

热成风适应原理在大雪短期分析预报 应用中的某些尝试*

吉林省气象局气象台**

提 要

本文在解剖吉林省 10 月份八次大雪过程基础上,应用陈秋士的关于热成风适应理论分析了降雪系统的斜压不稳定发展过程,指出平直锋区上非热成风的产生,可能是气旋暖锋锋生的根本动力原因,锋区入口区是锋生不可缺少的特定环境场;还应用三层斜压准地转模式对暖锋锋生特大降雪搞了数值预报试验。

一、引 言

近些年来,国内对暴雨的研究较多,有关大雪分析文章较少。王继志^[1]曾分析了一次华北锢囚锋大雪的例子。

本文在分析 10 月份的大雪过程的基础上,认为大雪的物理过程,主要是斜压不稳定发展所伴随的锋生,特别是暖锋锋生过程。关于斜压扰动发展和锋生问题,自从卡尼 1947 年首先讨论以来^[2],国内外不少学者发表过这方面的论述,佩特森 1956 年曾指出“中纬度大尺度扰动增长时,同时有锋生出现”^[2]。陈秋士在理论和预报实践的结合上,应用热成风适应原理比较成功地解释了中纬度各类大尺度斜压不稳定过程及其向下游传播^[3],并指出了在较平直的锋区上扰动特征尺度 L 大于热成风适应特征尺度 L_0 ,是气旋发生的必要条件。本文结合大雪过程中气旋的发生发展证明了这一点(见表 1),用热成风平衡不断破坏和不断调整的分解分析方法,可给出平直锋区上扰动所造成的非热成风,即流场热成风涡度大于温度场热成风涡度时,在向热成风调整过程中,扰动移入锋区入口区,会迅速发生暖锋锋生降水天气。如果把流场和温度场不同配置的初始场进行合理的分型,可以把暖锋或冷锋锋生从 48 小时前就区别开来,为短期预报提供重要的着眼点,经过三年的实践较为成功。

本文还给出了一次数值试验结果:对平直锋区上斜压扰动发展所造成的暖锋锋生形势能模拟出来。

二、一次暖锋锋生降大雪的诊断分析

1974 年 10 月 20 日 20 时到 22 日 20 时,从华北北部到东北中南部发生一场大雪过程,如图 1 所示:大雪区呈纬向型,大于 5 毫米的雪量外包线,东西长达 1700 多公里,

* 本文于 1979 年 11 月 29 日收到,1980 年 4 月 23 日收到修改稿。

** 参加工作的主要人员有,廉毅、胡建勋、仲雅琴、田雨斌、高荣实、鄂伟民、王桂荣、王惠明、董礼仁等,本文由廉毅执笔。

表 1

| 分型及雪量 日期 | 影响系统 分型 | 测站数雪量 (毫米) | 700 毫巴 | | 地面影响系统 |
|--------------|------------|-----------------------------|--------|---|-----------------|
| | | | 降雪系统 | 流场扰动尺度 L | |
| 74 年 21—22 日 | 1 | 46 \geq 5 30 \geq 10 | 低涡、高空槽 | $l \sim 50^\circ E, D \sim 20^\circ \varphi > L_0$ (前 48 小时)19 ²⁰ | 蒙古和华北气旋 |
| 72 年 20—22 日 | 2 | 37 \geq 5 25 \geq 10 | 高空槽 | $l \sim 60^\circ E, D \sim 15^\circ \varphi > L_0$ (前 48 小时)18 ⁰⁸ | 蒙古和江淮气旋 |
| 73 年 22—23 日 | 3 | 33 \geq 5 16 \geq 10 | 横槽、冷涡 | $l \sim 30^\circ E, D \sim 15^\circ \varphi < L_0$ (前 48 小时)21 ⁰⁸ | 副冷锋产生弱波动 |
| 76 年 27—28 日 | 1 | 35 \geq 5 12 \geq 10 | 南北槽结合 | $l \sim 55^\circ E, D \sim 25^\circ \varphi > L_0$ (前 48 小时北槽)25 ⁰⁸ | 蒙古和华北气旋合并 锢囚 |
| 76 年 22—23 日 | 1 | 22 \geq 5 12 \geq 10 | “丁”字形槽 | $< L_0$ | 华北弱气旋波 |
| 71 年 10—11 日 | 2 | 19 \geq 5 12 \geq 10 | “丁”高空槽 | $l \sim 60^\circ E, D \sim 20^\circ \varphi > L_0$ (前 36 小时北槽)8 ⁰⁸ | 冷锋上小波动 |
| 66 年 27—28 日 | 2 | 14 \geq 5 6 \geq 10 | 冷涡槽 | $l \sim 55^\circ E, D \sim 16^\circ \varphi > L_0$ (前 48 小时)25 ²⁰ | 华北气旋 |
| 72 年 26 日 | 1 | 12 \geq 5 3 \geq 10 | 高空槽 | $l \sim 70^\circ E, D \sim 14^\circ \varphi > L_0$ (前 24 小时)25 ⁰⁸ | 蒙古和华北气旋 |

雪量指纯雪量, 个别年份是雨加雪中的估计雪量
 L_0 (热成风适应特征尺度) ~ 367 公里

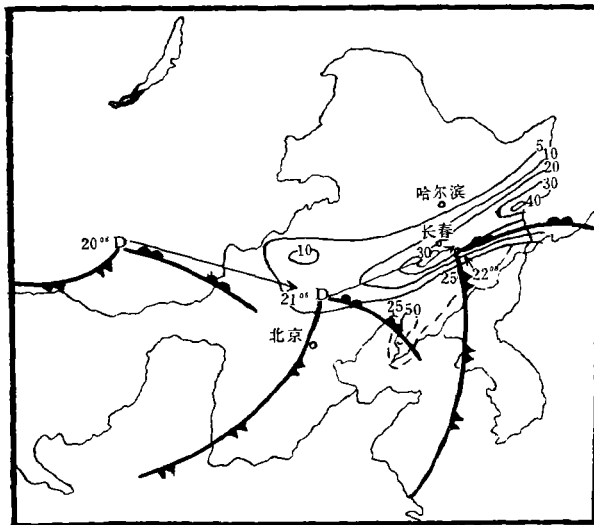


图 1 1974 年 10 月 20 日 08 时—23 日 08 时雪量分布图
(实线为雪量线, 虚线为雨量线)

南北宽达近 400 公里; 辽宁、吉林二省中南部地区还降了大雨, 局部地方下了暴雨, 吉林省最大降雪中心在四平, 纯雪量为 30 毫米, 黑龙江省的绥芬河市达 40 毫米为最大降雪中心, 吉林省最大积雪深度为一尺。大雪区位于低气压中心暖锋的北侧, 并与其移动路径相平行。这次降雪是由于在一个较平直的锋区上, 斜压小扰动发展, 气旋的暖锋锋生所造成的。

1. 暖锋锋生的概况及特点

图 2 概括了暖锋锋生过程。图 2 A 中二条粗实线中间为较平直的锋区, 经过 24 小

时以后(图2C),平直锋区受到扰动,暖锋锋生,并且快速向东移动到华北的北部到东北中部一带,而后移速减慢,从图2C还可看出,在低层有利暖锋锋生的有三股气流:一股是冷锋后的西北气流;第二股是东南和西南气流所组成的暖湿空气输送带,移向原为干冷空气控制的“冷垫”上;第三股是暖锋北侧的偏西气流。暖锋锋生带就介于第二、三股气流中间。图2B为图2C同时刻正交冷锋和暖锋的A—O—A'垂直剖面图,有二层冷锋锋区,低层锋区上方600毫巴附近有一个中空西南急流,急流周围呈正环流;高层锋区几乎和低层锋区对接,锋区附近有一个反环流,高层锋区与对流层顶相联系。暖锋锋区较低只伸展到500毫巴附近,在700毫巴层有一个低空西南较湿急流,暖锋前为正在减弱的干冷空气堆(从 θ_e 线上凸程度远比冷锋后的冷堆小),暖锋锋区中水平温度梯度低层大于中层,从地面到700毫巴层平均为每100公里差1.5—2.0度。经过12小时后,见图D,由于冷锋后干冷空气的强烈爆发,冷锋移速加快,而暖锋已移到吉林省中部地区,吉林省开始降大雪,暖锋锋区之所以保持东西向,使北上的暖湿气流与原来控制东北区的干冷空气交绥,这不能不归结于哈尔滨以北维持一支偏西气流,与偏南气流形成锋区入口区,使暖锋锋生带得以稳定在吉林省,起到了暖锋锋生的特定环境场作用。

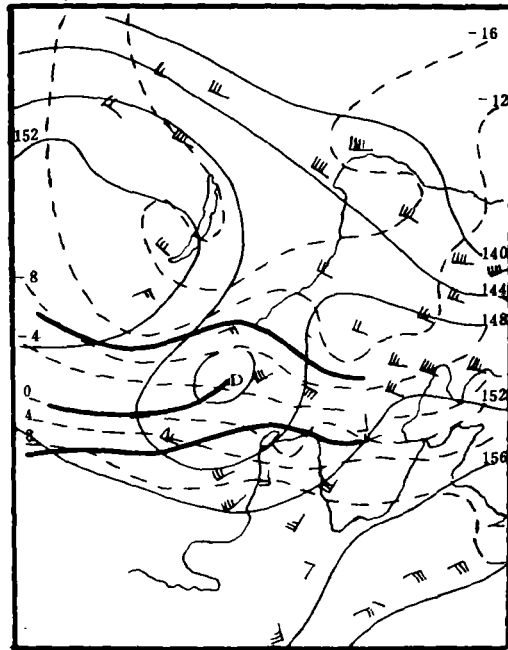


图 2a 1974 年 10 月 20 日 08 时 850 毫巴图
(细实线为等高线,粗实线为槽线和锋生带,虚线为等温线。)

2. 平直锋区扰动发展产生非热成风是暖锋锋生的内在动力机制

1) 根据热成风适应原理^[3]: 流场扰动尺度 L 即

$$\frac{1}{L^2} = \left(\frac{2\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{D}\right)^2 \quad (1)$$

l 为扰动波长, D 为扰动宽度, L_0 为热成风适应特征尺度。吉林省处于 45°N 附近, 一

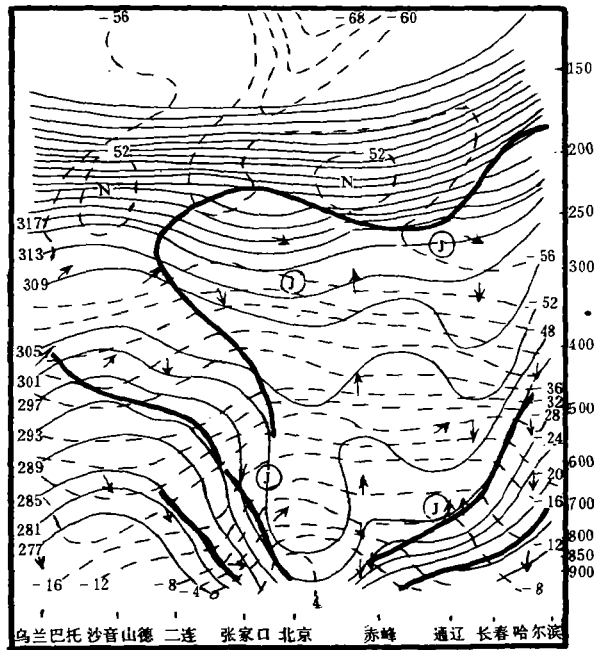


图 2b 1974 年 10 月 21 日 08 时垂直剖面图
(细实线为 θ_e 线, 虚线为等温线, 粗实线为锋区对流层顶, \rightarrow 表示二维气流, J 表示 SIV 急流轴。)

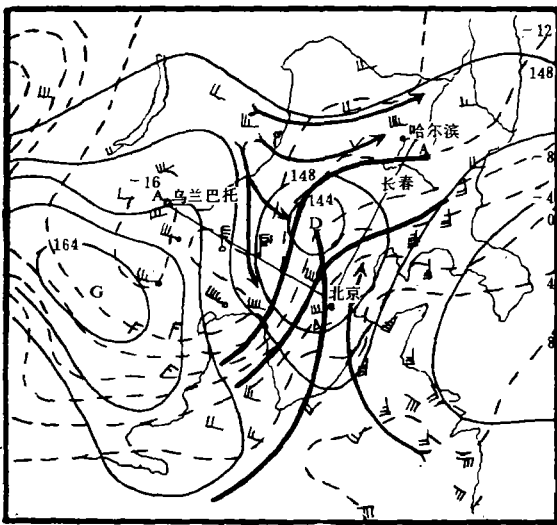


图 2c 1974 年 10 月 21 日 08 时 850 毫巴图

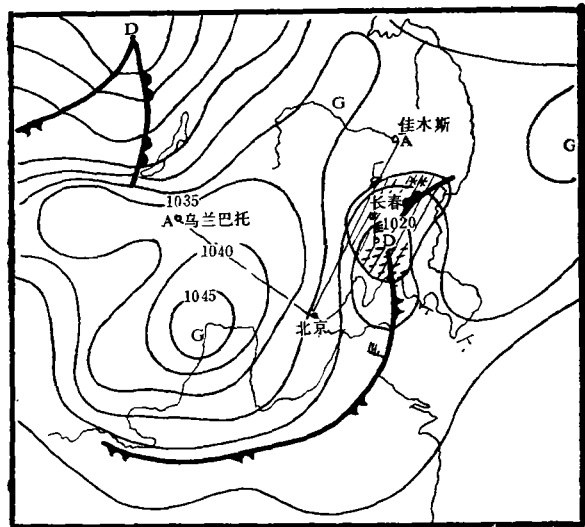


图 2d 1974 年 10 月 21 日 20 时地面图
(斜线区为雪区, 带点的斜线区为雨区。)

般 $L_0=367$ 公里, 如图 3, 当 $L=370$ 公里 $>L_0$, 用公式 (1) 计算出所对应的 D 和 l 近似为一条双曲线, 便于在天气图上判断扰动 L 的大小, 凡是一定的 D 和 l 所对应的点落在曲线上或它的右侧, 均表示 $L > L_0$ 。通过普查大雪个例发现 (见表 1), 降雪前 72—48 小时, L 并不一定大于 L_0 , 但由于: 一种是扰动的上游系统的不稳定发展向下游传

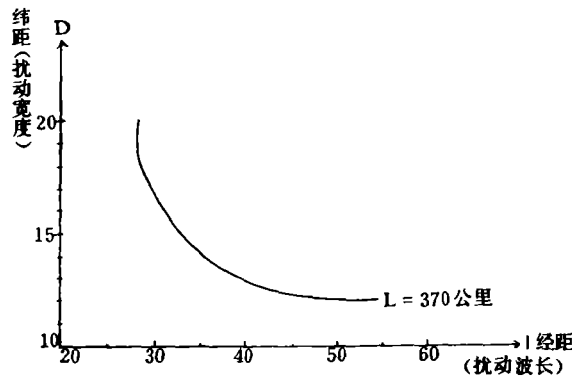


图 3 北纬 45 度附近 $L=370$ 公里 $>L_0$ 时, l 与 D 的对应关系(图中 l 为 l)

播^[3], 以及下游相邻扰动迅速衰减, 致使扰动 $L>L_0$, 如 1974 年 10 月 19 日 08 时—19 日 20 时, L 从小于变成大于 L_0 , 地面蒙古气旋新生; 另一种是南支和北支流场叠加, 扰动的经向度加大, 使 $L>L_0$, 如 1976 年 10 月 26 日 20 时 (图略)。

2) 在平直锋区上, 依据简化的流场热成风涡度 $\hat{\zeta}$ 和温度场热成风涡度 ζ_T 方程^[3]

$$\frac{\partial \hat{\zeta}}{\partial t} = -U_2 \frac{\partial \hat{\zeta}}{\partial x} - \hat{v} \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta_T}{\partial t} = -U_2 \frac{\partial \zeta_T}{\partial x} - \frac{1}{2f} \Delta V_2 \frac{\partial}{\partial y} (\varphi_1 - \varphi_3) \quad (3)$$

(下标 2 为 500 毫巴层, Δ 号表示垂直切变, 1、3 为 250 和 750 毫巴), (2) (3) 二式右边第一项为基本流场对流场 $\hat{\zeta}$ 和温度场 ζ_T 的平流, 在准地转运动中两者是相等的, 第二项为产生非热成风的可变平流部分, 对系统的发生发展起支配作用。当扰动尺度 $L>$

L_0 , 穿过平直锋区的扰动槽前相对涡度沿着热成风方向向下游减小, 即 $-\hat{v} \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} > 0$,

$\frac{\partial \hat{\zeta}}{\partial t} > 0$, 而 $\frac{\partial \zeta_T}{\partial t} < 0$, 从而造成流场上热成风涡度 $\hat{\zeta} >$ 温度场热成风涡度 ζ_T , 即正的非

热成风涡度, 在向热成风调整过程中, 使槽前较平直的锋区上产生相对暖的负热成风涡度, 即暖脊长起来, 也使槽前暖平流加强, 一旦和副高后部的偏南气流汇合, 当移到锋区入口区, 必然引起南北温度梯度加大。由此推断, 平直锋区上扰动发展产生的非热成风, 可能是暖锋锋生的根本动力原因。

3) 从能量的观点, 暖锋锋生最有利于扰动总能量的增长, 从公式^[4]

$$\frac{d(P' + K')}{dt} = \lambda^2 U_T \langle (\psi'_1 - \psi'_3) \frac{\partial}{\partial x} (\psi'_1 + \psi'_3) \rangle$$

可见, 只要经向速度 $\frac{\partial}{\partial x} (\psi'_1 + \psi'_3)$ 和温度正相关, 热成风 $U_T > 0$, 也就是说, 要系统地向北输送暖空气和向南输送冷空气, 扰动总能量就将增加。而在高空急流下方的暖锋锋生总是满足上述条件。1974 年 10 月大雪过程中的三股气流正是这种扰动动能增加的生动体现。

依据热成风适应原理^[3]，平直锋区上的流场槽前，若 $L > L_0$ ，非热成风向热成风调整过程中，槽前要有上升运动，槽后要有下沉运动（参见图 6）。垂直运动的这种配置使扰动的有效位能和动能之间转换，大雪区就落在上升运动较强的区域。

三、一次暖锋锋生特大降雪的数值预报试验

我们应用陈秋士、张元箴的三层斜压分解计算方法的准地转模式，用 200、300、500、700、850 毫巴和地面图六层资料插值到 350、500、750 三层等 σ 面上，取正交网格，格距 300 公里，格点 999 个，一般取五点平滑，以吉林省最大一次暖锋降大雪过程前 48 小时即 1974 年 10 月 19 日 20 时为初始场，进行了一次数值预报试验，结果如下：a) 高度场 24 小时预告相近（见图 4 和图 5），36—60 小时偏慢，500 毫巴横槽 24 小时正在转向以及位置与实况很接近，只是地面低压 24 小时预告稍落后于实况，但是暖锋锋生的两个高气压中间夹着一个低气压的形势被较好地模拟出来了（图略）。b) 某些物理量预告和实况很相近： W 的上升区 60 小时内预告，与降雪区始终相配合，与 w 实况分布大体一致，仅举 36 小时 W 预告和 w 实况，如图 6 和图 7。由于 w 未经修正案稍偏大。非热成风涡度的正区基本处在实况低压中心和暖锋附近。为了揭露暖锋附近的热成风适应特点，取了与实况地面暖锋附近相配合的四个网格点的预报物理量值，列表 2，从中可见垂直运动的大小，主要取决于非热成风涡度 $\zeta - \zeta_T$ 的符号和大小，即 W 随 $\zeta - \zeta_T$ 增大而增大，特别要指出的是 750 毫巴 $\zeta - \zeta_T$ 在 24 和 60 小时分别为二个极大值，但意义迥然不同，24 小时 ζ 和 ζ_T 同号相减，都是正涡度，只是因为温度场较平直， ζ_T 值小，又经过 24 小时后的 21 日 20 时 ζ_T 出现了负涡度，到了 60 小时的 22 日 08 时 ζ_T 达到了大尺度量级 ($-10 \times 10^{-6} \text{秒}^{-1}$) 的负热成风涡度，此时 ζ 和 ζ_T 是反号相减，使 $\zeta - \zeta_T$ 出现第二个极大值， W 的值也随之增加到 2.2 cm/s，从中可以揭露出温度场和流场在斜压和正压发展中的互激作用，这比我们在天气图上通常所单方面考虑涡度平流或

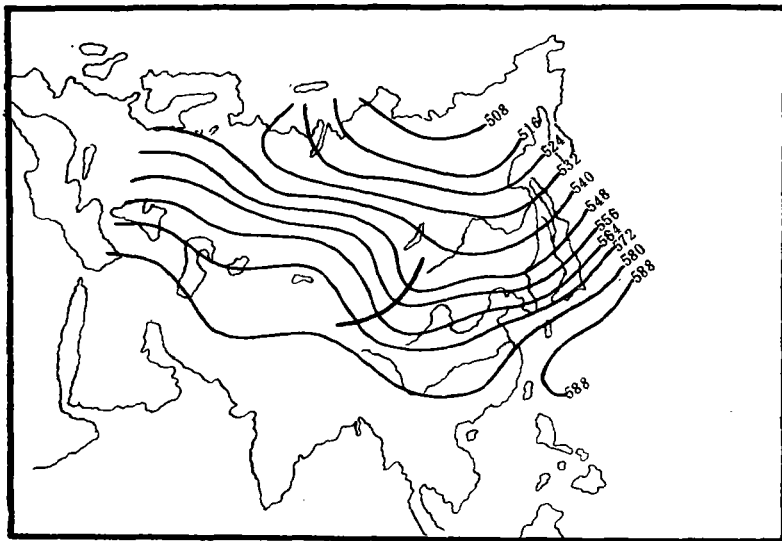


图 4 1974 年 10 月 20 日 20 时 500 毫巴形势预告图

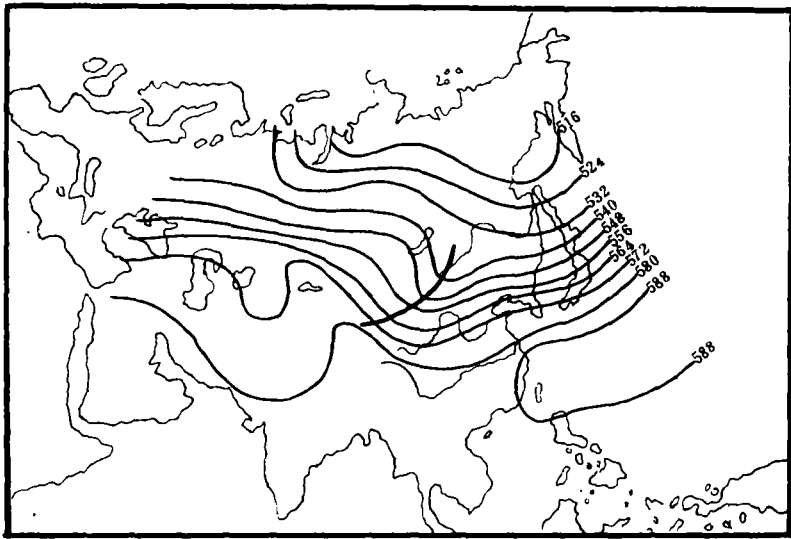


图 5 1974 年 10 月 20 日 20 时 500 毫巴实况图

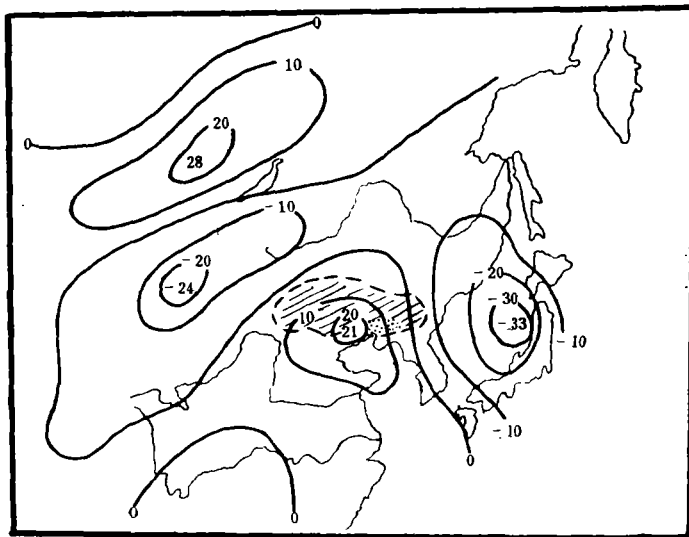


图 6 1974 年 10 月 21 日 08 时 750 毫巴 W
(10^{-1}cm/s) 36 小时预告图
(斜线区为实况降雪区, 点区为雨区。)

温度平流的作用要辩证一些。当然, 还需要谈到暖锋附近在 750 毫巴等压面上所对应的暖脊应该在 36 小时即 21 日 08 时长起来, 数值预告是 48 小时长起来的, 偏慢了 12 小时, 这次数值试验, 没有把水汽凝结释放潜热考虑进去可能是上述偏差的主要原因。

四、降大雪的前 48 小时环流分型

1. “L”型锋区上扰动类型: 亚洲为稳定的一脊宽槽, 锋区走向亦相应成“L”形。贝加尔湖与日本海之间中纬度为较平直的急流锋区带, 在贝加尔湖西侧有流场槽或涡穿过



图 7 1974年 10月 21日 08时 700毫巴 ω
(10^{-8}mb/s) 实况诊断分析图(运动学方法)

表 2

| 量级 物理量 | 时间 | 74年10月19日20时 | 24小时预告 | 36小时预告 | 48小时预告 | 60小时预告 |
|--|-----------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | | (初始场) | 20日20时 | 21日08时 | 21日20时 | 22日08时 |
| $\xi - \zeta_r$ | mb 750 | $26 \times 10^{-7} \text{秒}^{-1}$ | 143×10^{-7} | 85×10^{-7} | 22×10^{-7} | 132×10^{-7} |
| | 350 | 17×10^{-7} | 62×10^{-7} | 63×10^{-7} | 11×10^{-7} | 52×10^{-7} |
| \bar{W} | 750 | 1.2 (厘米/秒) | 2.4 | 1.5 | 1.1 | 2.2 |
| | 350 | 0.7 (厘米/秒) | 0.4 | 0.9 | 1.1 | 1.6 |
| ζ_r | 750 | $8 \times 10^{-6} \text{秒}^{-1}$ | 3×10^{-6} | 8×10^{-6} | -1×10^{-6} | -10×10^{-6} |
| | 350 | $5 \times 10^{-6} \text{秒}^{-1}$ | 14×10^{-6} | 16×10^{-6} | 15×10^{-6} | 17×10^{-6} |
| $-\bar{V} \cdot \nabla T$ | 750 | $7 \times 10^{-5} \text{度/秒}$ | 132×10^{-4} | 132×10^{-4} | 164×10^{-4} | |
| | 350 | $81 \times 10^{-5} \text{度/秒}$ | 149×10^{-4} | 73×10^{-4} | 62×10^{-4} | |
| $-\bar{V} \cdot \nabla \eta$ (绝对涡度平流) | 350 | $2 \times 10^{-10} \text{秒}^{-2}$ | 3×10^{-10} | 0.5×10^{-10} | 1×10^{-10} | |
| | 500 | | 6.6×10^{-10} | 6×10^{-10} | 1×10^{-10} | |
| | 750 | $10 \times 10^{-10} \text{秒}^{-2}$ | 9×10^{-10} | 0.7×10^{-10} | 7×10^{-10} | |

锋区(五个纬距有三条或以上等温线),我国东北地区处于急流锋区入口区,副热带高压呈纬向且偏北。这种类型降大雪,都如本文前面所揭示的气旋新生暖锋锋生所致。

2. “V”形强锋区东移类型:乌拉尔山附近有一个东移的流场脊,贝加尔湖和巴尔喀什湖之间是移动的大槽,与之配合的强锋区呈“V”型,其尺度小于流场槽尺度。东北区为脊控制。这种类型多半是雨转大雪,是一次气旋的冷锋锋生过程,依据热成风适应原理,斜压涡度向正压涡度转化,地面上冷高压发展,实际上也是如此,我国东部是一次

寒潮天气。降雨能否转雪，我们经过普查，发现 700 毫巴负 8 度等温线在地面上的投影线是雨雪区中雨和雪的分界线，我们称之为阈温指标。

五、几点结论

1. 暖锋锋生是吉林省 10 月份降大雪的主要形式，雪量也较大，而且多半发生在起始场较平直的锋区上，锋区上斜压扰动发展，产生非热成风是暖锋锋生的动力机制；锋区入口区是暖锋锋生的特定环境场，在低层等压面图上表现为三股气流，即西北、偏南和偏西气流，暖锋锋生带夹在后二股气流中间，锋生带维持和稳定的区域降雪较大。

2. 从天气实例普查和应用热成风适应原理分析以及数值试验，揭示了 10 月份大雪的主要物理过程是锋生，也证明了流场和温度场初始场的不同配置，扰动尺度 L 是否大于 L_0 ，热成风适应过程也不同，锋生过程也不同。为短期预报的合理分型提供了依据。

本文承蒙北京大学陈秋士同志和张元箴同志的指导和帮助，深为感谢。

参 考 文 献

- [1] 王继志，大气科学，4，1978。
- [2] 佩特森，天气分析与预报（中译本），科学出版社，1965。
- [3] 陈秋士，数值预报和数理统计预报论文集，科学出版社，1974。
- [4] 霍尔顿，动力气象引论，第十章（中译本），中国人民解放军空军气象学校训练部译，1976。

АНАЛИЗ И КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПРОЦЕССОВ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО СНЕГОПАДА В ОКТЯБРЕ В ПРОВИНЦИИ ГИРИНЕ

Метеостанции Гиринской провинции

Резюме

В данной статье на основе разработки восьми процессов значительного снегопада мы отметили, что главным физическим процессом значительного снегопада является фронтогенез (тёплого фронта), сопровождающийся бароклинным неустойчивым развитием короткой волны. Мы считали главными принципами классификации процессов значительного снегопада следующие: первичное расположение фронтальной зоны с полем токов, эволюционное изменение струйного течения и признак облачной системы значительного снега на спутниковой облачной карте. Это даёт нам возможность разделить процессы значительного снегопада нашей провинции в октябре на три типа. Было найдено, что 8 градусов ниже нуля (700 mb) является критическим показателем температуры в конце осени и начале зимы, когда дождь переходит в снегопад. Проанализировав процессы бароклинного неустойчивого развития системы снегопада по теории адаптации термического ветра, мы отметили, что возникновение нетермического ветра на прямой фронтальной зоне, по-видимому, служит динамической основной причиной фронтеза тёплого фронта, а вход высотной фронтальной зоны-его необходимое условие. Более того, при помощи трёхслойной бароклинной квазигеострофической модели мы сделали опыты численных прогнозов погоды о наибольшем снегопаде фронтеза тёплого фронта.