我国健康建筑中VOC污染控制研究进展及思考

樊娜¹, 刘聪¹, 黄衍², 李景广^{2*}

1. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096;

2. 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海 200032

* 联系人, E-mail: lijingguang@sribs.com

2019-09-06 收稿, 2019-10-23 修回, 2019-10-24 接受, 2019-12-30 网络版发表

国家重点研发计划(2017YFC02110800)资助

摘要 系统介绍了我国建筑室内VOC的定义、来源、浓度、健康危害、评价标准、控制技术的研究应用现状, 总结了过去10多年我国在室内VOC控制方面采用的技术途径及效果. 基于未来室内环境VOC控制指标数量、限值、健康风险等的发展趋势, 同时结合室外源、室内固定源和活动源的特征, 提出了我国近期和未来应当采取的技术路径, 以及工程、产品、环境质量评估方面面临的主要任务.

关键词 室内空气质量, 挥发性有机物, 健康建筑, 控制方法

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOC)是室内空气主要污染物之一, 极大地影响人们的身心健康, 是室内环境领域研究应用重点问题之一. 在我国GB/T 18883-2002《室内空气质量标准》19项指标中VOC占5项, 在GB 50325-2010《民用建筑室内环境控制规范》5项指标中VOC占3项, 在已实施的T/ASC02-2016《健康建筑评价标准》中空气章节条文共15项, 涉及VOC的条文有5项. 因此, 控制室内VOC是健康建筑关键任务之一.

1 研究背景

1.1 VOC定义

由于关注的角度不同, 全球环境标准、产品标准及室内空气标准中对VOC的定义各不相同^[1]. 胡中源等人^[2]系统整理并分析了我国各类标准中的VOC定义类型(图1). 在室内空气研究领域, 主要关注VOC对人员健康的影响, 因此多采用挥发性定义、沸点定义和 nC_6 -

nC_{16} 定义, 很少采用光化学定义. 在不同的定义中, 甲醛的归类也不同. 为描述方便, 本文论述时采用挥发性定义, 与T/ASC 02-2016《健康建筑评价标准》保持一致, 即在 20°C时, 饱和蒸汽压大于或等于 0.01 kPa, 或者在特定适用条件下具有相应挥发性的全部有机化合物的统称, 包括甲醛和常见的烯类、卤烃类、酯类、醛类、酮类等.

1.2 室内VOC对健康的影响

室内空气中常见的VOC种类繁多, 根据化学结构可分为烷类、芳烃类、烯类、卤烃类、酯类、醛类、酮类等^[3]. 长期摄入空气中的超量VOC, 会对人体的呼吸系统、造血系统和神经系统等产生慢性或急性损害, 包括哮喘、急性中毒、神经系统障碍、肝功能异常, 甚至诱发白血病及产生致癌效应^[4]. 世界卫生组织(World Health Organization, WHO)列出的四类致癌物清单(agents classified by the IARC monographs)中包含了很多室内常见的VOC(表1). 不同种类的VOC对人体

引用格式: 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. 科学通报, 2020, 65: 263–273

Fan N, Liu C, Huang Y, et al. Research progress and consideration of VOC pollution control in healthy buildings in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 263–273, doi: 10.1360/TB-2019-0495

图 1 (网络版彩色)不同标准采用的VOC定义^[2]Figure 1 (Color online) VOC definitions in different standards^[2]

表 1 室内常见VOC的IARC致癌分类表

Table 1 IARC carcinogenic classification of common indoor VOCs

英文名	中文名	年份	分类	亚类
Trichloroethylene	三氯乙烯	2014	1类	/
Formaldehyde	甲醛	2012	1类	/
Benzene	苯	2012	1类	/
Acetaldehyde	乙醛	1999	2类	B
Ethylbenzene	乙苯	2000	2类	B
Para-dichlorobenzene	对二氯苯	1999	2类	B
Toluene diisocyanates	甲苯二异氰酸酯	1999	2类	B
Trichloroacetic acid	三氯乙酸	2014	2类	B
Polyvinyl chloride	聚氯乙烯	1987	3类	/
Toluene	甲苯	1987	3类	/
Xylenes	二甲苯	1999	3类	/

的健康影响并不相同, 如苯类化合物会损伤动物的神经中枢, 造成神经系统障碍等^[5,6]; 某些多环芳烃、芳

香胺、醛类、卤代烷等物质对机体有致癌作用^[7]。随着公共卫生的发展及人类认知的提高, 越来越多的VOC的健康危害被确认并纳入清单或分类等级发生变化, 如2012年甲醛被修订确认纳入1类致癌物清单中^[8]。

1.3 我国室内VOC污染现状

据报道, 我国室内VOC污染情况不容乐观, 甲醛及苯浓度明显高于境外^[9]。国内多个研究者陆续对我国多个城市开展了室内空气质量实测, 测试指标绝大多数集中于甲醛、苯、甲苯、二甲苯、总挥发性有机化合物(total volatile organic compounds, TVOC)这5项^[10]。周超斌^[11]对2003~2014年报道的检测数据进行统计分析后发现, 在国内6个城市总计436个住宅类被测样本中, 甲醛超标率约为70%, TVOC超标率大于50%, 苯、甲苯和二甲苯也存在不同程度的超标现象。王喜元等人^[12]对我国15个城市1360个房间(均为I类民用建筑, 即住宅、幼儿园等类型建筑)的空气质量进行了大规

表 2 各地 I 类建筑室内污染调查数据(包括家具)**Table 2** Indoor pollution survey data of class I buildings (including furniture)

城市名称	甲醛超标率(%)	VOC超标率(%)
郑州	34.1(2014年) 42.0(2010~2014年)	63.5(2014年) 60.7(2013~2014年)
昆山	41(2014年)	44(2014年)
临沂	78.5(2014年)	68.8(2014年)
太原	85.7(2012年) 69.23(2013年) 63.6(2014年)	/
广州	36(2014年)	19
上海	33	52
珠海	12	20
济南	50	50
温州	42	48
苏州	39(2014年)	27(2014年)
新乡	72	35
烟台	55	71
天津	30	28
福州	34	/

模调研,统计数据详见表2。结果表明,自2001年发布《室内装饰装修材料有害物质限量标准》10项国家强制性标准之后,我国建筑室内空气污染依然严重。

1.4 VOC控制指标和标准限值

世界各国法规和标准关于室内空气VOC控制要求在控制指标种类、数量和限值方面均存在较大差异。表3列出了几个常用标准体系中VOC控制种类和限值规定。WHO认为苯无安全阈值,这样不仅限定材料物品的释放,而且要限制一些燃烧过程;LEED-NC V4限制甲醛为0.027 ppm(1 ppm=22.4/M,其中M为具体物质的分子量),远低于WHO提出的0.08 ppm。不一样的目

标限值不仅要求采用性能更好的产品,而且往往意味着需要采用不同的控制技术路线才能达到控制要求。

我国室内空气质量标准的制定起步相对较晚,最早始于1988年由卫生部制定的一系列公共场所卫生标准。2002年我国发布了更为严格的推荐性国家标准GB/T 18883-2002《室内空气质量标准》,该标准是现行健康建筑评价标准中引用的主要标准依据。

考虑到我国的污染现状、行业现状和工程可实施性等因素,尚不宜在短时间内追求大幅降低VOC控制限值。未来,我国室内空气质量标准的制定应充分考虑健康需求、技术和经济发展条件,同时综合考虑公共卫生、环境、材料、暖通空调等多学科研究进展,并协调卫生保健、环境、质检、住房和城乡建设等多部门共同开展。

1.5 VOC控制指标发展变化

室内空气中VOC控制指标制定与公共卫生研究基础及建材生产技术水平等因素密切相关。世界各国的VOC控制体系都经历了较长发展历程,控制指标通常也都包括总挥发性有机物和单一VOC指标控制两部分。表4列出了日本VOC控制指标限值的发展过程,图2是德国历史上VOC控制指标的变化历程,表5反映了我国室内空气质量VOC控制指标的变化。不难发现,各个国家的控制指标数量都在逐渐增多。我国现行室内环境标准对苯、甲醛等进行了限定,对乙苯、苯乙烯、三氯甲烷、四氯化碳、三氯乙烯、四氯乙烯、对二氯苯、邻二氯苯等对人体存在健康危害的单一VOC组分尚未做出限定^[13],但在未来标准发展中这些指标值得重点关注。

2 健康建筑中VOC控制方法及研究现状

控制室内VOC污染主要有3种途径,即源头控制、

表 3 各国标准中部分VOC限值规定^{a)}**Table 3** Partial VOC limit provisions in different standards

污染物	GB/T 18883-2002	加拿大	WHO/Europe	日本	LEED-NC V4
苯(ppm)	0.034(1 h)	0.019(长期暴露)	无安全阈值	/	0.009
甲苯(ppm)	0.053(1 h)	0.08(长期暴露)	/	0.07	0.04
二甲苯(ppm)	0.046(1 h)	0.0161(长期暴露)	/	0.20	0.081
甲醛(ppm)	0.08(1 h)	0.05(长期暴露)	0.081(30 min)	0.08(1 h)	0.027
TVOC(mg/m ³)	0.6(1 h)	/	/	/	0.5

a) 1 h为1小时均值, 30 min为30分钟暴露

表 4 日本室内化学物质浓度指标值(厚生省)

Table 4 Limit concentration of indoor air pollutants in Japan (Ministry of Health and Welfare)

序号	化学物质	室内浓度指标值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	制定时间(年)
1	甲醛	100(0.08 ppm)	1997
2	甲苯	260(0.07 ppm)	2000
3	二甲苯	870(0.20 ppm)	2000
4	对二氯苯	240(0.04 ppm)	2000
5	乙苯	3800(0.88 ppm)	2000
6	苯乙烯	220(0.05 ppm)	2000
7	正十四烷	330(0.04 ppm)	2001
8	乙醛	48(0.03 ppm)	2002

通风稀释以及空气净化。

2.1 源控制

源控制是避免空气污染最根本的方式。建筑室内VOC的来源较复杂,目前主要侧重建材、构件及家具等装饰装修污染源的源头控制,主要目标是降低目标污染物的释放率,主要方式是通过标识或标准等管理手段,鼓励目标污染物低释放或无释放的产品发展。

2.1.1 标识方法

欧美发达国家主要通过法令法规、产品标识等方法实施源头控制。德国蓝天使作为世界上最早的产品环保标识在环保和消费导向方面都取得了巨大成功,目前已覆盖90类11500种产品^[14]。德国AgBB(German Committee for Health-related Evaluation of Building Products)及美国BIFMA(The Business and Institutional

Furniture Manufacturer's Association)认证体系的成功也使产品标识成为全世界普遍推荐的控制建材有害物质的有效机制^[15]。目前,已有20多个国家和地区对建筑装饰材料实行环境标志,详见表6^[16]。

我国在较长时间内以实行标准管理方法为主,产品标识认证开展得相对较晚。1993年开始实行环境标识制度,但其影响力有待提高,产品的健康性能评价方法也有待完善。近几年,随着民众对室内空气关注度的提高和产品认证的兴起,建材及家具等相关产品“健康性能”的认证标识将成为主要的发展方向,尤其是能被产品行业、建筑行业共同认可的产品标识,其推广应用前景光明。

2.1.2 控制指标

从产品性能控制指标来看,我国的装饰装修材料及家具产品的VOC控制从最初的“含量”控制方法,逐渐发展过渡到以健康影响为主导思路的“释放量”控制方法。

我国于2001年12月颁布了《室内装饰装修材料有害物质限量标准》10项国家强制性标准,对人造板、溶剂型木器涂料、内墙、胶黏剂、木家具、壁纸、聚氯乙烯卷材地板、地毯、混凝土外加剂及无机建筑材料的相关有害物质限量做出规定,其中主要建材都采用“含量”作为评价指标。这些标准的实施在一定程度上缓解了空气污染问题。

室内空气污染控制解决的是空气中污染物浓度,因此产品关注的应该是“释放量”。“十一五”、“十二五”期间,建筑业、林业的研究者们陆续提出了“释放量”测试评价思路,逐步解决了关键设备研发、测试评价

图 2 (网络版彩色)德国室内空气质量指南制订历史

Figure 2 (Color online) Development of indoor air quality guidelines in Germany

表5 我国室内空气中VOC指标制定历程

Table 5 Development of indoor air quality guidelines in China

编号	参数	场所标准及制定年份
1	甲醛	1995 GB/T 16127-1995 1996 GB 9663-9673-1996, GB 16153-1996 2002 GB/T 18883-2002
2	对二氯苯	2001 GB 18468-2001
3	苯	2002 GB/T 18883-2002
4	甲苯	2002 GB/T 18883-2002
5	二甲苯	2002 GB/T 18883-2002
6	总挥发性有机物	2002 GB/T 18883-2002

方法、标准品研发等关键难题,为装饰装修建材领域产品“释放量”测试评价方法的推广和普及奠定了坚实基础。

获得释放率有两种途径:第一种是目前已被广泛应用的通风舱直接测试法,ISO 16000, BIFMA, AgBB, M₁(Mission Classification of Building Materials, M₁)等国外标准体系以及GB 18580-2017《室内装饰装修材料人造板及其制品中甲醛释放限量》、JG/T 527-2017《木制品甲醛和挥发性有机物散发率测试方法——大型测试舱法》等国内标准都采用此方法。第二种是密闭舱逐时浓度法,通过测试C₀(可释放量)、D(扩散系数)、K(分配系数)计算得到释放率,目前在编的《木家具C-history快速检测方法》标准采用此法,其突出优势是可大大减少测试时间。

2.1.3 替代技术

对于高风险化学物质,常采用替代方法解决其产

生的暴露风险。目前最为典型的是鼓励水性涂料逐步替代溶剂型涂料,被替代后产品的VOC排放大幅降低。

以社会关注度较高的甲醛为例。众所周知,胶黏剂是影响人造板甲醛释放水平的关键因素,目前关于如何替代脲醛树脂,大幅降低甲醛释放率的研究非常多。Pan等人^[17]通过调节温度、pH以及Na₂SO₃和NaHSO₃对米糠(含蛋白质和淀粉)黏接性能的影响,使得该生物质胶黏剂黏接强度提升4倍,可用于胶合板、刨花板等。Li等人^[18]向多巴胺改性的聚乙二醇中加入7.5%的明胶,减少了固化时间,增加了胶黏剂的交联密度,使其黏接强度提高了1.5~2倍,且该胶黏剂无细胞毒性。Xu等人^[19]以木薯淀粉为原材料,丙烯酸为改性单体,制备了一种可降解、环境友好型的淀粉基木材胶黏剂,改性后产品储存稳定性可长达90 d,同时减少了有机挥发物的释放,达到国家控制标准。

当然,在替代技术应用中需要关注新替代物应用可能带来的新问题。例如,涂料企业由于VOC的约束,采用C₁₆以上替代助剂,降低了产品的VOC散发量,却也增加了半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds, SVOC)的污染风险。板材生产时采用酚醛树脂替代脲醛树脂,减少游离甲醛的同时增加产生了苯酚污染。

总体来看,降低装饰装修产品的释放率将成为未来源头控制的主要思路,而对于长期释放的高风险化学物质,新型替代物的应用将成为必然趋势。

2.2 通风控制

通风控制是降低室内VOC浓度的常用方法之一。通风不仅可以稀释一些已知的污染物浓度,也能降低

表6 各国建材及家具污染物释放标识体系^[16]Table 6 Pollutant emission marking system for building materials and furniture in different countries^[16]

地区	标识
欧洲	德国Blue Angel(1978年), GUT(1990年), EMICODE(1997年), AgBB(2000年), Natureplus(2002年); 法国NF Environment(1991年), CESAT(2003年), AFSSET(2004年); 瑞典Good Environmental Choice(1992年), TCO(1992年); 北欧Swan(1989年); 奥地利Umweltzeichen(1990年); 欧盟EU Flower(1992年); 荷兰Milieukeur(1992年); 捷克Environmentally Friendly Products(1993年); 克罗地亚Environmental Friendly(1993年); 西班牙Aenor(1993年); 丹麦LCL(1994年); 匈牙利Environmentally Friendly(1994年); 芬兰M1(1995年); 斯洛伐克Environmental Friendly Product(1996年); 波兰Eco Mark(1998年); 葡萄牙LQAI(2000年)
美洲	美国Green Seal(1989年), CRI Green Label Plus(1992年), LEED(2000年), Section 01350(2001年), Greenguard(2001年), CHPS(2002年), SCS Indoor Advantage(2004年), BIFMA(2005年), Floorscore(2005年), CARB(2008年), Indoor airPLUS(2009年); 加拿大Environmental Choice(1988年); 巴西Environmental Quality(1993年)
大洋洲	澳大利亚Environmental Choice(1991年); 新西兰Environmental Choice(1992年)
亚洲	中国台湾Green Mark(1992年); 中国香港Eco-label(1995年), Green Label(2000年); 日本Eco Mark(1989年); 印度Ecomark(1991年); 韩国Eco-label(1992年); 新加坡Green Label(1992年); 以色列Green Label(1993年); 泰国Green Label(1993年); 马来西亚Eco-label(1996年); 菲律宾Green Choice(2001年)

一些未知VOC的暴露风险^[20]. 在建筑中提供足够的新风, 选择合理的通风方式是保证空气品质和人员满意度的重要前提. 各国都制定了新风量标准, 如表7所示, 但不同标准的新风量制定原则、方法及限值都不尽相同. 以住宅为例, 中国、美国、英国从评价指标到数值选取均有很大差异, 详见表8. 以往, 我国关于新风量的确定方法或原则主要体现在GB 50736《采暖通风与空气调节设计规范》、GB 50189《公共建筑节能设计标准》规范中^[21], 是基于CO₂浓度控制要求确定新风量, 即主要考虑消除室内人员污染, 对建筑污染考虑较少. ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)Standard 62系列标准则强调对化学污染物的控制; ASHRAE Standard 6.1-2010推荐采用规定设计法确定新风量, 同时考虑人员污染和建筑污染, 并对不同人员密度的建筑规定了不同的建筑新风量设计方法.

在健康建筑中如何进行新风量设计是关系到运营期空气质量和人员满意度的关键问题. 直接采用GB 50736, GB 50189的新风量限值进行设计, 往往很难鼓

励低污染材料和产品的应用. JGJ/T 461-2019《公共建筑室内空气质量控制设计标准》提出了一种新风量计算方法, 该方法除考虑人员所需最小新风量之外, 还考虑了稀释建筑装修污染所需的新风量, 鼓励在健康建筑中应用低污染建筑材料和家具以及优化气流组织.

$$Q_b = Q_{b1} \times P + Q_{b2} \times A, \quad (1)$$

式中, Q_b 为设计最小新风量(m^3/h); Q_{b1} 为人员所需最小新风量($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{人})$), 应符合现行国家标准GB 50736《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》的规定; P 为设计人数(人); Q_{b2} 为按单位地板面积计算所需最小新风量($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$), 符合表9要求; A 为设计房间地板面积(m^2).

目前, 我国建筑通风设计存在3个难题: (1) 如何解决因建筑密封性提高、城市噪声等问题导致的夜间通风不足; (2) 大气环境灰霾严重时, 如何协调控制通风和室内PM_{2.5}浓度; (3) 现有的通风评价指标(换气次数、通风量等)来源于机械通风, 如何评价自然通风的设计和运营效果.

表7 国内外新风量相关标准和规范^[22]

Table 7 Limit value of fresh air rate in national and foreign standards^[22]

我国	国外
GB/T 18883-2002室内空气质量标准;	美国ASHRAE Standard 62系列标准;
GB50325-2010民用建筑室内环境污染控制规范;	德国DIN 1946 Part II 通风与空调: 技术上的卫生要求;
GB50019-2016采暖通风与空气调节设计规范;	英国CIBSE 1993设计中的环境原则;
GB50189-2015公共建筑节能设计标准;	欧盟CEN pr ENV 1752-1996建筑通风: 考虑室内环境的设计准则;
JGJ 134-2010夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准;	北欧NKB-61北欧导则;
GB 9663~9673-1996公共场所卫生标准;	日本1986空气调节手册;
GB/T 17226-2017中、小学校教室换气卫生标准;	建筑和建筑设备的节能——设计、管理技术的基础和应用;
GB 16153-1996饭馆(餐厅)卫生标准;	HEAS-02-2004医院空调设备的设计与管理指南
GB 50333-2002医院洁净手术部建筑技术规范	

表8 各国标准中住宅新风量限值^{[11]a)}

Table 8 Limit value of fresh air rate of dwelling in national and foreign standards^[11]

标准	GB50376-2012(中国)	ASHRAE62.1-2010(美国)	CIBSE Guide A(英国)
指标	换气次数(air changes per hour, ACH)	人均新风量(L/(s person))	单位建筑面积新风量(L/(s m ²))
限值	0.70($F_p \leq 10 \text{ m}^2$) 0.60($10 \text{ m}^2 < F_p \leq 20 \text{ m}^2$) 0.50($20 \text{ m}^2 < F_p \leq 50 \text{ m}^2$) 0.45($50 \text{ m}^2 < F_p$)	2.5	0.3
			换气次数
			0.4~1

a) F_p 为人均居住面积

表 9 按单位地板面积计算所需最小新风量

Table 9 Minimum fresh air required per unit floor area

建筑污染分级	按单位地板面积计算所需最小新风量($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$)
一级污染建筑	0
二级污染建筑	2.16
三级污染建筑	3.24

未来,在人员最小连续通风量和间歇通风量、不同通风方式导致的暴露量及暴露方式等基础问题尚未完全得到解决之前,如何根据污染源释放特性实现精准通风将是健康建筑的重要研究方向。

2.3 净化控制

空气净化是降低室内空气污染不可或缺的控制手段。当源头控制和通风控制途径应用受到限制时,空气净化具备两个突出优势:(1)可独立控制去除室内空气中的目标污染物,无须承担因增加新风产生的运行成本(包括新风热湿负荷以及室外空气污染物的过滤净化成本等);(2)结合工程污染特点进行针对选型,运行时亦可灵活调整运行方案,降低投资和运行成本^[22]。

目前常见的室内空气净化产品可分为被动式和主动式两类。相较而言,被动式净化的作用效果相对有限,更适用于针对污染源的空气净化及解决低浓度空气污染;主动式净化产品更容易获得更大的洁净空气量,且可控性更强。表10列举了常见主动式净化产品中采用的空气净化技术^[23]。其中,吸附技术因具有价格便宜、简单易用、无副产物等突出优点应用最为广泛^[24]。EPA推荐将吸附技术用于室内VOC排放控制,但也提醒应充分考虑吸附组件的再生或更换^[25]。在催化氧化

类净化技术中,光催化、等离子体催化都因易产生有害副产物存在安全性顾虑^[26,27]。长期工程实践表明,目前仅依靠单一净化技术难以满足工程实际的综合性控制需求,集成应用是目前解决工程问题的主要途径。

总体来看,随着室内环境标准中VOC控制指标增加和控制标准越来越严格,空气净化产品普及率越来越高,净化技术也将不断创新。高CADR(clean air delivery rate)、高CCM(cumulate clean mas)、低阻力、低能耗、无二次污染将成为空气净化技术及产品的未来主要发展趋势。

2.4 室内VOC工程控制

建筑室内VOC主要分为一次源和二次源,其中一次源VOC的主要来源见表11^[28]。现阶段我国室内VOC污染来源主要为一次源,因此本文仅讨论一次源的控制。

固定源主要是指建筑本身、建筑室内装饰装修、通风空调系统管道、家具以及人体自身释放出来的VOC。这些污染源的主要特点是,在相对稳定的环境中释放率相对稳定,在较长时间内变化相对较少。除人自身外,其他污染源也可以通过技术手段降低释放,主要采用源头控制方法。

活动源主要是人员行为或一些设备工作才产生的污染源,常见的活动源包括吸烟、烹饪污染、复印机、打印机、过滤器(这里指过滤器附着的微生物代谢产生有机挥发物)、清洁剂等。这些污染源的主要特点是,在一般建筑内属于间歇性污染(烹饪污染在家庭里面属于间歇性污染,在饭店属于连续性污染;复印机等在办公室属于间歇性污染,在复印室属于连续性污染),释放率在较短时间变化较大。目前已有很多关于

表 10 常见主动式净化产品中采用的空气净化技术^[23]Table 10 Air purification technology used in common active purification products^[23]

净化技术	材料及装置	适用污染物	备注
吸附	吸附材料	VOC	需再生或定期更换
紫外消毒	紫外灯	生物	需要足够的照射时间
光催化	光催化材料、紫外光源等	VOC、生物	可作用于大部分VOC,但易产生有害副产物
热催化	热催化材料	VOC	可有效消除甲醛
吸收	吸收液	颗粒、VOC、生物	需防止液体泄漏,定期更换
臭氧、负离子、等离子体	高压放电装置	颗粒、VOC、生物	放电过程产生的臭氧和聚合物微粒对人体有害,不宜在人员活动区使用
其他	生物净化模块等	VOC	有效性尚需验证

表 11 室内空气中常见VOC来源

Table 11 Common VOC sources in indoor air

序号	常见污染源	备注
1	周边大气、土壤污染带来的空气影响	室外源
2	建筑本身材料、构件及建筑本身污染	固定源
3	通风及通风空调系统污染	固定源+活动源
4	人员生活所需材料、设备等带来的影响 (活动家具、复印机等)	固定源+活动源
5	人员本身及活动产生的影响(吸烟等)	固定源+活动源

人员活动产生的污染物释放数据的论文发表^[29-32],如吸烟、烹饪释放强度等,但是很多活动性污染释放强度基础数据依然缺乏,导致工程中排风、净化等设计选型无法定量.除吸烟外(按照《公共场所控制吸烟条例》、《“健康中国2030”规划纲要》等,无烟环境将成为发展趋势),其他活动性污染源控制方式包括两方面,即通过工艺设备的提升实现源控制,或者通过通风或/和净化控制.

以往,室内VOC主要控制对象是室内源,但随着室内控制指标限值的要求越来越严,室外源产生的影响也越来越需要重视.以甲醛为例,室外甲醛浓度大约为 $0.01\sim 0.02\text{ mg/m}^3$ ^[33](排除电化学法测量).当室内浓度控制标准限值是 0.1 mg/m^3 (GB/T 18883-2002限值)时,室外对室内浓度贡献非常小,约占10%~20%,这时主要控制对象是室内源;但是当室内目标控制浓度为 0.03 mg/m^3 (如LEED-NC V4)时,室外污染源也成为重要贡献源,这时就需要采用新风净化.

我国建筑工程标准体系中,在规划、设计、施工、验收和运行管理5个阶段都有相应的标准规定.自

2017年以来,JGJ/T 436-2018《住宅建筑室内装修污染控制技术标准》、JGJ/T 461-2019《公共建筑室内空气质量控制设计标准》相继发布,填补了设计标准缺失的空白,对健康建筑的设计有重要参考意义.施工验收主要依据GB 50325《民用建筑工程室内环境污染控制规范》进行管理,运行阶段则有GB/T 18883-2002《室内空气质量标准》等.表12对适用于公共建筑的标准甲醛控制限值进行比较分析,JGJ/T 461-2019对建筑结构性污染、活动家具及运行污染等因素考虑得较为系统,GB 50325(修订报批版)相比2010版提出了更严格的要求,但对后期增加的建材负荷考虑依旧不足.此外,目前常用标准在具体实施时都选择某一天采集的浓度数据进行判断,属于瞬时评价,如何评价VOC长时间总暴露风险也是未来面临的重要问题之一.

随着我国健康建筑评价标准的提出、实施和发展,未来室内空气质量控制指标数量会越来越多,限值会越来越严格,相应的解决途径也会不断变化,如何系统控制VOC将成为健康建筑中的重大挑战.

3 结论与展望

总体来看,我国建筑室内VOC控制大致可分为3个阶段.

(1) 第1个阶段(2001~2015年).控制指标以甲醛、苯、甲苯、二甲苯、TVOC为主,限值按照GB/T 18883-2002执行;主要控制对象是固定污染源控制(室内装饰装修材料和家具);采用的控制方法包括:产品以含量控制为主,工程以验收控制为主.这个阶段的主要特点是,国家已将VOC作为主要的室内空气质量控制目标,但由于产品测评方法不合理,工程缺少事前控制

表 12 甲醛浓度比较(公共建筑)

Table 12 Comparison of formaldehyde limits value in standards (public buildings)

标准	对象	状态	级别	标准值(mg/m^3)	折算值 ^{a)} (mg/m^3)
GB 50325(报批版)(仅装饰装修)	I类建筑	非稳态		≤ 0.07	≤ 0.08
	II类建筑	非稳态		≤ 0.08	≤ 0.09
JGJ/T461-2019(仅装饰装修)	I类建筑	稳态	一级	≤ 0.02	$\leq 0.03\sim 0.04$
		稳态	二级	$0.02 < X \leq 0.04$	$0.03 < X \leq 0.05$
	II类建筑	稳态	一级	≤ 0.03	$\leq 0.04\sim 0.05$
		稳态	二级	$0.03 < X \leq 0.05$	$0.04 < X \leq 0.06$
GB/T 18883-2002	建筑	稳态		≤ 0.1	≤ 0.1

a) 折算值=标准值+室外甲醛背景浓度(以 0.01 mg/m^3 估算),GB/T 18883-2002计算时已考虑室外甲醛背景浓度

制, 导致建筑室内VOC浓度和超标率较高。

(2) 第2个阶段(2016年后一二十年左右)。通过积累疾病负担研究基础数据分析, 进一步明确各类VOC的健康影响, 以此为基础扩展控制指标参数。除了甲醛、苯、甲苯、二甲苯、TVOC之外, 将逐步增加乙醛、乙苯等出现频率高、毒性较大的单一VOC, 限值将主要参考我国自身研究结论以及WHO, ISO等国际组织相关限值要求, 相比现在会更严格。主要控制对象包括室内装饰装修材料和家具等固定污染源、烹饪等活动性污染源。可采用的控制方法包括: 产品以释放量控制为主, 工程以“设计+验收”为主, 事前控制将纳入工程建设流程。这个阶段的主要特点是, 通过产品与工程相结合的系统性控制策略的提出, 建筑室内整体VOC浓度及超标率将明显下降。低释放VOC、脲醛树脂替代技术等将成为产品发展的主要方向。

(3) 第3个阶段。未来, 随着民众认知及公共卫生的发展, 控制指标进一步增加, 限值进一步严格, 并逐渐区分急性暴露和慢性暴露限值。主要控制对象包括固定污染源控制(室内装饰装修材料和家具)、活动源控制(人员行为、设备性污染)和室外源传递控制(大气、土壤等)。由于活动性污染、二次反应源及室外大气污染的防控要求, 净化成为不得不采用的技术手段。可采用的控制方法主要包括: 产品以释放量控制为主, 净化技术主要关注其时效性、能效性, 工程以“设计+验收+运营”为主, 事前控制、运营监测实现将纳入工程建设流程。控制指标不仅是浓度控制, 还可能采用生物标志物控制。此外, 还可能加入个体控制。这个阶段的主要特点是, 室内VOC浓度进一步降低, 主观满意度进一步提升, 降低人体暴露风险, 实现100%健康满意成为发展目标和发展趋势。

参考文献

- 1 U.S. Environmental Protection Agency. Technical Overview of Volatile Organic Compounds. 2017-04-12
- 2 Hu Z Y, Gu Y C, Sun L P, et al. Interpretation of different definitions of volatile organic compounds in Chinese standards (in Chinese). *Electroplating Finish*, 2018, 37: 644–651 [胡中源, 顾煜澄, 孙利萍, 等. 国内标准中挥发性有机化合物的定义解析. *电镀与涂饰*, 2018, 37: 644–651]
- 3 Hodgson M, Levin H, Wolkoff P. Volatile organic compounds and indoor air. *J Allergy Clin Immunol*, 1994, 94: 296–303
- 4 Tagiyeva N, Sheikh A. Domestic exposure to volatile organic compounds in relation to asthma and allergy in children and adults. *Expert Rev Clin Immunol*, 2014, 10: 1611–1639
- 5 Zhou Y, Zhang S, Li Z, et al. Maternal benzene exposure during pregnancy and risk of childhood acute lymphoblastic leukemia: A meta-analysis of epidemiologic studies. *PLoS One*, 2014, 9: e110466
- 6 Cheng S G, Dan D Z. Environment and Health (in Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 2006. 266 [程胜高, 但德忠. 环境与健康. 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 266]
- 7 Liu Y J, Mu Y J, Zhu Y G, et al. Which ornamental plant species effectively remove benzene from indoor air? *Atmos Environ*, 2007, 41: 650–654
- 8 Zhang L, Steinmaus C, Eastmond D A, et al. Formaldehyde exposure and leukemia: A new meta-analysis and potential mechanisms. *Mutat Res/Rev Mutat Res*, 2009, 681: 150–168
- 9 Adamkiewicz G, Choi H, Saborit J M D. WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. Technical Report, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark. 2010
- 10 Zhu T L, Hao J M, Zhou Z P, et al. Present situation, formative causes and countermeasures of indoor air pollution in China (in Chinese). *Tech Equip Environ Pollut*, 2002, 3: 14–18 [朱天乐, 郝吉明, 周中平, 等. 我国室内空气污染现状、成因与对策. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3: 14–18]
- 11 Zhou C B. Impact of natural ventilation on indoor air quality in high-rise apartments (in Chinese). Doctor Dissertation. Tianjin: Tianjin University, 2016 [周超斌. 自然通风对高层住宅空气品质影响的研究. 博士学位论文. 天津: 天津大学, 2016]
- 12 Wang X Y, Chen S H, Mei J, et al. Survey and Research on Indoor Environment in China (in Chinese). Beijing: China Planning Press, 2018. 255–256 [王喜元, 陈松华, 梅菁, 等. 中国室内环境概况调研与研究. 北京: 中国计划出版社, 2018. 255–256]
- 13 Tan H P, Qian S S, Sun D F, et al. Study on the pollution status and standards of indoor organic compounds (in Chinese). *China Meas Test*, 2015, 41: 1–5 [谭和平, 钱杉杉, 孙登峰, 等. 室内环境中有害有机物污染现状及标准研究. *中国测试*, 2015, 41: 1–5]
- 14 Yao Y. Research on some key problems of furniture VOC emission labeling system (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2016 [姚远. 家具化学污染物释放标识若干关键问题研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2016]
- 15 Weschler C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmos Environ*, 2009, 43: 153–169
- 16 Liu W W, Zhang Y P, Yao Y, et al. Indoor decorating and refurbishing materials and furniture volatile organic compounds emission labeling systems: A review (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 1533–1543 [刘巍巍, 张寅平, 姚远, 等. 室内装饰装修材料和家VOC释放标识体系述评. *科学通报*, 2012, 57: 1533–1543]

- 17 Pan Z, Cathcart A, Wang D. Thermal and chemical treatments to improve adhesive property of rice bran. *Ind Crop Prod*, 2005, 22: 233–240
- 18 Li Y, Meng H, Liu Y, et al. Gelatin microgel incorporated poly(ethylene glycol)-based bioadhesive with enhanced adhesive property and bioactivity. *ACS Appl Mater Inter*, 2016, 8: 11980–11989
- 19 Xu Q, Wen J, Wang Z. Preparation and properties of cassava starch-based wood adhesives. *Bioresources*, 2016, 11: 6756–6767
- 20 Liu D. Practical Manual of Indoor Pollution Detection and Control Methods and Standards (in Chinese). Beijing: Zhongke Multimedia Electronic Publishing House, 2003. 65 [刘焯. 室内污染检测控制方法与标准规范实用手册. 北京: 中科多媒体电子出版社, 2003. 65]
- 21 Zhang X, Zhou X, Wang J, et al. Research on design fresh air requirement for civil buildings (in Chinese). *J HV&AC*, 2012, 42: 27–32 [张旭, 周翔, 王军, 等. 民用建筑室内设计新风量研究. 暖通空调, 2012, 42: 27–32]
- 22 Xu Q J. Research on the mechanism, characteristic and evaluation of adsorption and reaction for indoor VOC removal (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2011 [徐秋健. 室内VOC净化材料吸附与反应机理、特性及评价研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2011]
- 23 Zhu T L. Indoor Air Pollution Control (in Chinese). Beijing: Chemical Industry Press, 2003. 101–161 [朱天乐. 室内空气污染控制. 北京: 化学工业出版社, 2003. 101–161]
- 24 Zhang Y, Mo J, Li Y, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review. *Atmos Environ*, 2011, 45: 4329–4343
- 25 Cheng Y, Yin H Q, Liu Y J, et al. Application of porous carbon in indoor air pollution control (in Chinese). *Chem Ind For Prod*, 2004, 24: 92–96 [程琰, 尹华强, 刘勇军, 等. 多孔炭材料在室内空气污染控制中的应用. 林产化学与工业, 2004, 24: 92–96]
- 26 Mo J H. Research on some key fundamental problems in the photocatalytic oxidation of indoor volatile organic compounds (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2009 [莫金汉. 光催化降解室内有机化学污染物的若干重要机理问题研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2009]
- 27 Mo J, Zhang Y, Xu Q, et al. Determination and risk assessment of by-products resulting from photocatalytic oxidation of toluene. *Appl Catal B-Environ*, 2009, 89: 570–576
- 28 Li J G. Development of indoor air quality standard system in China (in Chinese). *J HV&AC*, 2013, 43: 68–73 [李景广. 我国建筑室内空气质量标准体系建设. 暖通空调, 2013, 43: 68–73]
- 29 Chen C, Zhao Y, Zhao B. Emission rates of multiple air pollutants generated from Chinese residential cooking. *Environ Sci Technol*, 2018, 52: 1081–1087
- 30 Zhao Y, Zhao B. Emissions of air pollutants from Chinese cooking: A literature review. *Build Simul*, 2018, 11: 977–995
- 31 Chen C, Zhao Y, Zhao B. Emission rates of ultrafine and fine particles generated from human smoking of Chinese cigarettes. *Atmos Environ*, 2018, 194: 7–13
- 32 You R, Cui W, Chen C, et al. Measuring the short-term emission rates of particles in the “personal cloud” with different clothes and activity intensities in a sealed chamber. *Aerosol Air Qual Res*, 2013, 13: 911–921
- 33 Liu C, Miao X, Li J. Outdoor formaldehyde matters and substantially impacts indoor formaldehyde concentrations. *Build Environ*, 2019, 158: 145–150

Summary for “我国健康建筑中VOC污染控制研究进展及思考”

Research progress and consideration of VOC pollution control in healthy buildings in China

Na Fan¹, Cong Liu¹, Yan Huang² & Jingguang Li^{2*}

¹ School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

² Shanghai Research Institute of Building Science (Group) Co., Ltd, Shanghai 200032, China

* Corresponding author, E-mail: lijingguang@sribs.com

In China, VOC pollution in indoor air is quite serious, and the control of VOC concentration in indoor air has always been a difficult problem. It is also an important control target of healthy buildings in China, since VOC has significant health hazards to human body. This paper introduces the definition and source of volatile organic compounds in indoor air, analyses the present situation of pollution and expounds the human hazards of VOC. There are differences between VOC control indexes in China and other countries in terms of indoor air quality standards. In the future revision of standards, health needs, industry status and implement ability should be fully considered.

There are three ways to control indoor VOC pollution: Source control, ventilation dilution and air purification. Source control is the most fundamental way to avoid indoor air pollution. The identification of “health performance” of building materials and furniture products will be the main development direction. The main idea of control is “release rate” instead of “content” control method. For high-risk substances, developing alternative products is the most direct solution, but this method depends on technological progress. Diluting indoor air pollutants with outdoor fresh air is the most convenient way to reduce VOC concentration. How to achieve precise ventilation according to the emission characteristics of pollution sources will be the main task of ventilation research in healthy buildings. Air purification is an indispensable means of controlling indoor air pollution in modern buildings. With the standard limit of VOC concentration in indoor environment getting lower and lower, the application of air purification technology will be more and more widely. High CADR, high CCM, low resistance and no secondary pollution will become the main development direction.

Since 2017, JGJ/T 436-2018 (*Technical Standard for Interior Decoration Pollution Control of Residential Buildings*) and JGJ/T 461-2019 (*Design Standard for Controlling Indoor Air Quality of Public Building*) have been released successively. They fill in the standard gap in the architectural design stage, and require architectural designers to systematically consider the guarantee of indoor air quality. These two standards play an important role in promoting the promotion of healthy building. GB 50325 (*code for Indoor Environmental Pollution Control of Civil Building Engineering*) and GB/T 18883 (*Indoor Air Quality Standard*) are still the two most commonly used evaluation standards in building indoor air quality control in China. When these two standards are implemented, they all tend to adopt the instantaneous evaluation method, that is, to use the concentration data of a certain day for conformity evaluation. Therefore, how to evaluate the long-term total exposure risk of VOC is also one of the important problems in the future.

VOC control in building indoor air in China can be roughly divided into three stages: The first stage focuses on product control, the second stage focuses on engineering control, and the third stage focuses on human exposure. In the future, with the implementation of health buildings evaluation standards in China, the number of indoor air quality indicators will be more and more, the limits will be more and more stringent, and the corresponding solutions will be constantly changing. How to systematically control VOC will become a major challenge in healthy buildings.

indoor air quality, volatile organic compounds, healthy buildings, control methods

doi: [10.1360/TB-2019-0495](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0495)