1	doi:10.3799/dqkx.2025.015			
2	我国西北暖湿化的年代际预测技巧及其来			
3	源评估			
4	魏韵,邱惠宇			
5	中国地质大学环境学院,湖北武汉 430074			
6	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			
7	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			
8	暖湿化的年代际预测技巧及其主要来源。多模式对西北变暖的年代际预测技巧(与观测的相关系数)都在			
9	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			
10	用,多模式对西北变湿的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			
11	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			
12	影响,更需要考虑初始化对降水的影响。			
13	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			
14	中图分类号: P467 收稿日期: 2024-10-14			
15 16	Assessment the Skill and Source of Decadal Climate Prediction of Warm- ing and Humidification in Northwest China			
17	Wei Yun, Qiu Huiyu			
18	School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China			
19 20 21 22 23 24 25 26	Abstract: Based on observational data from 1962 to 2020 and the multi-model decadal hindcast and historical sim- ulation 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 基金项目: 中国博士后科学基金第 74 批面上资助 (2023M743284); 中国地质大学(武汉) "地大学者"人才岗位科研启动经费资助 (2022121)			
	第一作者简介:魏韵(1995-),副教授,研究方向:干旱气候变化及气候预估,E-mail:wei- yun@cug.edu.cn,ORCID:0000-0002-2965-1881			

- 27 initialize, there is significant variation in the predictive skill for wetting trends. The contribution of initialize to the
- 28 predictive skill varies widely among models, ranging from 19% to 94%. This suggests that to achieve accurate short-
- 29 term projections of future temperature and precipitation changes in Northwestern China, it is crucial to consider not
- 30 only the impact of external forcing but also the influence of initialize on precipitation.
- 31 Keywords: warming and wetting in Northwest China; decadal climate prediction; model assessment; external forc-
- 32 ing; initialize
- 33

34 引言

我国西北地区深居欧亚大陆腹地,位于世界上最大干旱半干旱带的核心区域。较少的降 35 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 36 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 37 提供了丰富的资料来源(张强等,2023)。谢金南和周嘉陵(2001)认为西北地区在20世纪 38 下半叶整体呈暖干化,在 80 年代后期增暖显著(施雅风等,2002),同时伴随着西北西部降 39 水和径流的增加(施雅风等,2003)。基于此,在本世纪初,施雅风等(2002)指出西北地 40 41 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 42 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 43 44 (2019)提出的西北地区降水的反向跷跷板式变化一致。到了上世纪 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 45 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 46 47 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 48 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 49 50 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。

前人的研究表明,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 51 (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 52 53 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 54 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 Wuetal.(2019)指出降水的 55 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 56 响大气环流来影响西北旱区的降水(Luo et al., 2021)。有研究指出,近几十年西北地区的 57 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 58 59 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 1980s 以来北大西洋年代际涛动(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)位 60 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 61 弱,而太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation, PDO)位相在 1990s 后由正转负,使 62 63 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中国西北地区,最终使到达西北地区的水汽增多,降 64 65 水增加(Wang et al., 2014; Zhu et al., 2015; Qin et al., 2018; Chen et al., 2021; Wu et al., 2022; 66 Xue et al., 2022)。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

67 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68 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 69 (Hansen et al., 1981; Hausfather et al., 2020)。前人的研究大多使用 CMIP5 或 CMIP6 中多 70 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 71 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; 72 Wang and Zhai, 2022)。基于此,年代际气候预测计划(Decadal Climate Prediction Projection, 73 DCPP)作为第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project phase 6, 74 75 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, 76 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 77 的来源,量化内部变率和外强迫的贡献(Boer et al., 2016)。 78

79 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
额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
减,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。

88 1.1 数据

本文使用的三套观测温度数据分别为 HadCRUT5、CRU TS v4.07 以及 GISTEMP,其 89 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 90 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 91 /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 92 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://crudat 93 a.uea.ac.uk/cru/data/hrg 下载获取; 而 GISTEMP 则来自美国国家海洋和大气管理局 (NOA 94 A),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: 95 96 //psl.noaa.gov/data/gridded/data.gistemp.html 下载获取。此外,本文使用了三套降水观测数据, 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1 97 891-2019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/ 98 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 99 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/ 100 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 101 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.prec 102 1.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°。 103

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(Hind
cast)试验数据。其中 hindcast 和 historical、SSP245 的试验成员数分别为 123 和 167 个。关
于模式的详细信息见下表 1。

109 110

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		

5

111 1.2 预测技巧评估方法

112 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
113 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(ACC)和
114 均方根误差技巧分数(MSSS)的计算公式分别如下:

115
$$ACC = \frac{\sum_{i=1}^{N} (f_i - f)(o_i - o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (f_i - f)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (o_i - o)^2}}$$

116
$$MSSS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (f_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} (o_i - o_i)^2}$$

(2)

(1)

117 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
119 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
120 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
121 技巧越高。

122 1.3 分离初始化与外强迫对预测技巧的贡献

123 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
124 迫对西北暖湿化预测技巧的相对贡献,本文使用了 Sospedra-Alfonso 和 Boer (2020)以及 Hu
125 和 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
126 拟结果(U)分解为:

127

$$X = \chi_{f} + \chi + x$$

$$Y_{A} = \{Y_{k}\} = \psi_{f} + \psi + \{y_{k}\}$$

$$U_{A} = \{U_{k}\} = \varphi_{f} + \{u_{k}\}$$
(3)

128其中 k 代表模式集合成员, χ_f 、 $\psi_f \models \varphi_f$ 代表由外强迫产生的变化, $\psi \models \chi$ 代表初始129化的内部变率产生的可预测分量, $x \in Y_k \models u_k$ 代表不可预测的噪声, {}表示多模式集合平130均。假设 $\psi_f \models \varphi_f$ 在集合成员间保持一致, $Y_k \models u_k$ 相互独立, 且满足正态分布。当取集合131平均时, $Y_k \models u_k$ 相互抵消使噪声约等于 0。 $Y_A \models U_A$ 分别代表年代际预测和历史模拟的集132合平均。

133 α 为 ψ_f 在 ϕ_f 上的投影系数, 计算公式为:

134
$$\alpha = \theta \, \overline{\frac{\psi_f \varphi_f}{\sigma_{\varphi_f}^2}} = \theta r_{Y_A U_A} \, \frac{\sigma_{Y_A} \sigma_{U_A}}{\sigma_{\varphi_f}^2} \tag{4}$$

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:

$$Y_u = \alpha \varphi_f$$
$$Y_i = (\psi_f - \alpha \varphi_f) + \psi$$

(5) 137 其中 σ_{Y_A} 、 σ_{U_A} 与 σ_{φ_f} 分别代表 Y_A 、 U_A 与 φ_f 的标准差,如果 ψ_f 与 φ_f 的协方差($\psi_f \varphi_f$) 138 小于零,则 $\theta=0$,否则 $\theta=1$, $r_{_{Y,U_{1}}}$ 是多模式集合平均年代际预测与多模式集合平均历史模 139 拟的相关系数。

140 相关技巧可以被分解为:

141
$$r_{XY_{A}} = \frac{\overline{EXY_{u}}}{\sigma_{X}\sigma_{Y_{A}}} + \frac{\overline{EXY_{i}}}{\sigma_{X}\sigma_{Y_{A}}} = r_{XY_{u}}\frac{\sigma_{Y_{u}}}{\sigma_{Y_{A}}} + r_{XY_{i}}\frac{\sigma_{Y_{i}}}{\sigma_{Y_{A}}} = r_{u} + r_{i}$$

142 其中 $\sigma_{Y_{4}}$ 、 $\sigma_{Y_{u}}$ 与 $\sigma_{Y_{i}}$ 代表 Y_{A} 、 Y_{u} 与 Y_{i} 的标准差, $r_{XY_{4}}$ 、 $r_{XY_{u}}$ 、 $x_{XY_{i}}$ 是观测与集合平均预 143 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},的贡献。

1.4 潜在的可预测性和预测技巧 144

145 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 p 146 是可预测技能的上限,用可预测方差和总方差的比率来表示;实际预测技能r是衡量实际预 147 测系统成功与否的指标。使用 Boer et al. (2013)的方法将潜在技能和实际技能近似分解为 148 外强迫和内部变率的共同作用, 基于模型潜在技能和实际技能的差异, 可以明确模型未来的 149 改讲空间。

150 模式的潜在技能 (
$$\rho$$
) 遵循以下计算方式:

$$\rho = CovYY_{A} / \sqrt{VarYVarY_{A}} = \sigma_{\psi}^{2} / \sigma_{Y} \sigma_{Y_{A}} \rightarrow \sigma_{\psi} / \sigma_{Y}$$

$$= (\sigma_{\psi_{f}}^{2} + \sigma_{\psi_{i}}^{2}) / \sigma_{Y} \sigma_{Y_{A}} = \rho_{f} + \rho_{i}$$
151
$$\rho_{f} = \sigma_{\psi_{f}}^{2} / \sigma_{Y} \sigma_{Y_{A}} \approx \sigma_{\varphi_{f}}^{2} / \sigma_{Y} \sigma_{Y_{A}} = CovU_{A}Y_{A} / \sqrt{VarYVarY_{A}}$$

$$\rho_{i} = \sigma_{\psi_{i}}^{2} / \sigma_{Y} \sigma_{Y_{A}} \approx \rho - \rho_{f}$$
(7)

1

135

136

152 其中 Y 和 U 代表模式的预测和模拟, Ψ 和 φ 代表其中的可预测部分,角标 i 和 f 代表可 153 预测中的内部变率和外强迫分量, σ_{Y_A} 、 σ_{Y} 、 σ_{φ_f} 、 σ_{ψ_f} 、 σ_{ψ_i} 代表 Y_A 、Y、 φ_f 、 ψ_f 和 ψ_i 154 的标准差, $CovYY_A$ 和 $CovU_AY_A$ 表示 Y和 Y_A 的协方差, 以及 U_A 和 Y_A 的协方差, VarY、 155 $VarY_{A}$ 表示Y和 Y_{A} 的方差。 ρ 代表总潜在技能, ρ_{i} 和 ρ_{f} 分别代表内部变率和外强迫分量 156 的潜在技能。

模式的实际技能(r)计算式为: 157

(6)

$$r = CovXY_{A} / \sqrt{VarXVarY_{A}} = E \overline{\chi \psi} / \sigma_{X} \sigma_{Y_{A}} \rightarrow \sqrt{p}R_{\chi \psi}$$
$$= E(\overline{\chi_{f}\psi_{f}} + \overline{\chi_{i}\psi_{i}}) / \sigma_{X} \sigma_{Y_{A}} = r_{f} + r_{i}$$
158
$$r_{f} = E \overline{\chi_{f}\psi_{f}} / \sigma_{X} \sigma_{Y_{A}} \approx E \overline{\chi_{f}}\varphi_{f} / \sigma_{X} \sigma_{Y_{A}}$$
$$= CovXU_{A} / \sqrt{VarXVarY_{A}}$$

$$r_{i} = E \overline{\chi_{i}\psi_{i}} / \sigma_{X} \sigma_{Y_{A}} \approx r - r_{f}$$
(8)

159其中 X 代表观测结果,其中可预测部分为 X,由内部变率 χ_i 和外强迫分量 χ_f 组成,p160为潜在可预测方差分数, $R_{\chi \psi}$ 代表 X 和 ψ 的相关系数, σ_{Y_A} 、 σ_X 代表 Y_A 、 X 的标准差,161 $CovXY_A$ 和 $CovXU_A$ 表示 X 和 Y_A 的协方差以及 X 和 U_A 的协方差, VarX、 $VarY_A$ 分别表162示 X 和 Y_A 的方差。r 代表总实际技能, r_i 和 r_f 分别代表内部变率和外强迫分量的实际技能。

163 1.5 显著性检验方法

164 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
 165 (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,
 166 并使用 Pyper 和 Peterman (1998)的方法估计有效自由度 (*N_{eff}*),计算方法为:

167
$$\frac{1}{N_{eff}} \approx \frac{1}{N} + \frac{2}{N} \sum_{j=1}^{n} \frac{N-j}{N} \rho_{XX}(j) \rho_{YY}(j)$$

168 其中 N 表示样本数量, ρ_{xx}(j)代表 X 在滞后时间为 j 时的自相关, ρ_{yy}(j)代表 Y 在滞
 169 后时间为 j 时的自相关, 文中取 n 为 10。

170

(9)

171 2结果

172 2.1 观测的西北暖湿化现象

173 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
174 0.28-0.34℃/10a。其中,自上世纪 80 年代后期到 20 世纪末增暖最显著,速率高达 0.72-0.87℃
175 /10a,随后增速放缓。从温度趋势的空间分布(图 1c)来看,过去 60 年西北地区整体都发
176 生了显著变暖,但变暖并不均匀,呈自西向东递增的状态分布,其中新疆东部、内蒙古西部、
177 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 1.85-2.54mm/10a (图 1b)。其 178 中增湿幅度较大的时段主要出现在 1960s、1980s 和 2010s 前后, 趋势分别可达 1.17-1.82mm 179 /year、0.72-0.80mm/year 和 1.34-2.08mm/year。三个观测数据集 1962-2020 年的 9 年滑动平 180 均增湿速率均大于 0.18mm/year, 表明西北地区在过去近 60 年显著变湿。从空间分布(图 1 181 d)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 182 部、青海北部以及甘肃中部的增湿速率较大,最大增速可达 14.80mm/10a。总体来看,三个 183 184 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 185 肃中部。



186

187 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。(a)温度距平(℃),(b)降
 188 水距平(mm),(c)温度趋势(℃/10a),(d)降水趋势(mm/10a)。(距平相对于 1971-2000
 189 年)。图中加点区域表示 p<0.05。

Fig.1 Spatiotemporal characteristics of temperature and precipitation in Northwest China during summer from
 1962 to 2020 based on 9-year averages. (a) temperature anomalies (°C), (b) precipitation anomalies (mm), (c) temperature trends (°C/decade), (d) precipitation trends (mm/decade). (Anomalies are relative to the 1971-2000 base line period). Dotted areas indicate regions where p<0.05.

194 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
195 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
196 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。

197 2.2 多模式年代际预测技巧评估

198 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 的 8
 个年代际预测 123 个成员的 2-10 年平均和 167 个历史模拟成员的 9 年平滑进行评估,同时
 使用 PRECL 降水和 GISTEMP 温度的观测数据进行比较。



202

203	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。
204	(a)温度距平(℃),(b)降水距平(mm),(c)温度趋势(℃/10a),(d)降水趋势
205	(mm/10a)。(距平相对于 1971-2000 年)。(a)、(b)中的阴影表示 <mark>集合平均</mark> ±1个标准差,
206	(c)、(d)中右上角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。
207	Fig.2 Spatiotemporal characteristics of temperature and precipitation in Northwest China during summer from
208	1962 to 2020 based on 9-year (years 2-10) averages from DCPP multi-model predictions. (a) temperature anoma-
209	lies (°C), (b) precipitation anomalies (mm), (c) temperature trends (°C/decade), (d) precipitation trends (mm/dec-
210	ade). (Anomalies are relative to the 1971-2000 baseline period). In (a) and (b), the shading represents ensemble
211	$mean \pm one$ standard deviation. In (c) and (d), the top right corner shows the spatial correlation coefficient between
212	prediction trends and observation trends, with dotted areas indicating p<0.05.

213 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
214 (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

215 也很好地预测出了 1980s 后期到 20 世纪末期的快速增暖,预测和模拟的趋势达到了
216 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
217 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
218 地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
219 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
220 势高达 0.68℃/10a。

221 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
222 和 0.82(图 2b),相应趋势为 0.16mm/year 和 0.17mm/year。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
225 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
226 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,我们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。



234

235 图 1 DCPP 多模式预测的西北地区 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。(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。
 238 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 predictions. (a) ACC and MSSS
 for temperature (T) predictions, (b) ACC and MSSS for precipitation (Pr) predictions. Dotted areas indicate regions where p<0.10.

242 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
243 预测的效果, ACC 的最大值达到了 0.95, 但模式并不能很好的模拟出西北地区中部和东南

244 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
246 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。

247 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
248 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
249 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
250 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
251 巧优于降水,对位相的再现能力优于振幅。

252 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,我们计算了多模式 集合预测的潜在技能和实际技能。在温度预测技能变化(图 4a、b)上,模式的潜在技能中外 253 强迫分量占主要地位,随着预测范围增加潜在技能逐渐增大。多模式集合预测的实际技能及 254 其内部变率的技能随预测范围增加而增大,外强迫分量的技能在第2年后逐渐降低,但仍在 255 总技能中占主要地位,实际技能在后期的增加主要由内部变率技能的上升引起。对比多模式 256 集合预测的潜在技能和实际技能,发现模式对温度预测的实际技能高于自身的潜力,这是由 257 于模型中的信噪比过大而发生的"信噪比悖论"现象(Smith et al., 2019),未来对模式预测 258 结果的改进可以着眼于校正温度预测的信噪比来进行。 259



260

- 261 图 2 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。
- 262 (a)温度预测的潜在技能, (b)温度预测的实际技能。(c)降水预测的潜在技能, (d)降水预测的实
 263 际技能。(图中黑色为总技能,红色为内部变率的技能,蓝色为外强迫的技能)。
- Fig.4 Variation of DCPP multi-model prediction skills for summer temperature and precipitation in Northwest
- 265 China from 1962 to 2020. (a) potential skill for temperature predictions, (b) actual skill for temperature predictions. (c) potential skill for precipitation predictions, (d) actual skill for precipitation predictions. (Black line is to 267 tal skill, red line is skill from internal variability, and blue line is skill from external forcing).

268 模式对降水预测的潜在技能大于实际技能(图 4c、d),外强迫分量在潜在技能和实际
269 技能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。总潜在技能在第 1-3

270 年发生大幅度降低,而实际技能在第1-2年也明显降低,且降幅大于潜在技能,两者的变化
271 都与内部变率技能的减小有关,表明总技能的波动主要由内部变率引起。在后期,总技能又
272 会受外强迫技能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
273 内部变率的技巧随预测范围增加而出现的降低进行改进。

274 多模式集合预测温度和降水的潜在技能和实际技能随预测范围的变化明显不同。模式对
275 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
276 来说,模式未来应着眼于改进内部变率技能随预测范围增大出现的衰减。

277 2.2.2 模式间差异

283

278 为了探究模式间温度预测的差异,我们对 8 个模式的温度趋势分别进行计算(图 5a),
279 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℃/10
a,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,
281 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
282 上,模式间差异较小。



284 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。
 285 (a)温度趋势(℃/10a),(b)降水趋势(mm/10a)。右上角为模式预测趋势与观测趋势的空间相关系
 286 数,加点区域表示 p<0.05。

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) temperature trends (°C/dec ade), (b) precipitation trends (mm/decade). The top right corner shows the spatial correlation coefficient between
 prediction trends and observation trends, with dotted areas indicating p < 0.05.

291 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
292 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

293 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,
294 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
295 体来看,不同模式预测降水年代际变化的空间分布间存在较大差异,其中 CanESM5 的空间
296 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 297 测和历史模拟的结果一致,均为0.40°C/10a,对比观测趋势0.29°C/10a,模式对温度变化存 298 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 299 了 0.55°C/10a, 而 MIROC6 的升温速率最小, 只有 0.23°C/10a; 与观测相比, MPI-ESM1-2-300 301 LR 与观测的结果最接近,为 0.29℃/10a。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 0.75-302 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-ESM1-303 2-LR 的结果与观测值最近,预测效果最好;而 CanESM5 距离最远,预测效果最差。 304



306 图 3 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。(a)温度趋势
 307 (°C/10a), (b)温度预测泰勒图, (c)降水趋势(mm/10a), (d)降水预测泰勒图。((a)、
 308 (c)中蓝线为最大/小值,绿线为集合平均±标准差)。

305

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) temperature trends (°C/decade), (b) Taylor diagram for
temperature predictions, (c) precipitation trends (mm/decade), (d) Taylor diagram for precipitation predictions. (In
(a) and (c), blue lines indicate the maximum/minimum values, and green lines represent ensemble mean ± standard
deviation).

314 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
 315 果分别为 1.63mm/10a 和 1.73mm/10a, 低于观测的 2.39mm/10a。8 个模式中 CanESM5 预测

316 的降水趋势最大,达到了 2.82mm/10a,而 MPI-ESM1-2-LR 的预测结果最小,为-0.54mm/10
317 a。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
318 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 M
319 PI-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 320 低的特点(图 7a、b),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 321 度变化的位相模拟优于西部,其中 MPI-ESM-1-2-LR 的 ACC 最高,在新疆东部、甘肃西部 322 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 323 324 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-ESM-325 1-2-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 326 现,模式对西北地区东部温度变化的振幅和位相模拟技能高于西部,对位相的模拟技能高于 327 振幅。 328



329

330 图 4 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。(a) ACC,(b)
 331 MSSS。图中加点区域表示 p<0.10。

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. Dotted areas indicate regions where p<0.10.



图 5 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。(a) ACC, (b) 335 336 MSSS。图中加点区域表示 p<0.10。

337 Fig.8 Predicted skill for summer precipitation in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2-10) 338 average from DCPP predictions. (a) ACC, (b) MSSS. Dotted areas indicate regions where p < 0.10.

对各模式的降水预测技能分别进行评估,发现与多模式集合平均的结果不同(图 3b), 339 340 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、 341 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 342 343 好的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能,其余地 344 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 345

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 347

334

346

348 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 和 Boer (2020) 以及 Hu 和 Zhou (2021) 的方法探究初始化和外 349 强迫分量对预测技巧的贡献,分离的结果如图 9 和 10。 DCPP 多模式集合平均对温度的预测 350 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 351 0.99。通过分离初始化(ri)和外强迫(ru)的贡献发现,集合平均的预测技巧主要来自外强 352 迫分量(图 9c、d), 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 353 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 354 355 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、f)。



357 图 6 DCPP 多模式预测的西北地区 1962-2020 年夏季 9 年(第 2-10 年)平滑的温度预测技巧。(a)预测
 358 结果与观测的相关系数 rxy, (b)历史模拟与观测的相关系数 rxu, (c)初始化分量的技能 ri, (d)外强
 359 迫分量的技能 ru, (e)初始化分量与观测的相关系数 rxyi, (f)外强迫分量与观测的相关系数 rxyu。图中
 360 加点区域表示 p<0.10。

356

361Fig.9 Predictive skill for summer temperature in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2-10)362average from DCPP multi-model predictions. (a) correlation coefficient between predictions and observations (r_{xy}),363(b) correlation coefficient between historical simulations and observations (r_{xu}), (c) skill of the initialized compo-364nent (r_i), (d) skill of the external forcing component (r_u), (e) correlation coefficient between initialized component365and observations (r_{xyi}), (f) correlation coefficient between external forcing component and observations (r_{xyu}). Dot-366ted areas indicate regions where p<0.10.</th>

367 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
368 相关,最大相关系数达到了 0.95(图 10a、b)。分解初始化(r_i)和外强迫(r_u)的技能显
369 示,新疆西部和青海、甘肃的显著正技能以及西北地区东北部的负技能主要来自外强迫分量
370 (图 10c、d)。初始化分量的技能主要表现为新疆西部和北部小范围的显著正值,以及新疆
371 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,
372 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、f)。



8 7 DCPP 多模式预测的西北地区 1962-2020 年夏季 9 年(第 2-10 年)平滑的降水预测技巧。(a)预测
 结果与观测的相关系数 rxy, (b)历史模拟与观测的相关系数 rxu, (c)初始化分量的技能 ri, (d)外强
 迫分量的技能 ru, (e)初始化分量与观测的相关系数 rxyi, (f)外强迫分量与观测的相关系数 rxyu。图中
 加点区域表示 p<0.10。

378Fig.10 Predictive skill for summer precipitation in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2-37910) average from DCPP predictions. (a) correlation coefficient between predictions and observations (r_{xy}) , (b) cor-380relation coefficient between historical simulations and observations (r_{xu}) , (c) skill of the initialized component (r_i) ,381(d) skill of the external forcing component (r_u) , (e) correlation coefficient between initialized component and observations (r_{xyi}) , (f) correlation coefficient between external forcing component and observations (r_{xyu}) . Dotted ar-383eas indicate regions where p<0.10.</th>

384 2.3.2 模式间初始化和外强迫分量贡献的差异

373

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)技能的空间分布(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 模式预测的青海北部、CanESM5 模式预测的新疆南部和 FGOALS-f3-L 的新疆北部有显著的技巧,其在各模式中的贡献仅有 1%-20%。

391 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)
392 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-ESM1393 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
394 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%
395 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
396 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
397 看,对于西北地区降水的预测各模式初始化和外强迫分量都有重要影响。



399 图 8 DCPP 预测的西北地区 1962-2020 年夏季 9 年(第 2-10 年)平滑的温度预测技巧。(a)初始化分量
 400 的技能 r_i, (b)外强迫分量的技能 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
 401 域的占比,图中加点区域表示 p<0.10。

402Fig.11 Predicted skill for summer temperature in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 2-10)403average from DCPP predictions. (a) The skill of the initialized component r_i , (b) The skill of the external forcing404component r_u . (c) correlation coefficient between predictions and observations. The proportion of r_i or r_u in the re-405gion where $r_{xy} > 0$ in the upper right corner, with dotted areas indicating p<0.10.</td>



407 图 9 DCPP 预测的西北地区 1962-2020 年夏季 9 年(第 2-10 年)平滑的降水预测技巧。(a)初始化分量
 408 的技能 r_i, (b)外强迫分量的技能 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
 409 域的占比,图中加点区域表示 p<0.10。

Fig.12 Predicted skill for summer precipitation in Northwest China from 1962 to 2020 based on 9-year (years 210) average from DCPP predictions. (a) The skill of the initialized component r_i, (b) The skill of the external forcing component r_u. (c) correlation coefficient between predictions and observations. The proportion of r_i or r_u in the

```
413
```

406

398

region where $r_{xy} > 0$ in the upper right corner, with dotted areas indicating p<0.10.

414 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
415 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
416 的模式间差异较大。

418 3 结论和讨论

419 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420 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:

421 (1)西北地区的温度和降水存在明显的年代际变化,自上世纪 60 年代以来,西北地区
422 显著暖湿化,以 0.28-0.34°C/10a 的趋势变暖,同时以 1.85-2.54mm/10a 的速率变湿。

423 (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
424 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,
425 模式对温度和降水的位相模拟优于振幅。

426 (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
427 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
428 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
429 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 430 431 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 432 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 433 434 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能贡献,本文的结果表明在提高 435 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 436 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 437 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 438 并未进行研究,有待未来的进一步探索。 439

440

441

442 作者贡献度说明:作者 1:魏韵,文章思路、绘图、论文撰写;作者 2:邱惠宇,绘图、论443 文撰写

444

445 References

- Boer, G. J., Kharin, V. V., Merryfield, W. J., 2013. Decadal Predictability and Forecast Skill. *Climate Dynam- ics*,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
- 450 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 Climatol- ogy*,41(2):1024-1038. https://doi.org/10.1002/joc.6727
- 453 Chen, F. H., Xie, T. T., Yang, Y. J., et al., 2023. Discussion of the "Warming and Wetting" Trend and its Future
 454 Variation in the Drylands of Northwest China under Global Warming. *Science China Earth Sci-*455 *ences*,53(6):1246-1262(in Chinese).
- 456 Ding, Y. H., Liu, Y. J., Xu, Y., et al., 2023. Regional Responses to Global Climate Change: Progress and Prospects
 457 for Trend, Causes, and Projection of Climatic Warming-wetting in Northwest China. *Advances in Earth Sci-*458 *ence*,38(6):551-562(in Chinese with English abstract).
- 459 Du, Y., Wang, D. G., Zhu, J. X., 2021. Study on Warming and Humidification Evolution in Northwest China Based
 460 on CMIP5. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 32(5):61-69+77(in Chinese with English abstract).
- 461 Hansen, D., Johnson, A., Lacis, et al., 1981. Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Sci-*462 *ence*,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. *Geo- graphical 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).
- 472 Luo, R., Liu, Y. Z., Zhu, Q. Z., et al., 2021. Effects of Aerosols on Cloud and Precipitation in East-Asian Drylands.
 473 *International Journal of Climatology*, 41(9):4603-4618. https://doi.org/10.1002/joc.7089
- 474 Peng, D. D., Zhou, T. J., 2017. Why was the Arid and Semiarid Northwest China Getting Wetter in the Rrecent
- 475 Decades? Journal of Geophysical Research: Atmospheres,122(17):9060–9075.
 476 https://doi.org/10.1002/2016JD026424
- 477 Peng, D. D., Zhou, T. J., Zhang, L. X., 2020. Moisture Sources Associated with Precipitation during Dry and Wet
- 478 Seasons over Central Asia. Journal of Climate, 33(24):10755-10771. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0029.1

- 479 Pyper, B. J., Peterman, R. M., 1998. Comparison of Methods to Account for Autocorrelation in Correlation Analyses
- 480 of Fish Data. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences,55(9):2127-2140.
 481 https://doi.org/10.1139/cjfas-55-9-2127
- 482 Qin, M. H., Li, D. L., Dai, A. G., et al., 2018. The Influence of the Pacific Decadal Oscillation on North Central
 483 China Precipitation during Boreal Autumn. *International Journal of Climatology*,38,e821-e831.
 484 https://doi.org/10.1002/joc.5410
- 485 Ren, G. Y., Yuan, Y. J., Liu, Y. J., et al., 2016. Changes in Precipitation over Northwest China. *Arid Zone Re-*486 *search*,33(1):1-19(in Chinese with English abstract).
- 487 Shi, Y. F., Shen, Y. P., Hu, R. J., 2002. Preliminary Study on Signal, Impact and Foreground of Climatic Shift from
 488 Warm-dry to Warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*,24(3):219-226(in Chi489 nese with English abstract).
- 490 Shi, Y. F., Shen, Y. P., Li, D. L., et al., 2003. Discussion on the Present Climate Change from Warm-dry to Warm491 wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*,23(2):152-164(in Chinese with English abstract).
- 492 Smith, D. M., Eade, R., Scaife, A. A., et al., 2019. Robust Skill of Decadal Climate Predictions. *npj Climate and* 493 *Atmospheric Science*,2(1):13. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0071-y
- 494 Sospedra-Alfonso, R., Boer, G. J., 2020. Assessing the Impact of Initialization on Decadal Prediction Skill. *Geo-* 495 *physical Research Letters*,47(4):e2019GL086361. https://doi.org/10.1029/2019GL086361
- Wang, Q., Zhai, P. M., Qin, D. H, 2020. New Perspectives on 'Warming-wetting' Trend in Xnjiang, China. Ad vances in Climate Change Research, 11(3):252-260. https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.09.004
- 498 Wang, Q., Zhai, P. M., 2022. CMIP6 Projections of the "Warming-Wetting" Trend in Northwest China and Related
- 499 Extreme Events Based on Observational Constraints. *Journal of Meteorological Research*,36(2):239-250.
 500 https://doi.org/10.1007/s13351-022-1157-8
- 501 Wang, S. S., Huang, J. P., He, Y. L., et al., 2014. Combined Effects of the Pacific Decadal Oscillation and El
- 502 Nino-Southern Oscillation on Global Land Dry-Wet Changes. Scientific Reports,4(1):6651.
 503 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: Atmos- pheres*, 127(11):e2022JD036533. https://doi.org/10.1029/2022JD036533
- 507 Wu, B., Xin, X. G., 2019. Short Commentary on CMIP6 Decadal Climate Prediction Project (DCPP). *Climate* 508 *Change Research*,15(5):476-480(in Chinese with English abstract).
- 509 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
- 512 Wu, P., Liu, Y. J., Ding, Y. H., et al., 2022. Modulation of Sea Surface Temperature over the North Atlantic and

- 513 Indian-Pacific Warm Pool on Interdecadal Change of Summer Precipitation over Northwest China. Interna-
- 514 tional 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 Variation 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
- 531 Zhang, C. J., Gao, X. J., Zhao, H. Y., 2003. Impact of Global Warming on Autumn Precipitation in Northwest
 532 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):13-18(in Chinese with English abstract).
- 538 Zhang, Q., Lin, J. J., Liu, W. C., et al., 2019. Precipitation Seesaw Phenomenon and its Formation Mechanism in
 539 the Eastern and Western Parts of Northwest China during the Flood Season. *Science China Earth Sci-*540 *ences*,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: Atmos- pheres*,120(17):8817-8827. https://doi.org/10.1002/2015JD023545
- 546
- 547 附中文参考文献

- 548 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,
 549 53(6):1246-1262.
- 550 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
 551 估研究进展与展望.地球科学进展,38(6):551-562.
- 552 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):61 553 69+77.
- 554 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.
- 555 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,
 556 48(9):1141-1152.
- 557 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.
- 558 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):
 559 219-226.
- 560 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):
 561 152-164.
- 562 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.
- 563 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.
- 564 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,2
 565 5(3):327-330.
- 566 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):1
 567 0-22.
- 568 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.
- 569 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):13-18.
- 570 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:
 571 地球科学,49(12):2064-2078.
- 572 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.