

陈丽娟, 王悦颖, 李维京, 等. 海温异常对中国汛期降水的影响及预测应用. 应用气象学报, 2024, 35(2): 129-141.
DOI: 10.11898/1001-7313.20240201

海温异常对中国汛期降水的影响及预测应用

陈丽娟^{1)2)*} 王悦颖¹⁾ 李维京²⁾ 孙林海²⁾ 李想²⁾ 章大全²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

²⁾(国家气候中心 中国气象局气候预测研究开放实验室, 北京 100081)

摘要

以厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)循环和其他关键区海温对东亚季风关键系统影响机理的科学认知与应用为线索, 回顾我国汛期降水业务发布预测的技巧。按照三类雨型划分, 1981—2020 年每 10 年的雨型预测正确率分别为 50%、60%、50%、70%; 按照四类雨型划分, 1981—2020 年每 10 年的雨型预测正确率分别为 30%、30%、40%、50%, 即我国汛期旱涝空间分布型的预测准确率明显提高。筛选预测准确率偏低且有显著旱涝发生年用于复盘, 重点分析当年的主要预测依据和预测偏差较大的原因。结果表明: 对海温影响东亚夏季风系统机理的有限认知影响很大, 包括 ENSO 循环不同位相的影响、ENSO 影响的不对称性、ENSO 空间型的变化、印度洋等海域海温异常的影响均起重要作用, 提出多因子多时间尺度协同作用理论、客观化预测方法、精细化监测预测影响评估一体化系统建设等有助于提高精准化预测能力和精细化服务水平。

关键词: 海温; 汛期; 降水预测; 协同作用

引言

我国是世界上开展短期气候预测业务和科研较早的国家之一。20 世纪 50 年代末即在大气环流型和气候要素等历史演变规律研究的基础上发布预测信息, 为国家防汛抗旱和农业生产服务, 有档案记载的汛期降水发布预测信息从 20 世纪 70 年代开始。我国短期气候预测技术和业务建设大体经历 4 个发展阶段^[1-2]。进入 21 世纪, 在一系列科研项目 and 工程项目的支持下, 建立了延伸期、月、季、年等多时空尺度现代气候预测业务, 其中动力气候模式系统起到重要的技术支撑作用^[3-8]。基于动力产品的释用方法和技术^[9-14]、多模式集合技术和系统建设^[15-16]、动力-统计相结合及动力相似预报的策略和方法^[17-23]均为短期气候预测业务提供了重要科技支撑。伴随着动力气候模式的发展和业务系统能力的

建设, 气象学者对气候系统各成员的认识以及系统内各成员间物理联系的理解更加丰富且深刻^[24-27], 李维京^[27]以南方旱涝为例, 基于影响因子与预报对象间的关系, 从年际关系的年代际变化角度进行全面阐述, 同时指出年际尺度上多因子协同作用是影响降水的重要原因, 需要利用不同方法和策略提高短期气候预测水平和服务能力。由于汛期降水预测与国家防汛抗旱决策、重大工农业生产规划、电力调度、人民生活福祉等密切相关, 一直受到高度重视。

我国汛期降水异常的空间分布及早涝灾害受东亚夏季风环流系统活动进退快慢、停滞时间长短的直接影 响, 而东亚夏季风又受海温、陆面、冰雪等外强迫及大气环流内部动力热力异常^[28]的显著作用。从预测信号超前时间和强弱的角度, 海温异常及演变一直是汛期降水预测的重要可预报性来源, 尤其是厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)循环作为热带太平洋海气相互作用的最强年际信号, 对东亚夏季风的

2023-12-01 收到, 2024-01-08 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(42275030, U2242206, 41730964), 科技部重大专项(2018YFC1506006), 中国气象局创新发展专项(CXFZ-2022J009)

* 邮箱: chenlj@cma.gov.cn

季节变率具有重要作用,可影响我国东部地区降水异常的空间分布^[29-32]。

随着监测手段的进步以及海气相互作用领域的深入研究,人们认识到 ENSO 循环自身还有更加复杂的特征,其影响具有多样性和不确定性^[33-34]。例如厄尔尼诺和拉尼娜的影响具有不对称性^[35-36],其生命史的不同阶段对夏季风的影响存在差异^[37], ENSO 事件的不同空间型对东亚季风的影响不同^[38-40],不同强度的 ENSO 事件对中国气候的影响也存在差异^[41-43],定义也有所不同^[44]。

这些认识是逐步深入和丰富的,我国汛期降水预测为实时业务,受到资料和科学认知的局限。本文以汛期降水预测业务发布为线索,回顾历史上预

测的成功和失败个例,尤其是从海温影响的机理认知和应用角度分析预测技巧高低的原因,并对今后进一步做好汛期降水预测和保障服务的科学和技术问题提出展望。文中采用国家气候中心整理的全国 160 个站资料用于降水预测评估。

1 我国汛期降水预测业务水平回顾

国家气候中心保留了 1978 年以来我国汛期降水发布的预测档案:1978—2023 年汛期降水预测准确率(PS)平均值为 67.8%,距平相关系数(ACC)平均值为 0.0(图 1)。分别统计我国东部汛期三类雨型(雨型划分参见文献[2])(表1)和四类雨型(雨型

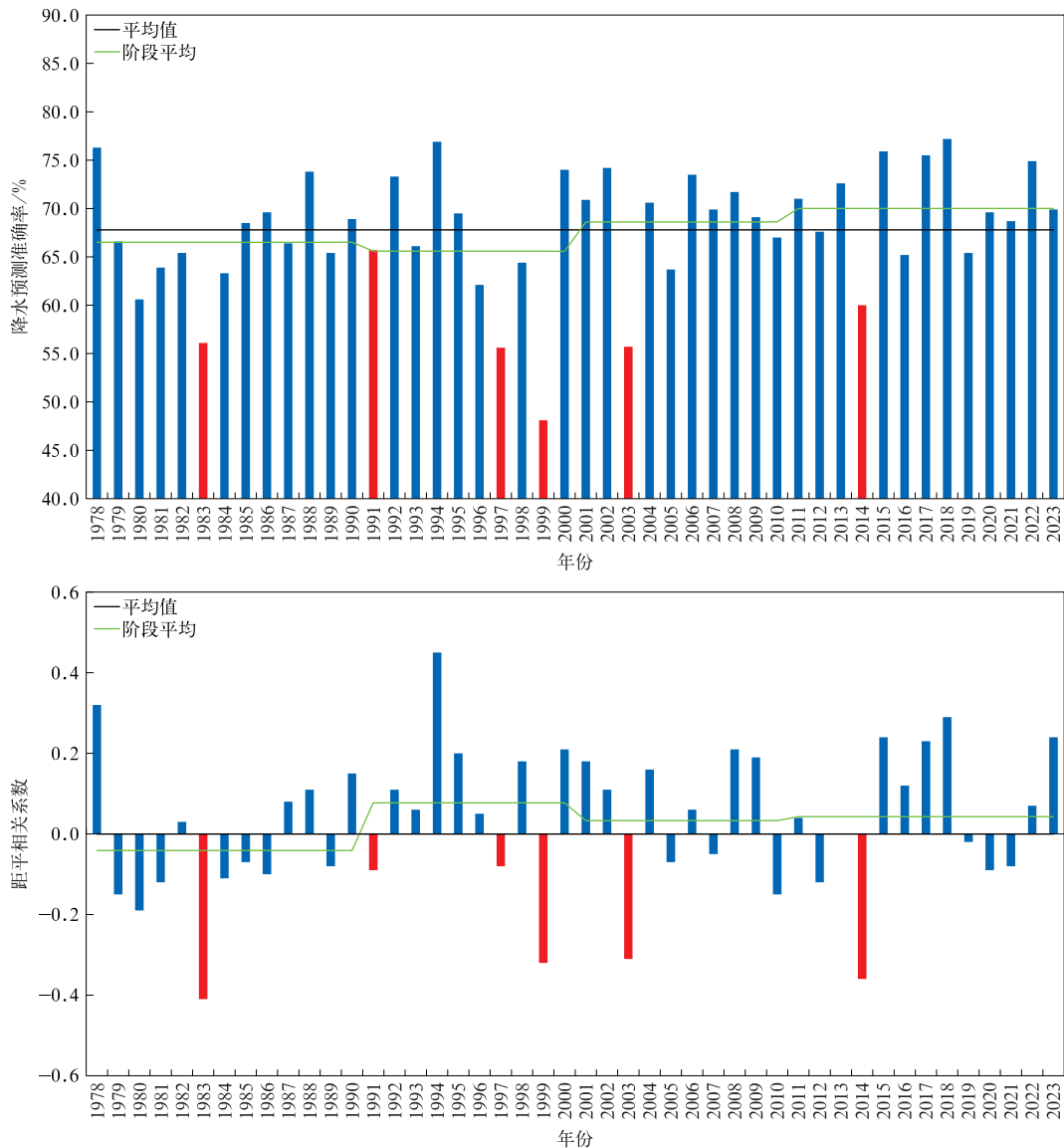


图 1 汛期降水预测准确率和距平相关系数(红色柱状为明显偏低年份)
Fig. 1 Prediction score and anomaly correlation coefficient for precipitation prediction in flood season(red bars denote years with low prediction skill)

划分参见文献[45])的预测能力(表2)。图2是汛期雨型预测正确率。由图2可以看到,1981—1990年、1991—2000年、2001—2010年和2011—2020年三类雨型的预测正确率分别为50%、60%、50%、

70%,四类雨型的预测正确率分别为30%、30%、40%、50%。4个阶段的平均预测准确率分别为66.5%、65.6%、68.6%和70%,距平相关系数分别为-0.041、0.077、0.033和0.043(图1)。总体上,

表1 汛期三类雨型的预测与实况

Table 1 Prediction and observation of 3 types of rainfall pattern in flood season

年份	实况雨型	预测雨型	年份	实况雨型	预测雨型
1981	1	3	2001	3	2
1982	2	2	2002	3	3
1983	3	1	2003	2	1
1984	2	2	2004	1	1
1985	1	2	2005	2	3
1986	3	1	2006	3	2
1987	3	3	2007	2	3
1988	1	1	2008	2	2
1989	2	2	2009	2	2
1990	2	1	2010	2	2
1991	2	1	2011	3	2
1992	1	1	2012	1	2
1993	3	3	2013	1	1
1994	1	1	2014	3	2
1995	1	1	2015	3	3
1996	3	2	2016	3	3
1997	3	1	2017	3	3
1998	3	3	2018	1	1
1999	3	2	2019	3	3
2000	2	2	2020	3	3

注:1代表华北多,2代表黄河与长江之间多,3代表长江以南多。

表2 汛期四类雨型的预测与实况

Table 2 Prediction and observation of 4 types of rainfall pattern in flood season

年份	实况雨型	预测雨型	年份	实况雨型	预测雨型
1981	1	1	2001	4	2
1982	2	2	2002	4	2
1983	3	1	2003	2	1
1984	2	2	2004	1	1
1985	1	2	2005	2	3
1986	3	1	2006	4	2
1987	1	3	2007	2	3
1988	2	1	2008	2	2
1989	1	2	2009	2	2
1990	3	1	2010	2	2
1991	1	1	2011	3	2
1992	4	1	2012	1	2
1993	4	3	2013	1	1
1994	1	1	2014	4	2
1995	3	1	2015	3	3
1996	4	2	2016	3	3
1997	3	1	2017	4	4
1998	4	3	2018	1	1
1999	4	2	2019	4	3
2000	2	2	2020	3	4

注:1代表黄河流域及华北多,2代表黄河与长江之间多,3代表长江流域多,4代表江南—华南多。

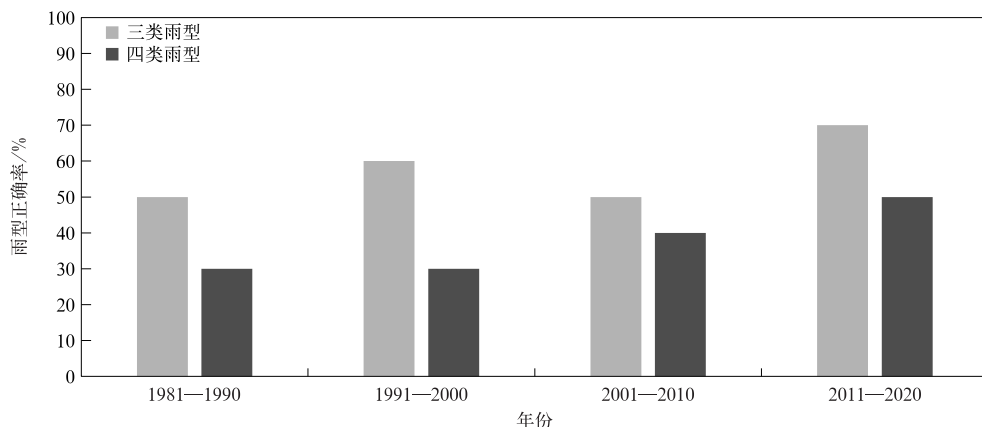


图 2 近 40 年夏季雨型预测正确率

Fig. 2 Prediction accuracy of summer rainfall pattern in recent 40 years

伴随着大气科学的发展和气候预测业务系统的改进,我国汛期降水预测能力在稳步提升,尤其主要雨型的预测与实况逐渐接近,表明旱涝空间分布型的预测准确率明显提高。

对预测与实况有较大差异的年份进行复盘有助于提高认知。由图 1 可以看到,预测准确率和距平相关系数均明显偏低的年份有 1983、1991、1997、1999、2003 年和 2014 年,其中 1997 年全国降水偏多范围较小,不是显著洪涝年,其余年份均发生严重洪涝灾害。我国东部主要多雨区的趋势预测准确率决定了我国汛期预测的水平。由于 1997 年的洪涝灾害相对较轻,下面重点分析历史上汛期预测雨型与实况相反且洪涝灾害较重的 5 个年份,从当时关注的预测依据出发,通过复盘、反思获得更多启示。

2 预测偏差个例及关键区海温异常的影响机理

2.1 1983 年预测

1983 年夏季我国主要多雨带位于长江中下游地区,发生严重洪涝灾害。欧亚中高纬度位势高度场为西高东低型,乌拉尔山高度场偏强,西北太平洋副热带高压(简称副高)偏强,位置偏西偏南,西北太平洋为反气旋式距平环流,主要水汽辐合位于长江流域。当年预测主要多雨区位于我国北方大部,次要多雨区位于江南到华南,与实况雨型相反。主要预测依据为前期厄尔尼诺事件发生年的合成降水和北太平洋海温异常偏低相似年分析。

1982 年 5 月—1983 年 8 月发生了厄尔尼诺事件,国内气象工作者仅能对有限的资料进行分析。

1983 年 3 月下旬会商时,预报员注意到 1982 年秋季赤道东太平洋地区的海水出现异常增暖现象,其强度与第二次世界大战后的几次厄尔尼诺年相当,认识到这可能对全球大气环流和天气产生较大影响,需警惕可能发生较明显旱涝等灾害性天气^[46]。当时厄尔尼诺现象与我国后期夏季降水关系的研究^[47]显示厄尔尼诺次年(代表年份有 1958、1964、1966、1970、1973、1977 年),我国夏季降水呈现南北多、中间少的特征。此外,根据我国 20 世纪 70 年代北太平洋海温对夏季雨带影响的研究^[48],认为北太平洋中部海温偏高时,梅雨期降水偏强,梅雨期长,而 1983 年北太平洋中部海温偏低,有利于主要多雨带位于我国北方。因此,1983 年发布的预测是我国夏季出现南北两条多雨带且以北方雨带为主。

大量科学研究证实认知受资料和样本限制,且对 ENSO 动力学及影响的理解有限,当时国际上对 ENSO 动力学的研究起步不久^[49-50],国内关于 1982—1983 年 ENSO 事件的介绍和分析非常有限。王绍武^[51]指出与以前自东向西传播不同,1982—1983 年赤道海温正距平先出现在西太平洋、中太平洋,后出现在东太平洋,赤道西风异常及向外长波辐射(OLR)的东传更为明显;以前厄尔尼诺过程在 10—12 月才加强,本次过程在 1982 年 6 月就已很强,且过程结束迟;海洋与大气几乎同时变化。这些厄尔尼诺新特征对全球气候影响显著^[52],其动力学特征以及海洋-大气耦合响应机理引起国际学术界广泛关注,助推了热带海洋与全球大气研究计划(TO-GA)的策划和实施。

太平洋年际和年代际变化特征和机理研究显示北太平洋中部海温偏低时,太平洋年代际涛动(PDO)

为正位相,有利于我国夏季风偏弱,多雨带出现在南方,如果对应 ENSO 衰减阶段,长江流域降水异常偏多更为显著^[53]。1983 年夏季海温异常基本符合以上特征,当年汛期降水预测受到资料不足、样本欠缺以及海气相互作用研究深度的限制,雨型预测和实况偏差很大。

1983 年汛期降水预测使人们认识到厄尔尼诺对副高偏强有显著影响,副高引导的水汽辐合主要位于长江流域,可影响我国东部夏季旱涝的空间分布。

2.2 1991 年预测

1991 年夏季我国东部江淮地区降水偏多,黄河流域及长江以南明显偏少,江淮地区入梅早、梅雨期长、降水强度大,淮河流域和长江中下游发生严重洪涝灾害,造成重大经济损失,引起社会密切关注,相关研究取得大量成果^[54]。1991 年夏季中高纬度高度场为两槽一脊型,贝加尔湖高度场偏强,副高偏强、位置偏西偏南,西北太平洋为反气旋式距平环流,主要水汽辐合位于淮河流域。当时预测有南北两条多雨区,北方在华北和黄河中下游地区,南方在江南地区,与实况雨型完全相反。1991 年 5 月发生的中等强度东部型厄尔尼诺事件在 1992 年 5 月结束。业务预测时考虑赤道中东太平洋海温增暖的影响,认为南方多雨带的位置与 1983 年相近,降水偏多中心位于长江中下游至江南北部地区,北方多雨区位于东北到华北地区。与实况相比,预测的北方多雨区比较接近,但南方多雨区的中心位置出现较大偏差。

黄荣辉^[55]指出前期冬季热带西太平洋暖池及暖池次表层的海温偏低,盛夏菲律宾—中印半岛的对流活动偏弱,日期变更线附近对流活动偏强,副高位置偏南且呈带状,有利于我国江淮流域的降水偏多;热带西太平洋暖池偏冷时,菲律宾上空对流活动偏弱且季节内变化小,有利于副高季节内变化小,6 月突然北跳不明显,长期在江南上空滞留,造成雨带长期维持在长江中下游和淮河流域,发生洪涝灾害。

经历了 1982—1983 年、1991—1992 年的厄尔尼诺事件后,有关 ENSO 影响东亚大气环流机理的研究大量涌现,其中最具有代表性的工作是将 ENSO 循环不同阶段与东亚夏季风及我国夏季雨带的关系建立了比较清晰的物理图像^[56-57],多数研究认为在厄尔尼诺发展年和拉尼娜衰减年的夏季,主要多雨带位于江淮地区,而在厄尔尼诺衰减年和拉尼娜发

展年的夏季,主要多雨区位于长江及以南地区。

1991 年江淮流域特大暴雨及持续性洪涝的发生不仅有厄尔尼诺事件的贡献,还与中纬度冷空气活动、西南季风、东亚大气的低频振荡等多种因素的共同作用有关^[58-59]。正是由于 1991 年淮河洪涝的严重性和复杂性,“九五”期间国家自然科学基金资助的重大项目包括淮河流域能量与水分循环试验和研究。1998 年和 1999 年夏季,中国与日本科学家合作在安徽省淮河流域进行了第 1 次大规模能量与水循环试验(WCRP/GEWEX/GAME/HUBEX),从观测到灾害机理研究均取得重大进展^[60]。

1991 年汛期降水预测启示厄尔尼诺发展的不同阶段对东亚夏季风和我国降水异常型的影响存在很大差异。

2.3 1999 年预测

1998 年 9 月—2000 年 6 月发生了强拉尼娜事件。根据历年秋冬季发生拉尼娜事件次年夏季的合成降水,预测夏季主要多雨区位于我国北方,中心在黄淮地区,次要多雨区位于华南。实际情况是长江以南大部地区降水偏多,长江中下游沿江和两湖地区发生严重洪涝,长江以北大部地区降水明显偏少,即预测与实况出现较大偏差。夏季中纬度西风带环流比较平直,贝加尔湖以南地区位势高度场明显偏高,我国大部地区上空为北高南低型,副高偏弱偏东,菲律宾以东为反气旋性环流异常,以北为气旋性环流异常,水汽辐合主要位于长江以南地区。

大量研究显示拉尼娜对东亚夏季风和我国夏季雨带的影响与厄尔尼诺大致相反,但其影响没有厄尔尼诺显著^[57,61],即厄尔尼诺和拉尼娜事件对我国气候影响具有不对称性^[62-63]。1997—1998 年发生了极强厄尔尼诺事件,大气对海洋的响应很充分。虽然 1999 年夏季赤道中东太平洋海温已转为拉尼娜状态,但低纬度大气对热带西太平洋印度尼西亚附近的异常热源强迫呈现响应,出现典型 Gill 理论模态环流分布型^[64],同时中纬度贝加尔湖高压偏强,导致副高无法正常北跳^[65]。

后期大量研究显示 1999 年夏季降水异常不仅与厄尔尼诺和拉尼娜影响的不对称性有关,还受到东亚季风年代际变化的影响。20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水发生了年代际突变,1999—2010 年中国东部季风区夏季降水异常从经向三极子型分布变为经向偶极子型分布,即呈现南涝北旱(除长江沿岸地区)特征^[66]。由此可见,1999 年夏季降水异常

是多因子多时间尺度异常共同作用的结果。

1999 年夏季降水预测的失败使人们认识到 ENSO 影响的不对称性,同时还要关注热带和中纬度环流的配置及影响。

2.4 2003 年预测

2002 年 6 月—2003 年 2 月发生了厄尔尼诺事件,2003 年夏季为厄尔尼诺衰减年。基于前期 ENSO 循环位相和东部地区夏季降水关系的研究,预测主要多雨区位于江南—华南地区,次要多雨区位于华北—东北南部。而实况主要多雨区位于黄河与长江之间,中心在淮河流域,长江以南大旱,东北—华北北部偏少。欧亚中纬度位势高度异常为西高东低型,贝加尔湖以西到乌拉尔山高度场偏强,东北冷涡活跃、位置偏北,副高偏强、位置偏西略偏北,菲律宾地区为反气旋性环流,主要水汽辐合位于淮河流域。

大量研究和分析发现 2003 年为中部型厄尔尼诺事件,与东部型厄尔尼诺事件的发展和影响不同^[38,40,67-69]。中部型厄尔尼诺事件不仅在发展演变机制上与东部型厄尔尼诺事件不同,其对全球大气环流、西北太平洋台风和大西洋飓风活动等的影响也表现出显著差异。中部型厄尔尼诺发生时,最大海温正距平中心位于赤道中太平洋日界线附近,对流活跃区较东部型厄尔尼诺位置偏西,在赤道太平洋上空地区形成两个异常沃克环流圈。赤道太平洋中部相对偏湿导致在西北太平洋上空对流层中层激发正位相的太平洋—日本(Pacific—Japan, PJ)波列,在西北太平洋—北美地区上空对流层中层激发正位相的夏季太平洋—北美(Pacific—North American, PNA)遥相关型^[70]。当中部型厄尔尼诺发生时,菲律宾异常反气旋的强度显著减弱,持续时间显著缩短,且位置西移至我国南海地区,造成南海北部及我国南方大部分地区受下沉气流影响,长江以南降水偏少^[40]。

2003 年夏季降水预测偏差提示,进入 21 世纪中部型 ENSO 事件发生频率增加,利用 ENSO 信号开展气候预测时,不能仅考虑厄尔尼诺指数,还需要从热带海温异常的分布类型以及大气响应等多角度看待 ENSO 循环的影响。

2.5 2014 年预测

2013 年秋冬季赤道中东太平洋为弱冷水状态,2014 年初国内外气象学界认为将发生 1 次较强厄尔尼诺事件,实际情况是 2014 年春季厄尔尼诺事件

明显增强,8 月迅速衰减,秋季继续发展。按照中国和日本气候业务监测标准,2014 年春夏季形成弱厄尔尼诺事件,而部分欧美国家监测标准认为厄尔尼诺事件尚未形成,仍处于厄尔尼诺前期预警状态。国内大量诊断和动力方法均预测 2014 年春季至夏季赤道中东太平洋海温距平为正常到偏暖,可能在夏季形成 1 次暖事件。根据春夏季厄尔尼诺事件发展的可能影响,不同发生时间、不同强度和不同爆发类型间的差异,春夏季发生中等强度以下厄尔尼诺事件对我国夏季降水的影响比较一致,即夏季主要雨带位置偏北,位于华北南部—长江。当厄尔尼诺强度偏强或爆发为混合型(东部与中部混合发展)时,夏季主要雨带偏南,位于江南南部至华南^[29,57,71]。根据对海温的预测,排除 1997 年和 2002 年主雨带位于长江以南的年份^[72],预测 2014 年夏季多雨区位于我国北方,中心在黄淮地区,该预测结果接近 1991 年降水实况。然而,2014 年降水实况是我国东部地区为北少南多的偶极子型;欧亚中高纬度地区环流比较平直,贝加尔湖地区高度场偏强,日本以西为低压槽区,其西部为偏北风;副高偏强、偏西,位置前期偏南、后期偏北,菲律宾以东为反气旋性环流,我国南方地区上空为偏北风距平,与副高外围引导水汽在长江以南辐合,造成持续性强降水。

监测显示 2014 年春夏季印度洋—西太平洋海温持续偏暖,这一方面是对前期厄尔尼诺信号的储存和再释放,另一方面与全球变暖背景下热带海温持续增暖有密切关系。印度洋—西太平洋海温异常偏暖,改变局地 Hadley 环流,有利于副高偏强、位置偏西偏南,将水汽输送至我国南方地区^[73-74]。此外,2014 年夏季雨带的季节内变率大也增加了季节尺度预测难度。

2014 年全球海温异常对东亚夏季风的影响提示应重视多洋盆协同作用,尤其是印度洋海温异常的重要性。随着全球变暖,印度洋海温异常的影响越来越显著,其与东亚夏季风的关系呈年代际增强的趋势,而热带太平洋海温的影响相对减弱,表现为年代际减弱的趋势。

3 多因子多时间尺度协同作用的物理过程及应用

我国汛期降水预测经历了几十年的发展历程,历代预报员系统梳理了影响中国夏季降水的东、西、

南、北、中 5 个方面的主要因素:东、西两方面因素反映海洋和陆地下垫面的热力异常,通过激发东亚大气环流异常影响中国夏季降水;南、北、中 3 方面因素反映东亚大气环流经向异常,是影响中国夏季降水空间布局的直接因素。这为我国夏季降水预测提出一个具有较强物理基础的概念模型^[2]。进入 21 世纪,该概念模型随着海气相互作用、季风动力学的进步得到丰富和发展;海洋信息除了太平洋海温异常外,还有印度洋和大西洋海温异常;北半球中高纬度增加北极极冰和环状模的影响,欧亚积雪和土壤湿度的影响;南半球环状模和南印度洋海温的影响;太平洋海温异常信号增强了北太平洋海温变化和赤道太平洋海温的空间分布型特征及影响^[27]。

随着对气候系统异常及其影响的深入认识,汛期降水预测逐渐关注多因子多尺度综合作用的影响和机理^[75]。在多因子协同作用比较清晰的年份可获得较高的预测技巧和较好的服务效果,如 1998 年是长江流域洪涝年,也是预报员第 1 次在预报图上绘制降水偏多 50% 以上的年份^[76],取得很好的服务效果。

2018 年取得预测准确率历史第 1 名的好成绩,距平相关系数位于第 2 位^[77]。2018 年东亚夏季风表现为异常偏强特征,但年代际背景下弱拉尼娜事件对东亚夏季风的影响有限,那么肯定还有其他因子的贡献。2017 年秋季发生的拉尼娜事件、热带印度洋海温偏低、北大西洋海温三极子正位相和青藏高原积雪偏少均是影响 2018 年东亚夏季风偏强的关键外强迫因子。各因子既有协同作用,也相互独立。拉尼娜事件、北大西洋海温和青藏高原积雪的协同作用对副高偏北和菲律宾附近异常气旋均为显著贡献,而中高纬度的纬向气旋-反气旋-气旋的空间异常特征主要来自北大西洋海温和青藏高原积雪的共同作用^[78]。

自 1981 年以来,ENSO 事件、北大西洋海温和积雪异常均与 2018 年相似的仅为 1985 年,该年东亚夏季环流和我国夏季降水也表现为与 2018 年夏季类似的特征。而 3 个因子异常特征均与 2018 年相反的为 1983 年和 1998 年。因此当 ENSO 事件、北大西洋海温和青藏高原积雪的位相特征和作用一致时,三者对东亚夏季环流和降水的协同影响非常显著。这种先兆信号的出现有利于提高气候趋势预测的可预报性,对防灾减灾决策提供的气象服务更可靠。

2019 年以后汛期主要雨型的预测与实况大多吻合,其中 2022 年再次准确预测出主要多雨带位于我国北方的特征^[79]。2022 年夏季气候异常与海温等外强迫因子密切相关^[80],前期拉尼娜事件在春季再次发展,赤道中太平洋冷海温加强,海洋性大陆上空对流活跃,热带印度洋偶极子负位相异常偏强,黑潮及延伸区海温偏暖,导致副高加强西伸和北抬,对夏季主雨带位置偏北和长江流域持续性异常高温天气起重要作用。

进入 21 世纪频繁发生连续两年拉尼娜事件,第 1 次拉尼娜事件与第 2 次拉尼娜事件的触发机制、海温分布形态、演变规律和气候影响截然不同^[81]。例如 2018 年处于拉尼娜背景,但西北太平洋为气旋式异常环流,而 2022 年则为反气旋式异常环流,副高特征不同,季节内变化也有差异,但二者雨型接近。以往的研究和业务多聚焦于单一峰值 ENSO 事件对我国汛期气候异常的影响,对连续 ENSO 事件的影响特征和机理关注不足。对于 2022 年夏季降水预测,业务人员考虑并分析了该特征,同时还关注了印度洋偶极子对副高的协同作用,取得较好的预测效果。

4 小 结

几十年的汛期降水预测业务历程有成功也有不足,通过回顾可以看到对科学的认识不足可能导致预测技巧偏低,但促进了科学研究的发展和应用。国内外研究和应用实践提示多因子多时间尺度协同作用理论、客观化预测方法、精细化监测预测影响评估一体化系统建设等均有助于提高精准化预测能力和精细化服务水平。

季节平均降水异常预测涉及年代际、年际、季节、季节内不同时间尺度相互作用,因此李维京^[27]提出在业务中使用多因子多时间尺度协同作用的思路。在年代际变化背景下,大量研究从不同角度揭示我国东部地区降水异常空间分布与其他因子关系的变化特征和机理^[66, 82-85],需要关注在预测应用中模型的重建。此外季节内尺度变化对夏季降水也有重要影响^[86-88]。从精细化服务的角度,不仅要提供汛期平均降水异常预测,还要加强降水的季节进程预测,这符合在东亚夏季风推进下,我国各地区逐步出现主汛期特征的实情和应用^[89]。

除物理机制诊断研究外,客观化方法的研发和

应用也是重要内容^[90]。在汛期降水的季节尺度预测方面,动力模式对于中高纬度降水的预测技巧通常低于热带海洋^[91],对我国夏季降水的预测也不理想,对季风雨带推进的模拟和预测较实况偏快^[92]。因此动力-统计相结合的降水异常预测技术路线得到广泛应用,发展中国多模式集合(CMME)预测也是提高预测技巧的重要手段^[16],但高技巧预测变量主要是海温和中低纬度大气环流,对夏季降水的预测能力仍然有限。需要在多模式多初值集合预测中考虑多因子的相互影响,建立多因子最优集合预测理论与方法。近年随着人工智能的发展,机器学习在气象领域逐渐发挥作用^[93-95]。将观测、数值天气预报和人工智能有机结合,有望提供效果更优的客观预测方法,有助于稳定提高气候预测业务水平和能力,避免因人员差异造成的主观预测不稳定。

国家安全和可持续发展的需求促使气候预测业务和服务成为一项重要保障,基于气象要素及可能造成灾害的影响评估对防灾减灾意义更大,因此加强灾害监测-预测-影响评估-预警系统建设,有利于提高极端天气气候事件预测、预警能力^[96]。

参考文献

- [1] 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场. 北京:气象出版社,1999.
Zhao Z G. Drought, Flood and Environmental Field in Summer in China. Beijing: China Meteorological Press, 1999.
- [2] 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京:气象出版社,2000.
Chen X F, Zhao Z G. Study and Application of Precipitation Forecast in Flood Season in China. Beijing: China Meteorological Press, 2000.
- [3] 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 中国业务动力季节预报的进展. 气象学报, 2004, 62(5): 598-612.
Ding Y H, Li Q Q, Li W J, et al. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China. *Acta Meteor Sinica*, 2004, 62(5): 598-612.
- [4] 李维京, 张培群, 李清泉, 等. 动力气候模式预测系统业务化及其应用. 应用气象学报, 2005, 16(增刊 I): 1-11.
Li W J, Zhang P Q, Li Q Q, et al. Operation and application of Dynamic Climate Model Prediction System. *J Appl Meteor Sci*, 2005, 16(Suppl I): 1-11.
- [5] 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等. 国家气候中心短期气候预测模式系统业务化进展. 应用气象学报, 2013, 24(5): 533-543.
Wu T W, Song L C, Liu X W, et al. Progress in developing the Short-range Operational Climate Prediction System of China National Climate Center. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(5): 533-543.
- [6] 吴捷, 任宏利, 张帅, 等. BCC 二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析. 大气科学, 2017, 41(6): 1300-1315.
Wu J, Ren H L, Zhang S, et al. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model. *Chinese J Atmos Sci*, 2017, 41(6): 1300-1315.
- [7] 王会军, 任宏利, 陈活泼, 等. 中国气候预测研究与业务发展的回顾. 气象学报, 2020, 78(3): 317-331.
Wang H J, Ren H L, Chen H P, et al. Highlights of climate prediction study and operation in China over the past decades. *Acta Meteor Sinica*, 2020, 78(3): 317-331.
- [8] Wu T W, Yu R C, Lu Y X, et al. BCC-CSM2-HR: A high-resolution version of the Beijing Climate Center Climate System Model. *Geosci Model Dev*, 2021, 14(5): 2977-3006.
- [9] 李维京, 陈丽娟. 动力延伸预报产品释用方法的研究. 气象学报, 1999, 57(3): 338-345.
Li W J, Chen L J. Research on reexplanation and reanalysis method of dynamical extended range forecast products. *Acta Meteor Sinica*, 1999, 57(3): 338-345.
- [10] 陈丽娟, 李维京, 张培群, 等. 降尺度技术在月降水预报中的应用. 应用气象学报, 2003, 14(6): 648-655.
Chen L J, Li W J, Zhang P Q, et al. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast. *J Appl Meteor Sci*, 2003, 14(6): 648-655.
- [11] 顾伟宗, 陈丽娟, 张培群, 等. 月动力延伸预报最优信息提取和对中国降水的降尺度应用. 气象学报, 2009, 67(2): 280-287.
Gu W Z, Chen L J, Zhang P Q, et al. Downscaling precipitation prediction in China based on optimization information extracted from monthly dynamic extended range forecast. *Acta Meteor Sinica*, 2009, 67(2): 280-287.
- [12] Gu W Z, Chen L J, Li W J, et al. Development of a downscaling method in China regional summer precipitation prediction. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 25(3): 303-315.
- [13] Ke Z J, Zhang P Q, Chen L J, et al. An experiment of a statistical downscaling forecast model for summer precipitation over China. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2011, 4(5): 270-275.
- [14] Jia X L, Chen L J, Luo J J. Climate prediction experiment for tropical cyclone genesis frequency using the large-scale circulation forecast by a coupled global circulation model. *J Trop Meteor*, 2014, 20(2): 103-111.
- [15] 刘长征, 杜良敏, 柯宗建, 等. 国家气候中心多模式解释应用集成预测. 应用气象学报, 2013, 24(6): 677-685.
Liu C Z, Du L M, Ke Z J, et al. Multi-model downscaling ensemble prediction in National Climate Center. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(6): 677-685.
- [16] Ren H L, Wu Y J, Bao Q, et al. The China multi-model ensemble prediction system and its application to flood-season prediction in 2018. *J Meteor Res*, 2019, 33(3): 540-552.
- [17] 任宏利, 丑纪范. 动力相似预报的策略和方法研究. 中国科学(地球科学), 2007, 37(8): 1101-1109.
Ren H L, Chou J F. Research on strategy and method of dynamic similarity prediction. *Sci China (Earth Sci)*, 2007, 37(8):

- 1101-1109.
- [18] 任宏利. 动力季节预测中预报误差与物理因子的关系. *应用气象学报*, 2008, 19(3): 276-286.
Ren H L. Relationships between prediction errors and physical predictors in dynamical seasonal prediction. *J Appl Meteor Sci*, 2008, 19(3): 276-286.
- [19] 郑志海, 任宏利, 黄建平. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验. *物理学报*, 2009, 58(10): 7359-7367.
Zheng Z H, Ren H L, Huang J P. Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments. *Acta Phys Sinica*, 2009, 58(10): 7359-7367.
- [20] 封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 动力-统计客观量化汛期降水预测研究新进展. *应用气象学报*, 2013, 24(6): 656-665.
Feng G L, Zhao J H, Zhi R, et al. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical-statistical method. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(6): 656-665.
- [21] 程娅蓓, 任宏利, 谭桂容. 东亚夏季风模式跨季预测的 EOF-相似误差订正. *应用气象学报*, 2016, 27(3): 285-292.
Cheng Y B, Ren H L, Tan G R. Empirical orthogonal function-analogue correction of extra-seasonal dynamical prediction of East-Asian summer monsoon. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(3): 285-292.
- [22] Liu Y, Fan K, Chen L J, et al. An operational statistical downscaling prediction model of the winter monthly temperature over China based on a multi-model ensemble. *Atmos Res*, 2021, 249. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105262.
- [23] 庞轶舒, 张俊, 秦宁生, 等. 长江上游夏季径流量年际增量预测模型及检验. *应用气象学报*, 2022, 33(1): 115-128.
Pang Y S, Zhang J, Qin N S, et al. Forecast model of interannual increment for summer runoff and its verification in the upper reaches of the Yangtze River. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 115-128.
- [24] 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 521-532.
Chen L J, Yuan Y, Yang M Z, et al. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(5): 521-532.
- [25] 贾小龙, 陈丽娟, 高辉, 等. 我国短期气候预测技术进展. *应用气象学报*, 2013, 24(6): 641-655.
Jia X L, Chen L J, Gao H, et al. Advances of the Short-range Climate prediction in China. *J Appl Meteor Sci*, 2013, 24(6): 641-655.
- [26] Ren H C, Zuo J Q, Li W J. The impact of tropical Atlantic SST variability on the tropical atmosphere during boreal summer. *J Climate*, 2021, 34: 6705-6723.
- [27] 李维京. 气候变暖背景下中国南方旱涝变化的机理及预测方法研究. 北京: 气象出版社, 2023.
Li W J. Study on the Mechanism and Prediction Methods of Drought and Flood Change in South China under Climate Warming. Beijing: China Meteorological Press, 2023.
- [28] 陈金秋, 施晓晖. 青藏高原-孟加拉湾大气热力差异与夏季暴雨. *应用气象学报*, 2022, 33(2): 244-256.
Chen J Q, Shi X H. Possible effects of the difference in atmospheric heating between the Tibetan Plateau and the Bay of Bengal on spatiotemporal evolution of rainstorms. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(2): 244-256.
- [29] 符淙斌, 腾星林. 我国夏季的气候异常与厄尔尼诺/南方涛动现象的关系. *大气科学*, 1988, 12(增刊 I): 133-141.
Fu C B, Teng X L. Climate anomalies in China associated with El Niño/Southern Oscillation. *Chinese J Atmos Sci*, 1988, 12(Suppl D): 133-141.
- [30] Wang B, Wu R G, Fu X. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?. *J Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [31] Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia. *J Climate*, 2003, 16(22): 3742-3758.
- [32] 张人禾, 闵庆辉, 苏京志. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用. *中国科学(地球科学)*, 2017, 47(5): 544-553.
Zhang R H, Min Q Y, Su J Z. Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone. *Sci Sinica (Earth Sci)*, 2017, 47(5): 544-553.
- [33] McPhaden M J. Playing hide and seek with El Niño. *Nature Clim Change*, 2015, 5(9): 791-795.
- [34] 任宏利, 郑飞, 罗京佳, 等. 中国热带海-气相互作用与 ENSO 动力学及预测研究进展. *气象学报*, 2020, 78(3): 351-369.
Ren H L, Zheng F, Luo J J, et al. A review of research on tropical air-sea interaction, ENSO dynamics, and ENSO prediction in China. *Acta Meteor Sinica*, 2020, 78(3): 351-369.
- [35] 薛峰, 段欣好, 苏同华. El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风季节内变化的比较. *气候与环境研究*, 2018, 23(3): 321-331.
Xue F, Duan X Y, Su T H. Comparison of intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon between El Niño developing years and La Niña years. *Clim Environ Res*, 2018, 23(3): 321-331.
- [36] Song X M, Zhang R H, Rong X Y. Influence of intraseasonal oscillation on the asymmetric decays of El Niño and La Niña. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36(8): 779-792.
- [37] Zhou X Y, Liu F, Wang B, et al. Different responses of East Asian summer rainfall to El Niño decays. *Climate Dyn*, 2019, 53(3): 1497-1515.
- [38] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J Geophys Res Oceans*, 2007, 112. DOI: 10.1029/2006JC003798.
- [39] Feng J, Chen W, Tam C Y, et al. Different impacts of El Niño and El Niño Modoki on China rainfall in the decaying phases. *Int J Climatol*, 2011, 31(14): 2091-2101.

- [40] Yuan Y, Yang S. Impacts of different types of El Niño on the East Asian climate: Focus on ENSO cycles. *J Climate*, 2012, 25(21):7702-7722.
- [41] 薛峰, 刘长征. 中等强度 ENSO 对中国东部夏季降水的影响及其与强 ENSO 的对比分析. *科学通报*, 2007, 52(23): 2798-2805.
Xue F, Liu C Z. Influence of moderate intensity ENSO on summer precipitation in eastern China and its comparative analysis with strong ENSO. *Chinese Sci Bull*, 2007, 52(23): 2798-2805.
- [42] 翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响. *气象学报*, 2016, 74(3): 309-321.
Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate. *Acta Meteor Sinica*, 2016, 74(3): 309-321.
- [43] 刘明站, 任宏利, 张文君, 等. 超强厄尔尼诺事件对中国东部春夏季极端降水频率的影响. *气象学报*, 2018, 76(4): 539-553.
Liu M H, Ren H L, Zhang W J, et al. Influence of super El Niño events on the frequency of spring and summer extreme precipitation over Eastern China. *Acta Meteor Sinica*, 2018, 76(4): 539-553.
- [44] Ren H L, Lu B, Wan J H, et al. Identification standard for ENSO events and its application to climate monitoring and prediction in China. *J Meteor Res*, 2018, 32(6): 923-936.
- [45] 孙林海, 赵振国, 许力, 等. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析. *应用气象学报*, 2005, 16(增刊 I): 56-62.
Sun L H, Zhao Z G, Xu L, et al. Division of summer rain patterns and analysis of circulation causes in monsoon region of East China. *J Appl Meteor Sci*, 2005, 16(Suppl I): 56-62.
- [46] 李小泉. 1983 年全国汛期降水预报会商会概况. *气象*, 1983, 9(6): 10.
Li X Q. Overview of national flood season precipitation forecast conference in 1983. *Meteor Mon*, 1983, 9(6): 10.
- [47] 史久恩, 林学椿, 周琴芳. 厄尼诺现象与我国夏季(6—8 月)降水、气温的关系. *气象*, 1983, 9(4): 2-5.
Shi J E, Lin X C, Zhou Q F. Relationship between El Niño phenomenon and summer precipitation and temperature in China (June—August). *Meteor Mon*, 1983, 9(4): 2-5.
- [48] 中国科学院大气物理研究所. 海气相互作用与旱涝长期预报. 北京: 科学出版社, 1978.
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Air-sea Interaction and Long-term Forecast of Drought and Flood. Beijing: Science Press, 1978.
- [49] Wyrki K. El Niño; The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanogr*, 1975, 5(4): 572-584.
- [50] Gill A E. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Q J R Meteor Soc*, 1980, 106(449): 447-462.
- [51] 王绍武. 1982—1983 年的厄·尼诺与南方涛动(ENSO). *气象科技*, 1984, 12(3): 1-7.
Wang S W. El Niño and southern oscillation(ENSO) in 1982—1983. *Meteor Sci Technol*, 1984, 12(3): 1-7.
- [52] Wagner A J. The climate of summer 1982—A season with increasingly anomalous circulation over the equatorial Pacific Ocean. *Mon Wea Rev*, 1983, 111(3): 590-601.
- [53] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. *气象学报*, 2003, 61(6): 641-654.
Zhu Y M, Yang X Q. Relationships between Pacific decadal oscillation(PDO) and climate variabilities in China. *Acta Meteor Sinica*, 2003, 61(6): 641-654.
- [54] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993.
Ding Y H. Study on the Persistent Torrential Rain in Jianghuai Basin in 1991. Beijing, China Meteorological Press, 1993.
- [55] 黄荣辉. 对今夏淮河流域和长江中下游特大洪涝成因的看法及其预报. *中国减灾*, 1991(3): 28-29.
Huang R H. Views on the causes of catastrophic floods in Huaihe River Basin and the middle and lower reaches of the Yangtze River this summer and its forecast. *Disaster Reduct China*, 1991(3): 28-29.
- [56] Huang R H, Yin B Y, Liu A D. Intraseasonal Variability of the East Asian Summer Monsoon and Its Association with the Convective Activities in the Tropical Western Pacific//Climate Variability. Beijing: Chinese Meteorological Press, 1992.
- [57] 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. *大气科学*, 2002, 26(5): 595-610.
Chen W. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 2002, 26(5): 595-610.
- [58] 陆尔, 丁一汇. 1991 年江淮持续性特大暴雨的夏季风活动分析. *应用气象学报*, 1997, 8(3): 316-324.
Lu E, Ding Y H. Analysis of summer monsoon activity during the 1991 excessively torrential rain over Changjiang-Huaihe River Valley. *J Appl Meteor Sci*, 1997, 8(3): 316-324.
- [59] 毛江玉, 吴国雄. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡. *气象学报*, 2005, 63(5): 762-770.
Mao J Y, Wu G X. Intraseasonal variability in the Yangtze-Huaihe River rainfall and subtropical high during the 1991 Meiyu period. *Acta Meteor Sinica*, 2005, 63(5): 762-770.
- [60] 丁一汇, 胡雯, 黄勇, 等. 淮河流域能量和水分循环研究进展. *气象学报*, 2020, 78(5): 721-734.
Ding Y H, Hu W, Huang Y, et al. The main scientific achievements of the first China-Japan cooperative GAME/HUBEX experiments: A historical review. *Acta Meteor Sinica*, 2020, 78(5): 721-734.
- [61] 倪东鸿, 孙照渤, 赵玉春. ENSO 循环在夏季的不同位相对东亚夏季风的影响. *南京气象学院学报*, 2000, 23(1): 48-54.
Ni D H, Sun Z B, Zhao Y C. Influence of ENSO cycle at different phases in summer on the East Asian summer monsoon. *J Nanjing Inst Meteor*, 2000, 23(1): 48-54.
- [62] Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East

- Asian monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 1996, 74(1): 49-62.
- [63] Hoerling M P, Kumar A, Zhong M. El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections. *J Climate*, 1997, 10(8): 1769-1786.
- [64] 孙颖, 丁一汇. 1999年东亚夏季风异常活动的物理机制研究. *气象学报*, 2003, 61(4): 406-420.
- Sun Y, Ding Y H. A study on physical mechanisms of anomalous activities of East Asian summer monsoon during 1999. *Acta Meteor Sinica*, 2003, 61(4): 406-420.
- [65] Song W L. 1999年北半球大气环流特征及其影响. *气象*, 2000, 26(4): 12-16.
- Song W L. General circulation and its impact over the Northern Hemisphere in 1999. *Meteor Mon*, 2000, 26(4): 12-16.
- [66] 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 20世纪90年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因. *科学通报*, 2013, 58(8): 617-628.
- Huang R H, Liu Y, Feng T. Interdecadal variation characteristics and internal dynamic causes of summer precipitation and circulation in eastern China in the late 1990s. *Chinese Sci Bull*, 2013, 58(8): 617-628.
- [67] Kao H Y, Yu J Y. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *J Climate*, 2009, 22(3): 615-632.
- [68] Kug J S, Jin F F, An S I. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J Climate*, 2009, 22(6): 1499-1515.
- [69] 袁媛, 杨辉, 李崇银. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响. *气象学报*, 2012, 70(3): 467-478.
- Yuan Y, Yang H, Li C Y. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following-summer precipitation in China. *Acta Meteor Sinica*, 2012, 70(3): 467-478.
- [70] Weng H Y, Ashok K, Behera S K, et al. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dyn*, 2007, 29(2): 113-129.
- [71] 黄刚, 严中伟. 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化. *科学通报*, 1999, 44(4): 421-424.
- Huang G, Yan Z W. Anomalous index of East Asian summer monsoon circulation and its interannual variation. *Chinese Sci Bull*, 1999, 44(4): 421-424.
- [72] 孙林海, 宋文玲, 龚振淞. 2014年汛期气候预测先兆信号应用及其复杂性初探. *气象*, 2015, 41(5): 639-648.
- Sun L H, Song W L, Gong Z S. Preliminary study of precursor and its application in summer climate prediction and its complexity in 2014. *Meteor Mon*, 2015, 41(5): 639-648.
- [73] Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between the eastern and central Pacific El Niño: Possible effects of Indian Ocean SST. *J Climate*, 2012, 25(22): 7867-7883.
- [74] Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. *Adv Atmos Sci*, 2016, 33(4): 411-432.
- [75] 李维京, 张若楠, 孙丞虎, 等. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 577-591.
- Li W J, Zhang R N, Sun C H, et al. Recent research advances on the interannual-interdecadal variations of drought/flood in south China and associated causes. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(5): 577-591.
- [76] 李维京. 1998年大气环流异常及其对中国气候的影响. *气象*, 1999, 25(4): 20-25.
- Li W J. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China. *Meteor Mon*, 1999, 25(4): 20-25.
- [77] 陈丽娟, 顾薇, 龚振淞, 等. 影响2018年汛期气候的先兆信号及预测效果评估. *气象*, 2019, 45(4): 553-564.
- Chen L J, Gu W, Gong Z S, et al. Precursory signals of the 2018 summer climate in China and evaluation of real-time prediction. *Meteor Mon*, 2019, 45(4): 553-564.
- [78] Chen L J, Gu W, Li W J. Why is the East Asian summer monsoon extremely strong in 2018? — Collaborative effects of SST and snow cover anomalies. *J Meteor Res*, 2019, 33(4): 593-608.
- [79] 章大全, 袁媛, 韩荣青. 2022年汛期气候预测效果评述及先兆信号分析. *气象*, 2023, 49(3): 365-378.
- Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q. Overview of climate prediction for the summer 2022 in China and its precursors. *Meteor Mon*, 2023, 49(3): 365-378.
- [80] 章大全, 袁媛, 韩荣青. 2022年夏季我国气候异常特征及成因分析. *气象*, 2023, 49(1): 110-121.
- Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q. Characteristics and possible causes of the climate anomalies over China in summer 2022. *Meteor Mon*, 2023, 49(1): 110-121.
- [81] Okumura Y M, DiNezio P, Deser C. Evolving impacts of multiyear La Niña events on atmospheric circulation and US drought. *Geophys Res Lett*, 2017, 44(22): 11614-11623.
- [82] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(3): 376-386.
- [83] Gao H, Wang Y G, He J H. Weakening significance of ENSO as a predictor of summer precipitation in China. *Geophys Res Lett*, 2006, 33. DOI:10.1029/2005GL025511.
- [84] Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II: Possible causes. *Int J Climatol*, 2009, 29(13): 1926-1944.
- [85] Sun L Y, Yang X Q, Tao L F, et al. Changing impact of ENSO events on the following summer rainfall in Eastern China since the 1950s. *J Climate*, 2021, 34(20): 8105-8123.
- [86] Yuan Y, Gao H, Li W J, et al. The 2016 summer floods in China and associated physical mechanisms: A comparison with 1998. *J Meteor Res*, 2017, 31(2): 261-277.
- [87] Ding Y H, Liu Y Y, Hu Z Z. The record-breaking Mei-yu in 2020 and associated atmospheric circulation and tropical SST

- anomalies. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38(12):1980-1993.
- [88] Zhao J H, Zuo J Q, Zhang H, et al. Extreme precipitation driven by the rapid tropical Atlantic warming and the second developing La Niña over the Yangtze-Huaihe River Basin in August 2021. *Climate Dyn*, 2023, 61(5):2581-2598.
- [89] 陈丽娟, 赵俊虎, 顾薇, 等. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展. *应用气象学报*, 2019, 30(4):385-400.
Chen L J, Zhao J H, Gu W, et al. Advances of research and application on major rainy seasons in China. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(4):385-400.
- [90] 李维京. 现代气候业务. 北京:气象出版社, 2012.
Li W J. Modern Climate Business. Beijing:China Meteorological Press, 2012.
- [91] Johnson S J, Stockdale T N, Ferranti L, et al. SEAS5: The new ECMWF seasonal forecast system. *Geosci Model Dev*, 2019, 12(3):1087-1117.
- [92] Liu Y Y, Hu Z Z, Wu R G, et al. Subseasonal prediction and predictability of summer rainfall over Eastern China in BCC_AGCM2.2. *Climate Dyn*, 2021, 56(7):2057-2069.
- [93] 米前川, 高西宁, 李玥, 等. 深度学习方法在干旱预测中的应用. *应用气象学报*, 2022, 33(1):104-114.
Mi Q C, Gao X N, Li Y, et al. Application of deep learning method to drought prediction. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1):104-114.
- [94] 谢舜, 孙效功, 张苏平, 等. 基于SVD与机器学习的华南降水预报订正方法. *应用气象学报*, 2022, 33(3):293-304.
Xie S, Sun X G, Zhang S P, et al. Precipitation forecast correction in South China based on SVD and machine learning. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3):293-304.
- [95] Jin W X, Luo Y, Wu T W, et al. Deep learning for seasonal precipitation prediction over China. *J Meteor Res*, 2022, 36(2):271-281.
- [96] 李莹, 王国复. 气象灾害风险管理系统设计与应用. *应用气象学报*, 2022, 33(5):628-640.
Li Y, Wang G F. Design and implementation of meteorological disaster risk management system. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(5):628-640.

Review of the Influence and Application of SST Anomaly to Flood Season Precipitation in China

Chen Lijuan¹⁾²⁾ Wang Yueying¹⁾ Li Weijing²⁾ Sun Linhai²⁾ Li Xiang²⁾ Zhang Daquan²⁾

¹⁾(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾(CMA Key Laboratory for Climate Prediction Studies, National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract

The spatial distribution of precipitation anomalies during flood season and characteristics of drought and flood disasters in China are directly affected by the speed and stagnation of the East Asian summer monsoon (EASM). EASM is significantly affected by external forcing such as sea surface temperature, land surface processes, ice and snow cover, and internal dynamic anomalies of atmospheric circulation. The sea surface temperature (SST) anomaly and its evolution have always been important factors for predicting precipitation during the flood season, considering lead time and the strength of precipitation prediction in flood season.

Based on the scientific understanding and application of the mechanism of El Niño-southern oscillation (ENSO) cycle and other Ocean SST on the key factors of EASM, the prediction skill of flood season precipitation is reviewed. According to a prediction evaluation spanning over 40 years of historical records, the prediction accuracy for different types of rainfall pattern, the prediction accuracy of rain types in 1981–1990, 1991–2000, 2001–2010, and 2011–2020 is 50%/30%, 60%/30%, 50%/40%, and 70%/50%, respectively. In other words, the prediction of the primary rainfall patterns during the flood season in China is closer to the observation, and the accuracy of predicting spatial distribution patterns of drought and flood has significantly improved. This improvement can be attributed to the in-depth understanding of the impact of SST on EASM activities and enhancements made to dynamic climate models. In the history of flood season prediction, there have been both successful and unsuccessful cases. The years with low prediction accuracy and significant flooding events are as follows: 1983, 1991, 1999, 2003, and 2014. The primary basis for prediction is analyzed, revealing that the limited understanding of the mechanism of SST affecting the EASM had a great impact on the skill of precipitation predictions during the flood season. Among these factors, the influence of different phases of the ENSO cycle, the asymmetry of ENSO's influence, the change in ENSO spatial patterns, and the influence of other local seas, such as the Indian Ocean SST anomaly, all play important roles.

The importance of multi-factor and multi-scale synergy theory and application, as well as the technical support of the objectification method for prediction, are emphasized in summarizing causes for low prediction skill cases. Finally, some suggestions for improving future flood season precipitation predictions are put forward, and it is emphasized that the development of a multi-factor and multi-time scale synergistic theory, an objective climate prediction method, and an integrated system for monitoring, predictions and impact assessment will significantly enhance predictions and provide services for flood season precipitation.

Key words: SST; flood season; precipitation prediction; synergistic effect