

# 黑风暴的沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验\*

刘春涛 程麟生

(兰州大学大气科学系, 兰州, 730000)

## 摘 要

西北地区典型黑风暴和强沙尘暴都是在特定大尺度环流背景和中尺度系统相互作用下发生和发展的, 而中、低空强锋区相伴的强冷锋移经沙源充足的大沙漠区是黑风暴和强沙尘暴形成和发展的必要条件。为了研究黑风暴和沙尘暴的沙尘形成、输送及沉降机制, 本文提出了一种沙尘源、汇项的参数化方案和一个沙尘输送方程, 进而引入已有的MM 4中尺度数值模式模拟系统; 应用这个改进和发展的模式模拟系统基本成功地模拟了“93.5”黑风暴的天气系统演变及其沙尘浓度的近地层和垂直分布以及沙尘的沉降与输送。模拟结果分析表明, 用包括沙尘输送方程及其沙尘源、汇项参数化方案的中尺度数值模式来研究黑风暴的沙尘形成、输送和沉降机制是一种具有应用前景的方法。

**关键词:** 黑风暴, 沙尘形成与输送, 沙尘源和汇参数化, 数值模拟。

## 1 引 言

1993年5月4日-6日(“93.5”), 中国西北的沙漠戈壁地区及其东缘发生了一次特强沙尘暴, 席卷了新疆的古尔班通古特及东疆戈壁、甘肃省河西走廊、内蒙古阿拉善巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、宁夏平原及河东沙区和沙黄土区的18个地、市, 72个县。平均风力7-8级, 最大风力达12级, 金昌市瞬时最大风速达34m/s, 能见度降为零。金昌、永昌、武威等地灾情严重。根据观测, 在上述几个地区已形成了危害很大的黑风暴<sup>[1-2]</sup>。这次黑风暴是自1927年有气象记录以来最强的一次。继“93.5”黑风暴之后, 1994年4月5日至11日(“94.4”), 在甘肃、新疆、宁夏以及内蒙西部和青海省部分地区又发生了一次大范围强沙尘暴天气过程<sup>[3]</sup>。兰新铁路部分路段沙埋深度达2m<sup>[4]</sup>。这两次沙尘灾害对西北地区的经济和人民生命财产造成了极大的危害, 因此对西北地区沙尘暴过程的成因进行研究是非常必要的。

由于沙尘暴危害极大, 国内外不少学者都对它进行了分析和研究。徐国昌等<sup>[5]</sup>曾对甘肃省“4.22”特大沙暴作过天气分析; Iwasaka等<sup>[6]</sup>曾对亚洲沙尘暴云的输送及空间尺度作了个例研究; Westphal等<sup>[7]</sup>曾对撒哈拉沙尘的抬升和输送进行了研究; Karyampudi等<sup>[8]</sup>也曾对撒哈拉气层进行了分析; 江吉喜<sup>[9]</sup>根据GM S-4卫星云图资料分析了“93.5”黑风暴

\* 初稿时间: 1996年6月13日; 修改稿时间: 1996年11月8日。

资助课题: 国家自然科学基金资助项目(49475268)。

的成因; 陈敏连等<sup>[1]</sup>的分析指出, 与“93.5”黑风暴相伴冷锋前部存在一条干飚线; 程麟生等<sup>[10,11]</sup>对“93.5”黑风暴的发展结构和成因进行了中尺度数值模拟研究, 结果指出: 这次特大黑风暴的形成和发展与一个中尺度气旋性涡旋在低层大气内的生成和急剧发展密切相关, 而与其相伴的特强冷锋具有飚线性性质。

尽管至今对中国西北地区沙尘暴和黑风暴的研究已有不少工作, 但还没有涉及黑风暴沙尘形成与输送参数化方面的数值试验工作。为此, 本文将试图在这方面进行一些初步研究, 即首先在已有的能较好模拟中尺度系统的MM 4中尺度模式中加入一个沙尘3维输送方程与一个驱动地面沙尘抬升以及包括沙尘粒子谱的沙尘沉降的参数化方案; 然后在此基础上进行“93.5”黑风暴沙尘输送的中尺度控制模拟; 为了研究沙尘暴发生发展的一般机制, 还对“94.4”沙尘暴过程进行了沙尘输送的中尺度数值模拟, 对沙尘暴天气过程进行了进一步的研究。

## 2 “93.5”黑风暴天气过程简述

这次黑风暴天气过程主要是由于位于西伯利亚的强冷空气迅速由西北向东南侵入, 而其一部分翻越天山经南疆东部进入河西地区, 并伴有一条迅速东移和具有飚线性性质的地面冷锋造成的<sup>[10,11]</sup>。图1为实况5月5日17时(北京时, 下同)区域地面天气图<sup>[11]</sup>。在14时冷锋已过张掖, 冷锋前后变压梯度很大, 并配合有锋前中尺度低压槽, 锋后有中尺度高压脊(图略)。在冷锋经过巴丹吉林沙漠时, 已造成当地强沙尘暴, 随着冷锋南下加强, 锋后西北风速大大加强(金昌瞬时最大风速达34 m/s)。到张掖、金昌、民勤地区的腾格里沙漠边缘时, 由于当地地表状况干燥, 风蚀严重, 导致了黑风暴的加强。

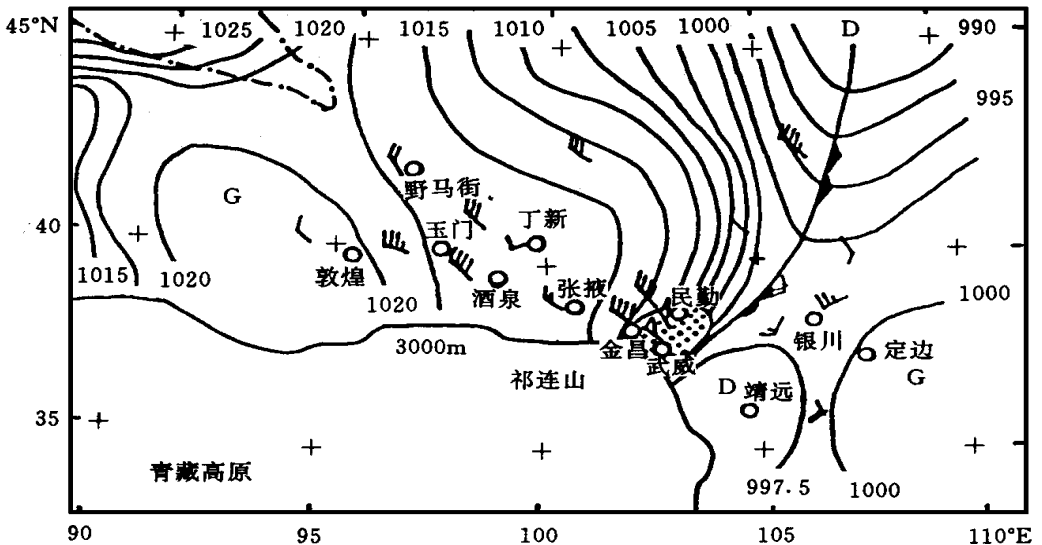


图1 1993年5月5日17时地面区域天气图  
(图中阴影为黑风暴区)

冷锋过境时不仅仅沙尘蔽日, 而且地面温度、气压、风速、湿度等急剧变化, 图2给出了

金昌站5月5日主要气象要素变化曲线<sup>[10]</sup>,各气象要素的这种急剧变化表明,与黑风暴相伴的强冷锋具有飑线性质<sup>[10]</sup>。

图3为模拟区域的下垫面类型分布图,其中等值线9.0表示沙漠戈壁区,从图上可以看到一些加粗线区,即42°N, 100°E处的巴丹吉林沙漠地区和39°N, 102°E处的腾格里沙漠区域,以及42°N, 92°E处的库姆塔格沙漠和柴达木盆地戈壁地区。西北地区,尤其是甘肃河西地区沙尘暴的产生都与这三个沙源地有关。

由上述分析可见,“93.5”黑风暴的形成与发展不仅与特定的环流形势和中尺度环流系统有关,也与大范围的沙漠下垫面和恶劣的环境条件有关。对“94.4”沙尘暴天气过程和天气学成因分析<sup>[4]</sup>也如此,这里不再叙述。

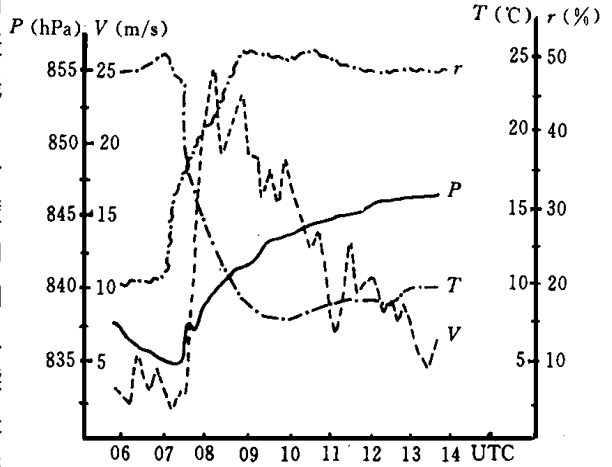


图2 1993年5月5日金昌地面气压(P)、温度(T)、比湿(r)、风速(V)时间变化曲线

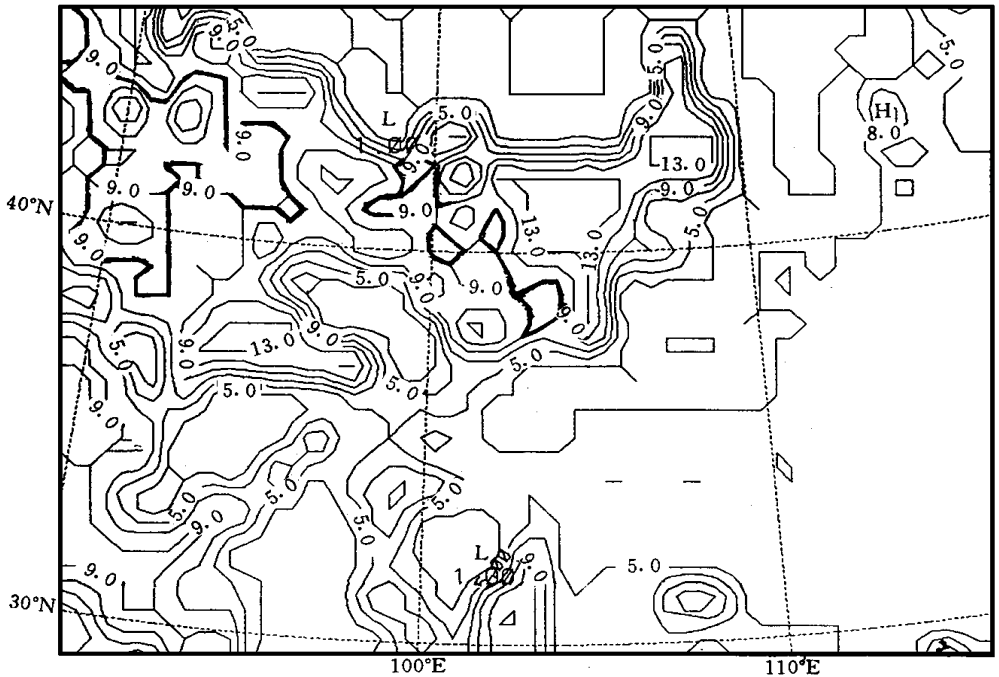


图3 模拟区域下垫面类型  
(其中加粗线为西北地区大沙漠区域)

以下讨论黑风暴的沙尘形成、输送和沉降问题。

### 3 沙尘输送方程及沙尘源项和汇项参数化

#### 3.1 沙尘输送方程

考虑到沙尘物质的形成、输送和沉降与气溶胶有类似之处, 这里首先给出以下类似气溶胶物质守恒方程的沙尘物质守恒方程:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - \mathbf{v} \cdot \nabla X + S_X - D_X \tag{1}$$

(1) 式中  $X$  为沙尘浓度, 即单位体积内沙质物质的质量,  $S_X$  和  $D_X$  分别为沙尘的源项和汇(沉降)项, 将式(1)转换到有兰勃特地图投影因子  $m$  的修正  $\sigma(\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t})$  坐标系中, 可以得到:

$$\frac{\partial^* X}{\partial t} = - m^2 \left( \frac{\partial^* u X/m}{\partial x} + \frac{\partial^* v X/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial^* \sigma X}{\partial \sigma} + S_\sigma - D_\sigma \tag{2}$$

在式(2)中,  $p^* = p_s - p_t$ ,  $p_s$  和  $p_t$  分别为地面气压和模式顶气压, 而式中各项含义分别为: 气压权重的沙尘浓度趋势项; 气压权重的沙尘水平通量输送项; 气压权重的沙尘垂直通量输送项; 和 分别为  $\sigma$  坐标系中沙尘的源项和汇(沉降)项。

#### 3.2 沙尘源项参数化

根据上述黑风暴和沙尘暴形成的天气学条件, 沙尘源项  $S_\sigma$  应与地表类型  $L_d$ 、物质密度  $\rho_d$ 、近地面风速  $V_s$  及  $V_s$  在时间  $\Delta t$  内风蚀地表的距离  $V_s \Delta t$  以及单位地表所受的切应力  $\tau_s$  有关。因此, 沙源项  $S_\sigma$  可以如下参数化式表示, 即

$$S_\sigma = (V_s^2 \Delta t) \left( \frac{\tau_s}{\Delta_s} \right) \rho_d L_d \tag{3}$$

当考虑到近地层如下关系式:

$$\tau_s = \rho_s u_*^2, \quad V_s = \left\{ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right) - \Psi_m \left( \frac{z_s}{L} \right) \right\} u_* = A \sigma u_*$$

则式(3)可表示为:

$$S_\sigma = L_d \left[ \alpha \left( \frac{\Delta t}{\Delta_s} \right) (\rho_s \rho_d) \right] u_*^4 = L_d C_0 u_*^4 \tag{4}$$

其中,

$$C_0 = a_0 \left( \frac{\Delta t}{\Delta_s} \right) (\rho_s \rho_d), \quad a_0 = A^2, \quad A_0 = \frac{1}{\kappa} \left[ \ln \left( \frac{z_s}{z_0} \right) - \Psi_m \left( \frac{z_s}{L} \right) \right] \tag{5}$$

$\Delta t$  可取为积分时步,  $\Delta_s$  为模式水平网格面积,  $\rho_s$  和  $\rho_d$  分别为近地面空气密度和沙质密度,  $V_s$  为  $z_s$  处风速,  $z_0$  是地表粗糙度,  $\Psi_m$  是动量稳定度参数,  $L$  是  $M-O$  长度,  $\kappa$  是 Kam an 常数,  $u_*$  是地表摩擦速度;  $L_d$  是模式中 13 类地表分类代码(无因次), 当  $L_d = L_d(9)$  时, 为沙质地表; 当  $L_d \neq L_d(9)$  时, 则  $S_\sigma = 0$ 。根据以上分析讨论, 则可给出沙源项  $S_\sigma$  的如下参数化方案:

$$S_{\sigma} = \begin{cases} 0 & u^* < u^*_{*c} \text{ 或 } q_{vs}(T_g) > q_c, \text{ 或 } L_d = L_d(9) \\ L_d C_0 u^{*4}; & u^* \geq u^*_{*c}, q_{vs}(T_g) \leq q_c \text{ 且 } K_{\sigma} = 1, L_d = L_d(9) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中参数式  $C_0$  在式(5)中给出,  $q_{vs}(T_g)$  为地面饱和比湿;  $u^*_{*c}$  为  $u^*$  的临界值; 根据 Helgren 和 Prospero<sup>[12]</sup>对西撒哈拉1974年7月1日—8月15日8次沙尘风速分析后给出的沙尘抬升平均风速临界值  $10.5 \text{ m/s}$  及地面摩擦速度  $u^*$  作为产生沙尘抬升的临界值  $0.6 \text{ m/s}$ , 这里也采用临界值  $u^*_{*c} = 0.6 \text{ m/s}$ ,  $q_c$  为  $q_{vs}(T_g)$  的临界值, 这里取为  $0.005 \text{ kg/kg}$ ,  $K_{\sigma}$  为垂直  $\sigma$  层数。

此外应说明,  $S_{\sigma}$  项的量纲和方程(2)其余各项量纲一致, 例如, 在 MKS ( $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}$ ) 制中, 各项量纲均为  $[\text{M}^{-4}][\text{K}^2][\text{S}^{-3}]$ 。对与  $S_{\sigma}$  相关的  $C_0$  而言, 仅对  $L_d(9)$  的沙质下垫面作计算。例如,  $\kappa = 0.4$ ,  $z_s = 1 \text{ m}$ ,  $z_0$  (沙漠) =  $3 \times 10^{-4} \text{ m}$ ,  $\frac{z_s}{L} = -2$ , 则有  $\ln(\frac{z_s}{z_0}) = 8.1017$ ,  $\Psi_m(\frac{z_s}{L}) = 1.43$ , 这里  $\Psi_m(z_s/L) = -1.86(z_s/L) - 1.07(z_s/L)^2 - 0.249(z_s/L)^3$  是采用对流不稳定情形下的  $\Psi_m$  表示式<sup>[14]</sup>,  $A_0 = 16.68$ ,  $a_0 = 278.2$ ; 当  $\Delta t = 90 \text{ s}$ ,  $\Delta s = 1.6 \times 10^9 \text{ m}^2$ ,  $\rho_s = 1.112 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_d = 1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 则有:  $C_0 = 0.0261 (\text{m}^{-8} \cdot \text{kg}^2 \cdot \text{s})$ ; 当  $u^* = 1 \text{ m/s}$  时, 则由式(6)知:

$$S_{\sigma} = L_d(9) (C_0 u^{*4}) = (C_0 u^{*4}) \Big|_{\text{沙漠}} = 0.0261 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right) \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

该结果表明, 在方程(2)中沙尘源项将以  $26.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的速率提供沙尘。

### 3.3 沙尘汇项参数化

对于黑风暴的沙尘汇项是指黑风暴过程沙尘的沉降过程及沉降量。从物理直观考虑, 黑风暴沙尘汇项主要与其沙尘浓度  $\chi$ , 单位面积  $S_D$  上空沙尘气柱重量  $P_X (= m_X g)$  以及沙尘粒子的干沉降速度  $\bar{\omega}$  和运动场垂直下沉运动  $\bar{\omega}'$  有关; 其中, 单位面积气柱内的沙尘质量  $m_X$  又与沙尘粒子谱的空间分布有关。根据上述考虑, 给出沙尘沉降项, 即汇项的参数化表示式如下:

$$D_0 = \chi \left( \frac{m_X g}{S_D} \right) (\bar{\omega} + \bar{\omega}') \quad (7)$$

其中,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ , 是重力加速度,  $\bar{\omega}$  和  $\bar{\omega}'$  在  $\sigma$  坐标中的量级均为  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,  $m_X$  是沙尘粒子谱分布  $n(z, r)$  的函数, 如果假设沙尘粒子均为球形, 则沙尘粒子在高度区间为  $z_1$  和  $z_2$  气柱内的质量  $m_X$  可由下式计算:

$$m_X(z_1, z_2) = \frac{4}{3} \pi \rho_d \int_{z_1}^{z_2} \int_{r_1}^{r_2} r^3 n(z, r) dr dz \quad (8)$$

其中,  $\rho_d$  为干沙密度,  $r$  为沙尘粒子半径,  $n(z, r) = A(z)n(r)$ 。对沙尘粒子谱  $n(r)$  假设在粒子半径区间  $0.15 \mu\text{m} < r < 10 \mu\text{m}$  和地面以上  $1500 \text{ m}$  厚沙尘气层服从 Junge 幂函数分布(J谱), 那么, 在  $A(z) = e^{-z/H}$  假设下, 我们可以把黑风暴沙尘粒子谱及其在垂直向的分布分为如下3层:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1: 0 \leq z \leq 500 \text{ m}, \quad 1 \mu\text{m} \leq r \leq 10 \mu\text{m}, n(z, r) = e^{-z/H} \cdot C_1 r^{-\gamma_1} \\ L_2: 500 \text{ m} < z \leq 1500 \text{ m}, \quad 0.15 \mu\text{m} \leq r \leq 1 \mu\text{m}, n(z, r) = e^{-z/H} \cdot C_2 r^{-\gamma_2} \\ L_3: z > 1500 \text{ m}, \quad r < 0.15 \mu\text{m}, \quad n(z, r) = \text{Const} \end{array} \right. \quad (9)$$

根据朱文琴等<sup>[13]</sup>对中国北方气溶胶粒子谱的观测资料及分析, 取  $C_1 = 25.75$ ,  $\gamma_1 = 3.42$ ;  $C_2 = 1.1383$ ,  $\gamma_2 = 3.61$ ; 取  $H$  为  $1500 \text{ m}$ 。

按以上参数化方案对累积沙尘沉降量的数值计算结果将在后面给出。

## 4 中尺度数值模式发展及控制模拟

### 4.1 沙尘输送方程的引入及MM4的改进和发展

将沙尘输送方程(2)引入到 PSU/NCAR 中尺度模式<sup>[14]</sup>中, 并考虑沙尘的水平扩散项和垂直扩散项, 得到以下方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\phi}^* u}{\partial t} = & -m^2 \left( \frac{\partial \hat{\phi}^* uu/m}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\phi}^* uv/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial \hat{\phi}^* \hat{\sigma} u}{\partial \sigma} \\ & - m p^* \left[ \frac{RT_v}{(p^* + p_i/\sigma)} \frac{\partial \hat{\phi}^*}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial x} \right] + f p^* v + F_H(u) + F_V(u) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\phi}^* v}{\partial t} = & -m^2 \left( \frac{\partial \hat{\phi}^* uv/m}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\phi}^* vv/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial \hat{\phi}^* \hat{\sigma} v}{\partial \sigma} \\ & - m p^* \left[ \frac{RT_v}{(p^* + p_i/\sigma)} \frac{\partial \hat{\phi}^*}{\partial y} + \frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial y} \right] - f p^* u + F_H(v) + F_V(v) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \hat{\phi}^*}{\partial t} = -m^2 \left( \frac{\partial \hat{\phi}^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\phi}^* v/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial \hat{\phi}^* \hat{\sigma}}{\partial \sigma} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \hat{\phi}^*}{\partial t} = -m^2 \int_0^\sigma \left( \frac{\partial \hat{\phi}^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\phi}^* v/m}{\partial y} \right) d\sigma \quad (13)$$

$$\hat{\sigma} = -\frac{1}{p^*} \int_0^\sigma \left[ \frac{\partial \hat{\phi}^*}{\partial t} + m^2 \left( \frac{\partial \hat{\phi}^* u/m}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\phi}^* v/m}{\partial y} \right) \right] d\sigma \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\phi}^* T}{\partial t} = & -m^2 \left( \frac{\partial \hat{\phi}^* uT/m}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\phi}^* vT/m}{\partial y} \right) - \frac{\partial \hat{\phi}^* \hat{\sigma} T}{\partial \sigma} \\ & + \frac{RT_v \omega}{C_{pm}(\sigma + p_i/p^*)} + \frac{p^* Q}{C_{pm}} + F_H(T) + F_V(T) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\omega = p^* \hat{\sigma} + \hat{\sigma} \frac{dp^*}{dt} \quad (16)$$

$$\frac{dp^*}{dt} = \frac{\partial \hat{\phi}^*}{\partial t} + m \left( u \frac{\partial \hat{\phi}^*}{\partial x} + v \frac{\partial \hat{\phi}^*}{\partial y} \right) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \hat{\Phi}}{\partial n(\sigma + p_i/p^*)} = -RT_v \left( 1 + \frac{q_c + q_r}{1 + q_v} \right)^{-1} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{\phi}^* X}{\partial t} = & -m^2 \left( \frac{\partial \hat{\phi}^* uX/m}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\phi}^* vX/m}{\partial y} \right) \\ & - \frac{\partial \hat{\phi}^* \hat{\sigma} X}{\partial \sigma} + F_H(X) + F_V(X) + S\sigma - D\sigma \end{aligned} \quad (19)$$

方程组中式(10)~(18)的详细描述见文献[14], 式(19)即为作者引入的沙尘输送方程, 式

中  $F_H(X)$  为沙尘浓度水平扩散项,  $F_V(X)$  为沙尘浓度垂直扩散项,  $S_\sigma$  和  $D_\sigma$  分别为(6)和(7)式中给出的沙尘源项和汇项参数化式。其中对于沙尘浓度水平扩散项  $F_H(X)$  采用四阶水平扩散<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} F_H(X) = p^* K_H \nabla^4 X & K_H = (d)^2 K_{H0} \\ K_H = A [K_{H0} + \frac{1}{2} k^2 d^2 D] \end{cases} \quad (20)$$

式中  $K$  为 Kamman 常数,  $D$  是水平变形,  $d$  是水平格距,  $K_{H0}$  是基值,  $A$  是振幅因子。

对沙尘浓度垂直扩散项是采用 K 理论计算的, 即:

$$F_V(X) = p^* K_z \frac{\partial X}{\partial z^2} \quad (21)$$

式中垂直扩散率  $K_z$  是局地  $R_i$  的函数。按照 Anthes 等<sup>[14]</sup>, 可写作如下:

$$K_z = \begin{cases} K_{z0} + l^2 S^{\frac{1}{2}} \frac{R_{ic} - R_i}{R_{ic}} & R_i < R_{ic} \\ K_{z0} & R_i \geq R_{ic} \end{cases} \quad (22)$$

$K_{z0} = 1.0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $R_{ic}$  是临界  $R_i$  数,  $R_i = \frac{g}{s\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$ ,  $S = \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + 10^{-9}$ , 其中附加项  $10^{-9}$  是为避免当风的垂直切变为零时,  $R_i$  趋于无穷。

## 4.2 控制模拟

(1) 模式基本参量: 模式是改进和发展的 MM4。模式顶气压  $p_t = 100 \text{ hPa}$ , 垂直分辨率  $K_\sigma = 16$  层, 水平分辨率  $d = 40 \text{ km}$ , 水平域中心: 38°N, 103°E, 水平域格点:  $46 \times 61$ 。

(2) 初始条件: T42 全球分析+ 探空资料。

(3) 侧边界条件: 时变的海绵边界。大尺度趋势由线性时间内插 12 h 观测资料获得。

(4) 行星边界层物理过程: 高分辨 PBL 参数化。

(5) 地面物理过程: 包括有非均一地表的热通量、水汽通量和动量通量。

(6) 地面温度: 由浅层模式和有云效应的能量收支方程预报获得。

(7) 积云对流参数化: 采用 Anthes-Kuo 型方案。

(8) 模式地形: 通过分析 NCAR 的 0.5 度地形资料以及利用中尺度客观分析方案而获得 40 km 格点地形。

(9) 下垫面分类: 通过分析全球下垫面资料, 并分成 13 类地表特征而获得网格点下垫面特征。对沙漠区域还作些修正。

(10) 沙尘参数化: 含有驱动地表沙尘抬升参数化的沙尘输送方程。

(11) 沙尘浓度初始场: 水平均匀极稀薄的理想场。

(12) 模拟时间: 24 h, 即自 1993 年 5 月 4 日 20 时至 5 日 20 时。

包括上述全部条件和过程的即为控制模拟。以下主要讨论“93.5”黑风暴的模拟结果。

## 5 数值模拟结果及讨论

图4为自5月4日20时起模拟21 h 的 700 hPa 涡度场结果。从每 3h 输出图可以看出这次模拟基本模拟出了这次黑风暴的发生和发展过程。在积分 18 h 的 700 hPa 涡度场图中(图略), 在金昌以西有  $48.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的涡度中心形成。该涡旋发展区对应 5 日 14 时地面冷

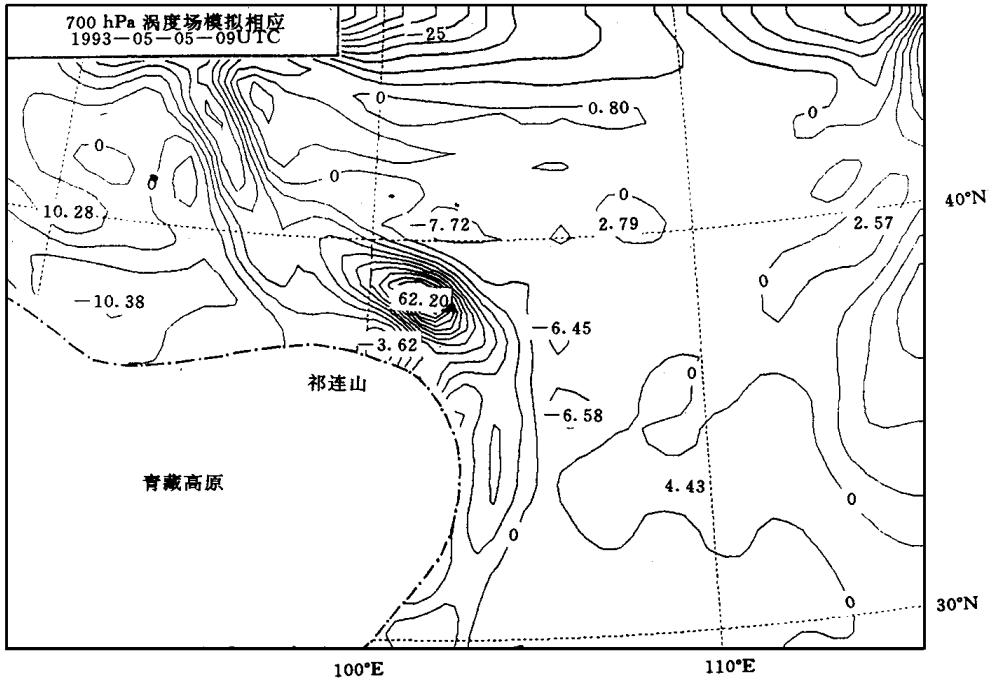
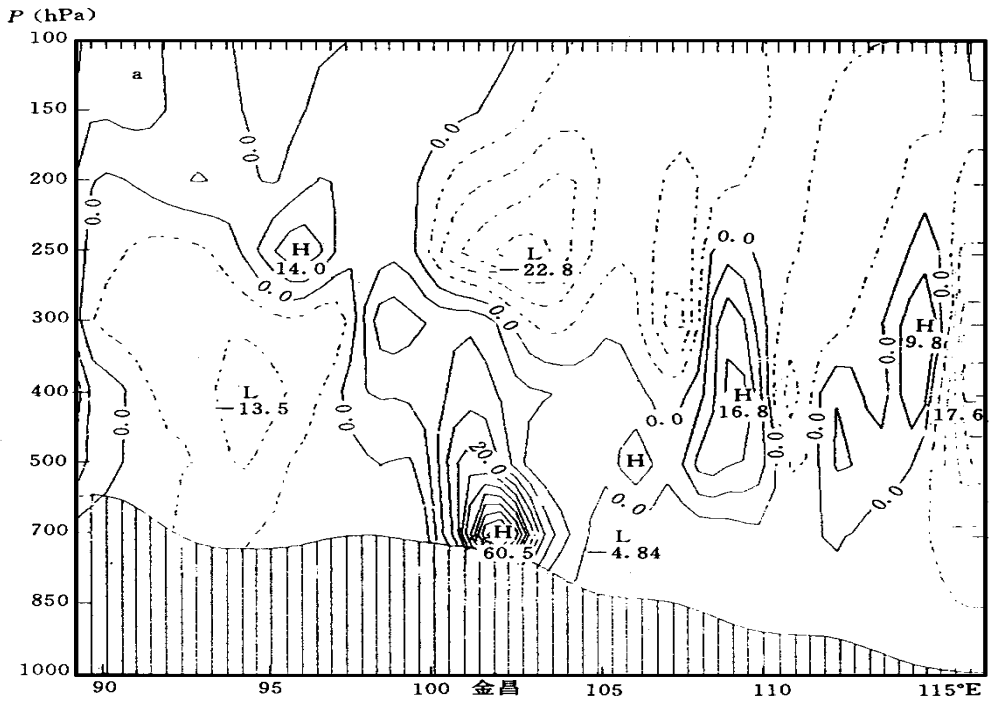


图4 控制模拟21 h 的700 hPa 涡度场  
(相应于1993年5月5日17时, 涡度等值线间隔为 $5 \times 10^{-5} s^{-1}$ , 图中 为金昌)





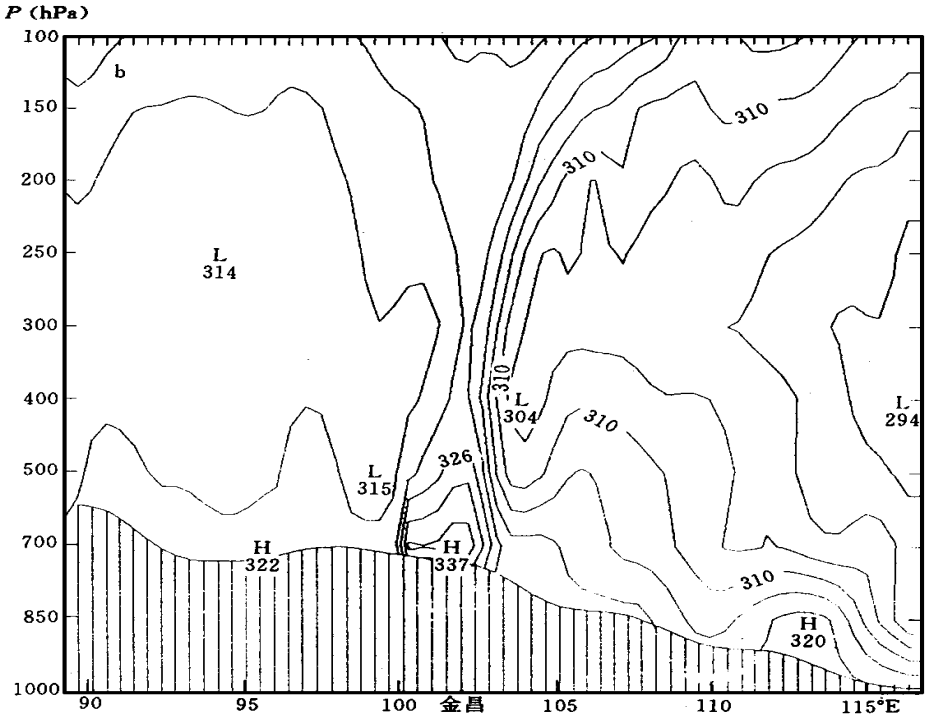


图5 通过图4涡度中心的涡度(a)和相当位温  $\theta$  (b)的W-E垂直剖面

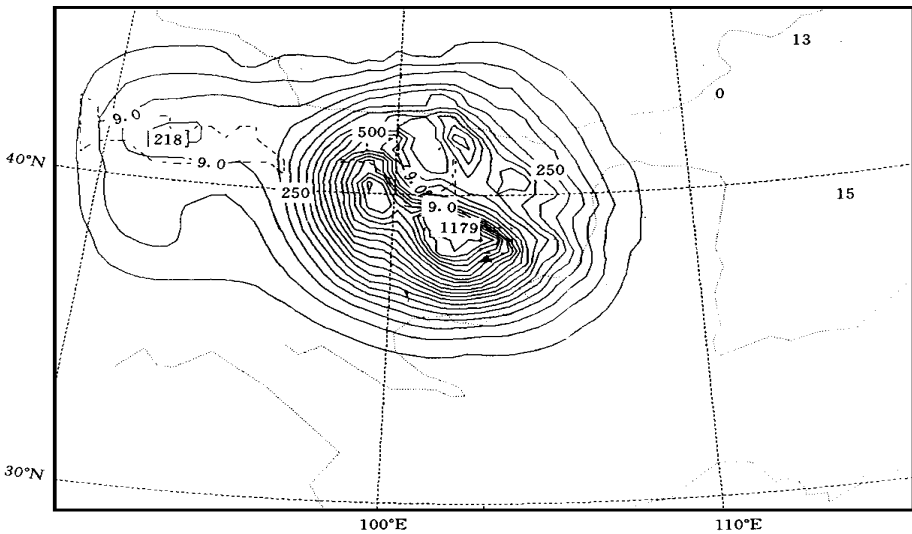


图6 控制模拟21h 的沙尘浓度近地面水平分布  
(相应5月5日17时, 图中等值线间隔为50 mg/m<sup>3</sup>, 图中 为金昌)

锋(图略)两侧强变压梯度的强辐合区。3 h 后, 即17时, 该中尺度涡旋在东移同时继续强烈发展(图4), 而涡度中心强度达 $62.20 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。这一结果与黑风暴的强烈发展同步, 而且黑风暴区(图1)与该强烈发展的涡旋区大体一致。正如文献[11]中所指出, 该涡旋的发展与该过程黑风暴的发生发展密切相关; 而且从通过图4涡旋中心的W-E向涡度场和 $\theta$ 场的垂直剖面图5a, 5b可以看出, 一个极强的气旋性(正)涡(度)柱在金昌附近从地面伸展至400 hPa, 其上有一个伸展到接近对流层顶的反气旋性(负)涡(度)柱。这种黑风暴涡柱结构的动力学本质是: 在低空有剧烈的辐合入流, 并伴有强上升运动; 在高空有强烈的辐散流出, 并伴有非对称下沉运动; 其结果是驱动整个黑风暴涡柱内的强上升运动不断发展, 地面水平风速增强; 而热力结构又使低空具有显著的对流不稳定, 这是对黑风暴发展极有利的动力和热力结构。

图6是模式包括沙尘输送方程(19)模拟21 h 的近地面沙尘浓度水平分布图。从图6中可以发现, 在金昌附近的浓度中心为 $1179 \text{ mg}/\text{m}^3$ , 这与5日16时30分在金昌观测到的沙尘含量 $1016 \text{ mg}/\text{m}^3$ 相当接近; 积分至24 h, 即5日20时, 近地面沙尘浓度中心已减小到 $679.1 \text{ mg}/\text{m}^3$ (图略), 这时黑风暴过程已趋于结束。

图7为通过图6强浓度中心作的W-E向垂直剖面图, 这时黑风暴最强, 其沙尘向上可

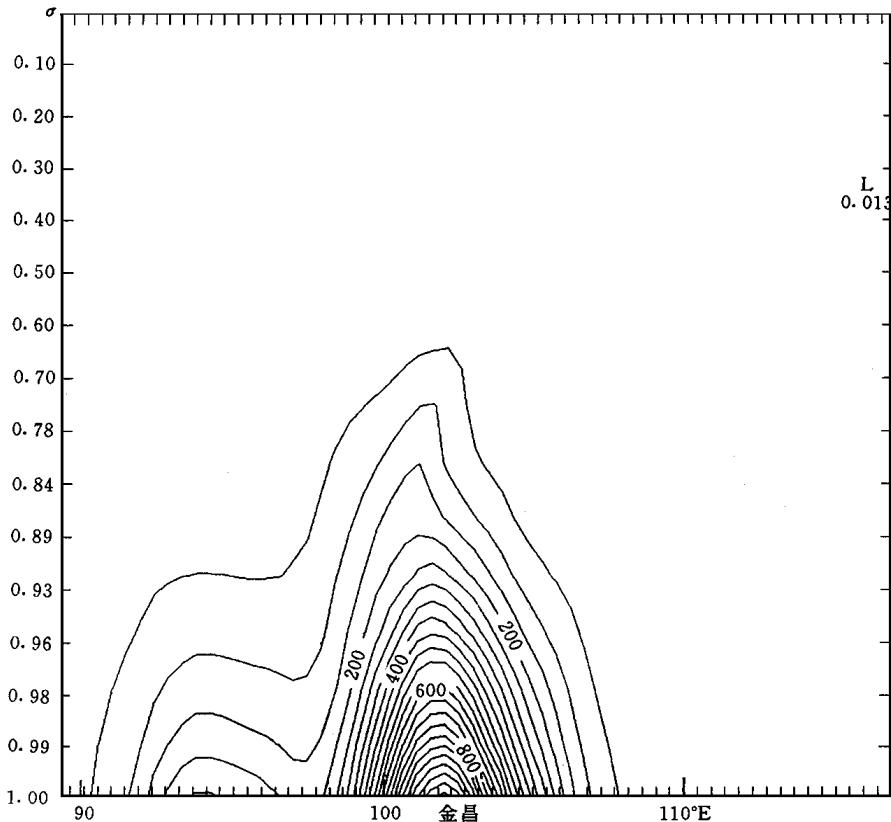


图7 通过图6的最大沙尘浓度中心的W-E垂直剖面

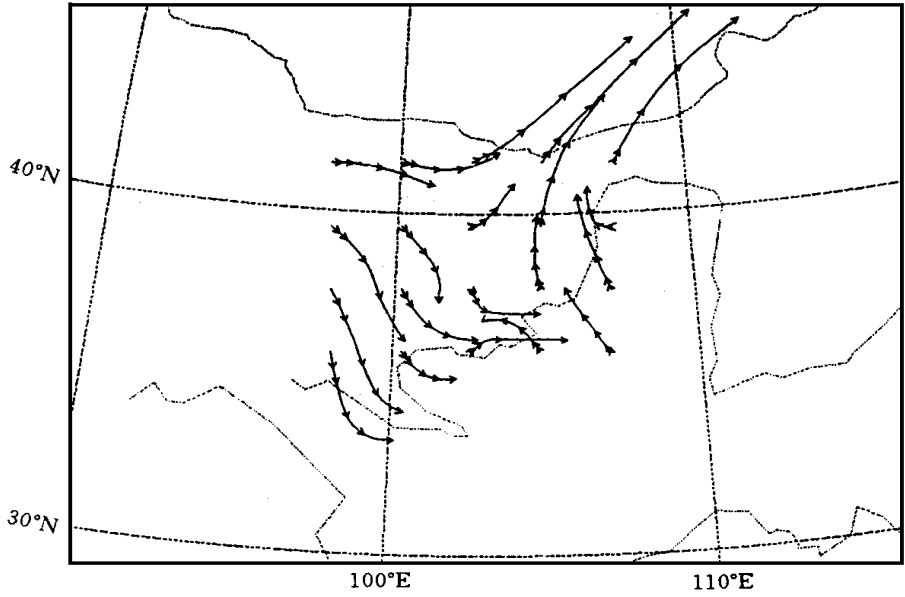


图8 24 h 控制模拟期间部分选择沙尘质点的轨迹线

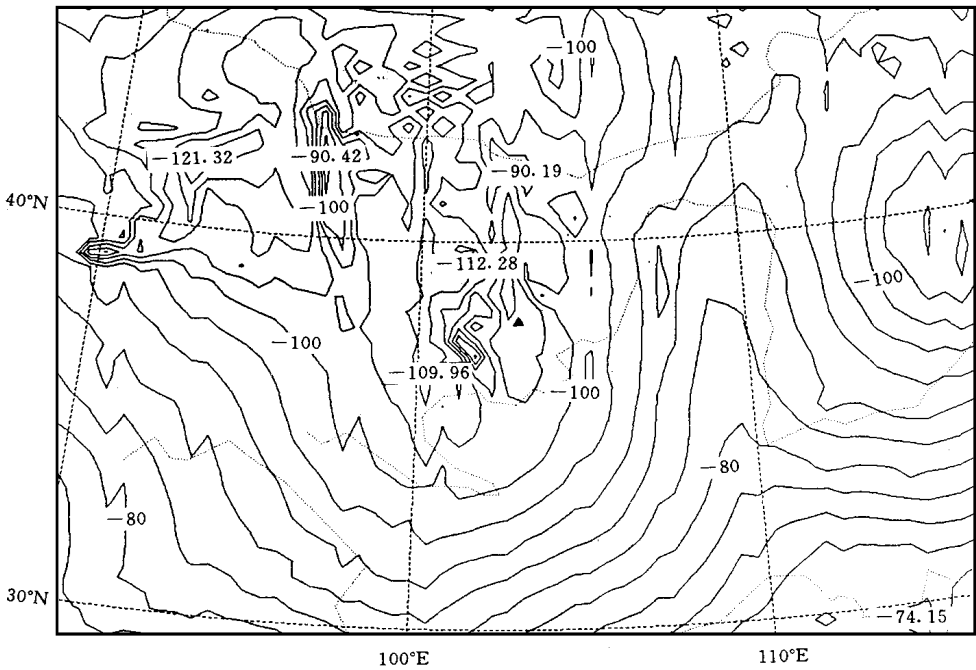


图9 控制模拟21 h 的地面沙尘累积沉降量等值线图(等值线间距 $4\text{kg}/\text{m}^2$ )

输送至700 hPa。图8为积分24 h 过程中沙尘质点轨迹分析图,从该图也可以看到沙尘质点的轨迹曲线主要是自巴丹吉林沙漠向腾格里沙漠方向的西北-东南方向移动的,另一些沙尘质点则移向东北方向。

图9是控制模拟21 h 的地面累积沙尘沉降量。由该图可见,沙尘沉降的范围远较沙尘抬升的平均沉降率大,而其主要沉降中心在近地面沙尘浓度中心之后,从最大沉降中心值估算,约 $15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,这比沙源项从地表提供的 $26.19 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 要小,而其差值显然是因水平输送和垂直扩散到远距离及其高空。

对“94.4”沙尘暴模拟,除模拟时间为36 h,即从1994年4月5日20时到7日08时外,其余均与对“93.5”黑风暴的控制模拟类同。限于篇幅,这里不再详述。

## 6 结论

综上所述可得以下结论:

(1) 天气分析表明,西北地区典型黑风暴和强沙尘暴都是在特定大尺度环流背景和中尺度系统相互作用下发生和发展的。中、低空锋区相伴的强冷锋移经沙源充足的大沙漠区是黑风暴形成和发展的必要条件,整层大气不稳定是其重要的热力条件。典型“93.5”黑风暴具有飑线性质。

(2) 控制模拟结果指出,当中尺度数值模式物理过程较全,模式空间分辨率较高和模拟区域足够大时,即使用常规观测资料也能较成功地模拟出黑风暴中尺度系统的发生发展及结构演变。

(3) 在中尺度模式中引入发展的沙尘源、汇项参数化方案及沙尘输送方程的模拟结果揭示,该方案和方程能有效和成功地模拟出“93.5”黑风暴及“94.4”沙尘暴的沙尘形成、输送和沉降,其沙尘浓度与水平分布与观测结果大体一致。

(4) 建立对沙尘暴的外场观测实验,获得有关沙尘水平和垂直分布的浓度资料以及黑风暴和沙尘暴的环境场及结构演变资料是进一步发展沙尘形成和输送参数化方案与中尺度数值模式和模拟所必须的。这对建立和发展黑风暴和沙尘暴短时预测和预报系统是十分必要的。

## 参考文献

- [1] 陈敏连,郭清台,徐建芬. 黑风暴天气的研究和探讨. 甘肃气象, 1993, 11(3): 16—27.
- [2] 杨根生,王一谋,赵兴梁. 我国西北地区“5.5”强沙尘暴的危害状况和对策. 甘肃气象, 1993, 11(3): 43—48.
- [3] 徐建芬等. 我国西北地区4.5沙尘暴天气研究. 中国沙漠, 1996, 16(3): 281—286.
- [4] 黄石柱. 罕见的“黄雨”天气. 甘肃气象, 1994, 12(2): 16—21.
- [5] 徐国昌,陈敏连,吴国雄. 甘肃省“4.22”特大沙尘暴分析. 气象学报, 1979, 37(4): 26—35.
- [6] Iwasaka Y H, Minoura and Nagaya K. The transport and spacial scale of Asian dust-storm clouds: a case study of the dust-storm event of April 1979. Tellus, 1983, 35B(3): 189—196.
- [7] Westphal D L, Toon O B and Carlson T N. A case study of Mobilization and transport of saharan dust. J Atmos Sci, 1988, 45(15): 2145—2175.
- [8] Karyanpudi V M and Carlson T N. A nalysis and numerical simulation of the Saharan air layer and its effect on

- easterly wave disturbances J Atmos Sci, 1988, 45(21) : 3102- 3136
- [ 9 ] 江吉喜 一次沙尘暴成因的卫星云图分析 应用气象学报, 1995, 6(2) : 177- 184
- [ 10 ] Cheng L insheng, Ma Y an and Liu Chuntao. Influence of mesoscale model resolution on the evolutive simulation of the "93. 5" black storm. International Workshop on Limited- Area and Variable Resolution Models (23- 27 October 1995, Beijing). WMO/TD, 1995, No. 699 : 323- 328
- [ 11 ] 程麟生, 马艳 "93. 5"黑风暴发展结构及不同模式分辨率的数值试验 应用气象学报, 1996, 7(4) : 385- 395
- [ 12 ] Helgren D M and Prospero J M. Wind Velocity associate with dust deflation events in the western sahara J Climate Appl Meteor, 1988, 26 : 1147- 1151
- [ 13 ] 朱文琴 气溶胶粒子谱的观测分析 大气科学, 1982, 6(2) : 217- 223
- [ 14 ] Anthes R A, Hsieh E - Y and Kuo Y - H. Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4). NCAR TECH. Note, 1987, NCAR/TN- 282+ STR. P. 65

## PARAMETERIZATION OF THE FORMATION AND TRANSPORTION FOR SAND-DUST OF THE BLACK STORM AND MESOSCALE NUMERICAL EXPERIMENTS

Liu Chuntao Cheng L insheng

*(Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, 73000)*

### Abstract

The results indicated that the typical black storm and severe sand-dust storm in the Northwest Region were generated and developed under an interaction between the special large scale circulation pattern and mesoscale systems, the severe cold front with intensive front zone on mid- and lower-levels moved along a huge of desert with abundant sand source to be a necessary condition for a black storm and a severe sand-dust storm. In order to study the mechanism on the formation and transportation as well as sedimentation for sand-dust of the black storm and sand-dust storm, a parameterized scheme of sand-dust source and sink term and an equation of transporting sand-dust were achieved and posed, while both the scheme and the equation were introduced to the mesoscale model and simulation system for MM4 which have been done. We applied the improving and developing model and simulation system to achieve basically successful simulations for the evolution of weather systems and the distribution of the sand-dust concentration in both the vertical and surface layer, as well as the sand-dust sedimentation and transportation of the "93. 5" black storm. The analysis of simulating results shown that it is a quite well method with applying prospects to study a mechanism of the formation and transportation as well as sedimentation of sand-dust of the black storm by using mesoscale

numerical model included the equation of transporting sand-dust and parameterized scheme of the sand-dust source and sink tem s

**Key words :**Black storm , Formation and transportation of sand-dust, Parameterization of sand-dust source and sink tem s , Numerical simulation

### 更正和致歉

我在本刊55卷3期发表的“次天气尺度系统中的非地转运动和广义平衡模式”一文中(28页)式(26)中,因推演不慎以及笔误共造成3处错漏。正确的式子应是:

$$\begin{aligned}
& [\sigma \nabla^{*2} + f(f + \xi^*) \frac{\partial}{\partial \varphi^2} - f \frac{\partial \xi^*}{\partial \varphi^2}] \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} = f \frac{\partial}{\partial \varphi} [V_3^* \cdot \nabla_3^* \frac{\partial \xi^*}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_r^*}{\partial \varphi} \cdot \nabla^* \xi^* \\
& + K \cdot (\frac{\partial V_r^*}{\partial \varphi} \nabla^* \omega + \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \frac{\partial \xi^*}{\partial \varphi}) + \nabla^{*2} (V^* \cdot \nabla^* \frac{\partial \Phi^*}{\partial \varphi} \\
& + \frac{\partial V_r^*}{\partial \varphi} \cdot \nabla^* \frac{\partial \Phi^*}{\partial \varphi} + \frac{R}{P c_p} \frac{\partial \theta^*}{\partial \varphi}) + f \frac{\partial V_d^*}{\partial \varphi} \cdot \nabla^* \xi^* + 2fK \\
& \cdot (\frac{\partial V_r^*}{\partial \varphi} \frac{\partial V_d^*}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_e^*}{\partial \varphi} \frac{\partial V_d^*}{\partial \varphi} + \frac{\partial V_e^*}{\partial \varphi} \nabla^* \frac{\partial \theta^*}{\partial \varphi})
\end{aligned} \tag{26}$$

特在此更正并向读者致歉。

作者 胡伯威