

渭河流域极端降水特性指标分析

张海宁, 周旗, 毛雨唯, 马元森, 丁鹏程, 文彦君

(宝鸡文理学院 陕西省灾害监测与机理模拟实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘 要:为研究渭河流域极端降水特性指标及极端降水事件发生频率,基于渭河流域 1961—2016 年 41 个气象站的逐日降水数据和流域历史洪水资料,选定极端降水量(R95P)、极端降水频数(RD95)、极端降水强度(RI95)和极端降水贡献率(RC95)4 个极端降水特性指标,采用线性趋势法、相关分析法、Mann-Kendall 突变检验法、普通克里金插值等方法,对各指标时空变化特征以及不同子流域极端降水事件的发生频率进行了分析。结果表明:(1) 渭河流域极端降水阈值介于 16.40~26.29 mm,流域中 17% 以上的气象站极端降水阈值超过 25 mm。(2) 空间分布上,R95P 介于 127.81~201.41 mm,随纬度升高而减少;RD95 干流和泾河流域较高。RI95 介于 24.37~39.81 mm/d,与 R95P 空间分布相关性较好,干流东部和下游较高,综上,渭河流域极端降水量越大的区域极端降水强度越高,未来应考虑多区域极端降水对干流及下游河道的叠加作用,降低灾害风险。(3) 年际变化上,R95P 和 RD95 变化不显著,RI95 和 RC95 呈轻微增加趋势,2000 年后增加显著。(4) 渭河流域几次大洪灾均伴随着极端降水,渭河下游极端降水事件发生频率最高,主要发生于 20 世纪 80 年代初期和 21 世纪初期。

关键词:渭河流域; 极端降水; 时空特征; 百分位法

中图分类号:K903

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0128-07

Analysis of Extreme Precipitation Characteristics in Weihe River Basin

ZHANG Haining, ZHOU Qi, MAO Yuwei, MA Yuansen, DING Pengcheng, WEN Yanjun

(Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation,

Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract: To study the characteristics of extreme precipitation and frequency of extreme precipitation events in Weihe River Basin, based on the daily precipitation data of 41 meteorological offices and stations and historical flood data of Weihe River Basin in the period 1961—2016, the extreme precipitation(R95P), extreme precipitation frequency(RD95), extreme precipitation intensity ratio(RI95) and extreme precipitation features(RC95) four extreme precipitation index were selected, spatial and temporal variation characteristics of each index and different frequency of extreme precipitation events sub basin were analyzed by using the linear trend method, correlation analysis, Mann-Kendall mutation test, ordinary kriging interpolation method. The results show that: (1) the threshold of extreme precipitation in the Weihe River Basin was between 16.40 mm and 26.29 mm, and the threshold of extreme precipitation in more than 17% of meteorological stations in the basin was more than 25 mm; (2) the spatial distribution of R95P was between 127.81 mm and 201.41 mm, and it decreased with the increase of latitude; RD95 main stream and Jinghe River Basin were higher; RI95 ranged from 24.37 to 39.81 mm/d, and had a good correlation with the spatial distribution of R95P. It was higher in the east and downstream of the main stream; (3) in terms of inter-annual variation, R95P and RD95 showed no significant change, while RI95 and RC95 showed a slight increase trend, and increased significantly after 2000; (4) several major floods in the Weihe River Basin were accompanied by extreme precipitation; the frequency of extreme precipitation events in the lower reaches of the Weihe River Basin was the highest, mainly occurred in the early 1980s and the early 21st century. In conclusion, the region with higher extreme precipitation in the Weihe River Basin has higher extreme precipitation intensity. In the future, the superposition effect of multi-regional extreme precipitation on the mainstream and downstream river should be considered to reduce disaster risk.

Keywords: Weihe River Basin; extreme precipitation; spatiotemporal characteristics; percentile method

收稿日期:2021-02-19

修回日期:2021-05-18

资助项目:国家自然科学基金项目(41771215);陕西省重点研发计划项目(2020SF-385)

第一作者:张海宁(1995—),女,山东聊城人,硕士研究生,主要从事区域气候变化及其风险感知研究。E-mail:765049056@qq.com

通信作者:周旗(1963—),男,重庆荣昌人,教授,博士,主要从事区域气候变化及其风险管理研究。E-mail:chzhou@163.com

IPCC 第五次全球气候评估公告指出:1880—2012 年全球地表平均温度升高约 0.85℃,全球变暖成为毋庸置疑的事实^[1]。极端气候事件对气候变化的响应极为敏感^[2],日益加剧的极端气候事件引起专家学者及政府决策者的高度重视。我国学者关于不同流域极端降水时空分布和气候变化的研究,从极端降水时空演变规律到强度特征、区域差异及季节变化均有涉及。研究表明,我国年降水总量变化趋势不显著,但极端降水强度和频率总体增加^[3-4];我国主要河流域降水时空分布特征主要表现为北方流域降水量少且年际变化大,南方流域以降水量增多为主^[5-6]。长江流域^[7-9]极端强降水增加显著;黄河流域^[10-13]降水具有明显的地区性和季节差异性,极端降水强度变化趋势稳定。珠江流域^[14-15]年降水总量呈减少趋势,但强降水量和极端降水量呈增加趋势,降水强度有所增大;淮河流域^[16-18]年降水总量、强降水日数呈下降趋势,降水强度呈上升趋势,极端降水发生时间在流域内由西南向东北推迟。

20 世纪 60 年代以来,国内学者开始对渭河流域极端降水时空分布特征进行研究。渭河流域降水量季节分配差异较大,主要集中于夏、秋两季,降水量在时间上呈减少趋势,春、秋两季减小趋势更为显著^[19-20];流域降水量空间分布表现为“东南多、西北少”的趋势,上游减少趋势较中下游显著^[21];极端降水阈值由南向北阶梯状递减,流域降水特征向不均衡、极端化发展^[22-24]。因此,厘清气候变化异常背景下渭河流域降水时空分布特征演化规律,进一步明晰流域当前极端降水概率变化特征,不仅对提高渭河流域应对极端气候事件及其次生灾害的能力具有现实意义,也为周边区域极端气候事件发生规律及可预测性提供基础性研究,从而为区域气候变化研究提供有力证据。

1 研究区概况

渭河是黄河流域第一大支流,主干流全长约 818 km,总面积约 13.48 万 km²。流域支流众多,北岸有泾河和北洛河两大支流,控制流域面积分别为 2.70 万 km², 4.54 万 km²,共占渭河流域总面积的 53.7%。渭河流域地势西高东低,西部为黄土丘陵沟壑区,北部为陕北黄土高原区,东部为河谷冲积平原区——关中平原,南部为秦岭山区(图 1)。渭河流域位于半干旱半湿润地区,地形和海拔等因素导致渭河流域降水空间分布不均;典型的大陆性季风气候使其冬季气候寒冷干燥,夏季炎热多雨,降水量年际变化存在较大差异,降水主要集中于 7—10 月的强降水。



图 1 渭河流域分区示意图

2 资料与方法

2.1 数据来源

本文所需逐日气象资料来源于陕西、甘肃两省气候中心,并通过中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>)进行检验补充。为保证气象数据序列的完整性和时间一致性,选取渭河流域内气候要素完备、建站时间长、空间分布均匀且时间序列完整的 41 个气象台站(图 1),逐日降水数据时段取在 1961—2016 年。为减小渭河流域地形起伏和气象台站空间分布不均匀性的影响,基于 ArcGIS 10.5 构建泰森多边形^[25],估算各气象台站所控制的流域面积并计算其比例(泰森多边形面积分割见图 1);同时对流域台站降水阈值进行加权平均,确定流域的极端降水阈值。

2.2 极端降水阈值确定

渭河流域降水空间分布极不均匀,因此不能简单利用绝对值等级(例:50 mm/d)作为区域统一降水阈值。本文基于逐日降水数据定义各自气象台站的极端降水阈值,即将某台站 1961—2016 年日降水量 ≥ 0.1 mm 的降水量升序排列,将第 95 个百分位值的降水量定义为该台站极端降水阈值,当该站某日降水量大于该阈值时,就称该站出现极端降水事件^[2]。

2.3 极端降水特性指标选取

根据世界气象组织气候委员会(WMO-CCL)推荐的极端气候指数,结合闵岫和钱永甫的研究^[26],分别从极端和非常极端两个级别,量、频率、强度、贡献率 4 个角度,选定 R95P, RD95, RI95, RC95 共 4 个中国极端降水事件的区域性和持续性研究指标,对渭河流域的极端降水序列进行时空变化特征分析(表 1)。

表 1 极端降水特性指标定义

名称	指标	定义	单位
极端降水量	R95P	日降水量超过该测站极端降水阈值的降水量之和	mm
极端降水频数	RD95	日降水量超过极端降水阈值的日数	d
极端降水强度	RI95	极端降水量与极端降水频数的比值	mm/d
极端降水贡献率	RC95	极端降水量与年降水总量的比值	%

渭河流域 RI95 的变化范围在 24.37~39.81 mm/d (图 3C), 几乎所有台站极端降水强度都达到大雨以上量级, 高强度中心为渭河干流东部、下游和北洛河流域, 蓝田站极端降水强度最大, 为 39.81

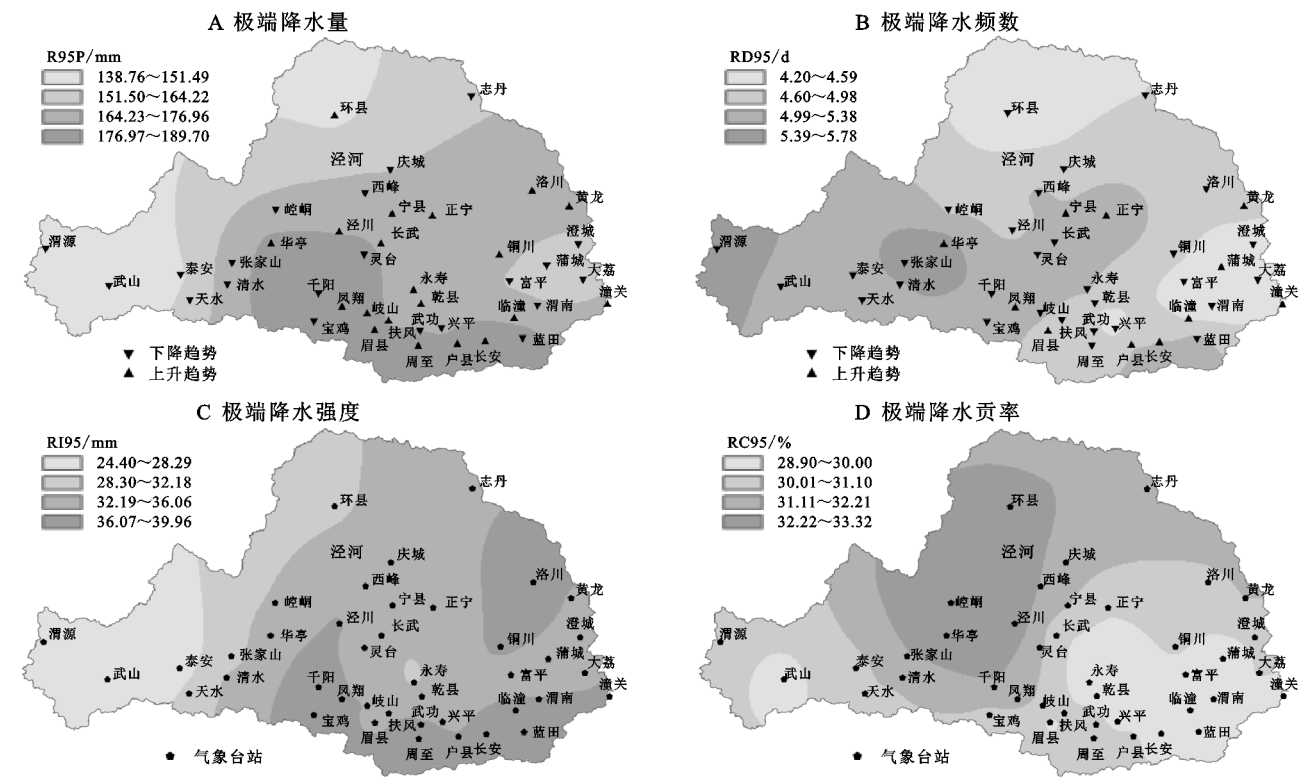


图 3 极端降水—量—频数—强度—贡献率空间特征

表 2 极端降水—量—频次—强度—贡献率相关系数(空间特征)

参数	纬度	prcptot	95th	R95P	RD95	RI95
95th	−0.384 *	0.698 **				
R95P	−0.311 *	0.921 **	0.562 **			
RD95	−0.082	0.282	−0.456 **	0.408 **		
RI95	−0.267	0.710 **	0.939 **	0.683 **	−0.386 *	
RC95	0.594 **	−0.326 *	−0.430 **	0.055	0.266	−0.175

注: * 通过 0.05 水平置信度检验; ** 通过 0.01 水平的置信度检验。

RI95 呈上升趋势,线性趋势为 0.320 mm/(d · 10 a),通过 0.05 显著性水平检验;主要可分为两个变化阶段,1961—1986 年变化平稳,1987 年后上升趋势显著,强度增大。由于极端降水频数变化较小,因此极端降水强度增强的主要原因是极端降水量增加。RC95 呈轻度上升趋势,1961—2016 年渭河流域年降水总量中极端降水量和非常极端降水量的比重增大,累计距平曲线显示 2000 年后降水贡献率高于平均值,结合降水量和降水频数年际变化可知 2000 年后年降水总量主要来自于几场大量级的极端降水。

3.3 极端降水频率分析

渭河流域洪涝灾害频发,当流域发生大范围高强度降水时,子流域降水汇聚于干流,导致干流及下游河道压力倍增,流域洪涝灾害风险升高,因此研究渭河流域极端降水时必须考虑渭河干流、泾河、北洛河对渭河下游的汇流影响。

3.3.1 不同区域极端降水频次年际变化及频率特征

为研究不同区域极端降水特征,规定若某区域超过

30%的气象台站发生极端降水,定义为极端降水事件;超过半数气象台站发生极端降水,定义为区域性极端降水事件。分别对渭河流域 4 个区域极端降水事件发生频次、频率进行计算,结果见图 5。

1961—2016 年 4 个区域极端降水事件变化趋势均不显著,但不同年代间存在较大变化差异。综合分析发现,4 个区域极端降水事件在 1981—1984 年、2003—2005 年发生频次较高,除北洛河外,均在 1983 年达到频次最高值,干流次数最多为 20 次;此阶段区域极端降水事件的发生次数也处于高值,干流达到了 10 次。1991—1995 年极端降水事件频次较少;2000 年之后频次增多,2011—2014 年再次出现极端降水事件频次小峰值,流域内干流和泾河流域增多最为明显。

1961—2016 年,极端降水事件发生频次最高的区域为渭河干流,频率高达 3.45%;干流区域性降水事件发生频率也最高为 1.90%,共 217 次。渭河流域中下游地势较低、河网密集程度较高、河道排水泄洪能力有限,因此高频率的极端降水极易引发洪灾。

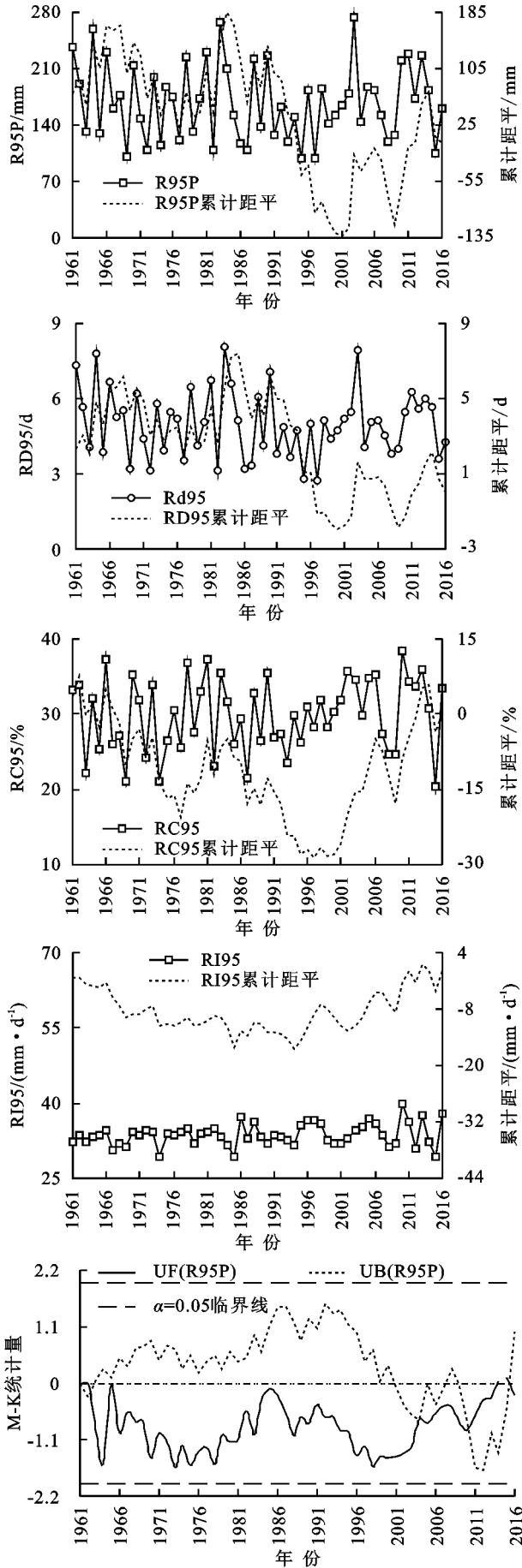


图 4 极端降水—量—频数—强度—贡献率年际变化

3.3.2 多区域极端降水频次年际变化及频率特征
渭河流域多区域降水事件发生频次年际变化见图 6, 多区域同时发生极端降水事件的频次变化趋势均不显著, 但年际变化波动较大。

1961—2016 年, 渭河流域单个区域发生极端降水事件的频次变化趋势不显著。两个区域同时发生极端降水事件的频次表现为轻微下降趋势, 1961—1970 年、1981—1984 年极端降水事件发生较多, 其中 1983 年极端降水发生频次最多, 高达 11 次, 其中有 3 次为区域性极端降水事件; 1989—1999 年发生频次较少, 均在 4 次左右; 2000 年后极端降水事件发生频次增多显著, 增加速率为 0.81 d/10 a。3 个区域同时发生极端降水事件的年际变化趋势波动较大, 1975—1984 年频次高于均值, 1983 年发生频次最高为 6 次; 1984—1995 年频次减少趋势明显; 1998—2012 年频次较高, 2011 年极端降水事件高达 5 次。

全流域同时发生极端降水事件的变化趋势平稳, 有 17 a 的极端降水事件频次超过 56 a 均值, 1976 年、2003 年较高均为 5 次; 2000 年后渭河流域极端降水事件发生频次增多, 尤其是 2011 年, 3 次均为区域性极端降水事件。考虑到子区域极端降水的叠加效应, 此时渭河干流河道和下游汇流处的压力将远超过部分台站降水的汇流压力, 流域洪涝灾害风险升高。

1961—2016 年, 渭河全流域发生极端降水事件共 67 次, 频率为 0.51%, 其中有 23 次为一半以上气象台站的降水超过极端降水阈值; 3 个区域同时产生区域性极端降水共 12 次, 频率为 0.9‰。

通过对渭河流域暴雨洪灾资料调查发现渭河流域洪灾形成原因复杂多样, 不同子流域的极端降水、连续降水等都会导致洪灾, 主要分为 4 种情况: 局部极端降水导致洪灾、上游极端降水导致洪灾、连续阴雨叠加极端降水导致洪灾和多流域极端降水叠加导致洪灾^[28]。水文年鉴资料显示, 渭河流域 1961—2016 年多次洪水灾害。1981 年 8 月中旬至 9 月初长时段极端降水导致渭河流域林家村和中下游支流高量级来水, 从而引发流域性洪水; 2003 年 8 月 26 日至 10 月 12 日, 渭河流域发生 1981 年以来高水位、大洪量洪水。同年 8 月下旬至 10 月上旬, 渭河流域共发生 6 次大范围、高强度极端降水事件, 其中 8 月 28 日、9 月 19 日和 10 月 10 日共 3 次全流域极端降水。2011 年 9 月 3 日以来, 渭河流域先后出现三次较强降水过程, 造成渭河秦岭北麓支流水位猛涨, 汇入渭河干流后与干流洪水形成首尾相连的秋淋洪水过程^[29-30]。2011 年 9 月 18 日, 渭河全流域发生了极端降水事件。

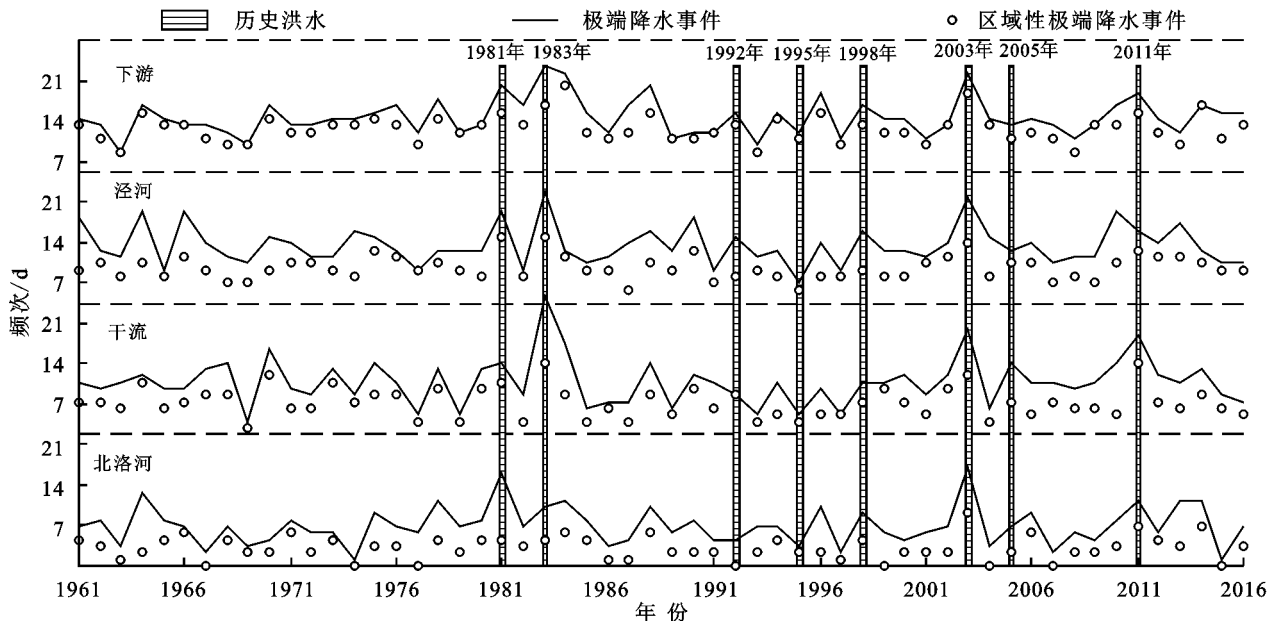


图5 渭河流域降水事件频次

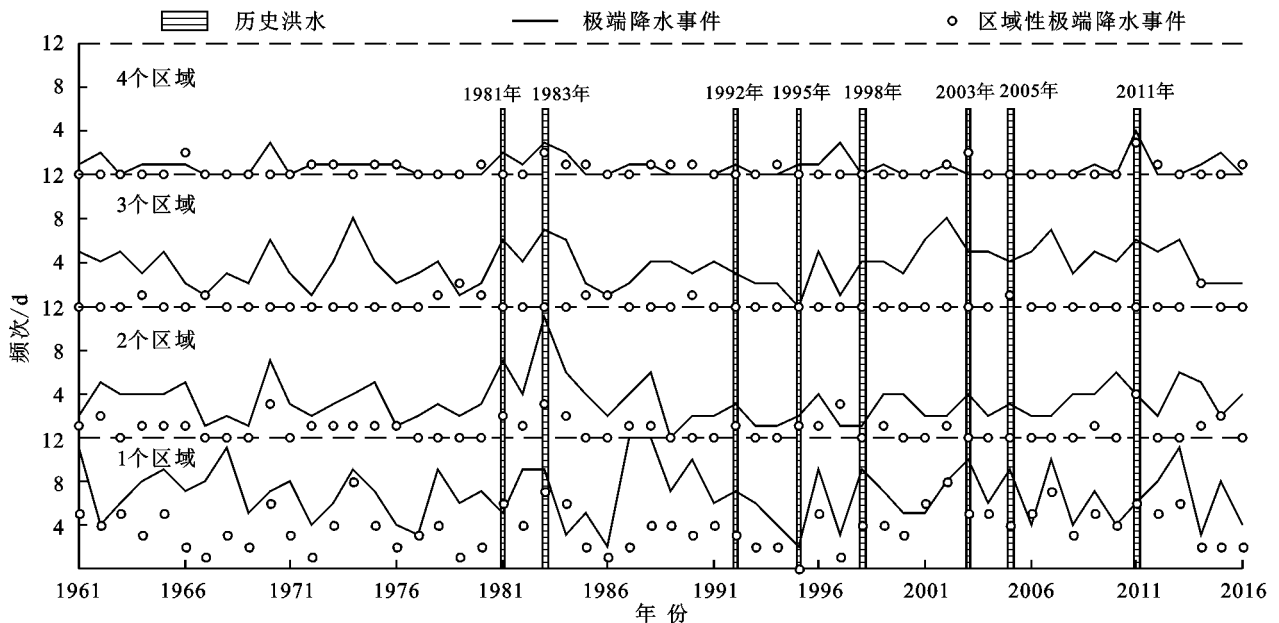


图6 渭河流域多区域降水事件频次

通过参考水文年鉴发现几次流域性洪水均伴随极端降水,尤其是渭河流域干流下游,小范围极端降水也多导致中常洪水量级的洪涝灾害。因此研究极端降水事件时,应充分考虑多个不同区域降水对干流河道和干支流汇流处的压力,及时降低灾害风险。

4 结论

(1) 渭河流域极端降水阈值呈从西北至东南增多的趋势,与年降水总量空间分布一致;极端降水阈值变化范围介于 16.40~26.29 mm,超过 17% 的台站达到大雨(25.0 mm)以上量级,主要分布于渭河下游地区。

(2) R95P 变化范围介于 127.81~201.41 mm,随纬

度升高而减少,流域东部和下游较高,此区域内各气象台站主要呈增加趋势;上游、泾河、北洛河北部较低,上游各气象台站主要呈减少趋势。RD95 变化范围介于 4.16~5.84 d,干流和泾河流域较高,下游和北洛河流域较低;流域内多数气象台站 RD95 呈减少趋势。

(3) RI95 变化范围介于 24.37~39.81 mm/d,与 R95P 的空间分布相关性较好,降水量越大的地区降水强度越高;干流东部、下游和北洛河流域强度较高。RC95 与纬度有较好的相关性,纬度越高,贡献率也越高;其中泾河西部年降水总量主要来自于几场极端降水。

(4) 1961—2016 年渭河流域 4 个极端降水指标的年际变化趋势整体平稳,仅 R95P 在 2010 年发生增多突

变;56 a 内极端降水强度有所增强,主要是降水量增加导致。RC95 呈增加趋势,极端降水占年降水总量的比重增大,2000 年后极端降水占比增加显著。

(5)渭河下游区域性极端降水事件发生频率最高;极端降水事件主要发生于 20 世纪 80 年代初期和 21 世纪初期;渭河流域的几次洪灾均伴随着极端降水,未来应考虑多区域极端降水对干流及下游河道的叠加作用,降低灾害风险。

参考文献:

- [1] Xiao Song, Zhao Zhang, Yi Chen, et al. Spatiotemporal changes of global extreme temperature events (ETEs) since 1981 and the meteorological causes[J]. Natural Hazards, 2013, 70(2): 975-994.
- [2] 刘长空,陈东辉,郭刚,等.吉林省夏季极端降水事件特征分析[J].灾害学,2020,35(1):102-108.
- [3] 任国玉,吴虹,陈正洪.我国降水变化趋势的空间特征[J].应用气象学报,2000,11(3):322-330.
- [4] 任国玉,柳艳菊,孙秀宝,等.中国大陆降水时空变异规律:Ⅲ.趋势变化原因[J].水科学进展,2016,27(3):327-348.
- [5] 陈峪,陈鲜艳,任国玉.中国主要河流流域极端降水变化特征[J].气候变化研究进展,2010,6(4):265-269.
- [6] 陈峪,高歌,任国玉,等.中国十大流域近 40 多年降水量时空变化特征[J].自然资源学报,2005,20(5):637-643.
- [7] 冯亚文,任国玉,刘志雨,等.长江上游降水变化及其对径流的影响[J].资源科学,2013,35(6):1268-1276.
- [8] 潘欣,尹义星,王小军.1960—2010 年长江流域极端降水的时空演变及未来趋势[J].长江流域资源与环境,2017,26(3):436-444.
- [9] 王琼,张明军,王圣杰,等.1962—2011 年长江流域极端气温事件分析[J].地理学报,2013,68(5):611-625.
- [10] 何金梅,李照荣,闫昕畅,等.黄河兰州上游流域近 4 a 汛期降水变化特征[J].干旱气象,2019,37(6):899-905,943.
- [11] 贺振,贺俊平.1960—2012 年黄河流域极端降水时空变化[J].资源科学,2014,36(3):490-501.
- [12] 王远见,傅旭东,王光谦.黄河流域降雨时空分布特征[J].清华大学学报:自然科学版,2018,58(11):972-978.
- [13] 赵翠平,陈岩,王卫光,等.黄河流域近 50 a 极端降水指数的时空变化[J].人民黄河,2015,37(1):18-22.
- [14] 赵一飞,邹欣庆,许鑫王豪.珠江流域极端降水事件及其与大气环流之间的关系[J].生态学杂志,2014,33(9):2528-2537.
- [15] 郑江禹,张强,史培军,等.珠江流域多尺度极端降水时空特征及影响因子研究[J].地理科学,2017,37(2):283-291.
- [16] 潘欣,尹义星,王小军.1960—2014 年淮河流域极端降水发生时间的时空特征[J].高原气象,2019,38(2):377-385.
- [17] 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.
- [18] 赵丹,张叶晖,刘俊杰.淮河流域近 58 年降水特征分析[J].水电能源科学,2018,36(11):9-13.
- [19] 董晴晴,王会肖.60 年来渭河关中地区气温与降水变化及其原因[J].南水北调与水利科技,2016,14(6):33-38,49.
- [20] 来文立,宋进喜,章杰,等.近 60 a 渭河流域降水特征[J].干旱区研究,2013,30(6):1106-1112.
- [21] 周旗,张海宁,任源鑫.1961—2016 年渭河流域极端降水事件研究[J].地理科学,2020,40(5):833-841.
- [22] 姜创业,蔡新玲,吴素良,等.1961—2009 年陕西省极端强降水事件的时空演变[J].干旱区研究,2011,28(1):151-157.
- [23] 李斌,解建仓,胡彦华,等.1961—2013 年渭河流域降水与径流变化特征[J].南水北调与水利科技,2017,15(2):29-36.
- [24] 赵安周,朱秀芳,刘宪锋,等.1965—2013 年渭河流域降水时空变化分析[J].自然资源学报,2015,30(11):1896-1909.
- [25] 徐晶,林建,姚学祥,等.七大江河流域面雨量计算方法及应用[J].气象,2001(11):13-16,51.
- [26] 闵岫.钱永甫.中国极端降水事件的区域性和持续性研究[J].水科学进展,2008,19(6):763-771.
- [27] 万智巍,周岩,贾玉连,等.近 130 年来赣江洪水灾害事件重建与特征诊断[J].灾害学,2018,33(1):96-101,110.
- [28] 王旭仙,孙一民,赵奎锋,等.渭河流域洪水灾害特征分析[J].灾害学,2003(1):44-48.
- [29] 蔡新玲,康岚,孙娴,等.2011 年渭河和汉江上游秋汛期环流特征及暴雨致洪成因[J].暴雨灾害,2013,32(2):120-125.
- [30] 雷文青.渭河 2011 年秋淋洪水减灾原因浅析[J].陕西水利,2012(6):17-19.
- [31] 左德鹏,徐宗学,李景玉,等.气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J].水科学进展,2011,22(4):455-461.
- [32] 张城,李晶,周自翔.基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局[J].地理科学,2021,41(2):350-359.
- [33] 张新弟,任源鑫,张海宁,等.21 世纪宝鸡市水资源特征分析及对策研究[J].湖北农业科学,2020,59(9):37-40.