

梅一清, 陈海山, 刘鹏, 等. 2019. 夏季亚洲高空急流纬向非对称变异与北大西洋海温和欧亚陆面热力异常的可能联系 [J]. 大气科学, 43 (2): 401–416.
Mei Yiqing, Chen Haishan, Liu Peng, et al. 2019. Zonally asymmetric variation of summer Asian upper-tropospheric jet and its possible association with North Atlantic SST anomaly and Eurasian land surface thermal anomaly [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 401–416, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.18112.

夏季亚洲高空急流纬向非对称变异与北大西洋 海温和欧亚陆面热力异常的可能联系

梅一清^{1,2} 陈海山^{1,2} 刘鹏^{1,2} 李笛³

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

3 中国气象局成都高原气象研究所高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072

摘要 基于1979~2015年ERA-Interim再分析资料, 分析了夏季亚洲高空急流纬向非对称变异特征及其可能的外强迫因子。研究发现夏季亚洲200 hPa纬向风异常EOF第二模态(方差贡献为16.4%)主要表现出了急流纬向非对称的空间异常形态, 反映了西亚和东亚区域急流南北偏移的反位相变化。通过进一步的诊断分析, 我们发现急流纬向非对称变异与北大西洋海表温度(简称海温)和欧亚陆面热力异常可能存在一定的联系。北大西洋三极型海温异常会激发出向下游传播的异常波列, 夏季该波列在欧亚大陆上空的异常环流中心与急流纬向非对称相关的异常环流中心对应一致, 其中东欧平原的异常反气旋和巴尔喀什湖附近的异常气旋对西亚急流变化存在影响, 东亚地区急流的变化与贝加尔湖北部异常气旋和贝加尔湖南部的异常反气旋有关。对比欧亚土壤湿度关键区内垂直环流, 陆面热力异常可能会改变局地环流进而影响急流变异, 且这种影响存在区域差异。

关键词 夏季亚洲高空急流 纬向非对称变异 北大西洋海温三极子 欧亚陆面热力异常

文章编号 1006-9895(2019)02-0401-16

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.18112

Zonally Asymmetric Variation of Summer Asian Upper-tropospheric Jet and Its Possible Association with North Atlantic SST Anomaly and Eurasian Land Surface Thermal Anomaly

MEI Yiqing^{1,2}, CHEN Haishan^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, and LI Di³

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

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

3 Heavy Rain and Drought–Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Institute of Plateau Meteorology, China Meteorology Administration, Chengdu 610072

Abstract Based on the ERA-Interim reanalysis data during 1979–2015, the zonally-asymmetric variation of summer Asian upper-tropospheric jet and its possible external forcing factors are analyzed. The second empirical orthogonal

收稿日期 2018-01-21; 网络预出版日期 2018-05-03

作者简介 梅一清, 女, 1992年出生, 硕士研究生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: meiqing0519@126.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、41405068

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41230422, 41625019, 41405068)

function mode of summer Asian 200-hPa zonal wind anomalies, which accounts for 16.4% of total variance, is characterized by zonally asymmetric spatial distribution. This mode reflects the out-of-phase changes of meridional displacement of jet over West Asia and East Asia. The North Atlantic sea surface temperature anomalies (SSTA) and the Eurasian surface thermal anomalies may have a linkage with the zonally asymmetric variation. The tripole pattern of North Atlantic SSTA in the spring can trigger anomalous wave trains that propagate downstream with anomalous circulation centers over Eurasian in the summer corresponding to circulation anomaly centers associated with the zonally-asymmetric variation of the Asian jet. The anomalous anticyclonic circulation around the East European Plain and anomalous cyclonic circulation around Lake Balkhash associated with the wave trains can affect the West Asian jet. In addition, the East Asian jet is well correlated with the anomalous cyclonic circulation to the north of Lake Baikal and the anomalous anticyclonic circulation to the south. Land surface thermal anomaly may also lead to changes in local circulation and affect the jet variation by modulating vertical motion and land-atmosphere interaction over soil moisture key areas and the impacts are regionally different.

Keywords Summer Asian upper-tropospheric Jet, Zonally asymmetric variation, North Atlantic SST anomaly tripole, Eurasian land surface thermal anomaly

1 引言

南、北半球中纬度对流层均存在强而窄的西风气流带，表现出强的垂直和侧向风切变，风速在对流层上层达到极大值，称之为副热带高空急流。副热带西风急流是对流层高层持续存在的行星尺度环流系统，对维持全球大气角动量、能量输送和平衡起非常重要的作用。东亚夏季高空急流作为影响我国天气和气候的重要环流系统，伴随着许多重要的异常信号，急流在不同时间尺度上的变化特征也引起了人们的关注（陆日宇等，2013）。东亚高空急流在冬夏季节转换过程中表现为两次突变（葉篤正等，1958），在此基础上，李崇银等（2004）指出初夏时期西风急流存在两次明显的北跳过程。此外，Lin and Lu (2008) 和 Lin (2013) 研究了东亚高空急流夏季次季节演变及其对于中国气候影响，发现急流轴在盛夏期间存在两种不同类型的显著变动。

夏季东亚西风急流在年际尺度上最主要的变化表现为经向移动，该特征在以往的研究中备受关注（廖清海等，2004；Lu, 2004；Lin and Lu, 2005；杨莲梅和张庆云，2007, 2008；Qu and Huang, 2012）。Lin and Lu (2005) 指出，无论是季节平均还是月平均，夏季东亚高空西风急流的年际变化均主要表现为急流的经向偏移，次之为强度变化。最近，Du et al. (2016) 和 Hong and Lu (2016) 运用经验正交分解方法分析了对流层上层纬向风异常，指出经向移动特征是亚洲急流的主要模态。一些研究指出热带海表温度（简称海温）对急流的经向移动具有重要贡献，前冬和同期夏季热带太平洋海温异常对

东亚夏季急流的南北移动具有十分重要的影响（廖清海等，2004；陆日宇，2005；Lin, 2010）。此外，Qu and Huang (2012) 指出热带印度洋海温异常可激发东传 Kelvin 波进而引起急流南北移动。Du et al. (2016) 通过数值试验研究，指出热带中东太平洋、印度洋和西北太平洋海温异常的共同作用是急流经向偏移的重要原因。

目前为止，人们对夏季急流经向移动特征及其原因已经开展了大量详细的研究，同时其异常变化与东亚气候的密切联系也受到了越来越多的关注（Lau et al., 2000；Lu, 2004；况雪源和张耀存，2006a, 2006b；马音等，2011）。除了急流的南北移动之外，夏季亚洲急流的另外一个特征近年来也受到了关注。Du et al. (2016) 通过夏季亚洲 200 hPa 纬向风异常的经验正交分解 (EOF) 分析发现，EOF 第二模态的空间型 (Du et al. (2016) 中的 Fig. 2d) 呈现四极子分布；与 EOF 第一模态纬向一致的经向移动特征不同，该模态表现出了纬向非对称的变化特征，反映了西亚和东亚区域急流南北偏移的反位相变化。进一步研究通过数值试验初步判断北大西洋海温对该模态的影响有限，急流纬向非对称变异在一定程度上受到了从北大西洋向东亚传播的罗斯贝波的作用。李笛和陈海山 (2017) 用大气环流模式研究了不同区域海温对夏季副热带西风急流主模态的影响，也发现北大西洋海温异常对第二模态的贡献。

从地理分布来看，夏季亚洲对流层上层的西风急流平均位置在 40°N 左右，急流位于欧亚大陆上空，从非洲北部的西亚延伸到东亚 (Lu et al., 2002；Enomoto et al., 2003；Kosaka et al., 2012)。北大西

洋作为亚洲急流的上游地区,除了在冬季通过强烈的海气相互作用引起同期欧亚环流的显著变化(Chen et al., 2015),在其他季节,北大西洋海温异常也会对下游地区的气候产生影响,包括春季欧亚表面温度(Ye et al., 2015; Chen et al., 2016; Chen and Wu, 2017a)、东亚夏季气候(Wu et al., 2009; Zuo et al., 2013; Cui et al., 2015)和随后冬季ENSO事件(Chen and Wu, 2017b)。因此,在前人研究基础上,继续探讨夏季亚洲急流纬向非对称变异与北大西洋海温异常的可能联系有助于进一步理解急流变异的相关机理。在全球变暖背景下,一些研究指出欧亚大陆的陆面热力异常变化会通过改变中高纬度环流系统进而影响东亚夏季风(Chen et al., 2017, 张莞昕和陈海山, 2017),而夏季高空西风急流是东亚夏季风系统的一个重要组成部分(陶诗言和卫捷, 2006; Huang et al., 2012),从欧亚陆面热力异常的角度去探讨急流变异特征对提升夏季气候的短期气候预测能力具有重要的指导价值。本文重点关注外强迫因子与夏季亚洲急流纬向非对称变异的可能联系,以期对深入理解急流变异特征,尤其是西亚和东亚区域急流南北偏移的反位相变化,提供进一步的科学依据。

2 资料和方法

本文采用了欧洲中期数值预报中心提供的ERA-Interim逐月再分析数据,包括位势高度、大气温度、风速及土壤湿度、地表温度、感热通量和海表温度资料。此外,还用到GPCC(Global Precipitation Climatology Centre)月降水资料。所用资料除海表温度的空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 外,其他资料的空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,研究时段为1979~2015年。为了揭示与急流纬向非对称变异有关的波列,本文采用Takaya and Nakamura(2001)给出的三维波活动通量(T-N通量)进行解释。研究中,主要通过经验正交函数(EOF)分解、相关分析和t检验等常规气象统计方法对夏季(6~8月)亚洲地区($20^\circ\sim60^\circ\text{N}$, $40^\circ\sim160^\circ\text{E}$)的高空西风急流第二模态特征和相关外强迫因子进行了探讨。

3 夏季亚洲高空西风急流变异的纬向非对称特征

选取($20^\circ\sim60^\circ\text{N}$, $40^\circ\sim160^\circ\text{E}$)为研究区域,对夏季200 hPa纬向风异常进行经验正交分解,结

果如图1所示。EOF第一模态在空间场(图1a)上表现为以 40°N 为界纬向风场南北反向的异常变化特征,方差贡献为23.9%。由于夏季副热带急流轴线的位置通常位于 40°N 左右,该模态体现了急流位置经向(南北)移动。经向移动特征与Du et al.(2016)和Hong and Lu(2016)的结果一致。EOF第二模态则主要表现为四极型分布(图1b),正异常中心出现在伊朗高原和贝加尔湖附近,负异常中心在东欧和东亚,方差贡献为16.4%。与第一模态不同的是,第二模态主要反映了西亚和东亚区域急流南北偏移的反位相变化。其中西亚地区的权重系数要稍大于东亚。为了讨论急流纬向非对称变异的特征和外强迫因子,用第二模态时间系数(PC2)(图1d)代表急流纬向非对称的变化。

为了更好地认识急流第二模态所反映的纬向非对称变异,首先分析与之有关的大气环流异常。图2用PC2时间系数回归得到850 hPa、500 hPa、200 hPa位势高度异常场的分布。可以发现,格陵兰岛南部为位势高度正异常,欧洲沿岸则为位势高度负异常;欧亚大陆上存在四个显著的异常中心,东欧平原和贝加尔湖南侧上空为正的位势高度异常,贝加尔湖北部和巴尔喀什湖附近上空为负的位势高度异常,且异常中心表现为相当正压结构。这种从北大西洋上空到欧亚大陆的位势异常分布意味着波列能从上游向下游传播。在PC2回归的200 hPa风场上(图3),也可看到类似的波列结构。波列传播的路径一方面可能经过高纬度区域(反气旋—气旋—反气旋—气旋),另一方面也可能经过较低纬度区域(反气旋—气旋—反气旋—气旋—反气旋),但其传播起点均位于北大西洋上空,这也在一定程度上说明了北大西洋的重要性。

前人已指出北大西洋海温可以激发类似图2、图3的大气遥相关波列(Chen et al., 2016; Chen and Wu, 2017a; Wu and Chen, 2016)。为了揭示与急流纬向非对称变异有关的波列,采用Takaya and Nakamura(2001)给出的三维波活动通量(T-N通量)进行解释。图4中,与PC2有关的夏季200 hPa相对涡度在北大西洋为负异常,欧洲沿岸为正异常。欧亚大陆上,东欧平原和贝加尔湖南侧上空为相对涡度负异常,贝加尔湖北部和巴尔喀什湖附近上空为相对涡度正异常。与此相对应,急流纬向非对称变异有关的波活动通量在对流层高层自北大西洋出发,向欧亚大陆延伸,较高纬度的一支波列

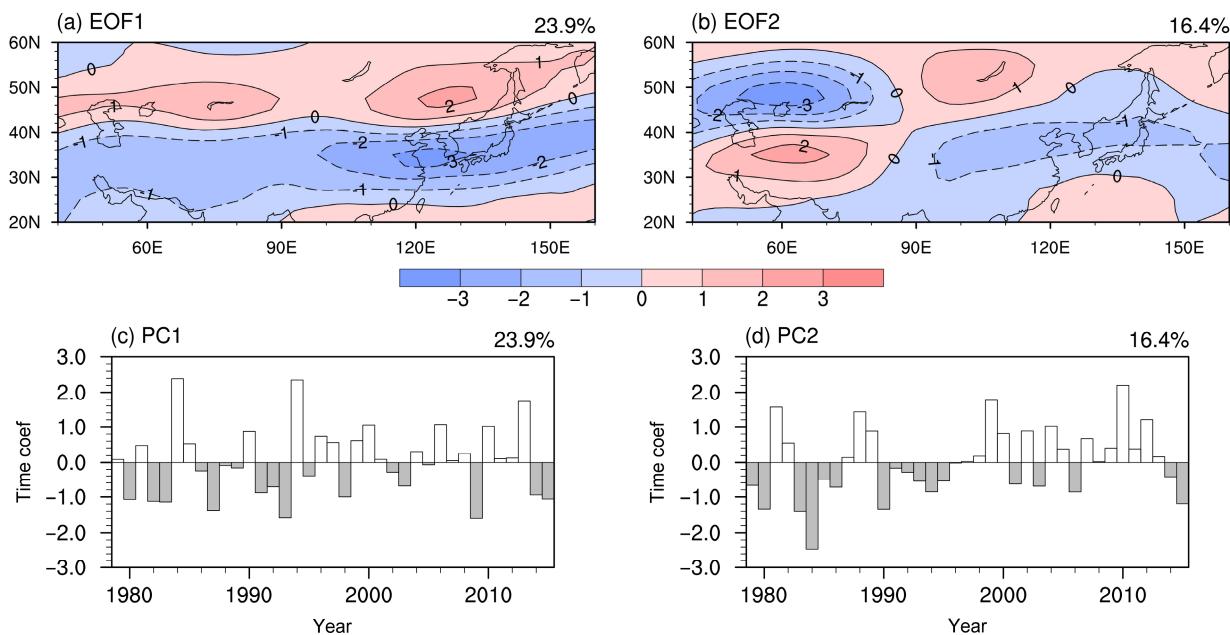


图 1 夏季 200 hPa 纬向风异常 EOF 分解的前两个模态的 (a、b) 空间分布和 (c、d) 时间系数

Fig. 1 (a, b) Spatial patterns and (c, d) corresponding principle component (PC) of the first two EOF modes of 200-hPa zonal wind anomaly in summer during 1979–2015

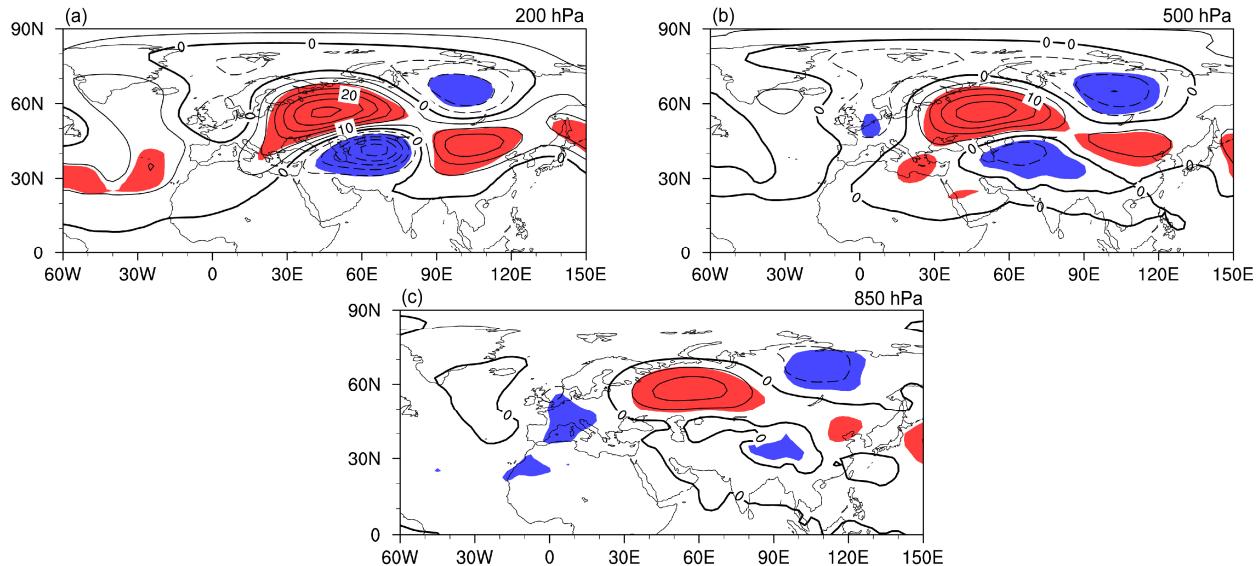


图 2 PC2 回归的夏季 (a) 200 hPa、(b) 500 hPa、(c) 850 hPa 位势高度异常场 (单位: gpm, 等值线间隔: 5 gpm)。红 (蓝) 色阴影代表正 (负) 回归系数通过 90% 信度水平检验

Fig. 2 Geopotential height anomalies (units: gpm; contour intervals: 5 gpm) at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 850 hPa regressed onto the PC2 in summer. The areas shaded in red (blue) denote positive (negative) regression coefficients above the 90% confidence level

途经东欧平原，进而转向贝加尔北部区域；另外一支波列从东欧平原向南转向中纬度巴尔喀什湖地区，然后向东到贝加尔湖南部地区，并从东亚沿岸转向太平洋地区。

夏季亚洲高空西风急流的平均位置在 40°N 附近，纬向风速大于 20 m s^{-1} 的区域从西亚延伸至东

亚太平洋上空，南北宽度约 15 个纬度（图 3）。欧亚大陆上的四个异常中心对西亚和东亚急流有较大的影响，且南北两侧差异显著。在亚洲急流的上游区域（西亚），受东欧平原的异常反气旋和巴尔喀什湖附近的异常气旋影响，北侧急流减弱，南侧急流增强；而在急流的下游区域，即靠近东亚沿岸，

北侧急流增强，南侧急流减弱，这种变化与贝加尔湖北部异常气旋和贝加尔湖南部的异常反气旋有关。因此，夏季亚洲急流纬向非对称变异特征在一定程度上反映了西亚和东亚急流变化。

4 北大西洋海温异常对急流纬向非对称变异的可能影响

4.1 急流纬向非对称变异与北大西洋海温异常的可能联系

如前所述，与急流纬向非对称变异相联系的自上游向下游传播的波列起点主要起源于北大西洋上空，这说明大西洋海温可能对该波列重要的激发作用。为了探究北大西洋海温异常对夏季急流纬向非对称变异的可能影响，计算了 PC2 与春、夏北大西洋海温异常的相关（图 5）。从图 5 可以发现从春到夏，与 PC2 的相关海温空间分布呈现典型的三极子特征：正相关区主要位于低纬度和高纬度海域，

负相关区域则位于中纬度海域。有研究指 (Wu et al., 2009; Zuo et al., 2013; Cui et al., 2015) 出北大西洋三极型海温异常对春、夏季北半球大气环流具有十分重要的影响，Wu et al. (2009) 指出春季北大西洋海温异常三极子能持续到夏季，夏季海温三极子异常激发的波列沿副热带西风急流向极一侧的纬向分布，并认为北大西洋海温三极子是联系春季北大西洋涛动 (NAO) 和东亚夏季风 (EASM) 的重要桥梁。Zuo et al. (2013) 通过观测分析和数值试验发现，夏季北大西洋海温三极子可以激发出一支跨越欧亚大陆的准正压纬向遥相关波列，进而引起东亚夏季风的强弱。Cui et al. (2015) 的研究指出春季海温三极子激发出来的波列能够影响春季青藏高原上空副热带西风急流的强度，并通过改变高原的感热通量进而影响 EASM。

上述研究一方面说明了北大西洋海温三极子对下游气候的重要性，另一方面也说明了海温三极

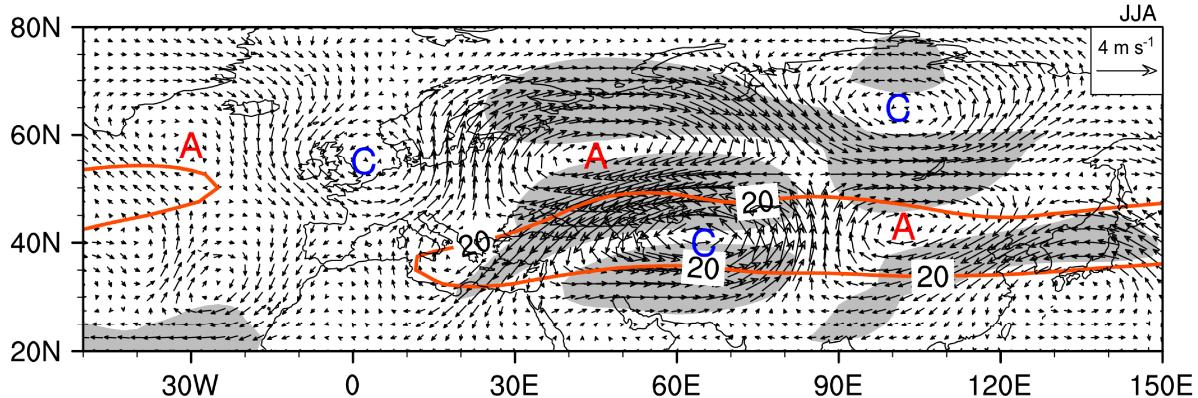


图 3 PC2 回归的夏季 200 hPa 风场异常 (单位: m s^{-1})。橘色线是夏季平均的 20 m s^{-1} 纬向风等值线，阴影为纬向风异常通过 90% 信度水平检验

Fig. 3 200-hPa wind anomalies (units: m s^{-1}) regressed onto PC2 in summer. The orange line is 20 m s^{-1} isoline of zonal wind averaged in summer. Shaded areas denote zonal wind anomalies above the 90% confidence level

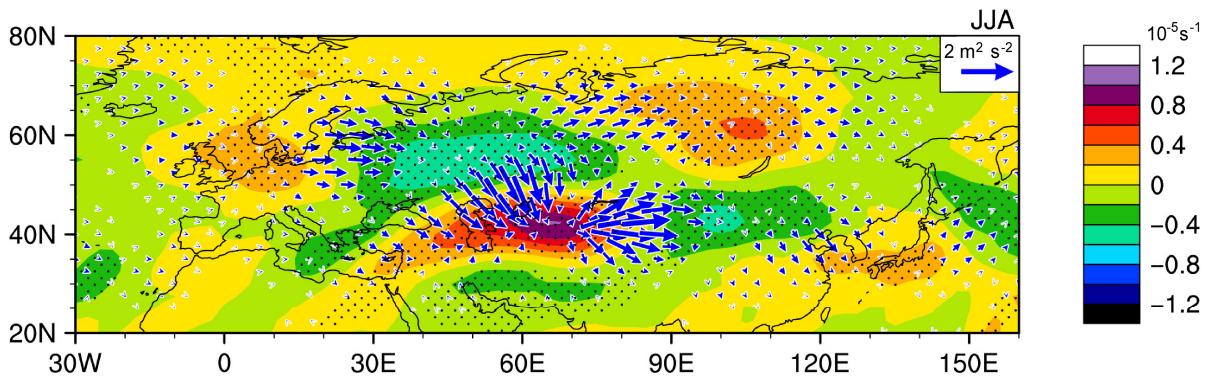


图 4 PC2 回归的夏季 200 hPa 相对涡度异常 (阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和波活动通量 (蓝色箭头, 单位: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$)，黑色打点区域表示相对涡度异常通过 90% 信度水平检验

Fig. 4 200-hPa relative vorticity anomaly (shadings, units: 10^{-5} s^{-1}) and wave activity fluxes (blue vectors, units: $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$) regressed onto PC2 in summer. Black stippling regions denote relative vorticity anomalies above the 90% confidence level

子激发出来的波列存在明显的季节变化，这种季节变化会影响到不同时期的环流系统。图5中，与夏季急流纬向非对称变异有关的三极型海温异常从春季持续到夏季，因此我们选择春季北大西洋三极型海温异常作为重要的外强迫因子，进一步探究与之有关的异常环流变化以及与急流变异的可能联系。本文对去趋势后的北大西洋($0^{\circ}\sim70^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\sim45^{\circ}\text{W}$)海温异常进行经验正交分解，得到的第一模态表现为三极型海温分布，其对应的时间系数为北大西洋海温三极子指数(NATI)。

4.2 北大西洋海温三极子影响急流纬向非对称变异的可能途径

下面我们通过诊断春季北大西洋三极型海温异常相关的环流异常，探讨北大西洋海温异常影响急流纬向非对称变异的可能途径。图6是春季NATI回归得到的200 hPa位势高度异常场春季(MAM、AMJ)(图6a、b)北大西洋上空的环流异常主要表

现为北纬 30°N 和 60°N 附近存在负位势异常中心和正位势异常中心，类似于北大西洋涛动(NAO)负位相的分布形势(Hurrell, 1995; Hurrell and van Loon, 1997)；欧亚大陆上信号并不明显。夏季(MJJ、JJA)(图6c、d)，海洋上的异常中心强度减弱，范围缩小，北欧异常中心也减弱缩小；同时欧亚大陆上出现了四个异常中心，分别位于东欧平原、贝加尔湖以北、巴尔喀什湖附近和贝加尔湖以南地区。上述四个异常中心的位置与急流第二模态对应的环流异常(图2)中心位置基本一致，且NATI回归得到的500 hPa和850 hPa的环流异常(图略)具有类似的空间型，表现为相当正压的结构。此外，春季NATI回归得到的夏季200 hPa纬向风场，也同样存在四个明显的异常中心(图7)，它们对欧亚大陆上空急流的影响与PC2的变异特征(图3)有着较高的一致性，尤其是各异常中心的位置分布十分相似。

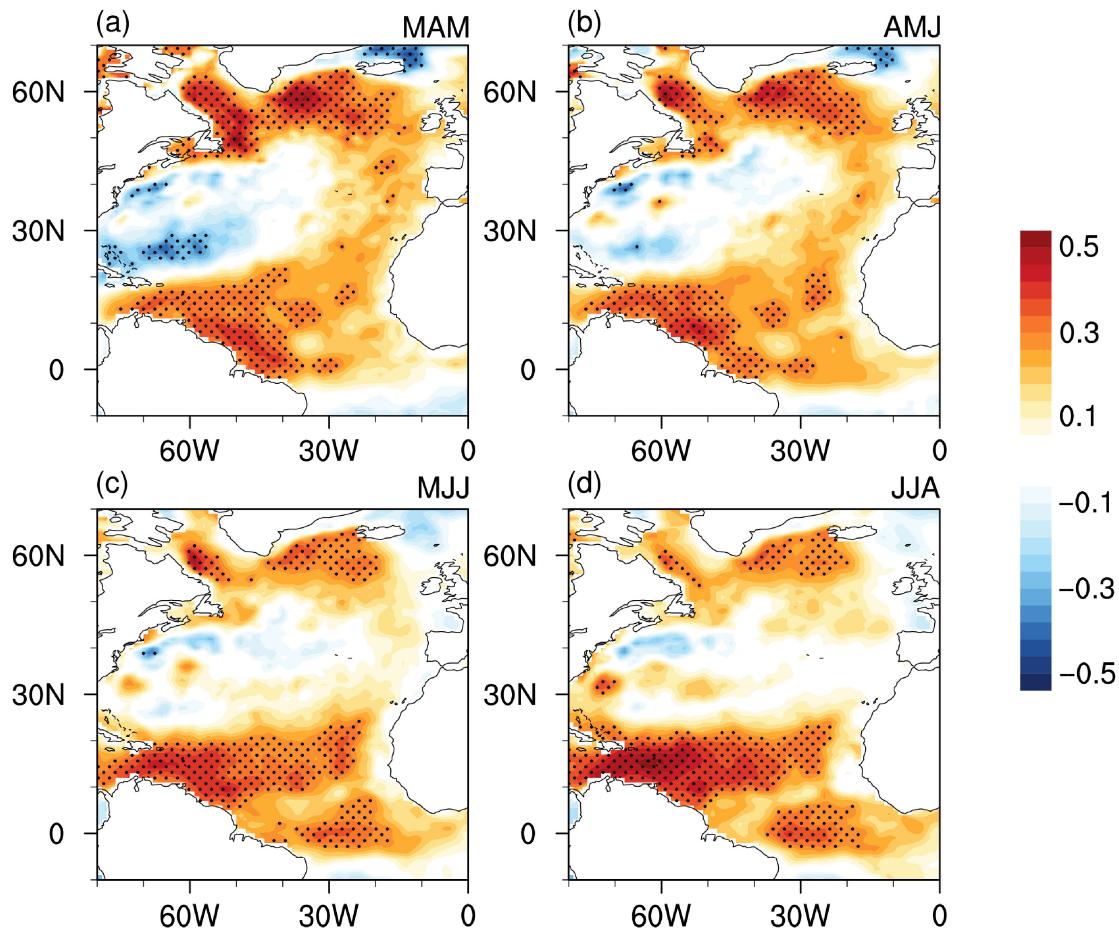


图5 PC2与(a)3~5月、(b)4~6月、(c)5~7月、(d)6~8月的北大西洋海温距平相关系数的空间分布。黑色打点区域表示通过95%信度水平检验

Fig. 5 Spatial distributions of correlation coefficients between PC2 and North Atlantic SST anomaly in (a) March–May, (b) April–June, (c) May–July, (d) June–August. Black stippling regions denote correlation coefficients above the 95% confidence level

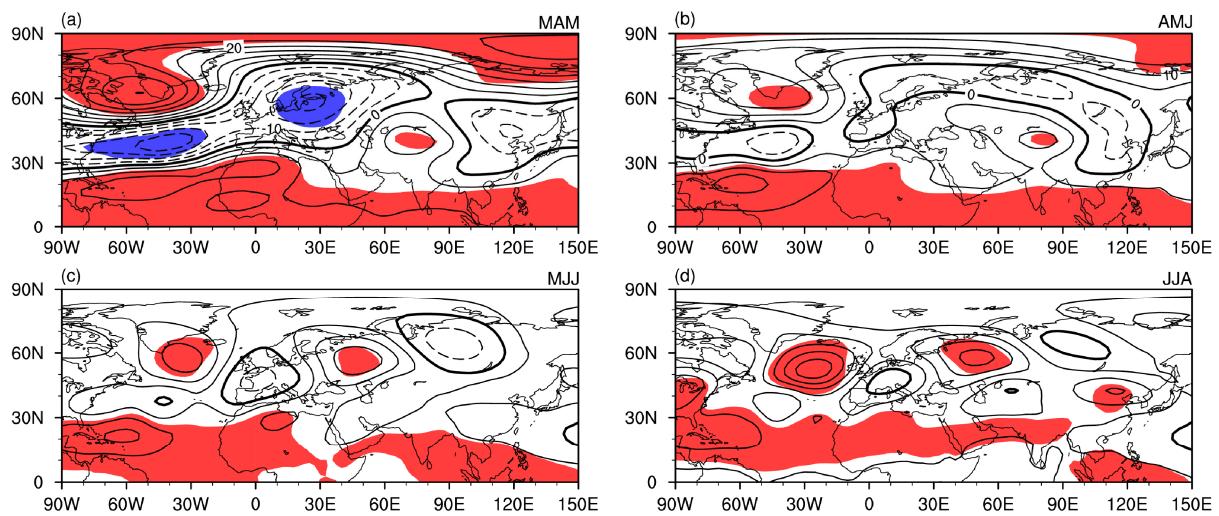


图 6 春季北大西洋海温三极子指数回归 (a) 3~5月、(b) 4~6月、(c) 5~7月、(d) 6~8月的 200 hPa 位势高度场 (单位: gpm, 等值线间隔: 5 gpm)。红色和蓝色阴影代表正、负回归系数通过 90% 信度水平检验

Fig. 6 200-hPa geopotential height anomalies (units: gpm; contour intervals: 5 gpm) in (a) March–May, (b) April–June, (c) May–July, (d) June–August regressed onto NATI (North Atlantic SST tripole index) in spring. The areas shaded in red (blue) denote positive (negative) regression coefficients above the 90% confidence level

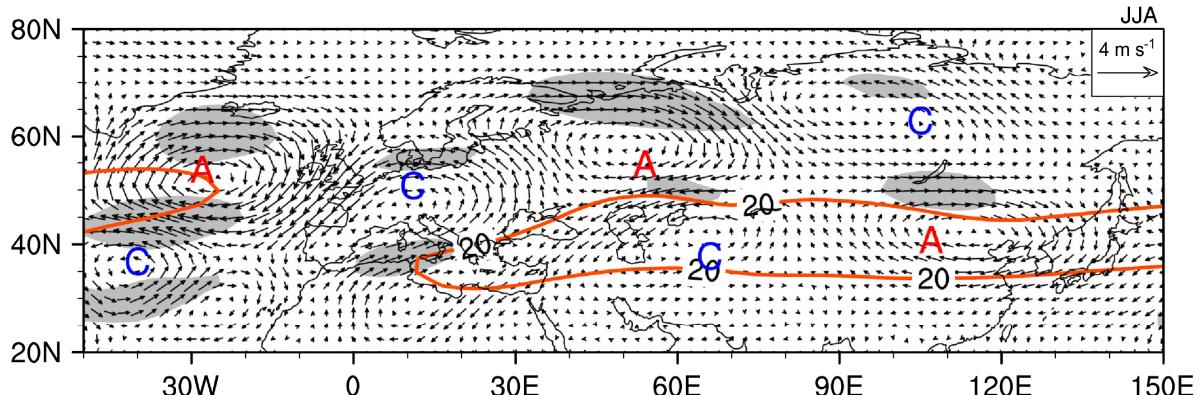


图 7 春季北大西洋海温三极子指数回归的夏季 200 hPa 风场异常 (单位: m s^{-1})。橘色线是夏季平均的 20 m s^{-1} 纬向风等值线, 阴影为纬向风异常通过 90% 信度水平检验

Fig. 7 200-hPa wind anomalies (units: m s^{-1}) regressed onto NATI in spring. The orange line is 20 m s^{-1} isoline of zonal wind averaged in summer. Shaded areas denote zonal wind anomalies above the 90% confidence level

前面已经提到, 从春季到夏季, 急流纬向非对称变异与北大西洋海温的相关呈现出三极型的分布, 这种持续性也体现在了春季、夏季北大西洋海温异常第一模态的空间分布上 (图 8)。春、夏季海温三极子的方差贡献分别为 33% 和 23.7%; 高、低纬海温与中纬度海温变化符号相反。AMJ (4~6 月)、MJJ (5~7 月)、JJA (6~8 月) 的三极子模态时间序列与 MAM (3~5 月) 的 NATI 相关系数分别为 0.96、0.86、0.73, 说明了海温三极子从春到夏具有较好的持续性。海温三极子本身空间模态季节变化 (图 7) 和图 4 相关系数空间分布的季节变化的一致性, 说明了北大西洋三极型海温异常对

急流纬向非对称变异的重要意义, 其中春季 NATI 和 PC2 的相关系数为 0.32 (夏季为 0.34), 通过了 95% 信度水平检验, 进一步证实了两者存在较为紧密的联系。

5 欧亚陆面热力异常对急流纬向非对称变异的可能影响

5.1 欧亚陆面热力异常与急流纬向非对称变异的关系

最近的一些研究指出环贝加尔湖地区气温升高会对局地上空环流产生影响, 进而可以改变区域气候 (徐康等, 2011a, 2011b; 杜梦醒等, 2016)。

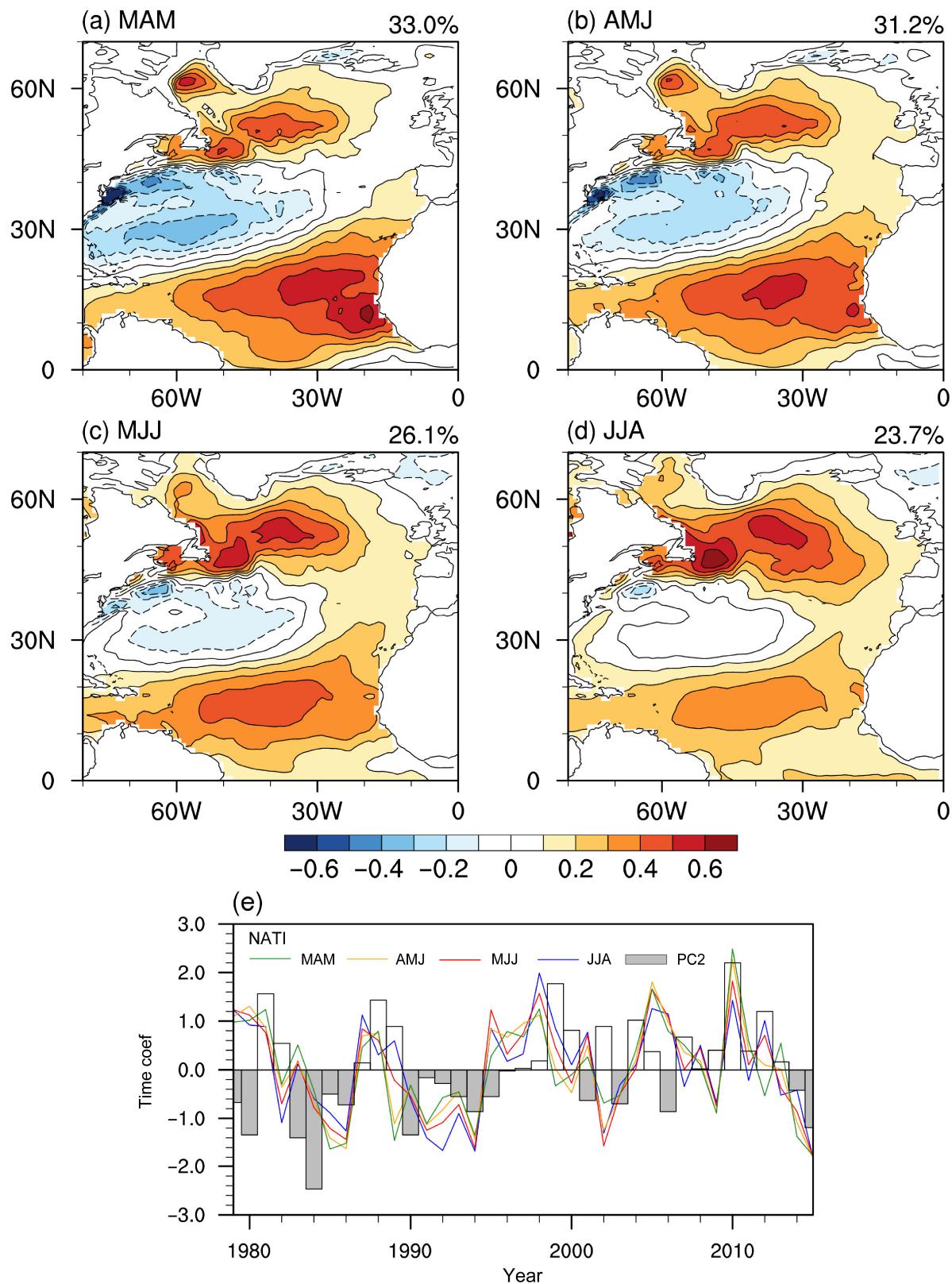


图 8 (a) 3~5 月、(b) 4~6 月、(c) 5~7 月、(d) 6~8 月的北大西洋海温异常第一模态的空间分布和 (e) NATI (折线)、6~8 月的 PC2 (柱)
Fig. 8 Spatial patterns in (a) March–May, (b) April–June, (c) May–July, (d) June–August and corresponding (e) NATI (broken lines) of the first EOF mode of North Atlantic SSTA with the PC2 (bars) from June to August

因此下面一部分我们将对欧亚大陆上空的四个异常环流中心及其下垫面热力状况作进一步的分析, 来判断它们是否对急流纬向非对称变异存在贡献。土壤湿度作为表征陆面过程的重要状态参量, 其异常变化对气候有十分重要的作用。土壤湿度通过改变地表的热力和水分状态, 影响陆气之间能量交换, 进而对气候产生影响(林朝晖等, 2001; Song et al., 2009)。早期有研究指出, 土壤湿度对气候的作用仅次于海表温度(Shukla and Mintz, 1982)。尤其是在中高纬地区, 土壤湿度对气候的影响甚至与海洋相当, 季节尺度的气候可测报性可能更多受到慢变土壤湿度的影响(Dirmeyer, 2000; 马柱国等, 2001; The GLACE Team et al., 2004)。

图9给出了PC2和欧亚土壤湿度的相关分布, 不难发现, 二者的负相关区主要出现在东欧平原(Area1)和贝加尔湖以南(Area4), 而正相关主要位于贝加尔湖以北(Area2)和巴尔喀什湖附近(Area3)。上述显著相关区与急流纬向非对称相对应的异常环流中心具有很好的对应关系, 东欧平原和贝加尔湖以南对应位势高度的正异常, 而贝加尔湖北部和巴尔喀什湖则对应位势高度的负异常(图2)。这可能在一定程度上说明了陆面热力异常与环流异常、甚至是急流纬向非对称变异之间可能存在一定的联系。土壤湿度异常可能通过局地陆气作用对大气产生异常加热, 从而影响局地环流, 并最终对急流纬向非对称变异起作用。具体来说, 土壤湿

度异常偏干(湿)的区域, 通常会使得地表对大气的热力强迫增强(减弱), 并引起正(负)的位势高度异常。

夏季急流纬向非对称变异, 本质上是西亚和东亚急流南北移动的反位相变化, 我们希望通过定义西亚和东亚急流经向偏移指数, 探究它们与各区域土壤湿度的联系, 从而理解欧亚土壤湿度与急流纬向非对称变异的可能影响。根据图9中相关显著区域, 定义各区域平均土壤湿度指数, 其中东欧平原附近($54^{\circ}\sim 64^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{E}$)土壤湿度指数Soil1, 贝加尔湖北区域($57^{\circ}\sim 67^{\circ}\text{N}, 95^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$)土壤湿度指数Soil2, 巴尔喀什湖附近($38^{\circ}\sim 48^{\circ}\text{N}, 68^{\circ}\sim 78^{\circ}\text{E}$)土壤湿度指数Soil3, 贝加尔湖南部区域($40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}, 92^{\circ}\sim 102^{\circ}\text{E}$)土壤湿度指数Soil4。为了描述东亚和西亚急流经向偏移的相反变化, 我们参考了Lu(2004)和Lin and Lu(2005)定义方法, 并根据图1b中EOF2空间分布特征, 选择200 hPa纬向风变化关键区, 计算东亚和西亚急流经向偏移指数: 西亚急流经向变化(JetW)=北侧($40^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$)减去南侧($26^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}, 50^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$)平均纬向风, 东亚急流经向变化(JetE)=北侧($44^{\circ}\sim 58^{\circ}\text{N}, 95^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)减去南侧($26^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}, 95^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)平均纬向风。表1为JetW和JetE分别与急流纬向非对称变异(PC2)、夏季NATI和各区土壤湿度指数的相关系数。

西亚、东亚急流与PC2的相关系数分别为-0.82

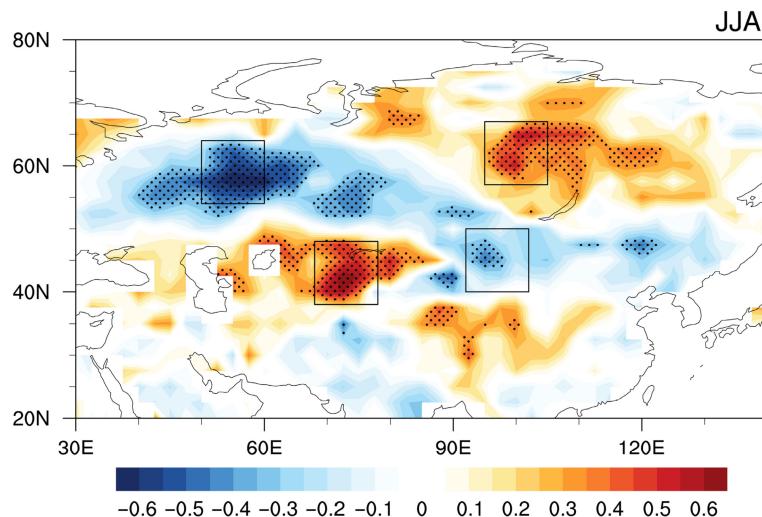


图9 PC2和夏季欧亚大陆土壤湿度相关系数的空间分布。方框代表四个显著相关区域(Area1、Area2、Area3、Area4), 黑色打点区域表示通过95%信度水平检验

Fig. 9 Spatial distribution of correlation coefficients between PC2 and summer soil moisture over Eurasia. Four squares indicate four significant correlated areas (Area1, Area2, Area3, Area4), black stippling regions denote correlation coefficients above the 95% confidence level

和 0.56, 说明急流纬向非对称变异在一定程度上反映了西亚和东亚急流的变化, 并且在更大程度上反映了西亚急流的变化, 异号则说明了西亚和东亚急流南北移动反位相的变化特征。西亚急流变化与欧亚大陆土壤湿度有着较好的相关性, 相比之下, 东亚急流与土壤湿度的显著相关仅存在于东欧平原和贝加尔湖南部。此外, 西亚急流作为靠近北大西洋下游的区域, 与海温三极子的联系要比东亚急流紧密。图 10 是各土壤湿度指数回归的夏季 200 hPa 纬向风异常, 各图均表现出了急流纬向非对称分布特征, 纬向风正异常中心出现在伊朗高原和贝加尔湖附近, 负异常中心在东欧和东亚, 与图 1 中的空间分布十分相似。对比来看, 西亚和东亚区域纬向风异常存在区域差异, 其中 Soil1、Soil2、Soil3 回归出来的西亚纬向风异常要比东亚显著, Soil2 和 Soil4 回归出来的东亚纬向风异常比 Soil1 和 Soil3 的回归结果显著, 结合表 1 可以进一步认为, 西亚和东亚的急流与各区域的土壤湿度存在不同的联系, 换言之, 急流纬向非对称变异与欧亚土壤湿度的联系有着明显的区域差异。

5.2 欧亚陆气作用对急流纬向非对称变异的可能影响

根据上述分析, 我们可以初步确定急流纬向非对称变异与土壤湿度的紧密联系, 且这种联系存在区域差异, 为了揭示区域差异的特征, 通过分析急流变异相关环流的垂直结构, 结合相关物理量来做一些简单的对比判断。图 11 是 PC2 回归各区上空的位

势高度场、温度场和经向环流的剖面, 它们代表了急流纬向非对称变异相关环流中心的特征, 从图中可以清楚地看到各种中心的垂直热力结构。东欧平原(图 11a)和贝加尔湖南部区域(图 11d)正的位势高度异常对应正的温度异常和上升运动, 贝加尔湖北侧(图 11b)和巴尔喀什湖附近(图 11c)负的位势高度异常对应负温度异常和下沉运动。在较高纬度的东欧平原和贝加尔湖北部, 温度异常中心靠近地表, 并且伴随着明显的整层垂直运动, 异常温度深厚。在较低纬度的巴尔喀什湖和贝加尔湖南部, 较强的温度异常中心位于对流层的中上层,

表 1 西亚、东亚急流经向变化与 PC2、土壤湿度指数 (Soil1、Soil2、Soil3、Soil4) 和 NATI 的相关系数

Table 1 The correlation coefficient between JetW (meridional change of western Asian Jet), JetE (meridional change of eastern Asian Jet) and PC2, Soil1 [soil moisture index near East European Plain ($54^{\circ}\text{--}64^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{--}60^{\circ}\text{E}$)], Soil2 [soil moisture index near the north of the Lake Baikal ($57^{\circ}\text{--}67^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{--}105^{\circ}\text{E}$)], Soil3 [soil moisture index near Balkhash Lake ($38^{\circ}\text{--}48^{\circ}\text{N}$, $68^{\circ}\text{--}78^{\circ}\text{E}$)], Soil4 [soil moisture index near the south of the Lake Baikal ($40^{\circ}\text{--}50^{\circ}\text{N}$, $92^{\circ}\text{--}102^{\circ}\text{E}$)], NATI

	与 JetW、JetE 的相关系数					
	PC2	Soil1	Soil2	Soil3	Soil4	NATI
西亚急流经向变化 (JetW)	-0.82***	0.56***	-0.58***	-0.64***	0.39**	-0.29*
东亚急流经向变化 (JetE)		0.56***	-0.32**	0.14	0.25	-0.32**
						-0.18

注: ***代表通过 99% 信度检验, **代表通过 95% 信度检验, *代表通过 90% 信度检验。

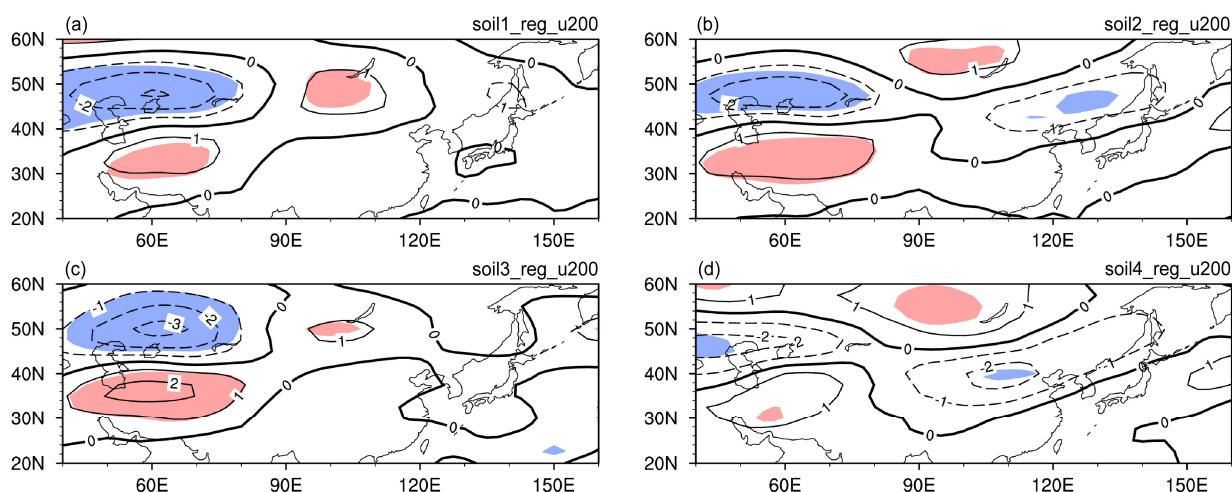


图 10 夏季 (a) Soil1、(b) Soil2、(c) Soil3、(d) Soil4 回归的 200 hPa 纬向风异常 (单位: m s^{-1})。红(蓝)色阴影代表正、负回归系数通过 90% 信度水平检验

Fig. 10 200-hPa zonal wind anomalies (units: m s^{-1}) regressed onto (a) Soil1, (b) Soil2, (c) Soil3, and (d) Soil4 in the summer. The areas shaded in red (blue) denote positive (negative) regression coefficients above the 90% confidence level

靠近地面的温度异常中心并不明显。在巴尔喀什湖附近, 700 hPa 以下为正位势高度异常对应上升运动, 而 700 hPa 以上为负位势高度异常对应下沉运动。对比其他区域的经向环流, 贝加尔湖南部垂直运动十分微弱。结合各区域的垂直结构, 可以初步认为, 在高纬度地区, 明显的地表陆面热力异常伴随着较强的垂直运动, 对大气可能产生异常加热, 对局地异常环流的影响比较明显。而在中纬度, 温度异常和垂直运动之间的配置比较复杂。

为了表现不同关键区土壤湿度对对局地环流的可能影响, 用土壤湿度指数 Soil1、Soil2、Soil3、Soil4 回归各关键区上空的位势高度场、温度场和经向环流(图 12)。为了便于和图 11 的结果进行比较, 我们在指数 Soil1 和 Soil4 前添加负号, 使得正指数

分别对应东欧平原和贝加尔湖的南部土壤湿度是干异常, 而在贝加尔湖北部和巴尔喀什湖附近, 土壤湿度是湿异常。总体而言, 图 11 和图 12 中各区的垂直结构特征十分相似, 说明急流纬向非对称变异和土壤湿度存在紧密的联系。尤其在高纬度地区(图 12a、b), 土壤湿度指数回归的温度异常中心靠近地表且伴随着较强的经向环流, 越靠近地面, 垂直分量越大, 这种剖面结构在一定程度上可以理解为陆面热力异常引起的低层温度异常, 通过较强的垂直运动对上层大气产生加热异常。而在中纬度(图 12c、d), 地表附近虽然有较为明显的温度异常, 但是根据垂直运动结构很难去理解陆面热力作用。

通过上述讨论, 可以初步判断夏季欧亚陆面热

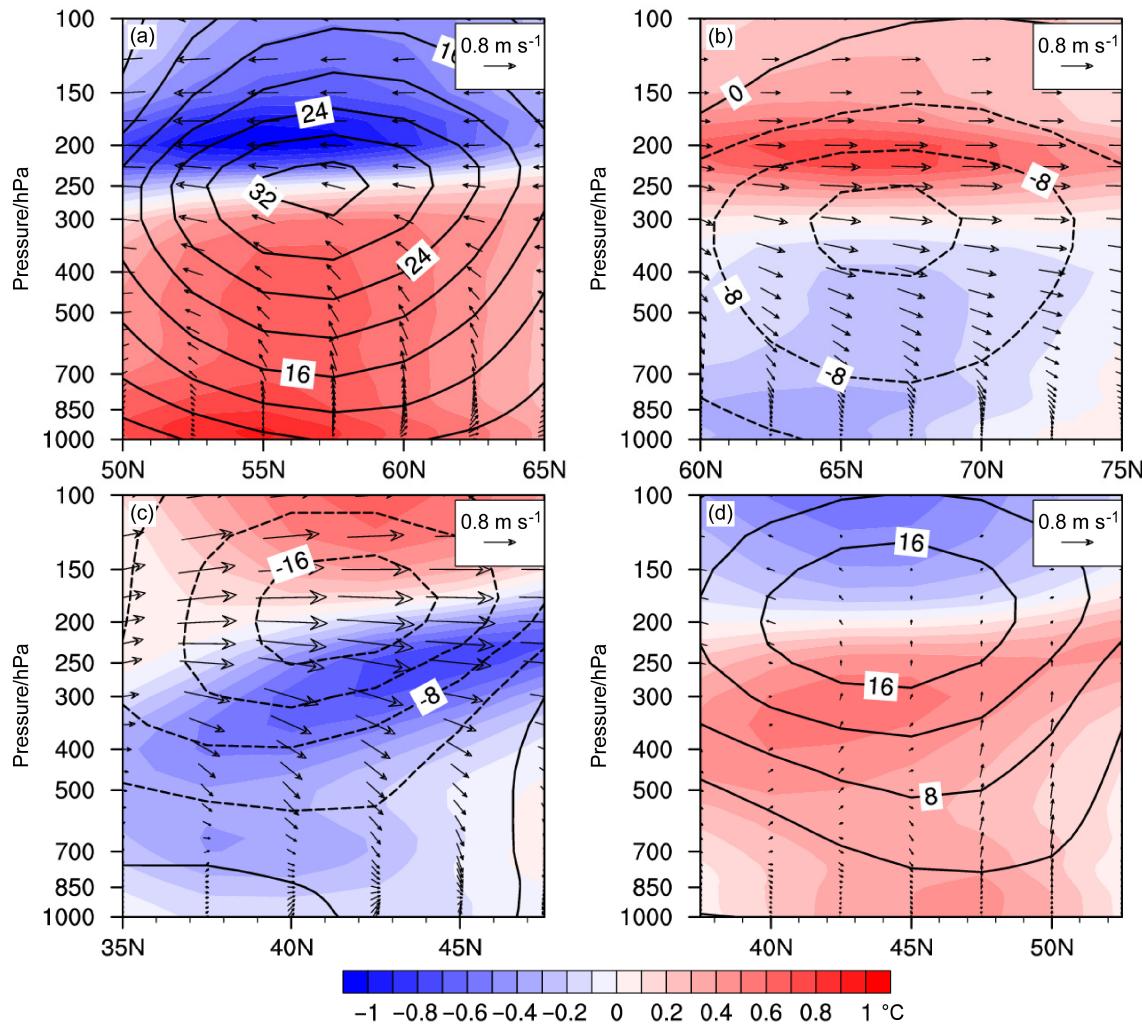


图 11 夏季 PC2 回归的位势高度场(等值线, 单位: gpm)、温度场(阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、经向环流(箭头, 单位: m s^{-1})的剖面: (a) 东欧平原; (b) 贝加尔湖北部; (c) 巴尔喀什湖附近; (d) 贝加尔湖南部

Fig.11 Latitude-height cross sections of geopotential height (contours, units: gpm), temperature (shadings, units: $^{\circ}\text{C}$), and meridional circulation (vectors, units: m s^{-1}) regressed onto PC2 in JJA: (a) East European plain; (b) North of Lake Baikal; (c) near Lake Balkash; (d) South of Lake Baikal

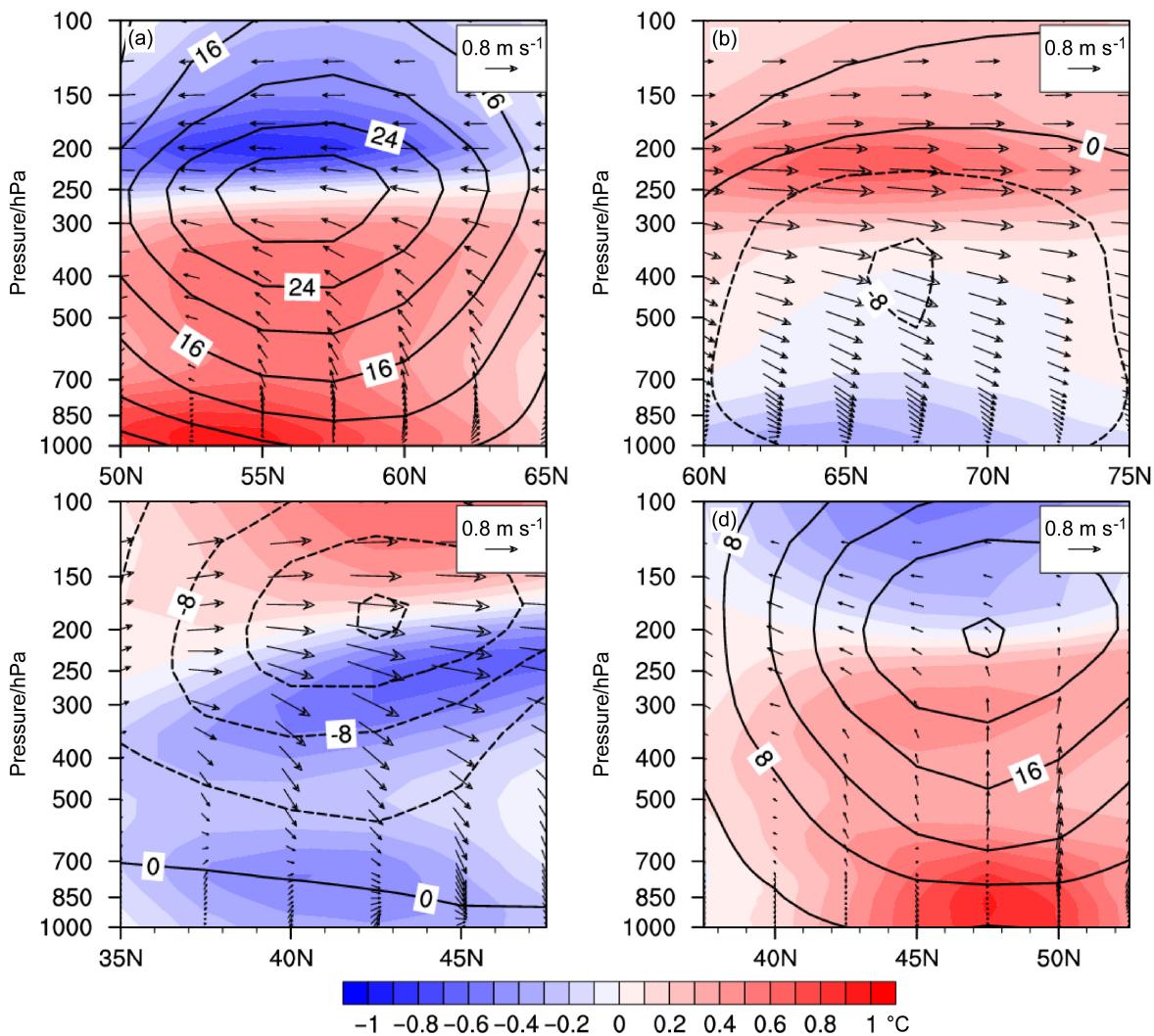


图 12 夏季 Soil1、Soil2、Soil3、Soil4 回归的各关键区的位势高度场（等值线，单位: gpm）、温度场（阴影，单位: $^{\circ}\text{C}$ ）、经向环流（箭头，单位: m s^{-1} ）的剖面: (a) 东欧平原; (b) 贝加尔湖北部; (c) 巴尔喀什湖附近; (d) 贝加尔湖南部

Fig.12 Latitude-height cross sections of geopotential height (contours, units: gpm), temperature (shadings, units: $^{\circ}\text{C}$), and meridional circulation (vectors, units: m s^{-1}) regressed onto Soil1, Soil2, Soil3, Soil4 in respective key areas in summer: (a) East European plain; (b) North of Lake Baikal; (c) near Lake Balkash; (d) South of Lake Baikal

力异常与急流纬向非对称之间可能存在一定的联系, 这种局地陆面热力异常加热上空大气的过程主要出现在较高纬度的东欧平原和贝加尔湖北部, 而在较低纬度, 陆气作用可能比较复杂, 仅依赖于诊断统计难以做出进一步判断。陆气作用过程涉及多个物理量之间的反馈过程, 用 PC2 回归土壤湿度、感热通量、地表温度和降水 (图 13), 得到的回归显著的区域是比较一致的, 并与急流纬向非对称变异的异常中心对应, 分别位于东欧平原, 贝加尔湖北部, 巴尔喀什湖附近以及贝加尔湖南部。其中, 干(湿)土壤湿度, 正(负)地表温度, 增强(减弱)感热通量, 降水减少(增加)之间关系

意味着这些区域的陆面热力和降水异常与大气环流异常存在对应的正反馈过程, 这种正反馈过程使得下垫面和上空的环流的作用在一起, 从而影响急流纬向非对称变异。一方面我们可以理解为土壤湿度异常影响大气异常加热, 造成环流的变化, 另一方面异常环流也会通过影响降水, 最后造成土壤湿度异常。

6 结论和讨论

本文基于 ERA-Interim 再分析资料, 分析了夏季亚洲高空急流纬向非对称变异特征及其可能的外强迫因子, 初步得到以下结论, 有助于进一步认

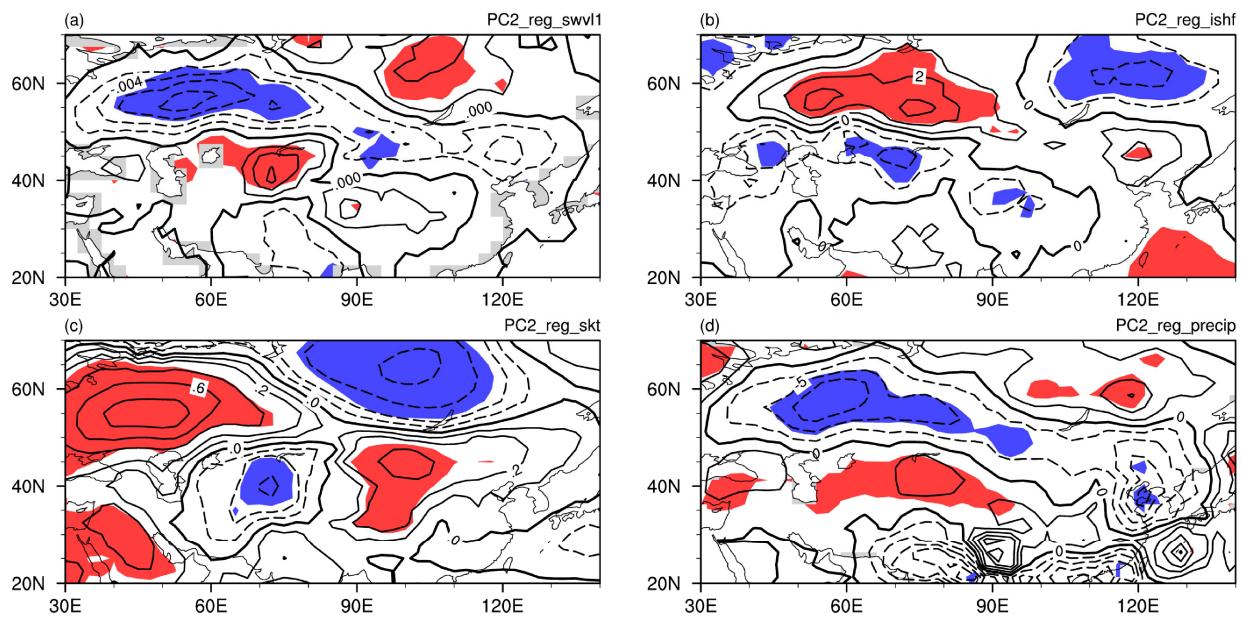


图 13 PC2 回归得到的夏季 (a) 土壤湿度 (单位: $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)、(b) 感热通量 (单位: W m^{-2})、(c) 地表温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (d) 降水量 (单位: mm)。红(蓝)色阴影代表正、负回归系数通过 95% 信度水平检验

Fig.13 (a) Soil moisture (units: $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), (b) sensible heat fluxes (units: W m^{-2}), (c) skin temperature (units: $^{\circ}\text{C}$), (d) precipitation (units: mm) regressed on PC2. The areas shaded in red (blue) denote positive (negative) regression coefficients above the 95% confidence level

识亚洲西风急流的年际变化特征和相关物理过程，对短期气候预测有一定意义。

(1) 夏季亚洲 200 hPa 纬向风异常第二模态方差贡献为 16.4%，表现出纬向非对称变异的空间形态分布，该特征在一定程度上反映了西亚和东亚区域急流南北移动的反位相变化，从北大西洋向欧亚大陆传播的波列和欧亚大陆上的四个异常环流对急流变异有着较为重要的影响。

(2) 三极型海温异常作为春夏北大西洋海温异常的主模态，它会激发异常波列，对下游地区的环流和气候产生影响，该波列存在季节变化，到了夏季它在欧亚大陆上空的异常环流中心与急流纬向非对称相关的异常环流中心对应一致，其中东欧平原的异常反气旋和巴尔喀什湖附近的异常气旋对西亚急流变化存在影响，东亚地区急流变化与贝加尔湖北部异常气旋和贝加尔湖南部的异常反气旋有关。

(3) 对比异常环流中心和欧亚土壤湿度的相关关键区，我们发现陆面热力异常可能是影响急流变异的另一个潜在外强迫因子。土壤湿度与急流纬向非对称变异的影响存在区域差异，西亚急流与欧亚土壤湿度的相关比较显著，东亚急流只与贝加尔湖北部和南部的土壤湿度有着紧密联系。这种区域差异可能进一步影响到陆面热力异常和局地环流之

间的关系，东欧平原和贝加尔湖北部陆气作用对急流变异影响可能要强于巴尔喀什湖附近和贝加尔湖南部。陆气作用的物理过程一方面可以理解为土壤湿度异常影响大气异常加热，造成环流的变化，另一方面异常环流也会通过影响降水，最后造成土壤湿度异常，或者这两个过程都存在。

关于急流纬向非对称变异对气候的影响，我们发现在夏季急流纬向非对称变异的下游东亚区域，贝加尔湖南部的反气旋异常会东亚急流强度变化（图 3），而副热带西风急流的强度与东亚地区夏季气候间存在一定联系。林中达和陆日宇（2004）研究指出，亚洲高空急流的强度突变是导致 2003 年夏季长江流域出现降水异常和持续高温的重要原因，因此关于急流纬向非对称变异对东亚气候的影响还值得进一步探究。此外，急流纬向非对称变异的时间序列还存在年代际的特征（图 1d），转折时间大约出现在 20 世纪 90 年代中期，而东亚气候在 20 世纪 90 年代发生了一次明显的年代际变化。Kwon et al. (2007) 发现伴随我国华南地区降水的显著增强，东亚高空西风急流的强度在 1993~1994 年存在年代际减弱。黄荣辉等（2011, 2013）和 Liu et al. (2011) 指出我国东部夏季降水异常模态在 20 世纪 90 年代初以后由经向三极型转为经向偶极型。Zhu et al. (2011, 2015) 在研究中国东部夏季降

水的年代际变化背景时指出, PDO 在 20 世纪 90 年代末向负位相的转变会导致东亚西风急流减弱。因此夏季急流纬向非对称变异的年代际变化特征还需要借助更长时间的资料做进一步的分析。本文的研究只是基于观测分析的, 还需要借助数值模拟来探索更深层次的机制和过程。

参考文献 (References)

- Chen H S, Teng F D, Zhang W X, et al. 2017. Impacts of anomalous midlatitude cyclone activity over East Asia during summer on the decadal mode of East Asian summer monsoon and its possible mechanism [J]. *J. Climate*, 30 (2): 739–753, doi:10.1175/JCLI-D-16-0155.1.
- Chen S F, Wu R G. 2017a. Interdecadal changes in the relationship between interannual variations of spring North Atlantic SST and Eurasian surface air temperature [J]. *J. Climate*, 30 (10): 3771–3787, doi:10.1175/JCLI-D-16-0477.1.
- Chen S F, Wu R G. 2017b. An enhanced influence of sea surface temperature in the tropical northern Atlantic on the following winter ENSO since the early 1980s [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 10 (2): 175–182, doi:10.1080/16742834.2016.1259542.
- Chen S F, Wu R G, Chen W. 2015. The changing relationship between interannual variations of the North Atlantic Oscillation and northern tropical Atlantic SST [J]. *J. Climate*, 28 (2): 485–504, doi:10.1175/JCLI-D-14-0422.1.
- Chen S F, Wu R G, Liu Y. 2016. Dominant modes of interannual variability in Eurasian surface air temperature during boreal spring [J]. *J. Climate*, 29 (3): 1109–1125, doi:10.1175/JCLI-D-15-0524.1.
- Cui Y F, Duan A M, Liu Y M. 2015. Interannual variability of the spring atmospheric heat source over the Tibetan Plateau forced by the North Atlantic SST [J]. *Climate Dyn.*, 45 (5–6): 1617–1634, doi:10.1007/s00382-014-2417-9.
- Dirmeyer P A. 2000. Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation [J]. *J. Climate*, 13 (16): 2900–2922, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2900:UAGSWD>2.0.CO;2.
- 杜梦醒, 林中达, 陆日宇. 2016. 1990 年代初夏季东北亚低压的年代际转变 [J]. 大气科学, 40 (4): 805–816. Du Mengxing, Lin Zhongda, Lu Riyu. 2016. Inter-decadal change in the summertime Northeast Asia low-pressure system in the early 1990s [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (4): 805–816, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1511.15178.
- Du Y, Li T, Xie Z Q, et al. 2016. Interannual variability of the Asian subtropical westerly jet in boreal summer and associated with circulation and SST anomalies [J]. *Climate Dyn.*, 46 (7–8): 2673–2688, doi:10.1007/s00382-015-2723-x.
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129 (587): 157–178, doi:10.1256/qj.01.211.
- Hong X W, Lu R Y. 2016. The meridional displacement of the summer Asian jet, silk road pattern, and tropical SST anomalies [J]. *J. Climate*, 29 (10): 3753–3766, doi:10.1175/JCLI-D-15-0541.1.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589–606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (4): 589–606, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.01.
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因 [J]. 科学通报, 58 (8): 617–628. Huang Ronghui, Liu Yong, Feng Tao. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over eastern China around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 58 (12): 1339–1349, doi:10.1007/s11434-012-5545-9.
- Huang R H, Chen J L, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (5): 910–942, doi:10.1007/s00376-012-2015-x.
- Hurrell J W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 269 (5224): 676–679, doi:10.1126/science.269.5224.676.
- Hurrell J W, van Loon H. 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation [J]. *Climatic Change*, 36 (3–4): 301–336, doi:10.1023/A:1005314315270.
- Kosaka Y, Chowdary J S, Xie S P, et al. 2012. Limitations of seasonal predictability for summer climate over East Asia and the northwestern Pacific [J]. *J. Climate*, 25 (21): 7574–7589, doi:10.1175/JCLI-D-12-0009.1.
- 况雪源, 张耀存. 2006a. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 25 (3): 382–389. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006a. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 25 (3): 382–389, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.004.
- 况雪源, 张耀存. 2006b. 东亚副热带西风急流季节变化特征及其热力影响机制探讨 [J]. 气象学报, 64 (5): 564–575. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006b. The seasonal variation of the East Asian subtropical westerly jet and its thermal mechanism [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 64 (5): 564–575, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.05.003.
- Kwon M, Jhun J G, Ha K J. 2007. Decadal change in East Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (21): L21706, doi:10.1029/2007GL031977.
- Lau K M, Kim K M, Yang S. 2000. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 13 (14): 2461–2482, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2461:DABFCO>2.0.CO;2.
- 李崇银, 王作台, 林士哲, 等. 2004. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究 [J]. 大气科学, 28 (5): 641–658. Li Chongyin, Wang Joughtai, Lin Shizhei, et al. 2004. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (5): 641–658, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.

- 2004.05.01.
- 李笛, 陈海山. 2017. 不同区域海温对亚洲夏季副热带西风急流变异主模态的影响 [J]. 气象科学, 37 (4): 425–435. Li Di, Chen Haishan. 2017. Impact of sea surface temperature anomalies in different regions on dominant modes of summer Asian subtropical westerly jet variability [J]. *J. Meteor. Sci.*, 37 (4): 425–435, doi:10.3969/j.issn.0041-3733.2016jms.0041.
- 廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 2004. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响 [J]. 地球物理学报, 47 (1): 10–18. Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the North Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 47 (1): 10–18, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2004.01.003.
- 林朝晖, 杨小松, 郭裕福. 2001. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究 [J]. 气候与环境研究, 6 (2): 240–248. Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. 2001. Sensitivity of land surface model to the initial condition of soil moisture [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6 (2): 240–248, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2001.02.017.
- 林中达, 陆日宇. 2004. 2003 年夏季我国气候异常的背景和环流分析 [M]// 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 中国天气气候异常成因研究——2003 年. 北京: 气象出版社, 113–138. Lin Zhongda, Lu Riyu. 2004. Background circulation analysis on summer climate anomaly of China in 2003 [M]// Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. *Mechanisms of Weather and Climate Anomalies of China in 2003 (in Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 113–138.
- Lin Z D. 2010. Relationship between meridional displacement of the monthly East Asian jet stream in the summer and sea surface temperature in the tropical central and eastern Pacific [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 3 (1): 40–44, doi:10.1080/16742834.2010.11446840.
- Lin Z D. 2013. Impacts of two types of northward jumps of the East Asian upper-tropospheric jet stream in midsummer on rainfall in eastern China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (4): 1224–1234, doi:10.1007/s00376-012-2105-9.
- Lin Z D, Lu R Y. 2005. Interannual meridional displacement of the East Asian upper-tropospheric jet stream in summer [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 22 (2): 199–211, doi:10.1007/BF02918509.
- Lin Z D, Lu R Y. 2008. Abrupt northward jump of the East Asian upper-tropospheric jet stream in mid-summer [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86 (6): 857–866, doi:10.2151/jmsj.86.857.
- Liu Y, Huang G, Huang R H. 2011. Inter-decadal variability of summer rainfall in eastern China detected by the Lepage test [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 106 (3–4): 481–488, doi:10.1007/s00704-011-0442-8.
- 陆日宇. 2005. 华北汛期降水量年际变化与赤道东太平洋海温 [J]. 科学通报, 50 (11): 1131–1135. Lu Riyu. 2005. Interannual variation of North China rainfall in rainy season and SSTs in the equatorial eastern Pacific [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 50 (18): 2069–2073, doi:10.1360/04wd0271.
- Lu R Y. 2004. Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (1): 155–165, doi:10.2151/jmsj.82.155.
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus A*, 54 (1): 44–55, doi:10.1034/j.1600-0870.2002.00248.x.
- 陆日宇, 林中达, 张耀存. 2013. 夏季东亚高空急流的变化及其对东亚季风的影响 [J]. 大气科学, 37 (2): 331–340. Lu Riyu, Lin Zhongda, Zhang Yaocun. 2013. Variability of the East Asian upper-tropospheric jet in summer and its impacts on the East Asian monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 331–340, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12310.
- 马音, 陈文, 王林. 2011. 中国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景及其比较 [J]. 气象学报, 69 (2): 334–343. Ma Yin, Chen Wen, Wang Lin. 2011. A comparative study of the interannual variation of summer rainfall anomalies between the Huaihe Meiyu season and the Jiangnan Meiyu season and their climate background [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 69 (2): 334–343, doi:10.11676/qxb2011.028.
- 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 2001. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题 [J]. 地球科学进展, 16 (4): 563–568. Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, et al. 2001. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change [J]. *Adv. Earth Sci. (in Chinese)*, 16 (4): 563–568, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2001.04.019.
- Qu X, Huang G. 2012. Impacts of tropical Indian Ocean SST on the meridional displacement of East Asian jet in boreal summer [J]. *Int. J. Climatol.*, 32 (13): 2073–2080, doi:10.1002/joc.2378.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate [J]. *Science*, 215 (4539): 1498–1501, doi:10.1126/science.215.4539.1498.
- Song Y M, Guo W D, Zhang Y C. 2009. Numerical study of impacts of soil moisture on the diurnal and seasonal cycles of sensible/latent heat fluxes over semi-arid region [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (2): 319–326, doi:10.1007/s00376-009-0319-2.
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (6): 608–627, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. 应用气象学报, 17 (5): 513–525. Tao Shiyuan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the west Pacific in summer [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 17 (5): 513–525, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001.
- The GLACE Team, Koster R D, Dirmeyer P A, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. *Science*, 30 (5687): 1138–1140, doi:10.1126/science.1100217.
- Wu R G, Chen S F. 2016. Regional change in snow water equivalent–surface air temperature relationship over Eurasia during boreal spring [J]. *Climate Dyn.*, 47 (7–8): 2425–2442, doi:10.1007/s00382-015-2972-8.
- Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. *J. Geophys. Res.*, 114 (D18): D18120, doi:10.1029/2009JD011733.
- 徐康, 祝从文, 何金海. 2011a. 近 50 年环贝加尔湖区变暖对中国华北夏季降水的影响机理 [J]. 高原气象, 30 (2): 309–317. Xu Kang, Zhu Congwen, He Jinhai. 2011a. Impact of the surface air temperature warming around Lake Baikal on trend of summer precipitation in North China in the

- past 50 years [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 30 (2): 309–317.
- 徐康, 何金海, 祝从文. 2011b. 近 50 年中国东部夏季降水与贝加尔湖地表气温年代际变化的关系 [J]. 气象学报, 69 (4): 570–580. Xu Kang, He Jinhai, Zhu Congwen. 2011b. The interdecadal linkage of the summer precipitation in eastern China with the surface air temperature over Lake Baikal in the past 50 years [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (4): 570–580, doi:10.11676/qxxb2011.050.
- 杨莲梅, 张庆云. 2007. 夏季东亚西风急流扰动异常与副热带高压关系研究 [J]. 应用气象学报, 18 (4): 452–459. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007. Relationships between perturbation kinetic energy anomaly along East Asian westerly jet and subtropical high in summer [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 18 (4): 452–459, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.04.005.
- 杨莲梅, 张庆云. 2008. 夏季亚洲副热带西风急流气候特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 10–20. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2008. Climate features of summer Asia subtropical westerly jet stream [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 10–20, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.02.
- Ye K H, Wu R G, Liu Y. 2015. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s [J]. J. Geophys. Res., 120 (7): 2738–2753, doi:10.1002/2015JD023148.
- 葉篤正, 陶诗言, 李麥村. 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. Yeh Tucheng, Dao Shihyen, Li Meitsun. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 29 (4): 249–263.
- 张莞昕, 陈海山. 2017. 陆面热力异常与东亚夏季中纬度气旋年代际变化的联系 [J]. 气象科学, 37 (4): 458–465. Zhang Wanxin, Chen Haishan. 2017. Relationship between land surface thermal anomaly and the interdecadal variation of extra-tropical cyclone activity during summer over East Asia [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 37 (4): 458–465, doi:10.3969/2016jms.0048.
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. Climate Dyn., 36 (7–8): 1463–1473, doi:10.1007/s00382-010-0852-9.
- Zhu Y L, Wang H J, Ma J H, et al. 2015. Contribution of the phase transition of Pacific Decadal Oscillation to the late 1990s' shift in East China summer rainfall [J]. J. Geophys. Res., 120 (17): 8817–8827, doi:10.1002/2015JD023545 .
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature tripole on the East Asian summer monsoon [J]. Adv. Atmos. Sci., 30 (4): 1173–1186, doi:10.1007/s00376-012-2125-5.