

娄德君,王永光,陈晨,2022. 近 20 年长江中下游梅汛期雨量异常的环流特征及前兆信号[J]. 气象,48(9):1130-1139. Lou D J, Wang Y G, Chen C, 2022. Circulation characteristics and precursory signals of abnormal Meiyu rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River in the past 20 years[J]. Meteor Mon, 48(9):1130-1139(in Chinese).

近 20 年长江中下游梅汛期雨量异常的 环流特征及前兆信号*

娄德君¹ 王永光² 陈 晨¹

1 黑龙江省齐齐哈尔市气象局,齐齐哈尔 161006

2 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: 利用长江中下游梅汛期雨量资料、NCEP 逐日再分析资料、NOAA 月平均海表温度和北极海冰指数等资料,采用相关分析、回归分析等方法研究了 2000 年后长江中下游梅汛期年代际少雨背景下雨量异常的环流特征和前兆信号,建立了预测模型并开展了预测试验。结果表明,长江中下游梅雨量偏多时,欧亚中纬度巴尔喀什湖和渤海湾附近低值系统较活跃,高空西风急流偏南偏东,低层风场呈经向波列分布,东亚夏季风偏弱,日本海至长江中下游地区梅雨锋偏强,有强的辐合上升运动和水汽辐合。前冬热带中东太平洋海温、北极海冰异常是长江中下游梅汛期雨量异常的主要前兆信号。当前冬热带中东太平洋海温偏暖和北极海冰异常偏多时,北方冷空气与副热带高压外围的西南暖湿气流在长江中下游交汇,造成该区域有异常的风场和水汽辐合,降水偏多。利用海温和海冰因子构建了长江中下游梅雨量多元回归预测模型,拟合和预测效果均较好。

关键词: 长江中下游,梅汛期雨量,前兆信号,海表温度,海冰,预测

中图分类号: P461, P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041802

Circulation Characteristics and Precursory Signals of Abnormal Meiyu Rainfall in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River in the Past 20 Years

LOU Dejun¹ WANG Yongguang² CHEN Chen¹

1 Qiqihar Meteorological Office of Heilongjiang Province, Qiqihar 161006

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

Abstract: Based on the rainfall data of the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLRYR) during Meiyu season (MYS), NCEP/NCAR daily reanalysis data, NOAA monthly average sea surface temperature (SST) and Arctic sea ice (ASI) indices data, the circulation characteristics and precursory signals of the abnormal rainfall in MLRYR after 2000 are studied by correlation analysis, regression analysis and other methods. A prediction model is established and a prediction experiment is carried out. The results show that when there is more precipitation in MLRYR, the low-value systems near Balkhash Lake and Bohai Bay in the Eurasian mid-latitudes are more active, the upper-level westerly jet stream is southward and eastward, the low-level wind field is distributed in meridional wave train, the East Asian summer monsoon is weaker, and the Meiyu front is strong in the area from the Sea of Japan to MLRYR, which results in strong

* 国家重点研发计划(2017YFA0603701)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033)共同资助

2021 年 6 月 30 日收稿; 2022 年 4 月 18 日收修定稿

第一作者: 娄德君, 主要从事短期气候预测研究. E-mail: ldj7308@163.com

通讯作者: 王永光, 主要从事短期气候预测研究. E-mail: ygwang@cma.gov.cn

ascending motion and convergence of water vapor flux over MLRYR, thus increasing the rainfall therein. The anomalous SST over tropical eastern Pacific (TEP) and ASI in previous winter are the main precursors of abnormal Meiyu rainfall over MLRYR. The anomalous anticyclone over South China Sea during MYS induced by the positive phase of SST over TEP and ASI are beneficial to the convergence of cold air and warm moist air over MLRYR. So that the rainfall over MLRYR increases. Therefore, the rainfall multiple regression prediction model constructed by the use of SST and ASI factors for MLRYR during MYS can produce better results of fitting and prediction.

Key words: middle and lower reaches of the Yangtze River, Meiyu rainfall, precursory signal, sea surface temperature (SST), sea ice, prediction

引言

梅雨期是东亚季风雨带季节循环中的一个典型阶段,主要雨带位于 $27^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 的长江中下游一带(丁一汇等,2007)。梅雨期雨量多寡对长江中下游旱涝灾害有重要影响,如1954、1969、1980、1991、1996、1998、2020年等长江流域大的洪涝灾害均对应着强的梅雨(张明玉,1997;陶诗言等,1998;李维京,1999;张庆云等,2003;刘芸芸和丁一汇,2020)。长江流域是我国洪涝灾害最为严重的地区,其中近 $1/3$ 的地区是洪水灾害高脆弱性地区(姜彤和施雅风,2003),洪涝灾害的频繁发生给当地经济带来了巨大的损失,也严重制约了当地社会经济发展。因此,研究长江中下游梅雨期降水异常的成因并准确预测梅雨趋势具有重要意义。

梅雨是东亚夏季风系统与欧亚中高纬环流系统相互作用的体现(丁一汇等,2007;李丽和张耀存,2017),许多学者做了大量研究,认为梅雨与中高纬度槽、脊(唐玉和李栋梁,2020)、东亚副热带西风急流(陶诗言等,1958;李侃等,2018)、西太平洋副热带高压(梁萍等,2007;江丽俐等,2012;赵俊虎等,2016;王永光等,2020)等密切相关。环流因子异常受海温和海冰等下垫面强迫因子影响。长江流域梅雨与前期赤道中东太平洋、印度洋、西太平洋暖池、北大西洋等关键区海温关系密切(宗海锋等,2005;魏凤英,2006;梁萍等,2018)。赵俊虎等(2018)指出受到前冬超强厄尔尼诺衰减和随后的印度洋海温偏暖影响,2016年梅雨期西太平洋副热带高压异常偏强,其西南侧转向的水汽输送偏强,与北方弱冷空气在长江区和江淮区辐合,导致该区域降水异常偏多。前期中太平洋 ENSO 事件通过东亚太平洋遥相关型来影响梅雨建立,是梅雨建立年际变化的强信号

(汪靖等,2009;Wang et al,2009)。赤道印度洋、南海和西太平洋黑潮海温偏高有利于出现长江流域降水偏多(宗海锋等,2005)。冬、春季关键区海冰的变化通过异常湍流热通量激发大气异常 Rossby 波源(Honda et al,2009),这种大气能量波动以波列的形式向东亚传播,影响夏季东亚环流,进而影响长江流域的降水变化(王乐等,2019;张若楠等,2018)。

司东等(2010)、Si et al(2010)、蒋薇和高辉(2013)研究表明,长江流域梅雨在2000年后明显减弱,梅雨雨带明显北移,而对梅雨年代际减少背景下的预测研究还不多。因此本文在分析2000年后长江中下游梅雨及环流异常特征的基础上,研究影响梅汛期降水异常的海温、北极海冰等下垫面强迫因子的异常特征,并进行预测试验。

1 资料和方法

本文所用资料包括:国家气候中心整编的长江区/长江中下游梅雨监测资料(周兵等,2017)。NCEP逐日再分析资料(Kalnay et al,1996),资料水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$,垂直方向为17层。NOAA的ERSST V5月海表温度资料(以下简称海温),资料水平分辨率为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ (Huang et al,2017)。上述资料时段均为1961—2020年。北极海冰指数资料由国家气候中心网站下载(http://cmdp.ncc-cma.net/pred/seaice.php?product=seaice_moni),时段为1982—2020年。文中梅汛期雨量为长江区每年梅雨期内的雨量。长江中下游入梅和出梅时间年际变率较大,为分析环流特征,本文参照气候态将每年6月下半月至7月上半月30天梅雨期(Meiyu season,MYS)的平均环流场作为梅汛期环流场。采用相关分析、回归分析、多元回归等统计方法,相关分析和回归分析时资料的线性趋势均已

去除。

2 结果分析

2.1 长江中下游梅汛期雨量变化特征

1961 年以来长江中下游地区梅汛期雨量随时间呈略增加趋势(图 1),气候倾向率为 $19.6 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,增加趋势通过了 0.10 的显著性水平检验。梅汛期雨量具有明显的阶段性变化特征,20 世纪 60 年代至 80 年代降水总体偏少,其中 1965 年梅汛期雨量仅有 46.9 mm,为 1961 年以来最少。90 年代降水偏多,21 世纪 00 至 10 年代前期降水急剧减少,10 年代中期至今降水又有增多趋势,尤其是 2020 年梅汛期雨量达到 753.9 mm,为 1961 年以来最多。

对降水序列进行滑动 t 检验突变检测(图略)发现,梅汛期雨量在 2000 年前后发生了明显突变,2000 年后较 20 世纪 90 年代降水明显减少。梅汛期雨量的减少与长江中下游 2001 年以后入梅日偏晚和梅汛期长度明显缩短是一致的(图略)。下文着重分析 2000 年后年代际少雨背景下的梅汛期雨量异常的环流特征及前兆信号。

2.2 长江中下游梅雨量异常的环流特征

图 2 是 2000—2020 年长江中下游梅雨序列与梅汛期 500 hPa 位势高度、200 hPa 纬向风、850 hPa 风和整层水汽通量和水汽通量散度距平场的回归系数分布,图中浅色、深色阴影区分别代表通过 0.10 和 0.05 的显著性水平检验的区域。由图 2a 可知,乌拉尔山附近、贝加尔湖至中国东北地区北部、东亚副热带地区为正高度距平区,巴尔喀什湖—渤海湾—日本岛南部为负高度距平区。其中巴尔喀什湖和渤海湾附近的负异常通过了 0.10 以上显著性水平检验。表明长江中下游梅雨偏多年中纬度巴尔喀什湖、渤海湾地区冷空气活动频繁。图 2b 通过显著性水平检验的区域表明,梅雨偏多年副热带西风急流轴较气候态偏南,急流中心位置偏东,长江中下游地区位于急流出口区右侧,高层辐散。图 2c 表明,梅雨偏多年低层 850 hPa 风场上贝加尔湖至东北地区有异常反气旋式距平环流,日本海至华东沿海为异常的气旋式距平环流,巴士海峡附近有异常的反气旋式距平环流。东亚沿岸距平风场呈经向的“反

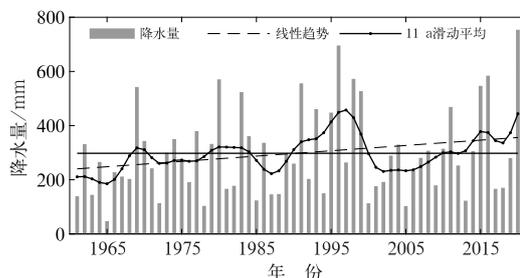


图 1 1961—2020 年长江中下游梅汛期雨量时间序列

Fig. 1 Time series of Meiyu rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 2020

气旋—气旋—反气旋”分布,中低纬以偏北风距平为主,夏季风偏弱,长江中下游梅雨锋偏强,有距平风场辐合。水汽通量和水汽通量散度回归场显示(图 2d),梅雨量偏多年长江中下游地区为水汽通量距平大值区和水汽通量距平辐合区。对梅雨量偏多年和偏少年的环流场合成分析也可以得到一致的结论(图略)。

对突变前(1961—1999 年)梅汛期降水序列也做上述分析(图略)可知,1961—1999 年与近 20 年影响梅汛期降水异常的环流差异主要反映在中低纬度地区。1961—1999 年西太平洋副热带高压(以下简称副高)异常偏强偏南,副热带西风急流轴更偏南,中心偏东,东亚太平洋遥相关型(EAP)波列显著。菲律宾反气旋距平环流异常偏强,副高前部有充沛的暖湿水汽输送。暖湿气流与渤海湾附近冷空气在长江中下游地区交汇,水汽通量辐合区范围明显偏大。突变前后环流场差异与梅雨量在突变后明显减少的特征一致。

综上所述,近 20 年长江中下游梅雨偏多的主要环流特征是:欧亚中纬度巴尔喀什湖和渤海湾附近低值系统较活跃,高空西风急流偏南偏东,低层风场呈经向波列分布,东亚夏季风偏弱,日本海至长江中下游地区梅雨锋偏强,有强的辐合上升运动和水汽辐合。突变前,梅汛期环流 EAP 显著偏强,副高偏强偏南。

2.3 长江中下游梅雨量异常的前兆信号及可能影响机制

研究表明,海温、海冰等是影响长江流域夏季降水的重要下垫面强迫因子(宗海锋等,2005;王乐等,2019),因此下面着重分析前期海温和海冰与长江流域梅雨量的相关。

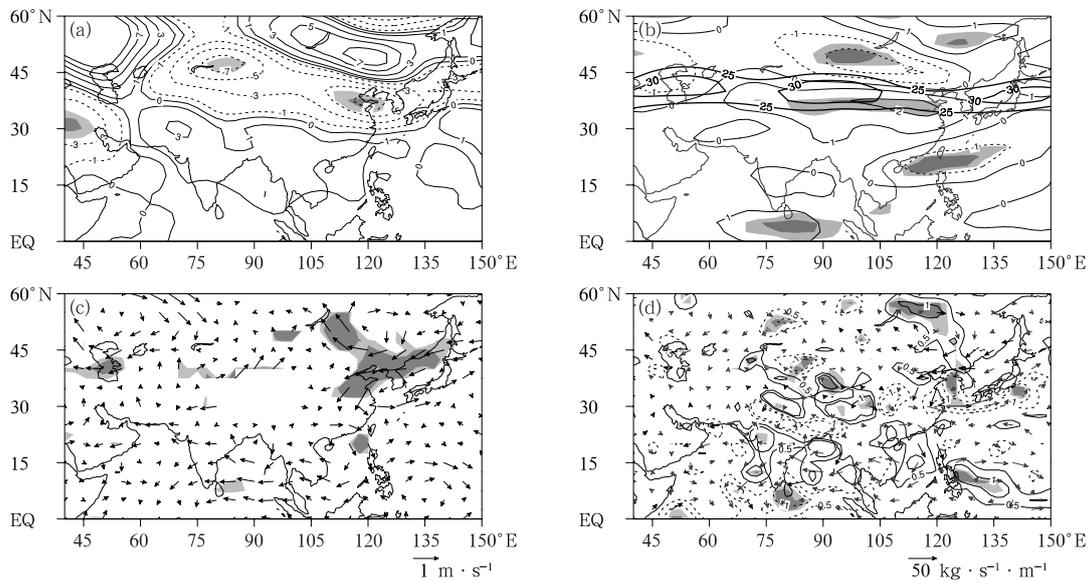


图 2 2000—2020 年长江中下游梅雨量标准化时间序列与梅汛期各气象要素距平场的回归

(a)500 hPa 位势高度,(b)200 hPa 纬向风(其中粗实线表示气候平均的 25、30 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 线),
 (c)850 hPa 风,(d)整层水汽通量(箭头)和水汽通量散度(等值线)
 (浅色、深色阴影分别代表通过 0.10 和 0.05 显著性水平检验,下同)

Fig. 2 Regression maps of (a) 500 hPa geopotential height, (b) 200 hPa zonal wind (Bold contours indicate the climate mean $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),

(c) 850 hPa wind, (d) vertically integrated water vapor flux (vectors) and water vapor flux divergence (contours) anomalies in MYS on the normalized Meiyu rainfall time series in MLRYR from 2000 to 2020 (Light and dark shadows indicate the regions having passed the significance test at levels of 0.10 and 0.05, respectively, the same below)

2.3.1 海温

图 3 为长江中下游梅雨量突变后(图 3a)和突变前(图 3b)与前冬海温场的距平相关系数分布。由图 3a 显示的通过显著性水平检验的区域可知,前一年冬季热带中东太平洋及北太平洋夏威夷岛附近为正相关区,其南北两侧为呈侧“V”型分布的负相关区,澳大利亚西北侧的南印度洋为正相关区。相关场分布类似 ENSO 暖位相年冬季海温异常分布型(Alexander, 2010)。而突变前(图 3b)的显著相

关区域主要分布在北太平洋亲潮区,与热带太平洋区域相关较弱,大部分区域没有通过 0.10 显著性水平检验。两个时段相关场对比可知,近 20 年前冬 ENSO 信号与梅汛期雨量的联系更密切。检测结果显示,1961—2019 年冬季 Niño3.4 区海温指数没有明显的年代际尺度突变特征(图略),其与梅雨量的 21 年滑动相关表明二者的滑动相关在 20 世纪 80、90 年代较弱,90 年代末期以后明显加强,通过了 0.05 的显著性水平检验。可见近 20 年与过去相比前

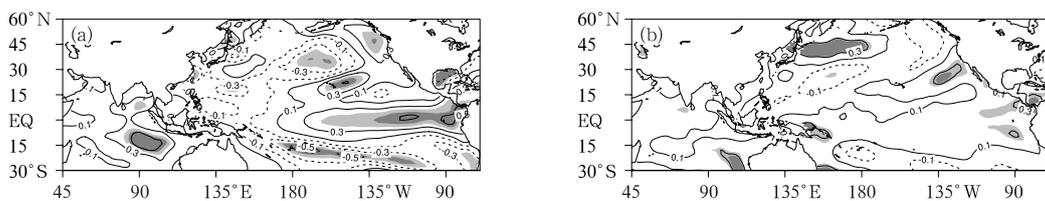


图 3 (a)2000—2020 年和(b)1961—1999 年长江中下游梅雨量与前冬海温场的距平相关系数分布

Fig. 3 Distribution of anomaly correlation coefficients between the Meiyu rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the sea surface temperature in the previous winter (a) from 2000 to 2020 and (b) from 1961 to 1999

冬热带东太平洋海温信号突变特征不明显,但与梅汛期雨量之间相关加强,2000年后前冬 ENSO 信号是影响长江中下游梅雨量的主要前兆信号之一。

图 4 为近 20 年前冬 Niño3.4 区海表温度标准化指数和前冬 500 hPa 高度场和风场、梅汛期 500 hPa 高度场和风场、200 hPa 纬向风场、850 hPa 风场、垂直速度场距平场的回归系数分布。由图可知,当前冬热带中东太平洋海温偏暖时,对应的冬季 500 hPa 高度距平场上,环流呈相对的“两脊一槽”型分布,巴尔喀什湖以南和日本海附近为相对的高度脊,正高度中心异常通过 0.10 以上显著性水平检验,东亚槽偏弱。两脊之间至中国南方地区为相对低槽,低纬度

地区至西北太平洋均为显著的正高度异常。东部沿海地区处在低槽前和日本海高脊后部偏南气流控制下,东亚冬季风偏弱(图 4a)。之后的梅汛期对中层环流在东亚地区呈经向波列分布。副高异常偏强偏西,渤海附近低槽偏强,贝加尔湖脊偏强(图 4b)。西北高东南低的环流配置有利于北方冷空气南下影响长江中下游地区。对流层高层 100°E 以东区域的副热带急流异常偏南,较气候态偏南约 5~10 个纬度,其南北两侧有显著异常的距平东风(图 4c)。低层距平风场东亚沿岸自低纬到高纬呈“反气旋—气旋—反气旋”的东亚太平洋型(EAP)遥相关波列分布,异常的偏北风与副高前沿异常偏

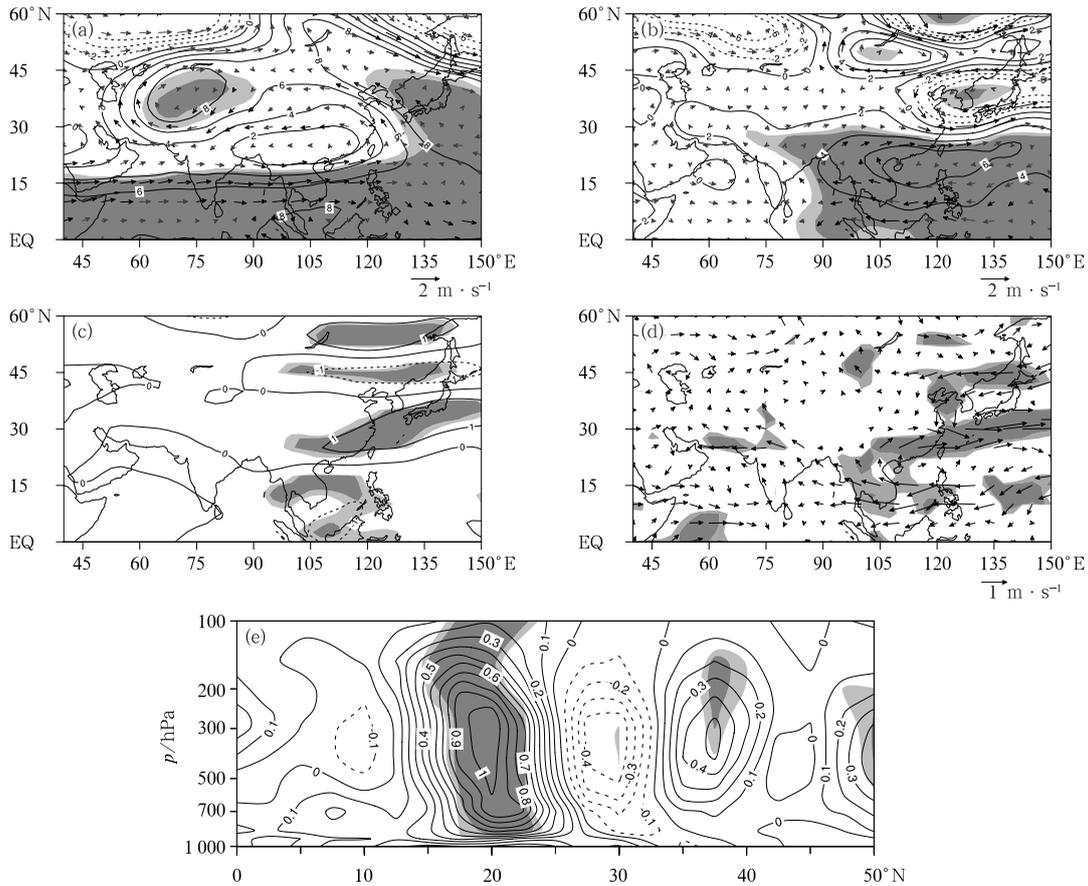


图 4 2000—2020 年前冬 Niño3.4 区海温标准化指数与各气象要素距平场的回归
(a)前冬 500 hPa 高度(等值线)和风(箭头),(b)梅汛期 500 hPa 高度(等值线)和风(箭头),
(c)梅汛期 200 hPa 纬向风,(d)梅汛期 850 hPa 风,(e)梅汛期 100°~120°E 平均的垂直速度的纬度-高度剖面

Fig. 4 Regression maps of (a) previous winter 500 hPa geopotential height (contours) and wind (vectors), (b) 500 hPa geopotential height (contours) and wind (vectors) in MYS, (c) 200 hPa zonal wind in MYS, (d) 850 hPa wind in MYS, (e) 100°—120°E average latitude-height cross-section of vertical velocity anomalies in MYS on the normalized

Niño3.4 indices in the previous winter from 2000 to 2020

西风在长江中下游地区交汇(图4d)。沿 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的垂直速度经向剖面图显示, $15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 附近为显著正异常, $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 为明显负距平,表明南海北部有异常下沉运动,季风槽偏弱,长江中下游地区有异常上升运动(图4e)。回归分析表明,当前冬热带中东太平洋偏暖时,东亚冬季风偏弱,随后的梅汛期对流层中层副高异常偏强偏西,渤海湾附近低槽加强,低层距平风场环流呈经向波列分布。北方冷空气与副高外围的西南暖湿气流在长江中下游交汇,造成该区域有异常的风场和水汽辐合,降水偏多。

2.3.2 海冰

计算突变后和突变前长江中下游梅雨量和前一年秋、冬季及当年春季北极海冰指数的相关,得到只有突变后的近20年前冬北极海冰指数与长江中下游梅雨量相关显著,相关系数为0.58,通过了0.01的显著性水平检验,其余季节和时段二者相关均较弱。计算得到冬季北极海冰指数在1997、2011年前后发生了2次突变,1997年后指数偏高,2011年后又转入偏低。21年滑动相关也表明梅汛期雨量与前冬北极海冰指数在1997年开始由相关不明显变化为显著相关。20世纪90年代末期冬季北极海冰指数发生突变时间略早于梅汛期雨量突变时间,突变后二者相关明显加强,近20年前冬北极海冰指数也是影响梅汛期雨量的主要前兆信号之一。

图5为近20年前冬北极海冰标准化指数和前冬500 hPa高度场和风场、梅汛期500 hPa高度场和风场、200 hPa纬向风场、850 hPa风场、垂直速度场距平场的回归系数分布。由图可知,当前冬海冰异常偏多时,冬季500 hPa对流层中纬度地区高度距平场呈“两脊一槽”型分布,乌拉尔山和日本海附近为高压脊,两脊之间为宽广槽区,高原高度场显著偏低。西伯利亚高压及东亚大槽均偏弱,东亚沿岸冬季风环流减弱(图5a)。随后的梅汛期对流层中层欧亚中高纬也呈“两脊一槽”型分布,但东亚高压脊的位置较冬季明显偏北。乌拉尔山、贝加尔湖以东至鄂霍次克海为高压脊,乌拉尔山脊异常偏强。两脊之间为低槽,低值区由巴尔喀什湖一直延伸到日本岛南部,其中巴尔喀什湖东侧和朝鲜半岛附近负异常通过0.10以上显著性水平检验。低纬度副高略偏强偏西(图5b)。对流层高层东亚西风急流中

心位置略偏南偏东(图5c)。对流层低层距平风场渤海湾以北有异常的偏东风,贝加尔湖以东—渤海湾距平风场呈经向的反气旋—气旋式分布,长江中下游附近有距平风场辐合(图5d)。沿 $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均的垂直速度场在 25°N 附近对流层有异常的下沉运动,长江中下游地区低层有异常上升运动,高层为下沉运动(图5e)。可以看出500 hPa高度场、200 hPa纬向风场和850 hPa风场环流配置与图2均非常相似。由上可知,当前冬北极海冰异常偏多时,冬季风偏弱,随后的梅汛期渤海湾附近低槽加强,高空西风急流偏南偏东,东亚沿岸俄罗斯远东地区—渤海距平风场环流呈反气旋—气旋波列分布,夏季风偏弱,长江中下游地区低层辐合高层辐散,降水偏多。

黄荣辉和陈文(2002)、陈丽娟等(2013)研究表明,当前冬海温场呈现 ENSO 暖位相特征时,热带中东太平洋上空对流活动加强,菲律宾附近对流活动受到抑制,在对流层低层激发 Rossby 波列,南海附近强迫出异常的反气旋环流,冬季风偏弱。刘毓赞等(2008)研究也证实冬季热带中东太平洋和印度洋同时偏暖时,通过西太平洋地区强迫出的异常南风分量,使得冬季风偏弱。当前冬北极海冰异常偏多时,北极气温偏低,欧亚大陆北部向极的大气热力梯度和厚度梯度加大,纬向西风增强,影响欧亚大陆的冷空气活动减弱,西伯利亚高压偏弱,也造成冬季风环流减弱(Francis and Vavrus, 2012; 武炳义等, 2011; Wu et al, 2011)。冬季风减弱使得东亚上空吹向海洋的偏北风减弱,近海地区海温偏暖,随后的夏季近海暖海温维持使得东亚地区海陆温差减小,东亚夏季风减弱(李瑜, 2015)。另外作为对 ENSO 暖位相响应,印度洋海温会在随后的春季继续增暖,暖海温不断向东扩展,使得南海至菲律宾反气旋异常持续到夏季,致使副高持续偏强偏西(吴国雄等, 2000; 刘芸芸等, 2021; 司东等, 2016; 高辉等, 2017), 南海季风槽减弱,夏季风减弱。因此,当前期冬季热带中东太平洋海温偏高或北极海冰偏多时,在随后的梅雨期北方冷空气会与沿副高外围的暖湿水汽在长江中下游交汇,使该地区上空有异常的风场和水汽辐合,降水偏多。

2.4 预测试验

计算图3中3个显著相关区域(热带中东太平

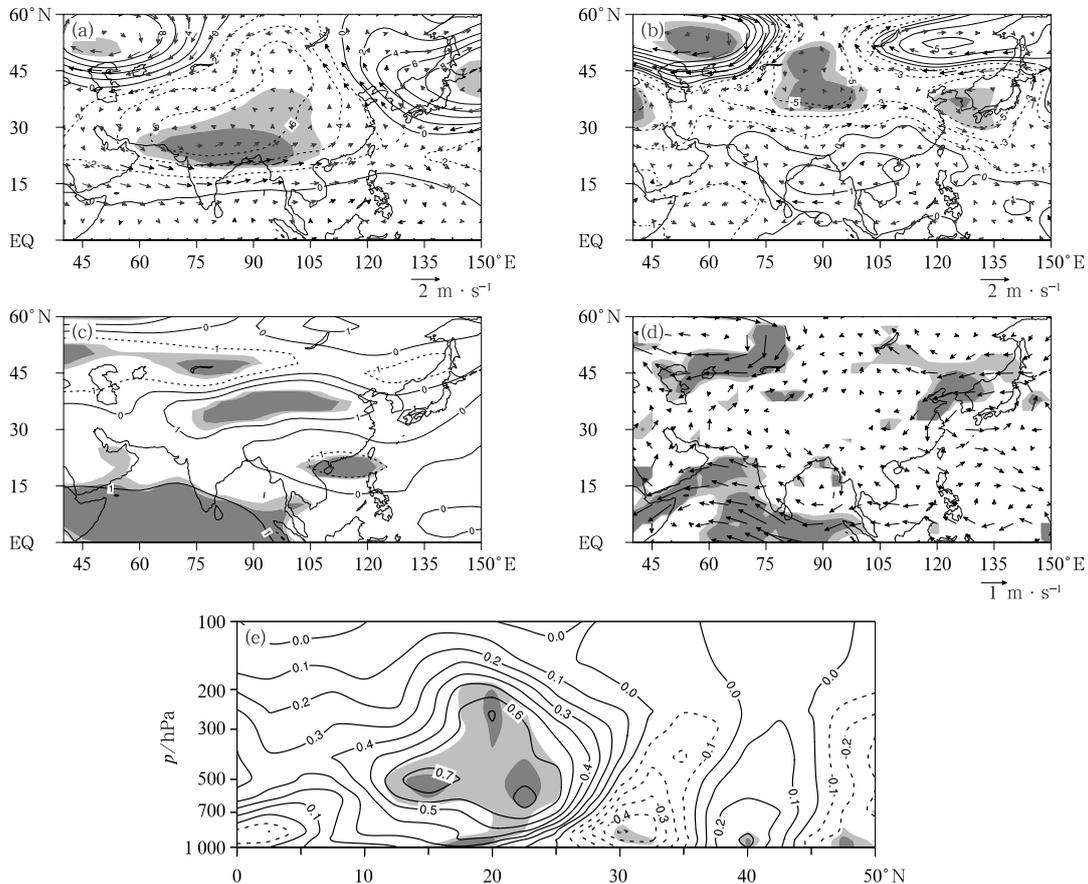
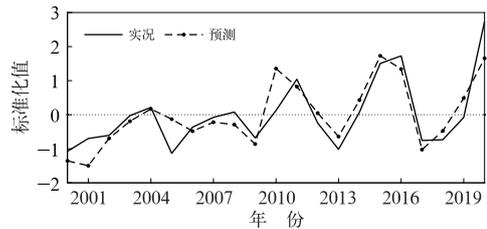


图 5 同图 4, 但为标准化的北极海冰指数

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the normalized Arctic sea ice indices

洋关键区、北太平洋夏威夷岛关键区、南印度洋澳大利亚西北侧关键区)的冬季平均海温,将标准化后的 3 个区域海温与标准化后的冬季北极海冰指数作为预报因子,利用多元回归方法建立梅雨量预测方程。

采用交叉验证方式进行独立样本预测试验。以预测 2015 年梅雨量为例,首先去掉资料序列中 2015 年的梅雨量数据及 2014/2015 年冬季海温和海冰因子数据,用其余 20 年数据建立预测方程,计算方程的拟合相关系数,然后代入 2014/2015 年冬季 4 个因子实况值得到 2015 年梅雨量预测值。得到 21 年梅雨量预测值后,计算预测值序列与实况序列的相关系数,评估预测效果。结果表明 21 个预测方程的拟合相关系数均在 0.85~0.91,通过了 0.001 显著性水平检验,预测方程拟合效果均较好。图 6 为交叉验证预测结果。可以看到预测曲线与实况曲线一致性较好,二者相关系数 $R=0.82$,通过了 0.001 显著性水平检验,标准化距平的同号率为 85.7%(18/21)。总体来说,利用海温和海冰因子建立的预测方程对梅雨预测效果较好,好于单独因子

图 6 2000—2020 年梅雨量
交叉验证预测结果Fig. 6 Meiuyu rainfall cross-validation
forecast results from 2000 to 2020

的预测效果(图略)。

3 结论与讨论

本文主要分析了 2000 年后长江中下游梅雨量年代际减少背景下的环流异常特征、海温和海冰等前兆信号及可能影响机制,最后建立了多元回归预测模型并开展了预测试验。结论如下:

(1)长江中下游梅雨偏多的主要环流特征是:欧

亚中纬度巴尔喀什湖和渤海湾附近低值系统较活跃,高空西风急流偏南偏东,低层距平风场呈径向波列分布,东亚夏季风偏弱,日本海至长江中下游地区梅雨锋偏强,有强的辐合上升运动和水汽辐合。

(2)影响梅汛期雨量的前兆信号变化有明显差异。近20年与过去相比前冬赤道中东太平洋海温信号突变特征不明显,但与梅汛期雨量之间相关加强,而前冬北极海冰指数则在1997年前后发生了突变,略早于梅汛期雨量突变时间,且突变后二者相关明显加强。前冬热带中东太平洋海温、北极海冰异常是近20年长江中下游梅汛期雨量的主要前兆信号。当前冬热带中东太平洋海温偏暖时,海温场呈现 ENSO 暖位相特征,菲律宾附近对流活动受到抑制,在对流层低层激发 Rossby 波列,南海附近有异常的反气旋环流,冬季风偏弱。印度洋对 ENSO 暖事件的滞后增暖响应及东亚冬季风对海温的持续性影响均使随后的夏季副高偏强、东亚夏季风偏弱,长江中下游梅汛期降雨偏多。当前冬北极海冰异常偏多时,欧亚大陆北部大气热力梯度增大,纬向西风增强,欧亚大陆冷空气活动减弱,冬季风减弱。随后的东亚夏季风也偏弱,长江中下游梅汛期降雨偏多。

(3)利用海温和海冰因子构建了长江中下游梅雨量多元回归预测模型,交叉验证结果表明,对梅汛期雨量的回报和预测效果均较好。预测值序列与实况序列的相关系数达到 0.82,通过了 0.001 显著性水平检验。

前期 4—5 月北大西洋涛动可以在北大西洋激发海温三极型异常,海温异常能够持续到随后的初夏,并激发欧亚型遥相关,从而使乌拉尔山脊和鄂霍次克海脊加强或减弱,进一步影响东亚夏季风的强弱,从而影响长江流域梅汛期雨量(Wu et al, 2009; 王永光和郑志海, 2018)。因此,对北大西洋三极子及热带北大西洋海温异常对长江流域梅雨影响的进一步探讨将有助于更加全面地了解长江中下游梅雨的影响机理。本文中建立的预测方程对长江中下游梅汛期雨量有一定的预报能力,但突变后的资料年份较短,可能存在一定的局限性。

参考文献

陈丽娟,袁媛,杨明珠,等,2013.海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展[J].应用气象学报,24(5):521-532. Chen L J, Yuan Y, Yang M Z, et al, 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5):521-532(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[J].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[J]. Chin J Atmos Sci, 31(6):1082-1101(in Chinese).
- 高辉,袁媛,洪洁莉,等,2017.2016年汛期气候预测效果评述及主要先兆信号与应用[J].气象,43(4):486-494. Gao H, Yuan Y, Hong J L, et al, 2017. Overview of climate prediction of the summer 2016 and the precursory signals[J]. Meteor Mon, 43(4):486-494(in Chinese).
- 黄荣辉,陈文,2002.关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展[J].气候与环境研究,7(2):146-159. Huang R H, Chen W, 2002. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle[J]. Climatic Environ Res, 7(2):146-159(in Chinese).
- 江丽俐,张程明,陈红梅,2012.2011年长江中下游梅雨锋暴雨的环流特征分析[J].暴雨灾害,31(1):66-71. Jiang L L, Zhang C M, Chen H M, 2012. Analysis on circulation characteristics of Meiyu front rainstorm in the middle and lower reaches of Yangtze River in 2011[J]. Torr Rain Dis, 31(1):66-71(in Chinese).
- 姜彤,施雅风,2003.全球变暖、长江水灾与可能损失[J].地球科学进展,18(2):277-284. Jiang T, Shi Y F, 2003. Global climatic warming, the Yangtze floods and potential loss[J]. Adv Earth Sci, 18(2):277-284(in Chinese).
- 蒋薇,高辉,2013.21世纪长江中下游梅雨的新特征及成因分析[J].气象,39(9):1139-1144. Jiang W, Gao H, 2013. New features of Meiyu over middle-lower reaches of Yangtze River in the 21st century and the possible causes[J]. Meteor Mon, 39(9):1139-1144(in Chinese).
- 李侃,余锦华,王元,等,2018.江淮梅雨期降水异常分布型及其与东亚副热带高空西风急流的关系[J].气象科学,38(3):302-309. Li K, Yu J H, Wang Y, et al, 2018. Abnormal distribution of Meiyu precipitation over Jianghuai Region and its relation with East Asia subtropical westerly jet[J]. Sci Sin Meteor, 38(3):302-309(in Chinese).
- 李丽,张耀存,2017.梅雨期温带急流变化与中高纬环流系统的关系[J].暴雨灾害,36(4):301-308. Li L, Zhang Y C, 2017. The relationship between the East Asian polar front jet and mid-high latitude circulation during Meiyu season[J]. Torr Rain Dis, 36(4):301-308(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. Li W J, 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China[J]. Meteor Mon, 25(4):20-25(in Chinese).
- 李瑜,2015.长江中下游冬夏降水韵律现象的特征及其机理分析[D].北京:中国气象科学研究院. Li Y, 2015. Characteristics and mechanism analysis of dry/wet rhythms in winter and summer precipitation over the mid-lower reaches of the Yangtze River Basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences(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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin, 76(3): 379-393(in Chinese).
- 梁萍, 汤绪, 柯晓新, 等, 2007. 中国梅雨影响因子的研究综述[J]. 气象科学, 27(4): 464-471. Liang P, Tang X, Ke X X, et al, 2007. Review of study on influencing factors of China Meiyu[J]. Sci Meteor Sin, 27(4): 464-471(in Chinese).
- 刘毓赞, 赵获, 曹杰, 2008. 热带太平洋和印度洋海温异常对东亚冬季风影响的一个物理机制[J]. 高原山地气象研究, 28(1): 24-29. Liu Y Y, Zhao D, Cao J, 2008. A mechanism for the impact of sea surface temperature anomaly over tropical Pacific and Indian Ocean on East Asian winter monsoon[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 28(1): 24-29(in Chinese).
- 刘芸芸, 丁一汇, 2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象, 46(11): 1393-1404. Liu Y Y, Ding Y H, 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020[J]. Meteor Mon, 46(11): 1393-1404(in Chinese).
- 刘芸芸, 王永光, 龚振淞, 等, 2021. 2020 年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析[J]. 气象, 47(4): 488-498. Liu Y Y, Wang Y G, Gong Z S, et al, 2021. Precursory signals of the 2020 summer climate in China and evaluation of real-time prediction[J]. Meteor Mon, 47(4): 488-498(in Chinese).
- 司东, 丁一汇, 柳艳菊, 2010. 中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其原因[J]. 科学通报, 55(1): 68-73. Si D, Ding Y H, Liu Y J, 2010. Decadal northward shift of the Meiyu belt and the possible cause[J]. Chinese Sci Bull, 55(1): 68-73.
- 司东, 柳艳菊, 邵娜, 等, 2016. 2015 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象, 42(4): 481-488. Si D, Liu Y J, Shao X, et al, 2016. Anomalies of oceanic and atmospheric circulation in 2015 and their impacts on climate in China[J]. Meteor Mon, 42(4): 481-488(in Chinese).
- 唐玉, 李栋梁, 2020. 江淮梅雨与东亚副热带夏季风进程变异的关系[J]. 气象科学, 40(2): 169-179. Tang Y, Li D L, 2020. The relationship between the Meiyu in the Yangtze-Huaihe Region and the variation of the East Asian subtropical summer monsoon process[J]. Sci Sin Meteor, 40(2): 169-179(in Chinese).
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利, 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件[J]. 气候与环境研究, 3(4): 290-299. Tao S Y, Zhang Q Y, Zhang S L, 1998. The great floods in the Changjiang River Valley in 1998[J]. Climatic Environ Res, 3(4): 290-299(in Chinese).
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏, 1958. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. 气象学报, 29(2): 119-134. Tao S Y, Zhao Y J, Chen X M, 1958. The relationship between May-Yü in far East and the behaviour of circulation over Asia[J]. Acta Meteor Sin, 29(2): 119-134(in Chinese).
- 汪靖, 何金海, 刘宣飞, 等, 2009. 江淮梅雨建立的年际变化及其前期强影响信号分析[J]. 科学通报, 54(1): 85-92. Wang J, He J H, Liu X F, et al, 2009. Interannual variability of the Meiyu onset over Yangtze-Huaihe River Valley and analyses of its previous strong influence signal[J]. Chinese Sci Bull, 54(1): 85-92(in Chinese).
- 王乐, 杨文发, 张录军, 等, 2019. 北极海冰对长江流域主汛期降雨的影响[J]. 水科学进展, 30(5): 623-631. Wang L, Yang W F, Zhang L J, et al, 2019. Effect of Arctic sea ice on precipitation in the main flood season of the Yangtze River Basin[J]. Adv Water Sci, 30(5): 623-631(in Chinese).
- 王永光, 娄德君, 刘芸芸, 2020. 2020 年长江中下游梅汛期降水异常特征及其成因分析[J]. 暴雨灾害, 39(6): 549-554. Wang Y G, Lou D J, Liu Y Y, 2020. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu rainfall in the middle and lower reaches of Yangtze River Valley in 2020 [J]. Torr Rain Dis, 39(6): 549-554(in Chinese).
- 王永光, 郑志海, 2018. 2017 年汛期气候预测先兆信号的综合分析[J]. 气象, 44(4): 565-571. Wang Y G, Zheng Z H, 2018. Precursory signal analysis of summer rainfall prediction in China in 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 565-571(in Chinese).
- 魏凤英, 2006. 长江中下游夏季降水异常变化与若干强迫因子的关系[J]. 大气科学, 30(2): 202-211. Wei F Y, 2006. Relationships between precipitation anomaly over the middle and lower reaches of the Changjiang River in summer and several forcing factors[J]. Chin J Atmos Sci, 30(2): 202-211(in Chinese).
- 武炳义, 苏京志, 张人禾, 2011. 秋-冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响[J]. 科学通报, 56(27): 2335-2343. Wu B Y, Su J Z, Zhang R H, 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian high[J]. Chinese Sci Bull, 56(27): 2335-2343(in Chinese).
- 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等, 2000. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应[J]. 气象学报, 58(5): 513-522. Wu G X, Liu P, Liu Y M, et al, 2000. Impacts of the sea surface temperature anomaly in the Indian Ocean on the subtropical anticyclone over the western Pacific—two-stage thermal adaptation in the atmosphere[J]. Acta Meteor Sin, 58(5): 513-522(in Chinese).
- 张明玉, 1997. 1996 年与 1991 年梅雨期灾情及致灾因素对比分析[J]. 气象, 23(9): 46-49. Zhang M Y, 1997. The contrast analysis on causing damage factors and damage situation comparison in Meiyu season between 1996 and 1991[J]. Meteor Mon, 23(9): 46-49(in Chinese).
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利, 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件[J]. 大气科学, 27(6): 1018-1030. Zhang Q Y, Tao S Y, Zhang S L, 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer[J]. Chin J Atmos Sci, 27(6): 1018-1030(in Chinese).
- 张若楠, 孙丞虎, 李维京, 2018. 北极海冰与夏季欧亚遥相关型年际变化的联系及对我国夏季降水的影响[J]. 地球物理学报, 61(1): 91-105. Zhang R N, Sun C H, Li W J, 2018. Relationship between the interannual variations of Arctic sea ice and summer Eurasian teleconnection and associated influence on summer

- precipitation over China[J]. *Chinese J Geophys*, 61(1):91-105 (in Chinese).
- 赵俊虎,陈丽娟,王东阡,2018. 2016年我国梅雨异常特征及成因分析[J]. *大气科学*, 42(5):1055-1066. Zhao J H, Chen L J, Wang D Q, 2018. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2016[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(5):1055-1066 (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).
- 周兵,梁萍,王东阡,等,2017. 梅雨监测指标:GB/T 33671—2017[S]. 北京:中国标准出版社. Zhou B, Liang P, Wang D Q, et al, 2017. Meiyu monitoring indices: GB/T 33671—2017[S]. Beijing:Standards Press of China(in Chinese).
- 宗海锋,张庆云,彭京备,2005. 长江流域梅雨的多尺度特征及其与全球海温的关系[J]. *气候与环境研究*, 10(1):101-114. Zong H F, Zhang Q Y, Peng J B, 2005. Multiple scale characteristics for precipitation over the Yangtze River Valley during the Meiyu period and their relationships with the global sea surface temperature[J]. *Climatic Environ Res*, 10(1):101-114(in Chinese).
- Alexander M, 2010. Extratropical air-sea interaction, sea surface temperature variability, and the Pacific decadal oscillation[M]//Sun D Z, Bryan F. *Climate Dynamics: Why Does Climate Vary?* Washington, DC: American Geophysical Union:123-148.
- Francis J A, Vavrus S J, 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes[J]. *Geophys Res Lett*, 39(6):L06801.
- Honda M, Inoue J, Yamane S, 2009. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters[J]. *Geophys Res Lett*, 36(8):L08707.
- Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al, 2017. Extended reconstructed sea surface temperature, version 5 (ERSSTv5): upgrades, validations, and intercomparisons[J]. *J Climate*, 30(20):8179-8205.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3):437-472.
- Si D, Ding Y H, Liu Y J, 2009. Decadal northward shift of the Meiyu belt and the possible cause[J]. *Chinese Sci Bull*, 54(24):4742-4748.
- Wang J, He J H, Liu X F, et al, 2009. Interannual variability of the Meiyu onset over Yangtze-Huaihe River Valley and analyses of its previous strong influence signal[J]. *Chinese Sci Bull*, 54(4):687-695.
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H, 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian high[J]. *Chinese Sci Bull*, 56(27):3220-3228.
- Wu Z W, Wang B, Li J P, et al, 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 114(D18):D18120.

(本文责编:王蕾)