

# 石羊河流域极端干旱事件的时空变化特征

王兴梅<sup>1</sup>, 张 勃<sup>1</sup>, 张 凯<sup>2</sup>, 张调风<sup>1</sup>, 戴声佩<sup>1</sup>, 王亚敏<sup>1</sup>, 李 丹<sup>1</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730000)

**摘 要:** 本文借助 ArcGIS 9.2 和 Matlab 7.0 数据软件平台, 运用复值 Morlet 小波分析和数理统计方法对石羊河流域极端干旱事件在时空上的变化特征进行分析, 结果表明: ①石羊河流域的平均湿润指数自北向南逐渐增大, 其湿润指数与年均降水和海拔高度具有显著正相关性(在 0.01 置信水平), 而与年均蒸发具有显著负相关性(在 0.05 置信水平)。②在时间尺度上来说, 极端干旱事件的频数具有 19a、9a、6a、4a、15a 的周期, 可能是受南亚高压的准 3 年周期的影响; 在空间尺度上来说, 极端干旱事件频数与湿润指数的空间分布大体相似, 略有不同是两者的最小值不同: 即地表湿润指数最小值在民勤, 而极端干旱事件发生频数最小值在武威。7-9 月份发生极端干旱频数占年极端干旱总频数的 60.62%。③年极端干旱总频数和 7-9 月份极端干旱总频数都呈略微上升趋势, 且年极端干旱频数的线性倾向率较大, 即将达到 0.3/10a。通过 Pettitt 突变检验法对年极端干旱总频数和 7-9 月份极端干旱总频数进行检测, 结果检验到突变点分别为 2000 年和 1983 年(在 0.01 置信水平)。

**关 键 词:** 石羊河流域; 极端干旱; 湿润指数; 时空特征

## 1 引言

在增暖背景下, 近年来对于干旱及干旱化发生和发展的影响已引起重视, 在全球和区域尺度上由增暖所引起的干旱化日趋严重的事实已被揭示<sup>[1-4]</sup>。大量事实还说明, 全球极端干旱的面积正在扩大<sup>[2]</sup>, 中国北方地区干旱化正在加剧<sup>[5-6]</sup>且增暖显著<sup>[7]</sup>。20 世纪 90 年代以来, 学者对西北干旱气候其特征、成因及其监测和预测等方面做了大量研究<sup>[8-13]</sup>。邓振镛等<sup>[14]</sup>、尹宪志等<sup>[15]</sup>对甘肃省近 50 年干旱灾情进行了研究, 并指出在夏季河东有两个少雨时段。由于甘肃旱灾具有明显的地域特征, 存在几个比较重要的时段: 如对甘肃省河东春旱、春末夏初旱、伏旱以及秋旱的研究<sup>[16-19]</sup>。但是对石羊河流域地区的极端干旱研究还不多见。本文拟在过去研究的基础上, 利用降水、平均气温、平均空气湿度、日照时数、平均风速的月数据构建一个能够表征地表干湿状况的湿润指数, 通过分析地表湿润指数变化来揭示近 50 年来石羊河流域极端干旱发生的频率及其时空变化的事实。

## 2 研究区概况

石羊河流域(图 1)位于祁连山东段与巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠南缘之间, 101°41' ~ 104°16' E、36°29' ~ 39°27' N, 全长 300 km 以上, 流域面积  $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域行政区划包括武威市的古浪县、凉州区、民勤县全部及天祝县部分, 金昌市以及张掖市肃南裕固族自治县和山丹县的部分地区, 流域共涉及 3 市 8 县/区, 总人口 220 万人。石羊河起源于南部祁连山, 消失于巴丹吉林和腾格里沙漠间的民勤盆地北部, 主要由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河、西大河等河流组成。全流域可分为南部祁连山地、中部走廊平原区、北部低山丘陵区及荒漠区 4 大地貌单元。南部祁连山区海拔 2000 ~ 5000 m, 年降水量 300 ~ 600 mm, 年平均气温 2 ~ 6℃; 中部走廊平原温凉干旱, 海拔 1500 ~ 2000 m, 年降水量 150 ~ 300 mm, 年平均气温 6 ~ 8℃; 北部区海拔 1300 ~ 1500 m, 年降水量小于 150 mm, 年平均气温大于 8℃。

收稿日期: 2010-10; 修订日期: 2011-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40961038); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806021-07); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YWQ10-4); 甘肃省自然科学基金项目(3ZS061-A25-009); 生态经济学甘肃省级重点学科项目(5001-063)。

作者简介: 王兴梅(1984-), 女, 甘肃民勤人, 硕士研究生, 主要从事气候变化、资源与环境研究。E-mail: xingmeiyifan@163.com

3 研究资料与方法

3.1 研究资料

本文数据是中国气象局国家气象信息中心及甘肃省气象局提供的1959-2008年逐月降水(mm)、平均气温(℃)、平均空气湿度(%)、日照时数(h/day)、平均风速(m/s)的数据资料。选取石羊河流域具有代表性的气象站点,主要有上游祁连山区乌鞘岭,古浪气象站,平原中游地区武威、永昌气象站,以及下游民勤盆地气象站。

3.2 研究方法

3.2.1 地表湿润指数

近年来,地表湿润指数在中国区域干湿变化的检测中得到很好的应用<sup>[20-21]</sup>,特别是对中国北方干旱、极端干旱和干湿变化趋势的研究显示出独特的应用价值,计算方案中包含了地表水分收支的两个重要过程降水和潜在蒸发。文中所用的湿润指数有Humle<sup>[22]</sup>提出,定义为:

$$H = \frac{P}{Pe}$$

式中:  $H$  为月湿润指数;  $P$  为月降水(mm);  $Pe$  为潜在蒸发(mm),其中潜在蒸发可由经过改进的Thornthwaite<sup>[23]</sup>方法求得,但只考虑了降水和气温。而本文中  $Pe$  的计算采用FAO中的ET<sub>0</sub> Calculator专用软件,综合考虑气温、降水、空气湿度、风速的因素计算了潜在蒸发。有关地表湿润指数的建立,文献[20]已有详细的介绍,它的基本物理过程就是考虑了影响地表干湿状况变化的两个主要影响因子,降水和地表蒸发潜力(潜在蒸发),降水增多有利于地表变湿,而地表蒸发潜力增大可使地表变干。

3.2.2 复值Morlet小波分析及小波方差

小波分析是近10年来被引入气象领域的一种新方法,它不仅可以给出气候序列变化的尺度,还可以显示出变化的时间位置。复值Morlet小波用于时间序列的分析时,小波系数实部的变化趋势与信号的起伏是基本一致的,等值线中心为高低值中心(正小波系数为高值,负小波系数为低值),中心值的大小可以反映出波动的振荡强度<sup>[24]</sup>。

小波方差反映了波动的能量随尺度的分布,可以用来确定一个时间序列中各种尺度扰动的相对强度,对应峰值处的尺度即为该序列的主要时间尺度,即主要周期<sup>[25]</sup>。因此,小波方差提供了一种确定一个时间序列中存在主要周期的客观而有效的分析方法。

4 平均地表湿润指数的空间分布

图2是石羊河流域平均湿润指数、年均降水、年均蒸发、海拔空间分布图,很显然平均湿润指数自北向南逐渐增大,其空间分布与年均降水、海拔空间分布基本一致;而与年均蒸发的空间分布恰好相反。这与表1中所示的相关性是一致的,即湿润指数与年均降水和高程具有显著正相关性(在0.01置信水平);而与年均蒸发具有显著负相关性(在0.05置信水平)。图中明显看出:降水量最少的民勤地区,潜在蒸发却是最大的;而降水量最多的乌鞘岭地区,潜在蒸发却是最小的。由此可以猜测:在石羊河流域湿润指数表示的干和湿的地区在降水、蒸发、海拔高度的影响下,民勤和乌鞘岭地区会不会分别走向更极端的趋势?考虑到石羊河流域属干旱区,仅通过湿润指数表示干旱程度,来进一步了解该区域的空间干旱特征,即对其进行了极端干旱事件发生频数的研究。

表1 湿润指数与年均降水、蒸发以及高程的相关性  
Tab.1 The correlation among humid index, mean annual precipitation, mean annual evaporation and elevation

	湿润指数	年均降水	年均蒸发	海拔
湿润指数	1	0.992**	-0.857	0.926**
年均降水	0.992**	1	-0.807	0.891*
年均蒸发	-0.857*	-0.807	1	-0.920**
海拔	0.926**	0.891*	-0.920**	1

注: \* 在 0.05 水平上显著相关; \*\* 在 0.01 水平上显著相关

图1 研究区概况图  
Fig.1 The study area

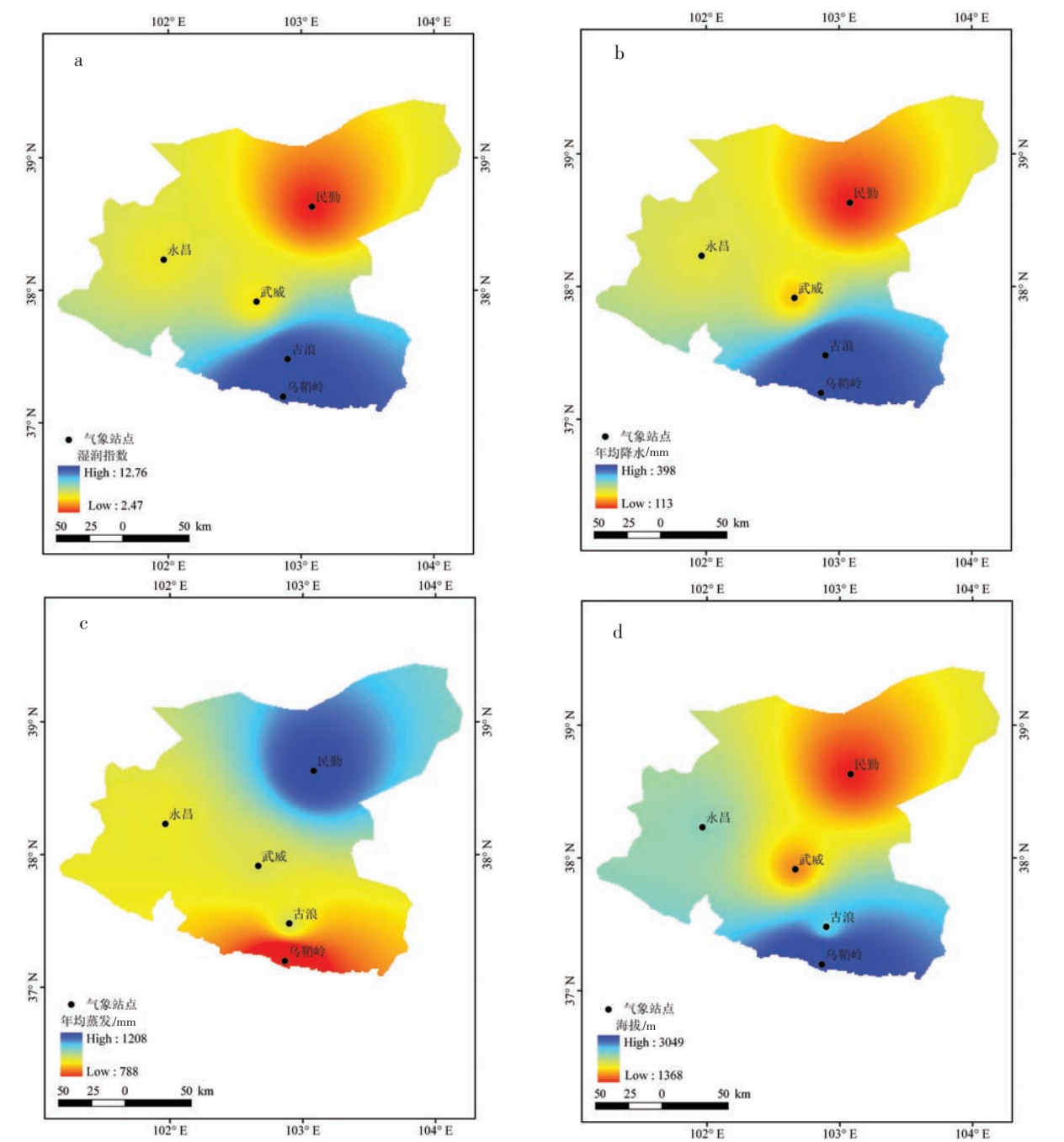


图2 地表湿润指数、年均降水、年均蒸发、海拔的空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of humid index, mean annual precipitation, mean annual evaporation and elevation

5 极端干旱事件频数的时空分布

年极端干旱频数统计的方法是:首先计算逐个月份湿润指数 $H$ 的标准化变量,极端干旱定义为 $H$ 的标准化变量小于等于-0.5<sup>[26]</sup>,然后分别统计每一年月 $H$ 的标准化变量小于等于-0.5的次数就作为该年极端干旱发生的频数。月极端干旱频数的统计是:在1959-2008年这50年里,每月湿润指数 $H$ 的

标准化变量小于等于-0.5的次数。

5.1 年极端干旱事件频数的时空变化特征

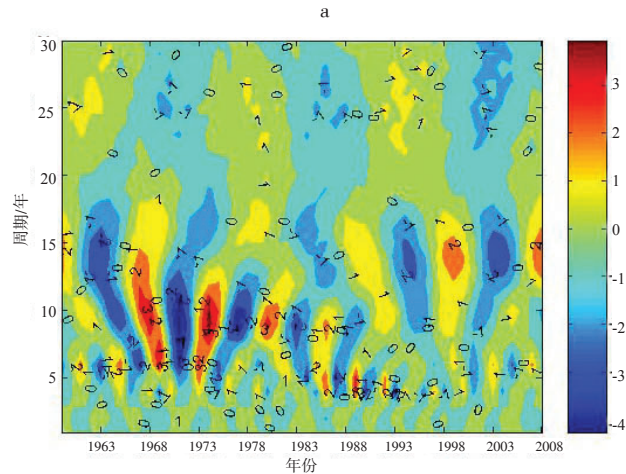
5.1.1 年极端干旱事件频数的时间变化特征

从图3极端干旱频数序列的复值Morlet小波变换图和小波方差图对应可以看出,年极端干旱频数序列在9a左右的周期为第一主周期,其次是6a、4a、15a,其中6a周期主要是80年代之前振荡较明显,4a周期主要表现在80、90年代,15a周期在2000年

以来开始表现的比较明显。

5.1.2 年极端干旱事件频数的空间分布特征

图4为近50年来,年极端干旱事件发生总频数的空间分布图,其中发生次数最多的是乌鞘岭,最少的是武威,民勤、永昌地区次之。这与湿润指数的空间分布大体相似,略有不同的是两者的最小值不同:即地表湿润指数最小值在民勤,而极端干旱事件发生频数最小值在武威。这与前面的猜测是不同的。为了更好的研究该区极端干旱频数的特征,对各代表站近50年来各月发生的极端干旱频数做了进一步的统计,得到各月发生极端干旱事件频数分布图,可以看出该区各代表站在7-9月份发生极端干旱事件的频数明显高于其它月份,说明石羊河流域发生极端干旱事件主要集中在7-9月份。



5.2 7-9月份极端干旱事件频数的时空特征

5.2.1 7-9月份极端干旱事件频数的时间特征

从图5极端干旱频数序列的复值Morlet小波变换图和小波方差图对应可以看出,7-9月份极端干旱频数序列在19a左右的振荡最为显著,并且贯穿于整个时间序列。其次是25a和6a周期,其中6a周期出现在80年代之前,但振荡表现的很微弱,这与年极端干旱频数6a周期发生在同一时代。25a左右的周期表现也很明显,但有待于更长时间序列观测数据的验证。

5.2.2 7-9月份极端干旱事件频数的空间分布特征

图6是石羊河流域极端干旱事件在近50年间7-9月份发生频数的空间分布图,与该区年极端干旱频数相比永昌在7-9月份发生极端干旱频数相对

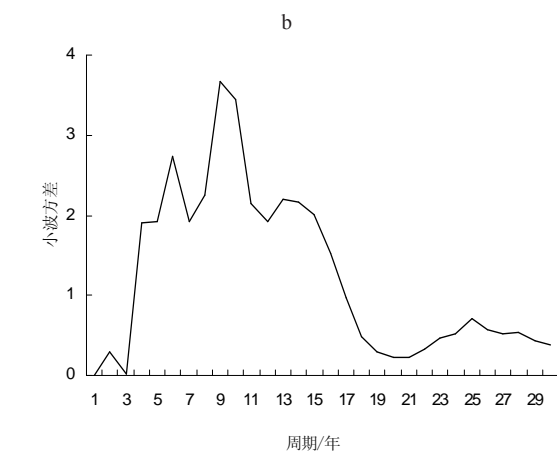


图3 年极端干旱频数序列的复值Morlet小波和小波方差图

Fig.3 Complex Morlet wavelet and the wavelet variance of annual extreme drought frequency

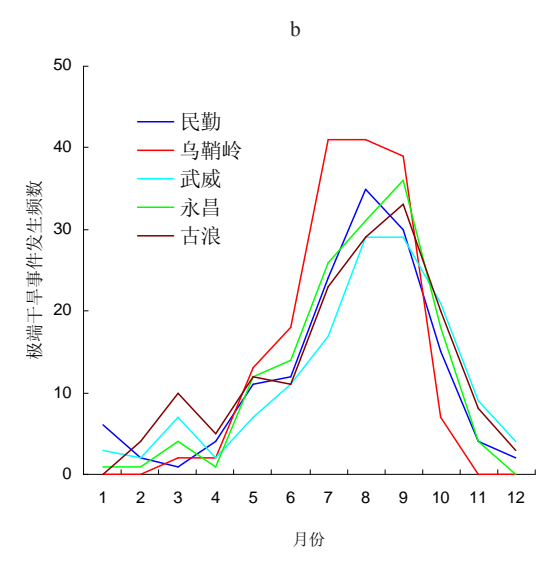
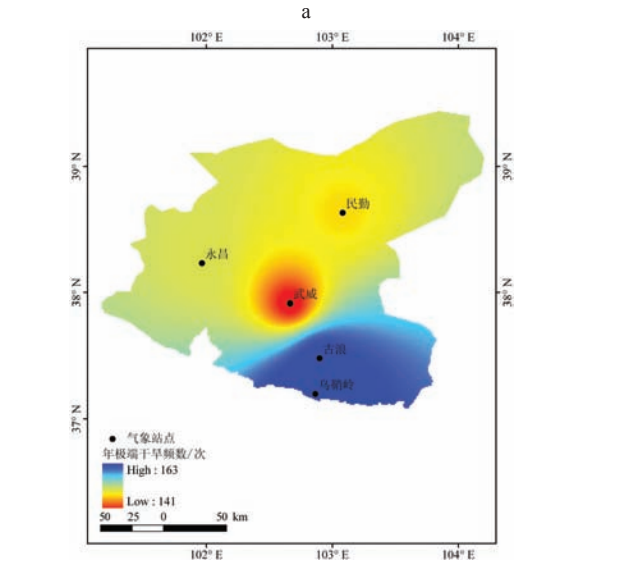


图4年极端干旱频数空间分布图和各月极端干旱频数图

Fig.4 Spatial distribution of annual extreme drought frequency and monthly extreme drought frequency

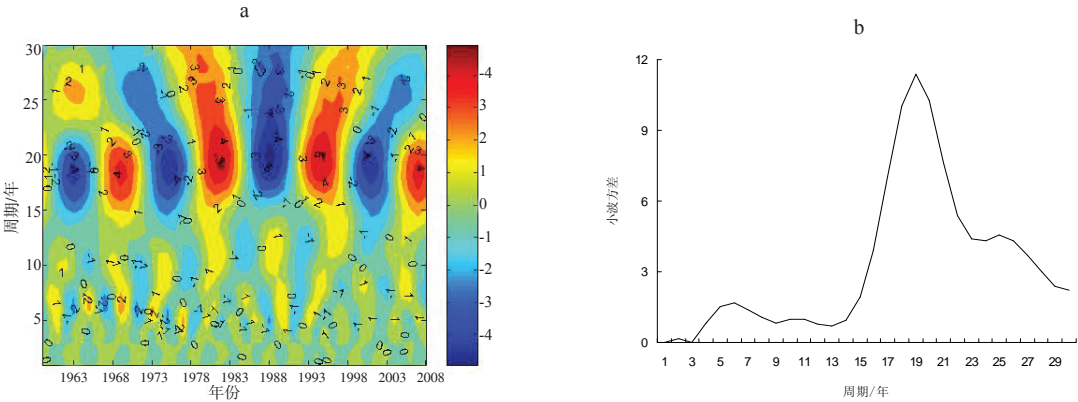


图5 7-9月极端干旱频数序列的复值Morlet小波和小波方差图

Fig.5 Complex Morlet wavelet and the wavelet variance of extreme drought frequency from July to September

增加了,而古浪相对减少了,其他地区与年极端干旱频数基本一致。极端干旱在干旱的形成和维持上占有主导作用<sup>[26]</sup>,同样该区在7-9月份发生极端干旱频数在年极端干旱总频数也占了主导作用,即占了60.62%。而此时是一年中秋田作物的主要生长成熟期和麦田的收摘期,也是水库、水窖的蓄水期,发生的极端干旱不仅影响当时的生产生活,而且还对后期及次年的生产生活带来深远的影响<sup>[27]</sup>。为了预防灾害的发生一定要在期间做好防范准备。

综上,从时间尺度上来说,极端干旱事件的频数具有19a、9a、6a、4a、15a的周期,周期几乎都是3年左右的倍数。有研究表明<sup>[28]</sup>:夏季甘肃的干旱主要是西太副高和南亚高压控制下的干旱,并且南亚高压的准3年周期很可能是造成甘肃降水准3年周期的环流原因。而本研究中极端干旱事件频数的周期和南亚高压的准周期有很好的对应关系,南亚高压的环流是否同样影响极端干旱事件还有待进一步研究。从空间尺度上来说,极端干旱事件频数与湿润指数的空间分布大体相似,略有不同是两者的最小值不同:即地表湿润指数最小值在民勤,而极端干旱事件发生频数最小值在武威。7-9月份发生极端干旱频数在年极端干旱总频数也占了主导作用。

6 7-9月份极端干旱频数趋势变化

如图7是近50年来,年极端干旱总频数和7-9月份极端干旱总频数线性趋势图,有研究表明<sup>[26]</sup>:35°N以北,100°E以东地区,近50年来极端干旱频数具有明显的增加趋势,而石羊河流域正好位于该

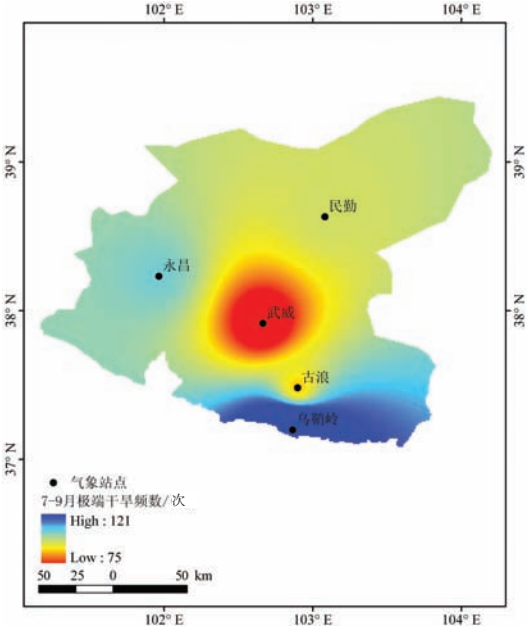


图6 7-9月极端干旱频数空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of extreme drought frequency from July to September

区域,但增加不是很明显,可以从图中看出:它们都只呈略微上升趋势,且年极端干旱频数的线性倾向率相对较大些,即将达到0.3/10a。另外,运用Pettitt突变检验法对年极端干旱总频数和7-9月份极端干旱总频数进行检测,结果检验到突变点分别为2000年和1983年(在0.01置信水平)。

7 结论与讨论

本文借助 ArcGIS 9.2、ETo Calculator 和 Matlab 7.0 数据软件平台,采用复值 Morlet 小波分析及小波方差分析了石羊河流域 1959-2008 年极端干旱的

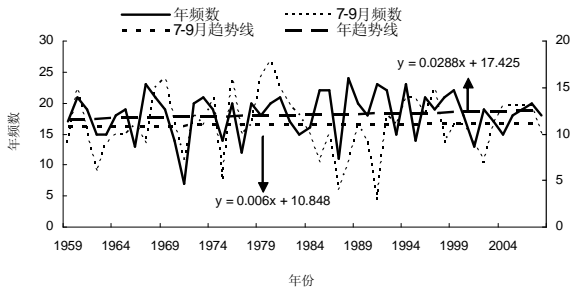


图7 极端干旱频数图

Fig. 7 Extreme drought frequency

时空变化特征,初步可以得出以下结论:

(1) 石羊河流域的平均湿润指数自北向南逐渐增大,其湿润指数与年均降水和海拔具有显著正相关性(在0.01置信水平);而与年均蒸发具有显著负相关性(在0.05置信水平)。

(2) 年极端干旱频数的周期主要为9a、6a、4a、15a;年极端干旱事件频数与湿润指数的空间分布大体相似,略有不同是两者的最小值不同:即地表湿润指数最小值在民勤,极端干旱事件发生频数最小值在武威;且极端干旱频数主要集中在7-9月份。

(3) 7-9月份发生频数的周期主要为19a、6a;7-9月份发生频数的空间分布,与年极端干旱频数相比永昌在7-9月份发生极端干旱频数相对增加了,而古浪相对减少了;7-9月份发生极端干旱频数在年极端干旱总频数占了主导作用,即占了60.62%。

(4) 年极端干旱总频数和7-9月份极端干旱总频数都呈略微上升趋势,且年极端干旱频数的线性倾向率较大,即将达到0.3/10a。通过Pettitt突变检验法对年极端干旱总频数和7-9月份极端干旱总频数进行检测,结果检验到突变点分别为2000年和1983年(在0.01置信水平)。

气候变暖使我国经济面临四大严峻挑战,其中挑战之首是极端气候事件趋强趋多<sup>[29]</sup>。干旱对全球变暖的响应表现更为突出和敏感,已成为气候变化研究中的重点和热点问题之一,极端干旱事件的研究就更是得到了关注。本文对石羊河流域进行了极端干旱事件的时空变化特征研究,其中对极端干旱事件发生频数的周期与徐国昌<sup>[30]</sup>用周期分析的方法对甘肃省东部区域降水量的周期以及对甘肃省旱涝等级自身资料的周期分析<sup>[28]</sup>都吻合的很好;另外,通过Pettitt突变检验到突变点分别为2000年和1983年与前面极端干旱频数的周期发生变化的年份很接近,还需要进一步去证实。

## 参考文献

- [1] Fu C. An aridity trend in China in association with global warming//Richard G Z. Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change. New York: JohnWiley Sons, 1994: 1-17.
- [2] Dai A G, Trenberth K T, Qian T T. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming J. Hydrometeor, 2004, 5: 1117-1130.
- [3] 马柱国. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1011-1018.
- [4] 马柱国, 符淙斌. 1951-2004 年我国北方干旱化的基本事实. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [5] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的10 年际演变特征. 地球物理学报, 2005, 48(3): 519-525.
- [6] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近50 年干旱变化特征. 地理学报, 2003, 58(增刊): 61-68.
- [7] 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近54 年中国地面气温变化. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 711-727.
- [8] 孙国武, 罗哲贤, 李兆元, 等. 中国西北干旱气候研究. 北京: 气象出版社, 1996: 1-394.
- [9] 孙家宝, 邓子风. 新疆降水概论. 北京: 气象出版社, 1987: 1-400.
- [10] 白肇烨, 徐国昌, 陈乾, 等. 中国西北天气. 北京: 气象出版社, 1988: 1-442.
- [11] 戴加洗, 周陆生, 吴永森, 等. 青藏高原气候. 北京: 气象出版社, 1990: 1-356.
- [12] 李江风. 新疆气候. 北京: 气象出版社, 1991: 1-302.
- [13] 徐国昌. 中国干旱半干旱区气候变化. 北京: 气象出版社, 1997: 1-101.
- [14] 邓振镛, 张强, 尹宪志, 等. 干旱灾害对干旱气候变化的响应. 冰川冻土, 2007, 29(1): 114-118.
- [15] 尹宪志, 邓振镛, 徐启运, 等. 甘肃省近50a 干旱灾情研究. 干旱区研究, 2005, 22(1): 120-124.
- [16] 张存杰, 董安祥, 白虎志, 等. 甘肃省河东地区伏旱的小波分析. 应用气象学报, 1998, 9(3): 291-297.
- [17] 郭江勇, 李栋梁, 崔风英, 等. 甘肃河东春旱的气候特征分析及预测模型. 甘肃气象, 2001, 19(1): 5-8.
- [18] 王蕾, 李栋, 巴特尔, 等. 甘肃河东春末夏初干旱的时空特征和预测研究. 甘肃气象, 1999, 17(2): 1-5.
- [19] 林纾, 章克俭. 甘肃省陇东南9-10月的干旱. 甘肃气象, 1998, 16(1): 45-47.
- [20] Ma Z G, Fu C B. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China. Glob. Planet Change, 2003, 37: 189-200.
- [21] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的10 年际演变特征. 地球物理学报, 2005, 48(3): 519-525.
- [22] 马柱国. 中国东部土壤湿度和气候变率的关系及其一

个土壤湿度反演模式的建立[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 1999.

- [23] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Reviews*, 1948, 38(1): 55-94.
- [24] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999.
- [25] 纪忠萍, 谷德军. 广州近百年来气候变化的多时间尺度分析. *热带气象学报*, 1999, 15(1): 48-55.
- [26] 马柱国, 华丽娟, 任小波. 中国近代北方极端干湿事件

的演变规律. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 69-74.

- [27] 吴爱敏, 郭江勇, 王劲松. 中国西北地区伏期干旱指数及干旱分析. *干旱区研究*, 2007, 24(2): 227-233
- [28] 王燕, 王润元, 张凯, 等. 干旱气候灾害及甘肃省干旱气候灾害研究综述. *灾害学*, 2009, 24(1): 117-121.
- [29] 秦大河. 气候变暖中国经济面临严峻挑战. *中国气象报*, 2007-03-18(1).
- [30] 徐国昌, 姚辉. 甘肃省降水量模糊聚类分区. *甘肃气象*, 1988(3): 4-9.

## The Spatial and Temporal Characteristics of Extreme Drought Events in Shiyang River Basin

WANG Xingmei<sup>1</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>2</sup>, ZHANG Tiaofeng<sup>1</sup>, DAI Shengpei<sup>1</sup>,  
WANG Yamin<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>

(1. Geographic and Environmental Sciences Department of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of CMA, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** With global warming, hot days and warm nights have significantly increased, but cold days and cold nights have decreased, and the frequency of extreme weather and climate events has significantly increased. Climate warming has four major challenges for our economy to face, of which the first challenge is the extreme weather events. The frequency of extreme weather events is getting bigger, with a tendency of getting stronger. Drought in global warming becomes more prominent and sensitive, and is one of the key and hot issues in climate change research. This paper analyzes the spatial and temporal characteristics of extreme drought events in Shiyang River Basin, combining ArcGIS 9.2 and Matlab 7.0 data software platform and using complex Morlet wavelet analysis and mathematical statistical theory. The results show that: (1) the average humidity index increases gradually from north to south in Shiyang Basin, and annual precipitation and altitude have significant positive correlations with the moisture index (0.01 confidence level), while the annual evaporation has a significant negative correlation (0.05 confidence level). (2) From the time point of view, the cycle with extreme drought is 19a, 9a, 6a, 4a and 15a, which may be affected by the South Asia High pressure with a three-year cycle. In spatial scale, the spatial distributions of the extreme drought frequency and surface moisture index are broadly similar, with slight difference, of which the lowest extreme drought frequency is in the Wuwei region, and the humid index in Minqin is the smallest in the study area. Furthermore, the extreme drought events occur mainly from July to September, and the extreme droughts frequency of this period accounts for 60.62% of the total frequency throughout the year. (3) The annual and July-September extreme drought frequencies show a slight upward trend, and the linear trend of the annual frequency is obvious to reach about 0.3/10a. The sudden change of the annual and July-September of extreme droughts frequency can be detected by the Pettitt mutation test, which occurred respectively in 2000 and 1983 (0.01 confidence level).

**Key words:** Shiyang River Basin; extreme drought; humid index; spatial and temporal characteristics

本文引用格式:

王兴梅, 张勃, 张凯, 等. 石羊河流域极端干旱事件的时空变化特征. *地理科学进展*, 2011, 30(3): 299-305.