

# 沙尘暴垂直输运的两相流理论 I : 气块模式<sup>\*</sup>

巢纪平<sup>1</sup> 刘 飞<sup>2,3</sup>

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

1. 国家海洋环境预报中心, 北京, 100081

2. 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

3. 中国科学院研究生院, 北京, 100049

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

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

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

2007-06-15 收稿, 2007-09-19 改回.

**Chao Jiping, Liu Fei. 2009. The two-phase flow theory about dust storm's vertical transport, part I : The air parcel model. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(1):1 - 10**

**Abstract** Dust storm is a weather phenomenon over the desertification area. Nature factors tie together with human activities that have been put forward to account for the formation of dust storm. Nature factors include high wind, decreasing precipitation and enough sand sources. Human activities result in increasing of dust storm by decreasing vegetation covers in semiarid and arid regions during the economical development. Dust storm has been a serious climate disaster for northwest and north China, and the studies about dust storm focus on the blown sand-dust and sinking of sand-dust. Many studies prefer the former in theory, so the work on the sinking is necessary. Tiny dust particles whose Stockes terminal velocity can be overlooked will move with the air, and the air and the dust form a two-phase flow. We discussed the dust's sedimentation condition and velocity under mean and more real environment by two-phase flow. Under the mean environment the advantageous initial conditions for sinking are a strong disturbance of initial dust concentration and a weak disturbance of initial air parcel's temperature. further work is on the more real environment, and the model gives three characteristic sinking areas: (1) fast sinking area, where the sand-dust sinks fast; (2) slowly sinking area, where the sand-dust will rise first, then it sinks to the ground and the time for the total sinking is long; (3) wave sinking area, where the sand-dust will wave in the environment and it is hard to determine when sand-dust will sink to the ground, so the time for sinking is determined by the condition of the ground. The conditions for the sand-dust's continuous rise are also discussed finally.

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

**摘要** 沙尘暴是风蚀荒漠化中的一种天气现象,其形成受到两方面因素的共同影响;(1)自然因素,包括大风、降水减少及沙源;(2)人类活动因素,人类活动因素是指人类在发展经济过程中对植被的破坏以后,导致沙尘暴爆发频率数增加。沙尘暴已经成为中国西北、华北地区严重的气候灾害,而对沙尘的研究主要集中在起沙问题与沙尘沉降的问题,在理论上对前者研究较多,而对后者的研究则比较缺乏。假设空气块中带有沙尘,沙尘颗粒很小,随空气一起运动,可不计沙尘 Stockes 末速度,这样由空气和沙尘组成两相流。在两相流情况下,分析了均匀环境和非均匀环境条件下沙尘沉降的条件和速率。通过分析得到在均匀背景场下有利于沙尘沉降的条件为大的初始沙尘浓度扰动与小的初始温度扰动。进一步考虑更为真实的环境场,模式给出 3 种特征沉降区域:(1)速降区,沉降速率较快;(2)缓降区,沙尘先上升后下降,沉降时间较长;(3)波动区,沙尘在空气中不断地上下波动,此时很难判断沙尘何时沉降,取决于地面状况。同时也分析了沙尘不断上扬的背景条件。

**关键词** 沙尘暴, 两相流, 沉降, 气块模式

**中图法分类号** P445<sup>+</sup>.4 P435<sup>+</sup>.1

\* 作者简介:巢纪平,主要从事热带大气海洋动力学,沙尘动力学研究。E-mail:jipingchao@yahoo.com

## 1 引言

沙尘暴的频繁发生已成为中国西北、华北地区严重的气候灾害。关于沙尘暴的源地,发生的天气条件以及输送路径等,已有不少研究。对于东亚地区,沙尘天气多发区主要位于中国南疆盆地和内蒙古西部及蒙古南部,由于地形强迫促进了起沙过程,而青藏高原地形绕流的强大以及冷锋过程的相对频繁使得沙尘的向南输送更强(姜学恭等,2008)。而且,对于沙尘输送来说,春季环流对沙尘暴的输送有重要影响,其强度、轨迹控制着沙尘的输送(宋敏红等,2007)。对于起沙过程,较强沙尘暴天气过程中动力湍流强于热力湍流(张宏升等,2007),而数值模拟表明,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)。在曾庆存等著的《千里黄云-东亚沙尘暴研究》中总结了已有的研究成果并有著者们自身的发展(曾庆存等,2006)。

沙尘动力学至少有两个问题需要研究。一个沙尘暴的生成即起沙问题,显然它涉及下垫面的物理状态,其上面大气贴地层和边界层的湍流状态,以及向上输送沙尘的条件和过程,相对来讲这个问题的动力学比较复杂(Shao, 2001)。另一个是沙尘的沉降问题,对于该过程的理论分析还比较少。沙尘输送风力的强度,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(Slavin, 1983),云物理混合过程(Andreae, et al, 1986)等决定了大气中存在不同的沙尘尺度分布。虽然 Schütz(1979)研究表明沙尘粒径分布最后可能会到达一种平衡态,但是还缺乏充分的试验来证明。最近研究表明不同沙尘粒径的分布在海洋上存在着不同干沉降的关系(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转输的光学性质,只考虑动力学方面,则这个问题比较简单,比如当沙尘颗粒比较小时,它的 Stockes 末速不大,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能沉降到地面即出现沙尘暴。于是将沙尘大气看作为两相流,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。

本文从两相流的角度来研究沙尘的沉降和垂直输运,先从简单的气块法入手,后续工作将进一步发展到气柱挟卷模式,最后给出三维非线性模式的研究。沙尘质量和湍流过程在沙尘沉降过程中有一定作用,而气块法的局限性在于将气块看成质点,忽略其与环境的交换,所以湍流的过程在本文中不能描述,将在气柱挟卷模式中简单引入,在三维非线性模式中详细讨论。

该简化的气块模型能够给出沙尘沉降的解析解,能够很好地用来讨论沙尘沉降条件与过程,但是正因为是简化的理论模型,为了求得解析解,对真实的物理过程做了极大的简化,所以与复杂的沙尘输送业务模式相比,该理论模型所反映的物理过程比较简单,还有许多不足。但是该理论模式是能够从物理本质上讨论沙尘沉降的一个有力的工具,可以为发展复杂的沙尘输送业务模式系统提供一个判别与检测工具。

## 2 两相流的密度变化

设空气和沙尘的密度分别为  $\rho_a$ 、 $\rho_s$ ,混合体的体积为  $V$ ,其中空气占有的体积为  $V_a$ ,沙尘占有的体积为  $V_s = V - V_a$ ,总质量和分部质量分别为  $M$ 、 $M_a$ 、 $M_s$ ,并有

$$M = M_a + M_s \quad (1)$$

进而有

$$\rho = \frac{V_a}{V} \rho_a + \frac{V_s}{V} \rho_s = (1 - S) \rho_a + S \rho_s \quad (2)$$

式中  $S = \frac{V_s}{V}$  定义为沙尘的浓度。

密度变化值为

$$d\rho = (1 - S)d\rho_a + (\rho_s - \rho_a)dS \quad (3)$$

设空气的热膨胀系数为  $\alpha = -\left(\frac{1}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial T}\right)_p$ ,对理想气体有  $\alpha = \frac{1}{T}$ ,有  $d\rho_a = -\alpha \hat{\rho}_a dT$ ,  $T$  为空气温度,上式改写成

$$d\rho = -\alpha \hat{\rho}_a (1 - S) dT + (\rho_s - \rho_a) dS \quad (4)$$

式中  $dA \equiv A' = A - \bar{A}$ ,  $\bar{A}$  为环境的气候值或平均值。可见混合体的密度不只是决定于空气的温度,

也决定于沙尘的浓度。

### 3 均匀环境中的气块运动

#### 3.1 基本模型建立

设气块外环境的平均温度和沙尘浓度分别为 $\bar{T}$ 、 $\bar{S}$ , 气柱和环境之间存在扩散过程, 导致气柱内物理量变化, 这一过程是线性的, 为

$$\frac{dT}{dt} = c(\bar{T} - T) \quad (5)$$

$$\frac{dS}{dt} = d(\bar{S} - S) \quad (6)$$

引进无量纲量

$$\tilde{S} = S/\bar{S}, \tilde{T} = T/\bar{T}, \tau = ct, \delta = d/c \quad (7)$$

上面两个方程的无量纲形式为

$$\frac{d\tilde{T}}{d\tau} = 1 - \tilde{T} \quad (8)$$

$$\frac{d\tilde{S}}{d\tau} = \delta(1 - \tilde{S}) \quad (9)$$

可以认为沙尘的输送系数 $d$  小于温度的输送系数 $c$ , 即有 $\delta < 1$ 。上面两个方程的解为

$$\tilde{T} = 1 + (\tilde{T}_0 - 1)e^{-\tau} \quad (10)$$

$$\tilde{S} = 1 + (\tilde{S}_0 - 1)e^{-\delta\tau} \quad (11)$$

可见沙尘达到平衡态的时间要长于温度。若扣除环境值, 写成距平值为(略去 $\sim$ 号)

$$T' = (T_0 - 1)e^{-\tau} \quad (12)$$

$$S' = (S_0 - 1)e^{-\delta\tau} \quad (13)$$

现将式(4)写成无量纲形式, 并用距平符号写出, 略去无量纲符号 $\sim$ , 为

$$\rho' = -(1 - \bar{S})T' + \frac{\rho_s - \rho_a}{\hat{\rho}_a}\bar{S}S' \quad (14)$$

此式可简化, 考虑到 $\rho_a \ll \rho_s$  并当 $\bar{S} \ll 1$  时, 给出

$$\rho' = -T' + RS' \quad (15)$$

式中 $R = \frac{\rho_s - \rho_a}{\hat{\rho}_a}\bar{S}$ 。

另一方面, 在重力场中如基本密度与垂直压强梯度达成静力平衡, 则由扰动密度引起气块的垂直加速度为(有量纲)

$$\frac{d\rho'}{dt} = -g \frac{\rho'}{\hat{\rho}_a} \quad (16)$$

如取 $w$  的特征量为 $g/c$ , 则无量纲方程为

$$\frac{dw}{d\tau} = -\rho' \quad (17)$$

注意到扰动密度在此是以环境密度为特征值的, 故其值甚小。

应用式(12)、(13)、(15)、(17)为

$$\frac{dw}{d\tau} = (T_0 - 1)e^{-\tau} - R(S_0 - 1)e^{-\delta\tau} \quad (18)$$

如设 $\tau = 0, w = 0$ , 积分上式给出

$$w = -(T_0 - 1)(e^{-\tau} - 1) +$$

$$\frac{1}{\delta}R(S_0 - 1)(e^{-\delta\tau} - 1) \quad (19)$$

对气块运动,  $w = dz/d\tau$ , 如设 $\tau = 0, z = z_0$  (> 0 的指定高度), 积分上式得到

$$z = z_0 + (T_0 - 1)[(\tau - 1) + e^{-\tau}] -$$

$$\frac{1}{\delta}R(S_0 - 1)\left[\left(\tau - \frac{1}{\delta}\right) + \frac{1}{\delta}e^{-\delta\tau}\right] \quad (20)$$

$z$  的特征值为 $g/c^2$ 。

#### 3.2 计算参数选取

根据基本大气条件, 我们选取参数如下:  $\rho_a \sim 1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_s \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ ,  $c \sim 5.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,  $\delta \sim 1/6$ ,  $\bar{S} \sim 10^{-6}$ ,  $z \sim g/c^2$ ,  $T_0 = 1 \pm \Delta T$ ,  $S_0 = 1 \pm \Delta S$ 。其中 $\bar{S}$ 值是由观测到的沙尘暴浓度换算得到。

#### 3.3 气块沉降分析

气块法的缺陷在于没有扰动垂直压强梯度, 从而无法平均掉扰动密度的主要部分, 使剩下的扰动密度部分驱动垂直加速度, 因此气块模式极易产生强的垂直加速度(巢纪平等, 1964), 所以当用气块模式来研究对流运动时, 初始密度(在此为温度和沙尘浓度扰动)都要取得比观测值小, 这意味着其中有部分已用到和压强垂直梯度的平衡中去了。比如初始温度扰动实际为 1 ℃ 时, 在模式中取为 0.1 ℃。

根据基本浮力关系, 当初始气块温度比环境温度高时, 气块将上升, 不利于沙尘沉降; 而初始沙尘浓度比环境浓度高时, 气块密度大, 有利于沙尘的沉降。图 1 分析了初始扰动对沉降时间的影响。从图 1a、1b、1c 可以看到当初始温度扰动增加时, 沙尘沉降时间从图 1a 的 167.52 s 增加到图 1b 的 10893 s, 从图 1b 可以看到沙尘先上扬再沉降, 增长了沙尘在空气中滞留时间, 有利于沙尘在空气中离开源地的水平输送。当初始温度扰动继续增加时可以看到在模拟的时间内沙尘不断上扬, 反映了初始温度扰动越大越有利于沙尘在空气中滞留。从图 1d、1e、1f 可以看到初始气块沙尘扰动浓度越小, 越有利于沙尘在大气中滞留。其原因类似于对初始温度扰动的

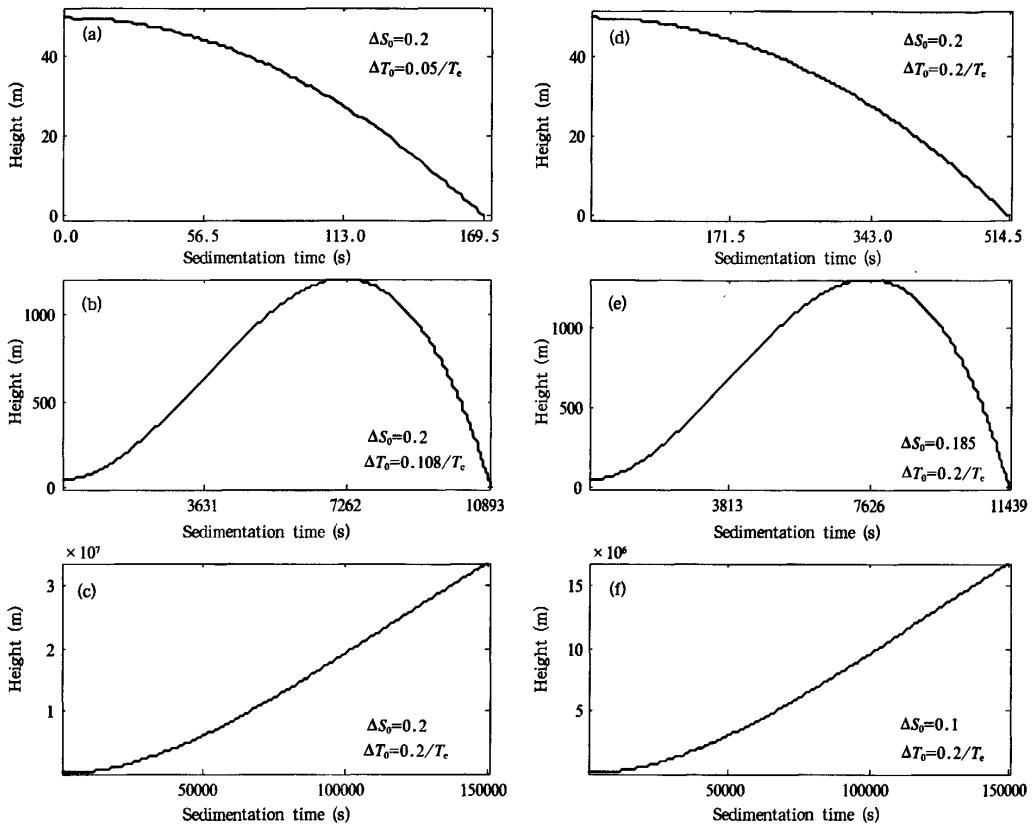


图 1 沉降时间随初始温度、沙尘浓度扰动的关系

(ΔS₀ 与 ΔT₀ 为无量纲量(下同), Z₀ = 50 m)

Fig. 1 Sedimentation time variation with the initial temperature and dust concentration disturbances

(ΔS₀ and ΔT₀ are all dimensionless (the follows are all the same), Z₀ = 50 m)

分析。所以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。

图 2 分析了初始高度对沉降时间的影响。假定初始温度,沙尘扰动在图 2a、2b 的  $Z_0 = 10$  m 与图 2c、2d 的  $Z_0 = 1000$  m 处。可以看到随着初始高度增加,沉降时间较大的增加,图 2b、2d 分别对应于图 2a、2c 的垂直速度。在上面讨论的有利沉降条件下,不管初始高度如何(在对流层内)沉降都能发生。所以在平均环境下,决定着沙尘是否沉降的主要因素取决于初始温度与沙尘浓度扰动。

## 4 非均匀环境下气块运动

### 4.1 基本模型建立

设环境的温度和沙尘有垂直分布,其梯度为

$$\Gamma_T(z) = -\frac{\partial \bar{T}}{\partial z}, \Gamma_S(z) = -\frac{\partial \bar{S}}{\partial z}, \text{ 扰动温度方程为} \\ \frac{dT'}{dt} + (\Gamma_a - \Gamma_T)w = -cT' - \lambda T' \quad (21)$$

式中  $\Gamma_a = g/C_p$  为气块上升时的干绝热递减率,  $\Theta(z) = \Gamma_a - \Gamma_T$  为静力稳定性,  $\lambda$  为牛顿辐射冷却系数。沙尘浓度的变化方程为

$$\frac{dS'}{dt} - \Gamma_S w = -dS' \quad (22)$$

无量纲的取值  $\Theta \sim \bar{T}/z, \Gamma_S \sim \bar{S}/z$ 。方程(21)的无量纲形式为

$$\frac{dT'}{dt} + \tilde{\Theta}(z)w = -T' - \hbar T' \quad (23)$$

式中  $\tilde{\Theta}$  是无量纲的,  $\hbar = \lambda/c$ 。类似地,式(22)的无量纲形式为

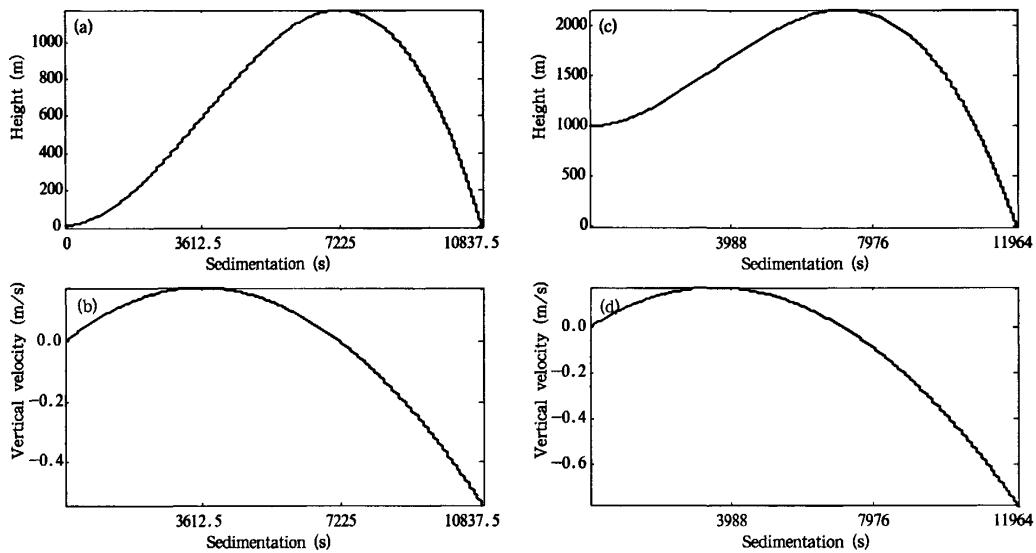


图 2 沉降时间随初始高度关系以及对应的垂直速度

(a,b,  $Z_0 = 10 \text{ m}$ ; c,d,  $Z_0 = 1000 \text{ m}$ ;  $\Delta S_0 = 0.2, \Delta T_0 = 0.108/T_e$ )

Fig. 2 Simentation time variation with the initial height, and the corresponding vertical velocity

(a,b,  $Z_0 = 10 \text{ m}$ ; c,d,  $Z_0 = 1000 \text{ m}$ ;  $\Delta S_0 = 0.2, \Delta T_0 = 0.108/T_e$ )

$$\frac{dS'}{d\tau} - \tilde{\Gamma}_S(z)w = -\delta S' \quad (24)$$

垂直加速度方程的无量纲形式为

$$\frac{dw}{d\tau} = T' - RS' \quad (25)$$

式(23)、(24)、(25)组成对变量  $T'$ 、 $S'$ 、 $w$  的闭合方程组。或者,对单一变量  $T'$  和  $S'$  写出,为

$$\begin{aligned} & \frac{d^3T'}{d\tau^3} + (1 + h + \delta) \frac{d^2T'}{d\tau^2} + (R\tilde{\Gamma}_S + \tilde{\Theta} + \\ & \delta(1 + h)) \frac{dT'}{d\tau} + (\delta\tilde{\Theta} + R\tilde{\Gamma}_S(1 + h))T' = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

对  $S'$  的方程同此。

初始条件为

$$\begin{aligned} & \tau = 0, (T', S') = (T'_0, S'_0), \\ & \frac{d(T', S')}{d\tau} = \frac{d^2(T', S')}{d\tau^2} = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

设解为

$$(T', S') = (T'_0, S'_0)e^{-\sigma\tau} \quad (28)$$

令

$$\begin{aligned} a &= 1 + h + \delta \\ b &= R\tilde{\Gamma}_S + \tilde{\Theta} + \delta(1 + h) \\ c &= \delta\tilde{\Theta} + R(1 + h) \end{aligned}$$

式(28)的特征根方程为

$$\sigma^3 - a\sigma^2 + b\sigma - c = 0 \quad (29)$$

设

$$\sigma = \omega + d$$

当取  $d = a/3$  时,得到三次方程的标准型,为

$$\omega^3 + P\omega + Q = 0 \quad (30)$$

其中

$$P = b - \frac{a^2}{3}, \quad Q = -\frac{2}{27}a^3 + \frac{1}{3}ab - c \quad (31)$$

由判别式

$$\Delta = \frac{Q^2}{4} + \frac{P^3}{27} \quad (32)$$

可决定方程(30)根的性质。

#### 4.2 基本参数选取

基本参数同 3.2 节,无量纲特征值  $\bar{T} = T_e = 273.15, h = 0.5, \Gamma_0 = 3.9 \times 10^5, \Theta_0 = 1.4 \times 10^3$ , 这里  $\tilde{\Gamma}_S = \Gamma_0\Gamma_1, \tilde{\Theta} = \Theta_0\Theta_1$ 。为了更简明的分析物理关系,我们假定  $\Theta$  与  $\Gamma$  随高度不变。

#### 4.3 模式结果分析

##### 4.3.1 解域分析

$T'$  的特征方程的标准形如式(30),根据一元三次方程解的判别式(32),由盛金判别法可知:(1)  $\Delta > 0$ ,式(30)有一对共轭虚根;(2)  $\Delta = 0$  有一个两重根;(3)  $\Delta < 0$  有 3 个不同实根。根据 a 的基本参数,

我们可以计算出  $\Theta - \Gamma$  场内判别式(32)的等值线。

如图 3a, 横坐标为  $\Theta_1$ , 纵坐标为  $\Gamma_1$ , 其中横纵坐标都为对数坐标系(图 3—图 5 同)。 $\Theta_1$  只大于 0, 因为干绝热不稳定不易存在,  $\Gamma_1$  为正表示正常条件, 为负值表示阵性沙尘入侵到上空环境。

(1) 解域 1: 0 等值线表示方程(30)有 3 个实根, 其中有一个两重根, 即表示方程(26)的解由两个不同的指数项表示;

(2) 解域 2: 0 等值线以上区域表示方程有一个实根和一对共轭虚根; 表示方程(26)在该区域内有振荡的解;

(3) 解域 3: 0 等值线以下区域  $\Delta < 0$ , 方程有 3 个实根, 表示方程(26)的解由 3 个不同的指数项表示。

#### 4.3.2 初始温度扰动对沉降区域的影响

为方便讨论, 我们对方程组(23)、(24)、(25)求数值解。

图 3 描述了  $\Theta - \Gamma$  场内沉降区域随初始温度扰动变化的关系, 深色部分为沉降区域(下同)。从图 3a—3f, 固定  $\Delta S_0 = 0.2$ ,  $Z_0 = 50$  m, 初始温度扰动从  $\Delta T = 0.05/T_e$  不断增加到  $\Delta T = 0.5/T_e$ 。 $\Delta T$ 之所以取这么小的原因同均匀场讨论的一样, 是由于

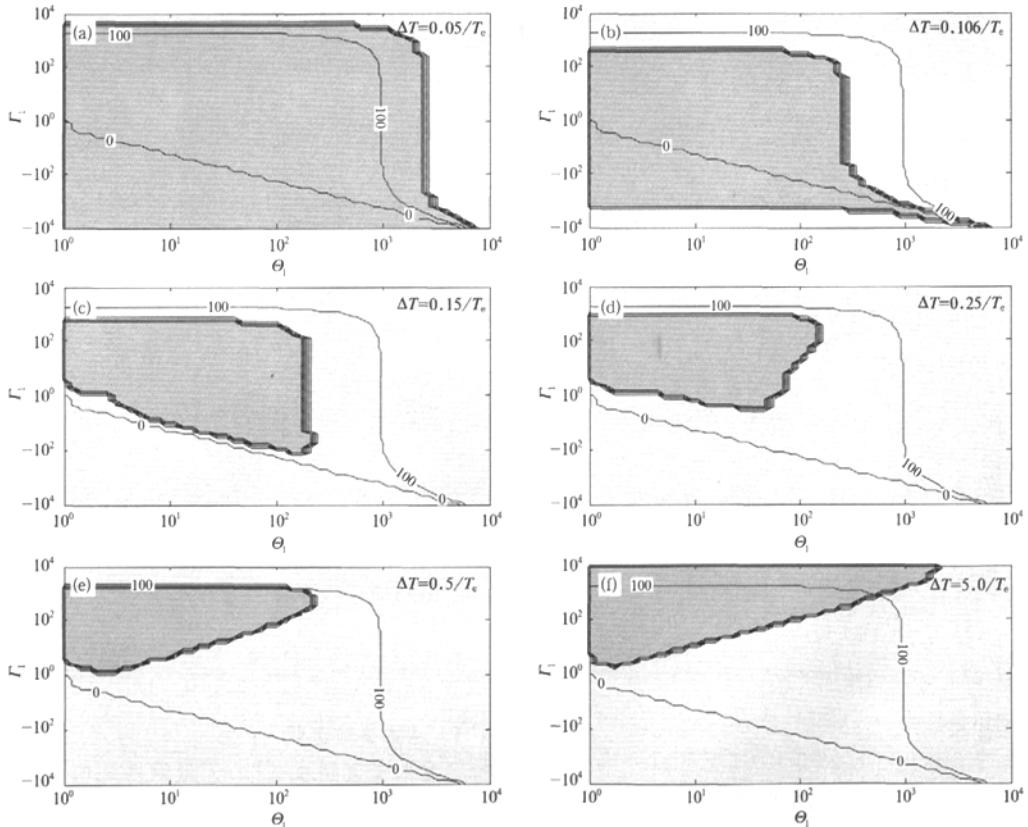


图 3 解域与初始温度扰动对沉降区域的影响

(两个坐标都为对数坐标,  $\Delta S_0 = 0.2$ ,  $Z_0 = 50$  m, 曲线为判别式的等值线, 深色区域为沉降区域)。

(1)根据盛金判别式, 0 线以上方程有一对共轭虚根, 0 线有一个两重根, 0 线以下为负值, 有 3 个不同实根。

(2)随着初始温度扰动的增加, 沉降区域减小, 当扰动足够大时沉降区域开始增大)

Fig. 3 The solution field suggests the impact of initial temperature disturbance on sedimentation fields  
(Both coordinates are logarithmic,  $\Delta S_0 = 0.2$ ,  $Z_0 = 50$  m. The curves are discriminant isolines; the dark areas show the sedimentation areas. (1) According to the discriminant, above the 0 isoline, the equation has two conjugate imaginary roots; on the 0 isoline, the equation has three real roots, two of them are the same; below the 0 isoline, the equation has three different real roots. (2) With the initial temperature disturbance increasing, the sedimentation area shrinks; when the disturbance becomes strong enough, the sedimentation area then begins to extend)

无扰动垂直压强梯度相平衡的一种近似。从图 3a—e 我们可以看到,随着初始温度扰动的增加,沉降区域从最初横跨 3 个解域的大范围逐渐缩小,最后只有在解域 2(存在共轭虚根的解域)内有沉降,其余的两个解域内都无沉降。特别是沉降区域减少速率在初始温度扰动偏小的时候比较大,当初始扰动温度较大后沉降区域变化比较缓慢。

当初始温度扰动足够大,如图 3f 的  $\Delta T = 5.0/T_e$  时我们可以发现沉降区域在解域 2 内开始发展扩大,但这需要极其稳定的环境场,即非常大的稳定度和垂直沙尘浓度梯度(绝对值)。

同平均场的讨论一样,气块温度升高有利于沙尘在空气中滞留,比如局地垂直对流较强的地方,气团温度比周围环境偏高,沙尘易在空气中悬浮。

#### 4.3.3 初始沙尘浓度扰动对沉降区域的影响

图 4 描述了  $\Theta - \Gamma$  场内沉降区域随初始沙尘浓度扰动变化的关系。从图 4b—4f,固定  $\Delta T_0 = 0.2/T_e$

$T_e, Z_0 = 50 \text{ m}$ , 初始沙尘浓度扰动从  $\Delta S = 0.12$  不断增加到  $\Delta S = 0.4$ 。可以看到随着初始沙尘浓度扰动的增大,沉降区域最初只存在于解域 2,慢慢扩大,最后在 3 个解域内都有沉降区域的出现。

从图 4a 我们可以看到当初始沙尘浓度扰动特别小,  $\Delta S = 0.01$ , 此时沉降区域与  $\Delta S = 0.1$  时的沉降区域变化不大,都在解域 2 内。

#### 4.3.4 易沉降区域分析

从图 4b、4c 我们可以看到,对于变化的初始温度扰动,沙尘浓度扰动,解域 2 内  $\Theta - \Gamma$  偏小的区域,即在较为稳定的环境下有利于沙尘的沉降。不稳定或者稳定性非常大的时候有利于沙尘在空气中悬浮。

#### 4.3.5 初始高度对沉降区域的影响

图 5 描述了  $\Theta - \Gamma$  场内沉降区域随初始沙尘高度变化的关系。图 5a—5f,固定  $\Delta T_0 = 0.2/T_e, \Delta S_0 = 0.2$ , 初始沙尘浓度扰动从  $Z_0 = 10 \text{ m}$  不断增加到

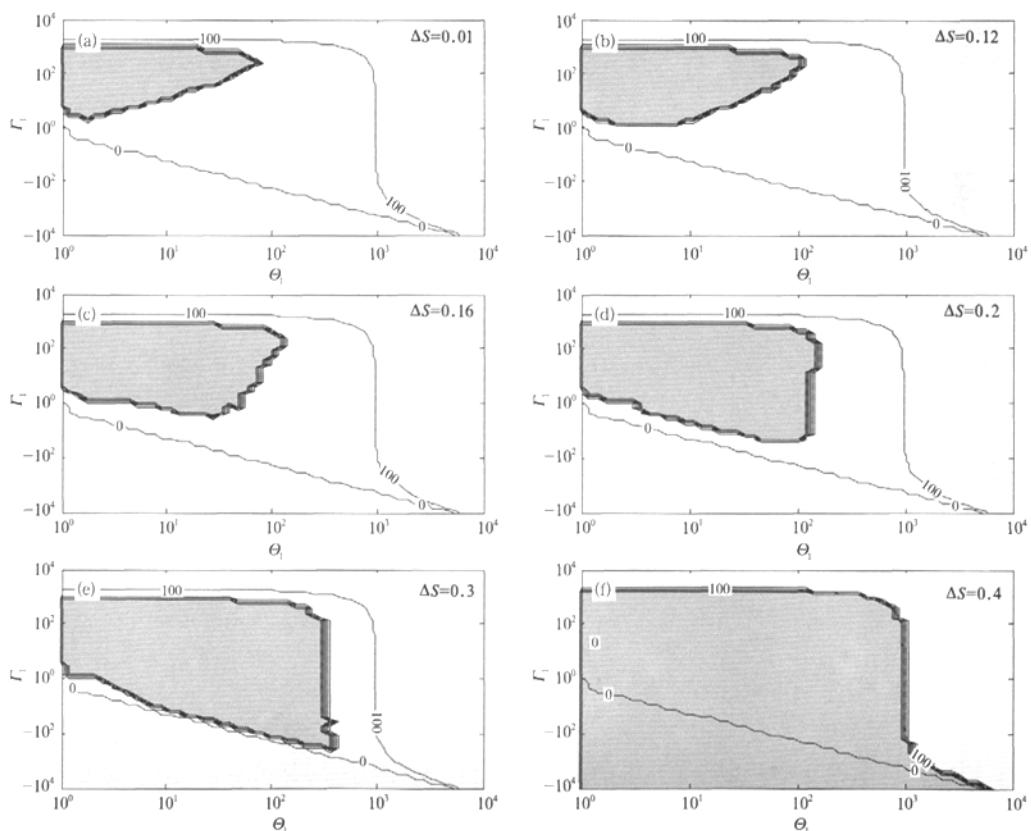


图 4 初始沙尘扰动对沉降区域的影响  
( $\Delta T_0 = 0.2/T_e, Z_0 = 50 \text{ m}$ ; 初始沙尘扰动增加, 沉降区域增大)

Fig. 4 Effect of initial dust concentration disturbance on sedimentation fields  
( $\Delta T_0 = 0.2/T_e, Z_0 = 50 \text{ m}$ . With the disturbance increasing, the sedimentation area extends)

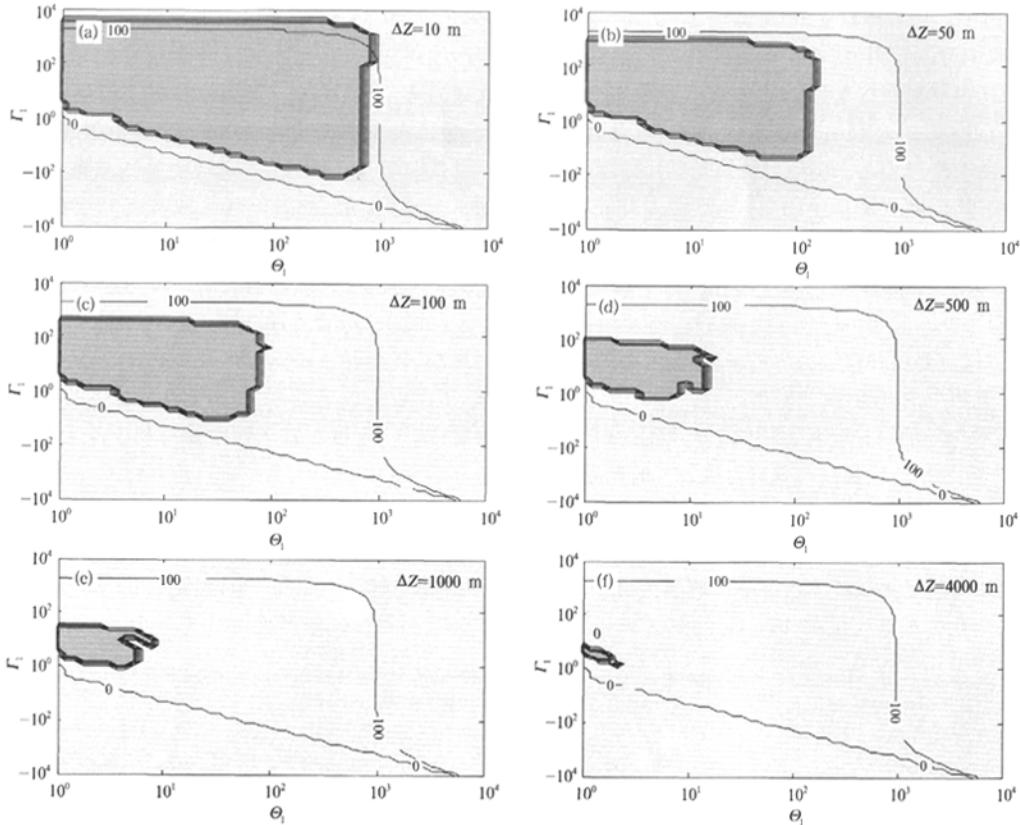


图 5 初始高度对沉降区域的影响  
( $\Delta T_0 = 0.2/T_e$ ,  $\Delta S_0 = 0.2$ ; 初始高度增加, 沉降解域减小至 0)

Fig. 5 Effect of initial height on sedimentation fields

( $\Delta T_0 = 0.2/T_e$ ,  $\Delta S_0 = 0.2$ ; With the initial height increasing, the sedimentation area shrinks into zero)

$Z_0 = 4000$  m。可以看到沉降区域逐渐缩小, 当到达一定的高度时沉降区域消失。此时沙尘在经过振荡后停留在高空。所以可以看出沙尘暴在高空更容易远距离地输送。

#### 4.3.6 3 种特征沉降分析

图 6 给出 3 种特征沉降变化图。3 种沉降都在易沉降区的解域 2 内。

(1) 速降区: 图 6a、6d,  $\Gamma_1 = 10$ ,  $\Theta_1 = 10$ ,  $\Delta S_0 = 0.2$ ,  $\Delta T_0 = 0.1/T_e$ ,  $Z_0 = 50$  m。

初始温度扰动较小, 沙尘浓度扰动较大的情况下沙尘容易沉降, 沉降时间较短, 而且垂直速度始终为负值, 因为沉降时间较短, 所以垂直速度也比较小。

(2) 缓降区: 图 6b、6e,  $\Gamma_1 = 10$ ,  $\Theta_1 = 10$ ,  $\Delta S_0 = 0.2$ ,  $\Delta T_0 = 0.2/T_e$ ,  $Z_0 = 50$  m。

当初始扰动温度变大时, 可以看到沙尘先上扬

后下降, 垂直速度由正变负, 沉降时间也大大的增长, 有利于沙尘悬浮与输送。

(3) 波动区: 图 6c、6f,  $\Gamma_1 = 100$ ,  $\Theta_1 = 100$ ,  $\Delta S_0 = 0.2$ ,  $\Delta T_0 = 0.2/T_e$ ,  $Z_0 = 50$  m。

当维持(2)的参数不变, 增加稳定度  $\Gamma_1$  与  $\Theta_1$ , 出现一种非常有趣的现象, 可以看到沙尘在空气中不断的上下波动, 此时很难判断沙尘何时沉降, 如图 6c 所示有可能在 5000 多秒沉降也有可能在 13380 s 时才沉降。这种情况取决于地面对沙尘的吸附能力, 当地面吸附能力较大沉降也就较早。可以看到沙尘的垂直速度也是在上下波动, 当然计算的垂直速度过大, 这是由于气块模型本身的缺陷, 缺乏抑制机制造成。这一缺陷将在后面的工作中改善。

当  $\Gamma_1$  与  $\Theta_1$  增大的时候, 此时为解域 2, 微分方程存在一对共轭虚根, 所以产生的解为振荡解, 故而

会有以上的物理表现。

#### 4.3.7 沙尘上扬与解域的关系

对于方程(26),其特征方程为(29),当有一特征值为负数的时候,可以看到对应于方程有一正指数组解,此时随着时间的增长,方程的解也会不断增长,所以此时沙尘将会上扬。为分析这种情况考虑以下情况,对于方程(30)设有两根  $\omega = -0.5a$  与  $\omega = -$

$2a$ ,在  $\Theta - \Gamma$  场内,0 等值线表示符合方程(30)的解。可以看到存在指数增长的解都发生在  $\Gamma_s < 0$  的区域内,即环境沙尘浓度垂直梯度为正值,当静力稳定性不变时,指数增长更快的解需要更大的环境沙尘浓度垂直梯度条件。例如较大的沙尘暴过境时沙尘气块更容易上扬。而在一般情况沙尘都只是经过振荡后悬浮在空气中随着背景场运动。

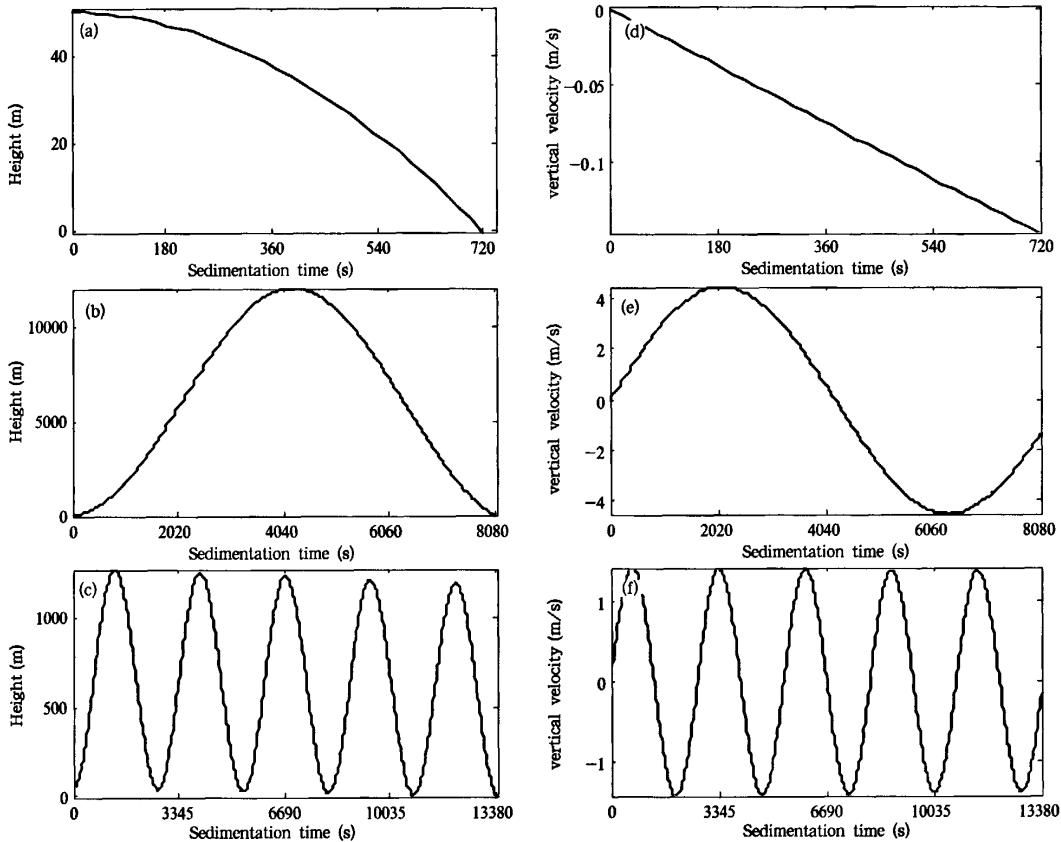


图 6 3 种特征沉降 ((1) d 为 a 对应的垂直速度,无量纲值  $\Gamma_1 = 10, \Theta_1 = 10, \Delta S_0 = 0.2, \Delta T_0 = 0.1/T_e, Z_0 = 50$  m; (2) e 为 b 对应的垂直速度,参数同(1),除了  $\Delta T_0 = 0.2/T_e$ ; (3) f 为 c 对应的垂直速度,  $\Delta S_0 = 0.2, \Delta T_0 = 0.2/T_e, \Gamma = 100, \Theta = 100, Z_0 = 50$  m)

Fig. 6 Three characteristic sedimentation patterns ((1) d shows the vertical velocity of a, dimensionless  $\Gamma_1 = 10, \Theta_1 = 10, \Delta S_0 = 0.2, \Delta T_0 = 0.1/T_e, Z_0 = 50$  m; (2) e shows the vertical velocity of b, the parameters are the same with (1) except for  $\Delta T_0 = 0.2/T_e$ ; (3) f shows the vertical velocity of c,  $\Delta S_0 = 0.2, \Delta T_0 = 0.2/T_e, \Gamma = 100, \Theta = 100, Z_0 = 50$  m)

## 5 结 论

考虑沙尘颗粒比较小的情况,它的 Stokes 末速不大,沙尘可以和所在的空气团一起运动,但由于沙尘的存在,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,利用气块法建

立简单的沙尘沉降模型。

在均匀背景场下,初始温度扰动增加沙尘沉降时间增长,当温度扰动继续增大时沙尘悬浮在空中而不能沉降,有利于沙尘的水平输送。初始沙尘浓度扰动的增大有利于沙尘的沉降。所以在均匀背景场下有利于沙尘沉降的条件为大的初始沙尘浓度扰动,小的初始温度扰动。

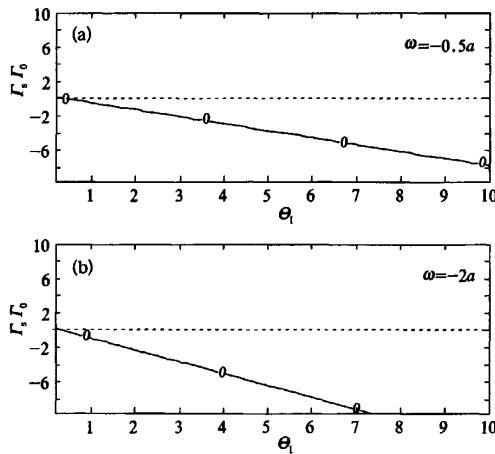


图 7 对于方程(30),设有两个指数

增长解  $\omega = -0.5a$  与  $\omega = -2a$

Fig. 7 Two different roots ( $\omega = -0.5a, \omega = -2a$ ) were assumed for equation (30)

进一步考虑环境场为更真实的情况,引入稳定性  $\Theta$  与垂直沙尘浓度梯度  $\Gamma$ 。

为了解释物理过程,我们根据特征方程的判别式来分析解域:在  $\Theta - \Gamma$  场内存在 3 个解域,解域 1 表示方程(26)的解由两个不同的指数项表示;解域 2 表示方程有振荡的解;解域 3 表示方程的解由 3 个不同的指数项表示。随着初始温度扰动增加,沉降区域减小,最后只存在解域 2 中;随着初始沙尘浓度扰动减小,沉降区域减小,最后也只存在解域 2 中。可见易沉降区域为解域 2 内  $\Theta - \Gamma$  偏小的区域,即在较为稳定的环境下有利于沙尘的沉降。不稳定或者稳定性非常大的时候有利于沙尘在空气中悬浮。

随着初始高度增加,沉降区域减小,即使在易降区内随着初始高度到达一定高度,沉降区域也会减小为 0,这种情况下沙尘在空气振荡后悬浮在空气中。

模式给出 3 种特征沉降方式:(1)速降区,沉降速率较快;(2)缓降区,沙尘先上升后下降,沉降时间较长;(3)波动区,沙尘在空气中不断的上下波动,此时很难判断沙尘何时沉降,取决于地面状况。

对于指数增长的解,物理上表现为沙尘不断上扬,此时只在环境沙尘浓度垂直梯度为正值,即  $\Gamma < 0$  的情况下出现。例如较大的沙尘暴过境时沙尘气块更容易上扬,而在一般情况沙尘都只是经过振荡后悬浮在空气中随着背景场而运动。

当然,因为是简化的理论模式,对不同的沙尘粒径的讨论可以用初始沙尘浓度的不同来替代。我们假设沙尘密度一定,较大的沙尘粒径即相当于较大

的初始沙尘扰动。

由于气块模型对抑制机制的缺乏,所以计算出来的垂直速度与沙尘高度也会偏大,该缺陷将在下面进一步的研究中改进。

## 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
- 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
- Schütz L. 1979. Saharan dust transport over the north Atlantic Ocean // Morales C. Model Calculations and Measurements, in Saharan Dust. New York: John Wiley, 233-242
- Shao Y. 2001. A model for mineral dust emission. *J Geophys Res*, 106 (D17): 20239-20254
- 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
- Slinn W G N. 1983. Air-to-sea transfer of particles// Liss P S, Slinn W G N, et al. Air-Sea Exchange of Gases and Particles. Norwell Mass, 299-405
- Song Minhong, Qian Zhengan, 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
- Zeng Qingcun, et al. 2006. Gigantic Yellow Cloud: Dust Storms in East Asia (in Chinese). Beijing: Science Press, 13228pp
- 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

## 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
- 顾兆林,赵永志,郁水章等. 2003. 半卷风的形成、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,陈受均. 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、弱沙尘暴年春季平均环流及沙尘活动变化分析. *气象学报*, 65(1):94-104
- 曹庆存等. 2006. 千里黄云·东亚沙尘暴研究. 北京:科学出版社, 13228pp
- 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