

寒潮冷堆增强的动力原因*

陆光明 姚竞生

(北京农业大学农业气象系)

陶祖钰**

(北京大学地球物理系)

提 要

本文利用动力学诊断方法分析了1979年11月一次东亚寒潮过程,证明500毫巴冷中心在南移过程中不断增强是由于寒潮冷空气堆中存在上升运动使空气绝热膨胀冷却所致。文中还从动力学观点解释了寒潮过程中垂直反环流的成因。指出对流层高层(300毫巴)急流核上游(入口区)和下游(出口区)存在相反的铅直环流,上游为正环流,下游为反环流。急流核两侧存在强大的正负切变涡度平流是使急流核上、下游存在性质相反的铅直环流的原因。文中近似计算了这次寒潮过程中槽后偏北急流核两侧空气的12小时二维轨迹,证明槽后偏北急流核左侧强大的正切变涡度中心及其相应的下游正涡度平流引起了寒潮冷空气堆上空质量辐散。因此在寒潮分析和预报时应注意围绕西风槽的急流分布的不均匀性,特别是300毫巴槽后偏北急流中急流核的存在及其活动对预报寒潮冷空气堆的增强是十分重要的。

一、引 言

东亚寒潮过程中一个常见的现象是500毫巴冷中心的温度在南移过程中不断降低。在冬季,500毫巴冷中心在高纬时,其最低温度只有 -40 — -44°C 左右,当它向南移到 60°N 以南时,其最低温度可降到 -50°C 以下,导致强冷空气侵袭我国。

关于高空冷中心温度下降的原因存在不同的看法。一种观点是强调辐射冷却的作用^[1],认为“西伯利亚上空维持一高空冷槽时,就在这冷槽位置上积聚着一堆冷空气,这堆冷空气受着辐射冷却的作用,一天比一天变冷”。但按经典的气团学说,在冷气团源地,低层为辐射散流场,下垫面的辐射冷却和下沉运动将在低层形成很强的逆温层,使辐射冷却效果难以传递到中高层。

另一种看法强调绝热过程的作用。谢义炳(1949)^[2]在对北美切断低压的研究中指出按照等熵面高度的变化,可以推断切断的冷空气堆温度的降低是由于冷堆中心存在上升运动所引起的绝热膨胀所致。Riehl(1953)^[3]从连续几个时刻等熵面的抬高及冷空气中温度层结近于干绝热递减率指出冷堆中空气是上升的。

因此要弄清楚冷堆温度降低的原因,首先必须弄清楚冷堆中是上升运动还是下沉运

* 本文于1982年4月2日收到,1982年8月4日收到修改稿。

** 本文由陶祖钰执笔,郑曼曼、王虹参加资料工作。

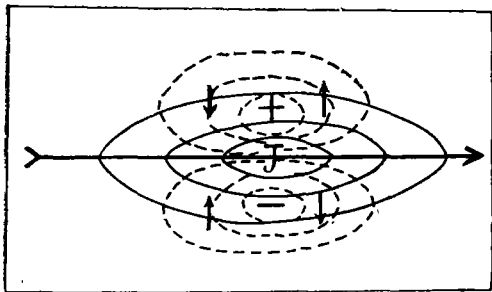


图 1 高空急流核四周的涡度场
(虚线)和由于涡度平流引起的中
层垂直运动分布(短矢线)
(图中实线为等风速线)

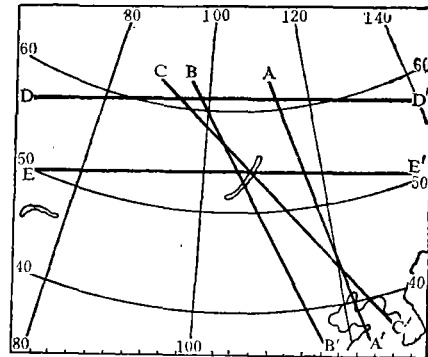


图 2 诊断分析计算范围
(下方竖线给出格距 (200 公里),
图中 AA', BB', CC', DD', EE' 为
剖面基线。)

动。Palmen 和 Newton(1951)^[4]及仇永炎(1957)^[5]通过对强冷空气活动个例的等熵面分析得到了冷空气下沉并扇形散开的事实,不同于谢义炳及 Riehl 的工作。

关于垂直环流的方向, Rossby 和 Namias (1947)^[6-7]同时指出它是和急流有关的,在急流的入口区存在正环流,出口区为反环流。此观点应作为分析垂直环流的指导思想。但在其后的一些研究中,由于没有把急流入口区和出口区加以区别以及由于垂直速度计算方法中存在的问题,因此对冷空气活动过程中的垂直环流状况得到了不相一致的结论。

按 ω 方程

$$\left(\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2}\right)\omega = \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \left[\vec{V}_e \cdot \nabla \left(\frac{1}{f_0} \nabla^2 \phi + f \right) \right] + \frac{1}{\sigma} \nabla^2 \left[\vec{V}_e \cdot \nabla \left(-\frac{\partial \phi}{\partial p} \right) \right]$$

如果以 500 毫巴等压面把大气分成上、下两层,则 500 毫巴的垂直速度取决于上、下两层涡度平流的差和 500 毫巴的温度平流分布。单就涡度平流而言,由于低层的涡度平流的绝对值小,因此可简化为 500 毫巴的垂直速度决定于高层的涡度平流,当高层(如 300 毫巴)有正涡度平流时,可引起 500 毫巴的上升运动($\omega = \frac{dp}{dt} < 0$),负涡度平流时为下沉运动。

当高空存在一支平直急流的情况下,由于急流核的左右两侧分别存在一个正负涡度中心,因此在急流的入口区和出口区应存在和两对正、负涡度平流区相配合的两对上升和下沉运动区(见图 1),它和 Rossby 及 Namias 的结论是一致的。

在寒潮爆发前,冷槽西侧往往存在很强的偏北急流,因此寒潮冷堆的增强可能与槽后急流出口区的反环流有关。本文的目的就是试图用近年来得到广泛应用的动力学诊断方法来分析冷堆中的垂直运动情况及其产生的原因。具体计算了 1979 年 11 月 9 日到 13 日寒潮过程中每隔 12 小时的垂直速度等物理量,计算方法采用了士晟、谢安的 7701 动力分析方案,水平格距为 200 公里,计算垂直速度采用修正的运动学方法,垂直格距为 100 毫巴。计算范围如图 2 所示,格点数为 24×20 。

二、寒潮过程简况

1979年11月9日到13日寒潮天气过程的特点是降温剧烈，过程降温（日平均气温）华北地区达20°C左右，东北地区达25°C以上，降温持续时间长达五天，因此对生产的影响较大，仅北京市就有上亿斤大白菜被冻坏，经济损失达五百万元^[8]。

这次寒潮是由500毫巴西伯利亚东部一个强大的冷性低压南下造成的。此低压中的冷中心从65°N附近南移到50°N，中心温度从-43.9°C降低到-55.7°C（见图3）。这次寒潮过程降温如此剧烈是和500毫巴冷中心的增强密切相关，本文的目的就是分析此冷中心温度下降的原因。

这次过程中冷空气分两次影响我国。第一股冷空气与低压南部的槽相联系，从图3可见10日20时它的前锋已将移出我国。第二股冷空气和低压西部的横槽相联

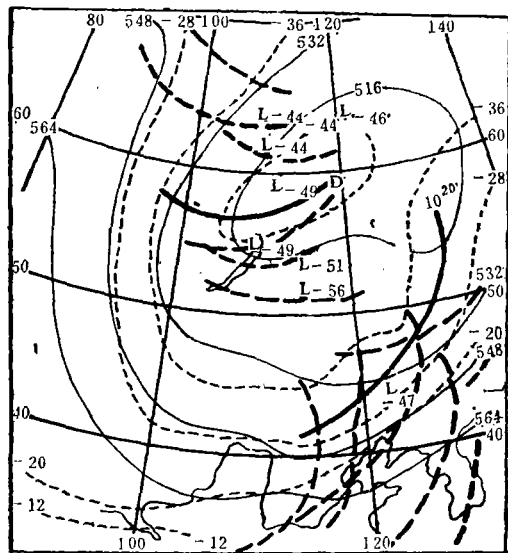


图3 1979年11月10日20时500毫巴图
(图中给出冷中心的动态，右下角为最低温度数值，粗虚线为槽线的动态)



a 9日08时—10日08时 b 10日08时—11日08时 c 11日08时—12日08时
图4 1979年11月9日08到12日08时的每24小时日平均温度变化

系，它取偏北路径影响我国。从地面日平均温度的24小时变温图(图4)上可以清楚地看出这两股冷空气的活动。

三、寒潮冷堆中的垂直运动状况

1. 等压面上 ω 场和温度场的配置

图5给出10日、11日两天08时的500毫巴温度场和 ω 分布。在10日08时，冷空气堆中既有上升运动也有下沉运动。下沉运动主要在地面冷锋和500毫巴锋区之间及60°N以北的-44°C冷中心附近。上升运动位于500毫巴锋区以北的冷空气堆南半部。11日08时冷中心已南下到贝加尔湖并与上升运动中心几乎重合，冷中心的温度也由-44°C

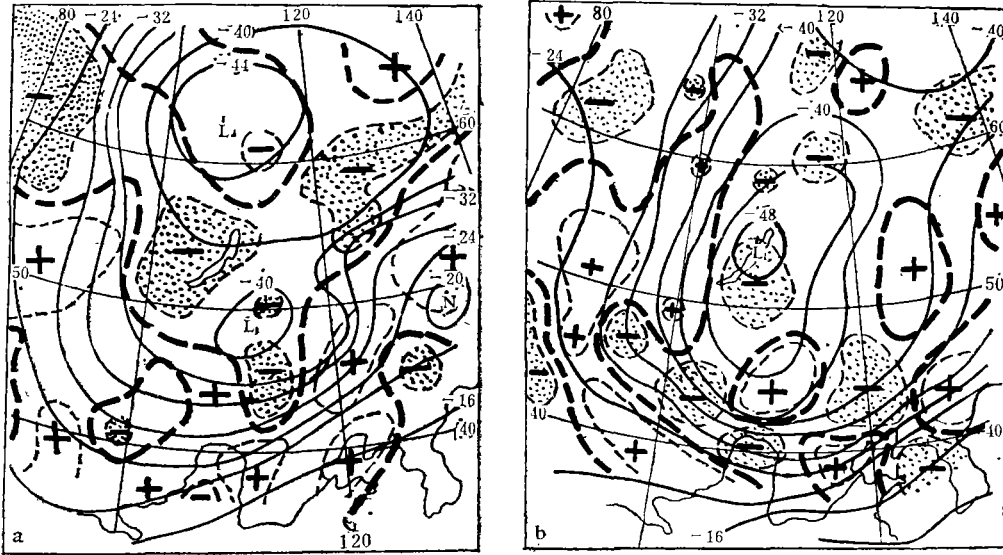


图 5 500 毫巴温度场(实线)和垂直运动分布(虚线为 $\omega = \pm 20 \times 10^{-4}$ 毫巴/秒)

(a 为 1979 年 11 月 10 日 08 时, b 为 11 日 08 时。上升速度超过 -20×10^{-4} 毫巴/秒的区域用阴影区表示,粗虚线为垂直运动零线。)

降为 -49°C 。从 9 日 08 时到 12 日 08 时各时次冷中心温度及其附近四个网格点的平均垂直速度可以看到(见表 1), 9 日 08 时到 10 日 08 时, 冷中心温度维持在 -44°C 附近, 冷中心附近为下沉运动或微弱的上升运动。10 日 20 时后, 冷中心温度逐日降低, 其垂直运动也由下沉转为上升。这一事实表明冷堆的加强是和上升运动造成的绝热冷却相联系的。

表 1 1979 年 11 月 9 日到 12 日 500 毫巴冷中心温度及其附近四个网格点上的平均垂直速度

时 间	9日08时	9日20时	10日08时	10日20时	11日08时	11日20时	12日08时
500毫巴冷中心 温度($^{\circ}\text{C}$)	-43.9	-45.9	-44.3	-49.5	-48.9	-50.5	-55.7
垂直速度 (10^{-4} 毫巴/秒)	-6	1	13	-4	-27	-30	-30

2. 剖面图上的垂直环流

图 6 给出 10 日到 12 日与锋区正交的西北、东南向垂直剖面图。10 日 08 时与第一股冷空气相对应的锋区 I 附近均为下沉运动。与第二股冷空气相对应的锋区 II 较弱, 为较弱的上升运动, 其北面 60°N 附近的冷中心处为下沉运动控制, 同时在 900 毫巴附近有很强的逆温层, 使地面的冷却作用难以影响到对流层中层。到 11 日 08 时, 锋区 II 已显著南下, 并靠近锋区 I, 两条锋区上均为相当强的下沉运动, 而锋区 II 北面的冷堆中已由前一日下沉运动转为强大的上升运动, 900 毫巴附近的逆温层已不复存在。从等温线

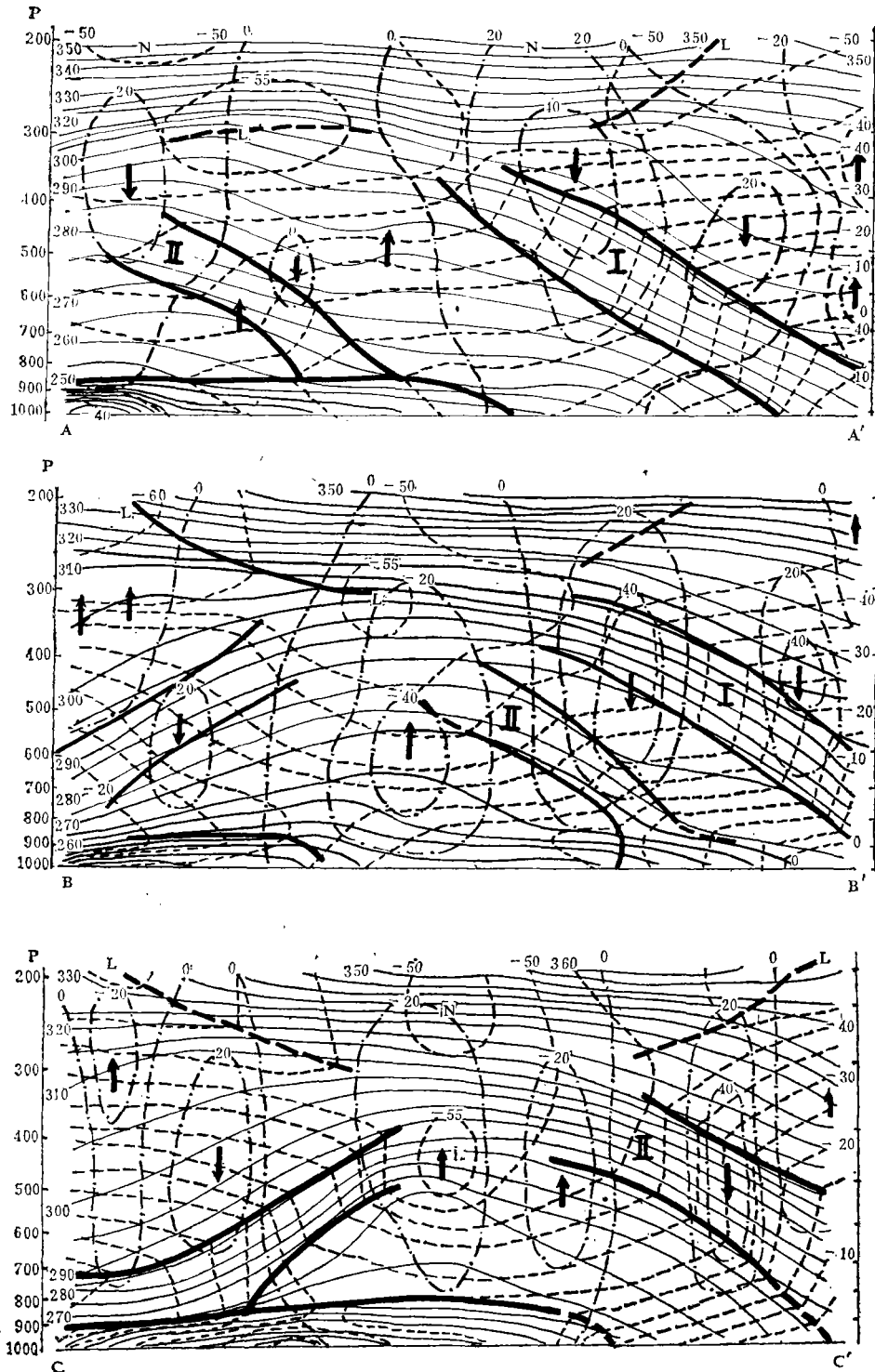


图 6 1979 年 11 月 10 日 08 时(a), 11 日 08 时(b), 12 日 08 时(c)的垂直剖面图

(粗实线为锋面及逆温层, 细实线为 θ_{se} 线, 虚线为等温线, 点划线为等 ω 线(间隔为 20×10^{-4} 毫巴/秒), 箭头表示上升或下沉运动中心。剖面基线位置在图 2 中给出。)

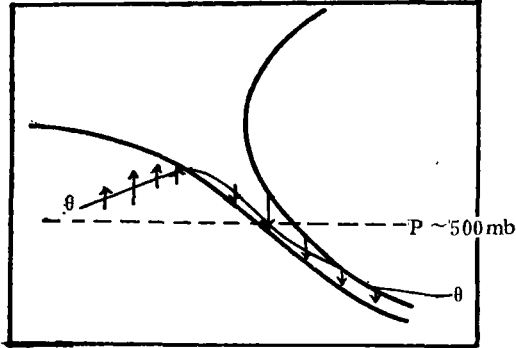


图7 穿过锋面的等熵面 θ 上的垂直速度分布的剖面示意图
(垂直速度大小由矢线的长短表示,粗实线代表锋界,(本图取自Staley 1960))

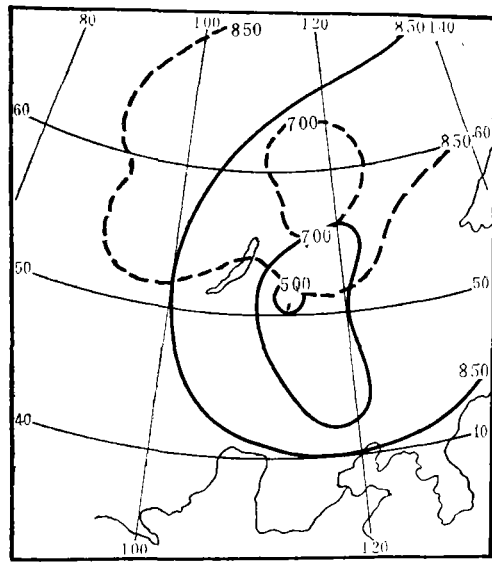


图8 265°K等熵面高度的变化
(虚线为10日08时,实线为11日08时,图中仅给出265°K等熵面和850,700,500毫巴等压面的交线)

的特征可以看出11日08时冷堆比10日08时增强。上述变化在12日08时的剖面图上仍然存在,并且冷堆变得更强,500毫巴出现-55°C以下的冷中心,它与上升运动中心重合在一起。Staley (1960)^[9]用等熵面轨迹分析及绝热法计算垂直速度所得的冷空气中垂直运动分布示意图和上述实况十分相似,即冷空气的前沿为下沉运动,在离锋面较远的冷空气中为上升运动,见图7。

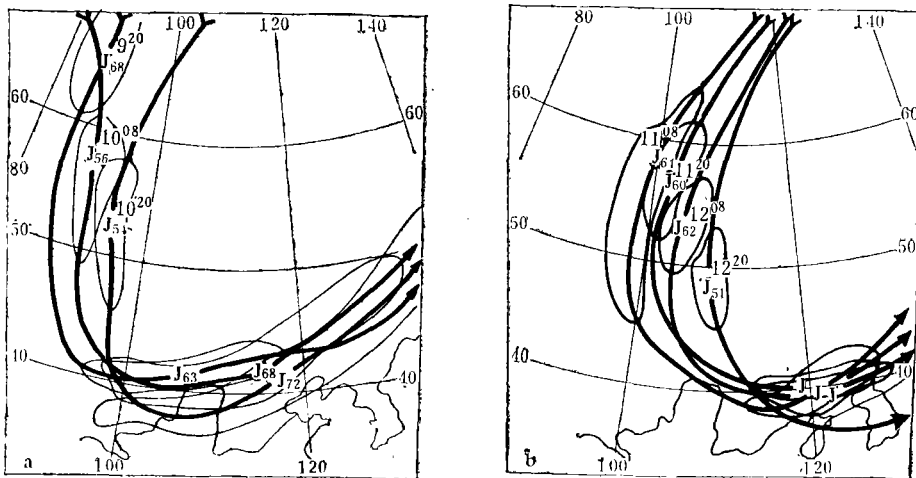


图9 300毫巴槽后急流核南移的动态
(a 1979年11月9日20时到10日20时, b 1979年11月11日08时到12日20时
矢线为急流轴,细实线为50米/秒的等风速线,急流中心(J)下方数字为最大风速值。)

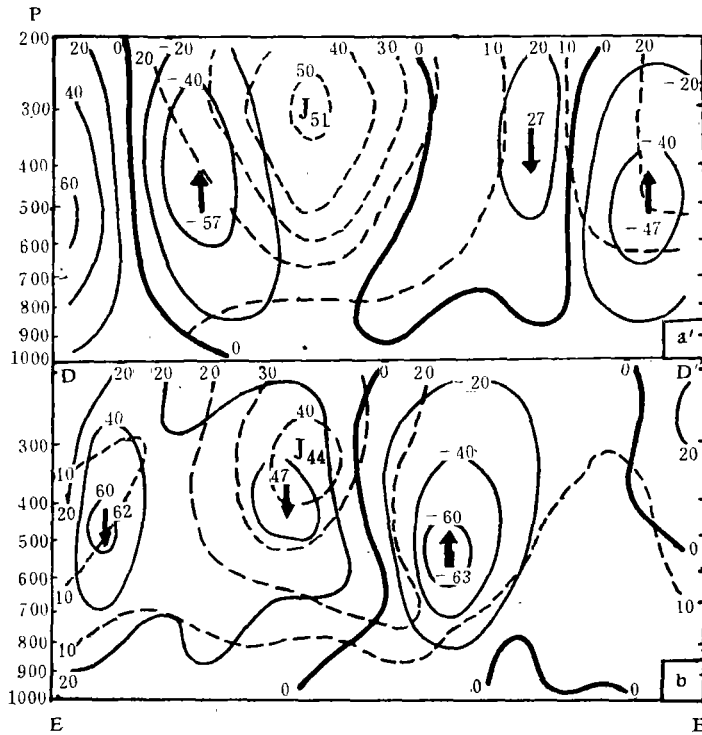


图 10 1979 年 11 月 10 日 08 时与 300 毫巴槽后偏北急流轴相垂直的纬向剖面图

(a 急流核的上游, b 下游。

虚线为等风速线, 间隔 10 米/秒, 实线等 ω 线, 间隔 20×10^{-4} 毫巴/秒。剖面基线 DD' , EE' 的位置见图 2。)

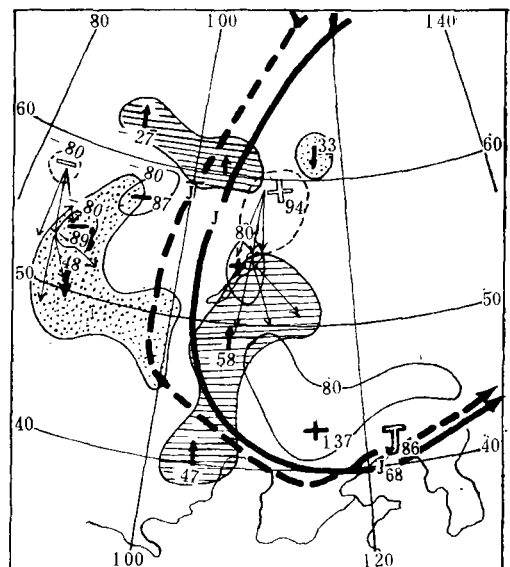


图 11 1979 年 11 月 11 日 20 时 300 毫巴槽后急流核两侧正负涡度中心处气块的 12 小时水平轨迹

(细实线为 $\pm 80 \times 10^{-8} \text{秒}^{-1}$ 的等涡度线, 线阴区和点阴区为急流核下方 500 毫巴的上升和下沉运动中心 ($|\omega| > 20 \times 10^{-4}$ 毫巴/秒), 细实线为气块的轨迹。图中还给出前 12 小时的 300 毫巴急流轴 (虚长矢线) 和急流核二侧的正负涡度中心 (细虚线))

3. 等熵面高度的变化

冷堆中的上升运动也可以从等熵面的升高得到印证。图 8 给出 10 日 08 时和 11 日 08 时的 265°K 等熵面的高度,从图中可以看到 265°K 等熵面的顶部从 700 毫巴左右上升到 500 毫巴以上,说明由于上升运动,冷堆在南移过程中变得越来越厚。

四、300 毫巴急流对冷堆增强的动力作用

1. 300 毫巴槽后急流核的活动

在这次寒潮过程中,槽后有一支强偏北风急流,其上有两个急流核有规律地自北向南移动,见图 9。第一个急流核南移到 50°N 附近,冷中心温度由 -44°C 降低到 -50°C 左右,第二个急流核南移时冷中心温度进一步降到 -56°C,这一事实说明,两次急流核的活动是与冷堆的两次加强相呼应的。

2. 急流核所伴随的垂直环流

引言中提到的急流核上、下游的一对正、反垂直环流在我们实例计算的剖面图上表现得相当清楚。图 10 仅给出 10 日 08 时与槽后急流轴相垂直的急流核上游和下游的剖面图。很明显,两个剖面图上的垂直环流方向是相反的,在急流核上游,东侧(冷区)为下沉运动,西侧(暖区)为上升运动,故围绕急流为一正环流;在急流核下游恰好相反,为一反环流,它使东侧的冷堆上升绝热冷却。

3. 寒潮冷堆加强的动力原因

300 毫巴槽后偏北急流对冷堆加强的动力作用可以用适合于天气尺度运动的简化涡度方程

$$\frac{d(\xi+f)}{dt} = -fD$$

或

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \xi + \beta v = -fD$$

来解释,其中 $D = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y$ 为水平散度。从上两式可以看到散度的符号和涡度的个别变化 ($d\xi/dt$) 的符号相反,和涡度的平流变化 ($-\mathbf{V} \cdot \nabla \xi$) 符号相同。在上升运动区的高层应有水平辐散,因此必须相应有个别涡度减小和正涡度平流¹⁾。

我们使用和 Petterssen^[10]类似的方法计算了 300 毫巴急流核两侧正负涡度中心处气块的 12 小时水平轨迹。计算中假定间隔为 12 小时的 300 毫巴流场分别代表观测时刻前后各 6 小时内的平均流场,根据相邻时次的 300 毫巴实测风求出前 6 小时和后 6 小时的气块轨迹作为近似的 12 小时水平轨迹。然后求出该气块移动 12 小时所造成的涡度平流变化及气块自身在 12 小时中的涡度个别变化来说明槽后偏北急流核对冷堆加强的动力作用。图 11 仅给出 11 日 20 时的 300 毫巴急流轴和相应的涡度场,图中还给出与槽后偏北急流相配合的 500 毫巴的两对垂直运动中心。从图中可以看到槽后急流核两侧确实存

1) 这里仅考虑了相对涡度 ξ 。如考虑牵连涡度 f ,则在偏北急流中,空气向南运动将造成正的牵连涡度平流 ($-\beta v > 0$),它一方面造成高空辐散,同时使气块的牵连涡度减小。在后面的表 2 中可以看到,上升运动区上空的涡度平流变化和个别变化的绝对值都较下沉运动区上空的小,就是由于实际上牵连涡度的平流对冷堆上空的辐散也有贡献。

表 2 1979 年 11 月 9 日 08 时到 11 日 20 时五个时段 300 毫巴急流核两侧正、负涡度中心处气块所造成的 12 小时涡度平流变化和气块自身涡度的个别变化, 以及相应的 500 毫巴垂直速度

	涡度中心值 (10^{-6} 秒 $^{-1}$) A	气块未来终点 处的涡度 (10^{-6} 秒 $^{-1}$) B	12小时后		12小时中	
			气块的涡度 (10^{-6} 秒 $^{-1}$) C	气块下方 500 毫巴 ω (10^{-4} 毫巴秒 $^{-1}$)	涡度平流变化 A-B	涡度个别变化 C-A
左侧	89.2	45.0	66.6	-25.2	44.2	-22.6
右侧	-78.0	-46.0	-22.6	35.2	-73.4	55.4

在一对强大的正负涡度中心, 其绝对值都在 80×10^{-6} 秒 $^{-1}$ 以上。图中矢线为前一时次涡度中心处气块在 12 小时内的水平轨迹(每一段矢线代表 6 小时的行径)。可以看到急流核左侧正涡度中心处的气块, 12 小时后到达 500 毫巴上升运动区的上空, 右侧负涡度中心处的气块到达下沉运动区上空。从表 2 给出 9 日 20 时到 11 日 20 时五个时段槽后急流核两侧正负涡度中心处气块运动造成的 12 小时涡度平流变化及气块自身的涡度个别变化可以看到急流核左(右)侧的正(负)涡度中心可造成下游正(负)涡度平流平均为每 12 小时 44.2×10^{-6} 秒 $^{-1}$ (-73.4×10^{-6} 秒 $^{-1}$), 相应的 500 毫巴上升(下沉)速度平均为 -25.2×10^{-4} 毫巴/秒(35.2×10^{-4} 毫巴/秒), 同时正(负)涡度中心气块涡度的个别变化平均减小(增加), 说明气块在运动过程中是辐散(辐合)的, 它与 500 毫巴的上升(下沉)运动相配合。此外我们还计算了急流核附近两对上升和下沉运动中心上空 300 毫巴气块在 12 小时前的位置, 以及此气块在 12 小时内造成的涡度平流变化及气块自身涡度的个别变化, 同样得到如表 2 相类似的结果。

总之, 用拉格朗日方法分析急流核周围空气块的三维轨迹, 所求出空气块所造成的涡度平流变化和个别变化与用运动学方法求得的垂直运动之间是符合准地转动力学原理的。它证明寒潮冷堆中的上升运动是由于高层槽后偏北急流核左侧有向下游的正涡度平流使冷堆上空产生水平辐散引起的。

为了检验槽后偏北急流核下游反环流圈的上升分支对寒潮冷堆的绝热冷却作用, 我们按运动学方法计算得 700 和 500 毫巴两层的平均垂直速度, 求出冷中心附近 700 毫巴空气块 12 小时后达到的高度及由于绝热冷却所达到的温度。从表 3 中所列数据可见, 700 毫巴空气块上升 12 小时即可达到 500 毫巴附近, 其温度也可达到 -50°C 。这一事实说明冷空气堆中存在 10^{-3} 毫巴/秒量级的上升速度就可使地面的冷空气在一天左右的时间上升对流层中层并在 500 毫巴上形成 -50°C 以下的冷中心。

表 3 按垂直速度推算的冷中心下方 700 毫巴空气块 12 小时后达到的高度及绝热冷却后的温度与 500 毫巴冷中心实测温度的比较

时 间	700和500毫巴平均 ω (10^{-4} 毫巴/秒)	700毫巴气块12小时 后达到的高度(米)	气块在 700 毫巴时 的温度($^{\circ}\text{C}$)	绝热冷却后的 温度($^{\circ}\text{C}$)	500毫巴冷中心 实测温度($^{\circ}\text{C}$)
10日20时	-28	4251	-34.3	-48.8	-49.5
11日08时	-44	5151	-31.3	-54.1	-48.9
11日20时	-37	4750	-34.8	-54.0	-50.5
12日08时	-30	4450	-38.3	-53.9	-55.7

五、结 论

1. 寒潮冷空气堆的三维运动并非以下沉运动为主。下沉运动主要在锋区附近。在冷堆的中心往往存在上升运动。上升运动所伴随的绝热冷却可直接使对流层中层的冷中心加强。因此不能只从热力学过程来分析寒潮冷空气的酝酿过程,动力学过程造成的垂直反环流在寒潮酝酿过程中起着十分重要的作用。

2. 动力学讨论和实例分析都表明高空急流核附近存在一对正、反垂直环流,槽后偏北急流核下游反环流的上升分支使冷空气上升绝热冷却从而使寒潮冷堆增强。因此在寒潮分析和预报中必须强调围绕高空槽的急流的不均匀性,尤其要注意槽后偏北急流中急流核的活动。当槽后存在强大的急流核,从急流中心沿急流轴,风速向下游迅速减小,并且在急流核的两侧有很强的水平风速切变,则在急流核的左前方存在强大的正涡度平流造成冷槽上空质量辐散,从而使寒潮冷空气堆上升增强。

3. 寒潮过程中垂直反环流的存在表明寒潮过程不仅仅是一种斜压不稳定过程使有效位能转换成动能,而且还存在有效位能的制造过程,它使原来的冷空气变得更冷。Holton(1972)^[11]曾指出平流层大气中存在某种“制冷机制”。寒潮过程中反环流的存在说明对流层中也存在“制冷机制”,而且它应和急流的活动有关。进一步弄清大气中的“制冷机制”将有助于加深对对流层中纬度大型扰动的发展及急流在大气环流中的地位的认识。

致谢: 本文的计算工作是在谢安和肖文俊同志的协助下完成的, 陈受钧同志对本工作提供了很有价值的意见, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 陶诗言,十年来我国对东亚寒潮的研究 气象学报 30卷 3期, 1959。
- [2] Hsieh, Y. P. An investigation of a selected cold vortex over North America. *J. Meteorol.* **6**, 401—410, 1949.
- [3] Riehl, H., A further study on the relation between the jet stream and cyclone formation. *Tellus*, **5**, 1953.
- [4] Palmén, E., C. W. Newton, On the three dimensional motion in an outbreak of polar air. *Jour. Meteorol.*, **8**, 25—39, 1951.
- [5] 仇永炎,在一种寒潮情况下的水平温度场及冷锋构造, 气象学报 28卷第一期, 1957。
- [6] Rossby, C. G. On the general circulation of the atmosphere in the middle latitudes, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **28**, 6, 1947.
- [7] Namias, J., P. F. Clapp, Confluence theory of the high tropospheric jet stream, *Jour. Met.* **60**, 5, 330—336, 1949.
- [8] 北京日报 1月15日, 1980年。
- [9] Staley, D. O. Evaluation of potential-vorticity changes near the tropopause and the related vertical motion, vertical advection of vorticity and transfer of radio active debris from stratosphere to tropopause, *Jour. Meteorol.*, **17**, 1960.
- [10] 佩特森: 天气分析和预报(上册) 科学出版社, 1958。
- [11] Holton, J. R., An introduction to dynamic meteorology, Academic Press, Inc. 1972.

THE DYNAMICAL CAUSE OF THE COLD DOME'S INTENSIFICATION IN THE COLD OUTBREAK PROCESS

Lu Guang ming Yao Jing sheng

(Peking Agricultural University)

Tao Zu yu

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

In this paper, a cold outbreak process (9—11, Nov 1979) has been analysed with dynamical diagnostic method. It shows that the decrease of the temperature in the cold dome moving to south is caused not only by the diabatic cooling on the surface but also by ascending adiabatic expansion. The mass divergence above the cold dome is caused by the strong positive vorticity advection combined with the maximum vorticity on the left side of the jet core. Thus, in the proceeding of the cold outbreak forecasting, we must pay more attention to the uniform of the wind speed distribution around the trough in higher troposphere, especially the behavior of the core on the northly jet stream behind the trough.