

中国室内挥发性有机物污染特征

刘舒婷^{1,2}, 黄宇², 崔龙², 薛永刚², 程燕¹

1. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院 环境科学与工程系, 西安 710049

2. 中国科学院地球环境研究所 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061

摘要: 近年来室内空气污染问题频发, 已引起全社会的广泛关注。挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是室内空气的主要污染物之一, 其成分复杂, 来源广泛, 严重威胁人体健康。本文综述了中国近十年来室内 VOCs 在来源、浓度水平、影响因素及健康评价方面的研究进展。研究表明, 室内建筑装修材料、人类活动及室外污染等来源都会影响 VOCs 的室内浓度; 中国住宅内甲醛、苯等 VOCs 污染普遍存在, 家具市场是甲醛污染最高的公共场所; VOCs 浓度受到温湿度、通风和装修时间等因素影响; 中国室内部分 VOCs 对人体健康影响评估值超过美国环保署可接受水平。调查更全面的室内 VOCs 数据, 探索对各类因素影响机制, 提出更有效降低 VOCs 对人体健康影响的措施将是未来室内空气治理重点发展方向。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 浓度特征; 来源; 健康影响评估

Characteristics of indoor volatile organic compounds in China

LIU Shuting^{1,2}, HUANG Yu², CUI Long², XUE Yonggang², CHENG Yan¹

1. Department of Environmental Science and Technology, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract: Background, aim, and scope In recent years, indoor air pollution is getting more and more serious, which has been paid more attention by the whole society. Volatile organic compounds (VOCs) which are the most abundant indoor pollutants can be emitted by a wide range of sources and it is harmful for human health. The aim of this paper is making an overview of advance in characteristics of indoor VOCs in China. **Materials and methods** This paper reviews studies over the last decades on the characteristics of indoor VOCs concentration, impact factors and human health risk assessment. **Results** The building materials and decorations, the human activities and outdoor pollution are the main sources of indoor VOCs. Formaldehyde, benzene, toluene and xylenes of some studies in China remained at a high percentage of total VOCs concentration in brand new decorated residences that had exceeded the national indoor air quality standard. Meanwhile, the public places, such as furniture market, shopping mall and hotel have seriously air pollution problems. Some researches

收稿日期: 2020-01-16; 录用日期: 2020-04-30; 网络出版: 2020-05-11

Received Date: 2020-01-16; **Accepted Date:** 2020-04-30; **Online first:** 2020-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21107084)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (21107084)

通信作者: 程燕, E-mail: chengyan@xjtu.edu.cn

Corresponding Author: CHENG Yan, E-mail: chengyan@xjtu.edu.cn

引用格式: 刘舒婷, 黄宇, 崔龙, 等. 2021. 中国室内挥发性有机物污染特征 [J]. 地球环境学报, 12(3): 243–255.

Citation: Liu S T, Huang Y, Cui L, et al. 2021. Characteristics of indoor volatile organic compounds in China [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(3): 243–255.

indicated that, health effect of formaldehyde, 1,3-dibutene and other VOCs were calculated by the cancer and non-cancer risk calculation model according to USEPA, resulting in higher than the acceptable risk level.

Discussion Indoor VOCs are influenced by temperature and relative humidity variations, ventilation conditions, and the decoration time. Seasonal fluctuations that change with temperature and humidity in formaldehyde levels also occur, and ventilation is the most efficient way to reduce the VOCs concentration. After one year of the decoration, the formaldehyde concentration was still above the national level, which the concentration range of BETX are larger than, because the most VOCs emitted within the first month after decoration are from the liquid materials, and solid materials dominate the emission after the liquid material VOCs have evaporated.

Conclusions Indoor VOCs pollution in China is serious issue, for a large number of Chinese occupants continually encounter multiple sources of VOCs. The concentration of indoor VOCs is impacted by many kinds of factors, which don't have a clear relationship to explain them. Even the inhalation-related health risks of VOCs lack the studies to improve the accuracy. **Recommendations and perspectives** The researches of the air pollution about the more species of VOCs, such as carbonyls which may be related to human activities, and more effective control measures is needed. Consequently, further study with larger sample size of indoor VOCs would help support effective health risk management.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); concentration characteristics; source; health risk assessment

室内空气污染物主要包括氮氧化物 (NO_x)、碳氧化物 (CO 和 CO_2)、颗粒物 (particulate matter, PM) 和挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, VOCs) 等。其中 VOCs 是众所周知对人体健康有很大影响的室内污染物之一，对室内空气品质 (indoor air quality, IAQ) 起着重要作用 (Wang et al, 2007)。室内 VOCs 种类繁多，检测浓度大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 VOCs 已超过 350 种 (Jones, 1999)。室内空气会受到自室外大气污染、室内建筑装修污染及人类活动污染等的影响，其中建筑材料、家具材料、生活消费品、室内人类活动、室外污染物等都是室内 VOCs 的主要来源 (Shin and Jo, 2013; Liu et al, 2016)。更值得关注的是人类大约有 80% 以上的时间都在室内度过，长期暴露于室内的 VOCs 污染环境中可引起急性和慢性健康疾病，如感觉刺激、神经系统损伤、哮喘和癌症等病症，其中甲醛、苯、1,3-丁二烯等室内常见的 VOCs 已被美国环境保护署 (USEPA) 认定为对人体有明确的致癌性的一类致癌物 (Zhou et al, 2011)。此外，长期暴露于 VOCs 浓度过高的室内环境中还会引发病态建筑综合征 (sick building syndrome, SBS)，产生易怒、嗜睡、注意力不集中等症状 (Mølhave, 2003)。人们每天都会接触到各类 VOCs 但对其潜在危害性却知之甚少，所以室内空气污染对

人体健康的影响评估也是国内外研究关注的重点。

室内空气污染问题已经成为全社会亟待解决的问题，中国室内 VOCs 污染研究相比国外起步较晚，目前在污染源分析与控制，室内污染物的检测方法，室内空气质量与健康影响评估等方面有部分研究。本文基于中国室内空气质量标准，归纳了中国近十年关于室内 VOCs 方面的研究，从室内挥发性有机物的种类、来源着手，总结中国不同城市及不同室内公共场所的 VOCs 浓度特征的研究进展，关注温湿度、通风、装修时间等因素对室内 VOCs 浓度影响，探讨暴露于 VOCs 环境中的人体健康影响评估方法与进展，最后展望了未来室内空气污染研究的发展趋势。

1 室内 VOCs 主要来源

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是一类具有挥发性的有机化合物的统称。世界卫生组织 (WHO) 定义 VOC 是室温下饱和蒸气压超过 133.322 Pa、沸点在 50—260℃ 的易挥发有机物 (WHO, 2010)。中国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 中的定义是：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物 (国家质量监督检验

检疫总局等, 2002)。根据 VOCs 化学结构的不同可划分为烷类、芳烃类、烯类、卤烃类、酯类、醛类、酮类、醚类等(赵金镯, 2004)。

在室内环境中, VOCs 的排放源是多种多样的。根据国内对室内环境污染的研究, 将室内 VOCs 的来源主要归纳为三个方面: 室外来源污染、室内建筑装修材料污染、人类活动污染(表 1)。

1.1 室外来源污染

室外环境是室内空气污染研究不可忽略的重要来源。室内空气中的 VOCs 浓度会受到包括交通排放、燃料挥发、工业排放和溶剂挥发等多种室外来源的影响(Liu et al, 2008)。室外汽车尾气中燃料不完全燃烧会产生不饱和烃类和苯, 燃料挥发会产生以异戊烷为标志的烷烃类 VOCs, 溶剂挥发主要以醇、醚、酯和苯系物等物质为主, 工业过程易产生卤代烃(李博伟等, 2017)。这些室外的 VOCs 通过自然通风、机械通风、渗透作用进入到室内聚积起来(Leung, 2015)。Duan et al (2016) 在北京住宅研究发现含氯的 VOCs 室内浓度高于室外浓度, 而含氯 VOCs 常源于工业过程, 说明室内部分 VOCs 主要源于室外。除了通过化合物种类判断室外来源, 也常用室内和室外 VOCs 浓度比值 I/O 判别, I/O 比值越大, 室内来源影响越大(Leung, 2015)。Huang et al (2019) 分析室内与室外的 I/O 比值发现, 氯化化合物如六氯-1,3-丁二烯、1,2,4-三氯苯、1,1,2-三氯乙烷和 1,2-二氯苯的 I/O 比最高, 分别为 13、12、6, 这些比值均大于 1 的化合物主要来自室内的漂白剂和厕所除臭剂等生活用品, 而二硫化碳、正己烷、丙烯和 1,3-丁二烯的 I/O 小于 1, 说明这些 VOCs 主要来源于室外。

1.2 室内建筑装修材料污染

建筑材料包括砖瓦、水泥、混凝土、石材等, 装修材料包括人造板材、涂料、油漆、黏合剂等, 二者都对室内的空气质量有重要影响(Missia et al, 2010)。建筑装修材料主要是以甲醛、芳香烃等化合物的排放为主, 使得新装修的室内环境容易 VOCs 超标(Chang et al, 2017)。人造板广泛应用于室内, 释放出的 VOCs 有甲醛、苯、二甲苯、甲基戊烷、乙烷、 α -蒎烯等 VOCs(He et al, 2012)。装修使用的涂料油漆等溶剂的芳香烃排放量占比高, Wang et al (2014) 在研究中发现家

用涂料的芳香烃排放占比高达 97.3%, 其中二甲苯占 56.3%, 其次是乙苯 19.3% 和甲苯 1.8%。其次装修过程中常使用的胶黏剂也是室内甲醛、苯、甲苯、二氯乙烷等 VOCs 严重超标的原因之一(宁占武等, 2008)。作为家庭装饰的地毯也会因为其制造工艺中的化学产品残留释放到室内环境中, 成为室内 VOCs 重要释放源之一(李新, 2004)。

1.3 人类活动污染

使用生活用品, 吸烟、做饭以及人体新陈代谢等与人类活动相关的污染来源都会对室内的 VOCs 浓度产生影响。人类活动所需的生活用品包括清洁剂、除臭剂、杀虫剂、化妆品等家用化学品, 以及复印机等电器。Guo (2011) 在香港的室内排放源研究中得到空气清新剂($8\% \pm 4\%$)、清洁用品和个人护理产品等家居用品($6\% \pm 2\%$)人类活动相关的排放源, 会释放出大量的 VOCs, 如柠檬烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、乙醛、丙酮和乙醇。柠檬烯等这些芳香萜烯会与室内的臭氧发生反应, 产生甲醛等二次污染物(Nazaroff and Weschler, 2004)。室内常见的樟脑丸会造成室内甲醛、乙醛、甲苯、二氯甲烷、二氯苯等化合物的超标(Duan et al, 2014)。办公室常用的激光打印机在运行时会产生甲苯、乙苯、二甲苯、苯乙烯等对健康有影响的 VOCs, 潘祥凯等(2017)研究发现打印机在工作室 TVOC 浓度高达 $2380 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 远超国家标准 $600 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在室内焚香和吸烟是 VOCs 的重要室内空气污染源之一。中国部分住宅有焚香的习惯, 会造成苯、甲苯、氯甲烷和二氯甲烷的浓度显著增加(Lee and Wang, 2004)。Wang et al (2012) 在模拟室内环境仓中检测到室内吸烟产生的 VOCs 中最丰富的是甲苯($36—120 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 其次是苯($26—81 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。室内做饭烹调过程中会产生大量的甲醛、乙醛、苯、甲苯等 VOCs, 其中乙烷、乙烯、乙炔等 C₂ 化合物是由于肉类、油脂、木炭不完全燃烧而产生的(Huang et al, 2011)。人类可以显著影响室内 VOCs 组成和室内环境中的氧化能力。人类代谢排放会产生如异戊二烯、甲醇、乙醇、丙酮和醋酸等 VOCs(Stönnér et al, 2018)。Liu et al (2016) 研究发现人体表面的反应对室内 VOCs 浓度的贡献高达 40%, 并且在通风良好的室内环境中, 人排放的 VOCs 占主导地位, 约占总体的 57%(Tang et al, 2016)。

表 1 室内 VOCs 主要来源
Tab. 1 The main source of indoor VOCs

来源 Sources	污染源示例 Example	主要化合物 Main compounds	参考文献 Reference
室外来源 Outdoor	交通、燃料、工业排放等 Transport, fuel, industrial emission	乙烯、苯、异戊烷、卤代烃 Ethylene, benzene, isopentane, halohydrocarbon	李博伟等, 2017 (Li B W et al, 2017)
	涂料 Paint	甲苯、二氯甲烷、丙二氯、醇、酯、醚、酮 Toluene, dichloromethane, propylene chloride, alcohols, ethers, ketone	Wang et al, 2014
建筑装修材料 Building decoration materials	人造板 Wood-based panel	甲醛、苯、二甲苯、甲基戊烷、乙烷、 α -蒎烯 Formaldehyde, benzene, xylene, methylpentane, ethane, α -pinene	He et al, 2012
	胶黏剂 Adhesive	甲醛、苯、甲苯、二氯乙烷 Formaldehyde, benzene, toluene, dichloroethane	(Ning Z W et al, 2008)
	地毯 Carpet	甲醛、苯乙烯 Formaldehyde, styrene	宁占武等, 2008 (Li X, 2004)
	空气清新剂 Air freshener	柠檬烯、乙醇、丙酮、 α -蒎烯、 β -月桂烯、甲苯、乙苯、己烷、癸烷 Limonene, ethyl alcohol, acetone, α -pinene, β -myrcene, toluene, ethylbenzene, hexane, decane	Guo, 2011; Steinemann, 2015
	打印机 Printer	甲苯、乙苯、二甲苯、苯乙烯 Toluene, ethylbenzene, xylene, styrene	Lee et al, 2001a; Kagi et al, 2007
	烹饪 Cooking	丙烷、丁烷、异丁烷、乙醛、丙烯醛、苯、甲苯 Propane, butane, iso-butane, acetaldehyde, acrolein, benzene, toluene	Wang et al, 2017; Huang et al, 2011
人类活动 Human activity	吸烟 Smoking	1,3-丁二烯、苯、甲苯 1,3-butadiene, benzene, toluene	Wang et al, 2012
	人体代谢活动 Metabolic activity	甲醇、乙醇、丙酮、醚、醋酸 Methyl alcohol, ethanol, acetone, ethers, acetic acid	Tang et al, 2016; Stönnér et al, 2018

2 中国室内 VOCs 浓度特征

中国室内空气污染研究始于 20 世纪 70 年代, 目前对于部分 VOCs 浓度已经有了明确的国家标准。中国现行的室内空气质量适用标准是《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002), 明确规定了 VOCs 浓度: 室内甲醛浓度 1 h 平均值 $\leq 0.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 苯浓度 1 h 平均值 $\leq 0.11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 甲苯浓度 1 h 平均值 $\leq 0.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 二甲苯浓度 1 h 平均值 $\leq 0.20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 总挥发性有机物浓度 8 h 平均值 $\leq 0.60 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (国家质量监督检验检疫总局等, 2002)。室内 VOCs 污染来源广, 变化复杂, 且中国地域广阔, 不同室内类型, 不同城市的室内环境问题都有差异。目前研究重点关注住宅环境 VOCs 浓度水平, 部分研究也聚焦在公共场所, 如办公室、宾馆、商场、地铁等室内公共空间环境的 VOCs 浓度变化, 并且通过浓度分析对比发现温湿度、通风、装修后的时间长短对 VOCs 有显著影响。本节将从室内 VOCs 浓度水平和影响室

内 VOCs 浓度的因素两个方面综述中国室内 VOCs 浓度特征。

2.1 住宅和公共场所 VOCs 浓度水平

2.1.1 住宅

从化合物浓度水平来看, 中国室内 VOCs 整体污染严重。表 2 总结了 2000—2017 年部分城市住宅室内甲醛、苯、甲苯、二甲苯和 TVOC 的浓度。甲醛浓度范围变化较大, 同一研究中最高浓度与最低浓度相差几十倍或者上百倍, 浓度受到装修的影响较为显著。西安市住宅甲醛污染最严重, 有 83.6% 的房间甲醛超标, 平均浓度为 $(160 \pm 70) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于国家标准 (Chang et al, 2017)。Huang et al (2019) 检测的西安市 11 间住宅的甲醛浓度平均浓度最低, 为 $(21.45 \pm 13.72) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。苯系物中苯和二甲苯所列平均浓度基本在国家标准要求范围内, 甲苯是苯系物中占比最高的, 其最高平均浓度出现在 Dai et al (2017) 检测的上海新装修一年之内的住宅中, 为 $(200.13 \pm 443.89) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。表 2 中

总结的文献中TVOC普遍超标, 尤其是新装修住宅, 最高测量值达 $1181\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Gao et al, 2014)。其他VOC的定量化研究较少、系统性不强, 从已开

展的工作中可看出, 醛酮类、烷烃、卤代烃、卤代烃、萜烯、酯类在住宅室内空气中都有不同程度的检出 (Duan et al, 2014)。

表2 住宅室内 VOCs 平均浓度
Tab. 2 The average concentration VOCs of residence in China

地点 Location	房间数 Number of residences	甲醛 Formaldehyde /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	苯 Benzene /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	甲苯 Toluene /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	二甲苯 Xylene /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	TVOC /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	采样时间 Measured period	装修时间 Time after decoration	参考文献 Reference
	27	55.1	4.5	14.1	7.7	—	2013-07-21— 2013-09-08	NA	Huang et al., 2018
北京 Beijing	50	40.2 ± 26.2	7.35 ± 11.6	23.5 ± 45.6	8.65 ± 4.68^a	—	2011年12月; 2012年 4—5月 (Dec. 2011; Apr.—May 2012)	20% <24 months	Duan et al., 2014 方建龙等, 2014 (Fang J L et al, 2014)
	48	50 ± 30	10 ± 11	24 ± 21	13 ± 12	292 ± 226	2009年3—5月 (Mar.—May 2009)	>12 months	Dai et al., 2017 郑康杰等, 2014 (Zheng K J et al, 2014)
	8	—	2.32 ± 1.19	200.13 ± 443.89	72.15 ± 59.52	—	2015年5月 (May 2015)	<12 months	
上海 Shanghai	288	74 ± 4^b	$25—1195^b$	$50—689^b$	$100—283^b$	—	2011年10月— 2012年11月 (Oct. 2011— Nov. 2012)	<44 months	Gao et al., 2014 Du et al., 2014b
	64	11—144	0.89—56	2.2—111	1.2—52	30—1181	2011年6月 (Jan. 2008— Jun. 2011)	NA	
	43	—	18.5 ± 11.6	173.2 ± 129.5	49.45 ± 74.3	—	2012年12月 (Dec. 2012)	NA	
杭州 Hangzhou	42	$10—1000^b$	$59—190^b$	$46—570^b$	$35—190^b$	—	2007年1月— 2009年12月 (Jan. 2007— Dec. 2009)	6— 12 months	李飞等, 2010 (Li F et al, 2010)
	50	72.5	41.75	19.5	—	—	2014年11月— 2015年2月 (Nov. 2014— Feb. 2015)	>12 months	Cheng et al., 2018
重庆 Chongqing	471	160 ± 70	0.85 ± 1.55	20 ± 20	30 ± 40	100 ± 130	2014年3月— 2015年10月 (Mar. 2014— Oct. 2015)	<6— 48 months	Chang et al., 2017
	11	21.45 ± 13.72	3.58 ± 3.48	7.23 ± 7.00	6.01 ± 6.79^a	—	2016年11月— 2017年2月 (Nov. 2016— Feb. 2017)	>36 months	Huang et al., 2019
	73	119^a	46^a	83^a	133^a	—	2010年7月— 2011年6月 (Jul. 2010— Jun. 2011)	NA	陆日贵等, 2013 (Lu R G et al, 2013)
深圳 Shenzhen	30	—	$20—8650^b$	$50—5200^b$	$100—6350^b$	—	2010年11月— 2011年11月 (Nov. 2010— Nov. 2011)	<12 months	李玲等, 2013 (Li L et al, 2013)
	100	112.3 ± 90.3	—	15.3 ± 45.4	—	—	2002	NA	Guo, 2011 Lee et al,
香港 Hong Kong	6	—	4.99 ± 2.58	59.13 ± 19.78	9.16 ± 3.64	—	2000年4—6月 (Apr.—Jun. 2000)	NA	2001a; Guo et al, 2003

a: 重新计算(多个平均值); b: 浓度范围; NA: 未提出。

a: data were recalculated (more than two mean value); b: concentration range was used instead; NA: not available.

从地域角度总结数据，可以得出不同研究和不同城市的浓度水平相差较大，没有明显的地域性分布特征。甲醛、苯、甲苯、二甲苯、TVOC 是调研文献中定量化研究最多的化合物。香港关于住宅的 VOCs 检测研究较早，对于甲醛及其他芳香烃类化合物有较为全面的检测，对于后来各城市的室内污染研究开展有一定的领先和指导作用。北京城市住宅甲醛及苯系物浓度相差不大，上海、杭州、深圳等城市的住宅装修结束一年以内的房间各类 VOCs 浓度超标情况更严重。

2.1.2 公共场所

表 3 总结了 2007—2017 年研究中公共场所的甲醛检测浓度水平，涵盖了商场、家具市场、宾馆、餐馆、教室、办公室、公共交通工具这 7 类中国典型的室内公共环境。公共空间的室内甲醛平均浓度变化范围从 $2.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 到 $370 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，最大浓度可达 $1720 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，远超国家标准十倍多。其中，甲醛超标情况最严重的是家具市场，平均浓度达 $(262 \pm 93) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ （表 3），其超标的主要原因是家具市场存放着大量新制作的木质家具以及涂料等建筑装修材料，向周围环境释放残留的甲醛（张金萍等，2015）。其次是商场，平均浓度达 $(110 \pm 30) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。宾馆甲醛平均浓度为 $(92 \pm 15) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，主要受装修材料、室外环境污染程度影响，部分宾馆房间中甲醛浓度超过国家标准（Chan et al, 2006; Chan et al, 2009; Chan et al, 2011）。办公室甲醛平均浓度 $(67 \pm 30) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，文献给出的平均浓度变化范围是 $50—110 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。贵阳市办公室甲醛污染最严重，最高值为 $740 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，远超国家标准（Li et al, 2008），其他均在 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内。教室甲醛平均浓度最低，为 $2.3—40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ （黄燕娣等，2007；Li et al, 2008；Zhao et al, 2008）。餐馆甲醛平均浓度为 $17—400 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ （Lee et al, 2001b；张建新和周婧炜，2012），公共交通工具内的甲醛浓度相对来说比较低，平均浓度范围在 $19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右。整体而言，中国室内的甲醛污染仍然是一个严重的问题。

根据表 2 和表 3 的室内甲醛浓度数据绘制图 1。图 1 表明了不同类型的室内场所浓度水平及超标情况。室内场所总体甲醛浓度水平呈现家具市场 $((262 \pm 93) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) >$ 商场 $((110 \pm 30) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) >$ 宾馆 $((92 \pm 15) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) >$ 住宅 $((72 \pm 45) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) >$

餐馆 $((70 \pm 31) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) >$ 办公室 $((67 \pm 25) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) >$ 教室 $((22 \pm 15) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}) >$ 公共交通工具 $((19 \pm 7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ 。家具市场整体浓度偏高，值得重点关注，其次商场和宾馆会受到装修等因素影响，浓度偏高，对长期居住者会有健康影响。公共交通工具内空气质量研究以颗粒物为主，甲醛浓度数据量整体较少，最终平均浓度仅供参考。

2.2 中国室内 VOCs 影响因素研究

影响室内 VOCs 浓度的除了室内室外的污染源之外，还与室内环境因素有关，如室内温湿度，通风情况，装修时间的长短等。中国近十年的研究中也不同程度地总结了室内 VOCs 不同影响因素下的变化特征。

2.2.1 温湿度变化

室内温度、相对湿度对于建筑材料中甲醛等 VOCs 的释放率有显著影响。理论模拟和现场测量都验证了室内温度越高，甲醛浓度越高（Xiong et al, 2016）。室内湿度也和甲醛浓度呈正相关关系（Ye et al, 2017）。由于季节变化，室内的温湿度等因素也会发生变化，所以很多研究也探究了室内 VOCs 与季节的关系。Jiang et al (2013) 检测北京室内 VOCs 总浓度冬季平均值为 $(106.8 \pm 63.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，春季为 $(115.8 \pm 23.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，夏季为 $(621.7 \pm 218.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，VOCs 总浓度呈现夏季 $>$ 春季 $>$ 冬季的变化趋势。Liang et al (2014) 研究发现 VOCs 在冬季和夏季之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)，浓度峰值夏季高于冬季，可能是因为入渗率冬夏不同和室内温度的变化。与此同时，也有研究者认为可能原因是冬季通风率低导致室内 VOCs 浓度无法被稀释，而不一定是季节变化造成的（Duan et al, 2014）。室内 VOCs 与季节变化的关系并没有一个普遍适用的结论，会根据实际温度湿度，空气交换率的影响呈现出不同的特征，但可以明确的是，由季节变化带来的环境变化确实会影响到室内 VOCs 浓度，但仍需要综合各类因素判断。

2.2.2 通风变化

通风是稀释室内污染物的基本手段，对于解释室内 VOCs 浓度变化至关重要（Ye et al, 2017）。机械通风、自然通风这两种方式是常用的通风方式，中国绝大多数住宅建筑依靠门窗通风和渗透等自然通风手段，被动地将室外空气引入室内。在室内 VOCs 来源模型研究中，已经模拟计算出

VOCs的散发率并计算房间内的VOCs浓度分布。郑晓红等(2009)通过建立地板材料的VOCs散发模型模拟0.1次·h⁻¹和10次·h⁻¹两个换气次数工况,发现高换气次数的VOCs浓度下降50%,说明通风能够直接稀释空气中的VOCs浓度。Pei et al (2016)通过80 d在自然通风条件下对室内甲醛和TVOC的观测发现,室内的甲醛平均浓度下降50.8%,衰减模式可以用指数方程($R^2=0.98$)表示,衰减系数为0.011·d⁻¹,同时室内TVOC最

高组和最低组浓度下降97.1%和72.8%,衰减率为0.0318·d⁻¹。虽然通风能有效降低室内VOCs浓度,但是通风对源的散发影响不大(Xiong et al, 2016),不能从根本上解决室内VOCs污染问题。由于中国大多数住宅建筑仍然依赖自然通风以及不同气候城市的室内通风条件不同等原因,目前中国仍缺少关于住宅通风率研究的足够数据,通风与室内VOCs浓度和健康之间的关系可能很难确定。

表3 中国公共场所甲醛平均浓度
Tab. 3 The average concentration of formaldehyde of public places in China

参考文献 Reference	采样时间 Measured period	采样地点 Location	空间种类 Room type	平均值 Mean /(μg·m ⁻³)	标准偏差 SD /(μg·m ⁻³)	最小值 Min /(μg·m ⁻³)	最大值 Max /(μg·m ⁻³)
Gong et al, 2017	2015-03-28— 2015-10-20	上海 Shanghai	地铁车厢 Metro carriage	14.59 ^a	—	—	—
Hong et al, 2017	2014-06-01; 2014-09-30	桂林/柳州/南宁 Guilin/Liuzhou/ Nanning	家具市场 Furniture market	193	—	—	—
	2015-07-01; 2015-08-30		商场 Shopping mall	147	—	—	—
			宾馆 Hotel	79	—	—	—
			餐馆 Restaurant	58	—	—	—
Shang et al, 2016	2014年8月; 2015年7—8月 (Aug. 2014; Jul.— Aug. 2015)	重庆/昆明/ 西安/兰州 Chongqing/ Kunming/Xi'an/ Lanzhou	商场 Shopping mall	72.5 ^a	—	—	—
陶海涛等, 2015 (Tao H T et al, 2015)	2014-06-05— 2014-06-15	西安 Xi'an	地下商场 Underground mall	131 ^a	—	50	260
张金萍等, 2015 (Zhang J P et al, 2015)	2014年4—6月 (Apr.—Jun. 2014)	北京 Beijing	家具市场 Furniture market	150	50	90	270
程婧晨等, 2015 (Cheng J C et al, 2015)	NA	北京 Beijing	餐馆 Restaurant	113.03	—	3.49	449.11
张建新和周婧炜, 2012 (Zhang J X and Zhou J W, 2012)	2010年4月— 2011年3月 (Apr. 2010—Mar. 2011)	昆山 Kunshan	餐馆 Restaurant	40	50	0	230
王永星等, 2014 (Wang Y X et al, 2014)	NA	郑州 Zhengzhou	地铁车厢 Metro carriage	10	0.0	—	—
Zhou et al, 2011	2014	天津 Tianjin	办公室 Office	50 ^a	—	—	—
			商场 Shopping mall	110 ^a	—	—	—
崔晓明等, 2011 (Cui X M et al, 2011)	2010	潍坊 Weifang	家具市场 Furniture market	335	—	20	1720

(待续 To be continued)

(续表 3 Continued Tab.3)

参考文献 Reference	采样时间 Measured period	采样地点 Location	空间种类 Room type	平均值 Mean /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	标准偏差 SD /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	最小值 Min /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	最大值 Max /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
Chan et al., 2011	2006 年 1 月； 2007 年 1 月 (Jan. 2006; Jan. 2007)	中国南方 Southern China	宾馆 Hotel	114	84	43	355
张淑娟等, 2011 (Zhang S J et al., 2011)	2005 年 8—12 月 (Aug.—Dec. 2005)	广州 / 深圳 / 佛山 / 东莞 Guangzhou / Shenzhen / Foshan / Dongguan	办公室 Office	50	—	—	—
姜传佳等, 2010 (Jiang C J et al., 2010)	2009 年 7—8 月 (Jul.—Aug. 2009)	北京 Beijing	家具市场 Furniture market	370	80	200	510
Chan et al., 2006	2006 年 1—2 月 (Jan.—Feb. 2006)	珠三角 Pearl River Delta	宾馆 Hotel	83.97	48.48	—	—
Li et al., 2008	2004 年 3 月—2005 年 1 月 (Mar. 2004—Jan. 2005)	贵阳 Guiyang	办公室 Office	110	130	10	740
Mui et al., 2008	1996—2005	香港 Hong Kong	教室 Classroom	40	40	—	—
Zhao et al., 2008	2004 年 12 月 (Dec. 2004)	太原 Taiyuan	教室 Classroom	2.3	1.1	1	5
Pang and Mu, 2007	2005 年 3—4 月 (Mar.—Apr. 2005)	北京 Beijing	地铁车厢 Metro carriage	19	—	15	27
黄燕娣等, 2007 (Huang Y T et al., 2007)	NA	北京 Beijing	出租车 Taxi	26 ^a	—	15	34
			公共汽车 Bus	27 ^a	—	13	94
			教室 Classroom	25 ^a	—	10	60

a: 重新计算 (多个平均值) ; NA: 未提出。

a: data were recalculated (more than two mean value); NA: not available.

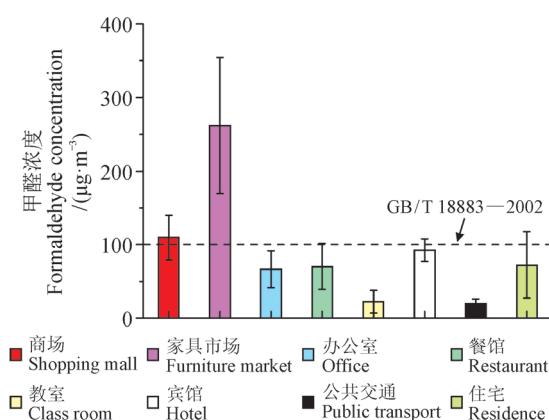


图 1 八种室内场所的甲醛浓度
Fig. 1 The concentration of formaldehyde in eight indoor places

2.2.3 装修时间

室内 VOCs 浓度与装修时间有着一定的联系：来自建筑材料的甲醛和其他 VOCs 的排放通常遵

循一个长期的衰减曲线，甲醛释放在装修后的前 3 个月至 6 个月内非稳态阶段，经过大约 6—12 个月后，排放进入准稳定状态，如图 2 所示 (Ye et al., 2017)，类似的结果也适用于其他 VOCs。但甲醛来源较多，释放材料比较复杂，所以仍有装修结束几年后的房间出现甲醛超标的情况。在实际检测中室内 VOCs 浓度并不是一直衰减的，在前几个月有明显的下降趋势之后，由于其他来源 VOCs 的影响，变化趋势会有所不同 (Liang et al., 2014)。苯系物释放周期相较于甲醛短，所以会在很多研究中发现装修一年以后甲醛浓度仍超标但苯系物已经下降至国家标准以下 (Chang et al., 2017)。这是由于苯系物主要来自装修涂料、胶黏剂等液体材料，在装修完的 6 个月内仍处于蒸发期，浓度较高污染较为严重，但随时间推移浓度下降较快。

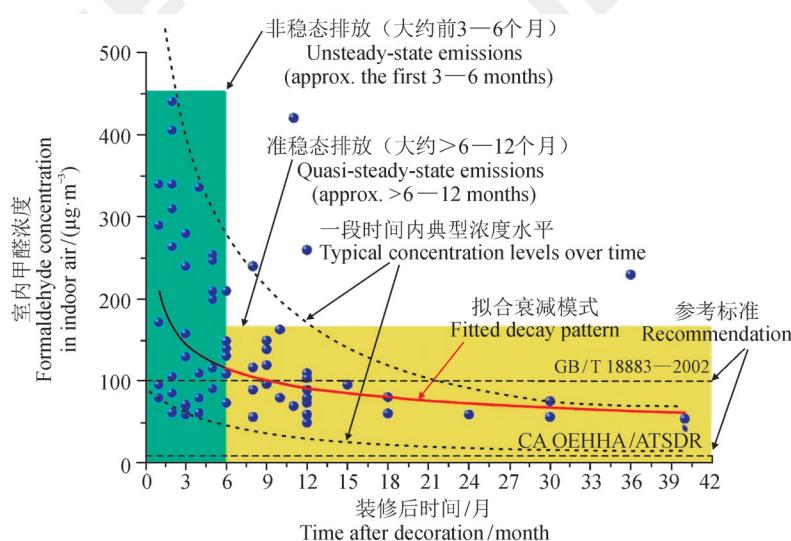


图2 室内甲醛浓度长期衰减规律的研究——基于中国典型住宅房间的实测数据 (Ye et al., 2017)

Fig. 2 Indoor formaldehyde concentration long-term decay pattern based on measurement data taken in typical rooms in Chinese residences (Ye et al., 2017)

3 室内 VOCs 健康评价

近年来中国家庭装修普遍导致室内 VOCs 水平显著增高, 与此同时带来的健康问题也引起中国社会的广泛关注。一些 VOCs 可能对居住者的健康产生短期和长期的不良影响, 包括感觉刺激、过敏、病态建筑综合征、肺功能下降、哮喘甚至白血病, 特别是在儿童、老人等弱势群体中 (Zhou et al., 2011)。吸入甲醛会加重哮喘症状, 苯与儿童白血病密切相关, 故而国际癌症研究中心将甲醛、苯、1,3-二丁烯定为对人体有明确性致癌性的一类致癌物质, 对人类致癌性证据充分 (WHO, 2010)。

由于这些 VOCs 的潜在影响, 许多国家已经开展了室内 VOCs 浓度水平的风险评估。美国制定了 VOCs 对人体健康风险常用致癌风险 (LCR) 的评估方法已被广泛应用在实际研究分析中 (USEPA, 1991)。暴露浓度 (EC_i) 与检测浓度和暴露时长有关, 目前对致癌风险的可接受限制一般采用美国环保署推荐的致癌风险水平, $EC_i \leq 10^{-6}$ 是可接受水平。非致癌反应日均暴露量 (HQ_i) 是从暴露浓度与 RfC (美国有毒物质和疾病登记局 ATSDR 数据库的参考浓度) 比值所得, 当 $HQ_i \geq 1$ 时, 表明污染物暴露量超过反应的阈值, 非致癌风险水平处于不可接受范围内, 可能对人体健康产生不良影响 (USEPA, 2009)。

利用这些健康评价模型, 中国很多城市已经开展室内 VOCs 对健康影响的研究。天津室内

苯、氯仿、四氯化碳和 1,3-丁二烯致癌风险都超过了 10^{-6} 的可接受水平 (Zhou et al., 2011)。Huang et al (2019) 在西安室内癌症风险评估数据表明, 甲醛、1,3-丁二烯和 1,2-二氯乙烷的健康风险远远高于可接受的风险水平。上海住宅中的 1,2-二氯乙烷、1,4-二氯苯和二氯甲烷、乙苯的平均致癌风险高于 USEPA 建议的可接受致癌风险水平 (Dai et al., 2017)。上海地铁通勤者致癌风险为 8.5×10^{-6} — 4.8×10^{-5} , 略高于可接受水平 (Gong et al., 2017)。除了针对不同化合物的评估, 还有研究者关注到了性别因素。Du et al (2014a) 通过中国 16 个城市 VOCs 浓度数据评估了中国城市职业女性和男性因这些空气污染物导致的致癌风险分别为 2.25×10^{-4} 和 2.90×10^{-4} , 比基准 10^{-6} 大 2 个数量级。

到目前为止, 中国对室内挥发性有机物的特征及其与吸入相关的健康风险系统的研究相对较少。中国室内空气污染的研究多数关注的是苯、甲苯、二甲苯和乙苯或羰基化合物, 而其他 VOCs 的水平及其潜在的健康影响知之甚少。因此, 更好地了解新装修住宅中 VOCs 的概况和潜在的健康影响也是未来研究的重点之一。

4 结论与展望

(1) 室内 VOCs 种类繁多。目前中国室内大多关注的是甲醛、苯系物这类化合物, 对于其他低浓度 VOCs 文献较少。室内 VOCs 来源广泛,

可以归纳成三大类型——室外污染来源、建筑装修材料来源、人类活动来源。室内建筑装修材料的污染是室内 VOCs 浓度超标的主要源头，其次是包括使用日化用品、吸烟、烹饪等和人类活动有关的来源。

(2) 虽然不同文献的检测数据可比性有差异，但从调查研究的结果中可以看出，目前中国室内 VOCs 污染状况比较严重。住宅、公共空间定量化研究最多的甲醛、苯系物、TVOC 浓度不同程度上超过国家标准。

(3) 室内 VOCs 浓度受到材料种类、温湿度、通风条件、装修时间等因素的影响。温湿度与甲醛浓度呈正相关，并且与温湿度有关的季节变化会影响到室内 VOCs 浓度。通风是降低室内污染的有效手段之一，但不能从根本上解决室内 VOCs 污染问题。甲醛等 VOCs 在室内释放有一定的周期，会随着装修时间的推移而下降。

(4) 中国室内甲醛、1,3-二丁烯等 VOCs 对人体致癌风险超过美国环保署规定的可接受水平的现象严重，对人体健康风险较高。

从目前中国室内 VOCs 浓度特征的研究进展可知，在未来研究中，需要更加丰富室内 VOCs 数据调查及分析，如：VOCs 种类及浓度、各类室内环境的实测数据等，作为下一步探究室内污染物影响机制的基础。其次要关注室内 VOCs 浓度控制措施的提出，有效阻止室外污染源进入室内，如：选择合适的低排放的建筑装修材料和家具，以及避免人类活动带来的不必要污染是控制 VOCs 来源的有效途径，对于 VOCs 污染严重的室内环境可以通过调节温湿度、通风量及选择装修后的使用时间，也都是降低室内 VOCs 对人体健康影响的有效措施。VOCs 的健康评价中还需要更准确地评价低浓度水平 VOCs 对人体健康的直接和潜在影响，探究如何有效减少室内 VOCs 对健康的影响，最终营造满足人们生活所需的健康环境，实现人与自然和谐相处的基本愿望。

参考文献

- 程婧晨, 崔 彤, 何万清, 等. 2015. 北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 [J]. 环境科学, 36(8): 2743–2749. [Cheng J C, Cui T, He W Q, et al. 2015. Pollution characteristics of aldehydes and ketones compounds in the exhaust of Beijing typical restaurants [J]. *Environmental Science*, 36(8): 2743–2749.]
- 崔晓明, 刘志霞, 王丽萍. 2011. 潍坊市坊子区家具商场室内空气污染现状调查 [J]. 中国卫生工程学, 10(6): 471–473, 478. [Cui X M, Liu Z X, Wang L P. 2011. Air pollution in furniture shops of Weifang City [J]. *Chinese Journal of Public Health Engineering*, 10(6): 471–473, 478.]
- 方建龙, 杨 旭, 李 红, 等. 2014. 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, 31(7): 585–586. [Fang J L, Yang X, Li H, et al. 2014. Survey of formaldehyde and TVOC in indoor air in families with children in Beijing and Wuhan [J]. *Journal of Environment and Health Environ Healt*, 31(7): 585–586.]
- 国家质量监督检验检疫总局, 卫生部, 国家环境保护总局. 2002. GB/T 18883—2002 室内空气质量标准 [S]. 北京: 中国标准出版社. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Ministry of Health of the People's Republic of China, State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. 2002. GB/T 18883—2002 Indoor air quality standard [S]. Beijing: China Standard Press.]
- 黄燕娣, 赵寿堂, 蔡 馨. 2007. 北京某区中小学教室挥发性有机物污染现状 [J]. 中国学校卫生, 28(5): 468–469. [Huang Y D, Zhao S T, Cai X. 2007. Volatile organic compounds pollution in primary and secondary schools in Beijing [J]. *Chinese Jounal of School Health*, 28(5): 468–469.]
- 姜传佳, 李申屾, 张彭义, 等. 2010. 北京市某家具城室内空气污染水平与特征 [J]. 环境科学, 31(12): 2860–2865. [Jiang C J, Li S S, Zhang P Y, et al. 2010. Level and characteristics of indoor air pollutants in a furniture mall in Beijing [J]. *Environmental Science*, 31(12): 2860–2865.]
- 李博伟, 黄 宇, 何世恒, 等. 2017. 我国大气中挥发性有机物的分布特征 [J]. 地球环境学报, 8(3): 225–242. [Li B W, Huang Y, He S H, et al. 2017. Characteristics of volatile organic compounds in China [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(3): 225–242.]
- 李 飞, 郑双来, 项橘香, 等. 2010. 杭州市余杭区部分居室装修后室内空气污染调查分析 [J]. 中国预防医学杂志, 11(9): 952–953. [Li F, Zheng S L, Xiang J X, et al. 2010. Survey of indoor air pollution after the decoration of residents in Yuhang District, Hangzhou [J]. *China Preventive Medicine*, 11(9): 952–953.]
- 李 玲, 陈 卫, 何 彩. 2013. 住宅装修后不同时间室

- 内空气中苯、甲苯和二甲苯的监测 [J]. 职业与健康 , 29(2): 231–233. [Li L, Chen W, He C. 2013. Monitoring of benzene, toluene and xylene pollution of indoor air in the newly decorated tenements at different time [J]. *Occupation and Health*, 29(2): 231–233.]
- 李 新 . 2004. 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 . [Li X. 2004. Effect of building material on indoor air quality and its evaluation [D]. Chongqing: Chongqing University.]
- 陆日贵 , 陈清德 , 黄 丽 . 2013. 南宁市装修居室内空气污染的调查及防治措施 [J]. 职业与健康 , 29(15): 1929–1930. [Lu R G, Chen Q D, Huang L. 2013. Investigation on indoor air pollution in decorated rooms and its prevention measures in Nanning City [J]. *Occupation and Health*, 29(15): 1929–1930.]
- 宁占武 , 张艳妮 , 刘杰民 , 等 . 2008. 二次热解吸 - 气相色谱 - 质谱分析室内挥发性有机化合物 [J]. 环境工程学报 , 2(3): 391–394. [Ning Z W, Zhang Y N, Liu J M, et al. 2008. Determination of volatile organic compounds in indoor air by two-stage thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2(3): 391–394.]
- 潘祥凯 , 高衍新 , 王德军 , 等 . 2017. 室内激光打印机污染物的释放特性 [J]. 环境与职业医学 , 34(11): 953–957. [Pan X K, Gao Y X, Wang D J, et al. 2017. Release characteristics of pollutants from indoor laser printers [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 34(11): 953–957.]
- 陶海涛 , 樊越胜 , 李晓庆 , 等 . 2015. 西安市地下商场甲醛和 TVOC 污染水平与来源分析 [J]. 环境工程 , 33(8): 61–65. [Tao H T, Fan Y S, Li X Q, et al. 2015. Occurrence and pollution source of formaldehyde and TVOC in underground stores in Xi'an City [J]. *Environmental Engineering*, 33(8): 61–65.]
- 王永星 , 田好亮 , 祝 刚 , 等 . 2014. 郑州市地铁一号线空气质量状况调查分析 [J]. 河南预防医学杂志 , 25(6): 465–468. [Wang Y X, Tian H L, Zhu G, et al. 2014. Investigation and analysis on circumstances of air quality in Zhengzhou metro line 1 station [J]. *Henan Journal of Preventive Medicine*, 25(6): 465–468.]
- 张建新 , 周婧炜 . 2012. 昆山市 20 家星级酒店餐厅空气质量监测分析 [J]. 环境卫生学杂志 , 2(4): 162–165. [Zhang J X, Zhou J W. 2012. Analysis on the monitoring of air quality of 20 star hotel restaurants in Kunshan [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2(4): 162–165.]
- 张金萍 , 陈文军 , 杜鹏宇 . 2015. 北京市公共场所室内甲醛浓度水平分析 [J]. 环境污染与防治 , 37(7): 40–45. [Zhang J P, Chen W J, Du P Y. 2015. Study on the level of indoor formaldehyde concentrations in public places in Beijing [J]. *Environmental Pollution and Control*, 37(7): 40–45.]
- 张淑娟 , 苏志锋 , 林泽健 , 等 . 2011. 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) , 50(2): 139–142. [Zhang S J, Su Z F, Lin Z J, et al. 2011. Research of actuality and characters of indoor air pollution in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 50(2): 139–142.]
- 赵金镯 . 2004. 室内挥发性有机物的来源及其健康效应 [J]. 卫生研究 , 33(2): 229–232. [Zhao J Z. 2004. Source and health effect of indoor volatile organic compounds [J]. *Journal of Hygiene Research*, 33(2): 229–232.]
- 郑康杰 , 李明珠 , 沈富荣 , 等 . 2014. 上海市宝山区装修居室内空气污染状况调查 [J]. 职业与健康 , 30(4): 537–539. [Zheng K J, Li M Z, Shen F R, et al. 2014. Analysis of air pollution in decorating residences in Baoshan District of Shanghai [J]. *Occupation and Health*, 30(4): 537–539.]
- 郑晓红 , 钱 华 , 王如竹 , 等 . 2009. 烘焙和通风对室内 VOC 浓度分布的影响及预测 [J]. 东南大学学报 (自然科学版) , 39(5): 978–982. [Zheng X H, Qian H, Wang R Z, et al. 2009. Influence of bake out and ventilation on indoor distribution of VOC concentration [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 39(5): 978–982.]
- Chan C S, Lee S C, Chan W, et al. 2011. Characterisation of volatile organic compounds at hotels in Southern China [J]. *Indoor and Built Environment*, 20(4): 420–429.
- Chan W H, Lee S C, Mak B L, et al. 2006. Indoor air quality investigation in new hotel guest rooms in the Pearl River Delta, China [C]. International Conference on Tourism and the New Asia. Beijing: Tourism Education Press: 721–728.
- Chan W, Lee S C, Chen Y, et al. 2009. Indoor air quality in new hotels' guest rooms of the major world factory region [J]. *International Journal of Hospitality Management*, 28(1): 26–32.
- Chang T, Ren D, Shen Z, et al. 2017. Indoor air pollution levels in decorated residences and public places over Xi'an, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(9): 2197–2205.

- Cheng Z, Li B Z, Yu W, et al. 2018. Risk assessment of inhalation exposure to VOCs in dwellings in Chongqing, China [J]. *Toxicology Research*, 7(1): 59–72.
- Dai H X, Jing S G, Wang H L, et al. 2017. VOC characteristics and inhalation health risks in newly renovated residences in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 577: 73–83.
- Du Z J, Mo J H, Zhang Y P. 2014a. Risk assessment of population inhalation exposure to volatile organic compounds and carbonyls in urban China [J]. *Environment International*, 73: 33–45.
- Du Z J, Mo J H, Zhang Y P, et al. 2014b. Benzene, toluene and xylenes in newly renovated homes and associated health risk in Guangzhou, China [J]. *Building and Environment*, 72: 75–81.
- Duan H Y, Liu X T, Yan M L, et al. 2016. Characteristics of carbonyls and volatile organic compounds (VOCs) in residences in Beijing, China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10(1): 73–84.
- Gao Y, Zhang Y, Kamijima M, et al. 2014. Quantitative assessments of indoor air pollution and the risk of childhood acute leukemia in Shanghai [J]. *Environmental Pollution*, 187: 81–89.
- Gong Y, Wei Y J, Cheng J H, et al. 2017. Health risk assessment and personal exposure to Volatile Organic Compounds (VOCs) in metro carriages—a case study in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 574: 1432–1438.
- Guo H. 2011. Source apportionment of volatile organic compounds in Hong Kong homes [J]. *Building and Environment*, 46(11): 2280–2286.
- Guo H, Lee S. C, Li W. M, et al. 2003. Source characterization of BTEX in indoor microenvironments in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 37(1): 73–82.
- He Z K, Zhang Y P, Wei W J. 2012. Formaldehyde and VOC emissions at different manufacturing stages of wood-based panels [J]. *Building and Environment*, 47(1): 197–204.
- Hong W, Meng M, Xie J, et al. 2017. Investigation of the pollution level and affecting factors of formaldehyde in typical public places in Guangxi, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(11): 2816–2828.
- Huang L H, Qian H, Deng S X, et al. 2018. Urban residential indoor volatile organic compounds in summer, Beijing: Profile, concentration and source characterization [J]. *Atmospheric Environment*, 188: 1–11.
- Huang Y, Ho S S H, Ho K F, et al. 2011. Characteristics and health impacts of VOCs and carbonyls associated with residential cooking activities in Hong Kong [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1): 344–351.
- Huang Y, Su T, Wang L Q, et al. 2019. Evaluation and characterization of volatile air toxics indoors in a heavy polluted city of northwestern China in wintertime [J]. *Science of the Total Environment*, 662: 470–480.
- Jiang C J, Li S S, Zhang P Y, et al. 2013. Pollution level and seasonal variations of carbonyl compounds, aromatic hydrocarbons and TVOC in a furniture mall in Beijing, China [J]. *Building And Environment*, 69: 227–232.
- Jones A P. 1999. Indoor air quality and health-formaldehyde and long-term VOC measuremens [J]. *Atmospheric Environment*, 33(28): 4535–4564.
- Kagi N, Fujii S, Horiba Y, et al. 2007. Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers [J]. *Building And Environment*, 42(5): 1949–1954.
- Lee S C, Lam S, Fai H K. 2001a. Characterization of VOCs, ozone, and PM₁₀ emissions from office equipment in an environmental chamber [J]. *Building and Environment*, 36(7): 837–842.
- Lee S C, Li W M, Chan L Y. 2001b. Indoor air quality at restaurants with different styles of cooking in metropolitan Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 279(1/2/3): 181–193.
- Lee S C, Wang B. 2004. Characteristics of emissions of air pollutants from burning of incense in a large environmental chamber [J]. *Atmospheric Environment*, 38(7): 941–951.
- Leung D Y C. 2015. Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2: 69. DOI: 10.3389/fenvs.2014.00069.
- Li T T, Liu Z R, Bai Y H. 2008. Human cancer risk from the inhalation of formaldehyde in different indoor environments in Guiyang City, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 81(2): 200–204.
- Liang W H, Yang C Q, Yang X D. 2014. Long-term concentrations of volatile organic compounds in a new apartment in Beijing, China [J]. *Building and Environment*, 82: 693–701.

- Liu S, Li R, Wild R J, et al. 2016. Contribution of human-related sources to indoor volatile organic compounds in a university classroom [J]. *Indoor Air*, 26(6): 925–938.
- Liu Y, Shao M, Fu L L, et al. 2008. Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: part I [J]. *Atmospheric Environment*, 42(25): 6247–6260.
- Missia D A, Demetriou E, Michael N, et al. 2010. Indoor exposure from building materials: a field study [J]. *Atmospheric Environment*, 44(35): 4388–4395.
- Mølhave L. 2003. Organic compounds as indicators of air pollution [J]. *Indoor Air*, 13(S6): 12–19.
- Mui K W, Wong L T, Hui P S. 2008. Policy influence of formaldehyde exposure risk in air-conditioned office environment [J]. *Indoor and Built Environment*, 17(5): 449–454.
- Nazaroff W W, Weschler C J. 2004. Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants [J]. *Atmospheric Environment*, 38(18): 2841–2865.
- Pang X B, Mu Y Y. 2007. Characteristics of carbonyl compounds in public vehicles of Beijing City: concentrations, sources, and personal exposures [J]. *Atmospheric Environment*, 41(9): 1819–1824.
- Pei J J, Yin Y H, Liu J Y. 2016. Long-term indoor gas pollutant monitor of new dormitories with natural ventilation [J]. *Energy and Buildings*, 129: 514–523.
- Shang Y Z, Li B Z, Baldwin A N, et al. 2016. Investigation of indoor air quality in shopping malls during summer in Western China using subjective survey and field measurement [J]. *Building And Environment*, 108: 1–11.
- Shin S H, Jo W K. 2013. Longitudinal variations in indoor VOC concentrations after moving into new apartments and indoor source characterization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(6): 3696–3707.
- Steinemann A. 2015. Volatile emissions from common consumer products [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(3): 273–281.
- Stönnér C, Edtbauer A, Williams J. 2018. Real-world volatile organic compound emission rates from seated adults and children for use in indoor air studies [J]. *Indoor Air*, 28(1): 164–172.
- Tang X C, Misztal P K, Nazaroff W W, et al. 2016. Volatile organic compound emissions from humans indoors [J]. *Environmental Science & Technology*, 50(23): 12686–12694.
- Wang B, Ho S S H, Ho K F, et al. 2012. An environmental chamber study of the characteristics of air pollutants released from environmental tobacco smoke [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(6): 1269–1281.
- Wang H L, Qiao Y Z, Chen C H, et al. 2014. Source profiles and chemical reactivity of volatile organic compounds from solvent use in Shanghai, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(1): 301–310.
- Wang L N, Xiang Z Y, Stevanovic S, et al. 2017. Role of Chinese cooking emissions on ambient air quality and human health [J]. *Science of the Total Environment*, 589: 173–181.
- Wang S B, Ang H M, Tade M O. 2007. Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: state of the art [J]. *Environment International*, 33(5): 694–705.
- USEPA. 1991. Risk assessment guidance for superfund, volume 1: human health evaluation manual (supplemental guidance: standard default exposure factors) (final interim report (directive)) [R]. Washington D.C.: Office of Emergency and Remedial Response, Environmental Protection Agency.
- USEPA. 2009. Risk assessment guidance for superfund, volume 1: human health evaluation manual (part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment) [R]. Washington D.C.: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Environmental Protection Agency.
- WHO. 2010. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants [M]. Geneva: World Health Organization.
- Xiong J Y, Zhang P P, Huang S D, et al. 2016. Comprehensive influence of environmental factors on the emission rate of formaldehyde and VOCs in building materials: correlation development and exposure assessment [J]. *Environmental Research*, 151: 734–741.
- Ye W, Zhang X, Gao J, et al. 2017. Indoor air pollutants, ventilation rate determinants and potential control strategies in Chinese dwellings: a literature review [J]. *Science of the Total Environment*, 586: 696–729.
- Zhao Z H, Zhang Z, Wang Z H, et al. 2008. Asthmatic symptoms among pupils in relation to winter indoor and outdoor air pollution in schools in Taiyuan, China [J]. *Environmental Health Perspectives*, 116(1): 90–97.
- Zhou J, You Y, Bai Z, et al. 2011. Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic compounds in Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 409(3): 452–459.