第50卷 第9期
2025年9月

地球科学 Earth Science
http://www.earth-science.net

Vol. 50 No. 9
Sept. 2025

https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.015

我国西北暖湿化的年代际预测技巧及其来源评估

魏 韵,邱惠宇

中国地质大学(武汉)环境学院,湖北武汉 430078

摘 要: 基于1962—2020年的观测和第六次耦合模式比较计划(CMIP6)中年代际气候预测计划(DCPP)的多模式年代际回报和历史模拟试验数据,本文主要评估了DCPP多模式对我国西北地区近60年来夏季显著暖湿化的年代际预测技巧及其主要来源.对西北变暖的多模式年代际预测技巧(与观测的相关系数)都在0.9以上,较高的预测技巧主要来源于外强迫分量,其贡献可达80%~99%;而受初始化与外强迫的共同作用,对西北变湿的多模式年代际预测技巧存在较大差异,其中多模式初始化分量对预测技巧的贡献可分别达到19%~94%.这表明,对我国西北地区未来短期温度和降水变化的订正预估不仅需要重点考虑外强迫的影响,更需要考虑初始化对降水的影响.

关键词: 西北暖湿化;年代际气候预测;模式评估;外强迫;初始化;干旱区;气候变化.

中图分类号: P467 **文章编号:** 1000—2383(2025)09—3321—19 **收稿日期:** 2024—10—14

Assessment of the Skill and Source of Decadal Climate Prediction of Warming and Humidification in Northwest China

Wei Yun, Qiu Huiyu

School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, *China*

Abstract: Based on observational data from 1962 to 2020 and the multi-model decadal hindcast and historical simulation experiments from the Decadal Climate Prediction Project (DCPP) under the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6), this paper primarily evaluates the interdecadal predictive skill of the significant summer warming and wetting trends in northwestern China over the past 60 years and its main sources. The interdecadal predictive skill of the multi-model ensemble for warming in Northwestern China, as indicated by the correlation coefficient with observations, is above 0.9. The high predictive skill is mainly attributed to the external forcing component, contributing between 80% and 99%. However, due to the combined influence of external forcing and initialization, there is significant variation in the predictive skill for wetting trends. The contribution of initialize to the predictive skill varies widely among models, ranging from 19% to 94%. This suggests that to achieve accurate short-term projections of future temperature and precipitation changes in Northwestern China, it is crucial to consider not only the impact of external forcing but also the influence of initialize on precipitation.

Key words: warming and wetting in Northwest China; decadal climate prediction; model assessment; external forcing; initialize; arid regions; climate change.

基金项目: 中国博士后科学基金第74批面上项目(No. 2023M743284);中国地质大学(武汉)"地大学者"人才岗位科研启动经费(No. 2022121).

作者简介: 魏韵(1995—),女,副教授,研究方向为干旱气候变化及气候预估. ORCID:0000-0002-2965-1881. E-mail: weiyun@cug.edu.cn

引用格式: 魏韵,邱惠宇,2025.我国西北暖湿化的年代际预测技巧及其来源评估.地球科学,50(9):3321—3339.

Citation: Wei Yun, Qiu Huiyu, 2025. Assessment of the Skill and Source of Decadal Climate Prediction of Warming and Humidification in Northwest China. *Earth Science*, 50(9): 3321—3339.

0 引言

我国西北地区深处欧亚大陆腹地，位于世界上最大干旱半干旱带的核心区域．较少的降水使该地区植被匮乏，生态环境脆弱（张强等，2000；张存杰等，2003；Peng *et al.*，2020）．自20世纪50年代以来，我国逐步完善了地面气象站的建设，为西北近几十年的气候变化研究提供了丰富的资料（张强等，2023）．谢金南和周嘉陵（2001）认为西北地区在20世纪下半叶整体呈暖干化，在20世纪80年代后期增暖显著（施雅风等，2002），同时伴随着西北西部降水和径流的增加（施雅风等，2003）．基于此，在21世纪初，施雅风等（2002）指出西北地区气候出现“暖湿化”的转变．具体表现为，在全球变暖背景下，西北地区近半个世纪的温度和降水随时间显著上升．从空间分布上看，西北地区的温度总体上显著变暖，而降水呈东西反向变化的状态，西部湿润化而东部干旱化（杨金虎等，2012；李明等，2021），与张强等（2019）提出的西北地区降水的反向跷跷板式变化一致．到了20世纪90年代，西北地区降水的增速进一步加大，暖湿化加剧（陈发虎等，2023），并在21世纪开始东扩增强（Yang *et al.*，2021；张强等，2023），由此引起的极端降水事件频发，灾害强度也进一步加大（Wang *et al.*，2020；丁一汇等，2023），这些现象引发了学术界和社会的广泛关注．尽管西北暖湿化已成事实，但关于暖湿化的成因及其未来短期变化仍然存在争议．因此，定量分析外强迫和内部变率的相对贡献，明确未来短期气候的可预测性来源，对增加西北地区未来短期气候预测的可靠性，以及维护我国旱区生态安全和经济社会可持续发展具有重大意义．

前人研究表明，由于人类活动产生的温室气体和气溶胶的增加使西北地区明显变暖（徐影等，2003）．但对于西北地区的显著变湿，不同学者各有见解．任国玉等（2016）认为人类活动增加的温室气体排放引起变暖，导致地表蒸散加速，使空气中水汽含量增大，水循环速率加快，引起降水增多（Peng and Zhou，2017；Yao *et al.*，2020），Xue *et al.*（2022）则认为西北地区降水增加的绝大部分原因是水汽输送的增强，而Wu *et al.*（2019）指出降水的增多是局地蒸散引起的水分再循环和平流水汽共同作用的结果．此外，气溶胶也可以通过影响大气环流来影响西北旱区的降水（Luo *et al.*，2021）．有研究表明，近几十年西北地区的显著变湿不仅受到亚洲季风环流和西风环流的影响，也与印度洋、大西洋以及太平洋三大洋海温的年代际变化密切相关（刘玉芝等，2018；Wang *et al.*，2022；丁一汇等，2023；张强等，2023）．其中自20世纪80年代以来北大西洋年代际涛动（Atlantic Multidecadal Oscillation，简称AMO）位相由负变正和印度洋海温的持续变暖，引起蒙古上空出现反气旋环流异常，使东亚夏季风减弱，而太平洋年代际涛动（Pacific Decadal Oscillation，简称PDO）位相在20世纪90年代后由正转负，使东亚西风急流减弱并向极地移动，这些变化共同作用导致西北地区出现异常偏东气流，它将来自北太平洋和高纬地区的水汽输送到西北地区，使到达西北地区的水汽增多，降水增加（Wang *et al.*，2014；Zhu *et al.*，2015；Qin *et al.*，2018；Chen *et al.*，2021；Wu *et al.*，2022；Xue *et al.*，2022；丁一汇等，2023）．由此可见，西北暖湿化是气候系统内部变率和外强迫共同作用的结果（丁一汇等，2023；张强等，2023），受此影响，西北气候的未来短期预估存在较大不确定性，厘清年代际尺度上外强迫和内部变率对西北暖湿化的相对贡献是亟待解决的问题．

气候模型在再现洋流、季风、厄尔尼诺以及全球气候对外强迫的响应等方面非常成功（Hansen *et al.*，1981；Hausfather *et al.*，2020）．前人的研究大多使用CMIP5或CMIP6中多模式的历史模拟和未来预估数据，它们主要反映气候对外强迫的响应情况，缺乏对气候系统内部变率的考虑，使得模式间对西北地区降水未来短期预估的差异可达约16%（杜懿等，2021；Wang and Zhai，2022）．基于此，年代际气候预测计划（Decadal Climate Prediction Projection，简称DCPP）作为第六次国际耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6，简称CMIP6）的子计划之一，涵盖从年到十年时间尺度的预测（Boer *et al.*，2016），通过同化观测数据对模式进行初始化，同时考虑与历史气候模拟相同外强迫的影响（吴波和辛晓歌，2019），可以更好地了解外强迫和内部变率引起的西北气候暖湿化，诊断其年代际预测技巧的来源，量化内部变率和外强迫的贡献（Boer *et al.*，2016）．

上述研究表明，我国西北地区的气候发生了显著的变化，且存在明显的区域差异．由于受到气候系统内部变率和外强迫的共同影响，CMIP6耦合模式对西北地区未来气候变化的预估存在较大不确

定性.但是,目前关于DCPP对西北地区气候变化的年代际预测能力及其预测技巧来源的评估研究较少.因此,本文拟结合观测数据,研究西北暖湿化的时空变化特征,对DCPP多模式预测西北暖湿化年代际变化的技巧进行评估,并分析模式的预测技巧来源,为利用模式探究气候系统内部变率和外强迫对区域气候的影响提供科学参考,同时也为未来进一步加强模式对西北地区暖湿化短期预估的可靠性给予有效建议.

1　数据和方法

1.1　数据

本文使用的3套观测温度数据分别为HadCRUT5、CRU TS v4.07以及GISTEMP,其中HadCRUT5来自英国气象局哈德莱气候科学与服务中心,提供了1850—2022年全球月平均格点温度数据,空间分辨率为5°×5°,可以从https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/data/HadCRUT.5.0.1.0/download.html下载获取;CRU TS v4.07的1901—2022年全球月平均温度数据来自东英吉利大学气候研究中心,其空间分辨率为0.5°×0.5°,可以从https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg下载获取;而GISTEMP则来自NASA戈达德太空研究所(GISS),提供了1880—2022年全球月平均的格点温度数据,空间分辨率为2°×2°,可以从https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gistemp.html下载获取.此外,本文使用了3套降水观测数据,分别是GPCC、CRU TS v4.07和PRECL,其中GPCC来自全球降水气候学中心,提供了1891—2019年全球月平均格点降水数据,空间分辨率为0.5°×0.5°,可以从https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.gpcc.html下载获取;CRU TS v4.07的1901—2022年全球月平均降水数据来自东英吉利大学气候研究中心,空间分辨率为0.5°×0.5°,可以从https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg下载获取;PRECL来自美国国家海洋和大气管理局,提供了1948—2022年全球月平均降水数据,空间分辨率为0.5°×0.5°,可以从https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.precl.html获取.进行计算前将数据网格的分辨率统一插值到0.5°×0.5°.

为了评估第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中年代际预测计划(DCPP)的多模式对西北暖湿化的年代际预测技巧及其来源,本文还使用了CMIP6中8个模式的历史模拟(Historical)、SSP245情景下的未来预估以及年代际预测计划(DCPP)的历史回报(Hindcast)试验数据.其中Hindcast和Historical、SSP245的试验成员数分别为123个和167个.关于模式的详细信息见表1.

表1　CMIP6年代际气候预测计划试验数据

Table 1　CMIP6 Decadal Climate Prediction Project experimental data

模式	Hindcast	Historical、SSP245	分辨率
BCC-CSM2-MR	8	1	160×320
CanESM5	40	50	64×128
CMCC-CM2-SR5	20	1	192×288
EC-Earth3	10	23	256×512
FGOALS-f3-L	9	1	180×288
IPSL-CM6A-LR	10	11	143×144
MIROC6	10	50	128×256
MPI-ESM1-2-LR	16	30	96×192
合计	123	167	

1.2　预测技巧评估方法

本文主要使用了距平相关系数技巧分数(ACC)以及均方根误差技巧分数($MSSS$)来评估模式对西北地区温度和降水年代际变化的预测能力.距平相关系数技巧分数和均方根误差技巧分数的计算公式分别如下(Hu and Zhou,2021):

$$ACC=\frac{\sum_{i=1}^{N}(f_i-\bar{f})(o_i-\bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(f_i-\bar{f})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(o_i-\bar{o})^2}},\quad(1)$$

$$MSSS=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}(f_i-o_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(o_i-\bar{o})^2},\quad(2)$$

其中N表示时间,f_i和o_i表示对应时间的集合平均预测和观测;横线表示整个时段的平均值.ACC可以衡量模式对观测数据位相变化的预测性能,$MSSS$可以衡量模式对观测数据振幅的预测性能.ACC的范围为[−1,1],$MSSS$的范围为(−∞,1],当ACC和$MSSS$等于1时,评分最高,通常取$MSSS$大于0作为有预测技巧的标准,ACC与$MSSS$越大代表预测技巧越高.

1.3　分离初始化与外强迫对预测技巧的贡献

年代际尺度上的气候预测同时受到初始场和外强迫的影响,为了分别研究初始化和外强迫对西北暖湿化预测技巧的相对贡献,本文使用了Sospedra-Alfonso and Boer(2020)以及Hu and Zhou(2021)分离预测技巧的方法,将观测结果(X)、年代际预测结

果(Y)和历史模拟结果(U)分解为：

$$\begin{aligned} X &= \chi_{\mathrm{f}} + \chi + x \\ Y_{\mathrm{A}} &= \{Y_k\} = \psi_{\mathrm{f}} + \psi + \{y_k\}, \\ U_{\mathrm{A}} &= \{U_k\} = \varphi_{\mathrm{f}} + \{u_k\} \end{aligned} \tag{3}$$

其中k代表模式集合成员，χ_{f}、ψ_{f}与φ_{f}代表由外强迫产生的变化，ψ与χ代表初始化的内部变率产生的可预测分量，x、y_k与u_k代表不可预测的噪声，{}表示多模式集合平均．假设ψ_{f}与φ_{f}在集合成员间保持一致，y_k与u_k相互独立，且满足正态分布．当取集合平均时，y_k与u_k相互抵消使噪声约等于0. Y_{A}与U_{A}分别代表年代际预测和历史模拟的集合平均．

α为ψ_{f}在φ_{f}上的投影系数，计算公式为：

$$\alpha = \theta \frac{\overline{\psi_{\mathrm{f}}\varphi_{\mathrm{f}}}}{\sigma_{\varphi_{\mathrm{f}}}^2} = \theta r_{Y_{\mathrm{A}}U_{\mathrm{A}}} \frac{\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}\sigma_{U_{\mathrm{A}}}}{\sigma_{\varphi_{\mathrm{f}}}^2}. \tag{4}$$

因此，年代际预测中初始化分量(Y_{i})和外强迫分量(Y_{u})可以由以下计算得到：

$$\begin{aligned} Y_{\mathrm{u}} &= \alpha\varphi_{\mathrm{f}} \\ Y_{\mathrm{i}} &= (\psi_{\mathrm{f}} - \alpha\varphi_{\mathrm{f}}) + \psi \end{aligned}, \tag{5}$$

其中$\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}$、$\sigma_{U_{\mathrm{A}}}$与$\sigma_{\varphi_{\mathrm{f}}}$分别代表$Y_{\mathrm{A}}$、$U_{\mathrm{A}}$与$\varphi_{\mathrm{f}}$的标准差，如果$\psi_{\mathrm{f}}$与$\varphi_{\mathrm{f}}$的协方差($\overline{\psi_{\mathrm{f}}\varphi_{\mathrm{f}}}$)小于零，则$\theta=0$，否则$\theta=1$，$r_{Y_{\mathrm{A}}U_{\mathrm{A}}}$是多模式集合平均年代际预测与多模式集合平均历史模拟的相关系数．

相关技巧可以被分解为：

$$\begin{aligned} r_{XY_{\mathrm{A}}} &= \frac{\overline{XY_{\mathrm{u}}}}{\sigma_X\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}} + \frac{\overline{XY_{\mathrm{i}}}}{\sigma_X\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}} = r_{XY_{\mathrm{u}}}\frac{\sigma_{Y_{\mathrm{u}}}}{\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}} + r_{XY_{\mathrm{i}}}\frac{\sigma_{Y_{\mathrm{i}}}}{\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}} = \\ & r_{\mathrm{u}} + r_{\mathrm{i}}, \end{aligned} \tag{6}$$

其中“—”表示协方差，$\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}$、$\sigma_{Y_{\mathrm{u}}}$与$\sigma_{Y_{\mathrm{i}}}$代表Y_{A}、Y_{u}与Y_{i}的标准差，$r_{XY_{\mathrm{A}}}$、$r_{XY_{\mathrm{u}}}$、$r_{XY_{\mathrm{i}}}$是观测与集合平均预测、外强迫分量以及初始化分量的相关系数，r_{i}和r_{u}为初始化与外强迫对总技巧$r_{XY_{\mathrm{A}}}$的贡献(Hu and Zhou，2021)．

1.4 潜在的可预测性和预测技巧

气候“可预测性”表示在理想条件下可以预测气候的程度，气候系统的潜在可预测性是可预测技巧的上限，与潜在预测技巧ρ密切相关；实际预测技巧γ是衡量实际预测系统成功与否的指标，使用Boer *et al.*(2013)的方法将潜在技巧和实际技巧近似分解为外强迫和内部变率的共同作用，基于模型潜在技巧和实际技巧的差异，可以明确模型未来的改进空间．

模式的潜在技巧(ρ, potential)遵循以下计算方式：

$$\begin{aligned} &\rho = \mathrm{Cov}YY_{\mathrm{A}} \Big/ \sqrt{\mathrm{Var}Y\mathrm{Var}Y_{\mathrm{A}}} = \sigma_\nu^2 \big/ \sigma_Y\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} \to \sigma_\nu \big/ \sigma_Y = \\ &\qquad \left(\sigma_{\nu_{\mathrm{f}}}^2 + \sigma_{\nu_{\mathrm{i}}}^2\right) \big/ \sigma_Y\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} = \rho_{\mathrm{f}} + \rho_{\mathrm{i}} \\ &\rho_{\mathrm{f}} = \sigma_{\nu_{\mathrm{f}}}^2 \big/ \sigma_Y\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} \approx \sigma_{\eta_{\mathrm{f}}}^2 \big/ \sigma_Y\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} = \mathrm{Cov}U_{\mathrm{A}}Y_{\mathrm{A}} \Big/ \sqrt{\mathrm{Var}Y\mathrm{Var}Y_{\mathrm{A}}}, \\ &\rho_{\mathrm{i}} = \sigma_{\nu_{\mathrm{i}}}^2 \big/ \sigma_Y\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} \approx \rho - \rho_{\mathrm{f}} \end{aligned} \tag{7}$$

其中Y和U代表模式的预测和模拟，ν和η代表其中的可预测部分，角标i和f代表可预测中的内部变率和外强迫分量，$\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}$、σ_Y、$\sigma_{\eta_{\mathrm{f}}}$、$\sigma_{\nu_{\mathrm{i}}}$、$\sigma_{\nu_{\mathrm{f}}}$代表$Y_{\mathrm{A}}$、$Y$、$\eta_{\mathrm{f}}$、$\nu_{\mathrm{f}}$和$\nu_{\mathrm{i}}$的标准差，$\mathrm{Cov}YY_{\mathrm{A}}$和$\mathrm{Cov}U_{\mathrm{A}}Y_{\mathrm{A}}$表示$Y$和$Y_{\mathrm{A}}$的协方差，以及$U_{\mathrm{A}}$和$Y_{\mathrm{A}}$的协方差，$\mathrm{Var}Y$、$\mathrm{Var}Y_{\mathrm{A}}$表示$Y$和$Y_{\mathrm{A}}$的方差．$\rho$代表总潜在技巧，$\rho_{\mathrm{i}}$和$\rho_{\mathrm{f}}$分别代表内部变率和外强迫分量的潜在技巧．

模式的实际技巧(γ, actual)计算式为：

$$\begin{aligned} &\gamma = \mathrm{Cov}XY_{\mathrm{A}} \Big/ \sqrt{\mathrm{Var}X\mathrm{Var}Y_{\mathrm{A}}} = \overline{\mu\nu} \big/ \sigma_X\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} \to \sqrt{p}\, R_{\mu\nu} = \\ &\left(\overline{\mu_{\mathrm{f}}\nu_{\mathrm{f}}} + \overline{\mu_{\mathrm{i}}\nu_{\mathrm{i}}}\right) \big/ \sigma_X\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} = \gamma_{\mathrm{i}} + \gamma_{\mathrm{f}} \\ &\gamma_{\mathrm{f}} = \overline{\mu_{\mathrm{f}}\nu_{\mathrm{f}}} \big/ \sigma_X\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} \approx \overline{\mu_{\mathrm{f}}\eta_{\mathrm{f}}} \big/ \sigma_X\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} = \\ &\mathrm{Cov}XU_{\mathrm{A}} \Big/ \sqrt{\mathrm{Var}X\mathrm{Var}Y_{\mathrm{A}}} \\ &\gamma_{\mathrm{i}} = \overline{\mu_{\mathrm{i}}\nu_{\mathrm{i}}} \big/ \sigma_X\sigma_{Y_{\mathrm{A}}} \approx \gamma - \gamma_{\mathrm{f}} \end{aligned}, \tag{8}$$

其中X代表观测结果，X中可预测部分为μ，由内部变率μ_{i}和外强迫分量μ_{f}组成，p为潜在可预测方差分数，$R_{\mu\nu}$代表μ和ν的相关系数，$\sigma_{Y_{\mathrm{A}}}$、σ_X代表Y_{A}、X的标准差，$\mathrm{Cov}XY_{\mathrm{A}}$和$\mathrm{Cov}XU_{\mathrm{A}}$表示$X$和$Y_{\mathrm{A}}$的协方差以及$X$和$U_{\mathrm{A}}$的协方差，$\mathrm{Var}X$、$\mathrm{Var}Y_{\mathrm{A}}$分别表示$X$和$Y_{\mathrm{A}}$的方差．$\gamma$代表总实际技巧，$\gamma_{\mathrm{i}}$和$\gamma_{\mathrm{f}}$分别代表内部变率和外强迫分量的实际技巧．

1.5 显著性检验方法

本文对数据进行9年平滑，消除年际变化以得到年代际信号．对距平相关系数技巧分数(*ACC*)、均方根误差技巧分数(*MSSS*)和相关系数的显著性使用学生t检验进行评估，并使用Pyper and Peterman(1998)的方法估计有效自由度(N_{eff})，计算方法为：

$$\frac{1}{N_{\mathrm{eff}}} \approx \frac{1}{N} + \frac{2}{N}\sum_{j=1}^{n}\frac{N-j}{N}\rho_{XX}(j)\rho_{YY}(j), \tag{9}$$

其中N表示样本数量，$\rho_{XX}(j)$代表X在滞后时间为j时的自相关，$\rho_{YY}(j)$代表Y在滞后时间为j时的自相关，文中取n为10.

2　结果

2.1　观测的西北暖湿化现象

从时间变化(图 1a)来看,西北地区夏季在过去 60 年呈显著变暖的趋势,增暖速率达 0.28～0.34 ℃/10a.其中,自 20 世纪 80 年代后期到 20 世纪末增暖最显著,速率高达 0.72～0.87 ℃/10a,随后增速放缓.从温度趋势的空间分布(图 1c)来看,过去 60 年我国西北地区整体都发生了显著变暖,但变暖并不均匀,呈自西向东递增状态,其中新疆东部、内蒙古西部、青海和甘肃西北部的增暖幅度较大,最高可达 0.47 ℃/10a.

对于降水,西北地区在近 60 年来明显变湿,增湿速率达 1.85～2.54 mm/10a(图 1b).其中增湿幅度较大的时段主要出现在 20 世纪 60 年代、80 年代和 21 世纪第二个十年前后,趋势分别可达 1.17～1.82 mm/a、0.72～0.80 mm/a 和 1.34～2.08 mm/a.三个观测数据集 1962－2020 年的 9 年滑动平均增湿速率均大于 0.18 mm/a,表明西北地区在过去近 60 年显著变湿.从空间分布(图 1d)来看,西北地区夏季的变湿主要出现在西部和南部,中部则有微弱变干,新疆西部和北部、青海北部以及甘肃中部的增湿速率较大,最大增速可达 14.80 mm/10a.总体来看,三个观测数据集的空间分布基本一致,显著增湿都出现在新疆地区的西部和北部、青海北部和甘肃中部.

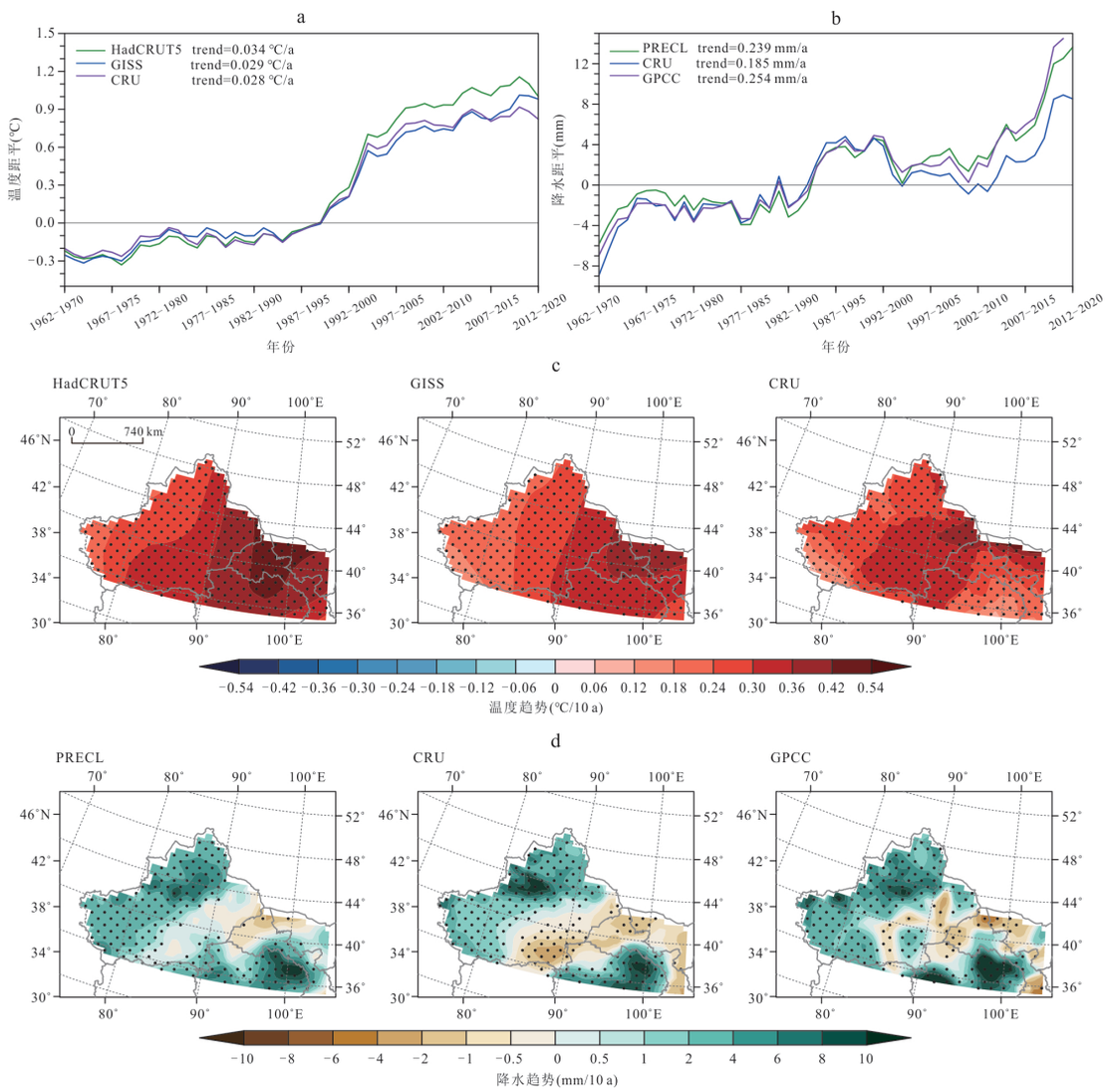

图 1　西北地区 1962－2020 年夏季 9 年平滑的温度和降水时空变化特征

Fig.1　Spatiotemporal characteristics of temperature and precipitation in Northwest China during summer from 1962 to 2020 based on 9-year averages

a.温度距平(℃);b.降水距平(mm);c.温度趋势(℃/10a);d.降水趋势(mm/10a);距平相对于 1971－2000 年.图中加点区域表示 $p<0.05$

图1的结果表明，过去60年西北地区气候发生了明显改变，整个西北显著变暖，同时新疆西部和青海北部显著变湿，温度和降水在20世纪末都呈现快速增长的趋势．西北地区气候的时空变化表明，近几十年来西北地区夏季发生了显著的暖湿化现象．

2.2　多模式年代际预测技巧评估

2.2.1　多模式集合平均　为了评估DCPP多模式对西北地区温度和降水的年代际预测能力，使用了CMIP6中8个年代际预测的123个成员的2～10年平均和167个历史模拟成员的9年平滑温度进行评估，同时使用PRECL降水和GISTEMP温度的观测数据进行比较．

结果显示，DCPP多模式的年代际预测和历史模拟很好地再现了温度随时间的显著变暖（图2a），增暖速率均为0.40 ℃/10a，与观测结果的时间相关系数达到了0.99．同时，模式也很好地预测出了20世纪80年代后期到20世纪末期的快速增暖，预测和模拟的趋势达到了0.64 ℃/10a和0.63 ℃/10a．相比于观测的温度变化，模式模拟和预测的温度变化趋势均高于观测．从空间分布上来看（图2c），DCPP多模式年代际预测和历史模拟的过去60年西北地

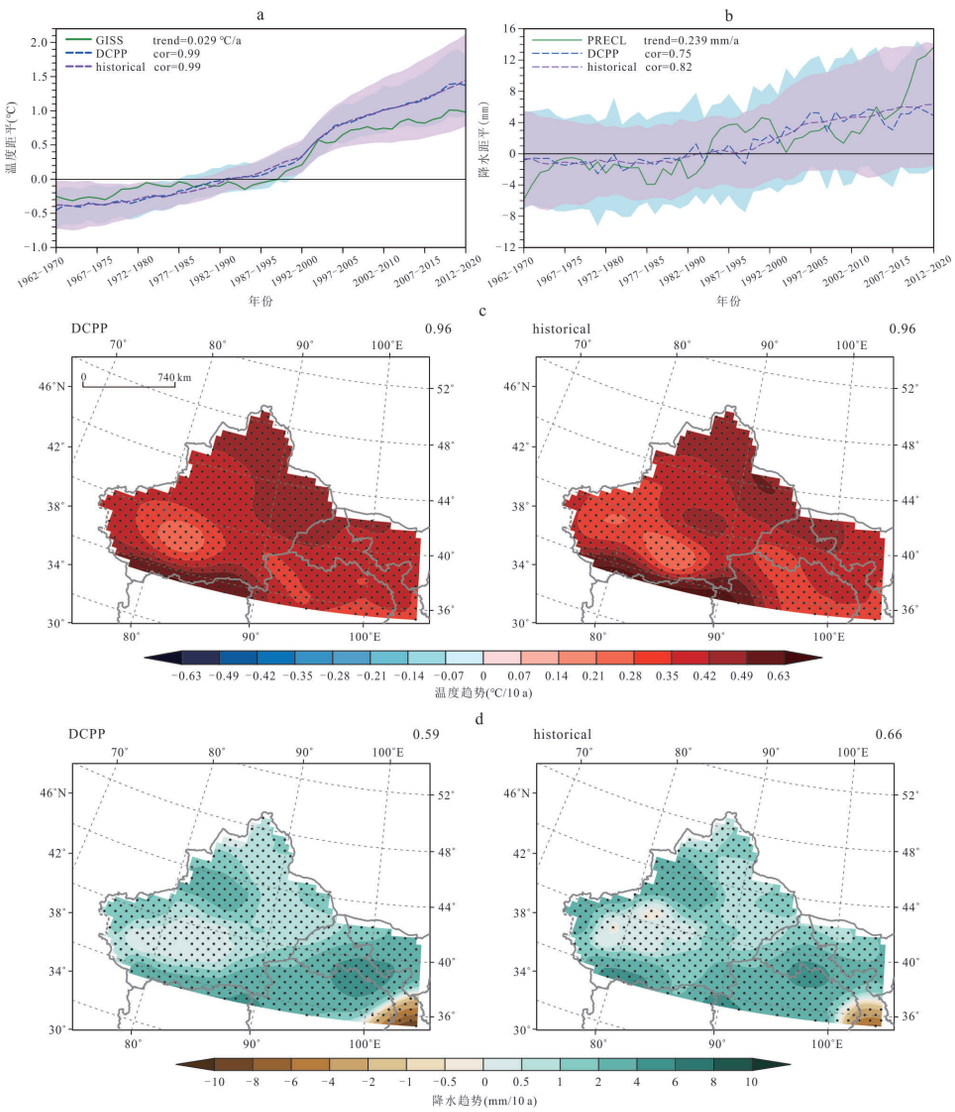

图2　DCPP多模式预测的西北地区1962－2020年夏季9年（第2～10年）平滑的温度和降水时空变化特征

Fig.2　Spatiotemporal characteristics of temperature and precipitation in Northwest China during summer from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2－10) averages from DCPP multi-model predictions

a. 温度距平（℃）；b. 降水距平（mm）；c. 温度趋势（℃/10a）；d. 降水趋势（mm/10a）；距平相对于1971－2000年．图a、b中的阴影表示集合平均±1个标准差，图c、d中右上角数值为模式预测趋势与观测趋势的空间相关系数，加点区域表示$p<0.05$

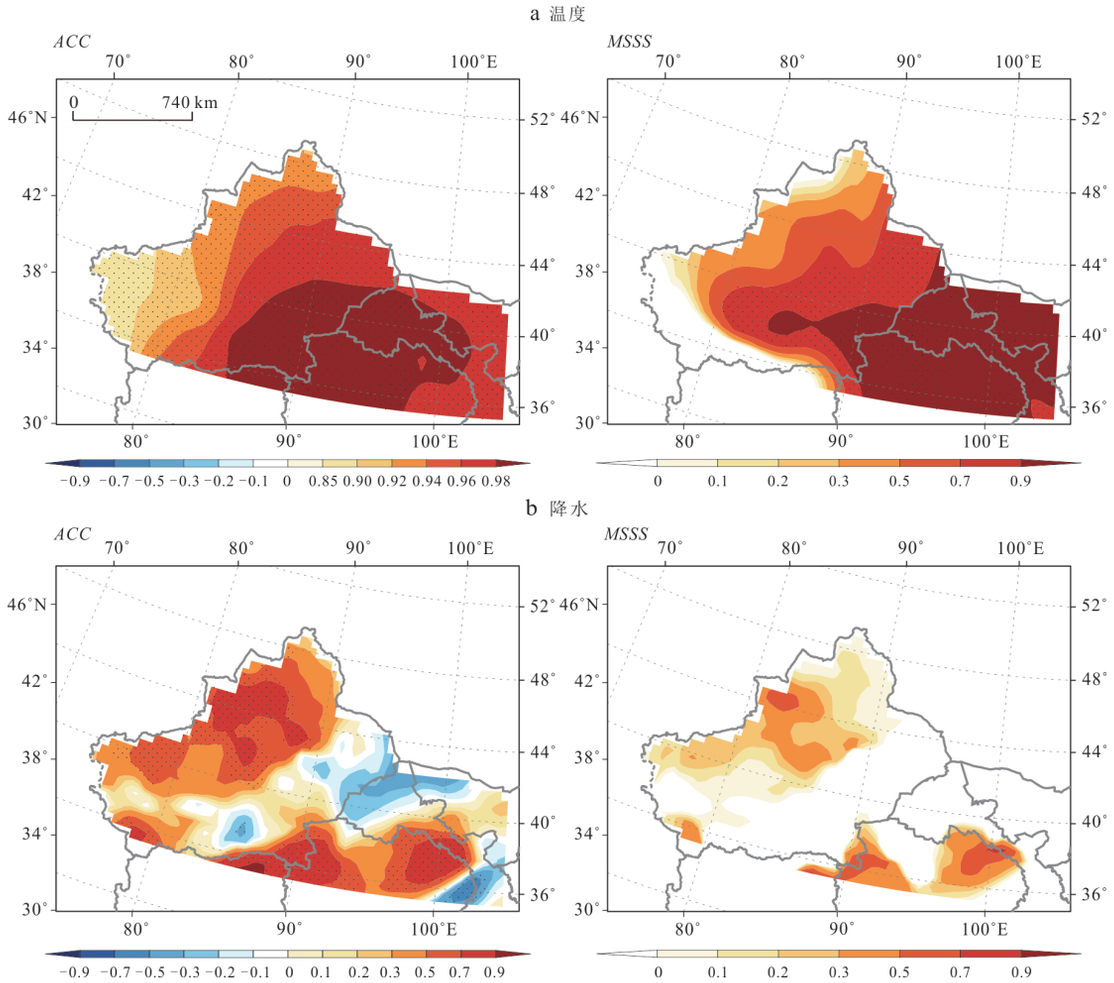

图 3　DCPP 多模式集合平均预测的西北地区 1962－2020 年夏季 9 年(第 2～10 年)平滑温度和降水的预测技巧空间分布

Fig.3　Spatial distribution of predictive skill for temperature and precipitation in Northwest China during summer from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2－10) average from DCPP multi-model ensemble mean predictions

a. 温度(T)预测的 ACC 和 $MSSS$;b. 降水(Pr)预测的 ACC 和 $MSSS$. 图中加点区域表示 $p<0.10$

区温度趋势呈全区域的显著变暖,与观测结果的空间相关系数达到了 0.96,但模式预测结果的分布并不均匀,升温速率从 38°N 向南北迅速增加,以新疆南北部的增温最大,最大趋势高达 0.68 ℃/10a.

多模式集合平均年代际预测和历史模拟的降水时间序列与观测的相关系数分别为 0.75 和 0.82(图 2b),相应趋势为 0.16 mm/a 和 0.17 mm/a. 相比于观测,模式明显低估了 20 世纪 60 年代以来西北地区的变湿趋势. 从空间分布上来看(图 2d),模式的预测结果显示除西北地区东南部的显著变干外,其余地区均为显著变湿,模式年代际预测以及历史模拟结果与观测趋势的空间相关系数达到了 0.59 和 0.66. 整体来看,无论是对降水的时间变化还是空间分布,模式均再现出了西北地区近 60 年的显著变湿.

为了评估 CMIP6-DCPP 多模式集合平均的预测效果,笔者使用了距平相关系数技巧分数(ACC)和均方根误差技巧分数($MSSS$)对预测结果进行衡量. 结果显示,DCPP 中 123 个成员集合平均的温度预测与观测有较高的 ACC(图 3a),但 ACC 的空间分布并不均匀,呈自西向东递增的分布状态,最大达到了 0.99,表明模式能很好地再现西北东部温度位相的变化,其中新疆东南部、青海和甘肃西部的预测效果最好. 从模式对温度变化振幅预测的评估结果来看,模式对新疆西北和南部温度振幅的变化没有预测技巧. 除此之外,$MSSS$ 自西向东逐渐递增,在新疆以东的西北东部 $MSSS$ 较高,最大的 $MSSS$ 达到了 0.98.

从图 3b 来看,DCPP 多模式集合平均在新疆西部和青海北部对降水位相的变化有较好预测的效

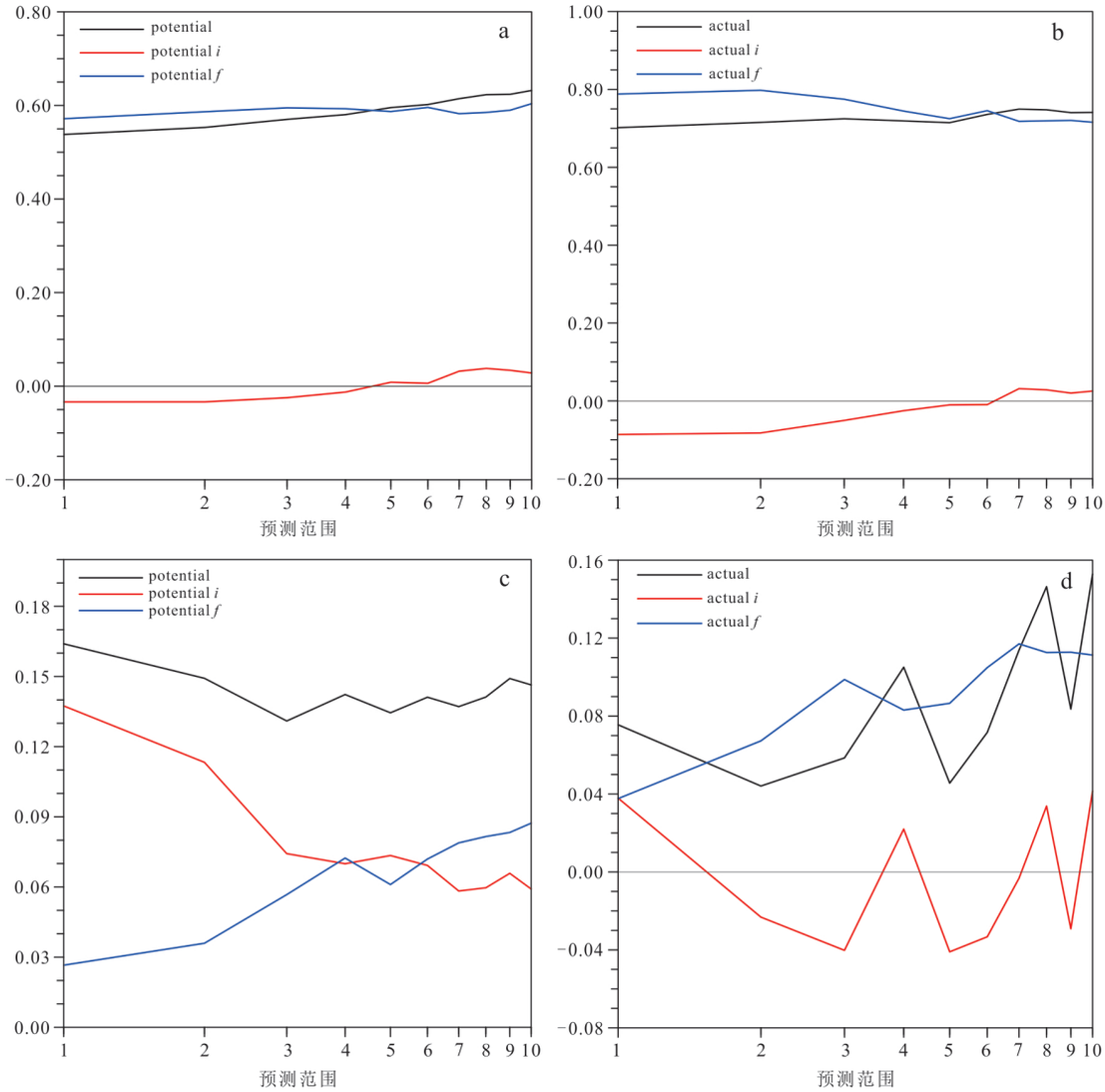

图4　1962—2020年夏季DCPP多模式年代际预测西北地区温度和降水的预测技巧随预测范围的变化

Fig.4　Variation of DCPP multi-model prediction skills for summer temperature and precipitation in Northwest China from 1962 to 2020

a. 温度预测的潜在技巧；b. 温度预测的实际技巧；c. 降水预测的潜在技巧；d. 降水预测的实际技巧；图中黑色为总技巧，红色为内部变率的技巧，蓝色为外强迫的技巧

果，*ACC*的最大值达到了0.95，但模式并不能很好地模拟出西北地区中部和东南部的变化，导致这些区域的*ACC*小于零．通过计算多模式集合平均的均方根误差技巧分数，可以发现模式仅对青海东北部降水的振幅变化有显著的预测技巧，其最大值为0.80，在其余地区*MSSS*不显著甚至小于0，表明模式对该区域降水振幅的预测技巧较差．

对比多模式集合平均对温度和降水的预测技巧，发现两者存在较大差异．DCPP对西北地区温度预测的*ACC*和*MSSS*自西向东逐渐递增，模式对西北全区温度位相的变化和新疆南北部以外振幅的变化有较好的模拟，而模式对西北地区降水位相模拟的较大预测技巧主要出现在青海和新疆西部．对比DCPP温度和降水预测的评估结果，发现模式对温度的预测技巧优于降水，对位相的再现能力优于振幅．

为了研究随着预测范围增加模式的实际预测效果和本身的最大潜力，笔者计算了多模式集合预测的潜在技巧和实际技巧．在温度预测技巧变化（图4a、4b）上，模式的潜在技巧中外强迫分量占主要地位，随着预测范围增加潜在技巧逐渐增大．多模式集合预测的实际技巧及其内部变率的技巧随预测范围增加而增大，外强迫分量的技巧在第2年后逐渐降低，但仍在总技巧中占主要地位，实际技

巧在后期的增加主要由内部变率技巧的上升引起.对比多模式集合预测的潜在技巧和实际技巧,发现模式对温度预测的实际技巧高于自身的潜力,这是由于模型中的信噪比过小而发生的“信噪比悖论”现象(Smith *et al.*, 2019),未来对模式预测结果的改进可以着眼于校正温度预测的信噪比来进行.

模式对降水预测的潜在技巧大于实际技巧(图 4c、4d),外强迫分量在潜在技巧和实际技巧中表现为随预测范围增加而上升,其中第 2～3 年的上升幅度较大.总潜在技巧在第 1～3 年发生大幅度降低,而实际技巧在第 1～2 年也明显降低,且降幅大于潜在技巧,两者的变化都与内部变率技巧的减小有关,表明总技巧的波动主要由内部变率引起.在后期,总技巧又会受外强迫技巧增加的影响而波动上升,这表明在降水的预测上,未来可以着眼于减少前期内部变率技巧随预测范围增加而出现的降低进行改进.

多模式集合预测温度和降水的潜在技巧和实际技巧随预测范围的变化明显不同.模式对温度的预测出现了信噪比悖论现象,表明模式可能低估了实际温度的可预测性;而对于降水来说,模式未来应着眼于改进内部变率技巧随预测范围增大出现的衰减.

2.2.2　模式间差异　为了探究模式间温度预测的差异,笔者对 8 个模式的温度趋势分别进行计算(图 5a),结果显示 CanESM5 的预测中新疆西部有小范围的降温趋势,其最大降温幅度为 −0.03 ℃/10a,除此之外,其余模式均表现为西北地区整体的显著变暖,且增温速率自南向北逐渐递增,最大增速达到了 1.56 ℃/10a.各模式年代际预测与观测趋势的空间相关系数都达到了 0.90 以上,模式间差异较小.

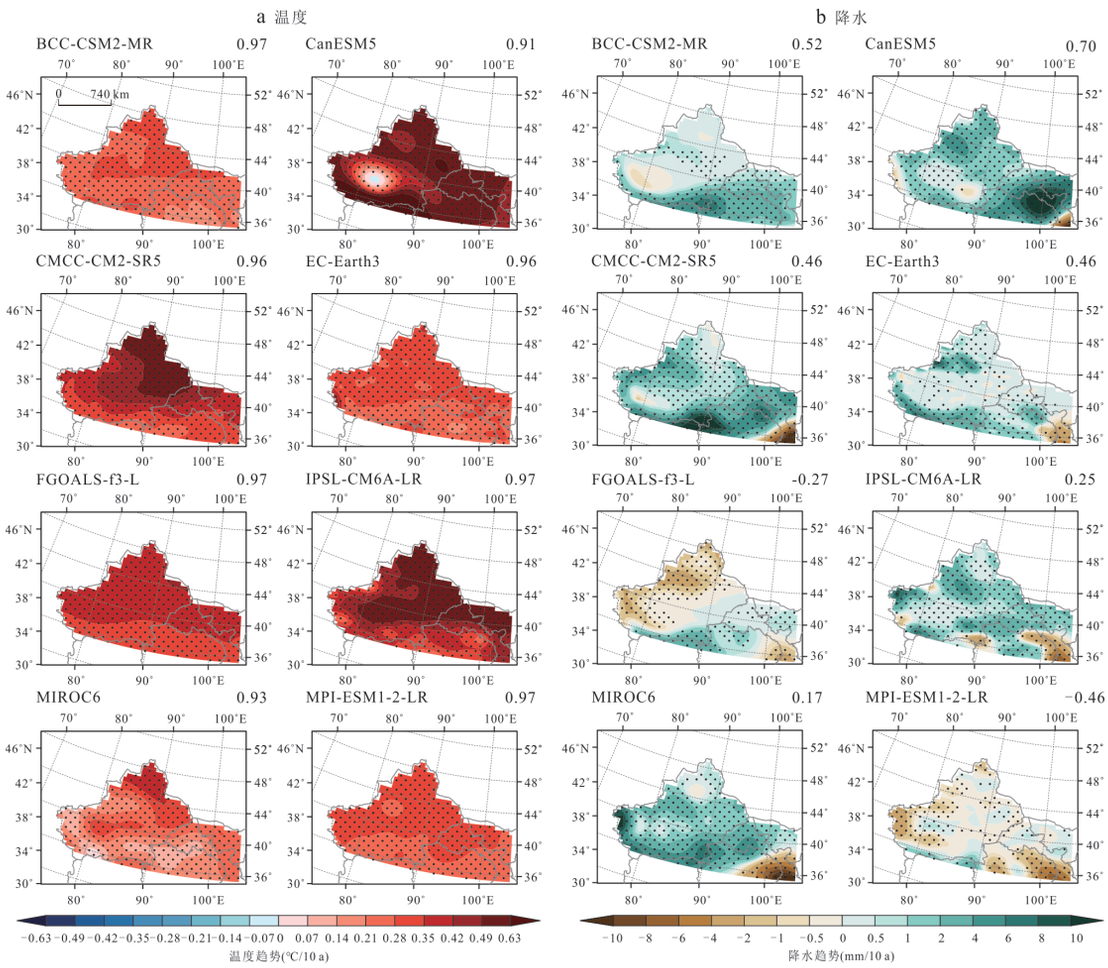

图 5　DCPP 预测的西北地区 1962－2020 年夏季 9 年(第 2～10 年)平滑温度和降水趋势的模式间差异

Fig.5　Inter-model differences in predicted trends of summer temperature and precipitation in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2－10) average from DCPP predictions

a. 温度趋势(℃/10a);b. 降水趋势(mm/10a).右上角数值为模式预测趋势与观测趋势的空间相关系数,加点区域表示 $p<0.05$

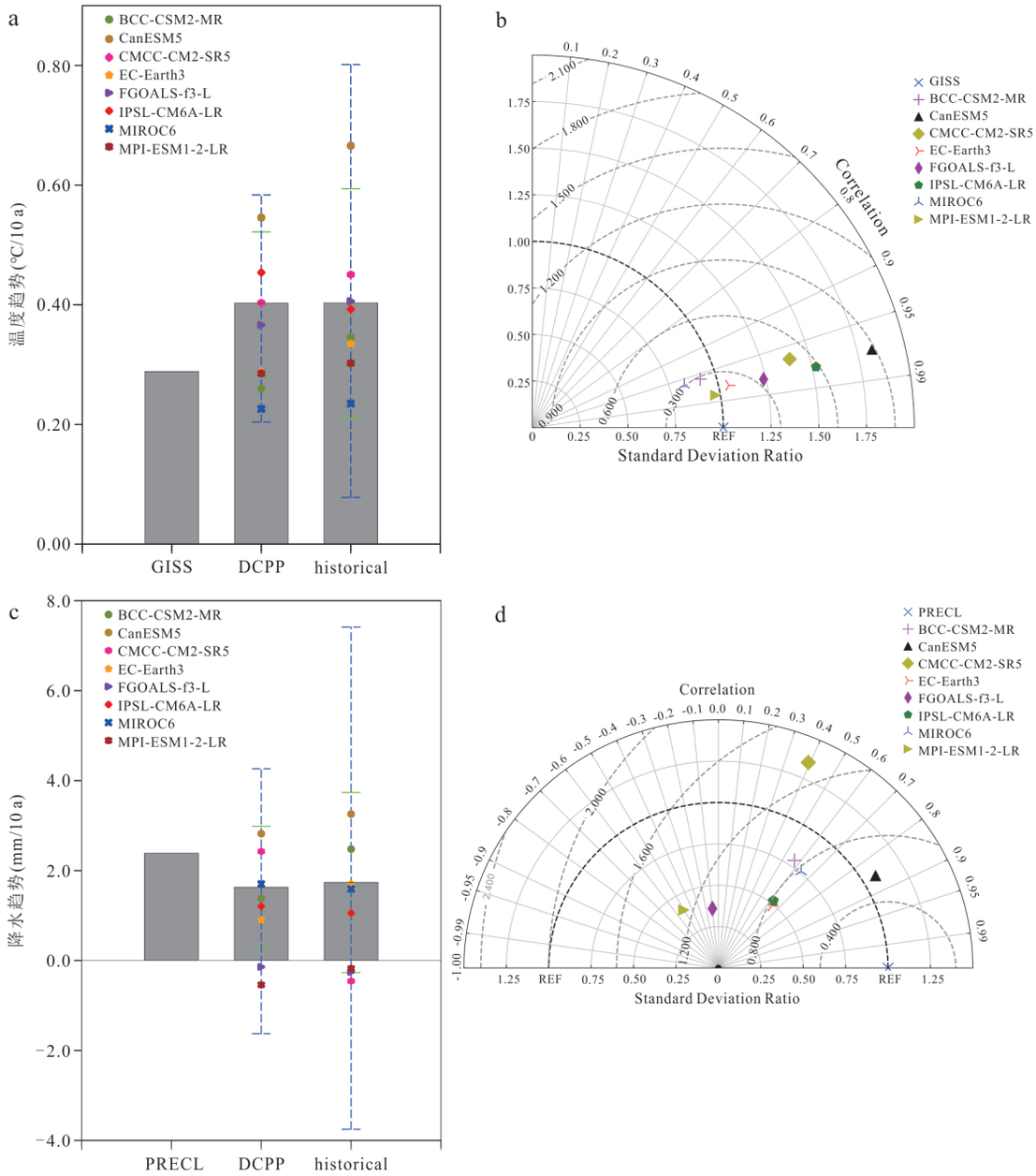

图 6　DCPP 预测的西北地区 1962－2020 年夏季 9 年(第 2～10 年)平滑的温度和降水

Fig.6　Predictions of temperature and precipitation in Northwest China during summer from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2－10) average from DCPP predictions

a. 温度趋势(℃/10a);b. 温度预测泰勒图;c. 降水趋势(mm/10a);d. 降水预测泰勒图. 图 a、c 中蓝线为最大/小值,绿线为集合平均±标准差

计算不同模式预测的西北地区夏季降水趋势,结果显示,8 个模式预测结果的空间分布差异较大(图 5b),其中 FGOALS-f3-L 和 MPI-ESM1-2-LR 的结果与观测甚至相反,呈西北西部显著变干和中部微弱变湿的趋势,与观测趋势的空间相关系数分别为－0.27 和－0.46,其余 6 个模式的预测结果则以变湿为主,与观测结果的空间相关系数在 0.17～0.70 之间. 总体来看,不同模式预测降水年代际变化的空间分布存在较大差异,其中 CanESM5 的空间分布与观测的相关系数最高,达到了 0.70.

8 个模式对西北地区温度变化趋势的预测和模拟如图 6a 所示,其中多模式集合平均预测和历史模拟的结果一致,均为 0.40 ℃/10a,对比观测趋势 0.29 ℃/10a,模式对温度变化存在明显的高估. 8 个模式预测的温度趋势都大于零,其中 CanESM5 的升温速率最大,达到了 0.55 ℃/10a,而 MIROC6 的升温速率最小,只有 0.23 ℃/10a;与观测相比,EC-Earth3 与观测的结果最接近,为 0.29 ℃/10a.

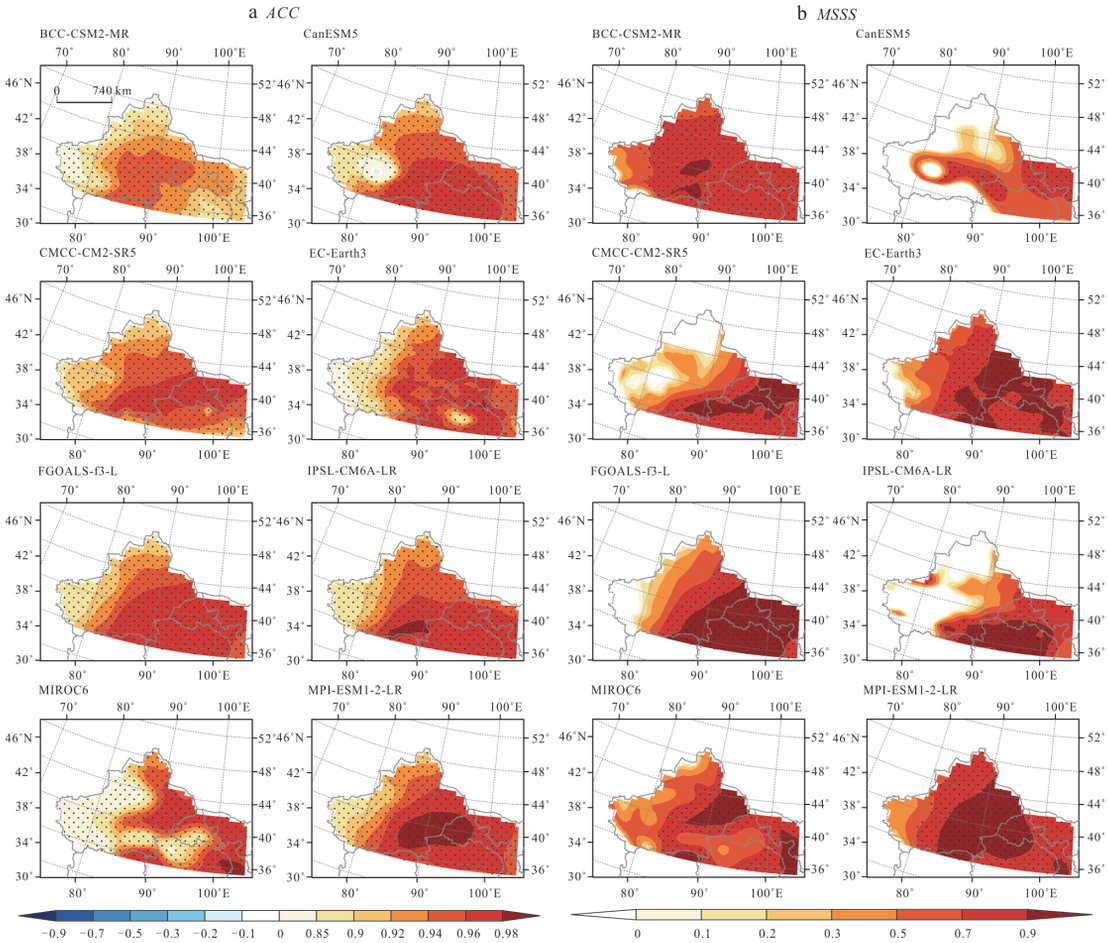

图 7　DCPP 预测的西北地区 1962—2020 年夏季 9 年(第 2～10 年)平滑温度的预测技巧

Fig.7　Predicted skill for summer temperature in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2—10) average from DCPP predictions

a. *ACC*; b. *MSSS*. 图中加点区域表示 $p<0.10$

从 8 个模式的标准差比率、相关系数和标准化的中心均方根误差来看(图 6b),模式与观测的相关系数在 0.95～0.99 之间,标准差比率在 0.75～2.00 之间,而标准化的中心均方根误差在 0～0.90 之间,模式间差异较小,其中 MPI-ESM1-2-LR 的结果与观测值最接近,预测效果最好;而 CanESM5 距离最远,预测效果最差.

对于降水,8 个模式预测和模拟的趋势如图 6c 所示,多模式集合平均预测和模拟的结果分别为 1.63 mm/10a 和 1.73 mm/10a,低于观测的 2.39 mm/10a. 8 个模式中 CanESM5 预测的降水趋势最大,达到了 2.82 mm/10a,而 MPI-ESM1-2-LR 的预测结果最小,为 −0.54 mm/10a. 从泰勒图来看(图 6d),降水的预测与观测的相关系数在 −0.60～0.90 之间,标准差比率在 0.25～1.50 之间,而标准化的中心均方根误差在 0.40～1.60 范围内,模式间差异较大,其中 MPI-ESM1-2-LR 距观测最远,预测效果最差,而 CanESM5 距观测最近,预测效果最好.

各模式对西北地区近 60 年来温度变化预测的 *ACC* 和 *MSSS* 在空间分布上呈现东高西低的特点(图 7a、7b),这与多模式集合平均结果一致(图 3a),即模式对西北地区东部温度变化的位相模拟优于西部,其中 MPI-ESM1-2-LR 的 *ACC* 最高,在新疆东部、甘肃西部 *ACC* 大于 0.90,最大值达到了 0.99. 对温度振幅的模拟结果显示(图 7b),西北东部的 *MSSS* 高于西部,显著的技巧主要出现在新疆以东的西北东部地区,而除 BCC-CSM2-MR、MIROC6、MPI-ESM1-2-LR 外,其余模式的 *MSSS* 在西北西部小于 0,最大值 *MSSS* 出现在 MPI-ESM1-2-LR 的新疆以东地区,达到了 0.97. 通过评估各模式对温度预测的 *ACC* 和 *MSSS* 可以发现,模式对西北地区东部温度变化的振幅和位相模拟技巧高于西部,对位相的模拟技巧高于振幅.

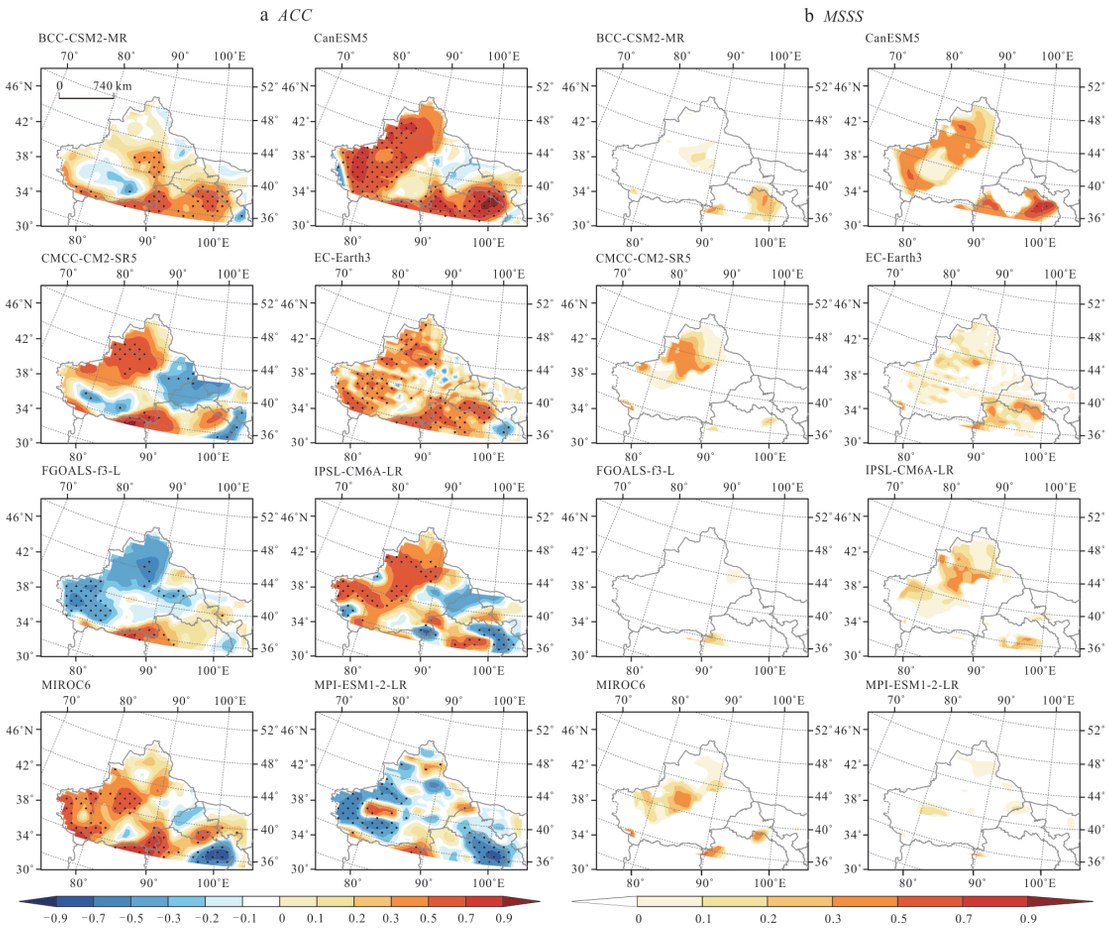

图8 DCPP预测的西北地区1962—2020年夏季9年(第2～10年)平滑降水的预测技巧

Fig.8 Predicted skill for summer precipitation in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2—10) average from DCPP predictions

a. *ACC*;b. *MSSS*.图中加点区域表示$p<0.10$

对各模式的降水预测技巧分别进行评估,发现与多模式集合平均的结果不同(图3b),模式间的差异较大,显著的正距平相关系数技巧分数(*ACC*)主要出现在CanESM5、CMCC-CM2-SR5、EC-Earth3、IPSL-CM6A-LR和MIROC6的新疆西部和BCC-CSM2-MR、CanESM5、CMCC-CM2-SR5、EC-Earth3的青海境内(图8a),最大*ACC*为0.94,表明这些模式能较好地模拟新疆西部和青海降水的位相变化.降水的*MSSS*评估结果显示(图8b),正*MSSS*主要分布在新疆西部和青海区域,其中仅CanESM5的青海东北部存在显著正技巧,其余地区的*MSSS*几乎都小于0,表明模式不能很好模拟出降水的振幅变化.综合对比各模式的*ACC*和*MSSS*结果来看,8个模式降水预测结果的差异较大.

2.3 初始化及外强迫对预测技巧的相对贡献

2.3.1 多模式集合平均中初始化和外强迫分量的贡献 使用Sospedra-Alfonso and Boer(2020)以及Hu and Zhou(2021)的方法探究初始化和外强迫分量对预测技巧的贡献,分离的结果见图9和图10. DCPP多模式集合平均对温度的预测与观测值在西北地区有显著的正相关性(图9a),相关系数自西向东逐渐递增,最大值为0.99.通过分离初始化(r_i)和外强迫(r_u)的贡献发现,集合平均的预测技巧主要来自外强迫分量(图9c、9d),r_u在整个西北地区均为正值,其中最大值达到了0.99,而初始化分量只在新疆南部地区存在微弱贡献.西北地区温度的多年际变率同样以未初始化的外强迫分量贡献为主,初始化分量的贡献主要出现在新疆南部,且最大值只达到0.26(图9e、9f).

多模式集合平均对降水的年代际预测与观测在新疆西部、青海北部和甘肃中部呈显著正相关,最大相关系数达到了0.95(图10a、10b).分解初始化(r_i)和外强迫(r_u)的技巧显示,新疆西部和青海、甘肃的显著正技巧以及西北地区东北部的负技巧主

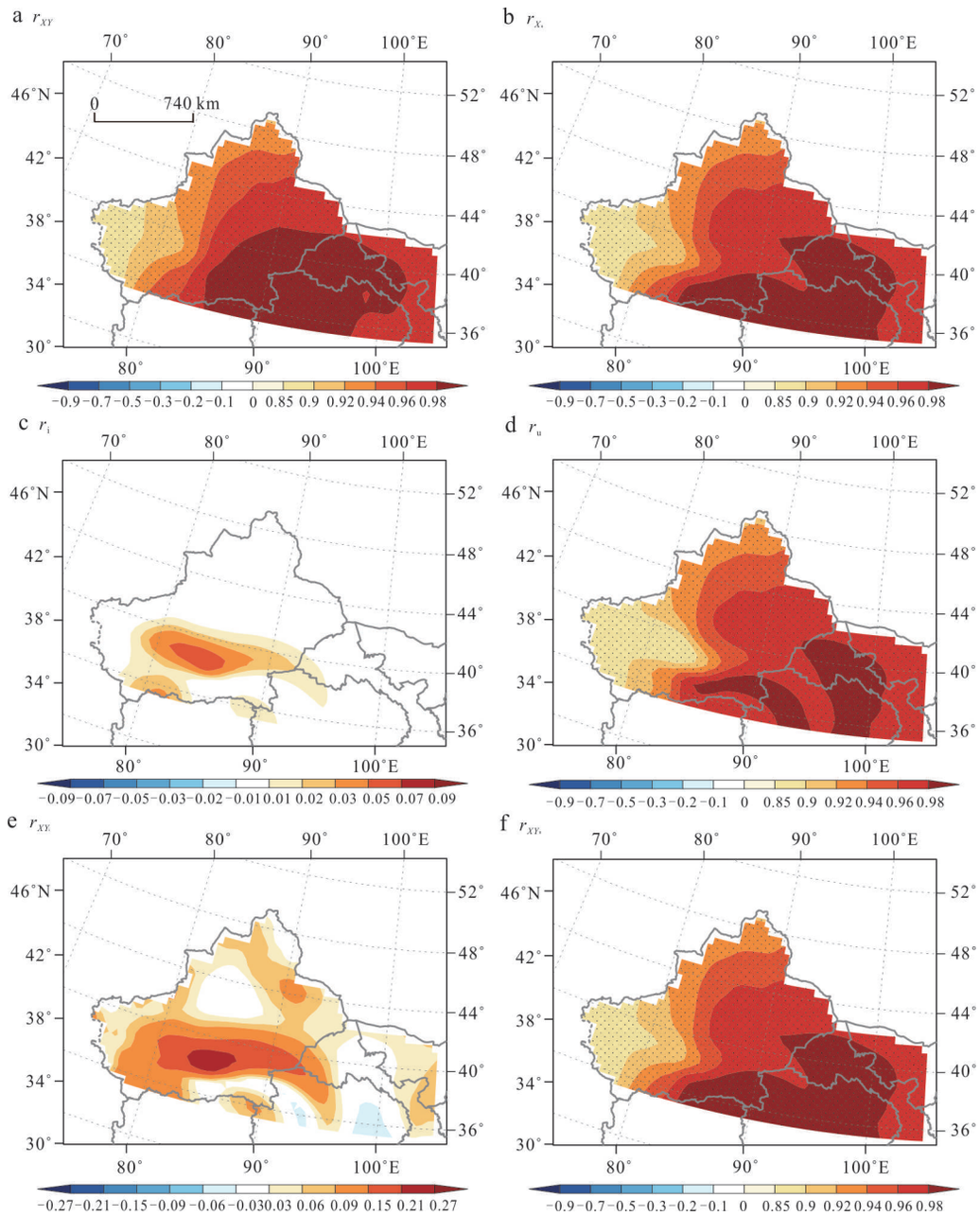

图 9　DCPP 多模式集合平均对西北地区 1962—2020 夏季 9 年(第 2～10 年)平滑温度的预测技巧分解

Fig.9　Predictive skill for summer temperature in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2—10) average from DCPP multi-model ensemble mean predictions

a. 预测结果与观测的相关系 s 数 r_{XY};b. 历史模拟与观测的相关系数 r_{X_u};c. 初始化分量的技巧 r_i;d. 外强迫分量的技巧 r_u;e. 初始化分量与观测的相关系数 r_{XY_i};f. 外强迫分量与观测的相关系数 r_{XY_u}. 图中加点区域表示 $p<0.10$

要来自外强迫分量(图 10c、10d). 初始化分量的技巧主要表现为新疆西部和北部小范围的显著正值,以及新疆南部、西北东部的显著负值(图 10c). 西北地区降水的多年际变化受到外强迫分量影响,最大相关系数达到 0.95,而初始化分量与观测的最大相关系数有 0.57(图 10e、10f).

2.3.2　模式间初始化和外强迫分量贡献的差异

为了进一步探究各模式预测技巧来源的差异,对 8 个模式初始化和外强迫的贡献分别进行分解. 对比各模式温度预测的初始化(r_i)和外强迫分量(r_u)技巧的空间分布(图 11),发现两者在模式间的差异较小,预测技巧主要来自外强迫分量,且外强迫分量的贡献呈自西向东递增的分布,其占比在 80%～99% 之间. 初始化分量仅在 BCC-CSM2-MR 模式

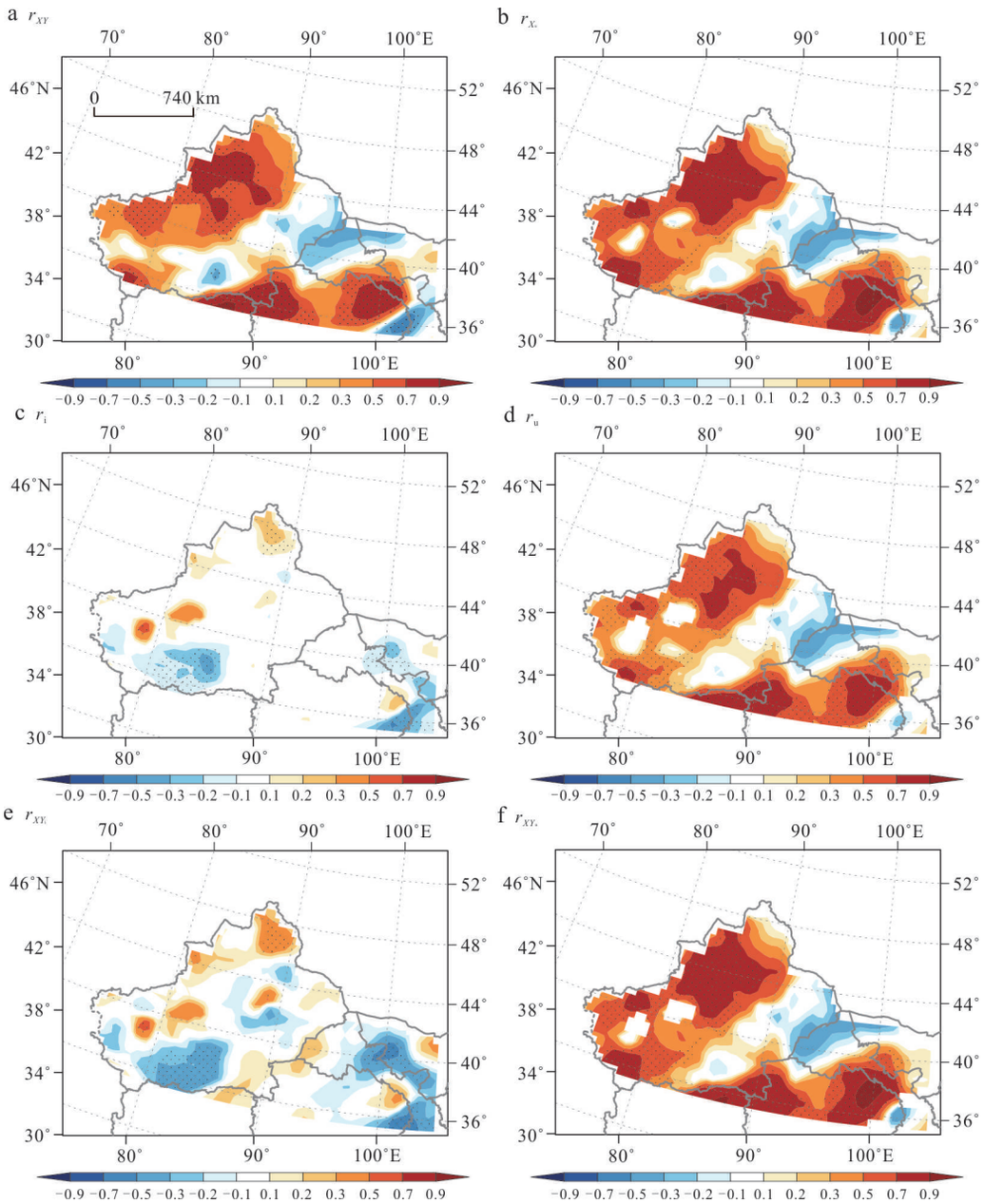

图 10　DCPP 多模式集合平均对西北地区 1962—2020 夏季 9 年(第 2～10 年)平滑降水的预测技巧分解

Fig.10　Predictive skill for summer precipitation in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2—10) average from DCPP multi-model ensemble mean predictions

a. 预测结果与观测的相关系数 r_{XY};b. 历史模拟与观测的相关系数 r_{X_u};c. 初始化分量的技巧 r_i;d. 外强迫分量的技巧 r_u;e. 初始化分量与观测的相关系数 r_{XY_i};f. 外强迫分量与观测的相关系数 r_{XY_u}.图中加点区域表示 $p<0.10$

预测的青海北部、CanESM5 模式预测的新疆南部和 FGOALS-f3-L 模式预测的新疆北部有显著的技巧,其在各模式中的贡献仅有 1%～20%.

对 8 个模式降水的年代际预测技巧进行分解,结果显示,各模式预测降水的初始化(r_i)和外强迫(r_u)分量的技巧存在较大的空间差异(图 12),除 FGOALS-f3-L 和 MPI-ESM1-2-LR 这两个与观测趋势完全相反的模式(图 5b)表现出大范围的负技巧外,剩余 6 个模式中 BCC-CSM2-MR、CMCC-CM2-SR5 的预测技巧主要来自初始化分量,其贡献达到了 71% 和 94%,初始化分量对预测技巧的贡献主要出现在新疆以及青海;其余 4 个模式的预测技巧主要来自外强迫分量,其贡献占比在 64%～81% 之间,且主要分布于新疆和青海境内.总体来看,对于西北地区

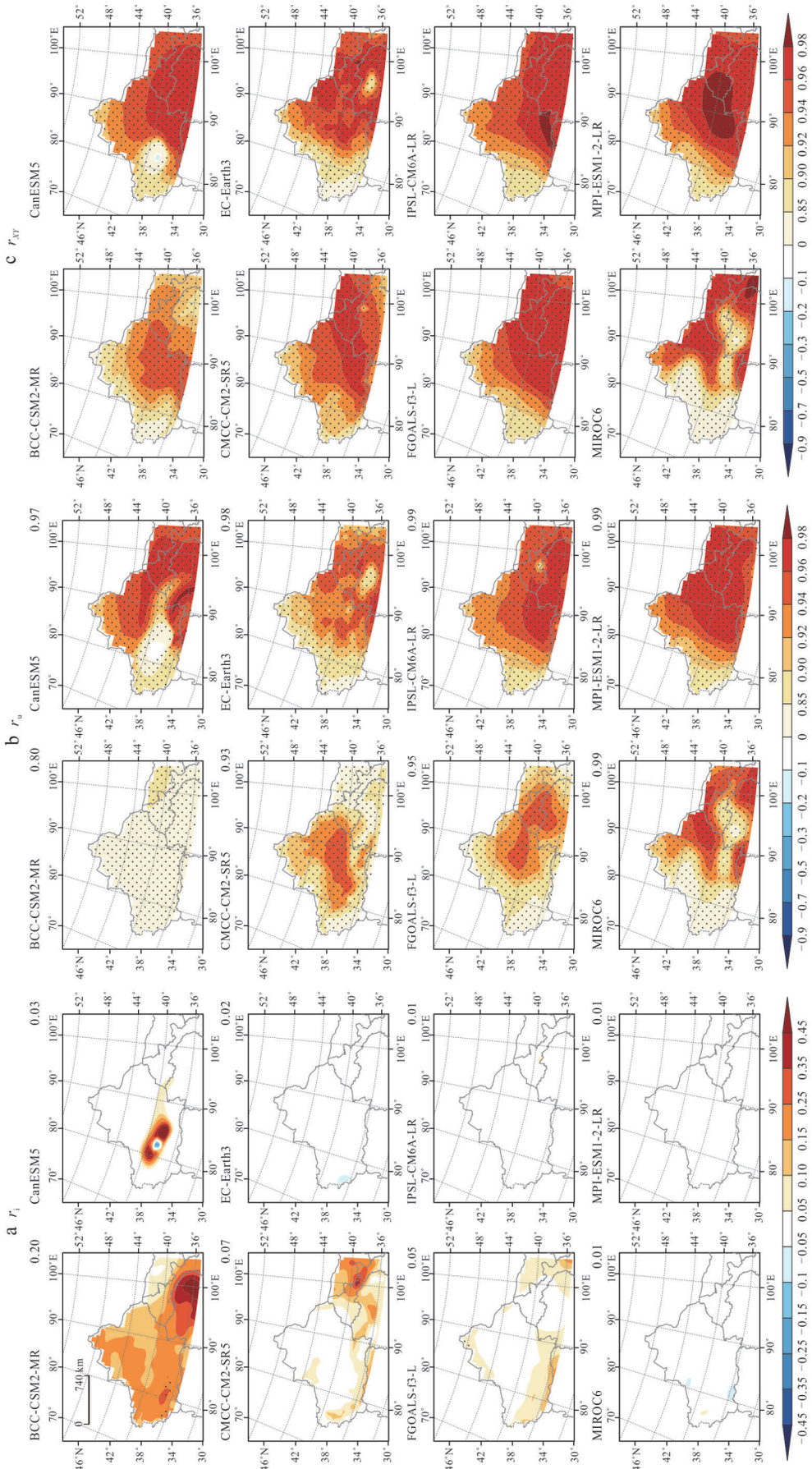

图11　DCPP多模式对西北地区1962—2020年夏季9年(第2~10年)平滑温度的预测技巧分解

Fig.11　Predicted skill for summer temperature in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2−10) average from DCPP predictions

a.初始化分量的技巧r_i; b.外强迫分量的技巧r_u; c.预测结果与观测的相关系数r_{xy}. 右上角数值为r_i或r_u在r_{xy}>0区域的占比, 图中加点区域表示p<0.10

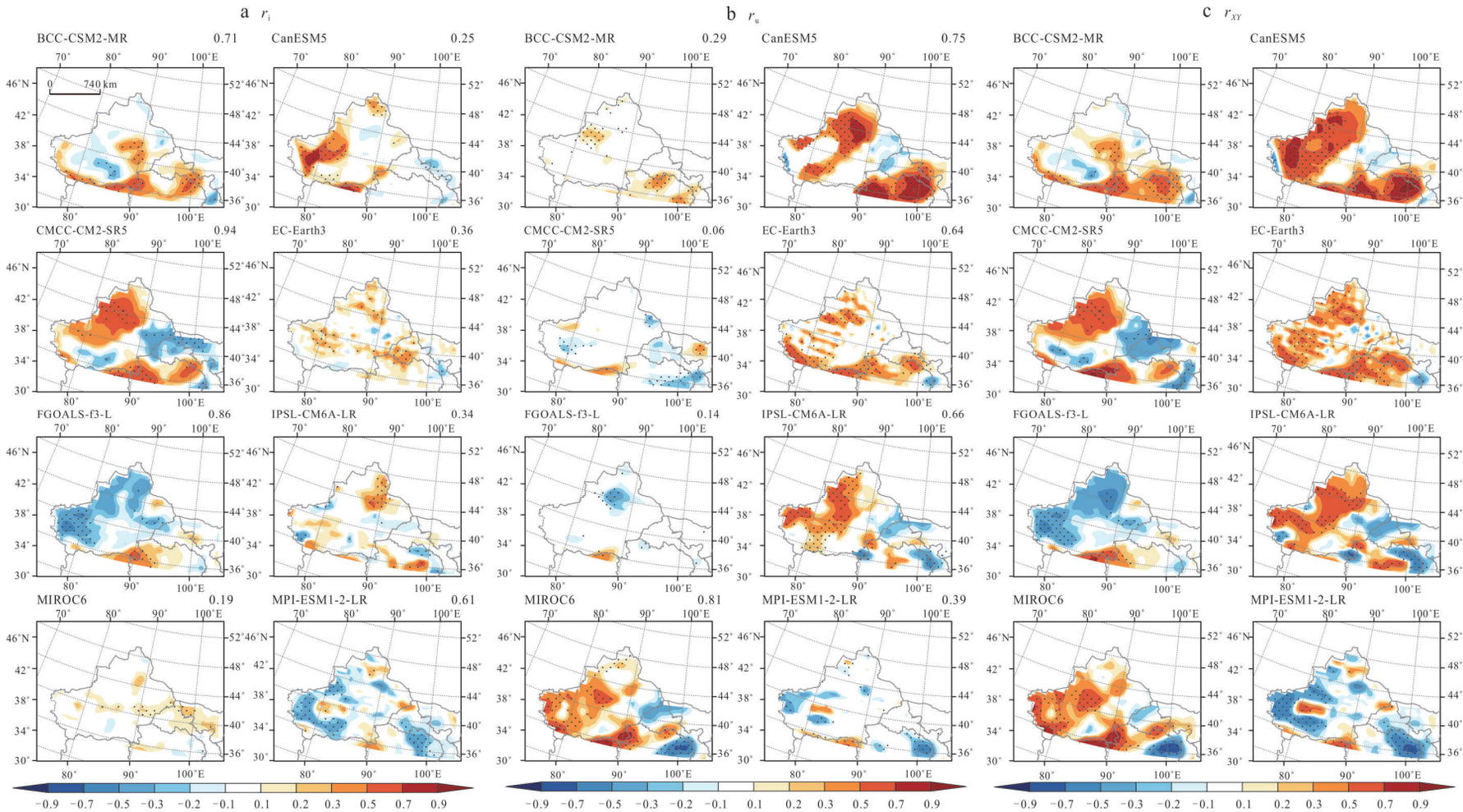

图12 DCPP多模式对西北地区1962—2020年夏季9年(第2~10年)平滑降水的预测技巧分解

Fig.12 Predicted skill for summer precipitation in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2−10) average from DCPP predictions

a.初始化分量的技巧r_i; b.外强迫分量的技巧r_u; c.预测结果与观测的相关系数r_{XY}. 右上角为r_i或r_u在$r_{XY}>0$区域的占比, 图中加点区域表示$p<0.10$

降水的预测各模式初始化和外强迫分量都有重要影响.

对比各模式温度和降水的预测技巧来源,温度的预测技巧主要来自外强迫分量,而降水的预测技巧受到初始化和外强迫分量的共同影响.温度预测的模式间差异较小,而降水预测的模式间差异较大.

3　结论和讨论

本文对西北暖湿化的时空变化特征以及CMIP6-DCPP多模式年代际预测效果进行了评估,并研究了初始化和外强迫分量对模式年代际预测技巧的贡献,得到的主要结论如下:

(1)西北地区的温度和降水存在明显的年代际变化,自20世纪60年代以来,西北地区显著暖湿化,以0.28～0.34 ℃/10a的趋势变暖,同时以1.85～2.54 mm/10a的速率变湿.

(2)DCPP多模式集合平均能够较好地预测出西北地区年代际尺度上的暖湿化,其中温度预测的显著技巧出现在西北全区,而降水的预测技巧主要存在于新疆西部和青海北部,模式对温度和降水的位相模拟优于振幅.

(3)DCPP各模式间温度预测技巧的空间差异较小,各模式与观测的相关系数均达到0.9以上,且主要受到外强迫分量的影响,其贡献均在75%以上,其中MPI-ESM1-2-LR的预测效果最好;降水预测的模式间预测技巧差异较大,且同时受到初始化和外强迫的共同影响,其中初始化分量的贡献在19%～94%之间,而CanESM5的预测效果最好.

本文对CMIP6年代际气候预测计划对我国西北地区暖湿化的预测能力进行了评估,并探究其预测技巧来源,得出西北地区温度的预测技巧主要来自外强迫分量,而降水的预测技巧既有初始化也有外强迫分量的影响这一结论.已有的研究表明,西北地区变暖受到人类活动引起的温室气体增多这一外强迫的影响,而变湿既有外强迫也有大气自然变率的影响(丁一汇等, 2023; 张强等, 2023),但未来西北地区气候的变化方向以及降水的长期趋势仍不明确(Zhang *et al.*, 2023).通过量化初始化和外强迫分量的技巧贡献,本文的结果表明在提高对我国西北地区未来短期气候预估的可靠性上,对温度变化的订正预估主要需要考虑外强迫的影响,而对降水变化的订正预估则需要一同考虑初始化和外强迫分量的影响,同时还需要改进模式对温度和降水振幅的模拟能力.但对于西北地区近几十年变暖变湿的驱动机制文中并未进行研究,有待未来的进一步探索.

References

Boer, G. J., Kharin, V. V., Merryfield, W. J., 2013. Decadal Predictability and Forecast Skill. *Climate Dynamics*, 41(7): 1817－1833. https://doi.org/10.1007/s00382-013-1705-0

Boer, G. J., Smith, D. M., Cassou, C., et al., 2016. The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) Contribution to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(10): 3751－3777. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3751-2016

Chen, C. Z., Zhang, X. J., Lu, H. Y., et al., 2021. Increasing Summer Precipitation in Arid Central Asia Linked to the Weakening of the East Asian Summer Monsoon in the Recent Decades. *International Journal of Climatology*, 41(2): 1024－1038. https://doi.org/10.1002/joc.6727

Chen, F. H., Xie, T. T., Yang, Y. J., et al., 2023. Discussion of the "Warming and Wetting" Trend and its Future Variation in the Drylands of Northwest China under Global Warming. *Science China Earth Sciences*, 53(6): 1246－1262 (in Chinese).

Ding, Y. H., Liu, Y. J., Xu, Y., et al., 2023. Regional Responses to Global Climate Change: Progress and Prospects for Trend, Causes, and Projection of Climatic Warming-Wetting in Northwest China. *Advances in Earth Science*, 38(6): 551－562 (in Chinese with English abstract).

Du, Y., Wang, D. G., Zhu, J. X., 2021. Study on Warming and Humidification Evolution in Northwest China Based on CMIP5. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 32(5): 61－69, 77 (in Chinese with English abstract).

Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., et al., 1981. Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science*, 213(4511): 957－966. https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957

Hausfather, Z., Drake, H. F., Abbott, T., et al., 2020. Evaluating the Performance of Past Climate Model Projections. *Geophysical Research Letters*, 47(1): e2019GL085378. https://doi.org/10.1029/2019GL085378

Hu, S., Zhou, T. J., 2021. Skillful Prediction of Summer Rainfall in the Tibetan Plateau on Multiyear Time Scales. *Science Advances*, 7(24): eabf9395. https://doi.org/10.1126/sciadv.abf9395

Li, M., Sun, H. Q., Su, Z. C., 2021. Research Progress in

Dry/Wet Climate Variation in Northwest China. *Geographical Research*, 40(4): 1180—1194 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y. Z., Wu, C. Q., Jia, R., et al., 2018. An Overview of the Influence of Atmospheric Circulation on the Climate in Arid and Semi-Arid Region of Central and East Asia. *Science China Earth Sciences*, 48(9): 1141—1152 (in Chinese).

Luo, R., Liu, Y. Z., Zhu, Q. Z., et al., 2021. Effects of Aerosols on Cloud and Precipitation in East-Asian Drylands. *International Journal of Climatology*, 41(9): 4603—4618. https://doi.org/10.1002/joc.7089

Peng, D. D., Zhou, T. J., 2017. Why Was the Arid and Semiarid Northwest China Getting Wetter in the Recent Decades? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(17): 9060—9075. https://doi.org/10.1002/2016JD026424

Peng, D. D., Zhou, T. J., Zhang, L. X., 2020. Moisture Sources Associated with Precipitation during Dry and Wet Seasons over Central Asia. *Journal of Climate*, 33(24): 10755—10771. https://doi.org/10.1175/jcli-d-20-0029.1

Pyper, B. J., Peterman, R. M., 1998. Comparison of Methods to Account for Autocorrelation in Correlation Analyses of Fish Data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(9): 2127—2140. https://doi.org/10.1139/cjfas-55-9-2127

Qin, M. H., Li, D. L., Dai, A. G., et al., 2018. The Influence of the Pacific Decadal Oscillation on North Central China Precipitation during Boreal Autumn. *International Journal of Climatology*, 38(S1): e821—e831. https://doi.org/10.1002/joc.5410

Ren, G. Y., Yuan, Y. J., Liu, Y. J., et al., 2016. Changes in Precipitation over Northwest China. *Arid Zone Research*, 33(1): 1—19 (in Chinese with English abstract).

Shi, Y. F., Shen, Y. P., Hu, R. J., 2002. Preliminary Study on Signal, Impact and Foreground of Climatic Shift from Warm-Dry to Warm-Humid in Northwest China. *Journal of Glaciolgy and Geocryology*, 24(3): 219—226 (in Chinese with English abstract).

Shi, Y. F., Shen, Y. P., Li, D. L., et al., 2003. Discussion on the Present Climate Change from warm-Dry to Warm Wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 23(2): 152—164 (in Chinese with English abstract).

Smith, D. M., Eade, R., Scaife, A. A., et al., 2019. Robust Skill of Decadal Climate Predictions. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2: 13. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0071-y

Sospedra-Alfonso, R., Boer, G. J., 2020. Assessing the Impact of Initialization on Decadal Prediction Skill. *Geophysical Research Letters*, 47(4): e2019GL086361. https://doi.org/10.1029/2019GL086361

Wang, Q., Zhai, P. M., 2022. CMIP6 Projections of the "Warming-Wetting" Trend in Northwest China and Related Extreme Events Based on Observational Constraints. *Journal of Meteorological Research*, 36(2): 239—250. https://doi.org/10.1007/s13351-022-1157-8

Wang, Q., Zhai, P. M., Qin, D. H., 2020. New Perspectives on 'Warming-Wetting' Trend in Xinjiang, China. *Advances in Climate Change Research*, 11(3): 252—260. https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.09.004

Wang, S. S., Huang, J. P., He, Y. L., et al., 2014. Combined Effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on Global Land Dry-Wet Changes. *Scientific Reports*, 4: 6651. https://doi.org/10.1038/srep06651

Wang, S. S., Huang, J. P., Huang, G., et al., 2022. Enhanced Impacts of Indian Ocean Sea Surface Temperature on the Dry/Wet Variations over Northwest China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(11): e2022JD036533. https://doi.org/10.1029/2022JD036533

Wu, B., Xin, X. G., 2019. Short Commentary on CMIP6 Decadal Climate Prediction Project(DCPP). *Climate Change Research*, 15(5): 476—480 (in Chinese with English abstract).

Wu, P., Ding, Y. H., Liu, Y. J., et al., 2019. The Characteristics of Moisture Recycling and Its Impact on Regional Precipitation Against the Background of Climate Warming over Northwest China. *International Journal of Climatology*, 39(14): 5241—5255. https://doi.org/10.1002/joc.6136

Wu, P., Liu, Y. J., Ding, Y. H., et al., 2022. Modulation of Sea Surface Temperature over the North Atlantic and Indian-Pacific Warm Pool on Interdecadal Change of Summer Precipitation over Northwest China. *International Journal of Climatology*, 42(16): 8526—8538. https://doi.org/10.1002/joc.7743

Xie, J. N., Zhou, J. L., 2001. A Preliminary Study on Trends and Interannual Variaration of Precipitation in Central and Western Portions of Northwest Region of China. *Plateau Meteorology*, 20(4): 362—367 (in Chinese with English abstract).

Xu, Y., Ding, Y. H., Zhao, Z. C., 2003. Scenario of Temperature and Precipitation Changes in Northwest China Due to Human Activity in the 21st Century. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(3): 327—330 (in

Chinese with English abstract).

Xue, T., Ding, Y. H., Lu, C. H., 2022. Interdecadal Variability of Summer Precipitation in Northwest China and Associated Atmospheric Circulation Changes. *Journal of Meteorological Research*, 36(6): 824－840. https://doi.org/10.1007/s13351-022-2021-6

Yang, J. H., Jiang, Z. H., Liu, X. Y., et al., 2012. Influence Research on Spring Vegetation of Eurasia to Summer Drought-Wetness over the Northwest China. *Arid Land Geography*, 35(1): 10－22 (in Chinese with English abstract).

Yang, J. H., Zhang, Q., Lu, G. Y., et al., 2021. Climate Transition from Warm-Dry to Warm-Wet in Eastern Northwest China. *Atmosphere*, 12(5): 548. https://doi.org/10.3390/atmos12050548

Yao, J. Q., Chen, Y. N., Zhao, Y., et al., 2020. Climatic and Associated Atmospheric Water Cycle Changes over the Xinjiang, China. *Journal of Hydrology*, 585: 124823. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124823

Zhang, C. J., Gao, X. J., Zhao, H. Y., 2003. Impact of Global Warming on Autumn Precipitation in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(2): 157－164 (in Chinese with English abstract).

Zhang, J. X., Wang, S. S., Huang, J. P., et al., 2023. The Precipitation-Recycling Process Enhanced Extreme Precipitation in Xinjiang, China. *Geophysical Research Letters*, 50(15): e2023GL104324. https://doi.org/10.1029/2023GL104324

Zhang, Q., Hu, Y. Q., Cao, X. Y., et al., 2000. On Some Problems of Arid Climate System of Northwest China. *Journal of Desert Research*, 20(4): 357－362 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Q., Lin, J. J., Liu, W. C., et al., 2019. Precipitation Seesaw Phenomenon and Its Formation Mechanism in the Eastern and Western Parts of Northwest China during Flood Season. *Science China Earth Sciences*, 49(12): 2064－2078 (in Chinese).

Zhang, Q., Yang, J. H., Wang, P. L., et al., 2023. Progress and Prospect on Climate Warming and Humidification in Northwest China. *Chinese Science Bulletin*, 68(14): 1814－1828 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Y. L., Wang, H. J., Ma, J. H., et al., 2015. Contribution of the Phase Transition of Pacific Decadal Oscillation to the Late 1990s' Shift in East China Summer Rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(17): 8817－8827. https://doi.org/10.1002/2015JD023545

中文参考文献

陈发虎，谢亭亭，杨钰杰，等，2023. 我国西北干旱区“暖湿化”问题及其未来趋势讨论. 中国科学: 地球科学，53(6): 1246－1262.

丁一汇，柳艳菊，徐影，等，2023. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望. 地球科学进展，38(6): 551－562.

杜懿，王大刚，祝金鑫，2021. 基于CMIP5的中国西北地区暖湿化演变研究. 水资源与水工程学报，32(5): 61－69，77.

李明，孙洪泉，苏志诚，2021. 中国西北气候干湿变化研究进展. 地理研究，40(4): 1180－1194.

刘玉芝，吴楚樵，贾瑞，等，2018. 大气环流对中东亚干旱半干旱区气候影响研究进展. 中国科学: 地球科学，48(9): 1141－1152.

任国玉，袁玉江，柳艳菊，等，2016. 我国西北干燥区降水变化规律. 干旱区研究，33(1): 1－19.

施雅风，沈永平，胡汝骥，2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土，24(3): 219－226.

施雅风，沈永平，李栋梁，等，2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究，23(2): 152－164.

吴波，辛晓歌，2019. CMIP6年代际气候预测计划(DCPP)概况与评述. 气候变化研究进展，15(5): 476－480.

谢金南，周嘉陵，2001. 西北地区中、东部降水趋势的初步研究. 高原气象，20(4): 362－367.

徐影，丁一汇，赵宗慈，2003. 人类活动引起的我国西北地区21世纪温度和降水变化情景分析. 冰川冻土，25(3): 327－330.

杨金虎，江志红，刘晓芸，等，2012. 近半个世纪中国西北干湿演变及持续性特征分析. 干旱区地理，35(1): 10－22.

张存杰，高学杰，赵红岩，2003. 全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响. 冰川冻土，25(2): 157－164.

张强，胡隐樵，曹晓彦，等，2000. 论西北干旱气候的若干问题. 中国沙漠，20(4): 357－362.

张强，林婧婧，刘维成，等，2019. 西北地区东部与西部汛期降水跷跷板变化现象及其形成机制. 中国科学: 地球科学，49(12): 2064－2078.

张强，杨金虎，王朋岭，等，2023. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望. 科学通报，68(14): 1814－1828.