

陈红. 2017. 欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性的影响 [J]. 大气科学, 41 (4): 727–738. Chen Hong. 2017. Impacts of Eurasian snow condition on spring climate predictability over China by a global climate model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 727–738, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16231.

欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性的影响

陈 红

中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘 要 利用大气环流模式 IAP9L_CoLM, 通过两组集合后报试验, 考察了欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性的影响。一组试验为常规后报试验, 积雪是由模式陆面过程预报得到的, 另一组试验为积雪试验, 模式积分过程中欧亚大陆雪水当量由微波遥感积雪资料替代, 一天替换一次。通过分析两组试验后报结果的差异, 来考察欧亚大陆积雪对我国春季 (3~5 月) 气候可预报性的影响。分析表明: 欧亚大陆积雪模拟水平的改善能提高春季欧亚大陆中高纬环流场 (海平面气压场和中、高层位势高度场) 的可预报性, 模式对我国春季气温异常的年际变化和空间分布的可预报能力也有显著增强。对我国春季降水, 虽然预报技巧较低, 但引入较真实的欧亚积雪作用后, 由于中高纬环流场预报技巧的改进导致降水的预测能力也有所改进。个例分析也表明, 欧亚中高纬春季积雪异常模拟水平的改善导致了欧亚中高纬贝加尔湖及以南区域环流场可预报性的提高, 最终使中国东部区域春季气候异常模拟技巧得以改善。以上结果也证实, 欧亚大陆积雪是影响东亚区域春季气候的一个重要因子, 要提高模式对中国春季气候的预报技巧, 积雪模拟水平的改进是非常必要的。

关键词 欧亚积雪 春季气候 可预报性

文章编号 1006-9895(2017)04-0727-12

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16231

Impacts of Eurasian Snow Condition on Spring Climate Predictability over China by a Global Climate Model

CHEN Hong

International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Two ensemble experiments with an atmospheric general circulation climate model (IAP9L_CoLM) were conducted to investigate the impacts of realistic Eurasian snow condition on spring climate predictability over China. In one ensemble simulation, snow condition was allowed to evolve interactively; in the other ensemble simulation, the snow condition was prescribed according to microwave remote snow water equivalent depth data. Differences between the two experiments were assessed to evaluate the impact of realistic Eurasian snow condition on simulated climate anomalies in the spring. Looking at sea level pressure and geopotential height at the middle and upper levels, it was found that the IAP9L_CoLM prediction skill was enhanced at the middle–high latitudes of Eurasia with improved Eurasian snow condition. Furthermore, the results indicate that the predictive skill of IAP9L_CoLM for both interannual variation and spatial distribution of surface air temperature over China was obviously improved with prescribed snow condition over Eurasia. For spring precipitation over China, although the predictive skill was low, the potential predictability increased with more realistic snow condition. One case study also showed that with the improved simulation of snow condition over Eurasia, the predictive skill for large scale circulation anomalies over the middle–high latitudes of Eurasia was

收稿日期 2016-09-14; **网络预出版日期** 2017-03-08

作者简介 陈红, 女, 1972 年出生, 博士, 副研究员, 从事气候预测和可预报性研究。E-mail: chh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金面上项目 41575080

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41575080)

increased, which finally led to a better hindcast of spring climate anomalies over China. Overall, this study suggests that Eurasian snow condition can potentially affect the spring climate anomalies over China. Thereby the predictive ability for Eurasian snow condition must be improved for better prediction of spring climate over China.

Keywords Eurasian snow conditions, Spring climate, Climate predictability

1 前言

积雪代表了一类特殊而又十分重要的下垫面,它是气候系统中的一个重要而活跃的组成部分,对气候异常有着重要的影响。早在 1884 年,Blanford (1884) 就发现喜马拉雅山冬春雪量与其后的印度夏季降水之间存在反相关,并根据这一关系,用喜马拉雅山积雪预报印度季风降水。此后,大量工作开始对积雪异常及其气候效应进行了深入的研究,加深了人们对积雪异常相关问题的认识 (Dickson, 1984; Barnett et al., 1988; Yasunari et al., 1991)。

欧亚大陆积雪在北半球雪盖中占有重要的位置,它对全球气候变化,尤其是亚洲季风系统的变化起着十分重要的作用。欧亚大陆积雪对印度夏季风降水和东亚气候的影响近百年来也一直为气候学家所瞩目。Hahn and Shukla (1976)、Dickson (1984) 等先后对积雪异常与印度季风的关系进行了深入研究,我国学者则针对积雪对东亚气候异常的影响,开展了大量富有成效的研究。大量研究表明欧亚大陆冬、春季积雪通过影响东亚夏季风的变率,造成我国东部的夏季降水异常 (如,罗勇, 1995; 陈兴芳和朱文玲, 2000; 吴统文和钱正安, 2000; 张顺利和陶诗言, 2001; 钱永甫等, 2003; Wu and Qian, 2003; Zhao et al., 2007), 而冬季欧亚积雪异常则可通过积雪的辐射冷却效应,导致东亚冬季风环流的异常 (陈海山和孙照渤, 2003; 陈海山等, 2003)。虽然我国大部分地区春季降水绝对值远小于夏季,但春季降水的多少对我国农业非常重要,已有研究揭示欧亚大陆冬、春积雪异常与我国春季降水有密切关系 (Wu and Kirtman, 2007; Zuo et al., 2012a, 2012b)。我国春季降水异常同时受到低纬和中高纬大气环流系统的影响 (韩晋平等, 2006)。中低纬环流系统,如南支槽、西太平洋副热带高压等通过影响水汽的输送影响我国春季降水异常;而中高纬环流系统,如北极极涡、蒙古高压、高空西风带上的槽脊系统 (乌拉尔山阻高、贝加尔湖脊、东亚大槽等) 等的异常,会通过影响北方冷空气的南下进而影响我国春季降水 (覃武等, 1994; 温之平等, 2007; Zhao et al., 2009; 张圣天和尤卫红, 2010; 周明森

等, 2013; 徐青竹, 2015; 夏阳等, 2016)。根据已有研究,欧亚大陆春季积雪正是通过影响欧亚中高纬大气环流系统进而影响我国春季降水的。如, Wu and Kirtman (2007) 的研究表明,欧亚大陆春季积雪异常可以在欧亚大陆上空的大气中激发出异常波列,此波列可影响到东亚气候。Zuo et al. (2012a, 2012b) 的研究也表明,欧亚春季积雪的偏少通过影响近地面加热的异常使欧亚中高纬度边界层厚度增加,进而引起向上和向极地的波流活动的减弱,最终导致以贝加尔湖为中心的西伯利亚区域 500 hPa 高度场增加,850 hPa 上以贝加尔湖为中心出现异常反气旋系统,我国东部为异常偏北风,进而造成我国东南地区降水减少和西南地区降水的增多。

鉴于欧亚积雪对东亚地区短期气候的重要影响,其已成为我国气象部门短期气候预测,特别是统计预测中的重要因子 (陈兴芳和朱文玲, 2000; 孙林海和宋文玲, 2001; 彭京备等, 2006)。但由于气候模式的局限性及观测积雪资料的缺乏,积雪异常在东亚动力学预测中的作用还未得到足够重视。一些研究表明,在动力学模式中如能真实地考虑作为下垫面的积雪异常的影响,必然会提高季度预测的可预报性。如 Gong et al. (2003) 的研究表明,使用真实的西伯利亚积雪资料,能较准确模拟出冬季北半球北极涛动的变率; Schlosser and Mocko (2003) 通过在气候模式中用实际的积雪替代模式中陆面模式预报的结果进行数值试验,结果表明,用观测的积雪异常可以提高模式对春季气温的预报技巧。Peings et al. (2011) 的研究表明较真实的积雪强迫会提高模式对中欧和北美春季气温的预报技巧。那么,欧亚大陆积雪对东亚区域气候可预报性的影响如何,迄今尚无系统性评估,有关这方面的研究现阶段还很少。Chen (2010) 通过在气候模式中用欧亚区域实际的积雪替代模式中陆面过程预报的结果进行数值试验,发现欧亚积雪模拟水平的改进会提高夏季欧亚中高纬环流场、东亚区域气候场的预报技巧。本文着重讨论欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性的影响,以进一步揭示欧亚积雪在预测东亚区域气候中的作用,为进一步提高东亚地区短期气候预测的准确度提供理论依据。

2 模式、资料和数值试验

本文使用的模式为 IAP9L_CoLM 模式, 该模式主要由 IAP9L 大气环流模式和陆面模型 CoLM 组成 (刘少锋, 2007)。IAP9L 大气环流模式在东亚区域具有可靠的模拟性能, 且已被用于东亚区域气候变化的数值模拟及跨季度短期气候预测中 (如 Lang et al., 2003; Jiang et al., 2003)。陆面模型 CoLM 是 Dai et al. (2003) 发展的, 被美国大气研究中心的气候系统模式 (NCAR CCSM) 采用。

本文使用的积雪资料为 1979~2002 年美国国家冰雪数据中心 (NSIDC) 北半球月平均雪水当量 (Armstrong et al., 2005), 资料分辨率为 $25\text{ km}\times 25\text{ km}$ 。雪水当量 (SWE) 反映的是积雪总水量, 同时包含了雪盖和雪深信息, 能较全面的体现积雪的作用。利用卫星微波遥感反演得到的这套 SWE 资料还存在一些问题, 如资料来源本身的缺测问题、资料来源分辨率较低、反演算法的合理性等, 这些问题可能导致资料的精确度有限。但就目前而言, 时间较长、范围较广的观测积雪资料比较缺乏, 而这套 SWE 资料相对来说资料时间较长、格点较密, 因此可适用于气候模式较大范围试验的需要。这套资料目前也已经被许多研究验证和使用 (Wu and Kirtman, 2007; Wu et al., 2009)。

大气环流资料为 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast) 提供的月平均再分析资料, 资料的水平分辨率为 $2.5^\circ\times 2.5^\circ$ (Uppala et al., 2005)。本文还利用中国气象局提供的中国区域 160 站月平均气温和降水资料。这些观测数据被用来进行模拟结果的比较评估。

为了评估欧亚大陆积雪对气候可预报性的影响, 本文设计了两组集合后报试验, 一组为常规后报试验 (CTRL), 另一组为积雪试验 (PSC)。两组试验的大气初始场取自每年 2 月 24~28 日的两个时次的数据, NCEP/NCAR 再分析资料, 共 10 个集合样本, 海温边界条件为实测 SST, 陆面初始场为模式气候态, 积分时间为 2 月 15 日至 8 月 31 日, 积分年份为 1980~2002 共 23 年。对 CTRL 试验, 积雪由模式预报得到。对 PSC 试验, 将卫星微波遥感反演所得雪水当量月平均资料线性插值到每天, 模式积分过程中欧亚区域 ($0^\circ\sim 90^\circ\text{N}$, $0^\circ\sim 180^\circ\text{E}$) 雪水当量用该资料进行替换, 一天 [每天 00 时 (协调世界时)] 替换一次, 其余时段积雪还是由模式陆面模型计算得到。

图 1 为卫星反演所得和模式模拟的 23 年平均的雪水当量分布及相应的标准偏差图。图 1a 所示, 卫星观测的欧亚大陆雪水当量由高纬度向低纬度逐渐减少, 高值区主要在西伯利亚区域。模式两组试验对雪水当量的分布具有较好的模拟能力, 能再现积雪由北向南的这种减少趋势, 只是贝加尔湖东北部的大值区没有模拟出来, 且青藏高原出现与观测不一致的大值中心 (图 1b、c)。与控制试验相比, 积雪试验能增大贝加尔湖东北部的雪水当量值 (图 1d), 部分区域能增加 20 mm 以上。从标准偏差上看, 卫星观测春季积雪变率大的区域主要在欧亚大陆 40°N 以北的中、高纬度区域, 大值区在 60°N 左右的西伯利亚区域, 中心值大于 25 mm (图 1e)。控制试验能模拟出 40°N 以北变率大的区域, 但与观测相比值明显偏低, 贝加尔湖东侧变率值甚至小于 5 mm, 60°N 左右的西伯利亚变率大值区也没能模拟出来 (图 1f)。相对于控制试验, 积雪试验能增大 40°N 以北区域的积雪年际变率 (图 1h), 60°N 左右的相对大值区也有所体现, 因此积雪试验在一定程度上改善了欧亚中高纬度雪水当量变率的模拟。对于青藏高原区域, 与观测相比, 控制试验在高原南侧模拟的大值中心与实况相比偏高, 积雪试验并没有改善该区域的模拟, 这可能与高原地形复杂、模式分辨率较低、卫星观测资料精确度有限等有关。总的来说, 积雪试验能改善欧亚大陆中高纬雪水当量的模拟水平, 特别是年际变率的模拟能力。Zuo et al. (2012b) 的研究表明, 春季欧亚中高纬西伯利亚雪水当量能代表欧亚大陆春季积雪的变化。欧亚大陆雪水当量无论其分布还是变率, 大值区都在中高纬度区域, 因此该区域是影响我国春季气候的关键积雪区域, 该区域积雪模拟能力的改进对气候异常预报技巧的改善非常重要。此外, 对积雪覆盖率的分布, 积雪试验的模拟能力相比于控制试验也是有所改善的, 控制试验模拟的中高纬雪盖百分比与观测相比略偏低, 积雪试验能在一定程度上提高该区域的雪盖值 (图略)。下面的分析着重考察欧亚大陆中高纬度积雪模拟水平改善对春季环流和我国春季气候可预报性的影响。

3 欧亚积雪对春季气候可预报性的影响

3.1 环流场

图 2 给出了海平面气压场和 500 hPa 高度场的

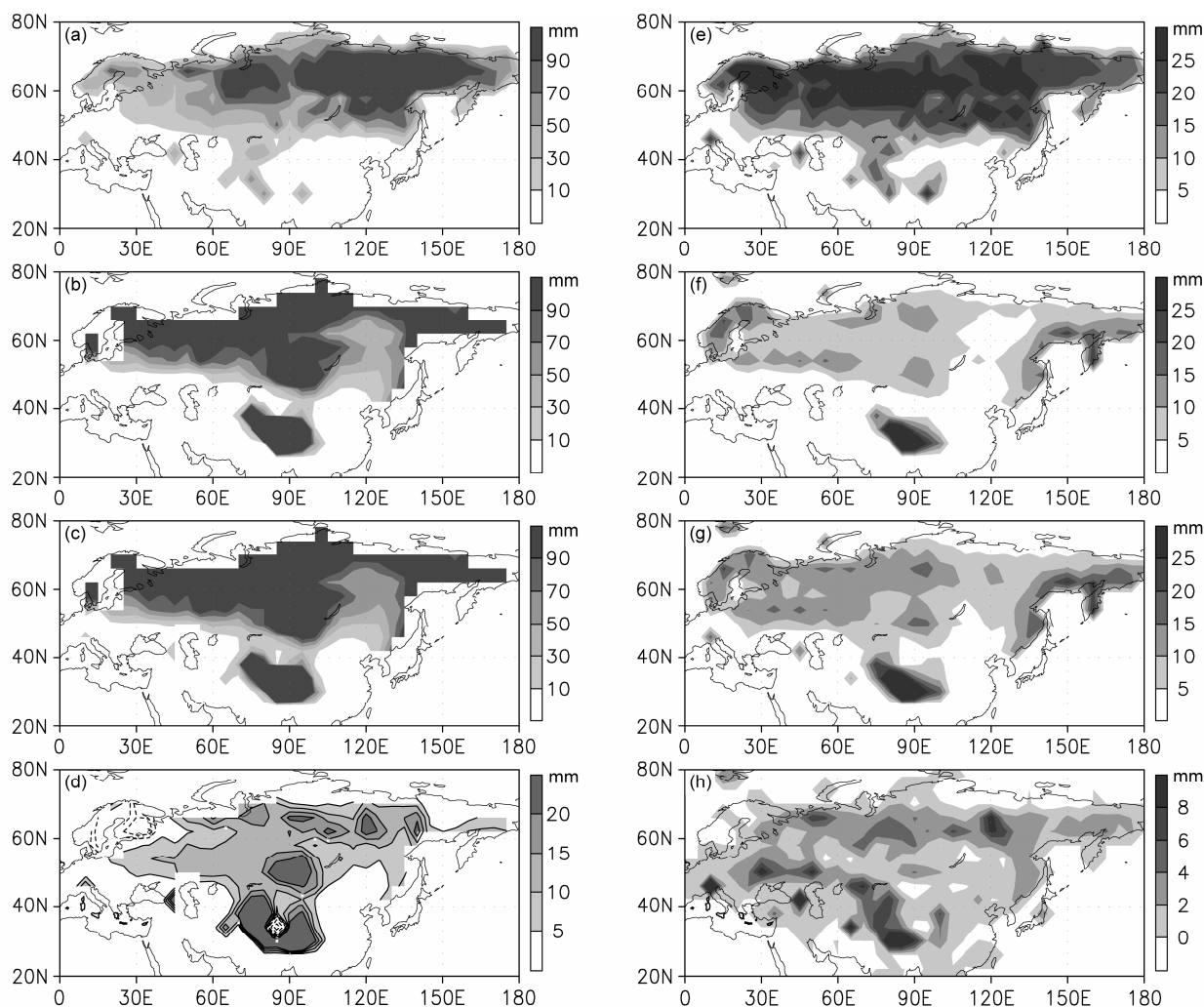


图1 23年平均的雪水当量分布(左图)及其标准偏差(右图):(a, e)卫星观测;(b, f)控制试验结果;(c, g)积雪试验结果;(d, h)积雪与控制试验差值。单位: mm

Fig. 1 Snow water equivalent (SWE) distribution (left panel) and its standard deviation (right panel): (a, e) Observations (satellite-derived); (b, f) CTRL simulation (control experiment); (c, g) PSC (prescribed snow condition) simulation; (d, h) difference between PSC and CTRL experiments. Units: mm

预报技巧分布。对海平面气压场,总的来说,和其它模式一样,可预报性高值区主要分布在海洋上,陆上相对较低。对控制试验,欧亚大陆中高纬地区预报技巧基本上都没有通过显著性检验。而模式中考虑较真实的欧亚积雪条件后,欧亚大陆中高纬度预报技巧得以改善,特别是贝加尔湖到乌拉尔山区域,预报技巧改进明显,出现了显著的正相关区(图2c、e)。考虑较真实的欧亚积雪作用后,热带区域可预报性没有改善。

对500 hPa高度场,控制试验中可预报性高值区主要在中低纬度地区,欧亚大陆中高纬区域基本没有什么预报技巧。考虑较真实欧亚积雪条件后,欧亚大陆中高纬度可预报性有所改善,欧洲西部、

西伯利亚西部、贝加尔湖东南部预报技巧提高0.3以上(图2f),乌拉尔山、贝加尔湖东南侧和欧洲西部出现了显著的正相关区(图2d)。与海平面气压场相似,中低纬度区域可预报性没有改善。对流层高层位势高度场(200 hPa)结果与500 hPa高度场相似,引入较真实的欧亚大陆积雪条件后,欧亚大陆中高纬环流场的可预报性得以改善(图略)。

由于中高纬环流是影响中国春季气候的一个重要因子,因此欧亚大陆中高纬度从低层到高层环流场预报能力的改进,对中国气候预报技巧的改进是有利的。

欧亚大陆中高纬积雪模拟水平的改善为何导致欧亚中高纬环流模拟水平的改善,而非热带环流

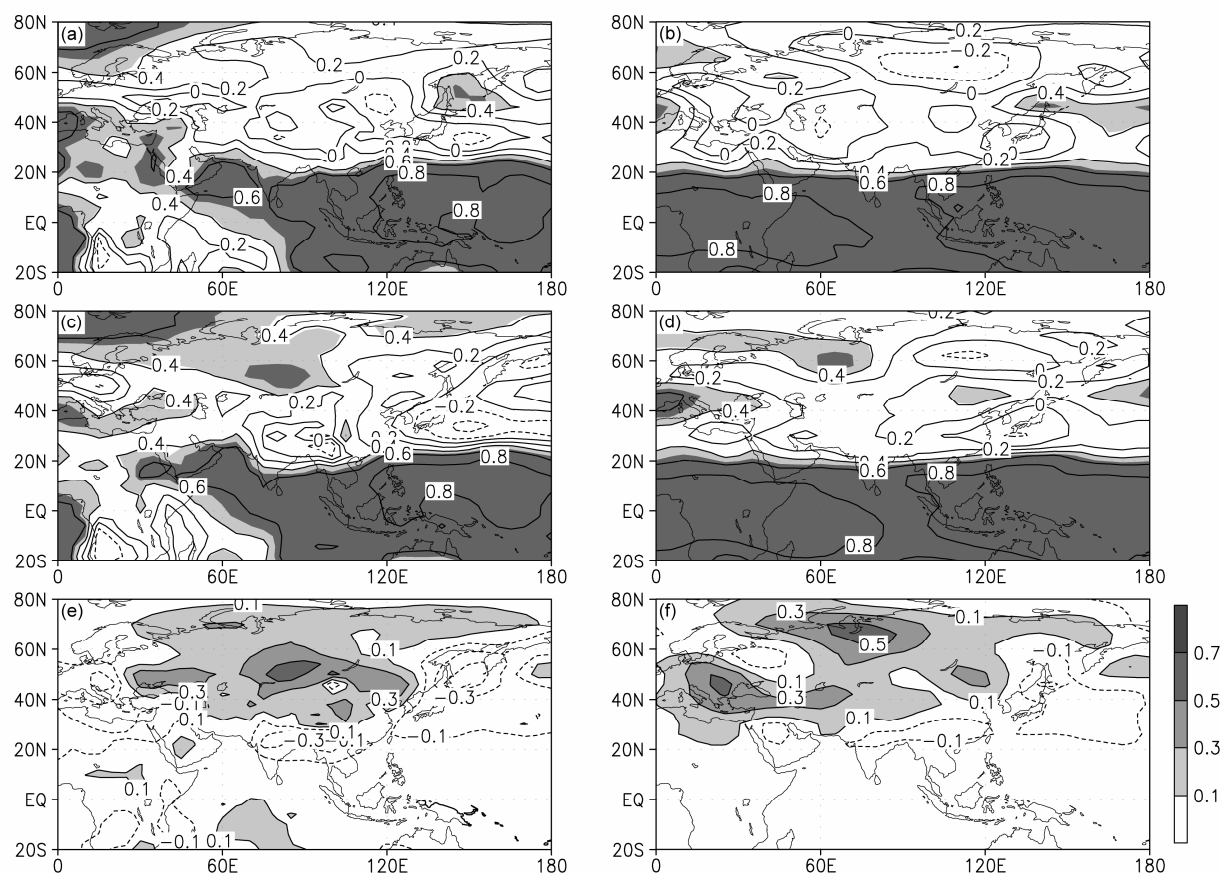


图2 春季海平面气压场(左图)和500 hPa高度场(右图)的时间相关分布:(a, b)控制试验;(c, d)PSC试验;(e, f)PSC试验和控制试验的差值。(a-d)中浅(深)阴影区为通过95%(99%)信度检验的区域

Fig. 2 Temporal correlation coefficients of the sea level pressure (left panel) and the geopotential height at 500 hPa (right panel) in the spring: (a, b) CTRL simulation; (c, d) PSC simulation; (e, f) the difference between the PSC and CTRL simulations. (a-d) The light (dark) shaded areas represent correlations statistically significant at the confidence level of 95% (99%)

场,这里通过欧亚大陆积雪和环流场的奇异值分解(SVD)进行简单解释。图3给出春季欧亚大陆积雪和500 hPa位势高度场SVD分解的第一模态异质相关分布。SVD第一模态的方差贡献率最高,达到42%,相应时间系数的相关为0.87。图3a显示,春季积雪的异质相关在欧亚大陆中高纬区域为显著正相关区,与欧亚大陆积雪年际变率大值区一致,大值区在西伯利亚地区。同期500 hPa位势高度场的相关分布显示,欧亚中高纬出现环流场的显著异常区,欧洲西部和贝加尔湖地区是负相关中心,巴伦支海地区是正相关中心。因此,从SVD分解结果看,欧亚大陆中高纬积雪的变化与欧亚大陆中高纬度环流场有密切关系,所以欧亚中高纬度积雪的改进,导致了欧亚中高纬度环流的改进。而第二模态显示(图略),热带环流场与高原积雪密切相关,但本文积雪试验中高原积雪模拟没有改进,加之热带环流原来预报技巧就很显著,所以本文中西低纬环

流预报技巧没有改进。

3.2 中国区域气温和降水

图4为中国春季气温时间相关系数的分布。常规后报试验结果表明(图4a),模式对我国春季气温具有一定的预报技巧,其中华南、东南沿海、青藏高原西部及内蒙古东北部零星区域,预报水平能通过显著性检验。当欧亚积雪模拟水平提高后,中国许多区域气温预测水平都能通过95%的显著性检验(图4b),特别是东北、西北东部、东南沿海、华南,预报技巧通过99%的信度检验。气温预报技巧的改善,可能与积雪导致的欧亚中高纬环流场模拟性能的改善有关。春季雪水当量与500 hPa位势高度场SVD第一模态中的位势高度场时间系数能表征与雪水当量相关的欧亚中高纬环流场的变化,计算该时间系数与中国春季气温的相关,发现中国春季许多区域的气温与之有显著的相关性(图5),也就是说中国春季气温与欧亚中高纬环流场有密

切的联系,因此欧亚中高纬高度场预报水平的改进(图2)有可能导致了中国区域气温预报技巧的改进。当然气温的影响因子比较复杂,需要以后作进一步深入分析。

此外,本文还分析了中国160站点春季气温的空间距平相关系数(ACC)和同号率(RSSA)。23年平均的ACC(RSSA)从控制试验的0.12(59%)提高到积雪试验的0.22(70%)。从年际变化来讲,

许多年份ACC都是改善的(图6a),同号率的改善则更明显,大多数年份都是提高的(图6b)。总的来说,引入相对真实的欧亚大陆积雪后,对我国春季气温,无论是年际变化还是空间分布,预报技巧都是改善的。

对中国区域春季降水,23年平均的空间相关也由-0.08提高到0.02。相对于控制试验,许多年份PSC试验的ACC和RSSA都是改进的(图6c、d),

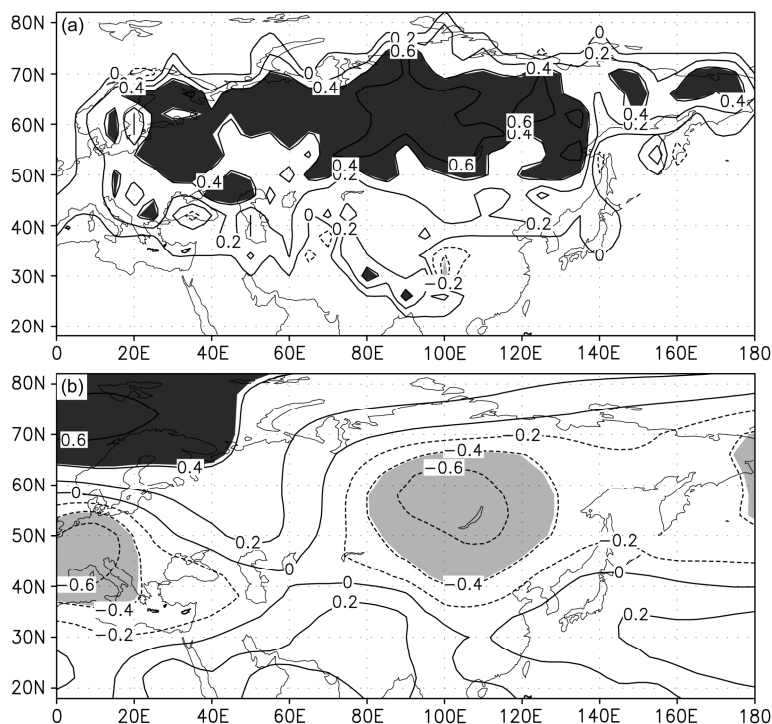


图3 春季(a)雪水当量(SWE)和(b)500 hPa位势高度场奇异值分解(SVD)第一模态异质相关分布。阴影区为通过95%信度检验的区域

Fig. 3 Spatial patterns of heterogeneous correlation of SWE (a) and geopotential height at 500 hPa (b) corresponding to the first leading mode of Singular Value Decomposition (SVD). Shaded areas represent correlations statistically significant at the confidence level of 95%

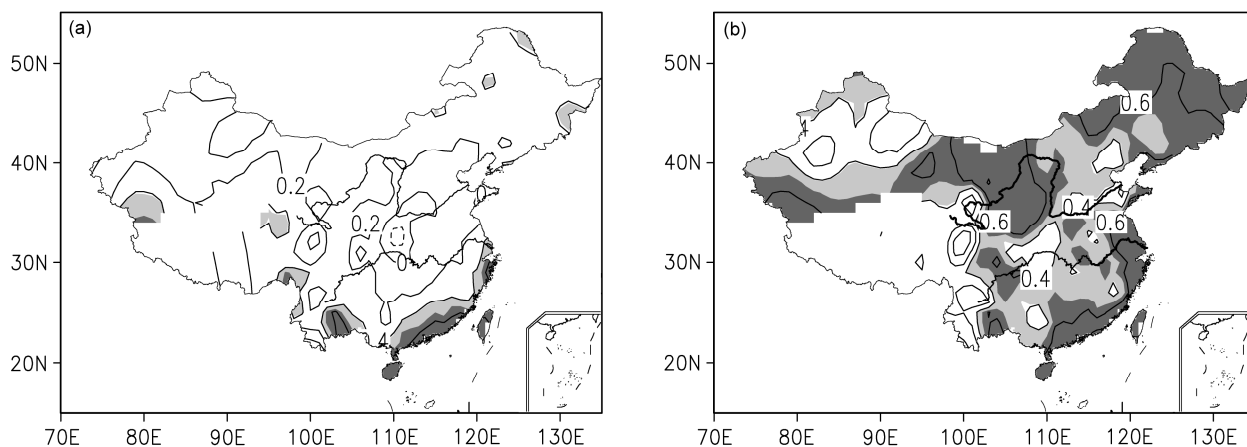


图4 观测和后报的1980~2002年中国区域春季气温间的时间相关分布:(a)CTRL试验;(b)PSC试验。浅(深)阴影区为通过95%(99%)信度检验的区域

Fig. 4 Temporal correlation coefficients of surface air temperature between observations and simulations in the spring over China during 1980–2002: (a) CTRL experiment; (b) PSC experiment. The light (dark) shaded areas represent correlations that exceed the confidence level of 95% (99%)

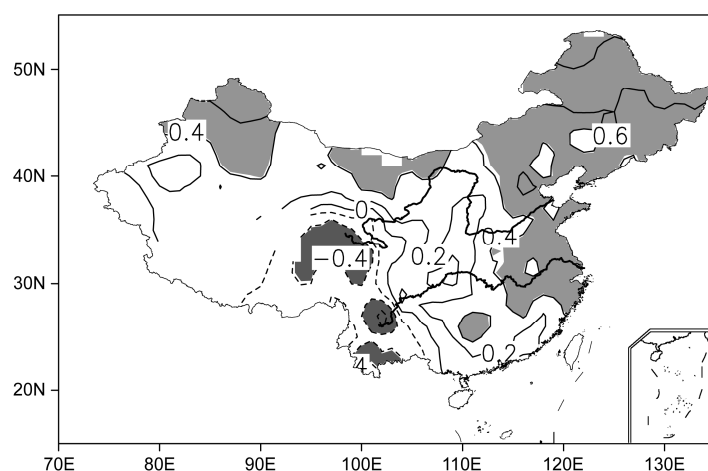


图5 春季雪水当量与 500 hPa 位势高度场间 SVD 第一模态中的位势高度场时间系数和中国区域气温相关。阴影区为通过 95% 信度检验的区域

Fig. 5 Temporal correlation coefficients between surface air temperature over China and the time coefficients of geopotential height in the first leading SVD mode between SWE and the geopotential height at 500 hPa in the spring. The shaded areas represent correlations statistically significant at the 95% confidence level

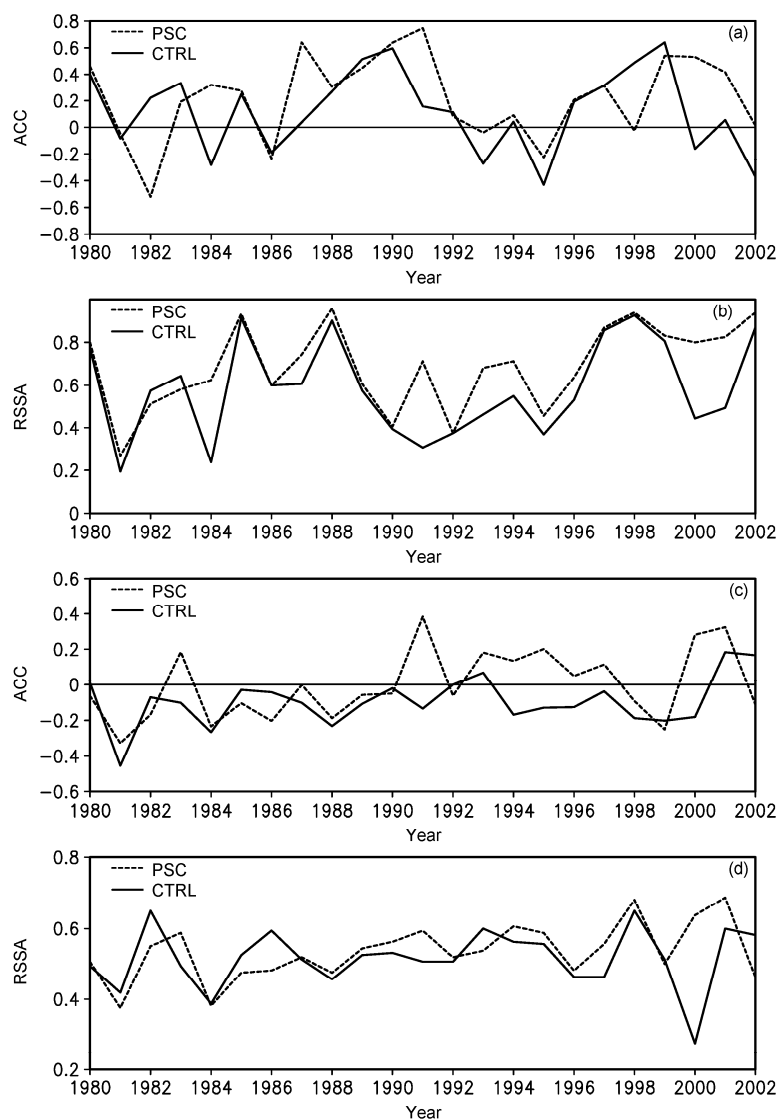


图6 中国区域 (a) 春季气温空间距平相关系数和 (b) 春季气温同号率, (c) 降水空间距平相关系数及 (d) 春季降水同号率的年际变化

Fig. 6 (a) Spatial anomaly correlations (ACC) and (b) the rate with the same sign of anomalies (RSSA) for surface air temperature in the spring, and (c) spatial anomaly correlations and (d) the rate with the same sign of anomalies for rainfall in the spring over China

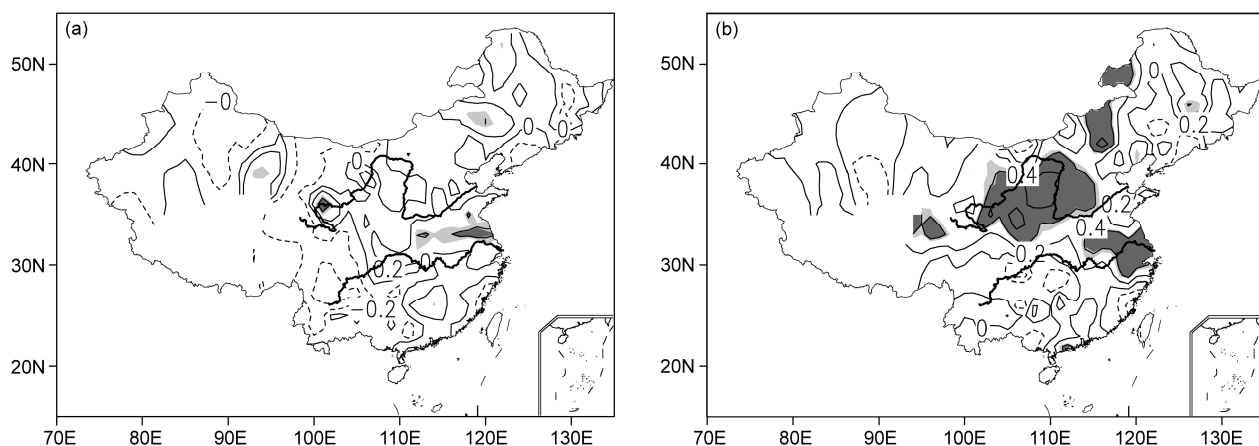


图7 观测和后报的中国区域春季降水间的时间相关分布: (a) CTRL 试验; (b) PSC 试验。浅色、深色阴影区分别为通过 90%和 95%信度检验的区域
Fig. 7 Temporal correlation coefficients of spring precipitation between observations and simulations over China: (a) CTRL experiment; (b) PSC experiment.
The light (dark) shaded areas represent correlations statistically significant at the 90% (95%) confidence level

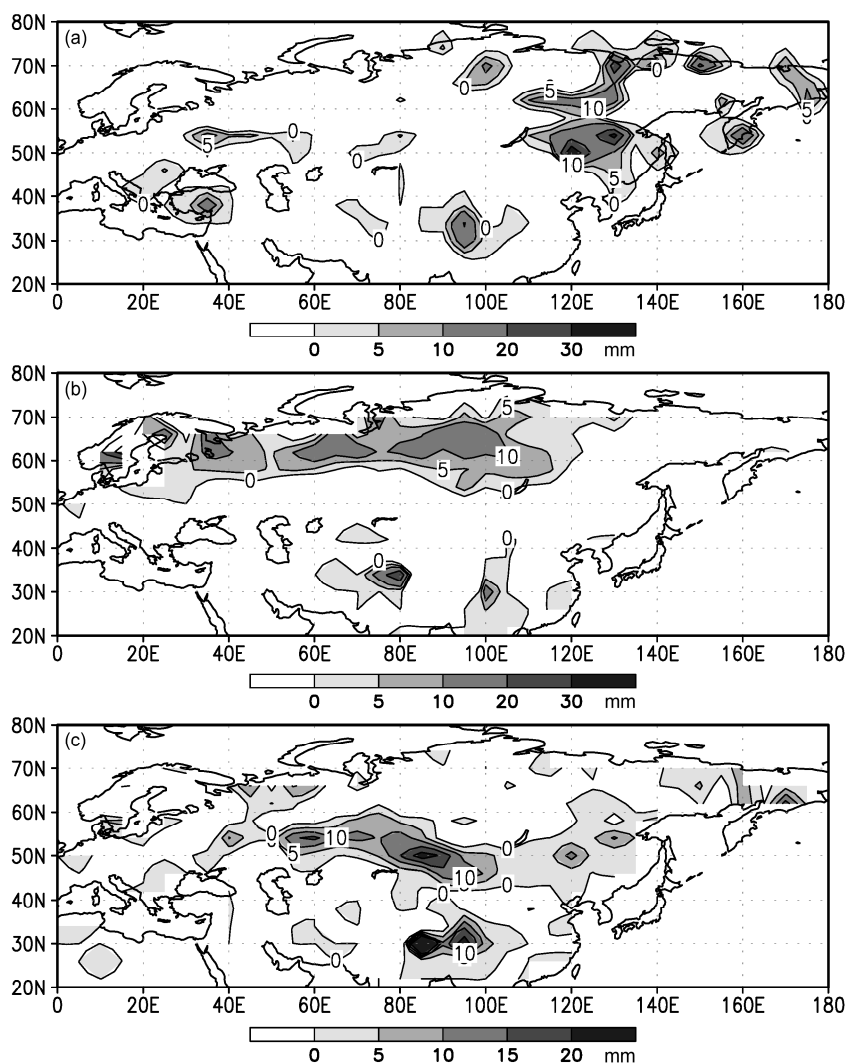


图8 2000 年春季雪水当量异常(单位: mm): (a) 观测; (b) 控制试验; (c) 两试验差值
Fig. 8 Snow water equivalent anomalies in the spring of 2000 (units: mm): (a) Observations; (b) CTRL simulation; (c) the difference between the PSC and CTRL simulations

正相关年份由控制试验的 4 年提高到积雪试验的 10 年。从时间相关图上也可发现, 模式控制试验的预报技巧较低 (图 7a), 预报技巧显著的区域仅出现在淮河流域、黄河上游及内蒙古东部一小片区域。考虑相对真实的欧亚积雪作用后, 春季降水预报技巧有所改善, 河套大部、长江中下游、内蒙古东部区域预报技巧通过 90% 显著性检验 (图 7b)。所以, 总的来说, 欧亚积雪模拟水平改进后, 我国春季降水的预报技巧也是改进的。但降水的预报水平还是较低, 所以在实际预测中, 为提高降水的预报水平, 对模式输出的降水进行订正是非常必要的。

3.3 个例分析

以春季降水和气温改进比较明显的 2000 年为例, 说明欧亚积雪模拟水平的改进对我国春季气候可预报性的影响。2000 年春季欧亚大陆中高纬积雪

分布特征为: 贝加尔湖以东东北亚地区积雪以偏多为主, 贝加尔湖以西 55°N 以北区域积雪以偏少为主、以南为正常。模式控制试验模拟的积雪异常与实况相反, 贝加尔湖以东偏少, 贝加尔湖以西 55°N 以北区域偏多, 55°N 以南区域以偏少为主。积雪试验则改善了欧亚中高纬积雪异常的分布, 与控制试验比, 贝加尔湖以东东北亚积雪增多了, 贝加尔湖以西 55°N 以北区域积雪减少了、以南区域积雪增多了 (图 8)。

观测环流场上, 贝加尔湖附近一直到中国东部海平面气压异常为负值区, 东北亚为气旋性环流异常, 中国东部基本为偏北风控制 (图 9a), 导致降水偏少 (图 10 a)。控制试验中贝加尔湖附近一直到中国东北部海平面气压为正异常, 中国东部 40°N 以南区域为偏东风控制 (图 9b), 带来大量由东部

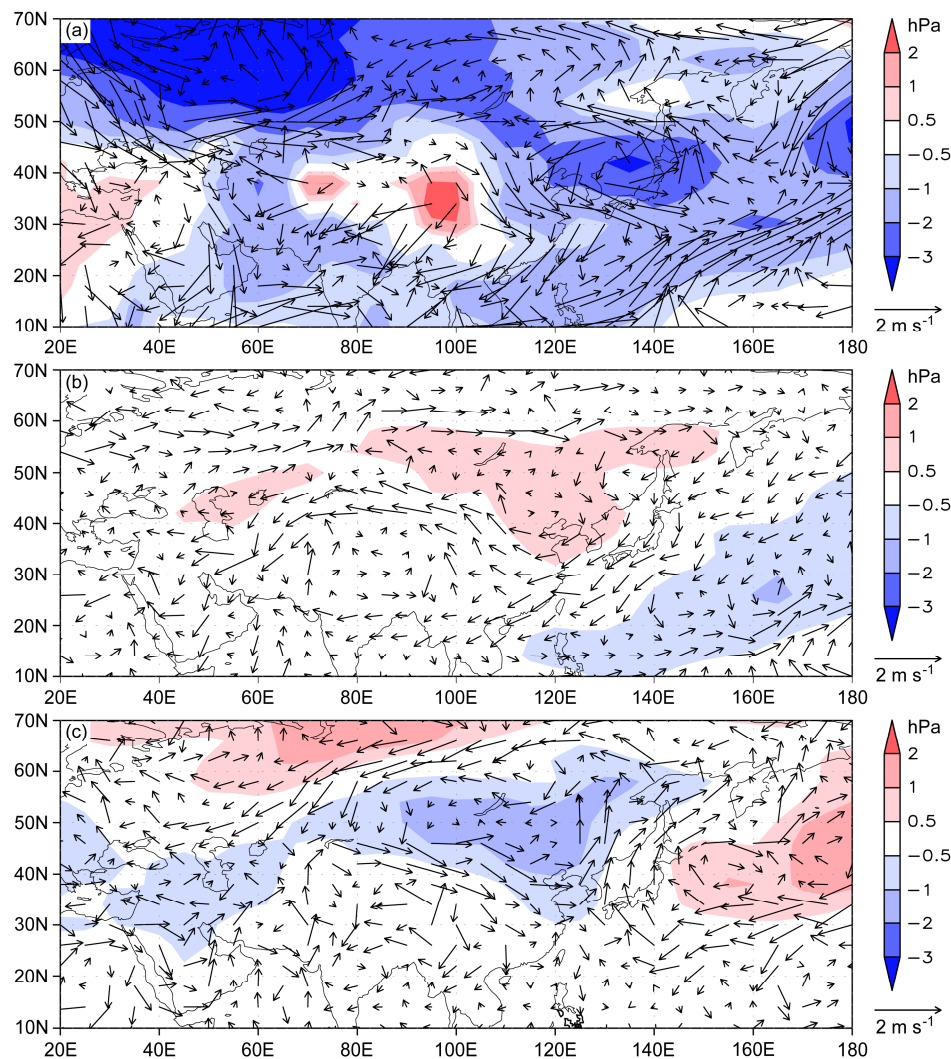


图 9 2000 年春季海平面气压 (单位: hPa) 和 850 hPa 风场 (单位: m s^{-1}) 异常: (a) 观测; (b) 控制试验; (c) 两试验差值

Fig. 9 Sea level pressure anomalies (units: hPa) and wind anomalies (units: m s^{-1}) at 850 hPa in the spring of 2000: (a) Observations; (b) CTRL simulation; (c) the difference between the PSC and CTRL simulations

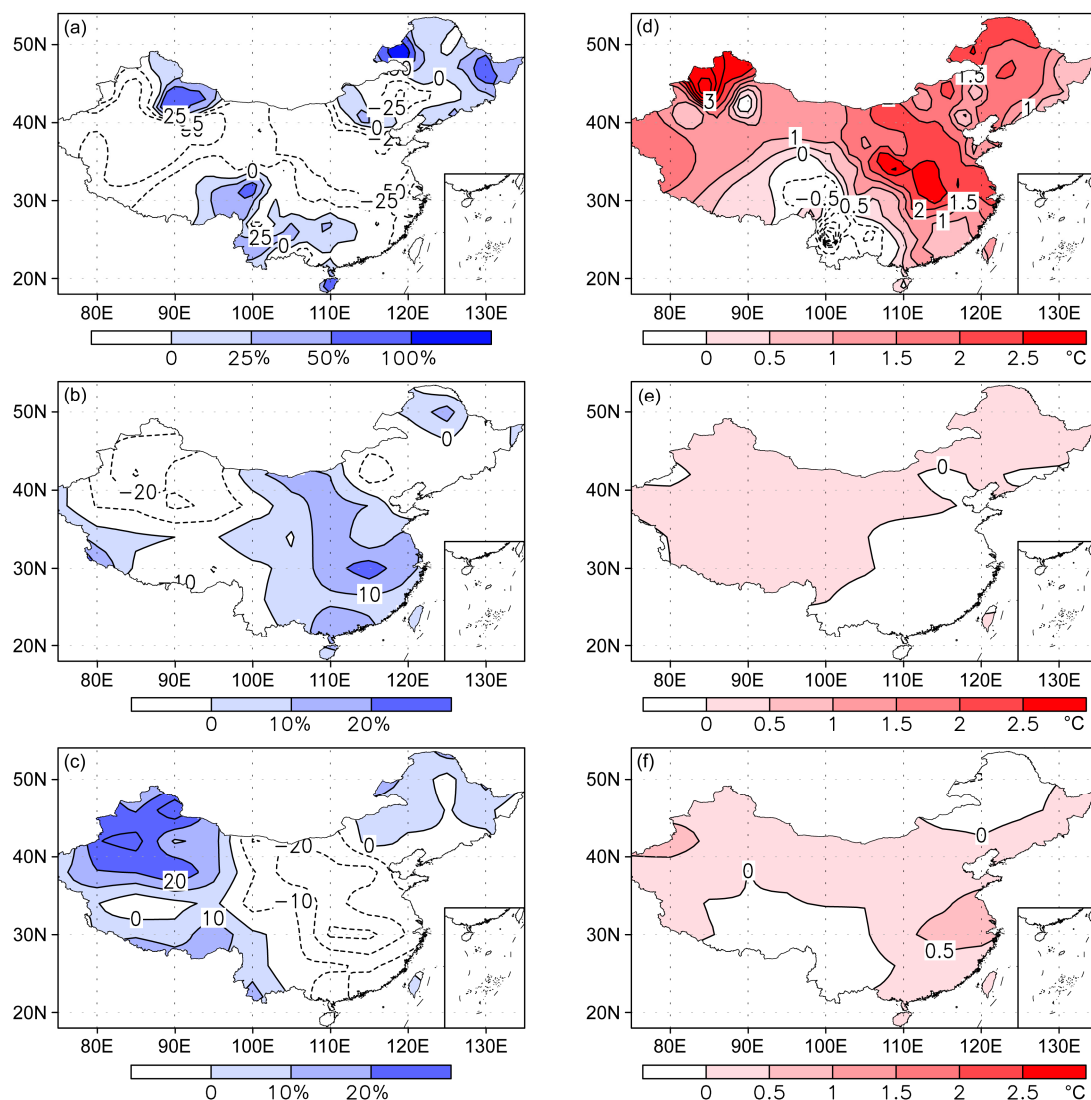


图 10 2000 年春季降水距平百分率(左图)、气温(右图)异常:观测(上图)、控制试验(中图)及两试验差值(下图)

Fig. 10 Distributions of percentages of rainfall anomalies (left panels) and surface air temperature anomalies (right panels) in the spring of 2000: Observations (top panels) and CTRL simulation (middle panels). The difference between the PSC and CTRL simulations is provided in the bottom panels

海上输送过来的水汽,导致该区域降水偏多(图 10 b)。引入相对真实的欧亚积雪异常后,与控制试验相比,贝加尔湖一直到中国东北部的海平面气压降低,华北以南区域北风异常加强,环流场预测结果得以改善。从降水场可见,PSC 试验中北风异常的加强导致华北以南区域降水相对于控制试验明显减少(图 10 c),降水预测能力也得以改善。降水的减少有利于气温的增加,从图 10f 可发现,相比于控制试验,PSC 试验中中国东部气温增加,气温的可预报性也得以改善。由此个例可见,欧亚中高纬春季积雪异常模拟水平改善后,贝加尔湖及以南区域环流场的可预报性得以改善,最终导致中国东

部区域春季气候异常模拟水平的改善。当然,本文仅涉及可预报性的分析,欧亚中高纬积雪对环流场的具体影响机制有待以后利用高分辨率模式进行关键积雪区域的敏感性试验来进行深入分析。

4 结论和讨论

利用大气环流模式 IAP9L_CoLM,通过两组集合后报试验,考察了欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性的影响。分析表明:欧亚大陆积雪模拟能力的改进能提高欧亚大陆中高纬环流场的可预报性,特别是贝加尔湖、乌拉尔山附近区域,这对我国春季气候预报技巧的改善是有利的;考虑较真实

的欧亚大陆积雪作用后, 中国许多区域气温年际变化的预测水平都能通过显著性检验, 特别是东北、西北东部、东南沿海、华南, 预报技巧通过 99% 的信度检验; 模式对我国春季气温异常空间分布的可预报能力也有显著增强, 许多年份气温的预报技巧都是改善的; 对春季降水, 虽然预报技巧较低, 但考虑较真实的欧亚积雪作用后, 模式的预测能力也得以提高。以 2000 年为例的个例分析也表明, 欧亚中高纬春季积雪异常模拟水平改善后, 贝加尔湖附近的环流场可预报性得以改进, 最终导致中国东部区域春季降水和气温异常预报能力的改善。以上结果也证实, 欧亚大陆中高纬春季积雪异常是影响我国春季气候的一个重要因子, 欧亚中高纬春季积雪异常可以通过影响中高纬大气环流进而影响我国春季气候。

本文主要考察欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性的影响, 其影响机制有待深入分析。本文所得的关于欧亚大陆积雪对可预报性的影响通过利用美国雪冰中心的雪水当量资料作试验得到的。使用了这套资料后, 模式的预报技巧得以改进, 说明这套资料在一定程度上是可信的。但由于资料的来源依然存在一些自身问题, 资料精确度有限, 所以积雪对气温和降水的影响在一定程度上可能也被低估了。此外, 本文所用的气候模式分辨率偏低, 以后需要利用高分辨率模式进行进一步研究。但无论如何, 本文的结果表明, 欧亚大陆积雪模拟水平的改善能提高我国春季气候的可预测能力, 所以为提高我国春季气候的预报技巧, 积雪模拟水平的改善是非常必要的。

参考文献 (References)

- Armstrong R L, Brodzik M J, Knowles K, et al. 2005. Global Monthly EASE-Grid Snow Water Equivalent Climatology [M]. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center.
- Barnett T P, Dümmil L, Schlese U, et al. 1988. The effect of Eurasian snow cover on global climate [J]. *Science*, 239 (4839): 504–507, doi:10.1126/science.239.4839.504.
- Blanford H F. 1884. On the connection of Himalayan snowfall with dry winds and seasons of drought in India [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 37: 3–22.
- Chen H. 2010. Assessing the impacts of Eurasian snow conditions on climate predictability with a global climate model [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 3 (6): 336–341, doi:10.1080/16742834.2010.11446894.
- 陈海山, 孙照渤. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 I. 观测研究 [J]. *大气科学*, 27 (3): 304–316. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation. Part I. Observational studies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (3): 304–316, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.02.
- 陈海山, 孙照渤, 朱伟军. 2003. 欧亚积雪异常分布对冬季大气环流的影响 II. 数值模拟 [J]. *大气科学*, 27 (5): 847–860. Chen Haishan, Sun Zhaobo, Zhu Weijun. 2003. The effects of Eurasian snow cover anomaly on winter atmospheric general circulation. Part II. Model simulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (5): 847–860, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.05.06.
- 陈兴芳, 宋文玲. 2000. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用 [J]. *高原气象*, 19 (2): 214–223. Chen Xingfang, Song Wenling. 2000. Analysis of relationship between snow cover on Eurasia and Qinghai–Xizang Plateau in winter and summer rainfall in China and application to prediction [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19 (2): 214–223, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2000.02.010.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (8): 1013–1023, doi:10.1175/BAMS-84-8-1013.
- Dickson R R. 1984. Eurasian snow cover versus Indian monsoon rainfall—An extension of the Hahn-Shukla results [J]. *J. Appl. Meteor.*, 23 (1): 171–176, doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0171:ESCVIM>2.0.CO;2.
- Gong G, Entekhabi D, Cohen J. 2003. Modeled Northern Hemisphere winter climate response to realistic Siberian snow anomalies [J]. *J. Climate*, 16 (23): 3917–3931, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3917:MNHWC>2.0.CO;2.
- Hahn D G, Shukla J. 1976. An apparent relationship between Eurasian snow cover and Indian monsoon rainfall [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33 (12): 2461–2462, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<2461:AARBES>2.0.CO;2.
- 韩晋平, 王会军, 姜大膀. 2006. 耦合模式长期积分资料所揭示的华南春季降水及环流特征的年际变化 [J]. *气候与环境研究*, 11 (2): 194–202. Han Jinping, Wang Huijun, Jiang Dabang. 2006. Interannual variation of spring precipitation and circulation in South China as simulated by a coupled model [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (2): 194–202, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2006.02.007.
- Jiang D B, Wang H J, Drange H, et al. 2003. Last glacial maximum over China: Sensitivities of climate to paleovegetation and Tibetan ice sheet [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D3): 4102, doi:10.1029/2002JD002167.
- Lang X M, Wang H J, Jiang D B. 2003. Extraseasonal ensemble numerical predictions of winter climate over China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (19): 2121–2125, doi:10.1360/03wd0171.
- 刘少锋. 2007. IAP 大气—陆面—植被耦合模式的建立及陆气耦合强度的定量评估 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 186pp.
- Liu S F. 2007. Development of a new land–atmosphere–vegetation coupled model and the quantitative assessment of land–atmosphere coupling strength (in Chinese) [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 186pp.
- 罗勇. 1995. 青藏高原冬春季雪盖对东亚夏季大气环流影响的研究 [J]. *高原气象*, 14 (4): 505–512. Luo Yong. 1995. Studies on the effect of snow cover over the Qinghai–Xizang Plateau in winter and spring on

- general circulation over East Asia in summer [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 14 (4): 505–512.
- Peings Y, Douville H, Alkama R, et al. 2011. Snow contribution to springtime atmospheric predictability over the second half of the twentieth century [J]. *Climate Dyn.*, 37 (5): 985–1004, doi:10.1007/s00382-010-0884-1.
- 彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2006. 多因子和多尺度合成中国夏季降水预测模型及预报试验 [J]. *大气科学*, 30 (4): 596–608. Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2006. The statistic prediction model and prediction experiments of the summer rain over China by multiple factors and multi-scale variations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (4): 596–608, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.06.
- 钱永甫, 张艳, 郑益群. 2003. 青藏高原冬春季积雪异常对中国春夏季降水的影响 [J]. *干旱气象*, 21 (3): 1–7. Qian Yongfu, Zhang Yan, Zheng Yiqun. 2003. Impacts of the Tibetan Plateau snow anomaly in winter and spring on precipitation in China in spring and summer [J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 21 (3): 1–7.
- 覃武, 孙照渤, 丁宝善, 等. 1994. 华南前汛期雨季开始期的降水及环流特征 [J]. *南京气象学院学报*, 17 (4): 455–461. Qin Wu, Sun Zhaobo, Ding Baoshan et al. 1994. Precipitation and circulation features during late-spring to early-summer flood rain in South China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 17 (4): 455–461.
- Schlosser C A, Mocko D M. 2003. Impact of snow conditions in spring dynamical seasonal predictions [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D16): 8616, doi:10.1029/2002JD003113.
- 孙林海, 宋文玲. 2001. 冬季积雪对我国夏季降水预测的评估分析 [J]. *气象*, 27 (8): 24–27, 35. Sun Linhai, Song Wenling. 2001. Influence of the winter snow cover in Tibetan Plateau and Eurasia on summer rainfall in China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 27 (8): 24–27, 35, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2001.08.005.
- Uppala S M, Kålbeg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (612): 2961–3012, doi:10.1256/qj.04.176.
- 温之平, 吴乃庚, 冯业荣, 等. 2007. 定量诊断华南春旱的形成机理 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1223–1236. Wen Zhiping, Wu Naigeng, Feng Yerong, et al. 2007. A quantitative diagnosis for the mechanisms of spring droughts in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (6): 1223–1236, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.17.
- Wu R G, Kirtman B P. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow [J]. *J. Climate*, 20 (7): 1285–1304, doi:10.1175/JCLI4068.1.
- Wu B Y, Yang K, Zhang R H. 2009. Eurasian snow cover variability and its association with summer rainfall in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (1): 31–44, doi:10.1007/s00376-009-0031-2.
- 吴统文, 钱正安. 2000. 青藏高原冬春季积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步分析 [J]. *气象学报*, 58 (5): 570–581. Wu Tongwen, Qian Zheng'an. 2000. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai–Xizang Plateau and summer rainfall of eastern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 58 (5): 570–581, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.05.006.
- Wu T W, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer monsoon and rainfall: An observational investigation [J]. *J. Climate*, 16 (12): 2038–2051, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<2038:TRBTW>2.0.CO;2.
- 夏阳, 万雪丽, 严小冬, 等. 2016. 中国西南地区春季降水的时空变化及其异常的环流特征 [J]. *气象学报*, 74 (4): 510–524. Xia Yang, Wan Xueli, Yan Xiaodong, et al. 2016. Variations of spring precipitation over Southwest China and characteristic circulations for precipitation anomalies [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 74 (4): 510–524, doi:10.11676/qxxb2016.038.
- 徐青竹. 2015. 中国东部春季降水的演变特征及其与大气环流和海温的关系 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 1–66. Xu Qingzhu. 2015. The variation characteristics of spring precipitation in eastern China and its relationships with atmospheric circulation and SST (in Chinese) [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 1–66. Yasunari T, Kitoh A, Tokioka T. 1991. Local and remote responses to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate—A study with the MRI-GCM [J]. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 69: 473–487.
- 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 [J]. *大气科学*, 25 (3): 372–290. Zhang Shunli, Tao Shiyun. 2001. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (3): 372–290, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07.
- 张天圣, 尤卫红. 2010. 我国春季降水的分布特征及其与环流异常的关系 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 32 (5): 553–560. Zhang Tiansheng, You Weihong. 2010. The distribution feature of spring rainfall and its relation to circulation anomaly in China [J]. *Journal of Yunnan University* (in Chinese), 32 (5): 553–560.
- Zhao P, Zhou Z J, Liu J P. 2007. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the hemispheric extratropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: An observational investigation [J]. *J. Climate*, 20 (15): 3942–3955, doi:10.1175/JCLI4205.1.
- Zhao P, Jiang P P, Zhou X J, et al. 2009. Modeling impacts of East Asian ocean–land thermal contrast on spring southwesterly winds and rainfall in eastern China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 54 (24): 4733–4741, doi:10.1007/s11434-009-0229-9.
- 周明森, 简茂球, 乔云亭. 2013. 华南 4~5 月持续性干旱及其环流背景 [J]. *气象学报*, 71 (1): 76–85. Zhou Mingsen, Jian Maoqiu, Qiao Yunting. 2013. April–May persistent drought events in South China and the related general circulation background [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 71 (1): 76–85, doi:10.11676/qxxb2013.006.
- Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y. 2012a. Inter-decadal variations of springtime rainfall over southern China mainland for 1979–2004 and its relationship with Eurasian snow [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 55 (2): 271–278, doi:10.1007/s11430-011-4337-4.
- Zuo Z Y, Zhang R H, Wu B Y, et al. 2012b. Decadal variability in springtime snow over Eurasia: Relation with circulation and possible influence on springtime rainfall over China [J]. *Int. J. Climatol.*, 32 (9): 1336–1345, doi:10.1002/joc.2355.