

气溶胶粒子干沉降速度的测量

洪钟祥 周乐义 沈剑青

(中国科学院大气物理研究所)

赵德山 韩应建 周舟 汤大纲 姜振远

(中国环境科学研究院)

提 要

在昆明和太原地区,通过气溶胶与气象要素的同步观测,得到了粒径范围为 $0.01-10$ 微米的三个自然模态气溶胶干沉降速度,结果表明:气溶胶粒子的干沉降速度与粒子直径有密切关系,直径大于 2 微米的粗粒子沉降速度随直径增大而迅速增大;直径小于 0.1 微米的爱根核模态粒子的沉降速度随直径减小而增大;直径为 $0.1-2$ 微米的积聚模态的粒子沉降速度出现最小值。这种变化规律虽与国外实验室测定结果在趋势上比较一致,但绝对值却要大得多,另外,沉降速度还与大气稳定性和地面粗糙度有关。

一、引 言

由于酸雨对环境生态的严重影响,使得大气酸性污染物干湿沉降规律的研究成为近年来环境领域最热门的课题之一^[1]。酸性物质随着降水一起降落到地面的湿沉降过程,在空间上和时间上都有一定限制,即湿沉降只在一定空间和一定时间内发生,沉降量相对比较集中;与此相反,干沉降是指没有降水条件下,污染物通过湍流输送和重力作用向地面沉降的过程,这种沉降可在更广阔的地域和更持久的时间内发生,虽然干沉降没有湿沉降那么相对集中,但由于其作用时间长,因此对环境酸化的影响当可与湿沉降相比。当然,对于干旱地区来说,干沉降的作用就更大。

另一方面,为了研究污染物浓度时空分布规律,对污染物在大气中的干湿沉降作用必须加以考虑。因为从污染源排放到大气中的污染物的去向不外乎两种:一是通过气流的输送和湍流扩散向远处或高空散布并得到稀释;二是通过迁移转化过程而被消除或生成新的物质。因此,在建立数学模式计算一个区域污染物浓度分布时,不但需要该地区污染源排放及污染物扩散的详细资料,而且还需要对大气自身的清除能力(干湿沉降)作充分的了解。特别是在描写尘污染的模式中,如不考虑随风飘流的微细粒子在长时间运行过程中的沉降作用,那就不可能成为一个成功的模式。

本文讨论了大气气溶胶在无降水情况下,从大气向地表迁移的干沉降过程。

气溶胶粒子的干沉降过程,常通过沉降速度 V_d 而加以参数化. 环境科学关心的粒子尺度具有5个数量级(0.01—100 微米)范围. 干沉降机制对于不同大小的粒子所起的作用有着重要差别. 直径大于10 微米的粗粒子,重力沉降将起决定作用,沉降速度可直接用斯托克斯公式计算. 对于直径小于10 微米的粒子,特别是小于2 微米的细粒子,湍流沉降过程将显得更加重要. 值得指出的是,直径小于2 微米的细粒子大多数为二次气溶胶粒子,其中含有大量的硫酸盐等多种有害成分,它们在空中停留时间长,可以随风飘到很远的地方,而且容易被吸入肺部,对健康造成危害. 因此,人们对这种粒子的沉降速度更为关注.

由于技术所限,国际上对直径小于2 微米的粒子的沉降速度的研究工作始于本世纪七十年代^[2],八十年代初在测量技术上有新的突破^[3],但终因这种测量特别是野外实测比较困难,所以至今未见系统的结果. 同时,考虑到干沉降速度与粒子大小、下垫面属性、大气状态等许多因子有关,其值可相差很大,有时竟达2 个数量级,因此在野外现场实测气溶胶粒子的沉降速度,对研究气溶胶粒子的生消规律、预测一个地区未来的污染趋势以及介环境酸化均十分必要.

二、测量原理

气溶胶中微细粒子从低层大气到下垫面的迁移,主要有三种物理过程: 第一种过程,气溶胶粒子从大气边界层(厚度约1 公里)中通过湍流输送作用,向地表近粘性的片流层(厚度约1—2毫米)迁移;第二种过程,由于片流层中湍流消失,粒子通过分子扩散作用,向下输送到表面;第三种过程,表面对粒子的吸附作用. 这里的表面是广义的,包括植被、土壤、水面、雪面等等. 实际上很难对以上三个过程作分离测量,对于应用来讲,只要测出它们合成的总效果,即粒子向下输送的净通量,从而计算出干沉降速度就可以了.

如前所述,直径大于10 微米的气溶胶粒子,重力沉降作用比较大,它们不可能在空中停留很长时间,往往在运行一段很短距离后就沉降地面,因此只对污染源附近有影响,对于区域环境的影响则不大. 在这里,我们最感兴趣的是要测出直径小于2 微米的气溶胶微粒的沉降速度.

我们采用的测量方法,是在近地面层中对气溶胶粒子浓度和气象要素(包括风速、温度的平均量和脉动量)进行同步梯度观测,然后从通量和平均梯度算出沉降速度. 基本原理如下:

当观测点附近没有局地污染源,气溶胶粒子在水平方向分布相对均匀时,根据 Herman Siercing 粒子的垂直通量(向下为正) F_z 可写成^[3]

$$F_z(z) = K_z(z) \frac{dC}{dz} + V_*(z) C(z) \quad (1)$$

式中, K_z 为质点涡旋扩散系数(数米²/秒), $V_*(z) C(z)$ 为非扩散作用项, C 是粒子浓度(个数/厘米³), V_* 为摩擦速度(厘米/秒), z 为高度(米).

在近地面层中,控制细粒子浓度垂直分布的主要因子是湍流输送,所以

$$K_s(z) \frac{dC}{dz} \gg V_* C(z) \quad (2)$$

虽然,我们不能对粒子涡旋扩散系数进行直接测量,但是对那些质量可以忽略的微细粒子来说,一般可安全地引入一个近似的假设,即用动量(或热量)涡旋扩散系数 K_m (或 K_h) 来代替随风飘流的气溶胶粒子的扩散系数。这样,在廓线平均高度 z 上沉降速度 V_d 便可表示为

$$V_d(z) = \frac{F_s(z)}{C(z)} \approx \frac{K_m(z)}{C(z)} \cdot \frac{dC}{dz} \quad (3)$$

如果写成能进行测量的有限高度间隔梯度的差分形式,使得

$$V_d = \frac{\overline{u'(z)w'(z)}}{u(z_2) - u(z_1)} \cdot \frac{C(z_2) - C(z_1)}{\bar{C}(z)} \quad (4)$$

式中 u' 、 w' 分别为风速水平和垂直脉动值; $u(z_1)$ 、 $u(z_2)$ 分别为 z_1 、 z_2 高度上的水平平均风速; $C(z_1)$ 、 $C(z_2)$ 分别为 z_1 、 z_2 高度上的粒子浓度; $\bar{C}(z)$ 是平均浓度。

由此可见,只要测量出不同高度上的平均风速、粒子浓度和动量通量,便可得到粒子的干沉降速度。

三、观测方法

1. 实验场地的选择

测量地点合适与否,将直接关系到测量结果的可靠性和代表性。最重要的是场地附近气溶胶水平分布应相对均匀,所以测点离局地污染源要有足够的距离。为了减少地面扬尘的影响,要求测点尽量远离公路。

根据以上要求,我们在昆明地区的测点设在昆明磷肥厂(污染源)以东约 2 公里的大河尾村附近,梯度测量铁塔立在农田之中,当时农田上种的是蚕豆,豆苗高度约为 10—20 厘米。除塔的北面 40 米处有些平房和树木(约 3 米高)外,四周比较开阔,既没有大的污染源,也没有繁忙的公路。

在太原地区的测量中,我们将测点设在市南郊区的观象台内,除了吹东北风外,对其它风向场地比较开阔,下垫面为草地,草高约 30 厘米,周围 1 公里内为稻田,而南侧和西侧有 1.2 米高的围墙,距观测塔 30—50 米。观测的主导风向(来自市区的北风)5 公里范围内没有工厂和其它大型污染源。

2. 仪器

进行这种梯度和通量观测的时候,要求仪器具有较高的精度和较快的响应时间。在大气特性测量方面,我们采用三分量超声风速温度仪测定垂直动量通量 $\overline{w'u'}$ 和热量通量 $\overline{w'T'}$; 用防辐射通风铂丝电阻温度计测量温度梯度。

在大气气溶胶测量方面,对于直径为 0.01—1 微米的微细粒子,采用 TSi-3030 型静电气溶胶粒谱仪分 9 档测量;对于直径为 0.5—47 微米的粗粒子,采用 F-100 型激光粒谱仪分 30 档测量。

为了减少塔体对仪器的影响, 风和温度的传感器都装在水平横臂上伸离塔体一定距离。如昆明塔的边宽为 3.6 米, 横臂的长度为 3 米, 并指向与当地盛行风垂直的方向。

风速和温度脉动每 3 秒钟(昆明)和 1 秒钟(太原)采样一次, 测量精度分别为 ± 0.01 米/秒和 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 。风速、温度和气溶胶浓度梯度测量的取样时间昆明为 20 分钟左右, 太原为 2 分钟左右。

在昆明的测量中, 将气溶胶仪器固定在一个可以上下升降的吊兰内, 逐层测量; 在太原的测量中, 为了保证更好的时间同步性, 在两个不同高度上分别安装了两台 F-100 型和 TSi-3030 型粒谱仪。所有仪器都是完全自动化的, 由微电脑控制, 数据记录在磁带上或由打印机打印输出。

两地测量均在常通量层内完成, 昆明观测塔高 27 米, 在 3, 7, 16 和 22 米四个高度上装有铂丝温度仪; 在 4.7, 10.5 和 23 米上装有超声风速温度仪。太原观测塔高 22 米, 在 5 米, 20 米高度上分别装有超声风速仪和粒谱仪。

3. 资料处理

在昆明的观测实验中, 与超声风速温度仪的高度相应, 测量了三个高度的气溶胶浓度。每个高度上的浓度值均为上升过程中的测量值与下降过程中的测量值的平均。上一次测量需时二十分钟。在处理资料时, 为了与太原地区所取得的实验资料进行比较, 我们只处理了第一层与第三层(4.7 米层和 23 米层)资料, 即公式(4)中 $C(z_2)$ 为 23 米层的浓度, $C(z_1)$ 为 4.7 米层的浓度。平均浓度 $\bar{C}(x)$ 为 $\frac{1}{2} [C(z_2) + C(z_1)]$ 。

为了配合浓度资料, 用超声风速温度仪计算通量 $\overline{u'w'}$ 时, 样本时段也取 20 分钟。虽然我们的实验层次都在常通量层内, 但各层的通量的实测值并不完全一致。因此公式(4)中的 $\overline{u'w'}$ 取值 $\frac{1}{2} [(\overline{u'(z_2)w'(z_2)}) + (\overline{u'(z_1)w'(z_1)})]$, 而 $u(z_2), u(z_1)$ 分别为 23 米层与 4.7 米层的 20 分钟的平均风速。

在太原的观测实验中, 两套气溶胶的仪器分别固定在 5 米, 20 米两个高度, 同时同步观测。为配合浓度资料, 通量与平均量的观测均定为 2 分钟。具体的算法与昆明地区实验的数据处理一样。

四、结果分析

如前所述, 对气溶胶微粒进行沉降速度的野外测量, 除了对仪器有较高的要求外, 还对气象条件有很大的依赖关系, 只有在近地面层中浓度净通量向下时的测量资料, 才能作沉降速度的计算。这种涡旋相关测量气溶胶沉降速度的方法, 在技术上比较复杂, 虽是首次尝试, 但基本成功, 测得了复杂地形条件下各种粒径大小的气溶胶的干沉降速度。

昆明的测量从 1984 年 11 月 24 日起, 到 12 月 3 日止, 共计 10 天, 测量期间, 当地天气晴好, 一般仅在午后有少量积云和层积云, 测点多 wsw 风, 风速为 0—4 米/秒, 平均值为 1.9 米/秒。塔上实测的温度垂直廓线如图 1 所示, 可见近地层大气处于弱稳定到中性状

态, 测点附近的摩擦速度 $V_* = 0.4 \sim 0.5$ 米/秒。

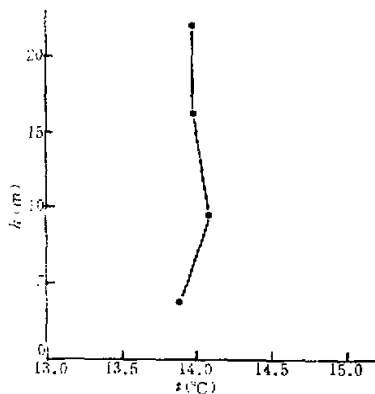


图 1 平均垂直温度廓线

太原的测量时间为 1985 年 6 月 3 日—6 月 23 日共观测 20 天, 观测期间天气晴朗, 平均风速一般在 3 米/秒以下, 测点附近的地面摩擦速度 $V_* = 0.4 \sim 0.7$ 米/秒。

图 2 给出了两地野外实测的干沉降速度, 表 1a, b 和 c 还分别列出了太原地区不同大气状态下各种模态气溶胶粒子的沉降速度。

由图 2 和表 1 可以得到以下初步结果:

1. 气溶胶粒子的干沉降速度与粒子的直径有密切关系。对于较大的粒子(直径 > 2 微米), 随着粒径增大, 沉降速度明显增大。这是由于粒子越大, 重力沉降作用越大之故。当粒子直径大于 5 微米或 10 微米时, 粒子的干沉降速

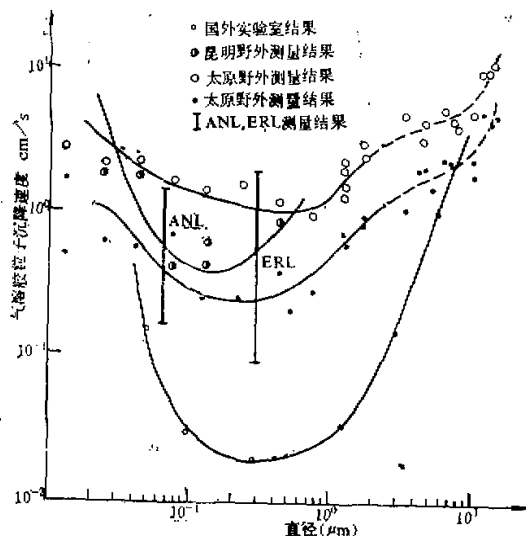


图 2 气溶胶沉降速度与粒径的关系

度完全受重力沉降作用所控制。对于直径小于 0.1 微米的爱根核粒子, 随着粒径减小, 其沉降速度反而增大。这是因为很小的粒子重力沉降作用虽然很小, 但静电沉降作用却比较大, 而且粒子越小, 静电作用越大。野外实际测量的结果还表明, 这种粒子的干沉降速度随粒径减小而增大的速率, 比实验室的结果要小得多。

由于上述两种机理作用的结果, 使得直径在 0.1 微米—2 微米的积聚模态粒子的干沉降速度达到了极小值。这一结论与 Schmel 1973 年在风洞中的测量结果基本一致(图 2)

表 1 太原地区各种模态气溶胶粒子的干沉降速度 (厘米/秒)

(a) 爱根核模态粒子 (0.01—0.1 微米)						
干沉降速度 (cm/s)	粒径 (μm)	0.013	0.037	0.042	0.075	平 均
观测时间						
19:00—06:00		1.10	0.62	0.58	0.68	0.76
06:00—17:00		2.92	2.19	2.21	1.56	2.22
平 均		1.71	1.40	0.74	1.12	1.48

(b) 积累模态粒子 (0.1—2 微米)						
干沉降速度 (cm/s)	粒径 (μm)	0.137	0.237	0.42	0.75	1.25 1.75 平均
观测时间						
19:00—06:00		0.26	0.24	0.38	0.28	0.64 0.85 0.44
06:00—17:00		1.41	1.55	1.18	0.92	1.70 2.60 1.56
平 均		0.84	0.89	0.78	0.62	1.17 1.73 1.0

(c) 粗模态粒子 (2—10 微米)						
干沉降速度 (cm/s)	粒径 (μm)	3.50	4.75	6.50	7.50	8.0 10.5 平均
观测时间						
19:00—06:00		1.0	1.95	1.45	2.25	2.20 2.10 1.83
06:00—17:00		4.75	3.55	5.0	4.3	3.8 4.7 4.35
平 均		2.88	2.75	3.23	3.27	3.0 3.4 3.09

中最下面的曲线)。但就绝对值来说要比实验室结果大得多。

2. 气溶胶粒子的干沉降速度与大气稳定度有密切关系。结果表明,在大气层结处于稳定的夜间和处于中性或不稳定的白天,气溶胶粒子干沉降速度随粒子大小的变化规律虽然相同,但沉降速度的绝对值却相差很大。即稳定层结下各种粒径尺度的粒子的干沉降速度均比不稳定大气层结下的干沉降速度小几倍到一个数量级,具体数据见表 1。

这种结果是完全合乎规律的,因为稳定大气的湍流运动比不稳定大气的湍流运动弱得多,即 $\overline{w'u'}$ 小;而平均风速在贴地常通量层中的垂直切变却比不稳定大气强得多,即 $u(z_2) - u(z_1)$ 这项大,所以此时沉降速度自然就小,反之亦然。由于两种状态下的干沉降速度相差较大,所以在实际应用中需加以区别。

3. 气溶胶粒子的干沉降速度与下垫面状态有关。由图 2 清楚地看到,不论是国内还是国外,野外测得的沉降速度都比室内风洞中测得的沉降速度大得多。野外测量的结果又因地面粗糙度不同而显出差别。我国太原和昆明地区测得的气溶胶粒子的沉降速度均

比美国阿贡国家实验室 (ANL) 和环境研究实验室 (ERL) 测得的结果大一些。这是因为美国的测量是在平坦地区气象塔上进行的, 所以沉降速度是应小些; 而昆明和太原测量地区的地形比较复杂, 所以沉降速度大些是合理的。

最后值得一提的是, 到目前为止, 国外对气溶胶粒子沉降速度的测量虽不少, 但还没有系统一致的测量结果, 特别是对复杂地形和大面积水域条件下的实际测量更少, 而这种下垫面条件下干沉降的测量对当前环境研究有着重要的现实意义。

致谢: 中国科学院大气物理研究所和中国环境科学院大气环境研究所部分同志参加观测工作, 太原环科所和云南环科所给予大力协助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] David Fowler, 1980, Removal of sulphur and nitrogen compounds from the atmosphere in rain and by dry deposition, Ecological impact of acid precipitation, Proceedings of an international conference, Sandefjord, Norway, March 11—14.
- [2] McMahon T. A. and Denison P. J., 1979, Empirical atmospheric deposition parameters—A survey, *Atmospheric Environment*, Vol. 13, 571—585.
- [3] Sievering H., 1982, Profile measurements of particle dry deposition Velocity at an air-land interface, *Atmospheric Environment*, Vol. 16, 301—306.

THE MEASUREMENTS OF AEROSOL DRY DEPOSITION

Hong Zhongxiang Zhou Leyi Shen Jianqing

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Zhao Deshan Han Yingjian Zhou Zhou Tang Dagang Jiang Zhenyuan

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences)

Abstract

The atmospheric aerosols and meteorological factors over the complex areas near the city of Kunming and the city of Taiyuan were measured synchronously in 1984 and 1985, and dry deposition velocities of three nature mode aerosols with diameter distribution from $0.01\ \mu\text{m}$ to $10\ \mu\text{m}$ were obtained. The results show that dry deposition velocities of aerosols are closely related to the diameters of the aerosols. Deposition velocities of coarse particles in the range $>2\ \mu\text{m}$ increase quickly with increase of the diameters while deposition velocities of Aitken nuclei particles in the range $<0.1\ \mu\text{m}$ increase with the decrease of the diameters, and deposition velocities of accumulation mode particles in the range of $0.1\text{--}2\ \mu\text{m}$ turn out to be the minimum values. Although the laws of variation correspond fairly to the results measured by foreign laboratories in tendency, the absolute values are much larger. In addition, deposition velocities are also related to the atmospheric stability and the surface roughness.