

# 近 58 年河西地区降水事件的连续性特征

折远洋<sup>1</sup>, 杨波<sup>2</sup>, 尚清芳<sup>1</sup>, 王凤鹏<sup>1</sup>, 苏玲<sup>1</sup>

(1. 陇南师范高等专科学校 历史文化与旅游学院, 甘肃 成县 742500; 2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 利用河西地区经过严格质量控制的 13 个站点 1958—2015 年的日降水资料, 从年度和季节尺度, 定义分析了最大连续降水事件的日数、降水量和降水强度的 9 个指标, 应用标准化序列法描述指标随时间的演变情况, 使用 Mann-Kendall 趋势分析法在 95% 置信水平下进行了趋势的显著性检验, 以研究该地区最大连续降水事件的时空变化特征。结果表明: (1) 河西地区最大连续降水日数发生以 1~2 d 为主, 近年来, 夏季日数增长, 秋季日数减短, 但整体来看, 年、夏和秋季最大连续降水日数均有增长, 但中西部更加明显。(2) 最大连续降水量在夏季略有下降, 秋季增多明显, 且河西中西部地区夏秋分化更明显, 东南部地区以下降为主。(3) 年、夏和秋季 4~6 d 的最大连续降水强度最大, 降水强度随着最大连续降水日数的增加略有上升。总体上近年来河西地区最大连续降水日数增加, 降水强度上升, 表明河西地区具有湿润化趋势, 而秋季湿润趋势更明显。研究结果有助于进一步了解西北干旱区的极端降水变化特征和区域气候变化应对情况。

**关键词:** 极端降水; 最大连续降水事件; 河西地区; 时空变化特征

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)03-0139-07

## Characteristics of Continuity of Precipitation Events in Recent 58 Years in Hexi Area

SHE Yuanyang<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2</sup>, SHANG Qingfang<sup>1</sup>, WANG Fengpeng<sup>1</sup>, SU Ling<sup>1</sup>

(1. School of History Culture and Tourism, Longnan Teachers College, Chengxian, Gansu 742500, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on the daily precipitation data which quality was control from 13 rain stations in Hexi Area during 1958—2015, nine precipitation extreme indices relative to days of consecutive wet events, precipitation and precipitation intensity were defined, the spatial and temporal possibility variations of maximum consecutive wet days in the whole year, summer and fall seasons were studied, the maximum consecutive wet events' spatial and temporal variability of the study area was examined by using the Mann-Kendall method for trend analysis and at the 95% confidence level for trend significance test. The results show that: (1) one or two days consecutive wet days occurred most frequently in Hexi Area; the days of maximum consecutive wet days increased in summer and reduced in fall in recent years, but all increased in whole years; (2) the precipitation of consecutive wet days had reduced in summer and more significantly increased in fall, the differentiation of wet days between summer and autumn was obviously in midwest of Hexi area, the reduction of precipitation of consecutive wet days mainly occurred in the southeast; (3) the maximum precipitation intensities mostly occurred in the events of onsecutive precipitation with the duration of four to six day, and the precipitation intensities increased with the increase of the number of days of maximum consecutive wet days. In all, the number of days of maximum consecutive wet days increased while precipitation intensities increased too in Hexi Area in recent years, showing the wet tendency and more obvious wet tendency in fall. These results of this study are helpful to further understand the characteristics of extreme precipitation change and regional climate change response in the northwest arid region.

**Keywords:** extreme precipitation; maximum consecutive wet days; Hexi Area; spatial and temporal variations

工业革命以来,全球  $\text{CO}_2$  浓度迅速升高,全球气候发生显著变化,极端气候事件的发生频率与强度明显增多增强,是其中对人类影响最大的变化之一<sup>[1]</sup>。在过去的几十年里,欧洲以地中海沿岸地区为主,干旱事件的频率、持续时间和强度方面都在上升,主要与不断升高的气温和持续的降水减少有关<sup>[2-5]</sup>。然而在世界其他一些地区,强降水事件发生频率也在增加。此外,A1B 和 B1 情景模拟显示,位于欧洲西南部的葡萄牙地区,极端降水量占年总降水的比例也在进一步增加,特别是在冬春季节<sup>[6]</sup>。排放情景特别报告(SRES)预测显示,21 世纪的极端降水事件发生频率很可能呈增加趋势<sup>[1]</sup>。因而,极端降水结合气温升高,将使得这些地区遭受更大的潜在自然灾害威胁。

极端气候事件目前已经成为世界范围内对人类社会造成损失最大灾害之一,广泛引起了学者的高度关注<sup>[1,7-8]</sup>。我国是一个气候类型多样的国家,气候变化将对不同地区产生不同的影响。而经济发展和基础设施的区域差异,使得不同区域的灾害应对能力也不同。目前研究表明,我国大部分区域,极端降水事件次数呈显著增加趋势<sup>[9]</sup>。降水量随气温的上升而增多,尤其是在 20 世纪的最后 30 年,西北地区气候明显由暖干型转变为暖湿型气候<sup>[10-11]</sup>。但是上述现象的稳定性较低,同时在干旱半干旱地区,也出现一些降水量下降的地区<sup>[12-13]</sup>。西北干旱地区,多属于经济欠发展地区,长期在较低降水气候适应下的应对方式,可能会受到因气候变化而引起的新的挑战。因而,分析干旱地区极端降水变化趋势,有助于提高精准制定应对规划,提高社会资源利用效率。

极端降水事件研究方法多以降水百分率、降水阈值等为主<sup>[14-16]</sup>。很多研究显示,最大连续降水特征是极端降水更为重要的统计指标,其对区域洪涝灾害的形成具有更大的影响。最大连续降水统计来反映区域极端降水的方法,已经成功应用于世界不同地区的极端降水分析和预测。在欧洲地区研究显示,连续降水日数有变长的趋势,同时对应的降水强度也在增加<sup>[17-18]</sup>。国内研究显示,新疆地区日数短连续降水天数事件频率减少,而降水日数长的连续降水时间在增加<sup>[19]</sup>。

河西地区是我国“一带一路”丝绸之路经济带的陆上重要通道,内陆地区连接新疆地区、西亚和东欧地区的重要廊道,也是祁连山生态环境保护区的重要辐射区域,同时是我国西北地区重要的经济文化核心区域,研究其极端降水事件的变化特征,对该区域和国家经济社会健康运行具有重要的意义。资料研究

表明,在 1955—2011 年期间,该地区年降水量呈显著增加趋势,降水增率为  $3.95 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ,但各个流域增加趋势并不一致<sup>[20-21]</sup>。因此,河西地区极端降水事件发生的不确定性可能增加,但是针对河西地区极端降水事件从连续性角度研究的报道相对不足<sup>[22]</sup>。因此本研究以河西地区为研究对象,主要包括以下研究目标:(1) 从不同时间尺度分析河西地区最大连续降水日数的时空变化特征;(2) 最大连续降水日数的累积降水量的空间变化特征;(3) 最大连续降水日数的降水强度时空变化特征。从而实现解河西地区半个世纪的极端降水分布和变化特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河西地区位于甘肃西北部,包括乌鞘岭以西,甘新交界以东地区,长约  $1\,000 \text{ km}$ ,总面积  $27.53 \text{ 万 km}^2$ 。地理位置上位于我国西北干旱荒漠区东部和青藏高原北部边缘地区,河西地区地势由西南向东北倾斜,由南往北可以分为祁连山至阿尔金山山地、河西走廊平原、北山山地和阿拉善高原三大地形区。河西地区共有大小河流 57 条,分别属于黑河流域、石羊河流域和疏勒河流域三大内陆水系,气候干旱,属于温带荒漠气候,年降水量仅在  $50 \sim 250 \text{ mm}$ ,年蒸发量却高达  $2\,000 \sim 3\,500 \text{ mm}$ 。其中农业生产主要依赖地表、地下水灌溉,且天然降水对河西地区脆弱的生态系统影响至关重要。

### 1.2 数据与方法

本文采用中国气象局国家气象信息中心提供的逐日降水资料,并对甘肃省的 35 个国家站点进行了详细比较,为保证数据的一致性和完整性,删除存在资料序列长度过短或缺失较多等情况下的站点数据,最终选取了 1958—2015 年河西地区 13 个站点(敦煌、瓜州、马鬃山、玉门镇、酒泉、鼎新、高台、张掖、山丹、永昌、民勤、武威和乌鞘岭)的降水数据(图 1),对个别站点缺失的数据按照线性回归法进行插补;对于  $1 \sim 2 \text{ d}$  缺失的数据,采用相邻天数的平均降水量进行插值;对连续缺失天数较长(连续超过 2 天缺测)的情况,采用其他年份同样时期的平均降水量进行插值。并对数据进行标准正态一致性检验,插值前后计算结果相差不大,不影响研究结果,数据通过严格的质量控制。

本文分析中包括以下降水指标:(1) 年、夏、秋季中最大连续降水天数 AD(Annual maximum Consecutive Wet Days)、SD(maximum Consecutive Wet Days in Summer)、FD(maximum Consecutive Wet

Days in Fall),指降水持续时间最长的日数,其中降水日数是指日降水量  $P \geq 0.1 \text{ mm}$  的日数,并且研究中只考虑降水量最大的那次降水事件。(2)年、夏、秋季中最大连续降水事件的总降水量,AP(Precipitation of Annual maximum Consecutive Wet Days),SP(Precipitation of maximum Consecutive Wet Days in Summer),FP(Precipitation of maximum Consecutive Wet Days in Fall);(3)年、夏、秋季中最大连续降水事件的平均降水强度,AI(Precipitation intensity of Annual maximum Consecutive Wet Days),SI(Precipitation intensity of maximum Consecutive Wet Days in Summer),FI(Precipitation intensity of maximum Consecutive Wet Days in Fall)。

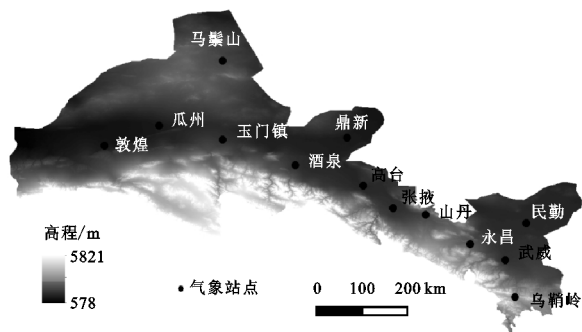


图1 河西地区概况及站点分布

本文使用标准化序列法描述相关指标随时间的演变情况,具体方法是先统计年内最大连续降水日数的不同日数频率分布,统计时考虑河西地区所有站点,以统计出不同历时不同年份的频率,对于其中某一日数,得到的频率随年份变化序列  $X$ ,按照下式求标准化序列  $Z$ :

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\text{Std}(X)} \quad (1)$$

式中: $\bar{X}$  是  $X$  的平均值; $\text{Std}(X)$  是  $X$  的标准差。最后对该序列进行 5 a 滑动平均,得出相关指标随时间的演变情况。然后应用非参数检验方法 Mann-Kendall 法对相关最大连续降水指标进行趋势分析,并在 95% 置信水平下进行趋势的相关显著性检验<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 最大连续降水日数的分布特征

2.1.1 频率分布特征 如图2所示,河西地区各气象站点 58 a 间日降水序列的最大连续降水日数频数分布。AD 频率最大连续降水日数为 1 d,占总降水日数的 73%,AD 为 2 d 的频率为 19%,其余最大连续降水日数占 8%;就 SD 而言,频率最大连续降水日数仍然是 1 d,占 71%,2 d 最大连续降水日数的频率

为 21%,其余最大连续降水日数的频率约为 8%;就 FD 而言,频率最大的连续降水日数为 1 d,占 72%,其次,最大连续降水日数为 2 d,频率为 20%,其他较高日数的频率为 8%。综上所述,河西地区年最大连续降水日数(AD)、夏季最大连续降水日数(SD)和秋季最大连续降水日数(FD)的频率分布特征相似,均以 1 d 为主,2 d 次之,6 d 以上的频率非常低;此外,最大连续 1 d 频率中秋季高于夏季,而较大最大连续降水日数在夏季的发生频率较高。

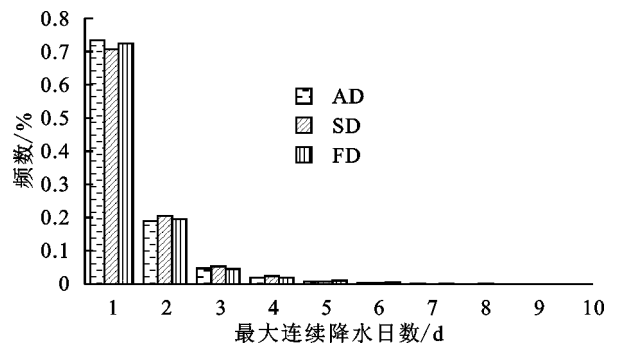


图2 河西地区 AD,SD,FD 频率分布特征

2.1.2 时间变化特征 根据标准化序列法得出河西地区 AD,SD,FD 标准化序列随时间的演变特征(图3)。由图可知,河西地区 1~8 d 的 AD 在 20 世纪 80 年代中期之前发生频率较高,20 世纪 80 年代中期之后各日数 AD 发生频率均减小,其中 5 d 以上日数减小更明显,但从 2010 年开始,1~3 d 的短日数发生频率增大显著。在整个时间序列中,5~10 d 的长日数 SD 发生频率减小明显,1~5 d 的短日数 SD 频率变化不明显,但在 20 世纪 90 年代后期至 21 世纪初出现了一个比较明显的峰值。20 世纪 80 年代初之前,FD 发生日数总体以增加趋势为主,1~3 d 和 5~8 d 的 FD 频率变化最为明显,而在随后 FD 发生所有日数呈减小趋势,出现一个低谷;2000 年之后 4~9 d 的长日数突然增高又出现下降,而 1~3 d 的短日数 FD 在 2006 年之后发生频率明显增大。

2.1.3 空间变化特征 图4为河西地区最大连续降水日数 AD,SD,FD 变化趋势特征。河西地区 AD 上升的站点有 8 个(62%),增加幅度达 0.06~0.18 d/10 a,以中西部站点为主,其中山丹和玉门镇 AD 增加 0.12~0.18 d/10 a,增幅最大,而东南部 3 个站点和北部 2 个站点 AD 呈下降趋势,降幅较小,最大为 0.13 d/10 a;研究区 10 个(77%)站点变化趋势显著,研究区中部和西北部的 AD 增加站点 80% 呈显著性,而 AD 下降趋势均显著。河西地区 SD 上升的站点有 10 个(77%),增加幅度在 0.1~0.14 d/10 a,主要集中在河西地区中西部,仅北部的马鬃山站和东南部的武威和乌鞘岭 3 站 SD 减少,最大降幅达 0.14



d/10 a;从河西地区 SD 变化显著性特征图来看,发生显著变化的站点达 11 个(85%),其中 SD 增加站点中有 8 个(80%)呈显著性,集中在中西部地区,SD 减小的站点变化趋势都显著。FD 变化趋势特征表明,FD 增加以河西地区西北部为主,增幅为 0.11~0.15 d/10 a,FD 减少以河西东南部靠近乌鞘岭地区为主,包括部分中部地区站点,降幅较小,在 0.04~0.08 d/10 a 之间;而 FD 变化显著性,仅河西东南部永昌站的变化趋势不显著,其余 12 个(92%)站点的 FD 变化趋势显著。

## 2.2 最大连续降水日数的累积降水量的变化特征

河西地区最大连续降水的总降水量 AP,SP,FP 变化趋势特征如图 5 所示。在河西地区 AP 增加的站点有 7 个(54%),但增幅较小,在 0.7~0.9 mm/10 a,而 AP 减小的 6 个(46%)站点减幅较大,在 -0.6~-1.7 mm/10 a,位于东部的山丹和西北部的敦煌站 AP 减少趋势显著,且 AP 有显著变化趋势的河西地区区仅此 2 站(15%)。河西地区 SP 减小的站点有 8 个(62%),SP 在 -0.3~-1.5 mm/10 a,主要集中在中北部和东南部站点(北部的马鬃山站 SP 减幅最大,且下降趋势显著),而 SP 增加的站点较少(5 个),SP 增加幅度较大,为 1.4~5.7 mm/10 a,主要在中西部站点(中部山丹站 SP 增幅最大,且增加趋势显著)。FP 增加站点居多(9 个,69%),增幅在 0.2~1.3 mm/10 a,集中于河西中部和西北部,而 FP 在东南部以降低为主(永昌、武威和乌鞘岭站),降幅在 0.1~

2.7 mm/10 a,大于河西地区其他站点的增幅,武威站 FP 下降趋势显著。

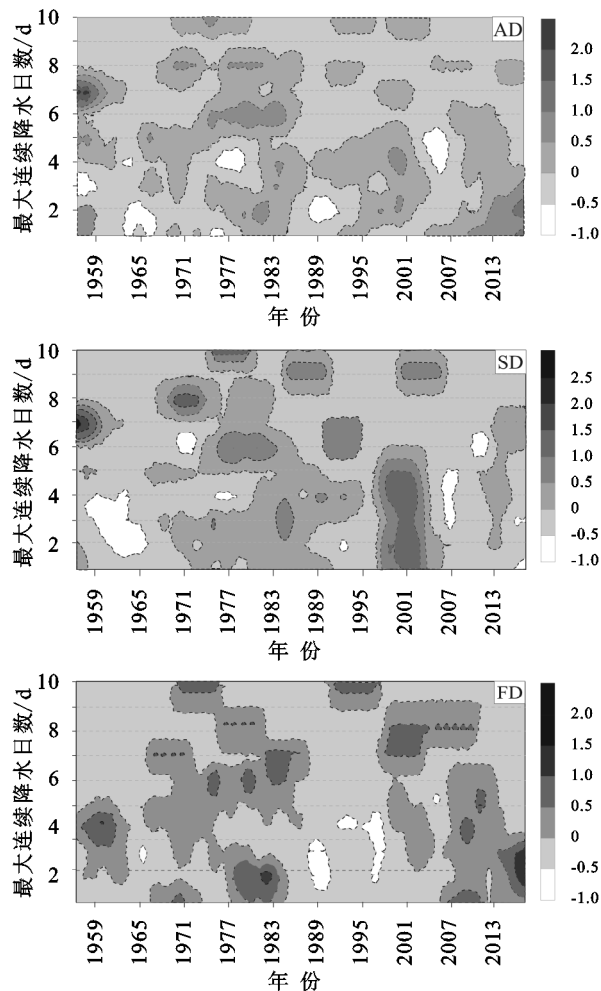


图 3 河西地区 AD,SD,FD 标准化序列随时间的演变特征

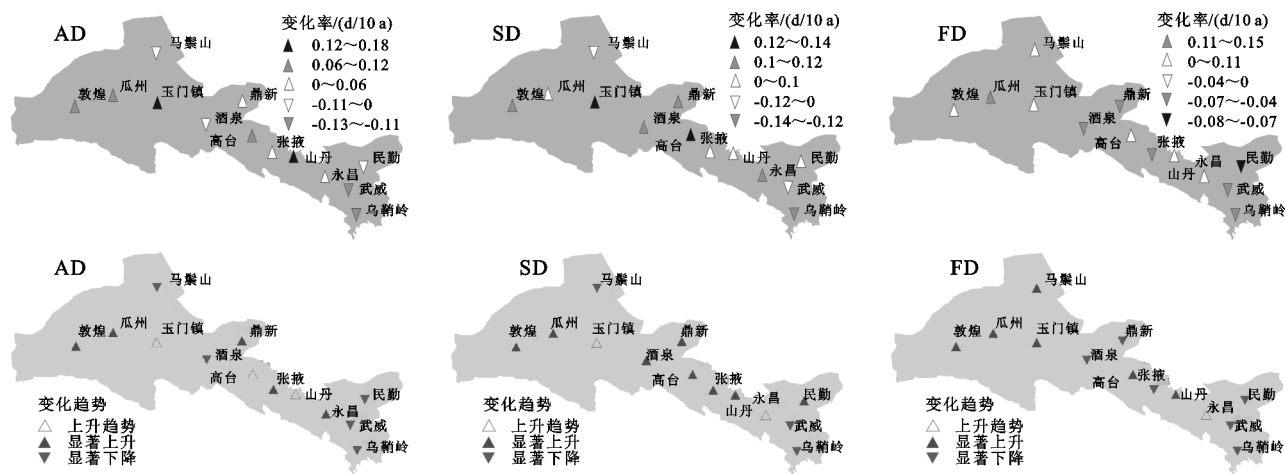


图 4 最大连续降雨日数 AD,SD,FD 的显著性检验结果

2.2.1 频率分布特征 河西地区各站点 58 a 各级最大连续降水日数的平均降水强度分布(图 6)。日数 4~6 d 的 AI 平均降水强度最大,达到 6 mm/d,AI 最低为 1 d 的平均降水强度,为 4 mm/d,其中 1~6 d 的 AI 值随着最大连续降水日数的增加而上升,7~10 d 亦是,但 AI 值仍保持在 4~6 mm/d;而河西地

区的 SI 与 FI 分布和 AI 基本一致,但 SI 值相较 AI 略高,在 4.5~7.5 mm/d,FI 值较低,在 3~6 mm/d。表明河西地区不同最大连续降水日数的平均降水强度相对稳定,和不同最大连续降水日数的发生频率关系不紧密。

2.2.2 时间变化特征 同样根据上文方法标准化

AI,SI,FI 时间序列得出最大连续降水日数随时间发生的演变特征(图 7)。在 20 世纪 60 年代初到 80 年代中期,AI 发生日数总体略有增长趋势,其中 5~9 d 的长日数 AI 增长明显,1~5 d 的短日数 AI 增长缓慢;而在 1985 年之后各 AI 日数呈减少趋势,其中 6 d 以上的长日数 AI 减小明显。SI 在 1965—90 年代末期间发生日数有减小趋势,其中 5~10 d 的长日数 SI

减小明显,1~5 d 的短日数 SI 减小趋势不明显,2000 年之后 2~4 d 的短日数 SI 增加显著。而 FI 演变特征和 AI 类似,略有增长,并在 1985—1990 年左右出现了低谷后又增长(1~4 d 短日数增长明显),表明 20 世纪 80 年代后期之后,河西地区短日数最大连续降水强度有明显增加趋势,而长日数降水强度增长后又略有减小趋势。

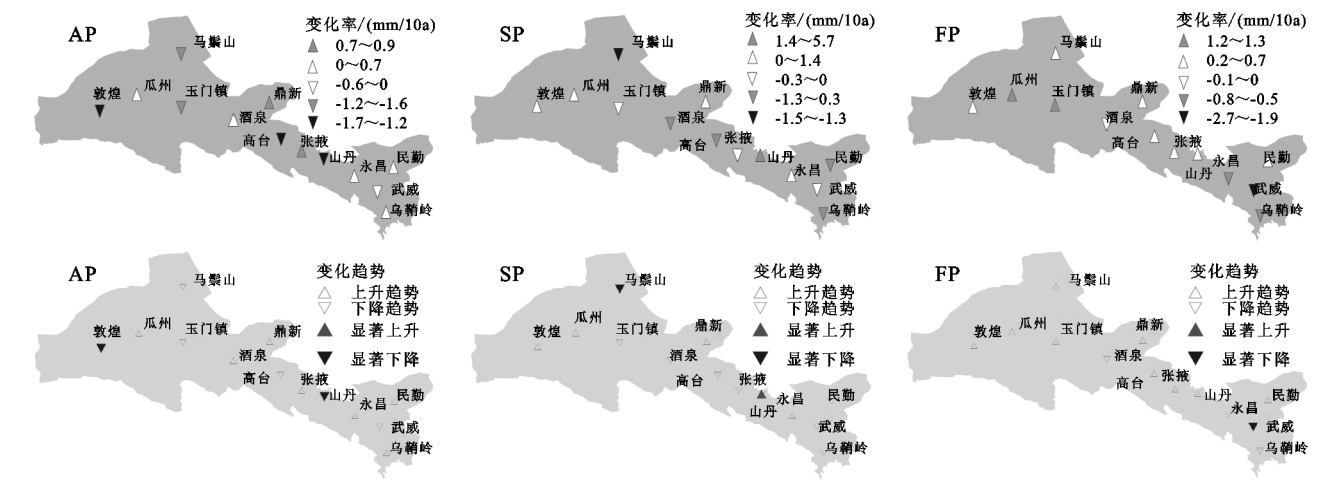


图 5 最大连续降水总量 AP,SP,FP 的显著性检验结果

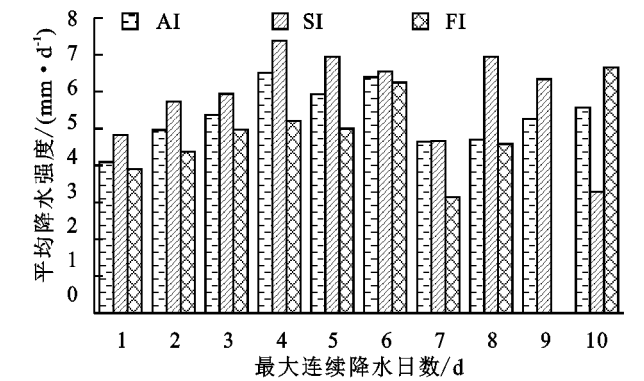


图 6 河西地区 (AI,SI,FI) 不同最大连续降水日数的平均降水强度分布

2.2.3 空间变化特征 河西地区最大连续降水的平均强度 AI,SI,FI 变化特征如图 8 所示。河西地区 AI 以高台和酒泉站为界,东南部 AI 为减小趋势(−0.21~−0.34 mm/10 a),西北部 AI 值整体呈增加趋势,增加幅度较大,在 0.35~1.21 mm/10 a,河西西北部 AI 增加趋势不显著,东南部的高台和民勤站 AI 减小趋势显著。SI 以增加趋势为主(12 个站点,92%),增幅在 0.16~0.54 mm/10 a,其中酒泉站 SI 增加趋势显著,所有站点中仅武威站 SI 为减小趋势(−0.22 mm/10 a),且 SI 减小趋势不显著。FI 变化趋势仍以增加趋势为主(11 个站点,85%),增幅在 0.08~0.63 mm/10 a,其中位于西北部的瓜州站增加趋势显著,而 FI 减小的站点(高台和武威站),减小 0.27~0.37 mm/10 a,并且减小趋势不显著。

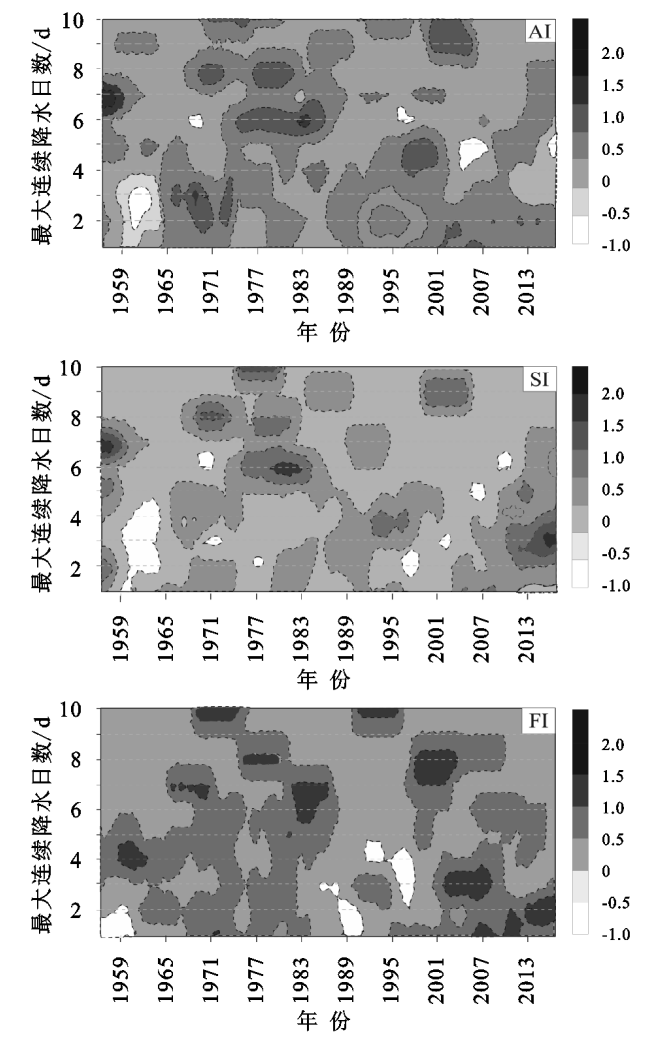


图 7 河西地区 AI,SI,FI 标准化序列随时间的演变特征

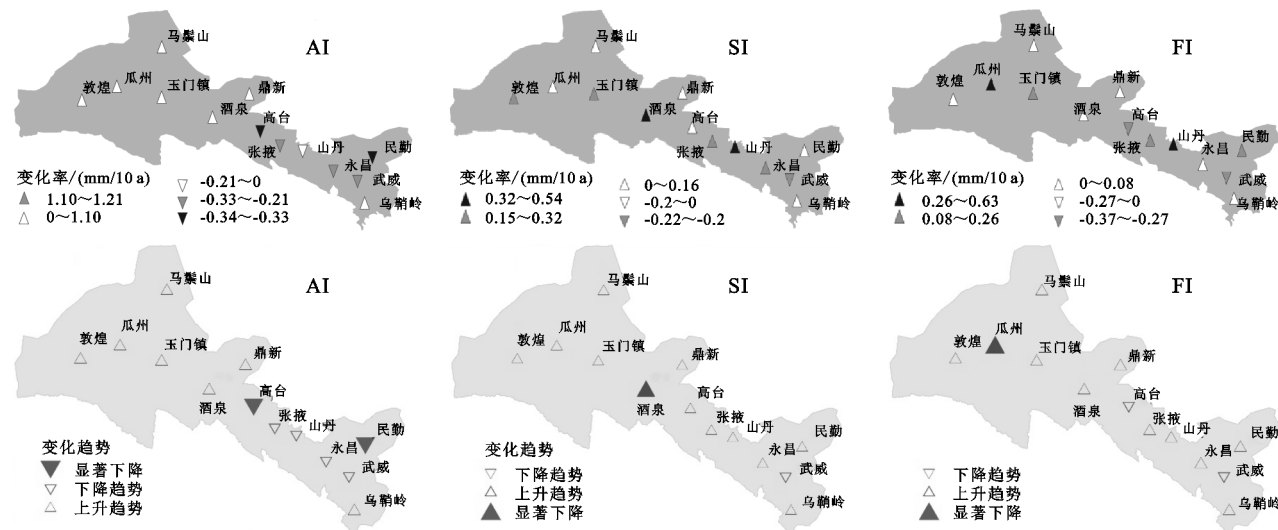


图 8 最大连续降水平均强度 AI,SI,FI 的显著性检验结果

### 3 讨论

近年来工业革命进一步深化的背景下,全球变化引起的降水事件变化是我们面对的研究热点问题之一,尤其在西北干旱地区显得更为重要。前人研究已经阐明 1961—2015 年,河西地区年降水量和强降水出现次数增多现象,并且近 30 a 来连阴雨最长持续时间呈缩短趋势,最大雨量呈增大趋势,但缺少降水事件连续性天数和区域分布变化的定量研究<sup>[24-25]</sup>。本文选取河西地区 1958—2015 年 13 个站点的日降水资料,从时间和空间角度分析了河西地区降水事件的连续性特征。研究表明,该区域降水量不论是 AD,SD 还是 FD 基本以 1~2 d 为主,但有增加趋势,中北部地区增幅较为明显;各站点最大连续降水量变化趋势不明显。自 20 世纪 80 年代以来,最大连续降水日数增加,降水强度上升。降水连续性变化直接影响河西地区水资源补充和灾害的发生频率,持续的强降水容易引发山洪和泥石流等自然灾害。该区域位于亚欧大陆腹地,加上毗邻青藏高原地区,其降水事件连续性变化原因主要受热力过程和气候系统动力作用共同影响,但机理非常复杂<sup>[26]</sup>。同时降水事件连续性变化对该地区的工农业生产和经济也将带来明显的影响,有待我们进一步深入研究<sup>[27]</sup>。

### 4 结论

(1) 河西地区最大连续降水日数的频率分布以 1~2 d 的短日数为主,6 d 以上长日数发生频率非常低。年最大连续降水日数经历 20 世纪 70 年代后期的峰值,先增后减,后期最大降水日数减小,但短日数发生频率增加;夏和秋季最大连续降水日数在 20 世纪 90 年代初期前与年变化趋势相似,而 90 年代初期之后夏季日数增

长,秋季日数明显减小,且短日数发生频率增加;整个研究时域来看研究区年、夏和秋季最大连续降水日数均以增加为主,中北部地区增加明显。

(2) 从年的角度来看,河西地区各站点年最大连续降水量有升有降,变化趋势不显著;夏季最大连续降水量略有下降,而秋季降水量增多更明显;且河西地区中西部地区这种分异变化更明显,东南地区以下降为主。

(3) 河西地区的年、夏和秋季最大连续降水强度频率分布相似,4~6 d 降水强度最大,降水强度随着最大连续降水日数的增加略有上升。最大连续降水强度分布情况与最大连续降水日数分布相似,表明河西地区 20 世纪 80 年代以来,最大连续降水日数增加,降水强度上升,与先前河西地区湿润化的研究结果一致<sup>[10-11]</sup>;此外河西地区秋季的湿润趋势比夏季更明显。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Kundzewicz Z W, Radziejewski M, Piskwar I. Precipitation extremes in the changing climate of Europe[J]. Climate Research, 2006, 31(1): 51-58.
- [3] Lehner B, Döll P, Alcamo J, et al. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental, integrated analysis [J]. Climatic Change, 2006, 75(3): 273-299.
- [4] Sheffield J, Wood E F. Characteristics of global and regional drought, 1950—2000: Analysis of soil moisture data from off-line simulation of the terrestrial hydrologic cycle[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112

- (D17):D17115.
- [5] Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections[J]. *Climatic Change*, 2007, 81(1): 71-95.
- [6] Costa A C, Santos J A, Pinto J G. Climate change scenarios for precipitation extremes in Portugal[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 108(1/2): 217-234.
- [7] Karl T R, Knight R W, Plummer N. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century[J]. *Nature*, 1995, 377(6546): 217-220.
- [8] Zhang X, Hogg W D, Mekis, et al. Spatial and temporal characteristics of heavy precipitation events over Canada[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(9): 1923-1936.
- [9] 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等. 中国年和季节极端降水时空特征及极值分布函数上尾部性质[J]. *地理科学*, 2017, 37(6): 929-937.
- [10] Shi Y F, Shen Y P, Kang E S, et al. Recent and future climate change in Northwest China [J]. *Climatic Change*, 2007, 80(3/4): 379-393.
- [11] Zhu S J, Chang Z F. Temperature and precipitation trends in minqin Desert during the period of 1961—2007 [J]. *Journal of Arid Land*, 2011, 3(3): 214-219.
- [12] 辛志远, 史激光, 刘雅琴, 等. 锡林郭勒地区降水时空分布特征及变化趋势[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(2): 312-316.
- [13] 贺俊杰. 锡林浩特市 50 年降水量变化特征分析[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(29): 278-285.
- [14] 陆桂荣, 郑美琴, 周秀君, 等. 近 55 年的日照市极端降水事件分析[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(24): 137-141.
- [15] 姜燕敏, 李松平, 张勇, 等. 丽水不同等级降水日数多时间尺度变化特征[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(35): 275-279.
- [16] 杨东, 程军奇. 甘肃黄土高原近 52 年四季极端降水变化特征[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(11): 180-187.
- [17] Zolina O, Simmer C, Gulev S K, et al. Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(6): L06704.
- [18] Santos M, Fragoso M. Precipitation variability in Northern Portugal: Data homogeneity assessment and trends in extreme precipitation indices [J]. *Atmospheric Research*, 2013, 131: 34-45.
- [19] 李剑锋, 张强, 白云岗, 等. 新疆地区最大连续降水事件时空变化特征[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3): 312-320.
- [20] Meng X J, Zhang S F, Zhang Y Y, et al. Temporal and spatial changes of temperature and precipitation in Hexi Corridor during 1955—2011[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(4): 653-667.
- [21] 孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 67(11): 1482-1492.
- [22] 李小亚, 张勃. 河西地区最大连续降水事件的时空变化特征[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 43-48.
- [23] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1/4): 182-196.
- [24] 虞敏, 曹广超, 曹生奎, 等. 近 30 年祁连山南坡降水量变化特征分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(2): 241-248.
- [25] 林婧婧, 王大为, 方锋. 1961—2015 年河西走廊强降水的时空演变及其对植被的影响[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(5): 1010-1017.
- [26] 谢五三, 田红, 王胜. 安徽省近 50 年汛期极端强降水量特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2010(S2): 226-230.
- [27] 李红英, 高振荣, 白松竹. 近 51 年河西走廊西部极端强降水事件变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(10): 100-106.

~~~~~

(上接第 138 页)

- [14] 史舟, 金辉明, 李艳, 等. 地统计软件包的开发及在土壤空间变异中的应用[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(5): 170-173.
- [15] 史文娇, 岳天祥, 石晓丽, 等. 土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(1): 163-174.
- [16] 李俊晓, 李朝奎, 殷智慧. 基于 ArcGIS 的克里金插值方法及其应用[J]. *测绘通报*, 2013(9): 87-90.
- [17] 范晓梅, 刘高焕, 刘红光. 基于 Kriging 和 Cokriging 方法的黄河三角洲土壤盐渍化评价[J]. *资源科学*, 2014, 36(2): 321-327.
- [18] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究[J]. *高原气象*, 2005, 24(6): 974-980.
- [19] 胡丹桂, 舒红, 刘艳. 基于地统计方法的新疆北部雪深空间插值研究[C]. *全国数学地质与地学信息学术研讨会*, 2013.
- [20] 李艳, 史舟, 王人潮, 等. 海涂土壤剖面电导率的协同克里格法估值及不同取样数目的比较研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3): 434-443.
- [21] 张剑明, 黎祖贤, 章新平, 等. 湖南省近 46 年来降水时空分布特征及趋势分析[J]. *水文*, 2009, 29(4): 73-78.