多学科和多行业协同破解建筑室内空气质量难题

张寅平^{1*}, 李景广², 刘炜¹, 孙之炜¹

1. 清华大学建筑技术科学系, 北京 100084;

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: zhangyp@tsinghua.edu.cn

良好的室内空气质量是健康建筑的基本要求, 其评分值约占健康建筑评价总值的 1/4。目前, 要科学确定我国建筑室内空气质量标准要求并完善相应技术体系, 应首先了解我国室内空气质量控制的重要需求问题, 洞悉其中的基础科学问题、关键技术问题和行业分割问题, 然后对症下药, 探寻破解方略和技术途径。为此, 本文列出了我国室内空气质量控制的若干关键需求问题: 根据我国国情确定建筑室内空气主控污染物及其阈值, 节约高效地控制室内空气温湿度和空气质量, 科学地评价室内空气质量控制效果。相应的基础科学问题和关键技术问题为: 我国室内空气主要污染物和阈值的确定原理和方法, 室内空气温湿度和污染物浓度综合控制原理和方法, 室内空气质量控制效果评价方法。我们依据正在开展的国家重点研发计划项目研究进展, 抛砖引玉, 提出了多学科和多行业协同破解我国健康建筑发展必须解决的室内空气质量问题的总体方略和具体思路。

1 良好的室内空气质量是我国健康建筑的重要方面

健康建筑是我国建筑领域发展的新方向。从生活质量层面看, 健康建筑是人们追求健康生活的必然需求; 从建筑行业层面看, 健康建筑是绿色建筑深层次发展的必然趋势; 从国家战略层面看, 健康建筑是“健康中国”战略的重要部分^[1,2]。作为中国健康建筑理念和实践的出发点, 中国建筑学会于 2017 年 1 月颁布了《健康建筑评价标准》(T/ASC 02-2016)。该标准遵循多学科交叉融合、多行业协同合作的原则, 对建筑的空气、水、舒适、健身、人文、服务等指标进行定性(控制项)和定量(打分项)评价^[3], 评出建筑的健康级别, 从高到低依次为三星、二星、一星、不达标。

良好的室内空气质量是健康建筑的重要方面, 在上述各方面的评价总分(100 分)中占了约 1/4。不仅如此, 室内空气质量如达不到基本(控制项)要求, 其他项目做得再好, 也不能获评“健康建筑”。可以说, 《健康建筑评价标准》是既学习和借鉴了美国等发达国家的经验(如美国的 WELL 标准), 又基于我国国情和大量实践及相关研究进展的结

张寅平 清华大学建筑技术科学系教授, 室内空气质量北京市重点实验室主任, 国际室内空气科学院秘书长, 中国室内环境与健康专业委员会主任委员。2007 年国家杰出青年科学基金获得者, 2015 年国家自然科学基金委员会创新群体学术带头人。获 2010 年教育部自然科学奖一等奖。主要从事建筑环境研究。

晶之作, 对我国建筑室内空气质量提升起到了积极的促进作用, 并将继续有力推动相关研究和行业的发展。与此同时, 在编制该标准空气部分的过程中, 我们也深感一些室内空气质量控制重要基础科学问题和关键技术问题尚未解决, 相关行业的条块分割造成了不同行业相关标准和技术间不匹配, 难以贯通实施, 它们严重妨碍了健康建筑的建造、评价和运维。要解决上述问题, 首先要洞悉相关基础科学问题、关键技术问题和行业分割问题, 然后确定研究战略和技术路线。本文作者正在负责国家重点研发计划项目“建筑室内空气质量控制基础理论和关键技术研究”, 结合项目研究进展和作者自身的思考, 抛砖引玉地提出了多学科和多行业协同破解健康建筑室内空气质量问题的总体方略和具体思路。考虑到我国城市和农村民用建筑室内空气质量问题特点和研究方法存在较大差异, 加之作者对农村民用建筑室内空气质量鲜有研究, 下文内容主要针对我国城市民用建筑室内空气质量控制, 部分可供农村民用建筑参考。

2 建筑室内空气质量基础科学问题、关键技术问题和行业分割问题

问题 1. 我国室内空气污染物应该控什么? 其阈值如何定? 这是我国室内空气质量控制的首要问题。2002 年, 我国颁布了《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002), 列出了室内空气污染物(化学性、生物性和放射性)及其阈值(表 1)。

表 1 《室内空气质量标准》(GB/T 18883-2002)主要控制指标

Table 1 Parameters controlled in *Standard of Indoor Air Quality* (GB/T 18883-2002)

参数	单位	标准值	备注
温度	°C	22~28	夏季空调
		16~24	冬季采暖
相对湿度	%	40~80	夏季空调
		30~60	冬季采暖
空气流速	m/s	0.3	夏季空调
		0.2	冬季采暖
新风量	m ³ /(h 人)	30	
二氧化硫(SO ₂)	mg/m ³	0.5	1 h 均值
二氧化氮(NO ₂)	mg/m ³	0.24	1 h 均值
一氧化碳(CO)	mg/m ³	10	1 h 均值
二氧化碳(CO ₂)	%	0.10	日均值
氨(NH ₃)	mg/m ³	0.20	1 h 均值
臭氧(O ₃)	mg/m ³	0.16	1 h 均值
甲醛(HCHO)	mg/m ³	0.10	1 h 均值
苯(C ₆ H ₆)	mg/m ³	0.11	1 h 均值
甲苯(C ₇ H ₈)	mg/m ³	0.20	1 h 均值
二甲苯(C ₈ H ₁₀)	mg/m ³	0.20	1 h 均值
苯并(a)芘(B(a)P)	ng/m ³	1.0	日均值
可吸入颗粒(PM ₁₀)	mg/m ³	0.15	日均值
总挥发性有机物(total volatile organic compounds, TVOC)	mg/m ³	0.60	8 h 均值
细菌总数	cfu/m ³	2500	依据仪器定
氡(²²² Rn)	Bq/m ³	400	年平均值(行动水平)

该标准自发布实施以来,为我国室内空气质量改善做出了很大贡献。但需要指出的是,该标准制定时主要参考了发达国家或地区的室内空气质量标准或指南,尚未对我国室内空气质量状况做大量广的调研。近年来,人们已明显感到该标准满足不了我国严峻和复杂的室内空气质量控制需求。譬如,全社会广为关注的 PM_{2.5} 就未被列入。此外,不同人群、不同功能的建筑(譬如大、中、小学生教室)新风量应为多少?其室内 CO₂ 限值如何确定?这些都是需要研究的问题。为此,钟南山院士呼吁:应尽快修订我国室内空气质量标准。但如何找到科学依据进行修订是亟待解决的重要问题。其背后的基础科学问题是室内空气污染物种类和浓度对人体健康的影响机理以及它们之间的统计学关联关系。

问题 2. 如何节约高效地控制室内空气温湿度和污染物浓度(这里高效主要指空气净化效率高,特别是室内空气目标污染物浓度略高于标准阈值范围的净化效率)?对

采用空气净化器作为空气污染物浓度主要控制设备的室内空间,室内空气温湿度和室内空气质量分别独立控制,热力学分析表明这是一种不可逆损失小、节能高效的方式。但近年来我国很多地区的建筑面临空气质量“内忧外患”的窘境:室外空气中以 PM_{2.5}, O₃, NO_x, SO_x 为代表的污染相当严重,室内空气中以挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)、半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds, SVOCs)为代表的污染物浓度也很高。发达国家常用的以室外空气稀释室内空气污染物(即通新风)的手段不能直接应用,需通过过滤才能进入室内。在严寒的冬季或湿热的夏季,室内通入过量的新风会增加采暖或空调能耗。如何在满足室内空气质量和热舒适要求的前提下,采用优化新风量并配以合适热回收方式尽量节约采暖或空调能耗(或费用)是迄今室内空气领域尚未很好解决的关键技术问题。其背后的基础科学问题是以满足设定空间和时间室内空气温湿度和空气质量要求为约束条件,以

使用期代价(能耗或费用)最小为优化目标,相应系统形式及其运行策略的确定原理和方法。这里的设定空间可以是全空间,也可以是部分空间,设定时间可以是全时间段,也可以是部分时间段。

需要特别指出的是,根据建筑功能和人为行为差异,应鼓励人们采用“部分时间、部分空间”的控制方式,这样可显著降低系统能耗或费用。为此,需研究不同建筑功能特点及人群的行为方式,研发节约高效的控制设备和技术,引导资源节约型生活理念和方式,有利于整个社会的可持续发展^[4]。

问题 3. 如何科学地评价室内空气质量控制效果。在工程领域,室内空气污染程度及其防控效果以往只用浓度来判断。但大量研究表明,这样的判断存在以下不足: (1) 一些低浓度污染物长时间暴露的健康危害难以确定^[5]; (2) 一段时间内污染物平均浓度相同,并不意味着健康风险相同,浓度的波动幅度和频率也可能影响健康风险^[6]; (3) 人存在个体差异,即使污染物浓度处于标准阈值之下,也不意味着暴露人群没有健康风险^[7]; (4) 各单一污染物浓度在标准阈值之下,但多种污染物并存时可能形成健康危害^[5]; (5) 《室内空气质量标准》中只列出了主控污染物,很多室内空气中存在的污染物并未列入,但并不意味着它们对人体无害,而只意味着从全国范围看,这些污染物造成的健康危害与目前标准中已列出的污染物相比还较小。为此,应克服工程领域仅用室内空气质量浓度反映控制效果的不足,发展更加科学的评价方法。其背后的基础科学问题是发展可反映个体或人群室内空气质量短期暴露和长期暴露健康风险的方法。

问题 4. 目前建筑室内空气质量控制涉及建材、家具、家电、暖通空调和建筑等行业,但由于行业分割,相关室内空气质量控制技术和标准存在不匹配甚至矛盾的现象,难以贯通使用,影响我国室内空气质量的有效控制。其背后的体制问题是如何克服室内空气质量“管、产、学、研、教”协同不够,产业链上的相关行业条块分割严重、交流不够的问题。

3 多学科交叉融合、多行业协同合作是破解上述问题的关键

3.1 采用疾病负担概念和分析方法,确定我国室内空气质量污染物控什么、控多严的问题

疾病负担是指由疾病问题所造成的健康损失。1992年,哈佛大学的Murray和Lopez^[8]提出了疾病负担最常用的量化指标——伤残调整生命年(disable adjusted life years, DALYs)。DALYs综合考虑了由过早死亡和发病导致的人口健康寿命年损失的时间长度(单位为年),已被世界卫生组织(World Health Organization, WHO)认可,被广泛用于

比较全球、国家和地区等不同疾病造成的损失^[9,10]。

由于有些疾病与环境暴露密切相关,根据全球疾病负担(global burden of disease, GBD)研究提出的比较风险评估理论^[11],采用人群归因分析法,可得某风险因素导致的该疾病人群归因比例(population attributable fraction, PAF),进而得出该因素的人群疾病负担(图1)。环境风险因素(如室内外空气污染)暴露造成的疾病负担统称为环境疾病负担(environmental burden of disease, EBD),它综合考虑了环境风险因素的暴露(浓度)水平和健康风险。

美国劳伦斯伯克利国家实验室的Logue等人^[12]结合疾病发病率与DALYs健康效应评估模型,建立了“摄入量-发病率-DALYs”模型和“摄入量-发病率”模型,总结了77份来自美国及其他国家住宅空气污染物浓度的研究报告,排除了霉菌、过敏原等生物性污染物,考虑了毒理学以及流行病学资料的影响,最终选取了70种空气污染物,评估了长期吸入这些污染物所引起的人均健康成本^[13]。

欧洲比利时、芬兰、法国、德国、意大利和荷兰6国的研究者合作开展了Environmental Burden of Disease in European Countries(EBODE)项目研究,比较了六国间主要室内空气污染物的环境疾病负担,确定的九大室内危险因素为苯、二噁英、二手烟、甲醛、铅、噪声、臭氧、PM_{2.5}、氡^[14]。

全球疾病负担项目中包括了部分室内空气污染物的疾病负担评估^[15,16],空气污染包括PM_{2.5}、住宅固体燃料所致空气污染、臭氧污染以及氡^[16]。

在科技部“十三五”重点研发计划项目“建筑室内空气质量控制基础理论和关键技术研究”资助下,2017年起,清华大学、北京大学和复旦大学等近10所高校和科研单位联合开展了“中国城市室内空气污染疾病负担研究”,旨在调研我国室内空气主要污染物浓度水平,分析相应的疾病负担,借此获得我国室内空气污染物的主控清单,为完善我国室内空气质量标准体系提供基础数据支撑。

图1 环境疾病负担估算基本流程^[10]

Figure 1 Process of estimating environmental burden of diseases (EBD)^[10]

在室内空气主控污染物确定后,其阈值的确定不仅要考虑健康收益(如降低的疾病负担、死亡人数或折算成的经济损失),还要考虑技术和经济可行性. Xiang 等人^[17,18]分析了室内 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧浓度采用不同标准阈值对我国死亡人数的降低情况,为室内空气污染物标准阈值确定提供了方法和数据支撑.

最近, Li 等人^[19]指出, $\text{PM}_{2.5}$ 就像很多化学物质和其他自然成分(如灰尘及微生物)组成的鸡尾酒一样,其毒性因时因地而变化,这种变化难以被追踪、理解和控制;研究者和政策制定者需要再思考这些成分不同的污染物健康风险评估方法和法规措施,以降低其健康风险. 在暴露水平相似时,欧洲和北美人群更容易因心脏病或急性呼吸道疾病而死亡^[20]. 复旦大学阙海东教授课题组^[21]在 *The New England Journal of Medicine* 上报了对全球 24 个国家 652 个城市 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 和全因心血管、呼吸道死亡关联的分析结果. 他们发现,不同颗粒物成分、长期空气污染水平、人群敏感性等因素对不同国家和地区的死亡关联分析结果有影响.

我国地域辽阔,自然条件和经济发展水平差异很大,大气 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度水平和成分差异明显. 因此,我们建议今后室内空气质量相关标准制定和修订时,应考虑按 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度水平和成分特征划分区域,并确定相应标准阈值,作为工程防控的标准基础. 这种区分地域的做法,可在全国室内空气质量标准中体现,也可由各地根据当地特点和需求制定地方标准实现.

此外,目前的健康建筑还基本停留在防病建筑理念上,在室内空气质量控制方面主要考虑的是防控污染物,尚未探索室内空气健康增强原理. 人们喜欢森林、高山和海边的清新空气,它们有什么特征? 它们对人体健康的影响机理是什么? 对人学习和工作效率的提高程度如何? 是否可增强健康? 这些都是值得今后深入研究的问题. 研究要想取得突破,将主要依赖于毒理学和公共卫生学领域研究者的努力,但也需要工程科学领域研究者的协同合作,为精细化暴露分析提供技术手段和仪器设备.

3.2 发展目标导向的反问题分析法,确定节约高效的室内空气温湿度和污染物浓度控制系统和策略

在室内空气质量控制方面,目前国内外常用的正问题即“以因求果”方法(给定污染负荷、选择控制方式后确定相关设备,然后优化运行)存在以下不足: (1) 一般只关心空气质量,而没有考虑与室内空气温湿度的综合控制; (2) 通过有限方案比较,难以确定“最佳”控制方式和设备,因为有限案例中的最佳并非真正意义上的最佳. 对给定气候区域、给定条件下的室内空气温湿度和污染物浓度的最佳综合、分级控制方式和设备,需采用以目标导向的反问题求解法,即以满

以控制代价(能耗或费用)最小为优化目标,探索相应的空气处理过程-最佳处理过程,并以此定出控制设备形式和运行策略. 如 3.1 节所述,我国地域辽阔,不同地区(如东部地区、京津冀地区、长三角地区、珠三角地区和西部地区)的气候条件和室外大气污染情况不同,建筑功能和其间的人员活动情况也不同,因此要探索不同地区 and 不同建筑的空气处理最佳过程和相应设备形式,以此作为空气处理过程和设备工程设计及运行优化的基础.

对非全空间、全时间有人的室内空间,局部时间、局部空间控制方式可显著节约控制成本(能耗或费用). 由于在一些建筑室内(如办公室),人员在其中的活动区域和活动时间往往很有限,室内空气质量控制时应重点关注人员活动区域和活动时间. 例如,住宅建筑中无需对每个房间的空气同时净化,仅需要净化有人员活动的房间空气即可. 此外,在人员呼吸区附近进行空气净化,将显著降低系统能耗和运行费用(图 2). 但是,如何发展相应的工程设计和运行优化方法,仍需要建筑环境领域的研究者深入研究.

要实现实时运行优化,需发展精度满足控制要求、价格可接受、性能可靠的 $\text{PM}_{2.5}$ 、室内典型 VOCs 和 CO_2 浓度传感器以及温湿度传感器. 目前市场上销售的一些甲醛和 VOCs 浓度传感器,性能参差不齐,难以满足上述要求,这方面技术的突破将主要依赖于材料领域和电子信息领域的研究者. 此外,需制定相应性能检定方法和标准进行识别和遴选.

3.3 发展室内空气质量控制效果科学评价方法

从根本上说,健康建筑的室内空气质量控制效果要靠其中的人来判断. 达到国家或行业等相关标准,只是基本要求.

近年来,随着毒理学和公共卫生学的发展,以及工程科学和它们的交叉渗透,暴露科学也迅速发展. 通过人体内暴露测量和生物标志物水平反映的健康风险也越来越多地被用于工程控制手段和效果优劣的判断,一定程度上

图2 (网络版彩色)局部空间控制示意图

Figure 2 (Color online) Schematic shown of partial-space-control

克服了传统工程控制只用目标污染物浓度判断的不足。譬如, Day 等人^[7]采用生物标志物评价了采用微量臭氧的空气净化系统对人体健康的影响, 他们发现, 即使空气净化系统出口臭氧浓度远低于国家室内空气质量标准浓度限值, 也仍会对人的呼吸道和心血管造成短期危害。受医学研究伦理学要求, 一些空气污染对健康影响的毒理学实验难以用人开展, 动物实验可以弥补上述不足。Zhang 等人^[6]研究发现, 暴露在波动甲醛浓度的小鼠受到的健康危害水平高于暴露于恒定甲醛浓度的小鼠, 尽管两者的时间平均浓度一样。

今后, 应将动物毒理学实验、人群干预-生物标志物实验和流行病学横断面调研和队列研究有机结合, 更好地破解室内空气质量控制效果难以科学评价的难题。

3.4 破除行业分割, 实现贯通控制

第一, 我国室内空气质量控制相关行业要以提升我国民众健康水平为最高目标, 打破行业利益垄断思想。如果相关行业(如建材、家具、家电、建筑等行业)优先考虑自身行业利益, 按“肥水不外流”的思路做事, 我国的室内空气质量控制就很难做好。

第二, 要建立统一的“语言体系”。目前我国在不同行业或专业中的室内空气质量相关术语差异明显, 以挥发性有机化合物 VOC 为例, 它在国家标准《室内装饰装修材料内墙涂料中有害物质限量》(GB 18582)、《民用建筑工程室内环境污染控制规范》(GB 50325)、《室内空气质量》(GB/T 18883)代表的产品业、建筑业、环境卫生业中的定义很不一样。其中, GB 18582 和 GB 50325 采用的是沸点定义, 但校准化合物完全不一样, 而 GB/T 18883 采用的是 $C_6 \sim C_{16}$ 定义, 也就是同一气体在 3 种方法中测试结果完全不一样。即便是一些常见的概念, 如新风量等在暖通空调(Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC)专业主编的国家标准《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736)和公共卫生专业主编的《室内空气质量》(GB/T 18883)中也存在差异。在 GB 50736 中, 新风量是机械设备提供的室外空气量; 而在 GB/T 18883 中, 新风量是指机械设备提供的空气和建筑渗透风量之和。因此, 建立统一的术语标准对解决上述问题很有必要。

第三, 要统一室内空气质量控制相关行业的标准体系。自 2001 年开始, 我国室内空气污染控制主要依靠 10 项建筑装饰装修材料标准(GB 18580~GB 18588 和 GB 6566)、《民用建筑工程室内环境污染控制规范》(GB 50325)以及《室内空气质量》(GB/T 18883)。但是, 标准执行了 10 余年室内空气污染情况依然严峻, 主要表现为建筑中即使采用了符合国家标准装饰装修材料产品, 室内甲醛、VOC 等化学污染仍然会超标。其中一个根本原因是目前建材和装饰装修材料行业的甲醛、VOC 限量和测试方法标准, 测

定的参数不是材料物性参数或释放特性参数, 不能用于建筑行业的室内空气质量控制设计和评价。为此, 需要材料和建筑行业的研究者协同攻关, 研发更多的材料 VOC 释放物性参数测定方法, 完善相关技术和设备, 并通过标准推广应用破解上述问题。

第四, 要建立目标统一、环节完整的工程技术体系。工程建设主要包括规划设计、施工验收、运营环节, 各个环节对不同时间段, 其目标 and 责任方并不完全一样。一个典型怪象就是采用一些短期有效的净化技术应用于验收阶段, 帮助项目通过工程验收, 但并没有真正解决运营阶段的问题。近年来, 在工程设计上制定了《住宅建筑室内装修污染控制技术标准》(JGJ/T 436-2018)和《公共建筑室内空气质量控制设计标准》(JGJ/T 461-2019)等, 一定程度上缓解了上述问题, 但是整个体系仍不完整。今后应完善工程建设和标准体系, 要特别加强建筑运营阶段室内空气质量的优化控制和科学评价。

第五, 要建立目标统一的“管、产、学、研、教”的协同合作体系。室内空气质量研究和应用单位主要包括高校、研究院、房产商、产品商及管理方等, 由于它们社会分工很不一样, 因此特长和关注点大相径庭。今后如何加强它们之间的合作, 需通过很好的顶层设计和商业模式实现。只有从顶层设计好室内空气质量控制全链条单位的责、权、利, 才能使它们更好地协同合作, 更好地实现认知提升、技术创新和产业发展, 满足人们的健康呼吸需求。

3.5 注意采用大数据及其分析技术, 发展室内环境人因学和工程控制理论

过去, 研究者由于技术和交流的限制, 得到的数据非常有限, 且往往局限于各自领域。现在, 互联网、物联网发展迅猛, 由于探测技术和手段快速更新和发展, 我们可以获得大量过去很难获得的数据, 包括室内环境参数数据和人体健康数据, 它们可以汇集成“大数据”。与此同时, 人工智能技术快速发展, 可以对这些大数据深入分析, 克服传统研究中的主流分析方法的不足, 突破对确定关系、因果关系、分学科规律分析方法的局限, 发展新的分析方法——概率关系、关联关系、跨学科规律的分析方法。同时, 热力学中的品位分析方法、分析力学中的泛函分析方法、公共卫生流行病学中的关联性分析方法, 会在这些大数据分析中得到广泛应用并不断发展。一些伴随大数据出现的新的分析方法也会应运而生并迅速发展, 使相伴的方法论产生从量的变化到质的变革。

由于大数据分析技术的发展和建筑环境和人群健康大数据的深入解读, 人和室内空气环境的关系认知可望显著深化, 相应的室内空气环境控制技术也会随之发展。在此基础上, 有望形成比目前认知和工程控制理论更深入

的“室内空气环境人因学和工程控制理论”。

4 结束语

面对我国室内空气质量控制迫切的社会需求问题,借助于我国健康建筑理念和实践的推广,我们一方面要学习和借鉴发达国家的有关经验和教训,另一方面要深入研究我国的相关国情,挖掘我国室内空气质量控制的基础科学

问题、关键技术问题及行业分割问题。通过相关学科交叉融合、相关行业协同合作,结合信息时代的技术特点和其带来的方法论变革,建立“室内空气环境人因学和工程控制理论”,完善我国室内空气质量控制标准与技术体系,并在实际应用中检验和改进,以此带动室内空气质量控制相关行业的发展,从而破解我国复杂和严峻的室内空气质量问题。

致谢 感谢国家重点研发计划(2017YFC0702700)、国家自然科学基金(51976106)和“清华大学建筑学院可持续住区研究中心”资助。

推荐阅读文献

- 1 Wang Q Q, Meng C, Zhang Y P, et al. Healthy Building: From Concept to Practice (in Chinese). Beijing: China Building Industry Press, 2018 [王清勤, 孟冲, 张寅平, 等. 健康建筑: 从理念到实践. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018]
- 2 Wang Q Q, Meng C, Li G Z. Demand and prospective of healthy buildings (in Chinese). J HV&AC, 2017, (7): 32–35 [王清勤, 孟冲, 李国柱. 健康建筑的发展需求与展望. 暖通空调, 2017, (7): 32–35]
- 3 Wang Q Q, Meng C, Li G Z. Introduction of *Healthy Building Assessment Standard* (T/ASC 02-2016) (in Chinese). Build Sci, 2017, 33: 163–166 [王清勤, 孟冲, 李国柱. T/ASC 02-2016《健康建筑评价标准》编制介绍. 建筑科学, 2017, 33: 163–166]
- 4 Zhang Y P, Mo J H, Cheng R. Develop sustainable indoor air environment: Problems, reflections and suggestions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1651–1660 [张寅平, 莫金汉, 程瑞. 营造可持续室内空气环境: 问题、思考和建议. 科学通报, 2015, 60: 1651–1660]
- 5 Birnbaum L S. Environmental chemicals: Evaluating low-dose effects. Environ Health Persp, 2012, 120: 143–144
- 6 Zhang X, Zhao Y, Song J, et al. Differential health effects of constant versus intermittent exposure to formaldehyde in mice: Implications for building ventilation strategies. Environ Sci Technol, 2018, 52: 1551–1560
- 7 Day D B, Xiang J B, Mo J H, et al. Pathophysiologic mechanisms underlying cardiorespiratory effects of ozone in healthy adults. J Am Med Assoc Intern Med, 2017, 177: 1344–1353
- 8 Murray C J, Lopez A D. The Global Burden of Disease. Cambridge: Harvard University Press, 1996
- 9 GBD 2016 DALYs and HALE Collaborators. Global, regional, and national disability-adjusted life-years (DALYs) for 333 diseases and injuries and healthy life expectancy (HALE) for 195 countries and territories, 1990–2016: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. Lancet, 2017, 390: 1260–1344
- 10 Hänninen O, Knol A B. European Perspectives on Environmental Burden of Disease: Estimates for Nine Stressors in Six Countries. Helsinki, Finland: University Printing, 2011
- 11 Lim S S, Vos T, Flaxman A D, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. Lancet, 2012, 380: 2224–2260
- 12 Logue J M, McKone T E, Sherman M H, et al. Hazard assessment of chemical air contaminants measured in residences. Indoor Air, 2011, 21: 92–109
- 13 Logue J M, Price P N, Sherman M H, et al. A method to estimate the chronic health impact of air pollutants in U.S. residences. Environ Health Persp, 2012, 120: 216–222
- 14 Hänninen O, Knol A B, Jantunen M, et al. Environmental burden of disease in Europe: Assessing nine risk factors in six countries. Environ Health Persp, 2014, 122: 439–446
- 15 Zhou M G, Wang H D, Zeng X Y, et al. Mortality, morbidity, and risk factors in China and its provinces, 1990–2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. Lancet, 2019, doi: 10.1016/S0140-6736(19)30427-1
- 16 GBD 2017 Risk Factor Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. Lancet, 2018, 392: 1923–1994

- 17 Xiang J B, Weschler C J, Wang Q Q, et al. Reducing indoor levels of “outdoor PM_{2.5}” in urban China: Impact on mortalities. *Environ Sci Technol*, 2019, 53: 3119–3127
- 18 Xiang J B, Weschler C J, Zhang J, et al. Ozone in urban China: Impact on mortalities and approaches for establishing indoor guideline concentrations. *Indoor Air*, 2019, 29: 604–615
- 19 Li X D, Jin L, Kan H D. Air pollution: A global problem needs local fixes. *Nature*, 2019, 570: 437–439
- 20 Chen R J, Yin P, Meng X, et al. Fine particulate air pollution and daily mortality: A nationwide analysis in 272 Chinese cities. *Am J Respir Crit Care Med*, 2017, 196: 73–81
- 21 Liu C, Chen R, Sera F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *New Engl J Med*, 2019, 381: 705–715

Summary for “多学科和多行业协同破解建筑室内空气质量难题”

Tackling difficult problems through collaboration among multi-disciplinary research and industry

Yinping Zhang^{1*}, Jingguang Li², Wei Liu¹ & Zhiwei Sun¹

¹ Department of Building Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

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

* Corresponding author, E-mail: zhangyp@tsinghua.edu.cn

Healthy building is a new trend after green buildings in the world. “WELL” was launched as the first guideline for healthy buildings in 2014 in USA. In 2017, China *Healthy Building Assessment Standard* was launched. Good indoor air quality is an important part for healthy buildings. The score of indoor air quality accounts for nearly 25 in the total score (100) in *Healthy Building Assessment Standard* (T/ASC 02-2016). The indoor air quality items in the standards are mainly based upon China *Indoor Air Quality Standard* (GB/T 18883-2001). However, the target indoor air pollutants in the both standards (T/ASC 02-2016 and GB/T 18883-2001) are not determined based upon the indoor air quality investigations in China. In order to revise the China *Indoor Air Quality Standard* (GB/T 18883-2001) and improve or develop the relevant indoor air quality control techniques, it's necessary to know the important and unsolved problems in indoor air quality control in China. From them, the important scientific problems and key technical problems in China can be identified, and the gaps between the control demands and the levels of the related industries in China can be recognized. Then, various control approaches and strategies can be developed effectively. For this purpose, we present a series of important and unsolved problems in indoor air quality control in China: Identify the target indoor air pollutants and the corresponding thresholds based upon China's indoor air quality situations, develop energy efficient engineering approaches to simultaneously control indoor air climate and quality, and develop the approach of scientific evaluation for indoor air quality control effect. The important scientific and key technical problems behind them are: The method of determining the target indoor air pollutants, the method of determining the thresholds of the target indoor air pollutants, the principle and method to overall control of indoor air climate and quality, the method of scientific evaluation for indoor air quality control effect not only based upon the concentrations of the target indoor air pollutants but also based upon the human health response. We are carrying out a national research project whose title is “study on fundamental problems and key technical approaches in indoor air quality control”. Based upon its research advance, we put forward a framework and understanding of solving the aforementioned problems: (1) Determining the target indoor air pollutants based upon the burden of diseases of indoor air pollutants in China. In the study, the burden of diseases of all target indoor air pollutants is obtained so that the overall burden of diseases of indoor air pollution can be roughly estimated. It's a quantitative index to show the importance of indoor air quality problems in China. (2) Determining the corresponding thresholds of the indoor air pollutants based upon the control feasibility and the health benefit. The healthy benefit can be evaluated by the reduction of burden of diseases of the target indoor air pollutants which can also be equivalent as the reduction of economic loss. (3) Developing inverse problem and variation method to identify the optimal control systems and operative strategies. It's an original novel approach for indoor air quality control. (4) Developing some partial space and/or partial time control approaches for indoor air quality. (5) Developing novel evaluation method for control effect by using biomarker-based techniques. (6) Narrowing or even removing the gaps between the indoor air quality control related industries. The indoor air quality control standards in those industries shouldn't conflict each other. (7) Applying various newly-developed sensors and big data techniques to understand the links between the indoor air quality and human health response. New on-line monitoring sensors with acceptable precision, together with some new big-data analysis methods are strongly needed. To tackling the above problems which are related to many disciplines, collaboration among multi-disciplinary research and industries is very important.

healthy building, indoor air quality, building environment, indoor air climate, multi-disciplinary collaboration

doi: 10.1360/TB-2019-0466