

室内空气质量控制:新世纪的挑战和暖通空调人的责任

清华大学 张寅平☆

摘要 自1902年美国的威利斯·开利发明空调以来,暖通空调逐渐成为一个行业和专业,并经历了如何为生产环境营造合适的温湿度、如何营造人们感到舒适的室内环境、如何减少建筑能耗的历程。上世纪70年代以后,由于强调建筑节能和室内环境中大量使用人工复合材料(其中一些会散发对人体有害的物质),发达国家首先遇到室内空气质量问题,人们的健康受到严重影响。我国近20年来快速的城镇化和现代化进程,使我国的室内空气质量问题虽出现较迟,但更为严峻。暖通空调人面临新挑战:如何对室内环境的温度、湿度和污染物浓度实现分级、综合控制,如何发挥学科特长并与相关学科研究者互相学习和合作,产生新的学术思路、方法和成果,构建以“健康、适用和节能”并重为特征的“可持续室内环境”,拓宽暖通空调领域的外延并充实其内涵,成为暖通空调人新世纪义不容辞的责任。

关键词 室内空气质量 挥发性有机化合物 暖通空调 可持续室内环境 病态建筑综合征 挑战

Indoor air quality control: The challenges and responsibilities of HVAC researchers in the new century

By Zhang Yinping★

Abstract Since Willis Haviland Carrier, USA, invented the air-conditioner in 1902, air conditioning developed as a component of the discipline later known as heating, ventilating and air conditioning (HVAC). Air conditioning undergoes the three stages: creating a suitable indoor climate for industry; creating an indoor environment with thermal comfort; and improving the energy efficiency of HVAC systems. After the 1970's world energy crisis, developed countries encountered indoor air quality (IAQ) problems that were harmful to health accompanying highlighting the building energy efficiency and using in large scale artificial materials which emit pollutants in indoor environments. With rapid development of modernization and urbanization, China's IAQ problems, although appearing about 20 years later than developed countries, become more serious. Thus, the HVAC researchers are faced with unprecedented challenges in how to effectively control temperature, humidity and air pollutants in the indoor environment. The scientific and technologic problems require multi-disciplinary efforts. The HVAC researchers should learn from other disciplines and develop novel academic ideas, routes and achievements by grafting the knowledge and methods of other disciplines onto their own. Thus, they can achieve the goal of creating and maintaining a "sustainable indoor environment" that features healthy, acceptable and energy efficient. In this way, the scope of the HVAC discipline will be expanded and its content refreshed and deepened. These are the responsibilities of HVAC researchers in the new century.

Keywords indoor air quality, volatile organic compound, HVAC, sustainable indoor environment, sick building syndrome, challenge

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

1 室内空气质量问题是全世界室内环境及相关领域面临的新问题

人类建筑出现的历史已很久远,早期主要功能是遮风挡雨、防暑避寒,形成温湿度相对适宜(和外部环境相比)的生活空间。1902 年,美国的威利斯·开利(Willis Haviland Carrier)开发了第一台空气温湿度调节装置,用以维持印刷车间相对恒定的温度和湿度,解决了不稳定的温湿度造成的印刷质量问题,从而成为空调系统的发明者。空调最早的功能主要是满足生产空间的温湿度要求,因此被称为“工艺空调”。随着经济的发展和人们生活水平的提高,空调成为满足人们居住和办公环境温湿度舒适要求的手段,“舒适空调”成为空调业主流。

空调的出现给历史悠久的建筑业带来了革命性的变化,大大拓宽了建筑的规模和功能,方便了建筑选址和围护结构材料的选用。当然,过度依赖空调和供暖虽然方便了建筑师的设计,成就了他们的美学创新,但也带来了严重的能耗和环境问题。20 世纪 70 年代初出现的能源危机使人们认识到地球上的能源并非取之不尽、用之不竭,因此,如何降低能源消耗大户的建筑能耗(包括空调和供暖能

耗)就成为了全世界的热门课题,建筑节能的重要性也日益凸显。

20 世纪 80 年代,世界上一些发达国家出现了以下三种病症:病态建筑综合征(sick building syndrome, SBS),与建筑有关的疾病(building related illness, BRI)和多种化学污染物过敏症(multiple chemical sensitivity, MCS)^[1-7]。

据美国等发达国家统计,每年室内空气质量低劣造成的经济损失惊人。美国环境保护署(Environmental Protect Agency, EPA)历时 5 年的调查结果显示,许多民用和商用建筑内的空气污染程度是室外空气污染程度的数倍至数十倍,有的甚至逾百倍^[8]。世界卫生组织(WHO)公布的《2002 年世界卫生报告》显示,人们受到的空气污染主要来自室内^[9]。据美国 EPA 统计,美国每年因室内空气质量低劣造成的经济损失高达 400 亿

①☆ 张寅平,男,1962 年 4 月生,博士,教授,博士生导师
100084 北京市清华大学建筑技术科学系
(010) 62772518
E-mail: zhangyp@tsinghua. edu. cn
收稿日期:2013-09-06
修回日期:2013-10-10

美元^[10]。考虑到人在室内的时间逾 80%，所以“室内空气质量对人体健康的影响比室外空气更重要”^[11]。

为什么最近 30 多年来室内空气质量出现了不少问题呢？一般认为主要原因如下：

1) 强调建筑节能后导致建筑密闭性增强和新风量减少。20 世纪 70 年代的能源危机后，建筑节能在发达国家普遍受到重视，作为建筑节能的有效手段，很多建筑增强了密闭性，减少了新风供给量，以降低供暖空调负荷。

2) 新型合成材料在现代建筑中大量应用。一些合成材料由于价格低廉、性能优越而被作为建筑构件、保温材料和建筑装饰材料广泛应用，但其中一些会散发对人体有害的气体，如挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOC)^[1-6]。此外，在室内环境(包含汽车、飞机等的内部环境)中大量使用塑料材料及其制品(含增塑剂)、杀虫剂和阻燃剂，这些材料中广泛使用了半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds, SVOC)^[7]，其中一些对人体健康包括生殖能力有严重负面影响。

此外，由于生活水平的提高，人们对居住、办公环境的要求也越来越高，与此同时，空气污染检测能力也相应提高，一些以往不被关注但实际存在的空气质量问题现在被认知并关注。

总体来说，世界范围内的室内空气质量及其引发的健康问题是近几十年来室内材料和物品、供暖空调(包括通风)模式和生活模式等发生的巨大变化所导致的，当然也和大气污染密不可分。概言之，其产生原因可概括为：“现代暴露”导致“现代疾病”。正如国际室内空气领域重要学术期刊《Indoor Air》前主编(2001—2010)、清华大学瑞典籍教授 Sundell 指出的：“越来越多的科学证据表明‘现代疾病’与‘现代暴露’密切相关，特别是那些在现代才出现的新型化学物质，人类和自然都没有足够的时间适应它们以致产生新的‘现代疾病’。而‘现代疾病’的致病机理还不清楚，我们不知道究竟发生了什么，而且相关研究非常缺乏，大多数必须的科学研究的还没有进行，甚至还没有开始。”^[12]

2 我国的室内空气质量问题较发达国家更为严重

由于我国系发展中国家，经济发展较发达国家滞后，因此我国室内空气质量问题(这里仅指城市地区)明显出现的时间也比发达国家滞后。但我国

的城镇化和现代化进程非常迅猛，其规模和速度举世无双(见图 1)^[13]。

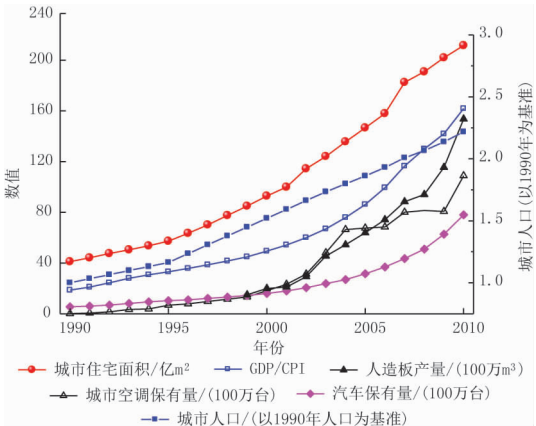


图 1 1990—2010 年我国快速现代化和城镇化进程的部分指标^[13]

在我国高速城镇化进程中，引发的室内外环境问题令人关注：

1) 20 世纪 90 年代起，我国城市每年新建建筑量惊人，建筑室内装修也成为时尚。这些新建建筑中，以人造板为主要原材料的建材、室内材料和复合木家具被大量使用，其中不乏会散发 VOC(譬如甲醛、苯)的材料和产品。与世界许多国家相比，我国一些城市的甲醛、苯等 VOC 污染更为严重，详见图 2,3。建筑装饰引发的人们对空气污染的抱怨和纠纷屡见报端，这种空气污染会对暴露人群造成健康危害，甚至致癌，成为了严重的社会问题。

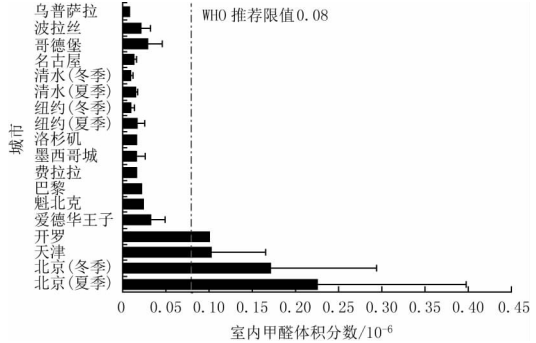


图 2 不同国家代表城市室内空气中甲醛体积分数检测结果比较^[14]

2) 我国增塑剂和阻燃剂的产量及消费量均居世界前茅，SVOC 在很多室内材料和物品中被大量使用，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^[16]。

3) 室内空气净化器缺乏科学评价标准，同时很多空气净化器检测机构执法不严，导致空气净化

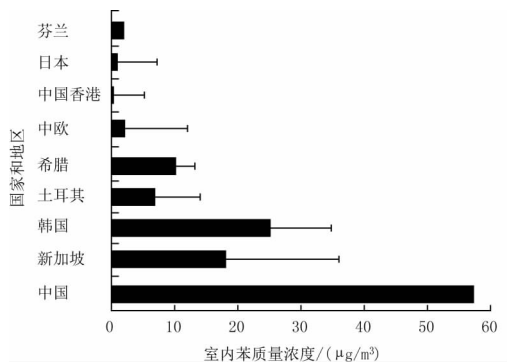


图3 不同国家和地区室内空气中苯质量浓度检测结果比较^[15]

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,不仅起不到净化空气的作用,反而雪上加霜,使室内空气质量更加恶化^[17-18]。

4) 室外空气污染日趋严重。由于我国能源主要依赖于煤炭,近年来煤炭消耗量逐年增长,而燃煤过程往往导致 SO_x 、 NO_x 及颗粒污染物的大量排放。此外,我国近年来城市汽车数量激增,增长率和增长总量在全世界均名列前茅,汽车尾气排放加剧了大气污染。进入 2013 年以来,主要由细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)污染导致的雾霾天气侵袭我国东部大部分地区,影响面积高达 190 万 km^2 ^[19],北京成为污染最严重的城市之一。最新全球疾病负担研究指出,细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)是我国排名第 4 的健康危险因素,2010 年导致 120 多万人死亡及 2 500 万健康生命年的损失^[20-21]。实际上,即使是大气污染(例如 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧),也会通过建筑通风和围护结构渗透进入室内,且由于人们在室内的时间高达 80% 以上,因此源于室外的空气污染也是引起健康问题的主要原因^[22-23]。特别值得指出的是,由于室外大气污染严重,本来可以依赖通风(自然通风或机械通风)来稀释室内污染物的有效且经济的手段也难以发挥应有的作用。

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我国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^[24]。

过去 20 多年,与(室内)空气污染相关的健康危害显著增长。图 4 列出了我国城市死亡率最高的 10 种疾病^[13],其中灰色实心柱表示和空气污染

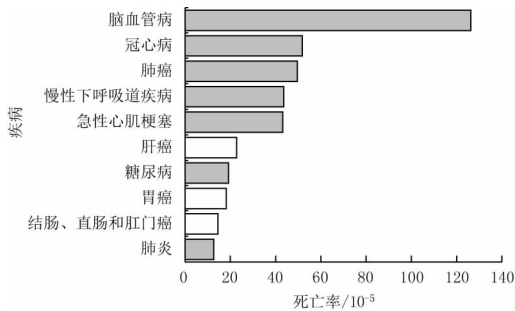


图4 我国城市死亡率最高的10种疾病^[13]

相关的疾病。

图 5 显示了近几十年在我国城市癌症死亡率中具首位的肺癌、乳腺癌、心脏病死亡率和出生缺陷率的变化情况,其中肺癌死亡率含吸烟原因;去除吸烟因素,2004—2005 年肺癌死亡率为 16.5/100 000(城市)和 8.2/100 000(农村)^[13]。分析表明,这些上升的疾病死亡率和室内空气污染相关^[13]。

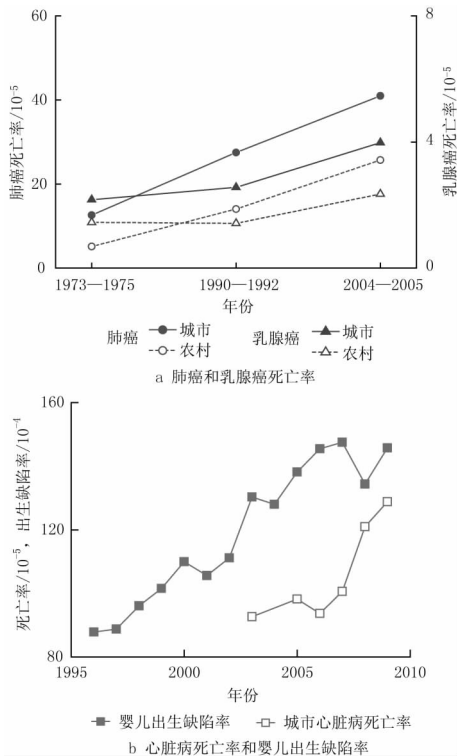


图5 我国一些疾病发病率或死亡率^[13]

2010 年 9 月,我国 10 所大学的研究者在我国 10 个重要城市启动了中国儿童家庭健康研究 (China, Children, Homes, Health, 简称 CCHH)。CCHH 分为两个阶段:阶段 I 是关于儿童哮喘、过敏性疾病和部分空气传染病的患病率及住宅环境暴露现状的问卷调查(2010—11—2012—

04);阶段Ⅱ是病例-对照研究,包含室内环境空气样本、灰尘和人体尿液中污染物及其代谢产物种类和浓度的检测(2012年11月开始)。研究发现,近20年我国儿童哮喘发病率迅速增长(见图6)^[25]。上述现象和(室内)环境的关联性正在作进一步探讨。

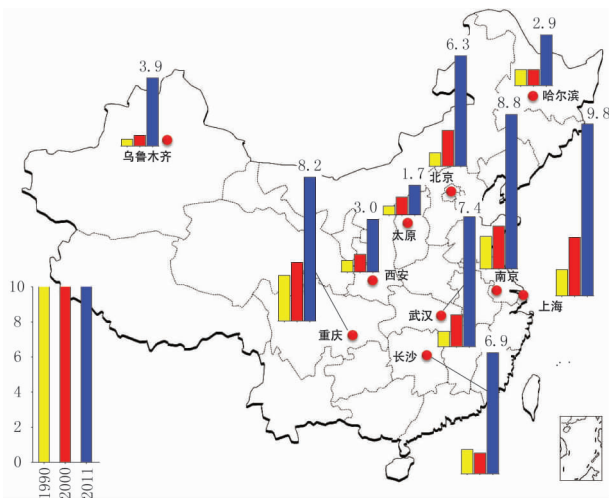


图6 我国10个城市儿童哮喘患病率情况
(太原3~5岁,武汉5~6岁,其余城市3~6岁)^[25]

可以说,近年来我国室内空气质量问题已成为百姓担心、媒体关注、政府关心的重要社会问题。2005年温家宝总理在第十届全国人大政府工作报告中还特别提到:“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第十二个五年规划纲要》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”。

3 室内空气质量控制——暖通空调人面临的新挑战和义不容辞的责任

暖通空调领域上个世纪主要控制参数为室内环境的温度和湿度,目的是满足产品生产和人们舒适生活或工作需要的热湿环境条件。其涉及的专业基础基本在热科学范畴(传热传质学、工程热力学、流体力学),针对控制对象的基础课程包括空气调节、供热工程、制冷原理和设备及建筑环境学等。传统的暖通空调也涉及到洁净度,但内容份额很小,与现在考虑的空气质量从内涵到外延都不可同日而语。

由于近年来大量出现的室内空气质量问题,暖通空调领域的研究者面临新的挑战,主要表现为:

1) 暖通空调领域的从业者需要营造和维护的

室内环境不再局限于温度和湿度,还需同时关注多个污染物“变量”,包括暖通空调自身也会产生或影响污染物“变量”,有些污染物还未被充分识别,因此是“隐形变量”。目前,较常见的室内空气污染物的种类就有百余种。因此,从某种意义上说,空调领域的“变量空间”一下从“二维”变成了“ n 维”($n \gg 2$),显而易见,控制或研究难度也随之大增。

2) 原来的“二维空间”基本在热科学范畴,基本学术语言属“物理语系”。现在的“ n 维空间”跨越了多个学科,如热科学(或称能源科学和工程)、建筑环境与能源应用工程、环境科学和工程、公共卫生、毒理学、材料科学和建筑学等;基本学术语言已分属“物理语系”、“化学语系”、“生命科学语系”等。一个跨学科的室内空气质量问题单个领域的研究者无法解决——不同学科背景的人讨论起来好像几个来自不同国别但只会说本国语言的人交流一样,意难会、言难传,对问题的理解和描述都难到位,更谈不上有效地解决问题。而要解决这些问题,至少要有对两种或多种“语言”具有足够的“单词量”并了解基本“语法”的人作为两个或多个领域研究者间的“翻译”,而现实情况是,这样的“翻译”奇缺,更为严重的是,我国现行教育体制下,缺乏培养这种“翻译”的土壤和条件。

3) 室内空气质量控制和研究非常倚重测试,而测试仪器一般都比较昂贵,仪器的操作、维护不仅需要很多的专业知识和技能,而且需要较高的资金;而一些常见的污染物浓度探测器不便携且价格昂贵,难以大规模应用,使得室内空气质量由于缺乏实时测试数据而难以在线控制。

4) 室内热湿环境模拟已较为成熟,而室内空气质量模拟缺乏大量物性参数等基础数据,从而室内空气污染负荷计算和控制模拟常常出现巧妇难为无米之炊的尴尬局面。

5) 室内环境领域不仅要和其他相关领域交融,而且自身也要理念更新、知识融合。如果说,20世纪70年代以前,室内环境研究者只需关注其舒适特性及其实现方式,20世纪末至今更多关注建筑节能的话,那么21世纪开始到今后相当长一段时间内,我国城市室内环境研究者考虑问题的方式将逐渐转变为:在保证室内环境健康、适宜(注意:这里不是舒适,在我国很多区域要保证室内环境冬季舒适还有些要求过高)的前提下尽可能节能、

节材和节资,“健康、适宜和节能”将成为“可持续室内环境”的三个密不可分的重要特征。相应的建筑环境控制原理、策略和方法都会发生变化甚至变革,一些控制设备和系统也会相继出现。

面对上述挑战,新世纪暖通空调人承担着义不容辞的责任,同时也面临大展才能的机遇。目前还没有一个专业可以完全解决所有的室内空气质量控制问题。暖通空调领域的研究者有自己的知识和能力特长——有对建筑环境特性的深入了解,有对建筑环境系统和设备的全面把握,有坚实的传热传质学、流体力学、工程热力学和工程试验理论等专业基础知识,有对建筑环境及相关行业和产业的长期了解和人脉资源,可以通过现象观测、机理揭示、过程描述、规律发现、设备研发、工程手段和规范制定等解决室内空气质量控制中的关键科学和技术问题,营造可持续室内环境,提高人们的健康水平。这些作用都是别的专业研究者难以替代的。

同样,室内环境的研究者没必要也不可能去做完全属于别人领域的事,因为我们缺乏关键基础知识的融会贯通和长期的规范训练,也缺乏他们赖以生存的学术生态环境。

4 近期亟待开展的工作

笔者从文献调研、会议发言和讨论及自身感悟中,感到以下工作亟待开展或深化:

1) 我国室内空气质量问题及其引发的健康问题还需进一步开展大规模调查并获得可靠数据。

2) 开展一些由于室内空气质量问题引发的严重影响我国人口健康的疾病发病率、死亡率和室内空气污染因素间的关联性研究及致病因素研究,从中找出对人体健康危害最重要的室内空气污染物,作为我国室内空气质量标准应控制的主要目标污染物。

3) 建立我国建筑装饰装修材料和家具污染水平标识体系并推广应用。一方面积累室内材料和物品的散发特性数据,建立数据库,为室内空气污染模拟和控制提供数据基础;另一方面藉此判断室内材料和家具的“绿色度”,进行有效的源头控制。

4) 研发价格适宜、使用方便、精度满足需要的室内主要污染物浓度实时探测器和污染暴露被动采样器,用于室内空气质量控制和暴露及健康风险评估。

5) 在全国范围内不同类型建筑中开展通风量检测,并保证方法和数据质量,解决我国建筑通风量数据严重缺乏的问题,使室内空气污染暴露和健康风险控制有重要的数据支撑。

6) 室内空气污染(包括主要源于室外的污染物——如颗粒物、臭氧和主要源于室内的污染物——如甲醛、苯)控制模式及其对健康的影响和能耗情况研究。

7) 目前我国已初步形成了室内空气质量标准体系,但还需完善。现有的国家标准、行业标准之间缺乏统一性,一些标准科学性欠佳,一些标准系对国际或国外标准的采标,不符合我国国情,材料标准、验收标准、卫生标准之间出现诸多矛盾,造成“材料合格,部件不合格”、“材料、部件合格,室内空气质量验收不合格”、“室内空气质量验收合格,室内空气质量居住时不合格”等现象。

8) 发展室内温湿度和室内空气质量综合控制理论和技术。如前所述,室内环境是一个有机的整体,过去室内空气温湿度和空气质量没有很好的分级、统一综合控制,这一方面源于目前人们认识和现有理论的局限,另一方面源于控制手段(包括探测器技术和相关设备)的缺乏,需要暖通空调及相关领域的研究者深入研究,提出新理念、新途径,解决其中关键的科学和技术问题。

上述问题挂一漏万,有些描述恐不准确,笔者旨在抛砖引玉,并进一步说明暖通空调人及相关领域的研究者面临的挑战和机遇。

5 结语

概言之,暖通空调人面对室内空气质量控制这一新挑战,需和相关领域研究者互相学习和合作,并注重学科间的交叉和融合,产生学科“嫁接”成果——形成新的学术思路、方法和研究成果。同时,还须加强自身的理念更新和知识融合,在保证室内环境健康、适宜的前提下尽可能节能、节材和节资,生活理念和日常行为应摒弃奢华、提倡简约,构建可持续室内环境,拓宽暖通空调领域的外延并充实其内涵。

实现上述目标还面临很多困难,如何在教学安排、科研攻关、学科合作和人才培养方面解决系列问题需要不断思考、探索和实践。

解决室内空气质量问题,不仅依赖于科技进步,而且依赖于有关管理部门、企业和全社会认识

的提高,“管、产、学、研、用”同心协力才能使问题真正逐步得到解决,才能真正构建和保持可持续室内环境。

参考文献:

- [1] Young M K, Stuart H, Roy M H. Concentrations and sources of VOCs in urban domestic and public microenvironments [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(6): 997-1004
- [2] World Health Organization. Indoor air quality: organic pollutants[R], 1989: 1-70
- [3] USEPA. Reducing risk: setting priorities and strategies for environmental protection [R]. Washington, DC, 1990
- [4] Wolkoff P, Clausen P A, Jensen B, et al. Are we measuring the relevant indoor pollutants? [J]. *Indoor Air*, 1997, 7(2): 92-106
- [5] Molhave L. Sick buildings and other buildings with indoor climate problems[J]. *Environ Int*, 1989, 15: 65-74
- [6] Weschler C J. Changes in indoor pollutants since the 1950s[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 153-169
- [7] Weschler C J, Nazaroff W W. Semi-volatile organic compounds in indoor environments. SVOC review paper[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(40): 9018-9040
- [8] USEPA. Sick building syndrome (SBS), indoor air facts[R]. Washington, DC, 1991
- [9] World Health Organization. The world health report 2002[R], 2002
- [10] Haymore C, Odom R. Economic effects of poor IAQ [J]. *EPA J*, 1993, 19(4): 28-29
- [11] Fanger P O, Olesen B W. Indoor air more important for human health than outdoor air[M]//Kristian S, Tine K. *Bridging from Technology to Society*, 2004: 65-73
- [12] 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? [J]. *Indoor Air*, 2010, 20(3): 185-186
- [13] Zhang Y P, Mo J H, Wescher C J. Reducing health risks from indoor exposures in today's rapidly developing urban China [J]. *Environ Health Perspective*, 2013, 121(7): 751-755
- [14] Zhang L P, Steinmaus C, Eastmond D A, et al. Formaldehyde exposure and leukemia: a new meta-analysis and potential mechanisms [J]. *Mutation Research*, 2009, 681(2/3): 150-168
- [15] WHO. Guidelines for indoor air quality[S], 2010
- [16] Wang L X, Zhao B, Liu C, et al. Indoor SVOC pollution in China: a review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55 (15): 1469-1478
- [17] Zhang Y P, Mo J H, Li Y G, et al. Can commonly-used fan driven indoor air cleaning techniques improve indoor air quality—a literature review[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(26): 4329-4343
- [18] 莫金汉,徐秋健,朱天乐. 室内空气净化现状与主要问题[M]//张寅平. *中国室内环境与健康研究进展报告 2012*. 北京:中国建筑工业出版社, 2012
- [19] 中国天气网. 2013年1月29日气象卫星遥感监测数据[EB/OL]. <http://weather.news.sina.com.cn/news/2013/0129/101584933.html>
- [20] 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[J]. *Lancet*, 2012, 380: 2224-2260
- [21] The Lancet. Global burden of disease study 2010[R/OL]. [2012-12-13]. <http://www.thelancet.com/themed/global-burden-of-disease>
- [22] 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 [J]. *Environ Health Perspective*, 2012, 120(2): 235-240
- [23] 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 [J]. *Epidemiology*, 2012, 23 (6): 870-878
- [24] 李景广. 室内空气质量标准问题探讨[M]//张寅平. *中国室内环境与健康研究进展报告 2012*. 北京:中国建筑工业出版社, 2012
- [25] Zhang Y P, Li B Z, Sundell J, et al. A 10 city cross-sectional questionnaire survey in China: a preliminary understanding for the riddles of rapid increased prevalence of Chinese children's asthma[J]. *Chinese Science Bulletin*, doi: 10.1007/s11434-013-5914-z