

# 一次强沙尘暴事件路径后向追溯的数值模拟研究

于京燕<sup>1</sup>, 王章帆<sup>2</sup>, 谭季青<sup>2\*</sup>, 张大川<sup>2</sup>

(1. 江西信息应用职业技术学院,江西 南昌 330043; 2. 浙江大学地球科学系,浙江 杭州 310027)

**摘要:**沙尘暴源地的确定技术,一直是沙尘暴空气浮尘浓度场长距离输送数值模拟的最困难的科学问题之一。传统方法通常是使用降尘区的采集样本进行化学成分分析来确定。然而,采样误差和化学成分在大气长距离输送过程中的不确定性,也使得这种方法的可操作性不强。本文使用拉格朗日后向追踪数值模拟的新方法,依据中国气象局(CMA)的气象观测数据及其预报资料对一次沙尘暴事件进行了数值模拟,结果表明:2003年4月9日的沙尘暴的主要源地来源于吉尔班通古特沙漠。

**关键词:**沙尘暴;后向追溯;数值模拟;长距离输送

中图分类号:P425.5

文献标识码:A

文章编号:1673-8047(2014)04-0001-06

## 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自然的天气现象。我国学者<sup>[1]</sup>的研究表明我国在古代最早开始沙尘暴的研究,但用现代气象学的方法研究沙尘暴始于非洲撒哈拉沙漠的沙尘暴研究。Sutton 用“沙尘暴”的苏丹语 Haboob 发表了一篇介绍苏丹沙尘暴的天气学论文<sup>[2]</sup>。由于观测和研究的方法不多,进入二十世纪七十年代后才有少量研究。例如:Carlson 研究了撒哈拉沙漠的沙尘暴如何在东风波的影响下将沙尘输送到几百千米外的赤道大西洋附近的个例<sup>[3]</sup>。Idso 以美国的 Haboob 为题对北美的沙尘暴开始了研究<sup>[4]</sup>。八十年代是沙尘暴事件在全球范围的频发期,关于沙尘暴的研究深度也在加强。例如:Carlson 和 Benjamin 对 Saharan 沙尘的辐射加热作用进行了研究<sup>[5]</sup>,Prospero 等对南非沙尘传输到南美的长距离输送做了分析研究<sup>[6]</sup>。Morals 则对 1973 年 4 月的苏丹沙尘暴历史上的个案作了细致的天气形势个例研究<sup>[7]</sup>。Brazel 和 Nicking 对 Arizona 沙尘暴的天气形势进行了分类<sup>[8]</sup>。Westphal 等研究

了源于非洲撒哈拉沙漠沙尘暴的二维动力学及微物理特点,并对撒哈拉沙漠的沙尘暴的起沙和传输进行了个例研究<sup>[9]</sup>。但是,这些研究结果可以借鉴来理解能传上万千米的东亚沙尘暴事件(如 1998 年 4 月从东亚到达美国西海岸)的内容不多。因为热带及副热带地区的天气系统不如中纬度高空急流那样提供强而持久的风场背景条件。Tan Jiqing<sup>[10-11]</sup>认为:我国东亚沙尘暴区别于在世界其他地区的沙尘暴的根本原因在于以下三点:(1)东亚沙漠起沙的源地纬度偏北( $35^{\circ}$ N— $46^{\circ}$ N);(2)东亚沙尘暴长距离输送的载体是中纬度的天气系统;(3)东亚沙区沙漠的海拔高度偏高又处于与东亚大槽相关的高空急流的上游地区。这个观点虽然可以定性解释东亚沙尘暴为何从强度和影响范围方面超过世界上其他三大沙区发生的沙尘暴事件;但对这些沙尘的起沙机制的认识还不够充分。游来光等人<sup>[12]</sup>在阿拉善及其附近地区的飞机观测中发现, $2 \sim 3.3$  km 高度层内有一高沙尘含量层。这些观测结果表明:沙尘之所以能在低空维持及长距离输送,一定存在某种持续稳定的机制,提供沙尘随空气运动的能量。因此,寻找沙尘暴事件的源地,追踪沙尘暴的移动

收稿日期:2014-07-24

基金项目:国家自然科学基金(40875091,40475043,40345025);中科院大气物理所联合创新青年学者计划项目;中国气象局灾害天气国家重点实验室开放课题

作者简介:于京燕(1963—),女,硕士,副教授,主要从事气象学、天气分析与预报研究。

通讯作者:谭季青(1963—),男,博士,副教授,主要从事环境气象及数值天气预报模式数值模拟研究。

路径,成为剖析强沙尘暴发生发展的大尺度垂直结构的重要信息。王可丽等<sup>[13]</sup>认为低层辐合高层辐散的结构易发生近地大风和上升气流,有利于地面起沙和向上扩散形成沙尘暴。但是这些工作未能系统地进行下去:即未能把所有发生过的沙尘暴事件逐个按路径剖析,然后得出从沙尘起沙到长距离输送;再从长距离输送到沙尘沉降的整个过程的比较完备的知识体系。本文作者认为这一研究思路未能加大力度进行研究,最难的科学问题之一是目前对许多沙尘暴事件源地的确定,缺少操作性较强的识别方法。因此,如何快捷识别沙尘暴事件的源地,提高对沙尘暴的各个物理过程的机理的认识,起着举足轻重的作用。

戚丹青等<sup>[14]</sup>使用美国 NOAA 的 Hysplit-4 模式曾使用模式自带的单粒子欧拉后向追源法<sup>[15-16]</sup>,对 2003 年 4 月一次强沙尘暴事件进行后向寻源的模拟试验。本文通讯作者发现在研究中存在两个明显的缺点:一是单粒子追源其模拟结果存在偶然性;二是后向追源的时间长度如何确定,存在主观性。本文介绍一个根据拉格朗日法<sup>[17-19]</sup>进行后向追源的数值模拟新方法,以确定一次强沙尘暴事件源地。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

本文采用中国气象局 T213 模式数值预报模式 2003 年 4 月 1 日至 16 日的模式逐日每天 72 h 预报的输出场和逐日分析场气象资料,资料为 30°—179°E,0°—90°N 的格点数据。

### 1.2 后向追源方法

本方法分为 5 个步骤:

(1) 依据扩散方程使用拉格朗日法,并用点对点对应(point to point respective, PTPR) 平流计算方案建模<sup>[20-21]</sup>。

(2) 确定沙尘降尘站周围方圆 100 km 范围内的有格点的所有粒子集合都作为待筛选的粒子。

对于本个例而言,初始粒子总数的确定,根据下面章节提到的站点(共有 17 个站)有沙尘降尘报告的经纬度,划分降尘区域,然后以所确定区域的中心为原点,以每隔 0.1 度经度(或纬度)均匀分配粒子。这样可得出五层(1 000 hPa, 925 hPa, 850 hPa, 700 hPa 和 500 hPa) 初始粒子的总数(共

200 万个粒子)。

(3) 依次逆向更新输入中国气象局 T213 模式数值预报模式各气象要素场分析场及预报场资料,进行后向空气粒子示踪模拟。

(4) 使用多数原则确定沙尘长距离输送历经的时间。

(5) 根据确定的时间,筛选剔出非沙尘源地来源的粒子。

此方法的科学性体现在以下两点:第一,使用一定规模待筛选的粒子集作为后向追源的依据;第二,追源的时间长度非人为设定,而是对比不同时间后向追源途径沙漠上空的粒子数峰值而定,这样可避免人为设定后向追踪时间长度的不确定误差。

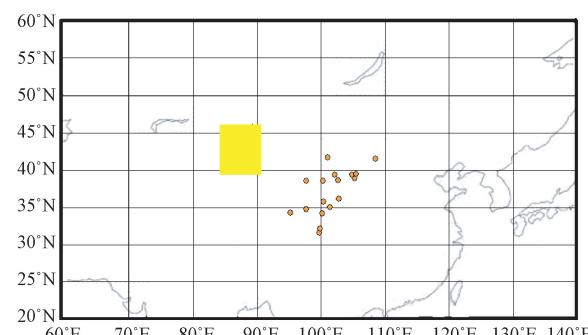
## 2 一个个例的数值模拟结果

### 2.1 2003 年 4 月 9 日沙尘暴事件

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(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 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,其中茫崖出现黑风天气,最大风速为 28 m/s,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。

### 2.2 850 空气层的模拟结果

由于篇幅有限,这里只给出 850 hPa 空气层



注:图中黄色区域为吉尔班通古特沙漠所在的地理区域

图 1 17 个有沙尘暴天气的站点分布图

Fig. 1 The geographic distribution of 17 stations with dust-storm report

中的9 h、15 h 和 21 h 的后向追踪模拟图(图2至4)。它们是粒子后向示踪模拟空间在850 hPa空 气层的模拟场,揭示空气粒子分布在不同时次下的地理空间的具体位置。

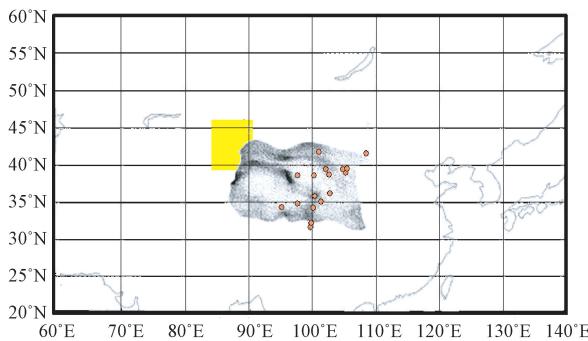


图2 9 h 粒子场后向模拟场

Fig. 2 The Simulated Particle Concentration Field of Tracing Backward the Source for Nine Hours

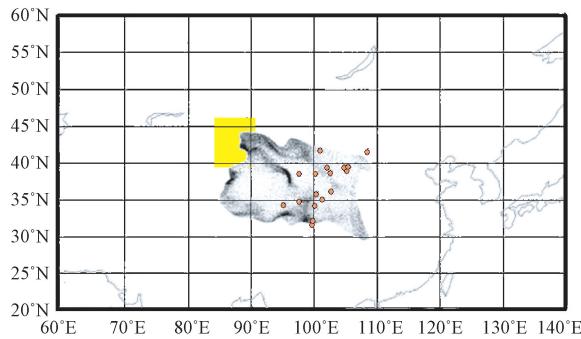


图3 15 h 粒子场后向模拟场

Fig. 3 The Simulated Particle Concentration Field of Tracing Backward the Source for Fifteen Hours

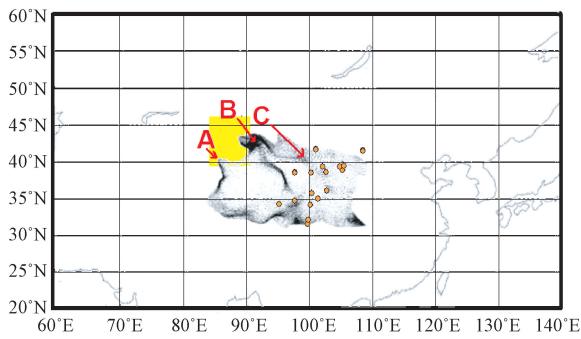


图4 21 h 粒子场后向模拟场

Fig. 4 The Simulated Particle Concentration Field of Tracing Backward the Source for Twenty-one Hours

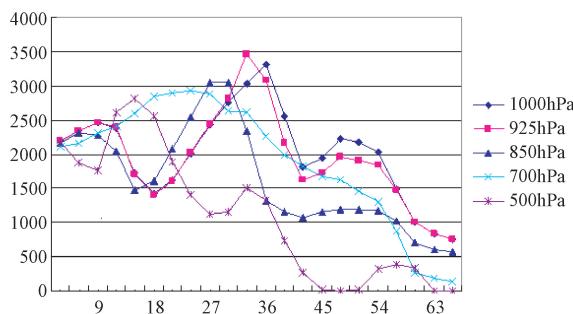
从图1至图3我们可以明显看出850 hPa空 气层中,按照粒子浓度的比例,周边空气粒子中有

三条路径进入降尘区域,这可从黑色阴影处(表明粒子浓度较高)看出,且在图3中最为明显:第一条路径是从A点(41°N, 86°E)附近处开始,先由北向偏南,稍作停顿,由东北向西南移动到整个粒子浓度场的最西点,然后沿南边界的方向由西向东移动;第二条路经从B点(43°N, 93°E)的粒子中心处,由西北向东南方向移动到C点(36°N, 97°E);第三条路径仍由B点向偏东方从浓度场北边界向东南方向扩散南下。该结果表明:多粒子后向追源可避免单粒子后向追源的偶然性。这里要强调指出一点是,只凭单层模拟数据还不能确定沙尘暴的源地,还必须根据多层(1 000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa)粒子集的总数进行综合考虑后,方可求出后向示踪的时间,依据此时刻粒子集的来源方可确定沙尘暴的源地。另外,进入降尘区的粒子并非全部来源于沙漠,因此,对追源时间长度的判断就需要一个法则。本文设定了一个较为合理的方法:当后向粒子进入沙漠上空的粒子数达到峰值时,就认定这个时间是合理的追源时间长度。

图4是大气中低层五个层次(1 000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa 和 500 hPa)追踪66 h的各时刻各气层粒子集落入东亚八大沙漠区域内的浓度总数图。图上数据表明:后向追踪30—36 h时段沙尘粒子总数达到峰值,随后急速下降。因此,可以据此确定这次沙尘暴的源地是后向追踪30—36 h时段来自东亚沙漠区域的粒子所致。从图4还可看出在后向追踪36—50 h时段,还有一个沙尘粒子峰值区。这表明这次沙尘暴事件很可能是由两次起沙过程共同完成的。

从图5上看,36 h位于925 hPa和1 000 hPa等压面气层达到峰值的中间点,可作为后向追踪的时间长度终点。据此,剔除非沙尘源地来源的空气团粒子,并计算当以后向追踪时间长度为36 h时,所有到达东亚八大沙漠区域内各沙区的空气粒子的比例。根据剔除沙尘源地来源的空气团粒子的数目及所有来源沙漠的空气粒子数目的比例进行计算后,可得出此次沙尘暴事件的来源。

一般说来,每一次强沙尘暴过程的沙尘浓度,都包括两个部分:第一部分是长距离输送带来的“输入性沙尘浓度”;另一部分是由在沙尘暴过程中所激发的次级环流产生的将于本地或沿途附近



注:横坐标是后向追踪模拟试验的时间长度(单位:h);纵坐标是到达沙漠上空的粒子个数。不同颜色的曲线是不同气层上后向追踪的数目

图 5 各等压面层次上后向追踪各时间长度能落入沙漠区域上空的数目

Fig. 5 The Number of Particles Located at Every Iso-pressure Layers for Tracing Backward the Source During Every Period

下垫面上的历史沉积沙尘,通过短距离输送过程,又重新把这部分卷入大气中去的沙尘浓度。本次模拟研究发现:2003 年 4 月 9 号沙尘暴降尘的沙尘粒子 38.9% 来源于境内的吉尔班通古特沙漠(图 6 中的黄色区域);而其它 61.1% 的粒子属于第二部分。这也是治理沙尘暴的主要数据依据。如果治理措施得当,例如广泛种植树木,建设水利设施,就能大大降低沙尘暴的浓度。

### 3 结论

过去关于某次沙尘暴事件后的源地调查认定的方法是在降尘区采集样本,然后进行化学成分分析,最后通过比对东亚八大沙漠(塔克拉玛干沙漠,古尔班通古特沙漠,腾格里沙漠,乌兰布和沙漠,库布齐沙漠,浑善达克沙漠,巴丹吉林沙漠和科尔沁沙地)区域的化学成分来大致判断。这种间接的方法虽然有一定的科学道理,但毕竟脱离真实大气运动的直接信息。而且,八大沙漠区域的沙尘的化学成分并非单一不变,历史上诸多沙尘暴长距离输送的过程早已使八大沙漠区域的沙尘成分互相交换,从而使八大沙漠区域的沙尘的化学成分混淆不清,故而存在极大的采样误差。

本文提出的使用拉格朗日建立的后向追踪数值模拟的新方法,依据真实的大气运动的气象观测及其预报资料进行后向追踪数值模拟的方法,可弥补传统方法的不足。同时,也节省了采样所造成的人力物力资源。另外,从后向追源数值模拟的图中,我们也可看到大气运动非一致连续性的特点。该研究成果有力支持在本文简介中提到的关于大气运动非一致连续性普遍存在的新学术观点。而未在进行数值模拟之前就对沙尘源地进行界定,采用东亚八大沙漠都列入待定源地,则模拟的浓度场的范围就偏大。图 6 是戚丹青等<sup>[14]</sup>

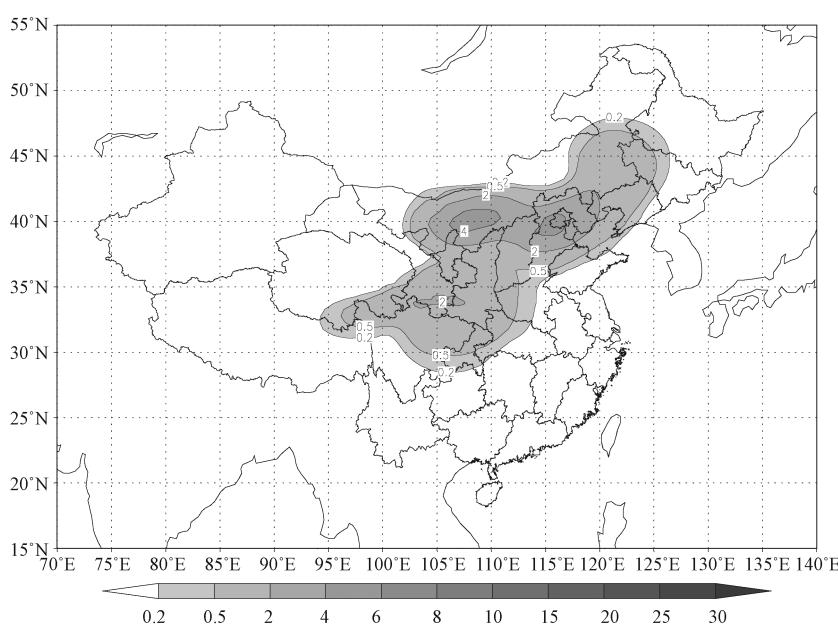


图 6 据美国 NOAA 的 Hysplit-4 模式输出的 2003 年 4 月 11 日的浓度场(单位: $\text{mg}/\text{m}^3$ )

Fig. 6 The concentration field (Unit:  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) on April 11, 2003 from HYSPLIT-4 model, NOAA, USA

于2006年使用美国NOAA空气资源研究所的HYSPLIT-4模式对同一次沙尘暴事件的数值模拟浓度场。从图中不难看出模拟的浓度场范围偏大。

未来将通过与美国NOAA空气资源研究所开展模式耦合研究合作方式,把本文提出的后向追源研究方法加入到HYSPLIT-4模式中去。届时可以改进HYSPLIT-4模式对非连续性强的污染事件的模拟能力。

**致谢:**本文作者得到过中国科学院大气物理研究所LASG国家重点实验室创新课题的大气所合作者王斌研究员的帮助,在此表示致谢。

## 参考文献

- [1] 张德二. 历史时期“雨土”现象剖析[J]. 科学通报, 1984, 27: 294–297.
- [2] Sutton, I. J. ‘Habooob’ [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1925, 51: 25–30.
- [3] Carlson, T. N. , Prospero, J. M. , The large-scale movement of Saharan air outbreaks over the northern equatorial Atlantic [J]. J. Appl. Meteor., 1972, 11: 283–297.
- [4] Idso, S. B. , Ingram, R. S. , Pritchard, J. M. : An American Habooob [J]. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 1972, 53: 930–935.
- [5] Carlson, T. N. , S. G. Benjamin, Radiative heating rates for Saharan dust [J]. J. Atmos. Sci., 1980, 37: 193–213.
- [6] Prospero, J. M. , R. A. Glaccum, R. T. Nees, Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America [J]. Nature, 1981, 289: 570–572.
- [7] Morals, H. C. A case study of a dust storm weather situation in the Sudan in April 1973' [J]. Pure Appl. Geophys. 1981, 119: 658–676.
- [8] Brazel, A. J. , Nicking, W. C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona [J]. J. Climatol. 1986, 6: 255–275.
- [9] Westphal, D. L. , O. B. Toon, T. N. Carlson, A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust storms [J]. 1987, J. Geophy. Res. , Vol. 92, 3027–3049.
- [10] 谭季青. 东亚沙尘暴预报系统研究[D]. 北京:北京大学, 1995.
- [11] Tan Jiqing, Chen Shoujun. A case study on the mobilization and transportation of a dust storm over east Asia [C], Program and Abstracts, 1995, 29: 52–53.
- [12] 游来光, 马培民, 陈君寒, 等. 沙暴天气下大气中沙尘粒子空间分布特征及其微结构[J]. 应用气象学报, 1991, 2(1): 13–21.
- [13] 王可丽, 江灏, 吴虹. 2001年春季中国北方沙尘暴的环流动力结构[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 303–308.
- [14] 戚丹青, 谭季青, 孙长. 一次强沙尘暴长距离输送的数值模拟研究[J]. 浙江大学学报, 2006(2): 216–222.
- [15] Vesely, Franz J Computational Physics: An Introduction[M]. New York: Springer, 2001
- [16] Butcher, John C. Numerical methods for ordinary differential equations[M]. New York: John Wiley, 2003.
- [17] Burachik R. S. , Rubinov A. M. . On the absence of duality gap for Lagrange-type functions [J]. J. Ind. Manage. Optim. , 2005, 1: 33–38.
- [18] Rockafellar R. T. , Wets R. J. – B. Variational Analysis [J]. New York: Springer, 1998.
- [19] Rubinov A. M. , Huang X. X. , Yang X. Q.. The zero duality gap property and lower semicontinuity of the perturbation function. [J], Math. Oper. Res, 2002, 27: 775–791.
- [20] Tan Jiqing, Masaru Chiba. A New Study to submit global “chemical weather chart” of sulfur Dioxide [C]. Fouth conference on atmospheric chemistry: urban, regional, and global-scale impacts of air pollutants, 2002: 57–54.
- [21] Tan Jiqing ,Masaru Chiba, A new advection scheme for global trasport models[C]. 日本气象学会春季大会(79), 2001: 57–64.

## A Numerical Simulation Study on the Backward Tracing the Path for the Source of a Severe Duststorm Event

Yu Jingyan<sup>1</sup>, Wang Zhangfan<sup>2</sup>, Tan Jiqing<sup>2\*</sup>, Zhang Dachuan<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Vocational and Technical College of Information Application, Nanchang,  
Jiangxi 330043, China; 2. Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

**Abstract:** The localization of a duststorm source is one of the most difficult scientific problems on numerical simulation of the long distance transport process of airborne dust. Traditionally, the duststorm sources are analyzed with a chemical composition analysis method. However, sampling error and uncertainty problem of the composition variation during the large-scale and long distance transport process in the atmosphere makes the operability of traditional method not strong. In this paper, using a new Lagrangian backward tracing method based on the observed and forecasting data of China Meteorological Administration (CMA), the numerical simulation for a duststorm event on April 9, 2003 has been analyzed. The results indicate that the main airborne dust for the duststorm event comes from Kurban Tonggute desert.

**Keywords:** duststorm; backward tracing the source; numerical simulation; long distance transport