

中国东部地区 SO_2 , SO_4^- 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 干沉降速度的季节变化*

毛节泰 李建国

(北京大学地球物理系, 北京, 100871)

摘 要

使用中国东部及其邻近地区各主要台站 1992 年全年 00 点和 12 点(GMT)地面及探空资料, 由中尺度气象预报模式 M M 4 产生中国东部地区地面以上大约 40m 高度(最低模式层)处二维温度、湿度和 wind 场, 使用污染物干沉降模块及该地区下垫面类型资料, 计算出了该地区 SO_2 , SO_4^- 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 全年干沉降速度的区域分布和季节变化。结果表明, 由于受气象条件和下垫面类型的综合影响, 3 种污染物的干沉降速度有明显的变化。对 SO_2 , 全年区域平均极小值为 0.088cm/s, 极大值为 1.275cm/s, 平均值为 0.430cm/s; 对 SO_4^- , 分别为 0.014cm/s, 0.287cm/s 和 0.118cm/s; 对 $\text{HNO}_3(\text{g})$, 分别为 0.060cm/s, 5.250cm/s 和 1.123cm/s。 SO_2 干沉降速度极大值分布在巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠一带, 对 SO_4^- 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$, 除在上述沙漠地带有一极大值区域外, 在靠近四川的云贵高原尚有另一极大区。对 1992 年全年来说, SO_2 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 干沉降速度极大值均出现在七月份, 分别为 0.552cm/s 和 1.518cm/s; 而对 SO_4^- , 干沉降速度极大值出现在九月份, 其值为 0.096cm/s。这些值均在实测范围内。

关键词: 污染物, 干沉降, 输送阻抗。

1 引 言

许多研究表明, 干沉降在污染物清除过程中与湿沉降有同等的重要性, 特别是对干旱少雨地区尤显重要(例如 Garland J. D^[1]; Galloway J. N 等^[2]; Shannon J D^[3]; Lindberg S E 等^[4], 污染物干沉降因受气象条件和地面类型的影响而有明显的时空变化, 对其研究已受到人们的普遍关注。Sheih 等^[5]使用在理论研究和野外测量的基础上提出的参量化方程, 在假定稳定性和风速具有稳定的特性条件下, 使用中尺度传输模式得到了美国东北部污染干沉降速度场。C. J. Walcek 等^[6]人使用区域地面类型和气象资料, 研究了美国东部和加拿大东南部地区的 SO_2 , SO_4^- 和 HNO_3 的干沉降速度 72h 的时空变化。在 C. J. Walcek 等^[6]工作的基础上, 根据中国东部地区下垫面特点, 并使用该地区及其附近主要气象台站 1992 年全年常规气象资料以及 M M 4 中尺度气象预报模式, 计算出中国东部地区 SO_2 , SO_4^- 和 HNO_3 干沉降速度的全年区域分布和季节变化。

* 初稿时间: 1996 年 1 月 18 日; 修改稿时间: 1996 年 9 月 19 日。

资助课题: 国家 85 科技攻关 85-912-01-04。

2 大气污染物干沉降过程的物理分析和参量化数值计算模式

大气污染物的干沉降受许多因子所制约。这些制约因子大致可分为 3 类, 即大气特性、表面特性和污染物本身特性, 而每一类又包括许多因子。这些诸多因子以复杂的方式相互作用的结果构成了问题的极端复杂性。欲完整了解污染物干沉降的整个物理过程, 应将大气污染物的干沉降问题放在大气-表面-污染物整个系统中去考虑。

作为粘性流体的大气与表面相互作用的结果, 使表面上方大气呈现分层结构。直接受地表影响的一层大气为行星边界层, 它又可根据作用力情况分为 3 层: 最靠近地表的一层是粘性副层, 在它之上 50—100m 为近地层, 又称常通量层, 在近地层之上直至 1—1.5km 高度为埃克曼层。根据大气的这种分层结构, 常将大气污染物向地表的输送分为 3 个分过程。第 1 个分过程是污染物由上而下被带进粘性副层的过程, 称为空气动力学输送; 第 2 个分过程是污染物贯穿粘性副层的过程, 称为边界层输送; 最后是到达表面的污染物同表面的相互作用。在各分过程中污染物输送机制不同。

定量地描述污染物的干沉降常使用沉降速度或输送阻抗的概念。沉降速度 $v_d(z)$ 可写为

$$v_d(z) = - \frac{F}{c(z)} \quad (1)$$

这里 F 为沉降通量, 假设在一合适的高度范围内为常数; $c(z)$ 为高度 z 处污染物质量浓度, 负号表示向下的通量为负, 从而定义了向下的沉降速度为正。大部分模式化尝试都始于公式 (1)。输送阻抗是沉降速度的倒数。每个输送分过程都有其相应的沉降速度或输送阻抗。对上述 3 个分输送过程, 总的沉降速度并不等于各分沉降速度简单的线性迭加, 但总阻抗却等于 3 个分阻抗的串联, 即

$$r = r_a + r_b + r_c \quad (2)$$

这里 r_a, r_b, r_c 分别称为空气动力学阻抗、边界层阻抗和表面阻抗。这是一般用来计算污染物干沉降的所谓多阻抗模式。只要分别给出 r_a, r_b, r_c 的参量化表达式, 则可计算出污染物的干沉降速度 $v_d(z)$ 。

目前, 在污染物空气动力学输送的理论研究中完全是模拟空气动量的湍流垂直输送理论。对绝热大气, 由大气边界理论容易得到适用于气体和小粒子的空气动力学阻抗:

$$r_a(z) = \frac{1}{v_a(z)} = \frac{1}{ku^*} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (3)$$

及其浓度廓线:

$$c(z) - c_0 = - \frac{F}{ku^*} \ln \frac{z-d}{z_{0c}} \quad (4)$$

式 (3) 是 k 为 Kaman 常数, u^* 为摩擦速度, d 为零平面位移, 而 z_0 为污染气体和小粒子质量输送的粗糙度。式 (4) 中的 c 表示污染物浓度, z_{0c} 为一积分常数, 表示污染物的汇, 在这里浓度下降为 c_0 。

当考虑非绝热大气中浮力影响时, 需要进一步修改式 (3)。为了便于模式预报, 根据大

气边界层理论和实验的最新进展, 通常使用 Monin-Obukhov 长度 L 进行稳定度订正, 这时式(3)可直接写为

$$r_a(z) = \frac{1}{ku^*} \left[\ln \frac{z-d}{z_0} - \Psi_c \right] \quad (5)$$

Wesely 和 Hicks^[7] 给出稳定度校正函数为

$$\Psi_c = \begin{cases} -5\zeta & \text{稳定} \\ 0 & \text{中性} \\ \exp\{0.032 + 0.448\ln(-\zeta) - 0.090\ln(-\zeta^2)\} & \text{不稳定} \end{cases} \quad (6)$$

这里 $\zeta = (z-d)L$ 。

当同时考虑空气动力学输送时, 所有边界层中污染物输送机制的净效应可体现在方程(4)中污染物的汇 z_α 上。于是可认为在 $(z-d) > z_0$ 的区域受空气动力学的影响, 而在 $z_{0c} < (z-d) < z_0$ 的区域受边界层输送的影响。仿照方程(3), 可将边界层输送阻抗 r_b 定义为

$$r_b = \frac{1}{ku^*} \ln \frac{z_0}{z_{0c}} \quad (7)$$

一般情况下 z_{0c} 难以直接确定, 因此方程(7)不常被用来计算边界层阻抗。Hicks 等^[8] 人在野外研究的基础上, 对气体和小粒子因扩散输送到植被的情形提出一个关于 r_b 的简单表达式:

$$r_b = 2 \left(\frac{1}{ku^*} \right) \left(\frac{s_c}{p_r} \right)^{0.5} \quad (8)$$

这里 $s_c = vD_g$ 为 Schmidt 数, 而 $p_r = v/k$ 为 Prandtl 数, 其中 k 为热扩散系数, D_g 为污染气体分子扩散系数。

影响 r_c 的因子十分复杂, 涉及到表面特性、污染物特性和它们之间的相互作用, 因此处理起来十分困难。即使象二氧化硫这样已被广泛研究的气体, 到目前为止也没有什么令人满意的参量化表达式。原则上说来, 如果表面附近污染物浓度为零, 则表面阻抗为零, 若表面附近出现非零浓度时, 则 r_c 可表示为

$$r_c = - \frac{c_0}{F} \quad (9)$$

对植被那样的复杂表面, c_0 值往往难以确定, 所以方程(9)并不常被用来计算植被的 r_c 。

深入研究植被内污染特质量输送问题相当困难, 有些现象是这里所特有而不能用现时理论去解决的。目前对 r_c 的定量化计算一般是基于“大叶”模式(Hicks 等^[8]人), 即整个植被被看作一片巨大的叶子, 同时又将 r_c 分成若干分量, 主要是气孔阻抗, 叶肉阻抗和表皮阻抗。一般认为气孔阻抗与叶肉阻抗串联, 而与表皮阻抗并联。在这些阻抗的参量化方面人们曾作了大量工作^[9-10], 但从植被情况和气象资料目前尚不能预报叶肉阻抗和表皮阻抗。因此在美国 RADM(Regional Acid Deposition Model) 以及 C. J. Walcek 等人^[6] 的

工作中, r_c 是在实测资料基础上以列表方式进入计算污染物干沉降速度的模块中。本文参照 Walcek 表, 对其 r_c 值按日期数作加权平均后, 构造出中国东部地区 SO_2 的 r_c 表, 如表 1 所示。这里将中国东部地区下垫面类型分为 9 类, 即农田、草地、落叶林带、针叶林带、混合林和湿地、水面、沼泽或湿地、沙漠、热带或亚热带树林; 而季节划分为两类, 即夏半年和冬半年。

表 1 粗糙度 z_0 和 SO_2 的 r_c 值

表面类型	季节	$z_0(\text{cm})$	日射值 (Wm^{-2})			晚	表面潮湿
			> 400	200- 400	0- 200		
农 田	夏	3	172.5	200	243.75	400	25
	冬	0.1	75	77.5	81.25	87.5	62.5
草 地	夏	2	200	230	275	450	25
	冬	0.1	200	210	225	250	75
落 叶 林	夏	30	305	365	500	1000	125
	冬	30	775	800	850	1000	625
针 叶 林	夏	30	312.5	380	500	950	25
	冬	30	487.5	510	600	750	275
混 合 林 和 湿 地	夏	15	260	320	450	950	75
	冬	15	625	650	750	900	475
水 面	夏	0.0001	0	0	0	0	0
	冬	0.0001	0	0	0	0	0
沼 泽 或 湿 地	夏	2	62.5	70	81.25	100	18.75
	冬	0.1	87.5	90	93.75	100	68.75
沙 漠	夏	1	100	100	100	100	100
	冬	0.1	100	100	100	100	100
热带或亚 热带树林	夏	20	305	365	500	1000	125
	冬	20	260	320	450	950	75

对气态硝酸, 在任何条件下都令其 $r_c = 0$ 。

对于硫酸盐粒子, 按照 C. J. Walcek 等^[6]的处理, 将 r_b 和 r_c 结合在一起写为

$$v_{ds} = (r_b + r_c)^{-1} \quad (10)$$

v_{ds} 按稳定度参量化为:

$$v_{ds} = \begin{cases} u^* / 500 & \frac{Z}{L} \geq 0 \\ \frac{u^*}{500} \left[1 + \left(\frac{300}{-L} \right)^{0.6} \right] & \frac{Z}{L} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

在强不稳定条件下

$$v_{ds} = 0.0009u^* \left[\frac{p_{\text{H}}}{(-L)} \right]^{\text{滞}} \quad \frac{p_{\text{H}}}{L} < -30 \quad (12)$$

这里 p_{H} 为行星边界层高度。

以上方程中摩擦速度 u^* 和 Monin-Obukhov 长度 L 已由 Louis^[11] 根据 Businge 等^[12] 的实验观测参量化为:

$$u^* = \begin{cases} \frac{ku}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \left[\frac{1}{1 + 4.7R_b} \right] & R_b > 0 \\ \frac{ku}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \left[1 - \frac{9.4R_b}{1 + 7.4B} \right]^{\text{滞}} & R_b < 0 \end{cases} \quad (13)$$

这里

$$B = 9.4 \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right]^2 \left[R \frac{z}{z_0} \right]^{\text{滞}} \quad (14)$$

其中 R_b 为体理查孙数(bulk Richardson number):

$$R_b = \frac{gz(\theta_a - \theta_g)}{\theta_a u^2} \quad (15)$$

其中 g 为重力加速度, u 为风速, z 为计算干沉降速度时的高度, 而 θ_a 和 θ_g 分别为高度 z 和地面处的虚位温。

Monin-Obukhov 长度 L 由下式计算:

$$L = \frac{\theta_g u_*^2}{kgH} \quad (16)$$

这里 H 为通过最低大气层(由 MM4 模式确定)的虚位温通量, 使用 Louis^[11] 参量化公式:

$$H = \begin{cases} \frac{u\Delta\theta_v}{0.74} \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right]^2 \left[\frac{1}{(1 + 4.7R_b)^2} \right] & R_b > 0 \\ \frac{u\Delta\theta_v}{0.74} \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right]^2 \left[1 - \frac{9.4R_b}{1 + 5.3B} \right] & R_b < 0 \end{cases} \quad (17)$$

其中 $\Delta\theta_v = \theta_a - \theta_g$, 而 B 已由式(14)给出。式(13), (14)和(17)中的 z_0 为粗糙度, 对不同下垫面类型和季节, 参照 Roland B. Stull^[13] 已在表 1 中给出。

此模式的特点是可在特定的下垫面类型和结构条件下, 使用常规气象资料计算出中国东部地区一些污染物的干沉降速度。

3 污染物的选择及气象场的产生

大气污染物包括种类众多的痕量气体和具有不同物理、化学特性的颗粒物。在研究

它们的干沉降时存在的最大困难在于其中大部分物种的表面阻抗 r_c 不清楚,这无疑会影响对它们的干沉降速度的正确估计,所以目前尚不能讨论所有污染物的干沉降问题。这里仅选择了 3 种污染物,即二氧化硫,硫酸盐粒子和气态硝酸。这主要有两个考虑,一是在众多的大气痕量气体中,人们对二氧化硫的研究最为深入,其 r_c 有不同条件下的大量观测资料,可基本定量化进入模块加以计算。对其它一些气体,人们也提出了一些方法,如 J. S. Chang 等^[14]在三维欧拉酸沉降模式中曾涉及到种类众多的化学物种,但几乎都是以二氧化硫的 r_c 为基准,再乘以不同的订正因子后作为相应的化学物种的 r_c 。对这种处理方法, M. L. Weccely^[15]认为有失精确。他引入反应度和溶解度这两个因子,试图将干沉降的研究扩展到其它物质,但这需要亨利定律常数和和其它一些参数在不同植被条件下的精确数据,而这些数据的获得也是相当困难的。对于硫酸盐粒子,其尺度处于亚微米范围,而在此尺度范围内的粒子沉降可以忽略重力场的影响,这样则可选择适用于气体和小粒子的 r_c 的表达式,使具体的数值计算较为简单。对气态硝酸,因为它是一种化学活性气体,一般认为它的 r_c 为零。此外,从酸雨的角度来看,干沉降主要关心的是大气中的酸性物质,特别是强酸性物质。而二氧化硫是大气中形成强酸性气溶胶粒子的主要前置气体;另外,大气中主要的气体强酸是气态硝酸,它代表着一类化学活性物质的干沉降,随着中国交通事业的飞速发展,对它的研究有着巨大的潜在意义。这 3 种污染特质的干沉降曾被 C. J. Walcek 等^[6]处理过。

由第二节可以看出,在计算这 3 种污染物的干沉降速度模块中,需要首先确定的基本参量是摩擦速度 u^* 和 Monin-Obukhov 长度 L 。欲确定 u^* 和 L ,则需要在区域尺度范围内和处于常通量层内的某一高度上产生二维风场、温度场和湿度场。使用中尺度气象预报模式 MM4(使用高分辨率 PBL 模块)产生地面以上大约 40m 高度处(最低模式层)所需的二维气象场。这个高度处于常通量层内。这样便可计算此高度上二氧化硫、硫酸盐粒子和气态硝酸的干沉降速度。在具体计算干沉降速度之前,首先对 MM4 进行了验证,MM4 运行 24h 后与该时刻的实测值进行比较,发现在常通量层内,温度、位温和气压的相对偏差小于 10%,对风场,在部分区域风向偏差较大。

此外,行星边界层高度 p_{bl} 以及二氧化硫的 r_c 表中的日射值和使表面变潮湿的降水(包括对流性降水和非对流性降水)、露点温度等也都由 MM4 产生。需要指出的是表面变潮湿的条件,选为温度降到露点温度以下或雨点大于 0.1mm/h,这与文献[14]的处理一致。

在使用 MM4 时,区域网格中心定于 35 N 和 115 E,网格距 $\Delta x = \Delta y = 100\text{km}$ 。格点数为 31×37 ,即南北向大于东西向。整个网格地区覆盖了中国东部地区。

所用气象资料为 1992 年全年中国东部地区及其附近各主要气象台站逐日 00 点和 12 点(GMT)地面和探空资料。计算中假定 4 月 16 日至 10 月 15 日为夏半年,其余时间为冬半年。

初始气象资料经格式转换、检误后,使用 Cressman 逐步订正法水平内插到规则的模式网格上。这是在等压面上进行的。垂直方向上采用简单的线性、对数关系从 p 面内插到 σ 面上。水平插值后,采用整层无辐散处理作初始化以抑制重力外波。这样处理过的气象资料作为 MM4 输入边条件。

模式中在考虑地形影响时, 取经、纬各 1 的实际地形资料, 经客观分析内插到水平格点上。

值得指出的是, GMT 00 点和 12 点这两个时刻的气象资料计算得到的污染物的干沉降速度不能代表它们的日均值。这里使用 00 点气象资料, 经 MM4 作 24h 逐时预报, 计算出污染物干沉降速度逐时值, 以便求取其日均值。月平均值由 00 点和 12 点二瞬时值作加权平均得到。模式系统总框图如图 1 所示。

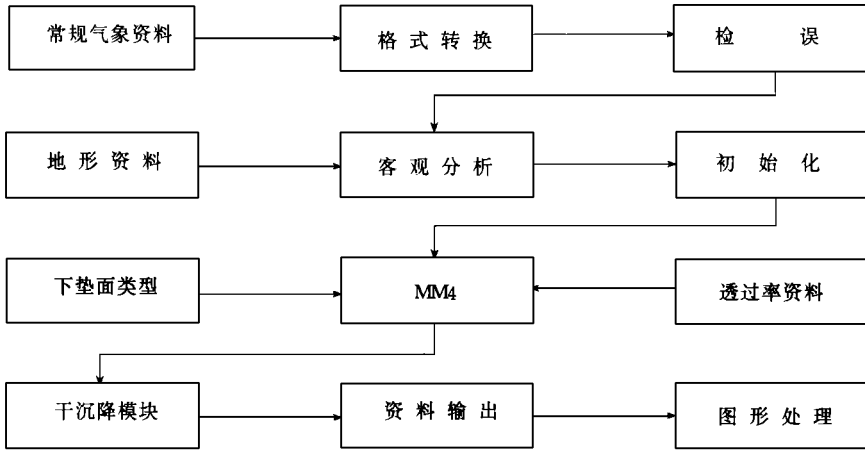


图 1 模式系统总框图

4 干沉降速度模式计算结果及分析

使用 1992 年全年中国东部地区及其周围各主要气象台站 00 点和 12 点 (GMT) 的地面和探空资料, 经客观分析和初始化处理后, 输入到中尺度气象预报模式 MM4 中, 产生出最低模式层 (地面以上高度大约 40m 处) 的二维温度场、湿度场、风场以及行星边界层高度, 计算出不同气象条件和下垫面类型下 SO_2 , SO_4^- 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 干沉降速度的日平均值, 进而得到中国东部地区 3 种污染物逐月、逐季和全年干沉降速度平均场分布和区域平均值的季节变化。从这些计算结果可以明显看出, 由于气象条件和下垫面类型及特性有明显的时空变化, 污染物干沉降速度也随之有明显的时空变化。

图 2 给出了中国南昌地区 1992 年 1 月 3 日 3 种污染物干沉降速度的日变化。该图表明, 3 种污染物的干沉降速度白天大于夜间, 极大值出现在北京时间 13 点左右。这主要是白天由于日射引起地面以上湍流混合增强的缘故。对于 SO_2 , 白天干沉降速度平均值为 0.620cm/s , 夜间平均值为 0.472cm/s , 极大值为 0.918cm/s ; 对于 SO_4^- , 分别为 0.061cm/s , 0.036cm/s 和 0.152cm/s ; 对于 $\text{HNO}_3(\text{g})$, 分别为 0.952cm/s , 0.583cm/s 和 1.581cm/s 。这里 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 的干沉降速度最大, 这主要是在模式计算中, 象 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 这样的化学活性气体对任何类型的下垫面都令其 r_c 为零的缘故。为了进一步说明干沉降速度与气象条件的关系, 图 3 和图 4 分别给出了 1992 年 1 月 3 日南昌地区摩擦速度 u^* 以及地面温度与最低模式层气温之差 ΔT_{ga} 的日变化。对照图 2 可看出, 污染物干沉降速度日

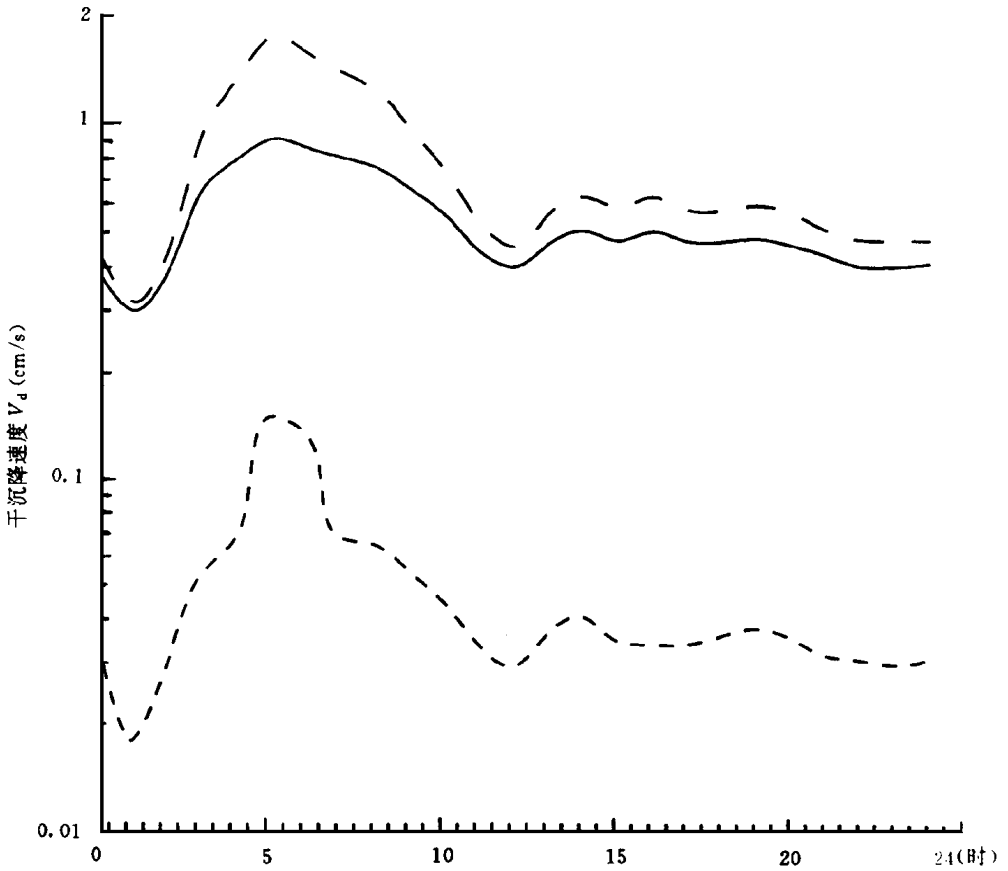


图 2 1992 年 1 月 3 日南昌 SO_2 (实线)、 SO_4 (短虚线)和 HNO_3 (长虚线)干沉降速度日变化

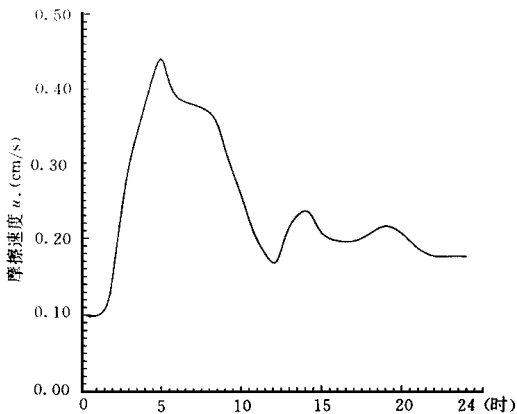


图 3 1992 年 1 月 3 日南昌摩擦速度 u_* 日变化

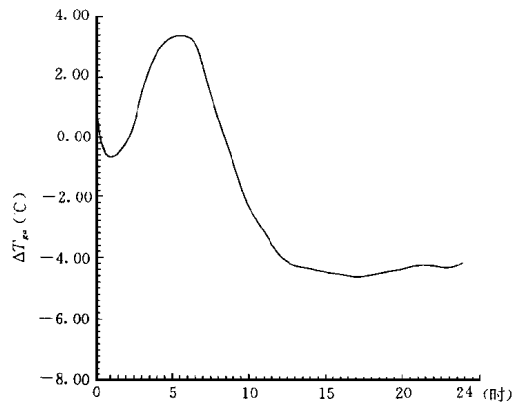


图 4 1992 年 1 月 3 日南昌地面温度与最低模式层气温之差的日变化

变化与 u^* , ΔT_{ga} 的日变化一致, 并且大体上说来, SO_4^- 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 的干沉降速度与 u^* 和 ΔT_{ga} 的日变化有更好的相关, 而 SO_2 的干沉降速度除与 u^* 和 ΔT_{ga} 相关外, 还受下垫面类型的影响。

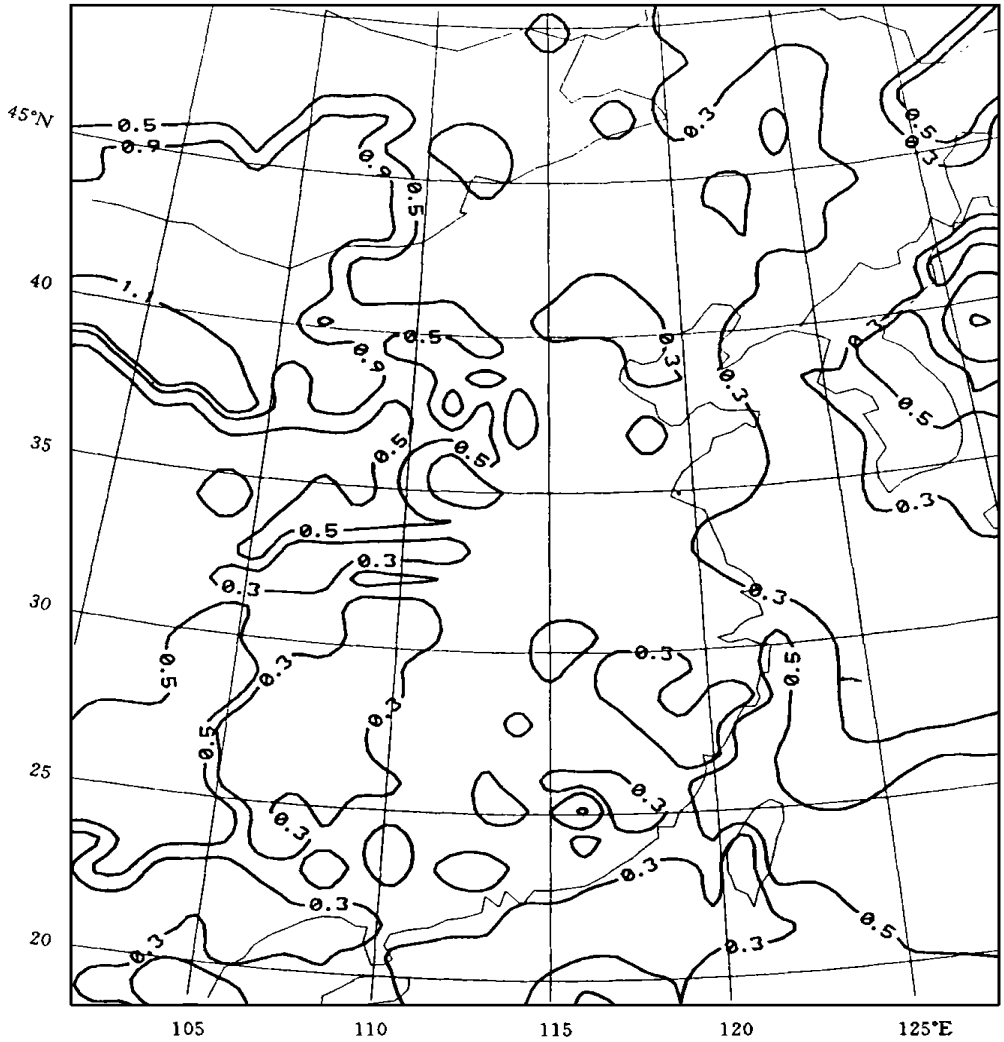


图5 中国东部地区 1992 年全年 SO_2 干沉降速度区域平均分布(单位: cm/s)

图 5、图 6 和图 7 分别给出了 SO_2 , SO_4^- 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 1992 年全年干沉降速度的区域平均分布。由图 5 可以看出, SO_2 干沉降速度极大值区域位于 40°N , 100°E 附近, 这里是巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠。图 8 给出了摩擦速度 u^* 1992 年全年区域平均分布。此图也表明在此区域 u^* 较大, 说明 SO_2 干沉降速度受地面类型和气象条件综合影响, 决定了这一地区 SO_2 干沉降速度较大。除这一地区 SO_2 干沉降速度稍大于 1cm/s 外, 中国东部其它地区的 SO_2 干沉降速度值均低于 1cm/s 。对 SO_4^- 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$, 其干沉降速度年平均区域分布有与 SO_2 类似的分布特点, 但它们受气象条件影响更为明显。除在 40°N , 100°E 附近

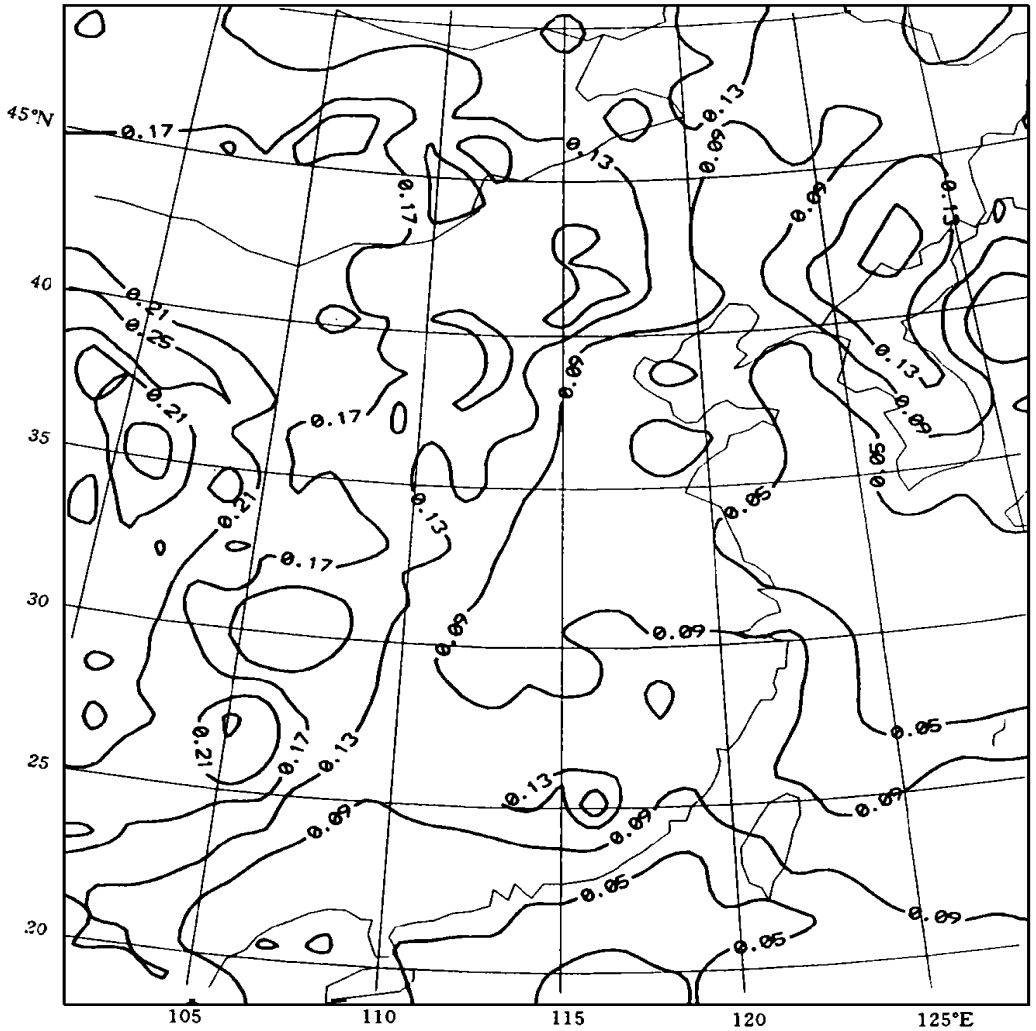


图 6 中国东部地区 1992 年全年 SO_4^{2-} 干沉降速度区域平均分布(单位: cm/s)

有一极大值分布外,在云贵高原北部四川一侧还有一极值区,这与 u^* 的年平均区域分布很好相关。

图 9 给出了 SO_2 , SO_4^{2-} 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 干沉降速度区域平均值的年变化。由该图可以看出,3 种污染物干沉降速度区域平均值的年变化呈多峰分布。对 SO_2 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$,极大值均出现在 7 月份,其值分别为 0.522cm/s 和 1.518cm/s ;而 SO_4^{2-} 的极大值出现在 9 月份,为 0.096cm/s 。

表 2 给出 1992 年 3 种污染物干沉降速度逐月区域平均值,其 1992 年四季和全年的特征值由表 3 给出。表 3 指出,在中国东部地区, SO_2 , SO_4^{2-} 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 的干沉降速度年平均值分别为 0.430cm/s , 0.118cm/s 和 1.123cm/s 。

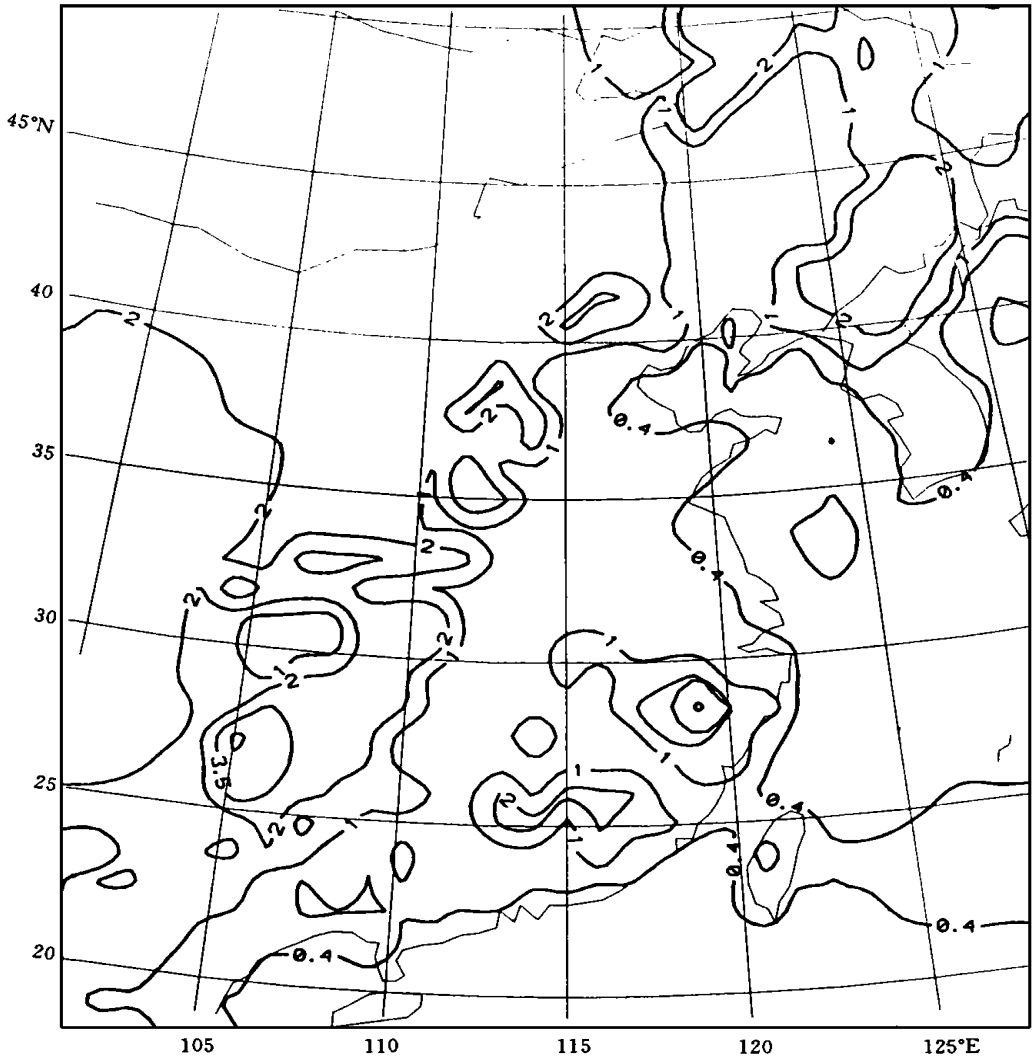


图 7 中国东部地区 1992 年全年 HNO_3 干沉降速度区域平均分布(单位: cm/s)

表 2 3 种污染物干沉降速度 1992 年逐月区域平均值(单位: cm/s)

月份	SO_2	SO_4^{2-}	$\text{HNO}_3(\text{g})$	月份	SO_2	SO_4^{2-}	$\text{HNO}_3(\text{g})$
一月	0.438	0.071	0.858	七月	0.522	0.089	1.518
二月	0.463	0.073	0.958	八月	0.363	0.089	1.171
三月	0.460	0.073	0.985	九月	0.369	0.096	1.175
四月	0.416	0.091	1.255	十月	0.456	0.094	1.046
五月	0.349	0.083	1.279	十一月	0.506	0.076	0.956
六月	0.356	0.088	1.260	十二月	0.462	0.070	0.886

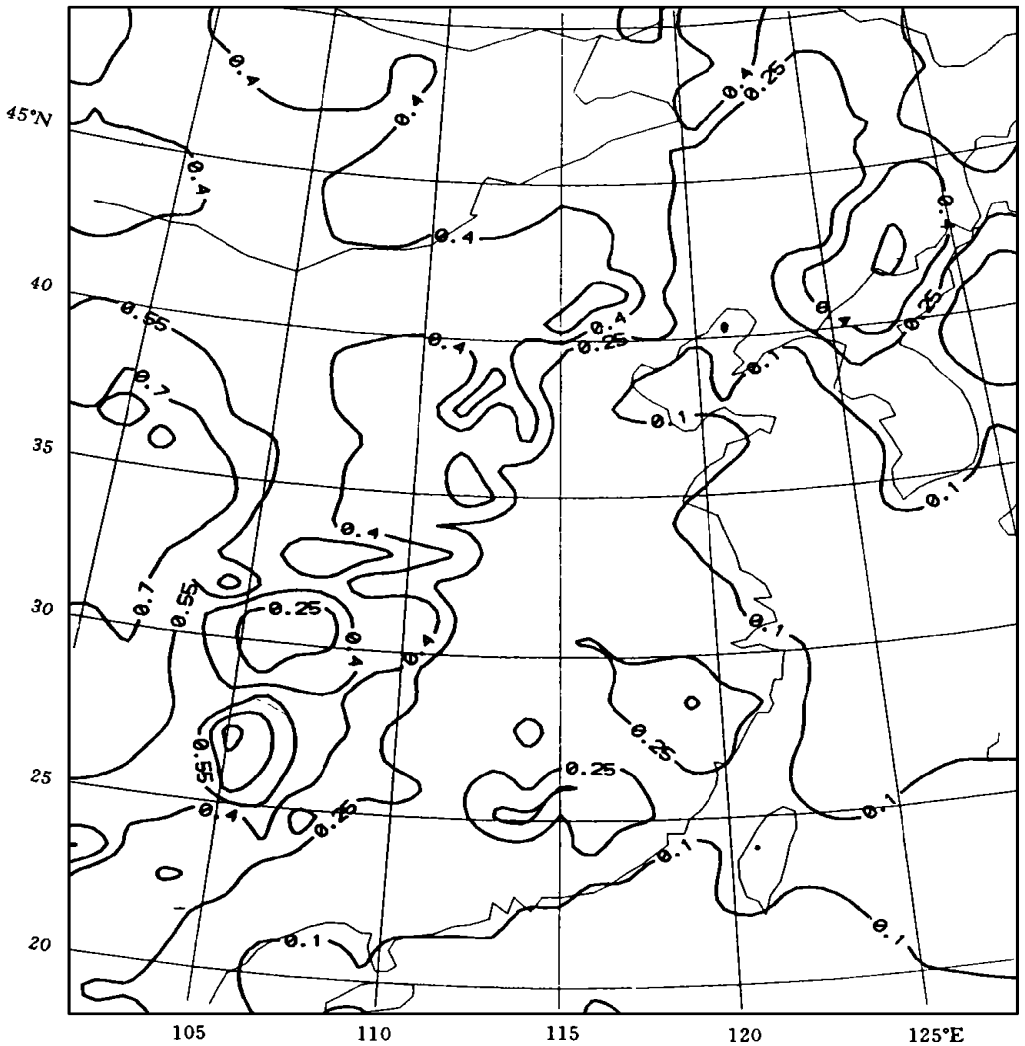


图8 中国东部地区1992年全年摩擦速度 u^* 、干沉降速度区域平均分布(单位:cm/s)

中国东部地区幅员辽阔,选择了7个代表性的地区,给出了那里 SO_2 、 SO_4^{2-} 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 干沉降速度的年变化,如图10—12所示。图中图例说明如下:1表示沈阳地区(东北),2表示兰州地区(西北),3表示四川内江地区(西南),4表示广州地区(华南),5表示上海地区(华东),6表示京津地区(华北),7表示武汉地区(华中)。从此3图可见,在中国兰州和内江地区,3种污染物干沉降速度均高于其它地区,其中尤以兰州地区为最。另外由此3图还可看出,对 SO_2 ,各地干沉降速度年变化规律极为相似。冬季干沉降速度大些,这主要是冬季 r_c 较小,而 SO_2 的干沉降速度与 r_c 有强的相关。但对 SO_4^{2-} 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$,各地干沉降速度年变化规律则不尽相同,这主要是各地气象条件年变化规律不同而引起的。

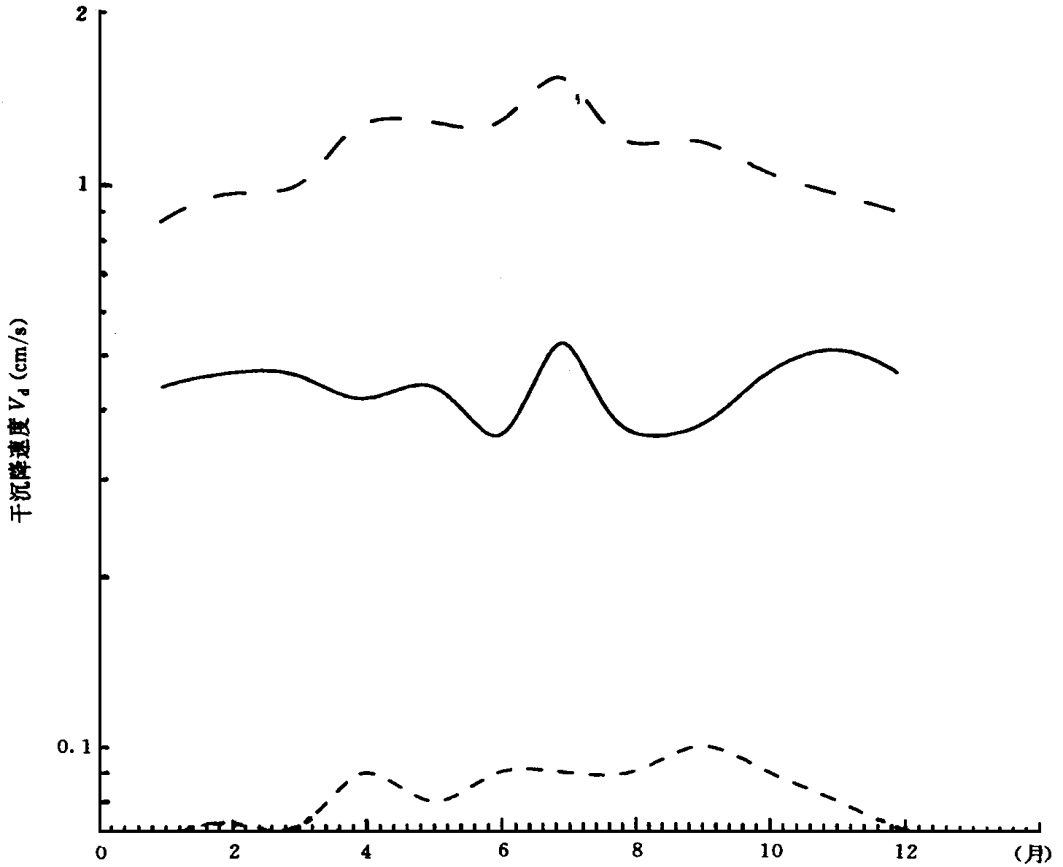
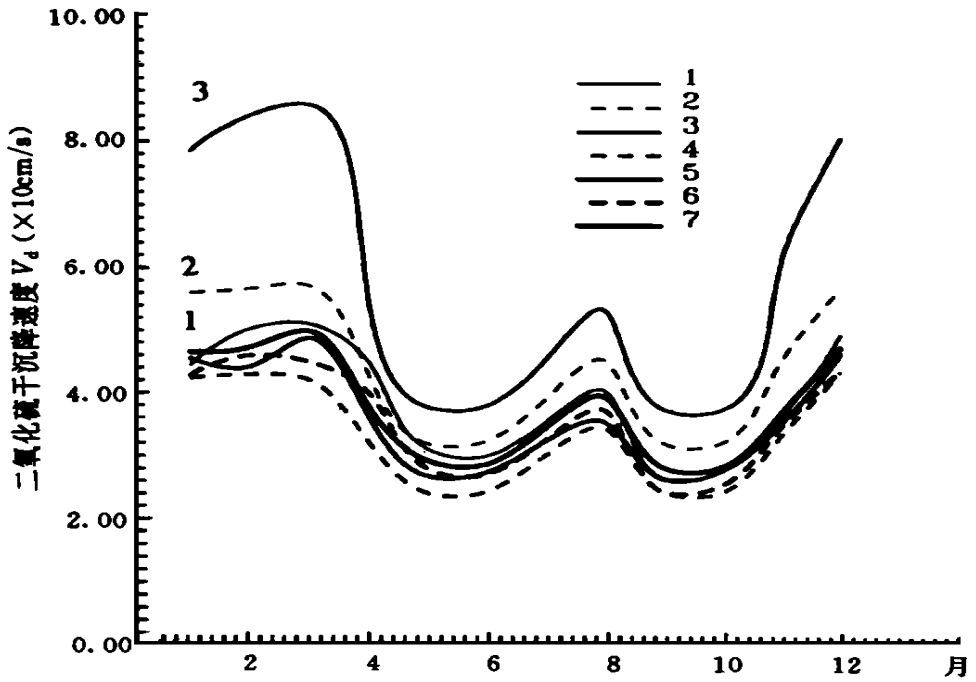
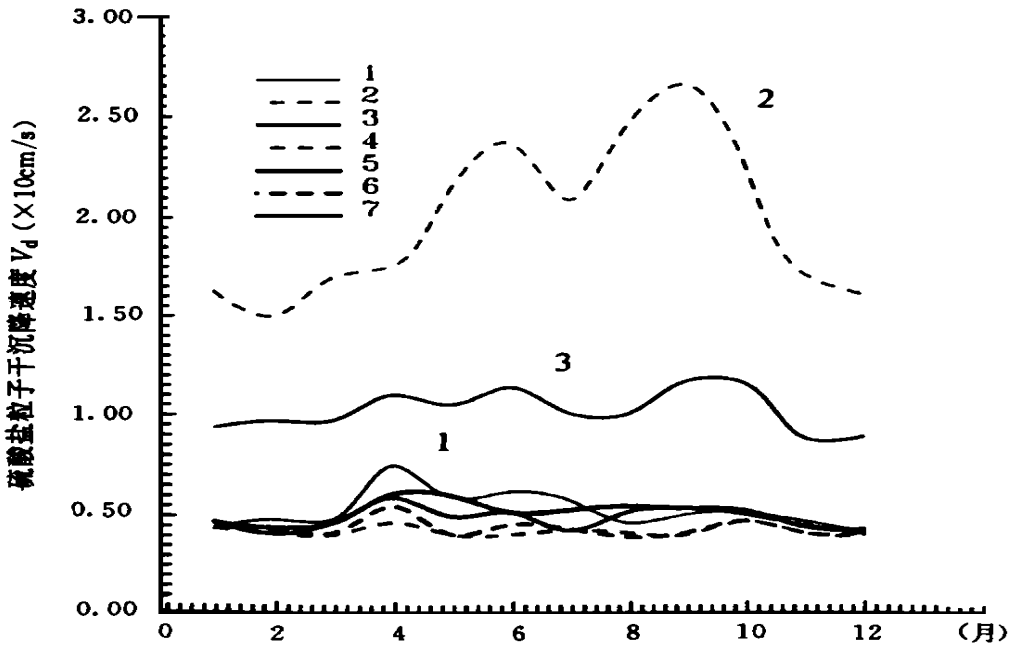
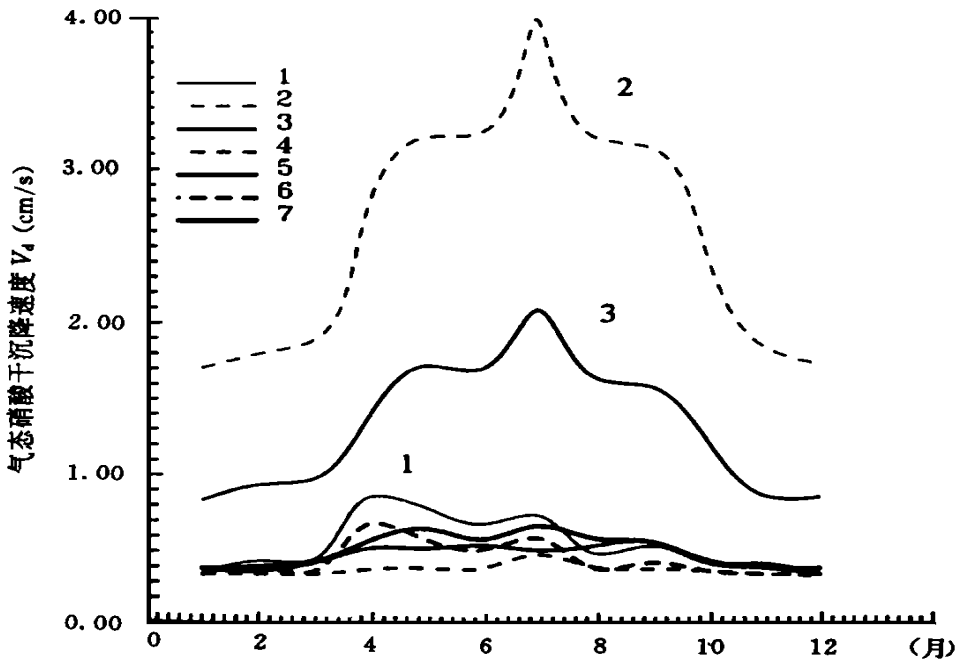
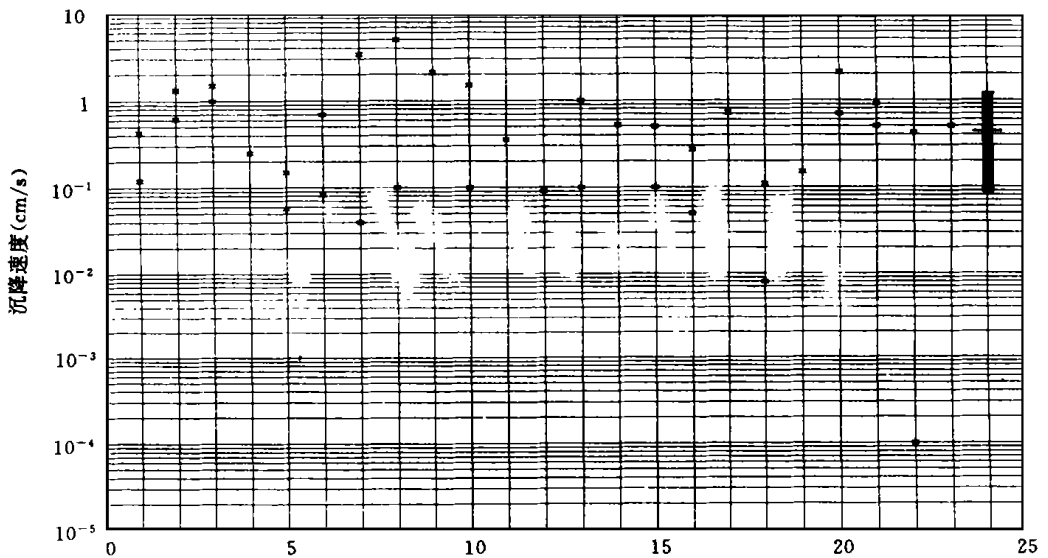


图 9 3 种污染物 SO_2 , SO_4^- 和 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 干沉降速度区域平均值年变化
(实线为 SO_2 , 短虚线为 SO_4^- , 长虚线为 $\text{HNO}_3(\text{g})$)

表 3 3 种污染物沉降速度 1992 年 4 季和全年的特征值(单位: cm/s)

季节	特征量	SO_2	SO_4^-	$\text{HNO}_3(\text{g})$
春季	极小值	0.061	0.025	0.050
	极大值	1.262	0.605	5.405
	平均值	0.408	0.224	1.248
夏季	极小值	0.129	0.053	0.105
	极大值	1.323	0.633	5.652
	平均值	0.413	0.226	1.394
秋季	极小值	0.053	0.021	0.042
	极大值	1.223	0.595	5.130
	平均值	0.444	0.237	1.139
冬季	极小值	0.062	0.024	0.047
	极大值	1.292	0.599	5.124
	平均值	0.454	0.222	0.975
全年	极小值	0.088	0.014	0.060
	极大值	1.275	0.287	5.250
	平均值	0.430	0.118	1.123

图 10 七地区 SO_2 干沉降速度年变化图 11 七地区 SO_4 干沉降速度年变化

图 12 七地区 $\text{HNO}_3(\text{g})$ 干沉降速度年变化图 13 不同工作者关于 SO_2 干沉降速度的测试结果

为了与 SO_2 干沉降速度的测量结果做比较, 图 13 汇集了一些文献中报导的测量结果。图中 x 轴的不同值代表不同作者, 其中 1 为毛节泰等^[16]的结果, 2 为袁撰英^[17]的结果, 3 为范思泓^[18]的结果, 从 4 到 23 为 Davidson 和 Wu^[11]所收集的结果。因为这些结果

包括极不相同的测量方法和测量条件,因此数据的离散度较大。作者的计算结果在该图右边以黑色竖条表示,处于实测值范围之内。

另外,Davidson 和 Wu^[9]还收集了关于硫酸盐粒子和气态硝酸干沉降速度的野外实测值,对硫酸盐粒子,不同作者使用不同方法,在不同下垫面类型、高度和气象条件下,实测其干沉降速度相差 3 个量级,从 0.001—1cm/s。对气态硝酸,其干沉降速度野外实测值变化从 0.39 ± 0.31 cm/s 到 2.9 ± 1.1 cm/s。对 3 种污染物干沉降速度模式计算的结果均处于这些野外实测值范围之内。需要提到的是, C. J. Walcel 等^[6]对美国东部和加拿大南部 SO₂, SO₄⁻ 和 HNO₃(g) 的干沉降速度进行了春季 72h 的数值模拟,结果得到在地面以上大约 40m 高度处, SO₂, SO₄⁻ 和 HNO₃(g) 的干沉降速度区域平均值在白天分别为 0.8cm/s, 0.02cm/s 和 2.5cm/s; 在夜间分别为其相应干沉降速度值的 50%, 45% 和 70%。这与本文的结果相当一致。

5 结 论

以上给出了中国东部地区 3 种污染物 SO₂, SO₄⁻ 和 HNO₃(g) 的干沉降速度区域平均分布及其季节变化。从计算结果可以看出,随着下垫面类型和结构以及气象条件的不同,污染物干沉降速度有明显的时空变化。这提示在污染物输送模式中将污染物干沉降速度假定为常数作为边条件的通常做法不可能得到比较准确的结果,时空尺度变化越大,差别就越明显。但假定干沉降速度为常数作为边条件可使模式计算简单化,这时最好选用干沉降速度的气候统计值。

虽然理论模式计算的干沉降速度区域分布和时间变化特性基本上能和各地下垫面特性及气候状况相对应,但在这种理论模式中,有的经验公式具有一定的局限性,其中一些参数值的选取也带有一定的人为主观性。所以,欲取得更好的结论,尚需做更多的观测比较工作。

参考文献

- [1] Garland J A. Dry and wet removal of sulfur from the atmosphere. *Atmos Environ*, 1978, 12: 349– 362.
- [2] Galloway J N and Likens G W. Acid precipitation: the importance of nitric acid. *Atmos Environ*, 1981, 15: 1081– 1097.
- [3] Shannon J D. A Model of regional long-term average sulfur atmospheric pollution, surface removal, and net horizontal flux. *Atmos Environ*, 1981, 15: 689– 701.
- [4] Lindberg S E, Lovett G M, Richter D D and Johnson D W. Atmospheric deposition and canopy interactions of major ions in a forest. *Science*, 1986, 231: 141– 145.
- [5] Sheih C M, Wesely M L and Hicks B B. Estimated dry deposition velocities of sulfur over the Eastern United States and surrounding regions. *Atmos Environ*, 1979, 13: 1361– 1368.
- [6] Walcel C J, Brost R A, Chang J S and Wesely M L. SO₂ sulfate and HNO₃ deposition velocities computed using regional landuse and meteorological data. *Atmos Environ*, 1986, 30: 949– 964.
- [7] Wesely M L and Hicks B B. Some factors that affect the deposition rates of sulfur dioxide and similar gases on vegetation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1977, 27: 1110– 1116.
- [8] Hicks B B, et al. On the use of monitored air concentration to infer dry deposition, NOAA Technical Memo-

randum ERL ARL-141, Silver Spring, MD. 1985.

- [9] Davidson C I and Wu Y L. Dry deposition of particles and vapors. *Acidic Precipitation*. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 3: 103- 107.
- [10] Baldocchi D D, Hicks B B and Camara P. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmos Environ*, 1987, 21: 91- 101.
- [11] Louis J F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorol*, 1979, 17: 187- 207.
- [12] Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y and Bradley E F. Flux-profile relationship in the atmospheric surface layer. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 181- 189.
- [13] Roland B. Stull. *边界层气象学导论*. 北京: 气象出版社, 1991.
- [14] Chang J S, et al. A three-dimensional Eulerian acid deposition model: physical concepts and formulation. *J Geophys Res*, 1987, 92: 14681- 14700.
- [15] Wesely M L. Parameterization of surface resistances to gaseous deposition in regional-scale numerical models. *Atmos Environ*, 1989, 23: 1293- 1304.
- [16] 毛节泰, 胡新章. 中国南昌地区若干污染物干沉降速度的测量. *气象科技*, 1996, 2: 36—42.
- [17] 袁撰英. 用间接浓度法测量干沉降通量. *大气科学*, 1986, 10(4): 357—369.
- [18] 范思泓. 二氧化硫干沉降测量. *大气科学*, 1993, 17(1): 106—111.

THE SEASONAL VARIATION OF SO_2 , SO_4^- AND $\text{HNO}_3(\text{g})$ DRY DEPOSITION VELOCITIES OVER EASTERN CHINA

Mao Jietai Li Jianguo

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing, 100871*)

Abstract

SO_2 , SO_4^- and $\text{HNO}_3(\text{g})$ dry deposition velocities and their seasonal variations at a height of approximately 40m above surface over eastern China were calculated using MM4 mesoscale meteorological model by combining detailed landuse data with meteorological information throughout 1992. It was found that spatial and time variations of SO_2 , SO_4^- and $\text{HNO}_3(\text{g})$ dry deposition velocities are very notable because of the combining influences of meteorological conditions and landuse. SO_2 , SO_4^- and $\text{HNO}_3(\text{g})$ domain-averaged dry deposition velocities vary among 0.088 – 1.275cm/s, 0.014 – 0.287cm/s and 0.060 – 5.250cm/s, respectively, the averaged values are 0.430cm/s, 0.118cm/s and 1.123cm/s, respectively. There was a maximum value region of domain-averaged SO_2 deposition velocity in Badain Jarain Desert and Tengger Desert, but for SO_4^- and $\text{HNO}_3(\text{g})$, there was also an other maximum value region in northern part of Yun-Gui Plateau except above mentioned areas. For one year period, SO_2 and $\text{HNO}_3(\text{g})$ maximum domain-averaged dry deposition velocities appeared in July 1992, which was 0.552cm/s and 1.518cm/s, respectively, but for SO_4^- , that appeared in September, and was 0.096cm/s. These values were all in the field measurement scope.

Key words: Pollutant, Dry deposition, Transport resistance.