

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0094

ZHANG Qingjie, TAO Hui, SU Buda, et al. and temporal patterns of snow depth in Xinjiang: insight from CMIP6 climate models[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5): 1435-1445. [张庆杰, 陶辉, 苏布达, 等. 基于CMIP6气候模式的新疆积雪深度时空格局研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1435-1445.]

基于CMIP6气候模式的新疆积雪深度 时空格局研究

张庆杰¹, 陶辉², 苏布达³, 窦挺峰⁴, 姜彤¹

(1. 南京信息工程大学地理科学学院/灾害风险管理研究院, 江苏南京 210044; 2. 中国科学院新疆生态与地理研究所 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011; 3. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 积雪深度的变化对地表水热平衡起着至关重要的作用。选用了国际耦合模式比较计划第六阶段(CMIP6)中目前情景比较齐全的五个全球气候模式, 通过对比新疆地区1979—2014年积雪深度长时间序列数据集, 评估了气候模式在新疆地区模拟积雪深度的模拟能力, 接着预估了未来不同SSPs-RCPs情景下新疆地区在2021—2040年(近期)、2041—2060年(中期)、2081—2100年(末期)相对于基准期(1995—2014年)的积雪深度变化。气温和降水对积雪深度变化有着重要的影响, 因此还分析了新疆地区到21世纪末气温和降水的变化趋势。结果表明: 订正后的气候模式模拟的积雪深度数据与观测数据的相关系数均达到0.8以上, 其中1月至3月与观测数据的结果更为吻合。气候模式基本上能够反映积雪深度年内变化的基本特征, 气候模式模拟的积雪深度空间分布和观测数据具有相似的特征。气温和降水在未来不同情景下均会波动上升, 其中气温的增幅相对比较明显, 达 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 而降水的增幅为 $0.63\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 新疆未来的气候总体上呈现出变暖变湿的趋势。新疆地区的平均积雪深度在未来不同时期相对基准期均呈增加的趋势。SSP1-1.9情景下, 21世纪近期、中期和末期北部大部分地区的积雪深度将会有所增加; SSP1-2.6情景下, 北部阿尔泰山地区的积雪深度在21世纪近期有所减小, 但中期和末期将会有所增加; SSP2-4.5情景下, 21世纪不同时期东部地区的积雪深度将会有所增加, 北部和中部大部分地区在不同时期积雪深度将会变小; SSP3-7.0情景下, 21世纪不同时期北部和西南地区的积雪深度将会普遍变小, 东部地区的积雪深度将普遍增加; SSP4-3.4和SSP4-6.0情景下, 21世纪不同时期西南昆仑山地区的积雪深度将会普遍变小, 东部地区的积雪深度将普遍增加; SSP5-8.5情景下, 北部阿尔泰山地区和东部地区的积雪深度将普遍增加。

关键词: SSPs-RCPs; CMIP6; 积雪深度; 预估; 新疆

中图分类号: P468.0*25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1435-11

0 引言

积雪是冰冻圈最重要的组成部分, 对全球和区域的辐射平衡和大气环流有着重要的影响^[1]。积雪也是一个对全球环境变化敏感的参数, 积雪的变化与气候环境变化有着密切的关系, 其动态变化对气候环境和人类生活产生重要影响^[2-3]。积雪深度、积雪密度、雪水当量等积雪相关变量的变化通过改变

地表和大气之间的能量和水平衡, 对水文、生态系统和农业产生深远影响^[4-6]。

中国最主要的积雪分布地区主要为北疆积雪带、天山积雪地区、青藏高原雪区以及内蒙古-东北地区, 其中新疆为我国陆地上最大的积雪分布区^[7]。季节性积雪作为临时水库, 冬季积雪决定了春季和夏季的河流变化^[8-9]。1960年以来, 新疆的气候总体上呈现出暖湿化的趋势^[10]。气候变化背景下的水

收稿日期: 2021-06-22; 修订日期: 2021-08-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018FY100501)资助

作者简介: 张庆杰, 硕士研究生, 主要从事气候变化与区域响应研究. E-mail: qjzhang_nuist@163.com

通信作者: 姜彤, 教授, 主要从事气候变化对水资源影响和风险评估研究. E-mail: jiangtong@nuist.edu.cn

资源供给是生态安全和社会经济发展的制约因素,如何应对全球变暖一直是关注的热点^[11],开展气候变化背景下积雪的变化研究具有非常重要研究意义。

近年来,国内外众多学者关于积雪的时空变化特征等方面展开了较多的研究工作。比利牛斯山脉(欧洲西南部)在1958—2017年间的积雪持续时间和平均深度均呈下降趋势^[12]。由积雪模型模拟的波兰地区的季节性积雪深度无论是在近期还是远期,都会普遍下降^[13]。北美地区冬季积雪在1930—1980年呈现出增加的趋势,在1980年后开始趋于减小^[14]。在大多数地区年平均降雪随着气候变暖而减少,但在地表温度较低的地区增加^[15-17]。近60年新疆区域尤其是北疆、天山山区的冬季最大积雪深度均呈增加趋势,北疆和天山山区年际变化波动较大,南疆略有增加,但趋势不明显^[18]。新疆的平均积雪日数在2001—2015年呈非显著下降趋势,新疆各地区平均积雪日数的分布具有明显的空间异质性^[19]。随着明显的增温增湿变化,新疆地区的积雪呈现出缓慢的增长趋势,并且积雪日数和厚度与冬季降水量呈正相关^[20]。乌鲁木齐市年际上冬季积雪量在1990—2004年呈现出比较缓慢的波动上升趋势^[21]。在积雪深度变化的影响因素方面,当前研究认为积雪深度的变化主要受近地面气温和降水量变化的之间相互作用影响^[22-23],并且在不同地区积雪深度的变化受气温、降水等不同的气象要素的影响大小也存在一定的差异性^[24-25]。

地球系统模式是理解历史气候与环境演变机理并预估未来气候变化的重要工具^[26]。为此,世界气候研究计划(WCRP)于1995年组织了众多学者和研究机构共同发起了国际耦合模式比较计划(CMIP)。CMIP计划主要开展气候模式模拟能力评估以及未来气候变化的情景预估等方面的研究,该计划得出的研究结果是历次IPCC科学评估的重要组成部分,同时CMIP计划在促进气候模拟、诊断以及归因研究等领域的国际合作和交流方面也起到了重要作用。迄今为止,国际耦合模式比较计划的第六阶段(CMIP6)已经进行了一套新的协调气候模式实验,已被应用于预估积雪、气温、降水、风速等气象要素的变化^[27]。CMIP6继承了CMIP5中的4种RCP情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5),此外还增加了3种排放路径(RCP1.9、RCP3.4、RCP7.0)。情景模式比较计划(ScenarioMIP)作为

CMIP6重要的子计划之一,为气候变化机理、减缓和适应研究提供了关键数据支撑。相比于CMIP5中的RCPs路径,CMIP6融合了共享社会经济路径,使减缓的成本与效益评估更加容易。此外,ScenarioMIP的SSP情景包含针对21世纪末不同温控目标的路径(如SSP1-1.9和SSP1-2.6),可以更加合理地评估1.5℃和2.0℃温升目标^[28]。

目前对积雪的研究一般是对历史时期积雪的时空变化及其影响因素的研究,缺乏积雪变化的预估研究^[18-23]。当前利用全球气候模式来预估积雪变化的相关研究还比较少。因此,本研究将利用全球气候模式数据并结合中国雪深长时间序列数据集等观测数据,开展新疆地区未来积雪时空特征演变的研究。首先基于中国雪深长时间序列数据集(1979—2014年),评估五个全球气候模式的区域适用性;其次预估未来新疆地区不同情景下积雪深度的时空变化特征。研究结果将促进我们更加深刻的认识积雪对气候的响应,同时也将会对未来新疆地区的水资源的合理利用奠定相关的理论基础。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

新疆地处欧亚大陆腹地,是中国最大的省级行政区,并且是古代丝绸之路的重要通道。新疆东西长1 950 km,南北宽1 550 km,面积达166万km²,占中国大约1/6的区域。北部为阿尔泰山脉,南部为昆仑山,中部为天山山脉。新疆最显著的地貌特征是山和盆地交替分布,形成山-盆地体系。新疆地处西风带,具有典型的温带大陆性气候特征。作为一个被高山环抱的内陆地区,其位置远离海洋,不容易受到海洋水分的影响。新疆是中亚地区典型的干旱半干旱区,淡水资源严重匮乏,地表径流主要由山地冰川和积雪融水供给。但该地区的季节性积雪水资源比较丰富,占全国积雪水资源总量的1/3^[29]。

1.2 数据

1.2.1 观测数据

本研究选取了中国雪深长时间序列数据集中新疆地区的雪深数据作为积雪观测数据,中国雪深长时间序列数据集提供了1979年1月1日至2020年12月31日逐日的中国范围的积雪厚度分布数据,其空间分辨率为25 km(来源:时空三极环境大数据平台)。反演该雪深数据集的原始数据来自美国国家雪冰数据中心处理的逐日被动微波亮温数

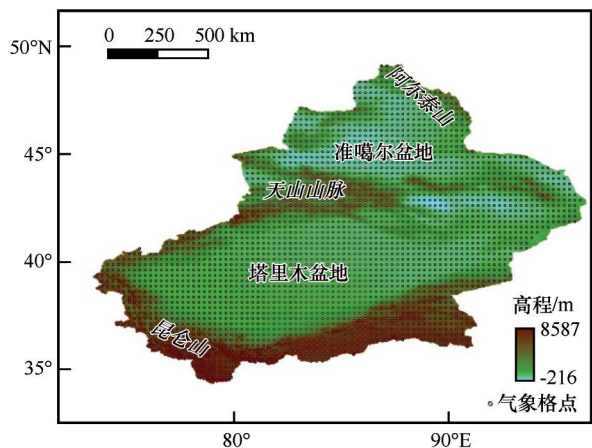


图1 新疆地形和气象格点分布图

Fig. 1 Xinjiang topography and meteorological grid distribution map

据。然后在 Chang 算法基础上针对中国地区进行修正后的算法进行雪深反演^[30-32]。本研究选取了 1979—2014 年为历史时期的新疆地区的雪深数据。

本研究选取了中国气象局地面观测站点的逐日气温和降水资料经过插值后的空间分辨率为

0.5°×0.5°的格点数据^[33],该数据由 2 416 个地面气象观测站的数据生成,已广泛应用于气候变化影响研究,选用新疆地区的 664 个格点数据作为观测值来评估气候模式对新疆地区气温、降水的模拟能力,本研究同样选取了 1979—2014 年为历史时期的气温、降水数据。

1.2.2 气候模式数据

CMIP6 基于不同的共享社会经济路径(SSPs)和最新的人为排放趋势提出了新的预估情景 SSPs-RCPs^[34]。考虑到国际耦合模式比较计划的第六阶段(CMIP6)的全部情景以及所需降雪通量、气温和降水等变量的可得性因素,本研究选取了以下五个全球气候模式(CanESM5、CNRM-ESM2-1、IPSL-CM6A-LR、MIROC6、MRI-ESM2-0)。表 1 描述了本研究中使用的五个全球气候模式的基本信息,主要包括模式名称、研究中心、原始分辨率以及降尺度后的分辨率等。表 2 描述了 7 个不同的 SSPs-RCPs 情景所对应的强迫类别、社会经济情景以及气候情景等。

表1 5个CMIP6模式的简介

Table 1 Basic information of 5 GCMs from CMIP6

模式名称	所属国家、研究中心	原始分辨率	降尺度后分辨率
CanESM5	加拿大气候模拟与分析中心	~2.8°×2.8°	0.25°×0.25°
CNRM-ESM2-1	法国国家科学实验中心	2.5°×1.2676°	0.25°×0.25°
IPSL-CM6A-LR	法国 Pierre-Simon 物理学研究所	2.5°×1.2676°	0.25°×0.25°
MIROC6	日本海洋地球科学与技术处	1.4063°×1.4°	0.25°×0.25°
MRI-ESM2-0	德国普朗克气象研究所	~1.125°×1.12°	0.25°×0.25°

表2 SSPs-RCPs情景介绍

Table 2 Basic information of SSPs-RCPs for CMIP6

情景名称	强迫类别	SSP(社会经济情景)	2100 年人为辐射强迫(气候情景)/(W·m ⁻²)
SSP1-1.9	非常低强迫情景	SSP1(可持续发展路径)	1.9
SSP1-2.6	低强迫情景	SSP1(可持续发展路径)	2.6
SSP2-4.5	中等强迫情景	SSP2(中度发展路径)	4.5
SSP3-7.0	中高等强迫情景	SSP3(局部发展路径)	7.0
SSP4-3.4	低强迫情景	SSP4(不均衡发展路径)	3.4
SSP4-6.0	中等强迫情景	SSP4(不均衡发展路径)	6.0
SSP5-8.5	高强迫情景	SSP5(常规发展路径)	8.5

本文采用了 CMIP6 中情景比较齐全的五個气候模式,考虑到气候模式的历史时期为 1850—2014 年,2014 年以后 CMIP6 气候模式基于不同的共享社会经济路径(SSPs)和最新的人为排放趋势提出了新的预估情景 SSPs-RCPs,因此 2014 年之后的气候模式数据已经变为了不同预估情景组合

下的数据,再结合雪深长时间序列数据集是从 1979 年开始的,所以本研究就考虑将 1979—2014 年作为历史时期。以 1995—2014 年作为基准期,将 2021—2040 年、2041—2060 年、2081—2100 年分别作为 21 世纪近期、中期和末期等三个不同时期展开未来的预估研究。

1.3 研究方法

本文选取的五个气候模式输出的是逐日降雪通量数据,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。但采用的观测雪深数据单位为厘米,因此,研究中将所有的气候模式的降雪通量数据转换为雪水当量(单位为 mm),并假定设雪的深度是液体当量的10倍,再使用近似的10-to-1规则转换成厘米深的雪^[35]。

在分析积雪深度变化时,由于不同气候模式输出数据空间分辨率存在较大的差异性,为了更加准确的与雪深数据集进行对比分析,将气候模式数据的空间分辨率统一降尺度为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ 。在对新疆地区的气温和降水的变化进行分析时,利用观测格点数据,通过统计降尺度方法并利用等距累积分布函数匹配方法(EDCDF)修正了模拟和观测之间的系统偏差,来对模式数据进行了降尺度和偏差订正等处理,将数据空间分辨率和观测格点数据统一为 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ ^[36-37]。

为了得到新疆积雪深度、降水以及气温的变化趋势,本文采用了Mann-Kendall检验法(M-K法)。M-K法是世界气象组织推荐并已在水文气象领域得到广泛使用的一种非参数统计检验的方法^[38]。

本研究主要利用Taylor图来定量评估气候模式的模拟能力。Taylor图通过标准差、均方根误差以

及相关系数来定量描述气候模式结果与观测值的一致性。从原点出发的纵向距离表示模式值与观测值的标准差大小;观测值与模式值之间的距离为均方根误差大小;相关系数的大小取决于为模式值所在的方位角位置,当模式模拟结果与观测值较一致时,相关系数越大,相关性越好。

2 结果与分析

2.1 气候模式对积雪深度的模拟能力

基于雪深观测数据评估了五个气候模式在1979—2014年模拟积雪深度方面的模拟能力。如图2(a)所示,与观测数据相比,气候模式模拟的积雪深度基本上能够反映其年内变化的基本特征,但在7—10月气候模式的模拟值远大于观测值。一般来说,1月至3月的积雪深度为年内最大分布的月份,并且1月至3月气候模式的模拟值与观测值的误差均较小,与观测值更为接近。因此,为了更加准确的预估新疆地区未来的积雪深度变化,本研究重点关注1月至3月的积雪深度变化以及所对应的1月至3月的气温、降水变化。

图2(b)表示了1979—2014年观测数据与气候模式模拟的匹配程度,可以看出,各气候模式与观测值的相关系数均在0.8~0.9之间。

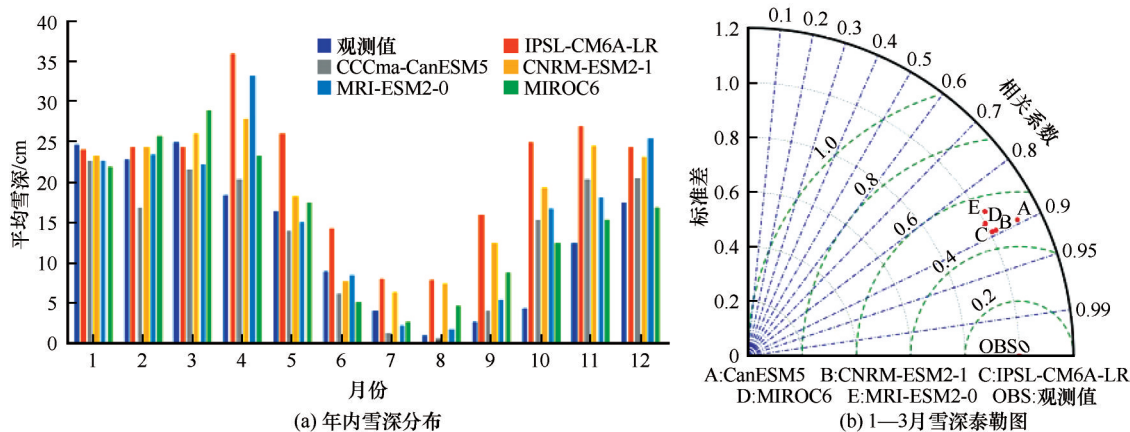


图2 1979—2014年观测数据与气候模式模拟的结果对比

Fig. 2 Comparison of observational data and climate model simulation results from 1979 to 2014: annual snow depth distribution (a); Taylor program of snow depth from January to March (b)

为进一步评估气候模式的模拟性能,文中将新疆雪深长时间序列数据集和五个气候模式模拟的1979—2014年间1月至3月平均积雪深度的空间分布进行了对比。结果如图3所示,气候模式在一定程度上捕获到了北部地区和西南地区的积雪深度最大,一般在40 cm以上。中部地区和东部大部分

地区积雪深度相对较小,平均积雪深度一般在20 cm以下。结合1979—2014年观测数据与气候模式模拟的对比结果可以看出,各气候模式与积雪深度观测值的均方根误差均在0.4~0.6中间,其中CNRM-ESM2-1和IPSL-CM6A-LR模式与积雪深度观测值的均方根误差相对较小,对积雪深度模拟的

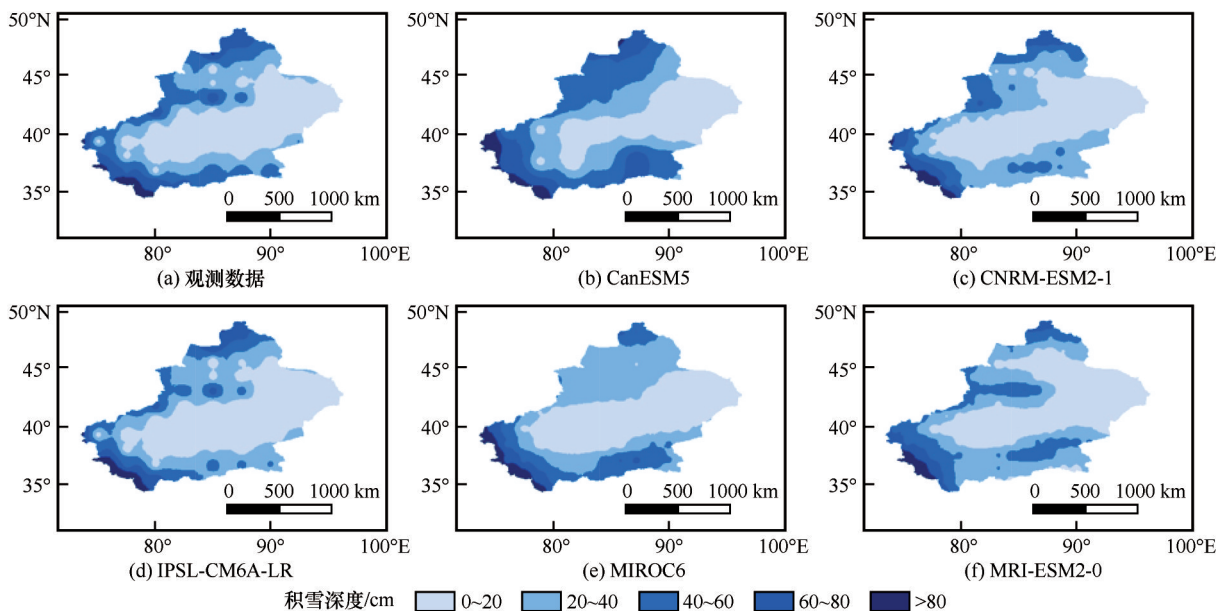


图3 1979—2014年观测数据与气候模式模拟的平均雪深空间分布对比

Fig. 3 Comparison of the spatial distribution of mean snow depth between observed data and climate model simulation from 1979 to 2014

能力相对较好,MIROC6气候模式与积雪深度观测值的均方根误差最大,结合该气候模式模拟的积雪深度空间分布图也可以看出,该气候模式对积雪深度模拟的能力相对较差。总体上看,新疆大部分地区由气候模式得到的积雪深度空间分布和积雪深度观测数据具有相似的特征。

2.2 未来气温、降水分析

气温和降水对积雪深度变化有重要影响,因此,本研究分析了气候变化背景下新疆地区1—3月气温和降水的变化。首先需要对选取的气候模式对新疆地区气温和降水的模拟能力进行评估,表3描述了气候模式原始模拟输出(偏差订正前)和偏差订正后与观测值比较的相关系数对比结果,可以

看出,气候模式偏差订正前后的模拟能力存在一定的差异,尤其是降水这个气象要素,经过偏差订正后降水与观测值的相关系数由原来的0.6左右提高到了0.8以上,气候模式的模拟能力得到了较大的提升。

图4描述了1979—2014年所有气候模式以及多模式集合模拟的气温、降水与观测数据比较的结果。可以看出,订正过的气候模式对新疆地区气温和降水的模拟能力较好,相关系数均大于0.8,并且多模式集合模拟的结果与观测值的相关系数均大于单个气候模式,模拟效果要优于单个气候模式,因此选用多模式集合的结果来对未来的气温和降水变化展开研究。

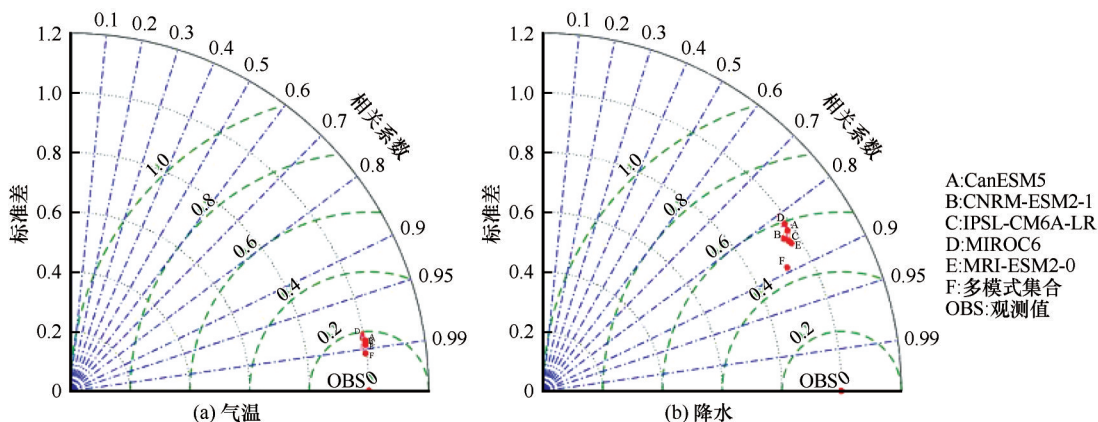


图4 1979—2014年观测数据与气候模式模拟比较

Fig. 4 Comparison of observational data and climate model simulations from 1979 to 2014: temperature (a); precipitation (b)

表3 CMIP6气候模式原始模拟输出和偏差订正后与观测值对比的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between the original simulated output and observed values of the CMIP6 climate model and the corrected deviations

		CanESM5	CNRM-ESM2-1	IPSL-CM6A-LR	MIROC6	MRI-ESM2-0
气温	偏差订正前	0.77	0.89	0.85	0.84	0.91
	偏差订正后	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98
降水	偏差订正前	0.68	0.67	0.59	0.67	0.66
	偏差订正后	0.82	0.83	0.84	0.81	0.86

图5和图6分别描述了气温和降水这两个变量在1995—2100年间每年1—3月的变化。由此看出,气温和降水在未来气候变化背景下均呈现出波

动上升的趋势,其中气温的平均增幅相对比较明显,达 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。而从气温的时间变化可以看出,不同SSPs-RCPs情景下均具有相对显著的升温趋势,其中高辐射强迫情景下的增加趋势比低辐射强迫情景更为显著(趋势均通过0.05显著性水平),具有更为明显的升温趋势,SSP5-8.5情景下,气温升高达 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。而从降水的时间变化可以看出,除高辐射强迫情景外,降水的增幅不是特别显著,平均增幅为 $0.63\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。因此,新疆未来的气候总体上将呈现出变暖变湿的趋势。

2.3 SSPs-RCPs情景下积雪深度的预估

2.3.1 时间变化

由多模式集合平均结果(图7)可以看出,新疆地区的积雪深度在1995—2100年呈波动上升的趋势。低辐射强迫情景下上升幅度较小,高辐射强迫情景下的变化较为显著,平均积雪深度在高强迫情景(SSP5-8.5)下中增幅最大,上升趋势最为显著,趋势均通过0.05显著性水平。

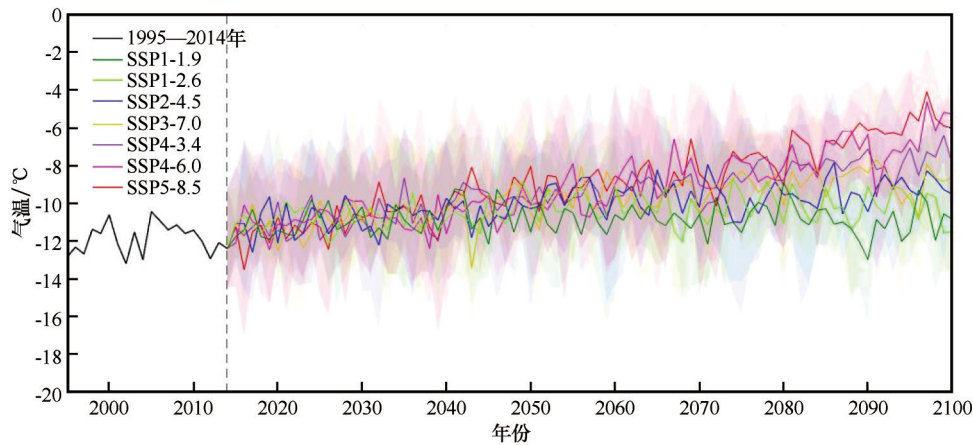


图5 不同SSPs-RCPs情景下,1995—2100年新疆气温变化趋势

Fig. 5 The trend of temperature change in Xinjiang from 1995 to 2100 under different SSPs-RCPs scenarios

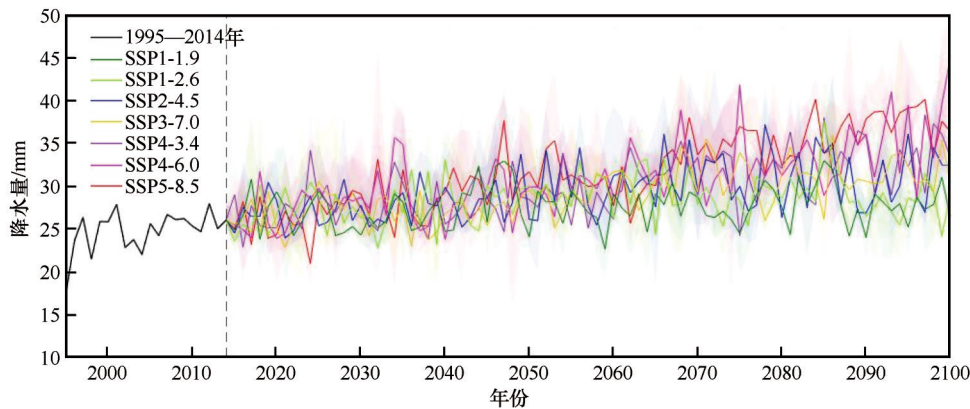


图6 不同SSPs-RCPs情景下,1995—2100年新疆降水变化趋势

Fig. 6 The trend of precipitation change in Xinjiang from 1995 to 2100 under different SSPs-RCPs scenarios

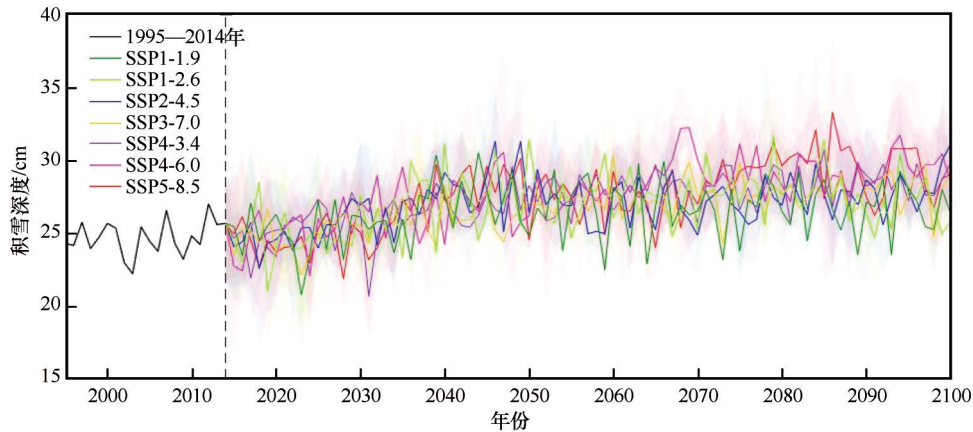


图7 不同 SSPs-RCPs 情景下, 1995—2100 年新疆积雪深度变化趋势

Fig. 7 The trend of snow depth change in Xinjiang from 1995 to 2100 under different SSPs-RCPs scenarios

基准期 1995—2014 年的平均积雪深度为 24.7 cm, 相对于基准期, 在 SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-3.4, SSP4-6.0, SSP5-8.5 情景下, 近期(2021—2040 年)平均积雪深度将分别增加 3.2%、3.3%、3.1%、5.5%、7.5%、6.0%、6.8%, 中期(2041—2060 年)相对增加 9.3%、11.0%、8.3%、11.1%、11.2%、10.9%、13.4%, 末期(2081—2100 年)相对增加 8.1%、10.8%、9.2%、18.8%、13.2%、15.1%、19.8%。中期和末期相对近期增幅更为明显, 各个时期高辐射强迫情景下积雪深度的增幅最大, 末期高辐射强迫情景下增幅达 20% 左右。

2.3.2 空间变化

21 世纪近期、中期和末期, 新疆地区的积雪深度在不同 SSPs-RCPs 情景下相对基准期的变化空间分布如图 8 所示。SSP1-1.9 情景下, 21 世纪近期、中期和末期北部大部分地区的积雪深度将会有所增加; SSP1-2.6 情景下, 北部阿尔泰山地区的积雪深度在 21 世纪近期有所减小, 但中期和末期将会有所增加; SSP2-4.5 情景下, 21 世纪近期、中期和末期东部地区的积雪深度将会有所增加, 北部和中部大部分地区在不同时期积雪深度将会变小; SSP3-7.0 情景下, 21 世纪不同时期北部和西南地区的积雪深度将会普遍变小, 东部地区的积雪深度将普遍增加; SSP4-3.4、SSP4-6.0 情景下, 21 世纪不同时期西南昆仑山地区的积雪深度将会普遍变小, 东部地区的积雪深度将普遍增加; SSP5-8.5 情景下, 北部阿尔泰山地区和东部地区的积雪深度将普遍增加。

不同 SSPs-RCPs 情景下, 新疆地区的积雪深度在 21 世纪前期相对于中期和后期增幅较小, 并且积雪深度减小的地区主要分布在西南昆仑山地区; 21

世纪中期和后期增加幅度较大的区域主要集中在东部地区。

3 讨论

积雪深度作为积雪相关变量之一, 积雪深度的变化对地表水热平衡起着至关重要的作用。气候模式的模拟表明, 在全球大多数地区年平均降雪随着气候变暖而减少, 但在地表温度较低的地区增加^[15-17]。例如 Li 等^[17]利用 CMIP5 的四个气候模式对中亚地区在未来不同升温目标下中亚地区的积雪深度变化进行研究得出: 全球暖化水平 1.5 °C 和 2.0 °C 时, 中亚东北部地区积雪深度将增加, 中西部地区积雪深度将会减少, 具有明显的空间格局。积雪深度的变化是气温、降水量等气象要素相互作用的结果。在气候变暖的情况下, 积雪的深度通常会下降。然而, 本研究中的预测表明, 在 SSP5-8.5 情景下, 北部阿尔泰山地区和东部地区的积雪深度在未来不同时期均呈现出增加的趋势。正如 Ræisaenen^[22]所指出的, 对全球变暖的积雪的变化受到预计降水量增加的调节, 并且积雪对气候变化的反映可能随纬度和海拔而变化。在高纬度和高海拔地区, 积雪的积累可能会增加。Krasting 等^[23]研究得出, 在气温足够低的地区, 气温的上升对降水的固相和液相(雪和雨)分配没有很大影响的情况下, 气候变暖时大气中水分含量的增加可能导致降雪的增加。在新疆气候总体上呈现出变暖变湿的前提下, 新疆北部和东部地区的降水量增加, 而 1—3 月平均气温仍低于 0 °C, 因此这些地区的积雪深度将会增加, 这可能是一种与预测变化相关的合理解释。

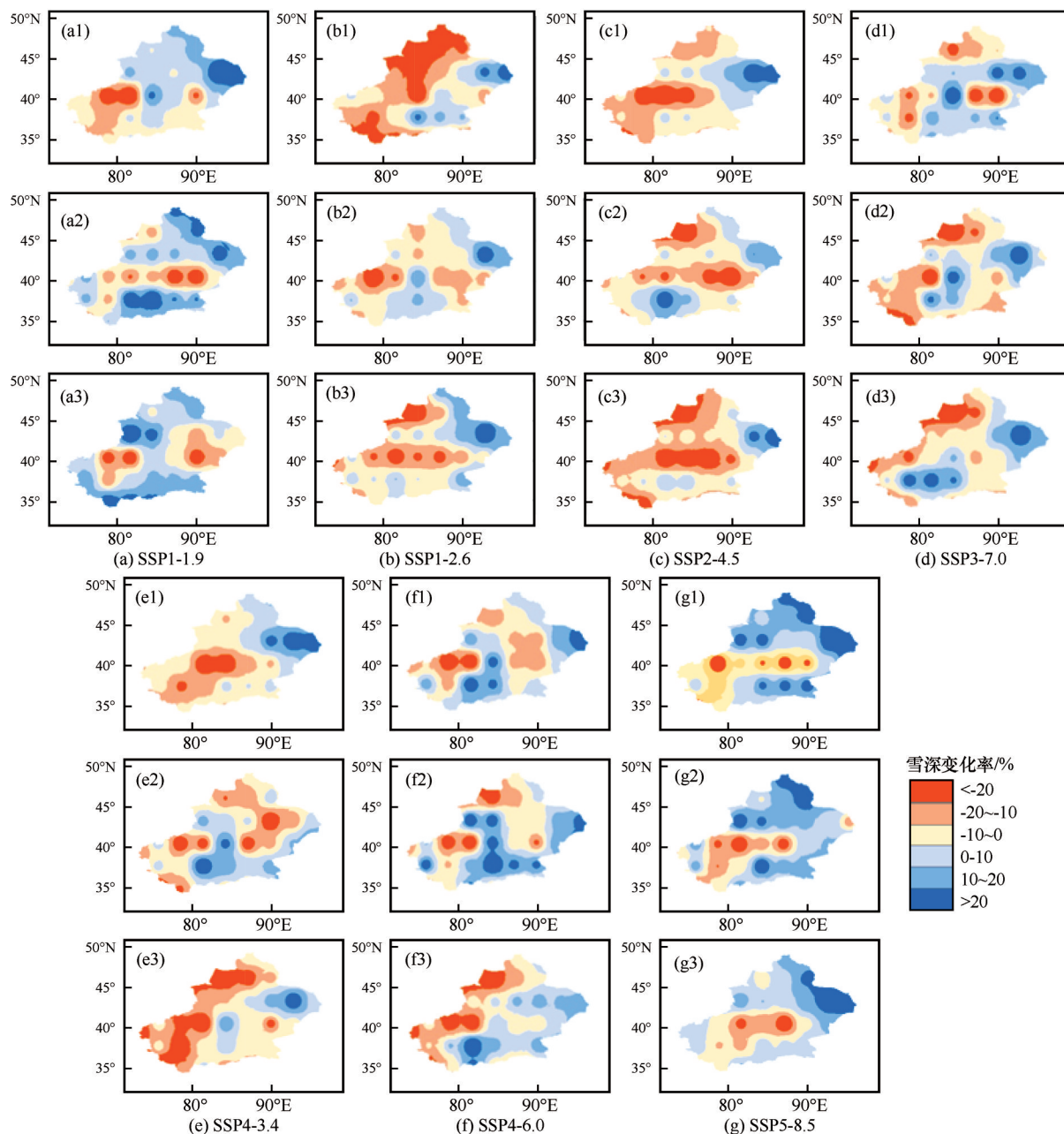


图8 不同情景下新疆2021—2040年(a1~g1), 2041—2060年(a2~g2)和2081—2100年(a3~g3)雪深较基准期(1995—2014年)变化(a表示 SSP1-1.9; b表示 SSP1-2.6; c表示 SSP2-4.5; d表示 SSP3-7.0; e表示 SSP4-3.4; f表示 SSP4-6.0; g表示 SSP5-8.5)

Fig. 8 Xinjiang region under different scenarios in 2021—2040 (a1~g1), 2041—2060 (a2~g2) and 2081—2100 (a3~g3) change in snow depth from the base period (1995—2014) (a denotes SSP1-1.9; b denotes SSP1-2.6; c denotes SSP2-4.5; d denotes SSP3-7.0; e denotes SSP4-3.4; f denotes SSP4-6.0; g denotes SSP5-8.5)

4 结论

本研究基于新疆地区的雪深长时间序列数据集, 评估所选取的第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中的五个气候模式, 以1979—2014年为历史时期在积雪深度方面的模拟性能, 然后研究了2021—2100年新疆地区积雪深度的时空变化。并

结合气温和降水这两个气象要素在1995—2100年的变化来展开相关分析, 得到结论如下:

(1) 在时间尺度上, 五个气候模式模拟的积雪深度基本上模拟了年内变化的基本特征, 其中1—3月模式模拟的结果与雪深数据集的结果更为接近。在空间尺度上, 五个气候模式和雪深数据集模拟出的最大平均雪深处和较低的平均雪深处在空间分

布上具有较好的空间一致性。

(2)在气候变化背景下降水和气温均会波动上升,并且气温的增幅要明显高于降水,未来的气候总体上趋于暖湿化。

(3)新疆地区的积雪深度在 21 世纪将波动上升,中期和末期相对于近期增幅更为明显,各个时期高辐射强迫情景下积雪深度的增幅相对较大,21 世纪末期高辐射强迫情景下增幅达 20% 左右。在空间变化方面,不同情景下积雪深度的空间变化存在一定的差异,但总体来说,北部和东部地区的积雪深度将会增加,中部大部分地区的积雪深度将会减少。

参考文献(References):

- [1] Li Yupeng, Chen Yaning, Li Zhi. Climate and topographic controls on snow phenology dynamics in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. *Atmospheric Research*, 2020, 236: 104813.
- [2] Jin Xin, Ke Changqing, Xu Yuyue, et al. Spatial and temporal variations of snow cover in the Loess Plateau, China[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(8): 1721-1731.
- [3] Liu Yijing, Sun Yanhua, Zhong Xinyue, et al. Changes of snow cover in the Third Pole and the Arctic[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 140-156. [刘一静, 孙燕华, 钟歆玥, 等. 从第三极到北极: 积雪变化研究进展[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 140-156.]
- [4] Alexander M A, Tomas R, Deser C, et al. The atmospheric response to projected terrestrial snow changes in the late twenty-first century[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(23): 6430-6437.
- [5] Lievens H, Demuzere M, Marshall H P, et al. Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4629.
- [6] Liu Shibo, Zang Shuying, Zhang Lijuan, et al. Analyzing the spatial-temporal variations of snow depth in the Northeast China by means of remote sensing in consideration of frozen ground zonation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(2): 261-269. [刘世博, 臧淑英, 张丽娟, 等. 东北冻土区积雪深度时空变化遥感分析[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2): 261-269.]
- [7] Che Tao, Li Xin. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993-2002[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005(1): 64-67. [车涛, 李新. 1993-2002 年中国积雪水资源时空分布与变化特征[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 64-67.]
- [8] Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, et al. Heat exchange during snow ablation in plains and mountains of Eurasia[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D22): 27013-27022.
- [9] Gafurov A, Lüdtke S, Unger-Shayesteh K, et al. MODSNOW-Tool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(14): 1-15.
- [10] Wu Xiulan, Zhang Taixi, Wang Hui, et al. Characteristics of temperature and precipitation change in Xinjiang during 1961—2017[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2020, 14(4): 27-34. [吴秀兰, 张太西, 王慧, 等. 1961—2017 年新疆区域气候变化特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2020, 14(4): 27-34.]
- [11] Li Zhi, Chen Yaning, Shen Yanjun, et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2205-2212.
- [12] López-moreno J I, Soubeyroux J M, Gascoin S, et al. Long-term trends (1958—2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees[J]. *International Journal of Climatology*, 2020, 40(14): 6122-6136.
- [13] Szwed M, Dobler A, Mezghani A, et al. Change of maximum snow cover depth in Poland-trends and projections[J]. *Ido-jaras*, 2019, 123(4): 487-500.
- [14] Frei A, Robinson D A. Northern Hemisphere snow extent: regional variability 1972—1994[J]. *International Journal of Climatology*, 1999, 19(14): 1535-1560.
- [15] Kapnick S B, Delworth T L. Controls of global snow under a changed climate[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(15): 5537-5562.
- [16] Räisänen J. Twenty-first century changes in snowfall climate in Northern Europe in ENSEMBLES regional climate models[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(1): 339-353.
- [17] Li Yun, Tao Hui, Su Buda, et al. Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on winter snow depth in central Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651(2): 2866-2873.
- [18] Wang Hui, Wang Shengli, Yu Xingjie, et al. Spatial-temporal variation of snow cover in Xinjiang based on surface observation from 1961 to 2017[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 72-80. [王慧, 王胜利, 余行杰, 等. 1961-2017 年基于地面观测的新疆积雪时空变化研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 72-80.]
- [19] Chen Wenqian, Ding Jianli, Wang Jingzhe, et al. Temporal and spatial variability in snow cover over the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China, from 2001 to 2015[J]. *PeerJ*, 2020, 8(14): e8861.
- [20] Cui Caixia, Yang Qing, Wang Shengli. Comparison analysis of the long-term variations of snow cover between mountain and plain areas in Xinjiang region from 1960 to 2003[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(4): 486-490. [崔彩霞, 杨青, 王胜利. 1960-2003 年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 486-490.]
- [21] Xie Yuqin, Zhao Qiudong, Wang Fang. The characteristics of snow change and the relation between snow change and climate—a case study of Urumqi area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(9): 51-55. [谢玉琴, 赵求东, 王芳. 积雪变化特征及与气候之间的关系——以乌鲁木齐地区为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(9): 51-55.]
- [22] Räisänen J. Warmer climate: less or more snow?[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 30: 307-319.
- [23] Krasting J P, Broccoli A J, Dixon K W, et al. Future changes in northern hemisphere snowfall[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(20): 7813-7828.
- [24] Li Yali, Lei Xiangjie, Li Qian, et al. The variation characteristics of snow cover in the Mount Hua from 1953 to 2016 and its relationship to air temperature and precipitation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(3): 791-800. [李亚丽, 雷向杰, 李茜, 等. 1953-2016 年华山积雪变化特征及其与气温和降水的关系[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3): 791-800.]
- [25] Bi Zherui, Sa Chula, Wang Mulan, et al. Spatiotemporal change of snow depth in the Mongolian plateau and its response

- to climate change[J]. Journal of Inner Mongolia Normal University(Natural Science Edition), 2020, 49(3): 256-262. [毕哲睿, 萨楚拉, 王牧兰, 等. 蒙古高原雪深时空变化及其对气候变化的响应[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2020, 49(3): 256-262.]
- [26] Wang Bin, Zhou Tianjun, Yu Yongqiang. A perspective on earth system model development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(6): 857-869. [王斌, 周天军, 俞永强, 等. 地球系统模式发展展望[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 857-869.]
- [27] 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.]
- [28] Jiang Tong, Lyu Yanran, Huang Jinlong, et al. New scenarios of CMIP6 model (SSP-RCP) and its application in the Huaihe River Basin[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(5): 102-109. [姜彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 等. CMIP6模式新情景(SSP-RCP)概述及其在淮河流域的应用[J]. 气象科技进展, 2020, 10(5): 102-109.]
- [29] Li Peiji. Preliminary evaluation of seasonal snow resources in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1988, 43(2): 108-119. [李培基. 中国季节积雪资源的初步评价[J]. 地理学报, 1988, 43(2): 108-119.]
- [30] Che Tao, Li Xin, Jin Rui, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. Annals of Glaciology, 2008, 49: 145-154.
- [31] Dai Liyun, Che Tao, Ding Yongjian. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S data to improve the consistency of snow-depth products in China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(6): 7212-7230.
- [32] Dai Liyun, Che Tao, Ding Yongjian, et al. Evaluation of snow cover and snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau derived from passive microwave remote sensing[J]. The Cryosphere, 2017, 11(4): 1933-1948.
- [33] Wu Jia, Gao Xuejie, Han Zhenyu, et al. Analysis of the change of comfort index over Yunnan Province based on effective temperature[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(2): 174-186. [吴佳, 高学杰, 韩振宇, 等. 基于有效温度指数的云南舒适度变化分析[J]. 地球科学进展, 2017, 32(2): 174-186.]
- [34] 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.]
- [35] Roebber P J, Bruening S L, Schultz D M, et al. Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density[J]. Weather and Forecasting, 2003, 18(2): 264-287.
- [36] Huang Jinlong, Zhai Jianqing, Jiang Tong, et al. Analysis of future drought characteristics in China using the regional climate model CCLM[J]. Climate Dynamics, 2018, 50(1): 507-525.
- [37] Tao Hui, Huang Jinlong, Zhai Jianqing, et al. Simulation and projection of climate changes under the RCP4.5 scenario in the Yangtze River Basin based on CCLM[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione ClimatIS, 2013, 9(4): 246-251. [陶辉, 黄金龙, 翟建青, 等. 长江流域气候变化高分辨率模拟与RCP4.5情景下的预估[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(4): 246-251.]
- [38] Guan Xiaoxiang, Zhang Jianyun, Elmahdi A, et al. The capacity of the hydrological modeling for water resource assessment under the changing environment in semi-arid river basins in China[J]. Water, 2019, 11(7): 1328.

Spatial and temporal patterns of snow depth in Xinjiang: insight from CMIP6 climate models

ZHANG Qingjie¹, TAO Hui², SU Buda³, DOU Tingfeng⁴, JIANG Tong¹

(1. School of Geographical Science / Institute for Disaster Risk Management (iDRM), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. National Climate Centre, Beijing 100081, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The change of snow depth plays an important role in the surface water heat balance. Five global climate models from Phase 6 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) with relatively complete scenarios are selected to evaluate the simulation ability of the climate model in simulating the snow depth in Xinjiang by comparing the long time series data sets of the snow depth in Xinjiang from 1979 to 2014. The change of snow depth in Xinjiang during 2021—2040 (recent period), 2041—2060 (middle period), and 2081—2100 (late period) relative to the base period (1995—2014) under different SSPs-RCPs scenarios in the future is also estimated. Temperature and precipitation have an important impact on the change of snow depth, so the change trend of temperature and precipitation in Xinjiang to the end of the 21st century is also analyzed. The results show that: (1) The correlation coefficients between the snow depth data simulated by the revised climate model and the observed data are all above 0.8, and the results from January to March are more consistent with the observed data. The climate model can basically reflect the basic characteristics of annual variation of snow depth. The spatial distribution of snow depth simulated by the climate model has similar characteristics with the observed data. (2) Temperature and precipitation will rising volatility under different scenarios in the future, the increase of temperature is relatively obvious, reaching $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, while the increase of precipitation is $0.63\text{ mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$. (3) In general, the climate of Xinjiang in the future will show a warming and wetting trend. The average snow depth in Xinjiang will increase in different periods in the future. Under SSP1-1.9 scenario, snow depth will increase in most northern regions in the near, middle and late 21st century. Under SSP1-2.6 scenario, the snow depth in the northern Altai Mountains will decrease in the recent century, but will increase in the middle and end of the 21st century. Under SSP2-4.5 scenario, the snow depth in eastern China will increase in different periods in the 21st century, while the snow depth in most of northern and central China will decrease in different periods. Under SSP3-7.0 scenario, the snow depth in north and southwest China will generally decrease, while the snow depth in eastern China will generally increase in different periods in the 21st century. Under the SSP4-3.4 and SSP4-6.0 scenarios, the snow depth in southwest Kunlun Mountains will generally decrease in different periods in the 21st century, while the snow depth in eastern Kunlun Mountains will generally increase. Under the SSP5-8.5 scenario, the snow depth will generally increase in the northern Altai Mountains and eastern regions.

Key words: SSPs-RCPs; CMIP6; snow depth; forecast; Xinjiang

(责任编辑: 戴礼云; 编辑: 周成林)