



煤烟型 城市污染 大气气溶胶

赵德山 王明星 等 编著

中国环境科学出版社

前 言

大气气溶胶是一种重要的大气微量成分。尽管大气中从总貌来说气溶胶粒子的浓度很低，但是它在大气物理、化学过程中的作用却是非常巨大的。众所周知，大气中的水汽必须在有凝结核存在的情况下才能开始凝结，或者说没有气溶胶粒子大气中将永远不会形成云和降水，地球大气中五光十色的天气现象也就会变得单调而无意义。仅从这个意义上说，气溶胶从来就是大气科学研究的重要对象。然而，由于气溶胶粒子的低浓度和其本身极大的尺度范围以及化学成分的复杂性给观测造成的困难，使得气溶胶研究长期局限于凝结核计数方面。

50年代以来，随着世界范围的工业化进程和大规模城市化，大气气溶胶在局部范围达到了很高的浓度，有时可以达到自然大气中浓度的几千倍。它影响天气，妨碍视线，影响人和其它生物的健康，还可能引起气候变化和其它环境效应。因此，气溶胶的研究开始冲出气象学领域，而引起大气物理、大气光学、气候、环境和工程技术等许多领域的普遍重视。这就使气溶胶科学在最近几十年里有了很大的发展，逐步形成了大气科学的一个重要分支学科。

气溶胶科学涉及的范围很广，它实际上包含了经典物理学的所有学科，还涉及到气候学、气象学、大气光学、辐射传输以及数学和化学的某些分支。迄今也还没有一本系统的全面的气溶胶学专著。实际上，要全面系统地论述气溶胶是相当困难的。我们发现，目前更需要的是侧重某一方面，有所取有所不取地较为系统地论述大气气溶胶的专著。正是这样我们才最后确定了本书的名字。

我们在写这本书时，充分考虑到中国的现状和需要，主要依据我们多年从事大气气溶胶研究的成果，依据中国城市气溶胶的大量实际观测资料，系统地论述了煤烟型城市污染大气气溶胶的物理、化学特性，在大气中的行为和作用及其来龙去脉。尽管其中许多方面尚不够成熟，或者正在深入研究与探讨之中。为了读者便于参考，也一般地介绍了气溶胶的普遍特性和基础知识。

本书共分为八章，第一章一般介绍了大气气溶胶的基本概念和基本属性；第二章着重介绍了城市污染大气气溶胶的谱分布，特别是重点给出了中国煤烟型典型城市气溶胶的各种谱分布、经验公式及其相应的经验函数；第三章论述大气气溶胶的源和汇；第四章论述气溶胶粒子在大气中的输送特性，介绍了描述这种特性的计算模式；第五章和第六章系统地论述了中国煤烟型城市污染大气气溶胶的物理特性和化学特性，给出了中国典型城市气溶胶的各种浓度、谱、化学成分及其随时间和地方变化规律的大量实际观测资料。读者可以从中对中国目前城市气溶胶有一个较为全面的认识；第七章专题讨论了气溶胶化学成分资料的统计学处理方法和实例。最后在第八章概要地介绍了当前使用的气溶胶观测仪器、分析方法和一些观测试验方法。

我们在写这本书的时候，得到了中国环境科学研究院大气环境研究所和中国科学院大气物理研究所许多专家、教授和同行的热情支持。事实上书中的大量实际观测资料和研究成果，都是作者和中国环境科学研究院大气环境所的姜振远、汤大钢、周舟、刘丽杰、韩应建、杜渐、陈延智、王玮等；中国科学院大气物理所的洪钟祥、任丽新、吕位秀、陈伴勤等，长期合作的结晶，他们也分别参加本书部分章节的编写和计算工作。所以，没有他们的智慧和无私的贡献，本书是不可能写成的。此外，我们还要真诚地感谢太原、沈阳、昆明、兰州、北京、广州、柳州、乌鲁木齐、大连等许多环保单位的同行们曾经给予我们的大力支持和帮助；感谢为本书作了大量资料处理、计算制图和校对工作的杨隆风、张孟衡、薛玉兰等同志；感谢中国环境科学出版社的杨吉林同志，是她们

的辛勤劳动和编辑得以使本书与读者见面。

由于作者的水平有限和时间的匆忙，本书肯定有许多不当、甚至错误，诚恳地期待着读者的修正和热情指导。

赵德山 王明星

1989年10月于北京

目 录

| | |
|----------------------------------|------|
| 第一章 气溶胶的基本性质 | (1) |
| § 1.1 基本定义 | (1) |
| 1.1.1 大气气溶胶与其他名称 | (1) |
| 1.1.2 常用的特征尺度范围名称 | (3) |
| § 1.2 形状 | (4) |
| § 1.3 尺度 | (5) |
| 1.3.1 几何直径、空气动力学直径和斯托克斯直径 | (6) |
| 1.3.2 粒子直径的统计计算方法 | (7) |
| 1.3.3 大气气溶胶的五种典型尺度 | (9) |
| § 1.4 浓度 | (11) |
| 1.4.1 常用的几种浓度的定义 | (11) |
| 1.4.2 自然和人为气溶胶浓度的数量级 | (12) |
| 1.4.3 自然和人为源贡献的估计 | (15) |
| § 1.5 化学组分 | (16) |
| § 1.6 自然分布模态 | (17) |
| 1.6.1 爱根核模态 | (18) |
| 1.6.2 积聚模态 | (20) |
| 1.6.3 粗粒子模态 | (20) |
| § 1.7 光学性质 | (21) |
| 1.7.1 爱根核模态粒子对可见光的散射——瑞利散射 | (21) |
| 1.7.2 积聚模态粒子对可见光的散射——米散射 | (22) |
| 1.7.3 粗模态粒子对可见光的散射——消光伴译 | (22) |
| 1.7.4 大气能见度和视程 | (22) |
| § 1.8 电学性质 | (24) |
| 1.8.1 大气中离子的产生和离子与粒子的相互作用 | (24) |
| 1.8.2 大气气溶胶粒子的荷电机理 | (25) |

| | | |
|------------|------------------------------|--------------|
| 1.8.3 | 大气电导率与气溶胶粒子的关系 | (17) |
| § 1.9 | 动力学性质 | (17) |
| 1.9.1 | 粒子在外力场中的迁移 | (28) |
| 1.9.2 | 气溶胶粒子的扩散运动 | (30) |
| 1.9.3 | 求连续分布函数的一般动力学方程 | (32) |
| § 1.10 | 气候效应 | (36) |
| 第二章 | 城市大气气溶胶的谱分布 | (38) |
| § 2.1 | 尺度谱分布函数 | (38) |
| § 2.2 | 尺度谱分布函数的经验公式 | (42) |
| § 2.3 | 实测大气气溶胶尺度谱分布的特征 | (53) |
| 2.3.1 | 几种典型条件的大气气溶胶尺度谱分布特征 | (53) |
| 2.3.2 | 非煤烟型城市气溶胶尺度谱分布的特征 | (55) |
| 2.3.3 | 典型煤烟型城市气溶胶尺度谱分布的特征 | (58) |
| § 2.4 | 空气动力学尺度谱分布 | (76) |
| 2.4.1 | 城市气溶胶空气动力学尺度谱分布的特征 | (76) |
| 2.4.2 | 城市气溶胶空气动力学尺度谱分布随地区和时间的 变化 | (84) |
| 2.4.3 | 城市气溶胶质量谱的特殊意义 | (91) |
| 第三章 | 大气气溶胶的源和汇 | (96) |
| § 3.1 | 源 | (96) |
| 3.1.1 | 天然气溶胶及其形成 | (96) |
| 3.1.2 | 人为气溶胶及其形成 | (106) |
| 3.1.3 | SO ₂ →粒子的转化及其测量 | (120) |
| § 3.2 | 汇 | (130) |
| 3.2.1 | 湿清除过程 | (130) |
| 3.2.2 | 干清除过程 | (138) |
| 第四章 | 大气气溶胶粒子的扩散与输送 | (148) |
| § 4.1 | 大气运动 | (148) |
| 4.1.1 | 大气的平均运动 | (148) |
| 4.1.2 | 大气湍流 | (149) |

| | |
|--|--------------|
| § 4.2 粒子的垂直扩散与输送 | (151) |
| 4.2.1 典型的垂直湍流扩散机制 | (152) |
| 4.2.2 粒子垂直输送的其它机制 | (157) |
| 4.2.3 粒子数浓度的垂直分布及其计算模式 | (161) |
| § 4.3 粒子三维空间的扩散与输送 | (166) |
| 4.3.1 一般污染物空间扩散与输送的尺度问题 | (166) |
| 4.3.2 建立城市气溶胶扩散模式的要点 | (169) |
| 4.3.3 气溶胶粒子干、湿沉积的模式化 | (172) |
| § 4.4 常用的大气气溶胶扩散模式 | (179) |
| 4.4.1 大气气溶胶干沉积模式的发展 | (179) |
| 4.4.2 高斯模式的应用 | (187) |
| 第五章 城市污染大气气溶胶的物理特征 | (198) |
| § 5.1 典型煤烟型城市气溶胶的各种浓度 | (198) |
| 5.1.1 总悬浮微粒、飘尘和可吸入肺粒子的质量浓度 | (198) |
| 5.1.2 TSP、飘尘、可吸入肺粒子质量浓度的相关性 | (199) |
| 5.1.3 不同城市三种质量浓度的相对含量 | (207) |
| 5.1.4 不同城市气溶胶三模态粒子数浓度、表面积浓度和 体积浓度 | (209) |
| § 5.2 城市气溶胶各种浓度的日变化规律及其形成 机制 | (213) |
| 5.2.1 三模态粒子数浓度的平均日变化规律 | (213) |
| 5.2.2 三模态粒子的表面积和体积浓度的平均日变化规律 | (217) |
| 5.2.3 城市气溶胶三种质量浓度的平均日变化规律 | (217) |
| 5.2.4 城市不同污染期的划分和各种浓度 | (220) |
| 5.2.5 城市气溶胶各种浓度日变化规律形成机制 | (225) |
| § 5.3 城市气溶胶质量浓度的逐日变化规律及其形成 机制 | (234) |
| 5.3.1 城市气溶胶质量浓度的逐日变化规律 | (234) |
| 5.3.2 城市气溶胶质量浓度逐日变化规律形成机制 | (236) |
| § 5.4 城市大气气溶胶的空间分布 | (241) |
| 5.4.1 城市气溶胶质量浓度的地面分布 | (241) |

| | | |
|--------------------------------------|---|--------------|
| 5.4.2 | 城市气溶胶稳定粒子 (0.3—10 μ m) 数浓度的空间分布 | (243) |
| 5.4.3 | 城市气溶胶稳定粒子的垂直分布 | (258) |
| 第六章 城市污染大气气溶胶的化学特征 | | (263) |
| § 6.1 | 城市污染大气气溶胶的化学元素组成 | (264) |
| 6.1.1 | 城市污染大气气溶胶中的金属、非金属元素 | (265) |
| 6.1.2 | 城市污染大气气溶胶中元素浓度的逐日变化及其与边界层气象条件的关系 | (273) |
| 6.1.3 | 城市污染大气气溶胶元素浓度的日变化 | (277) |
| 6.1.4 | 城市污染大气气溶胶元素浓度的谱分布 | (278) |
| § 6.2 | 城市污染大气中的可溶性物质 | (284) |
| 6.2.1 | 城市污染大气气溶胶中的硫元素 | (284) |
| 6.2.2 | 城市污染大气气溶胶中的氮元素 | (291) |
| 6.2.3 | 城市污染大气气溶胶中的氯 | (294) |
| 6.2.4 | 城市污染大气气溶胶水溶液的离子成分浓度 | (295) |
| § 6.3 | 城市污染大气气溶胶中的有机化合物 | (299) |
| 6.3.1 | 城市污染大气气溶胶中有机化合物的实际测量 | (299) |
| 6.3.2 | 城市污染大气气溶胶中有机化合物的来源 | (301) |
| 6.3.3 | 城市污染大气气溶胶中有机化合物的物理、化学特征 | (303) |
| 第七章 城市气溶胶来源判别及其贡献率的计算方法 | | (305) |
| § 7.1 | 采样 | (307) |
| § 7.2 | 物理和化学分析 | (308) |
| § 7.3 | 模式判别 | (309) |
| 7.3.1 | 显微法 | (309) |
| 7.3.2 | 化学-统计学方法 | (310) |
| 7.3.3 | 模式的联合应用 | (336) |
| § 7.4 | 实例 | (336) |
| 7.4.1 | 干净大陆本底大气气溶胶来源判别分析 | (336) |
| 7.4.2 | 北京气溶胶来源的判别分析 | (343) |
| 7.4.3 | 兰州西固工业区气溶胶主要来源的判别 | (356) |
| § 7.5 | 小结 | (364) |
| 第八章 观测实验方法概要 | | (366) |

| | |
|---------------------------|-------|
| § 8.1 观测仪器概述 | (366) |
| 8.1.1 现场直接测量仪器 | (367) |
| § 8.2 化学成分分析方法概述 | (377) |
| 8.2.1 化学元素浓度分析方法 | (377) |
| 8.2.2 可溶性物质分析技术 | (391) |
| § 8.3 标准粒子发生器 | (393) |
| § 8.4 实验方法概要 | (396) |
| 8.4.1 采样点的选择——代表性问题 | (396) |
| 8.4.2 采样流量控制 | (398) |
| 8.4.3 样品贮存和运输问题 | (399) |
| 参考文献 | (401) |

第一章 气溶胶的基本性质

§ 1.1 基本定义

1.1.1 大气气溶胶与其他名称

气溶胶的严格定义是气体载体中悬浮有固体和(或)液体粒子所组成的多相体系。因此,大气气溶胶是悬浮着固体和液体粒子的大气系统的一种名称。但是,在实际大气中,粒子的浓度一般都不会高到足以影响大气宏观动力学特性的程度,所以在环境科学中一般定义大气气溶胶为悬浮在大气中的尺度为几十埃到几百微米的固体或液体粒子。

然而,大气气溶胶的尺度范围,无论是上限还是下限,都不是严格确定的。例如,下限定义为直径 $0.002\mu\text{m}$,只是因为它代表了用凝结核计数器可以测到的最小粒子。

但是,我们知道一个分子或一个原子的尺度大约是 $10^{-4}\mu\text{m}$,可是多大的分子团才能称为粒子,还没有通用的定义,这就是说大气气溶胶粒子的下限尺度还可能更小。

关于大气气溶胶的上限尺度,是取决于具体问题的。在静止空气中或者在通常的大气条件下,直径为 $100\mu\text{m}$ 或者几百微米的粒子,由于重力沉降很快,因而在大气中存在的寿命极短,只能存在于距离产生源不太远的空间,所以我们通常把这种尺度定义为大气气溶胶尺度的上限。

但是,有人把大气气溶胶的上限定义为 $1000\mu\text{m}$ (1mm),这是降雨雨滴的典型尺度,甚至有人指出,既然我们都承认云、雾、雨、雪也是气溶胶的一部分,那么上限可以定为 10cm 左右(大雹块),所以把大气气溶胶粒子的上限尺度定为毫米级甚至厘米级。事实上,这样大小的粒子除了雪花、密度很小的植

物种子等个别物质外，只有在极特殊的条件下，如强烈的尘暴、强对流云、龙卷风等强风暴条件下，可以在空气中悬浮足够长的时间，以至于可以被视为气溶胶，而在通常情况下是没有什么意义的。尤其是对于以研究城市大气气溶胶污染与控制为目的的本书而言，定义尺度范围从几十埃到几百微米是合适的。

在日常生活中或者根据各种学科的需要，对于大气中可见的各种物质微粒，人们还定义了许多专门名称，例如：颗粒物、烟、尘、雾、霾以及烟尘、烟雾等。虽然，人们在生活中常常不加区别地更喜欢使用这些通俗的术语。然而，它们确实各自具有不同的含意，不应该随意滥用。

例如，颗粒物通常是指任意大小的固体和液体粒子。由于粒子悬浮而需要具有稳定性，气溶胶粒子的尺度，就排除了直径大于几百微米的颗粒物。

烟，通常是指那些由燃烧过程形成的粒子和燃烧产生的气体通过气→粒转化而形成的固体或固体、液体混合物，其尺度一般为直径小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子。

尘，是指通过各种碎裂过程而直接产生的固体粒子，这种粒子一般直径大于 $1\mu\text{m}$ 。

雾，是气象学定义的一种主要由液体微粒构成的粒子群体，其粒子尺度一般为直径 $2-30\mu\text{m}$ 。

霾，有时也称干雾，是特殊天气条件下形成的由液体粒子和固体粒子组成的粒子群体。

总而言之，所有上述这些名称，都没有严格的科学定义，都是在特定条件下一部分粒子的俗称。

还应该进一步指出的是，构成大气气溶胶这一复杂的粒子体系的，除了包括大量无生命的物质外，还包括许多有生命的物质，例如：种子、花粉以及微生物、细菌等。尽管本书没有单设一章将它们区分而加以详细论述，但是在某些特定的问题上，它们具有十分明显的特殊重要性。

1.1.2 常用的特征尺度范围名称

在详细研究大气气溶胶过程中，我们经常要根据气溶胶粒子的物理、化学特性，形成机制提出许多专用名称。其中，最常见的有粗粒子和细粒子，原生粒子和再生粒子或者一次气溶胶和二次气溶胶；还有爱根核粒子或凝结核粒子；爱根核模态粒子、积聚模态粒子和粗模态粒子。有的文献中也使用大粒子、巨粒子等名称。为了在使用中不致混淆，予以简洁说明是必要的。

粗粒子与细粒子。粗粒子是指由各种碎裂过程直接产生的直径大约大于 $2\mu\text{m}$ 的粒子，又叫原生粒子或者一次气溶胶粒子。在城市大气气溶胶中，这种粒子的最典型的来源有：燃烧过程产生的飞灰、机械过程产生的粉尘，由于风和运输、建筑、农业有关的活动产生的土壤尘，以及来自海洋、火山爆发、尘暴等产生的大量海盐粒子和尘埃。

细粒子。是指那些几乎全部通过气→粒转化过程形成的粒子。这种粒子的尺度大约为直径小于 $2\mu\text{m}$ 。这种粒子通常又叫做再生粒子或者二次气溶胶粒子。各种燃烧排放出来的烟气，尤其是汽车尾气中含有大量的细粒子。

细粒子的质量虽然远小于粗粒子，但是由于它在大气中的生命期可以长达几天、甚至几年（在平流层），而粗粒子悬浮于大气中的时间短得多。所以，对于单位时间排放到大气中的相同质量的细粒子和粗粒子来说，细粒子的有效悬浮质量是粗粒子的10—100倍。特别重要的是，城市大气气溶胶的细粒子中，含有大量的硫酸盐、硝酸盐、有机氧化物以及铅、砷、石棉等各种有毒物质和强致癌物质。加上细粒子能够全部被人吸入肺部这一特征，致使只是用吨来表示排放总量或者仅仅测量总悬浮微粒的质量浓度，而不考虑粒子的尺度、成分及其特性，对于环境影响评价来说就几乎没有什么重要意义，就象在沙漠表面上吹起100吨沙尘，其意义无法和从核燃料回收厂烟囱中排放出的几毫克铀钚比一样。所以，人们的注意力更应该集中在细粒子的研究上。

爱根核粒子、大粒子、巨粒子。这是更多出现在大气物理学研究中的名词。所谓爱根核粒子是指直径约小于 $1\mu\text{m}$ 的粒子，因爱根首次用凝结核计数器系统研究了这种粒子而得名。大气物理学中（如云雾物理），所指的大粒子，其尺度直径为 $0.1-1\mu\text{m}$ ，而巨粒子则通常是指直径大于 $1\mu\text{m}$ 的粒子。

爱根核模态粒子、积聚模态粒子、粗模态粒子，这是大气气溶胶实验研究中得到的著名的三个自然模态。爱根核模态粒子，是指直径小于 $0.1\mu\text{m}$ 的粒子；积聚模态粒子，是指直径为 $0.1-2\mu\text{m}$ 范围的粒子；粗模态粒子（或叫粗粒子模态），则是指直径大于 $2\mu\text{m}$ 的粒子。这些都是大气气溶胶研究中，经常使用的特征尺度粒子的专有名称。

§ 1.2 形 状

大气气溶胶粒子的形状是十分复杂的，主要的大致可以分为下列5种：

球形，如液滴、硫酸盐类气溶胶粒子、烟、花粉以及燃烧产生的飞灰等，基本上呈球形粒子；

不规则立方体，如机械粉碎而成的各种矿物质粒子；

片状，如矿物粒子、表皮等；

纤维状，如典型的石棉、纤维碎屑、植物纤维、玻璃纤维等；

不规则凝聚体，如燃煤产生的大量烟气、炭烟中就含有大量的不规则凝聚体。

即使如此，以上5种粒子的基本形状也难以包括大气气溶胶粒子的千状万态。不过，许多实际观测事实证明，复杂的城市大气气溶胶粒子的形状也具有某些规律性。例如，无论是由于物理过程还是由于化学过程，通过气→粒转化生成的二次气溶胶粒子中，也就是直径小于 $2\mu\text{m}$ 的细粒子中，具有大量的球形粒子。

Megaw和Whiffen(1966年)还曾经描述过人工产生的亚微

米大小的铬气溶胶粒子，是如何经受着非常剧烈的形状变化的。他指出，这种粒子最初为拉长的尖状结构，而逐渐变为更规则的几乎是球形的粒子。并且还指出，它们的形状变化所需要的时间受湿度和另外一些因子的影响。因此，他们认为对于非常小的粒子而言，固定持久的形状概念可能是相当无意义的，或者说它们所具有的任何形状很可能在相当短的时间内发生着变动。

空气中悬浮的粒子，也会由于相互凝聚而使其形状发生变化。人们往往认为凝聚过程会有利于产生聚集体，形成结构紧密并且形状接近于球形的粒子。但是，在现实观测中发现了链状的聚集体。Sutherland (1970年)完成了在简单的随机布朗碰撞情况下的粒子凝聚分析研究以及计算机模拟，结论是：“链的形成决非当初所预期的那样是个不可能的现象。”根据同一著者的结论，当组成链的粒子数 N 小于 8 时，粒子组成单个链的出现概率大约为 10% 左右。这不包括任何形式的支链结构。

所以，即使是由于分子尺度的球形粒子碰撞聚合的凝团成为球形粒子，也是不大可能的，或者说是少见到的，至少在显微镜里或者电子显微镜里所能看见到的那些粒子是如此。

实际观测还发现，无论通过什么形式，由破裂过程产生的原生粒子，即直径大于 $2\mu\text{m}$ 的粗粒子，大量的 是片状、纤维状及其它各种不规则的形状。球体乃至近似球体的粒子是很少可能的。

尽管如此，人们仍然经常用球形粒子或者等效球形粒子来近似地描述大气气溶胶。因为，这样做在许多处理中都十分方便和简单。

§ 1.3 尺 度

众所周知，在大气气溶胶研究中，大量资料证明，不仅粒子的生成、成分、结构与其尺度有着重要关系，而且它们的光学特性、电学特性、动力学特性等许多十分重要的物理、化学特性，

以及在大气中所产生的各种大气效应、污染危害等都和粒子的尺度密切相关。因此，粒子的尺度是大气气溶胶研究中一个极为重要的物理量。

简单地说尺度就是粒子大小的度量。然而，确切地度量气溶胶粒子的大小，并非是一件容易的事。因为我们前面说过，大气气溶胶粒子的形状是十分复杂的。人们不难理解，要度量一个形状不规则的大气气溶胶粒子的大小，需要使用多维线性尺度。只有同时给出粒子形状的描述，并指出表征粒子的各种特征方向上的尺度，才能唯一地定义粒子。这在实际上是过于复杂了，因而没有实用价值。所以，在大气气溶胶研究中所用的尺度都是等效尺度的概念。最简单的是球形粒子，只要一维线性尺度（如直径或半径）就可以完全表征粒子的大小。

因此，对于无论是怎样不规则的非球形粒子，通常都是引用等效球体的直径（或半径）来度量的。也就是使用具有等效的某一选定的物理参数值的球体的直径或半径来表示非球形粒子的大小。

可供选择的物理参数有，显微下测量的投影面积，或者用气体吸附法和表面积测定法测得的总表面积、粒子的体积或质量，粒子的沉降速度、电迁移率、光散射特性，扩散参数等。所以，一般说非球形粒子的等效直径是指对某一物理特性而言的。

例如：等效光散射直径就不同于等效电迁移率直径。虽然在以后的论述中，我们并不总是指出特定的等效尺度，但读者必须时刻记住气溶胶大小度量的这种性质，下面我们介绍几种常用等效尺度。

1.3.1 几何直径、空气动力学直径和斯托克斯直径

几何直径，是球形粒子或者具有相等体积的等效球体在平面上投影的直径。这是气溶胶研究中最常用的度量粒子大小的尺度。

空气动力学直径，是指与真实粒子具有相同沉降速度、密度

为1的球形粒子的直径。显然，这样定义的直径是一个等效直径。所以又叫空气动力学等效直径。这是气溶胶研究中一种非常重要的尺度，尤其是在环境科学研究领域更具有特殊意义。

斯托克斯直径，是指与真实粒子密度相同，且具有相同沉降速度的球形粒子的直径。这样定义也是一种等效直径。

几何直径与空气动力学直径的关系：

$$d^2 C \rho_p = d_a^2 C_a \quad (1.1)$$

式中， d ——几何尺度直径 (μm)，

C ——直径 d 的球形粒子的滑动修正系数 (无量纲数)，

ρ_p ——粒子的密度 (g/cm^3)，

d_a ——空气动力学直径 (μm)，

C_a ——直径 d_a 的球形粒子的滑动修正系数 (无量纲数)；

空气动力学直径与斯托克斯直径的关系：

$$d_a^2 C_a = d_s^2 C_s \rho_s \quad (1.2)$$

式中， d_s 、 C_s 、 ρ_s 同上。

d_s ——斯托克斯直径 (μm)，

C_s ——直径 d_s 的球形粒子的滑动修正系数 (无量纲数)。

滑动修正系数是与下列参数有关的无量纲数。在空气温度为 20°C 时，滑动修正系数为：

$$C = 1 + 1.246Kn + 0.42Kne^{-0.37/Kn} \quad (1.3)$$

式中， Kn ——努森数 $=\lambda/d$ ，

λ ——气体的平均自由程，

d ——粒子的直径，

当大气压为1个大气压时，即 $p=1$ ，

$\lambda = 0.653 \times 10^{-5} \text{cm}$ ，

所以 $\lambda = 0.653 \times 10^{-5} / p$ (cm)。

1.3.2 粒子直径的统计计算方法

算术平均直径 \bar{d} ，

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum (n_i d_i) \quad (1.4)$$

式中 N 为粒子总数, n_i 为直径 d_i 的粒子数。

这是考虑了各种粒径在粒子数量上的差异, 按数量加权来计算的粒子直径。反映的是各种粒子相对含量的特征。

几何平均直径 \bar{d}_g :

$$\bar{d}_g = (\sum \pi d_i^3)^{1/3} \quad (1.5)$$

这是考虑了有些气溶胶的粒径分布接近对数正态分布时的计算方法。其直径的特征仍然反映了不同尺度粒子数多寡的特征。

中值直径 d_c :

这是指气溶胶的数量浓度 (或质量浓度), 正好为总数量浓度 (或总质量浓度) 的 50% 处的直径值。可以从粒径的数量谱或质量谱的累积频率分布曲线上直接求得。显然粒子数的中值直径与质量的中值直径是不相等的。

平均面积直径 d_a :

$$d_a = \left(\frac{\sum n_i d_i^2}{N} \right)^{1/2} \quad (1.6)$$

这是用数量加权法来求取粒子的截面积, 便于求得粒子的总面积。

面积平均直径 \bar{d}_a :

$$\bar{d}_a = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}, \quad (1.7)$$

是考虑面积加权后的粒子直径。是在消光法测量技术中为了有效地计算粒子的横截面而经常使用的一种方法。

平均质量直径 d_m :

$$d_m = \left(\frac{\sum n_i d_i^3}{N} \right)^{1/3}, \quad (1.8)$$

这是由数量加权来求粒子的质量平均直径的方法。便于求得粒子的总质量或总体积。

质量平均直径 \bar{d}_m :