

江淮梅雨季亚洲阻塞高压活动统计特征*

孙晓晴¹ 金荣花² 肖天贵¹ 杨宁¹ 魏薇¹
SUN Xiaoqing¹ JIN Ronghua² XIAO Tianguai¹ YANG Ning¹ WEI Wei¹

1. 成都信息工程大学, 成都, 610225

2. 国家气象中心, 北京, 100081

1. *Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*

2. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2019-06-14 收稿, 2020-03-26 改回.

孙晓晴, 金荣花, 肖天贵, 杨宁, 魏薇. 2020. 江淮梅雨季亚洲阻塞高压活动统计特征. 气象学报, 78(4): 580-592

Sun Xiaoqing, Jin Ronghua, Xiao Tianguai, Yang Ning, Wei Wei. 2020. Statistical characteristics of Asian blocking activity during the Yangtze-Huaihe Meiyu season. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(4):580-592

Abstract The NCEP/NCAR daily analysis data for June and July of 1960–2018 and daily precipitation data collected at national weather stations in China for the same period are used to analyze geographical distribution of blocking activities in Asia, the characteristics of blocking events in key areas, and the relationship between blockings and abnormal Meiyu during the Yangtze-Huaihe Meiyu season. The results show that: (1) In the Yangtze-Huaihe Meiyu seasons (June–July) of the last 59 years, there are a total of 363 blocking events in Asia, and the centers are mainly distributed in three key areas, i.e., the Ural Mountains (40°–80°E), the Lake Baikal (80°–120°E) and the Okhotsk Sea (120°–160°E); (2) the frequency and number of days of blocking events in the three key areas from high to low are the Okhotsk Sea, the Ural Mountains and the Lake Baikal. The double-blocking situation is dominated by the Ural Mountains-Okhotsk Sea double-blocking pattern, which accounts for 60% of the double-blocking days in Asia. The average life cycle of the blocking event is about 7 d, and the longest holding time is 13 d; (3) there are obvious interdecadal changes and increase trends in the blocking frequency and number of days in the three key blocking areas, which are more obvious in the Okhotsk Sea. These changes are consistent with the increase trend of cumulative rainfall in the Yangtze-Huaihe Meiyu seasons of the past 59 years; (4) the amount of rainfall in the Yangtze-Huaihe Meiyu season is closely related to blocking activities. There are significantly more (less) blocking events in the Okhotsk Sea and Ural-Okhotsk in years of positive (negative) Meiyu rainfall anomalies, while the blocking events in the Ural and Baikal regions are not significantly related to Meiyu; (5) in the Yangtze-Huaihe Meiyu season, the number of blocking days in the Okhotsk may be related to the early sea surface temperature anomaly signal of ENSO.

Key words Blocking highs, Yangtze-Huaihe Meiyu season, Statistical features, Meiyu abnormal year

摘要 利用 1960—2018 年 6—7 月 NCEP/NCAR 逐日再分析资料和同期中国国家气象站日降水量资料, 对江淮梅雨季亚洲地区阻塞高压活动地理分布、关键区阻塞高压事件活动频次、生命周期以及年际和年代际变化, 及其与江淮梅雨异常的关系进行了系统分析。结果表明: (1) 近 59 年江淮梅雨季(6—7 月), 亚洲阻塞高压事件共计 363 次, 其中心主要分布在乌拉尔山区域(40°—80°E)、贝加尔湖区域(80°—120°E)和鄂霍次克海区域(120°—160°E) 3 个关键区。(2) 3 个关键区阻塞高压事件的次数和累计日数由高到低依次为: 鄂霍次克海、乌拉尔山和贝加尔湖区域。双阻塞形势以乌拉尔山-鄂霍次克海双阻居多, 约占亚洲地区双阻日数的 60%。阻塞事件的平均生命周期 7 d 左右, 最长维持时间为 13 d。(3) 3 个关键区总的及分区的阻塞次数和日数都

* 资助课题: 国家科技支撑计划项目(2015BAC03B04)、国家自然科学基金项目(41575066)。

作者简介: 孙晓晴, 主要从事天气分析与大尺度动力学研究。E-mail: 815151638@qq.com

通信作者: 金荣花, 主要从事天气分析与大尺度动力学研究。E-mail: jinrh@cma.gov.cn

有明显的年际变化并呈增加的趋势,其中线性增加趋势最为明显的是鄂霍次克海区域,与近59年江淮梅雨季的累计雨量增加趋势一致。(4)江淮梅雨季降雨量多寡与阻塞高压活动密切相关,梅雨正(负)异常年鄂霍次克海区域、乌拉尔山-鄂霍次克海双阻日数和次数显著偏多(偏少),而乌拉尔山和贝加尔湖区域的阻塞高压事件与梅雨关系并不显著。(5)江淮梅雨季鄂霍次克海阻塞高压的日数多寡可能与前期海表温度异常信号 ENSO 有关。

关键词 阻塞高压, 江淮梅雨季, 统计特征, 梅雨异常年

中图法分类号 P466

1 引言

阻塞高压是中高纬度地区大气环流异常的表现,可以引起大尺度气团质量和热量的强烈经向交换,导致大范围地区天气、气候异常,造成严重的气象灾害(李艳等,2010)。因此,自从20世纪40年代起,阻塞高压(以下或简称阻高)就一直为气象学者所关注。最早, Elliot 等(1949)对北半球西风带阻塞活动做了系统统计研究,发现中太平洋阻塞事件出现的数量是东北大西洋的2倍,而阻塞事件总天数是东北大西洋的4倍。此后, Sumner(1959)研究了北半球大西洋—欧洲部分阻塞的地理分布和季节变化,发现阻塞在5月最频繁,11月为次大值,7月最少。Treichl 等(1981)采用1945—1977年的资料对北半球发生的664个阻塞个例进行了统计分析,研究结论进一步确认了 Sumner(1959)的发现。另外, White 等(1975)分析了1950—1970年北半球海平面气压和700 hPa位势高度月平均图,结果发现北太平洋阻塞活动的频数在秋冬季(10月至次年3月)较大,春夏季较小。Lupo 等(1995)用阻塞强度作为研究阻塞的标准,分析了北半球阻高的气候变化,发现北半球阻高最常出现在冬季的太平洋和大西洋,且一般出现在主要风暴路径的下游。中国关于阻高的统计研究可以追溯到20世纪50年代。早期,周晓平(1957)研究了亚洲地区1953—1955年共36次阻塞形势,认为亚洲阻塞在1、5—7月较多,而在3和11月较少。随后,许多研究者也对北半球阻高特征进行了统计分析,其中,仪清菊(1988)研究了1958—1973年北半球冬季的阻高特征,赵汉光等(1990)利用1971—1988年资料对60°N上阻高进行了统计分析。进入21世纪,很多研究者利用长时间序列资料进一步统计了阻高的气候特征,黄菲等(2002)利用1976—1999年资料对欧亚大陆夏季阻高特征进行了统计研究,李峰等(2004)利用1970—2001年近30年资料对欧亚大陆夏季阻高的季节内变化进行了统计分析,发现欧

亚夏季阻高活动具有明显的季节内变化特征,史湘军等(2007)统计分析了欧亚大陆1950—2004年的阻高,指出不同地区的年际变化特征各有不同。Liu 等(2018)分析了北半球500 hPa持续性高值系统的统计特征,并与发生在北美及欧洲的危害性事件进行对比分析。

阻高活动对中国天气、气候的影响也备受关注。北半球冬半年寒潮爆发与阻塞形势建立、崩溃和不连续后退有紧密联系。王静(2002)和汪秀清等(2005)指出夏季低温受到阻高影响。李海军等(2007)和马晓青等(2008)指出阻高还是强寒潮爆发的主要影响系统。李崇银等(2010)讨论了2008年1月由于乌拉尔山阻高异常以及多系统配合,造成中国南方出现大范围低温雨雪冰冻灾害的成因。Wang 等(2010)分析了20世纪70年代气候突变前后乌拉尔山阻高对东亚冬季气候的影响。周宁(2016)利用阻高指数分析了冬季乌拉尔山、贝加尔湖及鄂霍次克海阻塞对中国温度的影响,指出,冷夏年500 hPa盛行经向环流,高纬度有阻塞高压或暖脊维持。夏季亚洲中高纬度阻塞系统的维持与中国南方降水也密切相关,此方面的研究也深受气象学者的关注。王会军(2000)发现欧亚中高纬度地区大气环流异常对东亚夏季大气环流和降水异常起非常重要的作用。杨义文(2001)提出7月东亚阻塞形势是造成中国长江流域多雨洪涝的重要环流系统,历史上严重的长江大水年(如1954年和仅次于1954年的1998年)常伴随着7月东亚阻塞形势的出现而发生。张庆云等(2001)指出,1980年7—8月由于阻塞高压位置偏南,江淮流域暴雨频繁,而中国东北、华北发生干旱事件。金荣花等(2008)发现,乌拉尔山阻塞高压在2007年淮河流域致洪暴雨中占据重要地位。由此可见,阻塞形势建立和长时间维持造成的大气环流异常很可能导致重大气象灾害的发生。

江淮梅雨是每年6、7月亚洲夏季风北上进程中发生在中国东部经济发达地区江淮流域持续阴

天降雨的气候现象,其降水量多寡引发的气象灾害会带来严重的社会经济损失并可能危及人民生命财产安全(丁一汇等,2007)。以往研究已表明,江淮梅雨与中高纬度地区的阻塞形势密切相关,但都是基于个例的定性分析,或者对自然季节的特征统计,针对江淮梅雨典型雨季阻塞高压的地理分布、阻塞高压持续时间、出现频次以及何种阻塞形势对江淮梅雨影响最为显著尚没有系统性的气候统计分析,对阻塞形势的年际和年代际变化及其影响也没有清楚的认识。文中采用1960—2018年6—7月美国环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)逐日再分析资料和中国国家气象站2472站日降水量资料,统计分析江淮梅雨季整个亚洲区域阻塞高压地理分布、活动频次、生命周期以及年际和年代际变化,及其与江淮梅雨异常的联系,初步探讨有利于梅雨的阻塞形势出现的可能原因,以便定量认识江淮梅雨季阻塞高压活动特征及其对江淮梅雨的影响,也为江淮梅雨的分析 and 预报提供有价值的参考。

2 资料和方法

利用1960—2018年NCEP/NCAR逐日再分析资料500 hPa位势高度场,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。具体的资料描述详见<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>。降水量资料为国家气象信息中心提供的中国国家气象站2472站日降水量资料(20时—20时,北京时间)。

为了方便使用数据资料来分析中高纬度阻塞高压的统计特征,Lejenäs等(1983)制定了一套计算阻塞高压指数的标准,Tibaldi等(1990)为了保证阻高向极地方向风速不小于平均西风气流(8 m/s),改进了这个方法,称为Tibaldi和Molteni方法(简称为T&M方法)。T&M方法作为自动、客观、定量识别阻塞高压形势的方法,在美国国家环境预报中心气候预测中心、中国中央气象台等业务部门得到广泛的应用。具体实现步骤请参考金荣花等(2009)。文中利用T&M方法,对NCEP/NCAR提供的1960—2018年500 hPa逐日位势高度资料,客观定量统计亚洲中高纬度地区(45° — 75° N, 40° — 160° E)的阻塞高压。为了保证统计结果的可靠,对照逐日500 hPa

位势高度场进行人工校正,获得亚洲阻塞高压指数历史序列统计数据。

历年江淮梅雨期各不相同,最早于5月底开始,最晚于8月初结束,一般处于每年6、7月两个月(丁一汇等,2007)。江淮梅雨季节是一个气候概念,李勇等(2017)对1960—2015年江淮梅雨季强降雨过程的特征进行系统分析,将江淮梅雨降雨过程出现主要时段(6—7月)作为江淮梅雨季。因此,该文江淮梅雨季时段也取为6—7月。在降水量统计方面,参照国家气候中心制定的中国梅雨监测业务标准,选取均匀覆盖江淮及长江中下游地区277个指标站,作为统计江淮梅雨季降水量的代表站。

3 阻塞高压活动地理分布

对天气、气候带来严重影响的阻塞高压,往往是持续稳定并占据一定空间范围的异常环流形势,因此也称为阻塞高压事件。文中分析的对象是达到阻塞高压事件条件的阻塞形势。国际上对于阻高事件维持的时间尺度的研究很多(Croci-Maspoli, et al, 2007),根据现有研究来看,比较通用的是阻高维持时间至少为5 d(Treidl, et al, 1981; Lupo, et al, 1995; Chen, et al, 2002; Altenhoff, et al, 2008)。因此,文中定义维持时间5 d以上、空间大于15个经距范围的大尺度阻塞过程为阻塞事件。

据此统计分析1960—2018年6—7月亚洲区域(40° — 160° E)阻高事件,共计363次,利用阻塞高压事件高压中心位置数据,绘制亚洲地区阻塞高压中心累计频次地理分布(图1),可以看出6—7月阻高活动频繁,阻塞形势复杂,几乎遍及整个亚洲中高纬度地区。但是相比较而言,有两个阻高活动稀少的区域,分别在 80° — 90° E附近和 120° — 130° E附近,有3个阻高活动频繁的区域(图1中红色方框区域),分别位于乌拉尔山、贝加尔湖和鄂霍次克海附近,并且这3个区域的纬度位置也有一定差异。

叶笃正(1962)提出与中国气候变化最为相关的阻塞为乌拉尔山阻塞、贝加尔湖阻塞以及鄂霍次克海阻塞。很多研究(杨义文,2001;陈丽娟等,2005;金荣花等,2008)也表明,影响中国降雨的阻塞高压主要分布在亚洲地区,在许多统计阻塞高压特征的文献中,将亚洲地区的阻塞高压划分为乌拉尔山、贝加尔湖、鄂霍次克海关键区域,例如史湘

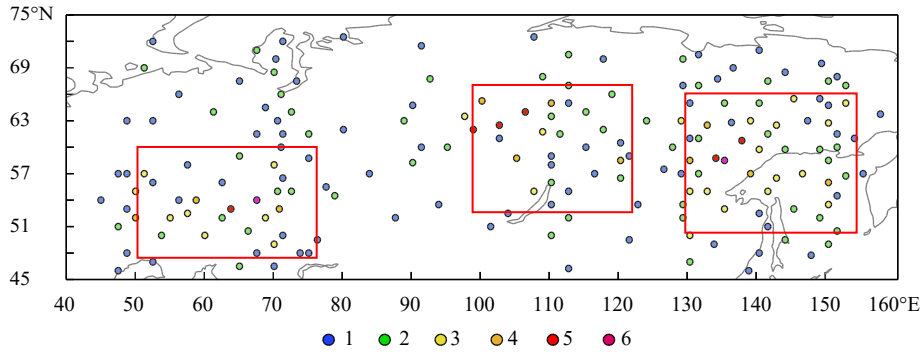


图1 1960—2018年6—7月亚洲地区阻塞高压中心累计频次分布(红色方框表示阻高频繁活动区域)
 Fig. 1 Geographic distribution of the occurrence frequency of blocking high centers in Asia in June and July during 1960—2018 (red frames represent high frequency areas)

军等(2007)提出夏季欧亚大陆阻高频繁活动区域为45°—70°E的乌拉尔山地区、90°—130°E的贝加尔湖地区和130°—150°E的鄂霍次克海地区,李艳等(2010)将影响中国天气较大的关键区也划为40°—80°E的乌拉尔山、80°—120°E的贝加尔湖和120°—160°E的鄂霍次克海3个关键区,周宁(2016)根据各阻塞区域的地理位置进行区分:乌拉尔山阻塞为50°—80°E,贝加尔湖阻塞为80°—120°E,鄂霍次克海阻塞为120°—160°E。

参考以往文献中阻高活动区域划分结果,结合文中统计分析的亚洲地区阻高活动频次地理分布,并考虑全覆盖亚洲区域阻高事件,将亚洲阻高事件地理区域划分为3个关键区,分别为乌拉尔山区域(40°—80°E)、贝加尔湖区域(80°—120°E)和鄂霍次克海区域(120°—160°E),据此对3个阻高关键区(以下或简称关键区)的阻高活动特征及其与梅雨异常联系做进一步的统计分析和。

4 6—7月亚洲关键区阻塞高压活动特征

4.1 阻高事件气候特征

江淮梅雨季,亚洲的阻高活动较为频繁,1960—2018年6—7月,亚洲关键区共有阻塞事件363次,平均每年6—7月约有6次阻高事件,这与

周晓平(1957)对1953—1955年亚洲中纬度区域阻塞形势的统计研究中得到的亚洲6—7月阻塞形势较多的结论一致。

下面对3个关键区的阻高事件分别进行分析。表1是亚洲3个关键区多年平均数据的统计结果,在59年中,乌拉尔山区域发生阻塞事件128次,多年平均约2.2次/a,累计阻高日数876 d,多年平均约为14.8 d/a;贝加尔湖区域发生阻塞事件102次,多年平均约1.7次/a,累计阻高日数756 d,多年平均约为12.8 d/a;鄂霍次克海区域发生阻塞事件133次,多年平均约2.3次/a,累计阻高日数903 d,多年平均约为15.3 d/a。比较3个关键区阻塞事件的次数和累计日数,鄂霍次克海阻塞高压最多,乌拉尔山区域次之,而贝加尔湖区域相对较少,但总体来说,3个关键区阻塞活动都比较活跃。分别计算3个关键区域阻高活动的生命周期,乌拉尔山区域阻塞事件生命周期为5—13 d,平均生命周期约为6.8 d,贝加尔湖区域生命周期为5—11 d,平均生命周期约为7.4 d,鄂霍次克海区域生命周期为5—13 d,平均生命周期约为6.8 d,总体差异不大。

将同一时间,只有一个关键区存在阻塞高压的形势称为单阻形势,两个关键区同时存在阻塞高压称为双阻形势,3个关键区都存在的称为三阻形

表1 1960—2018年6—7月平均亚洲关键区阻塞高压活动特征
 Table 1 Multi-year average characteristics of blocking activity in key areas of Asia from June to July during 1960—2018

	乌拉尔山	贝加尔湖	鄂霍次克海	双阻	乌拉尔山-贝加乐湖	贝加乐湖-鄂霍次克海	乌拉尔山-鄂霍次克海
年平均次数(次)	2.2	1.7	2.3	—	—	—	—
年平均日数(d)	14.8	12.8	15.3	5.9	1.3	1.1	3.5
平均生命周期(d)	6.8	7.4	6.8	—	—	—	—

势。对3个关键区单阻、双阻、三阻形势进行统计,发现1960—2018年江淮梅雨季(6—7月)存在双阻形势较多,累计双阻日数346 d,平均每年江淮梅雨季亚洲关键区中高纬度上空约有5.9 d存在双阻形势。其中,乌拉尔山与贝加尔湖区域存在双阻形势的日数为74 d,年平均为1.3 d,贝加尔湖与鄂霍次克海区域的双阻日数为66 d,年平均为1.1 d,乌拉尔山与鄂霍次克海区域的双阻日数最多,为206 d,年平均为3.5 d,约占亚洲地区双阻日数的60%。除此之外,单阻形势的日数为1798 d,3个关键区同时存在阻塞高压的日数为15 d。因此,江淮梅雨季(6—7月),亚洲中高纬度地区高压活跃,阻塞形势复杂,存在着较为频繁的双阻形势,尤其以乌拉尔山-鄂霍次克海双阻形势居多。这与史湘军等(2007)在统计欧亚大陆1950—2004年夏季阻高活动特征中得到的6—7月双阻形势较多的结论一致。

4.2 阻塞高压的年际及年代际变化

4.2.1 阻塞高压事件频次的年际及年代际变化

全球变暖已经是一个不争的事实,为了具体分析江淮梅雨季亚洲3个关键区阻高次数在全球变暖情况下的变化特征,对1960—2018年江淮梅雨季

(6—7月)亚洲3个关键区阻塞事件发生次数的年际和年代际变化特征做了分析(图2)。

由图2可见,近59年,乌拉尔山、贝加尔湖和鄂霍次克海3个关键区的阻高次数年际变化幅度大于3个关键区总的变化幅度,表明这3个关键区江淮梅雨季的阻高次数在一定程度上存在此消彼长的相互调制关系。在近59年6—7月,乌拉尔山区域阻塞事件年平均约为2.2次,最大值出现在1974、1988、1996、2004、2011、2012和2016年,均为4次,而1979、1980、1984、1985、1986、1994和2014年无阻塞事件。贝加尔湖区域阻塞事件年平均约为1.7次,最大值出现在2012年,为5次,而1960、1965、1977、1980、1988、1995、1997、1999、2005和2010年无阻塞事件。鄂霍次克海区域阻塞事件年平均约为2.3次,最大值出现在1998和1999年,均为6次,1963年无阻塞事件。3个关键区总的阻塞事件年平均为6.2次,最大值发生在2012年,为12次,最小值发生在1985年,仅为2次。此外,近59年的江淮梅雨季,3个关键区总的阻高次数线性趋势系数为0.0239次/a,乌拉尔山区域阻高次数线性趋势系数为0.0039次/a,贝加尔湖

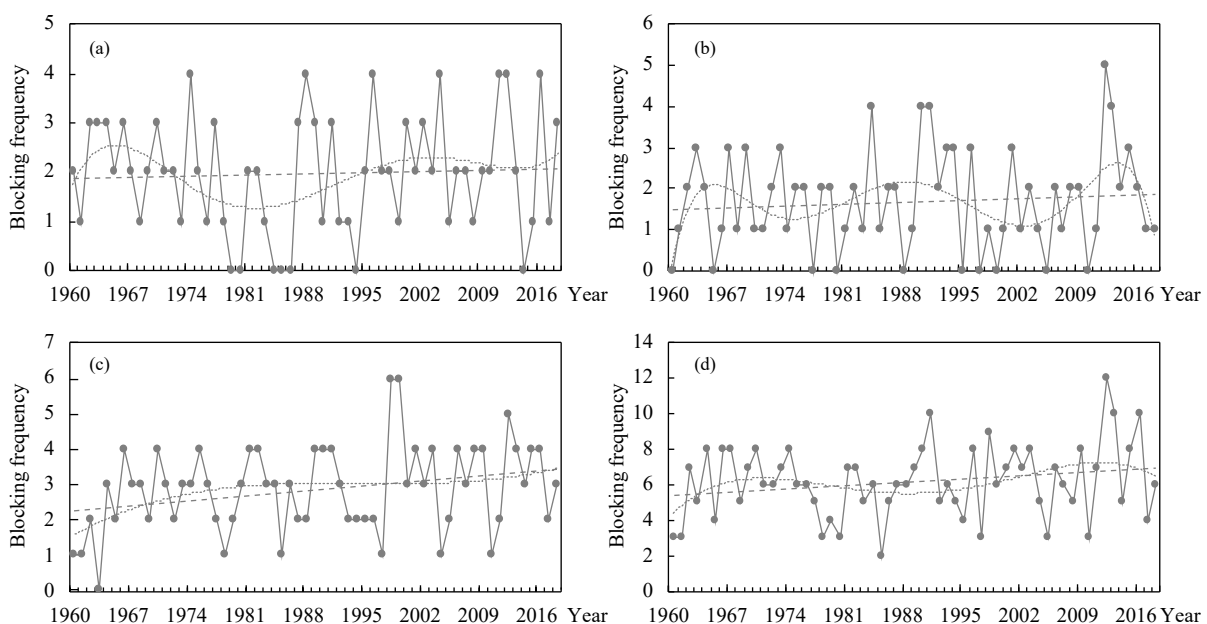


图2 1960—2018年江淮梅雨季(6—7月)3个关键区阻高次数的年际变化(实线)、线性变化趋势(短划线)和多项式拟合变化趋势(虚线)(a. 乌拉尔山区域, b. 贝加尔湖区域, c. 鄂霍次克海区域, d. 3个关键区总数)

Fig. 2 Interannual variation (real line), linear variation trend (dashed line) and multinomial fitting change trend (dotted line) of occurrence frequency of blockings that occurred in the Ural Mts (a), the Baikal (b), the Okhotsk Sea (c) and the three key areas (d) in the Yangtze-Huaihe Meiyu season (June—July) during 1960—2018

区域为 0.0063 次/a, 鄂霍次克海区域为 0.0196 次/a, 由此可见, 1960—2018 年的江淮梅雨季, 3 个关键区的阻塞次数都有略微增多的趋势, 其中线性增多趋势较为明显的是鄂霍次克海区域。亚洲阻高的增多, 意味着天气、气候异常事件增多的可能性增大, 因此清楚认识在全球变暖背景下阻高事件增多趋势, 并研究其形成机理, 十分必要和紧迫。

另外, 从图 2 中的多项式拟合变化趋势可以看出, 江淮梅雨季, 亚洲 3 个关键区总的阻高次数存在明显的年代际变化。近 59 年, 总的阻高次数在 20 世纪 60 年代末到 70 年代相对较多, 从 70 年代开始就略有下降趋势, 80—90 年代阻高活动较少, 阻高活动在 90 年代初开始增多, 在 2012 年出现峰值后又略有下降, 随着年份的增加, 多项式拟合变化趋势线的峰值及谷值都比上一次高, 反映在整体趋势增多的背景下存在明显的年代际变化。乌拉尔山区域, 20 世纪 60 年代阻高活动偏多, 70—80 年代阻高活动偏少, 从 90 年代开始, 乌拉尔山区域阻高次数的变化就趋于平稳并略有增加。贝加尔湖区域阻高次数年代际变化也相对较为明显, 20 世纪 60 年代中期、90 年代初期阻高活动相对频繁, 2012—2016 年阻高次数也较多, 并在 2012 年出现了一个峰值, 20 世纪 90 年代末至 21 世纪初阻高次数较少。鄂霍次克海区域阻高次数增多的气候变化趋势最显著, 但年代际变化不明显。

4.2.2 阻塞高压累计日数的年际及年代际变化

为了分析江淮梅雨季对中国天气影响较大的 3 个关键区域的阻塞高压日数在全球变暖情况下的变化, 对 1960—2018 年江淮梅雨季(6—7 月)亚洲 3 个关键区阻塞事件累计日数的年际和年代际变化特征进行了分析(图 3)。

同样, 近 59 年, 乌拉尔山、贝加尔湖和鄂霍次克海 3 个关键区的累计阻高日数年际变化幅度大于 3 个阻高关键区总的变化幅度, 表明这 3 个关键区江淮梅雨季的阻高日数在一定程度上存在此消彼长的相互调制关系。对比图 3 中的 3 个关键区, 近 59 年 6—7 月, 乌拉尔山区域阻塞事件的累计日数是 3 个区域中最多的, 年平均阻高日数约为 14.8 d, 最大值出现在 1996 年, 为 27 d, 1979、1980、1984、1985、1986、1994 和 2014 年均无阻高事件。贝加尔湖区域年平均阻高日数约为 12.8 d, 最大值出现

在 2012 年, 为 29 d, 1960、1965、1977、1980、1988、1995、1997、1999、2005 和 2010 年均无阻高事件。鄂霍次克海区域年平均阻高日数约为 15.3 d, 最大值出现在 1998 年, 为 37 d, 1963 年无阻高事件。3 个关键区总的年阻塞日数最大值出现在 2012 年, 为 74 d, 最小值出现在 1985 年, 为 10 d。亚洲地区年平均多阻(双阻和三阻)日数为 6.1 d, 最大值出现在 2012 年, 为 23 d, 1960、1961、1965、1968、1976、1977、1978、1979、1980、1983、1984、1985、1992、2003、2004、2010 和 2014 年均无多阻高事件, 其中, 双阻年平均日数约为 5.9 d, 最大值年份和最小值年份与多阻年份一致, 另外, 三阻日数共 15 d。此外, 近 59 年 6—7 月, 3 个关键区总的阻高日数线性趋势系数为 0.1911 d/a, 多阻日数线性趋势系数为 0.0618 d/a, 乌拉尔山区域阻高日数线性趋势系数为 0.0397 d/a, 贝加尔湖区域为 0.0604 d/a, 鄂霍次克海区域为 0.1298 d/a, 由此可见, 1960—2018 年的江淮梅雨季, 3 个关键区的阻塞日数都有略微增多的趋势, 其中线性增加趋势最为明显的是鄂霍次克海区域。Lupo(1997)研究指出, 这种增多趋势可能是由于全球变暖, 阻塞活动更加频繁的全球性特征导致的。

从图 3 的多项式拟合变化趋势线可以看出, 近 59 年, 亚洲 3 个关键区总的阻高日数也存在着明显的年代际变化。关键区总的阻高日数在 20 世纪 60 年代后期到 70 年代初相对较多, 从 70 年代开始就略有下降趋势, 在 70 年代末到 90 年代阻高活动偏少, 21 世纪初阻高相对频繁, 在 2012 年出现峰值后又略有下降, 除此之外, 随着年份的增加, 多项式拟合变化趋势线的峰值及谷值都比上一次高, 反映在整体增加的趋势背景下存在明显的年代际变化特征。乌拉尔山区域, 20 世纪 60 年代中期和 21 世纪初江淮梅雨季的阻高活动相对频繁, 80 年代初阻高日数较少, 从 90 年代开始, 乌拉尔山区域阻高日数的变化就趋于平稳并略有增加。贝加尔湖区域阻高日数存在明显的年代际变化, 60 年代中期、90 年代初期阻高活动相对频繁, 2012—2016 年阻高日数也较多, 并在 2012 年出现了一个峰值, 20 世纪 90 年代末至 21 世纪初阻高日数较少。同样, 鄂霍次克海区域阻高日数增加的气候变化趋势最为显著, 但年代际变化不明显。从上述亚洲 3 个关键

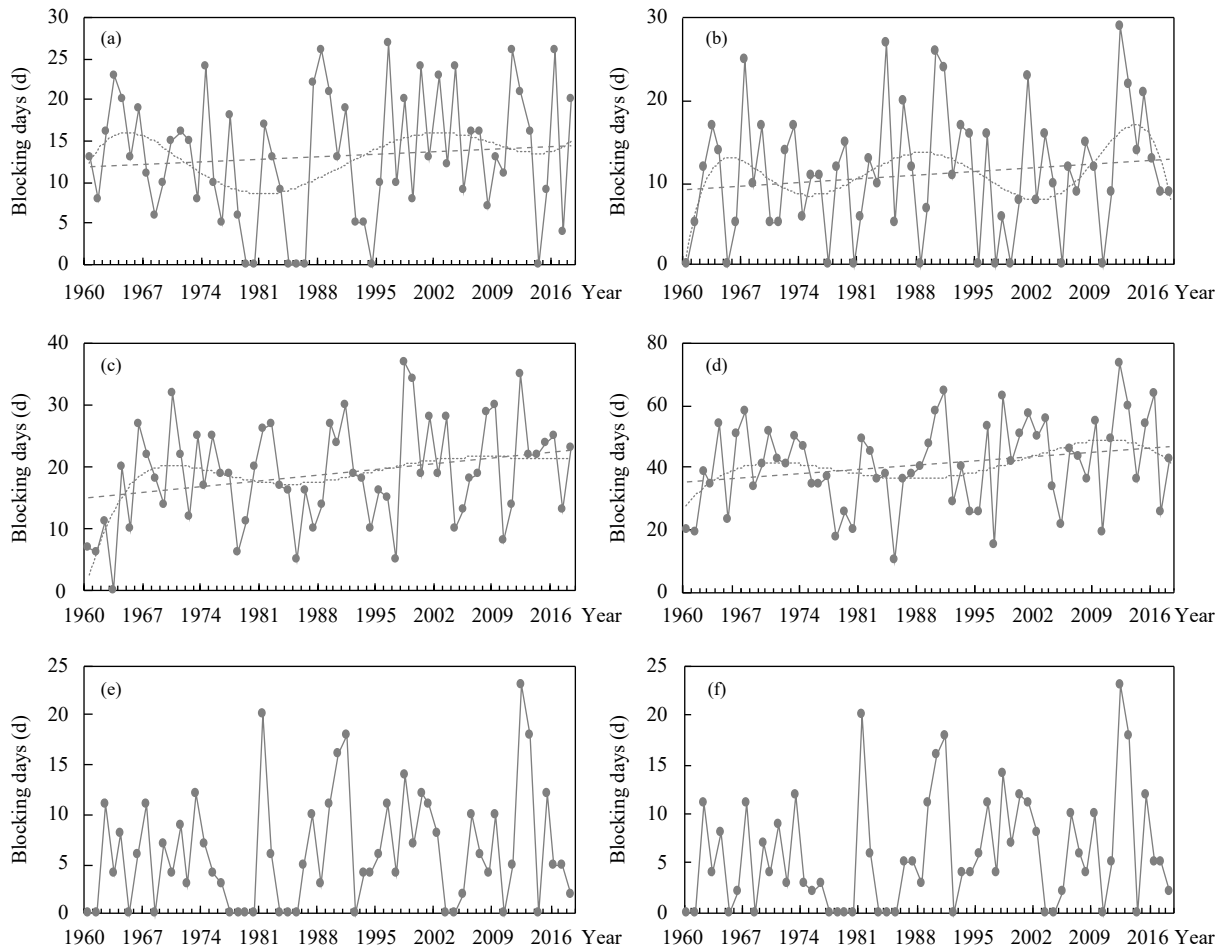


图3 1960—2018年江淮梅雨季(6—7月)3个关键区阻高累计日数的年际变化(实线)、线性变化趋势(短划线)和多项式拟合变化趋势(虚线)(a. 乌拉尔山区域, b. 贝加尔湖区域, c. 鄂霍次克海区域, d. 3个关键区总数, e. 多阻, f. 双阻)

Fig. 3 Interannual variation (real line), linear variation trend (dashed line) and multinomial fitting change trend (dotted line) of blocking days over the three key areas in the Yangtze-Huaihe Meiyu season (June—July) during 1960—2018 (a. the Ural Mts., b. the Baikal, c. the Okhotsk Sea, d. the three key areas, e. multiple blockings, f. double blockings)

区阻高频次、日数的年际和年代际变化来看,存在一定的区域差异。

5 亚洲阻塞高压与江淮梅雨的关系

5.1 与江淮梅雨季降雨量的关系

图4为1960—2018年6—7月江淮流域277个代表站点所处经纬度(28° — 34° N, 111° — 123° E)区域平均累计降雨量。由图4可见,1960—2018年6—7月年平均累计降雨量为370.83 mm,最大值出现在1996年,为540.62 mm,最小值出现在1961年,为169.96 mm。此外,近59年,累计雨量的线性趋势系数为1.14 mm/a,为增多的趋势,这与亚洲地区阻塞高压频次与日数的增多趋势一致。

另外,从图4中的多项式拟合变化趋势线可以看出,20世纪80年代至90年代江淮梅雨季节累计雨量较大,从20世纪80年代开始,累计雨量就有明显增大的趋势,进入21世纪以后,累计雨量的变化趋于平稳。比较累计雨量与亚洲各关键区阻高的年代际变化趋势,可以发现从20世纪80年代到2018年,累计雨量与鄂霍次克海区域的年代际变化较为一致。

为此,进一步分析江淮梅雨与阻塞高压的关系(图5),1960—2018年的江淮梅雨季,计算累计雨量与鄂霍次克海区域年阻高日数的相关系数为0.293,与3个关键区总的年阻高日数的相关系数为0.281,与乌拉尔山-鄂霍次克海双阻日数的相关

系数为 0.234, 均通过了显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 t 检验(相关系数在 $-0.203-0.203$ 未通过 $\alpha=0.05$ 水平的显著性 t 检验), 说明鄂霍次克海区域、3 个关键区总的阻高和乌拉尔山-鄂霍次克海双阻日数与江淮梅雨的相关显著。计算得到累计雨量与乌拉尔山年阻高日数的相关系数为 0.113, 与贝加尔湖年

阻高日数的相关系数为 0.043, 与关键区多阻日数的相关系数为 0.149, 均未通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 t 检验。因此, 在亚洲 3 个关键区中, 年阻高日数与累计雨量相关系数最高的是鄂霍次克海区域。

除此之外, 还计算了累计雨量与亚洲关键区阻高事件频次的相关系数。累计雨量与鄂霍次克海

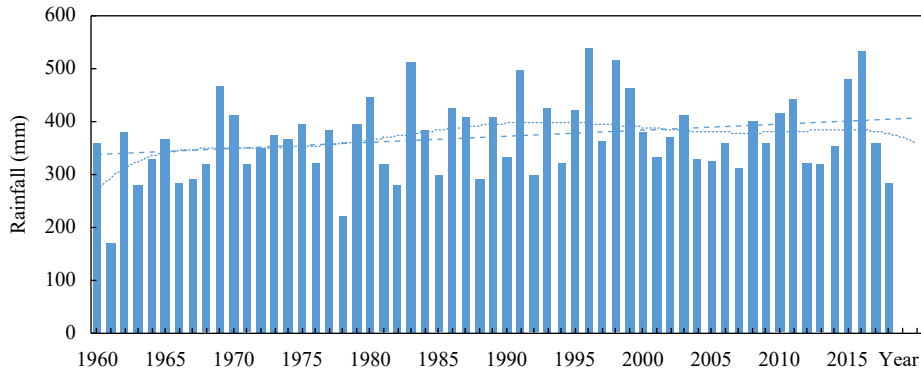


图 4 1960—2018 年江淮梅雨季(6—7 月) 累计雨量的年际变化(柱图)、线性变化趋势(短划线)和多项式拟合变化趋势(虚线)

Fig. 4 Interannual variation (histogram), linear variation trend (dashed line) and multinomial fitting change trend (dotted line) of accumulated rainfall in the Yangtze-Huaihe Meiyu season (June–July) during 1960–2018

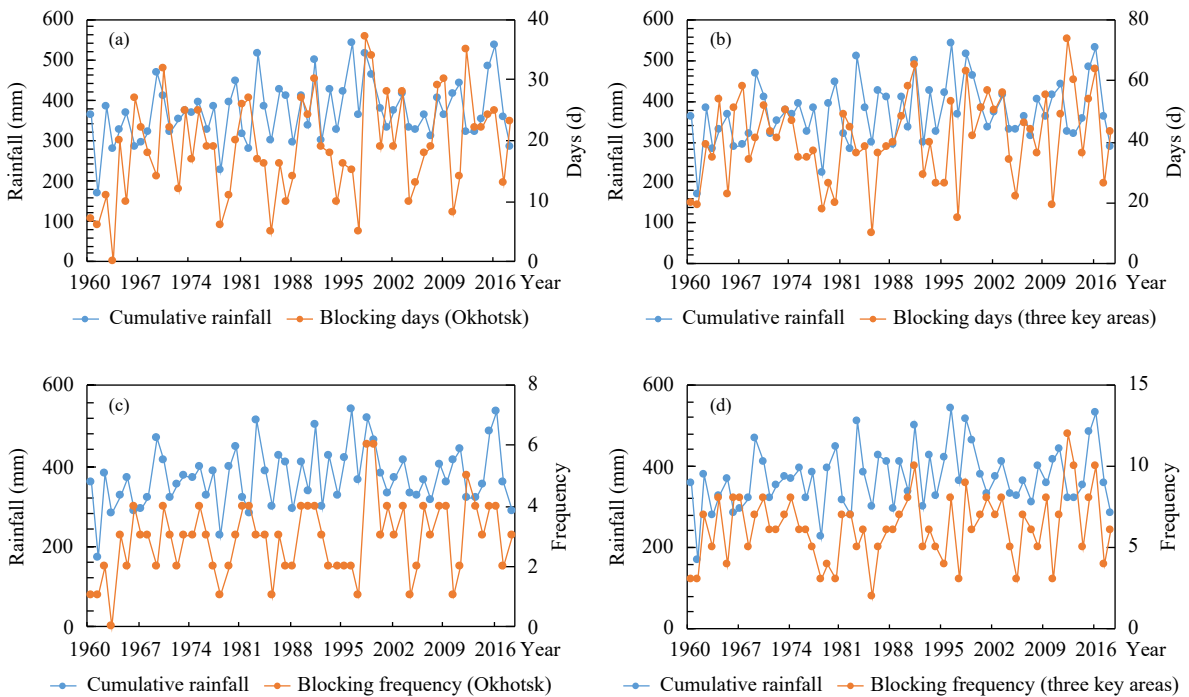


图 5 1960—2018 年江淮梅雨季(6—7 月) 累计雨量的年际变化与鄂霍次克海 (a)、3 个关键区总体 (b) 的阻高日数年际变化; 累计雨量的年际变化与鄂霍次克海 (c)、3 个关键区总体 (d) 的阻高次数年际变化

Fig. 5 Interannual variation of cumulative rainfall and number of blocking days in the Okhotsk Sea (a) and in the three key areas (b); interannual variation of cumulative rainfall and blocking frequency in the Okhotsk Sea (c) and in the three key areas (d) during the Yangtze-Huaihe Meiyu season (June–July) from 1960 to 2018

区域年阻高次数的相关系数为 0.307, 与亚洲 3 个关键区总的年阻高次数的相关系数为 0.273, 均通过了显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 t 检验, 说明鄂霍次克海区域和亚洲 3 个关键区总的阻高次数与江淮梅雨的相关显著。累计雨量与乌拉尔山年阻高次数的相关系数为 0.107, 与贝加尔湖年阻高次数的相关系数为 0.027, 均未通过显著性水平 $\alpha=0.05$ 的 t 检验。同样的, 在亚洲 3 个关键区中, 年阻高次数与累计雨量相关系数最高的也是鄂霍次克海区域。

5.2 与江淮梅雨异常年的关系

对江淮梅雨研究的文献很多。覃卫坚等(2014)对近 50 年广西大范围暴雨过程的大气环流异常特征进行了分析。张端禹等(2015)对华南前汛期持续暴雨过程按照环流进行了分型。而目前针对梅雨异常年阻塞高压活动的研究还较少。为了分析 6—7 月阻塞高压与梅雨正异常和负异常年关系, 根据金荣花等(2012)定义的梅雨异常年划分标准, 将大于 1.0 或小于 -1.0 的累计梅雨量的标准化值作为梅雨异常年划分标准, 当累计梅雨量标准化值大于 1.0 时, 该年份为梅年正异常, 当标准化值小于 -1.0 时, 该年份为梅雨负异常年。统计得到 8 个梅雨正异常年(1969、1980、1983、1991、1996、

1998、1999 和 2016 年), 5 个梅雨负异常年(1961、1963、1965、1978、1982 年)。

从表 2 可以看出, 对于梅雨正异常年, 3 个关键区中, 鄂霍次克海区域阻塞高压平均日数为 24 d, 远超过多年平均(15.3 d), 乌拉尔山阻塞高压年平均日数为 14.9 d, 接近多年平均(14.8 d), 而贝加尔湖区域阻高平均日数 10.8 d, 低于多年平均(12.8 d)。就 3 个关键区的阻塞高压事件频次而言, 鄂霍次克海阻塞高压年平均为 3.8 次, 远超过多年平均(2.3 次), 乌拉尔山和贝加尔湖阻塞高压的年平均频次均接近多年平均。在双阻方面, 梅雨正异常年表现为乌拉尔山-鄂霍次克海阻塞高压稳定形势, 年平均 6.4 d, 远超过 3.5 d 的多年平均数; 而贝加尔湖-鄂霍次克海阻塞高压事件为 0。相反, 梅雨负异常年, 乌拉尔山和鄂霍次克海地区阻塞高压事件频次明显少于多年平均, 而贝加尔湖地区阻塞高压事件频次年平均为 1.6 次, 接近多年平均的 1.7 次, 三类双阻形势的日数也明显少于多年平均, 接近 0。上述分析进一步验证了江淮梅雨多寡与阻塞活动密切相关, 在梅雨正异常年, 鄂霍次克海区域阻高、乌拉尔山-鄂霍次克海双阻的形势相对活跃且稳定, 贝加尔湖阻塞日数、频次均偏少。梅雨负异常年,

表 2 13 个梅雨异常年对应的阻高次数和日数
Table 2 The blocking frequency and number of days in 13 Meiyu abnormal years

	乌拉尔山	贝加尔湖	鄂霍次克海	双阻	乌拉尔山-鄂霍次克海	乌拉尔山-贝加尔湖	贝加尔湖-鄂霍次克海	
梅雨正异常年	1969	2次、10 d	<u>3次、17 d</u>	2次、14 d	7 d	5 d	2 d	
	1980	0	0	<u>3次、20 d</u>	0	0	0	
	1983	1次、9 d	1次、10 d	<u>3次、17 d</u>	0	0	0	
	1991	<u>3次、19 d</u>	<u>4次、24 d</u>	<u>4次、30 d</u>	18 d	14 d	4 d	
	1996	<u>4次、27 d</u>	<u>3次、16 d</u>	2次、15 d	11 d	10 d	4 d	
	1998	2次、20 d	1次、6 d	<u>6次、37 d</u>	14 d	10 d	4 d	
	1999	1次、8 d	0次、0 d	<u>6次、34 d</u>	7 d	7 d	0	
	2016	<u>4次、26 d</u>	<u>2次、13 d</u>	<u>4次、25 d</u>	5 d	5 d	0	
合计	17次、119 d	14次、86 d	30次、192 d	62 d	51 d	14 d	0	
平均	2.1次、14.9 d	1.7次、10.8 d	<u>3.8次、24 d</u>	7.8 d	6.4 d	1.8 d	0	
梅雨负异常年	1961	1次、8 d	1次、5 d	1次、6 d	0	0	0	
	1963	<u>3次、23 d</u>	<u>3次、17 d</u>	0	4 d	0	4 d	
	1965	2次、13 d	0	2次、10 d	0	0	0	
	1978	1次、6 d	<u>2次、12 d</u>	1次、6 d	0	0	0	
	1982	2次、13 d	<u>2次、13 d</u>	<u>4次、27 d</u>	6 d	1 d	0	5 d
	合计	9次、63 d	8次、47 d	8次、49 d	10 d	1 d	4 d	5 d
平均	1.8次、12.6 d	1.6次、9.4 d	1.6次、9.8 d	2 d	0.2 d	0.8 d	1 d	

注: 下划线数据表示大于59年平均值。

贝加尔湖阻塞活动接近常年,而乌拉尔山和鄂霍次克海阻塞高压日数、频次明显偏少,且几乎不会出现双阻形势。张庆云等(1998)在探讨亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响时得出结论,当亚洲中高纬度从乌拉尔山到鄂霍次克海区域出现“+—”波列形势时,夏季梅雨期降水相对较多,特别是鄂霍次克海高压稳定时,往往造成东亚夏季梅雨期降水异常偏多;反之,当亚洲中高纬度从乌拉尔山到鄂霍次克海区域出现“—+”波列形势时,梅雨期降水较少。这一诊断分析支持了文中通过统计得到的鄂霍次克海区域阻塞及乌拉尔山-鄂霍次克海双阻形势有利于梅雨期降水的结果。

5.3 阻塞形势出现的可能成因

阻高的形成实际上是一种典型的混沌现象(Lorenz, 1963)。对于阻高形成、发展机理的问题,许多学者已经做了相关研究(毕慕莹等, 1992; 王亚非等, 1998; 陆日宇, 2001; 徐辉等, 2011),他们的观点各不相同,王亚非等(2001)将这些观点整理出了5种流派,每种学说都有验证,但都不能概括阻塞现象的形成机理。这些“片面”的理论存在也正好说明了阻塞现象的复杂多样性。每个阻高都有其具体的特殊性,即阻高生成机制不太一样甚至完全不同。在一个阻高的形成过程中,可能是一种机制在起作用,也可能是几种不同的机制同时在起作用。

其中一种学说提到,海温异常对于阻高活动有一些影响(Wiedenmann, et al, 2002)。李艳等(2017)分析指出,冬季欧亚地区的阻塞形势与冬季两类ENSO事件有关。ENSO现象是赤道东南太平洋海表温度异常的强信号,它的发生、发展会使全球大气环流发生异常,从而影响全球的气候变化。文中确定ENSO位相的方法与Quan等(2004)提出的相同,即取Nino3区冬季海表温度标准化值大于1的年份为厄尔尼诺年,标准化值小于-1的为拉尼娜年。上文已得到梅雨正、负异常年与鄂霍次克海

区域阻塞日数多、寡相对应,但鄂霍次克海区域阻塞活动异常是否与海温异常存在某种可能联系,接下来将分析鄂霍次克海阻塞形势的出现与两类ENSO的关系。选取1960—2018年中的厄尔尼诺年和拉尼娜年,统计分析该期间6—7月鄂霍次克海地区的阻塞活动(表3)。

从表3可以看到,厄尔尼诺年的6—7月鄂霍次克海区域阻高多年平均日数高于近59年的年平均日数,而拉尼娜年则低于近59年的年平均日数。说明若前冬出现厄尔尼诺海温异常信号,则6—7月鄂霍次克海区域的阻高活动比较活跃,若前冬出现拉尼娜事件,则6—7月鄂霍次克海区域的阻高日数偏少。这种结果表明,6—7月的鄂霍次克海阻高日数多寡可能与前期海面温度异常信号ENSO有关。

此外,以往文献表明,ENSO也与中国江淮梅雨期降水异常有正相关关系,佐证了前面得到的结果。如梁萍等(2018)研究长江梅雨的长期变率与海洋的关系及其可预报性时指出,梅雨异常与ENSO呈现正相关关系,尽管这种关系呈现减弱趋势,但20世纪70年代以后的梅雨异常年际变化分量的可预报性有所增大。高辉等(2007)也提到,20世纪70年代中期之前,前期赤道东太平洋海温异常与中国夏季降雨有较好的对应关系,而在80年代之后,上述关系较难成立。因此,在今后的工作中,阻塞高压与梅雨期降水的预测在参考ENSO的作用时,应该充分考虑二者关系的不同年代际变化。

6 结论和讨论

采用1960—2018年6—7月NCEP/NCAR $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 逐日再分析资料和同期中国国家气象站日降水资料,统计分析了江淮梅雨季整个亚洲区域阻高活动地理分布,以及3个关键区阻高气候变化特征和江淮梅雨异常的关系,得出以下结论:

(1)1960—2018年59年的江淮梅雨季,亚洲阻

表3 1960—2018年中两类ENSO年6—7月鄂霍次克海阻高活动特征
Table 3 Multi-year average characteristics of blocking activity in the Okhotsk Sea from June to July of the years in the two stages of ENSO cycle during 1960—2018

两类ENSO年	6—7月鄂霍次克海阻高年平均日数(d)
厄尔尼诺年	17
拉尼娜年	14.7
1960—2018年	15.3

高活动较为频繁, 共计 363 次阻高事件, 其中心主要分布在乌拉尔山区域(40°—80°E)、贝加尔湖区域(80°—120°E)和鄂霍次克海区域(120°—160°E)。

(2) 近 59 年江淮梅雨季, 亚洲 3 个关键区阻高事件的次数和累计日数由高到低依次为: 鄂霍次克海、乌拉尔山区域和贝加尔湖区域。同时, 亚洲中高纬度地区双阻形势发生比较频繁, 累计双阻日数 346 d, 以乌拉尔山-鄂霍次克海双阻形势居多(206 d), 约占亚洲地区双阻日数的 60%。阻塞事件的平均生命周期 7 d 左右, 最长维持时间为 13 d。

(3) 近 59 年, 乌拉尔山、贝加尔湖和鄂霍次克海 3 个关键区的阻高次数和日数在一定程度上存在此消彼长的相互调制关系。3 个关键区阻塞总次数及分区的阻塞次数和日数都有明显的年际变化, 并呈增多的趋势, 其中线性增加趋势最为明显的是鄂霍次克海区域。年代际变化方面, 亚洲地区和乌拉尔山、贝加尔湖区域阻高事件次数和日数也存在着明显的年代际变化, 鄂霍次克海区域表现不明显。

(4) 近 59 年江淮梅雨季的累计雨量有随年份增大的趋势, 这与亚洲 3 个关键区总的阻塞高压次数与日数的增多趋势一致。江淮梅雨季降雨量多寡与阻高活动密切相关, 梅雨正(负)异常年鄂霍次克海区域、乌拉尔山-鄂霍次克海双阻日数和次数显著偏多(偏少), 而乌拉尔山和贝加尔湖区域的阻塞高压事件与梅雨的关系并不显著, 梅雨正、负异常年贝加尔湖地区阻塞高压次数均接近常年, 贝加尔湖-鄂霍次克海双阻形势为 0。

(5) 江淮梅雨季, 鄂霍次克海阻高日数多寡可能与前期海表温度异常信号(ENSO)有关。若前冬出现厄尔尼诺海温异常信号, 则 6—7 月鄂霍次克海区域的阻高活动比较活跃, 若前冬出现拉尼娜事件, 则 6—7 月鄂霍次克海区域的阻高日数偏少。

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. Bi M Y, Ding Y H. 1992. A study of budget of potential vorticity of blocking high during the drought period in summer of 1980. *Quart J Appl Meteor*, 3(2): 145-156 (in Chinese)

陈丽娟, 许力, 江滢. 2005. 2004 年北半球大气环流及对中国气候异常的影响. *气象*, 31(4): 27-31. Chen L J, Xu L, Jiang Y. 2005. General circulation over the Northern Hemisphere in 2004 and its impact on the climate in China. *Meteor Mon*, 31(4): 27-31 (in Chinese)

丁一汇, 柳俊杰, 孙颖等. 2007. 东亚梅雨系统的天气-气候学研究. *大气科学*, 31(6): 1082-1101. Ding Y H, Liu J J, Sun Y, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia. *Chinese J Atmos Sci*, 31(6): 1082-1101 (in Chinese)

高辉, 王永光. 2007. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究. *气象学报*, 65(1): 131-137. Gao H, Wang Y G. 2007. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO. *Acta Meteor Sinica*, 65(1): 131-137 (in Chinese)

黄菲, 姜浩娜. 2002. 欧亚大陆阻塞高压的统计特征及其与中国东部夏季降水的关系. *青岛海洋大学学报*, 32(2): 186-192. Huang F, Jiang H N. 2002. Study on the statistical characteristics of atmospheric blocking in the Eurasia and its relationship with the summer rainfall over the East of China. *J Ocean Univ Qingdao*, 32(2): 186-192 (in Chinese)

金荣花, 陈涛, 鲍媛媛等. 2008. 2007 年梅汛期异常降水的大尺度环流成因分析. *气象*, 34(4): 79-85. Jin R H, Chen T, Bao Y Y, et al. 2008. Causes analysis of abnormal rainfall and its large-scale circulation during 2007 Meiyu season. *Meteor Mon*, 34(4): 79-85 (in Chinese)

金荣花, 李艳, 王式功. 2009. 四种客观定量表征阻塞高压方法的对比分析. *高原气象*, 28(5): 1121-1128. Jin R H, Li Y, Wang S G. 2009. Comparison and analysis among four objective and quantificational blocking indexes. *Plateau Meteor*, 28(5): 1121-1128 (in Chinese)

金荣花, 李维京, 张博等. 2012. 东亚副热带西风急流活动与长江中下游梅雨异常关系的研究. *大气科学*, 36(4): 722-732. Jin R H, Li W J, Zhang B, et al. 2012. A study of the relationship between East Asia Subtropical Westerly Jet and abnormal Meiyu in the middle-lower reaches of the Yangtze River. *Chinese J Atmos Sci*, 36(4): 722-732 (in Chinese)

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. *大气科学*, 34(5): 865-874. Li C Y, Gu W. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural Mountains in January 2008. *Chinese J Atmos Sci*, 34(5): 865-874 (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. *气象学报*, 62(3): 347-354. Li F, Ding Y H. 2004. Statistical characteristic of atmospheric blocking in the Eurasia high-mid latitudes based on recent 30-year summers. *Acta Meteor Sinica*, 62(3): 347-354 (in Chinese)

李海军, 李云泉. 2007. 2005 年 3 月 10—12 日嘉兴市寒潮大雪成因浅析. *科技通报*, 23(5): 641-645. Li H J, Li Y Q. 2007. Analysis on cause of cold wave and heavy snow during 10-12 March of 2005 in Jiaxing. *Bull Sci Technol*, 23(5): 641-645 (in Chinese)

李艳, 金荣花, 王式功. 2010. 1950—2008 年影响中国天气的关键区阻塞高压统计特征. *兰州大学学报(自然科学版)*, 46(6): 47-55. Li Y, Jin R H, Wang S G. 2010. Statistical characteristics of blocking highs influencing the weather in China during 1950-2008. *J Lanzhou Univ (Natural Sci)*, 46(6): 47-55 (in Chinese)

李艳, 路瑶, 王嘉禾等. 2017. 冬季两类 ENSO 事件对欧亚地区阻塞高压的影响. *兰州大学学报(自然科学版)*, 53(5): 628-635. Li Y, Lu Y, Wang J H, et al. 2017. Effects of two types of ENSO events on the blockings in

- the Eurasian Region in winter. *J Lanzhou Univ(Natural Sci)*, 53(5): 628-635 (in Chinese)
- 李勇, 金荣花, 周宁芳等. 2017. 江淮梅雨季节强降雨过程特征分析. *气象学报*, 75(5): 717-728. Li Y, Jin R H, Zhou N F, et al. 2017. An analysis on characteristics of heavy rainfall processes during the Meiyu season in Jianghuai region. *Acta Meteor Sinica*, 75(5): 717-728 (in Chinese)
- 梁萍, 陈丽娟, 丁一汇等. 2018. 长江梅雨的长期变率与海洋的关系及其可预报性研究. *气象学报*, 76(3): 379-393. Liang P, Chen L J, Ding Y H, et al. 2018. Relationship between long-term variability of Meiyu over the Yangtze River and ocean and Meiyu's predictability study. *Acta Meteor Sinica*, 76(3): 379-393 (in Chinese)
- 陆日宇. 2001. 夏季东北亚阻塞形势维持时的天气尺度波. *大气科学*, 25(3): 289-302. Lu R Y. 2001. Eddies during the blocking maintenance over the northeastern Asia in summer. *Chinese J Atmos Sci*, 25(3): 289-302 (in Chinese)
- 马晓青, 丁一汇, 徐海明等. 2008. 2004/2005 年冬季强寒潮事件与大气低频波动关系的研究. *大气科学*, 32(2): 380-394. Ma X Q, Ding Y H, Xu H M, et al. 2008. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during the winter of 2004/2005. *Chinese J Atmos Sci*, 32(2): 380-394 (in Chinese)
- 覃卫坚, 李栋梁, 王慧等. 2014. 近 50 年广西大范围暴雨的大气环流异常分析. *高原气象*, 33(2): 515-521. Qin W J, Li D L, Wang H, et al. 2014. Analysis on general circulation anomalies of the extensive heavy rains in Guangxi in last 50 years. *Plateau Meteor*, 33(2): 515-521 (in Chinese)
- 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. *南京气象学院学报*, 30(3): 338-344. Shi X J, Zhi X F. 2007. Statistical characteristics of blockings in Eurasia from 1950 to 2004. *J Nanjing Inst Meteor*, 30(3): 338-344 (in Chinese)
- 王会军. 2000. 关于我国几个大水年大气环流特征的几点思考. *应用气象学报*, 11(Z1): 79-86. Wang H J. 2000. Characteristics of the atmospheric general circulation in three flood years in China. *Quart J Appl Meteor*, 11(Z1): 79-86 (in Chinese)
- 王静. 2002. 东北地区夏季冷暖气团环流异常的空间特征及演变. *气象科学*, 22(4): 394-401. Wang J. 2002. Global circulation anomalous spatial character of cold/warm years in summer in eastnorthern China and long-period variation. *Scientia Meteor Sinica*, 22(4): 394-401 (in Chinese)
- 汪秀清, 马树庆, 袭祝香等. 2005. 东北区夏季低温冷害的长期预报方法研究. *灾害学*, 20(1): 36-39. Wang X Q, Ma S Q, Xi Z X, et al. 2005. Method study on long-term forecast of summer freezing damage in Northeast China. *J Catastrophol*, 20(1): 36-39 (in Chinese)
- 王亚非, 宋永加. 1998. 1991 年夏东亚阻塞高压形成的诊断分析. *气象学报*, 56(2): 212-224. Wang Y F, Song Y J. 1998. A diagnostic analysis on the growth mechanism of the east Asia blocking high in 1991. *Acta Meteor Sinica*, 56(2): 212-224 (in Chinese)
- 王亚非, 倪允琪. 2001. 阻塞高压形成、发展机理问题概述. *南京气象学院学报*, 24(3): 437-445. Wang Y F, Ni Y Q. 2001. Review on the formation and development mechanism of blocking high. *J Nanjing Inst Meteor*, 24(3): 437-445 (in Chinese)
- 徐辉, 金荣花. 2011. 2008 年初瞬变涡在中高纬阻高异常中的作用分析. *高原气象*, 30(3): 600-606. Xu H, Jin R H. 2011. Analysis on the effect of the transient eddy on Ural blocking high in 2008. *Plateau Meteor*, 30(3): 600-606 (in Chinese)
- 杨义文. 2001. 7 月份两种东亚阻塞形势对中国主要雨带位置的不同影响. *气象学报*, 59(6): 759-767. Yang Y W. 2001. Different influence of two East Asian blocking situations in July on rain belt location in China. *Acta Meteor Sinica*, 59(6): 759-767 (in Chinese)
- 叶笃正. 1962. 北半球冬季阻塞形势的研究. 北京: 科学出版社, 1-10. Ye D Z. 1962. Study on the Winter Blocking Situations in the Northern Hemisphere. Beijing: Science Press, 1-10 (in Chinese)
- 仪清菊. 1988. 北半球阻塞高压的某些统计特征. *气象*, 9(3): 11-13. Yi Q J. 1988. Some statistical characteristics of blocking in the Northern Hemisphere. *Meteor Mon*, 9(3): 11-13 (in Chinese)
- 张端禹, 郑彬, 汪小康等. 2015. 华南前汛期持续暴雨环流分型初步研究. *大气科学学报*, 38(3): 310-320. Zhang D Y, Zheng B, Wang X K, et al. 2015. Preliminary research on circulation patterns in the persistent heavy rain processes during the first rainy season in South China. *Trans Atmos Sci*, 38(3): 310-320 (in Chinese)
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响. *气象学报*, 56(2): 199-211. Zhang Q Y, Tao S Y. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall. *Acta Meteor Sinica*, 56(2): 199-211 (in Chinese)
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2001. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流条件. *大气科学*, 25(4): 567-576. Zhang Q Y, Tao S Y, Zhang S L. 2001. A study of excessively heavy rainfall in the Songhuajiang-Nenjiang River Valley in 1998. *Chinese J Atmos Sci*, 25(4): 567-576 (in Chinese)
- 赵汉光, 陈雪珍. 1990. 北半球阻塞高压的统计分析. *气象*, 16(3): 3-7. Zhao H G, Chen X Z. 1990. The statistical analysis of atmospheric blocking in the Northern Hemisphere. *Meteor Mon*, 16(3): 3-7 (in Chinese)
- 周宁. 2016. 冬季欧亚阻塞高压的空间特征及其对中国温度的影响. *成都信息工程大学学报*, 31(4): 419-424. Zhou N. 2016. The spatial characters of blocking over Eurasia and its impact on temperature of China. *J Chengdu Univ Inf Technol*, 31(4): 419-424 (in Chinese)
- 周晓平. 1957. 亚洲中纬度区域阻塞形势的统计研究. *气象学报*, 28(1): 75-85. Zhou X P. 1957. Statistical investigation on the blocking situations over Asia. *Acta Meteor Sinica*, 28(1): 75-85 (in Chinese)
- Altenhoff A M, Martius O, Croci-Maspoli M, et al. 2008. Linkage of atmospheric blocks and synoptic-scale Rossby waves: A climatological analysis. *Tellus A*, 60(5): 1053-1063
- Chen T C, Yoon J H. 2002. Interdecadal variation of the North Pacific wintertime blocking. *Mon Wea Rev*, 130(12): 3136-3143
- Croci-Maspoli M, Schwierz C, Davies H C. 2007. A multifaceted climatology of atmospheric blocking and its recent linear trend. *J Climate*, 20(4): 633-649
- Elliott R D, Smith T B. 1949. A study of the effects of large blocking highs on

- the general circulation in the Northern-Hemisphere westerlies. *J Meteor*, 6(2): 68-85
- Lejenäs H, Økland H. 1983. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. *Tellus A*, 35(5): 350-362
- Liu P, Zhu Y J, Zhang Q, et al. 2018. Climatology of tracked persistent maxima of 500-hPa geopotential height. *Climate Dyn*, 51(1): 701-717
- Lorenz E N. 1963. The mechanics of vacillation. *J Atmos Sci*, 20(5): 448-465
- Lupo A R, Smith P J. 1995. Climatological features of blocking anticyclones in the Northern Hemisphere. *Tellus A*, 47(4): 439-456
- Lupo A R. 1997. A diagnosis of two blocking events that occurred simultaneously in the midlatitude Northern Hemisphere. *Mon Wea Rev*, 125(8): 1801-1823
- Quan X W, Diaz H F, Hoerling M P. 2004. Change in the tropical Hadley cell since 1950//Diaz H F, Bradley R S. *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*. Dordrecht: Springer
- Sumner E J. 1959. Blocking anticyclones in the Atlantic-European sector of the Northern Hemisphere. *Meteor Mag*, 88: 300-310
- Tibaldi S, Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking. *Tellus A*, 42(3): 343-365
- Treidl R A, Birch E C, Sajecki P. 1981. Blocking action in the Northern Hemisphere: A climatological study. *Atmos Ocean*, 19(1): 1-23
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2010. Effect of the climate shift around mid 1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate. *Int J Climatol*, 30(1): 153-158
- White E B, Clark N E. 1975. On the development of blocking ridge activity over the central north Pacific. *J Atmos Sci*, 32(3): 489-502
- Wiedenmann J M, Luop A R, Mokhov I I, et al. 2002. The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic. *J Climate*, 15(23): 3459-3473