{-4} .与甲醛浓度季节性特征一样,南北方供暖差异干扰了甲醛致癌风险的真实季节性趋势,南方四季甲醛致癌风险表现为夏季>秋季>春季>冬季,分别为 12.15×10^{-4} 、 7.19×10^{-4} 、 6.94×10^{-4} 、 5.60×10^{-4} ,但是北方四季甲醛致癌风险表现为冬季>夏季>秋季>春季,分别为 13.08×10^{-4} 、 10.14×10^{-4} 、 10.08×10^{-4} 、 8.08×10^{-4} .具体到城市层面,不同城市致癌风险范围为 $4.10\text{—}16.81\times10^{-4}$,最低值和最高值分别出现在四川阿坝藏族自治州和新疆的吐鲁番市.由于北方的年均甲醛浓度高于南方,因此北方的甲醛暴露终身致癌风险也高于南方.分区域来看,京津冀及周边地区、汾渭平原地区甲醛暴露癌症风险远高于成渝地区、长三角、珠三角、长江中游城市群.

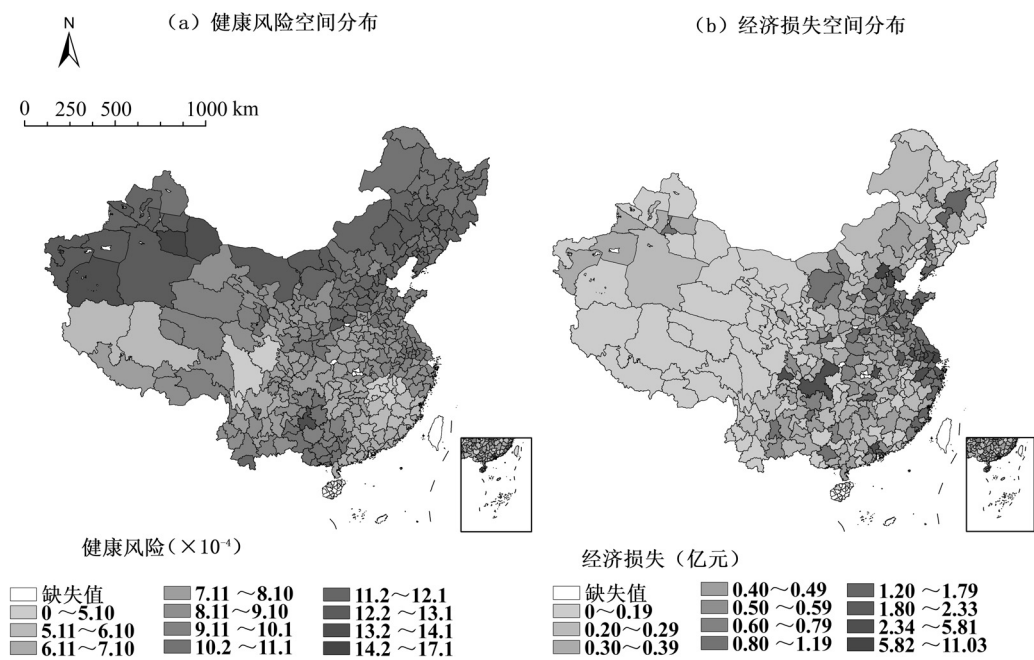


图 2 2020 年室内装修甲醛污染健康风险与经济损失空间分布

Fig.2 Spatial distribution of health risks and economic losses of formaldehyde pollution in indoor decoration in 2020

审图号:GS(2019)1822 号

根据历年住宅竣工面积,得出 2020 年存量住宅面积为 208.58 亿 m^2 ,同时根据式(12)~(13)得出我国 2020 年住宅装修面积为 30.11 亿 m^2 ,其中住宅商品房销售面积 15.49 亿 m^2 ,存量房翻新面积 14.62 亿 m^2 ,住宅装修面积与存量住宅面积比例为 14.4%,据此测算出住宅装修甲醛暴露人口.结合甲醛致癌风险,得出 2020 年全国室内装修甲醛暴露致癌人数多达 2548 人,占我国新增癌症人数的 0.06 %.甲醛暴露致癌人数最低值和最高值分别出现在西藏的阿里地区和重庆市,分别为 1 人和 48 人.南方甲醛暴露致癌人数高于北方达 1366 例,虽然北方的甲醛浓度与致癌风险均高于南方,但是南方的暴露人口远高于北方,导致总体致癌人数高于北方.分区域看,京津冀及周边地区、长三角地区甲醛暴露致癌人数远高于其余城市群.健康损失方面,2020 年全国室内甲醛暴露直接造成 DALY 达到 21656 人年,经济损失达 258.88 亿元,占全国 GDP 的 0.026%.健康经济损失最大的 3 个城市分别是上海市(10.56 亿元)、北京市(8.81 亿元)、苏州市(6.35 亿元),健康经济损失最小的 3 个城市分别是青海的玉树藏族自治州(0.02 亿元)、果洛藏族自治州(0.01 亿元)和西藏的阿里地区(0.01 亿元),健康经济损失差异主要取决于室内甲醛暴露浓度、暴露人口及人均 GDP.按南北方划分,南方健康经济损失高于北方,分别为 141.62,103.76 亿元,这是因为南方暴露人数与人均 GDP 均高于北方所致.分区域来看,长三角地区、京津冀及周边地区室内甲醛暴露经济损失最高,分别为 68.02,60.96 亿元,汾渭平原室内甲醛污染经济损失最低仅为 8.47 亿元.

2.3 不确定性及敏感度分析

根据现有研究,蒙特卡洛健康风险评估参数如表 4 所示.其中,甲醛释放速率的数据来自本研究所得到的各城市年均甲醛释放速率,利用 Oracle Crystal Ball 风险评估软件对甲醛释放速率分布进行卡方检验,模拟分布最优结果显示最可能符合对数正态分布,P 值为 0.224,因此本研究所估算的甲醛释放速率符合对数正态分布,为 $\text{Ln}l \sim N(438.9,108.42^2)$.相同的方法得出各省份的换气次数符合对数正态分布,P 值为 0.516, $\text{Ln}\alpha \sim N(1.37,0.65^2)$.在蒙特卡洛健康风险评估参数的基础上,使用 Oracle Crystal Ball 软件对甲醛浓度分布与健康风险采用蒙特卡洛方法进行 10000 次模拟计算^[2],得到甲醛浓度与健康风险的模拟分布与关键参数的敏感度,见图 3.

表 4 蒙特卡洛健康风险评估参数					
Table 4 Monte Carlo Health Risk Assessment Parameters					
变量名	暴露参数	分布	类型	单位	参考文献
E	甲醛释放速率	438.9±108.42	对数正态分布	$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	本文
L	装载度	0.42±0.04	对数正态分布	m^{-1}	[33]
α	换气次数	1.37±0.65	对数正态分布	h^{-1}	[34]
ET	暴露时间	14.38±6.83	对数正态分布	h/d	[36]
EF	暴露频率	(250,365,350)	三角分布	d	[36]
ED	暴露年份	(40,70,57.88)	三角分布	a	[36]

基于蒙特卡洛模拟的不确定性分析表明,中国室内装修甲醛浓度为 $(154.59 \pm 67.2) \mu\text{g}/\text{m}^3$,致癌风险为 $(8.56 \pm 6.12) \times 10^{-4}$,其均值与上文的甲醛浓度基于点估计的确定性分析结果 $146.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 与致癌风险 9.07×10^{-4} 基本一致,两者相对误差均保持在 5%左右,证明了研究结果的可信度.

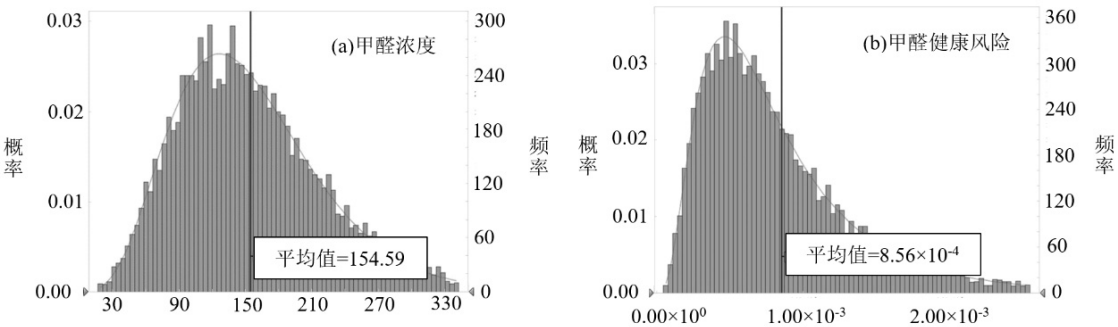


图 3 室内装修甲醛浓度及其致癌风险的蒙特卡洛模拟
Fig.3 Monte Carlo simulation of formaldehyde concentration and carcinogenic risk in interior decoration

进一步对甲醛浓度及其致癌风险的各参数进行敏感性分析,敏感性分析若为正值,则表示与风险结

果正相关,结果越大则影响越大;为负值则表示负相关,且结果的绝对值越大则造成的影响越大.结果显示,对甲醛浓度影响较大的是换气次数(α)、甲醛速率(E),敏感度分别为-65.7%、29.6%.对甲醛健康风险影响较大的是暴露时间(ET)、换气次数(α)、甲醛速率(E),敏感度分别为49.6%、-29.6%和12.9%,暴露年份(ED)、装载度(L)、暴露频率(EF)对风险结果造成的影响很小.总体来说,换气次数、甲醛速率、暴露时间是室内装修甲醛浓度及其致癌风险的关键因素.因此,为了减少甲醛对居民的健康损害,应该从增加换气次数、降低各人群在甲醛污染环境下的暴露时间以及减少甲醛释放量3方面入手,一是增加开窗时间,这会显著增加换气次数,降低甲醛浓度及健康风险;二是减少在新建、翻新住宅的休闲和睡眠时间,从暴露时间的角度控制健康风险;三是通过合理调节室内温度、湿度,规避甲醛释放速率的增加.

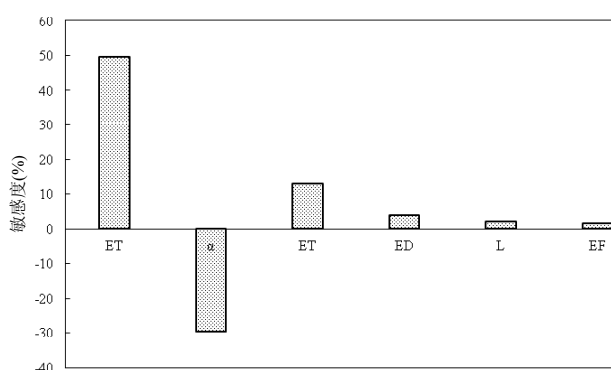


图4 甲醛暴露健康风险敏感性分析

Fig.4 Sensitivity analysis of health risk of formaldehyde exposure

3 讨论

人体暴露于室内的微环境包括住宅、办公场所、公共场所以及交通工具,暴露量由暴露浓度与暴露时长决定,现有研究证实^[4],住宅的甲醛浓度远高于其余室内场所,这主要是因为住宅装修程度较高,大量人造板材的使用导致较高的室内甲醛浓度.同时在住宅中度过时间通常占室内总时间的2/3以上^[49],对于失业者和退休人员,这一比例可高达100%.因此,本文从住宅的研究视角开展室内甲醛污染健康效应,不仅具有代表性,也更加真实的接近室内甲醛污染现状.尽管室内甲醛主要来源于地板和家具所使用的各类人造板材,室外甲醛源以及室内

人为活动(如吸烟、烹饪等)也是甲醛污染源,但考虑到室外甲醛浓度极低^[8],吸烟、烹饪等人类活动引起的室内甲醛量相对于人造板材较小^[50-51],且呈现间歇性、时长短、不连续的特征^[52],同时油烟机的大规模使用以及严格的室内禁烟条例会进一步降低以上污染源造成的影响,因此本研究主要聚焦于人造板材引起的室内甲醛污染健康问题.人造板材主要包括胶合板、刨花板、中密度纤维板3大类,由于缺乏基于温度、湿度参数的胶合板、刨花板甲醛释放速率模型的研究,同时考虑到中密度纤维板在中国广泛应用于家具、地板,且中密度纤维板甲醛释放速率的相关研究较为成熟^[6,17,22,45],因此本文以中密度纤维板作为典型人造板材开展甲醛浓度估算.甲醛释放速率是甲醛浓度估算的核心,对于给定的人造板材,可散发初始浓度 $C_{m,0}$ 、扩散系数 D_m 和分配系数 K 等特征参数是固定的,Xiong等^[17]基于不同研究中密度纤维板特征参数与温度、湿度的实验数据,通过非线性拟合构建了稳态条件下甲醛释放速率模型,具有一定代表性.因此本文在此基础上结合质量守恒定律,构建了甲醛浓度动态质量平衡模型,对室内甲醛浓度数据进行估算.此外,如果将不同人造板材的甲醛释放速率模型结合对应的装修中人造板使用占比,室内装修后甲醛浓度估算和健康风险分析将更加准确.总体而言,本文从中密度纤维板的研究视角开展甲醛浓度估算,具有一定代表性,也更加接近真实的室内装修甲醛浓度与致癌风险.相比较甲醛浓度现场监测和不考虑特征参数的经验模型,本文优势在于实现不同环境条件下室内甲醛浓度的连续模拟,这对于室内甲醛暴露的准确评估具有重要意义.

本文中室内装修后甲醛浓度中值、均值与Huang等^[6]、Liang等^[1]翻新1年内的中国不同城市室内甲醛浓度中位数、平均值总体较为接近,低于文献报告的秦皇岛市($200\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[53]、呼和浩特市($190\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[6]等室内装修后的甲醛浓度,高于上海市($100\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[6]、南宁市($120\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[6].同时本文研究结果也解释了不同地区甲醛浓度差异性的原因,即装修使用的人造板材的甲醛释放速率、装载度,以及环境条件如换气次数和温度、湿度的不同造成了甲醛浓度的差异.对于甲醛致癌风险,与Huang等^[6]研究发现中国2002~2015年翻新住宅室内甲醛暴露引起

的癌症风险较为接近,低于文献报告的哈尔滨市中位值(11.93×10^{-4})^[10],高于 Liang 等^[1]翻修 1a 内癌症风险的中位值 2.22×10^{-5} 。甲醛致癌风险具有差异性的原因是部分研究考虑到了室内甲醛浓度的长期衰减,因此暴露年份取 10a 以内;另一部分研究参考 US EPA 的默认假设在暴露时间内室内甲醛浓度保持恒定,暴露年份按照居家年份。到目前为止,绝大多数研究在暴露和风险评估中还未考虑室内甲醛浓度的衰减^[1],因此暴露年份较长,这导致致癌风险会较高。这是因为甲醛浓度的长期衰减具有很大的不确定性,其模型依据是指数衰减模型,如 Liang 等^[1]基于单指数衰减模型计算得到中国室内装修后甲醛浓度 10a 内会从 $154 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降到 $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$,从而设定 ED 为 10a。但是此研究未考虑温度、湿度对甲醛浓度的影响,不同温度、湿度下的甲醛释放速率可呈现数倍的波动^[16],导致甲醛浓度变化具有长期波动性,如 Yu 等^[54]研究房屋的甲醛浓度在长达 7a 时间中只下降了 33%,并且呈现季节性波动,夏天气温升高会促进甲醛浓度快速增加,这缓解了甲醛浓度的衰减。因此只考虑甲醛浓度的衰减而不考虑温度、湿度对甲醛浓度的影响,仍会导致结果具有很大的不确定性。由于目前尚未有研究同时考虑甲醛浓度的衰减与温度、湿度的影响,本文参考 US EPA 的默认健康风险评价方法,假设在暴露时间内室内甲醛浓度保持恒定,与众多研究保持一致,但这会导致甲醛致癌风险高估。

本研究基于蒙特卡洛模拟对点估计的确定性分析进行纠正,分析误差波动性。暴露参数分布中,由于缺乏全国性的室内装修度调研数据,本研究参考 Liu 等^[33]对北京约 1500 户家庭的调查得出的装载率分布,后续将进一步关注装载度研究进展。换气次数、暴露时间、暴露频率、暴露年份来自相关文献与报告^[33-34,36],可以较为真实的反映全国居民的暴露参数真实分布情况。基于蒙特卡洛模拟的不确定性分析表明,中国新装修住宅甲醛浓度与致癌风险均值与上文确定性分析结果基本一致,两者相对误差均保持在 5%左右,这证明了本研究结果的准确性与可信度。暴露人口的测算也是甲醛暴露健康效应不确定评估的关键,由于缺乏室内装修暴露人口的相关研究,本研究基于住宅装修面积占住宅总面积的比例,估算住宅装修引起的暴露人口数量,由于缺

乏详细的入住率与空置率数据,这可能存在一定的误差,后续将进一步提高估算方法的准确性。同时由于缺乏全国性的室内装修面积调研数据,本研究使用 Sun 等^[39]基于蒙特卡罗模拟估算的深圳市住宅翻新周期,后续将进一步优化室内装修面积测算方法。甲醛健康效应经济损失方面,每个癌症病例对应的健康生命损失年数是不同的。由于本研究聚焦于测算甲醛暴露年均致癌人数及其经济损失,而不是测算具体的某类癌症的人数(例如鼻咽癌),因此使用了美国 NATA 调查的不同类型癌症的平均值^[37],后续将进一步细化致癌类型,更好的评估甲醛暴露致癌效应的内部差异性。综上所述,甲醛暴露健康效应及其经济影响评价的相关研究尚不成熟,这一领域的未来研究有很大的空间,包括甲醛释放速率的衰减性与温、湿度的相互影响,开展系统的、全国范围内甲醛健康暴露参数分布研究,甲醛与其它室内污染物共同暴露的协同危害,不同甲醛暴露致癌类型的健康效应与经济损失的比较等。

4 结论

4.1 2020 年全国室内装修后甲醛浓度平均值为 $146.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$,甲醛暴露致癌风险平均值为 9.07×10^{-4} ,两者呈现“北高南低”的空间分布特征,其中北方呈现“冬高春低”的季节分布特征,南方呈现“夏高冬低”的季节分布特征,新疆西部和内蒙古西部装修后甲醛浓度及致癌风险最高,汾渭平原地区、京津冀及周边地区甲醛浓度及致癌风险高于其它城市群。

4.2 2020 年我国室内装修比例为 14.4%,这导致甲醛暴露致癌人数达 2548 人,占我国新增癌症人数的 0.06%,南方甲醛污染致癌人数高于北方,京津冀及周边地区、长三角地区甲醛暴露致癌人数高于其余城市群。

4.3 2020 年全国室内装修甲醛污染直接造成 DALY 达到 21656 人年,经济损失达 258.88 亿元,占全国 GDP 的 0.026%。南方健康经济损失高于北方,长三角地区、京津冀及周边地区室内甲醛暴露经济损失高于其余城市群。

4.4 蒙特卡洛模拟的不确定性分析表明,中国室内装修甲醛浓度分布为 $(154.59 \pm 67.2) \mu\text{g}/\text{m}^3$,致癌风险分布为 $(8.56 \pm 6.12) \times 10^{-4}$,均值与点估计相对误差均保持在 5%左右,证明本文结果的准确性与可信度。

敏感性分析表明暴露时间、换气次数、甲醛释放速率是影响甲醛暴露健康风险的最重要因素。

参考文献:

- [1] Liang W. Long-term indoor formaldehyde variations and health risk assessment in Chinese urban residences following renovation [J]. *Building and environment*, 2021,206:108402.
- [2] Huang L, Mo J, Sundell J, et al. Health risk assessment of inhalation exposure to formaldehyde and benzene in newly remodeled buildings, Beijing [J]. *Plos One*, 2013,8(11):79553.
- [3] 汪涌波.人造板在模拟室内环境甲醛释放规律的研究 [D]. 广州:中山大学, 2010.
Wang Y B. The study on the formaldehyde emission of wood—based panel simulating the indoor environment [D]. Gungzhou: Sun Yat-sen University, 2010.
- [4] 王 琼,肖 康.中国城市住宅室内甲醛浓度及影响因素(英文) [J]. *化学进展*, 2022,34(3):743-772.
Qiong W, Kang X. Indoor formaldehyde concentrations and the influencing factors in urban china [J]. *Progress in Chemistry*, 2021, 34(3):743.
- [5] 梁晓军,施 健,赵 萍,等.中国居民室内甲醛暴露水平及健康效应研究进展 [J]. *环境卫生学杂志*, 2017,7(2):170-181.
Liang X J, Shi J, Zhao P, et al. Progress on indoor formaldehyde exposure and health effects in China [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2017,7(2):170-181.
- [6] Huang S, Wei W, Weschler L B, et al. Indoor formaldehyde concentrations in urban China: preliminary study of some important influencing factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590:394-405.
- [7] Krzyzanowski M. WHO air quality guidelines for Europe [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2008,71(1):47-50.
- [8] GB/T18883-2022 室内空气质量标准 [S].
GB/T18883-2022 Indoor air quality standards [S]
- [9] Tang X, Bai Y, Duong A, et al. Formaldehyde in China: production, consumption, exposure levels, and health effects [J]. *Environment international*, 2009,35(8):1210-1224.
- [10] 侯 荣,阿依博塔·吐尔逊别克,秦 宁,等.室内空气中苯并[a]芘的健康限值研究 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(5):2287-2294
Hou R, Ayibota T, Qin N, et al. Research on benzo[a]pyrene criteria in indoor air [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(5):2287-2294.
- [11] 赵文静,马雪璞,阿依博塔·吐尔逊别克,等.基于中国人群暴露风险的室内苯健康限值推导 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(10):4889-4900.
Zhao W J, Ma X P, Ayibota T, et al. Derivation of indoor benzene threshold value based on carcinogenic risk assessment of Chinese population [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(10):4889-4900.
- [12] 曲洪娟,秦华鹏,姚婷婷,等.室内空气污染预测方法的实证研究 [J]. *环境科学*, 2008,29(2):290-295.
Qu H J, Qin H P, Yao T T, et al. Validation of a prediction method for indoor air pollution [J]. *Environmental Science*, 2008,29(2):290-295.
- [13] Chi C, Chen W, Guo M, et al. Law and features of tvoc and formaldehyde pollution in urban indoor air [J]. *Atmospheric Environment*, 2016,132:85-90.
- [14] 池 东,李立清.人造板甲醛释放灰色模型 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014,45(5):1724-1731.
Chi D, Li L Q. Grey model for formaldehyde emission from wood-based panels [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014,45(5):1724-1731.
- [15] 王 琨,李玉华,赵庆良,等.室内空气中的甲醛检测分析及其预测模型 [J]. *中国环境科学*, 2004,24(6):658-661.
Wang K, Li Y H, Zhao Q L, et al. Indoor air formaldehyde measurement analysis and its prediction model [J]. *China Environmental Science*, 2004,24(6):658-661.
- [16] 杨 叶,李立清,马卫武,等.相对湿度、温度对胶合板甲醛释放的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(2):390-397.
Yang Y, Li L Q, Ma W W, et al. Effect of relative humidity and temperature on formaldehyde emissions of plywood panels [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(2):390-397.
- [17] Xiong J, Zhang P, Huang S, et al. Comprehensive influence of environmental factors on the emission rate of formaldehyde and VOCs in building materials: Correlation development and exposure assessment [J]. *Environmental research*, 2016,151:734-741.
- [18] Zhang Z F, Zhang X, Zhang X, et al. Indoor occurrence and health risk of formaldehyde, toluene, xylene and total volatile organic compounds derived from an extensive monitoring campaign in Harbin, a megacity of China [J]. *Chemosphere*, 2020,250:126324.
- [19] Soltanpour Z, Mohammadian Y, Fakhri Y. The exposure to formaldehyde in industries and health care centers: A systematic review and probabilistic health risk assessment [J]. *Environmental Research*, 2022,204:112094.
- [20] Rovira J, Roig N, Nadal M, et al. Human health risks of formaldehyde indoor levels: An issue of concern [J]. *Journal of environmental science and health, part a*, 2016,51(4):357-363.
- [21] 李 新.建筑材料对室内空气质量的影响及其评价 [D]. 重庆:重庆大学, 2004.
Li X. Influence of building materials on indoor air quality and its evaluation [D]. Chongqing : Chongqing University, 2004.
- [22] Huang S, Xiong J, Zhang Y. A rapid and accurate method, ventilated chamber C-history method, of measuring the emission characteristic parameters of formaldehyde/VOCs in building materials [J]. *Journal of hazardous materials*, 2013,261:542-549.
- [23] Nguyen J L, Schwartz J, Dockery D W. The relationship between indoor and outdoor temperature, apparent temperature, relative humidity, and absolute humidity [J]. *Indoor air*, 2014,24(1):103-112.
- [24] Yang M, Lei H. Correlating indoor and outdoor temperature and humidity in megacities in China[C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2022,356:03037.
- [25] Lee K, Lee D. The relationship between indoor and outdoor temperature in two types of residence [J]. *Energy Procedia*, 2015, 78:2851-2856.
- [26] 文祥凤,洪 玲,黄志辉.昼间室内外温度和湿度特征比较 [J]. *广西科学院学报*, 2004,20(1):26-28.
Wen X F, Hong L, Huang Z H. Comparison of characteristics of temperature and relative humidity between indoor and outdoor at the daytime [J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2004,20(1): 26-28.
- [27] Zhang H, Yoshino H. Analysis of indoor humidity environment in chinese residential buildings [J]. *Building and Environment*, 2010, 45(10):2132-2140.
- [28] 孙红宾,赵素利,祁 鹏.室内空气中甲醛和苯与温湿度及大气压关系的统计分析 [J]. *岩矿测试*, 2008,27(2):158-160.
Sun H B, Zhao S L, Qi P. Statistic analysis of the release characteristics of formaldehyde and benzene in indoor air [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2008,27(2):158-160.
- [29] 刘 赞.上海郊区室内热舒适与空气品质研究及其测试系统开发

- [D]. 上海: 东华大学, 2010.
- Liu Y. Study on thermal comfort, IAQ in Shanghai suburb and the testing system based on labview [D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [30] 周范卓, 王昭俊, 苏小文, 等. 夏热冬冷地区过渡季热适应模型研究 [J]. 暖通空调, 2022, 52(3): 132-136.
- Zhou F Z, Wang Z J, Su X W, et al. Thermal adaptation model of transition seasons in hot summer and cold winter zone [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022, 52(3): 132-136.
- [31] 张 静, 李念平, 周淋萱, 等. 长沙市某办公建筑室内热环境与供暖行为研究 [J]. 热科学与技术, 2021, 20(6): 607-615.
- Z J, Li N P, Zhou L X, et al. Analysis on indoor thermal environment and heating behaviours of an office building in Changsha [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021, 20(6): 607-615.
- [32] 李念平, 刘鹏龙, 伍志斌. 长沙高校宿舍夏季热舒适与热适应现场调研 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(4): 194-200.
- Li N P, Liu P L, Wu Z B. Field survey on summer thermal comfort and adaptation of university dormitories in Changsha [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(4): 194-200.
- [33] Liu W W, Zhang Y P, Yao Y. Labeling of volatile organic compounds emissions from Chinese furniture: Consideration and practice [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(28): 3499-3506.
- [34] Yao M, Zhao B. Distribution of air change rates in residential buildings in Beijing, China [C]//The International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning. Springer, Singapore, 2019: 1149-1156.
- [35] Geelen L M J, Huijbregts M A J, den Hollander H, et al. Confronting environmental pressure, environmental quality and human health impact indicators of priority air emissions [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(9): 1613-1621.
- [36] 曾凡夫, 陈洁平, 潘刚雷, 等. 宁波市非新装修住宅中甲醛的分布和健康风险评估 [J]. 环境与职业医学, 2021, 38(12): 1340-1344.
- Zeng F F, Chen J P, Pan G L, et al. Distribution and health risk assessment of formaldehyde in non-newly decorated houses in Ningbo, China [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(12): 1340-1344.
- [37] Zhou Y, Li C, Huijbregts M A J, et al. Carcinogenic air toxics exposure and their cancer-related health impacts in the United States [J]. PLoS one, 2015, 10(10): e0140013. 19.
- [38] 吕双汝, 靳艳军, 刘国涛, 等. 住宅装修垃圾产生量特性分析及管理对策: 以北京市大兴旧宫为例 [J]. 环境工程, 2022, 40(7): 186-192.
- Lv S R, Jin Y J, Liu G T, et al. Characteristics of residential decoration waste generation and management measures: a case study on old palace area in Daxing District, Beijing [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(7): 186-192.
- [39] Sun P, Zhang N, Zuo J, et al. Characterizing the generation and flows of building interior decoration and renovation waste: A case study in Shenzhen City [J]. Journal of cleaner production, 2020, 260: 121077.
- [40] Zhang B, Zeng R, Li X. Environmental and human health impact assessment of major interior wall decorative materials [J]. Frontiers of Engineering Management, 2019, 6(3): 406-415.
- [41] Li X, Zhu Y, Zhang Z. An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes [J]. Building and Environment, 2010, 45(3): 766-775.
- [42] Viscusi W K, Aldy J E. The value of a statistical life: a critical review of market estimates throughout the world [J]. Journal of risk and uncertainty, 2003, 27(1): 5-76.
- [43] Li X, Song Z, Wang T, et al. Health impacts of construction noise on workers: A quantitative assessment model based on exposure measurement [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 721-731.
- [44] 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷) 概要 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014: 68-69.
- Duan X L. Highlights of the Chinese exposure factors handbook (Adults) [M]. Beijing: China Environmental Press, 2014: 68-69.
- [45] Huang S, Xiong J, Cai C, et al. Influence of humidity on the initial emittable concentration of formaldehyde and hexaldehyde in building materials: experimental observation and correlation [J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 1-9.
- [46] 李志生, 郭 初. 温湿度对典型家具材料甲醛散发的影响研究 [J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(2): 132-136.
- Li Z S, Guo C. Influence study of temperature and humidity in formaldehyde emission from typical furniture material [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2015, 32(2): 132-136.
- [47] 于海霞, 徐漫平, 方崇荣, 等. 人造板甲醛穿孔萃取法与气体分析法的比较与相关性 [J]. 林产工业, 2012, 39(5): 45-47.
- Yu H X, Xu M P, Fang C R, et al. Comparison and relativity between perforator method and gas analysis method for determining of formaldehyde emission from wood-based panel [J]. China Forest Products Industry, 2012, 39(5): 45-47.
- [48] 冯文如, 于 鸿, 郑睦锐, 等. 广州市室内环境中苯和甲醛的健康风险评估 [J]. 环境卫生学杂志, 2011, 1(6): 7-10.
- Feng W R, Yu H, Zheng M R, et al. Health risk assessment of benzene and formaldehyde in indoor environment in guangzhou city [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2011, 1(6): 7-10.
- [49] Zhou B, Zhao B, Guo X, et al. Investigating the geographical heterogeneity in PM₁₀-mortality associations in the China Air Pollution and Health Effects Study (CAPES): A potential role of indoor exposure to PM₁₀ of outdoor origin [J]. Atmospheric Environment, 2013, 75: 217-223.
- [50] 陈宇炼, 唐加林, 张敏会, 等. 吸烟对室内空气污染的研究 [J]. 环境与健康杂志, 2008, 25(12): 1080-1082.
- Chen Y L, Tang J L, Zhang M H, et al. Indoor air pollution caused by smoking [J]. Journal of Environment and Health, 2008, 25(12): 1080-1082.
- [51] 郭 浩, 张秀喜, 丁志伟, 等. 家庭烹饪油烟污染物排放特征研究 [J]. 环境监控与预警, 2018, 10(1): 51-56.
- Guo H, Zhang X X, Ding Z W, et al. Research on emission characteristics of family cooking fume [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2018, 10(1): 51-56.
- [52] 石晶金, 袁 东, 赵卓慧. 我国住宅室内 PM_{2.5} 来源及浓度的影响因素研究进展 [J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(9): 825-829.
- Shi J J, Yuan D, Zhao Z H. Residential indoor PM_{2.5} sources, concentration and influencing factors in china [J]. Journal of Environment and Health, 2015, 32(9): 825-829.
- [53] 刘 军, 卓玉国. 秦皇岛室内甲醛污染现状调查及其防控 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2014, 24(5): 16-17, 32.
- Liu J, Zhuo Y G. Investigation and control of indoor formaldehyde pollution in Qinhuangdao [J]. Journal of the Environmental Management College of China, 2014, 24(5): 16-17, 32.
- [54] Yu C W F, Kim J T. Long-term impact of formaldehyde and voc emissions from wood-based products on indoor environments; and issues with recycled products [J]. Indoor and Built Environment, 2012, 21(1): 137-149.

作者简介: 曾贤刚(1972-), 男, 江西九江人, 教授, 博士, 主要从事环境与资源经济学研究. 发表论文 100 余篇. zengxg@ruc.edu.cn.