

我国城市住宅室内空气中可挥发性有机化合物污染特征

丁洋¹, 李思航¹, 韩金保^{1,2}

1. 河北大学质量技术监督学院, 河北 保定 071000

2. 计量仪器与系统国家地方联合工程研究中心, 河北 保定 071002

摘要:

可挥发性有机化合物(TVOCs)是室内环境空气的主要污染物,长期暴露在TVOCs浓度超标的环境下,会对人体产生急性和慢性的不良健康影响。为了解我国城市住宅室内空气TVOCs污染特征,通过检索中国知网、万方数据库、维普网、Web of Science和PubMed中2000—2021年公开发表的住宅室内TVOCs的相关文献,分析了我国城市住宅室内TVOCs的污染特征及主要来源。结果表明,我国城市住宅室内环境空气TVOCs浓度均值范围为0.18~1.45 mg·m⁻³,存在分布范围广,超标普遍的现象。且不同居室中,卧室、书房、厨房中TVOCs浓度相对偏高。装修装饰材料以及入住后的人为活动等室内源是城市住宅室内TVOCs的主要来源,且TVOCs浓度在装修完工后4~6个月下降幅度最大。但延长装修完工后入住时间并不是有效去除室内TVOCs的最佳方法,特别是针对超标严重的区域,需要通过减少污染源以降低室内TVOCs浓度。对于室内环境空气TVOCs的研究,还需在室内外TVOCs的浓度比值和对室内人类活动等污染来源解析方面进行更深入的研究。

关键词: 可挥发性有机化合物; 室内空气; 污染特征; 来源

Pollution characteristics of total volatile organic compounds in indoor air of urban residential buildings in China DING Yang¹, LI Sihang¹, HAN Jinbao^{1,2} (1. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding, Hebei 071000, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center for Metrology Instruments and Systems, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract:

Total volatile organic compounds (TVOCs) are the main indoor pollutants. Long-term exposure to excessive TVOCs will cause acute and chronic adverse health effects. In order to understand current indoor TVOCs pollution in urban residential buildings in China, we searched related literature of indoor TVOCs in urban residential buildings published in CNKI, Wanfang, VIP, Web of Science, and PubMed from 2000 to 2021, and analyzed the pollution characteristics and main sources of indoor TVOCs in urban residential buildings in China. The results showed that the average TVOCs concentration range in urban residential buildings in China was 0.18-1.45 mg·m⁻³, which was widely distributed and exceeded the relevant national standard. The concentrations of TVOCs in bedrooms, study rooms, and kitchens were relatively high among different rooms. Indoor sources such as decoration materials and human activities after moving in were the main sources of TVOCs, and the concentration of TVOCs decreased the most in 4-6 months after the completion of decoration. However, extending the vacancy time after the completion of decoration is not the best method to effectively remove indoor TVOCs, especially for the areas where indoor air pollutants severely exceeding the national limit, it is necessary to control pollution sources to reduce indoor TVOCs concentration. For the study of indoor air TVOCs, future study directions could be the ratio of indoor and outdoor TVOCs concentration and the analysis of indoor human activities and other pollution sources.

Keywords: total volatile organic compounds; indoor air; pollution characteristics; source



DOI 10.11836/JEOM21504

基金项目

国家自然科学基金资助项目(41701579)

作者简介

丁洋(1995—),男,硕士生;

E-mail: dingyang0111@163.com

通信作者

韩金保, E-mail: jinbaobaohan@163.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2021-10-17

录用日期 2022-04-18

文章编号 2095-9982(2022)07-0821-06

中图分类号 R12

文献标志码 A

►引用

丁洋, 李思航, 韩金保. 我国城市住宅室内空气中可挥发性有机化合物污染特征 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(7): 821-826.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM21504

Funding

This study was funded.

Correspondence to

HAN Jinbao, E-mail: jinbaobaohan@163.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2021-10-17

Accepted 2022-04-18

► To cite

DING Yang, LI Sihang, HAN Jinbao. Pollution characteristics of total volatile organic compounds in indoor air of urban residential buildings in China[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(7): 821-826.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM21504

调查表明,城市居民平均有80%~90%的时间是在室内度过的^[1],因此,室内空气质量对人们健康的影响不容忽视,其一直是科学界、政府机构以及民众关注的焦点。可挥发性有机化合物(total volatile organic compounds, TVOCs)是影

响室内空气质量的重要污染物之一,通常指用气相色谱非极性柱分析保留时间在正己烷和正十六烷之间并包括它们在内的已知和未知的挥发性有机化合物总称^[2],其种类众多、成分复杂、来源广泛。长期暴露在 TVOCs 浓度超标的环境下,会对人体产生急性和慢性的不良健康影响,甚至诱发癌变^[3]。因此,研究室内环境空气 TVOCs 的浓度特征及来源,对提高室内空气质量、保护人体健康具有非常重要的作用。

随着经济的发展,我国已成为最大的装修装饰材料消费国,人们也更加注重生活品质的提高,有关我国室内环境空气 TVOCs 浓度特征的研究已有很多。这些研究总体主要集中在两个方面:一是在某个地区或城市选择刚装修或翻新的住宅进行 TVOCs 的实地检测^[4]。这类研究有助于了解新装修居室内 TVOCs 的实际浓度水平,并初步探讨影响 TVOCs 浓度的因素。二是对同一住宅进行长期检测研究^[5]。这类研究可较好地规避户型、装修程度、材料等多种因素的影响,更好地揭示所研究住宅中 TVOCs 随时间的变化规律以及不同因素的影响。这些研究在一定程度上反映了所研究室内环境空气 TVOCs 的污染程度,为室内环境空气 TVOCs 污染数据库的建立、室内空气质量的改善奠定了基础,具有一定的实际价值。然而这些研究数据较多且差别较大,缺乏合适的数据归类和分析总结,并且大部分研究的区域仅针对某一个城市或地区,而我国幅员辽阔,各地区气候环境、生活方式、消费水平等均有所不同。为全面了解我国城市住宅室内环境空气 TVOCs 污染特征,本文通过文献检索的方式,在大量文献调研的基础上,总结了我国室内环境空气 TVOCs 的浓度特征及其主要来源。

1 检索方法与文献筛选

1.1 检索方法

检索科学网(web of science, WOS)、中国知网、维普网、万方数据平台数据库中 2000—2021 年 11 月公开发表的有关城市住宅室内 TVOCs 的文献资料,检索条件是:“TVOC”或“VOC”或“挥发性有机化合物(volatile organic compounds)”或“空气污染(air pollution)”或“空气质量(air quality)”和“住宅(dwelling)”或“室内(indoor)”或“室内环境(indoor environment)”或“居室(room)”或“来源(source)”,英文检索中均包含关键词“中国(China)”。

1.2 文献筛选

截至 2021 年 11 月,经主题词、关键词、篇名、摘

要分别检索后,共获得 5 403 篇文献资料(其中中文 2 309,英文 3 094 篇),排除标题或内容重复的研究,优先选用科学引文索引(science citation index, SCI)、工程索引(engineering index, EI)、中文核心收录的高水平研究文献,排除会议、标准、年鉴等文章;选用研究对象为城市住宅的文献,排除办公室、娱乐、购物等公共场所和农村住宅的文献;选用能够准确提取研究地区、样本量及浓度均值的文献,排除样本量信息不全的文献。最后剩余 48 篇文献纳入分析范围。

2 我国城市住宅室内 TVOCs 浓度特征

2.1 我国城市住宅室内 TVOCs 浓度总体特征

由于城市住宅室内 TVOCs 浓度受检测方法的影响,为使资料具有可比性,降低研究对象和检测方法对城市住宅室内 TVOCs 浓度的影响,通过对文献的全文信息和数据完整性进行筛选,选择研究对象均为装修完成时间在 12 个月之内的城市住宅,并且采用 GB/T 18883—2002《室内空气质量标准》中规定的 TVOCs 标准检测方法(热解吸/毛细管气相色谱法)进行的研究用于分析我国城市住宅室内 TVOCs 浓度特征(见表 1),这些城市住宅分布在我国西安、上海等 14 个城市,样本总量为 1 249。

分析结果表明,我国城市住宅室内 TVOCs 质量浓度(后称浓度)均值范围为 0.18~1.45 mg·m⁻³(表 1)。虽然表中所列举的城市在经济、环境、文化、气候等方面各有不同,但对比《室内空气质量标准》中的 TVOCs 浓度限值(0.6 mg·m⁻³),发现超标现象普遍存在,且某些地区超标现象严重。其中,重庆、大连和天津住宅室内 TVOCs 浓度均值分别为(1.45±1.37)、(1.21±1.15)、(1.20±1.35)mg·m⁻³,分别超标 2.42 倍、2.02 倍和 2.00 倍。按照当年的经济发展水平,重庆、大连、天津的国内生产总值(gross domestic product, GDP)在我国城市排名位次均比较靠前,说明城市经济发展水平或是影响室内环境空气 TVOCs 浓度的因素之一。这与其他研究的结论相似^[6-7]。分析经济发达地区城市住宅室内 TVOCs 浓度较高的原因可能是:一方面经济水平发达的地区,人均住宅面积较小,单位面积所用装修装饰材料量大,从而导致室内环境空气 TVOCs 浓度较高。有研究表明,居室人均达到一定面积,室内空气污染降低^[8]。另一方面,经济水平发达地区,工业、居民生活消耗量大,导致室外环境空气 TVOCs 浓度较高,从而使室外到室内的传输浓度增大^[9-10]。此外,2010—2019 年期间,表 1 中所列城

市住宅中室内 TVOCs 浓度均值为 $(0.56\pm0.11)\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 而 2000—2009 年室内浓度均值为 $(1.08\pm0.11)\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 近十年来我国城市住宅室内 TVOCs 浓度水平下降了 48.15%, 表明我国室内空气污染问题得到一定改善, 这可能与人们环保和健康意识的提高, 家装材料制造工艺水平的提高, 室内空气污染净化技术的普及等原因有关^[11-12]。

表 1 我国不同城市住宅室内 TVOCs 浓度

Table 1 Indoor TVOCs concentrations of residential buildings in different cities of China

研究地区	研究时间	检测户数	浓度均值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), $\bar{x}\pm s$	超标率/%	文献来源
西安	2019	21	0.59 ± 0.29	47.00	[11]
上海	2019	114	0.51 ± 0.32	24.20	[13]
烟台	2014.5—2014.8	50	0.20 ± 0.11	59.88	[14]
哈尔滨	2013.5—2018.3	396	0.41 ± 0.03	—	[15]
无锡	2013	15	0.63 ± 0.70	33.33	[16]
杭州	2012.9—2013.12	30	1.09 ± 1.02	69.40	[17]
广州	2010—2016	22	0.18	—	[18]
宁波	2010.3—2012.8	80	0.87 ± 0.68	40.00	[19]
成都	2007	200	0.83 ± 1.49	38.80	[20]
天津	2002.5—2004.11	136	1.20 ± 1.35	—	[4]
大连	2002.5—2004.11	91	1.21 ± 1.15	—	[4]
重庆	2002.5—2004.11	14	1.45 ± 1.37	—	[4]
长春	2002.5—2004.11	32	1.08 ± 0.60	—	[4]
石嘴山	2002.5—2004.11	48	0.73 ± 0.75	—	[4]

2.2 装修完工后不同时间 TVOCs 浓度特征

表 2 为我国城市住宅装修完工后不同时间室内 TVOCs 的浓度特征, 涉及北京、南京等 6 个城市。综合不同文献中的装修完工后不同时间跨度, 本文选用了研究文献中使用最多的时间跨度, 即 1~3、4~6、7~9、10~12 个月和大于 12 个月。对应的样本量分别是 1 596、1 606、617、1 020、394。

分析结果发现, 室内环境空气 TVOCs 浓度随装修完工时间的增长不断下降。其中, 装修完工后 4~6 个月, TVOCs 浓度下降幅度最大。4 个月之前浓度超标不多的地点(如长沙), 装修完工后 4~6 个月后浓度即可达标; 但 4 个月前浓度超标严重的地点(如北京), 装修完工后 12 个月后浓度仍处于标准以上。结果说明, 装修完工后延长入住时间可以降低室居住时内空气中 TVOCs 浓度, 但并不是去除室内 TVOCs 的最佳方法, 特别是对超标严重的地方。需要注意的是, 虽然随着时间的推移, 装修造成的空气污染程度减小, 但人们的生活行为(抽烟、烹饪等)所产生的挥发性有机物污染也不容忽视^[21-22]。

表 2 装修完工后不同时间室内 TVOCs 特征分析

Table 2 Indoor TVOCs concentrations at different time after decoration

城市	浓度均值/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), 均值(样本量)					文献来源
	1~3个月	4~6个月	7~9个月	10~12个月	大于12个月	
北京	2.64(887)	2.16(893)	1.17(362)	0.92(336)	—	[23]
南京	0.48(40)	0.38(43)	0.32(21)	0.29(13)	0.25(13)	[24]
广州	0.45(217)	0.26(224)	—	0.13(246)	0.11(216)	[25]
咸阳	0.33(234)	0.26(234)	0.12(234)	0.09(234)	—	[26]
银川	0.46(168)	0.27(174)	—	0.14(191)	0.12(165)	[27]
长沙	0.92(50)	0.47(38)	—	—	—	[28]

2.3 不同季节 TVOCs 浓度特征

表 3 为不同季节我国城市住宅室内 TVOCs 的浓度特征, 涵盖上海、杭州等 5 个城市, 春季、夏季、秋季和冬季的样本量分别为 280、1317、305 和 1276。

从表中可以看出, 虽然我国不同城市或地区住宅室内 TVOCs 的季节分布规律略有不同, 但总体呈现夏季高于冬季的现象。分析原因可能是由于这些城市处于温带季风气候区, 四季分明, 夏季气温高, 冬季气温低, 而温度是影响室内环境空气 TVOCs 浓度的主要因素之一, 温度越高, 越有利于 TVOCs 的挥发。虽然北方城市供暖会使室内气温升高, 但普遍温度还是低于夏季, 因此, 多数城市室内 TVOCs 浓度呈现夏季高于冬季的现象。需要注意的是, 检测时的浓度都是关闭门窗一段时间后进行的检测, 虽然夏季室内 TVOCs 浓度较高, 但夏季通风时间较长, 而冬季室内 TVOCs 浓度虽然低于夏季, 但由于天气寒冷, 通风时间明显缩短, 长时间不通风会造成室内浓度累积。因此, 冬季室内环境空气 TVOCs 浓度均值也处于较高水平, 其危害不容忽视。

2.4 不同居室 TVOCs 浓度特征

为进一步研究我国城市住宅中不同居室 TVOCs 的特征, 将已查询到文献资料中家庭居室划分为客厅、卧室、书房、厨房四类。表 4 为我国城市住宅不同居室 TVOCs 的特征, 涵盖北京、天津等 9 个城市, 客厅、卧室、书房、厨房的样本量分别为 736、1657、591 和 477。从表中可以看出, 所研究城市不同居室环境空气 TVOCs 都有不同程度超标, 超标率最高达 77.50%。虽然不同城市同类型居室中 TVOCs 浓度差别较大, 但对比不同居室内的浓度值发现, 卧室和书房中 TVOCs 浓度相对客厅来说普遍偏高。这可能是由于卧室和书房面积较小、封闭性好、通风不佳, 且装修中使用的木制和漆器材料较多所致。此外, 厨房中 TVOCs 浓度也较高, 这可能是由于厨房中的燃料燃烧、烹饪油烟等造成的。因此, 家庭居室内 TVOCs 污染应给予重视, 特别是卧室、书房和厨房。

表 3 不同季节我国城市住宅室内 TVOCs 特征

Table 3 Indoor TVOCs characteristics of residential buildings in different cities of China in different seasons

城市	春季			夏季			秋季			冬季			文献来源
	样本量	浓度均值 ^a	超标率/%	样本量	浓度均值 ^a	超标率/%	样本量	浓度均值 ^a	超标率/%	样本量	浓度均值 ^a	超标率/%	
乌鲁木齐、哈密	—	—	—	54	0.88	—	54	0.17	—	54	0.14	—	[29]
成都	200	1.55	32.50	200	1.35	46.60	200	0.92	50.00	200	0.47	45.00	[20]
杭州	—	—	—	955	0.69	—	—	—	—	955	0.32	—	[30]
上海	80	0.37	11.80	108	0.60	41.30	51	0.48	5.60	67	0.37	11.80	[13]

[注] a: 单位为 mg·m⁻³。

表 4 我国部分城市不同居室 TVOCs 特征

Table 4 Indoor TVOCs characteristics of different rooms in residential buildings in different cities of China

研究城市	客厅			卧室			书房			厨房			文献来源
	样本量	浓度均值 ^a	超标率/%	样本量	浓度均值 ^a	超标率/%	样本量	浓度均值 ^a	超标率/%	样本量	浓度均值 ^a	超标率/%	
北京	10	2.10	—	10	1.91	—	10	1.83	—	10	1.86	—	[5]
天津	16	0.60	41.67	44	0.59	27.27	—	—	—	12	0.13	42.86	[31]
广东	126	0.14	37.30	443	0.14	43.57	70	0.21	65.28	70	0.19	51.43	[32]
咸阳	234	0.35	52.14	548	2.71	61.07	234	2.12	44.16	234	1.10	38.89	[26]
杭州	137	2.44	59.10	280	3.39	—	119	2.58	69.50	119	2.11	51.30	[33]
南宁	42	0.04	71.43	42	0.05	26.19	42	0.05	23.81	—	—	—	[34]
湘潭	15	0.23	13.30	22	0.34	27.30	15	0.31	26.70	15	0.18	20.00	[35]
长沙	80	0.44	3.50	80	0.75	70.00	80	0.82	77.50	—	—	—	[36]
上海	76	0.48	21.10	188	0.48	20.70	21	0.52	28.60	17	0.80	57.10	[13]

[注] a: 单位为 mg·m⁻³。

3 室内 TVOCs 来源

室内环境空气 TVOCs 的污染来源直接决定了污染物的种类和浓度,也是防控的关键。因此,要有效防控室内 TVOCs 污染,需要对污染物来源进行科学与系统的分析。目前,国内外对污染来源的研究主要集中于两个方面,一是源分类,即通过不同标准定性判断室内环境中 TVOCs 的来源类型^[17, 37];另一是源解析,即在源分类基础上,定量计算各类污染源的贡献^[38-39]。

在源分类方面,根据污染源来源位置的不同,将 TVOCs 的来源分为室内源和室外源。室外污染源对室内 TVOCs 的贡献大小常用室内外相关污染物的浓度比值 (I/O 值) 来表示^[40]。目前,查到的该方面的研究有一些,例如 Huang 等^[41]分析我国西北部地区室内 TVOCs 的来源,发现正己烷、丙烯等某些污染物的 I/O 小于 1,这些 I/O 值小于 1 的污染物主要源自室外燃料的挥发和汽车尾气的排放;六氯-1,3-丁二烯和 1,2,4-三氯苯的 I/O 比分别高达 13 和 12,这些 I/O 值大于 1 的污染物主要源自室内漂白剂、除臭剂等生活用品的使用。但与室内其他污染物(如颗粒物)相比,TVOCs 方面的 I/O 值研究相对较少^[42-43],且 I/O 值差别较大,不足以说明室外源对室内 TVOCs 的贡献。另外,气体和颗粒物在物理化学特性上都有所不同,颗粒物的 I/O

也不适用于 TVOCs。因此,为更深入了解室外源对室内 TVOCs 的影响,TVOCs 的 I/O 值有待进一步研究。

在源解析方面,通常利用主成分分析(principal component analysis, PCA)模型、正定矩阵因子分析模型(positive matrix factorization, PMF)模型、PCA/绝对主成分得分 [(absolute principal component score), PCA/APCS] 模型、条件概率函数 (conditional probability function, CPF) 等方法定量分析各污染源的贡献率。表 5 为对我国城市住宅环境空气 TVOCs 浓度有影响的污染源汇总。室外源中,TVOCs 释放量受到多种因素的影响,主要包括交通尾气、燃料燃烧、工业废气等,呈现出排放量多且排放源分散的特点。室内源中,在住宅室内装修完成初期,主要污染源以装修建筑材料为主,包括各类板材、涂料、有机溶剂等^[39]。对相关文献分析发现,室内源源解析的研究对象仍以装修完成初期的住宅为主。装修完工后,可通过通风或技术手段降低来自装修装饰材料的室内 TVOCs 的浓度;但在人员入住后,人类活动就成了室内 TVOCs 的主要来源^[44-45],因此,为更有效地控制室内 TVOCs 污染,需要对人类活动(如烹饪、吸烟、清洁等)、人体散发(如呼吸、皮肤分泌等)等 TVOCs 来源进行进一步研究。

表 5 影响室内环境空气 TVOCs 浓度的污染源分类

Table 5 Classification of pollution sources affecting indoor TVOCs concentration

研究地区	研究方法	污染源位置	污染源(贡献比例/%)	文献来源
上海	PMF	室外源	交通尾气(25)、工业溶剂(17)、燃油蒸发(15)、涂料溶剂(15)、工业排放(12)、生物质燃料燃烧(9)、煤炭燃烧(7)	[46]
南京	PCA/APCS、CPF	室外源	交通尾气(33.1)、燃料挥发(25.8)、工业排放(23.2)、溶剂挥发(8.1)、植物排放(9.7)	[47]
北京	PCA	室内源	地板材料(30)、木板和聚氯乙烯地面材料(17)、墙面装饰材料(10)、黏合剂(9)、涂料(5)	[38]
香港	PCA	室内源	建筑材料(77)、空气清新剂(8)、家用产品(6)、樟脑丸(5)、涂漆木制品(4)	[39]

4 结论

2000 年至今,我国关于室内 TVOCs 的相关研究逐步开展,二十多年来的研究发现,我国城市住宅室内环境空气 TVOCs 呈现分布范围广、平均浓度高、超标现象普遍的特征。浓度值与城市经济发展水平、通风时间、气候温度、生活方式、室外浓度等有关。虽然环保材料使用增加,但仍需注意各种材料挥发 TVOCs 的累积效应。延长装修完工后入住时间虽可降低室内 TVOCs 水平,但并不是有效去除室内 TVOCs 的最佳方法,特别是针对超标严重的区域。降低室内环境 TVOCs 浓度,还需从污染源入手,尽量减少装修材料的使用,并改善生活方式,减少 TVOCs 的排放。对于室内环境空气 TVOCs 的研究,还需在 I/O 值和对室内人类活动等污染来源解析方面进行更深入的研究。

参考文献

[1] CRUMP D. Strategies and protocols for indoor air monitoring of pollutants[J]. *Indoor Built Environ*, 2001, 10(3/4): 125-131.

[2] SHRUBSOLE C, DIMITROULOPOULOU S, FOXALL K, et al. IAQ guidelines for selected volatile organic compounds (VOCs) in the UK[J]. *Build Environ*, 2019, 165: 106382.

[3] SOREANU G, DIXON M, DARLINGTON A. Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants-A mini-review[J]. *Chem Eng J*, 2013, 229: 585-594.

[4] 徐东群, 尚兵, 曹兆进. 中国部分城市住宅室内空气中重要污染物的调查研究[J]. *卫生研究*, 2007, 36(4): 473-476.

XU D Q, SHANG B, CAO Z J. Investigation of key indoor air pollutants in residence in part of the cities in China[J]. *J Hyg Res*, 2007, 36(4): 473-476.

[5] LIANG W, YANG C, YANG X. Long-term concentrations of volatile organic compounds in a new apartment in Beijing, China[J]. *Build Environ*, 2014, 82: 693-701.

[6] PEI J, YIN Y, LIU J. Long-term indoor gas pollutant monitor of new dormitories with natural ventilation[J]. *Energy Build*, 2016, 129: 514-523.

[7] PEI J, YIN Y, LIU J, et al. An eight-city study of volatile organic compounds in Chinese residences: compounds, concentrations, and characteristics[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 698: 134137.

[8] 徐业林, 张留喜, 吕建萍, 等. 住宅居室容积与空气中甲醛含量的调查分析[C]//中华预防医学会. 第七届室内空气质量监测和净化技术学术研讨会论文集. 常德: 中华预防医学会, 2009.

XU Y L, ZHANG L X, LV J P, et al. Investigation and Analysis on the volume of residential room and the content of formaldehyde in the air[C]// Chinese Preventive Medicine Association. Symposium on indoor air

pollution monitoring and purification technology. Changde: Chinese Preventive Medicine Association, 2009.

[9] MOZAFFAR A, ZHANG Y L. Atmospheric volatile organic compounds (VOCs) in China: a review[J]. *Curr Pollut Rep*, 2020, 6(3): 250-263.

[10] MULLER CO, YU H, ZHU B. Ambient Air Quality in China: the impact of particulate and gaseous pollutants on IAQ[J]. *Procedia Eng*, 2015, 121: 582-589.

[11] 赵西平, 王嘉明, 金世杰, 等. 西安地区新装修住宅冬季室内有害气体检测分析研究[J]. *家具与室内装饰*, 2021(6): 118-123.

ZHAO X P, WANG J M, JIN S J, et al. Study on noxious fumes analysis for newly decorated house in Xi'an in winter[J]. *Furnit Inter Decor*, 2021(6): 118-123.

[12] 刘建明, 刘胜楠, 王晨晨, 等. 室内挥发性有机物处理技术的研究和应用[J]. *环境工程*, 2018, 36(5): 73-77.

LIU J M, LIU S N, WANG C C, et al. Research and application of indoor volatile organic compounds[J]. *Environ Eng*, 2018, 36(5): 73-77.

[13] 唐巍巍, 李学辉, 钟义林, 等. 上海市居民住宅室内空气典型VOCs浓度水平与污染特征[J]. *环境化学*, 2021, 40(4): 1038-1047.

TANG W B, LI X H, ZHONG Y L, et al. Study on concentration levels and pollution characteristics of typical VOCs in indoor air of residential buildings in Shanghai[J]. *Environ Chem*, 2021, 40(4): 1038-1047.

[14] 于桂梅, 徐建军, 徐迎春, 等. 烟台市新装修住宅室内空气污染特征分析[J]. *环境卫生学杂志*, 2016, 6(6): 412-414.

YU G M, XU J J, XU Y C, et al. Characteristics of indoor air of newly decorated apartments in Yantai city[J]. *J Environ Hyg*, 2016, 6(6): 412-414.

[15] ZHANG Z F, ZHANG X, ZHANG X M, 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.

[16] 陈茸, 刘斌, 张琦. 2009—2013年无锡市新装修居室空气污染状况分析[J]. *环境卫生学杂志*, 2016, 6(1): 82-84.

CHEN R, LIU B, ZHANG Q. Air pollutants in newly decorated rooms during 2009-2013 in Wuxi city[J]. *J Environ Hyg*, 2016, 6(1): 82-84.

[17] 莫菲菲. 居室室内空气中TVOC和甲醛的污染类型及规律[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

MO F F. Pollution patterns and characteristics of TVOC and HCHO in residential indoor air[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[18] 陈海波, 杨华秋, 刘映, 等. 广州市室内空气污染物实测及健康参考值研究[J]. *建筑节能*, 2018, 46(9): 83-86.

CHEN H B, YANG H Q, LIU Y, et al. Measurement of indoor air pollutants and health reference value in Guangzhou[J]. *Build Energy Conserv*, 2018, 46(9): 83-86.

[19] 黄家钊, 王炜, 陈郁, 等. 宁波市新装修住宅室内空气质量调查[J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(11): 1049-1050.

HUANG J D, WANG W, CHEN Y, et al. Investigation on indoor air quality of newly decorated houses in Ningbo city[J]. *J Environ Health*, 2012, 29(11): 1049-1050.

[20] 方正, 余海洋, 张毅, 等. 2007年成都新装修住宅空气质量检测结果分

- 析[J]. 中国测试, 2009, 35(3): 81-83.
- FANG Z, YU H Y, ZHANG Y, et al. Test result analysis of indoor air quality for newly decorative residences of Chengdu in 2007[J]. *China Meas Test*, 2009, 35(3): 81-83.
- [21] WANG B, LEE S C, HO K F. Characteristics of carbonyls: concentrations and source strengths for indoor and outdoor residential microenvironments in China[J]. *Atmos Environ*, 2007, 41(13): 2851-2861.
- [22] HUANG Y, HO S S H, HO K F, et al. Characteristics and health impacts of VOCs and carbonyls associated with residential cooking activities in Hong Kong[J]. *J Hazard Mater*, 2011, 186(1): 344-351.
- [23] 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]. *Environ Chem*, 2016, 35(10): 2191-2196.
- [24] 刘凯, 陈晓东, 林萍. 居室装修后甲醛和TVOC污染状况及对成人健康影响的调查[J]. *江苏预防医学*, 2005, 16(4): 12-14, 53.
- LIU K, CHEN X D, LIN P. Study on the situation of formaldehyde & TVOC's pollution to the air of decorated indoors and its effect to adult on health[J]. *Jiangsu J Prev Med*, 2005, 16(4): 12-14, 53.
- [25] 刘汝青, 杜德荣, 蔡承铿, 等. 广州市装修居室室内空气污染状况及其对人群健康的影响[J]. *环境与健康杂志*, 2010, 27(4): 361.
- LIU R Q, DU D R, CAI C K, et al. Indoor air pollution in decorated rooms and its impact on population health in Guangzhou[J]. *J Environ Health*, 2010, 27(4): 361.
- [26] 孟娟娟, 周晶, 齐宝宁. 2017年咸阳市新装修住宅中甲醛和总挥发性有机物污染状况调查[J]. *职业与健康*, 2019, 35(16): 2259-2262.
- MENG J J, ZHOU J, QI B N. Investigation on pollution status of formaldehyde and total volatile organic compounds in newly renovated houses in Xianyang city in 2017[J]. *Occup Health*, 2019, 35(16): 2259-2262.
- [27] 郭宁晓, 马福海, 舒学军, 等. 232户新装修居室空气污染状况及对居民健康的影响[J]. *宁夏医学院学报*, 2008, 30(4): 452-454.
- GUO N X, MA F H, SHU X J, et al. Investigation of indoor air quality and health effects in newly decorated residences[J]. *J Ningxia Med Coll*, 2008, 30(4): 452-454.
- [28] 周纯良, 张恒娇, 李原浩, 等. 长沙市新装修居室空气中总挥发性有机化合物污染状况[J]. *中国卫生工程学*, 2008, 7(5): 292-293.
- ZHOU C L, ZHANG H J, LI Y H, et al. Pollution status of total volatile organic compounds in the air of newly decorated rooms in Changsha[J]. *Chin J Public Health Eng*, 2008, 7(5): 292-293.
- [29] 杨晓琴, 区涌, 刘勇, 等. 新疆54家居室装修后不同季节的室内空气污染状况调查[J]. *地方病通报*, 2008, 23(5): 6-8.
- YANG X Q, OU Y, LIU Y, et al. Investigation on indoor air pollution in 54 decorated houses in different seasons in Xinjiang[J]. *Endem Dis Bull*, 2008, 23(5): 6-8.
- [30] 杜荣光, 齐冰, 黄洁. 杭州市区室内主要空气污染现状分析[J]. *浙江气象*, 2011, 32(3): 24-27.
- DU R G, QI B, HUANG J. Analysis of main indoor air pollution in Hangzhou[J]. *J Zhejiang Meteorol*, 2011, 32(3): 24-27.
- [31] 李赵相, 刘凤东, 王冬梅, 等. 装饰装修住宅室内有机污染物调查及防治研究[J]. *四川环境*, 2016, 35(6): 1-7.
- LI Z X, LIU F D, WANG D M, et al. The investigation and prevention research on the indoor organic pollutants in decorated houses[J]. *Sichuan Environ*, 2016, 35(6): 1-7.
- [32] 张淑娟, 苏志锋, 林泽健, 等. 广东省室内空气污染现状及特征分析[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(2): 139-142.
- ZHANG S J, SU Z F, LIN Z J, et al. Research of actuality and characters of indoor air pollution in Guangdong province[J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2011, 50(2): 139-142.
- [33] 刘建磊, 白鸽, 陈洁, 等. 城市新装修家庭TVOC的污染现状以及影响因素分析[J]. *科学通报*, 2011, 56(25): 2683-2689.
- LIU J L, BAI G, CHEN J, et al. Total volatile organic compound concentration and its influencing factors in urban indoor air after decoration[J]. *Chin Sci Bull*, 2011, 56(25): 2683-2689.
- [34] 蒙冕武, 齐丛亮, 刘庆业, 等. 南宁市典型居室内空气污染物污染水平调查[J]. *环境卫生学杂志*, 2015, 5(2): 99-102.
- MENG M W, QI C L, LIU Q Y, et al. Indoor air pollution of typical apartment in Nanning[J]. *J Environ Hyg*, 2015, 5(2): 99-102.
- [35] 欧阳辉. 室内环境空气污染现状及防治策略探讨[J]. *节能与环保*, 2020(S1): 36-37.
- OUYANG H. Discussion on the current situation and prevention strategy of indoor air pollution[J]. *Energy Conserv Environ Prot*, 2020(S1): 36-37.
- [36] 戴芳, 何静, 吴未红. 长沙市装修居室室内空气污染状况调查[J]. *环境与健康杂志*, 2008, 25(8): 732-733.
- DAI F, HE J, WU W H. Investigation on indoor air pollution of decorated rooms in Changsha city[J]. *J Environ Health*, 2008, 25(8): 732-733.
- [37] NORRIS C, FANG L, BARKJOHN K K, et al. Sources of volatile organic compounds in suburban homes in Shanghai, China, and the impact of air filtration on compound concentrations[J]. *Chemosphere*, 2019, 231: 256-268.
- [38] LIU Q, LIU Y, ZHANG M. Personal exposure and source characteristics of carbonyl compounds and BTEXs within homes in Beijing, China[J]. *Build Environ*, 2013, 61: 210-216.
- [39] GUO H. Source apportionment of volatile organic compounds in Hong Kong homes[J]. *Build Environ*, 2011, 46(11): 2280-2286.
- [40] SON B, BREYSE P, YANG W. Corrigendum to "Volatile organic compounds concentrations in residential indoor and outdoor and its personal exposure in Korea" [Environ. Int. 29 (2003) 79-85][J]. *Environ Int*, 2004, 29(8): 1109.
- [41] HUANG Y, SU T, WANG L, et al. Evaluation and characterization of volatile air toxics indoors in a heavy polluted city of northwestern China in wintertime[J]. *Sci Total Environ*, 2019, 662: 470-480.
- [42] 邹佳乐, 林尧林, 杨薇. 中国近年PM_{2.5}污染研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(3): 357-361, 366.
- ZOU J L, LIN Y L, YANG W. Advances on PM_{2.5} pollution research in China in recent years[J]. *Environ Pollut Control*, 2019, 41(3): 357-361, 366.
- [43] SHAO Z, BI J, MA Z, et al. Seasonal trends of indoor fine particulate matter and its determinants in urban residences in Nanjing, China[J]. *Build Environ*, 2017, 125: 319-325.
- [44] CHENG J H, LEE Y S, CHEN K S. Carbonyl compounds in dining areas, kitchens and exhaust streams in restaurants with varying cooking methods in Kaohsiung, Taiwan[J]. *J Environ Sci*, 2016, 41: 218-226.
- [45] WANG H, XIANG Z, WANG L, et al. Emissions of volatile organic compounds (VOCs) from cooking and their speciation: a case study for Shanghai with implications for China[J]. *Sci Total Environ*, 2018, 621: 1300-1309.
- [46] CAI C, GENG F, TIE X, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China[J]. *Atmos Environ*, 2010, 44(38): 5005-5014.
- [47] 杨辉, 朱彬, 高晋徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J]. *环境科学*, 2013, 34(12): 4519-4528.
- YANG H, ZHU B, GAO J H, et al. Source apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in summer[J]. *Environ Sci*, 2013, 34(12): 4519-4528.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 陈姣, 王晓宇)