

# 新疆温度和降水变化的 CMIP6 模式预估

张晓璐<sup>1</sup>、王晓欣<sup>2</sup>、华丽娟<sup>1</sup>、姜大膀<sup>2,1\*</sup>

1 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘要** 本文使用国际耦合模式比较计划第六阶段 (CMIP6) 中对新疆当代温度和降水模拟能力较好的 20 个模式的试验数据, 在三种共享社会经济路径 (SSPs) 情景下, 预估了新疆 21 世纪温度和降水的年和季节变化。根据多模式中位数, 相对于 1995~2014 年, 新疆 21 世纪不断升温, 盆地增幅大于山区。在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下, 2015~2099 年年平均增温趋势分别为 0.1°C/10a、0.3°C/10a 和 0.7°C/10a; 2080~2099 年区域平均分别升温 1.3°C、2.6°C 和 5.3°C, 其中夏季增幅最大。各模式预估的年和季节温度变化符号的区域平均一致性大于 90%, 模式结果间不确定性范围随时间增加, SSP5-8.5 情景下的不确定性较 SS1-2.6 和 SSP2-4.5 的更大; 除春季外, 模式对其它季节温度预估的不确定性高于年平均。新疆 21 世纪降水不断增加, 降水百分比变化的大值区位于塔里木盆地中部, 末期 SSP5-8.5 情景下增幅超过 50%。在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下, 2015~2099 年年降水增幅分别是 0.2%/10a、2%/10a 和 4%/10a; 2080~2099 年区域平均降水分别增加 5%、13% 和 25%, 其中冬季降水增幅更大。各模式预估的新疆降水变化符号的一致性较好, 且随时间有所提高, 但仍较温度的小; 对新疆降水百分比变化预估的不确定性范围随时间增加, 其中在 SSP5-8.5 情景下的最大; 各季节降水预估的不确定性较年平均偏大。

**关键词** CMIP6、温度、降水、预估、新疆

**文章编号**

**中图分类号**

**文献标识码** A

**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21182

**收稿日期** 2022-01-18; **网络预出版日期**

**作者简介** 张晓璐, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: zhangxiaolu191@mailsucas.ac.cn

**通讯作者** 姜大膀, E-mail: [jiangdb@mail.iap.ac.cn](mailto:jiangdb@mail.iap.ac.cn)

**资助项目** 国家自然科学基金项目 41991284

**Found by** National Natural Science Foundation of China (Grant 41991284)

# Future projections of temperature and precipitation over Xinjiang based on CMIP6 models

Xiaolu Zhang<sup>1</sup>, Xiaoxin Wang<sup>2</sup>, Lijuan Hua<sup>1</sup>, and Dabang Jiang<sup>2,1\*</sup>

<sup>1</sup> College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>2</sup> Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract** In this study, we project the changes in temperature and precipitation over Xinjiang during 2015~2099 relative to 1995~2014 by using 20 global climate models, which have good performance in simulating climatological temperature and precipitation over this region, from Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) under the three Shared Socioeconomic Pathways (SSPs). Multi-model median results indicate that annual and seasonal temperatures will increase during the 21st century, with larger values in the basins than in the mountains. The trends of annual temperature changes under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 are 0.1 °C/10a, 0.3 °C/10a, and 0.7 °C/10a, respectively. The regionally averaged temperature will increase by 1.3 °C, 2.6 °C, and 5.3 °C during 2080~2099, with the strongest warming occurring in summer. The regionally averaged consistency in sign of projected annual and seasonal temperature changes is larger than 90%, and the inter-model uncertainty will increase with time, with larger values under SSP5-8.5 than those under SSP1-2.6 and SSP2-4.5. Larger uncertainties occur in the projection of seasonal temperatures than that of annual case, except for spring. Precipitation is expected to increase over Xinjiang during the 21st century. The maximum increase of more than 50% locates in the central Tarim Basin under the SSP5-8.5 scenario during 2080~2099. Under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, the trends of annual precipitation changes from 2015 to 2099 are 0.2%/10a, 2%/10a, and 4%/10a, respectively, and annual precipitation increases by a regional average of 5%, 13%, and 25% during 2080~2099. The largest increase in precipitation occurs in winter. The inter-model consistency in sign of projected annual and seasonal precipitation changes increases with time but is weaker than its temperature counterpart. The inter-model uncertainty for precipitation projections will increase with time, with the largest magnitude under SSP5-8.5. The inter-model uncertainty of seasonal precipitation projections are larger than that of the annual case.

**Keywords:** CMIP6, Temperature, Precipitation, Projection, Xinjiang

## 47 1 引言

48 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告 (AR6) 指出, 相对于 1850~1900  
49 年, 2001~2020 年全球平均地表气温上升了  $0.99 (0.84\sim 1.10) ^\circ\text{C}$  (IPCC, 2021)。全球变暖  
50 已经对大气、海洋和陆地造成深远影响, 如海洋酸化、海平面上升、冰川面积退缩、水循环  
51 加快、极端天气气候事件频发等 (Rossati, 2017; Oliver et al., 2018; Shugar et al., 2020)。IPCC  
52 AR6 亦提出, 2021~2040 年全球平均地表气温相对于 1850~1900 年预计升高  $1.5^\circ\text{C}$  (IPCC,  
53 2021)。在未来全球持续变暖背景下, 自然系统和人类社会受到的影响将会加剧, 尤其体现在  
54 气候变化的敏感区 (Gleick et al., 2010; Diffenbaugh and Giorgi, 2012; Turco et al., 2015)。

55 新疆地处欧亚大陆腹地 (图 1), 约占中国国土总面积的六分之一, 远离海洋, 降水短缺  
56 且蒸发大, 属于典型的温带大陆型干旱半干旱气候区。受独特的三山夹两盆地地形影响, 新疆  
57 的生态系统复杂多样且脆弱, 受气候变化影响较大 (Wu et al., 2010; Zhao et al., 2010)。施雅  
58 风等 (2002, 2003) 通过对温度升高、降水量和冰川融水量以及径流量持续增加等一系列气候  
59 变化事实的综合研究提出, 中国西北自 1980s 由暖干向暖湿转型, 新疆位于显著转型区。观  
60 测资料分析和模式模拟试验均表明, 1960s 以来中国西北的温度和降水显著增加 (Wu et al.,  
61 2010; Li et al., 2011; Li et al., 2016; Peng and Zhou, 2017; Wang et al., 2017)。其中, 观测的  
62 新疆 1960~2010 年温度变化趋势为  $0.34^\circ\text{C}/10\text{a}$ , 高于同期全球和中国平均 (Li et al., 2012),  
63 1961~2015 年降水增幅为  $3.7\%/10\text{a}$  (Wu P et al., 2019)。虽然新疆气候变暖变湿在短期内可能  
64 对生态系统有益, 但亦给水资源利用可持续性和风险管理等带来一系列挑战 (Wang et al.,  
65 2020)。

66 在第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 多模式集合平均或中位数预估研究中, 21 世纪中  
67 国平均温度和降水增幅明显高于全球平均 (Xu and Xu, 2012), 增温由南向北加强, 北方降水  
68 增加 (Chen and Frauenfeld, 2014; Wang and Chen, 2014; Tian et al., 2015; 王晓欣等, 2019)。

69 Wang et al. (2017) 使用 24 个 CMIP5 模式试验预估指出, 相对于 1986~2005 年, 在 RCP4.5  
70 和 RCP8.5 情景下, 2020~2099 年中国西北的年平均升温分别为  $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.68^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ;  
71 2080~2099 年年降水分别增加 50.6 mm 和 77.2 mm, 其中温度和降水增幅最大值均出现在新  
72 疆。以往关于新疆温度和降水预估工作主要使用早期全球气候模式及其驱动的区域气候模式,  
73 结果均显示 21 世纪普遍升温、降水增加 (吴佳等, 2011; 于恩涛等, 2015; 于晓晶等, 2017;  
74 Luo et al., 2018)。其中, 20 个 CMIP5 模式在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的算术平均  
75 结果显示, 相对于 1961~2005 年, 2045~2065 年塔里木盆地年温度将分别升高  $2.3^{\circ}\text{C}$ 、 $2.8^{\circ}\text{C}$   
76 和  $3.7^{\circ}\text{C}$ , 年降水分别增加 26%、23%和 27% (Zhu et al., 2019)。王政琪等 (2021) 使用 5 个  
77 CMIP5 模式数据分别驱动 RegCM4 区域气候模式的预估显示, 相对于 1986~2005 年, RCP8.5  
78 情景下 2081~2098 年新疆区域平均温度和降水分别增加  $4.9^{\circ}\text{C}$  和 28%。

79 CMIP6 是所有 CMIP 计划中参与模式数量最多、设计数值试验最丰富、提供模拟数据最  
80 为庞大的一次 (周天军等, 2019), 同时模式具有更优的参数化方案和更高的水平分辨率, 使  
81 得模式性能有所改进 (Stouffer et al., 2017)。模式评估表明, CMIP6 模式可较好模拟过去几十  
82 年中国温度和降水的年和季节气候态, 模式模拟能力整体上较 CMIP5 模式有一定提升 (Wu  
83 T W et al., 2019; Jiang et al., 2020; Zhou et al., 2020; Zhu et al., 2020; Rong et al., 2021)。此  
84 外, 基于 CMIP6 模式有关中国气候变化预估方面的研究相继展开 (Xu et al., 2021; Zhang G  
85 W et al., 2021, Zhu et al., 2021)。例如, You et al. (2021) 使用 20 个 CMIP6 模式试验的预估  
86 显示, 相对于 1986~2005 年, SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下中国 2015~2100 年年  
87 平均增温分别是  $0.10^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.63^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。然而, 至今针对新疆的温度和降水  
88 预估尚缺乏。为此, 我们利用对新疆当代温度和降水气候态的空间分布模拟能力较优的 20 个  
89 CMIP6 模式试验数据, 预估了不同共享社会经济路径 (SSPs) 情景下该地区 21 世纪温度和降  
90 水变化, 并讨论了多模式预估之间的不确定性和变化信号一致性。

91 2 数据和方法

92 新疆地形表现为三座山夹着两个盆地，其中北纬 42°N 大致为天山山脉所在位置（同 Jiang  
93 et al., 2013），从北至南依次是阿尔泰山脉、准格尔盆地、天山山脉、塔里木盆地和昆仑山山  
94 脉，吐鲁番盆地位于天山山脉东段的南侧（图 1）。

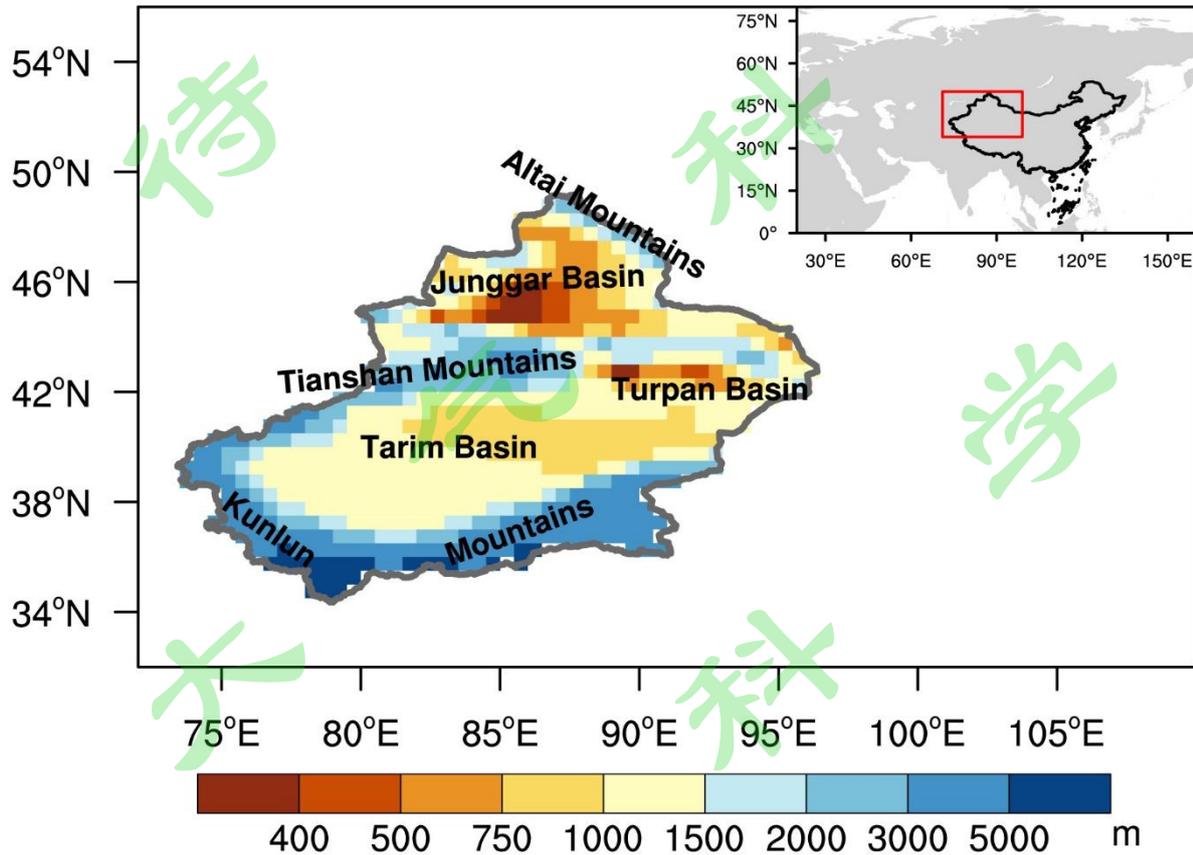


图 1 新疆地理位置（红色矩形框内：34°N~50°N，71°E~99°E）及  
其地形分布（填色，单位：m）

Fig. 1 The geographical location (curve in the red rectangle: 34°N~50°N, 71°E~99°E) and  
the topography (shading, units: m) of Xinjiang

95 本文在评估了 42 个 CMIP6 模式对 1995~2014 年新疆温度和降水气候态模拟能力的基  
96 础上（Zhang X L et al., 2021），择优挑选了 29 个模式，兼顾其中同时开展历史气候模拟试验  
97 （Eyring et al., 2016）、SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下 21 世纪气候预估试验（O'Neill

98 et al., 2016) 的模式, 最终分析了 20 个模式的试验数据。有关这些模式的基本信息请见表 1,  
99 更多细节请参阅 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>。

100 鉴于模式间水平分辨率从 $\sim 0.7^\circ \times 0.7^\circ$ 到 $\sim 2.8^\circ \times 2.8^\circ$ 不等(表 1), 这里将所有模式数据  
101 采取双线性插值法插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 水平分辨率上。春季(MAM)、夏季(JJA)、秋季(SON)  
102 和冬季(DJF)分别为 3~5 月、6~8 月、9~11 月和 12 月~次年 2 月。以 1995~2014 年作  
103 为参照时段, 2021~2040 年、2041~2060 年和 2080~2099 年分别作为 21 世纪近期、中期和  
104 末期, 以此预估了新疆 21 世纪年和季节温度、降水相对于参照时段的变化。

105 表 1 本文使用的 20 个 CMIP6 全球气候模式的基本信息

106 Table 1 Basic information of the 20 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)  
107 global climate models used in this study

| 序号 | 模式名称          | 所属国家<br>或地区 | 所属机构简称              | 水平分辨率<br>(纬向×经向)                       | 积分时段      |
|----|---------------|-------------|---------------------|--|-----------|
| 01 | AWI-CM-1-1-MR | 德国          | AWI                 | $0.9375^\circ \times \sim 0.9^\circ$   | 2015~2100 |
| 02 | BCC-CSM2-MR   | 中国          | BCC                 | $1.125^\circ \times \sim 1.1^\circ$    | 2015~2100 |
| 03 | CAMS-CSM-1-0  | 中国          | CAMS                | $1.125^\circ \times \sim 1.1^\circ$    | 2015~2099 |
| 04 | CESM2-WACCM   | 美国          | NCAR                | $1.25^\circ \times \sim 0.9^\circ$     | 2015~2100 |
| 05 | CanESM5       | 加拿大         | CCCma               | $2.8125^\circ \times \sim 2.8^\circ$   | 2015~2100 |
| 06 | EC-Earth3-Veg | 欧洲十国        | EC-Earth-Consortium | $0.703125^\circ \times \sim 0.7^\circ$ | 2015~2100 |
| 07 | EC-Earth3     | 欧洲十国        | EC-Earth-Consortium | $0.703125^\circ \times \sim 0.7^\circ$ | 2015~2100 |
| 08 | FGOALS-f3-L   | 中国          | CAS                 | $1.25^\circ \times 1.0^\circ$          | 2015~2100 |
| 09 | FGOALS-g3     | 中国          | CAS                 | $2.0^\circ \times \sim 2.0^\circ$      | 2015~2100 |
| 10 | GFDL-ESM4     | 美国          | NOAA-GFDL           | $1.25^\circ \times 1.0^\circ$          | 2015~2100 |
| 11 | INM-CM4-8     | 俄罗斯         | INM                 | $2.0^\circ \times 1.5^\circ$           | 2015~2100 |
| 12 | INM-CM5-0     | 俄罗斯         | INM                 | $2.0^\circ \times 1.5^\circ$           | 2015~2100 |
| 13 | IPSL-CM6A-LR  | 法国          | IPSL                | $2.5^\circ \times \sim 1.3^\circ$      | 2015~2100 |
| 14 | KACE1.0-G     | 韩国          | NIMS-KMA            | $1.875^\circ \times 1.25^\circ$        | 2015~2100 |
| 15 | MIROC6        | 日本          | MIROC               | $1.40625^\circ \times \sim 1.4^\circ$  | 2015~2100 |
| 16 | MPI-ESM1-2-HR | 德国          | MPI-M               | $0.9375^\circ \times \sim 0.9^\circ$   | 2015~2100 |
| 17 | MPI-ESM1-2-LR | 德国          | MPI-M               | $1.875^\circ \times \sim 1.9^\circ$    | 2015~2100 |

|    |            |    |       |   |           |
|----|------------|----|-------|---|-----------|
| 18 | NESM3      | 中国 | NUIST | $1.875^{\circ} \times \sim 1.9^{\circ}$ | 2015~2100 |
| 19 | NorESM2-LM | 挪威 | NCC   | $2.5^{\circ} \times \sim 1.9^{\circ}$   | 2015~2100 |
| 20 | NorESM2-MM | 挪威 | NCC   | $1.25^{\circ} \times \sim 0.9^{\circ}$  | 2015~2100 |

108 由于模式在动力学框架、物理过程和参数化方案等方面存在差异，不同模式对相同辐射  
 109 强迫的响应不同 (Hawkins and Sutton, 2011)。因此在研究区域共 700 个格点上，对每一个格  
 110 点计算 20 个 CMIP6 模式预估温度和降水变化的一个标准差，以此来量化多模式预估的不确  
 111 定性范围。

## 112 3 结果分析

### 113 3.1 温度变化

114 相对于参照时段，21 世纪新疆区域平均的年温度变化时间序列如图 2 所示。其中，2040  
 115 年之前缓慢升高，不同排放情景下的预估差异较小，之后有所增大；2060 年之后，SSP1-2.6  
 116 情景下变化趋于平稳且 2090s 以后略有减小，SSP2-4.5 情景下略有增加，SSP5-8.5 情景下增  
 117 幅明显加大。在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下，2015~2099 年年均温度变化线性趋  
 118 势分别为  $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.7^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ，均高于 20 个 CMIP6 模式预估的中国年均升温速  
 119 率 (You et al., 2021)；末期分别增温  $1.3^{\circ}\text{C}$ 、 $2.6^{\circ}\text{C}$  和  $5.3^{\circ}\text{C}$ 。多模式预估新疆年温度变化的不  
 120 确定性随时间放大，尤其是在高排放情景下。

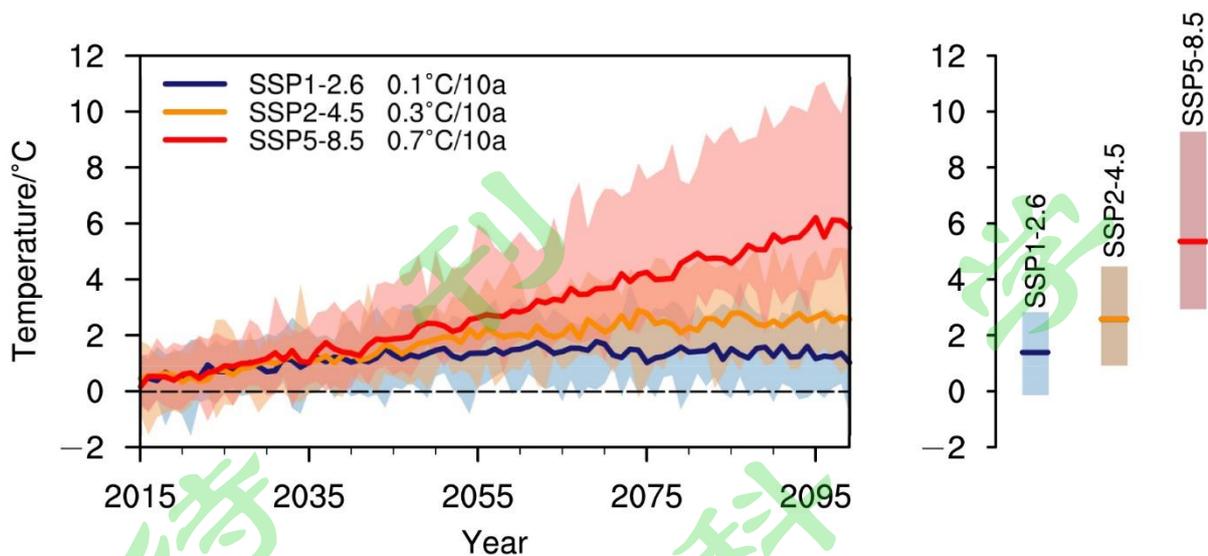


图2 相对于1995~2014年，在SSP1-2.6（蓝色）、SSP2-4.5（橙色）和SSP5-8.5（红色）情景下，20个CMIP6模式模拟的2015~2099年新疆区域平均年温度变化时间序列（左图，单位：°C）和21世纪末期的年温度变化（右图，单位：°C）。实线表示多模式中位数，阴影区为多模式模拟结果的5%~95%范围

Fig. 2 Time series of regionally averaged annual temperature changes over Xinjiang from 2015 to 2099 (left panel) and the annual temperature changes over the long-term during the 21st century (right panel) relative to 1995~2014 (units: °C), as derived from 20 CMIP6 models under SSP1-2.6 (blue), SSP2-4.5 (orange), and SSP5-8.5 (red), respectively. The solid line and the shading represent multi-model median and the range of 5%~95% of individual models, respectively

121 相对于1995~2014年，21世纪新疆年温度变化空间分布如图3所示。在三种情景下，  
 122 各时期年温度均显著升高，其中80%以上模式在全部区域通过了95%的显著性水平检验。根  
 123 据多模式中位数，SSP5-8.5情景下在近期、中期和末期分别升温0.9~1.4°C（区域内变化最小  
 124 值~最大值，下同）、2.0~2.6°C和4.7~6.2°C，其中大值区在准格尔盆地和吐鲁番盆地及其周  
 125 边，区域平均分别升温1.1°C、2.3°C和5.3°C。SSP1-2.6和SSP2-4.5情景下的变化与SSP5-8.5  
 126 的相似，近期区域平均分别升温0.9°C和1.0°C，进一步说明不同情景下的新疆温度变幅在近

127 期差异较小；中期区域平均分别增加 1.3℃和 1.8℃，末期则为 1.3℃和 2.6℃。SSP1-2.6、SSP2-  
 128 4.5 和 SSP5-8.5 情景下，新疆 21 世纪年温度变化与地形呈负相关关系，其空间相关系数在末  
 129 期分别为-0.6、-0.4 和-0.5，整体上与年温度在盆地增幅大于山区的分布特征相对应。这与基  
 130 于 37 个 CMIP5 模式的统计降尺度数据，预估所得的新疆 2021~2060 年相对于 1965~2014  
 131 年温度变化与地形的负相关关系一致 (Luo et al., 2018)。在三种情景下，多模式预估新疆各时  
 132 期年温度变化不确定性的空间分布相似，大值区出现在新疆北部、东部和西南部，模式间一  
 133 个标准差均超过 1℃。在近期、中期和末期，SSP1-2.6 情景下模式间一个标准差的区域平均值  
 134 均为 1.1℃，SSP2-4.5 的分别为 1.1℃、1.1℃和 1.2℃，SSP5-8.5 的随时间明显增加，分别为  
 135 1.1℃、1.3℃和 1.8℃。

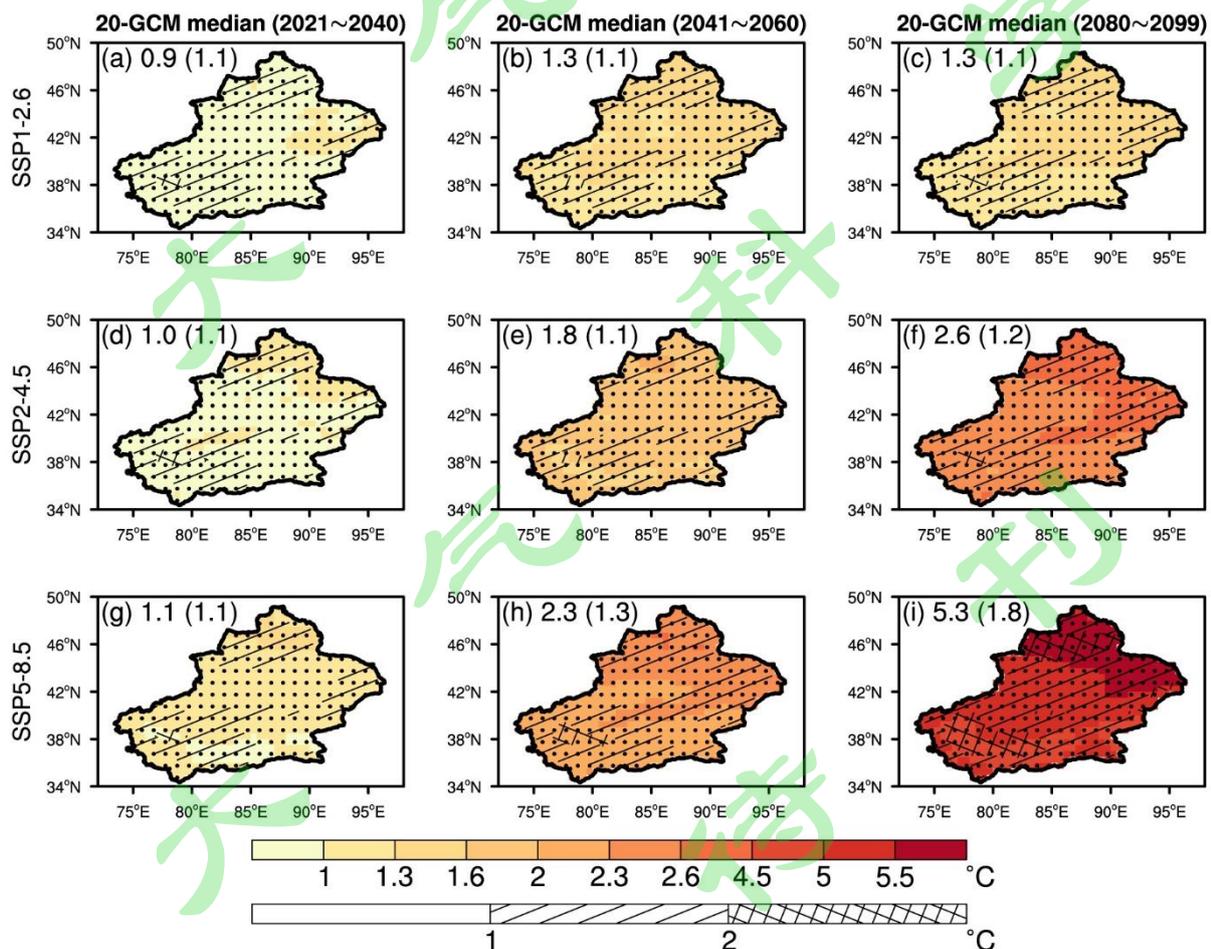


图 3 相对于 1995~2014 年，在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下，基于 20 个 CMIP6

模式的中位数预估，21 世纪近期（左列）、中期（中间列）和末期（右列）新疆年温度变化（填色，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）及多模式预估结果的不确定性（阴影，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）。黑色实心点和空心点分别表示大于 80% 和 50%~80% 的模式通过 95% 的显著性水平检验。各图左上角数字代表区域平均的年温度变化（不确定性）

Fig. 3 Changes in annual temperature (color, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) in the near- (left column), the middle- (middle column), and the long- (right column) terms during the 21st century relative to 1995~2014 over Xinjiang, as derived from the median of 20 CMIP6 models, under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, respectively, and inter-model uncertainty (shading, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) of temperature projections from individual models. The black solid dots and hollow dots indicate that more than 80% and 50%~80% of individual models are statistically significant at the 95% confidence level, respectively. The regionally averaged annual temperature change (inter-model uncertainty) is provided at the top left in each panel

136 与年温度变化的空间分布相似，SSP5-8.5 情景下 21 世纪新疆各季节温度普遍变暖，盆地  
137 增温大于山区，但上升幅度在季节间存在差异（图 4）。在近期，春季、夏季、秋季和冬季温  
138 度区域平均分别升高  $0.9^{\circ}\text{C}$ 、 $1.4^{\circ}\text{C}$ 、 $1.1^{\circ}\text{C}$  和  $1.0^{\circ}\text{C}$ ，中期较近期的略有上升，末期增幅则明显  
139 加大，分别为  $4.8^{\circ}\text{C}$ 、 $5.8^{\circ}\text{C}$ 、 $5.3^{\circ}\text{C}$  和  $5.1^{\circ}\text{C}$ 。期间，升温大值区所处位置在季节间有不同。以  
140 SSP5-8.5 情景下末期为例，增温大值区在春季和冬季出现在准格尔盆地，秋季位于塔里木盆  
141 地中部，夏季在准格尔盆地、塔里木盆地中部和吐鲁番盆地，幅度均大于  $6^{\circ}\text{C}$ （图 4c、f、i、  
142 1）。整体上，SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景下各季节温度变化的空间分布与 SSP5-8.5 的相似，但  
143 幅度偏小；从表 2 给出的具体数值可见，各情景下 21 世纪新疆夏季变暖最强，这与早期全球  
144 气候模式及其驱动的区域气候模式的预估相仿（许崇海等, 2008；于恩涛等, 2015；王政琪等,  
145 2021）；秋季、冬季次之，春季最小。多模式预估的各季节温度变化不确定性的空间分布与年

146 温度的类似，均在 SSP5-8.5 情景下末期最大，其中春季、夏季、秋季和冬季的模式间一个标  
 147 准差分别为 1.7℃、2.2℃、2.2℃和 1.9℃。在三种情景下，除春季以外，多模式对季节温度预  
 148 估的不确定性较年温度的偏大(表 2)。多模式预估新疆年和季节温度变化符号的一致性较高，  
 149 各情景下各时期区域平均的同号率均大于 90%。

150 表 2 根据 20 个 CMIP6 模式中位数，相对于 1995~2014 年，在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和  
 151 SSP5-8.5 情景下，21 世纪近期（2021~2040 年）、中期（2041~2060 年）和末期（2080~  
 152 2099 年），新疆年和季节温度、降水变化的区域平均值及模式间预估结果的不确定性

153 Table 2 Regionally averaged annual and seasonal temperature and precipitation changes over  
 154 Xinjiang projected by the median of 20 CMIP6 models under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-  
 155 8.5 scenarios in the near- (2021~2040), middle- (2041~2060), and long- (2080~2099) terms of the  
 156 21st century relative to 1995~2014. The regionally average inter-model uncertainty of the projected  
 157 temperature and precipitation changes among the models is listed in the brackets

|                 | 温度/℃（不确定性/℃） |           |           | 降水/%（不确定性/%） |         |         |
|-----------------|--------------|-----------|-----------|--------------|---------|---------|
|                 | 前期           | 中期        | 末期        | 前期           | 中期      | 末期      |
| Annual          | 0.9 (1.1)    | 1.3 (1.1) | 1.3 (1.1) | 4 (10)       | 7 (11)  | 5 (12)  |
| MAM             | 0.8 (0.8)    | 1.2 (0.9) | 1.3 (0.9) | 8 (18)       | 8 (18)  | 6 (17)  |
| <b>SSP1-2.6</b> |              |           |           |              |         |         |
| JJA             | 1.1 (1.4)    | 1.5 (1.4) | 1.6 (1.4) | -1 (22)      | -1 (22) | 1 (25)  |
| SON             | 1.0 (1.3)    | 1.4 (1.4) | 1.3 (1.4) | 1 (19)       | 6 (21)  | 2 (20)  |
| DJF             | 0.9 (1.3)    | 1.3 (1.2) | 1.3 (1.2) | 12 (21)      | 12 (21) | 11 (20) |
| Annual          | 1.0 (1.1)    | 1.8 (1.1) | 2.6 (1.2) | 4 (10)       | 9 (14)  | 13 (18) |
| MAM             | 0.8 (0.9)    | 1.4 (1.0) | 2.2 (1.0) | 4 (16)       | 10 (18) | 17 (24) |
| <b>SSP2-4.5</b> |              |           |           |              |         |         |
| JJA             | 1.1 (1.3)    | 2.0 (1.5) | 3.0 (1.5) | 2 (30)       | 2 (30)  | 1 (29)  |

|                 |        |           |           |           |         |         |         |
|-----------------|--------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|---------|
|                 | SON    | 0.9 (1.4) | 1.8 (1.4) | 2.6 (1.5) | 4 (18)  | 7 (21)  | 12 (27) |
|                 | DJF    | 0.9 (1.3) | 1.7 (1.2) | 2.6 (1.4) | 18 (23) | 18 (23) | 29 (29) |
|                 | Annual | 1.1 (1.1) | 2.3 (1.3) | 5.3 (1.8) | 4 (11)  | 9 (15)  | 25 (27) |
|                 | MAM    | 0.9 (1.0) | 2.0 (1.1) | 4.8 (1.7) | 5 (16)  | 11 (20) | 28 (34) |
| <b>SSP5-8.5</b> | JJA    | 1.4 (1.4) | 2.6 (1.6) | 5.8 (2.2) | 1 (24)  | -1 (26) | 2 (38)  |
|                 | SON    | 1.1 (1.4) | 2.3 (1.6) | 5.3 (2.2) | 5 (21)  | 9 (25)  | 22 (38) |
|                 | DJF    | 1.0 (1.2) | 2.1 (1.3) | 5.1 (1.9) | 10 (20) | 21 (26) | 59 (54) |

158

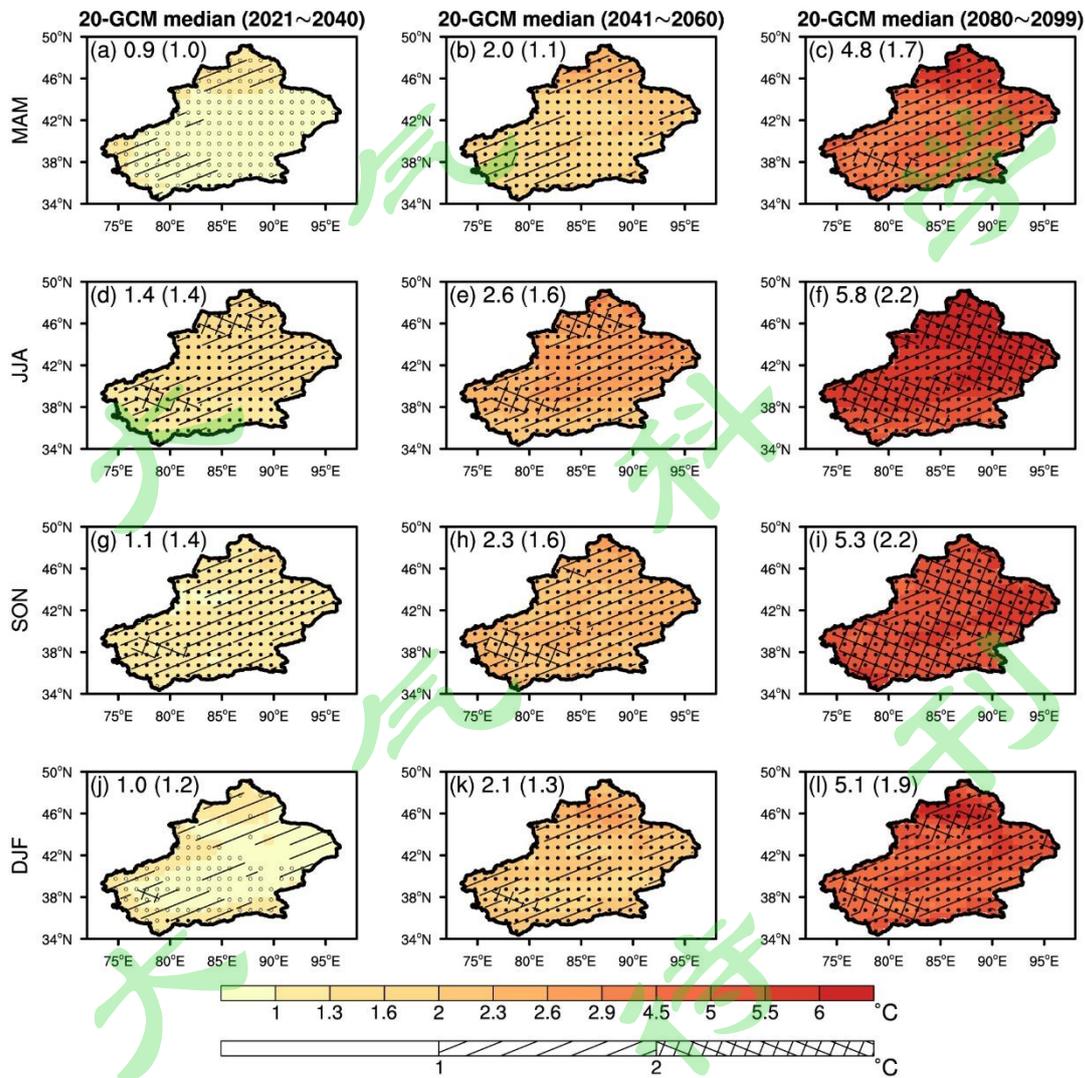


图 4 同图 3，但为 SSP5-8.5 情景下的季节温度变化（单位：°C）

Fig. 4 As in Fig. 3, but for the changes in seasonal temperature under SSP5-8.5 (units: °C)

159 3.2 降水变化

160 相对于 1995~2014 年,21 世纪新疆区域平均的年降水百分比变化时间序列如图 5 所示。  
161 它在近期和中期缓慢增加,不同情景下的差异较小;2060 年以后增幅在 SSP1-2.6 情景下略有  
162 减小,在 SSP2-4.5 情景下缓慢增加,在 SSP5-8.5 情景下明显增大。在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和  
163 SSP5-8.5 情景下,在 2015~2099 年变化趋势分别是 0.2%/10a、2%/10a 和 4%/10a,末期分别  
164 增加 5%、13%和 25%。与温度相似,多模式对降水百分比变化预估的不确定性随时间放大,  
165 尤其是在高排放情景下。

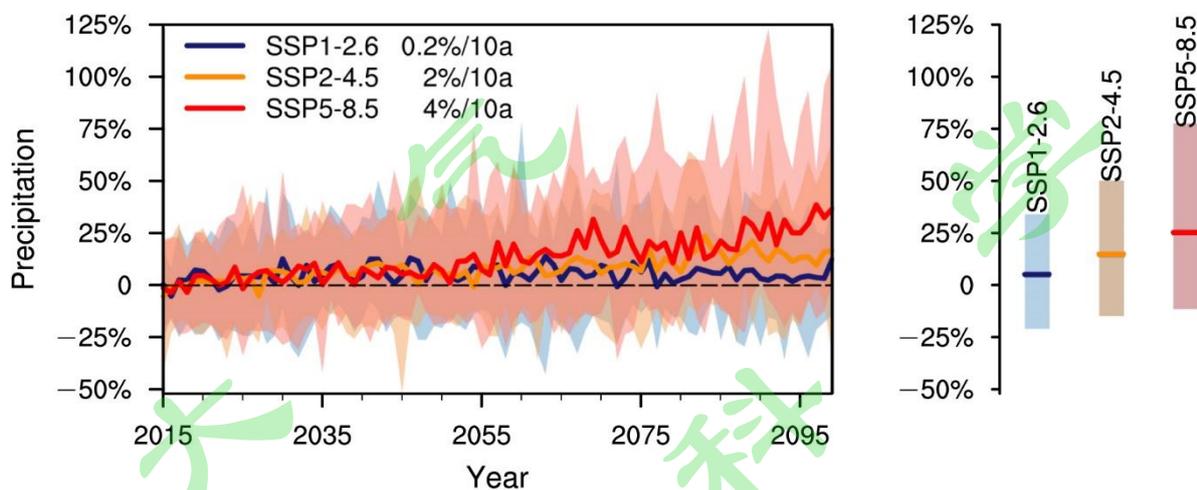


图 5 同图 2, 但为年降水变化 (单位: %)

Fig. 5 As Fig. 2, but for the changes in annual precipitation (units: %)

166 图 6 为相对于参照时段,在三种不同情景下,21 世纪新疆年降水在近期、中期和末期百  
167 分比变化的空间分布。在 SSP5-8.5 情景下,多模式中位数预估的年降水普遍增加,大值区位  
168 于塔里木盆地中部,这与 20 个 CMIP6 模式预估的中国 21 世纪降水变化的空间分布特征相似  
169 (Yang et al., 2021); 新疆大部在末期降水增幅大于 20%,其中大值区增幅超过 50%;近期、  
170 中期和末期区域平均值分别增加 4%、9%和 25%。SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景下的空间分布与  
171 SSP5-8.5 的形似,但幅度偏小。其中,近期区域平均值均增加 4%,中期分别为 7%和 9%,均

172 与 SSP5-8.5 情景下的变幅相当；末期区域平均值分别增加 5%和 13%，远小于 SSP5-8.5 情景  
 173 下的增幅。在高排放情景下，更多模式预估的变化通过了 95%的显著性水平检验。整体上，  
 174 盆地降水百分比变化较山区更大，这可能与参照时段盆地降水较少而山区降水偏多的背景气  
 175 候态有关（吴佳等, 2011）。在变化量上，各情景下阿尔泰山脉、天山山脉和昆仑山山脉降水  
 176 量超过  $1 \text{ mm d}^{-1}$ ，盆地处的降水量小于  $0.5 \text{ mm d}^{-1}$ ；与年温度的类似，新疆 21 世纪年降水变  
 177 化与地形之间亦存在相关关系，以年降水量变化为例，各情景下的空间相关系数为 0.8~0.9。  
 178 多模式预估的新疆年降水变化的不确定性大值区位于塔里木盆地中部，其模式间一个标准差  
 179 超过 15%，在中、高等排放情景下 21 世纪中期以后超过 30%，这可能与当代盆地降水偏少有  
 180 关。另外，当计算降水量变化的不确定性时，大值区位于阿尔泰山脉、天山山脉、昆仑上山  
 181 脉及其周边地区，在三种排放情景下模式间一个标准差均超过  $0.2 \text{ mm d}^{-1}$ 。

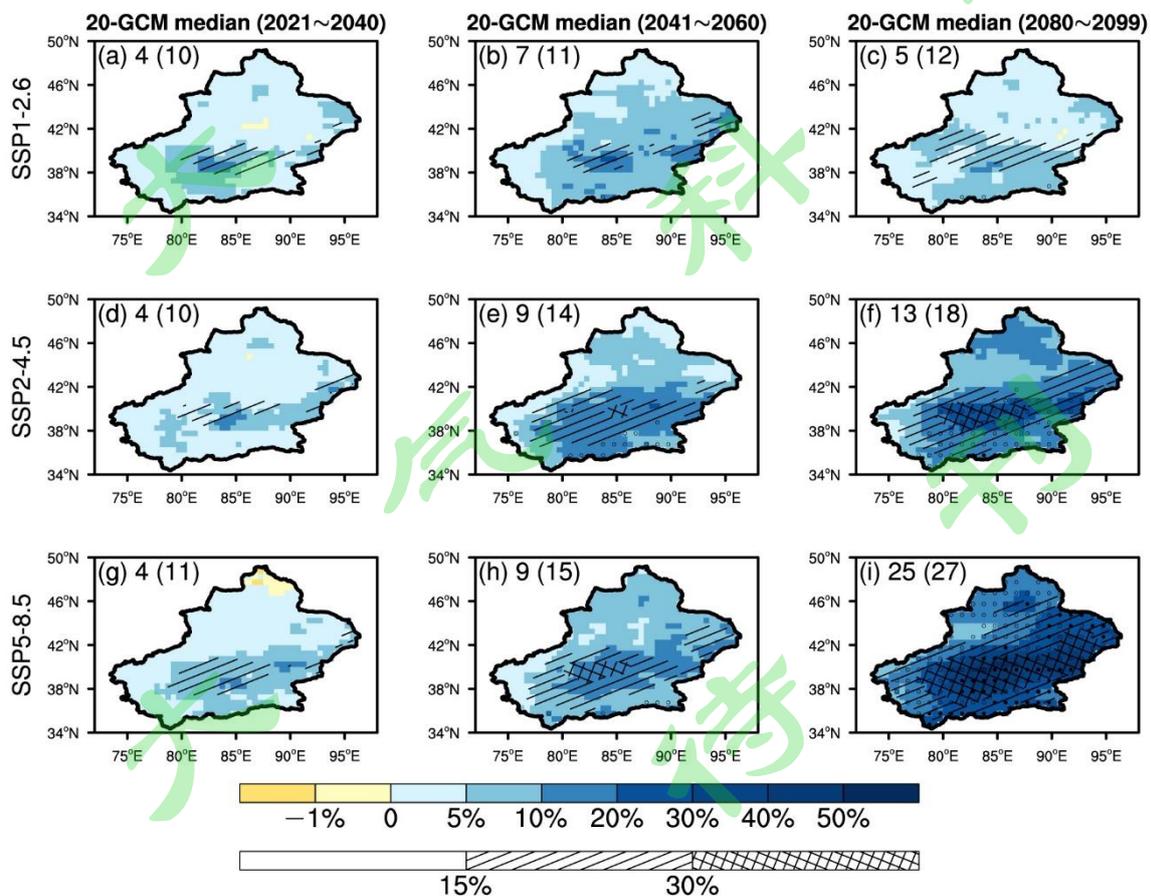


图 6 同图 3，但为年降水变化（填色，单位：%）及多模式预估结果的不确定性（阴影，单

位：%)

Fig. 6 As Fig. 3, but for the changes in annual precipitation (color, units: %) and associated inter-model uncertainty (shading, units: %)

182 除夏季外，SSP5-8.5 情景下 21 世纪各季节降水百分比变化的空间分布与年降水的相似，  
183 增幅在不同季节之间存在差异（图 7）。根据多模式中位数，春季区域平均降水在近期、中期  
184 和末期分别增加 5%、11%和 28%；秋季分别增加 5%、9%和 59%；冬季增幅最大，分别为  
185 10%、21%和 59%；夏季降水在新疆北部和西部减少，南疆大部增加，尤其是塔里木盆地中部  
186 和昆仑山一带，区域平均值变化分别为 1%、-1%和 2%，这可能与未来北疆地区偏南气流加  
187 强，形成反气旋性环流，气流下沉从而抑制降水过程有关（于晓晶等, 2017）。另外，以往基  
188 于气象站观测数据、NCEP/NCAR 再分析资料和 CMIP5 多模式预估的研究均表明，北疆夏季  
189 降水与西亚副热带西风急流的位置关系密切，当副热带急流位置偏北时，新疆北部的夏季降  
190 水减少（Zhao et al., 2014, 2018）。整体上，SSP1-2.6 和 SSP2-4.5 情景下降水变化空间分布与  
191 SSP5-8.5 的相似，除夏季外，各季节降水均增加但幅度偏小（表 2）。多模式预估各季节降水  
192 变化不确定性的空间分布与年降水的相似，均在新疆南部偏大，但数值相比年降水的偏大（图  
193 7，表 2）。模式预估新疆降水变化的一致性较温度的偏小，随时间有所提升。以 SSP5-8.5 情  
194 景为例，模式预估新疆 21 世纪春季、夏季、秋季和冬季降水变化信号一致性的区域平均值在  
195 近期分别为 66%、54%、63%和 74%，末期则分别为 93%、69%、79%和 98%。

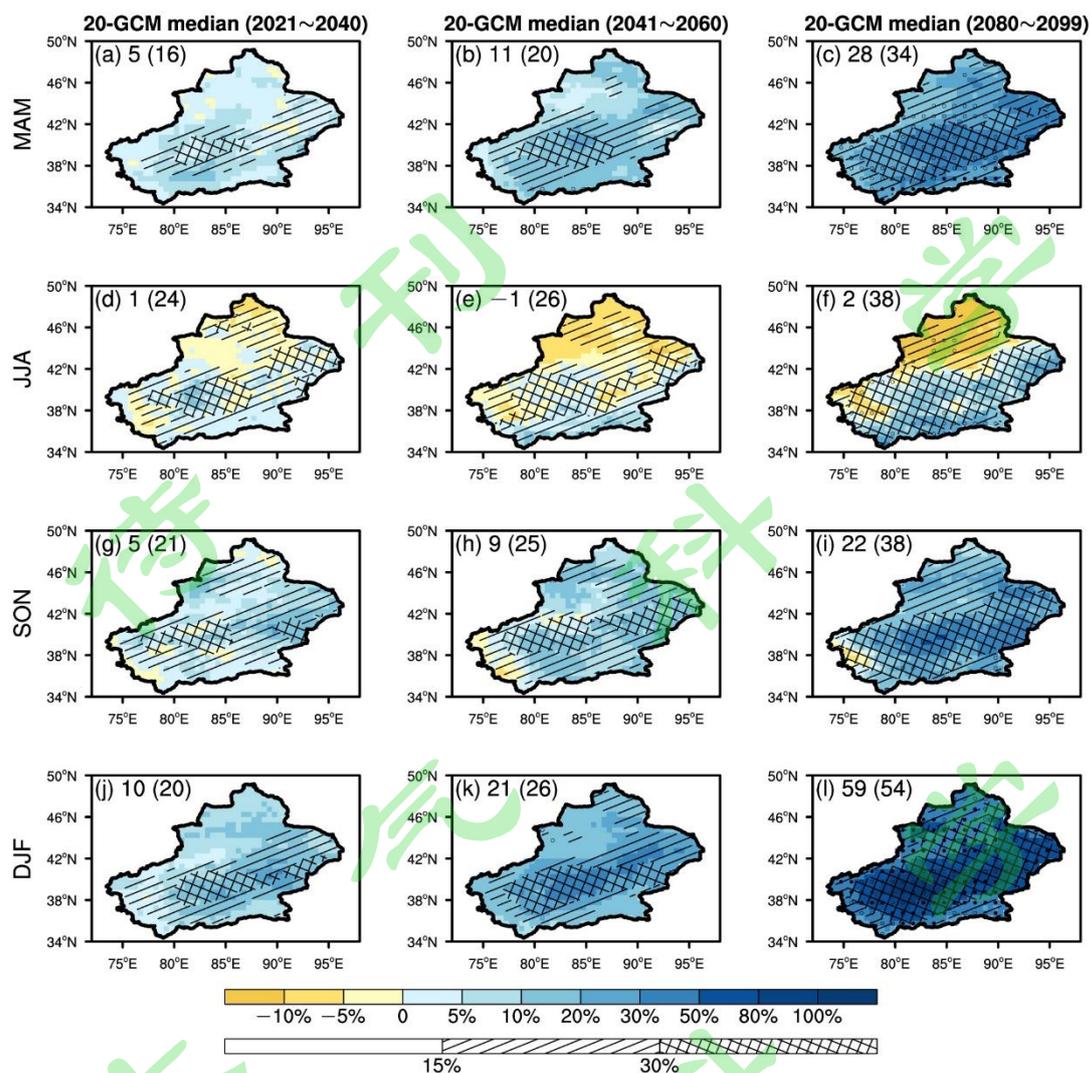


图7 同图6，但为 SSP5-8.5 情景下季节降水变化（填色，单位：%）

Fig. 7 As Fig. 6, but for the changes of seasonal precipitation under SSP5-8.5 (color, units: %)

#### 196 4 结论与讨论

197 本文在评估 42 个 CMIP6 模式对 1995~2014 年新疆温度和降水的年和季节气候态的模  
 198 拟能力基础上 (Zhang X L et al., 2021), 挑选出 29 个模拟能力较好的模式, 这些模式能够模  
 199 拟出温度在盆地高而在山区低、降水在山区偏多而在盆地偏少、温度和降水分布与地形高度  
 200 存在关联的主要空间分布特征; 进一步, 采用同时开展历史气候模拟试验、SSP1-2.6、SSP2-  
 201 4.5、和 SSP5-8.5 情景下未来预估试验的 20 个 CMIP6 模式的温度和降水月平均数据, 预估了  
 202 21 世纪新疆近期、中期和末期年和季节温度和降水相对于参照时段的变化, 得到以下主要结

203 论。

204 (1) 21 世纪新疆将持续变暖, 盆地增幅大于山区。在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5  
205 情景下, 2015~2099 年区域平均的年温度变化趋势分别是  $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$  和  $0.7^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,  
206 末期分别升温  $1.3^{\circ}\text{C}$ 、 $2.6^{\circ}\text{C}$  和  $5.3^{\circ}\text{C}$ 。各季节变化与年平均的相仿, 夏季增温最大, 秋季、冬  
207 季次之, 春季最小。多模式预估的年温度变化的不确定性随时间有所放大, 尤其在高排放情  
208 景下; 除春季以外, 模式对各季节温度变化预估的不确定性比年温度的大。另外, 模式预估  
209 的年和季节温度变化具有较高一致性, 各情景下各时期区域平均的模式一致性均高于 90%。

210 (2) 21 世纪新疆年降水将增加, 降水百分比变化大值区位于塔里木盆地中部, SSP5-8.5  
211 情景下的增幅最大。在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SP5-8.5 情景下, 2015~2099 年区域平均的年  
212 降水变化趋势分别是  $0.2\%/10\text{a}$ 、 $2\%/10\text{a}$  和  $4\%/10\text{a}$ , 末期分别增加 5%、13%和 25%。除夏季  
213 外, 各季节降水均增加, 其中冬季增幅最大。各情景下模式对季节降水变化预估的不确定性  
214 较年平均的偏大。整体上, 模式对年和季节降水变化预估的一致性较温度的低, SSP1-2.6、  
215 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下, 年降水变化预估模式一致性的区域平均值在各时期均大于 67%,  
216 末期分别增加到 70%、90%和 93%。

217 以上预估结果与以往使用 CMIP5 模式及其驱动的区域气候模式所得的 21 世纪新疆升温  
218 和降水增加的主要结论一致, 但在变化数值上存在一定差异 (如 Wang et al., 2017; 王政琪等,  
219 2021), 这与使用的模式数量、内部物理过程的差异以及排放情景等的不同有关。另外, CMIP6  
220 全球气候模式的水平分辨率在区域气候变化问题研究上仍相对偏低, 对新疆复杂地形区气候  
221 的模拟能力还存在着不足 (Zhang X L et al., 2021)。因此, 未来还需使用高水平分辨率的区域  
222 气候模式进行动力降尺度研究; 或者, 研发高效的统计降尺度方法, 就新疆地区气候进行专  
223 门的预估研究。

224 参考文献 (References)

- 225 Chen L, Frauenfeld O W. 2014. Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first  
226 centuries in China simulated by 20 CMIP5 models [J]. *J. Clim.*, 27(11): 3920–3937.  
227 doi:10.1175/JCLI-D-13-00465.1
- 228 Diffenbaugh N S, Giorgi F. 2012. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model  
229 ensemble [J]. *Clim. Change*, 114: 813–822. doi:10.1007/s10584-012-0570-x
- 230 Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project  
231 Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geosci. Model Dev.*, 9(5): 1937–  
232 1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016
- 233 Gleick P H, Adams R M, Amasino R M, et al. 2010. Climate change and the integrity of science [J].  
234 *Science*, 328(5979): 689–690. doi:10.1126/science.328.5979.689
- 235 Hawkins E, Sutton R. 2011. The potential to narrow uncertainty in projections of regional  
236 precipitation change [J]. *Clim. Dyn.*, 37: 407–418. doi:10.1007/s00382-010-0810-6
- 237 IPCC. 2021. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.*  
238 *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*  
239 *on Climate Change* [M]. Masson Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al., Eds. Cambridge University  
240 Press. In Press.
- 241 Jiang D B, Hu D, Tian Z P, et al. 2020. Differences between CMIP6 and CMIP5 models in simulating  
242 climate over China and the East Asian monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 37(10): 1102–1118.  
243 doi:10.1007/s00376-020-2034-y
- 244 Jiang Y A, Chen Y, Zhao Y Z, et al. 2013. Analysis on changes of basic climatic elements and extreme  
245 events in Xinjiang, China during 1961–2010 [J]. *Adv. Clim. Change Res.*, 4(1): 20–29. doi:10.  
246 3724/SP.J.1248.2013.020
- 247 Li B F, Chen Y N, Shi X. 2012. Why does the temperature rise faster in the arid region of northwest  
248 China? [J]. *J. Geophys. Res.*, 117, D16115. doi:10.1029/2012JD017953
- 249 Li B F, Chen Y N, Chen Z S, et al. 2016. Why does precipitation in northwest China show a significant

- 250 increasing trend from 1960 to 2010? [J]. *Atmos. Res.*, 167: 275–284.  
251 doi:10.1016/j.atmosres.2015.08.017
- 252 Li Q H, Chen Y N, Shen Y J, et al. 2011. Spatial and temporal trends of climate change in Xinjiang,  
253 China [J]. *J. Geogr. Sci.*, 21(6): 1007–1018. doi:10.1007/s11442-011-0896-8
- 254 Luo M, Liu T, Frankl A, et al. 2018. Defining spatiotemporal characteristics of climate change trends  
255 from downscaled GCMs ensembles: how climate change reacts in Xinjiang, China [J]. *Int. J.*  
256 *Climatol.*, 38: 2538–2533. doi:10.1002/joc.5425
- 257 Oliver E C J, Donat M G, Burrows M T, et al. 2018. Longer and more frequent marine heatwaves  
258 over the past century [J]. *Nat. Commun.*, 9, 1324. doi:10.1038/s41467-018-03732-9
- 259 O’Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project  
260 (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. *Geosci. Model Dev.*, 9(9): 3461–3482. doi:10.5194/gmd-9-3461-  
261 2016
- 262 Peng D D, Zhou T J. 2017. Why was the arid and semiarid northwest China getting wetter in the  
263 recent decades? [J]. *J. Geophys. Res.*, 122(17): 9060–9075. doi:10.1002/2016JD026424
- 264 Rong X Y, Li J, Chen H M, et al. 2021. The CMIP6 historical simulation datasets produced by the  
265 climate system model CAMS-CSM [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(2): 285–295. doi:10.1007/s00376-  
266 020-0171-y
- 267 Rossati A. 2017. Global warming and its health impact [J]. *Int. J. Occup. Environ. Med.*, 8(1): 7–20.  
268 doi:10.15171/ijocem.2017.963
- 269 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 [J].  
270 冰川冻土, 24(3): 219–226. Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. 2002. Preliminary study on signal, impact  
271 and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China (in Chinese)  
272 [J]. *J. Glaciol. Geocryol.*, 24(3): 219–226. doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2002.03.001
- 273 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 [J].  
274 第四纪研究, 23(2): 152–164. Shi Y F, Shen Y P, Li D L, et al. 2003. Discussion on the present  
275 climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China (in Chinese) [J]. *Quat. Sci.*,  
276 23(2): 152–164. doi:10.3321/j.issn:10017410.2003.02.005

- 277 Shugar D H, Burr A, Haritashya U K, et al. 2020. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990  
278 [J]. *Nat. Clim. Change*, 10(10): 939–945. doi:10.1038/s41558-020-0855-4
- 279 Stouffer R J, Eyring V, Meehl G A, et al. 2017. CMIP5 scientific GAPS and recommendations for  
280 CMIP6 [J]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98(1): 95–105. doi:10.1175/BAMS-D-15-00013.1
- 281 Tian D, Guo Y, Dong W J. 2015. Future changes and uncertainties in temperature and precipitation  
282 over China based on CMIP5 models [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 32(4): 487–496. doi:10.1007/s00376-  
283 014-4102-7
- 284 Turco M, Palazzi E, von Hardenberg J, et al. 2015. Observed climate change hotspots [J]. *Geophys.*  
285 *Res. Lett.*, 42(9): 3521–3528. doi:10.1002/2015GL063891
- 286 Wang L, Chen W. 2014. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and  
287 climatological drought in China [J]. *Int. J. Climatol.*, 34(6): 2059–2078. doi:10.1002/joc.3822
- 288 Wang Q, Zhai P M, Qin D H. 2020. New perspectives on ‘warming–wetting’ trend in Xinjiang, China  
289 [J]. *Adv. Clim. Change Res.*, 11(3): 252–260. doi:10.1016/j.accre.2020.09.004
- 290 王晓欣, 姜大膀, 郎咸梅. 2019. CMIP5 多模式预估的 1.5°C 升温背景下中国气温和降水变化  
291 [J]. *大气科学*, 43(5): 1158–1170. Wang X X, Jiang D B, Lang X M. 2019. Temperature and  
292 precipitation changes over China under a 1.5°C global warming scenario based on CMIP5  
293 models (in Chinese) [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.*, 43(5): 1158–1170. doi:10.3878/j.issn.1006-  
294 9895.1810.18225
- 295 Wang Y J, Zhou B T, Qin D H, et al. 2017. Changes in mean and extreme temperature and  
296 precipitation over the arid region of northwestern China: Observation and projection [J]. *Adv.*  
297 *Atmos. Sci.*, 34(3): 289–305. doi:10.1007/s00376-016-6160-5
- 298 王政琪, 高学杰, 童尧, 等. 2021. 新疆地区未来气候变化的区域气候模式集合预估 [J]. *大气*  
299 *科学*, 45(2): 407–423. Wang Z Q, Gao X J, Tong Y, et al. 2021. Future climate change projection  
300 over Xinjiang based on an ensemble of regional climate model simulations (in Chinese) [J]. *Chin.*  
301 *J. Atmos. Sci.*, 45(2): 407–423. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.20108
- 302 吴佳, 高学杰, 石英, 等. 2011. 新疆 21 世纪气候变化的高分辨率模拟 [J]. *冰川冻土*, 33(3):  
303 479–487. Wu J, Gao X J, Shi Y, et al. 2011. Climate change over Xinjiang region in the 21st

- 304 century simulated by a high resolution regional climate model (in Chinese) [J]. *J. Glaciol.*  
305 *Geocryol.*, 33(3): 479–487.
- 306 Wu P, Ding Y H, Liu Y J, et al. 2019. The characteristics of moisture recycling and its impact on  
307 regional precipitation against the background of climate warming over northwest China [J]. *Int.*  
308 *J. Climatol.*, 39(14): 5241–5255. doi:10.1002/joc.6136
- 309 Wu T W, Lu Y X, Fang Y J, et al. 2019. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-  
310 CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6 [J]. *Geosci. Model Dev.*, 12(4): 1573–1600.  
311 doi:10.5194/gmd-12-1573-2019
- 312 Wu Z T, Zhang H J, Krause C M, et al. 2010. Climate change and human activities: a case study in  
313 Xinjiang, China [J]. *Clim. Change*, 99: 457–472. doi:10.1007/s10584-009-9760-6
- 314 许崇海, 徐影, 罗勇. 2008. 新疆地区 21 世纪气候变化分析 [J]. *沙漠与绿洲气象*, 2(3): 1–7. Xu  
315 C H, Xu Y, Luo Y. 2008. Climate change of the 21st century in Xinjiang with SRES scenarios  
316 (in Chinese) [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2(3): 1–7.
- 317 Xu C H, Xu Y. 2012. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios  
318 using a CMIP5 multi-model ensemble [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5(6): 527–533.  
319 doi:10.1080/16742834.2012.11447042
- 320 Xu H W, Chen H P, Wang H J. 2021. Future changes in precipitation extremes across China based on  
321 CMIP6 models [J]. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.7264
- 322 Yang X L, Zhou B T., Xu Y., et al. 2021. CMIP6 evaluation and projection of temperature and  
323 precipitation over China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(5): 817–830. doi:10.1007/s00376-021-0351-  
324 4
- 325 You Q L, Cai Z Y, Wu F Y, et al. 2021. Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation,  
326 trend and uncertainty [J]. *Clim. Dyn.*, 57: 17–35. doi:10.1007/s00382-021-05691-2
- 327 于恩涛, 孙建奇, 吕光辉, 等. 2015. 西部干旱区未来气候变化高分辨率预估 [J]. *干旱区地理*,  
328 38(3): 429–437. Yu E T, Sun J Q, Lv G H, et al. 2015. High-resolution projection of future  
329 climate change in the northwestern arid regions of China (in Chinese) [J]. *Arid Land Geography*,

- 330 38(3): 429–437.
- 331 于晓晶, 李淑娟, 赵勇, 等. 2017. CMIP5 模式对未来 30a 新疆夏季降水的预估 [J]. 沙漠与绿  
332 洲气象, 11(5): 53–62. Yu X J, Li S J, Zhao Y, et al. 2017. Projected summer precipitation over  
333 Xinjiang by multi-CMIP5 models in the next 30 years (in Chinese) [J]. Desert and Oasis  
334 Meteorology, 11(5): 53–62. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2017.05.008
- 335 Zhang G W, Zeng G, Yang X Y, et al. 2021. Future changes in extreme high temperature over China  
336 at 1.5°C–5°C global warming based on CMIP6 simulations [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(2): 253–  
337 267. doi:10.1007/s00376-020-0182-8
- 338 Zhang X L, Hua L J, Jiang D B. 2021. Assessment of CMIP6 model performance for temperature and  
339 precipitation in Xinjiang, China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., in press.  
340 doi:10.1016/j.aosl.2021.100128
- 341 Zhao W Y, Chen Y N, Li J L, et al. 2010. Periodicity of plant yield and its response to precipitation  
342 in the steppe desert of the Tianshan Mountains region [J]. J. Arid Environ., 74(4): 445–449.  
343 doi:10.1016/j.jaridenv.2009.09.022
- 344 Zhao Y, Wang M Z, Huang A N, et al. 2014. Relationships between the West Asian subtropical  
345 westerly jet and summer precipitation in northern Xinjiang [J]. Theor. Appl. Climatol. 116: 403–  
346 411. doi:10.1007/s00704-013-0948-3
- 347 Zhao Y, Yu X J, Yao J Q, et al. 2018. Evaluation of the subtropical westerly jet and its effects on the  
348 projected summer rainfall over central Asia using multi-CMIP5 models [J]. Int. J. Climatol.  
349 38(suppl. 1): e1176–e1189. doi:10.1102/joc.5443
- 350 周天军, 邹立维, 陈晓龙, 等. 2019. 第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 评述 [J]. 气候变  
351 化研究进展, 15(5): 445–456. Zhou T J, Zou L W, Chen X L, et al. 2019. Commentary on the  
352 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) (in Chinese) [J]. Clim. Change Res.,  
353 15(5): 445–456. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2019.193
- 354 Zhou T J, Chen Z M, Zou L W, et al. 2020. Development of climate and earth system models in China:  
355 Past achievements and new CMIP6 results [J]. J. Meteorol. Res., 34(1): 1–19.  
356 doi:10.1007/s13351-020-9164-0

- 357 Zhu B L, Xue L Q, Wei G H, et al. 2019. CMIP5 projected changes in temperature and precipitation  
358 in arid and humid basins [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 136: 1133–1144. doi:10.1007/s00704-018-  
359 2542-1
- 360 Zhu H H, Jiang Z H, Li J, et al. 2020. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate  
361 extremes over China? [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 37(10): 1119–1132. doi:10.1007/s00376-020-9289-  
362 1
- 363 Zhu X, Ji Z M, Wen X H, et al. 2021. Historical and projected climate change over three major river  
364 basins in China from fifth and sixth Coupled Model Intercomparison Project models [J]. *Int. J.*  
365 *Climatol.*, 41(15): 6455–6473. doi:10.1002/joc.7206