

河西地区最大连续降水事件的时空变化特征

李小亚, 张勃

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 选取河西地区 13 个气象站点 1960—2011 年逐年日降水资料, 采用线性趋势、反距离加权法、Mann—Kendall 检验以及 R/S 分析法, 选取 4 个极端降水指标, 分析了河西地区极端降水事件的时空变化特征及未来变化趋势。结果表明, 河西地区近 52 a 最大 1 d 降水量和最大 2~3 d 连续降水量呈增加趋势, 而最大 4 d 连续降水量呈减少趋势, 但变化都不显著。除最大 4 d 连续降水量未来表现为持续性外, 其它不同天数最大连续降水未来变化趋势与过去相反。最大 1 d 降水量和最大 2 d 连续降水量与降水总量有很好的相关性, 可见最大 1 d 和最大 2 d 连续降水量对降水总量有很好的指示性。在空间分布上, 不同天数最大连续降水表现出明显的空间差异, 且不同区域的过去和未来变化趋势也不尽相同。研究还发现, 在 0.05 的置信度下, 河西地区不同天数最大连续降水发生了明显的突变现象, 但突变年份不尽相同。

关键词: 连续降水事件; 时空变化; 河西地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0043-06

中图分类号: P426.6

Spatio-temporal Probability Behaviors of Maximum Consecutive Wet Days in Hexi Region

LI Xiao-ya, ZHANG Bo

(College of Geographic and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data from 13 meteorological stations in Hexi Region during 1960—2011, the methods of linear regression, inverse distance weighted, Mann—Kendall analysis and rescaled range analysis were employed to analyze the spatial and temporal variability of precipitation extremes and predict its extremely precipitation variations in future. Four indices of extreme precipitation were studied. The results showed that over the 1960—2009 period, the regionally averaged occurrence of annual maximum precipitations within 1 d and 2~3 d increased whereas annual maximum precipitation of 4 d decreased. With the exception of annual maximum 4 d precipitation, the predicted trends of the other indices in future were opposite compared to the past. The annual maximum 1 and 2 d precipitations correlated with annual total precipitation very well, which implies that annual maximum 1 and 2 d precipitations are good indicators for annual total precipitation. The four indices differed substantially in spatial distribution with varying past and future tendencies. In addition, abrupt changes in extreme precipitation indices could be readily identified at the 0.05 confidence level, although they were not the same year.

Keywords: events of maximum consecutive wet days; spatial and temporal change; Hexi Region

20 世纪 90 年代以来, 气候变暖背景下极端天气气候事件的变化引起了广泛关注^[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)1995 年第二次评估报告指出了极端事件变化研究的重要意义, 并力图回答“气候是否变得更加极端了”这一难题^[2]。中国气象局国家气候中心气候变化室于 2003 年 1 月 24 日举办了“气候

变化研究关键科学问题研讨会”^[3]提出了极端天气气候事件研究的科学问题, 即极端事件的发生频率和强度变化是在目前全球气候变暖背景下发生的, 未来气候将进一步趋于变暖, 极端事件的情景又将如何等问题。国内学者对全国和各个区域的极端降水也进行了大量的研究, 翟盘茂等人^[4]的研究表明, 在过去

收稿日期: 2012-06-26

修回日期: 2012-07-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“水资源约束下的黑河流域土地利用/覆盖变化模拟研究”(40961038); 生态经济学省级重点学科(5001-021); 西北师范大学知识与科技创新工程项目(NWNU-KJXG-03-06)

作者简介: 李小亚(1984—), 女(汉族), 甘肃省秦安县人, 硕士研究生, 研究方向为区域环境与资源开发。E-mail: youhappy456@163.com。

通信作者: 张勃(1963—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市华池县人, 博士, 教授, 主要研究方向为区域环境与资源开发。E-mail: zhangbo@nwnu.edu.cn。

45 a中,中国年降水量、1 d 和 3 d 最大降水量以及不同级别的强降水总量没有明显的极端化倾向,但平均降水强度极端偏高的区域范围表现为扩大的趋势。潘晓华等^[5-6]指出,中国的极端降水事件趋多、趋强,其中西北西部总降水量趋于增多,极端降水值和极端降水强度不发生显著变化,但极端降水事件趋于频繁。有些研究^[7-8]取某个固定的日降水量作为阈值,判定出现大于改阈值的降水即为极端降水。例如,我国通常把日降水量超过 50 mm 的降水事件称为暴雨,日降水量超过 25 mm 的降水事件称为大雨。事实上,我国幅员辽阔,气候地域差异明显,不同地区有不同的气候和自然环境,因此仅用绝对阈值定义日降水极端事件,不能准确反映一地的降水情况^[9]。以及先前的研究主要利用降水百分率、降水阈值等来定义极端降水事件^[10-11],最近 Zolina 等^[12-13]应用连续湿润天数的历时及其降水强度来研究欧洲极端降水,得出连续湿润天数有变长的趋势,其对应的降水强度增加。

甘肃省河西地区东起乌鞘岭,西至玉门关,南依祁连山与青海省相邻,北与内蒙古自治区相接,以黑山、宽台山和大黄山为界将该地区分隔为石羊河、黑河和疏勒河 3 大内流水系,3 条河流均发源于祁连山,出山后,大部分渗入戈壁滩形成潜流,或被绿洲利用灌溉,水资源有限,降水较少,且主要以小雨为主,属于典型的内陆干旱地区。从河西地区局部区域来看,河西地区东部区域年降水量和年降水日数由北向南逐渐增加^[14]。其中部 20 世纪 90 年代后期又开始缓慢增加,意味着该地区气候由暖干向暖湿转变;未来 15 a 降水量呈缓慢上升趋势^[15]。近 48 a 来,河西东部各量级降水日数的变率较大,随着降水量级的增加降水日数迅速减少^[16],在全球大幅度变暖和循环加快的背景下,河西走廊东部年极端降水指数都呈增加趋势^[17]。尽管学者对河西地区做了大量研究^[18-19],但这些研究大多数是针对河西某个区域,且多体现在一般性降水方面,而对整个河西地区不同天数最大连续降水量的研究几乎空白;事实上,最大连续降水量是极端降水的重要方面。因此,对整个河西地区不同天数最大连续降水量的研究,可以进一步了解河西地区极端降水事件的时空特征。基于此,本研究从年最大连续降水量入手来分析其时空变化和发展趋势,为预测和预防极端事件灾害提供参考依据。

1 资料与方法

数据来自中国气象科学数据共享服务网提供(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。选取了 13 个气象观测

站(敦煌、瓜州、马鬃山、玉门镇、酒泉、鼎新、张掖、高台、山丹、永昌、民勤、武威和乌鞘岭站)。通过 1960—2011 年逐日雨量(日降水量 ≥ 0.1 mm 日数)数据计算不同天数最大连续降水量。研究中指标定义为:(1)年不同天数最大连续降水量,即降水量 $P \geq 1$ mm 有降水持续时间最长的天数的最大连续降水事件的总降水量。在某一时期中,可能出现几次具有最大连续降水天数的降水事件,研究中只考虑连续降水量最大的那次降水事件。计算了 8 个参数的年最大连续降水量,由于最大 5~8 d 连续降水量发生频次很低,没有实际研究价值。因此,本研究中只涉及到 4 个(即最大 1 d 降水量和最大连续 2,3,4 d 连续降水量)。

对河西地区 13 个气象站点的最大连续降水求年均值,采用线性趋势分析最大连续降水趋势变化,计算采取最小二乘法进行估计,用其线性倾向率来分析不同天数最大连续降水的变化率,并进行相关性分析。在 ArcGIS 环境下进行反距离加权插值绘制不同天数最大连续降水事件的空间分布图,进行空间差异分析;在此基础上用 Mann—Kendall 检验法对河西地区不同天数最大连续降水进行趋势分析和突变检验^[20-21]。

最后应用 R/S 分析法预测了未来不同天数最大连续降水趋势变化,该分析法近年来在地学等领域已被广泛应用^[22-24]。

2 结果与分析

2.1 不同天数最大连续降水的年际变化

不同天数最大连续降水的变化趋势有所不同(图 1)。最大 1,2,3 d 连续降水量均呈增加趋势,变化率分别为 0.505,0.207,0.457 mm/10 a,而最大 4 d 连续降水量呈减少趋势,变化率分别为 -1.289 mm/10 a,都未通过显著性检验;其中,最大 1 d 降水量与年份的相关性较高,为 0.251 2。最大 1 d 降水量在 20 世纪 60 年代至 80 年代中期波动增加,20 世纪 80 年代中期到 90 年代末处于波动减少,2000—2010 年表现为波动增加;最大 2 d 连续降水量 20 世纪 60 年代到 80 年代波动增加,80 年代到 90 年代波动减少,20 世纪 90 年代到 2000 年呈波动上升;在整个时间序列最大 3 d 连续降水量呈微弱上升趋势,20 世纪 60 年代中期、70 年代中期、80 年代中后期和 2002 年出现高峰期,1963 和 2006 年出现低谷;最大 4 d 连续降水量由 20 世纪 60 年代到 70 年代呈增加趋势,20 世纪 70 年代到 70 年代中期减少,20 世纪 70 年代中期到 2000 年呈持续波动减少趋势。

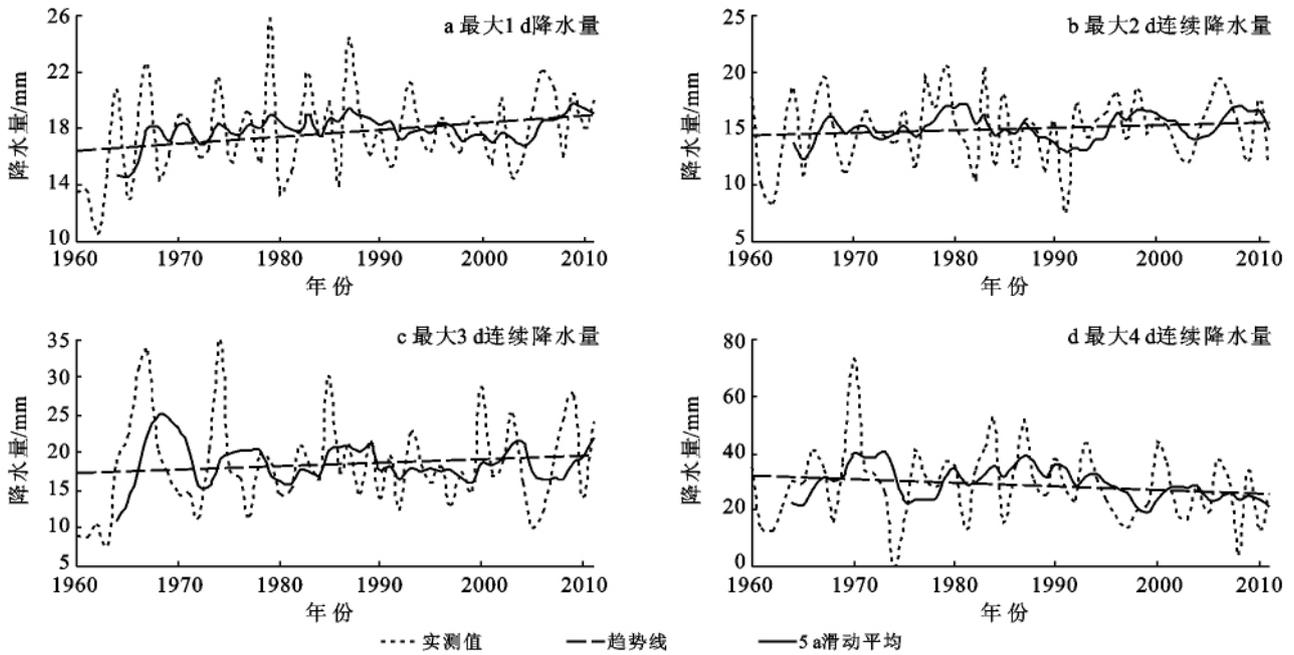


图 1 河西地区 1960—2011 年最大连续降水变化趋势

2.2 不同天数最大连续降水空间分布特征

不同天数最大连续降水倾向率空间变化有所不同(附图 2)。最大 1 d 降水量在绝大多数区域呈增多趋势,部分区域表现出减少趋势,在空间上表现出南多北少,东多西少的分异规律。以张掖地区为界,张掖地区东南主要呈增多趋势,越往东、南增多趋势越明显,增幅在 0.01~0.15 mm/a;张掖西北大部分表现出减少趋势,减幅在 -0.06~0.03 mm/a(除鼎新和敦煌地区)。最大 2 d 连续降水量减少区域主要集中在河西西部,玉门镇、酒泉、高台减少显著以及河西东部的武威和乌梢岭地区,减幅在 -0.06~0.01 mm/a;增加区域主要在河西东北部的民勤、永昌、山丹和张掖地区。最大 3 d 连续降水量增加区域主要为河西北部边界,马鬃山、鼎新、张掖、山丹和民勤地区,其它区域均呈减少趋势,其中瓜州地区减少最为明显,最大 4 d 连续降水量增加区域以北山为界,北山以北呈增多趋势,增幅在 0.20~2.69 mm/a;北山以南呈减少趋势,民勤减少最为明显,减幅在 -0.66~0.10 mm/a。

2.3 不同天数最大连续降水突变分析

在 0.05 置信度水平下,河西地区不同天数最大连续降水量的 UF 和 UB 检验曲线相交于信度线之间,说明该区不同天数最大连续降水均发生了突变(图 2);相交后如果 UF 曲线继续上升则降水增多,否则降水减少。最大 1 d 降水量在 1963 年发生突变,突变前为 8.7 mm,突变后为 18.8 mm,突变后降水增加了 10.1 mm,1978 年 UF 曲线超过了 1.96 的信度线,表明 1978 年后降水增加趋势更加显著。最大 2 d

连续降水在 1966 年发生突变,但突变不显著。最大 3 d 连续降水分别在 1964 和 2006 年发生突变,第一突变点在 1964 年,突变前降水为 7.7 mm,之后降水为 22.0 mm,突变后增加了 14.2 mm,1966 年 UF 曲线超过了 1.96 的信度线,表明从 1966—2006 年的 41 a 间最大 3 d 连续降水量增加显著;第二突变点在 2006 年,但突变不显著。最大 4 d 降水量分别在 1962 和 2007 年发生突变,第一突变点在 1962 年,突变前降水量为 13.6 mm,突变后降水量为 21.1 mm,突变后降水量增加了 7.5 mm,1970 年 UF 曲线相交于信度线,表明 1970 年之后的 38 a 间最大 4 d 连续降水量增加显著;第二突变点在 2007 年,但突变不显著。

2.4 最大连续降水和总降水的线性拟合关系

为了进一步研究河西地区最大连续降水对降水总量的响应,对最大连续降水和降水总量进行对比。用统计拟合方法建立线性方程,并进行相关关系统计显著性检验。

从河西地区最大连续降水和总降水量的关联性可以看出二者的分布规律性较强,二者呈线性关系。最大 1 d 降水量和年降水量呈正相关性(年降水量随最大 1 d 降水量的增加而增加),并通过显著性检验;最大 2 d 连续降水量与总降水量也具有很好的相关性,并通过显著性检验;可见最大 1 d 和最大 2 d 连续降水量对降水总量有很好的指示性。最大 3 d 和最大 4 d 连续降水量与降水总量的相关性不高,其散点图的分布没有表现出一定的规律性,且未通过显著性检验。

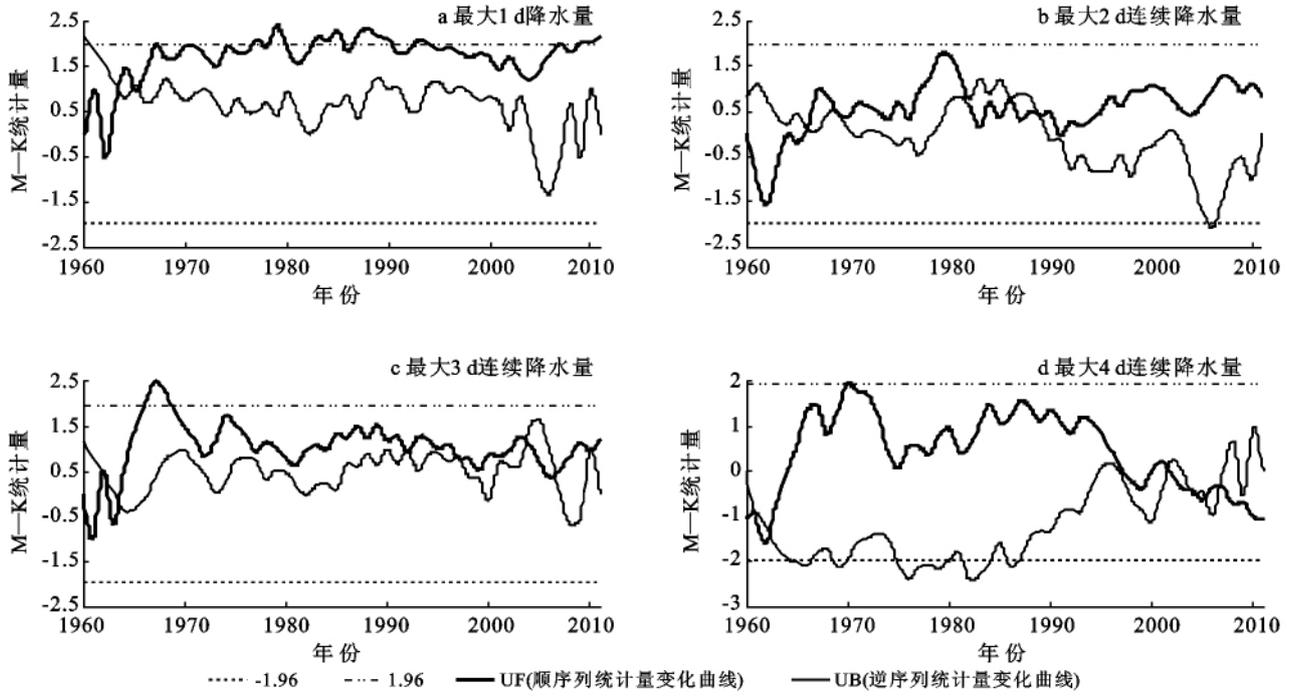


图 2 河西地区 1960—2011 年不同天数最大连续降水突变分析

2.5 最大连续降水的 R/S 分析

研究发现^[25], Hurst 指数值能很好地揭示出时间序列中的趋势性成分,且能够根据 Hurst 值的大小判断趋势性成分的强度。罗隆诚等^[26]用 R/S 分析法对南充地区极端气候变化研究发现,年极端最低气温将继续上升;汛期降水量将会增加,且多以“强降水事件”出现。通过对河西地区不同天数最大连续降水量用 R/S 分析法进行计算,并在此基础上绘制出

lg(R/S)与 lgN 坐标图(图 3)。从图 3 可以看出,最大 1 d 降水量和最大 2,3 d 连续降水量的 Hurst 指数值均小于 0.5,表明最大 1 d 降水量和最大 2,3 d 连续降水量的时间序列是反持续性的,过去两者呈增加趋势预示未来和过去发展趋势相反,呈减少趋势;最大 4 d 连续降水量 Hurst 指数为 0.61 且大于 0.5,时间序列呈持续性,但持续性强度不大,过去最大 4 d 连续降水量呈减少趋势,预示其未来也呈减少趋势。

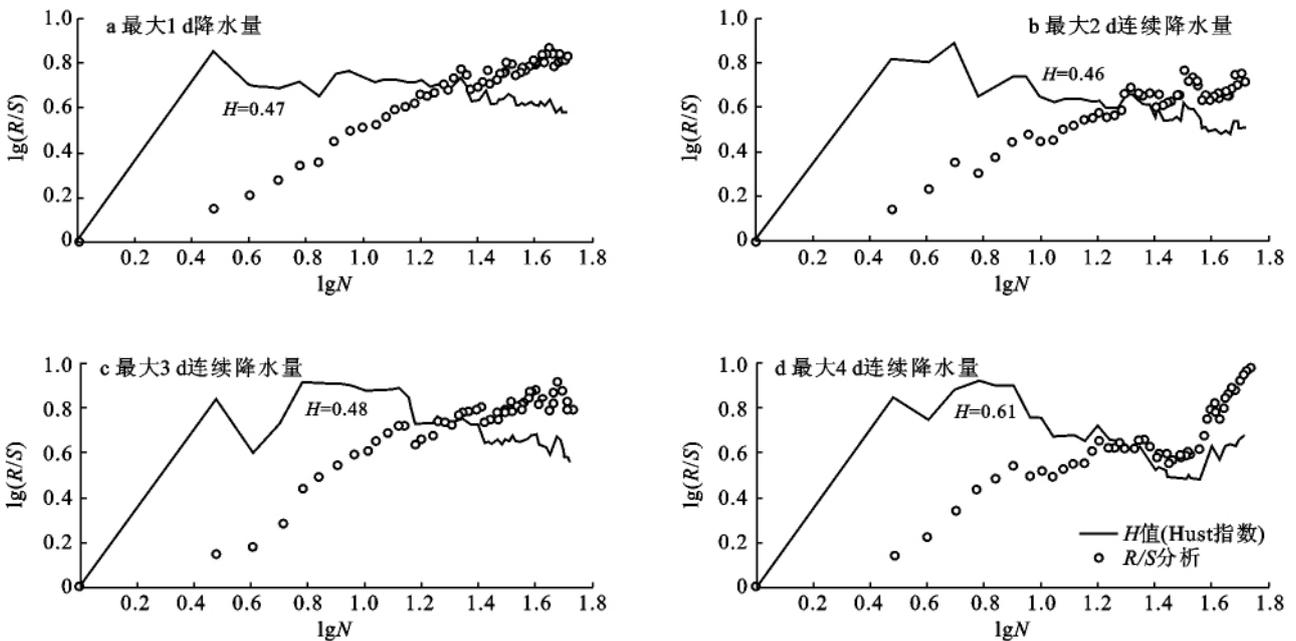


图 3 河西地区最大连续降水变化的趋势分析

2.6 河西地区不同区域最大连续降水的变化趋势

在给定的 α 置信水平上,如果 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则拒绝原假设,即在 α 置信水平上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。其变化趋势的大小用 β 表示,若 $\beta > 0$,表示呈上升趋势;若 $\beta < 0$,表示呈下降趋势^[27-30]。根据经度位置和气候特征将河西划分为东部、中部、西部 3 个区域。分别计算各个区域的 α (倾向率)、 z (显著性水平)、 β (变化幅度)、 H (hurst 指数)。

不同区域的最大连续降水变化趋势存在差异(表 1)。在河西东部,最大 1 d 降水量和最大 2 d 连续降水量倾向率分别为 1.3 和 0.6 mm/10 a,最大 3,4 d 连续降水倾向率分别为 -0.8 和 -2.3 mm/10 a, $\beta < 0$ 连续降水呈下降趋势;其中最大 1 d 降水量增加幅度最大且 $\beta > 0$, $z = 2.27$ 说明最大 1 d 降水量显著增

加。 $H > 0.5$ 表明河西东部未来连续降水为持续性趋势,最大 1 d 降水和最大 2 d 连续降水仍持续增加,最大 3 d 连续降水和最大 4 d 连续降水仍持续减少。河西中部最大连续降水量在 0.1~1.8 mm/10 a, $\beta \geq 0$,都未通过显著性检验,表明河西中部最大连续降水增加不显著; $H > 0.5$ 表明未来河西中部降水仍趋多。河西西部最大 1 d 降水量 0.1 mm/10 a, $\beta > 0$ 降水增加;最大 2 d 连续降水量倾向率为 -0.1 mm/10 a,最大 2 d 连续降水量呈下降趋势,但下降不显著;最大 3 d 连续降水量和最大 4 d 连续降水量倾向率分别为 0.3 和 1.1 mm/10 a, $\beta = 0$ 且未通过显著性检验,说明河西西部降水变化不显著; $H > 0.5$ 说明未来最大连续降水为持续性,未来除最大 2 d 连续降水减少,其它最大连续降水均表现为增加。

表 1 河西各区极端降水变化趋势

项目	河西东部				河西中部				河西西部			
	α	z	β	H	α	z	β	H	α	z	β	H
最大 1 d 降水量	0.13	2.27	0.10	0.64	0.02	0.82	0.01	0.54	0.01	0.59	0.23	0.58
最大 2 d 连续降水量	0.06	1.29	0.05	0.60	0.01	0.39	0.03	0.69	-0.01	-0.32	-0.01	0.58
最大 3 d 连续降水量	-0.08	-0.77	-0.05	0.61	0.03	0.98	0.06	0.60	0.03	0.72	0	0.60
最大 4 d 连续降水量	-0.23	-1.49	-0.22	0.52	0.18	1.17	0	0.80	0.11	0.45	0	0.79

注: α 为倾向率; z 为显著性水平; β 为变化幅度。

3 结论

(1) 最大 1 d 降水量和最大 2,3 d 连续降水量均有不同程度增加,最大 4 d 降水量略微减少,但均不显著。同时最大 1 d 降水量和最大 2 d 连续降水量在年代变化上较为相似。

(2) 最大 1 d 降水量和最大 2 d 连续降水量分别与降水总量的相关性都较高,且通过 0.001 的显著性检验,可见最大 1 d 和最大 2 d 连续降水量对降水总量有很好的响应;最大 3 d 连续降水量和最大 4 d 连续降水量与降水总量的相关性不高,且未通过检验。

(3) 最大 1 d 降水量在绝大多数区域呈增加趋势,部分区域表现出减少趋势,在空间上表现出南多北少,东多西少分异。最大 2 d 连续降水量,增加区域主要在河西东北部,减少区域主要集中在河西西部以及河西东部的武威和乌梢岭;最大 3 d 连续降水量增加的区域主要为河西北部边界,其他区域均呈减少趋势,其中瓜州减少最为明显。最大 4 d 连续降水增加区域主要集中在北山以北,减少区域以民勤地区为辐射中心。

(4) 最大 1 d 降水量在 1963 年发生突变,1978 年后降水增加趋势更加显著;最大 2 d 连续降水在 1966

年发生突变,但不显著;最大 3 d 连续降水分别在 1964 和 2006 年发生突变,1966—2006 年的 41 a 间最大 3 d 连续降水量增加显著;最大 4 d 降水量分别在 1962,2002 和 2007 年发生突变,1970 年后的 32 a 最大 4 d 连续降水量增加显著。

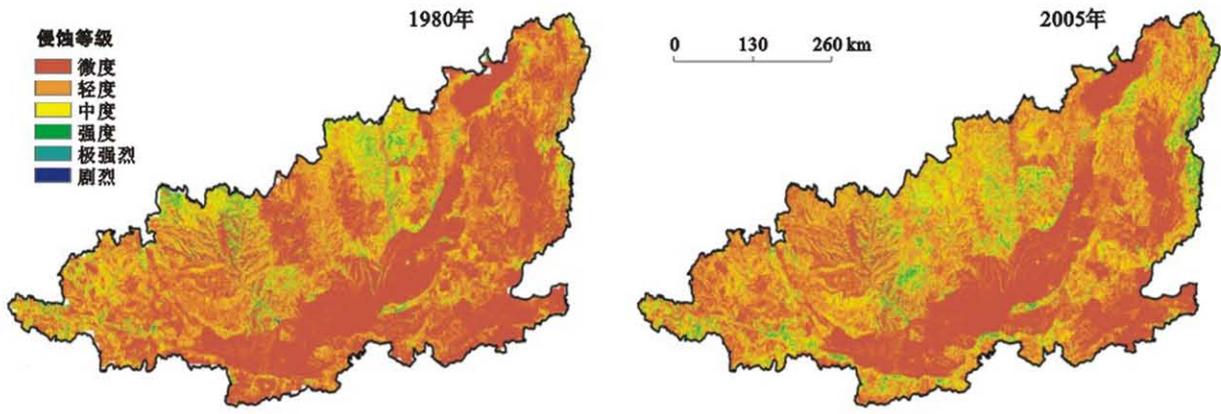
(5) 河西地区 1960—2011 年不同天数最大连续降水的 Hurst 指数计算结果表明,未来最大 1 d 降水量、最大 2 d 连续降水量、最大 3 d 连续降水量呈减少趋势;最大 4 d 连续降水量 Hurst 指数为 0.61 且大于 0.5,时间序列呈持续性,表明未来最大 4 d 连续降水量趋多。

(6) 在河西地区东部,最大 1 d 降水量增加幅度大且通过显著性检验;河西中部和河西西部地区增加均不显著。未来最大连续降水河西 3 个区域变化不尽相同,河西东部未来最大 1 d 降水量和最大 2 d 连续降水量均增加,最大 3 d 连续降水量和最大 4 d 连续降水量均变现为减少;河西中部未来最大连续降水均表现为增加;河西西部未来最大 2 d 连续降水减少,其它几天最大连续降水均为增加。

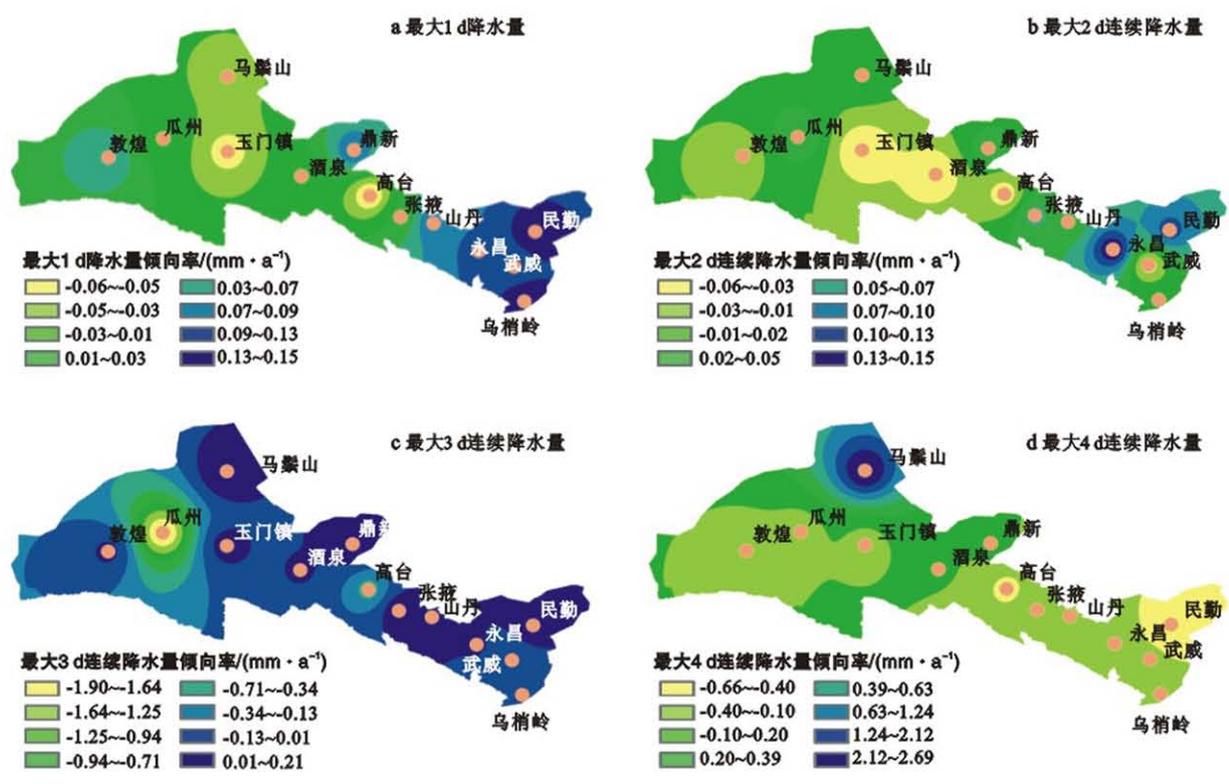
[参 考 文 献]

- [1] 余卫东,柳俊高,常军,等. 1957—2005 年河南省降水和温度极端事件变化[J]. 气候变化研究进展,2008,4(2):78-83.

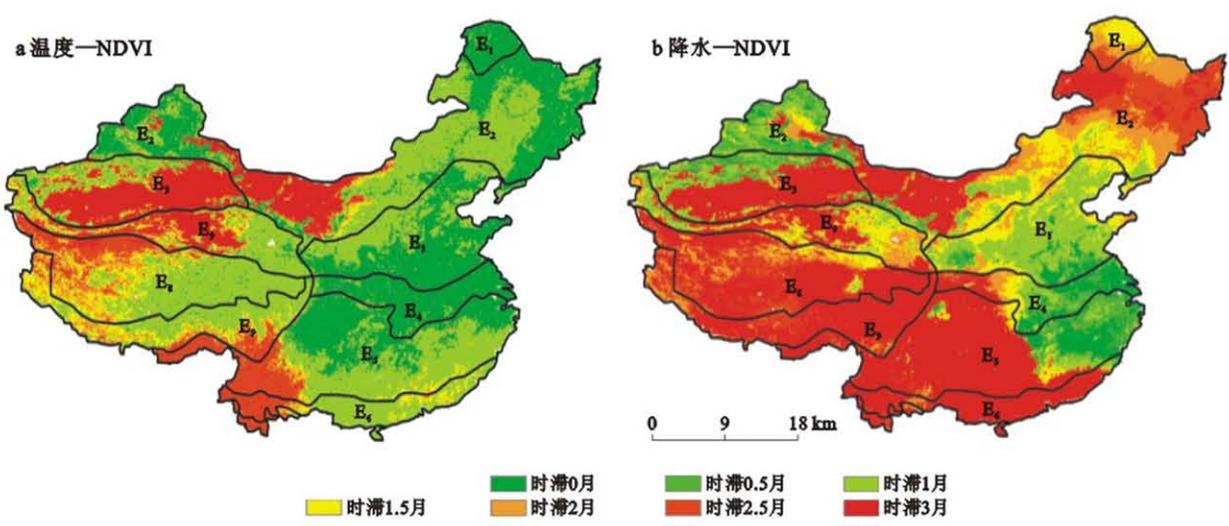
- [2] Houghton J T, Dnig Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: The Science of Climate Change[C]// Contribution of Working Group I to the Thrid Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] 罗勇,孙颖,高学杰,等. 气候变化研究关键科学问题进展[J]. 气候变化通讯, 2003, 2(2): 15-18.
- [4] 翟盘茂,任福民. 中国降水极端值变化趋势检测[J]. 气象学报, 1999, 7(2): 208-217.
- [5] 潘晓华,翟盘茂. 中国近 50 年极端温度和降水事件研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2002.
- [6] 王颖,施能. 1955—2004 年极端气温事件的时空变化特征研究[D]. 江苏 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [7] 李志,刘文兆,郑粉莉. 1965—2005 年径河流域极端降水事件的变化趋势分析[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1527-1532.
- [8] 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(9): 1-10.
- [9] 任玉玉,任国玉. 1960—2008 年江西省极端降水变化趋势[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 462-469.
- [10] 杨金虎,江志红,杨启国,等. 中国西北汛期极端降水事件分析[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2): 320-325.
- [11] Fatichi S, Caporali E. A comprehensive analysis of changes in precipitation regime in Tuscany[J]. International Journal of Climatology, 2009, 29(13): 1883-1893.
- [12] 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]. 地理学报, 2012, 67(3): 312-320.
- [13] Zolina O, Simmer C, Gulev S K, et al. Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls[J]. Geophys. Res. Lett., 2010, 37(6): 24-34.
- [14] 李玲萍,李岩瑛,盖晓萍. 河西走廊东部降水日数及强度的时空特征[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 254-260.
- [15] 刘洪兰,白虎志,张俊国. 河西走廊中部近 53 年降水变化及未来趋势预测[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 146-150.
- [16] 杨晓玲,丁文魁,郭利梅. 河西走廊东部的降水特征[J]. 干旱区研究, 2010, 27(5): 663-668.
- [17] 李玲萍,李岩瑛,钱莉,等. 1961—2005 年河西走廊东部极端降水事件变化研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 497-504.
- [18] 陈少勇,任燕,乔立,等. 中国西北地区大雨以上降水日数的时间分布特征[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 958-965.
- [19] 郭江勇,林纾,万莉莉. 500 hPa 高度场对西北地区秋季降水的影响分析[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1749-1754.
- [20] 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317.
- [21] 张菲,刘景时,巩同梁,等. 喜马拉雅山北坡卡鲁曲径流与气候变化[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1141-1148.
- [22] 秦耀辰,刘凯. 分形理论在地理学中的应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(4): 426-436.
- [23] 赵晶,王乃昂,杨淑华. 兰州城市化气候效应的 R/S 分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2000, 36(6): 122-128.
- [24] 罗隆诚,冯新灵,陈峰,等. 南充近 50 年极端气候变化研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2007, 26(8): 95-106.
- [25] 赵晶,王乃昂,杨淑华. 兰州城市化气候效应的 R/S 分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2000, 36(6): 122-128.
- [26] 罗隆诚,冯新灵,陈峰,等. 南充近 50 年极端气候变化研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2007, 26(8): 95-106.
- [27] 张勃,康淑媛,刘艳艳,等. 甘肃张掖市冬季气温变化的时空特征[J]. 地理研究, 2010, 29(1): 137-144.
- [28] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan[J]. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 2002, 20(2): 11-26.
- [29] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1/4): 144-150.
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 62-76.



附图1 黄土高原南部土壤侵蚀等级空间分布



附图2 河西地区1996—2011年不同天数最大连续降水空间分布



附图3 中国大陆NDVI与温度和降水的时滞空间分布

注: E₁,寒温带; E₂,中温带; E₃,暖温带; E₄,北亚热带; E₅,中亚热带; E₆,南亚热带; E₇,边缘热带; E₈,高原亚寒带; E₉,高原温带