

引用格式: 吕锦心, 刘昌明, 梁康, 等. 基于水资源分区的黄河流域极端降水时空变化特征[J]. 资源科学, 2022, 44(2): 261–273.
[Lv J X, Liu C M, Liang K, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation in the Yellow River Basin based on water resources regionalization[J]. Resources Science, 2022, 44(2): 261–273.] DOI: 10.18402/resci.2022.02.04

基于水资源分区的黄河流域极端降水 时空变化特征

吕锦心^{1,2}, 刘昌明¹, 梁康¹, 田巍^{1,2}, 白鹏¹, 张仪辉^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:探究和预估气候变化下黄河流域极端降水的变化特征,是科学认知黄河水情以及支撑流域防洪减灾工作的基础。本文基于全国水资源二级分区,综合采用“中国区域地面气象要素驱动数据集”和跨部门影响模型相互比较项目(ISIMIP)的降水数据,利用Mann-Kendall趋势检验、Sen's斜率估计等方法分析了黄河流域及其8个二级水资源分区的6个极端降水指标在历史期(1979—2018年)和未来期(2021—2100年)的时空变化特性。研究表明:①空间上,历史期与未来不同情景下黄河流域极端降水指标值在整体上均呈现由西北至东南逐渐增大的变化特征,在河口镇至龙门(Ⅳ)、龙门至三门峡(Ⅴ)等分区内部还出现了极端降水高值中心,这些区域高值中心与历史洪水爆发区具有较好的空间对应关系;②时间上(历史期),多数水资源分区的极端降水指标主要呈上升趋势,且小时尺度极端降水增强是所有分区的统一特征;作为黄河干流洪水主要来源区的兰州以上(Ⅰ和Ⅱ)、河口镇至龙门(Ⅳ)、花园口以下(Ⅶ)分区的所有极端降水指标呈上升趋势;③时间上(未来期),在不同辐射强迫情景下,未来各水资源分区的极端降水指标值都呈增加趋势,且增加幅度和空间覆盖范围会随着辐射强迫的增大而增大,这将加剧黄河分区防洪形势,其中河口镇以上3个分区(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)和龙门至三门峡(Ⅴ)分区的极端降水增强幅度最为明显,是未来防洪重点区。本文结果可为黄河流域未来极端降水灾害风险评估、区域防洪风险分析及应对、雨洪水资源管理等提供参考。

关键词:极端降水;水资源分区;空间分异;地球系统模式;ISIMIP;黄河流域

DOI: 10.18402/resci.2022.02.04

1 引言

在自然和人类活动的驱动下,19世纪后期以来,全球经历着以变暖为主要特征的气候变化^[1]。由于空气中饱和水汽压随温度升高,空气中水汽含量随气候变暖而增加,而暴雨量与底层水汽的辐合量成正比,所以极端降水的增加与气候变暖也较为一致^[2-4]。国内外学者针对不同地区的极端降水变化特性开展了诸多研究,发现极端降水的变化特征存在明显的空间分异性^[5-8]。开展典型流域的极端

降水研究,明晰其历史演变过程、区域差异性和未来变化情势,不仅有助于厘清气候变化下的流域水文响应机制,而且可为政府因时因地制宜制定相关适应与减缓策略提供支撑。

黄河作为中国西北和华北地区的重要水源,其水循环与全球变化紧密相关,并在中国经济社会发展和生态安全建设格局中具有重要的地位^[9]。但黄河水文情势复杂,洪水灾害严重,洪水风险依然是当前最大威胁^[10-12],特别是极端降水导致的骤发性

收稿日期: 2021-07-20; 修订日期: 2021-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971035); 中国科学院青年创新促进会会员人才专项(2019054); 中国科学院地理科学与资源研究所“秉维”优秀青年人才计划项目(2017RC204)。

作者简介: 吕锦心,女,浙江绍兴人,硕士生,研究方向为水文水资源。E-mail: lvjx.19s@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 梁康,男,重庆巴南人,博士,副研究员,主要从事流域水文过程演变机理与模拟研究。E-mail: liangk@igsnrr.ac.cn

洪水严重威胁了黄河沿岸人民的生命财产安全。近年来,黄河上游降水增多导致区间洪水突发性显著增强,其中上迳至兰州区间的暴雨型洪水经常与干流大洪水遭遇,对兰州市的防洪造成一定的压力^[13,14];中游小面积高强度降水极值事件增加,局部性暴雨形成的短历时洪水随机性变大,支流因遭遇极端暴雨事件发生历史大洪水,如2017年7月25—26日,大理河子洲、绥德等县出现暴雨洪水,受灾严重^[15-17];下游“二级悬河”发育严重,滩区“人水争地”,行洪期间威胁极大^[18]。因此,研究气候变化下黄河流域极端降水的时空变化特征及演变规律对区域洪涝灾害的风险评估、防治及应对等具有重要的意义。

现有相关研究主要存在几点不足。首先,有限的、低分辨率的数据是影响极端天气演变规律评估结果的重要因素,极端事件的分析通常需要使用日尺度或更小尺度的高分辨率数据。当前国内外极端降水的分析主要基于日尺度^[19-22],而对于黄河中下游地区暴雨历时短、强度大的这类降水,日尺度数据难以捕捉到有效的降水信号;而且,以往研究也主要基于站点数据^[23-25],难以精细刻画极端降水的空间分布规律。其次,极端降水事件的变化趋势存在很强的区域和次区域性,黄河上、中、下游地区的降水持续时间、强度、成因等特性存在差异^[26],分区域对比分析极端降水的空间分异性尤为必要。此外,现有研究很少对未来黄河流域的极端降水特征进行预估和分析,这主要是受限于未来降水数据的缺乏,但近年来,地球系统模式的快速发展极大地推动了此类研究工作的开展,也为支撑黄河流域生态保护和高质量发展的国家战略提供了新的科学视角。

基于此,为了更好地分析和预估黄河流域极端降水的变化情况,本文在空间上基于全国二级水资源分区将黄河流域划分为8个水资源二级分区,选取了3个小时尺度、2个日尺度以及1个阈值极端降水指标,对黄河流域及其8个水资源分区历史期(1979—2018年)和未来期(2021—2100年)的极端降水时空变化特性进行了分析,以期为黄河流域未来极端降水与洪涝灾害风险分析及应对等提供参考。

2 研究区、数据与方法

2.1 研究区概况

黄河干流全长5464 km,是中国的第二长河,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等9个省(自治区),最后汇入渤海。黄河流域的地势西高东低,海拔在103~6375 m,总面积达79.5万km²(含鄂尔多斯内流区面积4.2万km²)。根据水利部划分的全国水资源分区(<http://ghjh.mwr.gov.cn/>),黄河流域可分为龙羊峡以上(Ⅰ)、龙羊峡至兰州(Ⅱ)、兰州至河口镇(Ⅲ)、河口镇至龙门(Ⅳ)、龙门至三门峡(Ⅴ)、三门峡至花园口(Ⅵ)、花园口以下(Ⅶ)及内流区(Ⅷ)等8个二级水资源区(图1)。

2.2 数据来源

历史降水数据采用国家青藏高原科学数据中心^[27](<http://data.tpdac.ac.cn/zh-hans>)发布的“中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018)”,该数据集以Princeton再分析资料、GLDAS资料、GEWEX-SRB辐射资料、TRMM降水资料为背景场,融合中国气象局常规气象观测数据制作而成,精度介于气象局观测数据和卫星遥感数据之间。数据集时长为40年,时间分辨率为3小时,空间分辨率为0.1°,满足本文对黄河流域小时尺度极端降水分析的要求。

未来降水数据选用跨部门影响模型相互比较项目(Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISIMIP)输出的降水数据^[28],ISIMIP对耦合模式比较计划6阶段(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6)中5个地球系统模式的输出进行了偏差矫正和降尺度,5个地球系统模式分别为GFDL-ESM4、UKESM1-0-LL、MPI-ESM1-2-HR、IP-SL-CM6A-LR、MRI-ESM2-0。未来情景选用SSP1-RCP2.6(SSP126)、SSP3-RCP7(SSP370)、SSP5-RCP8.5(SSP585),分别代表低(2100年辐射强迫稳定在约2.6 W/m²)、中高(2100年辐射强迫稳定在约7.0 W/m²)、极高(2100年辐射强迫高至8.5 W/m²)强迫情景^[29],选取的数据序列为2021—2100共80年,时间分辨率为1日,空间分辨率为0.5°。

2022年2月

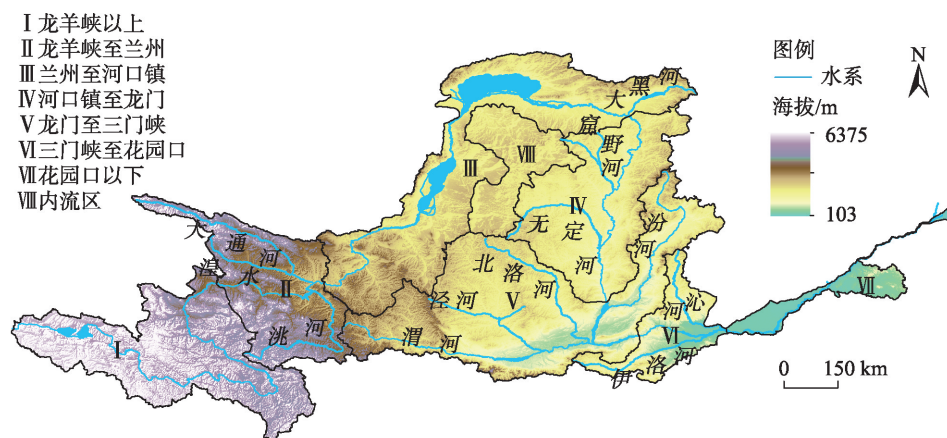


图1 黄河流域水资源分区及地形

Figure 1 Water resources subregions and DEM of the Yellow River Basin

2.3 研究方法

2.3.1 极端降水指标

根据世界气象组织(WMO)推荐使用的由气候变化监测和指数专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)定义的极端气候指标^[30],本文选用3个小时尺度、2个日尺度以及1个阈值极端降水指标等6个极端降水指标(表1),表征黄河流域历史及未来的极端降水情况。

2.3.2 Sen's 斜率估计法

Sen's 斜率估计法^[31]是一种非参数检验长时序趋势检测方法,广泛用于估计 n 个样本中 N 对数据的趋势斜率。对于数据序列 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$,以 Sen 表示 Sen's 斜率,则计算公式为:

$$Sen = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall j > i \quad (1)$$

式中: x_i, x_j 表示时间序列中第 i, j 时间序列对应的观测值; Median 表示取中值函数。

2.3.3 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验常用于分析水文气象变量的时间变化趋势及其显著性。对长度为 n 的数据序列 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$, 符号函数 $\text{sgn}(\cdot)$ 、秩序列 S 计算公式如下^[32]:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), i < j \quad (3)$$

当 $n \geq 8$ 时,秩序列 S 大致服从正态分布,其均值为 $E(S)=0$, 方差 $\text{Var}(S)$ 、检验统计量 Z 计算如下:

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

通过统计量 Z 来表征水文气象序列中趋势性大小, $|Z|$ 值越大,则趋势越明显; $Z > 0$, 说明有增大趋势, $Z < 0$, 说明有减小趋势。当给定显著性水平 α 后,若 $|Z|$ 大于临界值,则序列的趋势显著,本文统一选用 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,所对应 Z 的区间为 ± 1.96 。

3 结果与分析

3.1 历史极端降水时空变化特征

3.1.1 空间分布格局

如图2所示,1979—2018年,黄河流域所有极端

表1 极端降水指标及说明 (mm)

Table 1 Extreme precipitation indicators and description (mm)

指标	定义
$Rx3hour$	年最大3小时降水量
$Rx6hour$	年最大6小时降水量
$Rx12hour$	年最大12小时降水量
$Rx1day$	年最大1日降水量
$Rx5day$	年连续5日最大降水总量
$R95pTOT$	一年中超过多年湿日降水量(大于1 mm)中95百分位的降水总量

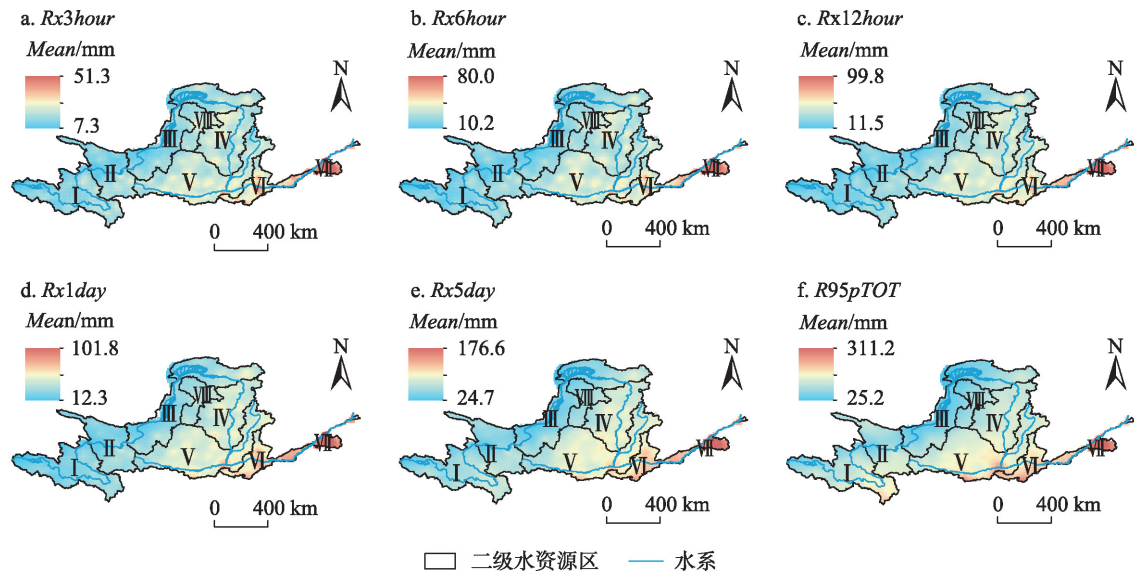


图2 1979—2018年黄河流域极端降水指标多年平均空间分布

Figure 2 Spatial distribution of the average values of extreme precipitation indicators in the Yellow River Basin, 1979-2018

降水指标的多年平均值 *Mean* 总体呈由西北到东南递增的趋势, *Rx3hour*、*Rx6hour*、*Rx12hour*、*Rx1day*、*Rx5day*、*R95pTOT* 分别在 7.3~51.5 mm、10.2~80.0 mm、11.5~99.8 mm、12.2~101.8 mm、24.7~176.6 mm、25.2~311.2 mm。其中,各极端指标的高值均位于花园口以下(Ⅶ)分区, *Rx3hour*、*Rx6hour*、*Rx12hour*、*Rx1day* 的低值主要位于兰州以上(Ⅰ、Ⅱ)分区, *Rx5day* 和 *R95pTOT* 的最低值主要位于兰州至河口镇(Ⅲ)分区,位于东部季风区的极端降水高值能达到西北极端降水低值的 7~12 倍左右;此外,河口镇至龙门(Ⅳ)、龙门至三门峡(Ⅴ)、三门峡至花园口(Ⅵ)分区内部存在多个短历时极端降水指标的局部高值中心,如河口镇至龙门(Ⅳ)中部黄河右岸地区 *Rx3hour*、*Rx6hour*、*Rx12hour*、*Rx1day* 这 4 个极端降水指标明显高于周围地区,这些局部高值

区与近年来发生过历史大洪水的窟野河流域、无定河流域、渭河下游地区等具有较好的空间对应关系^[33-35]。

从区域均值上看(表 2),比较各分区发现除内流区(Ⅷ)外,大部分极端降水指标值从龙羊峡以上(Ⅰ)分区到花园口以下(Ⅶ)分区依次增加,仅兰州至河口镇(Ⅲ)分区的 *Rx5day*、*R95pTOT* 低于龙羊峡至兰州(Ⅱ)分区,龙门至三门峡(Ⅴ)分区的 *Rx3hour*、*Rx6hour*、*Rx12hour*、*Rx1day* 低于河口镇至龙门(Ⅳ)分区除外。就内流区(Ⅷ)而言, *Rx3hour*、*Rx6hour*、*Rx12hour* 比紧邻的兰州至河口镇(Ⅲ)、河口镇至龙门(Ⅳ)、龙门至三门峡(Ⅴ)分区都大。6 个极端指标的黄河流域平均值,绝大部分低于各水资源分区的均值,说明大空间尺度的均值计算存在坦化极端降水指标量值的现象。

表 2 1979—2018 年黄河流域及水资源分区极端降水指标多年平均值 (mm)

Table 2 Average values of extreme precipitation indicators in the Yellow River Basin and water resources subregions, 1979-2018 (mm)

极端指标	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	黄河流域
<i>Rx3hour</i>	4.1	5.3	5.3	7.5	5.4	11.9	16.6	10.0	3.0
<i>Rx6hour</i>	6.8	8.6	8.6	12.6	10.0	19.5	27.5	15.6	5.3
<i>Rx12hour</i>	10.1	13.4	13.1	19.8	16.4	28.5	40.0	21.2	9.2
<i>Rx1day</i>	12.5	15.7	15.9	23.6	21.9	35.8	46.0	22.8	12.8
<i>Rx5day</i>	39.2	37.2	32.1	53.6	54.3	73.9	93.1	41.8	35.8
<i>R95pTOT</i>	68.7	69.1	44.2	85.2	94.9	131.6	165.7	58.8	64.5

2022年2月

3.1.2 时间变化特征

图3展示了1979—2018年区域极端降水指标的演变,黄河流域二级水资源区的极端降水指标值以增加为主,并且有多个指标上升趋势通过显著性检验($p < 0.05$,即 $Z > 1.96$)。尽管各分区指标变化趋势方向基本呈一致上升,但各分区之间指标变化的大小和显著性存在差异,可更为直观地体现出分区尺度指标变化的空间分异性。具体而言,龙羊峡以上(I)、龙羊峡至兰州(II)、河口镇至龙门(IV)、花园口以下(VII)等4个分区所有极端指标均呈上升趋势

势,其中,龙羊峡以上(I)分区 $Rx3hour$ 、 $Rx6hour$ 、 $Rx12hour$ 、 $Rx1day$ 等4个指标、龙羊峡至兰州分区(II) $Rx3hour$ 与 $Rx6hour$ 2个指标、河口镇至龙门(IV)分区 $Rx3hour$ 以及花园口以下(VII)分区 $Rx3hour$ 、 $Rx6hour$ 、 $Rx12hour$ 等3个指标上升趋势显著。其余4个水资源分区不同的极端降水指标变化方向性存在差异,兰州至河口镇(III)分区 $Rx3hour$ 、 $Rx6hour$ 呈微弱上升, $Rx12hour$ 、 $Rx1day$ 、 $Rx5day$ 、 $R95pTOT$ 呈微弱下降;龙门至三门峡(V)分区除 $5Rx5day$ 、 $R95pTOT$ 呈微弱下降趋势外,其余指标均

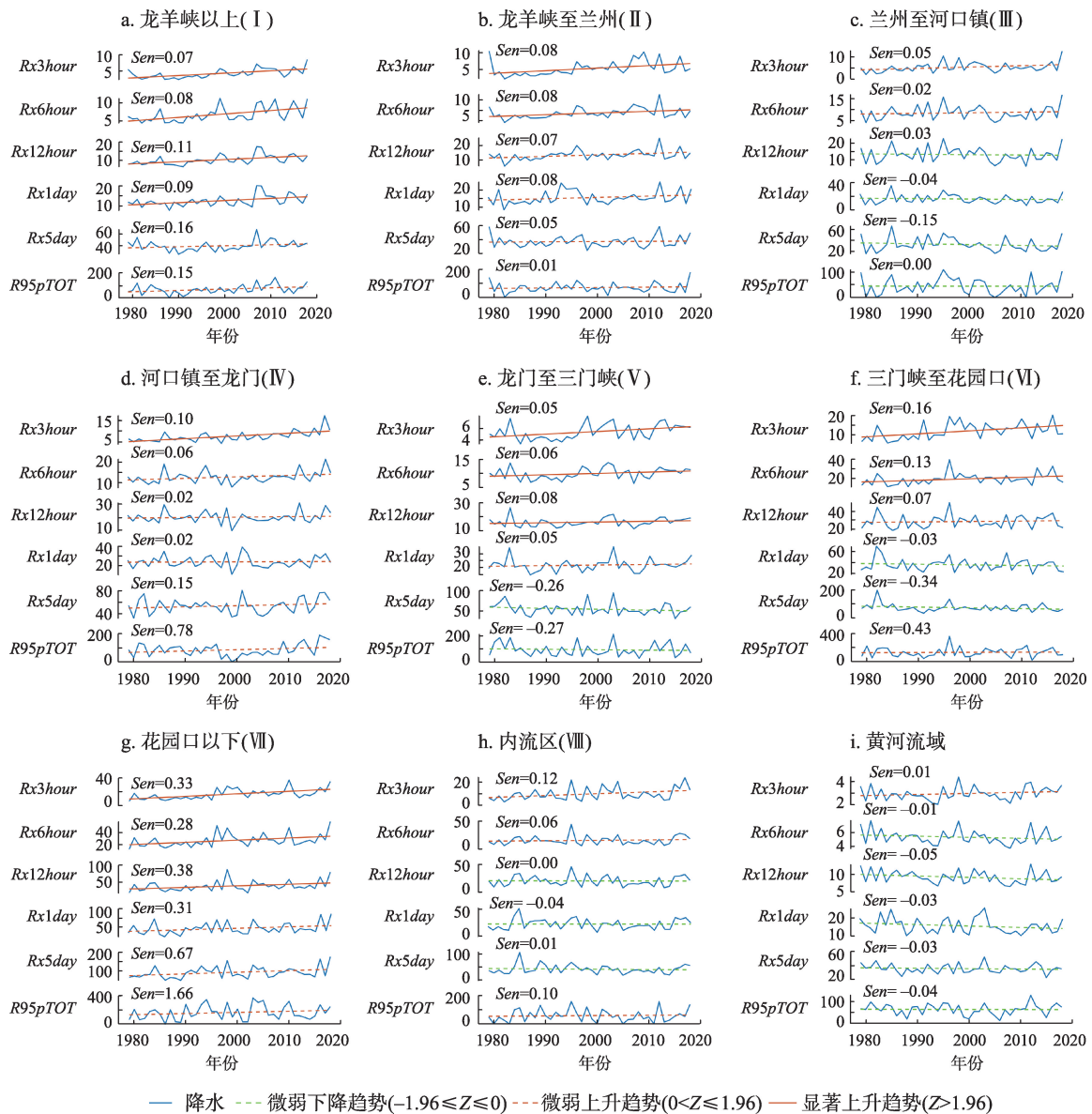


图3 1979—2018年黄河流域及水资源分区的极端降水指标变化 (mm)

Figure 3 Changes in extreme precipitation indicators in the Yellow River Basin and water resources subregions, 1979-2018 (mm)

呈现上升趋势,其中小时尺度的3个极端指标显著上升;三门峡至花园口(VI)分区 $Rx3hour$ 、 $Rx6hour$ 显著上升, $Rx1day$ 、 $Rx5day$ 等2个指标呈微弱下降趋势,其余指标微弱上升;内流区(VIII)的 $Rx3hour$ 、 $Rx6hour$ 、 $R95pTOT$ 微弱上升,其余指标微弱下降。然而,对流域平均而言,极端降水变化趋势不明显,除 $Rx3hour$ 显示微弱上升外,其余极端指标均呈下降趋势,变化趋势均不显著。

栅格尺度的结果如图4、5所示,1979—2018年,黄河流域大部分地区极端降水指标呈增加趋势,局

部下降的地区主要位于龙门至三门峡(V)分区干流沿岸地区;并且,随着极端降水指标时间尺度由小时尺度增长至日尺度,指标上升的趋势、显著性以及呈上升趋势的区域所覆盖空间范围在逐渐缩减。具体而言,全流域 $Rx3hour$ 的 Sen's 斜率在 $0.12\sim2.79$ mm/a,高值区主要分布在兰州以上2个分区(I、II),8个分区上升区域占比均达到100%,除零星栅格外,绝大部分区域上升趋势通过显著性检验($p<0.05$); $Rx6hour$ 的 Sen's 斜率在 $-0.25\sim2.06$ mm/a,每个分区均以上升趋势为主,上升区域占比

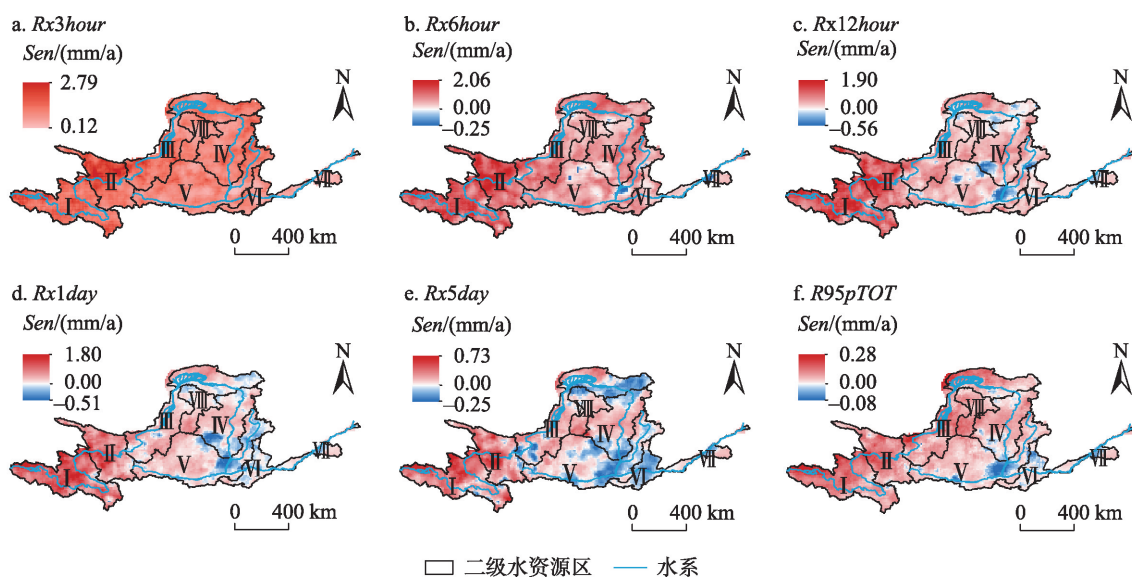


图4 1979—2018年黄河流域极端降水指标的Sen's斜率的空间分布

Figure 4 Spatial distribution of Sen's slope of extreme precipitation indicators in the Yellow River Basin, 1979-2018

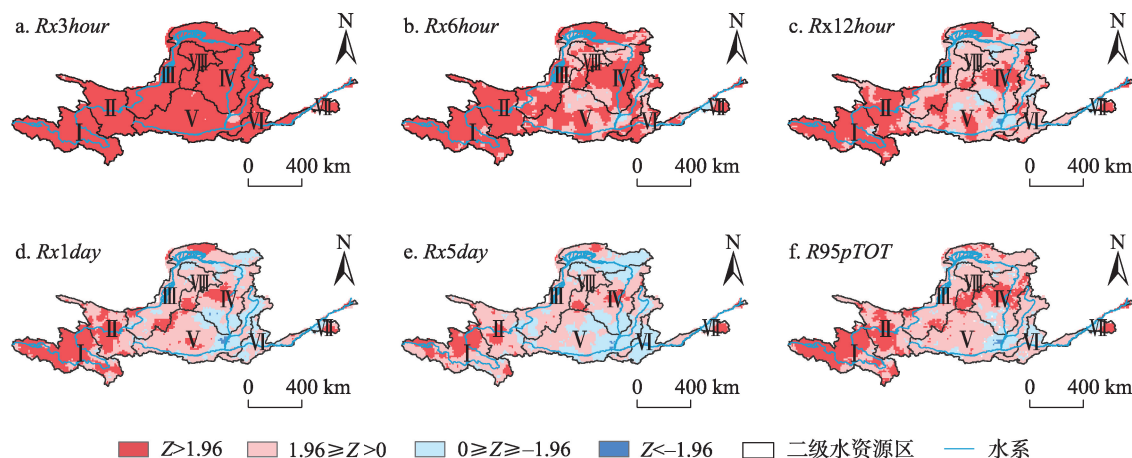


图5 1979—2018年黄河流域极端降水指标的Mann-Kendall趋势检验结果空间分布

Figure 5 Spatial distribution of Mann-Kendall trend test results of extreme precipitation indicators in the Yellow River Basin, 1979-2018

2022年2月

达到86.1%~100.0%,尤其兰州以上2个分区(I、II)上升幅度最大; $Rx12hour$ 的Sen's斜率在 $-0.56\sim 1.90\text{ mm/a}$,整个流域主要呈上升趋势,但相较于 $Rx3hour$ 和 $Rx6hour$,呈上升趋势的地区明显开始缩减,占比为82.9%~99.8%; $Rx1day$ 的Sen's斜率在 $-0.51\sim 1.80\text{ mm/a}$,各分区仍以上升为主,但上升的地区继续缩减,占比为52.8%~97.3%; $Rx5day$ 的Sen's斜率在 $-0.25\sim 0.73\text{ mm/a}$,除三门峡至花园口(VI)分区外,其他分区仍以上升为主,但趋势呈上升的地区已进一步缩减,占比为21.5%~99%; $R95pTOT$ 的Sen's斜率在 $-0.08\sim 0.28\text{ mm/a}$,全流域以上升趋势为主,各分区上升的地区占比达67.8%~99.3%。

综上所述,不同空间尺度黄河流域极端降水的变化趋势及其显著性存在较大空间异质性。在栅格尺度上,黄河流域大范围区域的多个极端降水指标显著上升;在水资源分区尺度,黄河流域二级水资源区的极端降水指标值的变化趋势仍以上升为主;而在全流域平均尺度,黄河流域的极端降水变化趋势则不明显。这说明由于流域下垫面和极端降水的空间异质性等因素,空间尺度的增大会坦化

或弱化极端降水的信号,甚至改变极端降水的变化特征。此外,通过相同空间尺度下的不同时间尺度指标的对比还发现,随着极端指标时间尺度由日缩短至小时尺度,极端指标变化的趋势和显著性是增强的,指标上升趋势所覆盖空间范围是增加的。因此,开展高时空分辨率尺度下的分区分析才能更加准确捕捉到极端降水的精细化变化过程及其区域分异性,这对于全球变化背景下的黄河流域极端气候事件的分析研判、流域分区防洪减灾对策的制定才能更有针对性和参考价值;同时,开展多时空尺度的黄河流域的极端降水变化特征综合分析还能够增强结果的科学性与可靠性。

3.2 未来极端降水时空变化特征

3.2.1 空间分布格局

根据ISIMIP输出的日尺度降水数据,综合多模式结果得到2021—2100年黄河流域3个极端降水指标的多年平均值空间分布(图6),在低、中高、极高3种辐射强迫情景下,各极端降水指标多年平均值的空间分布相似,总体呈西北到东南递增趋势,但随着辐射强迫的增强,各分区内部出现更多的局部高值,极端降水的空间分异性变大。具体而言,

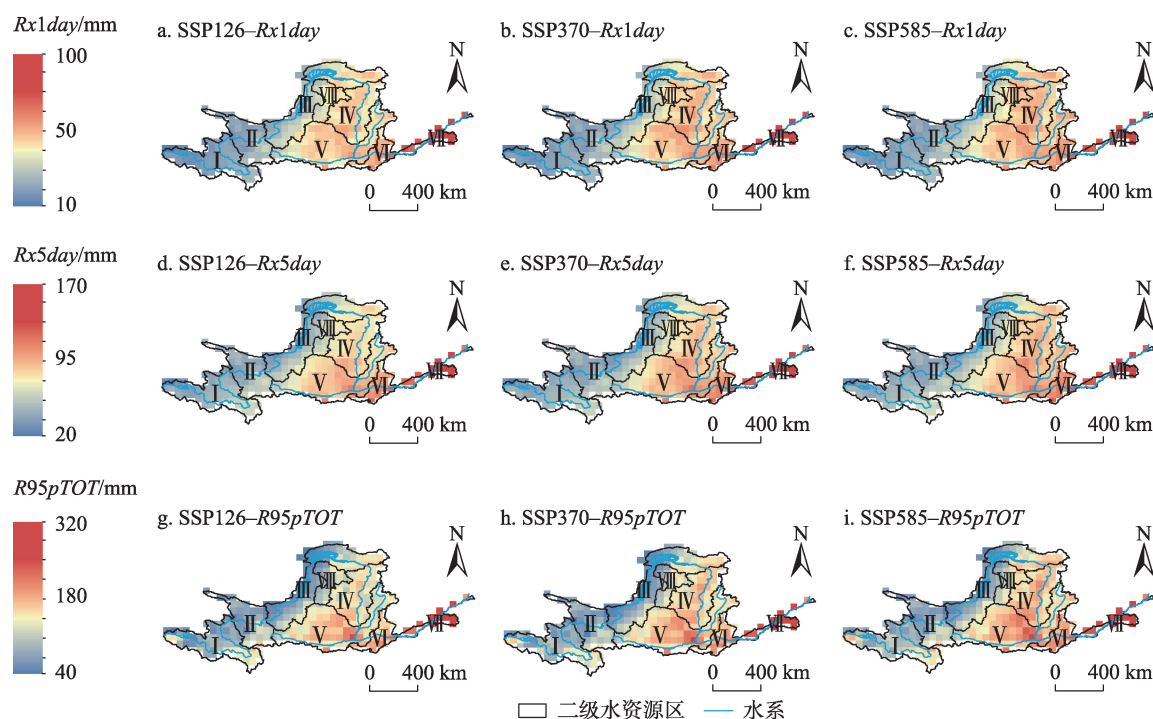


图6 不同情景下2021—2100年黄河流域极端降水指标多年平均空间分布

Figure 6 Spatial distribution of average values of extreme precipitation indicators in the Yellow River Basin under different scenarios, 2021-2100

在 SSP126、SSP370、SSP585 情景下,黄河流域 $Rx1day$ 分别在 11.8~89.1、12.8~93.4 和 13.2~90.8 mm, $Rx5day$ 分别在 27.3~163.8、29.0~170.6 和 30.2~168.0 mm, $R95pTOT$ 分别在 43.3~313.2、48.8~328.6 和 52.2~317.3 mm。其中,各情景下 $Rx1day$ 、 $Rx5day$ 、 $R95pTOT$ 的高值均位于花园口以下(Ⅶ)分区,低值主要位于河口镇以上3个分区(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ);此外,尤其在 SSP585 情景下,河口镇至龙门(Ⅳ)、龙门至三门峡(Ⅴ)分区内部还出现了相对高值区。

从区域均值上看(图7、8、9),比较各分区发现,在 SSP126、SSP370、SSP585 情景下,除内流区(Ⅷ)外,大部分极端降水指标值从龙羊峡以上(Ⅰ)分区到花园口以下(Ⅶ)分区依次增加。花园口以下(Ⅶ)分区的各项极端指标的均值在所有情景下均为最高; $Rx1day$ 的最低值在所有情景下均位于龙羊峡以上(Ⅰ)分区;SSP126、SSP370 情景下 $Rx5day$ 的最低值区也在龙羊峡以上(Ⅰ)分区,SSP585 情景下

$Rx5day$ 的最低值区是龙羊峡至兰州(Ⅱ)分区;兰州至河口镇(Ⅲ)分区 $R95pTOT$ 的多年平均值在所有情景下均为最低;内流区(Ⅷ)各极端指标的多年平均值介于兰州至河口镇(Ⅲ)与河口镇至龙门(Ⅳ)分区之间。此外,通过对比同一极端降水指标在不同情景下的数值发现,黄河流域极端降水指标量值对高辐射强迫是很敏感的,除花园口以下(Ⅶ)分区的3个指标和龙门至三门峡(Ⅴ)分区的 $Rx5day$ 在 SSP370 情景下最大外,其余水资源分区及黄河流域平均的极端降水指标均在 SSP585 情景下最大。

3.2.2 时间变化特征

如图7、8、9所示,在3种不同辐射强迫情景下,2021—2100年黄河流域及水资源分区的各极端降水指标主要呈上升趋势,且随辐射强迫的增加,极端降水显著上升的地区也随之增加。河口镇以上3个分区(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)以及龙门至三门峡(Ⅴ)分区的极端降水指标以显著增加为主,其余水资源分区的

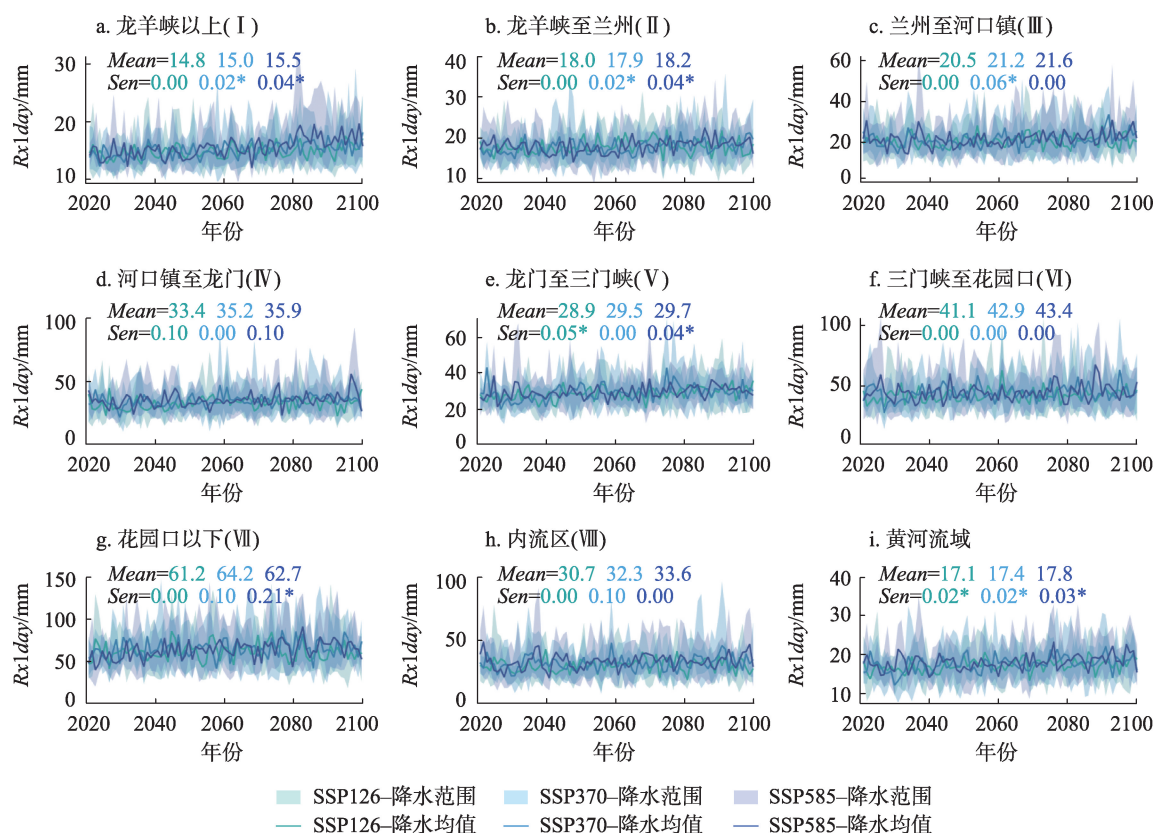
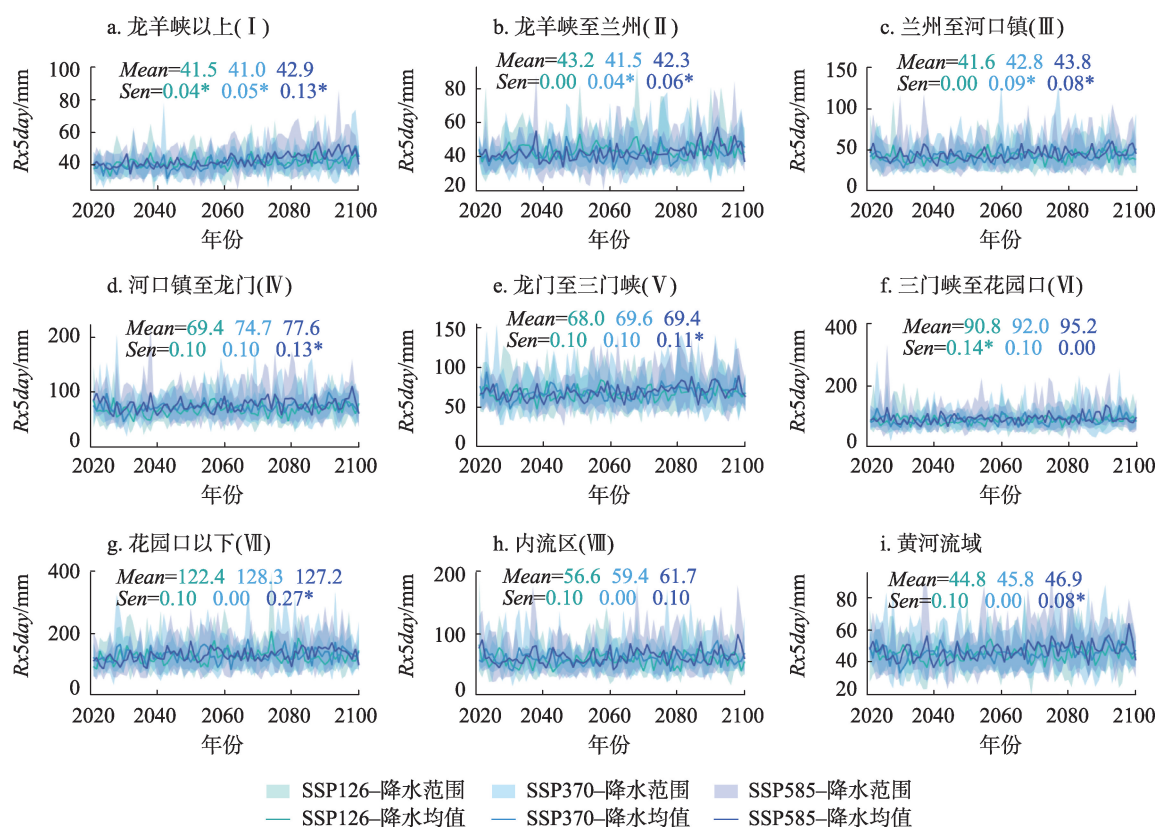


图7 未来情景下黄河流域及水资源分区2021—2100年多模式预测下的 $Rx1day$

Figure 7 Predicted $Rx1day$ under future scenarios in the Yellow River Basin and its water resources subregions, 2021-2100

注:*表示Sen通过0.05水平上的显著性检验,下同。

2022年2月

图8 未来情景下黄河流域及水资源分区2021—2100年多模式预测下的 $Rx5day$ Figure 8 Predicted $Rx5day$ under future scenarios in the Yellow River Basin and its water resources subregions, 2021-2100

极端降水指标以变化不明显为主。龙羊峡以上(I)分区只有 $Rx1day$ 在 SSP126 情景下的上升趋势未通过显著性检验($p < 0.05$), 其他极端降水指标在各未来情景下都显著增加, 尤其在 2080 年后上升幅度较大; 龙羊峡至兰州(II)分区的 3 个极端降水指标在 SSP370 和 SSP585 情景下均呈显著增加趋势; 兰州至河口镇(III)分区 3 个极端降水指标在 SSP126 情景下和 $Rx1day$ 在 SSP585 情景下的上升趋势不显著外, 其他极端降水指标在各未来情景下都显著增加; 在河口镇至龙门(IV)分区, SSP126 情景下的 $R95pTOT$ 、SSP585 情景下的 $Rx5day$ 和 $R95pTOT$ 上升明显, 其他情景下极端降水指标的变化趋势都未通过显著性检验; 龙门至三门峡(V)分区除 SSP126 情景下的 $Rx5day$ 、SSP370 情景下的 $Rx1day$ 和 $Rx5day$ 变化微弱外, 其余极端降水指标都显著上升; 三门峡至花园口(VI)分区极端降水指标的上升趋势都较小, 只有 SSP126 情景下 $Rx5day$ 的上升趋势通过显著性检验; 花园口以下(VII)分区的

极端降水指标在 SSP126 和 SSP370 情景下变化都不明显, 在 SSP585 情景下均显著增加, 说明辐射强迫对该区域的极端降水影响较大; 内流区(VIII)仅有 $R95pTOT$ 在 SSP370 和 SSP585 情景下显著上升; 黄河流域整体的 $Rx1day$ 在 3 种情景下均显著增加, $Rx5day$ 仅在 SSP585 情景下显著上升, $R95pTOT$ 在在 SSP370、SSP585 情景下显著上升。

综上所述, 3 种辐射强迫情景下, 黄河流域整体与水资源分区极端降水的严峻化情势将加剧未来黄河流域整体及其分区的防洪形势, 尤其是河口镇以上 3 个分区(I、II、III)、龙门至三门峡(V)分区的极端降水在未来增强的幅度最为明显。黄河上游洪水一般历时较长, 是组成黄河洪水的基流^[36], 本文未来情景预估显示, 黄河上游的短历时极端降水存在显著增加趋势, 相关部门在作好上游区连续降水导致的长历时洪水防御外, 也需加强对短历时暴雨洪水的监测预警工作; 龙门至三门峡区间历来是黄河中下游洪水的三大来源区之一, 在未来该地区

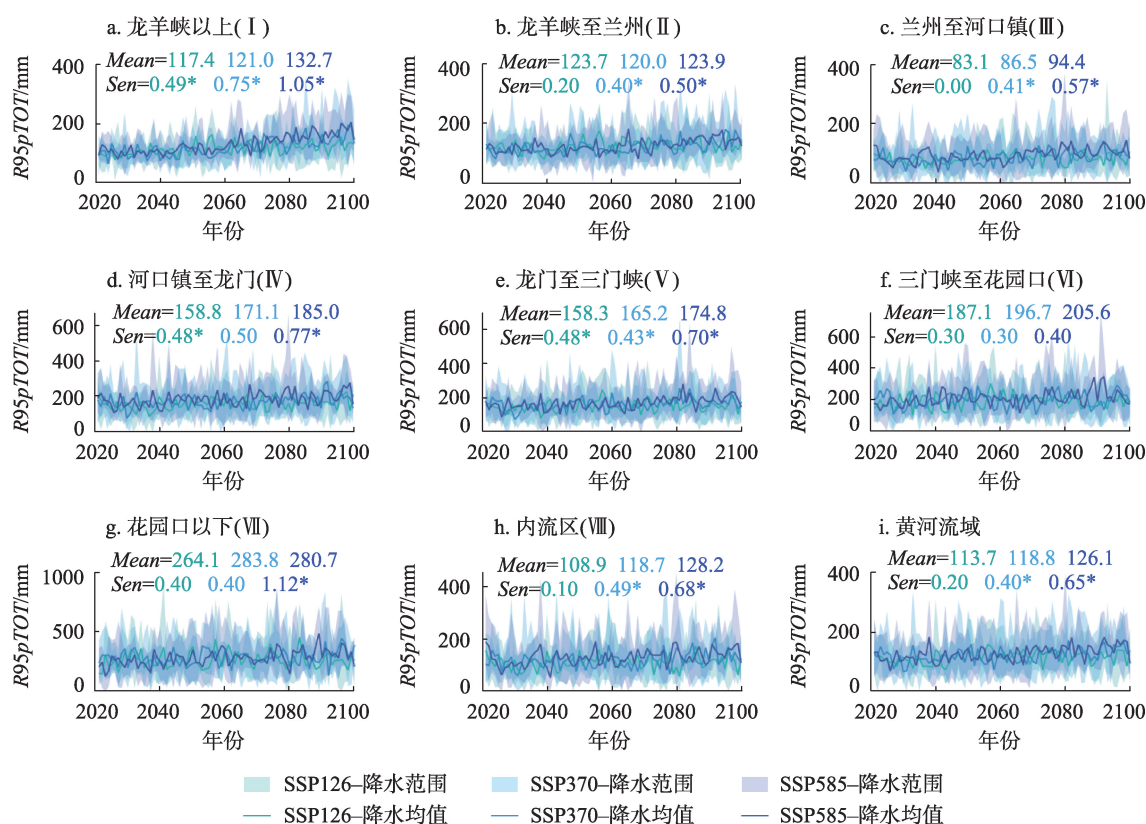


图9 未来情景下黄河流域及水资源分区2021—2100年多模式预测下的 $R95pTOT$

Figure 9 Predicted $R95pTOT$ under future scenarios in the Yellow River Basin and its water resources subregions, 2021-2100

极端降水情势严峻的情况下,尤其要强化对极端降水灾害的预防和应对;此外,通过对比不同辐射强迫情景发现,在全球及区域气候变化大背景下,黄河流域各极端降水指标量值、变化趋势和空间分布格局等变化特征对于辐射强迫都是很敏感的,辐射强迫越高,极端降水指标的量值越大、变化越剧烈、空间分异性越大,区域防洪减灾面临的压力将更大,这也可说明全球及区域温室气体减排对于减缓流域极端气候灾害及洪水灾害的重要性。

4 结论

本文综合分析了黄河流域及其二级水资源分区的6个极端降水指标在历史期(1979—2018年)和未来期(2021—2100年)的时空变化特征,主要结论如下:

(1)从空间上看,在历史期和未来不同情景下,黄河流域极端降水指标的多年平均值总体呈由西北至东南逐渐增加的空间变化特征。此外,在历史期, $Rx3hour$ 、 $Rx6hour$ 、 $Rx12hour$ 、 $Rx1day$ 在河口镇

至龙门(IV)、龙门至三门峡(V)、三门峡至花园口(VI)水资源分区出现了多个高值中心,这些极端降水的局部高值区是短历时暴雨洪水的易发多发区和防洪减灾的重点区;在未来期, $Rx1day$ 、 $Rx5day$ 、 $R95pTOT$ 在河口镇至龙门(IV)、龙门至三门峡(V)分区内部也出现了高值区域,未来发生极端降水灾害的可能性较大。

(2)从时间上看,在历史期,多数水资源分区的极端降水指标主要呈上升趋势,并且极端降水指标的时间尺度越短,指标的上升趋势和显著性越强,所呈现上升趋势的区域覆盖空间范围越大。作为黄河干流洪水主要来源区的兰州以上(I和II)、河口镇至龙门(IV)、花园口以下(VII)等4个分区所有极端指标均呈上升趋势,其中河口镇至龙门(IV)分区的极端降水强度本就高于周围分区,导致该区内极端降水灾害尤为频发。另外, $Rx3hour$ 在所有水资源分区均呈增加趋势,加强全流域的短历时暴雨的监测预报十分重要。

2022年2月

(3)从时间上看,在未来期,不同辐射强迫情景下,各水资源分区的所有极端降水指标均呈上升趋势,并且上升幅度和空间覆盖范围随辐射强迫的增大而增大。其中河口镇以上3个分区(Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ)和龙门至三门峡(V)分区的极端降水增强的幅度最为明显,作为黄河洪水的主要来源区,未来这4个水资源分区的极端降水灾害的防治工作需要格外重视。此外,黄河流域的极端降水对于共享社会经济和辐射强迫情景是很敏感的,所以当未来面临更高的气候变化挑战时,黄河流域整体及其分区防洪形势将进一步加剧。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Madakumbura G D, Thackeray C W, Norris J, et al. Anthropogenic influence on extreme precipitation over global land areas seen in multiple observational datasets[J]. Nature Communications, 2021, DOI: 10.1038/s41467-021-24262-x.
- [3] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展. 2021, 17(6): 629-635. [Zhai P M, Zhou B Q, Chen Y, et al. Several new understandings in the climate change science[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 629-635.]
- [4] Formayer H, Fritz A. Temperature dependency of hourly precipitation intensities—surface versus cloud layer temperature[J]. International Journal of Climatology, 2017, DOI: 10.1002/joc.4678.
- [5] 周天军,任俐文,张文霞. 2020年梅雨期极端降水的归因探讨和未来风险预估研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(10): 1637-1649. [Zhou T J, Ren L W, Zhang W X. Discussion on the attribution of extreme precipitation during the Meiyu period in 2020 and research on future risk prediction[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(10): 1637-1649.]
- [6] 陈晓龙,王平. 1979-2017年北极陆地气候变化趋势[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1260-1274. [Chen X L, Wang P. Climate changes over the Arctic land during 1979-2017[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1260-1274.]
- [7] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 161-173. [Song X M, Zhang J Y, Kong F Z, et al. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation extremes in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 161-173.]
- [8] Yin J B, Gentile P, Sha Z, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes[J]. Nature Communications, 2018, DOI: 10.1038/s41467-018-06765-2.
- [9] 刘昌明,田巍,刘小莽,等. 黄河近百年径流量变化分析与认识[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 11-15. [Liu C M, Tian W, Liu X M, et al. Analysis and understanding on runoff variation of the Yellow River in recent 100 years[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 11-15.]
- [10] Bai P, Liu X M, Liang K, et al. Investigation of changes in the annual maximum flood in the Yellow River Basin, China[J]. Quaternary International, 2016, 392: 168-177.
- [11] 王浩,何凡,何国华,等. 黄河流域水治理准则、路径与方略[J]. 水利发展研究, 2020, 20(10): 5-9. [Wang H, He F, He G H, et al. Water governance guidelines, paths and strategies of the Yellow River Basin[J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(10): 5-9.]
- [12] 牛玉国,张金鹏. 对黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的几点思考[J]. 人民黄河, 2020, 42(11): 1-4. [Niu Y G, Zhang J P. Thoughts on the national strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Yellow River, 2020, 42(11): 1-4.]
- [13] 宋伟华,刘红珍,崔鹏,等. 黄河上游近年中小洪水特点及水库调度分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 34-39. [Song W H, Liu H Z, Cui P, et al. Analysis of the characteristics of medium and small floods and reservoir operation in the upper reaches of the Yellow River in recent years[J]. Yellow River, 2020, 42(5): 34-39.]
- [14] 徐晓英,贺顺德. 基于中常洪水防洪调度的黄河上游洪水特性研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2019, 55(4): 4-7. [Xu X Y, He S D. Research on the flood characteristics of the upper reaches of the Yellow River based on the flood control and dispatch of medium floods[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2019, 55(4): 4-7.]
- [15] 雷鸣,高治定,宋伟华. 黄河中游河龙区间区域性暴雨特性分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 17-20. [Lei M, Gao Z D, Song W H. Regional rainstorm characteristics analysis on the He-Long Reach of the middle reaches of the Yellow River[J]. Yellow River, 2012, 34(8): 17-20.]
- [16] 张楷,王君善,纪登前. 陕北大理河“2017·7”暴雨洪水成因分析[J]. 陕西水利, 2021, (4): 51-53. [Zhang K, Wang J S, Ji D Q. Analysis on the cause of the “2017·7” storm flood in the Dali River in northern Shaanxi[J]. Shaanxi Water Resources, 2021, 4: 51-53.]
- [17] 王婧,那巍. 黄河河龙区间洪水泥沙关系分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S1): 107-110. [Wang J, Na W. Relationship between the flood cement and cement sand in the the Yellow River Helong Reach based on the typical sediment content[J]. Journal of Irriga-

- tion and Drainage, 2019, 38(S1): 107–110.]
- [18] 张金良. 黄河流域生态保护和高质量发展水战略思考[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 1–6. [Zhang J L. Water strategy for ecological protection and high quality development in the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2020, 42(4): 1–6.]
- [19] Sun Q H, Zhang X B, Zwiers F, et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation[J]. Journal of Climate, 2021, 34(1): 243–258.
- [20] Liang K, Liu S, Bai P, et al. The Yellow River Basin becomes wetter or drier? The case as indicated by mean precipitation and extremes during 1961–2012[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 119(3): 701–722.
- [21] 王怀军, 潘莹萍, 陈忠升. 1960–2014年淮河流域极端气温和降水时空变化特征[J]. 地理科学, 2017, 37(12): 1900–1908. [Wang H J, Pan Y P, Chen Z S. Spatial and temporal patterns of temperature and precipitation extremes in the Huaihe River Basin, China in 1960–2014[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(12): 1900–1908.]
- [22] Donat M G, Lowry A L, Alexander L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J]. Nature Climate Change, 2017, 6(5): 508–513.
- [23] Sun Q H, Zhang X B, Zwiers F, et al. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation[J]. Journal of Climate, 2021, 34(1): 243–258.
- [24] 慎璐璐, 杨艳芬, 吴晶, 等. 黄河流域极端气候事件时空变化规律[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 231–242. [Shen L L, Yang Y F, Wu J, et al. Spatial and temporal variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 231–242.]
- [25] 李双双, 汪成博, 延军平, 等. 面向事件过程的秦岭南北极端降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 989–1007. [Li S S, Wang C B, Yan J P, et al. Variability of the event-based extreme precipitation in the south and north Qinling Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 989–1007.]
- [26] 高治定, 李文家, 李海荣. 黄河流域暴雨洪水与环境变化影响研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. [Gao Z D, Li W J, Li H R. Research on the Impact of Storm Floods and Environmental Changes in the Yellow River Basin[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2002.]
- [27] He J, Yang K, Tang W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1–11.
- [28] Frieler K, Lange S, Piontek F, et al. Assessing the impacts of 1.5 °C global warming—simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b)[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(12): 4321–4345.
- [29] O'Neill B C, Tebaldi C, Vuuren D P, et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6[J]. Geoscientific Model Development, 2016, 9(9): 3461–3482.
- [30] Peterson T, Folland C, Gruza G, et al. Report on the activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2001.
- [31] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379–1389.
- [32] 陈婷, 夏军, 邹磊, 等. 白洋淀流域NDVI时空演变及其对气候变化的响应[J]. 资源科学, 2021, 43(6): 1248–1259. [Chen T, Xia J, Zou L, et al. Spatiotemporal variations of NDVI of different vegetation types in the Baiyangdian Basin under the background of climate change[J]. Resources Science, 2021, 43(6): 1248–1259.]
- [33] 由宇军, 富康平, 宋淑红. 合成流量法在窟野河神木水文站洪水预报中的应用[J]. 陕西水利, 2019, (4): 93–96. [You Y J, Fu K P, Song S H. Application of synthetic flow method in flood forecasting at Shenmu Hydrological Station of Kuye River[J]. Shaanxi Water Resources, 2019, (4): 93–96.]
- [34] 井宇, 陈闯, 胡启元. 2017年7月下旬无定河流域一次罕见洪灾研究[J]. 陕西气象, 2019, (2): 8–13. [Jing Y, Chen C, Hu Q Y. Case study of a rare flood disaster in late July 2017 in Wuding River Basin[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2019, (2): 8–13.]
- [35] 张凤华, 崔秋利, 陈利军. 渭河下游南岸防洪保护区洪水风险分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 65–69. [Zhang F H, Cui Q L, Chen L J. Analysis of flood risk of the flood-protected area of lower Weihe River[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 65–69.]
- [36] 黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 史辅成, 易元俊, 高治定. 黄河流域暴雨与洪水[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. [Yellow River Water Conservancy Commission Survey, Planning and Design Institute, Shi F C, Yi Y J, Gao Z D. Rainstorms and Floods in the Yellow River Basin[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1997.]

Spatiotemporal variations of extreme precipitation in the Yellow River Basin based on water resources regionalization

LV Jinxin^{1,2}, LIU Changming¹, LIANG Kang¹, TIAN Wei^{1,2}, BAI Peng¹, ZHANG Yihui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Investigating the change characteristics of extreme precipitation in the Yellow River Basin (YRB) is essential for understanding the hydrologic regime and reducing flood losses. In this study, based on the national secondary water resources regionalization, the spatiotemporal variations of the six extreme precipitation indicators of the YRB and its eight subregions were analyzed for the historical period (1979-2018) and the future period (2021-2100) using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. The precipitation data for the two periods were obtained from the China Meteorological Forcing Dataset and the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, respectively. The results show that: (1) Values of the six extreme precipitation indicators increase from northwest to southeast in the YRB during the two periods from a spatial perspective. The areas with high indicator values appear in the Hekou-Longmen subregion and the Longmen-Sanmenxia subregion, which correspond to sites with frequent floods. (2) From a temporal perspective, the hourly-scale indicator values increase in all subregions, and values of the rest five indicators increase in most subregions during the historical period. As significant flood source areas, the four subregions (above Longyangxia, Longyangxia-Lanzhou, Hekou-Longmen, and below Huayuankou) all experience an increase in values of the six indicators. (3) Values of the six indicators of all subregions increase in the three future emission scenarios, with larger increments in higher greenhouse gas emission scenarios. The increasing trends of all the indicators would prevent effective flood prevention. The three subregions above Hekou and the Longmen-Sanmenxia subregion with significant growing trends are critical areas for future flood prevention. The results could provide a valuable reference for future risk assessment of extreme precipitation, regional flood risk analysis and prevention, and water resources management in the YRB.

Key words: extreme precipitation; water resources regionalization; spatial differentiation; Earth System Model; ISIMIP; Yellow River Basin