

1961—2017年青藏高原极端降水特征分析

马伟东¹, 刘峰贵^{1,2}, 周强¹, 陈琼¹, 刘飞¹, 陈永萍¹

(1. 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810008;

2. 高原科学与可持续发展研究院, 西宁 810008)

摘要:基于青藏高原78个气象站点的逐日降水数据,采用百分位阈值法确定极端降水阈值,计算极端降水指数并分析其时空分布特征,以期为区域气候变化预测及防灾减灾对策的制定提供参考。结果表明:(1)1961—2017年青藏高原年降水量表现出上升趋势,上升速率为8.06 mm/10 a,多年平均降水量达472.36 mm。78个站点的年降水量倾向率最小值为-25.46 mm/10 a,最大值为43.02 mm/10 a,有15.38%的站点降水在下降,较为集中地分布在高原的东部和南部,其余84.62%的站点降水量在上升。(2)青藏高原各站点极端降水阈值的平均值为23.11 mm,取值范围为7.84~51.90 mm。高值中心出现在横断山区的贡山和木里,低值中心出现在柴达木盆地及昆仑山北翼区。(3)青藏高原各站点的极端降水量、极端降水日数和极端降水贡献率均表现出了明显的上升趋势,极端降水强度虽然也在上升但趋势并不明显,表明青藏高原极端降水量的上升并非是极端降水的强度引起的,而是由极端降水频次的上升引起的。柴达木盆地的极端降水量和极端降水日数虽然并没有表现出高值水平,但该地区的极端降水贡献率却表现出较高水平,表明该区域虽然降水量较少,但是降水往往以极端降水的形式产生。

关键词:青藏高原;气候变化;极端降水;阈值

全球气候变化造成的自然灾害风险的加剧,成为影响全球可持续发展的挑战之一^[1]。IPCC在2014年发布的第5次综合报告表明,在逐渐暖化的背景下,全球各地的极端天气事件正在发生着异常变化,导致各类自然灾害频发,风险陡增^[2]。气候变化愈发剧烈的同时社会资本也在增加和集聚,进一步使得自然灾害风险的各个组成要素正发生着变化^[3]。随着公众对气候变化的研究逐渐深入,气候变化对极端水文过程的影响受到更多灾害风险、气象和水文领域的研究人员以及部分国际机构的关注。2007年,国际水文计划(IHP)被联合国教科文组织提出,并在第七阶段(2008—2013年)的研究计划中将与水有关的灾害研究列入了研究的第一主题中^[4],新一期的第八阶段(2014—2021年),又在第一主题的第5领域提出要在全球范围内对极端水文事件展开积极应对^[5]。2012年,IPCC首次对极端天气事件受气候变化的影响程度进行了评估。由此可以看出,在未来适应全球气候变化的过程中,极端水文事件的相关问题已成为亟待研究的重要内容。

水循环在全球范围内的速率加快,使得降水的原空间分布格局发生变化,部分区域的降水较往常增多,进而该区域发生极端降水事件的概率就增加。极端降水事件在全球

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-11-05

基金项目: 科技部重点研发项目(2019YFA0606900); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0603)

作者简介: 马伟东(1994-),男,青海西宁人,博士研究生,主要从事自然灾害与土地退化研究。

E-mail: mwd0910@sina.com

通讯作者: 刘峰贵(1966-),男,青海门源人,博士,教授,博士生导师,主要从事青藏高原区域地理研究。

E-mail: lfg_918@163.com

尺度上的研究结果表明,仅有小部分地区的强降水事件在减少,大部分地区的强降水事件是表现出增多的趋势^[6]。2000年以来,气候变化的异常现象持续发酵,极端降水的波动性增强。中国因洪灾而产生的经济损失每年接近千亿元,且损失在持续增加^[7]。

国内外学者广泛关注极端降水的研究,原因在于其容易引发泥石流、山洪等突发性灾害。从全球视角来看,全球总降水量在20世纪后半期的变化趋势虽然并不显著,但产生极端降水事件的天数和极端降水的强度均表现出显著增多的趋势^[8,9];在北半球,中高纬度地区的极端降水日数平均以3.00%/10 a的速率在上升^[2];北美地区的情况与全球极端降水的情况一致,降水总量无明显变化但极端降水频次持续增多^[10];1951—2010年间,北欧的降水总量和极端降水量均有所增加,而南欧除冬季外其他三个季节的极端降水量均表现为增多趋势^[11]。从国家尺度来看,希腊的极端降水在总体上表现为增加趋势,但在季节上和空间上均表现出差异^[12];对格鲁吉亚的极端降水指数的测算结果表明在1971—2010年间极端降水量随着降水总量的增加而增加,同时极端降水量占全年总降水量的比例也在同步上升^[13];日本由于受到山脉走势的影响,极端降水事件的变化趋势与其山脉的走向有较好的关联性,但在总体上极端降水频次也表现出增加的趋势^[14]。

中国对极端降水的关注和研究,主要在不同的区域视角上讨论极端降水在未来气候变化背景下的走向,预估变化范围的同时进行程度的研判。1980年以来的极端降水频次以1.2 d/10 a的速率在上升,同期极端降水量以109.0 mm/10 a的速率上升,青藏高原区、西北干旱区、华南地区以及长江中下游点等地增加趋势更为明显,然而华北地区的极端降水事件的频次在减少^[15,16]。景丞等^[17]对中国极端降水事件在未来变化趋势的预估结果表现出2016—2050年极端降水事件整体将呈现增加趋势。江志红等^[18]在对中国的气候模拟场以及极端降水的实际情况进行研究后,判断21世纪的中国不仅极端降水事件将增多,同时极端降水强度将进一步增强。从空间上来看,西北地区的极端降水事件的频次在四个季节中均有所增加,而华北地区表现出相反的趋势。分季节来看,大部分地区的极端降水集中在夏季^[19]。分区域来看,极端降水事件表现出了明显的空间异质性,西南地区极端降水事件的频次变化虽然显著性不强,但仍表现出上升趋势^[20];西北干旱区的强降天气在明显增加,且从1990年以后出现了快速增长^[21];南方地区极端降水量在增加的同时极端降水强度也在提升^[22];黄土高原区气象站点的监测数据表明,该区域多数站点的极端降水日数呈下降的趋势^[23]。对于青藏高原地区的极端降水的相关研究,主要集中于区域的极端降水的变化情况上,对西藏、青海两地发生的极端降水事件的时空变化研究表明,两省区内极端降水指数的变化趋势与周边区域的变化趋势保持一致,连续干旱日数在减少,而雅江流域内的部分极端降水指数呈显著的上升趋势^[24,25];对高原东部的夏季强降水事件的研究表明,强降水量和频次呈现出弱增长的趋势,在空间上频次和降水量均表现出的趋势是由东南部向西北部逐渐递减。曹瑜等^[27]对青藏高原季节及年代尺度的极端降水变化趋势的研究表明,在青藏高原地区极端降水事件主要集中在夏季,且夏季极端降水事件在西藏东部呈现出减少的趋势,而在其他地区主要表现为增加趋势。极端降水的年代际变化表现出显著差异,在20世纪70年代以前表现为减少趋势,在其之后表现为增加趋势。由此可以看出,无论是在全球范围内还是在全国尺度上,总体上极端降水事件的频次在区域整体上呈现出一定的上升趋势,极端降水量和强度呈现出上升和增强的趋势,连续干旱的日数在减少,但在区域内部出现分异,小部分区域的

极端降水指数表现出下降趋势。

作为受全球气候变化影响最为显著且海拔高差最大的区域之一,青藏高原独特的自然地理环境原本就有利于各类自然灾害的发生,因此常常会形成灾害链从而引发级联效应,对区域内的原住民以及日益增加的短居人口的生命健康和区域内的基础设施建设造成了极为严重的负面影响^[28]。由于青藏高原整体起伏度差异较大,由短时强降水引发的洪水汇流迅速,常以山洪的形式对区域内的人、牲畜、农田以及其他基础设施造成危害^[29]。从第二次青藏科考发布的一系列研究成果可以看出,原本平衡的“固液结构”正在打破平衡,青藏高原在逐渐“液化”,这势必会使青藏高原遭受洪涝灾害的风险加剧,因此对青藏高原地区极端降水事件的深入研究很有必要。通过极端降水指数的测算来了解其变化规律及时空分布特征,以期为后续青藏高原地区的气候变化预测及其他领域内的灾害风险研究提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 数据来源

占中国陆地总面积26.80%的青藏高原,总面积约为 $2.57 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。位于 $26^\circ 00' 12'' \sim 39^\circ 46' 50'' \text{ N}$,南北向纵贯北半球13个纬度,幅宽1532 km; $73^\circ 18' 52'' \sim 104^\circ 46' 59'' \text{ E}$,东西向跨越了东半球31个经度,幅长2945 km^[30]。

1961—2017年青藏高原78个气象站点的长序列降水日值数据由中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供。研究所采用的站点的确定,是基于单个站点降水日值数据的长时序性、数据的连续性、建站以来历史上并未迁站和同一长时间序列内站点数量最多的原则筛选出的,筛选结果见图1。降水日值数据是从1961年初起至2017年末,对所有站点的数据进行了异常值校正,并进行了极值与一致性检验,所有站点均通过检验。洪涝灾害的频次数据从专著资料中统计得来^[31-37]。

1.2 研究方法

1.2.1 降水倾向率法

站点降水量的倾向率(X)一般采用一元线性方程来表示,其公式如下:

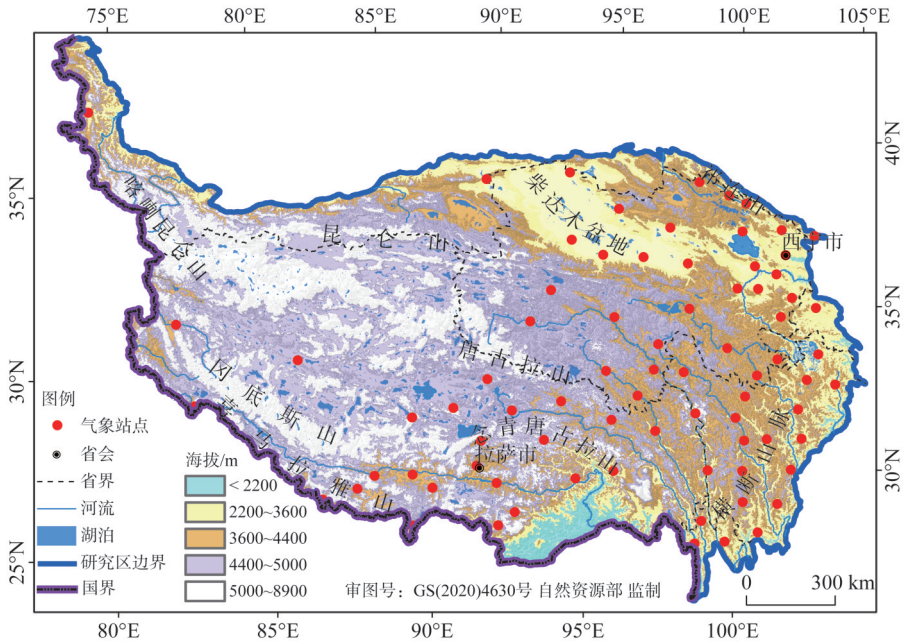
$$X = a_0 + a_1 t \quad (1)$$

式中: a_0 为常数项; a_1 为斜率,即线性趋势项; t 表示年份的序号。一般将 a_1 的值放大10倍来表示降水的倾向率^[38]。

1.2.2 百分位阈值法

由于中国降水量分布的空间异质性明显,针对三大气候分区中东部季风区降水集中而青藏高寒区和西北干旱区降水相对稀少的特点,将诸如达到大雨或暴雨的降水量等特定阈值作为区域极端降水事件的阈值来定义极端降水事件,会造成数据的过度收容或者遗漏、缺失,且不同区域的极端降水阈值之间不具有可比性,无法进行相互参考或对比。此方法首先由翟盘茂等^[39,40]提出,并运用于极端降水阈值的厘定中。先将站点降水日值数据剔除空值后升序排列,之后取累计百分比达到95%或99%的值作为该站点的极端降水阈值。百分位阈值法的提出避免了以往阈值的选取上“一刀切”的做法,同时让不同区域的阈值之间有了参照性。

在测算青藏高原极端降水阈值之前,要确定极端降水阈值采用的百分位数,将降水



注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

累计百分比达到95%的对应的阈值下极端降水频次 (R95D) 与降水累计百分比达到99%的对应的阈值下极端降水频次 (R99D) 作对比, 结果见图2。

对比结果发现相比第95个百分位数, 采用第99个百分位数的多年平均值作为青藏高原各站点的极端降水事件阈值更为可靠, 因此本文采用后者作为该站点的极端降水阈值。在选定百分位数后, 选择R99P、R99D、R99I及R99C4个指数来分析青藏高原极端降水事件的空间异质性, 如表1所示。

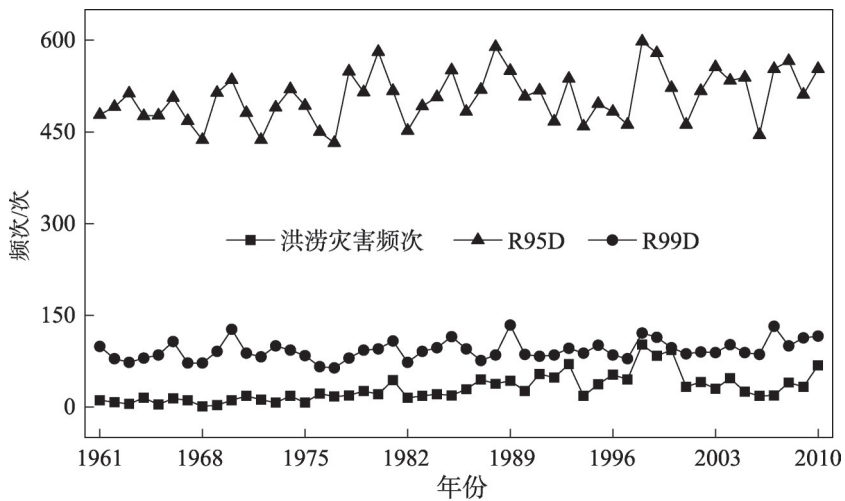


图2 R95D和R99D与洪涝灾害频次的比较

Fig. 2 Comparison of R95D and R99D with flood disaster frequency

表1 极端降水指数及其缩写和定义

Table 1 Extreme precipitation index and its abbreviation and definition

指数	缩写	定义	单位
极端降水量	R99P	全年日降水量大于第99个百分位值的降水总和	mm
极端降水频次	R99D	全年日降水量大于第99个百分位值的频次的总和	d
极端降水强度	R99I	站点R99P与R99D的比值	mm/d
极端降水贡献率	R99C	R99P占全年降水总量的百分比	%

2 结果分析

2.1 青藏高原降水的特征分析

2.1.1 降水的时间特征分析

由图3a可以看出, 1961—2017年青藏高原多年平均降水量为472.36 mm, 在这57年中, 有57.65%的年份降水量低于均值, 有40.35%的年份降水量高于均值。其中1972年的平均降水量仅为414.06 mm, 在历年中最低; 1998年的平均降水量534.52 mm, 为历年最高值。年降水量表现出上升的趋势, 上升速率为8.06 mm/10 a。

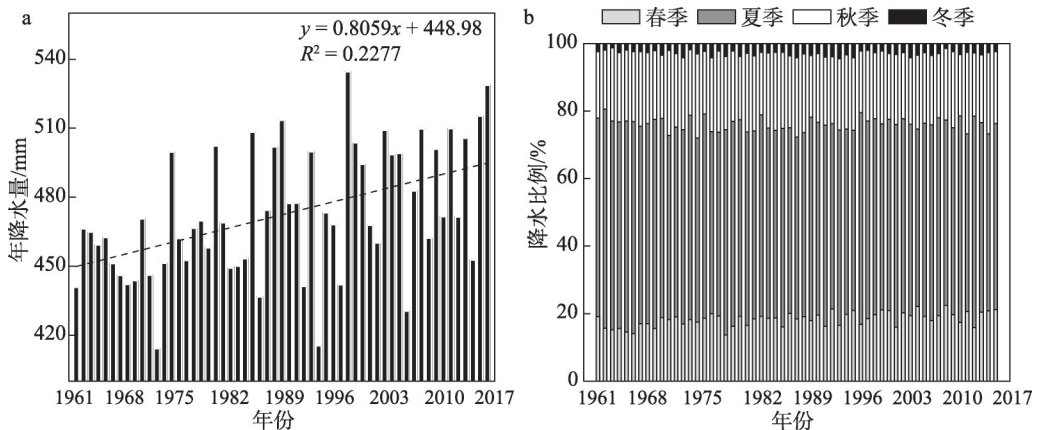


图3 青藏高原年降水量及各季节的降水比例变化

Fig. 3 The annual precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau and the change in the proportion of precipitation in each season

1961—2017年青藏高原年降水量在季节上的分配情况如图3b所示, 夏季降水量占年降水量的一半以上, 占比为57.69%; 冬季降水量占比最低, 仅为2.93%; 春、秋两季的占比接近, 相比来看春季略低于秋季, 占比分别为18.38%和21.00%。四个季节各自的降水倾向率均表现出上升的趋势, 冬季的降水虽然呈现出上升的趋势, 但速率微弱, 仅为0.62 mm/10 a; 夏、秋两季的降水分别以1.32 mm/10 a和1.48 mm/10 a的速率上升, 春季降水的增加得最快, 以4.61 mm/10 a的速率在增加。从降水的月际分布来看, 7月的降水量最高, 占比为21.23%, 其次为8月和6月, 占比分别为19.03%和17.62%。

2.1.2 降水的空间分布特征

高原年降水量的分布如图4a所示。在青藏高原78个站点中, 有5个站点的年降水量超过800 mm, 集中分布在高原东南部纬度较低的横断山区附近, 其中贡山站的年降水量达到了1718.9 mm, 在所有站点中最高; 降水量在400 mm以上到800 mm以下的站点主

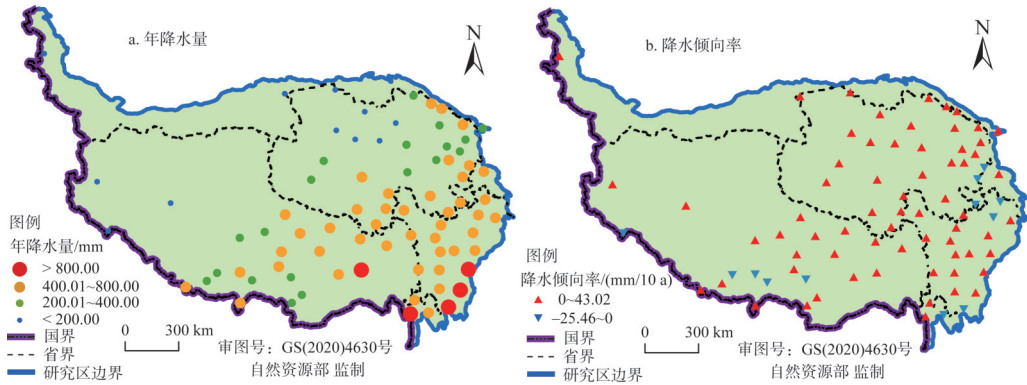


图4 青藏高原各站点的年降水量及降水倾向率

Fig. 4 Annual precipitation and precipitation tendency rate at each station on the Qinghai-Tibet Plateau

要分布在高原的正东、正南和东南部，共计45个；降水量再由东南向西北降低一个梯度，即降水量在200 mm以上到400 mm以下时，共有17个站点；最后的11个站点分布在高原西部的羌塘高原区和北部的柴达木盆地区，降水量均小于200 mm。其中冷湖站的年降水量最少，仅为16.8 mm。可以明显看出，青藏高原的降水表现出明显的空间异质性，降水量由东南向西北逐渐递减。

青藏高原78个站点年降水量的年际倾向率根据式(1)计算得来，结果如图4b所示。从图上可以看出，各站点降水倾向率的范围在-25.46~43.02 mm/10 a之间，降水量减少最快的站点是普兰，年降水量以25.46 mm/10 a的速率在下降，其次是拉孜，下降速率为22.54 mm/10 a；降水增加最快的站点为波密，年降水量以43.02 mm/10 a的速率在上升，其次是聂拉木和康定，增速分别为35.83 mm/10 a和32.01 mm/10 a。78个站点中，仅有15.38%的站点的降水在下降，较为集中地分布在高原的东部和南部，其余84.62%的站点降水量均在上升。由此可以看出，高原面上大部分地区的降水都在增加。

2.2 青藏高原极端降水事件的阈值

根据百分位阈值法的计算过程，首先将78个站点1961—2017年逐年的非零降水日值数据升序排列，之后取其累计百分比达到99%的降水值定义为各年的阈值，再取所有年份阈值的平均值，作为该站点极端降水事件的阈值，结果如图5所示。

青藏高原78个站点极端降水阈值的范围在7.84~51.90 mm之间，均值为23.11 mm。其空间分布特征与降水量的空间分布特征类似，也表现出由东南向西北减少的趋势。极端降水阈值最高的站点为贡山，阈值达到51.90 mm，是高原上唯一一个阈值超过50 mm的站点，其次是木里，阈值为38.34 mm；阈值最低的站点集中在柴达木盆地和昆仑山北部地区，小灶火的阈值最低，仅为7.84 mm。以此阈值为标准，日降水量超过此阈值即为发生极端降水事件，之后根据统计结果，分析极端降水指数的时空分布特征。

2.3 青藏高原极端降水的时空分布特征

2.3.1 极端降水指数的时间变化

由图6可知，各站点极端降水量的年均值为37.59 mm，1976年年均值最低，仅为26.32 mm；1989年年均值为最大值53.04 mm；各站点年均极端降水日数为1.22 d，1977年最少，仅有0.82 d；1989年的极端降水日数最多，达到了1.55 d；各站点的年均极端降水强度达到了30.79 mm/d，其中1968年的极端降水强度为历年最高，达到了33.61 mm/d；

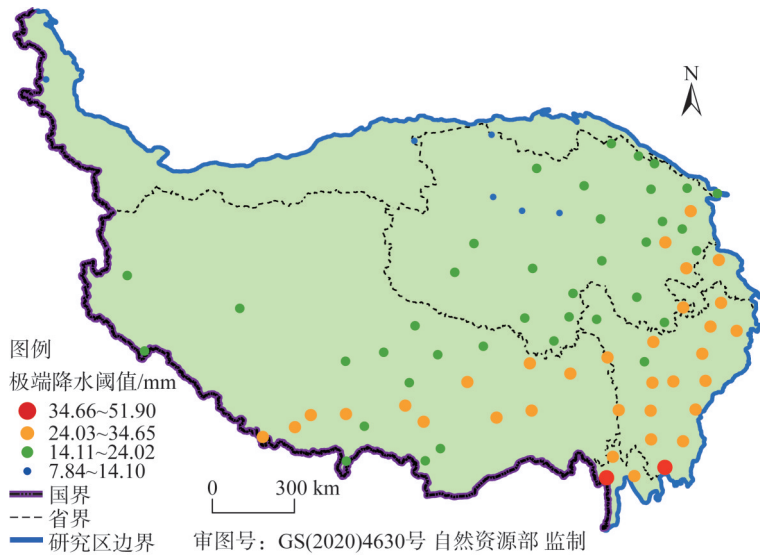


图5 青藏高原各站点极端降水阈值

Fig. 5 The extreme precipitation thresholds of each station on the Qinghai-Tibet Plateau

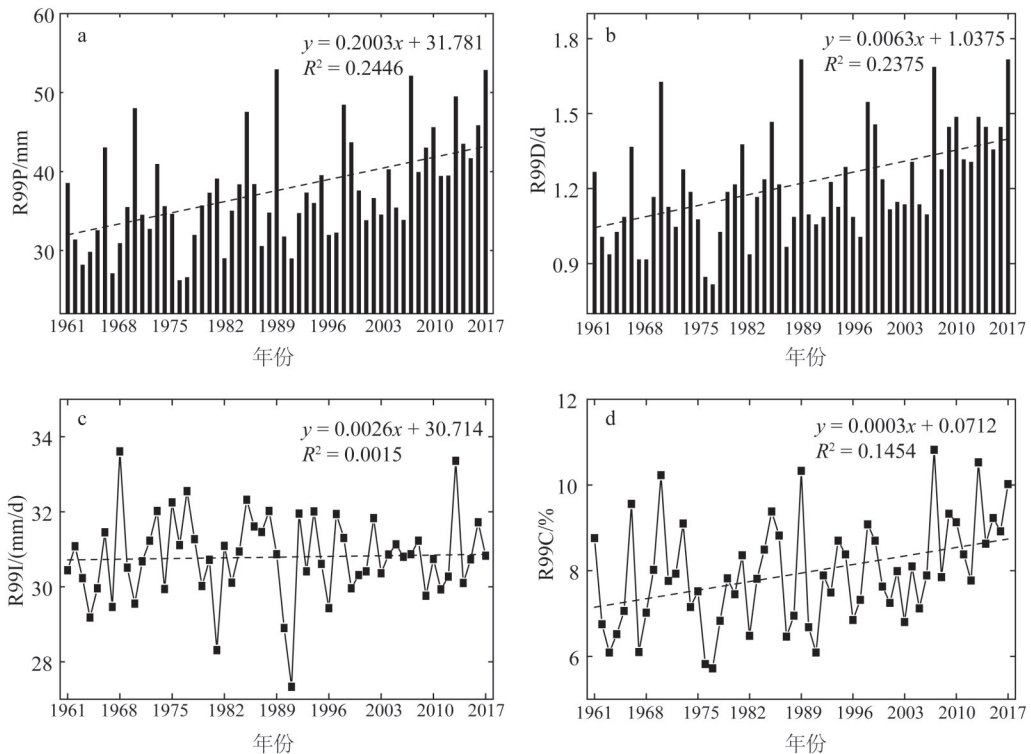


图6 四个极端降水指数的年际变化

Fig. 6 Interannual variation of the four extreme precipitation indexes

而1991年仅为27.33 mm/d；从年均极端降水贡献率来看，均值为7.94%，其中1977年的极端降水贡献率仅为5.72%，为历年最低值；2007年的极端降水贡献率最高，达到了10.28%。

从趋势变化来看, 站点年均极端降水量呈现出上升的趋势, 倾向率为2.00 mm/10 a; 站点年均极端降水日数以0.06 d/10 a的速率在上升; 极端降水强度的上升速率微弱, 仅为0.02 (mm/d)/10 a; 极端降水贡献率的上升速率为0.3%/10 a。

2.3.2 极端降水的空间分布

如图7a所示, 从极端降水量的空间分布来看, 分布与极端降水阈值的空间分布较为接近, 78个站点的年均极端降水量介于2.11~139.44 mm之间。从站点来看, 聂拉木和若尔盖两个站点的降水量虽然不高, 但其极端降水量却表现出较高水平, 贡山与波密两站在表现出高降水量的同时表现出了高极端降水量的特征。

从图7b来看, 78个站点的年均极端降水日数在0.14~2.23 d之间。空间上来看, 柴达木盆地、羌塘高原和昆仑山区的极端降水日数都较少, 而藏南河谷的局部、青南高原的南部、横断山区及若尔盖高原地区的诸多站点极端降水日数都比较多。

由图7c可知, 站点的极端降水强度在9.81~62.59 mm/d之间, 差异明显。极端降水强度的最高值出现在贡山, 达到了62.59 mm/d; 其次是55.24 mm/d的聂拉木。

从图7d来看, 78个站点的极端降水贡献率的在7.34%~14.12%之间。贡献率高的站点集中分布在青藏高原的北部和西南部, 其中聂拉木的极端降水贡献率最高, 达到了14.12%, 柴达木盆地的冷湖和托勒次之, 分别为12.52%和12.33%。由此可以看出, 在柴达木盆地地区, 极端降水的量和频次虽然表现出较低水平, 但极端降水的在降水总量中的占比却表现了较高水平, 表明此区域内降水量虽然较少, 但是一旦产生降水, 则往往是以极端降水的形式产生的。

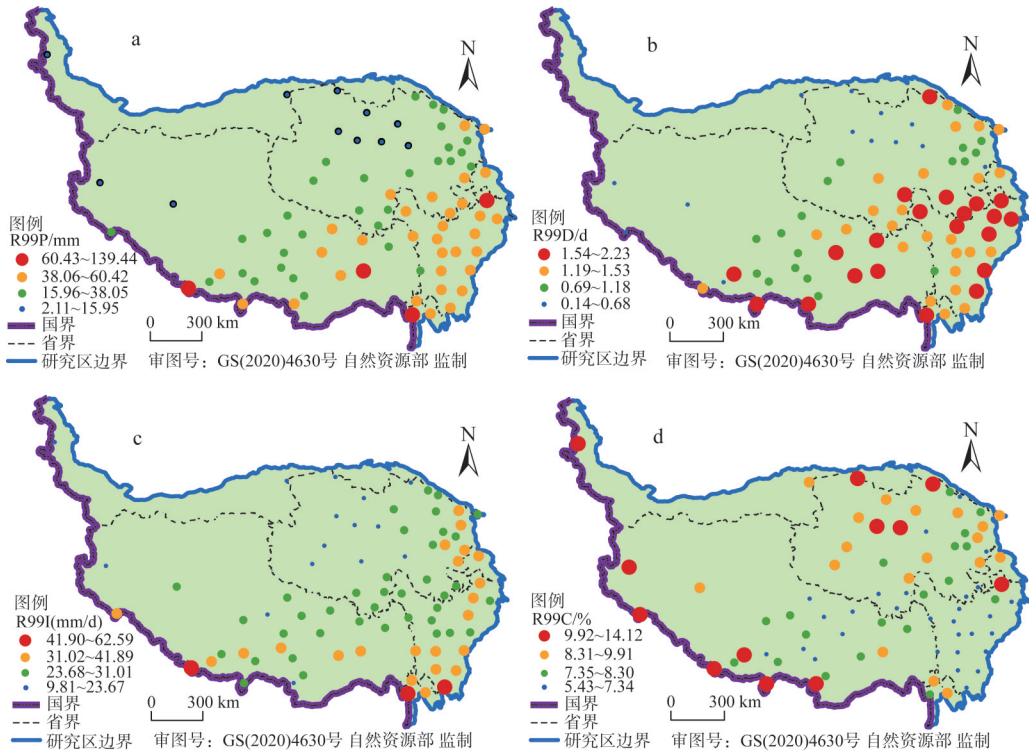


图7 四个极端降水指数的空间分布

Fig. 7 The spatial distribution of the four extreme precipitation indexes

3 结论与讨论

在对区域极端降水特征的刻画中,除采用极端降水指数外,一般采用中国气象局定义的雨量等级来表征区域极端降水特征,即24 h的降水量小于10 mm为小雨;10~25 mm为中雨;25~50 mm为大雨;50 mm以上为暴雨。一般采用某站点大到暴雨的天数来反映站点所在区域的极端降水情况。从不同区域的研究结果来看,雨量等级划分能很好地反映区域降水特征及极端降水特征,尤其是东部降水充沛、站点分布密集以及各站点海拔差异不大的地区。但青藏高原地区相对东部地区降水稀少,区域降水量差异大,站点分布不均且站点间海拔差异明显,若以大到暴雨的天数来反映区域极端降水的特征,则会掩盖大部分区域极端降水的真实变化情况。高原上各个省区对暴雨的界定不同,以青海省和西藏自治区为例,青海省采用的是中国气象局定义的雨量等级,而西藏自治区的地方标准将日降水量大于或等于25 mm统计为一个暴雨日数^[41]。因此在青藏高原地区,雨量等级的划分并不能很好地刻画极端降水特征。百分位阈值法避免了以往阈值的选取上“一刀切”的做法,考虑了降水的空间差异性,同时让不同区域的阈值之间有了参照性。

基于以上分析,得出以下结论:

(1) 1961—2017年青藏高原年降水量表现出上升的趋势,上升速率为8.06 mm/10 a,多年平均降水量达472.36 mm。78个站点的年降水量倾向率最小值为-25.46 mm/10 a,最大值为43.02 mm/10 a,有15.38%的站点降水量在下降,84.62%的站点在上升。

(2) 青藏高原78个站点极端降水阈值的范围在7.84~51.90 mm之间,均值为23.11 mm。其空间分布特征与降水量的空间分布特征类似,也表现出由东南向西北减少的趋势。极端降水阈值最高的站点在横断山区,阈值最低的区域在柴达木盆地和昆仑山北部地区。

(3) 青藏高原各站点的极端降水量、极端降水日数和极端降水贡献率均表现出了明显的上升趋势,极端降水强度虽然也在上升但趋势并不明显,表明青藏高原极端降水量的上升并非是极端降水的强度引起的,而是由极端降水频次的上升引起的。柴达木盆地的极端降水量和极端降水日数虽然没有表现出高值水平,但该地区的极端降水贡献率却表现了较高水平,表明该区域虽然降水量较少,但是产生的降水往往是以极端降水的形式出现的。

青藏高原的极端降水量随着时间变化呈现出增加的趋势,是由于频次的增加使得极端降水总量提升,但降水强度并未发生明显变化。与此同时极端降水贡献率也在提升,这就表明按目前的气候变化趋势,未来因极端降水事件影响而产生的灾害风险将在青藏高原地区持续增大^[42]。仅从数据表面来看,柴达木盆地降水虽然稀少,但极端降水贡献率高,这表明该地区产生的一般降水比其他地区更接近极端水平,故而虽然长期干旱但该地区仍然时有洪涝灾害发生,但对更深层次的降水机制及其与洪涝灾害之间的关系,需进一步的探讨与分析。

参考文献(References):

- [1] 方建, 杜鹃, 徐伟, 等. 气候变化对洪水灾害影响研究进展. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1085-1093. [FANG J, DU J, XU W, et al. Research progress on the impact of climate change on flood disasters. Progress in Geography, 2014, 29(9): 1085-1093.]
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. <http://www.ipcc.ch>.
- [3] 史培军, 应卓蓉. 中国气象灾害对宏观经济增长的影响分析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(6): 747-753.

- [SHI P J, YING Z R. Impact of meteorological disasters on macroeconomic growth in China. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2016, 52(6): 747-753.]
- [4] 联合国教科文组织. 国际水文计划第七阶段规划. 2007. [United Nations Education Scientific and Cultural Organization. Phase VII Planning of the International Hydrological Plan. 2007.]
- [5] 联合国教科文组织. 国际水文计划第八阶段规划. 2013. [United Nations Education Scientific and Cultural Organization. Phase VIII Planning of the International Hydrological Plan. 2013.]
- [6] 史培军, 孔锋. 1951—2010年中国年代际累积暴雨时空格局变化的相关因素研究. *地理科学*, 2016, 36(10): 1457-1465. [SHI P J, KONG F. Study on the correlation factors of the spatial temporal pattern of the decadal accumulative rainstorm in China in the past 1951-2010 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10): 1457-1465.]
- [7] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报 2011. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China Flood and Drought Disaster Bulletin 2011*. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2012.]
- [8] FRICH P, ALEXANDER L, DELLA-MARTA P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 2002, 19(3): 193-212.
- [9] WESTRA S, ALEXANDER L V, ZWIERS F W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of Climate*, 2013, 26(11): 3904-3918.
- [10] AGUILAR E, PETERSON T, OBANDO P R, et al. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and Northern South America, 1961-2003. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2005, 110(D23), DOI: 10.1029/2005JD006119.
- [11] VANDEN BESSELAAR E J M V D, TANK A M G K, BUISSHAND T A. Trends in European precipitation extremes over 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 2012, 33(12): 2682-2689.
- [12] NASTOS P, ZEREFOS C. Decadal changes in extreme daily precipitation in Greece. *Advances in Geosciences*, 2008, 16(16): 55-62.
- [13] KEGGENHOFF I, ELIZBARASHVILI M, AMIRI-FARAHANI A, et al. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971-2010. *Weather and Climate Extremes*, 2014, 5(4): 75-85.
- [14] MIYAJIMA J, FUJIBE F. Climatology of extreme precipitation in Japan for different time scales. *SOLA*, 2011, 7(1): 157-160.
- [15] 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. *气候与环境研究*, 2008, 13(1): 75-83. [YANG J H, JIANG Z H, WANG P X, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of annual extreme precipitation events in China. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13(1): 75-83.]
- [16] 武文博, 游庆龙, 王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 1015-1026. [WU W B, YOU Q L, WANG D. Characteristics of extreme precipitation in China based on homogenized precipitation data. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 1015-1026.]
- [17] 景丞, 陶辉, 王艳君, 等. 基于区域气候模式CCLM的中国极端降水事件预估. *自然资源学报*, 2017, 32(2): 266-277. [JING C, TAO H, WANG Y J, et al. Prediction of extreme precipitation events in China based on regional climate model CCLM. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(2): 266-277.]
- [18] 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 7个IPCC AR4模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估. *大气科学*, 2009, 33(1): 109-120. [JIANG Z H, CHEN W L, SONG J, et al. Evaluation of 7 IPCC AR4 models for simulating the extreme precipitation index in China and its future scenario prediction. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(1): 109-120.]
- [19] 宁亮, 钱永甫. 中国年和季各等级日降水量的变化趋势分析. *高原气象*, 2008, 27(5): 1010-1020. [NING L, QIAN Y F. Analysis on the variation trend of daily precipitation at different grades of annual and seasonal in China. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(5): 1010-1020.]
- [20] 袁文德, 郑江坤. 1962—2012年西南地区极端温度事件时空变化特征. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1246-1254. [YUAN W D, ZHENG J K. Spatial and temporal characteristics of extreme temperature events in Southwest China from 1962 to 2012. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(7): 1246-1254.]
- [21] 任朝霞, 杨达源. 近40年西北干旱区极端气候变化趋势研究. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(4): 10-13. [REN Z X, YANG D Y. Study on extreme climate change trend in arid areas of Northwest China in recent 40 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(4): 10-13.]

- [22] 任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961—2011年中国南方地区极端降水事件变化(英文). *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(1): 58-68. [REN Z G, ZHANG M J, WANG S J, et al. Changes in extreme precipitation events in Southern China from 1961 to 2011. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(1): 58-68.]
- [23] 赵安周, 朱秀芳, 潘耀忠. 1965—2013年黄土高原地区极端降水事件时空变化特征. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(1): 43-50. [ZHAO A Z, ZHU X F, PAN Y Z. Spatial and temporal characteristics of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1965 to 2013. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2017, 53(1): 43-50.]
- [24] 游庆龙, 康世昌, 闫宇平, 等. 近45年雅鲁藏布江流域极端气候事件趋势分析. *地理学报*, 2009, 64(5): 592-600. [YOU Q L, KANG S C, YAN Y P, et al. Trend analysis of extreme climate events in the Yarlung Zangbo River Basin in recent 45 years. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 592-600.]
- [25] 杜军, 路红亚, 建军. 1961—2012年西藏极端降水事件的变化. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 990-1002. [DU J, LU H Y, JIAN J. Changes of extreme precipitation events in Tibet from 1961 to 2012. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(6): 990-1002.]
- [26] 赵雪雁, 王亚茹, 张钦, 等. 近50 a青藏高原东部夏半年强降水事件的气候特征. *干旱区地理*, 2015, 38(4):675-683. [ZHAO X Y, WANG Y R, ZHANG Q, et al. Climatic characteristics of heavy rainfall events in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau in summer half year in recent 50 years. *Arid Region Geography*, 2015, 38(4): 675-683.]
- [27] 曹瑜, 游庆龙, 马茜蓉. 青藏高原中东部夏季极端降水年代际变化特征. *气象科学*, 2019, 39(4): 437-445. [CAO Y, YOU Q L, MA Q R. Interdecadal variation characteristics of summer extreme precipitation over the Middle and Eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2019, 39(4): 437-445.]
- [28] 崔鹏, 苏凤环, 邹强, 等. 青藏高原山地灾害和气象灾害风险评估与减灾对策. *科学通报*, 2015, 60(32): 3067-3077. [CUI P, SU F H, ZOU Q, et al. Risk assessment of mountain disasters and meteorological disasters on the Qinghai-Tibet Plateau and Disaster Mitigation Measures. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3067-3077.]
- [29] 高懋芳, 邱建军. 青藏高原主要自然灾害特点及分布规律研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(8): 101-106. [GAO M F, QIU J J. Study on characteristics and distribution law of major natural disasters in Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(8): 101-106.]
- [30] 张懿铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, 21(1): 1-8. [ZHANG Y L, LI B Y, ZHENG D. On the scope and area of Qinghai-Tibet Plateau. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-8.]
- [31] 王莘, 温克刚. 中国气象灾害大典(青海卷). 北京: 气象出版社, 2007: 32-121. [WANG Z, WEN K G. *China Meteorological Disaster Code (Qinghai)*. Beijing: Meteorological Publishing House, 2007: 32-121.]
- [32] 刘光轩, 温克刚. 中国气象灾害大典(西藏卷). 北京: 气象出版社, 2008: 108-150. [LIU G X, WEN K G. *China Meteorological Disaster Code (Tibet)*. Beijing: Meteorological Publishing House, 2008: 108-150.]
- [33] 史玉光, 温克刚. 中国气象灾害大典(新疆卷). 北京: 气象出版社, 2006: 88-124. [SHI Y G, WEN K G. *China Meteorological Disaster Code (Xinjiang)*. Beijing: Meteorological Publishing House, 2006: 88-124.]
- [34] 董安祥, 温克刚. 中国气象灾害大典(甘肃卷). 北京: 气象出版社, 2005: 220-234. [DONG A X, WEN K G. *China Meteorological Disaster Code (Gansu)*. Beijing: Meteorological Publishing House, 2005: 220-234.]
- [35] 詹兆渝, 温克刚. 中国气象灾害大典(四川卷). 北京: 气象出版社, 2006: 64-207. [ZHAN Z Y, WEN K G. *China Meteorological Disaster Code (Sichuan)*. Beijing: Meteorological Publishing House, 2006: 64-207.]
- [36] 刘建华, 温克刚. 中国气象灾害大典(云南卷). 北京: 气象出版社, 2006: 172-316. [LIU J H, WEN K G. *China Meteorological Disaster Code (Yunnan)*. Beijing: Meteorological Publishing House, 2006: 172-316.]
- [37] 《青海自然灾害》编委会. 青海自然灾害. 青海: 青海人民出版社, 2003: 26-29. [Editorial Board of Qinghai Natural Disasters. *Qinghai Natural Disasters*. Qinghai: Qinghai People's Publishing House, 2003: 26-29.]
- [38] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 37-39. [WEI F Y. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques*. Beijing: Meteorological Publishing House, 2007: 37-39.]
- [39] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近50年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, 58(s1): 1-10. [ZHAI P M, PAN X H. Extreme events of temperature and precipitation in Northern China over the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(s1): 1-10.]
- [40] 翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 144-148. [ZHAI P M, WANG C C, LI W. Observation of changes in extreme precipitation events. *Climate Change Research*, 2007, 3(3): 144-148.]
- [41] 杨志刚, 杜军, 刘玲, 等. 西藏自治区(1961—2008年)气象灾害气候图集. 北京: 气象出版社, 2011: 1-2. [YANG Z G, DU J, LIU L, et al. *Climatic Atlas of Meteorological Disasters in Tibet Autonomous Region (1961-2008)*. Beijing: China

Meteorological Press, 2011: 1-2.]

[42] 马伟东. 青藏高原极端降水特征及洪涝灾害临界雨量估算. 西宁: 青海师范大学, 2019. [MA W D. Characteristics of extreme precipitation in Qinghai-Tibet Plateau and estimation of critical rainfall for flood disasters. Xining: Qinghai Normal University, 2019.]

Characteristics of extreme precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017

MA Wei-dong¹, LIU Feng-gui^{1,2}, ZHOU Qiang¹, CHEN Qiong¹, LIU Fei¹, CHEN Yong-ping¹

(1. School of Geographic Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

2. Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008, China)

Abstract: Using the daily precipitation data of the long-term series of meteorological stations on the Qinghai-Tibet Plateau, the percentile threshold method is used to determine the extreme precipitation threshold, calculate the extreme precipitation index and analyze its spatial and temporal distribution characteristics, in order to provide reference for regional climate change prediction and disaster prevention and mitigation countermeasures. The results show that: (1) From 1961 to 2017, the annual precipitation of Qinghai-Tibet Plateau showed an upward trend, with a rate of 8.06 mm/10 a, and the average annual precipitation reached 472.36 mm. The minimum precipitation tendency rate of 78 stations is -25.46 mm/10 a, and the maximum value is 43.02 mm/10 a. The precipitation of 15.38% of the stations is decreasing, which is mainly distributed in the east and south of the plateau, and the precipitation of the remaining 84.62% of the stations is increasing. (2) The average threshold value of extreme precipitation in the Qinghai-Tibet Plateau is 23.11 mm, with error values ranging from 7.84 mm to 51.90 mm. The high value centers are located in Gongshan and Muli of Hengduan Mountains, while the low value centers are located in the northern flank of Qaidam Basin and Kunlun Mountains. (3) The extreme precipitation, the number of days of extreme precipitation and the contribution rate of extreme precipitation at all the stations in the Qinghai-Tibet Plateau show an obvious upward trend. Although the intensity of extreme precipitation is also rising, the trend is not obvious, which shows that the increase of extreme precipitation in the plateau is not caused by the intensity of extreme precipitation, but by the increase of the frequency of extreme precipitation. Although the extreme precipitation and days of extreme precipitation in the Qaidam Basin do not show a high value level, the contribution rate of extreme precipitation is larger, which suggests that although there is less precipitation, extreme precipitation events frequently occur in this area.

Keywords: Qinghai-Tibet Plateau; climate change; extreme precipitation; threshold