

Air Purification Technology and Application

空气净化技术与应用

杜峰 主编



科学出版社

空气净化技术与应用

杜 峰 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

近年来,随着经济的高速发展,环境污染问题凸显,其中空气污染问题日益严峻。本书针对粉尘、微生物及空气主要气态污染物如甲醛、挥发性有机物、臭氧、氨气、氮氧化物、二氧化硫、一氧化碳等的治理分章予以阐述,重点围绕民用场合如室内居所、隧道、停车场、汽车、美容屋、打印社、医院等封闭、半封闭空间场所的污染特点,结合近十年来相应的空气污染管控标准,以及学界、产业界最新研发动向,对涉及的新材料、新技术等做了较为细致的比较分析,并提出了合理化建议。

本书旨在让读者系统了解空气净化相关知识,知晓不同场合的空气污染特点及相应治理技术。本书不仅适合民众的科普阅读,而且适合从事空气污染控制、评价、监测、治理等空气净化行业的从业者及环保、建筑、材料、安全等专业的院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

空气净化技术与应用/杜峰主编. —北京:科学出版社,2016.3

ISBN 978-7-03-047837-5

I. ①空… II. ①杜… III. ①空气净化 IV. ①X51

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第056098号

责任编辑:惠 雪 程心珂/责任校对:胡小洁

责任印制:张 倩/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:22 1/4

字数:449 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

社会的进步离不开经济的发展,工业文明高速发展的同时,环境污染尤其空气污染也日趋严重。空气污染已成为全球性问题,如温室效应加剧、酸雨增多和臭氧层空洞等已成为热点话题。近年来,中国空气污染状况也十分严重,机动车尾气污染物排放总量迅速增加,氮氧化物、硫氧化物、臭氧等污染呈逐步加重趋势,全国形成华中、西南、华东、华南多个酸雨区;大气环境中总悬浮颗粒物、PM₁₀、PM_{2.5}等颗粒物浓度普遍超标,多地普现灰霾天气;室内空气环境污染更是触目惊心,由于装修材料质量参差不齐,甲醛、NH₃、VOCs、苯系物、氡气等污染也常见不鲜,给人们的健康带来极大的危害。

层出不穷的空气污染问题,带动了空气污染治理相关学科快速发展。近年来,各种新的空气污染净化技术大量涌现,学术界和产业界对空气净化相关技术的创新日益重视,针对各种空气污染均有较好的应对技术,在粉尘颗粒物污染治理、空气消毒杀菌、VOCs治理、异味消除等方面均有相应的成套解决方案,形成了物理、化学、生物等多层面的治理,各种新型材料及技术也不断引入空气污染治理领域。

本书的作者杜峰教授及其项目组多年来一直在环境保护领域从事空气污染技术相关学科的教学、科研和产业化推广工作,并取得了丰硕的成果,该书的出版是他们辛勤工作的结晶。该书从典型空气污染组分的角度着手,分别针对粉尘颗粒物、微生物、甲醛(CH₂O)、挥发性有机物(VOCs)、臭氧(O₃)、氨气(NH₃)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)等污染组分的来源、危害、检测及治理技术做了较为全面的阐述,是空气污染治理领域不可多得的一部好书。相信该书的出版发行将推动空气污染治理技术的进一步发展,为相关行业专业人士的工作提供重要参考与指导。

任官平

中国环境科学学会副理事长兼秘书长

2015年11月

前 言

近年来,随着工业和经济的高速发展,环境污染问题日益凸显,其中空气污染问题日趋严峻。大气污染由传统煤烟型向复合型污染转变,空气污染物组成则更为复杂,酸雨、雾霾等事件频发;而人们日常接触的办公室、居室、汽车、地铁、高铁、隧道、停车场、商场、医院等各类场所空气污染也日趋严重,室内污染被视为继“煤烟型”“光化学烟雾型”污染后的第三大类污染,室内污染损害健康及致害事件常见报道。

本书针对空气典型污染物,如粉尘($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等)、微生物及气态污染物如甲醛、挥发性有机物(VOCs)、臭氧(O_3)、氨气(NH_3)、二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)等的检测治理办法分章节予以详述,重点围绕民用及公众场合如办公室、居所、隧道、地下停车场等封闭、半封闭空间场所的空气污染特点,结合近十年来相应的空气污染管控标准及学界、产业界最新研发动向,对涉及的新材料、新技术等做了较为细致的比较分析,并提出了编者较为合理的建议。

本书旨在让读者系统了解空气净化相关知识,知晓各类民用及公众场合的空气污染特点,并能适当选择相应的治理技术。本书不仅适合作为科普阅读,而且适用于从事空气污染控制、评价、监测、治理等空气净化行业的从业者及环保、建筑、材料、安全等专业的院校师生参阅。

全书由绪论(第1章)、粉尘治理(第2章)、微生物治理(第3章)、主要气态污染物治理(第4章)、结论与展望(第5章)五章构成,其中主要气态污染物治理一章分为甲醛篇(4.1)、挥发性有机物篇(4.2)、臭氧篇(4.3)、氨气篇(4.4)、氮氧化物篇(4.5)、二氧化硫篇(4.6)及一氧化碳篇(4.7)等七个小节分别予以介绍。全书由杜峰负责书稿架构、统稿编辑,第1章、第2章、第4章4.1节、第5章由杜峰编写;第3章、第4章4.2、4.3节由章文贵编写;第4章4.4、4.7节由邹巍巍编写;第4章4.5、4.6节由高卫民编写。李鹏、刘晓婷、兰茜、邵萍等参与书稿文献的搜集、书稿润色等,在此一并表示感谢。

受编写人员学术水平、编写时间及经验所限,书中缺点和错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

杜 峰

2015年11月于南京工业大学行正楼

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 空气污染简介	1
1.1.1 大气污染	1
1.1.2 室内空气污染	3
1.2 主要空气污染物危害与管控	5
1.2.1 固态污染物	6
1.2.2 气态污染物	7
1.2.3 各国大气污染治理举措	12
1.3 常用室内空气污染治理技术	15
1.3.1 固态污染物治理技术	16
1.3.2 气态污染物治理技术	17
参考文献	20
2 粉尘治理	28
2.1 背景介绍	28
2.1.1 来源及组成	29
2.1.2 空气粉尘危害	32
2.1.3 空气粉尘污染及管控	39
2.2 空气粉尘颗粒检测、治理技术及原理	41
2.2.1 空气粉尘检测及原理	41
2.2.2 空气粉尘治理技术及原理	46
2.2.3 应用实例	53
参考文献	56
3 微生物治理	60
3.1 背景介绍	60
3.2 空气微生物检测、治理技术及原理	65
3.2.1 空气微生物检测手段及现状	65
3.2.2 空气微生物治理技术及原理	74

3.2.3 应用实例	93
参考文献	96
4 主要气态污染物治理	102
4.1 甲醛 (CH ₂ O) 篇	102
4.1.1 背景介绍	102
4.1.2 甲醛检测、治理技术及原理	109
4.1.3 应用实例	134
参考文献	136
4.2 挥发性有机物 (VOCs) 篇	141
4.2.1 背景介绍	141
4.2.2 VOCs 检测、治理技术及原理	151
4.2.3 应用实例	197
参考文献	201
4.3 臭氧 (O ₃) 篇	210
4.3.1 背景介绍	210
4.3.2 臭氧检测、治理技术及原理	217
4.3.3 应用实例	227
参考文献	228
4.4 氨气 (NH ₃) 篇	233
4.4.1 背景介绍	233
4.4.2 氨气检测、治理技术及原理	238
4.4.3 应用实例	252
参考文献	253
4.5 氮氧化物 (NO _x) 篇	258
4.5.1 背景介绍	258
4.5.2 NO _x 检测、治理技术及原理	261
4.5.3 应用实例	277
参考文献	281
4.6 二氧化硫 (SO ₂) 篇	285
4.6.1 背景介绍	285
4.6.2 SO ₂ 检测、治理技术及原理	289
4.6.3 应用实例	300
参考文献	306

4.7 一氧化碳 (CO) 篇	310
4.7.1 背景介绍	310
4.7.2 CO 检测、治理技术及原理	316
4.7.3 应用实例	333
参考文献	335
5 结论与展望	340
5.1 取得的成就	340
5.2 存在的不足	340
5.3 发展建议	342
索引	343

1 绪 论

1.1 空气污染简介

1.1.1 大气污染

室外空气污染也称大气污染,当自然过程和人类活动导致的污染物进入大气,超过环境自净能力时就会造成大气污染。自然过程主要包括火山活动、山林火灾、海啸、土壤岩石风化等;人类活动则主要包括生活活动和生产活动,其中大规模的工业生产活动是造成大气污染的主要原因^[1]。我国改革开放以来,经济水平得到极大的提高,但也伴随着诸多环境污染问题,其中大气环境的形势就日益严峻。近年来,雾霾的频发也引起了人们对大气污染的关注。

大气污染的特点主要是污染物流动性大、扩散性强且有不可见性,较强的流动扩散性使大气污染呈现无国界性;而且,除悬浮颗粒物外,大气污染物一般不易察觉。同时,全球变暖等也成为全世界关注的问题。我国大气污染目前主要呈现为煤烟型污染^[2-5],悬浮颗粒物浓度普遍超标,二氧化硫(SO₂)污染保持较高水平。随着机动车使用量的增加,机动车污染物排放总量增加,氮氧化物(NO_x)污染加重,SO₂、NO_x超标,致使全国形成华中、西南、华东、华南等多个酸雨区^[6]。目前,受到关注的大气污染物主要有悬浮颗粒物、臭氧、SO₂、NO_x等。

1. 悬浮颗粒物

悬浮颗粒物是目前室外常见空气污染物,也是引起雾霾天气的元凶。环境空气中的悬浮颗粒物主要包括固态和液态两种形态,主要有两个来源^[7]:一是各种污染源和发生源向空气中直接释放的细颗粒物,包括烟尘、粉尘、扬尘、油烟、油雾、微生物和花粉等;二是具有化学活性的气态污染物在空气中发生反应后生成的细颗粒物,这些活性气态污染物包括SO₂、NO_x、挥发性有机物和氨气(NH₃)等。

工业污染源包括火电、钢铁、建材、化工、炼油、冶金、锅炉、窑炉、垃圾焚烧装置等;移动污染源包括机动车、机动船舶等;生活污染源包括饮食业、干洗业、家庭厨房、取暖煤炉、生活垃圾和城建废弃物、露天焚烧等。

2. 臭氧

不断上升的臭氧浓度已成为全球科学家和公众密切关注的话题,臭氧(O₃)已成为近地层最重要的大气污染物之一^[8,9]。室外臭氧污染是一种典型的大气二次污

染,主要是大气中的氮氧化物、碳氢化合物在特殊的气象条件下,经过一系列复杂的光化学反应生成的。在大气中氧的参与下,经太阳紫外线照射,氮氧化物与挥发性有机物经过一系列复杂的光化学反应生成臭氧、醛类和过氧乙酰硝酸酯等二次污染物。

全球近地层大气中臭氧浓度已从工业革命前的 38 nL/L(25~45 nL/L,夏季每天平均 8 h)上升到 2000 年的 50 nL/L,估计到 2100 年近地层大气中臭氧浓度将上升到 80 nL/L。臭氧污染问题已在我国广泛存在,不同地域分布特点不同,大气中的臭氧浓度为 50~60 nL/L;从空间分布来看,呈现中心城区低郊区高的特征,且清洁干净的小区相对较低。

3. 二氧化硫

我国作为煤炭大国,也使大气污染呈现煤烟型污染特征,而其中产生的主要大气污染物之一是 SO_2 。

大气中的 SO_2 主要来源于自然界和人类活动两个方面。人类活动产生的 SO_2 主要来自含硫煤和石油的燃烧、石油炼制及有色金属冶炼和硫酸制造等;自然界中的 SO_2 主要来源于火山喷发与微生物的分解。在 SO_2 污染源中,自然源的贡献率难以准确估算,但是人为源却可以通过计算和统计获得相当准确的数字。据估计,20 世纪 80 年代,自然源和人为源所贡献的 SO_2 在数量上几乎相当,都在 1.5 亿吨左右。随着工业经济的飞速发展,人为源大幅度增加,全世界 SO_2 排放总量增加了几十倍,平均年递增率约为 5%。总的来说, SO_2 排放量与工业发展水平和人口密集程度有关,因而北半球 SO_2 排放量比南半球高 10 倍以上。

4. 氮氧化物

氮氧化物(NO_x)包括 N_2O 、 NO 、 N_2O_3 、 NO_2 、 N_2O_4 、 N_2O_5 等化合物,其中造成大气污染的主要是 NO 和 NO_2 。 NO_x 的来源可分为自然发生源和人为发生源。自然发生源产生 NO_x 的途径有雷电、臭氧与细菌的作用。自然界形成的 NO_x 由于自然选择能达到生态平衡,所以对大气污染很小。

人类社会活动产生的 NO_x 主要有三个来源:①火力发电:空气中的 NO_x ,最大的来源是火力发电。据统计,2005 年,我国 NO_x 排放总量超过 1900 万吨,其中火力发电是最大来源,燃煤电厂排放 700 万吨,其次是工业和交通运输部门,分别贡献了 23%和 20%;②机动车尾气: NO_x 更重要的来源是机动车排放的尾气,在北京、上海、广州等机动车保有量全国排名靠前的城市中,约 50%的 NO_x 污染来自于机动车尾气的排放,深圳市机动车排放的 NO_x 占到了全市排放量的 56.4%,其中大型客车和重型货车排放的 NO_x 约占机动车排放 NO_x 总量的 70%;③燃煤采暖锅炉, NO_x 污染在冬季尤为明显,在冬季采暖季节,北京大气中的 NO_x 浓度是夏天的 10 倍。

1.1.2 室内空气污染

现代人平均有 80%~90% 的时间在室内度过，室内空气质量直接影响人们的健康。研究表明，室内空气的污染程度要比室外空气严重 2~5 倍，在特殊情况下可达到 100 倍。室内空气污染物可大致分为两大类：一类是悬浮固体污染物，包括可吸入颗粒、灰土、总悬浮颗粒物、花粉、微生物、烟雾等；另一类则是气态污染物包括挥发性有机物（甲醛、苯、甲苯、烃类化合物等）、臭氧（ O_3 ）、氨气（ NH_3 ）、氡气（ Rn ）、氮氧化物（ NO_x ）、二氧化硫（ SO_2 ）和一氧化碳（ CO ）等^[10,11]。

室内空气污染多由于室内引入可释放有害物质的污染源或室内环境通风不佳，使室内空气中有害物质在数量和种类上不断增加而引起。《民用建筑工程室内环境污染控制规范》（GB 50325—2010）^[12] 根据现阶段国内室内污染的特点，将室内环境污染定义为：室内空气中混入有害人体健康的甲醛、苯、氨、氡、挥发性有机物等气体的现象。其中民用建筑工程主要包括住宅、医院、老年建筑、幼儿园、学校教室、办公楼、商店、旅馆、文化娱乐场所、图书馆、展览馆、体育馆、公共交通等候室、餐厅、理发店等与人类生活息息相关、人们最经常活动的室内场所。

室内空间所使用的无机非金属材料、人造木板及饰面人造木板、涂料、胶黏剂、水性处理剂及其他建筑和装饰材料，长时间释放甲醛、苯系物、 NH_3 、 Rn 、挥发性有机物（VOCs）等有毒有害物质，悄悄地威胁着人类的健康（图 1-1-1）。由于室内空气污染物种类众多，在此根据常见室内空气污染源及其相应污染物予以介绍。

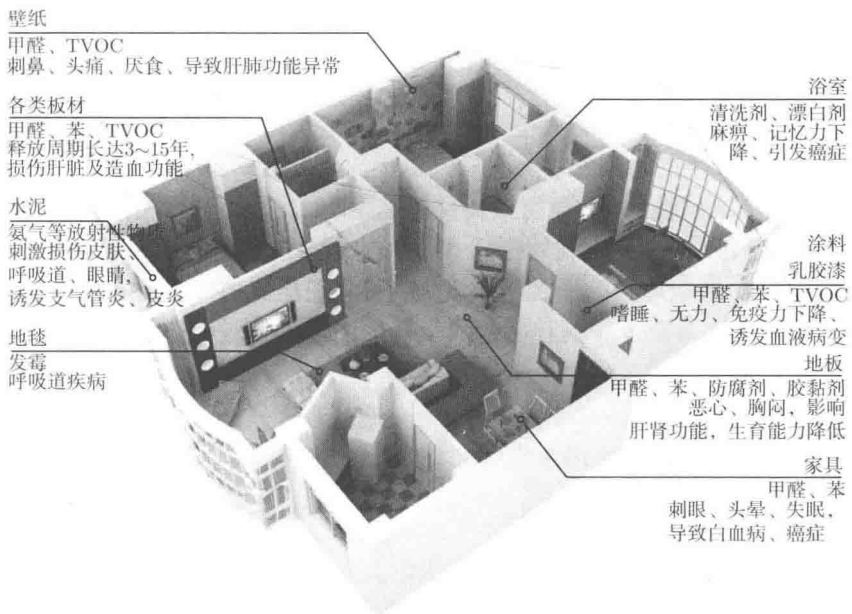


图 1-1-1 室内主要空气污染源及污染物

1. 装饰材料释放污染

随着经济飞速发展,人们日益追求高品质、高舒适度的生活质量,室内装饰材料日渐丰富。室内装饰材料中大量应用的人造板材、内墙涂料、油漆和家具、壁纸、地毯等,由于其材质和加工工艺的缘故,均一定程度上造成室内空气污染,为此国家对该类材料做了释放限定^[13-23]。人造板在生产过程中加入大量黏合剂、防腐剂等,使用过程中会释放出甲醛、苯、五氯苯酚等;涂料成分非常复杂,使用过程中会释放出大量甲醛、氯乙烯、氯化氢、酚类等有害气体,还可能含有砷、铅、汞、锰等重金属物质;壁纸、地毯的细毛绒也是过敏原。装饰材料是目前室内空气污染最主要的成因,其污染物以甲醛等挥发性有机物为主,长期接触会引发包括呼吸道、消化道、神经内科、视力、视觉等方面超过 30 多种疾病,而且这些有毒气体的释放期比较长,例如甲醛的释放期为 3~15 年,苯系物等释放期长达 1 年^[24]。

2. 建筑材料释放污染

建筑施工中使用的混凝土外加剂,特别是在冬季施工过程中,在混凝土墙体中加入尿素和氨水为主要原料的防冻剂。这些含有大量氨类物质的添加剂在墙体中随着温度、湿度等环境因素的变化而还原成 NH_3 缓慢释放,造成室内空气中 NH_3 的浓度大量增加^[25-27]。另外,一些建筑主体材料中含有放射性物质,如建筑物地基、水泥、砖沙以及居室内使用的瓷砖、石材等常为氡 (Rn) 的主要来源,长期受氡产生的射线照射易使人患气管癌和肺癌,接触皮肤可使皮肤癌发病率升高。

3. 油烟和香烟烟雾污染

研究发现,烹饪与吸烟是室内污染的主要来源之一。烹饪时,煤气、液化石油气、煤炭等燃烧产生的油烟、废气等使厨房成为室内污染最严重的地方^[28-32]。燃料的种类不同,产生的污染物种类和数量也不同,其烟雾成分极其复杂,这其中的许多物质都具有致癌性,严重危害人类身体健康,如烹饪时的食用油油烟含有短链醛、酮、酸、醇等 VOC 有害气体^[29],而使用的燃料未燃烧完全时则容易形成 CO 等有毒气体^[32]。吸烟形成的烟雾组成更为复杂,在居室内吸一支香烟产生的污染物对人体的危害比马路上一辆行驶的汽车排放的污染物对人体的危害还要大。吸烟者吐出的烟雾中主要含有 CO、 NO_x 、烷烃、烯烃、芳烃、含氟烃、 H_2S 、 NH_3 、亚硝酸胺、悬浮颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10}) 等^[33-35],这些有害气体对人体的肺及支气管黏膜的纤毛上皮细胞有严重的损害作用。

4. 人体自身污染

人体自身污染是指人体自身的新陈代谢及人为活动和各种生活废弃物所带来的污染。人体自身新陈代谢如通过人体呼吸、汗液等排出的 NH_3 、有机胺、 H_2S 、VOCs 等,正常脱落的毛发、皮屑,生病所携带的细菌、病毒,通过咳嗽、打喷嚏

等排出的结核杆菌、链球菌等污染物；人为活动如从外界带入的灰尘、细菌、病毒，使用清洁剂、杀虫剂、化妆品残留的化学物质，使用地毯，特别是化纤地毯滞留的尘、螨、细菌等悬浮颗粒物及散发的有毒有害气体等。

5. 日用化学品污染

现在许多日用化学品中都含有有害化学成分，这些化学品可以分为两大类：房间保养品和个人保养品，房间保养品包括杀虫剂、驱蚊剂、各种清洁用品等；个人保养品包括香水、化妆品、洗浴用品等。典型污染物有 VOCs、NH₃ 等，该类污染在美容美发行业等领域尤其明显，加上人员相对密集，常伴生有细菌微生物污染等状况^[36-38]。

6. 办公设备释放物污染

随着信息产业的到来，越来越多的电子产品和设备，如复印机、传真机、绘图机、打印机、计算机等应用于办公室和居室，给人们的生活带来极大的便利，但 these 产品和设备会释放有害物质到室内空气中，部分在使用中会产生 O₃、VOCs、颗粒物等有害物^[39-42]。在一些经常使用复印机的地方，O₃ 浓度足以危害人体健康，容易使操作人员产生“复印机综合征”，主要症状表现为咽喉干燥、咳嗽、头晕、视力减退等，严重者可导致中毒水肿和神经系统方面的病变^[42]。

1.2 主要空气污染物危害与管控

室内空气污染要远比大气污染种类繁多，但由于大气污染治理受诸多因素制约，目前治理效果并不明显，随着技术的不断发展，针对室内空气污染物的治理则取得了长足发展。为此，本书根据《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 规定的常见室内空气污染物分类为：固态污染物如悬浮颗粒物、微生物等；气态污染物如甲醛、挥发性有机化合物 (VOCs) (苯、甲苯、二甲苯等为典型代表)、O₃、NH₃、SO₂、NO_x(NO₂、NO) 及 CO 等 (表 1-2-1)，并在后续章节中对各污染物的释放特点、污染现状、检测及治理技术等予以详述。

表 1-2-1 《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)

序号	参数类别	参数	单位	标准值	备注
1		温度	°C	22~28	夏季空调
				16~24	冬季采暖
2	物理性 (1~4)	相对湿度	%	40~80	夏季空调
				30~60	冬季采暖
3		空气流速	m/s	0.3	夏季空调
				0.2	冬季采暖
4		新风量	m ³ /(h·人)	30	

续表

序号	参数类别	参数	单位	标准值	备注
5		二氧化硫 SO ₂	mg/m ³	0.50	1 h 均值
6		二氧化氮 NO ₂	mg/m ³	0.24	1 h 均值
7		一氧化碳 CO	mg/m ³	10	1 h 均值
8		二氧化碳 CO ₂	%	0.10	日平均值
9		氨 NH ₃	mg/m ³	0.20	1 h 均值
10	化学性 (5~17)	臭氧 O ₃	mg/m ³	0.16	1 h 均值
11		甲醛 HCHO	mg/m ³	0.10	1 h 均值
12		苯 C ₆ H ₆	mg/m ³	0.11	1 h 均值
13		甲苯 C ₇ H ₈	mg/m ³	0.20	1 h 均值
14		二甲苯 C ₈ H ₁₀	mg/m ³	0.20	1 h 均值
15		苯并 [a] 芘 B[a]P	mg/m ³	1.0	日平均值
16		可吸入颗粒 PM ₁₀	mg/m ³	0.15	日平均值
17		总挥发性有机物 TVOC	mg/m ³	0.60	8 h 均值
18	生物性	细菌总数	cfu/m ³	2500	依据仪器定
19	放射性	氡 Rn	Bq/m ³	400	年平均值

1.2.1 固态污染物

1. 悬浮颗粒物

悬浮颗粒物是指分散在空气中的颗粒状物质,按其形态一般有固态和液态两种。由于其种类繁多,难以测得实际具体颗粒物的粒径密度数据,研究人员通常利用颗粒物的动力学等效直径来进行分类区别,其中较为重要的为 PM_{2.5} 及 PM₁₀^[43]:

总悬浮颗粒物 (total suspend particulate, TSP): 总悬浮微粒,又称总悬浮颗粒物,是指大气中 100 μm 以下的颗粒物总量,是分散在大气中的各种粒子的总称。

PM₁₀(inhalable particulate matter, IPM): 可吸入颗粒物,是指空气中动力学直径小于或等于 10 μm 的粉尘颗粒,可以被人体吸入,沉积在呼吸道、肺泡等部位从而引发疾病,PM₁₀ 在大气中的滞留时间较长,是日常大气的主要污染物之一。GB/T 18883—2002 中限定日均值不得超过 150 μg/m³。

PM_{2.5}(respirable particulate matter, RPM): 细颗粒物,又称细粒、细颗粒、可入肺颗粒物,是指空气中动力学直径小于或等于 2.5 μm 的粉尘颗粒,它们能够进入人体肺泡,直接影响肺的通气功能,使机体容易处在缺氧状态,PM_{2.5} 可吸附重金属和致病菌等大量有毒有害物质,其在大气中的滞留时间更长,输送距离也较一般的污染物更远,对大气能见度、空气质量和人体健康的影响很大。

PM_{2.5} 是可吸入颗粒物中较多含量的部分,占其总量的 50%~80%,是粉尘污染治理的重点对象。我国于 2012 年修订的《环境空气质量标准》中,首次规定了 PM_{2.5} 的浓度限值,日平均浓度一级标准为 35 μg/m³,二级标准为 75 μg/m³,并

于 2016 年 1 月 1 日将正式实施。

2. 微生物

微生物是空气生态系统中的重要生物组成部分，主要来源于土壤、水体、动植物和人类，此外污水处理、动物饲养、发酵和农业活动等也是空气微生物的重要来源^[44-47]。微生物在空气中多以气溶胶形式存在，是固态或液态微粒悬浮在气体介质中的一类分散体系。微生物以单独悬浮状态或附于固体颗粒（尘埃）、液体微粒上在空气中悬浮形成微生物气溶胶（microbiological aerosol）。可简单划分为细菌（bacterial）气溶胶、病毒（viral）气溶胶、真菌（fungi）气溶胶，胶粒粒径从 $10^{-3} \sim 10^2 \mu\text{m}$ 不等，其中小于 $10 \mu\text{m}$ 粒子能被动物呼吸系统吸入，因而被称为可吸入颗粒物，是空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 物质组成的一部分^[48]。

根据致病程度，微生物大体可分为非致病性、条件性致病及致病性三类，其中非致病性微生物占大部分。微生物气溶胶中的非致病性微生物在高浓度下能对基体产生极大危害，包括致基体免疫负荷过重，对疫苗的免疫应答力下降、抗病力降低等，条件性致病微生物在适当条件下可能发挥致病作用，病原体气溶胶粒子不仅能破坏呼吸道微生态环境，而且会引起严重呼吸道疾病，如过敏性鼻炎、支气管炎、过敏性肺炎、流感等。此外除呼吸道传染外，微生物气溶胶可经消化道、皮肤伤口、黏膜浸染人体，引起肠胃炎、皮肤病等。病原微生物不仅对人体健康产生不利影响，而且对动植物亦能造成巨大危害，广泛影响世界范围内的农业、畜牧业。

在常规环境中，非致病性微生物占空气微生物的绝大部分，据 GB/T 18883—2002 要求，室内空气中微生物菌落不得超过 $2500 \text{ cfu}/\text{m}^3$ 。然而在一些高传染场合如医院等，对微生物污染做了更为严格的限定。《医院消毒卫生标准》（GB 15982—2012）中规定 I 类洁净环境微生物气溶胶浓度则需控制在不高于 $150 \text{ cfu}/\text{m}^3$ 范围内，不得检出致病微生物。随着人们对空气质量的日益关注，微生物污染管控也从原有的菌落总数限定，逐步转成某类微生物尤其是致病微生物的监控，如 GB/T 18204.3—2013 中对空气微生物的检测要求不仅包括细菌总数，还引入真菌总数、 β -溶血性链球菌（GB/T 18203—2000 规定溶血性链球菌不超过 $36 \text{ cfu}/\text{m}^3$ ）、嗜肺军团菌等检测指标。

1.2.2 气态污染物

1. 甲醛

甲醛是一种全身性毒物，是室内环境污染的罪魁祸首之一，1995 年甲醛就被国际癌症研究机构确定为可致癌物，在我国有毒化学品优先控制名单上高居第二位。甲醛污染多见于室内，主要来源于：室内装饰的胶合板、细木工板、中密度纤维板和刨花板等人造板材，甲醛黏合剂，含甲醛组分的并可能释放的其他各类装饰

材料,香烟、燃料及有机材料燃烧等^[49,50]。

甲醛不仅能引发眼刺激、头痛、咳嗽、过敏性鼻炎和支气管炎,造成肝脏、心肌、肺和肾脏神经毒性损伤,还会导致失眠、精神不集中、记忆力下降、情绪反常、食欲不振、流产和不孕等,甚至能引发鼻咽癌、结肠癌、脑瘤等疾病,还是一种典型的气道和眼部刺激性气态污染物。甲醛是学术界公认的多重化学物敏感症的化学致敏物,是一种环境致敏原,可引起皮肤致敏化,甲醛诱导性哮喘已经成为我国一种典型疾病。甲醛能降低机体各个器官的抗氧化能力,导致器官的氧化损伤,浓度越高损伤越严重。甲醛可以与空气中的离子性氯化物生产致癌物(二氯甲基醚)。不仅如此,甲醛也被证实对生殖系统有一定副作用,长期接触可引发受孕推迟、孕妇流产等问题,并具有遗传毒性,可引起 DNA 损伤^[51-53]。

鉴于甲醛污染的普遍性、长久性,以及较大的危害性,甲醛一直是室内空气污染管控的重点,我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)规定居室空气中甲醛卫生标准(最高容许浓度)为 0.1 mg/m^3 ,而《居室空气中甲醛的卫生标准》(GB/T 16127—1995)中规定最高容许浓度为 0.08 mg/m^3 。

2. 挥发性有机物

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是一类普遍存在于室内外空气中的污染物。VOCs 在美国的 ASTM D3960—98 标准中被定义为任何能参加大气光化学反应的有机化合物;美国环境保护局(EPA)将 VOCs 定义为除一氧化碳、二氧化碳、碳酸、金属碳化物、金属碳酸盐和碳酸铵外,任何参加大气光化学反应的碳化合物;世界卫生组织(WHO)在 1989 年认为总挥发性有机化合物(TVOC)为熔点低于室温且沸点在 $50\sim 260\text{ }^\circ\text{C}$ 的挥发性有机化合物的总称。

挥发性有机污染物的成分比较复杂,主要包括烃类、醇类、酯类、醛类、酮类、卤代烃以及低沸点的芳香族化合物等。工业上,其来源主要包括石油化工、造纸、纺织、制药等行业排放的有机废气^[54-56]。建筑材料、室内装饰材料及生活、办公用品等是室内 VOCs 的主要产生源,同时诸如电脑、打印机等设备及烹饪过程等也会产生一部分 VOCs 污染^[57-61]。

VOCs 污染较重时对环境生态和人类健康都会造成严重的危害^[59,62,63],主要表现在:某些 VOCs 在紫外光的激发下,能与大气中的氮氧化物发生光化学反应,形成毒性更大的光化学烟雾;某些 VOCs 对人体的毒性很大,一定浓度的 VOCs 对呼吸道、眼、鼻等人体感官有刺激性,容易造成急性或慢性中毒,甚至可致癌或引发突变。长期处在 VOCs 污染环境中,将导致机体免疫水平失调,影响中枢神经系统功能,出现头晕、头痛、嗜睡、无力、胸闷等自觉症状;还可能影响消化系统,出现食欲不振、恶心等,严重时可能损伤肝脏和造血系统。为此,针对 VOCs 污染,《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)以总挥发性有机物 TVOC 限量指标规定居室空气挥发性有机物浓度不得超过 0.60 mg/m^3 。

低沸点芳香族化合物苯、甲苯、二甲苯等是与甲醛并重的 VOCs 中典型污染物, 该污染也称为苯系物污染, 多由于油漆、涂料、胶黏剂、防水材料等释放所致^[64,65], 装饰程度较高的轿车等常为苯系物污染重灾区^[66]。其因具有脂溶性的特点, 可以通过完好无损的皮肤进入人体, 对皮肤有刺激作用, 能诱发人的染色体畸变, 国际卫生组织已经把苯系物定为强烈致癌物质。浓度很高的苯蒸气具有麻醉作用, 短时间内可使人昏迷, 发生急性中毒, 甚至可导致生命危险。长期吸入高浓度的苯系物蒸气, 会破坏人体的循环系统和造血机能, 导致白血病。此外, 妇女对苯系物的吸入反应格外敏感, 妊娠期妇女长期吸入会导致胎儿发育畸形和流产^[64,65,67]。鉴于苯系物的危害性巨大, 《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 分别对苯、甲苯和二甲苯浓度做了限定, 分别不得超过 0.11、0.20、0.20 mg/m³。

3. 臭氧

大气中臭氧 (O₃) 是二次污染物, 主要是由于大气中的 NO_x、碳氢化合物在特殊的气象条件下, 经过一系列复杂的光化学反应生成, 但其浓度相对较低, 不足以达到致害的风险。室内空气中的臭氧主要来源于复印机、静电式空气清洁机、臭氧消毒机以及其他家用电器等, 多由于运行时高压放电、紫外高能辐照所产生, 具有浓度高、产生速度快等特点, 极易造成较大的身体危害^[68,69]。

O₃ 可以通过接触呼吸系统管道而对人体造成损害, 且由于 O₃ 在水中的溶解度很低, 因此可以通过呼吸达到呼吸道的深处, 进入肺的周边区域和最细小的空气通道。O₃ 浓度为 0.43 mg/m³(0.2 ppm) 时能闻到气味, 21.8 mg/m³(10 ppm) 时容易引起肺气肿, 长时间待在 O₃ 浓度为 1 ppm 的室内环境中会引起慢性中毒, 引起肺组织癌变。会对人类造成神经中毒, 头晕头痛、视力下降和记忆力衰退等症状。对人体皮肤中的维生素 E 起到破坏作用, 致使人的皮肤起皱, 出现黑斑。O₃ 还能够破坏人体免疫机能, 诱发淋巴细胞染色体病变, 加速衰老, 致使胎儿畸形。以 O₃ 为主的光化学氧化剂对人体的远期危害, 主要损伤机体膜 (包括各种器官组织和细胞膜), 使心脏功能衰退, 氧化组织中的弹力纤维使纤维中的蛋白质分子变硬或失去弹力, 从而使皮肤出现皱纹, 血管失去弹性, 动脉硬化, 骨骼变脆, 容易骨折, 肺泡间弹力纤维失去弹性, 引发肺气肿等, 促使机体提早衰老, 寿命缩短^[42,69]。在“中国苏州多种臭氧度量方式暴露水平与人群死亡风险的相关性研究”中发现^[70], 每日 8 h 臭氧浓度每增加 70.6 μg/m³ 和每日 1 h 浓度每增加 59.6 μg/m³, 人群非意外总死亡风险分别增加 2.15% 和 1.84%。

为此, 臭氧作为室内常见污染物被列入管控范围, 我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002) 标准规定居室空气中 O₃ 容许浓度为 0.16 mg/m³。

4. 氨气

氨 (NH₃) 是一种无色而具有强烈刺激性恶臭味的气体, 比空气轻, 人体可感受