

龚志强, 王晓娟, 任福民, 等. 2013. 亚欧中纬度关键区正位势高度距平场配置与中国冬季区域性极端低温事件的联系 [J]. 大气科学, 37 (6): 1274–1286, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12135. Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Ren Fumin, et al. 2013. The Euro–Asia height positive anomalies character and its probable influence on regional extreme low-temperature events in winter in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (6): 1274–1286, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12135.

亚欧中纬度关键区正位势高度距平场配置与中国 冬季区域性极端低温事件的联系

龚志强¹ 王晓娟^{2,3} 任福民¹ 封国林¹

¹ 国家气候中心, 北京 100081

² 常熟理工学院物理与电子工程学院, 常熟 215500

³ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘 要 基于中国地面台站观测资料和 NCEP 再分析资料, 研究了欧亚中纬度 500 hPa 高度场关键区正异常配置及其与中国冬季区域性极端低温事件 (Regional Extreme Low Temperature Events, RELTE) 的联系。结果表明, 发生 RELTE 时乌拉尔山 (简称乌山)、贝加尔湖 (简称贝湖) 和雅库茨克—鄂科斯克海 (简称雅鄂) 附近的某一区域出现高度场正异常的概率为 0.83, 即欧亚关键区 500 hPa 正高度距平场的相互匹配是形成 RELTE 的直接原因。在此基础上, 将三个关键区域高度场异常配置分为 7 种类型: 乌山型、贝湖型、雅鄂型、乌山—贝湖型、乌山—贝湖—雅鄂型、乌山—雅鄂型、贝湖—雅鄂型。不同类型异常模态对应的 RELTE 在空间分布、持续时间和强度等各有差异, 如: 乌山型对应 RELTE 以全国型为主, 平均持续天数达 14.2 天; 乌山—雅鄂型对应的 RELTE 以东北—华北型为主, 事件平均持续天数为 14.1 天。此外, 不同类型的异常配置均对应超前于 RELTE 的前期特征, 平均超前时间为 1~8 天不等。超前天数的空间分布、高度场异常的时间演化, 进一步揭示了乌山以西和雅鄂以东两个方向高度场异常的发展并形成多种环流异常模态的过程, 也验证了 RELTE 存在前期信号的可能性。

关键词 高度场异常模态 区域性极端低温事件 前期异常特征 欧亚关键区域

文章编号 1006-9895(2013)06-1274-13

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12135

The Euro–Asia Height Positive Anomalies Character and Its Probable Influence on Regional Extreme Low-Temperature Events in Winter in China

GONG Zhiqiang¹, WANG Xiaojuan^{2,3}, REN Fumin¹, and FENG Guolin¹

¹ National Climate Center, Beijing 100081

² College of Physics and Electronic Project, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500

³ Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract Based on observation data and NCEP/NCAR reanalysis data, the 500-hPa height positive anomalies mode of Euro–Asia and its probable influence on regional extreme low-temperature events (RELTEs) in China during winter are investigated. The results indicate that the probability of positive anomalies occurring in one of three areas (Ural, Baikal,

收稿日期 2012-08-24, 2013-02-22 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41305075、41205040, 公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY201106016, 国家重大基础研究计划项目 2012CB955203

作者简介 龚志强, 男, 1981 出生, 高工, 主要从事区域性低温事件的检测和诊断分析研究。E-mail: gongzq@cma.gov.cn

通讯作者 王晓娟, E-mail: mouse0903@126.com

or Okhotsk) is 0.83 when there is a RELTE, suggesting that the height anomalies mode in high areas of the Euro-Asia blocking might be directly responsible for such RELTEs. The modes with positive height anomalies are divided into 7 types, with positive anomalies in Ural, Baikal, Okhotsk, Ural-Baikal, Ural-Baikal-Okhotsk, Ural-Okhotsk, and Baikal-Okhotsk. Each RELTE corresponds to a different anomaly mode, with differences in spatial distribution, duration, and intensity. For example, the positive anomalies modes of Ural-Baikal and Ural-Okhotsk always correspond to RELTEs affecting all of China and northeast-northern China, with average durations of 14.2 and 14.1 days, respectively. Furthermore, each type of positive height anomaly provides advance warning of the RELTEs, with average lead times of up to 1-8 days. The spatial distribution of average advance days and the development of height before or after the first day of RELTEs also suggest that the positive height anomalies mode could develop from two directions: west of Ural or east of Okhotsk. This further validates the probability of the advance warning for RELTEs.

Keywords Height anomalies mode, Regional extreme low-temperature events, Prior signals, Euro-Asia blocking high areas

1 引言

近几年,随着极端气候事件研究的深入,由站点或格点的极值分析向时间和空间两个角度并重的方向发展,提出了时空群发性极端事件(封国林等,2011;杨萍等,2011),区域性极端事件(任福民等,2012)等新的概念。对于极端低温事件而言,我国的气象工作者也开展了相关的研究,并取得了一些成果。如在以往寒潮和冷空气等天气尺度冷事件研究的基础上,给出了空间范围更广,持续时间更长,影响更大的低频至季节内尺度的区域性极端低温事件(Regional Extreme Low Temperature Events, RELTE)(龚志强等,2009),并发展了一系列相应的检测方法,建立了近50年RELTE库。同时,部分研究成果揭示了近50年来RELTE总体呈减弱的趋势,尤其是20世纪80年代中期以来,中国区域在40°N附近的RELTE频发带显著减弱;但2000年以来RELTE的发生频率和强度等较20世纪80~90年代有所增强等。此外,根据RELTE的空间范围,分别将近50年中国的RELTE划分为4类和8类,并指出不同类型的低温事件与冷空气南下影响我国的路径有密切联系(任福民等,2012; Zhang and Qian, 2011; 龚志强等, 2009, 2012; 王晓娟等, 2009, 2012)。

RELTE主要是指单个站点的最低温度超过一定的阈值,并且达到条件的站点在空间范围上具有一定的“群簇效应”(cluster),这种效应在时间上有一定的持续性,群簇中心会随着事件的发展出现一定移动,从而形成时空群发性事件。此类事件与冷空气或寒潮有一定的相似性,如温度偏低,影响范围出现异动等;但也有不同点,如RELTE的时间持续性相对更长(最长可以在30天以上),事件

本身可能包含多次寒潮或冷空气过程等(Zhang and Qian, 2011; Peng and Bueh, 2011; 封国林等, 2011; Gong et al., 2011)。因此,RELTE形成的物理机制等,可能与寒潮或冷空气过程具有不同的特征。张宗婕和钱维宏(2012)通过大气变量物理分解的方法(钱维宏, 2012),提取出对极端事件有指示意义的天气尺度扰动信号,追踪区域性极端事件发生之前天气扰动的来源、传播路径及提前时间(日数)。Bueh et al. (2011a, 2011b)研究揭示了SLP中西伯利亚高压发展和持续控制亚洲大陆地区,以及中高纬度地区的冷空气沿着亚洲东部内陆或东部沿海南下影响东亚地区,从而有利于在中国地区形成区域性低温事件,并且西伯利亚高压的中心位置和形态等对应不同类型的区域性低温事件。此外,RELTE的形成与冷空气南下影响我国有很大的联系,而冷空气的向南传播主要形式是一种低频模态的10~20天周期振荡(丁一汇, 1991; 马晓青等, 2008),其主要路径和强度等与中纬度地区500 hPa关键区有很强的关联。就2008年1~2月的南方RELTE而言,丁一汇等(2008)分析了乌拉尔山地区阻塞异常向北伸展,而且持续日数超过20天,冷空气主要从西伯利亚地区连续不断的自偏北方流向中亚的稳定低槽中,然后沿河西走廊南下入侵中国;王东海等(2009)也指出了与乌拉尔山地区的阻塞形势长时间稳定维持有联系。陶诗言和卫捷(2008)指出2008年冬季低温过程的成因之一主要是亚洲中高纬度阻塞高压稳定维持长达20余天。因此,对RELTE的研究必然离不开对欧亚地区500 hPa高度场中阻塞高压(简称阻高)所在关键区的异常特征进行分析研究。

影响中国冬季温度的欧亚中纬度500 hPa关键区(下文简称关键区)主要分布在乌拉尔山(简称

乌山)、贝加尔湖(简称贝湖)和雅库茨克—鄂科斯克海(简称雅鄂)附近,这些区域主要是阻高所在的区域。三个关键区高度场异常有可能独立作用于中纬度地区的冷空气活动,也可能是相互配置共同影响,造成下游地区形成各种不同类型的低温事件(丁一汇, 1989; 沈柏竹等, 2011)。目前,各关键区高度场异常配置具有哪些可能的空间模态,不同配置模态对中国的 RELTE 的影响有何差异(尤其是与近几年发生的 RELTE 的联系),能否从关键区域高度场异常配置的模式找到中国地区 RELTE 的前期信号等,关于这些科学问题的系统性研究还相对较少。

综上所述,本文立足于三个关键区的高度场异常特征,分析发生 RELTE 时三个区域高度场异常配置的空间模态及其可能超前于 RELTE 的时间,并结合关键区高度场异常形成的可能源地,讨论存在前期异常特征的可能原因。

2 数据和方法

2.1 数据

高度场资料来源(Kistler et al., 2001): NCEP/NCAR 逐日高度场资料,逐日风场资料和温度场资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,垂直分辨率为 17 层。三个关键区域的选择参考了国家气候中心《气候系统监测诊断年报》中关于阻高区域的设定: I 乌山区域($50^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $40^\circ\text{E} \sim 70^\circ\text{E}$); II 贝湖区域($50^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $80^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$); III 雅库茨克—鄂科斯克海域(简称雅鄂区)($50^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{E} \sim 150^\circ\text{E}$)。中国冬季 RELTE 所用逐日最低温度资料来源:国家气象信息中心发布的经过质量控制的 731 站点的逐日最低温度资料,研究的时段是 1960~2011 年的当年 11 月至次年 3 月。

2.2 RELTE 识别方法

RELTE 的识别采用 Ren et al. (2012)、龚志强等 (2012) 发展的区域性极端低温事件客观识别技术进行客观识别。该方法主要包括:(1) 极端低温阈值的确定;(2) 极端低温事件空间区域的识别;(3) 空间区域的连续性过程提取;(4) 指标体系。首先,对单日极端低温事件进行空间区域识别,进而识别临时事件和低温带的重合信息,对每日临时事件和低温带的信息进行整合,可客观识别出连续过程的极端低温事件。采用该技术对 1960~2011 年的事件进行客观识别以建立 RELTE 库。本文主

要分析持续时间 6 天以上的 RELTE,共计 128 次。低温事件的综合指数是指体现 RELTE 的过程极端值、过程累计强度、累计影响面积、持续天数等加权求和得到的综合性质的指标,是对 RELTE 几方面性质的综合描述(为节省篇幅不再展开介绍)。

2.3 RELTE 的站点出现概率计算方法

统计三个关键区中仅有一个或多个区域 500 hPa 高度场出现持续正异常对应 RELTE 的站点出现概率(P_k)的空间分布时,站点 k 的出现概率 P_k 计算方法如下:

$$P_k = \frac{m_k}{M_k}, k = 1, \dots, 730 \quad (1)$$

其中, m_k 为某一类关键区高度场正异常对应的低温事件中站点 k 出现的次数, M_k 为各关键区异常对应的低温事件中站点 k 出现的总次数。

2.4 前期异常信息分析

分析不同关键区域 500 hPa 高度场的异常配置,是否有超前于 RELTE 的异常信息的方法如下:首先我们规定当关键区的高度场距平指数为正值时,该区域存在正异常,设定 RELTE 发生的第 1 天为第 0 天,则 -1 天(即事件发生前 1 天)对应的关键区出现正异常则存在超前 1 天异常信息, -2 天出现正异常则存在超前 2 天的异常信息,以此类推便可确定出现异常信息的超前天数。在确定超前天数时,出现 1 天以上的高度场负异常波动,则认为超前信息并未终止,从而保证了异常信息的持续性。但是,当关键区高度场距平出现连续三天及以上的负异常时,则认为超前信息不复存在。高度场异常超前天数 D_s 计算公式如下:

$$D_s = \sum_{j=-1, -15} \Theta \Delta h_s^j, \Delta h_s^j > 0 \quad (2)$$

其中, Δh_s^j 为第 j 天对应的关键区 s 的高度场距平值, Θ 为阶跃函数。

2.5 关键区持续性异常发展过程的分析

关键区持续性异常发展过程的分析,主要采用如下的方法:对于不同关键区持续性异常对应的低温事件,分别计算事件开始日期前的第 6 天(第 -6 天)的高度场距平均值,开始前第 5 天(第 -5 天)的高度场距平均值,以此类推,直至所有事件结束,并分别计算逐日所有事件高度场距平的平均值。这样的处理可以使多次开始日期不同的事件,均从事件的第 -6 天开始分别计算高度场距平均值,并分析逐日变化情况。由此,相应的第 -6

天高度场距平的均值 H_{-6} ,

$$H_{-6} = \sum_{i=1}^{M_{-6}} \frac{\Delta h_i^{-6}}{M_{-6}}, \quad (3)$$

其中, Δh_i^{-6} 为事件 i 对应的第-6 天的高度场距平值, M_{-6} 为某种组合对应事件第-6 天的事件数。类似于公式 (3), 分别计算第-5 天以来的逐日高度场距平的均值 H_j ,

$$H_j = \sum_{i=1}^{M_j} \frac{\Delta h_i^j}{M_j}, (j = -5, N_{\max}), \quad (4)$$

其中, N_{\max} 为某种组合对应的低温事件最大持续天数, Δh_i^j 为事件 i 对应的第 j 天的高度场距平值, M_j 对应的事件第 j 天的实际事件数。

3 关键区高度场异常与 RELTE 的联系

我们统计了发生 RELTE 时, 三个区域出现 500 hPa 高度场持续正异常的概率 (表 1)。可以看出, 贝湖地区 500 hPa 距平场正异常时, 对应 RELTE 的发生概率最高, 乌山区域次之, 雅鄂地区最小。此外, 除雅鄂地区高度场正异常与 11~15 天的低温事件对应概率相对较小以外, 总体表现为低温事件的持续天数越长, 则与三个区域高度场正距平的对应关系越好。对于持续天数为 15 天以上的 RELTE, 与贝湖、乌山和雅鄂地区的对应概率分别为 0.69、0.58 和 0.53, 均在 0.5 以上。此外, 综合考虑三个关键区高度场异常的配置情况 (表 1 中第 5 列) 表明, 当发生 RELTE 时, 对于四类不同的时间尺度, 三个区域中有一个区域出现正异常的概率都在 0.8 以上, 且时间尺度越大, 对应关系越好。15 天以上的事件, 对应比例达到 0.92。因此, 用三个阻塞高压区的高度场异常的组合配置来解释中国冬季的持续时间较长的 RELTE 是可行的。

表 1 不同时间尺度 RELTE 对应的三个关键区 500 hPa 距平场正异常的概率

Table 1 Probability of positive anomalies at 500 hPa over three blocking high regions corresponding to RELTEs at different scales

尺度	贝湖	乌山	雅鄂	任一区域
1~5 天	0.47	0.45	0.37	0.82
6~10 天	0.56	0.57	0.44	0.86
11~15 天	0.66	0.56	0.28	0.88
15 天及以上	0.69	0.58	0.53	0.92
全部	0.50	0.49	0.39	0.83

4 关键区域高度场异常分类及 RELTE 响应

我们进一步讨论不同的区域出现高度场正异常时, 对应 RELTE 有何特征。对于 1960~2011 年中 6 天以上的 RELTE, 表 2 给出了乌山、贝湖和雅鄂三个区域中仅有一个区域 500 hPa 高度场出现持续正异常时对应 RELTE 的信息。可以看出, 乌山地区单独出现正异常对应的 RELTE 数为 25 次, 是三个区域中最多的; 对应 RELTE 的持续天数为 14.2 天, 平均综合指标值为 2.0, 乌山地区 500 hPa 高度场逐日距平的平均为 85.6 hPa, 是三个区域中最长, 最大的。贝湖地区 500 hPa 高度场持续正异常对应的 RELTE 数为 12 次, 平均持续天数为 12 天, 高度场逐日距平的平均为 49.4 hPa, 均小于乌山地区的情况。雅鄂地区 500 hPa 高度场持续正异常对应的 RELTE 数仅为 3 次, RELTE 的平均持续天数、平均综合指标和高度场逐日距平的平均值都是三个区域中最小的。

表 2 单个关键区 500 hPa 高度场持续正异常对应的 RELTE 的信息

Table 2 Characteristics of RELTEs corresponding to continual positive anomalies of 500-hPa height over any single blocking high region

区域	平均高度场距平 (hPa)	事件数 (次)	平均持续天数 (d)	平均综合指数
乌山	85.6	25	14.2	2.0
贝湖	49.4	12	12.1	1.4
雅鄂	50.3	3	9.3	0.6

根据 2.3 节的方法, 我们给出了三个区域中仅有一个区域 500 hPa 高度场出现持续正异常对应 RELTE 的站点出现概率 (P_k) 的空间分布 (图 1)。图 1a 可以看出, 全国除青藏高原以外, 大部分站点的发生概率在 0.3 以上, 西北东部和中国东部的大部分地区站点发生概率在 0.5 以上, 即乌山地区单独出现正异常对应的 RELTE 主要是空间范围较广的全国型事件 (Peng and Bueh, 2011)。图 1b 可以看出, 中国东部地区大部分站点的发生 RELTE 的概率在 0.3 以上, 其中内蒙古中部—华北—华南的区域大部分站点发生概率在 0.5 以上, 与乌山异常的情况相比, 东北地区站点发生 RELTE 的概率明显降低。因此, 贝湖地区单独出现正异常时主要对应华北—华南型事件 (Peng and Bueh, 2011)。图 1c 可以看出, 站点出现概率的空间分在东北地

区和西南—江南—华南地区分别存在两个站点发生概率在 0.3 以上的区域, 结合后面的动力过程分析, 雅鄂地区单独出现正异常可能更多对应东北型的 RELTE。由此可见, 乌山、贝湖和雅鄂单独出现持续性异常时, 对应的 RELTE 在事件持续时间、综合强度和区域分布上都有显著差异。

为了进一步探讨上述对应关系的可能性, 我们分析了单个关键区 500 hPa 距平场持续正异常对应高度场和风场异常的总体分布特征。图 2a 可以看出, 中亚到东亚北部地区是明显的负距平区, 表明有低槽或低涡的发展, 它与乌山地区的正距平区构成了西高东低的环流形式, 东亚大部为负距平控制, 东亚大槽偏强, 有利于偏西路径的冷空气南下影响东亚地区, 从而形成覆盖中国大部分地区的 RELTE。图 2b 中, 贝湖地区 500 hPa 高度场为正距平控制, 其中东西两侧为负距平控制, 空间分布上构成了一个典型的“两槽一脊”的环流形式; 贝湖地区的阻塞形式向南扩展至印度北部地区, 从而不利于偏西路径的冷空气向南扩展。因此, 东亚大槽位置偏东, 对应的 RELTE 的空间范围主要集中在我国中部偏东的地区。图 2c 中可以看出, 雅鄂地区的 500 hPa 存在异常的正距平中心, 并向西南方向扩展至蒙古地区, 该正距平中心可能由白令海附近的正异常中心发展而来, 形成机制与乌山和贝湖附近的正距平中心有所差异。此外, 雅鄂地区的正距平中心存在有利于阻高的发展, 在贝加尔湖以东地区形成暖脊, 其下游地区的西北太平洋为显著的负距平, 则形成偏东的低温槽, 从而有利于偏东路径的冷空气影响我国的北方地区。同时, 乌山至贝湖西侧的负距平中心向南扩展至南亚地区, 形成弱的低温槽, 有利于形成西南—江南—华南地区的 RELTE。因此, 雅鄂附近单独出现正异常时, 有利于发生东北地区 and 西南—江南—华南地区的 RELTE。

图 3 给出了单个关键区高度场持续正异常对应的 850 hPa 风场和 2 m 温度场 (2 m 高度处的温度场) 距平的合成。图 2a 中, 欧洲东部至东亚北部的“两脊一槽”的形式下, 欧洲东部至东亚北部地区以偏北的西风为主, 在东亚东部地区则转为西北风 (图 3a), 冷空气沿着相应的路径南下, 在西伯利亚和东亚等地形成低温事件。当贝湖附近出现正异常中心时, 乌山至雅鄂地区的“两槽一脊”的形势下 (图 2b), 贝湖附近的反气旋环流和鄂海附近

的气旋性环流的共同作用下, 在东亚东部地区盛行西北风, 冷空气沿着东亚东部和近海地区南下影响中国的东部地区, 容易造成我国华北—华南等地区的气温异常持续偏低 (图 3b)。此外, 雅鄂地区正距平中心的存在 (图 2c), 一方面减弱中纬度地区在西伯利亚中部折向的冷空气的南侵, 西北太平洋上空偏西的气旋性环流在雅鄂地区以偏南风为主, 在中国东北和日本海附近以偏北气流为主, 因而从西伯利亚东部延伸至欧洲东部等以气温偏高为主, 在中国东北和日本等地区气温以偏低为主 (图 3c)。另一方面, 西亚地区低压槽的存在, 则有利于印度至中国西南地区以偏北风为主, 从而在中国西南至东南部等地形成弱的低温事件 (图 3c)。

Bueh et al. (2011a, 2011b) 研究揭示了 SLP 中西伯利亚高压发展和持续控制亚洲大陆地区, 以及中高纬度地区的冷空气沿着亚洲东部内陆或东部沿海南下影响东亚地区, 从而有利于在中国地区形成区域性低温事件, 并且西伯利亚高压的中心位置和形态等对应不同类型的区域性低温事件。本文进一步给出单个关键区高度场持续正异常对应的 SLP 和 2 m 温度场距平的合成图。图 4a 中, 西伯利亚高压的中心强度达到 1035 hPa, 1025 hPa 线控制了西亚至东亚及西伯利亚等地区, 且高压中心位于贝湖以西地区, 同时在白令海地区存在持续稳定的阿留申低压, SLP 场的这种典型的西高东低的形势, 有利于引导中纬度地区的冷空气南下影响中国大部地区 (图略)。图 4b 中, 西伯利亚高压持续稳定, 但高压中心较图 4a 的情况略偏东, 强度略偏弱, 且 1025 hPa 等执行控制的范围略偏小; 白令海地区存在持续稳定的阿留申低压, SLP 场的这种西高东低的形势有利于引导中纬度地区的冷空气南下, 同时由于高压北侧存在一个“暖脊”, 故低温的范围主要集中在我国华北至华南的地区。图 4c 中, 西伯利亚高压持续稳定, 但中心强度和 1025 hPa 等执行控制的范围是三种情况下最小的, 且高压北部的类似“暖脊”分布的空间跨度较大, 故中国东南部等地的低温事件较弱; 同时阿留申低压面积较弱, 位置偏西, 有利于引导西伯利亚和雅库茨克地区的冷空气南下影响中国的东北等地区 (图略)。

北半球中纬度 500 hPa 高度场的三个关键区除了单个区域出现正异常的情况, 还会出现两个或三个区域同时出现正异常的情况, 根据不同的正异常的组合配置大致可以分成四类 (表 3)。表 3 给出了

四类关键区 500 hPa 距平场正异常配置对应的 RELTE 的信息。总体来看, B 类组合对应的三个区域同时异常时, 发生 RELTE 的次数最多, RELTE 的平均持续天数为 15.3 天, 综合指数平均强度为 2.0, 均为 4 类组合中对应 RELTE 最长、最强的。从空间分布来看, B 类组合下 RELTE 发生概率 0.3 以上的区域主要位于中国内蒙古—华北—华南的区域, 在东北北部、西北和西藏西部等地发生的概

表 3 四类关键区 500 hPa 距平场正异常配置对应的 RELTE 事件信息

Table 3 Characteristics of RELTEs corresponding to four types of assembled positive anomalies of 500-hPa height over three blocking high regions

组合	区域	事件数 (次)	平均持续天数 (d)	平均综合指数
A	乌山—贝湖	20	14.0	1.8
B	乌山—贝湖—雅鄂	24	15.3	2.0
C	乌山—雅鄂	9	14.1	1.5
D	贝湖—雅鄂	18	12.4	1.4

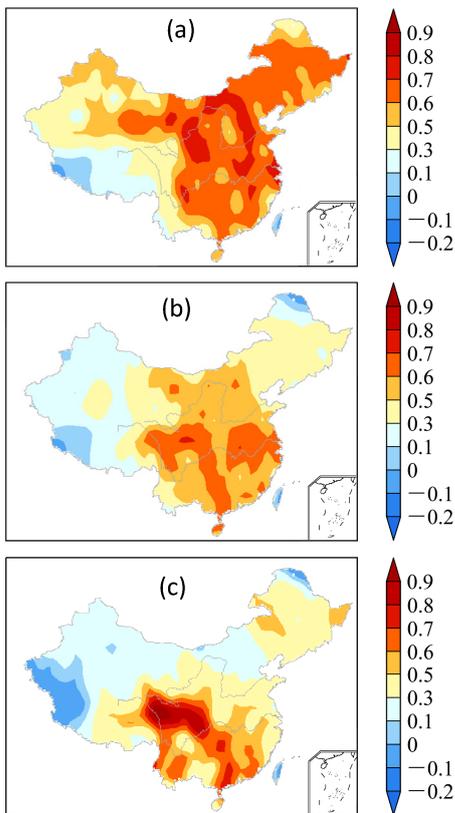


图 1 单个关键区 500hPa 距平场持续正异常对应的 RELTE 站点的概率分布: (a) 乌山; (b) 贝湖; (c) 雅鄂
Fig. 1 Spatial probability distribution of RELTE corresponding to continual positive anomalies of 500-hPa height over blocking high regions of (a) Ural, (b) Baikal, (c) Okhotsk, respectively

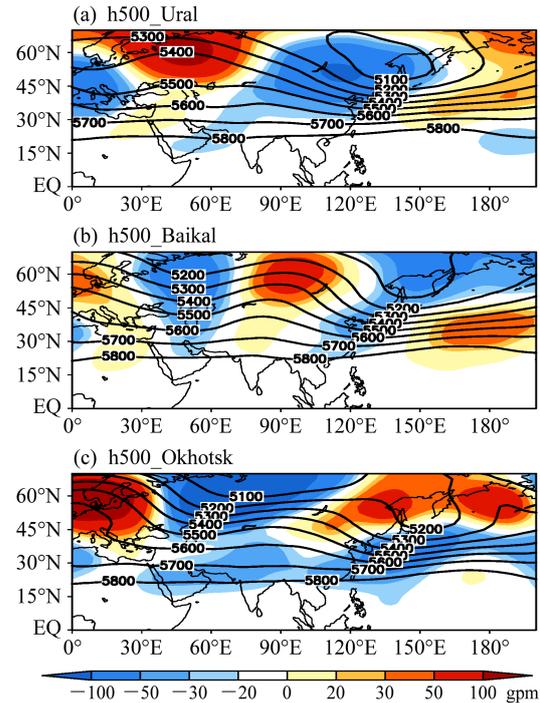


图 2 单个关键区高度场持续正异常对应的 500 hPa 高度场距平的合成 (单位: gpm)

Fig. 2 Composite of 500-hPa height anomalies corresponding to continual positive anomalies over blocking high regions of (a) Ural, (b) Baikal, (c) Okhotsk, respectively (unit: gpm)

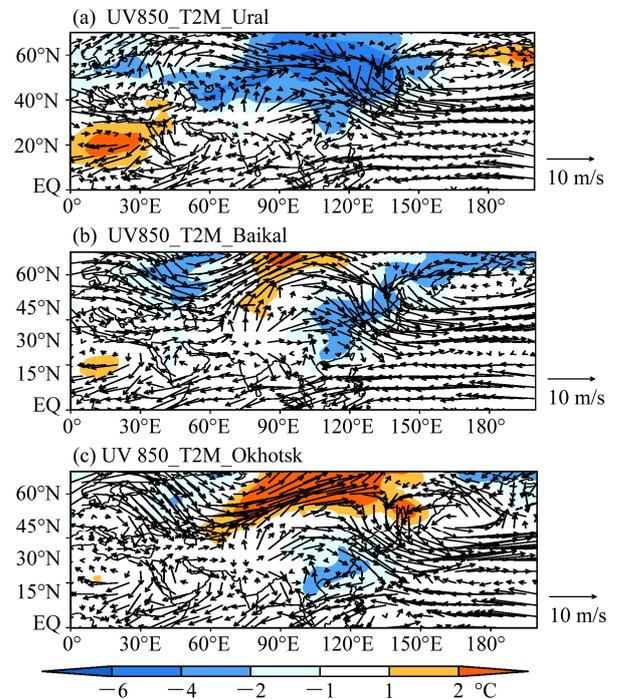


图 3 单个关键区高度场持续正异常对应的 850 hPa 风场 (单位: m/s) 和 2 m 温度场距平 (单位: °C) 的合成

Fig. 3 Composites of 850-hPa wind (unit: m/s) and surface atmosphere temperature (SAT) anomalies (unit: °C) corresponding to continual positive height anomalies over blocking high regions of (a) Ural, (b) Baikal, (c) Okhotsk, respectively

率较小, 以华北—华南型事件为主 (图 5b)。A 类组合的情况下, 发生 RELTE 的频次, 事件的平均

持续天数和综合指数等, 仅次于 B 类的情况, 事件的空间分布覆盖了全国大部分区域, 以全国型事件为主 (图 5a)。C 类组合下 RELTE 的发生次数最少, 对应 RELTE 的空间分布比较特殊, 发生概率在 0.3 以上的区域主要位于东北—华北区域为主, 就事件分类而言, 以全国东北—华北型事件为主 (图 5c); D 类组合下 RELTE 的平均持续天数最少, 综合指数最小。D 类组合对应 RELTE 的站点发生概率最高的中心位于华北至华南的区域, 空间分布与 B 情况类似, 但在西北西部等地, 发生概率更低一些 (图 5d)。

下面分别讨论不同组合下环流场的异常特征。A 类组合下, 乌山地区的正异常中心向东伸展到贝湖地区, 雅鄂至贝湖以西的区域存在一个负异常中心, 中纬度地区自西向东“+ - +”的波列特征明显 (图 6a)。这样的形式下, 在乌山至贝湖地

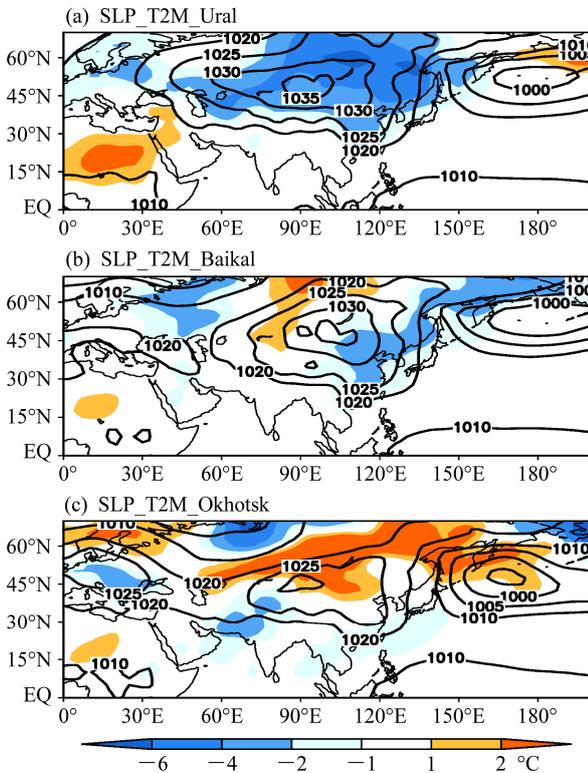


图 4 单个关键区高度场持续正异常对应的 SLP (单位: hPa)、2 m 温度场距平 (单位: °C) 的合成

Fig. 4 Composites of SLP (unit: hPa) and anomalies of SAT (unit: °C) corresponding to continual positive height anomalies over blocking high regions of (a) Ural, (b) Baikal, (c) Okhotsk, respectively

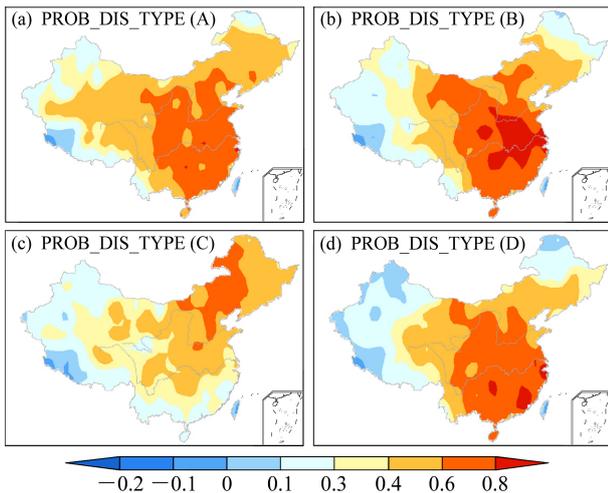


图 5 四类组合对应区域性事件站点概率的空间分布: (a) 乌山—贝湖, (b) 乌山—贝湖—雅鄂, (c) 乌山—雅鄂, (d) 贝湖—雅鄂 (下文中图的排序与此一致)

Fig. 5 Spatial probability distribution of RELTE corresponding to four types of assembled 500-hPa positive height anomalies in regions of (a) Ural-Baikal, (b) Ural-Baikal-Okhotsk, (c) Ural-Okhotsk, (d) Baikal-Okhotsk, respectively

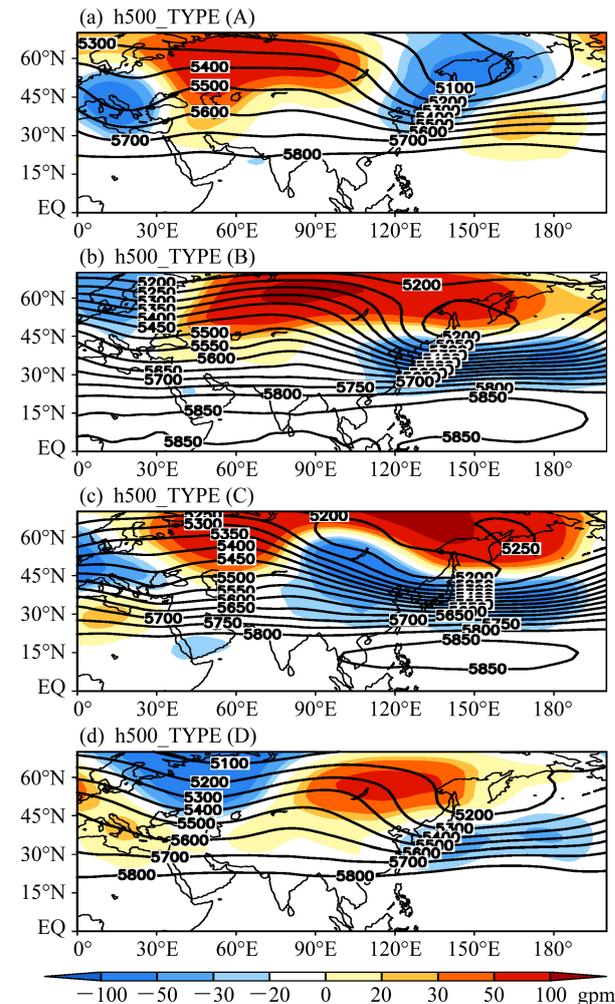


图 6 四类组合对应 500 hPa 高度距平合成 (单位: gpm)

Fig. 6 Same as Fig. 5, except for the composite of 500-hPa height anomalies (unit: gpm)

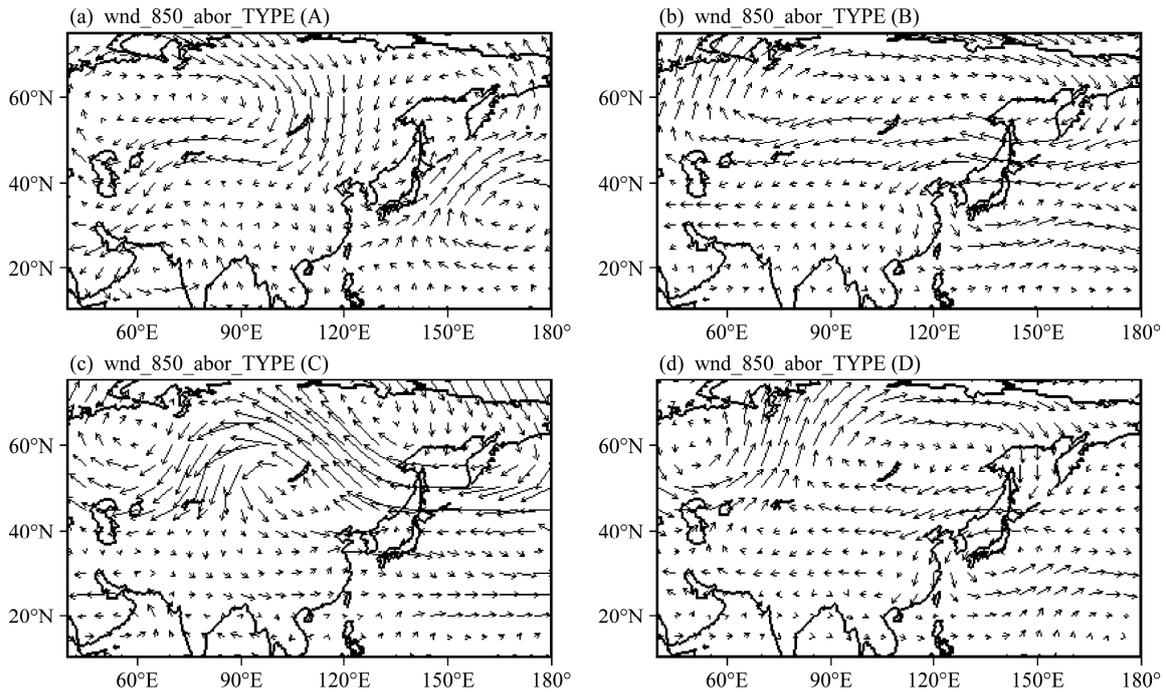


图 7 四类组合对应的 850 hPa 风场距平合成 (单位: m/s)

Fig. 7 Same as Fig. 5, except for the composite of 850-hPa wind (unit: m/s)

区容易形成异常反气旋性环流,北方的冷空气经中亚折转南下,沿中部路径南下侵入我国(图 7a),从而在中国容易发生大范围的 RELTE。B 类组合下,乌山至雅鄂区域存在稳定的正异常中心,覆盖了西伯利亚的大部分地区,同时在日本至东亚东部沿海地区存在一个负异常中心(图 6b)。这样的环流形势下,西伯利亚地区存在异常反气旋环流,日本海附近存在异常气旋性环流,华北至华南区域是异常的北风气流,有利于冷空气沿南下影响东部中国,对东北南部至华南地区的影响尤为显著(图 7b)。C 类组合下,乌山和雅鄂区域存在正异常中心,而贝湖地区受负异常中心控制,中纬度地区的波列特征转变为北高南低的偶极子形态,东亚槽呈一个浅薄的“V”形状(图 6c)。这样的形势下,西风气流偏弱,乌山和雅鄂附近分别存在异常反气旋环流,不利于欧亚大陆的冷空气南下影响东亚的南部地区;与此同时,在贝湖的负距平中心附近存在一个异常气旋性环流,引导蒙古等地的冷空气影响中国的北方地区(图 7c),从而造成中国东北至华北等地发生持续性低温事件。D 类组合下,雅鄂—贝湖一线存在异常的正距平中心,贝湖附近的正异常扩展至西亚东部,欧亚大陆北部地区高度场是一个东高西低的形式,这样有利于中高纬度地区西风偏强,中低纬度地区西风偏弱(图 6d),在 850 hPa

的雅鄂至贝湖形成一个异常反气旋环流,中国东北地区受异常西风控制,减弱了冷空气对该区域的影响;此外,日本—中国东部沿海受负距平中心控制,与其上游的正距平中心相互作用,在日本海至西北太平洋上空形成偏东的东亚槽,低压槽西侧北风偏强进而在西北太平洋上空形成异常气旋性环流,从而引导东路的冷空气影响中国的东部和南部等地区。

图 8(见文后彩图)给出了四种配置对应的 SLP 原始场和 SAT 距平场的空间分布。可以看出,四类组合下欧亚大陆上均受西伯利亚高压控制,中心等压线均达 1035 hPa。西伯利亚高压的向南扩展的程度则与气温异常偏低的南边界有较好的联系,西伯利亚高压北部的类似倒“V”形的等压线分布则与北部地区气温异常偏高有一定的联系。A 类组合下,西伯利亚高压中心位置偏南,1020 线南扩至海南岛以南,低温区域则相应的分布在亚洲东部的沿海地区。同时,西伯利亚高压北部的倒“V”形较弱,因此温度异常偏高的范围在 50°N 以北地区,在东亚的西部地区也有一条带状的异常低温区(图 8a)。B 类组合与 A 类组合的情况类似,差异在北部地区的倒“V”形特征更明显,因此温度异常偏高的区域在乌山和雅鄂地区明显南扩,温度异常偏低的区域主要集中在贝湖至中国东南部的区域(图

8c)。C 类组合下, 西伯利亚高压的位置整体偏北, 东亚南部地区 1020 线控制的范围在台湾岛以北, 因此异常低温的空间范围明显偏北, 对应的中国范围的 RELTE 则主要分布在东北至华北区域 (图 8c)。D 类组合的情况与 B 类组合基本相似, 温度异常偏低的区域主要分布在东亚地区。此外, Bueh et al. (2011a, 2011b) 的研究也说明了这四类组合下区域性低温分布与西伯利亚高压分布联系的可能性。

5 RELTE 对应的关键区的高度场前期异常特征分析

前文讨论了单个和多个关键区域出现高度场持续正异常时对应的 RELTE, 本节采用 2.4 节的方法进一步分析不同关键区高度场的异常配置, 是否有超前于 RELTE 的异常信息。

图 8 给出了四类组合下三个关键区 500 hPa 距平平均值曲线。可以看出, A 类情况下, 乌山地区高度场距平出现正异常的时间显著超前于贝湖地区, 而雅鄂地区的高度场距平则不存在超前于低温事件的正异常 (图 9a)。B 类情况下, 三个区域的高度场距平均出现了超前于低温事件的高度场正异常, 其中乌山地区出现正异常的时间显著超前于贝湖和雅鄂地区, 而后两者中雅鄂地区正异常信号相对更超前一些 (图 9b)。C 类情况下, 乌山和雅鄂

地区存在超前于低温事件的高度场正异常特征, 且后者的正异常相对更超前一些。C 类组合下, 乌山的正异常强度相对弱一些, 并且这种向东发展的特征也较弱, 在贝湖地区没有形成显著的正异常中心 (该地区不存在前期正异常特征)。同时, 雅鄂地区的正异常中心则相对更稳定, 强度更大, 所以异常特征更超前一些 (图 9c)。D 类情况下, 贝湖和雅鄂地区均存在时间比较短的前期正异常, 这说明没有乌山地区参与的阻高正异常配置, 高度场的形势相对弱, 持续时间较短, 对应的 RELTE 相对较弱、时间较短, 因此两个地区前期出现正异常的超前时间相对较短 (图 9d)。

表 4 给出了 4 类组合下各关键区出现正异常的超前信息。将高度场距平 0 值作为阈值的情况下, 正异常超前事件的最大天数基本都在 15 天左右, 仅 C 类的乌山地区为 13 天。平均超前天数在 1~8 天之间变化, 总体而言 A 类、B 类、C 类事件的超前天数较大, 而 D 类事件则相对较小。可能原因是 D 类组合对应的 RELTE 相对较弱, 低温事件本身持续时间也相对较短 (表 3), 对应环流系统异常的稳定性比前三类情况差, 故而前期信号出现的时间上则略显滞后。此外, 分别计算 4 种组合下, 三个关键区前期高度异常的平均特征, 平均超前天数分别为: 6.0 天、2.6 天、5.1 天, 存在前期信号的低温事件的平均比例则分别为: 0.77、0.56、0.68, 乌

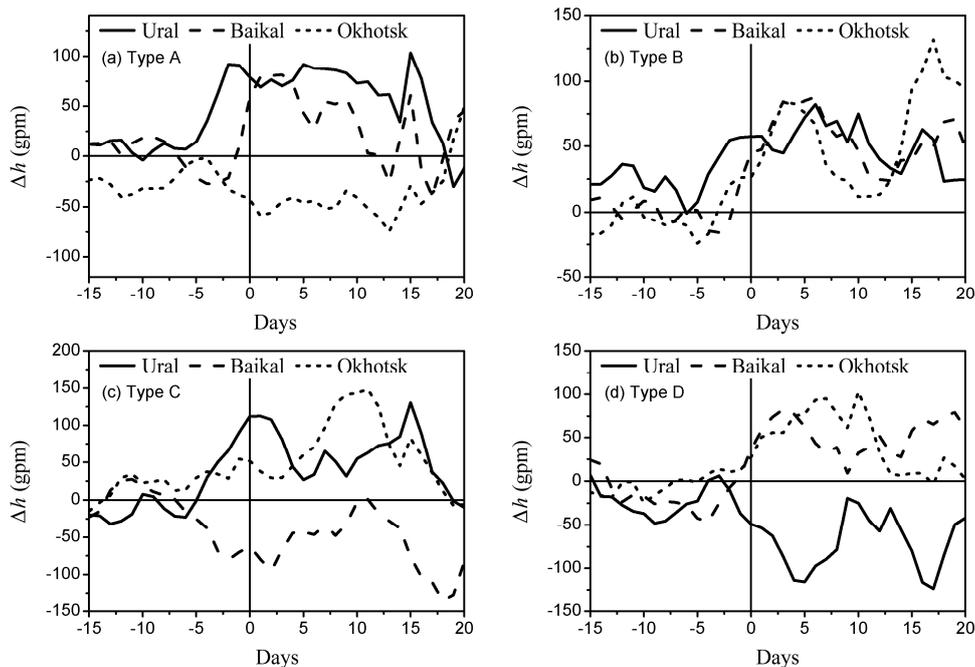


图 9 四类组合下三个关键区域 500 hPa 高度距平均值曲线 (单位: gpm)

Fig. 9 Same as Fig. 5, except for the 500-hPa height anomaly averages over three blocking high regions before and after RELTEs (unit: gpm)

山和雅鄂区的超前天数较大一些。这种对应关系与关键区环流系统的异常主要是由东西两个方向发展而来的特征是一致的。此外，考虑到高度场距平阈值对信号的超前天数的可能影响，我们进一步给出了距平阈值分别为 10 和 20 的情况（表 4）。可以看出，和阈值为 0 的情况相比，最大超前天数和存在超前信息的事件比例的变化均较小。阈值为 10 和 20 的各个区域的平均超前天数分别为 1~7 天和 1~5 天，虽然随着阈值的增加有不同程度的减小，但减小的幅度不大，并且乌山和雅鄂区的超前天数相对较大的特征依然存在。显然，发生 RELTE 时，对于三个区域中东西两侧关键区出现前期异常的比例更高，且在时间上更早。

表 4 四类组合下各个关键区出现正异常的超前信息

Table 4 In-phase positive anomalies information for four types of assembled positive anomalies of 500-hPa height over blocking high regions

组合 类型		最大超前天数			平均超前天数			存在超前信息的 事件比例		
		(d)			(d)					
		$t > 0$	$t > 10$	$t > 20$	$t > 0$	$t > 10$	$t > 20$	$t > 0$	$t > 10$	$t > 20$
A	乌山	15	15	13	6.6	5.6	4.7	0.85	0.80	0.80
	贝湖	15	15	15	3.4	3.2	3.2	0.5	0.45	0.45
B	乌山	15	15	15	5.3	4.8	4.1	0.67	0.63	0.58
	贝湖	15	12	12	2.8	2.3	2.2	0.63	0.54	0.54
	雅鄂	15	15	15	4.8	3.9	3.3	0.63	0.58	0.58
C	乌山	13	12	12	5.0	4.9	4.6	0.78	0.78	0.78
	雅鄂	15	15	15	7.4	6.7	4.8	0.78	0.78	0.78
D	贝湖	8	8	8	1.7	1.2	1.2	0.56	0.56	0.50
	雅鄂	15	15	15	3.2	2.9	2.1	0.61	0.56	0.50

注： t 表示阈值

我们分别计算了 4 类组合下，各次事件在（50°N~80°N, 20°E~180°）范围内各格点 500 hPa 高度场距平的逐日平均值，然后依据公式（2）的算法计算格点出现正异常超前于相应 RELTE 的天数。4 种组合下取阈值为 0 时的正异常超前天数的空间分布如图 8 所示。可以看出，A 类情况下，在乌山地区超前天数为 11~15 天左右，向东超前天数逐渐减小，并在其上游地区超前天数有所减小（图 10a，见文后彩图）。B 类情况下，乌山附件超前天数为 3~7 天，向东扩展的部分地区的超前天数为 13~15 天左右；东西伯利亚地区，超前天数为 13~15 天左右，中间地区的超前天数相对较小，在 1~3 天左右（图 10b，见文后彩图）。这也说明了此类组合下，三个关键区高度场正异常主要还是从东西两个方向发展而来，故而前期异常在东西两

侧更早一些。C 类组合下，挪威海—东西伯利亚—鄂科斯克海一线均存在超前于低温事件 13~15 天左右的高度场持续正异常，其中东侧的超前特征更为显著（图 10c，见文后彩图）。D 类组合下，雅鄂地区的超前天数为 15 天左右，超前天数向西逐渐减小，贝湖地区超前天数为 1~3 天左右（图 10d，见文后彩图），由此 D 类组合下关键区的异常特征对应自东向西发展的特征比较明显。

6 关键区高度场异常形成过程分析

关键区高度场异常在东西两个方向均存在一定的超前信号，并存在一定的差异，这可能是东西两个不同的源地沿着东西两条路径发展而来（Hoskins et al., 1985; Park et al., 2008）。下面基于 2.5 的方法，结合关键区持续性异常的可能来源进一步分析关键区高度场异常配置形成的可能动力学成因。

图 11 给出了 4 类组合对应的 500 hPa 逐日距平合成的经度—时间剖面图。可以看出，A 类组合的情况下，正异常中心由开始前的第 6 天自 50°E~60°E 附近，自西向东发展。A 类情况对应的事件开始后的 2~3 天内，在 80°E~90°E 附近的乌山和贝湖一带形成持续的正异常中心，稳定几天之后出现正异常中心小幅度的东移，但乌山和贝湖的正异常特征继续维持（图 11a），同时结合图 9a 中高度场距平可以看出，自西向东的波列特征明显。已有的研究也表明，乌山至贝湖地区的正异常，可能是由源地在大西洋地区激发的高层大气的波列传递形成的（Hoskins et al., 1985; 布和朝鲁等, 2010）。B 类组合，乌山至雅鄂一线的正异常中心，主要从东西两个方向共同发展而来，一支是 40°E~50°E 附近的中欧地区自西向东延伸，在乌山和贝湖地区形成持续正异常，另外一支是从 20°E 附近的西北太平洋自东向西延伸，并在雅鄂至贝湖地区形成持续正异常，两支异常环流在贝湖地区交汇，形成了乌山至雅鄂一线持续正异常，并且具有形势稳定、持续时间长等特征（图 11b）。C 类组合下，图 11c 清晰的给出了东面 180°附近开始的，西面从 40°E 附近开始的两支独立发展的正异常中心的发展，从而形成了乌山地区和雅鄂地区的持续稳定的正异常形势，这也进一步说明中纬度欧亚地区阻高的形成，可能是西面大西洋的波列传递和东面北太平洋的正异常中心扩展形成。Park et al. (2008) 结合 2005/

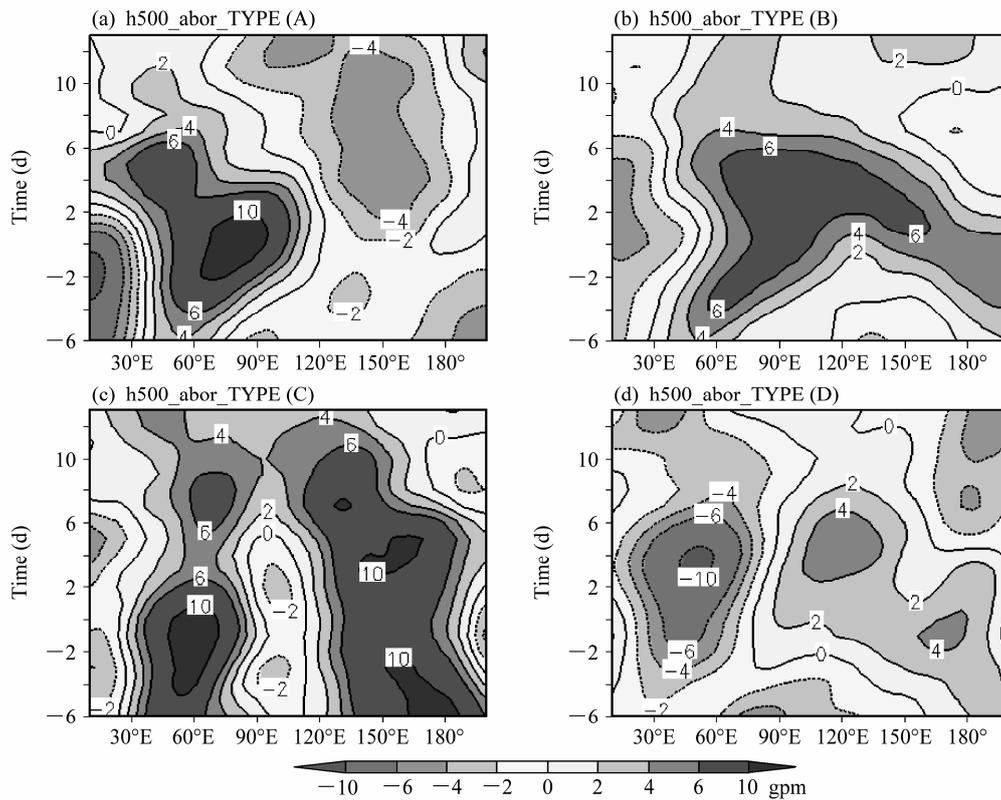


图 11 4 类组合对应的 500 hPa 高度逐日距平合成的经度—时间剖面 (单位: gpm) ($50^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$)。纵坐标为 RELTE 对应的前后天数

Fig. 11 Same as Fig. 5, except for the cross section of daily average of 500-hPa height anomalies before and after RELTEs ($50^{\circ}\text{N}\sim 80^{\circ}\text{N}$) (unit: gpm)

2006 冬季的两次寒潮的个例, 指出了阻塞区域高度场正异常的形成可能分别源自西边的大西洋和东边的北太平洋。D 类组合情况, 图 11d 清晰的给出了贝湖和雅鄂地区的持续正异常是由 20°W 附近自东向西发展形成, 并持续维持, 但正异常的强度较前三类情况偏弱一些。

7 结论和讨论

本文立足于欧亚大陆中纬度地区的乌山、贝湖和雅鄂三个关键区的高度场异常特征, 分析发生 RELTE 时三个区域高度场异常配置的空间模态, 及其异常信息对应 RELTE 的超前天数的时空分布特征, 并结合关键区域高度场异常的形成过程, 讨论存在前期异常信息的可能原因。主要得到以下结论:

(1) 近 50 年中国冬季 RELTE 与贝湖、乌山和雅鄂中某一区域 500 hPa 高度场出现正异常的对应概率在 0.8 以上, 持续时间 15 天以上事件的对应概率达到 0.92, 用三个关键区的 500 hPa 正高度异常来解释中国区域的持续时间较长, 影响范围较广的 RELTE 是可行的。

(2) 三个关键区域高度场异常大致可以分为 7

个类型: 乌山型、贝湖型、雅鄂型、乌山—贝湖型、乌山—贝湖—雅鄂型、乌山—雅鄂型、贝湖—雅鄂型, 不同类型异常模态对应的 RELTE, 在持续时间、综合强度和空间分布等方面均有较大的差异。单个区域的异常中, 乌山型对应 RELTE 的平均持续时间达 14.2 天, 空间范围以全国型为主; 贝湖型对应 RELTE 的持续时间和强度次之, 空间范围以华北—华南型为主; 雅鄂型对应 RELTE 的强度最弱, 持续时间最短, 空间范围以东北型为主。组合型异常对应的 RELTE 持续时间和强度总体强于单个区域异常型的情况。乌山—贝湖—雅鄂型对应 RELTE 的持续天数达 15.3 天, 平均综合指数强度达 2.0, 是 4 类组合型中最强的, 事件空间分布以全国型为主。乌拉—贝湖和贝湖—雅鄂两类情况居中, RELTE 的空间分布前者对应华北—华南型, 后者对应东北—华北型; 乌山—雅鄂型对应 RELTE 的持续天数为 9 天, 是四类事件中最短, 强度最弱的, 空间分布以华北—华南型为主。

(3) 4 类组合型的高度场距平, 均对应超前于 RELTE 的前期异常, 并且超前天数随异常阈值的增加而有所减少。就阈值为 0 值的情况而言, 最

大超前天数多为 15 天左右, 平均超前天数为 1~8 天不等, 其中乌山和雅鄂地区对应的超前天数更大, RELTE 存在前期异常的比例更高。前期高度场异常的超前天数的空间分布进一步揭示了关键区的高度场正异常主要是从乌山以西和雅鄂以东等地区沿东西两个方向发展而来: 即一支是 40°E~50°E 附近的中欧地区自西向东延伸, 在乌山和贝加尔湖地区形成持续正异常, 另外一支是从 20°W 附近的西北太平洋自东向西延伸, 并在雅鄂至贝湖地区形成持续正异常。

参考文献 (References)

- Bueh C, Shi N, Xie Z W. 2011a. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over southern China in January 2008 [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 12: 273–280.
- Bueh C, Fu X Y, Xie Z W. 2011b. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 4 (4): 235–241.
- 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): 11–121.
- 丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析 [M]. 北京: 科学出版社, 292pp. Ding Yihui. 1989. *Diagnosing and Analysis in Weather Dynamics (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 292pp.
- 丁一汇. 1991. 东亚寒潮冷空气的传播和行星尺度作用 [J]. *应用气象学报*, 2 (2): 124–132. Ding Yihui. 1991. The propagation of the winter monsoon during cold air out breaks in East Asia and the associated planetary scale effect [J]. *Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 2 (2): 124–132.
- 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. 66 (5): 808–825. Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 808–825.
- 封国林, 侯威, 支蓉, 等. 2011. 极端气候事件的检测、诊断和可预测性研究 [M]. 北京: 科学出版社, 350pp. Feng Guolin, Hou Wei, Zhi Rong, et al. 2011. *Research on Detecting, Diagnosing and Predictability of Extreme Climate Events (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 350pp.
- 龚志强, 王晓娟, 支蓉, 等. 2009. 中国近 58 年温度极端事件的区域特征及其与气候突变的联系 [J]. *物理学报*, 58 (6): 741–752. Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Zhi Rong, et al. 2009. Regional characteristics of temperature changes in China during the past 58 years and its probable correlation with abrupt temperature change [J]. *Acta Phys. Sin. (in Chinese)*, 58 (6): 4342–4352.
- Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, et al. 2011. Circulation system complex networks and teleconnections [J]. *Chin. Phys. B*, 20 (7): 79201.
- 龚志强, 王晓娟, 崔冬林, 等. 2012. 区域性极端低温事件的识别及其变化特征 [J]. *应用气象学报*, 23 (2): 195–204. Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Cui Donglin, et al. 2012. The identification and changing characteristics of regional low temperature extreme events [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 23 (2): 195–204.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 111: 877–946.
- Kistler R, Kalnay E, Kanamitsu M. 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82: 247–268.
- 马晓青, 丁一汇, 徐海明, 等. 2008. 2004/2005 年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究 [J]. *大气科学*, 32 (2): 380–394. Ma Xiaqing, Ding Yihui, Xu Haiming, et al. 2008. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during the winter of 2004/2005 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 380–394.
- Park T W, Jeong J H, Chang H H, et al. 2008. Characteristics of atmospheric circulation associated with cold surge occurrences in East Asia: A case study during 2005/06 winter [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (5): 791–804.
- Peng J B, Bueh C. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4 (5): 281–286.
- 钱维宏. 2012. 天气尺度瞬变波的物理分解原理 [J]. *地球物理学报*, 55 (5): 1439–1448. Qian Weihong. 2012. Physical decomposition principle of regional-scale transient anomaly [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 55 (5): 1439–1448.
- Ren F M, Cui D L, Gong Z Q, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events [J]. *J. Climate*, 25 (20): 7015–7027.
- 沈柏竹, 刘实, 廉毅, 等. 2011. 2009 年中国东北夏季低温及其与前期海气系统变化的联系 [J]. *气象学报*, 69 (2): 320–333. Shen Baizhu, Liu Shi, Lian Yi, et al. 2011. An investigation into 2009 summer low temperature in Northeast China and its association with prophase changes in the air-sea system [J]. *Acta Meteor. Sin. (in Chinese)*, 69 (2): 320–333.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 337–350. Tao Shiyang, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing rain in January 2008 in the southern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 337–350.
- 王晓娟, 龚志强, 周磊, 等. 2009. 温度关联网稳定性分析 I——极端事件的影响 [J]. *物理学报*, 58 (9): 6651–6658. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Zhou Lei, et al. 2009. Analysis of the stability of temperature networks part 1—The influence of extreme events [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 58 (9): 6651–6658.
- 王晓娟, 龚志强, 任福民, 等. 2012. 1960–2009 年中国冬季区域性极端低温事件的时空特征 [J]. *气候变化研究进展*, 8 (1): 1–15. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Ren Fumin, et al. 2012. Spatial-temporal characteristics of China regional extreme low temperature events in

winter during 1961–2009 [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis (in Chinese)*, 8 (1): 1–15.

杨萍, 封国林, 刘伟东, 等. 2010. 空间点过程理论在极端气候事件中的应用研究 [J]. *应用气象学报*, 21 (3): 352–359. Yang Ping, Feng Guolin, Liu Weidong, et al. 2010. Cluster extreme events based on point process theory [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (3): 352–359.

Zhang Z J, Qian W H. 2011. Identifying regional prolonged low

temperature events in China [J]. *Advances in Atmosphere Sciences*, 28 (2): 338–351.

张宗婕, 钱维宏. 2012. 中国冬半年区域持续性低温事件的前期信号 [J]. *大气科学*, 36: 1269–1279, doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2012.11227.

Zhang Zhongjie, Qian Weihong. 2012. Precursors of regional prolonged low temperature events in China during winter-half year [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36: 1269–1279, doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2012.11227.

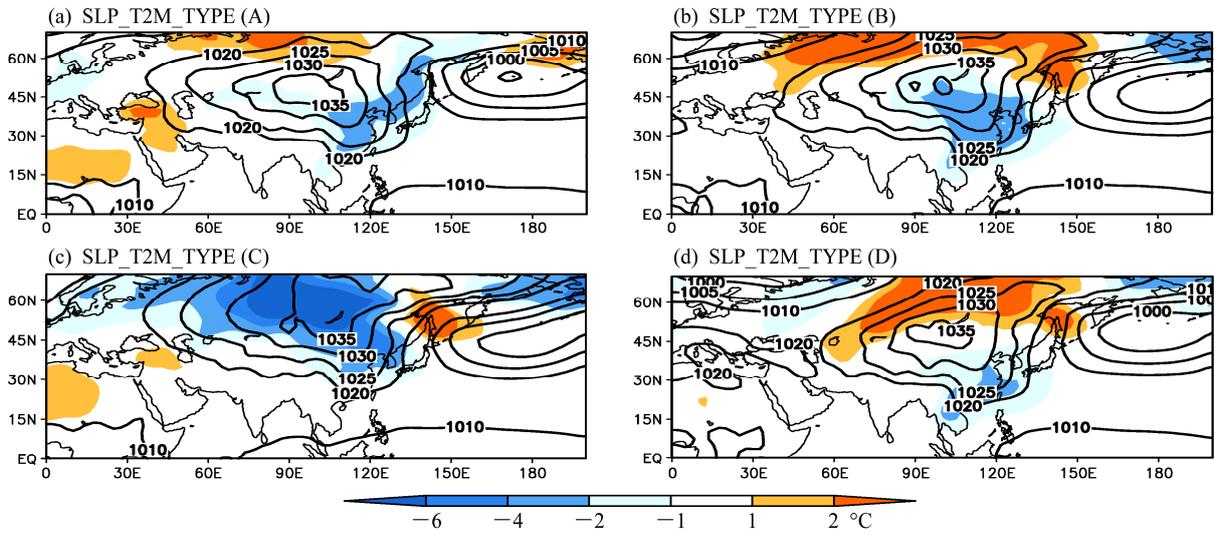


图 8 四类组合对应 SLP (单位: hPa)、SAT 距平 (单位: °C) 合成

Fig. 8 Same as Fig. 5, except for the composites of SLP (unit: hPa) and anomalies of SAT (unit: °C)

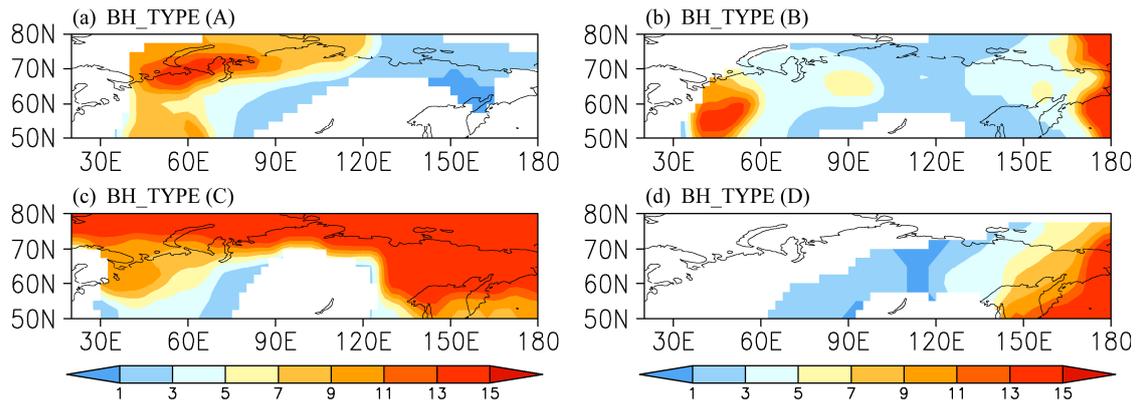


图 10 4 类组合下 500 hPa 高度距平场出现正异常超前于 RELTEs 的天数

Fig. 10 Same as Fig. 5, except for the spatial distribution of leading days of positive 500-hPa height anomalies to RELTEs