#### DOI: 10.5846/stxb201508151709

张利利,周俊菊,张恒玮,王蓓,曹建军.基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究.生态学报,2017,37(3): - . Zhang L L, Zhou J J, Zhang H W, Wang B, Cao J J. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on Standard Precipitation Index in Shiyang River Basin.Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

# 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时 空格局特征研究

# 张利利,周俊菊\*,张恒玮,王 蓓,曹建军

西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070

摘要:利用石羊河流域4个气象站1960—2013年逐月降水量资料,应用标准化降水指数(SPI)、游程理论等方法,分析石羊河流 域近54年的气候干湿变化及不同时间尺度干旱事件时空演变特征。结果表明:①不同时间尺度 SPI 对降水量变化的敏感程度 存在较大差异,时间尺度越小,SPI 对一次降水的反应越明显。②石羊河流域年代际、年际和季的 SPI 在波动中均呈增加趋势, 其中,冬季湿润化速度最快,对年湿润化过程的贡献最显著。③1960—2013年,石羊河流域不同时间尺度干旱事件持续时间、 干旱程度和干旱强度均呈减少趋势,且波动渐趋平缓;石羊河流域农业干旱和水文干旱最严重的时期分别为1964—1965年和 1962—1964年。④两种时间尺度干旱事件持续时间的减少速度从上游至下游均逐渐变慢,上游乌鞘岭地区是农业干旱持续时 间最长区域,永昌和下游民勤地区是水文干旱持续时间较长区域;两种时间尺度干旱事件干旱强度减少速度最快区域均在上游 乌鞘岭地区;武威和民勤地区3月尺度干旱强度稍有上升,其它地区不同时间尺度干旱事件干旱强度均呈下降趋势,永昌地区 是多尺度干旱事件干旱强度较大区域。

关键词:气候变化;干旱事件;标准化降水指数;石羊河流域

# Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on Standard Precipitation Index in Shiyang River Basin

ZHANG Lili, ZHOU Junju, ZHANG Hengwei, WANG Bei, CAO Jianjun

College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

**Abstract**: Shiyang River Basin is located in the northwest China, and it is a typical fragile ecosystem area. This region is extremely sensitive to climatic changes, and therefore, monitoring these changes can provide an important evidence for revealing trends indrought-wet transition mechanisms in drought-prone and arid regions of Northwestern China, this study aimed to investigate monthly precipitation data obtained from four stations in Shiyang River Basin. In particular, the Standard Precipitation Index (SPI) and Theory of Runs were adopted to analyze changes in climate drought-wet and space-time evolution of drought events on different time scale during a period of 54 years i.e., from 1960 to 2013. The main results of this study suggest that SPI characteristics at different time scale lead to SPI values were substantial sensitive to precipitation changes, and a smaller time scale resulted in a more sensitive response to one precipitation event. The inter-decadal, inter-annual and seasonal SPI showed an increasing trend. The wetting rate was the fastest in winter, which makes the largest contribution to annual wetting. The drought event duration, drought severity and drought intensity on different time scales showed a decreasing trend, and the fluctuations noticedwere gradually mild. The most serious agricultural

**基金项目**:国家自然科学基金地区项目(41461109);西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-12-18);国家自然科学基金项目(41261104);国家社科基金青年项目(12CTJ001);甘肃省青年科技基金计划项目(1107RJYA077)

收稿日期:2015-08-15; 网络出版日期:2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yzh\_su@ 163.com

http://www.ecologica.cn

drought and hydrological drought occurred during 1964 to 1965 and 1962 to1964, respectively. The drought event duration during two time scales reduced gradually from upstream to downstream, and the longest agricultural drought occurred in Wushaoling areas, whereas the longest hydrological drought occurred in Yongchang and Minqin region. Drought severity of the drought events during the two time scales reduced the fastest in Wushaoling areas. Except for the three-month scale for drought intensity showing a slight increase in Wuwei and Minqin regions, the intensity of drought events showed a decreasing trend in other regions on different time scales. More frequent drought events and relatively higher drought intensity were noted in the middle reaches of the river, especially in Yongchang region.

Key Words: climatic change; drought event; standard precipitation index; Shiyang River Basin

干旱是由于较长时段降水不足而引起水分供应失衡的气候事件[1],是气候灾害中最主要的灾害之一,它 具有出现频率高、持续时间长、波及范围大的特点。干旱的频繁发生和长期的持续不但给国民经济特别是对 农业生产带来巨大损失,还会造成水资源短缺、沙尘暴增加、荒漠化加剧等诸多不利的生态影响<sup>[2-3]</sup>。近年 来,在全球气候变化背景下随着极端天气气候事件频繁出现,干旱的发生频率和强度明显增加<sup>[4]</sup>。干旱对湿 润半湿润地区产生的影响是不言而喻的,而对于干旱地区和极端干旱地区,干旱发生也会导致区域地表变干, 直接影响当地的旱生植物的生长发育,也易成为沙尘暴的源地<sup>[5]</sup>。所以中国北方干旱化问题一直是气象学 和其他学科的一个重要研究课题,特别是对西北典型干旱区的研究备受关注<sup>[6]</sup>。由于干旱的形成原因异常 复杂,影响因素很多,许多干旱指标都是针对具体的研究目的而设定。根据建立途径的不同可以把干旱指标 大致归纳为两类:一类是通过研究干旱机理,力图细致地反映干旱涉及的各个物理过程,以 PDSI (Palmer drought severity index)<sup>[7]</sup>为代表,该类指标的物理机制较为明确,但其计算繁杂,对资料要求较高,部分参数只 能靠经验估计,则计算精度大大降低;另一类干旱指标则是通过气象学方法研究降水量的统计分布规律,以反 映干旱的强度和持续时间,此类指标仅需逐月降水量数据,计算简单,而且由于指标不涉及具体的干旱机理, 时空适应性较强,代表性指标是 McKee 等于 1993 年提出的标准化降水指标(SPI)为代表<sup>[8-9]</sup>。SPI 指标能够 较好地反映干旱强度和持续时间,对干旱变化反应较敏感,同时多时间尺度应用的特性可以为水资源评估和 不同时间尺度的干旱监测服务<sup>[10]</sup>。翟禄新等<sup>[11]</sup>研究得出标准化降水指数(SPI)作为一种干旱重建指标,适 用于西北地区,也可以作为气候变化的监测指标。Wu 等[12-13]的研究表明,在干旱气候条件下,应该更多地关 注干旱持续时间而不只是干旱强度,强调干旱持续时间和强度对干旱研究的重要性。袁文平等[14]指出基于 现有干旱指标的研究成果,未来应加强在应用某种干旱指标时动态评估干旱发生时间,并利用累积系数建立 反映累积效应的机制以准确反映干旱累积效应。

石羊河属西北干旱区内陆河流,地处蒙新、黄土、青藏三大高原交汇过渡带,是生态环境变化敏感区域之一。特殊的地理条件和气候特征决定了石羊河流域是一个干旱频繁发生的地区<sup>[15]</sup>。截至目前,关于石羊河流域干湿变化的最新研究成果:时间上,夏季干旱发生频率最高,冬季频率最低<sup>[15]</sup>;冬季是暖湿化趋势最明显的季节,其次是秋季,极端干旱事件频率在波动中呈减少趋势,极端湿润事件频率在波动中呈增加趋<sup>[16]</sup>;空间上,发生干旱频率最高的是武威站,最低的是民勤和乌鞘岭站<sup>[17]</sup>。以上多是基于某种干旱指数对石羊河流季节和年的干湿变化等进行研究,而对干旱事件的持续时间、强度时空演变特征的分析鲜有报道。本文旨在探讨石羊河流域近 54 年气候干湿变化特征,揭示干旱事件的时空演变规律,以期为流域农业生产和水文干旱监测提供科学依据。

### 1 数据与方法

#### 1.1 研究区概况

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,东经101°41′—104°16′,北纬36°29′—39°27′之间,流 域总面积4.16×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,地势南高北低,自西南向东北倾斜,全流域可分为南部祁连山区,中部走廊平原区,北

部低山丘陵及荒漠区四大地貌单元。石羊河流域由于地处内陆,属于典型的大陆性温带干旱气候,太阳辐射强,日照充足,夏季短而炎热,冬季长而寒冷,温差大,降水少,蒸发强烈,空气干燥,流域上游年平均气温低于 6℃,降雨量 400—600mm,中游年平均气温低于 6—8℃,降水量 150—250mm,下游年平均气温高于 8℃,降水 量不足 150mm。

#### 1.2 数据来源

石羊河流域乌鞘岭、武威、永昌和民勤4个气象站的1960—2013年及2014年1—2月份逐月降水量数据 均来源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/home.do)。本文主要分析对象为不同时间尺 度SPI(基于时间尺度内的降水量)、年SPI(基于年降水量)和季节SPI(基于季节的降水量,其中春季为3—5 月、夏季为6—8月、秋季为9—11月、冬季为12—2月)<sup>[18-19]</sup>。对于54年的时间序列可以获得比较可信的趋 势结果<sup>[20]</sup>,而且所有数据皆经一致性检验与处理。

#### 1.3 研究方法

采用标准化降水指数、游程理论来获得干旱事件的特征指标,分析本地的干湿时间特征;应用 ArcGIS10.0 软件制图分析石羊河流域干旱事件空间格局特征;使用 MK 趋势检验方法<sup>[21]</sup>,在 Minitab 软件里基于 MK 程 序对变化趋势的显著性水平进行 MK 检验统计。为了反映石羊河流域近 54 年每次农业干旱和水文干旱的持 续月数、干旱程度和强度的变化特征,本研究选用 3 月尺度 SPI 值(3 月尺度 SPI 对年内旱涝暴发时间与持续 影响更为敏感,可以反映短期气象旱涝特征,与农业干旱关系密切)和 12 月尺度 SPI 值(12 月尺度 SPI 对长 期旱涝影响及持续时段具有显著标识功能,可以反映长期降水变化,通常与河流水位,水库水位,甚至地下水 位相关度较高)<sup>[22-23]</sup>作为研究时间尺度。

### 1.3.1 标准化降水指数 SPI 及旱涝等级划分

由于不同时间,不同地区降水量变化幅度很大,直接用降水量很难在不同时空尺度上相互比较,而降水分 布是一种偏态分布,不是正态分布,所以可在降水分析中,采用 *Γ*分布概率来描述降水量的变化,然后再经正 态标准化求得 SPI值,SPI具体计算步骤参见文献[24]。依据相关研究<sup>[20,25-26]</sup>,结合石羊河流域实际情况,对 SPI旱涝等级进行划分(表1)。

	Table 1 Classification scales of	f meteorological drought for SPI	
SPI	旱涝等级 Category	SPI	旱涝等级 Category
-1 <spi<0< td=""><td>微干</td><td><math>0 \leq SPI &lt; 1</math></td><td>微湿</td></spi<0<>	微干	$0 \leq SPI < 1$	微湿
-1.5 <spi≤-1< td=""><td>中千</td><td><math>1 \leq SPI &lt; 1.5</math></td><td>中湿</td></spi≤-1<>	中千	$1 \leq SPI < 1.5$	中湿
-2 <spi≤-1.5< td=""><td>重干</td><td><math>1.5 \leq SPI &lt; 2</math></td><td>重湿</td></spi≤-1.5<>	重干	$1.5 \leq SPI < 2$	重湿
SPI≤-2	极干	SPI≥2	极湿

表1 SPI 旱涝等级

标准化降水指数(Standard Precipitation Index, SPI)

#### 1.3.2 游程理论

一般而言,在一个有限取值序列中,满足一定条件的同一符号的一个连串称之为一个"游程",一个游程 中同一符号出现的次数称之为游程的长度。干旱一般可以用干旱持续时间、干旱程度和干旱强度三个特征来 表示<sup>[26-27]</sup>,而这可以用游程理论来得到。有研究认为长历时的 SPI 小于 0 事件也会导致严重水资源供给及与 干旱有关的问题,所以取 0 作为游程的截断水平<sup>[28]</sup>,本文采用了与其相同的截断水平。当 SPI ≤ 0 时定义为 发生了一次干旱事件,游程长度为干旱持续时间 D(单位为月),在游程中累积的 SPI 值与临界值的缺乏值 (即 0 与干旱事件中累积的 SPI 值的差值)为干旱程度(即为干旱事件中累积的干旱缺水状况)*S*,即 *S* =  $\sum_{j=1}^{D}$  *SPI<sub>j</sub>*,其中干旱程度与干旱持续时间的比值为干旱强度(即为干旱事件中平均的干旱缺水状况)*I*,即 *I* = *S*/*D*,根据干旱分级可推出,当 1>*I*>0 时为轻度干旱;当 1.5>*I*≥1 时为中度干旱;当 2>*I*≥1.5 时为重度干旱; 当 *I*≥2 时为极端干旱。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 不同时间尺度 SPI 敏感性特征

从图 1 可以发现,不同时间尺度的 SPI 对降水量变化的敏感程度存在较大差异,时间尺度越小,SPI 对一次降水的反应越明显,其值可能会发生较大变化,甚至是正负波动,时间尺度越大,SPI 对于一次降水的反应越不显著,只有持续的多次降水才会使之发生波动,干湿波动周期亦相应延长;相同时段不同时间尺度发生干湿频次亦存在较大差异,1960—2013 年,1 月、3 月、6 月和 12 月尺度干旱发生频次分别为:27.6 次/10a、16.85 次/10a、12.96 次/10a 和 7.78 次/10a,重湿以上的发生频次分别为:27.4 次/10a、16.85 次/10a、12.78 次/10a 和 7.96 次/10a,说明随着时间尺度的延长,干旱和湿润的发生频次均为减少趋势。以上分析表明,SPI1 和 SPI3 能够反映短期气象旱涝特征,与农业干旱关系密切;SPI6 和 SPI12 可以清楚地反映长期的旱涝变化特征,其中,12 个月尺度 SPI 对长期旱涝影响及持续时段具有显著的标识功能,通常与河流水位,水库水位,甚至地下水位相关度较高,因此,多种时间尺度的 SPI 综合应用可实现对旱涝的综合监测评估。



图 1 石羊河流域近 54 年不同时间尺度 SPI 变化过程



## 2.2 石羊河流域气候干湿变化特征

2.2.1 SPI 年际及年代际变化特征

由图 2 可知,1960—2013 年石羊河流域年 SPI 在波动中呈增加趋势,其变化倾向率为 0.156/10a,经 MK

http://www.ecologica.cn

趋势检验,未通过 P<0.05 的显著性信度水平;干旱年和湿润年分别为 25a 和 29a,虽然干旱年和湿润年的年数相差不多,但干旱年和湿润年达到的等级程度相差较大(图 3),属于极干、重干、中干、微干、微湿、中湿、重湿和极湿的年数分别为 2a、4a、2a、17a、19a、10a、0a、0a,其中,1962 年和 1991 年的 SPI 值分别为-2.93 和 -2.27,属极干旱年份。据《甘肃省历史气候资料》记载:1962 年武威全县各河流 4 月平均流量比上年减少 54.4%,5 月减少 56%,50 万亩夏田未灌水,主要是由当年降水量较少、工农业大量使用河水所致;1991 年大旱使武威市农作物受灾面积达到 39.5%,受灾严重。说明基于年降水量的 SPI 能够较好的监测到干旱年份及干旱等级。从图 4 可以看出,1960s 和 1970s 的 SPI 为负值,为干旱期,1960s 为最干年代,这与王莺等<sup>[17]</sup>的研究 结论一致;1980s、1990s 和 2000s 的 SPI 为正值,为湿润期,2000s 为最湿润年代。其年代际 SPI 值大小的分布规律与周俊菊等<sup>[16]</sup>基于湿润指数所得研究结论基本一致。据以上分析可知,石羊河流域有湿润化的发展趋势,这与王菱等<sup>[29]</sup>的东经 100°以西的西北地区有干暖型向湿暖型转变,周俊菊等<sup>[16]</sup>的石羊河流域有湿化趋势,吴绍洪等<sup>[30]</sup>的青藏高原大多数地区的干湿状况由干向湿发展,靳立亚等<sup>[31]</sup>的甘肃西部的夏、秋两季气候有湿润化趋势的结论基本一致。



图 2 1960—2013 年石羊河流域年 SPI 变化 Fig.2 Evolution of SPI in Shi River Basin during 1960—2013



#### 2.2.2 SPI 季节变化特征

由图 5 可知,1960—2013 年石羊河流域不同季节 SPI 均呈缓慢上升趋势,经 MK 趋势检验,冬季上升趋势极显著(P≤0.01),其他季节未通过 P≤0.05 的显著性水平,上升趋势均不显著,但不同季节 SPI 增加速度和干湿等级频次的分布存在较大差异。春季,SPI 变化倾向率为 0.083/10a,干旱季和湿润季分别为 28a 和 26a,中度及以上干湿季发生频率为 35.18%,其中,1967 年春季 SPI 值为 2.32,湿润等级为极湿;夏季,SPI 变化倾向率为 0.108/10a,干旱季和湿润季均为 27a,中度及以上干湿季发生频率为 25.93%,其中,1962 年和 1991 年夏季 SPI 值分别为-3.15 和-2.63,干旱等级为极干;秋季,SPI 变化倾向率为 0.055/10a,干旱季和湿润季分别为 26a 和 28a,中度及以上干湿季发生频率为 29.63%,其中,1971 年秋季为极湿季,SPI 值为 2.52,1972 年和 1993 年秋季为极干季,SPI 值分别为-2.29 和-2.12;冬季,SPI 变化倾向率为 0.256/10a,干旱季和湿润季均为



图 5 1960-2013 年石羊河流域不同季节 SPI 变化 Fig.5 Change of different seasons SPI during 1960-2013

27a,中度及以上干湿季发生频率为40.74%,其中,1964 年和 1970 年冬季为极干季, SPI 值分别为-2.06 和 -2.2。以上分析表明,冬季湿润化速度最快,对年湿润 化过程的贡献最为显著这与前人研究结果基本一 致[16]:1962年和1991年极端干旱年的发生主要是由该 年夏季极端干旱所致,1963年的重旱主要是受该年的 夏旱和秋旱影响,1972年的重旱主要是由该年的秋旱 所致,2013年的重旱主要是受该年的春旱和秋旱影响 (如表2)。

6



#### 不同季节 SPI 频次统计 图 6

Fig.6 Frequency statistics of different seasonal SPI for seasonal drought

	Table 2 Extrem	e drought and heavy dr	ought year and seasonal	arought grade table		
年份(年)	干湿等级 Classification for drought and wet					
Year	年 Year	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	
1962	极干	重干	极干	微湿	微干	
1963	重干	微湿	中干	重干	微湿	
1965	重干	中干	中干	微湿	中干	
1972	重干	微湿	中干	极干	中干	
1991	极干	中湿	极干	重干	中湿	
2013	重干	中千	微干	中千	中湿	

极干和重干年份的年和季节干旱等级对照表 表 2

2.3 石羊河流域干旱事件时空变化特征

2.3.1 石羊河流域干旱事件时间变化特征

(1) 干旱事件持续时间变化特征

在3月尺度和12月尺度中,一次干旱事件开始到结束所跨越年份定为该次事件的名称(图7、图8和图 9)。由图7可知,不同时间尺度干旱事件持续时间变化特征存在差异。①3月尺度,干旱事件持续时间整体 呈极显著的减少趋势(P≤0.01,变化倾向率约为-0.418月/10a),干旱事件持续时间的离散程度亦渐趋平缓,

7

其中,1960s、1980s、1990s 干旱事件平均持续时间分别为 3.82 个月、4.27 个月、3.17 个月,1970s 最长为 4.67 个 月,2000s 最短为 2.5 个月;近 54 年多次干旱事件平均持续时间为 3.527 个月,大多数干旱事件持续时间处于 1—8 个月之间,其中,持续时间最长的是 1974/75 干旱事件,持续时间长达 18 个月。②12 月尺度,干旱事件 持续时间整体亦呈减少趋势,但减少趋势不显著(变化倾向率约为-0.809 月/10a),干旱事件持续时间的离散 程度亦有渐趋平缓的趋势,其中,1970s、1980s、2000s 干旱事件平均持续时间分别为 6.63 个月、7.44 个月、6.1 个月,1960s 最长为 11.6 个月,1990s 最短为 5.1 个月;近 54 年多次干旱事件平均持续时间为 6.905 个月,大多 数干旱事件持续时间处于为 1—20 个月之间,其中,持续时间最长的是 1962/64 干旱事件,持续时间长达 27 个月,其次是 1965/67、1974/76、1990/92 干旱事件,其持续时间分别为 24、23、24 个月。以上分析表明,3 月尺 度和 12 月尺度干旱事件持续时间整体变化趋势基本一致,但 12 月尺度干旱事件平均持续时间和减少速度均 大于 3 月尺度。





#### (2) 干旱事件干旱程度变化特征

据图 8 可知,近 54 年石羊河流域不同时间尺度干旱事件干旱程度及其离散程度均呈较明显的下降趋势。 其中,3 月尺度,干旱事件干旱程度在 0.02—16.13 之间波动,干旱程度平均值为 2.835,最严重的是 1964/65 事件,其 SPI3 绝对值累计值为 16.13,次之的是 1974/75、1972/73 和 1962 事件,其值分别为 15.35、15.18 和 14.49;12 月尺度,干旱事件干旱程度在 0.02—51.66 之间波动,干旱程度平均值为 5.942,最严重的是 1962/64 事件,其 SPI12 绝对值累计值为 51.66,次之的是 1990/92、1965/67 和 1974/76 事件,其值分别为 36.43、30.61 和 24.28。结合图 8 中 5 次滑动平均线可以看出:3 月尺度和 12 月尺度具体时段干旱程度变化趋势与其干旱 持续时间变化趋势基本一致,也就是说一般干旱持续时间较长的干旱事件干旱程度也较重。综合以上分析, 从水分亏缺量来看,1964/65 事件的 SPI3 绝对值和 1962/64 事件的 SPI12 绝对值的累计值最大,说明 1964— 1965 年是石羊河流域近 54 年农业干旱最严重的时期,1962—1964 年是近 54 年水文干旱最严重的时期,以上 结论与已有研究结果<sup>[32]</sup>基本一致。



图 8 1960—2013 年石羊河流域 SPI3(a)、SPI12(b)干旱事件干旱程度变化 Fig.8 Change of SPI3(a) /SPI12(b) drought events severity of the Shiyang River Basin during 1960—2013

(3) 干旱事件干旱强度变化特征

据图 9 可知,3 月尺度和 12 月尺度干旱事件干旱强度整体均呈减小趋势,变化倾向率分别为-0.0421/10a 和-0.0583/10a,经 MK 趋势检验,减少趋势均不显著。3 月尺度,近 54 年干旱事件干旱强度的平均值为 0. 587,86.87%的干旱事件干旱强度在 0.02—1 之间波动,最强的是 1991 事件,值为 2.308,为极干事件,其次是 1962 事件,干旱强度为 2.07,也为极干事件;12 月尺度,干旱事件干旱强度的平均值为 0.524,83.33%的干旱 事件干旱强度在 0.02—1 之间波动,最强的是 1962/64 事件,值为 1.913,为重干事件,其次是 1972/73 事件,值 为 1.79,也达到重干。据分析可知,石羊河流域短尺度干旱事件强度与长尺度干旱事件强度相比,下降速度更 慢,干旱强度的平均值和波动幅度更大。所以从干旱事件的整体来看,农业干旱强度比水文干旱强度严重。 2.3.2 石羊河流域干旱事件空间格局特征

(1) 干旱事件持续时间空间特征

近54年来,石羊河上中下游不同地区不同时间尺度干旱事件持续时间及其变化存在明显差异。3月尺度,上中下游干旱事件持续时间均呈减少趋势,经MK趋势检验,上游乌鞘岭地区减少速度最快,变化倾向率为-0.782月/10a,减少趋势较显著(P<0.05),其次是中游地区,平均变化倾向率为-0.209月/10a,减少趋势不显著,下游民勤地区干旱事件持续时间减少速度最慢,减少趋势亦不显著(变化倾向率为-0.119月/10a); 干旱事件持续时间平均值的最低值在永昌地区,而石羊河流域东部亦存在从上游到下游(乌鞘岭-武威-民勤)逐渐递减的变化趋势。12月尺度,上中下游干旱事件持续时间均呈减少趋势,永昌地区减少速度最快,就平均情况来看,从上游到下游干旱事件持续时间减少速度逐渐变慢;干旱事件持续时间平均值的低值区在武威地区,高值区在永昌地区,从整体来看,从上游到下游,干旱事件持续时间平均值逐渐增加。以上分析表明,两种时间尺度干旱事件持续时间的减少速度均从上游到下游逐渐变慢,就持续时间平均值而言,上游乌鞘岭







图 10 SPI3 和 SPI12 干旱事件持续时间变化倾向率及平均值空间分布

Fig.10 Spatial distribution of change trend rate and average value for SPI3/SPI12 drought events duration

(2) 干旱事件干旱程度空间特征

近 54 年来,3 月尺度和 12 月尺度石羊河流域各站点干旱事件的干旱程度在波动中均呈减少趋势。3 月 尺度,干旱事件干旱程度变化倾向率的空间分布规律和持续时间变化倾向率的空间分布规律基本一致。12

http://www.ecologica.cn

9

月尺度,上游乌鞘岭地区干旱事件干旱程度减少速度最快,其次是永昌地区,武威地区减少速度最慢;干旱事件干旱程度平均值的最大值在下游民勤地区,最小值在武威地区。以上分析表明,两种时间尺度干旱事件干

旱程度减少速度最大的地区均在上游乌鞘岭地区,水分亏缺状况有所缓解,湿润化趋势明显,而干旱事件干旱 程度平均值出现了截然相反的空间格局特征,从干旱事件干旱程度平均值来看,武威地区的农业水分亏缺量 比较大,而民勤地区的水文水分亏缺量比较大。





(3) 干旱事件干旱强度空间特征

从图 12 可以看出,3 月尺度和 12 月尺度干旱事件干旱强度变化倾向率具有相同的空间分布格局,乌鞘 岭地区减少速度最快,然后依次为永昌地区、民勤地区、武威地区,不同的是 3 月尺度武威地区和民勤地区干 旱事件干旱强度有轻微的增加趋势,经 MK 趋势检验,增加趋势均不显著;近 54 年干旱事件干旱强度的平均 值,3 月尺度的最大值在中游武威和永昌地区,最小值在上游乌鞘岭地区,12 月尺度的最大值在中游的永昌地 区,最小值在武威地区,据以上分析可知,永昌是多尺度干旱事件干旱强度较大的地区,该地区是严重的农业 干旱事件和水文干旱事件的多发区。

#### 3 结论

(1)不同时间尺度 SPI 对降水量变化的敏感程度存在较大差异,时间尺度越小,SPI 对于一次降水的反应 越明显,SPI1 和 SPI3 能够反映短期气象旱涝特征,与农业干旱关系密切;SPI6 和 SPI12 可以清楚地反映长期 的旱涝变化特征。

(2)石羊河流域年代际、年际和季的 SPI 在波动中均呈增加趋势,湿润化趋势明显,其中,1962 年和 1991 年为极干年份;1960s 为最干旱年代,2000s 为最湿润年代;冬季湿润化的速度最快,对年湿润化过程的贡献最为显著,其次为夏季。

(3)近54年石羊河流域不同时间尺度干旱事件持续时间、干旱程度和干旱强度均呈减少趋势,且波动渐 趋平缓,短尺度干旱事件强度与长尺度干旱事件强度相比,下降的速度更慢,平均值和波动幅度更大。综合来 看,1964—1965年是石羊河流域近54年农业干旱最严重的时期,1962—1964年是近54年水文干旱最严重的





时期。从干旱事件干旱强度来看,农业干旱比水文干旱严重。

(4)从空间格局来看,两种时间尺度干旱事件持续时间的减少速度从上游到下游均逐渐变慢,上游乌鞘 岭地区农业干旱持续时间最长,中游永昌和下游民勤地区的水文干旱持续时间最长;两种时间尺度干旱事件 干旱程度减少速度最快的地区均在上游乌鞘岭地区,水分亏缺状况有所缓解,湿润化趋势明显,而干旱事件干 旱程度平均值出现了截然相反的空间格局特征;除武威和民勤地区3月尺度干旱强度稍有上升趋势之外,其 它地区不同时间尺度干旱事件干旱强度均呈下降趋势,而永昌是多尺度干旱事件干旱强度较大的地区,为农 业干旱事件和水文干旱事件的多发区。

#### 参考文献(References):

- [1] 王芝兰,王劲松,李耀辉,王澄海.标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析.高原气象 2013,32(3): 839-847.
- [2] 张强. 华北地区干旱指数的确定及其应用. 灾害学, 1998, 13(4): 34-38.
- [3] 包云轩, 孟翠丽, 申双和, 邱新法, 高苹, 刘聪. 江苏省典型干旱过程特征. 生态学报, 2011, 31(22): 6853-6865.
- [4] 黄晚华,杨晓光,李茂松,张晓煜,王明田,代妹玮,马洁华.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征.农业工程学报,2010,26(7):50-59.
- [5] 李耀辉,张书余.我国沙尘暴特征及其与干旱关系的研究进展.地球科学进展,2007,22(11):1169-1176.
- [6] 周扬, 李宁, 吉中会, 顾孝天, 范碧航. 基于 SPI 指数的 1981-2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1694-1706.
- [7] Palmer W C. Meteorological drought in USA. Weather Bureau Research Paper, Washington DC: US Weather Bureau, 1965: 45-58.
- [8] 袁文平,周广胜.标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析.植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529.
- [9] Gocic M, Trajkovic S. Spatiotemporal characteristics of drought in Serbia. Journal of Hydrology, 2014, 510: 110-123.
- [10] 陈丽丽,刘普幸,姚玉龙,朱晓娟,赵敏丽. 1960—2010 年甘肃省不同气候区 SPI 与 Z 指数的年及春季变化特征. 生态学杂志, 2013, 32 (3):704-711.
- [11] 翟禄新,冯起. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847-857.
- [12] Wu H, Hayes M J, Wilhite D A, Svoboda M D. The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation. International Journal of Climatology, 2005, 25(4): 505-520.

[13]	Wu H, Svoboda M D, Hayes M J, Wilhite D A, Wen F J. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry
	seasons. International Journal of Climatology, 2007, 27(1): 65-79.
[14]	袁文平,周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望.地球科学进展,2004,19(6):982-991.

- [15] 张调风,张勃,王有恒,刘秀丽,安美玲,张建香.基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析. 生态学报, 2013, 33 (3): 975-984.
- [16] 周俊菊,石培基,师玮. 1960-2009 年石羊河流域气候变化及极端干湿事件演变特征. 自然资源学报, 2012, 27(1): 143-153.
- [17] 王莺, 赵福年, 姚玉璧, 李耀辉. 基于 Z 指数的石羊河流域干旱特征分析. 灾害学, 2013, 28(2): 100-106.
- [18] 张调风, 张勃, 张苗, 刘秀丽, 孙力炜, 安美玲. 1962—2010 年甘肃省黄土高原区干旱时空动态格局. 生态学杂志, 2012, 31(8): 2066-2074.
- [19] Jiang D J, Li Z, Wang Q X. Trends in temperature and precipitation extremes over Circum-Bohai-Sea region, China. Chinese Geographical Science, 2012, 22(1): 75-87.
- [20] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993, 17(22): 179-183.
- [21] 季定民, 张勃, 王东, 马琼, 张耀宗, 赵一飞, Yagoub Y E. 甘肃河东玉米种植区春夏气象干旱时空变化特征及其与环流因子关系. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1547-1559.
- [22] 叶正伟. 基于 SPI 的江苏沿海开发地区旱涝演变特征分析——以盐城市为例. 地理科学, 2014, 34(4): 479-487.
- [23] 王媛媛, 张勃. 基于标准化降水指数的近 40a 陇东地区旱涝时空特征. 自然资源学报, 2012, 27(12): 2135-2144.
- [24] Husak G J, Michaelsen J, Funk C. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications. International Journal of Climatology, 2007, 27(7): 935-944.
- [25] Lloyd-Hughes B, Saunders M A. A drought climatology for Europe. International Journal of climatology, 2002, 22(13): 1571-1592.
- [26] Hassan I H, Mdemu M V, Shemdoe R S, Stordal F. Drought pattern along the coastal forest zone of Tanzania. Atmospheric and Climate Sciences, 2014, 4(3): 369-384.
- [27] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [28] 肖名忠,张强,陈小宏.基于多变量概率分析的珠江流域干旱特征研究.地理学报,2012,67(1):83-92.
- [29] 王菱,谢贤群,李运生,唐登银.中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化.地理研究, 2004, 23(1):45-54.
- [30] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 杨勤业. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. 地理学报, 2005, 60(1): 3-11.
- [31] 靳立亚,李静,王新,陈发虎.近50年来中国西北地区干湿状况时空分布.地理学报,2005,59(6):847-854.
- [32] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征. 地理学报, 2003 (增刊): 61-68.