

春季土壤温度在中国东北盛夏降水年际分量预测中的关键作用

杨占梅^{1,4}, 张井勇^{2,3}, 杜振彩²

¹湖南工商大学资源环境学院, 湖南长沙, 410205

²中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

³中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

⁴碳中和与智慧能源湖南省重点实验室, 湖南长沙, 410205

摘要: 全球变暖背景下, 中国东北夏季洪涝干旱灾害发生频繁, 对人类和自然系统造成严重影响。但是, 目前东北夏季降水预测水平较低, 远不能满足防灾、减灾的需求。中国东北汛期降水主要集中在盛夏(7-8月), 其年际变率与年代际变率相当。本文聚焦在分析春季土壤温度在中国东北盛夏降水年际分量预测中的作用。研究发现中国东北盛夏降水年际分量与欧洲中东部春季土壤温度年际分量存在显著负相关关系、与青藏高原东部和西亚东北部春季土壤温度年际分量存在显著正相关关系。春季关键区土壤温度异常对应下游地区盛夏土壤温度异常, 从而引起东亚盛夏大气环流异常, 高空西风急流偏强偏北、西太平洋副热带高压偏强偏北, 进而造成中国东北水汽辐合与上升增强, 引起中国东北盛夏降水增强。进一步采用欧洲中东部、青藏高原东部和西亚东北部春季土壤温度年际分量建立了中国东北盛夏降水年际分量的季节预测模型, 1979-2021年留一法交叉检验时间相关系数在GLDAS-Noah、ERA5和CRA3套数据中最高可达0.64, 2012-2021年的后报试验时间相关系数在3套数据中最高可达0.78, 表明春季土壤温度在中国东北盛夏降水年际分量预测中起到关键作用。研究成果能够为提高中国东北夏季降水预测提供科学基础, 并易于应用到实际预测。

关键词: 盛夏降水异常, 春季土壤温度, 年际分量, 季节预测模型

作者简介 杨占梅, 女, 1992年12月出生, 博士, 主要从事季节预测研究。Email: yangzhanmei16@163.com

通讯作者 杨占梅 Email: yangzhanmei16@163.com 收稿日期: 2022年7月22日

资助项目 国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101), 国家重点研发计划(2018YFA0606501)

The critical role of spring soil temperature in predicting interannual variability of midsummer precipitation over northeastern China

Zhanmei Yang^{1,4}, Jingyong Zhang^{2,3}, Zhencai Du²

¹School of Resources and Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha, 410205, China

²Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

³ College of Earth and Planetary sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁴Hunan Provincial Key Laboratory of Carbon Neutrality and Intelligent Energy, Changsha, 410205, China

Abstract: Under the background of global warming, floods and droughts occur frequently in summer over northeastern China, leading to severe consequence to human and natural systems. However, the current seasonal prediction of summer precipitation over northeastern China is still low, far from meeting the needs of disaster prevention and reduction. The precipitation during the rainy season over northeastern China is mainly concentrated in midsummer (July and August), and its interannual variability is comparable to that of interdecadal variability. This study focuses on analyzing the predictive role of interannual variability of soil temperature in the interannual variability of midsummer precipitation over northeastern China. This study found a significant negative correlation between the interannual variability of midsummer precipitation over northeastern China and the interannual variability of spring soil temperature over central and eastern Europe, as well as a significant positive correlation with the interannual variability of spring soil temperature over the eastern Qinghai Tibet Plateau and northeastern West Asia. The abnormal soil temperature in the key areas in spring corresponds to the abnormal soil temperature in the downstream region during the midsummer, which leads to abnormal atmospheric circulation in East Asia during the midsummer. The upper level westerly jet is strong and northward, and the western Pacific subtropical high is northward, resulting in enhanced water vapor convergence and upward movement over northeastern China, leading to increased precipitation in the midsummer. A seasonal prediction model for the interannual variability of spring soil temperature over central and eastern Europe, eastern Qinghai Tibet Plateau, and northeastern West Asia was established to predict the interannual variability of summer precipitation over northeastern China. The TCC of the Leave-One-Out Cross-Validation can reach a maximum of 0.64 and hindcast for

the period of 2012 -2021 can reach a maximum of 0.78 in the GLDAS-Noah, ERA5, and CRA data sets, indicating that spring soil temperature plays a key role in predicting the interannual component of midsummer precipitation over northeastern China. The research results can provide a scientific basis for improving the prediction of summer precipitation over northeastern China, and can be easily applied to actual prediction.

keywords: midsummer precipitation anomaly, Spring soil temperature, interannual variability, Seasonal prediction model

1 引言:

中国东北地处东亚东北部, 位于东亚夏季风的北边缘, 地域辽阔, 地形复杂, 具有独特、脆弱的气候特征 (熊开国等, 2012; 吴健等, 2017; 朱琪等, 2021)。在近几十年, 中国东北夏季干旱洪涝灾害发生愈加频繁, 造成了巨大损失 (李维京, 1999; 张庆云等, 2001; 高西宁等, 2015; Wang and He, 2015)。而在全国夏季整体降水预测能力提升的背景下, 东北地区降水预测水平依然较低, 远不能满足防灾、减灾的迫切需要 (丁一汇, 2011; 封国林等, 2015; 陈丽娟等, 2019; 赵俊虎等, 2020)。加强对中国东北夏季降水异常机理和预测的研究, 提升预测水平, 具有重要的科学意义和实际应用价值。

众多学者已经对中国东北夏季降水异常及其预测因子开展了研究, 取得了一系列重要研究进展 (沈柏竹和廉毅, 2004; 武炳义等, 2008; Sang et al., 2022)。研究指出中国东北初夏 (6 月) 与盛夏 (7-8 月) 降水具有明显不同的特征, 初夏主要受冷涡活动影响, 盛夏主要受东亚夏季风影响 (沈柏竹和廉毅, 2004; 沈柏竹等, 2011; Han et al., 2018; 胡泊等, 2018; Zhao et al., 2019)。中国东北夏季降水主要集中在盛夏, 并且盛夏降水具有明显的年际与年代际变率 (沈柏竹等, 2011; Zhao et al., 2018; 2022)。就中国东北夏季预测而言, 大多数研究关注前期海洋温度的影响, 包括北太平洋、赤道中东太平洋、北大西洋、热带印度洋等海温异常 (白人海, 2001; Gao et al., 2014; 高晶和高辉, 2015; 王永光和郑志海, 2018; Han et al., 2018; Fang et al., 2020; Timmermann et al., 2018; Zhao and Feng, 2014; 赵俊虎等, 2020)。例如, Zhao 等 (2020) 发现春季热带北印度洋、热带西太平洋和东太平洋以及北大西洋海温信号对中国东北盛夏降水年际分量的预测具有重要实用价值。但是, 慢变的陆面要素在中国东北夏季降水预测中的作用尚不清楚。

土壤温度是表征陆面状况的一个关键要素, 不仅能够影响局地 and 区域的气候, 还会通过激发罗斯贝波等影响下游地区的气候 (汤懋苍等, 1986; Xue 等, 2012; 张井勇和吴凌云, 2014)。土壤温度对气候异常具有记忆作用, 土壤层越深, 记忆时间越长, 因而对季节气候预测具有重要的潜在价值 (Hu and Feng, 2004; Yang and Zhang, 2018)。汤懋苍等 (1986, 1987, 1988) 发现中国冬季次表层土壤温度对预测后期的降水具有重要作用。周连童和黄荣辉

(2006, 2008) 发现中国西北干旱半干旱区的感热与夏季东北地区和长江中下游地区降水呈正相关, 而与华北和西南地区呈负相关。Xue 等 (2018) 发现东亚青藏高原的土壤温度会引起下游地区长江流域的降水异常, 对 2003 年夏季长江以南的严重干旱来说, 上游地区 5 月份土壤温度异常造成的降水异常和海表温度异常造成降水异常大小相当。2018 年, 全球能量和水循环/全球大气系统研究中心发起了一项“地表温度和雪盖对次季节到季节预测的影响”(LS4P) 的国际计划, 旨在探究高海拔地区的土壤温度的非局地影响, 从而提高下游地区降水的预测水平 (Xue 等, 2021)。同时, Zhang 等 (2018) 和 Yang 等 (2019, 2022) 发现了前期中亚土壤温度对下游的中国北部夏季极端高温具有重要影响。

基于以上认识, 本文聚焦在春季土壤温度对中国东北盛夏降水年际分量季节预测的作用开展研究。首先寻找对中国东北盛夏降水年际分量影响显著的春季土壤温度关键区, 之后分析和讨论前期土壤温度影响盛夏降水的物理机制, 进而利用关键区春季土壤温度构建中国东北盛夏降水年际分量的季节预测模型, 最后对建立的预测模型的预测能力进行评估。

2 数据与方法:

本研究中, 中国东北是指 43°N 以北的中国区域, 1979-2021 年降水数据来自英国东安格利亚 (East Anglia) 大学提供的 CRU-TS 4.06 全球高分辨率 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 月平均降水数据集 (Harris et al., 2022)。1979-2021 年土壤温度来自 3 个数据集: 1. 由全球陆地数据同化系统 (GLDAS) 版本 2 驱动的 Noah 陆面模式 $0.4 \sim 1\text{ m}$ 的月平均土壤温度 (分辨率: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$); 2. ERA5-Land 再分析资料的 $0.83 \sim 1.38\text{ m}$ 月平均土壤温度 (分辨率: $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$); 3. 中国气象局提供的 CRA/Land 再分析资料的月平均 1 m 土壤温度 (分辨率: $1^{\circ} \times 1^{\circ}$)。

http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/NAFP_CRA40_FTM_MON_NC.html [2022-11-23]) (Rodell et al., 2004; Berrisford et al., 2009; Muñoz Sabater, 2019; Beaudoin and Rodell, 2019)。1979-2021 年气温、垂直运动、风场、位势高度场以及整层水汽通量和水汽通量散度数据来自 ERA5 再分析资料中的月平均集, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ (Hersbach et al., 2023a, 2003b)。

本文首先利用经验正交函数分解方法（Empirical Orthogonal Function，EOF）对中国北方盛夏降水进行分析，并依据 EOF 空间分布模态确定本文的中国东北区域范围。紧接着利用傅里叶变换方法提取周期在 9 年以下的年际变化分量进行中国东北盛夏降雨的分析与预测，之后利用相关分析方法确定与中国东北盛夏降水年际分量显著相关的春季土壤温度关键区，以及利用相关分析方法揭示春季土壤温度与夏季中国东北盛夏降水的物理联系，相关系数的显著性检验采用 Student's t-test 检验，最后利用留一法交叉检验和后报试验测试预测模型，并利用时间相关系数(TCC)评估模型的预测技巧。本文在预测因子的确定、物理解释及预测模型的搭建过程中所有物理量均使用其周期小于 9 年的年际分量。

交叉验证被广泛用于预测模型的检验，即在给定的预测因子和预测量中，选择大部分样本建立模型，建立模型预报剩下的样本，这样可以更好检验预报模型的预报能力（杜良敏等，2011；史恒斌等，2017；邬定荣等，2019）。在本研究中，留一法交叉检验为在 1979-2021 年中选择一年作为预测年，利用剩余 42 年的信息建立预测年的预报方程。例如，预测 2005 年中国东北盛夏降水，即需利用 1979-2004 年以及 2006-2021 年的春季关键区土壤温度和中国东北盛夏降水信息建立线性回归方程，得到斜率和截距，把 2005 年春季关键区土壤温度年际分量代入方程，即可得到 2005 年盛夏中国东北降水预测值。预测年依次选择 1979-2021 年的不同年份即可获得留一法交叉检验的预测序列。后报试验在此研究中为利用 1979-2011 年共 33 年的春季关键区土壤温度与盛夏中国东北降水量信息建立线性回归方程，得到斜率和截距，将 2012-2021 年春季关键区土壤温度信息带入到预测模型中得到 2012-2021 年中国东北盛夏降水量。

3 结果分析：

3.1 中国东北盛夏降水年际分量与春季土壤温度年际分量的相关关系

1979-2021 年中国北方盛夏（7 月和 8 月）降水的 EOF 分析第一模态显示北方盛夏降水呈现区域一致性，即北方一致降水偏多或偏少，第二模态显示在大致 43°N 以北和 43°N 以南的中国北方区域呈现降水的反向分布，即大致 43°N 以北的中国北方盛夏降水具有和其他北方区域不一致的分布特征，据此在本研究中将 43°N 以北的中国北方定义为中国东北盛夏降水研究范围（图 1）。

图 2 展示了 1979-2021 年中国东北盛夏（7 月和 8 月）降水年际分量与春季（3 月、4 月和 5 月）土壤温度年际分量的相关系数的空间分布，其中 3 套土壤温度数据均在欧洲中东部（48 °-58 °N, 35 °-68°E）呈现显著负相关，青藏高原东部（25 °-38 °N, 100 °-108 °E）和西亚东北部（26°-35 °N, 53 °-67°E）呈现显著正相关。进一步计算 GLDAS-Noah, ERA5 和 CRA 中 3 个区域平均土壤温度与盛夏降水两者年际分量之间的相关系数（表 1）。春季欧洲中东部土壤温度与盛夏中国东北降水两者年际分量之间的相关系数分别为：-0.51, -0.52, -0.46，均在 1%水平上显著；春季青藏高原东部土壤温度与盛夏中国东北降水两者年际分量之间的相关系数分别为：0.62, 0.60, 0.63，均在 1%水平上显著；春季西亚东北部土壤温度与盛夏中国东北降水两者年际分量之间的相关系数分别为：0.62, 0.43, 0.50，均在 1%水平上显著。因此将欧洲中东部（48 °-58 °N, 35 °-68°E）、青藏高原东部（25 °-38 °N, 100 °-108 °E）和西亚东北部（26°-35 °N, 53 °-67°E）定义为本研究中的春季土壤温度的关键区域。

3.2 春季土壤温度年际分量影响中国盛夏季降水年际分量的物理原因

图 3 显示 3 个关键区域的春季土壤温度异常代表了春季更广范围的土壤温度异常，到 7、8 月份，土壤温度异常虽然会在关键区局地维持，但是更强的土壤温度异常信号出现在关键区域的下游方向。欧洲中东部春季土壤温度异常对应盛夏下游地区土壤温度异常，其中包括蒙古-中国东北的西侧土壤温度异常。青藏高原东部春季土壤温度异常对应盛夏下游地区土壤温度异常，包括中国华北地区土壤温度异常。西亚东北部春季土壤温度异常对应盛夏下游地区土壤温度异常包括青藏高原、中国中东部以及日本岛土壤温度异常。受土壤温度异常影响，空气温度异常从春季到盛夏也向下游移动。在春季，由土壤温度异常导致的从地表至 200hPa 大气层的空气温度异常主要表现在关键区局地上空，在盛夏，大气温度异常会向下游移动（图 4）。欧洲中东部春季土壤温度异常冷对应盛夏下游地区 43°N 以北蒙古-中国东北大气温度异常冷，青藏高原东部春季土壤温度异常热对应盛夏下游地区 43° N 以南的华北地区的大气温度异常热，西亚东北部春季土壤温度异常热对应盛夏下游地区 43° N 以南地区包括青藏高原北侧、中国中东部以及日本岛上空大气温度异常上升并且整个中国东北地区也对应大气温度异常上升。

盛夏东亚高空西风急流轴出口位于 43°N 左右，欧洲中东部春季土壤温度异常冷导致盛夏急流北侧温度偏冷，西亚东北部春季土壤温度异常热导致盛夏急流南侧温度偏高，两者均会加强急流两侧温度差，导致盛夏急流偏强。西亚东北部春季土壤温度异常热对应盛夏下游地区 43°N 以南地区以及中国东北上空温度偏高，致使盛夏急流偏北，偏强（图 5）。

图 6a 和 6b 从垂直方向展示了欧洲中东部春季土壤温度异常冷和青藏高原东部春季土壤温度异常热时，盛夏中国东北从地表到 200hPa 层大气温度的异常情况，两者均对应中低层温度的冷异常。图 5a 和图 5b 显示两者对应高层急流偏强，故从热力角度和动力角度欧洲中东部春季土壤温度冷异常和青藏高原东部春季土壤温度热异常均会加强中国东北中高层位势高度的负异常（图 7 a- d），对应整层显著的上升运动（图 6 a- b）。图 6c 显示西亚东北部春季土壤温度异常热时，盛夏中国东北上空大气温度为热异常，中高层位势高度为正异常（图 7 e-f），加之急流轴北移，故对应的较弱的上升运动（图 6c）。由图 7f 看出，春季西亚东北部春季土壤温度偏热时，盛夏西太平洋副热带高压偏强偏北，中国东北位于其西北侧，有利于产生降水。

图 8 展示的水汽通量与图 7 环流形势相对应。中国东北北侧的反气旋带来了北太平洋的水汽与中国东北上空的气旋从日本海带来的水汽在中国东北辐合（图 8a）。中国东北上空的气旋从北太平洋带来水汽与中国华北上空的反气旋西侧从印度洋带来水汽在中国东北辐合（图 8b）。西北太平洋高压西侧把水汽由西太平洋输送到中国东北。

综上，欧洲中东部、青藏高原东部和西亚东北部春季土壤温度异常对应盛夏下游地区土壤温度异常和大气温度异常。其中，欧洲中东部、青藏高原东部春季土壤温度可以通过改变高空西风急流两侧的温度差使得急流偏强，大气温度的热力因素与急流轴出口区次级环流的动力因素造成中国东北盛夏的位势高度的负异常与上升运动，并对应中国东北水汽辐合。西亚东北部春季土壤温度对应盛夏下游地区大面积土壤温度异常，进而造成高空急流偏北偏强，致使中国东北盛夏为中高层位势高度正异常，对应副热带高压偏北偏强，中国东北对应副热带高压西北侧，高压西侧可以将西太平洋水汽输送到中国东北。

3.3 利用春季土壤温度年际分量搭建中国东北盛夏降水年际分量预测模型及检验

欧洲中东部、青藏高原东部和西亚东北部春季土壤温度年际分量与中国东北盛夏降水年际分量紧密相关。本研究利用 3 个春季关键区土壤温度建立中国东北盛夏降水年际分量季节预测模型，并采用留一法交叉检验方法和后报试验对预测模型进行测试。

春季土壤温度关键区信息作为预测因子搭建季节预测模型：

$$Y_p = a \times ST_1 + b \times ST_2 + c \times ST_3 + d$$

Y_p 是中国东北盛夏降水年际分量预测值； ST_1 、 ST_2 和 ST_3 分别是欧洲中东部、青藏高原东部和西亚东北部春季土壤温度年际分量， a 、 b 和 c 与 d 分别为相应的斜率与截距。

1979-2021 年的留一法交叉检验序列与观测序列见图 9a，使用 Noah、ERA 5 和 CRA 数据集中关键区土壤温度的预测模型 TCC 分别为 0.64, 0.64 与 0.62，即留一法交叉检验预测值可以解释观测值 41%，41%，38% 的方差。

后报试验模型预测 2012-2021 年盛夏降水（图 9b），利用 Noah、ERA 5 和 CRA 数据集中关键区土壤温度的后报试验模型分别为： $Y_p = -5.36 \times ST_1 + 11.07 \times ST_2 + 4.99 \times ST_3 - 0.63$ 、 $Y_p = -6.75 \times ST_1 + 11.37 \times ST_2 + 5.51 \times ST_3 - 0.63$ 和 $Y_p = -3.29 \times ST_1 + 11.84 \times ST_2 + 6.40 \times ST_3 - 0.70$ 。预测模型结果在 2012-2021 年的 TCC 为 0.78、0.69 和 0.77，对 1979-2021 年整个序列 TCC 为 0.71、0.72、0.70。

4 结论：

针对中国东北夏季降水预测水平低下的现实困境，本文从春季土壤温度年际分量出发寻找中国东北盛夏降水年际分量的预测关键区，通过分析发现欧洲中东部春季土壤温度年际分量与中国东北盛夏降水年际分量存在显著负相关关系、青藏高原东部和西亚东北部春季土壤温度年际分量与中国东北盛夏降水年际分量存在显著正相关关系。3 个关键区春季土壤温度异常对应盛夏下游地区土壤温度异常和大气温度异常。欧洲中东部、青藏高原东部春季土壤温度可以通过改变盛夏高空西风急流两侧的温度差使得急流偏强，大气温度的热力因素与高空西风急流出口区次级环流的动力因素造成中国东北盛夏的位势高度的负异常与上升运动，并对应中国东北水汽辐合。西亚东北部春季土壤温度对应盛夏下游地区大面积土壤温度异常，进而造成高空急流偏北偏强，对应副热带高压偏北偏强，高压西侧可以将西太平洋水汽输送到中国东北。

基于以上认识，文章采用春季关键区土壤温度信息建立了中国东北盛夏降水预测模型。通过留一法交叉检验和后报试验发现使用 3 套数据集建立的预测模型均可以较为准确预测中国东北盛夏季降水年际变化，其中 1979-2021 年留一法交叉检验 TCC 最高可达 0.64，2012-2021 年后报试验 TCC 最高可达 0.78。本文研究表明春季土壤温度状况是提高中国东北盛夏降水季节预测能力的关键先兆信号，并易于应用到实际预测。同时需指出的是，为保证更好的实际预测效果，还需要综合考虑其他预测因子的作用。

致谢：感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”提供支持。

参考文献 (References)

- [1] 白人海. 2001. 大西洋海表温度异常与中国东北地区夏季降水的关系 [J]. 海洋通报, 20(1): 23–29.
- Bai RH. 2001. The relationship between abnormal Atlantic sea surface temperature and summer precipitation in Northeast China [J] Ocean Bulletin (in Chinese), 20(1): 23–29.
- [2] Beaudoin H, Rodell M. 2019. GLDAS Noah Land Surface Model L4 monthly 1.0 x 1.0 degree V2.0, Greenbelt, Maryland, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 10.5067/QN80TO7ZHFJZ (Accessed on 22-05-2023).
- [3] Berrisford P, Dee D, Fielding K, et al. 2009. The ERA-Interim archive [M]. ECMWF, ERA Report Series 1, 16pp.
- [4] 丁一汇. 2011. 季节气候预测的进展和前景[J]. 气象科技进展, 1(3): 14–27.
- Ding YH. 2011. Progress and prospects of seasonal climate prediction [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 1(3): 14–27.
- [5] 陈丽娟, 顾薇, 龚振淞, 等. 2019. 影响 2018 年汛期气候的先兆信号及预测效果评估[J]. 气象, 45(4): 553–564.
- Chen LJ, Gu W, Gong ZS, et al. 2019. Precursory signals affecting the climate in the flood season of 2018[J]. Meteorology Monthly (in Chinese), 45(4): 553–564.
- [6] Fang YH, Lin YT, Ren HL, et al. 2020. Possible Relationships Between the Interannual Anomalies of the South-North Positions of the Northeastern China Cold Vortexes and the Sea Surface Temperatures (SSTs) During the Early Summer Periods[J]. Frontiers in Earth Science, doi:10.3389/FEART.2020.557014.
- [7] 封国林, 赵俊虎, 杨杰, 等. 2015. 中国汛期降水动力—统计预测研究[M]. 北京: 科学出版社, 330pp.
- Feng GL, Zhao JH, Yang J, et al. 2015. The Study on Dynamical and Statistical Prediction on Summer Precipitation over China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 330pp.
- [8] 杜良敏, 张培群, 周月华, 等. 2011. 基于非负矩阵和典型相关的场定量预测方法研究[J]. 高原气象, 30(01): 103–108.
- Du LN, Zhang PX, Zhou YH. 2011. Non-Negative Matrix and Canonical Correlation

Method of Field Quantitative Prediction [J], *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30(01):103-108.

[9]高晶, 高辉. 副热带东南太平洋海温对东北夏季降水的影响及可能机制[J]. *大气科学*, 2015, 39(5): 967-977. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14246.

Gao J, Gao H. Relationship between Summer Precipitation over Northeastern China and Sea Surface Temperature in the Southeastern Pacific and the Possible Underlying Mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2015, 39(5): 967-977. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14246.

[10]高西宁,王耸, 郝志新,等.2015.东北地区近 50 年降水量变化特征的分区[J].*沈阳农业大学学报*,46(03):270-276.

Gao XN, Wang S, Hao ZX, et al. 2015. Division of precipitation variation characteristics over Northeastern China in recent 50 years[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University* (in Chinese), 46(03):270-276.

[11]Gao ZT, Hu ZZ, Zhu JS, et al. 2014. Variability of summer rainfall in Northeast China and its connection with spring rainfall variability in the Huang-Huai region and Indian Ocean SST [J]. *Journal of Climate*, 27(18):7086–7101. doi:10.1175/JCLI-D-14-00217.1.

[12]Han TT, He SP, Wang HJ, et al. 2018. Enhanced influence of early spring tropical Indian Ocean SST on the following early-summer precipitation over Northeast China [J]. *Climate Dynamics*, 51(11-12):4065–4076. doi:10.1007/s00382-017-3669-y.

[13]Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2023a. ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.6860a573 (Accessed on 22-05-2023).

[14]Harris C, Jones PD, Osborn T. 2022. CRU TS4.06: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.06 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2021). NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis, <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/e0b4e1e56c1c4460b796073a31366980> (Accessed on 22-05-2023).

[15]Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2023b. ERA5 monthly averaged data on

single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.f17050d7 (Accessed on 22-05-2023).

[16]胡泊, 申红艳, 王晓娟,等.2018. 东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水特征及环流型的异同性研究[J]. 大气科学, 2018, 42(1): 109-123. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16290.

Hu P, Shen HY, Wang XJ, Feng GL.2018. A Study on Characteristics of Precipitation and Circulation Pattern in Early Summer, Midsummer and Conventional Summer in Northeast Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 42(1): 109-123. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16290.

[17]Hu Q, Feng S. 2004. A role of the soil enthalpy in land memory[J]. Journal of Climate, 17. 3633-3643.

[18]李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响[J]. 气象, 25(4): 20–25. Li WJ. 1999.

Li WJ. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. Meteorology Monthly (in Chinese), 25(4): 20–25. doi:10.3969/ j.issn.1000-0526.1999.04.004.

[19]Muñoz Sabater J. 2019. ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.68d2bb30.

[20]Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 85 (3): 381–394, doi:10.1175/BAMS-85-3-381.

[21]Sang Y, Ren H, Deng Y, et al. 2022. Impacts of late-spring North Eurasian soil moisture variation on summer rainfall anomalies in Northern East Asia [J]. Climate Dynamics, 58, 1495–1508. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05973-9>.

[22]沈柏竹, 廉毅. 2004. 青藏高原积雪与东北地区夏季冷涡雨季降水关系的初探 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 34: 112–118.

Shen BZ, Lian Y. 2004. The preliminary analysis on the relationship between snow cover over the Tibetan Plateau and summer cold vortex precipitation in Northeast China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition, in Chinese), 34: 112–118.

- 390 [23]沈柏竹, 林中达, 陆日宇, 等. 2011. 影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流
391 特征分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 41(3): 402–412.
- 392 Shen BZ, Lin ZD, Lu RY, et al., 2011. Analysis of the circulation characteristics
393 affecting the interannual variation of precipitation in early summer and
394 midsummer over Northeast China [J] Chinese Science: Earth Science (in
395 Chinese), 41(3): 402–412.
- 396 [24]史恒斌, 梁俊平, 吴璐. 2017. 匹配域投影降尺度方法在河南省夏季降水预测中
397 的应用及检验 [J]. 气象与环境科学, 40(04): 70–75. DOI:10.16765/j.cnki.1673-
398 7148.2017.04.010.
- 399 Shi HB, Liang JP, Wu L. 2017. Application and Evaluation of Pattern Projection
400 Downscaling Method in Prediction of Summer Precipitation in Henan [J].
401 Meteorology and Environmental Science (in Chinese), 40(04): 70-
402 75. DOI:10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.04.010.
- 403 [25]汤懋苍, 尹建华, 蔡洁萍. 1986. 冬季地温分布与春、夏降水相关的统计分析 [J].
404 高原气象, 01: 40–52.
- 405 Tang MC, Yin JH, Cai JP. 1986. Statistical analysis of correlation between winter
406 ground temperature distribution and spring and summer precipitation [J]. Plateau
407 Meteorology (in Chinese), 01: 40–52.
- 408 [26]汤懋苍, 张建, 王敬香, 等. 1988. 我国季平均的 0.8m 地温距平场与后一季降水场
409 的相关分析 [J]. 气象学报, 4: 99–103.
- 410 Tang MC, Zhang J, Wang JX. 1988. Correlation Analysis between the Seasonal
411 Average Ground Temperature Anomaly of 0.8m in China and the Precipitation Field
412 in the Next Season [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 4: 99–103.
- 413 [27]Timmermann A, An SI, Kug JS, et al. 2018. El Niño–Southern Oscillation
414 complexity [J]. Nature, 559, 535–545. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0252-6>.
- 415 [28]熊开国, 封国林, 黄建平, 等. 2012. 最优多因子动态配置的东北汛期降水相似
416 动力预报试验 [J]. 气象学报, 70(2): 213–221.
- 417 Xiong KG, Feng GL, Huang JP, et al. 2012. Analogues dynamical prediction of
418 monsoon precipitation in Northeast China based on dynamic and optimal
419 configuration of multiple predictors [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese),
420 70(2): 213–221. doi:10.11676/qxxb2012.021.

- 421 [29]Wang HJ, He SP. 2015. The North China/Northeastern Asia severe summer
422 drought in 2014[J]. *Journal of Climate*, 28(17): 6667–6681. doi:10.1175/JCLI-
423 D-15-0202.1.
- 424 [30]王永光, 郑志海. 2018. 2017 年汛期气候预测先兆信号的综合分析[J]. *气象*,
425 44(4): 565–571.
- 426 Wang YG, Zheng ZH. 2018. Comprehensive analysis of precursor signals for climate
427 prediction in 2017 flood season [J]. *Meteorology Monthly (in Chinese)*, 44(4):
428 565–571.
- 429 [31]武炳义, 张人禾, D'Arrigo R. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水[J].
430 *科学通报*, 53(14): 2230–2237.
- 431 Wu BY, Zhang RH, D'Arrigo R. 2008. Arctic dipole anomaly and summer rainfall in
432 Northeast China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 53(14): 2230–2237.
- 433 [32]郭定荣, 霍治国, 王培娟, 等. 2019. 陕西苹果花期机理性预报模型的适用性评价
434 [J]. *应用气象学报*, 30(05): 555–564.
- 435 Wu DR, Huo ZG, Wang PJ, et al. 2019. Evaluation on the Applicability of Rational
436 Prediction Model of Apple Florescence in Shaanxi [J]. *Journal of Applied
437 Meteorological Science (in Chinese)*. 30(05): 555–564.
- 438 [33]吴健, 李英花, 黄利亚, 等. 2017. 东北地区产水量时空分布格局及其驱动因素[J].
439 *生态学杂志*, 36(11): 3216–3223.
- 440 Wu J, Li YH, Huang LY, et al. Spatial and temporal distribution pattern of water yield
441 over Northeastern China and its driving factors [J]. *Chinese Journal of Ecology
442 (in Chinese)*, 36(11): 3216–3223.
- 443 [34]Xue Y, Diallo I, Li W, et al. 2018. Spring land surface and subsurface temperature
444 anomalies and subsequent downstream late spring-summer droughts/floods in
445 North America and East Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,
446 123, 5001–5019. <https://doi.org/10.1029/2017JD028246>.
- 447 [35]Xue Y, Yao T, Boone AA, et al. 2021. Impact of Initialized Land Surface
448 Temperature and Snowpack on Subseasonal to Seasonal Prediction Project,
449 Phase I (LS4P-I): Organization and Experimental design [J]. *Geoscientific
450 Model Development*. Discuss, <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-329>.
- 451 [36]Yang K, Zhang J. 2018. Evaluation of reanalysis datasets against observational
452 soil temperature data over China [J]. *Climate Dynamics*, 50, 317–337.
- 453 [37]Yang Z, Zhang J, Liu Y, et al. The substantial role of May soil temperature over

Central Asia for summer surface air temperature variation and prediction over
Northeastern China [J]. *Climate Dynamics*. DOI: 10.1007/s00382-022-06360-8.

[38]Yang Z, Zhang J, Wu L. Spring soil temperature as a predictor of summer
heatwaves over northwestern China [J]. *Atmospheric Science Letters*, 2019, doi:
10.1002/asl.887.

[39]张井勇,吴凌云. 2014. 陆—气相互作用对东亚气候的影响[M], 北京: 气象出版社,1-138 页.

Zhang JY, Wu LY. 2014. The influence of land-air interaction on East Asian climate
[M], Beijing: China Meteorological Press(in Chinese), pp1-138.

[40]Zhang JY, Yang Z, Wu L. Skillful prediction of hot temperature extremes over the
source region of ancient Silk Road [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6677.

[41]张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2001. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流
条件[J]. *大气科学*, 25(4): 567–576.

Zhang QY, Tao SY, Zhang SL. 2001. A study of excessively heavy rainfall in the
Songhuajiang-Nenjiang River valley in 1998[J]. *Chinese Journal of Atmospheric
Sciences (in Chinese)*, 25(4): 567–576. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.04.13.

[42]Zhao JH, Feng GL. 2014. Reconstruction of conceptual prediction model for the
three rainfall patterns in the summer of eastern China under global warming [J].
Science China Earth Sciences, 57(12): 3047–3061. doi:10.1007/s11430-014-
4930-4.

[43]赵俊虎, 熊开国, 陈丽娟. 2020. 东北夏季降水预测技巧偏低的原因探讨[J]. *大
气科学*, 44(5): 913–934.

Zhao JH, Xiong KG, Chen LJ 2020. The Causes of Low Predictive Skills of
Precipitation in Flood Season in Northeast China[J]. *Chinese Journal of
Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(5): 913–934. doi:10.3878/j.issn.1006-
9895.1911.19132.

[44]Zhao JH, Zhang H, Zuo JQ, et al., 2022. Oceanic drivers and empirical prediction
of late summer rainfall variability over Northeast China. *Climate Dynamics*,
58(3-4):861–878.

[45]Zhao JH, Zhou J, Xiong KG, et al., 2019. Relationship between tropical Indian
ocean SSTA in spring and precipitation of Northeast China in late summer. *J.
Meteor. Res.*, 33(6), 1060–1074

- [46]Zhao JH, Zhou J, Yang L, et al., 2018. Inter-annual and inter-decadal variability of early- and late-summer precipitation over northeast China and their background circulation. *International Journal of Climatology*. 38(6):2880–2888.
- [47]周连童, 黄荣辉. 2006.中国西北干旱、半干旱区春季地气温差的年代际变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响[J]. *气候与环境研究*, 11(1): 1-13. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2006.01.01.
- Zhou LT, Huang RH. 2006.Characteristics of Interdecadal Variability of the Difference Between Surface Temperature and Surface Air Temperature in Spring in Arid and Semi-Arid Region of Northwest China and Its Impact on Summer Precipitation in North China[J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11(1): 1-13. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2006.01.01.
- [48]周连童, 黄荣辉. 2008.中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系[J]. *大气科学*, 32(6): 1276-1288. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.04.
- Zhou LT, Huang RH.2008. Interdecadal Variability of Sensible Heat in Arid and Semi\Arid Regions of Northwest China and Its Relation to Summer Precipitation in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(6): 1276-1288. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.04.
- [49]朱琪,王亚楠,周旺明,等.2021.东北森林带生态脆弱性时空变化及其驱动因素[J].*生态学杂志*,40(11):3474-3482.DOI:10.13292/j.1000-4890.202111.021.
- Zhu Q, Wang YN, Zhou WM, et al. 2021. Spatial and temporal distribution pattern of water yield in Northeast China and its driving factors[J]. *Chinese Journal of Ecology(in Chinese)*, 40(11): 3474-3482.DOI:10.13292/j.1000-4890.202111.021.

517 表 1 来自 GLDAS-Noah, ERA5 and CRA-Land 3 个数据集的春季关键区域土壤温
518 度与中国东北盛夏降水在年际尺度上的相关系数。CEE 代表欧洲中东部 (48 °-
519 58 °N, 35 °-68°E), EQTP 代表青藏高原东部 (25 °-38 °N, 100 °-108 °E), NWP
520 代表西亚东北部 (26°-35 °N, 53 °-67°E), 上标*代表相关系数在 1%水平上显
521 著。

522 Table 1 the correlation coefficients on the interannual scale between spring soil
523 temperature over key areas from the GLDAS-Noah, ERA5, and CRA-Land datasets
524 and midsummer precipitation over northeastern China. CEE represents central and
525 eastern Europe (48 ° -58 ° N, 35 ° -68 ° E), EQTP represents eastern Qinghai Tibet
526 Plateau (25 ° -38 ° N, 100 ° -108 ° E), and NWP represents northeastern West Asia
527 (26 ° -35 ° N, 53 ° -67 ° E). Superscript* indicates that the correlation coefficient is
528 significant at the 1% level.

529

Cor	CEE	EQTP	NWP
GLDAS-Noah	-0.51*	0.62*	0.62*
ERA5	-0.52*	0.60*	0.43*
CRA-Land	-0.46*	0.63*	0.50*

530

531

532

533

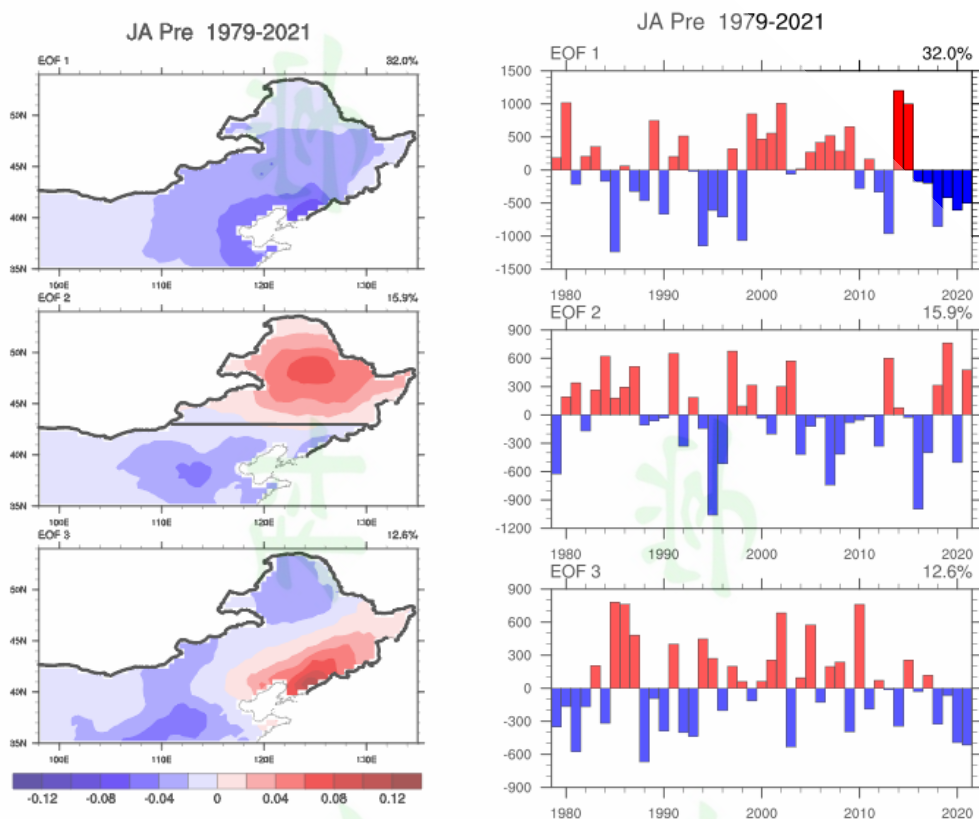


图 1 1979-2021 年中国北方盛夏（7 月和 8 月）降水量的 EOF 分析结果，左列和右列为前三模态的空间分布和时间系数。左列中间图的黑色线以北的中国区域为本研究的中国东北区域。

Fig.1 Spatial distribution (left column) and time coefficient (right column) of the first three modes of EOF analysis of midsummer (July -August) precipitation over northern China for the period of 1979-2021. The China region north of the black line in the middle of the left column is the northeastern China in this study.

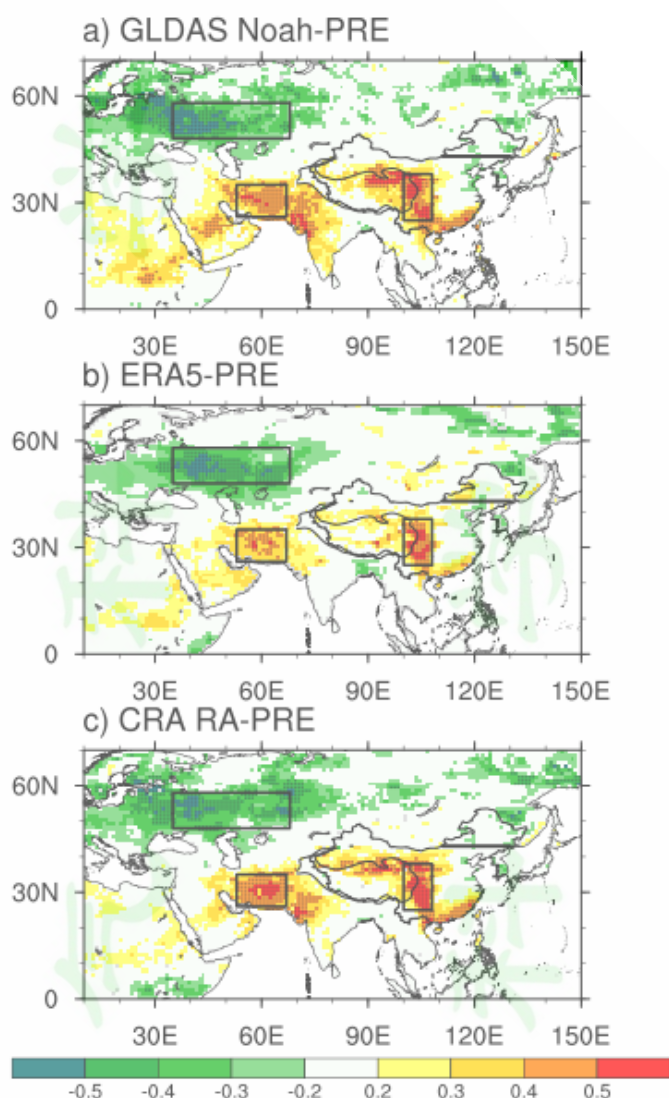


图 2 1979-2021 年中国东北盛夏(7 月和 8 月)平均降水时间序列与春季平均 (3 月、4 月和 5 月) 土壤温度在年际尺度上的相关系数分布。土壤温度数据分别来自 GLDAS-Noah (a), ERA5 (b) , CRA-Land (c)。打点区相关系数在 1%水平上显著。黑色框所示区域—欧洲中东部 (48 °-58 °N, 35 °-68°E)、青藏高原东部 (25 °-38 °N, 100 °-108 °E) 和西亚东北部 (26°-35 °N, 53 °-67°E) 是春季土壤温度的关键区域, 黑色线以北的中国区域为中国东北区域。

Fig. 2 The distribution of correlation coefficients on the interannual scale between the time series of midsummer (July -August) precipitation averaged over northeastern China and spring (March-April-May) soil temperature for the period of 1979-2021. Soil temperature are from GLDAS-Noah (a), ERA5 (b) and CRA-Land(c). The correlation coefficient is significant at the 1% level over the dotted area. The areas shown in the black boxes -central and eastern Europe (48 ° -58 ° N, 35 ° -68 ° E,

CEE), eastern Qinghai Tibet Plateau (25° - 38° N, 100° - 108° E, EQTP), and
northeastern West Asia (26° - 35° N, 53° - 67° E, NWP) are key areas for spring soil
temperature. The China region north of the black line is the northeastern China.

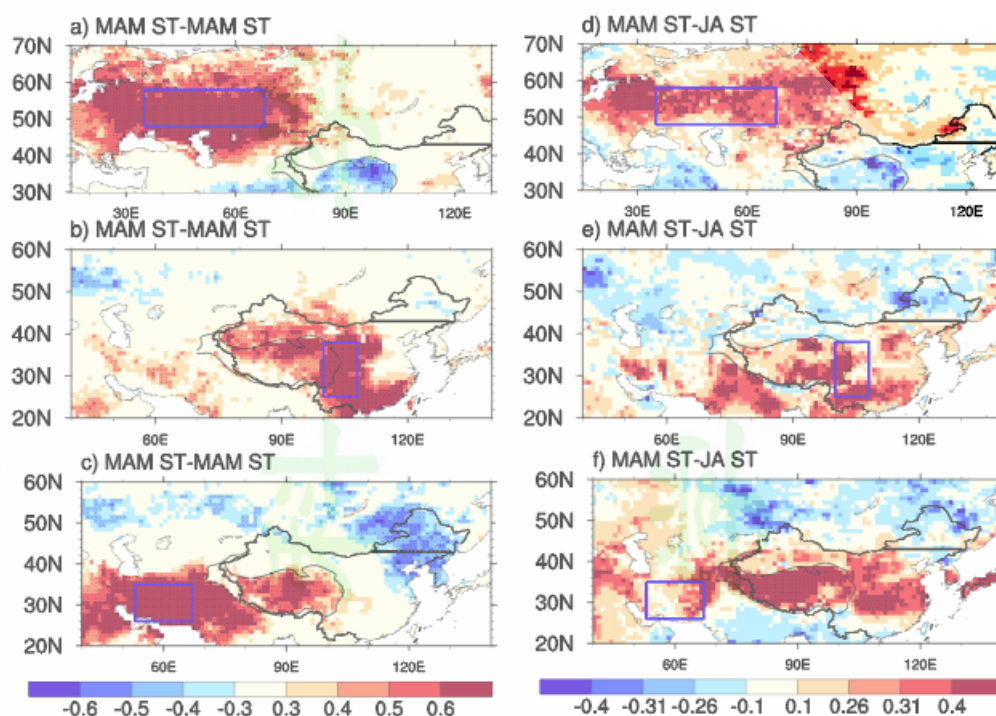


图 3 1979-2021 春季（3 月、4 月和 5 月，左列）和盛夏(7 月和 8 月，右列)土壤温度与欧洲中东部（a, d）、青藏高原东部（b, e）和西亚东北部（c, f）春季土壤温度的在年际尺度上相关关系。打点区相关系数 1%水平上显著。蓝色框所示区域—欧洲中东部（48 °-58 °N, 35 °-68°E）、青藏高原东部（25 °-38 °N, 100 °-108 °E）和西亚东北部（26°-35 °N, 53 °-67°E）是春季土壤温度的关键区域，黑色线以北的中国区域为中国东北区域。

Fig. 3 The distribution of correlation coefficients on the interannual scale between spring (March-April-May, left column) and midsummer (July-August, Right column) soil temperature and spring soil temperature over central and eastern Europe (a, d), eastern Qinghai Tibet Plateau (b, e), and northeastern West Asia (c, f) for the period of 1979-2021. The correlation coefficient is significant at the 1% level over the dotted area. The areas shown in the blue boxes - central and eastern Europe (48 ° -58 ° N, 35 ° -68 ° E, CEE), eastern Qinghai Tibet Plateau (25 ° -38 ° N, 100 ° -108 ° E, EQTP), and northeastern West Asia (26 ° -35 ° N, 53 ° -67 ° E, NWP) are key areas for spring soil temperature. The China region north of the black line is the northeastern China.

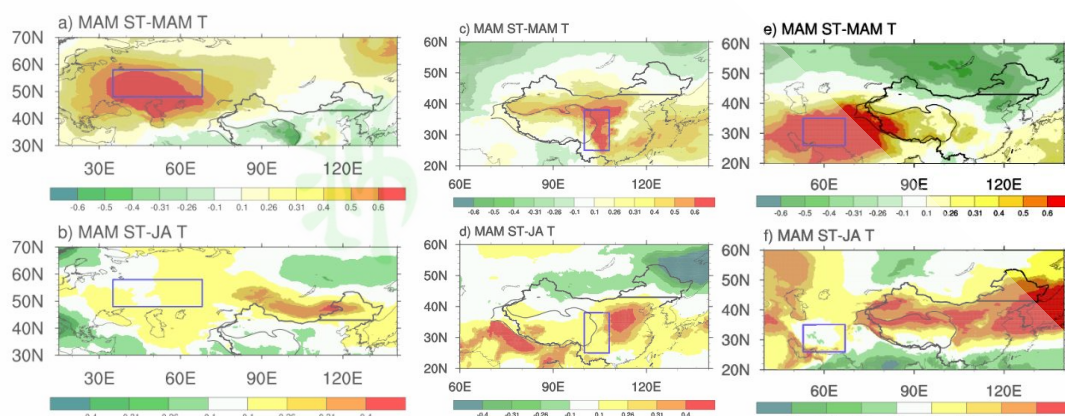


图 4 1979-2021 年欧洲中东部、青藏高原东部和西亚东北部春季土壤温度与春季（a, c, e）和盛夏（b, d, f）从地表到 200hPa 层气温的垂直积分在年际尺度上的相关关系的空间分布，打点区相关系数在 10%水平上显著。蓝色框所示区域——欧洲中东部（48 °-58 °N, 35 °-68°E）、青藏高原东部（25 °-38 °N, 100 °-108 °E）和西亚东北部（26°-35 °N, 53 °-67°E）是春季土壤温度的关键区域，黑色线以北的中国区域为中国东北区域。

Fig. 4 Spatial distribution of the correlation coefficient on the interannual scale between spring soil temperature over central and eastern Europe, eastern Qinghai Tibet Plateau and northeastern West Asia and vertical integration of spring (a, c, e) and midsummer (b, d, f) temperature from the surface to the 200 hPa layer for the period of 1979-2021. The correlation coefficient is significant at the 10% level over the dotted area. The areas shown in the blue boxes - central and eastern Europe (48 ° - 58 ° N, 35 ° -68 ° E, CEE), eastern Qinghai Tibet Plateau (25 ° -38 ° N, 100 ° -108 ° E, EQTP), and northeastern West Asia (26 ° -35 ° N, 53 ° -67 ° E, NWP) are key areas for spring soil temperature. The China region north of the black line is the northeastern China.

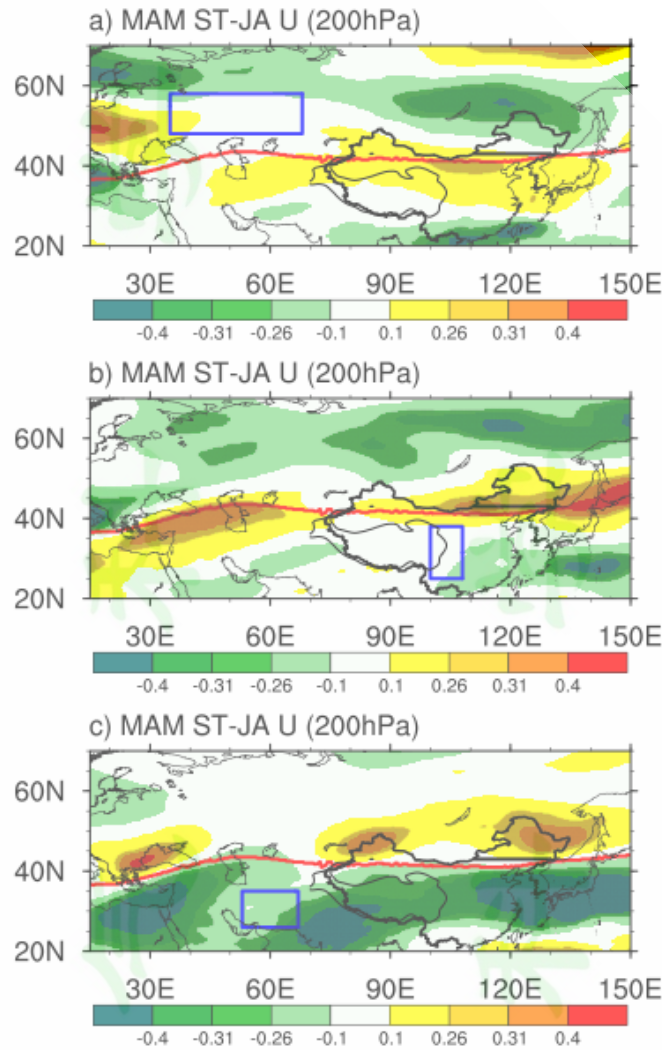


图 5 1979-2021 年欧洲中东部 (*-1, a)、青藏高原东部 (b) 和西亚东北部 (c) 春季土壤温度与盛夏 200hPa 纬向风在年际尺度上的相关关系分布，打点区相关系数在 10%水平上显著。蓝色框所示区域—欧洲中东部 (48 °-58 °N, 35 °-68°E)、青藏高原东部 (25 °-38 °N, 100 °-108 °E) 和西亚东北部 (26°-35 °N, 53 °-67°E) 是春季土壤温度的关键区域，黑色线以北的中国区域为中国东北区域。红色线为 200hPa 东亚高空西风急流气轴位置。

Fig. 5 Spatial distribution of the correlation coefficient on the interannual scale between spring soil temperature over central and eastern Europe (*-1, a), eastern Qinghai Tibet Plateau (b) and northeastern West Asia (c) and midsummer zonal wind at 200 hPa for the period of 1979-2021. The correlation coefficient is significant at the 10% level over the dotted area. The areas shown in the blue boxes - central and eastern Europe (48 ° -58 ° N, 35 ° -68 ° E, CEE), eastern Qinghai Tibet Plateau (25 ° -

38 ° N, 100 ° -108 ° E, EQTP), and northeastern West Asia (26 ° -35 ° N, 53 ° -67 ° E,
NWP) are key areas for spring soil temperature. The China region north of the black
line is the northeastern China. The red line is the position of the axis of the East Asian
westerly jet at 200 hPa.

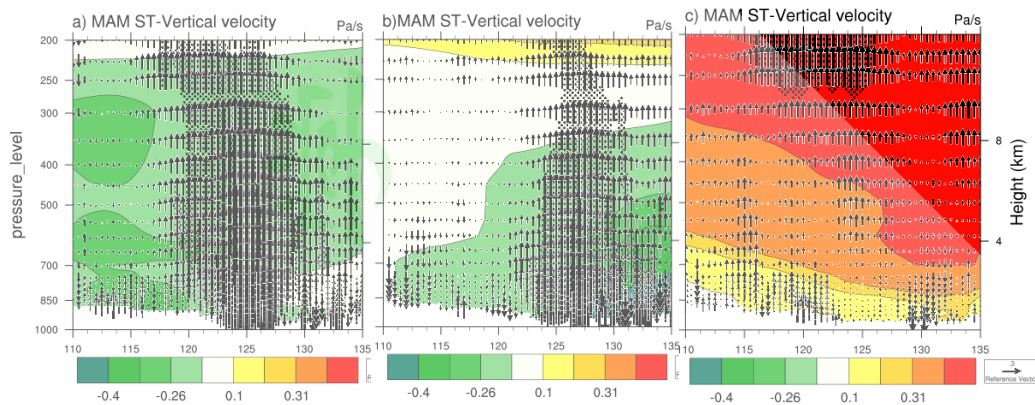


图 6 1979-2021 年欧洲中东部 (a, *-1)、青藏高原东部 (b) 和西亚东北部 (c) 春季土壤温度与盛夏 43°N -54°N 纬向平均垂直运动 (箭头) 和气温 (颜色) 在年际尺度上的相关关系分布, 打点区代表土壤温度与垂直运动的相关系数在 10%水平上显著。

Fig.6 Spatial distribution of the correlation coefficient on the interannual scale between spring soil temperature over central and eastern Europe (a, *-1), eastern Qinghai Tibet Plateau (b) and northeastern West Asia (c) and midsummer vertical velocity (vector) and air temperature (color) averaged in 39 °N -54 °N latitudinal direction for the period of 1979-2021. The correlation coefficient between soil temperature and vertical velocity is significant at the 10% level over the dotted area.

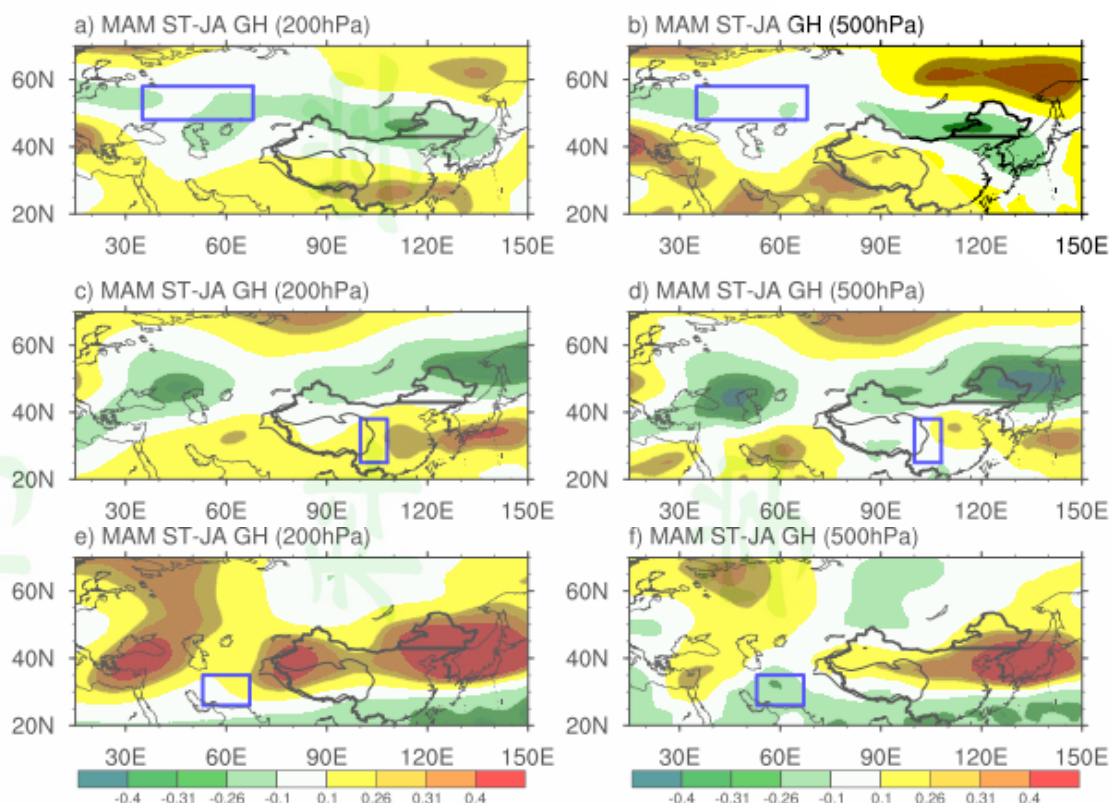


图 7 1979-2021 年欧洲中东部 (*-1)、青藏高原东部和西亚东北部春季土壤温度与盛夏 200 hPa (a, c, e) 和 500 hPa (b, d, f) 位势高度场的在年际尺度上相关关系分布，打点区相关系数在 10% 水平上显著。蓝色框所示区域—欧洲中东部 (48 °-58 °N, 35 °-68 °E)、青藏高原东部 (25 °-38 °N, 100 °-108 °E) 和西亚东北部 (26 °-35 °N, 53 °-67 °E) 是春季土壤温度的关键区域，黑色线以北的中国区域为中国东北区域。

Fig. 7 Spatial distribution of the correlation coefficient on the interannual scale between spring soil temperature over central and eastern Europe (*-1), eastern Qinghai Tibet Plateau and northeastern West Asia and midsummer geopotential height at 200 hPa (a, c, e) and 500 hPa (b, d, f) for the period of 1979-2021. The correlation coefficient is significant at the 10% level over the dotted area. The areas shown in the blue boxes - central and eastern Europe (48 ° -58 ° N, 35 ° -68 ° E, CEE), eastern Qinghai Tibet Plateau (25 ° -38 ° N, 100 ° -108 ° E, EQTP), and northeastern West Asia (26 ° -35 ° N, 53 ° -67 ° E, NWP) are key areas for spring soil temperature. The China region north of the black line is the northeastern China.

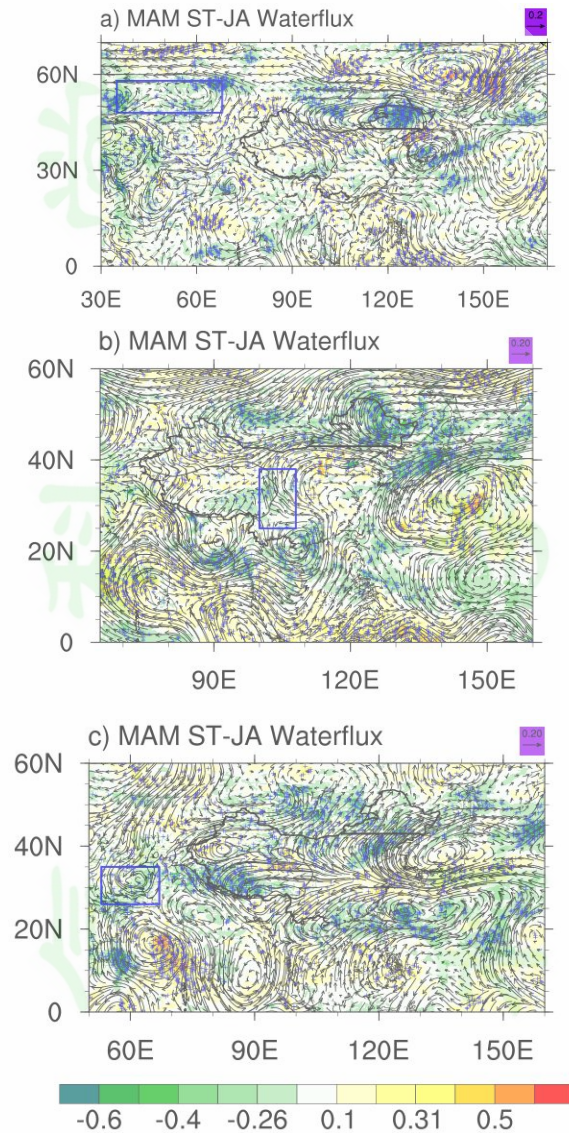


图 8 1979-2021 年欧洲中东部(*-1, a)、青藏高原东部 (b) 和西亚东北部 (c) 春季土壤温度与盛夏整层水汽通量垂直积分 (箭头) 与整层水汽通量散度垂直积分 (颜色) 在年际尺度上的相关关系的空间分布, 蓝色“+”区代表土壤温度与水汽通量散度的相关系数在 10% 水平上显著。蓝色框所示区域—欧洲中东部 (48 °-58 °N, 35 °-68°E)、青藏高原东部 (25 °-38 °N, 100 °-108 °E) 和西亚东北部 (26°-35 °N, 53 °-67°E) 是春季土壤温度的关键区域, 黑色线以北的中国区域为中国东北区域。

Fig. 8 Spatial distribution of the correlation coefficient on the interannual scale between spring soil temperature over central and eastern Europe (*-1, a), eastern Qinghai Tibet Plateau (b) and northeastern West Asia (c) and the vertical integration of water vapor flux (vector) and water vapor flux divergence (color) in midsummer

for the period of 1979-2021, the blue "+" area represents a significant correlation coefficient between soil temperature and water vapor flux divergence at the 10% level.

The areas shown in the blue boxes - central and eastern Europe (48 ° -58 ° N, 35 ° - 68 ° E, CEE), eastern Qinghai Tibet Plateau (25 ° -38 ° N, 100 ° -108 ° E, EQTP), and northeastern West Asia (26 ° -35 ° N, 53 ° -67 ° E, NWP) are key areas for spring soil temperature. The China region north of the black line is the northeastern China.

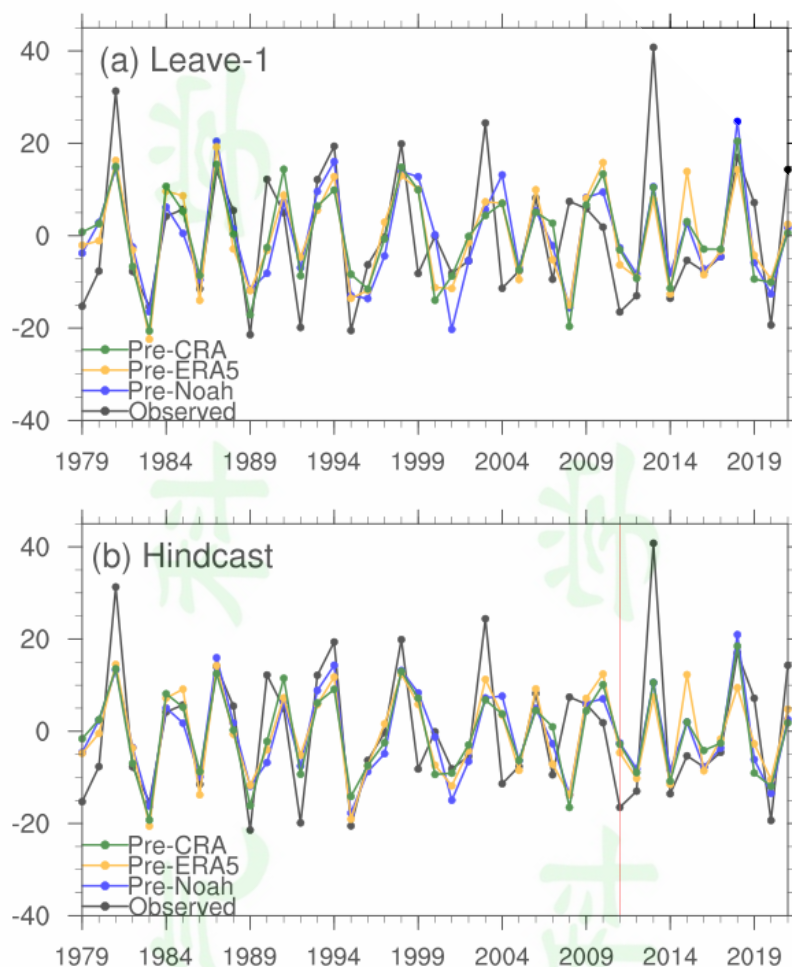


图 9 1979-2021 年中国东北盛夏(7 月和 8 月) 降水年际分量观测和预测序列 (单位: mm)。预测结果为使用 GLDAS-Noah, ERA5 和 CRA 数据集中欧洲中东部 (48 °-58 °N, 35 °-68°E)、青藏高原东部 (25 °-38 °N, 100 °-108 °E) 和西亚东北部 (26°-35 °N, 53 °-67°E) 春季土壤温度年际分量作为预测因子的留一法交叉检验 (a) 和后报试验 (b) 的结果。

Fig. 9 Time series of observed and predicted midsummer (July-August) precipitation interannual variability averaged over northeastern China for the period of 1979-2021 (Unit: mm). The predictions are the results of Leave-One-Out Cross-Validation(a) and hindcast (b) using the spring soil temperature interannual variability over central and eastern Europe (48 ° -58 ° N, 35 ° -68 ° E, CEE), eastern Qinghai Tibet Plateau (25 ° -38 ° N, 100 ° -108 ° E, EQTP), and northeastern West Asia (26 ° -35 ° N, 53 ° -67 ° E, NWP) as the predictors from GLDAS-Noah, ERA5 and CRA-Land datasets.