

# 东北冷涡环流及其动力学特征

布和朝鲁<sup>1,2</sup> 谢作威<sup>1</sup>

(1 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;

2 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:** 主要总结了东北冷涡形成和维持的动力学原因: (1) 大兴安岭/小兴安岭的地形以及临海的水汽条件有利于东北地区移动性冷涡系统的形成和发展。(2) 与欧亚大陆阻塞型环流相联系的准纬向低频Rossby波活动将其波能量直接频散到东北地区, 形成冷涡环流。(3) 源自东北亚阻塞型环流以及副热带异常环流的Rossby波均可经向传播到东北地区, 有利于东北冷涡环流的维持(尤其在仲夏和晚夏)。(4) 与相邻阻塞型环流有关的对流层中低层冷空气活动可强迫出东北地区局地上游Rossby波, 致使冷涡环流形成和维持。(5) 来自东北地区上游的瞬变天气扰动与下游异常环流型相互匹配, 形成有效的瞬变涡动强迫作用, 使冷涡环流持续维持。(6) 负位相西太平洋(WP)遥相关型是东北冷涡活动的下游背景环流型, 其盛行是东北冷涡环流反复出现和持续维持的一个重要原因。

**关键词:** 东北冷涡, 阻塞型环流, Rossby波, 瞬变涡动强迫, WP遥相关型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.03.005

## Northeastern China Cold Vortex Circulation and Its Dynamical Features

Bueh Cholaw<sup>1,2</sup>, Xie Zuwei<sup>1</sup>

(1 International Center for Climate and Environment Sciences (ICES), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

**Abstract:** The dynamical mechanisms associated with the formation and maintenance of Northeastern China Cold Vortex (NCCV) are summarized in this paper: (1) The topography conditions related to the Greater and Lesser Hinggan Ling ranges and the water vapor condition facilitated by the neighboring seas are favorable to the formation and development of the migrating cold vortex system over the Northeastern China; (2) The NCCV circulation may be directly formed due to the downstream energy dispersion of the quasi-zonal low-frequency Rossby waves that are emanated by the upstream blocking-type anomalous circulation over the Eurasian continent; (3) The meridional propagations of Rossby waves from the blocking-type circulation over Northeastern Asia and from the subtropical anomalous circulation are favorable to the maintenance of the NCCV circulation, in particular, in mid- and late summer; (4) the formation and maintenance of NCCV circulation can also be caused by the upward propagation of Rossby waves over Northeastern China, which is forced by the cold air activity in the lower and mid-troposphere associated with the neighboring blocking-type circulation; (5) The effective transient eddy feedback forcing, due to the interaction between the transient synoptic disturbances from upstream regions and the downstream basic flow pattern, leads to the persistent maintenance of the NCCV circulation; (6) The western Pacific (WP) pattern is the background downstream basic circulation pattern of the NCCV circulation and its dominance is the primary cause of the recurrence and persistence of the NCCV activity.

**Keywords:** northeastern China cold vortex, blocking-type circulation, Rossby wave, transient eddy feedback forcing, western Pacific pattern

### 1 引言

中纬度西风带长波槽有时演变成孤立、闭合的冷性低压中心, 称为切断低压, 它经常与阻塞高压相伴

出现, 能稳定维持很长一段时间, 对局地天气气候产生重要影响<sup>[1]</sup>。中国东北地区为北半球切断低压频发的三个地区之一, 其冷涡活动以夏季最为活跃, 尤其在初夏<sup>[2]</sup>。东北冷涡是东亚地区一个持续时间较长且较为频繁的系统, 冷涡天数占夏季总天数的近1/3。东北冷涡活动的多寡, 是造成中国东北地区的洪涝灾害和持续性低温事件的主要原因<sup>[3-5]</sup>。它的盛行与否也对

收稿日期: 2012年6月17日

第一作者: 布和朝鲁(1968—), Email: bueh@lasg.iap.ac.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(40975033); 国家科技支撑计划项目(2009BAC51B02)

江淮梅雨形势能否正常建立具有重要影响<sup>[6]</sup>。例如，东北冷涡反复出现和持续维持过程导致了2012年入梅较晚的形势。因此，东北冷涡活动的机理研究对短期气候预测也具有重要的参考意义。

欧亚大陆上空盛行阻塞型环流是东北冷涡形成和维持的一个重要原因<sup>[2, 7, 8]</sup>。由于东北冷涡可与多种阻塞型环流相联系，有必要依据阻塞型环流及北半球环流形势对其进行分类。不同类型的东北冷涡环流的形成和维持机理并不相同，对应的天气影响也不尽相同<sup>[9]</sup>。

既然东北冷涡可与多种上游欧亚大陆异常环流相联系，那么一定存在一个下游环流型，它使来自高纬度地区的冷空气陷于东北地区形成冷涡。那么，这一背景环流型究竟是什么？什么样的动力过程衔接东北冷涡及其上下游异常环流？这些问题值得我们总结和进一步思考。

本文将使用美国环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)多年(1965—2007年)再分析资料<sup>[10]</sup>，试图重点探讨东北冷涡形成和维持的动力学机理。

## 2 东北冷涡类型及天气影响

东北冷涡的分类过程如下：(1)在1965—2007年的冷涡活跃期(5月1日—6月14日)<sup>[9]</sup>，界定出100个冷涡事件，具体方法见文献[11]。取每个冷涡峰值日的500hPa位势高度距平场当作形势场，进行旋转主分量分析(范围为35°—75°N, 40°—160°E)，其前4个模态总解释方差为58.2%。(2)将100个冷涡事件峰值日500hPa高度距平场投影到四个模态，并以最大投影指数(标准化)作为分类标准，最大投影指数须大于0.5且须比其余模态上的投影指数均大0.5。(3)根据相邻阻塞型环流的位置，将东北冷涡分为贝加尔湖(BKL)型、叶尼塞河(YNS)型、乌拉尔(UR)型和雅库茨克/鄂霍茨克海(YO)型等四个类型。

表1给出了这四类冷涡事件的个数及持续性性质。实际上，除表1中的58个冷涡事件以外还有42个事件，它们具有表1中两个甚至3个类型的特点，对这些个例，这里不作阐述。

图1为合成的四类东北冷涡在其峰值日的500hPa高度距平场。BKL型和YNS型冷涡事件中，在贝加尔湖和叶尼塞河地区存在阻塞型环流，北半球异常环流

表1 4类东北冷涡事件个数，其中维持3~5d的为移动性冷涡，维持5d以上的为持续性冷涡

类型	BKL型	YNS型	UR型	YO型
个数	18	17	11	12
移动性	8	14	7	7
持续性	10	3	4	5

以中高纬Rossby波列为主要特征，对应的东北亚地区环流(图略)显出“反气旋式波破碎”特征<sup>[12]</sup>。UR型冷涡不仅与乌拉尔地区阻塞型环流相联系，而且与雅库茨克地区高压脊也有密切关系。而YO型冷涡的上游并无明显的高压脊出现，主要在雅库茨克/鄂霍茨克海地区有一高压脊伸向北冰洋。UR型和YO型冷涡环流在亚洲北部显出经向环流型特征，也具有“气旋式波破碎”特征<sup>[12]</sup>。

东北冷涡活动的天气影响不仅在不同类型中存在差异，而且在不同时段也显出不同特征<sup>[9]</sup>。在其活跃期，冷涡活动在东北地区产生的天气影响主要是低温效应。就东北地区而言，YO型冷涡的低温效应最强，UR型冷涡的则最弱。BKL型和YNS型冷涡带来的冷空气活动可影响到中国南方地区。在这一时段，虽然冷涡引起局地降水，但与随后的夏季相比，降水量都不大。在仲夏和晚夏(6月15日—8月31日)，只有3类(YNS型、UR型和YO型)东北冷涡盛行，它们的低温效应逐步减弱，但其降水效应逐步加强。特别是在盛夏(7月15日—8月31日)，冷涡在东北地区可引起持续5d左右的强降水，有时也带来区域性暴雨<sup>[13]</sup>。值得关注的是，在仲夏和晚夏，YNS型和YO型冷涡在其减弱阶段可转变为“梅雨槽”，对长江中下游降水过程产生重要影响。此外，由于其冷空气影响，YNS型冷涡在其减弱阶段，可与热带和副热带天气系统匹配，在中国西南地区引起持续性降水过程<sup>[9]</sup>。

## 3 东北冷涡形成和维持机理

东北冷涡系统的形成具有特殊的地理环境，它在东北平原和三江平原上空反复出现。大兴安岭和小兴安岭的地形有利于对流层低气压系统在其下游发展。由于东北地区南濒渤海，东邻日本海，水汽条件也有利于东北冷涡系统的形成和发展。但这些仅仅是移动性冷涡形成的有利条件，并不能解释冷涡的持续性活动。

这里以活跃期持续性BKL型冷涡为例，揭示其形成和维持的动力学机理。图2a和b为持续性BKL型冷涡500hPa高度异常场的演变及对应的波作用通量，图2c和d为瞬变涡动强迫对500hPa低频异常环流的贡献(具体方法见文献[14]和[15])。简单起见，以第一-N(N)天代表冷涡峰值日之前(之后)的第N天。第一-6d，北欧上空有一显著的阻塞型环流，它由上游Rossby波以及局地瞬变涡动强迫共同维持。第一-4~0d，Rossby波能量由北欧逐步向乌拉尔山、贝加尔湖以及中国东北地区频散，使东北冷涡环流形成和发展。值得注意的是，第一-4d在西北太平洋地区及相邻的东北亚地区存在负位相西太平洋(WP)型环流，对应着

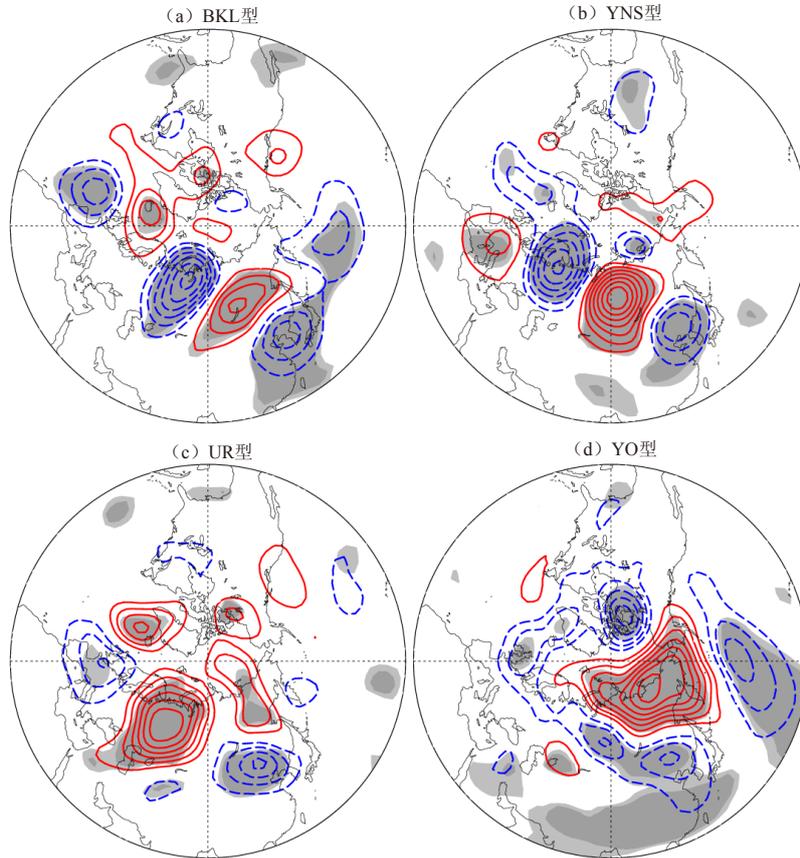


图1 BKL型 (a)、YNS型 (b)、UR型 (c) 和YO型 (d) 东北冷涡的峰值日500hPa位势高度距平场 (单位: m, 合成), 等值线间隔10m, 深 (浅) 阴影表示95% (90%) 置信度

西风气流的分支现象<sup>[16]</sup>。这样的环流形势有利于瞬变天气扰动在其上游处强迫出低频异常环流<sup>[15]</sup>。如图2c和d所示, 东北地区上空稳定维持的异常瞬变涡动强迫作用有利于冷涡环流的形成和维持。由此可见, 欧亚大陆上空低频Rossby波活动以及在WP型环流背景下的瞬变涡动强迫作用是持续性东北冷涡活动的主要原因。这一关键动力学特征在YNS型和UR型冷涡活动中也普遍存在, 这里不再复述。通常情况下, 瞬变天气扰动使冷涡环流中心向下游移动, 这也正是移动性东北冷涡活动的主要特点。但是, 对于持续性东北冷涡活动而言, 来自上游的瞬变扰动与下游异常环流相互匹配, 导致冷涡持续滞留于东北地区上空的形势, 正是这一特点使其有别于移动性冷涡活动。

由于其低温效应十分显著, 东北地区业务部门最为关注YO型冷涡及其影响。它的动力学特征也与其他3类冷涡有所不同。图3给出与移动性YO型冷涡活动相联系的低频异常环流及瞬变涡动强迫异常特征。第-4d (图3a), 在北太平洋地区中部存在“北正南负”的偶极子型异常环流, 是为东北地区下游最为明显的异常环流。在上游的乌拉尔山地区, 有一个气

旋式异常环流。这些上下游异常环流主要由异常瞬变涡动强迫所维持 (图3d)。第-2d至峰值日 (图3b和c), 上述北太平洋偶极子型异常环流逐步向西扩展和移动, 最终成为典型的YO型冷涡环流。这一过程主要由异常瞬变波强迫完成 (图3d和e)。换言之, 由瞬变涡动强迫机制所体现的上游瞬变扰动与下游异常环流的相互匹配是YO型冷涡环流形成的主要原因。同时, 源于乌拉尔山气旋式异常环流的Rossby波能量频散过程也有利于西北太平洋/东北亚地区的阻塞型环流向西扩展。值得注意的是, 雅库茨克/鄂霍茨克地区阻塞型环流引导对流层中低层冷空气活动, 在东北地区强迫出局地上传播的Rossby波, 对流层中层环流对此进行调整, 这一过程也有利于冷涡环流的形成和维持 (图3f)。持续性YO型冷涡的形成过程与上述移动性冷涡过程十分相似, 但雅库茨克/鄂霍茨克地区阻塞型环流的维持时间更为持久, 这使其有别于对应的移动性冷涡活动。可见, 瞬变涡动强迫作用以及东北地区局地上传播的Rossby波活动是YO型冷涡形成和维持的主要机制。

东北冷涡的形成和维持的动力学机理存在季节性

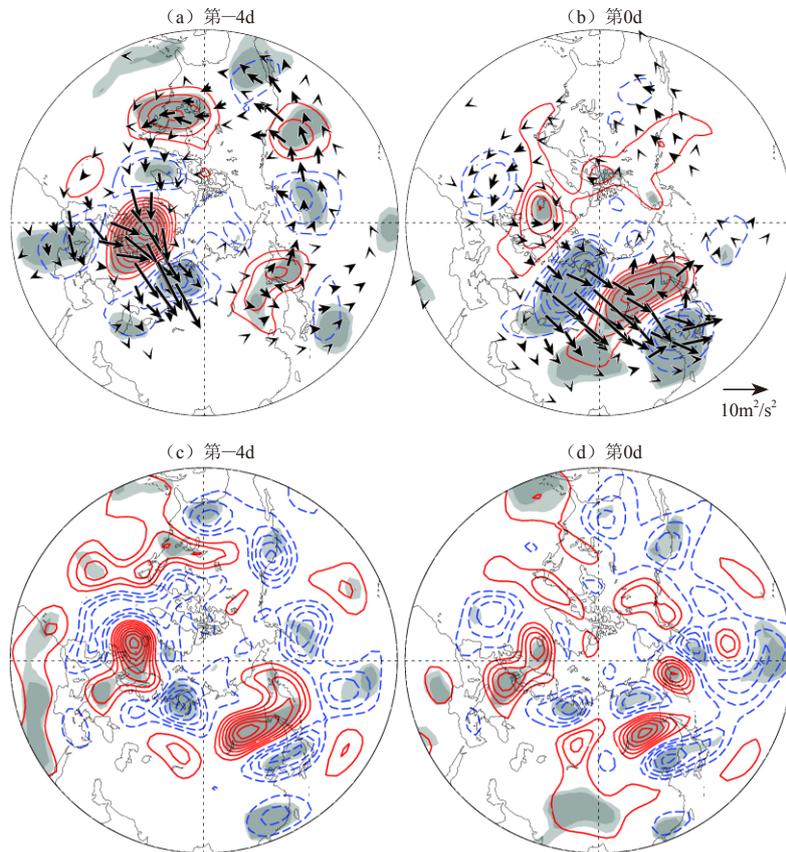


图2 持续性BKL型东北冷涡500 hPa高度距平场(单位: m, 等值线)的演变过程及其对应的波作用通量(单位:  $m^2/s^2$ , 箭头), (a)为第-4d, (b)为冷涡峰值日, 等值线间隔为20 m; (c)和(d)同(a)和(b), 但为异常瞬变涡动强迫(单位: m/d), 等值线间隔为2 m/d, 深(浅)阴影表示95%(90%)置信度

特征<sup>[9]</sup>。首先, 在活跃期, 欧亚大陆上空盛行较强的西风气流, 波状环流显著, 源自上游地区的Rossby波能量的注入, 使得东北冷涡活动较为强盛。在仲夏和晚夏, 欧亚大陆中高纬西风气流波导的位置偏北, 对应的准纬向Rossby波也在偏高纬地区传播, 因此东北冷涡活动较弱, 与冷涡相联系的东北亚阻塞型环流也生成于偏高纬地区; 其次, 在仲夏和晚夏, 由于东亚急流的北进, 东北地区上空为局地静止波波数的大值区。其结果是, 源自东北亚阻塞型环流以及副热带异常环流的Rossby波均可以经向传播到东北地区, 有利于东北冷涡环流的维持; 最后, 在仲夏和晚夏, 在准纬向Rossby波向东北地区频散较弱的情况下, 瞬变波强迫为东北冷涡的形成和发展提供了能量来源, 它对各类冷涡的发展均有重要贡献。

#### 4 东北冷涡的下游背景环流型

我国气象工作者早已注意到, 东北冷涡活动与前冬北太平洋涛动及北极涛动(AO)存在密切关系<sup>[17, 18]</sup>。但从冷涡活动与其上下游环流的联系看, 其同期的背景环流型更值得关注和研究。迄今为止, 尚没有研究明

确提出, 究竟什么环流型是东北冷涡活动的同期背景遥相关型。

由表2可知, 8月北大西洋涛动(NAO)和AO与冷涡天数之间的负相关系数达到了显著程度。但这两个遥相关型对活跃期及仲夏的冷涡活动没有启示意义。太平洋/北美(PNA)遥相关型在初夏阶段在其负位相有利于东北冷涡活动, 但在中晚夏并不存在显著关系。5—8月, WP型与东北冷涡天数之间的负相关关系最为显著(-0.30~-0.36), 均达到了95%的置信度。对整个暖季而言, 两者的相关系数为-0.44, 达到了99%的置信度。由此可知, 负位相WP型是东北冷涡活动的下游同期背景环流型。

图4a和b分别为5和6月负位相WP型的500hPa位

表2 遥相关型指数与东北冷涡天数的相关

类型	5月	6月	7月	8月	5—8月
WP	-0.36**	-0.33**	-0.30**	-0.35**	-0.44***
PNA	0.34**	0.32**	0.05	0.22	-0.01
NAO	-0.04	-0.02	-0.08	-0.45***	-0.24
AO	0.04	0.12	-0.07	-0.33**	-0.17

注: \*\*和\*\*\*分别表示95%和99%置信度

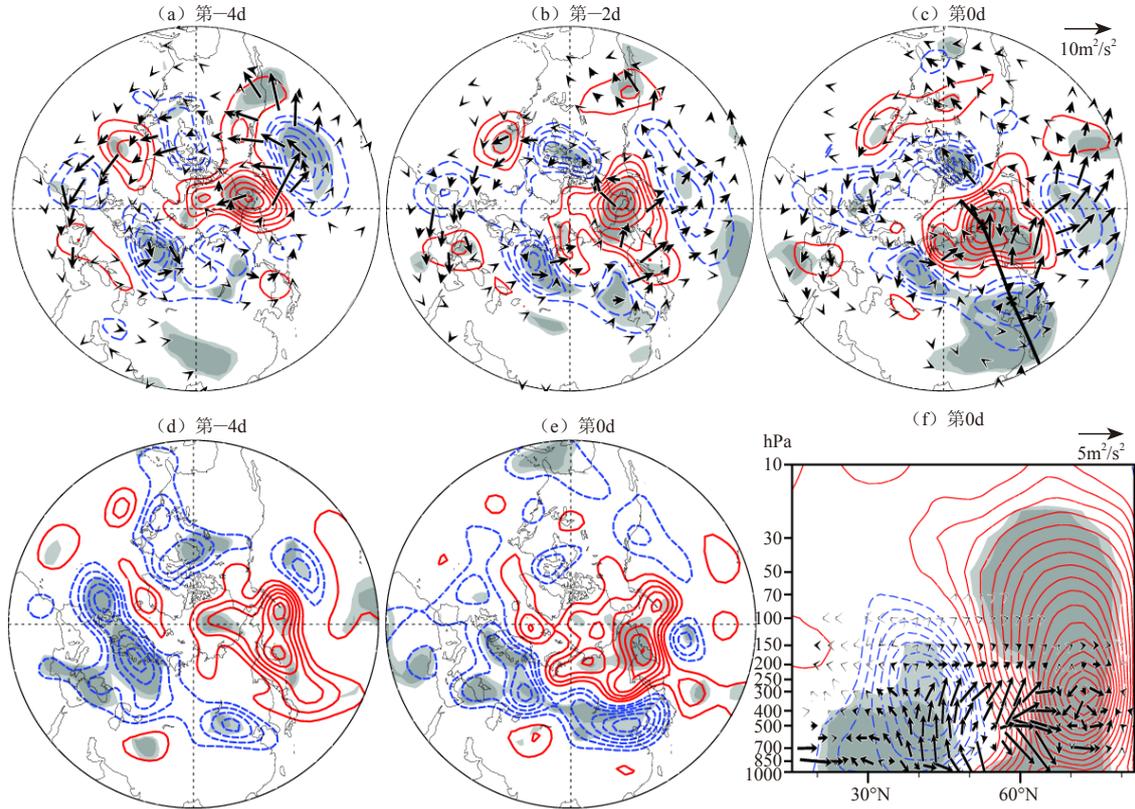


图3 移动性YO型东北冷涡500 hPa高度距平场 (单位: m, 等值线) 的演变过程及其对应的波作用通量 (a) ~ (c) (单位:  $m^2/s^2$ , 箭头), (a) 为第-4d, (b) 为第-2d, (c) 为冷涡峰值日, 等值线间隔为20 m; (d) 和 (e) 同 (a) 和 (c), 但为异常瞬变涡动强迫 (单位: m/d), 等值线间隔为2 m/d; (f) 冷涡垂直结构 (沿图3c粗黑线画的纬度—气压剖面) 图, 等值线为位势高度距平 (间隔为1 m), 箭头为波作用通量 (单位:  $m^2/s^2$ ), 深 (浅) 阴影表示95% (90%) 置信度

势高度距平场, 图4c和d则为东北冷涡环流的月平均异常场。WP型表征的是位势高度场在东亚/北太平洋急流南北两侧反位相的变化<sup>[16]</sup>, 整个东北亚至阿拉斯加湾的广大正距平区与其南侧的负距平区共同组成了负位相WP型。它所对应的东亚/北太平洋急流偏南偏东。东北冷涡天数与WP型之间的显著负相关表明, 暖季节急流在北太平洋区处于偏南的位置可能有利于东北冷涡的发生和维持。由图4c和d可见, 与多冷涡活动相联系的月平均异常环流与负位相WP型较为相似, 但是靠近东亚地区的两个活动中心的位置有所不同。与WP型相比, 与冷涡环流相对应的两个活动中心在位置上偏西, 处于WP型的上游地区, 这一现象与廉毅等<sup>[8]</sup>的结果基本一致。如前所述, 负位相WP型环流所表征的是在东北地区下游出现环流分支的情形。因此, 由瞬变涡动强迫机制可知, 来自上游的瞬变斜压扰动易于在东北地区形成低频冷涡环流。这正是负位相WP型为东北冷涡活动下游背景遥相关型的主要原因。

## 5 小结

本文基于与东北冷涡活动相联系的阻塞型环流特征以及北半球环流形势, 对东北冷涡进行了分类。在其活跃期 (初夏) 可分为4种类型 (BKL, YNS, UR和YO型), 在夏季其余时段可分为3种类型 (YNS, UR和YO型)。不同类型东北冷涡活动的关键环流特征和天气影响存在明显的差异。本文从低频Rossby波活动以及瞬变涡动强迫作用的角度, 揭示了东北冷涡形成和维持的物理机理及其季节变化特征。西太平洋 (WP) 遥相关型是东北冷涡活动的下游背景环流型, 其负位相有利于冷涡的生成和维持。

与东北冷涡环流相联系的阻塞型环流是多样的, 也就是说, 冷涡上游的欧亚大陆异常环流是多种多样的, 并不存在一种主导性的上游环流型。由此可知, 对持续性冷涡活动做出较准确的中期—延伸期预报是相当困难的。但如果在中国东北地区的下游盛行负位相WP型, 这将冷涡活动中期—延伸期预报提供非常有用的信息。例如, 在2012年5月, 持续3d以上的东

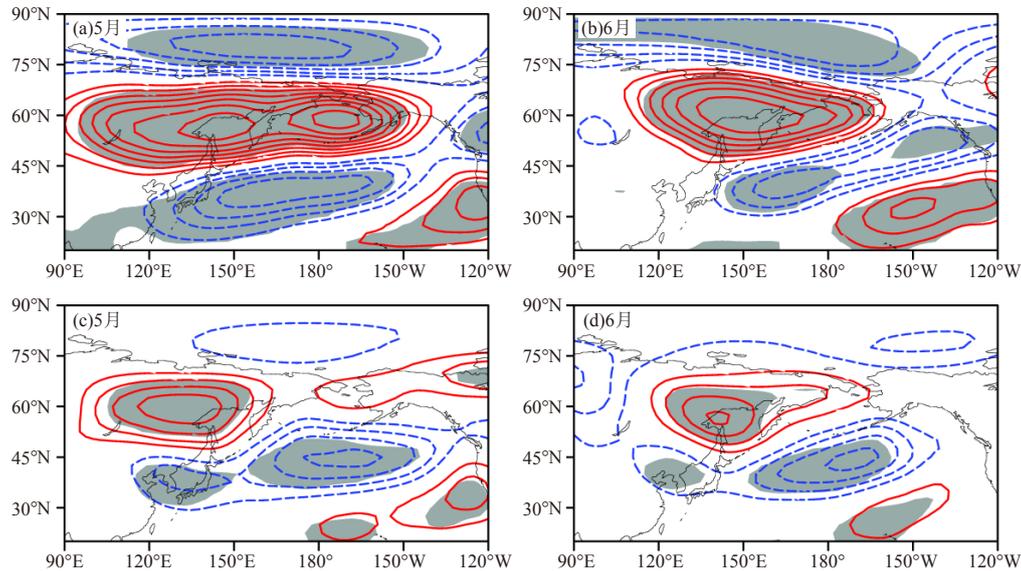


图4 500hPa位势高度距平对负位相WP型指数(1个标准差)的回归场(a, b)(单位:m); 500hPa位势高度距平对东北冷涡天数(1个标准差)的回归场(c, d)(单位:m), 等值线间隔均为5m, 阴影表示95%置信度

北冷涡一共盛行了16d(2—9日, 14—16日, 22—27日), 其主要原因是负位相WP型的稳定维持(该月标准化指数为-1.0)。迄今为止, 负位相WP型的稳定维持机理尚不清楚, 可能与北太平洋地区海气相互作用过程有关, 这一问题值得我们进一步研究。

#### 参考文献

- [1] Palmén, E. Origin and structure of high-level cyclones south of the Maximum westerlies. *Tellus*, 1949(1): 22-31.
- [2] 孙力, 郑秀雅, 王琪. 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. *应用气象学报*, 1994, 5: 297-303.
- [3] 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析. *气象学报*, 2000, 58(6):704-714.
- [4] 孙力, 安刚, 高枫亭, 等. 1998年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析. *应用气象学报*, 2002, 13: 156-162.
- [5] 沈柏竹, 刘实, 廉毅, 等. 2009年中国东北夏季低温及其与前期海气系统变化的联系. *气象学报*, 2011, 69: 320-333.
- [6] 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响. *科学通报*, 2006, 51: 2803-2809.
- [7] 郑秀雅, 张延治, 白人海. *东北暴雨*. 北京: 气象出版社, 1992.
- [8] 廉毅, 布和朝鲁, 谢作威, 等. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化. *大气科学*, 2010, 34: 429-439.
- [9] 谢作威. 夏季东北冷涡活动特征及其机理研究. 中国科学院大气物理研究所博士论文, 2012.
- [10] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77: 437-471.
- [11] 谢作威, 布和朝鲁. 东北冷涡低频活动特征及背景环流. *气象学报*, 2012, 70(4):704-716.
- [12] Peters D, Waugh D H. In influence of barotropic shear on the poleward advection of upper-tropospheric air. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 52: 3013-3031.
- [13] Xie Z, Bueh C, Ji L, et al. The cold vortex circulation over Northeastern China and regional rainstorm events. *Atmospheric and Oceanic Science Letter*, 2012, 5: 134-139.
- [14] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a wave: Activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24: 2985-2988.
- [15] Lau N C, Nath M J. Variability of the baroclinic and barotropic transient eddy forcing associated with monthly changes in the midlatitude storm tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1991, 48: 2589-2613.
- [16] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, 1981, 109: 784-812.
- [17] 刘宗秀, 廉毅, 高枫亭, 等. 东北冷涡持续活动时期的北半球500hPa环流特征分析. *大气科学*, 2002, 26: 361-372.
- [18] 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 近50年东北冷涡异常特征及其与汛期华南降水的关系分析. *大气科学*, 2006, 30: 1249-1256.