

东亚春季沙尘天气的卫星云图 特征分析和分型*

吴晓京¹⁾ 郑新江¹⁾ 李小龙¹⁾
刘景涛²⁾ 康 玲²⁾ 姜学恭²⁾

1) (中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

2) (内蒙古自治区气象台, 呼和浩特 010051)

摘 要 2001年春季, 沙尘天气对我国北方地区产生了较大的影响, 作者给出了卫星遥感监测到的沙尘过程的图像特征并对产生沙尘的天气系统进行了云图分型。最后得出沙尘天气主要发生在3种天气系统及相应的云系分布类型下。

关键词: 沙尘暴; 卫星监测; 云图特征

文章编号 1006-9585 (2004) 01-0001-13 **中图分类号** P412.27 **文献标识码** A

1 引言

2001年1月1日, 我国甘肃中西部、宁夏、内蒙古中西部地区出现了扬沙与沙尘暴天气过程, 在偏北大风驱动下, 沙尘影响到北京等地区。此后的4个多月内, 我国北方地区又先后出现不同范围、强度不等的沙尘天气达30天, 不仅湖北、安徽等沿江省份受到了影响, 高空浮尘还影响到台湾省。进入3月以后, 几乎平均2~3天即出现一次沙尘天气, 根据气象卫星监测到的沙尘天气统计, 3~5月上旬共出现了范围较大的沙尘过程18次(见表1), 从表1中可以看出我国西北地区东部、华北及东北地区都有涉及, 尤其以内蒙古中西部、甘肃、宁夏等地出现沙尘的天数最多。

2 沙尘天气卫星图像特征分析

图1~2是有代表性的沙尘天气过程卫星图像(图中黄色区域为沙尘区), 从这组图像中可以宏观分析了解沙尘影响地区和相对强度。图1显示了在甘肃、内蒙古西部、宁夏以及陕西北部的沙尘区。图2显示了在内蒙古中东部、陕西北部、山西北部、河北北部有沙尘区。

3 产生沙尘过程的天气系统卫星图像分型

对于沙尘暴的研究, 已经有很多成果^[1~7]。利用气象卫星资料, 除了可以监测沙尘

2004-01-08收到, 2004-02-10收到修改稿

* 国家财政部“西北地区土壤水分、沙尘暴监测预测研究”项目(Y0101)资助

表 1 2001 年 3~5 月上旬卫星监测到的沙尘过程及具体天数

日期	影响地区
3 月 2~3 日	内蒙古中东部、山西北部、河北西北部以及山西北部
3 月 4~6 日	蒙古国南部、甘肃河西走廊和内蒙古西部地区、宁夏、陕西、山西、河北以及河北。
3 月 13 日	内蒙古中部和西部、甘肃中部、宁夏南部、陕西西部
3 月 18~19 日	新疆东部、甘肃西部、内蒙古中部、陕西北部、山西北部
3 月 21 日	宁夏北部、陕西北部、山西西部、内蒙中部、河北、北京、辽宁西部
3 月 23 日	内蒙古中部
3 月 24 日	内蒙古中部、陕西、山西、河北以及北京
3 月 26 日	内蒙古西部等地的西北地区东部
3 月 28 日	宁夏、甘肃、陕西
4 月 1~2 日	吉林中东部地区、内蒙古东南部、辽宁西部
4 月 6~7 日	内蒙古、甘肃、华北北部、东北大部以及蒙古国南部
4 月 8 日	内蒙古中西部、甘肃中部
4 月 9~10 日	华北地区北部、东北地区西南部
4 月 13 日	西北地区东部的部分地区
4 月 22 日	甘肃、宁夏、青海东北部、内蒙古以及蒙古国中南部
4 月 27 日	内蒙古东部以及蒙古国南部
4 月 28~29 日	内蒙古西部、甘肃、青海以及蒙古国南部
4 月 30 日	东北地区西部、河套等地区

暴影响范围，还可以分析产生沙尘暴的过程，并为预报和预警提供服务。通过对 2001 年及以前沙尘天气的分析，归纳得到造成沙尘天气的地面天气系统可以分为以下 3 种类型。

3.1 第 1 种类型：高压前部偏东风过程及锋前偏东、偏南风所引起的沙尘天气

这类沙尘天气过程，是由于地面高压前部的偏东大风所引起的，在卫星云图上表现为大片晴空区南侧出现沙尘天气，此种类型多出现在我国西北地区和西北地区东部。以 2001 年比较典型的过程为例：4 月 20 日有弱冷空气位于新疆以北的巴尔喀什湖地区，新疆大部及西北地区东部为一地面弱高压控制（图 3），新疆南部、甘肃西部、河西走廊盛行地面偏东风，并出现了沙尘天气。从云图云型分析（图 4），位于新疆北部的云型是高空短波槽云系，随着时间此云系移过新疆，直接进入蒙古国西部，说明冷空气南下势力弱，新疆南部及西北地区东部的沙尘天气主要是由高压南侧的偏东风引起的，与锋面过境的相关性较小。同样更明显的例子出现在 4 月 22~23 日，当时，巴尔喀什湖、贝加尔湖、蒙古国大部和我国西北地区上空为一大陆高压控制，高压中心位于贝加尔湖西南部，中心气压达 1 037 hPa，高压南部的我国内蒙古西部、青海东北部出现的偏东风区域内，出现了沙尘天气（图略）。

另外，锋前的偏东风及偏南风区域也会出现沙尘天气，如 4 月 8 日 08 时，冷空气扩散南下过程中，在河西走廊地区出现大范围由西北风引起的沙尘天气，同时，内蒙古阿拉善左旗、甘肃武威地区东部、兰州等地都出现了由锋前偏东和偏南风形成的沙尘天气。新疆南部也有大片由偏东风引起的沙尘暴区域（如图 5、6，图 6 中白色云区南部的甘肃中部其黄色区域为沙尘区）。

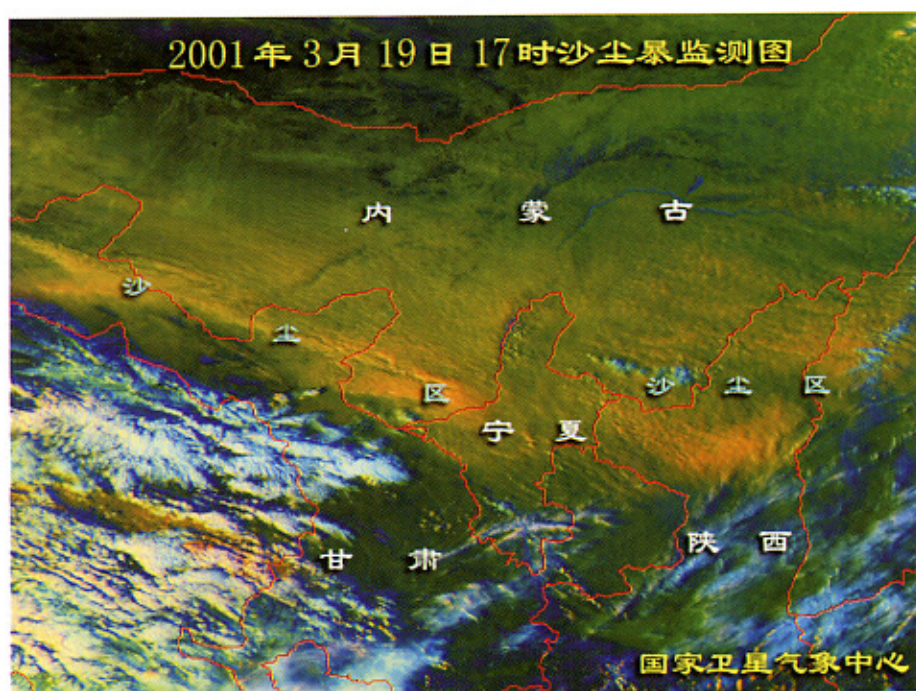


图1 2001年3月19日卫星监测到的沙尘图像（黄色区域为沙尘区）

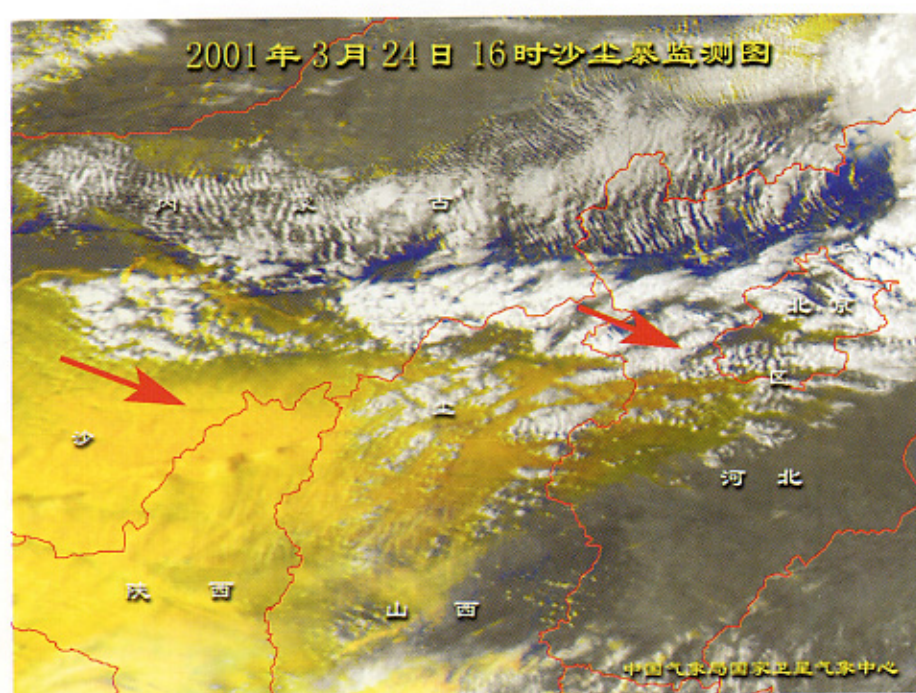


图2 2001年3月24日卫星监测到的沙尘图像（黄色区域为沙尘区）

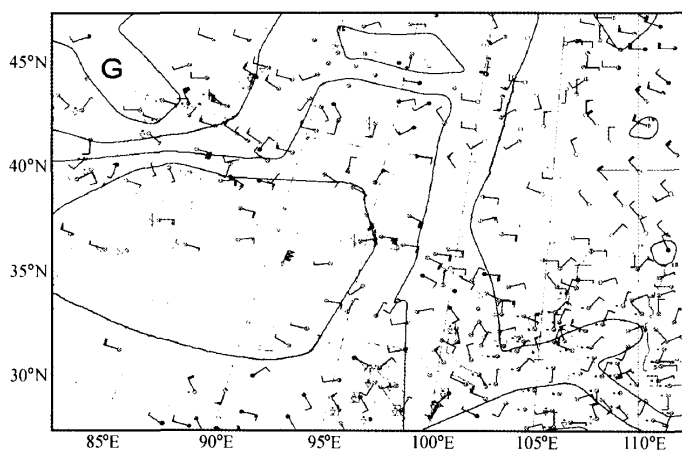


图3 2001年4月20日14时地面观测图

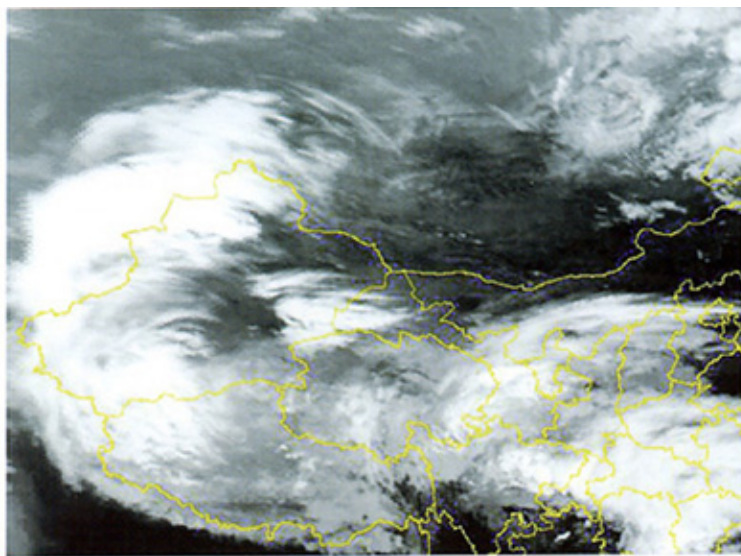


图4 2001年4月20日08时GMS红外云图

3.2 第2种类型：锋面云系过境所引起的沙尘天气

在卫星云图上表现一条密实的云带，自西北地区向偏东方向移动，沙尘天气发生在地面冷锋后部。如4月28日自新疆东移的锋面云系，29日在西北地区造成了较大范围的沙尘暴，它与局地的大风及上升、下沉气流作用相关，也是较普遍的出现沙尘天气的一种天气形势（图7、8）。

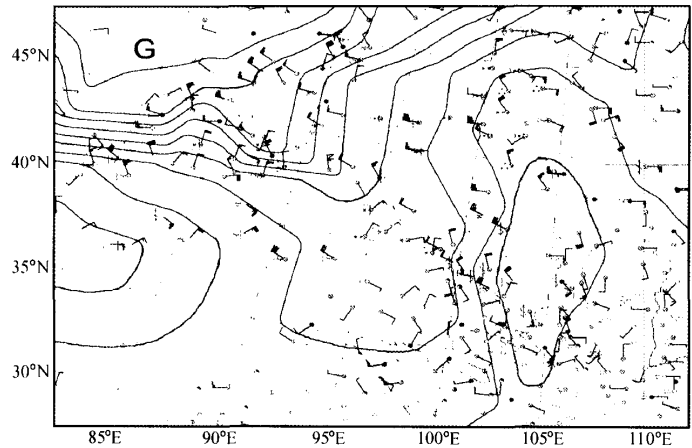


图 5 2001 年 4 月 8 日 08 时地面观测图

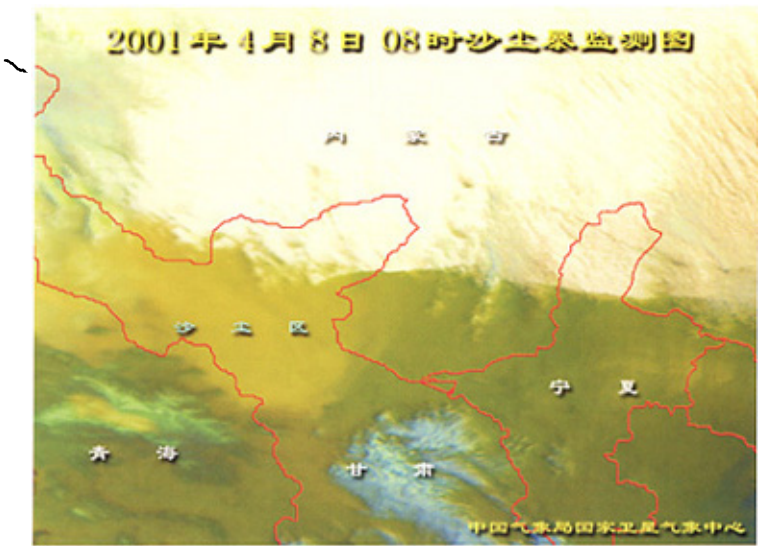


图 6 2001 年 4 月 8 日 08 时气象卫星图像

4 月 22 日也是由于锋面云系过境在蒙古国东部及我国内蒙古东部地区形成了沙尘天气。从地面形势图分析出两条锋面，前一条已经南压到河北、山西、陕西北部，后一条位于中蒙边境附近（图 9），沙尘区位于第一条地面锋面后部（图 10、11），由于地面的西北大风作用形成，沙尘区主要形成于地面风场的切变区内，并随着切变区的东移而由蒙古国东部进入我国内蒙古东部地区（图 12）。

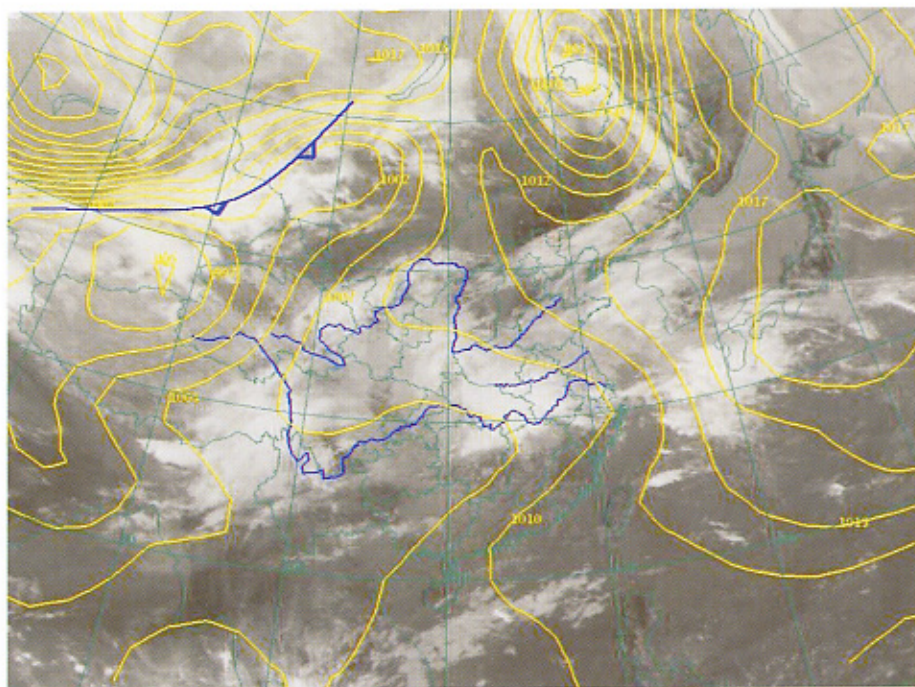


图7 2001年4月28日09时云图与地面天气形势叠加图

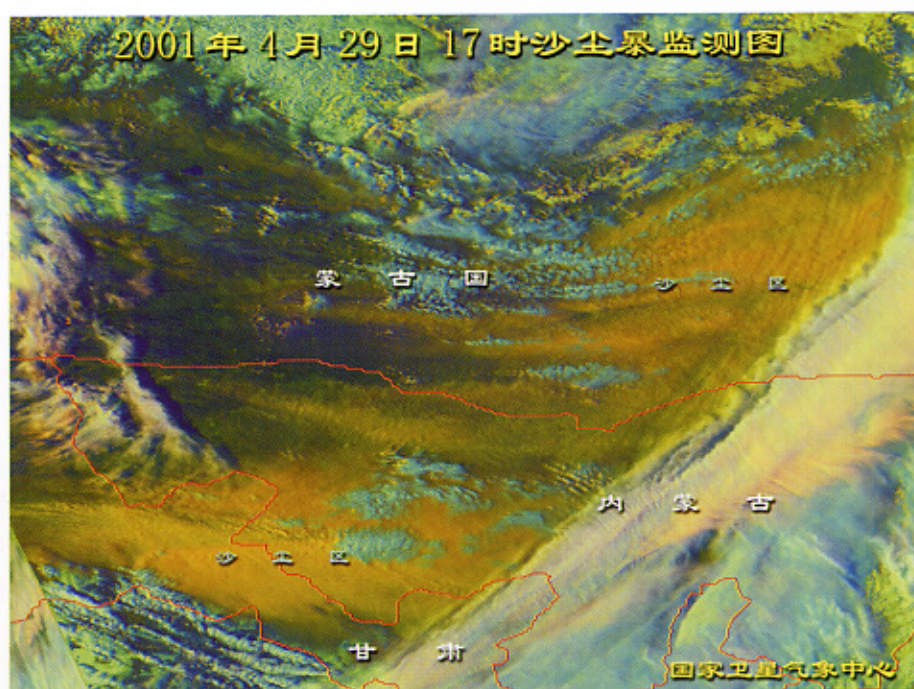


图8 2001年4月29日17时气象卫星图像

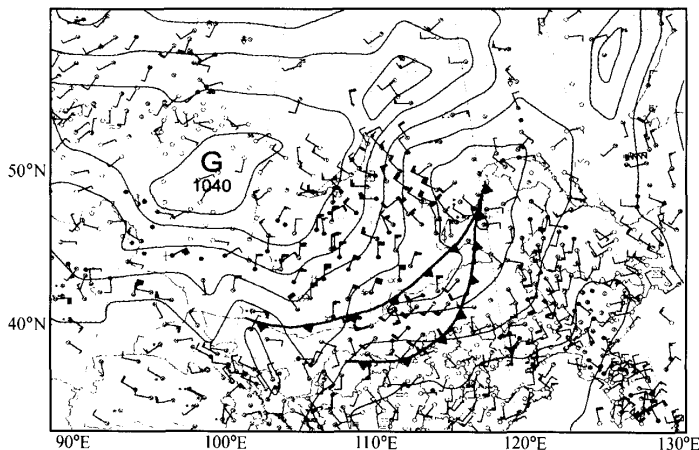


图 9 2001 年 4 月 22 日 08 时地面观测图

3.3 第 3 种类型：蒙古气旋快速发展所引起的沙尘天气

这是造成东亚强沙尘暴和影响最强的一类沙尘天气过程。在卫星云图上表现为一个巨大涡旋云系的南部有沙尘区。这种天气形势造成的沙尘暴天气，多发生在华北及东北西部地区。根据统计 2001 年 3 月 15 日~4 月 30 日共有 13 个蒙古气旋活动，并造成沙尘天气。其中，当气旋移动路径偏南时，对华北较大影响，当气旋路径偏东时则对东北等地产生影响。

2001 年最强的一次沙尘暴天气过程，就是由于蒙古气旋的东移而引起的，4 月 6 日 02 时（北京时），西西伯利亚冷空气开始侵入新疆，在吐鲁番出现扬沙。08 时冷空气东移侵入内蒙古西部阿拉善盟，造成该盟大范围扬沙。14 时沙尘天气迅猛加强，根据沙尘暴的定义^[8]，内蒙古阿拉善盟、巴彦淖尔盟、包头市北部、乌兰察布盟北部和锡林郭勒盟西部出现大范围沙尘暴和强沙尘暴，风力达到 7~9 级（巴彦淖尔盟乌拉特后旗定时风速 24 m s^{-1} ，满都拉庙定时风速 22 m s^{-1} ）。水平能见度下降到 200 m 到 300 m，其中阿拉善盟的额济纳旗沙尘暴从 8 点 25 分持续到 16 点 17 分，持续时间近 8 h，能见度下降到 0 m。6 日 20 时阿拉善盟、巴彦淖尔盟沙尘暴停止，上述其余地区沙尘暴仍在持续，其范围向东扩展到锡林郭勒盟中东部，能见度下降到 200 m 以下。7 日 02 时，沙尘暴和强沙尘暴区稳定少动。在 6 日 16 时到 7 日 02 时，沙尘暴强度达到最强，内蒙古中部偏北地区 5 个气象站能见度降至 0 m，形成特强沙尘暴（黑风暴）。7 日 08 时包头市北部、乌兰察布盟北部沙尘暴停止，沙尘暴区继续向东扩展到内蒙古赤峰市北部、通辽市北部、兴安盟北部，其中兴安盟北部出现了强沙尘暴，能见度下降到 50 m 到 300 m。7 日 14 时上述地区沙尘暴仍然持续，同时黑龙江和吉林省开始出现沙尘暴。7 日 20 时横扫我国西北、华北、东北 7 个省、区及蒙古国南部，历时 40 多个小时的沙尘暴才告停止。

图 13、14 是 4 月 6 日 14 时和 7 日 8 时的气象卫星观测图像。由图可见，这次沙尘暴过程，特强沙尘暴中心主要位于内蒙古中部偏北地区，满都拉、朱日和、二连浩特、

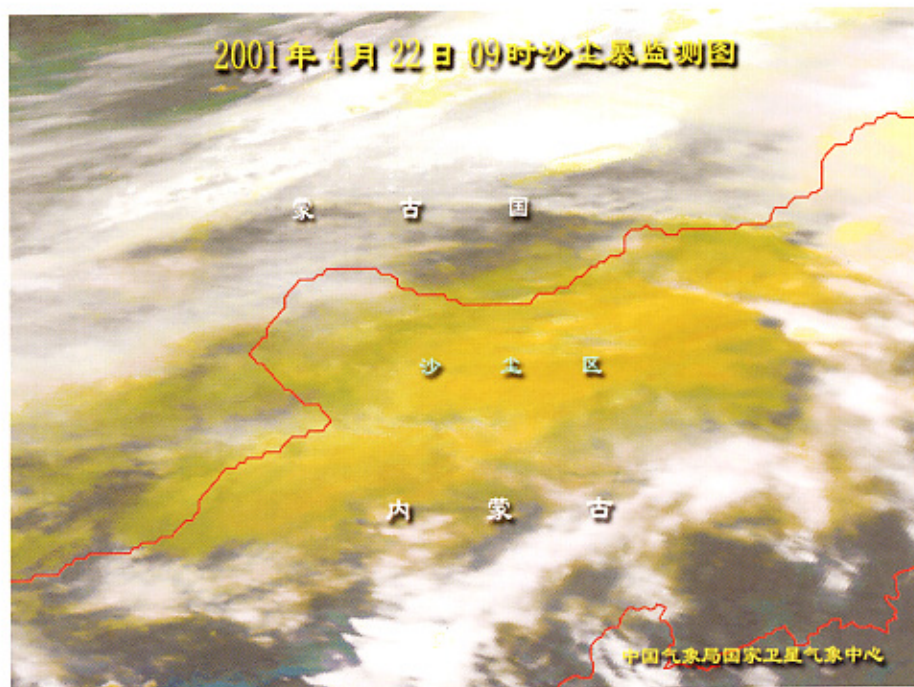


图 10 2001 年 4 月 22 日 09 时气象卫星图像

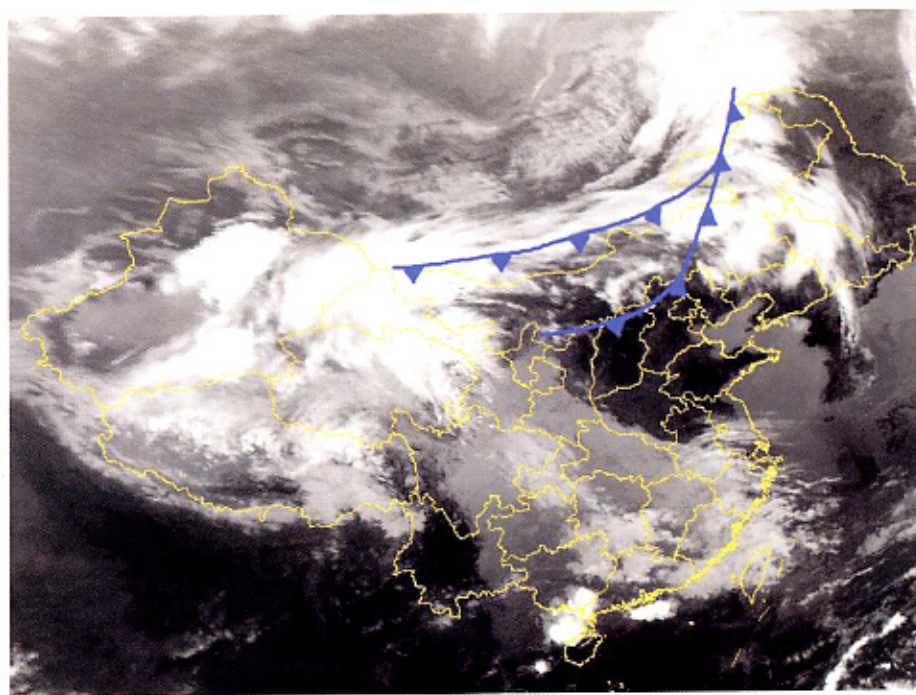


图 11 2001 年 4 月 22 日 08 时 GMS 红外云图

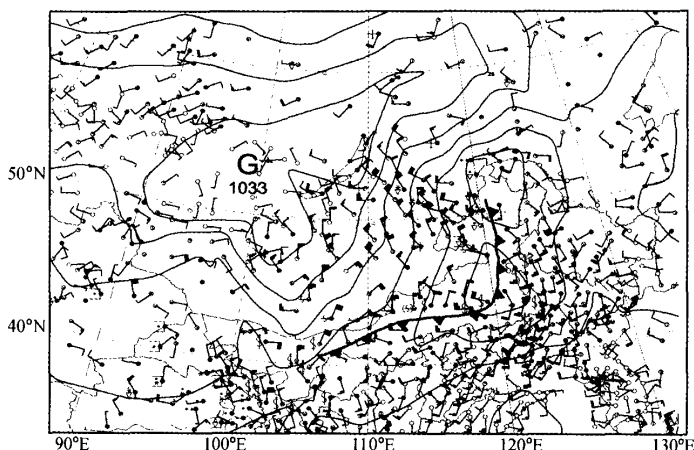


图 12 2001 年 4 月 22 日 14 时地面观测图

苏尼特左旗和阿巴嘎旗能见度均为 0 m。强沙尘暴区（能见度小于 200 m）主要位于 42°N 以北，呈东西带状。下面详细分析一下造成这次沙尘天气过程的原因。

3.3.1 蒙古气旋的生成发展和移动

这次大范围强沙尘暴与蒙古气旋爆发性发展关系密切。蒙古气旋 2001 年 4 月 5 日 02 时生成，中心位于（51°N，82°E），中心气压 1 003 hPa。后向东偏南方向移动，6 日 02 时中心位于（49°N，100°E），中心气压加深到 995 hPa，此时气旋冷锋开始影响新疆、甘肃，形成大风沙尘天气。6 日 08 时越过蒙古西部山地，移到乌兰巴托附近，气旋中心加深到 991 hPa，在气旋冷锋袭击下，内蒙古西部的阿拉善盟出现大范围扬沙。6 日 14 时后气旋沿 48°~50°N 纬带东移，气旋中心加深到 987.5 hPa（图 15），气旋冷锋和副冷锋扫过内蒙古，出现大范围强沙尘暴。图 16 是 7 日 14 时的地面气压形势图，图中蒙古气旋暖区中的二连浩特与化德之间有一中尺度气压梯度扰动。这种强变压梯度产生的瞬时变压风，经常导致沙尘暴的产生。6 日 20 时到 7 日 02 时，气旋爆发性发展，中心气压急剧下降了 6 hPa，移动缓慢，只移动了 100 km，在锡林郭勒盟引发了最猛烈的沙尘暴，能见度降为 0 m。显然气旋爆发性发展使地面风迅速加大，造成沙尘暴猛烈加强。7 日以后气旋锢囚，中心东移到（48.5°N，118.5°E），沙尘暴开始影响黑龙江省和吉林省。气旋中心加深到 977 hPa（24 h 内气旋中心加深了 14 hPa）。这一记录是 2001 年 1~5 月 18 次气旋沙尘暴过程中的气旋中心气压的最低值^[9]。

强沙尘暴和特强沙尘暴就发生在 6 日 08 时到 7 日 08 日这一时段。上述事实说明，沙尘暴强度、范围与蒙古气旋爆发性发展和移动有着密切关系。7 日 14 时蒙古气旋开始填塞，20 时消亡，沙尘暴随之结束。沙尘暴自西向东历时 40 多个小时。

3.3.2 此次过程的湍流垂直输送

应用下式计算了 2001 年 4 月 6 日 08 时到 7 日 20 时间隔 12 h 850~700 hPa 和 700~500 hPa 大气层的 Richardson 数^[10]：

$$Ri = -\frac{R_d \Delta P}{P} \left(\Delta T_p - \frac{AR\bar{T}}{C_{p,d}} \frac{\Delta P}{P} \right) / (\Delta U_p^2 + \Delta V_p^2),$$

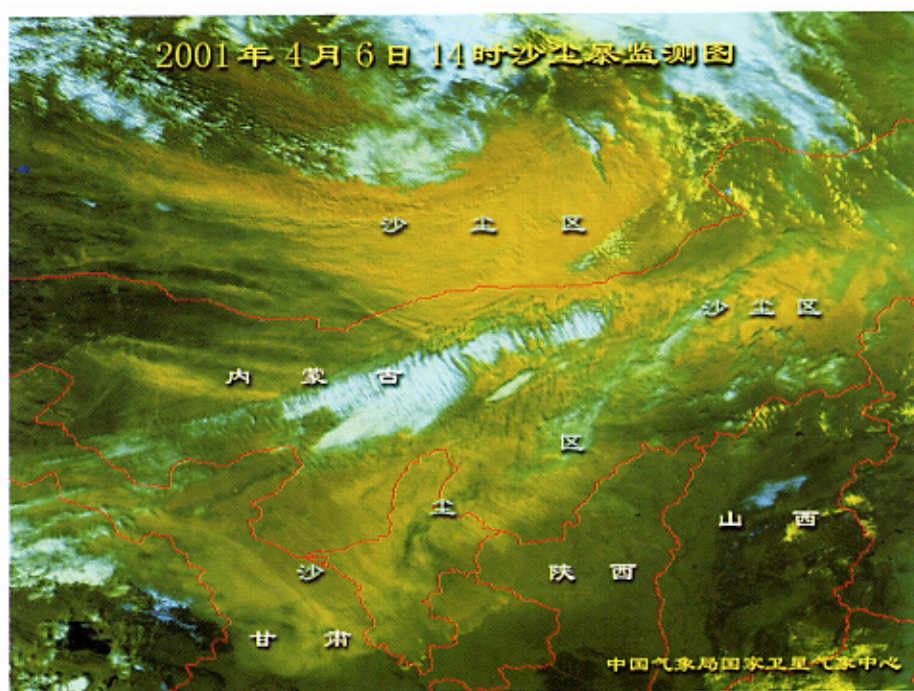


图13 2001年4月6日卫星监测到的沙尘图像

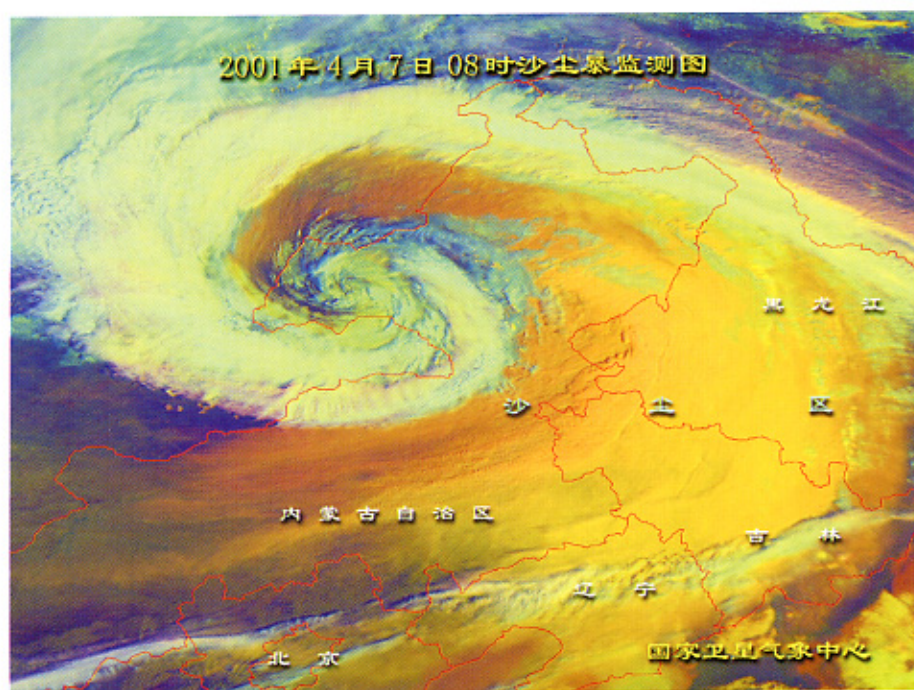


图14 2001年4月7日卫星监测到的沙尘图像

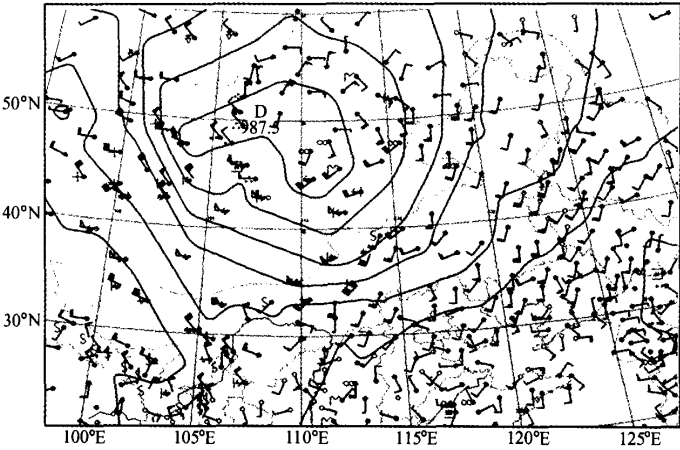


图 15 2001 年 4 月 6 日 14 时地面观测和气压场

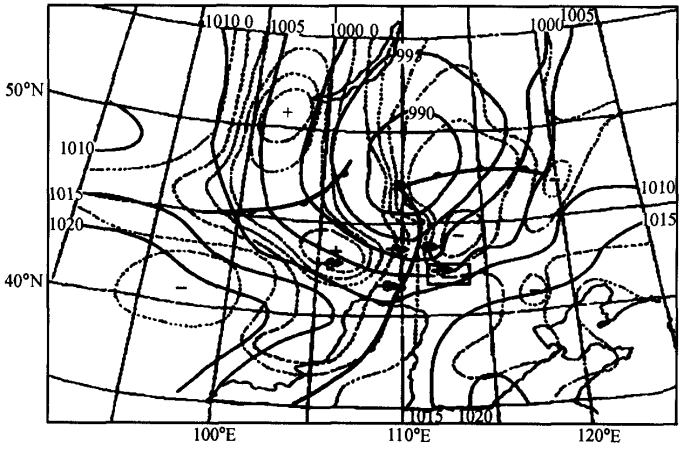


图 16 2001 年 4 月 7 日 14 时地面天气图（实线为等压线，虚线为 3 h 变压线）

式中， R_d 为干空气比气体常数， R 为空气气体常数， ΔP 为两层气压差， \bar{P} 为两层平均气压， ΔT_p 为两层温度差（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）， A 为功热当量， T 为两层平均温度（ K ）， $C_{p,d}$ 为干空气的定压比热， ΔU_p 和 ΔV_p 分别为两等压面之间的风速分量差。

计算结果显示，6 日 08 时到 7 日 08 时 850~700 hPa，我国北方大部分地区 Ri 均小于 0.1（图略），说明对流层低层大气存在着强烈的湍流运动。人们看到的黑风墙中沙尘团随气流不规则的翻滚现象就是沙尘被湍流输送的观测事实。7 日 20 时 850~700 hPa 除内蒙古东部和黑龙江省西部、吉林省西部 $Ri < 0.1$ ，内蒙古中西部 Ri 转为 > 0.1 ，沙尘暴过程基本结束。 Ri 与沙尘暴有良好的关系。计算结果还显示，6 日 08 时到 7 日 08 时，即在沙尘暴发展盛期，700~500 hPa Ri 值也 < 0.1 ，说明在较深厚的大

气层内均有湍流运动。沙尘暴减弱结束时(7日20时),700~500 hPa R_i 均变为 >0.1 ,湍流运动在中层明显减弱。

湍流是大气低层和中层扬起沙尘的主要动力机制。由上式不难看出 R_i 既包括了热力不稳定,又包括了由于垂直风切变造成的动力不稳定。

3.3.3 干冷锋强迫抬升和锋面次级环流

造成这次强沙尘暴的冷锋没有出现降水,低层坡度陡峭。6日02时到7日02时每6 h移动300~400 km。7日02时气旋爆发性发展后,移速减慢,到7日08时只移动了100 km,后移入东北平原,移速稍有加快。

干冷锋冲击造成的强对流上升气流是沙尘向上输送的重要动力。地面大风扬起的大量沙尘被锋面次级环流的上升气流携带向更高层输送。

3.3.4 高空急流出口区左侧辐散强迫

在本次强沙尘暴过程中,高空强极锋西风急流非常活跃,急流核与蒙古气旋和气旋冷锋相伴有规律的自西东移。

(1) 6日08时高空急流核位于哈密上空,中心最大风速为 46 m s^{-1} 。到6日20时,移速较快,东移到包头北部,移速为 700 km h^{-1} ,中心风速明显加大。其间14时在其移动路径左侧出现了两个强沙尘暴中心:一个在内蒙古阿拉善盟西北部的额济纳旗,另一个在包头市北部的满都拉庙,最小能见度均为0 m。

(2) 随着急流核风速加大(6日20时急流核最大风速由 46 m s^{-1} 增大到 64 m s^{-1})移速减慢,沙尘暴猛烈加强,6日20时在急流出口区左侧,东西200 km、南北150 km中尺度范围内能见度降为0 m,出现0 m能见度的测站为二连浩特、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、朱日和。

(3) 高空急流核沿 $42\sim 43^\circ\text{N}$ 纬带东移与蒙古气旋移动方向一致。

4 小结

(1) 气象卫星连续监测沙尘过程所得到的统计分析结果,说明了2001年春季影响我国的沙尘过程频繁,范围遍及西北、华北、东北地区,造成的灾害也相对较重。

(2) 在监测结果的分析基础上,得出产生沙尘的主要地面天气系统有3种类型:①高压前部偏东风过程及锋前偏东、偏南风型;②锋面云系过境;③蒙古气旋快速发展。其中蒙古气旋爆发性发展所形成的沙尘天气影响范围最大,强度最强。

(3) 蒙古气旋的爆发性发展和气旋冷锋后的大风是沙尘暴起沙的主要动力。

参 考 文 献

- 1 杨东贞、房秀梅、李兴生,我国北方沙尘暴变化趋势的分析,应用气象学报,1998,9(3),352~358.
- 2 钱正安、贺慧霞、瞿章等,我国西北地区沙尘暴的分级标准和个例谱及其统计特征,方宗义等编,中国沙尘暴研究,北京:气象出版社,1997,230~237.
- 3 陆均天、邹旭恺、王锦贵等,近3年我国沙尘天气较频繁发生的原因分析,气候与环境研究,2003,8(1),107~113.
- 4 张仁健、王明星、浦一芬等,2000年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析,气候与环境研究,2000,5

(3), 259~267.

5 郎咸梅、王会军、周广庆, 我国 2003 年冬季气候特征与 2004 年春季沙尘气候形势的实时预测初步报告, 气候与环境研究, 2003, 8 (4), 381~386.

6 刘毅、周明煜, 北京沙尘质量浓度与气象条件关系研究及其应用, 气候与环境研究, 1998, 3 (2), 142~146.

7 徐启运、胡敬松, 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征分析, 方宗义等编, 中国沙尘暴研究, 北京: 气象出版社, 1997, 11~15.

8 中国气象局, 沙尘天气年鉴, 北京: 气象出版社, 2003, 1~2.

9 刘景涛、郑新江、康玲等, 蒙古气旋爆发性发展导致的强沙尘暴个例研究, 气候与环境研究, 2003, 8 (2), 18~228.

10 陈创买、郭英琼, 气象常用参数和物理量查算表, 北京: 气象出版社, 1980, 9~11.

Analyses on the Characteristics and Pattern Classifications
of East-Asia Spring Dust Storms by Using
the Meteorological Satellite Images

Wu Xiaojing¹⁾, Zheng Xinjiang¹⁾, Li Xiaolong¹⁾, Liu Jingtao²⁾,
Kang Ling²⁾, and Jiang Xuegong²⁾

1) (*National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081*)
2) (*Inner Mongolia Meteorological Office, Hohhot 010051*)

Abstract Dust storm weather made a serious influence in the northern part of China in 2001. The meteorological satellite monitoring image characteristics of dust storm were given. The synoptic systems were also classified by analyzing the cloud features. The results show that dust storm events mainly happened on three kinds of synoptic system and the corresponding cloud pattern.

Key words: dust storm; satellite monitoring; meteorological satellite image