

## 基于 RAMS/CFORS II 模式一次低空核试验 放射性烟云扩散的数值模拟

张彦<sup>1,2</sup> 郑毅<sup>1</sup> 王自发<sup>2</sup>

1 防化研究院第二研究所, 北京 102205

2 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森研究中心, 北京 100029

**摘要** 采用 RAMS/CFORS II 模式模拟了一次低空核试验烟云的传输和沉降过程。CFORS II 模式是在 RAMS/CFORS 模式的基础上开发的, 可用于对核试验放射性烟云长距离输送和沉降过程的模拟研究。模拟表明: 对流层中低层的低压槽系统对本次低空核试验烟云的水平传输和垂直扩散起着重要的影响作用; 烟云的长距离传输速度呈现出随高度递减而减小的趋势, 在 6 000 m 以上, 烟云在爆后 48 h 即东移入海, 6 000 m 以下, 烟云在中国大陆的扩散和沉降维持了 5 d 以上; 爆后 2 天内以大粒子沉降为主, 其后以小粒子沉降为主, 小粒子的放射性远小于大粒子, 在爆后第 4 天, 放射性沉降就减小了 3 个量级, 而小粒子的沉降范围是大粒子的 5 倍以上。通过模拟和观测对比表明, 模拟结果基本符合实际烟云的传输和沉降态势。

**关键词** 传输 沉降 RAMS/CFORS II 模式 低空核试验

**文章编号** 1006-9585 (2008) 06-0717-10 **中图分类号** X591 **文献标识码** A

## Numerical Simulation of a Low Altitude Nuclear Explosion Test Radioactive Plume Diffusion Based on RAMS/CFORS II Model

ZHANG Yan<sup>1,2</sup>, ZHENG Yi<sup>1</sup>, and WANG Zi-Fa<sup>2</sup>

1 *The 2nd Research Institute, Chemical Defense Academy, Beijing 102205*

2 *Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** Transport and deposition processes of a low altitude nuclear explosion test plume were simulated by using RAMS/CFORS II model. CFORS II model implemented in RAMS/CFORS, can be used to simulate long-distance transport and deposition processes of nuclear explosion test radioactive plume. A good agreement was gotten through comparison between simulation results and observed data. And some other conclusions were found. The trough system on low-middle troposphere had played an important role in the horizontal transportation and vertical diffusion of this test plume. The velocity of plume long-distance transportation decreased with altitude, and the test plume above 6 000 m moved towards sea after 48 h and under 6 000 m, the diffusion and deposition processes of the plume were sustained beyond 5 d. During 2 d after test, deposition was dominated by big particles, but later fine particles seemed to be the main component of the deposition. The radioactivity of fine particles was much lower than that of big particles. On the 4th day after test, the radioactivity of deposition decreased about 3 levels, but the deposition area of fine particles was 5 times more than that of big particles.

**Key words** transport, deposition, RAMS/CFORS II model, low altitude nuclear explosion test

**收稿日期** 2007-07-16 收到, 2008-08-08 收到修定稿

**作者简介** 张彦, 男, 1976 年出生, 博士研究生, 工程师, 主要从事核爆与核事故放射性沾染(沉降)规律研究。

E-mail: jnszy@sohu.com

## 1 引言

在大气层核试验中,可以按照比高的不同来区分试验的类型。通常,大比高的核试验卷入的颗粒物较少,烟云尘柱比较清洁,放射性碎片长距离的传输量也较少;而小比高的核试验则往往会吸入大量的地面颗粒物,由于粒子尺寸较大,携带的放射性较强,同时烟云上升的高度较低,主要在对流层低层随风运动,因此除了爆炸时场区附近的放射性沉降外,短期几天内也会给下游广大地区造成较强的放射性污染。

24 h 内的近区放射性沉降由于其可以造成人员伤亡,从 20 世纪 60 年代起就得到了广泛关注<sup>[1]</sup>,其中 Harvey<sup>[2]</sup>、Ljung 和 Nyren<sup>[3]</sup>、Thanning 和 Naeslund<sup>[4]</sup>等做了许多有代表性的工作;而超过 24 h 的延迟沉降或全球沉降,由于其沉降量较小,比天然放射性本底稍高,对人体没有急性伤害,因此没有受到足够重视,相关的研究尚不多。目前尽管我国已经停止核试验,但恐怖主义分子制造简易核装置和核脏弹的威胁依旧存在,因此研究核烟云长距离传输和沉降态势,对于放射性辐射防护,具有积极的参考和指导意义。

2000 年郑毅等<sup>[5]</sup>提出了一个三维大气层核试验放射性碎片长距离输送和沉降的欧拉模型,通过对一次大比高高空爆核试验的模拟进行了理论上的初步研究。本文的研究工作是在 Uno 等<sup>[6]</sup>开发的在线区域空气污染模式 RAMS/CFORS 的基础上,通过增加放射性源项,加入放射性衰变过程,对干、湿过程进行改进等,开发了可以应用于实际评估的 RAMS/CFORS II 模式,主要可对各种核试验放射性烟云的长距离输送和沉降过程进行模拟和评估研究。本文模拟了一次小比高低空核试验烟云的长距离传输过程,并利用实测数据对模式的有效性进行了初步验证,同时得出一些核烟云在对流层中扩散的经验性规律。

## 2 模式简述

CFORS 模式<sup>[6]</sup>是在中尺度气象数值模式 RAMS4.3<sup>[7,8]</sup>的基础上构造的多轨迹在线模拟系统,其模拟过程主要是通过 RAMS 模式中加入

污染物标量和各种物理化学过程来实现的。其主要特点是实现了气象场和污染场的同步计算,因此在每个时间步长内都可以直接使用计算得出的气象数据,这样的做法避免了一般污染模式引入气象数据时对其进行再度插值带来的误差,一定程度上提高了污染预报的精确性。

CFORS II 模式的设计延续了 CFORS 模式的特点,针对研究目标又进行了一定的改进,主要针对核爆炸产生的放射性烟云扩散,不同于常规的核电站放射性泄漏扩散模式,例如 Monte Carlo 多源模式<sup>[9]</sup>等。其主要特点有以下几个方面:

(1) 使用 RAMS6.0 系统代替了原来的 4.3 版本。模式的结构更加清晰合理,突出了模块化设计思路,增加了更多的参数化方案,同时修正了一些以前存在的缺陷,使其更加适应目前流行的 64 位计算机系统。

(2) 源项的设置。CFORS II 的设计目的是模拟核试验烟云,因此在源项设计上有很大的调整。模式可以模拟低空和高空各种比高的核试验,针对具体的模拟过程,根据实测数据确定放射性源的尺度和源强,可以根据不同的粒子半径对源项进行分谱,最大支持 40 种甚至更多粒子,能够满足不同的试验类型需要。由于核烟云初始尺度都较小,必须要等烟云扩散到模式网格的尺度后才能进行模拟,因此 CFORSII 模拟是从爆后数小时开始的,主要研究长距离输送问题,对爆炸场区的污染沉降不作研究。

(3) 物理过程的改进。CFORS 模式主要是针对化学污染物,因其粒径较小,因此仅在模式的底层考虑干沉降和湿沉降过程。而 CFORS II 模拟的放射性颗粒粒径较大,因此必须考虑粒子的重力沉降速度  $V_g$ , 模式中采用的干沉降公式如下:

$$\begin{cases} R_d \Delta H = (V_d + V_{gi}) C_i, & \text{模式底层} \\ R_d \Delta H = V_{gi} C_i, & \text{模式其他层} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $R_d \Delta H$  为沉积通量,  $V_d$  为湍流沉积速度,  $V_{gi}$  为第  $i$  种尺度粒子的重力沉积速度。根据长距离输送的粒子尺度分布,按照不同直径分为  $40 \sim 100 \mu\text{m}$ 、 $10 \sim 40 \mu\text{m}$  和  $< 10 \mu\text{m}$ , 设其对应  $V_d$  分别为  $0.2$ 、 $0.03$  和  $0.003 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $C_i$  为第  $i$  种尺度粒子的放射性活度。总地面沉积通量(单位:  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )为

$$\sum_{i=1}^n (V_d + V_{gi}) C_i.$$

对放射性衰变过程，主要模拟  $\beta$  衰变过程，使用 Way-Wigner 公式<sup>[10]</sup> 的单一指数法，它的基本形式是：

$$A(t) = A_0 (t/t_0)^{-1.2}, \quad (2)$$

其中，时间  $t$  的单位是 min， $t_0$  为 1 min。

在模式中具体的处理是：

$$C_{\beta 2} = C_{\beta 1} (t_2/t_1)^{-1.2}. \quad (3)$$

模式中的其他物理过程采用 RAMS 6.0 中默认的参数设置，例如湍流的水平扩散系数采用了 Smagorinsky<sup>[11]</sup> 计算方法，垂直扩散系数采用了 Mellor 和 Yamada 方案<sup>[12,13]</sup>。

### 3 核试验源项及初始化

由于低空小比高的核试验产生的放射性颗粒多，沾染后果比较严重，因此本文选取了一次低空核试验过程进行模拟。中国于 1971 年 11 月 18 日 1400 UTC 左右在 (41°N, 90°E) 附近进行了一次低空近地面核试验，其当量约为 15~20 kt TNT 当量<sup>[14]</sup>，取其中值 17.5 kt，并认为裂变份额为 100%。爆后 1 min 裂变武器的总  $\beta$  放射性活度为<sup>[15]</sup>

$$C_{\beta 0} = 3.7 \times 10^{21} Q, \quad (4)$$

其中， $Q$  为当量（单位：kt）。因此，这次核爆 1 min 时的放射性总量为  $6.475 \times 10^{22}$  Bq。

核爆瞬时产生的烟云尺度很小，模式的网格设置为 50 km 分辨率，因此当烟云上升到一定高度后，同时水平扩散到网格尺度大小时，才开始模拟。根据观测资料表明，烟云大约在爆后的 7 h 左右到达中国冷湖地区，此时烟云的垂直扩展达到 6 km 左右，水平尺度扩展到 100 km 左右，烟云大约占据 30 个网格点。按照 Way-Wigner 公式，此时总的  $\beta$  放射性总量约衰减为  $4.6 \times 10^{19}$  Bq，每个网格点上的放射性活度分布约为  $1.8 \times 10^6$  Bq · m<sup>-3</sup>。

为了合理描述烟云中的颗粒物分布，本文对粒子尺度进行了分谱。根据 Bridgman 等<sup>[16]</sup> 的理论，放射性活度—粒子尺度分布是粒子的面分布和体分布的权重平均，即

$$A(r) dr = C_1 A_s(r) dr + C_2 A_v(r) dr, \quad (5)$$

其中， $A(r) dr$  表示半径为  $r \sim (r+dr)$  的粒子占总放射性的百分比， $A_s(r)$  为面积分布， $A_v(r)$  为体积分分布，中值半径分别为  $\ln R_s + 2 \ln^2 S$  和  $\ln R_s + 3 \ln^2 S$ ，几何标准差为  $S$ ， $C_1$  和  $C_2$  为常数， $C_1 = 0.32$ ， $C_2 = 0.68$ 。由于粒子谱是连续的，因此可以把粒子按大小分成不同的区间，每一粒子区间的放射性分数通过积分得到：

$$F_i = \int_{R_i}^{R_{i+1}} A(r) dr. \quad (6)$$

低空地爆吸入的地面颗粒物较多，因此粒子的半径也较大，分布范围也较广，从几个微米到几百微米。根据公式 (5) 和 (6) 计算，地爆可以分成 8、10、20 和 40 个等多个半径区间，本文考虑 20 个区间的半径粒子。表 1 中是 20 个代表性的不同中值粒子半径所占放射性总量百分比和重力沉降速度。从表中可以看到：最大的粒子半径达到近 1 000  $\mu\text{m}$ ，其重力沉降速度最大，但其放射性活度所占百分比很小，不到 2%；半径 < 100  $\mu\text{m}$  以下的粒子占放射性总量的 64%，但其重力沉降速度相对较小，假设粒子密度为  $2.6 \times 10^3$  kg · m<sup>-3</sup>，因此可以随风向下游传输很远的距离。重力沉降速度  $V_{gi}$  从 Beard<sup>[17]</sup> 的方程得出。

表 1 中的粒子是核爆烟云稳定后的粒子分布情况。稳定是指烟云上升到最大高度后停止上升，开始向下游随风扩散的时刻，一般在爆后数分钟烟云就可以达到稳定状态。由于模式分辨率的限制，本文的模拟在大约爆后 7 h 从冷湖地区开始，而比较大的粒子在模拟开始前就已经沉降在爆区及附近数百公里范围内。根据实际烟云移动至冷湖地区所需的时间和当时的烟云顶高，得到一个速度值：速度值 = 顶高 / 到达所需时间，应用观测资料计算约为  $0.43$  m · s<sup>-1</sup>。本文认为此速度为一临界速度，凡是粒子重力沉降速度大于临界速度的粒子都在模拟前沉降到了地面，因此文中实际模拟选取的是表 1 中前 8 种粒子的长距离输送，其放射性大约占总放射性的 48%。

RAMS/CFORS II 是中尺度区域模式，需要边界气象场数据进行初始化。本文中采用的是 ECMWF（欧洲气象预报中心）的再分析数据，数据内容包括 16 层（1 000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、20 和 10 hPa）等压面风、位势高度、温度和

表 1 不同中值粒子半径所占放射性总量百分比和重力沉降速度

Table 1 Radioactivity percent and gravity deposition velocity of some different median-radius particles

中值粒子半径/ $\mu\text{m}$	放射性百分比 $F_i/\%$	$V_{gi}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
4.3	9.35	0.006
8.6	7.99	0.023
13.0	6.44	0.053
17.7	5.65	0.096
22.7	5.15	0.153
28.3	4.80	0.224
34.6	4.55	0.306
41.7	4.35	0.391
50.0	4.19	0.473
59.5	4.06	0.726
70.8	3.95	0.915
84.4	3.87	1.444
101.0	3.80	1.427
122.0	3.73	1.780
149.0	3.68	2.228
185.7	3.62	2.816
238.7	3.58	3.622
323.8	3.53	4.812
493.8	3.49	6.866
983.4	1.88	11.247

湿度, 水平分辨率  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 数据间隔 6 h。本次模拟的区域为 ( $13 \sim 57^\circ\text{N}$ ,  $75 \sim 130^\circ\text{E}$ ), 水平分辨率为  $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ , 垂直从地面到高空 26 km 处分为 35 层, 时间步长为 50 s, 总模拟时间为 120 h。

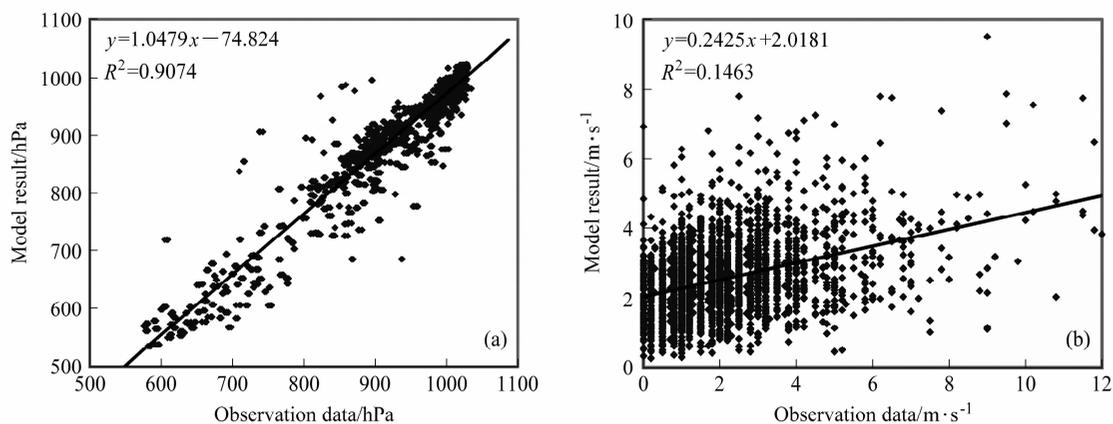


图 1 1971 年 11 月 19~22 日地面气象要素与模式模拟的相关性分析: (a) 气压; (b) 风速

Fig. 1 Correlation analysis between surface meteorology elements data and model results during 19-22 Nov 1971: (a) pressure; (b) wind speed

## 4 结果和讨论

### 4.1 气象要素的相关性比较

由于历史资料缺乏, 本文主要对地面站点的观测资料与模式模拟的气象要素进行相关分析, 图 1 是 1971 年 11 月 19~22 日期间 600 多个站点的地面气压和风速日均值与模拟结果的相关分析。从图中可以看到, 模式对地面气压的模拟结果十分理想, 相关性好,  $R^2$  达到 0.9, 而地面风速模拟相对差的比较多,  $R^2$  只有 0.14。由于地面风速受局地环流和湍流运动影响很大, 因此模拟难度很大, 模拟结果也较差, 说明模式对近地面的湍流运动和局地环流变化的模拟仍存在一定的误差, 这可能给近地面污染范围的模拟带来一定的偏差。而模式对气压模拟得较好, 说明了模式能够模拟出大尺度天气系统对地面气压的影响, 能够较准确地反应出大尺度天气形势的变化。

### 4.2 烟云走势分析

从模拟结果看, 核爆后产生的放射性烟云, 在空中风场的作用下, 从中国西北地区向东部地区移动, 随着高度的不同, 各层烟云走势不尽相同。由于本次核试验是小比高近地面爆炸, 因此烟云上升到空中需要一定的时间, 模拟是从爆后 7 h 开始的, 此时烟云顶最高已经上升到 10 km 以上, 在高空风场的作用下, 开始迅速向下游地区移动和扩展。

图 2 是主烟云在核爆后的 7~48 h 内分别在

200、500 和 850 hPa 等压面上的移动态势和爆炸当天 2000 UTC 的 200、500 和 850 hPa 等压面上的天气形势。实际观测的烟云边界是根据测得的总  $\beta$  浓度值大于等于所测高度和地区大气总  $\beta$  浓

度值本底平均值加 3 倍标准差作为依据, 模式参考观测数据和天然本底值, 设定烟云边界浓度值要大于  $3.7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

绘制的每个烟云时间间隔为 5 h。可以看到,

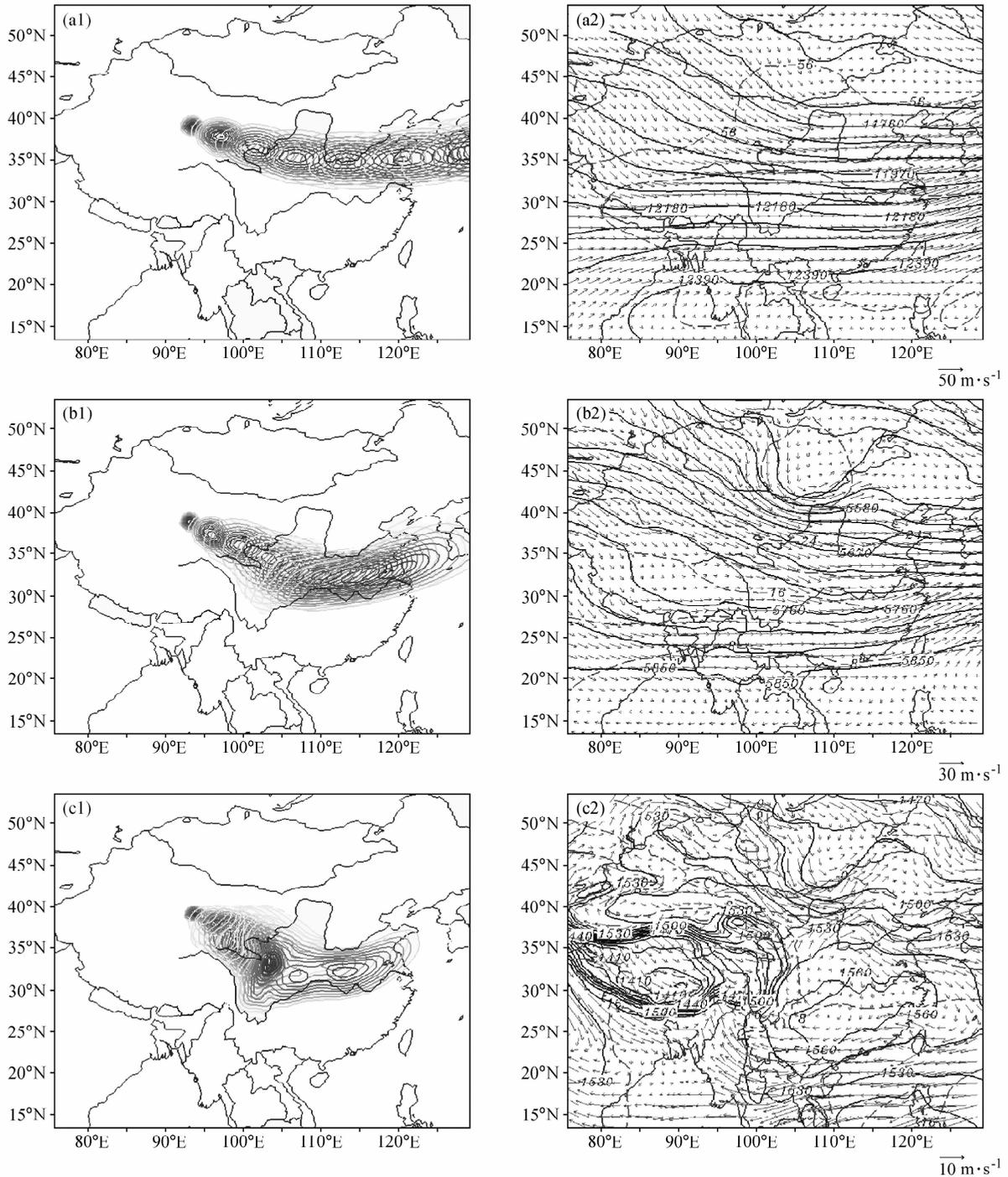


图2 核爆后 48 h 内主烟云在等压面上的移动示意图 (1 表示) 和等压面天气形势图 (2 表示, 图中实线为等高线, 单位:  $\text{gpm}$ ; 虚线为等温线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 200 hPa 等压面; (b) 500 hPa 等压面; (c) 850 hPa 等压面

Fig. 2 The movement figures (showed by 1) of main plume at isobaric surfaces during 48 hours after test and weather maps (showed by 2, real line is contour (units:  $\text{gpm}$ ); broken line is isotherm (units:  $^{\circ}\text{C}$ ): (a) 200 hPa; (b) 500 hPa; (c) 850 hPa

在本次试验过程中,空中主要受蒙古低压槽的控制,核爆区位于槽后,风速较大,但盛行下沉气流,一定程度上阻碍了烟云的向上抬升,因此烟云的范围呈现出从低空到高空逐渐减小的态势。在200 hPa等压面上,低压槽势力较弱,空中急流势力较强,在35°N线以北,风向从西向东表现为西北风迅速转为平直西风气流的过程,风速也很大,达到 $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。主烟云正处于西风气流的控制中,随风向迅速东移,核爆后40 h在山东半岛东移入海。同时烟云的水平扩展也较小,影响范围没有到达长江以南,下游的扩展也主要位于30~40°N之间。在500 hPa等压面上,蒙古低压槽势力较强,槽后西北风强烈,达到 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。烟云在风场的作用下,初始时快速向东南方向移动,当移动到槽前时,受西风气流影响,移速减慢,核爆后48 h从上海地区东移入海,在(33°N, 105°E)呈现出明显的由向东南移动到向东移动的转折点。烟云的水平扩展也较强,下游的扩展延伸到28~40°N。在850 hPa等压面上,槽后冷平流较强,蒙古低压处于强烈的发展中,槽前东南方受高压控制,高压势力较强,低压槽东移缓慢,槽前以西南气流为主。由此,整体看中国大陆地区低空影响系统较多,风向变化比较复杂,烟云在风场的作用下,出现了较强的扩散。初始时,烟云向东南方向缓慢移动,最南端到达26°N线附近,随后缓慢向东移动,在核爆后48 h,主烟云前部刚刚入海,中心仍位于长江中游,水平扩展东西延伸到100~120°E。对于此次核试验,中国空军进行了跟踪测量,通过资料对比发现,模式模拟的烟云空中走向与实际观测十分吻合。

#### 4.3 烟云的垂直结构

图3是模式模拟的核爆后不同时刻沿33°N线放射性烟云的垂直剖面。从图中可以看到,在该纬度上,核爆后的20 h之内,空中烟云的中心位于3 000~6 000 m高度,随着烟云的垂直扩展,中心不断抬升到6 000 m的高空。此后,中心并没有继续上升,而是逐步东移入海。烟云的垂直扩展不仅与湍流运动有关,更主要的是受到了系统性垂直运动的影响。从以上的气象场形势上可以看到,空中蒙古低压槽位于110°E线附近,并随时间缓慢东移。对应在垂直图上,12 000 m以

下110°E线以西处于槽后,一直是比较强烈的下沉运动,烟云在下沉运动的影响下,底部逐渐接地,垂直尺度扩展较小,中心位置高度变化不大;当烟云越过110°E线到达槽前的上升运动区后,其中上部出现了比较强烈的抬升和尺度扩展,中心位置高度也随之上升。

#### 4.4 地面沉降态势比较

图4是核爆后第2~4天地面沉降量的模式模拟结果和实际观测资料插值后的结果比较。其为归一化后的相对值的比较,归一化值是采用当天个站沉降量/当天全部站点总沉降量所得到的,主要是比较模拟和实测的沉降分布趋势是否吻合。从图中可以看到,核爆后的第2天,模拟的沉降只有一个单一的中心,位于(37°N, 97°E)。中心向外浓度值逐次递减,呈现出明显的靶心状等值线分布,沉降范围也较小,南北仅跨越5个纬度,东西跨越7个经度,而观测结果与模拟较为相似,沉降范围与模拟差别不大,但中心略偏北;核爆后第3天,模拟的主要沉降区扩展到黄河和长江流域之间,此时地面沉降量就开始出现多中心、不规则的等值线分布特征,模拟结果在102°E和110°E附近有两个高峰中心区,而实测结果在102°E附近出现一个小高峰区,在长江下游也出现了零星沉降,整体看东移趋势比模拟结果略有滞后,两者存在一定的偏差;核爆后第4天,模拟结果和实测比较符合,沉降区扩展到长江以南地区,南北跨越达到15个纬度,东西跨越25个经度以上,整体沉降范围是第二天的5倍以上,模拟结果出现了一系列小的高峰值分布,而实测也出现了多中心的分布结果,沉降区的最南端扩展到了中国南部大陆海岸线附近。

综合对比发现,尽管前两天沉降范围较小,但沉降量比后几天大得多,第2天和第4天的模拟结果相差了3个量级。这说明前期沉降以大粒子为主,从核爆后第3天开始,大粒子的沉降已经基本结束,烟云的放射性也减小很多,小粒子开始发挥主导作用。同时由于粒子半径更小,因此更容易随气流向下游输送,近地面湍流运动对其的影响也更大,烟云水平扩展达到数千公里,地面的沉降态势也表现出比较复杂的特征。

#### 4.5 各站沉降比较

图5是郑州、上海、南宁和福州地区地面沉

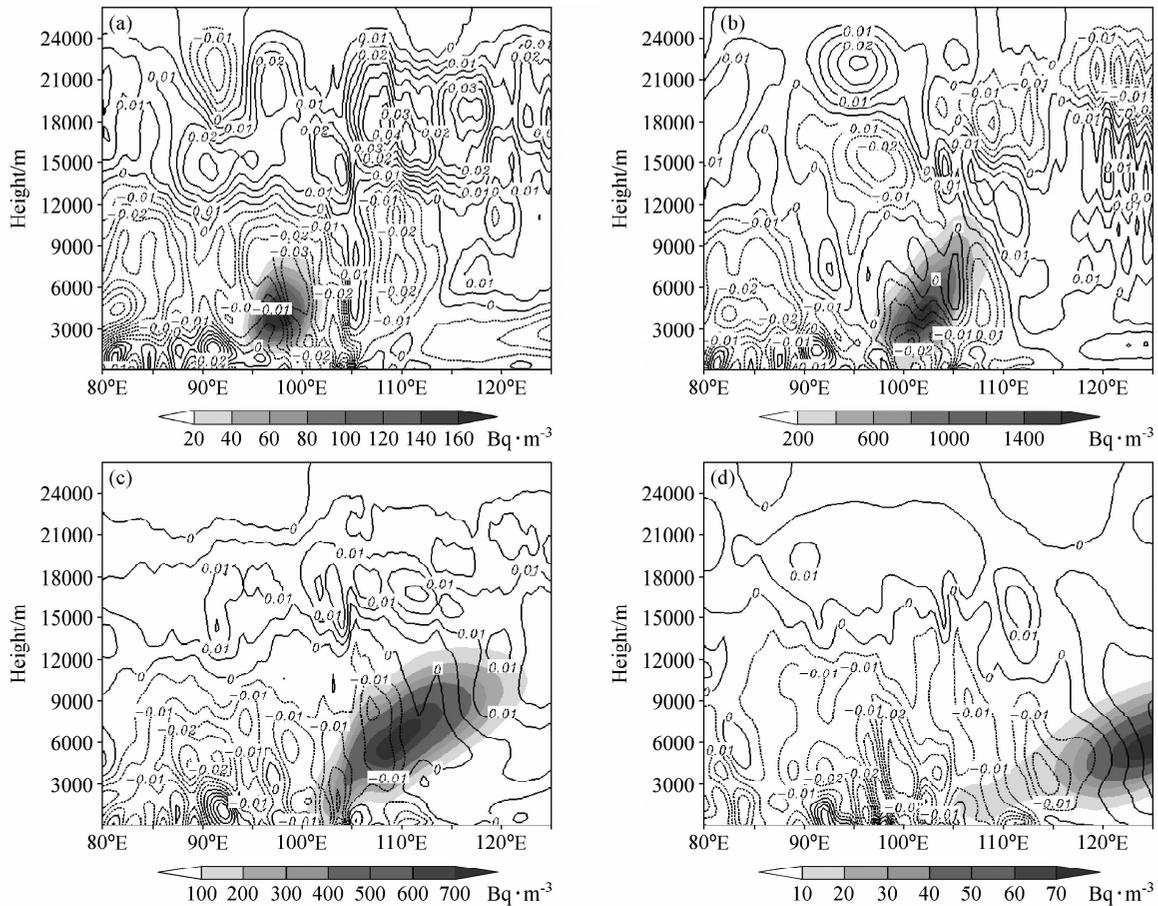


图3 33°N 主烟云的垂直剖面(阴影为浓度;等值线为垂直运动,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a) 核爆后 13 h; (b) 核爆后 19 h; (c) 核爆后 29 h; (d) 核爆后 49 h

Fig. 3 Vertical profile of main plume along 33°N (shadow is concentration; isoline is vertical motion, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ): (a) at the 13th hour after test; (b) at the 19th hour after test; (c) at the 29th hour after test; (d) at the 49th hour after test

降水量随时间变化的模拟和实测结果。图中为相对值, 归一化值是采用各站当天降水量/各站 5 天总降水量得到。从图中可以看到, 在郑州和上海模式模拟的高峰值均比实测要早一天, 说明了模式模拟的烟云在郑州—上海一线的近地面东移要比实测的快, 该误差可能是由于模拟的该地区空中风速比实际偏大而引起的; 而在南宁和福州的模拟与实测结果比较吻合, 烟云在第 4 天同步扩展到了中国的西南和东南地区, 第 5 天达到一个峰值, 此时烟云的水平尺度扩展也达到了 2 000 km 以上。总体看, 模式模拟的结果在长江流域东移比实际要偏快一些, 而在长江以南的扩散和沉降较好。

#### 4.6 误差分析

从上面的结果分析可知, 模式基本能够构建

出小比高低空核试验期间的烟云传输过程, 模拟的沉降分布态势也与实际比较接近, 但在具体细节上, 两者之间仍然存在一定的偏差。分析其误差可能的原因如下:

(1) 由于模拟尺度的局限, 模式的模拟只能从核爆后的第 7 小时开始, 初始的源项设计上与实际放射性粒子分布存在一定的误差。

(2) 由于模式采用的欧拉方法, 在计算中存在一定的伪扩散现象, 可能给长期的计算带来偏差, 造成模拟的污染区域有一定的虚假扩大; 同时由于模式对近地面湍流运动和局地环流的模拟存在一定的误差, 可能引起地面污染范围的模拟偏差。

(3) 由于观测站点较少, 实测资料不足, 地面沉降量的插值图也存在一定的误差, 可能出现

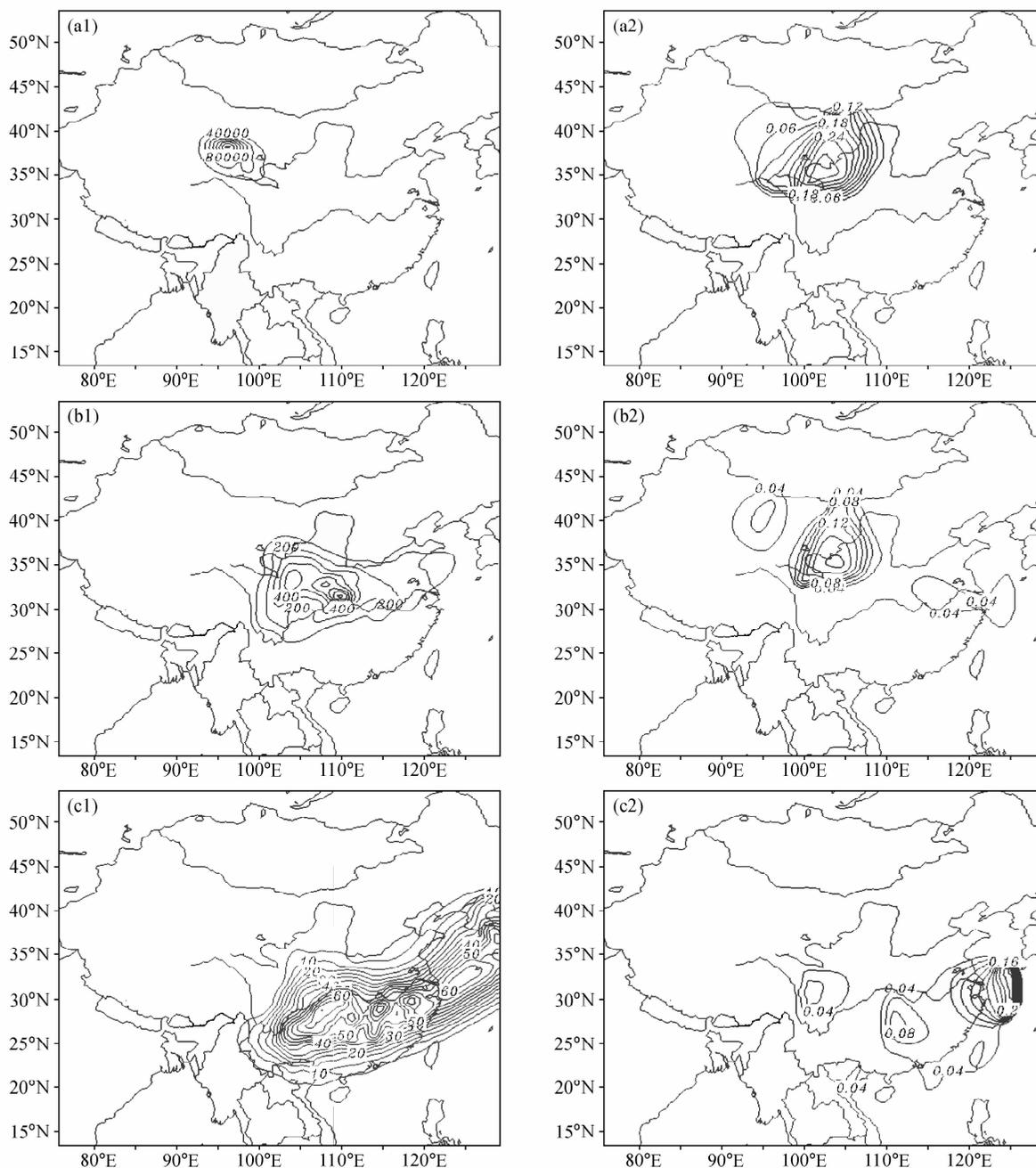


图4 地面沉降分布 [1为模式模拟结果, 单位:  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 2代表地面资料插值图(归一化值)]; (a) 核爆后第2天; (b) 核爆后第3天; (c) 核爆后第4天

Fig. 4 The distribution of surface deposition [1 denote model result, units:  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 2 denote interpolated figure of surface observed data (normalization data)]; (a) on the 2nd day after test; (b) on the 3rd day after test; (c) on the 4th day after test

对污染物分布区域有遗漏的现象。同时, 观测资料也存在一定的误差, 可能影响插值图的精确性。

## 5 结论

通过对本次低空核试验烟云传输过程的模拟,

得到以下结论:

(1) RAMS/CFORS II 模式能够用于小比高低空核试验烟云长距离输送和沉降的模拟研究, 模拟结果基本符合实际观测趋势。

(2) 对流层中低层的低压槽系统对本次低空核试验烟云的水平传输和垂直扩散起着重要的影

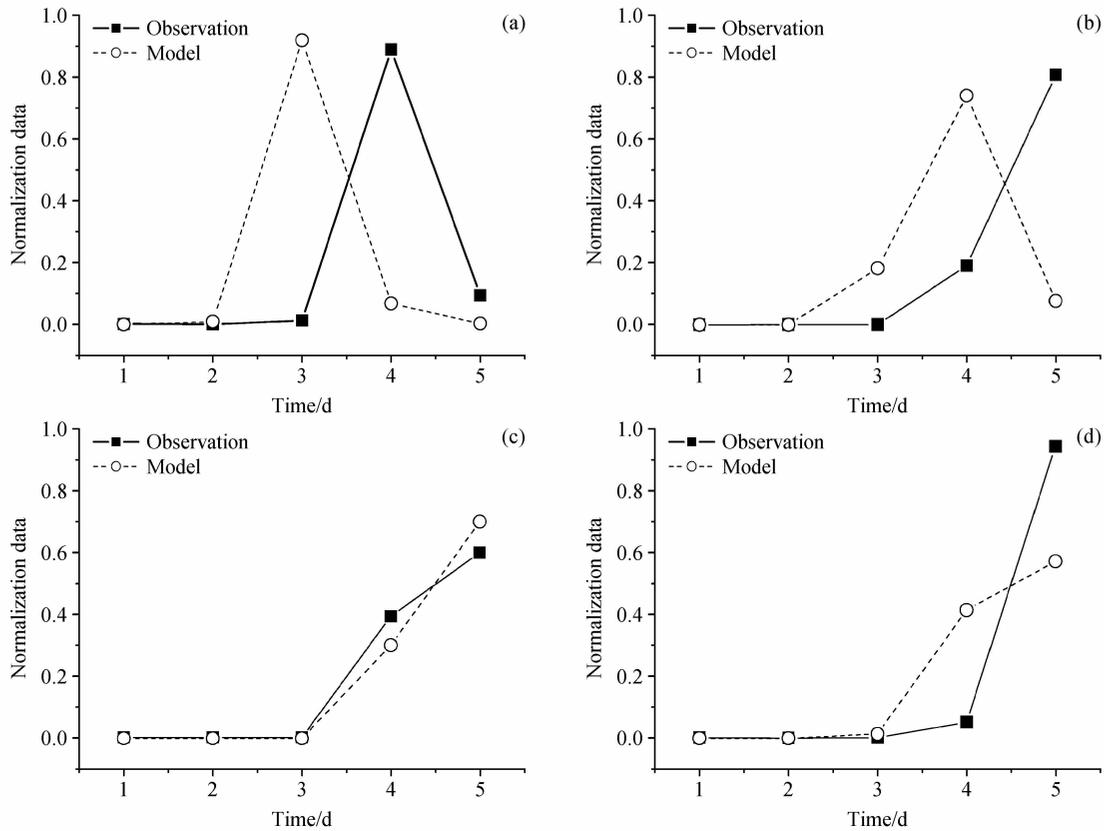


图5 站点地面降水量变化比较(纵坐标为归一化值): (a) 郑州; (b) 上海; (c) 南宁; (d) 福州

Fig. 5 The variation of station surface deposition (y-axis is normalization data): (a) Zhengzhou; (b) Shanghai; (c) Nanning; (d) Fuzhou

响作用。

(3) 烟云的长距离传输速度呈现出随高度递减而减小的趋势, 在 6 000 m 以上, 烟云在核爆后 48 h 即东移入海, 6 000 m 以下, 烟云在中国大陆的扩散和沉降维持了 5 天以上。

(4) 核爆后 2 天内以大粒子沉降为主, 其后以小粒子沉降为主, 小粒子的放射性远小于大粒子, 在核爆后第 4 天, 放射性沉降就减小了 3 个量级, 而小粒子的沉降范围是大粒子的 5 倍以上。

本文对小比高低空核试验烟云的传输模拟主要涉及了干沉降过程, 这只是对 RAMS/CFORS II 模式的模拟性能进行了初步的验证, 对于大比高的高空核试验以及模式对湿沉降过程的模拟性能, 还有待于后续进一步的研究。

#### 参考文献 (References)

- [1] Willis J C. The history of fallout prediction. United States Air Force, Air Force Institute of Technology, AD -

A079560, 1979

- [2] Harvey T F. Perspective on the local fallout model used in the SCOPE/ENUWAR study. The Moscow meeting of the SCOPE/ENUWAR Committee. International Council of Scientific Unions. March 1988
- [3] Ljung P, Nyren K. Nuclear fallout simulation using KDFOC3. Foersvarets Forskningsanstalt, Umea (Sweden). Huvudavdelning for ABC-Skydd. PB95-131645, May 1994
- [4] Thaning L, Naeslund E. Simulation of radioactive fallout using the MATHEW/ADPIC model. Foersvarets Forskningsanstalt, Umea (Sweden). Huvudavdelning for ABC-Skydd. PB92-177575, December 1991
- [5] 郑毅, 王自发, 黄美元. 一个大气层核试验放射性碎片长距离输送的三维欧拉模型. 气候与环境研究, 2000, 5 (2): 118~128  
Zheng Yi, Wang Zifa, Huang Meiyuan. A 3-dimension Euler model for long-range transportation of atmospheric nuclear explosion test radioactive debris. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, 5 (2): 118~128
- [6] Uno I, Satake S, Carmichael G R, et al. Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simu-

- lated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D19S24, doi: 10. 1029/2003JD004222
- [7] Pielke R A, Cotton W R, Walko R L, et al. A comprehensive meteorological modeling system; RAMS. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1992, **49**: 69~91
- [8] Cotton W R, Pielke R A, Walko R L, et al. RAMS2001: Current status and future directions. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2003, **82**: 5~29
- [9] 张美根, 韩志伟, 雷孝恩. Monte Carlo 多源模式在广东核电站大气环境评价中的应用. *气候与环境研究*, 1999, **4** (2): 203~209  
Zhang Meigen, Han Zhiwei, Lei Xiaoen. Application of Monte Carlo Model for Multiple Sources to Air Quality Assessment at Atomic Power Plant of Guangdong. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4** (2): 203~209
- [10] Way K, Wigner E P. The rate of decay of fission products. *Phys. Rev.*, 1948, **73** (11): 1318~1330
- [11] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. Part I: The basic experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 1963, **91**: 99~164
- [12] Mellor G L, Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**: 1791~1806
- [13] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, **20**: 851~875
- [14] <http://cns.mis.edu/research/china/coxrep/testlist.htm>
- [15] 乔登江. 核爆炸物理概论. 北京: 原子能出版社, 1988  
Qiao Dengjiang. *Introduction to Nuclear Burst Physics* (in Chinese). Beijing: Atomic-Energy Publishing House, 1988
- [16] Bridgman C J, Bigelow W S. A new fallout prediction model. *Health Physics*, 1982, **43**: 205~218
- [17] Beard K V. Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**: 851~864