

2006年两次影响北京的沙尘天气对比分析

李小龙^{1,2} 方宗义¹

1 国家卫星气象中心, 北京 100081

2 北京大学物理学院, 北京 100871

摘 要 利用卫星、再分析 (NECP)、地面观测等多种资料, 针对 2006 年 3 和 4 月影响北京的两次沙尘天气过程, 就天气过程形势、云系演变以及沙尘传播和沉降进行分析。前者对北京上空的沙尘天气一扫而过, 后者对北京的影响则是遍地黄沙。对比分析表明: 1) 强沙尘天气过程是蒙古气旋所引起的, 沙尘天气起源于中蒙边境、内蒙古西部, 在河套地区北部鄂尔多斯高原以及浑善达克沙地得到加强, 并随着高空西北风将沙尘输送到华北、渤海、黄海北部一带。卫星遥感监测技术不仅可以有效地监测到沙尘天气的发展演变过程, 也能有效地监测到沙尘的覆盖范围和沉降区; 2) 导致 4 月 16~17 日华北东部严重沙尘沉降现象的原因是地面冷锋静止于华北中部地区, 距地面 1 km 以上的浮尘层稳定覆盖华北东部和渤海等广大区域的主要原因, 是边界层中尺度涡旋对低空冷锋的阻挡作用; 冷锋云系在东移发展过程中, 受到日本海上空涡旋云系的顶推阻碍, 其结构发生变型瓦解。

关键词 沙尘天气 卫星监测 强沉降

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0320-09 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

Comparison between Two Dust Weather Process Effecting Beijing in 2006

LI Xiao-Long^{1,2} and FANG Zong-Yi¹

1 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract With satellite data, NCEP reanalysis data, and observation data and so on, weather process, cloud variation, dust transport and subsistence are analysed during those two dust storms happened in March and April 2006, respectively. The influence coming from the first one was just passing by, but the latter one brought severe yellow sand into the whole Beijing. Though the dust process from 16 to 17 April, which was in the early period, was not the strongest in the spring of 2006, it caused a very negative social influence. The analysis indicates that 1) strong dust process was caused by Mongolin cyclone and dust source was from the border between China and Mongo, and western inner Mongolia, and strengthened in northern Hetao region, Ordos plateau and Hunshandake sandland. Dust was transported to Northern China, Bohai sea, and northern Huanghai sea with the help of high-level wind. Satellite remote sensing technique not only can monitor the development of dust process, but also can detect the region covered by dust and estimate the value of subsidence. 2) the main reason for that during the dust process from April 16th to 17th, the dust layer covered east part of Northern China, Bohai sea and larger area, is that in the boundary layer middle-scale vortex stopped low-level cold front; cold front clouds were obstructed by the scroll clouds staying over the Japan Sea during moving eastward, so the structure of cold front clouds was twisted and collapsed, therefore, severe dust subsidence occurred over Northern China.

收稿日期 2007-03-27 收到, 2007-04-18 收到修定稿

资助项目 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)

作者简介 李小龙, 男, 1980 年出生, 工程师, 主要从事大气遥感、卫星气象分析监测工作和研究。E-mail: lixiaolong@cma.gov.cn

Key words dust storm, satellite monitor, subsidence

1 引言

沙尘天气是干旱半干旱地区风蚀荒漠化过程中一种自然的天气现象^[1], 它的形成主要受自然因素制约, 人类活动因素在一定程度上可以影响到沙尘天气的发生。钱正安等^[2~4]的研究表明, 东亚地区共有 6 个比较强的沙尘暴高发区: 塔克拉玛干沙漠, 阿拉善地区, 河西走廊, 鄂尔多斯高原, 浑善达克沙地, 蒙古国南部与我国接壤的东戈壁省和南戈壁省。土地荒漠化只是沙尘暴形成的一个重要因素, 沙尘天气增多或减少的决定因素是大气环流的变化。研究表明, 锋面和气旋^[5~8]是引发大范围沙尘天气的天气尺度系统, 另外飚线^[9,10]和副冷锋^[11]是产生局地强沙尘暴或者起沙的重要中尺度系统。本文探讨的 2 次沙尘天气的起沙过程与除塔克拉玛干沙漠外的其他 5 个高发区均有联系, 而造成这 2 次沙尘天气过程的影响系统均是蒙古气旋。本文着重讨论: 同样是蒙古气旋引发的沙尘天气, 为什么对华北东部地区的影响却截

然不同。

2 2006 年春季沙尘天气概况

2006 年春季沙尘天气发生的时间特点是: 来得早, 走得晚, 频次比较高。3 月 9 日发生我国北方入春以来第一次大范围的沙尘天气过程, 最后一场大范围的沙尘天气过程出现在 5 月 31 日。2006 年春季共计 17 次沙尘天气, 属于近年来沙尘天气偏多的一年, 其中共有 5 次强沙尘暴天气过程 (见表 1)。

4 月 6~7 日的沙尘天气影响系统——蒙古气旋云系强度中等偏弱, 且沙尘发生、传播路径偏北, 主要影响内蒙古境内以及东北中南部地区, 华北地区并没有遭到严重的正面袭击。

4 月 9~11 日的沙尘天气过程影响我国北方广大地区, 冷空气移动路径为偏西路径, 严重的沙尘天气主要发生在西北地区 (新疆、河西走廊等地), 其产生的沙尘并没有直接影响到华北地区。冷空气主体势力在东移过程中有所北抬, 与之对应的蒙古气旋云系主体主要位于蒙古国境内, 临

表 1 2006 年 5 次强沙尘暴天气过程 (中央气象台)

Table 1 Five severe duststorm process in 2006

序号	起止时间	过程类型	主要影响系统	扬沙和沙尘暴影响的范围
1	3 月 9~12 日	强沙尘暴	蒙古气旋冷锋	新疆南部、内蒙古中西部 and 东部偏南地区、甘肃中西部、宁夏北部、陕西北部、山西大部、河北北部、北京、辽宁西部和北部出现了扬沙, 其中南疆盆地、内蒙古中西部、青海西北部、甘肃中部、宁夏东部、陕西北部、辽宁西部的部分地区出现了沙尘暴或强沙尘暴。
2	3 月 26~27 日	强沙尘暴	蒙古气旋冷锋	内蒙古中部和东部偏南地区、河北北部、辽宁西部、京津地区、宁夏南部和东部、陕西北部、山西西南部、山东北部、河南北部等地的部分地区出现了扬沙; 其中内蒙古中部和东部偏南地区的部分地区出现了沙尘暴和强沙尘暴。
3	4 月 6~7 日	强沙尘暴	蒙古气旋冷锋	甘肃西部、内蒙古中西部、宁夏北部、陕西北部出现了扬沙, 部分地区出现了沙尘暴或强沙尘暴。
4	4 月 9~11 日	强沙尘暴	蒙古气旋冷锋	新疆南部、青海北部、甘肃、内蒙古中西部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北西北部、河南西北部等地出现了扬沙, 其中部分地区出现了沙尘暴或强沙尘暴。
5	4 月 16~17 日	强沙尘暴	蒙古气旋冷锋	内蒙古中西部、甘肃河西中西部、宁夏北部、陕西北部、山西北部、河北西北部、北京北部等地出现了扬沙和沙尘暴, 其中甘肃金塔, 内蒙古中部的海力素、临河、四子王旗、朱日和、集宁出现了强沙尘暴。

近京津地区的锡林郭勒盟境内出现的一支沙尘带向东偏北方向移动,也未对京津地区造成明显影响。

3月9~12日、26~27日和4月16~17日3次强沙尘天气过程中沙尘的传播路径均直接经过京津地区。3月的2次过程无论是气旋云系强度、地面低压系统强度还是沙尘在起沙源地所表现出的强度都比4月16~17日的强,可是对于华北、渤海等地所感受到的沙尘天气影响和沙尘的沉降现象来说,4月16~17日这次过程却是最强的,特别是对于华北东部、北京临近地区的影响。本文将对3月26~27日和4月16~17日这两次强沙尘暴过程做比较分析,探究造成16日夜间至17日凌晨华北北部地区发生严重沙尘沉降现象的主要原因,为今后的预报提供思路。

3 两次沙尘天气过程分析

图1a和b分别是2006年3月26日08时(北京时间,下同)和4月16日08时的500 hPa天气形势图,它说明这两次过程均在西北气流控制下,形势基本一致。在4月16日08时的500 hPa形势图(图1b)中,蒙古国东部有一弱的高压脊控制,我国东北、日本海、朝鲜半岛至我国黄海地区受一个清楚的东亚大槽控制,这种高空流场型式造成高空西北气流稳定维持,贝加尔湖西侧有另一个较为深厚的低压槽南下,正是这个低压槽造成了本文所讨论的沙尘天气过程。

3月26日14时700 hPa高空图(图2a)上,在蒙古国东部地区已经出现了清晰的气旋性的闭

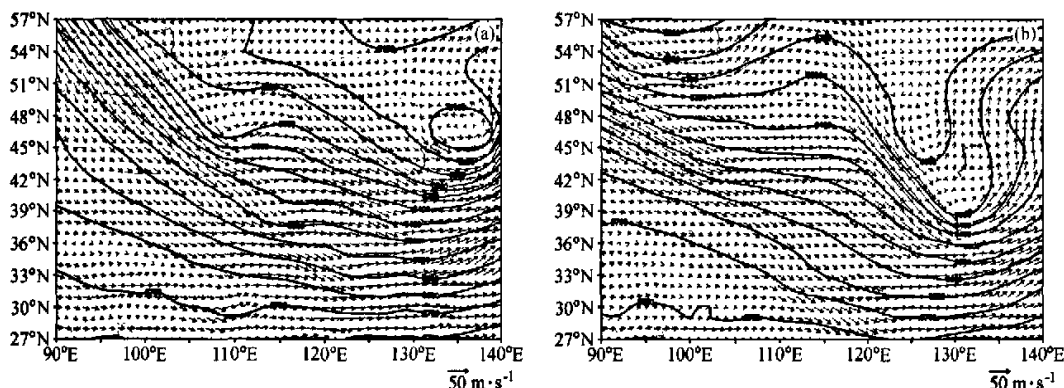


图1 500 hPa高度场(单位: gpm)和风场: (a) 3月26日08时; (b) 4月16日08时

Fig. 1 The geopotential height (gpm) and wind at 500 hPa: (a) 0800 LST 26 Mar; (b) 0800 LST 16 Apr

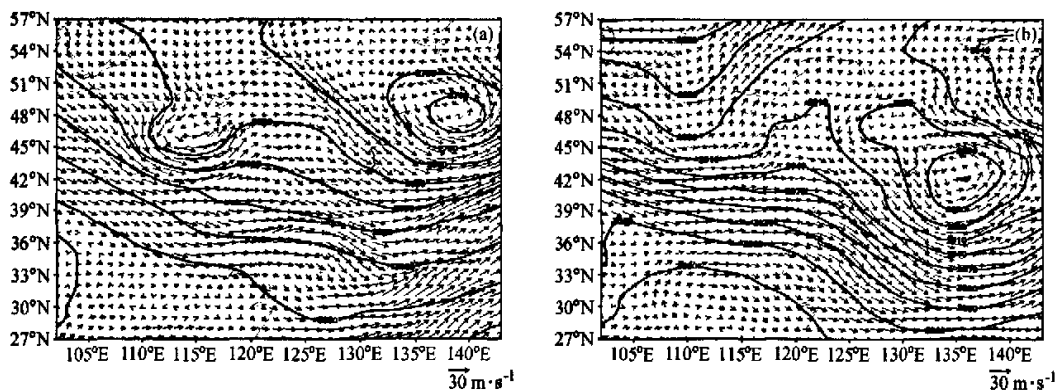


图2 700 hPa高度场(单位: gpm)和风场: (a) 3月26日14时; (b) 4月16日14时

Fig. 2 The geopotential height (gpm) and wind at 700 hPa: (a) 1400 LST 26 Mar; (b) 1400 LST 16 Apr

合环流, 而 4 月 16 日 14 时 (图 2b) 中蒙边境地区并没有出现清晰的闭合环流, 说明气旋强度较弱; 图 2b 中还可以看到中心位于日本海北部的低压系统强度也相对较弱。一般起沙时间多在中午时分, 前后两次过程的 14 时资料比较而言, 天气形式分布基本相似, 后者强度弱于前者。

4 月 16 日中午以后中蒙边境中段附近地区出现大范围强沙尘暴天气, 蒙古低压逐渐接近内蒙古锡林郭勒盟, 沙尘区主要分布在我国境内。从 NOAA-16 的观测来看 (图 3b), 此时冷锋云系前

锋位于内蒙古中东部, 锋面云系穿过河北西北部到达山西北部地区, 由于冷锋后部偏西大风的作用, 大部分沙尘起源于内蒙古中西部以及鄂尔多斯高原地区, 并在向下游地区传播的过程中不断加强。

3 月 26 日 NOAA-16 的观测显示 (图 3a), 蒙古气旋的发展比 4 月 16 日要强大许多, 云系密实白亮且结构清晰, 有完整的气旋结构。它在内蒙古所产生的沙尘暴天气也相对严重, 沙尘主要起源于蒙古国和内蒙古锡盟境内, 与京津冀地区毗

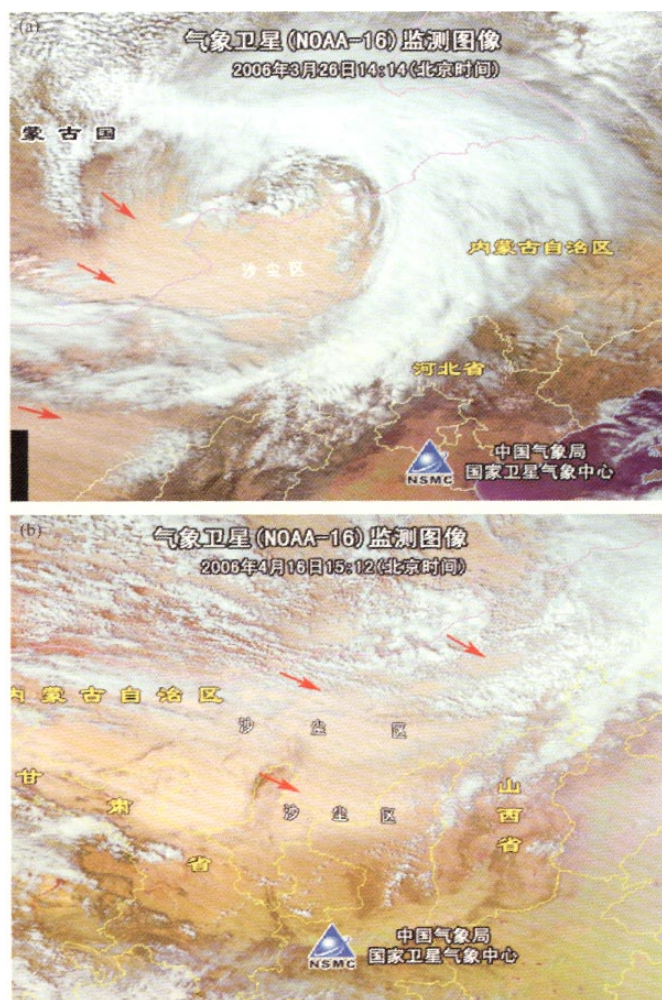


图3 卫星监测图: (a) 3月26日; (b) 4月16日

Fig. 3 The satellite images: (a) 26 Mar; (b) 16 Apr

邻;起源于内蒙古中西部地区以及河套地区的沙尘,要经过一定的传播距离才能到达华北地区。

进入夜间以后,行星边界层趋于稳定,沙尘源地的大风减弱,地面沙尘天气渐弱。但此前下午时段内被吹起的沙尘颗粒随偏西气流,已经向下游地区蔓延。850 hPa 以上高空槽东移,相应地距地面 1 km 以上的西北偏西大风区在 $38^{\circ}\sim 44^{\circ}\text{N}$

纬度带内维持东移,将沙尘向东输送。

4 2006 年 4 月 16~17 日华北东部大范围沙尘沉降的原因分析

图 4 是 2006 年 3 月 27 日 08 时地面天气和 26 日 14 时至 27 日 08 时地面气旋冷锋移动位置。

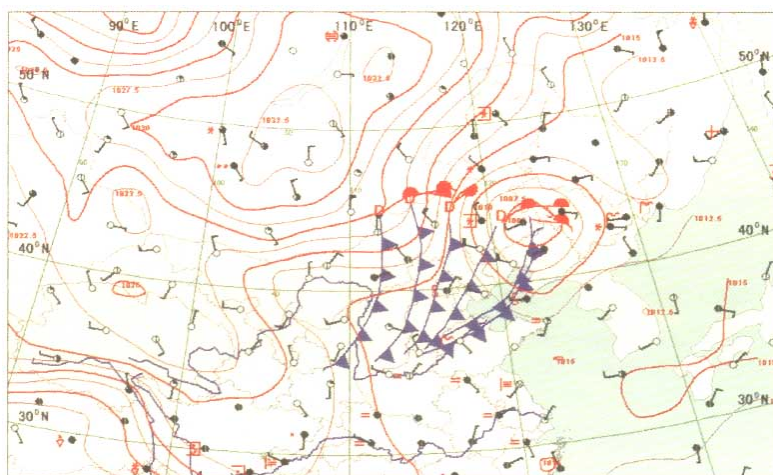


图 4 3 月 27 日 08 时地面天气和 26 日 14 时至 27 日 08 时地面锋面气旋位置

Fig. 4 The surface observation at 0800 LST Mar 27 and the positions of the cold front from 1400 LST 26 to 0800 LST 27 Mar 2006

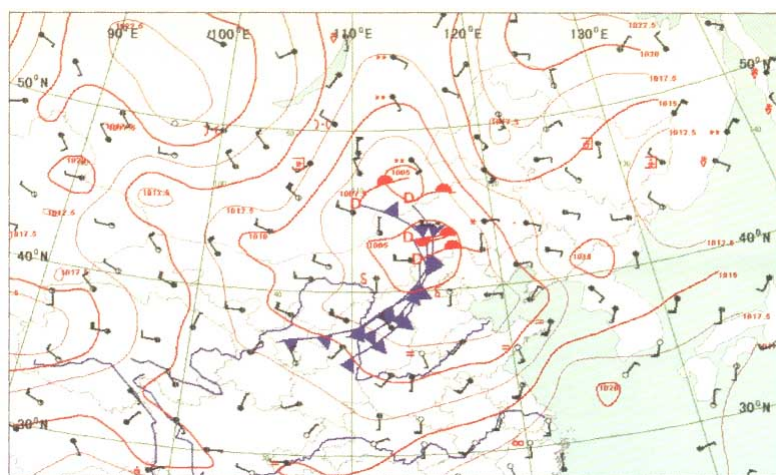


图 5 4 月 17 日 08 时地面天气和 16 日 14 时至 17 日 08 时地面锋面气旋位置

Fig. 5 The surface observation on 0800 LST Apr 17 and the positions of the cold front from 1400 LST 16 to 0800 LST 17 Apr

3 月 26 日中午, 蒙古气旋中心移动到我国内蒙古中部的锡林郭勒盟。此时锡盟境内出现了严重的沙尘暴天气。气旋云系逐渐加强, 与之对应的地面冷锋于 26 日夜间经过北京上空。27 日清晨低压中心移动到内蒙古通辽地区, 锋面已经越过北京。27 日北京有浮尘天气出现, 但沙尘天气一扫而过。

图 5 是 4 月 17 日 08 时地面天气和 16 日 14 时至 17 日 08 时地面气旋冷锋移动位置。与 3 月 26~27 日的过程相比, 地面冷锋移动十分缓慢, 蒙古低压中心在 16 日夜间经过我国内蒙古中部侵入华北地区, 南下移动分量加大, 移动速度相对较

慢, 移动距离不及前一次的一半; 地面锋面在近 20 h 内几乎没有移动, 处于准静止状态。17 日上午冷锋依然位于北京的上游地区。

4 月 16 日夜间出现了这次沙尘天气过程中最具影响的天气形势变化。900 hPa 以下的边界层内, 我国黄淮地区、黄海中部上空出现一支强盛的西南气流, 在渤海—山东半岛—黄海北部—辽东半岛上空形成一个中尺度气旋性涡旋 (图 6b), 涡旋缓慢向东移动。该涡旋北部的偏东气流阻滞了冷锋在边界层内的移动。这是造成 4 月 16 日夜至 17 日清晨华北地区出现严重降尘现象的直接原因。

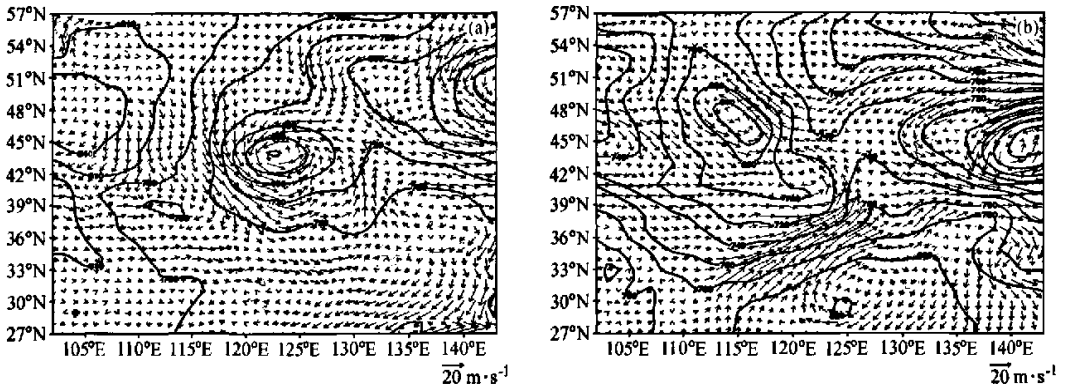


图 6 925 hPa 高度场 (单位: gpm) 和风场: (a) 3 月 27 日 08 时; (b) 4 月 17 日 08 时

Fig. 6 The geopotential height (gpm) and wind at 925 hPa: (a) 0800 LST 27 Mar; (b) 0800 LST 17 Apr

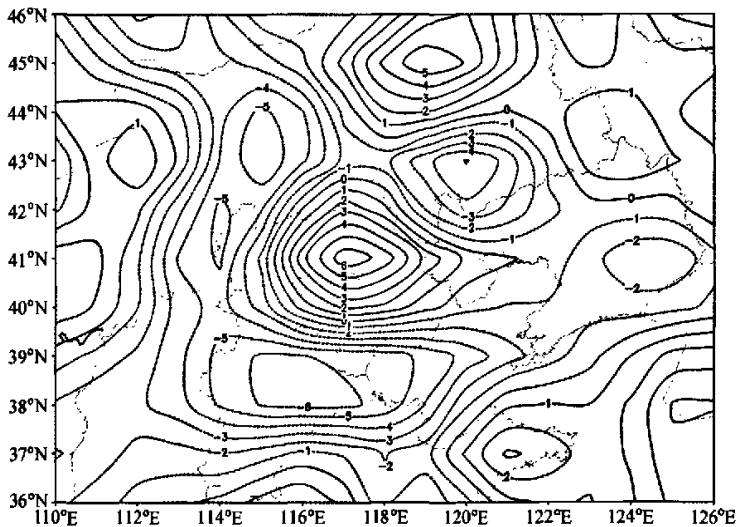


图 7 4 月 16 日 20 时 975 hPa 散度场

Fig. 7 The 975 hPa divergence field at 2000 LST 16 Apr

图 6a 则清晰地表明 3 月 27 日清晨时分,蒙古低压中心已经移动到了我国东北地区中南部,华北北部上空有强盛的西北气流;而 4 月 17 日清晨 (图 6b),影响系统——蒙古低压的中心依然位于蒙古国东部地区,华北北部地区处于低压的东南方向,距离低压中心较远,受很弱的偏西气流控制。黄海以及辽东半岛低空风向出现重要变化,由西北风向转为东南风向。4 月 16 日 23 时的资料反映黄海上空偏南气流十分强盛,华北上空的中低层出现气流的汇合以及静风现象,地面观

测出现清楚的偏东风 (3 月 26~27 日这一地区地面为西风)。

4 月 16 日夜间 20 时 (图 7) 华北北部地区 800 hPa 以下的中低空存在一个清晰的辐散下沉中心,北京、河北北部地区被辐合区包围,南部和西部有较强的辐合上升运动,这样在华北北部地区中低空有一个相对完整且具有连续性的下沉运动区,来自西北地区的沙尘颗粒在途经华北东北部上空时沉降到地面。在 4 月 17 日 08 时 117°E 剖面图中 (图 8),可以看到 35~42°N 900 hPa 以

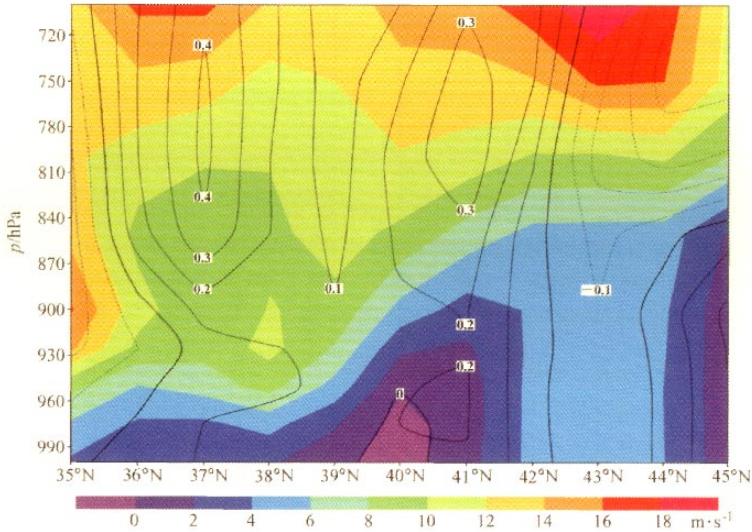


图 8 4 月 17 日 08 时沿 117°E 垂直剖面。黑线为气压垂直速度 (单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), 彩色为东风分量 u ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 The vertical section of latitudinal wind (shaded) and pressure vertical velocity (black line) along 117°E on 0800 LST 17 Apr

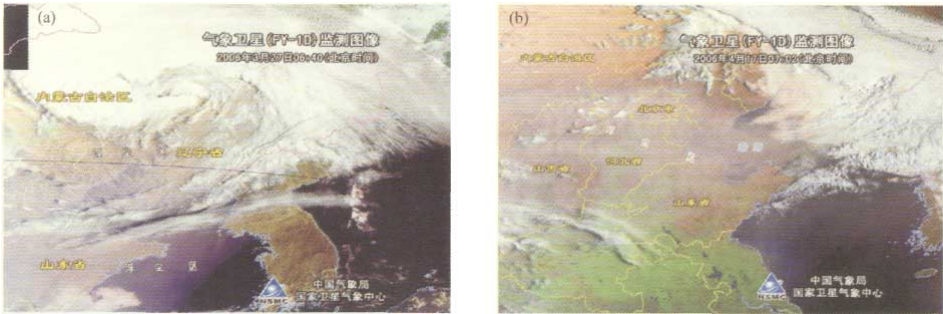


图 9 卫星监测图: (a) 3 月 27 日; (b) 4 月 17 日

Fig. 9 The satellite images: (a) 27 Mar; (b) 17 Apr

下为大范围的弱西风,这一区域上空垂直速度为正,16日夜间至17日凌晨北京近地面层一直为偏东气流控制,气流处于大范围均一的下沉状态,这十分利于沙尘在华北东北部、渤海地区沉降;3月17日凌晨(图略)该地区的低层弱西风范围相对较小,上空气流多处于上升状态,没有稳定持续的沉降条件。

5 沙尘源区输送与沉降分析

利用多时次静止卫星云图、高分辨的极轨卫星资料,可以比常规资料在更高的时空分辨上获得整个沙尘过程直观的发展、传播情况,能更好地分析沙尘的发展移动路径。4月16日沙尘起源于中蒙边界,在内蒙古浑善达克沙地加强,以偏西路径影响华北平原地区。

图9b说明4月17日华北气旋的头部云系已逐渐被裹挟进入日本海气旋后部的西北气流中,并逐渐被拉伸成为一条狭长的云带,失去了其气旋性结构。在丧失了南侧的锋面结构后,所携带的沙尘随之失去了有组织的引导输送,从而呈现出弥散的状态。3月26~27日的气旋云系强度、结构组织均明显高于4月16~17日的气旋云系(图9a),气旋中心位于辽宁北部,冷锋云系结构清晰完整。尽管华北、渤海上空也有清楚的沙尘信息,但沙尘仍处于有组织的偏西气流控制区内,且传播速度较快,经过华北上空的时间较短,因而地面沉降相对不明显。

据北京市环保局监测中心的监测结果显示,4

月17日空气中的总悬浮颗粒物浓度为 $350 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,凌晨时部分时段曾达到 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,空气质量属最严重的五级重度污染。据北京市气象局介绍,经测算北京全市降尘平均 $20 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。4月17日上午FY-1D气象卫星监测到的沙尘覆盖范围与地面信息叠加(图10)分析表明,此时沙尘影响华北地区的总面积约为 449700km^2 ,其中山东省境内沙尘区域面积 47910km^2 ,河北省约为 133000km^2 ,北京市约为 16390km^2 ,天津市 11600km^2 ,山西省约为 119000km^2 ,渤海、黄海部分海区的沙尘覆盖面积约为 71700km^2 。卫星观测显示沙尘在上述地区分布较为均一,据此可以推定华北北部沙尘沉降量大体相同,以北京录得的 $20 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 计算:山东境内沉降量约为 $9.58 \times 10^5 \text{t}$,河北约为 $2.66 \times 10^6 \text{t}$,北京约为 $3.28 \times 10^5 \text{t}$,天津约为 $2.32 \times 10^5 \text{t}$,山西约为 $2.38 \times 10^6 \text{t}$,渤海、黄海水域约为 $1.43 \times 10^6 \text{t}$ 。

6 结论

2006年春季5次强沙尘暴天气过程均是由于蒙古气旋东移发展造成的。4月16~17日沙尘过程起沙传播的前期并不是2006年春季最强烈的,但后期在京津冀地区沉降严重,造成的社会影响很大。

气旋云系在4月16日夜间出现戏剧性变化,冷锋近地面层受到前方中尺度涡旋的阻滞,850 hPa以上的西北偏西气流把沙尘从内蒙古中部、冀北输送到华北东部、京津地区和渤海湾,该区域的边界层相对静稳,被辐散下沉气流控制,有利于浮尘天气的维持和沉降。随着蒙古气旋的冷锋准静止于华北中部,相对应的冷锋云系在华北上空变形瓦解,飘浮在空中的沙尘颗粒,特别是较大的浮尘颗粒丧失了有组织的输送动力。与通常的气旋云系相比,经过华北上空的西北气流相对比较弱,沙尘传播速度的降低,近地面层辐散下沉气流的维持,导致了华北地区出现了严重的干沉降现象。因此要制作沙尘维持和沉降预报,必须考虑边界层内局地环流的作用。

卫星遥感技术是监测沙尘暴、扬沙和浮尘等沙尘天气直观有效的手段,将它与常规观测以及GIS技术相结合,可以让我们更完整、连续地理

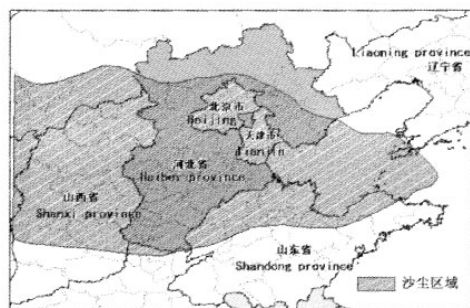


图10 4月17日气象卫星沙尘监测示意图

Fig. 10 The sketch map of dust image using the satellite data on 17 Apr

解和认识沙尘天气过程, 评估和提取沙尘天气造成的沉降量、影响范围、社会损失等决策信息。

参考文献 (References)

- [1] 王炜, 方宗义. 沙尘暴天气及其研究进展综述. 应用气象学报, 2004, 15 (3): 366~381
Wang Wei, Fang Zongyi. Review of duststorm weather and reserch progress. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2004, 15 (3): 366~381
- [2] 钱正安, 蔡英, 刘景涛, 等. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展. 地球物理学报, 2006, 49 (1): 83~92
Qian Zheng'an, Cai Ying, Liu Jingtao, et al. Some advances in dust storm research over China-Mongolia areas. *Chinese Journal of Sinica* (in Chinese), 2006, 49 (1): 83~92
- [3] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析. 中国沙漠, 2002, 22 (2): 106~111
Qian Zheng'an, Song Minghong, Li Wanyuan. Analyses on distributive variation and forecast of sand-dust storms in recent 50 years in north China. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2002, 22 (2): 106~111
- [4] 钱正安, 蔡英, 刘景涛. 中国北方沙尘暴研究的若干进展. 干旱区资源与环境, 2004, 18: 1~8
Qian Zheng'an, Cai Ying, Liu Jingtao. Some advances in dust storm researches in northern China. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 2004, 18: 1~8
- [5] 陆均天, 邹旭恺, 王锦贵. 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
Lu Juntian, Zou Xukai, Wang Jingui. Analyses of the causes for frequent dust weather occurred in China during the last three years. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (1): 107~113
- [6] 刘景涛, 郑新江, 康玲. 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): 218~229
Liu Jingtao, Zhen Xinjiang, Kang Ling. A case study of a severe dust storm resulted from a explosive mongolia cyclone. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (2): 218~229
- [7] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 2002 年 3 月 20 日沙尘暴天气的影响系统、起沙和输送的数值模拟. 干旱区资源与环境, 2004, 18 (1): 72~80
Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Numerical simulation of synoptic background, sources, emissions and transport of dust Storms during 20 Mar, 2002 in China. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (in Chinese), 2004, 18 (1): 72~80
- [8] 吴晓京, 郑新江, 李小龙, 等. 东亚春季沙尘天气的卫星云图特征分析和分型. 气候与环境研究, 2004, 9 (1): 1~13
Wu Xiaojing, Zheng Xinjiang, Li Xiaolong, et al. Analyses on the characteristics and pattern classifications of East-Asia spring dust Storms by using the meteorological satellite images. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, 9 (1): 1~13
- [9] 江吉喜. 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析. 应用气象学报, 1995, 6 (2): 177~184
Jiang Jixi. A study of formation for "black storm" using GMS-4 imagery. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1995, 6 (2): 177~184
- [10] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴发展与干飚线-黑风暴形成的一个机理分析. 高原气象, 1996, 15 (2): 178~185
Hu Yinqiao, Yasushi Mitsuta. Development of the strong dust storm and dry aqall line-a mechanism analysis on generating black storm. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1996, 15 (2): 178~185
- [11] 方宗义, 王炜. 2002 年我国沙尘暴的若干特征分析. 应用气象学报, 2003, 14 (5): 513~521
Fang Zongyi, Wang Wei. Characteristic analysis of China dust storm in 2002. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2003, 14 (5): 513~521