

柯宗建,王永光,龚振淞. 2014. 2013 年汛期气候预测的先兆信号及其应用. 气象, 40(4):502-509.

2013 年汛期气候预测的先兆信号及其应用^{* 1}

柯宗建 王永光 龚振淞

国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

提 要: 本文系统回顾了 2013 年汛期气候预测的主要先兆信号。其信号特征是:2013 年前期赤道中东太平洋呈正常略偏冷的状态、冬季北极海冰异常偏少、青藏高原积雪偏少,这些特征对后期东亚夏季风有明显影响。通过对前期先兆信号的分析,国家气候中心比较准确地预测了东亚夏季风偏强、我国夏季主要多雨带偏北的特征,以及南海夏季风爆发偏早、长江中下游入梅偏晚且雨量少雨期短、华北雨季提前雨量偏多的季节内过程演变趋势。最后对汛期气候预测存在的不足进行了分析和讨论。

关键词: 汛期, 先兆信号, 东亚夏季风, 多雨带

中图分类号: P461

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 04. 013

Review of the Precursor and Its Application in Summer
Climate Prediction in 2013

KE Zongjian WANG Yongguang GONG Zhensong

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

Abstract: The possible precursors of the summer climate in 2013 are reviewed which are that in the winter of 2012/2013, ENSO-neutral with slightly cold condition persists in the central and eastern tropical Pacific, the Arctic sea ice area is significantly less, and the snow cover over the Tibetan Plateau is less than normal. These features have an important impact on the following East Asia summer monsoon. By diagnosing and analyzing the possible influence of these precursors, the features of stronger East Asian summer monsoon and main rainfall belt locating the northern China are successfully captured in the prediction issued by the National Climate Centre of CMA in late March 2013. In addition, the onset date of the South China Sea summer monsoon is earlier, the Meiyu along the middle-low reaches of Yangtze River Valley is less with later onset and short rainfall period, and the rainy season in North China is earlier and more than normal. These intra-seasonal features are all successfully predicted. Finally, the imperfection in the summer climate prediction is discussed.

Key words: flood season, precursor, East Asian summer monsoon, rainfall belt

引 言

短期气候预测可为国家防灾减灾提供重要的参考依据。每年的汛期气候趋势预测均是气候预测服

务的重中之重。我国自首次发布短期气候预测产品已走过半个多世纪,是国际上开展此项业务最早的国家之一(陈兴芳,2000)。随着气候研究领域的不断拓展以及研究的深入,气象工作者对海洋大气的演变规律认识不断加深,尤其是对影响我国夏季气

^{*} 国家重大科学研究计划(2012CB955902)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306024)、国家自然科学基金(41005051 和 41105070)及国家科技支撑计划项目(2009BAC51B05)共同资助
2014 年 2 月 27 日收稿; 2014 年 3 月 25 日收修定稿
第一作者:柯宗建,主要从事气候诊断与预测研究. Email: kezj@cma. gov. cn

候的主要系统有了更好的了解。但是,气候的演变具有不同时间尺度的特征,受不同圈层相互作用的影响,区域气候的年际变化异常复杂。这使得短期气候预测仍存在较大的不确定,目前仍是世界性的难题。国际上短期气候预测更多依赖于动力模式,而我国短期气候预测已经形成基于动力模式的产品释用并结合下垫面强迫影响诊断分析的业务流程,这种动力—统计相结合的预报思路在业务中取得了较好的效果。而针对汛期气候异常开展的总结分析工作也加深了我们对汛期气候主要影响因子及其影响机理的认识(张培群等,2009;艾婉秀等,2010;贾小龙等,2011;王遵娅等,2012;陈丽娟等,2013;王艳姣等,2013)。

本文在回顾 2013 年汛期气候预测效果的基础上,归纳了影响当年汛期气候异常的主要先兆信号,分析了这些先兆信号与汛期气候在不同时间尺度上的联系,并对汛期气候预测的不足之处及其可能的原因进行了讨论。

1 资 料

本文所用到的资料有中国气象局国家气候中心整编的 160 站逐月和 723 站逐日降水资料。大气环流资料为 NCEP/NCAR 逐月再分析资料,水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al, 1996)。海温、积雪和极冰资料来源于国家气候中心气候监测业务采用的资料。海温资料为美国 NOAA 提供的线性最优插值全球海温数据,分辨率是 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (Reynolds et al, 2002)。积雪资料为国家气候中心业务用 1973 年以来的北半球逐月积雪日数格点资料(郭艳君等,2004)和 1998 年以来的 IMS 资料(Helfrich, 2007)气候平均值采用 1998—2010 年平均。极冰监测原始资料取自 OI. v2 Monthly SST Analysis (Reynolds et al, 2002),气候平均值采用 1982—2010 年平均。如无特别说明,其他变量的气候平均值均为 1981—2010 年平均。

2 2013 年夏季气候趋势预测评估

2.1 夏季降水预测及效果

2013 年 3 月底,国家气候中心预测“夏季我国东部呈两条多雨带分布,北方多雨带强于南方,主要

多雨带位于东北地区南部、华北大部、黄淮东部”(图 1a)。夏季降水实况表明主要多雨带明显偏北,位于西北地区东部、华北到东北地区,另一个多雨带位于华南地区。对我国东部多雨带的预测与实况比较一致,对夏季主要多雨带偏北的特征把握准确,但对北方多雨带的范围和强度估计不足,尤其是内蒙古东北部、东北中北部降水明显偏多估计不足。

2013 年 5 月底,国家气候中心根据 3 月以来气候系统的演变特征以及多种动力、统计预测结果对夏季降水的预测意见进行了订正(图 1b),该订正将北方主要多雨带北扩,扩大了北方多雨带的范围,与实况(图 1c)特征更为接近。体现了临近的大气异常变化信息对季节预测的重要作用,也体现了滚动订正预测对气候预测服务的重要性。但是订正预报

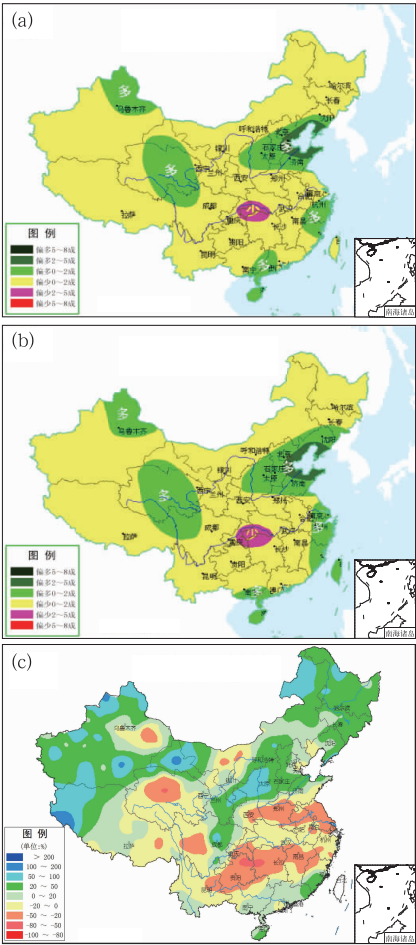


图 1 2013 年夏季降水量距平百分率预报
(a) 3 月底发布, (b) 5 月底发布, (c) 实况
Fig. 1 The predicted rainfall anomaly percentages in summer 2013 issued in late March (a), late May (b) and the observation (c)

仍没有把握住内蒙古东北部、东北中北部降水明显偏多的特征。

2.2 夏季气温预测及效果

2013 年 3 月底,国家气候中心预测“全国大部地区气温接近常年同期或偏高”与实况基本一致(图 2),对华南南部气温较常年同期偏低的预测与实况一致,此外,预测“西南地区东北部、江南西北部气温明显偏高,西南地区东部、江南西部、江汉西部高温日数较常年同期偏多”与实况一致。虽然较好地预测夏季气温偏高的特征,但是对黄淮、江淮、江南北部等地气温偏高的幅度估计不足。长江下游地区出现持续高温酷暑天气,其影响较预测偏重。

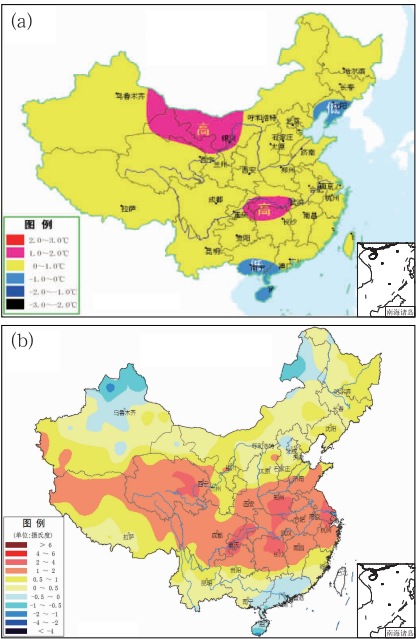


图 2 2013 年 3 月底发布的夏季气温距平预报(a)和实况(b)
Fig. 2 The predicted air temperature anomaly in summer 2013 issued in late March (a) and the observation (b)

2.3 热带气旋预测效果

2013 年 3 月底对热带气旋登陆个数偏多、初台时间偏早、登陆路径偏西的预测比较成功,但对生成个数偏多估计不足。

2.4 汛期主要季节内过程预测及效果

汛期季节进程演变是汛期预测服务的重点之

一,对汛期主要气候事件的预测越发体现出其重要性,也为汛期防灾减灾服务提供很好的科学指导,国家气候中心不断加强汛期季节内主要气候事件的跟踪预测服务。2013 年 3 月底预测“南海夏季风爆发略偏早,东亚夏季风较常年略偏强”;5 月 7 日预测“南海夏季风将于 5 月第三候爆发,比常年偏早”;5 月 28 日预测“长江中下游梅雨在 6 月下旬前期开始,接近常年或略偏晚,梅雨期短,雨量少”;6 月 18 日预测“长江中下游地区将于 6 月 23 日入梅,较常年略偏晚”;6 月 27 日预测“华北雨季开始时间较常年偏早,雨量偏多,雨期长”。监测显示南海夏季风于 5 月第三候爆发;长江中下游地区于 6 月 23 日入梅,梅雨量偏少 59.4%;华北雨季于 7 月上旬开始,较常年(7 月中旬)偏早,雨季内华北地区平均降水量较常年偏多 68.9%;东亚夏季风指数(祝从文等, 2000)为 1.30,较常年(0.02)明显偏强(龚志强等, 2014),预测与实况基本一致。表明对汛期季节进程的演变特征及主要气候事件均有很好的把握,也为汛期预测服务提供了很好的参考依据。

3 汛期预测的主要先兆信号及其应用

汛期预测的重点在于主要多雨带的分布,而主要多雨带的位置与东亚夏季风的强弱密切相关。夏季风偏强有利于我国夏季主要多雨带偏北,而夏季风偏弱夏季主要多雨带偏南(Ding et al, 2009)。因此,预测夏季主要多雨带的位置首先考虑夏季风的可能趋势,通过对夏季风系统地把握进而预测我国夏季主要多雨带位置,而不同下垫面强迫信号对夏季风的可能影响是汛期预测的关注重点。

3.1 年代际信号

夏季降水具有明显的年代际特征。从 20 世纪 50 年代以来,我国夏季主要多雨带经历了从北到南又从南到北的演变(陈丽娟等,2013)。比较而言,20 世纪 60 年代多雨带最为偏北,位于华北到东北地区,而 90 年代多雨带偏南最明显,多雨带位于江南华南地区。自从 2003 年淮河流域发生几次明显的流域性洪涝以来,淮河流域是否出现洪涝一直是汛期预测关注的重点。通过对近几年夏季降水多雨带分布以及影响夏季降水主要系统的分析表明,淮河流域降水偏多的年代际特征已经明显发生变化,而这种变化主要从 2009 年开始(图 3)。

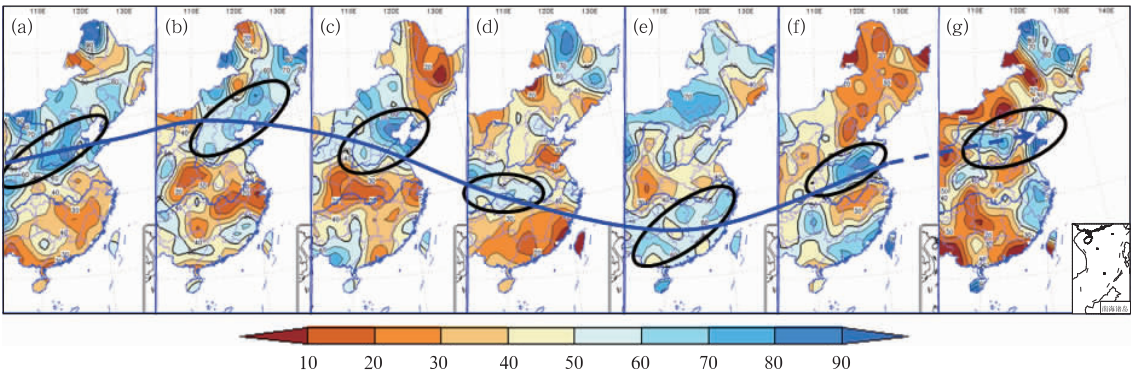


图 3 夏季降水正距平频次合成

(a) 1951—1960, (b) 1961—1970, (c) 1971—1980, (d) 1981—1990,
(e) 1991—2000, (f) 2001—2008, (g) 2009—2012
Fig. 3 Composite positive anomaly frequency of summer precipitation
(a) 1951—1960, (b) 1961—1970, (c) 1971—1980, (d) 1981—1990,
(e) 1991—2000, (f) 2001—2008, (g) 2009—2012

夏季降水合成分析表明,2009 年以来淮河流域连续出现降水偏少的特征,而这些年份对应中东太平洋海温特征各异。2008/2009 年冬季海温处于中性状态;2009/2010 年冬季出现 El Nino 事件;2010/2011 和 2011/2012 年冬季出现 La Nina 事件。前期中东太平洋海温的异常对西太平洋副热带高压(简称副高)有重要的影响,中东太平洋海温的不同使得这些年份副高的特征也存在明显的差异。副高的强度及位置对我国夏季降水的影响非常显著。不同的副高特征下,近些年淮河流域降水较前期明显减弱是汛期预测的一个重要信号。

降水的年代际变化特征与下垫面强迫的年代际变化有关,太平洋年代际涛动(PDO)对 ENSO 具有明显的调制作用,它可以通过影响东亚夏季风的强弱进而影响东亚气候(朱益民等,2003)。PDO 位相和降水的年代际变化密切相关,PDO 冷位相的特征有利于东亚夏季风偏强,因此有利于夏季主要多雨带偏北。20 世纪末 PDO 转入冷位相以来,我国夏季主要多雨带发生了北移,而 2009 年以来夏季主要多雨带再次北移。此外,也有研究指出,北大西洋年代际振荡(AMO)有利于增强东亚夏季风(李双林等,2009)。

3.2 年际信号

季节气候的变率是不同时间尺度影响因子共同作用的结果。对于季节预测而言,除了考虑年代际信号的可能影响外,下垫面强迫信号的年际特征尤

为重要,是汛期预测的关键。影响我国汛期降水的因素众多,来自中国东、西、南、北、中 5 个方面的 5 大因素被认为是主要的影响系统,包括东面的海洋、西面的青藏高原、南面的季风、北面的阻塞高压以及中间的副高(陈兴芳等,2000)。这些系统与我国夏季降水关系密切,而且它们之间存在相互联系。除了这些主要影响系统,其他海区的海温、欧亚大陆积雪、北半球海冰的年际变化也是汛期降水预测中被考虑的重要因素。

(1) 海温

2012/2013 年冬季中东太平洋海温处于正常偏冷状态,国内外大多数动力模式预测 2013 年春季至夏季,Nino 区海温自东向西将逐渐上升,但仍将处于中性状态。中东太平洋海温异常会通过蒸发—风反馈机制影响西北太平洋的大气环流。秋冬季赤道中东太平洋海温异常偏暖,有利于在菲律宾附近激发低层风场反气旋(Wang et al, 2000)。反之,则有利于菲律宾附近低层出现气旋性风场异常。前冬赤道中东太平洋海温正常偏冷(图 4),但菲律宾附近 850 hPa 风场呈反气旋异常(图 5),副高较常年同期偏强。这说明冬季西北太平洋地区大气环流与赤道中东太平洋冷水特征并不匹配,因此,不能根据前冬赤道中东太平洋海温的状态简单预判夏季副高的特征,2013 年夏季副高可能与典型冷水位相影响下的特征不同。

印度洋海温的异常对副高的强度有明显的影 响。当印度洋海温偏高时,通过深对流的湿绝热适

应过程导致对流层气温上升,激发斜压性开尔文波东传,在西北太平洋产生东北风距平,副热带的辐散场抑制对流,这有利于菲律宾反气旋的维持(Xie et al, 2009)。前冬北印度洋海盆海温一致偏高(图4)对西太平洋大气环流有明显的影响,菲律宾附近低层风场维持反气旋异常。这个特征不利于后

期副高呈现偏弱的状态。根据前冬印度洋海温偏高、西太平洋副高偏强的特征预测2013年夏季副高强度略偏强、位置偏西。实况表明,2013年夏季副高强度指数距平为16.3,较常年同期(气候平均值为148.7)略偏强,西伸脊点距平为-8.0,较常年同期偏西(指数定义见刘芸芸等,2012)。

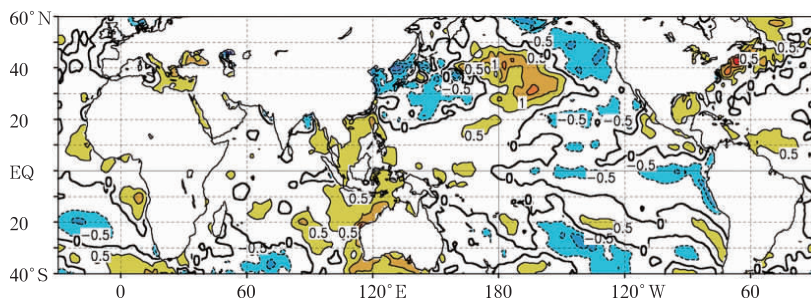


图4 2012/2013年冬季海温距平分布图

Fig. 4 Distribution of sea temperature anomalies in the 2012/2013 winter

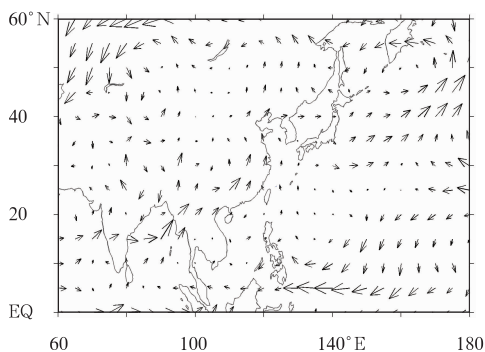


图5 2012/2013年冬季850 hPa风场距平

Fig. 5 The 850 hPa wind anomaly in the 2012/2013 winter

北大西洋区域海温受到大气的强迫作用,北大西洋涛动(NAO)正位相有利于北大西洋区域由南到北呈现“一十”的三极子型海温异常。而这种海温异常对大气环流产生重要的反馈作用(李建等,2007),特别是春—夏季北大西洋三极子海温异常对东亚夏季风的年际变化存在显著的影响(Wu et al, 2009; 左金清等,2012; Zuo et al, 2013)。2012/2013年冬季北大西洋三极子空间型态并不典型,其影响也存在较大的不确定性,因此其对夏季中高纬环流的可能影响没有做重要的参考。

(2) 积雪

不同区域的积雪异常对我国夏季气候的影响存在差异。青藏高原积雪改变了高原春夏季的陆面热状况,造成亚洲季风系统较大的年际变化。关于青

藏高原积雪对东亚气候的影响已经开展了大量的研究(陈烈庭,1979;张顺利等,2001;Wu et al, 2003)。高原积雪对夏季气候的影响研究仍存在一定程度的差异,但从高原的热力和动力异常角度分析其对我国夏季气候影响的主要机制得到较为广泛的认可(张顺利等,2001)。青藏高原冬春季积雪偏少,春夏季感热增强,高原垂直上升运动加强,使得高原对流层加热增强,导致高原对流层增暖,这使得高原同其南面海洋对流层热力对比增大,增强东亚夏季风。因此,前期青藏高原积雪明显偏少,高原与南面印度洋以及东侧太平洋的热力对比偏大,海陆热力差异明显,有利于东亚夏季风偏强。

前期冬季东北亚地区降雪明显偏多,研究表明,东北亚地区春季融雪异常会对我国夏季气候产生明显影响,通过在东亚地区激发经向“一十”异常波列,有利于副高偏北,东亚夏季风偏强(许立言等,2012)。

(3) 海冰

海冰的异常会对中高纬的大气环流造成影响,进而影响不同地区的气候。秋冬季喀拉海、巴伦支海海冰偏少时,北极增温,极地与欧亚中高纬之间的热梯度减弱,导致欧亚北部西风减弱,经向环流增强,有利于东亚冬季风偏强(Wu et al, 2011)。而喀拉海、巴伦支海海冰的多寡与后期春季白令海海冰呈明显的反相关关系(武炳义等,2004)。前冬喀拉海、巴伦支海海冰明显偏少,白令海海冰较常年同期

明显偏多(图 6),这些信号有利于后期春季白令海海冰偏多。春季白令海海冰异常会激发异常波列东传改变欧洲和西亚地区的土壤湿度,并通过陆气相互作用影响东亚的气候。一般春季白令海海冰偏多会导致东亚地区夏季对流层低层冷空气活动减弱,西南风偏强,东亚夏季风偏强(Zhao et al, 2004)。

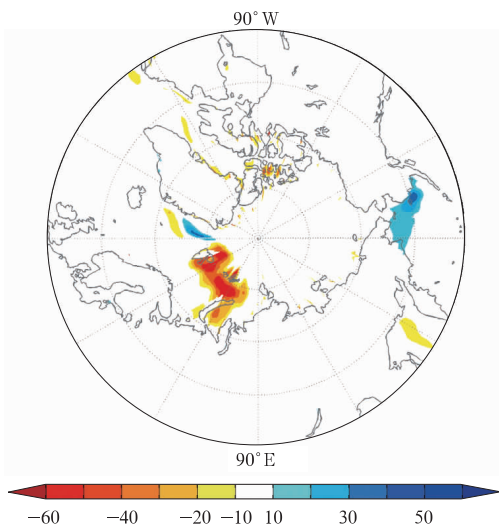


图 6 2012/2013 年冬季北半球海冰
密集度距平百分率

Fig. 6 The sea ice concentration percentages in
the Northern Hemisphere in the 2012/2013 winter

综合热带海洋、青藏高原积雪、北半球海冰等下垫面强迫特征及其可能的影响,预测 2013 年东亚夏季风强度偏强,西太平洋副高略偏强、偏西偏北(夏季副高偏北 0.5°),夏季主要多雨带偏北。

3.3 季节内尺度先兆信号

国家气候中心对汛期季节进程的预测主要从下垫面强迫的可能影响进行预测,并根据气候系统的演变对预测进行滚动订正。南海夏季风爆发的早晚是汛期季节进程的一个重要表征。ENSO 循环对南海夏季风爆发早晚有明显的影响,统计分析机理研究均表明,前冬发生 La Nina 事件有利于南海夏季风爆发偏早(Zhou et al, 2007)。菲律宾周围春季对流活动强弱对南海夏季风的爆发有重要影响,一般当春季西太平洋暖池处于偏暖状态,菲律宾附近对流活跃,南海季风爆发早(Huang et al, 2006; 黄荣辉等, 2008)。2013 年前期冬季中东太平洋海温呈弱冷水的特征,西太平洋海温偏高,菲律宾附近对

流活跃,热带太平洋海洋大气特征有利于南海夏季风爆发偏早。菲律宾附近对流偏强有利于季节推进呈跳跃式北进,长江流域夏季风降水偏弱,有利于 7 月初季风很快北推到黄河流域、华北和东北地区(黄荣辉等, 2005)。2013 年,季风季节北推阶段性特征明显,梅雨期短、雨量少,华北雨季提前且雨季偏强。其对季节内气候演变特征及主要气候事件的预测与实况基本一致。

3.4 汛期预测不足分析

虽然 2013 年对汛期主要多雨带以及季节进程的预测与实况比较一致,但仍存在一些不足,主要表现在对我国东北地区降水明显偏多估计不足。东北地区不同区域降水性质存在差异,东北地区南部和东部降水具有明显的季风降水性质,但东北地区西部和北部降水更多受冷涡的影响。东北地区降水一致性的模态分析表明,夏季贝加尔湖南侧高度场异常是影响东北地区降水的主要系统。当 500 hPa 高度距平场上贝加尔湖南侧出现明显的负异常,东北冷涡活跃,东北地区降水易偏多(图略)。此外,汛期预测虽然把握了夏季副高偏强偏北的主要特征,但是对盛夏副高稳定西伸估计不足。7 和 8 月副高分别较常年同期偏西 7 个和 16 个经度,副高逐日监测也清晰地表现了这种偏西的特征(图略)。副高稳定偏西导致西太平洋和南海地区的水汽被源源不断地输送到黄河以北地区,对东北地区尤其是东北东部地区的降水贡献很大,加剧了东北地区的降水异常。另一方面,盛夏副高的稳定西伸导致了长江中下游地区持续高温酷暑天气。副高的强度和位置与热带海洋的特征密切相关。前冬 El Nino 事件有利于夏季副高偏强、位置偏西。2013 年前期冬季中东太平洋海温呈弱冷水的状态,不利于夏季副高呈持续稳定西伸的特征。因此,对 2013 年赤道中东太平洋弱冷水位相下盛夏副高持续稳定的形成机理和预测技术仍需要更深入的研究。

4 结论和讨论

本文总结了国家气候中心 2013 年汛期气候预测的效果,并回顾分析了汛期预测主要的先兆信号及应用。2013 年汛期预测较好地把握了主要多雨

带位置偏北、降水北多南少的分布特征。准确预测了南海夏季风爆发偏早,长江中下游梅雨偏少、雨期短,华北雨季提前且雨量多的季节内主要气候事件的演变趋势。这与前期主要先兆信号的科学分析与应用密切相关。

虽然 2013 年对汛期气候趋势整体把握较好,但是对东北中北部降水明显偏多估计不足,这主要是对东北冷涡系统影响估计不足。目前,季节气候模式对欧亚中高纬地区的模拟能力普遍偏低,对夏季东北冷涡的预测仍缺乏技巧,这使东北地区汛期降水预测存在很大的困难。研究表明,前期冬季格陵兰海冰对夏季贝加尔湖南侧的低槽有显著的影响(Wu et al, 2013),这为东北地区汛期降水预测提供了很好的参考。

此外,已有研究指出,前期冬季欧亚地区积雪增量偏少会影响欧亚大陆积雪融化进程,进而减弱夏季东亚地区南北热力差异,导致东亚副热带急流减弱,使得江南地区夏季降水偏多(穆松宁等,2010;2012)。春季偏强的南半球环状模(SAM)会强迫南印度洋中高纬地区海温升高,并通过印度洋、南海海温的“桥梁”作用,有利于东亚夏季风偏弱,导致长江中下游夏季降水偏多(Nan et al, 2003;南素兰等,2005)。这些可能影响我国夏季气候的前兆信号在 2013 年并没有表现出其影响特征,这有待于在未来实际业务预测中进一步检验和应用。

致谢:感谢国家气候中心李想提供了图 3 的绘制,刘芸芸提供夏季副高监测资料。中国气象局短期气候预测创新团队为本文的完成提供了技术指导。

参考文献

艾婉秀,孙林海,宋文玲. 2010. 2009 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响. 气象,36(4):101-105.

陈丽娟,高辉,龚振淞,等. 2013. 2012 年汛期气候预测的先兆信号和应用. 气象,39(9):1103-1110.

陈烈庭,阎志新. 1979. 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响/中长期水文气象预报文集(第一集). 北京:水利电力出版社,185-194.

陈兴芳,赵振国. 2000. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京:气象出版社.

龚志强,王艳姣,王遵娅,等. 2014. 2013 年夏季气候异常特征及成因简析. 气象,40(1):152-158.

郭艳君,李威,陈乾金. 2004. 北半球积雪监测诊断业务系统. 气象,30(11):24-27.

黄荣辉,顾雷,陈际龙,等. 2008. 东亚季风系统的时空变化及其对我

国气候异常影响的最新研究进展. 大气科学,32(4):691-719.

黄荣辉,顾雷,徐予红,等. 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热力状态的关系. 大气科学,29(1):20-36.

贾小龙,陈丽娟,龚振淞,等. 2011. 2010 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响. 气象,37(4):446-453.

李建,周天军,宇如聪. 2007. 利用大气环流模式模拟北大西洋海温异常强迫响应. 大气科学,31:561-570.

李双林,王彦明,邵永祺. 2009. 北大西洋年代际振荡(AMO)气候影响的研究评述. 大气科学学报,32(3):458-465.

刘芸芸,李维京,艾婉秀,等. 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用. 应用气象学报,23(4):414-423.

穆松宁,周广庆. 2010. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系. 大气科学,34(1):213-226.

穆松宁,周广庆. 2012. 欧亚北部冬季增雪“影响”我国夏季气候异常的机理研究——陆面季节演变异常的“纽带”作用. 大气科学,36(2):297-315.

南素兰,李建平. 2005. 春季南半球环状模与长江流域夏季降水的关系 II. 印度洋、南海海温的“海洋桥”作用. 气象学报,63(6):847-856.

王艳姣,周兵,司东,等. 2013. 2012 年夏季我国降水异常及成因分析. 气象,39(1):121-125.

王遵娅,任福民,孙冷,等. 2012. 2011 年夏季气候异常及主要异常事件成因分析. 气象,38(4):448-455.

武炳义,卞林根,张人禾. 2004. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候的影响. 极地研究,16(3):211-220.

许立言,武炳义. 2012. 欧亚大陆春季融雪量与东亚夏季风的可能联系. 大气科学,36(6):1180-1190.

张培群,贾小龙,王永光. 2009. 2008 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响. 气象,35(4):112-117.

张顺利,陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究. 大气科学,25(3):372-390.

祝从文,何金海,吴国雄. 2000. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系. 气象学报,58(4):391-402.

朱益民,杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报,61(6):641-654.

左金清,李维京,任宏利,等. 2012. 春季北大西洋涛动与东亚夏季风年际关系的转变及其可能成因分析. 地球物理学报,55:384-395.

Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: Possible causes. Int J Climatol, 29:1926-1944.

Helfrich S R, McNamara D, Ramsay B H et al. 2007. Enhancements to, and forthcoming developments in the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS). Hydrol Process, 21:1576-1586.

Huang R H, Gu L, Zhou L T, et al. 2006. Impact of the thermal state of the tropical western Pacific on onset date and process of

- the South China Sea summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 6:21-32.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77:437-471.
- Nan S L, Li J P. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode. *Geophys Res Lett*, 30(24):2266, doi: 10.1029/2003GL018381.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J Climate*, 15:1609-1625.
- Wang B, Wu R G, Fu X. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J Climate*, 13:1517-1535.
- Wu B Y, Su J Z, Zhang R H. 2011. Effects of autumn-winter Arctic sea ice on winter Siberian High. *Chinese Sci Bull*, 56:3220-3228.
- 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 Climate*, 26:5523-5536.
- Wu T W, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall. An observational investigation. *J Climate*, 16:2038-2051.
- Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO. *J Geophys Res*, 114, D18120. doi: 10.1029/2009JD011733.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Nino. *J Climate*, 22:730-747.
- Zhao P, Zhang X D, Zhou X J, et al. 2004. The sea ice extent anomaly in the North Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon rainfall. *J Climate*, 17:3434-3447.
- Zhou W, Chan J C L. 2007. ENSO and South China Sea summer monsoon onset. *Int J Climatol*, 27:157-167.
- Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface temperature triple on the East Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 30(4):1173-1186.