

中高纬大气 ISO 对夏季鄂海阻高形成和维持的调节作用



通信作者简介:李天明,博士,教授/博士生导师。2004年获得夏威夷大学终身教授职位,2006年获得国家自然科学基金海外杰出青年科学家奖,2013年组建南京信息工程大学气候动力学研究中心,任中心主任,入选江苏省“双创团队”领军人才。2015年担任973计划项目首席科学家。长期从事热带海气相互作用、季风、季节内振荡和台风方面的研究,获得大量创新及高影响力的成果,是全球著名的热带天气和气候动力学专家,在国际知名学术期刊发表SCI收录论文300篇,论文总被引达1.1万余次。受邀担任国际学术期刊 *Journal of Climate* 责任编辑,WMO WWRP 季风工作组成员,WCRP 气候变率和可预测性计划(CLIVAR)/大气环流模式比较计划(AMIP)东亚气候(EAC)工作组成员,亚太经济合作组织韩国釜山气候中心(APCC)科学家咨询组成员。

杨双艳^①,李天明^{①②*}

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

② 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,檀香山 夏威夷 96822

摘要 运用1979—2015年的逐日NCEP-DOE再分析资料,探讨了夏季鄂霍次克海阻塞高压(简称“鄂海阻高”)与中高纬大气季节内振荡(简称“ISO”)之间的可能联系。研究发现,ISO扰动与夏季鄂海阻高在关键区(130°~160°E,60°~75°N)有最好的耦合关系,且关键区位势高度表现出显著的10~30d的振荡周期。超前滞后合成分析表明,与鄂海阻高相联系的ISO扰动具有明显的向西传播的特征。波活动通量分析结果显示,波能量在中高纬140°W附近累积,因此西传的ISO扰动可能源自中高纬140°W附近。对位势倾向方程的诊断结果显示,动力作用对关键区位势高度的时间变化起主要作用。进一步运用尺度分析表明,在夏季鄂海阻高发生和维持的过程中,ISO经向风引导的平均涡度平流对位势高度的时间变化起主导作用。

关键词 鄂海阻高;中高纬季节内振荡;波活动通量;位势倾向诊断

阻塞高压(简称“阻高”)是中高纬地区经向型气流阻断纬向型气流的结果,是中高纬地区最重要的大气环流持续性异常现象之一(Rex, 1950a, 1950b; Masato et al., 2012)。在亚洲区域,乌拉尔山地区和鄂霍次克海地区经常出现阻高(李峰和丁一汇, 2004; 季明霞等, 2008)。

研究表明,鄂霍次克海阻高(简称“鄂海阻高”)对我国降水,尤其是梅雨期的降水量有显著影响。鄂海阻高的强度与夏季长江流域梅雨期降水量存在明显的正相关(沈爱华等, 2008; 周宁芳和贾小龙, 2018)。鄂海阻高偏强时,欧亚中高纬地区以经向环流为主,冷暖空气在长江流域辐合,导致长江流域降水偏多(平凡等, 2014; 赵俊虎等, 2016)。鄂海阻高的维持是我国梅雨发生的重要大气环流条件,东亚夏季梅雨期异常的降水与鄂海阻高的建立密切相关。当鄂海阻高建立并稳定时,亚洲中高纬度及东亚东部地区的距平场易形成正-负-正的距平波列,东亚地区距平波列的这种分布形势及其相互作用常常造成东亚夏季梅雨期降水偏多(李维京, 1999; 张庆云和陶诗言, 2003; 张庆云等, 2008; 王小玲和丁一汇, 2013)。鄂海阻高的出现,使高纬冷空气直达中纬度,梅雨锋扰动加强,造成江淮流域汛期降水偏多(张庆云和陶诗言, 2003)。鄂海阻高是夏季江淮流域洪涝的基本环流型之一。江淮流域洪涝全国降水偏多时,欧洲地区和鄂海阻高同时存在;江淮流域洪涝其南北降水偏少时,只有鄂海阻高存在(于淑

* 联系人, E-mail: timli@hawaii.edu

2019-10-01 收稿, 2019-12-11 接受

国家重点研发计划(2018YFC1505803); 江苏省高校自然科学基金资助项目(18KJB170015); 南京信息工程大学人才引进启动基金(2018R027)

引用格式: 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 S Y, Li T M, 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*, 43(1): 104-115. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191001010. (in Chinese).

秋和林学椿,2006)。同时,鄂海阻高的发展是造成夏季东北多雨的重要因子(贾小龙和王谦谦,2006;丁婷和陈丽娟,2015)。受鄂海阻高的阻挡,冷空气在贝加尔湖附近堆积,有利于东北发生降水(李菲等,2016)。此外,夏季鄂海阻高的稳定维持,对华北平原严重干旱的形成(李春和孙照渤,2003)和东北冷涡的发展(梁红等,2009;沈伯竹等,2011;刘刚等,2015;苏丽欣等,2015;Liu et al.,2017)起重要作用。鉴于鄂海阻高对我国大范围地区天气和气候的影响,探讨鄂海阻高形成和维持的影响因子对于提高我国天气和气候事件的预报能力是十分重要的。

阻高活动除了受到波流相互作用(吴国雄等,1994;曹杰等,2006)、静止 Rossby 波(Hinton et al.,2009)、气候基本态(Austin,1980;陆日宇和黄荣辉,1999)、天气尺度环流(毕慕莹和丁一汇,1993;Nakamura et al.,1997;布和朝鲁等,2018)和年际尺度环流(Cheung et al.,2012)的影响外,还受到季节内尺度环流的影响。Simmons et al.(1983)指出,在拉尼娜事件发生年份,大气内部的季节内变率有利于中高纬地区阻高的形成,从而造成阻高天数的增加。Takaya and Nakamura(2005)的研究显示,北半球阻高的形成与冬季西伯利亚高压的季节内振荡有关。Schneidereit et al.(2012)的研究表明,中高纬大气季节内尺度波列有助于俄罗斯上空阻高的形成和维持。

MJO(Madden-Julian Oscillation)是热带地区季节内振荡(ISO, Intra-Seasonal Oscillation)的主要形式(Madden and Julian,1971,1972)。MJO 诱发的 Rossby 波能够显著地改变北半球热带外环流(Matthews et al.,2004),进而对北半球阻高的形成产生显著的影响(Cassou,2008;Hamill and Kiladis,2014)。Henderson et al.(2016)和 Henderson and Maloney(2018)定量地研究了 MJO 不同位相对北半球冬季阻高发生频率的影响程度。相对于季节平均而言,东太平洋阻高和大西洋阻高的发生频率在 MJO 第 3 位相显著减少,在 MJO 第 7 位相显著增加;而欧洲阻高的发生频率在 MJO 第 4 位相显著减少,在 MJO 第 6 位相显著增加。

然而,ISO 不仅仅存在于热带地区,也普遍存在于中高纬地区。研究表明,对流(Yang et al.,2010)、东北冷涡(刘慧斌等,2012)、南亚高压(Yang and Li,2016a)、非绝热加热(Wang and Duan,2015;Yang and Li,2017a)和阿留申低压(张盛曦和任雪娟,2017)等中、高纬环流系统均存在显著的季节内

振荡特征。中高纬 ISO 环流在夏季有明显向西南方向的传播特征(Yang et al.,2013a),而在冬季有明显向东南方向的传播特征(杨双艳等,2014;Yang and Li,2016b)。中高纬 ISO 环流对江淮流域的夏季旱涝事件有显著影响(毛江玉和吴国雄,2005;韩荣青等,2006;Yang et al.,2013b)。夏季中高纬 ISO 信号向南传播,与低纬向北传播的 ISO 信号汇合于长江流域,形成强的振荡中心,有利于长江流域产生强降水(王遵娅和丁一汇,2008)。中高纬 ISO 环流对华南持续性降水也有直接影响。中高纬 ISO 系统与低纬度 ISO 系统的配置和变化十分有利于华南前汛期持续性降水异常的发生(高建芸等,2013)。中高纬地区的 ISO 环流可通过 Rossby 波能量沿着低频遥相关波列的频散影响华南地区 ISO 的变化,进而造成华南前汛期降水的异常(苗芮等,2017)。在特殊年份,华南降水显著地依赖于中高纬地区高空的 ISO 环流。在对流层高层,中高纬地区存在一支自大西洋经欧亚大陆的 ISO 波列,该波列在欧亚大陆地区向东南传播,当 ISO 反气旋和气旋分别位于青藏高原和华北上空时,这种偶极型 ISO 环流之间的高空辐散有利于华南地区上升运动的发生,使华南降水偏强(孔晓宇等,2017)。以上关于中高纬地区 ISO 扰动的研究还表明,中高纬地区的大气变化主要存在 10~30 d 和 30~60 d 两个明显的低频振荡周期。

Yang and Li(2017b)发现中高纬地区 ISO 经向气流引导的行星涡度平流对太平洋阻高的形成起重要的促进作用。徐敏等(2013)指出,夏季副极地波导能从欧洲北部沿急流流向亚洲高纬度地区,并在鄂海地区形成强盛的 ISO 流函数正扰动中心。这种由欧洲北部正扰动下游效应导致在鄂海地区形成的正扰动中心,非常有利于夏季鄂海阻高的形成和维持,造成我国夏季雨带偏南。陈彩珠等(2016)研究指出,对流层中层有 4 种常见的中高纬 ISO 环流配置对福建省前汛期暴雨天气造成显著影响。其中两脊一槽型和一槽一脊型在 500 hPa 鄂海地区均存在强的 ISO 正高度异常中心,使鄂海阻高得以形成并稳定维持。可见,中高纬 ISO 环流异常对阻高的形成和维持存在明显的调节作用。

关于中高纬 ISO 扰动对夏季鄂海阻高形成和维持的调节作用,前人的研究仅给出了观测事实,本文主要解决以下几个问题:1)确定影响鄂海阻高形成和维持的中高纬 ISO 环流的关键区及影响鄂海阻高形成和维持的主要周期;2)揭示关键区影响鄂

海阻高形成和维持的 ISO 扰动的演变特征及扰动的来源;3)确定是动力过程还是热力过程对鄂海阻高的形成和维持起主要作用。

1 资料和方法

所用资料为 1979—2014 年(共 36 a)逐日 NCEP-DOE 再分析资料(Kanamitsu et al., 2002),包括纬向风场 u , 经向风场 v , 位势高度场 Z 和温度场 T 。运用 u 和 v 计算得到相对涡度 ζ 和流函数 Ψ 。本文参考 Tibaldi and Molteni(1990)的定义方法计算得到阻高指数,该方法在南北半球中高纬度具有普遍的适用性。该阻高识别方法在业务上应用比较成熟,且广泛应用于国际气象业务中,比如美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和中国气候中心(NCC)均采用该方法定义的阻塞指数来监测大气阻塞状况。针对每一个经度(经度间隔 2.5°),首先根据以下公式计算出 500 hPa 位势高度的梯度:

$$G_s = \frac{Z(\varphi_0) - Z(\varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s}, \quad (1)$$

$$G_N = \frac{Z(\varphi_n) - Z(\varphi_0)}{\varphi_n - \varphi_0}. \quad (2)$$

其中 G_s 和 G_N 分别表示向南和向北的 500 hPa 位势高度梯度; $\varphi_n = 80^\circ N + \delta$, $\varphi_0 = 60^\circ N + \delta$, $\varphi_s = 40^\circ N + \delta$, $\delta = -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ$ 。为分离持续时间较长的阻塞,在计算 G_s 和 G_N 之前,对 500 hPa 位势高度进行了 5 d 滑动平均。对某时某经度任意一个 δ 值,如果满足以下条件,则诊断为该经度发生了阻塞,满足条件的最大 G_s 值则定义为该经度上的阻塞指数:

$$G_s > 0, \quad (3)$$

$$G_N < -10 \text{ gpm}/(^\circ). \quad (4)$$

利用 Lanczos 带通滤波器(Duchon, 1979)对 36 a 的每个变量进行带通滤波(滤波之前,先去掉年循环及其前 4 个谐波)得到目标低频信号,然后提取 36 个夏季的低频信号。每年夏季定义为 6—8 月(JJA)。为了分析鄂海阻高发生时,哪一过程对位势高度异常起主要作用,对位势倾向方程进行了诊断。位势倾向方程可表示为(Holton, 1992):

$$\underbrace{\left[\nabla^2 + \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{f^2}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right]}_A \frac{\partial \Phi'}{\partial t} = -f \left(\underbrace{u_g \frac{\partial \zeta_g}{\partial x}}_{B1} + \underbrace{v_g \frac{\partial \zeta_g}{\partial y}}_{B2} + \underbrace{\beta v_g}_{B3} \right)' + \underbrace{\frac{f^2 R}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial p} \left(p^{-1} u_g \frac{\partial T}{\partial x} + p^{-1} v_g \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right]'}_{C1 \quad C2}. \quad (5)$$

其中:上标一撇表示季节内分量;下标 g 表示准地转

分量; ∇ 表示水平梯度算子; Φ 表示位势; σ 是静力稳定参数; R 是干空气的气体常数; f 是行星涡度; β 是 f 的经向梯度。其他符号遵循气象惯例。公式中所标注的每一项都包含括号前面的符号。比如 B3 项是指 $-f(\beta v_g)'$ 。在方程(5)中,A 项表示局地位势倾向,该项通常正比于 $-\frac{\partial \Phi'}{\partial t}$;B 项(B1+B2+B3)是与涡度平流有关的项,该项与绝对涡度平流成正比;C 项(C1+C2)表示温度平流随高度的变化项。

基于关键区对位势倾向方程中的最大贡献项进行尺度分析,即对每一个物理变量分解成三个分量:

$$A = \bar{A} + A' + A^* \quad (6)$$

其中: A 表示任意物理量;上划线 $\bar{\quad}$ 表示低频背景场(>30 d);上标'表示低频分量(10~30 d);上标*表示天气尺度分量(<10 d)。对最大贡献项进行尺度分析后一共得到 9 项,通过计算这 9 项的大小,得到主要的贡献项,从而确定 ISO 与何种尺度相互作用对鄂海阻高的形成和维持起主要作用。例如:如果 B2 项为最大贡献项,则对 $-v \frac{\partial \zeta}{\partial y}$ (为方便表述,此处省去 B2 项括号外面的物理量 f ,并略去下标 g)进行尺度分析,其分解式为:

$$\begin{aligned} -v \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= -(\bar{v} + v' + v^*) \frac{\partial (\bar{\zeta} + \zeta' + \zeta^*)}{\partial y} = \underbrace{-\bar{v} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y}}_1 - \underbrace{v' \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y}}_2 \\ &\quad - \underbrace{\bar{v} \frac{\partial \zeta'}{\partial y}}_3 - \underbrace{v' \frac{\partial \zeta'}{\partial y}}_4 - \underbrace{v^* \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y}}_5 - \underbrace{v^* \frac{\partial \zeta'}{\partial y}}_6 - \underbrace{v^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial y}}_7 \\ &\quad - \underbrace{v^* \frac{\partial \zeta'}{\partial y}}_8 - \underbrace{v^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial y}}_9. \end{aligned} \quad (7)$$

上述分解式中第 2、4、5、6、8 项均与 ISO 扰动有关,表示 ISO 扰动与各尺度相互作用的贡献;第 1 项是低频背景场的贡献;第 3、7 项表示天气尺度扰动与平均流相互作用的贡献;第 9 项表示天气尺度的贡献。

为研究中高纬地区罗斯贝波列能量的传播情况,本文还计算了波活动通量 W (Takaya and Nakamura, 2001),波活动通量 W 的计算公式如下:

$$W = \frac{1}{2|U|} \left[\bar{u}(\psi_x'^2 - \psi' \psi'_{xx}) + \bar{v}(\psi'_x \psi'_y - \psi' \psi'_{xy}) \right] + \frac{1}{2|U|} \left[\bar{u}(\psi'_x \psi'_y - \psi' \psi'_{xy}) + \bar{v}(\psi_y'^2 - \psi' \psi'_{yy}) \right]. \quad (8)$$

其中上划线 $\bar{\quad}$ 表示低频背景场,即 >30 d 的时间尺度;上标'表示低频场,即 10~30 d 的时间尺度;下

标 x 、 y 分别表示对 x 和 y 求偏导; u 、 v 分别表示纬向风和经向风; ψ 表示流函数; U 表示风矢量。

2 影响夏季鄂海阻高形成和维持的主要周期

之所以关注夏季的鄂海阻高,是因为在亚洲地区的夏季,鄂海阻高的发生频率最大,这从夏季阻高的发生频率随经度的演变(图 1a)上能够很清晰地显示。图 1a 中红色阴影区表示鄂海阻高区的经度范围($120^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$)。此外,相对于其他季节而言,鄂海阻高在夏季的出现频率也最大,这在鄂海阻高的发生频率随季节的演变(图 1b)中能很清楚地显示。

依据公式(1)–(4),计算夏季鄂海地区每个纬向格点($120^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$,间隔 2.5°)每次鄂海阻高发生时的阻高指数,并依次按经度(120°E , 122.5°E , 125°E , 127.5°E , ..., 160°E)将阻高指数拼接后构成阻高指数的时间序列,计算该序列与对应 500 hPa 位势高度场的空间相关系数,这样就得到它们之间相关系数的水平分布(图 2a)。图中黄色和绿色阴影区分别表示通过 0.05 和 0.01 的显著性水平区。由图 2a 可知,在($130^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$, $60^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}$)这个关键区(红色框所示区域),夏季鄂海阻高指数与位势高度场具有最好的耦合关系。对关键区区域平均的夏季 500 hPa 位势高度场(Z_{500})进行功率谱分析(图 2b)发现,夏季关键区的位势高度场主要表现出显著的 10~30 d 的低频周期。同时,关键区其他物理

量也表现出显著的 10~30 d 的振荡周期(图略)。

因此,夏季鄂海阻高与中高纬关键区 10~30 d ISO 扰动的关系最为密切。对关键区区域平均的 500 hPa 位势高度场进行 10~30 d 的带通滤波,得到高度场的低频时间序列(Z'_{500}),并对其标准化,其标准化时间序列如图 3 所示。同时,将发生鄂海阻高对应的时间序列在图中用蓝色粗线标识。与前人的研究结果一致(徐敏等, 2013; 陈彩珠等, 2016),中高纬地区 ISO 高度异常能够明显调节鄂海阻高的形成和维持。统计结果显示,超过 70% (约 72%)的阻高发生在 $Z'_{500} > 0$ 的时刻。同时在图 3 中,将鄂海阻高维持时间 ≥ 5 d 的事件用紫色柱状标识,这样的事件一共发生了 74 次。统计显示,阻高维持时间 ≥ 5 d 的每次事件中, $Z'_{500} > 0$ 的发生天数大都占每次事件总维持天数的一半以上,这种阻高维持期间 $Z'_{500} > 0$ 的发生天数占阻高维持天数一半以上的事件一共有 68 次,占总事件的 92% ($68/74 \approx 92\%$)。在阻高维持时间 ≥ 5 d 的每次事件中,将 Z'_{500} 超过 +1 个标准差的时刻在图 3 中用绿色柱状标识。统计分析表明,阻高维持时间 ≥ 5 d 的每次事件中,其间 Z'_{500} 至少有 1 d 超过 +1 个标准差的事件有 50 次,占总事件的 68% ($50/74 \approx 68\%$)。以上分析结果表明,夏季鄂海阻高的形成和维持与中高纬关键区的 ISO 活动确实存在紧密联系。

本文以下部分主要分析 10~30 d ISO 扰动对夏季鄂海阻高形成和维持的调节作用。选取阻高维持时间 ≥ 5 d 的每次事件中, Z'_{500} 至少有 1 d 超过 +1 个

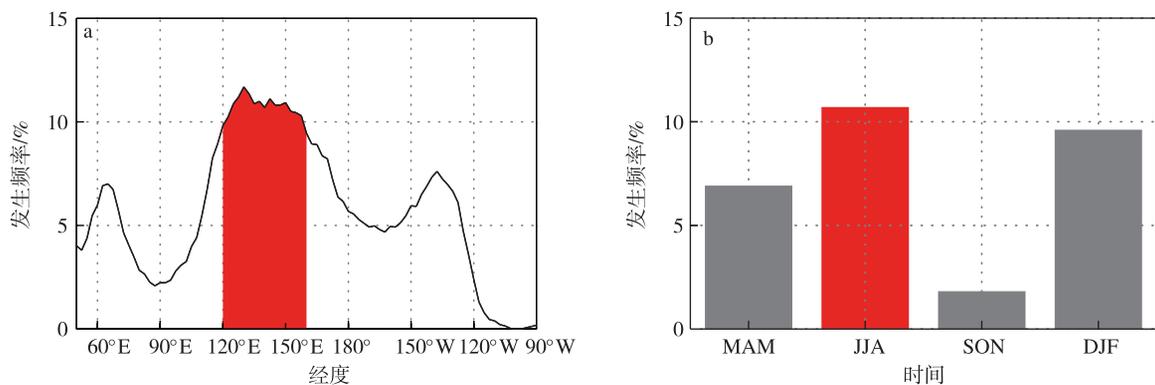


图 1 1979—2014 年夏季(6—8 月)阻高的发生频率随经度的演变(a;单位:%;红色阴影表示鄂海阻高区 $120^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$);鄂海阻高在春(March-April-May, MAM)、夏(June-July-August, JJA)、秋(September-October-November, SON)、冬(December-January-February, DJF)四个季节的发生频率(b;单位:%;红色柱状用来突出显示夏季的发生频率)

Fig.1 (a) Percentage frequency of blocking as a function of longitude during 1979—2014 boreal summer (JJA) (unit:%; the shaded longitude belt of $120^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ with the largest frequency of blocking denotes the selected area to determine the Okhotsk blocking activity); (b) percentage frequency of Okhotsk blocking during the four traditional seasons (spring: MAM, summer: JJA, autumn: SON, winter: DJF; unit:%; the red bar denotes the frequency in summer)

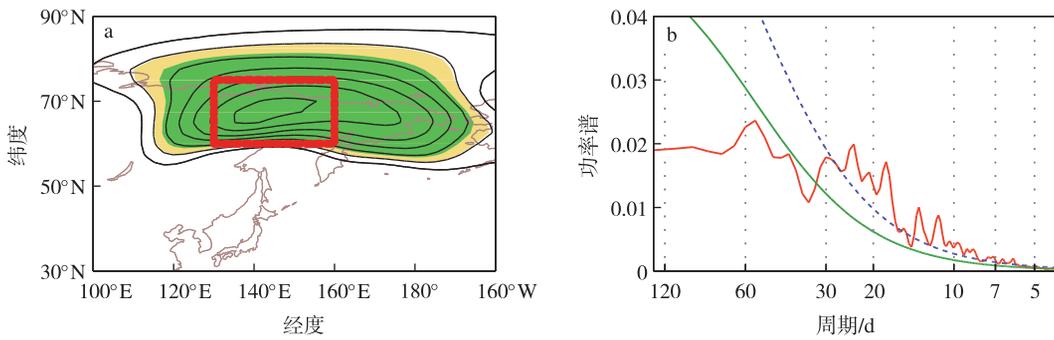


图2 夏季鄂海阻高指数与对应 500 hPa 位势高度空间场的相关系数(a;等值线间隔为 0.03;起始等值线为 0.03;黄(绿)色阴影区表示超过 0.05(0.01)的显著性水平区域;红色矩形框表示关键区(130°~160°E,60°~75°N);关键区区域平均的 500 hPa 位势高度场(去掉了年平均及其前 4 个谐波)的功率谱分析(b;红线为谱值,绿线和蓝线分别表示红噪声标准谱及其 0.05 的显著性水平线)

Fig.2 (a) Horizontal distributions of correlation coefficient between blocking index and the associated 500hPa-geopotential height (with contour interval of 0.03; minimum contour shown in the figure is 0.03; shadings exceed 0.01 (0.05) significance level; boxed area of great coefficient denotes a selected key area of 60°—75°N, 130°—160°E); (b) power spectral analysis of the box-averaged 500 hPa-geopotential height anomalies (with the mean and first four harmonics of the annual cycle removed; solid curve denotes power spectrum; solid and dashed lines denote red noise spectrum and its 0.05 significance level, respectively)

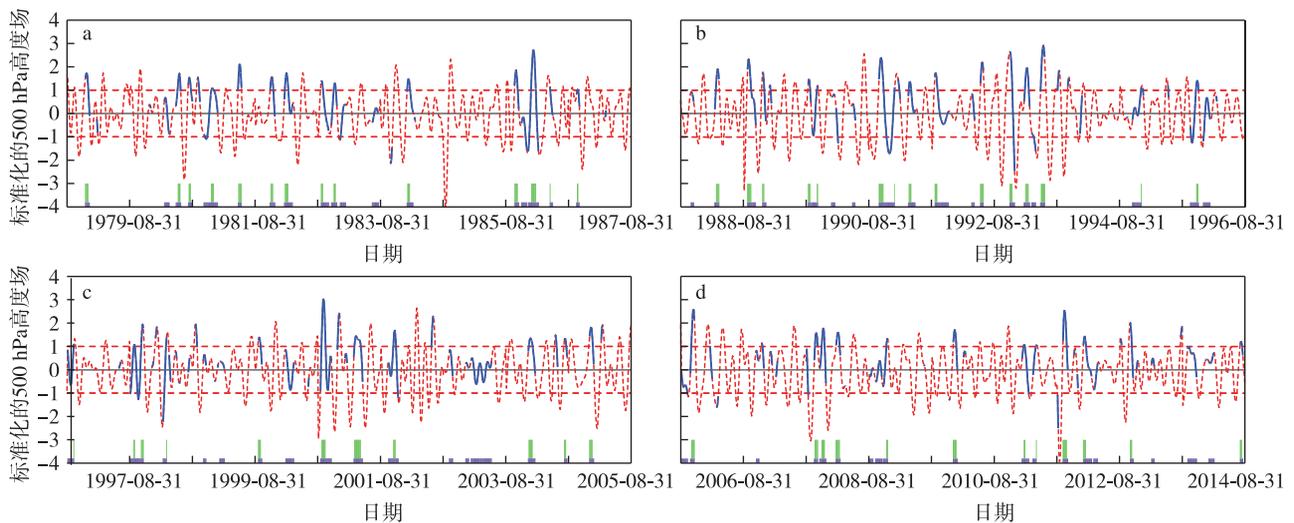


图3 夏季关键区区域平均的 10~30 d 500 hPa 高度场(Z'_{500}) 标准化时间序列(a—d;蓝色粗实线用于突出显示鄂海阻高发生的时刻;紫色柱状表示鄂海阻高维持时间 ≥ 5 d的事件的发生时刻;绿色柱状表示阻高维持时间 ≥ 5 d的事件中 Z'_{500} 超过+1个标准差的时刻;水平实线表示零线;水平虚线分别表示+1和-1个标准差)

Fig.3 (a—d) The normalized Z'_{500} averaged in the key area over 36 summers. A thick solid time point indicates when a blocking day occurs; the purple bars indicate when a blocking lasts more than 5 days; and the green bars indicate when the Z'_{500} exceeds +1 standard deviation during the blocking events lasting more than 5 days. The horizontal solid line is the zero line, and the horizontal dashed line indicates ± 1 standard deviation.

标准差的 50 次事件作为阻高事件进行合成分析,定义这 50 次事件 Z'_{500} 的每个对应峰值为第 0 天,每个事件峰值的前 1 天,2 天,3 天,⋯为-1 天,-2 天,-3 天,⋯;后 1 天,2 天,3 天,⋯为+1 天,+2 天,+3 天,⋯。接下来,主要运用超前滞后合成分析和动力诊断来揭示中高纬 ISO 扰动与夏季鄂海阻高形成和

维持之间的可能联系。

3 影响鄂海阻高的中高纬 ISO 扰动的演变特征

图 4 表示阻高事件发生过程中,10~30 d 500 hPa 高度场的时间演变。如图所示,从-10 天到-6

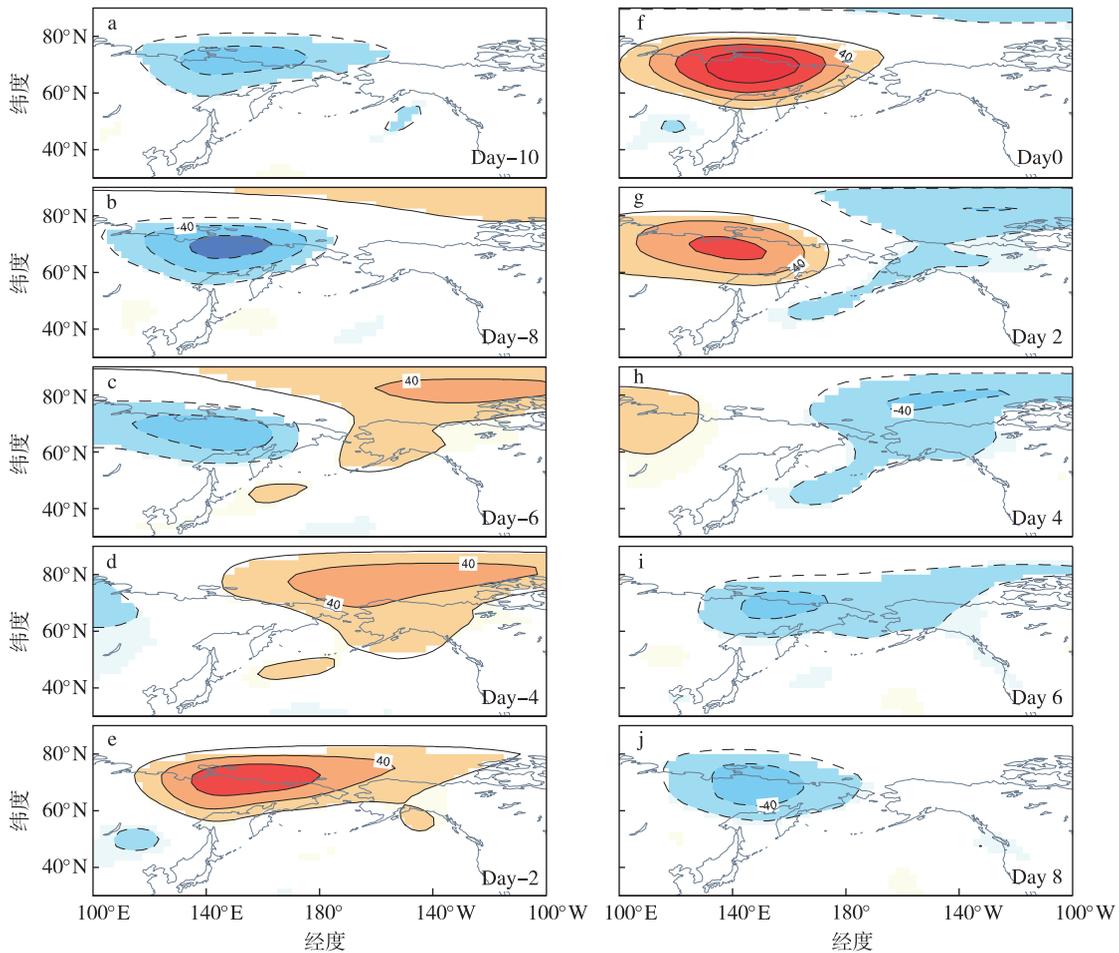


图 4 合成的 Z'_{500} (等值线间隔:20 gpm;0 等值线已略去)从 -10 天至 +8 天(a—j)的演变(阴影区表示超过 0.05 的显著性水平区)

Fig.4 Composite Z'_{500} (interval:20 gpm; zero contour omitted) from (a—j) day -10 to +8 in blocking events(shaded areas exceed 0.05 significance level)

天,关键区主要受负高度异常控制,同时在关键区的东边,逐渐出现正高度异常,并且该正异常逐渐加强并向西传播,至 0 天的时候传播到关键区(130°~160°E,60°~75°N),且强度达到最大。与此同时,在其东边中高纬地区产生新的负异常,此负异常和关键区的正异常均向西移动。随着负的高度异常向西传播,至+8 天的时候,关键区已基本受西传而来的负高度异常控制。

以上对图 4 的分析表明,鄂海阻高与向西传播的 ISO 扰动密切相关。从图 4 还可发现,向西传播的 ISO 信号源自 140°W 附近的中高纬地区。为何扰动源出现在 140°W 附近? 为寻找其可能的物理原因,基于公式(8)计算 500 hPa 层次上的二维波活动通量及其散度。

图 5 显示了阻高事件发生时合成的波活动通量和通量散度。从图 5 可看出,波活动通量主要是向

东的,显著的负通量散度发生在中高纬 140°W 附近。这表明尽管 ISO 扰动是向西传播的(参见图 4),但 ISO 扰动激发出的波能量主要是向东传播的,并且能量在中高纬 140°W 附近积累。猜测能量在中高纬 140°W 附近的累积可能是触发 ISO 扰动的重要过程,当然这需要进一步研究确认。

4 ISO 扰动对鄂海阻高的调节作用

为进一步分析关键区 ISO 扰动的特征,图 6 给出了关键区区域平均的 Z'_{500} 及其变化率 $\left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)'_{500}$ 随时间的演变。可以看出,最大的高度扰动异常发生在 0 天,而最大的高度异常的变化发生在 -4 天。接下来,将基于 -4 天,在关键区对位势倾向方程(5)进行诊断,分析是右端哪一些对左端的 A 项起主要贡献。

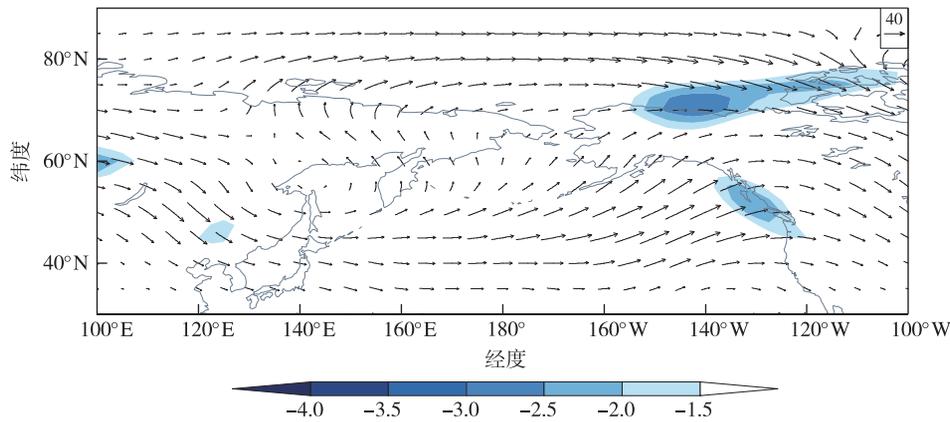


图5 合成的-6天至0天平均的波活动通量(箭头;单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)和波通量散度(阴影;单位: $10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$;阴影区均超过0.05的显著性水平检验)

Fig.5 Composite wave activity flux(vector;unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$), wave flux divergence (shading;unit: $10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) averaged from day -6 to 0 (shadings exceed 0.05 significance level)

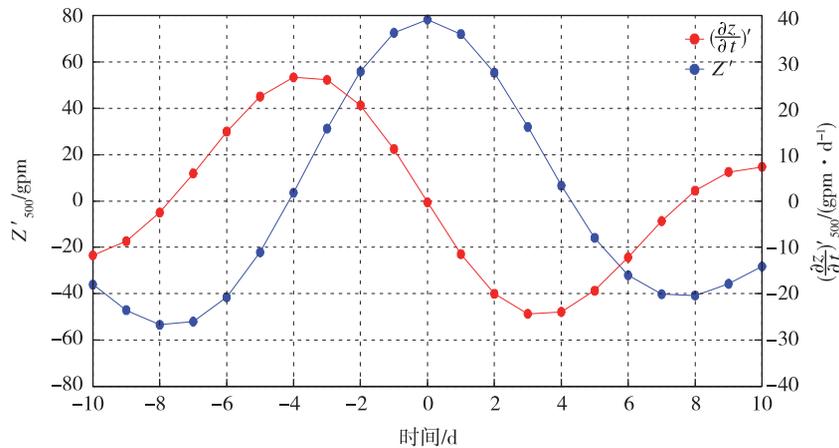


图6 合成的关键区区域平均的 Z'_{500} (蓝线;单位:gpm) 和 $\left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)'_{500}$ (红线;单位:gpm · d⁻¹) 随时间的演变

Fig.6 Composite box-averaged Z'_{500} (blue line;unit:gpm) and $\left(\frac{\partial Z}{\partial t}\right)'_{500}$ (red line;unit:gpm · d⁻¹) in blocking events as a function of time

在方程(5)中的A项涉及到 $\frac{\partial \Phi'}{\partial t}$ 的空间二次偏导,因此A项正比于 $-\frac{\partial \Phi'}{\partial t}$,也即正比于 $-\frac{\partial Z'}{\partial t}$,即 $A \propto -\frac{\partial Z'}{\partial t}$ 。因此,接下来基于方程(5)对关键区的位势高度的倾向进行诊断。同时注意到,在中高纬大尺度运动中,地转风近似等于实际的风场。

图7a给出了方程(5)右端各项在-4天时区域平均值以及它们的总和。由于 $A \propto -\frac{\partial Z'}{\partial t}$,方程(5)右端五项总和(由图7a中最右边的柱表示)为负

值,这与图6中显示的位势高度倾向值在-4天时为正值是一致的。由图7a可知,动力作用(B1+B2+B3)对鄂海阻高的形成和维持起主要作用,而热力作用(C1+C2)在鄂海阻高的形成和维持中所起作用较小。如图7a所示,对总和贡献最大的项是热力作用项中的B2项(即 $-f\left(v \frac{\partial \zeta'}{\partial y}\right)$,由图7a中的第二根柱表示)。这表明,在关键区季节内时间尺度上,方程(5)中左端的A项主要是由异常的经向涡度平流 $-f\left(v \frac{\partial \zeta'}{\partial y}\right)$ 引起的。接下来进一步在季节内时间尺度上诊断方程(7)右端9项中的哪一项对经向涡度

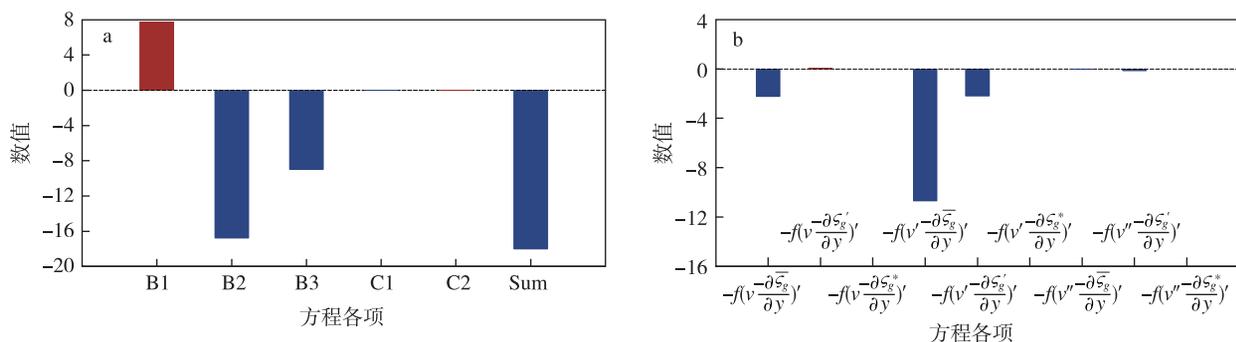


图7 方程(5)右端各项及它们的总和在-4天的值(a);基于方程(7)对B2项进行分解后得到的各项在-4天的值(b)(单位: 10^{-16} s^{-3})

Fig.7 (a) Budget terms in Equation (5) and their sum at day -4 in blocking events; (b) individual terms of B2 for day -4 based on Equation (7) (unit: 10^{-16} s^{-3})

平流项 $-f\left(v' \frac{\partial \zeta'}{\partial y}\right)$ 的贡献最大。诊断结果如图 7b 所示。由图 7b 可以看出,最大的贡献项来自 $-f\left(v' \frac{\partial \zeta'}{\partial y}\right)$ 。这意味着对鄂海阻高形成和维持起主要作用的是 ISO 经向风引导的平均涡度平流。

图 8 展示了 v' (矢量)、 $\bar{\zeta}$ (阴影) 和 $-f\left(v' \frac{\partial \zeta'}{\partial y}\right)$ (等值线) 在-4天时的水平分布情况。ISO 经向扰动风场在关键区主要表现为南风 ($v' > 0$), 而平均涡度在关键区基本上随着纬度升高是增加的 ($\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} > 0$)。在

关键区向北的 ISO 经向风场引导较低的平均涡度场到较高纬度 ($-f\left(v' \frac{\partial \zeta'}{\partial y}\right) < 0$), 从而使得关键区经向涡度平流主要表现为负值, 从而对负的位势高度的变化起积极贡献。可见, ISO 扰动和平均场的共同作用在鄂海阻高的形成和维持中起主导作用。

5 总结

本文运用 1979—2015 年共 36 a 的逐日 NCEP-DOE 再分析资料, 分析了中高纬 ISO 扰动对鄂海阻高形成和维持的调节作用。由于在亚洲地区的夏季, 鄂海阻高的发生频率最大, 且相对于其他季节而

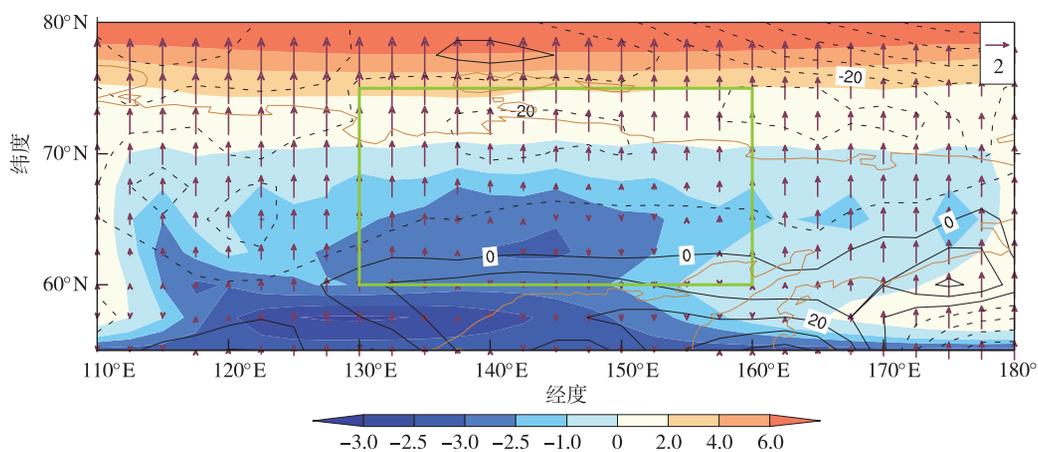


图8 ISO 经向风 v' (箭头; 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、背景涡度场 $\bar{\zeta}$ (阴影; 单位: 10^{-6} s^{-1}) 和经向涡度平流项 $-f\left(v' \frac{\partial \zeta'}{\partial y}\right)$ (等值线; 单位: 10^{-12} s^{-2}) 在-4天的水平分布(方框区域表示关键区 ($130^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{ E}$, $60^{\circ} \sim 75^{\circ} \text{ N}$))

Fig.8 Horizontal distribution of ISO meridional wind v' (vector; unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), mean vorticity $\bar{\zeta}$ (shaded; unit: 10^{-6} s^{-1}) and $-f\left(v' \frac{\partial \zeta'}{\partial y}\right)$ (contoured; unit: 10^{-12} s^{-2}) for day -4 (the boxed area indicates the key area of $60^{\circ} \sim 75^{\circ} \text{ N}$, $130^{\circ} \sim 160^{\circ} \text{ E}$)

言,鄂海阻高在夏季的发生频率也最大,因此以夏季为目标季节,研究 ISO 扰动对鄂海阻高的调节作用。研究发现,夏季 500 hPa 位势高度场在(130°~160°E,60°~75°N)这个关键区与鄂海阻高具有最好的耦合关系,并且关键区的位势高度场表现出显著的 10~30 d 的低频振荡周期。因此,主要探讨了中高纬地区 10~30 d ISO 扰动对鄂海阻高形成和维持的调节作用。

选取鄂海阻高维持时间 ≥ 5 d 的每次事件中,500 hPa 位势高度至少有 1 d 超过+1 个标准差的 50 次事件作为阻高事件进行合成分析。分析结果表明,与鄂海阻高活动密切相关的 ISO 扰动在中高纬地区表现出明显向西传播的特征。该 ISO 扰动源自 140°W 附近的中高纬地区。波活动通量分析结果显示,显著的负通量散度发生在中高纬 140°W 附

近,这表明中高纬 140°W 附近有明显的波能量累积,该能量累积在触发 ISO 扰动过程中可能起着重要作用。

为了更好地理解 ISO 扰动调节夏季鄂海阻高活动的具体过程,针对阻塞事件对位势倾向方程进行了动力诊断。诊断结果表明,动力作用对位势倾向起主导作用,即在季节内时间尺度上位势倾向的主要贡献项来自经向涡度平流项。进一步运用尺度分析法探讨 ISO 扰动调节鄂海阻高活动的主要过程。即将特定变量分解成低频背景场(>30 d)、低频分量(10~30 d)和天气尺度分量(<10 d)三个分量。结果表明,位势高度扰动随时间的变化率主要受 ISO 经向风引导的平均涡度平流的作用。因此,夏季鄂海阻高发生和维持过程中,ISO 扰动和平均场的共同作用起主导作用。

参考文献(References)

- Austin J F, 1980. The blocking of middle latitude westerly winds by planetary waves[J]. *Quart J Royal Meteor Soc*, 106(448): 327-350.
- 毕慕莹, 丁一汇, 1993. 1980 年夏季华北干旱时期东亚阻塞形势的位涡分析[J]. *应用气象学报*, 3(2): 145-156. Bi M Y, Ding Y H, 1993. A study of budget of potential vorticity of blocking high during the drought period in summer of 1980[J]. *J Appl Meteor Sci*, 3(2): 145-156. (in Chinese).
- 布和朝鲁, 彭京备, 谢作威, 等, 2018. 冬季大范围持续性极端低温事件与欧亚大陆大型斜脊斜槽系统研究进展[J]. *大气科学*, 42(3): 656-676. Buhe C, Peng J B, Xie Z W, et al., 2018. Recent progresses on the studies of wintertime extensive and persistent extreme cold events in China and large-scale tilted ridges and troughs over the Eurasian continent[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(3): 656-676. (in Chinese).
- 曹杰, 黄荣辉, 陶云, 2006. 夏季东北亚阻塞高压年际变化的一个物理机制[J]. *地球物理学报*, 49(1): 37-44. Cao J, Huang R H, Tao Y, 2006. A mechanism for interannual variations of Northeast Asian Blocking High in summer[J]. *Chin J Geophys*, 49(1): 37-44. (in Chinese).
- Cassou C, 2008. Intraseasonal interaction between the madden-Julian oscillation and the North Atlantic oscillation[J]. *Nature*, 455(7212): 523-527.
- 陈彩珠, 高建芸, 黄丽娜, 等, 2016. 大气低频变化对福建前汛期典型持续性暴雨影响[J]. *应用气象学报*, 27(1): 75-84. Chen C Z, Gao J Y, Huang L N, et al., 2016. Effects of atmospheric low-frequency variation on typical persistent heavy rains during pre-flood season in Fujian[J]. *J Appl Meteorol Sci*, 27(1): 75-84. (in Chinese).
- Cheung H N, Zhou W, Mok H Y, et al., 2012. Relationship between Ural-Siberian blocking and the East Asian winter monsoon in relation to the arctic oscillation and the El Niño-southern oscillation[J]. *J Climate*, 25(12): 4242-4257.
- 丁婷, 陈丽娟, 2015. 东北地区夏季旱涝的环流型及动力气候模式解释应用[J]. *高原气象*, 34(4): 1119-1130. Ding T, Chen L J, 2015. Circulation pattern for summer precipitation in Northeast China and application of dynamical climate model information[J]. *Plateau Meteorol*, 34(4): 1119-1130. (in Chinese).
- Duchon C E, 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions[J]. *J Appl Meteor*, 18(8): 1016-1022.
- 高建芸, 陈彩珠, 周信禹, 等, 2013. 2010 年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析[J]. *气象科技进展*, 3(1): 39-45. Gao J Y, Chen C Z, Zhou X Y, et al., 2013. Analysis of low-frequency features on typical persistent heavy rainfall during pre-flood season in Fujian Province in 2010[J]. *Adv Meteorol Sci Technol*, 3(1): 39-45. (in Chinese).
- Hamill T M, Kiladis G N, 2014. Skill of the MJO and Northern Hemisphere blocking in GEFS medium-range reforecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 142(2): 868-885.
- 韩荣青, 李维京, 董敏, 2006. 北半球副热带-中纬度太平洋大气季节内振荡的纬向传播与东亚夏季旱涝[J]. *气象学报*, 64(2): 149-163. Han R Q, Li W J, Dong M, 2006. The impact of 30-60 day oscillations over the subtropical Pacific on the East Asian summer rainfall[J]. *Acta Meteorol Sin*, 64(2): 149-163. (in Chinese).
- Henderson S A, Maloney E D, 2018. The impact of the Madden-Julian Oscillation on high-latitude winter blocking during El Niño—southern oscillation events[J]. *J Climate*, 31(13): 5293-5318.
- 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.
- Hinton T J, Hoskins B J, Martin G M, 2009. The influence of tropical sea surface temperatures and precipitation on North Pacific atmospheric blocking

- [J].Clim Dyn,33(4):549-563.
- Holton J R,1992.An introduction to dynamic meteorology[M].Academic Press:London.
- 季明霞,黄建平,王绍武,等,2008.冬季中高纬地区阻塞高压活动及其气候影响[J].高原气象,27(2):415-421. Ji M X,Huang J P,Wang S W, et al.,2008.Winter blocking episodes and impact on climate over East Asia[J].Plateau Meteorol,27(2):415-421.(in Chinese).
- 贾小龙,王谦谦,2006.东北地区汛期降水异常的大气环流特征分析[J].高原气象,25(2):309-318. Jia X L,Wang Q Q,2006.Analyses on general circulation character of precipitation anomaly in Northeast China flood season[J].Plateau Meteorol,25(2):309-318.(in Chinese).
- Kanamitsu M,Ebisuzaki W,Woollen J,et al.,2002.NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2)[J].Bull Amer Meteor Soc,83(11):1631-1644.
- 孔晓宇,毛江玉,吴国雄,2017.2002年夏季中高纬大气准双周振荡对华南降水的影响[J].大气科学,41(6):1204-1220. Kong X Y,Mao J Y, Wu G X,2017.Influence on the South China rainfall anomalies of the atmospheric quasi-biweekly oscillation in mid-high latitude during the summer of 2002[J].Chin J Atmos Sci,41(6):1204-1220.(in Chinese).
- 李春,孙照渤,2003.中纬度阻塞高压指数与华北夏季降水的联系[J].南京气象学院学报,26(4):458-464. Li C,Sun Z B,2003.Association of mid-latitude blocking high index with summer precipitation in North China[J].J Nanjing Inst Meteorol,26(4):458-464.(in Chinese).
- 李菲,赵春雨,林蓉,等,2016.辽宁省春播期第一场透雨特征及其与鄂霍次克海阻塞高压的关系[J].气象与环境学报,32(6):174-178. Li F, Zhao C Y,Lin R,et al.,2016.Characteristics of the first soaking rain in spring sowing season of Liaoning Province and their relationships with Okhotsk blocking high[J].J Meteorol Environ,32(6):174-178.(in Chinese).
- 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):347-354,324. Li F,Ding Y H,2004.Statistical characteristic of atmospheric blocking in the Eurasia high-mid latitudes based on recent 30-year summers[J].Acta Meteorol Sin,62(3):347-354, 324.(in Chinese).
- 李维京,1999.1998年大气环流异常及其对中国气候异常的影响[J].气象,25(4):20-25,57. Li W J,1999.General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China[J].Meteorol Mon,25(4):20-25,57.(in Chinese).
- 梁红,王元,郭正强,2009.夏季东北冷涡与副高、鄂海阻高的遥相关关系[J].气象科学,29(6):793-796. Liang H,Wang Y,Guo Z Q,2009.The teleconnection relationship between the Northeast cold vortex and the subtropical high,the Okhotsk high in summer[J].Sci Meteorol Sin,29(6): 793-796.(in Chinese).
- 刘刚,廉毅,颜鹏程,等,2015.5—8月东北冷涡客观识别分类及北半球大气环流特征分析[J].地理科学,35(8):1042-1050. Liu G,Lian Y,Yan P C,et al.,2015.The objective recognition and classification of Northeast cold vortex and the northern hemisphere atmospheric circulation characters in May to August[J].Sci Geogr Sin,35(8):1042-1050.(in Chinese).
- Liu G,Wang T,Yang X Y,et al.,2017.Climate characteristics of abnormal double-blocking activities over the Ural Mountains and Sea of Okhotsk[J].J Meteorol Res,31(4):694-707.
- 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 H B,Wen M,He J H,et al., 2012.Characteristics of the Northeast cold vortex at intraseasonal time scale and its impact[J].Chin J Atmos Sci,36(5):959-973.(in Chinese).
- 陆日宇,黄荣辉,1999.夏季西风带定常扰动对东北亚阻塞高压的影响[J].大气科学,23(5):533-542. Lu R Y,Huang R H,1999.Influence of the stationary disturbance in the westerlies on the Blocking Highs over the northeastern Asia in summer [J].Chin J Atmos Sci,23(5):533-542.(in Chinese).
- 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,28(5):702-708.
- Madden R A,Julian P R,1972.Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40—50 day period[J].J Atmos Sci,29(6):1109-1123.
- 毛江玉,吴国雄,2005.1991年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡[J].气象学报,63(5):762-770. Mao J Y,Wu G X,2005.Intraseasonal variability in the Yangtze-Huaihe river rainfall and subtropical high during the 1991 meiyu period[J].Acta Meteorol Sin,63(5):762-770.(in Chinese).
- Masato G,Hoskins B J,Woollings T J,2012.Wave-breaking characteristics of midlatitude blocking [J].Quart J Roy Meteorol Soc,138(666): 1285-1296.
- Matthews A J,Hoskins B J,Masutani M,2004.The global response to tropical heating in the Madden-Julian oscillation during the northern winter[J]. Quart J Roy Meteorol Soc,130(601):1991-2011.
- 苗芮,温敏,张人禾,2017.2010年华南前汛期持续性降水异常与准双周振荡[J].热带气象学报,33(2):155-166. Miao R,Wen M,Zhang R H, 2017.Persistent precipitation anomalies and quasi-biweekly oscillation during the annually first rainy season over South China in 2010[J].J Trop Meteorol,33(2):155-166.(in Chinese).
- Nakamura H,Nakamura M,Anderson J L,1997.The role of high-and low-frequency dynamics in blocking formation[J].Mon Wea Rev,125(9): 2074-2093.
- 平凡,唐细坝,高守亭,等,2014.长江和淮河流域汛期洪涝大气环流特征的比较[J].中国科学:地球科学,44(4):766-782. Ping F,Tang X B, Gao S T,et al.,2014.A comparative study of the atmospheric circulations associated with rainy-season floods between the Yangtze and Huaihe River Basins [J].Sci China Earth Sci,44(4):766-782.(in Chinese).
- Reed D F,1950a.Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate.Part I:an aerological study of blocking action[J].Tellus,2(3):196-211.

- Rex D F, 1950b. Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. Part II: the climatology of blocking action [J]. *Tellus*, 2(4): 275-301.
- Schneiderreit A, Schubert S, Vargin P, et al., 2012. Large-scale flow and the long-lasting blocking high over Russia: summer 2010 [J]. *Mon Wea Rev*, 140(9): 2967-2981.
- 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 A H, Ren G C, Wang B, 2008. Analysis and forecasting of relationship between East-Asia blocking situation and precipitation of China in July [J]. *Clim Environ Res*, 13(2): 205-211. (in Chinese).
- 沈柏竹, 林中达, 陆日宇, 等, 2011. 影响东北亚初夏和盛夏降水和年际可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]. *Sci China Earth Sci.*, 41(3): 402-412. (in Chinese).
- Simmons A J, Wallace J M, Branstator G W, 1983. Barotropic wave propagation and instability, and atmospheric teleconnection patterns [J]. *J Atmos Sci*, 40(6): 1363-1392.
- 苏丽欣, 廉毅, 李尚锋, 等, 2015. 东北区夏季低温事件概率空间分布与亚洲阻塞流型域及其冷空气活动路径 [J]. *地理科学*, 35(2): 251-258. Su L X, Lian Y, Li S F, et al., 2015. Distribution of summer cool events over Northeast China and the Asian blocking regime and cold air path [J]. *Sci Geogr Sin*, 35(2): 251-258. (in Chinese).
- Takaya K, Nakamura H, 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J Atmos Sci*, 58(6): 608-627.
- Takaya K, Nakamura H, 2005. Geographical dependence of upper-level blocking formation associated with intraseasonal amplification of the Siberian high [J]. *J Atmos Sci*, 62(12): 4441-4449.
- Tibaldi S, Molteni F, 1990. On the operational predictability of blocking [J]. *Tellus A: Dyn Meteorol Oceanogr*, 42(3): 343-365.
- Wang M R, Duan A M, 2015. Quasi-biweekly oscillation over the Tibetan Plateau and its link with the Asian summer monsoon [J]. *J Climate*, 28(12): 4921-4940.
- 王小玲, 丁一汇, 2013. 2010年夏季欧亚异常阻高演变过程及对天气气候的影响 [J]. *气象*, 39(9): 1089-1095. Wang X L, Ding Y H, 2013. Evolution of the exceptional blocking over Eurasia and its impact on weather and climate in 2010 summer [J]. *Meteor Mon*, 39(9): 1089-1095. (in Chinese).
- 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 Z Y, Ding Y H, 2008. Climatic features of intraseasonal oscillations of summer rainfalls over mid-lower reaches of the Yangtze River in the flood and drought years [J]. *J Appl Meteorol Sci*, 19(6): 710-715. (in Chinese).
- 吴国雄, 刘辉, 陈飞, 等, 1994. 时变涡动输送和阻高形成—1980年夏中国的持续异常天气 [J]. *气象学报*, 52(3): 308-320. Wu G X, Liu H, Chen F, et al., 1994. Transient eddy transfer and formation of blocking high on the persistently abnormal weather in the summer of 1980 [J]. *Acta Meteorol Sin*, 52(3): 308-320. (in Chinese).
- 徐敏, 丁小俊, 罗连升, 等, 2013. 淮河流域夏季旱涝急转的低频环流成因 [J]. *气象学报*, 71(1): 86-95. Xu M, Ding X J, Luo L S, et al., 2013. A possible cause of the low frequency circulation of summertime drought-flood abrupt alternation over the Huaihe River basin [J]. *Acta Meteorol Sin*, 71(1): 86-95. (in Chinese).
- Yang S Y, Li T, 2016a. Zonal shift of the South Asian High on the subseasonal time-scale and its relation to the summer rainfall anomaly in China [J]. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 142(699): 2324-2335.
- Yang S Y, Li T, 2016b. Intraseasonal variability of air temperature over the mid-high latitude Eurasia in boreal winter [J]. *Clim Dyn*, 47(7/8): 2155-2175.
- Yang S Y, Li T, 2017a. Causes of intraseasonal diabatic heating variability over and near the Tibetan Plateau in boreal summer [J]. *Clim Dyn*, 49(7/8): 2385-2406.
- Yang S Y, Li T, 2017b. The role of intraseasonal variability at mid-high latitudes in regulating Pacific blockings during boreal winter [J]. *Int J Climatol*, 37(S): 1248-1256.
- Yang J, Wang B, Wang B, et al., 2010. Biweekly and 21~30-day variations of the subtropical summer monsoon rainfall over the lower reach of the Yangtze River basin [J]. *J Climate*, 23(5): 1146-1159.
- 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.
- 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.
- 杨双艳, 鲍炳义, 张人禾, 等, 2014. 冬季欧亚中高纬大气低频振荡的传播及其与欧亚遥相关型的关系 [J]. *大气科学*, 38(1): 121-132. Yang S Y, Wu B Y, Zhang R H, et al., 2014. Propagation of low-frequency oscillation over Eurasian mid-high latitude in winter and its association with the Eurasian teleconnection pattern [J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(1): 121-132. (in Chinese).
- 于淑秋, 林学椿, 2006. 两类江淮大水的大气环流特征 [J]. *气象学报*, 64(5): 605-613. Yu S Q, Lin X C, 2006. Characteristics of two general circu-

- lation patterns during floods over the changjiang-Huaihe river valley[J].Acta Meteorol Sin,64(5):605-613.(in Chinese).
- 张庆云,陶诗言,2003.夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征[J].大气科学,27(3):369-380. Zhang Q Y,Tao S Y,2003.The anomalous subtropical anticyclone in Western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer[J].Chin J Atmos Sci,27(3):369-380.(in Chinese).
- 张庆云,陶诗言,彭京备,2008.我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J].大气科学,32(4):815-825. Zhang Q Y,Tao S Y,Peng J B,2008.The studies of meteorological disasters over China[J].Chin J Atmos Sci,32(4):815-825.(in Chinese).
- 张盛曦,任雪娟,2017.阿留申低压低频变化及其相关的瞬变动力学过程分析[J].气象科学,37(1):1-9. Zhang S X, Ren X J,2017.Low-frequency variability of the Aleutian Low and its related synoptic transient eddy dynamic process[J].J Meteorol Sci,37(1):1-9.(in Chinese).
- 赵俊虎,杨柳,曾宇星,等,2016.夏季长江中下游和华南两类雨型的环流特征及预测信号[J].大气科学,40(6):1182-1198. Zhao J H,Yang L,Zeng Y X,et al.,2016.Analysis of atmospheric circulation and prediction signals for summer rainfall patterns in southern China[J].Chin J Atmos Sci,40(6):1182-1198.(in Chinese).
- 周宁芳,贾小龙,2018.NCEP CFSv2 对北半球夏季中高纬阻塞高压的预测检验[J].高原气象,37(2):469-480. Zhou N F,Jia X L,2018.Check analysis of the prediction of Northern Hemisphere blocking in summer by NCEP CFSv2[J].Plateau Meteorol,37(2):469-480.(in Chinese).

The role of intraseasonal oscillation at mid-high latitudes in regulating the formation and maintenance of Okhotsk blocking in boreal summer

YANG Shuangyan¹, LI Tim^{1,2}

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster(CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

²International Pacific Research Center, Department of Atmospheric Sciences, University of Hawaii at Manoa, Honolulu 96822, USA

In this study, by using daily data from the Department of Energy Reanalysis at the National Center for Environmental Prediction, dating from 1979 to 2015, we investigated the connection between Okhotsk blockings and mid-high latitude atmospheric intraseasonal oscillation (ISO) in the boreal winter. The results showed that the ISO perturbation over a key area of 60°—75°N, 130°—160°E is the most greatly co-variated with Okhotsk blockings. The averaged geopotential height over this key area exhibits a statistically significant 10 to 30-day periodicity. By applying lead-lag composite analysis, it is revealed that the ISO perturbation associated with the Okhotsk blocking activity exhibits pronounced westward propagation. The perturbation initiates at about 140°W, triggered by intraseasonal wave energy accumulation. A geopotential tendency diagnosis reveals that the time change rate of the geopotential height over the key area is primarily attributed to the dynamic process. In addition, the results of a scale analysis show that the advection of mean vorticity by the ISO meridional flow plays a dominant role in the time change rate of the geopotential height during the occurrence and maintenance of the summertime Okhotsk blockings.

Okhotsk blocking; intraseasonal oscillation at mid-high latitude; wave activity flux; diagnosis of geopotential tendency

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191001010

(责任编辑:刘菲)