

为什么 NCEP-CFSv2 模式对 11 月西伯利亚高压强度的预测性能较好？

杨洪卿^{1,2} 范可^{*2,3} 田宝强² 华维^{1,2}

1 成都信息工程大学大气科学学院，成都 610225

2 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

3 中国科学院大学，北京 100049

摘要 作为东亚冬季风的关键系统，西伯利亚高压的变化对欧亚大陆冬季天气及气候异常产生重要影响。本文系统地评估了美国国家环境预测中心第二代气候预测系统(NCEP-CFSv2, National Center for Environment Prediction-Climate Forecast System, version 2) 对冬半年(11~2月)及逐月西伯利亚高压强度的预测效能。结果表明，NCEP-CFSv2 模式仅对 11 月西伯利亚高压强度的预测效能较好，研究其成因发现 11 月西伯利亚高压强度主要受该地区热力、动力过程以及西伯利亚地区积雪状况的影响。在热力过程方面，NCEP-CFSv2 模式可以较好地再现 11 月西伯利亚高压强度及其相联的该地区表层土壤温度、对外长波辐射等热力因素；在动力过程方面，模式能较好地再现 11 月西伯利亚高压强度及其相联的该地区对流层低层辐散环流、中高层下沉运动；同时，模式也能较好地再现 11 月西伯利亚高压强度与该地区积雪覆盖率之间的相互作用。因此，与 11 月西伯

收稿日期：2020-09-08；**网络预出版日期**

作者简介：杨洪卿，1996.10，女，硕士研究生，从事气候预测研究。E-mail: yanghongqing@mail.iap.ac.cn

通讯作者：范可，女，研究员，从事气候动力学和气候预测研究。E-mail: fanke@mail.iap.ac.cn

资助项目：国家自然科学基金项目(41730964, 41421004, 41575079)

利亚高压相联的热力、动力过程和该地区积雪状况可能是 11 月西伯利亚高压强度的可预测来源，且 NCEP-CFSv2 模式能较好地再现这些可预测来源。

关键词： 11 月西伯利亚高压强度； NCEP-CFSv2； 预测效能； 可预测来源

稿件编号： 2020106C

文章编号： doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20106

气 象 学 报
第 49 卷 第 1 期
2010 年 1 月

Why is the NCEP-CFSv2 More Predictable for the Siberian High Intensity in November?

Yang Hongqing^{1,2} Fan Ke^{*2,3} Tian Baoqiang² Hua Wei^{1,2}

1 School of Atmosphere Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

2 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Supported by National Nature Science Foundation of China (41730964, 41421004, 41575079)

Abstract As a critical system of the East Asian winter monsoon, the Siberian High has an important impact on the winter weather and climate anomalies in Eurasia. Based on the National Center for Environment Prediction-Climate Forecast System, version 2 (NCEP-CFSv2), the seasonal and monthly prediction performance of the Siberian High is comprehensively evaluated during the winter time (November to February). It is found that the NCEP-CFSv2 model can skillfully predict the Siberian High intensity only in November, the reasons for which are that local thermal process, dynamic process and Siberian snow cover extent mainly affect the intensity of Siberian High in November. In terms of thermal process, NCEP-CFSv2 can better reproduce the intensity of Siberian High in November and its related surface soil temperature, upward long wave radiation and other thermal factors in Siberia. In aspect of dynamic processes, the NCEP-CFSv2 can better reproduce the strength of the Siberian High in November and its associated with low-level tropospheric divergent circulation, the sinking movement of the upper and middle layers respectively in Siberian area. Meanwhile, the model also reproduces the relationship between the snow cover extent over Siberia and the intensity of the Siberian High in November. The thermodynamic process of the Siberian High and the snow cover in the area are

predictability sources of the Siberian High intensity in November, and the NCEP-CFSv2 can reasonably reproduce these predictability sources in November.

Keywords: November Siberian High intensity, NCEP-CFSv2, prediction skill, predictability sources

1 引言

由于海陆热力差异的影响,冬半年在欧亚大陆对流层低层形成一个季节性大气活动中心—西伯利亚高压。作为东亚冬季风的关键系统,西伯利亚高压是影响欧亚地区冬季气温和降水年际变率的主要因子之一(施能等, 2000; 龚道溢等, 2002; Gong and Ho, 2002; 李勇等, 2007; Hasanean et al., 2013)。同时,它强度和位置的变化会对欧亚地区极端低温、降水以及雾霾等天气事件产生影响(杨莲梅等, 2006; 麻巨慧等, 2009; Iqbal et al., 2013; Jia et al., 2015; Zhang et al., 2016; Lei and Wu, 2017; Riaz and Iqbal, 2017)。例如,2012年1~2月欧亚大陆极端低温事件发生时,西伯利亚高压强度达到1979年以来的最大值(Wu et al., 2017)。因此,准确地预测西伯利亚高压强度对欧亚地区冬季气候形势的预测有着重要意义。

西伯利亚高压在动力和热力因子共同作用下形成,地表辐射冷却和大尺度下沉运动是高压加强和维持的主要原因(Ding and Krishnamurti, 1987; Ding, 1990; 丁一汇等, 1991; 谢安等, 1992)。在全球变暖的背景下,冬季西伯利亚高压强度在1975年前后有明显的减弱趋势(Sahsamanoglou et al., 1991; 龚道溢和王绍武, 1999; Panagiotopoulos et al., 2005)。此外,已有研究表明11月与12~1月西伯利亚高压强度的关系存在年代际变化,1978年之前11月与12~1月西伯利亚高压强度一致变化,之后相反(Chang and Lu, 2012)。进一步研究表明,造成1978年以后11月与12~1月西伯利亚高压强度相反的原因是9月北极海冰对11月与12~1月北极地区热通量、北大西洋风暴轴和乌拉尔山阻塞高压频次的响应不同(Lü et al., 2019)。

已有研究表明，西伯利亚高压强度不仅受北极涛动、北大西洋风暴轴等大气内部变率的影响，同时也受海温、海冰以及积雪等下垫面变化的影响（Wagner, 1973; Parkinson, 1990; Gong et al., 2001; 曾鼎文等, 2015; 李栋梁和蓝柳茹, 2017）。冬季北极涛动处于负位相时，冬季的西伯利亚高压强度越强，东亚冷涌事件频发（Gong et al., 2001; Park et al., 2011）。同时，当冬季北大西洋风暴轴位置偏北时，高纬地区的西风增强，使得冬季西伯利亚高压强度减弱（曾鼎文等, 2015）。除了大气内部变率对西伯利亚高压强度的影响，9月巴伦支海-喀拉海海冰的减少会使冬季极地至中高纬的经向温度梯度减弱，西伯利亚地区纬向西风减弱，更多的冷空气在此地堆积，冬季西伯利亚高压强度增强（Parkinson, 1990; 武炳义等, 2011; Chen et al., 2018; 武炳义, 2018）。冬季北大西洋海温异常通过影响乌拉尔山阻塞高压的强度，也造成同期西伯利亚高压强度的变化（李栋梁和蓝柳茹, 2017）。此外，冬半年欧亚大陆积雪的变化会对欧亚地区大气环流以及东亚地区气候造成影响（Wagner, 1973; Barnett et al., 1988; 葛旭阳和周霞琼, 2001; Robinson and Kukla, 2010; 陈红, 2017; Xu et al., 2017）。对于西伯利亚地区而言，10月该地区积雪覆盖率异常增加，造成10~11月对流层低层向平流层传播的波活动通量增加，平流层增暖，使得冬季平流层向对流层低层传播的波活动通量加强，对流层低层位势高度降低，冬季北极涛动出现负位相（Cohen et al., 2001; Cohen and Fletcher, 2007; Jaiser et al., 2013）。同时，欧亚地区积雪覆盖率的变化也会通过改变地表辐射收支影响对流层低层大气环流系统（Cohen and Rind, 1991; Cohen, 1994; 陈海山和孙照渤, 2003; 张天宇等, 2007）。

目前，大多数国内外先进的气候模式对东亚冬季风的预测能力非常有限，其中对风场的预测能力由赤道向中高纬地区递减，且利用中高纬关键系统定义的东

亚冬季风强度指数的预测准确度则更低（张刚, 2012; Yang and Lu, 2014; Tian et al., 2017）。西伯利亚高压是东亚冬季风中高纬系统的重要组成部分，科学系统地评估和提高西伯利亚高压的预测能力将有助于东亚冬季风预测能力的提升。本文利用美国国家环境预测中心第二代气候预测系统（NCEP-CFSv2, National Center for Environment Prediction-Climate Forecast System, version 2）对冬半年（11~2月）及逐月西伯利亚高压的预测能力进行系统地评估，进而分析西伯利亚高压的可预测来源和原因，为改进气候模式对西伯利亚高压的预测效能提供基础。

2 数据和方法

本文使用美国国家环境预测中心—国家大气研究中心 1948~2019 年月平均再分析资料（Kalnay et al., 1996），包括海平面气压场、经向风场和纬向风场等水平分辨率为 2.5° （纬度） $\times 2.5^\circ$ （经度）的大气环流资料以及 0~10 cm 土壤温度、对外长波辐射通量、潜热通量和感热通量场等高斯格点的地表资料。同时，采用美国罗格斯大学全球积雪实验室 1966~2019 年分辨率为 89 个格点（纬向） $\times 89$ 个格点（经向）积雪覆盖率资料，积雪覆盖率表示格点内积雪覆盖面积与总面积之比（Robinson and Kukla, 2010）。为了便于对该积雪覆盖率资料进行分析，将其双线性插值为 2.5° （纬度） $\times 2.5^\circ$ （经度）。

NCEP-CFSv2 模式是美国环境预测中心研制的第二代海洋—陆地—海冰—大气全耦合的实时动力预测系统。该数据的时间段为 1982~2019 年，由 1982~2010 年的回报试验和 2011~2019 年的实时预测结果共同组成，其中每月隔 5 天分别从 00、06、12、18 UTC 这四个时刻的初始场开始积分，共 24~28 个集合成员回报当月并对未来 8 个月进行预测，其分辨率为 1° （纬度） $\times 1^\circ$ （经度）（Saha

et al., 2014)。例如，模式 10 月预测 11 月的结果即为模式提前 1 个月起报的结果，依次类推模式 10~5 月预测 11 月的结果即为模式提前 1~6 个月对 11 月预测的结果。GloSea5 (Global Seasonal forecast system version 5) 模式是英国气象局研制的第五代大气、陆地、海洋和海冰全耦合的全球季节至季节的预报系统。其英国气象局版本数据的时间段为 1993~2019 年，由 1993~2015 年的回报试验和 2016~2019 年的实时预测结果共同组成，对未来 5 个月进行预测，其分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) (Maclachlan et al., 2015)。

为了便于分析和评估，本文采用双线性插值将模式资料插值成与观测资料相同的分辨率，同时利用时间相关系数 (TCC)、空间相关系数 (PCC) 及均方根误差 (RMSE) 等指标来评估 NCEP-CFSv2 模式对西伯利亚高压的预测能力。此外，本文利用信噪比 (SNR) 的方法 (公式 1~5) 评估集合模式的潜在可预测性 (Phelps et al., 2004; Peng et al., 2011)。假设集合模式完美，模式集合平均的气候态为准确预测的结果，将各子集合成员相对于集合平均的内部变率定义为模式的噪音 (公式 1~3)，集合平均的变率则看作可预测的部分，称为模式的外部变率，即信号 (公式 1, 4)。SNR 为信号和噪音的比值 (公式 5)。因此，SNR 越大表明模式潜在可预测性越高。

信噪比 (SNR) 的计算公式如下：

$$\overline{A_{h\alpha}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A_{h\alpha i} \quad (1)$$

$$\sigma_{\alpha}^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (A_{h\alpha i} - \overline{A_{h\alpha}})^2 \quad (2)$$

$$\sigma_I^2 = \frac{1}{Y} \sum_{\alpha=1}^M \sigma_{\alpha}^2 \quad (3)$$

$$\sigma_E^2 = \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^M (\overline{A_{h\alpha}} - \overline{A_h})^2 \quad (4)$$

$$SNR = \frac{\sigma_E^2}{\sigma_I^2} \quad (5)$$

其中 M 为模式集合成员的个数， Y 为模式预测时间的长度。

本文采用 Gong and Ho (2002) 定义的西伯利亚高压强度指数 (SHI) 即海平面气压场的区域 ($40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 平均值, 选取 11~2 月 (+1) 作为北半球的冬半年, 利用 1982~2018 年 NCEP-CFSv2 模式提前 1~6 个月的预测结果对冬半年平均及逐月 SHI 的预测能力进行系统评估。

3 NCEP-CFSv2 模式对冬半年及逐月西伯利亚高压强度的预测效能

3.1 实际预测效能

首先, 利用 NCEP-CFSv2 模式对冬半年及逐月西伯利亚强度的预测效能进行评估。图 1a 为 1982~2018 年冬半年 (11~2 月) 及逐月观测和 NCEP-CFSv2 模式提前 1~6 个月预测的 SHI 之间的时间相关系数 (TCC), 结果显示模式对 12 月、1 月、2 月及冬半年平均的 SHI 的预测能力较低, 其 TCC 接近于 0 甚至为负值。值得注意的是, 模式对 11 月西伯利亚高压具有较好的预测效能。1982~2018 年, 模式除了提前 2 个月对 11 月 SHI 预测 TCC 为 0.23, 未通过 0.1 的显著性水平外, 提前 1、3、4、5 和 6 个月预测的 11 月 SHI 的 TCC 分别为 0.36、0.43、0.42、0.28 和 0.37, 均通过 0.1 的显著性水平。模式提前 1~6 个月预测的冬半年及逐月 SHI 的均方根误差 (RMSE) 显示 11 月的 RMSE 最小 (图 1b)。其中, 提前 1 个月起报时, 11 月 SHI 的 RMSE 为 1.12, 而 12 月、1 月、2 月及冬半年 SHI 的 RMSE 分别为 1.37、1.40、1.23 和 1.43。故 NCEP-CFSv2 模式提前 1~6 个月对 11 月 SHI 的预测效能较之冬半年、12 月、1 月和 2 月相比是最好。

同时, 选取 GloSea5 模式和 NCEP-CFSv2 模式重合的时间段 (1993~2018) 比较两个模式提前 1~4 个月对 11 月西伯利亚高压的预测能力 (图略)。在 1993~2018 年 NCEP-CFSv2 和 GloSea5 模式提前 1 个月对 11 月 SHI 具有较好的预测能

力。然而，较 NCEP-CFSv2 模式而言，GloSea5 模式前 2~4 个月对 11 月 SHI 的预测能力较差，其 TCC 分别为-0.01，-0.24，0.22（均未通过 0.1 的显著性水平）。

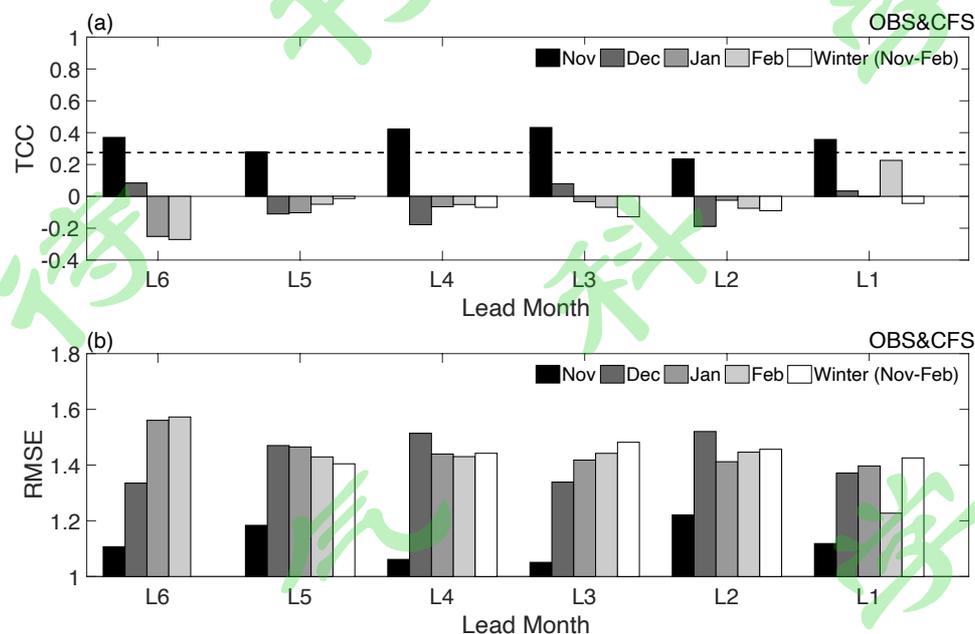


图 1 (a) 1982~2018 年冬半年 (11~2 月) 及逐月观测与 NCEP-CFSv2 (National Center for Environment Prediction-Climate Forecast System, version 2) 提前 1~6 个月预测的西伯利亚高压强度指数 (SHI) 的时间相关系数 (TCC)，虚线为 0.1 的显著性水平；(b) NCEP-CFSv2 提前 1~6 个月预测的 SHI 的均方根误差 (RMSE)

Fig1 (a) The temporal correlation coefficient (TCC) of the Siberian High intensity index (SHI) during 1982–2018 in winter (November–February), November, December, January and February between observed and predicted by the NCEP-CFSv2 (National Center for Environment Prediction-Climate Forecast System, version 2) at 1- to 6-month leads. The dotted lines indicate significant at 0.1 significance level. (b) Root-mean-square error (RMSE) of SHI predicted by the NCEP-CFSv2 at 1- to 6-month leads

进一步分析 NCEP-CFSv2 模式对 11 月西伯利亚地区海平面气压场的预测能力。由 1982~2018 年观测和 NCEP-CFSv2 模式提前 1 个月和 6 个月预测的 11 月海平面气压场的气候态可知，11 月观测和模式预测的西伯利亚高压地区海平面气压场不仅空间分布基本一致（图 2a~c），而且在高压关键区内（ $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ， $70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ）平均的海平面气压值也相同，均为 1026 hPa。观测和模式预测的西伯利亚高压气候态之间的空间相关系数（PCC）也显示提前 1~6 个月时 PCC 均达 0.6 以上，通过 0.01 的显著性水平（图 2f）。但是，较观测而言，NCEP-CFSv2 模式对高压中心强度的预测能力略偏低为 1032 hPa（观测为 1035 hPa）。在贝加尔湖东北部地区，模式提前 1 个月和 6 个月预测的海平面气压气候态较观测偏高（图 2d, e）。

此外，评估模式对西伯利亚高压地区海平面气压异常的预测能力。由图 3 可以看出，模式提前 1~6 个月对海平面气压场的预测能力均较好，大部分地区通过 0.01 的显著性水平。在高压关键区内，随着提前预测时间不同，海平面气压场预测效能最好的区域有所不同，其中提前 1、2 和 5 个月时，模式在西伯利亚西部地区有较高的预测能力（图 3a, b, e）；而提前 3、4 和 6 个月起报时，模式对其中部和北部地区的预测效能较好（图 3c, d, f）。因此，NCEP-CFSv2 模式提前 1~6 个月能有效地预测 11 月西伯利亚地区的海平面气压场。

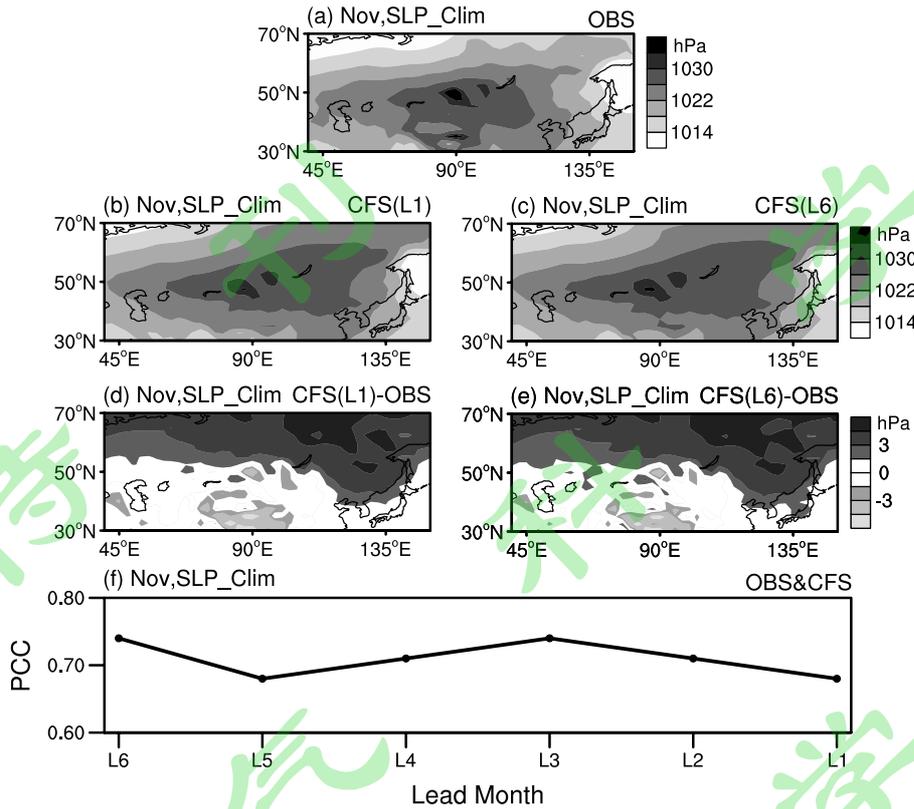


图 2 1982~2018 年 11 月 (a) 观测、NCEP-CFSv2 提前 (b) 1 个月和 (c) 6 个月预测的海平面气压气候态 (单位: hPa); 提前 (d) 1 个月和 (e) 6 个月预测的 11 月海平面气压场气候态差值 (模式-观测); (f) 观测和提前 1~6 个月预测的西伯利亚地区 (40°~60°N, 70°~120°E) 海平面气压气候态的空间相关系数 (PCC), 0.01 的显著性水平对应的 PCC 为 0.24

Fig 2 Climatological mean of (a) the observed and NCEP-CFSv2-predicted at (b) 1-month and (c) 6-month lead sea level pressure (units: hPa) in November during 1982–2018. The climatological differences between the NCEP-CFSv2-predicted at (d) 1-month, (e) 6-month lead and observed sea level pressure in November. (f) The spatial pattern correlation coefficient (PCC) between the observed and predicted sea level pressure in November at 1- to 6- month leads over the region (40°–60°N, 70°–120°E). The value of PCC with 0.24 is the 0.01 significance level

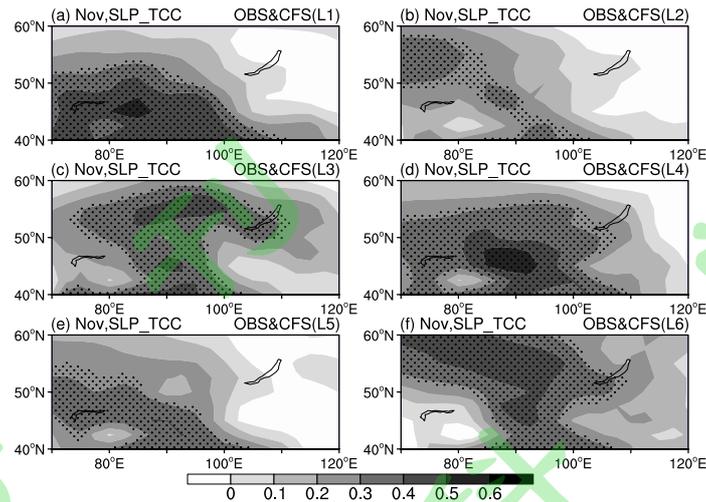


图 3 1982~2018 年 11 月观测与 NCEP-CFSv2 提前 1~6 个月 (a~f) 预测的海平面气压距平场 TCC 的空间分布, 打点为通过 0.1 的显著性水平

Fig 3 The TCC between the observed and predicted sea level pressure anomalies by NECP-CSFv2 at 1- to 6-month leads (a-f) during 1982-2018. The dotted areas indicate significant at 0.1 significance level

3.2 潜在可预测性

Lorenz (1969) 指出集合模式的可预测性包括两部分, 一方面是模式相对于观测而言的预测能力, 另一方面是假设集合模式的结果为完美的, 将模式集合平均的结果假设为准确的结果来讨论模式集合成员和集合平均之间的差异, 以研究模式的潜在可预测性。近年来, 针对模式内部不同集合成员的初始条件不同, 模式的潜在可预测性逐渐成为影响模式预测时效的重要因素之一 (Peng and Robinson, 2001; Peng et al., 2011)。随着预测时间的提前, 模式不同集合成员之间的差异逐渐显著, 故本文进一步利用信噪比 (SNR) 方法研究西伯利亚高压的潜在可预测性。

模式提前 1~6 个月预测的 11 月海平面气压场 SNR 显示, 西伯利亚高压南部的潜在可预测性高于北部 (图 4a~e), 其中模式提前 1~2 个月对 11 月该地

区海平面气压的潜在可预测性较高，其区域（ $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ， $70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ）平均的海平面气压场的 SNR 均为 0.14。随着预测时间的提前，模式内部的噪音逐渐增大，SNR 也逐渐减小（图 4g）。但较冬半年和其它月份而言，提前 1~6 个月预测的 11 月西伯利亚区域（ $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ， $70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ）平均海平面气压场 SNR 均高于 0.1，而冬半年及其它月份提前 3 个月以上预测的西伯利亚区域平均海平面气压场 SNR 低于 0.1。因此，相比于冬半年、12 月、1 月、2 月而言，NCEP-CFSv2 模式提前 1~6 个月对 11 月西伯利亚高压的潜在可预测性更高。

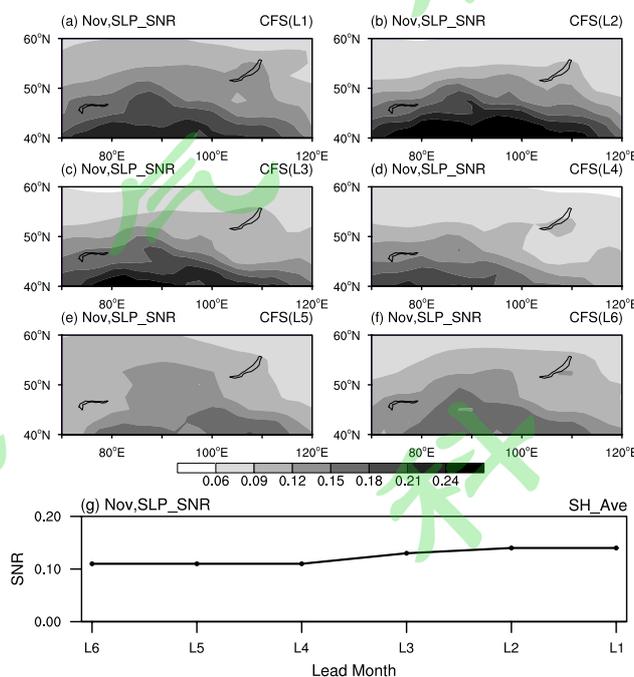


图 4 1982~2018 年 11 月模式提前 1~6 个月 (a~f) NCEP-CFSv2 预测的海平面气压的信号噪声比 (SNR)；(g) NCEP-CFSv2 提前 1~6 个月预测的 11 月西伯利亚区域关键区 ($40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ， $70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 平均的 SNR

Fig 4 The signal-noise-ratio (SNR) for the sea level pressure predicted by NCEP-CFSv2 at 1- to 6-month leads in November (a-f) during 1982–2018. (g) The regional-average SNR for sea level pressure predicted by NCEP-CFSv2 at 1- to 6-month leads over the region ($40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ， $70^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) in November

4 模式对 11 月西伯利亚高压强度预测能力较好的原因

为什么 NCEP-CFSv2 对 11 月西伯利亚高压的预测效能及潜在可预测性均较好？本文利用 NCEP-CFSv2 模式提前 1 个月起报的结果为例，对影响西伯利亚高压强度的热力过程、动力过程以及该地区积雪状况进行分析，由此分析该模式对 11 月西伯利亚高压强度预测效能较好的原因和可预测来源。

4.1 影响西伯利亚高压发展的热力过程

西伯利亚地区是欧亚大陆冷空气聚集地，其东移南下造成欧亚地区大范围的降温和寒潮等天气过程发生（王遵娅和丁一汇, 2006; Lei and Wu, 2017; Lei et al., 2017）。已有研究表明，西伯利亚高压的形成主要由于西伯利亚地区对流层低层绝热加热和温度平流的作用相抵消，其热量分布主要受非绝热冷却影响，其中地表对外长波辐射增加造成该地区冷空气堆积，气温降低，使得海平面气压升高（Ding and Krishnamurti, 1987）。基于此，我们分析 11 月 SHI 与西伯利亚地区 0~10 cm 土壤温度之间的联系。由图 5a 显示，当西伯利亚地区土壤温度越低，西伯利亚高压越强，其中在西伯利亚高压西部和南部区域 0~10 cm 土壤温度对西伯利亚高压强度的影响最为显著。此外，冷空气堆积使得西伯利亚地区地表辐射冷却加强，这将进一步造成该地区非绝热冷却加强，高压强度增强，其中在巴尔喀什湖及其东部区域，辐射冷却和土壤温度对西伯利亚高压强度的影响较为一致（图 5b）。由此可见，西伯利亚地区的土壤温度、地表辐射等相关热力过程对西伯利亚地区强度有重要的影响。

那么，模式对 11 月西伯利亚高压强度及其相联热力过程的再现能力如何？图 5c, d 为 1982~2018 年 11 月 NCEP-CFSv2 模式提前 1 个月预测的 0~10 cm 土壤温度和对外长波辐射异常对 SHI 的回归场。可以看出，模式提前 1 个月能够

较好地再现 11 月西伯利亚高压强度和该地区 0~10 cm 土壤温度（图 5c）、对外长波辐射之间的相互作用（图 5d）。在巴尔喀什湖及其东部地区的西伯利亚高压强度受土壤温度和辐射冷却影响较大，与观测相一致。然而，在贝加尔湖东南部和巴尔喀什湖以南地区，模式较观测而言，高估了高压强度和土壤温度、对外长波辐射之间的联系（图 5e, f）。

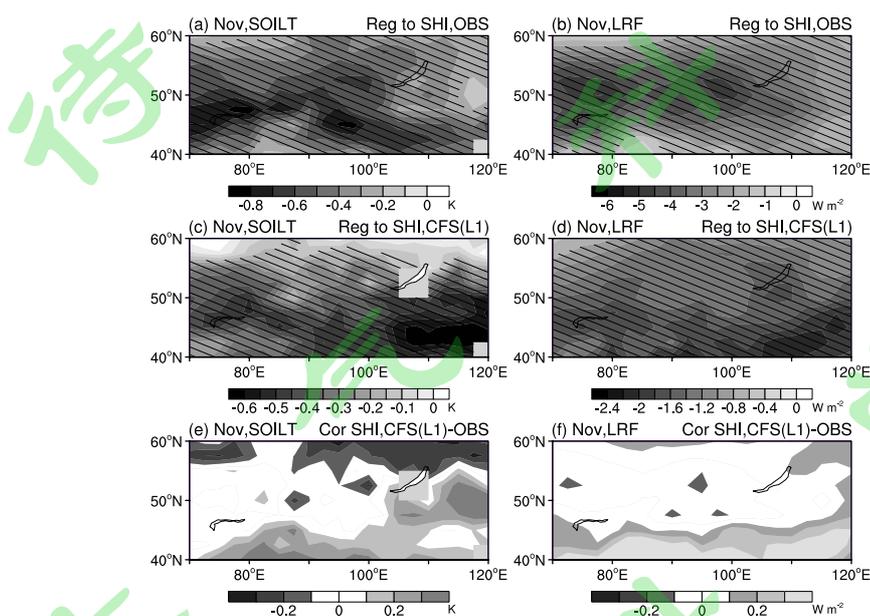


图 5 1982~2018 年 11 月观测 (a, b) 和 NCEP-CFSv2 提前 1 个月预测 (c, d) 的 0~10 cm 土壤温度 (a, c; 单位: K) 和对外长波辐射通量 (b, d; 单位: W/m²) 异常对 SHI 的同期回归分析, 斜线为通过 0.1 的显著性水平; SHI 与 0~10 cm 土壤温度 (e) 和对外长波辐射通量 (f) 的 TCC 差值 (模式-观测)

Fig 5 Regression coefficients of 0–10 cm soil temperature (a, c; units: K) and upward long wave radiation flux (b, d; units: W/m²) anomalies onto the SHI in November during 1982–2018 for observation (a, b) and NCEP-CFSv2 at 1-month lead (c, d). The areas with slash indicate significant at 0.1 significance level. TCC between SHI and 0–10 cm soil temperature anomalies (e), upward long wave radiation flux anomalies (f) differences between the NCEP-CFSv2 and observation

由观测结果可知，1982~2018年冬半年及逐月SHI和西伯利亚区域（40°~60°N, 70°~120°E）平均的0~10 cm土壤温度之间的TCC分别为-0.68、-0.67、-0.68、-0.64、-0.52，均通过0.01的显著性水平，故冬半年及逐月西伯利亚地区的表层土壤温度也是影响同期西伯利亚高压强度的重要因子之一。那么模式对冬半年及其它月份西伯利亚高压强度和该地区土壤温度之间联系的再现能力又如何呢？11月模式提前1个月预测的SHI和区域平均土壤温度的TCC与观测相一致，均为-0.67；冬半年模式预测的TCC为-0.79，与观测相比高估冬半年土壤温度和高压强度的统计关系；12月、1月、2月TCC分别为-0.29、-0.37、-0.03，与观测结果的偏差更大，均未通过0.01的显著性水平（图6）。因此，模式仅对11月西伯利亚高压强度预测效能较好，可能是由于NCEP-CFSv2可以较好地再现11月西伯利亚高压强度和表层土壤温度等相关热力过程之间的联系。

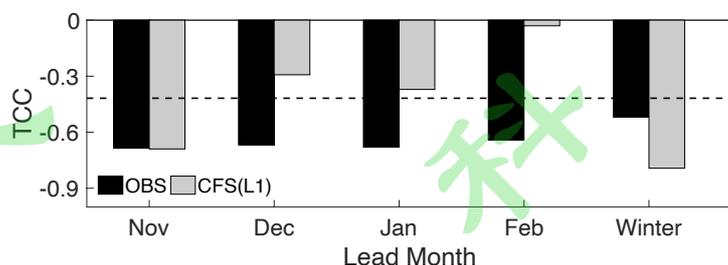


图6 1982~2018年冬半年（11~2月）及逐月观测（黑色柱）和NCEP-CFSv2（灰色柱）提前1个月预测的SHI和区域（40°~60°N, 70°~120°E）平均的0~10cm土壤温度的TCC，虚线为0.01的显著性水平

Fig 6 The TCC between SHI and regional-averaged 0–10 cm soil temperature over the region (40°–60°N, 70°–120°E) in winter (November–February), November, December, January and February for the observation (black bar) and NCEP-CFSv2 at 1-month lead (white bar) during 1982–2018. The dotted lines indicate significant at 0.01 significance level

4.2 影响西伯利亚高压发展的动力环流

影响西伯利亚高压发展的动力成因主要是对流层中、上层强的质量辐合和强的下沉运动(丁一汇等, 1991)。图 7a, b 为 1982~2018 年纬向平均的(70°~120°E)散度异常、垂直速度异常对 SHI 的回归场。结果显示, 在对流层中高层, 高压中心(50°N)北侧为强的辐合运动, 使得更多的冷空气在对流层中高层聚集造成强下沉运动(图 7a)。西伯利亚高压地区对流层低层的辐散运动也相应的增强, 西伯利亚高压强度加强(图 7)。

与观测相比, 在高压中心北侧的对流层中高层, 模式预测结果与观测均为一致的辐合运动; 在对流层低层, 观测和模式均为一致的辐散环流(图 7c)。同时, 模式可以较好地再现西伯利亚高压中心北侧的高压强度与其对应的下沉运动(图 7d)。但由模式提前 1 个月预测的纬向平均的(70°~120°E)散度异常、垂直速度异常对 SHI 的回归场可以看出, 在高压中心(50°N)南侧, 模式高估对流层中高层辐散环流、对流层低层下沉运动对西伯利亚高压强度的 z 影响(图 7e, f)。

进一步分析 12 月、1 月和 2 月 SHI 和该地区垂直速度之间的联系。图 8 为 1982~2018 年 12~2 月观测的纬向平均的(70°~120°E)垂直速度异常对 SHI 的回归场。结果显示, 在 12 月、1 月和 2 月, 对流层高层至低层的下沉运动加强, 西伯利亚高压强度也增强, 其中 1 月在高压中心北侧对流层中层下沉运动和高压强度之间的联系最为密切(图 8a~c)。观测结果也表明 12 月高压强度和下沉运动统计关系最显著的中心位于 50° N 以北, 但模式预测的中心却位于 43° N 和 57° N 附近(图 8a, d)。此外, 观测的 12 月、1 月和 2 月对流层低层下沉运动越强, 高压强度越强, 模式预测结果却与之相反(图 8)。因此, 相对于冬

半年其它月份而言，模式能较好地再现 11 月西伯利亚高压强度及其动力过程的联系是 NCEP-CFSv2 模式对 11 月西伯利亚高压强度预测能力较好的另一原因。

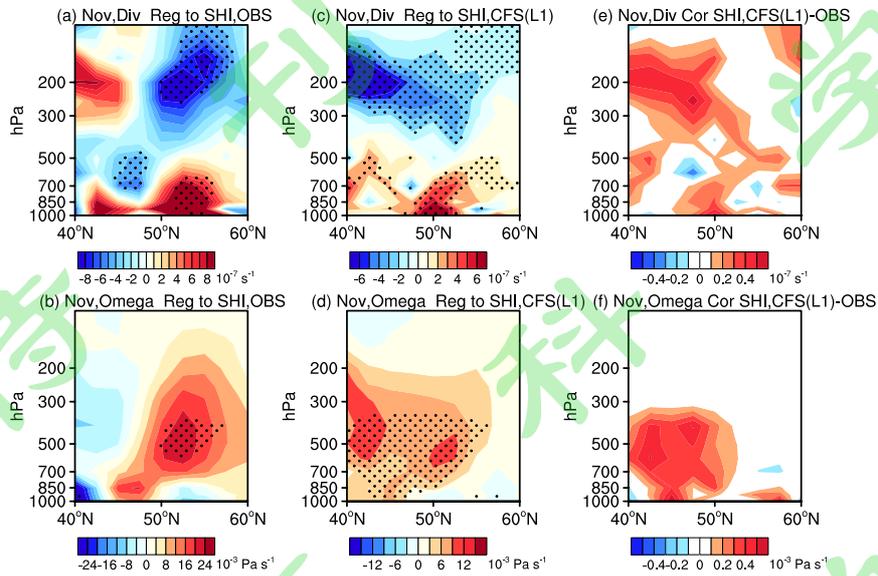


图 7 1982~2018 年 11 月观测(a, b)和 NCEP-CFSv2 提前 1 个月预测(c, d)的纬向平均 $70^{\circ}\sim 120^{\circ}$ E) 散度 (a, c; 单位: 10^{-7} /s) 和垂直速度 (b, d; 单位: 10^{-3} Pa/s) 异常对 SHI 的同期回归分析, 打点为通过 0.1 的显著性水平; SHI 与纬向平均 ($70^{\circ}\sim 120^{\circ}$ E) 的散度场 (e) 和垂直速度场 (f) 的 TCC 差值 (模式-观测)

Fig 7 Regression coefficients of zonal ($70^{\circ}\sim 120^{\circ}$ E) mean horizontal divergence (a, c; unites: 10^{-7} /s) and vertical velocity (b, d; units: 10^{-3} Pa/s) anomalies onto the SHI in November during 1982–2018 for observation (a, b) and NCEP-CFSv2 at 1-month lead (c, d). The dotted areas indicate significant at 0.1 significance level. TCC between SHI and zonal mean horizontal ($70^{\circ}\sim 120^{\circ}$ E) divergence (e), vertical velocity (f) differences between the NECP-CFSv2 and observation

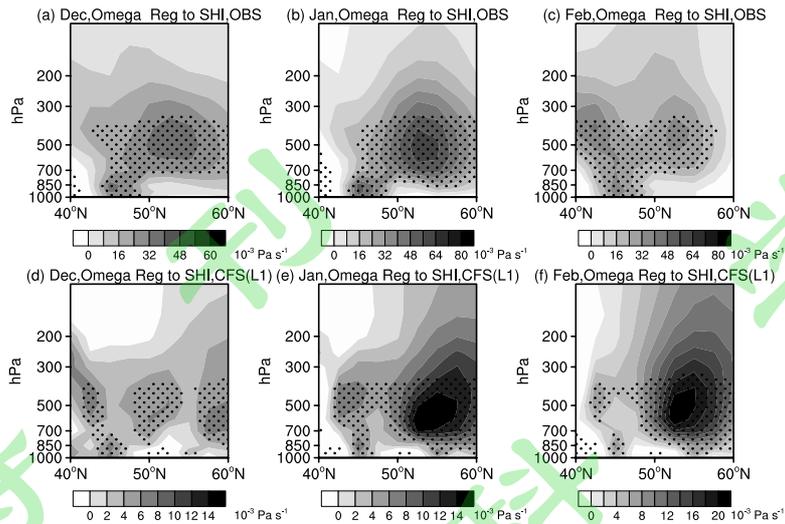


图 8 1982~2018 年 12~2 (+1)月观测 (a~c) 和 NCEP-CFSv2 提前 1 个月预测 (d~f) 的纬向平均 (70°~120° E) 垂直速度 (单位: 10^{-3} Pa/s) 异常对 SHI 的同期回归分析, 打点为通过 0.1 的显著性水平

Fig 8 Regression coefficients of zonal (70°–120° E) mean horizontal vertical velocity (units: 10^{-3} Pa/s) anomalies onto the SHI in December, January and February during 1982–2018 for observation (a–c) and NCEP-CFSv2 at 1-month lead (d–f). The dotted areas indicate significant at 0.1 significance level.

4.3 11 月西伯利亚地区积雪

积雪作为陆气相互作用的主要因子之一, 其较高的反照率和低的热传导性不仅使得地表热量分布发生变化, 也对大气环流和气候有重要影响 (陈海山和孙照渤, 2003; Gong et al., 2004; Cohen and Fletcher, 2007; Ao and Sun, 2015)。观测结果显示, 从 9~1 月欧亚大陆积雪覆盖率逐渐增加 (图略), 但西伯利亚地区 11 月积雪覆盖率年际变率最大。1982~2018 年 9~2 月西伯利亚地区 (40°~60° N, 70°~120° E) 平均的积雪覆盖率标准差分别为 1.29、8.14、8.34、3.85、3.44 和 3.15。1982~2018 年 11 月观测的积雪覆盖率气候态显示, 巴尔喀什湖以北地区的积雪覆盖率达到 90%以上, 以南地区积雪覆盖率为 20%左右 (图 9a)。模式

提前 1 个月和 6 个月预测的西伯利亚地区的积雪覆盖率气候态的空间分布与观测结果较为一致（图 9b, c），但模式提前 1 个月和 6 个月预测的 11 月巴尔喀什湖至贝加尔湖以南地区积雪覆盖率较观测偏少（图 9d, e）。此外，观测和模式提前 1~6 个月预测的西伯利亚地区积雪覆盖率气候态之间的 PCC 均达 0.8 以上（图 9f），通过 0.01 的显著性水平。因此，NCEP-CFSv2 模式可以较好地预测 11 月西伯利亚地区积雪覆盖率气候态的空间分布状况。

由 1982~2018 年 11 月西伯利亚地区积雪覆盖率、潜热通量、感热通量异常对 SHI 的回归场可以看出，当积雪覆盖率升高时，该地区潜热通量减少，且较高的反照率使得该地区吸收热量减少，释放的感热通量增加，造成该地区的气温降低，西伯利亚高压强度增强（图 10a~c）。进一步分析 1982~2018 年 11 月西伯利亚区域（40°~60° N, 70°~120° E）平均的积雪覆盖率与该区域平均土壤温度的 TCC 为-0.7，通过 0.01 的显著性水平。因此说明西伯利亚积雪异常可能影响西伯利亚地区的热力过程，进一步对西伯利亚高压强度造成影响。

与观测结果相比，模式能较好地再现 11 月西伯利亚高压强度和该地区积雪及其相关过程（图 10d~f）。然而，较观测而言，在巴尔喀什湖以北地区，模式低估西伯利亚高压强度与积雪覆盖率之间的联系，而在以南地区又高估两者之间的相互作用（图 10g）。在贝加尔湖地区，模式低估西伯利亚高压强度和潜热通量之间的联系，而在巴尔喀什湖以南地区模式高估其与感热通量之间的联系（图 10h, i）。进一步分析观测和模式中 12~2 月逐月西伯利亚地区积雪覆盖率对西伯利亚高压强度的影响。由 12~2 月的积雪覆盖率异常对同期 SHI 的回归场显示，在巴尔喀什湖地区，12 月积雪覆盖率升高，西伯利亚高压强度增强，而模式预测结果却与之相反（图 11a, b）。此外，观测结果显示，在 1 月和 2 月巴尔

喀什湖东南部地区的积雪覆盖率越高时，西伯利亚高压强度越强，模式预测结果却与之相反（图 11c~f）。因此，模式对 11 月西伯利亚高压强度预测效能较好的另一原因是模式在一定程度上可以较合理再现 11 月西伯利亚高压强度和该地区积雪状况。

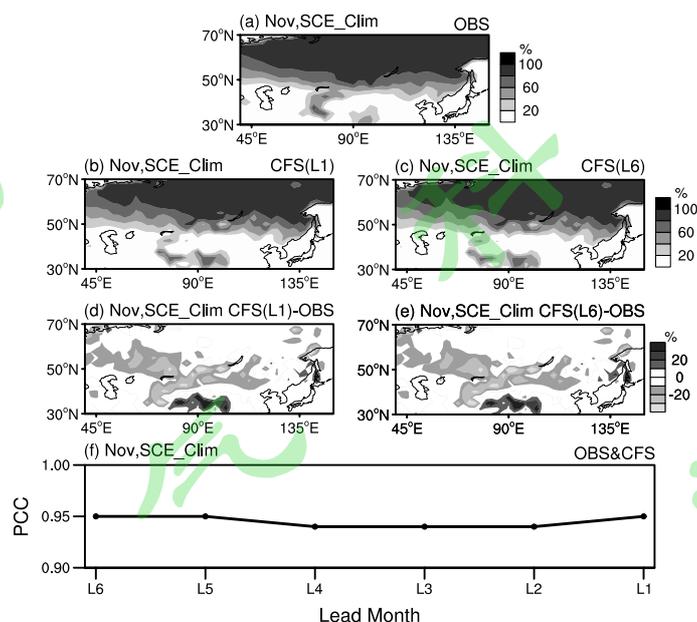


图 9 1982~2018 年 11 月 (a) 观测、NCEP-CFSv2 提前 (b) 1 个月和 (c) 6 个月预测的积雪覆盖率气候态 (单位: %); 提前 (d) 1 个月和 (e) 6 个月预测的 11 月积雪覆盖率气候态差值 (模式-观测); (f) 观测和提前 1~6 个月预测的西伯利亚地区 (40°~60°N, 70°~120°E) 积雪覆盖率气候态的 PCC, 0.01 的显著性水平对应的 PCC 为 0.24

Fig 9 Climatological mean of (a) the observed and NCEP-CFSv2-predicted at (b) 1-month and (c) 6-month snow cover extent (units: %) in November during 1982–2018. The climatological differences between the NCEP-CFSv2 predicted at (d) 1-month, (e) 6-month lead and observed snow cover extent in November. (f) The PCC between the observed and predicted snow cover extent in November at 1- to 6- month leads over the region(40°–60°N, 70°–120°E). The value of PCC with 0.24 is the 0.01 significance level

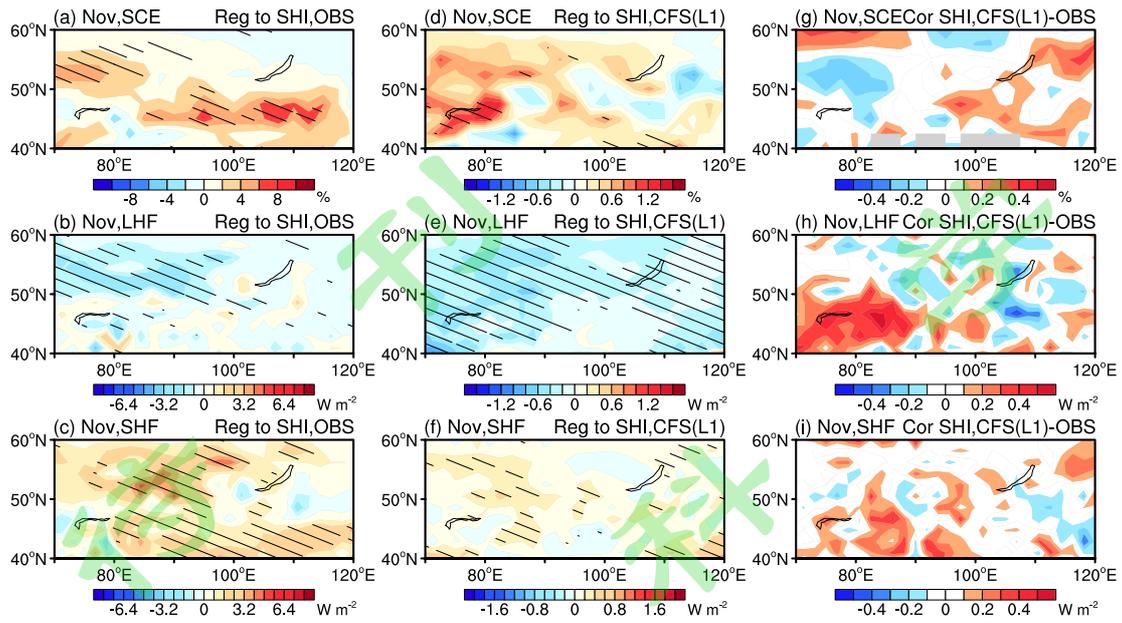


图 10 1982~2018 年 11 月观测 (a, b, c) 和 NCEP-CFSv2 提前 1 个月预测 (d, e, f) 的积雪覆盖率 (a, d; 单位: %)、潜热通量 (b, e; 单位: W/m^2) 和感热通量 (c, f; 单位: W/m^2) 异常对 SHI 的同期回归分析, 斜线为通过 0.1 的显著性水平; SHI 与积雪覆盖率 (g)、潜热通量 (h) 和感热通量 (i) 的 TCC 差值 (模式-观测)

Fig 10 Regression of the observed (a, b, c) and NCEP-CFSv2 predicted November snow cover extent (a, d; units: %), latent heat flux (b, e; units: W/m^2) and sensible heat flux (c, f; units: W/m^2) anomalies at 1-month lead onto the November SHI. The slashes areas indicate significant at 0.1 significance level. Temporal correlation coefficient between SHI and snow cover extent anomalies (g), latent heat flux anomalies (h) and sensible heat flux anomalies (i) differences between the NECP-CFSv2 and observation

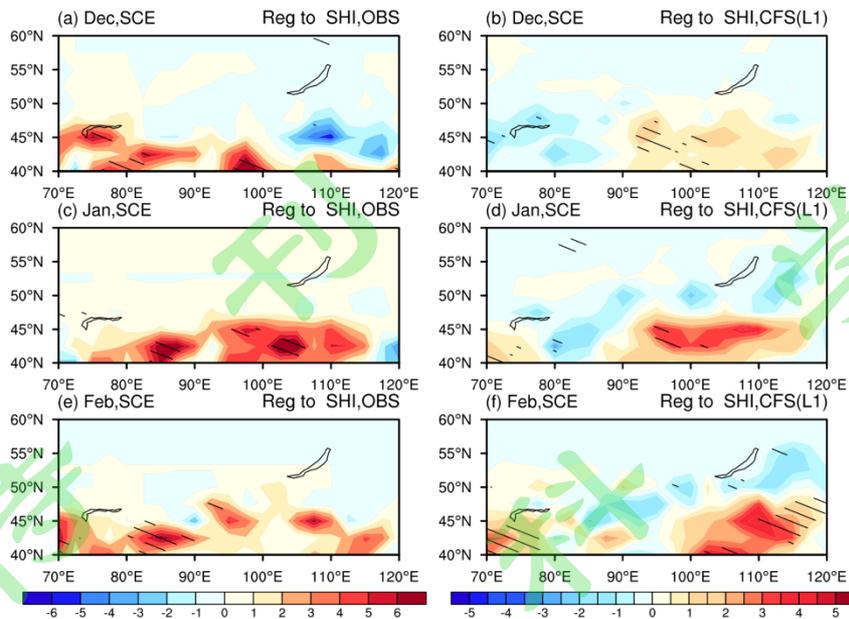


图 11 1982~2018 年 12~2 (+1)月观测 (a, c, e) 和 NCEP-CFSv2 提前 1 个月预测 (b, d, f) 的积雪覆盖率 (单位: %) 异常对 SHI 的同期回归分析, 斜线为通过 0.1 的显著性水平

Fig 11 Regression coefficients of snow cover extent (a, d; units: %) anomalies onto the SHI in December, January and February during 1982–2018 for observation (a, c, e) and NCEP-CFSv2 at 1-month lead (b, d, f). The slashes areas indicate significant at 0.1 significance level

5 总结和讨论

本文首先系统评估了 NCEP-CFSv2 模式对 1982~2018 年冬半年及逐月西伯利亚高压强度的预测效能, 研究结果表明 NCEP-CFSv2 模式对冬半年及 12 月、1 月、2 月西伯利亚高压强度预测效能偏低, 仅对 11 月西伯利亚高压强度的预测能力和可预测性较好。同时, NCEP-CFSv2 模式在不同起报月份对 11 月西伯利亚高压强度的预测能力均高于 GloSea5 模式。

研究结果表明, 西伯利亚高压强度的变化不仅受西伯利亚地区热力和动力过程的影响, 同时也与西伯利亚地区积雪状况有关。首先, 土壤温度及相关的热力过程是造成西伯利亚地区地表热量分布及强度变化的因素之一。冬半年及逐月的

西伯利亚高压强度与地表热力过程之间联系密切，而 NCEP-CFSv2 模式仅能较好地再现 11 月西伯利亚高压强度与土壤温度等热力因素之间的联系。同时，西伯利亚地区对流层中高层的辐合下沉运动以及对流层低层的辐散是造成西伯利亚高压加强的动力因素。模式也能较好地再现 11 月西伯利亚高压及其该地区中高层辐合下沉运动以及低层辐散环流。此外，模式在一定程度上也能再现 11 月西伯利亚高压和该地区积雪及其相关过程。

西伯利亚高压是北半球冬半年主要的大气环流系统之一，通过上述分析表明西伯利亚地区的局地热力过程、动力过程以及该地区的积雪是 11 月西伯利亚高压强度的主要可预测来源。但在分析中我们注意到，NCEP-CFSv2 模式对 11 月西伯利亚高压强度提前 2 个月的预测却低于提前 6 个月的预测能力，这说明气候模式对季节内尺度的预测更为复杂和不稳定。因此，在未来工作中，除了季节平均的预测外，将进一步深入研究西伯利亚高压季内变化的物理过程、可预测来源，进而提高西伯利亚高压的季节平均和季内的预测水平。

参考文献 (Reference)

- Ao J, Sun J. 2015. Connection between November snow cover over Eastern Europe and winter precipitation over East Asia [J]. *Int. J. Climatol.*, 36(5): 2396-2404.
- Barnett T P, Dümenil L, Schlese U, et al. 1988. The effect of Eurasian snow cover on global climate [J]. *Science*, 239(4839): 504-507.
- Chang C P, Lu M M. 2012. Intraseasonal predictability of Siberian High and East Asian winter monsoon and its interdecadal variability [J]. *J. Climate*, 25(5): 1773-1778.
- 陈红. 2017. 欧亚大陆积雪对我国春季气候可预报性影响 [J]. *大气科学*, 41(4): 727-738. Chen Hong. 2017. Impact of Eurasian snow condition on climate predictability over China by a global climate mode [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(4): 727-738.
- Chen X, Luo D, Feldstein S B, et al. 2018. Impact of winter Ural Blocking on Arctic sea ice: short-time variability [J]. *J. Climate*, 31(6): 2267-2282.
- 陈海山, 孙照渤. 2003. 欧亚积雪异常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.
- Cohen J. 1994. Snow cover and climate [J]. *Weather*, 49(5): 150-156.
- Cohen J, Rind D. 1991. The effect of snow cover on the climate [J]. *J. Climate*, 4(7): 689-706.

- Cohen J, Saito K, Entekhabi D. 2001. The role of the Siberian High in northern hemisphere climate variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28(2): 299-302.
- Cohen J, Fletcher C. 2007. Improved skill of northern hemisphere winter surface temperature predictions based on land-atmosphere fall anomalies [J]. *J. Climate*, 20(16): 4118-4132.
- Ding Y, Krishnamurti T N. 1987. Heat budget of the Siberian High and winter monsoon [J]. *Mon. Weather Rev.*, 115(10): 2428-2449.
- Ding Y. 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian High and its relations to cold surge in East Asia [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44(1-4): 281-292.
- 丁一汇, 温市耕, 李运锦. 1991. 冬季西利亚高压动力结构的研究 [J]. *气象学报*, 49(4): 430-439. Ding Yihui, Wen Shigeng, Li Yunjin. 1991. A study of dynamic structure of the Siberian High in winter [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 49(4): 430-439.
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究 [J]. *地理学报*, 54(2): 125-133. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1999. Long-term variability of the Siberian High and the possible connection to global warming [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 54(2): 125-133.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28(10): 2073-2076.
- Gong D Y, Ho C H. 2002. The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 72(1-2): 1-9.

- Gong G, Entekhabi D, Cohen J, et al. 2004. Sensitivity of atmospheric response to modeled snow anomaly characteristics [J]. *J. Geophys. Res.*, 109(D6). doi: 10.1029/2003JD004160
- 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 2002. 西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析 [J]. *高原气象*, 21(1): 7-13. Gong Daoyi, Zhu Jinhong, Wang Shaowu. 2002. The influence of Siberian High on large-scale climate over continental Asia [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21(2): 7-13.
- 葛旭阳, 周霞琼. 2001. 欧亚大陆雪盖月际变化特征及其与我国气候异常的关系初探 [J]. *大气科学学报*, 24(2): 281-285. Ge Xuyang, Zhou Xiqiong. 2001. Eurasian snow cover intermonthly features and its relations to China climate [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 24(2): 281-285.
- Hasanean H M, Almazroui M, Jones P D, et al. 2013. Siberian High variability and its teleconnections with tropical circulations and surface air temperature over Saudi Arabia [J]. *Climate Dyn.*, 41(7-8): 2003-2018.
- Iqbal M J, Riaz S M F, Ghauri B M K. 2013. Impact of Siberian High on rainfall variability over northern part of Indo-Pak region [J]. *Arab J. Geosci.*, 6(8): 3087-3092.
- Jaiser R, Dethloff K, Handorf D. 2013. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes [J]. *Tellus A Dyn. Meteorol. Oceanogr.*, 65A: 19375. doi: 10.3402/tellusa.v65i0.19375
- Jia B, Wang Y, Yao Y, et al. 2015. A new indicator on the impact of large-scale circulation on wintertime particulate matter pollution over China [J]. *Atmos.*

Chem. Phys., 15(20): 11919-11929.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437-441.

李勇, 陆日宇, 何金海. 2007. 影响我国冬季温度的若干气候因子 [J]. 大气科学, 31(3): 505-514. Li Yong, Lu Riyu, He Jinhai. 2007. Several climate factors influencing the winter temperature over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(3): 505-514.

Li F, Orsolini Y J, Keenlyside N, et al. 2019. Impact of snow initialization in subseasonal-to-seasonal winter forecasts with the Norwegian climate prediction model [J]. J. Geophys. Res: Atmos., 124(17-18): 10033-10048.

Lei S, Wu R. 2017. Processes for occurrence of strong cold events over eastern China [J]. J. Climate, 30(22): 9247-9266.

Lei S, Wu R, Yang J. 2018. Relative contributions of synoptic and intraseasonal variations to strong cold events over eastern China [J]. Climate Dyn. 50 (11-12): 4619-4634.

李栋梁, 蓝柳茹. 2017. 西伯利亚高压强度与北大西洋海温异常的关系 [J]. 大气科学学报, 40(1): 13-24. Li Dongliang, Lan Liuru. 2017. Relationship between the intensity of the Siberian High and the SST anomaly in the North Atlantic [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 40(1): 13-24.

Lorenz. 1969. The predictability of a flow which possesses many scales of motion [J]. Tellus, 21(3): 289-307.

Lü Z Z, He S, Li F, et al. 2019. Impacts of the autumn Arctic Sea Ice on the

- intraseasonal reversal of the winter Siberian High [J]. *Adv Atmos Sci*, 36(2): 173-188.
- Maclachlan C, Arribas A, Peterson K A, et al. 2015. Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): A high-resolution seasonal forecast system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(689): 1072-1084.
- 麻巨慧, 王盘兴, 李丽平等. 2009. “0801 南方雪灾”与同期蒙古高压中期活动的关系 [J]. *大气科学学报*, 32(5): 652-660. Ma Juhui, Wang Panxing, Li liping, et al. 2009. Contemporaneous relationship between "0801 snow storm over southern China" and medium-term activities of Mongolian High [J]. *Trans Atmos Sci (in Chinese)*, 32(5): 652-660.
- Panagiotopoulos F, Shahgedanova M, Hannachi A, et al. 2005. Observed trends and teleconnections of the Siberian High: a recently declining center of action [J]. *J. Climate*, 18(9): 1411-1422.
- Park T W, Ho C H, Yang S. 2011. Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over East Asia [J]. *J. Climate*, 24(1): 68-83.
- Parkinson C L. 1990. The impact of the Siberian High and Aleutian Low on the sea-ice cover of the sea of Okhotsk [J]. *Annals of Glaciology*, 14: 226-229.
- Peng P, Kumar A, Wang W. 2011. An analysis of seasonal predictability in coupled model forecasts [J]. *Climate Dyn.*, 36(3-4): 637-648.
- Peng S, Robinson W A. 2001. Relationships between atmospheric internal variability and the responses to an extratropical SST anomaly [J]. *J. Climate*, 14(13): 2943-2959.

- Phelps M W, Kumar A, O'Brien J J. 2004. Potential predictability in the NCEP CPC dynamical seasonal forecast system [J]. *J. Climate*, 17(19): 3775-3785.
- Riaz S M F, Iqbal M J. 2017. Singular value decomposition analysis for examining the impact of Siberian High on winter precipitation variability over South Asia [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 130: 1189-1194.
- Robinson D A, Kukla G. 2010. Albedo of a dissipating snow cover [J]. *J. Appl. Meteor*, 23(12): 1626-1634.
- 施能, 邓自旺, 潘蔚娟等 2000. 北半球海平面气压场的气候基本态与气候变率特征及其影响的初步研究 [J]. *大气科学*, 24(6): 795-803. Shi Neng, Deng Ziwan, Pan Weijuan, et al. 2000. A preliminary study of Northern winter SLP climate base state and its climate variability and effect [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 24(6): 795-803.
- Saha S, Moorthi S, Wu X R, et al. 2014. The NCEP climate forecast system version 2 [J]. *J. Climate*, 27(6): 2185-2208.
- Sahsamanoglou H S, Makrogiannis T J, Kallimopoulos P P. 1991. Some aspects of the basic characteristics of the Siberian anticyclone [J]. *Int. J. Climatol.*, 11(8): 827-839.
- Tian B, Fan K, Yang H. 2017. East Asian winter monsoon forecasting schemes based on the NCEP's climate forecast system [J]. *Climate Dyn.*, 51(7-8): 2793-2805.
- Wagner A J. 1973. The Influence of average snow depth on monthly mean temperature Anomaly [J]. *Mon. Weather Rev.*, 101(8): 624-626.
- 王遵娅, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. *大气科学*,

- 30(6): 1068-1076. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(6): 1068-1076.
- Wu B Y, Yang K, Francis J A. 2017. A cold event in Asia during January-February 2012 and its possible association with Arctic sea ice loss [J]. J. Climate, 30(19): 7971-7990.
- 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.
- 武炳义. 2018. 北极海冰影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题 [J]. 大气科学, 42(4): 786-805. Wu Bingyi. 2018. Progress in the impact study of Arctic sea ice loss on wintertime weather variability over East Asia and key academic disputes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(4): 786-805.
- Xu X, He S, Li F, et al. 2017. Impact of northern Eurasian snow cover in autumn on the warm Arctic-cold Eurasia pattern during the following January and its linkage to stationary planetary waves [J]. Climate Dyn., 50(5-6): 1993-2006.
- 谢安, 卢莹, 陈受钧. 1992. 冬季风爆发前西伯利亚高压的演变 [J]. 大气科学, 16(6): 677-685. Xie An, Lu Ying, Chen Shoujun. 1992. The evolution of Siberian High prior to the outbreak of cold air [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 16(6): 677-685.

- 杨莲梅, 张广兴, 杨青. 2006. 南疆盆地翻山型沙尘暴环流动力结构分析 [J]. 中国沙漠, 26(1): 71-76. Yang Lianmei, Zhang Guangxing, Yang Qing. 2006. Circulation dynamical structure of sand-dust storm caused by cold air crossing mountains in southern Xinjiang [J] (in Chinese), 26(1): 71-76.
- Yang S H, Lu R Y. 2014. Predictability of the East Asian winter monsoon indices by the coupled models of ENSEMBLES [J]. Adv Atmos Sci, 31(6): 1279-1292.
- 张刚. 2012. 欧洲多个耦合气候模式对东亚冬季气候的预测性能研究 [J]. 气象学报, 70(4): 84-97. Zhang Gang. 2012. Study of East Asian winter climate predictability by using European multi-model ensemble prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(4): 84-97.
- 张天宇, 陈海山, 孙照渤. 2007. 欧亚秋季雪盖与北半球冬季大气环流的联系 [J]. 地理学报, 62(7): 728-741. Zhang Tianyu, Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2007. The relationship between autumn-time Eurasian snow cover and winter-time NH circulation [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 62(7): 728-740.
- Zhang X, Jin L, Huang W, et al. 2016. Forcing mechanisms of orbital-scale changes in winter rainfall over northwestern China during the Holocene [J]. Holocene, 26(4): 549-555.
- 曾鼎文, 朱伟军, 马小娇等. 2015. 冬季北大西洋风暴轴的变化及其对西伯利亚高压的影响[J]. 大气科学学报, 38(2): 232-240. Zeng Dingwen, Zhu Weijun, Ma Xiaojiao, et al. 2015. North Atlantic storm track and its influence on Siberian High in winter [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 38(2): 232-240.