

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021112701

李思航, 丁洋, 牛璨, 等. 保定市新装修室内空气污染特征及人体健康风险评估[J]. 环境化学, 2023, 42(5): 1584-1592.

LI Sihang, DING Yang, NIU Can, et al. Air pollution characteristics and human health risk assessment of newly decorated indoor in Baoding City[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42(5): 1584-1592.

保定市新装修室内空气污染特征及人体健康风险评估*

李思航^{1,2,3} 丁洋^{1,2,3} 牛璨⁴ 韩金保^{1,2,3}**

(1. 河北大学质量技术监督学院, 保定, 071002; 2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心, 保定, 071002; 3. 河北省能源计量与安全检测技术重点实验室(筹), 保定, 071002; 4. 河北大学公共卫生学院, 保定, 071002)

摘要 为了解保定市新装修房屋室内空气污染特征及其对人体的健康影响, 于2018年至2020年, 在全市范围内选取装修完成半年内的住宅居室和办公场所共79处进行了环境空气样本采集, 分析了其甲醛、TVOC和苯系物含量, 并评估了甲醛暴露对成年人群造成的健康风险. 结果表明, 保定市新装修室内环境空气污染普遍存在且污染较为严重, 其中住宅居室室内空气污染以甲醛和TVOC为主, 办公场所室内空气污染以甲醛、TVOC和苯系物为主; 室内甲醛浓度多分布在(0.10—0.15) mg·m⁻³范围内, 室内TVOC浓度多分布在(0.60—0.90) mg·m⁻³范围内. 健康风险评估结果显示, 保定市住宅居室内装修环境空气甲醛呼吸暴露途径对成年人具有较高的致癌风险; 办公场所室内装修环境空气甲醛呼吸暴露途径对成年人具有潜在致癌风险, 且同样环境下, 成年男性通过呼吸途径受到的甲醛致癌风险比女性更大. 敏感分析结果表明, 环境空气中的甲醛浓度和人的呼吸速率对风险评估结果影响较大.

关键词 室内装修, 空气污染, 甲醛, TVOC, 蒙特卡罗模拟.

Air pollution characteristics and human health risk assessment of newly decorated indoor in Baoding City

LI Sihang^{1,2,3} DING Yang^{1,2,3} NIU Can⁴ HAN Jinbao^{1,2,3}**

(1. College of Quality and Technical Supervision Hebei University, Baoding, 071002, China; 2. National and local Joint Engineering Research Center for Metrology Instruments and Systems, Baoding, 071002, China; 3. Hebei Key Laboratory of Energy Metering and Safety Testing Technology, Baoding, 071002, China; 4. College of Public Health Hebei University, Baoding, 071002, China)

Abstract In order to understand the characteristics of indoor air pollution of newly renovated houses in Baoding city and its impact on human health, this study collected environmental air samples from 79 residential rooms and offices within six months after renovation in Baoding City from 2018 to 2020, and analyzed the contents of formaldehyde, TVOC and benzene series. The health risks of formaldehyde exposed to adults were assessed. The results showed that the air pollution of newly decorated indoor environment in Baoding was widespread and serious, and formaldehyde and TVOC were the main pollutants in residential rooms, while formaldehyde, TVOC and benzene series were the main pollutants in office buildings. Indoor formaldehyde concentration was mainly distributed in the range of 0.10—0.15 mg·m⁻³. Indoor TVOC concentration was mainly

2021年11月27日收稿(Received: November 27, 2021).

* 国家自然科学基金(41701579, 51808178)和河北省自然科学基金(D2021201002)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41701579, 51808178) and Natural Science Foundation of Hebei Province (D2021201002).

** 通信联系人 **Corresponding author**, Tel: 15373127112, E-mail: jinbaobaohan@163.com

distributed in the range of 0.60—0.90 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. The results of health risk assessment showed that adults in Baoding had a high risk of cancer due to formaldehyde respiratory exposure in the indoor air of residential decoration. Formaldehyde respiratory exposure in the air of indoor decoration environment in office places has a potential carcinogenic risk for adults, and in the same environment, adult males are more exposed to formaldehyde carcinogenic risk through respiratory pathway than females. The results of sensitive analysis showed that formaldehyde concentration in ambient air and respiration rate had great influence on the risk assessment results.

Keywords interior decoration, air pollution, formaldehyde, TVOC, Monte Carlo simulation.

有研究表明,人们一生中 90% 的时间是在室内度过的^[1]. 随着时代的发展,人们越来越重视室内装饰装修,加之现代住宅的房型布局和密闭性等因素的影响,室内空气污染问题变得日益严重. 世界卫生组织已将室内空气污染列为人类健康的十大威胁之一^[2]. 室内污染主要是以甲醛、苯系物和总挥发性有机物(TVOC, total volatile organic compounds)为代表的室内化学性污染^[3]. 其中苯系物是苯及其衍生物的总称,环境污染领域关注的苯系物主要为苯、甲苯、二甲苯等^[4]. TVOC 是总挥发性有机物的总称,定义为利用 Tenax GC 或 Tenax TA 采样,非极性色谱柱(极性指数小于 10)进行分析,保留时间在正己烷和正十六烷之间的挥发性有机化合物^[5]. 甲醛、苯系物和 TVOC 等可通过皮肤接触和呼吸暴露影响人体健康^[6],其中甲醛和部分苯系物及 TVOC 已被国际癌症研究中心确认为致癌物^[4],其健康危害不容忽视. 因此,研究室内化学性污染物污染特征及其健康危害已成为环境与健康领域的主要课题^[4,7].

近年来,许多学者对不同城市的室内环境空气污染状况进行了研究,结果发现室内环境空气污染普遍存在,且室内污染程度远大于室外^[8-9]. 但目前已有的研究选择的实验周期大多时间跨度较小,主要集中在几个月内选取一定数量的刚装修完的居室环境进行分析^[6,10],无法全面反映室内环境空气污染在时间维度上的特征. 且目前的研究区域多为住宅居室或公共场所等单一区域^[7,11],除了住宅和公共场所外,办公区域也是人们(特别是成年人)的主要活动区域,其空气质量对人体健康的影响不容忽视. 因此,有必要对办公场所的空气污染特征及健康风险进行分析评价. 目前有关室内环境空气污染的健康效应研究较多的是基于美国环保署的致癌风险模型进行计算^[4,12-14]. 然而在实际情况下,该模型中的各参数均存在不确定性,计算出的致癌风险也存在不确定性,这些因素在不同程度下会对致癌风险的真实情况造成影响^[10,15-16].

为了解保定市新装修房屋室内空气污染特征及对人体的健康影响,本研究于 2018 年 4 月到 2020 年 1 月,在全市范围内选取装修完成半年内的居室室内环境和办公室内环境共 79 处进行了环境空气样本采集分析,对主要致癌污染物进行了健康风险评价,并运用蒙特卡罗模拟对健康风险进行了不确定性分析,研究了各参数的敏感度,从而为有针对性的进行室内空气污染控制、保护人群健康提供支持.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 样品采集与分析

在 2018 年 4 月到 2020 年 1 月期间,选取保定市下辖 5 区(竞秀区、莲池区、满城区、清苑区和徐水区)范围内的 79 个地点共 302 个房间进行了室内环境空气样本的采集. 采样地点分为住宅居室和办公场所两类. 其中住宅居室共采集 65 户,采样以客厅和卧室为主,包含 218 个采样点;办公场所以公司办公楼为主,共采集 14 户,包含 84 个采样点.

使用双气路大气采样器(QC-2B,北京市劳动保护所)进行空气样品采集(其中一路装配酚试剂吸收液采集甲醛,另一路装配活性炭管采集苯系物和 TVOC),该装置流量范围为 0.1—1.2 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$;流量误差为 $\pm 5\%$;定时范围为 1—99 min;定时误差为 $\pm 0.1\%$. 使用紫外分光光度计(TU1810,北京谱仪)分析

空气样品中的甲醛含量,该仪器波长范围为 190—1100 nm;波长准确度为 ± 0.3 nm.使用气相色谱仪(GC-2014C,日本岛津)分析苯系物和 TVOC 含量.

样品采集与分析按照《室内空气质量标准》(GB/T18883-2002 附录 A、附录 B)^[5] 中的要求实施.为保证样品采集与分析准确,采样前,所有房屋门窗关闭至少 12 h;采样器已进行过气密性检查和流量校准,每次采样过程都会设置 1 个空白样品;采样时,采样器安装在离地面 1.5 m 的三脚架上,四面 1 m 内没有障碍物;每次采样时间为 20 min,流速为 $0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.采样后,样品遮光保存,立即运往实验室冷藏保存,直至样品分析.分析过程中甲醛和 TVOC 的标准曲线每周重做一次以保证分析精度及准确度.

1.2 健康风险评价方法

甲醛等室内空气污染物可通过皮肤接触、呼吸等暴露途径进入人体造成健康危害(包括致癌性危害和非致癌性危害),其中呼吸是其造成健康危害的主要途径^[17],甲醛等致癌性物质对人体造成的致癌风险(CR)可用以下公式进行估算^[18]:

$$\text{CR} = (\text{CA} \times \text{IR} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{SF}) / (\text{BW} \times \text{LT}) \quad (1)$$

式中,CR 为致癌风险;CA 为空气中的污染物浓度($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$);IR 为呼吸速率($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$);ET 为暴露时间($\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$);EF 为暴露频率($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$);ED 为暴露持续时间(a);SF 为致癌斜率因子;BW 为体重(kg);LT 为终生时间(d).

各参数取值如下:CA 为实验期间的实测浓度,呈对数正态分布.我国成年男性与成年女性的 IR 均呈三角分布,最可能值分别为 $0.796 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.589 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,最小值分别为 $0.477 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.349 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,最大值分别为 $0.945 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $0.709 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ^[19-20].健康风险评价研究对象为保定市成年人群,在不同场所的 ET 无权威数据,选择河北省城市人口中成年男性与成年女性在住宅居室的 ET,分别为 $19.83 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $20.15 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[21].不同性别人群的 LT 均为 25550 d ^[22],所以成年人群在住宅居室的 ED 为 52 a,EF 设为 $365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$.河北省城市人口中成年人群在办公场所的 ET、EF 和 ED 分别为 $8 \text{ h}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[23]、 $250 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[23] 和 40 a ^[23].我国成年男性与成年女性的 BW 均呈正态分布,分别为 $(62.7\pm 6.3) \text{ kg}$ 和 $(54.4\pm 4.9) \text{ kg}$ ^[24].由 IRIS 数据库可知,甲醛的 SF 为 $0.046 \text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}\cdot\text{mg}^{-1}$ ^[25].

健康风险分析过程中存在许多不确定性,造成这些不确定性的因素包括环境介质中的污染物浓度、暴露参数以及暴露人群的个体差异等,这些因素会对分析结果的真实性造成不同程度的影响^[10].作为一种常用的不确定性分析方法,蒙特卡罗模拟在物理、经济、环境等各个领域广泛应用,它将符合一定概率分布的大量随机数作为参数输入模型求出目标变量的概率分布,从而明确输入参数对模拟结果的综合影响以及模拟结果的统计特征^[26].与单一的数学方法相比,蒙特卡罗模拟可以更好地直接处理每个风险因素的不确定性,并把这种不确定性在风险方面的影响,以概率分布的形式表现出来^[26].因此,本研究应用蒙特卡罗模拟分析居室内空气污染物健康风险评估过程中的不确定性.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 室内空气污染物质量浓度特征

保定市室内空气污染状况如表 1 所示.从表 1 可以看出,所检测住宅居室内主要空气污染物的平均质量浓度为:甲醛(0.144 ± 0.078) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、苯(0.006 ± 0.019) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、甲苯(0.056 ± 0.179) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、二甲苯(0.120 ± 0.553) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TVOC(0.843 ± 0.904) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.其中,客厅空气污染物的平均质量浓度为:甲醛(0.138 ± 0.062) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、苯(0.003 ± 0.009) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、甲苯(0.062 ± 0.214) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、二甲苯(0.082 ± 0.201) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TVOC(0.709 ± 0.382) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$;卧室空气污染物的平均质量浓度为:甲醛(0.146 ± 0.086) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、苯(0.008 ± 0.023) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、甲苯(0.057 ± 0.167) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、二甲苯(0.143 ± 0.666) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TVOC(0.912 ± 1.069) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.办公场所主要室内空气污染物的平均质量浓度为:甲醛(0.098 ± 0.056) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、苯(0.065 ± 0.062) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、甲苯(0.129 ± 0.122) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、二甲苯(0.308 ± 0.335) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、TVOC(1.652 ± 0.824) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

表 1 保定市不同类型房间室内空气污染物浓度均值($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)及其超标率(%)Table 1 Average concentration($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) of indoor air pollutants in different types of rooms and their over-limit ratio(%) in Baoding City

污染物 Pollutant	客厅 Living room	卧室 Bedroom	住宅居室 Residence	办公场所 Office	国家标准 National standard
甲醛 Formaldehyde	0.138±0.062(78.13%)	0.146±0.068(79.17%)	0.144±0.078(79.45%)	0.098±0.056(40.96%)	0.10
苯 Benzene	0.003±0.009(0.00%)	0.008±0.023(1.74%)	0.006±0.019(1.14%)	0.065±0.062(13.64%)	0.11
甲苯 Methylbenzene	0.062±0.214(9.80%)	0.057±0.167(11.30%)	0.056±0.179(10.34%)	0.129±0.122(18.18%)	0.20
二甲苯 Xylene	0.082±0.201(17.65%)	0.143±0.666(28.70%)	0.120±0.553(24.13%)	0.308±0.335(46.97%)	0.20
Tvoc	0.709±0.382(94.12%)	0.912±1.069(91.30%)	0.843±0.904(91.95%)	1.652±0.824(89.39%)	0.60

注:表中数据表达形式为:均值±标准差(超标率)

对照《室内空气质量标准》(GB/T18883-2002)^[5]中各污染物的限值发现,住宅居室甲醛和TVOC的平均质量浓度超过了国家标准,所检测样品中分别有79.45%和91.95%的样品超过了国家标准限值,其余污染物的平均质量浓度均未超标.客厅中甲醛和TVOC的平均质量浓度超过了国家标准,所检测样品中分别有78.13%和94.12%的样本超过了国家标准限值,其余污染物的平均质量浓度均未超标;卧室中甲醛和TVOC的平均质量浓度超过了国家标准,所检测样品中分别有79.17%和91.30%的样本超过了国家标准限值,其余污染物的平均质量浓度均未超标.办公场所二甲苯和TVOC的平均质量浓度超过了国家标准,所检测样品中分别有46.97%和89.39%的样品超过了国家标准限值,其余污染物的平均质量浓度均未超标.虽然办公场所其余污染物的平均质量浓度均未超过国家标准限值,但所检测样品中仍有不同比例的样品超标,其中13.64%的样品检测出苯超标,18.18%的样品检测出甲苯超标,而46.97%的样品检测出二甲苯超标.这些结果表明保定市室内空气污染中甲醛和TVOC的污染情况普遍存在且污染较为严重,而苯、甲苯、二甲苯等苯系物污染多存在于办公场所.

对比保定市住宅居室和办公场所室内空气污染情况发现,虽然两种区域的主要空气污染物都是甲醛和TVOC,但办公场所室内空气中的甲醛超标率比住宅居室明显偏低,而苯、甲苯、二甲苯的超标率明显偏高.分析其差异的原因可能是由于住宅居室和办公场所装修风格的差异、室内人流量的多少、室内通风情况及室内的人类行为等的影响.甲醛主要来源于人造板、胶黏剂和地毯等被广泛应用的装修材料^[1].办公场所甲醛超标率相对偏低的原因可能是多数办公场所装修较为简单,装饰材料少,且办公场所空间较大,有利于通风,使得甲醛稀释扩散^[27].此外,室内苯系物主要来源于油漆、涂料等物质,其中甲苯还来自于油墨和印刷产品^[4,11,28].和住宅居室相比,办公场所甲苯浓度偏高可能是因为办公场所人群对打印机及印刷产品的使用较多.

与国内其他城市相比,保定市住宅居室内的空气甲醛超标检出率高于我国其他城市,如杭州(56.10%)^[3]、海口(52.20%)^[29]、北京(50.80%)^[11]、上海(25.80%)^[7]、长春(20.00%)^[6].这种差异性很可能与各地不同的气候环境、风俗习惯、装修风格以及人们的环保意识有关^[7,30].同时,各地市场上建筑和装饰装修材料质量也可能存有差异,这也可能是导致保定市住宅居室内的空气甲醛超标检出率偏高的原因之一^[7].

2.2 时间和季节对室内空气污染状况的影响

为了解不同季节室内环境空气的污染状况,将所测样品中污染程度较高的甲醛与TVOC等污染物的浓度按采集月份进行了分析,结果见图1.从图1可以看出,2019年1月—12月保定市室内环境空气中甲醛的平均浓度值分别为无数据、(0.100 ± 0.026) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、无数据、(0.091 ± 0.043) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.165 ± 0.072) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.142 ± 0.021) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.168 ± 0.065) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.155 ± 0.064) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.158 ± 0.057) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.117 ± 0.036) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.084 ± 0.028) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.087 ± 0.029) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.其中有6个月的甲醛平均质量浓度超过国家标准限值,这些月份为该年的5—10月.这主要是与保定市的地理位置和气候特征有关.研究表明,温度与甲醛的挥发呈显著的正相关^[7,31],5—10月保定市气温相比其他月份较高,室内装修装饰材料中甲醛挥发大,且这几个月相较其他月份自然风较少较小,从而造成了甲醛浓度

相对偏高的现象. 另外, 从样品在不同甲醛浓度区间中的分布情况(图2)来看, 室内环境空气中甲醛质量浓度分布在(0.10—0.15) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内的频度最大, 占样本总量的 44.59%, 进一步说明室内新装修环境空气污染情况普遍存在.

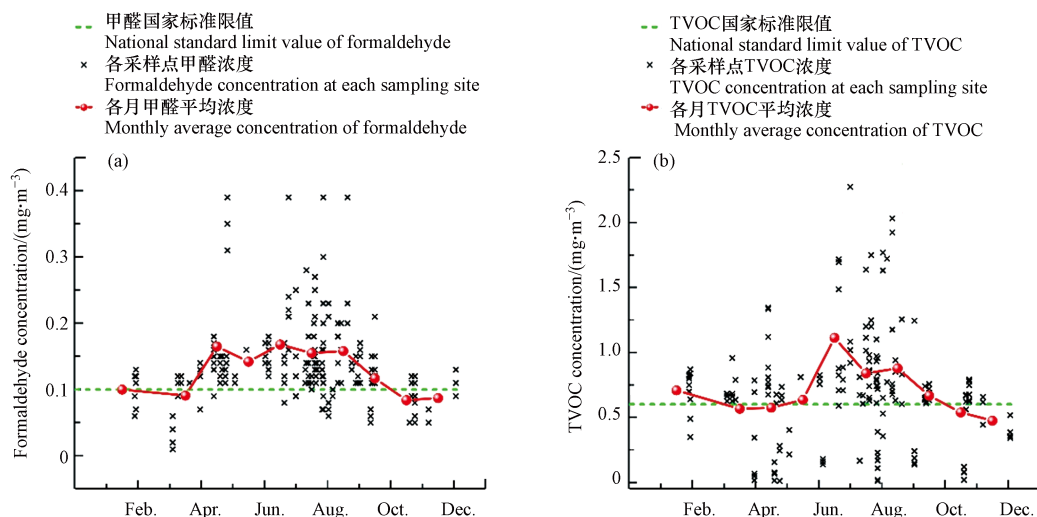


图1 保定市各月份室内环境空气污染物浓度散点图

Fig.1 Scatter chart of indoor ambient air pollutant concentration in Baoding city in each month

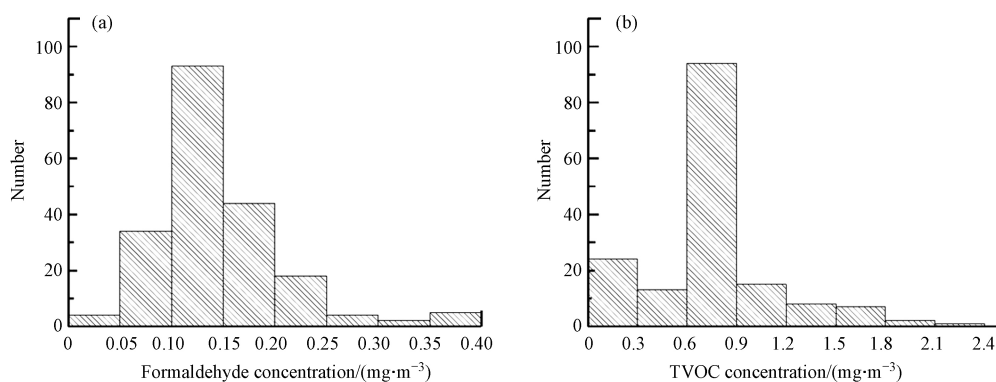


图2 保定市室内环境空气污染物浓度频数分布直方图

Fig.2 Frequency distribution histogram of indoor ambient air pollutant concentration in Baoding city

2019年1月—12月保定市室内环境空气中TVOC的平均浓度值分别为无数据、(0.709±0.162) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、无数据、(0.567±0.268) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.576±0.400) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.636±0.237) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(1.113±0.473) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.840±0.422) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.879±0.535) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.668±0.043) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.539±0.276) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、(0.475±0.117) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 该年2月、6月、7月、8月、9月、10月的TVOC平均质量浓度超过国家标准限值. 其中7月、8月、9月的3个月TVOC平均质量浓度最高. 由于TVOC的释放机制为蒸发和扩散, 高温环境会增加装饰材料和物品中TVOC的释放速率^[4]. 7—9月保定市气温仍然偏高, TVOC的释放速率被加快, 且夏天需要不定时的使用空调, 长期关闭门窗导致空气不能及时流通都可能是这3个月TVOC浓度偏高的原因^[11]. 另外, 从TVOC浓度频度分布情况(图2)来看, 室内环境空气中TVOC质量浓度分布在(0.60—0.90) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内的频度相对较大, 占样本总量的57.31%, 说明室内新装修环境中TVOC的污染问题也普遍存在, 应引起大众重视.

对比甲醛与TVOC各月的浓度值和标准差可知, 甲醛浓度在5月至10月连续六个月较高, 5月至10各月平均质量浓度的标准偏差分布在0.021—0.072范围内, 浓度分布较稳定; TVOC只有7月至9月三个月连续较高, 这3个月各月平均质量浓度的标准偏差分布在0.422—0.535范围内, 浓度值较分散. 虽然甲醛和TVOC的浓度或释放量都与温度呈正相关关系^[4], 但是相比TVOC而言, 甲醛与环境温度的相关性更为密切^[7,9], 这可能是导致气温较高的几个月中甲醛浓度分布比TVOC浓度分布较稳

定的原因之一. 因此, 室内装修完后, 应错开每年甲醛与 TVOC 浓度较高的几个月, 选择合适的时间入住, 以最大程度的降低室内甲醛与 TVOC 污染对人体的健康影响.

2.3 室内环境空气甲醛的健康风险评估

由表 1 可知, 在保定市不同场所的室内空气环境中, 甲醛和 TVOC 的污染程度相对较高, 但 TVOC 是混合物, 其对人类健康危害的致癌斜率因子目前无法界定, 暂时无法使用吸入风险模型进行健康风险评估. 因此对广泛存在于保定市新装修室内空气环境中且污染较严重的甲醛进行健康风险评估, 其评估结果见图 3.

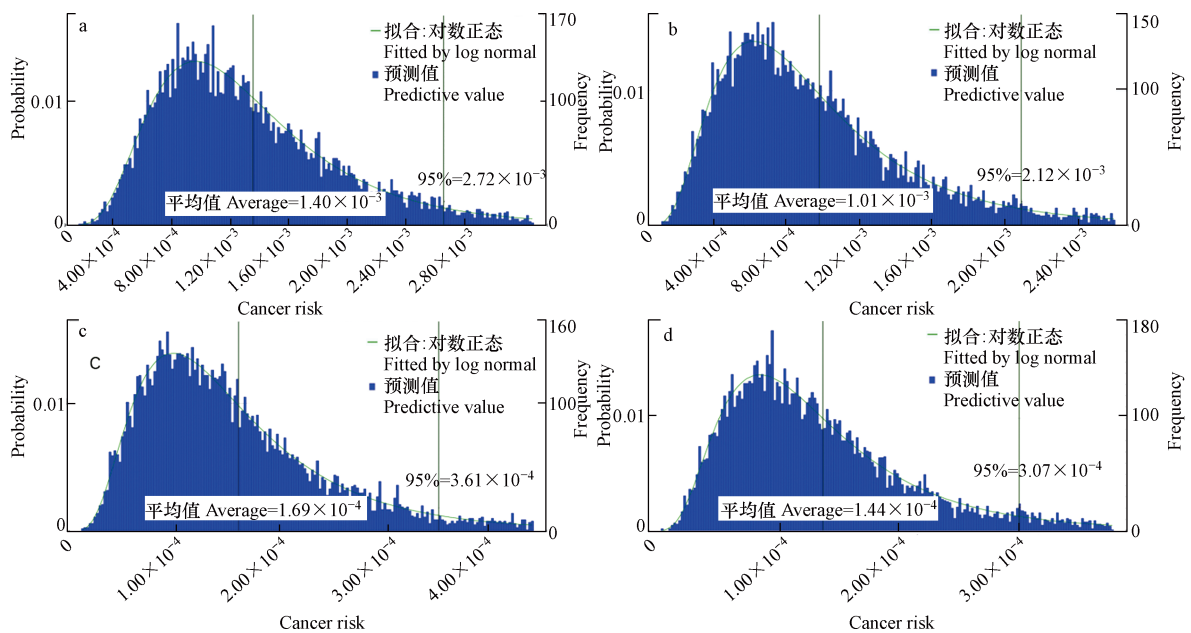


图 3 保定市成人暴露于不同室内环境空气甲醛的吸入终生致癌风险
(a)住宅居室男性(b)住宅居室女性(c)办公场所男性(d)办公场所女性

Fig.3 Inhalation incremental lifetime cancer risk for adult exposure to formaldehyde from different indoor air in Baoding
(a) Male cancer risk in residential areas (b) female cancer risk in residential areas (c) male cancer risk in workplace areas (d) Female cancer risk in workplace areas

由图 3 可以看出, 保定市成年男性和成年女性通过呼吸途径暴露于住宅居室内环境空气甲醛的致癌风险平均值分别为 1.40×10^{-3} 和 1.01×10^{-3} . 暴露于办公场所室内环境空气甲醛的致癌风险平均值分别为 1.69×10^{-4} 和 1.44×10^{-4} . 根据美国环境保护署的相关规定, 当 $CR < 10^{-6}$ 时表明致癌风险不明显; 当 $10^{-6} < CR < 10^{-4}$ 时表明有潜在的致癌风险; 当 $CR > 10^{-4}$ 时则表明致癌风险很高^[25]. 评估结果表明, 保定市住宅居室内成年男女的 CR 值远大于 10^{-4} , 表明保定市住宅居室内装修环境空气甲醛呼吸暴露途径对成年人具有很高的致癌风险. 办公场所室内成年男女的 CR 值处在 10^{-4} 边缘, 表明保定市办公场所室内装修环境空气甲醛呼吸暴露途径对成年人具有潜在致癌风险.

对比国内其他城市发现, 长沙、株洲、怀化、益阳、武汉、贵阳六个城市住宅居室内成年人群的甲醛致癌风险平均值分别为 5.12×10^{-4} 、 1.73×10^{-4} 、 1.96×10^{-4} 、 5.36×10^{-4} 、 6.83×10^{-4} 、 6.05×10^{-4} ^[32-33]. 可见保定市住宅室内装修环境空气甲醛呼吸暴露途径对成年人的致癌风险尤为严重. 上海市公共场所甲醛致癌风险为 3.60×10^{-5} — 4.60×10^{-5} 不等^[12]; 武汉市某高校新建教学楼室内甲醛致癌风险为 2.69×10^{-6} — 9.89×10^{-6} 不等^[10]; 西安市五类公共场所甲醛致癌风险为 1.73×10^{-5} — 1.25×10^{-4} 不等^[4]. 可见保定市办公场所室内装修环境空气甲醛呼吸暴露途径对成年人的潜在致癌风险需要引起重视. 相比其他城市, 保定装修室内环境甲醛暴露的致癌风险较高的原因可能与各个城市不同的经济发展水平、地理位置、气候环境等因素有关^[12-13,32]. 因此需对不同城市、不同地区进行相应的健康风险评估, 以准确的了解其风险程度, 从而有针对性地降低危害.

通过蒙特卡罗模型的敏感分析发现(图 4), 不论是住宅居室内还是办公场所内, 对 CR 结果影响最大的参数是 CA, 也即环境空气中的甲醛浓度. 其贡献度不论是对成年男性还是女性, 都超过了 80%.

其次是 IR 参数,也即呼吸速率.虽然其贡献度均不超过 10%,但该参数的影响也不能忽视,因为不论是在住宅居室内还是办公场所内,成年男性通过呼吸途径暴露于环境空气甲醛的致癌风险平均值均略高于女性.表明同样环境下,成年男性通过呼吸途径受到的甲醛致癌影响更大.这可能是成年男性呼吸速率较高造成的^[19-20,33].因此,可以通过降低环境空气中甲醛浓度并降低呼吸速率以降低甲醛对人体的致癌风险.

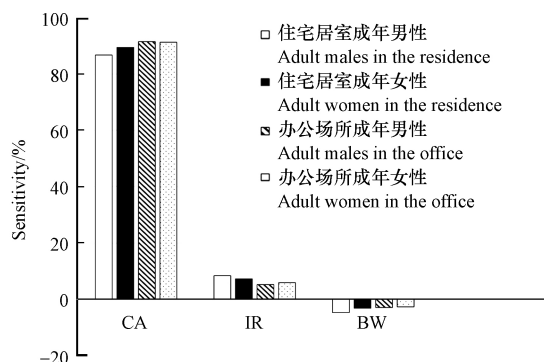


图 4 保定市室内环境空气甲醛致癌风险评估参数敏感度分析

Fig.4 Sensitivity analysis of formaldehyde carcinogenic risk assessment parameters in Baoding indoor air

3 结论(Conclusion)

本研究分析了保定市 2018 年至 2020 年间新装修室内空气中的甲醛、TVOC 和苯系物污染特征,并利用蒙特卡罗模拟评估了成年人通过呼吸途径暴露于室内甲醛污染的健康风险,主要研究结论如下:

(1) 保定市新装修室内空气污染普遍存在且污染较为严重,其中住宅居室内空气污染以甲醛和 TVOC 为主,办公场所室内空气污染以甲醛、TVOC 和苯系物为主.

(2) 温度是影响室内环境空气甲醛及 TVOC 质量浓度的主要因素之一.保定市 5—10 月份室内甲醛浓度相对较高,且浓度分布在 $(0.10—0.15)\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内的频度最大.保定市 7—9 月份室内 TVOC 浓度相对较高,且浓度分布在 $(0.60—0.90)\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内的频度最大.

(3) 终生致癌风险评估结果表明,保定市住宅居室内装修环境空气甲醛呼吸暴露途径对成年人具有很高的致癌风险;办公场所室内装修环境空气甲醛呼吸暴露途径对成年人具有潜在致癌风险,且同样环境下,成年男性通过呼吸途径受到的甲醛致癌影响更大.

(4) 敏感分析结果表明,环境空气中的甲醛浓度和人的呼吸速率对评估结果影响较大,可通过降低环境空气中甲醛浓度并降低呼吸速率以降低甲醛对人体的健康危害.

参考文献 (References)

- [1] DAI X L, LIU J J, YIN Y H, et al. Modeling and controlling indoor formaldehyde concentrations in apartments: On-site investigation in all climate zones of China [J]. *Building and Environment*, 2018, 127: 98-106.
- [2] GUILBERT J J. The world health report 2002 - reducing risks, promoting healthy life [J]. *Education for Health (Abingdon, England)*, 2003, 16(2): 230.
- [3] CHI C C, CHEN W D, GUO M, et al. Law and features of TVOC and Formaldehyde pollution in urban indoor air [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 132: 85-90.
- [4] 范洁, 樊灏, 沈振兴, 等. 西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2153-2158.
FAN J, FAN H, SHEN Z X, et al. Concentration analysis and health risk assessment of air pollutants in newly decorated public places in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2153-2158 (in Chinese).
- [5] 国家质量监督检验检疫总局;卫生部. 室内空气质量标准: GB/T 18883—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Indoor air quality STANDARD: GB/T 18883—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003 (in Chinese).

- [6] 杜博宇. 新装修住宅室内甲醛浓度抽样状况分析 [J]. *北方建筑*, 2017, 2(3): 60-62.
DU B Y. Analysis of the sampling situation of formaldehyde concentration in newly renovated residential house [J]. *Northern Architecture*, 2017, 2(3): 60-62(in Chinese).
- [7] 唐巍飏, 钟义林, 陈希尧, 等. 上海市居民住宅室内空气中典型VOCs浓度水平与污染特征 [J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1038-1047.
TANG W B, ZHONG Y L, CHEN X Y, et al. Study on concentration levels and pollution characteristics of typical VOCs in indoor air of residential buildings in Shanghai [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 1038-1047(in Chinese).
- [8] 李荣江. 我国室内空气污染及控制进展 [J]. *环境与健康杂志*, 2001, 18(6): 407-408.
LI R J. Progress in indoor air pollution and control in China [J]. *Journal of Environment and Health*, 2001, 18(6): 407-408(in Chinese).
- [9] 周霁阳, 沈振兴, 党文鹏, 等. 西安市办公和家庭室内空气污染状况分析 [J]. *环境化学*, 2015, 34(9): 1642-1648.
ZHOU J Y, SHEN Z X, DANG W P, et al. Indoor air pollution in office and residence environment in Xi'an [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 34(9): 1642-1648(in Chinese).
- [10] 张敬东, 蒋路平, 李亚男, 等. 基于蒙特卡罗模拟的高校室内甲醛暴露健康风险评价 [J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(1): 419-425.
ZHANG J D, JIANG L P, LI Y N, et al. Healthrisk assessment of indoor formaldehyde exposure in universities based on Monte-Carlo simulation [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(1): 419-425(in Chinese).
- [11] 吕天峰, 袁懋, 吕怡兵, 等. 2007—2015年北京市室内环境空气污染状况及防治措施 [J]. *环境化学*, 2016, 35(10): 2191-2196.
LV T F, YUAN M, LV Y B, et al. Air pollution in redecorated rooms in Beijing between 2007—2015 and prevention and control measures [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(10): 2191-2196(in Chinese).
- [12] 张莉萍, 倪俊, 郑毅鸣, 等. 上海市大型展会部分室内空气污染物分布特征与健康风险评价 [J]. *环境与职业医学*, 2021, 38(5): 489-493.
ZHANG L P, NI J, ZHENG Y M, et al. Distribution characteristics of indoor air pollutants in large-scale exhibitions in Shanghai and its health risk assessment [J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2021, 38(5): 489-493(in Chinese).
- [13] 单冰, 崔亮亮, 张迎建, 等. 济南市宾馆、理发店和美容院室内空气中常见化学污染物的健康风险评估 [J]. *山东大学学报(医学版)*, 2021, 59(12): 110-119.
SHAN B, CUI L L, ZHANG Y J, et al. Health risk assessment of common chemical pollutants in the indoor air of hotels, barber shops and beauty salons in Jinan City [J]. *Journal of Shandong University (Health Sciences)*, 2021, 59(12): 110-119(in Chinese).
- [14] 王政, 张金萍, 张佳琳, 等. 商业类不同功能公共场所室内甲醛浓度水平及健康风险评价 [J]. *建筑科学*, 2021, 37(4): 156-161,188.
WANG Z, ZHANG J P, ZHANG J L, et al. Concentration of formaldehyde in commercial public places with different functions and health risk assessment [J]. *Building Science*, 2021, 37(4): 156-161,188(in Chinese).
- [15] HAN J B, ZHANG N, NIU C, et al. Personal exposure of children to particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in Tianjin, China [J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2014, 34(4): 320-342.
- [16] 韩金保, 肖亚楠, 刘晨飞, 等. 保定市环境空气PM_{2.5}中多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(4): 1459-1466.
HAN J B, XIAO Y N, LIU C F, et al. Characteristics and human health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons components in fine particle in Baoding, Hebei [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(4): 1459-1466(in Chinese).
- [17] 王彬, 周芸, 马继轩, 等. 挥发性有机物致呼吸系统损害的流行病学研究综述 [J]. *环境与职业医学*, 2018, 35(5): 471-477.
WANG B, ZHOU Y, MA J X, et al. Respiratory system impairments induced by volatile organic compounds: An epidemiological review [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2018, 35(5): 471-477(in Chinese).
- [18] Means. Risk-assessment guidance for Superfund. Volume 1. Human Health Evaluation Manual. Part A. Interim report (Final)[R]. Washington: Office of Emergency and Remedial Response, 1989
- [19] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(10): 1164-1170.
WANG Z S, DUAN X L, LIU P, et al. Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(10): 1164-1170(in Chinese).
- [20] 王宗爽, 武婷, 段小丽, 等. 环境健康风险评价中我国居民呼吸速率暴露参数研究 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(10): 1171-1175.
WANG Z S, WU T, DUAN X L, et al. Research on inhalation rate exposure factors of Chinese residents in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(10): 1171-1175(in Chinese).
- [21] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
ZHAO X G, DUAN X L. Highlights of the Chinese exposure factors handbook(adults)[M]. Beijing: China Environment Publishing

- Group, 2014(in Chinese).
- [22] United States Environmental Protection Agency. Exposure factors handbook: 2011 edition[R]. Washington: Office of Research and Development National Center, 2011.
- [23] 马惠娣, 张景安. 中国公众休闲状况调查[M]. 北京: 中国经济出版社, 2004.
MA H D, ZHANG J G. Survey Studies of the State of Leisure Life Among the Chinese Public[M]. Beijing: Economic Press China, 2004(in Chinese).
- [24] 段小丽, 黄楠, 王贝贝, 等. 国内外环境健康风险评价中的暴露参数比较 [J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(2): 99-104.
DUAN X L, HUANG N, WANG B B, et al. Development of exposure factors research methods in environmental health risk assessment [J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(2): 99-104(in Chinese).
- [25] 佟瑞鹏, 马晓飞. 基于蒙特卡罗法的家具制造工人不安全行为风险评估 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(7): 187-192.
TONG R P, MA X F. Risk assessment on unsafe behavior of furniture manufacturing workers based on Monte Carlo method [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(7): 187-192(in Chinese).
- [26] CHANG T, REN D X, SHEN Z X, et al. Indoor air pollution levels in decorated residences and public places over xi'an, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, 17(9): 2197-2205.
- [27] AYDEMIR C, AYHAN ÖZSOY S,. Environmental impact of printing inks and printing process [J]. *Journal of Graphic Engineering and Design*, 2020, 11(2): 11-17.
- [28] 肖莎, 龙文芳, 杨建军, 等. 海口市装修居室空气中甲醛浓度调查 [J]. *中国热带医学*, 2016, 16(2): 124-126.
XIAO S, LONG W F, YANG J J, et al. Investigation on indoor formaldehyde level of new decorated apartments in Haikou [J]. *China Tropical Medicine*, 2016, 16(2): 124-126(in Chinese).
- [29] 樊娜, 刘聪, 黄衍, 等. 我国健康建筑中VOC污染控制研究进展及思考 [J]. *科学通报*, 2020, 65(4): 263-273.
FAN N, LIU C, HUANG Y, et al. Research progress and consideration of VOC pollution control in healthy buildings in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(4): 263-273(in Chinese).
- [30] TAO H T, FAN Y S, LI X Q, et al. Investigation of formaldehyde and TVOC in underground malls in Xi'an, China: Concentrations, sources, and affecting factors [J]. *Building and Environment*, 2015, 85: 85-93.
- [31] 刘建龙, 谭超毅, 张国强, 等. 湖南省4城市住宅室内环境健康风险评价 [J]. *环境与职业医学*, 2008, 25(4): 375-377.
LIU J L, TAN C Y, ZHANG G Q, et al. Study on health risk assessment of residential indoor environment at four cities in Hunan Province [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2008, 25(4): 375-377(in Chinese).
- [32] CHEN X Y, LI F, LIU C Y, et al. Monitoring, human health risk assessment and optimized management for typical pollutants in indoor air from random families of university staff, Wuhan city, China [J]. *Sustainability*, 2017, 9(7): 1115.
- [33] 李涪涪, 程艳丽, 颜敏, 等. 贵阳市室内空气中苯和甲醛的健康风险评价 [J]. *环境与健康杂志*, 2008, 25(9): 757-759.
LI T T, CHENG Y L, YAN M, et al. Human health risk assessment of benzene and formaldehyde in different indoor environment in Guiyang City [J]. *Journal of Environment and Health*, 2008, 25(9): 757-759(in Chinese).