

# 东北低压大风天气的数值预报与模式诊断分析\*

张玉玲 仲雅琴

(北京大学地球物理系)(吉林省气象科学研究所)

东北低压是我国东北地区的主要天气系统,一年四季均可出现。但在春季出现最频繁,低压强度也最大,它所带来的天气经常是持续的强烈大风。根据1956—1980年的历史资料统计,四、五月份东北低涡出现大风(长春,四平和白城三站地面风速  $\geq 10$  米/秒)的机率可达60—80%<sup>[1]</sup>。本文对一次东北低压的发展及其大风天气进行了数值预报。为了解低压发展和风速加强的过程,又利用模式输出的结果分析了低压结构和动能平衡情况。

东北低压有不同来源,其中一部分是在蒙古产生的低压,它在东移过程中逐渐加深,到达东北后不但地面低压发展很深,在500—700毫巴高空也出现切断形势,此时东北地区产生大风天气。本文就是选取了一个这样的个例进行预报。由于有限区域模式的限制,做24小时以上的预报已无实际意义,所以选取了一个已经发展到一定程度的蒙古低压作为初始场,来预报它的进一步发展和出现的主要天气现象。

## 1. 东北低压个例

我们选取1976年5月23日08时的高度场作为初值。初始场上500毫巴低压槽位于 $105^{\circ}\text{E}$ ,锋区在槽的中后部。24小时后在贝加尔湖东南方发展成为中心为532位势什米的切断低压,锋区移至低压槽的南部边缘(图2d)。23日08时地面低压在蒙古东部,中心强度为992毫巴,24小时内低压在东北地区强烈发展,中心气压下降至979毫巴(图2c)。地面气旋暖区的西南大风最大达22米/秒,冷锋后的西北风也达18—20米/秒。对于所选个例进行了一次24小时预报。

## 2. 模式与预报结果

这次低压发展的主要天气现象是大风,没有产生降水,为了简单,模式也没有考虑水汽的作用。用有

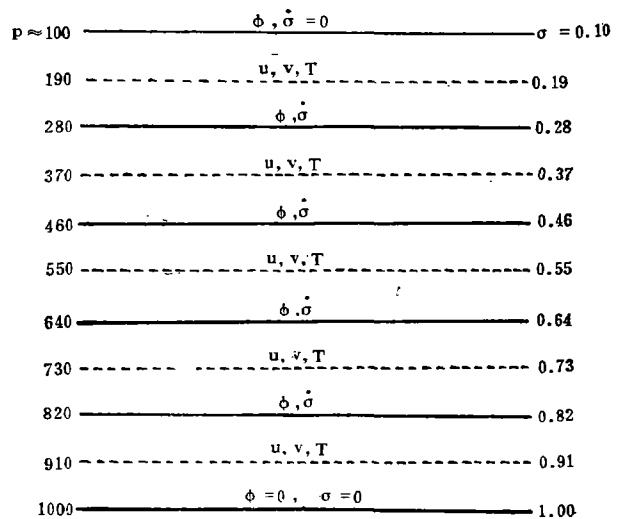


图1 模式分层及变量垂直分布

\* 本文于1983年6月23日收到,1983年12月23日收到修改稿。

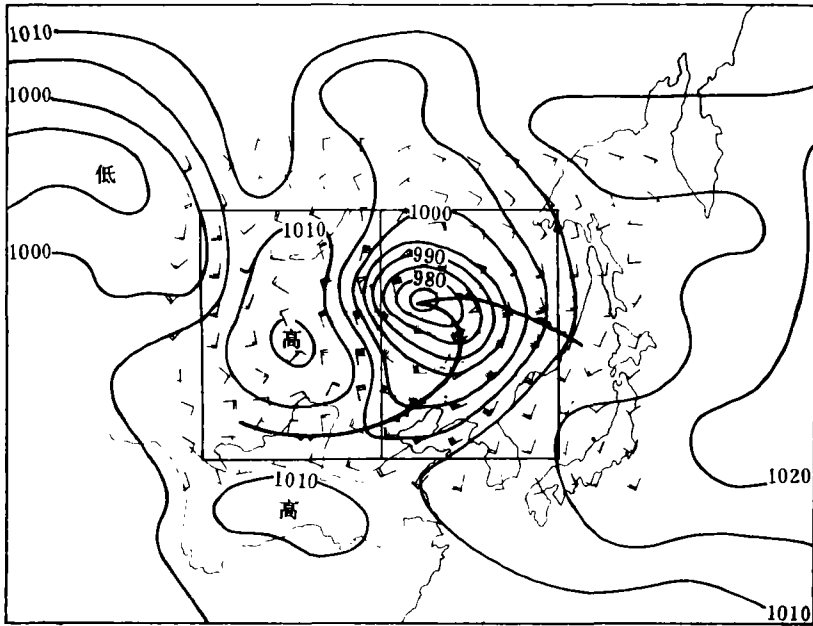


图 2a 1976年5月24日08时24小时地面预报图  
(方框为计算能量的区域,左为I区,右为II区)

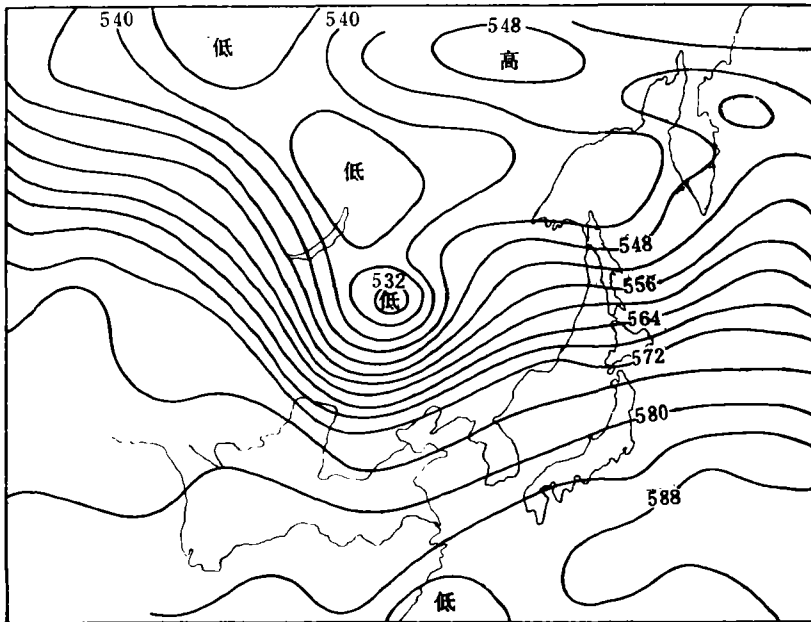


图 2b 1976年5月24日08时500毫巴24小时预报图

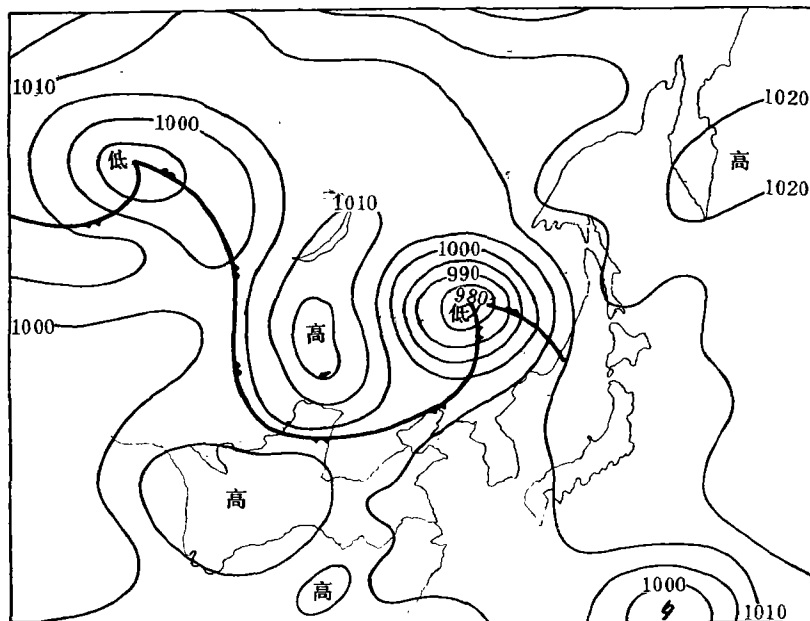


图 2c 1976 年 5 月 24 日 08 时地面实况图

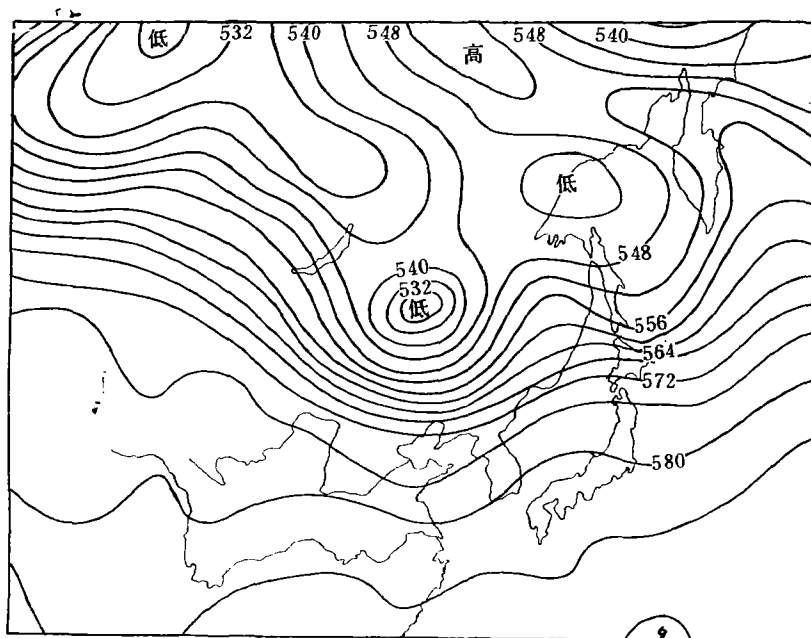


图 2d 1976 年 5 月 24 日 08 时 500 毫巴实况图

限区域五层原始方程干模式进行预报, 格距取 300 公里, 垂直分层和变量分布如图 1 所示。有关模式的详细介绍可见[2]。

总的来讲, 这次低压发展预报比较成功。图 2 为 500 毫巴及地面的预报和实况。高空槽加深并切断, 地面低压强烈发展, 暖区西南风加强和冷锋后的西北风加强等趋势都预报正确, 大风强度也和实况很接近。500 毫巴低压槽和实况强度一样, 但地面低压比实况约深 4 毫巴。由于预报系统移动速度偏慢, 地面低压中心位置比实况偏西一个格点(约 300 公里)。从整个预报结果来看, 系统的主要特征预报正确, 因此可以认为模式基本上能够描述这次东北低压的发展过程。

### 3. 速度场的演变

东北低压的发展与冷空气南下密切联系, 模式所预报的温度场变化和实况基本一致, 这里不多作讨论。我们更感兴趣的是大风天气的产生, 因此对速度场的演变作比较详细的分析。

水平风场变化的主要特征是高空槽前和与之对应的地面低压的暖区风速都迅速加强。槽后和地面冷锋后的风速虽然也有所增加, 但相对来讲不如槽前变化率大。初始阶段高空急流的最大风速中心在槽的中后部, 24 小时以后槽前也出现一个急流中心, 而且强度比槽后还大(图 3)。低层大风由一个强度为 15 米/秒的中心分裂为两个大于 20 米/秒的中心(图 4), 暖区是西南大风, 冷锋后为西北大风(图 2a)。为了更清楚地表示出高低空风场的联系, 我们给出沿图 3 折线 ABCD 的垂直剖面图。图 5 所画等值线为全风速线, 风的方向基本与垂直剖面平行。从每隔 6 小时一张的剖面图可以清楚地看出这个低压系统发展过程中高低空风速的变化情况。槽前部分高低空风速都迅速加强, 在  $\sigma=0.37$  高度( $p \approx 370$  毫巴), 最大风速由 30 米/秒(图 5(a)) 增加到 42 米/秒(图 5(d)), 而槽后的急流中心仅由 42 米/秒增加到 46 米/秒。积分 12 小时后 500 毫巴以下槽前风速已明显大

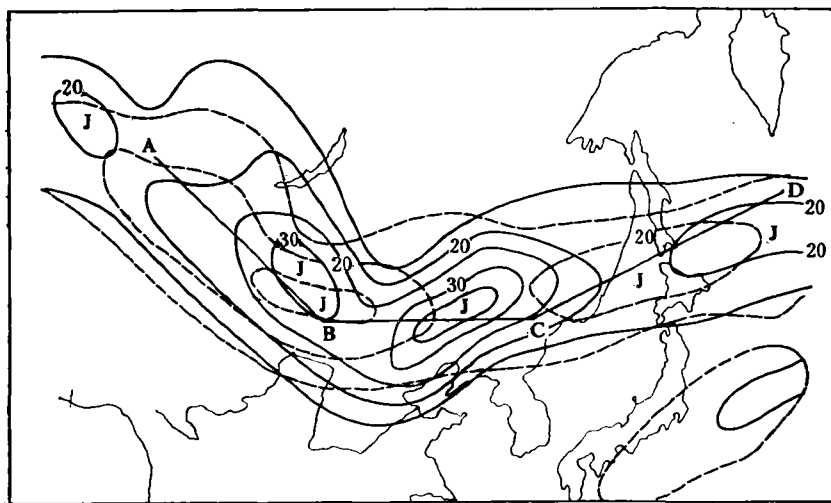


图 3  $\sigma=0.55$  层上全风速

(虚线为 6 小时预报, 实线为 24 小时预报, 单位为米/秒)

于槽后，到 24 小时大风区一直由高空延伸到地面。 $\sigma=0.19$  的两个风速高值分别与地面冷锋后的西北大风和暖区的西南大风相对应。大风区的垂直轴是向西北倾斜的。

垂直运动分布有明显的系统性，大体上是槽后冷空气下沉，槽前暖空气上升。但 24 小时内垂直运动正负中心在气压系统中的相对位置还是有变化的。图 6 为 6 小时和 24 小时的垂直速度( $\omega$ ) 分布。开始阶段上升运动区和下沉运动区东西并列，其中心在锋区上(图 6 a)。随后暖空气向北推进，冷空气南下，温度波振幅加大，垂直运动强度也加大。但在 18 小时以前垂直运动与温度波，从第 6 小时到第 18 小时下沉运动中心只向南移动一



图 4  $\sigma=0.91$  层上全风速(说明同图 3)

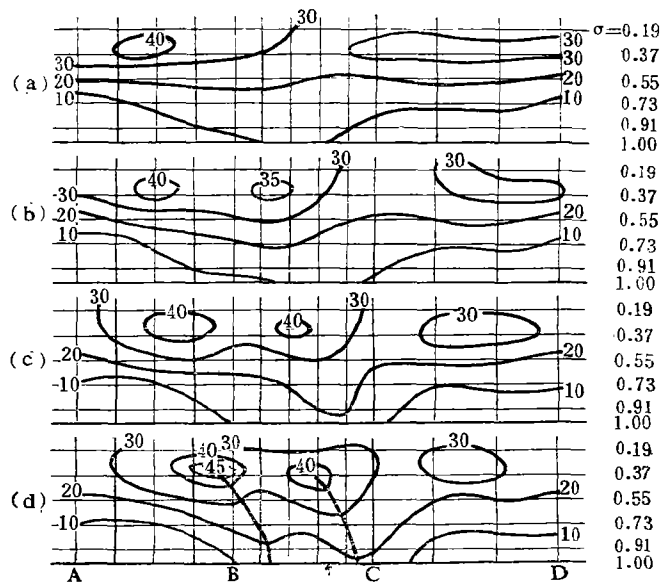


图 5 风速垂直剖面图

(细实线为垂直剖面上的网格，粗实线为等风速线。单位：米/秒。(a)，(b)，(c)，(d) 依次为 6 小时，12 小时，18 小时和 24 小时的预报图。(d) 图中粗断线为最大风速轴线，下方的箭头为地面冷锋所在位置。)



#### 4. 动能平衡

为了进一步弄清楚风速加强的能量来源, 用模式输出结果计算了这一段预报时间内的动能平衡。

由模式的运动方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\pi u}{m} \right) = -m \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\pi u}{m} u \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\pi v}{m} u \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\pi \dot{\sigma}}{m} u \right) + f \frac{\pi v}{m} - \pi \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{RT}{\pi} \frac{\partial \pi}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\pi v}{m} \right) = -m \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\pi u}{m} v \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\pi v}{m} v \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\pi \dot{\sigma}}{m} v \right) - f \frac{\pi u}{m} - \pi \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{RT}{\pi} \frac{\partial \pi}{\partial y} \right) \quad (2)$$

得到动能方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\pi}{m} k \right) = -\nabla \cdot \mathbf{V}k - \frac{\partial}{\partial \sigma} (Wk) - m \mathbf{V} \cdot (\nabla \phi + \frac{RT}{\pi} \nabla \pi) \quad (3)$$

其中  $\sigma = p/\pi$ ,  $\pi$  为地面气压,  $u, v$  为水平速度分量,  $\dot{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt}$ ,  $k = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$  为单位质量空气的动能。(3) 式中  $\mathbf{V} = \mathbf{V}(U, V)$ , 而

$$U = \frac{\pi u}{m}, \quad V = \frac{\pi v}{m}, \quad W = \frac{\pi \dot{\sigma}}{m}$$

在垂直边界条件

$$\left. \begin{aligned} \sigma = 0.1, \quad \dot{\sigma} = 0 \\ \sigma = 1.0, \quad \dot{\sigma} = 0 \end{aligned} \right\} (4)$$

下对(3)式作体积分  $\left[ \int_A (\quad) dA \right] \Delta \sigma$ , 且令

$$\begin{aligned} TK &= \frac{1}{A} \int_A \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\pi}{m} k \right) dA \Delta \sigma, \quad HD = -\frac{m}{A} \int_A \nabla \cdot (\mathbf{V}k) dA \Delta \sigma \\ VD &= -\frac{1}{A} \int_A \frac{\partial}{\partial \sigma} (Wk) dA \Delta \sigma, \quad GK = -\frac{m}{A} \int_A \mathbf{V} \cdot (\nabla \phi + \frac{RT}{\pi} \nabla \pi) dA \Delta \sigma \end{aligned}$$

则对于厚度为  $\Delta \sigma = 0.18$  的空气层, 动能方程可写成

$$TK = HD + VD + GK \quad (5)$$

式中  $A$  为所选区域的面积。

(5) 式左端  $TK$  为动能局地变化项, 右端  $HD$  为动能的水平散度,  $VD$  为动能的垂直散度,  $GK$  为动能产生项。将地面气旋及其后部的反气旋规定为所研究的系统, 在其周围选取一块  $3000 \times 2100$  (公里)<sup>2</sup> 的面积, 在该面积内计算动能方程(5)的各项, 并讨论全区内的平均动能平衡。又将该区域分为面积相等的两部分, 分别位于高空槽线的东西两侧, 大体上是一部分在地面低压范围内, 称为 II 区, 另一部分包含了低压后部的高压, 称为 I 区, 再分别计算两个区的动能平衡。以上计算都用 6 小时和 18 小时的结果进行平均, 作为这次预报期间的平均情况。

表 1 为全区模式大气空气柱的动能收支。可看出, 低压发展过程中空气柱的动能是增加的, 单位面积空气柱的平均增加率为 3.57 单位(单位为米<sup>2</sup>毫巴/秒<sup>3</sup>)。使动能增加的主要因子是动能的制造, 动能产生率为 2.93 单位, 是增加率的 82%。由于用了边界条件(4), 空气柱的动能垂直散度为零, 而动能的水平辐合为 0.64 单位, 也就是说, 这个系统与外界的动能交换只占动能增加量的 18%。因此系统发展的主要能量来源是斜压不稳定波的位能释放。

表 1 全区动能平衡

单位: 米<sup>2</sup>毫巴/秒<sup>3</sup>

项 目	<i>TK</i>	<i>HD</i>	<i>VD</i>	<i>GK</i>
$\sum$	3.57	0.64	0.00	2.92

注:  $\sum$  表示五层之总和

表 2 分区动能平衡

单位: 米<sup>2</sup>毫巴/秒<sup>3</sup>

项 目	<i>TK</i>		<i>HD</i>		<i>VD</i>		<i>GK</i>	
	I	II	I	II	I	II	I	II
0.19	-0.81	-0.66	-0.90	1.38	-0.04	0.02	0.13	-2.06
0.37	1.02	1.54	0.03	0.57	-1.11	0.80	2.10	0.17
0.55	1.38	1.16	-0.71	0.82	0.48	-0.30	1.61	0.64
0.73	0.52	0.85	-0.42	0.48	0.48	-0.28	0.46	0.65
0.91	0.64	1.49	-0.25	0.29	0.19	-0.24	0.70	1.44
$\sum$	2.75	4.38	-2.25	3.54	0	0	5.00	0.84

注: I 表示图 2a 中高压所在区域, II 表示低压所在区域

在系统内部究竟哪里是主要的动能产生区, 动能产生后又如何在系统内部重新分布, 为了弄清这个问题, 有必要分别计算 I 区和 II 区各层的动能收支。表 2 给出了两个区的动能平衡。可以看出, 动能的制造主要发生在槽后, 强度为 5.00 单位, 槽前只有 0.84 单位。相反, 动能的水平辐合对槽前区动能的增加却做出重要贡献。由于各层都有偏西风(地面除外), 且 I 区和 II 区的动能水平散度符号相反(-2.25 单位和 3.54 单位), 这在很大程度上反映了有动能自 I 区输送到 II 区。换句话说, 水平运动将把槽后区产生的一部分能量输送到槽前区。

由表 2 还看出, 动能产生有两个极大值。一个在槽后的高空( $\sigma=0.37$  和  $\sigma=0.55$ ), 这是因为初始阶段高空急流中心在槽的中后部, 这里不仅原来就有很大的动能, 风向偏向低压又可使动能迅速产生。另一极大值在槽前的低空( $\sigma=0.91$ ), 这里是低压所在地, 风向向中心辐合, 也有动能产生。

动能的垂直输送决定于垂直环流, 槽前向上输送, 槽后向下输送。因上升和下沉运动都在中层最大, 垂直输送作用使槽前  $\sigma=0.46$  以上动能辐合, 以下动能辐散, 槽后恰好相反。从剖面图上看, 槽前的大风似乎是由高层向低层扩展, 但实际上动能是自下而上输送的。



根据以上讨论,可以得到这样的能量平衡图象:高空槽后的急流中心所在地,不仅原来就储存着大量动能,而且还是主要的动能制造区。这里的动能向下游和低层输送,在低层积聚的动能又通过垂直运动在槽前向高层输送,使动能在槽前的高空集中,形成一个新的急流中心。对于这个中心的形成,动能局地产生的作用相对较小,而水平和垂直输送的作用却比较大。相反,低空大风的加强则主要是气压梯度力作功的效应,水平和垂直输送的作用几乎相互抵消。

## 5. 结 束 语

本文对东北低压的斜压不稳定发展阶段进行了数值预报,并通过模式输出分析了系统的结构,着重讨论了大风产生的机制。朱抱真<sup>[3]</sup>指出,东北低压前身的蒙古低压和西北低槽,其产生与春季下垫面的加热作用有关。显然,东北低压的发展前期和本文所讨论的这个阶段可能是在不同的决定性因子作用下产生的。由于模式的预报区域所限,未能从低压的发展前期开始做更长时间的预报和分析。但为了了解东北低压发展的整个过程,对蒙古低压的产生及下垫面的加热作用进行研究是很有必要的。

## 参 考 文 献

- [1] 郑秀雅,东北低压的天气气候分析,吉林气象,1,1—11,1982。
- [2] 北京大学数值预报协作组,一个用于降水预报的五层原始方程模式,第二次全国数值天气预报会议论文集,1980。
- [3] 朱抱真,从平流动力分析论我国东北低压的发展,气象学报,24, No.3, 157—187,1953。