

# 中国气候预测研究与业务发展的回顾\*

王会军<sup>1</sup> 任宏利<sup>2</sup> 陈活泼<sup>1,3</sup> 马洁华<sup>1,3</sup> 田宝强<sup>1,3</sup> 孙博<sup>1,3</sup>

黄艳艳<sup>1,3</sup> 段明铿<sup>1,3</sup> 汪君<sup>1,3</sup> 王琳<sup>2,4</sup> 周放<sup>1,3</sup>

WANG Huijun<sup>1</sup> REN Hongli<sup>2</sup> CHEN Huopo<sup>1,3</sup> MA Jiehua<sup>1,3</sup> TIAN Baoqiang<sup>1,3</sup> SUN Bo<sup>1,3</sup>

HUANG Yanyan<sup>1,3</sup> DUAN Mingkeng<sup>1,3</sup> WANG Jun<sup>1,3</sup> WANG Lin<sup>2,4</sup> ZHOU Fang<sup>1,3</sup>

1. 南京信息工程大学, 南京, 210044

2. 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京, 100081

3. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

4. 中国地质大学(武汉)环境学院大气科学系, 武汉, 430074

1. *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

3. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

4. *Department of Atmospheric Science, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

2019-09-24 收稿, 2019-12-11 改回.

王会军, 任宏利, 陈活泼, 马洁华, 田宝强, 孙博, 黄艳艳, 段明铿, 汪君, 王琳, 周放. 2020. 中国气候预测研究与业务发展的回顾. 气象学报, 78(3): 317-331

Wang Huijun, Ren Hongli, Chen Huopo, Ma Jiehua, Tian Baoqiang, Sun Bo, Huang Yanyan, Duan Mingkeng, Wang Jun, Wang Lin, Zhou Fang. 2020. Highlights of climate prediction study and operation in China over the past decades. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(3):317-331

**Abstract** Weather forecast means day-to-day meteorological prediction for up to two weeks, while climate prediction is a long-term prediction from one month to decades or even longer. In China, climate prediction started quite early, both in scientific research and in meteorological operation. A lot of achievements in climate research and prediction application have been made over the past half-century. In this paper, the authors briefly highlight these achievements, including the initial recognition of the East Asian monsoon, Meiyu and cold surge, climate prediction development in the early stage, development of dynamical climate prediction, development of operational climate prediction model and its initialization, research on statistical climate prediction approach, intensive study on the variability and predictability of East Asian climate system, expansion of the scope of climate prediction and development of new prediction approaches, etc. Prospects on climate prediction in the future are given as well in the last part of this paper, with the focus on multi-scale climate variability and their interaction, intra-seasonal to inter-decadal climate prediction, improvements of the climate system model and initialization, and hybrid dynamical-statistical climate prediction methods.

**Key words** Climate prediction, Climate system model, East Asian monsoon, Intra-seasonal climate variability, Inter-decadal climate variation

**摘要** 天气预报是指一周内至两周时间尺度的气象预报, 而月季及以上时间尺度的预报则属于气候预测范畴。中国的气候预测起步很早, 无论在研究工作中还是在业务应用上都取得了显著成就。文中扼要回顾了这些研究和业务发展成就, 重点包括: 对于季风和梅雨、寒潮的早期认知和后期研究发现、早期气候预测业务发展概况、动力气候预测的早期探索、动力-统计气候预测方法的研制和应用、气候预测模式的发展以及初始化和多模式集合预测、东亚气候系统变异的全方位探索、气候预测范畴的

\* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600703)。

作者简介: 王会军, 主要从事气候动力学、气候预测、古气候等研究。E-mail: wanghj@mail.iap.ac.cn

不断拓展和气候预测研究的不断创新。也对未来气候预测研究和业务发展提出了几个重大挑战性课题,涉及不同时间尺度气候变异过程之间的相互作用、季节内至年代际气候预测、气候系统模式及初始化、动力-统计相结合的气候预测方法等方面。

**关键词** 气候预测, 气候系统模式, 东亚季风, 季节内气候变异, 年代际气候变化

**中图法分类号** P46

## 1 引言

人类对未来总是充满好奇,对未来的预知则更具诱惑,先知先见之明被认为是智慧的顶峰。变幻莫测的大气尤其是人们渴望预知的对象。直到20世纪人类才掌握了科学预报天气的基本理论和方法,并在20世纪的后半叶实现了基于大型电子计算机数值求解大气运动偏微分方程组的数值天气预报,已成为天气预报的核心手段。世界气象组织评价其为20世纪最伟大的科技成就之一。

由于大气的记忆性和数值预报系统初始误差及计算过程中舍入误差的累积,逐日天气预报存在的时效上限大约为两周(Lorenz, 1982)。但是,人类预测大气运动长期变化的梦想,由于和大气运动密切互动的海洋和陆面过程对异常存在“长记忆性”和学科发展水平的不断进步而逐步变得可实现了。

总的来说,在利用气候系统数值模式进行短期气候预测(出现在20世纪80年代末—90年代初)之前,中外均是以统计和经验方法为主。一些方法是纯数学统计方法,这方面在20世纪60—70年代蓬勃发展,形成了多种多样的预测方法。另一些则是基于气候系统变异过程中不同变量、不同子系统物理过程的联系而建立的,特别是利用气候系统中的“慢变”参量作为气温、降水等的短期气候预测因子。这些“慢变”参量包括前期海表温度、极区海冰覆盖、陆面积雪、陆面植被覆盖、土壤温度、土壤湿度等,也包括太阳活动若干参量(如太阳黑子数)。也有利用一些前期大气环流要素与气温、降水等的超前-滞后关系建立预测模型,尽管这些超前-滞后关系背后的物理机制经常是比较复杂的。

## 2 中国气候预测发展概要

在上述发展历程中,中国一直是积极的实践者和创新者,这不仅是因为有价值的探索在中国开始得很早,而且也由于中国在气候预测研究与应用方面的进展可圈可点。

(1)很早就注意到季风、江淮流域梅雨、寒潮等基本特征。如,竺可桢(1934)指出,东南季风与中国雨量有明显关联;涂长望等(1944)则发现了中国夏季风的季节进退特征;李宪之(1955a)进一步提出了东亚寒潮可以越赤道影响到澳大利亚北端,澳大利亚寒潮也可以影响西太平洋台风活动(李宪之, 1955b)。这些早期研究发现阐述了东亚季风的基本特征及其和中国降水、气温变化的关系,并且提出了南、北两个半球存在气候相互影响。这些工作影响巨大,开创了中国季风研究之先河,引发了直至今日的大量深入、广泛的关于季风系统及其各种时间尺度变异过程、机制和可预测性的研究工作,也为后来利用统计和经验方法做季风和气候预测埋下了伏笔、奠定了物理基础。

(2)几乎与美国、日本同期开始了气候预测业务工作。涂长望(1937)就进行了3大涛动与中国旱涝关系等方面的研究。Namias(1953)才发表了关于30 d长期天气预报的10 a总结。杨鉴初(1953)提出了历史演变法的长期预报思路,并发表了关于应用气象要素历史演变规律制作一年以上长期预报的文章。1954年第1次正式对外发布年度气候趋势展望,1958年增加了月预报内容、并易名为长期天气预报。但那时大多是以单站气象要素为预报对象。在预测实践中,结合对夏季风影响中国夏季降水研究的不断深入,发现中国夏季形成差异很大的多雨带(旱涝)分布类型(赵振国, 1999),预报对象由单站转为全国旱涝分布趋势的预测,1961年开始正式发布汛期预报和汛期旱涝趋势预测。Namias(1964)发表了关于季节气候预测的5 a试验总结。日本和苏联也在长期天气预报(现在称为气候预测)方面做了很多研究和预测试验。直到20世纪80年代末至90年代初基于海-气耦合模式的动力数值预测方法出现以前都是以统计方法、大气环流型相似方法等为主。前面提到,中国在该领域开展得相当早,以气候统计分析、气候变量间的物理联系为基础,做出了大量研究成果。1958年中国已经正式开始短期气候预测业务并发布预测信

息(魏凤英, 2011)。此后各种时间序列统计方法、气候异常型历史相似方法等都得到了发展和应用。到了20世纪70—80年代,中国学者已经开始研究海区海表温度异常对气候的影响,并逐步形成了基于海温、陆面过程异常信息的短期气候预测方法(杨鉴初等, 1963; 陈烈庭, 1974, 1977; 符淙斌, 1978, 1980)。

(3)为了构建有气候系统动力学基础的气候预测方法和模型,中国学者开展了大量的东亚气候系统变异特征、机制及模拟研究。这些工作涵盖面极为广泛、非常深入、系统。时间尺度包括季节内至年代际;空间尺度包括局地、区域到东亚甚至全球;系统范畴从大气圈到海-气耦合系统、陆-气耦合系统、天文因素等;模式应用从大气环流模式到气候系统模式和地球系统模式。表1列出了影响中国夏季降水年际变化的主要预测因子及其物理机制,热带主要有太平洋和印度洋海表温度;中高纬度区域主要有前冬春季海冰分布、春季欧亚积雪以及春季北大西洋涛动(NAO);青藏高原的前冬春季积雪和土壤湿度以及地表感热通量。对中国冬季气温的年际变化影响中,中高纬度的一些因素是主要的,包括北极涛动(AO)、前秋海冰和欧亚大陆积雪、北太平洋海表温度。ENSO也有一些影响,但是比较复杂,具有非对称性。冬季中国霾污染状况年际变化的气候影响因素主要包括:北极海冰、东亚冬季风、ENSO、大西洋海表温度以及青藏高原热力异常等(表2)。

(4)中国学者最早发表了国际上基于海-气耦合模式的跨季节气候预测系统(曾庆存等, 1990)。尽管当时采用的全球大气环流模式分辨率较低,海洋环流模式也仅限于热带太平洋区域(主要针对ENSO预测),但海洋和大气环流模式均为自行研发且有一系列理论和方法(半隐式差分方案、大气环流模式的标准层结扣除、海洋环流模式的自由海表方案等)创新。这一创新性研究大大促进了气候预测业务的发展,中国由此设立了国家“九五”计划“重中之重”项目“中国短期气候预测系统的研究”和国家气候中心的成立。后来又研制出用于构建气候预测系统和气候变化研究的基于多孔介质理论框架的完整的陆面过程模式(IAP94),其理论方法、模式框架、计算方案等全部系中国学者自行研

建(Dai, et al, 1997),是美国公用陆面过程模式(CLM)的主要蓝本(Dai, et al, 2003),并被国际广泛采用。2003年以来,国家气候中心先后建立了第一代和第二代动力气候预测模式并作为短期气候预测的主要手段(丁一汇等, 2004; 吴统文等, 2013)。近年来,中国科学院大气物理研究所又发展了基于美国公用气候系统模式(CCSM4)的动力预测系统(马洁华等, 2014);国家气候中心对中国多个“一步法”预测系统进行集成,建立了中国第一代多模式集合预测系统(CMME1.0)(Ren, et al, 2019),在业务中广泛应用。

(5)在发展动力-统计相结合的气候预测方法方面有重要创新并研制出系列高效能的预测模型。较早基于动力与统计相结合的预报方法是模式解释应用,主要包括模式输出统计量(MOS)和完全预报。MOS统计方法要建立数值模式输出的资料档案,配以局地天气的观测资料,所建立的预报系统会自动考虑数值模式的偏差和不确定性,以及地方性的气候特点,20世纪80年代到90年代初应用非常广泛。中国学者在基于动力与统计相结合预报方法方面也有很多有益的探索和重要创新。在预测对象和预测方法方面,年际增量气候预测方法的提出和应用有重要的科学和实际价值(Wang, et al, 2000),其关键在于该方法通过预测年际增量叠加前一年观测信息的途径很好地解决了年代际趋势问题(因为年代际趋势已经隐含在前一年的观测信息中了)。年际增量相比于预测对象变量本身具有更加显著的年际变化幅度、更易于寻找预测因子、具有更好的可预测性。大量的应用年际增量方法开展的研究和预测模型有力地证明了该方法的优越性。表3列出了基于年际增量方法构建的系列气候预测模型,预测对象的涵盖面非常广,包括区域气温、降水、东亚季风、沙尘天气频次、北大西洋涛动、极端气候、霾污染、粮食产量等,这些模型均显示出比以往更优的预测能力。同时,在综合运用动力模式和较全面历史资料发展气候预测方面也进行了新探索。如,任宏利(2006)以及任宏利等(2005, 2007a, 2007b)提出利用历史相似信息对动力模式预报误差进行预报的新思路 and 动力相似预报新策略,还进一步将相似误差订正方法运用于ENSO预测(Ren, et al, 2014; Liu, et al, 2017)。中

表 1 影响中国夏季降水年际变化的主要前期因子及其物理机制

Table 1 The related predictors for summer precipitation over China and the associated physical mechanisms

前期信号	影响机制及过程	参考文献	
热带	① 春季赤道东太平洋海表温度	① 春季赤道东太平洋海温偏高, 导致夏季西太平洋副热带高压偏南偏西、强度偏强, 东亚夏季风偏弱, 长江流域多雨。	① 彭加毅等, 2000; Han, et al, 2017a; 王永光等, 2018
	② ENSO	② 中国南方夏季极端降水频次的增加与厄尔尼诺的快速衰退以及菲律宾海异常反气旋有关; 北方夏季极端降水频次的增加与拉尼娜的发展以及西太平洋副热带高压与亚洲低压之间的纬向海平面气压差异有关。	② Li J, et al, 2018
	③ 早春热带印度洋海表温度	③ 热带印度洋海表温度异常通过影响哈得来和费雷尔环流, 同时在地中海地区激发有效罗斯贝波, 进而调整欧亚上空大气环流异常而影响东北夏季降水。	③ Han, et al, 2017b
	④ 印度洋偶极子(IOD)	④ 当IOD指数为正位相时, 汛期华北及江淮流域干旱少雨, 而华南沿海地区为多雨带; 反之, 汛期雨带分布基本为南北多雨而长江流域少雨。	④ 肖子牛等, 2002
	⑤ 南印度洋偶极子	⑤ 前期夏、秋季偶极子正位相时次年夏季印度洋、南海(东亚)夏季风偏弱, 副热带高压加强且南撤、西伸, 南亚高压偏强且位置偏东, 易形成中国长江流域降水偏多, 华南降水偏少; 负位相相反。	⑤ 贾小龙等, 2005
中高纬度	① 早春巴伦支海海冰	① 早春巴伦支海海冰减少激发南传罗斯贝波波列, 导致欧亚大陆西部积雪融化加速, 进而引起后续土壤湿度异常; 亦可导致极地出现异常低压中心, 激发从巴伦支海向东北传播的极地-欧亚遥相关型波列, 东北上空盛行北风异常以及下沉运动异常, 造成东北地区夏季土壤偏干、温度偏高和降水偏少, 最终导致高温干旱事件的发生。	① Li H X, et al, 2018
	② 冬季白令海海冰	② 当冬季海冰偏多时, 北太平洋涛动正位相加强, 通过海-气相互作用, 使得北太平洋海表温度升高并能一直持续到夏季, 而后极涡减弱、西太平洋副热带高压增强, 使得东北地区水汽辐合增强, 导致降水增多。	② Zhou, et al, 2014
	③ 春季北极海冰	③ 春季北极海冰减少易激发欧亚遥相关波列, 在东亚和贝加尔湖为南北偶极子型, 导致中国东北和中部地区降水增加而东部(长江—黄淮流域)降水减少的格局。	③ Wu, et al, 2009a
	④ 春季欧亚积雪	④ 一方面, 春季欧亚积雪异常能够激发遥相关波列且从春季一直持续到夏季, 造成中国北方为高压控制, 南方为弱低压控制, 导致南方地区降水偏多; 另一方面, 春季积雪异常通过改变后期土壤湿度、温度分布及辐射状况, 促进陆-气相互作用, 激发夏季遥相关波列或影响夏季风爆发, 进而影响中国夏季降水。	④ Wu, et al, 2009b; 李震坤等, 2009
	⑤ 春季NAO	⑤ 5月北大西洋三极型海表温度异常激发出向东传的罗斯贝波波列, 进而影响长江中下游夏季极端降水频次。	⑤ Tian, et al, 2012
	⑥ 冬季北大西洋三极子	⑥ 经向海温距平呈“—+—”型分布时, 梅雨偏少; 反之, 当海温距平呈“+—+”分布时, 梅雨偏多。	⑥ Wu, et al, 2009b; Gu, et al, 2009
青藏高原	① 积雪	① 青藏高原冬季积雪偏多会使得青藏高原地表加热减弱, 并且信号一直持续到春—夏季, 减小海、陆热力梯度, 使得亚洲夏季风减弱, 从而导致中国长江流域夏季降水偏多; 青藏高原西部和喜马拉雅山脉5月积雪可以持续到夏季, 并通过向下游输送水汽, 天气尺度扰动及减弱南亚高压等途径使得下游地区夏季降水增多; 高原冬、春积雪引起的非绝热加热异常还可导致200 hPa西风急流和500 hPa南支气流异常, 从而导致长江流域夏季降水偏多, 华南降水偏少。	① 张顺利等, 2001; 杜银等, 2014; 霍飞等, 2014; Xiao, et al, 2016
	② 春季土壤湿度	② 春季土壤湿度信号能够持续到夏季, 当土壤湿度偏大时, 在对流层中高层从高原西部经中国大陆直至东北地区激发出一个气旋—反气旋—气旋波列, 有利于东北冷涡的加强及冷空气向南爆发; 与此同时, 南亚高压加强东伸, 西太平洋副热带高压西伸加强, 低空南方暖湿气流与北方干冷气流在长江流域汇合, 伴随着上升运动加强, 有利于夏季长江流域降水增多。	② 左志燕等, 2007; 王静等, 2016
	③ 春季感热	③ 春季青藏高原感热增强, 南亚高压位置偏东, 西太平洋副热带高压位置偏西、偏南, 其北侧为气旋式环流异常。在西太平洋副热带高压的控制下, 华南东部降水减少; 西太平洋副热带高压西侧的偏南气流为长江流域带来大量水汽, 并与来自北部气旋式环流异常西侧的偏北风发生辐合, 使得降水增多。	③ Gao, et al, 2014; 李秀珍等, 2018; 张超等, 2018

国学者还率先构建了适用于东亚区域的基于全球气候系统模式预测结果的统计降尺度预测方法 (Chen, et al, 2012; Sun, et al, 2012; Liu, et al, 2015;

孙建奇等, 2018)。延伸期天气预报是世界气象组织季节内-季节气候预测计划(S2S)的关键内容, 中国学者在这方面也有重要创新成果, 研发了时空投

表 2 影响中国冬季气温、降水和霾污染年际变化的主要前期因子及其物理机制  
Table 2 The related predictors for variations of winter temperature, precipitation, and haze pollution over China and their associated physical mechanisms

预测量	前期信号	影响机制及过程	参考文献
气温	① 北极涛动(AO)	① 当前期(10—12月)北极涛动为正位相时,东亚极端冷(暖)事件频次显著偏少(多),可能与北极涛动在平流层的固有持续性以及欧亚雪盖的持续性有关。	① He, et al, 2016; Zhuang, et al, 2017
	② 秋季北极海冰	② 秋季北极海冰减少,通过调整中高纬度大气环流系统(西伯利亚高压、东亚大槽以及东亚西风急流等),导致东亚冬季风异常,从而影响中国冬季的平均气温及低温天气的发生频次。	② 谢永坤等, 2014; Zuo, et al, 2016b; Sun C H, et al, 2016; Chen, et al, 2014; Li, et al, 2014
	③ 10月欧亚积雪	③ 当西伯利亚积雪偏多(偏少)时,导致极地气压偏高(偏低)以及中高纬度气压偏低(偏高);由于积雪具有持续性,大气环流异常有利于(不利于)大范围冷空气从极地涌向东北地区,导致东北冬季气温偏低(偏高)。	③ Li, et al, 2017b
	④ 秋季北太平洋海表温度	④ 当秋季北太平洋海表温度第3模态和11月北极涛动为正位相时,西伯利亚高压减弱,东亚冬季风减弱,东亚地区偏暖。	④ Kim, et al, 2012
	⑤ 冬季白令海海冰	⑤ 白令海海冰通过影响同期亚洲-北太平洋区域的大尺度环流,进而影响东亚冬季风,导致中国冬季气温异常。	⑤ Li, et al, 2013
	⑥ 北太平洋西南部秋季海温	⑥ 北太平洋西南部秋季海温异常通过海气过程影响东亚大槽和亚洲副热带西风急流的变化,进而影响东亚冬季风的年代际变化。	⑥ Sun J Q, et al, 2016
降水	① 欧洲东部秋季积雪	① 积雪的持续性及其相关的平流层和对流层相互作用是积雪异常产生跨季度影响的主要物理机制。	① Ao, et al, 2016a
	② 南太平洋秋季海表温度	② 秋季海表温度异常信号能够一直持续到冬季,并在冬季激发出一个由南半球到北半球的经向遥相关波列,进而导致冬季东亚出现大气环流的经向偶极子型,最终影响东亚冬季降水异常并出现偶极子型异常分布。	② Ao, et al, 2016b
	③ 秋季南极涛动(AAO)	③ AAO正(负)异常年,副热带西风急流显著增强(减弱),欧洲西部槽、乌拉尔山高压脊和东亚沿岸大槽均偏强(偏弱),阿留申低压、南支槽和西太平洋副热带高压偏弱(偏强),西南急流上的扰动不活跃(活跃),中国大部分地区出现异常偏北风(偏南风)和向外长波辐射弱(强)距平,导致南方降水偏少(偏多)。	③ 钱卓蕾, 2014
霾污染	① 北极秋季海冰	① 北极秋季海冰减少会导致欧亚大陆大气环流异常,中国北方地区气旋活动减弱、大气层结稳定,进而加剧中国东部地区冬季霾污染。	① Wang, et al, 2015b, 2016; Yin, et al, 2016, 2017
	② 大西洋夏季海表温度异常	② 夏季北大西洋海表温度暖位相导致中国北方地区强的稳定西风异常,而秋季南大西洋海表温度异常三极型分布有利于中国东部盛行偏南风异常,均不利于冷空气的入侵,霾污染加剧。	② Xiao, et al, 2015
	③ ENSO	③ 厄尔尼诺年,南方地区霾污染日数偏多;拉尼娜年,偏少。	③ Gao, et al, 2015
	④ 青藏高原热力作用	④ 青藏高原变暖时,东亚冬季风减弱,中国中东部地区下沉运动增强,对流层低层稳定层结增强,易导致霾污染加剧。	④ Xu, et al, 2016
	⑤ 东亚冬季风	⑤ 东亚冬季风偏强时,地面风速和水平纬向风的垂直切变增强,地面风速增大有利于污染物的扩散,垂直切变增强有利于大气层结不稳定性增强,有利于污染物垂直扩散。	⑤ Li Q, et al, 2016

影方法(STPM)和预测模型(Hsu, et al, 2015),并应用于延伸期天气预报业务,取得了很好的预报效果。

(6)拓展气候预测的范畴,助力经济和社会发展、防灾减灾。气候异常关乎方方面面,包括作物长势和粮食产量、大气污染潜势、水循环与水资源、洪水与滑坡泥石流、野火、生态系统等。中国学者针对这一广泛领域开展了有价值的探索。Yin等(2016, 2017)构建了基于关键气候因子的中国霾天气发生频次季节气候预测模型,Zhou等(2014)建立了基于冬春季气候信息的中国东北粮食产量预测模型。利用基于动力模式的气候预测

系统和自行建立的中国洪水与滑坡、泥石流预测系统实现了对洪水与滑坡、泥石流的季节和跨季节预测(汪君等, 2016; 马洁华等, 2019)。

### 3 中国气候预测业务现状概述

中国已经建立起了结构较为完整、功能较为完善的气候预测业务体系,主要包括面向延伸期、月、季节、年际以及年代际等不同时间尺度的气候预测,面向全球、亚洲、中国以及气候区、省、市、县等不同空间尺度的气候预测,面向气候要素、气候现象、气候事件以及气候灾害等不同对象的预测。

表3 应用年际增量方法构建的预测模型  
Table 3 The prediction models constructed using the year-to-year increment method

序号	预报量(年际增量)	预测因子描述(年际增量)	参考文献
1	长江中下游夏季(6—8月)降水	$x_1$ : 春季南极涛动; $x_2$ : 春季欧亚环流指数; $x_3$ : 东亚环流指数; $x_4$ : 印尼—澳洲附近经向风垂直切变; $x_5$ : 冬季南太平洋环流指数; $x_6$ : 春季长江中下游850 hPa涡度指数。	Fan, et al, 2008
2	华北汛期(7—8月)降水	$x_1$ : 冬季东北亚地区环流因子; $x_2$ : 春季北太平洋环流指数; $x_3$ : 6月南亚环流指数; $x_4$ : 6月北半球高纬度环流指数; $x_5$ : 6月Nino 3指数。	Fan, et al, 2009a
3	全年登陆台风数	$x_1$ 、 $x_2$ : 前期10月海平面气压(50°—40°S, 120°E—180°)、(50°—60°N, 160°E—180°); $x_3$ 、 $x_4$ : 前一年夏季海平面气压(55°—60°N, 15°—45°E)、海表温度(50°—60°S, 30°—60°E); $x_5$ : 5月海平面气压(0°—10°N, 120°—150°E)。	Fan, 2009a
4	东北冬季气温	$x_1$ 、 $x_2$ : 前冬海平面气压(70°—90°N, 0°—45°E)和(40°—50°N, 45°W—0°); $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ : 11月海平面气压(40°—50°N, 135°—105°W)、(40°—50°S, 90°—120°E)和(20°—40°S, 180°—120°W); $x_6$ : 秋季海平面气压(60°—70°S, 150°E—150°W)。	Fan, 2009b
5	西北太平洋台风个数	$x_1$ : 冬季海冰密集度(53.5°—66.5°N, 158.5°E—159.5°W)和(44.5°—59.5°N, 140.5°—155.5°E); $x_2$ : 春季1000 hPa气温(20°S—20°N, 90°—120°E); $x_3$ : 6月850 hPa相对涡度(15°—20°N, 125°—140°E); $x_4$ : 6月风垂直切变(5°—10°N, 145°—170°E); $x_5$ : 6月海平面气压(10°—20°N, 135°E—150°W)。	Fan, et al, 2009b
6	6—11月大西洋热带风暴频次	$x_1$ 、 $x_2$ : 前一年11月200 hPa气温(30°—45°N, 60°—105°E)和(30°—40°N, 45°—15°W); $x_3$ : 2月60°S以南的200 hPa气温; $x_4$ : 3月海平面气压(5°—20°S, 120°—90°W); $x_5$ : 4月海平面气压(10°—20°N, 150°—165°E); $x_6$ : 4月200 hPa纬向风(45°—65°N, 160°—120°W)。	Fan, 2010
7	夏季东北气温	$x_1$ 、 $x_2$ : 前秋200 hPa 位势高度(70°—80°N, 60°—120°E)和(60°—70°S, 60°—90°W); $x_3$ : 3月海平面气压(50°—60°N, 120°—90°W); $x_4$ : 春季海表温度(10°S—0°, 160°E—170°W); $x_5$ : 冬季冰盖(5°—80°N, 160°E—180°)。	Fan, et al, 2010
8	春季北方降水	$x_1$ : 冬季海温(20°S—20°N, 60°—90°E); $x_2$ 、 $x_3$ : 冬季1000 hPa气温(60°—70°N, 165°E—165°W)和(40°—60°N, 155°—175°E); $x_4$ : 前一年夏季海平面气压(30°—50°S, 90°—120°E); $x_5$ : 前一年9月200 hPa经向风(20°—40°S, 30°—40°E); $x_6$ : 前一年12月200 hPa气温(60°—70°N, 0°—60°E)。	Fan, 2012
9	冬半年大雪—暴雪日数	$x_1$ : 9月土壤湿度(48°—55.25°N, 122°—128°E); $x_2$ : 9—10月200 hPa经向风(60°—75°N, 150°—120°W); $x_3$ : 前期夏季海平面气压(20°—40°S, 30°—65°E); $x_4$ : 前一年冬半年850 hPa气温(20°—35°N, 105°—120°E)。	Fan, et al, 2013
10	东亚夏季风(EASM)	$x_1$ : 模式(DEMETER)预测EASM年际增量; $x_2$ : 模式预测的500 hPa 位势高度(10°—30°N, 110°—135°E)。	Fan, et al, 2012
11	东北玉米和水稻产量	$x_1$ : 春季北大西洋涛动; $x_2$ : 2—3月冰盖(55°—65°N, 160°E—160°W)。	Zhou, et al, 2014
12	夏季APO	模式(DEMETER)预测的亚洲-太平洋涛动(APO)年际增量。	Huang, et al, 2014
13	冬季北大西洋涛动(NAO)	统计模型: $x_1$ : 前秋北大西洋海表温度; $x_2$ : 前秋欧亚大陆雪盖; 动力和统计预测模型: $x_1$ : 模式(DEMETER、ENSEMBLES、CFSv2)预测的NAO年际增量; $x_2$ : 前秋观测的北大西洋海表温度。	Fan, et al, 2016; Tian, et al, 2015
14	华北冬季霾日数	$x_1$ : 前秋地表温度(35°—65°N, 130°—140°E); $x_2$ 、 $x_3$ : 前秋海表温度(36°—56°N, 130°—170°W)和(50°—70°N, 30°—65°W); $x_4$ : 前秋海冰密度(73°—78°N, 130°—165°W); $x_5$ : 前秋土壤湿度(35°—42°N, 117°—127°E); $x_6$ : 前夏土壤湿度(48°—52°N, 115°—125°E); $x_7$ : 9—10月南极涛动。	Yin, et al, 2016
15	华北冬季霾日数	广义可加模型: $x_1$ : 前秋海表温度(36°—56°N, 130°—170°W); $x_2$ : 前秋海冰密度(73°—78°N, 130°—165°W)。	Yin, et al, 2017
16	东亚冬季风(EAWM)	$x_1$ : 模式(CFSv2)预测的EAWM年际增量; $x_2$ : 前秋观测的北太平洋海表温度; $x_3$ : 前秋海冰密度(74.5°—84.5°N, 119.5°—179.5°E)。	Tian, et al, 2018
17	东北冬季气温	$x_1$ : CFSv2预测的冬季海平面气压(60°—20°S, 0°—150°E); $x_2$ : 前期8月海表温度(10°—60°N, 120°E—120°W); $x_3$ : 前期11月海冰密度(70°—90°N, 0°—90°E)。	Dai, et al, 2018
18	中国北方春季沙尘频次	$x_1$ : CFSv2预测的春季850 hPa 位势高度(40°—55°N, 100°—120°E); $x_2$ : 前期冬季海冰密度(74°—78°N, 30°—55°E); $x_3$ : 前期夏季植被(30°—45°N, 100°—112°E); $x_4$ : 前期冬季南极涛动。	Ji, et al, 2019
19	春季南极涛动(AAO)	$x_1$ : 前秋观测海冰密度(60°—71°S, 30°—60°W)和(67°—73°S, 77°—108°W)的差值; $x_2$ : 春季CFSv2预测的海表温度(19°—37°S, 100°—135°W)与(5°N—4°S, 175°E—145°W)的差值。	Zhang, et al, 2019

10—30 d 延伸期预报一直是科学研究和业务关注的重点(肖子牛, 2010), 中国国家气候中心先后建立了第 1 和 2 代月动力延伸预报系统(DERF1.0 和 2.0), 实时发布延伸期逐日和月平均环流以及要素预报产品(李维京等, 2000; 吴统文等, 2013), 包括延伸期气候趋势和强降水、强降温等预报, 进一步形成基于气候系统模式的次季节预报, 参与到国际季节内-季节气候预测比较计划。月、季预测主要基于耦合模式和气候系统模式, 中国国家气候中心在第 1 代预测业务系统基础上, 于 2015 年建立了第 2 代季节气候预测模式系统, 成为汛期和年度预测的重要工具。检验表明, 该模式各季节全球平均降水提前 0 月预测的时间相关技巧大约是 0.2, 2 m 气温在 0.42 以上(吴捷等, 2017)。目前, 基于动力-统计相结合和物理统计的气候预测方法已被广泛应用于业务中(陈丽娟等, 2003; 李维京等, 2013; 贾小龙等, 2013; 任宏利等, 2014; 封国林等, 2015), 使得实际业务预测的整体水平得以不断提升。

气候现象预测是近些年来中外蓬勃发展的主要气候业务领域。影响中国的主要气候现象包括 ENSO、热带大气季节内振荡(MJO)、北大西洋涛动/北大西洋涛动、印度洋和大西洋海温变率的主模态以及东亚区域关键环流系统等。它们对全球和区域气候异常具有重要影响, 对中国气候要素异常变化具有重要指示意义, 已成为中国开展气候预测的重要参考。针对这些气候现象开展预测业务, 对温度和降水等气候要素的预测至关重要。

对于 ENSO 预测, “九五”期间基于简化海气耦合模式发展的第 1 代 ENSO 预测系统曾经在业务中发挥了积极作用。2015 年, 中国国家气候中心建立了新一代 ENSO 监测、分析和预测业务系统(SEMAP2.0), 实时发布产品(任宏利等, 2016), 对 ENSO(Nino3.4 指数)提前 6 个月预报的相关技巧达到 0.8, 已跻身国际先进行列(Ren, et al, 2017)。基于 SEMAP2.0 的 ENSO 动力预测和统计预测产品均已正式纳入美国气候与社会国际研究中心/气候预测中心(IRI/CPC)联合发布的全球 ENSO 多模式集合预测框架, 实时产品同国外各 ENSO 业务预测产品同期发布。

对于 MJO 预测, 2013 年以来国家气候中心启动系统研发计划, 至 2017 年已经建成了监测、预测业务系统, 进行与 MJO 相关的实时监测、预测和诊

断分析(任宏利等, 2015; 吴捷等, 2016; Wu, et al, 2016)。Zhu 等(2015)应用时空-投影预报模型可对未来 10—30 d 候平均 MJO 指数进行预测, 历史回报预报技巧约为 25—30 d。Ren 等(2017)发展了一种基于不同模式版本滞后平均的多初值集合预报新方法, 可将 MJO 的预测技巧提升至 20 d, 在业务系统中得到采用。

对于北极涛动/北大西洋涛动预测, 动力模式和统计是最主要的手段。Tian 等(2015)采用年际增量预测方法, 基于北大西洋秋季海温和秋季欧亚大陆的雪盖, 建立了冬季北大西洋涛动的统计预测模型。Fan 等(2016)基于国际上多个耦合模式发展了冬季北大西洋涛动的预测模型。以上研究成果目前已应用到冬季北大西洋涛动的实时气候预测中, 并取得了较好的预测效果。中国国家气候中心对其大气环流模式和耦合模式的逐日及逐月北极涛动/北大西洋涛动指数预报性能进行了综合评估, 并诊断分析了模式中可能引起预报误差的主要因素(Zuo, et al, 2016a, 2016b), 相应开发了基于气候模式和物理统计模型的北极涛动指数预报产品, 已在国家级业务上得以应用(Ren, et al, 2017)。

对于东亚夏季风和副热带高压的预测, 动力和统计相结合能够显著提高东亚夏季风的预测(Fan, et al, 2012)。现阶段对东亚夏季风指数能够做出有效预测, 时间越临近、准确率越高(Liu, et al, 2015)。目前基于季节预测业务模式以及国际主流业务模式预报资料, 开发了东亚夏(冬)季风指数和副热带高压指数预测业务产品, 在实际预测业务中发挥了重要作用(Ren, et al, 2017)。此外, 印度洋偶极子的预测中国起步相对较晚。对于较强的印度洋偶极子事件, 中国业务耦合模式能够提前两个季度给出合理的预测(Lu, et al, 2018)。相比之下, 业务模式对北大西洋海温三极子(NAST)1—7 月的预测有不错的能力和参考价值, 但对其整体预测能力仍相对较弱(Wang, et al, 2015a)。中国国家气候中心目前已开发出印度洋和大西洋海温异常主模态的预测产品(Ren, et al, 2017)。

#### 4 未来发展

总体上看, 气候预测理论、方法和技术仍处于探索阶段, 气候预测业务属于典型的研究型气象业务。未来气候预测研究和业务的发展既是国际热

点也是科学难点,必将展现出多个方面的发展趋势和特点。

(1)不同时间尺度气候变异之间的相互作用应更为重视。

世界气象组织已经发起从季节内到季节气候预测计划,以实现从天气预报到短期气候预测的“无缝隙”连接。天气尺度变化、季节内尺度变化和季节尺度变化实际上是有密切联系的,如,不同的MJO位相可以调制中国南方的天气过程(Hsu, et al, 2016, 2017);不同的ENSO位相和MJO也有显著联系,并且有年代际变化(Gushchina, et al, 2019)。另外,世界气候研究计划(WCRP)也长期关注年代际至百年尺度气候变化,并设有专门研究内容。气候年代际变化机制和预测是气候研究的重大科学挑战,也关乎短期气候预测,如,不同的太平洋年代际振荡或北大西洋年代际振荡位相可能对应不同的年际变化机制;另外,ENSO和东亚气候(不论是夏季,还是冬季)之间的联系也受年代际变化的显著调制,并且是不稳定的(Wang, 2002; Wang, et al, 2012)。年代际气候变化也关乎中、长期气候变化的预估、预测,没有科学、准确的年代际气候预测就谈不上近期、中期和长期气候变化的预测。

所以,未来的气候预测研究首先要对季节内变化和年代际变化的预测给予更多的重视,同时也将更加关注不同时间尺度气候变化之间的相互作用,这方面的进展直接关系到各时间尺度气候预测的科技含量和预测水平的提升程度。热带外的季节内变异过程非常复杂,没有成熟的理论、更没有成型的预测方法,是S2S的重点内容和关键挑战,而年代际气候预测毫无疑问是科学大难题。当然,季节-年际气候预测仍然处于初始阶段,同样没有系统理论和较为完善的预测手段。中国学者应该在这方面投入更多研究精力,力求取得创新突破。

(2)气候系统预测模式及初始化的改进仍是关键课题。

改进用于各时间尺度气候预测的动力气候系统模式/地球系统模式及其初始化方案是未来气候预测方法和技术研究的重要任务。总的来说,目前的动力气候系统模式/地球系统模式对全球热带外的降水各时间尺度气候变异的预测效能都比较弱。英国气象局的新一代气候预测系统(GloSEA5,

MacLachlan, et al, 2015)对长江流域夏季降水有较好的预测效能,较之此前的气候预测系统均有较大的改进。有分析认为,该模式系统对海洋性大陆区域对流活动的预测较好,进而改善了对中国长江流域夏季水汽输送的预测(Li C F, et al, 2016, 2017; Li H L, 2017)。

从理论上讲,尚不清楚气候系统模式/地球系统模式究竟对热带外气候季节内、季节及更大时间尺度气候预测有多大潜力、上限在哪,或者说,热带外气候究竟有多大的可预测性。根本原因是热带外大气的内在变率很大,而影响热带外气候变异的因素太多、太复杂。所以,理论上的深入探索仍然是必要的。

对气候系统中各种过程的认识和对模式的改进也许是长期的研究主题,甚至还不十分清楚改进哪些方面对改进气候预测是最关键的,GloSEA5对长江流域夏季降水预测的改进是否最终源于模式分辨率的提高也是不清楚的。对于任何模式预测系统而言,初始化和资料同化都是至关重要的。未来10年,美、欧、日等国家和相关组织将陆续实施高分辨率多圈层耦合地球系统模式同化来实现环境监测和预测。随着获取数据手段的发展,使用数据的能力将有重大突破和进展,数据中隐藏的气候变化规律和趋势将被挖掘利用。可以预见,对气候异常的一些模糊认识将可以利用大数据来验证,从而提高气候预测的水平。因此,基于大数据和人工智能的气候预测,也会是将来短期气候预测领域的重要方向之一,并向延伸期尺度的气候预测、次季节-季节尺度预测等领域拓展。

表4简要介绍了国际上主要的季节-年际气候预测业务系统,来自欧洲、美国、日本、澳大利亚和中国。欧洲中期预报中心和英国气象局的模式系统水平和垂直分辨率都是最高的,预测系统的集合样本数也是最大的。在这些预测系统的发展中,对于模式物理过程和初始化过程的完善都是被高度重视的。在国际相关研究计划方面(表5),从早期的欧洲多模式短期气候集合预测计划(DEMETER, 2000-2003)到2013年开始至今的季节内-季节气候预测研究计划,可以清晰地看到,国际上对季节内-季节-年际气候预测研究高度重视。当然年代际气候预测无疑也是非常重要的方面和研究前沿。



表 4 目前国际上部分业务运行的季节气候预测系统  
Table 4 Some international prediction systems for the seasonal operational forecasting

机构/国家	预测系统/模式	模式类型	大气模式及分辨率	海洋模式及分辨率	初值扰动方案	模式物理过程扰动方案	集合数	参考文献
欧洲中期天气预报中心	SEAS5	海-气-陆-冰耦合模式	IFS CY43r1, T319L91	NEMO v3.4.1, 0.25°L75	EDA和SVs	SPPT和SKEB	51	Johnson, et al, 2019
美国	CFSv2	海-气-陆-冰耦合模式	GFS, T126L64	MOM4, 0.5°×(0.25°—0.5°)L40	LAF	—	24(28)	Saha, et al, 2014
英国	GloSEA5	海-气-陆-冰耦合模式	MetUM v3.0, N216L85	NEMO v3.0, 0.25°L75	LAF	SKEB2	42	MacLachlan, et al, 2015
法国	System 5	海-气-陆-冰耦合模式	ARPEGE-Climate V6.1, T255L91	Nemo v3.2, 1°L42	LAF	SDP	51	Météo-France, 2015
日本	JMA/MRI-CPS2	海-气-陆-冰耦合模式	JMA-GSM1011C, TL159L60	MRLCOM v3, 1°×(0.3°—0.5°)L52	LE和BGM	SPS	51	Takaya, et al, 2018
中国	BCC-CGCM	海-气-陆-冰耦合模式	BCC_AGCM2.2, T106L26	MOM_L40, 1/3°—1°	LAF和SVs	—	15	吴统文等, 2013
加拿大	CanSIPS	海-气-陆-冰耦合模式	CanAM3, T63L31; CanAM4, T63L35	CanOM4, 1.41°×0.94°L40	EDA	—	20	Merryfield, et al, 2013
澳大利亚	POAMA2	海-气-陆耦合模式, 但陆面模式为简单的“水桶模式”	BAM3.0d, T47L17	ACOM2, 2°×(0.5°—1.5°)L25	LAF	—	33	Alves, et al, 2003

EDA: 基于数据同化集合的初值扰动方案, perturbation based on Ensemble of Data Assimilations(Isaksen, et al, 2010)

SVs: 奇异向量法, Singular Vectors(Leutbecher, et al, 2008)

SPPT: 随机物理倾向扰动方案, Stochastically Perturbed Physical Tendency scheme(Leutbecher, et al, 2016)

SKEB: 随机动能补偿方案, Stochastic Kinetic Energy Backscatter scheme(Shutts, 2005)

LAF: 时间滞后平均方案, Lagged Average Forecasting(Hoffman, et al, 1983)

SDP: 随机动力过程方案, Stochastic Dynamics Procedure(Batté, et al, 2012)

BGM: 增长模繁殖法, Breeding of Growing Mode(Toth, et al, 1997)

SPS: 随机物理方案, Stochastic Physics scheme(Yonehara, et al, 2011)

SKEB2: 改进的随机动能补偿方案, Stochastic Kinetic Energy Backscatter v2(Bowler, et al, 2009)

表 5 涉及短期气候预测的主要国际研究计划  
Table 5 The main projects referring to the short-term climate prediction

计划名称	起止时间	参与模式数	回报时段	参考文献/介绍网站
DEMETER	2000—2003年	10	1958—2001年	Palmer, et al, 2004
ENSEMBLES	2004—2009年	5	1960—2005年	Hewitt, 2005
CHFP <sup>①</sup>	2007年—	16	1979/1996—2003/2012年 <sup>②</sup>	Tompkins, et al, 2017
NMME	2011年—	9	1981—2010年	Kirtman, et al, 2014
EUROSIP	2012年—	5	1991—2010年	<a href="https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/long-range/seasonal-forecast-documentation/eurosip-user-guide/multi-model">https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/long-range/seasonal-forecast-documentation/eurosip-user-guide/multi-model</a>
S2S	2013年—	11	1981/1999—2009/2014年 <sup>③</sup>	Vitart, et al, 2017
SPECS	2012年—	5/15 <sup>④</sup>	1979—2012年	<a href="http://www.specs-fp7.eu/">http://www.specs-fp7.eu/</a>

DEMETER: 欧洲多模式短期气候集合预测计划, Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to in TERannual predictions

ENSEMBLES: 基于多模式集合的气候变化、预测及影响研究计划, ENSEMBLE-based Predictions of Climate Change and their ImpactS

CHFP: 气候系统历史预报项目, The Climate-system Historical Forecast Project

NMME: 北美多模式集合预报计划, North American Multi-Model Ensemble

EUROSIP: 欧洲多模式季节-年际预测计划, European Seasonal to Interannual Prediction

S2S: 次季节-季节气候预测计划, sub-seasonal to seasonal prediction project

SPECS: 欧洲季节-年代际气候预测服务推进计划, Seasonal-to-decadal climate prediction for the improvement of European climate services

① 目前 CHFP 计划进行到第二阶段, 有些文献中以 CHFP I 和 CHFP II 对其第一阶段和第二阶段进行标识, 文中未进行更细致的划分。

② CHFP 中不同模式数据回报时段不尽相同。其中开始时间最早 1979 年, 最晚为 1996 年; 结束时间最早 2003 年, 最晚 2012 年。

③ S2S 中不同模式数据回报时段不同。其中开始时间最早 1981 年, 最晚 1999 年; 结束时间最早 2009 年, 最晚 2012 年。

④ 目前 SPECS 共有 15 个模式的数据开放, 其中 5 个模式提供季节尺度预测回报数据。

(3) 发展动力-统计相结合的气候预测方法对于区域气候预测而言至关重要。

基于模式的有效预测结果和前期观测信息发展一系列有效的动力-统计相结合的预测方法是现阶段及未来很长时期里提高气候预测准确度的重要途径,也许是最重要的途径,已经建立起来的多种有效预测方法和模型已经证明了这一点。对统计预测方法的研究也有很多进展,一些新的人工智能方法将会被有效应用起来。而究竟模式预测的哪些结果是有效可用的?这也是值得深入探究的。原则上,所有模式有能力预测的因素都可能是值得应用的。可是,由于这些因素之间可能存在着复杂的关联,任何有效的动力-统计预测模式都不可能把这些因素全部吸纳。所以,动力-统计相结合的气候预测模型的创新是非常需要研究的。

另外,目前的气候预测对象基本是针对月尺度和季节尺度气象变量时间平均值的距平(即与其多年平均值的差值)。而极端气候的预测更复杂、也更困难,涉及一段时间内发生极端气候的频次、强度、持续时间等(夏、秋季华北发生干旱的频次、强度、持续时间的预测)。极端气候的预测同样需要借助于动力和统计方法的结合,对于极端气候的发生过程和机制的深入、系统研究是做好发展有效的预测方法的前提,把模式预测和经验统计预测相结合是关键途径。

## 参考文献

- 陈丽娟,李维京,张培群等. 2003. 降尺度技术在月降水预报中的应用. *应用气象学报*, 14(6): 649-655. Chen L J, Li W J, Zhang P Q, et al. 2003. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast. *J Appl Meteor Sci*, 14(6): 649-655 (in Chinese)
- 陈烈庭. 1974. 1972年冬季世界性天气异常的环流特征及其与海表水温的联系. *科学通报*, (8): 372-375. Chen L T. 1974. Circulation characteristics of the global weather anomalies in winter 1972 and their relationship with the sea surface temperature anomaly. *Chinese Sci Bull*, (8): 372-375 (in Chinese)
- 陈烈庭. 1977. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响. *大气科学*, (1): 1-12. Chen L T. 1977. The effects of the anomalous sea-surface temperature of the equatorial Eastern Pacific Ocean on the tropical circulation and rainfall during the rainy period in China. *Sci Atmos Sinica*, (1): 1-12 (in Chinese)
- 丁一汇,李清泉,李维京等. 2004. 中国业务动力季节预报的进展. *气象学报*, 62(5): 598-612. Ding Y H, Li Q Q, Li W J, et al. 2004. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China. *Acta Meteor Sinica*, 62(5): 598-612 (in Chinese)
- 杜银,谢志清,肖卉. 2014. 中国东部夏季降水异常与青藏高原冬季积雪的关系. *气象科学*, 34(6): 647-655. Du Y, Xie Z Q, Xiao H. 2014. Relation between summer precipitation anomaly in eastern China and winter snow in Tibetan Plateau. *J Meteor Sci*, 34(6): 647-655 (in Chinese)
- 封国林,赵俊虎,杨杰等. 2015. 中国汛期降水动力-统计预测研究. 北京: 科学出版社, 330pp. Feng G L, Zhao J H, Yang J, et al. 2015. The Study on Dynamical and Statistical Prediction on Summer Precipitation over China. Beijing: Science Press, 330pp (in Chinese)
- 符淙斌. 1978. 用赤道太平洋某些海洋气象要素做副热带高压长期预报的试验. *气象*, 4(2): 16-17. Fu C B. 1978. Experiments on long-term forecast of subtropical high using the equatorial Pacific meteorological factors. *Meteor Mon*, 4(2): 16-17 (in Chinese)
- 符淙斌. 1980. 北半球冬春冰雪面积变化与我国东北地区夏季低温的关系. *气象学报*, 38(2): 187-192. Fu C B. 1980. Relationship between changes in the northern hemisphere winter-spring snow cover and the summer low-temperatures over Northeast China. *Acta Meteor Sinica*, 38(2): 187-192 (in Chinese)
- 霍飞,江志红,刘征宇. 2014. 春夏季青藏高原积雪对中国夏末秋初降水的影响及其可能机制. *大气科学*, 38(2): 352-362. Huo F, Jiang Z H, Liu Z Y. 2014. Impacts of late spring Tibetan Plateau snow cover on early autumn precipitation. *Chinese J Atmos Sci*, 38(2): 352-362 (in Chinese)
- 贾小龙,李崇银. 2005. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响. *地球物理学报*, 48(6): 1238-1249. Jia X L, Li C Y. 2005. Dipole oscillation in the Southern Indian Ocean and its impacts on climate. *Chinese J Geophys*, 48(6): 1238-1249 (in Chinese)
- 贾小龙,陈丽娟,高辉等. 2013. 我国短期气候预测技术进展. *应用气象学报*, 24(6): 641-655. Jia X L, Chen L J, Gao H, et al. 2013. Advances of the short-range climate prediction in China. *J Appl Meteor Sci*, 24(6): 641-655 (in Chinese)
- 李维京,纪立人. 2000. 月动力延伸预报研究. 北京: 气象出版社, 171pp. Li W J, Ji L R. 2000. Research on Monthly Dynamical Extended Range Forecast. Beijing: China Meteorological Press, 171pp (in Chinese)
- 李维京,郑志海,孙丞虎. 2013. 近年来我国短期气候预测中动力相似预测方法研究与应用进展. *大气科学*, 37(2): 341-350. Li W J, Zheng Z H, Sun C H. 2013. Improvements to dynamical analogue climate prediction method in China. *Chinese J Atmos Sci*, 37(2): 341-350 (in Chinese)
- 李宪之. 1955a. 东亚寒潮侵袭的研究//中国近代科学论著选刊: 气象学(1919—1949). 北京: 科学出版社, 35-118. Li X Z. 1955a. Study on the invasion of cold wave over East Asia//Chinese Modern Scientific Works Series: Meteorology (1919-1949). Beijing: Science Press, 35-118 (in Chinese)
- 李宪之. 1955b. 台风的研究//中国近代科学论著选刊: 气象学(1919—1949). 北京: 科学出版社, 119-146. Li X Z. 1955b. Study on typhoon//Chinese Modern Scientific Works Series: Meteorology (1919-

- 1949). Beijing: Science Press, 119-146 (in Chinese)
- 李秀珍, 唐旭紫, 李施华等. 2018. 春季青藏高原感热对中国东部夏季降水的影响和预测作用. *气象学报*, 76(6): 930-943. Li X Z, Tang X Z, Li S H, et al. 2018. Impact of the spring sensible heat flux over the Tibetan Plateau on summer rainfall over East China and its role in rainfall prediction. *Acta Meteor Sinica*, 76(6): 930-943 (in Chinese)
- 李震坤, 武炳义, 朱伟军. 2009. 春季欧亚积雪异常影响中国夏季降水的数值试验. *气候变化研究进展*, 5(4): 196-201. Li Z K, Wu B Y, Zhu W J. 2009. Numerical simulation on effect of spring Eurasian snow cover on summer rainfall in China. *Adv Climate Change Res*, 5(4): 196-201 (in Chinese)
- 马洁华, 王会军. 2014. 一个基于耦合气候系统模式的气候预测系统的研制. *中国科学: 地球科学*, 44(8): 1689-1700. Ma J H, Wang H J. 2014. Design and testing of a global climate prediction system based on a coupled climate model. *Sci China Earth Sci*, 57(10): 2417-2427
- 马洁华, 孙建奇, 汪君等. 2019. 2018年夏季我国极端降水及滑坡泥石流灾害预测. *大气科学学报*, 42(1): 93-99. Ma J H, Sun J Q, Wang J, et al. 2019. Real-time prediction for 2018 JJA extreme precipitation and landslides. *Trans Atmos Sci*, 42(1): 93-99 (in Chinese)
- 彭加毅, 孙照渤, 倪东鸿. 2000. 春季赤道东太平洋海温异常与东亚夏季风的关系. *南京气象学院学报*, 23(3): 385-390. Peng J Y, Sun Z B, Ni D H. 2000. Relation of eastern Asian summer monsoon with the equatorial eastern Pacific spring SSTA. *J Nanjing Inst Meteor*, 23(3): 385-390 (in Chinese)
- 钱卓蕾. 2014. 秋季南极涛动异常对冬季中国南方降水的影响. *大气科学*, 38(1): 190-200. Qian Z L. 2014. The impact of autumn Antarctic Oscillation (AAO) on winter precipitation in southern China. *Chinese J Atmos Sci*, 38(1): 190-200 (in Chinese)
- 任宏利, 丑纪范. 2005. 统计-动力相结合的相似误差订正法. *气象学报*, 63(6): 988-993. Ren H L, Chou J F. 2005. Analogue correction method of errors by combining both statistical and dynamical methods together. *Acta Meteor Sinica*, 63(6): 988-993 (in Chinese)
- 任宏利. 2006. 动力相似预报的策略和方法 [D]. 兰州: 兰州大学, 95pp. Ren H L. 2006. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 95pp (in Chinese)
- 任宏利, 丑纪范. 2007a. 数值模式的预报策略和方法研究进展. *地球科学进展*, 22(4): 376-385. Ren H L, Chou J F. 2007a. Study progress in prediction strategy and methodology on numerical model. *Adv Earth Sci*, 22(4): 376-385 (in Chinese)
- 任宏利, 丑纪范. 2007b. 动力相似预报的策略和方法研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 37(8): 1101-1109. Ren H L, Chou J F. 2007b. Strategy and methodology of dynamical analogue prediction. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 50(10): 1589-1599
- 任宏利, 张培群, 李维京等. 2014. 提高月预报业务水平的动力相似集合方法. *气象学报*, 72(4): 723-730. Ren H L, Zhang P Q, Li W J, et al. 2014. The dynamical-analogue ensemble method for improving operational monthly forecasting. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(4): 723-730 (in Chinese)
- 任宏利, 吴捷, 赵崇博等. 2015. MJO 预报研究进展. *应用气象学报*, 26(6): 658-668. Ren H L, Wu J, Zhao C B, et al. 2015. Progresses of MJO prediction researches and developments. *J Appl Meteor Sci*, 26(6): 658-668 (in Chinese)
- 任宏利, 刘颖, 左金清等. 2016. 国家气候中心新一代 ENSO 预测系统及其对 2014/2016 年超强厄尔尼诺事件的预测. *气象*, 42(5): 521-531. Ren H L, Liu Y, Zuo J Q, et al. 2016. The new generation of ENSO prediction system in Beijing Climate Centre and its predictions for the 2014/2016 super El Niño event. *Meteor Mon*, 42(5): 521-531 (in Chinese)
- 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. *大气科学*, 42(4): 806-822. Sun J Q, Ma J H, Chen H P, et al. 2018. Application of downscaling methods in the East Asian climate prediction. *Chinese J Atmos Sci*, 42(4): 806-822 (in Chinese)
- 涂长望. 1937. 中国天气与世界天气的浪动及其长期预告中国夏季旱涝的应用. *气象杂志*, 13(11): 647-697. Tu C W. 1937. China weather and world oscillation with application to longrange forecasting to floods and drought of China during the summer. *The Meteorological Magazine*, 13(11): 647-697 (in Chinese)
- 涂长望, 黄仕松. 1944. 中国夏季风之进退. *气象学报*, 18(1): 81-92. Tu C W, Huang S S. 1944. The advance and retreat of the summer monsoon in China. *Acta Meteor Sinica*, 18(1): 81-92 (in Chinese)
- 王静, 祁莉, 何金海等. 2016. 青藏高原春季土壤湿度与我国长江流域夏季降水的联系及其可能机理. *地球物理学报*, 59(11): 3985-3995. Wang J, Qi L, He J H, et al. 2016. Relationship between spring soil moisture in the Tibetan Plateau and summer precipitation in the Yangtze River Basin and its possible mechanism. *Chinese J Geophys*, 59(11): 3985-3995 (in Chinese)
- 汪君, 王会军, 洪阳. 2016. 中国洪涝滑坡灾害监测和动力数值预报系统的研究. 北京: 气象出版社, 164pp. Wang J, Wang H J, Hong Y. 2016. A Realtime Monitoring and Dynamical Forecasting System for Floods and Landslides in China. Beijing: China Meteorological Press, 164pp (in Chinese)
- 王永光, 郑志海. 2018. 2017 年汛期气候预测先兆信号的综合分析. *气象*, 44(4): 565-571. Wang Y G, Zheng Z H. 2018. Precursory signal analysis of summer rainfall prediction in China in 2017. *Meteor Mon*, 44(4): 565-571 (in Chinese)
- 魏凤英. 2011. 我国短期气候预测的物理基础及其预测思路. *应用气象学报*, 22(1): 1-11. Wei F Y. 2011. Physical basis of short-term climate prediction in China and short-term climate objective prediction methods. *J Appl Meteor Sci*, 22(1): 1-11 (in Chinese)
- 吴捷, 任宏利, 赵崇博等. 2016. 国家气候中心 MJO 监测预测业务产品研发及应用. *应用气象学报*, 27(6): 641-653. Wu J, Ren H L, Zhao C B, et al. 2016. Research and application of operational MJO monitoring and prediction products in Beijing Climate Center. *J Appl Meteor Sci*, 27(6): 641-653 (in Chinese)
- 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. 大气科学, 41(6): 1300-1315. Wu J, Ren H L, Zhang S, et al. 2017. Evaluation and predictability analysis of seasonal prediction by BCC second-generation climate system model. Chinese J Atmos Sci, 41(6): 1300-1315 (in Chinese)
- 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. 应用气象学报, 24(5): 533-543. Wu T W, Song L C, Liu X W, et al. 2013. Progress in developing the short-range operational climate prediction system of China national climate center. J Appl Meteor Sci, 24(5): 533-543 (in Chinese)
- 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. 热带气象学报, 18(4): 335-344. Xiao Z N, Yan H M, Li C Y. 2002. The relationship between Indian Ocean SSTA dipole index and the precipitation and temperature over China. J Trop Meteor, 18(4): 335-344 (in Chinese)
- 肖子牛. 2010. 我国短期气候监测预测业务进展. 气象, 36(7): 21-25. Xiao Z N. 2010. Advances of the short-range climate monitoring and prediction in China. Meteor Mon, 36(7): 21-25 (in Chinese)
- 谢永坤, 刘玉芝, 黄建平. 2014. 秋季北极海冰对中国冬季气温的影响. 气象学报, 72(4): 703-710. Xie Y K, Liu Y Z, Huang J P. 2014. The influence of the autumn Arctic sea ice on winter air temperature in China. Acta Meteor Sinica, 72(4): 703-710 (in Chinese)
- 杨鉴初. 1953. 运用气象要素历史变演的规律性作一年以上的长期预告. 气象学报, 24(2): 100-117. Yang J C. 1953. The long-term prediction using the regularity of the historical meteorological elements. Acta Meteor Sinica, 24(2): 100-117 (in Chinese)
- 杨鉴初, 陈烈庭. 1963. 太阳活动对冬半年中高纬度欧亚范围内长期天气过程长度的影响. 地球物理学报, 12(2): 131-136. Yang J C, Chen L T. 1963. The influence of solar corpus upon the duration of large-scale weather process of Eurasia during the winter half-year. Chinese J Sinica, 12(2): 131-136 (in Chinese)
- 曾庆存, 袁重光, 王万秋等. 1990. 跨季度气候距平数值预测试验. 大气科学, 14(1): 10-25. Zeng Q C, Yuan C G, Wang W Q, et al. 1990. Experiments in numerical extraseasonal prediction of climate anomalies. Sci Atmos Sinica, 14(1): 10-25 (in Chinese)
- 张超, 田荣湘, 菲慧玲等. 2018. 青藏高原4月感热通量异常对长江以南夏季降水的影响. 大气科学学报, 41(6): 775-785. Zhang C, Tian R X, Mao H L, et al. 2018. Impact of the sensible heat flux anomaly over the Tibetan Plateau in April on summer precipitation in the south of the Yangtze River Region. Trans Atmos Sci, 41(6): 775-785 (in Chinese)
- 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. Zhang S L, Tao S Y. 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon. Chinese J Atmos Sci, 25(3): 372-390 (in Chinese)
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场. 北京: 气象出版社, 297pp. Zhao Z G. 1999. Summer Drought and Flood and Their Associated Circulation Anomalies over China. Beijing: China Meteorological Press, 297pp (in Chinese)
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1(1): 1-27. Chu Coching. 1934. The enigma of southeast monsoon in China. Acta Geogr Sinica, 1(1): 1-27 (in Chinese)
- 左志燕, 张人禾. 2007. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系. 科学通报, 52(14): 1722-1724. Zuo Z Y, Zhang R H. 2007. The spring soil moisture and the summer rainfall in eastern China. Chinese Sci Bull, 52(23): 3310-3312
- Alves O, Wang G M, Zhong A H, et al. 2003. POAMA: Bureau of meteorology coupled model seasonal forecast system//ECMWF Workshop on the Role of the Upper Ocean in Medium and Extended Range Forecasting. Reading, UK: ECMWF
- Ao J, Sun J Q. 2016a. Connection between November snow cover over Eastern Europe and winter precipitation over East Asia. Int J Climatol, 36(5): 2396-2404
- Ao J, Sun J Q. 2016b. The impact of boreal autumn SST anomalies over the South Pacific on boreal winter precipitation over East Asia. Adv Atmos Sci, 33(5): 644-655
- Batté L, Déqué M. 2012. A stochastic method for improving seasonal predictions. Geophys Res Lett, 39(9): L09707
- Bowler N E, Arribas A, Beare S E, et al. 2009. The local ETKF and SKEB: Upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction system. Quart J Roy Meteor Soc, 135(640): 767-776
- Chen H P, Sun J Q, Wang H J. 2012. A statistical downscaling model for forecasting summer rainfall in China from DEMETER Hindcast datasets. Wea Forecasting, 27(3): 608-628
- Chen Z, Wu R G, Chen W. 2014. Impacts of autumn Arctic sea ice concentration changes on the East Asian winter monsoon variability. J Climate, 27(14): 5433-5450
- Dai H X, Fan K, Tian B Q. 2018. A hybrid downscaling model for winter temperature over Northeast China. Int J Climatol, 38(S1): e349-e363
- Dai Y J, Zeng Q C. 1997. A land surface model (IAP94) for climate studies Part I: Formulation and validation in off-line experiments. Adv Atmos Sci, 14(4): 433-460
- Dai Y J, Zeng Z B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model. Bull Amer Meteor Soc, 84(8): 1013-1024
- Fan K, Wang H J, Choi Y J. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River Valley summer rainfall. Chinese Sci Bull, 53(4): 602-609
- Fan K. 2009a. Seasonal forecast model for the number of tropical cyclones to make landfall in China. Atmos Oceanic Sci Lett, 2(5): 251-254
- Fan K. 2009b. Predicting winter surface air temperature in Northeast China. Atmos Oceanic Sci Lett, 2(1): 14-17
- Fan K, Lin M J, Gao Y Z. 2009a. Forecasting the summer rainfall in North China using the year-to-year increment approach. Sci China Ser D: Earth Sci, 52(4): 532-539
- Fan K, Wang H J. 2009b. A new approach to forecasting typhoon frequency over the western North Pacific. Wea Forecasting, 24(4): 974-986

- Fan K. 2010. A prediction model for Atlantic named storm frequency using a year-by-year increment approach. *Wea Forecasting*, 25(6): 1842-1851
- Fan K, Wang H J. 2010. Seasonal prediction of summer temperature over Northeast China using a year-to-year incremental approach. *Acta Meteor Sinica*, 24(3): 269-275
- Fan K. 2012. A statistical prediction model for spring rainfall over northern China based on the interannual increment approach. *J Trop Meteor*, 18(4): 543-550
- Fan K, Liu Y, Chen H P. 2012. Improving the prediction of the East Asian summer monsoon: New approaches. *Wea Forecasting*, 27(4): 1017-1030
- Fan K, Tian B Q. 2013. Prediction of wintertime heavy snow activity in Northeast China. *Chinese Sci Bull*, 58(12): 1420-1426
- Fan K, Tian B Q, Wang H J. 2016. New approaches for the skillful prediction of the winter North Atlantic Oscillation based on coupled dynamic climate models. *Int J Climatol*, 36(1): 82-94
- Gao H, Li X. 2015. Influences of El Nino Southern Oscillation events on haze frequency in eastern China during boreal winters. *Int J Climatol*, 35(9): 2682-2688
- Gao T, Xie L. 2014. Multivariate regression analysis and statistical modeling for summer extreme precipitation over the Yangtze River basin, China. *Adv Meteor*, 2014: 269059
- Gu W, Li C Y, Wang X, et al. 2009. Linkage between Mei-yu precipitation and North Atlantic SST on the decadal timescale. *Adv Atmos Sci*, 26(1): 101-108
- Gushchina D, Dewitte B. 2019. Decadal modulation of the relationship between intraseasonal tropical variability and ENSO. *Climate Dyn*, 52(3-4): 2091-2103
- Han T T, He S P, Wang H J, et al. 2017a. Enhanced influence of early-spring tropical Indian Ocean SST on the following early-summer precipitation over Northeast China. *Climate Dyn*, 51: 4065-4076
- Han T T, Wang H J, Sun J Q. 2017b. Strengthened relationship between eastern ENSO and summer precipitation over Northeastern China. *J Climate*, 30(12): 4497-4512
- He S P, Wang H J. 2016. Linkage between the East Asian January temperature extremes and the preceding Arctic Oscillation. *Int J Climatol*, 36(2): 1026-1032
- Hewitt C. 2005. The ENSEMBLES project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. *EGGS Newsletter*, 13: 22-25
- Hoffman R N, Kalnay E. 1983. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr*, 35(2): 100-118
- Hsu P C, Li T, You L J, et al. 2015. A spatial-temporal projection model for 10-30 day rainfall forecast in South China. *Climate Dyn*, 44(5-6): 1227-1244
- Hsu P C, Lee J Y, Ha K J. 2016. Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on rainfall extremes in southern China. *Int J Climatol*, 36(3): 1403-1412
- Hsu P C, Lee J Y, Ha K J, et al. 2017. Influences of boreal summer intraseasonal oscillation on heat waves in monsoon Asia. *J Climate*, 30(18): 7191-7211
- Huang Y Y, Wang H J, Fan K. 2014. Improving the prediction of the summer Asian-Pacific oscillation using the interannual increment approach. *J Climate*, 27(21): 8126-8134
- Isaksen L, Bonavita M, Buizza R, et al. 2010. Ensemble of data assimilations at ECMWF. Technical Report 636. Reading, UK: ECMWF.
- Ji L Q, Fan K. 2019. Climate prediction of dust weather frequency over northern China based on sea-ice cover and vegetation variability. *Climate Dyn*, 53(1): 687-705
- Johnson J S, Stockdale N T, Ferranti L, et al. 2019. SEAS5: The new ECMWF seasonal forecast system. *Geosci Model Dev*, 12(3): 1087-1117
- Kim H J, Ahn J B. 2012. Possible impact of the autumnal North Pacific SST and November AO on the East Asian winter temperature. *J Geophys Res*, 117(D12): D12104
- Kirtman B P, Min D, Infanti J M, et al. 2014. The North American multimodel ensemble: Ensemble: phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(4): 585-601
- Leutbecher M, Palmer T N. 2008. Ensemble forecasting. *J Comp Phys*, 227(7): 3515-3539
- Leutbecher M, Lock S J, Ollinaho P, et al. 2016. Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: State of the art and future vision. ECMWF Research Department Memorandum 785. Reading, UK: ECMWF
- Li C F, Scaife A A, Lu R Y, et al. 2016. Skillful seasonal prediction of Yangtze River valley summer rainfall. *Environ Res Lett*, 11(9): 094002
- Li C F, Lu R Y, Chen G H. 2017. Promising prediction of the monsoon trough and its implication for tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Environ Res Lett*, 12(7): 074027
- Li F, Wang H J. 2013. Relationship between Bering sea ice cover and East Asian winter monsoon year-to-year variations. *Adv Atmos Sci*, 30(1): 48-56
- Li F, Wang H J. 2014. Autumn Eurasian snow depth, autumn Arctic sea ice cover and East Asian winter monsoon. *Int J Climatol*, 34(13): 3616-3625
- Li H L, Wang H J, Jiang D B. 2017. Influence of October Eurasian snow on winter temperature over Northeast China. *Adv Atmos Sci*, 34(1): 116-126
- Li H X, Chen H P, Wang H J, et al. 2018. Can Barents Sea Ice decline in spring enhance summer hot drought events over northeastern China? *J Climate*, 31(12): 4705-4725
- Li J, Wang B. 2018. Predictability of summer extreme precipitation days over eastern China. *Climate Dyn*, 51(11-12): 4543-4554
- Li Q, Zhang R H, Wang Y. 2016. Interannual variation of the wintertime fog-haze days across central and eastern China and its relation with East

- Asian winter monsoon. *Int J Climatol*, 36(1): 346-354
- Liu Y, Ren H L. 2015. A hybrid statistical downscaling model for prediction of winter precipitation in China. *Int J Climatol*, 35(7): 1309-1321
- Liu Y, Ren H L. 2017. Improving ENSO prediction in CFSv2 with an analogue-based correction method. *Int J Climatol*, 37(15): 5035-5046
- Lorenz E N. 1982. Atmospheric predictability experiments with a large numerical model. *Tellus*, 34(6): 505-513
- Lu B, Ren H L, Scaife A A, et al. 2018. An extreme negative Indian Ocean Dipole event in 2016: Dynamics and predictability. *Climate Dyn*, 51(1-2): 89-100
- MacLachlan C, Arribas A, Peterson K A, et al. 2015. Global seasonal forecast system version 5(GloSea5): A high-resolution seasonal forecast system. *Quart J Roy Meteor Soc*, 141(689): 1072-1084
- Merryfield W J, Lee W S, Boer G J, et al. 2013. The Canadian seasonal to interannual prediction system. Part I: Models and initialization. *Mon Wea Rev*, 141(8): 2910-2945
- Météo-France. 2015. Météo-France seasonal forecast system 5 for Eurosp. Technical Description. Paris, France; Météo-France
- Namias J. 1953. Thirty-day forecasting: A review of a ten-year experiment. Boston, MA: American Meteorological Society
- Namias J. 1964. A 5-year experiment in the preparation of seasonal outlooks. *Mon Wea Rev*, 92(10): 449-464
- Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. 2004. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull Amer Meteor Soc*, 85(6): 853-872
- Ren H L, Liu Y, Jin F F, et al. 2014. Application of the analogue-based correction of errors method in ENSO prediction. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 7(2): 157-161
- Ren H L, Jin F F, Song L C, et al. 2017. Prediction of primary climate variability modes at the Beijing Climate Center. *J Meteor Res*, 31(1): 204-223
- Ren H L, Wu Y J, Bao Q, et al. 2019. The China multi-model ensemble prediction system and its application to flood-season prediction in 2018. *J Meteor Res*, 33(3): 540-552
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2014. The NCEP climate forecast system version 2. *J Climate*, 27(6): 2185-2208
- Shutts G. 2005. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(612): 3079-3102
- Sun C H, Yang S, Li W J, et al. 2016. Interannual variations of the dominant modes of East Asian winter monsoon and possible links to Arctic sea ice. *Climate Dyn*, 47(1-2): 481-496
- Sun J Q, Chen H P. 2012. A statistical downscaling scheme to improve global precipitation forecasting. *Meteor Atmos Phys*, 117(3-4): 87-102
- Sun J Q, Wu S, Ao J. 2016. Role of the North Pacific sea surface temperature in the East Asian winter monsoon decadal variability. *Climate Dyn*, 46(11-12): 3793-3805
- Takaya Y, Hirahara S, Yasuda T, et al. 2018. Japan Meteorological Agency/Meteorological Research Institute-Coupled Prediction System version 2( JMA/MRI-CPS2) : Atmosphere-land-ocean-sea ice coupled prediction system for operational seasonal forecasting. *Climate Dyn*, 50(3-4): 751-765
- Tian B Q, Fan K. 2012. Relationship between the late spring NAO and summer extreme precipitation frequency in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 5(6): 455-460
- Tian B Q, Fan K. 2015. A skillful prediction model for winter NAO Based on Atlantic sea surface temperature and Eurasian snow cover. *Wea Forecasting*, 30(1): 197-205
- Tian B Q, Fan K, Yang H Q. 2018. East Asian winter monsoon forecasting schemes based on the NCEP's climate forecast system. *Climate Dyn*, 51(7): 2793-2805
- Tompkins A M, De Zárate M I O, Saurral R I, et al. 2017. The climate-system historical forecast project: Providing open access to seasonal forecast ensembles from centers around the globe. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(11): 2293-2301
- Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon Wea Rev*, 125(12): 3297-3319
- Vitar F, Ardilouze C, Bonet A, et al. 2017. The subseasonal to seasonal (S2S) prediction project database. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(1): 163-173
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relations. *Adv Atmos Sci*, 19(1): 1-11
- Wang H J, Zhou G Q, Zhao Y. 2000. An effective method for correcting the seasonal-interannual prediction of summer climate anomaly. *Adv Atmos Sci*, 17(2): 234-240
- Wang H J, He S P. 2012. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s. *Chinese Sci Bull*, 57(27): 3535-3540
- Wang H J, Fan K, Sun J Q, et al. 2015a. A review of seasonal climate prediction research in China. *Adv Atmos Sci*, 32(2): 149-168
- Wang H J, Chen H P, Liu J P. 2015b. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 8(1): 1-9
- Wang H J, Chen H P. 2016. Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: Roles of climate change. *Atmos Chem Phys*, 16(6): 4205-4211
- Wu B Y, Zhang R H, Wang B, et al. 2009a. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall. *Geophys Res Lett*, 36(9): L09501
- Wu B Y, Yang K, Zhang R H. 2009b. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China. *Adv Atmos Sci*, 26(1): 31-44
- Wu J, Ren H L, Zuo J Q, et al. 2016. MJO prediction skill, predictability, and teleconnection impacts in the Beijing Climate Center Atmospheric General Circulation Model. *Dyn Atmos Oceans*, 75: 78-90
- Xiao D, Li Y, Fan S J, et al. 2015. Plausible influence of Atlantic Ocean SST anomalies on winter haze in China. *Theor Appl Climatol*, 122(1-2): 249-257

- Xiao Z X, Duan A M. 2016. Impacts of Tibetan Plateau snow cover on the interannual variability of the East Asian summer monsoon. *J Climate*, 29(23): 8495-8514
- Xu X, Zhao T, Liu F, et al. 2016. Climate modulation of the Tibetan Plateau on haze in China. *Atmos Chem Phys*, 16(3): 1365-1375
- Yin Z C, Wang H J. 2016. Seasonal prediction of winter haze days in the north central North China Plain. *Atmos Chem Phys*, 16(23): 14843-14852
- Yin Z C, Wang H J. 2017. Statistical prediction of winter haze days in the North China Plain using the generalized additive model. *J Appl Meteor Climatol*, 56(9): 2411-2419
- Yonehara H, Ujiie M. 2011. A stochastic physics scheme for model uncertainties in the JMA one-week ensemble prediction system. [https://www.wcrp-climate.org/WGNE/BlueBook/2011/individual-articles/06\\_Yonehara\\_Hitoshi\\_06\\_Yonehara\\_Hitoshi\\_WEPS.pdf](https://www.wcrp-climate.org/WGNE/BlueBook/2011/individual-articles/06_Yonehara_Hitoshi_06_Yonehara_Hitoshi_WEPS.pdf)
- Zhang D P, Huang Y Y, Sun B, et al. 2019. Verification and improvement of the ability of CFSv2 to predict the antarctic oscillation in boreal spring. *Adv Atmos Sci*, 36(3): 292-302
- Zhou M Z, Wang H J. 2014. Late winter sea ice in the Bering Sea: Predictor for maize and rice production in Northeast China. *J Appl Meteor Clim*, 53(5): 1183-1192
- Zhu Z W, Li T, Hsu P C, et al. 2015. A spatial-temporal projection model for extended-range forecast in the tropics. *Climate Dyn*, 45(3-4): 1085-1098
- Zhuang Y H, Zhang J Y, Wang L. 2017. Variability of cold season surface air temperature over northeastern China and its linkage with large-scale atmospheric circulations. *Theor Appl Climatol*, 132(3-4): 1261-1273
- Zuo J Q, Ren H L, Wu J, et al. 2016a. Subseasonal variability and predictability of the Arctic Oscillation/North Atlantic Oscillation in BCC\_AGCM2.2. *Dyn Atmos Oceans*, 75: 33-45
- Zuo J Q, Ren H L, Wu B Y, et al. 2016b. Predictability of winter temperature in China from previous autumn Arctic sea ice. *Climate Dyn*, 47(7-8): 2331-2343