

亚洲沙尘暴的遥感监测方法研究

——以中国-日本合作研究区为例

刘志丽^{1,2} 马建文² 张国平¹ 周自江¹

(1 国家气象中心,北京市中关村南大街46号,100081)

(2 中国科学院遥感应用研究所,北京市朝阳区大屯路,100101)

摘要:介绍了亚洲沙尘暴遥感监测的一些新方法,并对监测结果与数据进行了综合分析,这些结果能够为GCM全球尺度沙尘模型提供参数和验证数据。本次研究结果为亚洲沙尘暴的中长期预测/预警系统提供了新的遥感技术方法。

关键词:亚洲沙尘暴;遥感监测;综合监测方法;GCM模型

中图分类号:P237.9

近年来,发生在我国北方的沙尘暴受到国内许多部门的重视,有关部门都开展了大量研究工作。中国与日本环境厅合作启动了“亚洲风送沙尘及其对气候的影响研究与科学实验——阶段I”(aeolian dust experiment on climate impact-phase I, ADEC-I)。ADEC-I项目的目标是研究沙尘暴起沙及远距离传输的全过程,同时通过辐射强迫直接作用评价亚洲沙尘暴对全球气候的影响,使用全球尺度沙尘模型(GCM)评价沙尘暴期间飘浮在大气中的沙尘量、在大气中的三维分布、沉降到地表的沙尘量及其直接的辐射强迫的影响^[1~3]。本文主要介绍亚洲沙尘暴遥感监测的一些新进展,包括沙尘暴运移路径的遥感监测,沙尘气溶胶的光学厚度的遥感监测,Lidar数据反演原理与方法。

1 沙尘气溶胶运移路径的遥感监测

沙尘源区的沙和粉沙含量高而粘粒含量低的裸露、松散沉积物地面很容易产生扬尘。而在有植被和有胶结或具有结皮保护层的地表,即使是在严重的风暴天气条件下,所产生的尘埃量也是很少的。在风暴作用下,前者地表的粗沙粒可通过跃移进入地面以上数十cm的高度,细沙可以进入地面以上2m高度,而粉沙则被带入1500

m以上的高空,粘粒可悬浮于整个对流层中并被搬运到几千km以外。沙尘暴的这种大范围的运移过程很难通过地面观测站及自动气象站观测到。遥感卫星由于其覆盖范围广,时间分辨率高,能够对沙尘传输的运移方向和运移路径实时监测。

本研究采用HYSPLIT4模型(hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory, version 4,混合单粒子拉格朗日综合模型)模拟大气中气溶胶颗粒物运行轨迹的方法来监测沙尘暴的运移路径^[4],使用的数据是沙尘暴过程中的NOAA-16数据以及气象卫星观测的气象数据。

HYSPLIT4模型是一个完整的从简单的大气气溶胶颗粒的轨迹模拟到复杂的气溶胶传输和沉降过程模拟的模型系统。HYSPLIT4模拟沙尘后向轨迹算法模型为:

$$P'(t+dt) = P(t) + V(P,t)dt, \quad (1)$$

$$P(t+dt) = P(t) + 0.5[V(P,t) + V(P',t+dt)]dt \quad (2)$$

式中, $P'(t+dt)$ 是第一个假定位置; $P(t)$ 是初始位置; $V(P,t)$ 是初始速度向量; $P(t+dt)$ 是终点位置; $V(P',t+dt)$ 是第一个假定位置的速度向量。

将式(2)对时间积分就得到大气气溶胶颗粒的位置变化(轨迹)。从某个确定的起始地点和确

定的时刻回追前段时间气溶胶颗粒的运行轨迹,就称之为后向轨迹;反之,为前向轨迹。本文以2002年北京地区发生沙尘暴事件为例,分析影响北京地区沙尘暴的后向轨迹。

用该方法模拟气溶胶颗粒后向轨迹步骤包括:① 确定起始地点:北京 39.92°N, 116.38°E; ② 确定起始时刻:分别从2002年3月18、19、20日,4月6、7、8、9日的0时(世界时)开始;③ 确定总运行时间:前48 h~前72 h;④ 选择垂直运动的方式:采用气象局模型的垂直速度场数据,还要有当地的气象数据支持,最后形成后向轨迹。

后向轨迹的数据格式有三种:ASC II 数据格式、文本格式(经度、纬度以及沙尘气溶胶的高度)、图像格式。封三彩图1是将文本格式后向轨迹数据制成三列(经度、纬度、高度)工作表,将表格数据输入到 GraphTool 软件,最后形成2002年春季影响北京地区沙尘暴的后向轨迹线,是对2002年北京地区发生沙尘暴的运移路径的总结。图中标星号的地方是北京所处的位置,不同颜色的曲线代表以不同时刻为起始时间的后向轨迹(比如图中的红色线是从3月20日0时(世界时,下同)开始向后回追48 h的气溶胶颗粒的轨迹线;粉蓝色是从3月19日0时开始回追48 h的轨迹线;其他颜色的轨迹线同样表示从不同的时间节点向后回追的气溶胶的运行轨迹。图中几条粗黑的直线是几个大的山脉的位置示意。分析封三彩图1,2002年春季北京地区的沙尘暴通过5条主要路径到达北京地区。第一条路径是东北沙尘路径(图中蓝色和黄色线所示),沙尘从我国东北沙尘源区(尤其是浑善达克沙地)吹起,东北风将它们带到了北京上空;第二条路径(图中红色线),从蒙古国北部和阴山北坡来的气团将沙尘从北方地区经过我国内蒙古中部运移到了北京地区;第三条路径(图中紫色线)被称为北方沙尘路径,气团将沙尘从阿拉尔山脉经过我国北方沙漠地区从贺兰山和阴山之间穿过,然后运移到北京地区;第四条只有一条轨迹线(图中绿色线),沙尘从我国西部沙源地吹起后向东运移到北京;第五条路径(图中部的两条粉蓝色线),气团先是从西北方向向南移动,到一定位置后,突然转向北到达北京地区。

北京地区在2002年3月20日发生了一起典型的沙尘暴事件,因此将这一天的后向轨迹线单独进行分析,见图1。图1是封三彩图1中2002年3月20日的后向轨迹线的立体图,图中X轴是经度,Y轴是纬度,Z轴是高程。图中的箭头方

向表示沙尘的运移方向。

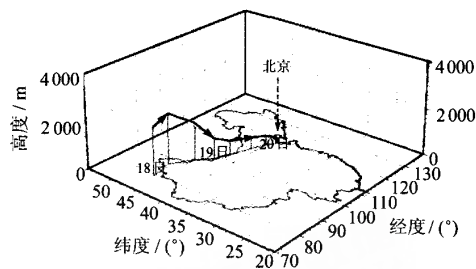


图1 2002年3月20日北京地区沙尘暴后向轨迹立体图
Fig. 1 Backward Trajectory in Beijing on Mar. 20, 2002

分析图1,2002年3月20日影响北京地区的沙尘暴可以回追到内蒙古东部、蒙古、新疆北部地区。北京处在西风环流带上,受地形的影响,主导风尤其春季形成沙尘暴的大风为西北风,北京处在下风向区。在此次事件中,沙尘从3月18日开始从新疆地区向东部地区运移,经过蒙古国、内蒙古东部,3月20日到达北京地区;沙尘的运移趋势是由高到低,由我国的西北向东部地区运移。在此次沙尘暴事件中沙尘暴的运移路径受两方面因素的影响:一是西风引导气流的作用;二是沙尘粒子自然沉降的结果。

2 沙尘气溶胶光学厚度的遥感监测

卫星传感器能够监测地球表面总的反射与辐射(R_0)。反射与辐射到达传感器透镜经历了大气散射、气溶胶散射、陆地表面散射以及云散射等过程。其中,气溶胶散射是遥感探测的主要内容。

卫星能够提供全球尺度的气溶胶浓度和分布信息。它主要通过测量大气消光(包括气溶胶颗粒散射和吸收太阳光)来实现^[5]。消光系数定义为:

$$\sigma_{\text{ext}} = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(m, r) n(r) dr \quad (3)$$

其中, r 为颗粒半径; $Q_{\text{ext}}(m, r)$ 为消光效率因子,它是颗粒成分和大小的函数; m 为折射的综合指数; $n(r)$ 为给定半径的颗粒数目。

气溶胶颗粒粒径、成分或分布都将影响观察的消光量。

气溶胶光学厚度^[5] σ_A 为:

$$\sigma_A = \int \sigma_{\text{ext}}(\lambda, z) d\lambda \quad (4)$$

其中, σ_{ext} 是消光系数; λ 是波长; z 是高度。

在遥感图像处理软件中,用式(4)就能计算出GMS-5的光学厚度。封三彩图2是由2002年4月8日GMS-5遥感数据反演的气溶胶光学厚度

时序变化系列数值图,每一景代表某一时刻的光学厚度。时间从0 h到5 h(世界时)。图中不同的颜色代表不同的气溶胶光学厚度,从蓝色到红色,沙尘气溶胶光学厚度值从0到25变化。从封三彩图2中可以看出,沙尘气溶胶光学厚度最大的地方是沙尘气溶胶的中心位置,随着时间的推移,沙尘气溶胶朝一定的方向运移、扩散,其光学厚度不断发生变化。通过对GMS-5遥感数据反演光学厚度的分析能够获得沙尘暴发生时的起沙区、沙尘的影响范围、沙尘气溶胶的运移方向等信息,这对于沙尘暴的预报和预警是非常重要的。

3 探空激光雷达(Lidar)

探空激光雷达是探测大气气溶胶和高云光学-物理参数时空分布的一个有效、可靠的手段,20世纪60年代以来始终是激光大气遥感的一个前沿研究课题。由于高云的时空分布变化很大,它的消光系数值也往往较小,它的微物理-光学特性的探测更加困难,激光雷达几乎是目前探测薄高云分布的惟一手段。为了观测远离沙尘源区地方的风沙变化,探测沙尘传输路径上空气溶胶在沙尘发生过程中随着时间的变化,中-日ADEC-I项目先后在日本、韩国以及中国的北京、合肥、敦煌、沙坡头、阿克苏等地布设了Lidar观测站。

3.1 雷达信号反演原理与方法

在一次散射的条件下,激光雷达方程为:

$$P(z) = ECz^{-2}[\beta_a(z) + \beta_m(z)]T_a^2(z)T_m^2(z) \quad (5)$$

其中, Z 是Lidar观测高度; $P(z)$ 是来自距离 z 处大气的激光回波信号; EC 是常数; $\beta_a(z)$ 是Mie(气溶胶和云)后向散射系数; $\beta_m(z)$ 是Rayleigh(分子)后向散射系数。

$$T_a(z) = \exp\left[-\int_0^z \sigma_a(z) dz\right] \quad (6)$$

$$T_m(z) = \exp\left[-\int_0^z \sigma_m(z) dz\right] \quad (7)$$

式中, σ_a 为Mie气溶胶消光系数; σ_m 为Rayleigh大气分子消光系数。

散射率 $R(z)$ 和极化率 D 为:

$$R(z) = \frac{\beta_a(z) + \beta_m(z)}{\beta_m(z)} \quad (8)$$

$$D = \frac{I_s}{I_p + I_s} \times 100\% \quad (9)$$

式中, I_s 是 $S(z)$ 部分的信号强度,与激光光束的极化角度垂直; I_p 是 $P(z)$ 部分的信号强度,与激光

光束的极化角度平行; $S(z) = P(z)z^2$

激光雷达方程的两个主要求解方法是Fernald方法和Klett方法。通常假设Mie消光后向散射比为常数以求解方程。邱金桓等采用前向积分法和后向积分法综合求解激光雷达方程,其分解点的高度距离记为 Z_c 。对 $Z > Z_c$,采用前向积分法,并有 $Z_0 = Z_c$;而对 $Z < Z_c$,采用后向积分法。 Z_c 是通过选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度来确定。本研究采用以上综合方法来求解激光雷达方程。

3.2 结果演示及分析

中-日合作ADEC-I项目将沙尘暴地面观测的第一个加强观测期(IOP)定于2002年4月8日~21日。用公式(9)计算得到的极化率是一组三维数组(时间、高度、大小)。封三彩图3将计算结果用MATLAB软件绘制成二维可视化图,时间是2002年4月8~11日,地点是沙坡头Lidar观测站。图中不同的颜色表示不同的极化率值,从蓝色到红色极化率的值是逐渐变大的。分析封三彩图3,只有个别非常大的极化率值(红色图斑)分布在10 km以上的高空外,比较大的极化率值(图中浅蓝色)都集中在地表以上10 km的范围内,这部分代表的是沙尘的极化率,说明沙尘起沙、传输以及沉降的过程都是集中在地表以上0~10 km的范围内进行的,接近地表。

4 结 语

1) 沙尘暴的遥感监测方法很多,本文介绍的三种监测方法的监测时间都是在ADEC-I项目第一个加强观测期内,它们是目前对沙尘暴的监测中常用到的,也是主要的遥感监测手段,都是沙尘暴立体综合监测体系中的一部分。这三种监测方法相辅相成,在沙尘暴的监测中起着举足轻重的作用。

2) 2002年影响北京地区的沙尘暴共有5条路径。要治理北京地区的沙尘暴,仅仅加强北京地区的生态环境建设是不够的,更应该加强北京周边地区尤其是官厅水库库区及库区周围以及张家口地区的生态环境建设。

3) 沙尘的运移路径不仅受到西风引导气流和冷空气移动路径的影响,而且还受到局部地形的影响。沙尘在运移过程中由于重力作用,沿途不断有沙尘颗粒沉降到地表,如果遇到沙漠或戈壁还会不断有沙源物质补充,因而沙尘气溶胶厚度在运移过程中其浓度会不断地发生变化。

4) 沙尘气溶胶在运移过程中一般在地表 0 至 10 km 范围内向远离沙尘源区的方向移动,接近地表。所以当发生沙尘暴时,地表能量(LST、Albedo 及 SM 等)会发生变化,也说明在沙尘源区及沙尘经过区域布设地面观测实验站并测量地表总悬浮颗粒物浓度(TSP)、可吸入颗粒物质量浓度(PM)、风速等近地表状况数据的科学性和必要性。

5) 遥感监测结果和数据能够为 GCM 全球尺度沙尘模型系统提供参数数据及验证数据,并为亚洲沙尘暴的中长期预测/预警系统提供基础数据及科学依据。以遥感监测为主的亚洲沙尘暴的综合监测体系,将多种监测方法和手段结合起来,进行了技术和手段的整合和研究,提高了沙尘暴的预测预报水平,同时该体系也需要一个不断完善的过程。

6) 本文所论述的遥感监测方法可以推广,不仅能用于 2002 年的沙尘暴监测,而且也可以用于其他时段的沙尘暴监测。

参 考 文 献

- 1 刘志丽,马建文,李启青,等. 沙尘暴过程地面测量与卫星同步观测实验及数据分析. 地理科学, 2003, 23(5): 571~578
- 2 刘志丽,马建文,韩秀珍,等. 沙尘源区 AVHRR 数据地表温度时序变化与沙尘干量 TSP 数据的对比分析. 干旱区地理, 2003, 26(1): 89~96
- 3 刘志丽,马建文,张仁健,等. 利用遥感综合分析西风引导气流与地形对沙尘运移路径的影响. 中国沙漠, 2004, 24(3): 330~334
- 4 Roland R D, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 Modeling System. NOAA Technical Memorandum ERL, ARL-224, 2004
- 5 邱金桓,林耀荣. 关于中国大气气溶胶光学厚度的一个参数化模式. 气象学报, 2001, 59(3): 368~372
- 6 Westphal D L, Toon O B, Carson T N. A Case Study of Mobilization and Transport of Saharan Dust. J. Atmos. Sci. 1988, 45: 2 145~2 175
- 7 Joussaume S. Three-dimensional Simulation of the Atmospheric Cycle of Desert Dust Particles Using a General Circulation Model. J. Geophys. Res., 1990, 95: 1 909~1 941
- 8 范一大,史培军,罗敬宁. 沙尘暴卫星遥感研究进展. 地球科学进展, 2003, 18(3): 367~373
- 9 罗敬宁,范一大,史培军,等. 多源遥感数据沙尘暴强度监测的信息可比方法. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 28~34
- 10 陈广庭. 北京强沙尘暴史和周围生态环境变化. 中国沙漠, 2002, 22(3): 210~213
- 11 范一大,乌日娜. 内蒙古极轨气象卫星的应用领域及方法. 内蒙古气象, 2001(3): 42~45
- 12 范一大,史培军,潘耀忠,等. 基于 NOAA/AVHRR 数据的区域沙尘暴强度监测. 自然灾害学报, 2001, 10(4): 46~51

第一作者简介:刘志丽,博士生,主要从事光学遥感图像处理与遥感应用研究。

E-mail: moying2002@sina.com

Remote Sensing Monitoring Method and Result for Asian Dust Storm

—An Example of China-Japan Project Regions

LIU Zhili^{1,2} MA Jianwen² ZHANG Guoping¹ ZHOU Zijiang¹

(1 National Meteorologic Center, 46 South Street, Zhong Guancun, Beijing 100081, China)

(2 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Datun Road, Chaoyang District, Beijing 100101, China)

Abstract: In this paper, the authors introduce a new remote sensing monitoring method. The monitored data are analyzed synthetically. These results can provide abundant parameters and validated data to GCM (The Globe Climate System Model). Simultaneously, it provide a kind of new remote sensing technology to long-term forecasting on Asia dust storms.

Key words: Asian dust; remote sensing monitoring; integrated monitoring method; GCM dust model

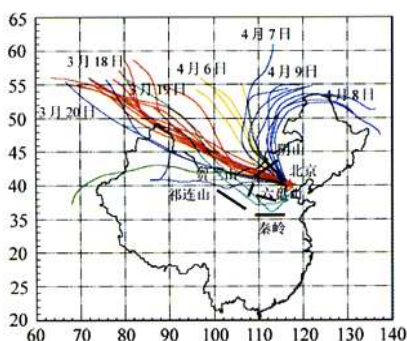


图 1 2002 年春季影响北京地区的混合单粒子拉格朗日综合模型计算结果图

Fig.1 Backward Trajectory in Beijing, 2002

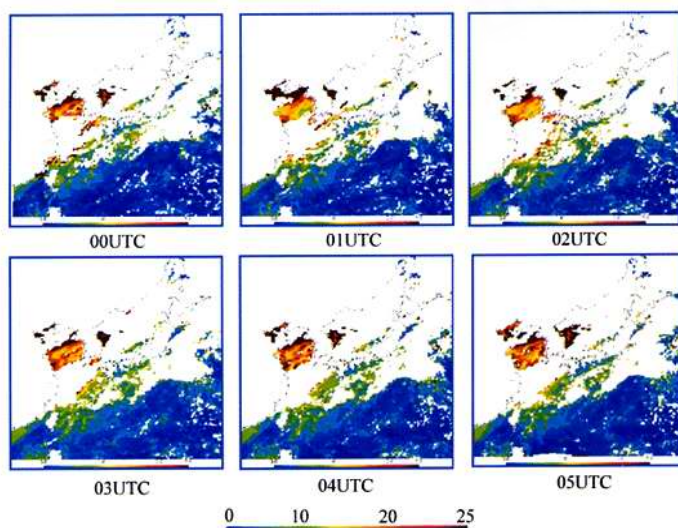


图 2 2002 年 4 月 8 日 GMS-5 反演的气溶胶光学厚度时序变化系列图

Fig.2 Atmospheric Aerosol Optical Depth Retrieved from GMS-5 Data on April 8, 2002

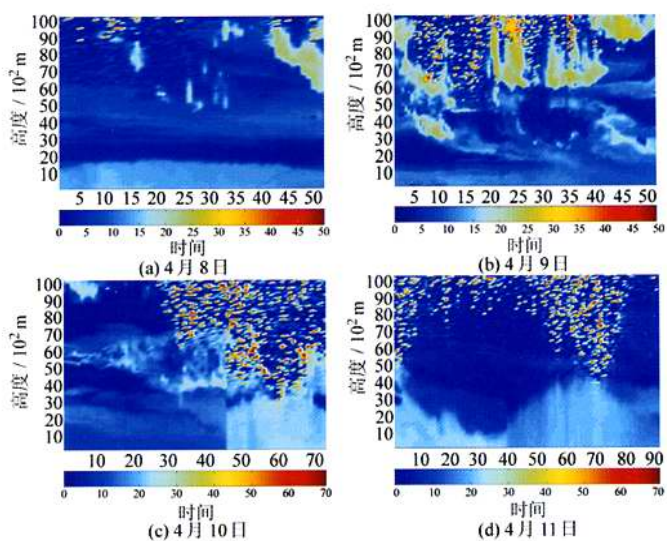


图 3 2002 年沙坡头 Lidar 观测站上空极化率时序变化图

Fig.3 Depolarization Ratio (Total) (%) in Shapotou on April, 2002