

空气污染气象学

吴祖常 编

目 录

第一章 大气污染的基本概念

第一节	大气污染源及其分类	4
第二节	大气污染物及其效应	8
第三节	大气质量及其评价	19
第四节	大气污染的监测	36

第二章 气象条件等对大气污染的影响

第一节	风对大气污染的影响	39
第二节	大气湍流对污染的影响	46
第三节	气温分布对污染的影响	50
第四节	大气扩散稳定度及其分类法	54
第五节	湿度、云雾降水、天气形势对污染的影响 ...	63
第六节	地形、地物对大气污染的影响	66

第三章 大气湍流扩散理论和扩散模式

第一节	梯度输送理论和扩散模式	70
第二节	湍流扩散统计理论和模式	81
第三节	湍流扩散相似理论和模式	107
第四节	高斯模式	117

第四章 空气污染浓度估算方法

第一节	烟气抬升理论	157
第二节	实用烟气抬升公式	167
第三节	扩散参数的估计方法	175
第四节	空气污染浓度的估算步骤	199

第五章 干沉积问题和复杂下垫面问题

第一节	干沉积对污染的影响	204
第二节	山区的大气扩散	215
第三节	城市的大气扩散	226
第四节	水陆交界区的大气扩散	237

第六章 污染气象学的应用

第一节	空气污染预报	247
第二节	厂址选择和城建规划	254
第三节	烟囱高度设计	262
第四节	大气污染防治	265

前 言

人们在与自然界的斗争中，生产力不断发展，人类创造的物质财富日益增多。但是，随着大工业的发展，使环境污染问题日趋严重。早在产业革命初期就存在以煤粉尘和二氧化硫为主的环境污染问题，进入二十世纪以来，特别是最近几十年，由于煤、石油、天然气的大量消耗，农药等有机合成物质的大量使用以及原子能工业的发展，造成了包括空气污染、水污染、土壤污染、噪声污染、微波污染、放射性污染等方面的环境污染问题。环境保护已成为关系到人类命运的大问题，世界各国都十分重视发展环境科学。大气污染是环境污染的一个重要方面，大气污染的研究受到各国的重视。

空气污染气象学是研究在不同气象条件下，污染物质在大气中输送、扩散稀释规律及应用的学科。它是气象学在环境科学方面的一个分支。它是最近几十年才发展起来的新学科，它的内容在不断地丰富和充实，例如近年来已把研究污染物的转化和清除规律作为它的内容。

空气污染气象学的许多课题尚处在探索阶段，本讲义中的许多理论、公式和方法只在特定的条件下适用，因此在使用时要注意应用条件。本讲义是大气物理系吴祖常参考兄弟院校和本院有关讲义以及国内外有关书籍文献的基础上编写而成的，由于编写者水平限制，讲义中不免存在许多错误和不当之处，请读者提出批评指正。

第一章 大气污染的基本概念

什么是大气污染？许多研究者给出过不同的定义，虽然至今各家的定义尚未统一，但内容是类似的。大气污染是指洁净空气中，混入了一些有害物质并且这些有害物质的含量超过一定限度，维持一定时间，对人体和动植物以及物产生危害的大气状况。这里所说的物质包括天然或人为释放的化学元素或化合物，这些物质在大气中的存在状态可以是气态、液态或固体颗粒，它们被称为大气污染物。而释放污染物的策源地为污染源。大气污染按所及的范围分为局部污染（例如污染源附近极小范围的污染）、地方性污染（某工业区或某城镇的污染）、厂界污染（如某大城市及周围地区的污染）和全球性污染。

围绕着地球的大气层总质量约为 5.3×10^{18} 吨，其中 98.2% 集中在 30 公里以下。洁净空气的主要成份，从地面直到数十公里处比例基本上是不变的（表 1.1）。污染空气中的污染物成份所占比例不一定很大（表 1.2），但它们已对人类和动植物及用品构成了危害。

表 1.3 燃料燃烧过程中散发的污染物

燃 料	SO ₂ 散发量	NO _x 散发量
煤	80 公斤/吨(假定含硫 5 %)	10 公斤/吨
天然气	6.4 公斤/10 ⁶ 立方米	3100 公斤/10 ⁶ 立方米
原 油	19.8 公斤/千升	7.1 公斤/千升

表 1.1 洁净空气成份

气体类别	含量 (容积百分比)
氮 N_2	78.08
氧 O_2	20.95
氩 Ar	0.93
二氧化碳 CO_2	0.03
氖 Ne	18×10^{-4}
氦 He	5.24×10^{-4}
氪 Kr	1.0×10^{-4}
氢 H_2	0.5×10^{-4}
氙 Xe	0.08×10^{-4}
臭氧 O_3	0.01×10^{-4}
水汽 H_2O	0—4

表 1.2 洁净空气与污染空气浓度对比

成分	洁 净 空 气	污 染 空 气
SO_2	0.001—0.01PPm	0.02—2PPm
CO_2	310—313PPm	350—700PPm
CO	< 1 PPm	5—200PPm
NO_x	0.001—0.01PPm	0.01—0.5PPm
碳氢物	1 PPm	1—20PPm
颗粒物	10—20 微克/米 ³	70—700 微克/米 ³

表 1·2 中的 PPM 浓度单位，下面详细讲，另外，本讲义认为大气污染和空气污染是同义语而不去区别它们。

第一节 大气污染源及其分类

污染源就是向大气排入有毒有害物质的策源地，可分为自然的和人为的两类。自然污染源是由于自然原因造成的：一次较大的火山爆发，可以使数千万吨尘埃进入大气，较小的微粒可经过几年才回到地球表面。另外每年由风从地面刮起的尘埃估计可达 5 亿吨，由于森林起火，大约三千万吨污染物质进入大气。人为污染源是由于人们从事生产和生活活动而形成的。因为人为的污染源普遍和经常存在于环境之中，故比自然源更为人们所密切关注，它们是我们研究的重点。

一、人工污染源的分类

按生产活动内容可分为四类：

1. 工业污染源

工业生产、交通运输过程中的气态、液态、固态废弃物（即所谓“三废”）可污染大气环境。二十世纪初以前，主要是燃煤产生的粉尘、CO、CO₂ 和 SO₂ 等；自从十八世纪中叶美国钻探石油成功并于二十世纪以后大量开采石油天然气以来，进入大气的污染物种类增多、数量增加。表 1·3 分别列出了若干种燃料在燃烧过程中散发的 SO₂、NO_x 等污染物质的量。现代大工业的烟囱、排气筒每天都在向大气排入可观的污染物质，其中以电力（火力发电厂）、冶金（钢铁厂、炼焦厂等）、化工（石化企业、化肥厂、农药厂等）、机械（机械工厂等）、轻工（造

纸厂等)、建材(水泥厂等)等工业最为重要。据估计,七十年代初期每年排入大气的污染物总量超过六亿吨,具体如表1.4所示。八十年代的排入量又有所增加,有人估计每年增长率约为5%。1980年美国工业污染物排入大气的总量2.05亿吨,其中 SO_2 为0.26亿吨。我国40万个工业企业和130万个农村企业在1981年的 SO_2 排放量约0.14亿吨。此外,目前全世界每年排入大气的 CO_2 总量约140.8亿吨。

表1.4 世界每年向大气排放有害气体总量

污染物	污 染 源	排放量 (亿吨)
煤粉尘	燃煤设备	1.00
二氧化硫	燃煤、燃油设备, 有色金属冶炼	1.46
一氧化碳	燃煤、燃油设备, 汽车废气	2.20
氮氧化物	燃煤、燃油设备, 汽车废气	0.53
烃类	燃煤、燃油设备、化工、汽车废气	0.88
氟化氢	化工废气	0.03
氨	化工废气	0.04

2. 家庭炉灶与取暖设备排气

这类污染源分布广, 数量多, 排放高度低, 排出的废气弥漫于居住区, 是低空大气污染不可忽视的污染源。

3. 交通运输污染源

汽车、火车、飞机等运输工具在运输过程中要向大气排放 SO_2 、 CO 、碳氢化合物等污染物。在发达国家, 汽车排气已成为一项十分重要的大气污染源, 目前世界上有两亿辆以上的各类

汽车，每年排出的CO约2亿吨，大气圈中的CO有80%是从汽车排放出来的。汽车排出的废气在大气中经光化反应后形成一种特殊的光化烟雾，其危害很大。

4. 农业污染源

现代农业生产中大量使用化肥、农药。在施化肥、喷农药时其中有一部分喷洒物将随风飘扬而污染大气。

按源的存在形式分为两类。

1. 固定污染源

位置不改变的排放源是固定源。它又分为点源（如工厂的高大烟囱排放）、线源（如车流量很大的一段公路，排放污染物的源头形成线状分布）、面源（如城市市区，较大面积上同时排放污染物）、复合源（若干点源与面源或线源同时排放，如大城市与工业中心）。

2. 流动源

汽车、火车、飞机、轮船等交通工具在运动过程中排放污染物，它们是流动源。

按排放形式分为两类。

1. 瞬时源

短时间排放污染物，例如煤幕弹的爆炸便是瞬时污染源。

2. 连续源

不停地开工生产的工厂烟囱，连续不断地排放污染物，它们是连续源。

按污染源离地面高度分为两类。

1. 高架源

污染物的排放不是在地面或贴地面处，而是在相当高的高

度处则称高架源。现代工业的烟囱有离地面50米、100米、200米甚至300米以上，它们都是高架源。单个烟囱的排放就是高架点源，排成线的多个烟囱组成高架线源，包含有许多高架源的地区可作为高架面源处理。

2. 地面源

在地面或紧贴地面的高度处排放污染物的源称地面源。低矮烟囱的排放、家庭炉灶的排放等都是地面源。

总之，污染源的分类多种多样，在处理问题时要按源的特点和研究问题的需要来决定源的分类，以利于问题的解决。在本课程中我们最常处理的是连续高架点源、连续地面点源、连续地面面源和线源。

二、源强

源强是定量表示污染源排放污染物数量大小的物理量。所谓源强是指污染物排放速率。对点源来说，源强就是单位时间内排放的污染物质的质量，单位为毫克/秒或克/秒，或者用单位时间内排出的污染物质的体积来表示点源的源强，当然由于气体是可压缩的，烟气体积会随气压、温度而改变，因而需要指明是什么状态时的体积，例如通常用标准状态（ $P = 760\text{mmHg}$ ， $t = 0^\circ\text{C}$ ）时的体积来表示。对于线源，源强就是单位时间单位长度内所排放的污染物质的质量（或体积），单位为毫克/秒·米。对于面源，源强则为单位时间单位面积所排放的污染物质的质量（或体积），单位为毫克/秒·米²。

实际工作中取得源强资料是很重要的，它是分析空气质量、估测污染物浓度的基础资料。通常要由污染源所耗燃的燃料品种、

数量等来估算单位时间内所排放的污染物数量，这中间需应用一些经验关系如表 1·3 的第二、三列所示。

第二节 大气污染物及其效应

从各种污染源排入大气中的污染物的种类不下数千种，已肯定产生危害并为人们注意到的有 100 多种。它们分为一次污染物和二次污染物。从污染源排入大气直接造成污染的各种成分是一次污染物。各种一次污染物在大气中相互作用或与正常大气成分发生种种化学反应，以及在阳光参与下发生光化反应等产生出来新的化学污染物称为二次污染物。一次污染物的毒性比二次污染物高，其形成机理，目前尚未完全弄清楚。一次污染物和二次污染物在大气中的浓度都有日变化，但变化不同，前者有两个峰值，但后者仅有一个峰值，如图 1·1 所示。

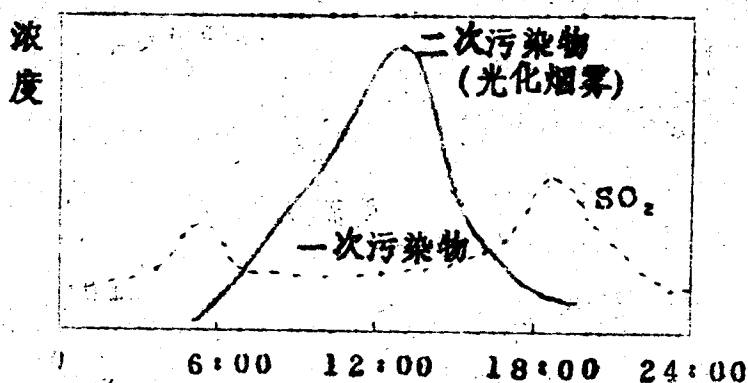


图 1·1 一次和二次污染物的日变化

一、污染物的分类

常把大气污染物分成五类。

1. 无机气体

排进大气中的污染物质，大部分为无机气体，它们又可分为五类。

1) 硫化物

大气中的硫化物主要有 SO_2 、 H_2S 等。 SO_2 是最重要的污染物之一，它的天然来源是火山爆发，它的人为来源是燃烧煤、石油等化石燃料。据 Robinson 等 (1969) 的估算，目前全球人为的 SO_2 排放总量 1.46 亿吨，其中北半球排放 1.36 亿吨，占 93%，南半球仅 0.1 亿吨。北半球的排放量的 72% 由燃煤排出，烧油、炼油等的排出占 19.9%。 SO_2 进入大气后其平均寿命为 6.5 天。大气中的 SO_2 可氧化成 SO_3 ，再转化成硫酸，从而对人体呼吸道产生危害， SO_2 的浓度较高时，人和动物的肺部会受伤害，最后由于窒息而引起死亡。大气中的 SO_2 含量，随气象条件等而变，通常在一天中是上午最高，午后最低，傍晚有一个次高；在一年中是冬季最高，夏季最低。大气中的 H_2S 的天然来源主要是动植物机体的腐烂，而人为来源则与 SO_2 的来源相同，凡是有 SO_2 排出的地方就有 H_2S 排出，其中令人不愉快的气味主要就是因为有 H_2S 。全世界工业排放的 H_2S 仅每年 300 万吨， H_2S 进入大气后，易氧化成为 SO_2 ，空气中 H_2S 的含量一般不高。

2) 氮氧化物

氮氧化物 (NO_x) 中，仅有 NO 、 NO_2 是最重的人为污染物。

目前全世界人为来源排出的 NO_x 总量为0.53亿吨/年，而从天然源（主要是细菌作用）排出的 NO 为50亿吨。 NO_x 对材料（如纺织品等）、动植物和人类都有不良影响，其中 NO_2 影响人和动物的气管直致发生慢性气管炎症。

3) 碳氧化物

碳氧化物主要有 CO 、 CO_2 ，全球 CO 的总产出量为3.4亿吨，其中大部分为人为来源（2.2亿吨）。在人为来源中，有半数以上是汽油燃烧排放出的特别是汽车的排放。 CO 是一种窒息性气体，浓度达50PPm时会产生缺氧症窒息而死。 CO 排入空气后容易氧化成 CO_2 ，故大气中的 CO 含量一般不高，不会使人窒息，它的危害在于它参与光化烟雾的形成。生物的呼吸和有机物的细菌分解后会放出 CO_2 ，这是 CO_2 的天然来源，一切燃料的燃烧是 CO_2 的人为来源。Robinson估计1965年全世界人为总的 CO_2 排放量为140.8亿吨，通过溶解于海洋中和光合作用，约有61%移出大气，其余的用来增加大气中的 CO_2 含量。就目前所知，由于 CO_2 的积存所造成的短期有害影响似乎并不存在。但是 CO_2 的不断增加，肯定总有一天会对全球气候和生态发生重大影响。

4) 卤化物

大气污染物中的卤素及其衍生物主要是氯气(Cl_2)、氟化氢(HF)和四氟化硅(SiF_4)以及氟氯甲烷(CH_2ClF)等。 Cl_2 是黄绿色有刺激性气体，对鼻腔、喉头粘膜有刺激作用，引起胸痛、咳嗽甚至死亡。 HF 和 SiF_4 是有毒气体。当空气中含氟量达8PPm时便开始对人有害。 HF 和 SiF_4 是积累性毒物，在骨骼和牙齿中累积，引起钙代谢紊乱，使人或牲畜发生软骨病

等。CH₂ClF在光致离解时可能破坏平流层的臭氧层从而使到达地球表面的有害紫外辐射增加。上述各种污染物来源于制碱厂、化工厂、砖瓦陶瓷工业、致冷设备等。

5) 氧化剂

最主要氧化剂是臭氧(O₃)，它是最有害的污染物之一，它引起植物叶子损伤、伤害纺织品和合成橡胶、破坏动物和人类肺部和气管。O₃是一种无色或淡兰色的气体，它不是排入空气中的气体，严格说来它不是空气污染物，但它是氮氧化物和碳氢化合物在阳光或其他射线作用下原地产生的，我们仍视它为大气污染物，当然可把它认为是二次污染物。

2. 有机气体

随着有机合成工业、石油工业的发展，向大气排入许多简单有机化合物、复杂高分子有机化合物。它们一般有恶臭，对人体器官有刺激作用，对内脏有毒害作用，有的是致癌物质。大体有主要如下几类：

- 1) 碳氢化合物如乙烷、丙烷、乙烯、丙烯、苯、萘等。
- 2) 含氧有机化合物如酚、醛、酮等。
- 3) 含氮有机化合物如过氧乙酰硝酸酯等。
- 4) 含硫有机化合物如硫醇等。
- 5) 含氯有机化合物如氯化乙烯等。

3. 颗粒物(气溶胶)

以固体、液体微粒形式分散悬浮于大气中的污染物称颗粒物，也叫气溶胶。飘尘、降尘、烟气、烟等是常用来描写气溶胶状态的一些名词，它们的含义如下。

飘尘：直径 $<10\mu$ 的尘粒，它们较小较轻，不易沉降，在空气中可飘浮几小时甚至几年，可以飘得很远甚至随气流周游全球。经常留在大气中的气溶胶粒子，以飘尘粒占优势。飘尘中，以 0.5 至 5μ 的质粒可直接深入人体肺部在肺泡内沉积，对人的危害最大。

降尘：直径大于 10μ 的质粒，它们较大较重，在重力作用下容易沉降并能较快落到地面，对人体健康危害较小。

烟气：直径小于 1μ 的质粒，它们可被吸入肺部，对人体危害尤大。今后亦称废气为烟气。

烟：从未采用消烟除尘措施的工厂烟囱或家庭煤炉等冒出的废气称为烟，烟是含有固体液体微粒的气溶胶。它的最主要固体微粒是烟黑（碳占96%以上，还有硫、氢等），其次粉尘，它的液体微粒包括水滴、硫酸微滴等。烟含有多种污染物质，是人们感到大气污染的最明显形式。经消烟除尘后可作到烟囱不冒黑烟而冒白烟，这时烟黑等污染物质大大减少而有较大比例的水滴等。当然这时仍排放 SO_2 、CO等气体污染物的。

此外还有聚积体、凝结核等名词，前者指几个尘粒吸附在一个大尘粒上或彼此吸在一起，在大气中象单个粒子一样运行；后者指空气中过饱和水汽的凝聚点，其直径约 0.1μ 。目前认为影响最大的是直径 0.1μ 到几十微米的颗粒物，我们通常把这个范围作为颗粒物的尺度范围。人为的颗粒物来源有家庭炉灶、家庭取暖、工作现场焚烧、汽车和工厂烟囱排放、交通运输、水泥工业等等。颗粒物的化学成分有硫酸盐、苯、可溶性有机物、铁及其他金属、硅等。颗粒物最显著影响是降低能见度、散射太阳辐射、引起肺部疾病、损害精美物品及艺术品及导致金属腐蚀等。

4. 放射性污染物

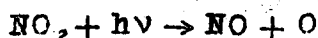
原子能的利用已日渐广泛，除军事利用外还用来发电等，放射性尘埃不断扩散到大气中引起大气污染，降落到地面又会引起食物污染。自然大气中的放射性物质不多，主要是来源于从地壳中逸出来的或大气成分在宇宙射线作用下转变成的放射性同位素。人类活动如核试验，核能工业燃料开采、制备，反应堆的运行和核废料处理等过程中，会有放射性污染物排入大气。放射性污染对人体有严重危害，可引起肺癌、骨瘤、血管和淋巴管瘤等。放射性污染物有钚(Pu^{239})、锶(Sr^{90})、铀(U^{235})等。

5. 光化烟雾和酸雨

二次污染物有许多类型，目前一般认为有硫酸盐、硝酸盐和含氧碳氢化合物等三种类型。前两者导致酸雨，后者导致光化烟雾的形成。

一次污染物 SO_2 被氧化成 SO_3 ，再与水蒸汽或其他污染物作用而形成硫酸或硫酸盐 ($\text{SO}_2 + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{SO}_3 + \text{M}$ ， M 为惰性气体如 Ar ， $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$)。一次污染物 NO_2 经过一系列化学反应成为硝酸或硝酸盐 ($2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{HNO}_2$ ， $\text{NaCl} + \text{HNO}_3 \rightarrow \text{NaNO}_3 + \text{HCl}$)。硫酸或硝酸及它们的盐类溶于水滴或附于水滴上，降落地面使雨水的 PH 值变小，若 $\text{PH} < 5.6$ 便称为酸雨。美国、加拿大东南部、北欧等地酸雨严重。1982年12月无锡的全国酸雨测报会议上指出我国酸雨问题突出而南方更突出。酸雨严重影响农业、林业、渔业等，必须加紧研究防治。

光化烟雾的形成，先有如下初始反应：



臭氧生成后又可分解为氧分子和氧原子，氧原子与 NO 化合又形成 NO₂： $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ 这样不断循环，一般不产生光化烟雾。但若空气中同时存在碳氢化合物，则原子氧、臭氧、一氧化氮等均与碳氢化合物反应，生成醛、酮、烯、烷、烷基硝酸酯等一系列产物，形成光化烟雾。洛杉矶是世界著名的光化烟雾城市，故也称洛杉矶烟雾。光化烟雾刺激眼睛、对呼吸道有害、还会损害植物、物品、降低能见度等。近年来对光化烟雾的形成已基本搞清，但还有许多问题如对人的危害等有待深入研究。

二、污染物含量的表示法

定量表示空气中的污染物浓度常有两种方法。一种是以单位体积空气内所包含的污染物的质量表示，用毫克/米³ 或微克/米³ 为单位，这是绝对量表示法，与通常的密度概念相似。另一种是用污染物气体或蒸汽与样品空气的体积比来表示，用 PPM 或 PPb 作单位，1PPm 是指在 100 万体积样品空气中含有 1 体积的污染物气体或蒸汽。PPb 则是 PPM 的 1000 分之一，

1PPm = 1000PPb。后一种方法是相对量表示法。

浓度的两种表示法之间有简单的换算关系为：

$$x(\text{PPm}) = \frac{22.4}{M} \cdot A \quad \text{或} \quad A(\text{毫克/米}^3) = \frac{M}{22.4} x$$

式中 A 为以毫克/米³ 表示的污染浓度，x 为以 PPM 表示的污染