

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.

降尺度方法在东亚气候预测中的应用

孙建奇^{1,3,4} 马洁华^{2,1,3} 陈活泼^{1,3} 汪君^{1,3} 于恩涛^{1,3} 田宝强¹

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

3 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 东亚气候变异十分复杂, 全球动力预测系统对该地气候异常的预测能力偏低, 如何进一步提高东亚地区气候异常的预测水平是一个非常重要的科学和现实需求问题。为此, 近些年一系列的动力和统计降尺度方法得以发展。本文主要回顾了这些降尺度方法在东亚气候预测研究和实时预测中的应用。首先, 文中简要介绍了我国目前应用于实时预测的全球动力预测系统及其性能, 这是开展降尺度的科学和技术基础; 在此基础上, 从区域模式物理过程参数化方案的评估与遴选、区域模式在东亚气候预测中的应用两个方面, 对于动力降尺度方法的发展和应用做了回顾; 在统计降尺度的综述中, 本文主要关注了东亚夏季汛期和冬季气候异常的预测, 特别是针对东亚冬季气候异常, 本文中提出了新的高效的统计与动力相结合的预测方法。最后, 展望了短期气候预测需要进一步深入研究的科学和技术问题。

关键词 短期气候预测 全球动力预测系统 区域气候模式 统计降尺度

文章编号 1006-9895(2018)04-0806-17

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17266

Application of Downscaling Methods in the East Asian Climate Prediction

SUN Jianqi^{1,3,4}, MA Jiehua^{2,1,3}, CHEN Huopo^{1,3}, WANG Jun^{1,3}, YU Entao^{1,3} and TIAN Baoqiang¹

1 Nansen–Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Variability of the East Asian climate is complicated, and the skill of the global dynamical prediction system is quite low over East Asia. Therefore, how to improve the climate prediction over East Asia is of highly scientific and practical necessity. For this reason, a series of dynamical and statistical downscaling schemes have been developed for East Asian climate prediction research and real-time prediction in recent years, and these schemes are reviewed in this paper. We first introduce the real-time global dynamical prediction systems in China and their prediction capabilities, which are the scientific and technological basis for further development of downscaling methods. Further, recent studies

收稿日期 2017-11-16; **网络预出版日期** 2018-01-31

作者简介 孙建奇, 男, 1978 年出生, 研究员, 主要从事中高纬气候系统变化及气候预测研究。E-mail: sunjq@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41522503、41421004, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306026

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41522503, 41421004), the Special Fund for Public Welfare Industry (meteorology) (Grant GYHY201306026)

on the evaluation and selection of physical parameterization schemes in regional climate models and their applications in the East Asian climate prediction are systematically reviewed. In the review of statistical downscaling methods, we mainly focus on researches on the East Asian summer and winter climate predictions. In addition, a new and skillful statistical-dynamical hybrid prediction method for East Asian winter climate prediction is developed. Finally, a number of scientific and technological questions that require further studies in the East Asian climate prediction are highlighted.

Keywords Seasonal climate prediction, Global dynamical prediction system, Regional climate model, Statistical downscaling

1 引言

我国是气候灾害的高发区, 每年巨大的经济损失严重影响着国家的可持续发展。因此, 农业、水利和防灾减灾等部门迫切需要准确的短期气候预测信息, 以科学服务于国民经济建设, 减小气候灾害所造成的人员伤亡和经济损失。与短时的天气预报相比, 短期气候预测不仅是大气初值问题, 还涉及到地球系统各圈层的变化及其相互作用, 预测对象的变异机理十分复杂, 因此, 短期气候预测是一个极其困难的科学问题, 也是世界气候研究计划 (World Climate Research Programme, 简称 WCRP)、欧洲季节到十年际气候预测发展计划 (Seasonal-to-decadal climate Prediction for the improvement of European Climate Services, 简称 SPECS) 和次季节到季节气候预测计划 (Subseasonal-to-Seasonal Prediction Project, 简称 S2S) 等众多科学计划的核心内容。

从 20 世纪 90 年代开始, 基于数值模式的动力学短期气候预测试验广泛开展。曾庆存等 (1990) 首次尝试利用大气环流模式耦合大洋环流模式开展跨季节气候预测, 之后中国科学院大气物理研究所 (以下简称大气所或 IAP) 逐步完善和建立了基于两层大气环流模式 (IAP2L-AGCM) 的 IAP PSSCA (大气所短期气候距平数值预测系统) 和 IAP DCP-II (大气所跨季节动力气候预测系统)、基于九层大气环流模式 (IAP9L-AGCM) 以及基于 IAP AGCM4 (大气所第四代大气环流模式) 的多个“两步法”预测系统, 并开展了多年的实时预测检验 (袁重光等, 1996; 林朝晖等, 1998; 曾庆存等, 2003; 郎咸梅等, 2004), 取得了令人鼓舞的成绩。“九五”期间通过国内众多科学家的共同努力, 于 2001 年建立了我国第一代短期气候预测业务系统, 并开始业务运行 (丁一汇, 2004)。

随着耦合模式的不断发展, 利用耦合模式开展

“一步法”气候预测逐渐成为动力气候预测的主流发展方向 (Stockdale et al., 1998)。至 21 世纪初, 欧美等发达国家相继建立“一步法”业务预测系统, 比较著名的包括美国国家环境预报中心气候预测中心 (NCEP CPC) 的气候预测系统 (Climate Forecast System, 简称 CFS) 系列 (Saha et al., 2006, 2014)、欧洲中长期天气预报中心 (ECMWF) 的 System 系列 (Molteni et al., 2011; Stockdale et al., 2011) 和英国 Hadley 中心的全球季节预测系统 (GloSea) 系列 (Arribas et al., 2011; MacLachlan et al., 2015) 等。为了更好地推动短期气候预测动力系统的发展, 国际上发起了季节到年际尺度多模式集合气候预测系统计划 (Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to inTERannual prediction, 简称 DEMETER; Palmer et al., 2004)、针对气候变化及其影响多模式集合预测计划 (ENSEMBLES; Hewitt, 2005) 和北美多模式集合计划 (The US National Multi-Model Ensemble, 简称 NMME; Kirtman et al., 2014) 等科学计划。作为较早开始利用数值模式开展气候预测的中国, 也努力研制基于耦合模式的“一步法”气候预测系统。国家气候中心发展了基于北京气候中心气候系统模式 (Beijing Climate Center Climate System Model, 简称 BCC_CSM) 的第 1 代和第 2 代气候预测系统 (丁一汇等, 2004; 吴统文等, 2013), IAP 发展了基于通用气候系统模式 (Community Climate System Model, 简称 CCSM4) 的动力预测系统 PCCSM4 (马洁华和王会军, 2014)。

经过多年的不懈努力, 动力预测方法各方面都取得了很大的进步, 特别是在 ENSO (厄尔尼诺和南方涛动) 预测方面, 目前的全球预测系统在超前 1 个月的情况下 Niño3.4 指数与观测的相关系数普遍能达到 0.8 左右 (MacLachlan et al., 2015; <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/mchen/CFSv>

2HCST/metrics/rmseCorl.html [2016-03-22]); 此外, 主流预测系统对一些大尺度环流的预测能力也得到很大的改进 (Kirtman et al., 2014; MacLachlan et al., 2015)。但由于东亚地区气候变异的复杂性、气候系统的混沌特性以及气候模式不完善等限制, 动力方法在东亚地区的预测准确率还十分有限。Yang et al. (2008) 评估了 CFS 对亚洲季风指数的预测能力, 结果显示, CFS 能够较好地回报出南亚季风和东南亚季风的年际变化, 在超前 0 个月的情况下 (6 月起报预测 6~8 月), 预测和观测季风指数的相关系数能够超过 0.6; 但对于东亚季风却没有稳定的预测能力, 相关系数仅为 0.12。Sun and Chen (2012) 评估了 DEMETER 计划的 7 个模式及多模式集合平均 (MME) 对全球降水的预测能力, 结果表明, 即使是回报性能最好的 MME 也只是对热带太平洋地区的降水具有一定的预测能力。Kirtman et al. (2014) 评估了 ECMWF 的 System4 和 NCEP 的 CFSv2 对于北半球冬季气候的预测能力, 结果显示两个系统都能较好地回报与 ENSO 有关的环流, 但对东亚地区的预测能力不足。GloSea5 对于 ENSO、西北太平洋副热带高压、北极涛动 (AO) 等大尺度环流系统都有很好的回报能力, 在超前 1 个月的情况下, 相关指数均在 0.6 以上, 但对于东亚地区的气温和降水的预测能力仍然十分有限[见 MacLachlan et al. (2015) 图 11、图 13]。

因此, 目前全球动力预测系统对东亚气候, 特别是东亚地区降水的预测能力远不能满足防灾减灾的实际需求, 而且其预测性能在短期内很难得到快速的提升, 需要通过其他方法对全球动力预测结果进行解释再利用 (李维京, 2012), 从而进一步提高东亚地区的气候预测水平。在这方面, 降尺度是比较高效和可行的方法, 本文将对近些年东亚区域降尺度方法的发展及其在预测中的应用进行回顾。文中将首先介绍我国目前应用于实时预测的动力预测系统的基本情况及其性能; 而后将重点介绍动力降尺度方法和统计降尺度方法在改进东亚预测方面的探索和应用; 最后, 讨论和展望短期气候预测领域需要进一步加强研究的关键科学和技术问题。

2 我国现有动力预测系统的预测性能

我国现在进行实时预测的主要有大气所基于 IAP2L-AGCM、IAP9L-AGCM 和 IAP AGCM4.1 的

“两步法”预测系统, 国家气候中心基于 BCC_CSM 的第 1 代和第 2 代“一步法”预测系统, 以及大气所基于 CCSM4 的“一步法”预测系统 PCCSM4。其中大气所的“两步法”预测系统的海温实时预测信息早年主要来自于周广庆等 (1998) 建立的 IAP ENSO 预测系统, 近些年则主要来自于 Zheng et al. (2006) 发展的 ENSO 集合预测系统。周广庆等 (1998) 建立的 IAP ENSO 预测系统是我国第一个基于复杂耦合模式并用于实时 ENSO 预测的动力系统, 曾对 1997/1998 年 ENSO 演变过程作出成功预测, 多年来为大气所“两步法”实时预测提供有力支持。郑飞等 (2007) 对其发展的 ENSO 预测系统的检验表明, 超前 12 个月的情况下, 预测和观测的 Niño3.4 指数的相关系数仍在 0.7 左右; 该系统已应用于实时预测多年, 并展现了良好的预测能力。以上“两步法”预测系统曾对 1998、1999 及 2002 年夏季中国地区的降水分布形势进行了成功的预测 (林朝晖等, 1998, 2000; 王会军等, 2012); 国家气候中心的第 1 代预测系统成功地预测出了 2003 年春季的降水形势 (李维京等, 2005)。

总体而言, 动力系统对我国降水的预测能力虽有所提升但仍十分有限; 相较而言, 经过多年的发展, 目前的预测系统对一些主要环流系统的预测能力还是得到了较大改进, 下面以目前我国参与实时预测的两套“一步法”预测系统为例进行说明。自 2013 年开始, 国家气候中心的第 2 代季节气候预测系统和大气所的 PCCSM4 开始进行实时预测。尽管在超前 3 个月的情况下, 气候中心的第 2 代预测系统对东亚地区夏季气温预测性能仍然偏低[见吴统文等 (2013) 图 6], 但与第 1 代预测系统相比, 其对 500 hPa 位势高度、200 hPa 和 850 hPa 纬向风的预测能力都得到了明显提升。Liu et al. (2015) 进一步评估了第 2 代预测系统对亚洲夏季风的预测能力, 结果表明, 尽管该系统对于东亚地区的降水预测仍然不稳定[见 Liu et al. (2015) 图 3e-h], 但对部分亚洲夏季风指数具有不错的预测能力, 特别是东南亚夏季风指数的相关系数最高可达 0.75; 即使超前 3 个月, 相关系数也能达到 0.6。马洁华和王会军 (2014) 评估了大气所的耦合预测系统 PCCSM4, 发现该系统可以较好地预测 ENSO 变化, 并且对北太平洋、北大西洋等其他地区的海温也有较好的预测性能, 从而包含了更多的海温预测有效

信息, 提高了气候预测能力; 同时该系统对亚洲季风区的主要环流系统有良好的预测性能, 对于所选取的 5 个季风指数均有较好的预测能力, 除 Webster-Yang 指数的相关系数仅能通过 95% 的信度检验外, 其余 4 个指数的相关系数均能通过 99% 的信度检验 (图 1)。

由此可见, 经过近三十年的发展, 我国动力预测系统性能的提升还是十分明显的, 尽管对东亚地区降水的直接预测能力仍然不足, 但其对于一些主要的海气系统已具有相当的预测能力。因此利用这些具有较好预测性能的环流信息开展动力和统计降尺度预测, 以进一步提高东亚地区降水的预测能力是可行的。

3 动力降尺度在东亚气候预测中的应用

所谓的动力降尺度是将全球气候模式与高分辨率区域气候模式进行嵌套, 从而利用区域模式更高的分辨率和更细致的物理过程参数化方案, 来改进区域气候尤其是复杂下垫面区域气候的模拟性能 (Giorgi, 1990; 高学杰等, 2006)。大量研究表明, 与全球模式相比, 区域模式的确能够更好地模拟气候要素的空间分布 (如: 高学杰等, 2006, 2010; Yu et al., 2010, 2015; Ahn et al., 2012; 汪君和王会军, 2013; Wang et al., 2016)。随着计算机技术的进步, 高分辨率区域模式的长时间积分用时越来越短, 这使得动力降尺度方法在气候预测中应用的

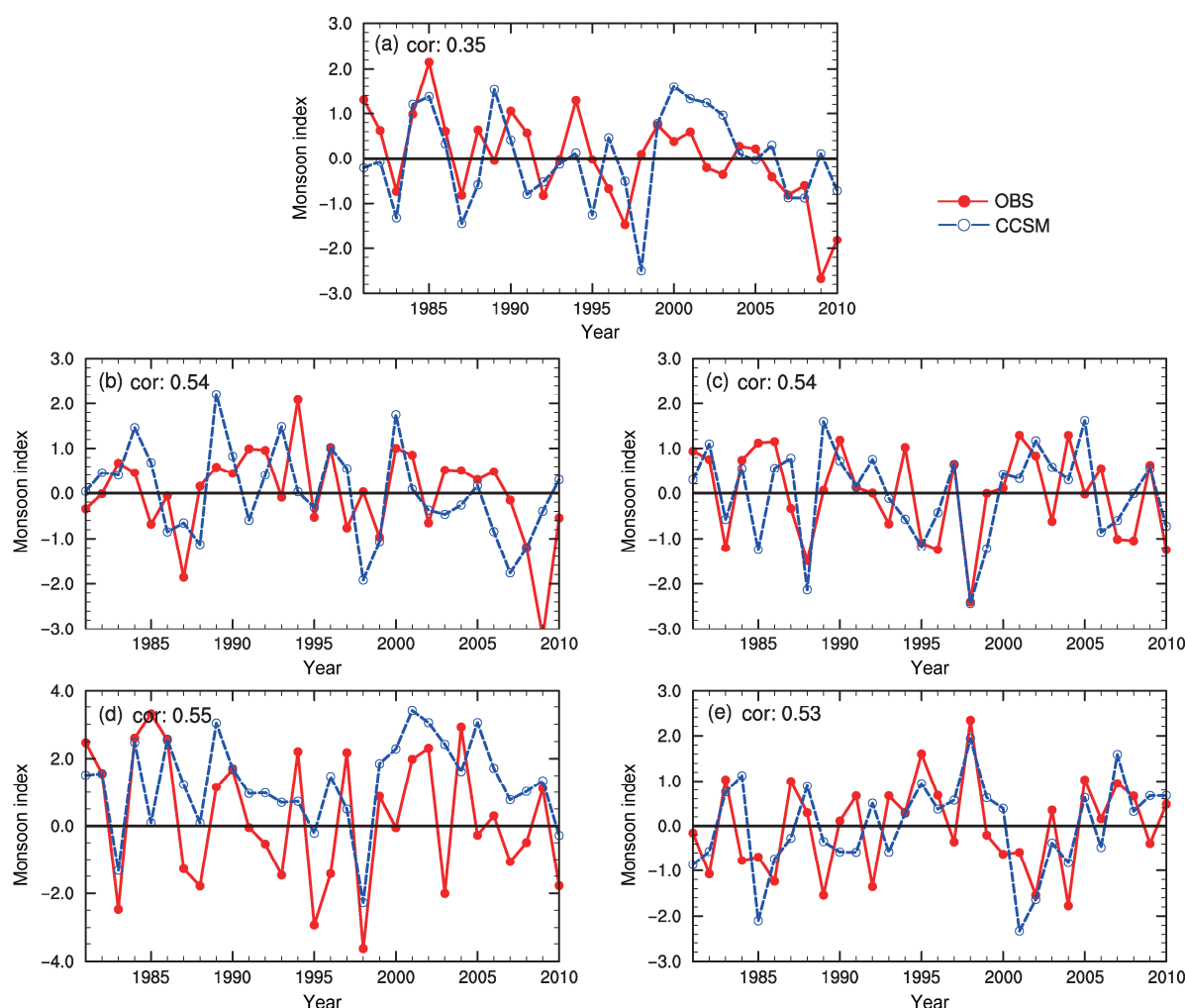


图1 1981~2010年观测(红色)与PCCSM4预测系统回报(蓝色)的(a) Webster-Yang季风指数(Webster and Yang, 1992)、(b)印度季风指数(Wang and Fan, 1999)、(c)西北太平洋季风指数(Wang et al., 2001)、(d)东亚夏季季风指数(张庆云等, 2003)和(e)东亚夏季季风指数(Wang, 2002)。引自马洁华和王会军(2014)

Fig. 1 Observed (red line) and hindcasted by PCCSM4 system (blue line) Asian monsoon indices over the period of 1981 to 2010: (a) Webster-Yang monsoon index (Webster and Yang, 1992); (b) Indian monsoon index (Wang and Fan, 1999); (c) western North Pacific monsoon index (Wang et al., 2001); (d) East Asian summer monsoon index (Zhang et al., 2003); and (e) East Asian summer monsoon index (Wang, 2002). Figures are cited from Ma and Wang (2014)

时效性得到保障,应用也越来越广泛,下面我们将对动力降尺度方法应用最为主要的两个方面进行回顾。

3.1 区域模式物理过程参数化方案的评估与遴选

在开展动力降尺度之前,进行区域模式的本地化适用性研究是十分必要的,其中最为重要的是参数化方案的评估与遴选。对于参数化方案的评估,关注最多的是积云对流参数化方案的性能。Yu et al. (2011) 比较了 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 模式三种不同积云对流参数化方案对我国夏季降水的影响,结果显示 Grell-Devenyi 方案表现出较优的模拟性能。Gao et al. (2016) 评估了国际理论物理中心区域气候模式 (ICTP Regional Climate Model system 4, 简称 RegCM4) 在使用最新通用陆面过程模式 (Community Land Model, 简称 CLM) 的陆面过程时不同积云对流参数化方案对我国 2000 年温度和降水模拟性能的影响,结果表明, Emanuel 积云对流参数化方案优于 Grell 方案。李荔珊等 (2016) 对比 RegCM4.0 中两种积云对流参数化方案对夏季东亚季风区气候模拟的影响,认为 Emanuel 方案对海洋降水和海温的分布形势模拟总体上要优于 Grell 方案。但是当具体到特定区域时,最优参数化方案的选择与以东亚作为一个整体的研究结果又有所差别。例如王澄海和余莲 (2011) 对比了 RegCM3 中三种积云对流参数化方案对青藏高原年平均降水和温度的模拟,认为 Anthes-Kuo 方案相比 Grell 和 Emanuel 方案更好一些。颜玉倩等 (2017) 则认为 RegCM4.0 中 Grell 方案相比其他两种方案能更好地模拟西南地区的降水,而 Emanuel 方案模拟的西南地区温度与观测最接近。

一般认为,积云对流参数化方案影响降水空间分布的模拟,而云微物理过程则影响降水量的模拟 (孙敏和袁慧玲, 2014; 姜珊珊等, 2015)。在模式网格距适当小的情况下,不同云微物理过程方案对降水模拟的影响十分明显 (徐国强等, 2007)。总体而言,最优云微物理方案过程对降水量级、模式分辨率和区域具有较大依赖性。如黄海波等 (2011) 对新疆地区降水模拟的研究发现,对小雨量级的降水, Lin 方案的模拟效果最好; 对于中雨和大雨量级的降水, WSM3 (WRF Single-Moment 3-class) 方案的效果最好; 对于暴雨量级的降水, WSM5 (WRF Single-Moment 5-class) 方案的最好。

而马严枝等 (2012) 对华北地区的暴雨模拟研究表明,在水平分辨率为 36 km 时, Lin 方案模拟结果最好; 12 km 时, Thompson 方案最好; 而水平分辨率为 4 km 时, WSM6 (WRF Single-Moment 6-class) 方案最好。朱格利等 (2014) 用八种不同微物理过程方案模拟了华南一次暴雨事件,结果显示 WSM3 方案对小到雨和大暴雨的模拟效果最好,对暴雨的模拟最差; WDM5 (WRF Double-Moment 5-class) 方案对暴雨模拟效果最好。而对北京地区 “7.21” (2012 年 7 月 21 日) 特大暴雨的模拟则表明, Ferrier 和 Kessler 方案对大雨和暴雨模拟效果最好 (徐之骁和徐海明, 2016)。

除了云相关的参数化方案,边界层和陆面过程的参数化方案也很重要。陈炯和王建捷 (2006) 研究了 WRF 中边界层方案对降水预报的影响,研究结果表明 MRF 和 MYJ 方案性能较为接近。贵志成等 (2014)、王子谦等 (2014) 分别研究了五种 [YSU (Yonsei University)、MYJ (Mellor-Yamada-Janjic TKE)、QNSE (Quasi-Normal Scale Elimination)、MYNN (Improved Mellor-Yamada) 2.5 和 ACM (Asymmetric Convective Model) 2] 和四种 [YSU、ACM2、Bougeault (Bougeault and Lacarrere) 和 MYJ] 边界层参数化方案对东亚夏季风模拟的影响,都认为 MYJ 方案对环流的模拟效果更好; 而 YSU 方案则对降水模拟较好。对我国不同地区,参数化方案的表现各不相同,如 Xie et al. (2012) 比较了四种边界层方案 (YSU、ACM2、MYJ 和 Bougeault) 对珠三角温度和边界层高度模拟的影响,认为 ACM2 方案模拟结果更合理。张小培和银燕 (2013) 的研究表明,对安徽黄山及其周边,YSU 方案模拟的 2 m 气温误差最小,ACM2 方案模拟的 2 m 露点温度和 10 m 风速误差最小。对西南低涡的路径、强度的模拟,YSU 模拟结果更好 (刘晓冉和李国平, 2014); 对西南地区降水的模拟,ACM2 对小雨和中雨模拟较好,YSU 对大雨和暴雨的模拟较好 (高笃鸣等, 2016)。在陆面过程方案的比较方面,邹靖和谢正辉 (2012) 对比了 RegCM4 中陆面过程方案对东亚区域气候模拟的影响,认为使用 CLM3.5 方案比 BATS (生物圈—大气圈传输模式) 方案对降水和温度的模拟偏差更小。张录军等 (2016) 对长江流域气候预测研究表明,RegCM4.5 中 CLM4.5 方案对流域内小雨预测结果最好, BATS 方案则对大雨和暴雨预测效果最优。此外, Zeng et al. (2016) 对

比了 WRF 模式中陆面过程对我国位势高度模拟的影响, 强调了选择和改进陆面过程对季节和月平均位势高度模拟的重要性, 认为 PLEX (Pleim- Xiu) 方案最好, NOAA (NCEP-Oregon State University- Air Force-Hydrological Research Lab 联合研发陆面模式)、RUC (Rapid Update Cycle) 和 SLAB (热扩散方案) 次之。

当然, 对气候预测而言, 多种物理过程是相互作用、相互影响的, 需要考虑多种参数化方案组合的影响。Yuan et al. (2012) 比较了不同陆面过程和辐射传输方案组合对我国 1982~2008 年冬季气候预测的动力降尺度结果, 结果表明 NOAA 对中国北方气候预测较好, 而 RUC 对南方较好; 同时, RUC-RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for Global application, 快速辐射传输模式全球版本) 组合比 NOAA-CAM 组合预测的降水偏多。李嘉鹏和汤剑平 (2012) 对中国东南地区多物理过程参数化方案集合预报试验表明, 各物理过程参数化方案对不同气象要素的预报能力存在差异, Thompson-KF-YSU-Thermal 组合对降水的预报效果较好。Que et al. (2016) 比较了不同边界层、微物理过程和积云对流参数化方案组合对 2008 年夏季西太平洋、东印度洋和中国大陆温度和降水的模拟、预测的影响, 结果表明各组合对温度的模拟与观测类似, 云微物理过程参数化方案 MYJ 比 YSU 模拟的降水要好, 积云对流参数化方案 Tiedtke 对雨带分布特别是 ITCZ (赤道辐合带) 模拟更合理。

综合上述的研究可以发现, 以往多针对单个物理过程参数化方案, 或针对单个气候变量进行比较研究, 而在业务预测实际需求中, 则需要遴选对我国温度、降水综合模拟效果最好的参数化方案的组合, 以开展实时预测。为此, 我们针对 RegCM 和 WRF, 分别评估了不同的参数化方案组合对我国年平均气温和降水的综合模拟能力: 在 RegCM4 模式中, 海洋和陆地积云对流参数化方案都采用 Grell, 陆面过程方案使用 BATS, 模式模拟结果最优; 而 WRF 模式中, 采用 WSM5 微物理过程方案, KF 积云对流参数化方案, RRTMG 长波和短波辐射方案, CLM4 陆面过程方案, 模式模拟结果最优。当然, 对我国不同地区及不同季节, 最优物理过程参数化方案可能不尽相同, 需要根据特定需求开展有针对性的参数化遴选研究。

3.2 动力降尺度在东亚气候模拟和预测中的应用

在东亚地区, 中国、日本和韩国等都较早地开展了利用高分辨率区域气候模式进行气候预测的工作。中国气象局国家气候中心 1996~2000 年在 RegCM2 基础上发展了 RegCM-NCC, 并从 2001 年开始业务预测。1991~2000 年夏季回报试验表明, 该模式对我国东部夏季雨带移动的预测有一定技巧; 2001~2003 年, RegCM-NCC 的实时季节预测与观测基本吻合, 同时, 预测的 2003 年梅雨季节长江和黄河之间降水偏多与观测是一致的 (丁一汇等, 2004); 此外, RegCM-NCC 对华东地区温度和降水的预测能力也总体优于全球模式结果 (杨雅薇等, 2008)。大气所也较早地将 RegCM2 与九层全球格点大气环流模式 IAP9L-AGCM 单向嵌套, 对东亚现代气候进行数值模拟, 并开展了 1982~2001 年夏季集合回报试验 (鞠丽霞和王会军, 2006), 结果表明, 区域模式能更好地模拟出全球模式不能分辨的中尺度信号, 而对降水的模拟也较全球模式有较大改善, 年平均降水的空间相关系数由全球模式的 0.5 提高到 0.7; 进一步将 RegCM3 嵌套到 IAP9L-AGCM, 其效果优于单独使用 IAP9L-AGCM 预测结果 (鞠丽霞和郎咸梅, 2012)。

近期, 我国也开展了很多基于 WRF 模式的模拟和回报研究。Yu et al. (2010) 检验了 WRF 模式对我国区域气候的模拟能力, 和全球模式相比, 区域模式可以显著提高温度和降水的模拟能力, 特别是对年平均降水的模拟能力有显著的提升。Wang et al. (2011)、Yu (2013) 利用 WRF 模式针对我国东北地区的 2010 年 4 月 12~13 日极端降雪事件以及 2009 年 10 月至 2010 年 5 月的季节降雪进行了模拟回报研究, 结果表明, 经过 WRF 动力降尺度之后, 模式对于降雪的极端个例和季节变化的模拟都有明显的改进, 尤其是对我国东北地区整个冬半年降雪事件的模拟中, WRF 模拟和观测的相关系数高达 0.93。在利用 MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research On Climate) 驱动 WRF 模式进行的历史模拟试验中, WRF 模式可以明显降低 MIROC5 对极端气候指数模拟的偏差, 空间相关系数也有所提高 (Yu et al., 2015)。可见, 区域气候模式对我国极端气候事件的模拟与全球模式相比也有明显改进。

最近几年, 利用区域模式开展气候预测的工作得到进一步加强。Ma et al. (2015) 利用大气所 “一

步法”预测系统 PCCSM4 驱动 WRF, 对 1998 年我国夏季降水异常进行了回报试验, 结果显示 WRF 能够提高对夏季降水的预测能力, 改进全球模式在青藏高原东部的系统偏差, 并给出更多的降水时空分布细节, 对长江中下游地区降水年际增量的空间相关系数从 PCCSM4 的 0.59 提升到 0.91; 此外, 区域模式对次季节尺度降水 (梅雨降水的逐日演变) 预测也有改进。张冬峰等 (2015) 利用 PCCSM4 驱动 RegCM4.4, 进行了 2001~2010 年的季节气候预测回报试验, 发现 RegCM4.4 能够提供更多的降水空间分布细节, 对降水的回报与观测的空间相关系数由 0.39 提高到 0.53。此外, 动力降尺度还应用到其他许多方面, 如使用 3 km 水平分辨率的 WRF 进行农事预测, 包括植物花期温度、积温、无霜日数等 (Ahn et al., 2010)。Hur and Ahn (2015, 2017) 使用高分辨率的 WRF 等五个区域气候模式开展花期的集合预测, 相较全球预测系统, 区域气候模式能更好地预测出局地气温异常以及主要果树的开花时间。

2014 年起, 大气所的预测系统 PCCSM4 嵌套区域气候模式开展实时预测, 2014~2017 年汛期 160 站降水 PS 评分 (Prediction Score) 分别为 78、74、80 和 73 分, 相较 PCCSM4 的直接结果皆有不同程度提升。

4 统计降尺度在东亚气候预测中的应用

在改进区域气候预测方面, 除了动力降尺度方法外, 统计降尺度也是重要的一种。而且相比于高分辨率区域气候模式所需的计算量, 统计降尺度更为方便可行。统计降尺度方法是通过模式预测的具有较高预测性能的大尺度环流信息与局地气候要素之间的统计关系, 建立预测模型, 开展气候预测。在利用统计降尺度方法进行短期气候预测时需要满足两点假设 (Von Storch et al., 1993): (1) 大尺度环流场与区域气象要素之间具有显著的统计关系; (2) 在预测中两者的关系是稳定的。

4.1 汛期降水的降尺度预测

目前, 统计降尺度方法已经在短期气候预测中得到了广泛应用, 并取得了很好的预测效果。利用多模式集合的统计降尺度预测方法对欧洲、美国等地区的温度和降水预测都明显优于全球模式的直接预测结果 (Feddersen and Andersen, 2005)。Kang et al. (2007, 2009) 利用亚太经济合作组织气候中

心 (APEC Climate Center, 简称 APCC) 的多个数值模式季节预测产品, 采用多模式集合预测技术, 发展了多因子优化选择的降尺度方案, 能够将 APCC 多模式集合对曼谷地区预测的降水与观测之间相关系数由 -0.39 提高到 0.62, 菲律宾北部地区由 -0.47 提高到 0.75, 韩国地区由 -0.21 提高到 0.75。不同降尺度方法在短期气候预测中, 预测技巧也存在一定的差异, 尤其在地形复杂的地区 (Barbero et al., 2017)。统计降尺度方法也广泛应用于未来气候变化的预估。基于广义线性模型的多变量统计降尺度方法能够再现加拿大地区观测降水和温度的时空变化特征, 并对该区域 2006~2100 年气候进行预估, 结果显示, 夏季平均降水量将增加, 冬季降水量将减少; 最低气温增加速度大于最高气温; 随着辐射强迫的增加, 极端气候将会加剧 (Asong et al., 2016)。

针对我国气候, 国内学者在统计降尺度预测理论与方法发展方面也做了很多创新性的工作。近年来, 热带相似、年际增量等预测理论与方法得到了快速发展。热带相似理论就是利用模式预测的热带地区降水异常来推算赤道外区域的降水异常, 可以显著提高模式对东亚区域降水异常的预测性能 (Wang and Fan, 2009)。年际增量方法是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 (Fan et al., 2008)。利用年际增量方法建立的预测模型可以显著改进耦合模式对东亚夏季风和冬季北大西洋涛动等的预测能力 (Fan et al., 2012; Tian and Fan, 2015; Fan et al., 2016)。基于数值模式对大尺度环流的预测能力和前期观测外部强迫因子对我国降水的影响机制研究, Liu and Fan (2014)、Liu and Ren (2015) 使用场信息耦合型方法发展了动力和统计相结合的预测方法, 建立我国站点季节降水的降尺度预测模型, 有效提高了数值模式对我国降水的预测技巧。Lang and Wang (2010) 也利用观测的前冬 AAO (南极涛动)、AO 和 SST (海表温度) 信息, 以及模式提前 3 个月预测的夏季降水为预测因子建立预测模型, 预测的江淮以西地区 and 新疆东南地区的夏季降水与观测降水相关系数分别由模式直接预测的 0.07 和 0.30 提高到了 0.77 和 0.78。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, 预测黄淮地区夏季降水与实况的距平符号

一致率由 61% 提高到了 72%。Zhu et al. (2008) 将经验正交 (EOF) 和奇异值分解 (SVD) 方法相结合, 利用 APCC 多模式集合预测系统回报的 500 hPa 位势高度场信息, 对东亚—太平洋地区的夏季季风降水进行降尺度预测研究, 结果显示, 相比多模式集合直接预测结果, 经过统计降尺度后, 预测东亚太平洋区域夏季季风降水的距平相关系数提高了 0.14, 均方根误差减少了 10.4%。苏海晶等 (2015) 利用两种统计方法对国家气候中心全球海气耦合模式输出的夏季温度进行了误差订正, 可以有效提高模式的预测效果。秦正坤等 (2011) 利用大气所第二代短期气候数值预测系统 (IAP-DCPII) 1980~1999 年集合回报结果, 提出了基于 EOF 和 SVD 的模式误差订正方法, 对东亚地区各个季节降水进行订正后发现, 各季节约 80% 的年份订正预测效果优于模式原始结果。Guo et al. (2014) 利用优选的西南印度洋区域海平面气压和中国东部的 850 hPa 经向风为预测因子, 并将建立的预测模型直接应用于 CFSv2 预测结果, 发现该方法对 CFSv2 提前 1 个月的降水预测结果改进最大, 距平一致率由 CFSv2 预测的 45.5% 提高到了 77.3%。Zhang and Yan (2015) 利用最优相关方法选取预测因子并用贝叶斯模型建模, 其对中国降水的预测能力要优于传统的多元线性回归方法。可以看到, 这些预测理论与方法的发展都有效提高了数值模式的预测技巧, 但也注意到, 预测因子选取方法的不同会使得预测结果存在较大的差异 (Yang et al., 2017); 而且气候的年代际变化限制了短期气候预测水平的进一步提高 (Liu and Li, 2014; 龚志强等, 2015)。因此, 在降尺度预测中如何考虑气候的年代际变化信息成为了亟需解决的关键科学问题。

目前, 国内的统计降尺度预测技术虽然发展迅速, 但大多还处于理论模型发展和回报试验阶段, 真正用于实时预测的模型与方法相对较少。例如丑纪范 (1979) 于 1979 年提出了相似—动力方法, 封国林等 (2013) 在此理论基础上基于国家气候中心实际业务模式——BCC_CSM 发展了动力—统计客观定量化预测方法 (FODAS1.0), 该方法已开始应用于我国汛期降水的实时预测, 并取得较好的预测效果。大气所竺可桢—南森国际研究中心 (NZC) 团队基于全球耦合模式于 2012 年发展了一种高效的动力—统计相结合的降尺度预测方法 (Chen et al., 2012; Sun and Chen, 2012), 简称

NZCSD。NZCSD 的核心思想是: 基于观测资料, 选择模式模拟最好的、最稳定的且与预测量有一定物理联系的预测因子, 利用这些预测因子进行建模并开展季节气候预测。系统回报结果显示, 该方法能显著提高我国汛期降水的预测技巧, 应用该方法后, 耦合模式预测的我国汛期降水与观测距平相关系数提升到了 0.71 (原始模式结果为 0.10), 均方根误差相对减少了 49%。预测性能的显著提升在于: (1) NZCSD 在选取预测因子时基于观测资料, 使得它与降水之间存在某种直接或间接的物理联系, 而且耦合模式需对预测因子具有较高的预测技巧; (2) 利用滑动检验的思想挑选稳定的预测因子, 在建立预测模型时可以最大程度地消除预测因子与预测量之间不稳定关系的影响。在 2013 年, NZCSD 与马洁华和王会军 (2014) 建立的“一步法”动力预测系统 (PCCSM4) 进行耦合, 并开始参与我国汛期降水实时预测, 表现出了较好的预测效果。2013~2017 年 2 月份预测的汛期 160 站降水 PS 评分分别为 73、74、75、74 和 70, 展现了良好的应用价值。

4.2 冬季降水的降尺度预测

以往对于东亚冬季气候变异规律和机理的研究很多 (丁一汇等, 2014; 谭本馗和陈文, 2014), 这里不再赘述。从预测的角度来讲 ENSO 被认为是影响东亚冬季气候最为主要的气候系统, 但是近期研究发现东亚冬季气候变化与 ENSO 的关系并不稳定 (He and Wang, 2013), 因此, 非常有必要探寻中高纬海洋异常对东亚冬季气候变化的影响。最新系列研究揭示, 中高纬海温、海冰以及积雪等缓变因子对东亚冬季气候变化存在显著影响, 而且其影响的物理过程清晰, 这为东亚冬季气候预测提供了新的理论基础及新的预测因子。

前期中高纬海表面温度 (SST) 异常能够显著影响东亚冬季气候。Sun et al. (2016) 研究揭示出北太平洋西南部海温存在一个显著的年代际变化模态, 观测与数值模式结果一致显示该海温模态的异常可以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; 而且该区域的海温异常信号能够从秋季一直持续到冬季, 可为东亚冬季风以及东亚冬季气候预测提供前期信息。同时研究发现北半球秋季南太平洋的 SST 异常与东亚冬季降水的偶极子型存在显著关系。而这种跨季节关系的维持主要是由于南太

平洋 SST 异常自身具有季节持续性的结果; 秋季 SST 异常信号能够一直持续到冬季, 并在冬季激发出了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 (Ao and Sun, 2016b)。这一发现不仅增强了我们对东亚冬季降水变化的理解, 也为东亚冬季降水的季节预测提供了一个潜在的预测因子。

与 SST 类似, 积雪具有较长的记忆性和持续性。在欧亚地区, 初始化的积雪信息在动力季节预测中能够持续达 2 个月之久 (Jeong et al., 2013)。欧亚积雪在冬半年对东亚地区气候变化的影响可能强于土壤湿度的作用, 对局地气候变化的影响甚至要大于 SST 的作用 (Kumar and Yang, 2003)。最近, Ao and Sun (2016a) 研究进一步指出欧洲东部秋季积雪对东亚冬季降水的作用能够从秋季一直持续到冬季, 而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; 而且他们将秋季积雪作为预测因子建立预测模型, 预测的东亚冬季降水与观测的相关系数可达 0.50, 这也表明该地积雪异常是东亚冬季降水的一个重要预测信息源。可见, 积雪异常在季节气候预测中具有非常重要的作用, 但是由于当前积雪观测资料的缺乏, 在业务统计预测系统中还很少利用积雪异常信息, 而大多数业务动力预测系统主要利用再分析的积雪初始化信息。

近几十年来北极海冰的急速消融已对全球气候系统, 特别是中高纬度地区的天气以及气候产生了显著影响 (武炳义等, 1999, 2011; Liu et al., 2012; Tang et al., 2013)。近年来欧亚、北美等地区的持续性冷冬与北极海冰的快速减少有着密切关系, 特别是巴伦支海—喀拉海地区的海冰减少是导致近年来东亚地区持续出现冷冬的重要原因 (Mori et al., 2014; Kug et al., 2015)。此外, 北极海冰迅速消融, 会使得北半球中高纬度水汽含量增加, 我国北方地区来自中高纬的水汽输送增强, 有利于北方冬季降雪增加; 同时, 北极海冰消融有利于东亚夏季风环流增强, 使得东亚夏季降水增加 (马洁华等, 2011)。这些研究成果引起了气候预测业务人员的高度关注, 陈丽娟等 (2013) 在 2012 年汛期预测中就开始考虑了北极海冰变化的信息。而且最新研究 (Wang et al., 2015; Li et al., 2017) 指出, 北极秋季海冰减少会导致欧亚大陆大气环流

异常, 我国北方地区气旋活动减弱、大气层结稳定, 进而加剧我国东部地区冬季霾污染。基于这一发现, Yin and Wang (2016, 2017) 利用北极海冰等作为预测因子建立了华北地区冬季霾污染日数的预测模型, 系统检验结果指出考虑北极海冰变化信息的预测模型能够成功预测华北区域霾污染日数的年际和年代际变化趋势。可见, 随着全球变暖的加剧, 海冰的快速变化已对全球气候系统产生越来越重要的影响, 对东亚气候预测具有越来越重要的作用。

基于最新揭示的中高纬海温、北极海冰等异常对东亚冬季气候变化的影响机制研究, 我们将这两个前期预测因子引入到了 NZCSD 预测模型中。由于积雪资料缺乏, 这里尚未将积雪加入到降尺度预测系统中。另外需要指出的是, 由于当前模式对海冰的模拟及预测性能仍很差, 因此, NZCSD 预测模型只引入了观测的前期海冰和海温变化信息。为了检验两者对东亚冬季气候预测性能的影响, 我们针对冬季降水和温度预测分别设置了三组试验: (1) 预测因子只选择同期动力预测的大尺度环流因子; (2) 预测因子只选择前期观测的海冰和海温; (3) 综合考虑前期观测海冰、海温和同期动力预测大尺度环流因子的作用。

系统回报试验表明, NZCSD 方法有效提高了东亚地区冬季气候的跨季节预测技巧 (图 2、图 3)。东亚地区区域平均的降水相关系数 (1991~2014 年) 由模式直接输出的 0.06 提高到了 0.51 (只考虑大尺度环流因子的作用), 温度相关系数由 0.12 提高到了 0.54; 而且在整个东亚地区, 对冬季降水和温度预测效能的改进都较为明显, 降水相关系数提高最大值区位于中国东部地区, 而温度主要集中在我国以东海域。考虑前期北极海冰和中高纬海温变化在一定程度上可以进一步提高东亚冬季气候的预测性能。当只考虑前期北极海冰和海温变化的作用时, 预测的东亚冬季降水 (温度) 相关系数提高到了 0.22 (0.27); 同时考虑北极海冰、中高纬海温和同期动力预测大尺度环流因子的综合作用时, 预测的东亚冬季降水 (温度) 相关系数提高到了 0.78 (0.80), 相比只考虑大尺度环流因子为预测因子时有了较大幅度的提升。

同时, 以观测的前期北极海冰、中高纬海温以及 PCCSM4 预测的同期大尺度环流为预测因子, NZCSD 分别对 2014~2016 年冬季降水和温度进行

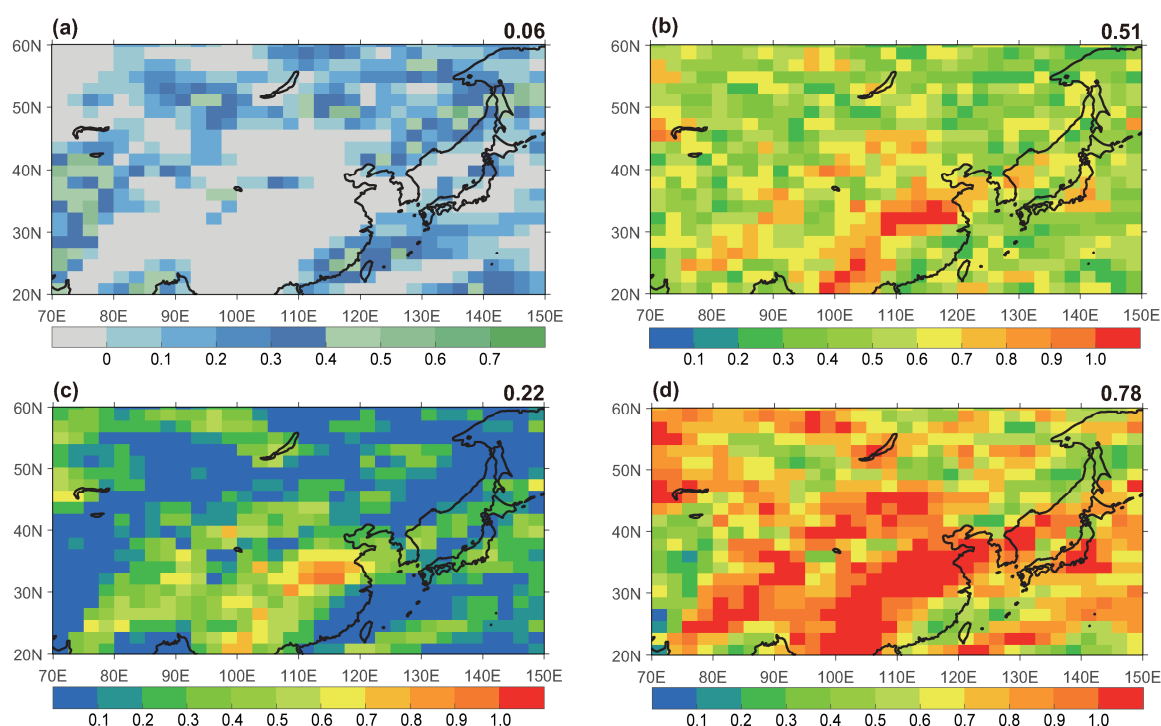


图 2 1991~2014 年 (a) PCCSM4 预测的冬季降水与观测的相关系数分布; (b) 只考虑 PCCSM4 预测的大尺度环流因子, 采用统计降尺度方法预测的降水和观测的相关系数与 (a) 的差值分布; (c) 只考虑前期北极海冰和中高纬海温异常, 利用统计方法预测的降水和观测的相关系数与图 (a) 的差值分布; (d) 综合考虑前期北极海冰、中高纬海温和 PCCSM4 预测的大尺度环流因子, 采用统计—动力相结合的方法预测的降水和观测的相关系数与 (a) 的差值分布。右上角数值为各种方法预测降水与观测降水相关系数的区域平均值, 降水来自 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation) 资料

Fig. 2 (a) Correlation coefficient (CC) distribution of winter precipitation between observations and PCCSM4 prediction. (b) CC differences between the results from statistical downscaling prediction scheme and from PCCSM4. Here the large scale atmospheric circulation anomalies predicted by PCCSM4 are considered as predictors in the scheme. (c) CC differences between the results from statistical prediction scheme and from PCCSM4. Here the observed preceding autumn Arctic sea ice and high-latitude SST anomalies are considered as predictors in the scheme. (d) CC differences between the results from statistical-dynamical hybrid prediction scheme and from PCCSM4. Here observed preceding autumn Arctic sea ice, high-latitude SST, and PCCSM4-predicted large scale atmospheric circulation anomalies are considered as predictors in the scheme. The number at the right top corner is the regionally averaged correlation between observed and predicted winter precipitation by different prediction schemes over the period 1991 to 2014. The precipitation data used here is derived from CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation)

实时预测。与实测相比, NZCSD 预测模型可以较好地预测出我国冬季降水异常的空间整体分布特征, 比如 2015 年冬季我国东部“十—十”的三极子异常空间分布。同时, NZCSD 也能够较好地预测出我国冬季整体偏暖的趋势。预测的 2014~2016 年冬季 160 站降水的 PS 评分分别为 79、80 和 76; 冬季 160 站温度 PS 评分为 81、74 和 89。

5 讨论与展望

短期气候预测是一个十分困难的国际前沿科学问题, 对于我国来讲更是一个重大的现实需求问题。围绕着如何提升东亚地区气候预测水平, 我国科学家做出了重大的贡献。从上世纪 90 年代初开

始, 一系列的全球动力预测系统被研发并应用于实时气候预测, 为我国的防灾减灾工作做出了实质性的贡献。近些年来, 基于耦合气候模式的“一步法”动力预测成为国际短期气候预测主流方向, 我国紧跟国际前沿, 国家气候中心和大气所也相继建立了“一步法”预测系统, 并实时运行, 使得我国对大尺度环流和海洋异常的预测能力有了显著的提升。但是到目前为止, 全球动力预测系统对于东亚气温和降水, 尤其是降水的预测性能的改进十分有限, 还是不能满足国家防灾减灾的实际需求。这一方面是由于全球耦合模式本身存在不足, 诸多物理、化学过程还不完善; 另一方面与观测的全面性、精确性和资料同化技术等问题所导致的模式初边

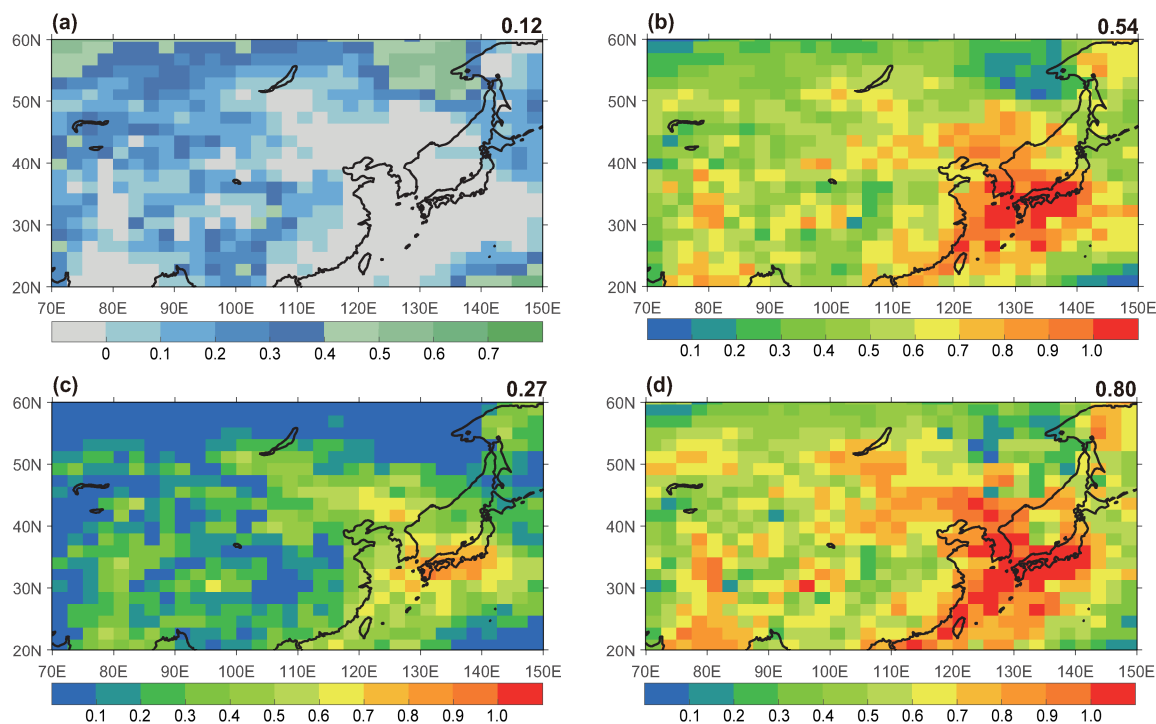


图3 同图2, 但为表面气温结果, 其中观测表面气温来自NCEP-DOE II再分析资料

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the surface air temperatures. The data of observed surface air temperature is derived from the NCEP-DOE II reanalysis

值误差有关。因此, 从提升全球预测系统的角度出发, 进一步改进模式本身, 提升其模拟性能、降低不确定性是提高短期气候预测水平的必由之路和科学基础; 在此基础上, 通过天地空一体化的观测系统, 提升对气候系统的观测水平, 发展更加高效的海陆气一体化同化技术, 减少初边值误差、增强气候系统多圈层初边值的协调性, 是提升动力预测的重要方面。在这一点上, 我国新一代静止轨道气象卫星——风云四号的应用, 有望为提升东亚地区气候预测水平做出实质性的贡献。这是提升气候预测水平的长期发展之路, 需要长时间的持续投入和研究。

就预测理论而言, 目前的次季节尺度预测、季节—年际预测和年代际预测基本上都处于独立预测状态。而气候系统不同时间尺度的过程存在很强的相互作用, 次季节尺度过程累积会严重影响季节—年际预测。但是就目前全球动力预测系统而言, 对于次季节尺度的预测性能较低, 很多信号还抓不住, 这无疑会影响到年际预测水平的提升。此外, 观测事实分析表明, 年代际变化对于年际变化具有很强的调制功能, 比较科学的方式是将年代际和年际预测结合起来, 综合考虑年代际和年际尺度的信息无疑会增强年际气候的预测水平, 尤其是对气候

转型时期的预测更为重要。但目前气候的年代际预测尚处于初级阶段, 还不能较好地将两个不同时间尺度的预测有效地连接起来, 这也是我们在气候转型期经常预测失败的重要原因。因此, 如何将不同时间尺度的预测有效地结合起来, 是改进短期气候预测的一个重要努力方向, 也是一个非常困难的科学问题, 需要长期的努力, 实现理论和技术上的突破。

从迅速提升短期气候预测水平的技术而言, 两方面的工作最为有效。一方面是开展动力系统的集合预测。对于单一模式, 可以增加集合预测的样本数, 这可以更好地捕捉中高纬度的一些有用预测信息, 也可降低模式的不确定性, 从而提升预测性能; 在国家层面, 更为有效的是建立我国自己的多模式集合预测平台, 让国内外更多的预测系统能够加入其中, 开展多模式集合预测, 从而降低单一模式预测的不确定性。在计算资源允许的情况下, 开展多模式、多参数化方案、多成员的集合预测, 可以有效地提高动力预测的性能, 降低预测的不确定性。另一方面是发展高效的降尺度方法。目前应用于实时预测的区域模式空间分辨率大都在 20~30 km 以上, 随着计算机技术的进步, 未来在东亚地区开展 1~3 km 分辨率区域气候预测十分可行, 在关键区

域可以达到百米甚至更高分辨率, 这样可以使得很多物理过程实现显式计算, 复杂地形的考虑会更加真实, 区域气候预测性能预期也会得到较大提升; 对于统计降尺度方法而言, 不断深入的气候研究, 使得我们对气候系统变异规律和机理的认识更加深入, 这将为统计降尺度方法的发展提供更为坚实的科学基础, 加之动力预测系统性能的提升, 无疑会进一步增强统计降尺度方法的适用性。

参考文献 (References)

- Ahn J B, Hur J N, Shim K M. 2010. A simulation of Agro-climate index over the Korean Peninsula using dynamical downscaling with a numerical weather prediction model [J]. *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, 12 (1): 1–10, doi:10.5532/KJAFM.2010.12.1.001.
- Ahn J B, Lee J, Im E S. 2012. The reproducibility of surface air temperature over South Korea using dynamical downscaling and statistical correction [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn. Ser. II*, 90 (4): 493–507, doi:10.2151/jmsj.2012-404.
- Ao J, Sun J Q. 2016a. Connection between November snow cover over eastern Europe and winter precipitation over East Asia [J]. *Int. J. Climatol.*, 36 (5): 2396–2404, doi:10.1002/joc.4484.
- Ao J, Sun J Q. 2016b. The impact of boreal autumn SST anomalies over the South Pacific on boreal winter precipitation over East Asia [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33 (5): 644–655, doi:10.1007/s00376-015-5067-x.
- Arribas A, Glover M, Maidens A, et al. 2011. The GloSea4 ensemble prediction system for seasonal forecasting [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139 (6): 1891–1910, doi:10.1175/2010MWR3615.1.
- Asong Z E, Khaliq M N, Wheeler H S. 2016. Projected changes in precipitation and temperature over the Canadian Prairie Provinces using the generalized linear model statistical downscaling approach [J]. *J. Hydrol.*, 539: 429–446, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.05.044.
- Barbero R, Abatzoglou J T, Hegewisch K C. 2017. Evaluation of statistical downscaling of North American multimodel ensemble forecasts over the western United States [J]. *Wea. Forecasting*, 32 (1): 327–341, doi:10.1175/WAF-D-16-0117.1.
- Chen H P, Sun J Q, Wang H J. 2012. A statistical downscaling model for forecasting summer rainfall in China from DEMETER hindcast datasets [J]. *Wea. Forecasting*, 27 (3): 608–628, doi:10.1175/WAF-D-11-00079.1.
- 陈炯, 王建捷. 2006. 边界层参数化方案对降水预报的影响 [J]. *应用气象学报*, 17 (S): 11–17. Chen Jiong, Wang Jianjie. 2006. Mesoscale precipitation simulation sensitivity to PBL parameterization [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 17 (S): 11–17, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.z1.002.
- 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 [J]. *气象*, 39 (9): 1103–1110. Chen Lijuan, Gao Hui, Gong Zhensong, et al. 2013. Overview of precursory signals of seasonal climate prediction and its application in summer 2012 [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 39 (9): 1103–1110, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.09.003.
- 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.
- 丑纪范. 1979. 长期数值天气预报的若干问题 [C]//中长期水文气象预报文集. 北京: 水利电力出版社, 216–221. Chou Jifan. 1979. Some problems of long-range numerical weather prediction [C]//Collection of Middle and Long-Range Hydrometeorological Prediction (in Chinese). Beijing: China Water Power Press, 216–221.
- 丁一汇. 2004. 我国短期气候预测业务系统 [J]. *气象*, 30 (12): 11–16. Ding Yihui. 2004. China operational short-range climate prediction system [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 30 (12): 11–16, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2004.12.003.
- 丁一汇, 李清泉, 李维京, 等. 2004. 中国业务动力季节预报的进展 [J]. *气象学报*, 62 (5): 598–612. Ding Yihui, Li Qingquan, Li Weijing, et al. 2004. Advance in seasonal dynamical prediction operation in China [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 598–612, doi:10.11676/qxxb2004.059.
- 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系 [J]. *气象学报*, 72 (5): 835–852. Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 72 (5): 835–852, doi:10.11676/qxxb2014.079.
- 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.
- 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 [J]. *Int. J. Climatol.*, 36 (1): 82–94, doi:10.1002/joc.4330.
- 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 [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 53 (4): 602–609, doi:10.1007/s11434-008-0083-1.
- Fedderson H, Andersen U. 2005. A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions [J]. *Tellus A -Dyn. Meteor. Oceanogr.*, 57 (3): 398–408, doi:10.3402/tellusa.v57i3.14656.
- 封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 2013. 动力—统计客观定量汛期降水预测研究新进展 [J]. *应用气象学报*, 24 (6): 656–665. Feng Guolin, Zhao Junhu, Zhi Rong, et al. 2013. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical–statistical method [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 24 (6): 656–665, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.06.002.
- 高笃鸣, 李跃清, 蒋兴文, 等. 2016. WRF 模式多种边界层参数化方案对四川盆地不同量级降水影响的数值试验 [J]. *大气科学*, 40 (2): 371–389. Gao Duming, Li Yueqing, Jiang Xingwen, et al. 2016. Influence of planetary boundary layer parameterization schemes on the prediction of rainfall with different magnitudes in the Sichuan Basin using the WRF model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (2): 371–389, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14323.
- 高学杰, 石英, Giorgi F. 2010. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟 [J]. *中国科学: 地球科学*, 40 (7): 911–922. Gao Xuejie, Shi

- Ying, Giorgi F. 2011. A high resolution simulation of climate change over China [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (3): 462–472, doi:10.1007/s11430-010-4035-7.
- Gao X J, Shi Y, Giorgi F. 2016. Comparison of convective parameterizations in RegCM4 experiments over China with CLM as the land surface model [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 9 (4): 246–254, doi:10.1080/16742834.2016.1172938.
- 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验 [J]. *大气科学*, 30 (2): 185–192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (2): 185–192, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.02.01.
- Giorgi F. 1990. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model [J]. *J. Climate*, 3 (9): 941–963, doi:10.1175/1520-0442(1990)003<0941:SORCUA>2.0.CO;2.
- 龚志强, 赵俊虎, 封国林, 等. 2015. 基于年代际突变分量的东亚夏季降水动力—统计预报方案研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 45 (2): 236–252. Gong Zhiqiang, Zhao Junhu, Feng Guolin, et al. 2015. Dynamic-statistics combined forecast scheme based on the abrupt decadal change component of summer precipitation in East Asia [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 58 (3): 404–419, doi:10.1007/s11430-014-4967-4.
- 贵志成, 郑益群, 曾新民, 等. 2014. 不同边界层参数化方案对东亚夏季风气候模拟的对比研究 [J]. *气象科学*, 34 (6): 638–646. Gui Zhicheng, Zheng Yiqun, Zeng Xinmin, et al. 2014. Impact of different planetary boundary layer parameterizations on summer monsoonal climate simulation in East Asia [J]. *J. Meteor. Sci.* (in Chinese), 34 (6): 638–646, doi:10.3969/2013jms.0064.
- Guo Y, Li J P, Li Y. 2014. Seasonal forecasting of North China summer rainfall using a statistical downscaling model [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 53 (7): 1739–1749, doi:10.1175/JAMC-D-13-0207.1.
- He S P, Wang H J. 2013. Oscillating relationship between the East Asian winter monsoon and ENSO [J]. *J. Climate*, 26 (24): 9819–9838, doi:10.1175/JCLI-D-13-00174.1.
- Hewitt C D. 2005. The ENSEMBLES project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts [J]. *EGGS Newslett.*, 13: 22–25.
- 黄海波, 陈春艳, 朱雯娜. 2011. WRF 模式不同云微物理参数化方案及水平分辨率对降水预报效果的影响 [J]. *气象科技*, 39 (5): 529–536. Huang Haibo, Chen Chuanyan, Zhu Wenna. 2011. Impacts of different cloud microphysical processes and horizontal resolutions of WRF model on precipitation forecast effect [J]. *Meteor. Sci. Technol.* (in Chinese), 39 (5): 529–536, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2011.05.001.
- Hur J, Ahn J B. 2015. Seasonal prediction of regional surface air temperature and first-flowering date over South Korea [J]. *Int. J. Climatol.*, 35 (15): 4791–4801, doi:10.1002/joc.4323.
- Hur J, Ahn J B. 2017. Assessment and prediction of the first-flowering dates for the major fruit trees in Korea using a multi-RCM ensemble [J]. *Int. J. Climatol.*, 37 (3): 1603–1618, doi:10.1002/joc.4800.
- Jeong J H, Linderholm H W, Woo S H, et al. 2013. Impacts of snow initialization on subseasonal forecasts of surface air temperature for the cold season [J]. *J. Climate*, 26 (6): 1956–1972, doi:10.1175/JCLI-D-12-00159.1.
- 鞠丽霞, 郎咸梅. 2012. RegCM3_IAP9L-AGCM 对中国跨季度短期气候预测的回报试验研究 [J]. *气象学报*, 70 (2): 244–252. Ju Lixia, Lang Xianmei. 2012. Hindcast experiment of extraseasonal short-term summer climate prediction over China with RegCM3_IAP9L-AGCM [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 70 (2): 244–252, doi:10.11676/qxxb2012.024.
- 鞠丽霞, 王会军. 2006. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候 [J]. *地球物理学报*, 49 (1): 52–60. Ju Lixia, Wang Huijun. 2006. Modern climate over East Asia simulated by a regional climate model nested in a global gridpoint general circulation model [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49 (1): 52–60, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.008.
- Kang H W, An K H, Park C K, et al. 2007. Multimodel output statistical downscaling prediction of precipitation in the Philippines and Thailand [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (15): L15710, doi:10.1029/2007GL030730.
- Kang H W, Park C K, Hameed S N, et al. 2009. Statistical downscaling of precipitation in Korea using multimodel output variables as predictors [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (6): 1928–1938, doi:10.1175/2008MWR2706.1.
- Kirtman B P, Min D, Infanti J M, et al. 2014. The North American multimodel ensemble: Phase-1 seasonal-to-interannual prediction; phase-2 toward developing intraseasonal prediction [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95 (4): 585–601, doi:10.1175/BAMS-D-12-00050.1.
- Kug J S, Jeong J H, Jang Y S, et al. 2015. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia [J]. *Nat. Geosci.*, 8 (10): 759–762, doi:10.1038/ngeo2517.
- Kumar A, Yang F L. 2003. Comparative influence of snow and SST variability on extratropical climate in northern winter [J]. *J. Climate*, 16 (13): 2248–2261, doi:10.1175/2771.1.
- Lang X M, Wang H J. 2010. Improving extraseasonal summer rainfall prediction by merging information from GCMs and observations [J]. *Wea. Forecasting*, 25 (4): 1263–1274, doi:10.1175/2010WAF2222342.1.
- 郎咸梅, 王会军, 姜大膀. 2004. 应用九层全球大气格点模式进行跨季度短期气候预测系统性试验 [J]. *地球物理学报*, 47 (1): 19–24. Lang Xianmei, Wang Huijun, Jiang Dabang. 2004. Extraseasonal short-term predictions of summer climate with IAP9L-AGCM [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 47 (1): 19–24, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2004.01.004.
- 李嘉鹏, 汤剑平. 2012. WRF 模式对中国东南地区的多参数化短期集合预报试验 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 48 (6): 677–688. Li Jiapeng, Tang Jianping. 2012. Experiment of WRF multi-physics short-range ensemble forecasts in southeastern China [J]. *J. Nanjing Univ. (Nat. Sci.)* (in Chinese), 48 (6): 677–688, doi:10.13232/j.cnki.jnju.2012.06.010.
- 李维京. 2012. 现代气候业务 [M]. 北京: 气象出版社, 170–347. Li Weijing. 2012. Contemporary Climate Services (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 170–347.
- 李维京, 张培群, 李清泉, 等. 2005. 动力气候模式预测系统业务化及其应用 [J]. *应用气象学报*, 16 (S): 1–11. Li Weijing, Zhang Peiqun, Li Qingquan, et al. 2005. Research and operational application of dynamical climate model prediction system [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 16 (S): 1–11, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.z1.001.

- 李荔珊, 胡轶佳, 钟中, 等. 2016. 积云参数化方案对夏季东亚季风区海气系统位相关系模拟的影响 [J]. 气象科学, 36 (3): 329–339. Li Lishan, Hu Yijia, Zhong Zhong, et al. 2016. Influences of cumulus parameterization scheme on the simulation of the air–sea system phase relation in East Asian summer monsoon region [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 36 (3): 329–339, doi:10.3969/2015jms.0041.
- Li S L, Han Z, Chen H P. 2017. A comparison of the effects of interannual Arctic sea ice loss and ENSO on winter haze days: Observational analyses and AGCM simulations [J]. J. Meteor. Res., 31 (5): 820–833, doi:10.1007/s13351-017-7017-2.
- 林朝晖, 李旭, 赵彦, 等. 1998. 中国科学院大气物理研究所短期气候预测系统的改进及其对 1998 年全国汛期旱涝形势的预测 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 339–348. Lin Zhaohui, Li Xu, Zhao Yan, et al. 1998. An improved short-term climate prediction system and its application to the extraseasonal prediction of rainfall anomaly in China for 1998 [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 3 (4): 339–348, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.06.
- 林朝晖, 赵彦, 周广庆, 等. 2000. 1999 年中国夏季气候的预测和检验 [J]. 气候与环境研究, 5 (2): 97–108. Lin Zhaohui, Zhao Yan, Zhou Guangqing, et al. 2000. Prediction of summer climate anomaly over China for 1999 and its verification [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 5 (2): 97–108, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2000.02.001.
- 刘晓冉, 李国平. 2014. WRF 模式边界层参数化方案对西南低涡模拟的影响 [J]. 气象科学, 34 (2): 162–170. Liu Xiaoran, Li Guoping. 2014. Effects of planetary boundary layer parameterization schemes in WRF model on southwest vortex simulation [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 34 (2): 162–170, doi:10.3969/2013jms.0017.
- Liu J P, Curry A, Wang H J, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 109 (11): 4074–4079, doi:10.1073/pnas.1114910109.
- Liu N, Li S L. 2014. Predicting summer rainfall over the Yangtze–Huai region based on time-scale decomposition statistical downscaling [J]. Wea. Forecasting, 29 (1): 162–176, doi:10.1175/WAF-D-13-00045.1.
- Liu X W, Wu T W, Yang S, et al. 2015. Performance of the seasonal forecasting of the Asian summer monsoon by BCC_CSM1.1(m) [J]. Adv. Atmos. Sci., 32 (8): 1156–1172, doi:10.1007/s00376-015-4194-8.
- Liu Y, Fan K. 2014. An application of hybrid downscaling model to forecast summer precipitation at stations in China [J]. Atmos. Res., 143: 17–30, doi:10.1016/j.atmosres.2014.01.024.
- Liu Y, Ren H L. 2015. A hybrid statistical downscaling model for prediction of winter precipitation in China [J]. Int. J. Climatol., 35 (7): 1309–1321, doi:10.1002/joc.4058.
- 娄珊珊, 陈光舟, 邱学兴. 2015. WRF 不同参数化方案对安徽一次暴雨过程模拟的影响分析 [J]. 气象科学, 35 (3): 370–378. Lou Shanshan, Chen Guangzhou, Qiu Xuexing. 2015. Impact of various parameterization schemes in WRF model on numerical simulation of a heavy rainfall in Anhui [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 35 (3): 370–378, doi:10.3969/2014jms.0027.
- 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 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (8): 1689–1700. Ma Jiehua, Wang Huijun. 2014. Design and testing of a global climate prediction system based on a coupled climate model [J]. Sci. China Earth Sci., 57 (10): 2417–2427, doi:10.1007/s11430-014-4875-7.
- 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.
- 马洁华, 王会军, 张颖. 2011. 北极夏季无海冰状态时的东亚气候变化数值模拟研究 [J]. 气候变化研究进展, 7 (3): 178–183. Ma Jiehua, Wang Huijun, Zhang Ying. 2011. Simulation of the East Asian summer climate change in the “Free Arctic” condition [J]. Adv. Climate Change Res. (in Chinese), 7 (3): 178–183, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2011.03.004.
- 马严枝, 陆昌根, 高守亭. 2012. 8.19 华北暴雨模拟中微物理方案的对比试验 [J]. 大气科学, 36 (4): 835–850. Ma Yanzhi, Lu Changgen, Gao Shouting. 2012. The effects of different microphysical schemes in WRF on a heavy rainfall in North China during 18–19 August 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 835–850, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11159.
- MacLachlan C, Arribas A, Peterson K A, et al. 2015. Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): A high-resolution seasonal forecast system [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 141 (689): 1072–1084, doi:10.1002/qj.2396.
- Molteni F, Stockdale T, Balmaseda M, et al. 2011. The new ECMWF seasonal forecast system (System 4) [R]. ECMWF Technical Memoranda 656.
- Mori M, Watanabe M, Shiogama H, et al. 2014. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades [J]. Nat. Geosci., 7 (12): 869–873, doi:10.1038/ngeo2277.
- Palmer T N, Doblas-Reyes F J, Hagedorn R, et al. 2004. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85 (6): 853–872, doi:10.1175/BAMS-85-6-853.
- 秦正坤, 林朝晖, 陈红, 等. 2011. 基于 EOF/SVD 的短期气候预测误差订正方法及其应用 [J]. 气象学报, 69 (2): 289–296. Qin Zhengkun, Lin Zhaohui, Chen Hong, et al. 2011. The bias correction methods based on the EOF/SVD for short-term climate prediction and their applications [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (2): 289–296, doi:10.11676/qxxb2011.024.
- Que L J, Que W L, Feng J M. 2016. Intercomparison of different physics schemes in the WRF model over the Asian summer monsoon region [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 9 (3): 169–177, doi:10.1080/16742834.2016.1158618.
- 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.
- Stockdale T N, Anderson D L T, Alves J O S, et al. 1998. Global seasonal rainfall forecasts using a coupled ocean–atmosphere model [J]. Nature, 392 (6674): 370–373, doi:10.1038/32861.
- Stockdale T N, Anderson D L T, Balmaseda M A, et al. 2011. ECMWF seasonal forecast system 3 and its prediction of sea surface temperature [J]. Climate Dyn., 37 (3–4): 455–471, doi:10.1007/s00382-010-0947-3.
- 苏海晶, 封国林, 杨杰, 等. 2015. 基于动力统计方法对中国夏季温度模

- 式误差订正的研究 [J]. 高原气象, 34 (5): 1345–1356. Su Haijing, Feng Guolin, Yang Jie, et al. 2015. Study of model error correction on summer temperature in China based on the method of combine with dynamic and statistical [J]. Plateau Meteorology, 34 (5): 1345–1356, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00069.
- Sun J Q, Chen H P. 2012. A statistical downscaling scheme to improve global precipitation forecasting [J]. Meteor. Atmos. Phys., 117 (3–4): 87–102, doi:10.1007/s00703-012-0195-7.
- Sun J Q, Wu S, Ao J. 2016. Role of the North Pacific sea surface temperature in the East Asian winter monsoon decadal variability [J]. Climate Dyn., 46 (11–12): 3793–3805, doi:10.1007/s00382-015-2805-9.
- 孙敏, 袁慧玲. 2014. WRF 模式中微物理和积云对流参数化方案对台风“莫拉克”模拟敏感性分析 [J]. 热带气象学报, 30 (5): 941–951. Sun Min, Yuan Huiling. 2014. Impact of microphysics and cumulus convective parameterization schemes on WRF numerical simulation of typhoon Morakot [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 30 (5): 941–951, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.05.014.
- 谭本旭, 陈文. 2014. 中高纬度大气遥相关动力学及其对东亚冬季气候影响的研究进展 [J]. 气象学报, 72 (5): 908–925. Tan Benkui, Chen Wen. 2014. Progress in the study of the dynamics of extratropical atmospheric teleconnection patterns and their impacts on East Asian climate [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 72 (5): 908–925, doi:10.11676/qxb2014.071.
- Tang Q H, Zhang X J, Yang X H, et al. 2013. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss [J]. Environ. Res. Lett., 8 (1): 014036, doi:10.1088/1748-9326/8/1/014036.
- 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.
- Von Storch H, Zorita E, Cubasch U. 1993. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime [J]. J. Climate, 6 (6): 1161–1171, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1161:DOGCEE>2.0.CO;2.
- Wang B, Fan Z. 1999. Choice of South Asian summer monsoon indices [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80(4): 629–638, doi:10.1175/1520-0477(1999)080<0629:COASMS>2.0.CO;2.
- Wang B, Wu R G, Lau K M. 2001. Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific–East Asian monsoons [J]. J. Climate, 14 (20): 4073–4090, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<4073:IVOTAS>2.0.CO;2.
- 王澄海, 余莲. 2011. 区域气候模式对不同的积云参数化方案在青藏高原地区气候模拟中的敏感性研究 [J]. 大气科学, 35 (6): 1132–1144. Wang Chenghai, Yu Lian. 2011. Sensitivity of regional climate model to different cumulus parameterization schemes in simulation of the Tibetan Plateau climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1132–1144, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.12.
- Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon–ENSO relations [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (1): 1–11, doi:10.1007/s00376-002-0029-5.
- Wang H J, Chen H P, Liu J P. 2015. Arctic sea ice decline intensified haze pollution in eastern China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 8 (1): 1–9, doi:10.3878/AOSL20140081.
- Wang H J, Fan K. 2009. A new scheme for improving the seasonal prediction of summer precipitation anomalies [J]. Wea. Forecasting, 24 (2): 548–554, doi:10.1175/2008WAF2222171.1.
- 王会军, 范可, 郎咸梅, 等. 2012. 我国短期气候预测的新理论、新方法和新技术 [M]. 北京: 气象出版社, 224pp. Wang Huijun, Fan Ke, Lang Xianmei, et al. 2012. Advances in Climate Prediction Theory and Technique of China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 224pp.
- Wang H J, Yu E T, Yang S. 2011. An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model [J]. Meteor. Atmos. Phys., 113 (1–2): 11–25, doi:10.1007/s00703-011-0147-7.
- 汪君, 王会军. 2013. WRF 模式对江苏如东地区风速预报的检验分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 145–155. Wang Jun, Wang Huijun. 2013. Forecasting of wind speed in Rudong, Jiangsu Province, by the WRF model [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 18 (2): 145–155, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.11152.
- Wang J, Wang H J, Hong Y. 2016. Comparison of satellite-estimated and model-forecasted rainfall data during a deadly debris-flow event in Zhouqu, Northwest China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 9 (2): 139–145, doi:10.1080/16742834.2016.1142825.
- 王子谦, 段安民, 吴国雄. 2014. 边界层参数化方案及海气耦合对 WRF 模拟东亚夏季风的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (3): 548–562. Wang Ziqian, Duan Anmin, Wu Guoxiong. 2014. Impacts of boundary layer parameterization schemes and air–sea coupling on WRF simulation of the East Asian summer monsoon [J]. Sci. China Earth Sci. (in Chinese), 44 (3): 548–562, doi:10.1007/s11430-013-4801-4.
- Webster P J, Yang S. 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 118 (507): 877–926, doi:10.1002/qj.49711850705.
- 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 1999. 冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰面积变化对东亚冬季风的影响 [J]. 大气科学, 23 (3): 267–275. Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. 1999. The impact of variation of sea-ice extent in the Kara Sea and the Barents Seas in winter on the winter monsoon over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (3): 267–275, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.03.02.
- 武炳义, 苏京志, 张人禾. 2011. 秋—冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响 [J]. 科学通报, 56 (27): 2335–2343. Wu Bingyi, Su Jingzhi, Zhang Renhe. 2011. Effects of autumn–winter Arctic sea ice on winter Siberian high [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 56 (27): 2335–2343, doi:10.1007/s11434-011-4696-4.
- 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.
- Xie B, Fung J C H, Chan A, et al. 2012. Evaluation of nonlocal and local planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 117 (D12): D12103, doi:10.1029/2011JD017080.
- 徐国强, 梁旭东, 余晖, 等. 2007. 不同云降水方案对一次登陆台风的降水模拟 [J]. 高原气象, 26 (5): 891–900. Xu Guoqiang, Liang Xudong,

- Yu Hui, et al. 2007. Precipitation simulation using different cloud-precipitation schemes for a landfall typhoon [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 26 (5): 891–900.
- 徐之骁, 徐海明. 2016. 不同云微物理方案对“7.21”特大暴雨模拟的对比试验 [J]. 气象科学, 36 (1): 45–54. Xu Zhixiao, Xu Haiming. 2016. Simulation contrast of different cloud microphysical schemes on the torrential rainfall event in Beijing on 21 July, 2012 [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 36 (1): 45–54, doi:10.3969/2014jms.0096.
- 颜玉倩, 李建云, 朱克云, 等. 2017. RegCM4 不同积云参数化方案对 2006 年川渝干旱模拟研究 [J]. 自然灾害学报, 26 (4): 143–154. Yan Yuqian, Li Jianyun, Zhu Keyun, et al. 2017. Study of drought over Sichuan–Chongqing area during 2006 to different cumulus parameterization schemes in RegCM4 [J]. J. Nat. Disast. (in Chinese), 26 (4): 143–154, doi:10.13577/j.jnd.2017.0417.
- Yang C L, Wang N L, Wang S J. 2017. A comparison of three predictor selection methods for statistical downscaling [J]. Int. J. Climatol., 37 (3): 1238–1249, doi:10.1002/joc.4772.
- Yang S, Zhang Z Q, Kousky V E, et al. 2008. Simulations and seasonal prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP climate forecast system [J]. J. Climate, 21 (15): 3755–3775, doi:10.1175/2008JCLI1961.1.
- 杨雅薇, 陈伯民, 董广涛, 等. 2008. 区域气候模式 RegCM_NCC 在华东地区的业务应用 (II): 10 年夏季回报试验 [J]. 高原气象, 27 (S): 32–41. Yang Yawei, Chen Bomin, Dong Guangtao, et al. 2008. An application of regional climate model (RegCM_NCC) in operation over the eastern China (II): 10-year summertime hindcasts [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 27 (S): 32–41.
- Yin Z C, Wang H J. 2016. Seasonal prediction of winter haze days in the north central North China Plain [J]. Atmos. Chem. Phys., 16 (23): 14843–14852, doi:10.5194/acp-16-14843-2016.
- Yin Z C, Wang H J. 2017. Statistical prediction of winter haze days in the North China Plain using the generalized additive model [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 56 (9): 2411–2419, doi:10.1175/JAMC-D-17-0013.1.
- Yu E T. 2013. High-resolution seasonal snowfall simulation over Northeast China [J]. Chinese Sci. Bull., 58 (12): 1412–1419, doi:10.1007/s11434-012-5561-9.
- Yu E T, Sun J Q, Chen H P, et al. 2015. Evaluation of a high-resolution historical simulation over China: Climatology and extremes [J]. Climate Dyn., 45 (7–8): 2013–2031. doi:10.1007/s00382-014-2452-6.
- Yu E T, Wang H J, Gao Y Q, et al. 2011. Impacts of cumulus convective parameterization schemes on summer monsoon precipitation simulation over China [J]. Acta Meteor. Sinica, 25 (5): 581–592, doi:10.1007/s13351-011-0504-y.
- Yu E T, Wang H J, Sun J Q. 2010. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 3 (6): 325–329, doi:10.1080/16742834.2010.11446886.
- 袁重光, 李旭, 曾庆存. 1996. 跨季度气候距平数值预测研究小结 [J]. 气候与环境研究, 1 (2): 150–159. Yuan Chongguang, Li Xu, Zeng Qingcun. 1996. Summary of numerical prediction research on extraseasonal climate anomalies [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 1 (2): 150–159, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1996.02.06.
- Yuan X, Liang X Z, Wood E F. 2012. WRF ensemble downscaling seasonal forecasts of China winter precipitation during 1982–2008 [J]. Climate Dyn., 39 (7–8): 2041–2058, doi:10.1007/s00382-011-1241-8.
- 曾庆存, 林朝晖, 周广庆. 2003. 跨季度动力气候预测系统 IAP DCP-II [J]. 大气科学, 27 (3): 289–303. Zeng Qingcun, Lin Zhaohui, Zhou Guangqing. 2003. Dynamical extraseasonal climate prediction system IAP DCP-II [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (3): 289–303, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.01.
- 曾庆存, 袁重光, 王万秋, 等. 1990. 跨季度气候距平数值预测试验 [J]. 大气科学, 14 (1): 10–25. Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Wang Wanqiu, et al. 1990. Experiments in numerical extraseasonal prediction of climate anomalies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 14 (1): 10–25, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1990.01.03.
- Zhang X L, Yan X D. 2015. A new statistical precipitation downscaling method with Bayesian model averaging: A case study in China [J]. Climate Dyn., 45 (9–10): 2541–2555, doi:10.1007/s00382-015-2491-7.
- Zeng X M, Wang B, Zhang Y, et al. 2016. Effects of land surface schemes on WRF—Simulated geopotential heights over China in summer 2003 [J]. J. Hydrometeor., 17 (3): 829–851, doi:10.1175/JHM-D-14-0239.1.
- 张小培, 银燕. 2013. 复杂地形地区 WRF 模式四种边界层参数化方案的评估 [J]. 大气科学学报, 36 (1): 68–76. Zhang Xiaopei, Yin Yan. 2013. Evaluation of the four PBL schemes in WRF model over complex topographic areas [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (1): 68–76, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.008.
- 张冬峰, 高学杰, 马洁华. 2015. CCSM4.0 模式及其驱动下 RegCM4.4 模式对中国夏季气候的回报分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (3): 307–318.
- Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Ma Jiehua. 2015. Analysis of summer climate over China from hindcast experiments by CCSM4.0 and RegCM4.4 models [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 20 (3): 307–318, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14158.
- 张录军, 王乐, 邢雯慧, 等. 2016. 分辨率和陆面方案对长江流域短期气候预测影响 [J]. 水科学进展, 27 (6): 800–809. Zhang Lujun, Wang Le, Xing Wenhui, et al. 2016. Effect of different spatial resolutions and land surface parameterization schemes on the short-term climate prediction in the Yangtze River basin [J]. Adv. Water Sci. (in Chinese), 27 (6): 800–809, doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2016.06.002.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. 气象学报, 61 (4): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (4): 559–568, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.05.005.
- 郑飞, 朱江, 王慧. 2007. ENSO 集合预报系统的检验评价 [J]. 气候与环境研究, 12 (5): 587–594. Zheng Fei, Zhu Jiang, Wang Hui. 2007. The verifications for ENSO ensemble prediction system [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 12 (5): 587–594, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2007.05.01.
- Zheng F, Zhu J, Zhang R H, et al. 2006. Ensemble hindcasts of SST anomalies in the tropical Pacific using an intermediate coupled model [J]. Geophys. Res. Lett., 33 (19): L19604, doi:10.1029/2006GL026994.
- 周广庆, 李旭, 曾庆存. 1998. 一个可供 ENSO 预测的海气耦合环流模式及 1997/1998 ENSO 的预测 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 349–357.
- Zhou Guangqing, Li Xu, Zeng Qingcun. 1998. A coupled ocean–atmosphere general circulation model for ENSO prediction and

- 1997/1998 ENSO forecast [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 3 (4): 349–357, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.07.
- Zhu C W, Park C K, Lee W S, et al. 2008. Statistical downscaling for multi-model ensemble prediction of summer monsoon rainfall in the Asia–Pacific region using geopotential height field [J]. Adv. Atmos. Sci., 25 (5): 867–884, doi:10.1007/s00376-008-0867-x.
- 朱格利, 林万涛, 曹艳华. 2014. 用 WRF 模式中不同云微物理参数化方案对华南一次暴雨过程的数值模拟和性能分析 [J]. 大气科学, 38 (3): 513–523. Zhu Geli, Lin Wantao, Cao Yanhua. 2014. Numerical simulation of a rainstorm event over South China by using various cloud microphysics parameterization schemes in WRF model and its performance analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 513–523, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13202.
- 邹靖, 谢正辉. 2012. RegCM4 中陆面过程参数化方案对东亚区域气候模拟的影响 [J]. 气象学报, 70 (6): 1312–1326. Zou Jing, Xie Zhenghui. 2012. The effects of the land-surface process parameterization of the RegCM4 on climate simulation in East Asia [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70(6): 1312–1326, doi:10.11676/qxxb2012.110.