

海河流域盛夏降水预测模型的研发和适用性分析*

洪洁莉¹ 陈丽娟^{1,2}

1 国家气候中心 中国气象局气候研究重点开放实验室, 北京 100081

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘要 海河流域 6 月和 7-8 月的降水有显著的年代际变化差异, 尤其在 2002 年之后, 海河流域 6 月和 7-8 月的年代际变化特征相反, 因此有必要分别建立预测模型。本文基于年际增量的思想, 寻找影响海河流域盛夏降水异常的预测因子, 以突出年际变化异常的影响信号。前冬欧亚中高纬度关键区域海平面气压指数(Sea level pressure index, SLPI)、6 月热带中东太平洋海温 Nino3 指数以及表征厄尔尼诺-南方涛动现象 (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) 演变速度的 Nino3 指数在 6 月与 1 月之差的年际增量作为三个关键预测因子, 建立回归方程。进一步利用多模式的 2022 年 6 月 Nino3 指数的预报结果代入预测模型, 对海河流域 2022 年盛夏降水进行预报试验。相对各动力气候模式 3 月起报的盛夏降水预测异常, 基于年际增量的回归模型对海河流域盛夏降水拟合和回报的准确率更高, 尤其是降水显著偏多年份, 预测技巧更突出。进一步对预报偏差较大的年份复盘归因发现, 前冬海平面气压指数对冬季风和夏季风转换关系的描述可能受到后期春夏热带太平洋和印度洋海温异常演变的干扰。当前冬海平面指数预示的后期海温演变与实际海温演变信号差异较大时, 需关注动力模式对临近热带海温尤其是热带印度洋海表温度距平的预报以及海温变化对海河流域盛夏降水的可能影响。

关键词: 海河流域 盛夏 年际增量 气候模式 预测方法

文章编号 2022142B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2100.20000

收稿日期 2022-08-10 网络预出版日期

作者简介 洪洁莉, 女, 1981 年出生, 博士、高级工程师, 主要从事气候异常诊断和气候预测研究。E-mail: hongjl@cma.gov.cn

通讯作者 陈丽娟, E-mail: chenlj@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 (U2242206, 42275030), 国家重点研发计划项目 2018YFC1506006, 国家重点基础研究发展计划项目 2015CB453203, 中国气象局创新专项 (CXFZ2022J009); Funded by the National Natural Science Foundation of China (U2242206, 42275030), National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1506006), National Basic Research Program of China (Grant 2015CB453203), the Innovation and Development Project of China Meteorological Administration (No. CXFZ2022J009).

Development and application of mid-summer precipitation prediction model over Haihe River Basin

HONG Jieli¹, CHEN Lijuan^{1,2}

¹Key Laboratory for Climate Studies, National Climate Centre, China Meteorological
Administration, Beijing100081

²Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters(CI
C-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044

Abstract There is a significant difference in the decadal variation between June and July-August precipitation over Haihe River Basin, especially after 2002, the decadal variation characteristics of June and July-August (JA) precipitation over Haihe River Basin are opposite, so it is necessary to establish prediction models respectively. Based on the idea of year-to-year increment, several important factors related to annual increment of mid-summer rainfall over Haihe are selected through correlation analysis. The difference between the current year and previous years (DY) of Sea level pressure index (SLPI) of key areas in middle and high latitudes of Europe and Asia in the previous winter, Nino3 index in June and the tendency between June and January of Nino3 index as ENSO evolution speed are used as key factors to establish the multivariate linear regression equation. Then forecast experiment of mid-summer precipitation over Haihe Basin in 2022 is conducted based on the predicted Nino3 index in June by models. The comparison between year-to-year increment model and climate model results initialed in March show that year-to-year increment has high prediction skill especially in flooding years. Then the failure hindcast case is carefully studied through the contribution of each predictor. The main factor is SLPI which reveals the relationship between East Asian winter monsoon and summer monsoon. The relationship is strongly relied on the following tropical Pacific and Indian sea surface temperature anomalies (SSTa) evolution. Nevertheless the tropical SSTa especially in western Indian during June exhibit unique feature may disturb the

contribution of SLPI. It suggests that the nearly prediction of SSTa in key area highly associated with Haihe late summer rainfall should be paid attention.

Keywords Haihe river basin, mid-summer, year-to-year increment, climate model, prediction method

1 引言

海河流域位于华北地区东部，主要分布于京津冀地区，人口及工农业生产集中。而在全球变暖背景下，气象灾害频发，造成的影响加重，因此提高气象灾害预报能力对于防灾减灾部署和国计民生有重要的应用价值。

已有研究往往聚焦更大范围的华北地区，由于华北地区地处东亚季风气候区的北边缘，因此影响华北夏季降水的环流具有复杂性。夏季降水既受到同期中高纬度环流和东亚季风活动的影响，还受到外强迫因子的作用。西太平洋副热带高压(简称西太副高)作为东亚夏季风系统的主要成员与华北夏季降水有密切联系。较多研究聚焦西太平洋副高的脊线、北界以及西伸脊点和华北降水的关系(张庆云, 1999; 张庆云和陶诗言, 1999; 卫捷等, 2003; 谭桂容和孙照渤, 2004)。赵声蓉和宋正山(1999)利用奇异值分解方法分析了华北降水与同期 500hPa 高度场的主要耦合相关模态。第一类环流反映欧亚高纬度环流异常和西太副高变化对华北地区降水的影响，第二类环流显示青藏高原高压和西太副高对华北地区降水的影响。闵锦忠等(2016)指出在华北雨季开始前后，最显著的变化特征是蒙古低压的建立和西伯利亚地区、菲律宾海环流的变化。从外强迫因子影响的角度，不少研究发现华北地区的雨季还间接受到热带太平洋海温、南极涛动、北极海冰等的影响(陈文, 2002; 宋华和孙照渤, 2003; Wang and Fan, 2005; 陈文等, 2006; 范可和王会军, 2006; Li et al., 2012; 刘娜和李双林, 2015; 阮成卿和李建平, 2016; 郭恒和张庆云, 2016)。相对于华北地区的雨季研究，海河流域夏季降水及其机理研究工作相对较少。海河流域作为华北地区的一部分，主要体现在华北地区正交经验模态展开后的第三模态(图略)，解释方差不到 13%，因此空间尺度的缩小，变率增大，超前较长时间的气候预测难度增大。马宁等人(2016)分析认为海河流域受中高纬度影响更显著，而热带地区环流异常对海河流域的影响机制复杂。这种复杂性还可能与夏季内的降水变率及影响系统差异有关(梁萍

等, 2007; 郝立生等, 2019)。

海河流域降水主要集中在 6-8 月, 降水量占全年的 65%。有研究将海河流域夏季 6 至 8 月降水及其环流特征作为一个整体分析 (马宁等, 2016), 也有不少研究注意到我国初夏和盛夏的环流有显著不同 (Wang et al., 2009; 刘屹岷等, 2013)。图 1 为海河流域 1981-2021 年夏季各月降水量的多时间尺度演变图 (年际变化、7 年滑动、线性趋势)。可以看到, 夏季各月都有显著的年际变化, 6 月降水量值明显低于 7-8 月, 其中 6 月和 7、8 月的年代际变化有明显差异。从剔除年际信号后的滑动 7 年平均可以看到, 20 世纪 90 年代后至 21 世纪初, 7 月和 8 月海河流域降水显示在波动中减少的趋势, 而 6 月降水的年代际变化特征不显著。2002 年之后, 7 月和 8 月海河流域降水显示在波动中增强的年代际特征, 2002 年之后为显著的线性增加趋势, 均通过 90% 显著性检验, 其中 7 月降水的线性趋势信号高于 8 月, 而 6 月年代际变化则表现为在波动中减少的特征, 与 7 月和 8 月的趋势变化相反, 但是未通过 90% 显著性检验。这说明 6 月和 7-8 月可能受到不同系统变率的影响。因此为了聚焦海河流域盛夏的降水特征和预测问题, 本文将预测对象定为海河流域盛夏 (7 月和 8 月) 的降水。

在华北夏季降水预测方法研究方面, 范可等人 (2008) 利用年际增量思路建立华北汛期降水预测方法, 预测效果较好; Guo et al. (2012) 利用时空尺度分离方法, 建立统计降尺度模型预测华北夏季降水。陆日宇 (2002, 2003) 研究表明华北汛期降水及其对应环流的年代际变化与年际变化之间的关系是线性的, 可以将华北汛期降水的年代际和年际变化信号进行简单的叠加而得到华北汛期降水变化规律。近十年来, 华北地区包括海河流域夏季降水呈现偏多趋势, 年际增量方法在年代际信号较明显时段优越性更突出。此外, 动力气候模式预测信息在当前气候预测业务中也发挥着重要作用, 但是模式输出不同变量的技巧有差异。本文拟采用年际增量思路, 结合国内外主流的多个业务用气候模式高技巧预测信息, 研发适用于海河流域盛夏降水的动力与统计相结合的预测模型。进一步评估预测模型的回报技巧和预报效果, 复盘预报效果优劣的年份, 找出预报方法的优越性和局限性, 为进一步改进海河流域预测模型提供参考依据。

图 1 海河流域 1981-2021 年 6-8 月各月降水年际变化 (细实线)、7 年滑动

平均（粗实线）和 2002-2021 年线性趋势（虚线）（单位：mm）

Fig. 1 The annual variation (thin solid lines) and 7-year running mean (thick solid lines) of precipitation over Haihe Basin in June ,July ,August of 1981-2021, and linear trend of precipitation during 2002-2001 (dashed lines) (units: mm).

2 资料和方法

本文所用海河流域降水站点数据取自国家气象信息中心中国地面气象要素月和日尺度数据集（任芝花等，2012），包含海河流域范围内 210 站（图 2），海河河段虽然在天津，但海河水系是由海河干流及五大支流（潮白河、永定河、大清河、子牙河、南运河）组成。覆盖了北京、天津、河北三省，还包括山西省、河南省、山东省和内蒙古自治区的一部分。大气环流再分析数据为美国 NCAR/NCEPI 1981 至 2021 年的逐月位势高度场、风场等变量(Kalney et al.,1996)，空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。海表温度（Sea Surface Temperature, SST）资料为美国 NOAA Optimum Interpolation Sea Surface temperature (OISST) V2 (Reynolds et al., 2002)，空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。本文使用的数据为 1981 年-2021 年，气候态时段为 1991-2020 年 30 年平均。本文所用气候模式数据主要来源于刘长征等人(2013)开发的国家气候中心多模式解释应用集成预测系统（Multi-model Downscaling Ensemble Prediction System, MODES），主要包括欧洲中期天气预报中心（The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts , EC）、东京气候中心(Tokyo Climate Center, TCC)、美国国家环境预报中心耦合气候预报系统（The NCEP Climate Forecast System Version, CFS）、英国气象局（United Kingdom Meteorological Office, UK）和中国气象局国家气候中心（Beijing Climate Center, BCC）5 个业务常用气候模式的历史回报和实时预报数据。

主要的分析方法包括年际增量方法（范可和王会军，2007；范可等，2008），一元和多元线性回归、相关和合成，显著性检验采用 student-t 检验(黄嘉佑，2000)。

图 2 海河流域站点分布图

Fig.2 The distribution of the stations over Haihe Basin.

3 海河流域盛夏降水预测因子的选取

由图 1 可知海河流域盛夏降水有着显著的年代际信号，在年代际信号强盛阶段，年际信号容易被掩盖。为了突出年际变化信号，研究对年际变化有显著作用的影响因子，本文采用范可等（2008）提出的年际增量思想来研发预测模型。范可等（2008）研究发现东亚冬季风和夏季风有准两年变化，提出利用冬季东北亚环流指数作为海河流域盛夏降水年际增量的一个预测因子。基于该思路，我们首先利用 1981-2021 年海河盛夏降水进行小波功率谱分析（图略），发现降水的准两年周期较显著。进一步分析了与海河流域盛夏降水年际增量对应的冬季海平面气压年际增量的相关（图 3）。从空间分布上看，与海河流域盛夏降水年际增量显著相关区位于欧亚中高纬度，尤其是乌拉尔山至贝加尔湖地区（图 3 黑框所示范围），该区域冬季的海平面气压偏强，对应冬季风偏强，有利于盛夏海河流域的降水偏多。本文取前期冬季欧亚中高纬度乌拉尔山至贝加尔湖（50°N -60°N，50°E -110°E）区域平均海平面气压年际增量作为海河流域盛夏降水预测模型的第一个预测因子。

图 3 1982-2021 年海河流域盛夏降水年际增量和前冬海平面气压的年际增量相关（绿线表示通过 95%信度检验区域）

Fig. 3 The correlation between DY of sea level pressure (SLP) in previous boreal winter (December-January-February, DJF) and mid-summer rainfall over Haihe (green lines represent 95% confidence level).

大量研究证实 ENSO 事件对海河流域盛夏降水的影响 (Huang and Wu, 1989; Wang et al., 2000; Lu, 2005; Wu and Li, 2008)。ENSO 通过海气相互作用，影响西太平洋副热带高压、东亚急流等东亚大气环流关键成员，进而对海河流域盛夏降水产生影响。在表征 ENSO 演变指标时，我们比较了 Nino3.4 和 Nino3 海温指数各月的年际增量和海河盛夏降水年际增量的相关（图 4a），以及二者气候距平值间的相关（图 4b）。从图 4a 和图 4b 的对比可以发现，ENSO 两个指数年际增量和海河流域降水年际增量的相关系数相比传统距平值之间的相关更高，进一步表明年际增量思想的优越性，可以更加突出预报对象和影响因子之间的年际关系。此外，图 4a 中 Nino3 与海河流域盛夏降水年际增量的相关比 Nino3.4 指数

更强，且在6月二者的负相关达到极大值，因此本文选取6月Nino3指数的年际增量作为海河流域盛夏降水的第二个预测因子。而在实时气候预测业务中，需要在每年的2-3月份提供夏季预测，因此需要预测6月Nino3指数的年际增量，由于动力气候模式对于Nino3指数的预报远远高于其它海区（汪栩加等，2015；Liu et al., 2021），因此利用动力模式的热带太平洋海温预测信息具有很高的可行性。

近年来不少研究关注到ENSO演变速度对于东亚气候有着重要影响。赵树云等（2017）研究发现华北雨季降水异常偏多年通常发生在El Niño结束且当年转为La Niña的年份，而华北雨季降水异常偏少年通常发生在赤道中东太平洋冷水位相结束且当年发展成El Niño事件的年份，因此ENSO的演变速度与海河流域盛夏降水有着密切关系。Zhang et al. (2018) 发现华北地区春夏连旱多出现在La Niña向El Niño转换年份的春夏季节，且伴随前春北太平洋涛动（North Pacific Oscillation, NPO）的负位相特征。通常ENSO事件在冬季达到峰值，计算1月之后各月ENSO指数与1月ENSO指数之差来表示ENSO演变速度的年际增量与海河盛夏降水年际增量的相关系数（图5）。同时也比较了Nino3指数和Nino3.4指数与海河流域盛夏降水关系的相对优劣性。发现Nino3指数3月开始与1月指数的差值和海河流域7-8月降水的年际增量相关系数负相关值显著增加，最显著负相关在6月与1月的Nino3指数之差达到峰值，而6月之后的负相关关系逐步减弱。该分析与赵树云等（2017）和Zhang et al. (2018) 研究结论一致，在El Niño结束且当年转为La Niña年，Nino3指数在6月与1月的年际增量为负值，从相关关系分析表明有利于海河流域盛夏降水偏多，而前冬La Niña结束且当年转为El Niño的年6月与1月Nino3指数的年际增量为正值，有利于海河流域盛夏降水偏少。因此选定6月与1月Nino3指数差值的年际增量作为本文的第三个预测因子。

图4 ENSO逐月指数的年际增量与海河流域盛夏降水年际增量的相关系数(a)
与二者距平值的相关系数 (b)

Fig. 4 Correlation coefficients of difference between the current year and previous years (DY) (a) and anomaly (b) between July-August (JA) Precipitation and monthly ENSO indices..

图 5 ENSO 逐月指数与 1 月 ENSO 指数之差的年际增量与海河流域盛夏降水
年际增量的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between DY of JA precipitation over Haihe basin
and DY of ENSO monthly indices minus the indices in January

4 预测模型的建立与评估

由以上分析可以得到三个预测海河流域盛夏降水年际增量变化的预测因子
分别是：前冬欧亚中高纬度关键区域海平面气压指数 X_1 ，6月Nino3指数 X_2 ，6月
与1月Nino3指数之差 X_3 的年际增量。这三个因子分别显示了前期冬季风特征及冬
夏季风转换的可能影响，初夏热带东太平洋海温异常特征以及ENSO循环从冬季
到夏季的演变速度等信息。利用三个因子的历史数据与海河流域7-8月降水年际
增量 Y 建立多元线性回归方程：

$$Y=20.96X_1-12.55X_2-4.79X_3-2.7$$

所有预测因子均用再分析大气和海温数据，拟合时段为1983-2014年，共32
年；独立样本检验时段为2015-2021年，共7年。

图6为由1980-2021年拟合和独立样本检验的降水年际增量经过换算为气候
预测业务使用的降水距平百分率以及与实况距平百分率的对比。可以发现在拟合
时段，对海河流域盛夏降水显著偏多的年份（如1988、1994、1995、1996年）拟
合效果很好；在独立样本检验阶段，对4年偏多年份（2016、2018、2020、2021
年）中的3年（2016、2018、2021年）预报与实况趋势一致。进一步利用该模型
在3月份对2022年盛夏海河流域降水进行预报试验。多元线性回归方程所需的因
子中前冬海平面指数和1月Nino3指数的年际增量值均可通过前期实况监测获取，
而6月Nino3指数可参考国内外多模式集合预报结果获取。主要参考网页包括
[https://cmdp.ncc-cma.net/pred/cn_cmme.php\[2022-03-25\]](https://cmdp.ncc-cma.net/pred/cn_cmme.php[2022-03-25])和
[https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/\[2022-03-25\]](https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/[2022-03-25])。多
模式预测未来6月份，Nino3指数可能在[-0.5 0.5]范围内变化，呈中性状态。根据
这个范围即可计算2022年海河流域盛夏降水距平百分率的变化范围是[49%-
63%]。

为了对比基于年际增量的多元线性回归方法和多模式在3月起报海河流域盛夏降水预测的能力,定义海河流域范围(35°N-42°N,112°E-119°E)内格点降水的平均作为代表。图7为五个动力气候模式3月起报的海河流域盛夏降水距平百分率的预测与实况对比。各动力气候模式对近十年海河流域盛夏降水预报准确率相对之前有很大提高。尤其是2018年和2021年,所有模式均准确预报了海河流域降水偏多的趋势。为了客观比较本文回归模型和各动力气候模式对于海河流域盛夏降水的预报能力,计算了回归方法以及各气候模式预报降水量与实况的距平相关系数和符号一致率(表1)。因为不同模式历史数据时间长度有所不同,本文选择各模式共有的历史时段(1991-2020年)数据,同时利用年际增量方法建立模型,对拟合和回报结果进行比较。基于年际增量的回归方法与实况的相关系数和距平符号一致率分别为0.63和73%,均为最高值,气候模式中CFS和TCC预测的相关系数和距平符号一致率次之,分别达到0.36和接近70%,相关系数超过0.05显著性水平。其他模式预报降水和实况的相关系数和距平符号一致率均较低。该结果也证实了基于年际增量思想选择的预测因子,建立回归预测模型,对海河流域盛夏降水拟合和预测技巧有明显提升,尤其是对降水偏多年份的拟合和预报效果更好。基于年际增量的预测模型,无论是相关系数还是距平符号一致率都是最高,其主要原因是年际增量方法对于海河流域盛夏降水异常偏多年预报效果更好(见图6),且预报量级更接近;而动力模式直接对降水量级的预测相对实况偏小(见图7),总体呈现较大的系统性偏差,其中CFS和TCC的预测和实况有较一致的年际变率。

图 6 1981-2021 年海河流域盛夏降水距平百分率实况(蓝点线)及预测模型拟合(红圈虚线)与独立样本检验(红色区间)对比

Fig.6 The observation (blue line), fitting (red dashed line) and hindcast (red area) precipitation anomaly percentage over Haihe in mid-summer from 1981 to 2021

图 7 1981-2021 年动力气候模式 3 月起报海河流域盛夏降水距平百分率预测和实况序列

Fig.7 The precipitation anomaly percentage forecast by each climate model and the observation over Haihe in mid-summer from 1981 to 2021

252

253

表 1 年际增量回归模型和各气候模式对海河流域盛夏降水的预测评估

254

Table 1 Evaluation of the forecast by year to year increment regression model

255

and climate model output for the mid-summer rainfall over Haihe

(1991-2021)	年际增量	CFS	TCC	BCC	UK	EC
预测与实况降水 的相关系数	0.63*	0.36*	0.36*	-0.02	0.03	-0.04
预测与实况降水距平 的符号一致率	73%	67%	69%	65%	46%	38%

256

备注：*表示通过 0.05 显著性水平

257

258

前面提到基于年际增量方法的回归模型，独立样本检验的年份为 2015-2021

259

年中，其中海河流域盛夏降水明显偏多年份（2016、2018、2020 和 2021 年）中，

260

3 年趋势预报准确，仅在 2020 年预报失败，因此有必要分析其中的原因。图 8

261

为拟合以及独立样本检验年各个预测因子的贡献以及与实况的对比。其中，2020

262

年海河流域盛夏降水的年际增量是正异常，而独立预报为负异常。复盘三个预测

263

因子的贡献，其中前冬海平面气压指数的负异常对于预报降水负趋势起到主导作

264

用，进一步分析海平面气压指数年际增量的异常及对应的海洋和大气环流异常特

265

征。

266

267

图 8 海河流域盛夏降水指数观测的年际增量和拟合值及三个预测因子的贡献

268

（所有变量均标准化）

269

Fig. 8 DY of observed and fitted precipitation index over Haihe in mid-summer and

270

the individual contributions of the three predictors (standardized)

271

272

图 9 1982-2021 年前冬海平面气压关键区指数的年际增量值回归冬季(a)及

273

春季(b)和夏季(c)海表温度距平(单位：℃)和 850hPa 风场距平场（单位：m/s）（绿

色等值线以及蓝色箭头表明通过 0.1 显著性水平)

Fig. 9 Regression of SLP Index in previous winter (DJF) on seasonal evolution of SSTa (shadings, $^{\circ}\text{C}$) and 850hPa wind (vectors, m /s) from (a)DJF, (b)MAM and (c)JJA in 1982-2021(green contour lines and blue vectors represent statistically significant at the 10% level)

图 9 为前冬海平面气压关键区指数的年际增量值回归到冬季、春季和夏季海表温度距平和 850hPa 风场距平场。表明前冬欧亚中高纬度海平面气压年际增量为正异常时, 冬季中东太平洋海温为偏暖异常, 而在西太平洋海温为负距平, 我国东部大部地区低层为南风异常, 是弱东亚冬季风的特征。春季热带太平洋海温仍然为西冷东暖分布, 但西太平洋冷海温距平发展, 而东太平洋海温暖异常有减弱趋势, 我国东部地区为不显著的北风距平。夏季热带中东太平洋海温暖异常进一步减弱, 热带印度洋海温增暖, 尤其是热带印度洋西部海温正距平超过 0.05 显著性水平。在这样的热带海温背景下, 印度洋的“电容器效应”(Xie et al., 2009)有利于西北太平洋上产生异常反气旋性环流, 我国东部地区为显著的南风距平, 有利于水汽向北方地区输送, 海河流域降水显著偏多。而 2020 年前冬海平面气压关键区为负年际增量, 根据回归结果对应夏季热带印度洋 SSTa 为冷异常; 而实况显示热带印度洋海温异常偏暖, 在东亚副热带地区为异常反气旋性环流 (Ding et al., 2021; 赵俊虎等, 2021; Pan et al., 2021), 海河流域盛夏降水较常年同期偏多 20%。统计关系显示的东亚冬季风和夏季风的联系在 2020 年夏季不适用, 这表明两者关系的复杂性。其中印度洋的电容器效应不容小觑, 研究表明印度洋海温不仅受到 ENSO 演变的影响, 其自身变率也较大, 但是模式对于印度洋海温的可预报性相对于中东太平洋偏低。通过复盘 2020 年盛夏海河流域降水预报失败的归因分析, 可知经典的冬季风(弱)和次年夏季风(强)的年际关系可能在次年由于印度洋海温信号的变率异常而中断, 导致回归模型预报效果差。因此需要关注春夏季热带印度洋海温信号对大气环流的可能影响, 进一步分析其对海河流域汛期降水的作用。

5 结论与讨论

本文从海河流域盛夏降水预测的角度, 结合模式对降水的预报能力有限和海河流域盛夏降水年代际信号强的特点, 提出利用年际增量思想寻找适当的预测因子, 建立降水的多元回归预测模型。进一步评估基于年际增量的回归模型的预报能力, 并复盘独立样本检验中预报失败年份的原因, 获得一些有价值的结论。

(1) 海河流域 6 月降水的年代际变化特征和 7-8 月年代际变化特征差异很大。尤其是 2002 年之后, 7-8 月降水的年代际尺度特征呈波动中显著增加的趋势, 而 6 月降水年代际尺度特征呈波动中减少的趋势。因而将 6 月和 7-8 月海河降水分离, 分别建立预测模型, 更有利于获得清晰的预测信号。

(2) 结合已有研究和近年来气候演变特征, 利用年际增量思想, 根据相关分析确定海河流域盛夏降水预测的三个关键预测因子: 前冬欧亚中高纬度关键区域海平面气压指数、6 月 Nino3 指数、反映 ENSO 演变速率的 6 月和 1 月 Nino3 指数之差。利用这三个变量的年际增量和海河流域盛夏降水的年际增量建立多元线性回归方程。该模型预报的降水与各动力气候模式 3 月起报的盛夏降水以及实况进行了对比, 回归模型预测和实况的相关系数、距平符号一致率分别达到 0.63 和 73%, 技巧最高。尤其是海河流域盛夏降水异常偏多的年份, 拟合和回报效果总体都比较高。各动力气候模式的预报中, CFS 和 TCC 预测和实况的相关系数达到 0.36, 超过 0.05 显著性水平; 距平符号一致率分别为 67%和 69%。其他模式预报降水和实况的相关系数和距平符号一致率均较低。该结果也证实了本文基于年际增量思想选择的预测因子, 建立回归预测方法的思路有效地提高了海河流域盛夏降水拟合和预测技巧。

(3) 对海河流域盛夏降水预测模型的成败个例进行了复盘分析。在独立样本检验中, 2020 年降水预报与实况完全相反。归因分析发现, 前冬欧亚中高纬关键区域海平面气压指数的年际增量项对于预报失败有着主导作用。分析表明海平面气压指数的年际增量项反映为典型的冬季风与夏季风的转折关系在 2020 年出现断裂。海平面气压指数的年际增量反映在夏季海温的关键区为热带印度洋海温异常, 热带印度洋海温通过电容器效应进而影响西北太平洋上空反气旋式异常环流, 导致对北方地区降水输送强弱的影响。因此关注临近的模式对热带印度洋海温的预报, 有利于提高海河流域盛夏降水的预测能力。本文研究内容主要针对

每年 3 月在全国气候预测会商时间节点提供盛夏海河流域降水预测,而夏季赤道印度洋海温的预报技巧相对于 ENSO 指数预测技巧偏低(汪栩加等, 2015; Liu et al., 2021)。印度洋相对太平洋海盆尺度更小,而变率更大,同时印度洋海温还受到太平洋和大西洋海温协同作用得影响(Yu et al., 2022),因此预测难度较大。下一步工作可评估多模式对于热带印度洋海温得预测技巧,挑选技巧较高的信号并添加为预测因子,进一步完善预测模型。

海河流域盛夏降水不仅受到跨季节尺度大气环流、ENSO 状态和演变速度以及印度洋海温的影响,还受到季节内振荡信号的调制(郝立生等, 2020, 2021)。尤其是海河流域盛夏降水显著偏多年份,季节内振荡信号较强。因此研究季节尺度的影响信号与季节内振荡信号的协调作用将有助于进一步提高海河流域夏季降水的预测能力。

参考文献 (References)

- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响[J].大气科学, 26 (5):595-610.
Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5):595-610.
doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02
- 陈文, 康丽华, 王玓. 2006.我国夏季降水与全球海温的耦合关系分析[J].气候与环境研究, 11 (3):259-269. Chen Wen, Kang Lihua, Wang Ding. 2006. The coupling relationship between summer rainfall in China and global sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3):259-269. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2006.03.02
- Ding, Y H, Liu Y Y, and Hu Z.-Z., 2021: The record-breaking mei-yu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST anomalies. Adv. Atmos. Sci., 38(12), 1980-1993.doi:10.1007/s00376-021-0361-2
- 范可, 王会军. 2006.有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展[J].大气科学, 30 (3):402-412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Studies of the relationship between Southern Hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3):402-412.doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.04
- 范可, 王会军, Choi Y J. 2007. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型. 科学通报, 52(24): 2900-2905.Fan Ke, Wang Huijun, Choi Y J.2007.A physical-statistical model for forecasting summer precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J].Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52(24): 2900-2905.doi: 10.3321/j.issn:0023-074x.2007.24.014

364 范可, 林美静, 高煜中. 2008.用年际增量方法预测华北汛期降水[J].中国科学(D 辑):地球科学,
 365 38 (11):1452-1459. Fan Ke, Lin Meijing, Gao Yuzhong. 2008. Forecasting the summer
 366 rainfall in North China using the year-to-year increment approach[J]. Science in China
 367 (Series D):Earth Sciences, 52 (4):532-539. doi: 10.1007/s11430-009-0040-0
 368 郭恒, 张庆云. 2016.北方雨季中国东部降水异常模态的环流特征及成因分析[J].大气科学, 40
 369 (5):946-964. Guo Heng, Zhang Qingyun. 2016. The dominant modes of precipitation
 370 anomalies over eastern China during the northern China rainy season and the possible causes
 371 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5):946-964, doi:
 372 10.3878/j.issn.1006-9895.1510.15218
 373 Guo, Y., J. P. Li, and Y. Li, 2012. A time-scale decomposition approach to statistically downscale
 374 summer rainfall over north China. J. Climate, 25, 572–591.doi: 10.1175/JCLI-D-11-00014.1
 375 郝立生, Li Tim,马宁,等.2020. MJO 对 2018 年华北夏季降水的影响[J]. 大气科学, 44(3):
 376 639-656. Hao Lisheng, Li Tim, Ma Ning, et al.2020. Influence of MJO on summer
 377 precipitation in North China in 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
 378 Chinese), 44(3): 639-656. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1912.19217
 379 郝立生, 马宁, 何丽烨, 等. 2021. 北半球夏季大气低频振荡演变特征及其与华北夏季降水的
 380 关系[J]. 大气科学, 45(6): 1259–1272. Hao Lisheng, Ma Ning, He Liye, et al. 2021.
 381 Evolution characteristics of BSISO and its relationship with summer precipitation in North
 382 China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1259–1272. doi:
 383 10.3878/j.issn.1006-9895.2101.20239
 384 Huang, R. H., and Y. Wu. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China
 385 and its mechanism. Adv. Atmos. Sci., 6, 21–32.
 386 黄嘉佑, 2000. 气象统计分析与预报方法[M]., 北京: 气象出版社. Huang J Y, 2000. Statistic
 387 analysis and forecast methods in meteorology [M]., Beijing: China Meteorological Press (in
 388 Chinese).
 389 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J].
 390 Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3):437-472.
 391 Li, Y., J. Li, and J. Feng. 2012. A teleconnection between the reduction of rainfall in southwest
 392 Western Australia and north China. J. Climate, 25, 8444–8461.doi:
 393 10.1175/JCLI-D-11-00613.1
 394 Liu, B., J. Z. Su, Ma L. B., et al.2021.Seasonal prediction skills in the CAMS-CSM climate
 395 forecast system. Clim Dyn. 57, 2953-2970 doi: 10.1007/s00382-021-05848-z
 396 梁萍, 何金海, 陈隆勋, 等.2007.华北夏季强降水的水汽来源[J].高原气象, 26 (3) : 460-465.
 397 Liang Ping, He Jinhai, Chen Longxun, et al.2007.Anomalous moisture sources for the severe
 398 precipitation over North China during summer[J].Plateau Meteor (in Chinese) , 26 (3) :
 399 460-465.doi: 10.3321/j.issn: 1000-0534.2007.03.004
 400 刘长征, 杜良敏, 柯宗建,等.2013.国家气候中心多模式解释应用集成预测. 应用气象学

401 报,24(6): 677-685. Liu Changzheng, Du Liangmin, Ke Zongjian, et al.2013.Multi-model
 402 Downscaling Ensemble Prediction in National Climate Center [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in
 403 Chinese), 24(6): 677-685.doi: CNKI:SUN:YYQX.0.2013-06-004
 404 刘娜, 李双林. 2015.基于时间尺度分离的中国东部夏季降水预测[J].应用气象学报, 26
 405 (3):328-337. Liu Na, Li Shuanglin. 2015. Short-term climate prediction for summer rainfall
 406 based on time-scale decomposition [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 26 (3):328-337.
 407 doi: 10.11898/1001-7313.20150308.
 408 刘屹岷,洪洁莉,刘超,等. 2013. 淮河梅雨洪涝与西太平洋副热带高压季节推进异常[J].大气科
 409 学,37(2):439-450. Liu Yimin, Hong Jieli, Liu Chao, et al. 2013. Meiyu flooding of Huaihe
 410 River valley and anomaly of seasonal variation of subtropical anticyclone over the western
 411 Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 439–
 412 450.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12313
 413 马宁,谢均,郭军,等.2016.海河流域夏季降水与北半球环流异常的相关[J].气象科
 414 技,2016,44(3):400-407.Ma Ning, Xie Jun, Guo Jun, et al.2016. Connection between summer
 415 precipitation over Haihe basin and northern hemisphere circulation anomalies
 416 [J].Meteorological Science and Technology (in Chinese), 44(3):400-407.
 417 doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2016.03.010
 418 陆日宇. 2002.华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离[J]. 大气科学, 26(5): 611-624.
 419 Lu Riyu. 2002.Separation of Interannual and Interdecadal Variations of Rainfall in North
 420 China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 26(5): 611-624. doi:
 421 10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.03
 422 陆日宇. 2003. 华北汛期降水量年代际和年际变化之间的线性关系[J]. 科学通报, 48(10):
 423 1040-1044. Lu Riyu. 2003. Linear relationship between the interdecadal and interannual
 424 variabilities of North China rainfall in rainy season [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese),
 425 48(10): 1040-1044. doi:10.1007/BF03184223.
 426 Lu, R. Y. 2005. Interannual variation of North China rainfall in rainy season and SSTs in the
 427 equatorial eastern Pacific. Chin. Sci. Bull., 50, 2069–2073.
 428 闵锦忠, 赵悦晨, 郝立生. 2016. 华北雨季监测及对应环流变化特征 [J]. 干旱区地理, 39 (3):
 429 539–547. Min Jinzhong, Zhao Yuechen, Hao Lisheng. 2016. Monitoring of rainy season and
 430 characteristics of corresponding circulation changes in North China [J]. Arid Land
 431 Geography (in Chinese), 39 (3): 539–547.
 432 Pan, X., T. Li, Y. Sun, and Z. W. Zhu. 2021.Cause of extreme heavy and persistent rainfall over
 433 Yangtze River in summer 2020. Adv. Atmos. Sci.,
 434 38(12):1994–2009.doi:10.1007/s00376-021-0433-3
 435 任芝花, 余予, 邹凤玲,等. 2012.部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J]. 应用气象学报,
 436 23(6):739-747. Ren Zhihua, Yu Yu, Zhou Fengling, et al. 2012. Quality detection of surface
 437 historical basic meteorological data[J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese) , 23(6):739-747.doi:

438 10.11898/1001-7313.20120611

439 Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST
440 analysis for climate [J]. J. Climate, 15:
441 1609-1625.doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2

442 阮成卿, 李建平. 2016.华北汛期降水分离时间尺度降尺度预测模型的改进[J].大气科学, 40
443 (1):215-226. Ruan Chengqing, Li Jianping. 2016. An improvement in a time-scale
444 decomposition statistical downscaling prediction model for summer rainfall over North China
445 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1):215-226. doi:
446 10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14317

447 宋华, 孙照渤. 2003.华北地区夏季旱涝的时空分布特征及其与北极海冰的关系[J].南京气象
448 学院学报, 26 (3):289-295. Song Hua, Sun Zhaobo. 2003. Flood and drought in North China
449 and their relationship to the North Arctic sea-ice[J]. Journal of Nanjing Institute of
450 Meteorology (in Chinese), 26 (3):289-295. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2003.03.001.

451 谭桂容, 孙照渤. 2004.西太平洋副高与华北旱涝的关系[J]. 热带气象学报, 20(2):206-211. Tan
452 Guirong, Sun Zhaobo. 2004. Relationship of the subtropical high and summertime
453 floods/droughts over North China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20(2):
454 206-211.doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2004.02.013

455 Wang, B., R. G. Wu, and X. H. Fu. 2000. Pacific-East Asian tele-connection: How does ENSO
456 affect East Asian climate? J. Climate, 13, 1517-1536.

457 Wang B, Liu J, Yang J, et al. 2009. Distinct principal modes of early and late summer rainfall
458 anomalies in East Asia. J. Climate, 22:3864-3875.doi: 10.1175/2009JCLI2850.1

459 Wang H J, Fan K. 2005. Central-north China precipitation as reconstructed from the Qing dynasty:
460 Signal of the Antarctic Atmospheric Oscillation[J]. Geophys. Res. Lett., 32
461 (24).doi:10.1029/2005GL024562

462 汪翔加, 郑志海, 封国林等. 2015. BCC_CSM 模式夏季关键区海温回报评估[J]. 大气科学,
463 39(2):271-288. Wang Xujia, Zheng Zhihai, Feng Guolin et al. 2015. Summer prediction of sea
464 surface temperatures in key areas in BCC_CSM model [J]. Chinese Journal of Atmospheric
465 Sciences (in Chinese), 39(2):271-288.

466 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2003. 近 20 年华北地区干旱期大气环流异常特征[J]. 应用气象学报, 14
467 (2):140-151. Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. Characteristics of atmospheric
468 circulation anomalies during persistent droughts in North China for last two decades[J]. J.
469 Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 14 (2):140-151, doi:10.3969/j.issn. 1001-7313.2003.02.002

470 Wu, Z., and J. Li. 2008. Prediction of the Asian-Australian monsoon interannual variations with
471 the grid-point atmospheric model of IAP LASG (GAMIL). Adv. Atmos. Sci., 25, 387-394.

472 Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian ocean capacitor effect on Indo-western Pacific
473 climate during the summer following El Niño[J]. J. Climate, 22(3):730-747.doi:
474 10.1175/2008JCLI2544.1

475 Yu, T., Chen, W., Gong, H. et al. 2022. Comparisons between CMIP5 and CMIP6 models in

476 simulations of the climatology and interannual variability of the east asian summer Monsoon.
 477 Clim Dyn.doi: 10.1007/s00382-022-06408-9
 478 Zhang L X, Wu P L, Zhou T J, et al. 2018. ENSO transition from La Niña to El Niño drives
 479 prolonged spring-summer drought over north China. J. Climate, 31(9):3509–3523.doi:
 480 10.1175/jcli-d-17-0440.1
 481 张庆云.1999. 1880 年以来华北降水及水资源的变化[J]. 高原气象, 18(4):486-495. Zhang
 482 Qingyun.1999.The variation of the precipitation and water resources in North China since
 483 1880[J]. Plateau Meteorology (in Chinese),
 484 18(4):486-495.doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.003
 485 张庆云,陶诗言.1999.夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究[J].气象学
 486 报,57(5):539-548.Zhang Qingyun,Tao Shiyuan.1999. The study of the sudder northward jump
 487 of the subtropical high over the western Pacific[J]. Acta Meteor. Sinica (in
 488 Chinese) ,57(5):539-548.doi: CNKI:SUN:QXXB.0.1999-05-003
 489 赵俊虎,张涵,左金清,等. 2021. 2020 年江淮流域超强梅雨年际异常的驱动因子分析[J]. 大气
 490 科学,45(6): 1433–1450. Zhao Junhu, Zhang Han, Zuo Jinqing, et al. 2021. What Drives the
 491 Super Strong Precipitation over the Yangtze–Huaihe River Basin in the Meiyu Period of
 492 2020? [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1433–1450. doi:
 493 10.3878/j.issn.1006-9895.2104.21011
 494 赵声蓉,宋正山.1999.华北汛期旱涝与中高纬大气环流异常.高原气象[J],11:535-540.Zhao
 495 Shengrong, Song Zhengshan.1999.Floods and droughts in northern China and general
 496 circulation anomalies over middle and high latitudes[J]. Plateau Meteorology (in Chinese),
 497 11:535-540. doi: CNKI:SUN:GYQX.0.1999-04-007
 498 赵树云, 陈丽娟, 崔童. 2017. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响 [J]. 大气科学, 41 (4):
 499 857-868. Zhao Shuyun, Chen Lijuan, Cui Tong. 2017.Effects of ENSO phase-switching on
 500 rainy-season precipitation in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
 501 Chinese), 41 (4): 857-868. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16226

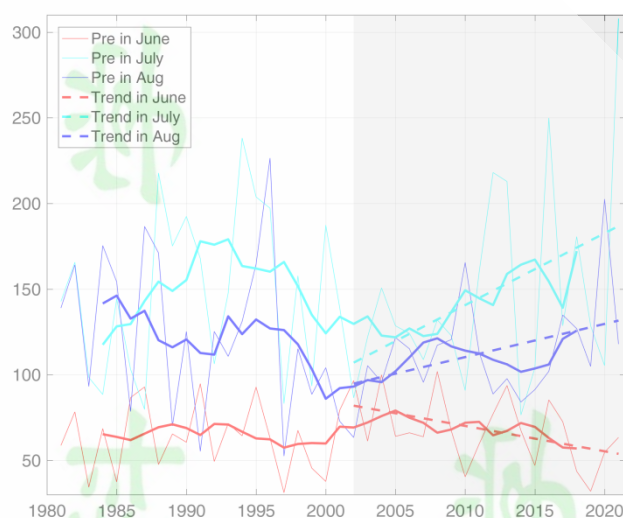


图 1 海河流域 1981-2021 年 6-8 月各月降水年际变化（细实线）、7 年滑动平均（粗实线）和 2002-2021 年线性趋势（虚线）（单位：mm）

Fig. 1 The annual variation (thin solid lines) and 7-year running mean (thick solid lines) of precipitation over Haihe Basin in June ,July ,August of 1981-2021, and linear trend of precipitation during 2002-2001 (dashed lines) (units: mm).

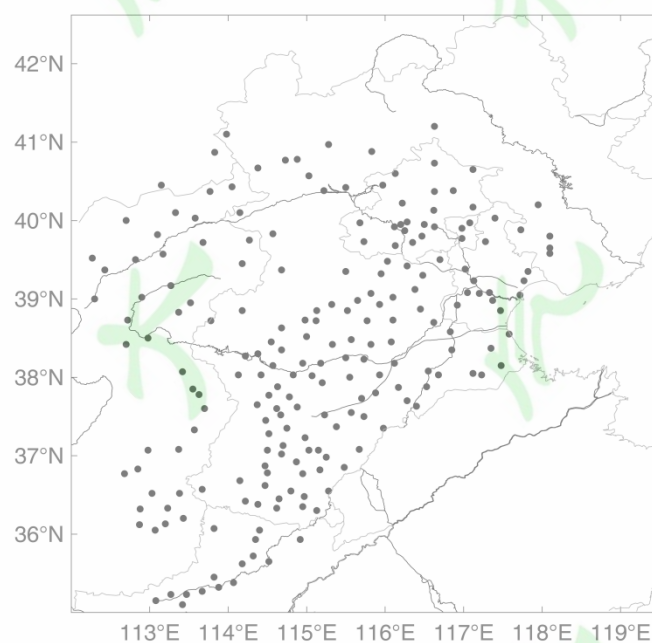


图 2 海河流域站点分布图

Fig.2 The distribution of the stations over Haihe Basin.

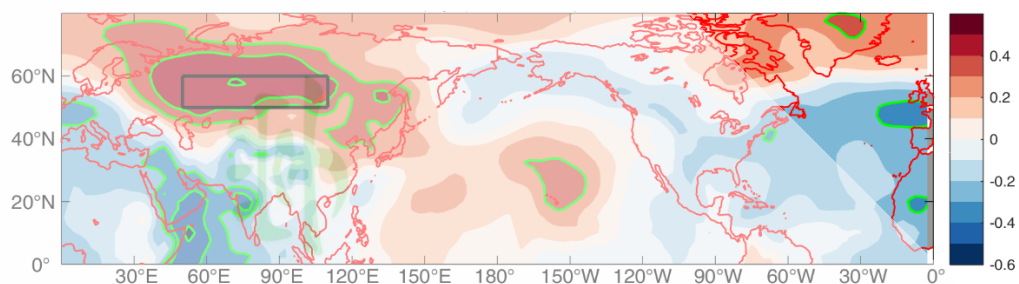


图 3 1982-2021 年海河流域盛夏降水年际增量和前冬海平面气压的年际增量相关（绿线表示通过 95%信度检验区域）

Fig. 3 The correlation between DY of sea lever pressure (SLP) in previous boreal winter (December-Janury-February, DJF) and mid-summer rainfall over Haihe (green lines represent 95% confidence level).

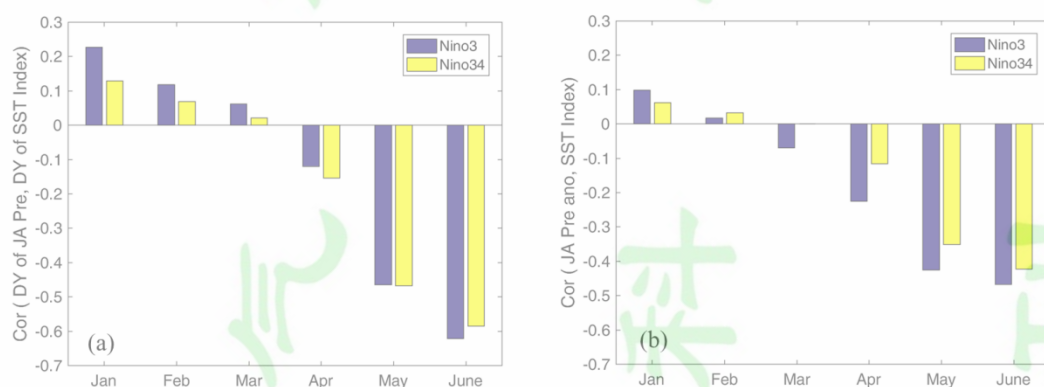


图 4 ENSO 逐月指数的年际增量与海河流域盛夏降水年际增量的相关系数(a)与二者距平值的相关系数 (b)

Fig. 4 Correlation coefficients of difference between the current year and previous years (DY) (a) and anomaly (b) between July-August (JA)Precipitation and monthly ENSO indices..

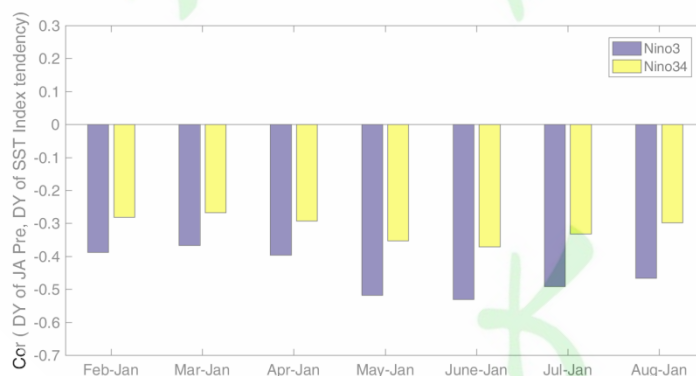


图 5 ENSO 逐月指数与 1 月 ENSO 指数之差的年际增量与海河流域盛夏降水

年际增量的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between DY of JA precipitation over Haihe basin and DY of ENSO monthly indices minus the indices in January

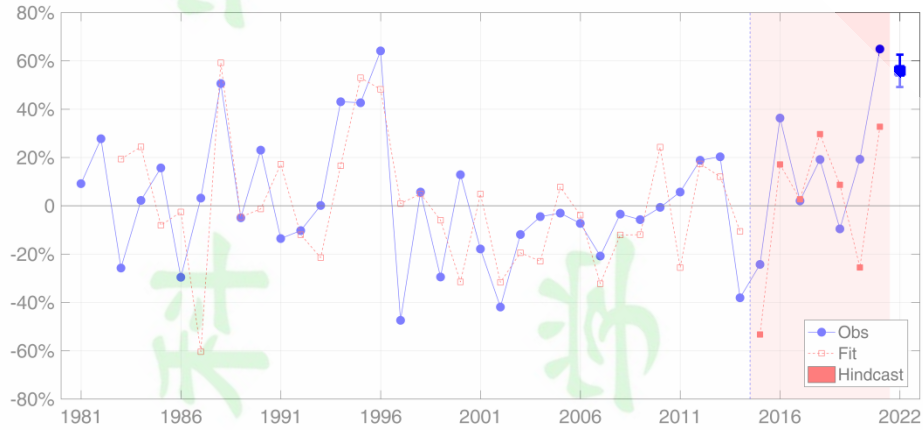


图 6 1981-2021 年海河流域盛夏降水距平百分率实况（蓝点线）及预测模型拟合（红圈虚线）与独立样本检验（红色区间）对比

Fig.6 The observation (blue line), fitting (red dashed line) and hindcast (red area) precipitation anomaly percentage over Haihe in mid-summer from 1981 to 2021

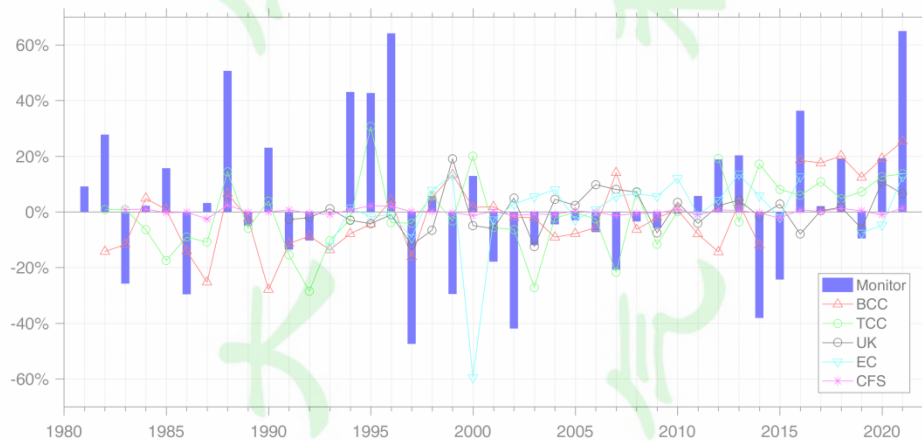
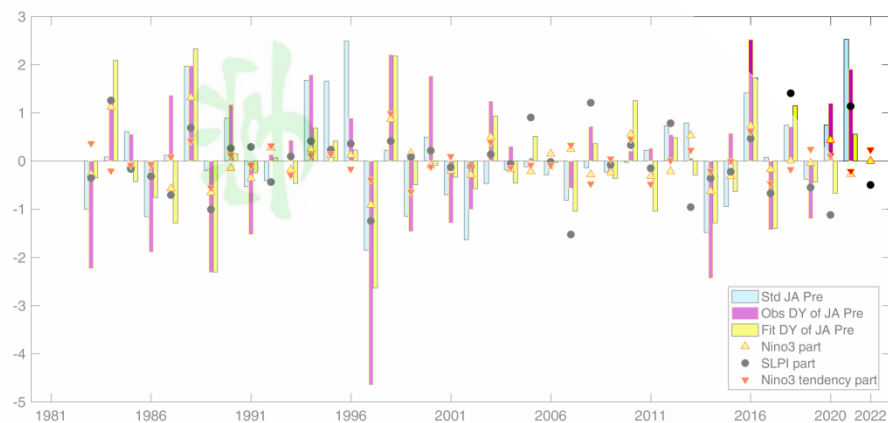


图 7 1981-2021 年动力气候模式 3 月起报海河流域盛夏降水距平百分率预测和实况序列

Fig.7 The precipitation anomaly percentage forecast by each climate model and the observation over Haihe in mid-summer from 1981 to 2021



539

540 图 8 海河流域盛夏降水指数观测的年际增量和拟合值及三个预测因子的贡献
541 (所有变量均标准化)

542 Fig. 8 DY of observed and fitted precipitation index over Haihe in mid-summer and
543 the individual contributions of the three predictors (standardized)

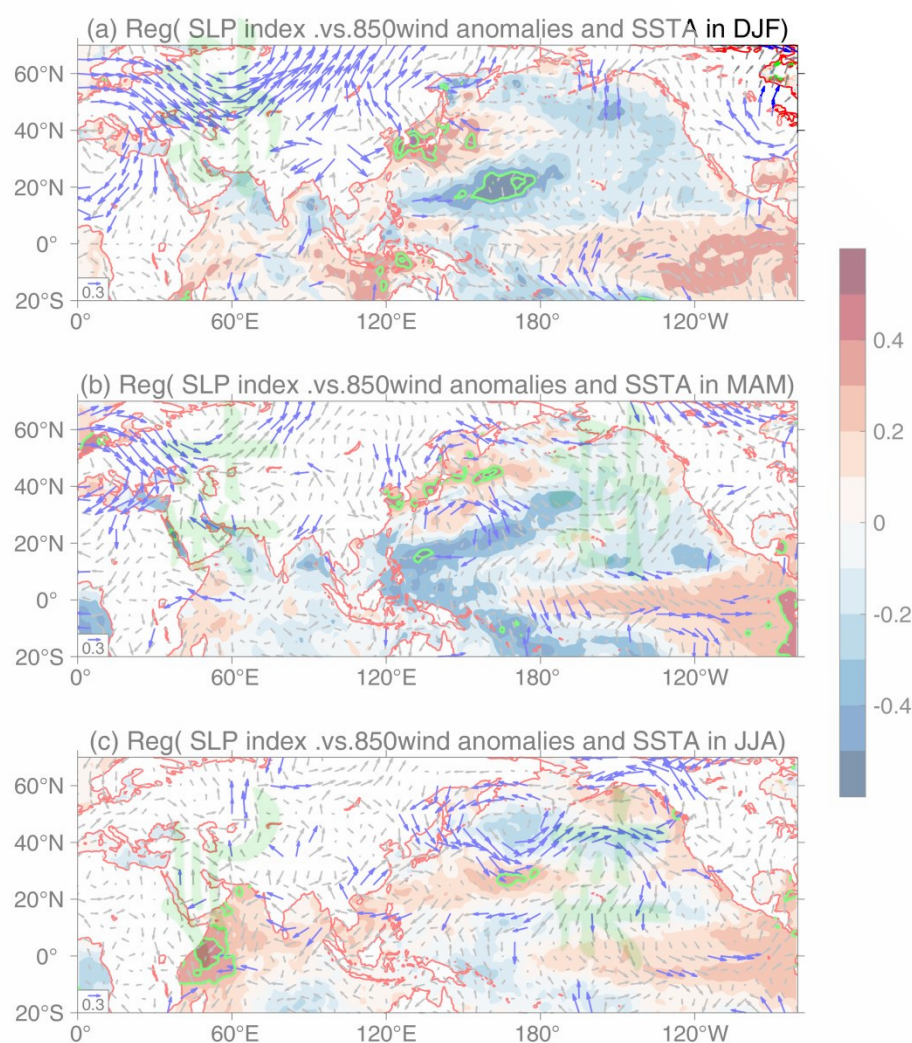


图 9 1982-2021 年前冬海平面气压关键区指数的年际增量值回归冬季(a)及春季(b)和夏季(c)海表温度距平(单位: °C)和 850hPa 风场距平场 (单位: m/s) (绿色等值线以及蓝色箭头表明通过 0.1 显著性水平)

Fig. 9 Regression of SLP Index in previous winter (DJF) on seasonal evolution of SSTa (shadings, °C) and 850hPa wind (vectors, m /s) from (a)DJF, (b)MAM and (c)JJA in 1982-2021(green contour lines and blue vectors represent statistically significant at the 10% level)