

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.02.003

SDSM 在黄河流域水源涵养区降水和气温降尺度 预报中的适用性

徐凡奇¹, 赵阳², 王兴平², 董贵明^{1,3}, 乔宇轩¹, 鞠琴¹, 王振龙⁴

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 四川省紫坪铺开发有限责任公司, 四川 成都 610091;
3. 中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;
4. 安徽省水利部淮委水利科学研究院五道沟水文实验站, 安徽 蚌埠 230088)

摘要: 为提高全球气候模式时空分辨率, 以黄河流域水源涵养区为研究对象, 基于 NCEP 再分析数据, 优选出与气温、降水相关性较强的因子和对应网格, 以此构建 SDSM, 并采用 1971—2014 年黄河水源涵养区 21 个气象站的逐日降水量和气温数据对 SDSM 的精度进行评估, 通过将降尺度数据、MRI-ESM2-0、EC-Earth3-Veg 气候模式自身的日降水和气温数据与实测数据进行对比分析验证降尺度数据的可靠性。结果表明: 影响黄河流域水源涵养区气温和降水的大气环流因子主要为向下短波辐射通量和可降水量; SDSM 对日气温的模拟效果优于降水, 相关系数和纳什效率系数皆在 0.95 以上; 日降水相关系数在 0.70 左右, 纳什效率系数在 0.50 左右; 在全流域上, 基于 SDSM 模拟的日气温和降水均优于 EC-Earth3-Veg 和 MRI-ESM2-0 气候模式。

关键词: SDSM; CMIP6 气候模式; 气温; 降水; 黄河流域水源涵养区

中图分类号: P457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)02-0019-10

Applicability evaluation of SDSM in the downscaling forecast of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin

XU Fanqi¹, ZHAO Yang², WANG Xingping², DONG Guiming^{1,3}, QIAO Yuxuan¹, JU Qin¹, WANG Zhenlong⁴

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Sichuan Province Zipingpu Development Co., Ltd., Chengdu 610091, China;

3. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

4. Wudaogou Hydrology and Water Resources Experimental Station, Water Resources Research Institute of Anhui Province, Bengbu 230088, China)

Abstract: In order to improve the spatial and temporal resolution of the global climate model, we selected the water conservation region of the Yellow River Basin as the study area. Based on NCEP reanalysis data, this study identified factors and corresponding grids with strong correlations to temperature and precipitation. These were used to construct a Statistical DownScaling Model (SDSM). The accuracy of SDSM was evaluated by using daily precipitation and temperature data from 21 meteorological stations in the water conservation area of the Yellow River between 1971 and 2014. The reliability of the downscaling data was verified by comparing the daily precipitation and temperature data of the downscaling data, MRI-ESM2-0 and EC-Earth3-Veg climate modes with the measured data. The results show that the atmospheric circulation factors affecting the temperature and precipitation in the water conservation region of the Yellow River Basin are mainly downward shortwave radiation flux and precipitable water. The model's performance showed a better simulation of daily temperatures, with the correlation coefficient and Nash efficiency coefficient above 0.95. The correlation coefficient is about 0.70, Nash efficiency coefficient is about 0.50, for daily precipitation. In the entire basin, the daily

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201104);“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2022490511);江苏省大学生创新创业项目(202310294012Z, 202310294176Y)

作者简介: 徐凡奇(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: xufanqi0409@qq.com

通信作者: 鞠琴(1980—),女,副教授,博士,主要从事气候变化下水文响应研究。E-mail: juqin@hhu.edu.cn

引用本文: 徐凡奇,赵阳,王兴平,等. SDSM 在黄河流域水源涵养区降水和气温降尺度预报中的适用性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 19-28.

XU Fanqi, ZHAO Yang, WANG Xingping, et al. Applicability evaluation of SDSM in the downscaling forecast of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(2): 19-28.

temperature and precipitation based on SDSM simulations outperformed those of both EC-Earth3-Veg and MRI-ESM2-0 climate models.

Key words: SDSM; CMIP6 climate models; temperature; precipitation; water conservation region of the Yellow River Basin

随着气候变暖加剧,许多地区极端天气和气候极端事件发生的强度与频率增加,对生态环境与人类生存造成了严重威胁^[1-3]。据 IPCC 第六次评估报告,近百年全球气候不断变暖,若不加以控制,地表升温幅度将进一步增大,评估气候变化对不同区域的影响,有利于应对气候变化带来的风险,降低人类和生态系统的损失^[4-5]。

全球气候模式(global climate models, GCMs)是模拟气候系统特征的重要工具,它以微分方程表现地球气候系统各个圈层的相互作用和反馈过程,可以量化评估气候变化带来的影响^[6-9],已广泛应用于研究过去、现在和未来的气候变化^[10]。然而 GCMs 在空间和时间上的粗分辨率很难直接与细分辨率的水文模式相连接,因此如何弥补两者分辨率上的差异是一个急需解决的问题^[11],对 GCMs 进行降尺度是弥补这一差异的有效方法。降尺度模型可分为动力降尺度模型、统计降尺度模型和动力-统计相结合模型。动力降尺度模型是基于区域气候模式(regional climate model, RCM),使用 GCMs 的初始和与时间相关的横向边界条件,以牺牲有限区域建模为代价实现更高的空间分辨率,主要缺陷是计算成本较大,仅适用于部分区域^[12]。统计降尺度模型(statistical downscaling model, SDSM)不需要考虑 GCMs 提供的边界条件,具有易于构建、方法众多和简单灵活等特点,在国内外气候变化研究中被广泛应用^[13-15]。例如:董甲平等^[16]基于贝叶斯高精度曲面建模算法,解决了降尺度残差校正方法存在的误差和多尺度问题,提升了 SDSM 的精度;Tang 等^[17]对中国的温度和降水的降尺度效果进行研究,发现 SDSM 更适用于温度,而对降水的降尺度效果不理想;段小兰等^[18]发现在黄河源区 SDSM 对降水的模拟值普遍偏低;杨肖丽等^[19]采用等距离累积分布函数法对降水和气温进行统计降尺度,对黄河流域气象干旱进行预估;张丹等^[20]研究发现统计降尺度校正后的 GCMs 能够有效地捕捉金沙江流域最高气温、最低气温和降水的变化;Eingrüber 等^[21]将 NCEP 再分析数据和 GCMs 进行耦合建模,使用 SDSM 对德国西部中尺度 Rur 流域的极端降水和洪水进行气候变化模拟和趋势分析。上述研究表明,高分辨率的区域气候信息是研究气候变化对区域水文过程影响的必要条件^[22],降尺度模型可以显著提高中小尺度区域的气候模拟和预估的可靠性,被认为是获得高分辨率数据的有效方法。但 SDSM 在各研究区域的适用性差异较大,有待进一步探讨。

黄河流域水源涵养区是黄河流域的主要产水区,地处黄河流域上游,是重要的生态屏障,生态环境脆弱,对气候变化的响应较敏感^[23]。降水和气温作为重要的气象要素,直接或间接地参与水循环过程,影响着流域水资源的时空分配。第六次耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project 6, CMIP6)虽然增加了更多的气候模式参与者、更加完整的设计试验和更庞大的模拟数据,但只有部分气候模式能提供日时间尺度的大气环流因子和气象数据^[24-25]。目前,在分析气候变化对水循环影响的研究中,关于日尺度的情景数据是选择降尺度模拟的日数据还是模式自身的日数据的研究并不多见。因此,本文以黄河流域水源涵养区为研究区域,基于 NCEP 再分析数据,构建 SDSM,采用实测站点资料进行精度评估,验证 SDSM 在 MRI-ESM2-0 气候模式中的适用性,同时通过将降尺度结果、MRI-ESM2-0、EC-Earth3-Veg 气候模式自身的日降水和气温与实测数据进行对比分析验证降尺度的可靠性,以期对未来气候变化下分析水资源变化趋势、管理流域水资源提供参考。

1 研究区概况和研究数据

1.1 研究区概况

黄河流域水源涵养区(30°55′~40°36′N, 95°55′~115°25′E)主要包括黄河兰州站以上、渭河华县站以上(不含泾河)和伊洛河流域^[26],发源于青藏高原,地跨青海、四川和甘肃三省,地势西高东低,跨越两大阶梯,海拔高程悬殊,高程在 92~6253 m 之间。黄河流域水源涵养区面积为 30.44 万 km²,占黄河流域的 38%,天然径流量占全流域的 84%^[27]。该区域多年平均降水量和气温都呈由东南向西北递减的特征,且近几十年气温、降水量和蒸散发量都有显著增加^[28]。本文将流域划分为与 NCEP 再分析数据分辨率一致的 24 个 2.5°×2.5°的网格(图 1)。

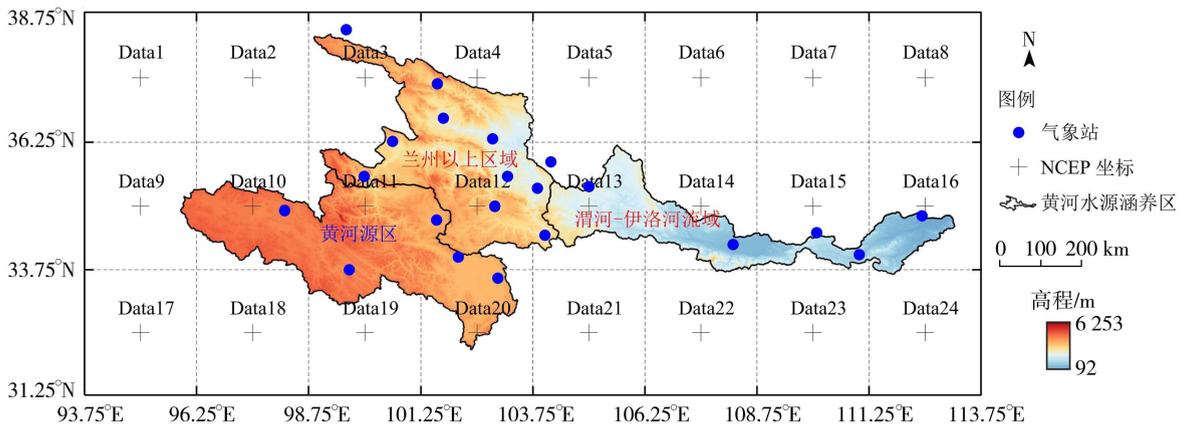


图 1 黄河流域水源涵养区气象站分布及 NCEP 再分析数据网格示意图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the water conservation region of the Yellow River Basin and grid diagram of NCEP reanalysis data

1.2 研究数据

本文采用的气象数据包括:①黄河流域水源涵养区 21 个气象站 1971—2014 年的逐日降水和气温数据,来源于中国气象数据网;②1971—2014 年 NCEP 再分析数据作为观测资料的大尺度气候资料,分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,时间为日尺度,包含 31 种大气环流因子;③全球气候模式(GCMs)选用 CMIP6 中 MRI-ESM2-0 模式(分辨率为 $1.1^{\circ} \times 1.1^{\circ}$)大气环流因子、MRI-ESM2-0 模式和 EC-Earth3-Veg 模式(分辨率为 $0.7^{\circ} \times 0.7^{\circ}$)的历史情景降水和气温数据。

2 研究方法

本文以黄河流域水源涵养区为研究区域,基于 NCEP 再分析数据,优选出与气温、降水相关性较强的大气环流因子和对应网格,构建 SDSM,并采用 1971—2014 年黄河水源涵养区 21 个气象站的逐日降水量和气温数据对 SDSM 的精度进行评估。利用构建的 SDSM,评估 CMIP6 中 MRI-ESM2-0 气候模式的适用性。吴金雨等^[29]评估了 20 种 CMIP6 气候模式在黄河流域水源涵养区的模拟能力,结果表明 EC-Earth3-Veg 模式的模拟能力最好,因此为验证 SDSM 降尺度后数据的可靠性,将 MRI-ESM2-0 降尺度数据, MRI-ESM2-0、EC-Earth3-Veg 气候模式自身的日降水和气温数据与实测数据进行对比分析,具体的研究思路框架如图 2 所示。

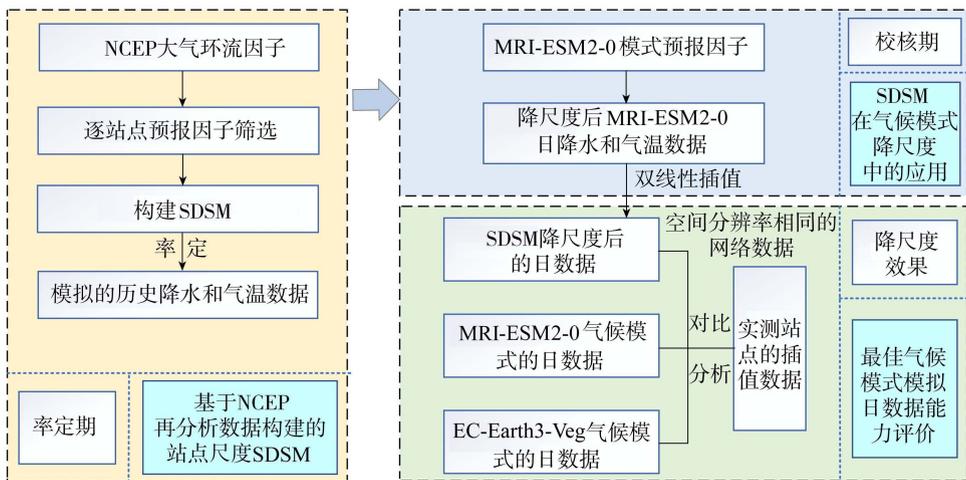


图 2 研究思路框架

Fig. 2 Research framework

2.1 SDSM

SDSM 是由英国 Wilby 等^[30]建立统计,它基于天气发生器和多元线性回归方法建立预报因子和预报量之间的统计关系,使得 GCMs 输出数据更接近观测值。SDSM 的模拟步骤如下:

步骤 1 优选大气环流预报因子。基于 NCEP 再分析数据中的大气环流因子的筛选原则,需要遵循以

下几点^[31]:①优选的预报因子及对应网格与预报量有良好的相关性与一致性;②预报因子能够表征预报量的物理过程;③必须为 GCMs 所包含的预报因子,以达到减小系统误差的目的;④应用于统计降尺度模式的预报因子之间为弱相关或者无相关。

步骤 2 建立统计关系,构建 SDSM,进行参数率定。

步骤 3 输入 GCMs 模式中优选的预报因子,验证 SDSM 对 CMIP6 中 MRI-ESM2-0 气候模式的降尺度效果。

2.2 评估指标

优选 NCEP 再分析数据中大气环流因子,分析其对黄河流域水源涵养区降水和气温的影响,计算各站点与邻近区域预报因子的相关系数,选出降水和气温相关性较强的网格区域和预报因子。选用相关系数(R)和纳什效率系数(NSE)作为 SDSM 模拟能力评估指标。 R 越接近于 1,表明模型的相关性越强;NSE 越接近于 1,表示模拟质量越好,模型可信度越高。

3 研究结果与分析

3.1 SDSM 的构建与验证

3.1.1 筛选预报因子和对应网格

为构建 SDSM,需要对 NCEP 再分析数据中的 31 种大气环流因子进行筛选。基于 NCEP 再分析数据,本文将黄河流域水源涵养区及其相邻区域共划分为 24 个网格(图 1),利用 SDSM 中 Screen Variables 模块,降水降尺度模型选择条件过程(Conditional),气温降尺度模型选择无条件过程(Unconditional),共优选出 11 个大气环流因子(表 1)。同时,采用 1971—2014 年黄河水源涵养区 21 个气象站的逐日降水量和气温数据进行精度评估,其中 1971—2004 年为模型率定期,用于建立统计关系;2005—2014 年为模型验证期,用于检验模型可靠性。研究区域 21 个气象站大气环流因子的相关性及其网格结果如图 3、图 4 所示。

表 1 优选的 NCEP 再分析数据中的大气环流因子

Table 1 Atmospheric circulation factors in preferred NCEP reanalysis data

大气环流因子	单位	名称
dswr	W/m ²	向下短波辐射通量
mslp	Pa	平均海平面气压
p5_u	m/s	500 hPa 纬向风速度
p5_v	m/s	500 hPa 径向风速度
temp	℃	2 m 平均气温场
pottmp	K	位温
shum	g/g	比湿
pr_wtr	kg/m ²	可降水量(气柱)
p500	m	500 hPa 位势高度
p850	m	850 hPa 位势高度
prec	mm	降水总量

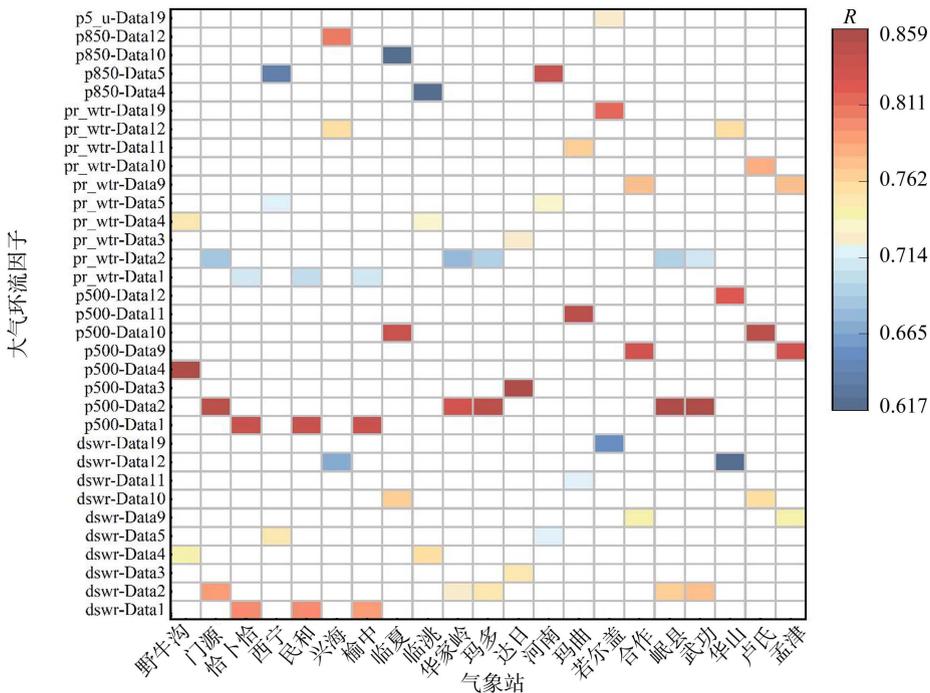


图 3 21 个气象站的气温与大气环流因子的相关系数热图

Fig. 3 Correlation coefficient heat map of air temperature factor and atmospheric circulation factor of 21 meteorological stations

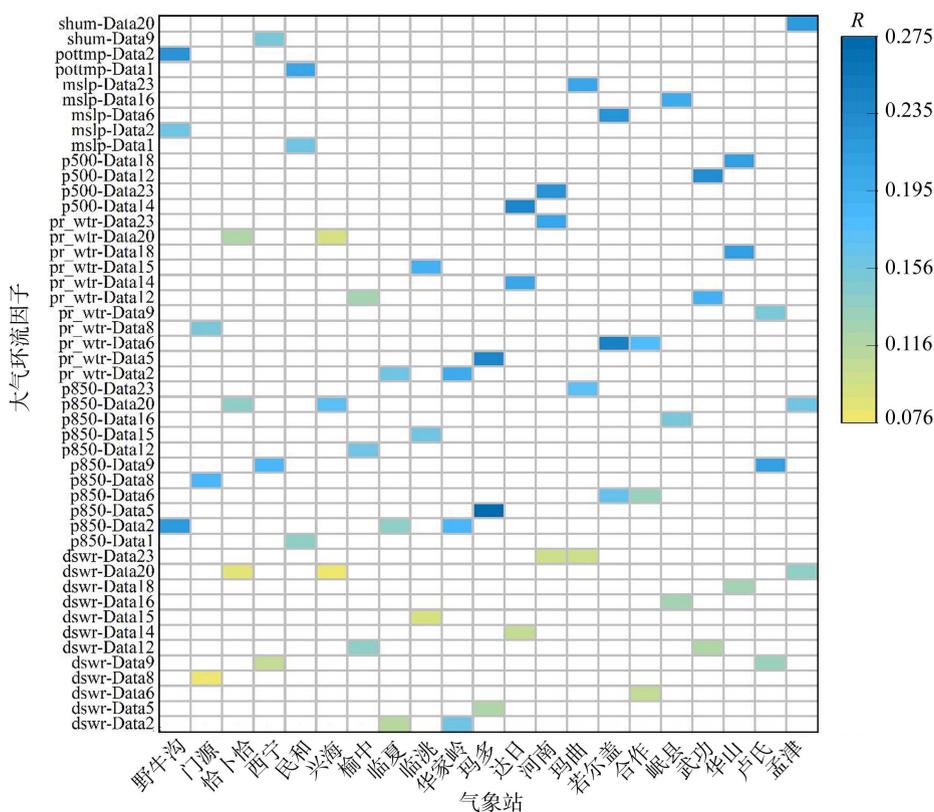


图 4 21 个气象站的降水与大气环流因子的相关系数热图

Fig. 4 Correlation coefficient heat maps of precipitation factors and atmospheric circulation factors of 21 meteorological stations

由图 3 可知,气温与 p500 的相关性最高,在 0.800 左右,与 p850 的相关性最低,在 0.600 左右。气温预报因子选取较多的是 dswr,该因子是表征地气间能量交换的重要参数,能影响地表吸收的热量。

对于气温预报因子区域的选取,共有 38% 的气象站选择了 Data1 和 Data2 号网格上的大气环流因子作为气温降尺度的预报因子,19% 的气象站选择了 Data4 和 Data5 号网格,剩余站点则分布在 Data3、Data9、Data10、Data11、Data12、Data19 号网格上,说明划分的 Data1 和 Data2 网格对黄河水源涵养区气温影响较强。

由图 4 可知,降水与 pr_wtr 的相关性最高,在 0.230 左右,与 dswr 的相关性总体偏低,在 0.100 左右。降水预报因子的选取比气温更加复杂多样,其中 dswr、p850、pr_wtr 因子对降水影响较为强烈。

对于降水预报因子区域的选取,有 14% 的气象站选取了 Data2 和 Data20 网格,其余站点分布在 Data1、Data5、Data6、Data8、Data9、Data12、Data14、Data15、Data16、Data18、Data23 号网格中,相较于气温预报因子区域选取,没有明显的 Data 网格对降水起主要影响作用,说明降水的预测受到全流域区域的综合因素影响。

综上,dswr、pr_wtr、p500、p850 作为气温的主要预报因子,dswr、pr_wtr、p500、p850、mslp、shum 作为降水的主要预报因子。关于气温和降水与大气环流因子的潜在响应关系已有学者开展了相关研究,认为不同地区的气候特征与大气环流因子间的潜在影响存在差异^[32]。许燕等^[33]在进行气温降尺度时选择了 p500、p850、mslp 等预报因子,王雅琳等^[34]认为 shum、p500、mslp 等预报因子为降水降尺度常用因子,与本文选择的大气环流因子基本一致。同时,考虑到邻近网格的大气环流因子对气温和降水也可能存在一定的影响,部分学者通常选取站点邻近网格的预报因子进行降尺度^[35]。从天气尺度和大气环流实际变化来看,较远区域的因子也可能对站点的气温和降水产生较强的影响。本文发现 Data1 和 Data2 区域对黄河水源涵养区气温和降水起主要的影响作用,各个气象站模拟的最优网格都不是气象站所在网格,通常是气象站的邻近网格,与代慧慧等^[35]的研究结果相似。

3.1.2 SDSM 验证

采用相关系数、纳什效率系数评价 MRI-ESM2-0 气候模式气温和降水在站点尺度上的降尺度结果。由图 5 可知,率定期气温模拟相关系数位于 0.960~0.990 之间,纳什效率系数均大于 0.960,验证期所有气象

站气温模拟相关系数和纳什效率系数均大 0.970, 气温降尺度模拟精度较高。

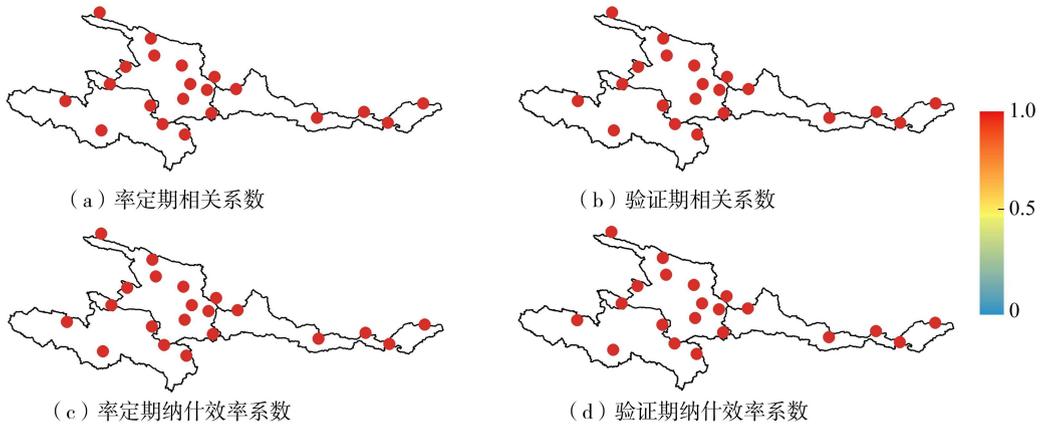


图5 SDSM 气温相关系数和纳什效率系数的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of SDSM temperature correlation coefficient and Nash efficiency coefficient

由图 6 可知, 率定期降水模拟相关系数位于 0.510~0.884 之间, 纳什效率系数位于 0.024~0.721 之间; 验证期降水相关系数位于 0.453~0.863 之间, 纳什效率系数位于 0.020~0.722 之间, 降水的纳什效率系数差异较大。空间上, 兰州以上区域站点降水模拟效果较好, 黄河源区次之, 渭河-伊洛河流域较差。渭河流域受南方涛动等大气环流因素的影响, 极端降水的强度不断增大, 极端降水事件发生的频率增强; 伊洛河流域修建了大量的淤地坝、梯田, 加上退耕还林、还草工程的影响, 流域下垫面情况复杂, 空间变异性强, 影响了 SDSM 降水模拟精度。

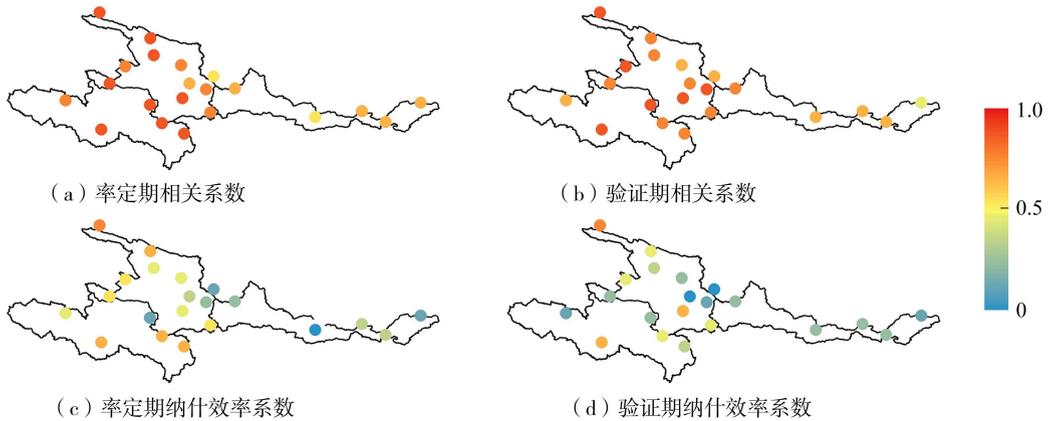


图6 SDSM 降水相关系数和纳什效率系数的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of SDSM precipitation correlation coefficient and Nash efficiency coefficient

综上, SDSM 在黄河水源涵养区气温的模拟效果优于降水, 全部气象站率定期和验证期相关系数和纳什效率系数皆大于 0.950。在验证期, 有 67% 的站点降水相关系数大于 0.700, 76% 的站点降水纳什效率系数大于 0.200, 降水的模拟效果较差, 原因可能是降水的物理机制较为复杂, 空间变异性较强, 受黄河水源涵养区多变地形的热力和动力作用, 尤其地形与经度的叠加作用, 引起的小尺度气候过程^[36]增加了降水模拟的不确定性。与日降水量模拟相比, SDSM 在模拟每日最高和最低温度方面显示出更强的预测能力, 日气温模拟结果优于降水, 这与 Phuong 等^[37]的研究结果基本一致。

3.2 日时间尺度数据的对比分析

利用构建的 SDSM, 输入 MRI-ESM2-0 模式对应各气象站的历史情景预报因子, 得到 1971—2014 年气象站日尺度数据的模拟结果, 并基于双线性插值法, 将实测站点降水数据、MRI-ESM2-0 和 EC-Earth3-Veg 模式数据统一插值为相同空间分辨率($0.7^\circ \times 0.7^\circ$)的网格数据。

3.2.1 气温数据对比

实测气温位于 $-2.50 \sim 14.13^\circ\text{C}$ 之间, 总体呈现西低东高的分布特征, 受地形影响, 西部与东部温差较大。由图 7 可知, SDSM 模拟气温与实测气温差值位于 $-2.40 \sim 0.25^\circ\text{C}$ 之间; MRI-ESM2-0 模式气温与实测气温差

值位于-6.7~3.8℃之间;EC-Earth3-Veg 模式气温与实测气温差值位于-8.10~2.60℃之间。

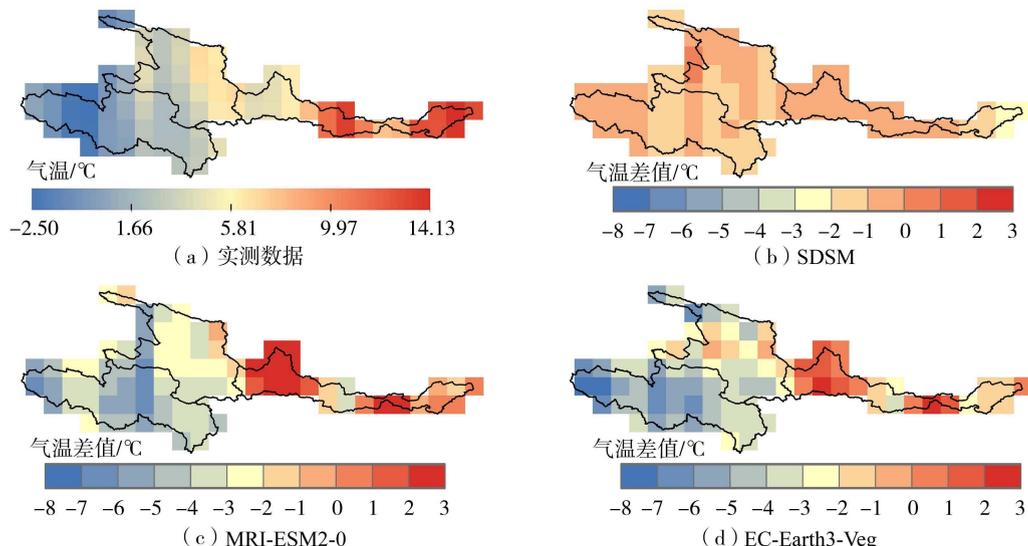


图 7 3 种气候模式日气温数据差值空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of daily temperature data difference of three climate modes

MRI-ESM2-0 模式气温差值在黄河源区为-6.70~-2.50℃,在兰州以上区域为-3.50~0.20℃,在渭河-伊洛河流域为-3.50~3.80℃,其中 0~3.80℃ 区间占比 75%;EC-Earth3-Veg 模式气温差值在黄河源区为-8.10~-2.80℃,在兰州以上区域为-4.70~0.50℃,在渭河-伊洛河流域为-4.00~2.60℃,其中 0~2.60℃ 区间占比 60%。SDSM 降尺度数据相较于两种模式数据,在黄河源区部分地区,将平均气温差值从-6℃降低至-1℃;在兰州以上区域,将平均气温差值从-3℃减低至-1℃;在渭河-伊洛河流域将平均气温差值从 1.5℃降低至-0.5℃。由此得出,EC-Earth3-Veg 和 MRI-ESM2-0 模式在黄河水源涵养区不同区域气温模拟存在差异,气温模拟值偏小的地区主要位于黄河源区和兰州以上区域,偏大的地区主要位于渭河-伊洛河流域。SDSM 模拟气温数据在全流域 90% 以上区域都偏小,差值空间分布均匀,降尺度后气温数据更符合黄河流域水源涵养区的时空分布特征。

3.2.2 降水数据对比分析

实测降水范围为 0.86~1.97 mm/d,空间分布上南多北少,东多西少,降水量最大的区域集中在渭河-伊洛河流域。由图 8 可知,SDSM 模拟降水、MRI-ESM2-0 模式降水、EC-Earth3-Veg 模式降水与实测降水的相

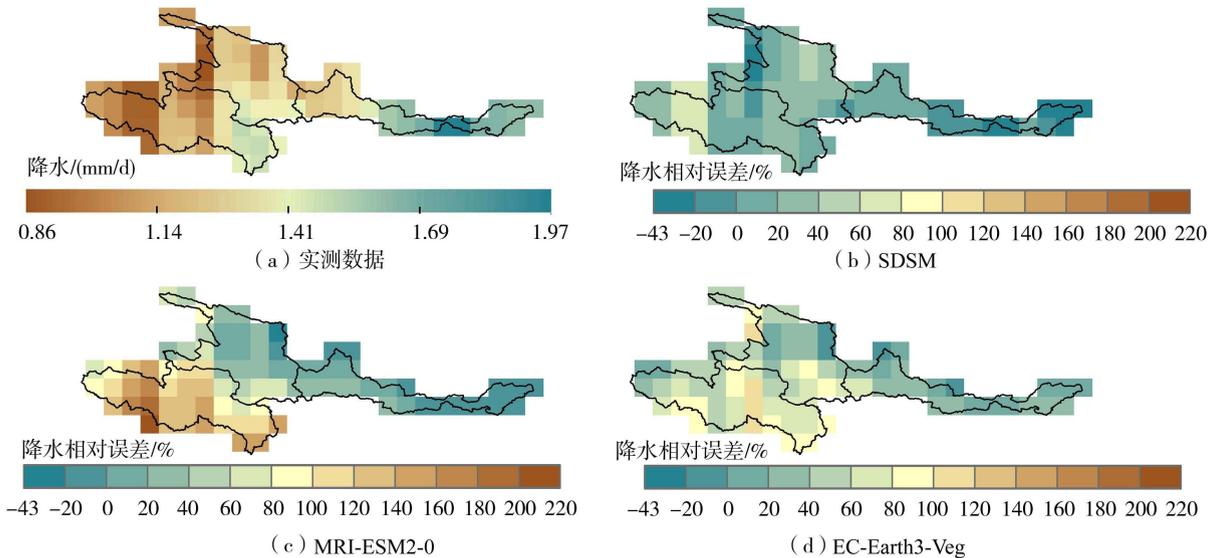


图 8 3 种气候模式日降水数据相对误差空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of relative error of daily precipitation data in three climate modes

对误差分别为-43%~70%、-21%~208%、-12%~115%。

MRI-ESM2-0 模式在黄河源区降水相对误差最大,位于 56%~208%之间,其中相对误差在 120%~208%范围的占比为 74%;在兰州以上区域降水相对误差位于-21%~96%之间,其中相对误差在-21%~60%范围的占比为 73%;在渭河-伊洛河流域降水相对位于-21%~60%之间,其中相对误差在-21%~20%范围占比为 64%。EC-Earth3-Veg 模式在黄河源区以南和兰州站以南区域降水相对误差位于 26%~120%之间,其中相对误差在 60%~120%范围的占比为 78%,黄河源区以北和兰州站以北区域降水相对误差位于-12%~105%之间,其中相对误差在-12%~60%范围的占比 81%;渭河-伊洛河流域降水相对误差位于-12%~65%之间。由此可知,MRI-ESM2-0 模式和 EC-Earth3-Veg 模式在黄河水源涵养区不同区域降水模拟存在差异,MRI-ESM2-0 模式呈现西高东低的分布特征,即在黄河源区偏差最大,兰州以上次之,渭河-伊洛河流域最优。EC-Earth3-Veg 模式呈现南高北低,西高东低的分布特征,渭河-伊洛河流域模拟最优,黄河源区和兰州站以北区域降水模拟效果优于以南区域。

相较于模式自身降水数据,降尺度后的降水相对误差明显减小。黄河源区相对误差降至 40%(MRI-ESM2-0 模式、EC-Earth3-Veg 模式的平均相对误差分别为 140%、75%);兰州以上区域,降尺度降水数据相较于两种模式平均相对误差降低了 20%左右;在渭河-伊洛河流域,降尺度降水数据相对误差范围为-43%~20%,与两种模式模拟效果较为一致,部分区域相对误差降低 5%。由此可知,SDSM 模拟值与实测值更为接近,离散程度较小,相对误差空间分布均匀,显著改善了黄河源区和兰州以上区域的降水模拟结果。

综上,构建 SDSM 模拟的降水和气温结果优于直接提取的 MRI-ESM2-0 和 EC-Earth3-Veg 模式数据,可为未来预测气候变化提供参考。

4 结 论

a. 1971—2014 年黄河水源涵养区气温预报因子中 p500 相关性最强,气温选取的网格主要为 Data1 和 Data2;降水预报因子中 pr_wtr 的相关性最强,降水选取的网格主要为 Data2 和 Data20。选择预报因子时不能仅从对应网格的大尺度气象因子中寻找,因为局地气候会同时受大气环流、地形等因素影响,与站点气候变量关系最好的网格通常不是站点所在的网格。

b. SDSM 模拟气温的站点相关系数和纳什效率系数皆大于 0.95,有 60%以上的站点降水相关系数大于 0.70,降水纳什效率系数 0.50 左右。SDSM 降尺度模型对气温模拟效果优于降水。

c. 相较于直接使用日尺度的情景数据,降尺度模拟的日数据精度更高,空间分布更均匀。其中,在黄河源区和兰州以上区域,CMIP6 模式数据受地形复杂,气候多样的影响,气温差值和降水偏差较大,而降尺度后的数据适用性强,偏差小,在全流域都能广泛应用。

参考文献:

- [1] 胡一阳,徐影,李金建,等. CMIP6 不同分辨率全球气候模式对中国降水模拟能力评估[J]. 气候变化研究进展,2021,17(6):730-743. (HU Yiyang, XU Ying, LI Jinjian, et al. Evaluation on the performance of CMIP6 global climate models with different horizontal resolution in simulating the precipitation over China[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 730-743. (in Chinese))
- [2] 胡文韬,余钟波,陈松峰,等. 长江上游卫星及再分析降水数据的适用性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):15-24. (HU Wentao, YU Zhongbo, CHEN Songfeng, et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in the upper Yangtze River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 15-24. (in Chinese))
- [3] 张长征,沈婷,徐慎晖,等. 极端天气下特大型城市“水资源-能源-粮食”安全风险研究[J]. 水利经济,2023,41(1):55-61. (ZHANG Changzheng, SHEN Ting, XU Shenhui, et al. Study on the security risk of “water-energy-food” in mega cities under extreme weather[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2023, 41(1): 55-61. (in Chinese))
- [4] 樊星,秦圆圆,高翔. IPCC 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护,2021,49(增刊2):44-48. (FAN Xing, QIN Yuanyuan, GAO Xiang. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 working group I report[J]. Environmental Protection, 2021, 49(Sup2): 44-48. (in Chinese))
- [5] 匡舒雅,周泽宇,梁媚聪,等. IPCC 第六次评估报告第二工作组报告解读[J]. 环境保护,2022,50(9):71-75. (KUANG

- Shuya,ZHOU Zeyu,LIANG Meicong,et al. Interpretation of the main conclusions of IPCC AR6 working group II report[J]. Environmental Protection,2022,50(9):71-75. (in Chinese))
- [6] LI Huixin,CHEN Huopo,WANG Huijun,et al. Future precipitation changes over China under 1.5°C and 2.0°C global warming targets by using CORDEX regional climate models[J]. Science of the Total Environment,2018,640-641:543-544.
- [7] RIVERA J A, ARNOULD G. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America:climatic features and long-term trends (1901-2014)[J]. Atmospheric Research,2020,241:104953.
- [8] GIORGI F,GAO Xuejie. Regional earth system modeling: review and future directions[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,2018,11(2):189-197.
- [9] 粟晓玲,刘雨翰,姜田亮,等. 西北地区陆地生态系统未来生态需水量预估[J]. 水资源保护,2023,39(4):9-18. (SU Xiaoling,LIU Yuhan,JIANG Tianliang,et al. Prediction of future ecological water demand of terrestrial ecosystem in Northwest China[J]. Water Resources Protection,2023,39(4):9-18. (in Chinese))
- [10] GUO Hao,BAO Anming,CHEN Tao,et al. Assessment of CMIP6 in simulating precipitation over arid Central Asia[J]. Atmospheric Research,2021,252:105451.
- [11] YAZDANDOOST F,MORADIAN S,IZADI A,et al. Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: uncertainty and model intercomparison[J]. Atmospheric Research,2021,250:105369.
- [12] 张力,赵自阳,王红瑞,等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. 水资源保护,2023,39(1):109-118. (ZHANG Li,ZHAO Ziyang,WANG Hongrui,et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):109-118. (in Chinese))
- [13] WOOD A W,MAURER E P,KUMAR A,et al. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2002,107(D20):ACL 6-1-ACL 6-15.
- [14] WOOD A W,LEUNG L R,SRIDHAR V,et al. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs[J]. Climatic Change,2004,62(1):189-216.
- [15] 范丽军,符淙斌,陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(3):320-329. (FAN Lijun,FU Congbin,CHEN Deliang. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques[J]. Advances in Earth Science,2005,20(3):320-329. (in Chinese))
- [16] 董甲平,冶运涛,顾晶晶,等. 遥感降水降尺度高精度校正及不确定性分析方法[J]. 水利学报,2024,55(2):226-237. (DONG Jiaping,YE Yuntao,GU Jingjing,et al. High-precision correction and uncertainty analysis method for remote sensing precipitation downscaling[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(2):226-237. (in Chinese))
- [17] TANG Jianping,NIU Xiaorui,WANG Shuyu,et al. Statistical downscaling and dynamical downscaling of regional climate in China:present climate evaluations and future climate projections[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2016,121(5):2110-2129.
- [18] 段小兰,郝振纯,陈奕. 基于BCSD降尺度方法的黄河源区气候变化预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(3):195-199. (DUAN Xiaolan,HAO Zhenchun,CHEN Yi. Climate change forecasting in source region of Yellow River based on BCSD downscaling method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2014,42(3):195-199. (in Chinese))
- [19] 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. (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. (in Chinese))
- [20] 张丹,梁瀚续,何小聪,等. 基于CMIP6的金沙江流域径流及水文干旱预估[J]. 水资源保护,2023,39(6):53-62. (ZHANG Dan,LIANG Hanxu,HE Xiacong,et al. Estimation of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6[J]. Water Resources Protection,2023,39(6):53-62. (in Chinese))
- [21] EINGRÜBER N,KORRES W. Climate change simulation and trend analysis of extreme precipitation and floods in the mesoscale Rur catchment in western Germany until 2099 using Statistical Downscaling Model (SDSM) and the Soil & Water Assessment Tool (SWAT model)[J]. Science of The Total Environment,2022,838:155775.
- [22] JIANG Shanhu,WEI Linyong,REN Liliang,et al. Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over Chinese mainland: spatiotemporal patterns and extremes[J]. Water Science and Engineering,2023,16(1):45-56.
- [23] 鞠琴,吴金雨,王兴平,等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. 水资源保护,2024,40(3):106-115. (JU Qin,WU Jinyu,WANG Xingping,et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature[J]. Water Resources Protection,2024,40(3):106-115. (in Chinese))
- [24] 邓鹏,徐进超,王欢. 基于CMIP6的气候变化对鄱阳湖流域径流影响研究[J]. 水利水运工程学报,2023(4):71-80.

- (DENG Peng, XU Jinchao, WANG Huan. Study on the impact of climate change by CMIP6 on the rainfall-runoff process of Poyang Lake Basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(4):71-80. (in Chinese))
- [25] 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. (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. (in Chinese))
- [26] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. *水文*, 2022, 42(2):65. (WANG Guoqing. Definition of water conservation region in the Yellow River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2):65. (in Chinese))
- [27] 岁姚炳, 牛存稳, 贾仰文, 等. 黄河水源涵养区近60a降水、气温和径流演变及其对水源涵养的影响[J]. *山地学报*, 2023, 41(1):41-55. (SUI Yaobing, NIU Cunwen, JIA Yangwen, et al. Precipitation, temperature and runoff for the recent 60 years in the Yellow River water conservation area of China and their influence on water conservation[J]. *Mountain Research*, 2023, 41(1):41-55. (in Chinese))
- [28] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. *中国科学院院刊*, 2020, 35(1):61-72. (ZHENG Ziyang, LYU Meixia, MA Zhuguo. Climate, hydrology, and vegetation coverage changes in source region of Yellow River and countermeasures for challenges[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, 35(1):61-72. (in Chinese))
- [29] 吴金雨, 鞠琴, 刘小妮, 等. CMIP6模式对黄河水源涵养区降水和气温模拟能力的评估[J]. *水利水运工程学报*, 2023(6):1-12. (WU Jinyu, JU Qin, LIU Xiaoni, et al. Assessment of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin using CMIP6 models[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(6):1-12. (in Chinese))
- [30] WILBY R L, WIGLEY T M L. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1997, 21(4):530-548.
- [31] WILBY R L, DAWSON C W, BARROW E M. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17(2):145-157.
- [32] 张克新, 苏志华, 刘金林, 等. 甘肃省降水集中度的变化特征及其与环流指数遥相关分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5):261-267. (ZHANG Kexin, SU Zhihua, LIU Jinlin, et al. Characteristics of variation of precipitation concentration index and its teleconnection relationships with large-scale atmospheric circulations in Gansu Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(5):261-267. (in Chinese))
- [33] 许燕, 王世杰, 白晓永, 等. 基于SDSM的珠江中上游气候模拟及未来情景预估[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(2):228-237. (XU Yan, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, et al. Simulation of future scenarios of climate change in the middle and upper reaches of the Pearl River using the Statistical Down Scaling Model (SDSM)[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(2):228-237. (in Chinese))
- [34] 王雅琳, 董晓华, 喻丹, 等. 基于MIROC气候模式的统计降尺度偏差订正方法及在雅砻江流域的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2023(6):66-73. (WANG Yalin, DONG Xiaohua, YU Dan, et al. Correction method of statistical downscaling bias based on MIROC climate model and its application in Yalong River Basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(6):66-73. (in Chinese))
- [35] 代慧慧, 杨汉波, 胡庆芳. 基于SDSM的疏勒河流域气候变化统计降尺度研究[J]. *水利水运工程学报*, 2015(5):46-53. (DAI Huihui, YANG Hanbo, HU Qingfang. Prediction of climate change over Shule River basin based on a statistical downscaling method[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2015(5):46-53. (in Chinese))
- [36] 赵传燕, 南忠仁, 程国栋, 等. 统计降尺度对西北地区未来气候变化预估[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(5):12-18. (ZHAO Chuanyan, NAN Zhongren, CHENG Guodong, et al. Prediction of the trend of the future climate change in northwestern China by statistical downscaling[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2008, 44(5):12-18. (in Chinese))
- [37] PHUONG D N D, DUONG T Q, LIEM N D, et al. Projections of future climate change in the Vu Gia Thu Bon river basin, Vietnam by using statistical downscaling model (SDSM)[J]. *Water*, 2020, 12(3):755.

(收稿日期:2024-05-16 编辑:刘晓艳)