

李凤,李毅,于强,等. 1961—2019年陕西省极端旱涝事件的时空演变规律[J]. 陕西气象,2020(6):23-29.

文章编号:1006-4354(2020)06-0023-07

1961—2019年陕西省极端旱涝事件的时空演变规律

李 凤¹,李 毅¹,于 强²,彭 艳^{3,4},姚 宁¹,冯 浩²,宋小燕¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所,陕西杨凌 712100;

3. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

4. 陕西省气象科学研究所,西安 710016)

摘 要:选用陕西省 51 个地面气象站 1961—2019 年日降水数据,利用 MATLAB2017 计算了 6 个极端降水指数,采用线性趋势分析法、森斜率和改进的非参数 Mann-Kendall 趋势检验法研究不同时间尺度下极端降水指数的时空演变特征并找出了发生突变的年份。结果表明:各极端降水指数的月际、年际和年代际变化差异较大;夏季(7—9 月)容易发生极端湿润事件,而冬季则容易发生极端干旱事件;连续干旱日数(D_{CD})、连续湿润日数(D_{CW})、强降水日数(D_{R10})和最大日降水量($R_{d,max}$)、非常湿润日降水量(R_{95p})、全年湿润日降水总量(R_T)的变化趋势率分别为-0.14、-0.13、-0.20 d/10 a 和 1.08、0.39、-3.42 mm/10 a,多年平均值分别为 38.8、5.8、20.0 d 和 60.7、167.8、644.3 mm;极端湿润事件发生较频繁的站点主要分布在陕南地区,而陕北地区的站点发生干旱的风险较高;陕北有变湿润的趋势,而关中平原地区的极端降水事件整体有缓解的趋势,陕南地区极端降水事件则表现为区域加剧和缓解并存的趋势。

关键词:极端降水指数;时空变化;陕西

中图分类号:P468

文献标识码:A

在全球气候变化的背景下,极端降水事件频发备受国内外研究学者的关注^[1-2]。极端降水事件虽然是小概率事件,但具有突发性强和危害性大等特点,同时因其所引发的洪涝、滑坡和泥石流等自然灾害对我国经济社会发展和社会稳定造成严重影响^[3]。IPCC 第五次评估报告指出,未来全球会有更多地区发生强度更高的降水和干旱等自然灾害。陕西省是我国西北地区极端降水事件发生高风险的区域之一,每年因极端降水事件造成的平均经济损失高达 91.02 万元,在气象灾害损失占比中属最高的一类^[4]。受气候变化和人类活动共同影响,我国西北地

区的暖湿特征越来越显著,大部分地区降水量显著增加,并呈现出年际变化大和空间区域分布不均衡等特点^[5-6]。

近 100 a 以来,我国年降水量呈现出下降趋势(-12.66 mm/a),表现为区域降水显著增加或减少的情况在增加,由此导致的洪涝和干旱风险也在增加^[7-9]。Li 等^[10]采用 Mann-Kendall 趋势检验方法分析研究了黄土高原地区极端降水和极端温度时空变化。于淑秋等^[11]对西北地区 64 个气象站的降水和温度数据进行分析发现,1986 年前后的温度和降水发生了明显的跃变。李萍云等^[12]利用陕西省 99 个气象站点 2005—2018 年

收稿日期:2020-04-10

作者简介:李凤(1995—),男,江西南昌人,汉族,硕士研究生,主要研究极端降水时空演变规律。

通信作者:李毅(1974—),女,陕西武功人,汉族,博士,研究员,研究方向是水土资源高效利用。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放研究课题基金(2019M-3);国家外专局外国专家引进项目(G20190027163)

的逐小时降水数据研究了短时强降水的时空变化,发现省内各区域的短时强降水差异较大。郭兆夏^[13]等在建立陕西省 GIS 地理因子与降水因子之间关系的研究中发现,陕西省年降水量呈现明显的空间差异。以往学者往往专注于降水的时空变化研究,本文从极端降水指数入手分析陕西省近 59 a 极端降水时空变化特征,为当地未来部署防洪防旱工作提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况与资料搜集

陕西省位于我国内陆腹地,黄河中游地区^[14]。地势呈现出南北高、中间低的特点。陕西省横跨了三个气候带,陕南、关中平原以及陕北地区的气候具有较明显的差异,其中降水主要呈现出南多北少的空间格局^[15]。

研究资料选用陕西省 51 个地面气象站(图 1) 1961—2019 年的日降水数据,日降水量(20—20 时)分别来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)和陕西省气象局(<http://sn.cma.gov.cn/>)。所有数据均通过了严格的质量控制,缺测的日降水数据由附近 3 个站点的平均值补齐。

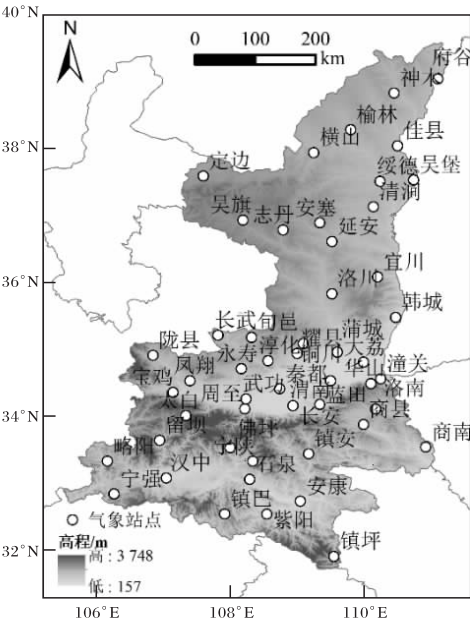


图 1 陕西省数字高程及所选站点分布

1.2 极端降水指数

研究所选用的 6 个极端降水指数由 MATLAB2017 计算得出。这 6 个指数均由气候变化检测专家组(ETCCDI)推荐,能够较为准确地体现极端降水事件的特征。有关极端降水指数的定义见表 1。

表 1 选择的 6 个极端降水指数及定义

极端降水指数	名称	定义
D_{CD}	连续干旱日数	日降水小于或等于 1 mm 的最长持续日数
D_{CW}	连续湿润日数	日降水大于或等于 1 mm 的最长持续日数
D_{R10}	强降水日数	日降雨量大于 10 mm 日数
$R_{d,max}$	最大日降水量	年内最大日降水量
R_{95p}	非常湿润日降水量	降水量大于 95 分位数的总降水量
R_T	全年湿润日降水总量	大于 1 mm 的年总降水量

1.3 方法

用线性趋势分析法、森斜率和 Mann-Kendall 趋势检验法来分析极端降水指数的趋势变化规律。以往的非参数 Mann-Kendall(MK)趋势检验方法会在显著性检验中出现估计误差,改进的非参数 Mann-Kendall(MMK)趋势检验方法对这方面计算进行了完善^[16],考虑了序列相关性对样本方差的影响,所以趋势检验能力更强。根据计算得到统计量 Z^* 值,当它为正值时表示时

间序列有上升的趋势,若为负值则表示有下降的趋势。在 5% 的显著性水平下,当 Z^* 的绝对值大于 1.96 时,则表示时间序列上有显著地趋势。根据计算得到森斜率 b 值,当它的值为正(负)表示时间序列呈递增(递减)趋势;森斜率值等于零,意味着时间序列没有趋势。

2 极端降水指数时间变化特征

2.1 月际变化

表 2 为极端降水指数的月际变化。由表可

知:极端降水指数的月际变化差异较大, D_{CD} 从1月到12月主要表现为先减小后增加,并且在7月最小(8.1 d),1月最大(20.3 d)。其他5个极端降水指数(D_{CW} 、 D_{R10} 、 $R_{d,max}$ 、 R_{95p} 和 R_T)的表现则与 D_{CD} 相反,即先增加后减少;此外,这5个指数7—9月的值明显高于其他月份,1、2和12月的值

则明显小于其他月份,两个时期对应5个指数的范围分别为3.0~3.7 d/0.9~1.3 d、3.5~3.8 d/0.02~0.03 d、32.6~42.6 mm/2.6~4.7 mm、32.5~42.6 mm/1.9~3.8 mm、107.6~125.8 mm/4.6~8.5 mm,这说明陕西省夏季各地容易遭受暴雨洪涝灾害,而冬季则容易出现干旱少雨的情形。

表2 陕西省极端降水指数的月际变化

月份	D_{CD}/d	D_{CW}/d	D_{R10}/d	$R_{d,max}/mm$	R_{95p}/mm	R_T/mm
1	20.28	1.00	0.02	2.74	2.02	4.99
2	15.89	1.31	0.11	4.72	3.77	8.50
3	13.55	1.89	0.59	10.08	9.46	22.61
4	10.72	2.22	1.45	16.97	16.64	43.35
5	9.70	2.49	2.16	22.39	22.14	63.52
6	9.98	2.68	2.45	27.43	27.27	74.44
7	8.17	3.11	3.83	42.63	42.55	125.84
8	8.95	3.03	3.46	39.09	38.89	111.86
9	8.43	3.74	3.60	32.59	32.54	107.58
10	10.27	3.05	1.76	19.08	18.84	55.48
11	12.46	2.03	0.57	9.41	8.79	21.54
12	19.94	0.94	0.03	2.58	1.88	4.60

2.2 年际和年代际变化

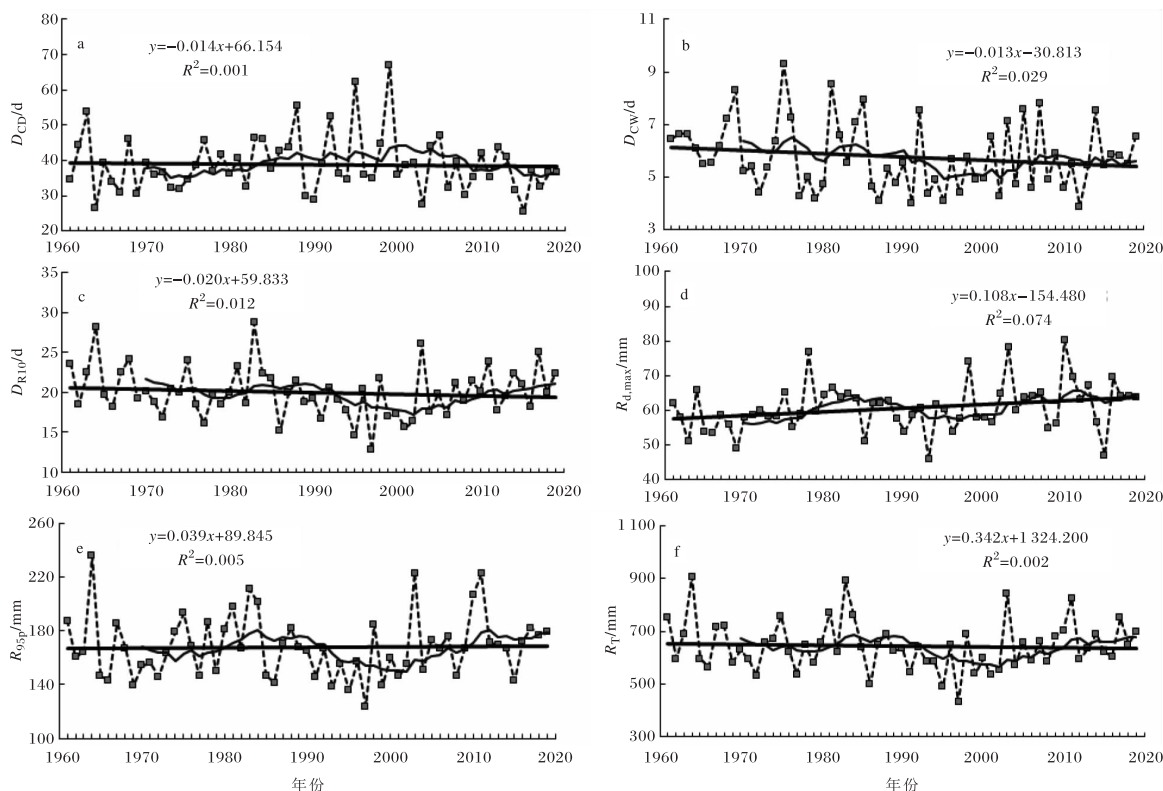
陕西省6个极端降水指数的年际和年代际变化特征见图2。从年际变化结果来看: D_{CD} 、 D_{CW} 、 D_{R10} 和 $R_{d,max}$ 、 R_{95p} 、 R_T 多年均值分别为38.8、5.8、20.0 d和60.7、167.8、644.3 mm,变化趋势率分别为-0.14、-0.13、-0.20 d/10 a和1.08、0.39、-3.42 mm/10 a, D_{CD} 、 D_{CW} 、 D_{R10} 和 R_T 出现下降的趋势,这表明陕西省的干旱状况有略微缓解的趋势,但仍需防范短时强降水的危害; D_{CD} 作为代表干旱状况的指数,在1999年出现最大值(67.1 d),同时 D_{CW} 、 D_{R10} 、 $R_{d,max}$ 、 R_{95p} 和 R_T 的值都比较低(4.9 d、17.0 d、57.7 mm、138.5 mm和540.3 mm),说明这一年属于极端干旱年^[17]; R_{95} 和 R_T 在1964年达到最高值(235.7 mm和907.3 mm),远远超过地区多年平均水平,说明这一年属于极端湿润年,容易发生洪涝灾害^[18]。

6个极端降水指数的年代际变化波动幅度较大: D_{CD} 从1960—1990年代的变化总体呈现增加

趋势,而后又呈现出下降趋势,这说明1990年代极端干旱事件较频繁; D_{CW} 与 D_{CD} 呈现出相反的变化规律,具体表现为1990年代以前呈下降趋势,且波动幅度更大,而1990—2000年代则呈现增加的趋势。 D_{R10} 、 $R_{d,max}$ 、 R_{95p} 和 R_T 有着相似的年代际变化特征,即1990年代指数较低,且后期呈现增高的趋势;此外,在1970—1980年代4个指数值较高,说明这个时期洪涝灾害较频繁。

3 极端降水指数空间分布及变化特征

图3展示1961—2019年极端降水指数多年平均值的空间分布。可以看出: D_{CD} 呈现出与其他5个极端降水指数相反的空间格局,即由南到北增加的趋势;超过46.0 d的站点均分布在陕北,佳县最高(60.3 d)。 D_{CW} 与 D_{CD} 的空间分布状况相反,即陕南和关中地区较高,超过6.2 d的站点都分布在这里,而陕北地区较低,主要体现为降水少且比较分散。 D_{R10} 较高的值分布在陕南山区,镇巴站最大(34.2 d),且 D_{R10} 由南到北出现均



折线为年际变化;曲线为 10 a 滑动平均的年代际变化;直线为年际变化趋势。

图 2 1961—2019 年陕西省极端降水指数的年际和年代际变化特征

匀递减的趋势,这说明陕南地区的强降水较频繁,而陕北则较少。 $R_{d,max}$ 由南到北大体表现为先减小后增加,关中地区部分站点相对较小。值得注意的是,镇巴站(118.6 mm)明显高于其他站点,这说明该站点容易遭受短时暴雨洪涝灾害的影响。 R_{95p} 的空间分布格局与 $R_{d,max}$ 相似,也是镇巴站最高(390.0 mm),与 $R_{d,max}$ 不同的是陕西最北部地区的站点较低。 R_T 由南到北呈现递减趋势,超过 1 000 mm 的站点均分布在最南部地区,而低于 440 mm 的站点均分布在最北部地区。

4 极端降水指数的突变年份和趋势变化

由森斜率 b 可以看出, D_{CD} 、 D_{CW} 、 D_{R10} 和 R_T 均出现了下降的趋势,而 $R_{d,max}$ 和 R_{95p} 则出现了增加的趋势,这与其线性趋势变化完全一致(表 3)。除 $R_{d,max}$ 以外的 5 个极端降水指数均无显著性趋势,说明陕西省极端降水的趋势变化并不显著。 $R_{d,max}$ 具有显著增加的趋势(Z^* 为 1.98),同时其森斜率 b 也大于其他 5 个极端降水指数,这也说明显著趋势和森斜率有一定的一致性。

1961—2019 年陕西省极端降水指数的突变检验见图 4。从图中可以看出:6 个极端降水指数均有显著性变化($|Z_m| \geq 1.96$)。 D_{CD} 、 D_{CW} 、 D_{R10} 、 $R_{d,max}$ 、 R_{95p} 和 R_T 发生突变的年份分别是 1964、1964、1961、1974、2016 和 1961 年, D_{CD} 和 D_{CW} 、 D_{R10} 和 R_T 分别具有相同的突变年份; D_{CD} 、 D_{CW} 、 D_{R10} 和 R_T 在突变年份前后先增后减,而 $R_{d,max}$ 和 R_{95p} 在突变年份前后则是先减后增。

根据各站点 6 个极端降水指数的趋势检验结果(表 4 和图 5)可知:全省 6 个极端降水指数无显著变化的站点远多于显著变化的站点,其中所有站点的 D_{CD} 值均无显著变化。从 D_{CD} 的变化趋势可见,陕南和关中地区出现不显著上升或者下降趋势的站点均匀分布在各处,而陕西中北部大多数站点呈现出不显著上升趋势,陕北地区大多数站点则呈现出不显著下降趋势。这说明未来陕北有干旱缓解趋势,同时陕南部分地区也会面临干旱的风险。 D_{CW} 出现显著下降、不显著下降趋势的站点均远高于显著上升、不显著上升的站点,且多集中在关中地区。与 D_{CW} 类似, D_{R10} 出现不

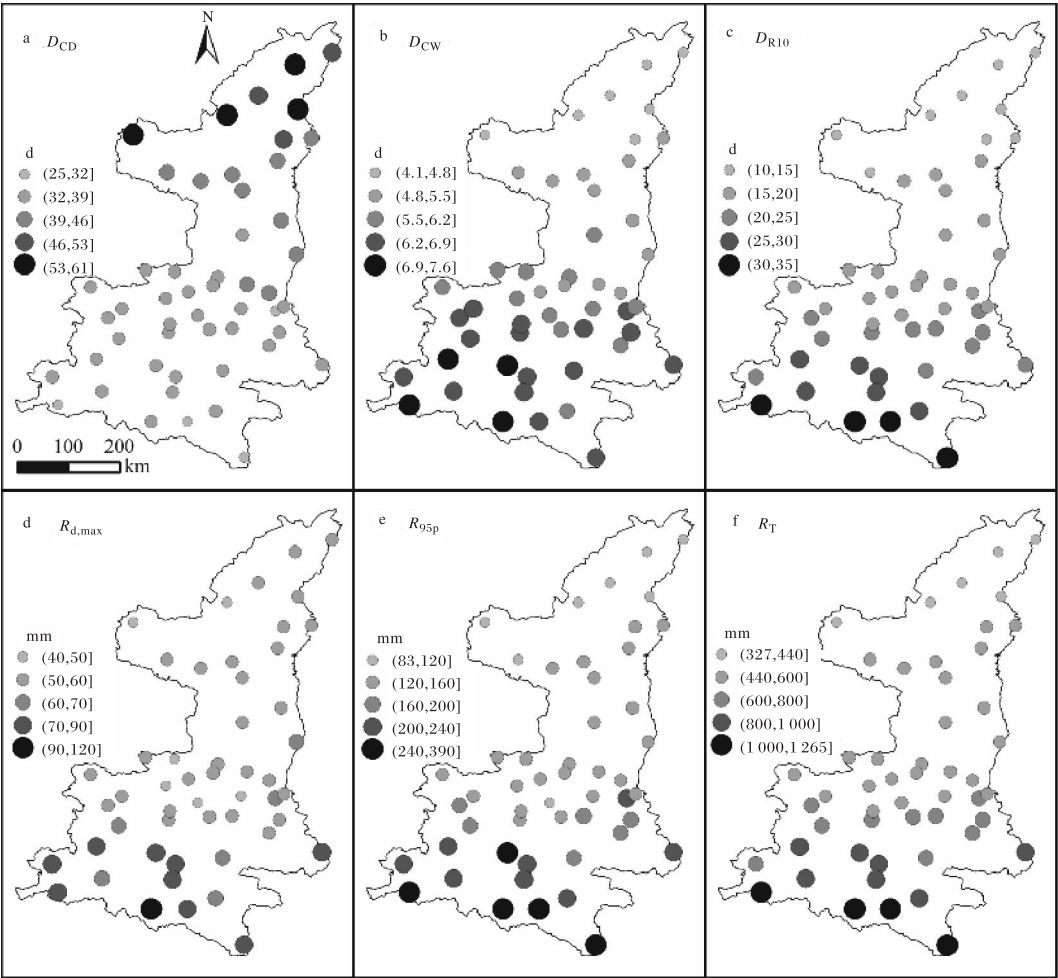


图 3 1961—2019 年陕西省极端降水指数多年平均值的空间分布

表 3 陕西省 6 个极端降水指数使用改进的非参数 MMK 检验得到的统计量 (Z^*) 以及森斜率 (b)

极端降水指数	D_{CD}	D_{CW}	D_{R10}	$R_{d,max}$	R_{95p}	R_T
Z^*	−0.17	−1.15	−0.62	1.98*	0.89	−0.03
b	−0.006	−0.012	−0.015	0.113	0.095	−0.012

注：* 表示通过 0.05 水平的显著性检验 ($|Z_m| \geq 1.96$)

表 4 1961—2019 年陕西省 6 个极端降水指数不同变化趋势的站点数量 单位:站

极端降水指数	D_{CD}	D_{CW}	D_{R10}	$R_{d,max}$	R_{95p}	R_T
显著上升	0	2	1	4	2	0
不显著上升	28	9	23	30	26	17
显著下降	0	8	1	0	1	2
不显著下降	23	32	27	17	22	32

显著下降趋势的站点主要集中在关中地区,且唯一一个显著下降趋势的站点也在该区,说明该区域未来极端降水事件可能呈现缓解的趋势。

$R_{d,max}$ 有 4 个站点有着显著上升趋势,其中 3 个站点位于陕南山区,而且该区域大多数站点有不显著上升趋势。对于原本极端降水事件频繁的陕南

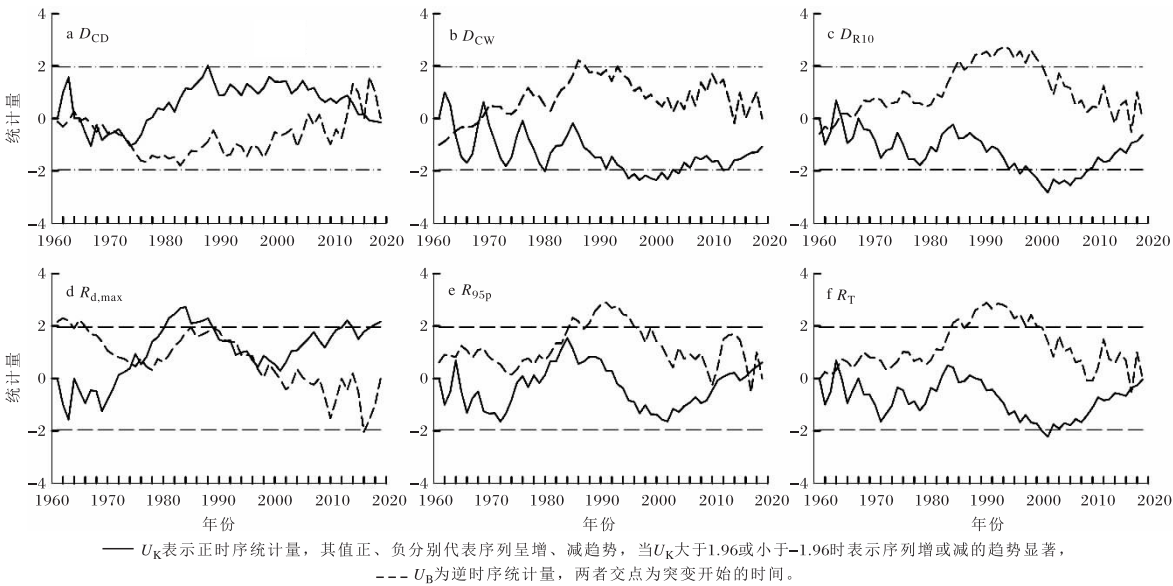


图4 1961—2019年陕西省极端降水指数的MMK突变检验

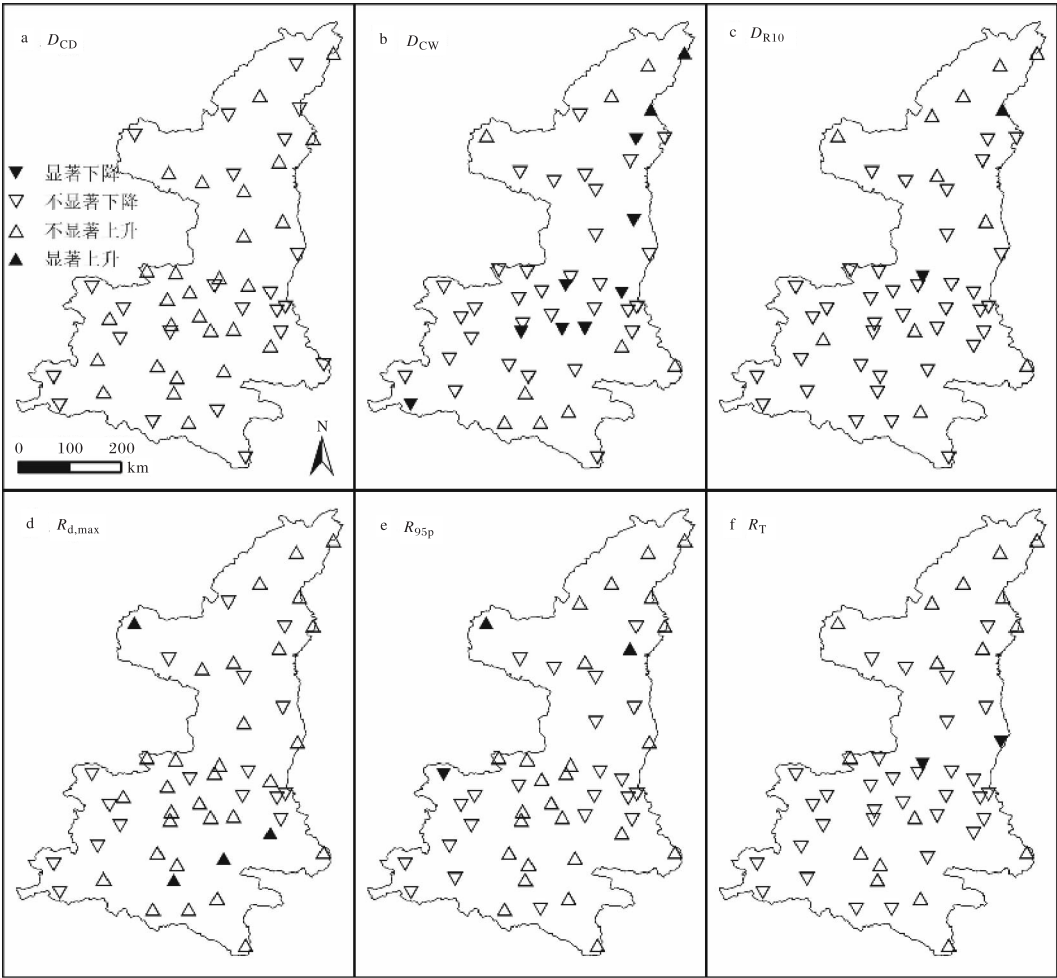


图5 通过MMK趋势检验方法计算的降水指数变化趋势的空间分布

地区来讲,未来暴雨洪涝灾害的风险将进一步加剧。 R_{95p} 出现趋势变化的站点随机地出现在全省各处,这说明非常湿润天的降水量的趋势变化无明显地区差异性。 R_T 出现显著下降和不显著下降趋势的站点占多数,这说明未来省内的降水可能会进一步减少,且主要集中在关中地区。

5 结论

(1)陕西省极端降水指数的月际变化差异较大。其中 1、2 和 12 月容易出现极端干旱状况,而 7—9 月容易出现极端湿润状况;年际和年代际变化主要表现为极端干旱和极端湿润交替出现,而且 1964 年和 1999 年分别对应极端湿润年和极端干旱年,对应的 D_{CD} 、 D_{CW} 、 D_{R10} 、 $R_{d,max}$ 、 R_{95p} 和 R_T 值分别为 26.4/67.1 d、6.1/4.9 d、28.2/17.0 d、65.6/57.7 mm、235.7/138.5 mm 和 907.3/540.3 mm。此外, D_{CW} 、 D_{R10} 、 $R_{d,max}$ 、 R_{95p} 和 R_T 在 1970—1980 年代较高,洪涝灾害影响明显;相反,这 5 个指数在 1990 年代较小(D_{CD} 值较高),干旱影响明显,1990 年代以后呈增加趋势。

(2) D_{CD} 、 D_{CW} 、 D_{R10} 和 R_T 的线性趋势和森斜率均呈下降趋势,而 $R_{d,max}$ 和 R_{95p} 呈增加趋势。

(3)在空间分布方面, D_{CD} 、 D_{CW} 、 D_{R10} 、 $R_{d,max}$ 、 R_{95p} 和 R_T 多年均值分别为 38.8 d、5.8 d、20.0 d、60.7 mm、167.8 mm 和 644.3 mm。除 D_{CD} 外,大部分极端降水指数有着北低南高的分布特征,这说明陕南地区的极端湿润事件更频繁,而陕北地区的极端干旱事件更频繁。极端降水事件空间趋势变化主要反映在陕北有湿润的趋势,关中平原地区极端降水事件有缓解的趋势,而陕南地区则出现区域加剧和缓解并存的趋势。

参考文献:

- [1] 王志福,钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征[J]. 水科学进展,2009,20(1):1-9.
- [2] LI L C, YAO N, LIU D L, et al. Historical and future projected frequency of extreme precipitation indicators using the optimized cumulative distribution functions in China[J]. J Hydrol, 2019, 579: 124-170.
- [3] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究,2008,13(1):77-85.
- [4] 程肖侠,方建刚,雷向杰. 陕西盛夏极端降水频次及其与全球海温的遥相关研究[J]. 干旱气象,2014,32(1):38-45.
- [5] 杨绚,李栋梁. 中国干旱气候分区及其降水量变化特征[J]. 干旱气象,2008,26(2):17-24.
- [6] WANG H, CHEN Y, CHEN Z. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960-2010[J]. Hydrol Process, 2013, 27(12): 1807-1818.
- [7] 于凯旋,张海军,王旭. 双城区近 50 a 降水变化特征分析[J]. 黑龙江气象,2018,35(1):45-46.
- [8] 武麦凤,乔舒婷. 渭河流域中尺度暴雨时空分布及环流特征[J]. 陕西气象,2019(2):3-9.
- [9] YAO N, LI Y, LEI T J, et al. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961-2013[J]. Sci Total Environ, 2018, 616-617: 73-89.
- [10] LI Z, ZHENG F L, LIU W Z, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961-2007 [J]. Quatern Int, 2010, 226(1): 92-100.
- [11] 于淑秋,林学椿,徐祥德. 我国西北地区近 50 年降水与温度的变化[J]. 气候与环境研究,2003,8(1):9-18.
- [12] 李萍云,赵强,王楠,等. 2005—2018 年陕西短时强降水时空分布特征[J]. 陕西气象,2019(5):34-39.
- [13] 郭兆夏,李星敏,朱琳,等. 基于 GIS 的陕西省年降水量空间分布特征分析[J]. 中国农业气象,2010,31(S1):121-123.
- [14] 薛平拴. 陕西历史人口地理研究[D]. 西安:陕西师范大学,2000.
- [15] 白爱娟,施能,方建刚. 陕西省降水量变化的区域特征分析[J]. 高原气象,2005,24(4):173-179.
- [16] HAMED K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. J Hydrol, 2008, 349(3): 350-363.
- [17] 张晓华,毕生,曹永潇,等. 基于 TOPSIS 法的陕西省黄河流域干旱综合评价模型[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(2):211-213.
- [18] 薛建兴. 陕北地区防汛抗洪工作与致灾原因调研[J]. 中国防汛抗旱,2013(6):31-32.