

研究生系列教材

室内空气污染 传播与控制

吕阳 卢振 编著
姜安玺 主审



研究生系列教材

室内空气污染 传播与控制

吕 阳 卢 振 编著
姜安玺 主审



机械工业出版社

室内空气环境直接影响人们的身体健康、生活舒适度与工作效率,本书全面系统地介绍了室内空气污染物的种类、来源、特性及危害,传播与迁移转化的特点,检测、分析与评价方法以及空气污染控制技术等。

本书内容丰富、资料翔实、实用性强,可作为高等院校供热、供燃气、通风与空调工程,环境科学、环境工程等专业研究生教材,也可供相关专业师生和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

室内空气污染传播与控制/吕阳,卢振编著. —北京:机械工业出版社,2014.10

研究生系列教材

ISBN 978-7-111-48201-7

I. ①室… II. ①吕…②卢… III. ①室内空气-空气污染控制-研究生-教材 IV. ①X510.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第230877号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘涛 责任编辑:刘涛 臧程程

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:路恩中 责任印制:李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014年11月第1版第1次印刷

169mm×239mm · 14印张 · 277千字

标准书号:ISBN 978-7-111-48201-7

定价:32.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面防伪标均为盗版

前 言

进入 20 世纪以后,随着建材、装饰装修材料、生活用品等大量增加,各国研究者对复杂的室内空气污染物传播、评价与控制相关问题进行了广泛研究。环境保护、公共卫生、建筑环境与能源应用工程等专业工作人员围绕着室内空气环境问题开展了检测监测、评价、流行病学调查、毒理实验、工艺改革及控制技术等研究工作。

本书基于笔者多年在室内空气环境领域所从事的科研与教学工作积累,以日本东北大学博士学位论文《室内灰尘防除用高效空调通风系统的开发》(导师:日本东北大学吉野博教授),哈尔滨工业大学博士学位论文《烘烤-生物滴滤组合技术去除室内有害气体的研究》(导师:哈尔滨工业大学吕炳南教授、刘京教授)、《通风空调系统空气微生物传播与消毒控制方法》(导师:哈尔滨工业大学张吉礼教授),大连理工大学博士后出站报告《室内环境微生物污染控制与大型公建运行能耗特性评价》(导师:大连理工大学张吉礼教授)上篇“室内环境微生物污染控制”为基础,对室内空气污染物来源、种类、特性及危害,传播与迁移转化特点,检测、测试与评价方法,CFD 数值模拟技术在室内空气环境领域的应用以及室内空气污染物控制技术进行了详细的阐述与介绍。

本书由 6 章构成,具体内容如下:

第 1 章概述室内空气污染问题及相关研究;第 2 章论述了室内空气污染物的种类、特性、危害与传播机理;第 3 章论述了室内空气污染物的检测评价方法;第 4 章结合数值模拟技术,对 CFD 在室内空气环境领域的应用研究进行阐述;第 5 章介绍了气体污染物的控制技术;第 6 章按照非生物颗粒和生物颗粒分类,介绍了颗粒污染物的控制技术。

本书由大连理工大学吕阳、深圳市建筑科学研究院股份有限公司卢振编著,其中吕阳负责的章节有 1.1~1.4、1.5.1~1.5.4、2.1、2.2.1、2.3、3.1、3.2.1、3.2.2、3.3、4.1、4.3.1、4.3.2.1、第 5 章、6.1、6.2.1、6.2.5,卢振负责的章节有 1.5.5、2.2.2、2.4、3.2.3、3.2.4、4.3.2.2、6.2.2、6.2.3、6.2.4、4.2 节为双方合著。吕阳负责全书统稿工作,哈尔滨工业大学市政环境工程学院姜安玺教授担任主审。

在本书的编著过程中,大连理工大学张吉礼教授为本书章节规划、内容安排和成果筛选做了大量工作。本书得到了大连理工大学陈滨教授、哈尔滨工业大学刘京教授的大力支持。大连理工大学土木工程学院付柏淋等研究生在资料收集、整理等

方面做了大量工作。机械工业出版社刘涛编辑在本书出版过程中提出了很多好的建议，本书得到大连理工大学研究生院研究生教改项目和国家“十二五”科技支撑计划课题“室内健康环境表征参数及评价方法研究”的资助。

由于编著者时间和水平有限，有疏漏和谬误之处，敬请读者赐教斧正。

吕 阳

2014 年 10 月于大连理工大学

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 室内空气污染问题概述	1
1.2 室内空气污染物的种类、特性及危害	1
1.2.1 室内空气污染物的种类	2
1.2.2 室内空气污染物的特性	2
1.2.3 室内空气污染物的危害	3
1.3 室内空气污染物的来源及传播	8
1.4 室内空气污染物的检测与评价方法	12
1.4.1 室内空气污染物的检测方法	12
1.4.2 室内空气污染物的评价方法	13
1.5 室内空气污染物的控制技术	13
1.5.1 污染源控制	13
1.5.2 通风换气	14
1.5.3 烘烤法	14
1.5.4 空气净化技术	15
1.5.5 室内微生物污染控制方法	16
参考文献	18
第2章 室内空气污染物种类与传播	25
2.1 气体污染物	26
2.1.1 无机化合物	26
2.1.2 有机化合物	29
2.2 颗粒污染物	32
2.2.1 非生物粒子	32
2.2.2 生物粒子	34
2.3 室内空气污染物的传播	39
2.3.1 影响室内空气污染物传播的因素	39
2.3.2 挥发性有机化合物的扩散机理与计算模型	42
2.3.3 室内空气污染物的迁移与转化	47

2.3.4 空气微生物的传播	48
2.4 生物粒子的悬浮扩散	49
2.4.1 生物粒子在粘性底层的受力分析	49
2.4.2 生物粒子的悬浮过程	53
2.4.3 多分散相生物粒子的悬浮模型	55
2.4.4 通风空调系统生物粒子的悬浮释放	60
参考文献	69
第3章 室内空气污染物检测与评价	75
3.1 室内空气质量的定义及标准	75
3.1.1 室内空气质量的定义	75
3.1.2 我国室内空气质量标准	75
3.1.3 其他国家的室内空气质量标准	78
3.2 室内空气污染物的检测	79
3.2.1 室内空气污染物的采样技术	79
3.2.2 室内空气污染物的检测方法	80
3.2.3 空调系统中微生物的检测	87
3.2.4 真菌孢子释放强度的测定	96
3.3 室内空气污染的评价	112
3.3.1 室内空气污染的预评价	112
3.3.2 室内空气污染的现状评价	113
3.3.3 人体暴露量估算与分析	116
参考文献	119
第4章 CFD 在室内空气环境领域的应用	124
4.1 CFD 数值模拟基础	124
4.1.1 流体流动特性的基本方程组	124
4.1.2 湍流计算模型	125
4.1.3 离散化方法	125
4.1.4 计算方法	126
4.1.5 计算条件	127
4.2 应用概要	128
4.3 应用实例	129
4.3.1 室内气体污染的数值解析	129
4.3.2 室内颗粒污染的数值解析	133
参考文献	141
第5章 气体污染物的控制技术	146

5.1 吸收	146
5.1.1 物理吸收	146
5.1.2 化学吸收	149
5.2 吸附	150
5.2.1 吸附分类	150
5.2.2 吸附理论	151
5.3 催化氧化	153
5.3.1 光催化氧化	153
5.3.2 热催化氧化	159
5.4 烘烤排风	160
5.4.1 室内装修有害气体烘烤排风稀释技术实验研究	160
5.4.2 室内装修有害气体烘烤排风稀释技术数学模型	164
5.5 生物法	168
5.5.1 生物处理技术的优缺点	168
5.5.2 生物处理技术的分类	168
5.5.3 生物处理技术的影响因素	170
5.5.4 生物降解动力学模型	170
5.5.5 有降解作用的微生物	171
参考文献	171
第6章 颗粒污染物的控制技术	175
6.1 非生物粒子的控制技术	175
6.1.1 机械过滤	175
6.1.2 静电过滤	182
6.2 生物粒子的控制技术	185
6.2.1 紫外线杀菌	185
6.2.2 远红外空气消毒	188
6.2.3 生物颗粒的捕集	192
6.2.4 微波消毒	197
6.2.5 高效通风换气	202
参考文献	205
附录	207

第1章 绪 论

1.1 室内空气污染问题概述

一个人每天摄取1~2kg食物、2~3L水，而呼吸的空气量为12~15m³。人的一生大约有70%~90%的时间是在室内度过的，因此室内空气质量对人们的健康、生活和工作效率产生极大的影响。

所谓“室内”，是指所有全封闭或者半封闭的空间。包括住宅、学校教室、幼儿园、医院、办公楼、商场、超市、体育场馆、图书馆、博物馆、宾馆、文化娱乐场所等，也包括各种交通工具（飞机、火车、汽车、轮船等）和军事设备（航天器、军舰、战机、潜艇等）内部空间。室内空气污染是一个既古老又新鲜的问题，早在1902年，日本的绪方正规就在东京医学杂志上发表了关于房屋通风的论文。从20世纪60年代起，室内空气污染问题在世界范围内引起了广泛关注，国内外学者对室内空气质量（Indoor Air Quality, IAQ）开展了大量的研究工作。1983年世界卫生组织（World Health Organization, WHO）将与建筑使用有关的病症称为病态建筑综合症（Sick Building Syndrome, SBS），包括眼睛发红、流鼻涕、嗓子疼、困倦、头痛、恶心、头晕、皮肤瘙痒等。2003年，严重急性呼吸道综合症（Severe Acute Respiratory Syndromes, SARS）病毒在我国和其他几个国家、地区蔓延，使人们更加深刻地意识到室内空气污染问题的严重性。

在经历了18世纪工业革命带来的“煤烟型污染”、19世纪石油和汽车工业带来的“光化学烟雾污染”之后，现代人正经历着以“室内空气污染”为标志的第三污染期，室内空气污染问题已成为当今建筑环境领域的重要研究课题。

1.2 室内空气污染物的种类、特性及危害

室内空气污染包括物理性污染、化学性污染、生物性污染和放射性污染。物理性污染是指因物理因素（如电磁辐射、噪声、振动以及不合适的温度、湿度、风速和照明等）引起的污染；化学性污染是指因化学物质（如一氧化碳、氨气、甲醛、挥发性有机物等）引起的污染；生物性污染是指因生物污染因子（如细菌、真菌、花粉、病毒和其他生物体等）引起的污染；放射性污染主要指因氡及其子体造成的污染。当前，室内空气污染主要以化学性污染和生物性污染最为突出。

1.2.1 室内空气污染物的种类

室内空气污染物种类繁多，分类方法也各异。按照污染物的存在属性分为物质型污染物（如粒子性污染物、气体污染物、生物污染物等）和能量型污染物（如工业余热、紫外线、微波辐射、噪声等）；按照污染物的物理特性分为物理性污染物、化学性污染物、生物性污染物和放射性污染物；按照污染物的化学属性分为无机污染物和有机污染物。本书将按照污染物的存在形态分为气体污染物和颗粒污染物两大类，后文也将根据这两大类对其传播、评价与控制技术进行阐述。

室内气体污染物和颗粒污染物种类详见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 室内气体污染物种类

污染物类型	种 类	
无机化合物	一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、臭氧、氨气等	
有机化合物	高挥发性有机化合物（Very Volatile Organic Compounds, VVOC） 沸点/℃：小于 0 至 50 ~ 100	甲烷、乙烯、乙炔、氟利昂、甲醛、氯化乙烯单体、甲胺、丁烷、甲基硫醇、乙醛、戊烷、二氯甲烷等
	挥发性有机化合物（Volatile Organic Compounds, VOC） 沸点/℃：50 ~ 100 至 240 ~ 260	正己烷、乙酸乙酯、乙醇、苯、甲基乙基酮、甲苯、三氯乙烷、丁醇、二甲苯、癸烷、柠檬烯、对二氯苯等
	半挥发性有机化合物（Semi-Volatile Organic Compounds, SVOC） 沸点/℃：240 ~ 260 至 380 ~ 400	L-尼古丁、磷酸三丁酯、噻苯哒唑、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二辛酯等
	颗粒有机物质（Particulate Organic Matter, POM） 沸点/℃：大于 380	苯并芘

表 1-2 室内颗粒污染物种类

污染物类型	种 类
非生物粒子	石棉、玻璃纤维、凝结金属颗粒（砷、镉等）等
生物粒子	花粉、昆虫类相关粒子（尘螨等）、微生物（细菌、真菌、病毒等）等

1.2.2 室内空气污染物的特性

室内空气污染可以定义为：由于室内引入能释放有害物质的污染源或室内环境通风不佳而导致室内空气中有害物质无论是从数量上还是种类上不断增加，并引起人类一系列不适症状的现象。室内空气污染物一般具有如下特性：

1. 累积性

室内环境是相对封闭的空间,其污染形成的主要特征之一是积累性。从污染物进入室内导致其含量升高,到排出室外其含量渐趋于零,大都需要经过较长的时间。室内的各种物品、设备,包括建筑装饰材料、家具、地毯、电器等都有可能释放出一定的污染物质。如不采取有效措施,它们将在室内逐渐累积,导致污染物含量增大,构成对人体健康的危害。

2. 多样性

室内空气污染物的多样性既包括污染物种类的多样性,又包括室内污染物来源的多样性。室内空气中存在的污染物既有化学性污染物,如甲醛、氨气、苯、甲苯、一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物、硫氧化物等;又有生物性污染物,如细菌、真菌、病毒等。室内空气污染物的来源既有室外污染源,又有室内污染源。例如作为光化学产物的臭氧在气流量大的公路上其含量一般较高,很有可能通过建筑物的门窗或空调换气装置进入室内。特别是近年来“雾霾”的出现,室外源细颗粒物通过门窗渗透等途径进入室内,造成室内细颗粒物污染,严重危害人民群众的健康。另外,家庭装修用的人造板材、墙纸、涂料、油漆等会在室内长期释放出大量的甲醛、挥发性有机物等有害污染物,这类污染引发的人群健康问题尚未解决,半挥发性有机化合物、室内细颗粒物和微生物气溶胶等所引发的新污染问题又成为影响社会和谐的重要因素。

3. 综合危害大

调查表明,现代社会中的人一生平均每天有70%~90%的时间是在室内度过的,因此当人们长期暴露在有污染物的室内环境中时,无疑污染物对人体的作用时间也相应地变长。即使含量很低的污染物,在长期作用于人体后,也会影响人体健康。另外,室内空气污染物种类繁多,包括化学性污染、生物性污染、物理性污染、放射性污染等。研究调查表明室内空气污染物种类已高达上百种,主要包括甲醛、苯系物等挥发性有机物,臭氧、一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物、氡及其子体、过敏反应物、微生物、可吸入颗粒物等,这些污染物释放时间长、含量低、种类多,无疑对人体健康、生活舒适度与工作效率产生综合危害。

1.2.3 室内空气污染物的危害

1. 室内空气污染对人体健康的影响

从20世纪80年代开始,美国、日本、加拿大和欧洲各国的报纸杂志上相继出现SBS、BRI和MCS三个英文缩写,它们分别代表室内空气污染引发的三种疾病名称,即病态建筑综合症(Sick Building Syndrome, SBS)、建筑相关疾病(Building-Related Illness, BRI)和化学物质过敏症(Multiple Chemical Sensitivity, MCS)。虽然当时这些疾病的具体原因不详,但均与室内空气污染有关,这些疾病的主要症状

为眼、鼻刺激，头痛、疲劳乏力、发热，甚至出现过敏性肺炎、哮喘、传染性疾病等，并且其主要发病规律是即使工作人员离开现场，症状也不会很快消失，必须进行治理才能恢复健康。

研究表明，全球范围内室内空气环境比室外空气环境污染更加严重。世界卫生组织公布的《2002 年世界卫生报告》中明确将室内空气污染与高血压、肥胖症等共同列为人类健康的十大威胁。据调查统计反映，全世界每年有 280 万人直接或间接死于装修污染，装修污染已被列为公众危害最大的五种环境问题之一。1997 年，世界卫生组织和日本政府联合对全日本室内空气品质进行跟踪调查，20% 的新装修建筑室内的甲醛超出世界卫生组织的规定值，部分建筑的总挥发性有机化合物高出规定值 10 倍以上。Otson 等随机调查了 757 户加拿大住宅，测定 57 种挥发性有机化合物的浓度，多数单种化合物的浓度值不超过 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但癸烷 ($54\mu\text{g}/\text{m}^3$)、甲苯 ($41\mu\text{g}/\text{m}^3$)、1, 1, 1-三氯乙烷 ($43\mu\text{g}/\text{m}^3$) 等 9 种化合物超过 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，总挥发性有机化合物的均值为 $0.114\text{mg}/\text{m}^3$ 。美国环保局现已将室内环境污染列为除大气污染、工作间有毒化学品和水污染外的第四大环境污染。大量统计研究表明，室内空气污染常常超出室外的 2~5 倍，偶尔超出 100 倍，美国每年直接用在由室内空气污染引起的疾病的医疗费用高达 10 亿美元，由此而产生的直接或间接损失达 400~1200 亿美元。

我国室内空气污染问题更不容乐观。在首届全国室内空气质量与健康学术研讨会上公布了惊人的数字：目前发展中国家有近 200 万例超额死亡可能是由于室内空气污染所致。北京每年因有毒建筑装饰材料引发的急性中毒事件有 400 多起，中毒人数 10 万人，死亡人数 350 人，慢性中毒的范围更加广泛。2001 年，中国消费者协会对居室内空气抽样检测调查显示，室内空气中容易引起人的鼻炎、支气管炎和结膜炎，并有可能致癌的有毒气体、甲醛含量超标率分别达到 73.3% 和 79.1%。另外，挥发性有机化合物和苯的超标情况也十分严重，分别达到 20% 和 43.3%。2002 年，黑龙江省尚志县某学校 5 名学生在刚刚粉刷一新的教室里出现空气污染物严重中毒症状，其他师生也有不同程度的反应，如头晕、恶心等。在哈尔滨市，每年有 1500 名以上的儿童在哈尔滨血液肿瘤研究所接受治疗，其中白血病患者高达 80%，以 4 岁儿童居多。2010 年我国统计资料显示，每年有 12 万人死于室内污染，90% 以上的幼儿白血病患者都是住进新装修房一年内患病的，我国每年由室内空气污染产生的损失达 107 亿美元。

表 1-3 列出了室内主要气体污染物对人体健康的影响。

颗粒污染物是另一类非常普遍的室内空气污染物。研究表明可吸入颗粒物 (Inhalable particles, PM_{10}) 的清除、滞留和转移与其粒径、沉积地点有关。国内外对 PM_{10} 的流行病学调查研究表明 PM_{10} 对人类健康有明显的直接毒害作用，可引起机体呼吸系统、心脏及血液系统、免疫系统和内分泌系统等广泛的损伤。近年来，我国细颗粒物 (Fine particles, $\text{PM}_{2.5}$) 污染形势日趋严峻，并对人体健康、环

表 1-3 室内主要气体污染物对人体健康的影响

污染物名称	对人体主要影响
甲醛	头痛、恶心、失眠、过敏性皮炎、气管哮喘、肝肺功能异常、鼻咽肿瘤
苯、甲苯、二甲苯	头昏、头痛、恶心、胸闷、乏力、意识模糊、昏迷，呼吸、循环衰竭而死亡
多环芳烃	过敏性皮疹、肺癌、咽喉癌、口腔癌
氨气	鼻炎、咽喉炎、气管炎、支气管炎、胸闷、呼吸困难、肺水肿
臭氧	眼睛刺激、鼻黏膜刺激、哮喘、头痛、胸闷、思维能力下降，肺气肿、水肿
氮氧化物	咽喉干燥、咳嗽、头昏、视力衰退、中毒性水肿，神经中枢瘫痪及痉挛

境、气候及大气能见度等造成了严重危害。环境健康和流行病学研究表明，空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体健康危害很大，长期暴露于细颗粒物中，易引起人体呼吸道疾病、眼睛和皮肤过敏等健康问题，严重时导致发病率增加甚至死亡。如 Pope 等对美国 50 个州超过 55 万成年人的健康数据进行研究，控制混杂因素后发现随着 $\text{PM}_{2.5}$ 的年平均浓度增加，全病因死亡率、心血管死亡率和肺癌死亡率均显著上升。越来越多的流行病学研究表明，人群发病率和死亡率与大气颗粒物质量浓度，特别是室内颗粒物浓度存在显著相关关系，室外颗粒污染物也主要是通过室内暴露来影响人体健康，尤其是对在室内停留时间较长的老人和小孩而言。然而尽管室内 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体健康的危害日益受到关注，目前仍缺乏主要针对室内 $\text{PM}_{2.5}$ 的监管政策和控制措施，我国也尚未制定 $\text{PM}_{2.5}$ 的室内卫生标准。

颗粒污染物中的生物粒子也会对人体健康产生较大影响，其中通风空调系统中生物粒子相关的传染性疾病已经有许多的报道。1957 年，Riley 证实了粟粒性结核菌可通过空气在人与人之间传播，这种病菌的危险性在于它能够通过打喷嚏或咳嗽进入空气中，形成凝结核悬浮在里面。1980 年，Houk 报道的一起在海军舰船上的肺炎事件，是通过通风系统传播的。1986 年，Croft 报道了通风系统传播葡萄状穗霉属毒素的事件。研究表明，大部分由细菌和病毒引起的呼吸道传染都是在人体之间进行的，可通过接触被感染的病人或者吸入被病人污染的气溶胶液滴而传染。气溶胶液滴可在病人打喷嚏、咳嗽和说话时，从人的口、鼻中释放出来，对于大部分足够大的气溶胶液滴，可以在 1m 以内沉降到地面上；而小的液滴迅速干燥，并收缩形成凝结核，凝结核的直径很小，约在 $0.5 \sim 5\mu\text{m}$ 之间，可以在空气中悬浮很长时间。凝结核对人体健康危害极大，因为它可以被吸入肺的深部。如果这些液滴中有足够剂量的传染性微生物，就可以传染易感人群。1934 年，Well 在研究空气传染时，对气溶胶液滴及其凝结核基本特性进行了研究。1991 年，Burge 和 Feely 指出相对湿度可以影响液滴的干燥过程，继而影响凝结核的大小和气溶胶病原体生存能力和传染力。在医疗系统中，对空气中的细菌控制与防止通过空气交叉感染一直是医院工作的重点，也是医院空调系统控制的主要任务。通风空调系统中有许多设备是微生物滋生的场所，可以引发疾病。空调系统的冷却塔滋生军团菌，这已是被

很多研究证明的事实。与空气微生物污染有关的非传染性疾病包括过敏、免疫和中毒反应，主要由微生物代谢的副产物引起而非微生物本身。据统计在美国，哮喘和鼻炎的暴发率高达总人口的 20%。哮喘是美国最主要的慢性病之一，根据美国疾病控制中心（Centers for Disease Control, CDC）的报告，1980~1994 年哮喘的暴发率增长了 75%，其中增长最大的是 0~14 岁的儿童，办公室职员的哮喘人数也增加了一倍，有关的直接和间接花费超过 127 亿美元。影响哮喘发病和死亡率的因素主要有两种，一是医疗条件，二是室内环境因素。大量的研究表明在哮喘和非特异性呼吸疾病的病人中，螨过敏有较高的暴发率。1964 年，Voorhost 通过对丹麦家庭进行的研究，第一个建立了螨过敏原和呼吸症状之间的关系。1983 年，Korsgaard 证实了这个发现，他发现与 75 个随机抽取的家庭相比，25 个哮喘病人的家中尘螨浓度明显较高。截至 1992 年，Arlan 对美国 8 个不同区域的 252 个家庭进行了 5 年的研究，这些家庭都有对螨敏感的人，83% 的家庭平均螨的密度大于规定的敏感限 100 个/g 灰尘。螨过敏原与遗传性皮肤病也有关系，可导致皮肤刺激和发痒等症状。研究表明在潮湿住宅生活的儿童可出现更多的螨过敏反应。真菌通过气溶胶真菌孢子及代谢副产物等对人体健康产生负面影响，包括过敏反应、超敏感性肺炎、真菌毒素中毒和病原性疾病。在北美的横断面问卷研究结果表明，27%~36% 的家庭有真菌问题。而在另一项随机选取的 450 个住房调查研究中显示，有 80% 受到湿度问题的影响。总体上，对真菌敏感的人比对尘螨和动物皮屑敏感的人少。最常见的能引起哮喘和鼻炎的菌属包括：交链孢属（*Alternaria* spp.）、曲霉属（*Aspergillus* spp.）、枝孢霉属（*Cladosporium* spp.）、青霉属（*Penicillium* spp.）。有几个菌属是病原性菌，可以感染人的肺部、耳朵、眼睛等部位。真菌代谢的气体包括挥发性有机物，可以产生潮湿的气味，这些挥发性有机物也会引起病态建筑综合症，室内真菌孢子如枝孢霉属浓度高与超敏感性肺炎有关。真菌孢子和植物状菌丝体包含有毒物质（真菌毒素），可导致呼吸道疾病。非过敏性免疫反应的特征表现为具有流感症状，如超敏感性肺炎、农夫肺和加湿热，是由于连续暴露在污染物中而引发的其他抗体或细胞免疫反应；没有遗传倾向，只有一部分人暴露后有此症状。超敏感性肺炎（Hypersensitivity Pneumonitis, HP）是一个经常被提及的由于室内空气引起的人体健康问题，它与很多的微生物有关，特别是喜温性放线菌，可在缺少维护的加湿器和空调系统中生长。通过对病人的调查可以知道，当他们离开了那些被污染的环境，症状就会减轻。1970 年，Banaszak 研究了办公室的员工暴发这种疾病的情况，发现致病起因是喜温性放线菌污染了空调系统。1985 年，Acierno 等也对 HP 值进行了大量的研究，认为它对健康的危害主要是由各种植物和动物蛋白，甚至是一些低相对分子质量的化学物质引起的，他们相信空调通风系统能够引起某种特定类型的 HP。还有一些文献中报道，在机械通风系统中喜温性放线菌可引起间质性肺炎。另外，微生物副产物对人体的危害也越来越受到人们的重视。如内毒素普遍存在于 G-细菌细胞结构中，可引起广泛的生物效应。在家庭和办公环境中

都会有内毒素气溶胶,吸入内毒素气溶胶可引起易感人群发热、抑郁、咳嗽、胸闷和呼吸困难。内毒素严重时可影响到免疫系统中白细胞的数量。1984年,Rylander等研究了加湿热病,认为是假单胞菌属(*Pseudomonas* spp.)的内毒素污染了加湿器,产生的气溶胶影响了工人的健康。1985年,Hendrick也证实了这种情况存在。真菌毒素由真菌产生,可引起呼吸道刺激,能够介入肺部巨噬细胞,可提高肺癌发病率。很多真菌也能制造微生物挥发性有机物(Microbial Volatile Organic Compounds, MVOC),引起发霉和腐味,是呼吸道的刺激物,并被证明是引发病态建筑综合症的主要因素之一。

另外,大量研究表明屋尘对人体健康也会产生负面影响。屋尘室内源主要包括由室内燃烧(做饭、熏香等)、日常活动导致的重悬浮、物体表面磨损、设备运行、走动带进的土壤颗粒物和气溶胶消耗产生的颗粒物沉降;屋尘室外来源主要包括由门窗缝隙进入室内的各种自然界气溶胶、沙尘等颗粒物,以及汽车尾气排放的颗粒物,人为生产及活动产生的颗粒物等。屋尘来源广泛,成分也比较复杂,一般可分为有机物类、无机物及重金属类和微生物类。有机物类中主要是以颗粒相存在的半挥发性有机物类(SVOC),如邻苯二甲酸酯(PAEs)、多溴联苯醚(PBDEs)、多环芳烃(PAHs)、多卤代化合物(PFCs)、尼古丁等,这些物质来源广泛,包括阻燃剂、胶黏剂、增塑剂等改善材料性能的助剂,卫生杀虫剂等生活用品以及烹饪、吸烟、熏蒸燃烧等生活行为。无机物及重金属类为自然界中的木屑、纤维等物质,在人们的日常生产生活中,掉落或刚蹭下的微小木屑、纤维,都可能存在于屋尘中。无机物及重金属类在灰尘中占比约60%,如石英、石棉、硫酸盐、硝酸盐,以及重金属如汞、镉、铅、锰、铬等。Plumlee等对美国世界贸易中心大厦的屋尘研究表明,大厦内屋尘的主要构成物为Si、Ca、S、Mg、Al、Fe,碳酸盐、Na和K等次之。Mølhave等对丹麦7座办公楼的1047户业主单位调查,发现Ca、Ba、K、Na、Ca、Al、Si、S等普遍存在于屋尘中。Rasmussen等对加拿大渥太华地区屋尘研究表明,屋尘包含的重金属元素主要有Pb、Cd、Sb、Hg、Al、Ba、Ti等。我国大连理工大学吕阳等人通过对我国四座城市(大连、哈尔滨、北京、上海)51户住宅屋尘实测调查发现,真菌类微生物污染中,上海地区相对于北方城市居住环境堆积真菌含量高,浓度达到946cfu/mg,平均浓度值是北方三座城市的1.5~5.2倍;半挥发有机物污染物中,大连含量最高,为3080 $\mu\text{g/g}$;哈尔滨、上海、北京的SVOC总体污染物水平依次降低,分别为2769 $\mu\text{g/g}$ 、2076 $\mu\text{g/g}$ 、1718 $\mu\text{g/g}$,四座典型城市均检出较高含量的邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)。屋尘中的微生物主要包括真菌、细菌、螨虫等。这些微生物来源并不是灰尘本身,而是进入室内的室外空气、室内居住者、宠物以及室内表面潮湿的建材。研究表明,在屋尘中出现的微生物种类达500~1000类之多,存在于屋尘的真菌类微生物主要是青霉属、曲霉属、枝孢属等20余种,细菌类微生物主要是革兰氏阳性菌属,如葡萄球菌、棒状杆菌、乳球菌等。屋尘成分复杂,极易成

为不同种类污染物的载体，直接或间接被人体吸入或者摄入，从而诱发各种疾病。屋尘中的 SVOC 类污染物对人体的生殖系统、内分泌系统、呼吸系统造成危害。部分 SVOC 会引起癌变，如多环芳烃（PAHs）、邻苯二甲酸二（2-乙基己基）酯（DEHP）。研究表明，PAHs 是人类重要的致癌因素之一，可致癌、致畸、致突变；DEHP 会增加肺炎的患病率，严重时可导致哮喘等疾病，Bornehag 等人的研究证明含 DEHP 在内的酞酸酯类（PEs）对儿童哮喘及过敏影响更为严重。也有研究表明，微生物类的真菌、细菌、螨虫等多以堆积或附着方式存在于屋尘中，会引起人体的湿疹、哮喘等疾病。

2. 室内空气污染对工作效率的影响

影响室内人员工作效率的因素很多，主要可归纳为四大类。包括个人因素（智力水平、知识技能、心理因素）、社会环境因素（人际关系）、管理因素（组织文化、管理结构）和环境因素（工作软、硬件条件的支持，室内环境质量等）。研究表明，与工作压力和工作满意度相比，室内环境质量对人员的工作效率影响最大，因此改善室内环境质量无疑是提高工作效率的重要途径之一。如丹麦学者 P. Wargocki 等的研究结果第一次书面证实了室内空气质量对办公室工作人员的工作效率有重要的影响。在一个控制良好的正常的办公室中通过包括或不包括一个对居住人员不可见的附加污染源来建立两种不同的空气品质，这两种情况分别对应于新的《欧洲室内环境设计指南》所规定的低污染和非低污染建筑，相同的受试者在两种空气质量环境中分别做了 4.5h 的模拟办公室工作，通风率和所有其他环境因素均相同，测试发现受试者的工作效率在良好的空气品质情况下增加 6.5%（ $P < 0.003$ ，指所发现的这一效应为非真实的概率小于 0.3%），并且出错较少，病态建筑综合症症状也减少。这项在丹麦所做的研究不久又在瑞典重做，其结果是相似的。研究表明改善的室内空气质量可以明显提高工作效率。基于文献研究，Fisk 和 Rosenfeld 提出，室内环境质量与人员健康和工作效率至少有四方面主要的联系：①传染性疾病，②过敏和哮喘，③病态建筑综合症，④直接影响人员工作绩效。他们对室内环境改善带来工作效率增加的收益进行了粗略估计，结果表明工作效率增加能带来巨大的经济效益。以每年来算，因呼吸疾病减少导致的工作效率收益为 60 亿～190 亿美元，减少过敏和哮喘症可带来 10 亿～40 亿美元的收益，病态建筑综合症减少能带来 100 亿～200 亿美元的收益，而改善室内环境使工作效率直接提高所带来的收益为 120 亿～1250 亿美元。可见因改善室内环境带来的经济收益超过其他各项投资的比例。

1.3 室内空气污染物的来源及传播

室内空气污染物来源于室内和室外两部分，主要包括建筑材料和室内设施、人类的活动的活动以及室外大气污染等。只有了解各种污染物的来源、产生和扩散机理才能

有针对性地采取有效措施, 把好控制室内空气环境质量的第一关。室内空气污染源主要可以归纳为以下4大方面:

1. 建筑材料和室内设施

建筑材料、日化产品、家用电器等室内设施是室内空气污染的主要来源。随着人们生活水平的提高, 室内装修已成为消费热点。但是某些装饰装修材料有害物质含量严重超标, 致使多种化学物质进入室内环境, 造成室内空气质量恶化。产生于建筑和装修的污染物主要包括甲醛、挥发性有机化合物、氨和氡气等。装修用的人造板材是室内甲醛的主要释放源, 这是由于单板、刨花、纤维之类基材本身含有甲醛; 生产人造板材的胶黏剂含有未参与反应的游离态甲醛; 未完全固化的胶黏树脂会分解出甲醛; 而部分已经固化的树脂会因结构降解释放甲醛。装修中大量使用的化工原料如油漆、涂料以及各种添加剂、稀释剂、胶黏剂、防水剂和溶剂等, 都含有苯、甲苯和二甲苯等挥发性有机化合物, 装修后会释放到室内。建筑施工过程中使用的混凝土膨胀剂和防冻剂等含有氨类物质, 随着温度、湿度等环境因素的变化会还原为氨气, 并从墙体释放出来影响人体健康。装饰用的木制板材中含有尿素、家具涂饰添加剂和增白剂也会释放氨。另外, 建筑石材、砖、土壤、泥沙、砂等是室内氡污染的主要来源。石棉作为保温隔热、防火材料在建筑中得到了广泛的使用, 也是室内空气污染的来源之一。室内各种日化产品主要包括化妆品、空气消毒剂、杀虫剂等。由于各种化工产品的原材料中含有某些有害物质或在生产过程中加入了某些有害物质(例如甲醛、苯), 使得生产出来的成品中也含有这类物质。产品进入室内后, 这些有害物质即可从化工产品中释放出来, 污染室内空气。此外, 室内装饰物品、化妆品等还会产生令人不愉快的气味。

近年来, 随着人们生活水平的提高, 多种家用电器如电视机、组合音响、微波炉、电磁炉、电热毯等进入室内, 导致人们接触电磁辐射的机会增多。由此产生的健康影响已引起国内外有关专家的关注。

2. 人类活动

人体呼吸过程中随呼吸向空气中排放 CO_2 、水蒸气。人们说话、咳嗽、打喷嚏时, 随着唾液飞沫可以排出呼吸道黏膜表面的病原微生物; 人的皮肤、衣物及卫生用品可散发出各种不良气体与碎屑; 人类活动时可以使地面、墙壁上的灰尘、微生物等散播到空气中。此外, 吸烟也会产生大量有害物质, 污染室内空气。由于人类活动所产生的室内空气污染物包括:

(1) 一氧化碳 室内最普遍的一氧化碳(CO)污染是人体自己引入的。吸烟者吸入的 CO 量肯定超过阈值。同时来自香烟的二次烟气, 即两次喷烟之间香烟燃烧时所发出的烟气, 其中所含的 CO 是室内 CO 的一个重要来源。

(2) 二氧化碳 人体在新陈代谢过程中吸入氧气, 呼出二氧化碳(CO_2)。 CO_2 是人体产生得最多的污染物质, 约占人体呼出的气体的4%。人体呼出的 CO_2