

## 沙尘暴垂直运输的两相流理论 II : 气柱挟卷模式

刘 飞<sup>1,2</sup> 巢纪平<sup>3</sup>

LIU Fei<sup>1,2</sup> CHAO Jiping<sup>3</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京, 100029

2. 中国科学院研究生院, 北京, 100049

3. 国家海洋环境预报中心, 北京, 100081

1. Key Laboratory Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China

2007-09-19 收稿, 2007-12-27 改回.

Liu Fei, Chao Jiping. 2009. The two-phase flow theory about dust storm's vertical transport, part II : The air column entrainment model. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(1): 11–19

**Abstract** To improve the air particle method in the previous paper, the air column entrainment method is used to study dust storm sedimentation. In the method, entrainment between the column and the environment is included, as is the turbulent exchange within the column. In a homogeneous environment, the computational results suggest that favorable conditions for sedimentation are larger initial dust concentration disturbances and smaller initial temperature disturbances; and furthermore, the larger the diffusion coefficient of temperature, the quicker the dust sedimentation, but the larger the diffusion coefficient of dust concentration, the slower the dust sedimentation. The turbulent process has little influence on the sedimentation. We further consider some more real environment conditions with vertical dust concentration and temperature gradients, the results suggest the same favorable conditions for the sedimentation in the above homogeneous environment. And meanwhile, four processes which are not conducive to the sedimentation are given: (1) ascending concentration variation process; (2) descending concentration variation process; (3) ascending temperature variation process; (4) descending temperature variation process. On the basis of the definitions of these processes, we can study the impacts of parameters on the sedimentation, and results show that the temperature diffusion is conducive to the sedimentation; and the dust concentration diffusion is not conducive to the sedimentation; the larger vertical temperature turbulent exchange coefficient is more conducive to ascending in the slowly sedimentation region, even in the non-sedimentation region; and the larger vertical dust concentration turbulent exchange coefficient is more conducive to the sedimentation.

**Key words** Dust storm, Two-phase flow, Sedimentation, Air column entrainment model

**摘 要** 为了改进气块法对沙尘沉降问题的研究, 文中利用气柱法, 考虑沙尘气体与环境的交换作用以及气柱内湍流交换作用。计算结果表明, 均匀场中有利于沉降的条件为较大的初始沙尘浓度扰动与较小的初始温度扰动, 而且温度扩散系数越大越有利于沙尘沉降, 沙尘浓度扩散系数越大越不利于沙尘沉降, 湍流过程在均匀场中对沙尘沉降影响不大。考虑到更真实的环境场, 得出在环境的垂直沙尘浓度梯度与温度梯度的参数域中, 初始沙尘扰动越大越有利于沙尘沉降, 初始温度扰动越大, 越不利于沙尘沉降。同时给出 4 种不利于沙尘沉降的过程: (1) 上升浓度变化过程; (2) 下沉浓度变化过程; (3) 上升温度变化过程; (4) 下沉温度变化过程。根据这些过程分析参数对沙尘沉降的影响得到: 温度扩散系数越大越有利沙尘沉降; 沙尘浓度扩散系数越大不利于沙尘沉降; 垂直温度湍流交换系数越大有利于缓降区甚至是非沉降区的上升; 垂直沙尘浓度湍流交换系数越大越有利于沙尘沉降。

**关键词** 沙尘暴, 两相流, 沉降, 气柱挟卷模式

**中国法分类号** P425.5<sup>+</sup>5 P435<sup>+</sup>·1

## 1 引言

沙尘暴是发生在沙漠及其邻近地区特有的一种灾害性天气, 国外从 20 世纪 20 和 30 年代就开始了沙尘暴时空分布、成因与结构以及监测与对策方面的研究。中国从 70 年代开始对沙尘暴天气进行了研究, 自 1993 年 5 月 5 日中国西北地区特强沙尘天气发生后, 沙尘暴的研究引起了中国政府有关部门和科学工作者的重视。对于东亚地区, 沙尘天气的多发区主要位于中国南疆盆地、内蒙古西部以及蒙古南部, 起沙的过程主要是由于地形的强迫所造成的, 而青藏高原地形造成的强大绕流以及冷锋过程的频繁发生使得沙尘的向南输送更为强烈(姜学恭等, 2008)。而研究表明沙尘暴输送的强度和轨迹主要是由春季环流所控制(宋敏红等, 2007)。对于起沙过程, 较强沙尘暴天气过程主要是由动力湍流所控制(张宏升等, 2007), 而数值的模拟表明尘卷风是由于地面局部增热不均匀而形成的一种特殊的旋转对流运动(顾兆林等, 2003)。近些年来, 曾庆存等(2006)集中力量总结并拓展了东亚沙尘暴的研究。

对于沙尘动力学的研究主要存在两个问题, 其中起沙问题的动力学研究比较复杂(Shao, 2001), 在本文中不做考虑, 这里主要考虑沙尘的沉降问题。大气中存在不同的沙尘运动尺度的分布, 这是由沙尘输送时风力的强度、天气情况、起沙过程(Gillette, et al, 1977; Nickling, 1983)、沙尘输送过程中干湿不同的沉降过程(Slinn, 1983)、云物理混合过程(Andreae, et al, 1986)等决定的。最近研究表明在海洋上不同沙尘粒径的分布存在着不同的干沉降的关系(Arimoto, et al, 1997)。但是为了抓住沉降的物理本质, 如不考虑由于沙尘而改变的空气中辐射传输的光学性质, 只考虑其动力学因素, 则这个问题比较简单。如同前面的工作(巢纪平等, 2009), 当沙尘颗粒比较小时, 它的 Stokes 末速度不大, 沙尘可以和所在的空气团一起运动, 形成了一个两相流的气团, 从而改变了气团的密度及相应的阿基米德浮力, 使空气团的垂直加速度相应发生改变, 也改变了

沉降的条件, 足够大浓度的沙尘如果能够沉降到地面即出现沙尘暴。由于是将沙尘大气看作两相流, 本文将不同物理化学性质的沙尘都用初始沙尘浓度来统一区别, 比如较大粒径的沙尘在本文中就通过较大的初始沙尘扰动来描述, 这有利于把握沙尘沉降的物理本质。

为了改进前一步工作(巢纪平等, 2009), 本文利用气柱法(巢纪平等, 1964)来研究沙尘沉降问题以及参数对沙尘沉降的影响。设有一个气柱, 其中含空气和沙尘的两相流, 气柱中的物理量有垂直分布但水平是均匀的, 柱中的物理量与气柱外环境场有动力挟卷, 并同时考虑气柱中两相流垂直湍流交换作用。

为了更好地看清问题的本质, 抓住主要的沉降过程, 本文主要通过气柱中最大沙尘浓度的轨迹来描述沙尘沉降问题, 而且文中假定, 当最大沙尘浓度存在的高度低于 50 m 时, 认为沙尘已经沉降。

文中考虑了均匀场与非均匀场中各种沉降条件的分布以及参数对沉降区域影响的分析, 特别是对于非均匀场, 提出 4 个不利于沙尘沉降条件的过程, 结合该过程, 可以很容易地分析参数对沙尘沉降分布的影响。

气柱模型虽然是较为简单的理论模型, 并对物理问题做了相当大的简化, 但是能够用来讨论沙尘沉降条件与过程, 而且还能够对参数的作用做研究, 可以为复杂的沙尘输送业务模式的理论发展以及参数化提供较好的判据与参考。

## 2 基本方程

设空气和沙尘的密度分别为  $\rho_a$ 、 $\rho_s$ , 沙尘的浓度为  $S$ , 两相流的密度变化为

$$d\rho = -\alpha\rho_a(1-S)dT + (\rho_s - \rho_a)dS \quad (1)$$

考虑到  $\rho_a \ll \rho_s$ , 上式近似地写成

$$\rho' = -\alpha\bar{\rho}(1-\bar{S})(T-\bar{T}) + \rho_s(S-\bar{S}) \quad (2)$$

式中  $\rho' = \rho - \bar{\rho}$ , “ $\bar{\phantom{x}}$ ”表示气候平均值或环境值。

连续性方程为

$$\frac{\partial w}{\partial z} + \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

温度变化方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial wT}{\partial z} + \left( \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} \right) + \Gamma_d w = -(\mu_T + \lambda)T + v_T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4)$$

式中  $\mu_T$  是对温度的扩散系数,  $\lambda$  是牛顿辐射冷却系数,  $v_T$  为温度垂直湍流交换系数,  $\Gamma_d$  为气温绝热递减率。沙尘浓度变化方程为

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial wS}{\partial z} + \left( \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} \right) = -\mu_S + v_S \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (5)$$

式中  $\mu_S$  是沙尘浓度的扩散系数,  $v_S$  是沙尘浓度的垂直湍流交换系数。垂直运动方程为

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \left( \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} \right) = -g \frac{\rho'}{\rho} + v_w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (6)$$

### 3 动力挟卷

设有一个非常薄的气柱片,其体积为  $\tau$ ,表面积为  $s$ ,取式(3)的体积分,由高斯公式给出

$$\int_{\tau} \frac{\partial w}{\partial z} d\tau = \int_s v_n ds \quad (7)$$

式中  $v_n$  是垂直侧边界的速度,向内为正。如果体积  $\tau$  非常小,上方方程可近似地给出

$$v_n \Delta s = \frac{\partial w}{\partial z} \Delta \tau \quad (8)$$

定义  $\Delta m = \rho v_n \Delta s / \Delta \tau$  为单位时间通过边界进入单位气柱的质量通量,则有

$$\Delta m = \rho \frac{\partial w}{\partial z} \quad (9)$$

此式给出了气柱内垂直运动的分布与挟卷效应的关系。

取方程(4)的体积分,给出

$$\left( \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial wT}{\partial z} + \Gamma_d w \right) \Delta \tau - v_n \bar{T} \Delta S = \left( -(\mu_T + \lambda)T + v_T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \Delta \tau \quad (10)$$

考虑到式(8),得到

$$\frac{\partial T}{\partial t} + w \left( \Gamma_d + \frac{\partial T}{\partial z} \right) + (T - \bar{T}) \frac{\partial w}{\partial z} = -(\mu_T + \lambda)T + v_T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (11)$$

类似地,对式(5)有

$$\frac{\partial S}{\partial t} + w \frac{\partial S}{\partial z} + (S - \bar{S}) \frac{\partial w}{\partial z} = -\mu_S S + v_S \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \quad (12)$$

对方程(6)有

$$\left( \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w^2}{\partial z} \right) \Delta \tau - v_n \bar{w} \Delta S = -g \frac{\rho'}{\rho} \Delta \tau + v_w \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (13)$$

如环境无垂直运动,并应用式(2),得到

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = \frac{g}{T} (1 - \bar{S})(T - \bar{T}) - g \frac{\rho_S}{\rho} (S - \bar{S}) \quad (14)$$

方程(11)、(12)、(14)组成对变量  $T$ 、 $S$ 、 $w$  的气柱挟卷模式。

如  $(T - \bar{T}) = T'$ ,  $(S - \bar{S}) = S'$  是个小量,略去它们和  $\partial w / \partial z$  相乘后的非线性项,同时令  $v_T, v_S, v_w = 0$ ,并设式(11)中,  $\partial T / \partial z \approx \partial \bar{T} / \partial z = -\gamma$ ,式(11)、(12)退化成

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\Gamma_d - \gamma)w = -(\mu_T + \lambda)T \quad (15)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial \bar{S}}{\partial z} w = -\mu_S S \quad (16)$$

略去式(14)的非线性项,给出

$$\frac{\partial w}{\partial t} + (\Gamma_d - \gamma)w = \frac{g}{T} (T - \bar{T}) - g \frac{\rho_S}{\rho} (S - \bar{S}) \quad (17)$$

这3个方程如将对时间的偏导数改成全导数即为气块模式,如同前面的工作(巢纪平等,2009)。

### 4 均匀环境场中的沙尘运动

假设环境场为均匀场,对于控制方程(11)、(12)、(14),根据边界条件,上下边界条件都为

$$S = \bar{S}, \quad T = \bar{T}, \quad w = 0 \quad (18)$$

在这里通过数值方法来解方程组(11)、(12)和(14),其中差分格式用跳点法,先根据式(14)、(18)计算出垂直速度  $w$ ,再根据式(11)和(12)计算出  $T$  和  $S$ 。时间步长取为 1 s,空间步长取为 10 m。

#### 4.1 参数设定

根据均匀场的假设,设定基本参数如下:  $\rho_a \sim 1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_s \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ ,  $\mu_T \sim 6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $\mu_S \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $v_T = 10 \times 10^{-5}$ ,  $v_S = 10 \times 10^{-6}$ ,  $\bar{S} \sim 10^{-7}$ ,  $\lambda = 1.0 \times 10^{-6}$ 。因为考虑到环境场是均匀的,这里不考虑绝热递减率,所以设  $\Gamma_d = 0 \text{ } ^\circ\text{C/m}$ 。

#### 4.2 均匀场沙尘沉降分析

因为控制方程描述的是物理量场的垂直变化,

为了更好地描述沙尘的沉降,主要关注最大初始扰动的运动。给定初始高度 200 m 处的初始温度与沙尘浓度扰动,随着沙尘场的运动,图 1 描述了最大沙尘浓度所在高度的垂直轨迹。图 1a、1b、1c 为初始温度扰动为  $1^{\circ}\text{C}$ , 初始沙尘扰动为  $2S_e$ 、 $10S_e$  和  $100S_e$  时最大沙尘浓度所在高度的垂直轨迹变化。从图中可以看到,当初始沙尘浓度较小时,最大沙尘浓度的高度不断升高,接着在高空振荡,随着扩散作用最后浓度会与环境场相同,即在该条件下沙尘不会沉降;当初始沙尘浓度扰动增加到环境场的 10 倍时,从图 1b 可以看到最大沙尘浓度的高度先上扬到 400 m 后,再沉降到地面,沉降时间需要 3800 s;继

续增大初始沙尘浓度扰动,如图 1c, 可以看到沙尘直接下降,而且沉降时间非常短。从上面的分析可以看到随着初始沙尘浓度扰动的增加,沙尘从最初的非沉降状态变化到速沉降状态。

图 1d、1e、1f 描述的是给定初始沙尘浓度扰动,而将初始温度扰动从图 1 d 的  $10^{\circ}\text{C}$  减小到图 1f 的  $0.2^{\circ}\text{C}$ 。如同上面的讨论,从图中可以看到当初始沙尘浓度扰动不变时,随着初始温度扰动的减小,沙尘从图 1d 的非沉降变化到图 1f 的速沉降。

综合上面的分析,可以再一次得到前面工作(巢纪平等, 2009)的结论:有利的沉降条件为较小的初始温度扰动、较大的初始沙尘浓度扰动。

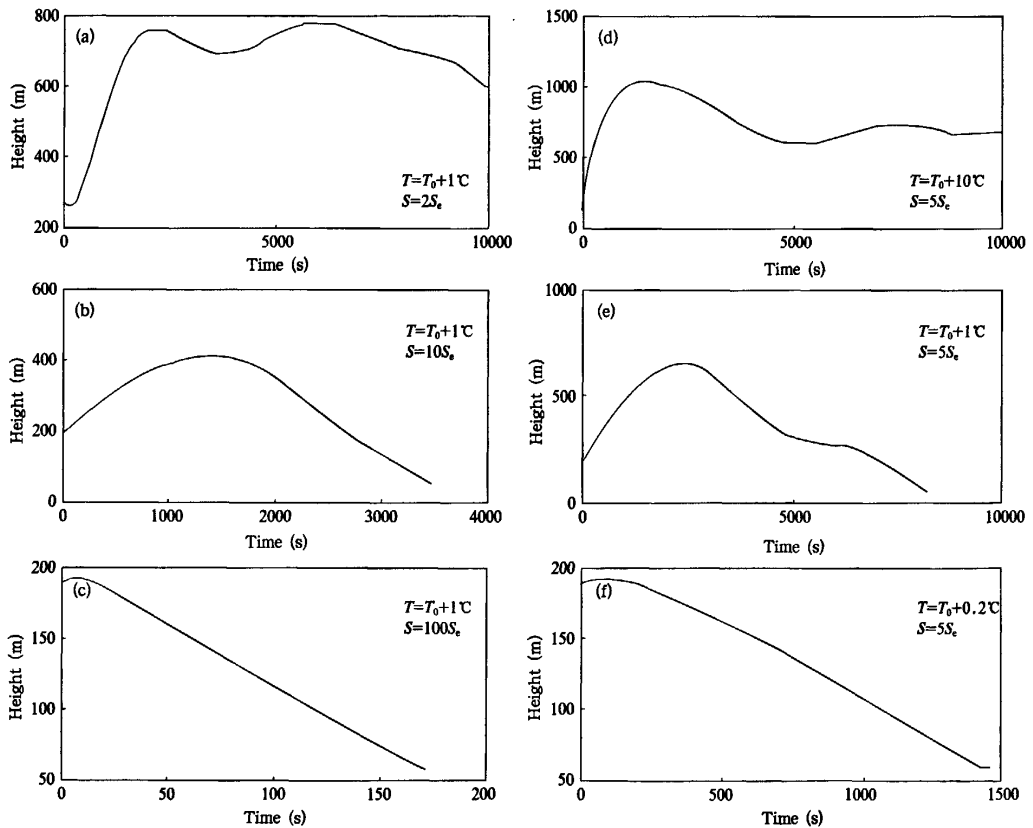


图 1 沉降时间随初始温度和沙尘浓度扰动的关系(初始高度取为 200 m)

Fig. 1 Sedimentation time as a function of initial dust concentration (a, b, c) and temperature (d, e, f) disturbances (the initial height is at 200 m)

### 4.3 参数对沙尘沉降影响分析

通过气柱法来描述沙尘的运动,相对于气块法而言,不但考虑到气柱与环境场的交换,还考虑到气

柱内的湍流作用,在这里进一步分析各参数对沙尘沉降的影响。设定初始沙尘浓度扰动  $\Delta S = S_e$ , 初始温度扰动  $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ 。如图 2 a, 初始参数设置为

$\mu_T \sim 6.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ,  $\mu_S \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ ,  $v_T = 10 \times 10^{-5}$ ,  $v_S = 10 \times 10^{-6}$ . 维持其他参数不变,将温度扩散系数增加到 10 倍,  $\mu_T \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ , 从图 2b 可以看到,原来非沉降的沙尘在该条件下开始沉降,这是因为随着温度扩散系数的增加,温度扰动比较容易耗散为零,从而温度扰动(正值)对沙尘向上的运动贡献减小,当正的沙尘浓度扰动产生的下沉运动占优时,沙尘开始沉降,如图 2b 所示,沙尘在 3800 秒时沉降。

维持其他参数不变,而将沙尘浓度扩散系数增

加到 10 倍,  $\mu_S \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ , 这表明沙尘浓度扰动比较容易扩散(图 2c), 可以看到,沙尘仍是非沉降的,但是在高空沙尘振荡的幅度加大,这是由于沙尘扰动对沙尘运动的限制减小,主要由温度扰动产生的浮力来控制,从而可以知道沙尘浓度扩散系数的增大不利于沙尘的沉降。

当将温度与沙尘的湍流系数都增加到  $v_T = v_S = 1 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$  时,沙尘沉降状况变化非常小,这是因为假设环境场是均匀的,所以湍流作用比较弱。

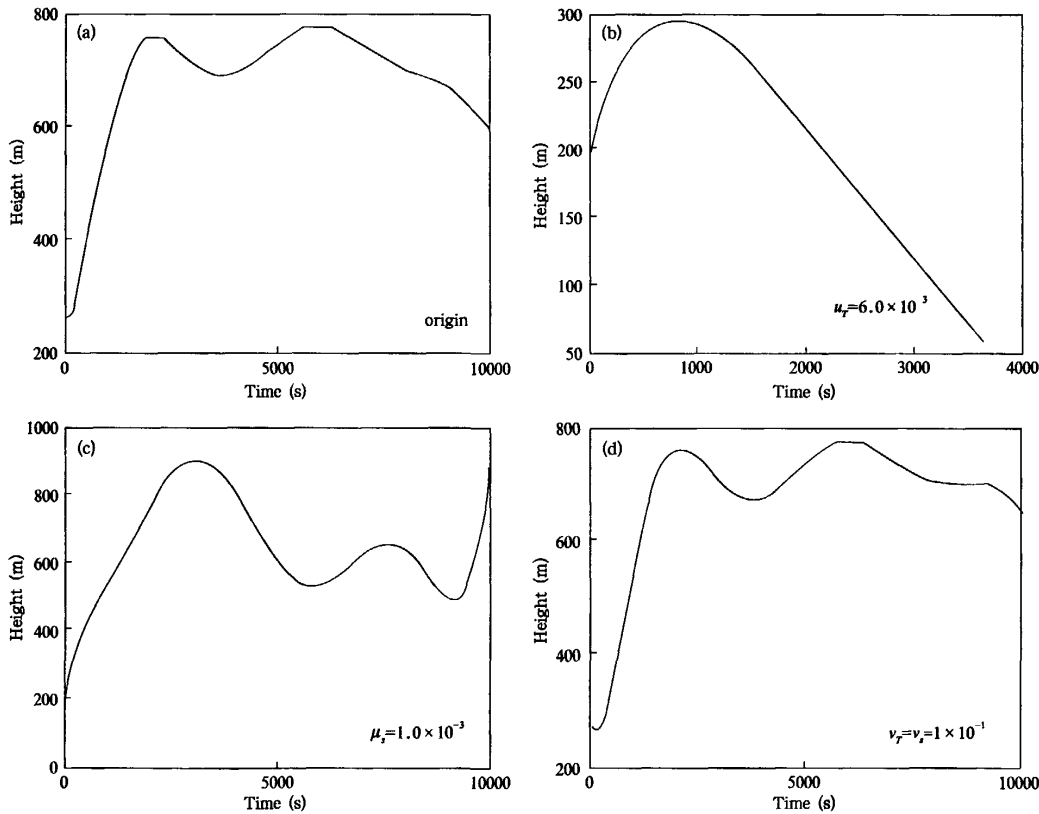


图 2 对于扰动  $\Delta T = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta S = S_e$ , 沙尘沉降随  $\mu_T, \mu_S, v_T, v_S$  的变化

Fig. 2 Sedimentation locus of the maximum dust concentration for different  $\mu_T, \mu_S, v_T$ , and  $v_S$  when initial disturbances are given as  $\Delta T = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , and  $\Delta S = S_e$

5 非均匀环境下沙尘沉降分析

考虑更加真实的沉降情况,在这节假定环境场存在着垂直方向的梯度,为了讨论方便,假定垂直的环境温度梯度  $T_{\omega}$  与环境沙尘浓度梯度  $S_{\omega}$  都为常

数,所以环境温度和环境沙尘浓度分别为:  $T_e = T_0 - T_{\omega}(z - z_0)$ ,  $S_e = S_0 - S_{\omega}(z - z_0)$ , 初始温度扰动与初始沙尘扰动都发生在 300 m 高处。

为了讨论不同环境场的沉降状况,假定 300 m 处的环境场是不变的,这样使得对比性更加明显。

### 5.1 参数设置

选取基本参数为

$$\rho_a \sim 1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3, \rho_s \sim 2.5 \text{ g/cm}^3, \mu_T \sim 6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}, \mu_S \sim 1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}, v_T = 10 \times 10^{-5}, v_S = 10 \times 10^{-6}, \bar{S} \sim 5 \times 10^{-7}, \lambda = 1.0 \times 10^{-4}.$$

因为考虑到环境场是非均匀,这里必须考虑绝热递减率,设  $\Gamma_d = 0.8 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/m}$ 。

### 5.2 沙尘沉降分析

在真实大气中,干绝热不稳定比较难达到,所以在此只考虑  $T_{ez} > 0$  的情况,以干绝热递减率  $\Gamma_d$  为参考,选取环境温度梯度范围为  $0 \leq T_{ez} \leq 2T_{0z}$ ,在这里选取  $T_{0z} = \Gamma_d$ 。对于环境沙尘浓度选取其梯度范围为  $-S_{0z} < S_{ez} < S_{0z}$ ,在这里  $S_{0z} = \frac{\bar{T}}{70\Delta z}$ ,  $\Delta z$  为空间步长,因为  $S_{ez}$  如果超过这个范围,则环境场沙尘浓度有可能为负数,不符合真实条件。

给定初始温度扰动  $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,当初始沙尘浓度扰动从图 3a 的不断增加到图 3f 的  $S = 20S_e$ ,沙尘沉降时间在环境沙尘浓度梯度  $S_{ez}$  和环境温度梯度  $T_{ez}$  参数域内的分布如图 3 所示。模式的积分时间为 5000 s,所以认为当沉降时间超过 5000 s 时表示该条件下沙尘为非沉降。从图中可以看到,随着初始沙尘浓度增加,沉降区域从最初非常小的区域不断增加到全部的参数域。

从图 3a 可以看到,在该条件下沉降区域只有非常小的一点,这是初始温度扰动与初始沙尘浓度扰动相互调谐的结果,下面给出 4 个不利沉降的过程:

(1) 上升浓度变化过程:如图 3a,在沉降区域左部的参数域,假设沙尘先上升,  $-(z - z_0) < 0$ ,随着沙尘上升,参数域越偏左,  $S_{ez}$  越小,  $-S_{ez}(z - z_0)$  也就越大,对应的环境沙尘浓度也就偏大(同一高度上,左非沉降区域对应的环境沙尘浓度比沉降区域对应的环境沙尘浓度要大),沙尘受到的浮力较大,从而由于沙尘浓度扰动产生的向下沉降作用较弱,故不易沉降。

(2) 下沉浓度变化过程:在该沉降区域右部,假设沙尘是下降的,  $-(z - z_0) > 0$ ,随着沙尘下沉,参数域越偏右,  $S_{ez}$  越大,  $-S_{ez}(z - z_0)$  也就越大,所以所对应的环境沙尘浓度也就偏大(同一高度上,右非沉降区域对应的环境沙尘浓度比沉降区域对应的环

境沙尘浓度要大),沙尘受到的浮力较大,从而如(1),不易沉降。

(3) 上升温度变化过程:在该沉降区域上部,  $T_{ez}$  相对较大,沙尘上升时,上非沉降区域所对应的环境温度要比沉降参数域所对应的环境温度要低,所以由温度扰动产生的上升运动也相对强些,沙尘不易沉降。

(4) 下沉温度变化过程:在该沉降区域下部,  $T_{ez}$  相对较小,沙尘下降到 300 m 以下,下非沉降区域所对应的环境温度要比沉降参数域所对应的环境温度要低,所以由温度扰动产生的上升运动相对较强,沙尘不易沉降。

综上所述,虽然在沉降区域周围的参数域内沙尘不易沉降,但是产生的原因是不同的,在沉降区域的左部和上部,导致沙尘不易沉降的过程发生在沙尘上升过程(1)与(3),而在沉降区域的右部与下部,导致沙尘不易沉降的过程发生在沙尘沉降的过程(2)和(4)。

当初始沙尘浓度扰动增加到  $S = 4S_e$ ,如图 4b,可以看到沉降区域扩展到了参数域间的一个狭长带,由于初始沙尘浓度的增加,从而减弱了过程(1)与(2)不易沉降作用,沉降区域增加。而对于沉降区域上下部的非沉降区域的原因同过程(3)与(4)。

如图 4c,当  $S = 4.4S_e$  时,可以看到在  $T_{ez} > T_{0z}$  的参数域,都为沙尘沉降区域,这是由于沙尘浓度扰动的增加极大地减弱了过程(1)、(2)和(3)不易沉降的作用,而参数域下部的非沉降区域是由过程(4)引起的。

从图 4d、4e、4f 可以看到,参数域已经全为沉降域,而且相对而言,在图的左上部为速降区,图的右下部为缓降区。这是由于初始沙尘浓度较大,使下沉过程的作用相对较大,从而由过程(2)与(4)决定了沉降域的这种分布。

对于初始温度扰动对沉降区域的影响分析类似,即初始温度扰动越小(正值),越有利于沙尘沉降。

### 5.3 参数对沙尘沉降影响分析

因为考虑的是非均匀场,所以参数的选定对沉降区域的分布有着非常重要的作用,这里给出不同的参数对沉降区域的影响。选定  $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $S =$

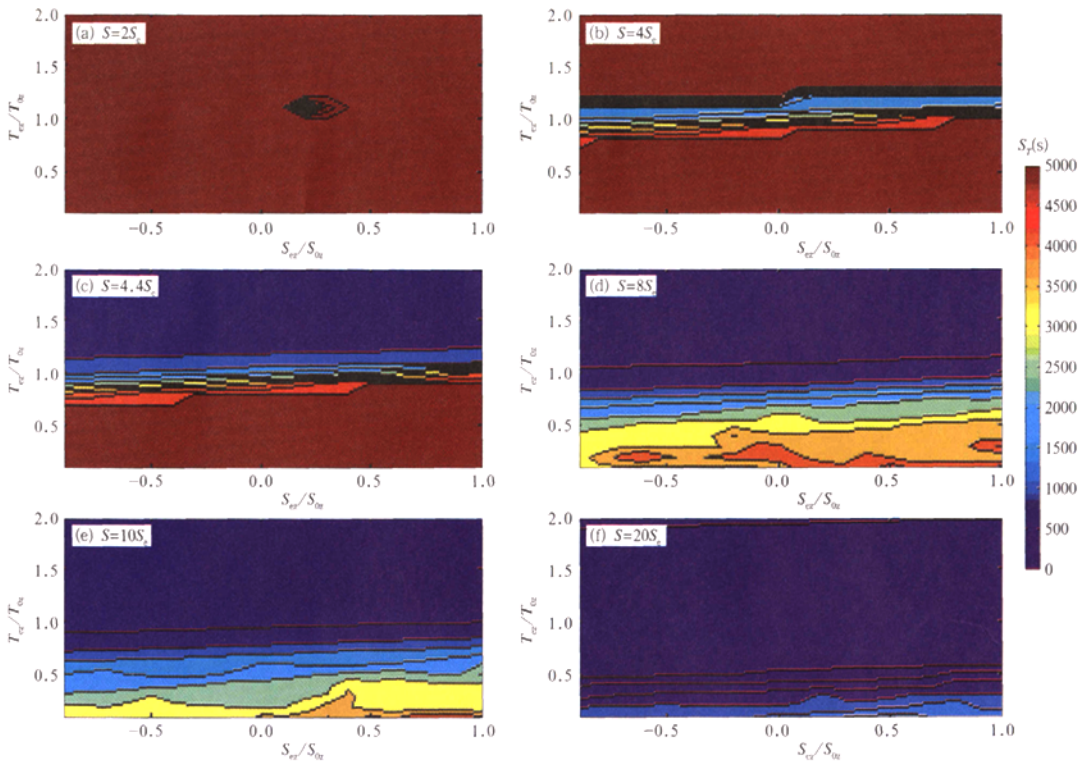


图 3  $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时沉降时间随初始沙尘浓度扰动在参数域内的分布

Fig.3 Patterns of sedimentation time under conditions of different initial dust concentration disturbances at the  $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.4 $S_0$ ,图 4a 为初始参数( $\mu_T \sim 6.0 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ ,  $\mu_S \sim 1.0 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ ,  $v_T \sim 10 \times 10^{-5}$ ,  $v_S = 10 \times 10^{-6}$ )时沉降区域的分布,可以看到参数域下部为非沉降区,上部为沉降区。

#### (a) 温度扩散系数的影响

温度扩散系数对沙尘沉降区域有着决定性的影响,如图 4 b,当温度扩散系数增大到初始值 10 倍,  $\mu_T \sim 6.0 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,可以看到在所考虑的参数域内,已经完全变成沉降区,图中左上部为速降区,右下部为缓降区,其原因如 5.2 节所分析。当温度扩散系数增大,考虑沙尘柱温度较快地变化,接近当前高度的环境温度,所以初始温度的扰动对沉降区域的影响就不那么明显,起主要作用的是初始沙尘浓度扰动,而从图 3c 可以看到非沉降区域主要是由于温度扰动引起,所以在此全部参数域都变成沉降区域。

#### (b) 沙尘浓度扩散系数的影响

沙尘浓度扩散系数也决定着沙尘沉降区域的分布,如图 4c,当其余参数不变,沙尘扩散系数增大到

10 倍,  $\mu_S \sim 1.0 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,可以看到沉降区域退化成一条狭长带,如同图 3b,沙尘浓度扩散系数增加,沙尘浓度扰动较快地接近当前环境的沙尘浓度,也就减弱了初始沙尘浓度扰动对沉降的作用,所以沉降区域减小。

#### (c) 垂直温度湍流交换系数的影响

由于存在着环境温度梯度,可以想象到湍流肯定起着相当的作用,如图 4d,当垂直温度湍流交换系数增加到  $v_T = 10 \times 10^{-2}$ ,可以看到整个参数域都变成沉降区域,但可以看到缓降区在参数域中上升到参数域的中下部。

可以这样理解,湍流作用对气柱的温度有着湍流输送的作用,从而使得上升过程中气柱温度比不考虑湍流作用(只考虑干绝热降温)的要高,根据过程(3)可以看到在参数域上部,上升过程起主要作用,沙尘运动向着非沉降方向发展。

而下降过程中其中温度比不考虑湍流作用(只考虑干绝热增温)的要低,从而根据过程(4)可以看到参数域下部,下降过程起主要作用,沙尘运动向着

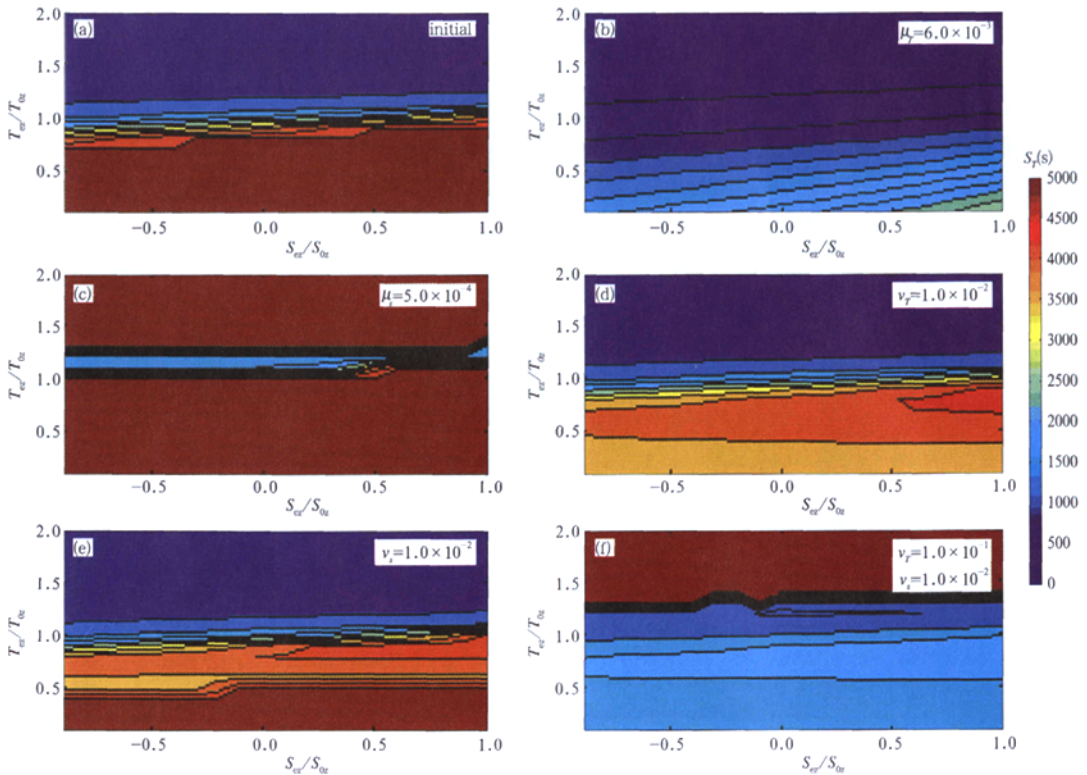


图4 给定  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ ,  $S = 4.4S_c$ , 沉降区域分布随  $\mu_T$ ,  $\mu_S$ ,  $v_T$ ,  $v_S$  的变化

Fig.4 Patterns of sedimentation time under conditions of different  $\mu_T$ ,  $\mu_S$ ,  $v_T$ , and  $v_S$  for given  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ , and  $S = 4.4S_c$

沉降方向发展。

#### (d) 垂直沙尘湍流交换系数的影响

如图4e, 当垂直沙尘浓度湍流交换系数增加到  $v_S = 10 \times 10^{-2}$ , 可以看到沉降区增加, 参数域下部原来非沉降区部分变成了缓降区。湍流交换作用使得在上升过程和下降过程中气柱沙尘浓度增大, 从而有利于沙尘沉降。

#### (e) 垂直湍流交换系数的影响

当将垂直湍流交换系数都增加到  $v_T = 10 \times 10^{-1}$ ,  $v_S = 10 \times 10^{-2}$ , 可以从图4f看到参数域内沉降区域的分布相对初始状况已经倒置, 上部为非沉降区, 下部为沉降区。从更多的参数试验分析得到温度湍流交换有利于缓降区在参数域内的上升, 沙尘浓度湍流交换有利于沉降区的扩展。其原因同前面(c)与(d)类同。

## 6 结论

考虑沙尘颗粒比较小的情况, 它的末速度不大,

沙尘可以和其所在的空气团一起运动, 形成了一个两相流的气团, 从而改变了气团的密度及相应的阿基米德浮力, 使空气团的垂直加速度发生改变, 在一定条件下沉降, 巢纪平等(2009)用气块法对沙尘沉降问题做了分析, 这里运用气柱法来分析该问题。一个气柱, 其中含空气和沙尘的两相流, 气柱中的物理量有垂直分布但水平是均匀的, 柱中的物理量与柱外环境有动力挟卷, 同时还考虑气柱中的湍流交换作用。

在本文中主要研究沙尘的沉降问题, 所以用最大沙尘浓度所在高度的轨迹来描述沙尘的沉降问题。

在均匀背景场下, 得到的结论与巢纪平等(2009)文章的结论相同: 有利的沉降条件为小的初始温度扰动、大的初始沙尘浓度扰动。

本文进一步考虑到一些参数对沙尘沉降影响的问题, 在均匀环境场下, 较大的温度扩散系数有利于沙尘的沉降, 较大的沙尘扩散系数不利于沙尘的沉降, 湍流交换系数在均匀场下对沙尘沉降的影响

不大。

为了更真实地分析沙尘沉降问题,考虑非均匀环境场,为了讨论方便,选择常数垂直环境温度梯度与环境沙尘浓度梯度。

对于非均匀的环境场,根据实际情况,考虑  $0 < T_{ez} \leq 2T_{0z}$ ,  $-S_{0z} < S_{ez} < S_{0z}$ , 参数域内的沉降分布,根据计算结果得到随着初始沙尘浓度扰动的增大,参数域内沉降区域从最初的小部分发展到全参数域,而且在参数域中左上部分为速降区域,右下部分为缓降区域。

根据沉降特征的分析,文中给出 4 个不利于沉降的过程:(1)上升浓度变化过程;(2)下沉浓度变化过程;(3)上升温度变化过程;(4)下沉温度变化过程。根据上面 4 个过程,很容易看出,虽然在沉降区域周围的参数域内沙尘不易沉降,但是产生的原因是不同的,在沉降区域的左部和上部,导致沙尘不易沉降的过程发生在沙尘上升过程(1)和(3),而在沉降区域的右部与下部,导致沙尘不易沉降的过程发生在沙尘沉降的过程(2)和(4)。

根据上面提出的 4 个过程,可以分析参数对沉降区域分布的影响,从而得到:温度扩散系数越大,越有利于沙尘沉降;沙尘浓度扩散系数越大,越不利于沙尘沉降;温度垂直湍流交换系数越大,越有利于缓降区甚至是非沉降区在参数域内的上升;而沙尘浓度的垂直湍流交换系数越大,越有利于沙尘沉降。

气柱法对气块法有较大的进步,不但考虑到气柱与环境场的挟卷作用,这里还考虑到垂直方向湍流交换的作用,通过本文提出的 4 个过程,可以比较容易地分析沙尘在气象条件下的沉降状况。沙尘业务预报模式的发展需要大量的参数设定,而本文也可以为发展沙尘业务预报模式提供较好的参考与判定。

## References

- Andreae M O, Charlson R J, Bruynseels F, et al. 1986. Internal mixture of sea-salt, silicates and excess sulfate in marine aerosols. *Science*, 232:1620-1623
- Arimoto R, Ray B J, Lewis N F, et al. 1997. Mass-particle size distributions of atmospheric dust and the dry deposition of dust to the remote ocean. *J Geophys Res*, 102(D13):15867-15874
- Chao Jiping, Zhou Xiaoping. 1964. *Cumulus Dynamics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 116pp
- Chao Jiping, Liu Fei. 2009. The two-phase flow theory about dust storm's vertical transport, part I: the air parcel model. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 67(1):
- Gillette D A, Walker T R. 1977. Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of west Texas. *Soil Sci*, 123: 97-110
- Gu Zhaolin, Zhao Yongzhi, Yu Yongzhang, et al. 2003. Numerical study of the formation evolution and structure of dust devil. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 61(6):751-760
- Jiang Xuegong, Chen Shoujun. 2008. An observational and numerical study on the topography influence on the dust transportation. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 66(1):1-12
- Nickling W G. 1983. Grain-size characteristics of sediments transported during dust storms. *J Sediment Petrol*, 53:1011-1024
- Shao Y. 2001. A model for mineral dust emission. *J Geophys Res*, 106 (D17): 20239-20254
- Slinn W G N. 1983. Air-to-sea transfer of particles//Liss P S, Slinn W g N, Reidel D. *Air-Sea Exchange of Gases and Particles*. Norwell, Mass, 299-405
- Song Minhong, Qian Zhengang, Cai Ying, et al. 2007. Analyses of spring mean circulations for strong and weak dust-storm activity years in China-Mongolia area. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 65 (1):94 - 104
- Zhang Hongshen, Zhu Hao, Pen Yan, et al. 2007. Experiment on dust flux during dust storm periods over sand desert. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 65(5):744 - 752
- Zeng Qingcun, et al. 2006. *Gigantic Yellow Cloud: Dust Storms in East Asia* (in Chinese). Beijing: Science Press, 13228pp
- 附中文参考文献**
- 巢纪平,周晓平. 1964. 积云动力学. 北京:科学出版社,116pp
- 巢纪平,刘飞. 2009. 沙尘暴垂直输运的两相流理论 I:气块法. *气象学报*, 67(1):
- 顾兆林,赵永志,郁永章等. 2003. 尘卷风的形成、结构和卷起沙尘过程的数值研究. *气象学报*, 61(6):751-760
- 姜学恭,陈受钧. 2008. 地形影响沙尘传输的观测和模拟研究. *气象学报*, 66(1):1-12
- 宋敏红,钱正安,蔡英等. 2007. 中蒙强、弱沙尘暴春季平均环流及沙尘活动变化分析. *气象学报*, 65(1):94 - 104
- 张宏升,朱好,彭艳等. 2007. 沙尘天气过程沙地下垫面沙尘通量的获取与分析研究. *气象学报*, 65(5):744 - 752
- 曾庆存等. 2006. 千里黄云:东亚沙尘暴研究. 北京:科学出版社, 13228pp