



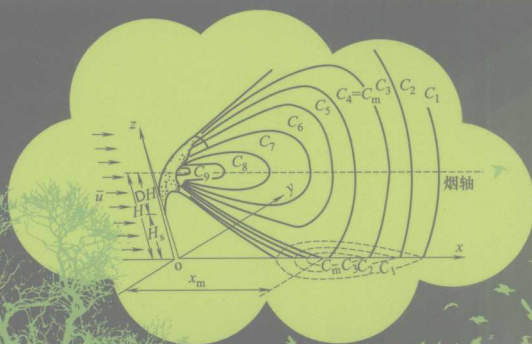
高等院校建筑环境与设备工程专业

规划教材 >>>>

KONGQI WURAN KONGZHI GONGCHENG

空气污染控制工程

丛晓春 主编 王根霞 副主编 张吉光 主审



化学工业出版社



高等院校建筑环境与设备工程专业

规划教材 >>>>

KONGQI WURAN KONGZHI GONGCHENG
空气污染控制工程



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要讲解工业与民用建筑环境空气污染物控制的基本理论与技术,全书共分10章。第1章主要介绍了空气污染控制技术的一些基本概念,分析了建筑环境空气污染物的种类及来源,并提出了空气污染的综合预防措施;第2章介绍空气污染物发生量;第3章主要介绍了空气污染物的迁移规律;第4章阐述了如何从源头上消除或减少污染;第5章阐述了通风技术在室内空气污染控制中的应用;第6章主要针对空气中微粒污染控制机理及方法进行了系统介绍;第7章主要是气态污染物控制;第8章则是细菌和病原体的去除方法介绍;第9章阐述了污染物的稀释控制法,主要包括大气扩散和烟囱设计;第10章对特殊建筑环境的空气污染控制问题做了介绍。

本书可作为高等院校建筑环境与设备工程专业本科教学用书,也可作为相关领域工程技术人员、科研人员和对室内环境关注人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

空气污染控制工程/丛晓春主编. —北京:化学工业出版社, 2009. 8

高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材
ISBN 978-7-122-06168-3

I. 空… II. 丛… III. 空气污染控制-高等学校教材 IV. X510.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 112604 号

责任编辑:陶艳玲
责任校对:徐贞珍

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张11 $\frac{3}{4}$ 字数292千字 2009年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:24.00元

版权所有 违者必究

前 言

随着国民经济的高速发展、人民生活水平的迅速提高和环保意识的增强,对环境的要求也越来越高。人们已不再仅满足于拥有住房,而是要求一个集舒适性、美观性、功能性和安全性于一体的建筑物及建筑室内环境。而空气是人类生存环境的重要组成部分,因此空气污染就变为人们非常关心的重要事情,空气污染控制的技术和手段也成为人们迫切需要的和环境保护事业必不可少的科学技术的一部分。

空气污染以围护结构为界可分为室外大气污染和室内空气污染。近年来室内空气污染越来越引起人们的重视,其污染浓度有时甚至高出室外几十倍、上百倍,而人类 80%~90% 以上的时间是在室内度过的。在世界卫生组织公布的《2002 年世界卫生报告》中,室内烟尘与高血压、胆固醇过高症及肥胖症等被共同列为人类健康的 10 大威胁。报告指出,尽管空气污染物主要存在于室外,但是人们长期生活在室内,因此人们受到的空气污染主要来源于室内空气污染。专家认为,继“煤烟型”、“光化学烟雾型”污染后,现代人正进入以“室内空气污染”为标志的第三污染时期。

据统计,全球近一半的人处于室内空气污染中,据统计 35.7% 的呼吸道疾病,22% 的慢性肺病,15% 的气管炎、支气管炎和肺癌是由室内环境污染引起的。目前中国每年由室内空气污染引起的超额死亡数已经达到 11.1 万人,超额急诊数达 430 万人次,直接和间接经济损失高达 107 亿美元。更令人担忧的是,儿童比成年人更容易受到室内空气污染的危害。一份来自北京儿童医院的调查表明,在该院接诊的白血病患者中有九成患儿家庭在半年内曾经装修。专家据此推测,室内装修材料中的有害物质可能是小儿白血病的一个重要诱因。世界卫生组织宣布全世界每年有 10 万人因为室内空气污染而死于哮喘病,而其中 35% 为儿童。据统计,我国儿童哮喘患病率为 2%~5%,其中 1~5 岁儿童患病率高达 85%。因此,室内空气污染的控制已提到日程上来。

《空气污染控制工程》是建筑环境与设备工程专业的一门专业技术课程,主要讲解工业与民用建筑环境空气污染物控制的基本理论与技术。通过本课程学习,可以系统掌握建筑环境空气污染控制的基本理论与技术,为从事建筑环境空气污染的控制、设计和设备的运行管理打下基础。

全书共分 10 章。第 1 章主要介绍了大气污染控制技术一些基本概念,分析了建筑环境空气污染物的种类及来源,并提出了空气污染的综合预防措施;第 2 章介绍空气污染物发生量,包括颗粒物、气态污染物、有害细菌、病原体、病毒和室内余热、余热发生量;并在第 8 章对细菌和病原体去除方法进行介绍;第 3 章主要介绍了空气污染物的迁移规律,对颗粒、气态污染物以及热湿气体的迁移规律进行了分析论述;第 4 章阐述了如何从源头上消除或减少污染,并对主要的控制方法进行了论述;第 5 章阐述了通风技术在室内空气污染控制中的应用;第 6 章主要针对空气中微粒污染控制机理及方法进行了系统介绍;第 7 章主要是气态污染物控制,包括吸收法、吸附法、催化转化法等;第 9 章阐述了污染物的稀释控制法,主要包括大气扩散和烟囱设计;第 10 章对特殊建筑环境的空气污染控制问题做了介绍。

本书由山东科技大学丛晓春主稿。第 1~3 章由亓玉栋编写;第 4 章、第 5 章、第 9 章

由王根霞、宋桂梅编写；第 10 章由刘建龙编写；第 6 章由陈香编写；第 7 章由陈香和陈志龙共同编写；第 8 章由陈志龙编写。

本书经张吉光教授审阅，并提出了许多意见和建议，使本书的质量有了很大的提高。

由于室内环境的保护和污染控制在我国是一个较新的行业，室内环境污染净化治理的理论和一些新的理念也在实践的指导下不断发展和丰富。加之时间仓促和编者水平所限，难免有疏漏之处，衷心希望得到大家的批评指正，我们也将不断总结和完善空气污染控制的理论和实践经验，以便再版时改正。

编者

2009 年 4 月

目 录

第 1 章 空气污染控制技术概述	1
1.1 室内环境质量问题	1
1.2 建筑环境空气污染物种类及来源	2
1.2.1 室内空气污染物种类	2
1.2.2 建筑环境的空气污染物来源	10
1.2.3 建筑环境空气污染的控制措施	14
1.3 空气污染防治的综合技术措施	15
1.3.1 污染物源头治理	16
1.3.2 通风稀释和合理气流组织	16
1.3.3 空气净化	16
1.3.4 室内空气品质的全过程控制	16
1.4 室内空气品质标准与规范	18
1.4.1 室内空气品质的定义	18
1.4.2 室内空气品质标准与规范	19
参考文献	21
第 2 章 空气污染物发生量	23
2.1 空气污染控制的主要技术参数	23
2.2 颗粒物的发生量	24
2.2.1 燃烧发生量	24
2.2.2 香烟(熏)发生量	25
2.2.3 人员发生量	25
2.2.4 办公设备发生量	26
2.3 主要气态污染物的发生量	27
2.3.1 VOCs 的发生量	27
2.3.2 二氧化碳(CO ₂)的发生量	27
2.3.3 硫氧化物 SO _x	28
2.4 有害细菌、病原体、病毒的发生量	28
2.5 室内余热、余湿的发生量	29
2.5.1 透明围护结构的传热	29
2.5.2 以其他形式进入室内的热量	31
2.5.3 室内开放湿表面散湿	33
参考文献	33
第 3 章 空气污染物的迁移规律	35
3.1 颗粒污染物的迁移	35
3.1.1 颗粒物的迁移模型	35
3.1.2 颗粒物穿透的气流量的确定	37
3.2 气态污染物的迁移	39
3.2.1 气态污染物散发迁移的描述	39
3.2.2 人员扰动的描述方法	40
3.2.3 污染物扩散的计算	42
3.3 热湿气体的迁移分析	43
3.3.1 室内余湿的迁移	43
3.3.2 自然渗透条件下余热的迁移	45
参考文献	47
第 4 章 空气污染源的控制	48
4.1 有限空间的密闭	48
4.1.1 密闭罩的基本形式	48
4.1.2 影响密闭罩性能的因素	49
4.1.3 密闭罩计算	50
4.1.4 通风柜	51
4.2 气流诱导与隔断	53
4.2.1 大门空气幕	53
4.2.2 吹吸式排风罩	56
4.2.3 气幕式排风罩	57
4.2.4 热过程排风罩	58
4.3 负压排风	60
4.3.1 负压隔离病房空调设计原则	60
4.3.2 负压隔离病房气流组织	61
4.3.3 负压隔离病房的压力控制	61
参考文献	62
第 5 章 空气质量改善的通风措施	63
5.1 自然通风	63
5.1.1 自然通风的作用原理	63
5.1.2 自然通风量的计算	66
5.2 机械通风	67
5.2.1 局部通风	68
5.2.2 全面通风	70
5.2.3 事故通风	73
5.3 局部送风	74
5.3.1 风扇	74
5.3.2 喷雾风扇	74
5.3.3 系统式局部送风	75
5.3.4 系统式送风装置的运行管理	76
5.3.5 行车司机室降温	76
5.4 循环风	76
5.4.1 洁净空调系统循环风	77

5.4.2 煤矿可控循环风	77	应用	114
5.5 诱导通风	79	7.4 其他净化方法	118
5.5.1 诱导通风工作原理	79	7.4.1 燃烧法	118
5.5.2 地下车库的无风管诱导通风 系统	80	7.4.2 冷凝法	120
5.5.3 地下车库无风管诱导风机通风 系统时应注意的几个问题	81	7.4.3 膜分离法	122
参考文献	81	7.4.4 生物法	124
第6章 气体中颗粒物的分离技术	82	参考文献	127
6.1 重力沉降室	82	第8章 细菌与病原体的去除	128
6.1.1 重力沉降室工作原理和分类	82	8.1 空气离子化	128
6.1.2 重力沉降室设计与计算实例	83	8.1.1 等离子体的产生机理及分类	128
6.1.3 除尘效率和压力损失	85	8.1.2 电子束辐照烟气脱硫脱硝技术	128
6.1.4 应用实例	85	8.1.3 工艺的主要影响因素	130
6.2 离心力分离	86	8.2 纳米过滤材料	131
6.2.1 工作原理、结构尺寸、分类和 除尘性能影响因素	86	8.2.1 纳米应用技术概述	131
6.2.2 设计计算	89	8.2.2 纳米材料净化空气中粉尘方面的 应用	131
6.2.3 选型方法和选型注意事项	91	8.2.3 纳米材料净化空气中的有害 气体	133
6.3 过滤	93	8.3 医院空调净化措施	134
6.3.1 袋式除尘器工作原理	93	8.3.1 医院空气污染特征	134
6.3.2 袋式除尘器的滤料	94	8.3.2 医院空气污染控制	134
6.3.3 袋式除尘器的应用和选择	95	8.3.3 医院净化要求	136
6.3.4 颗粒层除尘器	95	8.3.4 空调净化系统方式	137
6.4 电除尘器	97	8.3.5 洁净室气流组织形式	138
6.4.1 电除尘器的工作原理	97	8.3.6 空气过滤器的分类及性能特点	138
6.4.2 电除尘器的分类	98	参考文献	139
6.4.3 电除尘器的应用	98	第9章 污染物的稀释法控制	140
参考文献	99	9.1 影响大气污染的气象因子	140
第7章 有害气体的净化	100	9.1.1 风	140
7.1 吸收	100	9.1.2 湍流	143
7.1.1 吸收过程的基本原理	100	9.1.3 大气的温度层结	144
7.1.2 吸收设备的分类	101	9.1.4 大气稳定度	145
7.1.3 吸收法净化含氟废气	103	9.2 烟气的抬升高度	149
7.2 吸附	103	9.2.1 影响烟气抬升的因素	149
7.2.1 吸附原理	103	9.2.2 烟气抬升高度的公式	150
7.2.2 吸附装置的类型	104	9.3 污染物落地浓度	152
7.2.3 吸附装置的选择原则和选型	108	9.3.1 高斯扩散模式	152
7.2.4 吸附净化法的应用	109	9.3.2 有上部逆温时的扩散模式	154
7.3 催化转化法	111	9.3.3 熏烟扩散模式	154
7.3.1 催化作用	111	9.3.4 扩散参数的确定	155
7.3.2 气固相催化反应过程	112	9.3.5 影响浓度的时间因素	157
7.3.3 催化反应器	112	9.4 烟囱计算	158
7.3.4 影响催化转化的因素	114	9.4.1 烟囱高度的计算	158
7.3.5 催化转化法净化气态污染物的 应用	114	9.4.2 烟囱出口直径的计算	160
		参考文献	161

第 10 章 特殊建筑环境的空气污染

控制	162	10.2.3 通风量和风压	167
10.1 地下汽车停车场	162	10.2.4 通风方式的选择	168
10.1.1 地下汽车停车场通风与防排烟 系统的设计原则	162	10.3 地下建筑	171
10.1.2 地下汽车停车场通风量与排烟量 的确定	163	10.3.1 地下建筑空气污染特征	171
10.1.3 常用的地下车库通风与排烟 系统	164	10.3.2 地下建筑工程需风量计算	171
10.2 隧道	166	10.3.3 地下风道和峒室的通风管道 布置形式	174
10.2.1 隧道空气污染特征	166	10.4 热车间	176
10.2.2 通风要求	166	10.4.1 热车间自然通风计算	176
		10.4.2 隔热	177
		参考文献	178

第 1 章 空气污染控制技术概述

历史上旨在减少室外空气污染的努力可以追溯到 14 世纪，以当时英国伦敦的烟雾法为代表。现代空气污染问题的研究源于 1952 年的伦敦烟雾事件。经过 50 多年的研究，人们对空气污染的成因、影响因素和代表性危害都有了全面的认识。同时，控制空气污染的方法或措施也不断完善，形成了与室外空气污染控制相关的产业。

室内空气质量问题可追溯到远古时代，以原始人类将火种引入洞穴，引起洞穴内烟尘污染为标志。而采用科学的方法对待室内空气问题的历史至少可追溯到 20 世纪上半叶，1939 年美国成立了工业卫生协会（American Industrial Hygiene Association, AIHA），这标志着生产环境对人体健康的影响已受到社会关注。20 世纪 60 年代的北欧和北美国家提出了室内空气质量（Indoor Air Quality, IAQ）的概念。经过几十年的发展，到目前为止，欧美各发达国家，亚洲的日本、韩国和我国香港地区以及世界卫生组织均已建立比较完善的室内环境法规，创造优良的室内环境已是人类文明的共同愿望。

1.1 室内环境质量问题

室内环境是指采用天然材料或人工材料围隔而成的小空间，是与外界大环境相对分隔而成的小环境。本书中室内环境主要是指居室环境，从广义上讲，包括教室、会议室、办公室、候车（机、船）大厅、医院、旅馆、影剧院、商店、图书馆等各种用作生产性室内场所的环境。人的一生大约有 70%~90% 的时间是在室内度过的。因此，在一定意义上，室内环境对人们的生活和工作质量以及公众的身体健康影响远远超过室外环境^[1]。

人类为了生长、发育和维持生命活动需要不停地与外界环境进行物质交换。一个健康成年人一天约需从外界摄取 1~2kg 食物，2~3L 水和 12~15m³ 空气。可见，空气质量对于人体健康的意义是十分重要的。良好的室内空气能够使人感到神清气爽，精力充沛，心情舒畅，不易疲倦，工作效率提高；而不良的室内空气不但危害人体健康，还引起生态系统的破坏和财产损失等。在过去 30 多年中，我国在防止大气环境质量恶化，改善大气环境质量方面投入了大量的人力和物力，其着眼点主要是降低固定污染源和流动污染源向大气排放污染物，降低大气环境的污染物浓度，满足环境空气质量标准。毋庸置疑，这对于保障人体健康起到了积极的作用。然而，由于建筑材料的围隔作用，使得室内空气有别于室外，特别是随着节能、温度和湿度舒适要求的提高，建筑物密闭程度不断增大，相应地，室内向室外空气交换量减小，室内、外的环境差异也更加明显。美国环境保护署（Environmental Protection Agency, EPA）最近的一项研究显示，人们在室内接受某些污染物的程度超过室外 100 倍。澳大利亚的研究者认为，室内空气的污染程度超过室外 5~20 倍。香港环保部门的一项研究指出，约有 1/3 的办公楼室内空气质量不符合世界卫生组织及其他相关组织的标准。

国外早在 20 世纪 60 年代末期就出现了关于室内空气质量问题的报道。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频繁出现 SBS、BRI 和 MCS 三个英文缩写，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 Syn-

drome, SBS)、建筑相关疾病 (Building-Related Illness, BRI) 和化学物质过敏症 (Multiple Chemical Sensitivity, MCS)。

我国早期的室内空气污染物以厨房燃烧烟气、油烟、香烟烟雾, 以及人体呼出的二氧化碳, 携带的微尘、微生物、细菌等为主。近年来, 随着社会经济的高速发展, 人们越来越崇尚办公和居室环境的舒适化、高档化和智能化, 由此带动了装饰装修热潮和室内设施现代化的兴起。良莠不齐的建筑材料、装饰装修材料的不断涌现, 以及越来越多的现代化办公设备和家用电器进驻室内, 使得室内空气物质成分更加复杂。室内甲醛、苯系物、氨气、臭氧和氡气等污染物浓度水平远远高于室外, 由此引起“病态建筑综合症”的患者越来越多。因建筑和装饰装修质量不合格引起的投诉, 甚至房屋装饰装修后无法入住的案例也层出不穷。由于室内空气污染的危害性及普遍性, 有专家认为继“煤烟型污染”和“光化学烟雾型污染”之后, 人们已经进入以“室内空气污染”为标志的第三污染时期。

与一般的环境污染相比, 室内环境污染具有其独特的性质^[2]。

① 影响范围大 室内环境污染不同于其他的工矿企业废气、废渣、废水排放及噪声等造成的环境污染, 影响的人群数量非常大, 几乎包括了整个现代社会。

② 接触时间长 人类在室内的时间达到生命时间长度的 70%~90%, 人体长期暴露在室内环境的污染中, 接触污染物的时间比较长。

③ 污染物浓度低 室内环境污染物相对而言一般浓度都较低, 甚至仪器难于测量, 短时间内人体一般不会出现非常明显的反应, 而且不易发现致病源。

④ 污染物种类多 室内污染物的种类可以说成千上万, 到目前为止, 已经发现的室内污染物就有 3000 多种。不同污染物同时作用在人体上, 可能会发生复杂的协同作用。

⑤ 健康危害大 越来越多的科学证据显示, 不良的室内环境与一系列健康问题和不适有关, 这些疾病包括呼吸道和感觉器官的不适, 全身无力, 有的甚至危及人的生命。

1.2 建筑环境空气污染物种类及来源

1.2.1 室内空气污染物种类

室内空气污染按其污染物特性可分为以下三类^[3]。

化学污染: 主要为有机挥发性化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 和有害无机物引起的污染。有机挥发性化合物, 包括醛类、苯类、烯等 300 余种有机化合物, 其中最为主要的为甲醛和甲苯、二甲苯等芳香族化合物, 这类污染物主要来自建筑装饰或装饰材料。而无机污染物主要为氨气 (NH_3), 燃烧产物 CO_2 、 CO 、 NO_x 、 SO_x 等, 这些污染物主要来自室内燃烧产物。

物理污染: 主要指灰尘、重金属和放射性氡 (Rn)、纤维尘和烟尘等的污染。

生物污染: 细菌、真菌和病毒引起的污染。

下面对每一种污染的常见污染物及其性能作一简介。

1.2.1.1 常见化学污染及特性

(1) 有害燃烧产物

在家里烹饪是非常普遍的现象, 一方面由于燃料的燃烧会产生一些烟气和有害气体。烟气是燃烧的主要产物, 水蒸气和 CO_2 是其主要成分。水蒸气对人体健康没有显著影响, CO_2 通常对人体也没有显著影响, 但其浓度过高会使人精神萎靡, 工作效率变低, 尤其是发生火灾时, 大量的 CO_2 会使人窒息。在低浓度下对人体健康会产生损害的燃烧产物主要

是 CO 、 NO_x 、 SO_x 。 CO 是燃料不完全燃烧的产物，它是一种无色无味的气体，具有极强的毒性， CO 中毒在全世界是一个很大的问题。法国一项调查显示，每年 CO 中毒事件的发生率为 0.175%，这其中 97% 是偶然事件，死亡率达 5%。 CO 能够快速被肺吸收，它和血红蛋白结合的速率是氧气的 250 倍，从而阻止氧的传输，然后碳氧血红蛋白 (Carbonyl Hemoglobin, COHb) 的浓度在人体冠状动脉和脑部动脉处急剧升高。 CO 中毒对身体各个器官所造成的损伤程度不同，对人体需氧量大的器官和组织受伤害程度较大。深度中毒会使脑部收到永久性伤害，使中毒人员持续昏迷；由于心脏耗氧量特别大而且和肌球蛋白关系密切，心脏也特别容易受到损伤；其他的器官包括皮肤、肺以及骨骼肌肉也会受到影响。

NO_x 包括 N_2O 、 NO_2 、 N_2O_5 和 NO 。其中由于人类行为所产生的 NO 和 NO_2 是构成大气污染的主要氮氧化物。由于 NO 能够和空气中氧结合成 NO_2 ，因此 NO_2 的浓度通常作为氮氧化物污染的指标。低温的家庭燃烧器可以产生 $18.8 \sim 188 \text{ mg/m}^3$ 的氮氧化物，如果室内通风不良，这些氮氧化物就成了室内污染物。厨房烹饪所产生的 NO_2 是室内 NO_2 的主要来源。室内去除氮氧化物的主要途径是通风和绿色植物吸收。 NO_2 的毒性主要体现在对呼吸系统的损害上。研究表明：在对人的健康影响方面， NO_2 的浓度要比人在 NO_2 中的暴露时间和机体的抗病能力更为关键。通常在低浓度下几个小时的暴露不会对动物的肺部产生不利影响，只有几周以上的低浓度暴露才可能引起肺部损伤，但是在高浓度 NO_2 中的短期暴露就可能对健康产生不利影响。表 1-1 是 NO_x 对机体产生危害作用的各种浓度阈值。

表 1-1 NO_x 对机体产生危害作用的各种浓度阈值^[4]

损伤作用类型	浓度阈值/(mg/m^3)	损伤作用类型	浓度阈值/(mg/m^3)
接触人群呼吸系统患病率增加	0.2	呼吸道上皮受损,产生生理学病变	0.8~1
短期暴露使敏感人群肺功能改变	0.3~0.6	对机体产生损伤作用	0.94
嗅觉	0.4	肺对有害因子抵抗力下降	1
对肺部的生化功能产生不良影响	0.6	短期暴露使成人肺功能改变	2~4

SO_x 主要为 SO_2 ，由煤或者油燃烧产生。通常室内 SO_2 的浓度比室外低，这主要是由于 SO_2 被房间表面吸附之故。 SO_2 极易溶于水，因此它可能会在眼睛、鼻子和喉黏膜处变成亚硫酸、硫酸，产生更强的刺激作用，但上呼吸道对 SO_2 的这种阻留能够减轻其对肺部的刺激。然而 SO_2 可以通过血液到达肺部，仍会产生刺激作用；当其浓度为 $3.8 \sim 5.7 \text{ mg/m}^3$ 时，呼吸道的纤毛运动和黏膜的分泌作用均会受到不同程度的抑制；当它的浓度为 7.6 mg/m^3 时，会对眼睛产生很强的刺激，长时间暴露在这种环境中，会引起慢性呼吸综合症；当浓度为 9.5 mg/m^3 时，气管中的纤毛运动将有 65%~70% 受到障碍。而 SO_2 如果和粉尘一起进入人体，则由于粉尘能够把吸附在其上的 SO_2 直接带到肺部，因此使得毒性增强 3~4 倍。 SO_2 和苯并 [a] 芘的联合作用，使得肺癌的发病率比后者单独作用要高。此外， SO_2 进入人体体内后，能够与维生素 B_1 结合，从而阻止维生素 B_1 和维生素 C 的结合，破坏体内维生素 C 的平衡，进而影响新陈代谢。它还能抑制、破坏或激活某些酶的活性，使得糖和蛋白质的代谢发生紊乱，影响机体生长发育。

(2) 有机挥发物 (VOCs)

有机挥发物是一类低沸点的有机化合物的总称。各个组织对于 VOCs 所涵盖的物质的定义并不相同，美国环境署 EPA 对 VOCs 的定义是：除了 CO_2 、碳酸、金属碳化物、碳酸盐以及碳酸铵等一些参与大气中光化学反应之外的含碳化合物。主要包括甲烷、乙烷、丙酮、甲基乙酸和甲基硅酸等。室内空气品质的研究人员通常把采样分析的所有室内有机气态

物质称为 VOCs。各种被测量的 VOCs 被总称为 TVOC (Total VOC)。通常有一些没有在室外环境 VOCs 定义中的有机物质在室内污染研究中也当被当成一种 VOC，譬如甲醛。表 1-2 是世界卫生组织 (World Health Organization，WHO) 对室内有机污染物的分类。

表 1-2 世界卫生组织对室内有机污染物的分类

有 机 物 分 类	沸点/℃	典型采样方法
极易挥发的有机化合物(VVOC)	<0 到 50~100	分批采样:用活性炭吸附
挥发性有机化合物(VOC)	50~100 到 240~260	用炭黑或者木炭吸附
半挥发性有机化合物(SVOC)	240~260 到 380~400	用聚亚氨酯泡沫吸附或者 XAD-2 吸附
附着在微粒上的有机物(POM)	>380	过滤器

VOCs 对人体健康影响主要是刺激眼睛和呼吸道，皮肤过敏，使人产生头痛、咽痛与乏力。TVOC 浓度小于 $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 时，对人体不产生影响。人暴露于 $0.025\text{mg}/\text{m}^3$ 的 22 种 VOCs 环境中会头痛、疲倦和瞌睡，浓度在 $0.188\text{mg}/\text{m}^3$ 时会昏眩和昏睡，当浓度超过 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 时可能导致昏迷、抽筋甚至死亡。另外即使室内空气中单个 VOC 含量都远低于其限制浓度，但由于多种 VOCs 的混合存在及其相互作用，危害强度可能增大，整体暴露后对人体健康的危害仍然相当严重。由于 VOCs 中各化合物之间的协同作用比较复杂，难于了解，而且各国、各地、不同时间地点所测的 VOCs 的组分也不完全相同，所以目前对 VOCs 的健康效应的研究远远不及甲醛清楚。表 1-3 是丹麦 Lars Molhave 等根据他们所进行的控制暴露人体实验结果和各国的流行病学研究资料，定出的 VOCs 浓度与人体反应的关系。

表 1-3 TVOC 浓度与人体反应的关系

TVOCs 浓度/ (mg/m^3)	健 康 效 应	分 类
<0.2	无刺激、无不适	舒适
0.2~3.0	与其他因素联合作用时,可能出现刺激和不适	多因协同作用
3.0~25	刺激和不适:与其他因素联合作用时,可能出现头痛	不适
>25	除头痛外,可能出现其他的神经毒性作用	中毒

新建建筑或新装修建筑中，VOCs 浓度容易偏高，被认为容易引发病态建筑综合症。然而到目前为止，VOCs 引发病态建筑综合症的确切证据还显不足。

(3) 甲醛

甲醛是一种无色有强烈刺激性气味的气体，易溶于水，其 30%~40% 的水溶液称为福尔马林。甲醛容易聚合为多聚甲醛，其受热后则发生解聚作用，在室温下缓慢分解出甲醛。甲醛对人体危害较大，当空气中的甲醛浓度超过 $0.6\text{mg}/\text{m}^3$ 时，人的眼睛会感到刺激，咽喉会感到不适和疼痛，在含甲醛 $10\times 10^{-6}\text{mg}/\text{m}^3$ 的空气中停留几分钟，眼睛就会流泪不止。吸入高浓度甲醛时，由于甲醛能与蛋白质结合，可能会导致呼吸道的严重刺激、水肿和头痛。皮肤直接接触甲醛可引起过敏性皮炎、色斑甚至坏死。长期接触低浓度的甲醛可引起慢性呼吸道疾病，甚至引起鼻咽癌。但一般研究者认为，非工业性室内环境甲醛浓度水平还不至于导致人体的肿瘤和癌症。

(4) 氨

氨是一种无色而有强烈刺激气味的碱性气体，易溶于水、乙醇和乙醚， 0°C 时氨的溶解度为 1176L/L 水。室内氨浓度超标的主要原因是由于建筑施工过程中，为了加快混凝土的

凝固速度和冬季施工防冻，在混凝土中加入高碱混凝土膨胀剂和含有尿素和氨水的混凝土防冻剂，这些含有大量氨类物质的外加剂在一定的温度湿度条件下，被还原成氨气释放出来。氨对人体有较大的危害，当氨的浓度超过嗅阈： $0.5\sim1.0\text{mg}/\text{m}^3$ 时，对人的口、鼻黏膜及上呼吸道有很强的刺激作用，其症状根据氨气的浓度、吸入时间以及个人感受性等而有轻重之分。轻度中毒表现主要有鼻炎、咽炎、气管炎和支气管炎等。氨对人体作用的过程如下：由于它的碱性，它对接触的皮肤组织有腐蚀和刺激作用，可以破坏吸收皮肤组织中的水分，使组织蛋白变性，组织脂肪皂化和破坏细胞膜结构。又由于它在水中溶解度极高，容易被吸附在皮肤黏膜和眼结膜上，产生刺激和炎症。随着呼吸，氨气进入人体呼吸道，对上呼吸道有刺激和腐蚀作用，可麻痹呼吸道纤毛和损害黏膜上皮组织，使得病源微生物易于侵入，降低人体抵抗力。当浓度过高时，还可通过三叉神经末梢的反射作用而引起心脏停搏和呼吸停止。当氨进入肺部后，大部分被血液吸收，与血红蛋白结合，破坏输氧功能。短期吸入大量氨气后，可出现流泪、咽痛、声音嘶哑、咳嗽、痰带血丝、胸闷、呼吸困难、头痛、头晕、恶心和呕吐乏力等症状，严重时可发生肺水肿、成人呼吸窘迫综合症^[5]。目前氨污染在我国情况比较严重，许多新建建筑中的氨浓度严重超标，表 1-4 是研究人员测得的某建筑 14 层以上的氨浓度情况，从中可见其污染的严重程度。

表 1-4 某建筑 14 层以上的氨浓度测定结果

层面	采样点	检测值/(mg/m ³)	超标倍数	层面	采样点	检测值/(mg/m ³)	超标倍数
低层	1 号	2.54	12	中层	7 号	1.42	6.1
	2 号	4.52	22		8 号	1.60	7.0
	3 号	2.88	13	高层	9 号	6.39	31
	4 号	2.83	13		1 号对照点	0.20	0
	5 号	2.47	11	对照点	2 号对照点	0.20	0
	6 号	5.48	26		—	—	—

注：1. 本测量结果针对 14 层以上楼层，其中低层代表 14 层，按照不同方位随机布点 6 个；中层代表 15~18 层，随机布点 2 个，高层代表 19 层，布点一个；同时在楼外的草坪处随机布点 2 个；

2. 标准值为 $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 。

1.2.1.2 常见物理污染及特性

(1) 颗粒物

颗粒物是指空气污染物中的固相物质，多孔、多形，以及因此而具有的吸附性是其主要特点。颗粒的成分较多，除了一般的尘埃外，还有炭黑、石棉、二氧化硅、铁、铝、镉、砷等 130 多种有害物质，室内经常可检测出来的有 50 多种。颗粒物一般为物理污染，有时颗粒物参与化学反应，造成化学污染。颗粒物按照粒径的大小可分为以下几种类型，如表 1-5 所示。

表 1-5 按照粒径划分的颗粒物类型

名 称	粒径 $d/\mu\text{m}$	单 位	特 点
降尘	>100	$\text{t}/(\text{月}\cdot\text{km}^2)$	靠自身重量沉降
总悬浮颗粒物(简称 TSP)	$10<d<100$	mg/m^3	—
飘尘,可吸入颗粒物 PM_{10}	<10	$\text{mg}/\text{m}^3, \mu\text{g}/\text{m}^3$	长期漂浮于大气中,主要由有机物、硫酸盐、硝酸盐及地壳元素组成
细微粒, $\text{PM}_{2.5}$	<2.5	$\text{mg}/\text{m}^3, \mu\text{g}/\text{m}^3$	室内主要污染物之一,对人体危害最大

根据颗粒污染物物理性质的不同,可以分为如下几种^[6]。

① 粉尘 (dust) 指悬浮于气体介质中的细小固体粒子。通常是由于固体物质的破碎、分级、研磨等机械过程或土壤、岩石风化等自然过程形成的。粉尘粒径一般在 $1\sim 200\mu\text{m}$ 之间。大于 $10\mu\text{m}$ 的粒子,靠重力作用能在较短时间内沉降落到地面,称为降尘;小于 $10\mu\text{m}$ 的粒子,能长期的在大气中飘浮,称为飘尘。

② 烟 (fume) 指由冶金过程形成的固体粒子的气溶胶。在生产过程中总是伴有诸如氧化之类的化学反应,其熔融物质挥发后生成的气态物质冷凝时便生成各种烟尘。烟尘的粒子是很细的,粒径范围一般为 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 。

③ 飞灰 (flyash) 指由燃料燃烧后产生的烟气带走的灰分中分散得较细的粒子。灰分 (ash) 是含碳物质燃烧后残留的固体渣,在分析测定时假定它是完全燃烧的。

④ 黑烟 (smoke) 指由燃烧产生的能见气溶胶。它不包括水蒸气。在某些文献中以林格曼数、黑烟的遮光率、沾污的黑度或捕集的沉降物的质量来定量表示黑烟。黑烟的粒度范围为 $0.05\sim 1\mu\text{m}$ 。

⑤ 雾 (fog) 在工程中,雾一般泛指小液体粒子的悬浮体。它可能是由于液体蒸汽的凝结、液体的雾化以及化学反应等过程形成的,如水雾、酸雾、碱雾、油雾等,水滴的粒径范围在 $200\mu\text{m}$ 以下。

⑥ 总悬浮微粒 (TSP) 指大气中粒径小于 $100\mu\text{m}$ 的所有固体颗粒。这是为适应我国目前普遍采用的低容量 ($10\text{m}^3/\text{h}$) 滤膜采样法而规定的指标。

研究表明,室内可吸入颗粒物以细微粒为主,大于 $10\mu\text{m}$ 的粒子所占比例较小,粒径小于 $7.0\mu\text{m}$ 的粒子占 95% 以上,粒径小于 $3.3\mu\text{m}$ 的粒子占 80%~90% 以上,而粒径小于 $1.1\mu\text{m}$ 的粒子占 50%~70%,而且吸烟状态下细颗粒浓度最高,所占比例更大,主要是因为烟草烟雾中的颗粒物粒径多小于 $1\mu\text{m}$ ^[7]。颗粒物被吸入人体后由于粒径的大小不同会沉降到人体呼吸系统的不同部位,其中 $10\sim 50\mu\text{m}$ 的粒子沉降在鼻腔中, $5\sim 10\mu\text{m}$ 的粒子沉积在气管和支气管的黏膜表面,而小于 $5\mu\text{m}$ 的粒子则能通过鼻腔、气管和支气管进入肺部。当人体吸入尘埃浓度低于 50000 粒/L 时,人体可以靠自身能力将粒子排出体外,当尘埃浓度高的时候,人体还会自动调节增加巨噬细胞,增加分泌系统功能来调节防御能力,但当长期、高浓度的吸入颗粒后,细菌、病毒就会繁殖,一旦超过人体免疫能力时,就会发生感染,肺炎、肺气肿、肺癌、肺尘埃沉着病等病症就会被诱发。有毒的粒子还可能通过血液进入肝、肾、脑和骨内,甚至危害神经系统,引发人体机能变化,产生过敏性皮炎及白血病等症状。另外颗粒物还能够吸附一些有害气体和重金属元素,携带这些有害物质进入人体,对健康构成影响。颗粒物浓度一般有两种表示方式:计质浓度和计数浓度。计质浓度表示单位体积悬浮颗粒物的质量,单位为 mg/m^3 或 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;计数浓度表示单位体积悬浮颗粒物的数量,单位有粒/L,粒/ ft^3 ($1\text{ft}^3=0.0283\text{m}^3$),一般以 ft^3 内粒子数来代表洁净度级别,比如 100 级洁净度表示颗粒浓度为 100 粒/ ft^3 。

(2) 纤维材料

纤维材料也是室内污染物的一种,他们通常来自于隔音或者保温材料,譬如天花板、隔音层和管道的内套等。常见的室内污染纤维类物质通常有石棉、玻璃质纤维和纸浆。石棉纤维会引起两种疾病:石棉沉着病 (asbestosis) 和间皮瘤 (mesothelioma)。石棉沉着病是由于石棉纤维被吸入肺部而引起的肺部病变。慢性刺激引起了肺部的发炎,造成肺部组织损伤,使得肺部留下疤痕,并且纤维化使得肺部的弹性变差。肺部病变的程度取决于纤维吸入量、暴露时间、纤维形状和纤维种类的生物持续性以及每个人的抗感染能力。间皮瘤是间皮

细胞的一种癌变。早期研究表明,在3700例间皮瘤病人中,43%的病人被确认有在石棉纤维中暴露的经历。而且有证据表明玻璃质纤维能引起肺癌和其他呼吸系统疾病。1984年以来,玻璃质纤维一直被怀疑和病态建筑综合症的发生有关,而且可能会引起皮肤和体黏膜刺激。它还可能是“办公室眼睛综合症”、“群体性皮炎”以及上呼吸道刺激的病因。有几项研究表明粒径低于 $4.6\mu\text{m}$ 的玻璃质纤维不会引起皮肤的过敏反应,因此这种对皮肤的刺激仅是物理的刺激而不是免疫系统的反应。而粒径大于 $4\mu\text{m}$ 的纤维则不会长时间在空气中扩散。玻璃质纤维可能是一种致癌物质,而作为它的替代品的纸浆类纤维则被认为是“健康、绿色”的产品,它通常由可再循环报纸制成。但这类产品也能引起对黏膜和上呼吸道的刺激,同时也可能诱发霍奇金氏病。另外纸浆纤维产品容易滋生微生物,对人体的健康是一种威胁。

(3) 氡(Rn)气

氡(Rn)气是天然存在的无色、无味、非挥发的放射性惰性气体,是世界卫生组织(WHO)确认的主要环境致癌物之一,它主要来自于铀238的自然衰变,是一种比较稳定的气体。在矿井中,它通过从矿石中进入空气,或者溶入水中。在室内,最初的氡来自于土壤气体。有些建材特别是石材也会散发氡气。图1-1是室内氡气的来源示意图,其中1~11均表示氡的来源点。

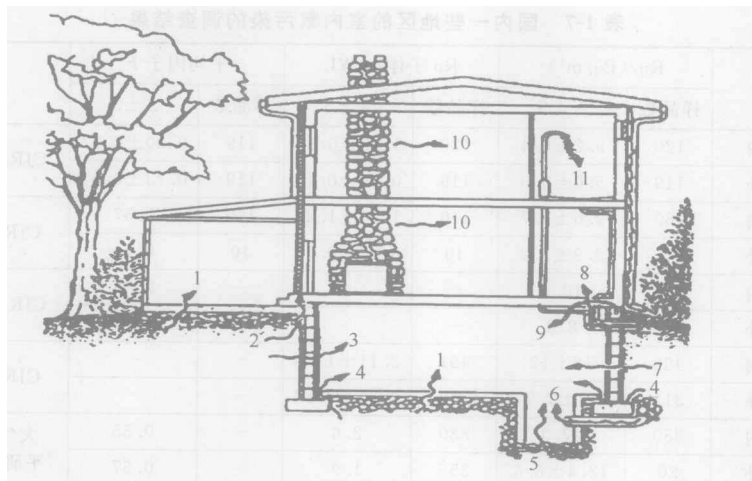
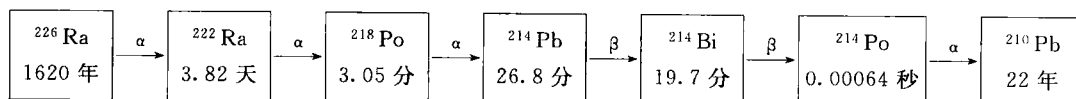


图 1-1 室内氡气的来源

- 1—水泥地板上的裂缝；2—竖墙和地板之间的间隙；3—水泥块中的孔和缝；
4—地板和墙的连接处；5—暴露的土壤；6—通过排水管进入室内；7—墙缝；
8—管子穿过墙处的墙缝；9—砌块墙顶层的开口；10—建材；11—水（来自井中）

Rn 的衰减过程如下。



室内 Rn 污染主要是指 ^{222}Rn 及其衰变产物 ^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 和 ^{214}Po 对人体的危害。室内空气,氡气浓度单位为 Bq/m^3 ,表示单位体积气体中的放射性活度, $1\text{Bq}/\text{m}^3$ 就是在 1m^3 气体中,每秒有一个放射性原子核发生衰变。表1-6为一些国家调查的室内氡气浓度水平^[8]。表1-7是国内一些地区的室内氡污染的调查结果(1992)。

表 1-6 一些国家调查的室内氡气浓度水平^[8]

国 家	调查年份	调查用户数目	平均浓度/(Bq/m ³)	标 准 差
美国	1989/1990	5694	24.8	3.11
意大利	1989~1994	4866	55.3	2.0
瑞典	—	8992	60.5	—
原西德	1984	5970	40	1.8
澳大利亚	1990	3413	8.7	2.1
加拿大	1977~1980	13413	14	3.6
丹麦	1985	496	29	2.2
芬兰	1982	8150	64	3.1
法国	1988	3006	41	2.7
爱尔兰	1987	736	37	—
日本	1990	6000	23	1.6
卢森堡公国	1991	2500	65	—
荷兰	1982~1984	1000	24	1.6
新西兰	1988	717	18	—
挪威	1991	7500	30	—
葡萄牙	1991	4200	37	—
西班牙	1991	1700	43	3.7

表 1-7 国内一些地区的室内氡污染的调查结果^[9]

地 区		Rn/(Bq/m ³)		Rn 子体/mWL		平均因子 F		数 据 来 源
		样品数	X±S	样品数	X±S	样品数	X±S	
上海	室内	120	9.2±6.4	120	1.19±0.89	119	0.50±0.22	CJRMP 1992,12(6),387
	室外	119	5.0±3.0	119	0.84±0.46	119	0.73±0.51	
西藏	室内	160	9.6±9.7	140	1.54±1.23	140	0.57	CJRMP 1992,12(1),24
	室外	62	3.9±3.2	40	0.96±0.60	40	0.64	
乐山	室内	659	10.4	—	—	—	0.46	CJRMP 1992,12(2),128
	室外	142	8.8	—	—	—	0.53	
江苏	室内	486	16±12	491	2.11±1.53	—	—	CJRMP 1992,12(1),28
	室外	311	12±7.7	313	1.35±0.82	—	—	
武汉	室内	250	17.3	880	2.6	—	0.55	大气及雾中 α 反射性水平研究,武汉卫生防疫站
	室外	20	12.4±6.6	355	1.9	—	0.57	
山东	室内	46	18.7±4.7	46	2.34±0.50	—	—	CJRMP 1992,12(2),94
	室外	148	5.07±1.30	83	0.99±0.23	—	—	
黑龙江	室内	413	20.8±20.1	40	6.19±9.28	—	—	CJRMP 1992,12(3),182
	室外	319	11.3±11.1	25	1.47±1.15	—	—	
北京	室内	537	30.3	—	—	—	—	CJRMP 1986,6(4),223
	室外	15	8.1±4.1	—	—	—	—	
南宁	室内	—	—	70	2.43±0.49	—	—	CJRMP 1982,2(4),223
	室外	—	—	10	1.49±0.20	—	—	
湖南	室内	78	42.8±27.0	78	5.59±3.31	—	0.51	CJRMP 1992,12(2),94
	室外	73	26.3±16.9	73	3.73±2.47	—	0.56	
陕西	室内	837	43.3±25.4	895	6.87±4.00	—	0.60±0.13	CJRMP 1992,12(3),175
	室外	335	26.2±14.9	337	3.34±3.24	—	0.75±0.09	

注: CJRMP 为中华放射医学与防护杂志 Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 数据摘自: 王身忠. 室内氡污染及控制. 工业安全与防尘, 1995, 7: 20.

Rn 及其衰变产物对人体的危害主要是通过内照射进行,即以食物、水和大气为媒介,摄入人体后自发衰变,放射出电离辐射,对人体构成危害。Rn 对人体的危害主要是由于其衰变产物极易吸附在空气的颗粒上,然后被吸入体内,由于氡的半衰期较长(3.82 天),因此随着人体的呼吸,吸入体内的氡大部分可被呼出,对人体的危害不大。但是氡的衰变产物却能够沉积在气管和支气管中,部分深入到人体肺部,随着这些衰变产物的快速衰变,所产生的很强的电离辐射可能会使得大支气管上的上皮细胞发生癌变,因此大部分的肺癌就发生在此区域。科学研究表明,诱发肺癌的潜伏期大多在 15 年以上,而世界上 1/5 的肺癌患者与氡有关,因此氡的危害往往不易被人察觉。另外氡及其衰变产物在衰变时还会同时放出穿透力极强的 γ 射线,长期暴露在中 γ 射线环境中的人血液循环系统会受到损害,如白细胞和血小板减少,严重的会造成白血病。

1.2.1.3 室内微生物污染及特点

微生物是肉眼看不见、必须通过显微镜才能看见的微小生物的统称。微生物普遍具有以下特点:①个体小;②繁殖快(繁殖一代只需几十分钟到几小时);③分布广、种类繁多;④较易变异,对温度适应性强。

自然界中大部分微生物是有益的,只有少数微生物有害。后者会引发生物污染。能引起人类传染病的病原微生物一般有以下几种:病毒(Virus)、细菌(Bacteria)和真菌(Fungus)。表 1-8 列出了一些典型生物污染源及其传播途径和特性。

在适宜的温度、湿度和风速等物理条件下,室内微生物会繁衍、生长,近年来由于建筑密闭性的加强更增加了这种污染的严重性,而一些突发事件,更使人们认识到室内生物污染治理的重要性和紧迫性。

2003 年严重急性呼吸综合症(Severe Acute Respiratory Syndrome, SARS)在世界上许多国家尤其在我国肆虐。截止 7 月 31 日,全球累计报告病例 8098 例,774 人死亡,仅中国累计感染就达 5327 例,349 人死亡。图 1-2 为 SARS 冠状病毒显微照片^[10]。

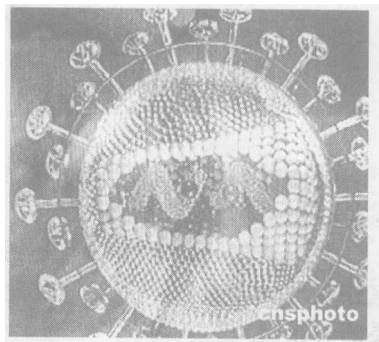


图 1-2 SARS 冠状病毒显微照片

表 1-8 一些典型生物污染源及其传播途径和特性^[11]

名称	大小/ μm	生存环境		引发病症举例	特点
		温度	pH		
病毒	0.02~0.3	适宜生长温度 25~60℃,大部分在 55~65℃ 内不到 1h 被灭活	一般对酸性环境不敏感,对高 pH 敏感	流感、水痘、甲肝、乙肝和 SARS	部分嗜超热菌在 75℃ 以上依然生长良好。传染途径通常为呼吸道传染和消化道传染
细菌	0.5~3.0	适宜生长温度 25~60℃	在 4~10 范围内可生存,一般要求中性和偏碱性	痢疾、百日咳、霍乱、过敏症、肺炎、哮喘和军团症	以空气作为传播媒介
真菌	1~60	适宜生长温度 23~37℃,最高温度为 60℃	大部分生存在 pH 在 6.5 以下的酸性环境中	湿疹性皮炎、慢性肉芽肿样炎症和溃瘍	细微的真菌类包括酵母菌和霉菌。能在免疫功能差的人群里引起过敏症,霉菌还能产生悬浮在空气中的有机体,产生我们常说的霉变的臭味