

近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究*

张高英 赵思雄 孙建华

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 2000~2002年春季(3~5月)中国北方有12次强沙尘暴天气过程发生, 其中11次与蒙古气旋有关。作者从干旱气候背景、环流状况、沙尘源、沙尘路径及天气系统等方面进行了分析, 并集中对引发强沙尘暴的蒙古气旋进行了诊断分析。结果表明: 在这3年中, 春季我国北方强沙尘暴天气主要与蒙古气旋的发展移动有关, 气旋冷锋后的大风是强沙尘暴天气发生的主要动力因子; 蒙古国南部、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地是强沙尘暴过程的主要沙尘源地; 影响我国的强沙尘暴的沙尘路径至少可分为3种类型, 即偏西路径、西北路径和南疆盆地型, 以西北路径居多; 我国北方春季的连续干旱、气温偏高及冷空气活跃是强沙尘暴天气形成的重要气候背景。

关键词: 强沙尘暴; 蒙古气旋; 天气型

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0101-15 **中图分类号** P445+.4 **文献标识码** A

1 引言

沙尘暴是发生在干旱和半干旱地区的一种灾害性天气, 愈来愈受到人们的关注^[1~4]。沙尘暴的产生, 决定于强风和沙尘两个方面, 不仅需要特定的地理环境和有利的下垫面, 而且需要特定的大尺度环流背景和某种天气系统。关于引发沙尘暴的天气系统已有一些研究, 而各地引发沙尘暴天气的系统也是不一样的。Brazel 等^[5]分析了美国亚利桑那州1965~1980年间沙尘暴爆发时的各种天气过程后, 提出了4种引发沙尘暴的天气系统: 锋面, 雷暴与对流, 热带扰动, 高层切断低压。江吉喜等^[6]通过对7次特强沙尘暴期间卫星云图和天气系统的研究, 归纳出常引发强沙尘暴的3种天气系统: 锋前飚线, 锋尾强对流云团, 锋前强对流云团。王式功等^[7]通过对我国西北地区几次大范围强或特强沙尘暴天气过程的分析, 指出易产生沙尘暴的主要环流形势和天气系统有: 经纬环流调整, 冷锋活动, 低空东风急流, 中尺度系统等。然而, 这主要是对我国西部地区, 尤其是西北地区情况的分析, 尚难反映北方地区, 尤其是华北地区的特征。

近年来, 特别是2000~2002年, 是我国沙尘暴一个新的频发期。其中, 2001年出现沙尘暴过程11次, 是进入20世纪90年代以来最多的一年, 而过去10年每年平均不到2次^[8]。

以往虽然对西北地区沙尘暴的个例有一些分析, 但由蒙古气旋引发的强沙尘暴天

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、风蚀和沙尘暴监测预测研究”项目(Y0101)和国家自然科学基金资助项目49875011共同资助

气气候特征的研究尚不太多,赵琳娜等^[9,10]对2000年一次由蒙古气旋引发的沙尘暴过程的起沙机制作了诊断分析与数值模拟研究,但是对其天气气候特征的了解仍显不够,需要对更多的个例作深入的探讨。本文对2000~2002年间发生在我国北方的12次强沙尘暴天气过程进行综合分析,其中,11次强沙尘暴天气过程与蒙古气旋发展移动有关。结果揭示出由蒙古气旋引发的强沙尘暴过程频发的天气气候背景,并归纳出有关的几类强沙尘暴天气过程的天气形势和诊断特征。

2 所用资料及处理方案

一般而言,根据世界气象组织(WMO)观测规范定义:强沙尘暴是指大风将地面尘沙吹起,空气变得非常混浊,水平能见度小于500 m的天气现象。而强沙尘暴天气过程的定义,在本文中采用中国气象局《沙尘天气预警业务服务暂行规定》的各类沙尘天气过程分类标准。即强沙尘暴天气过程是指在同一次天气过程中,我国预报区域内3个或3个以上的国家基本(准)站在同一观测时次同时出现了强沙尘暴天气。本文利用每日8个时次的常规地面观测资料,我国地面气象站1971~2002年月平均降水和月平均气温资料,以及每日4个时次的NCEP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点资料,首先对春季发生于我国北方地区的强沙尘暴天气过程的气候背景和天气特征进行分析,然后对引发强沙尘暴的天气形势做了分类,还对各种天气类型进行了初步的诊断研究。

3 北方春季强沙尘暴天气气候背景

如前所述,强沙尘暴产生的原因,一是沙尘,另一是强风。前者与前期降水及下垫面状况有关,而后者与大气环流状况及冷空气活动有关。以下将对2000~2002年的情况作一分析。

3.1 前期降水偏少

值得注意,2000年春季,我国北方大部分地区旱情严重,2~3月基本无雨雪。3月,我国北方除东北地区东部、甘肃南部和青海南部有10~50 mm的降水外,其余大部分地区月降水量不足10 mm,其中南疆、内蒙古西部和东部、甘肃西部、青海西北部、华北南部基本无降水;与常年同期相比,西北地区大部、内蒙古大部以及东北地区偏少5~9成。4月,我国北方大部分地区降水在50 mm以下,其中南疆、内蒙古中部偏西地区无降水;与历史同期相比,北疆西北部和南疆、青海大部、宁夏、陕西、甘肃东北部、内蒙古中部、山西、河北西部等地偏少5~7成,其中南疆地区偏少8成以上。5月的降水量比常年同期明显偏少,上旬,北方的降水主要集中在吉林东部、辽宁中部及山东部分地区,其余大部分地区降水少于常年。

与2000年相似,2001年春季我国北方地区的降水仍然偏少,3月,除东北地区东部降水比常年偏多1~4成外,北方其他地区降水明显偏少,其中新疆南部、内蒙古中部、青海北部、甘肃大部、陕西大部基本无降水。进入4月份,除新疆北部和东北地区的西北部分地区较常年偏多以外,北方其他地区降水均少于常年,其中,新疆南部基本无降水。5月,华北、西北大部地区降水不足10 mm,西北东部、华北、辽宁、内

蒙古中西部较常年偏少 5~9 成。

2002 年 2 月，我国北方大部仍以干旱为主，除西北地区 and 新疆北部部分地区较常年偏多外，北方大部分地区降水明显偏少，其中南疆、内蒙古东部、宁夏等地基本无降水。3 月，新疆大部、关中、东北地区大部，内蒙古中部降水均少于常年，其中南疆基本无降水。进入 4 月（图 1），北方地区先后出现了 3 次较大范围的降水，降水量较常年同期偏多 5 成至 2 倍；而华北南部、西北东南部一带降水持续偏少，月降水量一般在 25mm 以下，较常年同期偏少 3~8 成，旱情持续。

纵观 2000~2002 年春季的降水状况，我国北方地区以干旱为主，除少数地区降水偏多外，绝大部分地区降水明显偏少，因而使得我国北方地表土质干燥疏松，浮土较多，一旦有大风等动力条件出现，极易形成沙尘天气。

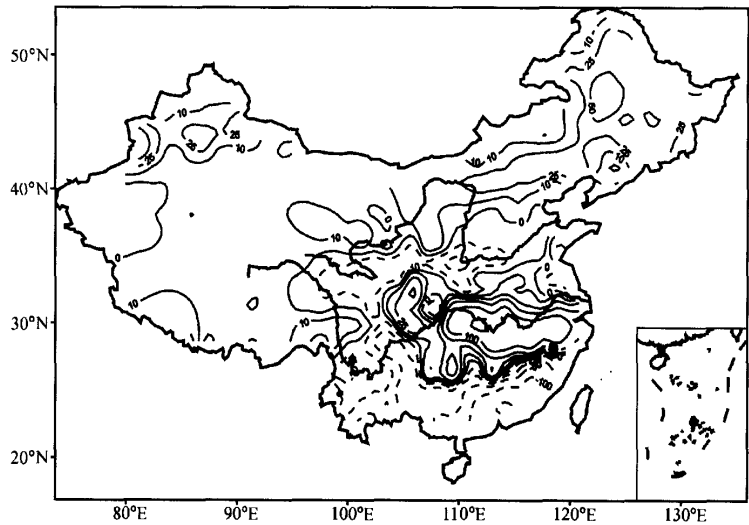


图 1 2002 年 4 月全国降水量距平（相对于 1971~2000 年平均值）
单位：mm，实线：>0，虚线：<0

3.2 温度偏高

2000 年春季气温回升较快，特别是 3 月，我国北方大部地区气温持续偏高，高于常年同期 1~2℃，其中华北大部偏高 2~4℃，尤其在 3 月下旬，华北部分地区偏高 4~5℃。2000 年 4 月冷空气活动频繁，北方地区温度虽有起伏，但与常年同期相比，西北地区大部、华北大部、东北西部、黄淮、江淮、汉水流域等地区月平均气温偏高 1~2℃，其中内蒙古东北部、华北南部偏高 2~3℃，新疆北部偏高 3~4℃。2001 年 3 月，我国大部分地区气温亦偏高，与常年同期相比，西北东南部、华北中南部偏高 2~3℃。该年 4 月，我国北方地区除东北中南部偏高 2~3℃外，其余大部分地区接近常年。2002 年 3 月，我国全国范围气温高于常年平均，东北和华北地区北部气温正距平达 6~9℃。同年 4 月（图 2），除新疆北部、内蒙古西部和华西的部分地区低于常年平均外，全国大部分地区气温仍与常年持平或偏高 1~2℃，其中内蒙古北部、黑龙江西

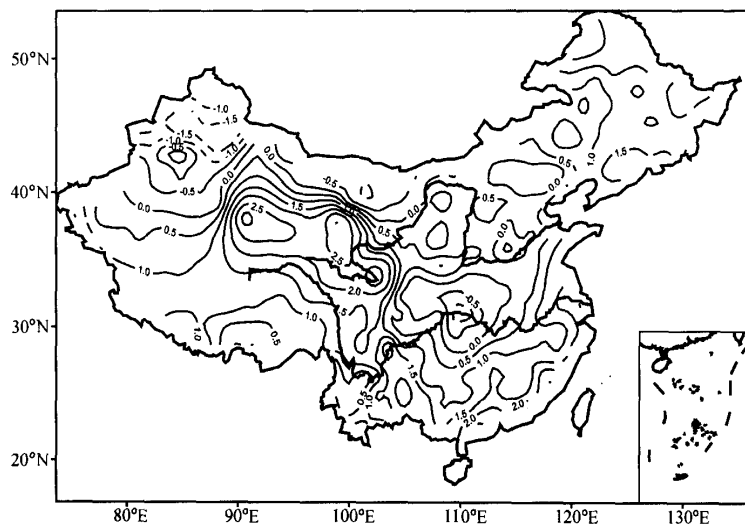


图 2 2002 年 4 月全国平均气温距平 (相对于 1971~2000 年平均值)

单位:℃, 实线: >0, 虚线: <0

北部、青海大部偏高 2~4℃。

2000~2002 年, 我国北方除部分地区接近于常年平均外, 大部分地区气温普遍高于常年。北方大部气温的偏高, 造成春季土壤失墒快, 地表浮土增多, 有利于沙尘天气的发生。

3.3 极涡环流偏向东半球

极涡是活动于极地附近的冷性涡旋, 是高纬大气环流中重要的系统之一。它的活动及其所在位置与我国的天气变化和冷空气活动密切相关。为了讨论极涡位置的变化, 分析了 2000 年 500 hPa 月平均高度场 (图略), 可以看到, 2000 年 3、4 两个月北半球极涡均呈偶极型分布, 极涡中心分别位于北美洲东北部到新地岛以西地区和库页岛附近, 特别是 4 月, 极涡环流重心更明显偏于东半球。这种极涡环流型分布, 造成我国北方冷空气和大风天气频繁出现, 为沙尘暴的发生创造了有利的动力条件。与 2000 年相似, 2001 年春季我国北方沙尘暴集中出现的 4 月份, 其极涡也呈偶极型分布, 重心偏向东半球。2002 年 3 月, 极涡强度偏强位置偏南, 且在亚洲的东北部分裂出一个中心。2002 年 4 月 (图 3), 极涡中心亦呈偶极型分布, 中心明显偏向于东半球, 在新地岛以东, 与常年相比, 强度明显偏强。涡的偏心分布, 使极锋锋区位置相对偏南, 中纬度短波槽脊活动频繁。当这类短波槽脊南下发展加深时, 常引导极地冷空气南下, 在我国北方造成大风天气, 在有利地表条件下, 形成沙尘天气。我们注意到, 国外的一些学者已讨论了大气环流异常变化与沙尘天气的关系, Yoshino^[11]发现冬季风期间, 500 hPa 环流指数的变化, 500 hPa 上阿留申低压、西伯利亚高压等高度场的距平变化与日本、韩国等地“黄沙”(Kosa, 即沙尘)发生的日数多寡有某些联系。这与本文对 500 hPa 平均高度场的分析结果有某些相似之处。

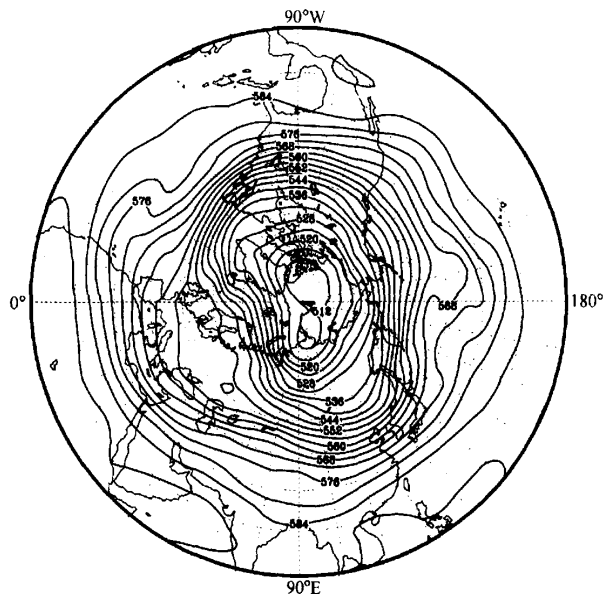


图3 2002年4月500 hPa平均高度场(单位: 10 gpm)

4 强沙尘暴天气过程的特征及其沙尘源地和影响路径

通过对2000~2002年3~5月我国地面观测资料统计分析可知,这3年春季我国北方共发生强沙尘暴天气过程12次(表1),其中,3月2次,5月1次,4月为最多共出现9次。

表1 2000~2002年春季中国北方强沙尘暴天气过程

发 生 时 间		同一时次强沙尘暴最多站数	沙 尘 源 地	沙尘路径
2000 年	4 月 8~9 日	3	蒙古国中东部、内蒙古中东部	西北路
	4 月 12~13 日	4	新疆东南部	偏西路
	4 月 18~19 日	4	内蒙古中西部	偏西路
	4 月 27~28 日	3	蒙古国中部、内蒙古西部	西北路
	5 月 10~11 日	3	内蒙古中西部	西北路
2001 年	4 月 5~7 日	16	蒙古国中部、内蒙古中部	西北路
	4 月 8~10 日	11	内蒙古中西部	西北路
	4 月 28~30 日	4	蒙古国中部、内蒙古中西部	西北路
2002 年	3 月 18~22 日	13	蒙古国中部、内蒙古中西部	西北路
	3 月 24~25 日	3	蒙古国中东部、内蒙古中部	偏西路
	4 月 6~8 日	11	蒙古国中东部、内蒙古中部	偏西路
	4 月 21~24 日	4	新疆南部	南疆盆地

在上述强沙尘暴天气中,共有4次属于大范围强沙尘暴天气过程,均出现在3月下旬至4月上旬。从地面观测到的强沙尘暴站数来看,同一时次出现超过11个测站(图4),影响范围主要集中在甘肃中东部、宁夏、内蒙古、山西和河北北部地区,其中尤以内蒙古中东部地区最甚。2001年4月上旬的两次强沙尘暴天气过程,其覆盖面积远大于2000年。而发生在2002年3月18~21日的强沙尘暴天气过程,是20世纪90年代以来范围最大、强度最强、影响最严重、持续时间最长的沙尘天气过程,袭击了我国北方140多万 km^2 的土地,影响人口达1.3亿。强沙尘暴的时间分布,也有很显著的特点,下午出现强沙尘暴的站点明显多于上午。造成沙尘暴天气的日变化可能主要有两个原因:一是下午大气层结的稳定性相对较弱,上升运动增强,有利于沙尘向上输送;二是下午近地层增温会破坏大气的稳定层结,上下层空气易于交换,高空动量下传增强,造成地面的风速加大,有利于地面起沙。

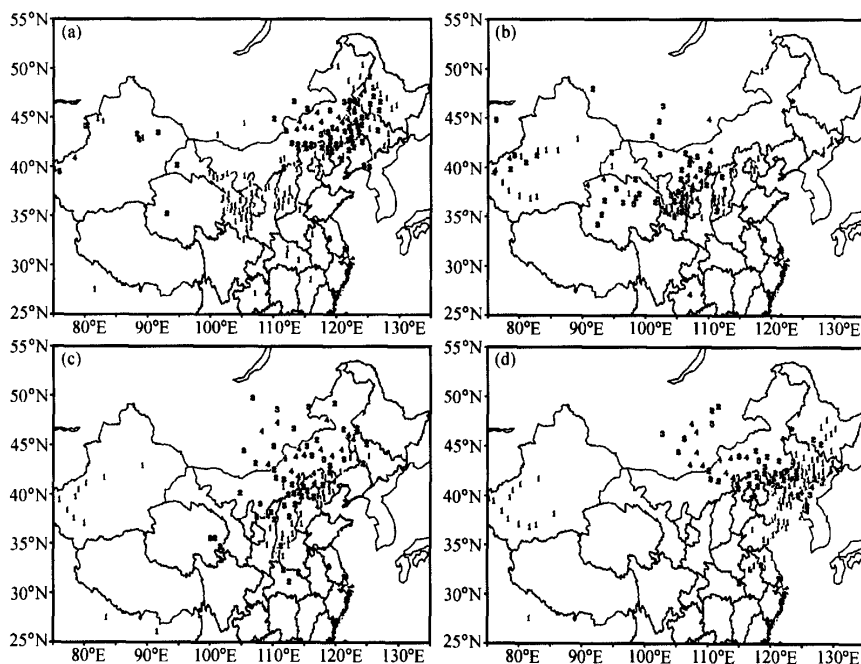


图4 2000~2002年4次大范围强沙尘暴过程天气观测

(a) 2001年4月7日14时; (b) 2001年4月8日20时; (c) 2002年3月20日14时; (d) 2002年4月7日14时

图中数字: 1为浮尘, 2为扬沙, 3为沙尘暴, 4为强沙尘暴

4.1 沙尘源地

作为形成沙尘暴的一个重要因子,沙尘源对沙尘暴的产生有着重要的作用。关于沙尘源的研究,有人对卫星遥感资料分析发现,对我国而言,境外源地主要是蒙古国南部广大的戈壁地区,而境内源地主要包括内蒙古西部的戈壁、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布其沙漠、毛乌素沙地以及内蒙古东南部的浑善达克沙地、

科尔沁沙地, 新疆北部的古尔班通古特沙漠、新疆东部的哈顺戈壁、库姆塔格沙漠及新疆南部的塔克拉玛干沙漠。通过对地面气象站观测到的沙尘天气现象跟踪分析, 2000~2002 年春季发生在我国北方的强沙尘暴天气过程的沙尘源地主要包括以下几个地区: 一是蒙古国南部的戈壁地区, 共有 7 次强沙尘暴过程的沙源与之有关。二是内蒙古中部和西部的沙漠和沙地, 其中有 10 次强沙尘暴过程的沙尘来源于此, 尤以巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地对强沙尘暴过程的沙尘贡献最大。孙建华等^[12]用实测资料对 2002 年 3 月 19~22 日和 4 月 6~9 日两次强沙尘暴过程起沙量的模拟分析发现, 两次过程起沙量的最大中心均位于内蒙古阿拉善盟地区的腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠, 这与本文的结果是一致的。三是新疆东部的库姆塔格沙漠和新疆南部的塔克拉玛干沙漠, 有 2 次强沙尘暴过程的沙源与该地区有关。

4.2 沙尘路径

根据沙尘源地及其影响范围的移动变化, 将强沙尘暴天气背景下沙尘路径分为偏西路径、西北路径和南疆盆地型 3 种类型, 其中以西北路径居多。分述如下:

偏西路径。沙尘天气起源于蒙古国西南部或南部的戈壁地区, 内蒙古西部的沙漠地区, 新疆北部戈壁和沙漠地区。受偏西气流引导沙尘主体向偏东方向移动。主要影响我国西北、华北, 有时还影响到东北地区西部和南部。此类沙尘路径共有 4 次, 分别出现在 2000 年 4 月 12~13 日, 2000 年 4 月 18~19 日, 2002 年 3 月 24~25 日, 2002 年 4 月 5~8 日。

西北路径。沙尘天气一般起源于蒙古国或内蒙古西部。受西北气流引导沙尘主体向东南方向移动, 或先向东南方向移动, 而后随蒙古气旋北上转向东北方向移动。主要影响我国西北、华北和东北部分地区, 有时甚至还会影响到黄淮、江淮等地。此类沙尘路径共有 7 次, 分别出现在 2000 年 4 月 8~9 日, 2000 年 4 月 27~28 日, 2000 年 5 月 10~11 日, 2001 年 4 月 5~7 日, 2001 年 4 月 8~10 日, 2001 年 4 月 28~30 日, 2002 年 3 月 18~22 日。沿此路径输送沙尘的过程, 一般影响范围较大, 在以上 4 次大范围强沙尘暴过程中就有 3 次沿此路径输送沙尘。

南疆盆地型。沙尘天气起源于新疆南部, 并主要影响该地区。此类沙尘路径只有 1 次, 出现在 2002 年 4 月 21~24 日。由于南疆盆地特殊的地形, 其沙漠的起沙一般主要影响盆地附近地区。

5 强沙尘暴天气过程的气象要素及其诊断特征

为了进一步了解强沙尘暴天气过程的形成和发展特点, 对它们的气象要素特征和引发强沙尘暴的蒙古气旋相关物理量进行了诊断分析 (表 2)。其中有一些值得注意的特点: (1) 在这 12 次强沙尘暴天气过程中, 从蒙古气旋强度来看, 涡度最大值为 $22 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 最小值为 $13 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 涡度场的数值比梅雨锋气旋的要强^[13]。(2) 从最大涡度的垂直分布看, 气旋最大涡度中心一般出现在 300~400 hPa 间, 属对流层中上层, 表明引发强沙尘暴的蒙古气旋是一个较深厚的系统。(3) 根据对造成蒙古气旋发展的温度平流和涡度平流的诊断分析可知, 蒙古气旋对应的高空槽后有很强的冷平流, 槽前有很强的暖平流。表明沙尘暴天气发展最最强盛时, 蒙古气旋存在明显的斜压性, 高

表 2 2000~2002 年春季中国北方强沙尘暴天气过程气象要素值及诊断物理量

发 生 时 间	最大 涡度/ 10^{-5} s^{-1}	最大 涡度所在 高度/ hPa	温度平流/ K d^{-1}		涡度平流/ 10^{-9} m s^{-2}		地面最大 风速/ m s^{-1}	最小能 见度/ km	
			涡后	涡前	涡后	涡前			
2000 年	4 月 8 日 14 时	22	300	-176	104	-15	10	16	0.3
	4 月 12 日 20 时	13	400	-80	88	-14	19	14	0.1
	4 月 19 日 14 时	22	350	-80	104	-11	4	16	0.2
	4 月 28 日 20 时	17	350	-136	128	-17	20	22	0.2
	5 月 11 日 14 时	14	400	-112	32	-11	5	14	0.4
2001 年	4 月 7 日 14 时	21	400	-56	104	-4	6	20	0.1
	4 月 8 日 20 时	11	300	-56	152	-6	14	16	0.1
	4 月 29 日 14 时	16	300	-64	192	-7	10	16	0.3
2002 年	3 月 20 日 14 时	17	400	-96	128	-9	8	21	0.1
	3 月 24 日 14 时	16	400	-128	105	-4	11	17	0.1
	4 月 7 日 14 时	17	350	-56	32	-5	4	22	0.1
	4 月 21 日 20 时	13	400	-136	40	-7	5	19	0.1

层温压场的这种配置,有利于气旋的发展和加强。

6 蒙古气旋引发强沙尘暴天气过程分型

2000~2002 年春季引发我国北方强沙尘暴的主要天气系统是蒙古气旋及其相伴的大风天气。蒙古气旋主要指发生于蒙古国及我国北方的一类气旋,但要仔细分析同是蒙古气旋的系统,其槽脊与地面低压的分布可以有很大不同,这表明了该类气旋的复杂性和多样性。依据蒙古气旋尤其是其对应的 500 hPa 上槽脊所处位置及对我国的影响,我们将造成强沙尘暴天气系统的特征分为东部型、中部型和西部型 3 种类型,其中以东部型最多,西部型最少。

6.1 东部型

此类强沙尘暴发生时蒙古气旋多位于蒙古国东部,气旋系统较为深厚,锋区位置偏北。高空槽线呈东北-西南走向,槽前暖平流强盛,槽后冷平流相对较弱。由于蒙古气旋所处的位置相对偏东,气旋冷锋后的大风引发的强沙尘暴首先出现在内蒙古中西部 and 宁夏地区,然后随着气旋向东移动,逐渐影响陕西、山西、河北等地,最后影响东北地区大部。

在 2000~2002 年春季引发强沙尘暴天气过程的蒙古气旋中,属于东部型的有 7 次,分别出现在 2000 年 4 月 8~9 日,2001 年 4 月 5~7 日,2001 年 4 月 28~30 日,2002 年 3 月 18~22 日,2002 年 3 月 24~25 日,2002 年 4 月 6~8 日,2002 年 4 月 21~24 日。以下将选出其中最强的一次,即 2002 年 3 月 18~22 日为例,予以介绍。

2002 年 3 月 18~22 日新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、北京、天津、辽宁、吉林、黑龙江、山东、河南、湖北、湖南、四川等地的部分地区先后出现了大范围的沙尘天气,内蒙古、甘肃中西部、宁夏北部、河北北部、北京、吉林西北部等地的部分地区出现了强沙尘暴。这是 3 年中影响范围最广、强度最强的一

次强沙尘暴天气过程。

在 2002 年 3 月 18 日 08 时 500 hPa 高空图（图略）上，极涡呈偶极型分布，偶极中心明显偏向于东半球，最强的一个冷中心位于新西伯利亚群岛附近。欧亚中纬度主要为两槽一脊型分布，其中东部浅槽位于贝加尔湖以东，另一个槽位于蒙古国西部，槽的振幅较大，而且在槽线附近有一个 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷中心。19 日 14 时，位于东部的浅槽与东亚大槽合并后迅速东移入海，西部的深槽也迅速东移至贝加尔湖西部，槽线附近等高线与等温线近乎垂直，有很强的冷平流。此时，蒙古国中部和内蒙古西部开始出现大范围沙尘暴天气，尤其在蒙古国中南部地区有多站出现强沙尘暴天气。随着气旋的东移，沙尘暴区继续向东移动。20 日 14 时，气旋中心已移至黑龙江西部，在 500 hPa 高空图（图 5a）上，槽线一直延伸到河套以南。受其影响，内蒙古中部地区出现大范围强沙尘暴天气。甘肃鼎新、内蒙古乌拉特后旗能见度接近 0 m，此次强沙尘暴过程影响达到最强。到 22 日，随着气旋中心移至我国东北边境，此次蒙古气旋引发的强沙尘暴天气过程结束，历时 5 天。

分析 200 hPa 等风速线（图 5b）发现，此型强沙尘暴天气高空急流的分布有如下特点：南支急流强盛且位置稳定少动，急流轴位于 30°N 附近，中心风速在 80 m s^{-1} 以上；北支副热带极锋急流自西向东移动，急流轴线位于我国北方上空，并且存在两个大风速中心，一个位于我国北疆地区上空，呈西北—东南走向，另一个位于我国华北南部上空，呈东北—西南走向，中心最大风速均在 50 m s^{-1} 以上。蒙古气旋中心处于第二个急流轴出口区的左侧。根据已有的研究，急流出口区将发生质量调整，在急流出口减速区有指向其右侧的非地转分量，引起质量的向南输送，使其左下方减压，有利于地面低压的发展^[14,15]。同时，这种高空急流出口区的存在，也有利于加强低层强风带和气旋性涡度切变，对强沙尘暴的发生起了重要作用。

在引发此型强沙尘暴天气的蒙古气旋快速发展的因子中，对流层中上层的温度平流起了重要作用。从温度平流的纬向垂直剖面（图 6a）可见，槽前暖平流异常强盛，为 3 种类型中的最强者，几乎整层均为暖平流，暖平流的最大值为 128 K d^{-1} ，处于 300 hPa 高度上。和槽前的暖平流相比，槽后的冷平流相对较弱，最大值为 -98

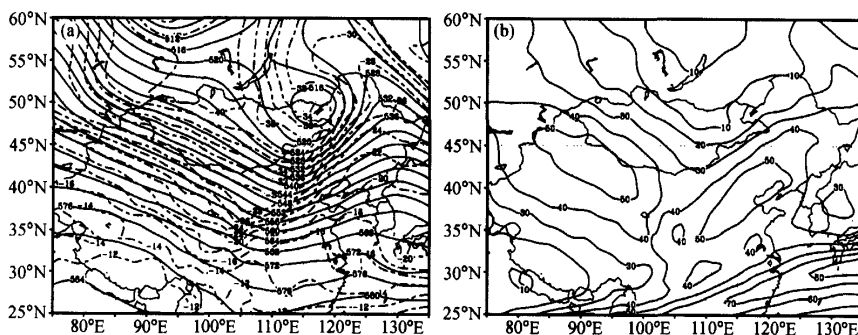


图 5 2002 年 3 月 20 日 14 时气象场

(a) 500 hPa 高度场（实线，单位：10 gpm）和温度场（虚线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）；(b) 200 hPa 等风速线（单位： m s^{-1} ）

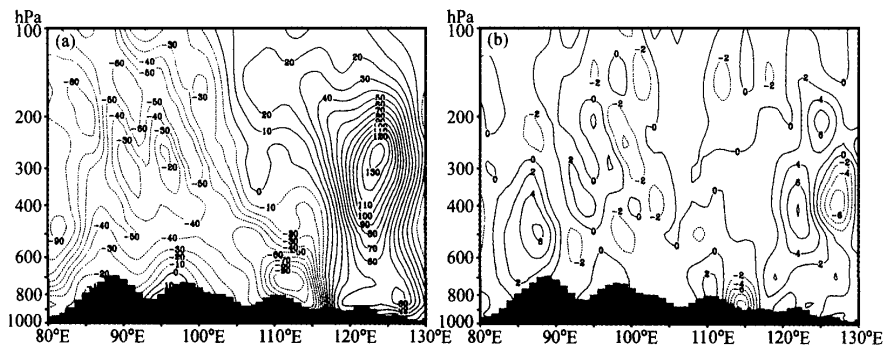


图 6 2002 年 3 月 20 日 14 时温度平流和涡度平流沿 45°N 东西向剖面

(a) 温度平流 (单位: K d^{-1}); (b) 涡度平流 (单位: 10^{-9} m s^{-2})

K d^{-1} , 与其他两种类型不太相同, 其主要集中在较低的层次中, 大约位于 700 hPa 高度上。冷平流中心随着高度增加位置西偏, 这与高空槽的西倾是一致的。高空冷暖平流的这种配置, 造成高空槽前的脊向北迅速伸展, 振幅加大, 脊线继续向西北—东南倾斜, 从而使槽后气流逐渐由西北转为偏西, 气旋冷锋后的大风沙尘从内蒙古中部逐渐移动到东北地区。与温度平流的作用相比, 正涡度平流主要集中在槽前 400 hPa 附近 (图 6b), 中心最大值为 $8 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-2}$; 负涡度平流大值中心位于 850 hPa 附近, 与地面冷高压相对应, 涡度平流的作用相对较弱。

6.2 中部型

此型强沙尘暴天气过程, 冷空气一般源自新地岛以东洋面, 经西北路径移至蒙古国中部, 高空槽发展加强并诱生为蒙古气旋。冷空气沿脊前西北气流侵入我国, 造成内蒙古西部和宁夏地区的大风和沙尘天气。

在 2000~2002 年春季引发强沙尘暴天气过程的蒙古气旋中, 属于中部型的有 4 次, 分别出现在 2000 年 4 月 18~19 日, 2000 年 4 月 27~28, 2000 年 5 月 10~11 日, 2001 年 4 月 8~10 日。以 2000 年 5 月 10~11 日强沙尘暴天气过程为例, 分析此型强沙尘暴天气过程的天气特征。

2000 年 5 月 9 日 20 时 500 hPa 高空图 (图略) 上, 极涡呈偶极型分布。东半球极涡中心比东部型略偏西, 位于北地群岛以南的洋面上。欧亚大陆为两槽一脊型, 西部槽位于欧洲中部, 东部槽位于中国大陆东部。两槽间为宽广的脊, 脊的径向度较小。蒙古气旋中心位于贝加尔湖以南, 中心最低气压为 998.2 hPa。10 日 20 时, 位于东半球的极涡中心向南扩散, 北支槽出现, 槽线位于贝加尔湖以西, 东亚大槽已东移到中国东部海区, 蒙古气旋中心缓慢南压, 中心最低气压下降为 996.2 hPa。在地面图上 (图略), 气旋冷锋移至蒙古国中部至新疆东部一线, 冷锋后有大片的正变压区, 24 h 变压达 +2.3 hPa。此时, 蒙古中部开始出现大风沙尘暴天气, 我国内蒙古西部也有两个测站出现了大风强沙尘暴天气。11 日 14 时, 气旋低压中心移至东北的东南部, 500 hPa 高空图 (图 7a) 上, 高空槽线位于河套东部。随着气旋冷锋的东移南压, 沙尘暴区影响到我国宁夏大部、陕西北部, 强沙尘暴天气过程影响范围达到最大。

在 200 hPa 等风速图(图 7b)上,南支急流位于我国华南沿海至日本南部,中心最大风速 50 m s^{-1} 。北支急流位于我国新疆西北部,东北地区是一个相对低值区。此型中蒙古气旋位于南支急流出口区左侧,气旋中心位置比东部型偏南。

分析引发强沙尘暴天气过程的蒙古气旋冷暖平流分布状况(图 8a)时发现,槽前的暖平流比东部型要弱得多,但槽后的冷平流比东部型要强,且更深厚,伸展到对流层上层。所在高度为 300 hPa 附近。对流层中高层的这种高度场和温压场分布有利于地面气旋的发展。在 2000 年 5 月 11 日 14 时涡度平流垂直剖面图(图 8b)上,槽前有正涡度平流中心,最大值为 $5\times 10^{-9}\text{ m s}^{-2}$,位于 300 hPa 附近;槽后有一个负涡度平流中心,最大值为 $-11\times 10^{-9}\text{ m s}^{-2}$,所在高度与正涡度平流相近。

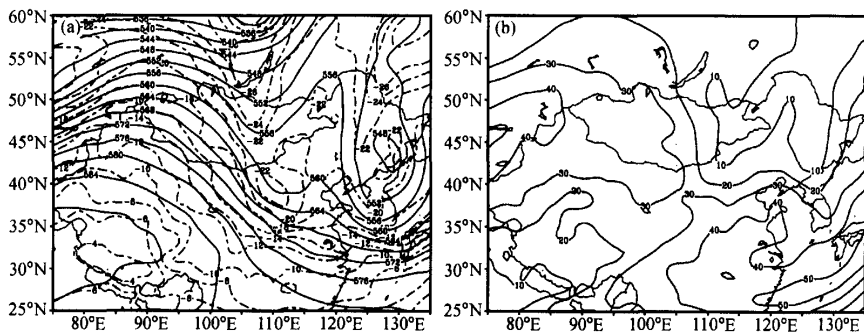


图 7 2000 年 5 月 11 日 14 时气象场
(a) 500 hPa 高度场(实线,单位:10 gpm)和温度场(虚线,单位:℃);(b) 200 hPa 等风速线(单位: m s^{-1})

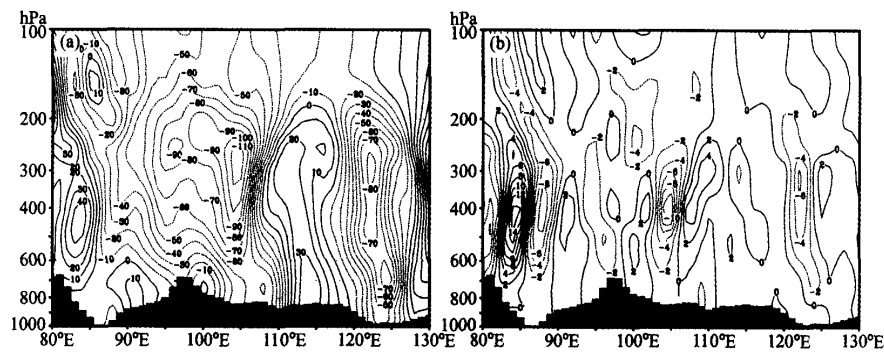


图 8 2000 年 5 月 11 日 14 时温度平流和涡度平流沿 45°N 东西向剖面
(a) 温度平流(单位: K d^{-1});(b) 涡度平流(单位: 10^{-9} m s^{-2})

6.3 西部型

造成此型沙尘暴天气的蒙古气旋位于蒙古国的西部。气旋冷锋后的冷空气从我国新疆北部向东南方向移动,在西北地区造成大风沙尘天气。

在 2000~2002 年春季引发强沙尘暴天气过程的蒙古气旋中,属于西部型的有 1

次,即 2000 年 4 月 12~13 日。

在 2000 年 4 月 12 日 08 时 500 hPa 高空图(图略)上,极涡呈偶极型分布,最强极涡中心位于新地岛以东,与东部型和中部型相比,此型的位置最为偏西。欧亚大陆为三槽两脊型,西部深槽位于波罗的海东部,东部深槽位于我国东北地区东部和山东半岛一线。中部横槽位于我国新疆北部,槽后为偏北气流。随着槽线的转向并向东南方向移动,冷空气不断向东南移动。地面冷锋位于新疆东部,未出现闭合的等值线。在 14 时 500 hPa 高空图上(图 9a),槽线已移到了新疆东部,此时,新疆西部已开始出现扬沙天气。17 时,地面冷锋移过青海西部,青海西部、中部和甘肃中部先后出现强沙尘暴天气,甘肃金昌还爆发了“黑风”。20 时,地面气旋中心已移至蒙古国西部,青海北部位于气旋冷锋后,有明显的+3 h 变压,最大值达+5.5 hPa,说明冷空气已侵入这一地区。

分析 2000 年 4 月 12 日 14 时 200 hPa 等风速图(图 9b)可见,沙尘暴期间,我国上空存在两个大风速区。南支急流位于长江流域,呈东西带状分布,中心最大风速约 70 m s^{-1} 。北支急流位于新疆西部,轴线呈南北走向,中心最大风速约 40 m s^{-1} 。蒙古气旋位于急流轴出口区的左侧,有利于对流层中下层锋区的加强,对强沙尘暴的发生有重要作用。

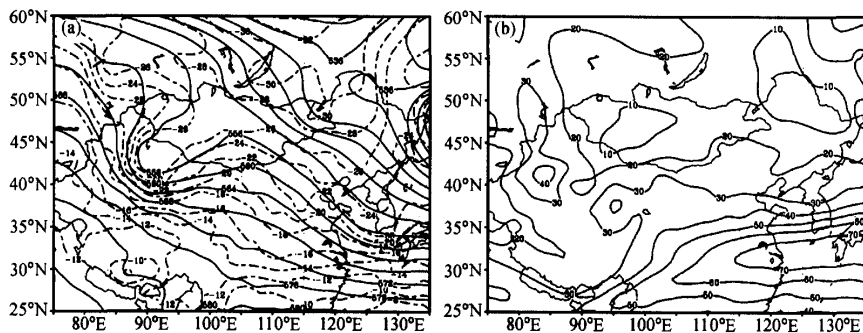


图 9 2000 年 4 月 12 日 14 时气象场

(a) 500 hPa 高度场(实线,单位:10 gpm)和温度场(虚线,单位:°C);(b) 200 hPa 等风速线(单位: m s^{-1})

在 2000 年 4 月 12 日 14 时温度平流剖面图(图 10a)上,槽后有很强的冷平流,中心最大值可达 -136 K d^{-1} ,高度位于 250 hPa,在 3 种类型中其强度最强,所在高度最高;槽前有较强暖平流,中心最大值为 $24 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-2}$ 。高度可达到 300 hPa,为 3 种类型中最弱者。分析此型蒙古气旋涡度平流的垂直分布(图 10b)可见,高空槽后的负涡度平流范围广,强度强,涡度平流的最大值为 $-16 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-2}$,出现在 300 hPa 附近;而槽前的正涡度平流较弱,反映在地面上气旋的强度相对较弱,出现大风强沙尘暴的范围相对较小。

7 结论和讨论

通过对近 3 年强沙尘暴天气气候特征的分析,可归纳如下:

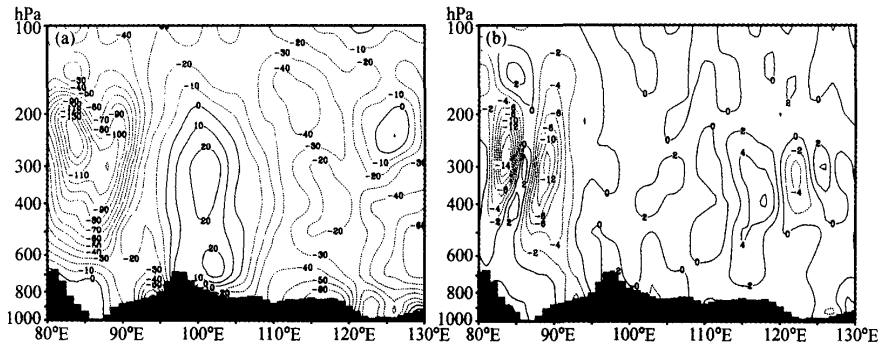


图 10 2000 年 4 月 12 日 14 时温度平流和涡度平流沿 45°N 东西向剖面

(a) 温度平流 (单位: K d^{-1}); (b) 涡度平流 (单位: 10^{-9} m s^{-2})

(1) 近年多蒙古气旋活动。在 2000~2002 年春季, 发生在我国北方的 12 次强沙尘暴天气过程中有 11 次与蒙古气旋的发展移动有关, 这与 20 世纪 90 年代早期, 尤其是 1993 年 5 月 5 日黑风暴的情况不同, 后者属于西北地区冷锋等系统所引发的过程。

(2) 前期下垫面特征及春季冷空气的活动。我国北方春季干旱少雨、气温偏高、地表干燥, 为强沙尘暴的发生提供了丰富的沙尘源。气旋冷锋后的大风是强沙尘暴天气发生的主要动力因子。北半球极涡多呈偶极型分布, 且极涡中心多偏向于东半球, 造成中国北方冷空气活动频繁。

(3) 影响华北的强沙尘暴天气的源地。从资料分析知, 近 3 年中强沙尘源地主要位于蒙古国南部的戈壁地区、新疆东部和青海西部的沙漠、内蒙古中部和西部的沙漠和沙地, 其中巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地是强沙尘暴过程的主要沙尘源地。

(4) 影响我国的强沙尘暴的沙尘路径。根据资料, 近 3 年中强沙尘暴的路径可分为偏西路径、西北路径、南疆盆地型 3 种类型, 其中西北路径最多, 而且影响范围相对最广。

(5) 近 3 年中强沙尘暴蒙古气旋结构的统计特征。引发强沙尘暴天气的蒙古气旋是一个比较深厚的系统, 最大强度位于 300~400 hPa, 气旋发展过程中温度平流作用显著, 温度场与高度场的不同配置, 决定了气旋的发展和移动方向。

(6) 蒙古气旋特征的复杂性和多样性。按照槽脊与低压的分布, 可将造成我国北方强沙尘暴天气的蒙古气旋归纳为西部型、中部型、东部型 3 种类型。它们分别出现了 7 次、4 次和 1 次。虽然, 它们均受冷暖平流的共同影响, 但其中以西部型的冷平流最强, 东部型的暖平流最强, 中部型的冷暖平流皆属于中等强度。2000~2002 年的强沙尘暴天气过程中, 以东部型最多且影响范围广, 持续时间长。而紧临高原的短波槽诱生的中部型和西部型, 其发展迅速, 预报时需密切注视。由此, 可以发现, 2000~2002 年中, 由于冷空气偏于我国中东部, 多引发蒙古气旋。而在蒙古气旋中, 又以东部型最盛。

应当指出, 引发我国强沙尘暴的天气系统是复杂、多样的。在 2000~2002 年主要

表现为蒙古气旋的发生发展,这尚未涉及引发我国西部地区沙尘暴的某些天气系统^[16]。因此,本文涉及的内容还不够广泛,今后应收集更多的资料,对其他类型的天气系统作更深入的研究。

致 谢 本文承蒙曾庆存院士给予热情的指导,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 石广玉、赵思雄,沙尘暴研究中的若干科学问题,大气科学,2003, **27** (4), 91~606.
- 2 吉野正敏,中国的沙漠化,北京:中国科学技术出版社,2002, 1~254.
- 3 卢琦、杨有林,全球沙尘暴警世录,北京:中国环境科学出版社,2001, 1~273.
- 4 周自江,近45年中国扬沙和沙尘暴天气,第四纪研究,2001, **21** (1), 9~17.
- 5 Brazel, A. J., and W. C. Nicking, The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona, *J. Climatol.*, 1986, **6** (3), 255~275.
- 6 江吉喜、项续康、王子厚等,以卫星云图资料为主的强沙尘暴超短期预报方法初探,中国沙尘暴研究,北京:气象出版社,1997, 98~102.
- 7 王式功、董光荣、陈惠忠等,沙尘暴研究的进展,中国沙漠,2000, **20** (4), 349~356.
- 8 李延香、高拴柱、周自江等,2001年沙尘暴天气气候特征,大气科学研究与应用,2002, **23**, 35~42.
- 9 赵琳娜、赵思雄,引发沙尘暴天气快速发展气旋的数值模拟研究,气候与环境研究,2004, **9** (1), 116~126.
- 10 赵琳娜、孙建华、赵思雄,一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究,气候与环境研究,2002, **7** (3), 279~294.
- 11 Yoshino, M., Kosa (Asia Dust) related to Asian Monsoon System, *Korean Journal of Atmospheric Science*, **5**, 93~100.
- 12 孙建华、赵琳娜、赵思雄,一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验,气候与环境研究,2003, **8** (2), 125~142.
- 13 施曙、赵思雄,梅雨锋上与强暴雨有关的中低压及其三维环境流场的诊断研究,大气科学,1994, **18** (4), 476~484.
- 14 Uccellini, L. W., On the role of upper tropospheric jet streaks and leeside cyclogenesis in the development of low-level jets in the Great Plains, *Mon. Wea. Rev.*, 1980, **108**, 1689~1696.
- 15 Keyser, D., and M. A. Shapiro, A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones, *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**, 42~499.
- 16 岳虎、王锡稳、李耀辉,甘肃强沙尘暴个例分析研究,北京:气象出版社,2003, 1~318.

Analysis of Climatological Characteristics of Severe Dust Storms in Recent Years in the Northern China

Zhang Gaoying, Zhao Sixiong and Sun Jianhua

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract During the spring (March~May) of 2000~2002, twelve severe dust storms occurred in the northern China. There are eleven among them related with Mongolian Cyclone. This study was conducted in the aspects, such as, dry climatic background, circulation conditions, possible sand-dust

sources, paths of sand transportation, and synoptic systems. The climate characteristics of the Mongolian Cyclone associated with severe dust storm has been diagnosed and analyzed. The results show that: In recent three years, the development of Mongolian Cyclones and the strong surface wind caused by the cold front induced the severe dust storm; The major sand-dust sources were in Gobi in South Mongolia, Badain Jaran Desert, Tengger Desert, Ulan Buh Desert and Mu Us Sandy Land; The paths of sand-dust that affecting the northern China can be divided into three types, at least: west, northwest, and southern Xinjiang basin. The northwest path is the majority; In the spring of 2000~2002, severe drought, higher temperature and active cold air over the northern China is the important climate background of formation and development the severe dust storm.

Key words: severe dust storm; Mongolian Cyclone; weather system