

营造可持续室内空气环境: 问题、思考和建议

张寅平*, 莫金汉, 程瑞

清华大学建筑技术科学系, 北京 100084

* 联系人, E-mail: zhangyp@tsinghua.edu.cn

2015-01-19 收稿, 2015-02-03 接受, 2015-04-20 网络版发表

国家自然科学基金(51136002, 51476013, 51478235)资助

摘要 人们在室内环境的时间超过80%, 室内空气环境质量对人的健康、舒适和工作效率影响很大. 近20多年来, 我国经历了快速的城镇化进程和经济发展, 城市建筑面积持续高速增长, 在人们生活水平不断提高的同时, 也出现了一系列室内空气环境问题: 建筑能耗不断攀升, 加剧了我国能源供需矛盾和大气污染问题; 人们对室内空气环境质量的要求越来越高, 在一些地区要采用传统思路和方法满足这些要求会面临能源供给不足和环境容量有限的刚性约束; 大气污染和室内材料散发的污染物降低了室内空气质量、危害人们健康. 本文以目前国际上特别是我国室内空气环境的若干典型问题为例, 分析它们产生的原因, 指出其中一些尚未解决的关键科学和技术问题, 基于文献调研和作者自身的科研实践和思考, 提出要营造我国以“健康、适用和节能”为特征的可持续室内空气环境需要新思路和新方法, 并提出一些可供讨论或参考的建议.

关键词

建筑环境
建筑节能
暖通空调
热舒适
室内空气质量
建筑通风

1 近年来出现的室内空气环境问题及其产生原因

建筑及其构建的室内环境是人类从早期的自然栖息地(如洞穴)中逐渐发展起来的, 是人们为了满足生活和生产需要, 利用所掌握的物质资源和技术手段, 并运用对自然规律的认识和对美的追求营造的. 建筑早期主要功能是遮风挡雨、防暑避寒, 形成比外环境适宜的生活空间. 根据现存最早的罗马时代的建筑家维特鲁威著的《建筑十书》记载^[1], 建筑的要素应具备实用(utilitas)、坚固(firmitas)和美观(venustas)的特点. 这种早期的建筑形式及其构造特征经过长期的改造或改良, 比较符合当地的自然条件(气象、物质资源状况)、民俗风情、生活习惯和生产需求. 在这个阶段, 建筑往往没有所谓的“职业建筑师”设计, 却与自然和谐, 并能满足人们的日常生活和生产的基本需求. 这类建筑地域性很强, 其室内

环境虽达不到完全舒适的要求, 却往往利用了当地自然条件所提供的能力极限.

1902年, 美国的威利斯·开利(Willis Haviland Carrier)博士发明了空气温湿度调节装置, 解决了当时印刷车间温湿度不稳定造成的印刷质量问题. 可以说, 空调的功能最早主要是为满足生产空间的温湿度要求, 因此被称为“工艺空调”. 但随着经济的发展和人们生活水平的提高, 空调逐渐成为了满足人们居住、办公和公共环境温湿度舒适要求的手段, “舒适空调”成为了空调业的主流^[2].

最近100多年来, 空调的出现对建筑的形式产生了巨大影响, 建筑的选址、围护结构形式和材料的选择不再受自然条件的限制, 建筑的规模和外形也发生了很大变化. 值得一提的是, 空调在给建筑师的建筑设计带来更大自由发挥空间的同时, 也会带来严重的能耗和环境问题. 20世纪70年代出现的能源危机使人们认识到地球上的化石能源并非取之不尽、用之

引用格式: 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

Zhang Y P, Mo J H, Cheng R. Developing a sustainable indoor air environment: Problems, considerations and suggestions (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1651-1660, doi: 10.1360/N972015-00053

不竭,节能成为了全世界共同关注的重要问题^[2].建筑能耗(主要为空调和采暖能耗)约占社会总能耗的1/4~1/3(<http://www.cisl.cam.ac.uk/Resources/Climate-and-Energy/Climate-Change-Implications-for-Buildings.aspx>),如何在保障室内环境舒适的前提下尽量节约建筑能耗成为了全世界的热点问题.作为建筑节能的有效手段,美国、日本和欧洲的一些发达国家开始降低建筑新风量、提高建筑围护结构保温性能和空调设备的能效,美国采暖、制冷和空调工程师学会(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)在1981年修订的新风量标准中明显降低了新风量^[3],就是这一背景下的产物(图1).

与此同时,全球化学产品的产量不断增加,其年增长速率(3%)超过了人口年增长速率(0.77%)(图2)^[4].大量人工合成材料由于价格低廉、性能优越,被用于建筑构件、保温材料和装饰装修材料,其中一些会散发对人体有害的物质,如挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)^[5-10]和半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds, SVOCs)^[11].它们会污染室内空气,危害人们健康.

由于上述原因,20世纪80年代起,世界上一些发达国家首先出现了室内空气质量问题,引发的健康

危害开始被关注.美国环境保护署(Environmental Protect Agency, EPA)历时多年的调查结果显示,许多民用和商用建筑中的空气污染程度是室外空气污染数倍至逾百倍^[7];美国每年因室内空气质量低劣造成的经济损失高达 4.00×10^{10} 美元^[12].世界卫生组织(World Health Organization, WHO)公布的“2002年世界卫生报告”显示,人们的空气污染暴露主要来自室内^[13].

丹麦技术大学室内空气领域的著名专家Fanger^[14]于20世纪70年代初完成的热舒适(thermal comfort)理论成为了室内空气热湿环境(indoor climate)营造的基础.他于1978年在丹麦哥本哈根发起并举办了第一届国际室内空气大会,后来被当作室内空气(indoor air)领域(包括室内热湿环境(indoor climate)和室内空气质量(indoor air quality)两部分)的开始^[15].该系列会议此后每3年举办1次,至今已举办13届.1991年,室内空气领域国际期刊*Indoor Air*创刊,至今已成为该领域顶尖国际期刊.2004年Fanger等人^[16]还特别指出:“室内空气质量对人健康的影响比室外空气更重要”.国际室内空气科学院前主席、*Indoor Air*前主编(任期2001~2010)、清华大学瑞典籍教授Sundell^[17]指出:“越来越多的科学证据表明‘现代疾病’与‘现代暴露’密切相关,对那些在现代才出现

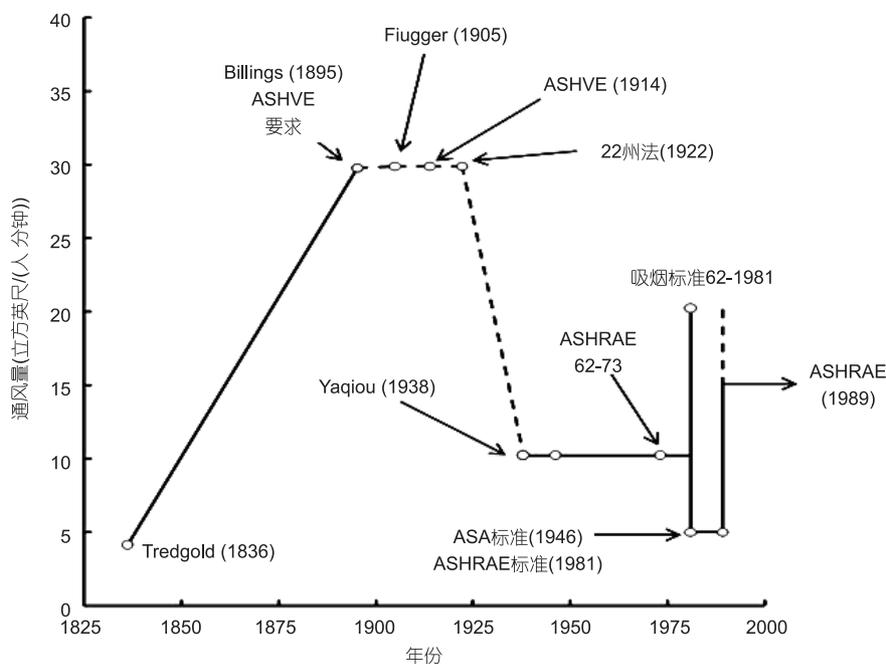


图1 建筑新风量标准值的变化情况^[3]

Figure 1 Variations of fresh air rate required in different standards^[3]

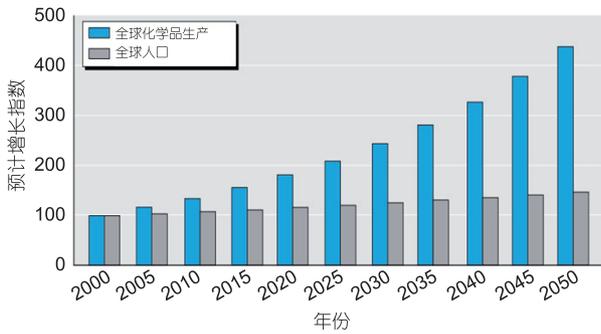


图2 (网络版彩色)全球化学产品和人口增长情况^[4]

Figure 2 (Color online) Projected growth index of global chemical production and population^[4]

的新型化学物质,人类和自然都没有足够的时间适应它们以至产生新的疾病——‘现代疾病’。‘现代疾病’的致病机理还不清楚,相关研究非常缺乏,大多数必须的科学的研究还没有进行,甚至还没有开始。”

我国系发展中国家,1978年改革开放后经济才得以迅速发展,因此,我国室内空气环境问题出现的时间比发达国家迟了约20年。但我国的城镇化和现代化进程却非常迅猛,其规模和速度举世罕见(图3)^[18]。由于建筑面积的不断扩大,建筑空调和采暖能耗不断增加。2001~2012年,我国建筑商品能耗总量及其中电力消耗量均大幅增长(图4)。2012年建筑总能耗(不含生物质能)为 6.90×10^8 tce(吨标准煤),约占全国能源消费总量的19.1%,此外,生物质能耗约 1.17×10^8 tce^[19]。

为了缓解我国日益紧张的能源供需矛盾,有识之士已清晰地认识到我国的建筑用能不能走发达国

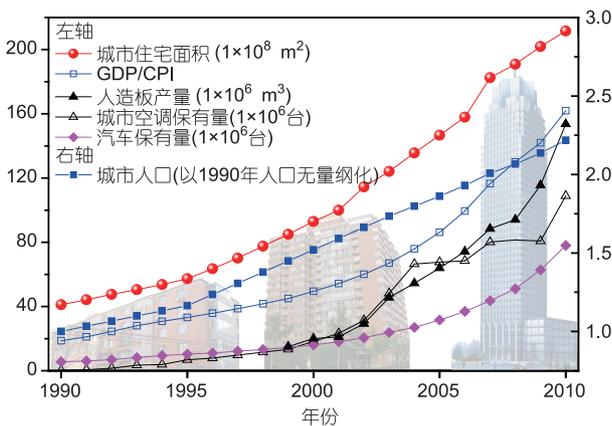


图3 (网络版彩色)1990~2010年间中国快速现代化和城镇化进程的部分指标^[18]

Figure 3 (Color online) Various indicator of rapid modernization in China during the period 1990~2010^[18]



图4 (网络版彩色)建筑商品能耗总量及用电量^[19]

Figure 4 (Color online) Total commercial energy and electricity consumption of the building sector^[19]

家的老路。国务院先后出台《节能减排“十二五”规划》和《能源发展“十二五”规划》。党的十八大提出了基于“能耗总量控制”的节能路线,未来建筑规模应控制在 6.00×10^{10} m²,建筑用能总量不应超过 1.00×10^9 tce,这成为了我国建筑节能工作的刚性约束^[19]。

我国《民用建筑热工设计标准GB50176-93》^[20]制定时考虑的基点是:当时经济发展水平不高,因此着重考虑北方严寒和寒冷地区人们的供暖需求。随着我国经济发展水平的不断提高,夏热冬冷地区的居民也开始使用各种设备进行采暖,但由于此地区围护结构保温性能不好,因此过去建筑节能工作中的“次要矛盾”上升成了如今的“主要矛盾”之一。如何兼顾该地区的室外气象条件和居民生活习俗,提出合适的冬季采暖方式及相应的围护结构构建及评价方法,是相关标准制定者的一项重要任务。

与此同时,我国的室内外空气质量显著下降,令人担忧,主要表现为:

(1) 从20世纪90年代起,我国城市每年新建建筑量逾 1.00×10^9 m²,以人造板为主要原材料的建筑装饰装修材料和复合木家具被大量使用,其中不乏一些会散发甲醛和VOCs(如苯、甲苯)的材料和产品^[21],造成了近年来我国一些城市的甲醛、苯等VOCs污染比国际上很多国家的城市 and 地区更为严重(图5和6)^[22,23]。建筑装饰引发的百姓空气污染抱怨和纠纷在20世纪末和21世纪初在我国屡见报端,危害人们健康,成为了严重的社会问题。

(2) 我国增塑剂和阻燃剂产量及消费量均列世界前茅,SVOC在很多室内材料和物品中大量使用,对我国人民的健康影响尚未引起足够关注,产品中SVOC的限量标准还很欠缺或欠科学^[24]。

(3) 室内空气净化器标准不够完善,一些空气净

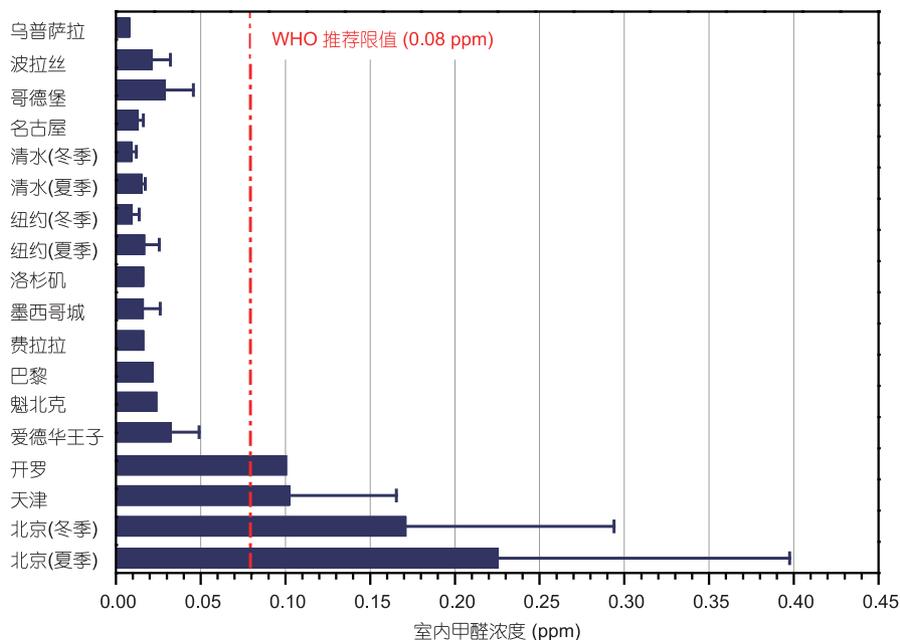


图5 (网络版彩色)不同国家代表城市室内空气中甲醛浓度检测结果比较(25℃环境下, 1 ppm=1.23 mg/m³)^[22]

Figure 5 (Color online) Indoor formaldehyde concentrations of representative cities in different countries(1 ppm=1.23 mg/m³ at 25°C)^[22]

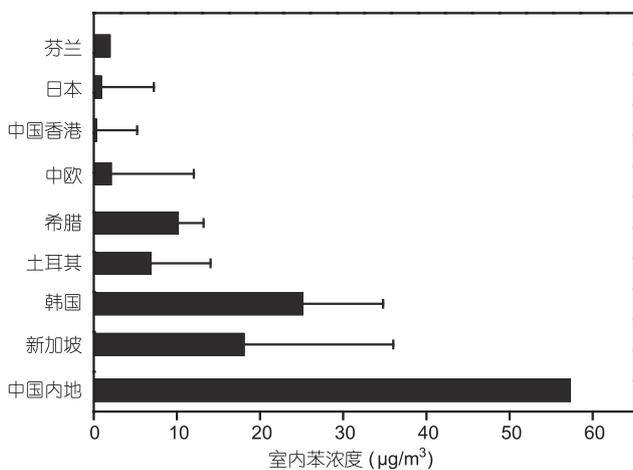


图6 不同国家、地区和代表城市室内空气中苯浓度检测结果比较^[23]

Figure 6 Indoor benzene concentrations in different countries, a region and a representative city^[23]

化器检测机构执法不严, 导致空气净化器市场鱼龙混杂、良莠难辨, 一些空气净化器在“净化空气”的过程中, 产生有害副产物, 使室内空气质量“雪上加霜”^[25]。

(4) 室外空气污染相当严重. 近年来我国煤炭消耗量逐年增长, 而燃煤过程往往大量排放SO_x, NO_x及颗粒物; 此外, 我国近年来城市汽车数量急增, 增长率和增长总量处于世界前列, 汽车尾气排放加剧了

大气污染. 2013年初, 主要由PM_{2.5}污染导致的雾霾天气侵袭我国东部大部分地区, 受害面积高达1.35×10⁶ km²(<http://www.weather.com.cn/news/1810351.shtml>), 首都北京成为污染最严重的城市之一. 最近的全球疾病负担研究指出: PM_{2.5}是我国排名第4的健康危险因素, 2010年导致120多万人死亡和2500万健康生命年的损失(<http://www.thelancet.com/themed/global-burden-of-disease>)^[26]. 但这种直接把大气污染和健康危害关联的作法欠科学, 因为人们在室内的时间高达80%以上, 其空气污染暴露主要发生在室内(即使对PM_{2.5}和臭氧这种主要源于室外的空气污染, 它们会通过建筑通风和围护结构渗透进入室内, 引发的人体暴露大部分也在室内)^[27,28]。

(5) 我国早期的室内空气质量相关标准主要借鉴国际或发达国家的相关标准, 其时我国对很多室内空气质量问题的研究尚未开展或刚刚开始, 缺乏较为全面和可靠的室内空气污染状况调查研究结果, 造成一些标准不符合我国国情或欠科学^[29]。

近年来我国空气污染相关疾病死亡率高居前10种的7种且不断增长(图7)^[18]。

2010年9月, 清华大学、重庆大学等10所大学室内环境领域和公共卫生领域的研究者进行了跨学科合作, 在北京、上海、重庆等10个重要城市启动了中国儿童家庭健康情况调研(China Children Homes

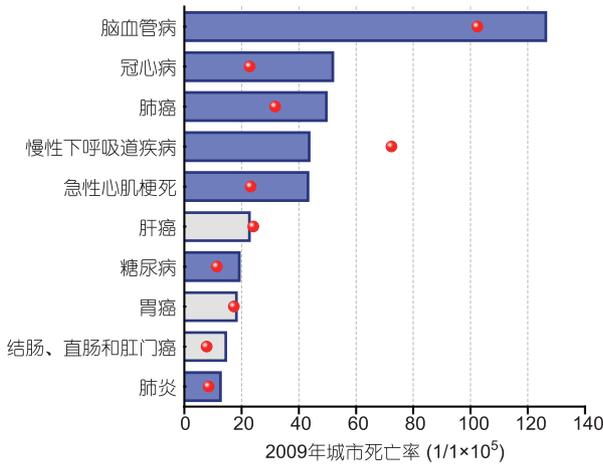


图7 (网络版彩色)我国城市死亡率最高的10种疾病(实心柱疾病与空气污染相关)^[18]。圆点为2003年的数据,柱状图为2009年的数据

Figure 7 (Color online) Top 10 mortality rates diseases in Chinese urban areas^[18]. Dots show the data of 2003; bars show the data of 2009

Health, CCHH). CCHH采用流行病学研究方法,旨在探索近年来我国儿童健康危害(以哮喘等过敏性疾病为代表)情况及其有显著影响的室内环境因素。研究发现,近20年我国儿童哮喘发病率大幅增长(图8)^[30],初步分析表明,室内环境因素和上述现象存在

很强的关联性,相关研究正在深入。

2005年召开的第十届全国人大政府工作报告中提出:“我们的奋斗目标是:让人民群众喝上干净的水,呼吸清新的空气,有更好的工作和生活环境”;2011年《国民经济和社会发展十二五规划纲要》指出:“以解决……空气污染等损害群众健康的突出环境问题为重点”。应该说,近年来我国室内空气质量问题已成为百姓担心、媒体关注、领导关心的重要社会问题。

2 室内空气环境领域社会需求问题举例

我国目前室内空气环境领域存在大量迫切需要解决的问题,由于我国城市和农村的室内空气环境问题的特点和研究方法存在很大差异,加之笔者对农村问题鲜有研究,因此下文的简介和分析仅针对我国城市的一些代表性可持续室内空气环境问题。

(i) 问题1. 随着我国经济的发展和人民生活水平的提高,我国长江中下游(夏热冬冷)地区要求冬季采暖的呼声越来越高,这一问题已受到领导和社会的广泛关注。但这一地区如果采用和我国北方地区(淮河以北)一样的集中供热方案和标准,不仅我国

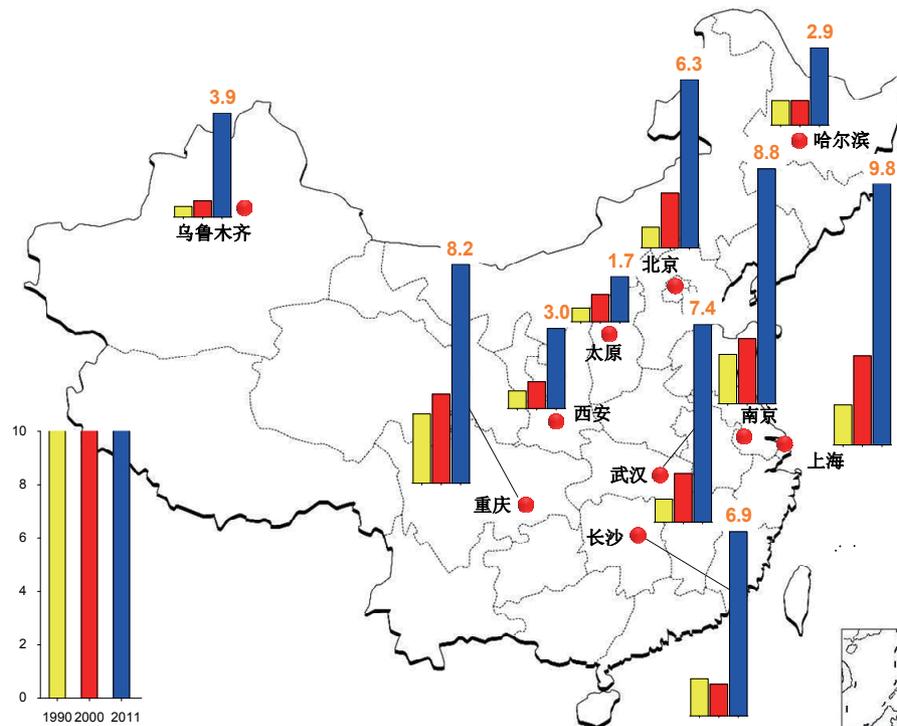


图8 (网络版彩色)全国10城市儿童哮喘患病率情况。太原3~5岁,武汉5~6岁,其余3~6岁;图中数字为百分数^[30]

Figure 8 (Color online) Prevalence of childhood asthma of 10 cities in China. Taiyuan 3–5 years old, Wuhan 5–6 years old, Other cities 3–6 years old; numbers are in percentages^[30]

的能源难以支撑,而且我国的大气污染问题还将严重恶化,将触及我国能源供给和环境污染“红线”而不可持续.江亿和朱颖心等人提出:如何在尽量满足社会公平性的情况下,考虑到长江中下游地区的气候特点、人们常年的生活习俗,在不触及能源和环境“红线”的前提下,发展适合这一地区的冬季采暖方式.这是室内空气环境领域的一个挑战性难题.

(ii) 问题2. 国际上现有的通风标准基本是依据发达国家的情况制定的,发达国家不仅大气空气质量较好,而且室内污染源散发强度也不高.据此国际上一些现行的通风标准(如ASHRAE 62.2-2013)规定了建筑新风量.但我国目前的情况是很多地区特别是大城市空气质量常常“内忧外患”:一些时间段室外空气中以 $PM_{2.5}$, O_3 , NO_x , SO_x 为代表的污染相当严重,不少建筑的室内空气中以VOCs, SVOCs和 $PM_{2.5}$ 为代表的污染物浓度也很高.发达国家可以用室外空气来稀释室内空气污染物(即通风手段)作为改善室内空气质量行之有效的办法,在我国一些地区和一些时间段却难以直接采用.我国地域辽阔,不仅按冷热可分为多个气候区,按大气污染的浓度水平和成分特征也应分成多个区域.不同功能的建筑新风量应为多少?不同区域的建筑如何通风和如何处理新风才能保证人的健康和舒适且最为节能?这些非常基本和重要的问题目前难有答案,是涉及室内空气环境是否可持续发展的又一个挑战性难题.

(iii) 问题3. 研究表明,我国居民“部分时间、部分空间”的使用方式是造成我国建筑能耗远低于发达国家的根本原因;与建筑使用和运行状况有关的人行为的差异,会导致建筑能耗的巨大差异.因此,针对不同人行为和生活方式,需要不同的建筑节能技术与之相适应.在建筑设计、使用和维护阶段,应通过合理的技术手段,鼓励和引导资源节约型生活理念和方式^[31-34].而且这种资源节约型理念的传承,是保证可持续发展的人的素质基础.离开这种基础,很多新技术带来的结果都会背离研发者的初衷,甚至背道而驰.因此,营造可持续室内空气环境不仅是科技问题,还应充分考虑人的行为动因和社会属性^[34],此外,相关研究不应忽视室内空气质量 and 人的健康.

(iv) 问题4. 营造可持续室内空气环境应从建筑师开始.以往建筑节能似乎成为了仅和暖通空调

工程师或研究者相关的任务,实际上,建筑师在建筑节能方面举足轻重,他们的工作直接会决定相关建筑节能与否.如果建筑师们“亡了羊”,而让暖通空调工程师去“补牢”,那是本末倒置,难免出现高能耗建筑.譬如建筑师设计的建筑外形和围护结构热性能很差,即使暖通空调工程师或研究者再神通广大,也难以构建既舒适又节能的室内空气环境.

(v) 问题5. 室内空气环境的营造不能只考虑舒适和节能,还要充分考虑健康.如何找到目前引发“现代疾病”的室内空气环境因素并加以有效控制?如何保证室内环境在满足“健康、舒适”的前提下尽可能节能,这是室内空气领域研究者面临的新挑战.

3 思考及建议

3.1 发展新的热舒适理论

要解决上述问题1,首先需要建立新的热舒适理论.目前室内环境营造主要基于Fanger^[14]的热舒适理论,它是建立在全空间区域、全时间时段、室内空气的温湿度都被调节到入着装很少还感到舒适的基础上的.该理论虽有独特的优点,但也有局限:(1)其营造的建筑环境需要强大的采暖和/或空调系统、很高的运行能耗做支撑才能实现;(2)忽略了不同气候地区的人们因长期气候适应性而造成的对室内环境冷热程度要求存在的差异;(3)忽略了人本能地需要自身生理冷热调节功能的“锻炼”,以及具有主动调节所在环境冷热程度的渴望和需求.因此,如果我国长江中下游地区的冬季采暖系统还按此热舒适理论构建,不仅没有必要,而且我国的能源和环境也难以支撑.早在20世纪90年代,赵荣义^[35,36]就指出了Fanger热舒适理论的上述局限,近10多年来朱颖心^[37]和赵荣义等人在上述方面做了大量工作,初步形成了考虑气候适应性的动态热舒适理论.这一理论正在发展和完善,它今后有望成为解决我国长江中下游地区冬季采暖问题的理论基础.

3.2 发展室内局部时间、局部空间空气环境控制理论与技术

要解决上述问题1,还要发展室内局部时间、局部空间空气环境控制理论与技术.目前的采暖规范和采暖负荷计算方法基本建立在全空间、全时间基础之上,在长江中下游夏热冬冷地区冬季采暖问题中,

完全可以摒弃此方案,以人的真实需求为中心,在可以满足人基本热舒适要求的前提下,优先考虑对人逗留的区域和时间段进行局部和间歇采暖的方案,为此需发展采暖负荷计算方法并研发相应采暖技术与设备,同时还要注意提高建筑围护结构的保温性能。实际上,我国很多地区的夏季空调即按此思路进行。李先庭等人^[38,39]在这方面开展了系列研究,他们分析了通过调节给定空间中气流组织以营造具有不同环境参数区域的实现方法,这方面的研究还在不断深入。

3.3 发展符合我国国情的建筑通风理论、技术与装备

解决上述问题2,首先要确定建筑最小新风量。在传统通风标准中,最小新风量的确定一定程度上兼顾了室内空气质量与节约新风输送和处理能耗。为此,建筑内空气中的二氧化碳浓度和温湿度常被当作确定新风量的主要指标。由于我国不少地区不少时间段大气污染(特别是PM_{2.5})和室内化学污染(譬如VOCs)严重,现有的发达国家采用的通风标准难以在我国直接应用,需在它们标准的基础上,发展兼顾PM_{2.5}浓度和室内典型VOCs浓度作为判据的建筑新风量确定方法,而且要在保障健康要求的情况下,再考虑舒适和节能。

其次要考虑新风采集方式。对于民用建筑,江亿^[40]多次指出:应优先鼓励人们根据气象条件和生活经验而进行的自然通风行为,在室内空气质量难以满足要求时再适当采用空气净化器作为补偿措施;对装有集中新风系统的办公或商用建筑,需发展精度满足控制要求、价格可接受、性能可靠的PM_{2.5}、室内典型VOCs和CO₂浓度传感器以及温湿度传感器,发展在保障健康、舒适条件下尽量节能的建筑通风理论和技术。目前市场上已出现一些PM_{2.5}和VOCs浓度传感器,但其性能参差不齐而且价格较高,亟待加强研发性能可靠、价格适宜的PM_{2.5}和VOCs浓度传感器,并制定相应性能检定方法和标准。

此外,还要加强新风过滤或净化系统或装置的维护和管理,避免其成为藏污纳垢的场所,否则不仅不能净化空气,还会降低室内空气质量。

特别需要注意的是,通风或净化方式的评价首先应该以健康效应为标准,其次考虑舒适和节能。当然,这其中需要开展大量研究,譬如以流行病学调查

或生物标志物为手段的人健康效应研究,污染物暴露途径和风险研究,不同类污染物的输运和复合特性研究,人的行为对污染暴露及控制的影响研究。开展上述研究,超出了传统室内空气环境领域的研究范畴,特别需要采用新思路进行跨学科研究。

3.4 在可持续室内环境营造和维护中充分考虑人的行为

住户的行为(如开关窗、窗帘关启)既会影响室内的热量,也会影响空调开启的时间和室内空气质量。特别对于间歇性供暖及空调,分析室内热湿环境时忽视人的行为,结果往往和实际情况大相径庭^[31-34]。

江亿和燕达等人^[41]近年来在人的行为对建筑能耗的影响方面做了大量研究,通过将马尔科夫链引入建筑人员作息的预测,较为准确地预测了住户的行为模式,为建筑能耗模拟中考虑人行为提供了新途径。当然,这方面的研究还在不断深化,如何在对人行为动因和群体行为统计规律深入理解的基础上,研发新的采暖和空调系统及控制方式,应是今后值得研究的方向。在这一方面的研究,需关注可持续建筑环境的问题,不能只考虑节能,还要关注室内空气质量以及人的健康。

3.5 加强建筑师和暖通空调工程师的合作

从建筑设计伊始,建筑师、暖通空调工程师就应在一起经常讨论,优化室内环境设计和控制方案,避免常常出现前者“亡节能之羊”、后者“补节能之牢”的尴尬局面。此外,我国的绿色建筑研究和实施正方兴未艾,绿色建筑不仅要在设计阶段进行预评估,还要在运行阶段进行实测评估,并找到预评估和实测评估偏离的原因,为两者更为科学的评估和建筑环境的科学设计、维护和管理提供指导和数据支撑。

此外,目前的建筑围护结构和空调末端各自独立,今后可以考虑在某些情况下两者的有机结合,这样不仅会提供建筑和室内环境的美观度,而且可以提高暖通空调系统性能。为此,建筑师和暖通空调设备师更需要在建筑设计阶段就一起合作,使建筑围护结构的性能可以根据季节和需求变化(从某种程度上看,像人根据季节和自身情况换衣服一样),这可以通过采用热物性随温度变化的材料实现,也可以通过围护结构形式(如Trombe墙)实现^[42,43],还可以通过在围护结构中的空调装置实现。

3.6 开展多学科交叉, 发展可持续室内空气环境构建理论

暖通空调领域的从业者需要营造和维护的室内空气环境不再局限于空气的温度和湿度这一“二元变量”, 还需同时关注空气中的污染物“变量”——有些污染物还未被充分识别, 甚至是“隐形变量”。目前, 较常见的室内空气污染物的种类很多, 因此, 从某种意义上说, 室内空气环境领域的“变量空间”一下从“二维”变成了“ n 维”($n \gg 2$), 显而易见, 控制或研究的难度也随之大增。

不仅如此, 原来的“二维空间”基本在热科学范畴, 学术语言基本属“物理语系”, 而现在的“ n 维空间”跨越了多个学科, 如热科学和能源工程、建筑环境科学和工程、环境科学和工程、材料科学、建筑学和生命科学等, 学术语言分属“物理语系”、“化学语系”、“生命科学语系”等——不同学科背景的人讨论起来说着不同的“学术语音”, 意难会、言难传。面临一个跨学科的室内空气环境问题, 单个领域的研究者常力不从心、无法解决。建议应设法打破我国现行教育体制下学科间的藩篱, 形成培养跨学科人才的土壤和条件。

此外, 在上述过程中要特别注意方法论的创新。过去, 研究者得到的信息有限, 且往往局限于各自领域, 因此其中的因果关系大多可以确定。而现在, 我们已经进入信息时代, 由于各种技术手段的更新和

发展, 我们可以获得大量过去很难获得的数据, 这些数据可以汇集成“大数据”, 其中一些会难以理解和深度消化。传统研究中的主流分析方法: 确定关系、因果关系、分学科规律的分析方法面对大数据往往显得力不从心, 需要发展新的分析方法: 概率关系、关联关系、跨学科规律的分析方法。量子力学中的基于概率的分析方法、热力学中的品位分析方法、分析力学中的基于最小作用量的变分分析方法^[44]、公共卫生流行病学中的关联性分析方法会在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长足发展, 使相伴的方法论产生从量的变化到质的变革^[2]。

4 结论

面对我国室内空气环境迫切的社会需求和严峻的研究挑战, 一方面, 我们需要很好地从发达国家的经验和教训中学习和借鉴, 另一方面我们要充分考虑我国的国情。与此同时室内空气环境学科需要和其他相关学科交融, 还要自身理念更新、知识融合, 并结合信息时代的特点, 进行方法论的变革。在此基础上发展符合我国国情的“可持续(即健康、适宜和节能)室内空气环境理论”, 并在实际应用中检验和改进, 以此带动建筑空气环境控制技术和设备的发展甚至变革, 破解我国目前迫切需要解决的室内空气环境重大需求难题。

致谢 感谢清华大学赵荣义教授和燕达副教授对本文的修改意见。

参考文献

- 1 Pollio W V. Ten Books on Architecture (in Chinese). In: Gao L T, ed. Beijing: Intellectual Property Rights Press, 2004 [Pollio W V. 建筑十书. 见: 高履泰, 译. 北京: 知识产权出版社, 2004]
- 2 Zhang Y P. Indoor air quality control: The challenges and responsibilities of HVAC researchers in the new century (in Chinese). Heating Ventil Air Condit, 2013, 12: 1-7 [张寅平. 室内空气质量控制: 暖通空调人新世纪的挑战和责任. 暖通空调, 2013, 12: 1-7]
- 3 Janssen J E. The history of ventilation and temperature control. ASHRAE J, 1999, 41: 48-72
- 4 Wilson M P, Schwarzman M R. Toward a new US chemicals policy: Rebuilding the foundation to advance new science, green chemistry, and environmental health. Environ Health Persp, 2009, 117: 1202-1209
- 5 Young M K, Stuart H, Roy M H. Concentrations and sources of VOCs in urban domestic and public microenvironments. Environ Sci Technol, 2001, 35: 997-1004
- 6 World Health Organization. Indoor air quality: Organic pollutants. EURO Report and Studies, 1989. 1-70
- 7 US EPA. Reducing risk: Setting priorities and strategies for environmental protection. US Environmental Protection Agency, 1990
- 8 Wolkoff P, Clausen P A, Jensen B, et al. Are we measuring the relevant indoor pollutants? Indoor Air, 1997, 7: 92-106
- 9 Molhave L. The sick buildings and other buildings with indoor climate problems. Environ Int, 1989, 15: 65-74

- 10 Weschler C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmos Environ*, 2009, 43: 153–169
- 11 Weschler C J, Nazaroff W W. Semi-volatile organic compounds in indoor environments. *Atmos Environ*, 2008, 42: 9018–9040
- 12 Haymore C, Odum R. Economic effects of poor IAQ. *EPA J*, 1993, 19: 28–29
- 13 World Health Organization. *The World Health Report 2002*, Geneva: WHO, 2002
- 14 Fanger P O. *Thermal Comfort*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1972
- 15 Nazaroff W W. Citations, impact factors, and indoor air: A look behind the numbers. *Indoor Air*, 2009, 19: 1–2
- 16 Fanger P O, Olesen B W. Indoor air more important for human health than outdoor air. In: Kristian S, Tine K, eds. *Bridging From Technology to Society*. Copenhagen: Press of Technical University of Denmark, 2004. 65–73
- 17 Sundell J. Climate change is the norm! Why focus on just one pop-problem at a time-energy, mould, sustainability or climate change? When is the time for real indoor air and health science? *Indoor Air*, 2010, 20: 185–186
- 18 Zhang Y P, Mo J H, Weschler C J. Reducing health risks from indoor exposures in today's rapidly developing urban China. *Environ Health Persp*, 2013, 121: 751–755
- 19 Building Energy Research Centre of Tsinghua University. *Annual Report on Chinese Building Energy Efficiency Research (in Chinese)*. Beijing: China Building Industry Press, 2014 [清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014]
- 20 Ministry of Construction of P.R. China. *Thermal design code for civil building (in Chinese)*. GB50176-93, 1993 [中华人民共和国建设部. 民用建筑热工设计规范GB50176-93. 1993]
- 21 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. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 2533–2543
- 22 Zhang L P, Steinmaus C, Eastmond D A, et al. Formaldehyde exposure and leukemia: A new meta-analysis and potential mechanisms. *Mutat Res*, 2009, 681: 150–168
- 23 World Health Organization. *WHO Guidelines for Indoor Air Quality*, 2010
- 24 Wang L X, Zhao B, Liu C, et al. Indoor SVOC pollution in China: A review. *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1469–1478
- 25 Mo J H, Xu Q J, Zhu T L. Current situations and major problems of indoor air cleaning research. In: Zhang Y P, ed. *Research Advance Report of Indoor Environment and Health in China (in Chinese)*. Beijing: China Building Industry Press, 2012 [莫金汉, 徐秋健, 朱天乐. 室内空气净化现状与主要问题. 见: 张寅平, 主编. 中国室内环境与健康研究进展报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012]
- 26 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
- 27 Chen C, Zhao B, Weschler C J. Assessing the influence of indoor exposure to “outdoor ozone” on the relationship between ozone and short-term mortality in us communities. *Environ Health Persp*, 2012, 120: 235–240
- 28 Chen C, Zhao B, Weschler C J. Indoor exposure to “outdoor PM₁₀”: Assessing its influence on the relationship between PM₁₀ and short-term mortality in US Cities. *Epidemiology*, 2012, 23: 870–878
- 29 Li J G. Discussions on indoor air quality standard. In: Zhang Y P, ed. *Research advance report of indoor environment and health in China (in Chinese)*. Beijing: China Building Industry Press, 2012 [李景广. 室内空气质量标准问题探讨. 见: 张寅平, 主编. 中国室内环境与健康研究进展报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012]
- 30 Zhang Y P, Li B Z, Huang C, et al. Ten cities cross-sectional questionnaire survey of children asthma and other allergies in China. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 4182–4189 [张寅平, 李百战, 黄晨, 等. 中国10城市儿童哮喘及其他过敏性疾病现状调查. 科学通报, 2013, 58: 2504–2512]
- 31 Li Z J, Jiang Y, Wei Q P. Survey and analysis on influence of environment parameters and residents' behaviors on air conditioning energy consumption in a residential building (in Chinese). *Heat Ventil Air Cond*, 2007, 37: 67–71 [李兆坚, 江亿, 魏庆芄. 环境参数与空调行为对住宅空调能耗影响调查分析. 暖通空调, 2007, 37: 67–71]
- 32 Qin R, Liu Y, Yan D, et al. Influence of raising set temperature of air conditioning systems in summer on energy consumption of office buildings (in Chinese). *Heat Ventil Air Cond*, 2007, 37: 33–37 [秦蓉, 刘焯, 燕达, 等. 办公建筑提高夏季空调设定温度对建筑能耗的影响. 暖通空调, 2007, 37: 33–37]
- 33 Zhu G J, Zhang X L, Yan D. Effects of operation mode of air conditioning on energy consumption of heating and air conditioning in residential buildings (in Chinese). *J Chongqing Jianzhu Univ*, 2006, 28: 119–121 [朱光俊, 张晓亮, 燕达. 空调运行模式对住宅建筑采暖空调能耗的影响. 重庆建筑大学学报, 2006, 28: 119–121]
- 34 Wang C. *Simulation research of human behavior related with building energy consumption (in Chinese)*. Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2014 [王闯. 有关建筑用能的人行为模拟研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2014]
- 35 Zhao R Y. Discussion on thermal comfort (in Chinese). *Heat Ventil Air Cond*, 2000, 3: 25–26 [赵荣义. 关于“热舒适”的讨论. 暖通空调, 2000, 3: 25–26]

- 36 Zhao R Y, Xu W Q. Conditioning strategies for improving indoor air environment (in Chinese). *Heat Ventil Air Cond*, 1997, 27: 1–4 [赵荣义, 许为全. 改善室内空气环境的调节策略. *暖通空调*, 1997, 27: 1–4]
 - 37 Zhu Y X. Dynamic thermal environment and thermal comfort. *Indoor Air*, in press
 - 38 Shao X L, Li X T, Ma X J. Optimising the supply parameters oriented to multiple individual requirements in one common space. *Indoor Built Environ*, 2014, 23: 828–838
 - 39 Shao X L, Li X T. Evaluating the potential of airflow patterns to maintain a non-uniform indoor environment. *Renew Energy*, 2015, 73: 99–108
 - 40 Jiang Y. Ventilation for IAQ & energy efficiency. The 13th International Conference of Indoor Air, Hong Kong, 2014
 - 41 Wang C, Yan D, Jiang Y. A novel approach for building occupancy simulation. *Build Simul*, 2011, 4: 149–167
 - 42 Zeng R L, Wang X, Di H F, et al. New concepts and approach for developing energy efficient buildings: Ideal specific heat for building internal thermal mass. *Energy Build*, 2011, 43: 1081–1090
 - 43 Zhang Y, Zhang Y P, Wang X, et al. Ideal thermal conductivity of a passive building wall: Determination method and understanding. *Appl Energy*, 2013, 112: 967–974
 - 44 Zhang Y P, Zhang Y, Shi W X, et al. A new approach, based on inverse problem and variation method, for solving building energy and environment problems: Preliminary study and illustrative examples. *Build Environ*, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.02.016
-

Developing a sustainable indoor air environment: Problems, considerations and suggestions

ZHANG YinPing, MO JinHan & CHENG Rui

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

People spend over 80% of their lives in indoor environments. The indoor air environment is very important to human health, comfort and working efficiency. In the past two decades, China has experienced very rapid urbanization and economic development. Building areas have developed very rapidly during this period, and the quality of life has continuously improved. However, there are serious problems of the indoor air environment: (1) Building energy consumption continues to increase, which aggravates ambient air pollution. (2) People in regions without central space heating systems desire indoor heating in winter to be thermally comfortable. In such regions, use of the same techniques and standards as in northern China is unacceptable, owing to energy supply and environmental capacity limitations. (3) Air pollutants of outdoor or indoor origin degrade indoor air quality, which is harmful to human health. Taking several typical problems of the indoor air environment as examples, the present paper analyzes causes of those problems and indicates certain unsolved scientific and technical issues underlying them. Based on the literature and some of our own considerations, we assert that new approaches to such problems are needed to develop a sustainable indoor air environment that has “healthy, thermally comfortable/acceptable, and energy-efficient” features. Suggestions for further discussion are presented.

indoor environment, building energy, HVAC, thermal comfort, indoor air quality, ventilation

doi: 10.1360/N972015-00053