

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. 气象, 39(9): 1089-1095.

2010年夏季欧亚异常阻高演变过程 及对天气气候的影响^{* 1}

王小玲^{1,2,3} 丁一汇³

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

提 要: 2010年6—8月, 北半球存在欧亚遥相关, 异常最早出现在北大西洋高空急流出口区, 为负扰动, 扰动沿遥相关波列向下游传播, 造成莫斯科地区的高温热浪以及巴基斯坦与中国西北和东北部的暴雨洪涝。遥相关分析表明, 急流出口区的负扰动首先引起俄罗斯西部的正扰动, 阻塞高压发展, 造成持续高温干旱; 之后引起西亚北部的负扰动, 造成冷空气频繁南下, 与北上和西进的印度季风交汇在巴基斯坦北部, 造成极严重的洪涝; 8月初扰动沿高空急流继续向下游传播, 在我国西北、东北以及朝鲜半岛造成洪涝, 甘肃舟曲突发性大暴雨和泥石流以及松花江暴雨就发生在这个时期。由于2010年夏季整个欧亚地区经向型环流异常发展, 高空急流经向分量很大, 这导致高、低纬冷暖空气在不同地区持续相互作用, 不仅使阻塞高压在中高纬俄罗斯西部异常发展、强大和持续, 而且使低纬巴基斯坦发生严重洪涝, 以及我国中纬度地区的强烈暴雨。季风活动在引发上述暴雨洪涝起着十分关键的作用, 分别表现为来自低纬阿拉伯海和孟加拉湾的两支暖湿气流与沿着阻高东侧南下的冷空气在巴基斯坦北部上空交汇; 来自印度洋、太平洋的暖湿气流和中纬度西风带的水汽在我国东北以及朝鲜半岛上空交汇。

关键词: 2010年夏季, 欧亚环流, 阻高, 遥相关, 热浪, 洪水

中图分类号: P461

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.09.001

Evolution of the Exceptional Blocking High over Eurasia and Its Impact on Weather and Climate in 2010 Summer

WANG Xiaoling^{1,2,3} DING Yihui³

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Laboratory of Climate Studies of CMA, National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: During June—August 2010, significant circumglobal teleconnections existed in the Northern Hemisphere which originated from the negative disturbance around the exit of upper-level jet stream over the Atlantic. The disturbance propagated downstream along the teleconnection wave train, causing Russian heat wave, heavy rains and floods in Pakistan and northwestern and northeastern China. The teleconnection analysis shows that the negative disturbance firstly caused positive perturbation and the development of blocking high in western Russia, resulting in persisting high temperature and drought. Secondly, the negative disturbance propagated to northern West Asia, causing cold air to move southward and meet the northward and westward Indian summer monsoons in northern Pakistan and produced torrential rains. In early August, the disturbance continued to propagate downstream along the upper-level jet stream over

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB950404)资助

2012年9月14日收稿; 2013年2月26日收修定稿

第一作者: 王小玲, 主要从事环流异常及气候变化研究. Email: xlwang@cma.gov.cn

Asia, causing floods in northwestern and northeastern China and the Korea Peninsula. The sudden rainstorm and landslide in Zhouqu, Gansu Province and the extremely heavy rain in Songhuajiang River region occurred just in this stage. The meridional circulation over the Eurasia developed exceptionally during 2010 summer and the meridional cell of the upper-level jet stream was great, causing cold air from high latitudes and warm air from low latitudes to interact continuously. This induced the establishing, strengthening, and maintaining of high-latitude blocking high in western Russian, and low-latitude severe floods in Pakistan and rainstorm in mid-latitudes of China. Monsoons acted as a key factor for the heavy rains and floods with the display of interaction of two warm and humid air flows from the Arabian Sea and Bay of Bengal and the southward cold air flow along the blocking high over northern Pakistan, as well as the interaction of warm and humid air flows from the Indian Ocean and the Pacific and the moisture from westerlies over northeastern China and the Korea Peninsula.

Key words: 2010 summer, Eurasia circulation, blocking high, teleconnection, heat wave, flood

引 言

自 2010 年 6 月中旬起,俄罗斯西部上空持续维持阻塞高压近 2 个月(Dole et al, 2011; Grumm, 2011)。作为中高纬地区典型的持续性环流异常,阻塞高压通过上下游效应影响大范围地区的天气气候(叶笃正等, 1962; Dole, 1986; 赵振国, 1999; 丁一汇等, 2008)。先是俄罗斯出现持续高温天气,强烈的高温引发多处森林大火;接下来巴基斯坦经历了严重洪涝(Houze et al., 2011);在我国,甘肃舟曲发生严重暴雨泥石流,东北地区则出现暴雨洪涝(国家气候中心, 2011);而日本则经历了 1898 年以来的最热夏季(WMO, 2011)。这一系列的极端天气和气候事件与局部海域海温异常升高引起大气环流异常,从而改变了季风有直接关系(Trenberth et al, 2012)。2010 年夏季俄罗斯西部阻塞高压(以下简称阻高)维持时间之久,引起的高温和洪涝之最,以及社会经济影响,使得这次事件备受关注。我国的重大洪涝与阻高的维持有重要联系(赵振国, 1999),这次阻高对我国有什么影响,其发展过程如何,弄清这些问题对我国的气候监测和预测有重要意义。本文重点分析了 2010 年夏季俄罗斯西部阻高的发展演变过程,以及下游环流形势和天气气候特点,讨论阻塞高压的启动机制,以及上游扰动在欧亚地区的传播特征,以期对我国的短期气候预测提供理论依据。

1 资料和方法

本文所用资料为 1948—2010 年 NCEP 逐日再

分析资料,要素包括位势高度,经、纬向风速,绝对湿度,地表面气压和垂直速度。根据 Green(1977)的算法,计算了 300 hPa 准地转位涡,以及平均流和瞬变流分别对位涡的输送(分别为 $\bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla \bar{q}$ 和 $\overline{\mathbf{V}' \cdot \nabla q'}$)。垂直积分的水汽输送自地面积分至 300 hPa。欧亚地区(45°~65°N, 0°~150°E)西风指数采用赵振国(1999)的算法。利用吴国雄等(1994)的方法,计算了时间平均动能向扰动动能的转化[公式(1)],以及扰动拟能向时间平均拟能的转化,在计算之前,首先通过滤波提取 2~6 天的天气扰动;根据 Ding 等(2005)确定北半球夏季遥相关波列的方法,计算了 200 hPa 高度场的一点相关系数。气候平均值采用 1971—2000 年平均。

$$C(\bar{K} \rightarrow K_r) = \frac{\overline{u'v'}}{a} \left[\cos\varphi \frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\frac{\bar{u}}{\cos\varphi} \right) + \frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial \bar{v}}{\partial\lambda} \right] - \frac{1}{a} \left[\overline{(v')^2} - \overline{(u')^2} \right] \left[\frac{1}{\cos\varphi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial\lambda} - \tan\varphi \cdot \bar{v} \right] \quad (1)$$

2 阻塞高压的发展演变过程及重要天气特征

从逐候的 500 hPa 高度演变,可以清晰地看到俄罗斯西部阻塞高压的发展演变过程。根据逐候的环流演变以及对下游天气气候的影响,可将阻塞的发展过程分为 4 个阶段(图 1): I 启动阶段(6 月 2—5 候); II 阻塞发展期(6 月 6 候至 7 月 4 候); III 阻塞鼎盛期(7 月 5 候至 8 月 1 候); IV 阻塞衰退期(8 月 2—4 候)。

I 启动阶段:自 6 月 2 候起,随着北大西洋东岸低槽加深并沿地中海向东移动,其槽前的偏南气流

向北输送了大量水汽,在西欧造成了明显降水;以后空气变干,并继续向东北输送,致使俄罗斯西部高度场逐渐升高,至 6 月 5 候,阻塞形势基本建立。这期间,欧亚大陆高纬地区为低槽控制,而中纬度呈多短波槽脊活动的纬向环流(图 1a)。这时上游高空急流开始出现分支。值得注意的是,6 月 5 候,北大西洋东部又有低槽出现。

II 阻塞发展期:6 月 6 候起,北大西洋东部的低槽迅速加深,欧亚地区的环流经向度随之加大(西风指数迅速减弱,图略),高压脊不断加强并向北扩展至斯堪的纳维亚半岛,高压脊与地中海低槽共同形成偶极子型的阻塞形势(图 1b)。贝加尔湖以北地区为宽广槽区,下游东北亚和我国东北、朝鲜半岛亦为偶极型的阻塞形势。结果在欧亚地区上下游形成一个稳定的阻高,这使欧亚环流能够在长时期稳定下来,这是造成这时期南北冷暖空气交汇的大尺度环流背景。在阻塞维持期间,高空急流中心有明显

的东传过程,并沿阻高南北两侧出现分支(图 2)。这一时期欧亚大陆上空急流核位于欧洲东南部和西亚北部上空(图 2a),此时期偶极子型阻高系统的低压槽位于急流的入口区右侧,欧洲东南部出现了异常降水;另一个急流核位于我国西北部上空。俄罗斯西部为大范围的水汽辐散区,这使得旱情持续发展(图略)。

III 阻塞鼎盛期(巴基斯坦大水):东欧至俄罗斯西部的 Ω 型的阻塞形势发展至鼎盛时期,并出现闭合中心,正距平中心超过 12 dagpm(图 1c)。分别位于高压上游和下游的西欧低槽和巴尔克什湖低槽向东南和西南方向伸展,巴尔克什湖低槽南伸到了 30°N 附近。同时,西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)深入我国内陆并北抬。高空急流核向东北方向伸展,强度有所加强,北美—北大西洋急流也有所加强(图 2b)。位于阻高东部的巴尔克什湖低槽异常向西南方向伸展至 30°N 附近,巴基斯坦北

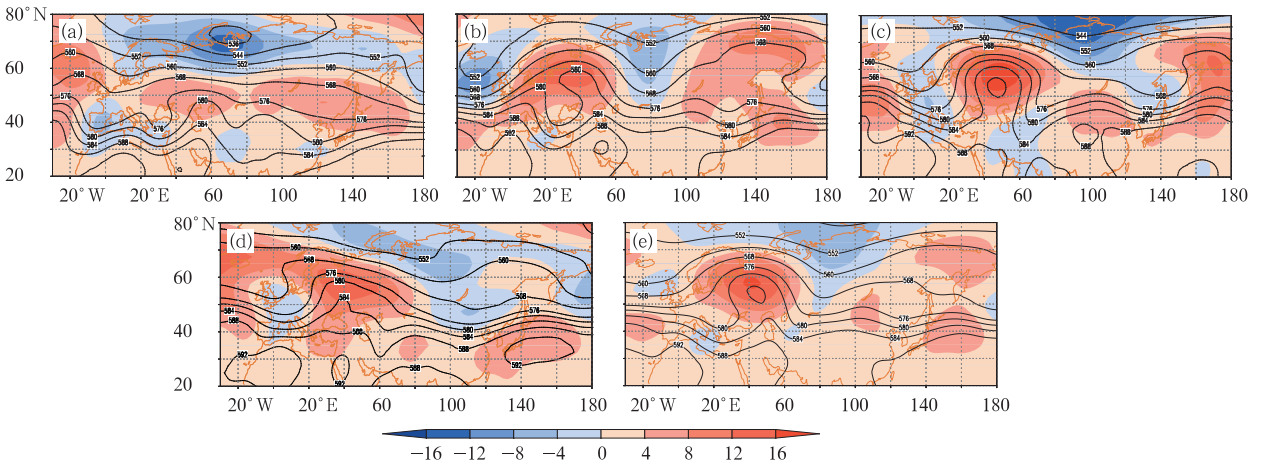


图 1 2010 年夏季欧亚地区 500 hPa 高度及距平(单位: dagpm)

(a) 6 月 2—5 候, (b) 6 月 6 候至 7 月 4 候, (c) 7 月 5 候至 8 月 1 候, (d) 8 月 2—4 候, (e) 6 月 5 候至 8 月 3 候

Fig. 1 Geopotential height and anomalies at 500 hPa over Eurasia during 2010 summer (unit: dagpm)

(a) June 6 to 25, (b) June 26 to July 20, (c) July 21 to August 5, (d) August 6 to 20, (e) June 21 to Augtst 15

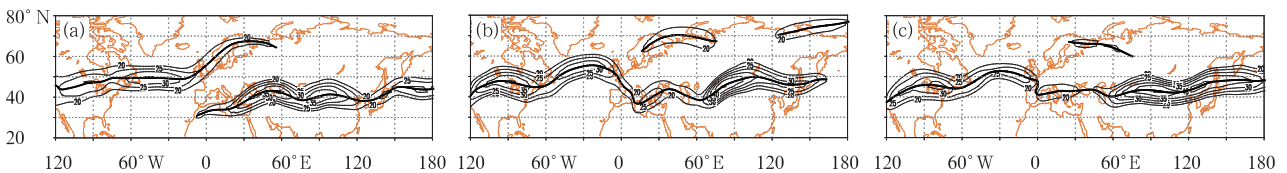


图 2 2010 年夏季高空急流(200 hPa 等风速线)的平均位置(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 6 月 6 候至 7 月 4 候, (b) 7 月 5 候至 8 月 1 候, (c) 8 月 2—4 候

Fig. 2 The jet stream at 200 hPa in the upper troposphere with the magnitude greater than $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ during 2010 summer (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) June 26 to July 20, (b) July 21 to August 5, (c) August 6 to 20

部出现大暴雨,这一区域处于深厚的上升运动区(图 3),且正好位于高空急流中心入口区右侧,索马里越赤道低空急流北部(图 4a)。从整层水汽输送可以看出,巴基斯坦大水的水汽来源有两个通道,一支来自阿拉伯海,在印度西北部上空转向西北输送;另一支来自孟加拉湾,在喜马拉雅山南麓转向西北方向,这正是 Houze 等(2011)指出的异常向西移动的孟加拉湾低压。暖湿气团($\theta_{se} \geq 340$ K)异常向北伸展至 40°N 。来自低纬的两支暖湿气流与沿着阻高东侧南下的冷空气在巴基斯坦北部上空交汇,高低纬冷暖空气的相互作用对大暴雨的形成起到了至关重要的作用(Hong et al, 2011)。

IV 阻塞衰退期(我国东北松花江、鸭绿江大水):西伯利亚低槽向东南扩展,贝加尔湖至我国东

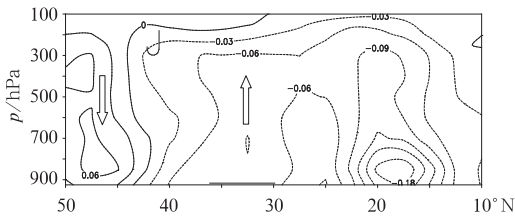
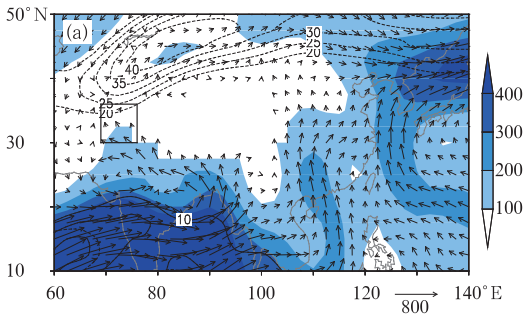


图 3 2010 年 7 月 5 候至 8 月 1 候平均的沿 72.5°E 垂直速度剖面

(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, J 表示高空急流的位置,横坐标上粗线表示巴基斯坦大水的位置,箭头分别表示上升/下沉运动)

Fig. 3 Section of vertical velocity along 72.5°E from July 21 to August 5, 2010

(unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, J illustrates the position of the jet stream at 200 hPa, solid line along the zonal axis illustrates the heavy rain in northern Pakistan, vector illustrates vertical upward/downward motion)



北部为低槽控制。西太副高进一步向西扩展,592 dagpm 闭合中心位于日本上空(图 1d)。受下游高压系统的阻挡,降雨系统(低涡、切变线)在东北亚持续发展,造成该地区暴雨洪涝。8 月 19 日,随着一场冷空气到来,上游阻高迅速崩溃(WMO, 2011),以后下游地区也迅速转变为平直环流型。在这一阶段,高空急流中心继续向东传播,急流核位于我国北方至朝鲜半岛上空(图 2c)。亚洲季风区的水汽输送由前期集中在印度季风区转向东亚季风区,同时,中纬度西风带也出现较强的水汽输送(图 4b)。分别来自西风带、印度季风区和西北太平洋的 3 支水汽交汇在我国西北、华北、东北地区以及朝鲜半岛上空。

根据 Dole 等(2011)定义的俄罗斯高温关键区($50^\circ \sim 60^\circ\text{N}$, $35^\circ \sim 55^\circ\text{E}$),我们计算了区域平均的 850 hPa 温度指数和 500 hPa 高度指数,两个指数均在 6 月 5 候至 8 月 3 候持续超过 1 个标准差,在阻高鼎盛时期甚至超过 3 个标准差,这期间的高度场分布(图 1e)与阻高鼎盛时期的分布类似。不仅俄罗斯西部出现了持续高温,在下游日本地区,整个时段也主要处于高压脊的控制之下,也出现了高温天气。

3 上游大西洋低槽的东移对阻塞发展的影响

在阻塞启动阶段,可以清楚地看到北大西洋东岸低槽的东移。自 6 月 5 候阻塞形势建立起,北大西洋东部洋面上空始终维持低槽,一直持续到 8 月 3 候(图 5)。在阻塞发展时期,北大西洋东部低槽逐

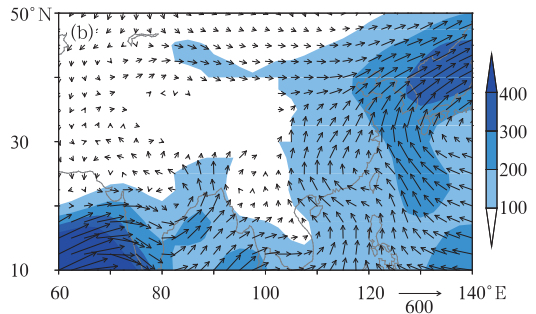


图 4 垂直积分的整层水汽输送(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 2010 年 7 月 5 候至 8 月 1 候平均[黑色虚线表示 200 hPa 高空急流,实线表示 850 hPa 低空急流(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),方框表示巴基斯坦北部], (b) 2010 年 8 月 2—4 候平均

Fig. 4 Vertically integrated atmospheric moisture transport (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) July 21 to August 5, 2010, (b) August 6 to 20, 2010

渐加深并略向东移动,槽区相对较为宽广;7月5日起,槽区突然变窄,形成一东南—西北向的低槽,并且十分稳定,而欧洲阻塞的发展改变了欧亚环流场和急流区分布,同时说明环流的经向度加大了,阻高也进入鼎盛时期。从空间分布上看,北大西洋东部的低槽正好位于北美—北大西洋高空急流的出口区(图6),急流出口区对低槽的发展和维持十分有利(Ding et al., 2005),而低槽对阻塞的维持和发展起到了至关重要的作用。正是高空急流引起扰动,从而引起下游环流的一系列变化。同时,下游的变化对上游也有一定的影响。李双林等(2001)的研究表明,上游低槽和下游阻塞的发展有相互促进的作用,上游瞬变波的活动有利于下游的正高度异常,而下游的正高度异常越强,越有利于上游瞬变活动的增强。

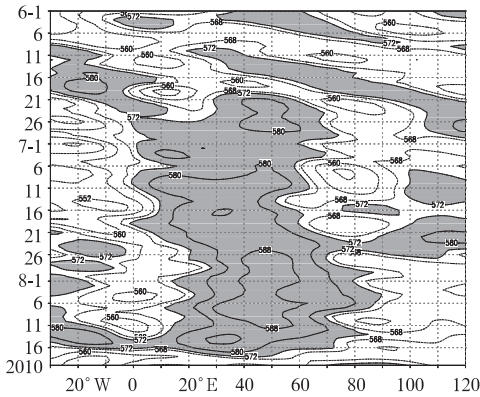


图 5 2010 年 6 月 1 日至 8 月 20 日沿 55°N 的 500 hPa 位势高度时间-经度剖面 (单位: dagpm)

Fig. 5 Time-longitude section of daily geopotential height at 500 hPa along 55°N during June 1 to August 20, 2010 (unit: dagpm)

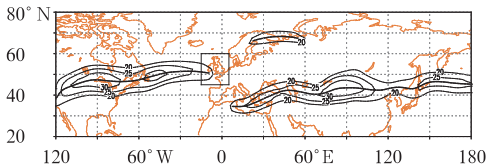


图 6 2010 年 6 月 21 日至 8 月 15 日平均的 200 hPa 等风速线 (单位: $m \cdot s^{-1}$; 方框表示北大西洋急流出口区)

Fig. 6 The mean jet stream at 200 hPa in the upper troposphere with the magnitude greater than $20 m \cdot s^{-1}$ from June

21 to August 15, 2010

(unit: $m \cdot s^{-1}$, The box illustrates the exit of the jet stream over the northern Atlantic)

对 300 hPa 准地转位涡的分布可以看出,阻塞上游和下游均为高位涡区,下游的高位涡区自东北向西南方向伸展并切入到阻塞南部;脊区则为低位涡分布(图 7)。对于阻塞的维持机制,瞬变波向高压中心输送低位涡有重要作用(Green, 1977; Shutts, 1983; 毕慕莹等, 1992; 刘辉等, 1995)。而对这次阻塞过程,从平均流对位涡的输送可以看出(图 8a),高压脊西北部有一正值中心,表明有低位涡输入高压脊区,平均流位涡平流使阻高西北部位涡减小,有利于阻高的向北伸展。瞬变位涡输送在阻高后有低位涡输入高压脊区(图 8b),其中心强

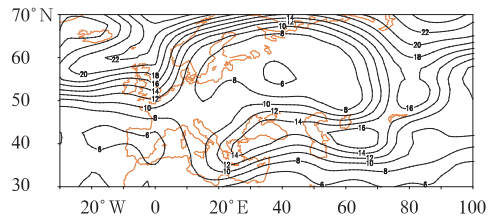


图 7 2010 年 6 月 21 日至 8 月 15 日平均 300 hPa 准地转位涡(单位: $10^{-5} s^{-1}$)
Fig. 7 The distribution of 300 hPa quasi-geostrophic potential vorticity averaged from June 21 to August 15, 2010 (unit: $10^{-5} s^{-1}$)

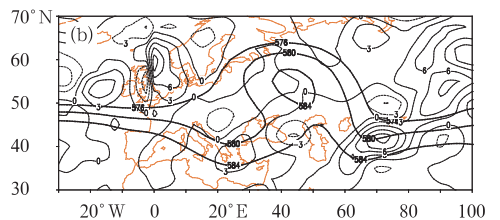
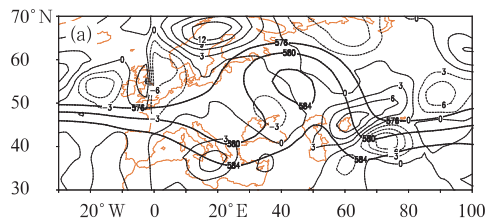


图 8 2010 年 6 月 21 日至 8 月 15 日平均季 300 hPa 平均流(a)和瞬变波(b)对准地转位涡的输送

(单位: $10^{-10} m \cdot s^{-2}$, 粗实线表示阻塞高压, 单位: dagpm)

Fig. 8 Transport of 300 hPa quasi-geostrophic potential vorticity by (a) mean flow and (b) transient eddy averaged from June 21 to August 15, 2010

(unit: $10^{-10} m \cdot s^{-2}$, Solid lines illustrate the blocking high, unit: dagpm)

度($12 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)约为这一区域平均流高位涡向阻高的输送(即对阻高的破坏作用)的 2 倍,从而抵消了平均流位涡平流的作用,使这个阻塞系统得以维持。为了进一步证实阻高的维持能量来源于北大西洋急流出口区的天气扰动,我们进一步计算了天气扰动拟能向时间平均拟能的转化,以及天气扰动动能向时间平均动能的转化,由于拟能比动能的量级小得多,这里仅给出动能转化的空间分布图(图 9)。可以看出,在大西洋高空急流出口区,有较强的天气扰动动能向时间平均动能的转化,扰动动能主要沿急流分支的南支传播,输送给时间平均流。

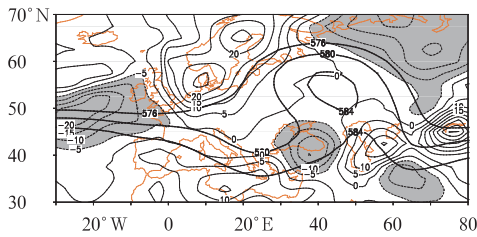


图 9 2010 年 6 月 21 日至 8 月 15 日
平均气流动能向天气尺度扰动

(2~6 天滤波)动能的转化空间分布

(单位: $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$, 负值表示扰动动能向平均
流动能转化, 阴影表示低于 $-5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$)

Fig. 9 Transfer of kinetic energy from mean
flow to transient eddy (2-6 d) averaged
from June 21 to August 15, 2010
(unit: $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$, Minus illustrates the transfer
from transient eddy to mean flow, shaded indicates
less than $-5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$, solid lines
illustrate the blocking high, unit: dagpm)

4 遥相关

Ding 等(2005)发现,北半球夏季中纬度地区存在绕球的遥相关(CGT),起始于北大西洋急流出口区的扰动异常通过波列的传播,可以影响印度季风,从而影响下游地区。我们计算了阻高期间的 200 hPa 高度一点相关系数,其空间分布如图 10 所示。可以清晰地看到源自北大西洋急流出口区的遥相关波列,波列沿阻高出现南北两个分支,这两个分支又在日本东部洋面汇合。波列沿高空急流向下游传播的传播如下:急流出口区的负相关,欧洲的正相关,接下来是西亚的负相关,中亚的正相关,这一正相关一直向东延伸到日本东部,北太平洋东部的负相关,

北美大陆的正相关,美国东部洋面的负相关相对较弱。由此看来,2010 年夏季北半球存在典型的 CGT 遥相关,位于北大西洋急流出口区的扰动负异常首先引起俄罗斯西部的正异常,阻高发展,接下来为西亚的负异常,导致冷空气异常向南伸展,印度季风区(巴基斯坦北部)出现暴雨、洪涝,接着在我国华北、东北至朝鲜半岛出现负异常,而日本以东地区为正异常,造成了日本的高温热浪。

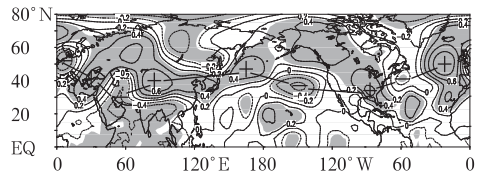


图 10 2010 年 6 月 21 日至 8 月 15 日
200 hPa 高度一点相关(50°N, 20°W)

(阴影区表示相关通过 0.05 显著性水平检验)

Fig. 10 One-point correlation map of 200-hPa
geopotential height from June 21
to August 15, 2010

(Shaded illustrates the correlation coefficients
have passed the 0.05 significance test)

5 小结

(1) 2010 年夏季欧亚大陆中高纬呈现上、下游阻塞长期维持的现象,尤其是俄罗斯西部出现近 2 个月的阻塞高压。源于北大西洋东部高空急流出口区的低槽维持了俄罗斯西部阻高的发展,涡度收支表明瞬变扰动对低位涡的输送主要维持了阻高的低位涡,天气尺度扰动动能向平均流动能的转化是阻高维持的重要能量来源。

(2) 200 hPa 高空急流中心有明显的东传过程,伴随着环流形势的调整,出现大振幅的经向环流型,地面的天气特征也有阶段性变化。在这种情况下,高、低纬冷暖空气相互作用造成持续季风降水,来自低纬阿拉伯海和孟加拉湾的两支暖湿气流与沿着阻高东侧南下的冷空气在巴基斯坦北部上空交汇,形成大暴雨;来自印度洋、太平洋的暖湿气流和中纬度西风带的水汽交汇在我国华北、东北以及朝鲜半岛上空。

(3) 2010 年夏季北半球存在典型的 CGT 遥相关,首先在北大西洋高空急流出口区出现负扰动,扰动以波列形式沿高空急流向下游传播,在下游负异

常区造成局地的暴雨洪涝。一点相关分析表明,急流出口区的负扰动首先引起俄罗斯西部的正扰动,阻塞高压发展,造成持续高温干旱;接下来引起西亚北部的负扰动,造成印度季风区巴基斯坦北部洪涝;扰动沿高空急流继续向下游传播,在我国华北、东北以及朝鲜半岛造成洪涝。在日本造成正扰动,有利于该地区持续性阻塞的发展,造成了高温热浪天气。

对于此次事件出现的气候背景,Trenberth等(2012)的研究表明,2010年夏季北印度洋、印尼附近海域以及热带大西洋海温异常偏高,同时又有La Niña事件出现。李双林等(2001)提出了一种在热带正异常热源驱动下,瞬变波与准定常行星波双向相互作用维持阻高的物理概念。2010年夏季的欧亚大气环流异常正是热带热源强迫和大气内部动力过程(瞬变强迫)的共同作用,本文重点探讨了大气内部动力过程,至于外强迫和内部过程的贡献各有多少,还需要进一步研究。

致谢:吴国雄院士和刘屹岷研究员对本研究提出建议并给予帮助,在此表示感谢。

参考文献

毕慕莹,丁一汇. 1992. 1980年夏季华北干旱时期东亚阻塞形势的位涡分析. *应用气象学报*, 3(2):145-156.

丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等. 2008. 中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系. *气象学报*, 66(5):808-825.

国家气候中心. 2011. 全国气候影响评价:2010. 北京:气象出版社, 27-32.

李双林,纪立人,倪允琪. 2001. 夏季乌拉尔地区大气环流持续异常. *科学通报*, 46(9):753-758.

刘辉,吴国雄,曾庆存. 1995. 北半球阻塞高压的维持. I: 准地转和

Ertel 位涡分析. *大气科学*, 19:177-185.

吴国雄,刘辉,陈飞,等. 1994. 时变涡动输送和阻塞高压的形成:1980年夏季我国的南涝北旱. *气象学报*, 52:308-320.

叶笃正,陶诗言. 1962. 北半球冬季阻塞形成的研究. 北京:科学出版社, 1-1324.

赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场. 北京:气象出版社, 75-78.

Ding Q, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J Climate*, 18(9):3483-3505.

Dole R. 1986. The life cycles of persistent anomalies and blocking over the North Pacific. *Adv Geophys*, 29:31-69.

Dole R, Hoerling M, Perlwitz J, et al. 2011. Was there a basis for anticipating the 2010 Russian heat wave? *Geophys Res Lett*, 38, L06702, doi: 10.1029/2010GL046582.

Green J S A. 1977. The weather during July 1976: Some dynamical consideration of the drought. *Weather*, 32:120-128.

Grumm, R H. 2011. The central European and Russian heat event of July-August 2010. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1285-1296, doi: 10.1175/2011BAMS3174.1.

Hong C C, Hsu H H, Lin N H, et al. 2011. Roles of European blocking and tropical-extratropical interaction in the 2010 Pakistan flooding. *Geophys Res Lett*, 38, L13806, doi: 10.1029/2011GL047583.

Houze Jr R A, Rasmussen K L, Medina S, et al. 2011. Anomalous atmospheric events leading to the summer 2010 floods in Pakistan. *Bull Amer Meteor Sci*, 291-298, doi: 10.1175/2010BAMS3173.1

Shutts G J. 1983. The propagation of eddies in diffluent jet streams: eddy vorticity forcing of 'blocking' flow fields. *Quart J Roy Meteor Soc*, 109(462):737-761.

Trenberth K E, Fasullo F. 2012. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010. *J Geophys Res*, 117, D17103, doi: 10.1029/2012JD018020.

WMO. 2011. WMO statement on the status of the global climate in 2010.