

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0028

LI Chun, JIANG Tong, WANG Yanjun, et al. Simulation and estimation of future air temperature in upper basin of the Yellow River based on CMIP6 models[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):171-178. [李纯, 姜彤, 王艳君, 等. 基于CMIP6模式的黄河上游地区未来气温模拟预估[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):171-178.]

基于CMIP6模式的黄河上游地区未来气温模拟预估

李纯¹, 姜彤¹, 王艳君¹, 缪丽娟¹, 李溯源², 陈梓延¹, 吕嫣冉¹

(1. 南京信息工程大学地理科学学院, 江苏南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏南京 210044)

摘要: 利用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)提供的5个气候模式,并结合基于地面气象站的CN05.1气象资料,评估了CMIP6模式对黄河上游地区1961—2014年气温变化的模拟能力。基于7个共享社会经济路径及代表性浓度路径(SSP-RCP)组合情景,结合多模式集合平均预估了2015—2100年黄河上游地区年均气温和季平均气温的时空变化规律。结果表明:多模式集合平均能较好地模拟黄河上游地区历史平均气温的空间分布格局与年变化。7个未来情景一致表明,2015—2100年黄河上游地区年均气温呈现波动上升趋势[$0.03 \sim 0.82 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$]。其中,低辐射强迫情景下(SSP1-1.9、SSP1-2.6及SSP4-3.4)气温先呈现增加趋势,21世纪中期到达增幅峰值,之后增温呈现放缓趋势;而中、高辐射强迫情景下(SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP4-6.0及SSP5-8.5)气温表现为持续上升态势。空间上,未来气温增幅显著的区域位于黄河上游西部地区;时间上,呈现夏季增温快,春季增温慢。四季增温的空间分布呈现出一致特征,表现为西部增温强于东部,北部增温强于南部。研究结果可为黄河流域水资源管理及气候变化的适应性研究提供科学依据。

关键词: 黄河上游地区; 气温; CMIP6; 多模式集合平均; 预估

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0171-08

0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次报告指出,近百年来全球平均气温升高了 $0.85 \sim 0.89 \text{ } ^\circ\text{C}$ ^[1],且未来气温将会持续升高,2020年可能成为近百年来最热的一年^[2]。有研究表明,驱动干旱和热浪的气候要素已从过去的降水不足转变为近几十年来的过高气温^[3]。在气候变暖背景下,高温^[3]、干旱^[4]、洪涝^[5]等极端气候事件频发,进而衍生出一系列问题,对人类生活、农业、社会经济等方面产生深刻影响^[6-7]。气温是气候变化研究中的基础要素,合理预估未来气温对区域维持生态系统稳定及保证社会经济稳定发展具有重要意义。

黄河是中国第二大河,是中国西北、黄淮海平

原、华北平原的重要水源。黄河上游的河源区是黄河流域主要的产流区之一,其产流量占黄河流域径流量的1/3以上^[8],且流域内冰川、冻土发育,地形地貌条件复杂,是气候变化的敏感区域。近年来,在气候变暖背景下,黄河上游地区气温呈持续上升趋势^[9],流域内冻土退化^[10]、冰川退缩^[11]、水资源时空分布不均^[12]等问题相伴而生,流域水资源脆弱性和风险很大。因此,科学预估黄河上游地区未来气候变化对黄河水资源管理、可持续发展具有至关重要的意义。过往很多学者对黄河流域气候变化的研究开展了不少工作^[12-13],但大多是分析黄河整个流域的历史气候变化特征,而对黄河上游地区未来的预估较少。

目前,对未来气候变化的预估,主要基于全球气候系统模式这一工具。鉴于其复杂性,在预估前

收稿日期: 2020-09-29; 修订日期: 2020-12-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1510200); 国家社科基金重大项目(16ZDA047); 南京信息工程大学灾害风险管理研究院运行经费资助

作者简介: 李纯, 硕士研究生, 主要从事气候变化与极端气候变化模拟预估研究. E-mail: lichun20200905@163.com

通信作者: 姜彤, 教授, 主要从事气候变化与水循环、灾害风险评估管理研究. E-mail: jiangtong@nuist.edu.cn

有必要针对模式的模拟能力先进行评估^[14]。已有大量研究基于CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)评估气候模式对全球或区域气候要素的模拟能力,预估了未来气候的变化趋势^[15-16]。从结果来看,几乎所有的模式都表明不同区域未来的气温呈升高趋势。当前,国际耦合模式比较计划已经进行到第六阶段(CMIP6),相较于以前的模式计划,它参与的模式数量最多、设计的科学试验最为完善、所提供的模拟数据最为齐全,并且CMIP6在分辨率、物理过程及参数化方面都有所改进。就排放情景而言,CMIP6模式引入新一代组合情景,即共享社会经济路径和代表性浓度路径(SSP-RCP)组合情景,这些模式数据结果将支撑未来5~10年的全球气候研究^[17-19]。并且已有学者证明,相比于CMIP5,CMIP6模式的集合效果能使模拟结果与观测更为接近^[20-21]。

基于以上认识,本文利用最新一代模式数据CMIP6评估其在黄河上游的适用性,并预估21世纪黄河上游在不同SSP-RCP情景下气温的年、季时空变化特征,以期为黄河上游适应气候变化及做出应对决策提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区(图1)位于黄河上游地区(32°~39°N、96°~105°E),西抵巴颜克拉山脉,流域内气温呈现西低东高的特点。平均海拔大于3 500 m,流域面积约为 $2.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。黄河上游地区的水资源约占全流域的57%^[12]。流域内广泛分布着冰川冻土,属青

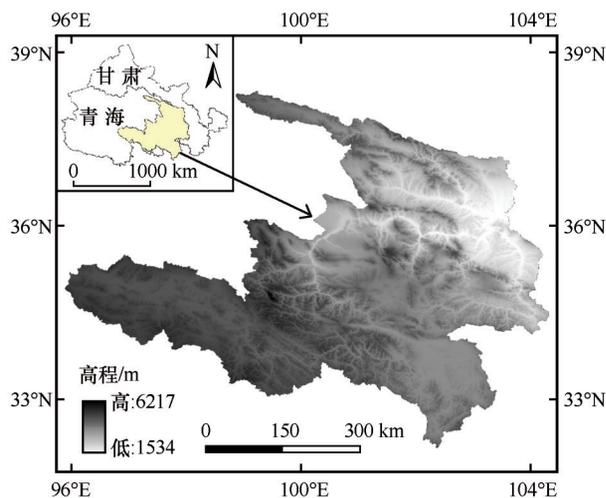


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

藏高原气候,由于其独特的地理位置、地形等因素,属于受气候变化影响的敏感区域。冬季受青藏高原高压控制,具有典型的大陆性气候特征;暖季受西南季风的影响,降水较多,形成高原亚热带湿润季风气候^[9]。

1.2 数据来源

1.2.1 气象观测资料

研究选取来源于中国气象数据共享网的再分析气象数据集CN05.1(<http://data.cma.cn/site/index.html>),该套网格化观测数据集是基于中国境内2 400多个气象台站的观测资料插值处理后得到^[22],其时间跨度为1961—2014年,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。本文使用该数据集提供的逐日平均气温资料。

1.2.2 气候模式资料

气候模式资料来源于CMIP6模式中的历史数据(1961—2014年),以及未来模拟数据(2015—2100年)(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>)。这套数据包括了不同共享经济社会路径SSP(shared socioeconomic pathway)与不同辐射强迫RCP(representative concentration pathway)的7种组合情景,包括SSP1-1.9、SSP1-2.6及SSP4-3.4(低辐射强迫情景)、SSP2-4.5、SSP4-6.0及SSP3-7.0(中等、中至高辐射强迫情景)和SSP5-8.5(高辐射强迫情景)^[17-18]。综合考虑历史时期与未来时期气候数据在时间与空间上的完整性,研究最终选用了5个模式资料的逐月平均气温(表1)。

为了便于将CMIP6模式资料与观测资料进行比较,使用反距离权重插值法将所有模式数据插值到与观测数据相同的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格点上,并将观测与历史模拟资料的年份统一为1961—2014年。基准期参照时段选为1995—2014年,未来时段选取2021—2040年、2041—2060年和2081—2100年,分别代表21世纪近期、中期和远期^[23]。在进行未来预估前,需要进行相应的降尺度与偏差订正工作^[24-25]。本文利用基于观测数据的等距累积分布函数法(EDCDF)对气候模式数据进行统计偏差订正,以提升未来预估数据可信度^[26],并且这一方法已经在不同区域得以应用^[27-28]。

1.3 研究方法

引入均方根误差(RMSE)和皮尔森空间相关系数(PCOR)2个评价指标,对观测与模拟结果进行评估^[29]。其中,均方根误差(RMSE)检验模拟与观测

表 1 本研究使用的 5 个 CMIP6 气候模式信息

Table 1 Information of the five CMIP6 climate models in the study

模式名称	所属单位	原始分辨率	降尺度后的分辨率
MRI-ESM2-0	德国普朗克气象研究所	1.1°×1.1°	0.5°×0.5°
CNRM-ESM2-1	法国国家科学实验中心	1.4°×1.4°	0.5°×0.5°
IPSL-CM6A-LR	法国 Pierre-Simon 物理研究所	1.3°×2.5°	0.5°×0.5°
CanESM5	加拿大气候模拟与分析中心	2.8°×2.8°	0.5°×0.5°
MIPOC6	日本海洋地球科学与技术局	1.4°×1.4°	0.5°×0.5°

资料的离散程度。计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - O_i)^2} \quad (1)$$

式中: O 为观测值; C 为模拟值; n 为样本数。

PCOR 由观测和模拟两个序列的协方差除以其标准差的乘积得到,用于衡量二者间的相关性。

$$PCOR_{ij} = \frac{Cov_{ij}}{\delta_i \delta_j} \quad (2)$$

式中: Cov_{ij} 为两序列间的协方差; δ_i 为 i 序列标准差; δ_j 为 j 序列标准差。PCOR 的值越接近 1,说明观测值与模拟值的空间相关性越强,大于 0.5 则表明相关性较强。

气象要素的变化趋势(气候倾向率)采用一元线性方程表示。

$$Y = a_0 t + a_1 \quad (3)$$

式中: Y 为气温; t 为时间(本文为 1960—2014 年); a_0 为回归系数; a_1 为常数^[30]。

本文所选用的多模式集合平均为多个模式的简单算术平均,相较于单一模式,多模式集合能更好地模拟出气候变化特征,模拟能力要优于单个模式^[31-32]。

2 结果与讨论

2.1 CMIP6 模式对气温的模拟评估

研究首先对比了观测资料与模式资料在历史时期(1961—2014 年)的表现。从均方根误差与多年平均值偏差指标来看,多模式集合平均的误差显著小于单个模式。多模式集合的气温与观测的年内月气温表现较为一致(图 2)。同时也发现多模式集合气温与观测气温有着较一致的年际波动趋势,观测气温与多模式集合气温的气候倾向率分别为 $0.35 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.34 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。对比观测资料,多模式集合平均也能较好地模拟出黄河上游地区历史时期的平均气温由东北向西南递减的空间分布特征(图 3)。由泰勒图^[33]可见,各模式对黄河上游气温的模拟能力较好。其中,各模式的标准差均小

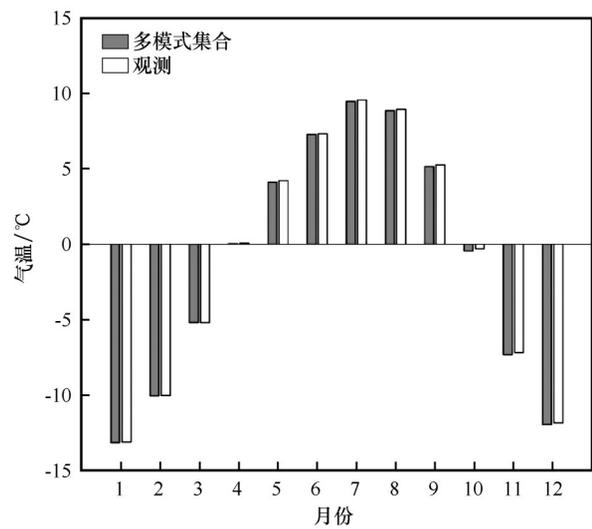


图 2 1961—2014 年观测与多模式集合平均的各月平均气温对比

Fig. 2 Comparison of monthly mean air temperature between observations and multi-model ensemble mean from 1961 to 2014

于 0.5,均方根误差在 0.4 以内,相关系数为 0.95 以上,且多模式集合的标准差、均方根误差均较单个模式小,其相关系数较单个模式更高,达 0.98 以上。综上,多模式集合平均的模拟效果较单个模式更好(图 4)。

2.2 黄河上游地区未来的气温变化

2.2.1 2015—2100 年年平均气温变化

整体看来,不同情景下 21 世纪黄河上游地区年平均气温(图 5)总体表现为波动上升趋势 [$0.03 \sim 0.82 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$]。其中,高辐射强迫情景 SSP5-8.5 下气温增速最快 [$0.82 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$];其次为中至高、中等辐射强迫情景,如 SSP3-7.0、SSP4-6.0、SSP2-4.5 的气候倾向率分别为 $0.62 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.48 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.37 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$;气温增速最慢的为低辐射强迫情景,如 SSP4-3.4、SSP1-2.6、SSP1-1.9,其气候倾向率分别为 $0.27 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.14 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.03 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,且均已通过 0.01 显著性水平检验。

分时期看来,低辐射强迫情景(SSP1-1.9、

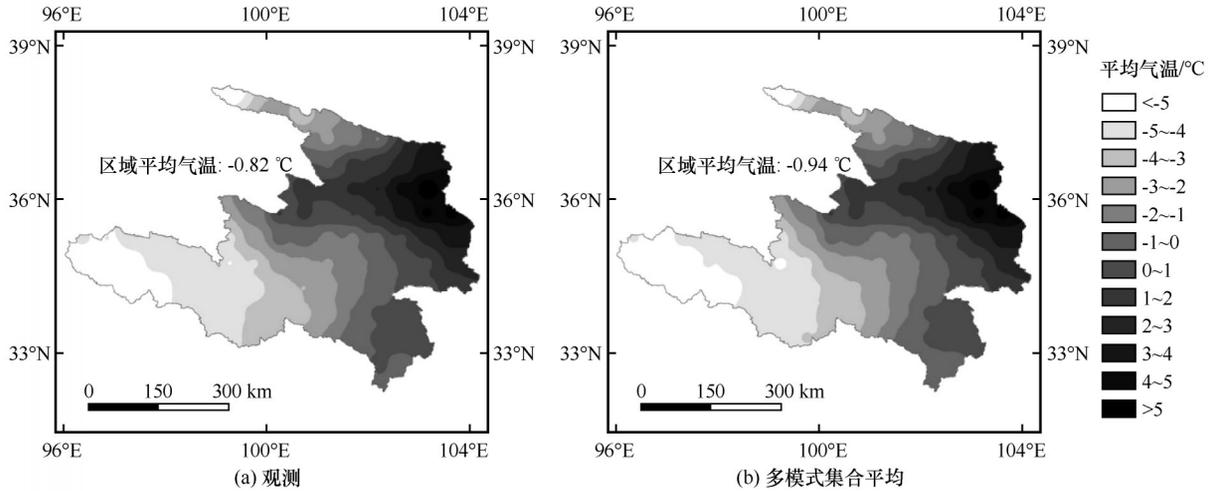


图3 1961—2014年黄河上游地区观测与多模式集合平均的平均气温空间分布
 Fig. 3 Spatial distribution of observed and multi-model ensemble mean average air temperature in upper basin of the Yellow River from 1961 to 2014

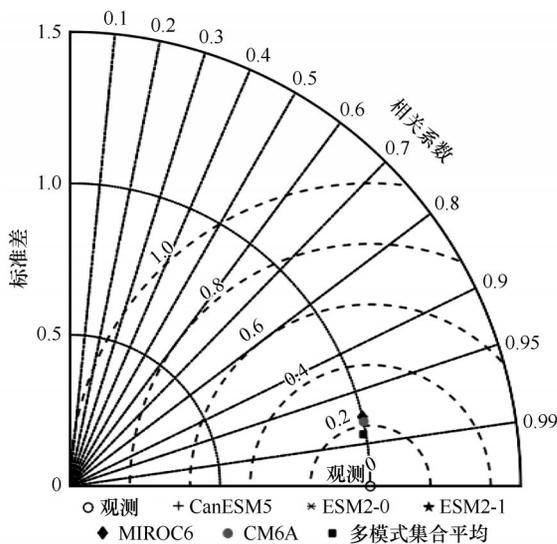


图4 基于气候模式与气象观测资料的黄河上游地区平均气温泰勒图

Fig. 4 Taylor chart of average air temperature in upper basin of the Yellow River based on multiple climate models and meteorological observation data

SSP1-2.6、SSP4-3.4) 下年气温变化表现为先增加, 在21世纪中期(2041—2060年)达到增幅峰值, 远期(2081—2100年)气温增速呈放缓趋势; 以SSP1-1.9为例, 在21世纪近、中、远三时期平均气温相对基准期(1995—2014年)分别增加1.22 °C、1.53 °C、1.25 °C(图6); 而在中、高辐射强迫情景下, 年平均气温随时间推移呈现持续上升态势, 均在21世纪末期达到峰值。如中至高辐射强迫情景下(SSP3-7.0), 在近、中、远三时期相对基准期(1995—2014年)分别增加1.31 °C、2.40 °C、5.07 °C; SSP5-8.5高

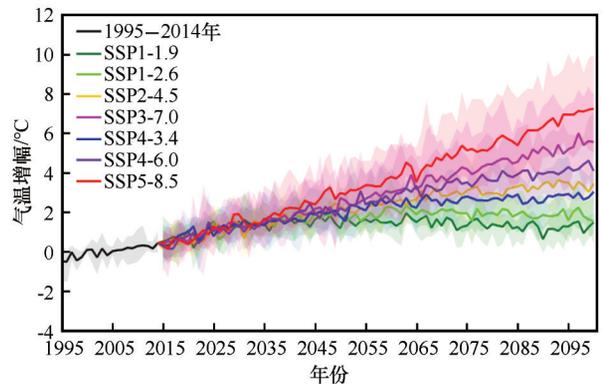


图5 不同SSP-RCP情景下21世纪平均气温相对基准期(1995—2014年)的温度增幅

Fig. 5 Temperature increase of average air temperature in the 21st century relative to the base period (1995—2014) under different SSP-RCP scenarios

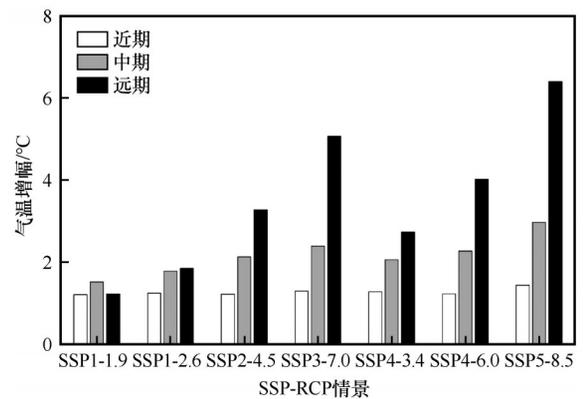


图6 不同SSP-RCP情景下21世纪近期、中期、远期平均气温相对基准期(1995—2014年)的温度增幅

Fig. 6 Temperature increase of short-term, mid-term and long-term average air temperature in the 21st century relative to the base period (1995—2014) under different SSP-RCP scenarios

辐射强迫情景下,在近、中、远期阶段气温相对基准期增加最多,分别增加 1.45 °C、2.98 °C、6.40 °C(图6)。

2.2.2 2015—2100年季平均气温变化

不同情景下,黄河上游地区四季平均气温在21世纪总体均表现出波动上升的趋势,增速随情景及季节各异(图略)。季节划分标准为:12月至次年2月为冬季、3—5月为春季、6—8月为夏季、9—11月为秋季。由21世纪春、夏、秋、冬四季不同情景的气候倾向率,得知不同情景下四季在2015—2100年的气温增速变化相差不大,夏季在各个情景下的气温增速相较于其他季节是最快的,春季增温相对最慢,也有个别情景如 SSP5-8.5 情景在秋季升温最快,气候倾向率达 $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$;其次,在每个季节中,7个情景下气温的增速也随情景不同而异,也符合低辐射强迫情景 SSP1-1.9 增速最慢,高辐射强迫情景 SSP5-8.5 增速最快的特点,其后为中至高、中等、低辐射强迫情景(SSP3-7.0、SSP4-6.0、SSP2-4.5、SSP4-3.4、SSP1-2.6、SSP1-1.9)。以夏季为例,低辐射强迫情景(SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP4-3.4)在2015—2100年的气候倾向率分别为 $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,而中等、中至高辐射强迫情景(SSP2-4.5、SSP4-6.0、SSP3-7.0)分别为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 、

$0.67\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$;高辐射强迫情景 SSP5-8.5 下气温增速达 $0.86\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。

如图7所示,不同情景下夏季在近期(2021—2040年)、中期(2041—2060年)、远期(2081—2100年)相对基准期(1995—2014年)的增温幅度不同,但升温空间分布格局类似,均呈现黄河上游西部增温强于东部,南部增温强于北部,增温幅度最大的区域位于黄河上游西部地区;如在 SSP5-8.5 高辐射强迫情景下,黄河上游西部地区在21世纪中期阶段气温相对基准期增幅将会超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,而在21世纪远期阶段,中等、中至高辐射强迫情景(SSP2-4.5、SSP4-6.0、SSP3-7.0)下,黄河上游西部地区在夏季的气温增幅均达 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上,高辐射强迫情景 SSP5-8.5 下更是达 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。就情景来看,高辐射强迫情景较其他情景增温幅度大,如 SSP5-8.5 情景下气温增幅最大($-0.13\sim 4.93\text{ }^{\circ}\text{C}$);其次为中至高、中等辐射强迫情景(SSP3-7.0、SSP4-6.0、SSP2-4.5),其气温增幅分别介于 $-0.34\sim 3.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.34\sim 2.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.36\sim 2.10\text{ }^{\circ}\text{C}$;增温幅度最小为低辐射强迫情景(SSP4-3.4、SSP1-2.6、SSP1-1.9),其气温增幅分别介于 $-0.23\sim 1.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.23\sim 0.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.08\sim 0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。文中只给出未来夏季相对基准期(1995—2014年)变化空间图,其他季节空间分布格局与夏季类似(图略)。

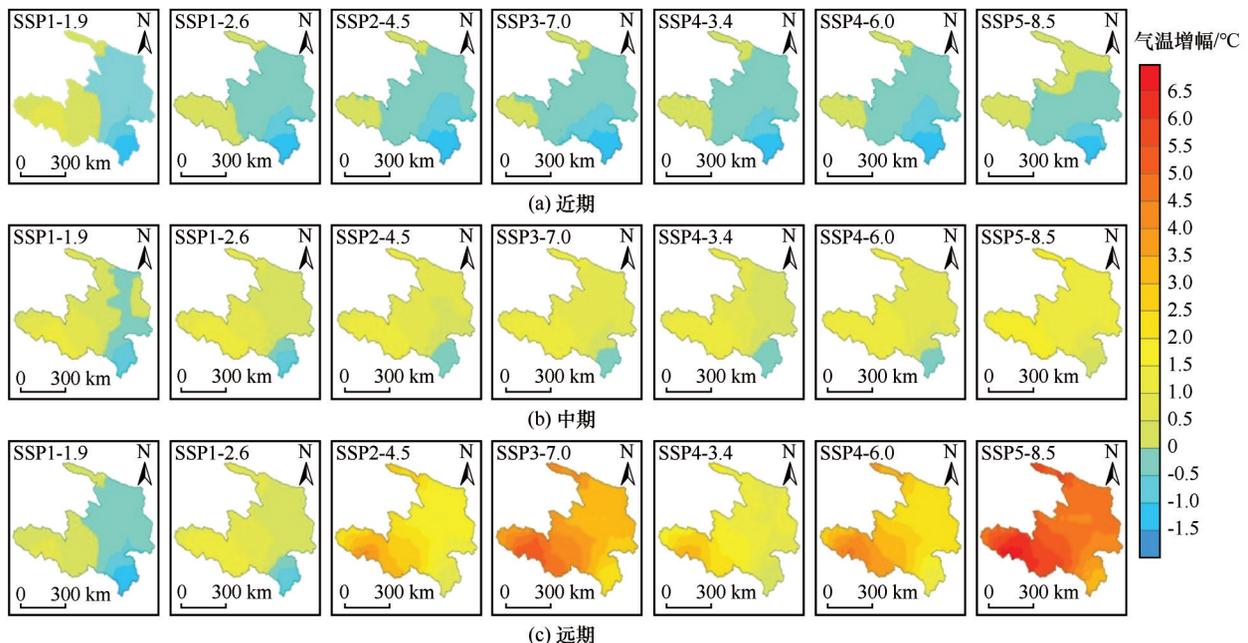


图7 黄河上游地区21世纪夏季平均气温相对基准期(1995—2014年)的温度增幅空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of temperature increase of average air temperature in summer in the 21st century relative to the base period (1995—2014) in upper basin of the Yellow River

3 结论与展望

本文通过5个CMIP6模式资料评估了黄河上游地区的历史与未来气温变化,并预估了7种不同组合情景下21世纪黄河上游地区的气温在年尺度、季节尺度的时空变化趋势。主要结论如下:

(1)通过观测资料与模式资料的对比,得到5个CMIP6的气候模式资料对于黄河上游地区的气温均具有较强的模拟能力,且多模式集合算术平均的模拟效果要优于单个气候模式,与观测资料的空间相关系数达0.9以上。

(2)黄河上游地区2015—2100年平均气温在7个情景下整体呈波动上升趋势,其增温速率为 $0.03\sim 0.82\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,其中低辐射强迫情景如SSP1-1.9、SSP1-2.6、SSP4-3.4的年气温变化表现为先增加,在21世纪中期到达增幅峰值,远期增速出现放缓趋势;其余中、高排放情景下气温随时间推移表现为持续增加态势;SSP5-8.5增速最快,达 $0.82\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$,SSP1-1.9增速最慢,为 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。空间上,模拟出黄河上游地区的气温由东北向西南递减的分布特征。

(3)黄河上游地区四季气温在未来不同情景下均呈现波动上升的趋势。虽然不同季节、不同情景下的气候倾向率变化相差不大,夏季在各个情景下的气温增速相较其他季节是最快的,SSP5-8.5情景在秋季升温最快[增温速率达 $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$]。刘勤等^[34]同样得出在1961—2010年黄河上游地区在夏季增温最快的结论。具体表现为在高辐射强迫情景下增温较低辐射强迫情景快,不同情景下的空间增温分布形态基本一致,均呈现西部增温强于东部,南部增温强于北部的特点。其中以黄河上游西部地区增温最为明显,王国庆等^[35]利用CMIP5资料也得出同样的未来增温空间分布特征。

全球变暖背景下,黄河上游地区气温将持续升高,会造成冰川退缩、积雪与径流量减少、水土流失,荒漠化进程加剧等,进一步加剧整个流域水资源分配不均的矛盾。本文利用CMIP6模式对黄河上游气温进行模拟预估,其研究结果与已有研究结果有很大相似性。即:总体上,未来黄河上游表现为增温趋势,但增温幅度随情景及时期不同各有差异。基于CMIP5模式资料的中国气温模拟预估研究表明,21世纪前期,不同情景之间的预估结果差别较小,到了21世纪远期,不同情景下气温升幅相差变大,越高的情景(如RCP8.5)下,气温增幅越

大^[15],这与本文的研究结果较为一致。

此外,王国庆等^[35]利用CMIP5模式分析了黄河流域未来水资源趋势变化,表明在RCP4.5、RCP8.5情景下,21世纪中期黄河流域气温增幅将可能超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阈值。本研究也同样得出相似的结论,即在21世纪中期,CMIP6模式资料中的高辐射强迫情景下(如SSP5-8.5),黄河上游气温增幅将会超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$;到达21世纪远期,在一些中等、高辐射强迫情景下(SSP2-4.5、SSP4-6.0、SSP3-7.0),黄河上游气温增幅也会超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,在21世纪远期高辐射强迫情景下(SSP5-8.5)黄河上游气温增幅更会超过 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

本文旨在科学预估黄河上游未来气温,为黄河未来水资源管理、合理规避灾害风险、社会经济发展提供指导意义,下一步可收集更多资料,依据各要素之间的关联,对气候变化作进一步的深入分析,从而提出更全面地应对与适应气候变化的措施。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Huang Yanyan, Wang Huijun. How about the global warming in 2020? [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(4): 585-591. [黄艳艳, 王会军. 2020年全球变暖会创新高吗? [J]. 大气科学学报, 2020, 43(4): 585-591.]
- [3] Alizadeh M R, Adamowski J, Nikoo M R, et al. A century of observations reveals increasing likelihood of continental-scale compound dry-hot extremes [J]. Science Advances, 2020, 6(39): eaaz4571.
- [4] Li Suyuan, Miao Lijuan, Jiang Zhihong, et al. Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015—2099 [J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(3): 210-217.
- [5] Condon L E, Gangopadhyay S, Pruitt T. Climate change and non-stationary flood risk for the upper Truckee River basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1): 159-175.
- [6] Lipczynska-Kochany E. Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: a review [J]. Science of the Total Environment, 2018, 640/641: 1548-1565.
- [7] Jiang Tong, Su Buda, Huang Jinlong, et al. Each $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ of warming increases annual flood losses in china by more than US \$60 billion [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2020, 101(8): E1464-E1474.
- [8] Lan Yongchao, Zhu Yuntong, Liu Gensheng, et al. Study of the seasonal characteristics and regional differences of climate change in source regions of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 741-749. [蓝永超, 朱云通, 刘根生, 等. 黄河源区气候变化的季节特征与区域差异研究 [J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 741-749.]
- [9] Pan Pan, Zhu Yali, Wang Jijun. Spatial-temporal variations of temperature and the cause analyses in the Yellow River valley during recent 50 years [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(4): 477-485. [潘攀, 祝亚丽, 王纪军. 近

- 50年黄河流域气温变化特征及背景分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(4): 477-485.]
- [10] Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi, et al. Features and degradation of frozen ground in the sources area of the Yellow River, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 10-17. [金会军, 王绍令, 吕兰芝, 等. 黄河源区冻土特征及退化趋势[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 10-17.]
- [11] Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asian water tower change and its impacts[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203-1209. [姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.]
- [12] Zhao Fangfang, Xu Zongxue. Long-term trend and jump change for major climate processes over the upper Yellow River basin[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(2): 246-255. [赵芳芳, 徐宗学. 黄河兰州以上气候要素长期变化趋势和突变特征分析[J]. 气象学报, 2006, 64(2): 246-255.]
- [13] Liu Liliu, Liu Zhaofei, Xu Zongxue. Trends of climate change for the upper-middle reaches of the Yellow River in the 21st century [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(3): 167-172. [刘绿柳, 刘兆飞, 徐宗学. 21世纪黄河流域上中游地区气候变化趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(3): 167-172.]
- [14] Knutti R, Furrer R, Tebaldi C, et al. Challenges in combining projections from multiple climate models [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(10): 2739-2758.
- [15] Zhang Yanwu, Zhang Li, Xu Ying. Simulations and projections of the surface air temperature in China by CMIP5 models [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2016, 12(1): 10-19. [张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5模式对中国地区气温模拟能力评估与预估[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 10-19.]
- [16] Yun Xiang, Cheng Jiayi, Li Qingxiang. Estimation of CMIP5 multi-mode on the extent of rise in air temperature in Asia [J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(2): 145-157. [云翔, 程嘉艺, 李庆祥. CMIP5气候模式对亚洲升温幅度的模拟与预估[J]. 气象, 2020, 46(2): 145-157.]
- [17] O'Neill B C, Tebaldi C, van Vuuren D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(9): 3461-3482.
- [18] Zhang Lixia, Chen Xiaolong, Xin Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison Project (ScenarioMIP) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 519-525. [张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525.]
- [19] Zhou Tianjun, Zou Liwei, Chen Xiaolong. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 445-456. [周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456.]
- [20] Chen Huopo, Sun Jianqi, Lin Wenqing, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(17): 1415-1418.
- [21] Zhai Jianqing, Mondal S K, Fischer T, et al. Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 246: 105111.
- [22] Wu Jia, Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1102-1111. [吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111.]
- [23] Zhou Tianjun, Chen Ziming, Zou Liwei, et al. Development of climate and earth system models in China: past achievements and new CMIP6 results [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(1): 1-19.
- [24] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. *Nature*, 2010, 463(7282): 747-756.
- [25] Piani C, Weedon G, Best M, et al. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 395(3/4): 199-215.
- [26] Li Haibin, Sheffield J, Wood E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching [J/OL]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115 (D10) [2022-01-23]. <https://doi.org/10.1029/2009JD012882>.
- [27] Huang Jinlong, Wang Yanjun, Su Buda, et al. Future climate change and its impact on runoff in the upper reaches of the Yangtze River under RCP4.5 scenario [J]. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(5): 614-620. [黄金龙, 王艳君, 苏布达, 等. RCP4.5情景下长江上游流域未来气候变化及其对径流的影响[J]. 气象, 2016, 42(5): 614-620.]
- [28] Yang Xiaoli, Zheng Weifei, Lin Changqing, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(5): 377-383. [杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和SPI的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383.]
- [29] Meng Yujing, Jiang Tong, Su Buda, et al. Temperature simulation assessment by high-resolution regional climate model (CCLM) in Poyang Lake basin [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(2): 123-129. [孟玉婧, 姜彤, 苏布达, 等. 高分辨率区域气候模式CCLM对鄱阳湖流域气温的模拟评估[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 123-129.]
- [30] Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [31] Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(5): 287-292. [许崇海, 沈新勇, 徐影. IPCC AR4模式对东亚地区气候模拟能力的分析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(5): 287-292.]
- [32] Li Xiuping, Xu Zongxue, Cheng Huaqiong. Projection of climate change with various emission scenarios over Huaihe River basin in the 21st century [J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(6): 1622-1635. [李秀萍, 徐宗学, 程华琼. 多模式集合预估21世纪淮河流域气候变化情景[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1622-1635.]
- [33] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D7): 7183-7192.
- [34] Liu Qin, Yan Changrong, Zhang Yanqing, et al. Variation of precipitation and temperature in Yellow River basin during the last 50 years [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4): 475-480. [刘勤, 严昌荣, 张燕卿, 等. 近50年黄河

- 流域气温和降水量变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 475-480.]
- [35] Wang Guoqing, Qiao Cuiping, Liu Minglu, et al. The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020 (2): 1-8. [王国庆, 乔翠平, 刘铭璐, 等. 气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析[J]. 水利水运工程学报, 2020(2): 1-8.]

Simulation and estimation of future air temperature in upper basin of the Yellow River based on CMIP6 models

LI Chun¹, JIANG Tong¹, WANG Yanjun¹, MIAO Lijuan¹, LI Suyuan²,
CHEN Ziyan¹, LÜ Yanran¹

(1. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Five global climate models from the latest released Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) and CN05.1 meteorological data are applied to evaluate annual air temperature variations in upper basin of the Yellow River from 1961 to 2014. This study focuses on characterizing the spatiotemporal and annual variations of air temperature across upper basin of the Yellow River under seven future scenarios, combing the shared socioeconomic pathways and the representative concentration pathways (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP4-6.0 and SSP5-8.5). The simulation capability of CMIP6 outputs are evaluated during the historical period (1961—2014). We find that: Multi-model ensemble mean provides good results in characterizing spatial distribution and annual variations of air temperature dynamics across the study area. The average air temperature shows a significant upward trend [$0.03\sim 0.82\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$] under all seven scenarios during 2015—2100. Air temperature increased and reached the peak till the middle 21st century, and showed a slowly increasing trend till the end of the century, under the low forcing scenarios (SSP1-1.9, SSP1-2.6 and SSP4-3.4). Under the mid and high forcing scenarios (SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-6.0 and SSP5-8.5), the annual mean air temperature showed a continuous rising trend. Regions featured with highest temperature increasing located in western part of upper basin of the Yellow River. Air temperature in summer will rise in a relatively fast speed, while that in spring is slower. Patterns of seasonal air temperature rising shows an obvious spatial distribution, relatively fast in west and slow in east, fast in north and slow in south. In the context of global warming, a reasonable estimation of the future air temperature changes in upper basin of the Yellow River is crucial for the water resources management and study on adaptations to climate change.

Key words: upper basin of the Yellow River; air temperature; CMIP6; multi-model ensemble mean; estimation

(责任编辑: 王澄海)