

# 沙尘暴辐射强迫的锋生过程分析\*

申 绍 华

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

陈 受 钧

(北京大学地球物理系, 100871)

## 提 要

本文利用锋面方程结合数值模式结果讨论了在沙尘辐射强迫下, 影响锋生过程的物理机制, 计算了不同的沙尘分布对这种锋生过程的影响。计算和分析结果表明: 白天锋生主要是由非绝热加热和水平速度变形场共同产生的, 垂直速度场对锋生的影响较弱, 主要起锋消作用。水平温度梯度的平流对锋生(消)的影响都很小。晚上影响低层锋消的主要因子是非绝热加热项。

当沙尘降低时, 沙尘辐射强迫的锋面强度和坡度都相应地减小。沙尘暴区中心上空的等熵混合层厚度也随之减少。

关键词: 沙尘, 辐射, 锋生。

## 1 引 言

在文献[1]里, 我们利用数值模式研究了沙尘爆发时, 沙尘的辐射效应对锋面系统的强迫作用。研究表明: 沙尘爆发时, 白天沙尘辐射加热在大气低层导致锋生, 晚上沙尘辐射冷却导致锋消。这些结论同现有的观测结果是一致的<sup>[2-4]</sup>。但是, 要更清楚地了解沙尘辐射强迫下, 影响锋生(消)的物理机制, 应在下面两个方面做进一步分析。一方面是沙尘辐射强迫的锋生(消)是通过什么样的物理机制形成的? 另一方面是沙尘的空间分析对这种锋生过程有什么影响? 用现有的观测资料很难对上面这两个问题进行详细的研究。目前, 有关这方面的研究也很少。

本文利用锋面方程并结合二维数值模式结果研究了沙尘爆发时, 在沙尘辐射强迫下, 影响锋生(消)的物理机制。同时, 也讨论沙尘的分布对这种锋生过程的影响。

## 2 锋生过程分析

### 2.1 锋面方程

在  $z$  坐标系里热力学方程可以写成<sup>[5]</sup>:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla\right)\theta + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta}{c_p} \dot{Q} \quad (1)$$

\* 1992 年 9 月 2 日收到修改稿, 受高等学校博士点科研基金资助, 项目编号 9200125。

式中  $\dot{Q}$  是非绝热加热,  $c_p$  是等压比热。

$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right), v = (u, v)$ 。用  $\nabla \times$  式(1)得到:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla \right) \nabla \theta = -\nabla v \cdot \nabla \theta - \nabla \left( w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \nabla \left( \frac{\theta}{c_p} \dot{Q} \right) \quad (2)$$

再用  $\nabla \theta \times$  式(2)得到下式:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + v \cdot \nabla \right) |\nabla \theta|^2 = -2\nabla \theta \cdot (\nabla v \cdot \nabla \theta) - 2\nabla \theta \cdot \nabla \left( w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + 2\nabla \theta \cdot \nabla \left( \frac{\theta}{c_p} \dot{Q} \right) \quad (3)$$

上式化为标量形式的局地变化方程可写成:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left| \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|^2 = & \underbrace{-u \frac{\partial}{\partial x} \left( \left| \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|^2 \right)}_{F_1} - 2 \underbrace{\left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \frac{\partial u}{\partial x}}_{F_2} - 2 \underbrace{\left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left( w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right)}_{F_3} \\ & + 2 \underbrace{\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\theta}{c_p} \dot{Q} \right)}_{F_4} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)表示,水平锋生由等式右端的四项决定,其意义分别为:  $F_1$  表示水平温度梯度的水平平流对锋生的作用,  $F_2$  表示水平变形场对锋生的作用,  $F_3$  表示垂直运动场在水平方向变形对锋生的作用,  $F_4$  表示非绝热加热对锋生的作用。在本文里,  $F_4$  表示沙尘辐射加热对锋生的直接作用。  $F_3$  可以表示成两部分:

$$F_3 = -\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} - w \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z \partial x} \quad (5)$$

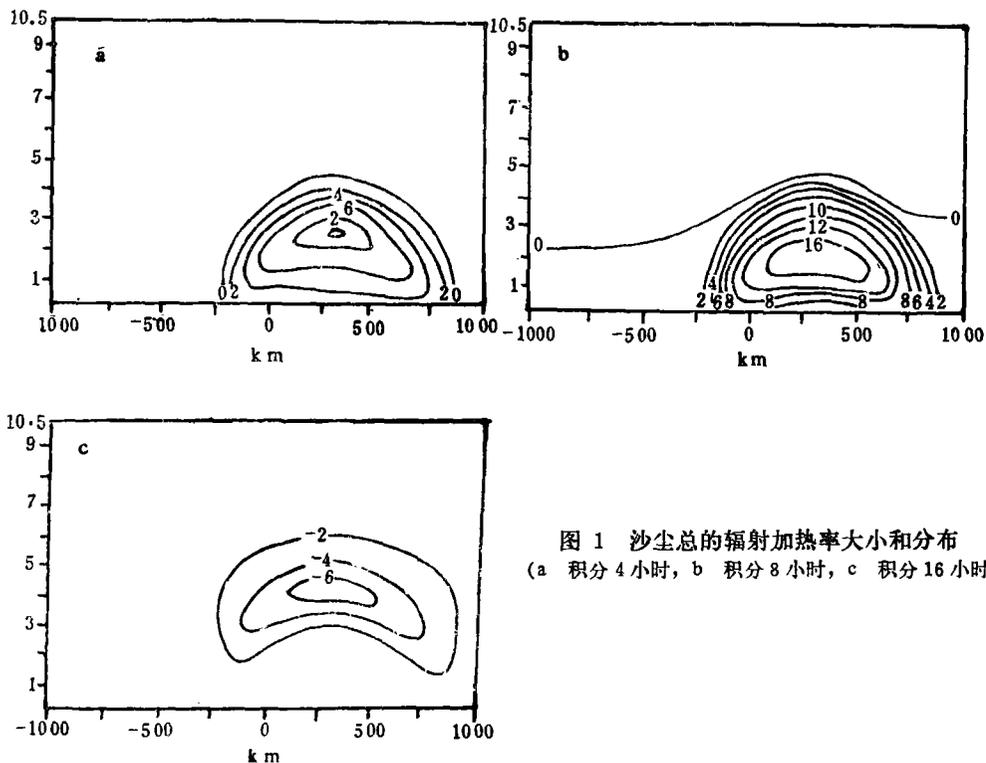


图 1 沙尘总的辐射加热率大小和分布  
(a) 积分 4 小时, b 积分 8 小时, c 积分 16 小时

式(5)中第一部分表示垂直运动的水平变形对锋生的作用,第二部分表示水平温度梯度的垂直输送诱导的锋生。

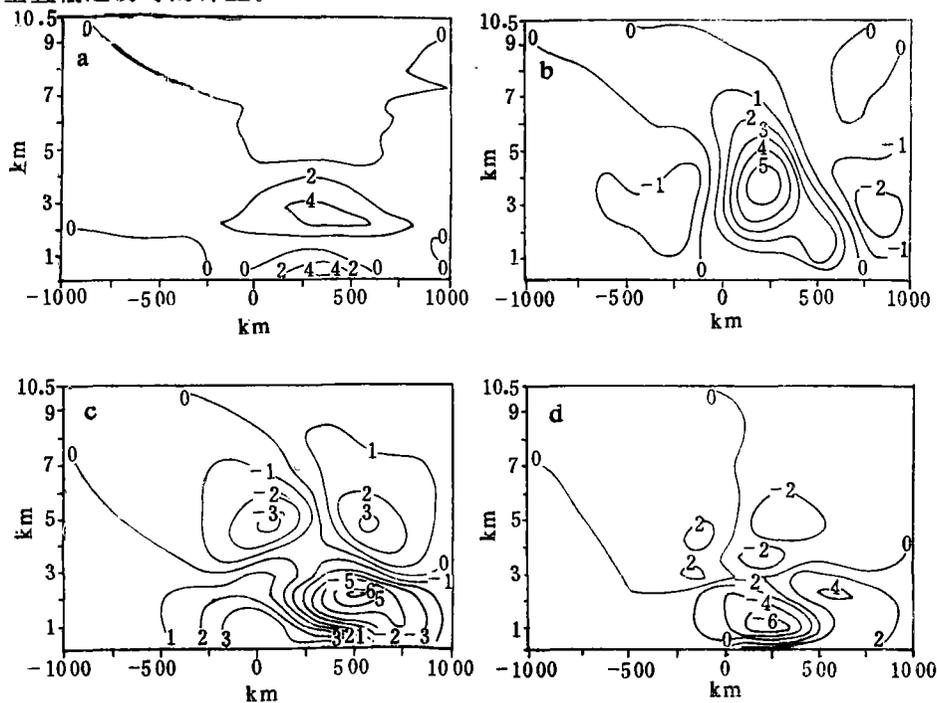


图 2 有无沙尘积分 8 小时的差值

(a)  $\hat{\theta}$  (等值线间隔 2 K), b  $\hat{\omega}$  (间隔 2  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ), c 和 d 为  $\hat{u}$  和  $\hat{v}$  (间隔 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

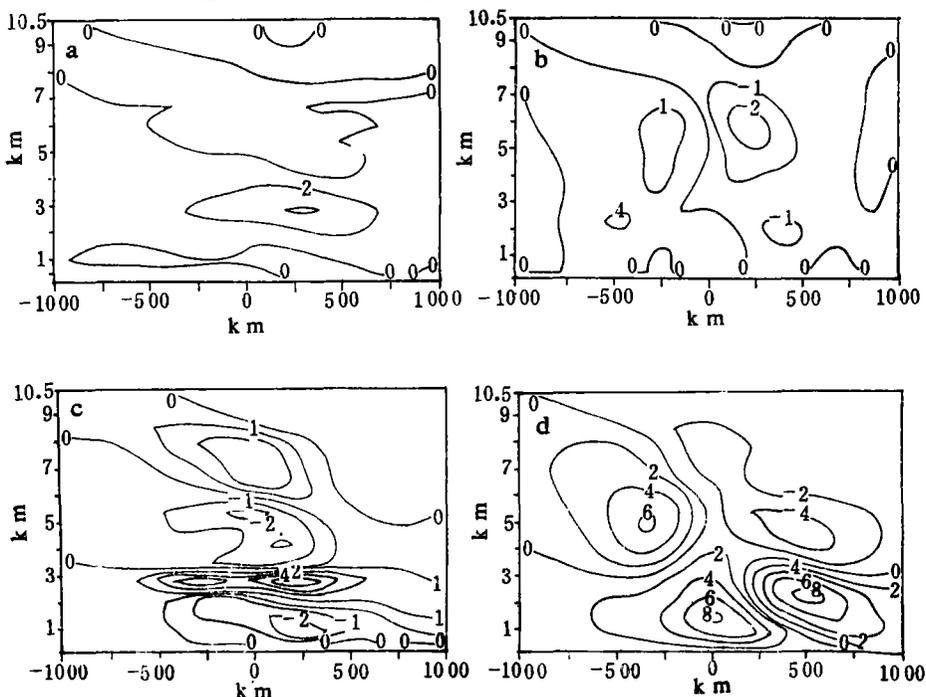


图 3 积分 16 小时的结果  
(说明同图 2)

## 2.2 沙尘辐射对锋生的作用

为了研究在沙尘辐射强迫下,影响大气低层锋生(消)的物理机制,首先利用文献[1]中的二维数值结果讨论单纯的沙尘辐射对锋生的作用及对  $F_1, F_2, F_3$  和  $F_4$  的影响。

从式(4)可以看到,  $F_4$  的大小依赖于沙尘辐射加热率的水平梯度。图1给出了积分4小时、8小时和16小时沙尘辐射加热率的大小和分布,也即局地时间10时、14时和22时沙尘辐射加热率的大小和分布。白天,主要是短波加热,大值中心位于3 km左右。辐射加热率的水平梯度在沙尘暴区边缘最大,它在沙尘暴区左侧边缘产生负的  $F_4$ , 在右侧边缘产生正的  $F_4$ 。这说明,单纯的沙尘辐射加热在沙尘区右侧产生锋生,左侧产生锋消。晚上沙尘放出长波辐射冷却大气,主要是起锋消作用。

式(4)也表明,  $F_1, F_2$  和  $F_3$  的大小主要依赖于  $\theta, u, w$  和它们的水平梯度  $\frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial x}$  和  $\frac{\partial w}{\partial x}$ 。沙尘辐射对  $F_1, F_2$  和  $F_3$  的影响可以从有沙尘辐射和无沙尘辐射两者的位温和速度场的差值分布中分析得到(分别以  $\hat{\theta}, \hat{w}$  和  $\hat{u}$  表示它们的差值)。图2—3给出了它们在积分8小时和积分16小时的分布。

白天(图2),在沙尘区2—4 km高度内,  $\hat{\theta}$  为正值,中心位于2.5 km附近,最大值达4.8 K。在它上面和下面  $\hat{\theta}$  均为负值,其中下面的负值区是沙尘吸收太阳辐射造成地面冷却的结果,它的最大负值为-4 K,上面的负值区是沙尘放出长波辐射冷却的结果,这是因为沙尘辐射冷却中心高于它的加热中心。 $\frac{\partial \hat{\theta}}{\partial x}$  除在沙尘区两侧近地面层外都很小。 $\hat{w}$  同有沙尘暴情况的垂直速度类似,它说明,垂直运动主要是沙尘辐射产生的,平流、扩散和摩擦对垂直运动的贡献相对较小。 $\frac{\partial \hat{w}}{\partial x}$  在沙尘区两侧的值较大,在沙尘暴区左侧  $\frac{\partial \hat{w}}{\partial x} > 0$ , 右侧  $\frac{\partial \hat{w}}{\partial x} < 0$ 。 $\hat{u}$  在整个区域形成4个明显的极值中心,其中在区域右下方和左上方为2个负的极值中心( $\hat{u} < 0$ )。在区域的左下方和右上方为2个正的极值中心( $\hat{u} > 0$ )。比较式(4)—(5)中  $F_1, F_2$  和  $F_3$  各项可以看出:  $\frac{\partial}{\partial x} \left( \left| \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|^2 \right)$  很小,  $w$  比  $u$  小一个量级,沙尘辐射对锋生的影响主要通过影响  $F_2$  和  $F_3$  中的第一部分来实现的。晚上(图3),  $\hat{\theta}$  和  $\hat{w}$  迅速减小,  $\frac{\partial \hat{\theta}}{\partial x}, \frac{\partial \hat{w}}{\partial x}$  和  $\frac{\partial \hat{u}}{\partial x}$  都变得很小。上面的分析表明,沙尘辐射在白天主要引起  $F_2$  和  $F_3$  的变化,其中  $F_2$  的变化导致沙尘区中心附近锋生,  $F_3$  的变化导致沙尘区左侧锋消,右侧锋生。

## 2.3 锋生(消)分析

下面根据二维模式的计算结果讨论  $F_1, F_2, F_3$  和  $F_4$  对锋生(消)作用的大小。图4—7分别给出了  $F_1, F_2, F_3$  和  $F_4$  在积分4小时、8小时、12小时和16小时的值。图4表明,在加热初期,锋生和锋消主要是由非绝热加热( $F_4$ )引起的,它在沙尘区中心地面附近和左上方产生强的极值中心,其中在近地面层的  $F_4$  达  $80 \times 10^{-15} \text{K}^2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以上,这主要是沙尘造成下垫面不均匀加热而产生的。垂直运动场的作用是在沙尘区中心左侧产生锋消( $F_3$  的最大负值达  $-30 \times 10^{-15} \text{K}^2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),在右侧产生弱的锋生。水平平流项和水平变

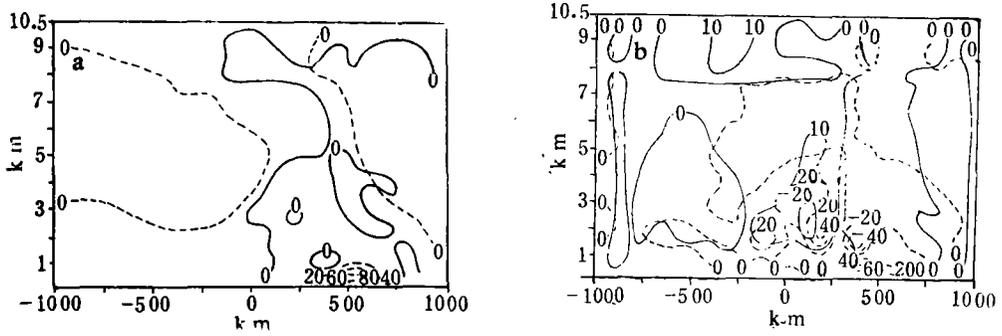


图 4 积分 4 小时的锋生函数  
 ( $F_1$ (实线)、 $F_2$ (虚线)(a)、 $F_3$ (实线)、 $F_4$ (虚线)(b), 其中,  $\Delta F_1=1, \Delta F_2=20, \Delta F_3=10, \Delta F_4=20$ , 单位:  $10^{-16} K^2 m^{-2} s^{-1}$ )

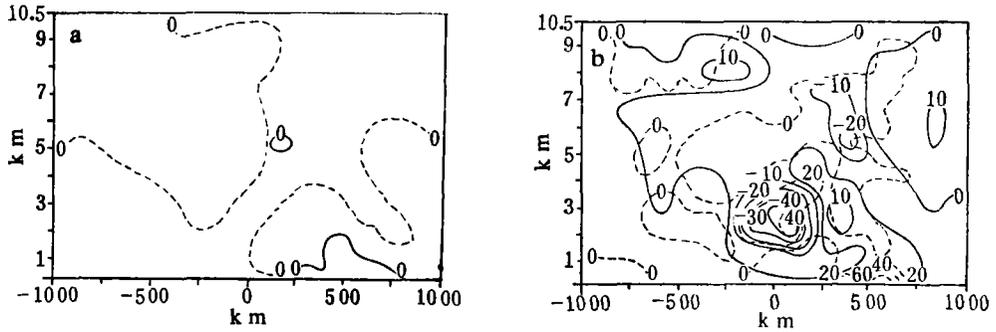


图 5 积分 8 小时的锋生函数  
 (说明同图 4)

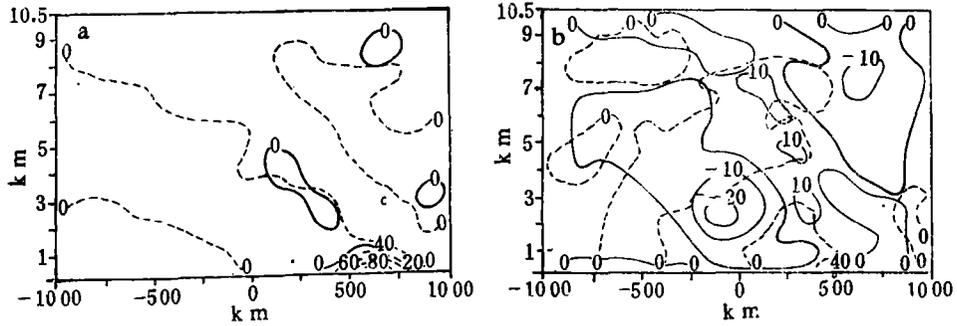


图 6 积分 12 小时的锋生函数  
 (说明同图 4)

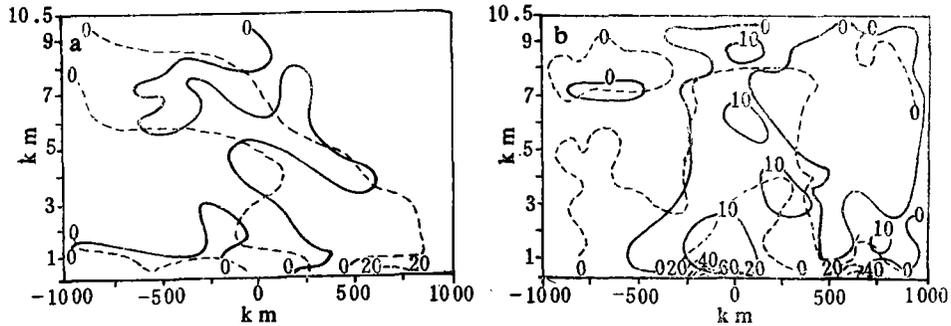


图 7 积分 16 小时的锋生函数  
 (说明同图 4)

形场对锋生(消)的影响很小,最大值只为  $10 \times 10^{-15} \text{K}^2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

从图 5 可以看到,继续加热 4 小时后,随着水平变形场  $F_2$  的建立和加强,锋生是非绝热加热和水平变形场共同作用的结果。非绝热加热产生的锋生位于沙尘区中心右侧地面附近和它的左上方,最大值达  $70 \times 10^{-15} \text{K}^2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。水平变形场诱导的锋生也主要位于沙尘区中心右侧附近的低层,最大值达  $80 \times 10^{-15} \text{K}^2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。两者共同作用的结果使锋生主要出现在沙尘区中心右下方到左上方一狭长带内。这同文献[1]和上节中讨论的锋生区是一致的。垂直运动场  $F_3$  的作用是在沙尘区右边附近产生弱的锋生,大小为前两者的 1/7。但锋消主要是由  $F_3$  引起的,锋消中心位于狭长的锋生区左侧 2 km 高度上,它对应于文献[1]中讨论的下沉区,这种锋消过程可能是下沉增温导致那里的水平位温梯度减弱的缘故。水平平流项  $F_1$  对锋生(消)的作用仍很小。

积分 8 小时以后,太阳辐射逐渐减弱,到积分 12 小时基本为零。沙尘辐射强迫的垂直速度和水平位温梯度减弱。这时  $F_3$ (图 6)产生的锋消强度明显减弱,仅是积分 8 小时相应值的 1/3,它对锋生的影响很小。沙尘暴区中心左上方由非绝热加热产生的锋生极值中心消失。非绝热加热项和水平变形场项仍是影响锋生的主要因子,两者都仅在沙尘区中心右侧地面附近表现明显。但相对来讲,这时水平变形场项  $F_2$  对锋生过程起支配作用,非绝热加热项的贡献仅是水平变形场的 1/2。在文献[1]里,我们曾指出:到积分 12 小时,锋面坡度减小,锋生仅在沙尘区中心的近地面层出现。这个结果同这里所讨论的锋生过程是相吻合的。水平平流项  $F_1$  对锋生的作用仍很小。

积分 12 小时以后,太阳辐射加热为零,沙尘和地面放出长波辐射冷却大气。图 7 表明,到积分 16 小时,水平变形场项  $F_2$  对锋生的影响显著减弱,最大值只有  $20 \times 10^{-15} \text{K}^2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (图 7 a 中虚线)。非绝热加热项  $F_4$  在沙尘区中心右侧有较强的锋消效应,在左侧有锋生效应(图 7 b 中虚线)。显然,这时的锋生(消)主要是由沙尘导致地面不均匀感热输送造成的。其它项的作用很小。

以上对锋生(消)过程物理机制的分析表明:白天、沙尘吸收太阳辐射不均匀加热大气和地面,导致大气低层锋生。在加热初期,锋生主要是非绝热加热项引起的,到中期,锋生是非绝热加热项和水平变形场项共同作用的结果,后期,水平变形场项对锋生起支配作用,但这时锋生仅局限在地面附近。垂直速度场项在沙尘区左侧斜压带产生很强的锋消,

中心位于 2 km 高度上。水平平流项对锋生(消)的作用很小。晚上,水平变形场项和垂直速度场项对锋生(消)的作用迅速减小。非绝热加热项在沙尘区内和边缘地面附近产生锋消和锋生,这主要是沙尘向下放出长波辐射造成下垫面不均匀的感热输送产生的。

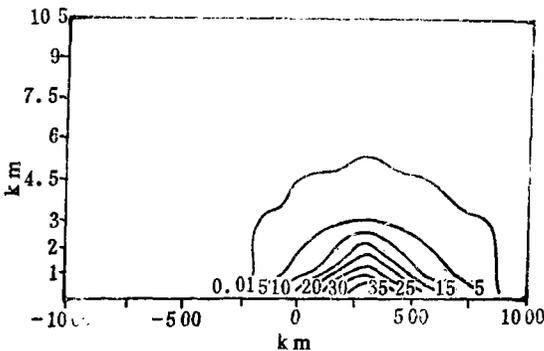


图 8 沙尘的垂直和水平分布  
(以消光系统  $\beta_v$  表示( $B_v$ , 单位  $10^{-4} \text{m}$ ),  $\Delta \beta_v = 5(10^{-4} \text{m})$ )

### 3 沙尘分布对锋生过程的影响

为了说明沙尘爆发时,沙尘分布对

锋生过程的影响,在本节里,我们利用二维数值模式模拟了不同沙尘分布情况下,沙尘辐射对锋生过程的影响。图 8 给出了同文献[1]中图 1 不同的沙尘分布。从图 8 可以看到:沙尘主要集中在 2.5 km 以下,沙尘层顶比文献[1]中沙尘层顶(图 1)低大约 1 km,但沙尘在低层浓度较大。它反映了沙尘爆发一段时间后,沙尘的分布状况。

在本节的模式计算中,初始场和物理参数值均同文献[1]中二维数值模式所用的值。

图 9 给出了积分 8 小时的位温和速度场的分布,它表明了白天沙尘辐射加热对位温和速度场的影响。从图 9 中可以看到:在低沙尘情况下,沙尘区中心左下侧仍有强的锋消,沙尘区中心右下侧有强的锋生,但锋面强度较弱,且限制在地面附近。沙尘暴中心上面有等熵混合层形成,但强度较弱。相对于高沙尘分布情况,低沙尘分布辐射加热诱导的垂直速度中的上升运动区的大小和强度都有所减弱,最大垂直上升速度为 5.4 cm/s,位于 3 km 高度附近。最大下沉速度为  $-1.8$  cm/s。沿锋面移动方向的水平速度  $u$  仅出现正负两个极值中心,中心值分布为  $-9.8$  m/s 和 4.5 m/s。相对于高沙尘情况,它的辐合强度明显减弱(图 9 c)。图 9 d 表明:垂直于锋面移动方向的低空急流( $v$ )强度相对于高沙尘情况较弱,特别是在低层急流中心右侧的水平切变没有明显的加强。我们在上节中指出:白天沙尘辐射加热诱导的水平变形场和非绝热加热在低层锋生中起主导作用。因此,在低沙尘情况下,沙尘辐射加热分布较低和水平变形场较弱是低层锋面较弱及限制在地面附近的主要原因。

到积分 12 小时(图略),除在沙尘区中心上面的等熵混合层已完全消失外,位温和速

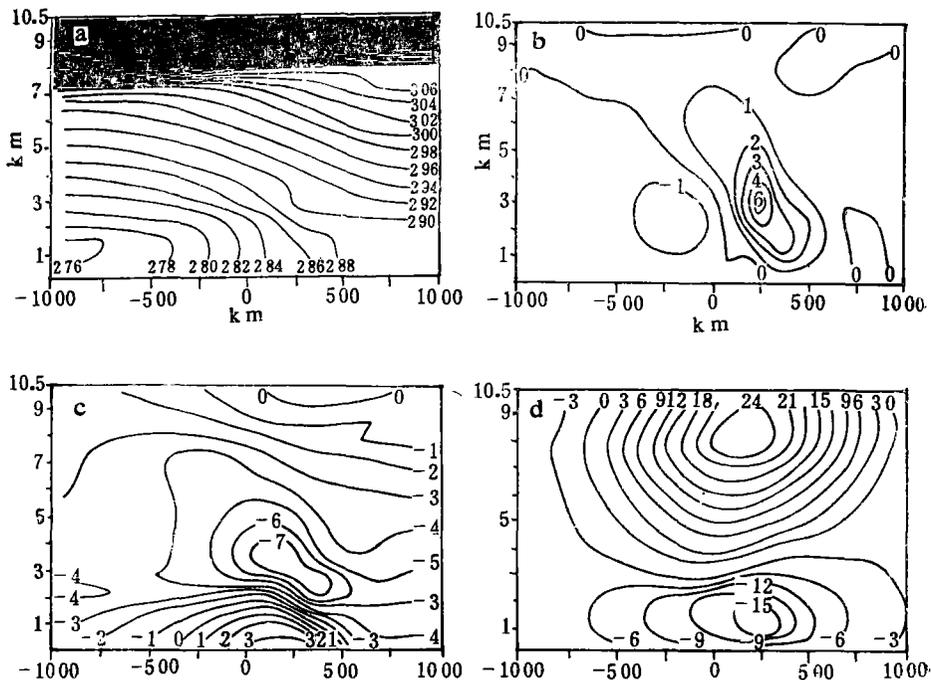


图 9 低沙尘分布情况下,积分 8 小时的  $\theta$ (a),  $w$ (b),  $u$ (c)和 $v$ (d)  
(等值线间隔同图 2)

度场的变化特征同高沙尘分布情况下位温和速度场的变化基本是一致的。

将本节的结果同文献[1]中图3比较可以看到,沙尘的垂直分布对锋生的辐射强迫作用有重要的影响。沙尘分布较高时,有利于低层锋生,反之有利于锋消。影响低层锋生的机制是沙尘辐射的非均匀加热和它诱导的水平变形场。沙尘区中心上方的等熵混合层是同沙尘层顶的辐射加热相联系的,它的强度依赖于沙尘层的高度和沙尘的浓度。

#### 4 总 结

本文利用二维数值模式结果和锋面方程讨论了单纯的沙尘辐射对锋生(消)的作用和影响锋生过程的物理机制。分析结果表明:

白天单纯的沙尘辐射使沿锋面移动方向的水平速度场表现出明显的辐合特征,并产生很强的上升运动。沙尘辐射加热强迫的锋生在早期主要是由非绝热加热项引起的,在辐射加热到一段时间后,水平速度变形场的作用逐渐加强,锋生是非绝热加热项和水平速度变形场共同作用的结果。随着沙尘辐射加热进一步加强,水平速度变形场起主要作用,但局限在地面附近。相对来讲,垂直速度场对锋生的作用较弱,主要是起锋消作用。温度水平梯度平流项对锋生(消)的作用很小。晚上水平速度变形场对锋生的作用迅速减弱,但非绝热加热项对低层锋生(消)仍起一定的作用,这可能同沙尘向下放出长波辐射造成下垫面不均匀加热有关。

我们也计算了不同的沙尘分布情况下,沙尘辐射加热对锋生过程的影响。结果表明:当沙尘降低时,沙尘辐射强迫的锋面强度减弱,锋面坡度减小。沙尘暴中心上方的等熵混合层的厚度和强度是同沙尘层顶的辐射加热相联系的,沙尘降低时,等熵混合层厚度也随之减少。

致谢: 本文承谢义炳教授指导,吴国雄、纪立人和颜宏等教授曾提出宝贵意见,在此表示感谢。

#### 参考文献

- [1] 申绍华,陈受钧. 沙尘辐射强迫的锋生过程的数值模拟. 气象学报, 1993, 51(3):283—249.
- [2] Carlson T N, Prospero J M. The large-scale movement of Saharan air outbreaks over the northern equatorial Atlantic. J Apply Metero, 1972, 11:283-297.
- [3] Carlson T N, Benjamin S G. Radiative heating for Saharan dust. J Atmos Sci, 1980, 37:193-213.
- [4] 徐国昌等. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析. 气象学报, 1979, 37(4):26-35.
- [5] 伍荣生. 动力气象学. 上海科学出版社, 1983.

## THE ANALYSIS OF FRONTOGENESIS PROCESS FORCED BY DUST RADIATIVE HEATING

Shen Shaohua

(National Research Center For Marine Environment Forecast, Beijing 100081)

Chen Shoujun

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

#### Abstract

In this paper, the physical mechanism affected the frontogenesis process

under force of dust radiative heating is discussed by using frontal equation and the results of two-dimension numerical model simulation. The effect of the distribution of dust on the frontogenesis process is also calculated. The calculation and analysis results indicate: In daytime, frontogenesis is mainly produced by diabatic heating and horizontal velocity deformation field. The effect of vertical velocity field on the frontogenesis is weak, it mainly result in frontolysis. The horizontal advection term contribute little to the frontogenesis and frontolysis. In night, the diabatic heating term is dominant factor which results in frontolysis.

When dust descent, both the frontal intension and slope, as well as the isentropic potential temperature layer above duststorm center, decrease.

**Key words:** Dust, Radiation, Frontogenesis.