

引用格式: 刘吉峰, 靳莉君, 张永生. 近 60 年渭河流域极端降水和洪水演变特征[J]. 山地学报, 2023, 41(2): 192-203.

LIU Jifeng, JIN Lijun, ZHANG Yongsheng. Evolution characteristics of extreme precipitation and flood in the Weihe River basin of China over last 60 years [J]. Mountain Research, 2023, 41(2): 192-203.

近 60 年渭河流域极端降水和洪水演变特征

刘吉峰, 靳莉君, 张永生

(黄河水利委员会水文局, 郑州 450004)

摘 要: 渭河流域地处中国西北地区东部, 是气候敏感区和生态环境脆弱区, 极端降水事件往往引发洪水、泥石流等灾害。现有研究主要集中在降水引发的流域径流变化, 而极端降水和洪水变化规律有待挖掘。本文基于 1961—2021 年气象水文资料, 选用 8 个极端降水指数、4 个代表水文站年最大洪峰流量, 采用百分位阈值法、Kriging 空间插值法、线性回归法、滑动平均法、小波分析法, 分析了渭河流域极端降水和洪水时空演变特征、周期特征以及 2021 年极端降水和洪水特性。结果表明: (1) 近 60 年渭河流域极端降水总量和暴雨频次显著增加的同时, 极端降水强度亦有所增强, 而弱降水事件减少。极端洪水整体呈不显著减少趋势。极端降水和洪水均在 2000 年以后显著增加, 特别是极端降水总量和暴雨频次较多年均值偏多 12%~22%, 并且各极端降水指数极大值均出现在 2000 年以后。(2) 极端降水和洪水年内分布不均, 前者主要集中在 7 月和 8 月, 后者除“七下八上”期外, 9 月也是多发期。(3) 各极端降水指数均呈现由上游向下游递增的分布, 中游南部极端降水普遍强于北部。流域内大部分站点极端降水指数呈增加趋势, 显著增加地区位于中游周至—临潼区间以及长武—宁县。(4) 极端降水和洪水存在多个周期变化特征, 且极端洪水周期年代际特征显著。(5) 2021 年渭河流域极端降水强度、大雨以上降雨日数均为近 61 年来之最, 华县站出现 2012 年以来最大洪水过程, 咸阳站出现 1935 年有实测资料以来 9 月份同期最大洪水。研究结果可为渭河流域水旱灾害防御以及治理规划提供参考依据。

关键词: 极端降水; 年最大洪峰流量; 趋势分析; 小波分析; 时空变化; 渭河流域

中图分类号: P426

文献标志码: A

以气候变暖为典型特征的全球气候变化引发各地极端气候事件频发, 对社会可持续发展及人民生活造成严重影响^[1-3]。其中, 极端降水导致的洪水灾害直接影响区域水资源多寡, 威胁国家防洪安全、供水安全以及生态环境安全^[4]。

近年来, 西北地区极端降水和洪水事件频发^[5-8]。渭河流域地处西北地区东部, 是气候敏感区和生态环境脆弱区, 少数几场极端降水事件往往就能引发洪水、泥石流等灾害^[9]。相关研究表明: 渭河极端降水自 1990 年以后年际波动明显增大, 同

时上游极端降水上升趋势高于中下游^[10-11]; 该区域年径流量呈减少趋势^[12-13], 且与极端降水密切相关^[14-15]。已有研究主要集中在该区域降水引发的径流演变趋势、突变年份及周期性特征等方面^[16-18], 对极端降水和洪水变化特征研究相对不足。

2021 年, 渭河发生有实测资料以来最强秋汛^[19], 使极端降水特征更加凸显。本文以 1961—2021 渭河流域气象水文数据为基础, 通过构建极端降水和洪水指标, 对该区域极端降水和洪水的时空

收稿日期(Received date): 2022-12-29; 改回日期(Accepted date): 2023-04-07

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划项目专题(2021YFC3201104-02)。[National Key Research and Development Program of China (2021YFC3201104-02)]

作者简介(Biography): 刘吉峰(1972-), 男, 山东聊城人, 博士, 教授级高工, 主要研究方向: 黄河流域水文预报。[LIU Jifeng (1972-), male, born in Liaocheng, Shandong province, Ph. D., professor of engineering, research on hydrological forecast of the Yellow River basin] E-mail: jifengliu@163.com

演变趋势、周期特征进行分析,并进一步探讨 2021 年该区极端降水和洪水特性,深入挖掘该地极端降水与洪水的变化规律,以期为流域治理规划和水旱灾害防御决策提供依据。

1 研究区概况

渭河是黄河第一大支流,发源于甘肃省渭源县,流经甘肃、宁夏、陕西三省,在陕西省潼关县注入黄河,干流全长 818 km。流域内地貌复杂,北部为黄土高原,南部为秦岭山脉,受大陆性季风气候影响,降水时空分布不均,呈现出东南向西北递减的变化特征。年均降水量 564.5 mm,年均天然径流量 $63 \times 10^8 \text{ m}^3$ [20]。泾河是黄河的二级支流,也是渭河最大支流。张家山水文站位于泾河下游,集水面积 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,占泾河流域面积的 95%,是泾河重要把口站 [21]。咸阳、临潼、华县水文站位于渭河干流的中下游,集水面积分别为 $4.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $9.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $10.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,是渭河干流重要控制站 [22]。

2 资料与方法

2.1 资料来源

(1)国家气象信息中心提供的渭河流域 55 个

气象站 1961—2021 年逐日降水数据,数据序列经过初步质量控制,缺测较少,对个别缺测值采用反距离权重法插补;

(2)在极端降水成因分析中,使用 NCEP/NCAR 提供的空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的全球格点再分析资料;

(3)张家山、咸阳、临潼、华县水文站年最大洪峰流量来源于水文年鉴黄河流域水文部门,其中临潼站数据序列为 1965—2021 年,其余为 1961—2021 年。站点具体位置如图 1 所示。

2.2 研究方法

考虑各极端降水指数特点,参考国内外相关文献 [15,17,19],从世界气象组织(WMO)气候变化监测指数专家组(ETCCDMI)推荐的 27 个极端气候指数 (http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices)中选取 8 个极端降水指数,定量分析渭河流域极端降水变化特征(表 1)。其中,百分位阈值的界定参考 Bonsal 等 [23] 工作,将每年逐日降水数据(日降水量 $\geq 1 \text{ mm}$)按升序排列 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$,某个值小于或等于 x_m 的概率为:

$$P = \frac{m - 0.31}{n + 0.38} \quad (1)$$

式中, n 为降水数据个数。

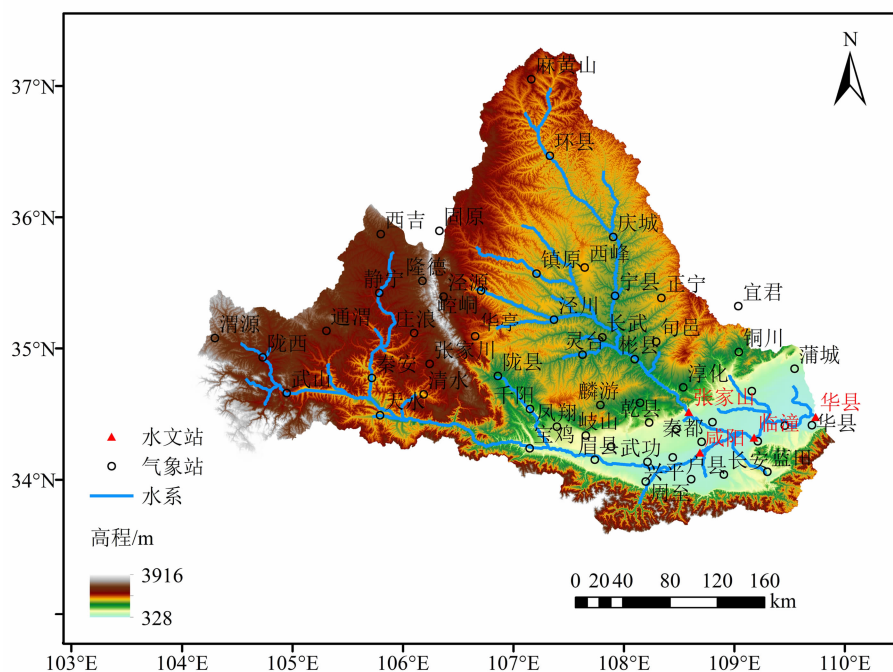


图 1 渭河流域水文和气象站点分布

Fig. 1 Meteorological stations and hydrological stations in the Weihe River basin of China

与采用某一固定的降水量定义阈值法以及拟合经验曲线函数定义阈值法相比,百分位阈值法更能反映极端降水的长期变化趋势,更具有统计学意义^[24]。

表 1 极端降水指数及其定义
Tab. 1 Definition of the extreme precipitation indices

指数名称	定义	单位
Rx1 day	年内日最大降水量	mm
Rx5 day	年内连续 5 日最大降水总量	mm
SDII	年降水总量/降水日数(日降水量≥1mm)	mm·d ⁻¹
R10	年内日降水量≥10 mm 的总日数	d
R20	年内日降水量≥20 mm 的总日数	d
R50	年内日降水量≥50 mm 的总日数	d
R95pTOT	日降水量≥95 百分位日降水量的降水总量	mm
R99pTOT	日降水量≥99 百分位日降水量的降水总量	mm

采用 Kriging 插值法对各极端降水指数进行空间插值分析;采用线性回归法并借助 *t* 检验分析各极端降水指数的年际变化;采用九点滑动平均法分析各极端降水指数的年代际特征;采用 Morlet 小波分析法识别各极端降水指数的周期变化。对极端洪水的分析采用年最大洪峰流量作为特征量,趋势及周期分析与极端降水分析方法相同。

3 结果与分析

3.1 极端降水特征分析

3.1.1 极端降水指数时域特征

图 2 和表 2 为利用线性回归和九点滑动平均法对极端降水指数序列进行处理,得到的渭河流域极端降水指数变化趋势图以及年代际特征值统计结果。

1961—2020 年,除 R10 呈减少趋势外,其余指数均呈增加趋势。其中 Rx1 day 通过 0. 05 信度检验,R50、R95pTOT、R99pTOT 通过 0. 1 信度检验,均呈显著增加趋势,这四个指标的变化预示着渭河流域极端降水总量以及暴雨的强度和频次的显著增加。Rx5 day、SDII、R20 总体增加但不显著(*p* > 0. 1),表明渭河流域极端降水强度、大雨事件不显著增加的同时,弱降水事件(R10)减少。

从九点滑动平均曲线上看,各极端降水指数具有典型的年代际振荡特征。其中 Rx1 day、Rx5 day、SDII、R20、R50、R95pTOT、R99pTOT 呈现“增加—减少—增加”的阶段变化趋势,R10 则表现为“减少—增加—减少—增加”的多波型变化趋势。总体来看,渭河流域极端降水大致可以分为三个阶段,1961—1985 年为波动增加阶段,1986—2000 年为持续减少阶段,2001—2020 年为急剧增加阶段,目前仍然处于增加趋势中。从表 2 也可以看出,2001—2020 年平均极端降水指数明显高于 1961—1985 年和 1986—2000 年,特别是表征暴雨和极端降水总量的 R50、R95pTOT、R99pTOT 分别达 0. 70 d、148. 50 mm 和 51. 25 mm,较多年均值偏多 12%~22%。另外从逐年变化曲线上也可以看出,各指数极大值多发生在 2000 年以后。

以 Rx1 day 为例,从极端降水发生频率年内分布来看(图 3),6—9 月为极端降水多发期,极端降水频率约占全年的 89%,其中 7 月和 8 月占 63%,最大月为 8 月,约占全年的 32%。极端降水集中于盛夏的特征十分显著。进一步统计发现,极端降水主要集中在 7 月上旬、7 月下旬以及 8 月中下旬,并且各旬之间发生频率差别不大。

3.1.2 极端降水指数空间分布

渭河流域 8 个极端降水指数空间分布大致相

表 2 不同时期渭河流域极端降水指数特征值

Tab. 2 Characteristic value of extreme precipitation indices in different periods in the Weihe River basin

时间	各极端降水指数特征值							
	Rx1 day/mm	Rx5 day/mm	SDII/(mm·d ⁻¹)	R10/d	R20/d	R50/d	R95pTOT/mm	R99pTOT/mm
1961—1985 年	49. 26	85. 42	8. 24	18. 40	6. 44	0. 55	129. 91	39. 47
1986—2000 年	48. 10	76. 14	7. 91	15. 57	5. 62	0. 49	116. 26	34. 44
2001—2020 年	53. 74	87. 23	8. 45	17. 31	6. 63	0. 70	148. 50	51. 25
1961—2020 年	50. 46	83. 70	8. 23	17. 37	6. 30	0. 58	132. 69	42. 14

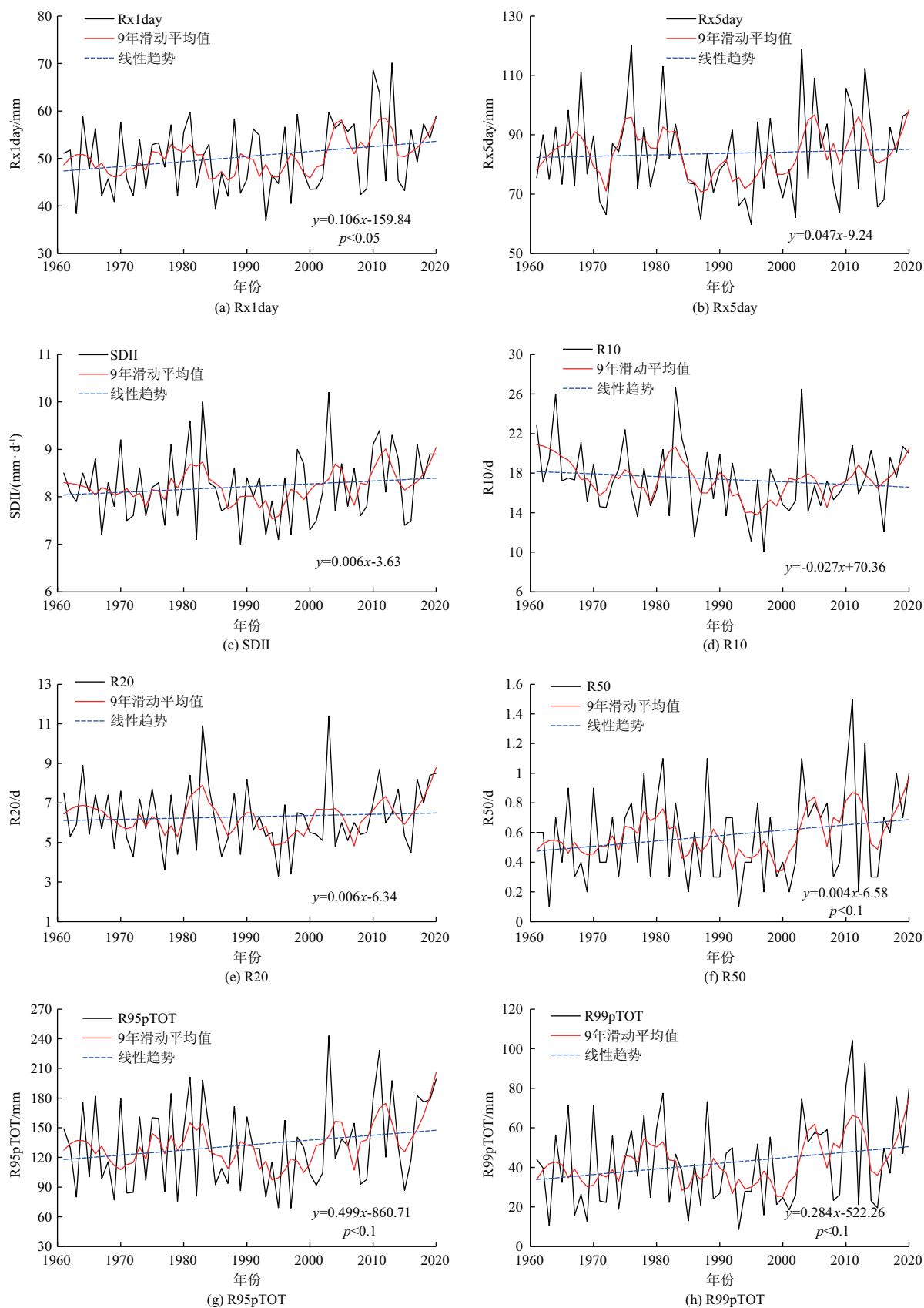


图 2 渭河流域极端降水指数变化趋势

Fig. 2 Trends of extreme precipitation indices in the Weihe River basin

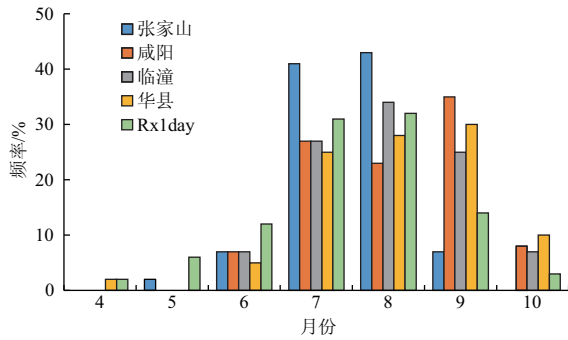


图 3 极端降水与极端洪水的年内变化

Fig. 3 Intra-year variation of extreme precipitation and extreme flood

同,均呈现自上游向下游递增的分布态势(图 4)。各指数最大值均出现在渭河下游蓝田站,最小值多出现在渭河上游武山、通渭、陇西之间,但 R95pTOT、R99pTOT 最小值出现在泾河上游麻黄山—环县,说明泾河上游极端降水总量不及渭河干流上游。仅渭河中游而言,南部极端降水普遍强于北部,极端降水日数以及极端降水总量的大值区位于宝鸡、千阳、凤翔附近,宜君、铜川附近为次大值区,两者之间为明显的低值区。

从多年变化趋势来看,除R10外,大部分站点

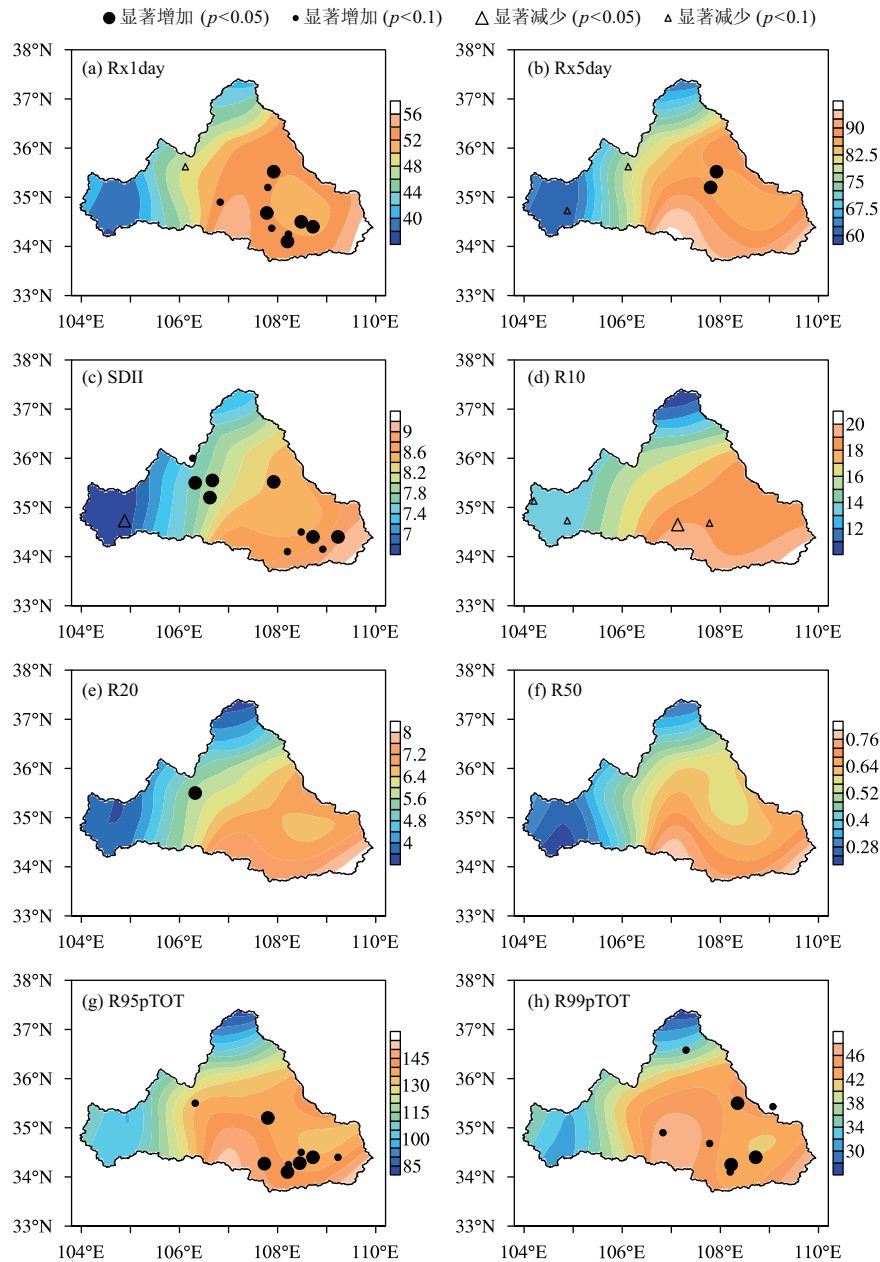


图 4 渭河流域极端降水指数空间分布及变化趋势

Fig. 4 Spatial distribution and variation trends of extreme precipitation indices in the Weihe River basin

极端降水指数呈现增多趋势,特别是 Rx1day、SDII、R95pTOT、R99pTOT 呈增多趋势的站点超过 3/4,而超过 83% 的站点 R10 呈现减少趋势。极端降水显著增多的区域主要集中在渭河中游周至—临潼区间以及长武—宁县,上述站点极端降水强度以及降水总量增加非常明显,特别是秦都和宁县站,前者 SDII、Rx1day、R95pTOT、R99pTOT 均达到 0.05 显著性水平,后者 SDII、Rx1day、Rx5day 均达到 0.05 显著性水平。另外,渭河上游特别是张家川以上以及下游的铜川—富平—渭南—华县一带,极端降水指数呈不显著减少趋势、R10 呈不显著增加趋势。

总体而言,极端降水强度及总量的高、低值区分别位于下游临潼以下和上游张家川以上,长期变化均呈现为不显著减少,中游极端降水增加并且以周至—临潼区间以及长武—宁县增加最为显著,因此要特别防范上述地区极端降水增多带来的影响。

3.1.3 极端降水指数周期特征

小波分析可以体现指标在研究时域内针对不同时间尺度的周期性特征,结合小波模可以反映波动能量随年尺度分布情况,进而确定主周期。由图 5 可以看出,除 R10、R20 外,其余极端降水指数均存在 24~40 a 和 6~8 a 两类周期,其中,前者贯穿整个研究时域,大致出现 2 次震荡;后者主要出现在

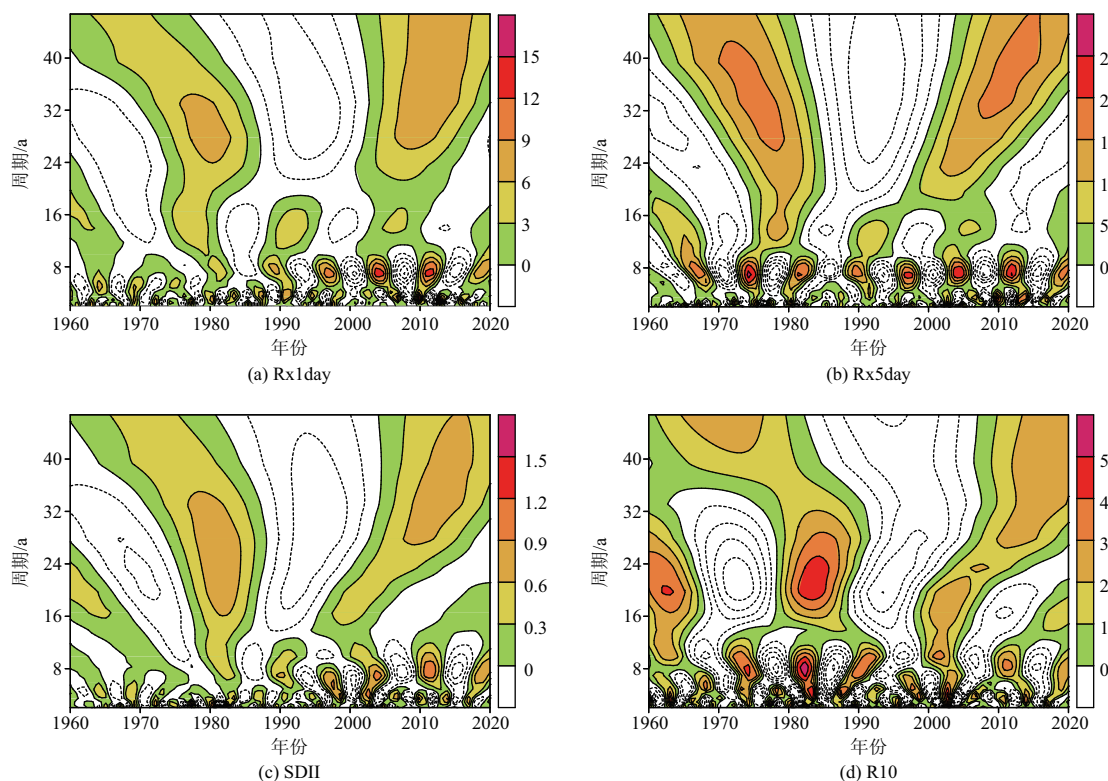
1991 年以后并伴随 5 次震荡。R10、R20 存在 6~8 a、16~24 a 和 24~40 a 三类周期,其中 6~8 a 周期主要出现在 1991 年之前(R10)和 1981 年以后(R20),16~24 a 周期存在于 1961—1990 年,之后转为 24~40 a 长周期。小波模结果显示,大部分极端降水指数表现出 6~8 a 为第一主周期,24~40 a 为第二主周期的特征,R10、R20 第一主周期不变、第二主周期为 16~24 a。

3.2 极端洪水特征分析

3.2.1 极端洪水时域特征

由泾河张家山站及渭河干流咸阳、临潼、华县站极端洪水指数变化趋势(图 6)可知,四站极端洪水均呈小幅减小趋势,年际变化倾向率分别为 -279.5、-227.4、-345.7 和 -308.0 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$,均未通过 0.1 显著性检验。

从九点滑动平均曲线上看,张家山站极端洪水量在 1961—1980 年较其他时段明显偏高,1981—1990 年流量显著减少,1991—2000 年流量波动增加,2010 年之后流量再次减少。咸阳站 1961—1980 年流量最大,之后流量呈波动减少持续至 2000 年左右,2000 年以后流量增加。临潼和华县站年最大流量变化趋势与咸阳站类似。从表 3 也可以看出,张家山站极端洪水呈现出“减小—增大—减小”的多



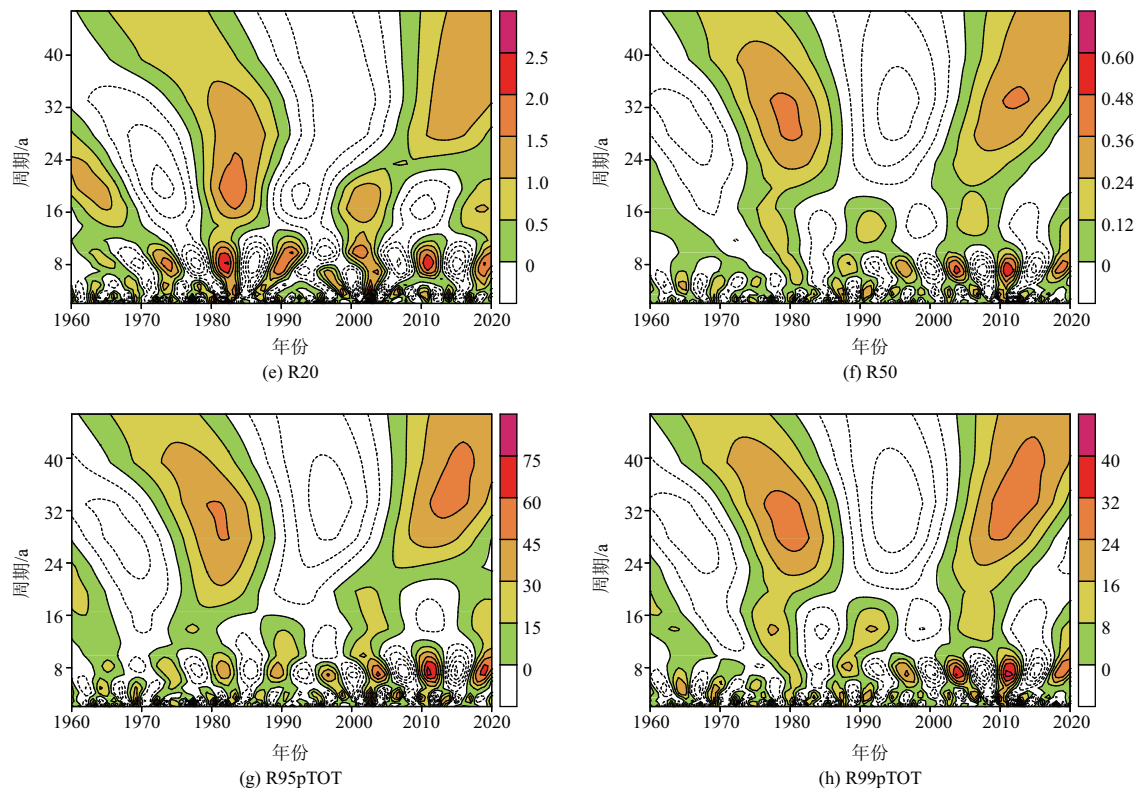


图 5 渭河流域极端降水指数的小波分析

Fig. 5 Wavelet analysis of extreme precipitation in the Weihe River basin

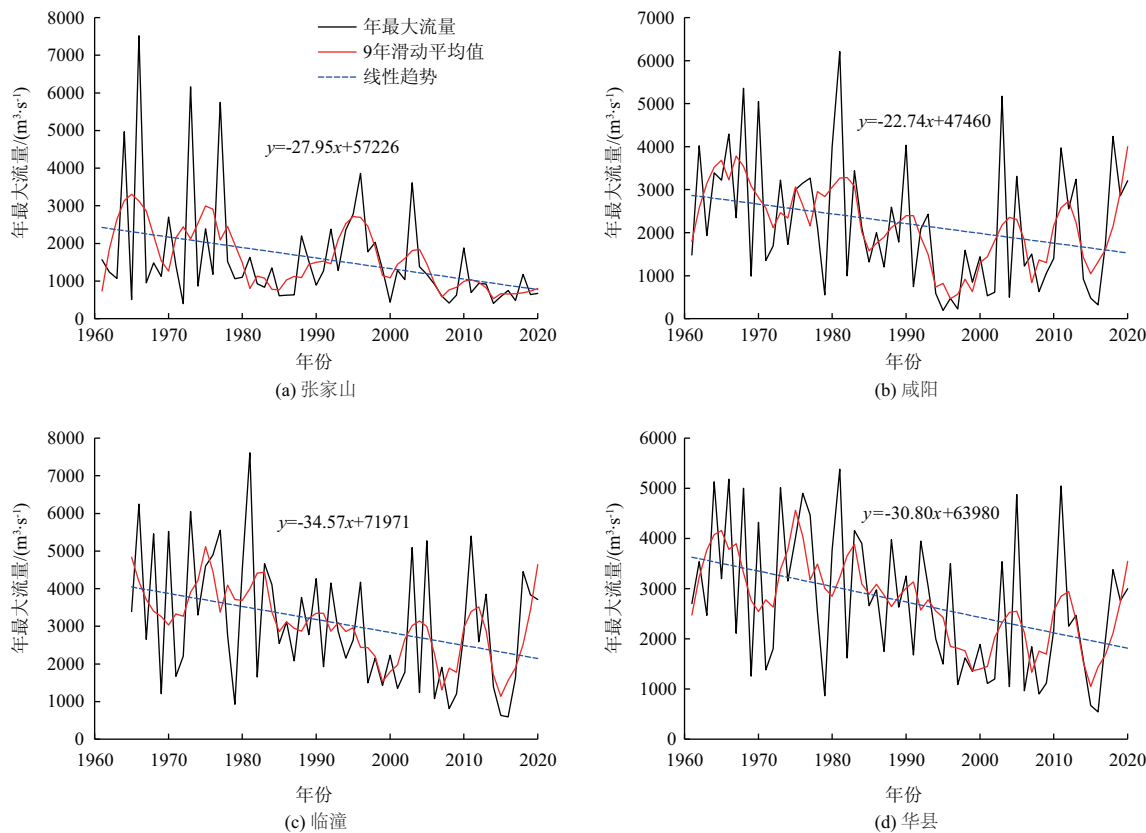


图 6 渭河极端洪水变化趋势图

Fig. 6 Trends of extreme flood in the Weihe River basin

波型变化趋势,咸阳、临潼、华县站极端洪水呈现出“减少—增加”的变化趋势。

表 3 不同时期渭河流域极端洪水特征值
Tab. 3 Characteristic values of extreme flood indices
in different periods in the Weihe River basin

时间	各水文站极端洪水特征值/(10 ³ (m ³ ·s ⁻¹))			
	张家山	咸阳	临潼	华县
1961—1970 年	2.31	3.21	4.08	3.49
1971—1980 年	2.18	2.41	3.65	3.19
1981—1990 年	1.12	2.57	3.66	3.23
1991—2000 年	1.95	1.06	2.52	2.16
2001—2010 年	1.29	1.59	2.25	1.88
2011—2020 年	0.73	2.35	2.81	2.37

对 1961—2020 年渭河极端洪水统计分析发现,年内最早极端洪水出现在 2015 年 4 月 7 日(华县站),最晚出现在 1961 年 10 月 20 日(华县站)。从洪水发生频率年内分布来看(图 3),7—9 月极端洪水占 86%,其中张家山站、临潼站发生频率最多的月份为 8 月,咸阳站、华县站发生频率最多的月份为 9 月。进一步统计发现,8 月下旬极端洪水出现频率

最高,占 14%,其次是 7 月下旬(占 13%)和 9 月中旬(占 12%)。可见,除“七下八上”盛夏期外,秋季也是渭河洪水发生频率较高的时段。

3.2.2 极端洪水周期特征

从图 7 可以看出,张家山站极端洪水主要表现为 24~40 a 周期,且贯穿整个时域,其他时间尺度的周期不显著且不连续。咸阳站极端洪水在 40 a 和 8~24 a、8~16 a、8~10 a 的时间尺度上信号较为强烈,周期的年代际特征显著,其中 1961—1970 年主要为 8~24 a 周期,1971—1990 年为 8~16 a 周期,2000 年以后为 8~10 a 周期。临潼站极端洪水主要为 40 a 和 8~10 a 周期,其中 40 a 周期十分明显,贯穿整个时域,8~10 a 周期在 1991—2000 年未出现,其他时段显著。华县站与临潼站类似。小波模结果显示,咸阳、临潼、华县站极端洪水第一主周期均为 8~10 a 并且 2000 年以后该周期有所增强,40 a 为第二主周期,张家山站极端洪水仅存在 24~40 a 周期。

3.3 2021 年极端降水与洪水特征

2021 年汛期(6—10 月),渭河流域总降水 561.4 mm,相当于该地年平均降水量(557.8 mm),

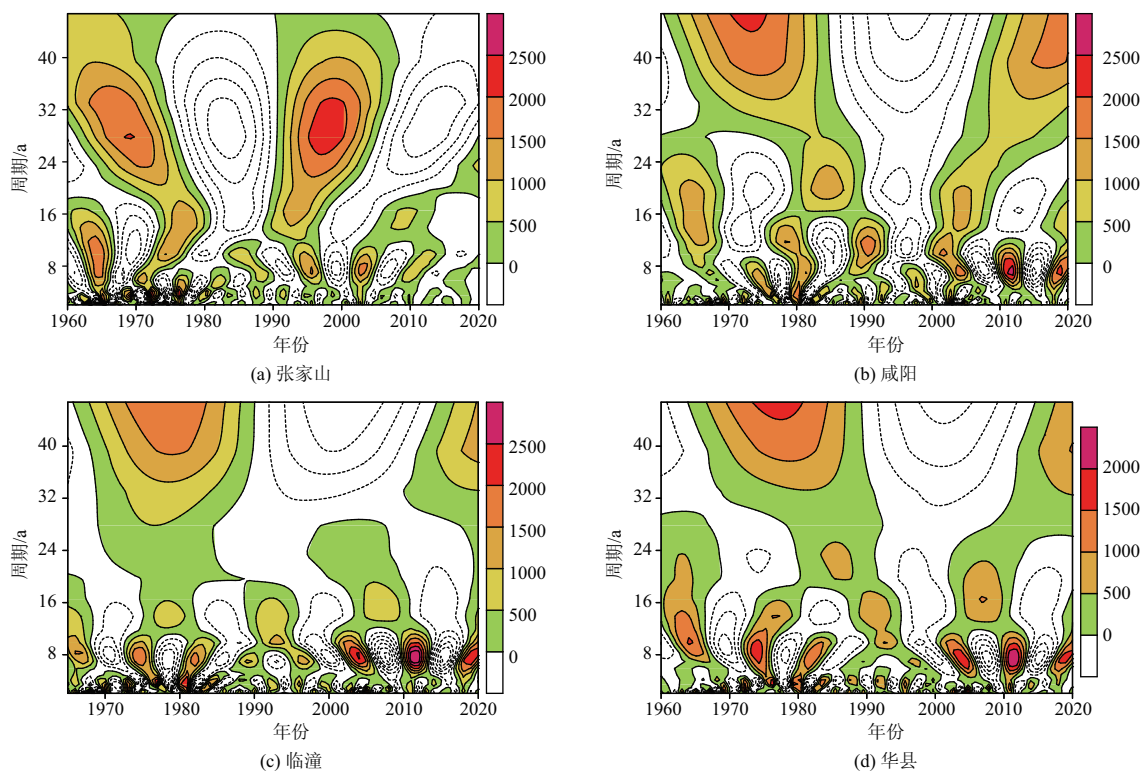


图 7 渭河流域极端降水指数的小波分析

Fig. 7 Wavelet analysis of extreme precipitation in the Weihe River basin

较常年同期偏多 37%, 其中 6 月降水接近同期, 7 月和 8 月偏少 10% ~ 22%, 9—10 月偏多 1.2 ~ 1.5 倍, 秋雨特征十分显著。对本年极端降水统计发现: SDII、R20 分别有 18 站、19 站突破历史极值达到近 61 年来最大, 表现出极端降水强度强、大雨日数多的特点, 另外, R10、Rx5day、R50 也分别有 1 站、6 站、7 站突破历史极值。突破极值站点主要集中在渭河中游的秦都—渭南区间以及泾河下游宜君—铜川—蒲城一带。以长安站为例, Rx5day、SDII、R10、R20 多年均值分别为 92.57 mm、9.32 mm · d⁻¹、21.43 d、8.58 d, 2021 年 1—10 月高达 200.20 mm、13.28 mm · d⁻¹、37 d、18 d, 较年均值偏多 43% ~ 116%, 降水的异常性、极端性可见一斑。此外, 从整个流域的平均极端降水指数来看, Rx5day、SDII、R20 为近 61 年来最大, R50 仅次于 2011 年, 因此 2021 年极端降水强度之强、大雨以上降雨日数之多均为历史罕见。

受极端降雨影响, 渭河共发生 6 次明显洪水过程, 历时 46 d, 其中以第 5 次洪水为最大, 历时长达 10 d。受 9 月 22—27 日持续长时间降雨过程影响, 咸阳站 9 月 27 日最大流量 5600 m³ · s⁻¹ (为 1935 年有实测资料以来 9 月份同期最大洪水), 比多年平均极值流量偏高 155%; 渭河临潼站 9 月 27 日最大流量 5860 m³ · s⁻¹, 比多年平均极值流量偏高 89%; 华县站 9 月 28 日最大流量 4860 m³ · s⁻¹ (为 2012 年以来最大洪水), 比多年平均极值流量偏高 79%, 临潼至华县洪峰流量削减率 17%。

4 讨论

研究结果表明, 渭河流域极端降水整体增加, 尤其是极端降水总量 (R95pTOT、R99pTOT)、暴雨强度 (Rx1day) 与频次 (R50) 显著增加, 这与前人的研究结论基本一致^[11,25]。极端洪水则呈不显著下降, 虽然二者长期变化趋势不一致, 但 2000 年以后均增加, 并且通过计算 8 个极端降水指数与华县站极端洪水的相关系数发现, 二者之间呈显著正相关。结合目前关于水文情势演变归因的研究以及渭河 2003 年、2011 年洪灾与极端降水关系的分析^[15,20,26], 说明极端降水对洪水有重要影响, 但并非是导致极端洪水的唯一因素, 人类活动、土壤蓄水量、植被覆盖等都可能影响极端洪水, 这也是今后研

究工作需要考虑的内容。各极端降水的空间分布体现出聚集性分布特征^[27], 同时存在空间差异, 比如渭河中游周至—临潼以及长武—宁县这两个区间极端降水强度以及降水总量显著增加, 而下游临潼以下和上游张家山以上极端降水呈减少趋势。另外, 极端降水和洪水年内分布具有不均匀性, 除防范“七下八上”极端事件外, 还应防范 9 月中旬极端洪水, 这提醒流域主管部门在制定极端事件防御政策时需要统筹考虑。

通过对 2021 年渭河极端降水以及洪水特性的分析得出, 该年度极端降水及洪水发生时间之晚以及指数之强实属罕见。该年度黄河中下游 9 d 内连续出现 3 场编号洪水, 其中渭河潼关站编号 2 次并在 3 号洪水期间出现 1979 年以来最大洪水, 多座水库突破建库以来最高蓄水位^[28]。由此可见, 全球变暖背景下, 极端降水及其引发的洪涝灾害影响越来越大, 这对流域水资源管理及水旱灾害防御部门提出了新的挑战, 如果不加以重视和防范, “黑天鹅”事件将在增加趋势的继续发展下给人类社会带来严重灾难。考虑到极端事件的复杂性, 本研究仅从极端降水和洪水变化特征的角度进行了分析, 未来还需进一步深入研究其影响因素和物理机制, 探索气象水文规律, 以期今后出现相似年份时保证有效应对洪水风险提供决策依据。

5 结论

(1) 1961 年以来渭河流域极端降水总量、暴雨频次增加, 极端降水强度有所增强, 弱降水事件减少。极端降水变化大致可以分为三个阶段, 1961—1985 年为波动增加阶段, 1986—2000 年为持续减少阶段, 2001 年至今为急剧增加阶段, 各指数极大值均出现在 2000 年以后。渭河极端洪水整体呈不显著减少趋势, 以 2000 年为变异点, 2000 年以后, 极端洪水呈增加趋势。极端降水与极端洪水年内分布不均匀, 前者主要集中在 7 月和 8 月, 后者除“七下八上”期外, 秋季也是多发期。

(2) 各极端降水指数均呈现出自上游向下游逐渐增加的分布态势, 并且中游南部极端降水指数普遍大于北部。同时, 从变化趋势空间分布上看, 大部分站点极端降水指数均呈增多趋势, 但 R10 呈减少趋势, 极端降水显著增加地区主要位于中游周至—

临潼区间以及长武—宁县,下游临潼以下和上游张家川以上地区为不显著减少。

(3) 极端降水指数存在 6~8 a、16~24 a 和 24~40 a 尺度的变化周期,第一主周期为 6~8 a,第二主周期为 24~40 a (R10、R20 为 16~24 a)。极端洪水存在 8~10 a、8~16 a、8~24 a、40 a 多种尺度的变化周期,且周期的年代际特征显著。咸阳、临潼、华县站极端洪水第一主周期均为 8~10 a 并且 2000 年以后该周期有所增强,40 a 为第二主周期,张家山站极端洪水仅存在 24~40 a 周期。

(4) 2021 年渭河流域 Rx5day、SDII、R20 均为近 61 年来最大,R50 仅次于 2011 年,极端降水强度之强、大雨以上降雨日数之多均为历史罕见。受其影响,渭河华县站出现 2012 年以来最大洪水过程,咸阳站出现 1935 年有实测资料以来 9 月份同期最大洪水。

参考文献 (References)

- [1] EASTERLING D R, KUNKEL K E, WEHNER M F, et al. Detection and attribution of climate extremes in the observed record [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2016, **11**: 17–27. DOI: 10.1016/j.wace.2016.01.001
- [2] 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*, 2016, **6**(5): 508–513. DOI: 10.1038/NCLIMATE2941
- [3] 李莹, 赵珊珊. 2001—2020 年中国洪涝灾害损失与致灾危险性研究[J]. *气候变化研究进展*, 2022, **18**(2): 154–165. [LI Ying, ZHAO Shanshan. Floods losses and hazards in China from 2001 to 2020 [J]. *Climate Change Research*, 2022, **18**(2): 154–165] DOI: 10.12006/j.issn.1673–1719.2021.196
- [4] 尹家波, 郭生练, 顾磊, 等. 中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应[J]. *科学通报*, 2021, **66**(33): 4315–4325. [YIN Jiabo, GUO Shenglian, GU Lei, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(33): 4315–4325] DOI: 10.1360/TB–2021–0438
- [5] 齐月, 陈海燕, 房世波, 等. 1961—2010 年西北地区极端气候事件变化特征[J]. *干旱气象*, 2015, **33**(6): 963–969. [QI Yue, CHEN Haiyan, FANG Shibao, et al. Variation characteristics of extreme climate events in northwest China during 1961–2010 [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, **33**(6): 963–969] DOI: 10.11755/j.issn.1006–7639(2015)–06–0963
- [6] 赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. *中国沙漠*, 2005, **25**(6): 904–909. [ZHAO Qingyun, ZHANG Wu, WANG Shigong, et al. Change of extreme precipitation events in arid and semi-arid regions in the east of northwest China [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, **25**(6): 904–909] DOI: 10.3321/j.issn.1000–694X.2005.06.015
- [7] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征[J]. *自然资源学报*, 2012, **27**(10): 1720–1733. [WANG Baolong, ZHANG Mingjun, WEI Junlin, et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over northwest China in recent 50 years [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27**(10): 1720–1733] DOI: 10.11849/zrzyxb.2012.10.010
- [8] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国西北极端降水事件年内非均匀性特征分析[J]. *中国沙漠*, 2008, **28**(1): 178–184. [YANG Jinhu, JIANG Zhihong, WANG Pengxiang, et al. Analysis on inner-annual inhomogeneity characteristic of extreme precipitation events over northwest China [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, **28**(1): 178–184]
- [9] 蔡新玲, 吴素良, 贺皓, 等. 变暖背景下陕西极端气候事件变化分析[J]. *中国沙漠*, 2012, **32**(4): 1095–1101. [CAI Xinling, WU Suliang, HE Hao, et al. Change of extreme climate events in Shaanxi province under global warming background [J]. *Journal of Desert Research*, 2012, **32**(4): 1095–1101]
- [10] 邹磊, 余江游, 王飞宇, 等. 渭河流域极端降水时空演变规律及其对大气环流因子的响应[J]. *干旱区研究*, 2021, **38**(3): 764–774. [ZOU Lei, YU Jiangyou, WANG Feiyu, et al. Spatial-temporal variations of extreme precipitation indices and their response to atmospheric circulation factors in the Weihe River Basin [J]. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(3): 764–774] DOI: 10.13866/j.azr.2021.03.18
- [11] 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. [ZHOU Qi, ZHANG Haining, REN Yuanxin. Extreme precipitation events in the Weihe River Basin from 1961 to 2016 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, **40**(5): 833–841] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.05.018
- [12] 徐瑞瑞, 高鹏, 穆兴民, 等. 渭河流域水沙时空变化及其对人类活动的响应[J]. *人民黄河*, 2020, **42**(3): 17–24. [XU Ruirui, GAO Peng, MU Xingmin, et al. Dynamic of streamflow and sediment load and its response to human activities in the Weihe River Basin [J]. *Yellow River*, 2020, **42**(3): 17–24] DOI: 10.3969/j.issn.1000–1379.2020.03.003
- [13] 黄晨璐, 杨勤科. 渭河与泾河流域水沙变化规律及其差异性分析[J]. *干旱区地理*, 2021, **44**(2): 327–336. [HUANG Chenlu, YANG Qinke. Runoff and sediment variation rules and differences in Wei River and Jing River Basins [J]. *Arid Land Geography*, 2021, **44**(2): 327–336] DOI: 10.12118/j.issn.1000–6060.2021.02.04
- [14] 邱德勋, 穆兴民, 赵广举, 等. 渭河流域极端降雨变化趋势及其对水沙情势的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(6): 65–72. [QIU Dexun, MU Xingmin, ZHAO Guangju, et al. Effects of

- precipitation extremes change on streamflow and sediment load in Weihe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(6): 65–72] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20220919.002
- [15] 张海宁, 周旗, 毛雨唯, 等. 渭河流域极端降水特性指标分析[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(3): 128–134. [ZHANG Haining, ZHOU Qi, MAO Yuwei, et al. Analysis of extreme precipitation characteristics in Weihe River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, **29**(3): 128–134] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.03.013
- [16] 尚潇瑛, 曲艳, 辛琛, 等. 2021 年渭河秋汛降雨与气象背景[J]. 陕西水利, 2022(5): 68–72. [SHANG Xiaoying, QU Yan, XIN Chen, et al. Rainfall and meteorological background of Weihe River autumn flood in 2021 [J]. Shaanxi Water Resources, 2022(5): 68–72] DOI: 10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2022.05.016
- [17] 肖洁, 罗军刚, 解建仓, 等. 渭河干流径流年际及年内变化趋势分析[J]. 人民黄河, 2012, **34**(11): 32–36. [XIAO Jie, LUO Jungang, XIE Jiancang, et al. Analysis on interannual and annual variation trend of runoff in the main stream of Weihe River [J]. Yellow River, 2012, **34**(11): 32–36] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2012.11.011
- [18] 赵静, 黄强, 刘登峰. 渭河流域水沙演变规律分析[J]. 水力发电学报, 2015, **34**(3): 14–20. [ZHAO Jing, HUANG Qiang, LIU Dengfeng. Analysis of runoff and sediment evolution in Wei River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, **34**(3): 14–20]
- [19] 鞠琴, 吴佳杰, 姚婷月, 等. 基于 IHA-RVA 法的渭河流域水文情势变化分析[J]. 水文, 2022, **42**(4): 76–82. [JU Qin, WU Jiajie, YAO Tingyue, et al. Analysis of hydrological regime change in Weihe River Basin based on IHA-RVA method [J]. Journal of China Hydrology, 2022, **42**(4): 76–82] DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210202
- [20] 江善虎, 刘亚婷, 任立良, 等. 变化环境下渭河流域生态水文情势演变归因研究[J]. 水资源保护, 2022, **38**(6): 9–14. [JIANG Shanhu, LIU Yating, REN Liliang, et al. Attribution analysis of eco-hydrological regime evolution in the Weihe River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2022, **38**(6): 9–14] DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.002
- [21] 冯绍杰, 穆兴民, 高鹏, 等. 泾河水沙变化特征及其影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2022, **36**(10): 151–157. [FENG Shaojie, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Trends of runoff and sediment loads in the Jinghe River Basin and influencing factors [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, **36**(10): 151–157] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2022.262
- [22] 任立良, 沈鸿仁, 袁飞, 等. 变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J]. 水科学进展, 2016, **27**(4): 492–500. [REN Liliang, SHEN Hongren, YUAN Fei, et al. Hydrological drought characteristics in the Weihe catchment in a changing environment [J]. Advances in Water Science, 2016, **27**(4): 492–500] DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.04.002
- [23] BONSAL B R, ZHANG Xuebin, VINCENT L A, et al. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. Journal of Climate, 2001, **14**(9): 1959–1976. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<1959:codaet>2.0.co;2
- [24] 吴梦雯, 罗亚丽. 中国极端小时降水 2010—2019 年研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, **38**(5): 502–514. [WU Mengwen, LUO Yali. Extreme hourly precipitation over China: Research progress from 2010 to 2019 [J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, **38**(5): 502–514] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.012
- [25] 张菁, 张珂, 王晟, 等. 陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, **49**(3): 288–294. [ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia contiguous region from 1971 to 2017 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, **49**(3): 288–294] DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2021.03.012
- [26] 王金, 冉启华, 刘琳, 等. 长江中下游流域极端洪水事件影响机制研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(6): 119–124. [WANG Jin, RAN Qihua, LIU Lin, et al. Research on the dominant mechanism of extreme flow events in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(6): 119–124]
- [27] 王芸, 赵鹏祥. 黄河流域极端气候事件的时空变异特征研究[J]. 西北林学院学报, 2021, **36**(3): 190–196. [WANG Yun, ZHAO Pengxiang. Temporal and spatial variation characteristics of extreme climate events in the Yellow River Basin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, **36**(3): 190–196] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2021.03.28
- [28] 苏茂林, 魏向阳, 李保国. 2021 年黄河秋汛洪水处理策略与实践[J]. 人民黄河, 2023, **45**(1): 56–60. [SU Maolin, WEI Xiangyang, LI Baoguo. Strategies and practices of flood management in 2021 autumn flood season [J]. Yellow River, 2023, **45**(1): 56–60] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2023.01.011

Evolution Characteristics of Extreme Precipitation and Flood in the Weihe River Basin of China over Last 60 Years

LIU Jifeng, JIN Lijun, ZHANG Yongsheng

(Hydrological Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: The Weihe River basin lies in the east of northwest China. It is a climate-sensitive and a fragile ecological environment area. Extreme precipitations often cause floods, debris flows and other disasters in the basin. Previous research mainly concerned about the regional runoff change caused by rainfall, but the change law of extreme precipitation and flood remained unknown.

In this study, it collected meteorological and hydrological data of 1961 – 2021, and eight extreme precipitation indices and annual maximum flood peak flow records at four representative hydrological stations were selected for statistical analysis. The method of percentile threshold, Kriging spatial interpolation, linear regression, and moving average and wavelet analysis was used to analyze the evolution pattern of extreme precipitation and flood in the Weihe River basin of China, the periodic change, and the extremity of precipitation and flooding in 2021.

The results show that: (1) In the past 60 years, while the total amount of extreme precipitation and the frequency of rainstorm increased significantly, the intensity of extreme precipitation also increased, but the weak precipitation events decreased in the Weihe River basin. Extreme floods generally showed a non-significant reduction trend. Both extreme precipitation and flooding increased significantly after 2000. In particular, the total amount of extreme precipitation and the rainstorm frequency were 12% ~ 22% higher than those of the annual average, and the maximum value of each extreme precipitation index all appeared after 2000. (2) The distribution of extreme precipitation and flood was not uniform within a year. The former was mainly concentrated in July and August, while the latter was also frequent in September except for a period of late July to early August. (3) Each extreme precipitation index showed an increasing distribution from upstream to downstream, and the extreme precipitation in the south of the middle reaches of the basin was generally stronger than that in the north. The extreme precipitation index of the most stations in the basin showed an increasing trend, and the significantly increasing areas were in the Zhouzhi-Lintong section and Changwu-Ning. (4) There were multiple periodic changes of extreme precipitation and flood, and the period of extreme flood changed significantly on interchronological scale. (5) In 2021, the extreme precipitation intensity and rainfall days above heavy rain in the Weihe River basin had been highest for the past 61 years. The Huaxian station recorded the largest flood since 2012. The largest flood was observed at Xianyang station in September since the measured data in 1935. The research results can provide reference for the prevention and control planning of flood and drought disasters in the Weihe River basin.

Key words: extreme precipitation; annual maximum flood peak flow; trend analysis; wavelet analysis; spatiotemporal variation; the Weihe River basin

(责任编辑 钟雨倩)