

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.09.012

# 西南地区不同海拔极端降水时空变化特征

董欣, 倪相

西南大学 地理科学学院, 重庆 400715

**摘要:** 基于西南地区 381 个地面气象观测站点的逐小时降水资料, 选取 9 个降水指数, 分析了 1980—2018 年暖季极端降水的时空变化特征。结果表明: ① 1980—2018 年, 大部分指数的区域平均值在各海拔地区都呈现不同程度的上升趋势, 而降水小时数和弱降水小时数则表现出了下降趋势。② 各指数的变化趋势表现出由西向东逐渐增多的特征, 趋势增加的站点主要集中在四川东部和贵州。③ 降水在不同的海拔呈现不同的特征, 随着海拔的升高, 降水小时数和弱降水小时数显著增加, 上升速率达到了 3.6 h/100 m 和 4.1 h/100 m, 其余 7 个指数则呈现下降趋势。④ 各指数在不同海拔表现出明显的差异, 1/12 h 最大降水量、平均小时降水强度、强降水小时数在中海拔地区具有最大上升趋势, 降水小时数和弱降水小时数在中海拔地区具有最大下降趋势。这些结论表明近 39 年来西南地区暖季极端降水的频率、极值和强度有上升趋势, 但在年际变化中表现出复杂的非线性趋势, 同时不同海拔区域展示出明显的区域差异。

**关键词:** 西南地区; 不同海拔; 极端降水指数; 时空变化;  
小时降水

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2022)09-0110-12

## Spatiotemporal Variation of Extreme Precipitation at Different Elevations in Southwest China

DONG Xin, NI Xiang

School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** Based on hourly precipitation observation data of 381 meteorological stations in southwest China, nine precipitation indices were selected to analyze the spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation in the warm season from 1980 to 2018. The results showed that: ① From 1980 to 2018, the regional averages of most indices showed increasing trend at each elevations, while the precipitation hours and hours with light precipitation decreased significantly. ② The trend of each extreme index showed a

收稿日期: 2021-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(42105005); 中央高校基本科研业务费专项(SWU-KT22007)。

作者简介: 董欣, 女, 硕士, 主要从事极端降水研究。

通信作者: 倪相, 副教授, 硕士研究生导师。

gradual increase from west to east, and the stations with increasing trends were mainly concentrated in eastern Sichuan and Guizhou. ③ The precipitation showed different characteristics at different elevations. With the increase of altitude, the total precipitation hours and hours with light precipitation increased significantly, and the rising rate reached to 3.6 h/100 m and 4.1 h/100 m, respectively, while the remaining seven indices showed decreasing trends. ④ The precipitation indices showed discrepant trends at different altitude. For example, the maximum precipitation during 1/12 hour, precipitation intensity and hours with heavy precipitation hour had the most increase trends at region of elevation from 1 000 m to 2 000 m than at other regions, while the total precipitation hours and hours with light precipitation showed the most downward trends at this region. These findings indicate that the frequency, extreme value and intensity of warm season extreme precipitation in southwest China over the past 39 years had upward trends, but the interannual variations showed complex nonlinear trends. Moreover, there were obvious regional differences at different elevations.

**Key words:** southwest China; different elevations; extreme precipitation index; spatiotemporal variation; hourly precipitation

自工业化以来,人类活动所造成的影响已经使得大气、海洋和陆地变暖<sup>[1]</sup>,这一趋势正对人类社会的可持续发展产生巨大的影响<sup>[2-3]</sup>.在全球变暖的背景下,极端降水事件变得更加频繁<sup>[4]</sup>,因极端降水引发的洪水、干旱、泥石流等自然灾害频发,自然生态系统和经济社会发展受到严重影响<sup>[5]</sup>,并对人类的生产生活构成了严重威胁.西南地区地形复杂,喀斯特地貌分布广泛,石漠化和水土流失问题严重.受季风环流的影响,该地区降水时空分布不均匀且季节差异性大<sup>[6-7]</sup>,从而使得局部强降水事件频繁发生,且区域差异显著.

近年来,洪涝、滑坡、泥石流等山地灾害在西南地区频繁发生.而诱发山地灾害与城市内涝的短时极端降水也因此受到了更加广泛的关注<sup>[8]</sup>.罗玉等<sup>[9]</sup>基于西南地区1970—2010年90个气象站的逐日降水资料,对极端强降水的变化趋势进行了研究,结果表明,强降水、降水强度及强降水比呈上升趋势,在空间上呈东西或西北、东南向梯度变化,这与刘琳等<sup>[10]</sup>得出的研究结果一致.罗玉等<sup>[11]</sup>还在气象站逐日降水资料基础上,加入NCEP/NCAR逐日再分析资料,对四川盆地夏季区域性极端降水事件特征及其成因进行了分析.丁文荣<sup>[12]</sup>以1960—2011年110个气象站的逐日降水资料为基础,发现西南地区极端降水频数有增加趋势.谭霞等<sup>[13]</sup>基于25个站点的逐日降水资料,分析了西南地区1979—2016年夏季降水的变化特征,得出降水总天数总体呈减少趋势的结论.唐红玉等<sup>[14]</sup>利用1960—2000年小时降水资料,分析了西南地区的降水频率和比率,总结了该地区降水时段的变化规律.毛冬艳等<sup>[15]</sup>利用逐小时降水资料,分析了1981—2010年西南地区的短时强降水与强暴雨的变化特征,指出短时强降水呈现频次增加、强度增强的变化趋势.张焕等<sup>[16]</sup>根据西南地区1961—2000年逐时降水资料,分析了不同季节降水和极端强降水的变化趋势,指出夏季西南大部分地区的极端强降水时数和强度增加.

极端降水常产生于中小尺度天气系统中,具有强度大、时间短的特征,利用日降水量的研究难以描述其突发性.西南地区地形复杂、海拔起伏大,导致该地区的极端降水情况复杂.鉴于此,本研究根据西南地区381个站点的逐小时降水观测资料,选取9个极端降水指数,揭示1980—2018年暖季极端降水事件在不同海拔的特征和长期变化趋势,以期为该地区气象灾害预测提供线索,以及对防灾减灾提供一定的参考.

## 1 数据和方法

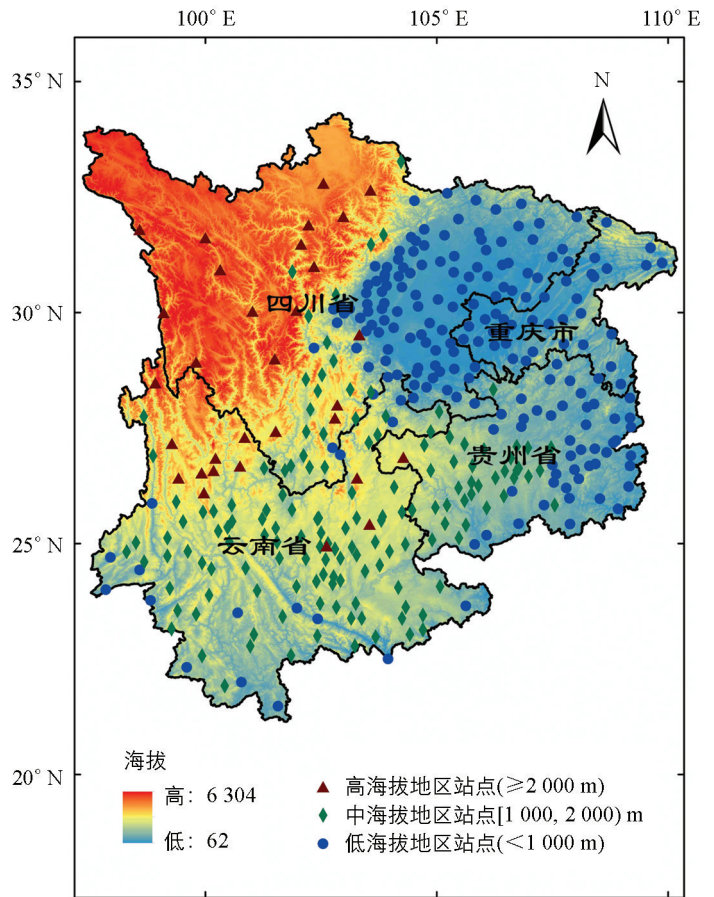
本研究中的西南地区包括重庆市、四川省、贵州省和云南省,所用降水数据来自国家气象信息中心

(<http://data.cma.cn>)的“中国地面气象站逐小时观测资料”,数据具有良好的完整性,并且经过严格的质量控制,以确保各站点降水资料的准确性和可靠性.数据观测时段为1980—2018年,本研究选取降水集中的暖季(5—9月)作为研究时间段.观测站测得的降水数据都会存在缺测的情况,为了保证数据的精度,首先要进行站点筛选.选择站点的标准是:①所需时段的降水缺测时数低于总时数的20%,若满足此要求则记该年为有效年份;②有效年份超过20年.经过筛选,满足上述条件的站点共计381个.根据李炳元等<sup>[17]</sup>的海拔分级指标,将本研究区按照海拔进行划分,海拔<1 000 m的区域为低海拔地区,[1 000, 2 000) m之间的为中海拔地区,≥2 000 m的划分为高海拔地区.按照该标准划分得出的结果为:低海拔地区有203个站点,中海拔地区有147个站点,高海拔地区有31个站点.西南地区各气象站点的分布状况如图1所示.

本研究参考气候变化检测监测和指标专家小组极端降水监测方法,利用小时降水定义了7个降水指数<sup>[18]</sup>,并引入2个新的指数,弱降水小时数(Hours with Light Precipitation, HLP)和强降水小时数(Hours with Heavy Precipitation, HHP).具体的指标定义如表1所示.研究中采用滑动平均、线性趋势等方法对各站点降水指数变化趋势进行分析,不同海拔地区指数区域平均值为各区域所有站点极端降水指数的算术平均值.

表1 极端降水指数及其定义

代码	名称	定义	单位
R95	强降水量	小时降水量>第95百分位值的降水总量	mm
R99	极强降水量	小时降水量>第99百分位值的降水总量	mm
RX1hour	1 h最大降水量	小时降水量的最大值	mm
RX12hour	12 h最大降水量	每个连续12 h降水量最大值	mm
PRCPTOT	年总降水量	小时降水量总和	mm
SDII	平均小时降水强度	小时降水量与降水小时数比值	mm/h
R1mm	降水小时数	降水小时数	h
HLP	弱降水小时数	小时降水量小于2 mm	h
HHP	强降水小时数	小时降水量大于20 mm	h



审图号: GS(2019)3333号

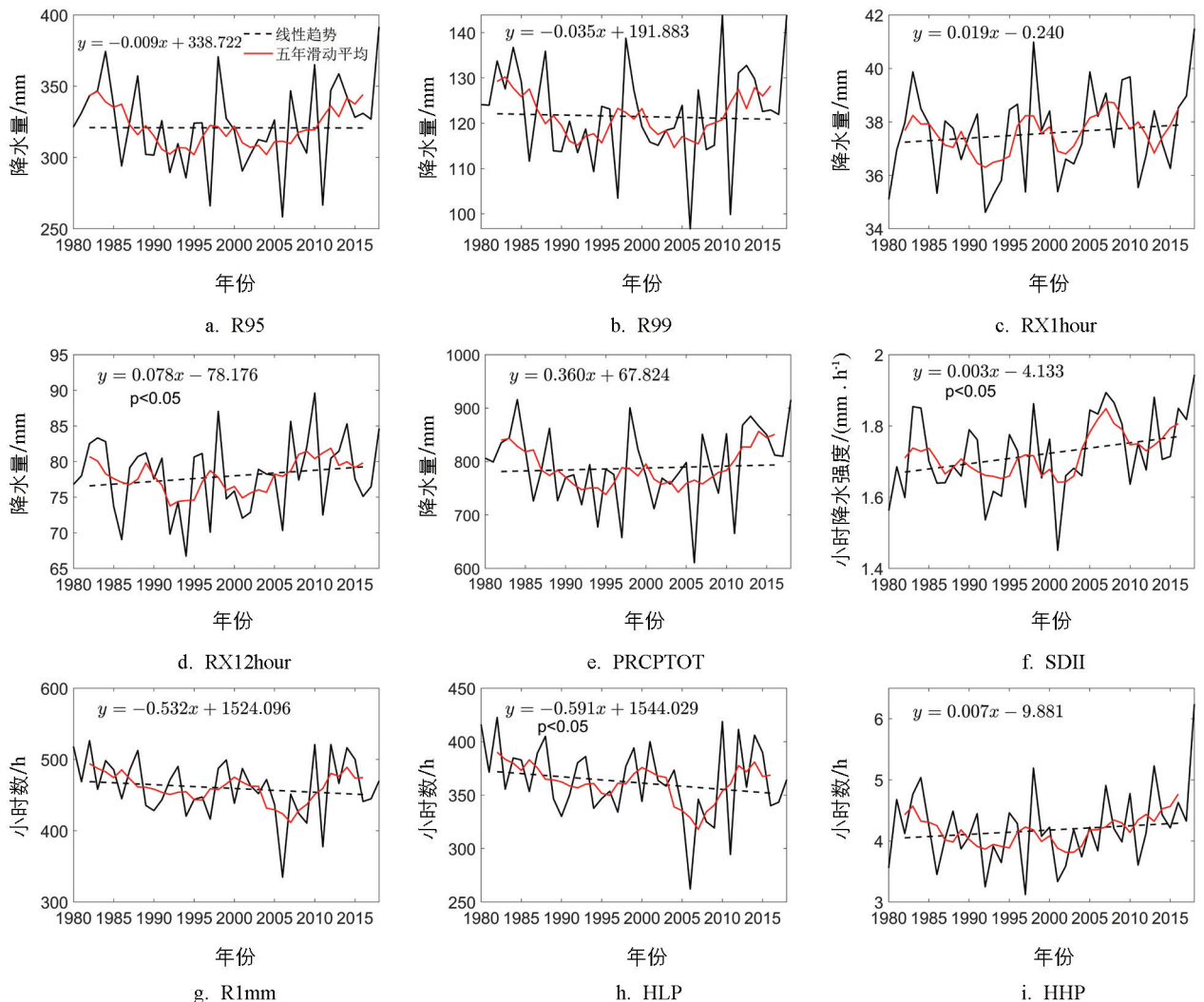
图1 西南地区气象站点分布图

## 2 结果与分析

### 2.1 暖季极端降水指数时间序列变化特征

#### 2.1.1 低海拔地区极端降水指数时间序列变化特征

低海拔地区的范围主要包括四川东部、重庆以及贵州东部,由低海拔地区暖季极端降水指数的年际变化来看(图2),RX1hour,RX12hour,PRCPTOT,SDII和HHP表现出了不同程度的上升,其中PRCPTOT上升速率最大,达到了3.6 mm/10 a,而R95(图2a)、R99(图2b)、R1mm(图2g)和HLP(图2h)呈现下降趋势,下降速率分别为0.09 mm/10 a,0.35 mm/10 a,5.32 h/10 a和5.91 h/10 a.这说明1980—2018年低海拔地区暖季降水小时数减少,强降水小时数增加,降水量增加,降水的强度显著增大.不过各指数的年际变化表现出明显的非线性趋势,如R95,R99和PRCPTOT等参数在2000年之前呈现下降趋势,2000年之后呈现上升趋势.



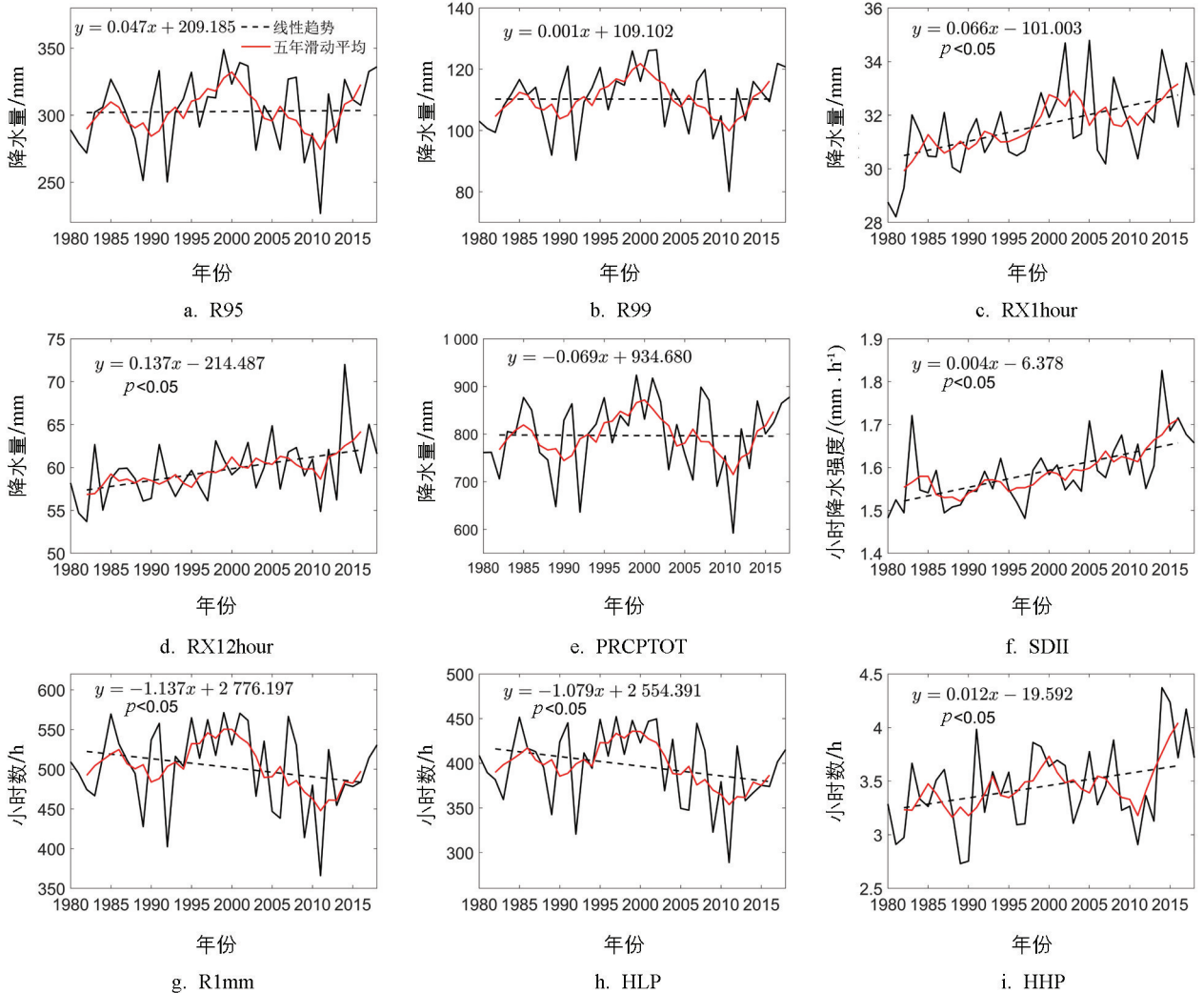
黑色实线为年平均,红色实线为5年滑动平均结果,黑色虚线为5年滑动平均的线性拟合结果.

图2 1980—2018年低海拔地区暖季极端降水指数的年际变化

#### 2.1.2 中海拔地区极端降水指数时间序列变化特征

中海拔地区包括四川中部、云南中东部以及贵州西部,其极端降水指数的变化如图3所示,除了

PRCPTOT(图 3e)、R1mm(图 3g)和 HLP(图 3h)表现为下降趋势,下降速率分别为 0.69 mm/10 a, 11.37 h/10 a 和 10.79 h/10 a, 其他指数 R95(图 3a)、R99(图 3b)、RX1hour(图 3c)、RX12hour(图 3d)、SDII(图 3f)和 HHP(图 3i)均表现出不同程度的上升,上升速率分别为 0.47 mm/10 a,0.01 mm/10 a, 0.66 mm/10 a,1.37 mm/10 a,0.04 mm/(h·10 a)和 0.12 h/10 a. 整体看来中海拔地区 1980—2018 年暖季降水小时数减少的同时,极端降水强度和极值都有所增加. 但在年际变化上,中海拔地区与低海拔地区表现出了明显的差异,比如中海拔地区 PRCPTOT 在 2000 年之前是较为明显的上升,但 2000 年后出现了较大的波动,这一波动与低海拔地区呈现相反趋势. 同时,中海拔地区 R95,R99,R1mm 和 HLP 也表现出了与 PRCPTOT 类似的年际变化.



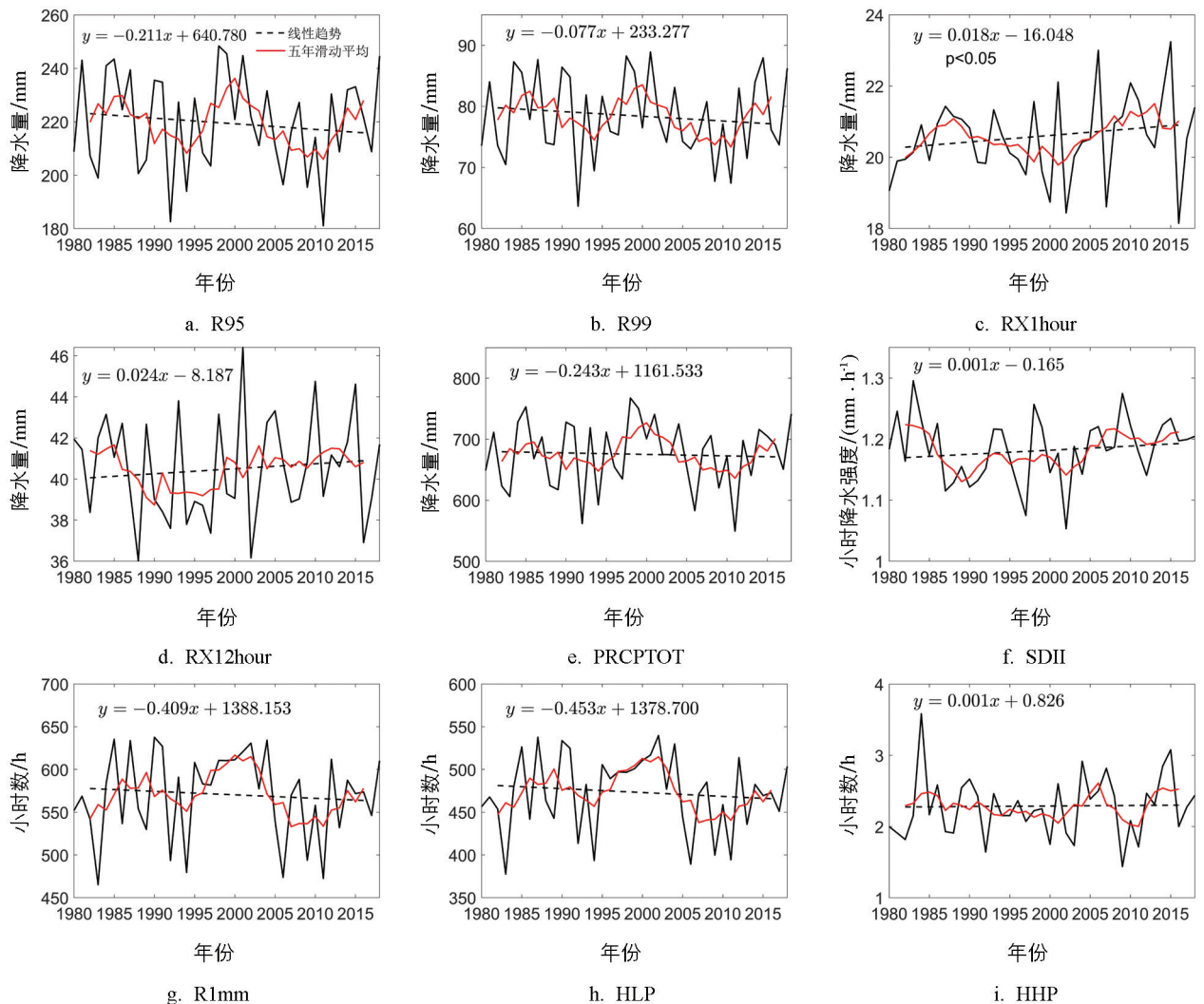
黑色实线为年平均值,红色实线为 5 年滑动平均结果,黑色虚线为 5 年滑动平均的线性拟合结果.

图 3 1980—2018 年中海拔地区暖季极端降水指数的年际变化

### 2.1.3 高海拔地区极端降水指数时间序列变化特征

高海拔地区为四川西部、云南西北部以及四川云南交界处,由图 4 可见,高海拔地区的 5 个极端降水指数均呈下降趋势,R95(图 4a)、R99(图 4b)、PRCPTOT(图 4e)、R1mm(图 4g)和 HLP(图 4h)的下降速率分别为 2.11 mm/10 a,0.77 mm/10 a,2.43 mm/10 a,4.09 h/10 a 和 4.53 h/10 a,其余指数表现出了上

升趋势, 而 RX12hour(图 4d)上升速率最大, 达到了 0.24 mm/10 a. 整体看来高海拔地区降水小时数减少, 总降水量减少, 极端降水量减少, 其频率、强度和极值也都表现出了不同程度的增加. 而大部分指数的年际变化非常相似, 如 R95, R99, PRCPTOT, R1mm 和 HLP 这些指数, 在 2000 年之前呈现上升趋势, 2000 年之后呈现下降趋势.



黑色实线为年平均值, 红色实线为 5 年滑动平均结果, 黑色虚线为 5 年滑动平均的线性拟合结果.

图 4 1980—2018 年高海拔地区暖季极端降水指数的年际变化

表 2 为不同海拔地区暖季极端降水指数平均值及变化趋势, 从各指数的平均值来看, 从大到小基本上都依次为: 低海拔、中海拔、高海拔, 而 PRCPTOT, R1mm 和 HLP 表现出不同的变化规律, R1mm 和 HLP 从大到小依次为: 高海拔、中海拔、低海拔, 而 PRCPTOT 从大到小依次为: 中海拔、低海拔、高海拔. 从各指数的变化趋势来看, 大多表现为中、高海拔高于低海拔, 并且有随海拔升高而增大的特点. 其中, RX12hour 表现出了显著的上升趋势, 尤其是在中海拔地区, 上升速率达到了 1.37 mm/10 a. 虽然总降水量在不同海拔并没有呈现一致的趋势, 但 RX1hour, RX12hour 和 SDII 在所有海拔均呈上升趋势, 这体现了短时极端降水量和降水强度的增加. HLP 在所有高度呈现一致的下降趋势, 与之相反的是 HHP 呈现上升趋势.

表 2 1980—2018 年西南不同海拔地区暖季极端降水指数的平均值及变化趋势

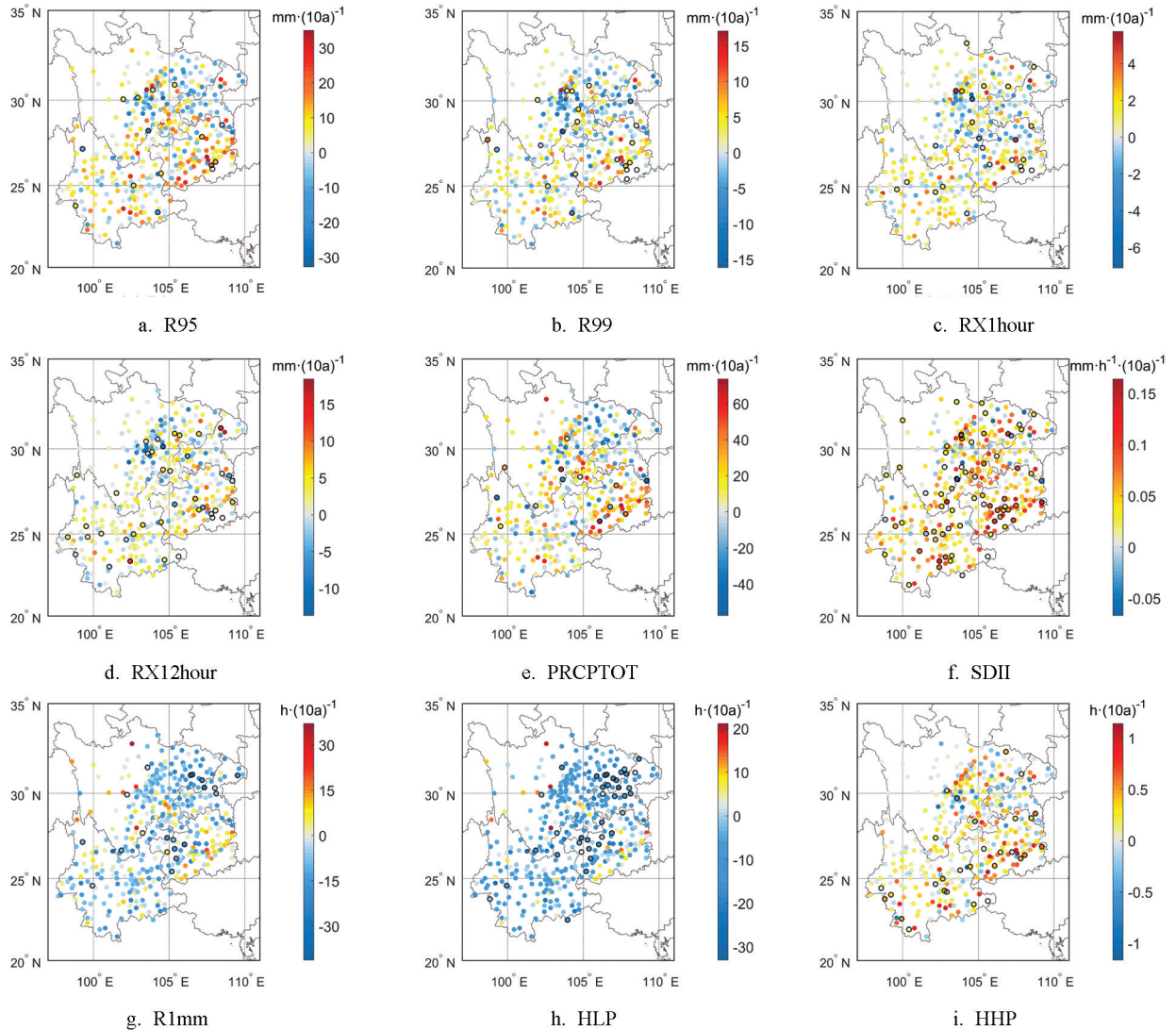
		低海拔	中海拔	高海拔
站点数目/个		203	147	31
R95	平均值/mm	323.216	303.065	216.576
	趋势/(mm·a <sup>-1</sup> )	-0.009	0.047	-0.211
R99	平均值/mm	122.335	110.257	77.132
	趋势/(mm·a <sup>-1</sup> )	-0.035	0.001	-0.077
RX1hour	平均值/mm	37.674	31.595	20.229
	趋势/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.019	<b>0.066</b>	<b>0.018</b>
RX12hour	平均值/mm	78.055	59.72	39.938
	趋势/(mm·a <sup>-1</sup> )	<b>0.078</b>	<b>0.137</b>	0.024
PRCPTOT	平均值/mm	792.088	797.744	669.343
	趋势/(mm·a <sup>-1</sup> )	0.36	-0.069	-0.243
SDII	平均值/(mm·h <sup>-1</sup> )	1.723	1.592	1.175
	趋势/(mm·h <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )	<b>0.003</b>	<b>0.004</b>	0.001
R1mm	平均值/h	453.567	494.743	541.287
	趋势/(h·a <sup>-1</sup> )	-0.532	<b>-1.137</b>	-0.409
HLP	平均值/h	363.387	397.251	471.812
	趋势/(h·a <sup>-1</sup> )	-0.591	<b>-1.079</b>	-0.453
HHP	平均值/h	4.194	3.24	1.645
	趋势/(h·a <sup>-1</sup> )	0.007	<b>0.012</b>	0.001

注：加粗表示在 5% 水平有统计学意义。

## 2.2 极端降水指数空间格局变化特征

图 5 为西南地区暖季 9 个极端降水指数趋势的多年平均空间分布特征。由图 5 可知, R95 和 R99 具有大致相同的空间分布(图 5a、图 5b), 在西南地区大多呈现出上升趋势, 且空间分布较为复杂, 四川东部的站点多呈现下降趋势。RX1hour 多表现为上升趋势, 出现下降趋势的地区主要集中在重庆西部、四川东部以及贵州西部(图 5c), 下降幅度集中在 0~6 mm/10 a。暖季 RX12hour 变化趋势整体表现为上升趋势, 主要在四川东部呈现明显的下降趋势, 降幅最大为 13.69 mm/10 a(图 5d)。PRCPTOT 出现下降趋势的站点主要集中在四川东部和重庆(图 5e)。SDII 在大部分地区表现出了上升趋势, 尤其是在贵州最为明显, 增幅达到了 0.1~0.164 mm/(h·10 a), 四川东部的部分站点下降幅度最大(图 5f)。R1mm 在绝大部分地区均以下降趋势为主, 而在四川西部、云南西部以及贵州东部呈现上升趋势(图 5g), HLP(图 5h)也表现出了相似的变化趋势。HHP(图 5i)的空间分布较为复杂, 在大部分地区表现出上升趋势, 最大增幅为 1.14 mm/10 a, 下降区域集中在四川东部和重庆。

总体而言, 各极端降水指数只有 R1mm 和 HLP 表现出了明显下降的趋势, 其余指数大多表现出了上升的趋势, 这表明西南地区暖季总降水量逐渐增加, 降水小时数尤其是弱降水小时数在减少, 而极端降水的强度和极值在增加。



黑色圆圈表示有统计学意义的站点。

图 5 1980—2018 年西南地区各站点暖季极端降水指数趋势的空间分布

### 2.3 极端降水指数与海拔之间的关系

各极端降水指数与海拔的关系较为复杂, 经计算, R95, R99, RX1hour, RX12hour, PRCPTOT, SDII, HHP 这 7 个指数与海拔呈负相关关系, 而 R1mm 和 HLP 与海拔呈正相关关系。图 6 为 1980—2018 年西南地区 381 个站点暖季极端降水指数多年平均值与海拔的散点图。其中 R95(图 6a) 的下降速率最大, 海拔每上升 100 m, 强降水量减少 3.8 mm, R99(图 6b)、RX1hour(图 6c)、RX12hour(图 6d)、PRCPTOT(图 6e)、SDII(图 6f) 以及 HHP(图 6i) 也随海拔的升高呈现下降趋势, 其下降速率分别为 1.8 mm/100 m, 0.7 mm/100 m, 1.7 mm/100 m, 3.4 mm/100 m, 0.02 mm/(h · 100 m) 和 0.1 h/100 m, 这反映了降水多集中在低海拔地区, 同时该区域也更容易发生极端降水事件。R1mm(图 6g) 和 HLP(图 6h) 的上升速率分别为 3.6 h/100 m 和 4.1 h/100 m, 这表明随着海拔的升高, 降水小时数和弱降水小时数增加。总体来看, 海拔对西南地区的极端降水指数均值有一定的影响。低海拔地区由于极端



降水量多且降水小时数少,降水强度高,因此发生极端降水事件的可能性较大;而高海拔地区却表现出了降水小时数较多且以弱降水为主,极端降水相对较少的特征,这一结果也说明了西南地区局部降水的复杂性。

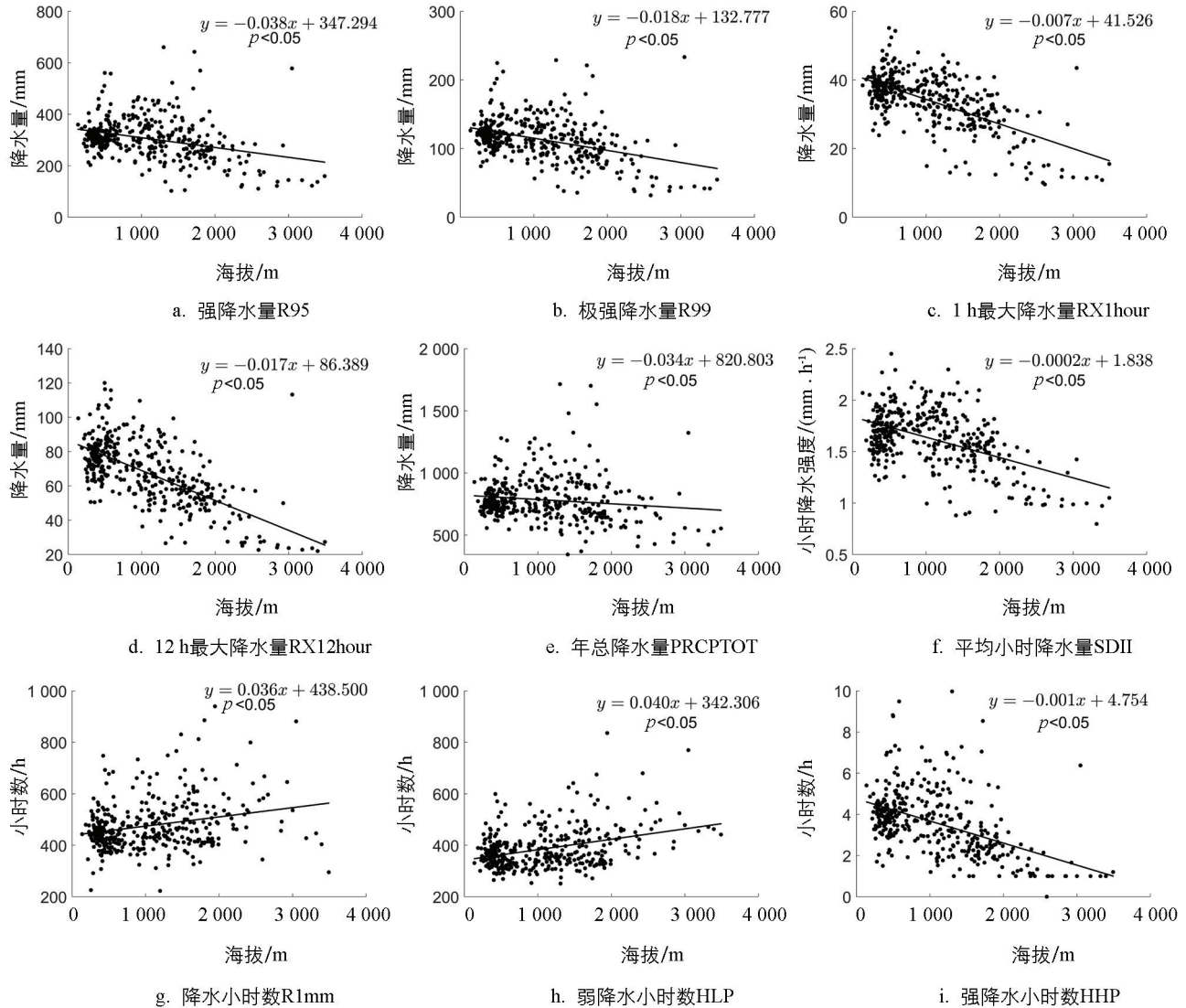


图 6 西南地区 1980—2018 年暖季各台站极端降水指数均值随海拔的变化

图 7 为西南地区各站点暖季指数变化趋势与海拔之间的关系,从图 7 中可以看出,除了 SDII(图 7f)和 HHP(图 7i)与海拔呈负相关关系,即海拔每上升 100 m,SDII 下降 0.000 6 mm/(h · 10 a),而 HHP 减少 0.002 h/10 a,其余 7 个指数的变化趋势均与海拔呈正相关关系,其中 R1mm(图 7g)和 HLP(图 7h)增幅最大,达到了 0.3 h/(10 a · 100 m)。因此,随着海拔的升高降水量增速加快,降水小时数增幅变大,且弱降水小时数增幅也逐年增加,表明高海拔地区降水小时数会进一步增加,并以弱降水小时数为主。SDII 和 HHP 的变化趋势随海拔升高而减小,说明低海拔地区降水强度和强降水小时数会进一步增加。

由图 8 可知,箱线图显示了不同海拔地区各指数变化趋势的分布情况,大部分指数的变化趋势在不同海拔地区的中位数和平均值都大于 0,说明这些指数整体变化趋势是增加的。而对于 R1mm 和 HLP 这两个指数,在低、中海拔的数据分布都比较集中,它们的中位数和平均值都小于 0,说明降水小时数和弱降水小时数整体上都呈下降趋势,因此西南地区暖季降水向强降水量和小时数更多、强度更强、极值更大的方向发展。

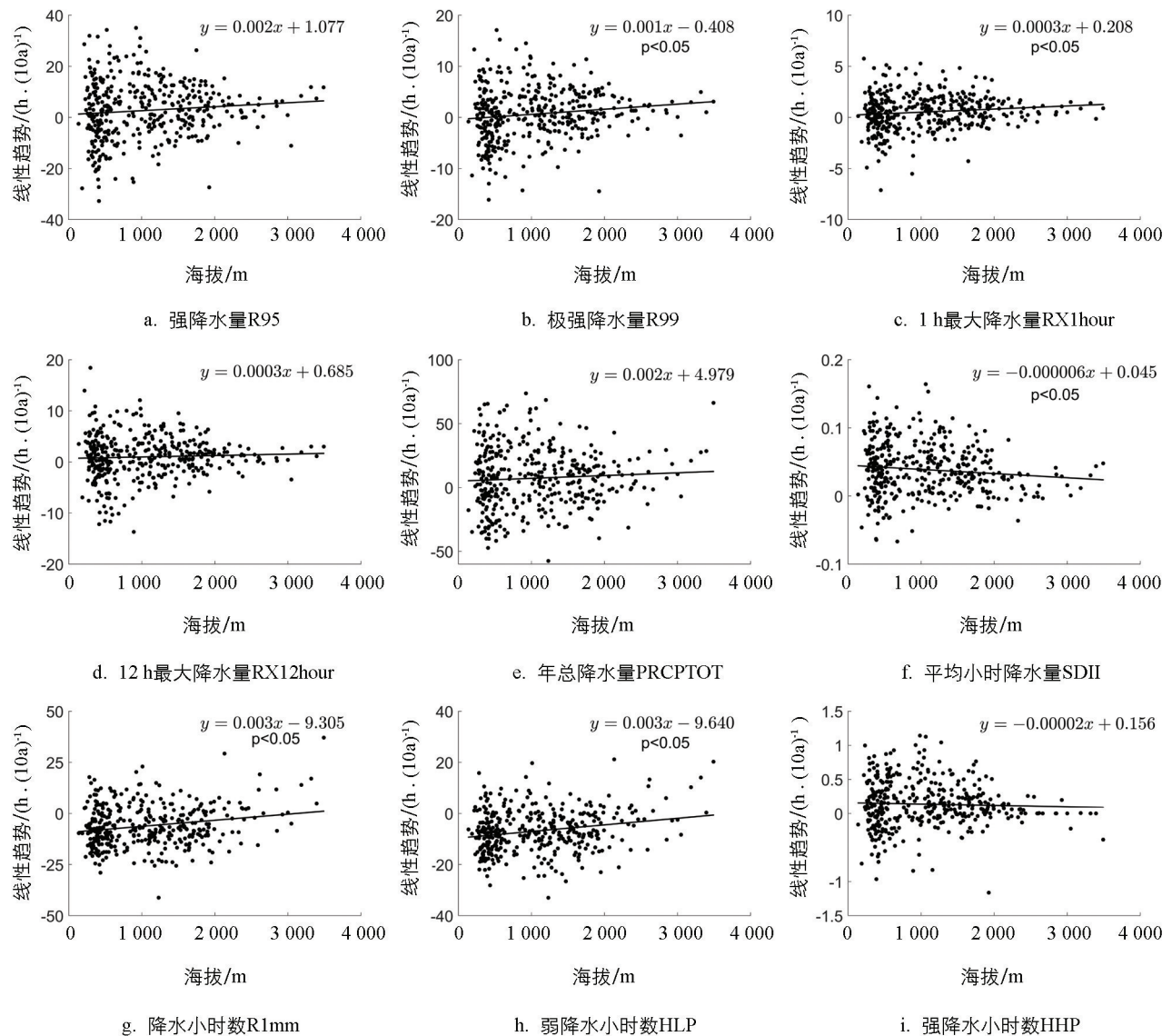


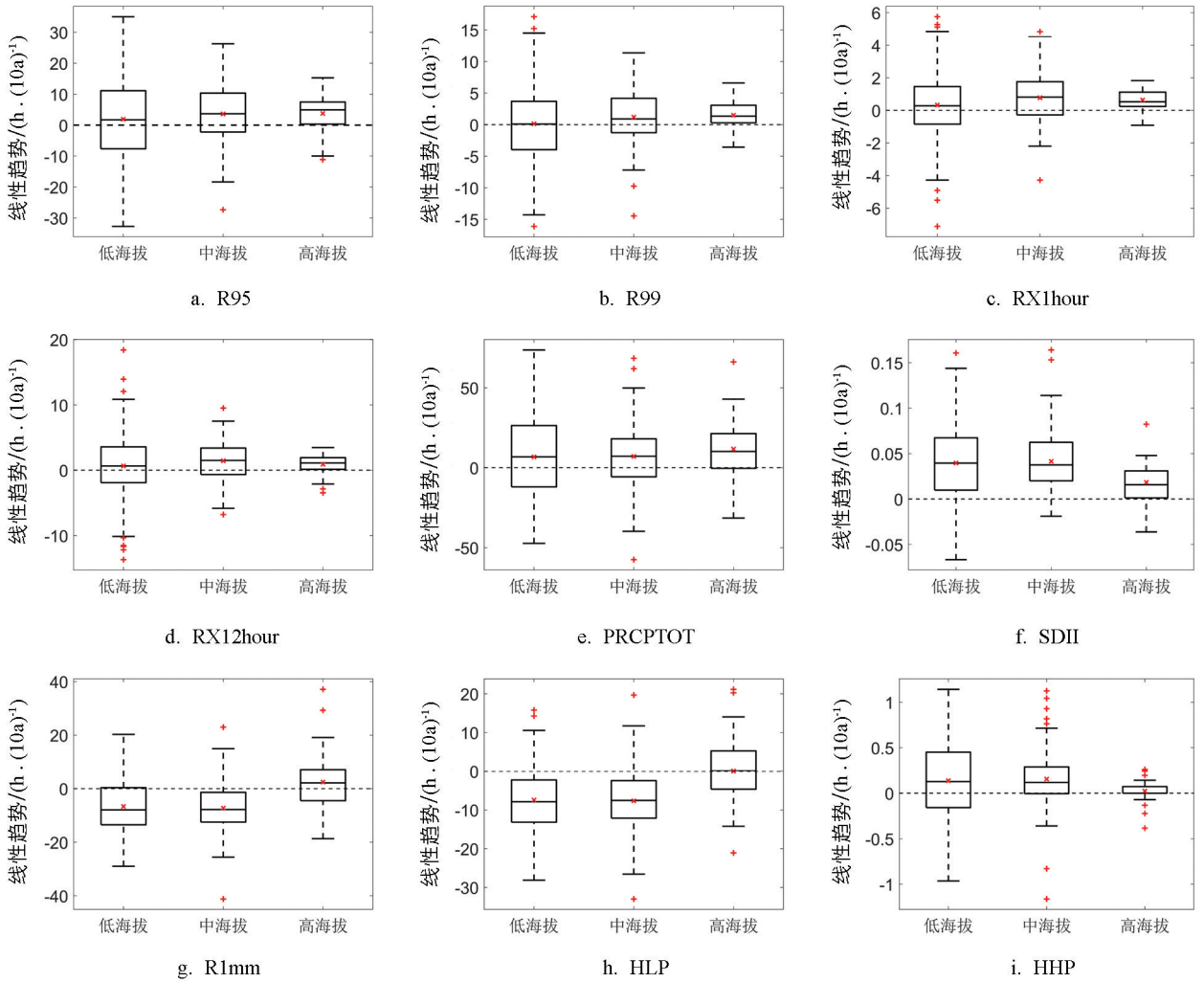
图 7 西南地区 1980—2018 年暖季各台站极端降水指数趋势随海拔的变化

### 3 结论

本研究基于西南地区 381 个站点的逐小时降水资料, 采用 9 个极端降水指数, 分析了 1980—2018 年暖季极端降水的时空变化特征, 主要得到以下结论:

1980—2018 年, 1 h 最大降水量 RX1hour、12 h 最大降水量 RX12hour、平均小时降水强度 SDII 以及强降水小时数 HHP 的区域平均值在各海拔区域都呈现不同程度的上升趋势; 强降水量 R95 和极强降水量 R99 在中海拔地区表现为上升趋势, 在低、高海拔地区则表现为下降趋势; 年总降水量 PRCPTOT 在低海拔地区呈现上升趋势, 在中、高海拔地区为下降趋势; 而降水小时数 R1mm 和弱降水小时数 HLP 则在各海拔区域都表现出了下降趋势。这表明近 39 年来, 西南地区暖季极端降水的频率、极值和强度在增加。各指数的年际变化表现出明显的非线性趋势, 如在低海拔地区, R95, R99 和 HHP 等参数在 2000 年之前呈现下降趋势, 2000 年之后呈现上升趋势; 中海拔地区则不同于低海拔地区, 比如 PRCPTOT 在 2000 年之前呈现为上升趋势, 但 2000 年后出现了较大的波动; 高海拔地区大部分指数的年际变化与中海拔地区相似。

各降水指数趋势表现出由西向东逐渐增多的特征, 增加的站点主要集中在四川东部和贵州; R1mm 和 HLP 趋势空间差异较大, 主要以减少趋势为主, 在四川西部和贵州东部增加趋势明显。



箱体内“x”表示各台站指数趋势的平均值

图 8 西南地区 1980—2018 年暖季不同海拔极端降水指数变化趋势的箱线图

总体来看,不同海拔地区的降水特征呈现出较大的差异.对于各指数的气候平均值来说,R1mm和HLP与海拔呈正相关关系,这表明随着海拔的升高,降水小时数和弱降水小时数增加.剩余7个指数随海拔的升高呈现下降趋势,反映了降水多集中在低海拔地区,同时该区域也更容易发生极端降水事件.对于各指数的变化趋势来说,RX1hour, RX12hour, SDII, R1mm, HLP, HHP在3个海拔范围均表现出上升或者下降趋势.综合结果表明,伴随着极端降水量、降水强度的增加,强降水小时数也在不断地增加.其余4个参数在不同海拔呈现不同的趋势,展示出西南地区不同海拔极端降水情况的差异.

政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第五次评估报告中指出,缺乏足够的降水资料将导致评估结果出现一定的偏差和不确定性.因此,用更长的时间序列、更高时空分辨率的降水数据对其进行全面、系统的分析是非常有必要的.在全球变暖的大背景下,我国西南地区极端降水指数对海拔具有一定的敏感性<sup>[19]</sup>,这也足以表现出该地区降水的复杂性.由于西南地区所处位置的特殊性及地形特征的复杂性,该区域气候特征极其复杂,这增加了极端降水事件变化的归因的难度.除海拔之外,气候变化导致的大气环流以及水汽输送条件的改变也会影响降水条件,作为中国气溶胶光学厚度的高值区<sup>[20]</sup>,气溶胶通过改变云微物理过程进而影响降水的发生<sup>[21]</sup>,未来的工作也将深入探讨这些因素对复杂地形下极端降水的影响.

## 参考文献:

- [1] CUBASCH U, WUEBBLES D, CHEN D, et al. Introduction. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. Computational Geometry, 2013, 18(2): 95-123.
- [2] MILLY P C D, DUNNE K A, VECCHIA A V. Global Pattern of Trends in Streamflow and Water Availability in a Changing Climate [J]. Nature, 2005, 438(7066): 347-350.
- [3] PATZ J A, CAMPBELL-LENDRUM D, HOLLOWAY T, et al. Impact of Regional Climate Change on Human Health [J]. Nature, 2005, 438(7066): 310-317.
- [4] 胡宜昌,董文杰,何勇. 21世纪初极端天气气候事件研究进展 [J]. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1066-1075.
- [5] 张存杰,黄大鹏,刘昌义,等. IPCC第五次评估报告气候变化对人类福祉影响的新认知 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 246-250.
- [6] 苏秀程,王磊,李奇临,等. 近50a中国西南地区地表干湿状况研究 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 104-116.
- [7] 张武龙,张井勇,范广洲. 我国西南地区干湿季降水的主模态分析 [J]. 大气科学, 2014, 38(3): 590-602.
- [8] 崔云,孔纪名,田述军,等. 强降雨在山地灾害链成灾演化中的关键控制作用 [J]. 山地学报, 2011, 29(1): 87-94.
- [9] 罗玉,范广洲,周定文,等. 西南地区极端降水变化趋势 [J]. 气象科学, 2015, 35(5): 581-586.
- [10] 刘琳,徐宗学. 西南5省市极端气候指数时空分布规律研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 294-301.
- [11] 罗玉,陈超,马振峰,等. 四川盆地夏季区域性极端降水事件特征及其成因 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 128-138.
- [12] 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): 1071-1079.
- [13] 谭霞,周筠珺,李明刚,等. 1979-2016年西南地区夏季持续性降水的变化特征 [J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(1): 1-10.
- [14] 唐红玉,顾建峰,俞胜宾,等. 西南地区降水日变化特征分析 [J]. 高原气象, 2011, 30(2): 376-384.
- [15] 毛冬艳,曹艳察,朱文剑,等. 西南地区短时强降水的气候特征分析 [J]. 气象, 2018, 44(8): 1042-1050.
- [16] 张焕,翟盘茂,唐红玉. 1961-2000年西南地区小时降水变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(1): 8-13.
- [17] 李炳元,潘保田,韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨 [J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543.
- [18] ZHANG X B, ALEXANDER L, HEGERL G C, et al. Indices for Monitoring Changes in Extremes Based on Daily Temperature and Precipitation Data [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(6): 851-870.
- [19] LI Z X, HE Y Q, THEAKSTONE W H, et al. Altitude Dependency of Trends of Daily Climate Extremes in Southwestern China, 1961 - 2008 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(3): 416-430.
- [20] QIAN Y, GIORGI F. Regional Climatic Effects of Anthropogenic Aerosols? the Case of Southwestern China [J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(21): 3521-3524.
- [21] FAN J W, ROSENFELD D, ZHANG Y W, et al. Substantial Convection and Precipitation Enhancements by Ultrafine Aerosol Particles [J]. Science, 2018, 359(6374): 411-418.