一次大一暴雪过程的诊断分析

马振锋*
（内蒙古自治区气象台）

一、前　言

大一暴雪过程是内蒙古自治区冬春季节的主要天气过程，其来临时常伴有较强的大风和降温，对农、林、牧业生产，交通运输和人民生活等有重大影响。因此，较细致地分析这类天气过程，为做好预报提供依据，是一项有意义的工作。

1986年11月22—24日，内蒙古出现了大范围的降雪天气，其中在伊克昭盟、乌兰察布盟、锡林郭勒盟、赤峰市、哲里木盟和兴安盟产生了大范围的大一暴雪（见图1）。由图1清楚地看到，这次过程的降雪量有两个中心：一个在林东附近，降雪量达15mm；

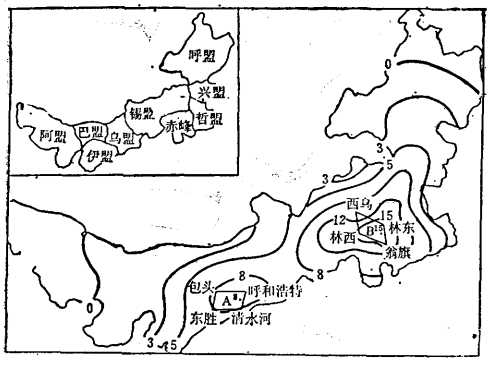


图1　1986年11月22—24日过程降雪量图
（单位：mm）

一个在呼和浩特市西南部，降雪量达8mm。分析6小时降雪量图（图略）可知，这次降雪集中在23日，并且有两片雪区自西向东移动，在赤峰市北部汇合。

二、大尺度环流形势背景及影响系统

过程发生前，欧亚上空500hPa环流形势发生了一次大的调整。最明显的是，原位于乌拉尔山地区的深厚低压被强大的暖高压取代，蒙古西部的弱高压被一从巴尔喀什湖到蒙古东部的低压带取代。亚洲上空准纬向锋区维持在42°N附近。受乌拉尔山高压脊前的偏北气流侵袭，其东南部切断低压中的冷空气迅速下沉，猛烈辐散，很快增温，气旋性涡度减弱，从而导致切断低压解体。冷空气主体在东移中并入贝加尔湖西南的低涡中，并于21日08时（北京时，下同）在蒙古西部和巴尔喀什湖南部形成一东北—西南向的横槽。21日20时槽横转竖，在蒙古形成一低压。与其对应，地面图上形成一锋面气旋（见图2）。

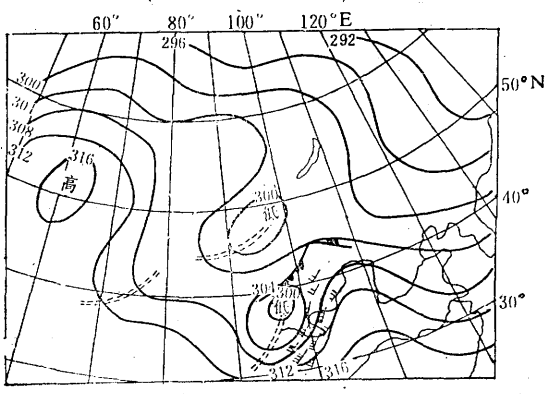


图2　1986年11月21日20时700hPa环流形势图
细实线为等高线，双虚线为槽线，锋系为地面冷暖锋，风矢为700hPa上的风

值得注意的是，在21日20时，与500hPa图上青藏高原东北部槽线相对应（图略），700hPa图上有一西北涡活动，涡前为一致的偏南风。该西北涡的东移北上，导致内蒙古发生了一次降雪过程。

总之，本次降雪过程虽是多个系统作用的产物，但东部的降雪与蒙古涡与西北涡相互作用有关；而西部偏南地区的降雪则与西北涡北上有关。

三、降雪成因分析

大量个例分析[1]表明，内蒙古大一暴雪形成的物理原因是：有较充沛的水汽来源以及中低层有较强的辐合上升运动。为了分析

---

* 成都气象学院实习学生赵红岩与胡冰参加了部份工作。

这次过程是否具备上述条件，我们计算了22—24日3天6个时次30—55°N、95—125°E（网格距240km）的500hPa涡度、散度、垂直速度，700hPa垂直速度、水汽通量、水汽通量散度以及$\theta_{e500}-\theta_{e850}$等物理量[1)]。此外还在两个最大降雪中心分别选取以呼和浩特市、清水河、东胜、包头和林东、翁旗、林西、西乌构成两个四点网格（即图1中的A区和B区），计算了涡度方程、散度方程及ω方程的各项在该两区域中的平均值。

上述计算结果，除表明本次过程同样具备降雪的物理条件外，还揭示了这些物理量场的变化与天气系统的移动有着密切的关系。

1.水汽条件

降雪前12小时，700hPa上由孟加拉湾经昆明、重庆、西安北伸至40°N附近的一支强西南风，在降雪期间逐渐北伸、东移（图略）。从降雪开始到结束的700hPa水汽通量及水汽通量散度分布图（图3、图4）可见，西南风速与水汽输送带是密切配合的：从22日20时到23日08时，水汽通量最大中心值由$5.4\times10^{-1}g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$增大到$6.5\times10^{-1}g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$，且中心由40°N以南东移北上伸展到40°N以北。此

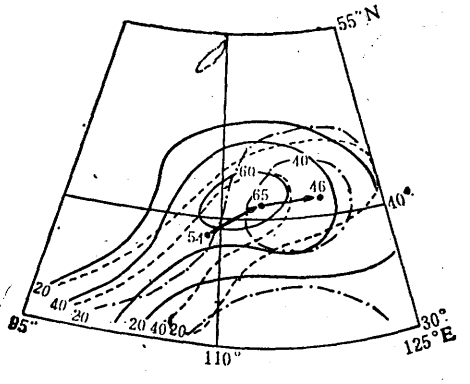


图3 700hPa水汽通量图
（单位：$g.cm^{-1}.hPa^{-1}\ s^{-1}$）
……1986年11月22日20时
——1986年11月23日08时
—·—·1986年11月23日20时

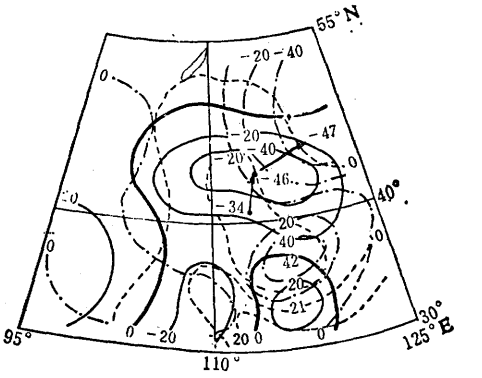


图4 700hPa水汽通量散度图
（单位：$10^{-8}g\cdot cm^{-2}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$，图例见图3）

时，水汽辐合也是增强的，最大值中心由$-3.4\times10^{-8}g\cdot cm^{-2}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$增大到$-4.6\times10^{-8}g\cdot cm^{-2}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$，并北伸东移。水汽通量中心及其辐合中心的移动与最大降雪区的移动是吻合的，可见，西南风的北伸东移为内蒙古大一暴雪的水汽输送起了重要作用。

2.垂直运动条件

由降雪开始到结束时的500hPa涡度场（图5）及700hPa垂直运动场（图6）的分布可知：22日20时两个正涡度中心分别对应于蒙古涡及西北涡，其中心最大值分别

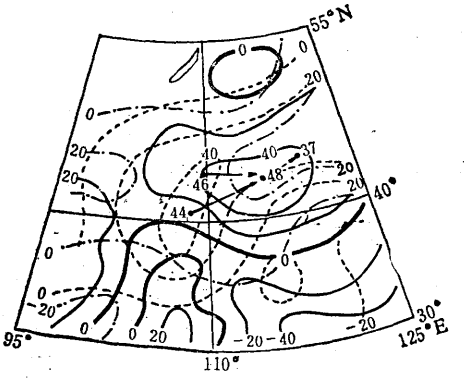


图5 500hPa涡度图
（单位：$10^{-6}\ s^{-1}$，图例见图3）

1） 计算模式见内蒙古气象局科技情报中心《科研报告》，1984年合订本。

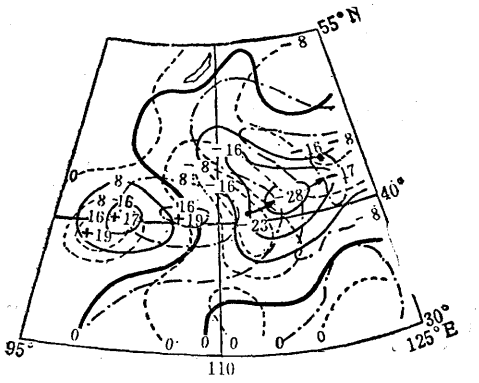


图 6　700hPa垂直速度图
（单位：10^{-4}hPa·s^{-1}；图例见图 3）

为 $46\times10^{-6}s^{-1}$ 和 $44\times10^{-6}s^{-1}$，到 23 日 08 时两个中心合为一体，中心值增大到 $48\times10^{-6}s^{-1}$，位于锡林郭勒盟东北部、赤峰市北部。与此同时，上升运动区达到最大值（28×10^{-4}hPa·s^{-1}），从而造成内蒙古东部大暴雪。

环流条件和影响系统结合起来分析可知，西北涡北上加剧了 42°N 附近锋区上的扰动，从而有利于蒙古涡强烈发展，造成强烈的辐合上升运动。

四、诊断分析

以上分析了水汽通量、水汽通量散度、涡度、垂直速度等的分布，下面进一步分析引起涡度、散度、垂直速度等物理量局地变化的主要原因。

为了分析引起涡度局地变化的原因，我们引入以下简化方程[2]：

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}=-\vec{V}\cdot\nabla\zeta-\beta v-fD \qquad (1)$$

上述方程表明，涡度局地变化主要取决于方程右端三项，即：涡度平流项 $-\vec{V}\cdot\nabla\zeta$，地球自转涡度平流项 $-\beta v$ 及散度项 $-fD$。由表 1、表 2 不难看出 A 区和 B 区的共同点是：在 500、700hPa 上，22 日 20 时到 23 日 08 时涡度的增长及 23 日 08 时到 23 日 20 时涡度的减小，散度项都起了决定作用。也就是辐合使涡度增加，辐散使涡度减小。而在 300hPa 上，A 区中 22 日 20 时到 23 日 08 时涡度的减小，和 B 区涡度的增加，涡度平流项 $-\vec{V}\cdot\nabla\zeta$ 都起了决定性的作用，并且从 22 日 20 时到 23 日 20 时涡度平流项 $-\vec{V}\cdot\nabla\zeta$ 都一直是正的。从表 1、表 2 还可以看出：

表 1　降雪过程中 A 区涡度方程右端各项计算的平均值（单位：$10^{-10}s^{-2}$）

层次	时：分	$-\vec{V}\cdot\nabla\zeta$	$-\beta v$	$-fD$	Σ
700hPa	22:20	−1.73	−1.13	9.80	6.94
	23:08	2.98	0.09	14.73	18.80
	23:20	−0.17	−0.01	0.19	0.01
500hPa	22:20	2.11	0.17	15.71	17.99
	23:08	3.10	1.14	16.76	21.00
	23:20	0.15	0.01	−4.13	−3.97
300hPa	22:20	9.81	2.07	13.43	25.31
	23:08	9.14	0.91	−8.91	1.14
	23:20	7.12	0.52	−9.18	−1.54

表 2　降雪过程中 B 区涡度方程右端各项计算平均值（单位：$10^{-10}s^{-2}$）

层次	时：分	$-\vec{V}\cdot\nabla\zeta$	$-\beta v$	$-fD$	Σ
700hPa	22:20	−2.11	−0.11	7.74	5.52
	23:08	4.15	1.96	15.63	21.74
	23:20	−0.59	−0.21	−4.18	−4.98
500hPa	22:20	−4.10	−0.98	14.11	9.03
	23:08	6.07	2.13	19.21	27.41
	23:20	−6.16	−1.40	−5.64	−13.20
300hPa	22:20	6.02	−1.89	16.48	20.60
	23:08	17.11	0.19	14.00	31.30
	23:20	9.76	−0.03	−19.23	−9.44

在 300hPa 上，23 日 08—20 时，A 区的涡度变化不大，而 B 区的涡度又有明显的减小，这与该时期内蒙古西部降雪结束，东部降雪增大是一致的。

下面再引入散度方程[3]：

$$\frac{\partial D}{\partial t}=-\vec{V}\cdot\nabla D-\omega\frac{\partial D}{\partial P}-D^2-\nabla\omega\cdot\frac{\partial\vec{V}}{\partial P}$$
$$+2J(u,v)-\beta u-[\nabla^2\phi-f\zeta] \qquad (2)$$

其中：$J(u,v)=\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial u}{\partial y}$为雅克比式，余为常用符号。

由散度方程右端各项的计算结果（表3、表4）可知：散度的局地变化在中低层主要取决于散度平方项$-D^2$与雅克比项$2J(u,v)$，而高层主要取决于散度平流项$-\vec{\nabla}\cdot\nabla D$。由表3、表4还可看出：在A区，从22日20时到23日08时，700hPa辐合加强，而500hPa、300hPa上由辐合转变为辐散，23日08—20时，几乎整层辐散。在B区，从22日20时到23日20时，700hPa、500hPa上辐合，而300hPa上辐散，高层辐散加强了低层辐合。

表3　降雪过程中A区散度方程右端各项计算的平均值（单位：$10^{-9}s^{-2}$）

层次	时：分	$-\vec{\nabla}\cdot\nabla D$	$-\omega\frac{\partial D}{\partial P}$	$-D^2$	$-\nabla\omega\cdot\frac{\partial\vec{\nabla}}{\partial P}$	$2J(u,v)$	βu	$-[\nabla^2\phi-f\zeta]$	Σ
700hPa	22:20	−0.19	0.01	−2.10	−0.01	1.17	−0.91	−0.01	−2.04
	23:08	−1.04	1.10	−1.74	−2.15	−2.17	1.05	0.91	−4.11
	23:20	−0.15	0.17	0.01	0.21	−0.31	0.01	1.07	1.01
500hPa	22:20	−0.22	−1.15	−3.11	1.11	1.91	−0.21	1.07	−0.60
	23:08	−0.07	2.11	−0.93	1.19	−0.09	0.04	0.71	2.96
	23:20	−0.26	0.61	0.23	0.44	−0.65	0.99	2.09	3.45
300hPa	22:20	−4.69	−2.10	−9.81	−0.07	−2.90	−0.15	2.10	−17.62
	23:08	7.12	1.96	−0.73	−2.18	−2.18	0.11	0.21	3.67
	23:20	9.98	1.05	2.15	−1.64	−0.95	0.21	0.97	11.77

表4　降雪过程中B区散度方程右端各项计算的平均值（单位：$10^{-9}s^{-2}$）

层　次	时　间	$\vec{\nabla}\cdot\nabla D$	$-\omega\frac{\partial D}{\partial P}$	$-D^2$	$-\nabla\omega\cdot\frac{\partial\vec{\nabla}}{\partial P}$	$2J(u,v)$	βu	$-[\nabla^2\phi-f\zeta]$	Σ
700hPa	22:20	−0.17	−0.06	−0.12	0.01	−0.91	−0.14	−0.21	−1.60
	23:08	−0.33	−1.12	−1.16	0.01	−1.53	−0.19	−0.71	−5.23
	23:20	−0.91	−0.07	−0.22	0.07	0.21	0.03	0.05	−0.63
500hPa	22:20	−0.09	0.01	−0.05	0.21	−0.61	−0.12	0.19	−0.46
	23:08	−1.93	−1.14	−1.73	−0.01	−2.16	−0.02	−0.93	−7.92
	23:20	1.21	−0.63	−0.25	−0.27	0.24	0.03	0.25	0.58
300hPa	22:20	4.93	2.10	−4.61	2.10	−1.19	−0.05	2.19	5.47
	23:08	4.19	−0.01	2.15	−2.96	−6.11	1.09	2.03	0.38
	23:20	6.97	−1.21	−0.11	2.11	3.43	−0.21	−0.19	10.79

为了分析垂直速度产生的原因，我们再引入ω方程[2]：

$$(\sigma\nabla^2+f^2\frac{\partial^2}{\partial P^2})\omega=-\frac{R}{P}\nabla^2(\vec{\nabla}\cdot\nabla\bar{T})+f\frac{\partial}{\partial P}[\vec{\nabla}\cdot\nabla(\zeta+f)]\qquad(3)$$

由表5、表6给出的ω方程右端各项贡献可知：从低层到高层，垂直运动大小主要取决于温度平流的拉普拉斯项$-\frac{R}{P}\nabla^2(-\vec{\nabla}\cdot\nabla\bar{T})$。事实上，雪区处于地面暖锋附近的槽前西南气流中，暖湿气流的强迫抬升作用加强了上升运动。

表5 降雪过程中A区ω方程右端各项计算的平均值（单位：$10^{-16}m \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$）

层 次	时：分	$-\frac{R}{P}\nabla^2(-\vec{V}\cdot\nabla\bar{T})$	$f\frac{\partial}{\partial P}[\vec{V}\cdot\nabla(\zeta+f)]$	Σ	
700hPa	22:20	1.21	0.29	1.50>0	上升
	23:08	-1.41	0.26	-1.15<0	下沉
	23:20	-1.21	-0.01	-1.22<0	下沉
500hPa	22:20	2.16	-0.27	1.89>0	上升
	23:08	-1.21	-0.71	-1.92<0	下沉
	23:20	-2.24	-0.21	-2.45<0	下沉
300hPa	22:20	5.16	2.19	7.35>0	上升
	23:08	3.16	-2.98	0.18>0	上升
	23:20	1.16	-2.19	-1.03<0	下沉

表6 降雪过程中B区ω方程右端各项计算的平均值（单位：$10^{-16}m \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$）

层 次	时 间	$-\frac{R}{P}\nabla^2(-\vec{V}\cdot\nabla\bar{T})$	$f\frac{\partial}{\partial P}[\vec{V}\cdot\nabla(\zeta+f)]$	Σ	
700hPa	22:20	-1.97	0.58	-1.39<0	下沉
	23:08	2.74	1.65	4.39>0	上升
	23:20	1.05	-0.09	0.06>0	上升
500hPa	22:20	-1.89	-0.93	-2.82<0	下沉
	23:08	3.98	4.61	8.59>0	上升
	23:20	2.74	1.65	4.39>0	上升
300hPa	22:20	2.61	1.96	4.57>0	上升
	23:08	8.93	5.16	14.09>0	上升
	23:20	1.21	-3.96	-2.75<0	下沉

五、结 语

1.这次大一暴雪是在特定的大尺度环流形势下产生的，构成本次过程的主要系统有乌拉尔山高压、蒙古低涡和700hPa上的西北涡。

2.700hPa上的强西南风速为这次大一暴雪区提供了充沛的水汽，同时有利于雪区上空暖平流加强，从而使雪区上空上升运动加强。

3.蒙古涡东移使得中层正涡度增强，而低层西北涡东移北上，使低层辐合气流通过上升运动向上输送，从而加剧了中层的辐合上升运动。

4.诊断分析表明：涡度的局地变化在中低层主要由散度项$-fD$决定，高层则由涡度平流项$-\vec{V}\cdot\nabla\zeta$决定；散度的局地变化在中低层主要由散度平方项$-D^2$及雅克比项$2J(u、v)$决定，高层主要由散度平流项决定；而上升运动的产生主要取决于温度平流的拉普拉斯项$-\frac{R}{P}\nabla^2(-\vec{V}\cdot\nabla\bar{T})$。

5.该次过程的大雪落区位于700hPa西南风速轴左前方的水汽辐合区、上升运动区与正涡度区的叠加区。

在本文撰写过程中，刘景涛同志给予了指导和帮助，在此表示感谢。

参考文献

〔1〕王炯等，内蒙古自治区天气预报手册(上册)，气象出版社，1987。

〔2〕朱乾根等，天气学原理和方法，气象出版社，1981年。

〔3〕G.J.哈廷讷，数值天气预报，科学出版社，1975。