

宁波市非新装修住宅中甲醛的分布和健康风险评估

曾凡夫¹, 陈洁平², 潘刚雷¹, 项琼珊¹, 蔡曦¹

1. 宁波市镇海区疾病预防控制中心, 浙江 宁波 315200

2. 宁波市疾病预防控制中心, 浙江 宁波 315000

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.21100

摘要:

[背景] 甲醛是住宅内常见空气污染物, 住宅内甲醛引起的健康风险不容忽视。

[目的] 评估宁波市非新装修住宅中的甲醛浓度及对人体可能造成的健康风险。

[方法] 采用多阶段随机抽样方法抽取宁波市 72 户装修满 1 年及以上的住宅作为研究对象, 采集客厅和卧室的空气并测定温度和湿度, 采样时间为 2018 年 7 月—2019 年 1 月, 参照 GB/T 16129—1995《居住区大气中甲醛卫生检验标准方法 分光光度法》(AHMT 法) 的规定检测甲醛质量浓度(后简称: 浓度), 运用美国环境保护署的健康风险评估模型对甲醛的非致癌风险和致癌风险进行评价, 并使用蒙特卡洛模拟进行敏感性分析。

[结果] 72 户住宅甲醛浓度的中位数(M)和第 25、75 百分位数(P_{25} , P_{75})为 0.019(0.012, 0.026) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 仅 1 户住宅客厅的甲醛浓度超标, 总合格率为 98.61%。卧室甲醛浓度的 $M(P_{25}, P_{75})$ 为 0.019(0.011, 0.031) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 较客厅浓度 [0.015(0.010, 0.024) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$] 高, 差异有统计学意义($t=-2.564$, $P=0.012$)。72 户住宅的非致癌风险(HQ)的 M 和第 90 百分位数(P_{90})为 1.35(2.80), 有 62.50% 的住宅 $\text{HQ}>1$; 72 户住宅的致癌风险(CR)的 $M(P_{90})$ 为 1.12×10^{-4} (2.32×10^{-4}), $\text{CR}>1\times 10^{-6}$ 和 $\text{CR}>1\times 10^{-5}$ 的比例均为 100.00%, $\text{CR}>1\times 10^{-4}$ 的比例为 54.20%。蒙特卡洛模拟发现, HQ 的 $M(P_{90})$ 降至 0.91(1.94), M 值小于限值, $\text{HQ}>1$ 的比例为 44.73%; CR 的 $M(P_{90})$ 降至 7.52×10^{-5} (1.79×10^{-4}), $\text{CR}>1\times 10^{-6}$ 的比例为 100.00%, $\text{CR}>1\times 10^{-5}$ 的比例为 98.96%, $\text{CR}>1\times 10^{-4}$ 的比例为 34.37%。

[结论] 宁波市非新装修住宅的甲醛浓度基本符合国标要求, 但甲醛引起的非致癌风险和致癌风险仍需关注, 特别是甲醛引起的致癌风险应引起特别重视, 居民应主要通过使用清洁的装修材料和环保家具从源头上预防甲醛的危害。

关键词: 甲醛; 健康风险评估; 蒙特卡洛模拟; 室内空气; 空气污染

Distribution and health risk assessment of formaldehyde in non-newly decorated houses in Ningbo, China ZENG Fanfu¹, CHEN Jieping², PAN Ganglei¹, XIANG Qionshan¹, CAI Xi¹ (1. Center for Disease Control and Prevention of Zhenhai District, Ningbo, Zhejiang 315200, China; 2. Ningbo Municipal Center for Disease Control and Prevention, Ningbo, Zhejiang 315000, China)

Abstract:

[Background] Formaldehyde is a common air pollutant in residential buildings, and the health risks caused by formaldehyde in residential buildings can not be ignored.

[Objective] This study aims to evaluate the air concentration of formaldehyde in non-newly decorated houses in Ningbo and its possible health risks.

[Methods] A total of 72 houses without any decoration in the past one year in Ningbo were selected by multi-stage random sampling method. From July 2018 to January 2019, the air samples of living rooms and bedrooms were collected and their temperature and humidity were also measured. The concentrations of formaldehyde were detected by AHMT method according to *Standard method for hygienic examination of formaldehyde in air of residential areas — Spectrophotometric method* (GB/T 16129—1995), the health risk assessment model of U.S. Environmental Protection Agency was used to evaluate the non-carcinogenic risk and carcinogenic risk of formaldehyde, and Monte Carlo simulation was used for sensitivity analysis.

[Results] The median (P_{25} , P_{75}) of formaldehyde concentration in the 72 houses was 0.019 (0.012,

作者简介

曾凡夫(1990—), 男, 硕士, 主管医师;
E-mail: zengff66@163.com

通信作者

陈洁平, E-mail: 48107332@qq.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-03-19

录用日期 2021-10-12

文章编号 2095-9982(2021)12-1340-05

中图分类号 R12

文献标志码 A

► 引用

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.

► 本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21100

Correspondence to

CHEN Jieping, E-mail: 48107332@qq.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-03-19

Accepted 2021-10-12

► To cite

ZENG Fanfu, CHEN Jieping, PAN Ganglei, 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.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21100

0.026) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。Only one house showed a formaldehyde concentration that exceeded the national standard in the living room, and the total qualified rate of formaldehyde concentration was 98.61%. The median (P_{25} , P_{75}) of formaldehyde concentration in the bedroom was 0.019 (0.011, 0.031) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, which was higher than that in the living room, 0.015 (0.010, 0.024) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, and the difference was statistically significant. The median and 90th percentile of non-cancer risk (hazard quotient, HQ) of the 72 houses were 1.35 and 2.80, respectively, and the proportion of the houses with HQ > 1 was 62.50%. The median and 90th percentile of cancer risk (CR) of the 72 houses were 1.12×10^{-4} and 2.32×10^{-4} , respectively, and the proportions of the houses with CR > 1×10^{-6} , CR > 1×10^{-5} , and CR > 1×10^{-4} were 100.00%, 100.00%, and 54.20%, respectively. After using Monte Carlo simulation, the median (90th percentile) of non-carcinogenic risk was reduced to 0.91 (1.94), where the median was lower than the national limit, and the proportion of samples with HQ > 1 was 44.73%; the carcinogenic risk was reduced to 7.52×10^{-5} (1.79×10^{-4}), and the proportions of samples with CR > 1×10^{-6} , CR > 1×10^{-5} , and CR > 1×10^{-4} were 100.00%, 98.96%, and 34.37%, respectively.

[Conclusion] The concentration of formaldehyde in non-newly decorated houses in Ningbo basically meets the national requirements, but it is still necessary to pay attention to the non-carcinogenic risk and carcinogenic risk caused by indoor formaldehyde, among which the carcinogenic risk is more important. Residents should prevent the harm of formaldehyde from its source by considering clean decoration materials and environmentally friendly furniture.

Keywords: formaldehyde; health risk assessment; Monte Carlo simulation; indoor air; air pollution

住宅是人类活动的主要场所之一,其空气质量与健康密切相关。甲醛是住宅内一种常见的污染物^[1],多来源于装修时使用的人造板材、黏合剂、涂料和装饰纺织品等,也可来自香烟、燃料等的不完全燃烧^[2]。甲醛可引起多种健康损害效应^[3],如急性毒性、氧化应激与炎症、遗传毒性、神经毒性、心血管效应等,也可诱发白血病、鼻咽癌和鼻窦癌等癌症,美国国家毒理学计划(National Toxicology Program, NTP)和国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)已分别将其列为“已知人类致癌物”和“确认致癌物”。基于此,本研究于2018—2019年检测了宁波市72户非新装修家庭的甲醛浓度,并评估了甲醛的非致癌风险和致癌风险,为指导公众防控住宅内甲醛的健康危害提供科学依据。

1 对象与方法

1.1 研究对象

为避免新装修住宅甲醛浓度过高,从而高估甲醛引起的健康风险,本研究以宁波市装修满1年及以上家庭的住宅为研究对象,采用多阶段随机抽样方法,首先从宁波市11个区(县)中随机抽取3个区(县),随后在各区(县)内随机选择一个环保国控、省控或市控点,在其2 km范围内随机选择装修完毕已购买并放置家具且已入住的居室各24户,装修完成时间要求满1年(装修完成时间参考床、沙发等大件家具进驻时间),对抽中小区不符合要求或不配合的,在同一小区行随机替换,最终共72户纳入本研究。监测时间为2018年7月—2019年1月,其中7—8月监测18户,9—11月监测36户,12月至次年1月监测18户。

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法 参照GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》附录A,采样点为住宅内客厅和卧室(主卧)。小于50 m²的房间设1个点,50~100 m²设3个点,100 m²以上设5个点,在中心(1个点)、对角线上(3个点)或梅花式(5个点)均匀分布。采样点避开通风口,距离墙壁大于0.5 m,相对高度为0.5~1.5 m。在采样点进行空气收集和温、湿度的测定,空气采样流量为1.0 L·min⁻¹,采样时间为20 min。采样前关闭门窗12 h,采样时保持门窗紧闭,空调关闭。

1.2.2 检测方法 参照GB/T 16129—1995《居住区大气中甲醛卫生检验标准方法 分光光度法》(AHMT法)的规定检测甲醛质量浓度(后简称:浓度),检出限为0.002 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (以40 L计)。

1.3 健康风险评估

1.3.1 暴露评估 住宅内甲醛的每日暴露浓度计算公式如下:

$$\rho_{\text{EC}} = \rho_{\text{CA}} \times t_{\text{ET}} \times t_{\text{EF}} \times t_{\text{ED}} / t_{\text{AT}}$$

式中: ρ_{EC} 为甲醛的每日暴露浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; ρ_{CA} 为甲醛检测浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,以住宅中客厅和卧室的平均浓度表示; t_{ET} 为每日居家时间, $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$,文献提示男性为15.53 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$,女性为16.97 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[4-5],本研究取均值16.25 $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$; t_{EF} 为每年居家天数, $\text{d}\cdot\text{年}^{-1}$,本研究取 t_{EF} 为350 $\text{d}\cdot\text{年}^{-1}$ ^[6]; t_{ED} 为暴露持续时间,表示一生的居家年数,文献提示男性居家年数55.16年,女性60.6年^[4],本研究取均值57.88年; t_{AT} 为平均暴露时间,h。

在非致癌风险评估中: $t_{\text{AT}} = t_{\text{ED}} \times 365 \times 24$; 在致癌风险评估中: $t_{\text{AT}} = t_{\text{LE}} \times 365 \times 24$ 。

式中: t_{LE} 为期望寿命,岁,根据2019年宁波市疾

疾病预防控制中心发布的慢性病和死因监测系统数据分析报告, 男性期望寿命为 79.54 岁, 女性期望寿命为 83.95 岁, 本研究取均值 81.75 岁。

1.3.2 非致癌风险评估 甲醛的非致癌风险危害商数 (hazard quotient, HQ) 的计算方法为 ρ_{EC} 除以参考接触浓度 R_{fc} 。其中: HQ 无量纲, 当 $HQ > 1$ 时, 可认为甲醛引起的非致癌效应不可接受, 反之可接受; R_{fc} 为参考接触浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 美国加州环境保护局 (California Environmental Protection Agency, CalEPA) 推荐甲醛的 R_{fc} 为 $9\times 10^{-3}\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ [7], 即 $9\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

1.3.3 致癌风险评估 甲醛的致癌风险 (cancer risk, CR) 的计算方法为: 吸入单位风险 (inhalation unit risk, IUR) 与 ρ_{EC} 相乘。其中: CR 无量纲, 当 $CR > 1\times 10^{-4}$ 时, 甲醛引起的致癌风险为确定风险, $1\times 10^{-5} < CR \leq 1\times 10^{-4}$ 时为较大可能风险, $1\times 10^{-6} < CR \leq 1\times 10^{-5}$ 时为可能风险, $CR \leq 1\times 10^{-6}$ 时, 风险可接受[8]; IUR 的单位为 $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$, 美国环境保护署 (United States Environmental Protection Agency, EPA) 推荐甲醛的 IUR 为 $1.3\times 10^{-5}(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$ [6]。

1.4 灵敏度分析

为降低点估计的不确定性对评估的影响, 提高风险评估的灵敏度[9], 采用 10000 次的蒙特卡洛方法对甲醛的非致癌风险和致癌风险进行模拟。使用检测数据判断和拟合甲醛浓度的分布, 本研究取 beta 分布 ($\alpha=2.80, \beta=129.30$); 每日居家时间假设由居家休闲时间和居家睡眠时间组成, 参考腾讯研究院《2020 年中国国民休闲状况调查报告》和 Wang 等[10] 的研究, 本研究取居家休闲时间为对数正态分布 ($\mu=1.41, \sigma=0.95$), 居家睡眠时间为对数正态分布 ($\mu=2.05, \sigma=0.24$), 每年居家天数取三角分布 ($a=250\text{ d}, b=365\text{ d}, c=350\text{ d}$), 居家年数取三角分布 ($a=40\text{ 年}, b=70\text{ 年}, c=57.88\text{ 年}$)。

1.5 统计学分析

本研究为横断面调查研究。采用 R 4.0.3 软件进行统计分析, 住宅面积、房龄、温度和湿度的描述使用均数 $\pm$ 标准差 ($\bar{x}\pm s$) 表示, 甲醛浓度的描述使用中位数 (第 25、75 百分位数) [$M(P_{25}, P_{75})$] 表示, 非致癌风险和致癌风险的描述采用中位数 (第 90 百分位数) [$M(P_{90})$] 表示。甲醛浓度数据经对数转换后, 使用配对设计资料的 t 检验比较客厅和卧室甲醛浓度差异; 采用 MonteCarlo 包进行蒙特卡洛模拟, 分布的判断和拟合使用 fitdistrplus 包[11]。双侧检验, 检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 基本情况

本研究监测的 72 户住宅中, 楼房 49 户, 楼层 $M(P_{25}, P_{75})$ 为 4(2, 5) 层, 平房 18 户, 别墅 5 户。住宅面积 (142.26 ± 75.85) m^2 , 房龄 (15.73 ± 8.64) 年, 五年内装修过的住宅占比 16.67% (12/72), 监测温度为 (26.83 ± 6.36) $^{\circ}\text{C}$, 监测湿度为 (68.90 ± 7.30) %。72 户住宅甲醛浓度的 $M(P_{25}, P_{75})$ 为 0.019(0.012, 0.026) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中客厅浓度 0.015(0.010, 0.024) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 卧室浓度 0.019(0.011, 0.031) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 卧室浓度较客厅高, 差异有统计学意义 ($t=-2.564, P=0.012$)。72 户住宅仅 1 户客厅的甲醛浓度超过 GB/T 18883—2002 规定的限值, 合格率 98.61%; 该超标房屋竣工于 1999 年, 近 5 年无新装修。甲醛浓度的具体分布详见图 1。

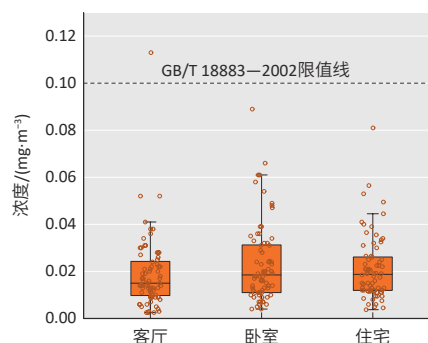


图 1 宁波市 72 户住宅甲醛浓度分布情况

Figure 1 The distribution of formaldehyde concentration in 72 houses in Ningbo

2.2 住宅甲醛健康风险评估

72 户住宅中甲醛引起的非致癌风险 HQ 的 $M(P_{90})$ 为 1.35(2.80), 提示对于这些住户而言, 甲醛引起的非致癌风险不容忽视; 此外, 在 72 户住宅中, 有 62.50% (45 户) 的住户甲醛引起的非致癌风险 $HQ > 1$, 提示甲醛引起的非致癌风险的波及范围较广。

72 户住宅中甲醛引起的致癌风险 CR 的 $M(P_{90})$ 为 1.12×10^{-4} (2.32×10^{-4}), 提示对于这些住户而言, 甲醛引起的致癌风险应引起足够的重视; 另外, 在 72 户住宅中, 甲醛引起的致癌风险 CR 均大于 1×10^{-6} , 其中 $CR > 1\times 10^{-5}$ 的比例也为 100.00%, $CR > 1\times 10^{-4}$ 的比例为 54.20%, 提示甲醛引起的致癌风险波及范围广。

2.3 敏感性分析

蒙特卡洛模拟发现, 住宅中甲醛引起的非致癌风险 HQ 的 $M(P_{90})$ 为 0.91(1.94), 低于点估计的结果, 其 M 值也低于 1, 但仍有 44.73% 的住宅中甲醛引起的非致癌风险 $HQ > 1$ (图 2)。住宅中甲醛引起的致癌风

险 CR 的 $M(P_{90})$ 为 7.52×10^{-5} (1.79×10^{-4}), 低于点估计的结果, 但其 M 值仍大于 1×10^{-6} , $CR > 1 \times 10^{-6}$ 的比例仍为 100.00%, 其中 $CR > 1 \times 10^{-5}$ 的比例为 98.96%, $CR > 1 \times 10^{-4}$ 的比例为 34.37% (图 3)。

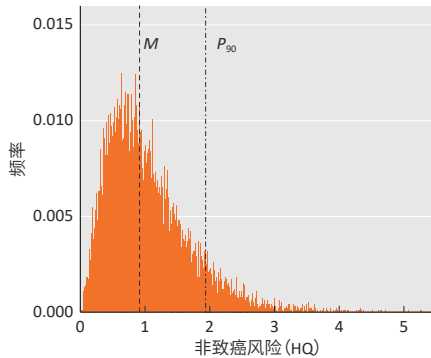


图 2 宁波市住宅甲醛非致癌风险的蒙特卡洛模拟

Figure 2 Non-carcinogenic risk of formaldehyde from the Monte Carlo simulations in houses in Ningbo

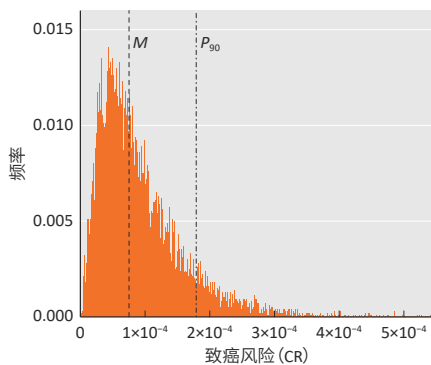


图 3 宁波市住宅甲醛致癌风险的蒙特卡洛模拟

Figure 3 Carcinogenic risk of formaldehyde from the Monte Carlo simulations in houses in Ningbo

3 讨论

甲醛是室内空气的主要污染物^[4], 本研究对宁波市 72 户装修满 1 年及以上住宅进行调查并检测了甲醛的浓度, 低于文献报告的国内新装修住宅甲醛浓度 ($0.125 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 和杭州市 ($0.055 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)、重庆市 (客厅 $0.021 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 卧室 $0.023 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 及北京市 ($0.050 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 等非新装修住宅的甲醛浓度^[1, 4, 12-13], 也低于 GB/T 18883—2002 的限值, 合格率为 98.61%, 提示宁波市非新装修住宅中的甲醛浓度可基本满足国标要求。此外, 本研究发现卧室中甲醛浓度高于客厅, 同新装修住宅中甲醛分布结果一致^[14-15], 这可能与卧室中存在大量的衣柜、储物柜等有关, 其污染问题应引起重视。对于非致癌风险, CalEPA 推荐的 Rfc 为 $9 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 远低于 GB/T 18883—2002 的 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 限值, 若以甲醛国标限值作为暴露浓度计算非致癌风险, 则 HQ 为 11.11, 即 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} / (9 \times$

$10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。同理, 对于致癌风险, 以甲醛国标限值作为暴露浓度计算致癌风险, CR 为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \times 1.3 \times 10^{-5} (\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$, 即 1.3×10^{-3} ; 此外, 对于环境中的致癌风险评估, 通常以 1×10^{-6} 而非职业环境中致癌风险评估采取的 1×10^{-4} 作为可接受水平, 评价更为严苛。因此甲醛国标限值的保守性, 甲醛 Rfc 参数和环境致癌风险接受水平的严苛性, 易出现住宅甲醛浓度符合国标限值而其非致癌风险和致癌风险超出可接受水平的情况, 但考虑到社会发展的阶段性, 可将此类结果与同类研究进行对比分析后综合考量, 而不对单一指标作过度解读, 引起不必要的恐慌。本研究对 72 户非新装修住宅甲醛的健康风险点估计表明, 甲醛引起的非致癌风险和致癌风险的中位数均超过了可接受限值, 且有 10% 的住宅的非致癌风险和致癌风险分别超过了 2.80 和 2.32×10^{-4} 的水平。考虑到点估计可能高估或低估了风险水平, 本研究通过蒙特卡洛模拟修正了点估计的结果, 模拟结果的非致癌风险和致癌风险均降低, 甲醛引起的非致癌风险的中位数降到可接受限以下, 但 $HQ > 1$ 和 $CR > 1 \times 10^{-6}$ 的住宅比例仍分别达到了 44.74% 和 100.00%。相较于非致癌风险, 室内甲醛引起的致癌风险在严重性和影响范围上更需要关注。欧阳幸子^[12] 对杭州市非新装修住宅调查发现, 不同年龄段人群在住宅室内空气中甲醛的致癌风险远超 1×10^{-6} 。Cheng 等^[4] 对重庆市非新装修住宅调查发现, 甲醛引起的非致癌风险中位数, 男性为 0.292, 女性为 0.293, 低于本研究的 0.91; 但致癌风险的中位数与本研究接近, 分别为男性 6.56×10^{-5} , 女性 7.16×10^{-5} , 甲醛在住宅中的非致癌风险和致癌风险值得引起重视。

研究提示, 住宅甲醛浓度的下降主要集中在装修后 1 年内, 随后下降速度将趋缓, 并在低浓度下维持多年^[12]。采用空气净化器、加湿器、通风和种植花草等方式对于新装修后不久的房屋中甲醛的去除可能有一定的帮助; 但随着甲醛浓度的降低, 这类措施的边际收益也递减。因此, 从源头上使用更环保、低甲醛的装修材料和家具才是最优策略^[16], 公众在装修和购买家具时应加以重视。

本研究的不足: (1) 受限于样本量较小和混杂偏倚 (如住宅类型、温湿度、楼层等) 的影响, 样本可能不能较好地代表所有非新装修住宅甲醛浓度的总体, 将结果外推到宁波市外的住宅存在不确定性; (2) 因缺少宁波市人群相关参数资料, 如 t_{ET} 、 t_{EF} 、 t_{ED} 等的分布, 本研究采用文献资料进行代替, 可能不能较好反映宁

波市居民的真实情况; (3) 根据采样规范, 采样前需关闭门窗 12 h, 并关闭空调, 以保证室内甲醛浓度达到稳定状态, 这一保守性考虑, 可能导致对甲醛浓度和风险的过高估计。但本研究采用蒙特卡洛模拟进行了灵敏度分析, 在一定程度上减少了点估计的偏倚, 通过与其他类似报道的对比, 结果基本一致, 增加了结果的可信度。综上所述, 本研究发现宁波市非新装修住宅甲醛浓度基本符合国标要求, 但甲醛引起的非致癌风险和致癌风险仍不容忽视, 特别是致癌风险的危害应引起高度的重视。

(志谢: 感谢宁波市鄞州区疾病预防控制中心, 宁波市江北区疾病预防控制中心和宁波市宁海区疾病预防控制中心对本研究的大力支持。)

参考文献

- [1] HUANG S, WEI W, WESCHLER LB, et al. Indoor formaldehyde concentrations in urban China: Preliminary study of some important influencing factors[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 590-591: 394-405.
- [2] SCHOBBER W, FEMBACHER L, FRENZEN A, et al. Passive exposure to pollutants from conventional cigarettes and new electronic smoking devices (IQOS, e-cigarette) in passenger cars[J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2019, 222(3): 486-493.
- [3] 赵云. 内源性和外源性甲醛的生理与毒性效应及采用 CRISPR 对其毒性机制的研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2020.
ZHAO Y. Studies on physiological and toxic effects induced by endogenous and exogenous formaldehyde and mechanisms of formaldehyde toxicity using CRISPR[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2020.
- [4] CHENG Z, LI B, YU W, et al. Risk assessment of inhalation exposure to VOCs in dwellings in Chongqing, China[J]. *Toxicol Res (Camb)*, 2018, 7(1): 59-72.
- [5] DU Z, MO J, ZHANG Y. Risk assessment of population inhalation exposure to volatile organic compounds and carbonyls in urban China[J]. *Environ Int*, 2014, 73: 33-45.
- [6] ROVIRA J, ROIG N, NADAL M, et al. Human health risks of formaldehyde indoor levels: an issue of concern[J]. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 2016, 51(4): 357-363.
- [7] LIU C, MIAO X, LI J. Outdoor formaldehyde matters and substantially impacts indoor formaldehyde concentrations[J]. *Build Environ*, 2019, 158: 145-150.
- [8] DURMUSOGLU E, TASPINAR F, KARADEMIR A. Health risk assessment of BTEX emissions in the landfill environment[J]. *J Hazard Mater*, 2010, 176(1/2/3): 870-877.
- [9] BU Z, ZHANG Y, MMEREKI D, et al. Indoor phthalate concentration in residential apartments in Chongqing, China: Implications for preschool children's exposure and risk assessment[J]. *Atmos Environ*, 2016, 127: 34-45.
- [10] WANG S, LI B, WU Y, et al. Relationship of sleep duration with sociodemographic characteristics, lifestyle, mental health, and chronic diseases in a large Chinese adult population[J]. *J Clin Sleep Med*, 2017, 13(3): 377-384.
- [11] DELIGNETTE-MULLER ML, DUTANG C. Fitdistrplus: an R package for fitting distributions[J]. *J Stat Softw*, 2015, 64(4): 1-34.
- [12] 欧阳幸子. 杭州市住宅室内空气中有机复合污染的特征及健康风险[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
OUYANG X Z. Characteristics and health risks of organic compound pollution in residential indoor air in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [13] 方建龙, 杨旭, 李红, 等. 北京与武汉部分儿童家庭室内空气中甲醛及挥发性有机物调查[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(7): 585-586.
FANG JL, YANG X, LI H, et al. Survey of formaldehyde and TVOC in indoor air in families with children in Beijing and Wuhan[J]. *J Environ Health*, 2014, 31(7): 585-586.
- [14] 梁晓军, 嵇心怡, 耿政祥, 等. 江苏省昆山市新装修住宅室内甲醛的污染特征[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(10): 994-998.
LIANG XJ, JI XY, GENG ZX, et al. Indoor formaldehyde pollution characteristics in newly decorated residences in Kunshan of Jiangsu Province[J]. *J Environ Occup Med*, 2020, 37(10): 994-998.
- [15] 孙芳, 刘俊玲, 何振宇. 武汉市新近装修住宅中甲醛污染特征及健康风险评估[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(7): 1043-1045.
SUN F, LIU JL, HE ZY. Characterization and health risk assessment for the formaldehyde pollution in newly decorated household dwellings in Wuhan[J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2015, 25(7): 1043-1045.
- [16] HUN DE, CORSI RL, MORANDI MT, et al. Formaldehyde in residences: long-term indoor concentrations and influencing factors[J]. *Indoor Air*, 2010, 20(3): 196-203.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 丁瑾瑜)