

全国勘察设计注册工程师环保专业管理委员会 编
中国环境保护产业协会

第四版

注册环保工程师 专业考试复习教材

大气污染防治工程技术与实践

(上册)

中国环境出版社

注册环保工程师 专业考试复习教材

(第四版)

大气污染防治工程技术与实践

(上册)

全国勘察设计注册工程师环保专业管理委员会

中国环境保护产业协会

编

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

注册环保工程师专业考试复习教材. 大气污染防治工程
技术与实践/全国勘察设计注册工程师环保专业管理委员会
编, 中国环境保护产业协会编. —北京: 中国环境出版社,
2017.3

ISBN 978-7-5111-2797-6

I. ①注… II. ①全… III. ①空气污染—污染防治—资
格考试—自学参考资料 IV. ①X

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 098565 号

出 版 人 王新程
策划编辑 沈 建 葛 莉
责任编辑 葛 莉 董蓓蓓
责任校对 尹 芳
封面设计 彭 杉

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (教材图书出版中心)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 3 月第 1 版
印 次 2017 年 3 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 38.5
字 数 920 千字
定 价 240.00 元 (全两册)

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

注册环保工程师专业考试复习教材

编委会

主 任 樊元生

副 主 任 易 斌

常务编委 郝吉明 左剑恶 朱天乐 蒋建国 李国鼎 李志远
余占清 姜 亢 邹 军 燕中凯 刘 媛

编 委 (按姓氏笔画排列)

马 金	井 鹏	方庆川	王玉珏	王敬民	司传海
田贺忠	任重培	刘 君	刘海威	孙 也	何金良
吴 静	张 纯	李 伟	李 彭	李兴华	李国文
纳宏波	邱 勇	邹 军	陈 超	陈德喜	周 律
孟宝峰	尚光旭	罗钦平	姜 亢	胡小吐	席劲瑛
郭祥信	彭 溶	彭孝容	翟力新	樊 星	

《大气污染防治工程技术与实践》分册

编写组

主 编 朱天乐

主 审 郝吉明

编 写 (按姓氏笔画排列)

王红妍 王文征 田贺忠 孙 也 刘 君 任重培

吕 栋 吕庆志 李兴华 李国文 陈 颖 纳宏波

张 纯 范维义 胡小吐 洪小伟 韩颖洁 谢德援

彭 溶 樊 星

前言

环境工程作为一门以环境科学为基础、以工程技术为主导的解决复杂环境问题的工程学科，具有起步晚、发展较快、多学科相互渗透、技术工艺复杂等特点，主要包括水污染防治、大气污染防治、固体废物处理处置、物理污染控制、污染修复等工程技术领域。环保工程师的主要职责就是要在从事环境工程设计、咨询等活动中，通过环境工程措施来削减污染物排放，使其稳定达到国家或地方环境法规、标准规定的污染物排放限值，其从业范围包括环境工程设计、技术咨询、设备招标和采购咨询、项目管理、施工指导及污染治理设施运行管理等各类环境工程服务活动。环保工程师作为环境工程设计、工程咨询服务的主要力量，应具有一定的理论知识、扎实的专业技能、丰富的实际工程经验和良好的职业道德，并能准确理解、正确应用各类环境法规、标准和政策，综合解决各类复杂环境问题。

为加强对环境工程设计相关专业技术人员的管理，提高环境工程设计技术人员综合素质和业务水平，保证环境工程质量，维护社会公共利益和人民生命财产安全，2005年9月1日起国家实施了注册环保工程师执业资格制度，并开始实行注册环保工程师资格考试。注册环保工程师资格考试实行全国统一大纲、统一考试制度，分为基础考试和专业考试，2007年至今，已成功组织了9次考试。

根据新修订的《勘察设计注册环保工程师执业资格专业考试大纲》（2014年版）要求，全国勘察设计注册工程师环保专业管理委员会秘书处和中国环境保护产业协会组织环境工程领域的资深专家重新编写了“注册环保工程师专业考试复习教材”系列丛书，供环境工程专业技术人员参加注册环保工程师资格专业考试复习使用。同时，也供从事环境工程设计、咨询、项目管理等方面的环境工程专业技术人员，以及高等院校环境工程专业的师生在实际工作、教学、学习中参考使用。

本复习教材以《勘察设计注册环保工程师执业资格专业考试大纲》（2014年版）为依据，内容力求体现专业考试大纲对以下三个层次知识和技能的要求：

- （1）了解：是指注册环保工程师应知的与环境工程设计密切相关的知识和技能。
- （2）熟悉：是指注册环保工程师开展执业活动必须熟悉的知识和技能。
- （3）掌握：是指注册环保工程师必须掌握，并能够熟练地运用于工程实践的知识和必备技能。

根据注册环保工程师执业资格专业考试和环境工程专业的特点，本复习教材内容以注册环保工程师应熟悉和掌握的具有共性的专业理论知识、环境工程实际技能为重点，既不同于普通教科书，也不同于一般理论专著，力求达到科学性、系统性与实用性的统一。为保证知识的系统性，本复习教材部分章节的编排并非与大纲一一对应，但其基本涵盖了大纲要求的全部内容。

本复习教材丛书共分五个分册：《水污染防治工程技术与实践》《大气污染防治工程技术与实践》《固体废物处理处置工程技术与实践》《物理污染控制工程技术与实践》《综合类法规和标准》。

参加本复习教材编写的单位近 20 个。其中，《水污染防治工程技术与实践》分册由清华大学环境学院编写；《大气污染防治工程技术与实践》分册由北京航空航天大学环境科学与工程系、福建龙净环保股份有限公司、中国恩菲工程技术有限公司、北京纬纶华业环保科技股份有限公司、广东佳德环保科技有限公司、北京国能中电节能环保技术股份有限公司、北京师范大学、北京科技大学、北京工业大学编写；《固体废物处理处置工程技术与实践》分册由清华大学环境学院、中国城市建设研究院、中国恩菲工程技术有限公司编写；《物理污染控制工程技术与实践》分册由合肥工业大学机械与汽车工程学院、清华大学电机工程与应用电子技术系、首都经济贸易大学安全与环境工程学院、深圳中雅机电实业有限公司、广东启源建筑工程设计院有限公司编写。

本复习教材的编写在全国勘察设计注册工程师环保专业管理委员会专家组的指导下完成，编写过程中得到了编写人员所在单位的大力支持，并参考了我国现行的环境工程高等教育的推荐教材和环境工程手册、专著等，在此表示诚挚的谢意。

本复习教材编写历时两年，不少内容几易其稿，凝聚了全体编写人员的心血。但由于环境工程技术涉及面广，本复习教材又是新考试大纲颁布实施后的重新编写，难免有差错之处，敬请广大读者批评指正，以期在本教材再版时补充和修正。

编 者

2016 年 8 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 大气污染与大气污染物	1
1.2 主要大气污染物的形成与控制	8
1.3 大气污染物的影响	13
1.4 气象要素及其对大气污染物扩散的影响	16
第 2 章 颗粒污染物控制技术	29
2.1 颗粒污染物控制技术基础	29
2.2 机械式除尘器	42
2.3 电除尘器	63
2.4 袋式除尘器	87
2.5 湿式除尘器	110
第 3 章 气态污染物净化技术基础	119
3.1 吸收法净化气态污染物	119
3.2 吸附法净化气态污染物	141
3.3 催化法净化气态污染物	160
第 4 章 主要气态污染物控制技术	170
4.1 烟气脱硫	170
4.2 烟气脱硝	201
4.3 挥发性有机物净化技术	225
第 5 章 大气污染治理工程设计	249
5.1 大气污染源的基本情况和工程设计依据	249
5.2 大气污染治理工程设计总体原则与要求	252
5.3 大气污染治理系统的构成及设计基本程序	255
5.4 集气罩设计	259
5.5 大气污染净化管道系统设计	275
5.6 风机选型计算及运行调节	287
5.7 烟气换热	303
5.8 烟囱（排气筒）的设计	311
5.9 大气污染控制系统辅助设施设计	318

5.10 与净化系统相关的构(建)筑物的功能和要求	353
5.11 净化系统电器、自动控制与烟气连续自动监测	356
第6章 净化工程的技术经济分析	362
6.1 净化工程的主要技术经济指标	362
6.2 净化工程技术经济分析的基础	364
6.3 净化工程经济、环境和社会效益分析的内容和方法	370
第7章 室内空气污染与控制	377
7.1 室内空气污染物及其来源	377
7.2 室内空气污染的危害	381
7.3 室内空气污染源控制	386
7.4 通风与室内空气污染控制	394
7.5 室内空气净化	397
参考文献	402

附 件

一、环境质量标准

GB 3095—2012 环境空气质量标准	405
GB/T 18883—2002 室内空气质量标准	412

二、污染物排放(控制)标准

GB 4915—2013 水泥工业大气污染物排放标准	428
GB 9078—1996 工业炉窑大气污染物排放标准	434
GB 13223—2011 火电厂大气污染物排放标准	441
GB 13271—2014 锅炉大气污染物排放标准	447
GB 13801—2015 火葬场大气污染物排放标准	453
GB 14554—93 恶臭污染物排放标准	458
GB 16297—1996 大气污染物综合排放标准	464
GB 18483—2001 饮食业油烟排放标准(试行)	485
GB 20950—2007 储油库大气污染物排放标准	492
GB 20951—2007 汽油运输大气污染物排放标准	502
GB 20952—2007 加油站大气污染物排放标准	509
GB 21522—2008 煤层气(煤矿瓦斯)排放标准(暂行)	536
GB 26453—2011 平板玻璃工业大气污染物排放标准	540
GB 28662—2012 钢铁烧结、球团工业大气污染物排放标准	546
GB 28663—2012 炼铁工业大气污染物排放标准	551

GB 28664—2012	炼钢工业大气污染物排放标准	556
GB 28665—2012	轧钢工业大气污染物排放标准	562
GB 29495—2013	电子玻璃工业大气污染物排放标准	569
GB 29620—2013	砖瓦工业大气污染物排放标准	576

三、环境工程相关技术（设计）规范

GB 50753—2012	有色金属冶炼厂收尘设计规范	582
GB 50965—2014	冶金烧结球团烟气氨法脱硫设计规范	605
GB 51045—2014	水泥工厂脱硝工程技术规范	617
GB 51135—2015	转炉煤气净化及回收工程技术规范	631
HJ 462—2009	工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范	649
HJ 434—2008	水泥工业除尘工程技术规范	660
HJ 435—2008	钢铁工业除尘工程技术规范	682
HJ 562—2010	火电厂烟气脱硝工程技术规范 选择性催化还原法	702
HJ 563—2010	火电厂烟气脱硝工程技术规范 选择性非催化还原法	726
HJ 663—2013	环境空气质量评价技术规范（试行）	742
HJ 664—2013	环境空气质量监测点位布设技术规范（试行）	751
HJ 2000—2010	大气污染治理工程技术导则	759
HJ 2001—2010	火电厂烟气脱硫工程技术规范 氨法	786
HJ 2012—2012	垃圾焚烧袋式除尘工程技术规范	804
HJ 2020—2012	袋式除尘工程通用技术规范	818
HJ 2026—2013	吸附法工业有机废气治理工程技术规范	881
HJ 2027—2013	催化燃烧法工业有机废气治理工程技术规范	893
HJ 2028—2013	电除尘工程通用技术规范	901
HJ 2033—2013	铝电解废气氟化物和粉尘治理工程技术规范	943
HJ 2039—2014	火电厂除尘工程技术规范	971
HJ 2040—2014	火电厂烟气治理设施运行管理技术规范	1011
HJ 2046—2014	火电厂烟气脱硫工程技术规范 海水法	1045
HJ 2049—2015	铅冶炼废气治理工程技术规范	1060
HJ/T 178—2005	火电厂烟气脱硫工程技术规范 烟气循环流化床法	1074
HJ/T 179—2005	火电厂烟气脱硫工程技术规范 石灰石/石灰-石膏法	1093
HJ/T 393—2007	防治城市扬尘污染技术规范	1112
DL/T 1121—2009	燃煤电厂锅炉烟气袋式除尘工程技术规范	1124
DL/T 5196—2016	火力发电厂石灰石-石膏湿法 烟气脱硫系统设计规程	1145

四、法律法规

中华人民共和国大气污染防治法（中华人民共和国主席令 第三十一号）	1165
----------------------------------	------

五、技术政策

机动车排放污染防治技术政策（环发[1999]134号）1183

燃煤二氧化硫排放污染防治技术政策（环发[2002]26号）1190

柴油车排放污染防治技术政策（环发[2003]10号）1194

火电厂氮氧化物防治技术政策（环发[2010]10号）1197

挥发性有机物（VOCs）污染防治技术政策
（环境保护部公告 2013年第31号）1200

环境空气细颗粒物污染综合防治技术政策
（环境保护部公告 2013年第59号）1204

第1章 概 论

1.1 大气污染与大气污染物

1.1.1 大气污染概述

1.1.1.1 大气污染的定义

大气污染是指人类活动或自然过程使得某些物质进入大气后，以其初始或转化形态在大气中停留足够的时间，并呈现出足够的浓度，从而危害人体舒适、健康和人类福利，或危害生态环境的现象。所谓人类活动包括生产、生活和交通运输等；自然过程则包括火山活动、山林火灾、海啸、土壤和岩石的风化等。

大气污染主要是人类活动造成的，这是因为自然过程产生的污染物大多远离人类的生存环境，借助自然环境对污染物的物理、化学和生物作用（自净作用），能够显著降低污染物浓度，甚至完全清除污染物，因而不会危害人体舒适、健康和人类福利，或危害生态环境。不过，如果自然环境的自净作用不足以消除污染物，也会造成大气污染。

大气污染对人体的舒适、健康的危害，包括对人体的正常生活环境和生理机能的影响，会引起急性病、慢性病以致死亡等；所谓福利是指与人类协调共存的生物、自然资源以及财产、器物等给人类带来的福利；所谓生态环境是指天然形成的、存在于人类社会周围的、对人类生存和发展产生直接或间接影响的物质、能量和信息总体，是自然界生物群体和一定空间环境共同组成的具有一定结构和功能的综合体。

1.1.1.2 大气污染的类型

按照污染范围大小，可将大气污染分为：

(1) 局部地区污染。是指局限于小范围的大气污染，如某燃煤锅炉烟囱排气对下风向居民区造成的大气污染。

(2) 地区性污染。是指涉及一个地区的大气污染，如影响一个特定工业区及其附近地区或整个城市的大气污染。

(3) 广域性污染。是指超过大型城市或行政区域范围的大气污染，如京津冀、长三角和珠三角区域性大气污染。

(4) 全球性污染。是指跨越国界，甚至影响全球范围的大气污染，如制冷剂泄漏导致的臭氧层破坏，大量排放 CO_2 等气体形成的温室效应，大量排放 SO_2 、 NO_x 等酸性气体导致的大范围酸雨等。

按照污染形成原因，可将大气污染分为：

(1) 煤烟型污染。是指因煤炭燃烧产生的大气污染，主要污染物包括烟尘、 SO_2 、 NO_x 和重金属等。

(2) 机动车尾气污染。是指因机动车燃用汽油、柴油、天然气和液化石油气等化石燃料造成的低空大气污染,主要污染物包括 NO_x 、CO 和碳氢化合物 (HC),柴油机车还会排放黑烟。

(3) 工业生产污染。是指特定工业企业工艺生产引起的大气污染,如金属冶炼、建材生产、石油化工等造成的大气污染,其污染物类型取决于生产原料和生产工艺条件。

(4) 面源污染。是指因道路扬尘、裸露土壤、餐饮油烟、秸秆和垃圾焚烧等形成的污染,面源污染的特点是大多以无组织方式排放、释放面积大,或数量多但单一污染源强度不大。

1.1.1.3 我国大气环境质量现状

我国环境空气质量总体不乐观,依据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)对 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值,CO 日均值和 O_3 日最大 8 h 均值进行评价,2014 年,京津冀、长三角、珠三角等重点区域和直辖市、省会城市及计划单列市共 74 个城市中,只有海口、拉萨、舟山、深圳、珠海、福州、惠州和昆明 8 个城市的 6 项污染物年均浓度均达标,其他 66 个城市存在不同程度的超标现象。2014 年空气质量相对较差的前 10 个城市分别是保定、邢台、石家庄、唐山、邯郸、衡水、济南、廊坊、郑州和天津。

京津冀区域 13 个地级及以上城市,空气质量平均达标天数为 156 天,比 74 个城市平均达标天数少 85 天,达标天数比例为 21.9%~86.4%,平均为 42.8%。超标天数中以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物天数最多,其次是 PM_{10} 和 O_3 。京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$,除张家口之外的 12 个城市超标; PM_{10} 年均浓度为 $158 \mu\text{g}/\text{m}^3$,13 个城市均超标; SO_2 年均浓度为 $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$,4 个城市超标; NO_2 年均浓度为 $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$,10 个城市超标;CO 日均值第 95 百分位浓度为 $3.5 \text{ mg}/\text{m}^3$,3 个城市超标; O_3 日最大 8 h 均值第 90 百分位浓度为 $162 \mu\text{g}/\text{m}^3$,8 个城市超标。北京市达标天数比例为 47.1%,与 2013 年相比下降 1.1 个百分点, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $85.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$,与 2013 年相比下降 4.0%。

长三角区域 25 个地级及以上城市,空气质量平均达标天数为 254 天,达标天数比例为 51.6%~94.0%,平均为 69.5%。超标天数中以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物天数最多,其次为 O_3 和 PM_{10} 。长三角区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$,24 个城市超标; PM_{10} 年均浓度为 $92 \mu\text{g}/\text{m}^3$,22 个城市超标; SO_2 年均浓度为 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$,25 个城市均达标; NO_2 年均浓度为 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$,11 个城市超标;CO 日均值第 95 百分位浓度为 $1.5 \text{ mg}/\text{m}^3$,25 个城市均达标; O_3 日最大 8 h 均值第 90 百分位浓度为 $154 \mu\text{g}/\text{m}^3$,10 个城市超标。

珠三角区域 9 个地级及以上城市,空气质量平均达标天数为 298 天,达标天数比例为 70.2%~95.6%,平均为 81.6%。超标天数中以 O_3 为首要污染物天数最多,其次是 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 。珠三角区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$,6 个城市超标; PM_{10} 年均浓度为 $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$,1 个城市超标; SO_2 年均浓度为 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$,9 个城市均达标; NO_2 年均浓度为 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$,3 个城市超标。CO 日均值第 95 百分位浓度为 $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,9 个城市均达标; O_3 日最大 8 h 均值第 90 百分位浓度为 $156 \mu\text{g}/\text{m}^3$,4 个城市超标。

1.1.2 大气污染物及其来源

1.1.2.1 气溶胶状态污染物和气态污染物

大气污染物是指由于人类活动或自然过程排入大气后,对人类和环境产生有害作用的

那些物质。大气污染物的种类很多,根据其存在状态(相态),可将其分为气溶胶状态污染物和气态污染物。气溶胶状态污染物也称颗粒物,是指在一定时间内能够悬浮于空气中的微小固体粒子或液体粒子。根据其来源和物理性质,可分为如下几种:

(1) 粉尘。是指微小固体颗粒,如黏土粉尘、石英粉尘、粉煤、水泥粉尘、各种金属粉尘等。通常产生于固体物质的破碎、研磨、筛分和输送等机械过程,或土壤和岩石的风化过程。此类固体颗粒的形状往往不规则,尺寸范围为 $1\sim 200\ \mu\text{m}$ 。

(2) 烟。通常是指高温冶炼过程产生的固体颗粒,是由熔融物质挥发后再冷凝形成的颗粒物,如有色金属冶炼产生的氧化铅烟、氧化锌烟,核燃料后处理产生的氧化钙烟等。在烟的形成过程中,总是伴有诸如氧化之类的化学反应。烟的尺寸很小,一般为 $0.01\sim 1\ \mu\text{m}$ 。

(3) 飞灰。是指随燃料(主要是煤)燃烧产生的烟气排出的灰分,原因是燃料含有灰分。其粒径大多为 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 。

(4) 黑烟。是指由燃料燃烧产生的能见气溶胶,是燃料不完全燃烧的产物,除炭粒外,还有碳、氢、氧和硫等组成的化合物。

工程中,烟、飞灰和黑烟使用比较混乱,一般将高温冶金和化学过程形成的固体气溶胶称为烟尘,将燃料燃烧产生的固体气溶胶称为飞灰和黑烟,不仔细区分时,也统称为烟尘。

(5) 雾。是空气中液滴悬浮体的总称,在气象学上是指造成能见度小于 $1\ \text{km}$ 的小水滴悬浮体。在工程中,雾一般泛指小液体粒子悬浮体,它可能是由液体蒸气的凝结、液体的雾化及化学反应等过程形成的,如水雾、酸雾、碱雾、油雾等。

《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中,将气溶胶状态污染物分为总悬浮颗粒物(TSP)、可吸入颗粒物(PM_{10})和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)。其中,总悬浮颗粒物(TSP)是指悬浮在空气中,空气动力学当量直径 $\leq 100\ \mu\text{m}$ 的颗粒物;可吸入颗粒物(PM_{10})是指悬浮在空气中,空气动力学当量直径 $\leq 10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物;细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)是指悬浮在空气中,空气动力学当量直径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物。

气体状态污染物是以分子状态存在的污染物,简称气态污染物。气态污染物的种类很多,大体可分为含硫污染物(如 SO_2 、 H_2S)、含氮污染物(如 NO 、 NO_2 和 NH_3)、挥发性有机化合物、含碳氧化物(如 CO 、 CO_2)和卤素化合物(如 HF 、 HCl)五大类。几种主要气态污染物的特征及来源介绍如下:

(1) 硫氧化物(SO_x)。包括 SO_2 和 SO_3 ,主要是 SO_2 ,是目前大气污染物中数量较大、影响范围广的一种气态污染物。大气中 SO_2 主要来源于化石燃料燃烧,其次是硫化物矿石焙烧、冶炼等热过程。火力发电厂、有色金属冶炼厂、硫酸厂、炼油厂以及所有燃煤或燃油的工业炉窑等都排放含 SO_2 的烟气。

(2) 氮氧化物(NO_x)。包括 NO 、 NO_2 、 N_2O 、 N_2O_3 、 N_2O_4 和 N_2O_5 ,主要是 NO 、 NO_2 。燃料高温燃烧主要生成 NO ,进入大气后, NO 可以缓慢地氧化成 NO_2 ,当大气中有 O_3 等强氧化剂存在或在催化剂的作用下,其氧化速度会加快。人类活动产生的 NO_x 主要来自火力发电厂、各种窑炉和机动车排气,其次是硝酸生产、硝化过程、炸药生产及金属表面处理等过程。

(3) 挥发性有机物 (VOCs)。按照世界卫生组织的定义,挥发性有机物是指沸点为 50~250℃,室温下饱和蒸气压超过 133.32 Pa,在常温下以蒸气形式存在于空气中的一类有机化合物。根据其化学结构,可以进一步分为烷类、芳烃类、烯类、卤烃类、酯类、醛类、酮类和其他 8 种类型。挥发性有机化合物主要来源于石油冶炼、有机化工、油品储运和燃料燃烧等生产和交通运输过程,以及油漆、涂料、胶黏剂和有机产品所含有有机溶剂的挥发。

(4) 碳氧化物 (CO_x)。包括 CO 和 CO₂,是各种大气污染物中产生量最大的污染物,主要来自燃料燃烧和机动车排气。CO 是一种窒息性气体,进入大气后,由于大气的扩散稀释作用和氧化作用,一般不会造成危害。但在城市冬季采暖季节或在交通繁忙的十字路口,当气象条件不利于排气扩散稀释时,CO 的浓度有可能达到危害人体健康的水平。CO₂ 是无毒气体,但当其在大气中的浓度过高时,会使氧气含量相对减小,对人产生不良影响。地球上 CO₂ 浓度的增加,会产生温室效应,迫使各国政府开始实施控制。

1.1.2.2 一次污染物与二次污染物

根据大气污染物是否在大气环境作用下发生物理或化学形态转化,可将其分为一次污染物和二次污染物。一次污染物是指直接从污染源排入大气的原始污染物质;二次污染物是指在大气环境作用下,一次污染物经过物理、化学或光化学反应而生成的、与一次污染物的物理或化学性质存在差异的污染物。在大气污染控制中,既需关注一次污染物,也需关注二次污染物,尤其是二次细颗粒物和光化学烟雾。

(1) 二次细颗粒物。二次细颗粒物是指由排放源排放的气态污染物,在大气环境中经过化学反应或物理过程转化形成的液态或固态颗粒物。如二氧化硫、氮氧化物、有机气体等在大气中经一系列化学反应或物理凝结过程所形成的硫酸盐、硝酸盐和有机气溶胶等。二次细颗粒物的物理化学性质与其排放物(即前驱物)完全不同,在大气中这种颗粒物比重通常较大。北京市 PM_{2.5} 源解析的最新研究表明:有机污染物占 26%、硝酸盐占 17%、硫酸盐占 16%、铵盐占 11%,包括地壳元素在内的其他组分占 12%。其中,70%是二次细颗粒物。

(2) 光化学烟雾。光化学烟雾是指汽车、工厂等污染源排入大气的碳氢化合物 (HC) 和氮氧化物 (NO_x) 等一次污染物在太阳光紫外线作用下,发生光化学反应生成二次污染物,从而形成一次污染物和二次污染物混合体(其中既有气态污染物,也有气溶胶状态污染物)的烟雾污染现象。光化学反应形成的代表性产物是臭氧 (O₃),此外,还有过氧化乙酰硝酸酯、酮类和醛类等。通常将 O₃ 作为光化学烟雾的代表污染物。2014 年上半年,京津冀地区出现了 PM_{2.5} 浓度下降而 O₃ 浓度上升的现象,表明光化学作用呈增强趋势。

1.1.2.3 大气污染源

大气污染源是指导致大气环境污染的因子或污染物的发生源。与大气污染类似,大气污染源也包括自然污染源和人为污染源两种类型。全球主要大气污染物的来源、大气停留时间和主要反应如表 1-1 所示。大多数大气污染物的自然源发生量大于人为源。尽管如此,由于自然源对人类生存环境影响远小于人为源,所以在大气污染控制工程中,主要关注人为大气污染源。

表 1-1 全球主要大气污染物的来源、大气停留时间和主要反应

污染物	人为源	自然源	推算在大气中的停留时间	迁移中的反应和沉降
SO ₂	煤和油的燃烧	火山活动	4 d	因臭氧和氧化性气溶胶作用而被氧化，最终转变为硫酸盐或硫酸
H ₂ S	化学过程污水处理	火山活动、沼泽中的生物作用	2 d	氧化为 SO ₂
CO	机动车和其他燃烧过程排气	森林火灾、海洋、萜烯反应	<3 a	可能转变为土壤有机体
NO/NO ₂	燃烧过程	土壤中的细菌作用	5 d	因臭氧和氧化性气溶胶作用转变为硝酸盐，或在光照作用下与 HC 反应形成光化学反应产物
NH ₃	废物处理	生物腐烂	7 d	与 SO ₂ 反应形成 (NH ₄) ₂ SO ₄ ，被氧化为硝酸盐
N ₂ O	无	土壤中的生物作用	4 a	在平流层中光离解、在土壤中的生物作用
HC	燃烧和化学过程	生物作用	—	与大气自由基 NO·NO ₂ 、O ₃ 发生光化学反应
CO ₂	燃烧过程	生物腐烂、海洋释放	2~4 a	生物吸附和光合作用，海洋的吸收
颗粒物	燃料燃烧，工农业生产	火山活动、森林火灾、风沙、海盐	对流层：7~14 d 平流层：1~3 a	参与 SO ₂ 、NO _x 、HC 的化学或光化学反应，生成硫酸盐或硝酸盐，降水冲刷

人为大气污染源有多种分类方法。按污染源是否移动，可分为固定源和移动源。固定源位置固定，如工厂的烟囱和排气筒；移动源是在移动过程中排放污染物，如汽车、火车、飞机、轮船等交通运输工具。按污染源的空间分布，可分为点源、面源和线源。点源是指污染物集中于一点或相当于一点排放到大气，如单个烟囱；面源是指在相当大的范围内有多个大气污染物排放源，如一个工业区或居住区多个相距不远且高度接近的烟囱构成的污染源；线源是指车流量大的道路因机动车排放大气污染物构成的污染源，其特点是道路沿线大气污染物浓度和构成相近。按污染物排放的连续性，可分为连续源、间歇源和瞬时源。连续源连续不断地排放污染物，如火电厂的排气筒；间歇源时断时续地排放污染物，如昼间工作、夜间停产的生产作业污染源；瞬间源是短暂地排放污染物，如工厂的事故排放口、运输车辆卸料等，有时也称阵发性污染源。按社会活动功能，可分为生活污染源、工业污染源、农业污染源和交通运输污染源。

就某一特定区域而言，其大气污染物来源往往非常复杂，解析起来也非常困难。近几年，由于城市雾霾严重，此方面的研究得到加强，获得了以 PM_{2.5} 为主要污染物的大型城市大气污染源解析结果。以北京市为例，大气污染物 28%~36%来自区域污染传输，剩下的 64%~72%来自北京本地。从本地排放来看，机动车占 31.1%、燃煤占 22.4%、工业生产占 18.1%、扬尘占 14.3%，其余 14.1%来自餐饮、汽修、烧烤、建筑涂装、畜禽养殖等。

1.1.2.4 我国大气污染物排放状况

我国是大气污染物排放大国，主要污染物的排放总量皆居世界之首，各主要大气污染物的总排放量如表 1-2 所示。

表 1-2 中国主要大气污染物排放量 单位：万 t

年份	SO ₂	NO _x	烟尘	工业粉尘
1990	1 501.7	—	1 327.5	775.0
2000	1 995.1	—	1 165.4	1 165.4
2005	2 549.4	—	1 182.5	911.2
2006	2 588.8	1 532.8	1 088.8	808.4
2007	2 468.1	1 643.4	986.6	698.7
2008	2 321.2	1 642.3	901.6	584.6
2009	2 214.4	1 692.7	847.7	532.6
2010	2 185.1	1 852.4	829.1	448.7
2011	2 217.9	2 404.3	1 278.8	
2012	2 117.6	2 337.8	1 234.3	
2013	2 043.9	2 227.3	1 278.1	

注：①2006 年之前，我国无全国性 NO_x 统计数据；
②自 2011 年开始，烟（粉）尘统一核算。

大气污染物排放量与地区产业和工业行业内部结构分布密切相关，大气污染排放之所以居高不下，最主要的原因是当地高能耗、高排放的工业行业比重太高。表 1-3 和表 1-4 分别给出了 2013 年我国各地区和分行业主要大气污染物排放量。

表 1-3 2013 年中国各地区主要大气污染物排放量 单位：万 t

地区	SO ₂		NO _x		烟（粉）尘	
	合计	其中：工业	合计	其中：工业	合计	其中：工业
北京	8.70	5.20	16.63	7.59	5.93	2.72
天津	21.68	20.78	31.17	25.06	8.75	6.28
河北	128.47	117.31	165.25	110.56	131.33	118.72
山西	125.54	114.08	115.78	8.64	102.67	89.79
内蒙古	135.87	123.64	137.76	110.45	82.21	68.41
辽宁	102.70	94.73	95.54	67.33	67.06	57.28
吉林	38.14	33.10	56.05	37.05	32.02	25.09
黑龙江	48.91	35.27	75.16	44.19	72.25	52.01
上海	21.58	17.29	38.04	26.23	8.09	6.72
江苏	94.17	90.95	133.80	98.53	50.00	45.56
浙江	59.34	57.91	75.30	57.35	31.97	59.66
安徽	50.13	45.02	86.37	62.64	41.86	35.18
福建	36.10	34.20	43.83	33.06	25.94	24.06
江西	55.77	54.35	57.04	34.60	35.63	32.47
山东	164.50	144.53	165.13	117.16	69.67	54.24
河南	125.40	110.27	156.56	102.88	64.13	54.72