廉毅, 布和朝鲁, 谢作威, 等. 2010. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化 [J]. 大气科学, 34 (2): 429 - 439. Lian Yi, Bueh Cholaw, Xie Zuowei, et al. 2010. The anomalous cold vortex activity in Northeast China during the early summer and the low-frequency variability of the northern hemispheric atmosphere circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 429 - 439.

初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化

廉毅1 布和朝鲁2,3 谢作威2 沈柏竹1 李尚锋1

1吉林省气象科学研究所中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室,长春 130062

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心,北京 100029

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029

摘 要本文在典型个例分析的基础上,揭示了初夏东北冷涡活动显著异常与北半球环流低频变化之间的联系 及其可能机理。主要结果为:(1)初夏东北冷涡活动显著异常与上游乌拉尔山附近和下游日本附近的持续性异常 环流相对应。冷涡异常多年,在向下游频散 Rossby 波能量和瞬变涡动强迫过程的共同作用下,乌拉尔山附近盛 行阻塞型环流。它一方面使极地冷空气向东北地区移动,另一方面通过 Rossby 波能量的传播,使东北冷涡活动 加强。冷涡异常少年的环流情况则基本相反。(2)谐波分析和低频振荡分析表明,在冷涡异常多(少)年的5~6 月,东北地区正(负)涡度位相占优,这与北太平洋超长波槽西退(东进)相对应。长波在北太平洋一北美一大西 洋地区呈驻波型,与 Rossby 波能量传播匹配,亦有利于乌拉尔山附近的异常环流得以长时间维持。(3)5月份, 乌拉尔山附近的异常环流信号对初夏东北冷涡活动的显著异常具有前兆性意义。

关键词 东北冷涡 低频变化 谐波分析 Rossby波

文章编号 1006 - 9895 (2010) 02 - 0429 - 11 中图分类号 P461 文献标识码 A

The Anomalous Cold Vortex Activity in Northeast China during the Early Summer and the Low-frequency Variability of the Northern Hemispheric Atmosphere Circulation

LIAN Yi¹, BUEH Cholaw^{2, 3}, XIE Zuowei², SHEN Baizhu¹, and LI Shangfeng¹

- 1 Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation System and East Asian Monsoon, Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062
- 2 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on the typical case analysis, the linkage between the anomalous cold vortex activity in Northeast China during the early summer and the Northern Hemisphere low-frequency variability and the possible underlying mechanism are investigated. It is shown that: (1) The anomalous cold vortex activity in Northeast China in the early summer is quite in concert with persistent circulation anomalies near the Ural Mountains and Japan. During the

- 资助项目 国家科技支撑计划 (2007BAC29B01、2009BAC51B04), 国家自然科学基金资助项目 40575047、40975033、40705036
- 作者简介 廉毅, 男, 1945 出生, 研究员, 主要从事全球变化区域响应、气候和环境研究。E-mail: lianyi1103@sina. com
- 通讯作者 布和朝鲁, E-mail: bueh@lasg. iap. ac. cn

收稿日期 2009-03-12, 2009-06-09 收修定稿

大 气 科 学 Chinese Journal of Atmospheric Sciences

strong cold vortex year, the persistent blocking-type circulation around the Ural Mountains is maintained both by the Rossby wave energy dispersion and anomalous transient eddy forcing. It, on the one hand, drives the polar cold air to move toward Northeast China and, on the other hand, amplifies the cold vortex through the Rossby wave energy dispersion. For the weak cold vortex year, the situation is basically reversed. (2) It is shown in Harmonic analysis and low-frequency oscillation analysis that while the cold vortex activity is strong (weak) from May to June, positive (negative) vorticity phase prevails over Northeast China, which corresponds well to the westward shift (eastward advance) of the ultra-long wave trough over the North Pacific. The persistent anomaly circulation around the Ural Mountains is maintained by the standing waves across the North Pacific – North America – the North Atlantic, through dispersion of the Rossby wave energy. (3) The anomalous circulation around the Ural Mountains in May constitutes a precursory signal to the cold vortex activity in Northeast China in the early summer. **Key words** cold vortex of Northeast China, low-frequency variability, harmonic analysis, Rossby wave

1 引言

初夏(6月)的大气环流往往具有突变性,表现为东亚高空急流的突然向北推进及夏季风的开始爆发(叶笃正等,1958)。因此,东亚夏季风的爆发和入梅等现象在这一时段一直备受关注。而关于中高纬大气环流,研究大都集中在东亚阻塞形势如何影响中国天气气候方面(汤懋苍,1957;陈汉耀,1957;毕慕莹等,1992;张庆云和陶诗言,1998)。然而,人们对与东亚阻塞高压相伴随的东北高空冷涡(切断低压)方面的研究则较少。

陶诗言等 (1980) 指出, 东北冷涡型是中国东 北地区和华北北部造成暴雨或雷阵雨的环流形势。 孙力等 (1994) 研究了东北冷涡的时空分布特征, 并探讨了东北冷涡与东亚阻高的联系。孙力 (1997, 1998) 从能量学的角度揭示了东北冷涡发 生发展的天气过程,并讨论了大气低频振荡和瞬变 扰动的位涡输送过程在东北冷涡活动中的作用。沈 柏竹等 (2008) 对多个 6 月东北冷涡活动正常和异 常年的环流进行谐波分析,并总结了沿 45°N 北半 球超长波和长波活动的典型特征。布和朝鲁等 (2008) 发现, 初夏东北低压的出现与中高纬 Rossby 波活动密切相关。

近年来,引发暴雨的东北冷涡系统及其盛衰过 程受到高度关注。乔枫雪等(2007)通过个例分 析,再次揭示了东北冷涡暴雨过程与中高纬亚洲阻 塞形势的密切联系。张云等(2008)认为,东北冷 涡在其衰退阶段也可引发暴雨。

尽管一次东北冷涡活动的时间尺度为天气(或 中期天气)尺度,但持续和频繁的东北冷涡活动具 有显著的"气候效应",不仅对东亚梅雨期降水有 影响(何金海等,2006a),还与前汛期华南降水量 密切相关(苗春生等,2006)。

由于东北冷涡具有显著的天气、气候效应,我 国气象工作者一直在探索东北冷涡活动的短期气候 预测方法。刘宗秀等(2002)揭示了前冬北太平洋 涛动(NPO)与夏季东北冷涡持续活动的关联,并 指出东北冷涡持续活动是北半球中高纬大气环流异 常持续与调整的重要表征。何金海等(2006b)指 出,东北夏季冷涡活动强弱与前冬2月份北半球环 状模(NAM)呈正相关,与前期中国近海海温存在 显著负相关。然而,目前东北冷涡的短期气候预测 方法还很不完善,需要进行更深入地研究。

本文的基本思路是,从春季环流背景出发,揭 示与初夏(6月)东北冷涡活动异常相联的北半球 低频环流的相关内部动力学特征(徐祥德和高守 亭,2002),一方面关注相伴出现的阻塞型环流(高 守亭等,1998),另一方面运用谐波分析方法探寻 低频环流演变特征或低频信号的传播过程,旨在为 初夏东北冷涡活动的短期气候预测寻找依据和前期 信号。由此,我们选择了6月东北冷涡异常多的 1991年和异常少的2007年,作为典型个例,从超 长波和长波活动贡献、30~60天的低频振荡、 Rossby波能量频散过程以及瞬变涡动反馈强迫作 用的角度,探讨了初夏东北冷涡活动异常与北半球 环流低频变化之间的内在关联。

2 资料和分析方法

选取 1991 年和 2007 年 NCEP 逐日再分析资料,其水平分辨率为 2.5°×2.5°,500 hPa 高度平均场为 1979~2007 年的平均值。

文中采用了 500 hPa 高度场的谐波分析 (仇永

炎,1985),取超长波为1、2、3波的合成,长波为 4、5、6波的合成。因为6月东北冷涡活动的最大 频数域在 45°N 附近 (郑秀雅等, 1992), 本文侧重 分析了沿 45°N 纬圈的高度场演变特征。利用李崇 银 (1990) 所用的带通滤波器, 计算了 500 hPa 涡 度场的 30~60 天低频振荡过程。

利用 Takava and Nakamura (1997, 2001) 推 导出的三维波作用通量, 描述 Rossby 波能量频散 过程,其中,多年(1979~2007)平均 500 hPa(或 300 hPa) 月 (或旬) 平均场作为基本场, 与此对应 的异常场则为准地转扰动场,位势高度的单位为 gpm。本文根据准地转位涡方程计算瞬变涡动所导 致的位势高度倾向场 (Lau and Holopainen, 1984; Lau and Nath, 1991: Bueh 和 Nakamura, 2007), 并 以此表征瞬变涡动反馈强迫(简称瞬变强迫)场。

超长波和长波活动 3

3.1 冷涡活动异常与背景环流

图1给出东北冷涡活动异常多(比多年平均多 7 天)的 1991 年和异常少(比多年平均少7天)的 2007 年 6 月 500 hPa 高度距平场。这里, 我们根据 孙力等(1994)所用东北冷涡的定义,计算得到了 1991 和 2007 年 6 月冷涡活动天数以及多年平均 (1965~2005年) 冷涡天数 (13天)。6月北半球高 纬度大气环流在1991年呈3波结构,而在2007年 则为2波特征。两年的波状环流位相分布差异也很 大,在欧亚大陆上空尤为明显。1991年6月,乌拉 尔山(60°E)附近呈现强大的正距平中心(+80 gpm),而在泰梅尔半岛和日本东南侧分别出现了 强度达-60 gpm 和+20 gpm 的距平中心。乌拉尔 山和泰梅尔半岛反气旋和气旋式环流相互匹配,形 成了稳定的极地冷空气源。中国东北地区的上游和 下游地区则均为高压控制,有利于在我国东北地区 形成闭合低压(孙力等, 1994)。这些环流形势易 于使极地冷空气南侵中国东北地区,形成东北冷涡 环流形态。与此对应,中国东北地区的负距平达-20 gpm 左右, 东北冷涡活动天数多达 20 天。2007 年6月,在欧亚大陆上空的环流形势呈现与1991 年基本相反的环流形势。乌拉尔山地区为强负距平 中心 (-80 gpm), 贝加尔湖以东到日本东南侧为止 为正距平区,特别是在中国东北地区有强达+60 gpm 的正距平中心,东北冷涡活动天数仅为6天。

431

3.2 5~6月超长波活动

为了更清楚地勾划出 1991 年和 2007 年 6 月 500 hPa 异常环流的形成和演变特征,对 5~6 月高 度场进行谐波分析,揭示超长波和长波活动的时空 分布特征及方差贡献。超长波生命史一般为10天 左右(仇永炎等, 1985)。长波的生命史一般 4~5 天(对中纬度而言),刚好与一次东北冷涡事件的 时间尺度相当,长波槽脊究竟哪个占优亦将对冷涡 活动区正涡度来源起着重要作用(仇永炎等, 1985;徐祥德和高守亭,2002)。



图 1 (a) 1991 年和 (b) 2007 年 6 月 500 hPa 高度异常 (单位: gpm)。等值线间隔: 20 gpm; 实 (虚)线: 正 (负) 距平 Fig. 1 500-hPa geopotential height anomalies (gpm) in Jun for (a) 1991 and (b) 2007. Contour interval: 20 gpm, solid (dashed) lines: positive (negative) anomalies

图 2 为 1991 和 2007 年 5~6 月 500 hPa 高度 场沿 45°N 超长波和长波的时间经度剖面图。由图 2a 可见,在 6 月冷涡异常多的 1991 年,5~6 月 500 hPa 高度场沿 45°N 纬圈超长波活动的最显著 特征为以北太平洋中西部上空 (120°E~180°)的超 长波槽为中心、2 波占优的环流形势。东北冷涡活 动区 [以 (120°E,45°N) 为中心]在 5~6 月始终受 北太平洋中西部超长波槽的影响,北太平洋超长波 槽主体在6月中旬有一次明显的西退。北美大陆上 空的超长波脊在5~6月变动较大,6月上中旬,脊 线基本稳定在北美西海岸。从图 2e 可见,1991年 5~6月超长波的方差贡献已达40%。

从图 2b 可见,2007 年除了 5 月上旬和 6 月末 以外的大部分时间,超长波槽中心位于北太平洋中



图 2 (a、c、e) 1991 年和 (b、d、f) 2007 年 5~6 月 500 hPa 高度场 (单位:gpm)的 (a、b) 超长波、(c、d) 长波以及 (e、f) 超长波和长 波合成方差贡献。等值线间隔:40 gpm; 实 (虚) 线: 正 (负) 距平

Fig. 2 (a, b) Ultra-long waves and (c, d) long waves distributions of 500-hPa geopotential height (gpm) from May to Jun in (a, c, e) 1991 and (b, d, f) 2007, and (e, f) variance contributions from ultra-long waves and long waves. Contour interval: 40 gpm; solid (dashed) lines: positive (negative) values

部而且主体缓慢东进。这与1991年的情况(图2a) 形成鲜明对比。中亚超长波脊在6月初有一次明显 的东移,到达东亚地区。与此对应,北太平洋超长 波槽也向东移动。这表明东亚东北冷涡活动区在 2007年6月份基本处于超长波脊的控制之下。从图 2f可见,2007年5~6月超长波扰动的方差贡献总体 上比1991年(见图2e)稍大,5~6月平均可达45%。

3.3 5~6月长波活动

从图 2c 可见, 1991 年 5~6 月 500 hPa 高度场 沿 45°N 长波活动的主要特征为,在 5 月中旬-6 月底,120°W 以东的地区长波自西向东呈"+-+"驻波特征,也就是北美大陆至北大西洋地区长 波随时间近于无位相变化。总之,120°W 以东的北 美至北大西洋的长波在整个 5~6 月份都显出驻波 特征,6 月份在 120°E 经线上长波槽位相占优,为 东北冷涡活动提供了正涡度源。1991 年 5~6 月长 波的方差贡献可达 40% (见图 2e)。

与 1991 年相比, 2007 年 5~6 月 500 hPa 高度 场沿 45°N 的长波活动(图 2d)只在 5 月中旬和 6

月下旬在东亚至北美东岸呈现驻波特征。从5月下 旬到6月中旬长波活动较弱,使整个5~6月份长 波方差只有30%左右(见图2f)。6月份在120°E 附近,绝大部分时间为长波脊位相占优。

433

4 30~60 天低频振荡

这一节我们从 30~60 天低频振荡的角度探讨 相关环流的演变特征。30~60 天低频振荡不仅是 热带大气的特征频率,也是热带外大气运动的重要 特点(李崇银,1990)。图 3 为 1991 年和 2007 年 4~ 6 月沿 45°N (120°E)的 500 hPa 涡度 30~60 天低 频振荡时间-经度(纬度)剖面图。从图 3a 可见, 1991 年 6 月上旬,来自 100°E 的低频涡度(向东传 播)与来自 140°E 的低频涡度汇合于 120°E。其结 果是在东北冷涡活动区 [(45°N,120°E)附近], 1991 年 6 月间大部分时间为 30~60 天的正涡度低 频振荡位相占优。这一特征在图 2c 也十分明显。 从图 3b 可见,在 120°E 的时间-纬度剖面上,一支 来自 15°N 附近的低频正涡度自 6 月上旬向北传播,



图 3 (a, b) 1991 年和 (c, d) 2007 年 5~6 月 500hPa 涡度的 30~60 天低频振荡时间-经度(纬度) 剖面图(单位: 10⁻⁵s⁻²): (a, c) 沿 45°N; (b, d) 沿 120°E。间隔: 0.5

Fig. 3 Time-longitude (latitude) cross sections for the 30-60 day low-frequency oscillation of 500-hPa vorticity (units: 10^{-5} s^{-2} , interval: 0.5) from May to Jun in (a, b) 1991 and (c, d) 2007: (a, c) Along 45°N; (b, d) along 120°E

另一支来自 60°N 附近的低频正涡度自 5 月中旬向 南传播,它们在 6 月中旬汇合于 40°N 附近,为东 北冷涡活动区提供了低频正涡度源。

图 3c、d 则清楚地反映出,2007 年低频涡度没 有持续性的、跨月的向(45°N,120°E)传播的活 动。在 6 月份,(45°N,120°E)附近 30~60 天振荡 的负涡度位相占优。值得注意的是,自 5 月下旬 45°N附近的低频正涡度向东传播,在 6 月份在东 北地区东侧形成了一个缓慢东移的正涡度区(图 3c)。它们可能与较早建立的北太平洋正负低频涡度 有关(图 3c)。从 6 月初开始,55°N附近的负低频涡 度向南传播到东北地区(图 3d)。另外,6 月上中旬 东北地区南侧(30°N附近)形成了一个低频正涡度 区,几乎与东北地区的负涡度是同时的(图 3d)。

5 Rossby 波能量频散及瞬变涡动反 馈强迫作用

上两节主要讨论了与东北冷涡活动有关的北半 球环流异常及其演变特征。但上述分析无法辨识包 含在北半球环流异常之间可能存在的因果关系。 Rossby 波能量频散及瞬变涡动反馈强迫过程能够 提供环流异常间的联系以及可能存在的波源 (Bueh and Nakamura, 2007),无疑有助于理解东北冷涡 活动异常及其相关环流异常的成因机理。

图 4 给出了 1991 和 2007 年 4~5 月份 500 hPa 环流异常和对应的波作用通量。为了便于不同纬度 环流异常的对比,图中给出了流函数形式的位势高 度异常(位势高度异常乘以 $\sin 45^{\circ}/\sin \varphi$,其中 φ 为 纬度)。图 5 为 1991 和 2007 年 4~6 月份瞬变强迫 异常,以500 hPa 位势高度倾向异常给出。在1991 年,乌拉尔山附近的阻塞型环流在4月份已经形 成,其中心距平达150gpm(图4a),波作用通量在 乌拉尔山地区大部显著辐散(深阴影),说明这一 地区成为波源区。由图 5a 可见,在乌拉尔山地区 存在很强的瞬变强迫,可达14 gpm/d,它是阻塞型 环流形成的主要原因, 而来自地中海地区的 Rossby 波能量注入也有利于该阻塞型环流的维持。在5月 份,随着局地瞬变强迫的减弱(图 5b),乌拉尔山 阻塞型环流有所减弱(图4b),但仍维持+80gpm 左右的距平,这与波作用通量在乌拉尔山地区大部 显著辐合有关(浅阴影)。5月份北美至北大西洋 地区的驻波型长波扰动(图 2c)恰好与图 4b的环 流异常所对应。由此可见, Rossby 波能量传播与 瞬变强迫机制共同导致了 4~5 月乌拉尔山阻塞型 环流的形成和维持。它在 6 月份(图 1a)基本保持 在 5 月份的位置和强度,其中瞬变强迫则有所加强 (见图 5c)。阿留申群岛附近 4~5 月存在气旋式异 常环流,它在图 2a 中表现为驻波型超长波,它与上 下游的 Rossby 波联系在 4 月份比较明显(图 4a), 但随着其强度的减弱,这种联系在 5 月份变得不明 显(图 4b)。

2007年4月份的环流与1991年明显不同。它 在东北大西洋-欧亚大陆-北太平洋呈波状,其异 常中心经向伸展,乌拉尔山及以西地区气旋式异常 环流主导,而在贝加尔湖附近则为反气旋式异常环 流。波能量的强迫和频散在这些地区比较明显(图 4c)。在西欧一地中海正高度异常区为波源区,它 与瞬变强迫正异常区一致(图 5d)。在5月份(图 4d),乌拉尔山地区为气旋式异常环流(负距平), 亚洲中纬度地区至东西伯利亚/白令海峡地区为反 气旋式环流(正距平)。值得注意的是,在亚洲大 陆上空,波作用通量不太明显,瞬变强迫作用却变 得十分明显。例如,中高纬地区的异常环流与瞬变 强迫分布非常一致(图 4d 和图 5e)。2007 年 5 月 最显著的特点是乌拉尔山和东西伯利亚/白令海峡 地区的负正距平分布,它们与当年初夏的东北冷涡 活动的异常少密切相关。

为了揭示初夏环流不同阶段的演变及其对应的 波能量频散特征,我们在图6中绘制了6月上、中、 下旬的 500 hPa 高度异常(流函数形式)及波作用 通量。在1991年6月上旬(图 6a),北欧至里海北 侧有-60 gpm 的负距平区,源自该地区的 Rossby 波向乌拉尔山地区传播,有利于乌拉尔山阻塞型环 流的维持。在乌拉尔山区,6月平均瞬变强迫异常 可达 6 gpm/d, 它维持阻塞型环流, 并成为波源 (图 5c)。与5月份的情况不同,这时起源于乌拉尔 山阻塞型环流区的 Rossby 波向下游显著频散,一 方面沿高纬向雅库茨克地区频散,另一方面沿中纬 度传播,分别在蒙古和环渤海地区形成了负、正距 平环流。在这种环流配置比较有利于东北冷涡的形 成,但冷涡的位置偏北,上旬的冷涡活动有4天 (我们考察了逐日 500 hPa 高度场)。在中旬(图 6b),基本保持上旬的环流形势,但贝加尔湖北侧 负距平环流加强并向鄂霍次克海一侧伸展,这使冷



图 4 (a, b) 1991 年和 (c, d) 2007 年 4~5 月 500 hPa 位势高度异常场 (单位: gpm,等值线)及其对应的波作用通量 (箭头)。等值线分别为 \pm 20、 \pm 80、 \pm 140 gpm,虚线表示负值,零线已略;深(浅)阴影表示波作用通量辐散(辐合)大于(小于)8×10⁻⁶(-8×10⁻⁶)m/s² 的区域

Fig. 4 500-hPa geopotential height anomalies (units: gpm, contours) and the corresponding wave activity fluxes (arrows) for Apr and May in (a, b) 1991 and (c, d) 2007. Contours of ± 20 , ± 80 , ± 140 gpm are given, dashed lines represent negative values, and zero line is omitted. Dark (light) shading shows the divergence (convergence) of wave activity fluxes with divergence more (less) than 8×10^{-6} (-8×10^{-6}) m/s²

涡位置偏东。蒙古的负距平环流也东伸到中国东北 地区,这在图 3a 中表现为 30~60 天的低频正涡度 从西侧向东北地区传播。中旬冷涡天数为 6 天。在 下旬(图 6c),极涡凸向贝加尔湖方向,东北地区由 气旋式异常环流控制。这种现象正对应着由南北两 侧低频正涡度向东北地区传播的特征(图 3b)。冷 涡活动区的两侧的乌拉尔山和西北太平洋地区均有 高压脊控制。这种环流配置极有利于东北地区闭合 低压的形成,使整个下旬都有冷涡盛行。我们注意 到,东北冷涡活动区的南侧 6 月份的各旬都有正距 平环流,对应的西太平洋副热带高压 586 线位于长 江口附近。在300 hPa 层,这一正距平环流由伊朗 一青藏高原一中国东海的"十一十"波列所形成, Rossby 波在亚洲副热带急流中的传播非常明显(图 略)。由于青藏高原的存在,这一特征在 500 hPa 层 不太明显。

在 2007 年 6 月 (图 6d~f),乌拉尔山地区气 旋式异常环流盛行,极地冷空气易于在乌拉尔山-亚洲北部-北太平洋带状区域活动,东北地区则为 高压脊控制。乌拉尔山地区负距平环流与东北地区



图 5 (a、b、c) 1991 年和 (d、e、f) 2007 年 4~6 月 500 hPa 瞬变涡动强迫异常场 (单位:gpm/d,等值线)。等值线间隔为 2 gpm/d, 虚线 表示负值,零线已略

Fig. 5 500-hPa transient eddy forcing anomalies (gpm/d) from Apr to Jun in (a, b, c) 1991 and (d, e, f) 2007. Contour interval is 2 gpm/d, solid (dashed) lines indicate positive (negative) values, and zero line is omitted

437



图 6 (a、b、c) 1991 年和 (d、e、f) 2007 年 6 月上、中、下旬 500 hPa 位势高度异常场 (单位:gpm,等值线)及其对应的波作用通量 (箭头)。等值线分别为±20、±80、±160 gpm,虚线表示负值,零线已略;深(浅)阴影表示波作用通量辐散(辐合)大于(小于)2×10⁻⁵ (-2×10⁻⁵) m/s²的区域

Fig. 6 500-hPa geopotential height anomalies (units: gpm, contours) and the corresponding wave activity fluxes (vectors) for the (a, d) first, (b, e) second, and (c, f) third ten days of Jun in (a, b, c) 1991 and (d, e, f) 2007. Contours of ± 20 , ± 80 , ± 160 gpm are given, dashed lines indicate negative values, and zero line is omitted. Dark (light) shading shows the divergence (convergence) of wave activity fluxes with divergence more (less) than $2 \times 10^{-5} (-2 \times 10^{-5})$ m/s²

正距平环流之间没有明显的 Rossby 波链接。但 是,东北地区为较强的波源区(深阴影区),它与局 地瞬变强迫异常分布所致,6月份平均瞬变强迫异 常可达6gpm/d。乌拉尔山一带的冷空气活动及其 对应的瞬变波活动可以强迫出持续性东北高压脊, 这一机制最早由 Green (1977)在研究欧洲高温干 旱时提出。自4月到6月,乌拉尔山地区一直由气 旋式异常环流控制,在6月上中旬它主要由来自北 欧/挪威海地区的 Rossby 波能量所维持(图 5d~ e)。极地冷空气长时间向乌拉尔山地区活动是东北 冷涡异常少的一个重要原因。

6 结论和讨论

本文以初夏东北冷涡异常多的 1991 年和异常 少的 2007 年为典型个例,利用谐波分析、30~60 天低频振荡分析、Rossby 波能量频散以及瞬变强 迫过程分析相结合的方法,探讨了大气环流低频变 化对初夏东北冷涡异常活动的影响,并得出如下结 果:(1) 初夏东北冷涡活动显著异常与上游乌拉尔 山附近和下游日本及以东(西北太平洋)的持续性 异常环流所对应。冷涡异常多年(1991年), Rossby 波能量向下游频散与瞬变扰动强迫致使乌拉尔山附 近阻塞型环流盛行。该阻塞型环流一方面使极地冷 空气向东北地区移动,另一方面通过 Rossby 波能 量沿中纬度向东北地区的传播,使东北冷涡活动加 强。冷涡异常少年(2007年)的环流情况则基本相 反。(2) 谐波分析和低频振荡分析表明,在冷涡异 常多(少)年的5~6月正(负)涡度位相占优,这 与北太平洋中西部的超长波槽西退(东进)所对 应。在北太平洋一北美一大西洋地区呈驻波型长波 活动有利于 Rossby 波能量的传播,亦有利于乌拉 尔山附近的异常环流得以长时间维持。(3) 初夏东 北冷涡活动显著异常的成因及信号至少可以追溯到 当年的5月份。冷涡活动区上游的乌拉尔山地区, 其初夏环流特征均在5月份环流上清晰可见。

本工作通过两个异常个例分析,捕捉了关键性 的低频异常强信号,为东北冷涡活动的月际尺度短 期气候预测提供了有一定价值的依据,不仅着眼于 冷涡活动区的上游地区,也要重视下游地区。

在 6 月份, 冷涡活动区的下游, 即日本及以东 (西北太平洋), 不论在冷涡活动异常多还是异常少 的年, 均存在异常环流 (图 1)。它们都对应着一个 减弱的局地西风气流,从而有利于波能量在冷涡活 动区聚集。特别是 1991 年 6 月,在对流层上层 (300 hPa) Rossby 波在亚洲副热带急流中传播,形 成了伊朗一青藏高原一中国东海的波列分布,使一 个正高度异常区一直滞留于日本岛南侧至中国东海 地区(图略)。由于篇幅关系,它与东北冷涡活动 的具体关联,本文未能详加分析。另外,尽管在白 令海峡和阿留申群岛一带有比较明显的异常环流, 但它对东北冷涡活动的具体影响也尚不清楚。

致谢 两位匿名审稿人对本工作提出了很多建设性的宝贵意见, 其中的一位冷涡专家甚至对本文的结构及文字方面也进行了认真修 改,在此深表谢意!

参考文献 (References)

- 毕慕莹,丁一汇. 1992. 1980 年夏季华北干旱时期东亚阻塞形势的 位涡分析 [J]. 应用气象学报,3 (2):145-156. Bi Muying, Ding Yihui. 1992. A study of budget of potential vorticity of blocking high during the drought period in summer of 1980 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 3 (2): 145-156.
- 布和朝鲁,施宁,纪立人,等. 2008. 梅雨期 EAP 事件的中期演变 特征与中高纬 Rossby 波活动 [J]. 科学通报,53 (1):111-121. Bueh Cholaw, Shi Ning, Ji Liren, et al. 2008. Features of the EAP events on the medium-range evolution process and the midand high-latitude Rossby wave activities during the Meiyu period [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 53 (1): 111-121.
- Bueh C, Nakamura H. 2007. Scandinavian pattern and its climatic impact. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 133 (629): 2117-2131.
- 陈汉耀. 1957. 1954 年长江淮河流域洪水时期的环流特征 [J]. 气象学报, 28 (1): 1-12. Chen Hanyao. 1957. The circulation features of the Yangtze-Huaihe River basin during the flood period in 1954 [J]. Acta Meteor. Sinica (in China), 28 (1): 1-12.
- 仇永炎. 1985. 中期天气预报 [M]. 北京:科学出版社,420pp. Qiu Yongyan. 1985. Medium-Range Weather Forecast (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 420pp.
- 高守亭,朱文妹,董敏. 1998. 大气低频变异中的波流相互作用(阻 塞形势) [J]. 气象学报,56(6):665-680. Gao Shouting, Zhu Wenmei, Dong Min. 1998. On the wave flow interaction in the low frequency atmospheric variation: Blocking pattern [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 56(6):665-680.
- Green J S A. 1977. The weather during July 1976: Some dynamical considerations of the drought [J]. Weather, 32: 120-128.
- 何金海,吴志伟,江志红,等. 2006a. 东北冷涡的"气候效应"及其 对梅雨的影响[J]. 科学通报,51(23):2803-2809. He Jinhai, Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, et al. 2006a. "Climate effect" of Northeast China cold vortex and its influence on the Meiyu [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (23): 2803-2809.

何金海,吴志伟,祁莉,等. 2006b. 北半球环状模和东北冷涡与中

国东亚夏季降水关系分析 [J]. 气象与环境学报, 22 (1): 1-5. He Jinhai, Wu Zhiwei, Qi Li, et al. 2006b. Relationships among the Northern Hemisphere Annual Mode, the northeast cold vortex and the summer rainfall in Northeast China [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 22 (1): 1-5.

- Lau N-C, Holopainen E O. 1984. Transient eddy forcing of the time-mean flow as identified by geopotential tendencies [J]. J. Atmos. Sci., 41: 313 - 328.
- Lau N-C, Nath M J. 1991. Variability of the baroclinic and barotropic transient eddy forcing associated with monthly changes in the mid-latitude storm tracks [J]. J. Atmos. Sci., 48: 2589 – 2613.
- 李崇银. 1990. 大气中的季节内振荡 [J]. 大气科学, 14 (1): 32-45. Li Chongyin. 1990. Intraseasonal oscillation in the atmosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 14 (1): 32-45.
- 刘宗秀, 廉毅, 高枞亭, 等. 2002. 东北冷涡持续活动时期的北半球 500 hPa 环流特征分析 [J]. 大气科学, 26 (3): 361 – 372. Liu Zongxiu, Lian Yi, Gao Zongting, et al. 2002. Analyses of the Northern Hemisphere circulation characters during northeast cold vortex persistence [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 361 – 372.
- 苗春生,吴志伟,何金海,等. 2006. 近 50 年东北冷涡异常特征及 其与前汛期华南降水关系分析 [J]. 大气科学,30 (6):1249-1256. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006. The anomalous features of the Northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1249-1256.
- 乔枫雪,赵思雄,孙建华. 2007. 一次引发暴雨的东北低涡的涡度 和水汽收支分析 [J]. 气候与环境研究,12(3):397-412. Qiao Fengxue, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2007. Study of the vorticity and moisture budget of a northeast vortex producing heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12(3): 397-412.
- 沈柏竹,李尚锋, 廉毅. 2008. 初夏东北冷涡活动的谐波分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 38 (增刊): 204 - 208. Shen Baizhu, Li Shangfeng, Lian Yi. 2008. The harmonic analysis of cold vortex of the Northeast China in early summer [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 38 (Suppl.): 204-208.
- 孙力,郑秀雅,王琪. 1994. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚 大型环流系统之间的关系 [J]. 应用气象学报,5(3):297-303. Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. 1994. The climatological characteristics of northeast cold vortex in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5(3):297-303.

孙力. 1997. 东北冷涡持续活动的分析研究 [J]. 大气科学, 21

(3): 297-307. Sun Li. 1997. A study of the persistence activity of northeast cold vortex in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (3): 297-307.

439

- 孙力. 1998. 一次东北冷涡发展过程中的能量学研究 [J]. 气象学报, 56 (3): 349 361. Sun Li. 1998. A energetic study of a northeast cold vortex [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 56 (3): 349 361.
- 汤懋苍. 1957. 亚洲东部的阻塞形势及其对天气气候的影响 [J]. 气象学报, 28 (4): 282 - 293. Tang Maocang. 1957. On the blocking situation of the eastern Asia and its climatic effects [J]. Acta Meteor. Sinica (in China), 28 (4): 282 - 293.
- 陶诗言,等. 1980. 中国之暴雨. 北京:科学出版社. 225pp. Tao Shiyan, et al. 1980. Rainstorm of China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varing basic flow [J]. Geophys. Res. Lett., 24 (23): 2985-2988.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on zonally varying basic flow [J]. J. Atmos. Sci., 58 (6): 608 – 627.
- 徐祥德,高守亭. 2002. 外源强迫与波流作用动力学原理(第二版)
 [M]. 北京:海洋出版社. 291pp. Xu Xiangde, Gao Shouting.
 2002. Dynamic Principle of External Source Force and Wave-Flow Interaction (Second Edition) (in Chinese) [M]. Beijing: Ocean Press, 291pp.
- 叶笃正,陶诗言,李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象[J]. 气象学报,29 (4):249-263. Ye Duzheng, Tao Shiyan, Li Maicun. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 29 (4): 249-263.
- 张云, 雷恒池, 钱贞成. 2008. 一次东北冷涡衰退阶段暴雨成因分析 [J]. 大气科学, 32 (3): 481-498. Zhang Yun, Lei Hengchi, Qian Zhencheng. 2008. Analyses of formation mechanisms of a rainstorm during the declining phase of a northeast cold vortex [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 32 (3): 481-498.
- 张庆云,陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. 气象学报,56(2):199-211. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Influence of Asian mid high latitude circulation of East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 56 (2):199-211.
- 郑秀雅,张延治,白人海. 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版 社,132pp. Zheng Xiuya, Zhang Yanzhi, Bai Renhai. 1992. Rainstorm in Northeast China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 132pp.