夏季欧亚中高纬大气 ISO 与欧洲阻塞频率的联系及其对极端高温事件的协同作用

温昕晟[1] 杨双艳[1*] 高铭祥[1,2] 李天明[1,3]

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/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，南京 210044

2 广州市气象台，广州 511430

3 夏威夷大学马诺阿分校大气科学学院国际太平洋研究中心，夏威夷 968226

摘要 本文利用 1979–2018 年 NCEP 逐日再分析资料，探讨了夏季欧亚中高纬地区 10–30 天大气季节内振荡（ISO）的时空演变及其对欧洲阻塞频率的影响，并探讨了两者对欧亚极端高温发生频率的协同作用。研究表明，欧亚中高纬 10–30 天大气 ISO 表现出东传和西传两种模态。东（西）传模态下，对流层西北-东南向倾斜的四极型（东西向分布的偶极型）准正压位势高度异常耦合温度异常同时向东南方向（向西）传播。位相合成表明，在两个模态下，中高纬低频 Rossby 波列在传播过程中能够显著影响欧洲阻塞的发生。东（西）传模态位相 6–7（5–6）期间，欧洲阻塞发生最频繁。在东（西）传模态位相 6–7（5–6）期间，欧洲西部、东欧平原、乌拉尔山以及我国东北平原（欧洲和乌拉尔山）地区分别受准正压的 + – + – (+ –) 高度异常控制。有阻塞发生时，东传模态下，欧洲西部的正高度异常强度明显增强，乌拉尔山地区，东欧平原以及我国东北平原地区的高度异常强度均有所减弱。同时，欧洲以南出现负的高度异常；西传模态下，偶极型高度异常强度均增强，欧洲以南和我国东北平原分别出现负的和正的高度异常。可见，在两个模态阻塞频发位相下，阻塞的发生增加了欧洲和我国东北地区极端高温事件的发生频率，降低了欧洲以南和乌拉尔山地区极端高温事件的发生频率。因此，欧洲阻塞活动显著调控了欧亚中高纬地区大气 ISO 两个传播模态对极端高温事件的影响。

关键词 欧亚中高纬 季节内振荡 欧洲阻塞 极端高温

文章编号: doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2207.22077

收稿日期 2022 年 5 月 11 日 **网络预出版日期**

作者简介 温昕晟，1998 年出生，硕士研究生，主要从事中高纬大气季节内振荡和极端高温研究。E-mail: wenxinsheng@nuist.edu.cn

***通讯作者** 杨双艳，E-mail: yangsy@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目（42088101），江苏省自然科学基金项目（BK20210660），热带海洋环境国家重点实验室（中国科学院南海海洋研究所）开放课题（LTO2116）

Funded by National Natural Science Foundation of China (42088101), Natural Science Foundation of Jiangsu province (BK20210660), State Key Laboratory of Tropical Oceanography (South China Sea Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences) (LTO2116)

Relation of Atmospheric ISO at Mid-High-Latitude-Eurasia to the European Blocking Frequency and Their Co-effect on Extreme Hot Events during Boreal Summer

Wen Xinsheng[1], Yang Shuangyan[1*], Gao Mingxiang[1, 2], Li Tim[1, 3]

1 *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC–FEMD)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environmental Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou, 511430*

3 *Department of Atmospheric Sciences, International Pacific Research Center, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, Hawaii 96822*

Abstract Based on NCEP reanalysis daily data during 1979–2018, the spatio-temporal evolution of the 10–30-day atmospheric intraseasonal oscillations (ISO) at mid-high-latitude Eurasia and its effect on the European blocking frequency are investigated. The co-effect of the blocking and ISO on extreme hot event frequency is also investigated. The ISO exhibits two modes, that is, the eastward and westward propagating modes. During the eastward (westward) propagating mode, the northwest-southeast tilted quadrupole (east-west dipole) quasi-barotropic geopotential height anomaly coupled with the air temperature anomaly at the troposphere propagates southeastward (westward). Phase composite shows that, during both modes, the mid-high-latitude low-frequency Rossby wave trains significantly affect the frequency of the European blocking during the propagating journey. The most frequent European blocking appears in phases 6–7 (5–6) during the eastward (westward) mode which is referred to as E-P67 (W-P56). During E-P67 (W-P56), western Europe, the eastern European plain, the Ural Mountains, and northeast plain of China (Europe and the Ural Mountains) are respectively controlled by quasi-barotropic + – + – (+ –) height anomalies, resulting in significantly positive frequency anomalies of extreme hot events over western Europe and the Ural Mountains (Europe), and negative ones over the eastern European plain and northeast plain of China (Ural Mountains). If blocking occurs, During E-P67, the positive height anomaly intensity over western Europe increases significantly, and the positive or negative ones over the Ural Mountains, the eastern European plain and the northeast plain of China weakens. Meanwhile, a negative height anomaly appears south of Europe, leading to a negative extreme hot frequency anomaly; during W-P56, both the positive and negative height anomalies are intensified, and a positive and a negative height anomaly respectively appear over northeastern plains of China and south of Europe, respectively decreasing and increasing the hot events in the two regions. So, during E-P67 and W-P56, the European blocking increases (decreases) the frequency of extreme hot events in Europe and northeast plains of China (south of Europe and the Ural Mountains). Therefore, European blocking activities significantly regulate the effect of the two propagating ISO modes on the extreme hot events over the middle and high latitudes of Eurasia.

Keywords Mid-high-latitude Eurasia, ISO, European blocking, Extreme hot events

1 引言

大气季节内振荡（intraseasonal oscillation，ISO）是大气运动的重要组成部分，其时间尺度为 10–90 天（李崇银，1995）。研究发现，热带地区的大气存在显著的 30–60 天振荡（Madden and Julian，1971），被称为 MJO（Madden-Julian oscillation）。中高纬地区的大气也存在显著的季节内信号（Anderson and Rosen，1983；Yang et al.，2013a，2016）。有研究指出，中高纬大气 ISO 的水平结构在冬季表现为纬向 1–2 波，在夏季表现为纬向 2–3 波（李崇银等，2003），其垂直结构在冬夏两季均表现为准正压的结构。事实上，中高纬大气 ISO 的振荡周期和传播特征都比较复杂。夏季欧亚地区 500hPa 位势高度场存在显著的 10–30 天振荡周期，并表现为显著向西南传播的特征（Yang et al.，2013a）。夏季东亚地区的地表气温也存在显著的 10–30 天振荡周期，表现为显著向东南传播的特征（Zhao et al.，2017）。夏季乌拉尔山地区 250hPa 位势高度场存在显著的 30–50 天的振荡周期，并且同时表现出东传和西传两种传播模态（Zhu and Yang，2021；Yang and Li，2003；Hu et al.，2016）。中高纬大气 ISO 的活动与极端事件之间往往存在密切联系。研究发现，与中高纬大气 ISO 相关的位势高度异常能导致大范围极端降水事件或极端高温事件（Yang et al.，2013b；Liu et al.，2014；Gao et al.，2018），而且中高纬大气 ISO 还可以与低纬度大气 ISO 共同作用导致江淮地区极端降水事件（王遵娅和丁一汇，2008）。

阻塞是发生在中高纬西风带上的大尺度环流形势，是南北经向型气流阻断东西纬向型气流的结果，其活动常常伴随着环流型的大范围调整，引发剧烈的天气变化（李峰和丁一汇，2004；李峰等，2008；沈爱华等，2008）。例如，冬季阻塞活动往往伴随寒潮，容易引发极端低温事件（李崇银和顾薇，2010；李亚飞和任荣彩，2019）。夏季阻塞活动容易引发高温热浪和局地强降水事件，进而造成严重的经济损失（姚秀萍和于玉斌，2005；王倩云等，2016）。研究发现，在季节内时间尺度上，大尺度环流异常对阻塞活动有显著的影响。在冬季，MJO 的遥相关波列能够改变太平洋地区位势高度异常，从而影响太平洋地区的阻塞发生频率（Henderson et al.，2016）。向西传播的大气 ISO 可以通过异常经向风引导的行星涡度平流改变太平洋地区位势高度异常，从而影响太平洋地区阻塞活动（Yang and Li，2017）。在夏季，向西传播的大气 ISO 也可以显著影响鄂霍次克海地区阻塞的发生频率（杨双艳和李天明，2020）。然而，无论是

夏季还是冬季，欧洲地区的阻塞活动都十分活跃（史湘军和智协飞，2007）。那么，中高纬大气 ISO 与欧洲阻塞是否存在联系?为回答上述问题，本文探讨了夏季欧亚中高纬大气 ISO 不同传播模态对欧洲地区阻塞发生频率的影响，并进一步讨论两者对欧亚地区极端高温事件的协同作用，这有助于进一步理解极端高温事件的影响因子。

本文余下部分内容安排如下：第 2 部分介绍所用资料和方法，着重介绍了二维阻塞指数和极端高温指数；第 3 部分揭示了北半球夏季欧亚中高纬大气 ISO 的传播特征；第 4 部分探讨了中高纬大气 ISO 对欧洲地区阻塞高压发生频率的影响；第 5 部分探讨欧洲阻塞和中高纬大气 ISO 对欧亚极端高温事件的协同作用；第 6 部分为本文的总结和讨论。

2 资料与方法

2.1 资料

本文所使用的数据来自美国环境预报中心/国家大气研究中心（NCEP/NCAR）提供的 1979–2018 年 5–9 月的逐日再分析数据（Kalnay et al.，1996），包括位势高度场和温度场，水平分辨率为 2.5°×2.5°，垂直方向包括 10 个气压层（1000，850，700，500，400，300，250，200，150，100hpa）。

2.2 二维阻塞指数的定义

本文借鉴 Scherrer et al.（2006）和 Davini et al.（2012）二维阻塞指数的定义，利用 500hPa 位势高度资料，计算每个经纬度格点上阻塞事件的发生频率。该二维阻塞指数是将 Tibaldi and Molten（1990）提出的一维阻塞指数发展至二维，因此该指数可以更好的表征阻塞高压活动的空间分布特征。具体公式如下所示：

$$GHGS(\theta,\Phi) = \frac{Z(\theta,\Phi) - Z(\theta,\Phi_S)}{\Phi - \Phi_S} \quad (1)$$

$$GHGN(\theta,\Phi) = \frac{Z(\theta,\Phi_N) - Z(\theta,\Phi)}{\Phi_N - \Phi} \quad (2)$$

其中 $Z(\theta,\Phi)$ 是 500hPa 位势高度，θ 是各格点的经度，取值范围是 0°–360°；Φ 是各格点的纬度，取值范围是 30°–75°N，$\Phi_S=\Phi-15°$，

$\Phi_N = \Phi + 15°$。当某格点同时满足条件$GSGS > 0$和$GHGN < -10\,\mathrm{m/°lat}$时，定义该格点发生了瞬时阻塞。当瞬时阻塞连续发生 15 个经度以上定义为大尺度阻塞。当发生大尺度阻塞的格点在以其为中心的 10°lon×5°lat 范围内，能持续至少 5 天时间时，则定义该格点发生了大尺度阻塞事件。因为大尺度阻塞事件更具代表性，所以本文主要研究大尺度阻塞事件。将满足大尺度阻塞事件条件的格点记为 1，否则记为 0。将数据在时间维求和再除以总天数，即可求得每个格点发生大尺度阻塞的频率。

2.3 极端高温指数的定义

本文参考 Alexander et al.（2006）和 Hsu et al.（2017）定义极端事件的方法。对每一个格点提取 1979–2018 年中每一年中同一天的 850hPa 温度，然后将其由低到高排序，选取第 95 百分位的温度作为该格点当天的极端高温事件阈值。由此得到每一个格点 365 天的阈值。对每一个格点进行筛选，将格点每一天对应的 850hPa 温度大于该格点在一年中对应位置阈值的日期定义为极端高温日，并记为 1，否则记为 0。因此可以检索各格点何时发生了极端高温事件，夏季各格点发生极端高温的频率为该格点夏季发生极端高温事件的总天数与多年夏季总天数的比值。本文计算了极端高温事件阈值的夏季平均，通过计算其与北半球夏季 850hPa 温度场气候态的差值后发现，沿 60°N 附近分别在亚洲地区和北美地区存在大值中心（图 1）。

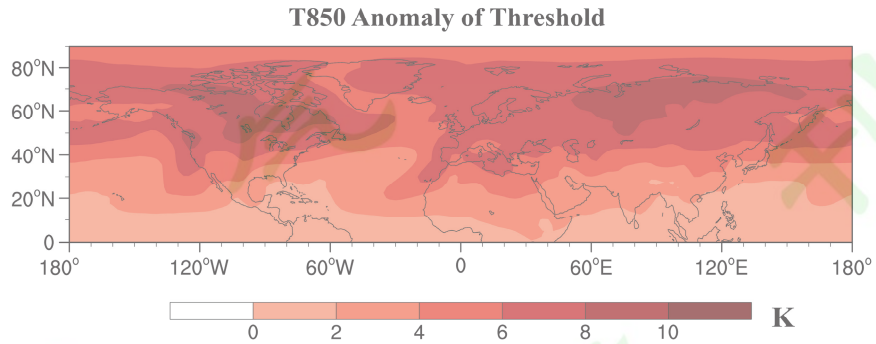

图 1 1979–2018 年夏季北半球极端高温事件的平均阈值相对于 850hPa 气温气候态的异常场的水平分布；单位：K

Fig.1 Horizontal distribution of the average threshold anomaly of extreme hot events relative to the 850hPa temperature climatology during the boreal summer of 1979–2018; unit: K

2.4 位相划分和扩展经验正交函数分解

为了获取季节内信号，首先对逐日数据去除季节循环及其前 3 个谐波，然后使用 Lanczos 带通滤波器（Duchon，1979）进行 10–30 天的带通滤波，最后提取 1979–2018 年期间夏季的季节内信号。本文的夏季定义为当年 5 月到 9 月。

参考 Matthews（2000）划分位相的方法，针对东传模态的季节内信号，建立以时间 t 为自变量的二维空间矢量场 $Z(t)$，具体公式如下所示：

$$Z(t) = [PC1(t), PC2(t)] \tag{3}$$

$$A(t) = [PC1(t)^2 + PC2(t)^2]^{1/2} \tag{4}$$

$$\alpha(t) = \arctan[PC2(t)/PC1(t)] \tag{5}$$

其中 PC1 和 PC2（PC3 和 PC4）是由 250hPa 位势高度场进行 EEOF 分解得到的 EEOF1 和 EEOF2（EEOF3 和 EEOF4）对应的时间系数。$A(t)$为振幅，$\alpha(t)$为位相角，将 α 转化为[0，2π]后可将每个周期划分为 8 个位相，相邻位相间相位角间隔π/4。图 2 是 PC1 和 PC2（或 PC3 和 PC4）划分东传（或西传）模态位相的示意图，后续阻塞频率、频率异常、各高度层位势高度异常以及温度等异常均是基于以上划分的位相进行合成。本文选取振幅 $A(t)$超过 0.8 个标准差的强 ISO 事件进行位相合成分析，并用 t 检验对合成结果进行统计性检验。

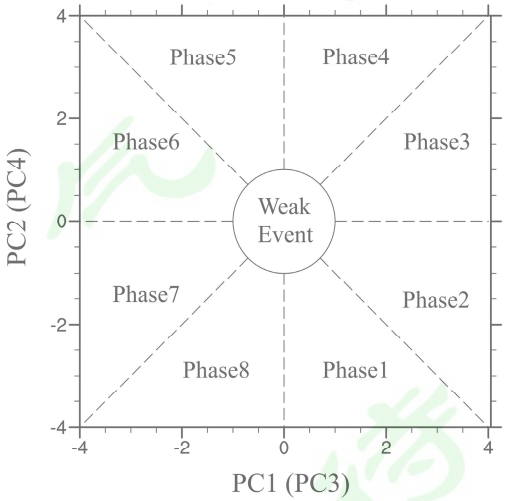

图 2 基于 PC1（PC3）和 PC2（PC4）划分的 8 个位相示意图；圆圈内表示振幅小于 0.8 个标准差的弱事件

Fig.2 Phase space diagram defined by the PC1 (PC3) and PC2 (PC4); the weak events within the

circle is based on the amplitude less than 0.8 standard deviation

此外，本文用到的 EEOF 方法类似于经验正交函数分解（EOF），利用气候变量场在时间上存在显著的自相关和交叉相关的特征，得到变量场的移动性分布特征。首先建立一个包含滞后 n 个时次的资料矩阵，之后再将包含多个时次的矩阵进行 EOF 分解，分离出的特征向量包含滞后 n 个时次的空间分布结构（Ghil et al.，2002）。本文选取的滞后时次分别为第 0 天（day 0），第 3 天（day +3）和第 6 天（day +6）。

3 北半球夏季欧亚中高纬大气 ISO 的演变特征

图 3a 为 1979–2018 年夏季欧亚中高纬地区 250hPa 位势高度场标准差的水平分布。由图可知，20°E 以东的北大西洋地区以及乌拉尔山地区分别存在最大变率中心。由于本文重点关注欧亚地区，所以选取乌拉尔山地区的变率中心（40°–70°E，55°–65°N；图 3a 中方框所示区域）作为重点关注对象。图 3b 是乌拉尔山地区最大变率中心区域平均的 250hPa 位势高度异常场（去掉年平均及其前 3 个谐波）的功率谱图。功率谱分析的结果表明，夏季乌拉尔山地区的大气分别存在为 10–30 天和 30–50 天显著周期，该结果与 Zhu and Yang（2021）的结论一致。然而，Zhu and Yang（2021）重点关注了夏季 30–50 天 ISO 的主要特征，对 10–30 天的 ISO 特征并未细致分析。虽然关于中高纬 10–30 天大气 ISO 在之前也有研究涉及，但他们要么关注的是冬季 ISO 的特征（Yang and Li，2016 ），要么仅仅关注了 ISO 的某种单一传播模态（Yang et al.，2013a；Zhao et al.，2017）。已有研究表明，中高纬 ISO 很可能存在东传和西传两种传播模态，而且不同区域表现出的传播特征差异较大（Kikuchi and Wang，2009）。因此，本文重点关注夏季欧亚中高纬地区 10–30 天大气 ISO 东传和西传两种传播模态的特征，并讨论其对欧洲地区阻塞活动的影响。

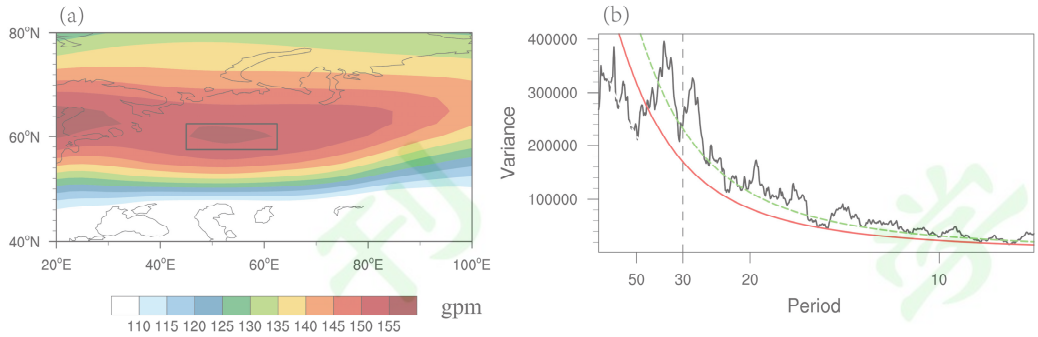

图 3 （a）夏季（5–9 月）欧亚中高纬地区 250hPa 位势高度场标准差的水平分布（阴影，单位：gpm）；黑色方框区域代表欧亚中高纬地区最大变率中心（45°–62.5°E，57.5°–62.5°N）；（b）中高纬地区最大变率中心（45°–62.5°E，57.5°–62.5°N）区域平均的 250hPa 位势高度异常场（去除年平均及其前 3 个谐波）的功率谱分析；黑线为谱值，红线与绿线分别表示红噪声标准谱及其 0.05 的显著性水平线

Fig.3 (a) Horizontal distribution of the standard deviation of the intraseasonal 250hPa-geopotential height (shading; unit: gpm) over the mid-high-latitude Eurasian region in boreal summer (May–September); The black boxed area represents the center of maximum variability over the mid-high-latitude Eurasian region (45°–62.5°E, 57.5°–62.5°N); (b) The power spectra of the intraseasonal 250hPa-geopotential height (the climatological annual cycle and the first 3 harmonics are removed) over the region of (45°–62.5°E, 57.5°–62.5°N); the black solid line denotes the power spectrum; the red and green lines represent standard spectrum of red noise and its 0.05 significance level

运用 EEOF 方法提取中高纬地区最大变率中心区域相关的欧亚中高纬地区（30°–100°E，40°–80°N）10–30 天季节内信号主模态。图 4a–d 分别为 EEOF 前四个模态（EEOF1，EEOF2，EEOF3，EEOF4）的空间分布。图 4a–d 中第 0 天分别指与 250hPa 高度异常滞后 0 天的 EEOF1–4 模态的分布型一致的时刻。其中 EEOF1 在第 0 天时表现为东西向分布的偶极型波列。EEOF2 第 0 天表现为正负异常相间的西北–东南向倾斜的波列。EEOF3 第 0 天表现为西弱东强的偶极子型波列。EEOF4 第 0 天表现为西强东弱的偶极子型波列。前四个模态的方差贡献分别为 13.5%、12.6%、10.3%和 9.2%，其方差贡献总和超过 40%。由图可知，EEOF1（图 4a）和 EEOF2（图 4b）主要反应的是大气 ISO 向东传播的特征，EEOF3（图 4c）和 EEOF4（图 4d）主要反应的是大气 ISO 向西传播的特征。图 4e 是前四个模态的方差贡献及其误差范围。由图 4e 可知，EEOF1（EEOF3）与 EEOF2（EEOF4）之间没有有效分开，但 EEOF1–2 与 EEOF3–4

能够有效分开。此外，当 PC1（PC3）超前/滞后 PC2（PC4）4 天时，它们之间有最显著的正/负相关（图 4f）。以上结果表明，EEOF1（EEOF3）和 EEOF2（EEOF4）实际上是同一空间模态的不同时间分布。因此，可以分别选取 PC1 和 PC3 作为参考时间序列来揭示欧亚中高纬地区大气 ISO 向西和向东传播的时空演变特征。

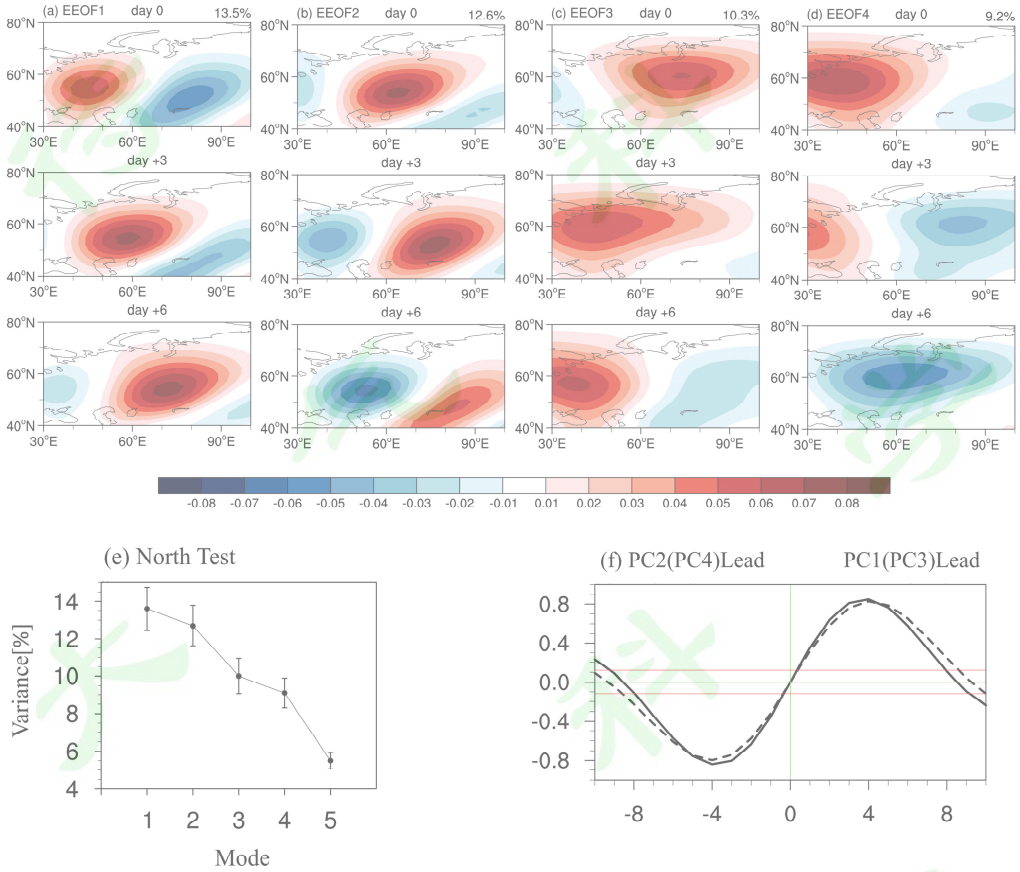

图 4 （a）夏季 10–30 天滤波的 250hPa 位势高度异常场 EEOF1 的空间分布；（b）–（d）同（a），但分别为 EEOF2，EEOF3，EEOF4 的空间分布，EEOF 选取时间间隔为 3 天，右上角为每个模态对总体方差的贡献；（e）EEOF 前 5 个模态的方差贡献（黑点）及其误差范围（垂线）；（f）PC1（PC3）与 PC2（PC4）的超前滞后相关，实线为 PC1 与 PC2 的相关，虚线为 PC3 与 PC4 的相关，水平红线表示 0.05 的显著性水平线

Fig.4 (a) The EOF1 of the 10–30-day filtered 250hPa-geopotential height in boreal summer; (b) – (d) as in (a), but for the EEOF2, EEOF3, and EEOF4, respectively; the EEOF with 3 days lags is employed; the contribution of each EEOF mode to total variance is marked at the upper-right-hand corner of the appropriate panel; (e) The contribution of the first five EEOF modes (black dot) and their error ranges (black vertical line); (f) The lead-lag correlation coefficients between PC1 (PC3) and PC2 (PC4); the solid line represents the correlation between PC1 and PC2; the dashed one

represents the correlation between PC3 and PC4; the red one represents a 0.05 significance level

图 5a，b 分别是以 PC1 和 PC3 作为参考时间序列合成的 10–30 天 250hPa 位势高度异常场和 850hPa 温度异常场从−8 天到+6 天的时间演变（间隔 2 天）。选取 PC1（PC3）大于/小于+0.8/−0.8 个标准差的事件进行合成（正事件减去负事件）。图 5a（5b）第 0 天表示东传（西传）模态的位势高度异常分布与 EEOF1（EEOF3）第 0 天的位势高度异常分布型一致或相反的时刻。

由图 5a 可知，−8 天，欧亚中高纬地区存在正负异常相间的西北−东南向倾斜的波列。从−8 天发展到 0 天，该波列的强度逐渐增强并向东南方向传播。至 0 天时，欧洲地区主要受正的位势高度异常控制，而乌拉尔山地区存在位势高度负异常，对应对流层低层，乌拉尔山地区为负的温度异常以及欧洲地区为正的温度异常。同时，欧洲以西和我国华北地区分别受负的和正的高度异常控制，分别对应对流层低层负的和正的温度异常。从 0 天发展到+6 天，波列继续向东南方向移动，欧洲地区正高度异常增强，并逐渐东移至乌拉尔山地区。原乌拉尔山地区的负高度异常减弱，并东移至渤海以西。同时乌拉尔山地区和渤海以西对流层低层分别逐渐出现正的和负温度异常。以上分析可知，欧亚中高纬地区大气 ISO 存在显著向东/东南方向传播的模态，定义该模态为东传模态。

由图 5b 可知，−8 天，中高纬地区欧洲东部至乌拉尔山地区主要受负高度异常控制，同时对流层低层这些地区表现为负的温度异常。从−8 天发展到−2 天，中高纬地区的负高度异常及对流层低层的负温度异常逐渐西移，同时该负高度异常以东逐渐受西传而来的正高度异常控制。至−2 天时，欧洲西部至东大西洋地区受负高度异常控制，而乌拉尔山地区受西移而来的正高度异常控制。从−2 天发展到+6 天，乌拉尔山地区正高度异常逐渐加强并继续西移至欧洲地区，同时欧洲地区在对流层低层逐渐转为受正温度异常控制。以上分析可知，欧亚中高纬地区大气 ISO 存在显著向西传播的模态，定义该模态为西传模态。

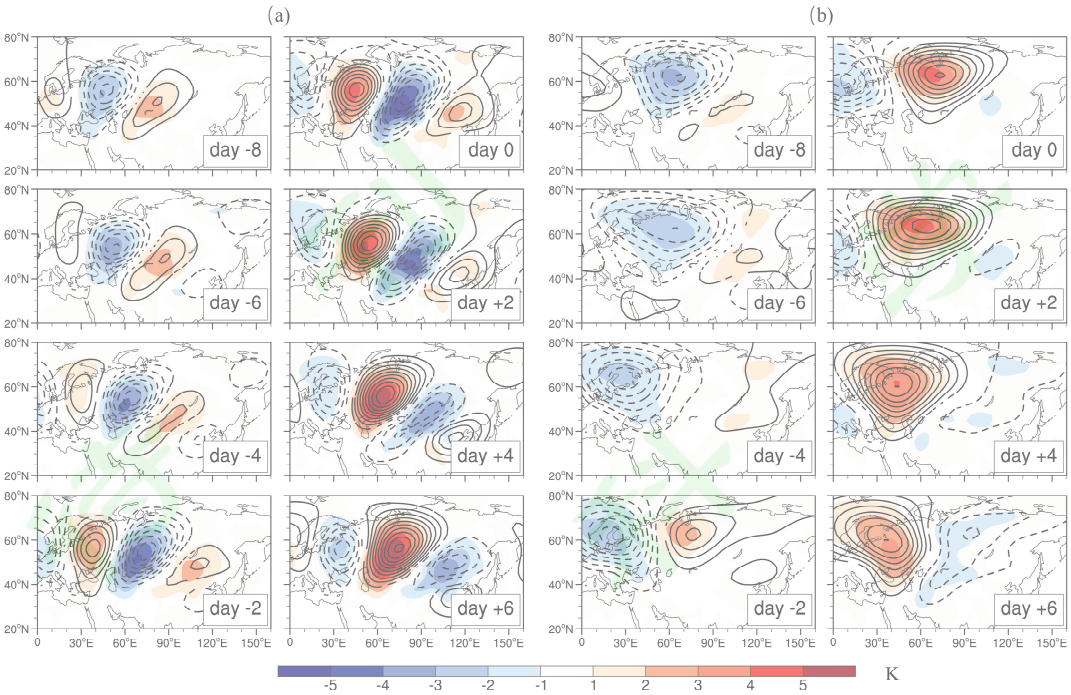

图 5 （a）以 PC1 作为参考时间序列合成的 10–30 天 250hPa 位势高度异常场（等值线，间隔：20gpm；0 等值线省略）和 850hPa 温度异常场（阴影，单位：K）从−8 天到+6 天的水平演变图；（b）同（a），但为以 PC3 作为参考时间序列合成的水平演变图；实线为正位势高度异常，虚线为负位势高度异常；阴影和等值线均通过 0.05 的显著性水平

Fig.5 (a) Evolution of the composite 10–30-day filtered geopotential height anomalies at 250hPa (contour interval: 20gpm; the zero line is omitted) and air temperature anomalies at 850hPa (shading; unit: K) based on the PC1 from day −8 to day +6; (b) as in (a), but for evolution based on the PC3; solid contours are positive values; dashed contours are negative values; all the contours and shadings exceeding 0.05 significance level

为了进一步分析东传模态和西传模态垂直结构的时间演变特征，图 6a，b 分别展示了基于 PC1 和 PC3 合成的沿 40°–80°N 纬度平均的低频温度和位势高度异常场的经度–高度剖面从−4 天到+6 天的演变（时间间隔为 2 天）。图 6a（6b）第 0 天表示东传（西传）模态的位势高度异常分布与 EEOF1（EEOF3）第 0 天的位势高度异常分布型一致或相反的时刻。由图 6 可以发现，中高纬地区两种传播模态的位势高度异常表现为准正压的特征，位势高度异常中心位于 250hPa 高度附近。当中高纬地区位势高度场为正异常时，温度异常场在对流层低层表现为正异常，在对流层高层表现为负异常，满足静力平衡关系。整个对流层的高度异常场耦合温度异常场向东（图 6a）和向西（图 6b）传播。

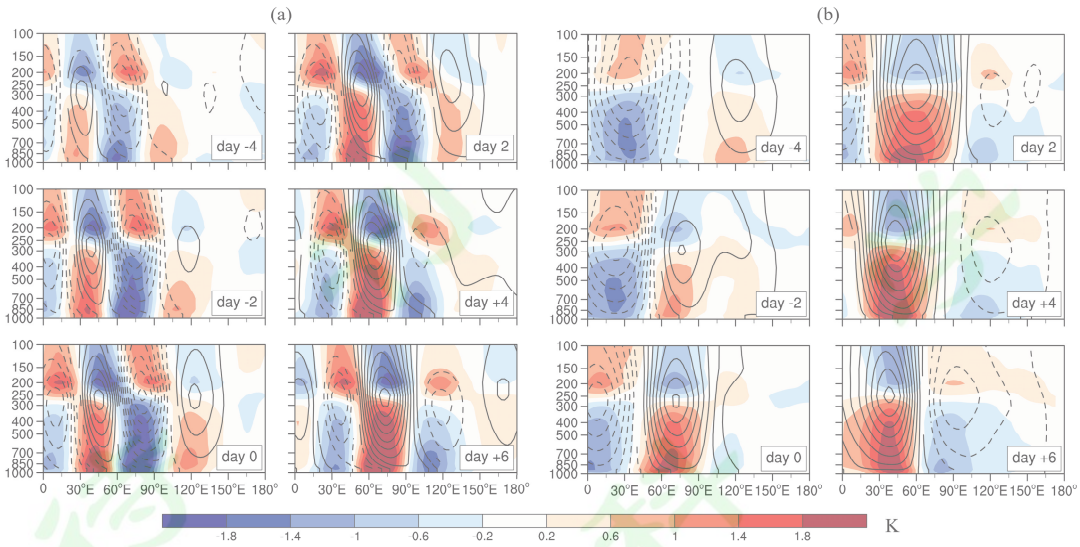

图 6 （a）以 PC1 作为参考时间序列合成的位势高度异常场（等值线间隔：10gpm；0 等值线省略）和温度异常场（阴影，单位：K）沿 40°–80°N 纬度平均的高度–经度剖面从−4 天到+6 天的演变；（b）同（a），但为以 PC3 作为参考时间序列的结果；实线为正位势高度异常，虚线为负位势高度异常；等值线和阴影均通过 0.05 的显著性水平

Fig.6 (a) The longitude-height section of the composite 10–30-day filtered geopotential height anomalies at 250hPa (contour interval: 10gpm; the zero line is omitted) and air temperature anomalies at 850hPa (shading; unit: K) averaged along 40°–80°N from day −4 to day +6 based on the PC1; (b) as in (a), but for the sections based on the PC3; solid contours are positive values, and dashed contours are negative values; the contours and shadings exceeding 0.05 significance level

4 夏季中高纬大气 ISO 与欧洲阻塞的联系

以上分析结果表明，夏季欧亚中高纬地区大气 ISO 存在两种模态，即东传模态和西传模态。两种模态在传播过程中势必会对下游的环流系统产生影响。本节主要分析这两种传播模态对欧亚阻塞发生频率的影响。为了得到夏季欧亚地区阻塞最活跃的区域，图 7a 给出了夏季欧亚地区阻塞频率的水平分布。由图可见，欧洲地区是阻塞最活跃的区域，最大频率超过 11%，另外还存在一个阻塞较活跃的地区，位于乌拉尔山地区。本文主要探讨欧亚中高纬大气 ISO 对欧洲阻塞频率的影响。选取 15°–40°E，55°–70°N 的区域（图 7a 中方框所示区域）作为欧洲阻塞的关键区。

图 7b 为夏季欧亚地区沿关键区所在纬度（55°–75°N）平均的阻塞频率随经度的演变。同样可以发现，夏季欧亚中高纬地区有两个阻塞多发中心，分别位于 15°–40°E 附近的欧洲地区和 60°–80°E 附近的乌拉尔山地区，这与前人（比

如，Tibaldi and Molten，1990）使用一维阻塞指数得到的结果一致。

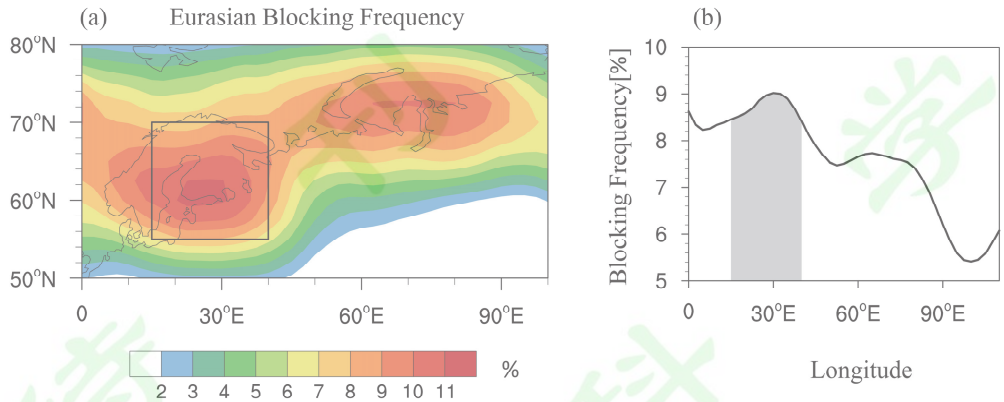

图 7 （a）夏季欧亚地区阻塞发生频率气候态的水平分布；黑色方框区域代表关键区（15°–40°E，55°–70°N）；（b）沿 55°–75°N 纬度平均的夏季欧亚地区阻塞发生频率随经度的分布；灰色阴影代表欧洲区域（15°–40°E）；单位：%

Fig.7 (a) Horizontal distribution of climatic Eurasian blocking frequency in boreal summer; the black boxed area represents the key region (15°–40°E, 55°–70°N); (b) The Eurasian blocking frequency averaged along 55°–75°N during summer time; shaded longitude belt (15°–40°E) denotes the European blocking area; unit: %

选取 PC1 和 PC2 对东传模态进行位相划分，并选取振幅大于 0.8 的强 ISO 事件进行位相合成。图 8 是欧亚中高纬地区阻塞频率异常和 10–30 天 500hPa 位势高度异常随东传模态位相的演变，其中阻塞频率异常是由各位相强事件期间的阻塞频率与其气候态的差值（图 7a）。图中黑色实线框为欧洲阻塞关键区。位相 1（图 8a）对应图 5a 中−4 天到−2 天的位势高度异常分布，即东欧平原地区在 250hPa 位势高度场表现为较弱的正异常，乌拉尔山地区表现为较强的负异常。关键区主要受正位势高度异常控制，有利于关键区阻塞的发生，因此关键区表现为正频率异常。位相 2–3（图 8b–c）对应图 5a 中 0 天到+2 天的位势高度异常分布，西欧地区表现为负位势高度异常，东欧平原地区（乌拉尔山地区）正（负）位势高度异常增强（减弱）东移，其中位势高度异常在位相 3 的分布形式与 EEOF1 第 0 天的分布形式一致。关键区西北部逐渐受负高度异常控制，东南部受正高度异常控制，故关键区位势高度梯度增强。前人研究指出，在中高纬西风带上出现有利于位势高度梯度减弱的位势高度异常分布型时，会导致异常东风，减弱中高纬西风带的西风气流进而有利于阻塞事件发生（Davini et

al.，2012）。因此当关键区表现为西风异常时，往往伴随着关键区位势高度梯度增强，不利于阻塞的形成。所以在位相 2–3 期间，关键区位势高度梯度增强，关键区表现为西风异常，不利于阻塞的形成，关键区逐渐演变为负阻塞频率异常。位相 4（图 8d）对应图 5a 中的+4 天到+6 天的位势高度异常分布，欧洲地区表现为较弱的负位势高度异常，欧洲东部至乌拉尔山地区表现为较强的正位势高度异常。关键区主要受负高度异常控制，不利于阻塞的形成，因此关键区主要表现为负阻塞频率异常。随着负位势高度异常向东南移动。位相 5 期间（图 8e）的位势高度异常分布与位相 1 期间的分布情况相反，东欧平原地区表现为较弱的负位势高度异常，乌拉尔山地区表现为较强的正位势高度异常。其中东欧地区负位势高度中心位于关键区东南部，同时整个关键区表现为负位势高度异常，有利于关键区北侧位势高度梯度减弱，出现异常东风，导致该区域出现正频率异常。关键区位势高度异常的在位相 6–8 期间（图 8f–h）的分布情况分别与位相 2–4 的分布情况相反，即在位相 6–7 期间，东欧平原地区（乌拉尔山地区）负（正）位势高度异常增强（减弱）东移，西欧地区出现正位势高度异常，关键区西北部受正高度异常控制，东南部受负高度异常控制。而在位相 8 期间，欧洲地区表现为较弱的正位势高度异常，欧洲东部至乌拉尔山地区表现为较强的负位势高度异常，关键区基本受正高度异常控制，所以在位相 6–8 期间，关键区主要表现为正的阻塞频率异常。

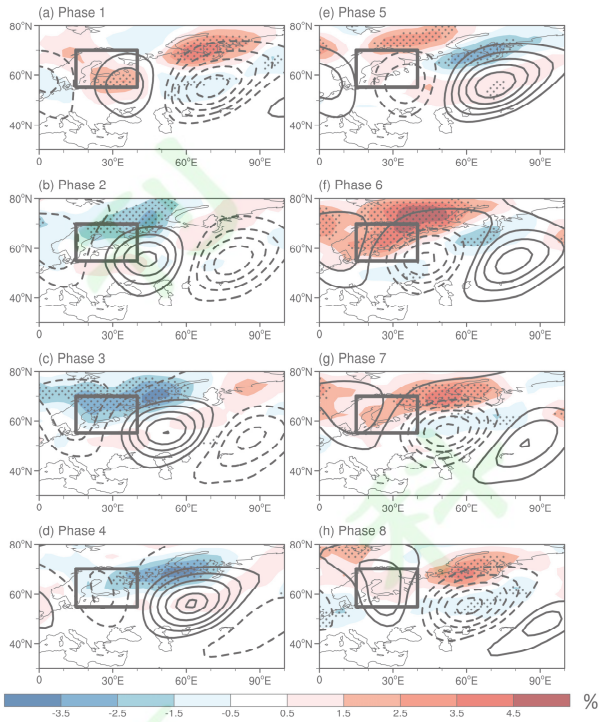

图 8 （a）东传模态下位相 1 期间阻塞频率异常（阴影；单位：%）和 10–30 天 500hPa 位势高度异常（等值线间隔：10gpm；0 等值线省略）的水平分布；（b）–（h）同（a），但分别为位相 2 至位相 8；图中黑色实线框为阻塞关键区；打点区域表示通过 0.05 的显著性水平区域

Fig.8 (a) Horizontal distribution of blocking frequency anomalies (shading; unit: %) and 10–30-day filtered 500hPa geopotential height anomalies (contour interval: 10gpm; the zero line is omitted) at phase 1 during eastward propagating mode; (b)–(h) As in (a), but for phase 2 to phase 8, respectively; the black boxed region indicates the key area; dotted area indicates the anomalies exceeding 0.05 significance level

选取 PC3 和 PC4 对西传模态进行位相划分，并选取振幅大于 0.8 的强 ISO 事件进行位相合成。图 9 是阻塞频率异常和 10–30 天 500hPa 位势高度异常随西传模态位相的演变图。位相 1 和位相 2（图 9a，b）对应图 5b 中的−4 天到−2 天 250hPa 位势高度异常分布，欧洲地区表现为较强的负位势高度异常，乌拉尔山地区表现为较弱的正位势高度异常。关键区受位势高度负异常控制，导致关键区出现较强的负频率异常。位相 3（图 9c）对应图 5b 中第 0 天的位势高度异常分布，表现为欧洲地区（乌拉尔山地区）负（正）位势高度异常减弱（增强）西移，与 EEOF3 第 0 天的位势高度分布形式一致。位相 4 到位相 6（图 9d–f）对应图 5b 中的+2 到+6 天位势高度异常分布，欧洲地区至乌拉尔山地区正位势

高度异常减弱西移。位相 3 到位相 6，随着中高纬地区 ISO 信号的西传，关键区逐渐受正的高度异常控制，有利于关键区阻塞的发生，因此关键区逐渐演变为正的阻塞频率异常。随着波列继续向西传播，位相 7 期间（图 9g）的位势高度异常分布与位相 3 的分布情况相反，表现为欧洲地区（乌拉尔山地区）正（负）位势高度异常减弱（增强）西移。关键区的正频率异常减弱。位相 8 期间（图 9h）的位势高度异常分布与位相 4 的分布情况相反，欧洲地区至乌拉尔山地区表现为较强的负位势高度异常。关键区受负的位势高度异常控制，导致关键区表现为负的阻塞频率异常。

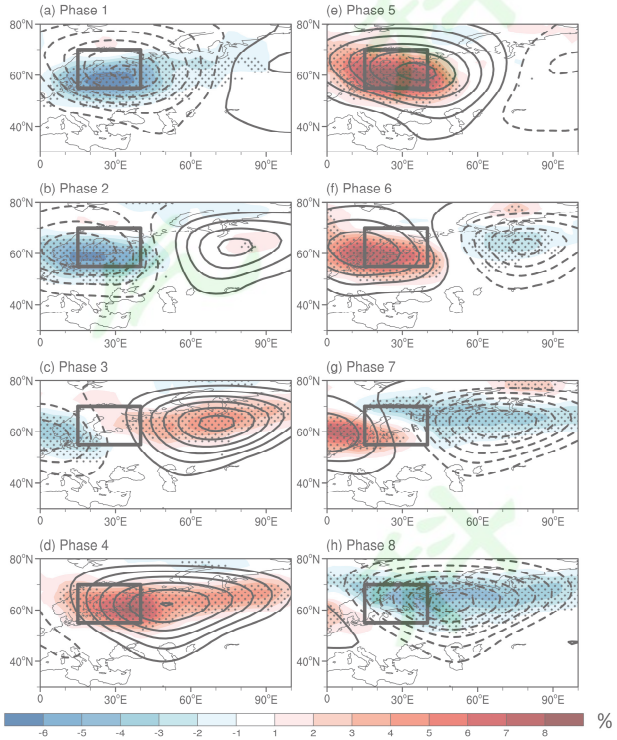

图 9 同图 8，但为西传模态

Fig.9 As in Fig.8, but for the westward propagating mode

为了进一步分析欧洲阻塞频率异常分别随东传模态和西传模态位相的演变特征，图 10 给出了欧洲阻塞关键区区域平均的阻塞频率异常随位相的演变。为了使阻塞频率异常随位相的演变特征表现的更明显，图中给出的是每相邻两个位相的平均值。由图可知，东传模态中位相 6 和位相 7（位相 6+7）期间，关键区阻塞频率异常达到最大（约 3%），而西传模态中最大频率异常位于位相 5 和位相 6（位相 5+6），达到 7%以上。值得注意的是，此处阻塞频率异常是各位相强事件期间阻塞频率与频率夏季气候态的差值，3%（7%）是阻塞频率异常

在关键区的区域平均值，代表的是关键区的阻塞频率较夏季气候态偏多的平均状态。根据前人研究，夏季大气 ISO 和阻塞事件都会引起大范围极端高温天气（王倩云等，2016；Gao et al.，2018），但同时考虑两者对欧亚地区极端高温事件影响的研究较少。由此，下文以东传模态的位相 6+7 和西传模态的位相 5+6 作为研究重点，对比分析这些位相下有欧洲阻塞和无欧洲阻塞时，欧亚地区夏季极端高温事件的发生频率。

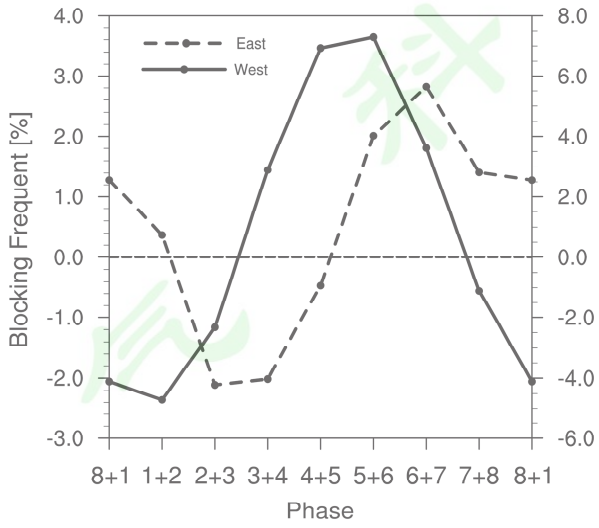

图 10 欧洲地区阻塞频率异常随东传模态（虚线）和西传模态（实线）位相的演变；左侧纵坐标轴对应东传模态情况，右侧纵坐标对应西传模态情况；单位：%

Fig.10 Evolution of European blocking frequency anomalies during different phases for the eastward propagating mode (dashed line) and the westward propagating mode (solid line); the left (right) vertical axis corresponds to the eastward (westward) propagating mode; unit: %

5 中高纬大气 ISO 与阻塞对极端高温的协同影响

图 11a 是东传模态位相 6+7 期间，500hPa 位势高度异常场和极端高温事件频率异常的水平分布，其中极端高温事件频率异常为位相 6+7 期间的极端高温事件发生频率与气候态的极端高温事件发生频率之间的差值。黑色实线框为欧洲阻塞关键区。由图 11a 可知，在不考虑有无阻塞的情况下，欧亚大陆整体呈现正负异常相间的西北-东南向倾斜的波列，该波列从欧洲地区一直延伸到我国东北地区。其中欧洲西部和乌拉尔山地区受正位势高度异常控制，这种在对流层表现为准正压的位势高度正异常（见图 6a）有利于激发下沉气流，导致局地出现高温天气。因此，欧洲西部和乌拉尔山地区表现为显著的极端高温频率正

异常。然而东欧平原和我国东北平原地区主要受负位势高度异常控制，导致这两个地区均存在显著的极端高温频率负异常。

图 11b，c 分别是欧洲地区无阻塞发生和有阻塞发生时，500hPa 位势高度异常和极端高温事件频率异常的水平分布。在无阻塞发生的情况下，欧洲西部的正位势高度异常强度相比于图 11a 明显减弱，而东欧平原地区（乌拉尔山地区）的负（正）位势高度异常强度明显增强（图 11b）。因此，在无阻塞发生时，整个欧洲地区极端高温事件减少，乌拉尔山地区极端高温事件增多。有阻塞发生时的情况，如图 11c 所示。相比于没有发生阻塞时（图 11b），欧洲西部地区的正位势高度异常强度明显增强，导致欧洲西部至北大西洋地区存在大范围的极端高温事件正频率异常。乌拉尔山地区（东欧平原和我国东北平原地区）的正（负）位势高度异常的强度有所减弱，导致东欧平原和我国东北平原地区的极端高温频率负异常和乌拉尔山地区的高温频率正异常的强度均明显减弱。同时，欧洲以南的高度异常由正异常变为负异常，导致该地区极端高温事件减少。

为了更直观的反映欧洲阻塞在中高纬大气 ISO 影响欧亚地区极端高温事件中所起的作用，图 11d 给出了各异常场在发生阻塞与未发生阻塞情况下的差值（图 11c 减去图 11b）的空间分布。由图可知，当欧洲阻塞发生时，整个欧洲地区的位势高度异常偏高，正位势异常中心位于阻塞关键区西侧，同时我国东北平原地区位势高度异常也显著偏高，因此欧洲阻塞的发生有利于欧洲地区和我国东北平原地区出现极端高温事件。而在欧洲以南和乌拉尔山地区位势高度异常显著偏低，因此欧洲阻塞的发生不利于这两个地区出现极端高温事件。可见，欧洲阻塞活动在中高纬大气 ISO 东传模态对欧洲、欧洲以南、乌拉尔山以及我国东北等欧亚地区极端高温事件的影响过程中起到重要的调控作用。在 ISO 东传模态的位相 6+7 阶段，当欧洲发生大范围阻塞时，整个欧洲和我国东北地区极端高温事件的发生频率增加，而欧洲以南和乌拉尔山地区极端高温事件的发生频率降低。

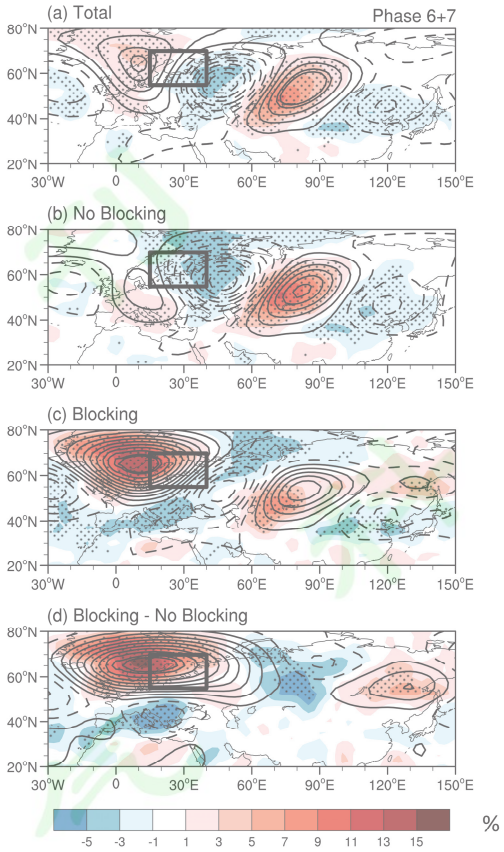

图 11 （a）东传模态位相 6+7 下 10–30 天 500hPa 位势高度异常（等值线间隔：8gpm；0 等值线省略）和极端高温事件频率异常（阴影，单位：%）的合成，极端高温事件频率异常为位相 6+7 期间的极端高温频率与夏季气候态的极端高温事件发生频率的差值；黑色实线框为欧洲阻塞关键区；（b）–（c）同（a），但分别为无欧洲阻塞发生和有欧洲阻塞发生时的合成结果；（d）为（c）与（b）的差值；实线为正位势高度异常，虚线为负位势高度异常；打点区域通过 0.05 的显著性水平区域

Fig.11 (a) Composites of the 10–30-day filtered geopotential height anomalies at 500hPa (contour interval: 8gpm; the zero line is omitted) and the extreme hot events frequency anomalies (shading; unit: %); the extreme hot events frequency anomalies are the difference between the extreme hot events frequency during Phase 6+7 in eastward propagating mode and the climatology during summer time; The black boxed area represents the key region of blocking; (b) – (c) as in (a), but for no European blocking and only European blocking; (d) the difference between (b) and (c); solid contours are positive values, and dashed contours are negative values; dotted area indicates the anomalies exceeding 0.05 significance level

图 12a 是西传模态位相 5+6 期间，500hPa 位势高度异常和极端高温事件频率异常的水平分布。其中，极端高温事件频率异常为位相 5+6 期间的极端高温事件发生频率与气候态的极端高温事件发生频率之间的差值。由图可知，在不

考虑有无阻塞的情况下，欧洲地区受到正高度异常控制，这种在对流层表现为准正压的正高度异常（见图 6b）有利于气流下沉，从而有利于欧洲地区极端高温事件的发生。乌拉尔山地区受到准正压的负位势高度异常控制，有利于气流上升，导致该地区极端高温事件的发生频率降低。

图 12b，c 分别是欧洲地区无阻塞发生和有阻塞发生时，500hPa 位势高度异常和极端高温事件频率异常的水平分布。由图 12b 可知，在无阻塞发生的情况下，欧洲地区的正位势高度异常的强度相比于图 12a 明显减弱，所以在无阻塞发生时，欧洲地区极端高温事件的发生频率降低，而乌拉尔山地区负位势高度异常的强度相比于图 12a 无明显变化，所以乌拉尔山地区极端高温事件频率异常变化不明显。由图 12c 可知，有阻塞发生时，欧洲地区（乌拉尔山地区）的正（负）位势高度异常的强度相较于图 12b 显著增强，同时在我国东北平原地区出现正位势高度异常，欧洲以南出现负位势高度异常。因此，欧洲地区的极端高温事件正频率异常和乌拉尔山地区的极端高温事件负频率异常强度均明显增强，同时欧洲以南和我国东北平原地区分别出现显著的极端高温事件负频率异常和正频率异常。可见，欧洲阻塞的出现会加强西传模态对欧亚地区极端高温事件的影响。

将 500hPa 位势高度场与极端高温事件发生频率在发生阻塞和未发生阻塞的情况下做差（图 12c 减去图 12b），如图 12d 所示。由图可知，欧洲阻塞的发生将导致整个欧洲地区存在显著的正位势高度异常，正位势高度异常中心位于阻塞关键区西侧，同时我国东北平原地区也出现显著的正位势高度异常，所以整个欧洲和我国东北平原地区的极端高温事件频率增加。同时，欧洲以南和乌拉尔山地区表现为负位势高度异常，所以欧洲阻塞的发生将导致这两个地区极端高温事件出现频率降低。此外，对于不利于阻塞发生的位相，欧洲阻塞活动对欧亚中高纬 ISO 两个传播模态和极端高温事件也有类似的调控作用（图略）。

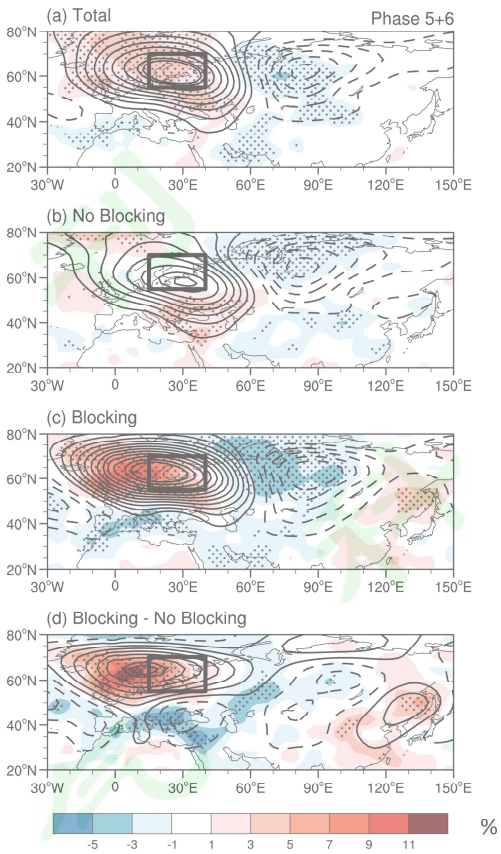

图 12 同图 11，但为西传模态位相 5+6 期间

Fig.12 As in Fig.11, but for phase 5+6 in westward propagating mode

6 结论与讨论

本文利用 1979–2018 年 NCEP/NCAR 逐日再分析资料，基于 EEOF、合成分析等统计方法，先探讨了夏季欧亚中高纬大气 ISO 不同模态的三维结构和演变特征及其对欧洲地区阻塞发生频率的影响，然后进一步探讨了中高纬 ISO 和阻塞对欧亚地区极端高温事件的协同作用。

分析发现，欧亚中高纬地区位势高度的最大变率中心出现在乌拉尔山地区（40°–70°E，55°–65°N）。通过对最大变率中心 250hPa 位势高度场的功率谱分析发现，中高纬地区大气存在显著的 10–30 天和 30–50 天的振荡周期。本文以 10–30 天的 ISO 为研究重点，运用 EEOF 分解发现欧亚中高纬地区 10–30 天的大气 ISO 存在东传和西传两种传播模态。合成分析表明，在东传模态下，欧亚中高纬地区 250hPa 位势高度异常主要表现为正负相间的西北–东南向倾斜的四级型波列，该波列在对流层呈准正压结构。准正压的位势高度异常场耦合温度异常场同时向东南方向传播。高度异常场和温度异常场满足静力平衡关系，即

对流层准正压的正（负）位势高度异常场耦合对流层低层正（负）温度异常场和对流层高层负（正）温度异常场。在西传模态下，欧亚中高纬地区 250hPa 位势高度异常主要表现为东西向偶极型波列，该波列在对流层亦呈准正压结构。准正压的位势高度异常场耦合温度异常场同时向西传播，且高度异常场和温度异常场也满足静力平衡关系。

东传和西传模态下，大气 ISO 的移动会显著影响下游系统。统计发现，在夏季，欧洲地区是欧亚地区阻塞最活跃的区域，且欧洲阻塞发生最频繁的区域为（15°–40°E，55°–70°N），定义该区域为欧洲阻塞关键区。位相合成表明，在东传（西传）模态位相 6–7（5–6）期间，欧洲关键区阻塞频率有最强正异常，达到 3%（7%）。在东传模态位相 6–7 期间，阻塞关键区西北部受正高度异常控制，东南部受负高度异常控制，关键区位势高度梯度减弱，导致异常东风，从而有利于关键区内阻塞的发生。在西传模态位相 5–6 期间，阻塞关键区受强的正高度异常控制，从而有利于关键区内阻塞的发生。

在东传（西传）模态下，选取关键区阻塞发生最频繁的位相 6–7（5–6）作为重点关注位相，分析了中高纬大气 ISO 与欧洲阻塞对欧亚中高纬地区极端高温事件的协同作用。结果表明，欧洲阻塞活动调控了欧亚中高纬 ISO 两个传播模态对极端高温事件的影响。在东传模态的位相 6–7 期间（图 11a），在对流层欧亚大陆上整体呈现正负异常相间的西北-东南向倾斜的高度异常分布，在没有阻塞发生时，欧洲西部和乌拉尔山地区受准正压的正高度异常控制，导致局地出现显著的极端高温频率正异常；而东欧平原和我国东北平原地区主要受准正压的负高度异常控制，导致局地出现极端高温频率负异常。相比于无欧洲阻塞情况下，阻塞的发生导致欧洲西部的正高度异常强度明显增强，以及乌拉尔山地区（东欧平原和我国东北平原地区）的正（负）高度异常的强度有所减弱，同时还导致欧洲以南出现负的高度异常。在西传模态位相 5–6 期间（图 12a），对流层欧亚大陆上整体呈现西负东正的高度异常分布，无阻塞发生时，欧洲地区和乌拉尔山地区分别受准正压的正的和负的高度异常控制，因此两地区极端高温事件的发生频率分别增加和降低。相比于无欧洲阻塞情况下，阻塞的活动导致欧洲地区（乌拉尔山地区）的正（负）高度异常的强度明显增强，并使欧洲以南和我国东北平原地区分别出现负的和正的高度异常。由此可见，欧洲阻塞调节了各模态相应位相下位势高度异常的分布，使得整个欧洲地区和我国东

北地区极端高温事件的发生频率增加，以及欧洲以南和乌拉尔山地区的极端高温事件的发生频率降低。虽然欧洲阻塞和中高纬大气 ISO 可以协同影响欧亚地区极端高温事件的发生频率，但是关于他们对极端高温协同影响的动力学机制还有待进一步探究。此外根据前人研究，某些区域的极端高温事件能表现出季节内变化特征（高庆九和尤琦，2019）。但对于阻塞高压，前人研究指出阻塞高压时间尺度复杂，且形成机理尚不明确，不同区域阻塞高压性质也存在较大差异，因此以往研究更多的是讨论阻塞事件在季节尺度上受到的调控影响。那么欧洲阻塞高压和极端事件本身是否也存在显著的季节内变化特征？能否从阻塞事件和极端高温事件自身出发对其季节内变化特征进行揭示？这一系列问题将在后续的研究中深入探讨。

参考文献（References）

Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 111(D5): 1–22, doi: 10.1029/2005JD006290.

Anderson J R, Rosen R D. 1983. The latitude–height structure of 40–50 day variations in atmospheric angular momentum [J]. J. Atmos. Sci., 40(6): 1584–1591, doi: 10.1175/1520-0469(1983)0402.0.CO;2.

Davini P, Cagnazzo C, Gualdi S, et al. 2012. Bidimensional diagnostics, variability, and trends of Northern Hemisphere blocking [J]. J. Climate., 25(19): 6496–6509, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00032.1.

Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. J. Appl. Meteorol., 18(8): 1016–1022, doi: 10.1175/1520–0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2.

Gao M, Yang J, Wang B, et al. 2018. How are heat waves over Yangtze River valley associated with atmospheric quasi–biweekly oscillation? [J]. Climate Dyn., 51: 4421–4437, doi: 10.1007/s00382-017-3526-z.

高庆九, 尤琦. 2019. 我国江南夏季极端高温季节内变化特征初探 [J]. 长江流域资源与环境, 28(7): 1682–1690. Gao Qingjiu, You Qi. Preliminary analysis of intraseasonal oscillation of summer extreme daily temperature in China [J]. Resour. Environ. Yangtze Basin (in Chinese), 28(7): 1682–1690, doi: 10.11870/cjlyzyyhj201907018.

Ghil M, Allen M R, Dettinger M D, et al. 2002. Advanced spectral methods for climatic time series [J]. Rev. Geophys., 40(1): 3–1–3–41, doi: 10.1029/2000RG000092.

Henderson S A, Maloney E D, Barnes E A. 2016. The influence of the Madden–Julian Oscillation on Northern Hemisphere winter blocking [J]. J. Climate., 29(12): 4597–4616, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0502.1.

Hsu P C, Lee J Y, Ha K J, et al. 2017. Influences of boreal summer intraseasonal oscillation on heat waves in monsoon Asia [J]. J. Climate., 30(18): 7191–7211, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0505.1.

Hu W, Duan A, Li Y, et al. 2016. The intraseasonal oscillation of eastern Tibetan Plateau precipitation in response to the summer Eurasian wave train [J]. J. Climate., 29(20): 7215–7230, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0620.1.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40–year reanalysis project [J]. Bull. Am. Meteorol. Soc., 77(3): 437–472, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2.

Kikuchi K, Wang B. 2009. Global perspective of the quasi–biweekly oscillation [J]. J. Climate., 22(6): 1340–1359, doi: 10.1175/2008JCLI2368.1.

李崇银, 顾薇. 2010. 2008 年 1 月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究 [J]. 大气科学, 34(5): 865–874. Li Chongyin, Gu Wei. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural Mountains in January 2008 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(5): 865–874, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.

李崇银, 龙振夏, 穆明权. 2003. 大气季节内振荡及其重要作用 [J]. 大气科学, 27(4): 518–535. Li Chongyin, Long Zhengxia, Mu Mingquan. 2003. Atmospheric intraseasonal oscillation and its important effect [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(4): 518–535, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.07.

李崇银. 1995. 热带大气季节内振荡的几个基本问题 [J]. 热带气象学报, 1995, 11(3): 276–288. Li Chongyin. 1995. Some basic problems of intraseasonal oscillation in Tropical Atmosphere [J]. J. Trop. Meteor (in Chinese), 1995, 11(3): 276–288, doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.1995.03.011.

李峰, 丁一汇. 2004. 近 30 年夏季亚欧大陆中高纬度阻塞高压的统计特征 [J]. 气象学报, 62(3): 347–354. Li Feng, Ding Yihui. 2004. Statistical characteristic of atmospheric blocking in the Eurasia high mid–latitudes based on recent 30 year summers. [J]. Acta. Meteor. Sinica (in Chinese), 62: 347, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2004.03.009.

李峰, 丁一汇, 鲍媛媛. 2008. 2003 年淮河大水期间亚洲北部阻塞高压的形成特征 [J]. 大气科学, 2008, 32(3): 469–480. Li Feng, Ding Yihui, Bao Yuanyuan. 2003. A Study of the Forming Characteristics of Blocking High in Northern Asia during the Flood Period of the Huaihe River Basin in 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(3): 469–480, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.05.

李亚飞, 任荣彩. 2019. 北半球冬季各阻塞系统对大范围极端温度异常的单独和协同影响 [J]. 大气科学, 43(6): 1313–1328. Li Yafei, Ren Rongcai. 2019. The independent and

coordinative influences of the four blocking systems in the Northern Hemisphere winter on the occurrence of widespread extreme cold surface temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1313–1328, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1811.18214.

Liu H, Yang J, Zhang D, et al. 2014. Roles of synoptic to quasi–biweekly disturbances in generating the summer 2003 heavy rainfall in East China [J]. Mon. Wea. Rev., 142(2): 886–904, doi: 10.1175/MWR-D-13-00055.1.

Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. J. Atmos. Sci., 1971, 28(5): 702–708, doi: 10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2.

Matthews A J. 2000. Propagation mechanisms for the Madden–Julian oscillation [J]. Q. J. Roy. Meteor. Soc., 126(569): 2637–2651, doi: 10.1002/qj.49712656902.

Scherrer S C, Croci-Maspoli M, Schwierz C, et al. 2006. Two-dimensional indices of atmospheric blocking and their statistical relationship with winter climate patterns in the Euro-Atlantic region [J]. Int. J. Climate., 26(2): 233–249, doi: 10.1002/joc.1250.

沈爱华, 任广成, 王冰. 2008. 东亚阻塞高压与我国降水关系的分析及预测[J]. 气候与环境研究, 13(2): 205–211. Shen Aihua, Ren Guangcheng, Wang Bing. 2008. Analysis and Forecasting of relationship between East Asia blocking Situation and Precipitation of China in July [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 13(2): 205–211, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.02.10.

史湘军, 智协飞. 2007. 1950–2004 年欧亚大陆阻塞高压活动的统计特征 [J]. 南京气象学院学报, 30(3): 338–344. Shi Xiangjun, Zhi Xiefei. 2007. Statistical characteristics of blocking in Eurasia from 1950 to 2004 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 2007, 30(3): 338–344, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2007.03.007.

Tibaldi S, Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking [J]. Tellus A, 42(3): 343–365, doi: 10.1034/j.1600-0870.1990.t01-2-00003.x.

王倩云, 罗德海, 王佳妮. 2016. 欧洲地区夏季热浪的特征及其与阻塞环流的联系 [J]. 气候与环境研究, 21(4): 367–379. Wang Qinyun, Luo Dehai, Wang Jiani. 2016. Characteristics of summer heatwaves over Europe and their link with European blocking circulations [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 21(4): 367–379, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15022.

王遵娅, 丁一汇. 2008. 夏季长江中下游旱涝年季节内振荡气候特征 [J]. 应用气象学报, 19(6): 710–715. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climate features of intraseasonal oscillations of summer rainfalls over mid–lower reaches of Yangtze River in the flood and drought years [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 19(6): 710–715, doi: 10.11898/1001-7313.20080610.

Yang H, Li C. 2003. The relation between atmospheric intraseasonal oscillation and summer severe flood and drought in the Changjiang–Huaihe river basin [J]. Adv. Atmos. Sci., 20(4): 540–553, doi: 10.1007/BF02915497.

杨双艳, 李天明. 2020. 中高纬大气 ISO 对夏季鄂海阻高形成和维持的调节作用 [J]. 大气科学学报, 43(1): 104–115. Yang Shuangyan, Li Tianming. 2020. The role of intraseasonal oscillation at mid–high latitudes in regulating the formation and maintenance of Okhotsk blocking in boreal summer [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 43(1): 104–115, doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191001010.

Yang S Y, Li T. 2016. Intraseasonal variability of air temperature over the mid–high latitude Eurasia in boreal winter [J]. Climate Dyn., 47(7): 2155–2175, doi: 10.1007/s00382-015-2956-8.

Yang S Y, Li T. 2017. The role of intraseasonal variability at mid–high latitudes in regulating Pacific blockings during boreal winter [J]. Int. J. Climate., 37(S): 1248–1256, doi: 10.1002/joc.5080.

Yang S Y, Wu B Y, Zhang R H, et al. 2013a. The zonal propagating characteristics of low–frequency oscillation over the Eurasian mid–high latitude in boreal summer [J]. Sci. China: Earth Sci., 56(9): 1566–1575, doi: 10.1007/s11430-012-4576-z.

Yang S Y, Wu B Y, Zhang R H, et al. 2013b. Relationship between an abrupt drought–flood transition over mid–low reaches of the Yangtze River in 2011 and the intraseasonal oscillation over mid–high latitudes of East Asia [J]. Acta Meteorol. Sin., 27(2): 129–143, doi: 10.1007/s13351-013-0201-0.

姚秀萍, 于玉斌. 2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用 [J]. 大气科学, 29(6): 973–985. Yao Xiupin, Yu Yubin. 2005. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu rain during 2003 Meiyu period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(6): 973–985, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2005.06.13.

Zhao C, Li T, Yao S, et al. 2017. Intraseasonal variability of air temperature over East Asia in boreal summer [J]. Front. Earth Sci., 5: 63–74, doi: 10.3389/feart.2017.00063.

Zhu T, Yang J. 2021. Two types of mid–high–latitude low–frequency intraseasonal oscillations near the Ural Mountains during boreal summer [J]. J. Climate., 34(11): 1–56, doi: 10.1175/JCLI-D-20-0589.1.