

华北地区春季大范围强寒潮过程 能量场及热源场的滤波分析

段莉 湖涛

徐祥德

(内蒙古气象台)

(南京气象学院)

提 要

本文通过春季华北地区大风、降温、强寒潮过程中能量场的滤波分析,研究了滤波处理后行星尺度系统动能变率的中、短期演变特征,及其与寒潮冷空气爆发路径的相关关系,揭示了有效位能各项对寒潮大风、降温、强天气区的预报指示意义。同时,利用热力学第一定律反算了春季寒潮过程中的非绝热热源项,并对其进行滤波分析,给出了寒潮前期和寒潮过程中热源场的分布特征及其与寒潮活动的关系。

一、前言

利用滤波方法,对华北地区春季强寒潮过程能量场和非绝热场作行星尺度和天气、次天气尺度分解的诊断分析,对揭示和描述寒潮过程中尺度分解动能、有效位能及非绝热热源的分布特征及其中、短期演变规律,探讨寒潮冷空气路径和寒潮大风、降温强天气区落区与上述各场诸项的相关关系,有助于提高寒潮天气预测水平。

为实现行星尺度与天气、次天气尺度的分解,运用平滑滤波方法^{〔1〕〔2〕}将实际风场、温度场和位势场分解为如下相应形式:

$$\vec{V} = \vec{V} + \vec{V}', T = \bar{T} + T', \Phi = \bar{\Phi} + \Phi'$$

在 (x, y, p, t) 坐标系中,相应的行星尺度系统运动的动能方程、有效位能方程^{〔3〕}及由热力学第一定律演变的非绝热热源方程分别为:

$$\frac{\partial \bar{K}}{\partial t} = -\nabla \cdot \bar{K} \vec{V} - (\bar{u} \nabla \cdot \vec{u}' \vec{V}' + \bar{V} \nabla \cdot \vec{V}' \vec{V}') - \bar{V} \cdot \nabla \bar{\Phi} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = & -\nabla \cdot \bar{A} \vec{V} - \frac{C_p}{[T]} \bar{T} \nabla \cdot \vec{T}' \vec{V}' - \\ & \frac{\partial \bar{A} \bar{w}}{\partial p} - \frac{C_p}{[T]} \bar{T} \frac{\partial \bar{T}' \bar{w}'}{\partial p} + \frac{R}{P} \bar{w} \bar{T} + \\ & \frac{\bar{Q} \bar{T}}{[T]} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{Q}}{\partial t} = & C_p \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{T} + \bar{V}' \cdot \nabla T' + \right. \\ & \left. + \bar{w} \frac{\partial \bar{T}}{\partial p} + \bar{w}' \frac{\partial T'}{\partial p} \right) \frac{R}{P} (\bar{T} \bar{w} + \bar{T}' \bar{w}') \end{aligned} \quad (3)$$

天气、次天气尺度运动的方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{K}'}{\partial t} = & -\nabla \cdot \bar{K}' \vec{V}' - \nabla \cdot \bar{K}' \vec{V} - \\ & (\nabla \cdot \bar{u} \vec{u}' \vec{V}' + \nabla \cdot \bar{V} \vec{V}' \vec{V}') + (\bar{u} \nabla \cdot \\ & \vec{u}' \vec{V}' + \bar{V} \nabla \cdot \vec{V}' \vec{V}') - \bar{V}' \cdot \nabla \Phi' \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{A}'}{\partial t} = -\nabla \cdot \bar{A}' \vec{V}' - \nabla \cdot \bar{A}' \vec{V} -$$

$$\frac{\partial \bar{A}' \bar{w}}{\partial p} - \frac{\partial \bar{A}' \bar{w}'}{\partial p} - \frac{C_p}{[T]} \nabla \cdot \bar{T}' \vec{T}' \vec{V}'$$

$$-\frac{C_p}{[T]}\frac{\partial}{\partial P}(\overline{T}\overline{T'}w') + \frac{C_p}{[T]}\overline{T}\nabla\cdot\overline{T'\vec{V}'} + \frac{C_p}{[T]}\overline{T}\frac{\partial\overline{T'}w'}{\partial P} + \frac{R}{P}\overline{T'}w' + \frac{\overline{Q'T'}}{[T]} \quad <5>$$

$$\frac{\delta Q'}{\delta t} = C_p \left(\frac{\partial T'}{\partial t} + \overline{\vec{V}} \cdot \nabla T' + \overline{\vec{V}'} \cdot \nabla T' + \overline{\vec{V}'} \cdot \nabla \overline{T} + \overline{w} \frac{\partial \overline{T}}{\partial P} + \overline{w'} \frac{\partial \overline{T}}{\partial P} + \overline{w'} \frac{\partial T'}{\partial P} - \overline{\vec{V}'} \cdot \nabla T' - \overline{w'} \frac{\partial T'}{\partial P} \right) - \frac{R}{P}(T'w' + T'\overline{w} + \overline{T}w' - \overline{T'}w') \quad <6>$$

混合尺度（未滤波场）的方程为：

$$\frac{\delta K}{\delta t} = -\nabla \cdot K\vec{V} - \vec{V} \cdot \nabla \Phi \quad <7>$$

$$\frac{\delta A}{\delta t} = -\nabla \cdot A\vec{V} - \frac{\partial A\overline{w}}{\partial P} + \frac{R}{P}wT + \frac{QT}{[T]} \quad <8>$$

$$\frac{\delta Q}{\delta t} = C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T + w \frac{\partial T}{\partial P} \right) - \frac{R}{P}wT \quad <9>$$

上式中 $K = (u^2 + v^2)/2$, $\overline{K} = (\overline{u^2} + \overline{v^2})/2$, $K' = (u'^2 + v'^2)/2$, 分别代表未滤波场、行星尺度场和天气、次天气尺度场的动能； $A = \frac{C_p}{2[T]}T^2$, $\overline{A} = \frac{C_p}{2[T]}\overline{T^2}$, $A =$

$\frac{C_p}{2[T]}T'^2$, 分别代表未滤波场、行星尺度场和天气尺度（次天气尺度）场的有效位能； $\frac{\delta Q}{\delta t}$, $\frac{\delta \overline{Q}}{\delta t}$, $\frac{\delta Q'}{\delta t}$ 分别代表未滤波场、行星尺度场和天气（次天气）尺度场的非绝热加热变率；其它为常用符号。

本文选取 1969 年 3 月 26—28 日，1976 年 4 月 21—22 日，1977 年 3 月 22—23 日，1978 年 3 月 8—9 日，1979 年 4 月 11—13 日 5 次寒潮个例。除 1969 年的个例外，其余 4 次寒潮过程均造成内蒙古中部、东部、

华北大部，渤海沿岸等地 7—9 级西北大风，及京、津、冀等地区的中到大雪。分析这 4 次过程可以看到，寒潮爆发前期，欧亚大陆上空 500hPa 形势场均为二槽一脊型，爆发前 1—2 天内乌拉尔山东部均有高压脊发展，冷空气都是经蒙古高原进入我国。1969 年的个例区别于上述 4 次个例。寒潮爆发前期，主体冷空气主要是沿 50°N 向东移动，进入贝加尔湖及以东地区，然后自内蒙古东部向南压。寒潮爆发日内蒙古大部首先是有 7—8 级偏东大风，同时内蒙古中部伴有大雪。

本文取寒潮过程第一天（以内蒙古为准）及前 5 天 08 时 500hPa、700hPa、850hPa 的实际风向、风速、位势高度、温度资料为原始资料，在空间取两层的平均，时间取两日的平均。

$$M_{500,i} = \frac{1}{2} \left[\frac{M_{500,i-1} + M_{700,i-1}}{2} + \frac{M_{500,i} + M_{700,i}}{2} \right]$$

$$M_{775,i} = \frac{1}{2} \left[\frac{M_{700,i-1} + M_{850,i-1}}{2} + \frac{M_{700,i} + M_{850,i}}{2} \right]$$

M 表示某一要素，下标的数字表示层次， i 为当日 08 时， $i-1$ 表示前一日 08 时。

对上述处理过的两层等压面资料进行平滑滤波，分别计算出行星尺度、天气（次天气）尺度及混合尺度的动能变率、有效位能变率和热源变率及其各贡献项。

二、尺度分解动能变率分布特征及其与

寒潮冷空气路径的关系

各种尺度的动能变率的计算结果表明，行星尺度系统和天气、次天气尺度系统的数值变化比较连续，中心完整，尺度意义明确。而混合尺度（未滤波场）系统的数值变化连续性差，中心零乱。作同一时刻、同一

层次、不同尺度动能变率分布图(图略),从图中不难看出,行星尺度系统和天气、次天气尺度系统的分布都比较完整、规律,而混合尺度(未滤波场)系统的特征不明显。这表明了尺度谱滤波分离的效应。

逐日分析寒潮前期各种尺度动能变率的连续变化可看出,无论是600hPa还是700hPa,各次过程的行星尺度系统变化特征基本相似。寒潮前期4—3天里,系统上游咸海、里海、巴尔喀什湖和西西伯利亚地区有大范围的、稳定持续的行星尺度动能增加,而贝加尔湖及以东沿海地区为广阔的行星尺度动能的减小区(如图1a,b,c,d),将其分别与500hPa和700hPa形势场做比较,发现寒潮前期 $\partial \bar{K}/\partial t > 0$ 的中心区域总是在主体冷空气(冷涡)西侧,其中心的延伸区域对应于主体冷空气未来24小时延伸和加强的区域,也是未来西北偏西气流加强的区域。高空低涡附近的弱风速区对应于 $\partial \bar{K}/\partial t \approx 0$ 的区域,而低涡东侧则对应于 $\partial \bar{K}/\partial t < 0$ 的中心区域。值得注意的是,滤掉了行星尺度系统后的天气尺度和次天气尺度系统,也有

相同的结果。即槽区对应于 $\partial \bar{K}'/\partial t \approx 0$,槽后为 $\partial \bar{K}'/\partial t > 0$,槽前为 $\partial \bar{K}'/\partial t < 0$ 。然而,它所反映的尺度小得多,对较大尺度的主体冷空气活动的反应不够突出。显然,行星尺度系统对大范围的冷空气活动(寒潮过程)的指示意义更为突出。

图1给出四个寒潮个例爆发当天及前5天内600hPa行星尺度动能变率的平均分布图,在图中同时绘出相应时间500hPa低涡中心和槽线位置(粗实线)。如果把500hPa高空冷涡(冷槽)的移动路径视为寒潮主体冷空气的移动路径,则由图不难看出,冷空气的移动路径恰与行星尺度动能的增值轴线(虚线)平行,冷涡(冷槽)移动方向总是指向行星尺度动能变率的负值中心区。

三、滤波有效位能输送通量对寒潮冷空气活动的指示意义

气活动的指示意义

由(2)、(5)、(8)可见, $-\nabla \cdot \bar{A} \bar{V}$,

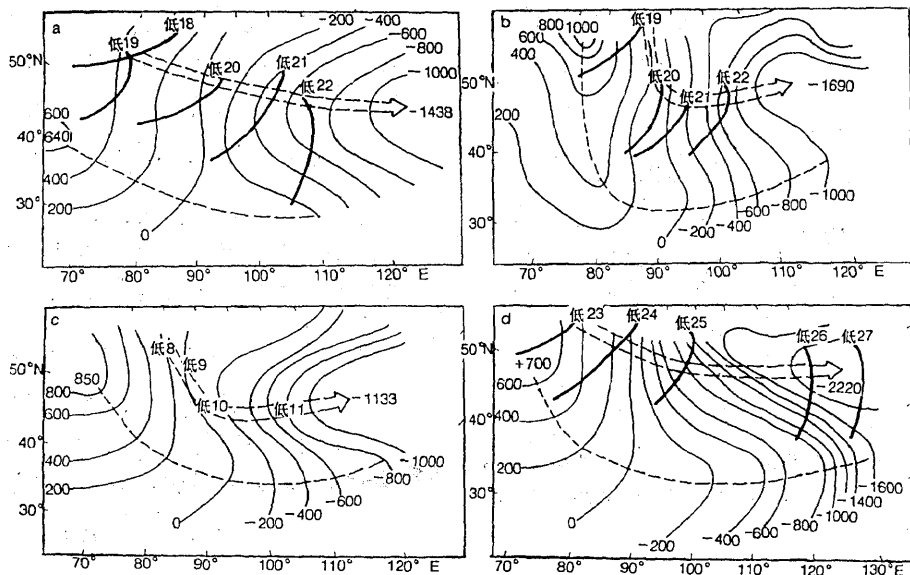


图1 寒潮爆发当天及前5天内600hPa行星尺度动能变率($10^{-5} \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)平均分布图

a. 1976年4月17—21日; b. 1977年3月18—22日; c. 1979年4月8—12日; d. 1969年3月23—27日。低和粗实线为对应日期的500hPa低涡中心和槽线位置,虚线为动能增值轴线

$-\nabla \cdot \overline{A'V}$, $-\nabla \cdot A'\overline{V}$ 分别为行星尺度, 天气、次天气尺度和未滤波场的有效位能输送通量对有效位能的贡献。5 次个例的计算结果表明, 无论在尺度意义或是在稳定性方面, 滤波有效位能输送通量场均优越于未滤波场。将 600hPa 和 775hPa 的滤波有效位能输送通量场与对应的 500hPa 和 700hPa 高空形势场作比较分析, 可见, 寒潮过程中, 主体槽线总是位于有效位能辐散区的前部, 而位于槽线后与主体冷空气相配合的强冷平流及冷中心, 总是与有效位能的辐散中心区相对应。寒潮冷空气(主槽)的移动方向和路径与行星尺度有效位能辐散中心的移动方向和路径一致。图 2 是 1977 年 3 月 19—22 日 775hPa 行星尺度有效位

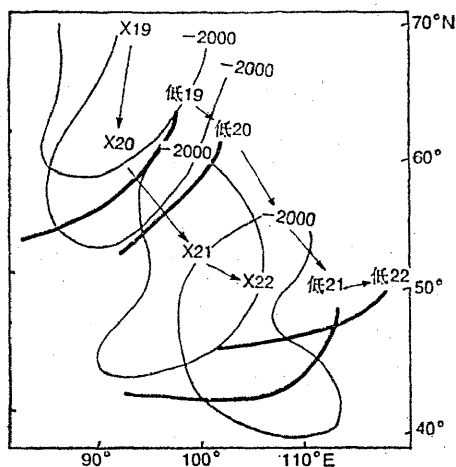


图 2 1977 年 3 月 19—22 日 775hPa 行星尺度有效位能输送通量辐散 ($10^{-5} \cdot \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 中心 (X) 与当日 700hPa 主体槽线位置图

低为 700hPa 冷涡位置, 下标为日期, 粗实线为槽线

能输送通量场 ($-\nabla \cdot \overline{A'V}$) 辐散中心与当日 700hPa 主体槽线位置的对应图。在图中, 辐散中心和冷空气的活动路径有着明显的对应关系。

值得注意的是, 天气、次天气尺度有效位能输送通量场对寒潮冷空气活动的预报指示意义较行星尺度要早 24 小时左右。作天

气、次天气尺度有效位能输送通量场 ($-\nabla \cdot \overline{A'V}$) 辐散中心与 500hPa 主体槽线位置对应图, 可见, 天气、次天气尺度有效位能的辐散中心与 24 小时后的主体槽线位置及高空冷平流区和冷平流中心区位置有很好的对应关系 (图略)。中心的移动路径与寒潮冷空气的爆发路径基本一致。作同一层次、同一层次行星尺度和天气、次天气尺度有效位能输送通量辐散中心动态图 (图略), 可见行星尺度有效位能散度场的变化明显地滞后于天气、次天气尺度有效位能散度场。这进一步说明天气、次天气尺度有效位能输送通量场对寒潮天气预报的指示意义, 同时也反映出局地有效位能的辐散减小首先是从短波开始, 尔后影响长波系统 [4]。

四、尺度分解热源变温贡献项的分析

对方程 (1)、(2)、(3) 各项作滤波分析, 其结果表明, 经过滤波后的变温贡献场 ($C_p \frac{\partial \overline{T}}{\partial t} \cdot C_p \frac{\partial T'}{\partial t}$) 与寒潮冷空气强度和爆发路径具有较明显的相关关系。

作行星尺度热源变温贡献分布与 700hPa 高空槽位置对应图。在图中 (图略), 寒潮前期主体槽线总是位于行星尺度热源变温贡献的负值区前沿。 $C_p \frac{\partial \overline{T}}{\partial t} < 0$ 的中心区与槽后冷空气区的位置一致, 移动方向和路径恰与寒潮冷空气爆发方向和路径一致。值得注意的是, 天气、次天气尺度热源变温贡献场 ($C_p \frac{\partial T'}{\partial t}$) 对冷空气强度具有很好的指示意义。从几个个例的天气、次天气尺度非绝热变温贡献场分布与 500hPa 高空槽位置对应图中 (图略) 不难看出, 在没有强冷空气的情况下, $C_p \frac{\partial T'}{\partial t}$ 场的分布零乱, 中心不明显。当冷空气到达一定强度时, $C_p \frac{\partial T'}{\partial t} < 0$

的中心强度开始增加。5个例子分析结果表明,一般在 $C_p \frac{\partial T'}{\partial t} < 0$ 的值达 $-3000(10^{-5} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$ 以下时,必有强冷空气与之对应。也就是说,当某一冷空气对应于 $C_p \frac{\partial T'}{\partial t} < -3000$ 时,可以认为该冷空气未来将造成寒潮天气过程。进一步分析表明, $C_p \frac{\partial T'}{\partial t} < -3000$ 中心区的移动方向和路径与寒潮冷空气的移动方向和路径是一致的。而这一点,在行星尺度场和未滤波场中反映并不明显。

五、滤波有效位能各贡献项对寒潮大风、降温强天气区的预报作用

对有效位能各贡献项作滤波分析,发现许多项经过尺度分解后,对大风、降温等强天气区有比较明显的反映。而有趣的是对寒潮大风、降温强天气区具有明显反映的各项都是天气、次天气尺度场,而在行星尺度场的反映要弱得多。另外与强天气区对应的都是使有效位能减小区。图3给出了部分有效位能贡献项与当日地面大风、降温等强天气的对应情况,可以看出地面大风、降温强天气区均位于有效位能减小的中心区。对上述未滤波场和行星尺度场也作了类似计算分析,其结果不如天气、次天气尺度分析明显(图略),这无疑说明了滤波后的天气、次天气尺度系统对寒潮天气的突出反映。

六、结语

通过以上分析可以看出,采用适当的“滤波器”,从能量学的角度对大范围的寒潮天气过程作相应的滤波分析,可以帮助我们进一步揭示这种多尺度的复杂天气过程,丰富我们对天气形势和爆发过程的认识。

目前,高度场、温度场和风场都已是可预报量,因此上述试验表明,对大范围的寒

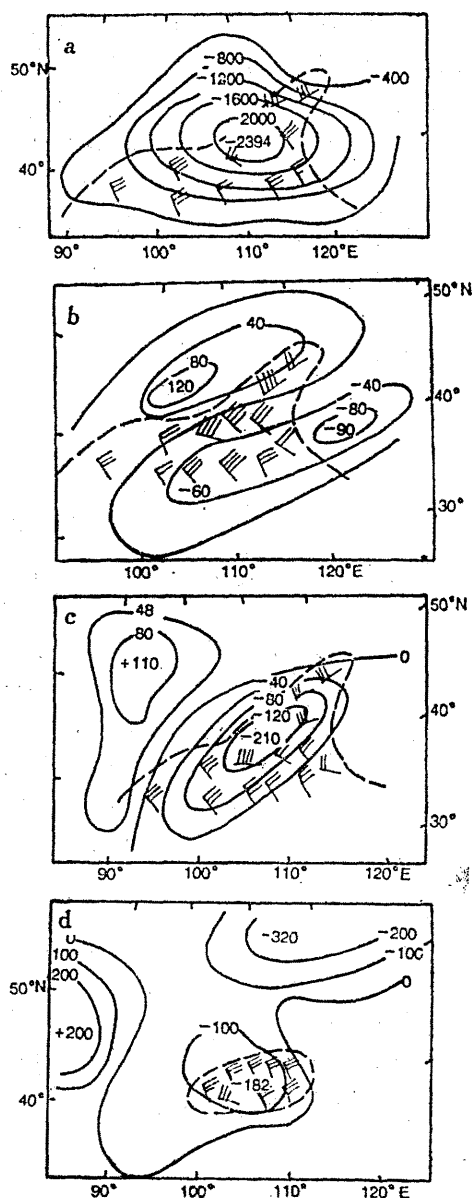


图3 天气、次天气尺度有效位能贡献项与地面强天气区的对应图

- a. 1977年3月22日600hPa有效位能热源项;
- b. 1977年2月22日776hPa有效位能水平输送通量;
- c. 1977年3月22日600hPa有效位能水平输送通量;
- d. 1976年4月21日600hPa有效位能垂直输送通量

潮天气过程,同样可以建立数值诊断方程和天气要素预报方程。可以设想,将上述滤波方法作为一种补充工具,用于日常的寒潮天气预报,并在可能的情况下,对某些与寒潮

冷空气活动和强天气区有明显对应关系的各滤波能量场及贡献项作出逐日36小时、48小时的适时预报,无疑将会提高寒潮天气的分析预报水平,进一步促进未来寒潮天气预报的客观定量化。

本文承王文辉、汪厚基先生多方指导在此谨示感谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 徐祥德,大范围暴雨过程涡旋场特征的滤波实验,气象学报,1985年第一期。
- 〔2〕 J. 哈廷纳:数值天气预报,科学出版社,1985年。
- 〔3〕 杨大升,动力气象,气象出版社,1983。
- 〔4〕 仇永炎,中期天气预报,科学出版社,1985年。

Filter analyses on the energy and heat fields in the process spring cold waves over North China

Duan Li

Hu Tao

(Meteorological observatory, Inner Mongolia)

Xu Xiangde

(Nanjing Meteorological Institute)

Abstract

In this paper, the filter analyses are made on the energy and heat fields in the process of spring cold waves over North China. The characters of the energy and heat distributions on different scales before and during the cold-wave process are given, along with their relationships with the activities of cold waves.