

二氧化硫干沉降的测量

范思泓 洪钟祥 周乐义 沈剑青

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

通过在成都市郊对二氧化硫气体浓度和气象要素进行同步梯度观测, 得到二氧化硫的干沉降速度, 总结了影响二氧化硫干沉降速度的主要因子及日变化规律, 发现其干沉降速度白天大于夜间, 并在白天午后15时前后出现极大值, 夜间2时前后出现极小值, 平均沉降速度为1—1.5 cm/s, 且随稳定度的增加干沉降速度减小。

关键词: 二氧化硫; 干沉降速度; 稳定度; 粗糙度。

一、引 言

作为含硫燃料燃烧的必然生成物二氧化硫广泛分布于大气之中, 是指示大气污染程度的重要参量, 对人类生活、工农业生产均有一定影响, 所以二氧化硫扩散、迁移和转化的研究是环境科学的重要课题。二氧化硫同大气中其它一些污染物一样在其传输过程中, 沉降是主要的物理机制之一, 也是空气中污染物清除的主要过程。污染物随降水降落到地面的湿沉降过程, 只在一定的空间和时间内发生, 沉降量相对集中, 在没有降水的条件下, 由于湍流运动的作用, 污染物在大气中输送、扩散时, 不断地被下垫面(包括陆面、水面和植被等)吸收, 形成向地面持续的迁移过程, 这种无降水参与的迁移过程叫干沉降。虽然干沉降没有湿沉降集中, 但以其地域广和持续时间长为特点, 据估计二氧化硫干沉降的总量与湿沉降量相当^[1], 在干旱少雨地区干沉降更显得重要, 故而人们对二氧化硫干沉降的研究给予高度重视^[2]。

干沉降的野外测量是研究干沉降规律的直接有效的手段, 由于污染物测量仪器设备条件和气象背景测量的限制, 干沉降的测量研究经历了曲折的发展过程。科学工作者先后采用替代表面、收集容器和烟云衰减等测量方法, 经过实际测量研究发现替代表面和收集容器不够精确, 它们不能代替我们感兴趣的表面和过程, 而烟云衰减测量因大气成分化学反应的干扰和烟云扩散模式的粗糙而很少应用。近10年来随着科学和技术的发展, 逐步发展了梯度测量法, 此法可不受化学反应的干扰, 直接测量总的沉降效应, 虽是单点测量但亦可获得有代表性的数据。当然最直接最有效的方法是脉动通量法, 此方法对仪器要求极高^[3], 目前只有少数污染物测量仪器达到要求。近年来虽然已经有人开始进行二氧化硫的脉动通量测量的实验, 但因条件要求太高, 还处于实验阶段。本文采用梯度测量法得到了一些初步结果^[4, 5]。

1992年2月2日收到, 3月24日收到修改稿。

二、原理及测量方法

污染物从低层大气到下垫面的迁移,主要有三种物理过程:(1)污染物从大气边界层(厚度约 1 km)中通过湍流输送作用,向地表粘性的片流层(厚度约 1—2 mm)迁移;(2)由于片流层湍流消失,污染物通过分子扩散作用,向下输送到表面;(3)表面的吸附作用,这里的表面指植被、土壤、水面和雪面等等。对这三个过程很难做分离测量,对于应用来讲,只需测出其总结果,即二氧化硫向下的通量,由于二氧化硫的浓度通量正比于同高度的二氧化硫气体浓度,即二氧化硫通量等于二氧化硫浓度乘以某一系数,此系数称为二氧化硫的干沉降速度,由此可得

$$F(z) = v_d(z) \times C(z),$$

其中 F 是二氧化硫的垂直通量(向下为正); C 是二氧化硫的浓度; v_d 为二氧化硫干沉降速度。

本文采用的梯度测量法是通过近地面层中对二氧化硫浓度和气象要素(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计算沉降速度,基本原理如下:

当观测点附近没有局地污染源,二氧化硫在水平方向分布相对均匀时,根据 Herman Siering 的垂直通量等式,有

$$F(z) = k(z) \frac{dc}{dz} + v_*(z) C(z),$$

其中 k 是质点涡旋扩散系数 (cm^2/s), v_* 是摩擦速度 (cm/s), z 是测量高度 (m)。

上式右边第一项为梯度输送项,第二项为非扩散作用项。在近地面层中,控制二氧化硫浓度垂直分布的主要机制是湍流输送,所以

$$k(z) \frac{dc}{dz} \gg v_*(z) \times C(z),$$

故而小量非扩散作用项可略去。

由于不能对二氧化硫涡旋扩散系数进行直接测量,根据大气扩散的梯度输送理论,我们引入

$$F_m(z) = k_m(z) \frac{dC}{dz},$$

其中 k_m 是湍流动量交换系数, F_m 是动量通量, C 是浓度。

由于二氧化硫气体与空气的动量、热量扩散特性近似相同,作为近似,我们假设二氧化硫气体的湍流交换系数等于湍流动量交换系数,得到

$$v_d(z) = \frac{F(z)}{C(z)} = \frac{k_m(z)}{C(z)} \cdot \frac{dC}{dz}.$$

写成与观测资料对应的有限高度间隔梯度的形式,有

$$v_d = \frac{\overline{u'(z)w'(z)}}{\overline{u(z_2) - u(z_1)}} \cdot \frac{C(z_2) - C(z_1)}{\overline{C(z)}},$$

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, $\overline{C(z)}$ 是两高度间的平均浓度. 因此, 只需测得不同高度上的平均风速、二氧化硫浓度和动量通量, 便可得到二氧化硫的干沉降速度.

为使取得的数据有代表性和可靠性, 必须注意到局地污染源的影响. 测点既要选择平坦开阔的场地, 又要离主要的污染源有足够的距离, 使污染物浓度在水平方向的分布相对均匀.

本次实验于 1989 年 9 月在成都进行, 根据成都地区 9 月的盛行风——北偏东风, 我们选择了成都南郊偏西的南神仙树为观测地点, 并竖起一座 20m 高的专用测量铁塔.

观测点正北和东北为刚收割过的稻田, 地势平坦, 东南方 40m 外为农家平房, 西北方 100m 外有外贸公司的六层仓库, 西南为外贸公司的冷库, 附近 4km 内无大污染源, 观测点正好处于两种不同下垫面的交界处.

对于大气特征的测量, 采用三分量超声风速温度仪测定垂直动量通量 $w'u'$, 用辐射通风铂丝电阻温度计测量温度梯度, 用螺旋桨式三分量风速仪测量平均风速. 在浓度测量方面, 使用美国 Monitor-Labs 公司的 8850 荧光二氧化硫仪, 并以该公司的 8550 动态校准仪进行校准, 使之符合测量的精度要求.

我们采用 6.2m 和 15.8m 两个高度的二氧化硫浓度以及对应的超声风速温度资料进行浓度通量和动量通量的计算, 取样时间为 20 分钟.

为减小仪器误差对实验精度的影响, 我们使用一台二氧化硫仪在两个高度上以 30 分钟间隔反复取样, 从而大大减小仪器的偶然误差.

由非线性函数的方差合成定理^[6], 得

$$\sigma_{\phi}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \cdots + \sigma_m^2,$$

其中 σ_{ϕ}^2 为方差总和, σ_i^2 ($i=1, \cdots, m$) 为各独立量对方差总和的贡献.

将本实验的各参量代入上式, 最后得到其误差传递公式, 由此计算出沉降速度 v_d 的误差:

$$\begin{aligned} \frac{\delta v_d}{v_d} = & \left\{ \left[\frac{\delta \overline{u'(z)w'(z)}}{\overline{u'(z)w'(z)}} \right]^2 + \left[\frac{\delta (u(z_2) - u(z_1))}{u(z_2) - u(z_1)} \right]^2 \right. \\ & \left. + \left[\frac{\delta (C(z_2) - C(z_1))}{C(z_2) - C(z_1)} \right]^2 + \left[\frac{\delta \overline{C(z)}}{\overline{C(z)}} \right]^2 \right\}^{1/2} \\ \approx & 30\% \end{aligned}$$

三、分析结果

1. 二氧化硫干沉降速度的周日变化

我们将测量各天的二氧化硫干沉降速度随时间的变化描绘成图 1 中的曲线.

从图中可以看出，二氧化硫干沉降速度有明显的日变化规律，白天(主要以15时为中心，从11时到21时)的二氧化硫干沉降速度大于夜间(主要以02时为中心，从21时到11时)，二段时间的二氧化硫干沉降速度出现了量级上的差异，白天二氧化硫干沉降速度为1—2cm/s，而夜间的二氧化硫干沉降速度大多小于0.5cm/s。在15时前后出现二氧化硫干沉降速度的极大值，数值一般为2cm/s，有时可达3—4cm/s；相应地可以看出，在夜间02时前后出现二氧化硫干沉降速度的极小值，其数值小于0.1cm/s。近年来 Hicks^[7] 采用吸收系数法，Nestlen^[4] 采用涡旋通量法测得的实验结果也得出了相似的日变化规律，即二氧化硫干沉降速度白天大于夜间。

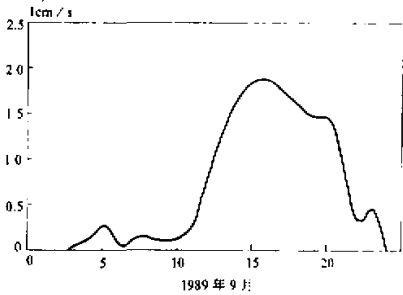


图1 二氧化硫干沉降速度的日变化

将本次观测各天的二氧化硫干沉降速度进行平均，即对图1进行面积平均，得到成都郊区二氧化硫干沉降速度的平均值为0.8cm/s。

2. 二氧化硫干沉降速度随稳定度的变化

通过对脉动风速温度资料的计算可以得出 Monin—Obukhov 长度 L ，用 M—O 长度 L 与稳定度的关系(见表1)，对实验测量过程中的大气条件进行分类。

表1 稳定度等级与 Ri 及 L 的关系

稳定度	Ri	L
A 强不稳定	-1.0—0.7	-2—-3
B 中等不稳定	-0.5—0.4	-4—-5
C 弱不稳定	-0.17—0.13	-12—-15
D 中性	0	∞
E 弱稳定	0.03—0.05	35—75
F 稳定	0.05—0.11	8—35

将各天计算得到的二氧化硫干沉降速度按其取样时段内的稳定度分类，在各稳定度下平均值见表2。

表2 二氧化硫干沉降速度 (cm/s) 随稳定度变化

	A	B	C	D	E	F
9 日				0.85	0.66	0.142
10 日			2.39	1.06		0.183
11 日			1.15	1.033		0.1175
12 日			2.37	0.80	0.75	0.20
13 日			2.20	1.01		0.02
14 日	4.04		3.26	1.06		0.08
15 日				0.60	0.164	0.15
16 日			1.19	1.00		

由表 2 所示, 二氧化硫干沉降速度随稳定度的增加而减小, 即大气状态越稳定, 二氧化硫干沉降速度越小, 大气状态越不稳定, 二氧化硫干沉降速度越大, 且数值差距较大. 这是由于大气越稳定, 湍流运动越弱, 湍流通量也就越小, 而平均风速在贴地面常通量层中的垂直切变却比不稳定时强得多, 所以二氧化硫干沉降速度在大气稳定时小, 而在不稳定时大.

3. 二氧化硫干沉降速度受下垫面的影响

Sehmel 和 Hodgson^[8] 在室内风洞实验中得到了干沉降速度随粗糙度增大而增大的

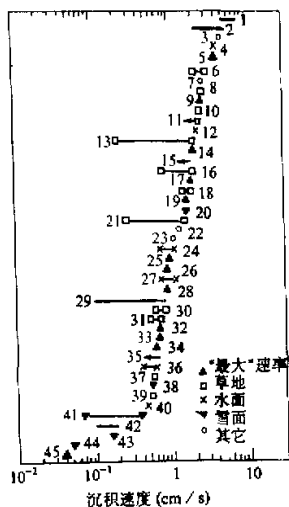


图 2 不同沉积表面上实验测量的 SO_2 沉降速度范围

规律. 本次实验受到了场地的限制, 不可能有许多下垫面即粗糙度不同的二氧化硫干沉降速度, 为此我们引用 Sehmel 收集的结果如图 2. 从图中可以看出尽管森林比草地和水泥地、水面粗糙度大, 但森林(如图上点 15、点 35)并不比草地(如图上点 6、点 11 等)干沉降速度大, 反而比草地的干沉降速度小. 类似地, 森林、草地、土壤、水泥、雪、水等表面上的二氧化硫干沉降速度在图中并非按粗糙度的大小有规律地排列, 而是相互混杂地排列着, 说明野外实地测量要比风洞实验复杂得多, 影响因素不只是粗糙度. 本次实验点处在两种不同下垫面的交界, 不同的风向代表了不同的下垫面, 将两种下垫面(粗糙度)时二氧化硫干沉降速度列于表 3. 发现两种下垫面时二氧化硫干沉降速度无明显差异.

综合国内外的二氧化硫干沉降的野外实验数据, 发现在野外实地观测时粗糙度的影响无法明显看出, 这可能是由于地面吸收、湿度等未知因子的影响结果, 由于测量条件的限制这方面的工作有待进一步研究.

表 3 不同下垫面的二氧化硫干沉降速度 (cm/s)

	A	B	C	D	E	F
稻田			2.39	0.96	0.66	0.163
低矮建筑	4.04		2.06	0.903	0.46	0.114

参 考 文 献

- [1] Fowler, D., 1978, Dry deposition of SO_2 on agricultural crops, *Atmospheric Environment*, 12, 369—373.
- [2] 洪钟祥等, 1987, 气溶胶粒子干沉降的测量, *大气科学*, 11(2), 138—144.
- [3] 李宗恺等, 1985, 空气污染气象学原理及应用, 气象出版社, 371—379.
- [4] Nesten, M. G., 1988, *Acid Deposition at High Elevation Sites*, Kluwer Academic Publishers, 569—582.
- [5] 袁模英, 1986, 用间接浓度法测量干沉积通量, *大气科学*, 10(4), 357—370.

- [6] 肖明耀等, 1985, 误差理论与应用, 计量出版社, 92 — 97.
- [7] Hicks, B. B., et al., 1988, Acid Deposition at High Elevation Sites, Kluwer Academic Publishers, 541 — 552.
- [8] Schmel, G. A., et al., 1978, PNL-SA-6721, 44.

The Measurement of SO₂ Dry Deposition

Fan Sihong, Hong Zhongxiang, Zhou Leyi, Shen Jianqing

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

The gradients of the SO₂ concentration and other meteorological factors were measured at the suburb of Chengdu in 1989. Then the velocity of SO₂ dry deposition is calculated. The velocity of the SO₂ dry deposition during daytime is larger than that during night. The maximum value is found at about three o'clock in the afternoon and the minimum value is at about two o'clock at night. The average value is about 1—1.5 cm/s. The velocity of SO₂ dry deposition decreases when the atmospheric stability increases.

Key words: SO₂ velocity of dry deposition; Atmospheric stability; Surface roughness.