

赵俊虎, 熊开国, 陈丽娟. 2020. 东北夏季降水预测技巧偏低的原因探讨 [J]. 大气科学, 44(5): 913–934. ZHAO Junhu, XIONG Kaiguo, CHEN Lijuan. 2020. The Causes of Low Predictive Skills of Precipitation in Flood Season in Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 913–934. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19132

东北夏季降水预测技巧偏低的原因探讨

赵俊虎¹ 熊开国² 陈丽娟^{1,3}

1 国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

2 武汉区域气候中心, 武汉 430074

3 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 1978~2018 年全国夏季降水实时业务预测技巧显示东北地区明显偏低, 尤其是近几年在对全国夏季旱涝的总体分布预测效果明显提高的情况下, 对东北地区的预测却与实况相反, 因此有必要分析该区域预测技巧偏低的原因。利用站点资料、再分析格点数据、实时预测历史数据及统计诊断等方法, 探讨了动力气候模式预测能力以及东北夏季降水预测的认识缺陷。通过系统地回顾东北夏季旱涝的气候特征、影响因子及预测方法等方面的研究进展, 以及东北夏季降水实时预测检验, 得出预测技巧偏低的可能原因: (1) 东北初夏降水主要受东北冷涡活动的影响, 盛夏主要受西太平洋副热带高压、东北南风和中高纬环流型的共同作用, 而业务常用的国内外主要动力气候模式无法准确反映与东北初夏和盛夏降水相联系的关键环流系统; (2) 东北夏季降水与全球海温的关系较弱且不稳定, 尤其是与 ENSO 的关系较为复杂, 年际关系随年代际变化而波动, 即 ENSO 不是预测东北夏季降水的强信号; (3) 东北夏季降水具有明显的季节内、年际和年代际等多时间尺度变率, 夏季降水受到多种时间尺度信息的叠加和调控, 不同尺度变率的贡献相当, 且影响系统不同, 导致预测难度较大。最后, 进一步探讨了东北夏季降水预测存在的科学问题及可能的解决途径, 以为夏季业务预测提供参考。

关键词 东北夏季降水 预测检验 ENSO 多时间尺度 影响系统

文章编号 1006-9895(2020)05-0913-22

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19132

The Causes of Low Predictive Skills of Precipitation in Flood Season in Northeast China

ZHAO Junhu¹, XIONG Kaiguo², and CHEN Lijuan^{1,3}

1 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The real-time forecast accuracies of summer precipitation in Northeast China (NEC) from 1978 to 2018 were

收稿日期 2019-04-06; 网络预出版日期 2020-03-24

作者简介 赵俊虎, 男, 1985 年出生, 高级工程师, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: zhaojh@cma.gov.cn

通讯作者 陈丽娟, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: chenlj@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项 2018YFC1506005, 国家自然科学基金项目 41875093、41705074、41275073, 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目 2015CB453203, 湖北省气象局重点项目 2016Z04

Funded by The National Key Research and Development Program on Monitoring, Early Warning and Prevention of Major Natural Disaster (Grant 2018YFC1506005), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41875093, 41705074, 41275073), National Basic Research Program of China (Grant 2015CB453203), Key Projects of Hubei Provincial Meteorological Bureau (Grant 2016Z04)

significantly low. Moreover, in the recent four years, when the prediction of the overall distribution of summer precipitation anomaly for the whole country was relatively accurate, the prediction of summer precipitation anomaly in NEC was contrary to the actual situation. Therefore, analyzing the cause for the low forecasting accuracy is necessary. In this paper, the forecasting ability of dynamic models and cognitive defects on forecasting summer rainfall in NEC are discussed. Moreover, by systematically reviewing the climatic characteristics, influencing factors, prediction methods of summer drought and flood in NEC, and the real-time forecasting skills, the causes have been obtained as follows: (1) The precipitation in early summer in NEC is mainly affected by the cold vortex activity in NEC, and in midsummer, it is mainly affected by the subtropical high in the West Pacific, the southerly wind in the Northeast, and the circulation pattern in the middle and high latitudes. However, the main dynamic climate models commonly used at home and abroad cannot accurately reflect the key circulation systems associated with precipitation in early summer and midsummer in NEC. (2) The relationship between the summer rainfall in NEC and the global sea surface temperature (SST) is weak and unstable. Especially, the influence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) on summer precipitation in NEC is complicated; the relationship between them varies from decade to decade. (3) The summer rainfall in NEC has remarkable multi-timescale variability (inter-seasonal, inter-annual, and inter-decadal timescales), influenced by different circulation systems, which makes accurately predicting summer precipitation in NEC more difficult. Finally, some scientific problems and possible solutions regarding summer rainfall forecasting in NEC are further discussed, which may be helpful for the future summer rainfall predictions in this area.

Keywords Summer precipitation over Northeast China, Predicted test, ENSO, Different time scales, Influence system

1 引言

东北地区是我国最大的商品粮基地和农业生产最有发展潜力的地区之一,同时也是我国重要的工业和能源基地。它地处欧亚大陆东端,东濒太平洋,南临渤海、黄海,地域辽阔,且地形复杂,其境内东、北、西三面为山脉环绕,中部是大平原,南北和东西相差约 15 个纬度或经度,境内有辽河、松花江、嫩江、黑龙江等多条大江。东北地区位于东亚夏季风的北边缘,受其独特的地理位置和地形条件的影响,具有独特的气候特征,是我国典型的气候“脆弱区”之一(孙力等, 2000; 廉毅等, 2003; 陈丽娟等, 2005),夏季降水与中国其他气候区的降水有着本质的差异,成因较复杂(姚秀萍和董敏, 2000; 贾小龙和王谦谦, 2006)。近几十年来的观测资料和研究表明,东北地区夏季暴雨洪涝等气候灾害异常频繁,尤其是 1998 年夏季,松花江和嫩江发生了特大暴雨洪涝(李维京, 1999; 张庆云等, 2001),造成巨大损失。研究东北夏季旱涝的异常变化机理,在此基础上作好该地区的气候预测,具有重要的科学意义和应用价值(刘宗秀等, 2003)。近几年,全国汛期降水预测总体比较成功,但对东北地区的预测与实况几乎相反(高辉等, 2017; 王永光和郑志海, 2018; 陈丽娟等, 2019),没有达到为东北地区的防灾、减灾提供优质决策服务的目的。

因此,非常有必要对东北地区的夏季降水预测进行系统的回顾、检验,并分析其成因。

近年来,众多学者对东北地区夏季降水的气候特征开展了研究,指出东北旱涝具有明显的年际变化和年代际变化以及阶段性和群发性特征,东北旱涝还存在着一定的周期性变化,尤其是 27 年左右的长周期和 10 年左右的次长周期以及 2~3 年左右的短周期较为明显(孙力等, 2000, 2002a)。同时,对影响东北夏季旱涝的环流系统和水汽输送条件进行了系统分析,指出东亚大槽、西太平洋副热带高压(西太副高)、亚洲季风诸系统及高空西风急流都与东北夏季降水联系密切(孙力等, 2002b),北半球环状模和东北冷涡对东北夏季降水的影响较大(何金海等, 2006a, 2006b),东北地区夏季南风异常对东北旱涝的发生也有重要的影响(孙力等, 2003; Sun, et al., 2017)。此外,研究了东北地区夏季旱涝的区域特征,根据旋转正交经验分解法划分为 6 个独立区域后,发现各区域旱涝年的异常水汽输送路径和关键影响区均存在明显差异,且旱涝年异常水汽输送并不是简单的反位相(汪秀清等, 2006)。在先兆预测信号方面,也有不少研究工作,涉及北大西洋、北太平洋、赤道中东太平洋、西风漂流区等海温异常的可能影响。例如,白人海(2001)研究指出北大西洋冬季海表温度(SST)出现南暖北冷异常时,对应来年夏季东亚西风环流

指数偏低,造成东北夏季降水偏多,反之亦然。冯新等(2006)发现当年3~5月北大西洋南部海区 SST 与东北夏季降水有较好的正相关关系,海温分布型为南北“跷跷板”型时,对东北地区汛期降水异常有较好的预示作用。孙力等(2003)指出前冬和春季北太平洋 SST 和大气环流异常是东北亚地区南风异常的重要前兆信号,从前冬到当年盛夏,当北太平洋海温从 El Niño 型(La Niña 型)分布向 La Niña 型(El Niño 型)分布转变和过渡时,则对应于东北亚地区夏季南风增强(减弱)。孙力和安刚(2003)研究还发现,当前期冬季和春季甚至是夏季赤道中东太平洋 SST 处于异常偏暖(偏冷)状态,且西风漂流区具有较明显的 SST 负(正)距平分布时,则东北大部分地区夏季降水具有整体偏多(偏少)的倾向。还有些研究指出前期中高纬度的环流异常可能预示后期东北地区夏季降水的异常,如发现 12 月份或冬季的极涡强度指数与次年 8 月份东北的降水存在密切的正相关(姚秀萍和董敏,2000),前期北太平洋涛动(NPO)呈负(正)位相阶段时,东北夏季降水偏多(少)(刘宗秀等,2003),利用前期秋冬季(11~12 月)两个反映中高纬环流异常的指数(大西洋欧亚指数和太平洋指数)可以较好地分辨和预测来年东北地区面雨量异常(陈丽娟等,2005)。

综上所述,过去对东北夏季降水及相应的环流系统、可能的先兆信号进行了大量的研究,很多研究成果也应用到了业务上,为气候预测业务提供了重要参考。然而在近几年,全国汛期降水预测总体比较成功的背景下,对东北地区的预测与实况几乎相反。东北地区夏季降水的预测为什么不升反降,1978~2018 年的总体业务预测技巧如何?是否明显低于其他地区?如果偏低,是何原因?存在哪些科学问题或困难,有何解决途径?这是本文试图回答的一些问题。

2 资料和方法

本文资料主要包括观测资料、预测历史资料和动力气候模式资料三部分。

观测资料为中国气象局国家气候中心(NCC)整编的全国 160 站月平均降水数据;美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)发布的全球逐月的大气环流再分析资料(Kalnay et al., 1996),水平空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,垂直方

向从 1000~10 hPa 共 17 层等压面;美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的全球 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 月平均海表温度重建资料(Reynolds et al., 2002);NCC 提供的 Niño 指数,时段均为 1951 年 1 月至 2018 年 12 月。

预测历史资料为中国气象局每年 3 月底至 4 月初组织的全国汛期预测大会商后发布的 160 站汛期降水距平百分率预测资料,时段为 1978~2018 年。

动力气候模式资料包括目前短期气候预测业务上常用的国内外三个短期气候预测模式:

(1) 国家气候中心第二代季节预测模式系统 BCC-CSM1.1m 模式(以下简称 CSM1.1 模式),CSM1.1 模式能够合理模拟出全球基本气候态、年平均降水以及热带降水年循环模态等大尺度气候要素的基本特征(吴统文等,2013;吴捷等,2017)。该模式每月初进行对未来 1~13 个月的预测,包含 24 个集合样本,文中使用 24 个样本的集合平均数据,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。该模式资料长度 1991~2018 年,共 28 年。由于全国汛期会商预测结果在 3 月下旬发布,文中模式资料均采用 3 月初起报的夏季(6~8 月)降水场资料。

(2) 美国国家环境预报中心(NCEP)第二代气候预测系统(后面简称 CFSv2)。CFSv2([http://cfs.ncep.noaa.gov/\[2019-05-24\]](http://cfs.ncep.noaa.gov/[2019-05-24]))是 CFSv1(Saha et al., 2006)的升级版,自 2011 年开始运行。大气和海洋的初始条件来自 NCEP 气候预报系统再分析(Saha et al., 2014)。与 CFSv1 相比,CFSv2 在预测系统的各个方面(包括模式耦合子系统、数据同化系统和集成配置)都有很大的变化,在业务预测方面也取得了重要进展。CFSv2 季节预测包括 4 个集合预测成员,文中使用 4 个成员的集合平均数据,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。该模式资料长度为 1982~2018 年,共 37 年。该系统的详细信息可以在 <http://cfs.ncep.noaa.gov> 找到。

(3) 欧洲中期天气预报中心第 4 代耦合模式(ECMWF System-4, 以下简称 ECMWF4),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。ECMWF4 和 CFSv2 是完全耦合的大气—海洋预报系统,提供实时的季节预报和历史回报数据,以评估和校正模式。ECMWF4 季节预测包括 15 个预测成员,文中使用 15 个成员的集合平均数据,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。ECMWF4 每个月第一天开始未来 7 个

月的模拟 (Weaver et al., 2011; Kim et al., 2012)。该模式资料长度为 1981~2018 年, 共 38 年。(有关 ECMWF4 系统的详情, 请参阅 [www.ecmwf.int/products/forecasts/seasonal/documentation/system4/\[2019-05-24\]](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/seasonal/documentation/system4/[2019-05-24])。

为定量检验我国汛期实际发布预测和主要业务参考动力气候模式的预测性能, 本文参考 WMO (World Meteorological Organisation) 推荐的标准和方法 (WMO, 2006), 用空间距平相关系数 (Anomaly Correlation Coefficient, 简称 ACC) 和时间相关系数 (Temporal Correlation Coefficient, 简称 TCC) 对预报技巧进行客观评估。其中 ACC 主要反映预报与观测异常场空间型的相似程度, 也可称为空间相似系数。与 ACC 不同, TCC 能够表征模式在每个站点或格点的预报能力, 得到预报技巧空间分布。ACC 和 TCC 的取值范围均在 -1 到 1 之间, 越接近于 1 表明技巧越高。此外, 还应用到了相关分析、距平符号一致率 (ASCR, anomaly sign consistency rate)、距平符号预测正确年数百

分率、功率谱分析、傅里叶分解的滤波方法等统计方法。其中距平符号一致率指的是距平符号预测正确的站点数与总站点数的百分比; 而距平符号预测正确年数百分率指的是距平符号预测正确的年数与总年数的百分比。

下文东北指的是内蒙古东部和东三省, 包含 25 个站点; 华北范围 ($37^{\circ}\sim 41.5^{\circ}\text{N}$, $109^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 包含 13 个站点; 长江中下游范围 ($28^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $109^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$) 包含 20 个站点。各区域范围如图 1a 所示。

3 东北夏季降水实时业务预测效果检验

3.1 实时业务发布的全国夏季降水预测效果检验

国家气候中心保存了 1978 年以来中国气象局每年 3 月底至 4 月初发布的全国汛期预测结果。该预报基于参与会商的主要科研高校以及中国气象局业务单位的预测意见和统计、动力等预测方法提供的结果。早期预测方法主要基于对海洋、积雪等的外强迫信号的物理机制分析和统计诊断, 近些年随

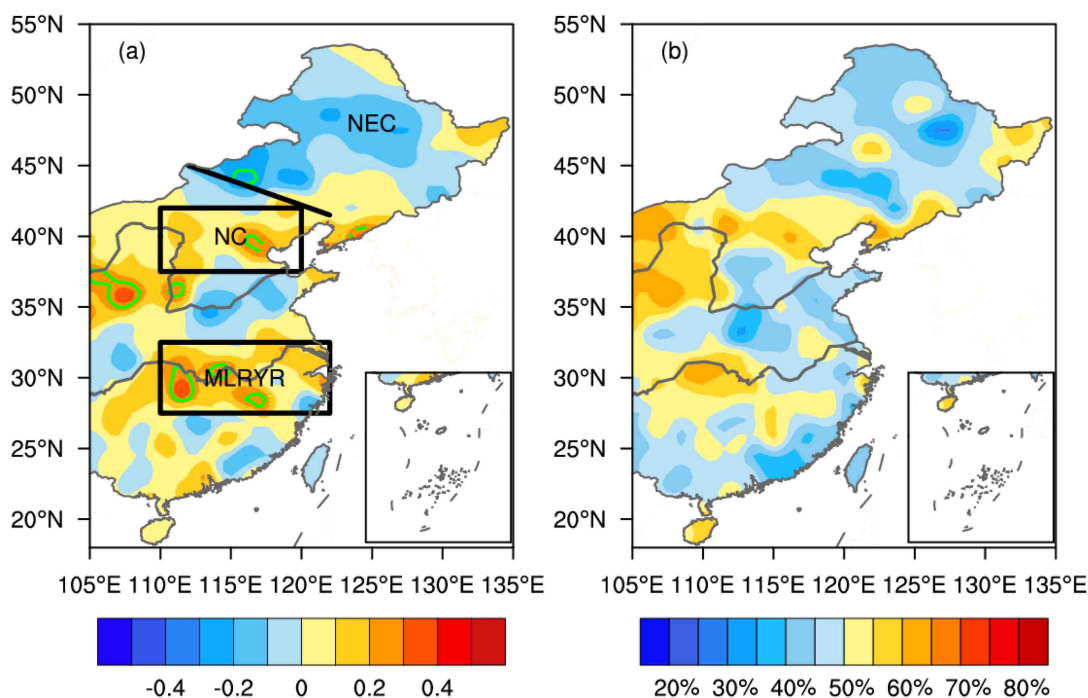


图 1 1978~2018 年中国东部夏季降水预测 (全国会商后的发布预报) 效果检验: (a) 时间相关系数 (TCC), 绿线表示达到 90% 的置信水平, 黑线以东和以北表示东北 (NEC) 地区, 黑色方框分别表示华北 (NC) 和长江中下游 (MLRYR) 地区; (b) 距平符号预测正确年数百分率

Fig. 1 The prediction test of summer precipitation in eastern China issued by the China Meteorological Administration from 1978 to 2018: (a) Temporal correlation coefficient (TCC), the green lines indicate significance at the 90% confidence level; the areas to the east and north of the black line represent the Northeast China (NEC), the black boxes indicate North China (NC) and the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLRYR); (b) the percentage of anomaly sign consistency correctly predicted years

着动力气候模式的快速发展, 基于动力模式的输出结果以及动力—统计相结合的预测结果逐渐成为重要参考依据 (Fan et al., 2009, 2012; 刘颖等, 2013; 封国林等, 2015), 全国会商后的发布预报是值班预报员综合集成各种方法的结果, 既有客观性, 又有主观经验的成分。

图 1 给出了 1978~2018 年发布的汛期降水预测与实况的年际变化相关的空间分布图, 我们重点关注东北 (NEC)、华北 (NC) 和长江中下游地区 (MLRYR)。由图 1a 可见, 华北北部和长江中下游等地 TCC 为正值, 而东北大部、黄淮和东南沿海等地区 TCC 为负值。从距平符号预测正确年数百分率的分布也可发现, 东北大部、黄淮和东南地区距平符号预测正确年数百分率低于 50%, 尤其是东北部分地区低于 40% (图 1b)。表明全国会商后的发布预报对华北和长江中下游的预测效果较好, 而对东北大部地区的实际预测效果较差。

图 2 进一步给出了东北 25 站、华北 13 站和长江中下游 20 站 ACC 和 ASCR 的年际变化。三个区域 1978~2018 年平均的 ACC 分别为 -0.02、0.02 和 0.04, 平均的 ASCR 分别为 48%、49.5%

和 51.5%。可以看到, 平均而言, 对长江中下游的预测技巧相对最高, 华北次之, 东北最差。从图 2a 和 d 可见, 东北的预测效果明显不稳定。从 ACC 来看, 最高的是 1994 年 (为 0.62), 最低的是 2001 和 2003 年 (为 -0.53); 且 ACC 还有明显的阶段性变化, 1995~2003 年这一阶段均为负值 (平均为 -0.24), 2004~2015 年这一阶段有所提高 (平均为 0.09), 最近三年 2016~2018 年又有所降低 (平均为 -0.33)。从 ASCR 来看, 最高的是 2007 年 (为 92%), 最低的是 2013 年 (为 8%); ASCR 也有明显的阶段性变化, 1995~2003 年这一阶段均低于 50% (平均为 39%), 2004~2012 年这一阶段有所提高 (平均为 60%), 最近三年 2016~2018 年又降低 (平均为 33.3%), 且均低于 40%。此外, 从线性趋势变化可见, 1978~2018 年东北地区 ACC 有下降的趋势。从图 2b 和 e 可见, 华北地区 ACC 年际变化较大, 阶段性变化和线性趋势均不明显, 1983~2018 年 ASCR 的线性趋势有增加的趋势。从图 2c 和 f 可见, 长江中下游地区 ACC 年际变化较大, 但有明显的线性增长趋势, 1983~2018 年 ASCR 的线性趋势增

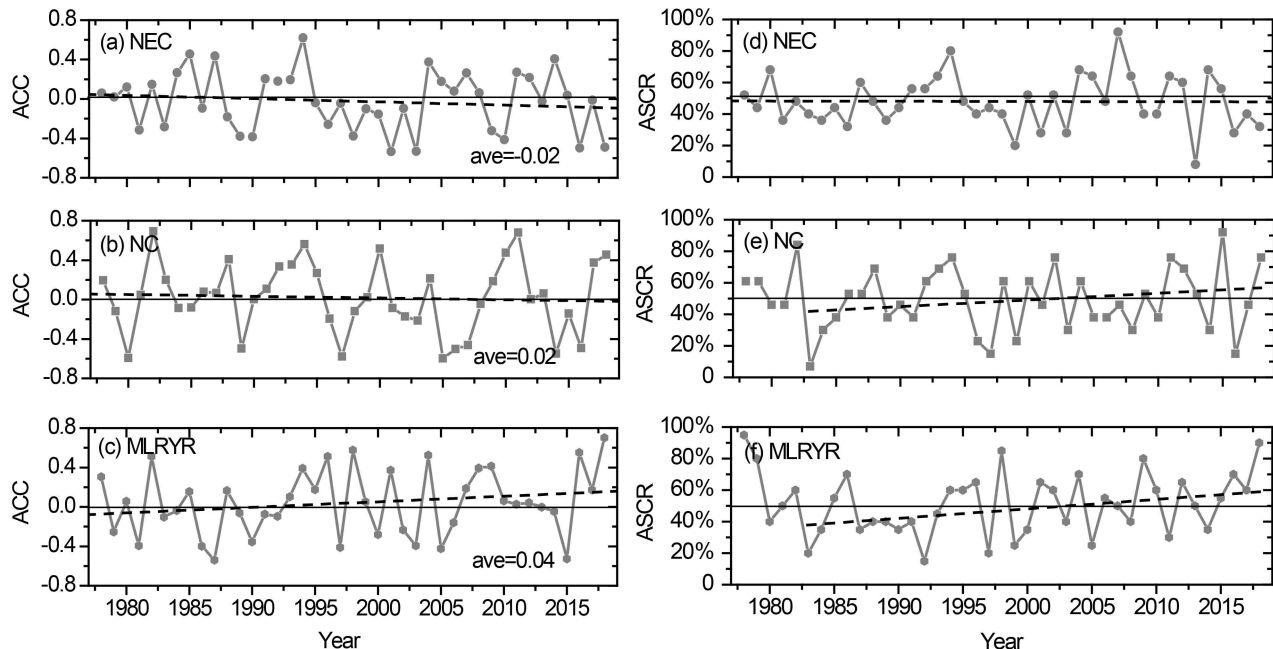


图 2 1978~2018 年 3 月起报的 (a, d) 东北、(b, e) 华北和 (c, f) 长江中下游夏季降水 (a, b, c) 距平相关系数 (ACC) 和 (d, e, f) 距平符号一致率 (ASCR) 的年际变化。虚线为线性趋势

Fig. 2 The inter-annual variability of (a, b, c) anomaly correlation coefficient (ACC) and (d, e, f) anomaly sign consistency rate (ASCR) skills for summer precipitation in (a, d) NC, (b, e) NEC, and (c, f) MLRYR based on observations and seasonal prediction issued in March from 1978 to 2018. Dotted lines represent the linear trends

长明显。

综上可见,东北夏季降水的预测准确率没有明显的线性提高趋势,即使是全国汛期预测总体比较成功的近几年(2015~2018年),东北的预测效果也不理想(陈丽娟等, 2016, 2019; 高辉等, 2017; 王永光和郑志海, 2018)。

3.2 国内外主要业务模式的夏季降水预测效果检验

CSM1.1、CFSv2 和 ECMWF4 是目前我国短期气候预测业务中最主要的三个国内外的参考模式,也基本代表了国际上短期气候预测实时业务模式的水平。图 3 给出这三个模式 3 月起报的我国东部夏季降水的 TCC 技巧的空间分布。可见,CSM1.1 模式预报技巧最高的地区主要在江南北部,部分区域达到 90% 的置信水平,此外在华南中部、黄淮西部和东北北部部分地区也有较高的预报技巧;而东南沿海、西北地区东部、华北大部和东北中部预报技巧较低,尤其是嫩江流域等地区负相关达到 90% 的置信水平,显示预测与实况完全相反(图 3a)。CFSv2 模式预报技巧最高的地区主要在黄淮和华北,黄淮大部达到 90% 的置信水平,此外在江南西部和东北南部部分地区也有较高的预报技巧;而东南沿海、东北中部和北部预报技巧较低,嫩江流域负相关也达到 90% 的置信水平(图 3b)。ECMWF4 模式预报技巧最高的地区主要在河套地区和长江流

域,河套部分地区达到 90% 的置信水平,此外在华南西部、华北南部和东北南部部分地区也有较高的预报技巧;而江南南部、淮河流域、华北东北部和东北大部预报技巧较低,东北北部部分地区负相关也达到 90% 的置信水平(图 3c)。总体而言,三个模式的预测技巧分布与业务发布预测类似,其中对长江和华北地区夏季降水的预报技巧较高,而对东北大部地区夏季降水预报技巧明显偏低。

图 4 给出了 CSM1.1、CFSv2 和 ECMWF4 模式 3 月起报的东北 25 站、华北 13 站和长江中下游 20 站夏季降水的 ACC 技巧的年际变化。表 1 给出了三个模式 3 月起报夏季降水 ACC 数值。CSM1.1、CFSv2 和 ECMWF4 模式对东北夏季降水预测的 ACC 多年平均值分别为 0.02, -0.06 和 -0.08, 均明显偏低(表 1)。由图 4a 可见,ACC 具有明显的年际变化,CSM1.1 的 ACC 范围为 -0.55 至 0.51, CFSv2 的 ACC 范围为 -0.74 至 0.44, ECMWF4 的 ACC 范围为 -0.69 至 0.54。ACC 还有明显的年代际变化的特点。CSM1.1 在 20 世纪 90 年代至 21 世纪 00 年代初 ACC 较高,21 世纪 10 年代以来 ACC 明显偏低。CFSv2 在 20 世纪 80 年代 ACC 较低,90 年代中期至 21 世纪 00 年代中期 ACC 较高,21 世纪 00 年代中期以来 ACC 明显降低。ECMWF4 预测技巧的年代际特点与 CFSv2 较

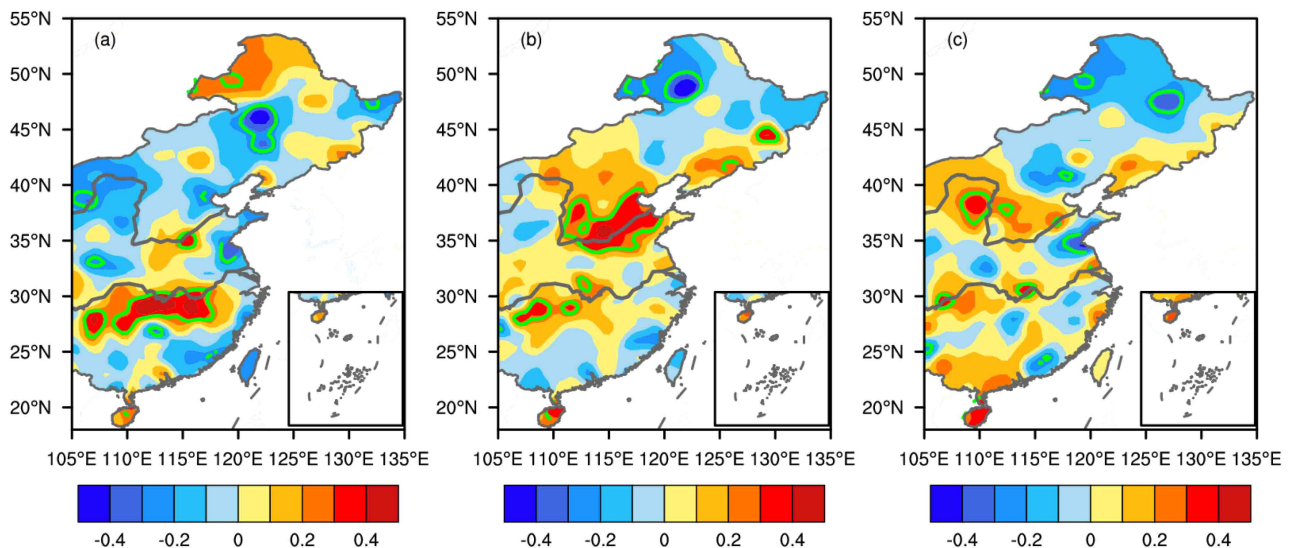


图 3 三个模式 3 月起报的中国东部夏季降水异常的 TCC 技巧:(a) CSM1.1 模式, 时间段为 1991~2018 年;(b) CFSv2 模式, 时间段为 1982~2018 年;(c) ECMWF4 模式, 时间段为 1981~2018 年。绿色线表示达到 90% 的置信水平

Fig. 3 TCC skills for summer precipitation anomalies based on observations and seasonal prediction issued in March by (a) CSM1.1 model, from 1991 to 2018, (b) CFSv2 model, from 1982 to 2018, and (c) ECMWF4 model, from 1981 to 2018. The green lines indicate significance at the 90% confidence level

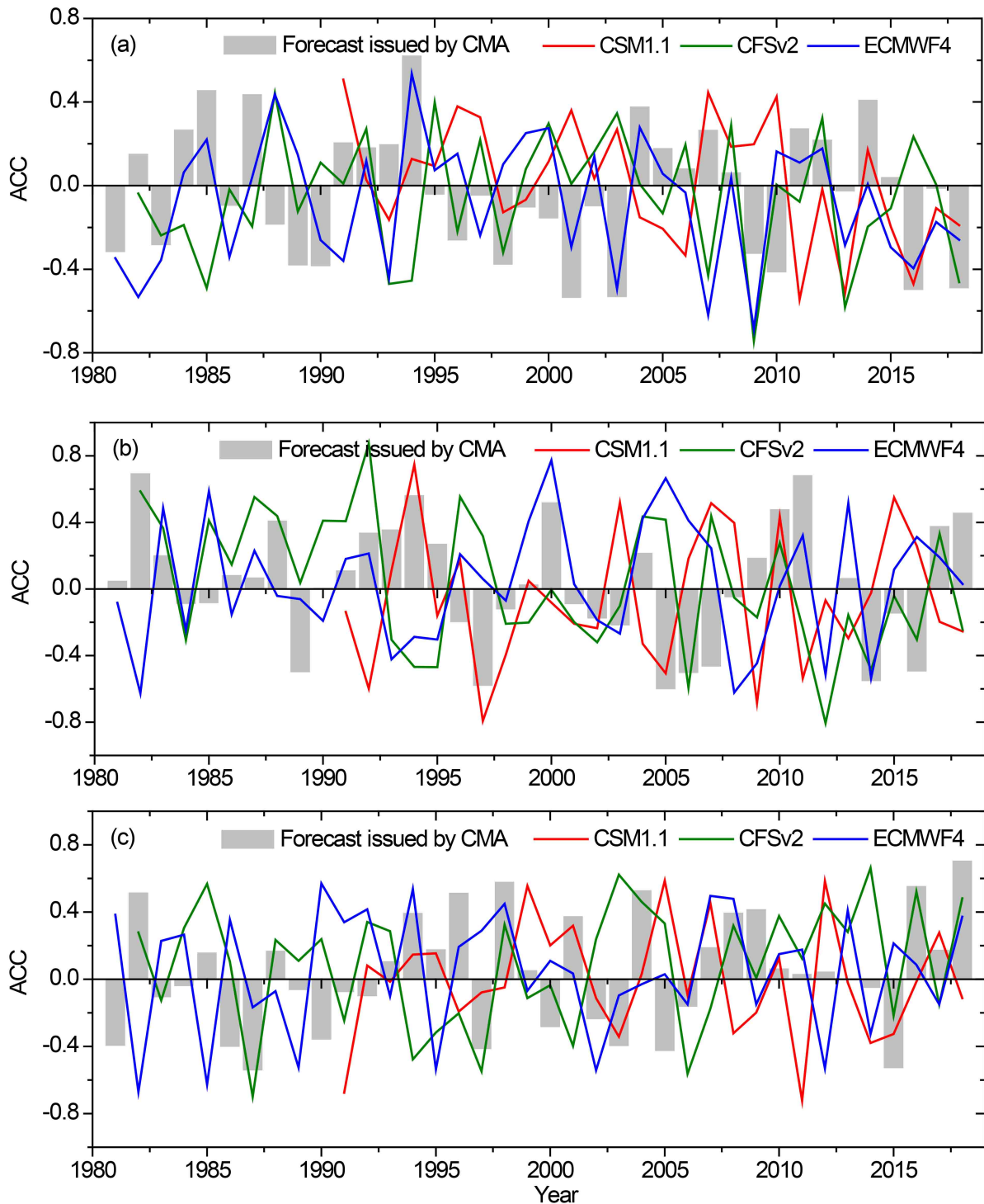


图4 CSM1.1、CFSv2 和 ECMWF4 三个模式 3 月起报夏季降水 ACC 的年际变化 (时间段同图 3): (a) 东北; (b) 华北; (c) 长江中下游

Fig. 4 The inter-annual variability of ACC skills for summer precipitation in (a) NEC, (b) NC, and (c) MLRYR issued in March by CSM1.1, CFSv2, and ECMWF4 models. The periods of each model are the same as in Fig. 3

为一致。此外,三个模式在 2013 年以来 ACC 均明显较低,并没有随着模式的总体发展而稳步提高。

相比之下,三个模式对华北夏季降水预测的

ACC 多年平均值分别为-0.06, 0.04 和 0.04, CFSv2 和 ECMWF 预测技巧相对较高(表 1)。由图 4b 和表 1 可见,ACC 具有明显的年际变化,三个模

表 1 CSM1.1、CFSv2和ECMWF4三个模式3月起报夏季降水距平相关系数（ACC）技巧

Table 1 The anomaly correlation coefficient (ACC) skills for summer precipitation issued in March by CSM1.1, CFSv2, and ECMWF4 models

	ACC(东北)			ACC(华北)			ACC(长江中下游)		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	最高	最低	平均
CSM1.1	0.51	-0.55	0.02	0.79	-0.75	-0.06	0.58	-0.72	0.01
CFSv2	0.44	-0.74	-0.06	0.87	-0.59	0.04	0.66	-0.70	0.09
ECMWF4	0.54	-0.69	-0.08	0.77	-0.63	0.04	0.57	-0.67	0.05

式的最高的 ACC 分别为 0.79、0.87 和 0.77，均明显高于三个模式对东北夏季降水预测的 ACC 最高值。三个模式对长江中下游地区夏季降水预测的 ACC 多年平均值分别为 0.01，0.09 和 0.05，CFSv2 和 ECMWF 预测技巧相对较高（表 1）。由图 4c 和表 1 可见，ACC 具有明显的年际变化，三个模式的最高的 ACC 分别为 0.58、0.66 和 0.57，均明显高于三个模式对东北夏季降水预测的 ACC 最高值。

4 东北夏季降水预测技巧偏低的原因分析

由上一节对我国夏季降水历史实时业务和模式预测技巧的检验情况可见，东北地区夏季降水预测水平明显偏低。抛开由于值班预报员主观的原因，下面从影响东北夏季降水的环流型及模式对环流型的预测能力、东北夏季降水与 SST 的关系、及多时间尺度分析等角度，分析东北夏季降水预测技巧偏低的可能原因。

4.1 东部三个区域夏季降水相联系的环流型及模式对环流型的预测能力

尽管影响中国东部夏季降水异常分布的因素是多方面的，但大气环流的异常变化是最直接和最重要的因素，作为对流层中、低层大气环流的代表，500 hPa 位势高度场和 850 hPa 风场可以清晰地反映中国东部夏季雨型的环流特征，在引言的历史研究回顾部分，也提到西太副高、南风、冷涡等环流对东北降水的影响。为分析东北夏季降水预测技巧偏低的原因，下文对比分析了与中国东部三个区域夏季降水相联系的环流型及模式对环流型的预测能力。

以往研究表明东北夏季降水受不同环流系统的影响：初夏主要受东北冷涡活动的影响，盛夏主要受西太副高、东北南风和中高纬环流的共同作用

（沈柏竹等, 2011; 丁婷和陈丽娟, 2015; Zhao et al., 2018）。图 5 分别给出了 1978~2018 年东北夏季（6~8 月）、初夏（6 月）和盛夏（7~8 月）降水与同期 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场的相关系数分布。由图 5a 可见，东北夏季降水与 500 hPa 高度场在贝加尔湖以南至我国北方地区呈显著的负相关，与长江下游至日本岛西部呈弱的正相关；与 850 hPa 风场在我国北方地区至贝加尔湖为显著的气旋式相关分布，与华北和东北地区的南风呈显著的正相关；表明与东北夏季降水异常相联系的环流系统主要为东北冷涡和东北南风。但夏季平均的相关场上，则主要反映了东北冷涡的影响。由图 5b 可见，东北初夏降水与 500 hPa 高度场在贝加尔湖以南至我国北方地区呈显著的负相关，与东北亚高纬地区呈显著的正相关；与 850 hPa 风场在我国北方地区至贝加尔湖呈显著的气旋式相关分布，表明与东北初夏降水异常相联系的环流系统主要为东北冷涡。由图 5c 可见，东北盛夏降水与 500 hPa 高度场在蒙古至内蒙古北部呈显著的负相关，在朝鲜半岛南部至日本岛西部呈显著的正相关；与 850 hPa 风场在华北和东北地区的西南风呈显著的正相关，表明与东北盛夏降水异常相联系的环流系统主要为东北冷涡、西太副高和东北南风。

图 5d 和 e 分别给出了华北和长江中下游夏季降水与同期 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场的相关系数分布。华北夏季降水与 500 hPa 高度场在贝加尔湖至蒙古呈弱的负相关，与江淮东部至朝鲜半岛南部呈显著的正相关（图 5d）；与 850 hPa 风场在我国东部地区至朝鲜半岛南部呈显著的反气旋式分布，与西北地区西风和华北南部的南风呈显著的正相关；表明与华北夏季降水异常相联系的环流系统主要为西太副高、东亚夏季风和西风带的水汽输送。长江中下游夏季降水与 500 hPa 高度场在东亚地区呈“正—负—正”的相关分布，在东北亚至鄂霍次

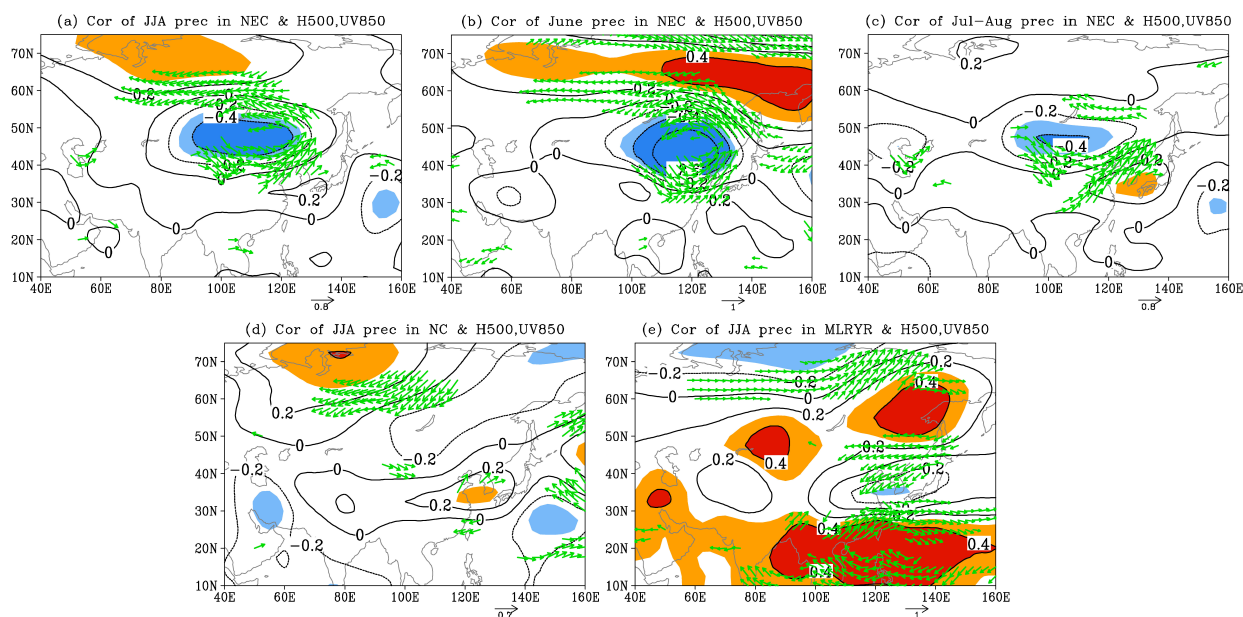


图5 1978~2018年东北(a)夏季、(b)初夏和(c)盛夏降水与同期500 hPa高度(等值线)和850 hPa水平风(箭头)的相关系数分布,(d)和(e)同图(a),但为华北和长江中下游。浅(深)色阴影表示达到95%(99%)的置信水平,仅绘出经向或纬向风速相关达到95%的置信水平的区域

Fig. 5 Correlation coefficients between precipitation over NEC in (a) summer, (b) June, and (c) July–August and contemporaneous 500 hPa geopotential height (contour) and horizontal winds (vectors) at 850 hPa from 1978 to 2018. (d) and (e) are the same as (a), but for NC and MLRYR. The light (dark) shading areas indicate significance at the 95% (99%) confidence level. The vectors are of correlations significant at the 95% confidence level.

克海西部、副热带西太平洋至孟加拉湾呈显著的正相关,在黄淮地区至日本岛呈弱的负相关(图5e),这一相关分布类似东亚—太平洋型(EAP; Huang, 1992)大气遥相关;与850 hPa风场在东亚地区从南向北分别呈显著的反气旋—气旋—反气旋式相关分布;表明与长江中下游夏季降水异常相联系的环流系统主要为西太副高、东亚夏季风和东北亚阻塞高压。

由此可见,与东北、华北和长江中下游夏季降水异常相联系的环流系统存在明显的差异,且与东北夏季季节内降水异常相联系的环流系统也存在明显的差异。那么模式中与三个区域夏季降水相联系的环流型是否与观测资料一致?模式对环流型的预测能力如何?图6给出了三个模式3月起报的东北夏季、初夏和盛夏降水和模式同期500 hPa位势高度场相关系数的空间分布。图7给出了三个模式3月起报的华北、长江中下游夏季降水和模式同期500 hPa位势高度场相关系数的空间分布。

首先,从三个模式3月起报的东北夏季降水和模式同期500 hPa位势高度场相关系数的空间分布可见,不同模式中与东北降水相联系的环流差异较

大: CSM1.1模式中,东北夏季降水和模式同期500 hPa位势高度场在东亚中高纬度(35°~55°N)呈显著的正相关(图6a),这一特征与观测资料中的关系完全相反;CFSv2模式中,贝加尔湖以南至内蒙古中东部为弱的负相关,朝鲜半岛以南为弱的正相关(图6d),这一分布型虽与观测资料类似,但相关并不显著;ECMWF4模式中,欧亚55°N以北地区和西太平洋副热带地区为显著的正相关,华北北部至东北南部为弱的负相关(图6g),这一分布型大体上与观测资料类似,但负相关中心和显著程度有明显差异。

从三个模式3月起报的东北初夏降水和模式同期500 hPa位势高度场相关系数的空间分布可见,仅CFSv2模式中,华北和东北为显著的负相关(图6e),这一分布型虽与观测资料类似,但相关范围和显著性较观测偏弱;而CSM1.1模式(图6b)和ECMWF4模式(图6h)未能反映出初夏降水与东北冷涡的关系。

三个模式3月起报的东北盛夏降水和模式同期500 hPa位势高度场相关系数的空间分布与夏季相关分布类似,不同模式中与东北盛夏降水相联系

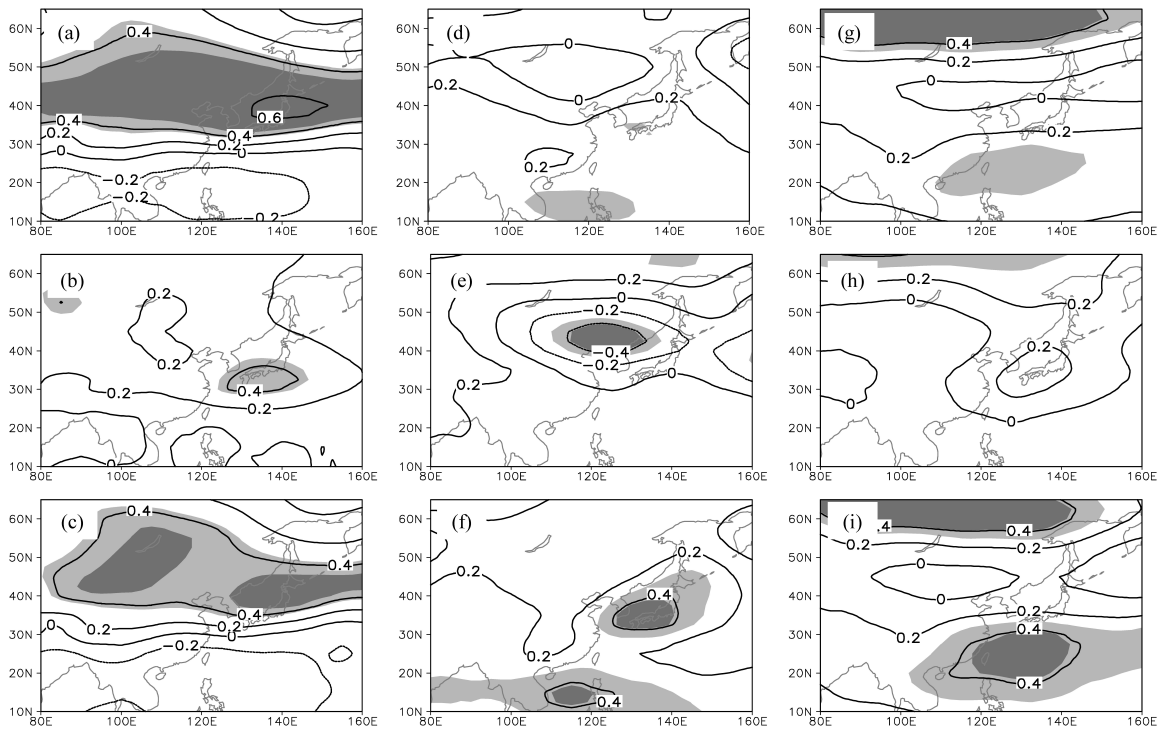


图6 (a, b, c) CSM1.1、(d, e, f) CFSv2 和 (g, h, i) ECMWF4 三个模式 3 月起报的东北 (a, d, g) 夏季、(b, e, h) 6 月和 (c, f, i) 7~8 月夏季降水和同期 500 hPa 位势高度相关系数。时间段同图 3, 浅(深)色阴影表示达到 95% (99%) 的置信水平

Fig. 6 Correlation coefficients between (a, d, g) summer, (b, e, h) June, and (c, f, i) July–August precipitation in NEC and contemporaneous 500 hPa geopotential height issued in March by (a, b, c) CSM1.1, (d, e, f) CFSv2, and (g, h, i) ECMWF4 models. The periods of each model are the same as in Fig. 3. The light (dark) shading areas indicate significance at the 95% (99%) confidence level

的环流差异较大: 仅 CFSv2 模式中, 朝鲜半岛南部至日本岛为显著的正相关 (图 6f), 较好的反映了盛夏降水与西太副高的关系; 但蒙古和内蒙古为弱的正相关, 未能反映盛夏降水与东北冷涡的关系; 而 CSM1.1 模式 (图 6c) 和 ECMWF4 模式 (图 6i) 未能准确反映出盛夏降水与西太副高、东北冷涡的关系。

从三个模式 3 月起报的华北夏季降水和模式同期 500 hPa 位势高度场相关系数的空间分布可见, 不同模式中与华北降水相联系的环流也有一定的差异: CSM1.1 模式中, 华北夏季降水和模式同期 500 hPa 位势高度场在华北至日本岛以东洋面呈显著的正相关 (图 7a), 这一特征与观测资料中的关系比较一致; CFSv2 模式中, 贝加尔湖至鄂霍次克海为显著的正相关 (图 7b), 正相关显著区与观测资料相比明显偏北; ECMWF4 模式中, 整个东北亚均为显著的正相关 (图 7c), 正相关显著区较观测资料明显偏大偏北。

从三个模式 3 月起报的长江中下游地区夏季降

水和模式同期 500 hPa 位势高度场相关系数的空间分布可见, 不同模式中与长江中下游降水相联系的环流较为相似, 但也有一定的差异: CSM1.1 模式中, 长江中下游夏季降水和模式同期 500 hPa 位势高度场在西太平洋副热带地区呈显著的正相关, 华北至鄂霍次克海南部呈显著的负相关 (图 7d), 这一特征与观测资料中的关系相比, 南面的正相关区位置接近, 而北面的负相关区位置偏北; CFSv2 模式中, 西太平洋副热带地区呈弱的正相关 (图 7e), 与观测资料相比相关偏弱; ECMWF4 模式中, 西太平洋副热带地区呈显著的正相关 (图 7f), 华北东部、东北至日本岛为弱的负相关, 负相关区较观测资料偏北。

总体而言, 三个模式均未能较好的反映出东北夏季降水与关键环流系统的关系, 尤其是季节内降水与环流系统的配置关系, 但在一定程度上反映了华北夏季降水与西太副高偏北的关系、及长江中下游夏季降水与西太副高偏南的关系。说明虽然三个模式对夏季环流的预测技巧有限, 但是还是能部分

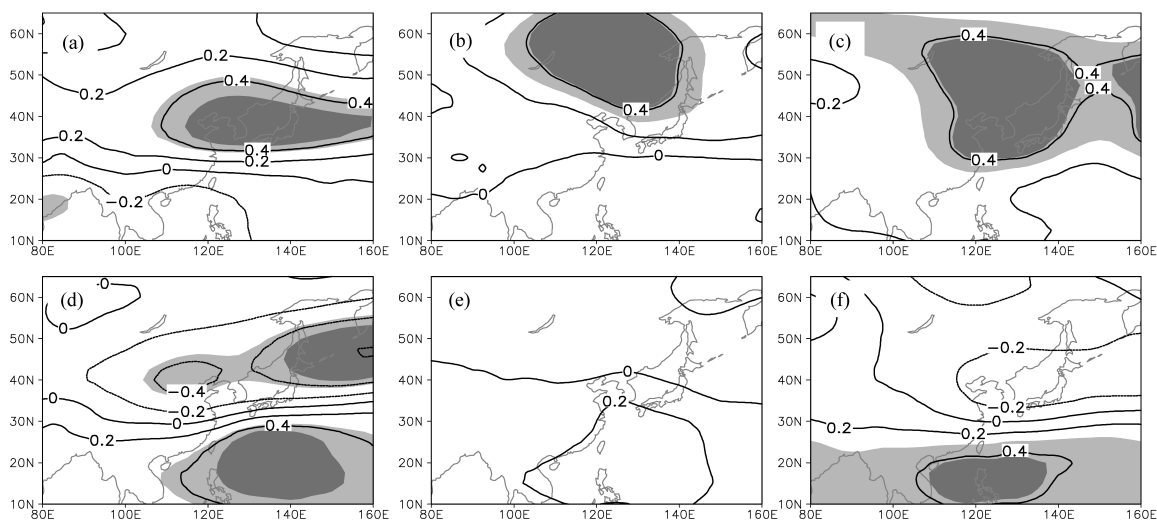


图7 (a, d) CSM1.1、(b, e) CFSv2 和 (c, f) ECMWF4 三个模式 3 月起报的 (a, b, c) 华北、(d, e, f) 长江中下游夏季降水和同期 500 hPa 位势高度的相关系数。时间段同图 3, 浅(深)色阴影表示达到 95%(99%) 的置信水平

Fig. 7 Correlation coefficients between summer precipitations in (a, b, c) NC, (d, e, f) MLRYR, and contemporaneous 500 hPa geopotential height issued in March by (a, d) CSM1.1, (b, e) CFSv2, and (c, f) ECMWF4. The periods of each model are the same as in Fig. 3. The light (dark) shading areas and vectors drawn indicate significance at the 95% (99%) confidence level

反映出实况大气中环流与华北、长江降水的物理关系, 但是模式大气无法准确反映实际大气中环流与东北降水的关系。

模式对东亚大气环流系统的预测技巧高低, 直接影响夏季降水的预测技巧。考虑到东北夏季季节内降水受不同环流系统的影响, 图 8 给出了三个模式 3 月起报的东亚夏季、初夏和盛夏 500 hPa 位势高度预报技巧的 TCC 的空间分布。由图 8a 可见, CSM1.1 模式对夏季热带地区的预报技巧最高, 中纬度副热带地区次之, 中高纬度技巧最低, 其中对西太副高所在区域有较高的预报技巧, TCC 在 0.4 以上。CSM1.1 对初夏贝加尔湖以东南至东北地区—东北冷涡活动区的预报技巧偏低, TCC 在 0.2 至 0.4 (图 8b); 对盛夏西太副高所在区域的预报技巧也偏低, TCC 在 0.2 至 0.4 (图 8c)。由此可见, CSM1.1 模式对初夏东北冷涡和盛夏西太副高的预报技巧均偏低, 导致对整个夏季的降水预报技巧较低。由图 8d 可见, CFSv2 模式在夏季热带地区和中国西北地区的预报技巧最高, 对贝加尔湖东北部至日本岛一带地区的预报技巧最低。CFSv2 对初夏整个东亚地区的预报技巧明显偏低, 大部分地区 TCC 在 0.2 以下 (图 8e); 对盛夏除东北以外的整个中国大陆有较高的预报技巧, 尤其是中国西北至华北西部, TCC 在 0.6 以上 (图 8f), 这也是模

式对这些地区夏季降水预报技巧较高 (图 2b) 的主要原因。由此可见, CFSv2 模式对初夏东亚地区和盛夏东北地区环流的报技巧均偏低, 导致对整个夏季的降水预报技巧较低。由图 8g 可见, ECMWF4 模式在夏季整个东亚地区的预报技巧最高, 但对江南和鄂霍次克海的预报技巧偏低。ECMWF4 对初夏整个东亚地区的预报技巧明显偏低, 尤其是东北冷涡活动区和长江流域, TCC 在 0.2 以下 (图 8h); 对盛夏贝加尔湖以南至秦岭—淮河有较高的预报技巧, 尤其是中国西北至华北, TCC 在 0.6 以上 (图 8i), 但对西太副高所在区域的南部和鄂霍次克海阻塞高压活动区的预报技巧偏低。由此可见, ECMWF4 模式对初夏东亚地区和盛夏西太副高区南部和鄂霍次克海环流的预报技巧均偏低, 导致对整个夏季的降水预报技巧较低。

综上所述, 三个模式对影响东北夏季不同阶段降水的关键环流系统的模拟和预测技巧存在显著偏差, 无法正确反映实际大气中环流和东北降水的关系, 因此也直接影响了降水的预测技巧。

4.2 东北夏季降水与前期信号(海温)关系的复杂性

目前国内外主要的气候预测模式对欧亚中高纬度环流和东亚季风降水的季节变率预测技巧较低 (Wang et al., 2009; 丁一汇, 2011; 封国林等,

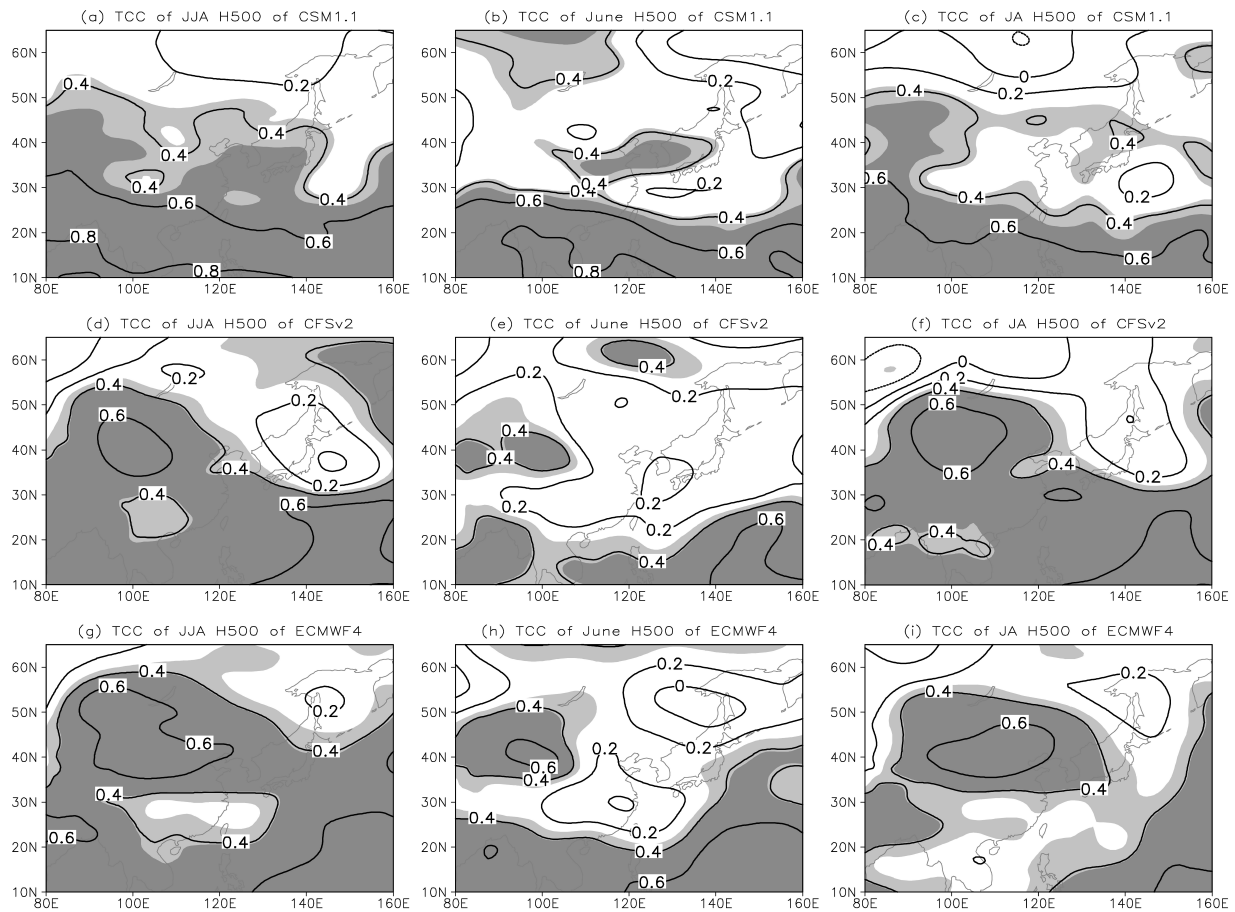


图8 (a, b, c) CSM1.1、(d, e, f) CFSv2 和 (g, h, i) ECMWF4 三个模式 3 月起报的东亚 (a, d, g) 夏季, (b, e, h) 6 月和 (c, f, i) 7~8 月 500 hPa 位势高度异常预报技巧的 TCC。时间段同图 3, 浅 (深) 色阴影表示达到 95% (99%) 的置信水平

Fig. 8 TCC skills for 500 hPa geopotential height anomalies issued in March by (a, b, c) CSM1.1, (d, e, f) CFSv2 and (g, h, i) ECMWF4 models in (a, d, g) JJA (June–July–August), (b, e, h) June and (c, f, i) JA (July–August). The periods of each model are the same as in Fig. 3, The light (dark) shading areas indicate significance at the 95% (99%) confidence level

2015), 因此考虑前期 SST 等外强迫特征对夏季风系统及降水的影响仍然是季节气候预测的重要手段 (肖子牛等, 2002; 晏红明等, 2009)。以往研究表明太平洋、印度洋和大西洋等不同区域 SST 异常是东北地区夏季降水异常较好的先兆信号 (白人海, 2001; 孙力和安刚, 2003; 冯新等, 2006; Gao et al., 2014; Han et al., 2018), 但由于研究时段、资料和方法等的不同, 导致结论有一定的差异。

图 9 给出了 1951~2018 年东北、华北和长江中下游夏季降水与前冬、春季和夏季全球 SST 的相关系数。由图 9a 可见, 与冬季 SST 的相关场上, 仅在南印度洋西部、西北太平洋西部、副热带太平洋东南部及北大西洋中部等地呈现显著的负相关, 其他大部分地区, 尤其是热带印度洋、赤道中东太平洋和北大西洋等显著影响亚太地区气候的关键海

区, 并没有显著的相关。与春季 SST 的相关场分布与冬季大体相似, 主要差异是西北太平洋西部的显著负相关区消失 (图 9b)。与夏季 SST 的相关场特征也与冬季大体相似, 相关也较弱 (图 9c)。即利用海温的超前信息预测东北夏季降水几乎没有信号。相比东北, 华北和长江中下游夏季降水与 SST 场有持续的显著相关区: 由图 9d-f 可见, 华北与冬季至夏季 SST 的相关场上, 赤道中东太平洋由弱的正相关逐步转变为显著的负相关, 夏季印度洋也呈显著的负相关, 即前冬至夏季赤道中东太平洋冷海温发展时 (或 La Niña 发展时), 华北夏季降水易偏多, 反之亦然; 由图 9g-i 可见, 长江中下游与冬季至夏季 SST 的相关场上, 赤道中东太平洋显著正相关逐步减弱, 而热带印度洋和西北太平洋的显著正相关则持续或加强, 即前冬至夏季

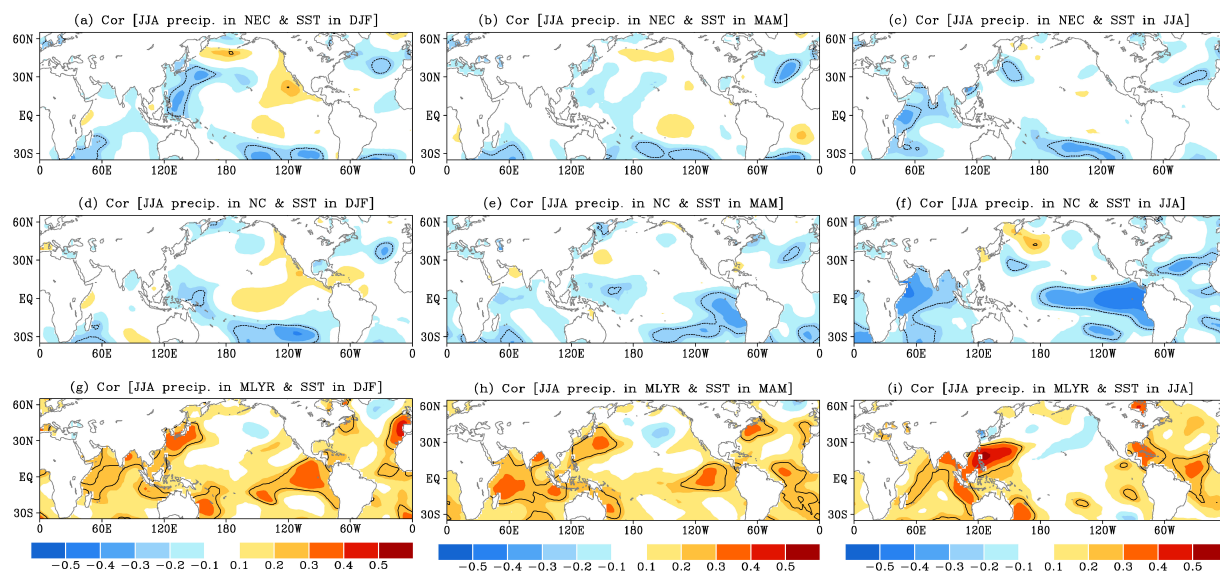


图9 1951~2018年(a, b, c)东北、(d, e, f)华北和(g, h, i)长江中下游夏季降水与(a, d, g)前冬、(b, e, h)春季和(c, f, i)夏季SST的相关系数。黑色线表示达到95%的置信水平

Fig. 9 Correlation coefficients between the summer precipitation in (a, b, c) NEC, (d, e, f) NC, (g, h, i) MLRYR, and sea surface temperature (SST) in (a, d, g) previous winter (DJF, December–February), (b, e, h) spring (MAM, March–May), (c, f, i) summer (JJA, June–August) from 1951 to 2018. Black lines indicate significant at the 95% confidence level

赤道中东太平洋暖海温衰减、热带印度洋和西北太平洋暖海温发展时(或El Niño衰减时),长江中下游夏季降水易偏多,反之亦然。

由此可见,华北和长江中下游夏季降水与SST场演变有持续的显著关系,可以利用海温的超前信息预测夏季降水,但东北夏季降水在SST场几乎没有通过显著性检验的预测信号。

Wang et al. (2009) 研究指出, ENSO 事件是季节预测最重要的可预报性来源。随着全球变暖, ENSO 与中国夏季降水年际变化关系表现出了不稳定的特征(宗海锋等, 2010; Zhao and Feng, 2014)。此外, 相比长江流域和华北地区, 东北夏季降水与 ENSO 的关系更加复杂。龚强等(2005) 研究指出 El Niño 事件与东北区夏季风异常无直接联系, 故与东北夏季降水关系不密切。Wu et al. (2003) 研究也表明, 1951~2010 年期间, ENSO 与东北夏季平均降水的关系不显著。

图 10 进一步分析了东北夏季降水与 ENSO 关系的复杂性。1951~2018 年东北夏季降水与 Niño3.4 指数关系的散点图(图 10a), 4 个象限的年份较为均匀, 二者的相关系数为 0.08, 没有显著的统计关系。1982~1983 年、1997~1998 年和 2015~2016 年三个超强 El Niño 年次年, 降水分别

出现接近常年、异常偏多和异常偏少的特征。从 1951~2018 年东北夏季降水的标准化序列与冬季 Niño3.4 指数的标准化序列(图略), 及二者的 11 年滑动相关系数(图 10b) 来看, 二者的年际关系存在明显的阶段性变化, 1964~1974 年和 1995~2003 年这两个阶段二者呈显著的正相关, 而 1978~1992 年和 2005~2013 年这两个阶段二者则转为弱的负相关。以往众多研究表明, 前冬至夏季中东太平洋为冷海温时, 东亚夏季风易偏强, 导致我国北方降水偏多, 反之亦然(金祖辉和陶诗言, 1999; 陈文, 2002; 陈丽娟等, 2013)。即我国北方降水与中东太平洋 SST 呈负相关, 东北降水与冬季 Niño3.4 指数在 1978~1992 年和 2005~2013 年这两个阶段呈弱的负相关, 符合这一规律。结合发布预报中东北地区的 ACC 的阶段性变化(图 2a) 可见, 2004~2015 年这一阶段预测技巧有所提高, 与东北降水与中东太平洋 SST 呈负相关有关。而 1995~2003 年东北降水与中东太平洋 SST 转为显著的正相关, 恰好这一阶段发布预测技巧较低, 东北降水与中东太平洋 SST 年际关系发生了年代际变化可能是导致这一阶段预测准确率较低的一个原因。

东北地区夏季降水 1978~2018 年的实际业务

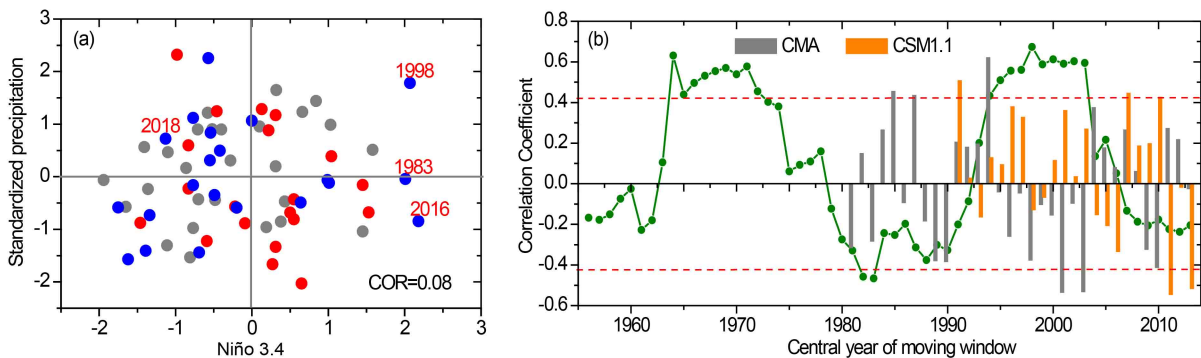


图 10 1951~2018 年东北夏季降水与 ENSO 关系的复杂性: (a) 夏季降水量标准化值 (纵坐标) 与冬季 Niño3.4 指数 (横坐标) 的散点图, 灰色的点为 1951~1977 年, 红色的点为 1978~2018 年期间发布预报预测 ACC 大于 0 的年份, 蓝色的点为 1978~2018 年期间发布预报预测 ACC 小于 0 的年份; (b) 二者的 11 年滑动相关系数 (绿色点线), 红色虚线表示达到 90% 的置信水平, 灰色柱状和橙色柱状分别为 CMA 发布预测和 CSM1.1 模式 3 月起报的东北 ACC 技巧

Fig. 10 The complexity of the relationship between the summer precipitation in NEC and ENSO: (a) Scatter plots of the standardized summer precipitation (y-axis) and DJF Niño 3.4 index (x-axis); gray points are for 1951–1977, red points indicate the years when ACC is greater than 0 during the period of 1978–2018, and blue points indicate the years when ACC is less than 0 during the period of 1978–2018; (b) the 11-year-sliding correlation coefficients (green dotted line) between summer precipitation and DJF Niño 3.4 index. The red dotted line denotes significance at the 90% confidence level. The grey and orange columns indicate the ACC skills for precipitation over NEC issued in March by CMA and CSM1.1, respectively

预测中, 每年的主要预测依据不尽相同, 下面以 2016 和 2018 年为例来说明海温预报因子的使用情况。2016 年为超强 El Niño 衰减年, 实际预报中重点考虑了 1998 年为相似年, 预测东北降水偏多, 而实况为偏少; 即 2016 年和 1998 年在长江流域的夏季降水异常很相似, 但在东北地区却大相径庭。2018 年为 La Niña 衰减年, 实际预报综合考虑了海温背景的可能影响和动力模式的预测结果 (CSM1.1、CFSv2 和 ECMWF4 模式均预测偏少), 预测东北降水偏少, 而实况为偏多。可见东北夏季降水与 ENSO 关系的复杂性, 即使在超强 El Niño 发生后, 东北地区的降水异常趋势仍然是不确定的, 从观测资料说明 ENSO 循环对东北地区夏季降水预测来讲不是一个强信号, 需要另辟蹊径。

研究表明, ENSO 是动力气候模式的重要可预报性来源, 模式在热带预报技巧的提升主要源于对 ENSO 预报技巧的提高 (吴捷等, 2017; 顾伯辉等, 2017)。那么, CSM1.1、CFSv2 和 ECMWF4 模式对东北地区夏季降水的预报技巧是否与 ENSO 的强度有关? 图 11 给出了三个模式 3 月起报的东北夏季降水历年 ACC 技巧与冬季平均的 Niño3.4 指数振幅的散点图和相关系数。由散点图可见, CSM1.1 的 ACC 技巧与 Niño3.4 指数振幅的关系并不明显, 相关系数为 -0.20 (图 11a); CFSv2 的 ACC 技巧与 Niño3.4 指数振幅的关系也并不明

显, 相关系数为 0.14 (图 11b); ECMWF4 的 ACC 技巧与 Niño3.4 指数振幅的关系相对紧密一些, 相关系数为 0.22, Niño3.4 指数振幅大于 1.0 共 12 年, 其中有 9 年的 ACC 大于 0 (图 11c)。即在 ENSO 事件发生时 (无论 El Niño 事件还是 La Niña 事件), CSM1.1 和 CFSv2 模式对东北夏季降水的预报技巧并不会显著提高, 而 ECMWF4 模式的降水预报技巧会提高一些, 但也不显著。

4.3 东北夏季降水的多时间尺度变率对季节可预报性的影响

东北地区位于我国东部季风区的北边缘, 受到中高纬西风带环流系统和副热带季风环流系统的综合影响, 东北夏季降水具有明显季节内变率、年际变率和年代际变率。初夏和盛夏降水异常受到不同环流系统的影响。例如影响北方降水的东北冷涡, 它的活动频率在初夏和盛夏具有明显的差异。东北冷涡在初夏较为活跃, 活动日数占全年的 44.9%, 对东北降水影响显著 (谢作威和布和朝鲁, 2012; 刘刚等, 2017)。而东亚夏季风平均在 7 月中旬才北推至华北地区, 7 月下旬北推至东北地区 (廉毅等, 2003)。即西风带环流系统和副热带季风环流系统在季节内不同阶段所起的作用大小不同, 在夏季风到达之前, 东北降水主要受到东北冷涡等西风带环流系统的主导, 在夏季风到达之后, 东北降水主要受到东亚夏季风的主导。

从东北初夏和盛夏降水的功率谱曲线(图略)分析表明,二者均存在2~4年的年际周期和15~22年的年代际周期。这与孙力等(2000)对1961~1995年东北夏季6~8月降水量的气候特征分析结论较一致。采用傅里叶分解的滤波方法,将1951~2018年东北初夏和盛夏降水分解为不同尺度的分量,将周期小于等于8年的高频部分作为年际分量,把周期大于等于15年的低频部分作为年代际分量。其中初夏的年际分量和年代际分量序列的标准差分别为16.4 mm和7.8 mm(分别占67.8%和32.2%),盛夏分别为31.9 mm和22.2 mm(分别占59.0%和41.0%),可见年代际分量占比可达30%~40%,非常重要。图12给出了东北初夏和盛夏降水年际和年代际变化序列。从年际变化

来看,初夏和盛夏降水相互独立,二者的年际相关系数为-0.05(图12a)。从年代际变化来看,初夏和盛夏降水大体上呈相反的变化特征,二者的年代际相关系数为-0.32(图12b)。尤其是初夏降水在21世纪00年代中期以来呈现年代际增加的趋势,而盛夏降水在20世纪90年代末期以来呈现年代际减少的趋势。可见分别考虑季内变化特征并分离时间尺度很有必要。

东北夏季降水的年际和年代际变率的影响环流系统存在明显的差异。图13给出了东北初夏和盛夏降水与东亚环流的年际尺度上的相关分布。由图13a可见,东北初夏降水与500 hPa高度场在贝加尔湖南部至中国东北呈显著的负相关,在亚洲北部至鄂霍次克海呈显著的正相关;东北初夏降水

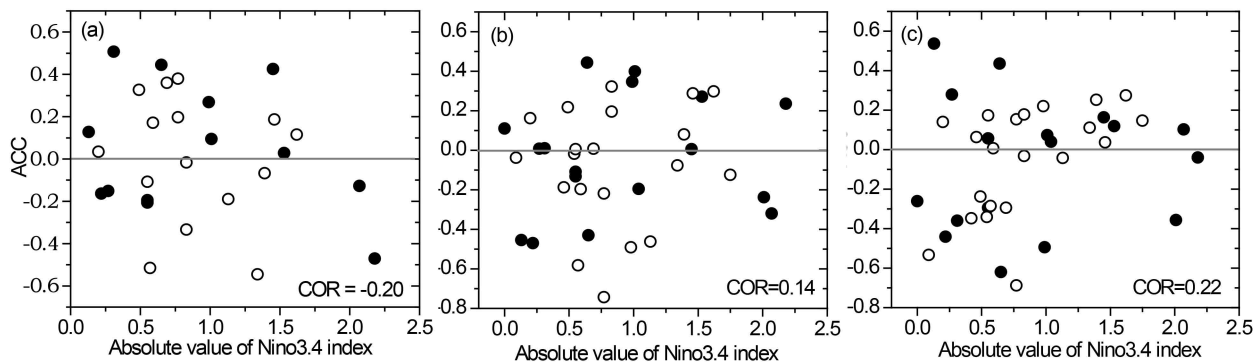


图11 (a) CSM1.1、(b) CFSv2 和 (c) ECMWF4 三个模式对东北夏季降水预测的历年 ACC 技巧与 Niño3.4 指数绝对值的散点图及其相关系数,时间段同图3,图中实心圆点代表 Niño3.4 指数大于0,空心圆圈代表 Niño3.4 指数小于0

Fig. 11 Scatter plots of ACC skills of the JJA precipitation in NEC for (a) CSM1.1, (b) CFSv2, and (c) ECMWF4 against the absolute value of Niño3.4 index, and their correlation coefficients. The periods of each model are the same as in Fig. 3. The solid circles represent the Niño3.4 index above 0, while the hollow circles represent Niño3.4 index below 0

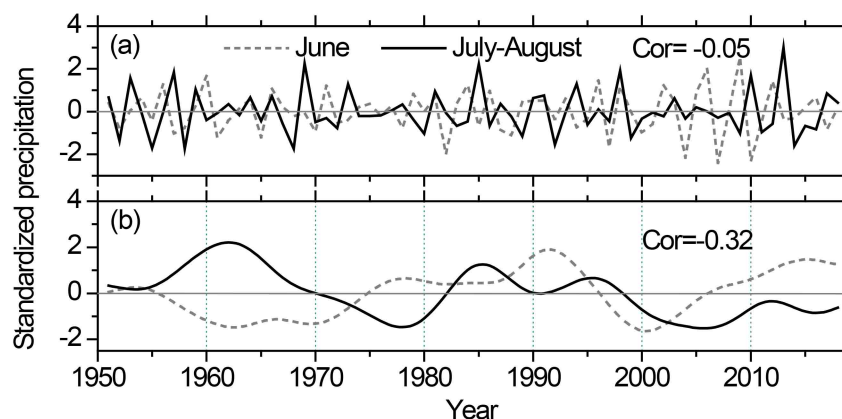


图12 1951~2018年东北夏季降水量标准化时间序列:(a)年际分量;(b)年代际分量

Fig. 12 The standardized time series of the (a) inter-annual and (b) inter-decadal components of summer precipitation in Northeast China during 1951–2018

与 850 hPa 风场在长江以北呈显著的气旋式相关分布、在鄂霍次克海呈显著的反气旋式相关分布。即初夏降水主要与东北冷涡和鄂霍次克海阻塞高压有关,副热带西风带、副热带西南风及日本岛以东洋面的东南风共同为东北降水提供充足的水汽。东北盛夏降水与 500 hPa 高度场在东亚地区呈南正北负的纬向带状相关分布,印度北部至日本岛东南部呈显著的纬向带状型正相关分布,在内蒙古和中国东北为显著的负相关;东北盛夏降水与 850 hPa 风场在长江至贝加尔湖呈显著的气旋式相关分布,长江中游至东北南部为显著的西南风相关(图 13b)。即盛夏降水主要与东北冷涡、西太副高和东亚夏季风有关,降水水汽主要来源于东亚夏季风。已有研究也表明,初夏东北降水偏多年,东北地区冷涡活动频繁(何金海等, 2006a, 2006b; Zhao et al., 2015),而盛夏降水异常主要受到对流层高层东亚高空西风急流北移以及低层的副高西伸北进的影响,随着副高西北侧东南风异常的加强,向北输送到东北地区的水汽显著增多,导致东北地区降水偏多(沈柏竹等, 2011; 丁婷和陈丽娟, 2015; Zhao et al., 2018)。

图 14 给出了东北初夏和盛夏降水与东亚环流的年代际相关。由图 14a 可见,东北初夏降水与 500 hPa 高度场在东亚地区呈现明显的“正—负—正”相关分布,其中在西太平洋副热带地区和东北亚—鄂霍次克海呈显著的正相关,在东北西部呈弱的负相关,类似于西太平洋—东亚(EAP)遥相关型的分布(Zhao et al., 2018);东北初夏降水与

850 hPa 风场在西太平洋副热带地区、东北地区 and 东北亚—鄂霍次克海呈显著的反气旋式—气旋式—反气旋式相关分布。东北初夏降水在 21 世纪 00 年代中期以来的年代际增多,与该时期副高的年代际增强(Li et al., 2012; 赵俊虎等, 2012, 2016)、东北冷涡和鄂霍次克海阻塞高压的年代际活跃有密切的关系(谢作威和布和朝鲁, 2012; 刘刚等, 2017)。由图 14b 可见,东北盛夏降水与 500 hPa 高度场在蒙古—中国大部和日本岛及其周围呈“负—正”的相关分布,其中在蒙古呈显著的负相关;东北盛夏降水与 850 hPa 风场在中国北方—贝加尔湖呈显著的反气旋式相关分布,与朝鲜半岛—东北南部的南风呈显著的正相关。东北盛夏降水在 20 世纪 90 年代末期以来呈现年代际减少的趋势,与该时期东亚夏季风的年代际偏弱(丁一汇等, 2013)和东北南风的年代际减弱密切相关(Sun et al., 2017)。

综上所述,东北夏季降水具有明显的季节内、年际和年代际等多时间尺度的变率,不同变率主导的环流系统也存在明显的差异。而过去对东北降水预测的研究和业务工作,大多数将夏季(6~8 月平均)作为一个整体来进行研究,一方面未充分考虑夏季降水的季节内差异,另一方面也未进行年际和年代际信息的分离预测。尤其是未将初夏和盛夏降水及其主导的影响环流系统分开研究和预测,这样极其不利于降水的异常成因分析和预测信号研究。例如,1955、1980、2002、2005、2008 及 2014 年等年份,东北初夏 6 月降水异常偏多,而盛夏

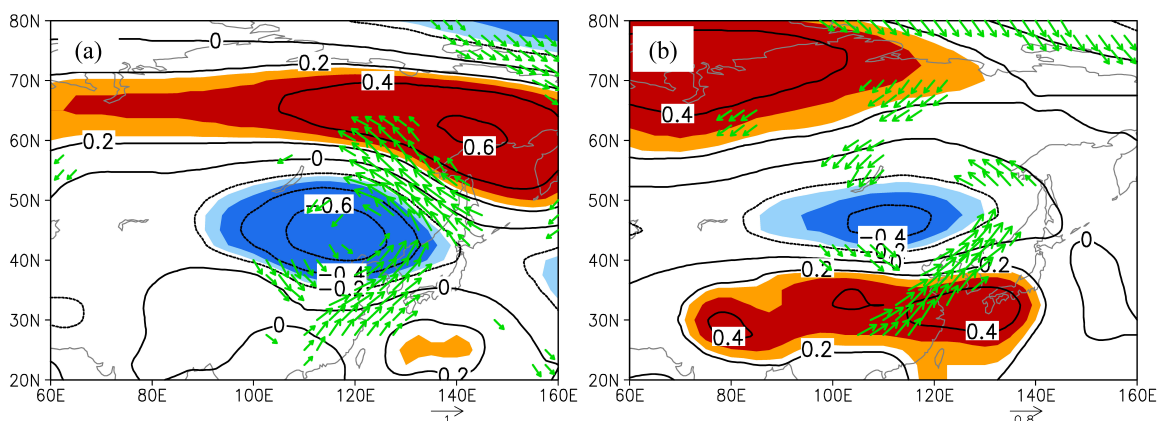


图 13 1951~2018 年东北夏季降水与 500 hPa 位势高度(等值线)和 850 hPa 水平风(箭头)的年际相关:(a) 6 月;(b) 7~8 月。其他同图 5

Fig. 13 Inter-annual correlation between summer precipitation in Northeast China and 500 hPa geopotential height (contour) and horizontal winds (vectors) at 850 hPa from 1951 to 2018: (a) June, (b) JA (July–August). Others are the same as in Fig. 5.

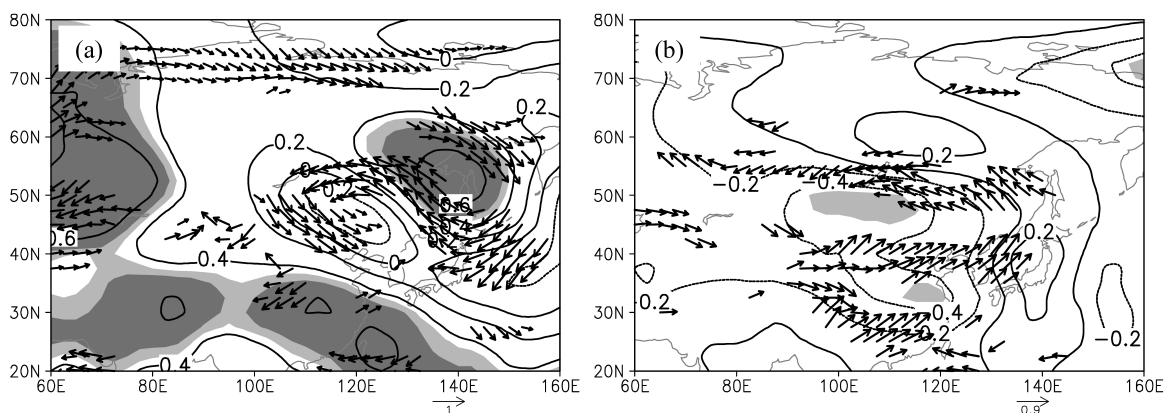


图 14 同图 13, 但为年代际尺度

Fig. 14 Same as in Fig. 13, but for the inter-decadal time scale

7~8 月降水异常偏少, 整个夏季则表现为偏少; 而另外一些年份则相反, 1961、1963 和 1969 年等年份东北初夏降水异常偏少, 而盛夏降水异常偏多, 整个夏季则表现为偏多; 还有一些年份初夏涝而盛夏旱, 整个夏季降水则接近常年。

5 总结和展望

东北地区位于东亚夏季风的北边缘, 夏季降水同时受到西风带系统扰动和东亚夏季风北进的共同影响, 影响系统复杂, 表现出明显的季节内变化、年际变化和年代际变化等多时间尺度变化特征, 且不同时间尺度对总变率的贡献相当, 预测难度较南方地区大。目前, 国内和国际上先进的气候模式对夏季中高纬环流和降水的预测技巧远低于低纬地区。从 1978~2018 年的全国会商后发布的预测结果和国内外的主要业务模式检验评估发现, 东北的预测技巧明显较低, 远低于华北和长江中下游等地区。本文对全国会商实际发布预报中东北夏季降水预测水平明显偏低的原因开展了分析, 发现主要有三个方面的原因: (1) 国内外主要业务参考动力气候模式对长江和华北地区夏季降水的预报技巧相对较高, 而对东北大部地区预报技巧严重偏低; 东北初夏降水主要受东北冷涡活动的影响, 盛夏主要受西太副高、东北南风和中高纬环流型的共同作用, 而模式无法准确反映东北初夏和盛夏降水相联系的关键环流系统, 对影响东北地区夏季降水的关键环流系统的预测技巧明显偏低; 模式对 ENSO 与东北降水关系的反映也很弱, 信号不显著; (2) 1951~2018 年期间, 东北夏季降水与前冬至夏季同期全

球 SST 的关系较弱, ENSO 与东北夏季平均降水的关系不显著且不稳定, 存在明显的阶段性变化, ENSO 对东北夏季降水的指示作用较弱, 不能作为强预测信号; (3) 东北夏季降水存在明显的季节内、年际和年代际等多时间尺度变率特征, 过去对东北夏季降水的研究和预测中, 对季节内差异未充分考虑, 对年际和年代际分量也未进行时间分离, 对东北冷涡的年际变率缺少有效的预报方法。

要想进一步提高东北地区的预测技巧, 需要结合东北夏季降水预测中的科学问题, 在模式改进、前期预测信号、同期环流、多时间尺度分析和客观预测方法等方面开展相应的研究和应用。

(1) 首先, 动力气候模式仍然是当今和未来很长时期内短期气候预测的重要工具, 但是受分辨率较低、初始条件不确定、物理过程不完善、气候现象本身的可预报性等多种因素限制, 气候模式对东亚气候的预测存在明显误差及较大不确定性 (Vannitsem and Toth, 2002; Wen et al., 2012)。在大气—海洋—陆地—海冰—生物组成的极其复杂的气候系统模式中, 不同预报量的模式误差及不确定性是由模式系统哪些动力过程或物理过程处理不当造成的, 需要对模式做深入的诊断研究, 然后进一步有针对性地改进模式, 以此来提高气候预测技巧。

(2) 在预测信号的使用中, 除 ENSO 信号外, 还需在业务中引入其他信号的可能影响。龚强等 (2005) 则指出 El Niño 事件与东北区夏季风异常无直接联系, 故与东北夏季降水关系不密切。Wu et al. (2003) 研究也表明, 1951~2010 年期间,

ENSO 与东北夏季平均降水的关系不显著。本文也分析发现, ENSO 与东北夏季降水的年际关系不稳定, 因此需要考虑其他信号的可能影响。例如沈柏竹和廉毅(2004)研究指出东北夏季降水可能和青藏高原冬春季的积雪有关; 武炳义等(2008)研究发现, 当夏季北极大气偶极子异常处于正位相时, 对应北极极涡中心位置在北极的西部, 导致东北夏季降水增多; Chang et al. (2013)发现印度洋的年代际增暖有利于东北夏季降水增多; Gao et al. (2014)研究指出东北夏季降水与前期春季黄淮地区的降水及热带印度洋 SST 有密切的联系; Han et al. (2018)研究表明, 20 世纪 90 年代末, 早春热带印度洋 SST 对东北初夏降水的影响在增强; Wu et al. (2013)研究表明, 春季北极海冰密度减小(增大)时对应东北夏季降水偏多(偏少)。此外还需要考虑冬春季南半球越赤道气流、马斯克林高压、澳大利亚高压、南半球环状模和南极涛动等大尺度环流系统的异常变化及其对东北夏季降水的影响(施能和朱乾根, 1995; 范可, 2006; Feng et al., 2010)、及夏季东亚副热带西风急流(张庆云等, 2018)等同期信号的预测和应用。

(3) 需要重点考虑初夏东北冷涡、盛夏东亚夏季风强度和北上台风的影响。廉毅等(2003)研究发现东亚夏季风在东北地区建立的平均日期为 7 月第 5 候, 累积平均影响候数为 3.6 候。夏季风在东北建立前和建立后, 东北降水受不同环流系统的影响。初夏主要受东北冷涡活动的影响, 初夏冷涡活动频繁年东北降水偏多(何金海等, 2006a, 2006b; Zhao et al., 2015; 刘刚等, 2017); 盛夏降水异常主要受到对流层高层东亚副热带西风急流北移以及低层的西太副高西伸北进的影响, 随着西太副高西北侧东南风异常的加强, 向北输送到东北的水汽显著增多, 导致东北降水偏多(沈柏竹等, 2011; 丁婷和陈丽娟, 2015; Zhao et al., 2018)。何金海等(2006b)研究表明前期北半球环状模和中国近海 SST 的异常可以作为夏季东北冷涡异常的一个前兆信号。但东北冷涡的形成机理复杂, 目前对东北冷涡的年际变率仍缺少有效的预报方法。此外, 北上台风对东北地区降水也有较大的影响(任丽等, 2018)。因此, 需要加强对初夏东北冷涡、盛夏东亚夏季风强度和北上台风的诊断预测。

(4) 气候系统的变化往往是多个时间尺度相互叠加的结果, 不同时间尺度异常相联系的环流系

统和外强迫信号存在明显差异, 且有时候可能相互作用。东北夏季降水的年际和年代际变率要比南方明显的多。龚强等(2005)研究了东北夏季降水的年代际、年际构成及成因, 发现东北夏季降水异常构成中年代际、年际变化相对均衡, 在年代际、年际尺度上, 东亚夏季风增强(减弱), 则东北降水偏多(偏少)。东北夏季降水量自 20 世纪 60 年代以来呈减少趋势, 80 年代初开始显著增加, 20 世纪末至今又呈明显的减少趋势, 其中太平洋年代际振荡对东北夏季降水及主要影响环流系统的年代际变化有重要的调制作用(丁婷等, 2015)。若能从年际和年代际两个主要的时间尺度来研究东北夏季降水, 不仅可以客观地揭露不同时间尺度降水异常的特征和成因等科学问题, 合理揭示不同时间尺度前期的预测信号, 还可以进行更加精细化的预测和服务。Guo et al. (2012)对华北盛夏降水开展了时间尺度分离的研究, 指出了分离尺度的必要性, 并发现分离时间尺度的预测模型可以较好的提高预测技巧。但目前对东北夏季降水的时间尺度分离和预测建模, 鲜有研究。因此, 针对东北初夏、盛夏降水的不同时间尺度, 分别探索影响其变化的主要气候系统, 认识不同时间尺度对应的旱涝影响过程和机理, 并进行物理统计预测模型构建, 将有助于提高东北夏季降水的预测水平。

(5) 预测方法方面, 需要将近年来发展的一些新的预测方法应用到东北夏季降水预测中。Fan et al. (2009)提出了年际增量方法, 将传统的距平预测对象改为年际增量, 基于气候变量的年际增量规律建立预测模型, 优点是不需考虑年代际变化的影响(Fan et al., 2012; Tian and Fan, 2015)。Zhu (2011)利用年际增量方法, 结合春季欧亚西北部的平均土壤湿度和我国东北地区 500 hPa 位势高度两个预报因子建立了东北地区夏季降水的季节预报模型。熊开国等(2012)基于国家气候中心季节预报模式预报结果, 提出了客观量化的最优多因子动态配置汛期降水相似—动力预测新方法, 对东北夏季降水预报试验表明此方法有一定预报技巧。此外, 近年来降尺度方法在东亚区域气候预测中得到了广泛地应用, 例如: Ma et al. (2015)发展了利用区域模式结果的东亚气候动力降尺度预测方法; 陈丽娟等(2017)利用 BCC_CSM1.1m 模式预测技巧较高且对黄淮地区夏季降水的影响有物理含义的环流异常作为预测因子, 改进了黄淮地区夏季降

水的预测技巧; 孙建奇等(2018)针对东亚冬季气候提出一种新的高效的统计与动力相结合的预测方法。若这些新的预测信号和预测方法能够在东北夏季降水中得到合理利用, 也将有助于提高东北夏季降水的预测水平。

参考文献 (References)

- 白人海. 2001. 大西洋海表温度异常与中国东北地区夏季降水的关系 [J]. 海洋通报, 20(1): 23–29. Bai Renhai. 2001. Relations between the anomaly of sea surface temperature in the Atlantic and the precipitation in summer over Northeast China [J]. Marine Science Bulletin (in Chinese), 20(1): 23–29. doi:10.3969/j.issn.1001-6392.2001.01.004
- Chang E C, Yeh S W, Hong S Y, et al. 2013. Sensitivity of summer precipitation to tropical sea surface temperatures over East Asia in the GRIMs GMP [J]. Geophys. Res. Lett., 40(9): 1824–1831. doi:10.1002/grl.50389
- 陈丽娟, 张培群, 赵振国. 2005. 松嫩辽流域夏季面雨量预测因子探讨 [J]. 应用气象学报, 16(5): 663–669. Chen Lijuan, Zhang Peiqun, Zhao Zhenguo. 2005. An approach to a prognostic factor of basin rainfall in summer over the Songhuajiang-Nenjiang-Liaohe valleys [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 16(5): 663–669. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.05.013
- 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 Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 24(5): 521–532. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.002
- 陈丽娟, 顾薇, 丁婷, 等. 2016. 2015 年汛期气候预测先兆信号的综合分析 [J]. 气象, 42(4): 496–506. Chen Lijuan, Gu Wei, Ding Ting, et al. 2016. Overview of the precursory signals of seasonal climate prediction in summer 2015 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 42(4): 496–506. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.04.014
- 陈丽娟, 顾伟宗, 伯忠凯, 等. 2017. 黄淮地区夏季降水的统计降尺度预测 [J]. 应用气象学报, 28(2): 129–141. Chen Lijuan, Gu Weizong, Bo Zhongkai, et al. 2017. The statistical downscaling method of summer rainfall prediction over the Huang-Huai valley [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 28(2): 129–141. doi:10.11898/1001-7313.20170201
- 陈丽娟, 顾薇, 龚振淞, 等. 2019. 影响 2018 年汛期气候的先兆信号及预测效果评估 [J]. 气象, 45(4): 553–564. Chen Lijuan, Gu Wei, Gu Zhensong, et al. 2019. Precursory signals of the 2018 summer climate in China and evaluation of real-time prediction [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(4): 553–564. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.04.010
- 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
- 丁一汇. 2011. 季节气候预测的进展和前景 [J]. 气象科技进展, 1(3): 14–27. Ding Yihui. 2011. Progress and prospects of seasonal climate prediction [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 1(3): 14–27.
- 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测 [J]. 大气科学, 37(2): 253–280. Ding Yihui, Sun Ying, Liu Yunyun, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(2): 253–280. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12302
- 丁婷, 陈丽娟. 2015. 东北地区夏季旱涝的环流型及动力气候模式解释应用 [J]. 高原气象, 34(4): 1119–1130. Ding Ting, Chen Lijuan. 2015. Circulation pattern for summer precipitation in Northeast China and application of dynamical climate model information [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(4): 1119–1130. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00101
- 丁婷, 陈丽娟, 崔大海. 2015. 东北夏季降水的年代际特征及环流变化 [J]. 高原气象, 34(1): 220–229. Ding Ting, Chen Lijuan, Cui Dahai. 2015. Decadal variations of summer precipitation in Northeast China and the associated circulation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(1): 220–229. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00155
- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49(3): 672–679. Fan Ke. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49(3): 672–679. doi:10.3321/j.issn.0001-5733.2006.03.009
- Fan K, Lin M J, Gao Y Z. 2009. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach [J]. Sci. China Ser. D: Earth Sci., 52(4): 532–539. doi:10.1007/s11430-009-0040-0
- Fan K, Liu Y, Chen H P. 2012. Improving the prediction of the East Asian summer monsoon: New approaches [J]. Wea. Forecasting, 27(4): 1017–1030. doi:10.1175/WAF-D-11-00092.1
- 封国林, 赵俊虎, 杨杰, 等. 2015. 中国汛期降水动力—统计预测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 330pp. Feng Guolin, Zhao Junhu, Yang Jie, et al. 2015. The Study on Dynamical and Statistical Prediction on Summer Precipitation over China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 330pp.
- Feng J, Li J P, Li Y. 2010. Is there a relationship between the SAM and southwest western Australian winter rainfall? [J]. J. Climate, 23(22): 6082–6089. doi:10.1175/2010JCLI3667.1
- 冯新, 王新, 王元. 2006. 东北地区汛期降水与全球大洋海温异常关系的 SVD 分析 [J]. 热带气象学报, 22(4): 367–373. Feng Xin, Wang Xin, Wang Yuan. 2006. Anomalies of the Northeast China floods season precipitation and SVD analysis with SSTA in world oceans [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 22(4): 367–373. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.04.008
- Gao Z T, Hu Z Z, Zhu J S, et al. 2014. Variability of summer rainfall in Northeast China and its connection with spring rainfall variability in the Huang-Huai region and Indian Ocean SST [J]. J. Climate, 27(18): 7086–7101. doi:10.1175/JCLI-D-14-00217.1
- 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 Hui, Yuan Yuan, Hong Jieli, et al. 2017. Overview of climate prediction of the summer

- 2016 and the precursory signals [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 43(4): 486–494. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.011
- 龚强, 王盘兴, 汪宏宇, 等. 2005. 东北夏季降水异常的年代际、年际构成及成因分析 [J]. *南京气象学院学报*, 28(2): 233–240. Gong Qiang, Wang Panxing, Wang Hongyu, et al. 2005. Constitutes and formation cause of Inter-decadal and inter-annual variations of summer rainfall anomalies in Northeast China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28(2): 233–240. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.02.012
- 顾伯辉, 郑志海, 封国林, 等. 2017. 季节预测模式对东亚夏季环流的预测能力及其对热带海洋的响应分析 [J]. *大气科学*, 41(1): 91–105. Gu Bohui, Zheng Zhihai, Feng Guolin, et al. 2017. The capacity of seasonal forecast models for the forecast of the East Asian summer circulation and its response to tropical SST anomaly [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(1): 91–105. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1603.15154
- Guo Y, Li J P, Li Y. 2012. A time-scale decomposition approach to statistically downscale summer rainfall over North China [J]. *J. Climate*, 25(2): 572–591. doi:10.1175/JCLI-D-11-00014.1
- Han T T, He S P, Wang H J, et al. 2018. Enhanced influence of early-spring tropical Indian Ocean SST on the following early-summer precipitation over Northeast China [J]. *Climate Dyn.*, 51(11-12): 4065–4076. doi:10.1007/s00382-017-3669-y
- 何金海, 吴志伟, 祁莉, 等. 2006a. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析 [J]. *气象与环境学报*, 22(1): 1–5. He Jinhai, Wu Zhiwei, Qi Li, et al. 2006a. Relationships among the Northern Hemisphere annual mode, the northeast cold vortex and the summer rainfall in Northeast China [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 22(1): 1–5. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2006.01.001
- 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 2006b. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响 [J]. *科学通报*, 51(23): 2803–2809. He Jinhai, Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, et al. 2007. “Climate effect” of the Northeast cold vortex and its influences on Meiyu [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(5): 671–679. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2006.23.016
- Huang R H. 1992. The East Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 6(1): 25–37.
- 贾小龙, 王谦谦. 2006. 东北地区汛期降水异常的大气环流特征分析 [J]. *高原气象*, 25(2): 309–318. Jia Xiaolong, Wang Qianqian. 2006. Analyses on general circulation character of precipitation anomaly in Northeast China flood season [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25(2): 309–318. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.02.018
- 金祖辉, 陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. *大气科学*, 23(6): 663–672. Jin Zuhui, Tao Shiyang. 1999. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23(6): 663–672. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.06.03
- 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. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- Kim H M, Webster P J, Curry J A, et al. 2012. Asian summer monsoon prediction in ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective seasonal forecasts [J]. *Climate Dyn.*, 39(12): 2975–2991. doi:10.1007/s00382-012-1470-5
- 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 Weijing. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 25(4): 20–25. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.1999.04.004
- Li W H, Li L F, Ting M F, et al. 2012. Intensification of Northern Hemisphere subtropical highs in a warming climate [J]. *Nat. Geosci.*, 5(11): 830–834. doi:10.1038/ngeo1590
- 廉毅, 沈柏竹, 高枫亭, 等. 2003. 东亚夏季风在中国东北区建立的标准、日期及其主要特征分析 [J]. *气象学报*, 61(5): 548–558. Lian Yi, Shen Baizhu, Gao Zongting, et al. 2003. The study of the on-set criterion and the date of East Asian summer monsoon in Northeast China and its main characteristic analysis [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 61(5): 548–558. doi:10.11676/qxb2003.055
- 刘宗秀, 廉毅, 沈柏竹, 等. 2003. 北太平洋涛动区 500 hPa 高度场季节变化特征及其对中国东北区降水的影响 [J]. *应用气象学报*, 14(5): 553–561. Liu Zongxiu, Lian Yi, Shen Baizhu, et al. 2003. Seasonal variation features of 500 hPa height in North Pacific oscillation region and its effect on precipitation in Northeast China [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 14(5): 553–561. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.05.005
- 刘颖, 范可, 张颖. 2013. 基于 CFS 模式的中国站点夏季降水统计降尺度预测 [J]. *大气科学*, 37(6): 1287–1296. Liu Ying, Fan Ke, Zhang Ying. 2013. A statistical downscaling model for summer rainfall over China stations based on the climate forecast system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(6): 1287–1296. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12143
- 刘刚, 封国林, 秦玉琳, 等. 2017. 初夏东北地区冷涡降水“累积效应” [J]. *大气科学*, 41(1): 202–212. Liu Gang, Feng Guolin, Qin Yulin, et al. 2017. “Cumulative Effect” of cold vortex precipitation in Northeast China in early summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(1): 202–212. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15231
- Ma J H, Wang H J, Fan K. 2015. Dynamic downscaling of summer precipitation prediction over China in 1998 using WRF and CCSM4 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(5): 577–584. doi:10.1007/s00376-014-4143-y
- 任丽, 赵玲, 马国忠, 等. 2018. 台风残涡北上引发东北地区北部大暴雨的中尺度特征分析 [J]. *高原气象*, 37(6): 1671–1683. Ren Li, Zhao Ling, Ma Guozhong, et al. 2018. Analysis of mesoscale feature of a heavy rainstorm caused by typhoon residual vortex in the northern part of Northeast China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 37(6): 1671–1683. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00036
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. *J. Climate*, 15(13): 1609–1625. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2

- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, et al. 2006. The NCEP climate forecast system [J]. *J. Climate*, 19(15): 3483–3517. doi:10.1175/JCLI3812.1
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2014. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. *J. Climate*, 27(6): 2185–2208. doi:10.1175/JCLI-D-12-00823.1
- 沈柏竹, 廉毅. 2004. 青藏高原积雪与东北地区夏季冷涡雨季降水关系的初探 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 34: 112–118.
- Shen Baizhu, Lian Yi. 2004. The preliminary analysis on the relationship between snow cover over the Tibetan Plateau and summer cold vortex precipitation in Northeast China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34: 112–118.
- 沈柏竹, 林中达, 陆日宇, 等. 2011. 影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流特征分析 [J]. *中国科学: 地球科学*, 54(7): 1095–1104.
- Shen Baizhu, Lin Zhongda, Lu Riyu, et al. 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early- and late-summer precipitation in Northeast China [J]. *Sci China Earth Sci (in Chinese)*, 54(7): 1095–1104. doi:10.1007/s11430-011-4173-6
- 施能, 朱乾根. 1995. 南半球澳大利亚、马斯克林高压气候特征及其对我国东部夏季降水的影响 [J]. *气象科学*, 15(2): 20–27.
- Shi Neng, Zhu Qian'gen. 1995. The climatic features of the Australian high and the Mascarene high in Southern Hemisphere and their influence on summer precipitation in eastern China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 15(2): 20–27.
- 孙建奇, 马洁华, 陈活泼, 等. 2018. 降尺度方法在东亚气候预测中的应用 [J]. *大气科学*, 42(4): 806–822.
- Sun Jianqi, Ma Jiehua, Chen Huopo, et al. 2018. Application of downscaling methods in the East Asian climate prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(4): 806–822. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17266
- 孙力, 安刚. 2003. 北太平洋海温异常对中国东北地区旱涝的影响 [J]. *气象学报*, 61(3): 346–363.
- Sun Li, An Gang. 2003. The effect of north Pacific sea surface temperature anomaly on the summer precipitation in Northeast China [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 61(3): 346–363. doi:10.11676/qxb2003.033
- 孙力, 安刚, 丁立, 等. 2000. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析 [J]. *气象学报*, 58(1): 70–82.
- Sun Li, An Gang, Ding Li, et al. 2000. A climatic analysis of summer precipitation features and anomaly in Northeast China [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 58(1): 70–82. doi:10.11676/qxb2000.007
- 孙力, 安刚, 丁立. 2002a. 中国东北地区夏季旱涝的分析研究 [J]. *地理科学*, 22(3): 311–316.
- Sun Li, An Gang, Ding Li. 2002a. The characteristics of summer drought and flood in northeast area of China [J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 22(3): 311–316. doi:10.3969/j.issn.1000-0690.2002.03.010
- 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 2002b. 中国东北地区夏季旱涝的大气环流异常特征 [J]. *气候与环境研究*, 7(1): 102–113.
- Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2002b. The unusual characteristics of general circulation in drought and waterlogging years of Northeast China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7(1): 102–113. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.01.010
- 孙力, 安刚, 唐晓玲. 2003. 东北亚地区夏季 850 hPa 南风异常与东北旱涝的关系 [J]. *大气科学*, 27(3): 425–434.
- Sun Li, An Gang, Tang Xiaoling. 2003. Relationship between the northeast Asian summer south wind anomaly and the precipitation in Northeast China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27(3): 425–434. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.12
- Sun L, Shen B Z, Sui B, et al. 2017. The influences of East Asian monsoon on summer precipitation in Northeast China [J]. *Climate Dyn.*, 48(5-6): 1647–1659. doi:10.1007/s00382-016-3165-9
- Tian B Q, Fan K. 2015. A skillful prediction model for winter NAO based on Atlantic sea surface temperature and Eurasian snow cover [J]. *Wea. Forecasting*, 30(1): 197–205. doi:10.1175/WAF-D-14-00100.1
- Vannitsem S, Toth Z. 2002. Short-term dynamics of model errors [J]. *J. Atmos. Sci.*, 59(17): 2594–2604. doi:10.1175/1520-0469(2002)059<2594:STDOME>2.0.CO;2
- 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 Yongguang, Zheng Zhihai. 2018. Precursory signal analysis of summer rainfall prediction in China in 2017 [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 44(4): 565–571. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.04.010
- 汪秀清, 陈长胜, 张智勇, 等. 2006. 东北地区夏季旱涝的区域特征及水汽异常输送 [J]. *自然灾害学报*, 15(4): 53–58.
- Wang Xiuqing, Chen Changsheng, Zhang Zhiyong, et al. 2006. Regional features of summer drought and flood in Northeast China and corresponding abnormal water-vapor transportation [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 15(4): 53–58. doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2006.04.010
- Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. 2009. Advance and prospectus of seasonal prediction: Assessment of the APCC/CLIPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction (1980–2004) [J]. *Climate Dyn.*, 33(1): 93–117. doi:10.1007/s00382-008-0460-0
- Weaver S J, Wang W Q, Chen M Y, et al. 2011. Representation of MJO variability in the NCEP climate forecast system [J]. *J. Climate*, 24(17): 4676–4694. doi:10.1175/2011JCLI14188.1
- Wen M, Yang S, Vintzileos A, et al. 2012. Impacts of model resolutions and initial conditions on predictions of the Asian summer monsoon by the NCEP climate forecast system [J]. *Wea. Forecasting*, 27(3): 629–646. doi:10.1175/WAF-D-11-00128.1
- WMO. 2006. Standardised Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF): New attachment II-8 to the manual on the GDPFS (WMO-No.485), Volume I[R]. [https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/documents/485_Vol_I_en.pdf]
- 武炳义, 张人禾, D'Arrigo R. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水 [J]. *科学通报*, 53(14): 2230–2237.
- Wu Bingyi, Zhang Renhe, D'Arrigo R. 2008. Arctic dipole anomaly and summer rainfall in Northeast China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 53(14): 2230–2237.
- Wu B Y, Zhang R H, D'Arrigo R, et al. 2013. On the relationship between winter sea ice and summer atmospheric circulation over Eurasia [J]. *J. Climate*, 26(15): 5523–5536. doi:10.1175/JCLI-D-12-00524.1
- Wu R G, Hu Z Z, Kirtman B P. 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia [J]. *J. Climate*, 16(22): 3742–3758. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3742:EOERAI>2.0.CO;2
- 吴统文, 宋连春, 刘向文, 等. 2013. 国家气候中心短期气候预测模式

- 系统业务化进展 [J]. *应用气象学报*, 24(5): 533–543. Wu Tongwen, Song Lianchun, Liu Xiangwen, et al. 2013. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of China National Climate Center [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 24(5): 533–543. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.003
- 吴捷, 任宏利, 张帅, 等. 2017. BCC 二代气候系统模式的季节预测评估和可预报性分析 [J]. *大气科学*, 41(6): 1300–1315. Wu Jie, Ren Hongli, Zhang Shuai, et al. 2017. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(6): 1300–1315. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1703.16256
- 肖子牛, 晏红明, 李崇银. 2002. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系 [J]. *热带气象学报*, 18(4): 335–344. Xiao Ziniu, Yan Hongming, Li Chongyin. 2002. The relationship between Indian Ocean SSTA dipole index and the precipitation and temperature over China [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 18(4): 335–344. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2002.04.006
- 谢作威, 布和朝鲁. 2012. 东北冷涡低频活动特征及背景环流 [J]. *气象学报*, 70(4): 704–716. Xie Zuwei, Cholaw B. 2012. Low frequency characteristics of Northeast China cold vortex and its background circulation pattern [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70(4): 704–716. doi:10.11676/qxxb2012.057
- 熊开国, 封国林, 黄建平, 等. 2012. 最优多因子动态配置的东北汛期降水相似动力预报试验 [J]. *气象学报*, 70(2): 213–221. Xiong Kaiguo, Feng Guolin, Huang Jianping, et al. 2012. Analogue-dynamical prediction of monsoon precipitation in Northeast China based on dynamic and optimal configuration of multiple predictors [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70(2): 213–221. doi:10.11676/qxxb2012.021
- 晏红明, 李崇银, 周文. 2009. 南印度洋副热带偶极模在 ENSO 事件中的作用 [J]. *地球物理学报*, 52(10): 2436–2449. Yan Hongming, Li Chongyin, Zhou Wen. 2009. Influence of subtropical dipole pattern in southern Indian Ocean on ENSO event [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 52(10): 2436–2449. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.003
- 姚秀萍, 董敏. 2000. 东北三江流域夏季旱涝基本特征分析 [J]. *应用气象学报*, 11(3): 297–303. Yao Xiuping, Dong Min. 2000. Research on the features of summer rainfall in Northeast China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 11(3): 297–303. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2000.03.006
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2001. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流条件 [J]. *大气科学*, 25(4): 567–576. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2001. A study of excessively heavy rainfall in the Songhuajiang-Nenjiang River valley in 1998 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25(4): 567–576. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.04.13
- 张庆云, 宣守丽, 孙淑清. 2018. 夏季东亚高空副热带西风急流季节内异常的环流特征及前兆信号 [J]. *大气科学*, 42(4): 935–950. Zhang Qingyun, Xuan Shouli, Sun Shuqing. 2018. Anomalous circulation characteristics of intraseasonal variation of East Asian subtropical westerly jet in summer and precursory signals [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(4): 935–950. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.18107
- 赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布 [J]. *气象学报*, 70(5): 1021–1031. Zhao Junhu, Feng Guolin, Yang Jie, et al. 2012. Analysis of the distribution of the large-scale drought/flood of summer in China under different types of the western Pacific subtropical high [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70(5): 1021–1031. doi:10.11676/qxxb2012.085
- Zhao J H, Feng G L. 2014. Reconstruction of conceptual prediction model for the three rainfall patterns in the summer of eastern China under global warming [J]. *Science China Earth Sciences*, 57(12): 3047–3061. doi:10.1007/s11430-014-4930-4
- Zhao J H, Yang L, Hou W, et al. 2015. Extra-seasonal prediction of summer 500-hPa height field in the area of cold vortices over East Asia with a dynamical-statistical method [J]. *Chinese Phys. B*, 24(5): 059202. doi:10.1088/1674-1056/24/5/059202
- 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 Junhu, Yang Liu, Zeng Yuxing, et al. 2016. Analysis of atmospheric circulation and prediction signals for summer rainfall patterns in southern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(6): 1182–1198. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1601.15249
- Zhao J H, Zhou J, Yang L, et al. 2018. Inter-annual and inter-decadal variability of early- and late-summer precipitation over Northeast China and their background circulation [J]. *Int. J. Climatol.*, 38(6): 2880–2888. doi:10.1002/joc.5470
- Zhu Y L. 2011. A seasonal prediction model for the summer rainfall in Northeast China using the year-to-year increment approach [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4(3): 146–150. doi:10.1080/16742834.2011.11446920
- 宗海锋, 陈烈庭, 张庆云. 2010. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征 [J]. *大气科学*, 34(1): 184–192. Zong Haifeng, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2010. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34(1): 184–192. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.17