

黄河流域极端降水的时空演变特征

赵晓雪¹,张慧慧¹,杨丽祯¹,赵静²,谢恒星³,曹琳⁴,姚付启¹

(1.鲁东大学 水利土木学院,山东 烟台 264039;2.长江水利委员会长江科学院,武汉 430012;
3.渭南师范学院 环境与生命科学学院,陕西 渭南 714099;4.昭通市水利水电勘测设计研究所,云南 昭通 657000)

摘要:研究黄河流域极端降水时空演变规律,为农业生产及防洪减灾提供参考依据。基于黄河流域 1979—2020 年多源加权集合降水数据集,运用线性回归法、Mann-Kendall 检验法、Pearson 相关系数法和 Theil-Sen 斜率估计法对最大日降水量(RX1day)、最大 5 日降水量(RX5day)、强降水量(R95p)、极端强降水量(R99p)、总降水量(PRCPTOT)、降水强度(SDII)、中雨日数(R10)、大雨日数(R20)和暴雨日数(R25)等 9 个极端降水指数的时空演变特征进行分析,得到如下研究结果。在时间尺度上,整个黄河流域的 RX1day、R99p、SDII、R20 呈下降趋势,RX5day、R95p、PRCPTOT、R10、R25 呈上升趋势;从黄河上游地区来看,除 RX1day 呈下降趋势外,其余 8 个极端降水指数均呈上升趋势;从黄河中游地区来看,9 个极端降水指数均呈下降趋势;从黄河下游地区来看,RX1day 和 RX5day 呈上升趋势,其余极端降水指数呈下降趋势。在空间分布上,9 个极端降水指数整体呈现由东南向西北逐渐下降的空间分布格局。从极端降水指数的影响因素来看,黄河流域极端降水指数相互之间呈现极显著的正相关关系,极端降水指数与大气环流因子存在一定的相关性。

关键词:极端降水;MSWEP;时空演变;黄河流域

中图分类号:P332.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2025)01-0039-12

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次报告^[1]指出,由于人类活动造成冰川、海洋、大气和陆地等多圈层变化,从而引发极端气候事件发生,尤其是极端降水出现的频率和强度不断增加,导致严重的山洪、滑坡和城市内涝,造成受灾人口数量增长和经济财产损失巨大^[2-3]。因此,研究极端降水时空演变规律对区域农业生产和防灾减灾策略制定具有重要意义。

为了更好地表征极端降水的特征,气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)定义了一套具有普遍适用性的指数体系,其中包含了 11 个具有代表性的极端降水指数^[4]。研究者们选用 ETCCDI 推荐的极端降水指数开展了大量研究,Giorgi 等^[5]和 Martinez 等^[6]研究发现全球多个国家和地区均观测到了极端降水事件的增加,认为 21 世纪极端降水事件的增长趋势是“前所未有的”;Mathbout 等^[7]基于 1961—2012 年地面气象站点观测数据对地中海地区的极端降水进行了研究,发现该地

区的极端降水表现出显著减少趋势,其南部地区的降水总量也显著减少;慎璐璐等^[8]基于气象站点观测数据分析了黄河流域极端降水事件的时空演变,发现 R95p、R99p、R10、R25、RX1day 及 RX5day 均呈上升趋势。

极端降水受地形、地势和海拔等因素的影响,仅仅依靠地理空间分布不均匀的气象站点数据对其进行时空特征分析存在一定局限性,研究结果可能无法准确反映所研究地域的真实情况。随着卫星技术的不断发展,陆续产生了一些具有时空分辨率高、数据覆盖范围广的网格数据,如热带降雨测量卫星^[9]、美国国家环境预报中心^[10]、多源加权集合降水数据集(multi-source weighted-ensemble precipitation,MSWEP)^[11]等。这些网格数据在一定程度上弥补了气象站数据空间代表性不足的缺陷,使得各个区域对极端降水的捕捉能力进一步提升。MSWEP 是一种全球降水产品,该产品集成站点数据、卫星观测数据以及再分析数

收稿日期:2024-08-29;修回日期:2024-11-20

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2020ME254,ZR2020QD061);陕西省教育厅重点实验室科学研究计划项目(20JS047)

通信作者简介:姚付启(1981—),男,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为农业节水及水资源高效利用研究。E-mail:fuqiyaol63@163.com

据,具有时间尺度长、空间分辨率高等优点,已成为当前应用最广泛的网格数据之一。研究者们选用 MSWEP 数据取得了大量研究成果, Alijanian 等^[12]研究发现相对其他网格数据, MSWEP 和站点日降水数据的相关性最高; Nair 等^[13]评估了 MSWEP 降水产品在印度区域的精度,发现 MSWEP 产品在日尺度上的降水具有较高精度; 邓越等^[14]评估了 MSWEP 降水产品在国内部分区域的精度,发现 MSWEP 和站点数据在年、月尺度上具有较好的相关系数。

黄河流域作为气候变化响应最敏感的区域之一,同时也是生态系统变化的脆弱区,极端降水事件频繁发生,给黄河两岸人民生命财产安全造成重大威胁,也严重制约当地的经济的发展。目前,应用 MSWEP 数据研究黄河流域极端降水的成果未见报道,因此,本研究采用 MSWEP 数据,选取 9 个极端降水指数,运用线性回归法、Mann-Kendall 检验法、Pearson 相关系数法和 Theil-Sen 斜率估计法分析黄河流域极端降水的时空演变特征,初

步探讨极端降水的影响因素,以期为区域合理安排农业生产以及制定防灾减灾对策提供参考。

1 区域概况与研究方法

1.1 研究区概况

黄河是中国第二大河,全长约 5464 km,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南及山东 9 个省(区),最终流入渤海。黄河流域位于我国北部(32°N~42°N, 96°E~119°E)(图 1),总面积约 75 万 km²。流域地势高差悬殊,西高东低;降水时空分配不均衡,主要降水季节为夏季,东南部地区降水多,西北部地区降水少。参照水利部黄河委员会划定的自然流域范围,将黄河流域划分为上游地区、中游地区和下游地区。上游地区主要包括青海、四川、甘肃、宁夏和内蒙古,中游地区主要包括陕西和山西,下游地区包括河南和山东。

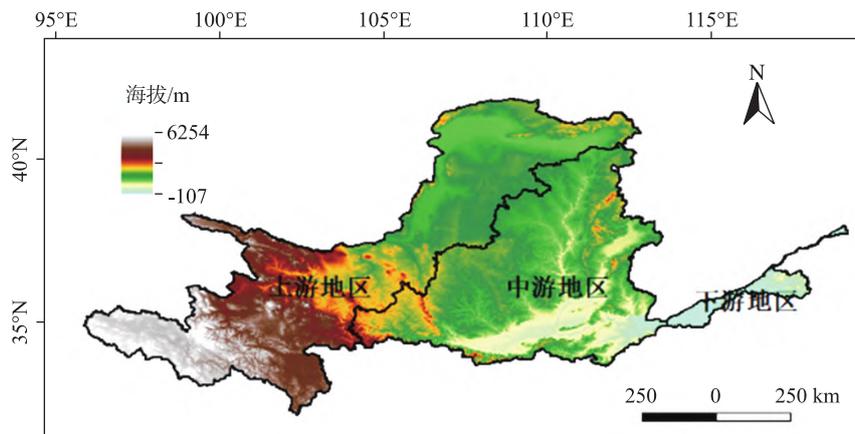


图 1 黄河流域概况

Fig.1 Overview of the Yellow River basin

注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图边界无修改。

1.2 数据来源

本研究所使用的 MSWEP 降水数据集来源于 MSWEP 官网(MSWEP-GloH2O)(<http://www.gloh2o.org/mswep/>),研究时段为 1979—2020 年,MSWEP 时间分辨率为 3 h,空间分辨率是 0.1°×0.1°。依据黄河流域的空间范围,使用掩膜提取相应网格单元的降水量,并将降水量在时间尺度上累加,分别得到日、月、年尺度的 MSWEP 降水量。

大气环流指数数据由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供,数据以月为单位。为进一步了解黄河流域大气环流指数对极端降水指数的影响,本研究选取与极端降水指数密切相关的 6 个大气环流指数,分别是北太平洋遥相关指数(NP)、太平洋年代际震荡(PDO)、南方涛动(SOI)、北极涛动(AO)、北方涛动(NOI)、海洋尼诺指数(ONI),具体数据来源于 NOAA 的气候预测中心(<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>)。

1.3 研究方法

1.3.1 极端降水指数

根据黄河流域气候特征,选取由 ETCCDI 定义的 9 个极端降水指数进行分析。极端降水指数按

类型可划分为 3 类,分别为:极端降水量指数,包含 RX1day、RX5day、R95p、R99p 和 PRCPTOT;极端降水强度指数,即 SDII;极端降水日数指数,包含 R10、R20 和 R25。极端降水指数的相关定义见表 1。

表 1 极端降水指数的定义

Tab.1 The definition of extreme precipitation indices

指数名称	符号	定义	单位
最大日降水量	RX1day	年内日降水量最大值	mm
最大 5 日降水量	RX5day	年内连续 5 日降水量最大值	mm
强降水量	R95p	年内日降水量大于第 95%分位值的降水量之和	mm
极端强降水量	R99p	年内日降水量大于第 99%分位值的降水量之和	mm
总降水量	PRCPTOT	湿天(日降水量≥1 mm)的年降水量总和	mm
降水强度	SDII	年总降水量除以年总降水日数	mm · d ⁻¹
中雨日数	R10	日降水量≥10 mm 的日数	d
大雨日数	R20	日降水量≥20 mm 的日数	d
暴雨日数	R25	日降水量≥25 mm 的日数	d

1.3.2 Theil-Sen 斜率估计法

Theil-Sen 斜率估计是一种稳健的非参数趋势估计方法^[15],被广泛用于计算水文、气象时间序列趋势的变化程度。对于长度为 n 的气象数据序列 $x_i(i = 1, 2, \dots, n)$, 计算公式如下:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_i - x_j}{j - i}\right) (j > i),$$

式中:median(·)为中值函数; i 和 j 分别表示时间序列中的第 i 年和第 j 年; β 表示气象数据序列的趋势, $\beta > 0$ 表明序列为上升趋势, $\beta < 0$ 表明序列为下降趋势, $\beta = 0$ 表明序列无明显变化。

1.3.3 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数检验方法,能减少数据异常值的影响,该方法在水文、气象等领域得到广泛验证^[16-17]。设有一时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 检验统计量 Z 的计算公式为:

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

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18},$$

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

式中:sgn(·)表示符号函数; n 表示时间序列长度。统计量 Z 表征时间序列的趋势性大小,对于已给定的置信水平 α ,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则表示拒绝

了原假设,即在指定置信水平 α 上,时间序列存在明显的上升或下降趋势, $Z > 0$ 表示上升趋势, $Z < 0$ 表示下降趋势; $|Z| \geq 1.64$ (微显著)、 $|Z| \geq 1.96$ (显著)、 $|Z| \geq 2.58$ (极显著)分别表示通过置信度 0.10、0.05、0.01 的显著性检验。

1.3.4 Pearson 相关系数法

Pearson 相关系数法是由英国统计学家 Pearson 于 20 世纪提出的一种计算直线相关性的方法。设 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 为 n 次独立观测值,Pearson 相关系数 R 的计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}},$$

式中: n 为时间序列长度; $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 分别为变量 x_i 和 y_i 的均值; $R < 0$ 表示负相关, $R > 0$ 表示正相关, R 的绝对值越接近 1,表明相关程度越强。

2 结果与分析

2.1 极端降水指数时间变化特征

为探究黄河流域极端降水的变化规律,本研究首先展开年际变化特征分析。其次,由于极端降水事件存在很强的区域性,按上游地区、中游地区、下游地区评估各区域所面临的极端降水风险,

以便更精准地掌握极端降水的变化规律。

2.1.1 极端降水指数年际变化特征

利用线性回归法对黄河流域 1979—2020 年

的 9 个极端降水指数的时间变化趋势进行分析,结果见图 2,同时利用 Mann-Kendall 趋势检验法进行显著性检验,得到表 2。

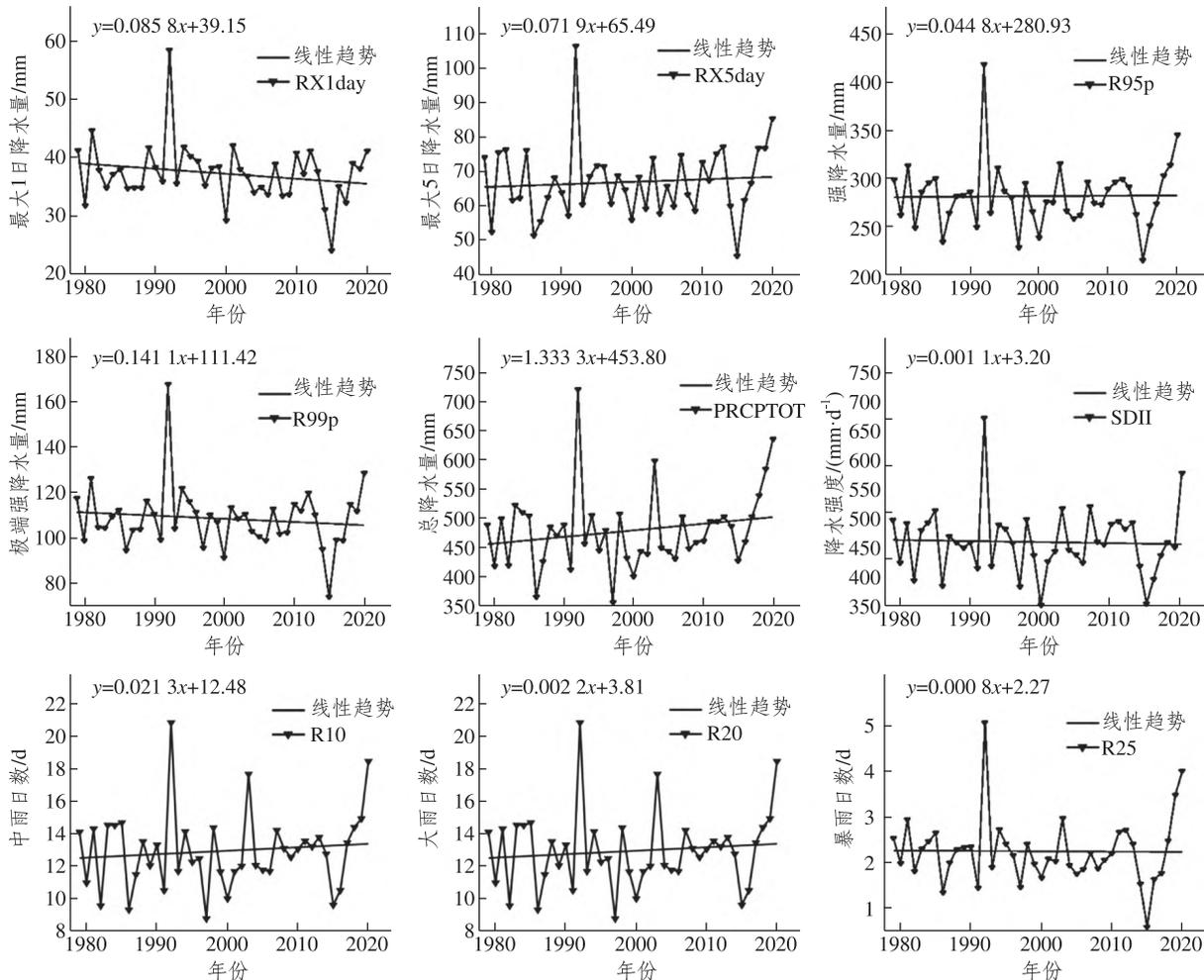


图 2 1979—2020 年黄河流域极端降水的年际变化趋势

Fig.2 Inter-annual change trends of extreme precipitation in the Yellow River basin from 1979 to 2020

表 2 1979—2020 年黄河流域及不同地区
极端降水指数的 Mann-Kendall 检验

Tab.2 Mann-Kendall test of extreme precipitation indices
in the Yellow River basin and different regions
from 1979 to 2020

极端降水指数	黄河流域	上游地区	中游地区	下游地区
RX1day	-0.910	-0.650	-1.408	0.736
RX5day	1.105	1.083	0.108	0.888
R10	0.975	1.690*	-0.628	0.563
R20	-0.130	0.520	-1.495	-1.300
R25	-0.260	0.000	-1.495	1.192
R95p	0.411	0.801	-1.300	-0.390
R99p	-0.498	-0.173	-1.365	0.021
PRCPTOT	1.430	2.254**	-0.780	-0.281
SDII	-0.303	0.758	-1.278	-0.845

注：“*”表示通过 0.10 显著性水平检验；“**”表示通过 0.05 显著性水平检验。

结合图 2 和表 2 可知,从极端降水量指数来看:RX1day 和 R99p 呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,其下降速率分别为 -0.507 、 $-0.664 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$;RX5day、R95p 和 PRCPTOT 呈上升趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,上升速率分别为 1.637 、 1.347 、 $10.869 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明总降水量增多。从极端降水强度来看:SDII 呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,其下降速率为 $-0.010 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$,表明该地区降水强度较少。从极端降水日数指数来看:R10 呈上升趋势,未通过 0.10 显著性检验,其上升速率为 $0.288 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明中雨日数增多;R20 和 R25 呈下降趋势,未通过 0.10 显著性检验,其下降速率分别

为 -0.126 、 $-0.025 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明大雨和暴雨出现日数减少。总体来看,黄河流域的总降水量增多,洪涝灾害发生的概率也增加。

2.1.2 上游地区极端降水指数年际变化特征

分析 1979—2020 年黄河上游地区极端降水的年际变化趋势,结果见图 3。

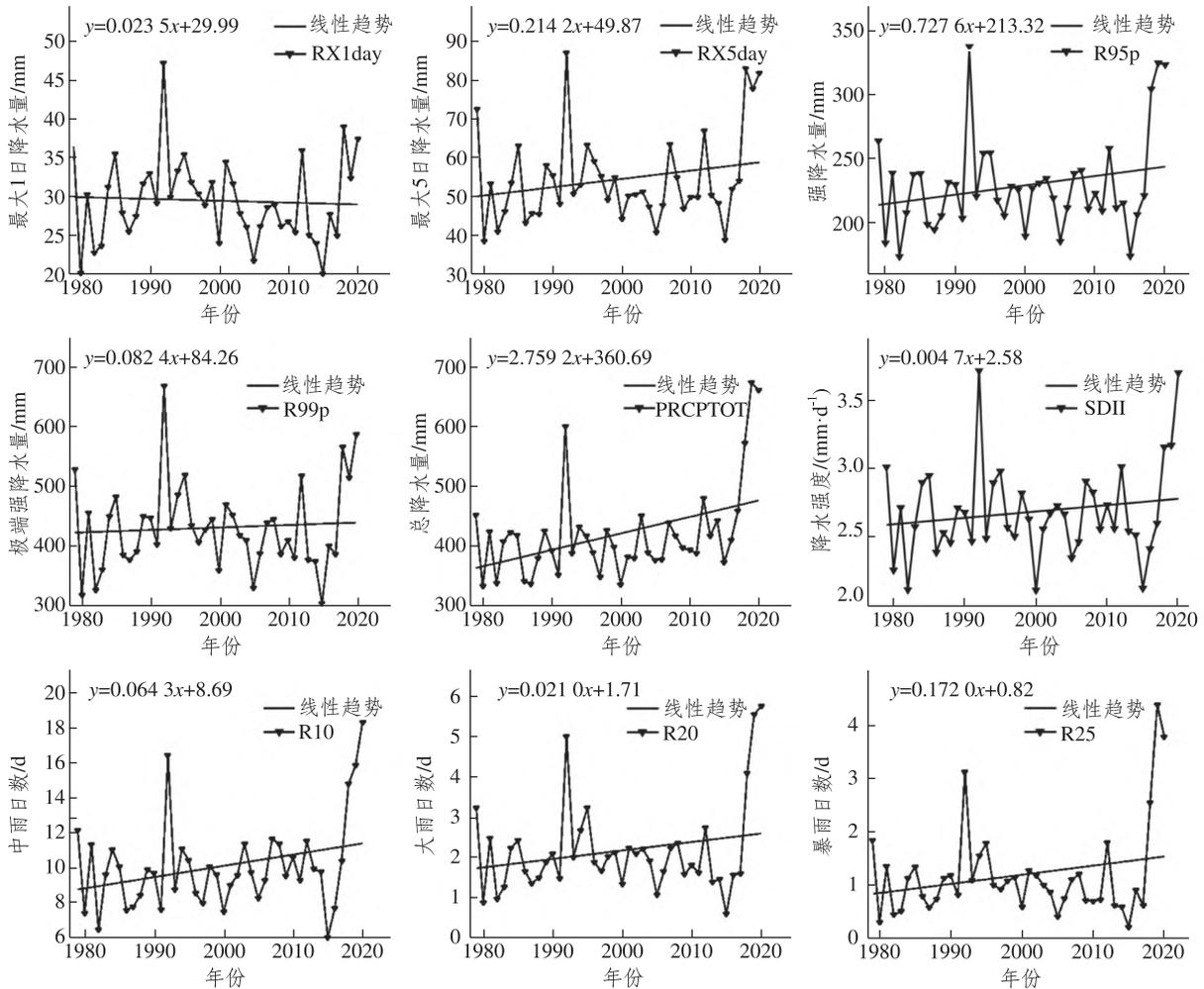


图 3 1979—2020 年黄河上游地区极端降水的年际变化趋势

Fig.3 Inter-annual change trends of extreme precipitation in the upper reaches of the Yellow River from 1979 to 2020

从极端降水量指数来看:RX1day 和 R99p 呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,其下降速率分别为 -0.627 、 $-0.241 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$; PRCPTOT 呈上升趋势,通过 0.05 显著性水平检验,其上升速率为 $17.293 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明总降水量显著增加;RX5day 和 R95p 呈上升趋势,未通过 0.10 显著性检验,其上升速率分别为 1.436 、 $3.826 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。从极端降水强度指数来看:SDII 呈上升趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,其上升速率为 $0.034 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$,表明该地区降水强度较大。从极端降水日数指数来看:R10 呈上升趋势,通过 0.10 显著性水平检验,上升速率为 $0.520 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明发生中雨日数微

显著增多;R20 呈上升趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,上升速率为 $0.054 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明发生中雨日数增多;R25 呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,下降速率为 $-0.003 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明发生暴雨日数减少。总体上,黄河上游地区的极端降水指数基本呈上升趋势,表明这些地区极端降水事件发生的概率将增加,其中总降水量呈显著增加趋势,上游地区发生山体滑坡、泥石流的可能性加大。

2.1.3 中游地区极端降水指数年际变化特征

分析 1979—2020 年黄河中游地区极端降水的年际变化趋势,结果见图 4。

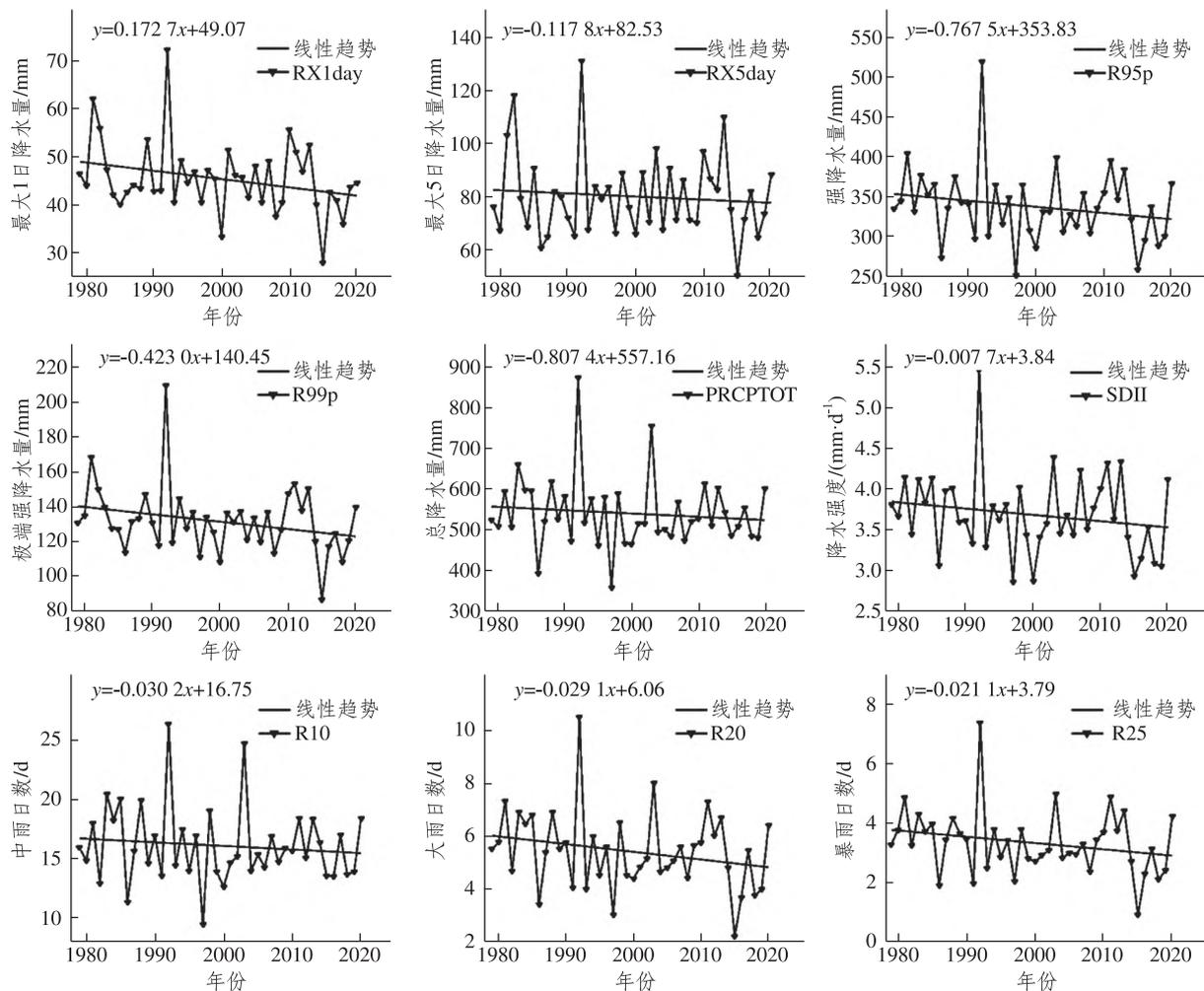


图 4 1979—2020 年黄河中游地区极端降水的年际变化趋势

Fig.4 Inter-annual change trends of extreme precipitation in the middle reaches of the Yellow River from 1979 to 2020

从极端降水量指数来看:RX1day、RX5day、R95p、R99p 和 PRCPTOT 均呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,其下降速率分别为 -1.727 、 -1.178 、 -7.675 、 -4.230 、 $-8.074 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明黄河中游地区的总降水量减少。从极端降水强度指数来看:SDII 呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,其下降速率为 $-0.077 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$,表明该地区降水强度较少。从极端降水日数指数来看:R10、R20 和 R30 呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,其下降速率分别为 -0.302 、 -0.291 、 $-0.211 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明发生中雨、大雨和暴雨的日数减少。总之,黄河中游地区的极端降水指数呈下降趋势,说明黄河中游地区发生极端降水事件的概率减少。

2.1.4 下游地区极端降水指数年际变化特征

分析 1979—2020 年黄河下游地区极端降水

的年际变化趋势,结果见图 5。

从极端降水量指数来看:RX1day 和 RX5day 均呈上升趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,上升速率分别为 1.377 、 $2.656 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$;R95p、R99p 和 PRCPTOT 均呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,其下降速率分别为 -5.900 、 -1.036 、 $-2.795 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明总降水量减少。从极端降水强度指数来看:SDII 呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,下降速率为 $-0.107 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$,表明该地区降水强度较少。从极端降水日数指数来看,R10、R20 和 R25 均呈下降趋势,未通过 0.10 显著性水平检验,下降速率分别为 -0.145 、 -0.368 、 $-0.323 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$,说明发生中雨、大雨和暴雨的日数减少。总之,黄河下游地区极端降水指数基本呈下降趋势,说明该地区出现极端降水事件的概率减少。

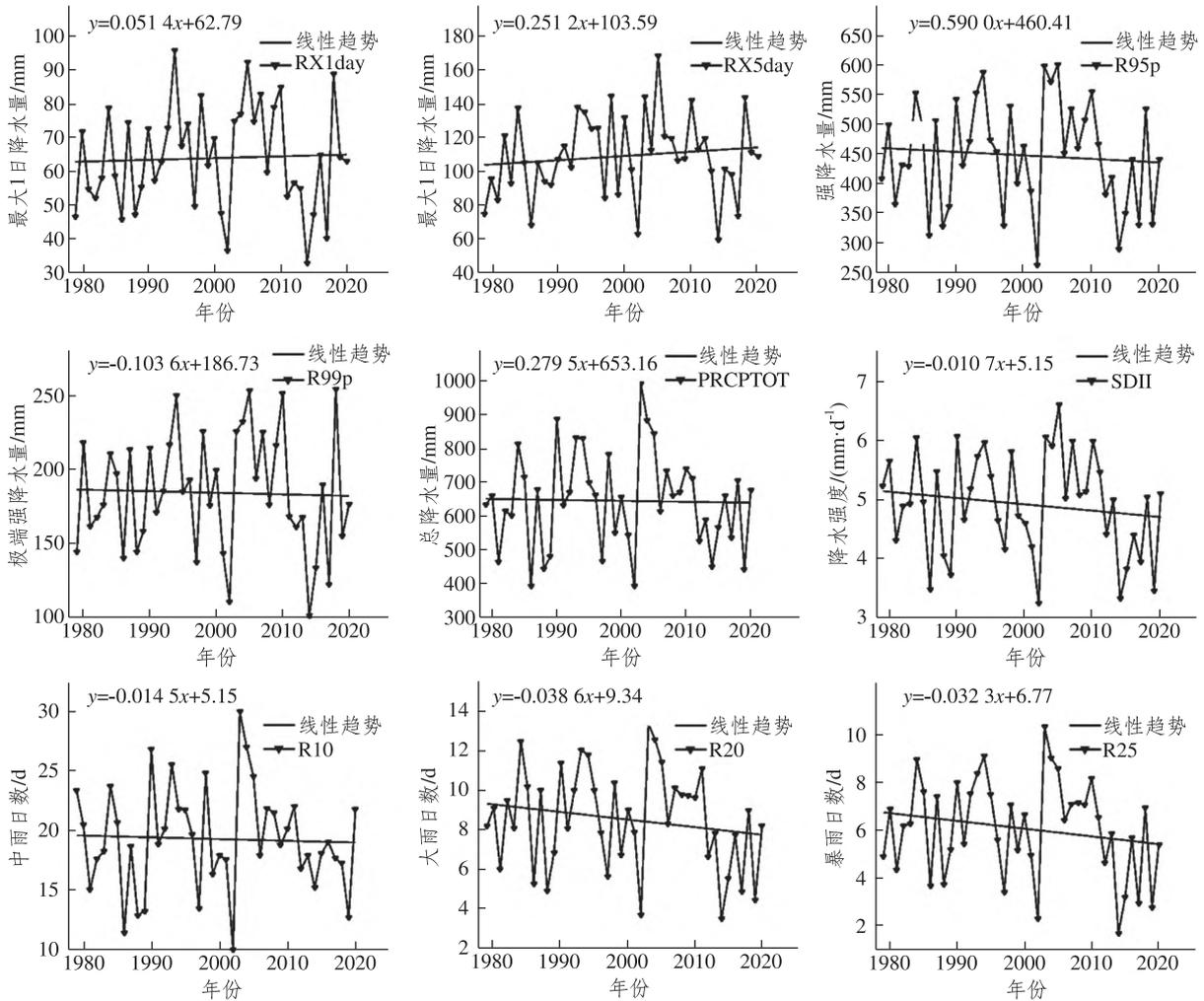


图 5 1979—2020 年黄河下游地区极端降水的年际变化趋势

Fig.5 Inter-annual change trends of extreme precipitation in the lower reaches of the Yellow River from 1979 to 2020

2.2 极端降水指数空间变化特征

2.2.1 极端降水指数空间分布

为了解黄河流域 1979—2020 年极端降水变化趋势的空间布局,首先计算逐网格逐年的极端降水指数并建立时间序列,利用 GIS 软件中的空间分析方法进行处理,得到极端降水指数多年平均值的空间分布,如图 6 所示。

从图 6 可以得出, RX1day、RX5day、R95p、R99p、PRCPTOT、SDII、R10、R20 和 R30 等 9 个极端降水指数大致呈东南向西北逐渐减少的空间分布格局。从极端降水量指数来看:RX1day 的高值区主要分布在山东和河南,低值区主要分布在青海、四川、甘肃、宁夏和内蒙古,高值和低值分别为 77.35、14.15 mm,高低值差别较大;RX5day、R95p、R99p 的空间分布基本相似,高值是低值的 4.5~4.8 倍,降水量差异较大;PRCPTOT 的高值

主要分布在山东、河南、陕西南部、青海南部和甘肃南部,低值区主要分布在内蒙古和宁夏,多年平均降水量为 119.65~885.77 mm,年降水量差异较大,空间分布不均匀。从极端降水强度指数来看:SDII 高值区主要分布在山东和河南,低值区主要分布在青海、甘肃、宁夏和内蒙古,高值和低值分别为 5.76、1.54 mm·d⁻¹,高低值差别较小。从极端降水日数指数来看:R10 高值区主要分布在山东、河南和陕西南部,低值区主要分布在青海、甘肃、宁夏和内蒙古,高值和低值分别为 26.83、2.57 d,高低值差别较大;R20 高值区主要分布在山东、河南和陕西南部,低值区主要分布在青海、四川、甘肃、宁夏和内蒙古,高值和低值分别为 10.40、0.19 d,高低值差别较大;R25 高值区主要分布在山东,低值区主要分布在青海、四川、甘肃、宁夏和内蒙古,高值和低值分别为 7.61、0.07 d,高低值差别较大。

2.2.2 极端降水指数变化趋势的空间分布

Theil-Sen 斜率估计法能够有效地判断一定时间序列的变化趋势,而 Mann-Kendall 趋势检验方法能够有效检测趋势的显著性,本节结合

Theil-Sen 斜率估计法和 Mann-Kendall 趋势检验法进行趋势分析和显著性检验,得到 1979—2020 年黄河流域极端降水指数变化趋势的空间分布,如图 7 所示。

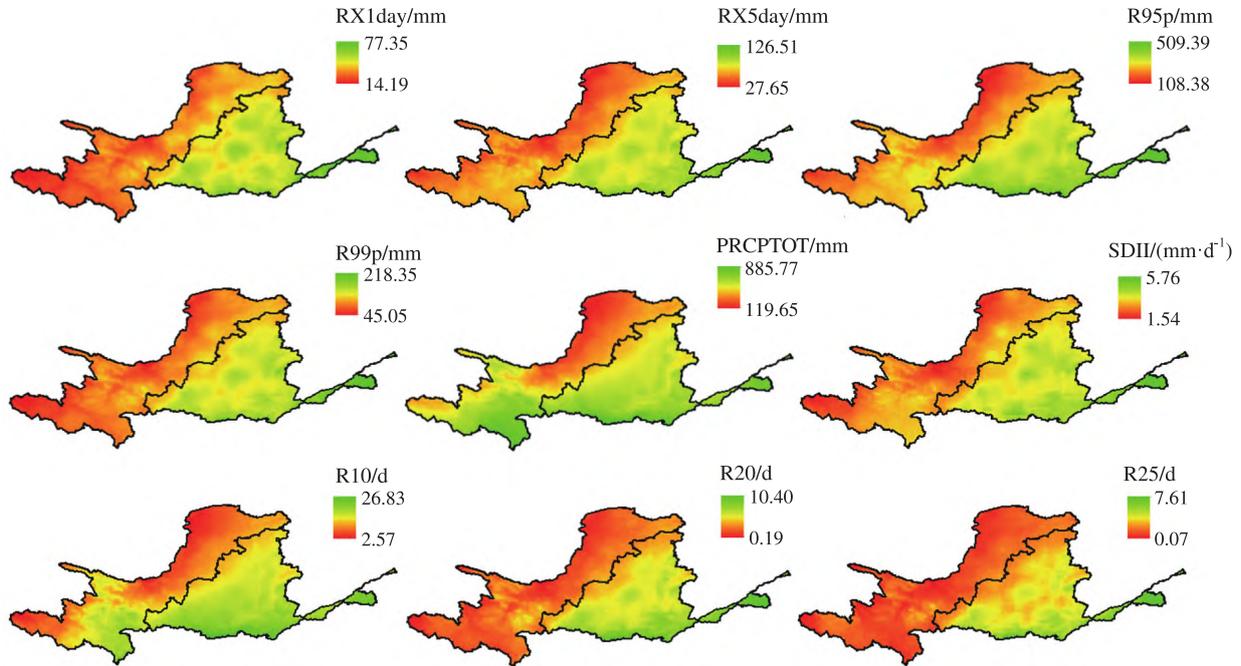


图 6 1979—2020 年黄河流域极端降水指数年平均值的空间分布

Fig.6 Spatial distributions of the annual average value of extreme precipitation index in the Yellow River basin from 1979 to 2020

注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图边界无修改。

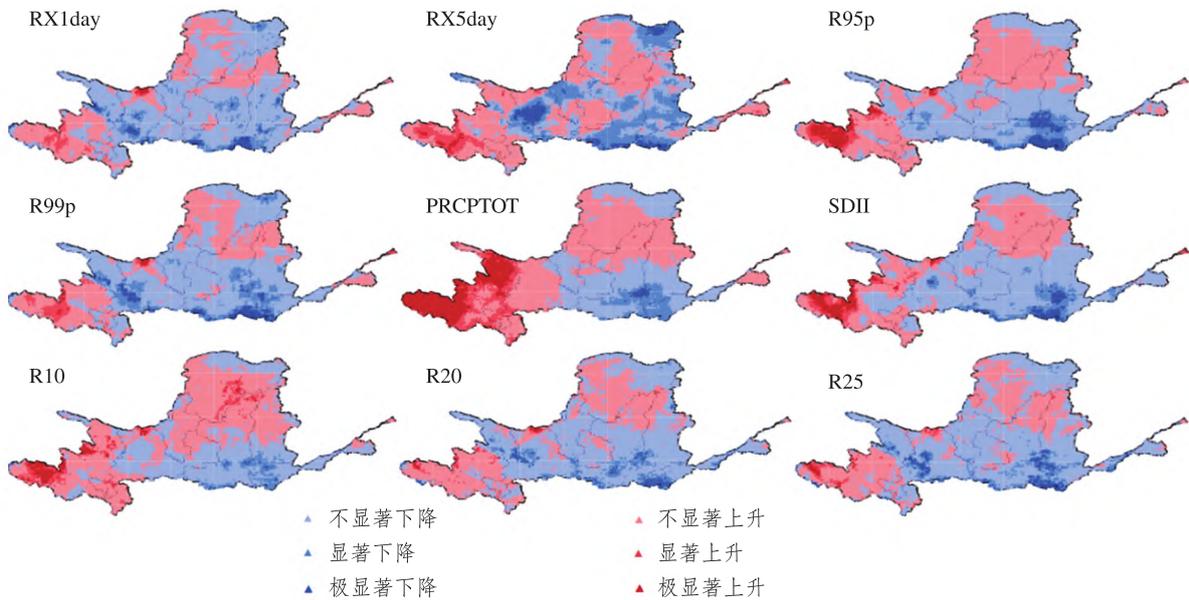


图 7 1979—2020 年黄河流域极端降水空间分布

Fig.7 Spatial distributions of extreme precipitation in the Yellow River basin from 1979 to 2020

注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图边界无修改。

从图 7 中各网格变化趋势来看, RX1day、RX5day、R95p、R99p、PRCPTOT、SDII、R10、R20 和 R30 等 9 个极端降水指数中大部分网格未通过显著性检验。RX1day 呈极显著下降的网格占 1.8%, 主要分布在陕西南部 and 甘肃; 显著下降的网格占 6.5%, 分布比较零散; 显著上升的网格占 1.5%, 主要分布在青海西部; 极显著上升的网格占 0.2%, 主要分布在甘肃北部。RX5day 呈极显著下降的网格占 0.5%, 主要分布在河南南部、甘肃和内蒙古; 显著下降的网格占 3.2%, 分布比较零散; 显著上升的网格占 4.2%, 主要分布在青海西部; 极显著上升的网格占 0.6%, 主要分布在青海西部。R95p 呈极显著下降的网格占 3.0%, 主要分布在河南西部、陕西南部和山西南部; 显著下降的网格占 5.8%, 主要分布在河南西部、陕西南部和山西南部; 显著上升的网格占 2.5%, 主要分布在青海西北部; 极显著上升的网格占 2.9%, 主要分布在青海西北部。R99p 呈极显著下降的网格占 2.8%, 主要分布在河南西部、陕西南部和甘肃西南部; 显著下降的网格占 8.9%, 主要分布在河南西部、陕西南部、山西南部和甘肃西南部; 显著上升的网格占 2.4%, 主要分布在青海西北部; 极显著上升的网格占 0.4%, 主要分布在甘肃东北部。PRCPTOT 呈极显著下降的网格占 0.5%, 主要分布在陕西东南部; 显著下降的网格占 5.6%, 主要分布在河南西部、陕西东南部及山西南部; 显著上升的网格占 7.0%, 主要分布在青海; 极显著上升的网格占 10.2%, 主要分布在青海西北部。SDII 呈极显著下降的网格占 2.0%, 主要分布在河南西部; 显著下降的网格占 5.7%, 主要分布在河南西部、陕西东南部和山西南部; 显著上升的网格占 3.0%, 主要分布在青海西部; 极

显著上升的网格占 2.8%, 主要分布在青海西部。R10 呈极显著下降的网格占 0.2%, 分布较为零散; 显著下降的网格占 5.7%, 主要分布在河南西部和山西南部; 显著上升的网格占 4.8%, 主要分布在青海西部和陕西北部; 极显著上升的网格占 2.3%, 主要分布在青海西部。R20 呈极显著下降的网格占 1.8%, 主要分布在河南; 显著下降的网格占 5.9%, 主要分布在河南西部、山西南部和甘肃中部; 显著上升的网格占 0.9%, 极显著上升的网格占 0.3%, 分布均较为零散。R25 呈极显著下降的网格占 2.5%, 主要分布在河南和甘肃; 显著下降的网格占 6.5%, 主要分布在河南西部、山西南部和甘肃中部; 显著上升的网格占 1.4%, 极显著上升的网格占 0.5%, 两者分布较为零散。

2.3 极端降水指数影响因素分析

2.3.1 极端降水指数间的相关性

1979—2020 年黄河流域各极端降水指数之间相关性分析见表 3。从表 3 可以看出, 各极端降水指数均存在极显著正相关性, 相关系数位于 0.61~0.98, 且通过了 0.01 显著性检验。具体来看, 各极端指数均与 PRCPTOT 表现出良好的相关性, 且通过了 0.01 显著性水平检验, 其中 RX5day、R95p、R10、R20 等 4 个指数与 PRCPTOT 的相关关系较强, 表明这些指数可以很好地表征总降水量, 这进一步说明了极端降水指数对黄河流域的降水有较好的指示作用。

2.3.2 大气环流因子与极端降水指数的相关性

极端降水事件受多种因素影响, 大气环流是主要影响因素之一, 本节选取 1979—2020 年 NP、PDO、SOI、AO、NOI 和 ONI 等 6 个大气环流因子, 探讨大气环流对黄河流域极端降水的影响。

表 3 1979—2020 年黄河流域各极端降水指数相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of each extreme precipitation index in the Yellow River basin from 1979 to 2020

极端降水指数	RX1day	RX5day	R10	R20	R25	R95p	R99p	PRCPTOT	SDII
RX1day	1								
RX5day	0.632***	1							
R10	0.786***	0.942***	1						
R20	0.809***	0.893***	0.983***	1					
R25	0.848***	0.774***	0.841***	0.859***	1				
R95p	0.825***	0.945***	0.982***	0.966***	0.869***	1			
R99p	0.964***	0.780***	0.904***	0.914***	0.887***	0.932***	1		
PRCPTOT	0.610***	0.960***	0.898***	0.882***	0.791***	0.918***	0.751***	1	
SDII	0.768***	0.918***	0.931***	0.886***	0.805***	0.942***	0.877***	0.837***	1

注:“***”表示通过 0.01 显著性水平检验。

1979—2020 年黄河流域极端降水指数与大气环流的相关性分析如表 4 所示。从表 4 中可以看出:AO、PDO 与 9 个极端降水指数均呈正相关关系;NOI、SOI 与绝大多数极端降水指数呈正相关关系;而 NP、ONI 与 9 个极端降水指数均呈负相关关系。总体来看,大气环流因子在一定程度

上影响黄河流域极端降水。此外,NP 与 5 个极端降水指数(RX5day、R10、R20、PRCPTOT、SDII)通过 0.05 显著性水平检验,这表明 NP 与 RX5day、R10、R20、PRCPTOT 及 SDII 呈显著负相关关系,随着 NP 的增强,RX5day、R10、R20、PRCPTOT、SDII 有减少的可能性。

表 4 1979—2020 年黄河流域极端降水指数与大气环流因子的相关性分析
Tab.4 Correlation analysis of extreme precipitation indices and atmospheric circulation factors
in the Yellow River basin from 1979 to 2020

极端降水指数	大气环流因子					
	AO	NOI	NP	ONI	PDO	SOI
RX1day	0.065	-0.084	-0.118	-0.132	0.065	-0.009
RX5day	0.156	0.072	-0.367 **	-0.216	0.156	0.098
R10	0.107	0.036	-0.366 **	-0.228	0.107	0.100
R20	0.126	-0.009	-0.377 **	-0.171	0.126	0.048
R25	0.098	0.033	-0.273	-0.204	0.098	0.086
R95p	0.128	0.030	-0.295	-0.201	0.128	0.071
R99p	0.095	-0.031	-0.230	-0.173	0.095	0.036
PRCPTOT	0.243	0.012	-0.369 **	-0.112	0.243	0.000
SDII	0.058	0.074	-0.326 **	-0.207	0.058	0.092

注:“**”表示通过 0.05 显著性水平检验。

3 讨论

从时间尺度来看,黄河流域各极端降水指数有增也有降,且区域差异明显。其中,RX1day、R99p、SDII 和 R20 呈下降趋势,这与 Liang 等^[18]研究结果一致;RX5day、R95p、PRCPTOT、R10、R25 呈上升趋势,慎璐璐等^[8]和刘健^[19]也得出了类似的研究结果。对各区域进行分析,黄河上游地区 RX5day、R95p、R99p、PRCPTOT、SDII、R10、R20、R25 呈上升趋势,而 RX1day 呈下降趋势;中游地区 RX1day、RX5day、R95p、R99p、PRCPTOT、SDII、R10、R20、R25 均呈下降趋势;下游地区 RX1day、RX5day 呈上升趋势,而 R95p、R99p、PRCPTOT、SDII、R10、R20、R25 呈下降趋势。因此,极端降水存在很强的区域性,区域之间极端降水指数的变化规律差异明显,这与极端降水的成因、强度、降水持续时间等因素有关^[20]。

从空间尺度来看,9 个极端降水指数(RX1day、RX5day、R95p、R99p、PRCPTOT、SDII、R10、R20 和 R25)呈现东南向西北逐渐减少的空间分布格局,这与慎璐璐等^[8]和刘健^[19]的研究结果一致。之所以存在这种空间分布格局,可能是因为我国西高东低的地形条件造成的,温暖湿润的温带季风气候主要影响流域的东南区域,而深

入内陆流域的西北部主要受干燥寒冷的温带大陆性气候影响。

极端降水事件受多种因素影响,如海拔、下垫面、人类活动和大气环流等因素。大量研究表明,大气环流因子是影响极端降水的重要因素^[21-22]。本研究发现,AO、PDO 与 9 个极端降水指数呈正相关关系,NOI、SOI 与绝大多数极端降水指数表现出正相关关系,而 NP、ONI 则与这 9 个极端降水指数呈负相关关系,说明黄河流域的极端降水事件的发生及变化和大气环流因子之间存在一定的相关性。进一步通过相关分析发现,各极端降水指数与大气环流因子的相关系数大小存在差异性,其中 NP 对黄河流域极端降水影响比较显著。

4 结论

本研究选取 9 个极端降水指数分析黄河流域极端降水时空演变特征,初步探讨极端降水的影响因素,得到以下结论。

1) 在时间尺度上,从整个黄河流域来看,RX1day、R99p、SDII、R20 呈现下降趋势,RX5day、R95p、PRCPTOT、R10、R25 呈上升趋势;从上游地区来看,除 RX1day 呈下降趋势,其他指数呈上升趋势;从中游地区来看,9 个指数均呈下降趋势;

从下游地区来看, RX1day、RX5day 呈上升趋势, 而其他指数呈下降趋势。

2) 在空间尺度上, RX1day、RX5day、R95p、R99p、PRCPTOT、SDII、CWD、R20 和 R25 整体上呈现由东南向西北逐渐减少的空间分布格局。

3) 黄河流域极端降水指数之间均呈现极显著性的正相关关系, 极端降水指数与大气环流因子存在一定的相关性。AO、PDO 与 9 个极端降水指数均呈正相关关系, NOI、SOI 与大多数极端降水指数也呈正相关关系, 而 NP、ONI 与 9 个极端降水指数均呈负相关关系。

参考文献:

- [1] 高启慧,秦圆圆,梁媚聪,等.IPCG 第六次评估报告综合报告解读及对我国的建议[J].环境保护,2023,51(Z2):82-84.
- [2] 林祚顶,刘宝元,丛佩娟,等.山东临朐 2019 年“8·10”特大暴雨水土保持调查[J].水土保持学报,2021,35(1):149-153.
- [3] 史文茹,李昕,曾明剑,等.“7·20”郑州特大暴雨的多模式对比及高分辨率区域模式预报分析[J].大气科学学报,2021,44(5):688-702.
- [4] KIRTI C,DHRUBAJYOTI S,JATAN D.Assessment of the land use/land cover and climate change impact on the hydrological regime of the Kushi River catchment, Northeast India[J].Sustainable Water Resources Management,2024,10(2):60.
- [5] GIORGI F,RAFFAELE F,COPPOLA E.The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections[J].Earth System Dynamics,2019,10(1):73-89.
- [6] MARTINEZ-ARTINEZ-VILLALOBOS C,NEELIN J D.Shifts in precipitation accumulation extremes during the warm season over the United States [J].Geophysical Research Letters,2018,45(16):8586-8595.
- [7] MATHBOUT S,LOPEZ-OPEZ-BUSTINSJ A,ROYE D, et al.Observed changes in daily precipitation extremes at annual timescale over the eastern mediterranean during 1961-2012[J].Pure and Applied Geophysics,2018,175(11):3875-3890.
- [8] 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.
- [9] WANG Y,SHEN J Y,ZAMAN M,et al.Accounting for non-stationary relationships between precipitation and environmental variables for downscaling monthly TRMM precipitation in the upper indus basin[J].Remote Sensing,2023,15(17):4356.
- [10] YOO J,CHUN H.Compensation between resolved wave forcing and parameterized orographic gravity wave drag in the northern hemisphere winter stratosphere revealed in NCEP CFS reanalysis data[J].Journal of the Atmospheric Sciences,2023,80(2):487-499.
- [11] LINGJIE L,YINTANG W,LEIZHI W,et al.Spatio-temporal accuracy evaluation of MSWEP daily precipitation over the Huaihe River Basin, China: a comparison study with representative satellite- and reanalysis-based products[J].Journal of Geographical Sciences,2022,32(11):2271-2290.
- [12] ALLJANIAN M,PAKSHANDEHROO G R,MISHRAA K,et al.Evaluation of satellite rainfall climatology using CMOPRH, PHRSIANN-COR, PERSIANN, TMRR, MSWEP over Iran[J].International Journal of Climatology,2017,37(14):4896-4914.
- [13] NAIR A S,INDU J.Performance assessment of multi-source weighted ensemble precipitation (MSWEP) product over India[J].Climate,2017,5(1):2.
- [14] 邓越,蒋卫国,王晓雅,等.MSWEP 降水产品在中国大陆区域的精度评估[J].水科学进展,2018,29(4):455-464.
- [15] LONG Y,JIANG F G,DENG M L,et al.Spatial-temporal changes and driving factors of ecoenvironmental quality in the three-north region of China[J].Journal of Arid Land,2023,15(3):231-252.
- [16] KUMAR S K,RATHNAM V E.Analysis and prediction of groundwater level trends using four variations of Mann Kendall tests and ARIMA modelling[J].Journal of the Geological Society of India,2019,94(3):281-289.
- [17] ALHAJIU U,YUSUFS A,EDETO C,et al.Trend analysis of temperature in gombé state using Mann-Kendall trend test[J].Journal of Scientific Research and Reports,2018,20(3):1-9.
- [18] 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(3/4):701-722.
- [19] 刘健.黄河流域极端气候对植被覆盖的影响[D].济南:山东师范大学,2024.
- [20] 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.
- [21] HUANHUAN Z,ZHIHONG J,LAURENT L.Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6 [J].Science Bulletin,2021,66

- (24):2528–2537. impacts of global climate change [J].Frontiers in Nutrition,2021,8:706552.
- [22] DACHUAN L, YAN L, PENGFEI W, et al. Sustainable agriculture development in northwest China under the

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Extreme Precipitation in the Yellow River Basin

ZHAO Xiaoxue¹, ZHANG Huihui¹, YANG lizhen¹, ZHAO Jing², XIE Hengxing³, CAO Lin⁴, YAO Fuqi¹

(1.School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China;

2.Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430012, China;

3.School of Environmental and Life Sciences, Weinan Normal University, Weinan 714099, China;

4.Zhaotong Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Zhaotong 657000, China)

Abstract: To provide reference basis for agricultural production and flood control and disaster reduction, the study aims to explore the temporal and spatial evolution patterns of extreme precipitation in the Yellow River basin. Based on the multi-source weighted ensemble precipitation data set of the Yellow River basin from 1979 to 2020, the linear regression method, Mann-Kendall test method, Pearson correlation coefficient method and Theil-Sen slope estimation method are employed to analyze the temporal and spatial evolution characteristics of nine extreme precipitation indices, which includes the maximum daily precipitation (RX1day), the maximum 5-day precipitation (RX5day), the heavy precipitation (R95p), the extremely heavy precipitation (R99p), the total precipitation (PRCPTOT), the precipitation intensity (SDII), the number of days with moderate rain (R10), the number of days with heavy rain (R20) and the number of days with torrential rain (R25). The results are shown as follows. On the time scale, RX1day, R99p, SDII and R20 in the Yellow River basin show a downward trend, while RX5day, R95p, PRCPTOT, R10 and R25 show an upward trend. In the upper reaches of the Yellow River, RX1day shows a downward trend, while the other eight extreme precipitation indices all show an upward trend. In the middle reaches of the Yellow River, the nine extreme precipitation indices show a downward trend. In the lower reaches of the Yellow River, except for RX1day and RX5day which show an upward trend, the other extreme precipitation indices all show a downward trend. In terms of spatial distribution, the nine extreme precipitation indices generally present a spatial distribution pattern of gradually decreasing from the southeast to the northwest. From the perspective of the influencing factors of extreme precipitation indices, all the extreme precipitation indices in the Yellow River basin show extremely significant positive correlations, and there are certain correlations between the extreme precipitation indices and the atmospheric circulation factors.

Keywords: extreme precipitation; MSWEP; temporal and spatial evolution; the Yellow River basin