

一次强沙尘暴长距离输送的数值模拟研究

戚丹青, 谭季青, 孙 长
(浙江大学 地球科学系, 浙江 杭州 310027)

摘 要:利用 HYSPLIT-4 传输、扩散模式对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的强沙尘暴进行长距离输送的数值模拟研究, 并进行轨迹和浓度分析. 研究结果表明: (1) 2003 年 4 月 9 日强沙尘暴过程的沙尘来源并非单一地区; (2) 此次沙尘暴长距离输送过程中, 主要有两个高浓度中心向东传输. 一个在北纬 35 度附近, 主要在 1 500~3 000 m 高空传输, 另一个在北纬 40 度附近, 且主要在 1 500 m 以下传输. 后期两者合二为一.

关 键 词:沙尘暴; HYSPLIT-4 模式; 长距离输送; 数值模拟

中图分类号: P445.4

文献标识码: A

文章编号: 1008-9497(2006)02-216-07

QI Dan-qing, TAN Ji-qing, SUN Zhang (Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

A numerical simulation about the long distance transportation of a dust storm event. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2006, 33(2): 216~222

Abstract: The model HYSPLIT-4 is used to simulate the long distance transportation of a dust storm occurring on 9 April, 2003 in Northwest China. The track and concentration of this event are analyzed. Results show that: (1) The original airborne dust, which is responsible for the dust storm event on 9 April, 2003, came from more than one desert area. (2) In the process of the long distance of this dust storm event, there are two high concentration centers transporting eastward. One is located in the latitude 35 degrees north, which transfers at an altitude between 1 500 and 3 000 meters which the other is located in the latitude 40 degrees north which transports below 1 500 meter. At last they merged.

Key words: dust storm; HYSPLIT-4 model; long distance transportation; numerical simulation

0 引 言

沙尘暴是在特定的天气条件下, 沙尘从地面进入大气层, 从而使能见度恶化的一种常见的自然天气现象. 沙尘暴的发生不仅影响本地区, 还可以通过大气输送影响大范围的下游地区的生态、环境和气候. 近年来, 中国北方频繁发生的沙尘暴事件引起了国内外的关注, 沙尘暴已经成为一个重要的地球环境问题. 尘暴不仅污染当地的空气, 还波及下游的朝鲜半岛、日本甚至太平洋中部. 因此, 许多国家的科学工作者重视研究起源于我国西北部干旱地区的沙尘暴.

日本的石坂隆^[1]据尘暴气溶胶的矿物成分, 外形结构, 卫星的可见光图片和地面的气象实况, 推断出 1979 年 4 月中旬出现在日本上空的尘暴, 起源于我国西北部的塔克拉玛干沙漠以及黄河上游的戈壁滩和腾格里等沙漠. 80 年代以来, 一些学者开始采用数值模拟的方法研究沙尘气溶胶模式的长距离输送问题. SCHUTZ L^[2]发展了一个二维稳态沙尘输送模式, 研究了撒哈拉地区沙尘在赤道大西洋上空的远距离传输; WESTPHAL^[3,4]等在 1987 年将 NCAR 的有限区域动力模式和 NASA 的气溶胶远距离传输模式相结合, 发展成二维动力沙尘输送模式, 并且后来发展成三维模式. 90 年代以来国内对沙尘暴长距离输送数值模拟也有不少工作. 刘春涛

收稿日期: 2004-12-16.

基金项目: 国家自然科学基金主任基金资助项目(40345025); 浙江大学回国引启动经费资助(107000-58165).

作者简介: 戚丹青(1980-), 女, 硕士研究生, 主要从事沙尘暴方面的研究.

等^[5]提出一种沙尘源、汇项的参数化方案和输送方程,并将其引入 MM4 中尺度数值模拟系统,较成功地模拟了“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.刘毅等^[6]运用 MM4 中尺度动力学模式结合沙尘气溶胶传输模式,模拟分析了 1992 年 4 月发生的沙尘天气以及黄沙输送过程.黄美元等^[7]提出了一个适合东亚地区的分谱的黄沙输送模式.

虽然对东亚地区黄沙的输送物理及化学过程已有一定研究,但尚处于起步阶段,存在的科学问题还很多,对影响黄沙输送的许多物理过程如起沙机制、分谱机制、沉降机制等都存在争议.本文利用 HYSPLIT-4 对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北部的一次强沙尘暴进行长距离输送数值模拟,并分析该过程中轨迹和浓度变化.这项工作对发展沙尘暴长距离输送研究和防治沙尘暴都具有重大意义.

1 资料和 HYSPLIT-4 模式简介

气象场采用美国 NWS 为 NCEP 业务运行 FNL 数值预报模式提供的初始场资料.每天共有 4 个时次:00、06、12、18UTC,格距为 190 km×190 km,垂直方向共 14 层,从地面至 50 hPa 的气象场.地面要素场包括:地面气压、温度,6 h 累计降水量,地面 U 、 V 方向动量通量,感热通量,潜热通量,地表向下短波辐射通量,地形高度,2 m 高度的温度、相对湿度,10 m 高度的风向、风速,土壤湿度,总云量.高空要素场包括:水平、垂直风场,温度,高度,相对湿度.

本文采用由 NOAA(ARL)的 Draxler 等开发的 HYSPLIT-4(混合单粒子拉格朗日积分)传输、扩散模式^[8]. HYSPLIT-4 模式能较好地应用于 PM_{10} 污染物(粒径 $<10\mu m$)扩散和传输的数值模拟^[9],其平流和扩散计算采用 Lagrangian 方法,而浓度计算采用 Eulerian 方法,即采用 Lagrangian 方法以可变网格定义污染源,分别进行平流和扩散计算;采用 Eulerian 方法在固定网格点上计算污染物浓度.模式采用地形 sigma 坐标,模式的水平网格与输入的气象场相同,垂直方向分为 28 层.模式将气象要素线性内插到各 sigma 层上.

HYSPLIT-4 能广泛应用于多种污染物在各个地区的传输和扩散,对世界各地的沙尘暴事件也能做较好的数值模拟,从文献^[9]该模式成功地模拟了 2001 年 4 月和 2002 年 3 月发生在中国的沙尘暴事件可以推断该模式对中国的沙尘暴事件具有一定的

适应性,并可进一步获取有关该模式对沙尘暴事件的具体应用.

1.1 起沙处理

对沙尘暴天气过程的模拟,首先要解决的就是沙尘源的问题,较为常用的方法有参数化法及起沙数值模拟法.整合进 HYSPLIT 模式的起沙通量用文献^[3]中的公式:

$$F=0.01\times u_*^4,$$

其中 u_* 为摩擦速度.由于没有十分精细的地表特征数据,HYSPLIT 粗略地使用 1×1 度经纬网络的地表类型数据,仅当格点所在处的地表特征为沙漠时,才认为可能是一沙尘源.当局地风速超过当地地表粗糙度所决定的临界风速并且此格点所对应的地表特征为沙漠时,则认为该格点会起沙.实际上是在扩散模式和传输模式启动前,HYSPLIT 用上述方法预先计算出模拟区域中的所有潜在点源.

1.2 扩散方程

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_h \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_v \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) = S + R,$$

其中 u , v , ω 为风场, c 为污染物浓度, S 为源, R 为汇(包括各种沉降、化学反应), σ 为垂直方向地形, sigma 坐标定义如下:

$$\sigma = (Z_{top} - Z_{msl}) / (Z_{top} - Z_{gl}),$$

其中, Z_{top} 是模式层顶高度, Z_{gl} 是地面高度, Z_{msl} 是要计算的垂直层高度.垂直方向不同层间间隔可以取定任意值,模式中预先给定 Z_{msl} 和垂直层指数间的定量关系:

$$Z = aK^2 + bK + c,$$

式中 $a=30$, $b=-25$, $c=5$.在这一关系式约束下,越上层垂直分辨率越小,当 $K=1,2,3$ 时,层高度分别为 10,75,200 m,依次类推,当 $K=20$ 时,层高度为 11 500 m,此时,层间间隔达到了 1 200 m.通过修改上述等式中的系数,可以得到任何精度的垂直分辨率.

1.3 平流方程

任何拉格朗日模式的根本都是根据各个粒子或烟羽来计算扩散的,即各个粒子互不依赖.因此一旦 U 、 V 、 W 基本气象背景场确定下来并且插值到了模式格点上,平流就可以确定了. HYSPLIT 模式对平流的处理如下:

$$P'(t+\Delta t) = P(t) + V(P,t) * \Delta t,$$

$$P(t+\Delta t) = P(t) + \frac{1}{2} [V(P',t+\Delta t) + V(P,t)] * \Delta t,$$

其中 P 为污染物位置, V 为三维风矢, Δt 为可变时间步长, $\Delta t < 0.75$ 格距 / U_{\max} (U_{\max} 为最大风速), 即一个时间步长内气团的移动不超过 0.75 个格距。

1.4 沉 降

沉降机制可分为干沉降、湿沉降及辐射衰减。干沉降可以显式定义一个沉降速度, 对粒子来说为一个与重力相关的速度, 也可以用抗阻方法求得。可溶性气体的湿沉降用 Henry 定律求得。粒子湿沉降通过计算云内清除率和云底以下显式清除系数求得。模式为了计算简便, 将沉降过程用一个统一的表达式表示:

$$D = m \{ 1 - \exp[-\Delta t(\beta_{\text{dry}} + \beta_{\text{gas}} + \beta_{\text{inc}} + \beta_{\text{bel}})] \},$$
 m 为污染物质量, 随着沉降过程而减少; β_{dry} 、 β_{gas} 、 β_{inc} 、 β_{bel} 分别为干沉降常数、气体沉降常数、云内清除常数、云底以下清除常数。

表 1 我国北方部分地区沙尘暴天气实况(陕西、新疆 4 月 9 日均未出现沙尘暴)
Table 1 Dust storm on 9 Apr, 2003 in Northwest of China

序	地名	能见度/m	风速/m·s ⁻¹	风向/度	天气现象	出现时间
1	张掖(甘肃)	900	18	西北	沙尘暴	10 时 00 分
2	金塔(甘肃)	300	25	西北	强沙尘暴	13 时 07 分
3	民勤(甘肃)	800	21	西北	沙尘暴	13 时 07 分
4	兰州(甘肃)	600	10	北风	沙尘暴	15 时 20 分
5	泽库(青海)	小于 200	24	偏西风	特强沙尘暴	16 时 30 分
6	玛多(青海)	小于 100	25	偏西风	特强沙尘暴	16 时 42 分
7	共和(青海)	小于 800	19	偏西风	沙尘暴	18 时 16 分
8	达日(青海)	小于 100	28	偏西风	特强沙尘暴	18 时 45 分
9	甘德(青海)	小于 300	29	偏西风	特强沙尘暴	18 时 44 分
10	玛沁(青海)	小于 100	24	偏西风	特强沙尘暴	19 时 01 分
11	曲麻莱(青海)	注:以电话方式确定该站无具体记录,但出现了沙尘暴				
12	巴音毛道(内蒙)	900	20	西北	沙尘暴	14 时 32 分
13	头道湖(内蒙)	600	20	西北	沙尘暴	15 时 01 分
14	锡林高勒(内蒙)	700	17	北北西	沙尘暴	15 时 05 分
15	额济纳旗(内蒙)	800	18	东南东	沙尘暴	15 时 15 分
16	阿拉善左旗(内蒙)	800	18	北西	沙尘暴	16 时 15 分
17	拐子湖(内蒙)	900	21	西北西	沙尘暴	16 时 45 分

2.1 后向轨迹分析

为了解 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的这次强沙尘暴的源地, 利用 HYSPLIT-4 轨迹扩散模式, 以 4 月 9 日 12UTC 为起点, 6 小时间隔, 对以上站点进行后向追踪, 共追踪 10 个时次。

从图 1 中可以看出甘肃省 4 个站点途经甘肃北部, 内蒙西部和新疆东北部, 向西北方向移动, 但具

2 模拟结果和分析

2003 年 4 月 9 日, 受新疆东移强冷空气影响, 甘肃河西、白银、兰州等地先后出现了大范围的大风、沙尘天气, 其中金塔、张掖、民勤、兰州等地出现沙尘暴, 能见度普遍在 900 m 以下, 金塔为强沙尘暴, 最大风速达到了 25 m·s⁻¹ (10 级), 能见度 300 m。内蒙西部有 6 站出现沙尘暴, 最大风速一般在 20 m·s⁻¹ 左右, 最低能见度达到 400 m。青海有 6 站出现沙尘暴, 最大风速一般在 20~28 m·s⁻¹, 其中茫崖出现黑风天气, 最大风速为 28 m·s⁻¹, 最低能见度达到 10 m。宁夏也先后出现了沙尘天气, 风速一般在 12~16 m·s⁻¹。见表 1, 本次模拟就是针对这次沙尘暴进行的。

体站点轨迹方向略有偏差。从图 2 中可以看出内蒙古自治区 5 个站点途经内蒙西北部 and 新疆东北部, 一直向西北方向移动, 而且轨迹路线基本一致。从图 3 中可以看出青海省 6 个站点轨迹明显不同于以上两省, 站点轨迹随着时间向前推移, 途经青海西北, 向西方向移动, 进入新疆南部, 其中有部分站点途经西藏北部。

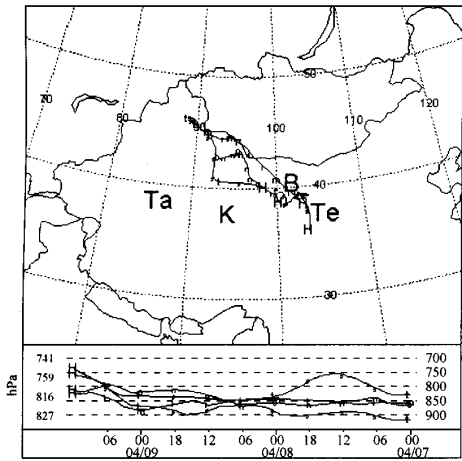


图 1 甘肃省站点后向轨迹图

Fig. 1 Backward trace in Gansu Province

H 表示站点位置;Ta 表示塔克拉玛干沙漠;K 表示库姆塔格沙漠;B 表示巴丹吉林沙漠;Te 表示腾格里沙漠;图 2、3 相同

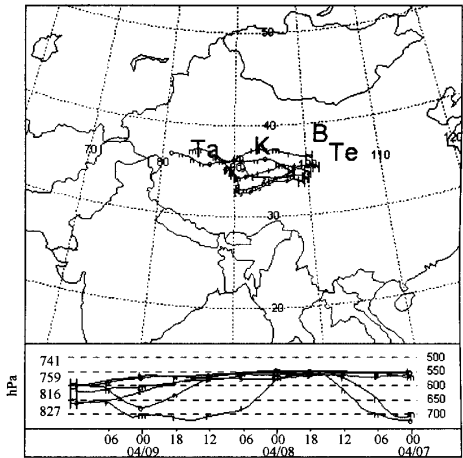


图 3 青海省站点后向轨迹图

Fig. 3 Backward trace in Qinghai Province

在垂直方向上,甘肃省 4 个站点中有 3 个轨迹线一直在 800 hPa 以下,说明沙尘暴的长距离输送一直稳定在低层,其中一个站点在 7 号 12 时左右局地垂直对流加大,沙尘传输进入中层.内蒙古自治区 5 个站点轨迹一直稳定在 800 hPa 以下传输,说明沙尘一直在低层稳定气流中进行长距离输送.青海省大部分站点都稳定于 550 hPa 传输,其中有个别站点一开始在 700 hPa 层传输,到 7 号 18 时上升并稳定于 550 hPa 传输,说明在 8 号左右局地抬升较为明显,之后气流较为稳定.考虑到甘肃省,内蒙古自治区和青海省在我国西北部,海拔较高,所以轨迹传输基本都在近地面层进行.

从表 2 统计图中可以看出,在进行后向轨迹追踪的整个过程中,站点总共经过 4 个沙区,分别为塔克拉玛干沙漠(Ta),库姆塔格沙漠(K),巴丹吉林沙漠(B)和腾格里沙漠(Te).在进行后向追踪的前期,

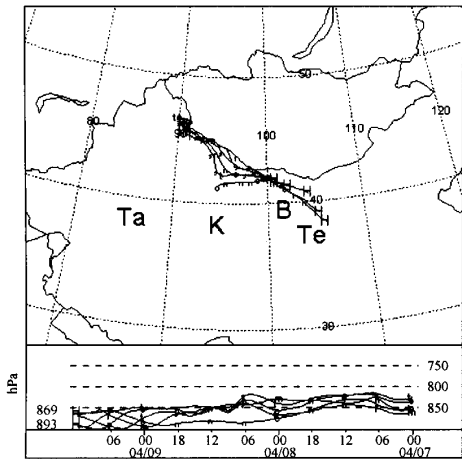


图 2 内蒙古自治区站点后向轨迹图

Fig. 2 Backward trace in Neimenggu Province

表 2 后向轨迹中各时刻落入八大沙区站点统计表

Table 2 The statistics of stations in 8 desert areas in the tracing process at every moment

时间	4 月 9 日 12 时	4 月 9 日 06 时	4 月 9 日 00 时	4 月 8 日 18 时	4 月 8 日 12 时	4 月 8 日 06 时	4 月 8 日 00 时	4 月 7 日 18 时	4 月 7 日 12 时	4 月 7 日 06 时	4 月 7 日 00 时	合计
塔克拉玛干沙漠	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	6
吉尔班通古特沙漠	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
库姆达克沙漠	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
巴丹吉林沙漠	2	5	6	3	2	0	0	0	0	0	0	18
腾格里沙漠	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
毛乌素沙地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
浑善达克沙地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
科尔沁沙地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	4	7	6	3	2	0	0	2	2	2	2	

即 4 月 9 号左右,沙尘粒子主要来源于巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,其中巴丹吉林沙漠在 4 月 9 号 00 时有 6 个站点沙尘来源于此,达到最高峰,腾格里沙漠在 4 月 9 号 12 时和 06 时也有沙尘来源于此.在后向轨迹追踪的后期,沙尘粒子则主要来源于另两个沙区塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠.整个过程沙尘来源巴丹吉林沙漠为最多,其次依次为塔克拉玛干沙漠,腾格里沙漠和库姆塔格沙漠.

经过以上分析,得到以下结论:这次沙尘暴过程沙尘来源并非单一,其中 73.3% 的降尘来源于短距离输送的临近的巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,另外 26.7% 的降尘来源于长距离输送的塔克拉玛干沙漠和库姆塔格沙漠.

由于资料精度较低,在确定沙尘起源地区时有一定误差.要解决这一误差,要求提高资料精度,同时对目前沙区位置需要更为精确的 GIS 数据

2.2 浓度分析

为了解 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北部的沙尘暴浓度以及长距离传输过程变化,选定北纬 35~70 度,东经 70~120 度该区域为沙尘源潜在区域,此矩形区域包含了东亚地区八大沙区的其中 7 个沙区(未包含的科尔沁沙地在内蒙古、吉林、辽宁三省的交界处,远离此次沙尘事件的影响区域,并且面积为一极小的沙区).此选定的矩形区域中,共有 224 个格点对应的地表特征为沙漠,此 224 个点中的局地风速大于当地条件下临界风速的点即被认为沙尘暴源区.选定 2003 年 4 月 7 日 00 时为模拟初始时间,积分总时间设定为 144 h,即从 2003 年 4 月 7 日 00 时至 13 日 00 时,时间步长设为 6 h.模式层顶设置为 10 000 m,当粒子碰到上下边界时,模式视其从边界完全反弹.

此次沙尘暴天气主要影响我国北方地区,所以选定积分区域中心为(40N,100E).X 向、Y 向跨度接受模式默认值,分别为 180 个经度和 90 个纬度.如此选定的积分区域包含了整个东亚地区,可以将此次沙尘暴置身于东亚地区考虑.由于沙尘暴的长距离输送主要集中在 3 000 m 以下高度,所以研究主要集中在 0~1 500 m 和 1 500~3 000 m 两地表面高度层.

图 4,6,8 分别代表 2003 年 4 月 9~11 日 00 时 0~1 500 m 沙尘平均浓度分布,表 1 所列站点标注在图中.9 日开始在新疆,西藏北部和青海的交界处已经出现大规模的沙尘区域,质量浓度在 0.2~6 mg·m⁻³.10 号沙尘暴区域大范围扩大,且沙尘浓度上升.主要分布为两个区域,一个主要分布于内蒙西部和甘肃,最高质量浓度中心达 25 mg·m⁻³,高质量浓度中

心停留在甘肃省中部,另一个主要分布于青海省及其邻近边界,最高中心质量浓度到 10 mg·m⁻³.11 号沙尘暴继续向东移动,还是分布为两个区域,其中前一区域范围继续扩大,高质量浓度中心到达河北山西北部,最高质量浓度中心维持在 25 mg·m⁻³左右.后一区域也向东移动,但是东移速度明显没有前一区域迅速,且范围有所减小,质量浓度有所下降.

图 5,7,9,分别代表 2003 年 4 月 9~11 日 00 时 1 500~3 000 m 沙尘平均质量浓度分布.在该层,9 号沙尘暴范围和 0~1 500 m 层相似,但质量浓度在 0.2~0.5 mg·m⁻³.10 号 00 时高层沙尘浓度也有两个区域,但是前一区域位于内蒙古,甘肃和宁夏边界,质量浓度只有 0.2 mg·m⁻³,且范围明显小于低层相应区域,后一区域范围在青海省和四川,西藏边界,但范围和质量浓度都小于低层相应区域,质量浓度最高只达到 6 mg·m⁻³.到 11 号 00 时,在高层这两个区域联合为一个区域,范围覆盖内蒙,山西,陕西,河北等多个省区,但沙尘质量浓度在 0.2~4 mg·m⁻³左右.

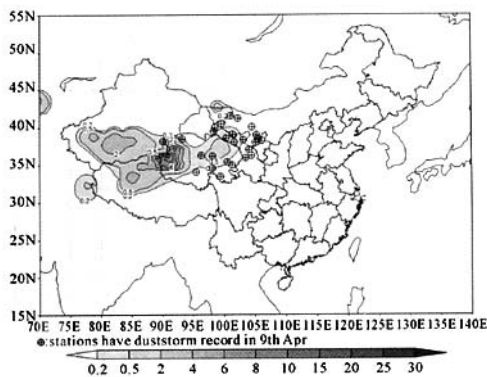


图 4 2003 年 4 月 9 日 00 时 0~1 500 m 平均沙尘质量浓度

Fig. 4 Average dust concentration below 1 500 m at 00UTC, 9 April, 2003

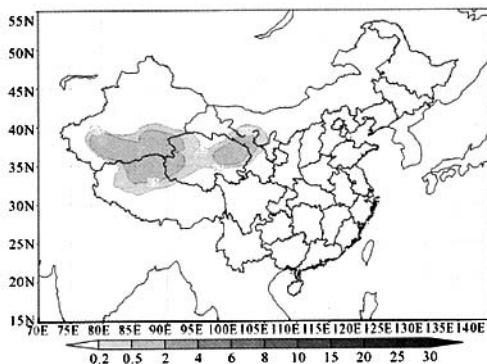


图 5 2003 年 4 月 9 日 00 时 1 500~3 000 m 平均沙尘质量浓度

Fig. 5 Average dust concentration between 1 500 m and 3 000 m at 00UTC, 9 April, 2003

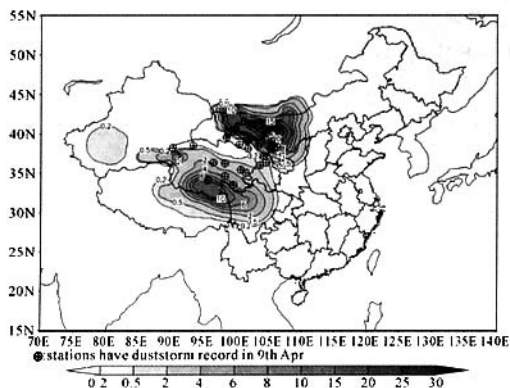


图6 2003年4月10日00时0~1500 m
平均沙尘质量浓度

Fig. 6 Average dust concentration below 1500 m
at 00UTC, 10 April, 2003

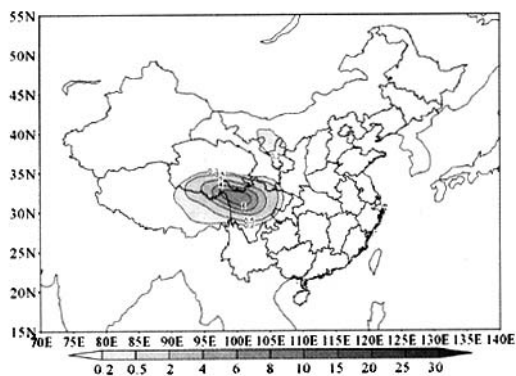


图7 2003年4月10日00时1500~3000 m
平均沙尘质量浓度

Fig. 7 Average dust concentration between 1500 m and
3000 m at 00UTC, 10 April, 2003

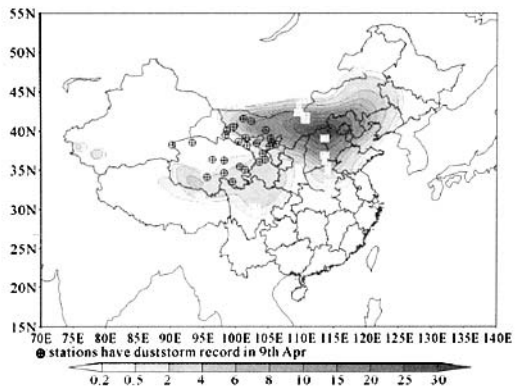


图8 2003年4月11日00时0~1500 m
平均沙尘质量浓度

Fig. 8 Average dust concentration below 1500 m
at 00UTC, 11 April, 2003

可见在这次沙尘暴过程中有两个沙尘传输中心,一个沿北纬35度传输。另一个沿北纬40度传输,其中前者质量浓度较小,在1500~3000 m高

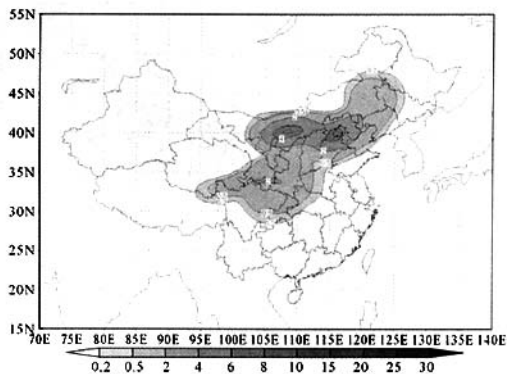


图9 2003年4月11日00时1500~3000 m
平均沙尘质量浓度

Fig. 9 Average dust concentration between 1500 m and
3000 m at 00UTC, 11 April, 2003

空传输,后者主要集中在1500 m以下传播,同时质量浓度大于前一质量浓度中心,但在沙尘暴发生后期该质量浓度中心上传于前一质量浓度中心合并为一个整体,一起东移入海。

3 检 验

气溶胶会吸收或反射太阳入射光线,因此会降低能见度。TOMS的气溶胶指数(AI)可用来反映气溶胶对入射的太阳光的影响。当AI小于0.1时,天空是一片蔚蓝的,此时具有最大的能见度;当AI超过4时表明气溶胶相当多,以至于想看到正午的太阳都有困难。气溶胶粒一般都在3000 m左右的高度。

沙尘暴天气过程中的卷起的细小沙尘胶粒在一定天气条件下可以输送到高空,并且传送到离源地很远的其他地区。当有沙尘暴天气事件发生时,会对AI指数产生一定影响,即可以从AI指数分布情况推测沙尘暴事件的发生发展情况。

TOMS气溶胶指数以日平均表示,分辨率为 1.25×1.0 经纬度网络,正值表示吸收性胶粒(如沙尘和烟羽),负值表示非吸收性胶粒。

图10~12分别为TOMS AI指数图。图10中只有在新疆,甘肃和新疆的边界有1、2的指数值零星分布。图11中,在新疆,甘肃和四川边界有相应的指数分布。在图12中,在我国华北地区有片状指数分布。TOMS AI指数在一定程度上较好地反映了高层沙尘区域,但并不十分吻合。究其原因,TOMS气溶胶指数虽可用于反映沙尘天气过程,但焦点在3000 m以上高空,对于3000 m以下,AI指数反映的结果并不理想。

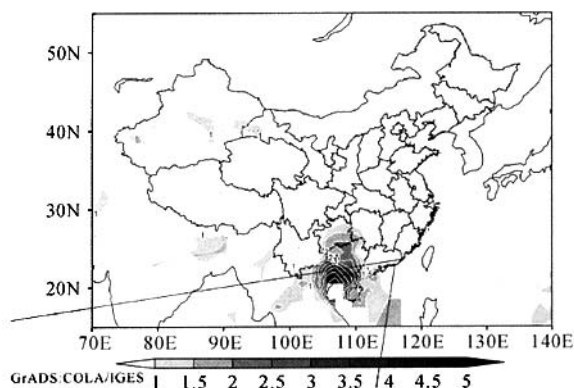


图10 2003年4月9号 TOMS AI 指数图

Fig. 10 Picture of aerosol index on 9 Apr, 2003

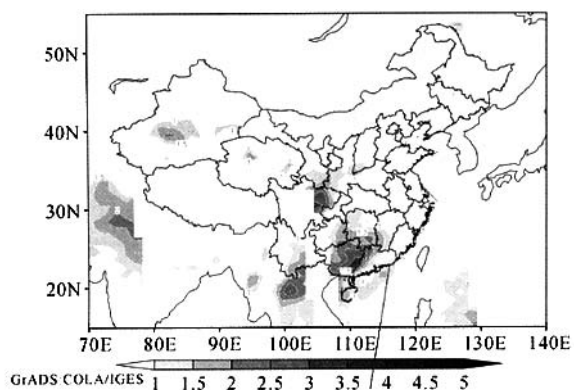


图11 2003年4月10号 TOMS AI 指数图

Fig. 11 Picture of aerosol index on 10 Apr, 2003

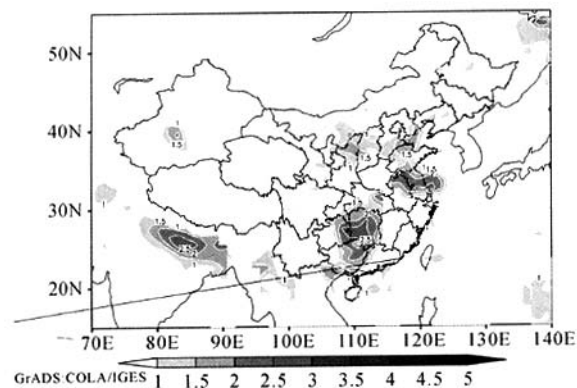


图12 2003年4月11号 TOMS AI 指数图

Fig. 12 Picture of aerosol index on 11 Apr, 2003

4 结 论

本文主要应用 NOAA 空气资源实验室提供的 HYSPLIT-4 模式,对 2003 年 4 月 9 日发生在我国西北的一次强沙尘暴过程进行长距离输送模拟,模

拟结果显示:

- 4.1 此次强沙尘暴过程的沙尘来源并非单一地区。
- 4.2 此次沙尘暴长距离输送过程中,主要有两个高质量浓度中心向东传输。一个在 35°N 附近,其高度稳定在 1 500~3 000 m 高空传输,另一个在 40°N 附近,且主要在 1 500 m 以下传输。在沙尘暴后期两个高质量浓度中心合二为一,东移出海。

参考文献(References):

- [1] 石坂隆. 黄砂[J]. 天气, 1981, 28(3): 651-653.
SHI Ban-long. Dust[J]. *Weather*, 1981, 28(3): 651-653.
- [2] SCHUTZ L. SAHARAN. Dust transport in the NE-tradewind region over the North Atlantic Ocean. [J] *Proc Sym Radiatom*, 1977, 21(1):68-70.
- [3] WESTPHAL, TOOM O B, CARLSON T N. A Two-dimension numerical investigation of the dynamics and microphysics of saharan dust storm[J]. *J of Geophysical Research*, 1987, 92(3):3027-3049.
- [4] WESTPHAL, TOOM O B, CARLSON T N. A case study of mobilization and transport of saharan dust[J]. *J of Atmospheric Science*, 1988, 45(2):2145-2175.
- [5] 刘春涛, 程麟生. 黑风暴沙尘形成与输送参数化及中尺度数值试验[J]. 气象学报, 1997, 55(6):726-738.
LIU Chun-tao, CHENG Ling-sheng. Parameterization of the formation and transportation for sand-dust of the black storm and mesoscale numerical experiments[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(6):726-738.
- [6] 刘毅, 任丽新, 周乐义. 一次黄沙输送过程的数值模拟研究[J]. 大气科学, 1998, 22(6):905-912.
LIU Yi, REN Li-xin, ZHOU Le-yi. Numerical analyses of a dust storm and dust transportation[J]. *Chinese J of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(6): 905-912.
- [7] 黄美元, 王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式的设计[J]. 大气科学, 1998, 22(4):625-637.
HUANG Mei-yuan, WANG Zi-fa. A model for long-range transport of yellow-sand in east asia[J]. *Chinese J of Atmospheric Sciences*, 1998, 22(4):625-637.
- [8] DRAXLER R R. HESS G D. An overview of HYSPLIT-4 modeling system for trajectories dispersion and deposition[J]. *Aust Met Mag*, 1998, 47(2):295-308.
- [9] ROLAND R. Draxler, forecasting dust storms using Hysplit[C]// *Sino-US Workshop on Dust storms and their effects on Human Health*. North Carolina: Raleigh, 2002: 25-26.

(责任编辑 寿彩丽)