

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20220621.004.

冯椰林, 贺中华, 焦树林, 等. 基于CMIP6气候模式的贵州省极端降水情景预估[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 282-290.

FENG Yelin, HE Zhonghua, JIAO Shulin, et al. Scenario Prediction of Extreme Precipitation in Guizhou Province Based on CMIP6 Climate Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 282-290.

# 基于CMIP6气候模式的贵州省极端降水情景预估

冯椰林, 贺中华, 焦树林, 刘炜

(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550025)

**摘要:**为探究气候变化下贵州省极端降水未来变化特征,基于台站观测和5个CMIP6模式的逐日降水资料,利用Delta降尺度、趋势分析等方法,分析了4种极端降水指数的历史与未来变化时空特征。结果表明:(1)利用Delta修正后的CMIP6模式数据取得了良好的效果,适用于贵州省极端降水的预估。(2)在1961—2019年的历史时期,贵州省的R95P, R25mm和CWD均呈南高北低的空间分布,而R95C呈明显的东中西差异;除CWD外,其它3个极端降水指数在1961—2019年均呈不明显的增加趋势。(3)未来3种SSPs情景下,无论是在时间还是空间上,4个极端降水指数均呈上升的趋势。(4)相较于历史时期,4个极端指数除R95C外均有增有减。R95P与R25mm在空间变化上相似,都表现为西北部较历史时期有减少,其余地区则表现为增多,且随SSPs升高而增大;CWD在中南部地区表现为减少,其余地区为增加,以北部较为明显,且在SSP126情景下最为显著;R95C则在整个地区都较历史时期增多,在中西部变化最明显,且在SSP245情景下最显著。总体而言,在气候变化背景下,贵州省的极端降水随SSPs的不同而变化,但整体会上会愈加多发,未来应加强防范与应对。

**关键词:**CMIP6; 极端降水; SSPs情景; 贵州省

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0282-09

## Scenario Prediction of Extreme Precipitation in Guizhou Province Based on CMIP6 Climate Model

FENG Yelin, HE Zhonghua, JIAO Shulin, LIU Wei

(School of Geographic and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to explore the characteristics of the future change of extreme precipitation in Guizhou Province under climate change, the temporal and spatial characteristics of the historical and future changes of four extreme precipitation indexes were analyzed by using the methods of Delta downscaling and trend analysis based on the station observation and daily precipitation data of five CMIP6 models. The results show that: (1) the CMIP6 model data modified by Delta has achieved good results and is suitable for the prediction of extreme precipitation in Guizhou Province; (2) from 1961 to 2019, the spatial distribution of R95P, R25mm and CWD in Guizhou Province was high in the south and low in the north, while the R95C showed obvious differences between east and west; except for CWD, the other three extreme precipitation indices showed the insignificant increasing trend from 1961 to 2019; (3) under the future three SSPs scenarios, the four extreme precipitation indices will all show an increasing trend both in time and space; (4) compared with the historical period, the four extreme indexes except R95C all increased and decreased; the spatial variation of R95P and R25mm is similar, showing decrease in the northwest compared with the historical period, and increase in the rest of the region, which increases with the increase of SSPs; CWD decreased in the central and southern regions, and increased in the rest regions, especially in the north, and was most significant under SSP126;

收稿日期:2021-10-11

修回日期:2021-10-24

资助项目:国家自然科学基金(u1612441);国家自然科学基金(41471032);贵州省水利厅自然科学基金(KT201402)

第一作者:冯椰林(1998—),男(苗族),重庆彭水人,硕士研究生,研究方向:喀斯特水文水资源与遥感。E-mail:1329032804@qq.com

通信作者:贺中华(1976—),男,贵州兴义人,博士,教授,研究方向:喀斯特水文水资源与遥感研究。E-mail:zhonghuahe@gznu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

R95C increased throughout the region, with the most significant changes in the midwest and SSP245. In general, in the context of climate change, extreme precipitation in Guizhou Province varies with different SSPs, but it will become more frequent on the whole. Therefore, prevention and response should be strengthened in the future.

**Keywords:** CMIP6; extreme precipitation; SSPs scenarios; Guizhou Province

全球气候变化目前成为全人类、各国政府机构和科研工作者共同关注的全球型重大社会问题<sup>[1]</sup>。全球变暖导致极端降水事件愈加频繁,而在联合国公布和重点关注的 15 种主要自然灾害中,极端降水发生最为频繁,也是损失最为严重的几种灾害之一<sup>[2]</sup>。随着全球变暖,不少研究也预期到了水文循环正在逐渐加速<sup>[3-4]</sup>,这可能会增加区域和全球范围内极端气候的频率和强度,并且大量模拟研究证实了极端降水的增强<sup>[5-7]</sup>。尽管人们对此有着广泛的兴趣,但对喀斯特地貌的极端降水研究目前较为匮乏。喀斯特地貌易诱发滑坡和泥石流等地质灾害,极端降水正是诱发这些地质灾害的主导因素。

我国贵州地区的典型喀斯特地貌,极易诱发泥石流和滑坡等地质灾害,特别是西部云贵高原边境,北部大娄山、东北雾灵山及苗岭地区<sup>[8-9]</sup>,给当地的社会经济发展带来了巨大的威胁。此外,该区域有东向的太平洋季风和南向的印度洋水汽输送,且西邻青藏高原,极易形成极端降水,部分研究表明贵州省大部分地区极端降水事件处于中高风险<sup>[10-11]</sup>。由此可见,贵州省极端降水特征分析及预测对于区域灾害防治是十分重要的。

耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)由世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)发起,旨在促进全球环流模式(global circulation model, GCM)数据的共享和比较,耦合模拟工作组(WGCM)先后组织了 6 次模拟比较计划<sup>[12]</sup>。与 2006 年发布的 CMIP5 相比,2015 年发布的 CMIP6 是新一代气候模式和未来情景,以及一套新的浓度、排放和土地利用情景<sup>[13]</sup>。CMIP6 可以更好地揭示过去、现在和未来的气候变化,这些变化是由自然、非强迫变化或多模式背景下的辐射强迫变化引起的<sup>[14]</sup>。以前的研究多集中于大尺度的 CMIP6 模式应用,例如胡一阳等<sup>[15]</sup>用 CMIP6 全球模式对于中国降水能力模拟进行了评估,黄禄丰等<sup>[16]</sup>基于 CMIP6 多模式预估了全球陆地生态系统总初级生产力的变化。然而精细化的小尺度研究却较少,如何利用 CMIP6 数据进行修正和降尺度以适用小尺度研究尤为重要。

基于以上分析,本文基于历史实测数据和耦合模式相互比较项目(CMIP6)第六阶段的逐日降水数据,选择

4 个具有代表性的极端降水指数(R95P:百分之 95 分位数的降水量总和;R25mm:降水量大于 25 mm 的天数;CWD:连续 $\geq 1$  mm 降水的天数;R95C:极端降水占比),首先利用 Delta 统计降尺度对未来情景数据进行修正,然后基于历史实测数据分析 4 个极端降水指数的年际变化,空间格局和空间趋势。最后探究 3 种 SSPs 情景下 4 种极端降水指数的年际变化,空间趋势以及与历史时期的差异。该研究对于该地区的极端降水灾害预警,应急管理具有一定的指导意义。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 研究区概况

贵州省位于中国西南部,具体经纬度为  $24^{\circ}37'$ — $29^{\circ}13'N$ ,  $103^{\circ}36'$ — $109^{\circ}35'$ 。全省面积约为  $176\ 167\text{ km}^2$ 。省内喀斯特地貌发育强烈,喀斯特地区占全省面积的 73.8%。位于云贵高原东部,山区面积广大,西高东低,海拔主要分布在  $152\sim 2\ 885\text{ m}$ (图 1)。气候为亚热带湿润季风气候,年降水量为  $621.69\sim 1\ 541.34\text{ mm}$ ,年均温为  $11.02\sim 21.64^{\circ}\text{C}$ ,年内温差较小,四季分明,雨量丰沛,雨热同期,植被覆盖度高,是研究极端降水变化的理想区域。

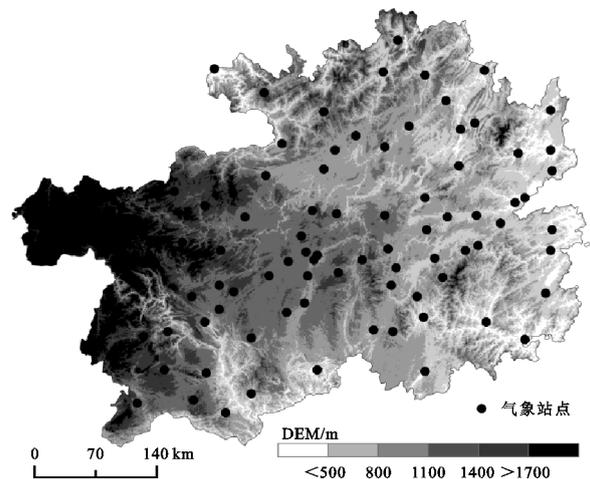


图 1 研究区位置及气象站点分布

### 1.2 数据来源及处理

本研究主要使用两种数据,一种是历史实测的气候数据,另一个是来自 GCMs 的未来预测气候数据。本研究使用的历史实测的气候数据来源于国家气象信息中心(V2.0)(<http://www.nmic.cn/>),该套数据基于全国 2400 多个站点制作而成,包括贵州省 84

个气象站点的逐日降水数据,时间跨度统一至 1961—2019 年(图 1)。使用新六代耦合模型相互比较项目(CMIP6)的 5 个气候模型,基本信息见表 1,数据下载于 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>。使用 3 种未来情景(SSP126, SSP245 和 SSP585)下的历史模拟(1850—2014)和 21 世纪预测(2015—2100),每个模型仅选择第一个驱动(r1i1p1f1),CMIP6 是基于典型集中路径(RCP)情景开发的,反映社会在适应和缓解气候变化方面面临的未来挑战。由于选定的 5 个 CMIP6 气候模式在空间分辨率上存在差异,因此使用双线性内插法将 5 个 CMIP6 气候模式重采样为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  分辨率。由于降水的模式预测不同,多模式集合平均(MME)能够在一定程度上抵消单个模式的偏差,并广泛用于未来气候变化的模拟和预测<sup>[17-19]</sup>。

表 1 本研究所采用的 5 个 CMIP6 模式

| 序号 | 模式          | 来源机构      | 国家    | 分辨率                               |
|----|-------------|-----------|-------|-----------------------------------|
| 1  | BCC-CSM2-MR | BBC       | China | $1.125^\circ \times 1.125^\circ$  |
| 2  | CMCC-ESM2   | CMCC      | Italy | $1.25^\circ \times 0.94^\circ$    |
| 3  | GFDL-ESM4   | NOAA-GFDL | USA   | $1.25^\circ \times 1.00^\circ$    |
| 4  | MIROC6      | JAMSTEC   | Japan | $1.40^\circ \times 1.40^\circ$    |
| 5  | NESM3       | NUIST     | China | $1.875^\circ \times 1.8647^\circ$ |

### 1.3 研究方法

1.3.1 Delta 统计降尺度 由于 CMIP6 的空间分辨率普遍较低,不能直接用来模拟较小尺度的气候情景变化。因此,发展了很多降尺度方法来弥补低分辨率数据的不足。本研究所选用的 Delta 降尺度是偏差修正中的变化因子法<sup>[20]</sup>。该方法主要是通过比较 CMIP6 模拟的历史时期值和实际值间的差异,来修正未来情境下的变化。具体计算公式如下:

$$\frac{P_{\text{fut}}}{P_{t\text{-his}}} = E \quad (1)$$

$$E \times P_{t\text{-obs}} = P \quad (2)$$

式中: $P_{\text{fut}}$ 为未来时期的模式降水数据; $P_{t\text{-his}}$ 为模式数据在率定期的多年均值; $E$ 为模式未来与率定期的比例因子; $P_{t\text{-obs}}$ 为实测数据在率定期的多年均值。 $P$ 为降尺度后的 CMIP6 多模式集合数据。

1.3.2 极端降水指数 世界气象组织气候变化监测与极端气候事件指标专家组(ETCCDI)在 1998—2001 年的气候变化监测大会上提出了一套极端气候事件指标,继而形成了气候变化研究领域的统一准则,IPCC 第四次报告又对极端气候进行了重新定义,其中有 27 个指数被确定是核心指标<sup>[21]</sup>。但不同指标之间关联性较强,因此,本文选择 4 个具有代表性的指标,分别代表极端降水强度(即:强降水量 R95P)、持续性(即:最长连续降水天数 CWD)、极端降水频次(即:大雨日数 R25 mm)和极端降水贡献率

(R95C)来研究历史时期和未来不同情境下的极端降水变化特征。具体指标见表 2。

## 2 结果与分析

### 2.1 CMIP6 降尺度模拟结果评估

将 1961—1999 年的模式与实测数据设定为率定期进行模型率定,2000—2014 年逐年的 R95P, CWD, R25mm 和 R95C 数据则用来验证模型,对比率定前后 4 个极端降水指数与气象站点观测值之间的差异。

表 2 极端降水指标的定义

| 指标    | 描述性名称    | 具体定义                     | 单位 |
|-------|----------|--------------------------|----|
| R95P  | 强降水量     | 日降水量>95%分位数的总降水量         | mm |
| CWD   | 最长连续降水天数 | 日降水量≥1 mm 的最长连续天数        | d  |
| R25mm | 大雨日数     | 日降水量≥25 mm 的降水日数         | d  |
| R95C  | 强降水量贡献率  | 日降水量>95%分位数的总降水量与年降水量的比值 | %  |

图 2 为 2000—2014 年 4 个极端降水指数的空间分布,其中图 2(A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub>, C<sub>1</sub> 和 D<sub>1</sub>)为实测站点数据计算得到的空间分布,图 2(A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub>)为 CMIP6 所有模式均值重采样得到的空间分布,而图 2(A<sub>3</sub>, B<sub>3</sub>, C<sub>3</sub> 和 D<sub>3</sub>)为通过 Delta 降尺度残差修正后的 CMIP6 所有模式均值的空间分布。从图 2A 中可以看出,3 种处理结果下 R95P 的空间格局变化趋势相似,均为东南高西北低,但实测值和重采样的 MME 平均值差异较大,实测值的强降水量偏低,贵州省强降水量低值区在西部,强降水量低于 350 mm。重采样后的 MME 平均值偏高,在贵州省西部高于 500 mm。而通过 Delta 降尺度后强降水量与实测值更加接近。因此可以采用 Delta 降尺度来对多模式集合的 CMIP6 计算的极端降水指标进行修订,以更好地揭示不同 SSPs 情境下未来贵州省极端降水的空间分布格局。

### 2.2 历史时期极端降水指数的时空变化特征

2.2.1 极端降水指数的时间变化 4 个极端降水指标 1961—2019 年的年际变化见图 3, R95P 总体呈略微增加的趋势(1.278 mm/10 a),但年际波动较大,其中 2008 年的极端降水强度为历年最高,最高值为 685 mm;而 1962 年的极端降水强度为历年最低最低值仅为 344 mm。R25mm 总体也呈略微增加的趋势(0.088 d/10 a)波动同样较大,最高值为 2008 年的 12 d,最低值为 1962 年的 5 d。CWD 呈较明显的减少趋势(-0.39 d/10 a),最高值为 1961 年的 16 d,最低值为 2013 年的 7 d。R95C 总体呈上升的趋势(0.518%/10 a),占比最高的为 1996 年的 55%,占比最低的为 1962 年的 34%。

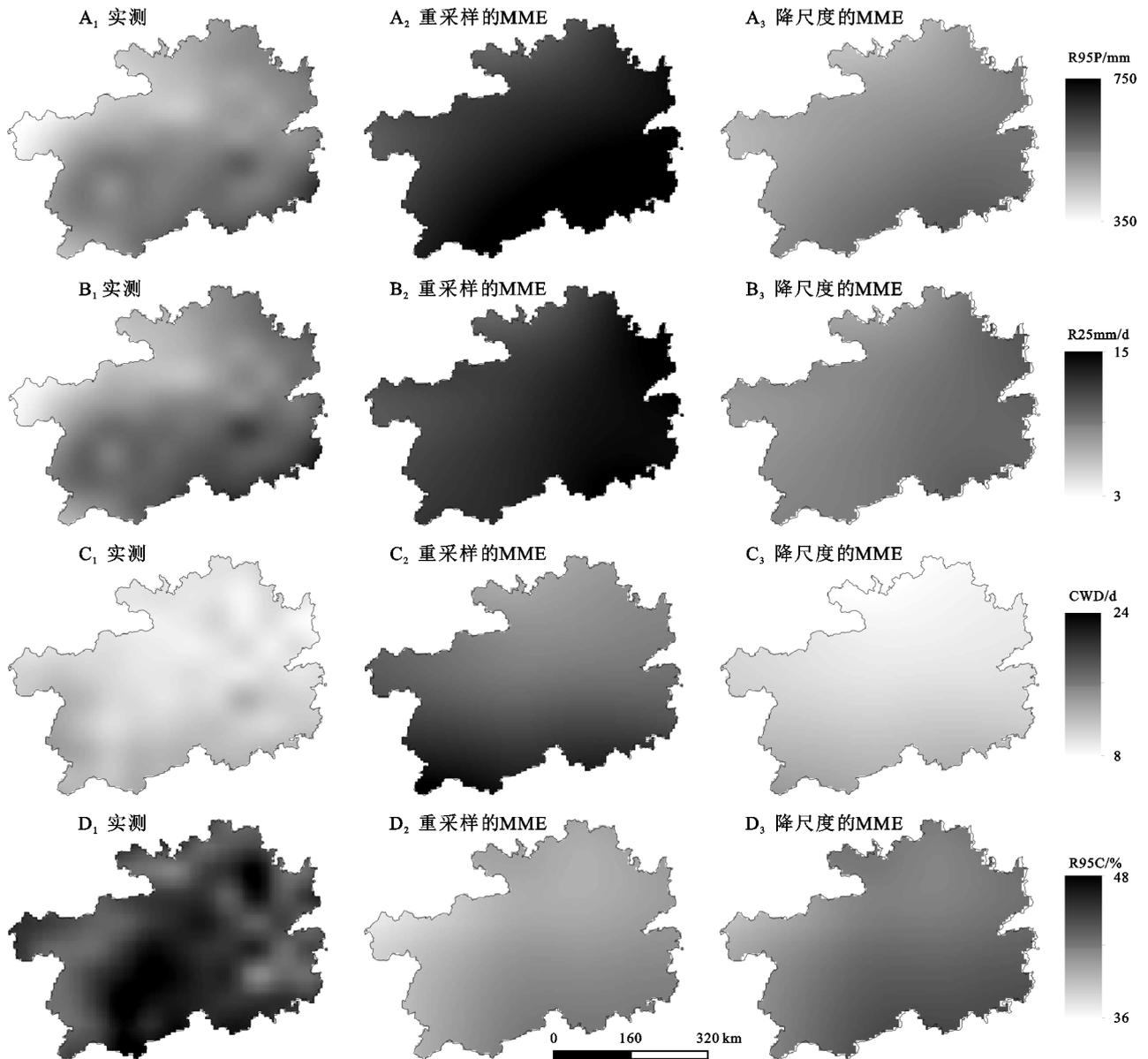


图 2 实测值、重采样后多模式集合均值和降尺度后多模式集合均值的 4 个极端降水指标的空间分布对比

2.2.2 极端降水的空间分布及其变化趋势 4 种极端降水指数通过实测数据计算后的历史均值空间分布见图 4。4 种指数总体均呈南高北低的空间分布。其中, R95P 呈东南高西北低的空间分布, 东南地区降水量最高为 684 mm, 西北部地区降水量最低为 345 mm。R25mm 东南部部分地区最高可达 14 d, 而西部最少地区仅为 3 d。CWD 降水天数在西南部最高, 可达 15 d, 而在东北部地区最低仅为 8 d。R95C 强降水量贡献率在南部最高, 可达 49%, 而在东南部和西部较低, 最低仅为 42%。

4 个极端降水指数的多年变化趋势并不相同(图 5)。其中 R95P 变化趋势空间格局总体呈增加的趋势, 增加趋势较为显著的地区分布在中部和南部, 其中南部最高为 19.53 mm/10 a, 而西部呈减小趋势, 最低为 -25.98 mm/10 a。R25mm 变化趋势空间格

局总体呈降低的趋势, 中部和南部呈增加趋势, 最高为 0.53 d/10 a, 而西部降低趋势最为明显, 最低为 -0.47 mm/10 a。CWD 变化趋势空间格局总体呈北部升高, 南部降低趋势, 上升最明显的地区分布在北部, 最高可达 0.31 d/10 a。而南部部分地区降低趋势最高为 -0.65 d/10 a。R95C 在中西部变化较明显, 其中中部呈明显的增加趋势, 最高为 1.68%/10 a, 而西部呈明显的降低趋势, 降低最快的地区可达 -0.81%/10 a。

### 2.3 未来不同 SSPs 情景下的极端降水指数时空变化特征

2.3.1 极端降水指数时间变化 未来不同 SSPs 情景下 4 个极端降水指数总体呈上升的趋势。具体来看, R95P 降水量在不同 SSPs 情景下均呈上升的趋势, 其中在 SSP585 情景下上升最明显 (28 mm/10 a,  $R^2 = 0.53$ ), 而在 SSP126 和 SSP245 情景下上升趋势相差

不大(11.8 mm/10 a, 11.01 mm/10 a)且不显著。R25mm在3个情景中均呈增加趋势,其中在SSP585情景下增高趋势为0.4 d/10 a。而在SSP126和SSP245情景下变化趋势分别为0.2 d/10 a和0.1 d/10 a。CWD连续降水天数变化较小且在不同情景下变化趋势不同。在SSP126和SSP585情景下呈弱的增加趋势

(0.1 d/10 a和0.02 d/10 a),而在SSP245情景下,呈弱的减小趋势(-0.02/10 a)。R95C强降水贡献率在不同SSPs情景下也均呈上升的趋势,其中,SSP585情景下R95C上升最快(1.3%/10 a),而在SSP126和SSP245情景下R95C上升趋势不明显(0.4%/10 a和0.5%/10 a)(图6)。

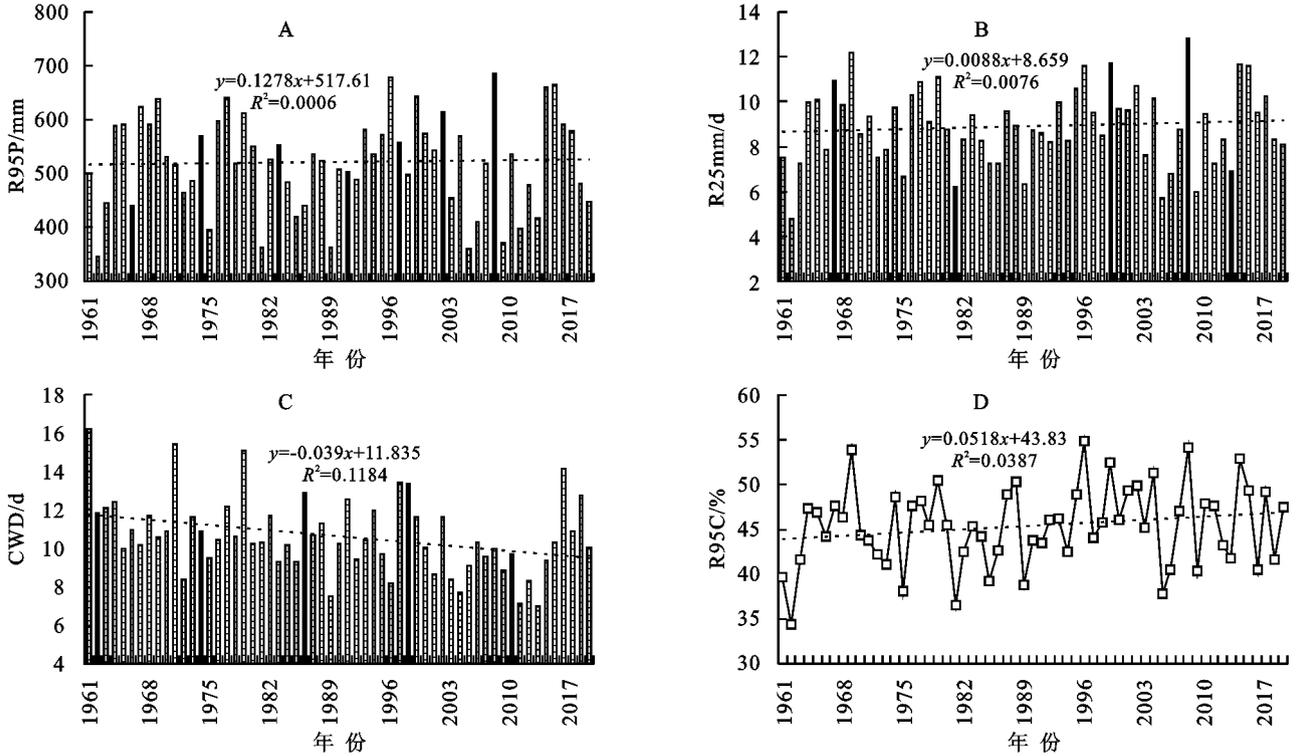


图3 历史时期4个极端降水指标的年际变化

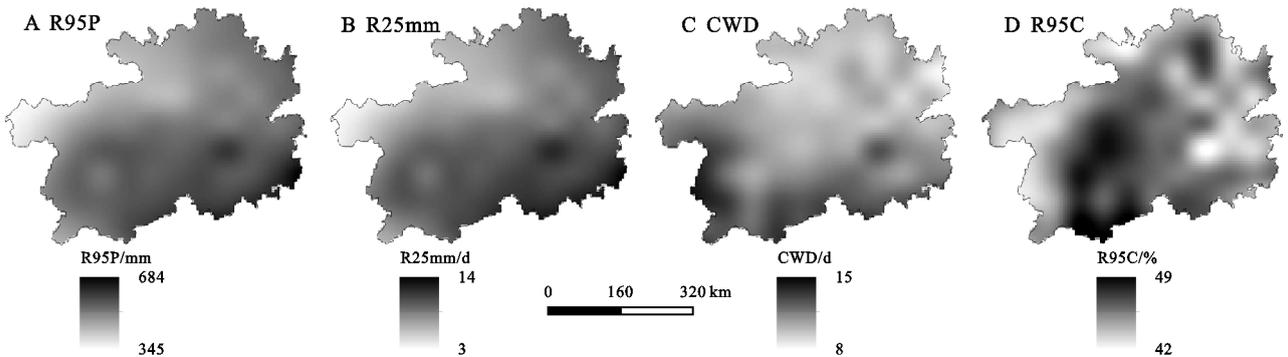


图4 历史时期4个极端降水指数的空间分布

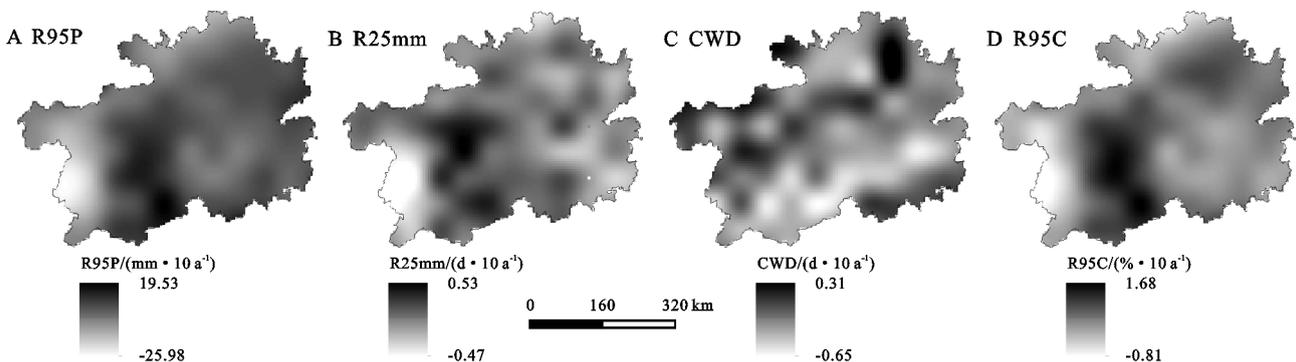


图5 历史时期4个极端降水指标的年际变化倾向率

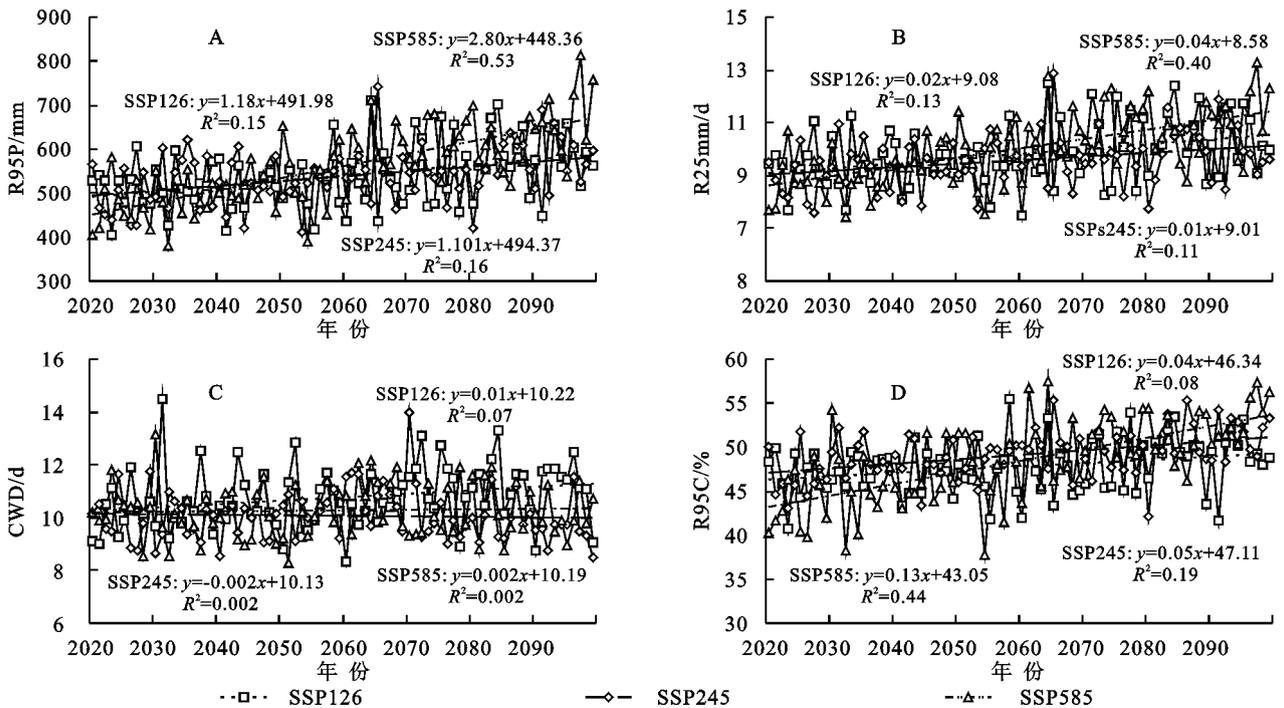


图 6 未来不同 SSPs 情境下的 4 个极端降水指数的年际变化

2.3.2 极端降水指数相较于历史时期的变化 未来不同 SSPs 情境下的 4 个极端降水指数相较于历史时期的变化量见图 7。R95P 随 SSPs 情景排放量的升高而增加,其中,在最西部,降水均比历史时期少,最高为 100 mm。而在贵州省的西南部,和东南部降水量比历史时期明显增多,最高为 100 mm。R25mm 在不同 SSPs 情景下较历史时期的变化具有明显的南北差异,其中南部地区呈明显的增高趋势,最高为 4 d,而北部总体呈减小的趋势,其中在最西部,减小最为明显,为 4 d。CWD 在 SSP126 低排放情景下呈明显的增加趋势,其中在北部、东南部和西部升高较明显,最高为 1.5 d,而在西南部减少较为明显。在 SSP245 和 SSP585 情景下,CWD 在东南部有明显的减小,最高可达 1.5 d。R95C 在不同情景下均呈升高趋势,然而在东南部,减小较为明显。在 SSP245 情景下,R95C 升高最明显,SSP585 次之。

2.3.3 未来不同 SSPs 情境下的极端降水指数变化趋势 未来不同 SSPs 情境下的 4 个极端降水指数变化趋势见图 8。R95P 在 3 种情景下均呈上升趋势,其中 SSP126 和 SSP245 情景下 R95P 升高趋势较小,而在 SSP585 情景下,降水量呈明显的增加趋势,其中在西南部增加最为明显。R25mm 在不同 SSPs 情景下均呈增加趋势。其中在 SSP126 情景下,贵州省东南部增加趋势相对明显,而在 SSP245 情景下,增加趋势总体不明显。而在 SSP585 情景

下,贵州省的东部 R25mm 呈明显的升高趋势,最高可达 0.5 d/10 a。CWD 在 SSP126 低排放情景下呈明显的增加趋势,其中在北部,东南部和西部升高较明显,其中北部部分地区最高升高趋势为 0.4 d/10 a。在 SSP245 和 SSP585 情景下,CWD 变化不明显。R95C 在不同情景下均呈升高趋势。在 SSP126 和 SSP245 情景下上升的幅度较小,而在 SSP585 情景下,R95C 升高最明显,西部最高为 1.6%/10 a。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

目前已有许多研究<sup>[6,22-23]</sup>尝试将格点化降水数据运用于极端降水事件研究,但多数集中于对过去极端降水事件的研究,很少针对未来时期极端降水事件进行研究。本研究采用最新的 CMIP6 模型,在 MME 和 Delta 降尺度逐日降水的基础上,计算不同 SSPs 情景下未来的极端降水时空分布特征,由于极端降水受复杂下垫面因素影响很大,可能出现明显的极端降水区域差异性。尽管该模型在逐日降水的模拟中仍然存在不确定性,但大多数研究都很好地证实了 MME 观察到的特征和趋势是可信的<sup>[24-25]</sup>。由于选择的 5 个 CMIP6 模型的空间分辨率不同,将每个模型重新采样到  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  可能会高估或低估极端降水的影响,以统计降尺度的方法来去除数据本身的空间分辨率差异,以达到降低这种影响的目的。

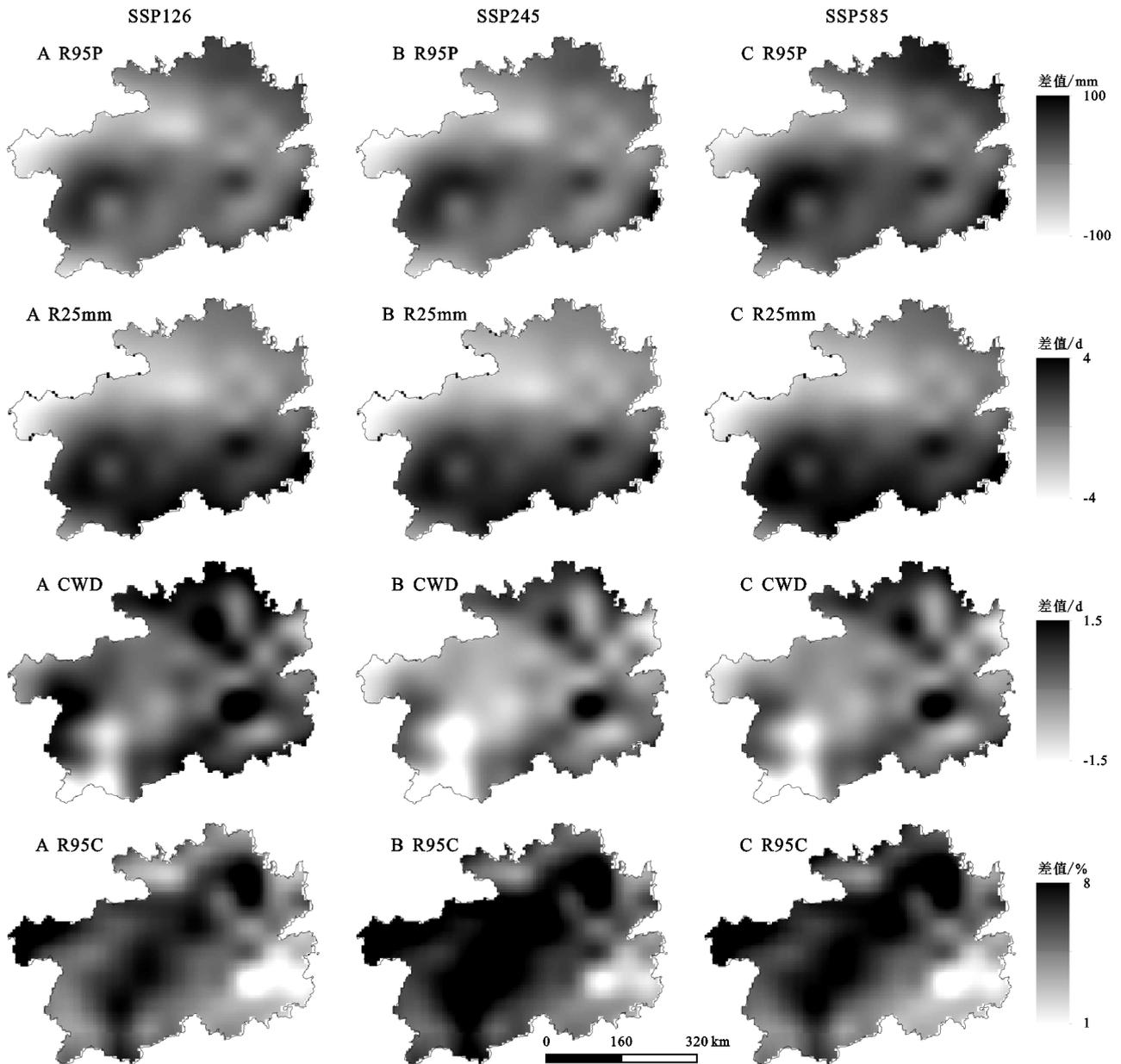


图 7 未来不同 SSPs 情境下的 4 个极端降水指数相较于历史时期的变化量

不同于普通降水的空间格局变化趋势,极端降水的长时间变化表现出了更为复杂的时空格局。在不同区域尺度上,不同学者利用格点或非格点化的降水资料,计算出了不同的极端降水增减趋势<sup>[26-28]</sup>。本文基于格点化的气象站点和 CMIP6 逐日降水资料的研究表明,贵州省极端降水事件整体上仍然呈现增加的趋势,降水表现出极端化倾向,这也与早期研究结论<sup>[29-30]</sup>是相一致的。东部、中部和西部之间也表现出了不同的干湿趋势,西南部临近青藏高原、云贵高原区更容易发生极端降水事件,该地区也是山脉较为密集的地区,极端降水的增加必将导致地质灾害频发,因此加强防范因极端强降雨引发的地质灾害对贵州省西南部区域可持续发展是极为重要的。

### 3.2 结论

本文基于历史实测数据和耦合模式相互比较项目(CMIP6)第六阶段的逐日降水数据对贵州省的极端降水事件进行了特征分析和预测。通过分析得到以下结论:

(1) 通过对比发现,仅通过重采样的 MME 数据下的 4 个极端降水指数与气象站点插值的数值有较大差异,总体偏高,而通过降尺度方法后,CMIP6 数据结果得到了很好的纠正,与气象站点的结果差异较小,可用于贵州省极端降水指数的预测。

(2) 在 1961—2019 年的历史时期, R95P, R25mm 和 CWD 均呈南高北低的空间分布,而 R95C 呈明显的东中西差异。除西部和最北部地区外,

R95P 均呈增加趋势。R25mm 在中部呈明显的增加趋势而在四周呈减小趋势。CWD 在北部总体呈增加趋势而在南部呈减小趋势。R95C 在西部呈降

低趋势而在中部呈增加趋势。除 CWD 外,其他 3 个极端降水指数在 1961—2019 年均呈不明显的增加趋势。

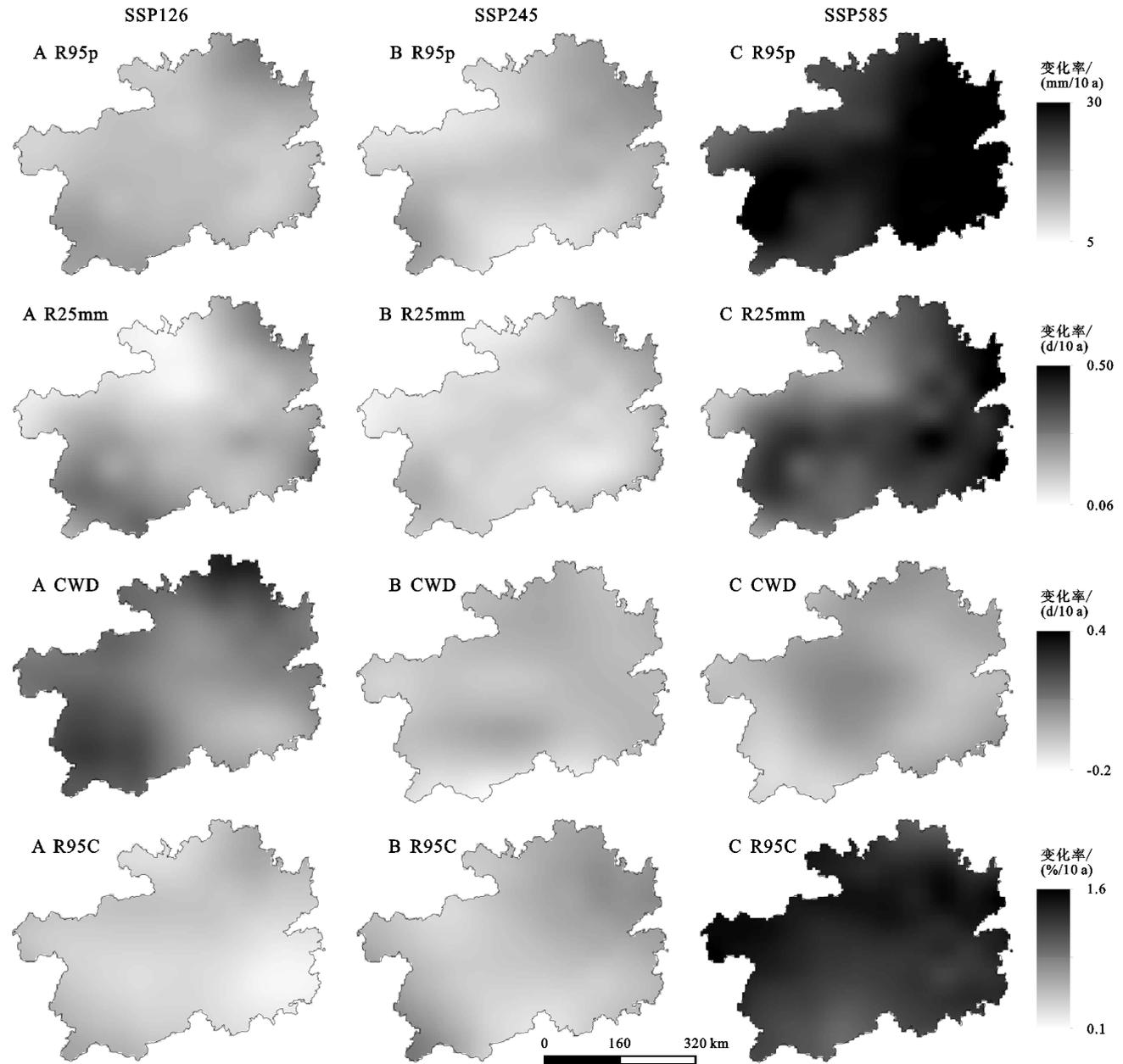


图 8 未来不同 SSPs 情境下的 4 个极端降水指数的空间变化

(3) 相较于历史时期,R95P 在除西部地区外均呈有增加。而 R25mm 在南部呈增加趋势北部呈减小趋势。CWD 较历史时期有所降低,其中西南部降低最为明显。R95C 在不同情景下均有增高。

(4) 未来 3 种 SSPs 情景下,极端降水指数总体均呈增加趋势,除 CWD 外,随着排放情景的升高,极端降水指数的增加趋势也更为明显,特别是在 SSP585 情景下。而 CWD 在 SSP126 情景下增加最为显著,而在中高排放情景下增加趋势较小,这表明在不均衡发展条件下,未来极端降水事件将更加频繁。

参考文献:

[1] Huang J, Zhang G, Zhang Y, et al. Global desertification vulnerability to climate change and human activities[J]. Land Degradation & Development, 2020,31(11):1380-1391.

[2] Munich Reinsurance Company. Topics Geo, Natural Catastrophes 2009: Analysis, Assessment, Positions [R]. Munich, Germany, 2010.

[3] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. Nature, 2002, 419(6903):224-232.

- [4] Zhang Q, Li J, Singh V P, et al. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 57-76.
- [5] 王少平, 姜逢清, 吴小波, 等. 1961—2010年西北干旱区极端降水指数的时空变化分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 318-326.
- [6] 任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961—2011年中国南方地区极端降水事件变化[J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 640-649.
- [7] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. *地理学报*, 2016, 71(5): 718-730.
- [8] 岳溪柳, 黄玫, 徐庆勇, 等. 贵州省喀斯特地区泥石流灾害易发性评价[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(11): 1395-1403.
- [9] 张克新, 王娟娟, 彭娇婷, 等. 贵州省降水集散程度时空变化及其影响因素分析[J]. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 38(2): 10-18.
- [10] 周超, 常鸣, 徐璐, 等. 贵州省典型城镇矿山地质灾害风险评价[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2020, 45(11): 1782-1791.
- [11] 龙万学, 谭勇鸿, 林剑. 基于GIS的贵州省地质灾害危险性评价[J]. *地理空间信息*, 2009, 7(6): 24-27.
- [12] 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.
- [13] Pu Y, Liu H B, Yan R J, et al. CAS FGOALS-g3 Model Datasets for the CMIP6 Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(10): 1081-1092.
- [14] Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6(CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [15] 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.
- [16] 黄禄丰, 朱再春, 黄萌田, 等. 基于CMIP6模式优化集合平均预估21世纪全球陆地生态系统总初级生产力变化[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(5): 514-524.
- [17] Maurer E P, Wood A W, Adam J C, et al. A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(22): 3237-3251.
- [18] Ning L, Bradley R S. Snow occurrence changes over the central and eastern United States under future warming scenarios[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 17073.
- [19] 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): 6-15.
- [20] Maurer E P, Wood A W, Adam J C, et al. A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(22): 3237-3251.
- [21] 关颖慧. 长江流域极端气候变化及其未来趋势预测[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [22] King A D, Alexander L V, Donata M G. The efficacy of using gridded data to examine extreme rainfall characteristics: A case study for Australia [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(10): 2376-2387.
- [23] Zolina O, Kapala A, Simmer C, et al. Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: A comparative assessment [J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 44: 129-161.
- [24] Swain, S., Hayhoe, K. CMIP5 projected changes in spring and summer drought and wet conditions over North America [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 44: 2737-2750.
- [25] Park C K, Byun H R, Deo R et al. Drought prediction till 2100 under RCP 8.5 climate change scenarios for Korea [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 221-230.
- [26] 雷享勇, 高路, 马苗苗, 等. 鄱阳湖流域极端降水时空分布和非平稳性特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3277-3287.
- [27] 唐明秀, 孙劭, 朱秀芳, 等. 基于CMIP6的中国未来暴雨危险性变化评估[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(5): 519-534.
- [28] 徐晓明, 张雪芹. 1961—2019年深圳市极端降水变化[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(3): 43-51.
- [29] 许玉凤, 陈宸, 黄娟. 贵州省无雨日和最长连续无雨日数时空分布特征[J]. *人民珠江*, 2019, 40(4): 59-64, 81.
- [30] 韩会庆, 张娇艳, 苏志华, 等. 2011—2050年贵州省极端气候指数时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 341-346.