

李兆奇,赵桂香,赵彩萍.山西近40年极端降水特征分析[J].海洋气象学报,2022,42(3):88-98.
LI Zhaoqi, ZHAO Guixiang, ZHAO Caiping. Analysis of extreme precipitation characteristics in Shanxi from 1979 to 2018[J].
Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(3): 88-98. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.009. (in Chinese)

山西近40年极端降水特征分析

李兆奇¹, 赵桂香², 赵彩萍¹

(1.太原市气象局,山西太原 030082;2.山西省气象台,山西太原 030002)

摘要: 利用山西108个国家级地面气象观测站1979—2018年日降水量资料,采用百分位法定义极端降水事件,应用气候趋势系数、Mann-Kendall (M-K) 检验等方法,研究山西极端降水特征及其变化规律。结果表明:(1)山西极端降水出现在3—10月之间,发生频次呈现“山区多、盆地少”的特点,平均强度表现为“北中部小、南部大”的空间分布特征。(2)山西极端降水持续时间以1 d为主,局地性特征明显,发生大范围极端降水事件的概率较低。(3)近40年,山西极端降水事件呈明显增多趋势,影响范围不断扩大,强度略有增强,没有突变发生。各区域极端降水的长期变化差异较大;北部强度显著增强,范围明显扩大且在1986年发生突变;中部极端降水日数和强度显著增多增强,并分别在2001、1992年发生突变;南部极端降水变化趋势微弱。

关键词: 极端降水; 特征; 贡献率; 变化趋势; M-K 检验

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)03-0088-11

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.009

Analysis of extreme precipitation characteristics in Shanxi from 1979 to 2018

LI Zhaoqi¹, ZHAO Guixiang², ZHAO Caiping¹

(1. Taiyuan Meteorological Bureau, Taiyuan 030082, China; 2. Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030002, China)

Abstract Based on the daily precipitation data of 108 national meteorological observation stations in Shanxi from 1979 to 2018, the percentile method is adopted to define extreme precipitation events, and methods such as climate trend coefficient and Mann-Kendall (M-K) test are used to study the characteristics and variation patterns of extreme precipitation in Shanxi. The results are shown as follows. (1) The extreme precipitation in Shanxi occurs between March and October and is distributed more in mountainous areas and less in basins, while the average intensity is small in the central and northern areas and large in the southern areas. (2) The extreme precipitation in Shanxi mainly lasts 1 d with apparent regional characteristics, and the probability of large-scale extreme precipitation events is low. (3) Over the recent 40 years, the number of extreme precipitation events in Shanxi shows a significantly increasing trend, the range of impact continuously enlarges, the intensity slightly increases, and there are no abrupt changes. For each area, the variation of extreme precipitation over a long time span differs greatly; in the northern areas, the intensity significantly increases, the range markedly expands, and abrupt changes occurred in 1986; in the central areas, the days of extreme precipitation present

收稿日期:2022-03-24; 修订日期:2022-05-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41475050);山西省气象局科研项目(SXKMSQH20217122)

第一作者:李兆奇,男,硕士,主要从事城市防灾减灾预报服务技术研究,lizhaoqi@sohu.com。

通信作者:赵桂香,女,正高级工程师,主要从事灾害天气天气预报技术研究,liyun0123@126.com。

significant increase with the intensity notably enhanced, and abrupt changes occurred in 2001 and 1992, respectively; the variation trend of extreme precipitation in the southern areas is weak.

Key words extreme precipitation; characteristics; contribution rate; variation trend; M-K test

引言

近年来,极端降水事件频繁发生,严重威胁社会经济和人民生命财产安全^[1],已引起学界高度关注^[2-8]。对于极端降水的定量研究,文献^[9-10]指出,需要确定一个降水判定阈值,但不同地区不能用统一的日降水量定义极端降水事件,而应根据各测站的日降水量确定当地的极端降水气候阈值。薛媛和薛晓萍^[11]也认为,当研究区域气候差异较大,选择相对阈值定义极端降水可以避免对部分区域极端降水变化特征反映的不足。刘学华等^[12]、ZHAI et al.^[13]分析中国极端降水总量和降水极值趋势发现,全国极端降水指数和年降水量总体呈线性增加趋势,中东部年平均降水强度极端偏强的趋势较为显著,西北地区极端降水增加趋势明显,但东北东部到华北大部呈现减少趋势。闵岫和钱永甫^[14]、王志福和钱永甫^[15]、陈峪等^[16]系统研究了我国极端气候事件的区域性和持续性变化趋势,指出我国极端降水特征存在明显的地域差异,四季降水量均有向极端化方向发展的趋势。不同区域极端降水的研究^[17-21]也表明,极端降水特征具有很强的地域性,有必要开展针对性的研究^[22-23]。

山西省地处华北平原以西、黄河中游东岸的黄土高原,境内地貌形态复杂,山多川少,太行山、吕梁山分立东西部,中部为一列沉陷盆地,平原展布其间,呈现“两山夹一川”的地势(图1)。特殊的地理条件和大陆性季风气候特征使山西较易受极端降水事件的影响,且常造成严重的洪涝灾害^[24]。为此,有学者对发生在山西的典型极端降水过程进行了天气学诊断分析^[25-26],也有对极端降水时空演变特征的研究^[27-29],但对极端降水的定义多采用全省统一的阈值或绝对阈值^[30-31],且选取的站点稀疏,对山西极端降水特征的分析不够精细。本文利用山西108个国家级地面气象观测站(以下简称“气象站”)近40年逐日降水资料,采用百分位法定义各地极端降水事件,研究山西及各区域极端降水分布特征和变化趋势,以期对山西洪涝灾害防御提供科学决策依据。

1 资料和方法

1.1 资料

山西省辖11个地级市,依所处地理位置分为北部(大同、朔州、忻州)、中部(吕梁、太原、晋中、阳泉)、南部(临汾、运城、长治、晋城),境内共有108个气象站(图1)。所用资料为由山西省气象信息中心经过质量控制的1979—2018年108个气象站逐日(前一日20时—当日20时)降水量数据。

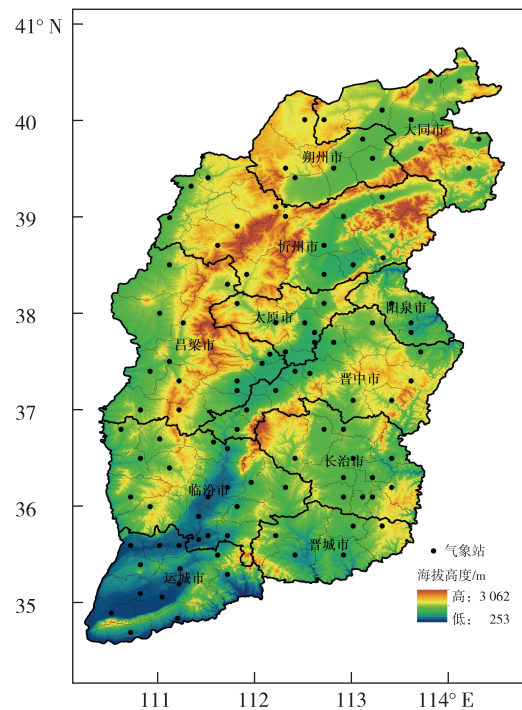


图1 山西省地形与国家级地面气象观测站位置分布
Fig.1 Topographic map of Shanxi Province and distribution of its national meteorological observation stations

1.2 方法

1.2.1 极端降水事件及其要素的定义

山西省面积广阔,区域气候差异较大,参照文献^[9,15]的百分位法定义不同站点的极端降水事件更为科学。对每个台站,按升序排列1979—2018年日降水量 ≥ 0.1 mm的所有样本,取第99个百分位的日降水量值作为该站极端降水阈值,当该站某日降水量超过此阈值时,记为1个极端降水日,称该站当日发生了极端降水事件。极端降水事件出现的次数称为极端降水频次;若同日全省(或区域)有

1 站及以上出现极端降水事件,则记为 1 个全省(或区域)极端降水日。当某站从某日开始连续 n 天降水量都大于上述阈值,则认为该站出现 1 次持续时间为 n 天的极端降水事件,以出现极端降水的第 1 天作为持续极端降水事件发生的时间;持续 n 天极端降水事件的次数、总降水量,分别称为对应持续天数的极端降水频次和极端降水量;极端降水量除以对应频次为极端降水平均强度。

1.2.2 分析方法

采用趋势系数、线性倾向率、Mann-Kendall (M-K) 突变检验等^[32] 统计和诊断方法。为减小边值和奇异值对线性趋势的影响,用 7 点滑动平均来分析极端降水事件的长期变化,并用相关系数进行显著性检验。选取的序列样本数为 40,当对应的相关系数达到 0.264、0.312、0.403、0.501 的临界值时,变化趋势分别通过 $\alpha=0.1$ 、0.05、0.01、0.001 的

显著性检验,且通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的趋势为显著。

2 极端降水事件的空间分布

2.1 阈值与极值的分布特征

由山西各地极端降水阈值的空间分布(图 2a)来看,总体呈自北向南增大的趋势;低值区主要位于北部和中部的太原、晋中两市,极端降水阈值不超过 46 mm,其中大同最低,不足 40 mm;高值区位于南部和中部的吕梁、阳泉等市,最大阈值达到 56.5 mm。由极端降水极值的空间分布(图 2b)来看,各地极值差异很大,高值区呈带状分布,主要位于忻州西北部—吕梁西部、阳泉—晋中东部、临汾北部—长治北中部、晋城—运城东部,中心降水量均不低于 160 mm,最大为 244 mm;其他区域相对较小,在 65~110 mm 之间。

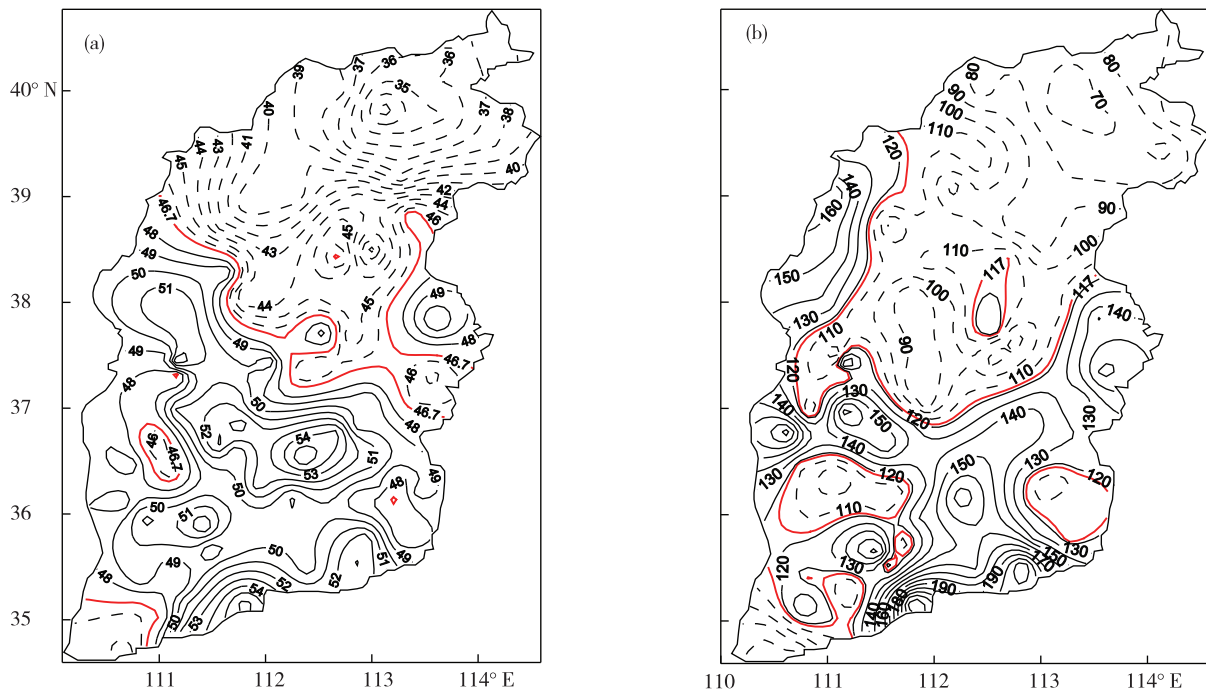


图 2 山西极端降水阈值(a)和极值(b)的空间分布(单位:mm;红实线代表全省平均值,黑实线、黑虚线分别代表大于、小于均值,下同)

Fig.2 Spatial distribution of threshold (a) and extremum (b) of extreme precipitation in Shanxi (units: mm; red solid lines represent the average of the entire province and values greater or smaller than the average are in black solid or dashed lines, respectively; the same for figures below)

2.2 频次和强度的分布特征

1979—2018 年,山西各地极端降水日数为 28~38 d,极端降水的持续天数为 1~4 d,出现频次随持续时间增长而快速减少,持续 3~4 d 的极端降水仅有 3 次,均为出现在南部的单站持续极端降水事件。

由图 3a 可以看出,山西极端降水频次呈现“山地多、盆地少”的空间分布特征。高频次区域主要分布在朔州西部、忻州西部和东北部、吕梁东部、临汾西部、晋中东部、长治东南部、晋城东部等丘陵山区,最高达 38 次,位于忻州西部;低频次区主要集中

在盆地地区,太原盆地最少,在 30 次以下。各地极端降水平均强度为 $41.8 \sim 90.5 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$,空间分布自北向南增强(图 3d),高强度区主要集中在南部,北中部大部为低强度区,大同强度最小,在 $50 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$ 以下。

持续 1 d 的极端降水频次和强度(图 3b、e)与极端降水总频次和强度的空间分布趋势基本一致。各地持续 1 d 的极端降水频次占比 80% 以上,有 48 个站达到 100%;平均强度介于 $41.8 \sim 83.6 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$

之间。持续 2 d 的极端降水频数显著减少,主要分布在忻州西南部、太原南部—阳泉南部、晋东南和运城东部(图 3c);持续 2 d 的极端降水强度的高值区位于阳泉南部—晋中东北部、吕梁东部与太原及晋中南部交界区域、运城的东南部—晋城西部,最强高达 $325.2 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$,出现在运城垣曲。由此可见,山西极端降水事件持续时间以 1 d 为主;在阳泉南部—晋中东北部、运城东南部—晋城西部,持续 2 d 的极端降水的强度较大。

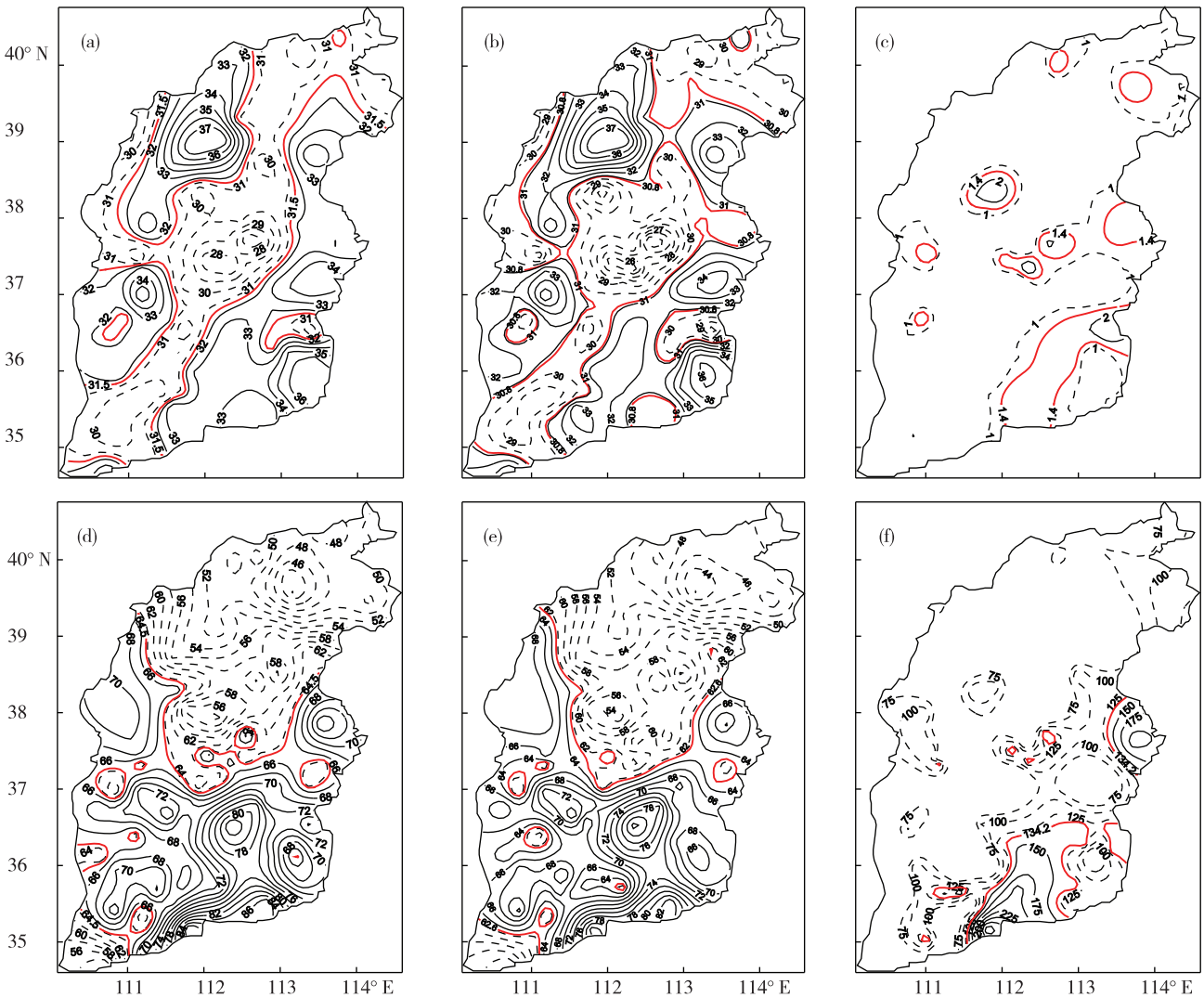


图 3 山西极端降水频次(a)、强度(d)和持续 1 d 的极端降水频次(b)、强度(e)以及持续 2 d 的极端降水频次(c)、强度(f)的空间分布(频次,单位:次;强度,单位: $\text{mm} \cdot \text{次}^{-1}$)

Fig.3 Spatial distribution of frequency (a) and intensity (d) of extreme precipitation, frequency (b) and intensity (e) of events lasting 1 d, and frequency (c) and intensity (f) of events lasting 2 d in Shanxi (units of frequency: times, units of intensity: $\text{mm} \cdot \text{times}^{-1}$)

2.3 影响范围分布特征

统计分析 1979—2018 年山西极端降水过程的影响范围及发生频次发现:在 804 次极端降水过程

中,单站发生频次高达 344 次,占总次数的 43.5%;2 站同日发生占比为 15.7%,15 站以上的占比仅 5.7%,同日发生极端降水事件最多的达 65 站(图

4),说明山西极端降水具有明显的局地性特征。

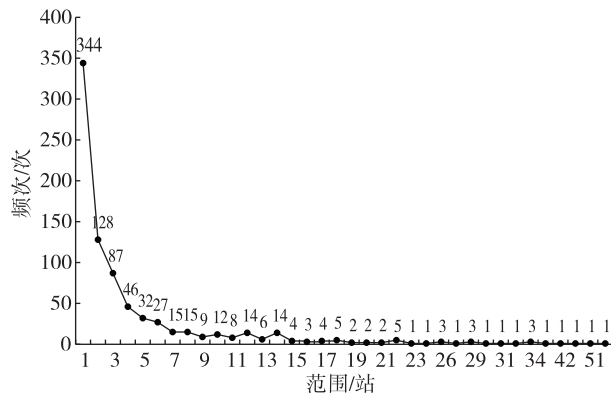


图4 山西极端降水影响范围(站点数)与发生频次
Fig.4 Range of impact (the number of stations) and frequency of extreme precipitation in Shanxi

进一步分析不同影响范围极端降水事件的月分布特征(表1)发现,无论影响范围大小,发生在7月的极端降水事件最多,8月次之。影响范围在10站及其以下的过程可出现在3—10月的任何月份,发生概率达88.9%;11~20站的过程主要发生在5—10月,出现概率为7.7%;20站以上的过程只出现在5—9月,发生概率仅为3.4%;40站以上的大范围极端降水事件极少发生,概率不足1%。

2.4 极端降水对年和夏季降水的贡献

极端降水在年、夏季降水总量中的占比,反映出极端降水对总降水量的贡献,同时从一定意义上反映出极端降水事件对洪涝灾害的贡献率^[15]。由图5a可见,山西极端降水对年降水贡献率在8.7%~12.3%之间,北中部大部贡献率较低,晋东南、临汾、运城东南部、阳泉、晋中的大部、忻州与吕梁西北部的贡献率在11.0%以上。夏季,山西1%的极端降水贡献了夏季总降水量的10.4%~20.6%,由空间分布看,其与图5a的分布相似,较年极端降水的贡

献率仅在长治南部有所减小,而在运城东北部明显增大(图5b)。持续1d的极端降水对年或夏季降水贡献率的空间分布(图略)与图5a、b基本相同。夏季,在山西南部大部、晋中东南部、忻州西北部—吕梁西部,持续1d的极端降水占总降水量的16.5%以上,如果这些地区发生洪涝灾害则主要是由持续1d的极端降水造成的。持续时间长的极端降水事件,由于发生频次少,贡献率也相对小;但在阳泉南部—晋中东北部、吕梁东部与太原及晋中南部交界区域、运城东南部—晋城西部等地,持续2d的贡献率在2.0%~4.7%之间,持续3d以上的极端降水事件对南部局部也有一定贡献;说明持续时间长的极端降水事件虽然出现频次低,但致灾风险不容忽视。

3 极端降水事件的时间分布

3.1 月、季分布特征

图6给出了1979—2018年全省及北、中、南部逐月极端降水频数与平均强度的分布。由图6a可见,近40年共出现极端降水事件3494站次,主要发生在3—10月之间,6—9月占总频次的92.9%,其中7—8月占比高达74.8%。月极端降水平均强度为56.7 mm·次⁻¹,4—10月均在52 mm·次⁻¹以上,4月其强度值较5月大,7—8月平均强度达64.8 mm·次⁻¹。各区域极端降水频次逐月分布及变化趋势与全省基本一致;极端降水平均强度的月分布与变化,南部与全省近乎相同,北部与中部的变化趋势一致(图6b—d)。这说明7—8月是山西极端降水事件最集中、强度最强的时段,全省极端降水逐月强度的变化主要受南部变化的影响。

进一步分析各季极端降水事件频次、强度和持续性(表略)发现,随着持续时间增长,极端降水事件频数快速减少,但强度增强。分季节来看,春季(3—5

表1 山西3—10月不同影响范围的极端降水过程统计

Table 1 Statistics of extreme precipitation processes with varied ranges of impact in Shanxi from March to October

影响范围/站	极端降水出现频次/次								总频次/次	概率/%
	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月		
1~10	2	4	39	90	287	215	69	9	715	88.9
11~20	0	0	1	4	31	17	6	3	62	7.7
21~30	0	0	1	3	6	6	1	0	17	2.1
31~40	0	0	0	0	3	3	0	0	6	0.8
>40	0	0	1	0	2	0	1	0	4	0.5
合计	2	4	42	97	329	241	77	12	804	100.0

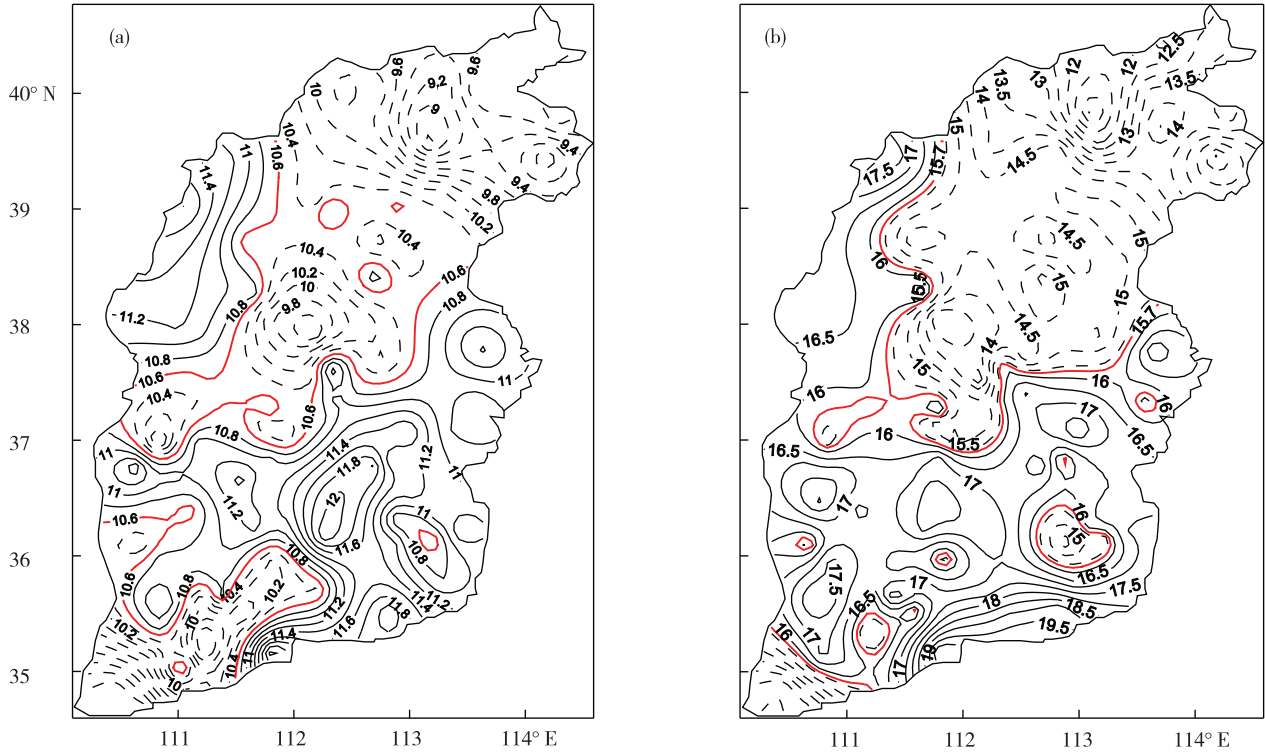


图5 山西极端降水对年降水量(a)、夏季降水量(b)贡献率(单位:%)的空间分布

Fig.5 Distribution of extreme precipitation's contribution rate (units: %) to annual precipitation (a) and summer precipitation (b) in Shanxi

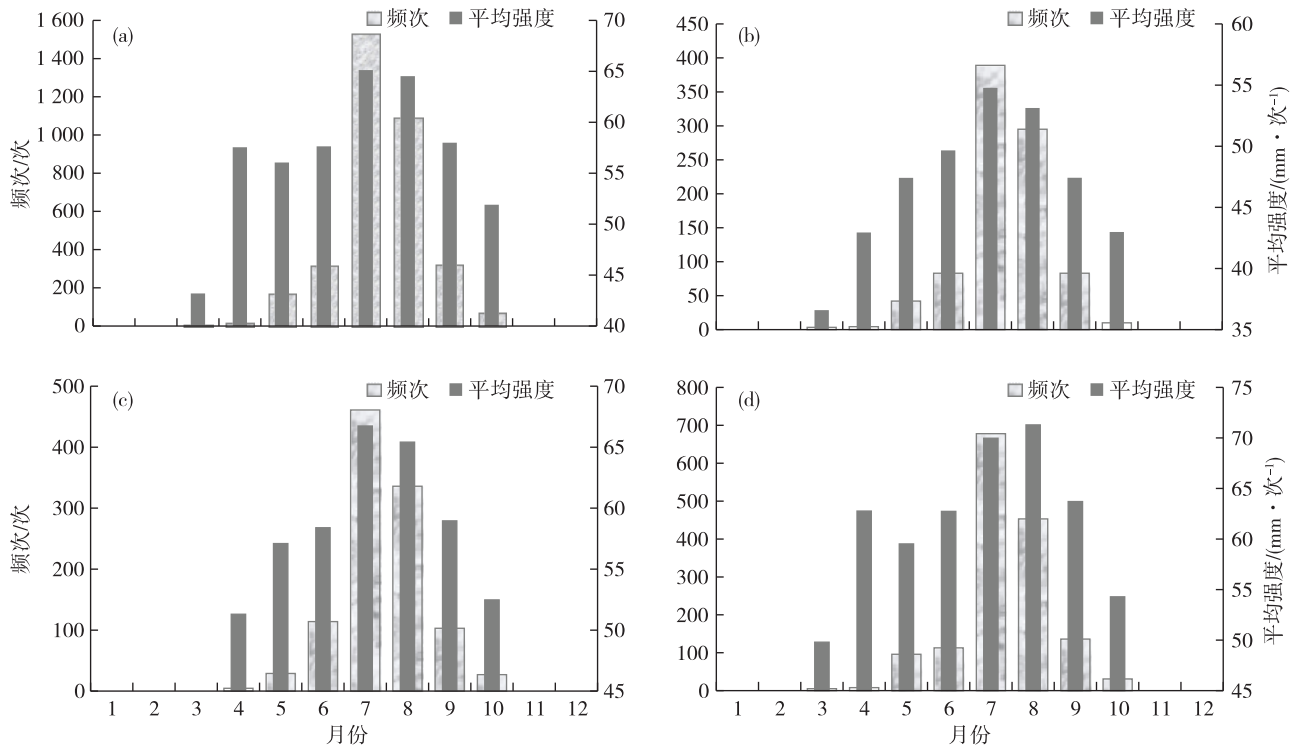


图6 山西(a)及其北部(b)、中部(c)、南部(d)极端降水频次和平均强度的逐月分布

Fig.6 Monthly distribution of frequency and average intensity of extreme precipitation in the whole province (a), northern areas (b), central areas (c), and southern areas (d) of Shanxi

月)发生频次逐月增加,平均强度为 $52.3 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$, 但仅能维持 1 d;夏季(6—8月)极端降水事件较集中,平均强度为 $62.4 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$,持续时间可达 2 d 以上;秋季(9—10月)的极端降水事件较夏季明显减少,平均强度为 $54.9 \text{ mm} \cdot \text{次}^{-1}$,持续时间在 2 d 以下。

3.2 年变化趋势分析

3.2.1 极端降水日数

由山西极端降水日数的逐年变化(图 7a)可以看出,近 40 年来,全省极端降水事件呈现出明显增加的趋势(通过 $\alpha = 0.01$ 信度检验),线性倾向率可达 $0.82 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。这种趋势与以往的研究^[12-13]有所不同。分区域(图 7b—d)来看,中部

极端降水日数增多趋势显著(通过 $\alpha = 0.001$ 信度检验),回归系数为 $0.51 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;北部极端降水日数有上升趋势,但不显著;南部的极端降水日数线性变化系数为负值,呈弱的下降趋势。由全省 108 个站点年极端降水日数序列的线性系数和显著性分布(图 8a)可知,线性趋势系数正值区域主要位于朔州及其以南的北中部大部、临汾大部和长治南部,有 52 站通过显著性检验,尤其是在忻州中部,最大值达 $0.35 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;其他地区线性系数为负值,14 站通过显著性检验,大同中南部、运城东南部、晋城西部极端降水日数明显减少,变化率达 $-0.24 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。这说明极端降水日数变化的区域差异较大,局地性较强。

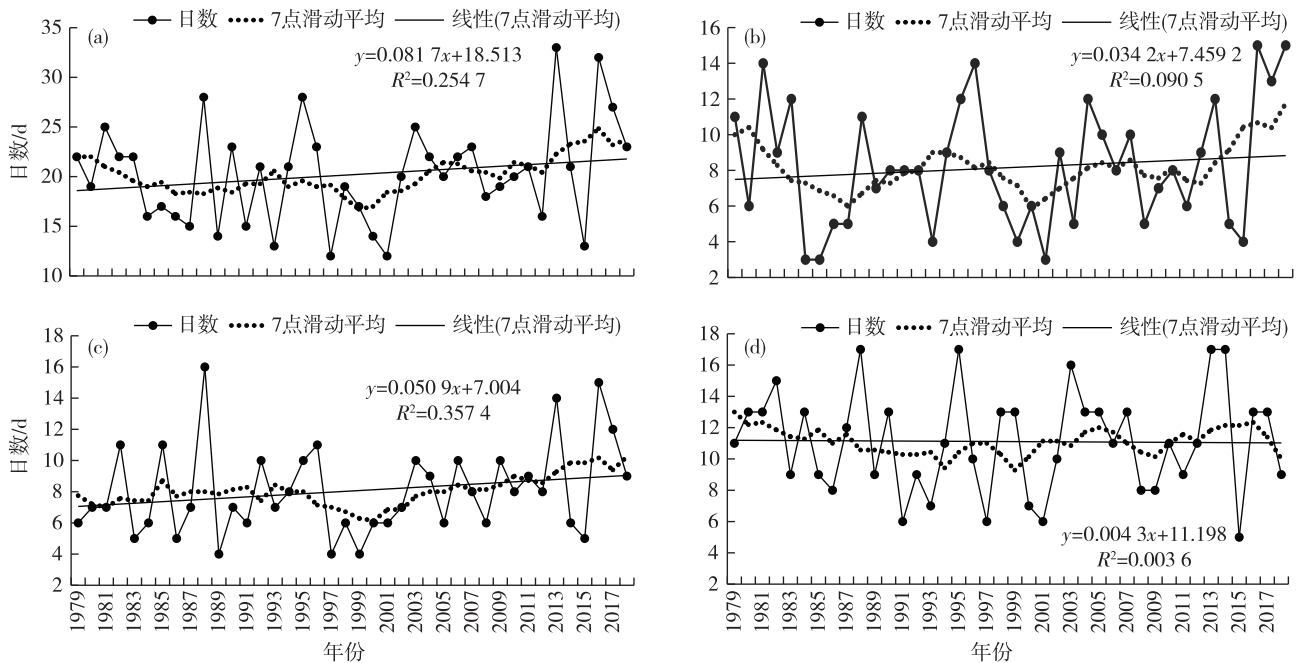


图 7 山西(a)及其北部(b)、中部(c)、南部(d)极端降水日数的逐年变化

Fig.7 Annual variation of days of extreme precipitation in the whole province (a), northern areas (b), central areas (c), and southern areas (d) of Shanxi

3.2.2 极端降水强度

由全省及各区域极端降水平均强度的逐年变化可见,全省和南部呈现出弱的上升趋势(图 9a、d);北部和中部上升趋势显著(图 9b、c),通过 $\alpha = 0.001$ 的显著性检验。由全省 108 个站点极端降水强度的线性趋势与显著性分布(图 8b)可看出,北中部大部极端降水强度呈增强趋势,43 站显著增强;南部强度变化较复杂,有 14 站极端降水强度显著减弱,尤其是运城西北部,每 10 a 减少 5.61 mm ;但同区域内还有 12 站的强度出现显著增强趋势,特别是晋城东南部最大变化率高达

$9.69 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,局地特征明显。

3.2.3 极端降水范围

由极端降水事件出现范围的逐年变化可看出,全省和北部极端降水事件出现范围呈显著的扩大趋势(图 10a、b),通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,线性趋势系数分别为 $0.15 \text{ 站} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.23 \text{ 站} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$;中部和南部影响范围增大与减小的变化趋势微弱(图 10c、d)。这说明山西极端降水范围的增大主要是由北部极端降水事件范围的扩大引起的。

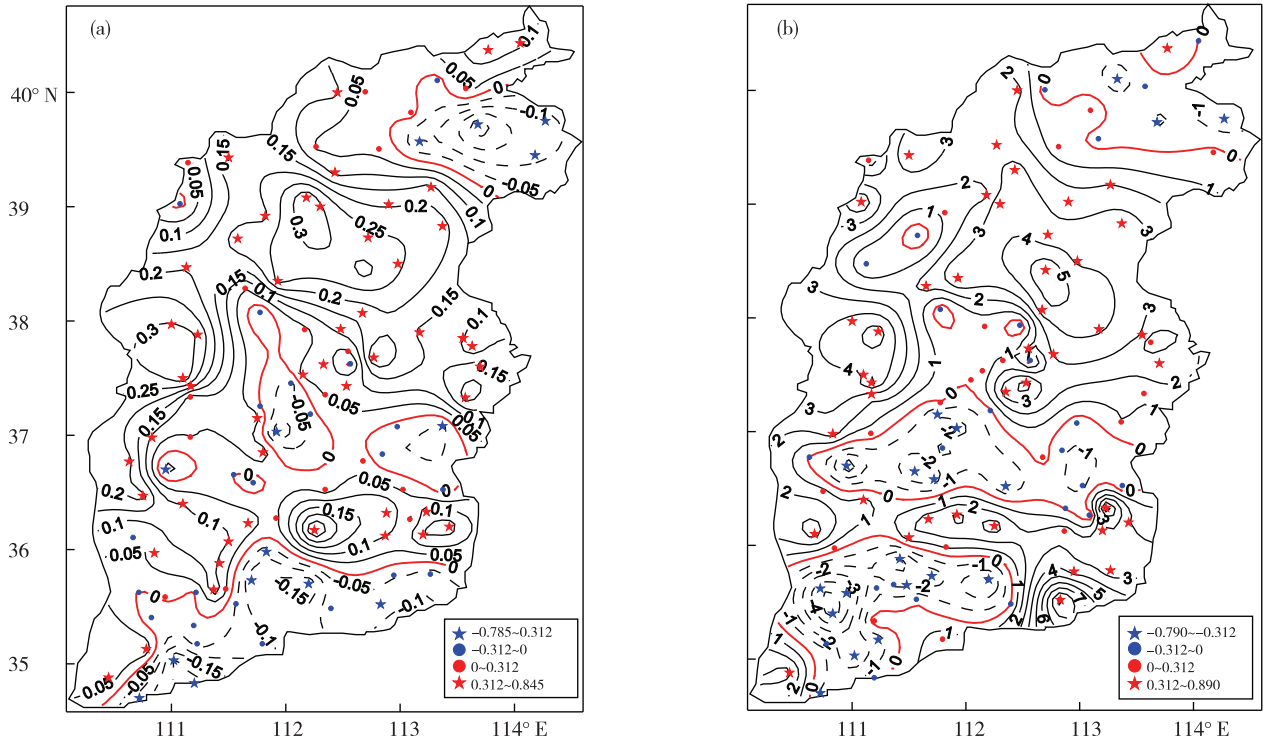


图8 山西各站极端降水日数(a,单位: $d \cdot (10 a)^{-1}$)、强度(b,单位: $mm \cdot (10 a)^{-1}$)线性变化系数及显著性空间分布(●、★、●、★分别表示增加、显著增加、减少、显著减少的站点)
 Fig.8 Spatial distribution of linear variation coefficient and significance for days (a, units: $d \cdot (10 a)^{-1}$) and intensity (b, units: $mm \cdot (10 a)^{-1}$) of extreme precipitation at each station in Shanxi Province (●, ★, ●, and ★ represent increase, significant increase, decrease, and significant decrease, respectively)

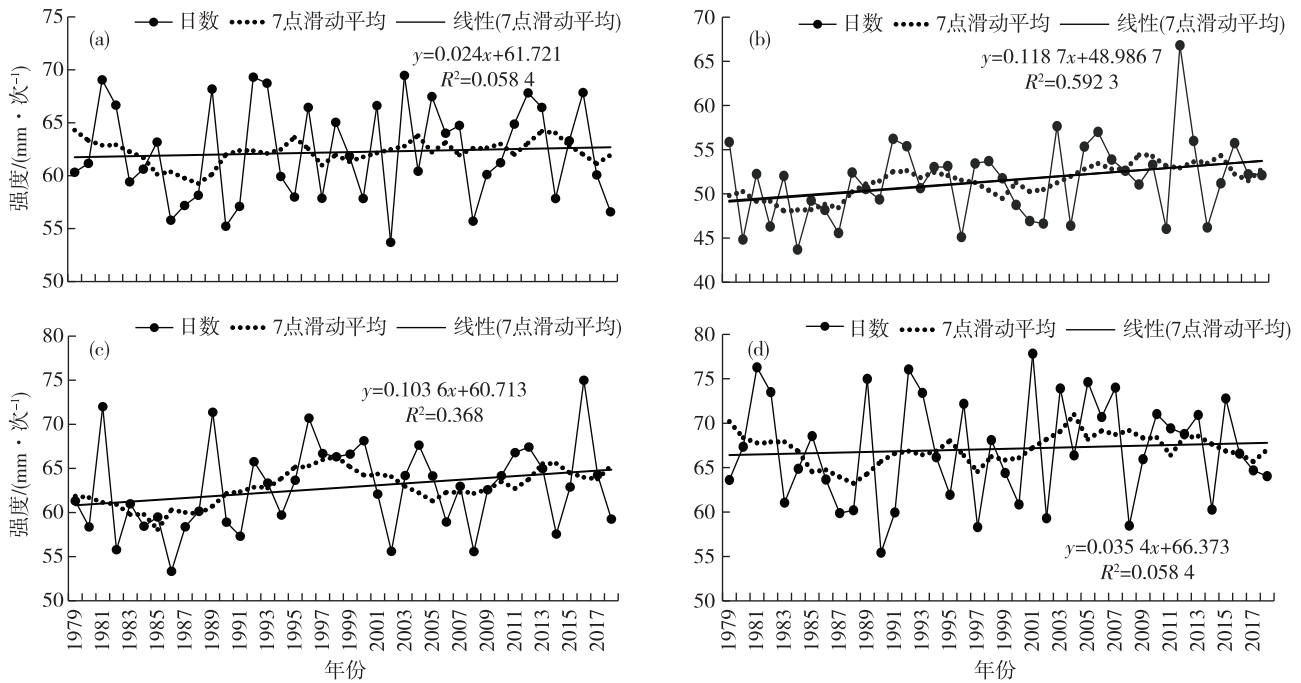


图9 山西(a)及其北部(b)、中部(c)、南部(d)极端降水强度的逐年变化
 Fig.9 Annual variation of intensity of extreme precipitation in the whole province (a), northern areas (b), central areas (c), and southern areas (d) of Shanxi

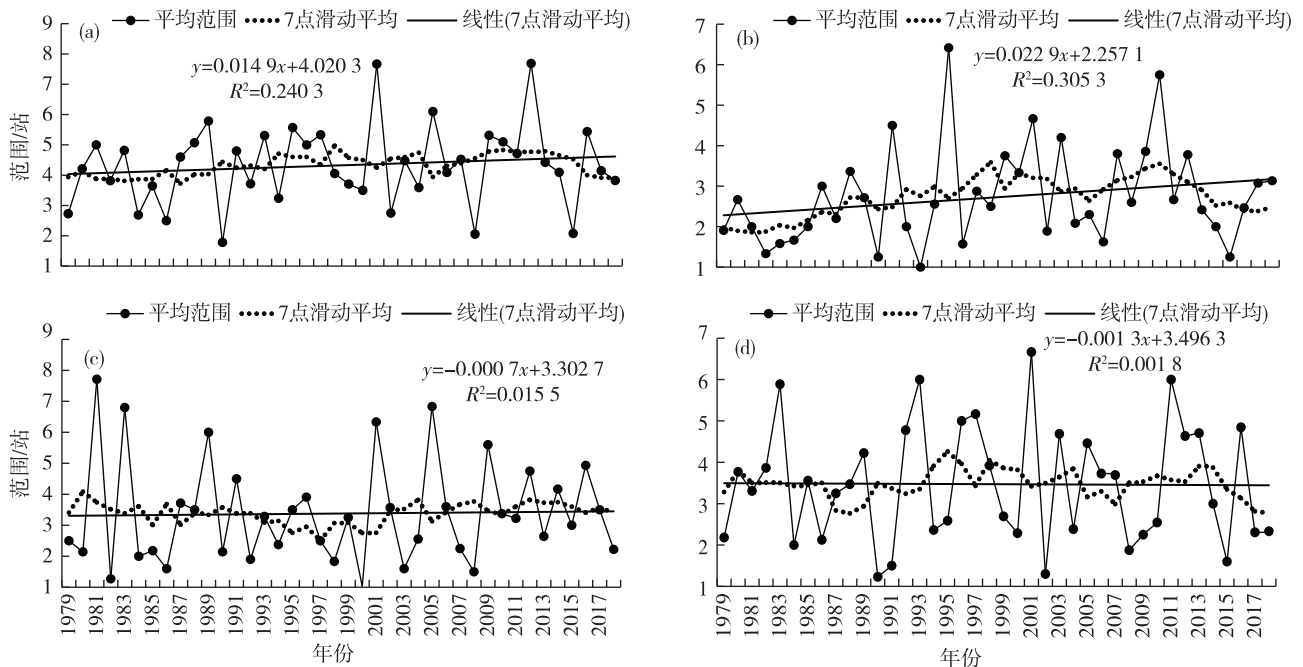


图10 山西(a)及其北部(b)、中部(c)、南部(d)逐年极端降水范围(站点数)的变化

Fig.10 Annual variation of range of extreme precipitation (the number of stations) in the whole province (a), northern areas (b), central areas (c), and southern areas (d) of Shanxi

3.3 突变分析

对极端降水日数、强度、范围年变化趋势显著区域进行了M-K突变检验(图11)。全省极端降水日数、范围(图11a、e)分别在2007、1988年后UF大于0,呈上升趋势,但始终处于置信区间内,没有发生突变。中部极端降水日数和强度(图11b、d),UF分别在2013和1998年超过了临界值,与UB在置信区间内最后一次相交的突变点发生在2001年和1992年。北部极端降水强度(图11c)在1990年后呈上升趋势,但没有发生突变;极端降水范围(图11f),1986年后UF大于0并于2001年超过临界值,扩大趋势显著,UF与UB相交于1986年,最早发生突变。

4 结论

(1)山西极端降水出现在3—10月之间,6—9月较集中;极端降水发生频次呈现“山区多、盆地少”的特点,平均强度表现出“北中部小、南部大”的空间分布特征。

(2)山西的极端降水持续时间以1d为主,具有明显的局地性强特征,发生大范围极端降水事件的概率较低。在山西南部大部、晋中东南部、忻州西北部—吕梁西部的洪涝灾害主要是由持续1d的极端降水造成的;而在阳泉南部—晋中东北部、吕梁

东部与太原及晋中南部交界区域、运城的东南部—晋城西部等地,需重视持续2d极端降水致灾的可能性。

(3)诊断分析表明,近40年全省极端降水事件总体上呈现日数明显增多、强度微弱增加、影响范围不断扩大的趋势,但没有突变发生。各区域极端降水的变化差异较大,局地变化特征明显。北部表现为极端降水显著增强,影响范围在1986年发生突变后存在不断增大的长期趋势;极端降水事件中,大同中南部减少幅度减弱,而忻州中东部显著增多、增强。中部则极端降水日数显著增多、强度明显增强,突变分别发生在2001年和1992年。南部极端降水的长期变化微弱,呈现出同区域内极端降水事件中运城东南部显著减少、长治中南部明显增多,降水强度晋城东南部显著增强、运城西北部明显减弱等相反的变化趋势。

采用百分位法定义极端降水事件,通过对山西108个气象站极端降水的统计分析,较全面地反映了山西各地极端降水的时空分布和变化特征。但由于极端降水的影响因素复杂,表征极端降水的指标较多,用单一标准定义和分析极端降水尚不能完全认识其特征及成因,还需在分析总结的基础上从天气和气候学角度进行极端降水成因和变化规律的后续研究。

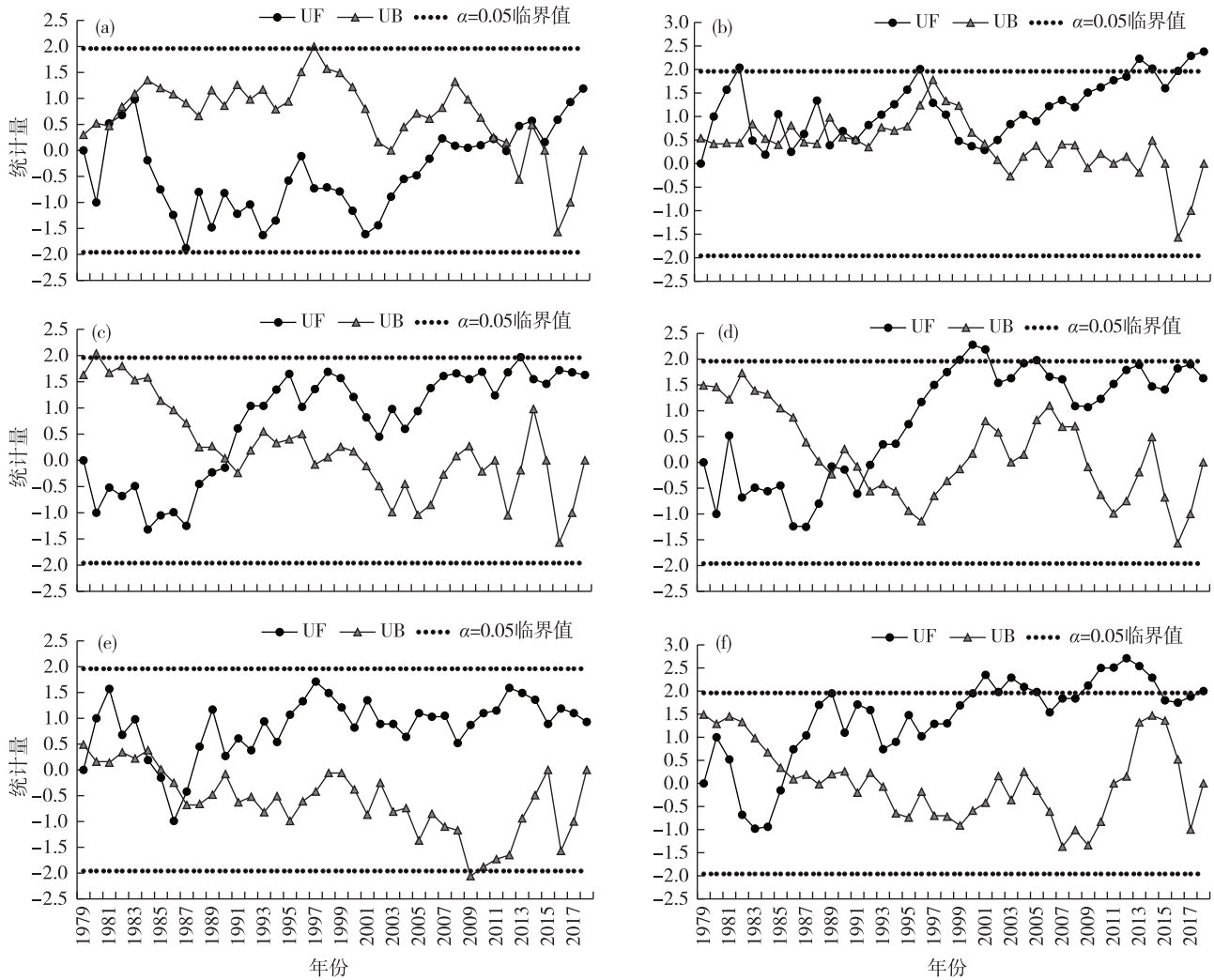


图 11 山西极端降水日数(a.全省,b.中部)、强度(c.北部,d.中部)和范围(e.全省,f.北部)M-K 检验
 Fig.11 M-K test for days (a. the whole province, b. central areas), intensity (c. northern areas, d. central areas), and range (e. the whole province, f. northern areas) of extreme precipitation in Shanxi

参考文献:

[1] IPCC. Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] GONG D Y, SHI P J, WANG J A. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China[J]. J Arid Environ, 2004, 59(4): 771-784.

[3] WANG Y Q, ZHOU L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation[J]. Geophys Res Lett, 2005, 32(5): L09707.

[4] MILLY P C D, WETHERALD R T, DUNNE K A, et al. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. Nature, 2002, 415(6871): 514-517.

[5] ALEXANDER L V, ZHANG X, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. J Geophys Res, 2006, 111(3): D05109.

[6] 翟盘茂, 任福民, 张强. 中国降水极值变化趋势检测[J]. 气象学报, 1999, 57(2): 208-216.

[7] 欧阳静怡, 黄菲, 徐士斌, 等. 1949—2019年影响山东的热带气旋时空分布及极端降水和大气环流异常[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(4): 1-10.

[8] 张萍萍, 钟敏, 董良鹏. 湖北省两类典型极端降水过程气象因子异常特征对比[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(1): 23-31.

[9] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 1-10.

[10] 潘晓华, 翟盘茂. 气温极端值的选取与分析[J]. 气象, 2002, 28(10): 28-31.

- [11] 薛媛,薛晓萍.极端降水与干旱同步频发的研究进展[J].海洋气象学报,2022,42(1):61-73.
- [12] 刘兴华,季致建,吴洪宝,等.中国近40年极端气温和降水的分布特征及年代际差异[J].热带气象学报,2006,22(6):618-624.
- [13] ZHAI P M, ZHANG X B, WAN H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. J Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 陈峪,陈鲜艳,任国玉.中国主要河流域极端降水变化特征[J].气候变化研究进展,2010,6(4):265-269.
- [17] 高霞,王宏,于成文,等.近45年来河北省极端降水事件的变化研究[J].气象,2009,35(7):10-15.
- [18] 尤焕苓,刘伟东,任国玉.1981~2010年北京地区极端降水变化特征[J].气候与环境研究,2014,19(1):69-77.
- [19] 苏志重,石顺吉,张伟,等.1960—2010年福建省极端降水事件变化趋势分析[J].暴雨灾害,2016,35(2):166-172.
- [20] 唐永兰,于晓晶,徐桂荣,等.近54a湖北极端降水的变化特征及其与城市化的关系研究[J].暴雨灾害,2018,37(1):73-82.
- [21] 范苏丹,盛春岩.1966—2010年山东夏季极端降水事件特征分析[J].气象与环境科学,2018,41(1):86-93.
- [22] 王苗,郭品文,邬昀,等.我国极端降水事件研究进展[J].气象科技,2012,40(1):79-86.
- [23] 江秀芳,李丽平,周立波.极端降水特性分析研究进展[J].气象与减灾研究,2012,35(2):1-6.
- [24] 郝寿昌,秦爱民,李馥峰,等.山西省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2016.
- [25] 赵桂香,范卫东,刘志斌,等.“8.18—19”山西中南部暴雨天气特征分析[J].高原气象,2012,31(5):1309-1319.
- [26] 苗爱梅,郝振荣,贾利冬,等.“0702”山西大暴雨过程的多尺度特征[J].高原气象,2014,33(3):786-800.
- [27] 王咏梅,张红雨,郭雪,等.山西省近48a高温和强降水极端事件变化特征[J].干旱区研究,2012,29(2):289-295.
- [28] 李树文,蔡晓芳,田晓婷.山西夏季极端降水日数变化规律[J].山西科技,2020,35(1):50-53.
- [29] 王颖苗.山西省近47年来极端气候事件的时空分布特征[J].水资源开发与管理,2020,40(10):64-71,80.
- [30] 李智才,宋燕,丁德平.山西省主汛期极端降水变化特征[J].气候与环境研究,2010,15(4):433-442.
- [31] 董伯纲,于洋.近60年山西省极端降水时空变化特征[J].水土保持学报,2022,36(1):135-141.
- [32] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007.