

文章编号:1000-0690(2003)05-0571-08

沙尘暴过程地面测量与卫星同步观测实验及数据分析

——以2002年沙尘暴事件为例

刘志丽¹, 马建文¹, 李启青¹, 张小曳², 张仁铨³, 王 宏³, 布和敖斯尔⁴, 安 井⁴

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院地球环境研究所, 陕西 西安 710054;
3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 4. 日本气象研究所, 日本 3050052)

摘要:2001年中日亚洲沙尘暴项目 ADEC 在中国的新疆、甘肃、陕西、内蒙、北京、青岛以及韩国和日本布设了雷达气溶胶探测仪、沙尘颗粒收集仪、风速测量仪, 结合利用卫星技术, 于2002年4~5月对起沙、输送和沉降开展了实时监测和测量, 获得地面风速、TSP、PM₁₀及地表温度等实测数据。以2002年3(4月)沙尘天气为例, 空中观测与地面监测密切结合, 综合分析卫星遥感数据和地面实测数据, 为沙尘暴综合分析与预测提供了基础数据。

关键词:沙尘暴; 地面测量; 遥感卫星同步观测

中图分类号:P445.4/P412 **文献标识码:**A

亚洲沙尘暴已成为一种国际环境事件。一次规模较大的沙尘暴过程, 沙尘可以从蒙古和中国西部沙源地输送到东部、韩国、日本乃至夏威夷、美国西海岸。对农业、城市交通、城市生活造成影响。亚洲沙尘暴已经在国际上引起了广泛关注。中国科学院地学部于2000年5月发布了沙尘暴成因与治理对策的报告, 报告中使用的数据基本上是基于土地利用、气象台站的统计数据 and 气象卫星云图。为了获取更多的沙尘暴过程科学数据, 2001年中日亚洲沙尘暴项目 ADEC 购置先进的测空雷达(Lidar)、沙尘自动测量仪(ANDSON)等先进设备, 在中国、韩国、日本布设了46个野外观测站和仪器自动观测点。2002年ADEC项目在内蒙古增设两个野外观测站点, 在辽宁增设一个观测站点, 在内蒙古和榆林增设两台激光雷达装置。这些站点实时测量和收集沙尘事件发生前后及发生过程中风速、大气中总悬浮颗粒物浓度TSP、大气中可吸入颗粒物浓度PM₁₀及地表温度等实测数据。为2002年3~4月的沙尘过程野外实时测量实验及今后沙尘暴监测提供野外实时测量科学数据。

研究表明, 遥感卫星同步观测数据与地面站点测量数据互相补充, 构成了对沙尘暴天地一体化监测系统, 这个系统连续获取数据能力在沙尘暴监测

与预报中发挥了重要的作用。

1 研究区概况

中国北方春季的沙尘天气与冷空气活动产生的大风相伴出现, 冷空气影响中国的路径主要有三条。东路从蒙古国东中部南下, 影响中国东北、内蒙古东部、中部和山西、河北及以南地区; 中路从蒙古国中西部东南下, 影响中国内蒙古中西部、西北东部、华北中南部及以南地区; 西路从蒙古国西部和哈萨克斯坦东北部东南移, 影响新疆在内的西北、华北及以南地区。图1是2002年3~4月发生沙尘暴的沙尘源区和传输路径^[1]。

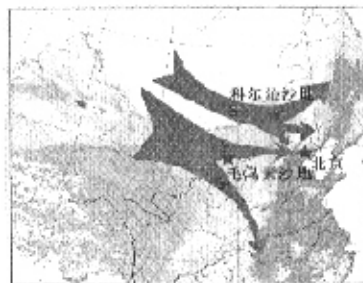


图1 沙尘源区和沙尘暴的传输路径

Fig. 1 Dust source regions and transport path of dust storm

收稿日期:2002-11-12; 修订日期:2003-03-03

基金项目:中日沙尘暴合作项目(ADEC)和亚洲沙尘暴项目(KZCX20305)。

作者简介:刘志丽(1973-),女,河南固始县人,博士研究生,从事地图学与地理信息系统研究。E-mail: moying2002@sina.com.

本文的研究区位于 $33^{\circ} \sim 54^{\circ}\text{N}$, $99^{\circ} \sim 135^{\circ}\text{E}$, 是中国北方地区沙尘暴发生的主要沙源地,也是影响北京沙尘暴的沙源地(图 2)。图中箭头所指的位置是科尔沁沙地和毛乌素沙地。科尔沁沙地位于西辽河中下游,面积 $5.06 \times 10^4 \text{ km}^2$;毛乌素沙地位于内蒙古鄂尔多斯高原东南部,面积 $3.21 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

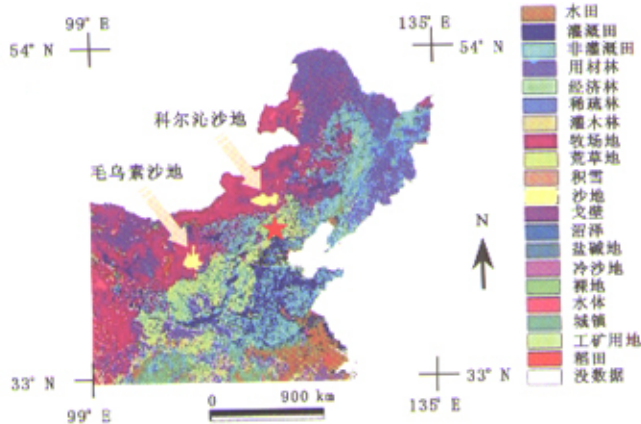


图 2 研究区示意图

Fig. 2 Sketch of investigated region

站点。Lidar 能够探测站点上空垂直方向上气溶胶在沙尘暴过程中的时空变化。Lidar 信号提取如公式(1)所示:

$$P(z) = ECz^{-2}[\beta_a(z) + \beta_m(z)] \quad (1)$$
$$T_a^2(z)T_m^2(z)$$

公式(1)中, $P(z)$ 表示 Lidar 信号, EC 是常数, $\beta_a(z)$ 是气溶胶后向散射系数, $\beta_m(z)$ 是大气分子后向散射系数, $T_a(z)$ 是气溶胶的传输, $T_m(z)$ 是大气分子后向散射系数。

2 地面监测数据与遥感数据处理及分析

2.1 Lidar 信号处理与分析

为了探测远离沙尘源区沙尘传输路径上空气溶胶在沙尘发生过程中的时空变化,中日 ADEC 项目在中国的策勒、沙坡头、阿克苏等地布设了 Lidar

图 3 是 2002 年 4 月 9 ~ 10 日在沙坡头 Lidar 观测站接收的沙坡头站上方垂直方向上的气溶胶时空变化图。图中,底部黄色的图斑表示的是沙坡头站上方 0 ~ 2 km 范围沙尘不同时间的变化;中部大块红色图斑表示的是沙坡头站上方 2 ~ 5 km 范围液态云在不同时刻的状态;上部小块红色图斑表示的是沙坡头站上方 5 ~ 10 km 范围冰云随时间的变化。图 3 中横坐标表示时间,纵坐标表示 Lidar 在垂直方向上的探测高度。

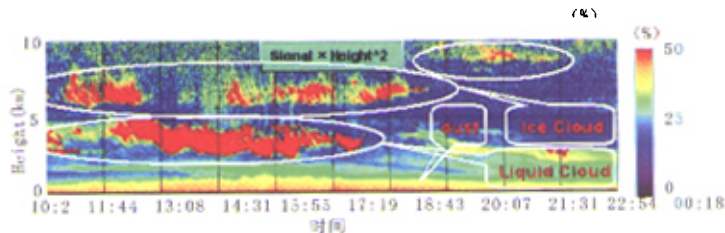


图 3 Lidar 信号图

Fig. 3 Lidar signal map

Lidar 数据及 Lidar 信号图表明沙尘气溶胶一般都集中在地表 0 ~ 5 km 处,接近地表,所以发生

沙尘暴时,地表温度和地表反照率会发生变化,也说明沙尘源区及发生沙尘暴时在沙尘经过区域布

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和必要。Lidar 图为地表物理状况和监测系统对数据采集提供了科学依据。

2.2 TSP/PM 地表实测数据分析

为便于监测沙尘暴的起沙、运输和沉降过程,中日 ADEC 项目在中国和日本布设 46 个地面观测站点,图 4 是中日 ADEC 项目部分地面观测站点的位置示意图和国内部分观测站地面测量数据柱状图。图 4 中部是沙尘地面观测站点示意图,其中斜线的阴影部分是现代黄沙分布;黑色小圆点是历史时期沙尘沉降地点;彩色小圆点是 ADEC 项目布设的沙尘暴地面观测站点。图中可看出 ADEC 布设观测站是结合历史资料及现代沙尘源区分布特点

设置的,很有代表性。这些观测站点实时接收沙尘发生前后及发生过程中近地面状况参数,如 TSP、PM、风速、地表气压、能见度等。

本研究收集了较有代表性的 5 个观测站 TSP/PM 数据并制成柱状图(图 4)。柱状图横坐标为测量日期(2002 年 3 月 15 日至 26 日),纵坐标表示 TSP/PM 浓度。图 4 显示沙尘暴事件前后及过程中 TSP/PM 值在空间和时间上的分布是不均匀的,榆林地区 3 月 17 日 TSP 值非常高,达 $1\,200\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上;敦煌地区 3 月 16 日和 3 月 20 日 TSP 值较高;敦煌地区 3 月 16 日和 3 月 20 日 TSP 值较高;银川和兰州地区 3 月 20 日 PM 值出现峰值,而北京地区 PM 值在 3 月 21 日出现峰值。图 1 中 2002 年沙尘传输路径能很好地解释 TSP/PM 值在空间和时间上分布的不均匀性。

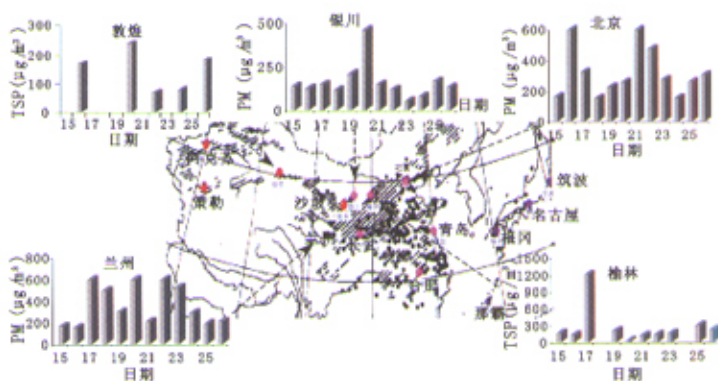


图 4 中日 ADEC 沙尘观察站点分布及国内部分站点测量数据柱状图

Fig. 4 Observation stations distribution sketch map and measured data histogram in part stations

沙尘暴地面观测站不仅测量 TSP、PM、能见度等数据,还在沙尘暴发生前后及过程中利用先进的仪器测量不同粒径气溶胶颗粒的体积浓度,体积浓度表示单位体积空气中所含不同粒径气溶胶的体积数,单位为 $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

2.3 气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度

本项目组研究气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度的目的有两个:(1)探讨 2002 年春季北京地区发生的沙尘暴对大气气溶胶特性的总影响;(2)研究浮尘、扬尘和沙尘暴天气对气溶胶特性的不同影响,这有助于确定 2002 年春季北京地区发生的沙尘暴特点以及沙尘源区。

2002 年气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度的观测时间是 3 月 1 日至 5 月 30 日(除 4 月 4 日和 22 日两天)7:00~17:00 时,或 6:00~18:00 时,每隔 3

个小时观测一次;观测高度 8 m;气溶胶颗粒物水平: $0.3\ \mu\text{m} < d < 2\ \mu\text{m}$ 为小颗粒, $2\ \mu\text{m} < d < 5\ \mu\text{m}$ 为中颗粒, $d > 5\ \mu\text{m}$ 为大颗粒,其中 d 表示气溶胶颗粒直径。图 5 是在北京站测量的 3 种气溶胶颗粒物水平体积浓度变化。

图 5 中横坐标为北京地区气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度的测量日期(3 月 1 日至 5 月 30 日,4 月 4 日和 22 日除外),纵坐标为气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度。图 5 中标 s 的地方是发生沙尘暴的日子。从图 5 中可以看出,当发生沙尘暴时,气溶胶沙尘颗粒物体积浓度都处在峰值,图 5 显示出 3 月 20 日的气溶胶沙尘颗粒物体积浓度是最高的,3 月 20 日这一天北京地区发生了强沙尘暴天气。图 6 是 3 月 20 日北京站测量的不同时刻的气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度。

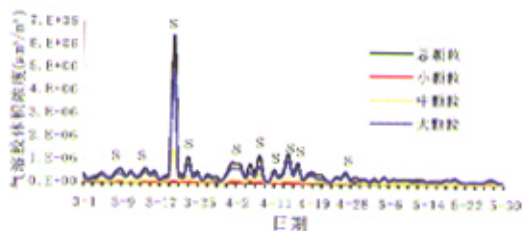


图5 3月1日至5月30日北京地区气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度日变化

Fig.5 Aerosol volume concentration daily change from Mar. 1 to May. 30 in Beijing station

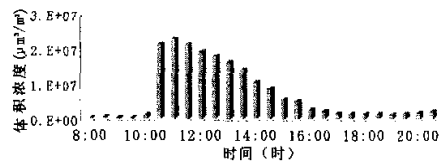


图6 3月20日不同时刻北京地区气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度变化

Fig.6 Aerosol volume concentration change in Beijing on Mar. 20

图6中横坐标为时间,纵坐标为气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度。图6显示3月20日的8时至11时气溶胶体积浓度不断地升高,11时过后浓度开始下降;10:00~11:00时,北京站接收的气溶胶总沙尘颗粒物体积浓度最高,北京地区这个时段沙尘暴也是最强烈的时候。这说明沙尘暴发生时,对地表有很大的影响,地表的沙尘气溶胶浓度增大。

地面观测站测量的是点上的数据,而遥感卫星能够对大范围的地区进行沙尘暴监测,日前有许多遥感数据都可以很好地用来监测沙尘暴事件,如NOAA、MODIS、ASTER等,我们正尝试用新的遥感数据来反演地面参数,更好地监测沙尘暴事件^[2]。

2.4 NOAA/AVHRR数据地面参数反演

结合地面观测站,本研究用NOAA-16/AVHRR对沙尘暴进行监测,主要是用NOAA卫星遥感数据对沙尘暴发生前后及过程中的地面参数进行反演,比如陆地表面温度(LST)、地表反照率(Albedo)。

从1990年开始,Saunders、Russell等就开始探索地表反照率(Albedo)的反演方法。力图寻求一

种高精度的科学的方法。表1^[1]是用遥感卫星数据反演地表反照率Albedo反演方法进展。

表1 反照率反演方法进展

Table 1 Technical evolution of retrieving albedo from remote sensing data

序号	反照率(Albedo)反演模型
1	$A = 0.5 R_1 + 0.5 R_2$
2	$A = 0.044 2 + 0.441 R_1 + 0.67 R_2$
3	$A = 0.035 + 0.545 R_1 + 0.32 R_2$
4	$A = 0.003 4 + 0.34 R_1 + 0.57 R_2$
5	$A = 0.041 2 + 0.655 R_1 + 0.216 R_2$
6	$A = -0.337 6 R_1^2 - 0.270 7 R_2^2 + 0.707 4 R_1 R_2 + 0.291 5 R_1 + 0.525 6 R_2 + 0.003 5$

表1中,A为地表反照率, R_1 为AVHRR第一波段反照率, R_2 为AVHRR第二波段反照率。可以看出,研究人员依据不同的地面数据和模型得到不同的转换公式。

本研究用BRDF模型求Albedo,以下是用BRDF模型求反照率(Albedo)的过程:

反照率与二向反射分布函数有以下关系:

$$A = \pi^{-1} \int \int_{2\pi/\pi/2} f(\theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi \quad (2)$$

其中 $f(\theta, \phi)$ 是二向反射分布函数, θ 是卫星天顶角, ϕ 是卫星方位角。

目前对于BRDF的核驱动模型研究较多,相应产生各种各样的“核”,并且在不同的下垫面得到了各种检验。一个完善的核驱动模型应表示为:

$$f = f_{iso} + f_{geo} * k_{geo} + f_{vol} * k_{vol} \quad (3)$$

公式(3)中, k_{geo} 和 k_{vol} 分别为描述下垫面集合特性和体散射的核, f_{geo} 和 f_{vol} 分别为各自的权重系数, f_{iso} 为下垫面各向同性分布函数。

由Nilson(1989)改进的经验统计“核”模型如下:

$$f(\theta, \phi) = p_0(\theta_i^2 + \theta_r^2) + p_1\theta_i^2\theta_r^2 + p_2\theta_i\theta_r\cos\phi + p_3 \quad (4)$$

公式(4)^①中, p_0 、 p_1 、 p_2 、 p_3 为常数。

根据Slingo等(1982)研究结果,采用下式计算核函数 f :

$$f = 0.5\rho_{CHI} + 0.5\rho_{CH2} \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(2)即求得反照率。

陆地表面温度(LST;land surface temperature)的反演方法也经历了不同发展阶段,详见表2所示。

① 公式1,Saunders,1990;公式2,Russell et al.,1995;公式3,Valiente et al.,1995;公式4,Key,1996;公式5,Stroeve et al.,1997;公式6,Liang,2000。

表 2 陆地表面温度(LST)反演方法进展

Table 2 Technical evolution of retrieving LST from remote sensing data

序号	陆地表面温度(LST)反演模型
1	$T_s = [T_4 + 3.33(T_4 - T_5)] \{ (5.5 + \varepsilon_4) / 4.5 \} + 0.75 T_5 \Delta \varepsilon$
2	$T_s = 1.274 + (T_4 - T_5) / 2 \{ 1 + [0.156 16(1 - \varepsilon) / \varepsilon] - 0.482(\Delta \varepsilon / \varepsilon^2) \} + (T_4 - T_5) / 2 \{ 6.26 + [3.98(1 - \varepsilon) / \varepsilon] + 38.33(\Delta \varepsilon / \varepsilon^2) \}$
3	$T_s = 3.45 \{ (T_4 - 273.15) / \varepsilon_4 \} - 2.45 \{ (T_5 - 273.15) / \varepsilon_5 \} + 40 \{ (1 - \varepsilon_4) / \varepsilon_4 \} + 273.15$
4	$T_s = T_4 + 1.8(T_4 - T_5) + 48(1 - \varepsilon) - 75 \Delta \varepsilon$
5	$T_s = T_4 + [1.29 + 0.28(T_4 - T_5)] (T_4 - T_5) + \alpha(1 - \varepsilon_4) - \beta(\varepsilon_4 - \varepsilon_5)$

通过比较不同方法,认为 Becker and Li 的算法由于使用4,5通道的平均 ε 和差值 $\Delta \varepsilon$ 比使用单独的 ε_3 和 ε_5 计算陆地表面温度更准确,故采用 Becker and Li 的算法计算陆地表面温度 LST。其计算模型如下所示:

$$LST = A_0 + P \frac{T_4 + T_5}{2} + M \frac{T_4 - T_5}{2}$$

$$A_0 = 1.274$$

$$P = 1 + 0.156 16 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} - 0.482 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}$$

$$M = 6.26 + 3.98 \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} + 38.33 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^2}$$

$$\varepsilon = 1.009 4 + 0.047 \ln(\text{NDVI})$$

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5 = 0.0101 9$$

$$+ 0.013 44 \ln(\text{NDVI}) \tag{6}$$

公式(6)中, LST = 陆地表面温度(K); T_4 = AVHRR 通道4亮温(K); T_5 = AVHRR 通道5亮温(K); ε_4 = 通道4地表比辐射率; ε_5 = 通道5地表比辐射率; $\varepsilon = \varepsilon_4 + \varepsilon_5$; $\Delta \varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$ 。^[3]

按照上述技术路线及方法将2002年3月14~26日的 AVHRR/NOAA 16 遥感数据进行处理,最后得到 LST/Albedo 的数值图像^[3-15]。

2.5 研究区样点选择及 NOAA 16/AVHRR 反演参数 LST/Albedo 时序趋势曲线

根据沙尘暴特点及影响范围,在研究区域内选择4个样区,包括科尔沁沙漠和毛乌素沙漠以及兰州和呼和浩特地区。每个样区分别采5个样点。采样时既要保证每一个样地的5个样点都是在同一地上,又要尽量避开被沙尘或云污染的像元,因此将研究区土地利用/覆盖数据与反演所得的 LST/Albedo 数值图像叠加,以满足采样条件。



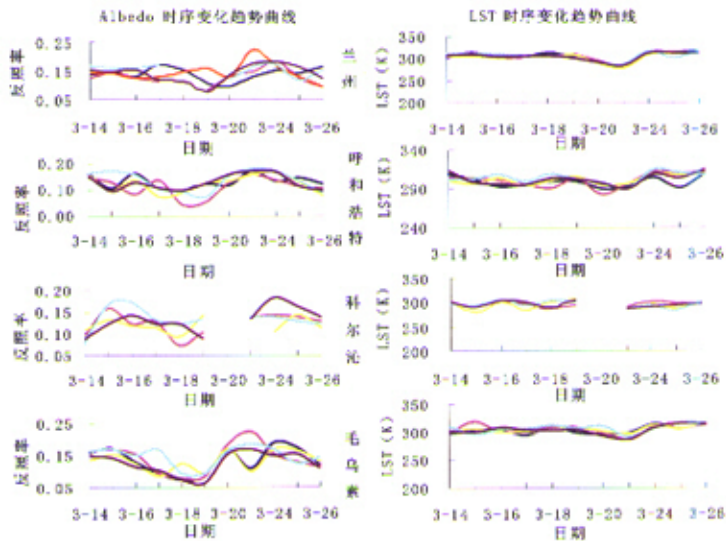
图 7 采样区示意图

Fig. 1 Sketch of sampled sites

将2002年3月14日至26日每一天的 LST/Albedo 数值图像按此标准进行选点,并按时间序列将同一位置的点做成趋势曲线,并将同一样区的点放在同一个坐标系内(图8),这样就使同一样区的 Albedo 和 LST 变化趋势更具代表性。图8中每一坐标系中5个不同曲线代表同一样区5个不同位置的时序变化。图8左边一列是4个样区 Albedo 的时序变化趋势曲线,右边一列是 LST 的时序变化趋势曲线。图中横坐标为日期(2002年3月14日至26日),纵坐标左边一列为反照率 Albedo,右边一列为陆地表面温度 LST。

图8中科尔沁样区的趋势曲线是不连续的,这是因为3月20日该地区发生强沙尘暴天气,当天的 NOAA 影像在该地区有很多云覆盖,很难取到不被污染的像元,所以3月20日在该样区没有取样点。从图8中可以看出地表反照率(Albedo)的变化起伏比较大,很不稳定,陆地表面温度(LST)的变化比较平稳;4个样区的 Albedo 和 LST 的时序变化趋势基本是一致的。

① 公式1, Price, 1984; 公式2, Becker and Li, 1990; 公式3, Prata and Platt, 1991; 公式4, Ulivieri et al., 1994; 公式5, Coll et al., 1994。



科尔沁曲线断处为无数据

图 8 LST/Albedo 时序变化趋势曲线

Fig. 8 Tend curves of LST and Albedo

3 遥感数据反演结果与地面实测数据综合分析

沙尘暴发生过程中,各野外地面站点实时测量总悬浮颗粒物质量浓度(TSP)、可吸入颗粒物质量浓度(PM)、风速等数据。结合遥感卫星数据反演地表参数实验,本研究使用了科尔沁、兰州、呼和浩特三个站点的数据,毛乌素样区因为没有布设地面观测站,没有地面实测数据。图 9 是研究区三个样区的地面实测 TSP/PM 数据时序变化曲线。图中横坐标为日期(3 月 16 ~ 26 日),纵坐标为 TSP/PM 浓度;直线是均值的位置,阴影部分是发生沙尘暴的日子。图 9 显示出发生沙尘事件时 TSP/PM 的值都很高,高于均值,反之,低于均值。

将地表实测 TSP/PM 时序变化曲线与 LST/Albedo 时序变化趋势曲线进行综合分析,如图 9 和图 10 所示。图 10 的横纵坐标表达方式在图 8 中已做过说明,图 10 中的直线代表均值,阴影部分与图 9 中的阴影部分一样代表有沙尘暴的日子。图 10 反映出,当有沙尘事件发生时地表反照率(Albedo)和陆地表面温度(LST)值都高于均值,处于波峰状态,反之低于均值。

图10中科尔沁地区的LST/Albedo的时序变化

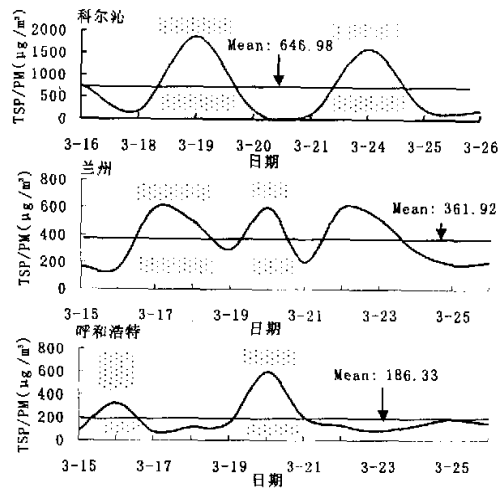


图 9 TSP/PM 时序变化曲线

Fig. 9 TSP/PM change curves according to time series

趋势曲线是不连续,中间断的位置是由于被采样图像(3 月 20 日)像元被遮盖的很厉害,无法保证在相同地类邻近地区采集到不被遮盖的像元,因此这一天没采样点。图 9 和图 10 可看出,用 NOAA 16 反演的 Albedo 和 LST 与地表实测 TSP/PM 数据有密切关系,两者有较好对应关系^[16~21]。

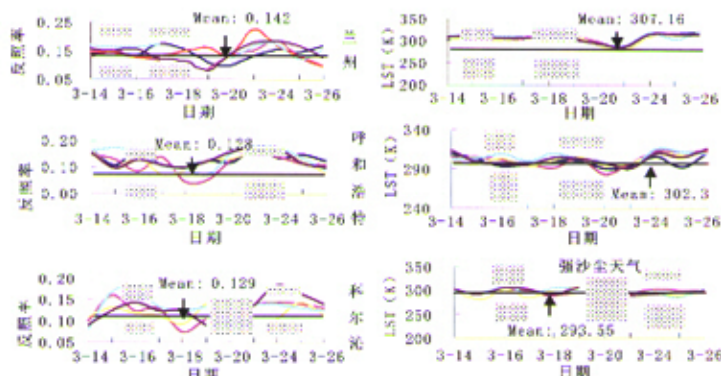


图 10 LST/Albedo 时序变化趋势曲线

Fig. 10 LST/Albedo trend curves according to time series

4 结论和讨论

Lidar 作为一种主动遥感探测计,能够测量观测站点上空垂直方向上的气溶胶在沙尘暴过程中的时空变化。地面观测 TSP/PM 数据存在空间上和时间上的不均匀性,不同的站点不同时间的 TSP/PM 值是不同的,但其变化趋势是一致的:当沙尘暴发生时,不同站点的地表实测 TSP/PM 值都较高,反之较低。发生沙尘暴不仅沙尘源区的气溶胶浓度增加,而且沙尘经过区域的源区下游的气溶胶浓度也会增加。

用 NOAA 16 反演的地表温度 (LST) 和地表反照率 (Albedo) 随时间变化趋势与同一地区野外观测站点测量的 TSP/PM 数据随时间的变化趋势基本一致,两者有较好的对应关系。这与我们 2001 年的结论一致。LST 与 Albedo 可以为亚洲沙尘暴的预警预报及防治 (减少) 提供科学依据。用 NOAA 16 遥感数据反演的地表反照率的变化起伏较大,较不稳定,陆地表面温度的变化起伏不大,较稳定。在对样区采样时尽量避开被污染的像元,这基本保证了所采样的数据是地表的。但本文在处理 NOAA 16 影像的过程中没有考虑非同温像元的问题,因此难免会影响参数提取的精度,不过本文用 LST/Albedo 的时序趋势曲线与地表实测 TSP/PM 时序曲线进行对比分析,分析的是 LST 和 Albedo 的变化趋势规律,分析结果并不受影响。

遥感卫星反演地面参数与地面观测站点测量数据互相验证,地面观测站点测量点上的数据,测量精度较,遥感卫星可以大范围地监测沙尘暴,可

以进行宏观观测。两者紧密地结合能够为沙尘暴监测、预警系统提供科学的理论依据。

参考文献:

- [1] 马超飞,马建文,韩秀珍,等. 沙尘暴迁移路径及影响范围遥感监测[J]. 自然灾害学报,2001,(4):222~227.
- [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[J]. 干旱区地理,2003,(1):89~96.
- [3] Ma Jianwen, Buheosir, Liu Zhili, et al. LST, Albedo retrieving and analysis in correspond with TSP temporal profile. M]. Tokyo, Japan: Proceedings of Program for the first ADEC workshop, Japan and China Joint Project on Aeolian Dust Experiment on Climate Impact, 2002. 26~27.
- [4] Yaping Shao. Numerical simulation of Asian dust storms[M]. Tokyo, Japan: Proceedings of Program for the first ADEC workshop, Japan and China Joint Project on Aeolian Dust Experiment on Climate Impact, 2002. 28~34.
- [5] 纪平,葛成辉,易浩若. MODIS 数据在火灾探测和热异常监测中的应用[J]. 中国图象图形学报(应用版),2001,(5):13~17.
- [6] Griend Owe. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces[J]. Remote Sensing, 1993, 14(6):1119~1131.
- [7] Zhengming Wan, Jeff Dozier. Land-Surface Temperature Measurement from Space: Physical Principles and Inverse Modeling[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(3):268~277.
- [8] Zhaoliang Li, Francois Becker. Feasibility of Land Surface Temperature and Emissivity Determination from AVHRR Data[J]. Remote Sens. Environ, 1993, (43):67~85.
- [9] Jose A Sobrino, Zhao-Liang Li, etc. Improvements in the Split-Window Technique for Land Surface Temperature Determination[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,

- 1994, **32**(2): 241 – 253.
- [10] Francois Becker, Zhaoliang Li. Surface Temperature and Emissivity at Various Scales: Definition, Measurement and Related Problems[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, **12**: 225 – 253.
- [11] Westphal D L, Toon O B, Carson T N. A case study of mobilization and transport of Saharan dust[J]. *J. Atmos. Sci.* 1998, **45**: 2145 – 2175.
- [12] Joussaume S. Three – dimensional simulation of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.* 1990, **95**: 1909 – 1941.
- [13] Shao Y, Leslie I. M. Wind erosion prediction over the Australian continent [J]. *J. Geophys. Res.* 1997, **102**: 30091 – 30105.
- [14] Lu H, Shao Y. Toward quantitative prediction of dust storms; an integrated wind erosion modeling system and its applications [J]. *Environ. Modeling & Software*, 2001, **16**: 233 – 249.
- [15] Brest C L, Samuel N Goward. Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1987, **8**(3): 351 – 367.
- [16] 田国良. 用 NOAA – AVHRR 数字图像和地面气象站资料估算麦田的蒸散和土壤水分[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [17] 祝汉文. 青藏高原晴空行星反照率与地面反照率关系的研究[J]. *气象学报*, 1993, **51**(1): 57 – 65.
- [18] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [19] 张 霞, 朱启疆, 闵祥军. 反演陆面温度的分裂窗口算法与应用分析[J]. *中国图像图形学报*, 1999, **4**(7): 595 – 599.
- [20] Briggleb V Ramanathan. Spectral and diurnal variation in clear planetary albedo [J]. *J. Climate Appl. Meteor.* 1982, **21**: 1160 – 1171.
- [21] Eck T F, P K Bhartia, P H Hwang, et al. Reflectivity of Earth's surface and clouds in ultraviolet from satellite observations [J]. *J. Geophys. Res.* 1987, **92**(14): 4287 – 4296.

In Situ Measurement and Satellite Observation Experiment and Data Analysis in the Course of Dust Storm

LIU Zhi-Li¹, MA Jian-Wen¹, LI Qi-Qing¹, ZHANG Xiao-Ye²,

ZHANG Ren-Jian², WANG Hong³, Buheaosir⁴, AN Jing⁴

(1. *Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;*

2. *Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xian, Shaanxi 710054;*

3. *Institute of Atmosphere and Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;*

4. *Weather Institute, Japan 3050052.)*

Abstract: In 2001, some in situ measurement stations were setup by Asia Dust Storm Project, ADEC, in Korea, Japan and Xinjiang, Gansu, Shaanxi, Nei Mongol, Beijing, Qingdao of China. Many instruments were fixed in those places, for example aerosol detector, dust particle gatherer, wind speed measuring apparatus and so on. Combined with remote sensing technology, they were used to measure the emission, transport and deposition of dust storm. In April and May, 2002, through these instruments, the wind speed, TSP, PM and LST(land cover temperature) data were obtained. In this article, taking example for the dust storm in March and April, 2002, combining satellite data with in situ measurement data, some basic data may be provided to general analysis and forecast of dust storm.

Key words: dust storm; in situ measurement; satellite data