

冬季风爆发前西伯利亚 高压的演变*

谢 安 卢 莹 陈受钧

(北京大学地球物理系, 北京, 100871)

提 要

本文是一个个例的诊断分析, 应用 FGGE-III₀ 资料分析了 1979 年 11 月 12—17 日的东亚寒潮过程, 着重讨论冷空气爆发前, 位于西伯利亚的冷堆的增强过程, 运用准拉格朗日坐标系的热量方程和涡度方程, 诊断了 500hPa 冷中心的温度变化和地面冷高压上空涡度演变的物理过程, 分析结果说明, 冷堆的增强与高空槽后急流中心前方出口附近的侧向环流有密切关系, 开始时 500hPa 冷中心就位于此侧向环流的上升支附近, 绝热冷却是冷堆加强的主要因子, 即动力因子是主要的, 冷高压上空的涡度变化与相对的涡度平流关系密切, 它也与高空急流的相对位置有关, 在地面高压加强的后期, 散度项和平流项对于温度变化的贡献相反, 但它们的垂直分布都有利于下沉运动加剧, 因此, 在分析预报中要密切注意急流的动态。

本文的分析结果将有助于进一步理解冷空气增强的物理机制, 也为寒潮过程的分析预报提供一定的参考。

关键词: 西伯利亚高压; 冷堆; 侧向环流; 绝热冷却。

一、引 言

亚洲冬季风的主要特征是西伯利亚高压所伴随的强冷空气一次又一次地爆发, 形成我国北方(甚至全国)的寒潮过程, 并使大气环流形势发生较大的变化, 强冷空气爆发时, 明显的温度下降和大风, 对我国的农业和交通运输及多方面的经济活动带来巨大的影响, 同时, 东亚的一次强冷空气活动, 与北半球大气环流的激烈变化有密切关系, 而且也影响到低纬地区, (甚至南半球)大尺度环流的演变, 因此, 这一课题引起了广大气象工作者的重视, 但应该指出, 过去的研究较侧重于冷空气爆发的天气过程以及它与大气环流演变的关系, 而对于冷空气爆发前, 即西伯利亚高压和冷空气形成和加强的物理过程的研究, 相对少一些, 本文的目的将着重对西伯利亚高压所伴随的冷堆的增强过程进行气象学和动力学分析。

对于西伯利亚高压的活动有重要意义的, 除了高空环流形势外, 还有与此高压相对应的冷空气(冷堆), 500hPa 冷中心的位置和强度, 与东亚寒潮的影响范围和强度有密切的关系, 关于这个冷堆的形成和增强过程, 过去的研究有不同的看法^[1], 一种是强调

1990 年 4 月 22 日收到, 1991 年 1 月 6 日收到再改稿。

* 国家自然科学基金项目(编号为 4880218)和国家气象局“季风”项目联合资助。

辐射冷却的作用,认为在高空冷槽位置上积聚着一堆冷空气,由于较强的辐射冷却作用,使冷空气越来越冷,另一种观点则强调动力作用,认为冷堆的增强阶段,它的上空不是一般认为的下沉运动,而是上升运动,正是由于这种上升运动,绝热冷却使冷堆变得越来越冷,因此有必要通过多种途径来分析这个冷堆的增强机制,这无疑对于进一步了解其中的物理过程和更好地预报它的发展是会有帮助的。

二、天气过程简述

本文的选例是1979年11月12日~17日一次西伯利亚高压的发展过程和东亚一次较明显的寒潮过程,不论从它的路径和强度,还是它的影响范围来看,这次过程是具有较好代表性的东亚反气旋个例^[2]。选择该个例的另一个原因是1979年有较好的观测资料供分析和计算用。本文使用的资料是欧洲中心的FGGE-III₀资料,但未使用其中的垂直运动资料,在热量平衡和涡度平衡计算中所需的 ω 资料,我们根据 u , v 资料按O' Brein订正的运动学法重新进行计算。这套EC资料,在垂直方向上由1000hPa到100hPa共分为10层,水平网格距为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ (经纬度)。为了计算和绘图上的方便,本文用拉格朗日9点插值法将经纬度网格资料转换成正方形网格资料,水平格距为120km。

图1是这次过程中间(冷空气爆发前)的地面形势图,图中还给出了高压中心以及相应的500hPa冷中心的路径,此高压形成于咸海东北的中亚地区,后来缓慢东移并逐渐加强,但明显增强出现在14日12时之后(见图2),发展初期的地面高压中心和500hPa

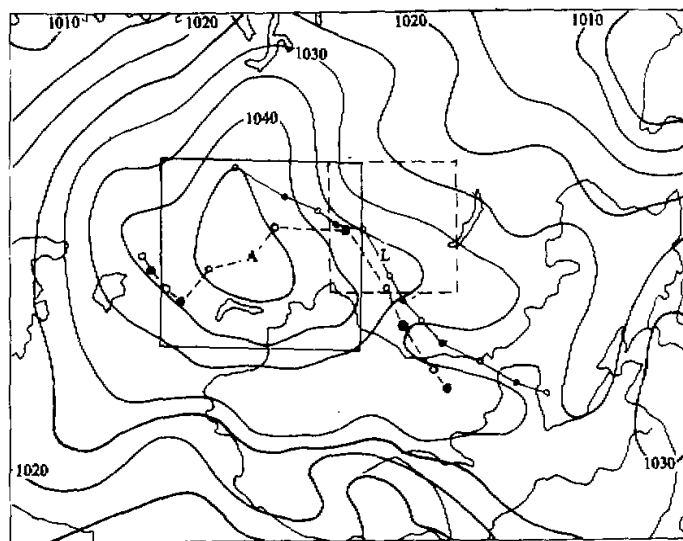


图1 14日12时(世界时,下同)地面气压场以及西伯利亚高压(A)和相应的500hPa冷中心(L)路径(12日00时—17日12时)

冷中心相距甚远(大约 1200km), 随着它们的各自加强相对位置逐渐靠近, 冷中心的路径一直是呈西北—东南走向, 冷空气开始爆发和南侵时, 高压中心和冷中心的路径才比较一致。由图 2 可见, 高空冷中心的发展加强是在地面气压明显增强之前。从 12 日 00 时至 14 日 12 时, 500hPa 冷中心的温度是直线下降的, 当地面高压急剧增强时, 高空冷中心基本维持原有强度并稍有减弱。这可能说明在一次西伯利亚冷空气的发展和爆发的整个过程中, 500hPa 冷中心的演变可能更为关键, 应更加予以重视。16 日 00 时, 地面高压达到最强, 此时的寒潮冷锋已到达河套地区, 一场影响全国大范围地区的强冷空气过程就这样爆发了。

在冷堆发展和冷高压加强过程中, 在对流层中上层位于乌拉尔山东侧的高压脊经历了一次发展过程。图 3 是这次寒潮过程中, 300hPa 形势和急流的演变情况。在这次过

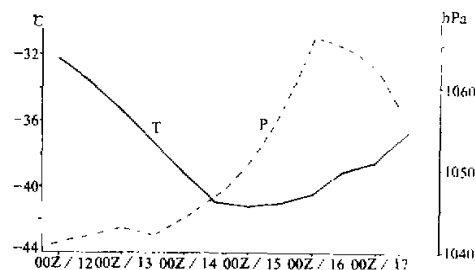


图 2 地面高压中心和 500hPa 冷中心强度的时间变化曲线

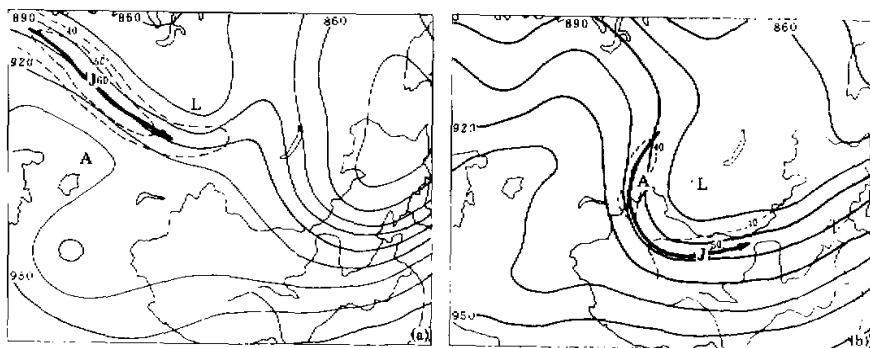


图 3 300hPa 等高线和急流附近等风速线

实线, 单位: 位势什米; 虚线, 单位: m/s

A 和 L 分别代表地面高压和 500hPa 冷中心位置

(a) 12 日 12 时(发展初期); (b) 15 日 12 时(发展后期)

程的初期, 源自喀拉海的冷空气与一弱槽对应, 位于新西伯利亚。位于中亚的高脊尚未发展。这时, 流场上的一个重要特征是, 在脊北侧和高压槽后有一较强的偏西风高空急流, 急流中心风速超过 60m/s。500hPa 冷中心(L)和地面高压中心(A)就分别位于此急流出口区的左、右两侧。11 月 12 日后, 来自地中海东部的低层西南气流增强, 位于咸海和黑海上空的高脊明显发展并北伸, 急流的走向逐渐由偏西顺时针地旋转, 变成了偏北(图 3 b)。在此过程中, 冷中心范围明显扩大, 从 12 日 00 时到 14 日 00 时的 48 小时内, 500hPa 图上 -36°C 等温线所包围的面积扩大了近 20 倍, 说明冷堆在快速发展。

地面高压中心也在缓慢增强,而且两者的水平距离不断缩短.图3b所代表的时间,是这次过程的转折时刻.冷空气已发展到最盛阶段,地面高压快速增强,接近最强阶段.也就是说,寒潮即将爆发.特别需要指出的是,到了图3b时刻,高空急流的主要中心已从槽后移到了槽前.

在冷空气增强过程中,冷中心和高压中心始终位于急流的两侧,急流出口区附近的垂

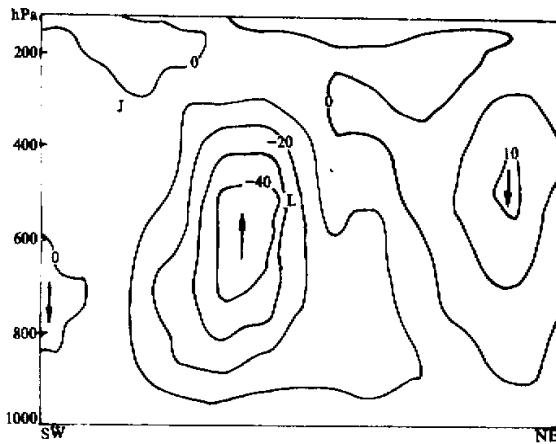


图4 13日00时,垂直于300hPa急流轴且通过500hPa冷中心(L)的垂直速度剖面
单位: 10^{-4} hPa/s

直侧向环流把这些系统联系起来,图4给出急流中心还位于高空槽前时,急流出口区附近,通过冷中心并垂直于急流轴的垂直速度剖面(NE-SW走向).由此图可见,出口区的侧向环流是一个垂直反环流,冷中心位于明显的上升运动区内(伴随有很强的非地转运动(图略)).地面高压位于下沉区内(此时,下沉中心不与地面高压中心相重合).因此,与传统的看法不同,在冷堆发展阶段,它并不是伴随着下沉运动.图4所示的形势说明,由于绝热冷却的作用,冷中心有可能继续降温.15日

以后,冷堆附近的 ω 场发生了较大的变化,由上升运动变成了(基本上)下沉运动(图略).这种变化与主要的急流中心从槽后移到槽前有密切的关系.可见,急流以及它与它相联系的侧向环流的演变,对于预报冷空气的增强和爆发可能具有十分重要的意义.

三、冷中心附近的热量平衡分析

如上节所述,冷空气堆的演变过程对于东亚寒潮的预报有重要意义.为了更好地检验各种物理过程在冷堆加强过程中的作用,我们计算了准拉格朗日坐标系的热量平衡方程.平流形式和质量平均的热量平衡方程^[1]可写为

$$\underbrace{\frac{\overline{\delta T}}{\delta t}}_{\text{TT}} = - \underbrace{(\widehat{\nabla} - \widehat{\nabla}_0) \cdot \nabla T}_{\text{RHTA}} - \underbrace{\omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} - \frac{\alpha}{c_p} \right)}_{\text{AC}} + \underbrace{\overline{Q}}_{\text{DH}}, \quad (1)$$

上式中,TT项是准拉格朗日坐标系中的局地变化项,RHTA是相对平流项, $\widehat{\nabla}_0$ 项为500hPa冷中心的移动速度.AC是绝热冷却.DH作为残差处理,它主要表示非绝热过程的影响,它还包含一部分计算误差."——"表示物理量在有限体积内的质量平均.在

本例中, 这个平均的体积内的截面积取在 500hPa 冷中心附近, 面积为 $1200 \times 1200 \text{ km}^2$ (参见图 1)。图 5 是热平衡计算结果的时-空剖面。TT 项的时空分布说明, 在计算的时段 (12—17 日) 里, 冷堆附近的整层大气, 除了初期的低层外, 大部分时间是降温的, 最大

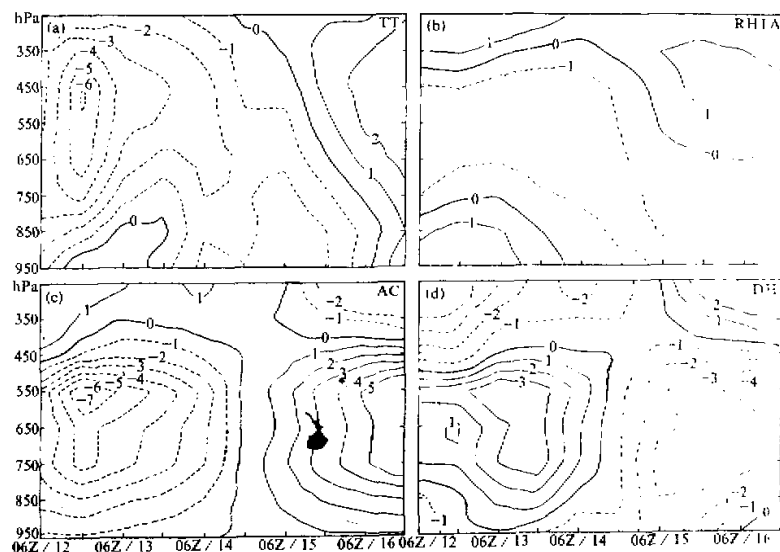


图 5 冷堆附近准拉格朗日坐标系热量平衡的时空剖面

单位: $^{\circ}\text{C}/\text{d}$

(a) TT —— 温度的局地变化; (b) RHTA —— 相对水平平流;
(c) AC —— 绝热冷却率; (d) DH —— 非绝热加热率。

降温出现在 12—13 日的对流层中层, 达到 $-6^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。低层的较大降温出现在 15—16 日。16 日以后, 寒潮爆发, 变成了整层增暖。RHTA 是抵消了由于系统的移动效果之后, 平流对于温度变化的净贡献。结果表明, 在对流层中层和后期的对流层下部, 平流使冷堆加强, 但较之其它物理过程, 这一项的贡献很小。对于冷堆的降温贡献最大的过程是绝热冷却。15 日前, 绝热冷却 (上升运动) 主要出现在 450hPa 以下的对流层中下部, 最大冷却率达 $-7^{\circ}\text{C}/\text{d}$ (位于 550hPa 附近)。这说明绝热冷却除了抵消非绝热过程和低层暖平流外, 是冷堆不断降冷的主要因素。15 日开始, 由于冷堆上空的垂直运动由上升变成了下沉, AC 项也由冷却变成了增暖, 而且增暖的效应越来越强。AC 项变化符号的时间大致和主要的急流核从槽后移到槽前的转换时刻相一致。关于 DH 项, 从计算结果可知, 它也是热平衡中的大项。从仔细分析这个例的天气过程看到, 12—14 日的新西伯利亚地区 (苏联叶尼塞河以东地区), 与高空小槽和冷空气活动相对应, 地面有一次降雪过程, 部分地区为中到大雪。可见, DH 项前期的加热与潜热释放有关, 而 500hPa 以上的冷却有可能是云顶的辐射冷却。到了 15 日以后, 冷中心和地面冷高压中心逐渐靠近, 盛行下沉运动, 天气以晴为主, 因此, 后期的 DH 项, 非绝热冷却主要是由于辐射冷却造成的, 但它的作用被绝热加热所抵消。总的效果是整层有微弱的增暖。总之, DH 项

的变化与天气过程的演变还是比较相符的,但关于非绝热过程的详细情况,还有待用其它方法(如直接的计算方法)进行讨论。

总之,从上述个例的天气分析和诊断分析可以初步证实,高空急流出口区附近的侧向环流,它的上升运动所产生的绝热冷却是寒潮冷空气加强的主要原因,也就是说,冷堆增强主要是由于动力过程所致,辐射冷却也是因子之一,但它和绝热冷却分别在不同的时段和层次起作用。

四、西伯利亚高压的涡度平衡分析

关于西伯利亚冷高压的加强过程,我们采用准拉格朗日坐标系的涡度方程进行诊断,这方程可表示为

$$\begin{aligned} \overline{\frac{\delta \zeta}{\delta t}}_{TV} = & \overline{-(\vec{\nabla} - \vec{\nabla}_0) \cdot \nabla(\zeta + f)}_{RHTV} - \overline{\omega \frac{\partial \zeta}{\partial p}}_{VV} \\ & - \overline{(\zeta + f) \nabla \cdot \vec{\nabla}}_{DV} - \overline{k \cdot \nabla \omega \times \frac{\partial \vec{\nabla}}{\partial p}}_{TP}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中的符号在气象上是常用的,不必赘述,式中各项的意义分别为:TV——移动坐标系中的涡度局地变化,RHTV——相对的水平涡度平流,VV——涡度的垂直平流,DV——辐散、辐合造成的涡度变化,TP——力管扭转项,在计算中此项作为余项处理,与(1)式相同,式中各项都进行质量平均,在各等压面上将计算结果进行区域平均,平均区域取在地面反气旋中心附近,面积为 $1800 \times 1800 \text{ km}^2$ (参见图1)。(2)式平衡计算结果如图6所示,其中的垂直输送项VV较(2)式中其余各项至少小一个数量级,对涡度平衡的作用很小,故未给出。

TV所显示的高压上空涡度倾向,可分成三个阶段,13日00时以前和15日00时以后,基本上是整层的负涡度倾向,而在计算时段内,TV的主要特征是13日至15日之间整层的正涡度倾向,从高压上空涡度本身的演变过程(图略),也许能较好地理解TV所代表的实际动态,虽然地面高压中心在15日后迅速增强,但从计算看出,低层的涡度在整个过程中变化缓慢,后期的负涡度有所增加,最明显的变化出现在对流层中上层,即初期地面高压上空是较明显的负涡度,后期变成很强的正涡度,最后正涡度有所减弱,这种演变实质上反映了地面高压与高空槽脊相对位置的变化,以及槽本身的加深过程,回顾图3的形势变化,说明开始形成的高压位于高空脊的下方(整层负涡度),随着脊的发展和它下游槽的加深,地面高压逐渐移到槽后的偏北气流下方(位于槽的范围内),因此,高压上空的对流层中上层,由原来的负涡度变成了明显的正涡度,有很大的正涡度倾向,就500hPa而言,16日00时正涡度最强,地面高压也达到最强,此后,高压迅速南移和崩溃,寒潮爆发,这时高空槽稍减弱,正涡度减小,因此,形成了三个阶段的TV

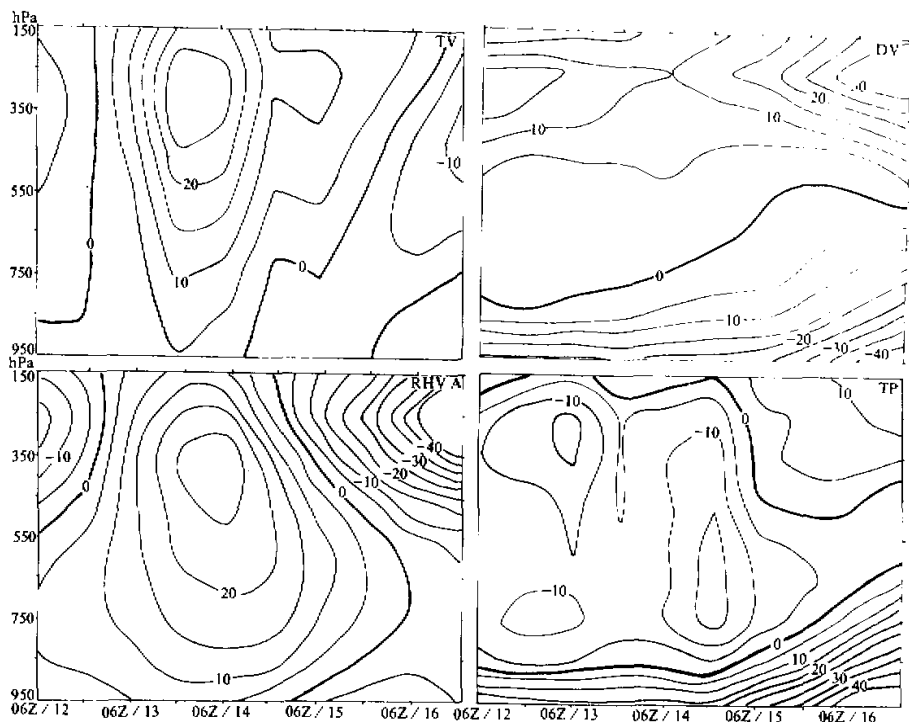


图 6 西伯利亚冷高压上空涡度平衡的时空剖面

单位: $10^{-6} \text{s}^{-1}/\text{d}$

TV — 涡度局地变化, RHVA — 相对的水平涡度平流.

DV — 散度项, TP — 力臂扭转项

形势. 地面冷高压的发展过程, 实质上是整层负涡度减小正涡度增加的过程. 它所对应的是高空槽明显加深的过程.

分析(2)式右端各项的大小和变化, 可知在对流层中上层的相对涡度平流(RHTV)在高压上空的涡度倾向中占有支配地位. 特别是 13 日至 15 日期间, 它和 TV 的形势很相似. 也许对此会产生疑问, 地面高压一直位于高空脊前, 为什么会有如此明显的正涡度平流? 经过仔细分析发现, 这种涡度平流变化与高空急流的位置有密切关系. 在整个寒潮过程中, 高压急流中心从槽后发展到槽前, 但槽后仍存在次要的急流核(图 3b). 地面冷高压上空的涡度变化与这个次要急流核有关. 当高压位于急流右前方时, 急流附近的切变涡度分布(此时曲率涡度很小)使高压上空有负涡度平流. 当高压位于急流核右侧时(14 日), 高压上空的负切变涡度最大, 因而有很大的正涡度平流. 当高压位于急流轴左侧时(图 3b), 它上空再次出现负涡度平流. 在 13—15 日, 很强的正涡度平流使脊下游的槽明显加深, 这也是切变涡度转换成曲率涡度的过程. 可见, 在寒潮冷高压的演变过程中, 高空急流的动力作用同样是重要的.

散度项的贡献不及平流项, 但仍是可观的. 在对流层上层, 它的作用与平流相反. 13

—15日期间,虽与TV同号,但数值较小,然而,散度项在低层对TV的变化,可能有一定贡献。如14—15日低层的负涡度倾向主要是低层辐散引起的,地面高压附近区域在整个过程中总是伴随着低层辐散和高层辐合,且强度不断增加,无辐散层的高度不断升高,从初期的850hPa抬升到后来的500hPa附近,应该指出,散度项和平流项对于高压上空的涡度变化具有相反的作用,但它们对于高压后期的明显加强(下沉运动也明显加剧)却有相同的贡献,高层辐合和低层辐散的增强使下沉运动加剧,而负涡度平流随高度增加也将加剧下沉运动(按照 ω 方程)。

扭转项(作为余项)在对流层中上层一直是较小的,它的作用不及上述几项重要,从这一项的物理意义可知,这样的结果是合理的,然而在低层,这一项对涡度的变化有不小的贡献,过去的研究(如[4])也指出,在低层的锋区附近和地形较复杂的地区,扭转项不可忽略,在本例中,15日12时之后这项作用增大,这可能与地形影响有关,因这阶段高压进入蒙古高原和青藏高原东侧,这里的地形相当不均一,容易形成复杂的 ω 水平分布,关于扭转项较详细的物理过程,有待用其它计算方法进行讨论。

五、结 语

通过对一次寒潮个例的天气分析和诊断计算,对冷堆的降冷和高压增强有以下认识:

(1)在一次寒潮的蕴酿过程中,对流层中下层冷空气的降冷和地面冷高压的加强分别在不同阶段进行,降冷在先,加压在后,而且在这过程之初,500hPa冷中心和地面高压中心相距甚远,但急流出口区之侧向环流将它们联系起来,随着各自的加强,冷中心和高压中心相互靠近。

(2)冷堆在整个过程中并不都是伴随着下沉运动,相反,在它的加强阶段,伴随着较明显的上升运动(且有降雪过程),这是高空急流出口区附近的侧向环流(反环流)的上升支促使冷堆增强的主要过程是绝热冷却,所以,动力因子是主要的,当主要的急流核从槽后移到槽前时, ω 场发生较大变化,冷堆停止降冷,这时,辐射冷却对于冷堆的维持可能有作用,但在整个蕴酿过程中,辐射冷却作用不是主要因子。

(3)地面冷高压上空的涡度变化,低层不明显,对流层中上层显著,相对的涡度平流支配着涡度倾向,平流项的变化又与急流的相对位置有密切关系,在地面高压加强的后期(寒潮临将爆发),散度项和平流项都明显加强,但对于涡度的变化有相反的贡献,然而,它们的垂直分布都有利于高压区内下沉运动的加剧。

(4)本文的分析结果将有助于进一步理解冷空气增强的物理机制,也为寒潮过程的分析预报提供一定的参考,其中特别强调对高空急流动态的关注,应该指出,本文对于冷堆增强(在前)和高压加强(在后)之间的内在联系还未进行深入的讨论,对非绝热项和扭转项的计算,也有待用直接方法进行分析,只有选取更多的、不同类型的寒潮个例进行分析,才能对于西伯利亚冷高压的发展机制有较全面的理解。

参 考 文 献

- [1] 陆光明、姚竞牛、陶祖钰, 1983, 寒潮冷堆增强的动力原因, 气象学报, 41, 第4期, 393—403.

- [2] Ding Yihui and T. N. Krishnamurti. 1987. Heat budget of the Siberian high and the Winter monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 2428 — 2449.
- [3] Liou, C-S. and R.L. Elsberry. 1987. Heat budgets of analyses and forecasts of an explosively deepening maritime cyclone. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1809 — 1827.
- [4] Dallavalle, J. P. and L.F. Bosart. 1975. A synoptic investigation of anticyclones accompanying North American polar air outbreaks. *Mon. Wea. Rev.*, **103**, 941 — 957.

The Evolution of Siberian High Prior to the Outbreak of Cold Air

Xie An Lu Ying Chen Shoujun

(Dept. of Geophysics, Peking University Beijing, 100871)

Abstract

The main objective of the present study is to estimate the contribution of different physical processes by calculating the quasi-Lagrangian heat and vorticity budgets of the Siberian high. The case selected in this study is a Siberian high prior to the outbreak during early winter, 12–17 November 1979. The results suggest that the dynamic process of the transferse circulation of the upper-level jet should be emphasized in the intensification of cold dome. The radiative cooling is probably a secondary factor compared with the adiabatic cooling. The results from the diagnosis of the vorticity equation indicate that the relative vorticity advection is pronounced in the mid and upper-troposphere. The deepening of downstream trough is essentially a transformation from shearing to curvature vorticity. The divergence term is considerable except at middle levels and has opposite tendency against the advective effect.

The present result are helpful to understand the physical mechanism of the intensification of cold dome and the Siberian high.

Key words: Siberian high; Cold dome; Transferse circulation; Adiabatic cooling.