

■ 绿色建筑系列

绿色建筑

空气环境技术与实例

王萌 孙勇 主编

徐莉 曹颖 副主编



化学工业出版社

■ 绿 色 建 筑 系 列

绿色建筑

空气环境技术与实例

王 萌 孙 勇 主 编

徐 莉 曹 颖 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

我国目前是世界上最大的建筑市场之一。建筑能耗占全社会总能耗的比重达 28%，连同建筑材料生产和建筑施工过程的能耗所占比重接近 50%。现在我国每年新建建筑和既有建筑中，只有少量采取了提高能源效率措施，节能潜力巨大。从近几年建筑能耗的情况看，我国建筑用能呈现出逐年上升趋势。面对这种形势，我国政府对发展绿色建筑给予了高度重视，近年来陆续制定并提出了若干发展绿色建筑的重大决策。因此，树立全面、协调、可持续发展的科学发展观，在建筑领域里将传统高消耗型发展模式转向高效生态型发展模式，即走建筑绿色化之路，是我国乃至世界建筑的必然发展趋势。

绿色建筑是 21 世纪建筑发展的主流，是适应生态发展，改善人类居住条件的必然选择，绿色建筑理论研究也逐渐成为建筑学科的热点问题。正是在这样的背景下，化学工业出版社组织编写了这套《绿色建筑系列》丛书，与其他同类著作相比有以下几个特点。

(1) 集概念、设计、施工、实例于一体，整体思路清晰，逻辑性强，适合不同层次水平的读者翻阅学习。

(2) 将绿色建筑技术与具体实例相结合，从专业角度分析，极具针对性，将理论融于实践，深入浅出地展现给诸位读者。

(3) 涵盖了从建筑整体至各细部结构的技术与实例，范围广泛，内容详细，可操作性强。

(4) 注重推陈出新，紧跟时代步伐，力求将最新绿色建筑技术和最新应用实例及时呈现给广大读者。

本系列作为国家“十一五”科技支撑计划（2006BAJ05A07）研究成果之一，得到了课题主持人徐学东教授的大力支持和帮助。本套丛书由孙勇教授担任主编。

这本《绿色建筑空气环境技术与实例》是《绿色建筑系列》丛书中的一本。本书介绍了绿色建筑空气环境的内涵及相关概念、室内空气污染物的类型与危害、室内空气环境的评价指标、评价方法和评价标准；同时，按照处理室内空气中污染物的原理，将空气环境保障技术分为室内空气污染源控制技术、自然通风技术与机械通风技术及室内空气污染物净化技术，结合大量国内外绿色建筑案例介绍了空气环境保障技术实施效果，力求反映本领域先进的研究方法、设计理念、材料、设备和运行管理策略。本书还精选了国内绿色建筑实例，详细介绍符合国情、切实有效的空气保障技术及设备，为绿色建筑设计提供参考。

全书共分 8 章，主要内容为绿色建筑空气环境及保障技术内涵，室内空气污染物类型、危害与检测，绿色建筑空气环境评价指标、方法与标准，室内空气污染源控制技术与实例，自然通风与实例，机械通风技术与实例，室内空气污染净化技术与实例以及绿色建筑空气环境保障技术实例分析。

本书由王萌编写第 1 章、第 6 章，河北建研建筑设计有限公司魏彩欣、马新然、中冶南方工程技术有限公司魏亚志编写第 2 章，中国建筑科学研究院邓琴琴、北京建筑技术发展有限公司徐奇编写第 3 章，中国卫星海上测控部徐莉编写第 4 章、第 5 章及第 7 章，青岛腾远设计事务所梁斌参编第 6 章，甄珍参编第 7 章，泰安市自来水公司曹颖编写第 8 章。全书由王萌、孙勇担任主编，徐莉、曹颖担任副主编。

在本书编撰、出版过程中，化学工业出版社给予了大力支持，在此表示衷心感谢。

鉴于作者学识有限，加之时间仓促，书中难免有疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

目录

第1章 绪论	1
1.1 绿色建筑	1
1.2 绿色建筑空气环境	2
1.3 绿色建筑空气环境保障技术	3
参考文献	4
第2章 室内空气污染物	5
2.1 室内空气污染物的种类及成因	6
2.1.1 甲醛	6
2.1.2 苯	9
2.1.3 总挥发性有机物	10
2.1.4 氨	13
2.1.5 氡	13
2.2 室内空气污染物的相互作用	14
2.3 室内空气污染物对人体的危害	14
2.3.1 甲醛	14
2.3.2 苯	15
2.3.3 总挥发性有机化合物	16
2.3.4 氨	16
2.4 室内空气污染物控制参数及检测	17
2.4.1 室内空气污染物控制参数	17
2.4.2 污染物的检测	17
参考文献	19
第3章 绿色建筑室内空气环境	20
3.1 绿色建筑的室内空气环境与室内空气品质	20
3.1.1 室内空气品质问题产生的原因及其改善的重要性	20
3.1.2 改善室内空气品质的紧迫性与重要性	21
3.1.3 室内空气品质的定义	22
3.1.4 室内空气品质研究回顾	22
3.2 影响室内空气品质的污染源和污染途径	23
3.2.1 室内污染源及其特性	23
3.2.2 室内空气污染途径	31
3.3 室内空气品质对人的影响及其评价方法	35
3.3.1 室内空气品质对人的影响	36
3.3.2 室内空气品质的评价方法	37

3.4 室内空气分布的描述参数	41
3.4.1 均匀混合气流组织的描述参数	41
3.4.2 送风有效性的描述参数	43
3.5 室内空气品质标准	47
3.5.1 国内室内空气品质标准	47
3.5.2 国内外绿色建筑标准体系空气品质内容的比较	49
3.5.3 分析与讨论	51
参考文献	52

第4章 室内空气污染源控制技术与实例 54

4.1 室内空气污染物全过程控制技术	54
4.1.1 起点控制技术	54
4.1.2 终点控制技术	55
4.1.3 过程控制技术	55
4.1.4 动态控制技术	56
4.1.5 系统控制技术	56
4.2 室内空气污染物单项控制技术	56
4.2.1 室内甲醛的污染源控制	56
4.2.2 室内氡的污染源控制	60
4.2.3 室内挥发性有机化合物的污染源控制	64
4.2.4 室内苯的污染源控制	66
4.2.5 室内氨的污染源控制	66
4.2.6 室内石棉的污染源控制	67
4.2.7 室内生物性污染源控制	68
4.3 室内空气污染物综合控制技术	69
4.3.1 建立健全空气质量标准	69
4.3.2 污染源控制	71
4.3.3 室内环境质量检测	73
4.3.4 加强通风换气	73
4.3.5 运用空气净化技术	74
4.4 绿色建筑污染源控制技术实例	74
4.4.1 健康住宅	74
4.4.2 绿色办公建筑	77
参考文献	78

第5章 自然通风与实例 79

5.1 自然通风原理	79
5.1.1 风压作用下的自然通风	80
5.1.2 热压作用下的自然通风	81
5.1.3 风压与热压同时作用下的自然通风	83
5.1.4 机械辅助式自然通风	84
5.2 自然通风设计计算与气流组织	84
5.2.1 自然通风的设计要求	84
5.2.2 自然通风的设计方法	85

5.2.3	自然通风量计算	86
5.2.4	自然通风的气流组织	88
5.3	自然通风技术措施	92
5.3.1	建筑设计措施	92
5.3.2	建筑部件的设置	95
5.3.3	生态能源的利用	99
5.4	CFD 模拟技术在自然通风设计中的应用及实例	100
5.4.1	CFD 模拟技术简介	100
5.4.2	CFD 在自然通风设计中的应用实例	102
5.5	绿色建筑自然通风技术实例	119
5.5.1	风压通风典型实例	119
5.5.2	热压通风典型实例	121
5.5.3	风压与热压同时作用下的自然通风典型实例	125
5.5.4	机械辅助式自然通风典型实例	127
	参考文献	129

第6章 机械通风技术与实例 131

6.1	局部通风与全面通风	131
6.1.1	局部通风	131
6.1.2	全面通风	134
6.1.3	气流组织设计	140
6.2	混合通风技术	147
6.2.1	侧送风	147
6.2.2	散流器送风	150
6.2.3	孔板送风	152
6.2.4	喷口送风	154
6.2.5	地板送风	155
6.2.6	工位送风	155
6.2.7	混合通风技术实例	156
6.3	置换通风技术	159
6.3.1	置换通风的原理与特点	159
6.3.2	置换通风的工程计算方法	161
6.3.3	置换通风的数值模拟	164
6.3.4	置换通风技术实例	165
6.4	碰撞射流通风技术	169
6.4.1	碰撞射流通风的原理	170
6.4.2	碰撞射流通风的特点	170
6.4.3	碰撞射流通风的研究方法	171
6.4.4	碰撞射流通风技术实例	173
6.5	工位空调技术	173
6.5.1	工位空调系统的特点	174
6.5.2	工位空调系统的形式	175
6.5.3	工位空调系统的研究方法	182
6.5.4	工位空调系统实例	184

6.6 多元通风技术	187
6.6.1 多元通风的系统形式	188
6.6.2 多元通风的特点	189
6.6.3 多元通风的控制方法	190
6.6.4 多元通风研究方法	191
6.6.5 多元通风技术实例	192
参考文献	197

第7章 室内空气污染的净化技术与实例 **199**

7.1 植物净化	199
7.1.1 室内绿化的益处	199
7.1.2 植物净化空气的机理	200
7.1.3 净化室内空气的常见植物	201
7.1.4 植物在室内空气净化方面存在的不足	202
7.2 颗粒捕集净化技术	203
7.2.1 纤维过滤技术	203
7.2.2 静电过滤技术	207
7.3 污染物吸收技术	209
7.3.1 吸收机理和分类	209
7.3.2 吸收基本理论	210
7.3.3 吸收剂	211
7.3.4 吸收在室内空气净化中的应用	212
7.4 污染物吸附技术	212
7.4.1 吸附的理论基础	212
7.4.2 影响气体吸附的因素	218
7.4.3 吸附理论	218
7.4.4 吸附性能参数的测定	221
7.4.5 吸附技术在室内空气净化中的应用	222
7.5 非平衡态等离子体技术	223
7.5.1 等离子体及其分类	224
7.5.2 非平衡等离子体的产生	224
7.5.3 非平衡等离子体空气净化原理	226
7.5.4 非平衡等离子体反应器	227
7.5.5 影响非平衡等离子体净化效果的因素	229
7.5.6 非平衡等离子体在空气净化方面的应用研究	233
7.6 光催化净化技术	234
7.6.1 光催化作用原理	234
7.6.2 影响光催化净化的主要因素	235
7.6.3 提高光催化性能的途径	238
7.6.4 气固相光催化反应器	239
7.6.5 光催化在空气净化中的应用	240
7.6.6 光催化与其他方法的组合应用	240
7.7 负离子净化技术	241
7.7.1 空气离子的来源、类型和特性	241

7.7.2 空气负离子与人体健康	242
7.7.3 空气负离子的产生技术	243
7.7.4 空气负离子的净化作用及其局限性	243
7.8 臭氧净化技术	244
7.8.1 臭氧的性质	244
7.8.2 臭氧发生技术	245
7.8.3 臭氧分解技术	246
7.8.4 臭氧在室内空气净化中的应用	247
7.9 化学合成技术	248
7.10 室内空气净化装置	248
7.10.1 空气净化器的诞生与发展	248
7.10.2 空气净化装置的种类	249
7.10.3 空气净化装置的选择	250
参考文献	251

第8章 绿色建筑空气环境保障技术实例分析 **252**

8.1 国家科技部建筑节能示范楼	252
8.2 上海生态建筑示范楼	253
8.3 深圳市建科大楼	255
8.4 山东交通学院图书馆	257
8.5 上海自然博物馆新馆	258
8.6 北京锋尚国际公寓	260
8.7 2010年上海世界博览会沪上·生态家	261
8.8 深圳华侨城体育中心扩建工程	262
参考文献	264

❖ 第1章

绪 论

1.1 绿色建筑

绿色建筑 (green architecture) 是指在建筑的全寿命周期内, 最大限度地节约资源 (节能、节地、节水、节材), 保护环境和减少污染, 为人们提供健康、适用和高效的使用空间, 与自然和谐共生的建筑。与之相关的概念还有生态建筑 (ecology architecture)、可持续发展建筑 (sustainable architecture) 等。这些概念是在不同阶段提出的, 体现了绿色建筑的发展过程, 目前仍然在同时使用, 虽然概念的侧重点不同, 但建筑的内涵和特征具有一定的共性。

(1) 减少对资源和环境的负荷和影响 通过人类的开发与建设活动, 在建筑的全寿命周期每一个阶段内都不破坏自然环境, 并且修复资源与自然环境, 实现人与自然的和谐共处。

(2) 充分有效利用资源 建筑将土地、水、土壤、矿藏、木材、化石燃料、太阳能等自然资源视为一种资本, 并且采取技术措施提高这些资源的利用效率, 如土地的高效利用、环保材料的选择、固体废弃物的处理、水资源的保护与利用、能量的有效利用等。

(3) 建筑空间健康、适用、高效 建筑不仅考虑环保与节能, 同时也关注建筑与人的关系, 使用者的生理与社会需求在这些建筑中能够得到满足。

绿色建筑的起源要追溯到 20 世纪 60 年代, 美国建筑师保罗·索勒瑞首次提出了“生态建筑”的理念。1969 年美国建筑师麦克哈格的《设计结合自然》(Design with Nature) 一书, 是最早提出在城市规划和环境评价中运用生态学和生态设计方法的著作。在这个时期, 欧美出现了大量的生态建筑。这些生态建筑主要是住宅, 采用多种生态技术达到充分利用可再生的自然环境资源, 维持室内舒适、健康的目的, 如利用覆土、温室及自然通风技术提供稳定、舒适的室内气候, 种植花卉、蔬菜等植物提供富氧环境, 收集雨水以获得生活用水, 处理污水用于养鱼及植物灌溉等。在这些建筑中, 建筑节能、节水、太阳能利用、生活污水处理、屋顶绿化等技术为日后绿色建筑常用的技术措施奠定了基础。

1990 年, 英国颁布了首个绿色建筑标准, 此后十余年的时间, 许多国家和地区也相继颁布绿色建筑的标准规范等文件。

1992 年, 在巴西里约热内卢举行的联合国环境与发展大会上通过了包括《21 世纪议程》(Agenda 21) 在内的 5 项文件和条约, 提出了全球可持续发展框架。可持续发展作为一种通向未来的新的发展观, 在各个国家未来的发展规划中被广泛采纳, 在人类共命运的地球上, 大家

共同追求一个共同的目标——可持续发展。

1993年,国际建筑协会第18次大会召开,这是“绿色建筑”发展史上带有里程碑意义的大会,在可持续发展理论的推动下,这次大会以“处于十字路口的建筑——建设可持续发展的未来”为主题,大会发表《芝加哥宣言》,其中指出:“建筑及其建成环境在人类对自然环境的影响方面扮演着重要角色;符合可持续发展原理的设计需要对资源和能源的使用效率、对健康的影响、对材料的选择方面进行综合思考”。“我们今天的社会正在严重地破坏环境,这样是不能持久的;因此需要改变思想,以探求自然生态作为设计的重要依据”。

1996年,联合国人居环境学与建筑学大会在伊斯坦布尔召开,参加会议的各国首脑签署了《人居环境议程:目标和原则、承诺和全球行动计划》,人类拥有了一个共同的建筑行动纲领。

我国的绿色建筑蓬勃发展的开始是在1992年的联合国环境与发展大会召开之后,我国相继颁布了相关纲要、导则和法规,大力推动绿色建筑的发展。

2004年9月,建设部全国绿色建筑创新奖启动,标志着我国的绿色建筑进入全面发展阶段。

2005年10月,建设部和科技部共同推出《绿色建筑技术导则》。

2006年8月,建设部正式颁布了《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2006)。

2007年8月,建设部出台了《绿色建筑评价技术细则(试行)》和《绿色建筑评价标识管理办法》,逐步完善适合中国国情的绿色建筑评价体系。

2008年,建设部组织推动绿色建筑评价标识和绿色建筑示范工程建设等一系列措施。

2008年3月,中国城市科学研究会节能与绿色建筑专业委员会成立,对外以中国绿色建筑委员会的名义开展工作。

2009年、2010年,《绿色工业建筑评价标准》、《绿色办公建筑评价标准》编制工作启动,这两项标准即将颁布。

1.2 绿色建筑空气环境

绿色建筑可以为使用者提供健康、适用和高效的室内空间,这一空间内的环境包括声环境、光环境、热湿环境和空气环境。绿色建筑的空气环境主要围绕室内空气污染物的种类、相互作用、对人体的危害进行研究,借助室内空气品质和室内气流分布指标来评价空气环境,详见第2、3章。在《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2006)中,规定了绿色建筑的空气环境质量和保障技术的要求。

(1) 住宅建筑 第4.5.4条规定,居住空间能自然通风,通风开口面积在夏热冬暖和夏热冬冷地区不小于该房间地板面积的8%,在其他地区不小于5%。除了开口面积的规定之外,对开口的设置位置也有要求,应能在室内形成有效的穿堂风。在条件允许时,可以采用计算机模拟辅助设计的方法,对典型户型进行模拟分析,优化自然通风的设计。

第4.5.5条规定,室内游离甲醛、苯、氨和总挥发性有机物TVOC等空气污染物浓度应符合现行国家标准《民用建筑室内环境污染控制规范》(GB 50325)。

第4.5.11条规定,设置通风换气装置或室内空气质量监测装置。所设置的监测装置应能有利于降低室内空气污染,有利于保证室内空气质量,满足人体健康要求。全年需要较长时间采暖或开启空调的住宅,设置独立的新风换气系统可以实现节能,并且改善室内空气环境。

第4.5.12条规定,卧室、起居室使用蓄能、调湿或改善室内空气质量的功能材料。

(2) 公共建筑 第5.5.1条规定,采用集中空调的建筑,房间内的温度、湿度、风速等参

数符合现行国家标准《公共建筑节能设计标准》(GB 50189)的设计计算要求。要保障上述室内环境参数符合标准的要求,需要经过详细的气流组织计算和合理的风口设计。必要时,也应进行计算机辅助模拟的方法优化设计。

第 5.5.3 条规定,采用集中空调的建筑,新风量符合现行国家标准《公共建筑节能设计标准》(GB 50189)的设计要求。公共建筑主要房间所需的最小新风量根据建筑的功能和类型参考相关的标准规范确定,如《旅游旅馆建筑热工与空气调节节能设计标准》(GB 50189)、《公共场所卫生标准》(GB 9663~GB 9673)、《饭馆(餐厅)卫生标准》(GB 16153)、《室内空气质量标准》(GB/T 18883)等。

第 5.5.4 条规定,室内游离甲醛、苯、氨、氡和总挥发性有机物 TVOC 等空气污染物浓度应符合现行国家标准《民用建筑室内环境污染控制规范》(GB 50325)。

第 5.5.7 条规定,建筑设计和构造设计有促进自然通风的措施。建筑的平面布局、建筑朝向、开窗的位置、朝向和大小及相互关系应有利于自然通风。在建筑和构造设计中,应设计导风墙、拔风井、拔风中庭等,加强自然通风动力,并且结合地道风,促进室内自然通风。有条件时,采用太阳能集热器加热空气等主动通风措施作为自然通风的补充手段。设计时,可采用计算机模拟,优化自然通风的通道及措施。

第 5.5.8 条规定,室内采用调节方便、可提高人员舒适性的空调末端。空调末端不应只有独立启闭的设施,还应具有温度、风速的调节装置。

第 5.5.14 条规定,设置室内空气质量监控系统,保证健康舒适的室内环境。空气质量监控系统要求具有数据采集、分析,浓度超标报警和自动通风调节的功能。根据建筑的污染物类型,选择污染物浓度传感器,如人员密度较大的房间设置 CO₂ 传感器,地下车库设置 CO 传感器。监控系统能够监测送、排风设备的工作状态,并且与污染物监测结果联动,必要时自动启停和调节通风设备。

1.3 绿色建筑空气环境保障技术

绿色建筑空气环境的保障技术,根据对室内空气中污染物的处理原理不同,可以分为室内空气污染源的控制技术、自然通风与机械通风技术以及室内空气污染物的净化技术。

室内空气污染源的控制技术是指从研究污染物产生的根源出发,控制污染物产生或散发到室内空气中的技术,包括在建筑全寿命周期内控制室内空气污染物的散发量的全过程控制技术、针对特定污染物的单项控制技术以及绿色建筑室内空气污染物的综合控制技术,详见第 4 章。

自然通风和机械通风技术是通过向室内补充清洁空气,稀释或置换室内空气污染物的技术方法。自然通风是绿色建筑提倡的通风方式,通过气流组织计算和模拟分析,合理设计开口位置、大小、自然通风结构、运行策略,可以形成节能、舒适、高效的室内通风效果,详见第 5 章。机械通风技术需要依靠机械动力有组织地强制室内进行通风换气,具有更大的通风范围,通风效果更加稳定,能够较精确地控制室内空气环境指标。机械通风技术的类型很多,第 6 章结合绿色建筑通风技术实例,介绍机械通风一般的分类方法、典型的机械通风方式及设计计算、新型的机械通风技术以及机械通风与自然通风结合的多元通风技术。

空气净化技术是指从空气中分离或去除污染物的技术。根据作用原理及处理对象的不同,空气净化技术可分为物理净化、催化净化、机械净化和生物净化。第 7 章主要介绍其中一些相对常见的室内空气净化技术及相关产品,并且着重介绍一些前沿技术的原理。

参考文献

- [1] 《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2006).
- [2] 黄献明. 绿色建筑的生态经济优化问题研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2006.
- [3] 尹晶. 生态建筑的实践性研究. 博士学位论文. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- [4] 谭亚武. 生态建筑设计方法研究. 硕士学位论文. 天津: 天津大学, 2005.
- [5] 住房和城乡建设部科技发展促进中心. 绿色建筑评价技术指南. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] TopEnergy 绿色建筑论坛. 绿色建筑评估. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

❖ 第2章

室内空气污染物

随着人们生活水平的不断提高，由家装、家具及日化产品带来的室内环境污染问题越来越严重。室内环境污染已成为继 18 世纪工业革命带来的煤烟污染及 19 世纪石油和汽车工业发展带来的光化学烟雾污染之后，由 20 世纪中叶开始、21 世纪还在继续的第三代污染。

室内空气污染是指室内各种化学、生物、物理的污染物在室内积聚扩散，使室内空气质量下降，危害人类生活、工作和健康的现象。室内空气污染成分很复杂，有成千上万种污染物同时作用于人体，但主要包括悬浮颗粒物、微生物和有害气体（包括放射性气体）。考虑到微生物多依附于固体颗粒和液滴传播，可将室内空气污染物分为颗粒物和有害气体两大类。常见的室内空气污染物种类见表 2-1。

表 2-1 室内空气污染物种类

污染物种类	典型污染物
燃烧产物	一氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、二氧化碳、多环芳烃、烟草烟雾组分
挥发性有机污染物	二丁烯、甲酚、1-十二烷醇、2-乙醛-1-己醇、1-己醇、异丙醇、苯酚； 甲醛、丙烯醛、癸醛、庚醛、己醛-壬醇、丙醇、戊醇； 环己胺、癸烷、十二烷、2,4-甲基己烷、1,3-二甲基环戊烷、二十烷、庚烷、己烷、壬烷、辛烷、戊烷； 苯、二乙基苯、乙烷苯、甲苯乙烷苯、萘、4-苯基环己烷、苯乙烯、甲苯、二甲苯； 乙烷基醛酸盐、1-己基丁酯； 氯仿、二氯苯、四氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷、三氯乙烯、三氯甲烷
可吸入颗粒物	石棉、玻璃纤维、磨损产生的粉尘、无机尘粒、金属尘粒、砷、铜、锂、汞、有机尘粒、纸张、粉尘、花粉
生物和生物气溶胶	真菌、细菌、原生动物、病毒、微生物颗粒
呼吸产物	水蒸气、二氧化碳
放射性物质	氡、氡的衰变产物
气味	以上诸种物质单独或组合产生的气味

表 2-1 所述诸多室内空气污染物的浓度不一，对人体健康的危害各异，所以不能对每一种污染物质逐个进行研究，而是用一种典型的污染物来代表一类污染物，其浓度大小表示这类污染物的污染水平。例如，用二氧化碳代表人的生物散发物；一氧化碳代表室内的燃烧活动；甲醛代表挥发性有机物；微生物代表其代谢物气味、过敏因子等。

由我国国家质量监督检验检疫总局、国家环境保护总局和卫生部制定并于 2002 年 11 月 19 日正式发布的我国第一部《室内空气质量标准》中，要求控制的室内污染物主要有物理性、

化学性、生物性和放射性 4 类 19 种。其中温度、湿度、空气流速和新风量 4 种是物理性因素；而二氧化硫、二氧化氮、一氧化碳、二氧化碳、氨、臭氧、甲醛、苯、甲苯、二甲苯、苯并[a]芘、可吸入颗粒物 PM_{10} 和总挥发性有机物共 13 种是化学性因素；细菌总数是生物性因素；氡是放射性因素。除去物理性因素的 4 种指标外，其中 13 种控制指标按其性质可分为有机化合物、无机含氮化合物和氧化剂、含硫磷的化合物、一氧化碳和二氧化碳、颗粒物质、微生物和尘螨 6 大类。

2.1 室内空气污染物的种类及成因

根据室内污染物的性质，室内污染物可以分为以下三类。

(1) 化学性污染物 化学性污染物是影响室内空气质量的主要因素，可以分为挥发性有机物和无机化合物。

① 挥发性有机物 主要有甲醛、苯类。室内已检测出的挥发性有机物已达数百种，而建材以及日用化学品中的挥发性有机物也有几十种。

② 无机化合物 来源于燃烧及化学品。有氨、 CO 、 CO_2 、 O_3 、 NO_x 、 SO_2 等。

(2) 物理性污染物 物理污染本身一般不会对人体产生严重的危害，但当污染物浓度较高时，会引起严重的人体健康问题。

① 放射性氡及其子体 来源于地基、井水、石材、砖、混凝土、水泥等。

② 噪声与振动 来源于室内或室外。

③ 电磁污染 来源于家用电器和照明设备。

(3) 生物性污染 有关研究和调查认为，室内空气质量问题中有 21% 是因生物污染引起的，主要包括细菌、霉菌、尘螨、军团菌、病毒、花粉、生物体皮屑等。

目前，室内空气污染物质主要有甲醛、苯、氨、总挥发性有机物 (TVOC) 等。

2.1.1 甲醛

2.1.1.1 甲醛的理化特性

甲醛是无色，具有强烈刺激性的气味，相对分子质量为 30.03，气体相对密度为 1.067 (空气中)，略重于空气，易溶于水和乙醚，其 35%~40% 的水溶液通常称为福尔马林。液体相对密度为 0.815 ($-20^{\circ}C$)，熔点为 $-92^{\circ}C$ ，沸点为 $-19.5^{\circ}C$ 。水溶液的含量最高可达 55%。

甲醛是一种挥发性有机物，污染源很多，是室内空气的主要污染物之一。甲醛也是最简单的醛类化合物，化学反应强烈，价格低廉，是广泛用于多种化工生产的工业原料之一。工业上主要用于生产树脂的主要原料，这些树脂主要用于胶黏剂。

2.1.1.2 甲醛的毒理学依据

甲醛对皮肤和黏膜有强烈的刺激作用，可使细胞中的蛋白质凝固变性，抑制一切细胞功能，由于甲醛在体内生成甲醇而对视丘及视网膜有较强的损害作用。

甲醛能与蛋白质中 NH_2 基结合生成甲酰化蛋白，其反应速率受 pH 值和温度的显著影响。气态甲醛强烈刺激黏膜，甲醛水溶液可使蛋白质变性，被广泛用于杀菌剂。

进入人体内的甲醛代谢非常迅速，立即氧化为甲酸，接着很快被氧化成二氧化碳，从肺部呼出，部分甲酸从尿中排出。因此，人和动物吸入甲醛后，血液中甲醛浓度并未发现升高。

用各种哺乳动物细胞体外检测结果证明，甲醛具有诱发哺乳动物细胞基因突变的作用，并对 DNA 有损伤作用，产生 DNA 断裂和 DNA-蛋白质交联，抑制 RNA 的合成。但整体动物

的试验结果与体外试验结果相反，其主要原因可能是甲醛在体内代谢快，除直接接触甲醛的器官（如鼻或气管）之外，远离接触器官的组织，很少直接受到甲醛的作用。

试验动物高浓度吸入染毒可引起鼻腔鳞状细胞癌。人群流行病学调查表明，接触甲醛患鼻咽癌、鼻咽癌和口腔癌的危险性升高。2004年，国际癌症机构（IARC）将甲醛上升为第一类致癌物质。该机构认为，以前的结论——第二类致癌物质是“基于较少数量的研究”，但新近对接触甲醛人员的研究资料已经增加这方面的研究。

甲醛对人眼的刺激阈值可低至 $0.6 \sim 1.2 \text{ mg/m}^3$ 。

2.1.1.3 室内甲醛的污染源

室内的甲醛可以来自室外的工业废气、汽车尾气和光化学烟雾，但主要来源于室内。室内污染源主要是建筑材料、家具、各种黏合剂、涂料、合成纺织品和室内不同的来源。

（1）人造板 人造板是由不同尺度和不同形态的木竹材，如木块、薄木片、刨花、碎料和木纤维等，用胶黏剂加压而成的板材、方材或其他异型材料。

生产人造板常用的胶黏剂有脲醛树脂、酚醛树脂和三聚氰胺甲醛树脂等，其中现在生产用于室内装饰装修的人造板所用的胶黏剂基本上是脲醛树脂和三聚氰胺甲醛树脂。

按其结构，人造板大致可分为三类：一类是由木块或大幅面薄木板用胶黏剂胶合热压或冷压而成的胶合木或胶合板类产品，如胶合板、细木工板（也称为大芯板）；另一类是由木刨花或碎料用胶黏剂胶合热压而成的刨花类产品；第三类是由木纤维用胶黏剂胶合热压而成的纤维产品，即俗称的密度板。

用于室内装饰装修的人造板产品主要有以下几类。

① 胶合板、装饰单板、贴面胶合板、细木工板、实木接材拼板等。

② 中密度纤维板、高密度纤维板、刨花板、定向刨花板等。

③ 饰面人造板及其制品（包括浸渍纸层压木质地板、实木复合地板、竹地板、竹木复合地板、浸渍胶膜纸饰面人造板、宝丽板等）。

甲醛因具有较强的黏合性和有加强板材硬度、防虫、防腐功能，而且价格便宜，所以是目前首选作为室内装饰装修的胶合板、细木工板、中密度纤维板、刨花板的原材料。以甲醛为主要成分的脲醛树脂还可作为建筑中的保温、隔热材料，板中残留的和未参与反应的甲醛会逐渐向周围环境释放，最长的释放期可达十几年，是形成室内空气中的甲醛污染的主体。据检测， 100 cm^2 的胶合板，1h 可以释放出 $3 \sim 18 \mu\text{g}$ 甲醛。用木质刨花板覆盖的地板经常释放甲醛，这类居室中甲醛浓度可达 0.6 mg/kg 。用木屑纤维较多的新建住宅内甲醛浓度比已经使用5年的旧住宅高出 $2 \sim 5$ 倍。新添置家具的居室空气中甲醛浓度也较高，家具多时可达 0.1 mg/kg 。

在人造板中以细木工板里的甲醛污染最为严重。2002年3月12日，中国消费者协会公布了北京市场上销售的33种牌号的大芯板的测试和比较结果，结果实在令人吃惊，33种产品中只有一种符合国家《室内装饰装修材料有害物质限量》中的人造板中甲醛释放限量的要求，可以直接用于室内装修。33种品牌中，甲醛释放最高的样品超过国家标准26倍。细木工板即大芯板是一种具有实木板芯的胶合板，里面的甲醛主要来自制作大芯板所使用的脲醛树脂胶，这种胶具有胶接强度高、不易开拉的特点，是目前生产各种大芯板普遍使用的黏合剂，但是脲醛树脂中含有一定的甲醛，会形成游离甲醛释放到空气中。2002年1月1日，国家质监局公布实施了《室内装饰装修材料人造板及其制品有害物质限量》，要求直接用于室内的大芯板的甲醛释放量一定要小于等于 1.5 mg/L 。

目前市场上销售的所谓“无醛人造板”，是采用水基胶黏剂加工制成的人造板，由于其不含缩醛类树脂胶，所以甲醛释放量极低或基本不存在。但值得注意的是，一些所谓的“无醛人造板”虽然没有甲醛释放，但其还会释放出苯、甲苯。

(2) 地毯等装饰装修材料 化纤地毯、塑料地板砖、涂料等均含有一定的甲醛。据国外调查,使用各种装饰材料(新家具、墙面及地面铺设、涂料等)的室内甲醛峰值可达 $2.3\text{mg}/\text{m}^3$,而没有明显污染源的室内甲醛浓度则仅为 $0.134\sim 0.67\text{mg}/\text{m}^3$ 。国内研究也发现,新装修的住宅或宾馆,室内空气中甲醛浓度升高。此外,用于隔热材料的脲醛泡沫树脂(UFFI)主要用于移动房屋的建筑材料。研究发现,应用 UFFI 的室内甲醛一般为 $3.35\text{mg}/\text{m}^3$,有时可达 $13.4\text{mg}/\text{m}^3$ 。

(3) 燃料的不完全燃烧 燃料燃烧可产生大量甲醛,厨房内如同时使用煤炉和液化石油气时,甲醛浓度大于 $0.4\text{mg}/\text{m}^3$,厨房内甲醛浓度日变化出现峰型与做饭时间相关。

另外,香烟的主流烟雾中甲醛平均浓度为 $212\text{mg}/\text{m}^3$,侧流烟为 $18\sim 58\text{mg}/\text{m}^3$,人们每吸一口烟(约 40mL),最多可吸入 $81\mu\text{g}$ 甲醛;每天吸一包烟,主流烟雾甲醛累计暴露平均为 1mg 。室内有人吸烟比无人吸烟甲醛浓度要高出 3 倍左右。

有人测定,一本 2cm 厚的新书, 1h 可以释放出 $1\mu\text{g}$ 甲醛。所以藏书多、通风不好的图书馆甲醛浓度明显高于室外,有的高达 $0.08\text{mg}/\text{kg}$ 。还有人发现,无碳复写纸能释放大量甲醛。

(4) 日常生活化学用品 人们在日常生活中所用的化学产品,如化妆品、清洁剂、杀虫剂、消毒剂、防腐剂、印刷油墨、纸张和编织化纤等均含有甲醛。

另外,室内空气中甲醛浓度的高低与室内温度、空气相对湿度、室内材料的装载度,即每立方米室内空间的甲醛散发材料表面积,以及室内通风换气次数,即室内空气流通量等因素有关。在高温、高湿、负压和高负载条件下会加剧甲醛散发的力度。实测数据说明,在一定条件下,室内空气中甲醛浓度可聚集到标准容许水平以上,而且释放期比较长,日本横滨国立大学的研究表明,室内甲醛的释放期一般为 $3\sim 15$ 年。

研究证明,室内释放甲醛污染空气的物品,其释放浓度随室内的气温、湿度的变化而改变。气温升高 $5\sim 6^\circ\text{C}$,气相中的甲醛浓度可提高 1 倍。当相对湿度由 30% 上升到 70% 时,甲醛浓度也可上升 40% 。而当室内气温和湿度同时增加时,复合作用的结果,可使甲醛浓度上升高达 5 倍。所以,为控制甲醛的气相浓度,应使室内保持适当的气温和湿度。

2.1.1.4 我国室内甲醛的污染现状

目前我国城市室内空气污染,特别是室内甲醛和苯的污染十分严重。我国 $60\%\sim 94\%$ 新装修的房间内甲醛浓度超过国家标准,其平均浓度是国家居室内甲醛卫生标准 ($0.08\text{mg}/\text{m}^3$) 的 $3\sim 10$ 倍,不但远远高于西方发达国家水平,也高于发展中国家水平,甲醛已成为我国目前室内空气中首要的污染物。室内空气中甲醛污染物的主要特征有以下几点。

(1) 污染范围广 在绝大多数新装修的家庭和办公室都存在甲醛,其主要原因是使用了含有脲醛树脂的木质人造板材,而脲醛树脂是由甲醛与尿素聚合反应生成的一种黏合剂,其中所含的游离甲醛和降解时产生的甲醛可以释放出来,污染室内空气。

(2) 污染时间长,呈季节性波动 甲醛污染可以持续数年之久,这是因为聚合脲醛树脂的降解是一个长期不间断的过程,而且甲醛释放量可随夏季环境温度和湿度的升高而大幅度增加。

(3) 污染水平相对较高 尽管居室内空气中甲醛与职业性甲醛的污染水平相比,还属于低浓度水平,但在所有由室内装修引起的有机类空气污染物中,甲醛的污染水平平常可以达到 $0.1\sim 4\text{mg}/\text{m}^3$,这样的浓度水平不但远远高于其他单个污染物,有时甚至高于其他挥发性有机物的总量,所占比重也是其他污染物难以相比的。

(4) 生物毒性高 根据美国政府化学性致癌物的分类标准,甲醛属于 A2 类化合物(可疑的人类致癌物)。目前美国甲醛的职业阈值限值为 $0.37\text{mg}/\text{m}^3$,我国也于 2002 年将车间甲醛的职业阈值限值由 $3.0\text{mg}/\text{m}^3$ 降低到 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$,同时根据世界卫生组织(WHO)文件,非

职业性环境空气中甲醛阈值限值仅为 0.1mg/m³，这些数据均说明气态甲醛有较大的生物毒性。

(5) 毒性作用种类繁多，机制不清 除了遗传毒性和致癌作用外，气态甲醛还具有免疫毒性、神经毒性、细胞毒性和生殖毒性。2001 年有专家观察了¹⁴C 标记中的甲醛胚胎毒性和致畸性，发现甲醛可穿过胎盘进入胎儿组织，导致胎儿器官（脑、肝）与之结合的放射活性高于母体组织。结合机制尚未阐明，但可能与甲醛进入单碳循环有关。甲苯与核酸、蛋白质以及有机化合物结合（如脱氧核糖核酸、核酸、核苷酸、蛋白质和氨基酸）发生加合和聚合反应，形成加合物和脱氧核糖核酸-蛋白质交联物。同时发现当暴露于甲醛后，母体血液中游离甲醛浓度不受影响，但这并不意味着甲醛与除鼻腔以外的细胞和脱氧核糖核酸无关。

我国室内甲醛污染的现状调研选择了北京、辽宁、山东、上海四个省市，代表了我国南北方不同地区。在冬、夏两季进行了不同暴露期限、不同时间、不同环境的环境监测，其取得有效数据 743 个。经统计学处理发现，室内装饰 5 个月后，甲醛的含量可低至 0.1mg/m³；装饰 7 个月后，甲醛的含量降低至 0.08mg/m³ 以下。通过询问，一般反应在 0.1mg/m³ 时，未感到有任何刺激感，也嗅不到甲醛气味。

通过对住宅、办公室、图书馆、工厂车间等地点的室内和室外空气中甲醛的测量，室内空气中甲醛浓度比室外高出约 2~11 倍，见表 2-2。

表 2-2 室内、外空气中甲醛浓度比较 单位：mg/m³

测定场所	室内	室外
平房	0.030~0.44	0.005~0.040
旧住宅楼	0.010~0.20	0.005~0.40
新住宅楼	0.050~0.38	0.005~0.040
办公楼	0.010~0.030	0.004~0.015
图书馆	0.010~0.30	0.005~0.015
车间	0.20~0.95	0.010~0.081

2.1.2 苯

2.1.2.1 苯的理化特性

苯是一种无色或近于浅黄色透明油状液体，具有强烈芳香气味，易挥发、易燃、易爆。其相对分子质量为 78.11，相对于水的密度为 0.8765，熔点为 5.5℃，沸点为 80.1℃，是室内挥发性有机物的一种，不溶于水，溶于乙醇、乙醚等许多有机溶剂。燃烧时发出光亮，苯蒸气与空气可形成爆炸性混合物，爆炸极限为 1.5%~8.0%。在适当情况下，分子中的氢能被卤素、硝基等置换，也能与氢和氯等起加成反应。

2.1.2.2 苯的毒理学依据

苯主要通过吸入受污染的空气进入人体，也可通过皮肤渗入人体，但摄入量很少。吸入的苯 30%~80% 进入人体到血液循环中，吸收的苯约 50% 以原形态经肺部呼出，约 10% 的苯以原形态可蓄积在体内，其余的苯在肝脏中通过 P450 混合功能氧化分解为水和二氧化碳后经肺部呼出及肾脏排出；约有 30% 被氧化为酚，其中部分再氧化为邻苯二酚、对苯二酚等，并且与硫酸及葡萄糖醛酸结合成苯基硫酸酯及苯基葡萄糖醛酸酯，经肾脏排出；还有约 1% 可与乙酰半胱氨酸结合成 2-苯硫酸尿酸经肾脏排出。苯的氧化物毒性比苯更强。世界卫生组织（WHO）及国际癌症研究机构于 1993 年将苯确定为人类的致癌物。

苯的健康效应表现在血液循环、遗传毒性和致癌性三个方面。暴露于不同水平的苯蒸气条件下所引起的健康效应，见表 2-3（Stephen T. Etal）。