

气候变暖下山东省月尺度极端降水的时空变化特征

邹瑾^{1,2}, 李君³, 高理^{1,2*}

(1.山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2.山东省气候中心, 山东 济南 250031;
3.淄博市气象局, 山东 淄博 255000)

摘要:为揭示气候变暖背景下极端降水多尺度的变化规律,基于山东省国家气象站1961—2020年逐日降水量资料,利用百分位数相对阈值法分析月尺度极端降水事件的时空变化特征。结果表明:山东省极端降水事件主要出现在夏季7、8月,年频率均在40%以上;各地年频次大致自东南向西北递减。大部分地区极端降水年频次和极端降水量增加,除秋季外各季均增加,冬季增加明显。20世纪80年代中期之后,各地极端降水普遍增多增强,年际变化明显增大;夏季和冬季极端降水强度明显增强,其中,鲁中、鲁西南、半岛等地夏季每10 a增加10~20 mm,冬季各月增加20%~50%。可见,在气候变暖背景下,山东降水不稳定性普遍增加,更需加强暴雨洪涝、暴雪等灾害风险预警与防控服务。

关键词:山东省;极端降水;月尺度;时空分布;变化特征

中图分类号:P4;P467 文献标志码:A 文章编号:1002-4026(2023)04-0104-10

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Characteristics of spatiotemporal variation of monthly-scale extreme precipitation in Shandong Province under climate warming

ZOU Jin^{1,2}, LI Jun³, GAO Li^{1,2*}

(1.Shandong Provincial Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Jinan 250031, China;
2.Shandong Provincial Climate Center, Jinan 250031, China; 3.Zibo Meteorological Bureau, Zibo 255000, China)

Abstract: To reveal the multiscale variation law of extreme precipitation events under climate warming, based on the daily precipitation data of the National Meteorological Station from 1961 to 2020, the spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation events on the monthly scale in Shandong Province were analyzed using the percentile relative threshold method. The results show that the monthly-scale extreme precipitation events in Shandong Province mainly occurred in July and August with the annual frequency bigger than 40%. The annual frequency showed a decreasing trend as one moves from southeast to northwest regions. The annual frequency and precipitation of extreme precipitation events increased in most areas for all seasons except autumn and considerably increased in winter. After the mid-1980s, extreme

收稿日期:2022-09-21

基金项目:环渤海科技创新项目(QYXM202107);山东省气象局科研项目(2009sdqxz08)

作者简介:邹瑾(1969—),女,硕士,高级工程师,研究方向为气候与气候变化。E-mail:zoujin_jn@163.com

*通信作者,高理,女,高级工程师,研究方向为气候与气候变化。E-mail:gaoli201213@163.com

precipitation events have generally increased and intensified, and their interannual changes have increased significantly. The intensity of extreme precipitation in summer and winter increased significantly by 10 mm to 20 mm during 10 years in summer in the central, southwestern, and peninsular areas of Shandong and 20% to 50% in winter months in Shandong province. The precipitation instability generally increases under climate warming in Shandong, and it is necessary to strengthen early warning and defense services for disaster risks such as rainstorm, flood, and blizzard.

Key words : Shandong Province; extreme precipitation; monthly scale; spatiotemporal distribution; changing characteristics

与气候平均态相比,极端气候事件对气候变化更为敏感^[1],气候变暖导致全球大部分地区极端强降水事件增多^[2-4],由此引发的洪涝及灾害风险已倍受各界广泛关注。研究表明,不同区域极端降水事件对气候变暖呈现不同的响应^[5-10]。中国大部分地区极端降水事件增多,冬季增加更为明显。极端降水存在显著的地域性和季节性差异^[11-17],不同时空尺度变化特征不同^[18-21],中国夏季极端降水量增加最大的月份为6—7月,极端降水频次增加较多的月份为1—3月^[22]。全国平均极端降水事件的开始时间和结束时间分别呈现出明显的提前和推迟趋势^[23]。

山东省位于中国东部沿海,黄河下游地区,中部山地突起,西部及北部为黄河冲积平原,中南部为山地丘陵,东部半岛以起伏和缓的山地丘陵为主。地处于副热带与西风带的过渡地带,属典型的温带季风气候。年内降水时空分布差异明显,旱涝灾害频繁。研究发现,山东极端降水呈现自东南向西北递减的态势^[24],新中国成立以来,山东省年降水量及汛期降水量呈减少趋势,极端天气气候事件出现的频率、强度都呈增大的趋势^[25],极端降水变化空间差异显著,西北部及中部山区极端降水量和降水强度增加,洪涝灾害加剧^[26-27]。1961年以来降水日数总体呈显著减少趋势,大雨日数减少和暴雨强度增强的趋势较明显^[28],1991年之后极端降水指数的变幅更大且变化显著的站点更多^[29]。大部分地区夏季极端降水频次和强度都存在增加趋势,尤其在鲁中及其以南地区呈明显增加趋势^[30]。这些研究都是年、季尺度的,而月尺度的研究少见。近年来在实际业务工作中发现月尺度极端降水事件时常发生,尤其在非夏季时段,如2020年11月18日,鲁中、鲁南和半岛地区出现了历史同期少见的大范围强降水天气,有35县市出现暴雨,59县市日降水量突破本地同月有记录以来的历史极值,但在年尺度上均未达到极端降水事件的标准。可见,年、季尺度标准会漏掉大量的非夏季时段的极端降水事件,不利于全面认识其分布变化规律。为了提高对极端降水事件的监测服务能力,研究极端降水事件不同尺度的变化规律是必要的。为此,本文试图从月尺度上分析山东省极端降水事件在气候变暖背景下的时空变化特征,以期对强降水等灾害性天气的风险预警和防控服务提供一定的参考依据。

1 资料和方法

资料来源于山东省气象信息中心提供的123个国家气象站1961—2020年逐日观测数据,经过数据质量控制,剔除缺测的站点,最后选取了资料较为完整的93站作为代表站。采用百分位数法确定各站月尺度极端降水阈值,具体做法:将代表站历年同月大于等于0.1 mm的日降水量从小到大排序,计算第95%百分位数,分别得到各代表站各月的极端降水阈值。若某站某日降水量大于或等于该站该日所在月份的极端降水阈值,则记该站该日为一次月尺度极端降水事件。由此统计得到各代表站历年各月的极端降水事件发生频次和极端降水总量。月极端降水出现频率为月发生频次与该月总天数的比值;年频率为该月发生极端降水的年数与总年数的比值;极端降水强度为月尺度极端降水总量与总频次的比值。采用气候倾向率和趋势系数^[31]分析极端降水的线性变化趋势及其显著性;采用 T 检验和 F 检验分析极端降水平均态和年际变化的显著性;利用变异系数^[32]分析极端降水对气候变化的敏感性。

2 极端降水基本特征

2.1 月际分布

山东省月尺度极端降水事件每年均有发生,1961—2020年,平均年频次为4.0次,夏季最多,占40%,春、秋次之,均占22.5%,冬季最少,占15%。平均年极端降水量占年总降水量的31.5%,夏季最多,占全年极端降水量的62.1%,秋季次之,冬季最少。极端降水强度年平均为53.7 mm/次,夏季最强,平均达82.2 mm/次,秋季次之,冬季最小。由此可见,月尺度极端降水与总降水量的季节分布是一致的。

图1为山东省各月极端降水出现频率(出现频率=频次/总天数)和年发生频率(年频率=发生年数/总年数),可以看出,7月出现频率最高,占全年的17.2%,年频率为49.2%。8月次之,占全年的13.8%,年频率为41%。其他各月均不足全年的10%,年频率均在40%以下,其中,4、6、9月年频率为30%以上,5、10、11月为20%~30%;1—3月、12月出现频率较低,年频率在20%以下。各季月尺度极端降水事件,夏季主要发生在7—8月,春季4月最多,秋季9月最多,冬季各月分布较为均匀。各月极端降水量占比平均为15%~30%,4—10月在20%以上,其中7—8月最高(均为30%)。6—9月极端降水强度在50 mm/次以上,其中8月最强,平均达93.7 mm/次,7月次之。

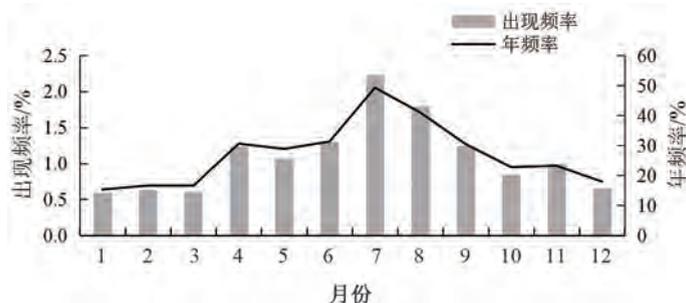


图1 山东各月极端降水事件出现频率和发生年频率分布

Fig.1 The frequency and annual frequency distribution of monthly extreme precipitation events in Shandong

2.2 地域分布

1961—2020年,山东省月尺度极端降水事件出现频次大致呈现自东南向西北递减的分布特征,四季略有不同。由表1可知,鲁西北和鲁西南的大部分地区年平均为3~4次,其他大部分地区为4~5次,文登达5次以上,泰山为4.6次,较周边多。春季,鲁东南和山东半岛出现总频次大多为60~70次,平均每年约1~2次;其他大部分地区为60次以下,鲁西北和鲁西南为50次以下;泰山为67次,明显较周边多,山东半岛南部较北部多。夏季,各地均明显增多,大部分地区总频次达90~120次,鲁东南地区最频繁,诸城、莒县达120~140次,平均每年约2~3次,这主要是由于东亚夏季风在山东不同地形作用影响的结果。秋季,中西部大体为南多北少,枣庄、临沂、日照等地总频次为60~70次,其他大部分地区为60次以下;山东半岛地区则是北部多南部少,与春季正好相反,这主要与沿海地区受东亚冬季风和夏季风转换影响有关。冬季,大部分地区总频次多为30~40次,鲁西北少,山东半岛多,其中山东半岛北部沿海地区最多,总频次为60次左右,平均每年发生1次左右,这主要是受东亚冬季风和海洋的共同影响所致。可见,月尺度极端降水与降水事件^[28]的地域分布基本是一致的。

表1 1961—2020年山东省月尺度极端降水出现频次

Table 1 Frequency of monthly-scale extreme precipitation events in Shandong Province from 1961 to 2020

地名	站点	年平均频次/次	总频次/次			
			春季	夏季	秋季	冬季
鲁西北	德州	3.6	41	84	65	28
	滨州	3.5	48	88	44	28
	东营	4.0	48	102	58	34
鲁西南	聊城	3.5	41	95	47	26
	菏泽	3.8	43	88	57	40
	济宁	3.7	40	98	47	36
鲁中	济南	3.9	46	100	55	30
	泰安	3.9	58	97	51	26
	新泰	4.0	52	102	50	37
	泰山	4.6	67	110	60	41
	淄博	3.9	50	95	58	32
	潍坊	4.0	59	96	51	34
鲁东南	诸城	4.3	56	126	48	30
	枣庄	4.5	60	106	67	35
	临沂	4.3	60	103	64	30
	沂水	4.5	67	116	51	34
	日照	4.7	64	119	63	38
	莒县	5.0	68	138	59	36
山东半岛	青岛	4.3	67	102	57	30
	烟台	4.6	56	97	68	56
	牟平	4.9	59	100	72	61
	文登	5.1	64	109	68	62
	乳山	4.2	71	93	51	39

3 极端降水时空变化特征

3.1 年际和年代际变化

山东省月尺度极端降水事件年际变化明显(图2),1961—2020年,年频次最高为7.6次(1964年),最少为1.6次(1986年),有12年达5次以上,其中9年在1989年之后。1980s为少发期,平均为3.4次,多数年份少于4次,其他年代平均频次相差不大。极端降水量年际变化大,最多为424.6 mm(1964年),最少为89.4 mm(2002年),有16年达250 mm以上,其中10年在1989年之后;年极端降水量占比最大为44.1%(2018年),最小18.2%(1986年),有11年达35%以上,其中9年在1990年之后。1980s中期至1990s后期极端降水量及其占比均显著增加,1990s和2010s平均占比均在30%以上(图2)。极端降水强度各年代平均值波动小,但年际变化大,最强为83.6 mm/次(2019年),有12年平均达60 mm/次以上,其中7年出现在1985年之后,1980s后期至1990s后期显著增强。由此可见,山东省月尺度极端降水在20世纪80年代中后期发生了较为明显的变化。

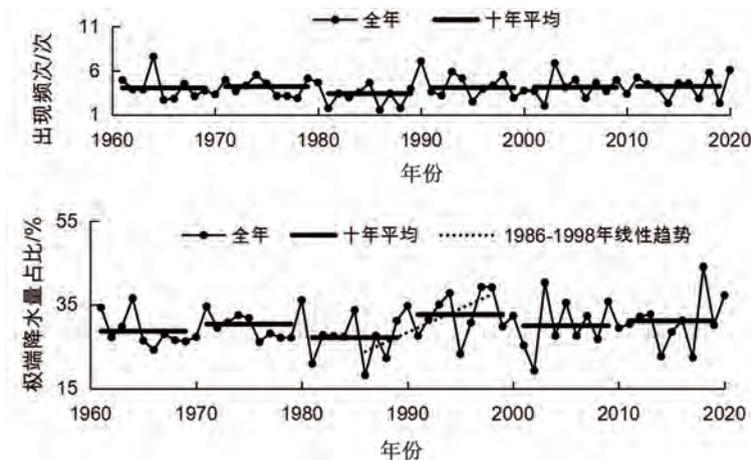


图2 1961—2020年山东月尺度极端降水年频次和极端降水量占比演变

Fig.2 Evolution of annual frequency and extreme precipitation proportion of monthly-scale extreme precipitation in Shandong from 1961 to 2020

从20世纪80年代中期前后各月极端降水事件的出现频次、极端降水量及其占比和强度的变化率来看(图3),1986—2020年与1961—1985年相比,4、9、10月平均频次和极端降水量减少20%~30%,10月极端降水量占比减少20%以上;其他大部分月份增加,其中2月平均频次、极端降水量及其占比增加1倍以上,11月平均频次、极端降水量和12月极端降水量占比增加50%以上,冬季各月(1、2、12月)极端降水强度增加20%~50%,其中2月最多,接近50%。经过 T 检验得知,1985年前后,2月极端降水平均频次、极端降水量及其占比和强度差异显著,9月平均频次差异显著,12月平均极端降水强度差异显著,通过 T 检验。值得注意的是,在极端降水量减少的4、7、9、10月中,7月极端降水量占比增加,其他3个月极端降水量占比的减少率相对极端降水量的减少率小。由此可知,除4、9、10月外,其他多数月份极端降水出现频次、极端降水量及其占比和强度在20世纪80年代中期之后是增加的,冬季各月增加明显,其中2月增加最显著。

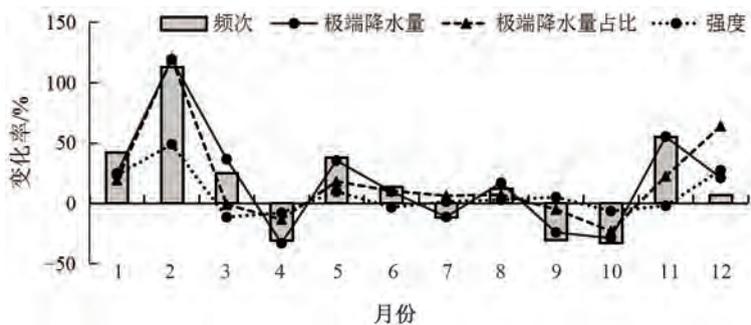


图3 1985年前后山东省各月极端降水出现频次、极端降水量及其占比和强度的变化率

Fig.3 Variation rate of the frequency, extreme precipitation, and its proportion and intensity of extreme precipitation events in each month in Shandong before and after 1985

利用 F 检验分析月尺度极端降水在20世纪80年代中期前后年际变化差异的显著性, F 统计量大于1,表示方差增大,说明年际变化增大; F 统计量小于1,表示方差减小,说明年际变化减小; F 统计量等于1,表示方差无变化,年际变化不变。从表2可以看出,1986—2020年,山东省月尺度极端降水事件全年出现的频次、极端降水量及其占比和强度的方差均较1961—1985年增大,年际变化增加,其中年极端降水量占比的年际变化增加显著,通过了0.05显著性水平的 F 检验。各季月尺度极端降水事件的年际变化存在差异,春季变化不大,但3月出现频次和极端降水量的年际变化显著增加,4月极端降水强度年际变化显著增加,说明春季强降水不稳定性增加,暴雨灾害风险增加。夏季及各月(6—8月)极端降水强度的年际变化显著增加,其中8月出现频次、极端降水量及其占比的年际变化均显著增加,说明夏季月尺度强降水发生几率增加,洪

涝灾害风险增大。秋季极端降水强度年际变化显著增加,其中11月出现频次和极端降水量的年际变化均显著增大,说明秋季强降水不稳定性也增加,暴雨出现几率增加。冬季极端降水强度年际变化显著减少,但出现频次、极端降水量及其占比的年际变化增加,其中2月显著增加,说明冬季暴雪等极端降水事件发生几率增加。由此可见,20世纪80年代中期之后,山东省极端降水事件更加不稳定,洪涝、雪灾等风险增加。

表2 1986—2020年与1961—1985年山东月尺度极端降水的F统计量

Table 2 F statistics of monthly-scale extreme precipitation events in Shandong from 1986 to 2020 and 1961 to 1985

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	春季	夏季	秋季	冬季	全年
出现频次	1.81	2.28*	3.03*	0.47*	1.19	0.73	0.72	1.95*	0.95	1.12	3.63*	0.58	0.97	0.82	1.73	1.67	1.37
极端降水量	1.26	2.24*	3.84*	0.46*	1.06	0.61	0.61	2.24*	1.19	1.57	2.91*	0.75	0.87	0.87	1.37	1.65	1.11
极端降水量占比	0.88	2.28*	1.30	0.97	1.02	1.60	1.26	2.59*	1.20	1.13	1.78	1.63	0.97	1.74	1.69	1.19	2.29*
极端降水强度	0.71	0.95	1.56	2.71*	0.65	3.28*	2.40*	2.52*	1.14	1.24	1.25	0.70	0.92	2.81*	2.23*	0.22*	1.39

注:表中*表示通过0.05显著性水平。

具体从各月历年变化来看,1960s至1970s极端降水出现频率集中在4、6—9月,之后有所减少,1980s后期开始各月的高频率增多(图4(a)),如11月在1993、2015年出现频率达7%(2.1次)。1990年左右之后,极端降水量在出现频次最高的7—8月明显增多(图4(b)),各月极端降水量占比的高值也明显增多,其中,2016年2月和2020年11月分别高达90.3%和81.7%,2018年3—6月均在50%以上。1990年之后,极端降水强度在7—8月的高值也明显增多(图4(c)),具体来看,7月全省平均极端降水强度达90 mm/次的年份共11年,有7年出现在2000年之后,其中2006、2014年分别达116.6 mm/次和107.8 mm/次;8月全省平均极端降水强度达100 mm/d的年份共10年,有7年出现1990年之后,其中1993、1999、2001、2019年均达120 mm/d以上。由此可见,近30年,山东各月极端降水均发生了变化,7—8月明显增多增强。

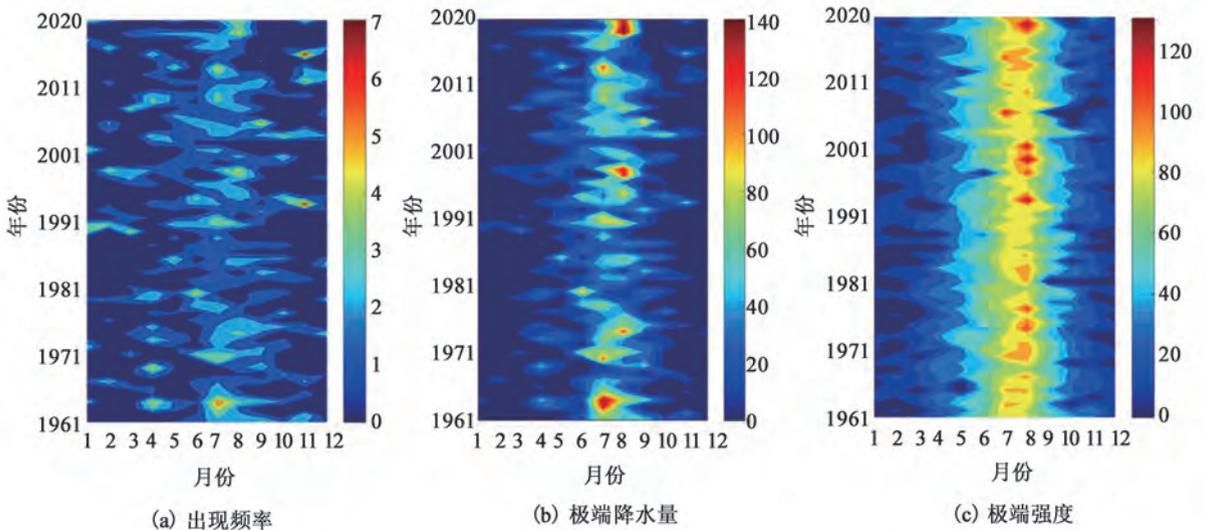


图4 1961—2020年山东省各月极端降水事件变化热图

Fig.4 Variation in monthly extreme precipitation events in Shandong Province from 1961 to 2020

从全省平均月尺度极端降水事件特征的线性趋势系数来看,出现频次和极端降水量,全年略呈增多趋势,秋季呈减少趋势,其他各季均呈增多趋势,冬季增多最明显,但均未达到显著性水平;4、7、9、10月减少趋势明显,2、5、8、11、12月增多趋势明显,其中9月频次减少显著,5月频次增多显著。极端降水量占比,全年增加趋势明显,秋季略减少,其他各季增加,夏季和冬季每10 a增加0.8%和2.5%,分别达到0.10、0.05显著性水平,冬季较夏季增加趋势明显(图5);9—10月减少趋势明显,2、5、7、8、11、12月增加趋势明显,其中2、12月增加显著。极端降水强度,年平均无明显趋势变化,秋季略减弱,其他各季增强;10月减弱趋势明显,2、5、7、8、12月增强趋势明显,但均未通过显著性水平。总的来看,山东月尺度极端降水出现年频次和降水量

增加,极端降水量占比增加趋势最明显。四季变化不一致,春季增加,主要发生在5月;夏季增加,主要发生在8月;秋季减少,主要发生在9、10月;冬季增加最明显,主要发生在2、12月,再次说明冬季暴雪越来越多,这与孙建奇等^[9]的研究结论是一致的。

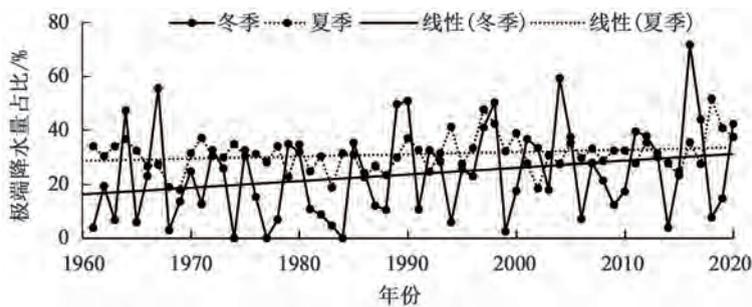


图5 1961—2020年山东省夏季和冬季月尺度极端降水量占比演变

Fig.5 Evolution of the proportion of monthly-scale extreme precipitation in summer and winter in Shandong Province from 1961 to 2020

3.2 空间变化特征

由以上分析可知,山东省月尺度极端降水事件在20世纪80年代中期前后发生了明显变化,故以1985年为界,分析山东月尺度极端降水变化的空间分布特征。从年频次变化倾向率分布来看,1961—2020年,鲁西北、山东半岛中部和东南部沿海及日照等地减少,鲁中及以南大部分地区、山东半岛的西部和北部沿海地区增加。1961—1985年大部分地区减少,鲁西北、鲁东南和山东半岛东南部减少趋势明显;1985年之后年频次普遍增加,93个代表站中71站倾向率为正(占76.3%),除鲁西南外其他大部分地区增加,其中鲁东南、山东半岛北部和德州等地22站增加趋势明显。60年间,极端降水量变化与年频次变化空间分布大致相同,鲁中及以南的大部分地区增加,其中鲁中和鲁南的部分地区每10a增加10mm以上;大部分地区极端降水量占比也普遍增加,全省有68站(占73%)倾向率为正,主要分布在中南部地区。1961—1985年,除鲁西南和山东半岛北部部分地区外,其他大部分地区极端降水量减少,其中鲁西北和鲁东南的部分地区每10a减少50mm;1985年之后大部分地区增加,全省达76站(占81.7%)倾向率为正,其中鲁东南、鲁西北和山东半岛东北部沿海地区每10a增加20mm以上。极端降水强度变化与频次变化分布也基本相似,鲁中大部分地区增强,其中潍坊的部分地区每10a增加5~6mm/次;1961—1985年大部分地区减小,1985年之后,除山东半岛外其他大部分地区增加,全省有60站(占65%)倾向率为正,其中鲁西南、鲁西北及潍坊等地显著增加,潍坊、济宁、菏泽等地的个别县市每10a增加10mm/次以上。

从月尺度极端降水事件四季的趋势系数分布来看,春季,除鲁南外其他大部分地区出现频次和极端降水量增多;极端降水强度除鲁西北、鲁中东南部及山东半岛的部分地区外其他大部分地区增强,其中鲁中西部、鲁西南及东南沿海地区增强明显,济南、淄博、聊城及日照沿海等地每10a增加3~5mm。1985年之后极端降水强度增加的站点增多,93站中74站为正趋势,其中31站趋势显著,鲁西南及东南沿海地区每10a增加5~10mm。夏季,鲁北、鲁中山区及以南地区频次和极端降水量增多,鲁西北、山东半岛及东南沿海地区减少;极端降水强度除鲁西北、鲁西南外,中东部大部分地区增强,其中潍坊和烟台、威海等地每10a增加5~8mm。1985年之后大部分地区频次、极端降水量和强度均普遍增加增强,93站中62站频次趋势为正,72站极端降水量趋势为正,70站强度趋势为正,其中潍坊、烟台、威海、济宁等地强度每10a增加10~20mm。秋季,鲁西北、山东半岛和鲁东南地区频次和极端降水量减少;鲁中、鲁西南及山东半岛的大部分地区强度减小,济南和威海的个别县市每10a减少4~6mm。1985年之后大部分地区频次增加,鲁西北地区极端降水量增加,其他大部分地区仍然减少,故大部分地区强度减小,93站中55站频次趋势为正,56站极端降水量趋势为负,69站强度趋势为负,其中潍坊的部分县市每10a减少10~15mm。冬季,山东大部地区频次和极端降水量增加,其中鲁东南至山东半岛的大部分地区频次增加明显,鲁西北、鲁东南及青岛等地极端降水量增加明

显,鲁西北和山东半岛南部沿海强度增加明显。1985年之后,频次和极端降水量增加的站点有所减少,但大部分地区强度明显增强,93站中83站强度趋势为正,其中52站趋势显著。

总的来看,近60年来,鲁中及以南大部分地区、山东半岛的西部和北部沿海地区月尺度极端降水年频次、极端降水量及占比增加,鲁中大部分地区强度增强。除秋季外,其他各季大部分地区增多增强。20世纪80年代中期之后,各地极端降水频次和降水量普遍增加,除半岛地区外其他大部分地区强度增强。大部分地区四季频次增多,除秋季外其他各季极端降水量增加,强度增强,其中,夏季鲁中、鲁西南、半岛地区明显增强;冬季大部分地区显著增强。与已有研究相比,月尺度极端降水变化与苏敏等^[27]和范苏丹等^[30]的研究成果基本是一致的。

4 气候敏感性分析

以上分析可知,在气候变暖背景下,山东省月尺度极端降水事件变化存在明显的季节性和地区性差异,且在20世纪80年代中后期发生了明显的变化,为进一步了解这种变化特征,利用变异系数分析其气候敏感性。从月尺度极端降水事件的变异系数来看(图6),极端降水量的变异系数最大,强度最小,说明极端降水量的气候敏感性最大,强度的敏感性相对较弱。出现频次、极端降水量及其占比和强度的变异系数均在冬季最大,夏季最小,各月的变化基本一致。春季均表现为3月最大,5月最小;夏季6月最大,7月最小;秋季11月最大,9月最小;冬季均在12月最小,出现频次和极端降水量均在1月最大,极端降水量占比和强度均在2月最大。说明月尺度极端降水事件的出现频次、极端降水量及其占比、强度对季节变化的敏感性基本一致,均存在明显的季节性差异,在降水量较多的夏季和月份敏感性小,而在降水量较少的冬季和月份敏感性较大。

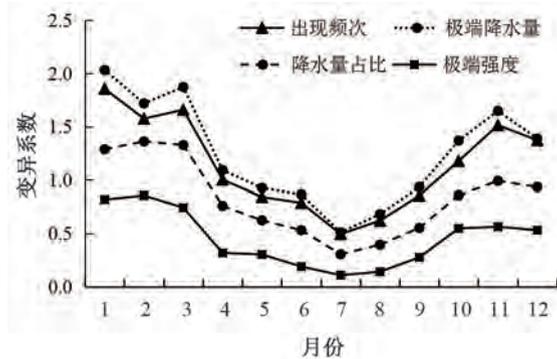


图6 山东省月尺度极端降水事件的变异系数

Fig.6 Coefficient of variation of monthly extreme precipitation events in Shandong Province

以极端降水量为例,分析山东省各地全年和四季的月尺度极端降水事件的气候敏感性可知,中西部全年月尺度极端降水量的气候敏感性呈现南部小北部大,半岛地区则相反,呈现北部小南部大,鲁西北、半岛南部以及潍坊、泰安等地的气候敏感性大。春季,各地敏感性呈现东南向西北递增,鲁西北最大;夏季,各地敏感性差异变小,鲁西南、渤海湾和山东半岛南部沿海地区大;秋季,各地敏感性增大,但差异减小,鲁西南地区最大;冬季,各地差异小,鲁西北和鲁西南等地敏感性最大。由此可见,山东各地月尺度极端降水的气候敏感性不同,春季差异最大,鲁西北地区最敏感。

5 结论与讨论

通过以上分析,得出如下结论:

(1) 山东省月尺度极端降水事件夏季出现最多,占40%,春、秋季均占22.5%,冬季占15%。夏季主要发生在7—8月,春季4月最多,秋季9月最多。各月极端降水量占比平均为15%~30%,7—8月最高。极端降水强度8月最强,7月次之。各地出现年频次大致呈现自东南向西北递减的分布特征,山东半岛地区春季与

秋季的分布相反,这主要是受东亚季风的转换影响所致。

(2)60年来,山东省月尺度极端降水年频次和极端降水量均呈增加趋势,除秋季外各季均增加,2、5、8、11、12月明显增加。20世纪80年代中后期明显增多增强,年际变化明显增大。除4、9、10月外,其他多数月份出现频次、极端降水量及其占比和强度增加,其中,冬季各月极端降水强度增加20%~50%,2月增加增强最明显,说明冬季暴雪几率增多。

(3)各地月尺度极端降水事件变化不一致,鲁中及以南大部、山东半岛的西部和北部沿海地区年频次和极端降水量及占比增加,鲁中大部分地区极端降水强度增强,除秋季外各季大部分地区增多增强。20世纪80年代中期之后,各地普遍增加增强,大部分地区四季出现频次增多,除秋季外各季极端降水量增加,强度增强,其中,夏季普遍增多增强,鲁中、鲁西南和半岛等地降水强度每10a增加10~20mm;冬季大部分地区明显增强。可见在变暖背景下山东降水不稳定性增加,暴雨洪涝、雪灾等风险增大。

(4)山东省月尺度极端降水事件对季节变化的敏感性基本一致,季节性差异明显,在降水量较多的夏季和月份敏感性小,而在降水量较少的冬季和月份敏感性较大。各地极端降水量的气候敏感性差异大,鲁西北地区春季最敏感,鲁西南地区秋季最敏感。具体原因可能与降水的季节分布有关,有待进一步研究。

总的来看,本文从月尺度角度揭示出的山东省极端降水事件的时空变化特征,与年尺度极端降水事件变化特征基本上是一致的。在气候变暖背景下,山东省月尺度极端降水事件变化存在明显的季节性和地区性差异,20世纪80年代中期之后普遍增加,冬季增加最明显,这种特征除了与冬季显著增暖有关外^[9],城市化发展的影响导致的地域性差异不容忽视,还有待深入研究。

参考文献:

- [1] KATZ R W, BROWN B G. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages[J]. *Climatic Change*, 1992, 21(3): 289-302. DOI: 10.1007/BF00139728.
- [2] PFAHL S, O' GORMAN P A, FISCHER E M. Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(6): 423-427. DOI: 10.1038/nclimate3287.
- [3] 陈姣, 张耀存. 气候变化背景下陆地极端降水和温度变化区域差异[J]. *高原气象*, 2016, 35(4): 955-968. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00075.
- [4] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 144-148. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2007.03.004.
- [5] ALEXANDER L V, ZHANG X, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D5): D05109. DOI:10.1029/2005JD006290.
- [6] WANGAH, FUJJ. Changes in daily climate extremes of observed temperature and precipitation in China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2013, 6(5): 312-319. DOI: 10.3878/j.issn.1674-2834.12.0106.
- [7] 吴佳, 周波涛, 徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5 模式模拟评估和预估[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3048-3060. DOI: 10.6038/cjg20150903.
- [8] 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应[J]. *地理学报*, 2016, 71(5): 718-730. DOI: 10.11821/dlxb201605002.
- [9] 孙建奇, 敖娟. 中国冬季降水和极端降水对变暖的响应[J]. *科学通报*, 2013, 58(8): 674-679. DOI: 10.1360/esb2013-58-8-674.
- [10] 罗燕, 田永丽, 戴敏, 等. 云南近50年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(6): 870-877. DOI: 10.7540/j.ynu.20140395.
- [11] 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(S1): 1-10. DOI: 10.3321/j.issn: 0375-5444.2003.z1.001.

- [12]陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节性差异[J]. 大气科学学报, 2009, 32(6): 744-751. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2009.06.005.
- [13]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): 75-83.
- [14]王冀, 蒋大凯, 张英娟. 华北地区极端气候事件的时空变化规律分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 166-173. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2012.02.002.
- [15]蔡敏, 丁裕国, 江志红. 我国东部极端降水时空分布及其概率特征[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 309-318. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0534.2007.02.013.
- [16]甘露, 刘睿, 冀琴, 等. 四川省极端降水事件时空演变特征[J]. 山地学报, 2021, 39(1): 10-24. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000572.
- [17]韦志刚, 李娴茹, 刘雨佳, 等. 1961—2018 年华南年和各季极端降水变化特征的比较分析[J]. 高原气象, 2021, 40(6): 1513-1530. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.zk001.
- [18]李绅东. 云南省昭通市多尺度极端降水时空特征分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(11): 127-132. DOI: 10.11988/ckyyb.20160686.
- [19]李春兰. 蒙古高原多时空尺度极端气候变化特征及其影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [20]汪成博, 李双双, 延军平, 等. 1970—2015 年汉江流域多尺度极端降水时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1209-1222. DOI: 10.31497/zrzyxb.20190607.
- [21]吴伟杰, 郑伟鹏, 郑秀云, 等. 1980—2017 年厦门地区小时尺度极端降水特征分析[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(3): 359-368. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18139.
- [22]杜予罡, 徐昕, 王元. 1990—2010 年中国极端温度和降水事件的月变化特征[J]. 气象与减灾研究, 2016, 39(1): 9-15. DOI: 10.12013/qxyjzyj2016-002.
- [23]卢珊, 胡泽勇, 王百朋, 等. 近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 683-693. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00058.
- [24]姜德娟, 李志, 王昆. 1961—2008 年山东省极端降水事件的变化趋势分析[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1118-1124. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2011.09.016.
- [25]张胜平, 张鑫, 王海军, 等. 气候变化对山东降水及极端天气气候事件的影响分析[J]. 水文, 2011, 31(4): 62-65. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2011.04.013.
- [26]郭元喜, 王建力. 山东极端降水的气候变化[J]. 中国水运(学术版), 2008(1): 175-177.
- [27]苏敏, 岳大鹏, 赵景波, 等. 山东省近 55 年来极端降水的时空变化与灾害效应研究[J]. 江西农业学报, 2020, 32(7): 90-98. DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2020.07.16.
- [28]董旭光, 顾伟宗, 孟祥新, 等. 山东省近 50 年来降水事件变化特征[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 661-671. DOI: 10.11821/dlxb201405009.
- [29]李胜利, 巩在武, 石振彬. 近 50 年来山东省极端降水指数变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 120-127. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20160513.013.
- [30]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. DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2018.01.011.
- [31]施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439.
- [32]夏军, 欧春平, HUANG G H, 等. 基于 GIS 和差异信息测度的海河流域水文气象要素时空变异性分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 409-414. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-3037.2007.03.010.