

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2018.09.019

1961—2015 年四川省汛期极端 降水指数时空变化研究^①

罗 玉^{1,2}, 陈 超², 马振峰²,
刘 佳², 李小兰², 杨 蓉³

1. 中国气象局 成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;
2. 四川省气候中心, 成都 610072; 3. 成都市气象局, 成都 610000

摘要: 利用近 55a 四川省 156 个气象台站的汛期(月)逐日降水量资料, 采用 F 检验、滑动 t 检验、小波分析等方法对近 55a 四川省汛期极端降水指数的时空特征、周期特征进行了分析。结果表明: 1) 近 55a 四川省汛期降水总量、强降水量、降水百分率、连续 5 日最大降水量及暴雨日数均在绝大部分地区呈增加趋势, 在川中部地区呈减少趋势; 降水强度及 1 日最大降水量在四川省大部分地区呈增加趋势。2) 在年代际变化率上, 汛期强降水、降水强度、降水百分率、1 日最大降水量、连续 5 日最大降水量及暴雨日数均对汛期总降水量的长期气候变化趋势具有一定的指示意义。3) 降水总量、强降水及降水强度、日最大降水量、暴雨日数均存在准 8a 以及 3~4a 的短周期; 降水百分率以及连续 5 日最大降水量为 6~8a 和 3~4a 的短周期。

关键词: 四川省; 极端降水; 时空特征; 小波分析

中图分类号: P468.0⁺24

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)09-0133-09

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告指出^[1], 全球平均气温在 1971—2010 年以 0.09~0.13 °C/10a 升高, 全球范围的冰川逐渐消退, 温室气体的浓度也上升到了前所未有的水平, 全球变暖导致水循环的加剧, 进而可能导致极端降水事件的频发。

在全球变暖的背景下, 我国增暖的趋势与北半球的增暖趋势大致相似^[2], 我国极端降水和极端温度事件的长期变化特征具有明显的区域性和局域性, 年和季节尺度的极端冷暖指数均呈现出增加趋势^[3]。杨金虎等^[4]指出中国年极端降水事件的主要空间异常模态为四川西南部、湖南、江淮北部、新疆西部、西藏与中国其他区域年极端降水的空间分布呈反向变化特征。胡豪然等^[5]指出四川盆地汛期极端降水的发生频次与降水量分布有很大差异, 由西向东呈阶梯状递减趋势。丁文荣^[6]指出四川盆地中部是极端降水的频发区, 而四川盆地北部山区则较少发生极端降水。

四川盆地地处高原大地形和东部平原的过渡带, 气候差异较为明显, 其气候变化具有独特的特点和规律, 胡豪然等^[5]采用相对阈值定义极端降水事件的方法研究过四川盆地汛期极端降水事件的变化, 本文将通过相对阈值以及绝对阈值 2 种方法定义的 7 种极端降水指数较为全面地分析近 55a 汛期极端降水事件的长期变化规律^[7], 为四川省短期气候预测与防灾减灾提供一定的科学理论依据。

1 资料与方法

采用四川省气象信息中心经过严格质量控制及错误值订正的 1961—2015 年四川省 156 个气象台站逐日降水资料, 气候平均值采用 1981—2010 年的平均值。四川省位于 97—110°E, 25—35°N 范围

① 收稿日期: 2016-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772173); 高原与盆地旱涝灾害四川省重点实验项目(2017-青年-07, 2015-青年-05); 中国气象局气象关键技术集成与应用(重点/面上)项目(YBGJXM(2017)05-01)。

作者简介: 罗 玉(1989-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事气候变化与数值模拟研究。

内, 站点分布如图 1 所示.

采用世界气象组织推荐使用的极端天气气候事件监测指标中的 7 种极端降水指数, 分别为降水总量、强降水、降水强度、降水百分率、1 日最大降水量、连续 5 日最大降水量、暴雨日数^[8]. 具体的指标如表 1 所示.

本文将 1961—2015 年每年的逐日降水序列的第 95 个百分位的 55a 平均值定义为该站发生极端降水事件的绝对阈值^[9], 当某日降水量超过此阈值时, 为该站发生了极端降水事件. 将四川省 156 个台站每站逐日降水资料作为一个降水序列, 把每站的降水序列按升序排列为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$, 当某个值小于或等于 x_i 的概率为:

$$p = \frac{i - 0.31}{n + 0.38}$$

式中: i 为 x_i 的序列号; n 为降水序列的总长度, 则 $p = 95\%$ 所对应的 x_i 的值为该站第 95 个百分位值^[10].

表 1 ETCCDMI 定义的极端降水指数

名称	定义	单位
暴雨日数	每站日降水量大于等于 50 mm 的日数	d
强降水量	每站日降水量 > 95% 分位值的年累计降水量	mm
降水总量	每站降水日的年累计降水量	mm
降水强度	每站日降水量达到或超过阈值以上降水总量与极端强降水日数之比	mm/d
降水百分率	每站日降水量达到或超过阈值以上降水总量与年降水总量之比	%
1 日最大降水量	每站每月最大 1 日降水量	mm
连续 5 日最大降水量	每站每月连续 5 日最大降水量	mm

此外, 本文采用 F 检验方法检验 1961—2015 年极端降水事件的变化趋势是否稳定, 采用低通滤波的方法^[11]滤掉低频信号来研究四川省汛期极端降水指数的年代际变化趋势, 通过滑动 t 检验方法^[11]对近 55a 四川省汛期极端降水指数进行突变检验, 通过相关系数^[11]分析其极端降水指数间的相关性, 采用小波分析方法^[11]分析极端降水指数的周期振荡特征.

2 四川省极端降水的时空变化特征

由 1961—2015 年四川省汛期极端降水指数的气候倾向率的空间分布可知(图 2a~2g), 对于总降水量而言(图 2a), 在川西及东北部地区主要呈增加趋势, 在东部地区总降水量呈显著增加趋势, 气候倾向率最大为 32.5 mm/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 1.9%, 汛期总降水量在川中部地区、川西高原西北部、攀西地区南部主要呈减少趋势, 在川中部地区减少最为显著, 气候倾向率最大为 -62.7 mm/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 14.1%; 汛期强降水量在川西绝大部分地区及川东北部地区呈增加趋势(图 2b), 在东北部地区增加显著, 气候倾向率最大为 74.61 mm/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 9.6%, 在川中部地区呈显著减少趋势, 最大气候倾向率为 -46.4 mm/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 7.7%; 汛期降水强度在四川省绝大部分地区呈显著增加趋势(图 2c), 最大气候倾向率为 0.77 mm/d/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 27.6%, 在川西高原的西北部以及北部、南部少部分地区呈减少趋势, 在南部地区减少趋势显著, 气候倾向率最大为 -0.74 mm/d/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 1.3%; 汛期降水百分率在川西部大部分以及东部地区呈增加趋势(图 2d), 在攀西地区以及川东部少部分地区呈显著增加趋势, 气候倾向率最大为 2.75%/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 7.0%, 在川中部地区主要呈显著减少趋势, 气候倾向率最大为 -0.47%/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 9.0%; 汛期 1 日最大降水量在四川省大部分地区呈增加趋势(图 2e), 在攀西地区南部以及川东部少部分地区增加显著, 气候倾向率最大为 226.57 mm/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 9.6%, 在川北部以及东南部主要呈显著减少趋势, 气候倾向率最大为

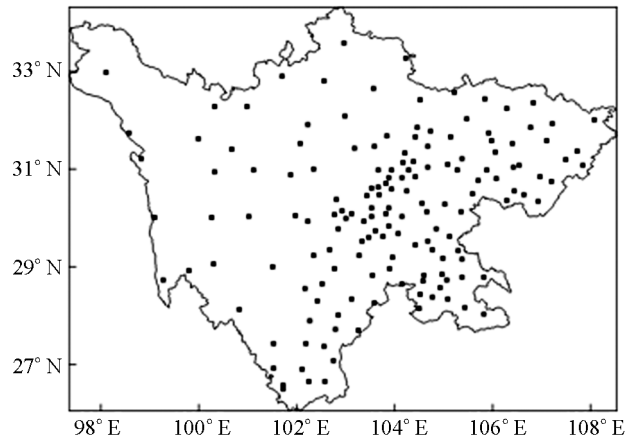


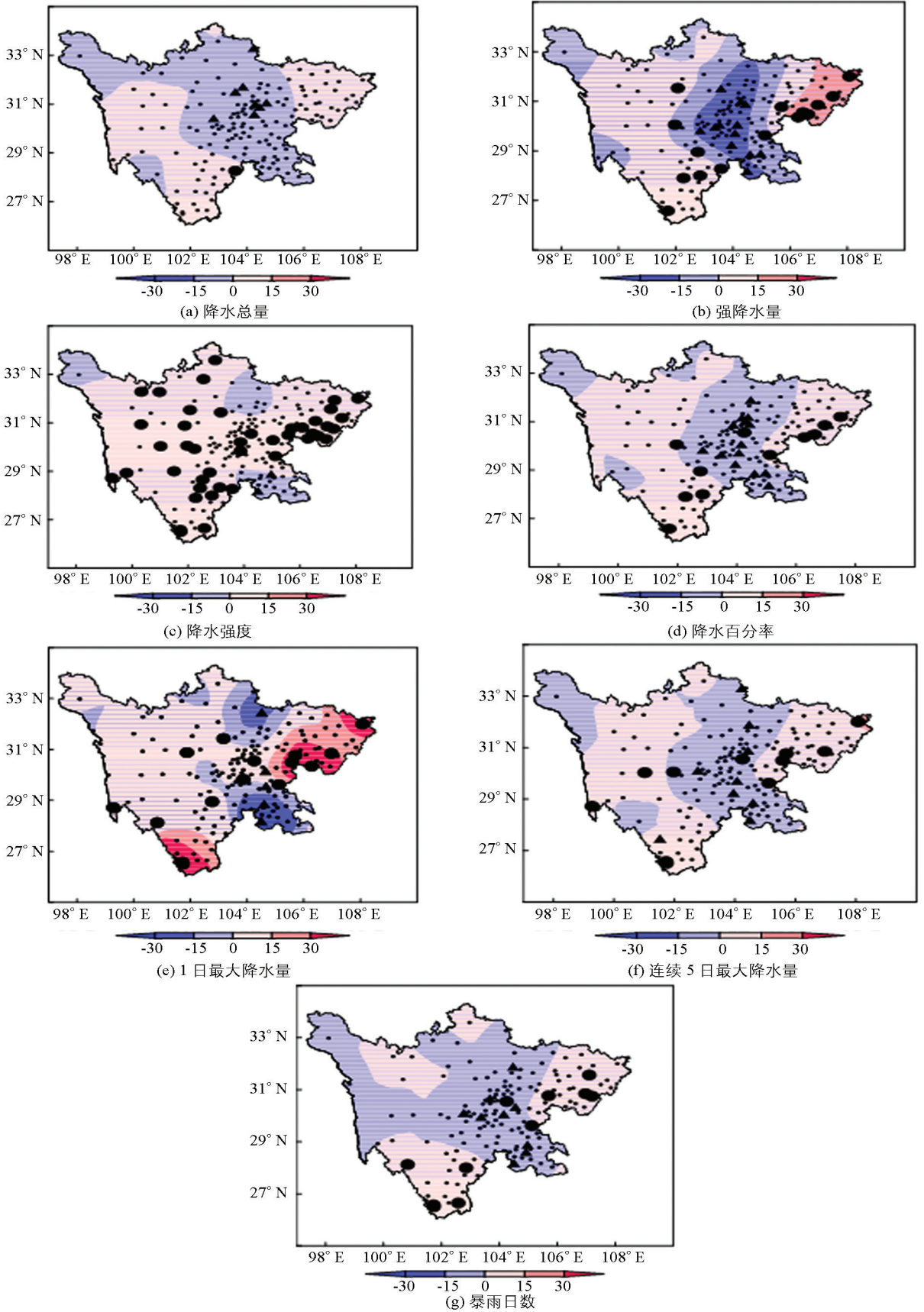
图 1 四川省 156 个气象台站站点分布

-107.8 mm/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 3.2%; 汛期连续 5 日最大降水量在川西大部分地区以及川东部地区呈增加趋势(图 2e), 气候倾向率最大为 33.70 mm/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 7.1%, 在川西高原北部以及川中部大部分地区呈减少趋势, 在川东地区显著减少, 气候倾向率最大为 -17.35 mm/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 5.8%; 汛期暴雨日数在川西部大部分地区以及川东部地区呈增加趋势(图 2f), 气候倾向率最大为 0.8d/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 7.1%, 在川西高原北部以及攀西地区西部、川中部地区呈减少趋势, 在川中部地区减少显著, 气候倾向率最大为 -0.6d/10a, 通过 0.05 显著性检验的站数占总站数的 5.8%。

表 2 1961—2015 年四川省汛期极端降水指数各站气候倾向率正、负趋势通过 0.05 显著性检验站数占总站数的百分率

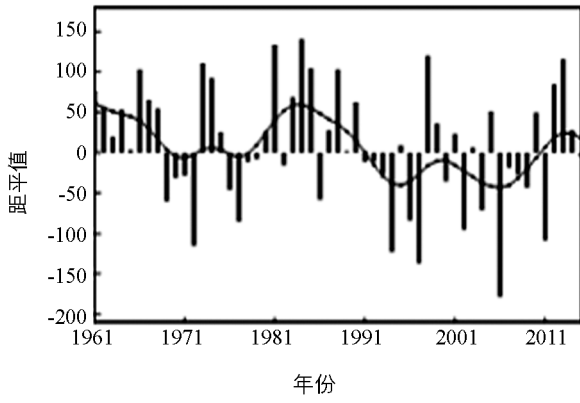
指 数	正趋势/%	负趋势/%
总降水量	1.9	14.1
强降水量	9.6	7.7
降水强度	27.6	1.3
降水百分率	7.0	9.0
日最大降水量	9.6	3.2
连续 5 日最大降水量	7.1	5.8
暴雨日数	7.1	5.8

近 55a 四川省汛期降水总量呈显著下降趋势(图 3a), 其气候倾向率为 -9.73 mm/10a, 在 0.25 的检验水平上有统计学意义, 在 1961—1989 年期间以正距平居多, 为汛期降水总量偏多的时期, 其余时期汛期降水总量偏少, 1981, 1985, 1998 年汛期降水总量异常偏多, 1994, 1997, 2006 年汛期降水总量异常偏少; 由滑动 t 检验可知, 汛期降水总量在 1980 年和 1988 年前后(在 0.05 的检验水平上有统计学意义)发生 2 次明显的转变, 具有明显的年代际变化特征(图 3b)。近 55a 四川省汛期强降水量呈增加的趋势(图 3c), 气候倾向率为 1.11 mm/10a. 在 1980—1989 年、2010—2014 年以正距平居多, 表现为汛期强降水量偏多的时期, 其余时期强降水量偏少, 1989, 2010 年异常偏多, 1971, 1976 年异常偏少; 由滑动 t 检验可知, 在 1980 年前后(在 0.05 的检验水平上有统计学意义)汛期强降水发生了一次明显的转折, 具有明显的年代际特征(图 3d)。近 55a 四川省汛期降水强度呈显著增加的趋势(图 3e), 气候倾向率 0.17 mm/d/10a, 在 0.01 检验水平上有统计学意义. 在 21 世纪初期以正距平居多, 表现为汛期降水强度偏大的时期, 其余时期降水强度偏小, 在 2013 年汛期降水强度异常偏大, 1976 年汛期降水强度异常偏小; 由滑动 t 检验可知, 在 1980 年和 1991 年、2005 年(均在 0.05 的检验水平上有统计学意义)前后, 汛期降水强度发生了明显的转折, 具有显著的年代际(图 3f). 值得一提的是, 近 55a 四川省汛期总降水量是明显减少的, 但是降水强度却是明显增加的。近 55a 四川省汛期降水百分率呈减少趋势(图 3g), 气候倾向率为 -0.05/10a. 在 1980 年以前以正距平居多, 表现为汛期降水百分率偏大的时期, 其余时期汛期降水百分率偏小. 1981, 1984, 1998, 2013 年汛期降水百分率异常偏大, 1972, 1997, 2006 年汛期降水百分率异常偏小; 由滑动 t 检验可知, 降水百分率在 1992 年前后(在 0.05 的检验水平上有统计学意义)发生了一次转变(图 3h)。近 55a 四川省汛期日最大降水量呈增加趋势(图 3i), 气候倾向率为 6.96 d/10a. 在 1980 年及 2009 年到 2015 年以正距平居多, 表现为汛期日最大降水量偏多的时期, 其余时期汛期 1 日最大降水量偏少, 1981, 1984, 1998, 2010 年汛期 1 日最大降水量异常偏多, 1976, 1986, 1994, 1997 年汛期日最大降水量异常偏少; 由滑动 t 检验可知, 汛期日最大降水量在 1980 年前后(在 0.05 的检验水平上有统计学意义)发生了一次转变(图 3j)。近 55a 四川省汛期连续 5 日最大降水量呈增加趋势(图 3k), 气候倾向率为 0.21d/10a. 1961—1980 年、2005 年到 2015 年汛期连续 5 日最大降水量以正距平居多, 表现为汛期连续 5 日最大降水量偏多的时期, 其余时期则偏少, 1981, 2010, 2013 年汛期连续 5 日最大降水量异常偏多, 1994, 1997, 2006 年汛期连续 5 日最大降水量异常偏少; 由滑动 t 检验可知, 汛期连续 5 日最大降水量在 1990 年前后发生了一次明显的转变, 年代际变化显著(图 3l)。近 55a 四川省汛期暴雨日数呈减少趋势(图 3m), 气候倾向率为 -0.01d/10a. 1981—1989 年、2010—2014 年以正距平居多, 表现为汛期暴雨日数偏多的时期, 其余时期汛期暴雨日数偏少, 1981, 1983, 1984, 2013 年汛期暴雨日数异常偏多, 1976, 1994, 1997 年汛期暴雨日数异常偏少; 由滑动 t 检验可知, 汛期暴雨日数在 1980 年和 1992 年前后(分别通过 0.05 和 0.01 显著性检验)发生了 2 次明显的转变, 具有明显的年代际变化图(3n)。

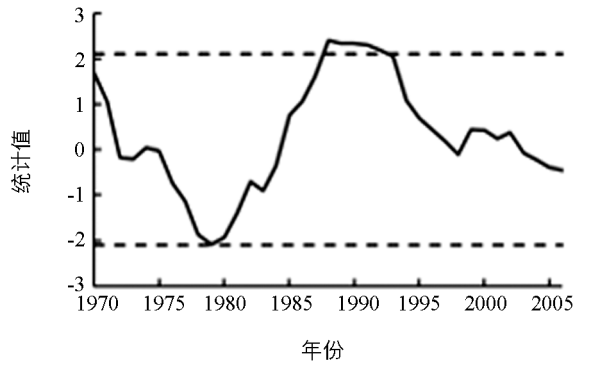


大实圆心, 实心三角形分别表示气候倾向率正趋势, 负趋势在 0.05 的检验水平上有统计意义的站点.

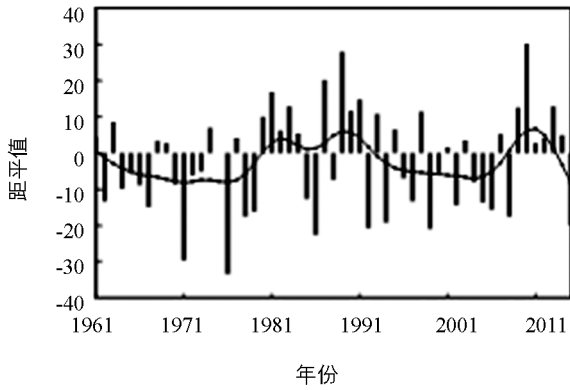
图 2 1961—2015 年四川省汛期极端降水指数气候倾向率空间分布图



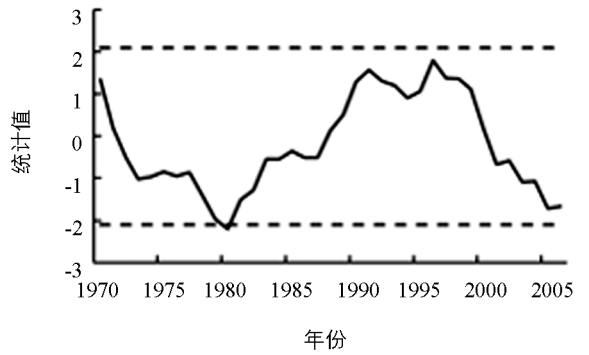
(a) 总降水量



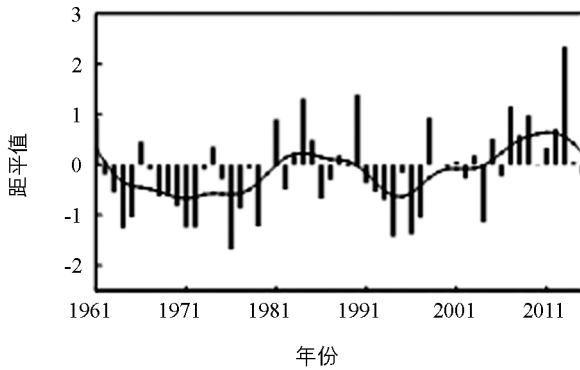
(b) 总降水量



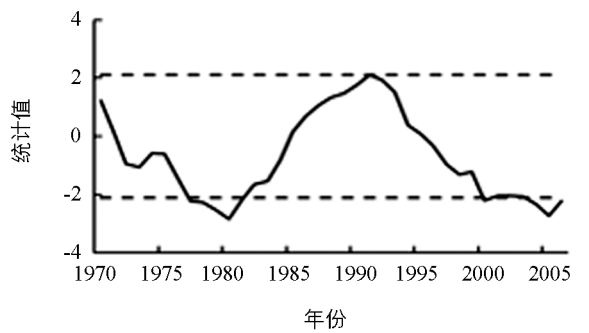
(c) 强降水量



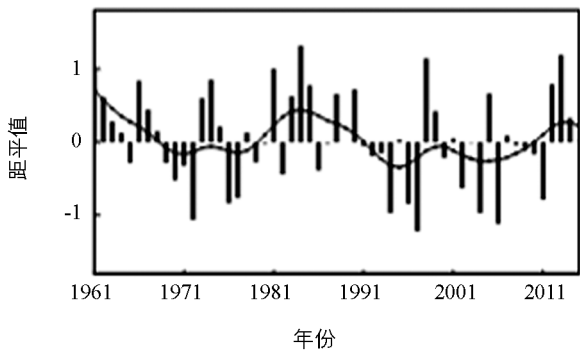
(d) 强降水量



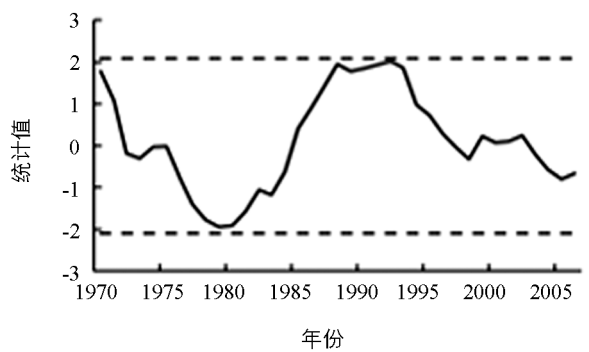
(e) 降水强度



(f) 降水强度



(g) 降水百分率



(h) 降水百分率

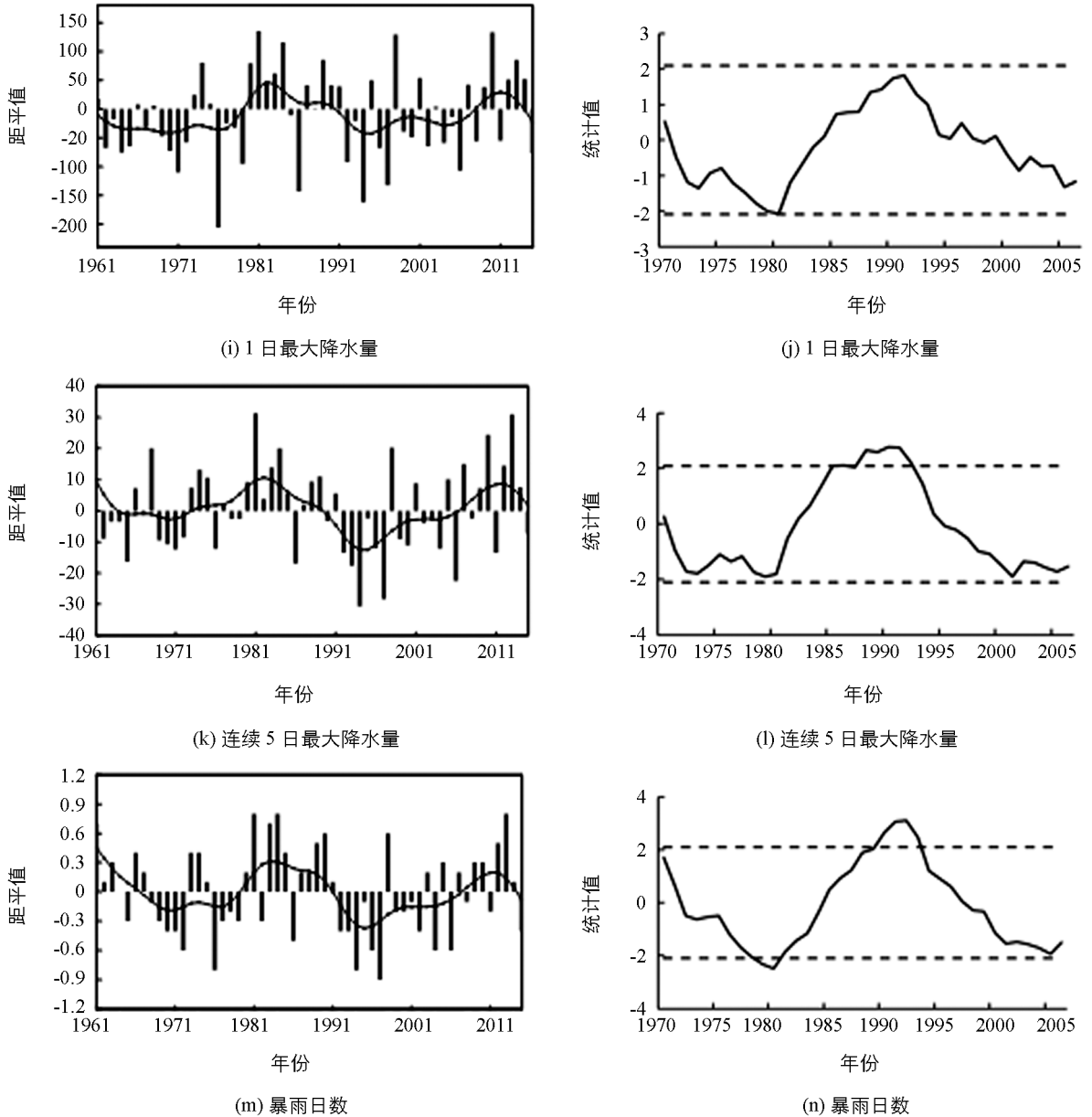


图 3 四川省汛期极端降水指数距平时间序列

(左图: 曲线表示低通滤波结果)和滑动 t 检验结果图(右图: 虚线表示 95% 置信水平)

3 四川省极端降水的周期分析

近 55a 四川省汛期降水总量存在准 8a 和 3~4a 左右的(图 4a), 8a 左右的周期振荡在 1967—1980 年明显, 3~4a 周期振荡在 1995—1998 年明显; 汛期强降水量存在着准 8a 和 3~4a 的(图 4b), 准 8a 周期振荡在 1975—1990 年明显, 3~4a 的周期振荡在 1975—1998 年和 2005—2013 年明显; 汛期降水强度存在准 8a 和 3~4a 的周期(图 4c), 3~4a 左右的周期振荡在 1975—1985 年和 1990—1998 年明显; 汛期降水百分率存在 6~8a 和 3~4a 的周期(图 4d), 6~8a 的周期振荡在 1967—1976 年明显, 3~4a 左右的周期振荡在 1982—1984 年以及 1995—1998 年明显; 汛期 1 日最大降水量存在准 8a 以及 3~4a 的(图 4e), 准 8a 的振荡周期在 1970—1994 年明显, 3~4a 的振荡周期在 1975—1984 年明显; 汛期连续 5 日最大降水量存在着 6~8a 以及 3~4a 的(图 4f), 6~8a 周期振荡在 1968—1990 年明显, 3~4a 周期振荡在 1995—2000 年明显; 汛期暴雨日数存在着 6~8a 以及 3~4a 的(图 4g), 6~8a 周期振荡在 1968—1990 年明显, 3~4a 周期振荡在 1995—2000 年明显。

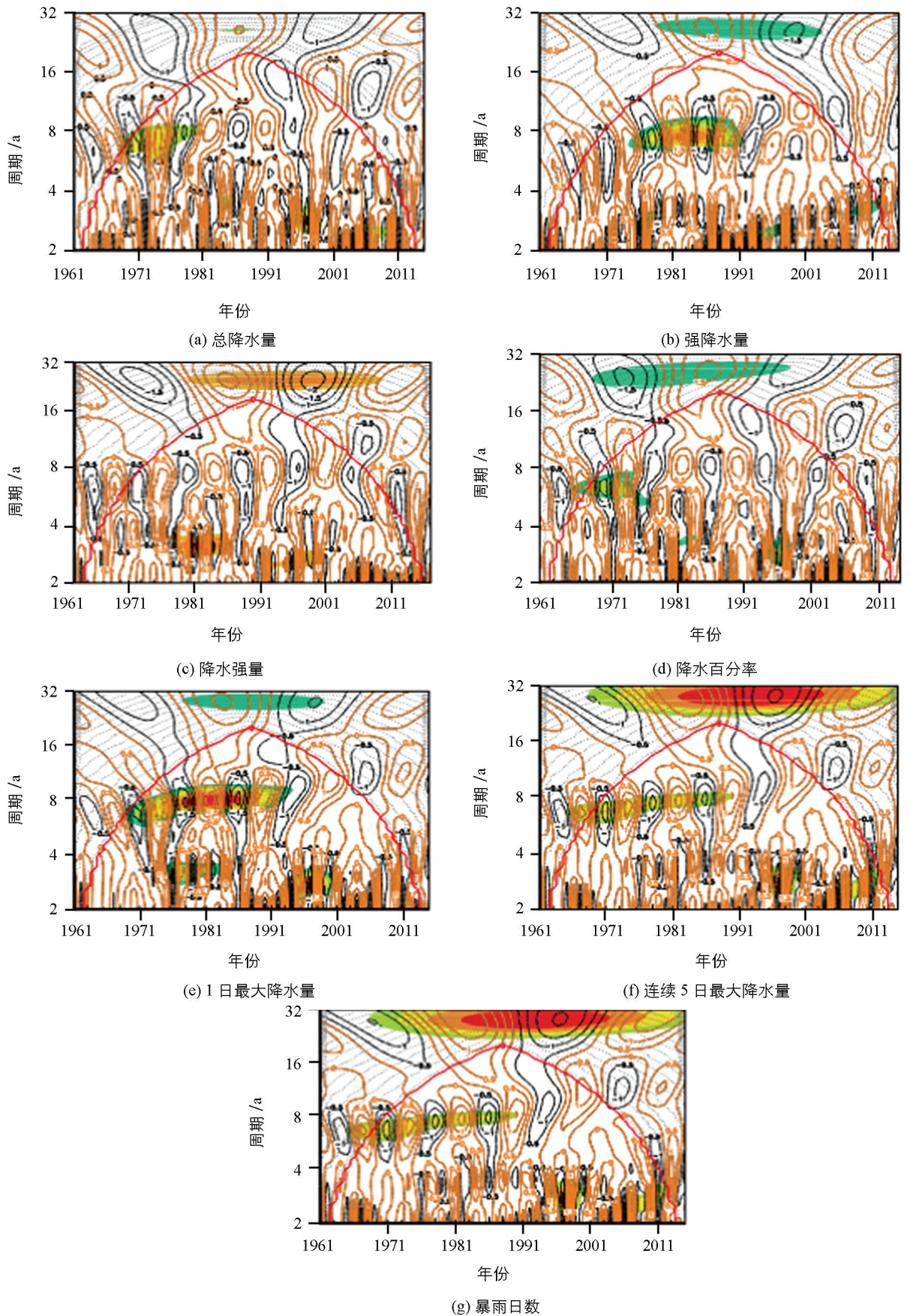


图 4 各极端降水指数的小波分析(阴影区表示通过了置信水平为 95% 的红噪声检验)

4 结论与讨论

1) 近 55a 四川省汛期降水总量、强降水量、降水百分率、连续 5 日最大降水量及暴雨日数均在川西绝大部分地区以及川东部地区呈增加趋势, 在川中部地区呈减少趋势; 降水强度及 1 日最大降水量在四川省绝大部分地区呈增加趋势。

2) 在时间变化上, 汛期极端降水指数(强降水量、降水强度、降水百分率、1 日最大降水量、连续 5 日最大降水量、暴雨日数)均对汛期降水总量的长期气候变化趋势具有一定的指示意义。

3) 四川省汛期各极端降水指数具有明显的周期振荡特征, 降水总量、强降水及降水强度、日最大降水量、暴雨日数均存在准 8a 以及 3~4a 的短周期振荡; 降水百分率以及连续 5 日最大降水量在年代变化上均具有 6~8a 和 3~4a 的短周期变化特征。

四川省汛期极端降水变化趋势具有明显的区域性差异特征, 造成这种差异可能是由地形、环流等诸多因子共同作用的结果。首先, 四川省地跨青藏高原、横断山脉、云贵高原、四川盆地等地貌单元, 作为高原大地形及我国东部平原的过渡带, 地势西高东低, 由西北向东南倾斜, 地形复杂多样, 使得四川省具有复杂的气候, 东部盆地属亚热带湿润气候, 西部高原在高原大地形的作用下, 以垂直气候带为主, 从南部山地到北部高原, 由亚热带演变到亚寒带, 垂直方向上亚热带到永冻带的各种气候类型, 这种地形造成的气候差异, 可能是造成四川省汛期极端降水区域性差异的重要原因。

其次诸多环流因子(如海温、冰雪、副热带高压、季风等)的共同作用也是造成地汛期四川省极端降水差异的重要因素。四川省位于青藏高原东侧, 诸多环流因子的变化均会对区域降水产生重要影响, 海温的异常、冰雪覆盖的变化、副热带高压位置和强弱以及季风等的变化均会影响区域降水的发生。例如东亚夏季季风减弱, 使得四川盆地西部及北部地区降水明显减少。副热带高压位置偏西偏南的变化会有利于四川盆地东部夏季降水的发生, 不利于四川盆地西部及北部地区夏季降水的发生^[12]。

另外, 人类活动也是不容忽视的一个原因, 随着中国经济的迅速发展, 使得人类活动加剧, 进而导致温室气体的增加, 有可能将导致区域降水的次数减少, 降水强度增加^[12]。

总之, 造成四川省汛期降水变化的原因是相当复杂的, 具体特征明显, 本文只通过多个角度定性地探讨其可能的原因, 在后续工作中会通过相关分析、合成分析以及数值模拟等方法进行定量的讨论。

参考文献:

- [1] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068—1076.
- [2] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化 [J]. 气象, 1994, 20(12): 19—26.
- [3] 杨 萍, 刘伟东, 王启光, 等. 近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征 [J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 29—36.
- [4] 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.
- [5] 胡豪然, 毛晓亮, 梁 玲. 近 50 年四川盆地汛期极端降水事件的时空演变 [J]. 地理学报, 2009, 64(3): 278—288.
- [6] 丁文荣. 西南地区极端降水的时空变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1029—1037.
- [7] 翟盘茂, 刘 静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾 [J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55—63, 84.
- [8] ALEXANDER L V, ZHANG X, PETERSON T C, et al. Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2006, 111: 1—22.
- [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(S1): 1—10.
- [10] BONSAI B R, ZHANG X, VINCENT L A, et al. Characteristics of Daily and Extreme Temperatures Over Canada [J].

Journal of Climate, 2001, 14(9): 1959—1976.

[11] 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.

[12] 齐冬梅, 周长艳, 李跃清, 等. 西南区域气候变化原因分析 [J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 35—42.

Spatial-Temporal Variation of Extreme Precipitation Indices During the Main Flood Season in 1961—2015 in Sichuan

LUO Yu^{1,2}, CHEN Chao², MA Zhen-feng²,
LIU Jia², LI Xiao-lan², YANG-Rong³

1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration/Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;
2. Climate Centre of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;
3. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610000, China

Abstract: Based on the daily precipitation data in June–Aug. of 156 meteorological stations in Sichuan during 1961–2015, F test, moving t-test, wavelet analysis and low pass filtering (LPF) are used to analyze the temporal and spatial distributions of extreme precipitation indices in Sichuan in the recent 55 years. The conclusions are as follows. 1) Spatially, total precipitation amount, heavy precipitation amount, precipitation abnormality percentage, maximum precipitation in five consecutive days and heavy rain days in the flood season during 1961–2015 in Sichuan showed a rising trend in the western and eastern parts of the province and a declining trend in the middle part, and precipitation intensity and day maximum precipitation showed an ascending trend in most parts of the province. 2) On the decadal variability, heavy precipitation amount, precipitation intensity, precipitation abnormality percentage, day maximum precipitation, maximum precipitation in five consecutive days and heavy rain days are of certain significant instruction of the total precipitation during the main flood season. 3) There are 8-year and 3-4-year periodic oscillation of total precipitation, heavy precipitation amount, precipitation intensity, day maximum precipitation and heavy rain days during the 55 years, and there exist 6-8-year and 3-4-year periodic oscillation of precipitation abnormality percentage and maximum precipitation in five consecutive days during the all time series.

Key words: Sichuan province; extreme precipitation; temporal and spatial characteristics; wavelet analysis