

湖南近 50 年极端连续降水的气候变化趋势

张剑明^{1,2}, 廖玉芳¹, 段丽洁¹, 曾向红¹

(1. 湖南省气候中心, 长沙 410007; 2. 株洲市气象局, 株洲 412000)

摘要: 采用湖南 88 个地面气象站点 1960~2009 年的逐日降水资料运用一元线性回归、小波分析及 M-K 突变分析等方法分析了湖南极端连续降水的时空分布特征及变化趋势。此外, 也运用 NCEP 再分析资料简要分析了影响湖南极端连续降水的因素。研究表明: 湖南极端连续降水的高值区位于湘西北、湘东南和湘东北, 其余地区为低值区。且湘北和湘西北部分站点极端连续降水的强度可能减弱, 湘中和湘西南部分站点极端连续降水可能比原来更少, 而其余地区极端连续降水均可能增多。在过去 50 年湖南极端连续降水事件增多、强度增大, 尤其是进入 1990 年代以后。在 1990 年代到 2000 年代初极端连续降水增多是突变现象, 且存在 2~3 年、4~7 年和 12~16 年左右的周期振荡。地形和气流相互作用、是导致湖南极端降水空间分布差异的主要原因之一, 湖南西部和南部山区的净获得水汽较北部和中部平原净获得的水汽多, 这与湖南极端降水空间分布基本趋势比较吻合。

关键词: 湖南, 极端连续降水, 时空分布, 区域差异, 影响因素

文章编号: 1000-0585(2012)06-1004-12

1 引言

在全球变暖背景下, 极端降水等极端天气气候事件的发生更为频繁^[1,2]。长江中下游地区是极端降水的高发的地区, 近些年来对其极端降水的研究备受国内外学者的关注。刘小宁^[3]研究我国暴雨极值事件发现, 1980 年代后期我国东部除华北外, 平均趋势为降水日数增多, 降水强度增大, 尤其是华南、江南地区。江南地区、华北、东北地区暴雨异常年份增多, 强度增大。大暴雨的频数存在 10 年左右的周期。Zhai 等^[4]指出近 50 年来长江及其以南地区夏半年极端降水事件趋多、趋强, 尤其在 1990 年代。鲍名^[5,6]研究了我国暴雨的年代际变化特征, 并指出持续性暴雨主要发生在华南和江南地区。朱宵峰等^[7]研究长江中下游汛期暴雨气候特征发现, 暴雨降水量呈现了增加的趋势, 且存在 6~9 a 的周期振荡。暴雨降水强度都不同程度地存在着 3 a 的周期振荡。汛期暴雨降水量在 1980 年代末~1990 年代初有一增多的过程。以上这些研究工作主要集中在对长江流域极端降水场的分析上, 但对极端连续降水的研究则是比较少的。而极端连续降水持续时间长, 影响范围广, 极易造成大范围严重的洪涝灾害, 如 1998 年 6 月江南持续暴雨达 10 多天^[6], 1999 年 6 月长江中下游持续暴雨达 9 天^[8]。因此, 研究湖南极端连续降水的时空分布、变化趋势及影响极端连续降水发生的机制, 对防灾减灾具有重大意义。

收稿日期: 2011-09-14; 修订日期: 2012-03-03

基金项目: 湖南省科技计划重大专项《2008FJ1006》; 中国气象局气候变化专项 (200920); 湖南省气象局重点科研项目 (200801); 中国气象局气候变化专项 CCSF-10-04

作者简介: 张剑明 (1982-), 男, 湖南长沙人, 硕士, 主要从事天气与气候研究。E-mail: zhaolanxiao@sina.com

2 资料来源与研究方法

降水资料来源于湖南省气候中心提供的湖南 97 个测站 1960~2009 年的逐日降水资料。剔除资料长度不够的站点, 剩余 88 站 (图 1)。

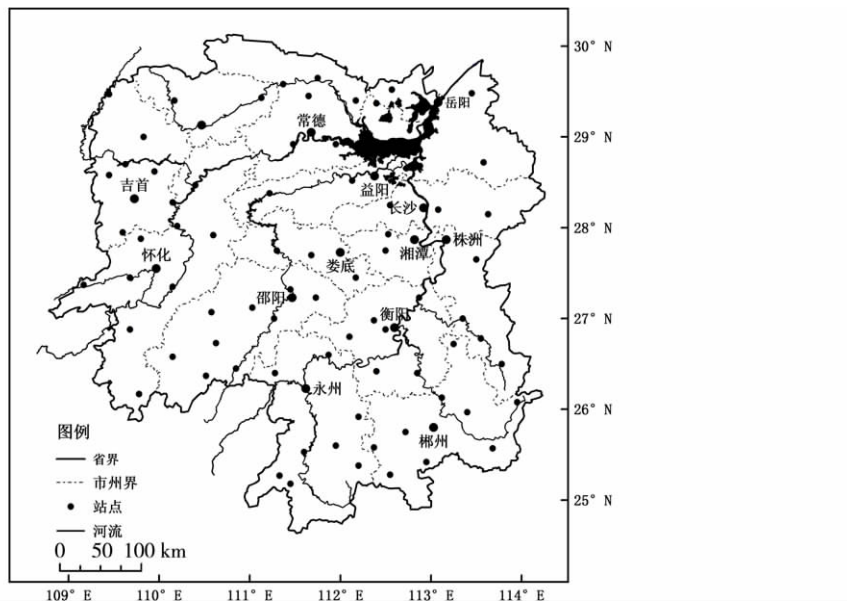


图 1 湖南气象站点的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in Hunan

1960~2009 年 NCEP 月平均资料包括 1000hPa、850hPa、700hPa、600hPa、500hPa、400hPa、300hPa 等层面的风场 (u , v)、比湿 (q) 以及地面气压 (p) 资料, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 其中风场、比湿以及地面气压资料用来计算整层垂直积分水汽通量散度^[9]。利用水汽通量散度来分析暴雨的水汽条件。

选取湖南 1960—2009 年各气象台站最大 1 天、2 天、3 天、……10 天 (含 10 天以上) 的过程降水 (过程降水是指以连续降水日数划分为一个降水过程, 一旦出现无降水则认为该过程结束, 选取统计时段内最大 1 天、2 天、3 天、……10 天的过程降水即为极端连续降水), 运用一元线性趋势^[10]、Morlet 小波分析^[10~12]、Mann-Kendall 突变检验^[10]及趋势系数等统计方法分析其气候特征。由于最大连续 5 天降水与 6 天、7 天、8 天、9 天、10 天最大连续降水的相似系数为 0.99 以上, 且它们的相关系数分别为 0.98、0.97、0.94、0.89、0.83, 通过 0.001 的显著性检验, 表明它们的空间分布、时间变化趋势非常的相似, 故本文只分析 1~5 天的最大连续降水。

3 极端连续时空分布特征

3.1 空间分布特征

湖南最大 1 日降水 (图 2a) 的空间分布表明, 最大 1 日降水在 116.5 (武冈)~455.5 (张家界) mm, 有 3 个高值区和 3 个低值区。高值区位于湘西北、湘东北和湘东南, 其中湘西北包括张家界大部分地区, 湘西自治州北部, 高值中心为张家界 (455.0mm)

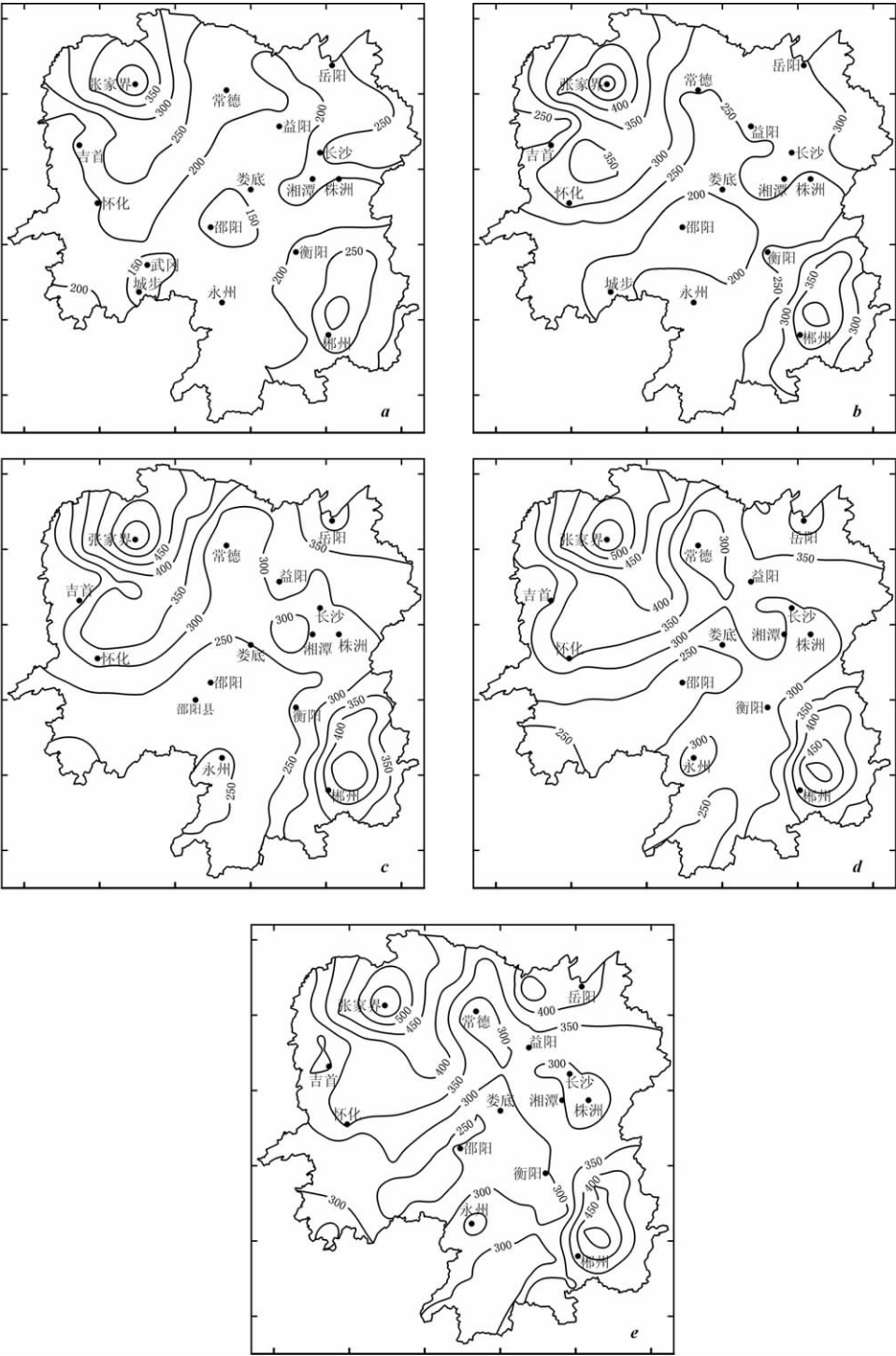


图 2 湖南极端连续降水量的空间分布

(a) 最大 1 日, (b) 最大连续 2 日, (c) 最大连续 3 日, (d) 最大连续 4 日, (e) 最大连续 5 日 (下同)

Fig. 2 Spatial distribution of extreme continuous rainstorms in Hunan

和桑植 (373.8mm); 湘东北包括岳阳、长沙部分地区, 高值中心为临湘 (289.3mm); 湘东南包括郴州北部、株洲中部和衡阳南部地区, 高值中心为永兴 (341.7mm)。低值区位于湘西南、湘中和湘北, 其中湘西南包括邵阳、永州大部分地区, 怀化中部南部, 低值中心为武冈 (116.5mm) 和城步 (126.4mm); 湘北包括益阳大部分地区, 长沙西部地区, 极值中心区为桃江 (142.0mm); 湘中包括娄底大部分地区, 衡阳、株洲北部, 湘潭部分地区, 低值中心区为醴陵 (134.3mm)。

最大连续 2 日降水 (图 2b) 的空间分布表明, 最大降水在 148.9 (城步) ~541.4 (张家界) mm, 湘西北和湘东南为最大连续 2 日降水高值区, 湘西南和湘中为低值区。与最大 1 日降水空间分布图比较, 发现湘东北最大连续 2 日降水增加不是非常明显, 而湘西北高值区增大了。

最大连续 3 日降水 (图 2c) 的空间分布表明, 最大降水在 190.1 (邵阳县) ~619.7 (张家界) mm, 湘西北、湘东南和湘东北为湖南最大连续 3 日降水高值区, 湘西南、湘中和湘北中部为低值区。与最大 1 日降水空间分布图比较, 发现湘东南最大连续 3 日降水区域增大了, 而湘中北部为低值区。

最大连续 4 日降水 (图 2d) 的空间分布表明, 最大降水在 191.0 (邵阳县) ~623.1 (张家界) mm, 也存在 3 个高值区和 3 个低值区, 其中湘西北和湘东北高值区增大。

最大连续 5 日降水 (图 2e) 的空间分布表明, 最大降水在 206.8 (邵阳县) ~623.1 (张家界) mm, 也存在 3 个高值区和 3 个低值区, 但湘西南永州、怀化部分地区最大连续 5 日降水较最大连续 4 日降水增加明显。

从以上分析不难看出, 湖南各级极端降水空间分布具有西北部、东北部和东南部高于西南部的特征, 分别有 3 个高值区和低值区, 高值区位于湘西北、湘东北和湘东南, 低值区位于湘西南、湘中和湘北。

3.2 空间变化趋势

为了分析极端连续降水变化趋势的区域差异, 对湖南各站点极端连续降水进行线性倾向估计。文中当 $b > 0$ 时, 说明极端连续降水随时间 t 的增加降水呈上升的趋势, $b < 0$ 时说明极端连续降水随时间 t 的增加降水呈下降的趋势。

最大 1 日降水 (图 3a) 在湘北、湘中、湘西北和湘西南部分站点呈下降趋势, 其它地区最大 1 日降水呈增加的趋势。有 69 个站点 $b > 0$ (表 1), 最大 1 日降水增加的极值区分别位于湘东南和湘西, 最大值分别为永兴 (11.6mm/10a) 和黔阳 (10.0mm/10a); 有 19 个站点 $b < 0$, 主要位于在湘中和湘北, 最小值分别为龙山 (-4.4mm/10a) 和株洲 (-4.0mm/10a)。18 个站点达到 0.1 的信度, 16 个站点达到 0.05 的信度, 分别位于湘西和湘南部分地区。

最大连续 2 日降水 (图 3b) 在湘北、湘中、湘西北和湘西南部分站点呈下降趋势, 其它地区最大连续 2 日降水呈增加的趋势。有 69 个站点 $b > 0$, 最大连续 2 日降水增加的极值区分别位于湘东南和湘西南部, 最大值分别为永兴 (14.4mm/10a) 和安化 (13.8mm/10a); 有 19 个站点 $b < 0$, 主要位于在湘中和湘北, 最小值分别为临澧 (-3.6mm/10a) 和韶山 (-3.3mm/10a)。21 个站点达到 0.1 的信度, 18 个站点达到 0.05 的信度, 分别位于湘西和湘南部分地区。

最大连续 3 日降水 (图 3c) 呈下降趋势的站点增多, 主要分布在湘北、湘中和湘西南。有 65 个站点 $b > 0$, 最大连续 3 日降水增加的极值区位于湘东南, 最大值为永兴

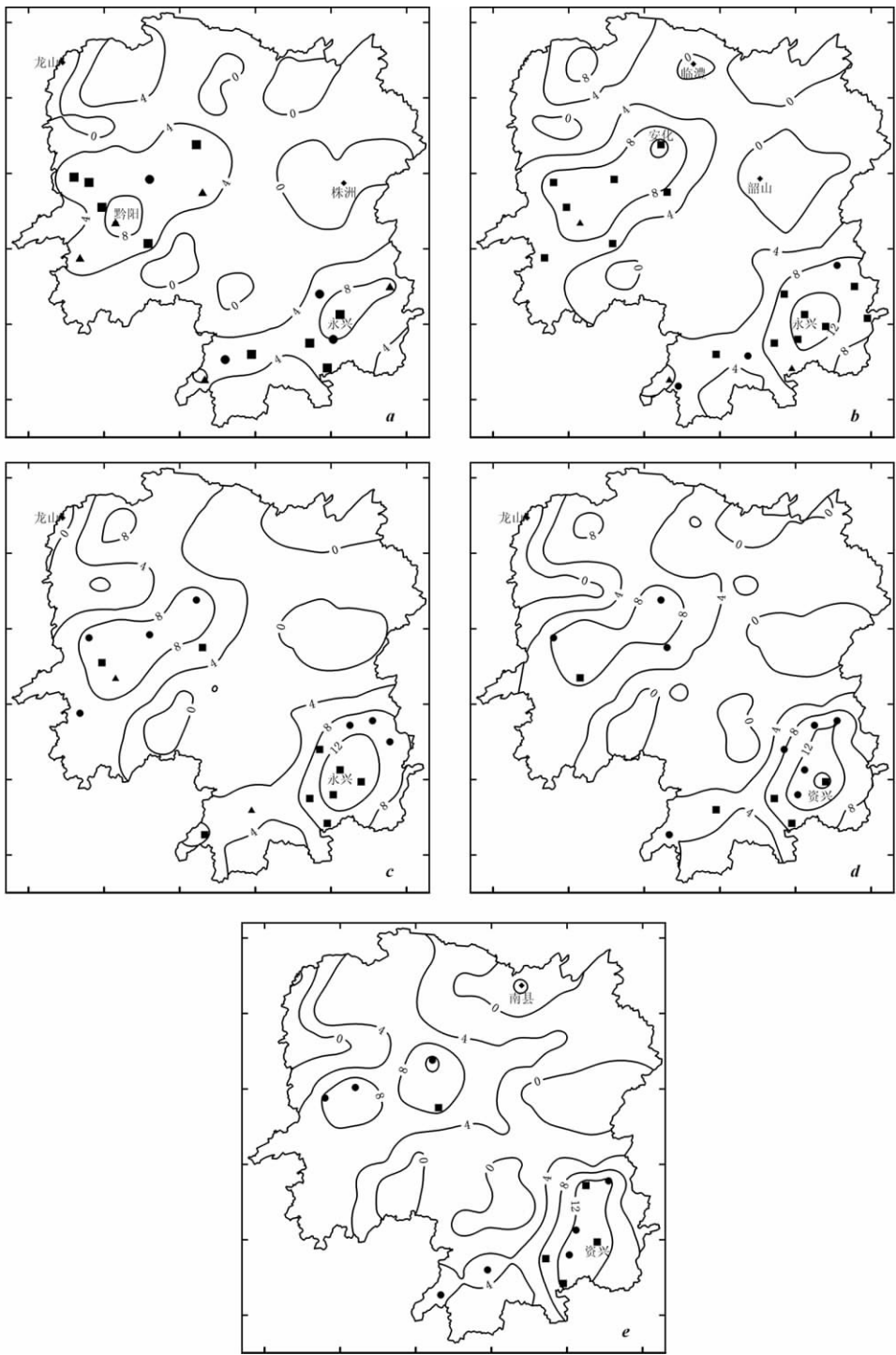


图 3 极端连续降水的空间变化趋势 (黑色圆点表示通过 0.1 显著性检验的站点, 黑色方形表示通过 0.05 显著性检验的站点, 黑色三角形表示通过 0.01 显著性检验的站点)

Fig. 3 Spatial variation trends of extreme continuous rainstorms of Hunan

(16.4mm/10a)；有 23 个站点 $b < 0$ ，最小值为龙山 (−3.0mm/10a)。18 个站点达到 0.1 的信度，14 个站点达到 0.05 的信度，分别位于湘西和湘南部分地区。

最大连续 4 日降水 (图 3d) 呈下降趋势的站点增多，其中湘中、湘北呈下降趋势的站点减少，湘西北和湘西南呈下降趋势的站点增多。有 62 个站点 $b > 0$ ，最大连续 4 日降水增加的极值区位于湘东南，最大值为资兴 (16.1mm/10a)；有 25 个站点 $b < 0$ ，最小值为龙山 (−4.3mm/10a)；有 1 个站点 $b = 0$ 。通过信度检验的站点呈减少趋势，14 个站点达到 0.1 的信度，7 个站点达到 0.05 的信度，主要位于湘南部分地区。

最大连续 5 日降水 (图 3e) 呈下降趋势的站点主要位于湘北、湘中、湘西北和湘西南，其余地区呈增加趋势。有 62 个站点 $b > 0$ ，最大连续 5 日降水增加的极值区位于湘东南，最大值分别为资兴 (15.0mm/10a)；有 26 个站点 $b < 0$ ，最小值为临澧 (−5.6mm/10a)。13 个站点达到 0.1 的信度，7 个站点达到 0.05 的信度，主要位于湘南部分地区。

表 1 湖南极端连续降水的倾向率及信度水平
Tab 1 Bias of extreme continuous rainstorms in Hunan

	\bar{b}	站点数			b_{\max} 及站点名	b_{\min} 及站点名	站点数	
		$b = 0$	$b > 0$	$b < 0$			$ r = 0.23$	$ r = 0.27$
1 日	2.64	0	69	19	11.6 (永兴)	−4.4 (龙山)	18	16
2 日	3.88	0	69	19	14.4 (永兴)	−3.6 (临澧)	21	18
3 日	3.95	0	65	23	16.4 (永兴)	−3.0 (龙山)	18	14
4 日	3.47	1	62	25	16.1 (资兴)	−4.3 (龙山)	14	7
5 日	3.43	0	62	26	15.0 (资兴)	−5.6 (临澧)	13	7

注： $|r| = 0.23$ 和 $|r| = 0.27$ 分别达到信度 0.1 和 0.05 的水平

以上表明，湖南极端连续降水的空间分布反映了地理位置和地形对其的影响，同时对比空间变化趋势发现，在湘北和湘西北部分站点极端连续降水的强度可能减弱，湘中和湘西南部分站点极端连续降水可能比原来更少，而其余地区极端连续降水均可能增多。

4 极端连续降水变化趋势

4.1 时间变化趋势

湖南最大 1 日降水 (取湖南该年最大降水的站点，下同) 逐年变化曲线 (图 4a) 表明，过去 50 年最大 1 日降水呈明显增加趋势，倾向率达 12.1mm/10a (达到 0.05 的信度水平)。7 年滑动平均曲线可以看出，1960 年代中期和 1990 年代以后最大 1 日降水偏多，1960 年代初期和 1970 年代初到 1990 年代初偏少。

最大连续 2 日降水逐年变化曲线 (图 4b) 表明，过去 50 年最大连续 2 日降水呈明显增加趋势，倾向率达 15.4mm/10a (达到 0.05 的信度水平)。7 年滑动平均曲线可以看出，1960 年代后期以前和 1990 年代以后最大连续 2 日降水偏多，1970 年代初到 1990 年代初偏少。

最大连续 3 日降水逐年变化曲线 (图 4c) 表明，过去 50 年最大连续 3 日降水呈波动上升趋势，倾向率达 15.9mm/10a (达到 0.1 的信度水平)。7 年滑动平均曲线可以看出，1960 年代中期和 1990 年代中期以后最大连续 3 日降水偏多，其余时段偏少。

最大连续 4 日降水逐年变化曲线 (图 4d) 表明，过去 50 年最大连续 4 日降水呈明显

上升趋势, 倾向率达 $14.1\text{mm}/10\text{a}$ (达到 0.1 的信度水平)。7 年滑动平均曲线可以看出, 1960 年代中后期以前和 1990 年代中期以后最大连续 4 日降水偏多, 其余时段偏少。

最大连续 5 日降水逐年变化曲线 (图 4e) 表明, 过去 50 年最大连续 5 日降水呈明显上升趋势, 倾向率达 $12.6\text{mm}/10\text{a}$ 。7 年滑动平均曲线显示, 1960 年代中后期到 1970 年代末和 1980 年代初到 1990 年代初最大连续 5 日降水偏少, 其余时段偏多。

对湖南极端连续降水的逐年变化曲线分析说明过去 50 年极端连续降水事件增多、强度增大, 尤其是进入 1990 年代以后极端连续降水事件增强的趋势更加明显。

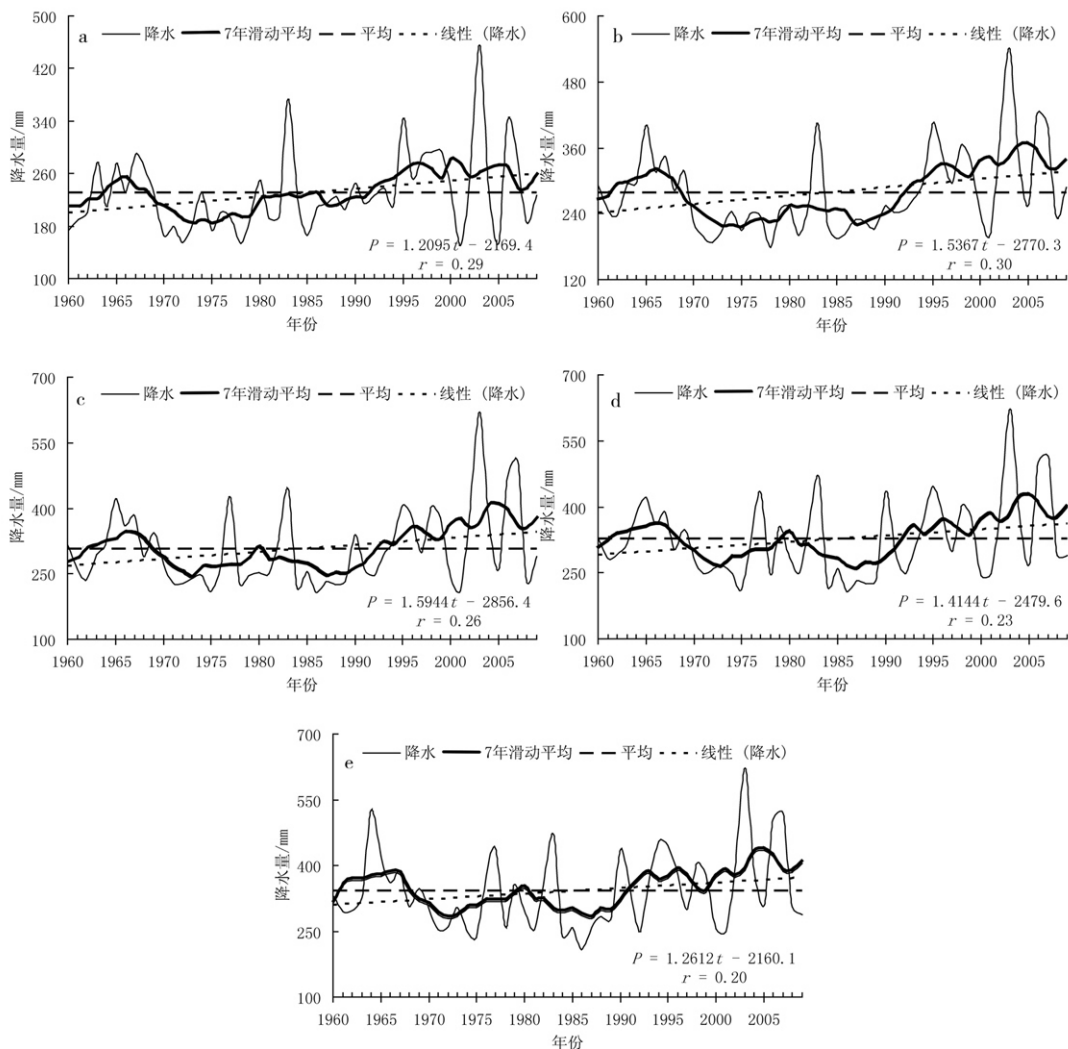


图 4 极端连续降水的时间变化

Fig. 4 Temporal variations of extreme continuous rainstorms in Hunan

4.2 周期变化

图 5a 中显示最大 1 日降水存在 3 个特征时间尺度, 分别是 3 年、6 年和 14 年的准周期。3 年时间尺度上, 在 50 年中始终存在, 且周期振荡稳定。6 年时间尺度上, 在 1970 年代中期以前表现为 5 年左右的周期变化, 在 1970 年代中期到 1990 年代中期以前表现为

6 年左右的周期变化, 1990 年代中期以后表现为 7 年左右的周期变化。14 年时间尺度上, 在 50 年内始终存在, 且周期振荡稳定, 50 年大致经历了 6 次降水多少的转换, 1960 年代初期以前最大 1 日降水偏少, 1960 年代初期到 1970 年代初偏多, 1970 年代初到 1970 年代中后期偏少, 1970 年代中后期到 1980 年代中期偏多, 1980 年代中期到 1990 年中期偏少, 1990 年代中期到 2000 年代初偏多, 之后偏少。

湖南最大连续 2 日降水 (图 5b) 周期性变化可分 2 个时段, 1990 年代初期以前最大连续 2 日降水存在 3 个特征时间尺度, 为 2 年、6 年和 12 年 3 个准周期; 1990 年代初期以后最大连续 2 日降水存在 3 个特征时间尺度, 为 3 年、7 年和 16 年 3 个准周期。

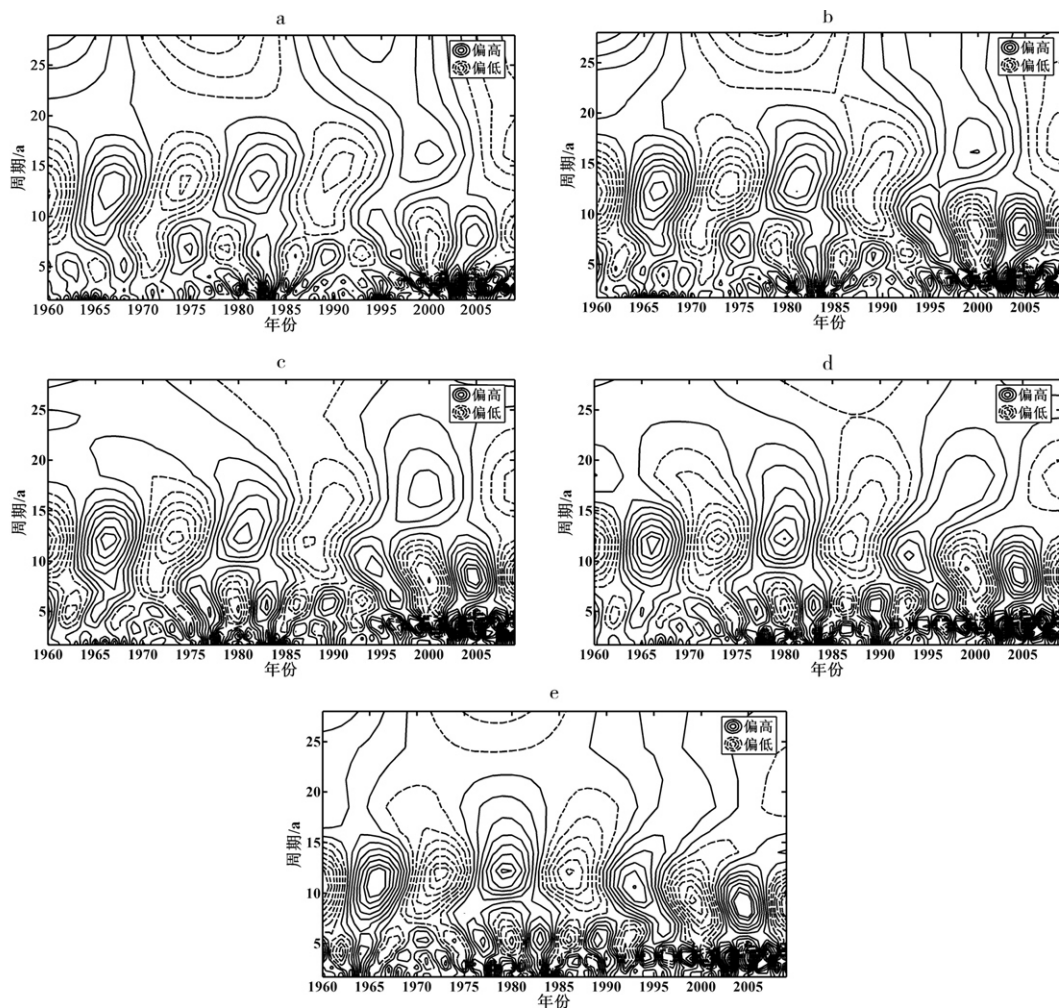


图 5 极端连续降水的 Morlet 小波系数实部等值线图

Fig 5 The contours of the real part of Morlet wavelet coefficients of extreme continuous rainstorms in Hunan

湖南最大连续 3 日降水 (图 5c) 周期性变化可以分为 2 个时段, 1990 年代初期以前最大连续 3 日降水存在 2 个特征时间尺度, 分别为 5 年和 12 年 2 个准周期; 1990 年代初期以后最大连续 3 日降水存在 3 个特征时间尺度, 分别为 4 年、7 年和 16 年 3 个准周期。

湖南最大连续 4 日降水 (图 5d) 周期性变化与最大连续 3 日降水周期变化图相似,

也可以分为 2 个时段, 1990 年代初期以前最大连续 4 日降水存在 2 个特征时间尺度, 分别为 5 年和 12 年 3 个准周期; 1990 年代初期以后最大连续 4 日降水存在 3 个特征时间尺度, 分别为 4 年、7 年和 16 年 3 个准周期。

图 5e 中显示最大连续 5 日降水存在 3 个特征时间尺度, 分别是 2 年、5 年和 12 年的准周期。3 年尺度上, 在 50 年中始终存在, 且周期振荡稳定。5 年尺度上, 由 1960 年代初的 4 年周期逐渐转变到 1980 年代 6 年周期, 之后又转变成 4 年周期。12 年尺度上, 在 50 年内始终存在, 且周期振荡稳定, 50 年大致经历了 8 次降水多少的转换。

湖南各级极端连续降水在 1980 年代末到 1990 年代初均有明显增加趋势, 这可能导致各级极端连续降水周期性发生变化, 从而形成上述各级极端连续降水尺度特征的不一致。

不难看出, 湖南各级极端连续降水存在 2~3 年、4~7 年和 12~16 年左右的周期振荡, 需指出 2~3 年周期振荡与对流层大气环流的准 2 年周期振荡 (TBO) 存在一致性关系。除在赤道平流层低层纬向风有明显的准两年周期振荡现象外, 对流层中各气象要素普遍存在准两年周期振荡现象, 通常把季风环流、降水、海温等具有 2~3 年周期的年际变化称之为对流层准两年振荡 (Tropospheric biennial oscillation, 简称 TBO)^[13,14]。当东亚东

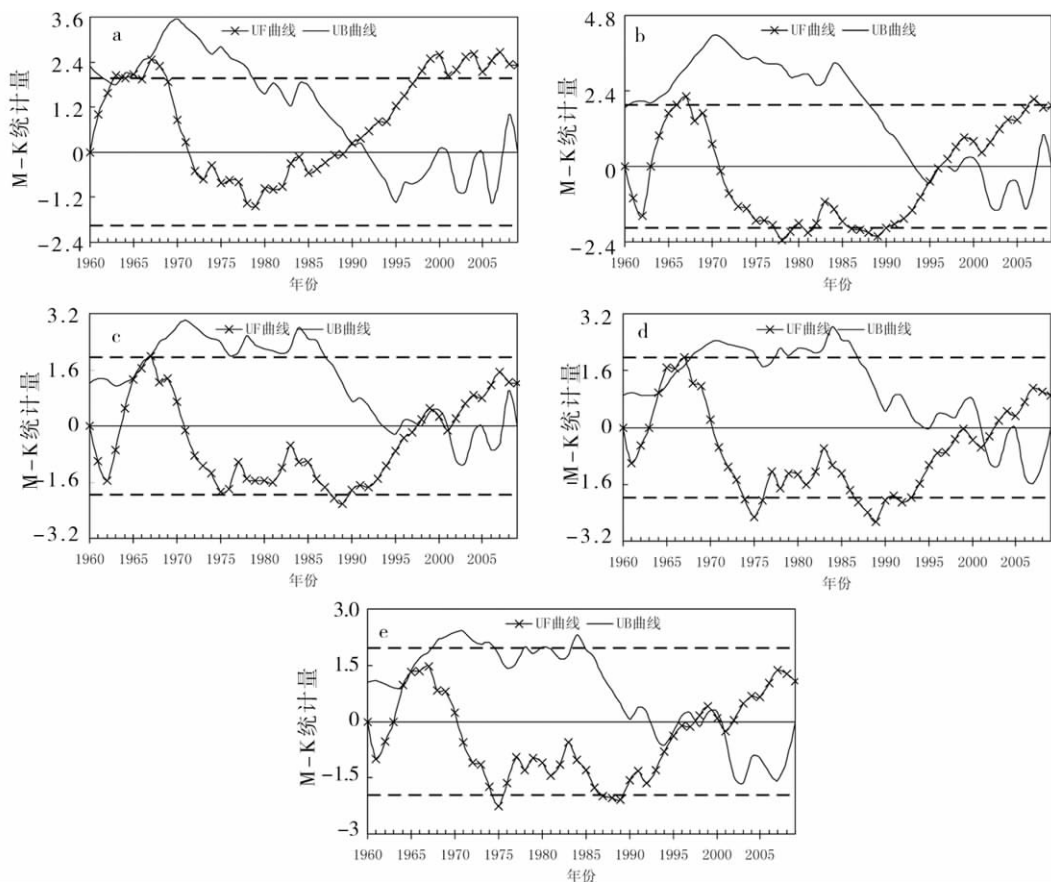


图 6 极端连续降水的曼肯德尔突变分析

Fig. 6 M-K test curve of extreme continuous rainstorms in Hunan

部地区 850hPa 有异常反气旋, 500hPa 高度距平场呈“+ - +”特征, 200hPa 南亚高压偏强, 西风急流偏南, 夏季降水 TBO 以江淮偏多。4~7 年的周期则与 ENSO 事件的 5~7 年的准周期相联系, 且极端连续降水事件对 ENSO 强信号有滞后响应, 在 ENSO 暖位相出现后的半年左右易发生极端连续降水事件^[15]。因此说明 ENSO 事件一定程度上影响湖南极端连续降水的变化^[15,16]。12~16 年左右的周期与太阳活动的准 11 年周期相吻合, 说明湖南极端连续降水变化受太阳活动影响^[17]。

4.3 突变分析

湖南最大 1 日降水的 M-K 曲线 (图 6a) 图中 UF 曲线可见 1990 年代初期开始最大 1 日降水有由少到多的增加趋势。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置, 确定最大 1 日降水是一突变现象, 具体是从 1990 年开始的。

湖南最大连续 2 日降水的 M-K 曲线 (图 6b) 图中 UF 曲线可见 1990 年代中期开始最大连续 2 日降水有由少到多的增加趋势。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置, 确定最大连续 2 日降水为突变现象, 具体是从 1996 年开始的。

湖南最大连续 3、4、5 日降水的 M-K 曲线 (图 6c~图 6e) 图中 UF 曲线可见 1990 年代末期开始有由少到多的增加趋势。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置, 确定最大连续 3 日、4 日、5 日降水为突变现象, 具体开始年份均为 2001 年。

湖南各级极端连续降水于 1990 年代到 2000 年代初存在突变现象, 这可能与湖南各级极端连续降水在 1980 年代末到 1990 年代初开始有明显增加趋势一致。也与 1980 年代以来东亚季风系统夏季风及冬季风明显减弱可能有一定关系^[18,19]。

5 极端连续降水影响因素

从 850hPa 流场、地形和水汽通量分析可更好的认识湖南极端连续降水的空间分布特征。中低层气流方向和地形是影响一个区域降水的重要因素。地形对气流有抬升和阻挡作用, 暖湿气流行进中受山地阻挡, 被迫抬升, 遇冷凝结而形成降水, 在山地迎风坡形成地形雨, 降水量大, 很多时候形成极端降

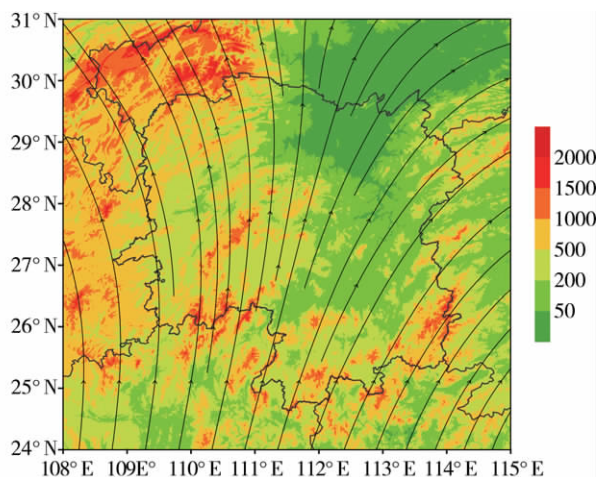


图 7 多年月平均 850hPa 流场和地形合成图

Fig. 7 The synthesis map of 850hPa flow fields and terrain in Hunan

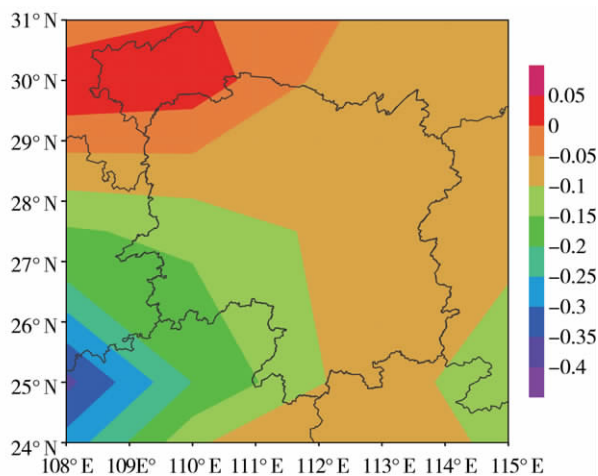


图 8 湖南多年月平均水汽通量散度图

(单位: $10^{-5} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 Water vapor flux divergence in Hunan

水。湖南地形的主要特征是东、南、西部为山地，而中北部为平原和丘陵。对于一个具体区域来说，气流方向不同，使得一个区域降水的多寡不一样。中低层气流和地形往往对一个区域降水共同起作用。

湖南 850hPa 流场和地形合成图（图 7）表明，在湖南 850hPa 气流为近似正南方向的气流，而湘西、湘南的山脉走向大多是西南—东北走向。南来的暖湿气流受阻于西南—东北走向山体，被迫抬升，水汽容易凝结，有利于形成极端降水。尤其是湖南西北部地区东南—西北方向暖湿气流与西南—东北走向的山体正交，为湖南极端降水的大值区。湘东北和湘东南也比较类似。而湘西南处于南来暖湿气流的背风侧，气流下沉，极端降水较少。

极端降水产生的一个重要条件就是充足的水汽。决定一个区域是否有供降水的充足水汽量（净得或净失）是水汽通量散度。水汽通量散度值为负值表明该区域净获得水汽，正值表明该区域净失去水汽，零值表明该区域无净得的水汽量的可供降水。

湖南多年月平均水汽通量散度空间分布图（图 8）表明，湖南绝大部分地区为净获得的水汽，其中湘西北净获得的水汽较少，湘西南和湘东南净获得的水汽较多。总体来看，湖南西部和南部山区的净获得水汽较北部和中部平原净获得的水汽多，这与湖南极端降水空间分布基本趋势比较吻合。但湘西北净获得的水汽较少，而该地为湖南的一个极端降水中心，这可能与湖南低空气流为近似正南方向的气流，而湖南西北部山脉走向大多是西南—东北走向，南来的暖湿气流受阻于西南—东北走向山体，被迫抬升，水汽容易凝结，有利于形成极端降水。

6 结论

（1）湖南极端连续降水的高值区位于湘西北、湘东南和湘东北，其余地区为低值区，且湘北和湘西北部分站点极端连续降水的强度可能没有原来那么强，湘中和湘西南部分站点极端连续降水可能比原来更少，而其余地区极端连续降水均可能增多。

（2）在过去 50 年湖南极端连续降水事件增多、强度增大，尤其是进入 1990 年代以后。在 1990 年代到 2000 年代初极端连续降水增多是突变现象，且存在 2~3 年、4~7 年和 12~16 年左右的周期振荡。

（3）地形和气流相互作用是导致湖南极端降水空间分布差异的主要原因之一。湘西和湘南山区的净获得水汽较北部和中部平原净获得的水汽多，这与湖南极端降水空间分布基本趋势比较吻合。但湘西北净获得的水汽较少，而该地为湖南的一个极端降水中心，这与湘西北部地区东南—西北方向暖湿气流与西南—东北走向的山体正交，水汽容易凝结，有利于形成极端降水。而湘西南处于南来暖湿气流的背风侧，气流下沉，极端降水较少。

参考文献：

- [1] 王小玲, 翟盘茂. 1957~2004 年中国不同强度级别降水的变化趋势特征. 热带气象学报, 2008, 24(5): 459~466.
- [2] 李红梅, 周天军, 宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析. 大气科学, 2008, 32(2): 358~370.
- [3] 刘小宁. 我国暴雨极端事件的气候变化特征. 灾害学, 1999, 14(4): 54~59.
- [4] Zhai Panmao, Zhang Xuebin, Wan Hui. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. Journal of Climate, 2005, 18(8): 1096~1107.
- [5] 鲍名, 黄荣辉. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征. 大气科学, 2006, 30(6): 1057~1067.
- [6] 鲍名. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景. 大气科学, 2007, 31(5): 779~792.
- [7] 朱宵峰, 钱永甫, 宁亮, 等. 长江中下游地区汛期暴雨气候特征分析. 热带气象学报, 2008, 24(2): 136~146.

- [8] 隆霄,程麟生,王文. 1999 年 6 月长江中下游梅雨暴雨环流特征分析. 高原气象,2007,26(3):563~571.
- [9] 丁一汇. 高等天气学. 北京:气象出版社,2005. 585.
- [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术,北京:气象出版社,1999.
- [11] Christopher Torrence, Gilbert P. Compo. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological Society,1998,79(1):61~78.
- [13] 林振山. 子波气候诊断技术的研究. 北京:气象出版社,1999.
- [14] 贾建颖,王永,孙照渤,等. 中国东部夏季降水准两年振荡空间分布及背景场特征. 地球物理学报,2010,53(10):2300~2309.
- [13] 贾建颖,孙照渤,刘向文,等. 中国东部夏季降水准两年周期振荡的长期演变. 大气科学,2009,33(2):397~407.
- [15] 李威,翟盘茂. 中国极端强降水日数与 ENSO 的关系. 气候变化研究进展,2009,5(6):336~342.
- [16] 许武成,马劲松,王文. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述. 气象科学,2005,25(2):212~220.
- [17] 段长春,孙绩华. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系. 气象科技,2006,34(4):381~386.
- [18] 陈桦,丁一汇,何金海. 亚洲夏季风指数的重新评估与季风的长期变化. 气象学报,2006,64(6):770~778.
- [19] 晏红明,段玮,肖子牛. 亚洲夏季风指数的重新评估与季风的长期变化. 热带气象学报,2003,19(4):367~376.

Climate variations of extreme continuous rainstorms in Hunan during 1960–2009

ZHANG Jian-ming^{1,2}, LIAO Yu-fang¹, DUAN Li-jie¹, ZENG Xiang-hong¹

(1. Hunan Climate Center, Changsha 410007, China;

2. Zhuzhou Meteorological Bureau, Zhuzhou 412000, Hunan, China)

Abstract: Using daily precipitation data of 88 stations from 1960 to 2009, the spatio-temporal distribution of extreme continuous rainstorms in Hunan is examined by linear regression, wavelet analysis and abrupt change analysis. In addition, the factors affecting rainstorms in Hunan are analysed using NCEP reanalysis data. The results showed that there are high value areas with extreme continuous rainstorms in northwestern, southeastern and northeastern Hunan, and low value areas in the remaining part of the province. And the intensity of extreme continuous rainstorms may weaken in northern and northwestern Hunan. Extreme continuous precipitation may become less in central, southwestern and northwestern Hunan, but occurs more frequently in other parts. The frequency of extreme continuous rainstorm events is increasing, and the intensity is aggravated. Generally, the extreme continuous rainstorms presented variations in three quasi-periods of 2–3a, 5–7a and 12–16a. The increase of extreme continuous rainstorms is characterized by abrupt changes from the 1990s to early 2000s. Interaction between topography and air flow is one of the main reasons for spatial difference of extreme continuous rainstorms in Hunan. Atmospheric moisture content and net gain of moisture in west and south mountainous areas is more than those in the central and northern plains. There is a good correspondence between the net moisture gain or net moisture loss and extreme continuous rainstorms distribution in Hunan.

Key words: Hunan; extreme continuous rainstorms; spatio-temporal characteristics; regional difference; factors