

徐玮平,孟祥新,伯忠凯,等. 2000—2015年华北地区8月极端干旱的异常环流型及其波活动特征[J].海洋气象学报,2021,41(1):92-99.

XU Weiping, MENG Xiangxin, BO Zhongkai, et al. Anomalous circulation patterns and wave activity characteristics of extreme drought in North China in August from 2000 to 2015[J]. Journal of Marine Meteorology, 2021, 41(1): 92-99. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.01.009. (in Chinese)

## 2000—2015年华北地区8月极端干旱的 异常环流型及其波活动特征

徐玮平<sup>1</sup>,孟祥新<sup>1</sup>,伯忠凯<sup>1</sup>,邢雅敏<sup>2</sup>

(1.山东省气候中心,山东 济南 250031; 2.淄博市临淄区气象局,山东 淄博 255400)

**摘要:** 利用1961—2015年华北地区54个国家级气象观测站夏季8月逐日降水资料和2000—2015年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)再分析数据,研究了华北地区8月极端干旱的异常环流型及原因。结果表明:华北地区极端干旱事件以年际变化为主,2000—2015年华北地区极端干旱年在中高纬500 hPa高度距平场上存在“-、+、-、+”的异常波列结构,乌拉尔山西部地区上空存在较强的反气旋性距平使得暖脊加强向北收缩,同时贝加尔湖上空存在较强的反气旋性距平使得此处的高空脊强度异常加强,影响范围加大,这种异常环流形势导致高空脊前干冷西北气流输送到华北地区。欧洲西部地区是北半球中高纬波作用通量的关键区,该地区地表2 m温度呈明显增加趋势,同时该关键区对应的500 hPa垂直波作用通量TNZ也呈现明显增加趋势。由于异常热力强迫作用激发出EU波列,低层能量向上传输,高层能量向外频散影响下游乌拉尔山西部地区暖脊加强,造成中高纬环流异常,导致华北地区极端干旱事件频发。

**关键词:** 极端干旱;地表2 m温度;大气环流;波通量

**中图分类号:** P46 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2021)01-0092-08

**DOI:** 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.01.009

## Anomalous circulation patterns and wave activity characteristics of extreme drought in North China in August from 2000 to 2015

XU Weiping<sup>1</sup>, MENG Xiangxin<sup>1</sup>, BO Zhongkai<sup>1</sup>, XING Yamin<sup>2</sup>

(1. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China; 2. Linzi Meteorological Bureau of Zibo, Zibo 255400, China)

**Abstract** Based on the daily precipitation data of 54 national meteorological observation stations in North China in August from 1961 to 2015 and reanalysis data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) from 2000 to 2015, this paper investigates the anomalous circulation patterns and causes of the extreme drought in August in North China. The results are as follows. The extreme drought events in North China show interannual variations. During the extreme drought years in North China from 2000 to 2015, there is an abnormal wave train structure of “-, +, -, +” in the geopotential height anomaly field at 500 hPa in the mid-high latitudes. There is a strong anticyclonic anomaly over the western Ural Mountains which makes the warm ridge move northward, the strong anticyclonic anomaly over Lake Baikal strengthens the upper-level ridge and enlarges its influence range at the same time, and such anomalous circulation situation impels the cold and dry northwest

收稿日期:2020-11-17;修订日期:2021-01-14

基金项目:山东省气象局科研项目(2020SDQN03)

第一作者:徐玮平,男,硕士,助理工程师,主要从事极端气候与短期气候预测研究,245332105@qq.com。

通信作者:孟祥新,男,博士,正高级工程师,主要从事短期气候预测和区域气候模拟研究,mxx8544@hotmail.com。

airflow in front of the upper-level ridge to be transported to North China. Western Europe is a key area for the wave activity flux in the mid-high latitudes of the Northern Hemisphere, where the surface temperature at 2 m presents a significantly increasing trend, and the vertical wave activity flux TNZ at 500 hPa corresponding to this key area also increases significantly. Due to the abnormal thermal forcing, EU wave trains are excited, low-level energy is transmitted upward, and high-level energy is dispersed outward, which strengthens the warm ridge over the western Ural Mountains, causing anomalous circulation patterns in the mid-high latitudes and frequent extreme drought events in North China.

**Key words** extreme drought; surface temperature at 2 m; atmospheric circulation; wave flux

## 引言

在全球气候变暖的背景下,全球降水量呈显著减少趋势,而极端干旱事件的频率和强度明显增加<sup>[1]</sup>。大范围洪涝和干旱等自然灾害持续时间长、影响范围广,对经济社会发展,特别是对农业生产具有重要影响<sup>[2]</sup>。据统计,在全球自然灾害造成的经济损失中,干旱占比约为50%<sup>[3]</sup>。华北地区是我国北方经济规模最大、最具活力的地区,其农业发展历史悠久,也是我国最重要的粮食产地之一。华北地区极端干旱事件也呈现异常变化趋势。因此对华北地区极端干旱事件的发生发展规律进行更为详细的研究,对监测预报极端天气气候、指导农业生产、减少经济社会损失等具有重要指导意义。

21世纪以来全球极端旱涝事件明显增多,欧亚大陆是全球干旱化最为剧烈的地区<sup>[4-5]</sup>,干旱发生的频率和强度进一步增强<sup>[6]</sup>。对于我国而言,北方极端干旱事件发生频率高于南方,且干旱化异常明显<sup>[7-8]</sup>,夏季的干旱主要发生在华北和江淮地区<sup>[9]</sup>;干旱较重时期主要在20世纪60年代、70年代后期至80年代前期、80年代中后期以及90年代后期至21世纪初<sup>[10]</sup>。气象干旱面积增加主要表现在北方地区,其中海河流域、辽河流域和松花江流域干旱趋势增加显著<sup>[11]</sup>。华北平原干旱略有恶化趋势,轻旱面积和中旱面积呈明显上升<sup>[12]</sup>。还有研究进一步指出20世纪60年代后我国夏季降水明显减少<sup>[13]</sup>,极端旱涝灾害事件主要集中在华北地区<sup>[14]</sup>,其中90年代中后期华北地区极端干旱事件呈现出明显增加趋势<sup>[15]</sup>。

极端干旱事件是大气环流持续异常作用的结果<sup>[16-17]</sup>,高度场异常分布主要是外强迫激发出的准定常波频散引起的<sup>[18-19]</sup>。我国西北干旱区春季感热通过欧亚上空“丝绸之路”型遥相关波列和江淮夏季降水有正相关关系,当西北地区感热减弱时,江淮地区易发生干旱<sup>[20-21]</sup>。欧亚大陆上空对流层

欧亚型(Eurasian pattern, EU)准静止波列使得江淮地区受高压脊控制,发生严重干旱事件<sup>[22]</sup>。许多学者也针对华北地区干旱事件进行了大量研究,其中影响华北地区降水并形成旱涝的主要原因有:东亚太平洋型遥相关波列<sup>[23]</sup>、低层大气反气旋环流增强和东亚夏季风减弱造成的水汽输送减少<sup>[24]</sup>、赤道东太平洋海温准周期震荡<sup>[25]</sup>以及夏季西太平洋副热带高亚南北移动导致的雨带位置变化<sup>[26-27]</sup>,另外也有研究认为北方地区的干旱化可能是人为气候变化和自然气候变率共同作用的结果<sup>[28]</sup>。

上述诸多研究侧重于极端干旱事件与大气环流异常的关系,但是针对华北地区极端干旱异常环流型及其罗斯贝波频散活动的研究较少。因此在前人的基础上,本文针对2000—2015年夏季8月华北地区极端干旱环流异常特征进行讨论,并从大气环流、波通量等方面进一步探讨华北地区极端干旱事件的成因,从而为气候预测奠定一定基础。

## 1 资料选取与研究方法

### 1.1 资料选取

本文利用华北地区(35°~41°N, 112°~123°E)1961—2015年夏季8月54个国家气象观测站逐日降水资料,再分析资料采用欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)分辨率为0.75°×0.75°的2000—2015年逐月再分析资料,要素包括:高度场、三维风场和地表2 m温度。

选择美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)提供的帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)作为连续无雨日干旱指标的对比指数,进行对比验证。PDSI指数充分考虑下垫面以及持续时间对干旱程度的影响<sup>[29]</sup>,该指数作为干旱指标已经被广泛应用于全球和区域干旱过程检测和分析<sup>[30]</sup>。

## 1.2 方法介绍

本文采用连续无雨日作为定义干旱的指标,该指标也已经应用于大量研究<sup>[31-32]</sup>中。将逐站夏季8月连续无雨日进行降序排列,通过百分位法<sup>[33]</sup>将华北地区每站逐年无雨日数序列的第95个百分位值的55 a无雨日平均值作为极端干旱的阈值。如果某站无雨日超过阈值,则认为该站出现极端干旱事件。

文章采用集合经验模态分解方法(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)分析夏季8月华北地区极端干旱时间变化特征,接着利用合成分析和回归等方法研究华北极端干旱与大气环流异常的关系,另外采用 TAKAYA and NAKAMURA<sup>[34]</sup>发现的三维波作用通量描述罗斯贝波能量的传播特征,探究波作用通量与华北地区极端干旱的关系,最后通过使用 SVD 奇异值分解方法探究地表 2 m 温度与垂直波作用通量的相关关系。

## 2 结果分析

### 2.1 华北极端干旱时间尺度特征分析

计算 1961—2015 年夏季 8 月华北地区连续无雨日超过极端干旱阈值事件的频次,除以总次数得到极端干旱频率,另外将计算得到的 8 月极端干旱频率与同期干旱指数 PDSI,进行相关关系分析(图 1),发现两者的相关系数高达 0.446,且通过了 99.9% 信度显著性检验,因此说明连续无雨日对于本文分析华北区域的极端干旱事件具有代表性。

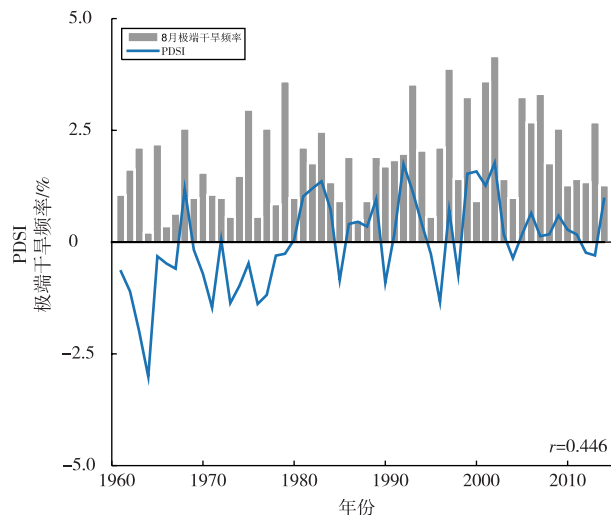


图 1 1961—2015 年华北地区 8 月极端干旱频率(灰色柱,单位:%)与同期干旱指数 PDSI(蓝色线)的相关关系(均经过标准化)

Fig.1 Correlation between frequency of extreme drought (gray bar, units: %) and synchronous PDSI (blue line) in North China in August from 1961 to 2015 (all data have been standardized)

图 2 是利用 EEMD 方法对 1961—2015 年 8 月极端干旱频率进行分解得到的 4 个本征模态函数 IMF (intrinsic mode function) 分量和趋势分量 (RES),各个 IMF 分量依次反映了华北极端干旱从高频到低频时间尺度的波动特征,趋势分量 RES 表示极端干旱频率整体演变趋势。另外对 4 个本征模态函数 IMF 进行红白噪声检验,IMF1 通过了白噪声 80% 的显著性检验(图略),其他本征模态函数没有通过,表明 IMF1 分量最为显著,即准 3 a 周期性振荡最为显著。

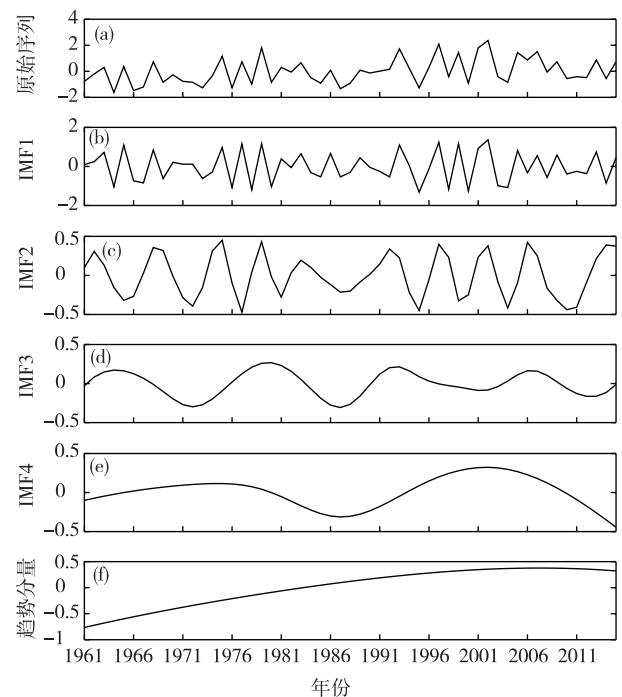


图 2 基于 EEMD 的 1961—2015 年华北地区 8 月极端干旱频率序列趋势分解(a.原始序列,b—e. IMF1—IMF4 分量,f.趋势项)

Fig.2 Trend decomposition of frequency of extreme drought in North China in August from 1961 to 2015 based on EEMD (a. original series, b—e. IMF1—IMF4 components, f. trend item)

由图 2 和表 1 可知,IMF1 分量表示的准 3 a 周期方差贡献率最大,达到了 70.68%,振荡信号极为明显,在 20 世纪 70 年代中后期和 90 年代以后至 21 世纪极端干旱频率变化振幅明显高于其他时段; IMF2 分量表示的准 6 a 周期振荡方差贡献率约为 9.33%,基本反映出 20 世纪 80 年代振幅相对较小; IMF3 分量表示准 18 a 周期振荡方差贡献率约为 3.18%,反映出 90 年代以后振幅相对较小; IMF4 分量表示准 24 a 的周期变化,其方差贡献率约为 3.18%,反映出 90 年代以后振幅相对较大;趋势项

分量的方差贡献率为 13.64%, 表明极端干旱频率整体上呈现出持续增大的趋势。

表 1 华北地区极端干旱频率各分量的方差贡献率

Table 1 Variance contribution rate of each component of frequency of extreme drought in North China

IMF 分量	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	RES
周期	3 a	6 a	18.5 a	24 a	
贡献率	70.68%	9.33%	3.18%	3.18%	13.64%

由上述分析可知,近五十多年来华北地区极端干旱频率异常分布具有多尺度的变化特征,年际振荡占据主导地位。为进一步探讨华北极端干旱频率年际、年代际振荡在整体变化中的作用,采用本征模函数 IMF1—2、IMF3—4 和趋势项 RES 分别对华北极端干旱频率的年际、年代际变化进行构造。图 3 显示的是华北极端干旱频率原始距平序列、年际变化和年代际变化。其中年际变化由本征模函数 IMF1 和 IMF2 相加得到,而年代际变化则由本征模函数 IMF3、IMF4 与趋势项相加得到。结果表明,1961—2015 年华北极端干旱在年际尺度上整体呈现出增加与减少相间的特征,在年代际尺度上 20 世纪 70 年代前期整体表现为缓慢增加,而在 20 世纪 80 年代中期—21 世纪呈现明显增加的趋势。

### 2.2 21 世纪华北极端干旱环流特征分析

大气环流异常是直接导致区域尺度甚至全球

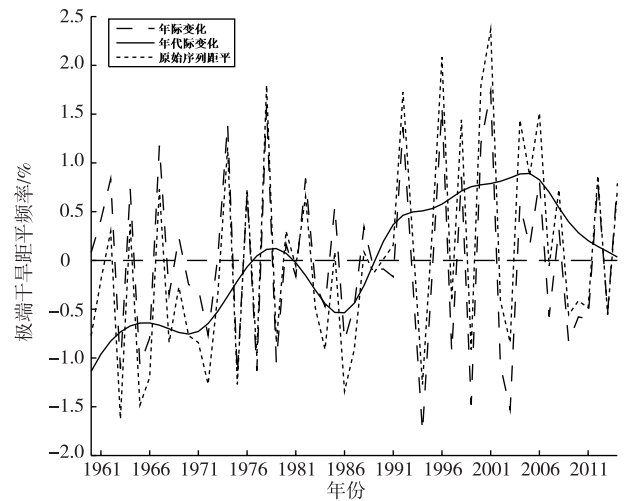


图 3 基于集合经验模态分解的 1961—2015 年华北地区 8 月极端干旱频率序列年际与年代际变化

Fig.3 Interannual and interdecadal variations of frequency of extreme drought in North China in August from 1961 to 2015 based on EEMD

尺度极端事件发生的重要原因<sup>[35]</sup>。本文主要分析 2000—2015 年华北地区 8 月极端干旱大气环流异常特征并初步探究其成因。2000 年以后所有典型极端干旱年份(2001、2002、2005、2006、2007、2009、2013 和 2015 年)对应的 500 hPa 环流距平场(图 4)上可以看出,在北半球中高纬格陵兰岛至欧亚大陆上空存在着“-、+、-、+”明显的异常波列结构。乌拉尔山西部地区 and 贝加尔湖地区上空存在明显的

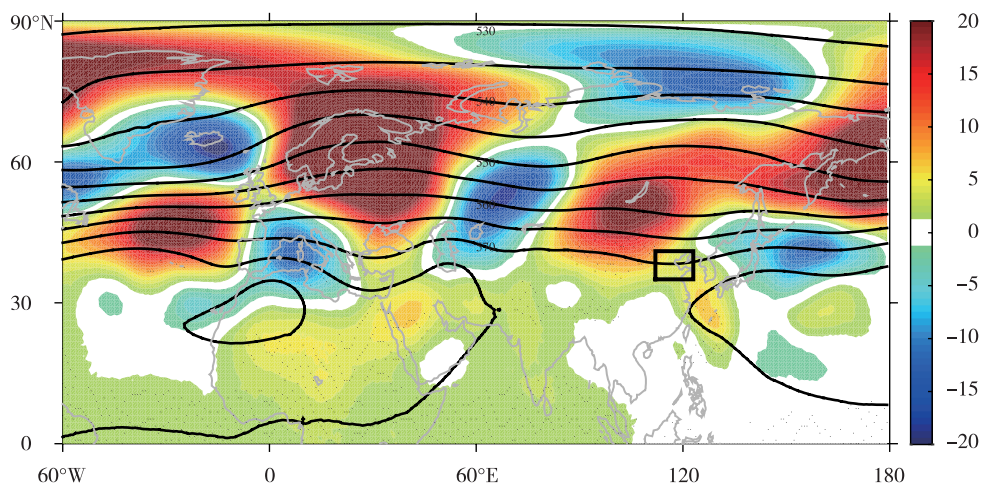


图 4 2000 年以后(2001、2002、2005、2006、2007、2009、2013 和 2015 年)华北地区 8 月典型极端干旱年 500 hPa 位势高度距平场(填色,单位:  $10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^2$ )和位势高度气候平均场(等值线,单位:  $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^2$ )(打点区域为通过 95% 显著性检验的区域,黑色方框为 112°E 以东的我国华北地区)

Fig.4 Distribution of geopotential height anomaly (colored, units:  $10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^2$ ) and climatological mean geopotential height (isoline, units:  $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^2$ ) at 500 hPa in typical years (2001, 2002, 2005, 2006, 2007, 2009, 2013, and 2015) of extreme drought in North China in August (dotted area denotes passing the significance test at 95% level, black rectangle indicates location of North China to the east of 112°E)

正异常中心,格陵兰岛以东和里海一带上空存在明显的负异常中心。由位势高度的气候平均场可看出,太平洋上空气旋性距平使得东亚大槽加深发展,乌拉尔山西部地区上空存在较强的反气旋性距平使得暖脊加强向北收缩,贝加尔湖上空存在较强且较大范围的反气旋性距平使得此处的高空脊强度异常加强、影响范围加大,这种异常环流形势导致高空脊前干冷西北气流输送到华北地区,有效地抑制了该地区夏季8月降水,导致华北地区夏季8月极端干旱少雨。

为进一步探讨华北地区极端干旱事件与大气环流异常的关系,将2000—2015年华北地区8月极端干旱频率与同期的500 hPa位势高度距平场进行回归分析(图5)。从图5中可以看出,北半球中高

纬存在着一个自西向东分布为“-、+、-、+”的波列结构,其中两个显著的正相关中心分别位于西欧和贝加尔湖地区,两个显著的负相关中心位于格陵兰岛和里海地区。该波列结构类似于EU欧亚遥相关型<sup>[22]</sup>,并且与前文提到的图5极端干旱环流分布类似。当夏季8月华北地区上空存在位势高度正距平时,反气旋式环流加强,高空脊影响范围加强,受干冷下沉气流控制的华北地区降水显著减少,而极端干旱频率呈显著增加趋势。这充分说明了,极端干旱事件中高纬环流形势异常主要是波列结构的异常,这是引起2000—2015年夏季8月华北地区极端干旱的直接因素。接下来,本文将寻找中高纬度欧亚大陆环流异常具体关键区,定量分析导致大气环流异常的原因。

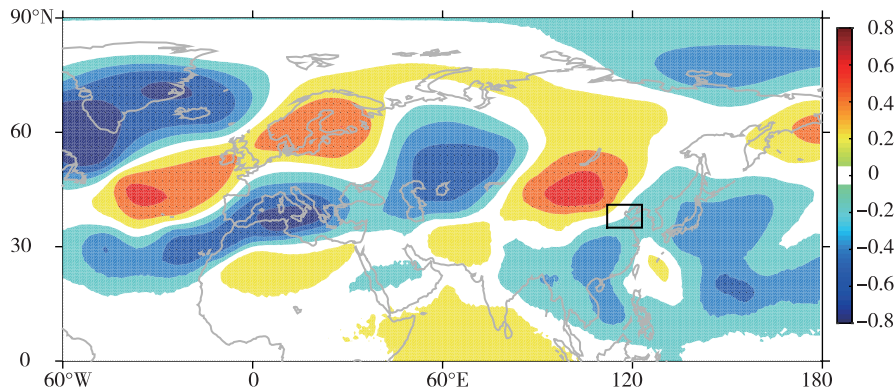


图5 2000—2015年华北地区8月极端干旱频率回归的同期500 hPa位势高度距平场(填色,单位: $10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^2$ ;打点区域为通过95%信度检验的显著区域,黑色方框为112°E以东的我国华北地区)

Fig.5 Regression of synchronous geopotential height anomaly at 500 hPa on frequency of extreme drought in North China in August from 2000 to 2015 (colored, units:  $10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^2$ ; dotted area denotes passing the significance test at 95% level, black rectangle indicates location of North China to the east of 112°E)

### 2.3 极端干旱环流异常的关键强迫源

为了探究极端干旱中高纬大气环流异常的原因,采用波作用通量来分析准定常波的活动情况,探究中高纬大气环流异常与夏季8月华北极端干旱事件的相关关系。因此选取2000年以后典型极端干旱年(2001、2002、2005、2006、2007、2009、2013和2015年)对300 hPa波作用通量矢量(TNF)的水平分量(TNX)和500 hPa波作用通量的垂直分量(TNZ)进行了合成分析(图6),其中垂直波作用通量TNZ表示与海平面变化和陆地表面异常强迫有关<sup>[36]</sup>,可以判断上层的波能量是否来源于低层。

从图6a中可以看出,在300 hPa高度上中高纬欧洲西部地区为波作用通量辐散的关键区,波作用通量从北大西洋洋面上自西向东传播,从该辐散关键区分为向偏南、偏北两个方向传播,在中高纬、中

低纬形成两支波作用通量传播带,其中向偏北方向传播一支传播路径更为连续,传播方向自西向东近乎与EU波列一致<sup>[37]</sup>,沿欧洲北部传播至我国华北地区,在华北地区有明显的波作用通量辐合,使得上空的反气旋式异常环流予以加强进而影响到华北地区;而向偏南方向传播一支的传播路径并不明显。另外从图6b中500 hPa垂直波作用通量(TNZ)特征分析可以看出,欧洲西部该频散区也是北半球最大的垂直波作用通量关键区,这个关键区将低层的能量向上传播,为高层波作用通量辐散关键区的垂直上升运动提供了动力,有利于华北地区极端干旱的维持和加强。

大气环流持续异常主要由海温、海冰、积雪和土壤湿度等外强迫因子造成<sup>[38]</sup>。前文已经从波作用通量的角度建立了欧亚大陆与我国华北地区在

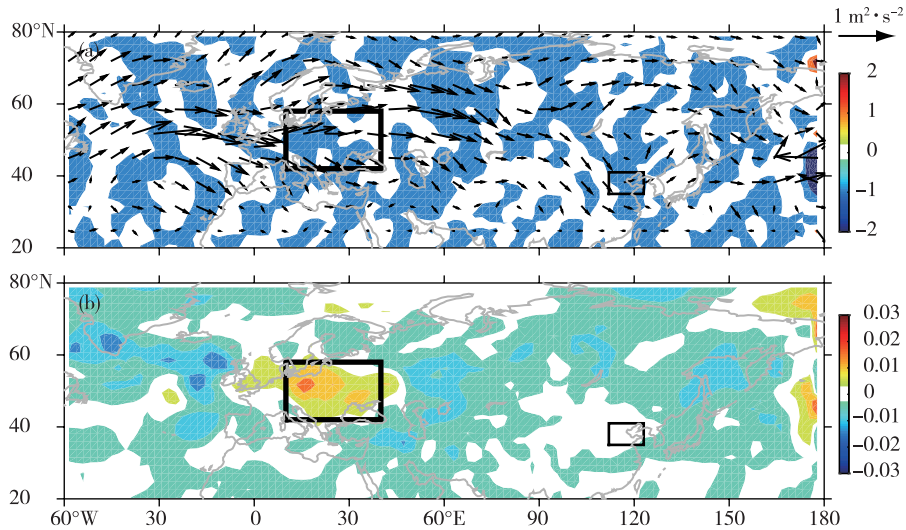


图 6 2000 年以后北大西洋地区与欧亚大陆 8 月 300 hPa 波作用通量(箭头,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )与通量水平散度(填色,单位: $10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )(a)及 500 hPa 波作用通量垂直分量的合成(b;填色,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )(细线方框为 112°E 以东的我国华北地区,粗线方框为关键区)

Fig.6 Wave activity flux (arrow, units:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) at 300 hPa and horizontal divergence of flux (colored, units:  $10^{-5} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) (a) and composites of vertical components of wave activity flux at 500 hPa (b; colored, units:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) in the North Atlantic and Eurasia in August since 2000 (rectangle in fine line for location of North China to the east of 112°E, rectangle in thick line for key area)

大气波扰动能量上的联系,为了进一步确定地表温度与波作用通量的对应关系,着重分析欧洲西部关键区地表 2 m 温度与同期上空 500 hPa 垂直波作用通量的关系。本文将 2000—2015 年夏季 8 月欧亚大陆乌拉尔山以西地区地表 2 m 温度作为左场,同期上空 500 hPa 垂直波作用通量作为右场进行 SVD 奇异值分解,其中第一模态方差贡献率最大达到了 53.77%,图 7 为两者第一模态异性相关图。

对比图 7a、7b,欧亚大陆整体正相关区域呈现

增多趋势,地表 2 m 温度增加明显,其中欧洲西部关键区地表 2 m 温度呈明显增加趋势,同时该关键区对应的上空 500 hPa 垂直波作用通量 TNZ 也呈现明显增加趋势。欧洲西部关键区地表异常热力强迫作用,使得低层能量向上传输,影响下游乌拉尔山西部地区暖脊加强,致使上空环流异常,从而导致华北地区气候异常,这与上文图 4 的环流形势相对应。

图 8 为 2000—2015 年夏季 8 月欧亚大陆乌拉

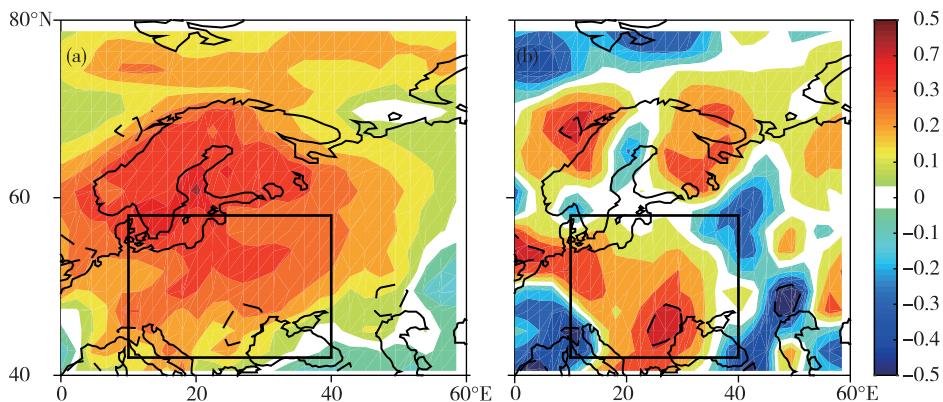


图 7 2000—2015 年欧亚大陆 8 月地表 2 m 温度(a)与同期上空 500 hPa 垂直波作用通量(b)SVD 第一模态异性相关系数(填色)空间分布(黑色虚线标记的区域为通过 95%信度检验的显著区域,黑色方框为关键区)

Fig.7 Heterogeneous correlation coefficients (colored) of the first mode of SVD (singular value decomposition) between surface temperature at 2 m (a) and synchronous vertical wave activity flux (b) at 500 hPa over Eurasia in August from 2000 to 2015 (area in black dotted line denotes passing the significance test at 95% level, rectangle in black line indicates key area)

尔山以西地区地表 2 m 温度与同期上空 500 hPa 垂直波作用通量 SVD 时间序列图。由图 8 可以看出, 欧亚大陆地表 2 m 温度和同期上空 500 hPa 垂直波作用通量都呈现出波动趋势。两者的相关系数为 0.513, 通过了 95% 的显著性检验, 说明 2000—2015 年夏季 8 月欧洲西部关键区地表 2 m 温度模态有助于波作用通量的上传, 这与上述结论相一致。上述分析表明 2000 年以后欧洲西部关键区地表温度上升, 导致此处垂直波作用通量 TNZ 也随之上升。由于欧洲西部关键区地表 2 m 温度异常热力变化激发欧亚波列, 导致高空中层 500 hPa 垂直波作用通量增加, 高空能量向外频散, 影响中高纬欧亚环流变化。

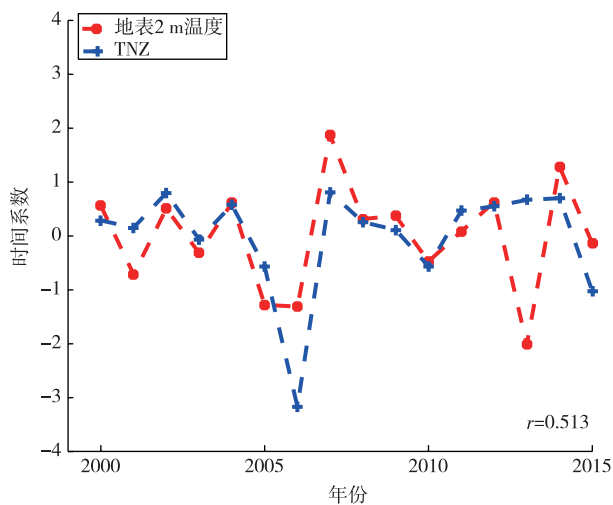


图 8 2000—2015 年 8 月欧亚大陆地表 2 m 温度与同期上空 500 hPa 垂直波作用通量 SVD 时间序列图

Fig.8 SVD time series of surface temperature at 2 m and synchronous vertical wave activity flux at 500 hPa over Eurasia in August from 2000 to 2015

该结果解释了 2000—2015 年夏季 8 月欧洲西部地区异常热力强迫下, 造成中高纬环流异常, 激发出 EU 遥相关, 乌拉尔山西部地区为显著的正距平, 反气旋式环流异常加强, 经向环流增大, 有利于该地区暖脊的维持和加强。我国华北地区上空的反气旋式环流也异常加强, 从而使得受该脊控制下的华北地区降水偏少, 进而导致华北地区发生极端干旱事件。

### 3 结论

本文首先分析了 1961—2015 年夏季 8 月华北地区极端干旱频率多时间尺度特征, 挑选 2000—2015 年夏季 8 月所有典型极端干旱年分析大气环

流异常特征, 并探究了极端干旱与大气环流异常之间的关系, 最后利用波通量探究能量源激发的罗斯贝波与极端干旱之间的关系, 得到以下结论:

1) 华北地区夏季 8 月极端干旱频率具有多时间尺度的变化特征, 以年际变化为主; 而在年代际尺度上前期 20 世纪 70 年代整体表现为缓慢增加, 而在 20 世纪 80 年代中期—21 世纪呈现明显增加的趋势。

2) 2000—2015 年典型极端干旱年在中高纬 500 hPa 高度距平场上存在明显的异常波列结构。乌拉尔山西部地区上空存在较强的反气旋性距平, 使得暖脊加强向北收缩; 贝加尔湖上空存在较强且较大范围的反气旋性距平, 使得此处的高空脊强度异常加强、影响范围加大, 受干冷下沉气流控制的华北地区降水显著减少, 极端干旱频率呈显著增加趋势。

3) 由于欧洲西部关键区地表异常热力强迫作用激发出 EU 欧亚波列, 低层能量向上传输, 高层能量向外频散影响下游乌拉尔山西部地区暖脊加强, 造成中高纬环流异常, 导致华北地区极端干旱事件频发。

通过波作用通量揭示了欧洲西部关键区激发出的罗斯贝波对 2000—2015 年夏季 8 月华北地区极端干旱的调制作用, 这对预测我国极端干旱事件具有一定指导意义。但是本文并未深入研究造成欧洲西部异常热力强迫的原因, 这部分有待于进一步讨论。对这方面问题的进一步探讨将有助于深入了解 21 世纪夏季华北地区极端干旱年际和年代际变化的形成机理。

### 参考文献:

- [1] 李维京, 赵振国, 李想, 等. 中国北方干旱的气候特征及其成因的初步研究[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 1-5.
- [2] PARK S, IM J, JANG E, et al. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions [J]. Agric For Meteorol, 2016, 216: 157-169.
- [3] 黄荣辉. 关于我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究进展[J]. 中国基础科学, 2001(8): 4-8.
- [4] 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 等. 干旱半干旱区气候变化研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 9-14.
- [5] HUANG J P, YU H P, GUAN X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. Nature Clim Change, 2016, 6(2): 166-171.
- [6] 管晓丹, 石瑞, 孔祥宁, 等. 全球变化背景下干旱区陆气机制研究综述[J]. 地球科学进展, 2018, 33(10):

- 995-1004.
- [7] FU C B. An aridity trend in china and its abrupt feature in association with the global warming[J]. *Adv Atmos Sci*, 1993, 10(1): 11-20.
- [8] 刘珂, 姜大勝. 中国夏季和冬季极端干旱年代际变化及成因分析[J]. *大气科学*, 2014, 38(2): 309-321.
- [9] 陈烈庭. 华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征[J]. *高原气象*, 1999, 18(4): 477-485.
- [10] 邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 371-378.
- [11] 杨杰, 侯威, 封国林. 干旱破纪录事件预估理论研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 664-675.
- [12] 田丰, 武建军, 刘雷震, 等. 1901—2015 年华北平原干旱时空转移特征及热点区域探测[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(6): 87-96.
- [13] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势[J]. *高原气象*, 1999, 18(4): 465-476.
- [14] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. *干旱区研究*, 2004, 21(2): 97-103.
- [15] 胡顺起, 曹张驰, 刘婷婷. 华北地区极端干旱事件的变化特征[J]. *气象与环境科学*, 2017, 40(4): 121-125.
- [16] WALLACE J M, GUTZLER D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter[J]. *Mon Wea Rev*, 1981, 109(4): 784-812.
- [17] ZHANG J, LI L, WU Z W, et al. Prolonged dry spells in recent decades over north-central China and their association with a northward shift in planetary waves[J]. *Int J Climatol*, 2015, 35(15): 4829-4842.
- [18] HOSKINS B J, KAROLY D. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing[J]. *J Atmos Sci*, 1981, 38(6): 1179-1196.
- [19] 吴国雄, 刘辉, 陈飞, 等. 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*, 1994, 52(3): 308-320.
- [20] 周连童, 黄荣辉. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系[J]. *大气科学*, 2008, 32(6): 1276-1288.
- [21] ZHOU L T, HUANG R H. Interdecadal variability of summer rainfall in Northwest China and its possible causes[J]. *Int J Climatol*, 2010, 30(4): 549-557.
- [22] 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 1999 及 2000 年夏季华北严重干旱的物理成因分析[J]. *大气科学*, 2004, 28(1): 125-137.
- [23] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. *天气学原理和方法* [M]. 4 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [24] 李新周, 马柱国, 刘晓东. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系[J]. *大气科学*, 2006, 30(2): 277-284.
- [25] 张宇, 冯建英, 王芝兰, 等. 2018 年秋季全国干旱状况及其影响与成因[J]. *干旱气象*, 2018, 36(6): 1052-1060.
- [26] 郭其蕴. 东亚夏季风的变化与中国降水[J]. *热带气象*, 1985, 1(1): 44-52.
- [27] 张庆云, 陶诗言. 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*, 2003, 27(3): 369-380.
- [28] 龚志强, 封国林. 中国近 1000 年旱涝的持续性特征研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(6): 3920-3931.
- [29] PALMER W C. Meteorological drought: NOAA Research Paper No. 45 [R]. Washington, D. C.: U. S. Weather Bureau, 1965: 1-58.
- [30] 马柱国, 符淙斌. 1951~2014 年中国北方干旱化的基本事实[J]. *科学通报*, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [31] FRICH P, ALEXANDER L V, DELLA-MARTA P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. *Climate Res*, 2002, 19(3): 193-212.
- [32] 刘诗梦, 张杰, 于涵. 近 30 年江淮流域夏季年代际干旱特征及其与欧亚西风环流异常的关系[J]. *高原气象*, 2018, 37(5): 1254-1263.
- [33] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 1-10.
- [34] TAKAYA K, NAKAMURA H. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow[J]. *Geophys Res Lett*, 1997, 24(23): 2985-2988.
- [35] 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 太平洋年代际振荡的研究进展[J]. *大气科学*, 2004, 28(6): 979-992.
- [36] 徐玮平, 张杰, 陈志恒. 两类春季极端低温的年代际特征与欧亚环流异常关系对比[J]. *高原气象*, 2018, 37(6): 1655-1670.
- [37] 刘晨, 张杰, 徐玮平. 春季欧亚大陆积雪主模态及其与北大西洋海温的关系[J]. *大气科学*, 2020, 44(4): 792-807.
- [38] 杨修群, 黄士松. 外强迫引起的夏季大气环流异常及其机制探讨[J]. *大气科学*, 1993, 17(6): 697-702.