2015—2100 年黄土高原四季气候变化的时空分布趋势预测

任婧宇[1,2]，赵俊侠[1]，马红斌[1]，彭守璋[2,3]，李炳垠[1,2]

(1. 水利部 黄河水利委员会 黄河上中游管理局，陕西 西安 710021；2. 西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨凌 712100；3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100)

摘　要：[目的] 研究黄土高原 2015—2100 年四季气候的时空变化及趋势，为该区应对全球气候变化制定适应性策略时提供科学依据。[方法] 基于 27 个 GCMs 2015—2100 年逐月气候数据集，利用 Delta 空间降尺度方法对该数据集在黄土高原地区进行降尺度处理并评价，最后采用距平、Mann-Kendall 趋势检验和 Sen's 斜率估计方法分析该区未来时期四季气候变化的时空分布特征。[结果] ①所用 27 个 GCMs，最适合模拟黄土高原未来时期四季月均温和月降水量降尺度的气候模式分别是 NorESM1-M 和 GFDL-ESM2M 模式。②2015—2100 年该区四季均温只有典型路径(RCP)2.6 情景下的春季、秋季无显著变化趋势，其余情景下均呈显著上升趋势；四季降水量只有 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的春季呈显著上升趋势，其余排放情景下均无显著变化趋势。③3 种 RCP 情景下，四季均温在 21 世纪初期、中期和末期相比于气候平均值均是增加的，降水量只在春季均是增加的。④3 种 RCP 情景下，四季均温和降水量趋势在空间分布上具有很大差异。[结论] 黄土高原区域气候对全球气候变暖有显著响应，对于造成未来时期黄土高原区域特定季节下气候变化的成因等问题，还需展开进一步的研究。

关键词：气候变化；Delta 空间降尺度方法；Mann-Kendall 趋势检验；Sen's 斜率估计；黄土高原

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2019)05-0262-10　　**中图分类号**：P467

文献参数：任婧宇，赵俊侠，马红斌，等. 2015—2100 年黄土高原四季气候变化的时空分布趋势预测[J]. 水土保持通报，2019，39(5)：262-271. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.037；Ren Jingyu，Zhao Junxia，Ma Hongbin，et al. Spatiotemporal distribution characteristics of seasonal climate change trends over Loess Plateau During 2015—2100[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(5)：262-271.

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Seasonal Climate Change Trends Over Loess Plateau During 2015—2100

Ren Jingyu[1,2], Zhao Junxia[1], Ma Hongbin[1], Peng Shouzhang[2,3], Li Bingyin[1,2]

(1. *Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an, Shaanxi* 710021, *China*; 2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] Spatiotemporal distribution characteristics of the climate change trends during 2015—2100 in the four seasons for the Loess Plateau were studied to provide a scientific basis for formulating adaptive strategies to cope with global climate change. [Methods] Based on the monthly climate datasets of 27 general circulation models (GCMs) from 2015 to 2100, the Delta method was used to process and evaluate the dataset of the Loess Plateau. At the same time, the Mann-Kendall trend test and Sen's slope estimator test were used to analyze the spatiotemporal distribution characteristics of the future climate change trends of this region in all seasons. [Results] ① Among the 27 GCMs used, NorESM1-M and GFDL-ESM2M were the most suitable climate models for simulating the downscaling data of the future monthly mean temperature and

收稿日期：2019-03-02　　**修回日期**：2019-04-07

资助项目：国家自然科学基金青年项目“基于动态植被模型的延河流域潜在植被分布及生境适宜度研究”(41601058)；中国科学院西部之光“青年学者 B 类”项目“黄土高原地区潜在自然植被的模拟研究”(XAB2015B07)；国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项“黄河流域水沙变化机理与趋势预测”(2016YFC0402408-3)

第一作者：任婧宇(1992—)，女(汉族)，陕西省澄城县人，硕士，助理工程师，主要从事水土保持监测研究。E-mail：jingyu_ren@163.com。

通讯作者：彭守璋(1986—)，男(汉族)，陕西省眉县人，博士，副研究员，主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail：szp@nwafu.edu.cn。

precipitation of the Loess Plateau in all seasons. ② There was no significant trend of the mean temperature over the Loess Plateau from 2015 to 2100 in the spring and autumn under the representative concentration pathways(RCP)2.6 scenario, and in the remaining scenarios, the temperature showed a significant upward trend. Precipitation during the four seasons showed a significant upward trend in the spring under the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, while there was no significant trend in the remaining emission scenarios. ③ Under the three kinds of RCP scenarios, the mean temperature of the four seasons increased in the beginning, middle, and end of the 21st century, compared with the climate average; however, the precipitation increased only in spring. ④ Under the three kinds of RCP scenarios, significant differences in the spatial distribution of the mean temperature and precipitation in all seasons were observed. [Conclusion] The climate of the Loess Plateau has a significant response to global warming, and further research is needed on the causes of climate change in the Loess Plateau region in a specific season in the future.

Keywords: climate change; delta downscaling; Mann-Kendall trend test; Sen's slope estimator test; Loess Plateau

气候变化会对社会经济活动、农业、环境和生态系统产生深远的影响,近年来气候变化特征及未来气候趋势预测已成为全球各界关心的热点问题[1]。IPCC 第五次评估报告[2]指出:20 世纪 50 年代以来,全球几乎所有地区都出现了不同程度的升温变暖;到本世纪末,在估算最保守的排放情境下,全球地表均温可能超过 1.5 ℃。中国气候变化趋势与全球变化总趋势基本一致,近 50 a 来增暖尤其明显,降水量以 12.66 mm/10 a 的速度减少[3-4]。在此背景下,中国四季气候也发生了明显变化,郁珍艳等[5]指出中国四季开始日期发生显著变化,春、夏季提早,秋、冬季推迟,20 世纪 80 年代初期开始冷季增暖明显,进入 90 年代以后夏季增暖也日趋明显。这些变化会引起旱涝灾害频次和强度的增加、荒漠化趋势的增强、物候期的改变等[6],对区域气候和生态环境产生深远影响,尤其是对气候变化的敏感区和生态环境的脆弱带[7]。而黄土高原,以其独特的地理地貌和复杂多样的生态环境成为气候变化敏感区和生态环境脆弱带的典型代表[8],全球变暖背景下四季气候的变化对该区未来时期的植被恢复与重建、水土资源变化以及农业生产有一定的影响,会限制该地区的发展。因此,系统、详细地研究黄土高原未来时期四季气候在区域时空上的变化趋势,对其应对全球气候变化带来的负面效应并便于制定合适的适应性与缓解性策略等具有非常重要的实际意义。

利用大气环流模式(general circulation model, GCM)预估未来气候变化是目前最可行的方法。随着数值预报理论与方法、大气探测技术及计算机技术的迅速发展,GCM 模型的空间分辨率已达到几十公里甚至十几公里,能够对全球尺度下气候情形进行宏观预测与分析,但其输出分辨率依然较低,缺少区域信息,因此对区域气候变化模拟以及对未来气候变化预估(如季节、年际以及年代际预测)的准确性较低[9]。为此,通常使用降尺度方法将气候模式输出的气候数据由低分辨率、长时间间隔转化成高分辨率、短时间间隔,为区域气候变化影响评价提供理论依据和数据资料[10]。降尺度方法主要有统计降尺度和动力降尺度。与统计降尺度相比,动力降尺度需要大量参数和较多计算资源驱动[11],并且有时不能真实反映小地理尺度上的气候变化[12]。常用的统计降尺度法有线性回归法和 Delta 法,目前众多学者选择 Delta 法对气候模式数据进行降尺度处理[13-14]。Delta 法使用低空间分辨率的月气候数据和高空间分辨率的参考气候数据作为输入数据,与直接插值不同,该方法可引入地形地貌对气候的影响[13],可得到小地理尺度上精准的降尺度气候数据。

目前已有很多针对黄土高原气候变化趋势的研究[15-16],但大都基于气象站点资料、线性回归法或直接插值进行降尺度,研究该区气候变化规律,这很难描述气候在小地理尺度上的详细变化。此外,多数研究仅对该区历史时期的年均温和年降水量变化特征进行了研究,缺乏未来时期四季气温、降水变化趋势的研究。鉴于此,本研究以 IPCC 耦合模式比较计划第 5 阶段(coupled model intercomparison project phase 5, CMIP5)发布的 GCMs 为基础,采用 Delta 法[17]进行空间降尺度,获取黄土高原未来时期高空间分辨率(约 1 km)四季的温度和降水数据集,并辅以距平、Mann-Kendall 趋势检验和 Sen's 斜率估计等方法,对该区 2015—2100 年四季的气候变化、趋势特征及其空间分布进行分析,以期为该区在制定应对全球气候变化策略时提供科学依据。

1　研究区概况、数据与方法

1.1　研究区概况

黄土高原位于中国中部偏北,东起太行山,西至乌

鞘岭，南连秦岭，北抵长城，主要包括山西、陕西、以及甘肃、青海、宁夏、河南等省部分地区(100.8—114.6°E，33.7°—41.3°N)(附图 28)。该区总面积约 64.06×10^4 km^2，其中水土流失面积 24.63×10^4 km^2(截至 2015 年底)[18]，生态环境脆弱，是气候敏感区。该区主要受暖温带半干旱大陆性季风气候的影响，冬季寒冷干燥，夏季温暖多雨；年均温约 4 ℃～12 ℃，从东南向西北逐渐降低；多年平均降水量为 466 mm，降水年际变化大，季节分配不均，从东南向西北降水量逐渐减少[19]；该区横跨半湿润、干旱和半干旱区，植被依次以森林带、森林草原过渡带和草原带呈明显的地带性规律分布，主要植物有辽东栎(*Quercus wutaishansea*)、油松(*Pinus tabuli formis*)、杨树(*Populus*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等[25]。

1.2 数据来源

Delta 降尺度所需数据包括长时间序列低空间分辨率的气候数据集和高空间分辨率的参考气候数据集(包含地形、地貌等因素)。前者采用 CMIP5 提供的 27 个 GCMs 的月均温和月降水量数据集(http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projections/)，详细信息见表 1[20]。这 27 个 GCMs 经过误差订正空间分解法(Bias-Correction Spatial Disaggregation，BCSD)处理，空间分辨率为 0.5°[21]；时间长度是 1950—2100 年，其中 1950—2005 年数据是历史排放情景下的历史时期数据，2006—2100 年数据是未来气候变化典型浓度路径(representative concentration pathway，RCP)下(即 RCP2.6，RCP4.5，RCP6.0 和 RCP8.5)的未来时期数据，由于 RCP4.5 和 RCP6.0 相似[2]，本研究选择 3 种路径情景下(即 RCP2.6，RCP4.5 和 RCP8.5)的 GCMs 气候数据进行研究。后者来源于国家生态系统观测研究网络(CNERN，http://www.cnern.org.cn)；该数据资料是利用全国 740 个气象站点数据，使用空间插值和地理信息系统生成的气象要素栅格数据；数据为 1961—2000 年各月的均值，空间分辨率是 1 km。

表 1 27 个 GCMs 模式情况

	模式名称	构建机构	参考文献标注
1	ACCESS1.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization and Bureau of Meteorology, Australia	Marsland, et al. (2013)
2	BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China	Xin, et al. (2013)
3	BCC-CSM1.1(m)		Ren, et al. (2016)
4	BNU-ESM	Beijing Normal University, China	Ji, et al. (2014)
5	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Canada	Chylek, et al. (2011)
6	CESM1-BGC	NSF/DOE NCAR, USA	Long, et al. (2013)
7	CESM1-CAM5		Neale, et al. (2013)
8	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I CambiamentiClimatici, Italy	Scoccimarro, et al. (2011)
9	CNRM-CM5	Centre National de RecherchesMeteorologiques, Meteo-France, France	Voldoire, et al. (2013)
10	CSIRO-MK-3.6.0	Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia	Rotstayn, et al. (2010)
11	FGOALS-g2	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China	Zhou, et al. (2013)
12	FIO-ESM	The First Institution of Oceanography, SOA, China	Qiao, et al. (2013)
13	GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	Donner, et al. (2011)
14	GFDL-ESM2G		Dunne, et al. (2012)
15	GFDL-ESM2M		Dunne, et al. (2012)
16	GISS-E2-H-CC	NASA Goddard Institute for Space Studies, USA	Wang, et al. (2015)
17	GISS-E2-R		Schmidt, et al. (2006)
18	GISS-E2-R-CC		Wang, et al. (2015)
19	HadCM3	Met Office Hadley Centre, UK	Collins, et al. (2001)
20	INMCM4.0	Institute for Numerical Mathematics, Russia	Volodin, et al. (2010)
21	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace, France	Dufresne, et al. (2013)
22	MIROC4h	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, University of Tokyo, and National Institute for Environmental Studies (Japan)	Zhang, et al. (2015)
23	MIROC5		Watanabe, et al. (2010)
24	MIROC-ESM		Watanabe, et al. (2011)
25	MIROC-ESM-CHEM		Watanabe, et al. (2011)
26	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Japan	Yukimoto, et al. (2012)
27	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Norway	Bentsen, et al. (2013)

此外,本研究使用研究区内外(附图 29)113 个气象站点数据对降尺度后的气候数据集进行评估、筛选,该站点数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn),时间长度约为 1954—2019。

1.3　降尺度过程

对上述数据使用 Delta 空间降尺度方法进行处理,获得 2015 年 1 月至 2100 年 12 月空间分辨率为 1 km 的月均温和月降水量数据,用于分析黄土高原未来时期四季气候的时空变化和趋势。Delta 降尺度法是 BCSD 方法的一部分,其具体的降尺度计算过程[13,20,22]已在许多相关文献中得到了详细的描述。在用 Delta 法进行降尺度的过程中,插值方法的使用会影响所获得降尺度数据的精确性,所以本文使用了 4 种插值方法(三次样条插值法、双线性插值法、最近邻点插值法和双三次插值法),这 4 种插值方法使用 MATLAB 中的内插函数进行处理。

1.4　分析方法

本研究以 CRU 1961.1 至 1990.12 Delta 降尺度的月均温和月降水量数据均值作为参考气候平均值,运用距平法、Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen's 斜率估计对筛选出的 2015 年 1 月至 2100 年 12 月最适 GCMs 模式下降尺度的四季气候数据集进行分析,春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12—翌年 2 月。其中,利用距平法分析研究区 2015—2100 年四季温度和降水在时间尺度上相对于参考气候平均值分别变化了多少。结合 Sen's 斜率估计值的 Mann-Kendall 趋势检验法是用于检测研究区 2015—2100 年四季温度和降水的趋势。Mann-Kendall 趋势检验提供度量值(Z)来检验时间序列变化趋势是否显著[23],本研究取显著水平 $\alpha=0.05$,$Z_{1-\alpha/2}=Z_{0.975}=1.96$。当$|Z|\leqslant 1.96$ 时,认为趋势不显著;若$|Z|>1.96$,则认为趋势显著,且如果 $Z>0$ 则认为序列存在上升趋势,$Z<0$ 则认为序列存在下降趋势。Sen's 斜率估计可以计算出序列趋势的变化程度(s)[24]。通过 Z 值分析研究区 2015—2100 年四季降水和温度时空尺度上趋势的显著性,使用 s 值反应其趋势的变化程度。

2　结果与分析

2.1　均温和降水降尺度结果评估

Peng 等人[22]使用 Delta 法对黄土高原 28 个 GCMs 月均温和月降水量数据进行空间降尺度获取 1 km 空间分辨率的月气候数据,其中的 27 个 GCMs 与本研究涉及到的 GCMs 相同。同时,其降尺度过程中也使用了 4 种插值方法(三次样条插值法、双线性插值法、最近邻点插值法和双三次插值法)进行处理,所用插值方法也与本研究相同。Peng 等[22]使用 1991 年 1 月至 2005 年 12 月均温和降水量的站点观测数据对 GCMs 1991 年 1 月至 2005 年 12 月的降尺度数据进行了评估,从其研究结果可知,使用 Delta 法将黄土高原 GCMs 网格分辨率为 0.5 °×0.5 °的月均温和月降水量气象数据降尺度到分辨率为 1 km×1 km 的网格上是可行的,所用到的 4 种插值方法中双线性插值法处理的降尺度结果具有更高精度,且 NorESM1-M 模式是最适合模拟未来时期黄土高原地区月均温降尺度的气候模式,GFDL-ESM2M 模式是最适合模拟未来时期黄土高原地区月降水量降尺度的气候模式(见图 1)。

本研究通过回归分析发现,使用双线性插值法处理的 NorESM1-M 模式四季月均温降尺度值与观测值具有很好的线性关系,决定系数分别为 0.93,0.89,0.99 和 0.90(图 $1a_1$,$1b_1$,$1c_1$,$1d_1$)。同样,使用双线性插值法处理的 GFDL-ESM2M 模式四季月降水量降尺度值与观测值也具有很好的线性关系,决定系数分别为 0.88,0.86,0.99 和 0.99(图 $1a_2$,$1b_2$,$1c_2$ 和 $1d_2$)。因此,本研究将使用双线性插值法处理的 NorESM1-M 模式月均温降尺度数据和 GFDL-ESM2M 模式月降水量降尺度数据对黄土高原 2015—2100 年四季均温和降水的变化趋势进行分析。

2.2　黄土高原四季均温变化趋势分析

对研究区 2015—2100 年的四季均温进行距平运算,结果见图 2。从图 2 可知,与气候平均值相比,整个黄土高原 3 种 RCP 情景下的四季均温距平波动均较为剧烈,四季均温均在 RCP8.5 情景下的变化范围最大,分别比气候平均值高 0.11 ℃～4.90 ℃,0.03 ℃～5.46 ℃,0.02 ℃～5.59 ℃和 0.26 ℃～7.51 ℃。比较表 2 中的结果发现,随着进入 21 世纪初期(2015—2040 年)、中期(2041—2070 年)、末期(2071—2100 年),3 种 RCP 情景下四季的平均距平均逐渐增大;到了 21 世纪末期,3 种 RCP 情景下距平之间的变化均有显著差异;同一 RCP 情景下,无论在哪一时期,冬季均温的距平变化在四季中均是最大的。表 3 统计可知,随着排放情景的升高(即 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5),2015—2100 年四季均温的平均距平均逐渐增大;春季平均值分别为 0.83±0.09 ℃,1.34±0.10 ℃,2.12±0.15 ℃,夏季平均值分别为0.79±0.05 ℃,1.33±0.10 ℃,2.29±0.16 ℃,秋季平均值分别为 1.13±0.07 ℃,1.60±0.08 ℃,2.64±0.17 ℃,冬季的平均值分别为 1.49±0.12 ℃,2.09±0.13 ℃,3.26±0.20 ℃;3 种排放情景下,冬季均温距平的变化在四季中均是最大的。根据 Mann-Kendall 趋势检验法可知在 95 %的置信水平下(表 3),除了 RCP2.6 情景下春季、秋季的均温无显著变化趋势,其余排放情景下的季均温均呈显著上升趋势,同一排放情景下,四季中冬季的上升速率几乎是最快的。

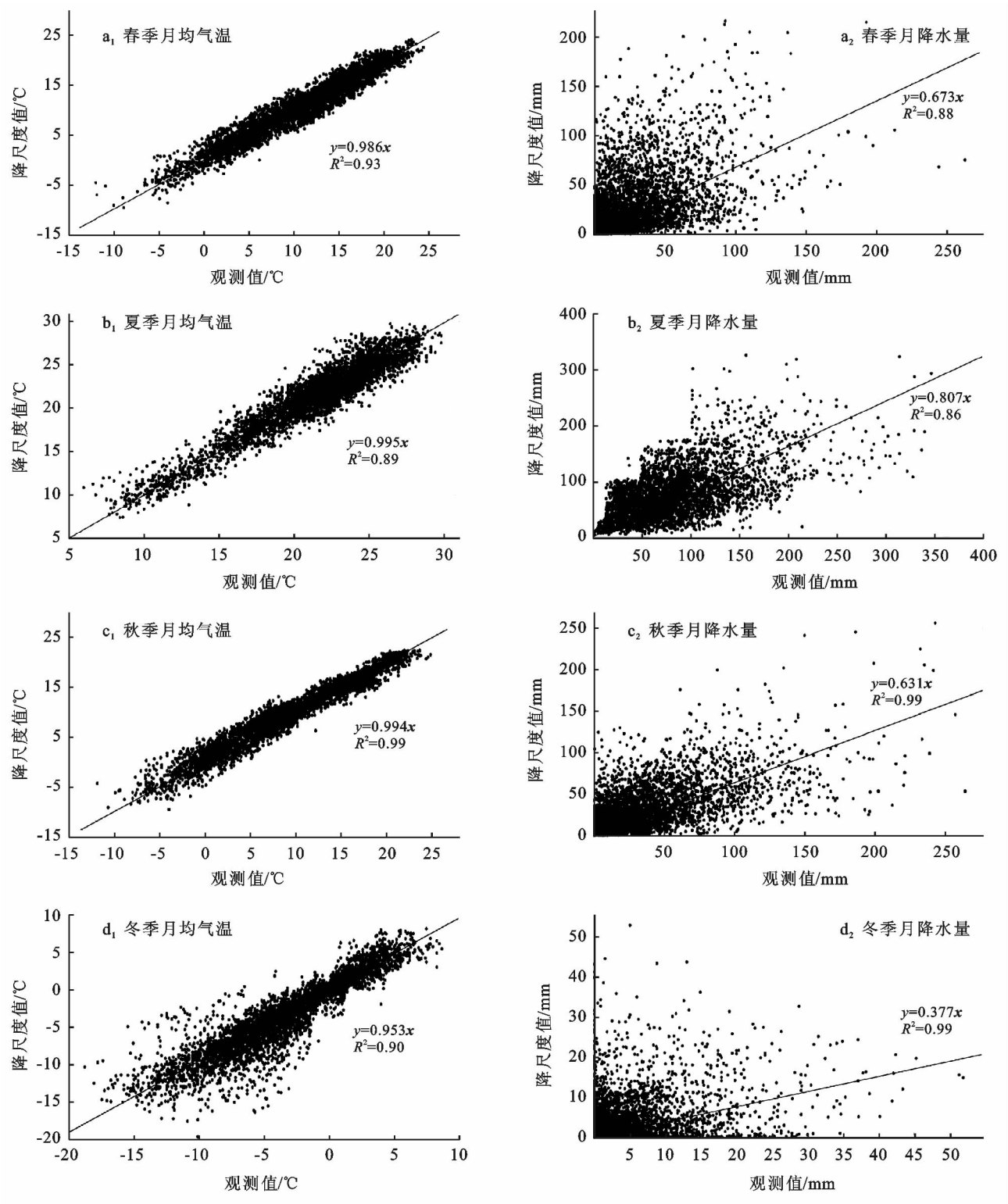


图 1　1991 年 1 月至 2005 年 12 月黄土高原四季均温和降水量观测值与降尺度值的特征

表 2　2015－2100 年黄土高原 3 种 RCP 情景下不同时间段四季均温变化的平均值　℃

季节	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	初期	中期	末期	初期	中期	末期	初期	中期	末期
春季	0.49	0.97	0.99	0.60	1.48	1.84	0.56	1.97	3.63
夏季	0.51	0.82	0.99	0.34	1.49	2.02	0.64	2.02	3.99
秋季	0.82	1.29	1.24	0.89	1.72	2.10	1.03	2.30	4.37
冬季	0.95	1.37	2.09	1.45	1.92	2.82	1.43	3.12	4.98

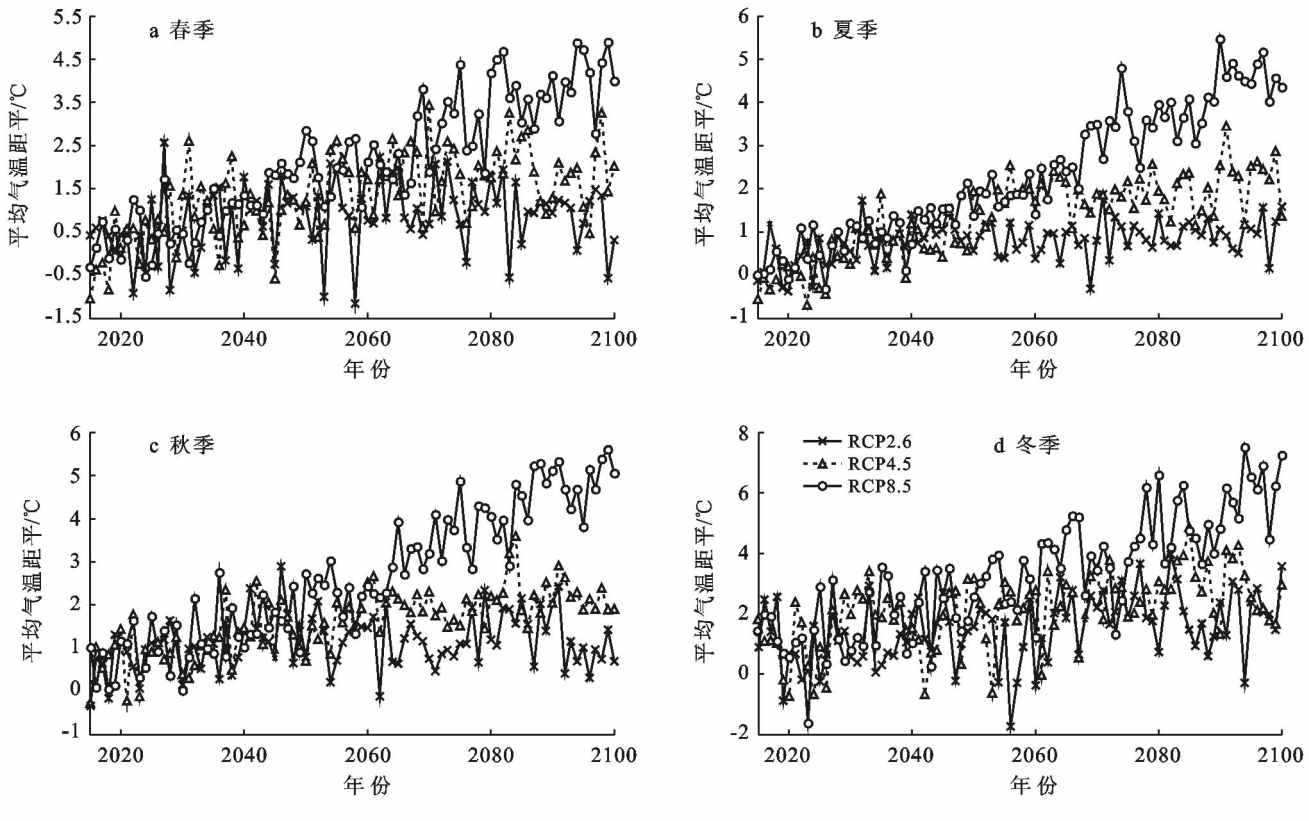


图 2　2015－2100 年黄土高原四季均温距平变化

表 3　2015－2100 年黄土高原四季均温 3 种 RCP 情景下变化的平均值(℃)、标准误差 SE,*Z* 及 *s*(℃/10 a)

季节	RCP2.6				RCP4.5				RCP8.5			
	平均值	SE	*Z*	*s*	平均值	SE	*Z*	*s*	平均值	SE	*Z*	*s*
春季	0.83	0.09	1.96	0.08	1.34	0.10	5.56	0.22	2.12	0.15	9.85	0.52
夏季	0.79	0.05	3.74	0.07	1.33	0.10	8.36	0.30	2.29	0.16	11.23	0.56
秋季	1.13	0.07	1.88	0.06	1.60	0.08	7.00	0.20	2.64	0.17	10.25	0.58
冬季	1.49	0.12	3.89	0.19	2.09	0.13	4.92	0.23	3.26	0.20	8.72	0.63

在研究区内的每个栅格上对 2015—2100 年 3 种 RCP 情景下的四季均温进行 Mann-Kendall 趋势检验和 Sen's 斜率估算,其趋势的空间分布如附图 29 所示。除了 RCP2.6 情景,其余两种 RCP 情景下四季均温通过显著性检验的区域均为整个黄土高原地区(附图 29b_1,29b_2,29b_3,29b_4)黑框区域和(附图 29c_1,29c_2,29c_3,29c_4 黑框区域)。RCP2.6 情景下,春季均温通过显著性检验的区域集中在宁夏、内蒙古、青海和山西部分以外的黄土高原中部地区(附图 29a_1 黑框区域),占黄土高原面积的 69.27%;夏季通过显著性检验的区域集中在贵德、同仁和大同以外的地区(附图 29a_2 黑框区域),占黄土高原面积的 98.38%;秋季通过显著性检验的区域集中在黄土高原东北部地区(附图 29a_3 黑框区域),占黄土高原面积的57.17%;冬季通过显著性检验的区域集中在青海部分区域以及临洮以外的地区(附图 29a_4 黑框区域),占黄土高原面积的 93.01%。

未来时期这些区域 3 种 RCP 情景下四季均温全部呈上升趋势。且由表 4 可知,3 种 RCP 情景下四季均温的上升速率均有较大差异,空间变异系数为2.06～30.40%,其中同种 RCP 情景下冬季均温的空间变异系数最大。随着排放情景的升高(即 RCP2.6,RCP4.5,RCP8.5),未来时期四季升温的平均速率均逐渐增大,且 RCP8.5 情景下冬季升温的平均速率最大,为 0.61 ℃/10 a,上升速度由东南向西北逐渐变大;RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,冬季均温的上升速度均由西南向北逐渐变大;RCP4.5 情景下,春季均温上升速度由东南向西北逐渐变大,夏季由西南向北逐渐变大;RCP8.5 情景下,春季均温上升速度由南向西北逐渐变大。

表 4 2015—2100 年黄土高原四季均温显著趋势空间分布的变化特征

项目	春季			夏季			秋季			冬季		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
最小值	0.06	0.14	0.41	0.04	0.24	0.50	0.05	0.17	0.54	0.07	0.09	0.48
最大值	0.13	0.28	0.57	0.13	0.35	0.60	0.11	0.24	0.63	0.31	0.42	0.80
平均值	0.10	0.23	0.50	0.07	0.30	0.56	0.08	0.20	0.57	0.22	0.26	0.61
变异系数	11.92	12.68	8.48	21.93	8.71	3.19	12.39	7.09	2.06	22.13	30.40	13.48
面积比例/%	69.27	100	100	98.38	100	100	57.17	100	100	93.01	100	100

2.3 黄土高原四季降水量变化趋势分析

对黄土高原 2015—2100 年的四季降水进行距平运算，结果见图 3。从图 3 可知，与气候平均值相比，整个黄土高原 3 种 RCP 情景下的四季降水距平百分比均剧烈波动，春季、夏季降水在 RCP4.5 情景下的变化范围最大，分别为－73.04%～147.18 %和－53.80%～65.50%；秋季、冬季降水在 RCP8.5 情景下的变化范围最大，－71.85%～114.70%和－84.36%～222.80%。比较表 5 中的结果发现，随着进入 21 世纪初期(2015—2040 年)、中期(2041—2070 年)、末期(2071—2100 年)，春季降水在 3 种 RCP 情景下与气候平均值相比均是增加的，夏季降水只在 RCP8.5 情景下是增加的，冬季在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下是增加的。表 6 统计可知，随着排放情景的升高(即 RCP2.6，RCP4.5，RCP8.5)，2015—2100 年春季和冬季降水的距平均值均逐渐增大，与气候平均值相比降水是增加的；其余季节降水的距平均值增减不一，春季平均值分别为(13.58±4.32)%，(16.38±4.09)%，(22.98±3.94)%，夏季平均值分别为(1.30±2.56)%，(－0.31±2.64)%，(11.51±2.47)%，秋季平均值分别为(－2.06±3.72)%，(2.40±3.79)%，(1.98±4.18)%，冬季的平均值分别为(8.83±6.02)%，(18.53±7.16)%，(26.34±7.85)%；3 种排放情景下，冬季降水距平均值在四季中几乎是最大的。根据 Mann-Kendall 趋势检验法可知在 95 %的置信水平下(表 6)，除了 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下春季降水呈显著上升趋势，上升速率分别为 3.13 mm/10 a 和 4.45 mm/10 a，其余排放情景下的季降水均无显著变化趋势。

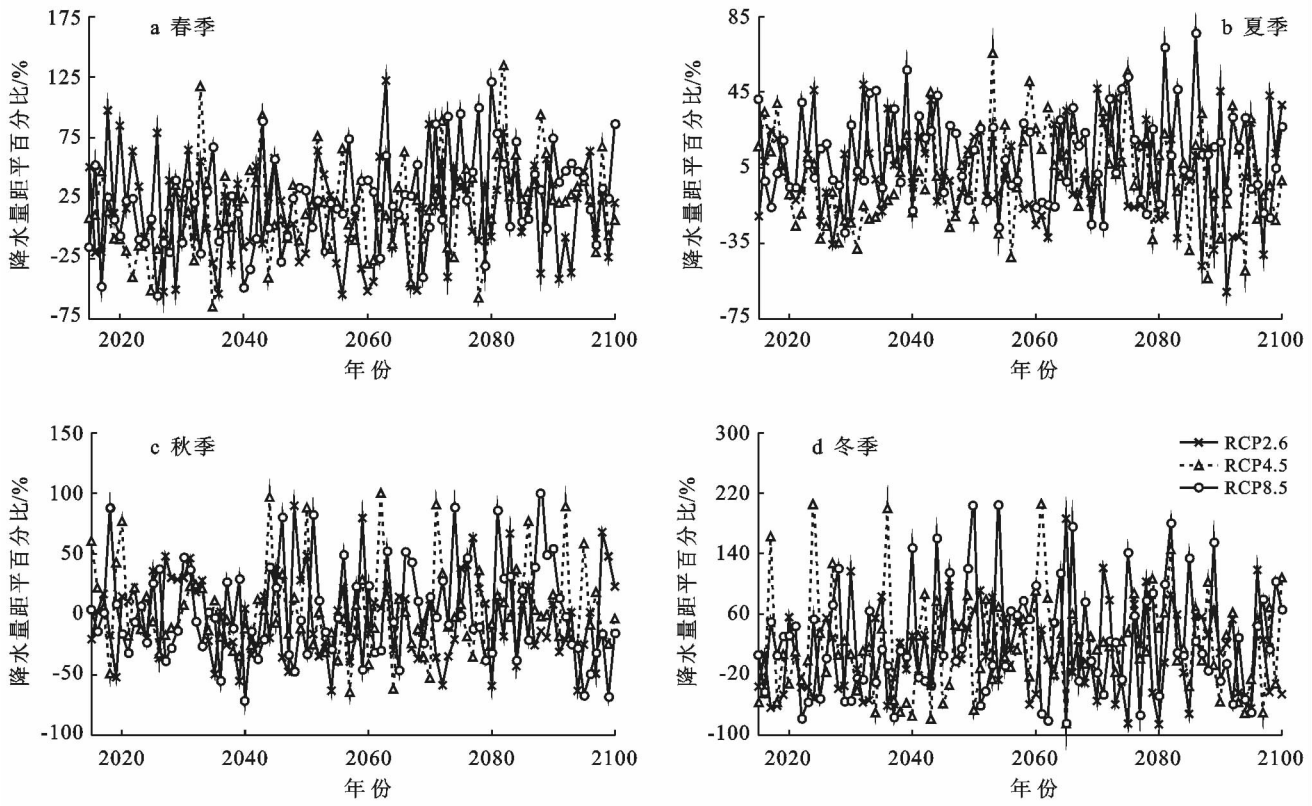


图 3 2015—2100 年黄土高原四季降水量距平百分比变化

表 5　2015－2100 年黄土高原 3 种 RCP 情景下不同时间段四季降水量变化的平均值　%

季节	RCP2.6			RCP4.5			RCP8.5		
	初期	中期	末期	初期	中期	末期	初期	中期	末期
春季	15.37	7.15	18.47	3.66	14.00	29.79	4.13	18.48	43.82
夏季	3.41	1.86	－1.09	－8.13	5.77	0.38	10.92	8.76	14.76
秋季	－0.04	－2.69	－3.18	1.60	－2.85	8.35	－1.17	2.17	4.52
冬季	－5.32	19.80	10.12	9.21	23.09	22.05	6.30	38.24	31.80

表 6　2015－2100 年黄土高原四季降水 3 种 RCP 情景下变化的平均值(mm)、标准误差 SE、Z 及 s(mm/10 a)

季节	RCP2.6				RCP4.5				RCP8.5			
	平均值	SE	Z	s	平均值	SE	Z	s	平均值	SE	Z	s
春季	13.58	4.32	0.01	0.05	16.38	4.09	2.53	3.13	22.98	3.94	3.66	4.45
夏季	1.30	2.56	－0.65	－1.99	－0.31	2.64	0.91	2.67	11.51	2.47	0.04	0.15
秋季	－2.06	3.72	－0.57	－0.82	2.40	3.79	－0.16	0.33	1.98	4.18	－0.20	－0.42
冬季	8.83	6.02	0.69	0.20	18.53	7.16	1.14	0.44	26.34	7.85	1.20	0.46

在研究区内的每个栅格上对 2015—2100 年 3 种 RCP 情景下四季降水进行 Mann-Kendall 趋势检验和 Sen's 斜率估算,其趋势的空间分布如附图 30 所示。

春季降水在 RCP2.6 情景下没有通过显著性检验的区域(附图 $30a_1$),其余两种 RCP 情景下通过显著性检验的区域分别集中在黄土高原西北部、南部(附图 $30b_1$ 黑框区域)和北部以外的大部分地区(附图 $30c_1$ 黑框区域),这些区域呈上升趋势,分别占黄土高原面积的 41.70%和 92.78%;夏季降水在 3 种 RCP 情景下均有通过显著性检验的区域,分别集中在黄土高原最西端极少数地区(附图 $30a_2$ 蓝框区域)、西南部(附图 $30b_2$ 黑框区域)和最南端极少部分地区(附图 $30c_2$ 黑框区域),其中 RCP2.6 情景下的这些区域呈下降趋势,RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的区域呈上升趋势,分别仅占黄土高原面积的 0.05%,6.35%和 0.05%;秋季降水只在 RCP8.5 情景下有通过显著性检验的区域,主要集中在黄土高原东南部地区(附图 $30c_3$ 蓝框区域),这些区域呈下降趋势,占黄土高原面积的 5.43 %;冬季降水在 3 种 RCP 情景下均有通过显著性检验的区域,且这些区域均呈上升趋势,分别集中在宁夏部分地区(附图 $30a_4$ 黑框区域)、黄土高原西南部内蒙古部分地区(附图 $30b_4$ 黑框区域)和西北端青海、宁夏部分地区(附图 $30c_4$ 黑框区域),分别占黄土高原面积的 3.63%,13.14%和 4.49%。

由表 7 可知,不管区域显著趋势是上升还是下降,3 种 RCP 情景下四季降水的变化速率均有较大差异,空间变异系数为 10.57%～42.79%。对比所有 RCP 情景下四季降水的空间变异系数,春季降水的最大,且其内降水的上升速度均由北向南逐渐变大;同种 RCP 情景下,夏季降水的上升速度均为最大,其平均值分别为 9.30 mm/10 a 和 10.81 mm/10 a;秋季降水的下降速度由西北向东南逐渐变大,平均速率为 7.36 mm/10 a;冬季降水上升的速度均较小,平均速率只有0.61 mm/10 a,0.37 mm/10 a 和 0.48 mm/10 a。

表 7　2015－2100 年黄土高原四季降水量显著趋势空间分布的变化特征

项目	春季			夏季			秋季			冬季		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
最小值	－	0.91	0.77	－7.26	4.85	7.57	－	－	－10.86	0.31	0.06	0.09
最大值	－	11.28	9.89	－2.34	25.91	12.88	－	－	－5.00	1.15	0.62	0.78
平均值	－	4.00	4.65	－4.44	9.30	10.81	－	－	－7.36	0.61	0.37	0.48
变异系数	－	42.79	31.33	28.95	25.00	10.57	－	－	14.11	21.38	26.24	21.75
面积比例	－	41.70	92.78	0.05	6.35	0.05	－	－	5.43	3.63	13.14	4.49

3　讨论

目前,区域尺度上的未来气候变化及趋势研究中通常存在一定的不确定性,该不确定性主要来自所用气候模式和降尺度过程。为满足研究气候变化的需要,世界气候研究计划(WCRP)耦合模式工作组(WGCM)联合国际地圈—生物圈计划、地球系统集成与建模项目以及世界上 20 多个知名的气候模拟机构共同组织实施了国际耦合模式比较计划(CMIP)[25]。本研究所用的 CMIP5 发布的气候模式是目前为止最全面的气候模式[25],被诸多学者应用于一系列区域气候变化研究[1,22]。CMIP5 模式在 SRES 情景的基础

上进行了重大改进，结合了 RCPs 去表征未来温室气体排放情景，3 种情景依据全球温室气体排放程度确定 CO_2 的排放范围和每个情景的辐射强度[26]，与耦合模式比较计划第三阶段(CMIP3)的气候模式相比，CMIP5 模式采用了更合理的参数化方案、通量处理方案和耦合器技术，以提高气候模式的模拟和预估能力，增强对气候系统变化的机理性认识[26]。且本研究采用多个气候模式数据(27 个 GCMs 在多种排放情景下的数据)进行研究，降低了不同模式、不同干扰设定对区域未来气候预估的不确定性。Delta 空间降尺度过程中采用了高空间分辨率的参考气候数据集，其中包含地形效应，得到的高空间分辨率网格地图数据包含了详细的地理信息，比如精确的地理位置、面积信息，且本研究降尺度过程中使用了 4 种插值法，这在一定程度上降低了 Delta 法在插值处理过程所产生的误差。Peng 等[22]使用与本研究相同的方法和数据降尺度到 1 km 空间分辨率，其研究结果表明，在黄土高原地区使用 Delta 法将 GCMs 气象数据降尺度到 1 km的网格上是可行的，且 GCMs 降尺度数据比 GCMs原始数据更加接近站点观测数据。因此，本研究分析黄土高原未来时期四季气候变化时空分布特征所得到的结果也较为可信。

赵天保等[27]研究结果表明，在不同 RCP 情景下，未来时期中国干旱半干旱区都以增温为主要特征，高等浓度路径下(RCP8.5)增温趋势更显著，且可能是气温升高、降水增多最为显著的区域之一。黄土高原横跨半湿润、干旱和半干旱区，本文结果表明，21 世纪其四季温度变化趋势与赵天保等[27]研究结果相似，四季均温均在 RCP8.5 情景下的变化范围最大，且 3 种排放情景下，冬季均温的增温幅度在四季中均是最大的。程雪蓉等[28]研究结果指出，2010—2099 年 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，中国的气温增加明显，并呈现出春弱秋冬强的特征；冬季全国的降水线性趋势普遍较小，春夏季全国的降水趋势普遍增大。本研究黄土高原在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，四季气温增加明显，其中秋冬增温的平均值均高于春夏；降水只在春季呈上升趋势，其他季节均无显著变化趋势，且 RCP4.5 情景下春季、夏季降水量的增幅最大，这与程雪蓉等[28]研究结果相比相似。但本文黄土高原地区的降水在 RCP8.5 情景下秋季、冬季降水量的增幅最大，这与程雪蓉等[28]的研究结果不太一致。黄土高原气候变化特征与中国气候变化特征结果相似，说明黄土高原区域气候对全国气候变暖有显著响应。但在小地理尺度上，不同地区四季温度和降水的变化趋势却会有明显差异，产生这种差异的原因可能是气候变化在空间上具有差异性，降水和气温受区域大气条件、地形地貌、下垫面等多种因素影响，具有明显的区域性特征。且四季温度和降水在未来时期的变化趋势差异也与所用气候模式描述的物理过程及模拟巧技有关，与所用模式的气候敏感度也有关[29]。

20 世纪以来，全球变暖已被广泛接受，并认为它已经并且正在对社会经济活动、农业、环境和生态系统产生深远影响。然而，目前在全球变暖的成因、幅度、空间分布及其未来变化等问题上还存在着不同的意见。本文研究了黄土高原未来时期四季气候的变化趋势，只得到了一些初步结果，对于造成未来时期黄土高原区域特定季节下气候变化的成因等问题，还需展开进一步的研究。

4 结 论

(1) 本文所用的 27 个 GCMs 中，最适合模拟黄土高原未来时期四季月均温和月降水量 Delta 降尺度的气候模式分别是 NorESM1-M 和 GFDL-ESM2M 模式。

(2) 2015—2100 年黄土高原区域四季均温除了 RCP2.6 情景下的春季、秋季无显著趋势，其余情景下四季均温均呈显著上升趋势，且同一情景下冬季上升速率是最快的；四季降水量只有 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下的春季呈显著上升趋势，其余排放情景下四季降水量均无显著趋势。

(3) 3 种 RCP 情景下，2015—2100 年黄土高原区域四季均温在 21 世纪初期(2015—2040 年)、中期(2041—2070 年)和末期(2071—2100 年)相比于气候平均值均是增加的，且 RCP8.5 情景下冬季均温的变化最大；降水量只在春季均是增加的，冬季只在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下是增加的，但冬季降水的变化在四季中是最大的。

(4) 空间分布上，四季均温在 RCP2.6 情景下为黄土高原部分地区呈显著上升趋势，RCP4.5 和 RCP8.5 情景下为整个黄土高原地区均呈显著上升趋势；3 种 RCP 情景下，四季降水量趋势在空间分布上具有很大差异，春季降水量增加速率均由北向南逐渐变大，秋季的下降速率由西北向东南逐渐变大；同种 RCP 情景下，夏季降水的增加速率最大，冬季增加速率较小。

[参 考 文 献]

[1] Wang Lin, Chen Wen. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China[J]. International Journal of Climatology, 2014,34(6):2059-2078.

[2] Pachaurir K, Allen M R, Barrosv R, et al. IPCC, 2014: A comprehensive report on climate change[R]. Geneva, Switzerland, 2014:151.

[3] 曲迎乐,高晓清,陈文,等. 近 50 年来我国东、西部地面气温和降水变化对比的初步分析[J]. 高原气象,2008,27(3):524-529.

[4] Wang Cenghai, Li Jian, Li Xiaolan. Analysis on quasi-periodic characteristics of precipitation in recent 50 years and trend in next 20 years in China[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1):1-10.

[5] 郁珍艳,范广洲,华维,等. 气温突变对我国四季开始日期的影响[J]. 气象,2010,36(11):32-37.

[6] Inouye D W. Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers[J]. Ecology, 2008,89(2):353-62.

[7] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group Ⅰ to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate changes[R]//Solomon S, et al(eds). Cambridge, United Kindom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

[8] 姚玉璧,王毅荣,李耀辉,等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学,2005,27(5):146-152.

[9] 张广俊,汪名怀,陆春松,等. 高分辨率全球气候模式大气物理过程参数化研发和应用[J]. 中国基础科学,2017,19(5):40-44.

[10] 刘永和,郭维栋,冯锦明,等. 气象资料的统计降尺度方法综述[J]. 地球科学进展,2011,26(8):837-847.

[11] 陈丽娟,李维京,张培群,等. 降尺度技术在月降水预报中的应用[J]. 应用气象学报,2003,14(6):648-655.

[12] Xu Jianwei, Gao Yanhong, Chen Deliang, et al. Evaluation of global climate models for downscaling applications centred over the Tibetan Plateau[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(2):657-671.

[13] Mosier T M, Hill D F, Sharp K V. 30-arcsecond monthly climate surfaces with global land coverage[J]. International Journal of Climatology, 2013, 34(7): 2175-2188.

[14] 赵芳芳,徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析[J]. 气象学报,2007,65(4):653-655.

[15] 晏利斌. 1961—2014 年黄土高原气温和降水变化趋势[J]. 地球环境学报,2015,6(5):276-277.

[16] Li Zhi, Zheng Fenli, Liu Wenzhao, et al. Spatially downscaling GCMs outputs to project changes in extreme precipitation and temperature events on the Loess Plateau of China during the 21st Century[J]. Global & Planetary Change, 2012(82/83):65-73.

[17] Diaz-Nieto J, Wilby R L. A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom[J]. Climatic Change, 2005,69(2/3):245-268.

[18] 杨建伟. 黄土高原常见树种的耗水规律及水分利用特征的研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2003.

[19] 刘宇,傅伯杰. 黄土高原植被覆盖度变化的地形分异及土地利用/覆被变化的影响[J]. 干旱区地理,2013,36(6):1097-1102.

[20] Peng Shouzhang, Ding Yongxia, Wen Zhongming, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011—2100[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2017,233(7):183-194.

[21] Brekke L, Thrasher B, Maurer E, et al. Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate and Hydrology Projections: Release of downscaled CMIP5 climate projections, comparison with preceding information, and summary of user needs[M]. US Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Services Center, Denver, Colorado, 2013.

[22] Peng Shouzhang, Gang Chengcheng, Cao Yang, et al. Assessment of climate change trends over the Loess Plateau in China from 1901 to 2100[J]. International Journal of Climatology, 2018,38(5):2250-2264.

[23] 陈中平,徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征[J]. 科技通报,2016,32(6):47-50.

[24] 易湘生,尹衍雨,李国胜,等. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化[J]. 地理学报,2011,66(11):1451-1465.

[25] 周天军,邹立维,吴波,等. 中国地球气候系统模式研究进展:CMIP 计划实施近 20 年回顾[J]. 气象学报,2014,72(5):892-907.

[26] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 93(4): 485-498.

[27] 赵天保,陈亮,马柱国. CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估[J]. 科学通报,2014,59(12):1148-1163.

[28] 程雪蓉,任立良,杨肖丽,等. CMIP5 多模式对中国及各分区气温和降水时空特征的预估[J]. 水文,2016,36(4):37-43.

[29] Zhou Tianjun, Song Fengfei, Chen Xiaolong. Historical evoluations of global and regional surface air temperature simulated by FGOALS-s2 and FGOALS-g2: How reliable are the model results? [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2013,30(3):638-657.