

韩世茹, 郑志海, 周须文, 等. 2019. 青藏高原积雪深度对延伸期预报技巧的影响 [J]. 大气科学, 43 (1): 142–154. Han Shiru, Zheng Zhihai, Zhou Xuwen, et al. 2019. Influence of the Tibetan Plateau snow depth on the extended-range prediction skill [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (1): 142–154, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17252.

青藏高原积雪深度对延伸期预报技巧的影响

韩世茹¹ 郑志海^{2,3} 周须文¹ 于长文¹ 车少静¹ 顾光芹¹ 卓嘎⁴

¹ 河北省气候中心, 石家庄 050021

² 国家气候中心中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

³ 珠海区域气候—环境—生态预测预警协同创新中心, 广东珠海 519087

⁴ 西藏自治区气候中心, 拉萨 850000

摘 要 高原积雪是重要的陆面因子, 其变化的时间尺度长于大气而短于海洋。本文利用国家气候中心第二代月动力延伸期预测模式 (DERF2.0) 历史回报资料与被动微波资料 (SMMR)、被动微波成像专用传感器 (SSM/I) 数据反演的逐日雪深资料, 分析了 1983~2014 年冬季和春季转换季节高原积雪对热带外地区延伸期尺度预测技巧的影响。结果表明, 高原积雪异常年动力模式在高原积雪显著影响的青藏高原地区、贝加尔湖地区和北太平洋地区预报技巧明显高于正常年份。随着预报时效的延长, 高原积雪偏多年的技巧衰减最慢、其次为积雪偏少年, 积雪正常年最快, 表明高原积雪异常年可预报时效更长, 且高原积雪异常对预报技巧的改善在第 1 候的预报中就显现出来, 尤其是积雪偏多年, 其影响时段明显要早于海洋。结果显示高原积雪对延伸期预报技巧有重要贡献, 暗示高原积雪异常为东亚延伸期预报的潜在可预报源。

关键词 青藏高原 积雪深度 延伸期预报 模式评估

文章编号 1006-9895(2019)01-0142-13

中图分类号 P468

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17252

Influence of the Tibetan Plateau Snow Depth on the Extended-Range Prediction Skill

HAN Shiru¹, ZHENG Zhihai^{2,3}, ZHOU Xuwen¹, YU Changwen¹, CHE Shaojing¹,
GU Guangqin¹, and ZHUO Ga⁴

¹ Hebei Provincial Climate Center, Shijiazhuang 050021

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

³ Zhuhai Joint Innovative Center—Environment—Ecosystem, Zhuhai, Guangdong 519087

⁴ Tibet Climate Center, Lhasa 850000

Abstract The Tibetan Plateau snow cover is an important land surface factor, whose time scale of change is longer than

收稿日期 2017-10-12; **网络预出版日期** 2018-03-15

作者简介 韩世茹, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候预测研究。E-mail: hanshiru615@163.com

通讯作者 郑志海, E-mail: zhengzh@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFC1502303, 国家自然科学基金项目 41875101, 41475096, 国家科技支撑计划项目 2015BAC03B04, 气象预报业务关键技术发展专项 YBGJXM(2017)04、YBGJXM(2018)04, 科技部公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY201506014, 河北省气象局科研开发项目 17ky03

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1502303), National Natural Science Foundation of China (Grants 41875101, 41475096), National Key Technology Support Program (Grant 2015BAC03B04), Meteorological Forecast Vocational Work Key Technologies Development Special Program (Grants YBGJXM(2017)04, YBGJXM(2018)04), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201506014), Meteorological Bureau Research and Development Program of Hebei (Grant 17ky03)

that of the atmosphere and shorter than that of the ocean. This study analyzes the influence of the Tibetan Plateau snow depth anomaly on extended-range prediction technique over extratropical regions. The reforecast data from DERF2.0 (Dynamic Extended Range Forecast 2.0) model provided by the National Climate Center of China and the daily snow depth data inversion calculated by scanning multichannel microwave radiometer (SMMR) and special sensor microwave imager (SSM/I) from 1983 to 2014 are used. The results show that the skill in extended prediction of DERF2.0 is much higher in abnormal years than in normal years, especially over regions significantly affected by snow cover in the Tibetan Plateau like the Tibetan Plateau region, Lake Baikal region and the North Pacific region. With the extension of the forecast lead time, the skill in extended prediction at tenuates the slowest in more- snow years and attenuates the fastest in normal snow years. The above result shows that the predictable time is longer in abnormal years of the Tibetan Plateau snow. The skill in extended prediction is improved, which can be seen from the first pentad in the Tibetan Plateau snow abnormal years, especially in more-snow years. The influence of the snow cover is obviously earlier than that of the ocean. The Tibetan Plateau snow cover has an important contribution to the skill in extended prediction, suggesting that the Tibetan Plateau snow anomaly is a potential source of prediction for extended-range prediction in East Asian.

Keywords The Tibetan Plateau, Snow depth, Extended-range prediction, Model evaluation

1 引言

青藏高原积雪能加强或减弱高原的冷热源作用, 对区域和全球气候有重要影响 (Park et al., 2012; 葛静等, 2015; Wang et al., 2017), 一直受到广大学者的关注。早在 1884 年, Blanford (1884) 指出喜马拉雅山地区积雪变化会影响印度的季节性干旱。随着积雪资料的不断丰富, Hahn and Shukla (1976)、Dey and BhanuKumar (1982)、Dickson (1984) 先后在研究中印证了积雪与印度季风的负相关关系, 此后关于高原积雪的研究蓬勃开展 (Ramsay, 1988; 吴杨等, 2007; 安迪等, 2009)。高原积雪不仅与印度季风之间有很好的相关, 对东亚夏季风的影响也十分显著, 多数研究认为, 高原冬春积雪与东亚夏季风呈负相关关系, 积雪偏多年东亚夏季风强度弱, 开始晚, 积雪偏少年反之 (陈乾金等, 2000; 张顺利和陶诗言, 2001; Wu and Qian, 2003; 张艳, 2004; Liu et al., 2014)。东亚夏季风的异常往往会造成东亚夏季气温和降水异常 (张东和余志豪, 1999; Souma and Wang, 2009; 崔洋, 2010; 郑志海等, 2012; 王黎娟和高龙龙, 2017; 杨凯等, 2017)。虽然目前高原冬春积雪影响东亚夏季降水的物理过程仍存在争议, 但高原积雪与夏季降水的关系仍广泛应用于夏季气温和降水等要素的气候预测中 (Wu and Kirtman, 2007; 吴统文和钱正安, 2000) 应用结果表明, 利用高原积雪信号对后期气温和降水的预测是行之有效的 (陈兴芳和宋文玲, 2000; 孙林海和宋文玲, 2001)。

高原冬春积雪由于其较高的反照率, 降低冬春高原地表温度, 减少冬春高原地表向大气的感热和潜热

输送, 减弱了高原冬春的热源作用; 当积雪融化时会吸收大量热量, 雪融使得土壤湿度增大, 增强土壤热容量, 从而导致地表能量平衡和水分交换异常, 不同的物理过程对东亚季风的影响也有所不同 (朱玉祥和丁一汇, 2007; 周秀骥等, 2009; 李栋梁和王春学, 2011; 段安民等, 2014; Hu and Duan, 2015; Xiao and Duan, 2016)。Wu and Kirtman (2007) 也指出, 冬、春季积雪对大气环流的影响并非一致, 冬季积雪与 50°N 以北地区关系更为密切, 而春季积雪更多地对华南前汛期降水产生影响, 因此应将冬季与春季高原积雪的影响分别进行研究, 其中春季积雪的作用对我国的影响可能更为重要。另一方面, 我国东部降水从春季到夏季是逐渐推进的过程, 降水性质也存在锋面降水和季风降水的差异, 而高原积雪异常对东亚环流的影响也存在季节内差异。已有研究表明前期高原积雪与我国降水尤其是华南前汛期降水存在密切联系 (陈烈庭和阎志新, 1979; 陈烈庭, 1998; 蔡学湛, 2001), 当前期高原积雪偏多时, 有利于华南前汛期雨涝, 反之则干旱。因此, 高原积雪和东亚季风在季节内尺度的联系需要进一步认识。

延伸期 (通常指 11~30 天) 的可预报性既依赖于初始条件的信息, 也依赖于边界条件的强迫。海气相互作用, 尤其是热带海温, 是延伸期重要的可预报源 (汪栩加等, 2017), 它直接或间接影响着大气低频流型的建立和维持 (张人禾等, 2003; 王会军等, 2008; Ding et al., 2010; Xie et al., 2016)。最近, 一些研究分析了延伸期预报中大气初值与海温异常的相对贡献, 研究了海气相互作用对北半球热带外地区的影响, 结果表明海气相互作用仍是热带外的东亚地区延伸期可预报性的重要来源 (Ding

et al., 2011; 李业进和王黎娟, 2016; Wang et al., 2018)。除了海气相互作用外, 作为重要陆面强迫因子的高原积雪, 其变化的时间尺度长于大气而短于海洋, 是延伸期预测的潜在可预报源 (Goddard et al., 2001), 但目前对高原积雪影响的研究多集中在季节尺度 (周浩等, 2010; 宋燕等, 2011), 而对于积雪异常信号在延伸期预报中的作用关注较少。本研究利用国家气候中心第二代动力延伸预测模式 (DERF2.0) 的历史回报资料, 评估了高原积雪对延伸期预报技巧的贡献, 重点探讨了青藏高原积雪在延伸期预报中的作用。DERF2.0 对全球平均降水、气温以及平流层纬向平均风场、温度场的分布特征和季节变化过程具有较好的回报能力 (Wu et al., 2014), 目前已广泛应用到国家气候中心业务中。

2 模式、资料和方法

2.1 模式简介及历史回报数据

第二代月动力延伸预测模式业务系统 (DERF2.0) 基于水平分辨率为 T106, 垂直分为 26 层的 BCC_AGCM2.2 大气环流谱模式开发 (Wu et al., 2014), 大气初始场采用 NCEP 一日四次的再分析资料, 海表温度初始场采用 NOAA 的最优插值海表温度 OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) 资料, 该资料中既包含月平均资料也包含周平均资料, 在资料能够获取的情况下使用最新的周平均资料 (何慧根等, 2014)。DERF2.0 逐日输出未来 55 天预报资料, 空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。DERF2.0 较 DERF1.0 在模式结果、产品分辨率等方面均有较大改进, 预测性能也有显著提升 (覃志年等, 2011; 贾小龙等, 2013), 在预测业务中应用广泛并起到积极作用 (何慧根等, 2014; 章大全和陈丽娟, 2016)。本文采用 DERF2.0 历史回报数据, 数据时间范围为 1983~2014 年, 对提前 10 天、提前 5 天和提前 0 天的预报结果进行分析, 预测结果为五日滑动集合平均。由于 DERF2.0 资料精度与 NCEP/NCAR 再分析资料精度存在差异, 为了便于分析, 利用双线性插值将 DERF2.0 资料插值到与再分析资料同等精度的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的网格上。

2.2 资料

被动微波资料 (SMMR)、微波成像专用传感器 (SSM/I) 反演的逐日雪深资料 (车涛和戴礼云, 2011), 空间分辨率精度为 25 km, 范围为 ($15^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$); 时间范围为 1983~2014 年。

李培基 (1996) 指出, 高原积雪最大覆盖度不足高原的 79%, 且空间分布不均匀, 存在东西两个多雪区。参考过霁冰 (2011) 的研究方法计算 1983~2014 年逐月高原地区积雪深度变化方差发现, 青藏高原东部是积雪深度变化较为显著的区域 (图略), 因此我们选取积雪深度变化最明显的青藏高原东部 ($27.5^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$) 范围为高原积雪变化敏感区。有学者指出, 高原东部既是积雪稳定存在的区域 (何丽焯和李栋梁, 2011), 同时又是高原积雪变化的敏感区 (柯长青和李培基, 1998), 这也印证了我们所选关键区的合理性。平均而言, 青藏高原地区积雪积累期主要在 10~12 月, 消融期主要在 4~6 月, 比北半球其他地区的积雪消融期 (一般在 3~5 月) 晚一个月左右。3 月是冬春季转换的过渡时段, 积雪变化对随后春季的增温和季节进程的推进有关键作用 (董敏和余建锐, 1997; Souma and Wang, 2009), 因此本文主要利用 3 月的积雪资料分析其异常特征及其对预报技巧的影响。3 月高原积雪深度与冬季 Niño3.4 指数的相关系数为 0.01, 表明其与 ENSO 之间是相互独立的。

2.3 检验方法

将 NCEP/NCAR 逐日再分析 500 hPa 高度场作为历史实况评估 DERF2.0 产品在高原积雪异常年的预报效果。短期气候预测检验方法有很多, 距平相关系数和均方根误差通常用来衡量模式的预测性能, 除此之外, 世界气象组织认为平均方差技巧评分 (MSSS; Jolliffe and Stephenson, 2016) 是评估长期预报的主要确定性检验评分方法, 能够反映预报误差相对于气候变率的大小。MSSS 评分越接近 1, 表示预报技巧越高, 技巧为 0 则表示预报技巧接近气候预报技巧, 负值表示预报技巧比气候预报技巧更差。MSSS 技巧评分是无量纲的, 且随着预报技巧的提高而增长。本文主要用上述检验指标评估 DERF2.0 延伸期预报产品的预测效果。

3 青藏高原积雪对 500 hPa 高度场的影响

图 1 给出了 1983~2014 年 3 月高原积雪深度的标准化时间序列, 可以看到高原积雪深度呈明显的下降趋势, 这反映了高原积雪对全球气温升高的响应 (田柳茜等, 2014)。为了明确高原积雪深度对大气环流的影响并评估 DERF2.0 预报产品对积雪信号的响应, 选取积雪深度超过平均值加减 0.8

倍标准差的异常年份, 其中积雪偏多年有 6 年, 分别为 1983 年、1986 年、1990 年、1993 年、1998 年和 2000 年, 积雪偏少年有 8 年, 分别为 1985 年、1988 年和 1989 年、2001 年、2002 年、2004 年、2006 年和 2010 年。

为了分析高原积雪对北半球环流的影响, 计算了 1983~2014 年 3 月高原积雪深度与同期 500 hPa 高度场的相关系数 (图 2a) 以及积雪偏多年与偏少年 500 hPa 高度场差异 (图 2b)。3 月高原积雪与青藏高原及其临近地区的高度场呈现显著的负相关, 另一个显著的负相关区在北太平洋地区; 而在贝加尔湖到中国东北地区 and 热带中太平洋正相关。多雪年和少雪年的环流差异 (图 2b) 也呈现类似的特征。高原积雪异常年份在中纬度地区位势高度差异显著, 无论正负差异中心值均在 50 gpm 以上, 其中在阿拉伯半岛至青藏高原地区 and 东亚大槽地区为位势高度负差异中心, 西欧和贝加尔湖地区为位势高度正差异中心; 在高纬度, 北极地区有位势高度负差异中心, 中心值达到 -70 gpm 以上; 低纬度地区差异相对较小, 在热带

太平洋地区有位势高度正差异中心, 中心值达到 30 gpm; 这与唐红玉等 (2014) 的研究结果类似。高原积雪与环流的这种关系在动力模式中也得到了验证, 董敏和余建锐 (1997) 的模拟研究表明高原积雪偏多能影响地表感热, 使得高原地表感热偏弱, 高原积雪异常增加将促使高原地区低层冷高压的加强和高层高度场的降低; 同时, 除了局地影响外, 3 月高原积雪对会影响到东亚的其它地区, 尤其是高原积雪偏多会使得蒙古高压增强, 使得由冬季蒙古高压转为春季大陆低压的时间推迟。

为了分析高原积雪对 500 hPa 高度场的影响, 图 3 给出了积雪异常年 500 hPa 位势高度距平分布。在高原积雪偏多年 (图 3a), 高原地区上空表现为冷中心, 高原冷却作用使得中高纬度地区有“负—正—负”距平中心分布。表明在高原积雪偏多年, 高原地表温度较低, 冷却作用有利于巴尔喀什湖槽向东南加深发展, 在波列的作用下, 贝加尔湖高压脊和东亚大槽位置偏东, 强度加强, 北半球中高纬度地区经向环流加强, 这样的环流分布有利

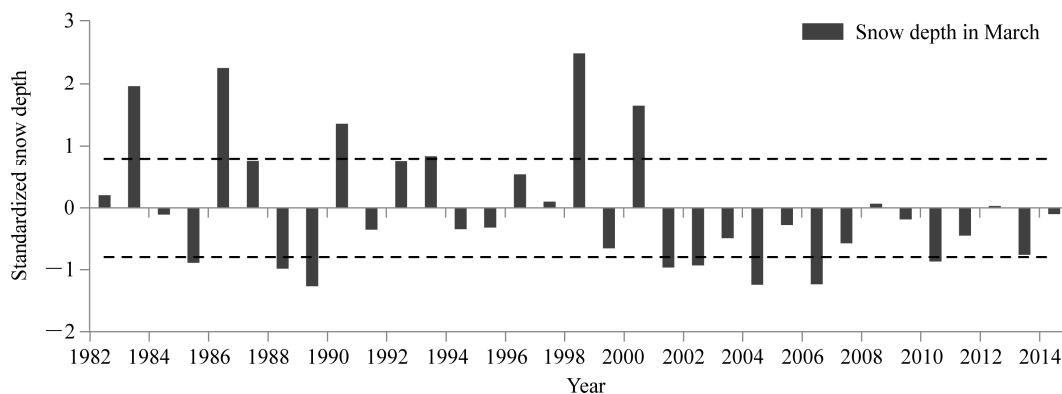


图 1 1983~2014 年 3 月高原积雪深度标准化时间序列 (虚线表示 0.8 个标准差, 实线为线性趋势)

Fig. 1 Standardized time series of snow depth in March over sensitive area in the Tibetan Plateau from 1983 to 2014. The dotted lines represent ± 0.8 standard deviations, and the solid line is the linear trend

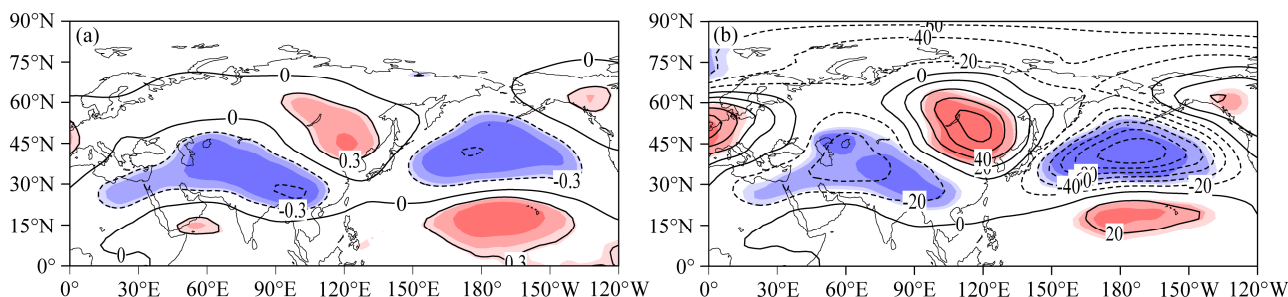


图 2 1983~2014 年 3 月 (a) 高原积雪深度与 500 hPa 位势高度场相关系数以及 (b) 积雪偏多年减去偏少年的 500 hPa 位势高度差值场 (单位: gpm) 分布。红色表示正值, 蓝色表示负值, 阴影区颜色由浅至深表示分别达到 90%、95%、99% 的信度水平

Fig. 2 (a) Correlation coefficient between the Tibetan Plateau snow depth and 500-hPa geopotential height field; (b) 500-hPa geopotential height difference between more-snow years and less-snow years over the Tibetan Plateau region in March from 1983 to 2014. The red (positive) and blue (negative) shaded areas from light to dark denote the values at the 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively

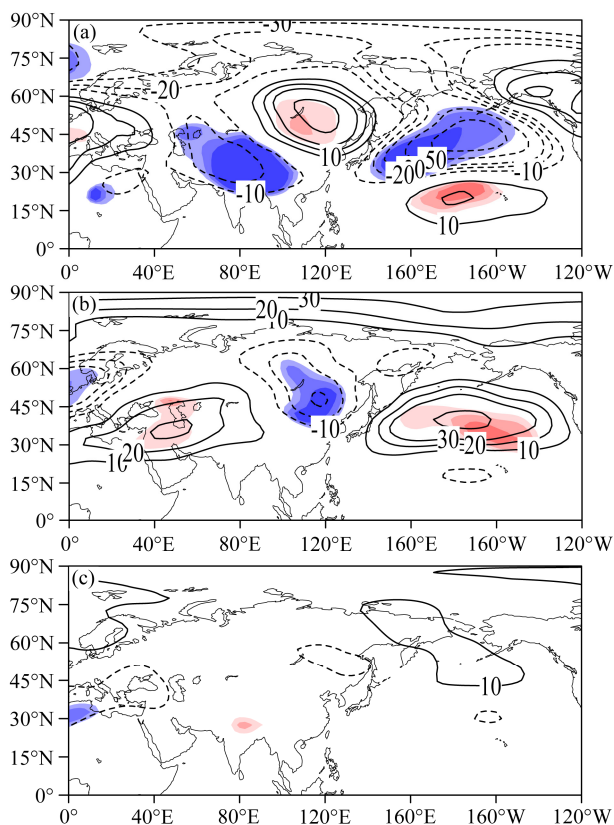


图3 1983~2014年3月积雪特征年的500 hPa位势高度距平(单位:gpm)分布:(a)积雪偏多年;(b)积雪偏少年;(c)积雪正常年。阴影区颜色由浅至深表示分别达到90%、95%、99%的信度水平

Fig. 3 Distributions of 500-hPa geopotential height anomalies in characteristic years of snow in the Tibetan Plateau in March from 1983 to 2014: (a) More-snow years; (b) less-snow years; (c) normal years. Units: gpm. Shaded areas from light to dark denote the values at the 90%, 95%, and 99% confidence levels, respectively

于冷空气势力加强并偏向于东半球,贝加尔湖高压脊和东亚大槽发展加强有利于冷空气和低值系统东移南下,影响我国东部地区。在高原积雪偏少年(图3b),中高纬度地区环流分布形势与积雪偏多年基本相反,有“正—负—正”距平中心自西向东分布,北半球中高纬经向环流不明显,以纬向环流为主,极地冷空气势力弱,不利于冷空气南下。在积雪正常年份(图3c),无明显环流差异中心,中高纬度环流系统位置、强度接近常年。

4 DERF2.0 对积雪异常年环流的预测效果

4.1 500 hPa 高度场的模式系统偏差

图4a和b分别给出了观测与模式的500 hPa高度场1983~2014年气候平均的空间分布,

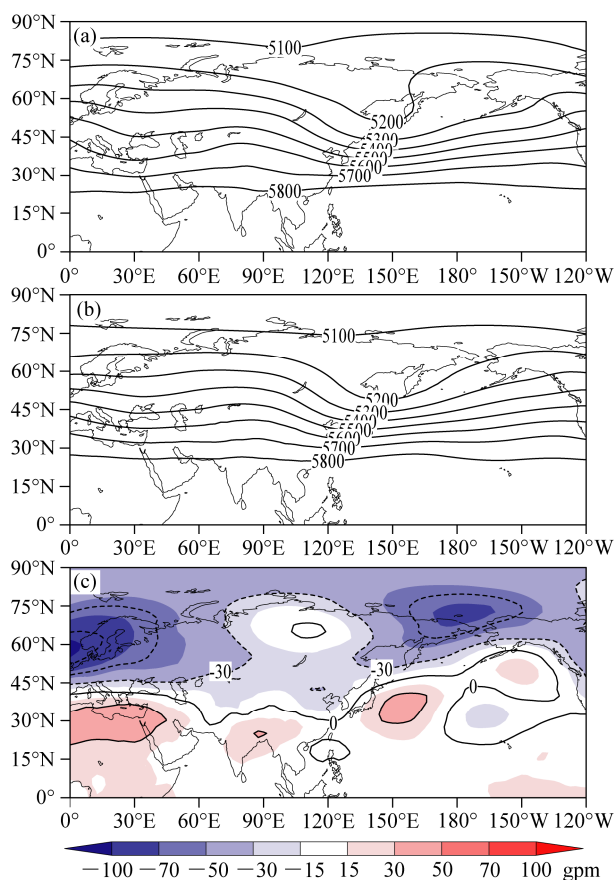


图4 1983~2014年3月观测与模式模拟500 hPa位势高度气候态分布(单位:gpm):(a)NCEP;(b)DERF2.0模式;(c)系统偏差(DERF2.0模拟结果与NCEP的差值)

Fig. 4 Distributions of climatological 500-hPa geopotential height (units: gpm) in March from 1983 to 2014: (a) NCEP data; (b) DERF2.0 model (Dynamic Extended Range Forecast 2.0); (c) systematic deviation (the difference between DERF2.0 simulation results and NCEP data)

DERF2.0模式给出的3月500 hPa位势高度场分布与实况中的位势高度分布形势非常接近(图4a和b),槽脊系统的位置基本对应,在欧洲东部和东亚地区模式与实况均表现为槽区,东亚槽强度较强;在中亚地区和北美西岸为脊区,北美西岸脊强度较强,表明模式较好的刻画了的主要环流特征,但系统的强度在不同区域存在差别。从500 hPa位势高度的系统偏差中(图4c,DERF2.0模拟结果减去NCEP)可以看到,不同纬度,系统偏差分布不同:在低纬度地区小于高纬度地区。系统偏差在低纬度地区主要表现为正偏差,即在低纬度地区,通常模式较观测的位势高度偏高,尤其是模式高原地区和东亚大槽区的南部高度场偏高较为明显;而在高纬度地区则相反,主要表现为负偏差,两个负偏差中心分别位于北大西洋和东西伯利亚海及其以北地区。

气候变率反映一个地区气候状态的稳定性,气候变率越大,该地区气候状态越不稳定。图 5 给出了观测和模式模拟气候变率的空间分布,观测中低纬度地区的气候变率小于中高纬度地区的气候变率(图 5a),在中高纬度地区气候变率分布不均匀,在乌拉尔山附近及北太平洋地区有两个变率大值中心,变率达 80 gpm 以上,西伯利亚地区有次大变率中心。模式(图 5b)能较好的反映出热带地区变率小,中高纬度地区变率大的特征,但对中高纬度地区三个变率中心反映效果略差,仅对北太平洋地区的变率中心有所体现,但其位置略偏北。为了比较模式变率与观测变率的相对差异,将模式与观测变率的比值减去 1 定义为相对偏差(图 5c),相对偏差大于 0 表示模式中变率比观测大,小于 0 则相反。结果表明,在低纬度地区动力模式的变率较观

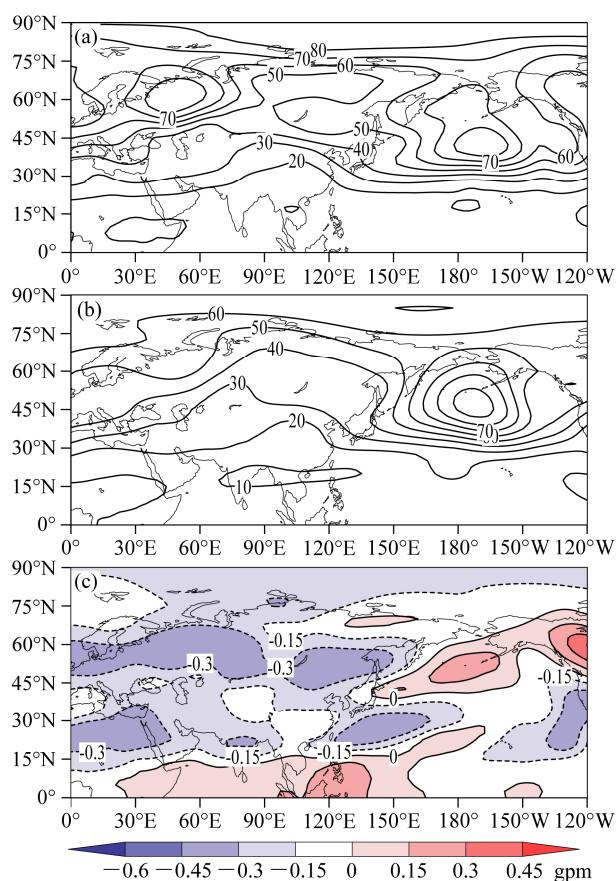


图 5 1983~2014 年 3 月观测与模式模拟 500 hPa 位势高度气候变率分布: (a) NCEP 资料; (b) DERF2.0 模式; (c) 系统相对偏差 (DERF2.0 模式结果与 NCEP 的比值减 1) (单位: gpm)

Fig. 5 Distributions of changing rate (units: gpm) of 500-hPa geopotential height in March from 1983 to 2014: (a) NCEP data; (b) DERF2.0 model; (c) systematic deviation (ratio of DERF2.0 simulation results to the NCEP data minus 1)

测偏大,而在欧亚大陆的中高纬度地区,动力模式的变率均小于观测,表明动力模式集合预报对大气内部的噪音阻尼很明显(Becker et al.,2014)

4.2 积雪特征年 500 hPa 高度场的模式预报偏差

以上分析了 500 hPa 高度场模式的系统偏差,但业务工作中更多关注年际异常的偏差,因此进一步分析了模式的距平预报偏差。模式不同起报时次在积雪异常年与积雪正常年分布特征与实况较为相似(图略),在此给出模式相对实况的偏差(图 6)。在高原积雪偏多年(图 6a1),中纬度地区自西向东存在“正负正”偏差中心,分别位于巴尔喀什湖地区、贝加尔湖地区与东亚大槽地区,与积雪偏多年距平中心位置对应,模式预报的环流距平较实况弱 15 gpm 左右;在极地地区,模式表现为全区一致的负偏差区,说明在积雪偏多年模式预报极地地区位势高度偏低强度较实况强,中心值达到 20 gpm 以上;模式在热带地区预报效果最好,环流异常强度与实况基本一致。可见模式对积雪异常年的环流的预报在极地地区偏强,在中纬度地区和热带地区偏弱,在中纬度地区偏弱特征更明显。以上偏差分布特征在提前 5 天起报产品(图 6a2)和提前 10 天起报产品(图 6a3)中均存在。在高原积雪偏少年(图 6b1~b3),中纬度地区和热带地区偏差中心分布与高原积雪偏多年相反,同时也与高原积雪偏少年环流异常分布情况相反,即高原积雪偏少年,模式对环流异常的预报较实况也偏弱。与积雪偏多年不同的是,在极地地区,模式的偏差表现为西正东负的分形式,在巴伦支海和喀拉海地区预报较实况位势高度偏高,在东西伯利亚海地区预报较实况位势高度偏低。在高原积雪正常年(图 6c1~c3),积雪信号无明显倾向性,模式相对实况的偏差也较小,其分布形式与积雪偏多年偏差分布更为相似,中心位置偏东。计算不同积雪异常年份模式与实况的绝对偏差,并将积雪异常年份的绝对偏差与正常年份相比较(图 7)表明,在高原积雪异常年中低纬度预报水平较积雪正常年有明显改善,这一特征在高原积雪的高影响区也有所体现。

4.3 积雪异常对预报技巧的影响

除了模式的系统偏差外,采用 MSSS 评分来评估高原积雪异常对北半球预报技巧的影响, MSSS 为 WMO 推荐的确定性预报的主要评估方法(Jolliffe and Stephenson, 2016),该评估主要考虑预报误差和“气候”预报误差的比值, MSSS 值越接

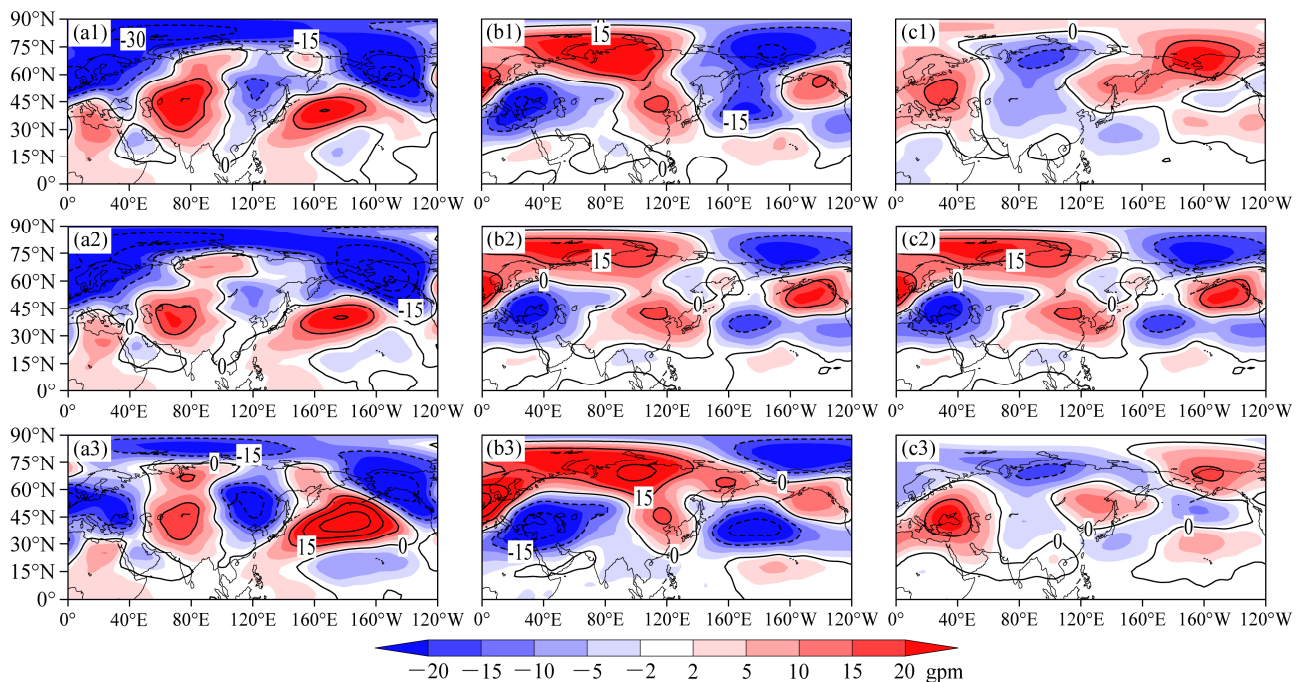


图6 1983~2014年3月高原(a1–a3)积雪偏多年、(b1–b3)积雪偏少年和(c1–c3)积雪正常年500 hPa位势高度距平(单位:gpm)提前0天(第一行)、提前5天(第二行)和提前10天(第三行)的预报偏差分布

Fig. 6 Forecasts deviation of 500-hPa geopotential height anomalies (units: gpm) at lead times of 0 d (the top line), 5 d (the middle line), and 10 d (the bottom line) in (a1–a3) more-snow years, (b1–b3) less-snow years, and (c1–c3) normal years over the Tibetan Plateau in March from 1983 to 2014

近1,表明模式预测越准确,大于0表明有预报意义。图8为积雪异常年MSSS技巧评分空间分布,整体而言,模式预测技巧主要集中在热带地区,中高纬度地区仅部分区域存在技巧,高纬度地区预报技巧较低。从提前0天的预报结果看,在高原积雪偏多年(图8a1),热带地区有较高的预报技巧,MSSS的值基本都在0.6以上;在中纬度地区的青藏高原地区、贝加尔湖地区和北太平洋地区具有较高的预报技巧,这些区域也正是高原积雪异常的显著影响区域。在积雪偏少年(图8b1),MSSS的分布与积雪偏多年类似,但在热带地区和北太平洋地区MSSS的值要低于积雪偏多年,在贝加尔湖地区和积雪偏多年相当。对于积雪正常年(图8c1),不论是在热带地区还是在中高纬度,其预报技巧评分均低于积雪偏多年和偏少年。在提前5天起报产品和提前10天起报的结果中分布特征也类似,积雪异常年份的MSSS依然高于正常年份,但随着提前时间的延长,预报技巧有所降低。总体来说,高原积雪异常的年份,动力模式的MSSS评分更高,尤其是在高原积雪影响显著的青藏高原地区、贝加尔湖地区和北太平洋地区,表明积雪异常是模式预报

技巧的重要信号来源。

从图2可以看出,高原积雪异常显著影响青藏高原地区、贝加尔湖地区和北太平洋地区的环流,为了更直观的反应动力模式对积雪异常的响应,选取以上三个影响显著区域以及(20°N~70°N, 0°~120°W)范围内所有通过95%信度水平的区域,分别计算积雪偏多、偏少和正常年份对应区域的MSSS评分(图9)。从整个区域来看(图9a),不论是提前0天、提前5天和提前10天,积雪偏多年均具有最高的预报技巧,其次为积雪偏少年,积雪正常年的评分最低。随起报时间的延长,不同积雪异常年份的预报技巧均有所下降,但积雪正常年下降最多,这主要是随着预报时效的延长,大气初值的作用衰减,由于积雪的时间尺度长于大气,其影响使得积雪异常的年份预报技巧高于无积雪异常的年份,显示高于积雪在延伸期尺度对预报技巧有正的贡献。分区域来看,在高原地区(图9b),积雪偏少年技巧最高,其次为积雪偏多年,积雪异常年的预报技巧均高于积雪正常年。在贝加尔湖地区(图9c),积雪偏多年和偏少年的技巧相当,积雪正常年最低,在提前10天起报的结果中,积雪

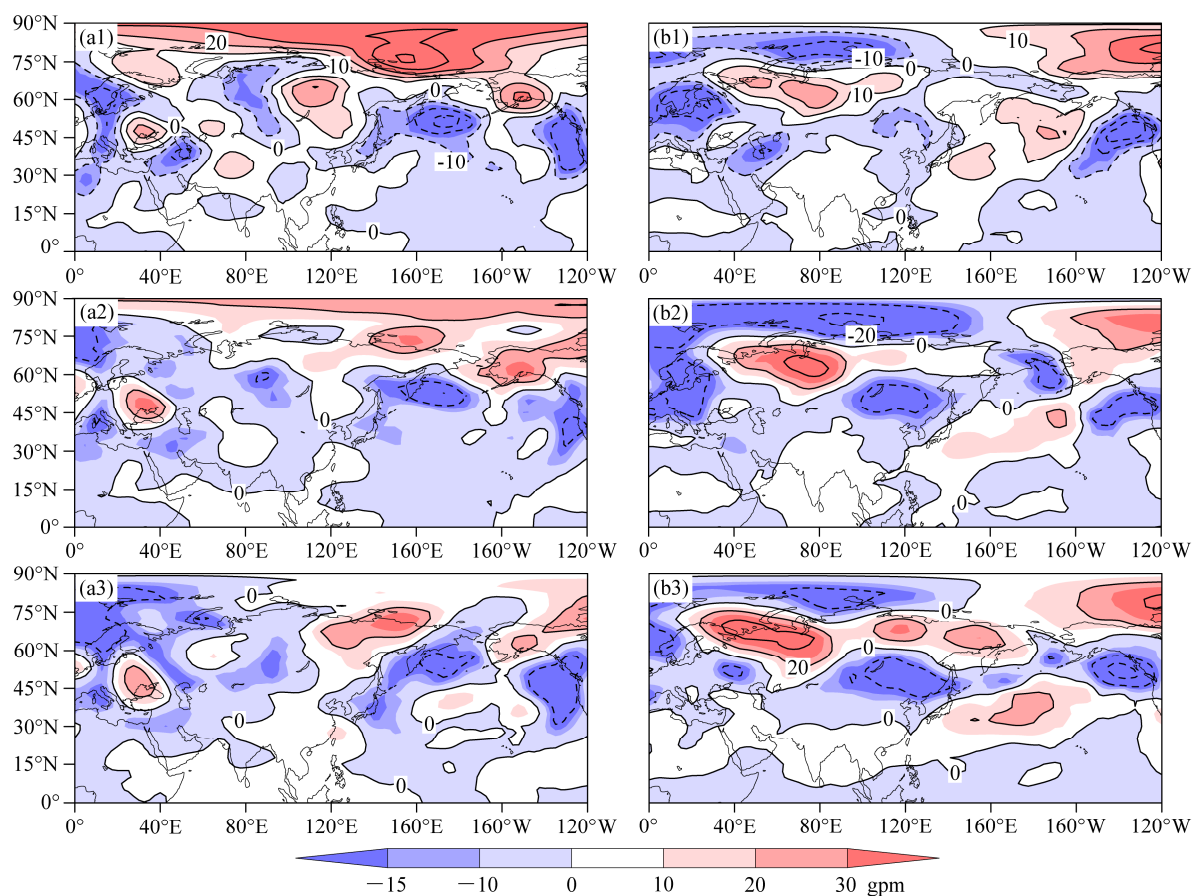


图7 1983~2014年3月(a1-a3)积雪偏多年与积雪正常年、(b1-b3)积雪偏少年与积雪正常年500 hPa位势高度(单位:gpm)提前0天(第一行)、提前5天(第二行)和提前10天(第三行)起报的绝对偏差差值场

Fig. 7 Absolute deviation differences (units: gpm) of forecasts of 500-hPa geopotential height at lead times of 0 d (the top line), 5 d (the middle line), and 10 d (the bottom line) between more-snow years and normal snow years (left column), between less-snow years and normal snow years (right column) over the Tibetan Plateau in March from 1983 to 2014

正常年评分为负值, 随起报时间的延长积雪正常年的预报技巧明显下降, 表明在提前时间较长时, 大气初值中信号较小, 而高原积雪异常是该区域非常重要的信号源。在下游的北太平洋地区(图9d), 边界条件的影响表现的更为明显, 积雪偏多年, 预报技巧显著高于积雪偏少年和积雪正常年, 这与图8中预报技巧评分的空间分布结果相一致。综合来看, 在延伸期尺度上, 随着预报时效的延长, 高原积雪的异常对预报技巧的贡献越大, 尤其是在积雪偏多年。

为了进一步分析初值和边界条件在不同时间尺度的相对作用, 图10给出了不同起报时间, 高原积雪异常年和正常年(20°N~70°N, 0°~120°W)范围通过95%信度水平的500 hPa位势高度场逐日预报的MSSS评分。在不同提前时间, 预报技巧均随着时间延长而降低, 积雪偏多年份的技巧基本都高于积雪偏少和正常年份, 且随着预报时效的延

长, 高原积雪异常对技巧的影响更大, 在提前10天的预报中, 积雪偏少年也明显高于积雪正常年份。由于逐日预报受天气尺度高频信号影响较大, 图11给出不同起报时间候平均预报技巧的变化, 候平均的预报技巧演变基本特征与逐日演变类似, 积雪异常年动力模式的预报效果显著优于积雪正常年。从提前0天的预报结果中(图11a), 积雪正常年份在3月第1候在高原积雪显著影响的区域其MSSS评分仅为0.3, 表明模式的预报技巧并不高, 而高原积雪偏多时MSSS评分为0.63, 偏少时为0.56, 随着预报时效的延长, 高原积雪偏多年的技巧衰减最慢、其次为积雪偏少年, 积雪正常年最快, 到3月第6候时高原积雪偏多年为0.26, 偏少年为0.22, 而积雪正常年接近于0, 表明高原积雪异常年可预报时效更长。提前5天(图11b)和提前10天(图11c)的预报与之类似, 在提前10天起报的

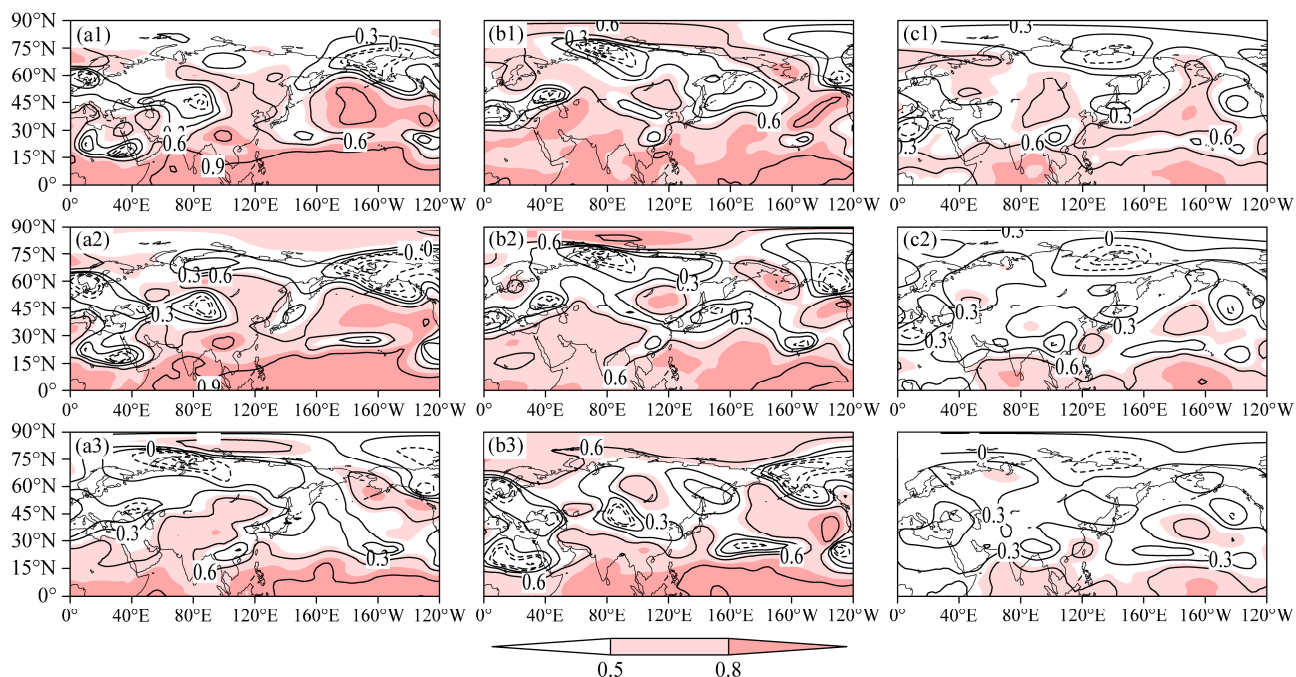


图 8 1983~2014 年 3 月高原 (a1-a3) 积雪偏多年、(b1-b3) 积雪偏少年、(c1-c3) 积雪正常年 500 hPa 位势高度距平提前 0 天 (第一行)、提前 5 天 (第二行) 和提前 10 天 (第三行) 预报的 MSSS 评分

Fig. 8 MSSS scores for 500-hPa geopotential height anomaly forecasts at leading times of 0 d (the top line), 5 d (the middle line), and 10 d (the bottom line) in (a1-a3) more-snow years, (b1-b3) less-snow years, and (c1-c3) normal years over the Tibetan Plateau in March from 1983 to 2014

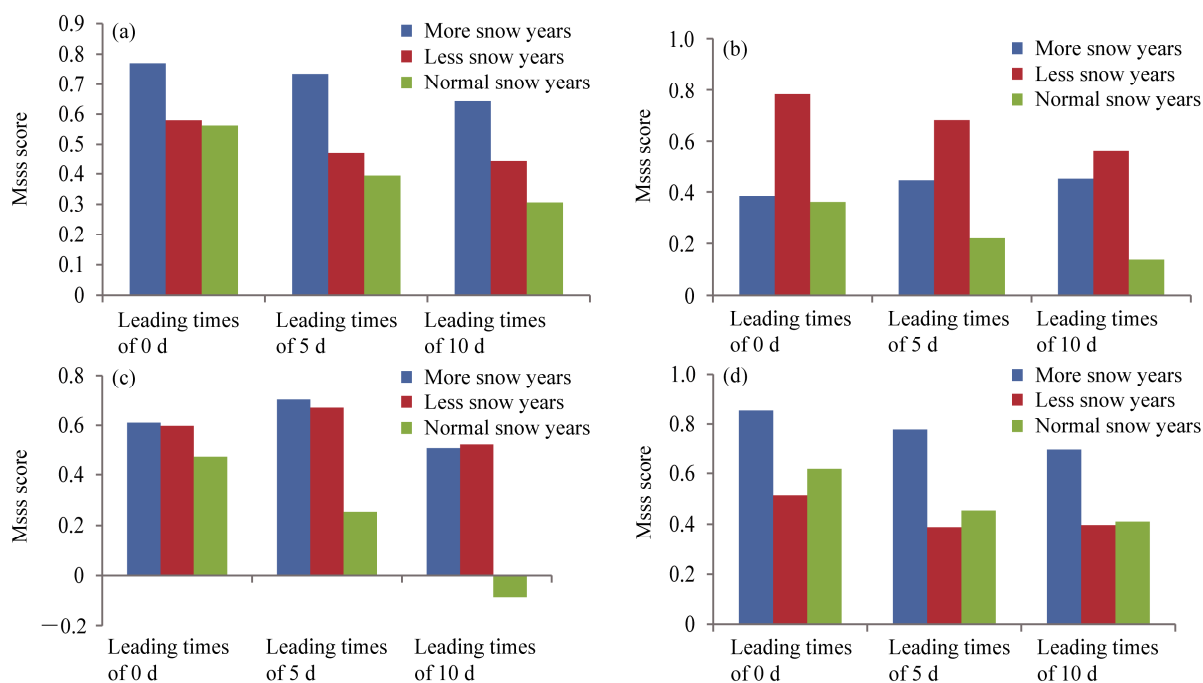


图 9 1983~2014 年 3 月高原积雪特征年高相关区不同起报时间 MSSS 评分: (a) (20°~70°N, 0°~120°W) 区域; (b) 青藏高原地区; (c) 贝加尔湖地区; (d) 北太平洋地区

Fig. 9 MSSS scores for different initial times over high-correlation areas in characteristic years of the Tibetan Plateau snow in March from 1983 to 2014: (a) Region (20°~70°N, 0°~120°W); (b) the Tibetan Plateau region; (c) the Lake Baikal region; (d) the North Pacific region

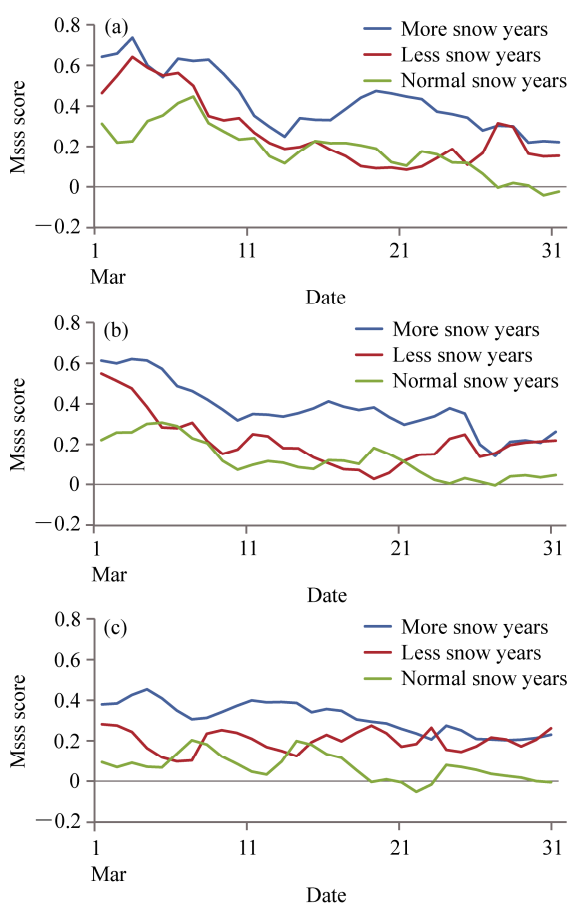


图 10 1983~2014 年 3 月高原积雪特征年 (a) 提前 0 天起报、(b) 提前 5 天起报、(c) 提前 10 天起报 500 hPa 高度场逐日 MSSS 评分
Fig. 10 Daily MSSS scores of 500-hPa height field forecasts at different leading times of (a) 0 d, (b) 5 d, (c) 10 d in characteristic years of the Tibetan Plateau snow in March from 1983 to 2014

预报结果中 (图 11c), 积雪偏多年预报技巧评分相对于积雪正常年在第 2、4、6 候分别提高了 0.32、0.27 和 0.28, 积雪偏少年分别提高了 0.24、0.13 和 0.22。可见, 高原积雪异常对提高预报技巧有显著作用, 且这种作用在第 1 候就显现出来, 而海洋异常的影响通常在 2~3 周以后 (汪栩加等, 2017), 表明高原积雪的影响时段要早于海洋, 这对延伸期的可预报性有着重要作用。值得注意的是, 本文是用 3 月积雪数据划分的异常年份, 实际上, 2 月与 3 月高原积雪深度的相关系数为 0.92, 表明具有极好的持续性, 利用 2 月积雪资料与 3 月积雪资料的划分的异常年份也基本一致, 表明高原积雪异常可以作为判断预报技巧高低的前兆信号。

5 小结与讨论

利用中国国家气候中心第二代月动力延伸期

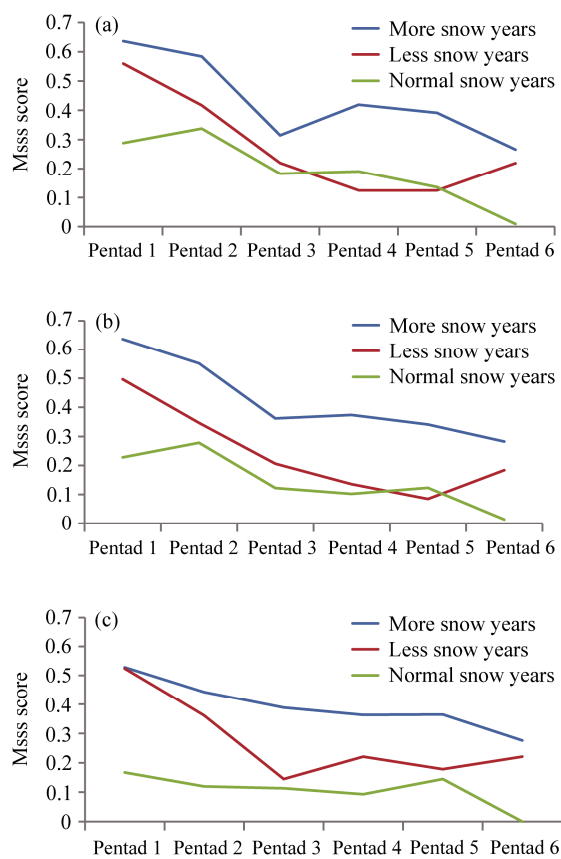


图 11 同图 10, 但为逐候 MSSS 评分

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for pentad-to-pentad MSSS scores

预测模式 (DERF2.0) 输出产品与 SMMR、SSM/I 反演的逐日雪深资料, 分析了 1983~2014 年冬春季转换时段高原积雪异常对 DERF2.0 模式在延伸期尺度预测技巧的影响。总体而言, 高原积雪异常年模式预报的技巧明显高于正常年份, 尤其是在高原积雪显著影响的青藏高原地区、贝加尔湖地区和北太平洋地区。在青藏高原地区, 高原积雪偏少年 500 hPa 高度场的预报技巧最高, 积雪偏多年略弱, 但均高于积雪正常年。在贝加尔湖地区, 积雪偏多年和偏少年的技巧相当, 积雪正常年最低。在北太平洋地区, 积雪偏多年预报技巧显著高于积雪偏少年和积雪正常年。从不同提前预报时间来看, 随起报时间的延长, 不同积雪异常年份的预报技巧均有所下降, 但积雪正常年下降最多, 表明随着预报时效的延长, 大气初值的作用衰减, 由于积雪的时间尺度长于大气, 其影响使得积雪异常的年份预报技巧高于无积雪异常的年份, 显示高原积雪对延伸期预报技巧有重要贡献, 尤其是对提前时间较长时贡献更大, 暗示高原积雪异常为东亚延伸期预报的潜在可预报源。

从预报技巧评分随时间演变来看, 预报技巧均随着时间延长而降低, 且高原积雪偏多年预报技巧高于积雪偏少年和积雪正常年。从不同提前时间的预报结果看, 随着预报时效的延长, 高原积雪偏多年的技巧衰减最慢、其次为积雪偏少年, 积雪正常年最快, 表明高原积雪异常年可预报时效更长。与海洋异常的影响通常在 2~3 周以后影响到东亚地区的环流预报技巧不同的是, 高原积雪异常提高预报技巧在第 1 候就显现出来, 尤其是积雪偏多年, 表明其影响时段明显要早于海洋, 是延伸期预测的重要可预报源。

延伸期的可预报性既依赖于初始条件的信息, 也依赖于边界条件的强迫。本文的研究表明在冬春季转换时段, 高原积雪异常信号对延伸期预报技巧有着重要贡献, 但在 4~6 月融雪期高原热力作用变化显著, 其影响大气环流的物理过程与融雪前存在差异, 同时, 受热带海洋影响显著的季风也逐渐向北推进影响我国, 二者的共同作用更为复杂, 高原积雪和海温异常在不同配置条件下对延伸期的可预报性的影响需要进一步研究。此外, 不同季节高原积雪异常对东亚环流的影响也不相同, 高原积雪在季节内时间尺度与东亚季风联系也还需要做更深入的研究。

参考文献 (References)

- 安迪, 李栋梁, 袁云, 等. 2009. 基于不同积雪日定义的积雪资料比较分析 [J]. 冰川冻土, 31 (6): 1019–1027. An Di, Li Dongliang, Yuan Yun, et al. 2009. Contrast between snow cover data of different definitions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 31 (6): 1019–1027.
- Becker E, van den Dool H, Zhang Q. 2014. Predictability and forecast skill in NMME [J]. J. Climate, 27 (15): 5891–5906. doi:10.1175/JCLI-D-13-00597.1.
- Blanford H F. 1884. On the connexion of Himalayan snowfall and seasons of drought in India [J]. Proc. Roy. Soc. Lond., 37 (232–234): 3–22, doi:10.1098/rspl.1884.0003.
- 蔡学湛. 2001. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响 [J]. 应用气象学报, 12 (3): 358–367. Cai Xuezhao. 2001. The influence of abnormal snow cover over Qinghai–Xizang Plateau and East Asian monsoon on early rainy season rainfall over South China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (3): 358–367, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.03.011.
- 车涛, 戴礼云. 2011. 中国雪深长时间序列数据集 (1978–2012) [R]. Che Tao, Dai Liyun. 2011. Long-term snow depth dataset of China [R]. doi:10.3972/westdc.001.2014.db.
- 陈烈庭. 1998. 青藏高原冬春季异常雪盖与江南前汛期降水关系的检验和应用 [J]. 应用气象学报, 9 (S1): 2–9. Chen Lieting. 1998. Test and application of the relationship between anomalous snow cover in winter–spring over Qinghai–Xizang Plateau and the first summer rainfall in southern China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (S1): 2–9.
- 陈烈庭, 阎志新. 1979. 青藏高原冬春季积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响 [C]//中长期水温气象预报文集 (第一集). 北京: 水利电力出版社, 185–194. Chen Lieting, Yan Zhixin. 1979. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau during winter and spring on atmospheric circulation and on rainfall over the southern China in pre-monsoon period [C]// Collected Papers on Long-Term Hydrologic and Meteorological Forecasts (1) (in Chinese). Beijing: Water Conservancy and Power Press, 185–194.
- 陈乾金, 高波, 李维京, 等. 2000. 青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期旱涝及其与环流关系的研究 [J]. 气象学报, 58 (5): 582–595. Chen Qianjin, Gao Bo, Li Weijing, et al. 2000. Studies on relationships among snow cover winter over the Tibetan Plateau and droughts/floods during Meiyu season in the middle and lower reaches of the Yangtze River as well as atmosphere/ocean [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (5): 582–595, doi:10.11676/qxb2000.060.
- 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.
- 崔洋. 2010. 青藏高原陆面过程与亚洲夏季风系统联系的研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 158pp. Cui Yang. 2010. Study on relationships between the land surface processes of Qinghai–Xizang Plateau and the Asian summer monsoon [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 158pp.
- Dey B, Bhanu Kumar O S R U. 1982. An apparent relationship between Eurasian spring snow cover and the advance period of the Indian summer monsoon [J]. J. Appl. Meteor., 21 (12): 1929–1932, doi:10.1175/1520-0450(1982)021<1929:AARBES>2.0.CO;2.
- Dickson R R. 1984. Eurasian snow cover versus Indian monsoon rainfall—An extension of the Hanh-Shukla results [J]. J. Climate Appl. Meteor., 23 (1): 171–176, doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0171:ESCVIM>2.0.CO;2.
- Ding R Q, Ha K J, Li J P. 2010. Interdecadal shift in the relationship between the East Asian summer monsoon and the tropical Indian Ocean [J]. Climate Dyn., 34 (7–8): 1059–1071, doi:10.1007/s00382-009-0555-2.
- Ding R Q, Li J P, Seo K H. 2011. Estimate of the predictability of boreal summer and winter intraseasonal oscillations from observations [J]. Mon. Wea. Rev., 139 (8): 2421–2438, doi:10.1175/2011MWR3571.1.
- 董敏, 余建锐. 1997. 青藏高原春季积雪对大气环流影响的模拟研究 [J]. 应用气象学报, 8 (S1): 100–109. Dong Min, Yu Jianrui. 1997. A simulation study for the influences of Tibetan Plateau spring snow cover on the general circulation [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 8 (S1): 100–109.
- 段安民, 肖志祥, 吴国雄, 等. 2014. 青藏高原冬春积雪影响亚洲夏季风的研究进展 [J]. 气象与环境科学, 37 (3): 94–101, doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2014.03.012. Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wu Guoxiong, et al. 2014. Study progress of the influence of the Tibetan Plateau winter and spring snow depth on Asian summer monsoon [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 37 (3): 94–101, doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2014.03.012.
- 葛静, 王黎娟, 张良瑜. 2015. 春末夏初南亚高压活动与青藏高原及周

- 边热力强迫的关系 [J]. 大气科学学报, 38 (5): 611–619. Ge Jing, Wang Lijing, Zhang Liangyu. 2015. Relationship between South Asian high activity and thermal forcing over Tibetan Plateau and surrounding regions during late spring and early summer [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 611–619, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140918001.
- Goddard L, Mason S J, Zebiak S E, et al. 2001. Current approaches to seasonal to interannual climate predictions [J]. Int. J. Climatol., 21 (9): 1111–1152, doi:10.1002/joc.636.
- 过霁冰. 2011. 青藏高原关键区积雪“强信号”特征对区域旱涝的影响 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Guo Jibing. 2011. Impact of “Strong Signal” characters of snow over Tibetan Plateau key area on regional drought and flood [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- Hahn D J, 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.
- 何慧根, 李巧萍, 吴统文, 等. 2014. 月动力延伸预测模式业务系统 DERF2.0 对中国气温和降水的预测性能评估 [J]. 大气科学, 2014, 38 (5): 950–964. He Huigen, Li Qiaoping, Wu Tongwen, et al. 2014. Temperature and precipitation evaluation of monthly dynamic extended range forecast operational system DERF2.0 in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 950–964, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13166.
- 何丽辉, 李栋梁. 2011. 中国西部积雪日数类型划分及与卫星遥感结果的比较 [J]. 冰川冻土, 33 (2): 237–245. He Liye, Li Dongliang. 2011. Classification of snow cover days and comparing with satellite remote sensing data in West China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 33 (2): 237–245.
- Hu J, Duan A M. 2015. Relative contributions of the Tibetan Plateau thermal forcing and the Indian Ocean sea surface temperature basin mode to the interannual variability of the East Asian summer monsoon [J]. Climate Dyn., 45 (9–10): 2697–2711, doi:10.1007/s00382-015-2503-7.
- 贾小龙, 陈丽娟, 高辉, 等. 2013. 我国短期气候预测技术进展 [J]. 应用气象学报, 24 (6): 641–655. Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Gao Hui, et al. 2013. Advances of the short-range climate prediction in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (6): 641–655, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.06.001.
- Jolliffe I T, Stephenson D B. 2016. 预报检验——大气科学从业者指南 [M]. 李应林, 译. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 76–77. Jolliffe I T, Stephenson D B. 2016. Forecast Verification—A Practitioner’s Guide in Atmospheric Science (in Chinese) [M]. Li Y L, trans. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 76–77.
- 柯长青, 李培基. 1998. 用 EOF 方法研究青藏高原积雪深度分布与变化 [J]. 冰川冻土, 20 (1): 64–67. Ke Changqing, Li Peiji. 1998. Research on the characteristics of distribution and variation of snow cover on the Tibetan Plateau by using EOF analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 20 (1): 64–67.
- 李栋梁, 王春学. 2011. 积雪分布及其对中国气候影响的研究进展 [J]. 大气科学学报, 34 (5): 627–363. Li Dongliang, Wang Chunxue. 2011. Research progress of snow cover and its influence on China climate [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 34 (5): 627–636, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.05.014.
- 李培基. 1996. 亚洲季风模拟试验中青藏高原积雪强迫问题的讨论 [J]. 高原气象, 15 (3): 350–355. Li Peiji. 1996. Discussion on the forcing of snow cover on the Qinghai–Xizang Plateau in simulation of Asian monsoon climate [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 15 (3): 350–355.
- 李业进, 王黎娟. 2016. 西太平洋暖池热状态变异及其邻近地区对流活动特征 [J]. 大气科学学报, 39 (2): 156–165. Li Yejin, Wang Lijuan. 2016. Variability of the thermal state of the western Pacific warm pool and the characteristics of its adjacent convective activities [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 39 (2): 156–165, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140915043.
- Liu G, Wu R G, Zhang Y Z. 2014. Persistence of snow cover anomalies over the Tibetan Plateau and the implications for forecasting summer precipitation over the Meiyu-baiu region [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2014, 7 (2): 115–119, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0074.
- Park H S, Chiang J C H, Bordoni S. 2012. The mechanical impact of the Tibetan Plateau on the seasonal evolution of the South Asian monsoon [J]. J. Climate, 25 (7): 2394–2407, doi:10.1175/JCLI-D-11-00281.1.
- 覃志年, 陈丽娟, 唐红玉, 等. 2011. 月尺度动力模式产品解释应用系统及预测技巧 [J]. 应用气象学报, 21 (5): 614–620. Qin Zhinian, Chen Lijuan, Tang Hongyu, et al. 2011. Downscaling methods and application system based on monthly-scale dynamical model outputs and forecast skill analysis [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (5): 614–620, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.05.011.
- Ramsay B H. 1998. The interactive multisensor snow and ice mapping system [J]. Hydrological Processes, 12 (10–11): 1537–1546, doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1537::AID-HYP679>3.0.CO;2-A.
- 宋燕, 张菁, 李智才, 等. 2011. 青藏高原冬季积雪年代际变化及对中国夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 30 (4): 843–851. Song Yan, Zhang Jing, Li Zhicai, et al. 2011. Interdecadal change of winter snow depth on Tibetan Plateau and its effect on summer precipitation in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (4): 843–851.
- Souma K, Wang Y Q. 2009. Improved simulation of the East Asian summer monsoon rainfall with satellite-derived snow water equivalent data [J]. Mon. Wea. Rev., 137 (6): 1790–1804, doi:10.1175/2008MWR2800.1.
- 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.
- 唐红玉, 李锡福, 李栋梁. 2014. 青藏高原春季积雪多、少年中低层环流对比分析 [J]. 高原气象, 33 (5): 1190–1196. Tang Hongyu, Li Xifu, Li Dongliang. 2014. Contrast of circulation pattern related to more and less spring snow cover over Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (5): 1190–1196, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00125.
- 田柳茜, 李卫忠, 张尧, 等. 2014. 青藏高原 1979–2007 年间的积雪变化 [J]. 生态学报, 34 (20): 5974–5983. Tian Liuxi, Li Weizhong, Zhang Yao, et al. 2014. The analysis of snow information from 1979 to 2007 in Qinghai–Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 34 (20): 5974–5983, doi:10.5846/stxb201303070365.
- Wang C H, Yang K, Li Y L, et al. 2017. Impacts of spatiotemporal anomalies

- of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in eastern China [J]. *J. Climate*, 30 (3): 885–903, doi:10.1175/JCLI-D-16-0041.1.
- 王会军, 孙建奇, 郎咸梅, 等. 2008. 几年来我国气候年际变异和短期气候预测研究的一些新成果 [J]. *大气科学*, 32 (4): 806–814. Wang Huijun, Sun Jianqi, Lang Xianmei, et al. 2008. Some new results in the research of the interannual climate variability and short-term climate prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 806–814, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.09.
- 王黎娟, 高龙龙. 2017. 江南春雨的时空分布特征及其旱涝年环流差异 [J]. *大气科学学报*, 40 (3): 310–320. Wang Lijuan, Gao Longlong. 2017. The spatial and temporal distribution of the spring persistent rains and circulation differences between its drought and flood years [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 40 (3): 310–320, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20150812001.
- Wang X J, Zheng Z H, Feng G L. 2018. Effects of air–sea interaction on extended-range prediction of geopotential height at 500 hPa over the northern extratropical region [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 132 (1–2): 31–40, doi:10.1007/s00704-017-2071-3.
- 汪栩加, 郑志海, 封国林, 等. 2017. 延伸期预报中大气初值与海温边值的相对作用 [J]. *气象学报*, 75 (1): 111–122. Wang Xujia, Zheng Zhihai, Feng Guolin, et al. 2017. The relative roles of initial atmospheric condition and lower boundary condition of SST for extended forecast [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 75 (1): 111–122, doi:10.11676/qxxb2017.007.
- 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.
- 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:10.11676/qxxb2000.059.
- 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:TRBTTW>2.0.CO;2.
- Wu T W, Song L C, Li W Q, et al. 2014. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies [J]. *J. Meteor. Res.*, 28 (1): 34–56, doi:10.1007/s13351-014-3041-7.
- 吴杨, 张佳华, 徐海明, 等. 2007. 卫星反演积雪信息的研究进展 [J]. *气象*, 33 (6): 3–10. Wu Yang, Zhang Jiahua, Xu Haiming, et al. 2007. Advances in study of snowcover from remote sensing data [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (6): 3–10, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2007.06.001.
- Xiao Z X, Duan A M. 2016. Impacts of Tibetan Plateau snow cover on the interannual variability of the East Asian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 29 (23): 8495–8514, doi:10.1175/JCLI-D-16-0029.1.
- Xie S P, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33 (4): 411–432, doi:10.1007/s00376-015-5192-6.
- 杨凯, 胡田田, 王澄海. 2017. 青藏高原南、北积雪异常与中国东部夏季降水关系的数值试验研究 [J]. *大气科学*, 41 (2): 345–356. Yang Kai, Hu Tiantian, Wang Chenghai. 2017. A numerical study on the relationship between the spring–winter snow cover anomalies over the northern and southern Tibetan Plateau and summer precipitation in East China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41 (2): 345–356, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.16119.
- 章大全, 陈丽娟. 2016. 基于 DERF2.0 的月平均温度概率订正预报 [J]. *大气科学*, 40 (5): 1022–1032. Zhang Daquan, Chen Lijuan. 2016. Bias correction in monthly means of temperature predictions of the dynamic extended range forecast model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40 (5): 1022–1032, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1509.15228.
- 张东, 余志豪. 1999. 青藏高原冬春季积雪异常与我国夏季低温的关系 [J]. *气象科学*, 19 (1): 1–8. Zhang Dong, Yu Zhihao. 1999. The relationship between snow cover over Qinghai–Xizang Plateau in winter and spring and low temperature damage in summer [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 19 (1): 1–8.
- 张人禾, 周广庆, 巢纪平. 2003. ENSO 动力学与预测 [J]. *大气科学*, 27 (4): 647–688. Zhang Renhe, Zhou Guangqing, Chao Jiping. 2003. On ENSO dynamics and its prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 647–688, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.16.
- 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): 372–390. Zhang Shunli, Tao Shiyuan. 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 372–390, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07.
- 张艳. 2004. 青藏高原热力参数特征及其异常气候效应的研究 [D]. 南京大学博士学位论文, 133pp. Zhang Yan. 2004. Researches on the characteristics of the thermal parameters in the Tibetan Plateau and its climate effects [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University, 133pp.
- 郑志海, 封国林, 黄建平, 等. 2012. 基于延伸期可预报性的集合预报方法和数值试验 [J]. *物理学报*, 61 (19): 199203. Zheng Zhihai, Feng Guolin, Huang Jianping, et al. 2012. Predictability-based extended-range ensemble prediction method and numerical experiments [J]. *Acta Phys. Sin. (in Chinese)*, 61 (19): 199203, doi:10.7498/aps.61.199203.
- 周浩, 唐红玉, 程炳岩. 2010. 青藏高原冬春季积雪异常与西南地区夏季降水的关系 [J]. *冰川冻土*, 32 (6): 1144–1151. Zhou Hao, Tang Hongyu, Cheng Bingyan. 2010. Relation between the abnormal snow cover in winter and spring over the Tibetan Plateau and summer precipitation over the Southwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese)*, 32 (6): 1144–1151.
- 周秀骥, 赵平, 陈军明, 等. 2009. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 39 (11): 1473–1486. Zhou Xiujia, Zhao Ping, Chen Junming, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the northern hemispheric climate [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences) (in Chinese)*, 52 (11): 1679–1693, doi:10.1007/s11430-009-0194-9.
- 朱玉祥, 丁一汇. 2007. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题 [J]. *气象科技*, 35 (1): 1–8. Zhu Yuxiang, Ding Yihui. 2007. Influences of snow cover over Tibetan Plateau on weather and climate: Advances and problems [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 35 (1): 1–8, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2007.01.001.