

张岳军, 周静, 韩照宇, 等. 2016. 基于海气耦合模式的山西省夏季降水统计降尺度预测研究 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 323–332. Zhang Yuejun, Zhou Jing, Han Zhaoyu, et al. 2016. A statistical downscaling model for summer rainfall over Shanxi Province based on CGCM/NCC model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 323–332, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15218.

基于海气耦合模式的山西省夏季降水统计 降尺度预测研究

张岳军¹ 周静¹ 韩照宇¹ 郝智文¹ 李芬² 李淑娟³

¹ 山西省气象科学研究所, 太原 030002

² 山西省气象服务中心, 太原 030002

³ 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

摘 要 基于中国气象局国家气候中心海气耦合模式 (CGCM/NCC) 预测产品和山西省 50 站夏季降水资料, 利用典型因子回归的方法 (CCA), 建立了山西省夏季降水的统计降尺度预测模型。该预测模型选取了 CGCM/NCC 模式夏季 500 hPa 高度场和海平面气压作为预测因子, 分别选取了长江中下游地区和热带中东太平洋作为预报关键区。统计降尺度模型对 2007~2014 年山西省夏季降水的回算较模式原始结果有显著提高, 除 2008 年外, 空间距平相似系数 (ACC) 均通过了 0.01 的显著性检验, 时间相关系数 (TCC) 在山西省大部分地区都有显著提高, 最大可达 0.6, 降水预测 (PS) 评分在 70 分以上。检验结果显示, 基于 CCA 降尺度方法建立的预测模型对山西省夏季降水模态预测的准确率较高且比较稳定, 其预测效果远高于 CGCM/NCC 直接输出降水结果。

关键词 海气耦合模式 山西 降水 降尺度

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0323-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15218

A Statistical Downscaling Model for Summer Rainfall over Shanxi Province Based on CGCM/NCC Model

ZHANG Yuejun¹, ZHOU Jing¹, HAN Zhaoyu¹, HAO Zhiwen¹, LI Fen², and LI Shujuan³

¹ Shanxi Province Meteorological Science Research Institute, Taiyuan 030002

² Shanxi Province Meteorological Service Center, Taiyuan 030002

³ Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002

Abstract A statistical downscaling system for forecasting summer precipitation at stations in Shanxi Province has been developed in this study on the basis of real-time products of numerical prediction from the CGCM/NCC (Coupled Ocean–Atmosphere General Climate Model of National Climate Center) and observational data collected at stations in Shanxi Province. Geopotential height at 500 hPa and sea level pressure in the summer of the current year from the CGCM/NCC simulations are selected as the two predictors; the middle- to lower reaches of the Yangtze River and the tropical central-eastern Pacific are taken as two key regions. The statistical downscaling hindcast of the 2007–2014 summer precipitation over Shanxi Province has improved the prediction compared with the original prediction of the CGCM/NCC. Except for the summer of 2008, the spatial anomaly correlation coefficients (ACC) are statistically

收稿日期 2015-09-18; 网络预出版日期 2016-02-18

作者简介 张岳军, 男, 1985 年出生, 工程师, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: ccolos@163.com

资助项目 山西省农业科技攻关项目 20130312012, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201406022, 山西省气象科研项目 152020010807

Funded by Agricultural Science and Technology Project of Shanxi (Grant 20130312012), Special Scientific Fund for Non-profit Public Industry (Meteorology) (Grant GYHY201406022), Shanxi Meteorological Scientific Research Project (Grant 152020010807)

significant at the 0.01 level, and the temporal correlation coefficients over most areas of Shanxi Province have also increased significantly with a maximum value of 0.6 by the downscaling scheme. The PS score can be greater than 70. Sample tests indicate that the downscaling method based on canonical correlation analysis (CCA) is applicable in the prediction of summer precipitation anomaly across most of Shanxi with high accuracy and stable performance. Predictions by the downscaling method are much better than the original predictions from the CGCM/NCC.

Keywords Coupled model, Shanxi, Rainfall, Downscaling

1 引言

月、季节气候趋势预测一直是短期气候预测关注的重点,也是政府防汛抗旱工作部署的重要参考。近年来,中外科学家围绕这个重要的课题做了大量工作,利用动力与统计项结合的方法实现降尺度预测目前已经取得了很多成果, Busuioc et al.

(2001) 用经验正交函数分解 (EOF) 和典型相关分析 (CCA) 方法估计瑞典的降水。Krishnamurti et al. (2009) 提出统计降尺度与多模式集合相结合方法,并将该方法应用到印度季风区降水预报中,显著提高了预报准确率。范可等 (2008) 将年际增量的降尺度方法应用到华北汛期降水的预测中,还有学者在经验正交函数分解和奇异值分解 (SVD) 相结合的基础上对东亚地区夏季风降水降尺度预测 (Zhu et al., 2008)。这些统计降尺度方法有效利用了气候模式的高技巧信息,极大地提升了气候预测的能力 (Wang and Fan, 2009; 顾伟宗等, 2012)。由于我国幅员辽阔,地形非常复杂,气候呈现出显明的区域特征,对不同区域的气候特征进行识别与分区 (陈烈庭和吴仁广, 1994), 以各分区作为预测对象,利用模式对大尺度因子较好的预测性,将模式输出资料与观测资料相结合,针对不同区域选取影响因子,然后做降尺度预测,结果显示,这种预测方法对各区域夏季降水距平一致率、量级以及时间变化上均优于模式本身的预报效果 (Lang and Wang, 2010; Gu et al., 2011)。在降尺度预测中,无论是单站预测,还是模态预测,因子的类型都可以分为两种类型 (魏凤英和黄嘉佑, 2010), 一种是直接利用模式的原始数据作为因子场;另一种是利用原始数据构建具有天气气候学意义的特征量 (施能和朱乾根, 1996), 它们是间接利用了气象场组成的综合因子。本文使用了前一种因子,来构建山西省夏季降水的降尺度预测模型。

中国气象局国家气候中心的海气耦合模式 (CGCM/NCC) 提供了全球多时间尺度的预测资

料。自 2005 年正式运行以来,衍生出了大量的天气气候服务产品,为我国气候预测及服务提供了丰富的信息。本文利用 CGCM/NCC 输出的历史预测资料,进一步挖掘模式对大气环流的高技巧预报信息,应用降尺度方法对山西省夏季降水进行预测。

2 数据与预测方案

2.1 数据

本研究使用的资料有来自于山西省气象信息中心整理的 1973~2014 年的 50 个测站逐月降水资料, 1973~2014 年各月 NCEP/NCAR 再分析资料 ([http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/\[2015-04-10\]](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/[2015-04-10])), 以及中国气象局国家气候中心海气耦合模式 (CGCM/NCC) 以 2 月海洋大气信息作为初值的夏季环流预报场。NCEP/NCAR 再分析资料和模式预报量要素选取了 500 hPa 位势高度场、海平面气压。模式输出变量和 NCEP/NCAR 再分析资料的分辨率均为 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)。

2.2 预测方案

选取预测因子是建立降尺度预测模型过程中至关重要的过程,在很大程度上决定了预测准确率 (李清泉等, 2004), 为了挑选出影响山西省夏季降水的最优因子,本研究利用山西省夏季降水 EOF 分解的第一模态时间系数 (PC1) 分别与再分析资料和模式历史预报数据求相关,寻求既能反应模式预报大尺度要素的高技巧区,同时也能反应影响降水的实际环流信息,选出满足两个条件的公共区域,以该区域内的模式输出的大尺度环流要素作为因子,山西省 50 个测站夏季降水作为预报量,利用典型因子回归法建立预测模型。挑选出来的因子至少满足三个条件:

(1) 所选预测因子与预报量有很强的相关性,不仅是一般的统计关系,而且要存在真实的物理联系;

(2) 选择的预测因子能够被模式准确地模拟出来,即该因子落在模式预报的高技巧区;

(3) 选择满足条件(1)和(2)的公共区,以该区域内的模式输出的大尺度环流要素作为因子,该区域相关分析的显著性水平应达到0.05以上,格点范围在 4×4 以上的成片区域,保证了统计显著性,避免了小尺度空间信息的干扰。

3 影响因子及其机理

本文把有限的资料序列分为两部分,前一部分(1973~2006年)用于建模,后一部分(2007~2014年)用于回算试验。夏季降水的EOF分解表明(图1a),山西省夏季降水模态收敛速度很快,第一模态的方差贡献占总方差的47.8%,是夏季降水出现

频率最多的雨型。该特征向量全省均为正值,属于一致变化型,说明山西夏季的降水类型以同位相变化为主导,也反映了全省降水在大多数年份具有一致变化特征,体现了山西夏季降水的整体性。变率最大中心位于中部地区,此处为该雨型的代表区;西北部 and 南部特征向量较小。图1b给出了第一特征向量对应的时间系数,从中可以看出,正位相与负位相事件相当,即全省夏季降水一致偏多或偏少的概率相当。以上分析可以得出第一特征向量代表了山西省34年来夏季降水的主要空间异常分布型态,已有研究结果也表明,山西省夏季降水第一模态最为显著,方差贡献远大于其他模态(李智才等,2008;宋燕等,2008),所以PC1的变化基本上可以代表历年来山西省夏季降水的总体变化趋势。

图2a为夏季PC1与同期观测500 hPa高度场的相关,最显著的区域位于长江中下游一带,最大相关系数可以达到0.45左右。对应于预测场的相关图(图2b),主要相关区域位于长江以南,最大相关系数可以达到0.5,可以看出与观测的相关系数分布存在较大差别,但是也存在共同的区域,即江南以南华南以北的中心地带($27^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E}\sim 127.5^{\circ}\text{E}$)。这个区域与副热带高压在盛夏活动的范围较为一致,副热带高压是影响华北地区夏季降水的重要环流系统,它的强度、纬度位置以及西伸程度对华北地区旱涝有着决定性的作用,6~8月副热带高压偏弱(强),脊线位置偏北(南),脊点明显偏西(东)时华北地区降水偏多(少)(黄嘉佑等,2004;黄荣辉等,2006)。

图3a为夏季PC1与同期观测海平面气压的相关,最显著的区域位于热带太平洋的中东部地区,即NINO 3区($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$)所在的区域,存在两个显著的相关中心,最大相关系数可达0.55。华北地区夏季降水与热带中东太平洋海平面气压存在显著的正相关关系(刘永强和丁一汇,1995;黄荣辉等,1996;张岳军等,2013),对华北地区夏季降水的年代际变化具有深远的影响。从PC1与预测海平面气压的相关可以看出(图3b),最显著的相关区域也位于NINO 3区,但是仅有一个较为显著的相关中心,最大相关系数也可以达到0.6以上,从中也可以找到一个共同的关键区($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $135^{\circ}\text{W}\sim 100^{\circ}\text{W}$)。

研究表明 ENSO 在不同的发展位相,对我国夏

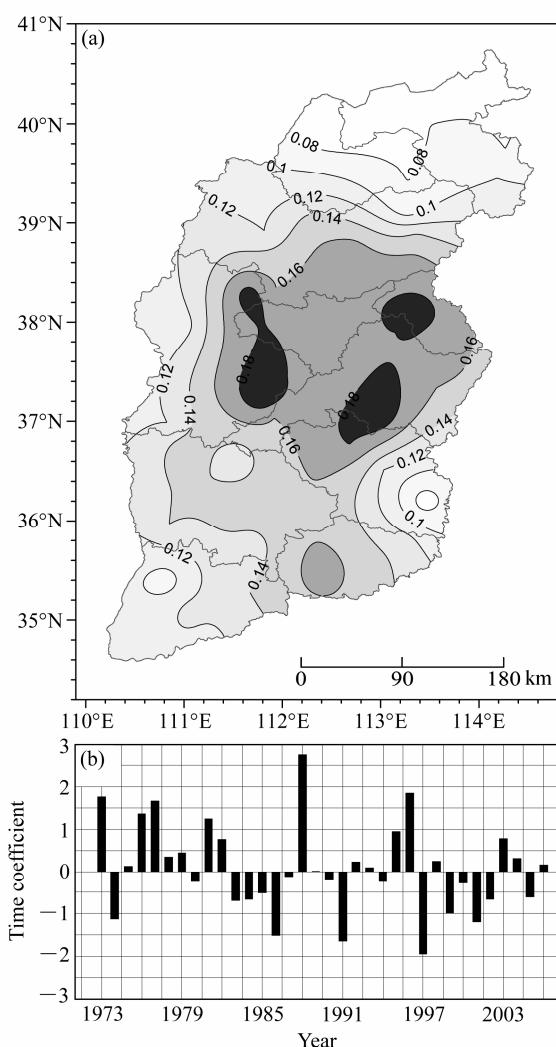


图1 山西省夏季降水 EOF 分解 (a) 第一特征向量及其 (b) 时间序列 (PC1)

Fig. 1 (a) The first EOF (Empirical Orthogonal Function) mode and (b) the corresponding time series (PC1) for summer precipitation in Shanxi Province

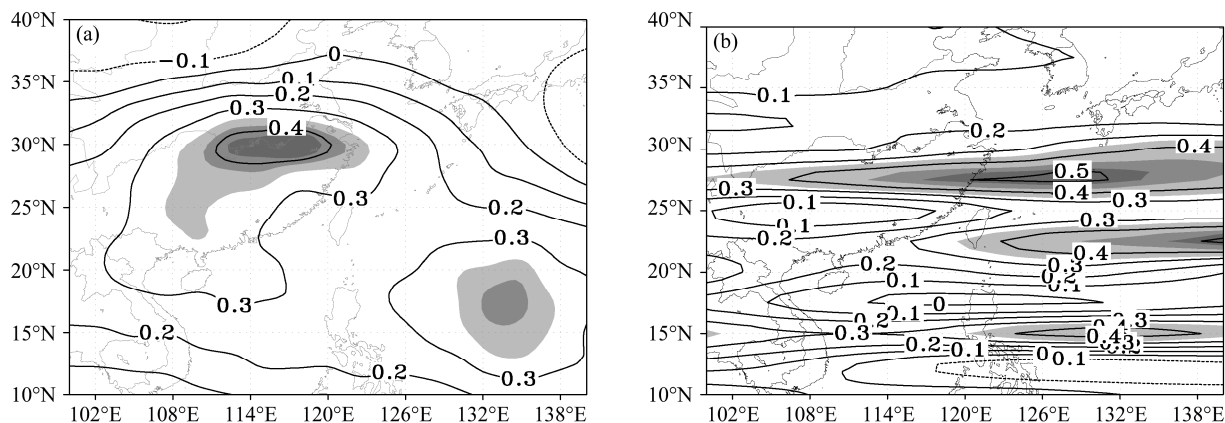


图2 PC1 与同期 (a) NCEP/NCAR 再分析资料以及 (b) CGCM/NCC 的 500 hPa 高度场的相关 (阴影部分表示相关系数通过了 0.05 显著性检验)
Fig. 2 Simultaneous correlation coefficients between PC1 and 500-hPa height (a) from the NCEP/NCAR reanalysis data and (b) from the CGCM/NCC (Coupled Ocean–Atmosphere General Climate Model of National Climate Center) (shaded areas are for values at the 0.05 significance level)

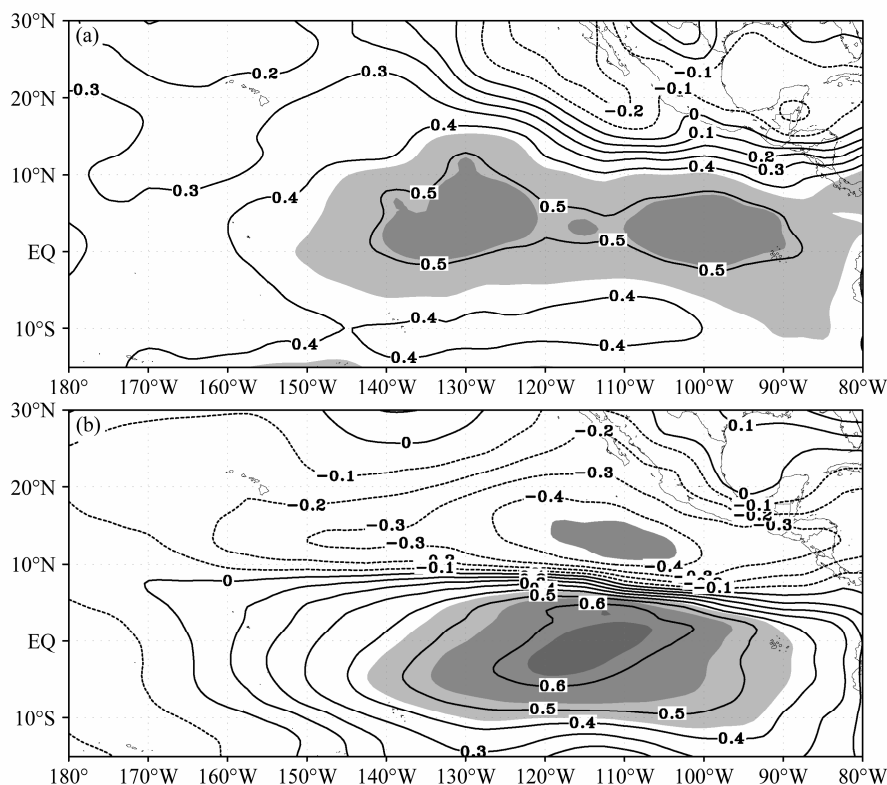


图3 PC1 与同期 (a) NCEP/NCAR 再分析资料以及 (b) CGCM/NCC 的海平面气压的相关 (阴影部分表示相关系数通过了 0.05 显著性检验)
Fig. 3 Simultaneous correlation coefficients between PC1 and sea level pressure (a) from the NCEP/NCAR reanalysis data and (b) from the CGCM/NCC (shaded areas are for values at the 0.05 significance level)

季旱涝影响有不同特征,在 ENSO 的发展阶段,该年夏季江淮流域降水偏多,而华北和华南地区降水偏少,容易发生干旱,当 ENSO 处在衰减阶段则相反,该年夏季我国江淮流域降水偏少,而华北和华南地区降水偏多(孙照渤等,2010)。山西省处于华北西部与全国降水模态的变化是一致的,本研究选取了 1982~1983 年、1986~1988 年、1991~1992

年、1994~1995 年、1997~1998 年共 5 次 ENSO 事件做合成分析,图 4a 为 ENSO 发展阶段当年夏季东亚地区 700 hPa 距平风场和 500 hPa 垂直运动距平合成分布图,从图中可以看出,在 ENSO 发展阶段的当年夏季,日本南部西太平洋 700 hPa 存在反气旋式距平环流,我国华北地区为偏北风异常,这表明华北地区偏南风较弱,水汽输送明显偏少,

同时，500 hPa 垂直运动距平显示在华北地区有很强的垂直下沉运动异常，这些环流异常都不利于山西省降水的发展。图 4b 为 ENSO 衰减阶段当年夏季东亚地区 700 hPa 距平风场和 500 hPa 垂直运动距平合成分布图，从图中可以看出，700 hPa 鄂霍次克海为反气旋式距平环流、西太平洋为气旋式距平环流，从我国西南到华北地区有很强的偏南风异常，这表明华北地区水汽输送明显偏多。500 hPa 垂直运动距平显示在华北地区有很强的上升运动异常，有利于降水的发展。

图 5a 为 ENSO 发展阶段当年夏季东亚地区 500 hPa 高度场和距平场，在东北亚地区存在一脊，贝加尔湖到鄂霍次克海为正距平，距平中心超过了 25 gpm，贝加尔湖以西和日本海为负距平；副热带高压明显偏弱，西伸脊点位于 135°E，较气候态明显偏东，脊线位置处于 25°N 以南，584 dagpm 线处于长江流域；这些环流特征表明，中高纬度地区冷空气活动较弱，南方水汽输送较弱，对华北地区降水的发展非常不利。图 5b 为 ENSO 衰减阶段的当年夏季东亚地区 500 hPa 高度场和距平场，从巴尔克什湖到鄂霍次克海呈现“+、-、+”的波列，贝加尔湖以西为槽，巴尔克什湖和鄂霍次克海为脊；副热带高压明显偏强，西伸脊点位于 120°E，较气候态明显偏西，脊线位置处于 25°N 左右，584 dagpm 线位于黄河流域。在 ENSO 暖事件的发展阶段，副热带高压会出现减弱，在衰减阶段的次年夏季 500 hPa 副热带高压会持续增强，副热带高压的变化是华北地区水汽输送强弱的决定性因子（李清泉和丁一汇，1997；张人禾和黄荣辉，1998）；研究表明长波槽位于 100°E~110°E 时，最有利于华北降水的形成，华北位于长波槽前，鄂霍次克海一代为脊，有利于阻塞形势的发展（朱乾根等，1981），阻塞高压的形成和维持增强了中高纬度的经向环流，有利于冷空气的南下，副热带高压的西伸，可以使得西南地区的暖湿气流向华北输送。主雨带是由冷空气长期对峙形成，副热带高压和东亚夏季风等反映了中低纬的暖湿气流的强弱和路径，中高纬的阻塞高压则反映了冷空气的强弱和路径（赵俊虎等，2014）。

4 统计降尺度预测结果分析

本文采用降水预测（PS）评分、距平符号一致

率 R 和降水空间距平相关系数（ACC）对回算结果进行定量评估。PS 评分是在距平符号预报准确率的基础上增加异常级加权得分，PS 评分展示了预测方法对气候趋势的把握能力，为短期气候预测业务常用方法（陈丽娟等，2003）。距平（距平百分率）符号一致率简称同号率，是指预测值与观测值距平符号相同的气站站数和参与评分的气站站总数的百分比，常用来检验中长期预报的一种有效方法。ACC 主要反映预测值与实况值的相似程度，能够反映降水空间异常分布预测的技巧。

表 1 给出了预测值 PS 评分、同号率 R 和 ACC 的检验值。从中可以看出，2008 年回算结果相对较差，同号率为 68%，ACC 值为 0.22，尽管同号率和 ACC 较低，但是 PS 评分仍然可以达到 63 分，各项评分均可以达到国家的评分标准。除 2008 年外其他年份 PS 评分均大于 70 分，2010 年、2013 年和 2014 年 PS 评分均在 80 分以上、同号率可以达到 75% 左右，ACC 值总体上都超过了 0.25 时的 0.01 显著性水平检验。

表 1 预测结果检验

Table 1 Statistical results of forecasting data

年份	PS 评分	同号率 R	ACC
2007 年	77	74%	0.42
2008 年	63	68%	0.22
2009 年	74	76%	0.37
2010 年	83	85%	0.54
2011 年	71	77%	0.48
2012 年	75	82%	0.51
2013 年	81	85%	0.59
2014 年	84	92%	0.63

图 6 为 1973~2006 年观测值与模式原始结果和降尺度结果的时间距平相关系数，观测值与模式结果的距平相关系数最显著的区域在吕梁东部，最大相关系数为 0.3 左右，其余大部分地区均小于 0.3，未能通过 0.01 的显著性检验。而观测值与模式降尺度结果的空间距平相关系数显著的区域较为广泛，吕梁东部、临汾西部和晋中东部等地均通过了 0.01 的显著性检验，最大的相关系数可以达到 0.6。

具体年份的预测结果怎么样呢？本研究分别选取了回算结果较差和较好的年份（2008 年、2014 年），对降水距平百分率做了分析。降水距平百分率是表征某时段降水量较气候平均值偏多或偏少的指标之一，能直观反映降水异常引起的干旱，在日常气象业务中多用于评估月、季、年发生的干旱

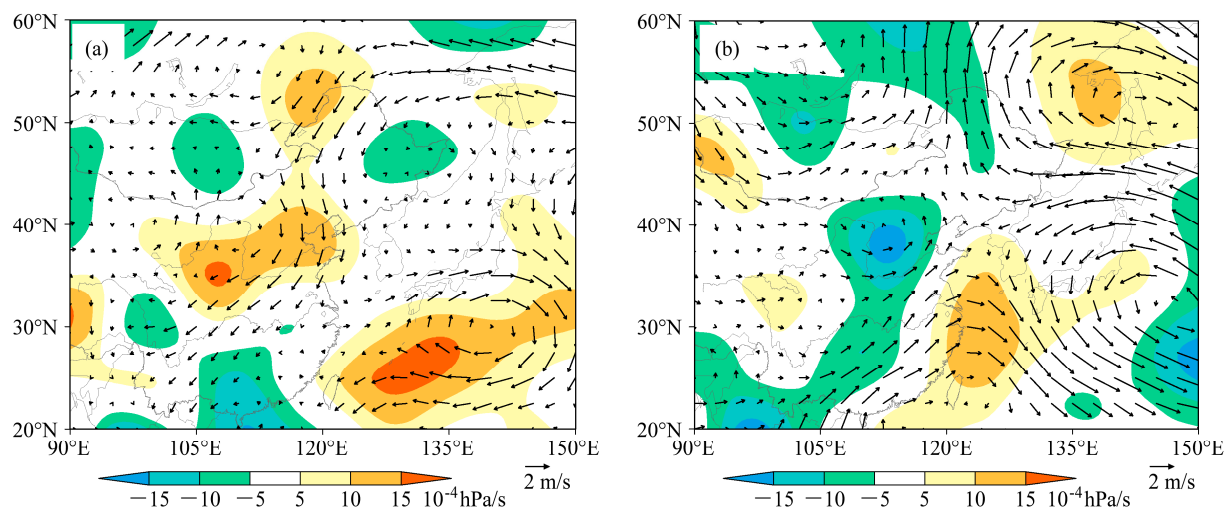


图4 ENSO (a) 发展阶段和 (b) 衰减阶段夏季东亚地区 700 hPa 风场距平和 500 hPa 垂直运动距平合成 (箭头: 700 hPa 风场距平; 彩色阴影区: 500 hPa 垂直运动距平, 单位: 10^{-4} hPa/s)

Fig. 4 Distributions of wind anomalies at 700 hPa and vertical motion anomalies at 500 hPa in the summer over East Asia in ENSO (a) developing and (b) decaying stages (vectors: wind anomalies at 700 hPa; shaded: vertical motion anomalies at 500 hPa, units: 10^{-4} hPa/s)

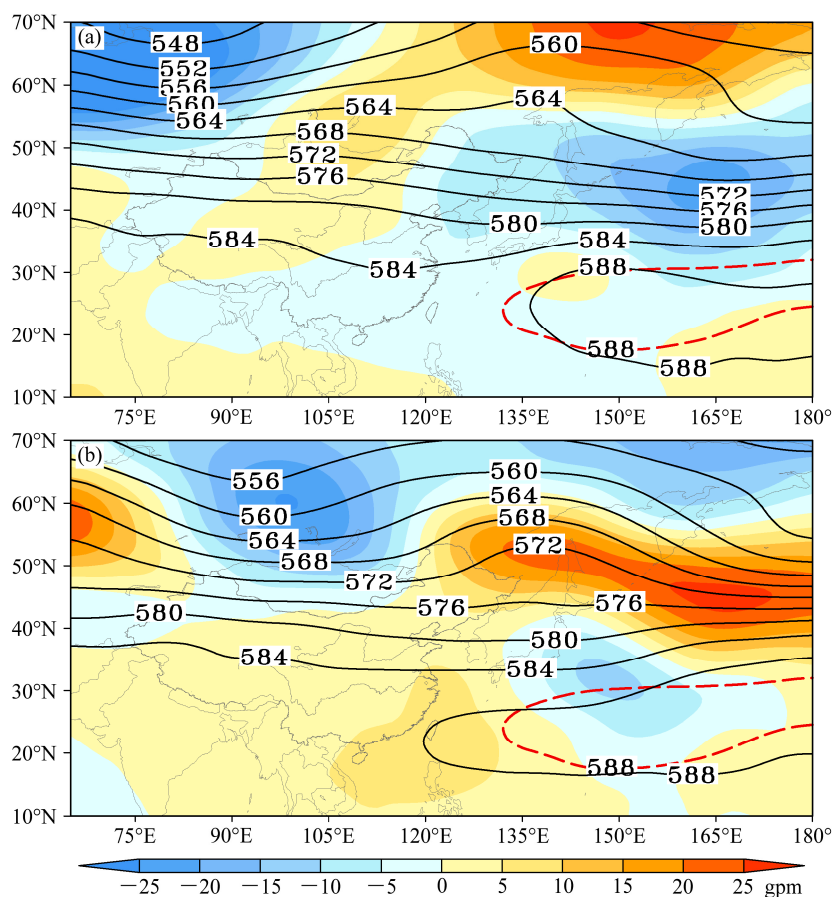


图5 ENSO (a) 发展阶段和 (b) 衰减阶段东亚地区夏季 500 hPa 位势高度 (黑色等值线: 高度场, 单位: dagpm; 红色虚线: 气候态 588 dagpm) 及其距平场 (彩色阴影, 单位: gpm)

Fig. 5 The distribution of 500-hPa geopotential height (black contour: geopotential height, units: dagpm; red dashed line: 588 dagpm for climatic state) and its anomalies (shaded) in the summer in ENSO (a) developing and (b) decaying stages

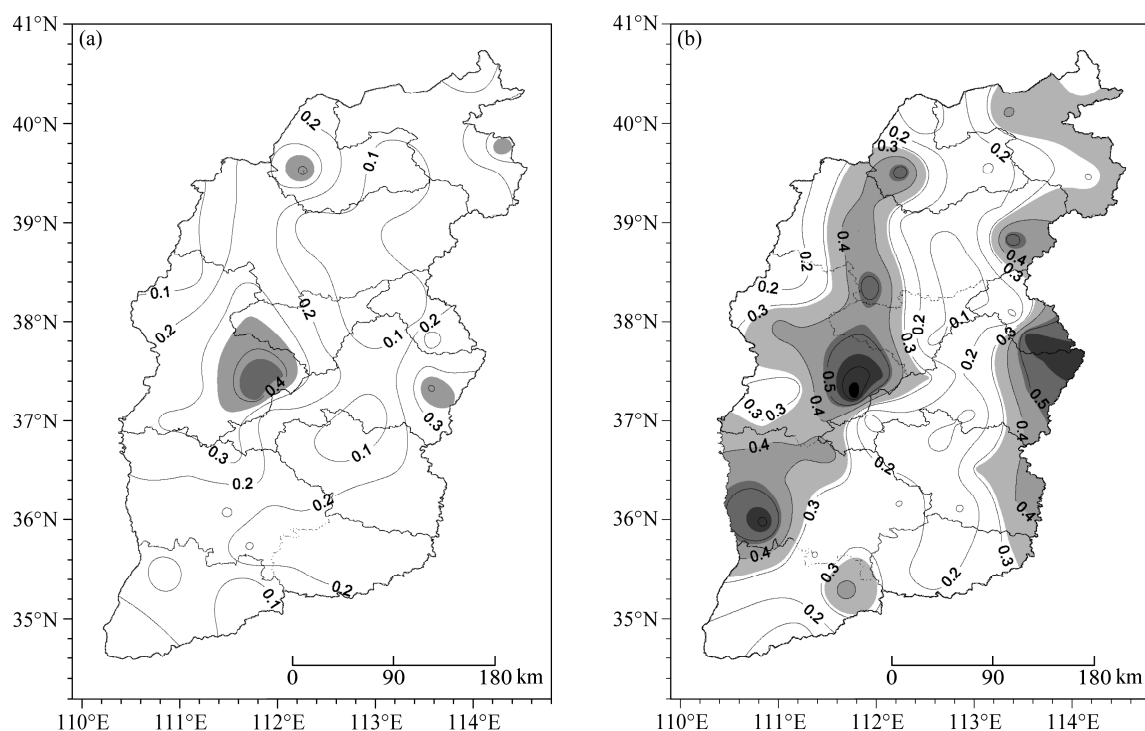


图6 观测值与(a)模式预测以及(b)降尺度结果夏季降水的时间距平相关系数(阴影部分表示通过了0.01显著性检验)

Fig. 6 Anomaly correlation coefficients of summer precipitation between observations and (a) the original model outputs, and (b) the downscaling results (shaded areas are for values at the 0.01 significance level)

事件。降水距平百分率等级适合于半湿润、半干旱地区平均气温高于 10°C 的时段。

2008 年是业务预测较差的一年, 业务预测 PS 评分为 45 分。模式降尺度结果的同号率 R 为 68%, ACC 为 0.22, PS 评分较业务预测评分有显著的提高, 为 63 分, 但是明显低于其他年份的降尺度预测评分。2008 年夏季吕梁中部、临汾和运城西部、晋城大部分地区降水偏少, 距平百分率小于 -20% , 忻州中西部、吕梁东部降水偏多, 距平百分率大于 20% (图 7a), 除忻州、太原、朔州和大同等地以外, 其他地区均出现了不同程度的干旱, 尤其是运城、晋城等地出现了轻度干旱, 预测的降水距平百分率也有类似的分布 (图 7b), 但降水整体上较观测明显偏少。

图 8a 为 2014 年夏季降水距平百分率情况, 2014 年山西省中南部地区降水普遍偏少, 距平百分率小于 -20% , 临汾、吕梁和长治三市交界地带, 以及运城、长治东部, 距平百分率小于 -40% , 达到了轻度干旱级别, 仅有大同和朔州部分地区降水距平百分率在 0.0% 以上, 个别站点偏涝。与实测情况相比, 回算结果中轻度干旱范围更大一些 (图 8b),

山西省中南部大部分地区距平百分率小于 -20% , 个别地区小于 -40% , 达到了轻度干旱级别。总体来讲, 该降尺度模型对 2014 年降水的回算结果较为理想, 主雨区预测较为准确, 回算结果与观测之间的 ACC 为 0.63, 同号率 R 达到了 92%, 较业务预测评分有较大的提高, PS 评分从 52 分提高到了 84 分。

5 结论

利用 CGCM/NCC 气候模式输出场、NCEP/NCAR 再分析资料和站点降水资料, 通过求相关系数的方法 (PC1 与模式资料和再分析资料分别求相关), 寻求影响山西夏季降水的预测因子, 并进一步对因子场的高技巧预报信息进行了分析。基于正交经验分解和典型相关分析的降尺度方法建立了山西省夏季降水预测模型, 结果表明:

(1) 本文建模的预测因子选择了长江中下游 500 hPa 高度场和热带中东太平洋海平面气压。该降尺度预测模型对山西省夏季降水的回报结果较模式原始数据有显著的提高, 时间距平相关系数和空间距平相关系数 ACC 均有较大幅度的提高, 说

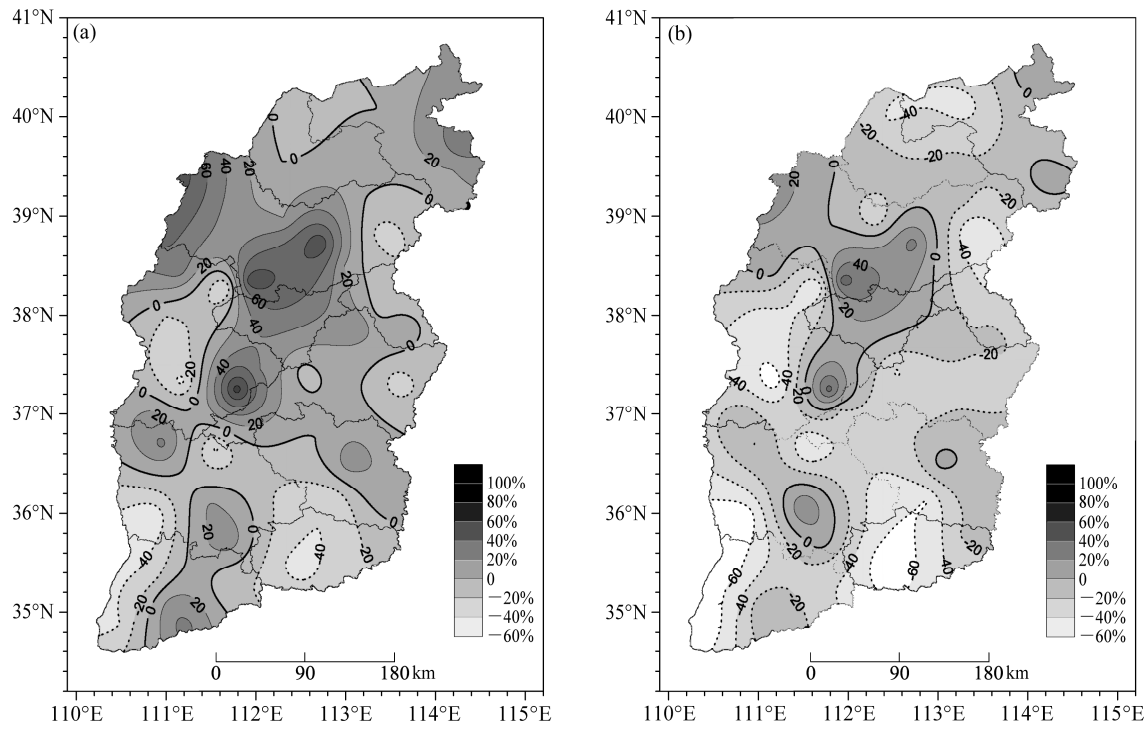


图 7 2008 年夏季降水距平百分率: (a) 观测数据; (b) 降尺度结果
Fig. 7 Spatial patterns of precipitation anomaly percentage for the 2008 summer from (a) observations and (b) downscaling outputs

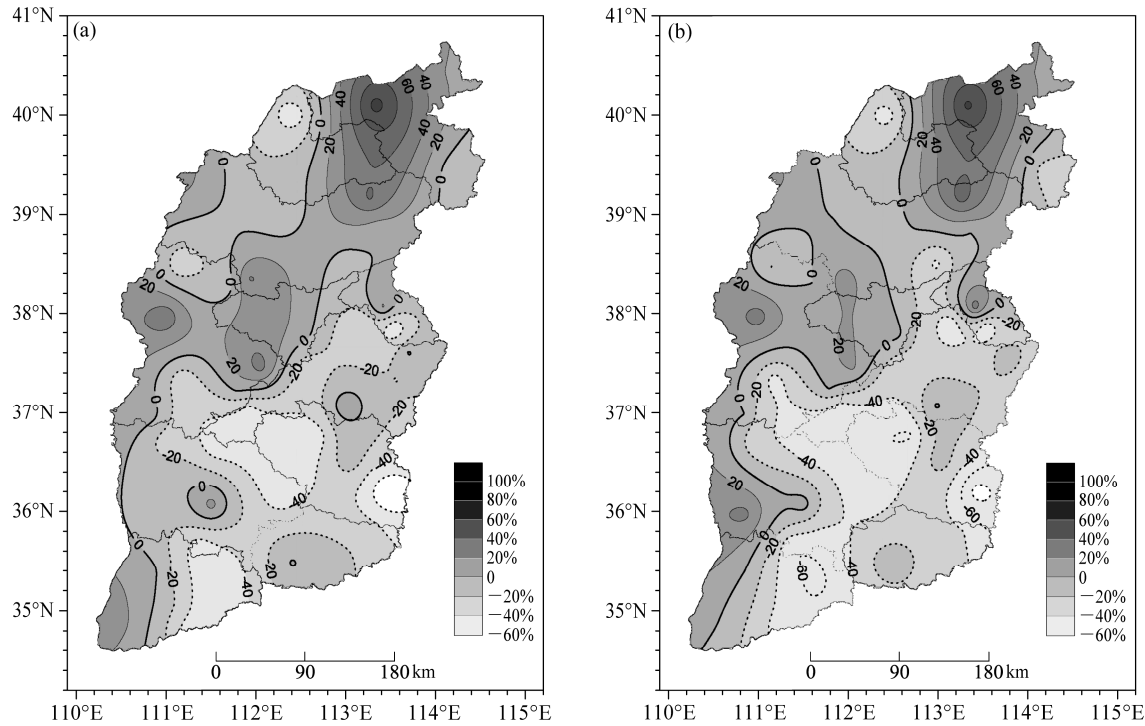


图 8 2014 年夏季降水距平百分率: (a) 观测数据; (b) 降尺度结果
Fig. 8 Spatial patterns of precipitation anomaly percentage in the 2014 summer from (a) observations and (b) downscaling outputs

明预报因子的选取是合理的, 副热带高压和 ENSO 信号都是影响山西省夏季降水的重要因子, 但是二者之间的作用是不同的, 前者对山西省夏季降水的

年际变化影响较大, 而后者对降水的年代际变化的影响较为显著。

(2) 从本文的分析可以说明, 基于模式高技巧

信息的降尺度方法能够显著提高山西省夏季降水预测准确率, 同时也可以看到, 在降尺度预测中, 模式性能从根本上决定了降水预测的技巧。在目前模式发展水平的基础上, 对模式系统误差进行订正有利于提高对降水的预测能力。基于观测资料的诊断分析, 以及对模式数据的高价值信息的挖掘相结合, 是进一步提高区域气候预测准确率的有效途径。

参考文献 (References)

- Busuioac A, Chen D L, Hellström C. 2001. Performance of statistical downscaling models in GCM validation and regional climate change estimates: Application for Swedish precipitation [J]. *International Journal of Climatology*, 21 (5): 557–578, doi: 10.1002/joc.624.
- 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 [J]. *应用气象学报*, 14 (6): 648–655. Chen Lijuan, Li Weijing, Zhang Peiqun, et al. 2003. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 14 (6): 648–655.
- 陈烈庭, 吴仁广. 1994. 中国东部的降水区划及各区旱涝变化的特征 [J]. *大气科学*, 18 (5): 586–595. Chen Lieting, Wu Renguang. 1994. Climatic division of precipitation in eastern China and drought–flood variation in various regions [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 18 (5): 586–595.
- 范可, 林美静, 高煜中. 2008. 用年际增量方法预测华北汛期降水 [J]. *中国科学 D 辑 (地球科学)*, 38 (11): 1452–1459. Fan Ke, Lin Meijing, Gao Yuzhong. 2008. Comprehensive evaluation of precipitation heterogeneity in China [J]. *Scientia Sinica Terrae (in Chinese)*, 38 (11): 1452–1459.
- Gu W Z, Chen L J, Li W J, et al. 2011. Development of a downscaling method in China regional summer precipitation prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25 (3): 303–315, doi: 10.1007/s13351-011-0306-2.
- 顾伟宗, 陈丽娟, 李维京, 等. 2012. 降尺度方法在中国不同区域夏季降水预测中的应用 [J]. *气象学报*, 70 (2): 202–212. Gu Weizong, Chen Lijuan, Li Weijing, et al. 2012. Development of a downscaling method in China regional summer precipitation prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 70 (2): 202–212.
- 黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响 [J]. *大气科学*, 28 (4): 517–526. Huang Jiayou, Liu Ke, Zhao Xinyi. 2004. The influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (4): 517–526.
- 黄荣辉, 傅云飞, 臧晓云. 1996. 亚洲季风与 ENSO 循环的相互作用 [J]. *气候与环境研究*, 1 (1): 38–54. Huang Ronghui, Fu Yunfei, Zang Xiaoyun. 1996. Asian monsoon and ENSO cycle interaction [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 1996, 1 (1): 38–54.
- 黄荣辉, 蔡格硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. *大气科学*, 30 (5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 730–743.
- Krishnamurti T N, Mishra A K, Chakraborty A, et al. 2009. Improving global model precipitation forecasts over India using downscaling and the FSU superensemble. Part I: 1–5-day forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (9): 2713–2735, doi: 10.1175/2009MWR2568.1.
- Lang X M, Wang H J. 2010. Improving extraseasonal summer rainfall prediction by merging information from GCMs and observations [J]. *Wea. Forecasting*, 25: 1263–1274, doi: 10.1175/2010WAF2222342.1.
- 李清泉, 丁一汇. 1997. 1991–1995 年 El Niño 事件的特征及其对中国天气气候异常的影响 [J]. *气候与环境研究*, 2 (2): 163–177. Li Qingquan, Ding Yihui. 1997. The basic features of the El Niño events during 1991–1995 and their anomalous influences on the weather and climate in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 2 (2): 163–177.
- 李清泉, 丁一汇, 张培群. 2004. 一个全球海气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估 [J]. *气象学报*, 62 (6): 740–751. Li Qingquan, Ding Yihui, Zhang Peiqun. 2004. Primary verification and assessment on the extra-seasonally predictive capability of a global atmospheric–oceanic coupled model in raining season [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (6): 740–751.
- 李智才, 宋燕, 朱临洪, 等. 2008. 山西省夏季年际气候异常研究 1. 山西省一致多雨或少雨型 [J]. *气象*, 34 (1): 86–93. Li Zhicai, Song Yan, Zhu Linhong, et al. 2008. On Shanxi summer interannual climate change I. Concurrent rich/seldom rainfall pattern [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (1): 86–93.
- 刘永强, 丁一汇. 1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响 [J]. *大气科学*, 19 (2): 200–208. Liu Yongqiang, Ding Yihui. 1995. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 19 (2): 200–208.
- 施能, 朱乾根. 1996. 北半球大气环流特征量的长期趋势及年代际变化 [J]. *南京气象学院学报*, 19 (3): 283–289. Shi Neng, Zhu Qiangen. 1996. Secular trends and interdecadal variation of characteristic quantities of atmospheric circulation for northern winter [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 19 (3): 238–289.
- 宋燕, 李智才, 朱临洪, 等. 2008. 山西省夏季年际气候异常研究 2. 北少(多)南多(少)雨型 [J]. *气象*, 34 (2): 61–68. Song Yan, Li Zhicai, Zhu Linhong et al. 2008. On Shanxi summer inter-annual climate anomalies 2. Seldom/rich rainfall in north/south and rich/seldom rainfall in north/south pattern [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (2): 61–68.
- 孙照渤, 陈海山, 谭桂容, 等. 2010. 短期气候预测基础 [M]. 北京: 气象出版社, 103–105. Sun Zhaobo, Chen Haishan, Tan Guirong, et al. 2010. *Elements of Short Period Climate Predictions (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 103–105.
- 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.
- 魏凤英, 黄嘉佑. 2010. 大气环流降尺度因子在中国东部夏季降水预测中的作用 [J]. *大气科学*, 34 (1): 202–212. Wei Fengying, Huang Jiayou. 2010. A study of downscaling factors of atmospheric circulations in the prediction model of summer precipitation in eastern China [J]. *Chinese*

- Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 202–212.
- 张人禾, 黄荣辉. 1998. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析 [J]. 大气科学, 22 (4): 587–599. Zhang Renhe, Huang Ronghui. 1998. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analyses [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 22 (4): 587–599.
- 张岳军, 余锦华, 刘征宇, 等. 2013. 2009/2010 年冬季中国气温异常及其对海表温度的遥响应 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 626–638. Zhang Yuejun, Yu Jinhua, Liu Zhengyu, et al. 2013. Winter 2009/2010 temperature anomaly in China and its remote response to sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 626–638.
- 赵俊虎, 支蓉, 申茜, 等. 2014. 2012 年我国夏季降水预测与异常成因分析 [J]. 大气科学, 38 (2): 237–250. Zhao Junhu, Zhi Rong, Shen Qian, et al. 2014. Prediction of the distribution of the 2012 summer rainfall in China and analysis of the cause for anomaly [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 237–250.
- 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]. Advances in Atmospheric Sciences, 25 (5): 867–884, doi: 10.1007/s00376-008-0867-x.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 1981. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 361–364. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen. 1981. Principles and Methods of Weather (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 361–364.