

王迪, 陈海山, 赵昶昱. 2018. 春季西亚地表热力异常与初夏东北冷涡活动年代际变化的联系 [J]. 大气科学, 42 (1): 70–80. Wang Di, Chen Haishan, Zhao Changyu. 2018. Connection between spring land surface thermal anomalies over West Asia and decadal variation of early summer cold vortex in Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 70–80, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16284.

# 春季西亚地表热力异常与初夏东北冷涡活动 年代际变化的联系

王迪<sup>1,2</sup> 陈海山<sup>1,2</sup> 赵昶昱<sup>1,2</sup>

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044  
2 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

**摘 要** 基于 1979~2015 年中国月平均站点温度资料, 计算了初夏东北冷涡指数, 分析了初夏东北冷涡活动的年代际变化特征。在此基础上, 进一步探讨了东北初夏冷涡活动与春季西亚地表热力异常之间的可能联系, 并初步讨论了前期西亚地表热力异常影响东北初夏冷涡活动的可能过程。结果表明: (1) 1979~2015 年间, 初夏东北冷涡强度表现出明显的年代际变化特征, 2000 年前, 冷涡活动总体偏强, 之后总体减弱。(2) 春季西亚地表热力状况在 2000 年前后也发生了明显的年代际转变: 2000 年前总体偏冷, 之后明显偏暖。(3) 春季西亚地区的地表热力异常与东北冷涡活动的在年代际尺度上联系密切。西亚地表异常偏冷, 东北冷涡活动偏强; 而西亚地表异常偏暖对应了偏弱的冷涡活动。初步分析发现, 西亚地表热力因子可能通过影响大气环流分布并通过遥相关型影响我国初夏东北地区冷涡, 当然相关的机理还有待深入分析。

**关键词** 东北冷涡 西亚地表热力异常 年代际变化

**文章编号** 1006-9895(2018)01-0070-11

**中图分类号** P461+4

**文献标识码** A

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16284

## Connection between Spring Land Surface Thermal Anomalies over West Asia and Decadal Variation of Early Summer Cold Vortex in Northeast China

WANG Di<sup>1,2</sup>, CHEN Haishan<sup>1,2</sup>, and ZHAO Changyu<sup>1,2</sup>

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/International Joint Research Laboratory on Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** The cold vortex index in Northeast China is calculated by using the monthly station temperature data during 1979–2015 provided by the National Climate Center of China. In the present study, basic features of the cold vortex activity variation and its possible linkage with the springtime land surface thermal condition over west Asia are investigated. Results are as follows: (1) The intensity of the cold vortex in Northeast China displays a significant decadal

**收稿日期** 2016-12-09; **网络预出版日期** 2017-06-08

**作者简介** 王迪, 女, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与短期气候预测研究。E-mail: wangdi\_18@163.com

**通讯作者** 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

**资助项目** 国家自然科学基金项目 41230422、41625019, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201206017, 江苏省自然科学基金 BK20130047

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 41230422, 41625019), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201206017), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant BK20130047)

fluctuation and an obvious decadal transition from positive phase (strong cold vortex) to negative (weak cold vortex) phase around 2000. (2) Decadal variation is also found in springtime land surface thermal condition over West Asia. The land surface was relatively cold before 2000 but became warm since then. (3) There is a close relationship between the decadal variations in early summer cold vortex and spring land surface thermal condition, i.e., cold (warm) land surface corresponds to intensified (weakened) cold vortex. Further analysis suggests that anomalous land surface thermal forcing can result in abnormal general circulation and affect the cold vortex activity via the atmospheric teleconnection. However, the related physical mechanism needs further investigation in the future.

**Keywords** Cold vortex in Northeast China, Land surface thermal anomalies over West Asia, Decadal variation

## 1 引言

东北冷涡发生于世界三大冷涡多发地之一的我国东北地区,是具有深厚冷空气性质的气旋性涡旋,多发生于夏季(胡开喜等,2011),能维持3天及以上(孙力等,1994;刘慧斌等,2012)。冷涡过境不仅造成东北地区的低温冷害、持续阴雨洪涝、突发性对流等灾害性天气,其持续和频繁的活动还能产生显著的“气候效应”,例如,可以对江淮梅雨期降水(何金海等,2006;沈柏竹等,2011;谢作威和布和朝鲁,2012;Chen and Lu, 2014; Gao et al., 2014; Chen et al., 2016)、华南雨季产生一定影响(苗春生等,2006)。因此,研究东北冷涡的异常活动规律及相关机理有重要的科学意义和实际应用价值。

目前,国内外学者主要从大气内部动力过程及外部强迫两个方面对影响东北冷涡变化因素开展研究。研究发现东北冷涡在5、6月最强,且6月冷涡位置总体偏南。随着副高的大幅北进及梅雨期结束后急流的突然北跳,冷涡强度减弱,频数减少。东北冷涡的生成与维持不仅受周围风向风速(Hsieh, 1949)影响,还与高纬度阻塞高压(孙力等,1994)和中高纬Rossby波活动有关。廉毅等(2010)探讨了初夏大气环流低频变化对东北冷涡异常活动的影响,发现冷涡与上游乌拉尔山阻塞形势和下游西北太平洋异常环流有关;而Xie and Bueh (2015)的研究根据东北冷涡上游高压脊的位置将冷涡分成四种类型,并指出当冷涡为乌拉尔山和雅库茨克—鄂霍茨克型时,会造成东北地区降水偏多。何金海等(2006)发现,东北冷涡偏强年,北半球环状模(NAM)偏弱;冷涡偏弱年,前期2月NAM偏强。尹姗等(2013)的研究也得到了类似的结论:当前冬北半球环状模偏弱时,东北冷涡偏强。孙力(1997)分析了东亚大气10~20天低频振荡及瞬变扰动对东北冷涡持续性活动的影响,

发现东亚大气准双周振荡是导致东北冷涡持续性活动的一个重要原因。此外,东北冷涡还与北太平洋涛动(NPO)有着一定的关联(刘宗秀等,2003),并且东北冷涡在西太平洋遥相关型为负位相时更易生成(谢作威和布和朝鲁,2012)。在外源强迫方面,何金海等(2006)发现东北冷涡的强弱与北太平洋海温存在一定的联系;高辉和高晶(2014)研究表明黑潮海温通过影响环流系统进而对东北冷涡产生影响。

不难发现,前人对东北冷涡的研究多集中于从中高纬大气环流内部调整对东北冷涡的影响出发,从外强迫因子出发分析影响冷涡变化的研究很少,除了对海温影响冷涡的个别研究以外,对陆面过程这一重要外强迫因子的关注很少。因此,我们从地表热力状况角度出发,试图从陆面外强迫的角度开展东北冷涡活动的相关研究,通过探讨前期春季欧亚大陆地表热力因子与东北冷涡活动的可能联系,以期深入理解东北冷涡异常变化特征并提供新的视角。

## 2 资料方法

本文使用的温度资料为国家气候中心提供的1979~2015年160站月平均站点资料;大气环流资料为美国国家环境预报中心和大气研究中心(NECP/NCAR)17个层次的再分析资料(Kalnay et al., 1996);地面要素场资料选取欧洲数值预报中心(ECMWF)提供的1979年1月至2015年12月,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  ERA-interim月平均再分析资料;同时还采用了CRU(Climatic Research Unit)1979年1月至2014年12月气温资料。本文主要采用了经验正交函数分解 EOF)、相关分析、合成分析、 $t$ 检验等多元统计分析方法。

## 3 东北冷涡强度变化的分析

根据苗春生等(2006)提出的方法来计算表征东北冷涡异常的冷涡指数(NECVI),具体方法如

下: 利用 6 月 160 站的站点温度资料, 首先计算得到温度变率最大的站点 (乌兰浩特站), 将该站温度与其他站点的温度进行相关分析; 进一步根据显著正相关的站点确定反映温度变化的关键区。最终选取 ( $40^{\circ}\sim 52^{\circ}\text{N}$ ,  $116^{\circ}\sim 132^{\circ}\text{E}$ ) 区域作为关键区, 计算关键区内的平均温度, 经过标准化处理后乘以  $-1$ , 最终得到 1979~2015 年 6 月的 NECVI (苗春生等, 2006)。NECVI 正值代表冷涡强年, 绝对值越大, 表明冷涡强度越强; 负值代表冷涡弱年, 绝对值越大, 表示冷涡强度越弱。为了验证该指数的合理性, 我们利用该指数回归得到同期 500 hPa 的位势高度、温度及地面降水等要素场, 发现该指数可以很好表征东北地区上空东北冷涡的变化情况。此外, 我们通过统计该地区上空冷涡出现的频次 (NIO, Number Index), 发现其与 NECVI 的变化相一致, 二者的相关系数为 0.72 (如图 1a 所示)。之前的研究发现东北冷涡的发生频率具有明显的年际和年代际变化特征 (孙力等, 2000)。为了探

讨其是否存在年代际尺度上的变化, 通过 Mann-Kendall 检验, 发现, 突变点的位置位于 1999 年前后; 2000 年后, 东北冷涡强度明显减弱 (图 1b)。综上所述, 1979~2015 年间初夏东北冷涡强度具有明显的年代际变化特征, 2000 年之前, 冷涡活动总体偏强, 之后总体呈减弱趋势。为此, 我们将研究时段分成 1979~1999 年及 2000~2015 年两个时段, 分别对东北冷涡强、弱时段的环流背景做进一步分析。

图 2 分别给出了东北冷涡强、弱两个阶段对应的环流异常的空间分布。不难发现冷涡活动偏强阶段 (1979~1999 年), 6 月 500 hPa 位势高度场上乌拉尔山及以西地区为高度场的正异常, 对应反气旋性异常环流; 而我国东北、贝加尔湖及以北地区则对应高度场的负异常, 对应弱的气旋性异常环流, 上述异常高度场的分布形势可能反映了乌拉尔山阻塞高压的异常增强, 有利于贝加尔湖及我国东北地区的低涡活动 (图 2a)。Liu et al. (2015b) 研究

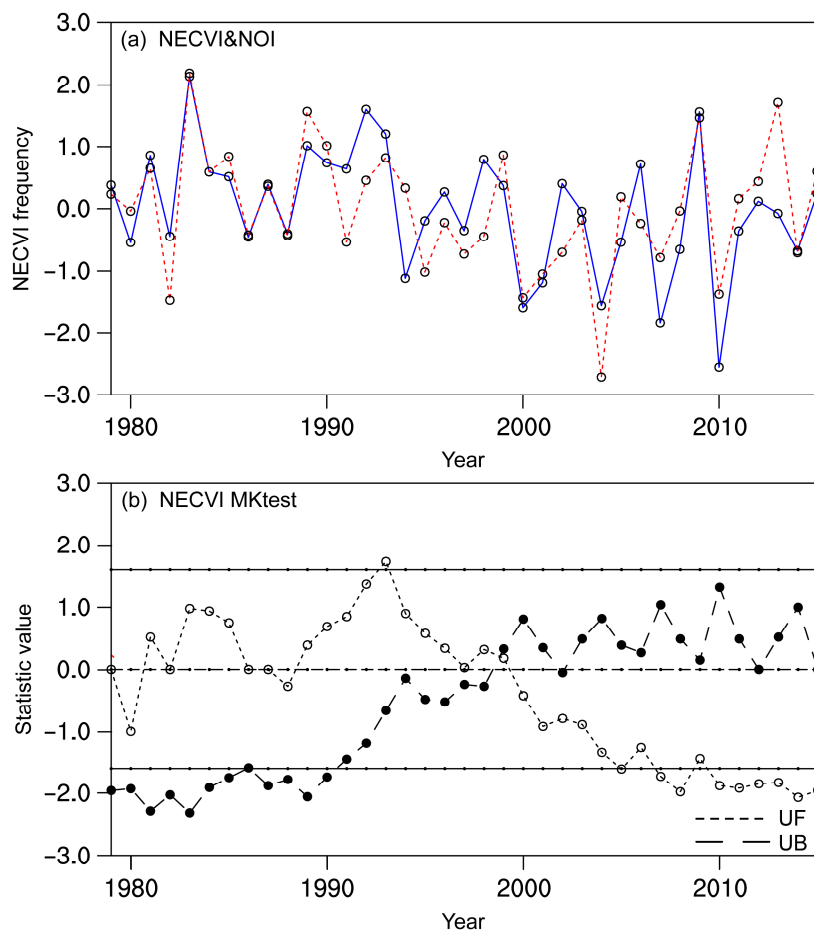


图 1 1979~2015 年 6 月东北冷涡指数与频数的 (a) 时间序列和 (b) Mann-Kendall 统计量曲线。黑色实线表示通过  $p=0.1$  显著性  $t$  检验

Fig. 1 (a) Time series of NECVI (Northeast Cold Vortex Index) and its frequency index (NOI, Number Index) and (b) Mann-Kendall test of NECVI in June during 1979–2015. Black solid lines denote statistical significance at  $p=0.1$  (by a two-tailed Student's  $t$  test)

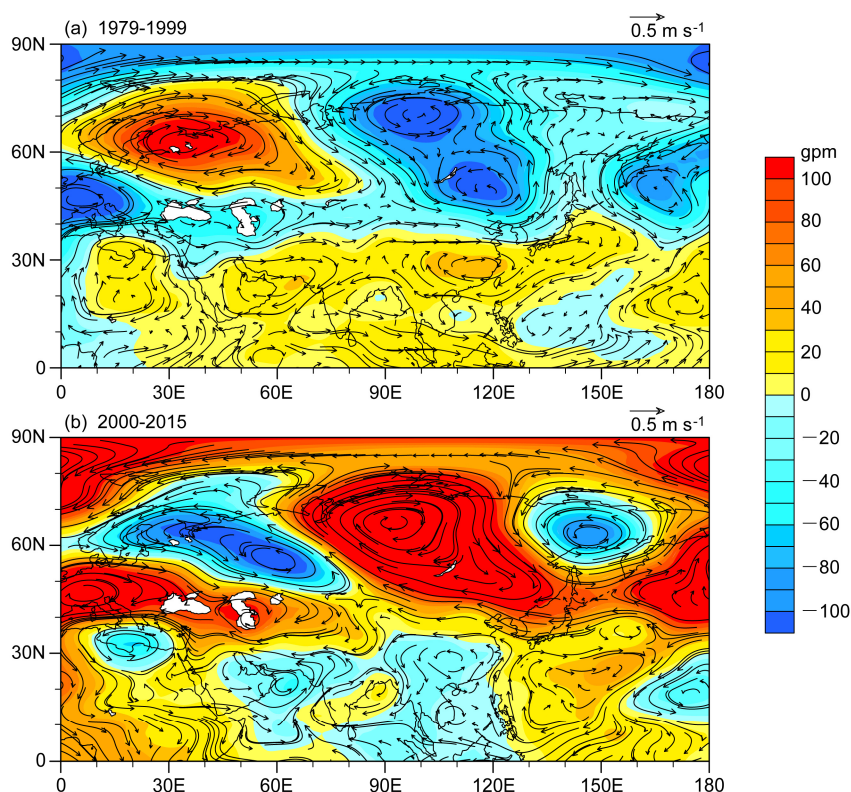


图2 6月500 hPa平均位势高度(填色, 单位: gpm)和风场(箭头, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )异常场: (a) 1979~1999年; (b) 2000~2015年

Fig. 2 Average geographic distributions of 500 hPa geopotential height (shaded, units: gpm) and wind field (vector, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) anomalies in June during (a) 1979–1999 and (b) 2000–2015

表明东北冷涡活动异常多年, 乌拉尔山阻塞高压偏强, 500 hPa 环流异常分布有利于偏强的东北冷涡活动。而冷涡活动偏弱阶段(2000~2015年), 环流异常分布与前一时段环流异常分布情况总体相反(图2b), 乌拉尔山及以西地区为高度场明显的负异常, 对应反气旋性环流异常; 而我国东北、贝加尔湖及以北地区则对应高度场的正异常, 上述环流异常分布形势不利于贝加尔湖及我国东北地区的低涡活动。Liu et al. (2015a) 研究也指出冷涡活动强年, 鄂霍次克海阻塞高压活动也偏强, 鄂霍次克海阻塞高压对东北冷涡的东移起到了一定的抑制作用, 有利于东北冷涡在东北地区维持较长时间; 鄂霍次克海阻塞高压活动减弱, 有利于东北冷涡向东移出东北地区, 使得东北冷涡活动总体偏弱。

#### 4 春季欧亚地表热力因子与东北冷涡的关系

前面的分析表明, 对应东北初夏冷涡活动异常

偏强、偏弱的两个阶段, 欧亚大陆上空的大气环流表现出显著的差异。大量的研究均表明, 大气环流的异常变化与外强迫关系密切, 因此我们试图从陆面过程影响的角度, 来探讨了东北冷涡异常变化的可能原因。

通过分析东北冷涡指数与春季欧亚大陆地表热力因子的关系, 发现冷涡指数与西亚地区的地表热力因子(土壤温度、地表气温、地面2 m气温)存在显著的负相关。为了减少结果的不确定性, 我们还利用CRU春季气温资料与NECVI进行了相关性分析, 也得到了较为一致的结果(图3)。

为了进一步分析西亚地区地面热力因子的变化情况及其与东北冷涡的联系, 选取( $10^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $30^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ )区域地表热力因子进行EOF分析, 得到不同地表热力因子的第一主模态, 大致反映了西亚地表热力异常在年代际尺度上全区一致的变化(图4a、c、e、g), 时间系数也表现出明显的年代际变化特征(图4b、d、f、h)。不同地表热力因子的EOF第一模态时间系数均在1999年前后发生了

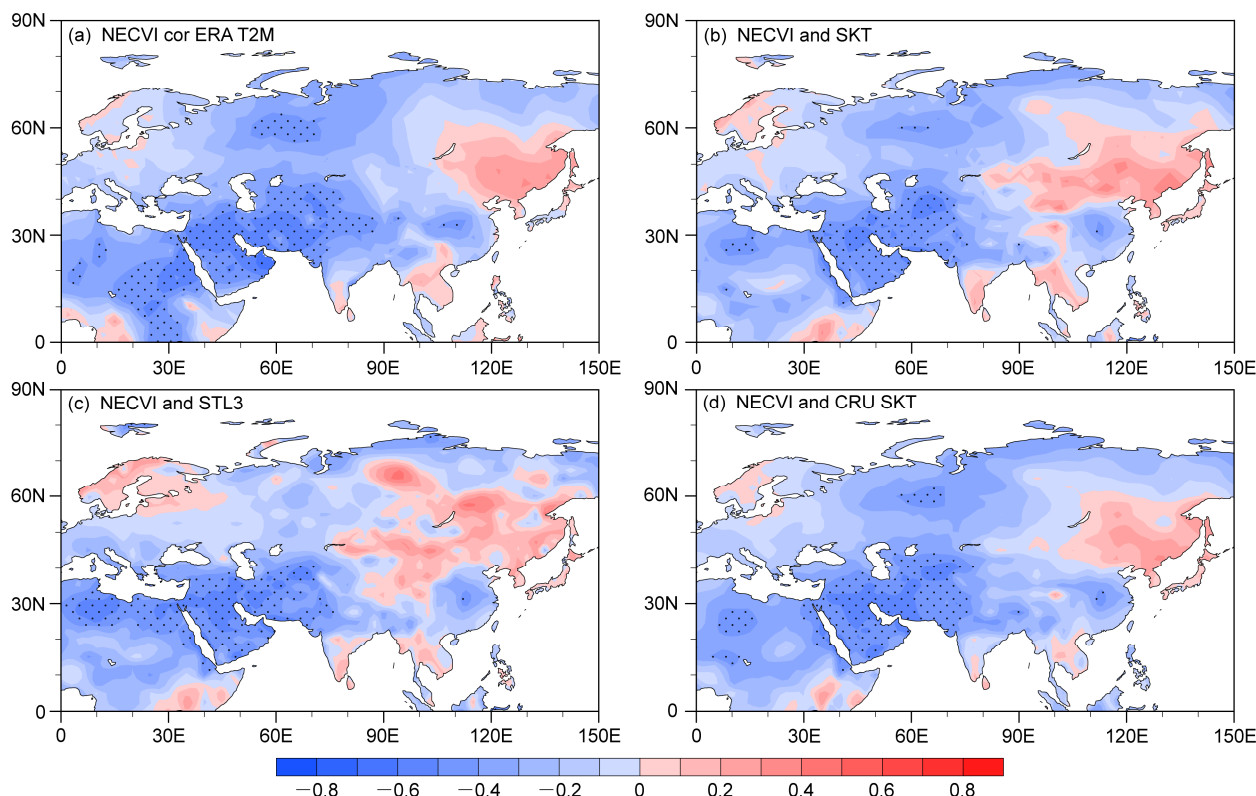


图3 6月东北冷涡指数与春季欧亚大陆 (a) 地面2 m气温、(b) 地表气温、(c) 土壤温度、(d) CRU (Climatic Research Unit) 气温的相关空间分布。黑色圆点表示通过 $p=0.05$ 的显著性检验

Fig. 3 Spatial distributions of correlation coefficients between NECVI in June and Eurasia continent surface thermal factors in spring: (a) 2-m air temperature; (b) ground surface temperature; (c) soil temperature; (d) CRU (Climatic Research Unit) temperature. Black dots indicate statistical significance at  $p=0.05$

明显的转变, 前一时段基本为负值, 之后则基本转为正值。结合空间分布特征可以发现, 西亚春季地表在后一时段较前一时段明显增暖, 尤其在伊朗高原地区升温更加明显。

我们注意到, 地表热力异常的年代际变化与NECVI的变化有很好的对应关系。西亚地表异常偏冷阶段, 对应东北冷涡活动偏强; 而西亚地表异常偏暖阶段, 则对应东北冷涡活动偏弱。为了进一步检验地表热力异常与东北冷涡活动的关系, 我们将地面2 m气温、地表气温, 土壤温度以及CRU提供的地表气温的第一模态时间系数作为表征西亚地面气温变化的指数, 分别定义为T2MI (Temperature at 2 Meters Index)、SKTI (Surface Skin Temperature Index)、STL3I (Soil Temperature at Level 3 Index) 和CTMPI (CRU Temperature Index), 计算了四个指数与NECVI的相关, 相关系数分别为-0.592、-0.602、-0.598和-0.616, 均通过0.01的显著性检验。为了消除长期趋势的影响, 还计算了不同指数

去倾后的相关, 分别为-0.517、-0.523、-0.522和-0.525, 也通过了0.01的显著性检验。同时, 对T2MI、SKTI、STL3I、CTMPI进行Mann-Kendall统计检验(图5), 四个系数均在1999年前后发生了突变, 这与东北冷涡指数突变时间完全一致。

## 5 西亚地表热力异常相关的环流异常特征分析

由于春季西亚地表热力异常与我国东北地区初夏冷涡之间不论在时间还是空间上都存在一定的距离, 以下我们重点分析西亚地表热力异常对应的大气环流异常特征, 以便为理解西亚地表热力因子与东北冷涡强度的联系提供进一步的参考。

为了说明春季西亚地表热力异常对同期、后期大气环流的可能影响, 图6为T2MI回归得到的春季与初夏850、500和200 hPa风场。不难发现, 春季在(40°N, 60°E)附近, 由低层至高层存在一个反气旋式的异常环流中心, 而在其北侧为一个气旋

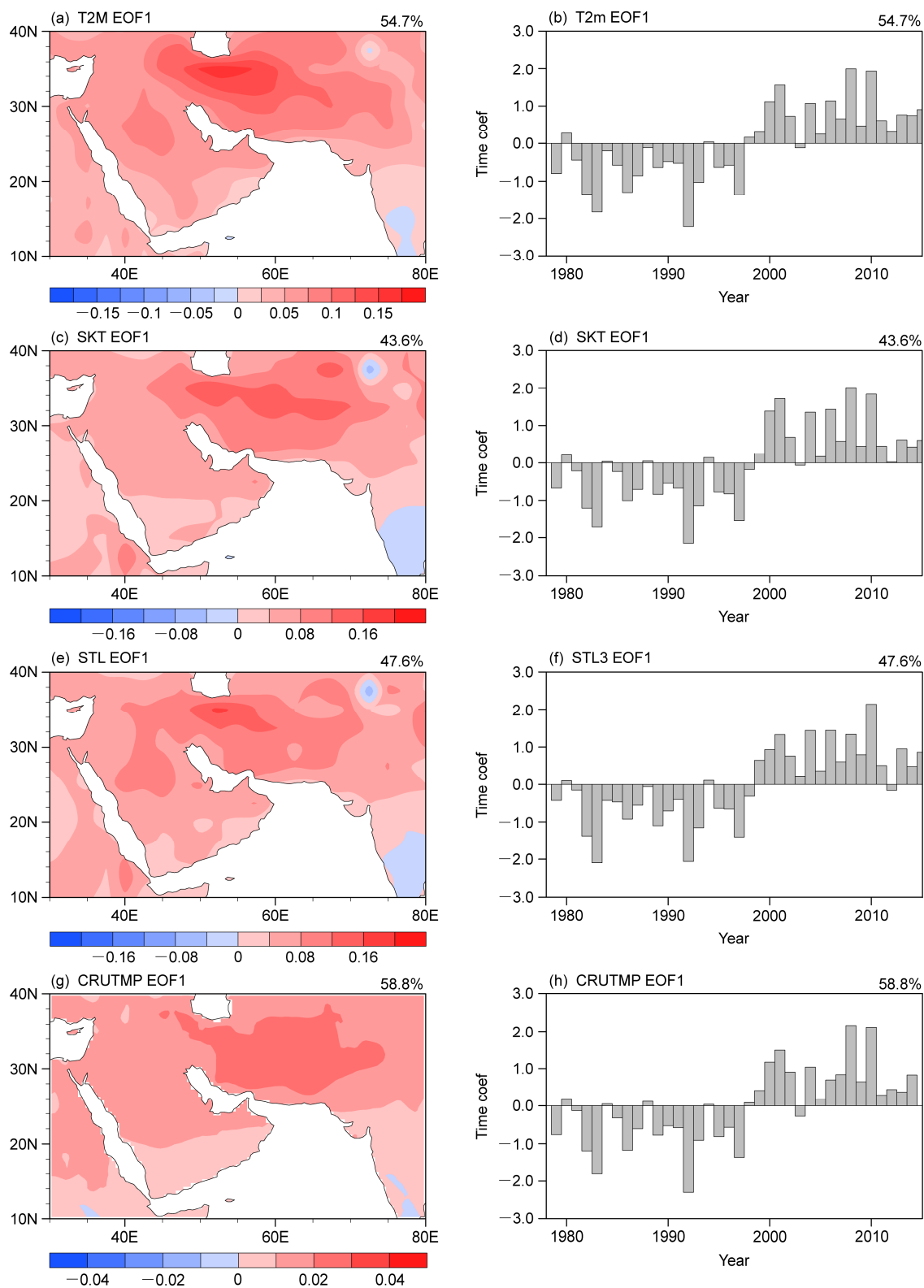


图4 春季西亚地区 (a、b) 地面 2 m 气温、(c、d) 地表气温、(e、f) 土壤温度、(g、h) CRU 气温的 EOF 第一模态空间分布与时间系数。右上角百分数表示模态所占比重

Fig. 4 Spatial patterns and time series of the first EOF modes of West Asia spring surface thermal factors: (a, b) 2-m temperature; (c, d) ground surface temperature; (e, f) soil temperature; (g, h) CRU temperature. The number in upper right corner represents the proportion of modality

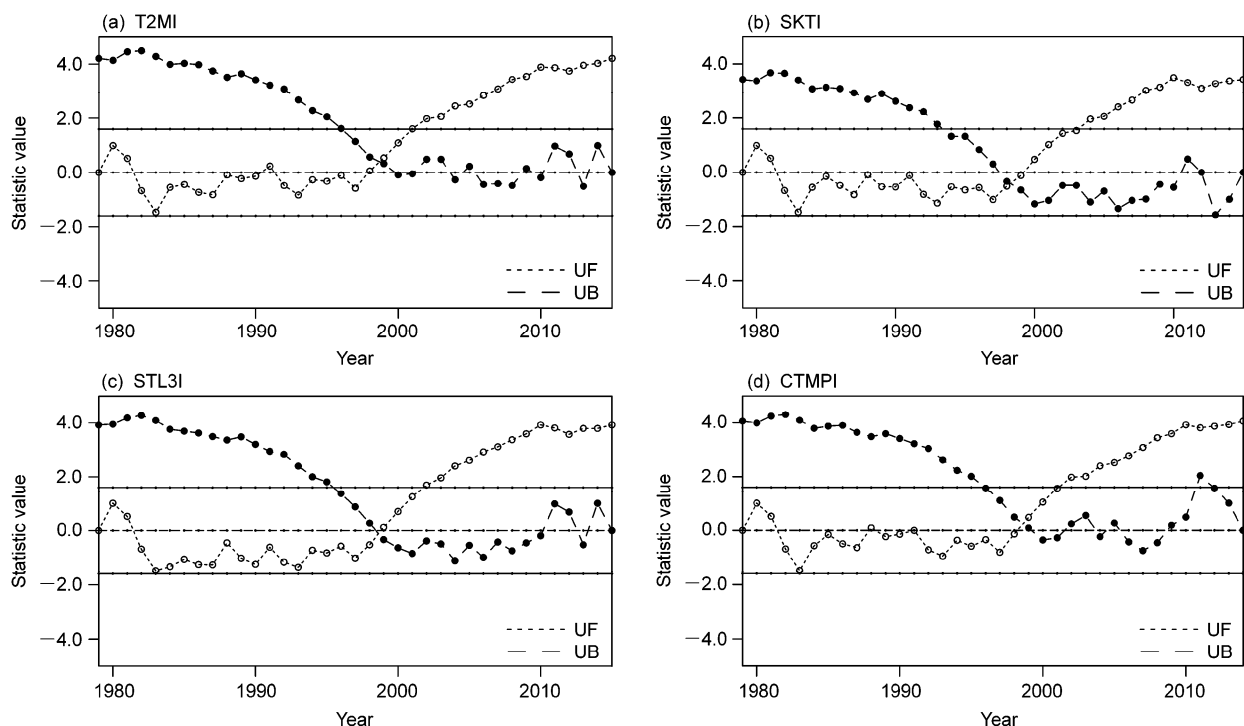


图5 西亚 (a) 地面 2 m 气温、(b) 地表气温、(c) 土壤温度、(d) CRU 气温的 EOF 第一模态时间系数的 Mann-Kendall 统计分析。黑色实线表示通过  $p=0.1$  的显著性检验

Fig. 5 Mann-Kendall test of the time coefficients of the first EOF modes of West Asia surface thermal factors: (a) 2-m air temperature; (b) ground surface temperature; (c) soil temperature; (d) CRU temperature. Black solid lines denote statistical significance at  $p=0.1$

式的异常环流中心,上述显著的环流异常主要出现在西亚热力异常区及其南北侧,这也说明大气环流对该地区的热力异常的直接响应;而在(30°N, 140°E)附近即我国东部、日本南部海上存在一个气旋式的异常中心(图 6a、c、e)。初夏,30°N 以南各层风场均以东风异常为主,而中高纬地区由西向东分别在乌拉尔山—贝加尔湖西北部至我国东北地区—鄂霍茨克呈现气旋—反气旋—气旋式异常环流,我国东北地区为异常反气旋性环流控制,不利于东北冷涡的活动(图 6b、d、f)。此外,我们首先将 MK 检验得到的突变点 1999 年作为分界点,研究西亚地表热力异常冷(1979~1999 年)、异常暖(2000~2015 年)阶段的环流特征。图 7a, c 分别给出了热力异常暖(2000~2015 年)与异常冷(1979~1999 年)阶段春季、初夏 500 hPa 位势高度的差值分布,高度场的异常的结果和风场异常分布是一致的。同时图 6 为 T2MI 回归得到的春季与初夏 500 hPa 高度场分布,与之前我们以 2000 年作为分界点得到的两个时段位势高度场的合成差值场的分布非常相似,低纬环流场的分布形式大体均为一个环绕全球型的分布,并且位于欧亚大陆中

低纬地区存在大值区域(图 7b、e)。总体而言,西亚热力异常暖年(冷年)的大气环流异常与东北冷涡弱年(强年)的环流特征总体一致,这也说明了西亚热力异常引起的大气环流异常可能是影响东北冷涡活动的直接途径。

此外,我们注意到西亚热力异常相关的大气环流分布具有环绕北半球的分布特点,因此根据 Yasui and Watanabe (2010) 定义“环球型遥相关”的方法,我们对 1979~2015 年初夏(6 月) 500 hPa 经向风进行 EOF 分析,将第一模态时间系数定义为 CGT 指数(Circum Global Teleconnection Index),并回归到春季、初夏 500 hPa 位势高度场,得到的高度场空间分布形式与 T2MI 回归至 500 hPa 位势高度场的分布及冷涡强弱时段合成得到的位势高度场分布均非常相似(图 7c、f),在欧亚大陆上空出现的位势高度场分布尤其相似。位势高度场的这种分布表现出类似于夏季的“丝绸之路”遥相关型的分布(Lu et al., 2002),而“丝绸之路”也与大陆增暖存在一定的联系。因此,我们认为春季西亚地表热力因子有可能通过影响大气环流的异常并通过上述的大气遥相关型影响我国初夏东北地区冷涡。当

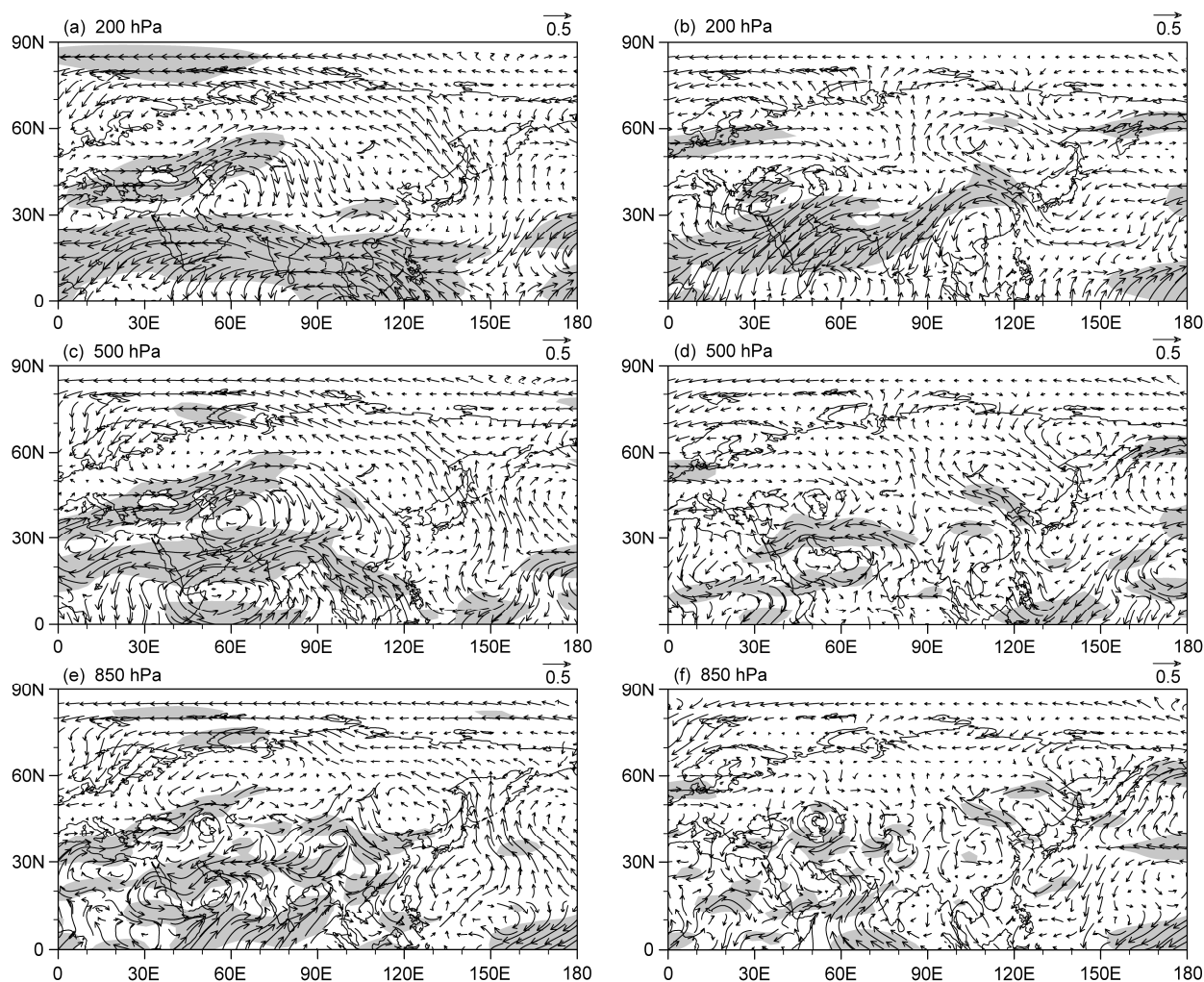


图6 T2MI (Temperature at 2 Meters Index) 回归得到的 (a、c、e) 春季与 (b、d、f) 初夏 200、500 和 850 hPa 风场。阴影部分表示通过  $p=0.1$  的显著性检验

Fig. 6 Regressions of wind fields in (a, c, e) spring and (b, d, f) early summer at 200, 500, and 850 hPa onto the T2MI (Temperature at 2 Meters Index). Shaded areas indicate statistical significance at  $p=0.1$

然相关的机制还值得进一步验证和深入讨论。

## 6 结论与讨论

本文通过分析基于 160 站气温资料定义的东北冷涡指数, 讨论初夏东北冷涡活动的年代际变化特征; 在此基础上, 进一步分析了东北初夏冷涡活动与前期春季西亚地表热力因子之间的可能联系, 并初步探讨了前期西亚地表热力异常相关的大气环流特征, 进而为理解西亚地区的地表热力异常与东北初夏冷涡活动之间的联系提供一些参考。主要结论如下:

(1) 1979~2015 年间初夏东北冷涡强度具有明显的年代际变化特征: 2000 年之前, 冷涡活动总

体偏强, 之后总体减弱。进一步的分析发现, 东北冷涡强、弱时段的环流背景存在显著差异。冷涡偏强阶段 (1979~1999 年), 6 月 500 hPa 位势高度场上, 乌拉尔山及以西地区为高度场正异常 (对应反气旋性环流异常), 而我国东北、贝加尔湖及以北地区则对应高度场的负异常 (气旋性环流异常), 上述异常高度场的分布形势反应了乌拉尔山阻塞高压的异常增强, 有利于偏强的东北冷涡活动。而冷涡偏弱阶段 (2000~2015 年), 环流异常分布与前一时段环流异常分布情况总体相反, 乌拉尔山及以西地区为高度场明显的负异常, 而我国东北、贝加尔湖及以北地区则对应高度场的正异常, 上述环流异常分布形势不利于贝加尔湖及我国东北地区

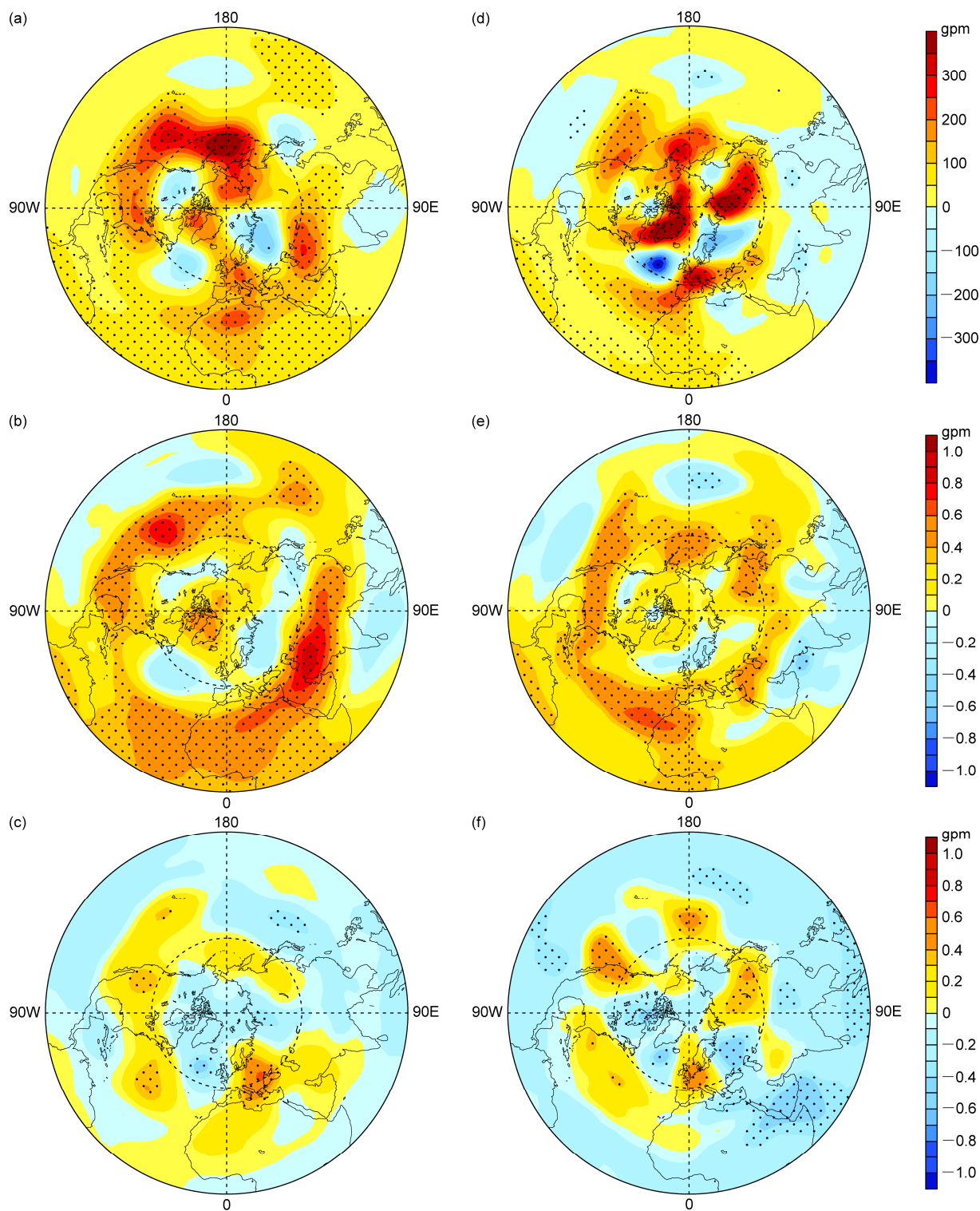


图7 (a, d) 2000~2015 年与 1979~1999 年 500 hPa 位势高度场的差值; (b, e) T2MI 回归的 500 hPa 位势高度场; (c, f) 6 月 CGTI (Circum Global Teleconnection Index) 回归的 500 hPa 位势高度场。单位: gpm。(a, b, c) 春季; (d, e, f) 初夏 (6 月)。黑色圆点表示通过  $p=0.05$  显著性检验

Fig. 7 (a, d) Composite differences in 500-hPa geopotential height (2000–2015 minus 1979–1999); (b, e) regression of 500-hPa geopotential height onto the T2MI time series; (c, f) regression of 500-hPa geopotential height onto June CGTI (Circum Global Teleconnection Index) time series. Units: gpm. (a, b, c) Spring; (d, e, f) early summer (June). Black dots denote statistical significance at  $p=0.05$

的低涡活动。

(2) 春季西亚地表热力因子在 1999 年前后发生了明显的转变, 1999 年前偏冷, 而之后表现为明显增暖; 且地表热力异常的年代际变化与东北冷涡活动的变化关系密切。西亚地表异常偏冷阶段, 对应了东北冷涡活动偏强; 而西亚地表异常偏暖阶段, 则对应了东北冷涡活动偏弱。

(3) 西亚地表热力偏暖(冷)阶段对应的大气环流异常特征与东北冷涡偏弱(强)阶段的环流分布总体一致; 西亚地表热力可能通过影响大气环流的异常并通过的夏季欧亚大陆上空的大气遥相关型影响东北冷涡活动。

本文初步探讨了西亚地表热力因子与东北冷涡活动的可能联系, 尤其是强调了二者年代际尺度上的关联, 结果可以为深入理解东北冷涡异常活动的成因提供参考。但是, 由于影响东北冷涡的因素众多, 成因复杂, 我们的研究还是初步的。此外, 冷涡的强度表征方法很多, 本文仅用冷涡指数这一概念系统地表示冷涡强弱特征, 而并没有从维持时间、路径等对冷涡类型进行更为细致的划分。因此, 对西亚地表气温通过影响环流场进而影响冷涡的何种特征有待进行深入的分析。尤其是西亚地表热力因子的影响与响应机制还需要进一步的研究。另外, 有学者认为降水释放潜热是影响欧亚地区上空“丝绸之路”型遥相关的机制(Chen and Huang, 2012), 那么地表热力因子通过何种途径影响上层大气遥相关也值得深入探讨。

## 参考文献 (References)

- Chen G S, Huang R H. 2012. Excitation mechanisms of the teleconnection patterns affecting the July precipitation in Northwest China [J]. *J. Climate*, 25 (22): 7834–7851, doi:10.1175/JCLI-D-11-00684.1.
- Chen W, Lu R Y. 2014. The interannual variation in monthly temperature over Northeast China during summer [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31 (3): 515–524, doi:10.1007/s00376-013-3102-3.
- Chen W, Hong X W, Lu R Y, et al. 2016. Variation in summer surface air temperature over Northeast Asia and its associated circulation anomalies [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33 (1): 1–9, doi:10.1007/s00376-015-5056-0.
- 高辉, 高晶. 2014. 黑潮冬季海温对我国东北地区夏季降水预测信号的增强 [J]. *海洋学报*, 36 (7): 27–33. Gao Hui, Gao Jing. 2014. Increased influences of the SST along the Kuroshio in previous winter on the summer precipitation in northeastern China [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 36 (7): 27–33, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2014.07.004.
- Gao Z T, Hu Z Z, Jha B, et al. 2014. Variability and predictability of Northeast China climate during 1948–2012 [J]. *Climate Dyn.*, 43 (3–4): 787–804, doi:10.1007/s00382-013-1944-0.
- 何金海, 吴志伟, 祁莉, 等. 2006. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析 [J]. *气象与环境学报*, 22 (1): 1–5. He Jinhai, Wu Zhiwei, Qi Li, et al. 2006. 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, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2006.01.001.
- Hsieh Y P. 1949. An investigation of a selected cold vortex over North America [J]. *J. Atmos. Sci.*, 6 (6): 401–410, doi:10.1175/1520-0469(1949)006<0401:AIOASC>2.0.CO;2.
- 胡开喜, 陆日宇, 王东海. 2011. 东北冷涡及其气候影响 [J]. *大气科学*, 35 (1): 179–191. Hu Kaixi, Lu Riyu, Wang Donghai. 2011. Cold vortex over Northeast China and its climate effect [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 35 (1): 179–191, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.15.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 34 (2): 429–439, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.16.
- Liu Gang, Feng Guolin, Qin Yulin, et al. 2015a. Activity of cold vortex in northeastern China and its connection with the characteristics of precipitation and circulation during 1960–2012 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 25 (12): 1423–1438, doi:10.1007/s11442-015-1243-2.
- Liu G, Lian Y, Yan P C, et al. 2015b. The objective recognition and classification of Northeast cold vortex and the Northern Hemisphere atmospheric circulation characters in May to August [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35 (8): 1042–1050, doi:10.13249/j.cnki.sgs.2015.08.1042.
- 刘慧斌, 温敏, 何金海, 等. 2012. 东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响 [J]. *大气科学*, 36 (5): 959–973. Liu Huibin, Wen Min, He Jinhai, et al. 2012. Characteristics of the Northeast cold vortex at intraseasonal time scale and its impact [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 36 (5): 959–973, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11167.
- 刘宗秀, 廉毅, 沈柏竹, 等. 2003. 北太平洋涛动区 500 hPa 高度场季节变化特征及其对中国东北区降水的影响 [J]. *应用气象学报*, 14 (5): 553–561. Liu Zongxiu, Lian Yi, Shen Baizhu, et al. 2003. Seasonal variation features of 500 hPa height in North Pacific oscillation region and its effect on precipitation in Northeast China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 14 (5): 553–561, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.05.005.
- Lu R Y, Jai-Ho O H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus Series A-Dynamic Meteorology & Oceanography*, 54 (1): 44–55, doi:10.1034/j.1600-0870.2002.00248.x.
- 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的关系分析 [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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 30 (6): 1249–1256, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.19.
- 沈柏竹, 林中达, 陆日宇, 等. 2011. 影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流特征分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 41 (3): 402–412. Shen B Z, Lin Z D, Lu R Y, et al. 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early- and late-summer precipitation in Northeast China [J]. *Science China: Earth Science*, 54 (7): 1095–1104, doi:10.1007/s11430-011-4173-6.
- 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 21 (3): 297–307, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1997.03.06.
- 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, 安刚, 廉毅, 等. 2000. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析 [J]. *气象学报*, 58 (6): 704–714. Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2000. A study of the persistent activity of Northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 58 (6): 704–714, doi:10.11676/qxxb2000.071.
- 谢作威, 布和朝鲁. 2012. 东北冷涡低频活动特征及背景环流 [J]. *气象学报*, 70 (4): 704–716. Xie Zuowei, Bueh Cholaw. 2012. Low frequency characteristics of Northeast China cold vortex and its background circulation pattern [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 70 (4): 704–716, doi:10.11676/qxxb2012.057.
- Xie Zuowei, Bueh Cholaw. 2015. Different types of cold vortex circulations over Northeast China and their weather impacts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143 (3): 845–863, doi:10.1175/MWR-D-14-00192.1.
- Yasui S, Watanabe M. 2010. Forcing processes of the summertime circumglobal teleconnection pattern in a dry AGCM [J]. *J. Climate*, 23 (8): 2093–2114, doi:10.1175/2009JCLI3323.1.
- 尹姗, 冯娟, 李建平. 2013. 前冬北半球环状模对春季中国东部北方地区极端低温的影响 [J]. *气象学报*, 71 (1): 96–108. Yin Shan, Feng Juan, Li Jianping. 2013. Influences of the preceding winter Northern Hemisphere annular mode on the spring extreme low temperature events in the north of eastern China [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 71 (1): 96–108, doi:10.11676/qxxb2013.008.