

序 一

空气污染是健康危害最大的环境问题之一，每年可造成几百万人的过早死亡。近年来，我国大气污染防治工作取得巨大成效，大气质量得到显著提升，但仍然面临巨大挑战。与室外空气相比，室内空气质量的影响更为直接，这是因为多数人 80% 以上的时间都在室内度过，而且很多排放源直接影响室内空气质量。与室外大气相比，室内空气污染的研究相对困难，进展滞后于室外空气污染的研究，是健康中国建设的瓶颈之一。

得益于高灵敏度测定仪器、在线监测手段、低成本传感器、数值模拟方法和人工智能等技术的快速发展，国内外针对室内空气污染特征与控制技术的研究工作有较快进展。为适应相关学科人才培养的需求，亟须一本针对室内空气污染特征和控制技术，既能系统阐述该领域的系统知识，又可以反映最新研究进展的教材。

由潘波、杜伟和沈国锋主编的《室内空气污染与控制》系统阐述了室内空气污染的来源、特征、监测方法及其对人体健康的影响，并介绍了一系列污染控制技术。结合国内外最新研究成果和案例，详细解析了室内空气中传统污染物与新型污染物的存在与危害。该书还针对管理需求，对比了不同国家和组织关于室内空气质量标准的异同，为污染防治提供了相关参照。该书的特色在于其前瞻性，特别是在结合最新研究成果的基础上，对新污染物、室内大气化学和机器学习的研究进行了系统介绍，为认识室内空气污染、开展相关研究和控制提供了新的视角。

该书不仅适用于从事环境科学、建筑工程、公共卫生等相关领域的学生和研究人员，也为政策制定者、工程技术人员及广大公众提供了一个了解室内空气污染的新视角，可为室内环境的改善与治理提供科学依据与实践指导。

陶 澍

中国科学院院士

2025 年 4 月

序 二

Indoor air quality is an invisible yet critical factor that shapes our health, productivity, and overall well-being. Despite spending most of our lives indoors, the air we breathe inside our homes, offices, and public spaces often goes unnoticed—until it becomes a problem. This book, *Indoor Air Pollution and Control*, seeks to illuminate the complexities of indoor air pollution, offering a comprehensive exploration of its sources, characteristics, health impacts, and mitigation strategies.

The idea for this book emerged from a growing recognition of the urgent need to address indoor air pollution—a silent public health challenge that affects millions worldwide. Whether from building materials, household activities, or chemical interactions, indoor pollutants pose significant risks, from respiratory diseases to reduced cognitive function. Yet, awareness and regulation often lag behind outdoor air quality concerns. This work aims to bridge that gap by providing a systematic, scientifically grounded examination of indoor air pollution in all its dimensions.

Scope and Structure

This book is structured to guide readers through the multifaceted nature of indoor air pollution:

Chapter 1 introduces the fundamentals, defining key terms, outlining hazards, and comparing global air quality standards; **Chapter 2** examines the primary sources of indoor emissions, from building materials to human activities like cooking and cleaning; **Chapter 3** analyzes the unique characteristics of indoor pollutants, including temporal-spatial variations and urban-rural disparities; **Chapter 4** delves into the chemistry governing indoor environments, exploring reactions influenced by light, temperature, and human presence; **Chapter 5** reviews predictive modeling approaches, from traditional statistical methods to cutting-edge machine learning applications; **Chapter 6** assesses health risks through epidemiological data and model organism

studies, linking pollution to tangible outcomes; **Chapter 7** presents actionable solutions, from source control to advanced purification technologies, while envisioning future innovations.

Intended Audience

This book is designed for researchers, environmental health professionals, policymakers, and students in public health, environmental science, or engineering. It balances technical rigor with accessibility, ensuring utility for both experts and those new to the field. Practitioners in building design, HVAC systems, and urban planning will also find actionable insights.

A Call to Action

Indoor air pollution is a solvable problem, but it demands interdisciplinary collaboration, public awareness, and evidence-based policies. By synthesizing the latest research, this book aims to empower readers to advocate for—and implement—healthier indoor environments.

We invite you to engage critically with these pages, apply their lessons, and join the effort to ensure that the air we breathe indoors is as safe as the air we strive for outdoors.

Sasho Gligorovski

National Natural Science Foundation of China (NSFC) Foreign Senior Scholar

2025 April

前言

随着城市化进程的加速和人们生活方式的不断变化，室内空气污染问题逐渐成为全球公共卫生领域的关注焦点。近年来，随着建筑密度的增加、能源消耗的变化以及室内环境中污染源的不断增多，室内空气质量的下降已成为威胁人体健康的重要因素。尽管大气污染问题受到广泛关注，但室内空气污染由于具有复杂性、多样性，并直接影响人类的日常生活和健康，其治理面临更加严峻的挑战。如何全面了解室内空气污染的成因、影响及防控技术，并采取有效措施提升室内空气质量，成为当前环境科学、公共卫生和建筑学领域亟待解决的重要问题。

本书旨在为读者提供关于室内空气污染的系统性认识，深入分析其产生机制、空间分布特点、健康风险以及应对策略。通过多学科的交叉融合，结合最新的研究成果和技术发展，希望本书能为学术界、政策制定者以及公众提供一套科学、全面的知识体系和实践方案。本书的写作意图不仅是揭示室内空气污染对人类健康的潜在威胁，同时也希望能够为改善室内环境质量、制定更加有效的政策措施提供理论依据和技术支撑。

全书共7章。第1章从全球空气污染现状入手，着重剖析室内空气污染的独特性与严峻形势，并系统阐释其定义与标准体系，为后续控制策略论述奠定理论与规范基础。第2章则专注于室内空气污染的主要来源，包括建筑材料、家具、家用电器及日常生活中的人为活动等，详细解析这些源头污染物的排放特征及强度，揭示其在室内环境中的积累效应。第3章进一步研究室内空气污染物的时空分布规律，探讨城市与乡村、不同地区间的差异，提供多维度的污染物分布数据和分析。第4章着重探讨室内化学反应的动态平衡，分析温湿度、通风条件等因素对室内空气质量的影响，为理解污染物的演变和去除过程提供理论依据。第5章介绍室内空气污染的监测与预测方法，涵盖传统的预测模型及先进的机器学习方法，为准确评估室内空气污染提供多种技术工具。第6章评估室内空气污染对人体健康的危害，结合流行病学数据，分析不同污染物暴露与呼吸系统、

心血管系统以及免疫系统健康问题的潜在关联。第7章总结源头治理、稀释通风、空气净化等室内空气污染控制技术的最新进展，展望未来空气净化与控制技术的发展方向，以期为将来的实际应用提供科学指导。

通过本书的学习，读者不仅能够全面了解室内空气污染的产生机制及其对健康的影响，还能掌握当前在污染防控方面的最新技术和未来研究的发展趋势。本书的内容将为提升全球室内空气质量、推动环境保护政策的实施以及减少空气污染带来的公共健康风险提供有力的理论支持和技术参考。

本书由多位长期从事环境科学与健康研究的学者共同撰写。其中，第1~2章由杜伟、陈龙、彭雪莲负责撰写，第3~4章由潘波、张鹏、王君雅、曾和平、胡芮静撰写，第5~6章由刘江平、田森林、岑启宏、林楠、江科完成，第7章由沈国锋、姜肃、孙健负责撰写。全书由潘波、杜伟、沈国锋统筹审定，确保内容的科学性与逻辑连贯性。在编写过程中，参考了国内外大量前沿文献与政策文件，并得到云南省基础研究计划青年项目B类（项目编号：202401AW070020）的资助和云南省土壤固碳与污染控制重点实验室的大力支持，在此一并致谢。

由于室内空气污染问题的复杂性，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。希望本书能为推动室内环境质量的改善贡献绵薄之力，助力实现健康人居与可持续发展。

编 者

2025年4月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 空气污染概述	1
1.2 室内空气污染	2
1.2.1 室内空气污染的定义	2
1.2.2 室内空气污染物的种类及来源	2
1.2.3 室内空气污染的特性	5
1.3 室内空气污染的危害	8
1.3.1 室内空气污染对人体健康的影响	8
1.3.2 室内空气污染对工作效率的影响	11
1.4 室内空气质量的定义及其标准	11
1.4.1 室内空气质量的定义	11
1.4.2 国内室内空气质量标准	12
1.4.3 国际室内空气质量标准	14
参考文献	16
第 2 章 室内典型源排放	18
2.1 建筑材料和室内设施	18
2.1.1 建筑材料	18
2.1.2 室内设施	23
2.2 人为活动	25
2.2.1 固体燃料排放	25
2.2.2 烹饪油烟排放	34
2.2.3 吸烟	36
2.2.4 清洁	37
2.2.5 焚香	38
2.3 室内生物污染源	39
2.3.1 人体代谢物	39
2.3.2 微生物滋生	40
参考文献	41
第 3 章 室内空气污染特征	46
3.1 室内空气污染物	46

3.1.1	传统室内空气污染物	47
3.1.2	新型室内空气污染物	57
3.1.3	室内空气污染的检测	63
3.2	室内空气污染特征分析	69
3.2.1	室内排放源的影响	69
3.2.2	室内空气污染的时空变化特征	71
3.2.3	室内外空气污染的相互作用	73
3.3	城乡室内空气污染	75
3.3.1	城市室内空气污染特征	75
3.3.2	乡村室内空气污染特征	76
3.3.3	城乡差异分析	77
	参考文献	78
第4章	室内化学	83
4.1	引言	83
4.1.1	室内化学的重要性	83
4.1.2	室内化学与城市大气化学的区别	85
4.2	室内化学的分配与平衡	87
4.2.1	室内地表储存库的作用	87
4.2.2	化学物质的分配机制	87
4.2.3	动态分配与反弹效应	88
4.2.4	气溶胶分配	89
4.2.5	室内化学平衡	91
4.3	室内化学类型	92
4.3.1	室内气相化学	93
4.3.2	室内表面化学	94
4.3.3	室内光化学	95
4.4	室内常见化学反应	96
4.4.1	光化学反应	97
4.4.2	氧化反应	98
4.4.3	水解反应	101
4.4.4	酸碱中和反应	102
4.4.5	酯化和酯解反应	103
4.5	环境因素对室内化学反应的影响	104
4.5.1	温度	104
4.5.2	水分	104
4.5.3	光照条件	105
4.5.4	人类居住者	106

4.5.5 建筑物	106
4.6 总结与展望	107
参考文献	108
第 5 章 室内空气污染预测模型和机器学习	112
5.1 传统统计模型	112
5.1.1 多元线性回归模型	113
5.1.2 广义线性模型	114
5.1.3 时间序列回归模型	115
5.1.4 贝叶斯模型	117
5.1.5 空间统计模型	118
5.1.6 混合效应模型	119
5.2 数值模拟模型	121
5.2.1 计算流体动力学模型	122
5.2.2 多区域气流/污染物传输模型	123
5.3 经验公式模型	124
5.3.1 质量平衡模型	124
5.3.2 稳态浓度模型	125
5.4 动态平衡模型	126
5.5 机器学习模型	127
5.5.1 随机森林回归	128
5.5.2 长短期记忆网络	130
5.5.3 支持向量机	132
5.5.4 K -最近邻算法	133
5.5.5 聚类算法	134
5.5.6 人工神经网络	135
5.6 机器学习在室内空气污染中的应用	136
5.6.1 机器学习在室内空气污染预测中的应用	137
5.6.2 机器学习在室内空气质量中的应用	140
5.6.3 机器学习与健康风险评估	142
参考文献	143
第 6 章 室内空气污染健康危害	145
6.1 室内空气污染暴露评估及健康风险评估	145
6.1.1 暴露及健康风险的基本概念	145
6.1.2 室内空气污染物暴露评估	148
6.1.3 室内空气污染物健康风险评估	154
6.2 基于流行病学统计方法的健康危害	159

6.2.1 描述性研究	160
6.2.2 推断性研究	163
6.2.3 模型拟合研究	165
6.3 基于模式生物模拟研究的健康危害	167
6.3.1 模式生物模拟简介	168
6.3.2 基于模式生物细胞模拟研究的健康危害	168
6.3.3 基于模式生物小鼠模拟研究的健康危害	172
参考文献	176
第7章 室内空气污染控制技术	179
7.1 源头治理	179
7.1.1 室内甲醛的污染源控制	180
7.1.2 室内挥发性有机化合物的污染源控制	181
7.1.3 室内颗粒物的污染源控制	182
7.2 稀释通风	183
7.2.1 自然通风	184
7.2.2 新风系统	186
7.2.3 抽油烟机	188
7.3 空气净化法	189
7.3.1 机械过滤	189
7.3.2 静电吸附过滤技术	190
7.3.3 HEPA 过滤技术	194
7.3.4 吸附净化方法	195
7.3.5 光催化净化方法	199
7.3.6 负离子净化	204
7.3.7 臭氧净化	205
7.3.8 植物与生物技术	206
7.4 未来发展与展望	208
参考文献	209

第1章 概 论

1.1 空气污染概述

在全球范围内，空气污染已经成为一个日益严重的公共健康问题，是全球排名第四的导致人类过早死亡的因素，在 2021 年大约导致了 810 万人过早死亡，揭示了其对人类健康的严重威胁。空气污染通过多种病理机制对人体产生系统性危害，其中，细颗粒物（PM_{2.5}）可穿透肺泡-血液屏障引发呼吸系统疾病（如慢性阻塞性肺疾病、肺癌）和心血管疾病（包括缺血性心脏病、中风），而地面臭氧（O₃）与二氧化氮（NO₂）则分别通过氧化应激机制导致哮喘急性发作及支气管炎症加重，长期暴露更可能诱发胎儿宫内发育迟缓、神经退行性疾病（阿尔茨海默病、帕金森病）及代谢综合征等远期健康风险。

发展中国家，尤其是中国和印度，空气污染问题尤为突出，主要由于城市化和工业化的迅速推进，伴随而来的大量煤炭消耗、机动车尾气排放和工业废气排放。尽管近年来各国政府对环境保护的重视促使空气质量有所改善，但面临的挑战依然巨大。以中国政府为例，自 2013 年出台《大气污染防治行动计划》以来，通过对重点行业进行控制，工业源排放大幅下降，重点区域空气质量明显好转。但与世界卫生组织（WHO）最新的推荐值相比，中国大部分地区 PM_{2.5} 仍然超标。2023 年 12 月 27 日，《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》中强调，到 2027 年，全国细颗粒物平均浓度下降到 28 μg/m³ 以下，各地级以上城市力争达标，这揭示了对空气污染治理需要持之以恒的努力。

空气污染的主要来源包括交通排放、工业排放和家庭燃料使用等。交通排放和工业排放主要包括机动车尾气和烟气中的二氧化硫（SO₂）、氮氧化物（NO_x）和颗粒物（PM）。此外，在中国这样的发展中国家，较为偏远的农村地区仍然大量使用固体燃料作为家庭生活能源（煤炭和生物质），这些燃料的不完全燃烧会释放大量的有害污染物，包括 PM、CO、SO₂ 和挥发性有机化合物（VOCs）等，对区域大气和室内空气污染造成严重的危害。

在过去的数十年内，中国在室外空气污染治理方面取得了显著的成效，特别是在实施“清洁空气行动”后，PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 等主要污染物的浓度显著下降，空气质量明显改善。通过加强工业排放标准、淘汰落后产能、推广清洁能源以及加强交通污染控制等一系列措施，空气中的主要污染物，如 PM_{2.5} 的浓度已下降了近 50%。然而，尽管室外污染治理取得了显著进展，室内空气污染问题依然严重且未得到足够的关注，尤其在高度工业化或交通密集的区域，因为建筑物逐渐密封，以节省供暖和制冷能源成本。许多建筑物完全依靠机械通风来再循环室内空气，大大降低了室外空气稀释水平，导致室内污染物的积累。此外，全球每天有近 30 亿人因使用固体燃料进行烹饪、取暖和照明而暴露在恶劣的室内空气环境中。这些固体燃料的燃烧会产生大量有害物质，如 PM_{2.5} 和多环芳烃

(PAHs), 对室内空气质量造成严重威胁。未来, 针对室内污染源的治理应成为政策关注的重点, 特别是要加强对家庭能源使用和交通污染的控制, 从而实现更全面的空气质量改善和公共健康保障。

1.2 室内空气污染

室内空气污染已成为全球性公共健康问题, 对人类健康构成了严重威胁。大多数人类生活和工作都发生在室内环境中, 包括住宅、办公室、交通工具等半封闭空间, 研究表明, 居民在这些空间内的时间通常超过 80%。室内空气污染源包括从外界渗透进入的污染物以及室内活动产生的污染物。由于室内污染物容易与物体表面及人体发生复杂的化学反应, 室内空气污染的多样性、暴露强度和健康影响常常比室外空气污染更为显著和严重。根据世界卫生组织的数据, 全球约有 23 亿人依赖明火或低效炉灶进行烹饪, 这些炉灶以煤油、生物质(如木柴、动物粪便和农作物废料)以及煤炭为燃料, 导致严重的家庭空气污染(household air pollution)。2020 年, 家庭空气污染, 包括室内空气污染(indoor air pollution)和室外空气污染(outdoor air pollution), 导致约 320 万人过早死亡, 其中包括超过 23.7 万名 5 岁以下儿童。在中国, 室内空气污染问题同样严重。清华大学与复旦大学的研究团队, 定量评估了中国 31 个省级行政区的主要室内空气污染物造成的疾病负担及经济损失。研究发现, 2017 年我国室内空气污染在总疾病负担中占比 14.1%, 相应经济损失为 2.88 万亿元, 占当年 GDP 的 3.51%, 在所有健康风险因素中排名第三(Liu et al., 2023)。

1.2.1 室内空气污染的定义

室内空气污染是指由各种原因导致的室内空气中有有害物质超标, 进而影响人体健康的室内环境污染行为。有害物质包括甲醛、苯、氨、放射性氡等。随着室内空气污染程度的加剧, 人体会产生亚健康反应甚至生命安全受到威胁, 所以目前, 室内空气污染是日益受到重视的人体危害因素之一。需要注意的是, 这里的“室内”并不主要指居室, 包括了上述提及的所有全封闭或者半封闭的空间(吕阳, 2014)。

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。物理性污染是由电磁辐射、噪声、振动等物理因素引起的污染; 化学性污染是指由一氧化碳、氨气、甲醛和挥发性有机化合物等化学物质引起的污染; 生物性污染是指由细菌、真菌、病毒等生物污染因子引起的污染; 放射性污染主要是指由氡及其子体造成的污染。

1.2.2 室内空气污染物的种类及来源

室内空气污染物是指由建筑材料或人类活动等产生和排放到空气中对人和环境产生不良影响的物质。室内空气污染物种类繁多, 分类方法也各异。按照污染物的化学属性分为无机污染物和有机污染物; 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(PM_{2.5}、二手烟、纤维粉尘、石棉等)、化学性污染物(甲醛、苯系物、VOCs、一氧化碳等)、生物性污染物(霉菌、细菌、病毒、尘螨、花粉等)和放射性污染物(氡气)。本书将具体阐述室内典型的污染物及其来源(图 1-1)。

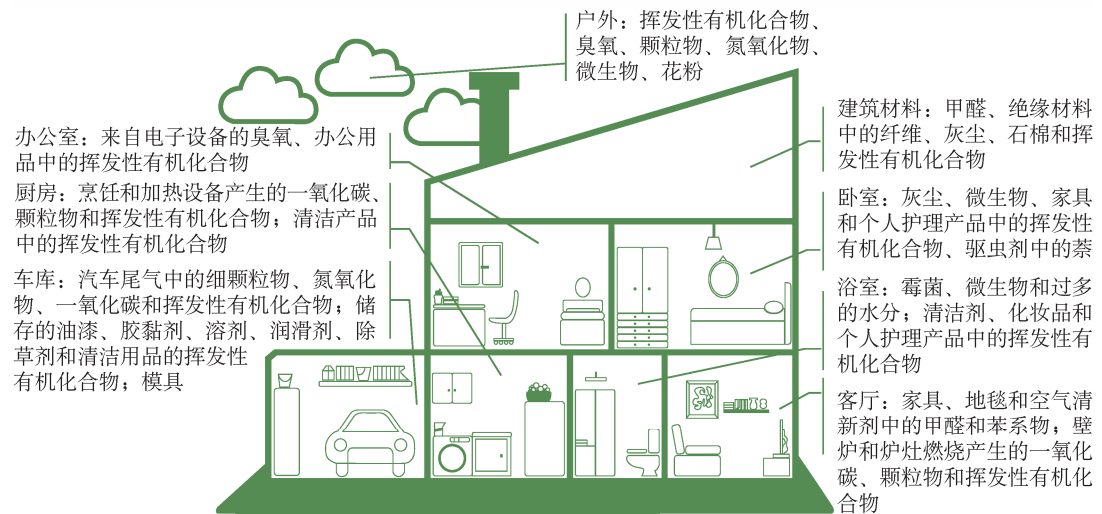


图 1-1 室内空气污染物种类及其来源 (González-Martín et al., 2021)

1. 物理性污染物

物理性污染物主要包括悬浮颗粒物、温度、湿度和噪声等。这些污染物的存在不仅影响人们的舒适度,还可能对健康产生长期的不良影响,尤其是对呼吸系统、心血管系统及免疫系统等。悬浮颗粒物的来源较为广泛,主要包括室内烹饪过程中产生的油烟、燃烧过程中的废气(如室内吸烟),以及建筑材料、家具和装饰品的挥发物。此外,外部空气中的颗粒物通过门窗、通风系统等途径进入室内,也是室内悬浮颗粒物的一个重要来源。室内温度的控制对于维持舒适的居住环境至关重要。温度过高或过低都会导致人体的不适,长期处于极端温度下还可能引发一些健康问题。例如,冬季温度过低会增加呼吸道疾病的发生风险,而夏季温度过高则可能导致中暑或心血管疾病。室内温度的异常变化通常来源于空调系统、取暖设备的不当使用,或者建筑物的热量积聚,尤其是在高温天气下,太阳辐射通过窗户进入室内,会大大提高室内温度,影响舒适性。湿度对室内空气质量的影响同样不容忽视。湿度过高会导致霉菌、细菌和尘螨等微生物的滋生,从而增加过敏和呼吸道疾病的发生率;而湿度过低则会导致空气干燥,引发皮肤干燥、咳嗽、喉咙不适等症状。湿度的变化主要来源于日常生活中的烹饪、沐浴、洗衣等活动,尤其在没有良好通风的情况下,水蒸气无法及时排出,导致湿度过高。外部天气条件也可能影响室内湿度,尤其在潮湿的季节,外部空气中的水分通过门窗进入室内,导致湿度过高。噪声污染是另一种常见的室内物理性污染物,长期暴露于噪声环境中不仅会使人的心理健康受到影响,还会增加心血管疾病的发生风险。室内噪声

的来源主要包括外部交通噪声、建筑施工的声音以及家电设备的运作声音。例如，城市中交通的喧嚣、邻里间的生活噪声以及空调、电风扇等家用电器的运作声，都会对居住者的休息和工作产生干扰。

2. 化学性污染物

室内空气中的化学性污染物主要是气态污染物，气态污染物又可分为无机类和有机类。其中，无机气态污染物包括二氧化硫（ SO_2 ）、二氧化氮（ NO_2 ）、一氧化碳（ CO ）、二氧化碳（ CO_2 ）和臭氧（ O_3 ），而有机气态污染物则包括甲醛、苯系物（如苯、甲苯、二甲苯）和苯并[a]芘。

无机气态污染物主要来源于室内的燃烧过程，如烹饪、取暖及室内吸烟等。 SO_2 和 NO_2 是燃料燃烧的主要产物，其中 SO_2 与空气中的氧化剂反应，形成刺激性气溶胶； NO_2 则在高温条件下生成，常见于厨房和靠近排气设施的区域。 CO 的来源多为不完全燃烧的化石燃料，尤其是使用煤气或石油的设备，而 CO_2 则主要来自人体呼吸、烹饪和取暖等活动。 O_3 则常由空气净化器、紫外灯和打印设备等产生，它是一种强氧化剂，过高浓度会刺激黏膜组织，引发呼吸道疾病。有机气态污染物中的甲醛是最常见的室内污染物之一，广泛存在于室内装饰材料、家具和化纤织物中。甲醛具有强烈的刺激性，并且被世界卫生组织列为一类致癌物。苯系物作为有机溶剂，广泛应用于涂料、腻子、胶黏剂等室内装修材料中，长期暴露于低浓度的苯系物会对中枢神经系统产生压制作用，甚至可能导致癌症。苯并[a]芘是一种致癌物，主要通过燃烧过程中的烟雾、汽车废气等进入室内，具有较强的毒性。

这些化学性污染物对人体健康构成严重威胁，尤其是呼吸系统、免疫系统和神经系统。 SO_2 和 NO_2 会导致慢性呼吸道疾病， CO 通过与血红蛋白结合阻碍氧气运输，甲醛和苯系物则增加癌症的发生风险。室内空气中的化学性污染物不仅影响健康，还可能导致工作效率下降、生产质量降低，因此有效控制和减少这些污染物的浓度，已成为改善室内空气质量、保障健康的重要任务。

3. 生物性污染物

生物性污染物是指那些来源于生物体的污染物，主要包括花粉、尘螨、细菌、真菌、病毒、原虫等微生物及其代谢产物。这些生物性污染物广泛存在于室内环境，并且通常以气溶胶的形式出现在室内空气中。生物气溶胶的粒径范围通常在 $0.001\sim 100\mu\text{m}$ ，因其尺寸较小，容易被人类吸入，从而对健康造成影响。尘螨及其代谢产物是常见的室内生物性污染物之一，特别是在家庭中容易引发过敏反应。尘螨的主要过敏原为Der p1，这是一种蛋白质，通常存在于尘螨的消化道中，并随着其排泄物排出体外。Der p1在尘螨排泄物中占总蛋白的15%~20%。研究发现，1 g室内灰尘中含有 $2\mu\text{g}$ Der p1时，可能引起过敏反应；如果含量达到 $10\mu\text{g}$ 以上，则有可能诱发过敏性哮喘等疾病。此外，其他微生物，如细菌、真菌和病毒也可通过空气传播，进一步加剧室内空气污染。真菌和霉菌的代谢产物特别在潮湿环境中容易滋生，这些微生物的孢子可随空气流动，进入人体的呼吸系统，导致呼吸道感染、过敏和哮喘等健康问题。

室内生物性污染物来源非常广泛，主要包括家庭中的尘土、宠物毛发、植物、食物残渣以及湿润的环境。尘螨主要栖息在床上用品、地毯、沙发和其他软装饰材料中，因为这些地方是它们理想的栖息地。霉菌和真菌则常常生长在潮湿的环境中，尤其是在卫生间、厨房、地下室等湿度较高的区域。花粉常见于室内的植物，尤其是在春季和秋季，某些花卉植物释放的花粉会随着空气流动进入室内并造成人体过敏。此外，宠物和家禽等动物也是室内生物性污染物的重要来源，它们的皮屑和毛发常常会被空气携带，影响空气质量并可能引发人体过敏反应。空气中的细菌和病毒也主要来自空气传播或通过人的呼吸、打喷嚏、咳嗽等方式传播。总之，室内的生物性污染物不仅来源多样，而且与室内的环境条件密切相关，如温度、湿度以及清洁度等都对其生长和传播有显著影响。

4. 放射性污染物

放射性污染物主要指空气中存在的放射性物质，如氡 (^{222}Rn) 及其衰变产物。氡是自然界中存在的一种惰性气体，具有放射性，并且是室内空气中的主要放射性污染物。氡的同位素均具有放射性，其中， ^{222}Rn 的半衰期为 3.8 天。尽管氡本身是惰性气体，不会对人体造成直接伤害，但其衰变过程会释放出 α 射线以及其他放射性子体，可能对人体细胞造成辐射损伤。室内空气中的 ^{222}Rn 主要来源于以下几个方面：首先，建筑材料和装修材料，如水泥、混凝土、砂石、砖块、陶瓷和石膏板等，都可能含有氡的前体元素。这些材料在与空气接触时会释放氡气，尤其是在建筑物的基础和地面区域。其次，地基以下及附近的土壤、岩石和地下水是氡的主要自然来源，特别是在含有铀矿物的土壤和岩石中，氡会通过地基渗透进入室内。最后，氡也可以来自外部空气，尤其是一些高氡地区，室外空气中的氡含量较高，可能通过门窗等方式进入室内。

1.2.3 室内空气污染的特性

室内空气污染与室外空气污染由于所处的环境不同，其特征也有所不同。室内空气受到人为因素影响较大，在不同的室内环境中表现出巨大的污染特征差异。室内空气污染有累积性、长期性、多样性、范围性和时空变化性等特征。

1. 累积性

室内空气污染的累积性是指污染物在室内环境中逐渐积聚并且浓度上升的特性。这一特性与室内空间的相对封闭性密切相关，污染物一旦进入室内，若缺乏有效的通风和净化措施，它们便会在室内空气中滞留并逐步累积，直到被排出室外为止。一般而言，空气污染物在室内的累积浓度取决于五个因素 (Lewis et al., 2023)：①排放源和包括过滤、沉积或化学反应等污染物去除措施在内的去除源；②室外空气污染物的浓度，这些污染物可能通过通风口和窗户进入室内环境；③分散污染物的气流和湍流的大小；④室内外空气交换的程度；⑤室内空间的大小。

室内环境通常存在多个污染源，如建筑装饰材料（如油漆、墙纸）、家具、地毯、家用

电器（如复印机、打印机）、烹饪、吸烟等，这些污染源不断释放挥发性有机化合物、颗粒物、气体污染物等。如果不采取有效的空气流通和净化措施，这些污染物就会在室内空气中不断积累，导致空气质量恶化。在通风条件有限的情况下，污染物的浓度将无法有效稀释或清除，从而在短时间内产生较高的污染水平。特别是在封闭空间内，缺乏外界空气流通的情况下，污染物的排放速度往往无法赶上其累积速度，导致污染物浓度持续升高。例如，厨房的烹饪过程或冬季取暖设备的使用，都会产生大量污染物。这些污染物在空气流通不足的环境中容易积聚，且难以迅速消散。此外，室内空气污染的累积性也受到温湿度、装修材料及家具的释放特性等因素的影响。一些有害物质，如甲醛、苯系物等会在装修材料和家具中持续释放，尤其是在新装修或购买新家具的初期，其释放量较高。如果室内空间通风不良，这些有害物质就会在空气中积累，长期暴露于其中会对健康产生负面影响。

2. 长期性

室内空气污染的长期性主要表现在污染物的持续释放和累积效应上。由于人类大部分时间都在室内环境中度过，即使暴露于低浓度的污染物，长时间的接触仍可能对健康产生显著影响。例如，甲醛等挥发性有机化合物的释放可以持续数年甚至十几年，长期暴露可能导致呼吸道疾病、过敏反应，甚至增加癌症的患病风险。氡等放射性污染物的潜伏期更长，可能达到几十年，长期暴露后，氡的衰变子体释放的辐射才会对人体健康构成威胁，尤其是肺癌的发生风险增加。此外，室内空气污染的长期性还表现在污染物的累积效应上。室内环境通常较为封闭，污染物难以有效排出，导致其浓度随着时间的推移逐渐增加。特别是在通风不良或缺乏空气净化措施的环境中，污染物，如建筑装修材料、家具、家电等释放的有害物质会持续积累，污染物浓度可能不断超标，进一步加剧健康风险。例如，甲醛、苯系物和其他有毒气体会持续释放，随着时间推移，它们的浓度可能远超安全标准，危害人体健康。

3. 多样性

室内空气污染具有显著的多样性，表现在污染物来源广泛、污染物种类繁多以及对健康的危害等多方面。室内空气污染的主要来源包括燃料燃烧排放、室内装修材料、日常化学用品、吸烟、烹饪活动以及室外污染源的渗透。室内空气中可存在多种污染物，包括物理性污染物（如混凝土、板材、石材释放的放射性氡及其子体）、化学性污染物（如燃料燃烧排放的无机和有机污染物、装修涂料释放的甲醛、吸烟产生的尼古丁及重金属等）以及生物性污染物（如细菌、霉菌、螨虫等）。长期暴露于这些污染物的人员，容易患上呼吸道和心血管疾病，神经系统、内分泌系统和免疫系统功能紊乱，皮肤易受到刺激引发皮肤病，甚至可能导致癌症和畸形等严重健康问题。室内空气污染物的来源既有室外污染源，也有室内的来源。例如，作为光化学产物的臭氧在车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、挥发性有机化合物

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(吕阳,2014)。

4. 范围性

室内空气污染具有显著的范围性特征,其影响不仅限于私人住宅,还广泛存在于学校、办公室、交通枢纽、餐厅、医院、商场、超市等公共场所。这些场所因人员密集、活动频繁以及通风条件差异,通常成为空气污染的高发区域。例如,学校教室由于装修材料释放的甲醛和学生密集活动产生的二氧化碳而污染空气;医院则可能因消毒剂挥发、病原体传播及医疗设备的电磁辐射等因素形成复杂的空气污染环境。此外,室内空气与外界空气通过窗户、通风口和门等途径进行持续交换,使得室内外污染物能够相互传递。室外污染物,如颗粒物、臭氧、二氧化氮等可进入室内,而室内的污染物也可能扩散至室外,进一步扩大了室内空气污染的影响范围。由于人们在这些场所的停留时间较长,室内空气污染的范围性特征使得人们难以完全避免健康风险。例如,上班族在办公室长时间暴露于 VOCs 和颗粒物的空气中;学生在学校教室和图书馆中接触可能含有甲醛和微生物的空气;在商场和餐厅等公共场所,人们则可能暴露于烟草烟雾、异味和微生物污染中。因此,室内空气污染的范围性不仅体现在其影响场所的广泛性,还体现在室内外空气的交互作用以及人们在这些场所的长时间暴露。

5. 时空变化性

室内空气污染的时空变化性是其复杂且重要的特征之一,受到多种因素的综合影响,包括季节、天气条件、室内外空气交换、室内活动模式以及污染物的物理化学性质等。

在时间变化性方面,季节变化和日常活动模式是主要影响因素。例如,冬季因为采暖需求,窗户通常关闭以保持室内温度,减少通风,导致甲醛、苯、PM_{2.5}等污染物浓度显著上升。而在夏季,频繁开窗通风有助于降低污染物浓度。挥发性有机化合物和半挥发性有机化合物的浓度也因季节变化而波动。此外,日常活动模式也会引起污染物的浓度波动,如家庭烹饪时段厨房油烟的排放会导致空气污染物浓度上升,室内吸烟和使用清洁剂等活动也会在短时间内显著增加污染物浓度。在空间变化性方面,室内空气污染物的浓度受到区域差异、室内外空气交换和建筑布局的影响。不同地区的室内空气污染水平存在显著差异,例如,东部和东北地区的城市群 PM_{2.5} 浓度普遍高于西部地区。在寒冷地区,冬季采暖期间的污染物浓度通常高于夏季。此外,室内外空气污染物浓度之间存在密切联系,尽管室内污染物浓度通常滞后于室外浓度,并且峰值浓度较低,但建筑结构、通风系统和室内活动仍会显著影响室内污染物的分布。同一建筑内部,不同功能区域的污染物浓度差异明显,厨房和餐厅的污染物浓度通常高于卧室和客厅,尤其是在烹饪时段。驱动因素方面,自然因素,如温度、湿度和风速等气象条件对污染物的时空分布有显著影响,温度变化会显著影响半挥发性有机化合物的浓度。人为因素,包括烹饪、吸烟、使用化学品等室内活动和交通尾气、工业排放等外部污染源的渗透,是室内空气污染时空变化的重要驱动因素。此外,建筑密度、城市化水平和能源消耗等社会经济因素也影响室内空气污染的时空分布。

1.3 室内空气污染的危害

近年来,随着城市化进程加快和建筑密闭性增强,室内空气污染逐渐成为威胁公众健康的隐形杀手。WHO 数据显示,全球每年约有 380 万人因室内空气污染导致的疾病过早死亡,其危害程度已超过多数人熟知的室外雾霾。室内环境中,甲醛、苯系物、VOCs、细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)、霉菌及放射性氡等污染物,通过建筑装饰材料、家具、清洁剂甚至日常活动长期潜伏,对人体造成多维度伤害:短期暴露可引发头痛、过敏、呼吸道刺激等症状;长期接触则与哮喘、慢性阻塞性肺疾病(COPD)、白血病、肺癌等严重疾病密切相关。儿童、孕妇、老年人及免疫缺陷群体尤为脆弱,其健康风险随暴露时间呈指数级增长。然而,公众对室内污染的认知仍存在显著盲区,这一问题尚未得到足够的关注和有效的控制措施(Lewis et al., 2023)。相比室外空气,室内空气污染源更加复杂且隐蔽,长时间的暴露可能对人体健康带来更大的威胁,因此,迫切需要加强对室内空气污染的控制与防护。

1.3.1 室内空气污染对人体健康的影响

室内空气污染与多种健康问题密切相关,尤其是呼吸系统疾病、心血管疾病,以及与建筑相关的疾病等。病态建筑综合征(SBS)和建筑相关疾病(BRI)是由室内环境中的空气污染物(如甲醛、挥发性有机化合物等)引发的综合症状群,表现为头痛、疲劳、呼吸道不适等,这些症状常在特定的建筑环境中发生。长期暴露于室内空气污染中,尤其是 $\text{PM}_{2.5}$ 和有害气体,会显著增加急性呼吸道感染的风险,尤其是儿童和老年人群体。污染物通过呼吸道进入体内,增加了上呼吸道感染和下呼吸道感染的发生率。肺部疾病,如慢性阻塞性肺疾病和哮喘,也与室内空气污染密切相关,尤其是在长期暴露于污染环境的情况下,易引发或加重这些疾病的发生。此外,室内空气污染还与心血管疾病(CVD)的发生密切相关。室内空气污染通过多途径影响人体健康,不仅对呼吸系统产生直接危害,还通过增加心血管疾病、肺部疾病等慢性病的风险,严重威胁公共健康。

1. 建筑疾病

1) 病态建筑综合征

室内空气污染是引发病态建筑综合征(SBS)的重要环境诱因。SBS 特指与建筑物物理环境密切相关的非特异性症状群,其临床表现具有空间依赖性(特定区域或全建筑分布)和时间动态性(症状随暴露时间延长而加剧,脱离环境后缓解)。根据 WHO 的定义,由室内空气污染引起的 SBS 症状可分为四类:①黏膜刺激症状,如眼睛、喉咙和鼻子的不适;②神经毒性症状,如头痛、易怒和疲劳;③哮喘及类似哮喘的症状,如胸闷和喘息;④皮肤刺激、干燥、胃肠道问题(如腹泻)及其他相关症状。国际劳工组织(ILO)指出,婴儿、老年人、慢性病患者以及大多数城市居民在遭遇室内空气污染时,面临较高的健康风险,并容易表现出 SBS 的症状。

2) 建筑相关疾病

建筑相关疾病 (BRI) 是指由接触建筑物内不良空气质量直接引发的疾病和症状, 这些疾病与室内空气污染密切相关。室内空气中的致病因子包括化学物质, 如甲醛、二甲苯、杀虫剂和苯等有毒气体, 以及生物因子。特别是在现代建筑中, 生物性污染物是引发 BRI 的主要原因之一, 常见的室内污染源包括冷却塔、加湿系统、过滤器、排水盘、潮湿表面以及水损坏的建筑材料等。室内空气污染物通过这些设备和环境源的释放, 对建筑内的空气质量产生影响, 从而引发一系列健康问题。BRI 的症状通常与流感相似, 常见表现包括发烧、寒战、胸闷、肌肉疼痛和咳嗽。在更严重的情况下, 室内空气污染物还可能导致肺部和其他呼吸系统问题。典型的 BRI 相关疾病包括军团病、过敏性肺炎和湿化热, 这些疾病均与空气中存在的有害物质或微生物污染密切相关。室内空气污染物通过四种主要机制引发 BRI 症状: 免疫性、感染性、毒性和刺激性。刺激性效应通常是 BRI 的初步表现, 表现为眼、喉和呼吸道的刺激症状。随着污染物的长期暴露, 这些刺激效应可能发展为毒性或过敏反应, 导致更严重的健康问题。例如, 甲醛、二甲苯等挥发性有机化合物可对免疫系统产生影响, 增强过敏反应的发生。而细菌、霉菌等生物污染物则可能通过感染机制引发呼吸道感染。心理机制虽常常未被充分考虑, 但研究表明, 长期暴露在污染的室内环境中, 心理压力和焦虑也可能加剧 BRI 的发生。

2. 急性呼吸道感染

呼吸系统通常是室内空气污染效应的主要目标, 因为污染物通常通过吸入进入人体。根据受影响的呼吸道部位, 急性呼吸道感染 (ARI) 可分为急性下呼吸道感染 (ALRI) 和急性上呼吸道感染 (URI)。URI 通常影响鼻腔、喉咙和耳朵, 常见症状包括咳嗽、鼻窦炎和中耳炎, 这些感染通常性质较轻, 一般由生物污染物 (如病毒、细菌、真菌、霉菌孢子和尘螨) 引发。相比之下, ALRI 是由病毒或细菌引起的急性肺部感染, 导致肺部炎症。室内空气污染物已被证实显著增加儿童发生 ALRI 的风险, 研究发现, 室内空气污染物使儿童患 ALRI 的风险增加了 78%, 并且每年导致约 100 万 5 岁以下儿童死亡 (Jary et al., 2016)。这一现象可能与儿童的肺表面积相对较大, 使其更容易吸入污染物, 从而导致感染有关。特别是, 生活在使用固体燃料 (如木柴、煤炭等) 的家庭中, 儿童患 ALRI 的风险比使用清洁燃料的家庭儿童高出 2~3 倍 (Kim et al., 2011)。固体燃料的燃烧会释放大量有害气体和颗粒物, 进一步污染室内空气, 增加儿童呼吸道感染的风险。室内空气污染物不仅对呼吸道的特异性和非特异性免疫防御产生不利影响, 还增加了呼吸道感染的严重程度, 甚至显著提高长期接触烹饪油烟的人群患慢性支气管炎的概率。总之, 室内空气污染通过多种机制加剧了呼吸道感染的发生及其严重性, 特别是对儿童和常年暴露于污染环境中的群体, 带来了显著的健康风险。因此, 改善室内空气质量, 减少污染物的排放, 特别是在家庭和厨房环境中至关重要。

3. 肺部疾病

室内空气污染对呼吸系统方面的影响尤为严重。吸入的空气污染物与过敏性疾病和肺部疾病, 如哮喘、特应性皮炎和过敏性鼻炎密切相关。此外, 吸烟活动被认为是慢性阻塞性

肺疾病（COPD）、哮喘和肺癌发展的最重要因素之一。室内空气污染物暴露可显著影响肺功能的最大获得，随后导致肺功能下降，包括 PM_{2.5} 和 CO 在内的有害颗粒物可能会影响子宫内开始的肺发育。COPD 的特征在于气道和肺部对有毒颗粒物或室内空气污染物的慢性炎症反应增强。研究表明，女性，尤其是发展中国家的女性，由于暴露于烹饪产生的家庭烟雾，患 COPD 的风险显著增大。来自化石燃料燃烧的 PM 引发肺部炎症，并大幅降低肺功能。有研究表明，家庭中的燃料烟雾可导致 COPD，其临床体征和死亡率与吸烟者相似。燃料燃烧产生的具有高氧化能力的化合物诱导氧化应激和 DNA 损伤，这被认为是 COPD 发病机制的主要途径。此外，生物因素，如过敏原、病毒和细菌物质，可能会诱导严重的炎症反应，导致免疫功能障碍和慢性炎症，从而加剧 COPD 的发生。暴露于室内空气污染物也会导致哮喘症状，或使哮喘症状加重。研究表明，急性暴露于燃烧烟雾中可引发支气管刺激、炎症，并增强支气管反应性，这被认为是导致哮喘加重的主要机制，尤其是在儿童中。研究显示，5~14 岁的儿童生活在燃烧煤炭、木柴和煤油的房屋中，哮喘急性发作的相对风险为 1.6（Jiang et al., 2016）。肺癌通常与吸烟密切相关，但最近的研究表明，肺癌与女性因长期烹饪而暴露于室内空气污染物有很大的相关性，因此，在非吸烟的情况下，肺癌在女性中比男性更为常见。此外，研究还表明，不同地区的非吸烟女性肺癌患者的百分比存在较大差异。例如，东亚和南亚超过 80% 的女性肺癌病例与吸烟无关，而美国只有 15%（Sun et al., 2007）。用于烹饪或加热的固体燃料燃烧产生的排放与肺癌的高风险密切相关。研究表明，使用固体燃料（如煤炭和木柴）取暖和烹饪的人群患肺癌的风险是使用清洁能源家庭的 4 倍（Mu et al., 2013）。不完全燃烧会大量排放多种颗粒物和气体致癌物，包括 SO₂、CO、NO₂、PAHs、甲醛、重金属和 PM_{2.5}，这些污染物与呼吸系统疾病的发病率和死亡率，尤其是肺癌，密切相关。

4. 心血管疾病

室内空气污染与心血管疾病（CVD）密切相关。在家庭中使用固体燃料（如煤炭、木柴和生物质燃料）会排放与 CVD 密切相关的多种污染物，包括 PM、PAHs、CO、重金属和其他有机污染物。这些污染物会显著影响室内空气质量，增加心血管疾病的发生率，尤其是 PM_{2.5}。暴露于 PM_{2.5} 会增加特定急性心血管疾病的风险，如缺血性脑卒中、心肌梗死、心律失常、心力衰竭和心房颤动等。研究表明，PM_{2.5} 可通过诱导氧化应激、引发全身性炎症、增加血液凝固性和导致自主神经及血管失衡等机制，促进心血管疾病的发生。此外，PM_{2.5} 被认为是增加纤维蛋白原、血小板活化、血浆黏度以及内皮素（血管收缩分子）释放的重要因素，这些生理变化进一步增加了患心血管疾病的风险。室内空气中的 CO 也对心血管功能产生不良影响。CO 通过与血红蛋白结合形成碳氧血红蛋白，降低血液的氧气运输能力，从而导致组织氧合不足，影响心脏及其他重要器官的功能。尤其在家庭中使用固体燃料的环境下，CO 浓度较高，长期暴露会加重心脏负担，增加心血管疾病的发生率。此外，使用固体燃料烹饪和取暖产生的 PAHs 和重金属（Pb）等有害物质，会通过增强氧化损伤、刺激肾素-血管紧张素系统、下调一氧化氮的水平，从而加剧血管的收缩，并可能导致血管张力和外周血管阻力的增加。这些变化显著提高了高血压、动脉硬化和其他心血管疾病的发生风险。

因此，室内空气污染，不仅直接影响室内空气质量，还通过多种机制增加心血管疾病的