

文章编号 : 1007-4619(2001)04-0300-06

气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究

郑新江 陆文杰 罗敬宁

(中国气象局 国家卫星气象中心 北京 100081)

摘要: 介绍了利用气象卫星多通道信息监测沙尘暴的原理和方法。并利用此技术方法对 2000 年 3—4 月北方沙尘暴过程进行了监测, 分析了影响北京地区沙尘暴过程的沙源和可能路径, 取得了较好结果。

关键词: 沙尘暴, 气象卫星

中图分类号: TP79/P407 文献标识码: A

1 引言

沙尘暴是一种灾害性天气。中国北方地区每年都要发生多次沙尘暴, 使大量的沙尘从沙漠、戈壁中输送出来, 在沿着其主要的输送路线上造成危险的后果。例如, 1993-05-05 一次强沙尘暴过程使新疆东部、甘肃河西地区、宁夏大部、内蒙古西部死亡 85 人, 失踪 31 人, 伤 264 人, 农作物受灾 3700 万 hm^2 , 死亡丢失牲畜 120 万头, 直接经济损失超过 5.5 亿元人民币^[1]。

由于沙尘暴多发区往往自然条件恶劣, 测站稀少, 找出沙尘暴发生的源地以及移动路线通常比较困难, 利用气象卫星遥感技术对沙尘暴进行监测是一种有效方法, 可以弥补地面常规观测资料水平分辨率的不足。

目前, 国外对利用气象卫星监测沙尘暴进行了大量研究, 如 Griggs^[2], Carlson^[3], Shenk 和 Curran^[4], 但这些工作仅限于使用气象卫星单通道的信息(可见光通道或红外通道), 对于判识沙尘暴区, 地表和不同类型的云存在着很大的局限性。本文介绍了利用气象卫星多通道组合信息资料相结合监测沙尘暴的一种方法, 通过卫星观测资料与地面气象观测资料进行对比分析, 证明了这种方法的可行性。利用此方法对 2000 年 3—4 月发生在中国北方地区的多次沙尘暴过程进行了监测, 取得了较好结果。并讨论了影响北京地区沙尘的可能路径和源地, 为决策部门提供信息。

2 原理

沙尘粒子的辐射特性主要体现在沙尘粒子的粒径大小、形状、质地上, 其中粒径大小是决定沙尘的尺度参数和它的散射特性的重要因素。形状对沙尘粒子散射特性也有很大影响, 但在研究中, 考虑到沙尘的来源和风化程度, 一般都近似地将沙尘粒子作为球形粒子考虑^[5]。造成中国沙尘性天气的沙尘源地主要为西部沙漠、沙化农田、黄土高原以及中亚沙漠和蒙古高原, 由此决定的沙尘质地主要为硅酸铝、石英、粘土等类物质。

随着沙尘性天气的强度不同, 沙尘的粒径差异也较大, 从浮尘天气到沙尘暴, 其沙粒半径可从 0.01—100 μm 以上。在造成影响的沙尘暴天气中, 5 μm 以上半径的沙尘粒子占大多数^[6], 沙尘天气越强, 空气中的大粒子沙尘越多。沙尘粒子的输送也与粒子尺度关系密切, 大粒子沉降速度快, 小粒子沉降慢, 因此小粒子输送距离远, 影响范围大。目前的气象卫星遥感监测研究中, 主要考虑沙尘粒子的发射和散射特征。由于有时在同一通道上(例如可见光通道或热红外通道)沙尘暴、地表和云的探测数值十分接近, 故使用单一通道准确判识沙尘暴比较困难, 而通过不同通道的探测值的数学组合, 可以较好地获得沙尘暴、地表和云在反照率和温度(T_B)上存在的差异, 来判识沙尘暴区。设沙尘粒子为球形, 在几种不同波长下, 通过我们对不同半径粒子计算的散射参数如表 1。

表1 几种不同波长下,不同半径的沙尘粒子的散射参数 w 散射比 g 不对称因子Table 1 Scattering properties of Dust Layer in 1—10 Radius at 0.63—11.0 μm

波长/ μm	0.63		1.06		3.75		11		
	粒子半径/ μm	w	g	w	g	w	g	w	g
1	0.91	0.96	0.91	0.85	0.56	0.77			
5	0.63	0.99	0.72	0.99	0.93	0.97			
6			0.69	0.99	0.87	0.97	0.70	0.92	
10			0.62	0.99	0.75	0.98	0.48	0.94	

由表1可见,粒子半径越大,散射能量越集中在前向方向,吸收消光也同时增加,散射比下降。即当天空中大粒子沙尘增多时,光线被强烈吸收,能见度急剧下降。图1是我们绘制的6.0 μm 和10.0 μm 半径沙尘粒子的Mie散射相函数曲线,散射角越小,粒子半径越大,波长越短,其相对散射能量越向前向集中,同时可见光0.63 μm 和1.06 μm 波长的相函数曲线比较接近,散射角100°时相函数最小。3.75 μm 和11.0 μm 波长上遥感接收器给出的标定值 K ,白天在二者的波长上包含散射和发射辐射能量,但11.0 μm 的散射较弱。从辐射亮度随散射角的分布看,3.75 μm 的前向散射大于11.0 μm 前向部分,而11.0 μm 的后向部分大于3.75 μm ,由于前向部分的

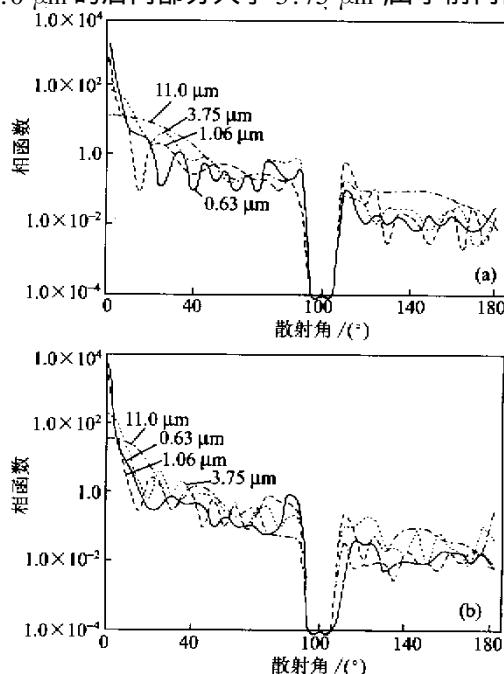


图1 球形沙尘粒子在不同波长的Mie散射相函数曲线

(a)为6.0 μm ;(b)为10.0 μm

Fig. 1 Curve of Mie Scattering phase function of different

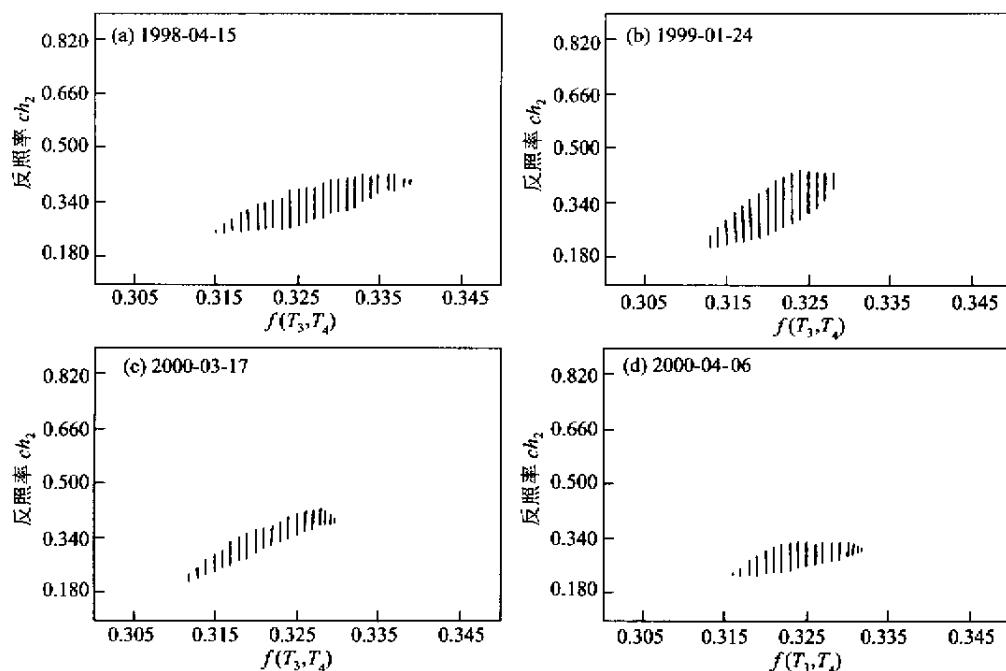
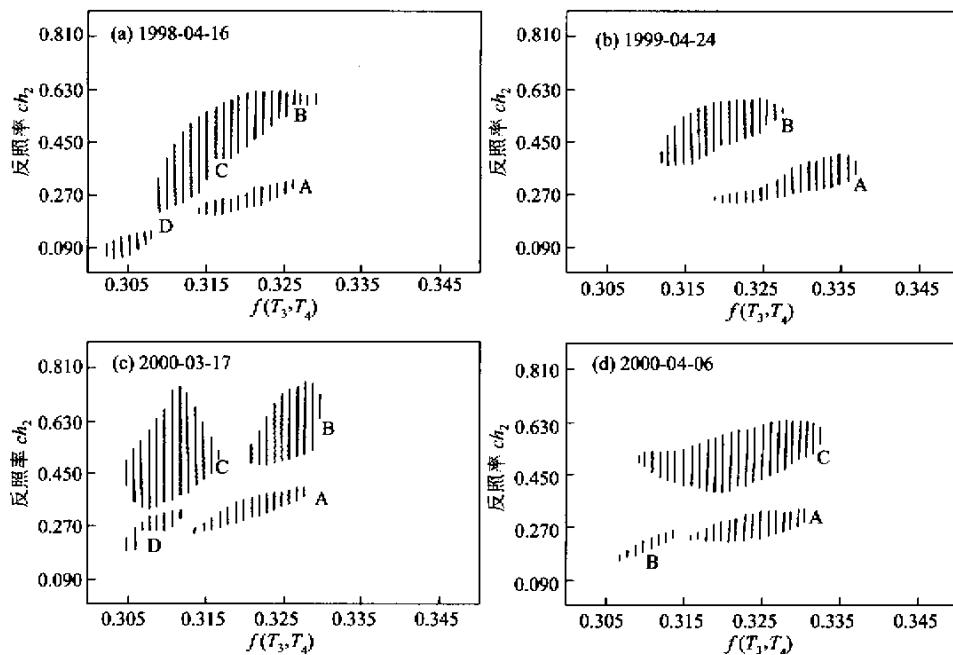
万方数据 wave-length particle

辐射亮度要远远大于后向部分,相差约10²—10³倍,所以白天天空中大粒子沙尘增多时,经多次散射后传感器接收的3.75 μm 辐射能要大于11.0 μm 辐射量。但当沙尘层不厚,地面辐射可以达到传感器时,11.0 μm 辐射亮度与3.75 μm 辐射亮度的差距将减小。同时沙尘层顶的高度越高,11.0 μm 辐射亮度也越低。从以上光谱波长对沙尘暴的反应特征,可以建立0.63 μm 或1.06 μm 波长反射率与3.75 μm 和11.0 μm 波长亮温(T_B)的统计关系。其中以1.06 μm 波长的关系更好一些,形式如 $R_{1.06} = f(T_{3.75} T_{11}) = a \frac{T_{3.75}}{T_{11}} + b$,式中 $R_{1.06}$ 为1.06 μm 反射率, $T_{3.75}$, T_{11} 分别为3.75 μm 和11.0 μm 亮温。根据几次沙尘暴的AVHRR遥感资料作出的 $f(T_{3.75}, T_{11})$ 与 ch_2 点聚图如图2。图2中(a),(b),(c),(d)分别是近年来几次较大范围的沙尘暴,由图2可见, $f(T_{3.75}, T_{11})$ 越大,对应的 ch_2 反照率也越大,经检验两者有显著的线性关系(0.001水平)。另外,利用 $f(T_{3.75}, T_{11})$ 也可将高、低云,地面与沙尘暴很清楚地加以甄别,图3中A代表沙尘暴,D代表地面,图3中(a),(b),(c)中的B、C分别代表高、低云;(d)中的C表示高云,B表示渤海海面上的沙尘暴,由于不存在地面干扰,B点群显示了更整齐的线性排列。与海上情况相比较,陆地上同一次沙尘暴的 $f(T_{3.75}, T_{11})$ 以及 ch_2 反照率的数值都较大,反映了地面因素在沙尘暴监测识别中的干扰作用是不容忽视的。

将 ch_2 反射率中的地面反射部分剔除,就可以得出沙尘层的反射率,并用于相应的沙尘暴遥感定量参数的确定。由以上不同光谱波段上沙尘粒子的散射和辐射特性,可以有效地将沙尘层、云、地面等遥感目标物和干扰因素加以区分,实现监测目的。

3 方法检验

为了说明上述方法的可行性,通过1999-04-24

图 2 $J(T_{3.75}, T_{11})$ 和 ch_2 /AVHRR 反射率的关系Fig. 2 Relation of albedo of $J(T_{3.75}, T_{11})$ and ch_2 /AVHRR图 3 $J(T_{3.75}, T_{11})$ 与 ch_2 /AVHRR 反射率的散点分布Fig. 3 Scatter diagram of $J(T_{3.75}, T_{11})$ and ch_2 /AVHRR

南疆盆地发生的强沙尘暴过程的卫星监测结果与常规观测资料及动力诊断对比分析。

3.1 卫星资料与地面能见度分析

气象观测规范中的沙尘暴是指能见度 $< 1 \text{ km}$

的风沙天气。有关研究表明,将卫星测量值与地面能见度观测资料进行比较是可行的,这是由于水平能见度通常与空气中土壤微粒的质量浓度有关^[7],使地面观测的水平能见度可以与卫星监测的沙尘暴范围进行比较。

1999年4月23—24日塔里木盆地出现了一次沙尘暴天气。过程前期,西西伯利亚地面冷高压自西向东缓慢东移,冷空气进入北疆滞留在天山北麓,并有冷锋配合,冷高压中心气压达1041 hPa。同时,在南疆盆地中部生成一个地面热低压,其中心气压值达989 hPa,两个系统之间形成了很强的气压梯度。23—24日冷空气翻越天山,并从盆地东部灌入南疆盆地,形成偏东大风,使地面热低压的气旋性环流进一步加强(图4),并出现了沙尘暴、扬沙和浮尘天气(图4中A表示辐散中心,C表示辐合中心)。从我们使用多通道技术处理后的4月24日16时NOAA卫星图像上可以清楚地分析出(图版Ⅰ图5),沙尘所形成的气旋性涡旋上升到很高的高度(图版Ⅰ图5中黄色区域,下同)。从图4中所给出的24日14时地面观测站记录到的沙尘暴等天气现象并绘制的能见度等值线分布上可以看出,能见度<1 km的区域与卫星观测到的沙尘区有较好的对应关系。

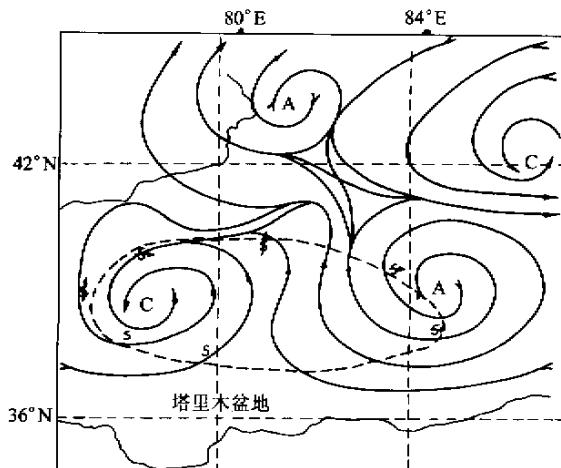


图4 1999-04-24 14时的天气图(→流线---能见度<1 km区)

Fig. 4 Weather map at 12:00 UTC on April 24th, 1999

3.2 垂直环流分析

图6是4月24日20时沿38°N所制作的垂直速度(ω)剖面图。从图6上可以分析出,发生沙尘暴天气的南疆盆地的西部从925 hPa到400 hPa高度上均为上升运动区(图6中点画区),并在不同高度上存在着两个上升运动的强中心。其中一个位于78°E附近850 hPa高度上的强闭合中心值达到 40×10^{-5} hPa/s,另一个强上升运动中心位于81°E附近的500 hPa高度上,中心值达到 32×10^{-5} hPa/s。这种较强的垂直运动对沙尘向高层大气输送非常有

利。

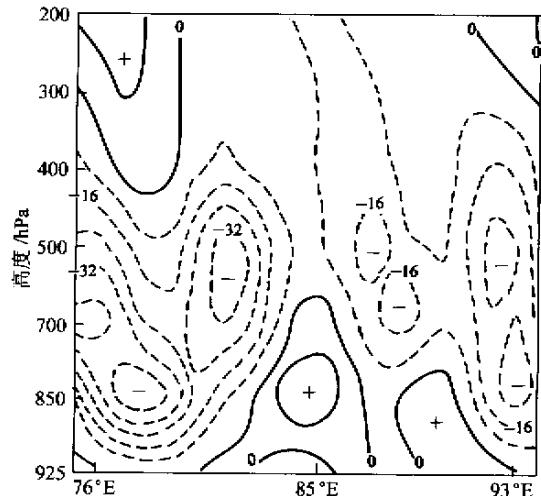


图6 1999-04-24 20时的沿38°N垂直速度剖面图

Fig. 6 (ω) cross-section diagram (along 38°N) at 12:00 UTC on April 24th, 1999

以上分析表明,利用本文提出的多通道信息监测沙漠等陆地上空沙尘暴的方法是可行的。另外,利用本方法也可以较好的区别出沙尘、地表和不同类型的云区。例如图版Ⅰ图7是气象卫星监测到的1998-04-16发生在中国东部地区的一次大范围浮尘与扬沙天气,从图上可以分析出位于中国东部地区的沙尘区(呈浅黄色调),其南边界已经影响到浙江和安徽南部地区。位于山东半岛至苏北沿岸一带是高云区(呈白色调),而位于图的右上角处的是由大水滴组成的低云区(呈蛋黄色),以上分析与气象站的观测结果相一致。

4 应用实例

2000年春季,中国北方地区天气晴朗、光照充足、气温偏高、干土层厚,而且冷空气活动活跃,造成十分频繁和强烈的大风天气。特别是3—4月,大风引发了12次不同强度的沙尘天气,严重影响到北京、天津等地的正常社会生活和环境质量。气象卫星对沙尘暴过程进行了详细的监测。并及时将有关资料提供给各级政府和新闻媒体,取得了较好效果。下面对其中几次沙尘过程的卫星图像做一简单分析。

4.1 卫星图像解释

图版Ⅰ图8—11是气象卫星遥感监测到的部分沙尘影响范围图像(图中黄色区域为沙尘区)。从图

上可以分析出沙尘天气影响到中国内蒙古、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南、河北、北京、天津、辽宁、山东及南方有关省市的上百万平方公里区域。

下面首先对卫星监测沙尘图像作一些说明：

图版 I 图 8 是 2000-03-17 下午的 NOAA-14 卫星图像, 蒙古国南部以及内蒙古北部出现大范围沙尘天气。由于地面有强切变线活动, 形成 600—700 km 的弧状沙墙。因此气象卫星为我们研究沙尘暴过程中的沙墙的成因、演变等中尺度现象提供了不可多得的信息。

图版 I 图 9 是 2000-04-03 下午的 NOAA-14 卫星图像, 内蒙古中部、山西等地出现大范围沙尘天气。其中内蒙古中部地区的沙尘未来主要影响河北北部等地区, 而山西的沙尘向东扩散, 主要影响河北西部、北京等地区。

图版 I 图 10, 图版 I 图 11 是 2000-04-06 的风云一号 C 和 NOAA-14 卫星图像, 内蒙古、河北、北京、天津、辽宁等地出现大范围沙尘天气, 这是影响北京最强的一次沙尘过程。上午, 内蒙古南部、河北北部以及北京北部出现了大范围扬沙与沙尘暴, 而从内蒙古的朱日和与浑善达克沙地各有一条沙尘路径向东扩展, 并影响与河北交界处。下午, 沙尘区已控制了内蒙古中部、河北、北京以及辽宁南部广大地区。浮尘的前边界已经扩展到了渤海高空。到 7 日沙尘形成的浮尘已经影响到日本海、朝鲜半岛、黄海及江淮地区。

4.2 影响北京地区沙尘的可能路径与源地

上文提到 2000 年春季大风引发的 12 次大范围的沙尘天气, 其中有 8 次对北京造成了明显影响, 气象卫星对这些沙尘过程的影响范围进行了详细的监测, 为研究影响北京地区沙尘的可能路径与源地提供了依据。

从处理后卫星图像中沙尘高浓度区的走向, (图版 I 图 9 和 10 中箭头) 可以分析沙尘进入北京的路径。在 2000-03-23 和 2000-04-06 的卫星图像上(图版 I 图 10), 显示了沙尘进入北京的第 1 条路径为内蒙古浑善达克沙地一带—河北黑河河谷—北京地区; 第 2 条路径为内蒙古朱日和一带—河北洋河河谷—北京永定河谷; 第 3 条路径由山西桑干河谷—永定河谷(图版 I 图 9 中箭头)。综合北京出现沙尘天气时高空的空气质量点移动轨迹, 从宏观上看, 主要有 3 条路径: 第 1 条为西北偏北路径(如 2000 年 3 月 18、27 日), 第 2 条为西北路径(如 2000 年 3 月

23 日和 4 月 6、9 日); 第 3 条为偏西路经(如 2000-04-03)。

从上述路径分析可以看出, 内蒙古的阿拉善盟、巴彦卓尔盟、乌兰察布盟和锡林郭勒盟, 河北省北部, 以及黄土高原等地的沙源都可能是影响北京地区的沙尘源地。

研究表明, 升空的沙尘微粒因自身的重力作用在移动的过程中不断沉降、扩散, 0.1 mm 直径的沙粒在空中只能停留几分钟到几小时。因此, 随着大风区的移动, 如果沿途不是不断地起沙补充, 那么离开初始沙源越远的地方, 大气中含尘量越少, 沙尘微粒也越小。由此可知, 北京地区出现浮尘天气, 其尘源可以来自很远的地方。但北京地区出现扬沙或沙尘暴天气, 临近北京的周边地区乃至北京本地的尘源必有相当的贡献。例如, 从 2000-03-18 的卫星图像上, 可以分析出北京地区南部局地有沙尘出现, 并向河北、天津等地扩散。

5 讨 论

本文提供了一种气象卫星多通道信息监测陆地沙尘暴的技术方法及其应用情况。今后将进一步研究沙尘暴载沙量及应用静止气象卫星对沙尘暴进行逐时的监测方法。

致谢 徐建芬、叶惠明对本工作的支持, 在此表示感谢。

参 考 文 献 (References)

- [1] Qian Zhengan. A Study of dust storm on 5 May 1993 [A]. Research on Dust storm in China [C]. Beijing: China Meteorological Press, 1996. [钱正安. "93.5.5"特大沙尘暴的分析 [A]. 中国沙尘暴研究 [C]. 北京: 气象出版社, 1996.]
- [2] Griggs M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data [J]. *Air pollute control Assoc.*, 1975, 25: 622—625.
- [3] Carlson T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data [J]. *Mon. Wea Rev.*, 1979, 107: 322—335.
- [4] Shenk W E, Curran R J. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements [J]. *Mon. Wea Rev.*, 1974, 102: 820—837.
- [5] Yin Hong. Basis of Atmospheric Radiation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993, 65—68 [尹 宏. 大气辐射学基础. 北京: 气象出版社, 1993.]
- [6] Yang Dongzhen. Analysis of sand-dust aerosols in the atmospheres during the dust storm on 5 May 1993 [A]. Research on Dust Storm in

China [C]. Beijing : China Meteorological Press , 1996. [杨东贞 . “ 93.5.5 黑风 [A]. 沙尘气溶胶分析中国沙尘暴研究 [C]. 北京 : 气象出版社 , 1996.]

[7] Patterson E M , Gillette D A. Measurements of visibility VS. mass-concentration for airborne soil particles [J]. *Atmos. Environ.* , 1977 , 11 : 193—196.

Research on The Duststorm Monitoring Using Multi-channel Meteorological Satellite Data

ZHENG Xin-jiang , LU Wen-jie , LUO Jing-ning

(National Satellite Meteorological Center , CMA , Beijing 100081 , China)

Abstract : In this article , the principles and methods of the dust storm monitoring with multi-channel image from the meteorological satellite are discussed. With the method , the 12 dust storm weather processes that affected a large area in the North China during the period of March to April of year of 2000 were monitored timely. With the analysis of monitoring data , it shows that the dust storm for Beijing region is mainly from the Inner Mongolia Autonomous Region and Hebei Province. They provide a valuable information for the government Department in planning for the dust storm prevention.

Key words : duststorm ; meteorological satellite

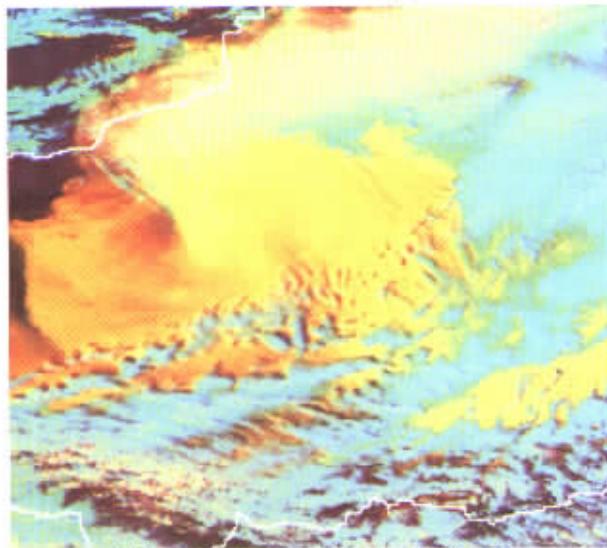


图 5 1999-04-24 16 时 NOAA 沙尘暴图

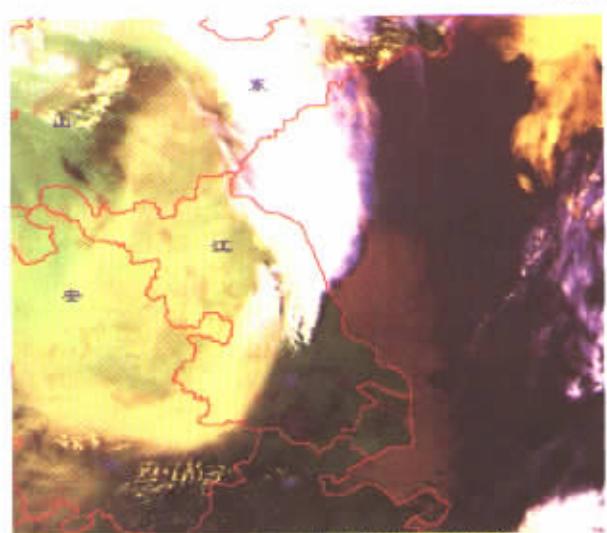


图 7 1998-04-16 13 时 NOAA 沙尘暴图

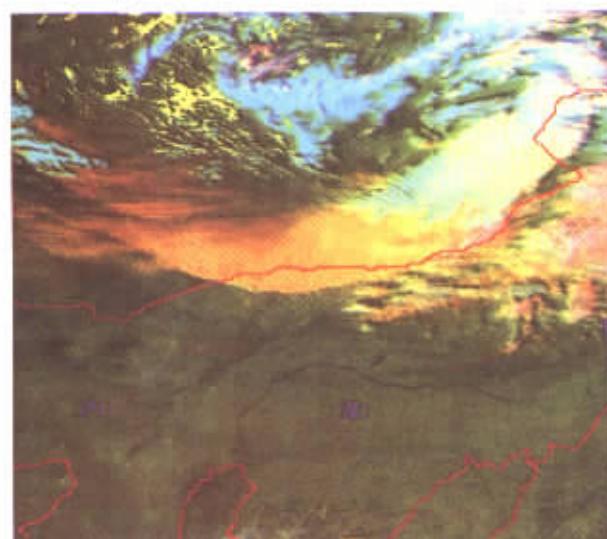


图 8 2000-03-17 16 时 NOAA 沙尘暴图

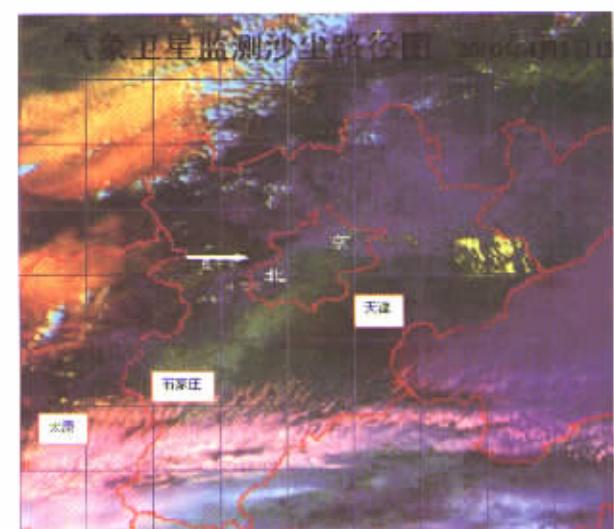
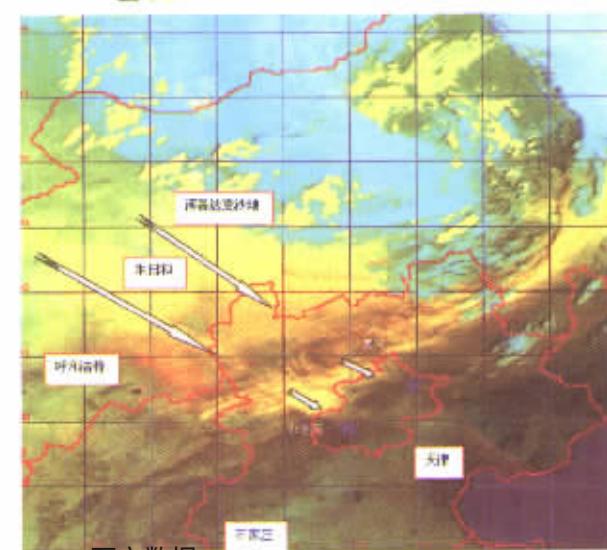


图 9 2000-04-03 15 时 NOAA 沙尘路径图



万方数据
图 10 2000-04-06 08 时 FY-1C 沙尘路径图

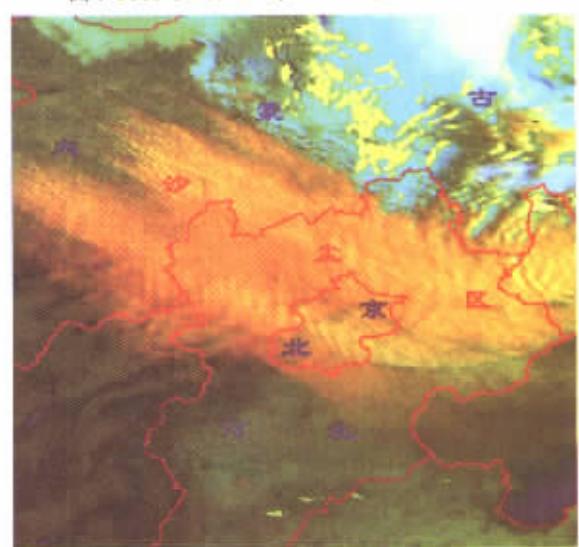


图 11 2000-04-06 16 时 NOAA 沙尘暴图