北京地区两次沙尘（暴）天气过程对比分析

申红喜　李秀连　石步鸠

（民航华北空管局气象中心　100621）

摘　要

本文通过对 2000 年 4 月 6 日和 4 月 9 日北京地区两次沙尘（暴）天气过程的对比分析认为：蒙古气旋型和不伴有气旋的西北槽型所造成的北京沙尘天气的严重程度不同；沙源地区中低层较强上升运动的主要作用是将当地沙尘垂直输送到空中，然后在 700 hPa 较强西北气流的引导下将卷起的沙尘水平输送到下游地区；不稳定层结又加强了沙尘天气；沙尘暴区上空 z-螺旋度分布的特征是高层为负值，低层为正值，对流层中低层螺旋度正的大值区与卫星云图显示的沙尘暴区具有较好的一致性，对沙尘暴的预报有一定的指示意义。

关键词：沙尘天气 蒙古气旋型　西风槽型　螺旋度

引言

沙尘（暴）天气是我国北方春季较为常见的一种灾害性天气现象，根据水平能见度的大小，沙尘天气可划分为浮尘、扬沙和沙尘暴三个等级。有关研究[1]表明：1999 年后我国大部分地区沙尘天气有明显增多趋势。首都机场 2000 年共出现能见度小于 3km 的沙尘天气 7 日。其中 2000 年 4 月 6 日，首都机场短时出现能见度 1km 的沙尘天气，北京朝阳、通州、南苑等地能见度短时小于 1km，达到了沙尘暴的强度。首都机场当日为保证飞行安全，及时开启二类盲降通讯设备和运行低能见度程序，增大飞机放行间隔，造成数十余架航班延误。因此加强沙尘暴天气的研究，提高沙尘（暴）的预报水平，是十分重要的课题之一。本文通过对发生在北京两次紧邻沙尘天气过程的对比分析，意在探寻影响北京沙尘（暴）天气过程的主要天气系统、环流特征和预报着眼点。

1　2000 年 4 月 6 日和 4 月 9 日两次沙尘天气过程简述

2000 年 4 月 6 日系统过首都机场（下称本场）时间在当日上午 10 时（北京时，下同），风向风速为 29006m • s^{-1}（表示风向 290 度，风速 6 m • s^{-1}，下同），11 时风向风速为 29013G21 m • s^{-1}（G 表示阵风，其后数字为阵风风速），最大风速出现在 14 时，30014G24 m • s^{-1}，晚上 22 时后转小，最差能见度达到 1km，出现在 11 时，为强扬沙天气，本市南苑等地短时出现沙尘暴。当日相对湿度 4%，最高气温出现在 12 时，达到 15.7℃，平均气温 14℃。

2000 年 4 月 9 日地面冷锋于当日上午 09 时过本场，其中 11 时风向风速为 34011G17 m • s^{-1}，最大风力出现在 14 时，达 32018G26 m • s^{-1}，晚上 22 时后转小。最差能见度出现时间与最大风

速出现时间一致，同为 14 时，短时能见度 2.5km，16 时后能见度在 6km 以上。当日相对湿度在 10%，最高气温出现在 16 时，19.8℃，平均气温 19℃。

2　产生沙尘天气所需条件的对比分析

沙尘天气的产生需具备沙（尘）源、强风和不稳定的大气层结三个条件[1]。沙、尘源是物质基础，强风是沙尘暴产生的动力条件，不稳定的热力条件有利于风力加大、对流发展，从而夹带更多的沙尘，并卷扬更高，从而形成强沙尘暴天气。比较以上两次过程，表面上看三个条件都具备，甚至后一个过程，冷空气更强，风力更大，4 月 6 日至 9 日期间北京和上游地区没有降水，可以近似地认为沙源和下垫面性质没有明显改变，但为什么造成的沙尘天气如此不同呢？ 由于缺少沙源分析资料，下面重点对动力和热力条件进行对比分析。

2．1 两次沙尘天气过程的环流背景对比分析

分析 4 月 5 日 20 时资料可见：500 hPa 以下各气压层在蒙古地区有涡旋形成，且处于加强阶段（图略）。图 1a 为 4 月 6 日 08 时 850 hPa 位势高度和温度图。由图可见在 47 °N、 116 °E 有明显的涡旋中心，此次过程属于蒙古气旋型。与此次过程相比较，图 1b 是 4 月 9 日 08 时 850 hPa 位势高度和温度图，由图可见 9 日 08 时北京附近西北方向为一槽区，无涡旋形成，故 9 日过程为不伴有气旋的西北槽型。

另外对 4 月 6 日和 4 月 9 日两次天气过程 08 时在 42 °N~45 °N、110 °E~115 °E 区域（以下简称北京西北方向）内的冷平流量进行了诊断分析（见表 1），结果发现两次过程 500 hPa、700 hPa 、850 hPa 等层冷平流都很强，但比较 4 月 6 日 08 时和 4 月 9 日 08 时各层冷平流值，9 日低层的冷平流值更大一些，所以风速也更大一些。

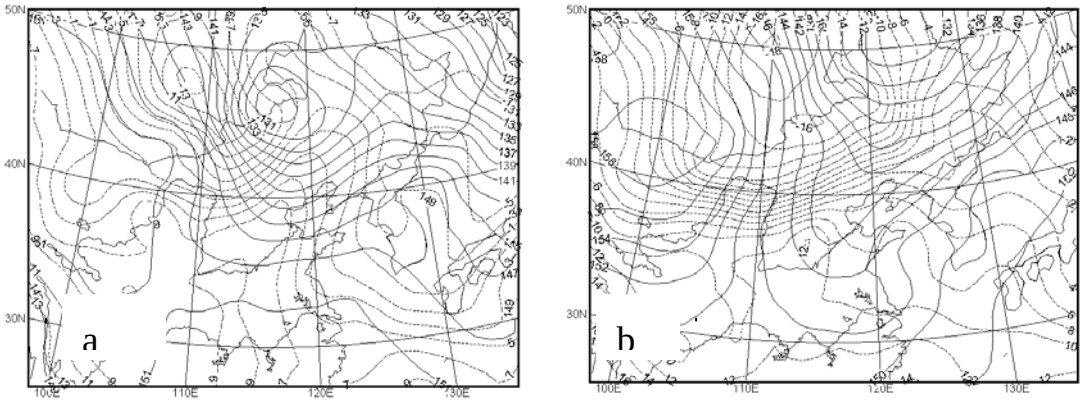


图 1　2002 年 4 月 6 日 08 时（a）与　2002 年 4 月 9 日 08 时(b) 850hPa 位势高度与温度，
实线为位势高度（单位：位势什米） 虚线为温度（℃）

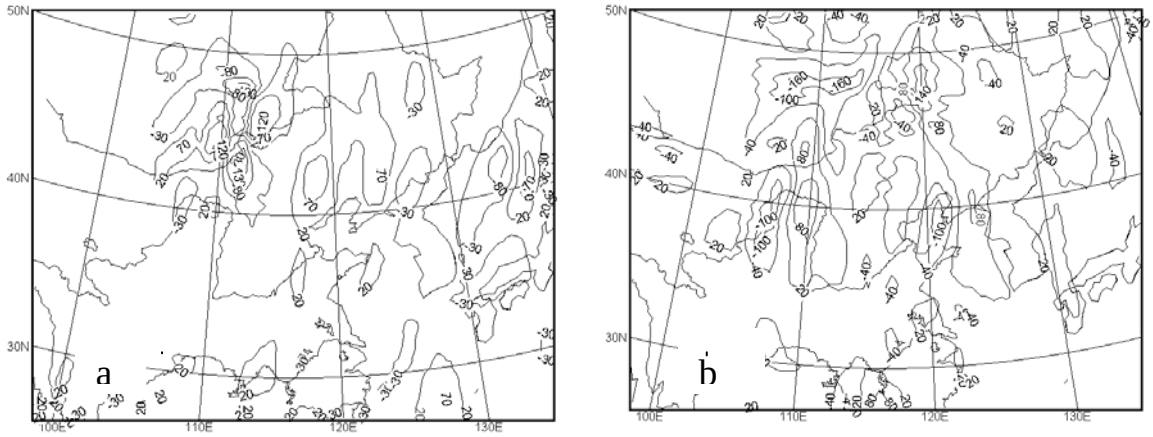
表 1　　北京西北方向（定义见正文）各层最大温度平流

层　次	4 月 6 日 08 时 温度平流（10^{-5}℃・s^{-1}）	4 月 9 日 08 时 温度平流（10^{-5}℃・s^{-1}）
850hPa	-66	-78
700hPa	-87	-38
500hPa	-19	-39

上述分析虽然可以很好地解释为什么9日会比6日风略大一些,因为前者冷空气更强一些，但不能解释为什么 9 日只出现一般沙尘天气而 6 日却出现沙尘暴的原因。

图 2a 为 4 月 6 日 08 时 850 hPa 涡度平流，图 2b 为 4 月 9 日 08 时 850 hPa 涡度平流，对比分析表明，4 月 6 日 08 时北京西北方向具有较大的正涡度平流，最大正涡度平流为 120×10^{-10}・S^{-2}，此时 850hPa 的相应位置已经有明显的气旋环流生成，预示蒙古气旋将进一步发展；4 月 9 日 08 时 500hPa 北京西北方向最大正涡度平流为 50×10^{-10}・S^{-2}，涡度平流值明显小于 4 月 6 日 08 时，此时 850hPa 的相应位置为西北气流控制，表明蒙古地区当时没有气旋生成，未来演变为蒙古气旋的可能性不大。

对比分析表明，蒙古气旋是有利于北京产生沙尘天气的主要系统，同样强度的冷空气，蒙古气旋比西北槽型造成的沙尘天气会更严重些。



2002 年 4 月 6 日 08 时（a）与　2002 年 4 月 9 日 08 时 (b)500hPa 涡度平流图（单位：10^{-10}・s^{-2}）

2．2 两次沙尘天气过程的垂直抬升和水平输送机制对比分析

根据对首都 2000 和 2001 年沙尘天气过程统计[2],沙尘天气最差能见度一般出现在大风突起或风力最大时。大风的主要作用就是将当地的浮土吹起，如果与上游地区漂移过来的沙尘结合，二者相互叠加，能见度就会较差，甚至出现沙尘暴；主要靠大风吹起的浮土是很难造成北京沙尘暴天气的，因此分析将沙源地区的沙尘通过何种影响系统和运输机制就显得非常关键。

4 月 6 日 08 时中低层（850hPa、700hPa）北京西北方向存在较强的上升运动，700hPa 最大上升速度为 130×10^{-3}m・s^{-1}（见图 3a），850hPa 最大上升速度为 50×10^{-3} m・s^{-1}（图略）；4

月 9 日 08 时北京西北方向

700hPa 最大上升速度为 60×10^{-3}m・s^{-1}（见图 3b），850hPa 最大上升速度为 90×10^{-3}m・s^{-1}（图略）。相比较而言，4 月 6 日 08 时 时北京西北方向 700hPa 上升速度较大，较强的上升运动有利于吹起沙尘和使沙尘飘浮在一定高度，并保持较长时间，不至于很快下落。这与最新的研究成果“输送到北京的沙尘主要高度在 2500～3000 米左右”是一致的。对比还发现，沙尘的产生和输送对 500hPa 的上升运动的强度要求不高。

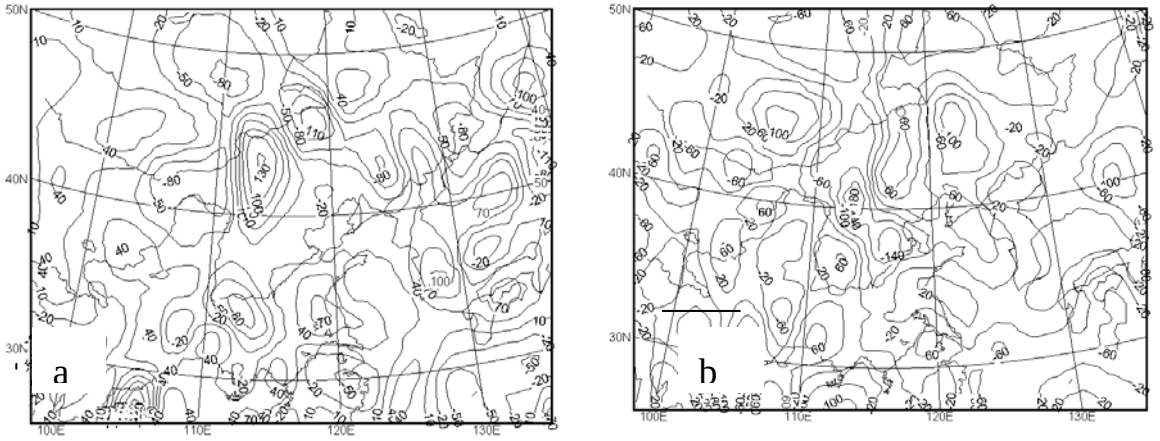


图 3　200 年 4 月 6 日 08 时(a)与 0200 年 4 月 9 日 08 时 (b) 700hPa 垂直速度图（正值用实线表示上升，负值用虚线表示下降）（单位：10^{-3}m・s^{-1}）

另外比较发现：4 月 6 日 08 时 沿 40 °N 纬圈的 115 ° E～120 °E 地区 700hPa 风速达到 24m・s^{-1}，比 9 日 08 时相同位置的风速 14m・s^{-1}大 10 m・s^{-1}，在平均海拔在 1300m 的蒙古高原，700hPa 较强的西北气流有利于将卷起的沙尘水平输送到下游地区。

2．3 两次沙尘天气过程的 z -螺旋度对比分析

螺旋度从物理本质上反映了流体涡管扭结的程度，其大小反映了旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度，其定义为：风矢量与涡度点积的体积分：

$$H=\iiint \vec{V}\bullet(\nabla\times\vec{V})d\tau$$ 单位是 m^2・s^{-2}。

Z 坐标系下的螺旋度密度可表示为：

$$H=\vec{V}\bullet(\nabla\times\vec{V})=(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z})u+(\frac{\partial u}{\partial z}-\frac{\partial w}{\partial x})v+(\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y})w$$

上式右端 3 项分别为 x，y，z 方向的涡度分量和风速的乘积，可分别称之为 x-螺旋度，y-螺旋度， z-螺旋度。文献［3］的研究指出，z-螺旋度较之 x-螺旋度和 y-螺旋度在某种情况下有更为清楚和重要的意义。本文仅讨论 z-螺旋度（严格讲，应是 z-螺旋度密度），将其定义为：

$$H_z = (\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y})w = \zeta w$$

根据上式，分别计算了 4 月 6 日 08 时和 4 月 9 日 08 时 700hPa～200hPa 北京西北方向的 z-螺旋度(仅计算有上升运动即 w>0 的区域)。对比分析表明，4 月 6 日 08 时北京西北方向在对流层中低层（700hPa 、500hPa）具有较大的正螺旋度，图 4a 为 4 月 6 日 08 时 500 hPa 螺旋度，最大正螺旋度值为 1600×10^{-8} $m^2 \cdot s^{-2}$，700 hPa 为 800×10^{-8} $m^2 \cdot s^{-2}$（图略），500 hPa、700 hPa 螺旋度正值区与当日卫星显示的沙尘暴区基本一致（图略）；相反 4 月 9 日 08 时北京西北方向在对流层中低层北京西北方向的正螺旋度很小，图 4b 为 4 月 9 日 08 时 500 hPa 螺旋度，主要原因是后者的不论是正涡度面积和正涡度数值均较小。计算高层(200hPa)的螺旋度值，发现两者均为负值，4 月 6 日 08 时和 4 月 9 日 08 时北京西北方向螺旋度最小值分别为-400 × 10^{-8} $m^2 \cdot s^{-2}$和-500 ×10^{-8} $m^2 \cdot s^{-2}$（图略）。

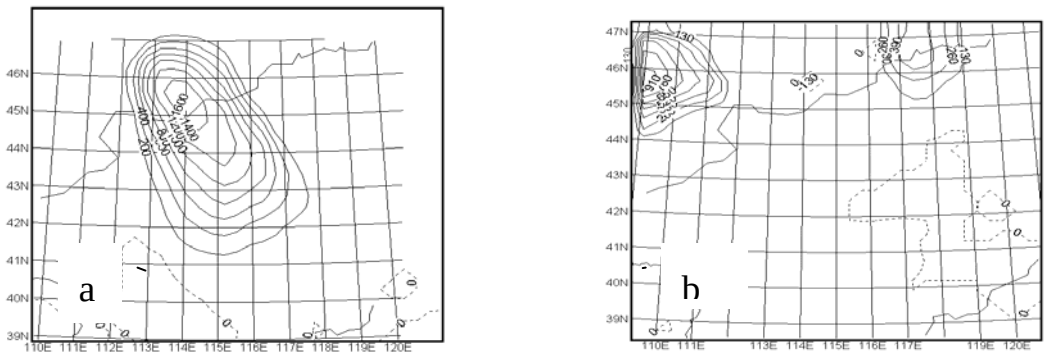


图 4　200 年 4 月 6 日 08 时 (a)与 0200 年 4 月 9 日 08 时(b) 500hPa 螺旋度图

（正值用实线表示，负值用虚线）（单位：$10^{-8}m^2 \cdot s^{-2}$）

对比表明，沙尘暴区上空 z-螺旋度垂直分布为高层为负值，低层为正值。对流层中低层（700hPa 、500hPa）螺旋度正的大值区与沙尘暴区具有较好的一致性，对沙尘暴的预报有一定的指示意义。

2．4 层结条件（热力条件）

通过 4 月 6 日 08 时（图 5）与 4 月 9 日 08 时（图略）北京上游地区张家口、呼和浩特、锡林浩特等地的层结曲线对比，发现 4 月 6 日上述各测站 850hPa 和 700hPa 之间温度递减率均大于干绝热递减率，属于绝对不稳定层结；相反 4 月 9 日 08 时上述各测站则属于条件性不稳定层结（考虑到春季系统比较干燥，水汽含量少，基本上可视为稳定层结）。

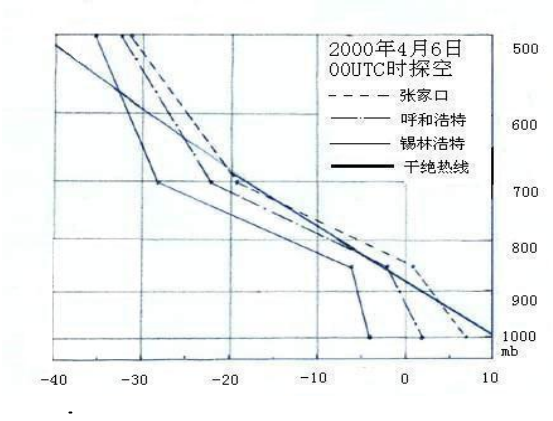


图 5　2002 年 4 月 6 日 08 时 张家口、呼和浩特、锡林浩特层结曲线

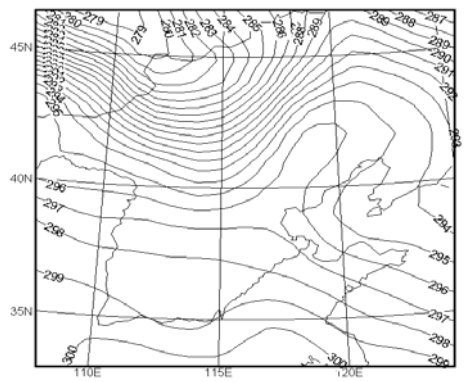


图 6 2002 年 4 月 6 日 08 时 700hPa 位温（单位：°K）

另外 4 月 6 日 08 时 850hPa 的位温分布，北京及其西北部地区呈“Ω”型，类似于夏季出现强对流天的湿静力能量分布形状（图 6）。

对比说明不稳定的热力条件有利于风力加大、湍流发展，从而夹带更多的沙尘，并卷扬更高，从而形成强沙尘暴天气。

3　预报着眼点

1、蒙古气旋是造成北京沙尘天气的主要系统，其发生、发展是预报沙尘天气强弱的前提。

2、沙尘天气的强弱很大程度上与冷空气的强弱有关。

3、中低层较强的上升运动将沙尘垂直输送到空中，700 hPa 较强西北气流可以将卷起的沙尘水平输送到下游地区；

4、沙尘暴区上空 z-螺旋度垂直分布为高层为负值，低层为正值。对流层中低层（700hPa 、500hPa）螺旋度正的大值区与沙尘暴区具有较好的一致性，对沙尘暴的预报有一定的指示意义。

5、北京西北方向的不稳定层结对沙尘起加强作用。

4　结束语

目前由于缺乏沙尘暴多发区的高分辨率的、实时的下垫面土壤及植被等资料，对于沙尘暴只能做出定性的过程和落区预报，缺乏科学的定时、定点及其强度的客观预报方法，只能通过不断研究，以进一步提高沙尘天气的预报水平。

致谢：中国气象科学研究院吴宝俊研究员的热心指导和帮助！

参考文献：

1、杨克明等，2000 年 3~4 月北方沙尘天气的初步分析和预报服务，天气预报方法与业务系统研究文集，北京：气象出版社，2001，

P261~262。

2、申红喜等，首都机场沙尘（暴）天气的统计分析（待发表）。

3、杨越奎等，“91.7”梅雨锋暴雨的螺旋度研究，气象学报，1994，52（3）：P379~383。