

基于 SPI 的渭北黄土高原干旱时空特征

王晓峰^{1, 2*}, 胡春艳^{1, 3}, 卫伟³, 于洋³

1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721016;
3. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态重点实验室, 北京 100085

摘要: 渭北黄土高原是陕西省重要的粮食生产基地, 为了提高该地区应对干旱气候事件的能力, 利用 1986—2015 年渭北黄土高原地区逐日降水资料详细分析该地区干旱变化的时空演变规律, 通过计算标准化降水指数 (SPI), 定量表征该地区的干旱时空特征, 结果表明: (1) 近 30 年该地区 SPI 和降水量的变化趋势基本相近, 都呈规律性波动变化, 但有些月份差异比较大, 这是由于 SPI 对不同时间尺度降水量的敏感性不同。(2) 不同时间尺度的 SPI 可以较好地反映干旱洪涝的发展演变状况和趋势。SPI 能够明确地反映渭北黄土高原的干旱变化状况, 短时间尺度 (1 个月) 能够反映逐月的干旱变化, 3 个月能够反映季节的干旱变化, 而长时间尺度 (12 个月) 则可以反映水分的滞后性作用。通过对多时间尺度 SPI 的时间序列分析可以发现, 渭北黄土高原总体上有变湿的趋势, 且随着时间尺度的增加, SPI 的随机性在减弱, 持续性在加强。与气候变化相对应, 全区干旱频次有总体下降的趋势。(3) 渭北黄土高原干旱主要出现在 1993、1994、1997、1998 和 2001 年。对不同季节的 SPI 分析结果表明, 春季和夏季干旱发生频率较高, 秋季和冬季干旱频率较低。同时, 干季干旱频率较高, 湿季干旱频率较低。(4) 渭北黄土高原不同地区干旱具有相对一致的趋势。研究结果可为渭北黄土高原农业旱情管理与决策提供科学依据。

关键词: SPI; 渭北黄土高原; 干旱; 滞后性; 干旱频率

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.03.008

中图分类号: S16; X16

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2016) 03-0415-07

引用格式: 王晓峰, 胡春艳, 卫伟, 于洋. 基于 SPI 的渭北黄土高原干旱时空特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(3): 415-421.

WANG Xiaofeng, HU Chunyan, WEI Wei, YU Yang. Temporal and Spatial Characteristics of Drought Based on Standardized Precipitation Index in Weibei Loess Plateau [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(3): 415-421.

干旱是短期的水分短缺现象, 涉及气象、农业、水文及社会经济等诸多领域 (张晓煜等, 2011), 从全球范围看, 干旱发生频率高、持续时间长、会在大范围内造成严重的环境、社会和经济后果, 是一种复杂的自然灾害现象 (程亮等, 2013; 姚玉璧等, 2007; 郑远长, 2000)。全球气候变暖, 以及由此而导致的海平面上升、水圈循环变化、海洋酸化、极端天气和气候事件频率和强度增加对不同的生态系统都会产生不同的影响 (姜大膀等, 2012; 秦大河, 2014)。由于干旱的影响效应是非结构性的, 同时又可以实现不同尺度的蔓延, 所以对干旱的定义乃至监测都存在诸多困难 (Lei et al., 2003; 王宏, 2008)。

中国历来就是一个干旱灾害严重的国家, 由于我国地处东亚季风气候区, 季风气候明显, 降雨量的季节波动和年际变化显著, 空间分布不均匀, 以及其他一些因素造成了我国干旱频繁发生 (茅海

洋, 2012), 每年因旱灾造成的粮食减产和经济损失约占因气象灾害造成的经济总损失 50% (黄荣辉等, 2003)。黄土台源地带是黄土高原重要的粮食生产基地, 在气候变化和人为干扰的双重影响下, 农业干旱形势存在不断恶化。已开始威胁到我国的粮食安全和社会经济的可持续发展。因此开展干旱的评估、监测与预测研究, 对合理进行农业生产具有重要意义 (张俊等, 2011; 闫峰等, 2010)。学者们先后提出了帕默尔干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI) (Palmer, 1965)、地表水分供应指数 (Surface Water Supply Index, SWSI) (Shafer et al., 1982) 和标准化降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) (McKee et al., 1993; McKee et al., 1995) 等干旱指数因子来定量表达干旱发生程度。其中由 McKee 等提出的 SPI, 因计算简单, 资料获取容易, 具有稳定的计算特性, 消除了降水的时空差异, 同时能够在各个

基金项目: 高分地球表层系统科学研究应用示范系统 (一期) 黄土高原生态系统变化研究示范 (30-Y30B13-9003-14/16); 国家自然科学基金项目 (41501091); 陕西省自然科学基金项目 (2014JM5211); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目 (14JS010)

作者简介: 王晓峰 (1977年生), 男, 副教授, 博士, 主要从事生态遥感方面的教学与科研。E-mail: hcc@chd.edu.cn

收稿日期: 2015-12-22

区域和各个时段乃至不同时间尺度有效反应旱涝状况,而被广泛应用。Livada et al. (2007) 利用希腊气象站点降雨量数据计算希腊地区的 SPI 值,分析了该区域干旱发生的时空特征; Hayes et al. (1999) 采用 SPI 分析了 1996 年美国南部平原和西南地区的干旱状况; Mihajlovic (2006) 采用不同时间尺度 SPI 分析了克罗地亚帕诺尼亚地区 2003—2004 年的气象干旱状况; 袁文平等 (2004) 通过计算并比较 SPI 和 Z 指数,分析了 SPI 对我国干旱监测的适用性,结果表明 SPI 消除了降水的时空分布差异,在各个区域和各个时段均能有效地反映旱涝状况,优于被我国广泛应用的 Z 指数; 冷明珠等 (2007)、李伟光等 (2009) 采用 SPI 分别对我国青海省和海南省进行了干旱监测和检验,结果表明该指数可较好地进行气象干旱监测与评价; 赵桂香 (2008) 分析山西省代表站点的 SPI 演变趋势,研究了干旱化趋势对山西省水资源的影响并提出了解决水资源短缺的对策,具有较重要的现实意义。

渭北黄土高原地区人类活动频繁,生态环境脆弱,是我国主要的干旱响应区之一。目前,大多学者主要采用以点代面的单一方法对研究区内 SPI 变化特征进行研究,而在实际应用中该方法会产生较大误差。为了弥补气象观测站点分布不均以及分布稀疏的不足,使数据能客观反应气象要素在区域上的时空属性 (王英等, 2006), 本文以渭北黄土高原 12 个气象站点 1986—2015 年逐月降水资料为基础,选用 SPI 作为干旱定量评价指标,综合以 SPI

栅格化处理和时序相结合的方法研究渭北黄土高原地区近 30 年季节性干旱的时空变化特征,以期为渭北黄土高原农业旱情管理与决策提供科学支撑和理论支持。

1 研究区概况

渭北黄土高原位于黄土高原中部、地处关中原向黄土高原过渡的地带,介于东经 $107^{\circ}10'$ ~ $110^{\circ}50'$ 和北纬 $34^{\circ}10'$ ~ $35^{\circ}50'N$ 之间,总面积 $11\,398\text{ km}^2$,黄土台塬地貌分布于该地区,属典型的温带季风气候,年降雨量介于 $400\sim 800\text{ mm}$,年均气温 $17.7\sim 18.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,是陕西省主要的粮食产地之一。土地利用类型以耕地为主,西部地区分布大面积的耕地,建筑用地主要是居民地,中部地区以耕地为主,东北部地区以林地、草地和建筑用地为主 (见图 1)。

2 资料与方法

2.1 数据来源

本研究收集了宝鸡市、咸阳市、铜川市和渭南市等 12 个气象站台 1986—2015 年逐日降水资料 (数据来源于中国气象数据网, <http://data.cma.cn/>),为了保证资料的完整性,对个别台站的缺测数据进行了插补处理,主要采用的是均值替换法 (周丹等, 2014)。

气象上一般将春季定为 3—5 月,夏季定为 6—8 月,秋季定为 9—11 月,冬季定为 12—2 月。本文分别计算了季节 SPI 和干季、湿季 SPI。如春季 SPI 是指春季 3 个月降水累加计算出来的 SPI,其它依此类推。干 (湿) 季 SPI 是指干 (湿) 季 6 个月降水累加计算出来的 SPI,由于干季跨越自然

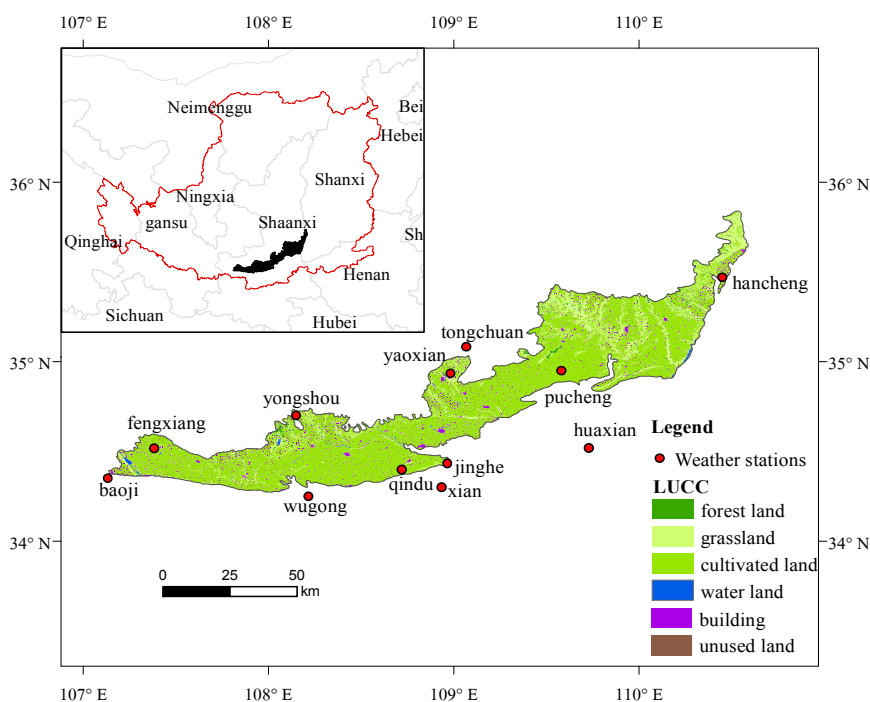


图 1 渭北黄土高原地理位置及 2015 年土地利用类型

Fig. 1 The geographical location of Weiwei Loess Plateau and landuse types in 2015

年，在下文中将 11 月到次年 4 月记为当年所在年份的干季，湿季为每年的 5—10 月，如 2000 年 11 月—2001 年 4 月记为 2000 年的干季，2000 年 5 月—2000 年 10 月记为 2000 年的湿季。

2.2 研究方法

标准化降水指数 (SPI) 在计算出某时段内降水量的 Γ 分布概率后，再进行正态标准化处理，最终用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级。

SPI 计算方法 (Guttman, 1998) 如下：

(1) 假设某时段降水量为随机变量 x ，则其满足 Gamma 分布的概率密度函数为：

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, \quad x > 0 \quad (1)$$

其中： $\alpha > 0$ 为形状参数， $\beta > 0$ 为尺度参数， $x > 0$ 为降水量。 $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数，其概率函数为：

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (2)$$

最佳的 α 和 β 可用极大似然估计法求得：

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (4)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x_i)}{n} \quad (5)$$

式中， x_i 为降水量序列的样本， $\bar{x}$ 为降水量序列的平均值， n 为计算序列的长度，时间长度的累积概率可由下式计算：

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx \quad (6)$$

式(2)由于 Gamma 方程中不包含 $x=0$ 的情况，而实际的降水量可能为 0，所以累积概率表达为：

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (7)$$

式中， q 是降水量为 0 的概率，如果设 m 为降水时间序列中降水量为 0 的数量，则有 $q=m/n$ 。

累积概率 $H(x)$ 可通过下式转换为标准正态分布函数：

$$H(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt \quad (8)$$

对其进行近似求解得到以下结果：

当 $0 < H(x) \leq 0.5$ 时，

$$SPI = - \left(t - \frac{2.515517 + 0.802853t + 0.010328t^2}{1 + 1.432788t + 0.189269t^2 + 0.001308t^3} \right) \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{H(x)^2} \right]} \quad (10)$$

当 $0.5 < H(x) < 1$ 时，

$$SPI = \left(t - \frac{2.515517 + 0.802853t + 0.010328t^2}{1 + 1.432788t + 0.189269t^2 + 0.001308t^3} \right) \quad (11)$$

$$t = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[1.0 - H(x)]^2} \right\}} \quad (12)$$

根据以上公式求得 SPI 值。SPI 反映不同时间和地区的气候特点，其干旱等级划分具有气候意义，适用于不同时段不同地区，具体等级划分参照表 1。

表1 标准化降水指数SPI的干旱等级

Table 1 Drought grades classified with Standardized Precipitation Index

Drought category	SPI	Frequency of drought/%
Near-normal	$-0.5 < SPI$	68%
Mild dry	$-1.0 < SPI \leq -0.5$	15%
Moderate dry	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	10%
Severe dry	$-2.0 < SPI \leq -1.5$	5%
Extreme dry	$SPI \leq -2.0$	2%

引自中国气象局 2005 年 6 月 30 日制定的《干旱监测和影响评价业务规定》(何卓马等, 2010)

3 结果分析

3.1 逐月 SPI 变化

1986—2015 年逐月 SPI 指数和降水量的时间变化如图 2 所示，2001 年 3 月是相对最早月份，SPI 指数为 -2.69，该月降水仅为 0.6 mm，是 3 月份多年平均降水量的 2.6%，此外，出现特旱 ($SPI \leq -2.0$) 的年份有 1993 年 9 月、1994 年 5 月、1997 年 6 月和 8 月、1998 年 11 月、2001 年 3 月。1993—2001 年连续出现重旱或特旱情况，但都发生在个别月份，从 SPI 指数看，近 30 年来没有出现极端干旱年。此外，SPI 指数和降水量的变化趋势基本相近，但有些月份差异比较大，这是由于逐月 SPI 值对降水量的敏感性较高，导致 SPI 值产生较大变化，随着时间尺度增加，这种差异就会减小。

3.2 季节 SPI 变化

干旱在不同季节有不同特征，渭北黄土高原地区不同季节 SPI 随时间的变化如图 3 所示。由图可知该地区在部分年份发生了不同程度的干旱。在图 3 (a) 中，有 4 年冬季出现了不同程度的干旱，分

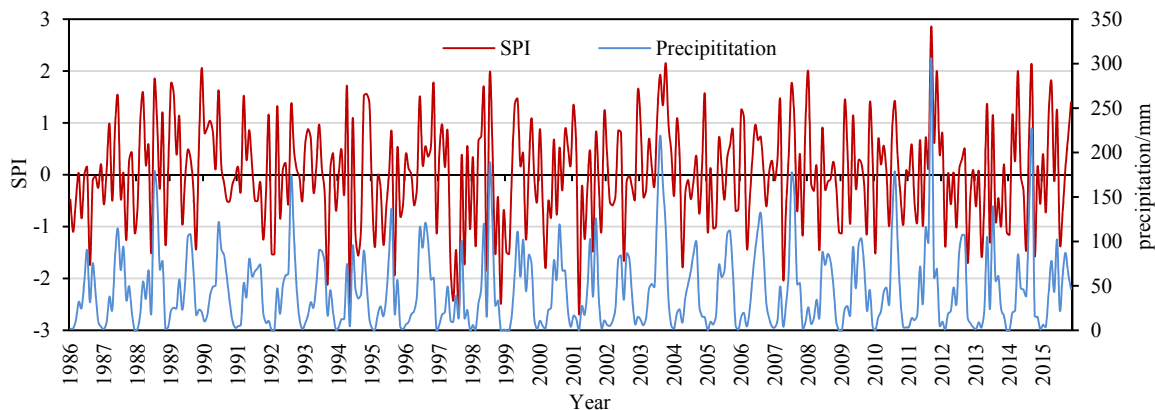


图 2 渭北黄土高原 1986—2015 年逐月 SPI 指数和降水量的时间变化

Fig. 2 The monthly variation of SPI and precipitation in 1986–2015 in Weiwei Loess Plateau

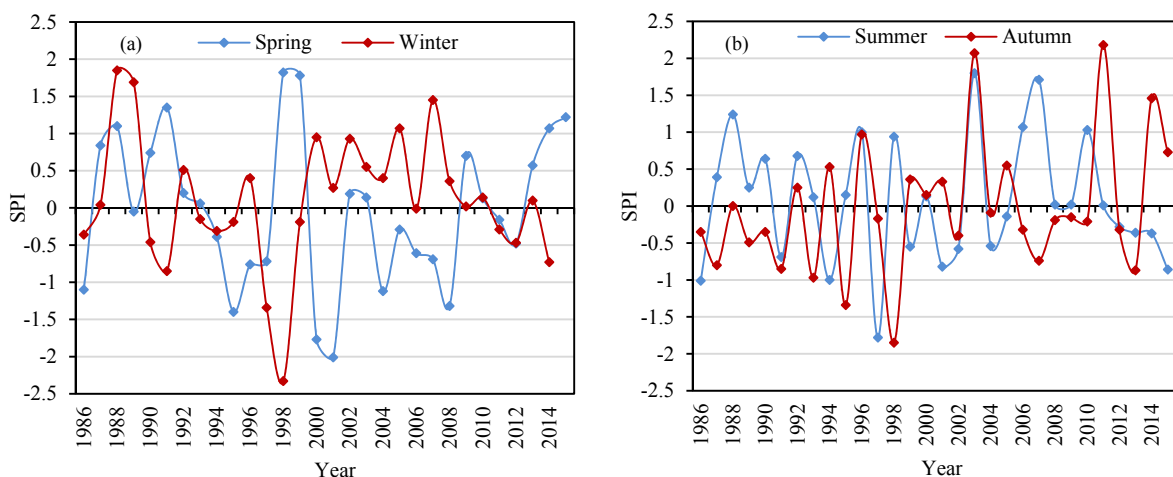


图 3 渭北黄土高原 1986—2015 年季节 SPI 指数的时间变化

Fig. 3 The seasonally variation of SPI in 1986–2015 in Weiwei Loess Plateau

别是 1991、1997、1998 和 2014 年, 其中特旱 1 年, 中旱 1 年, 轻旱 2 年, 发生频率为 13.33%, 1998 年冬季为该地区最早的冬季, SPI 指数为-2.33; 春季特旱只发生在 2001 年, 重旱只发生在 2000 年, 中旱和轻旱发生的频率相对较高, 都发生了 4 年, 30 年来, 春季干旱发生频率为 33.33%, 大于冬季。

由图 3 (b) 可知夏季与秋季干旱发生的情况。其中夏季发生干旱的年数为 8 年, 干旱频率为 26.67%, 秋季发生干旱的年数为 6 年, 干旱频率为 20%。夏季和秋季均未发生特旱事件, 但是夏季的轻旱年数稍有增加。

3.3 干湿季 SPI 变化

由于渭北黄土高原地区属温带季风气候, 干湿季十分明显, 图 4 给出了干湿两个季节 SPI 指数随时间的变化, 以便对干湿季节干旱状况进行分析。

由图 4 可知, 干季出现干旱次数明显比湿季多, 1991 年的干季为特旱季, SPI 指数为-2.05。湿季中最早的年份是 1997 年, SPI 指数为-1.89。干湿季出现干旱的次数分别为 9 次和 4 次, 干季轻旱、中旱、

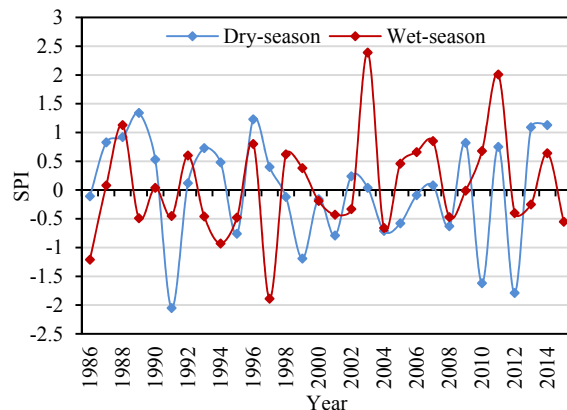


图 4 渭北黄土高原 1986—2015 年干季和湿季 SPI 指数的时间变化

Fig. 4 The variation of SPI in dry and wet seasons in 1986–2015 of Weiwei Loess Plateau

重旱、特旱均有发生, 干旱发生比较频繁, 而湿季以轻旱为主。

3.4 干旱频率分析

为了详细比较渭北黄土高原地区各个季节不同等级干旱发生情况, 表 2 列出了不同季节及干湿

表2 渭北黄土高原不同季节干旱频率统计表

Table 2 Statistics of different drought grades in different seasons of Weibei Loess Plateau

Classification	Winter	Spring	Summer	Autumn	Dry-season	Wet-season
Extreme dry	1	1	0	0	1	0
(SPI _M , year)	(-2.33, 1998)	(-2.01, 2001)	null	null	(-2.05, 1991)	null
Severe dry	0	1	1	1	2	1
(SPI _M , year)	null	(-1.77, 2000)	(-1.78, 1997)	(-1.85, 1998)	(-1.79, 2013)	(-1.89, 1997)
Moderate dry	1	4	2	1	1	0
(SPI _M , year)	(-1.34, 1997)	(-1.4, 1995)	(-1.01, 1986)	(-1.34, 2002)	(-1.19, 1999)	null
Mild dry	2	4	5	4	5	3
(SPI _M , year)	(-0.85, 1991)	(-0.76, 1996)	(-0.82, 2001)	(-0.97, 2007)	(-0.79, 2001)	(-0.93, 1994)
frequency of drought/%	13.33%	33.33%	26.67%	20%	30%	13.33%

季统计结果，其中括号中的 SPI_M 指的是某干旱等级中最大 SPI 值，括号中的 year 是指最大 SPI 值出现的年份。由表 2 可知，春季是全年中相对最早的季节，其次是干季，这与研究区的实际情况也比较吻合。此外，尽管干季中降水较少，干旱频率大于湿季，但干季不是干旱季节，只是降水相对较少，此时，农作物生长季节已经过去，需水量明显小于生长季节，因此降水减少并不会带来较大影响。但若降水过于稀少或者完全没有降水，农业和生活用水仅依靠水库和水塘维持，那么就会导致现有水源枯竭，产生干旱灾害。

3.5 SPI 空间变化

为分析方便，采用 12 个月的时间尺度，在空

间上将渭北黄土高原分为北部、中部和西部。其中，北部包括韩城市、合阳县、澄城县、大荔县、白水、蒲城县；中部包括富平县、耀县、三原县、泾阳县、礼泉县、兴平市；西部包括宝鸡市、凤翔县、岐山县、扶风县、杨陵区、永寿县、乾县。

渭北黄土高原北部、中部和西部地区的 SPI 时间变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知 3 个地区 SPI 变化趋势十分相近，说明该地区干旱情况在空间上差异不明显。

4 结论及讨论

4.1 讨论

表 3 是对基于 SPI 不同地区干旱情况的对比分析，相关研究结果表明：甘肃省河东地区 1971—

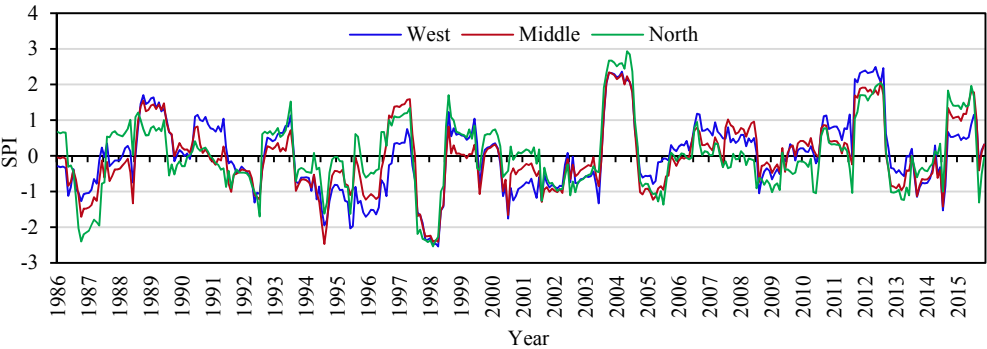


图5 渭北黄土高原北部、中部和西部地区的 SPI 时间变化

Fig. 5 The temporal variation of SPI in northern, central and western in Weibei Loess Plateau

表3 不同地区研究结果对比

Table 3 The results of different areas

Study area	Year	Results	Reference
Hedong region in Gansu province	1971—2005	drought increased	(王莺等, 2014)
Hebei province	1965—2005	drought increased	(李春强等, 2008)
Yunnan province	1958—2012	drought increased	(杨晓静等, 2014)
Guanzhong area in Shaanxi Province	1961—2001	drought increased	(谭学志等, 2011)
The Weihe River Basin	1961—2010	drought increased	(黄生志等, 2015)
Northwest	1961—2009	drought reduced	(任余龙等, 2013)
	1951—2006		(翟禄新等, 2011)
Xilinguole league	1961—2011	drought increased	(李春兰等, 2014)
Ningxia province	1959—2011	drought increased	(王允等, 2014)
The south of China	1951—2008	drought increased	(黄晚华等, 2010)
Fujian Province	1960—2006	drought reduced	(陈莹等, 2011)
Huaihe River basin	1961—2010	drought increased	(郑晓东等, 2012)

2005年总体上呈变干趋势,且干旱出现较多的时期为1991—2005年;河北省1958—2007年SPI在减小,干旱程度在增加;云南省1958—2012年干旱整体在加重,干旱强度在各时间尺度上均呈不同程度增加趋势;陕西关中地区1961—2001年SPI呈下降趋势,气象干旱程度在加剧;渭河流域1961—2010年干旱趋势明显,其中干旱化显著的月份主要有11、12以及1月;西北地区1951—2009年干旱趋势下降,干旱频次总体下降,这是由于全球气候变暖导致西北地区降水量、冰川融水量、河川径流量增加和湖泊水位上升的缘故;内蒙古锡林郭盟近52年以0.082/10a的速度趋于干旱化,且干旱出现的频率在增加;近53年来,宁夏回族自治区年SPI在波动中呈降低的趋势,其变化倾向率为-0.131/10a,呈更加干旱趋势,且干旱增幅以21世纪最大;中国南方1951—2008年干旱程度在时间尺度上呈不同程度增加趋势;福建省近50年总体上向洪涝的趋势发展,SPI指数在20世纪60年代先升后降,至70年代中后期开始上升,80年代初发生短暂下降,此后持续上升,上升趋势一直持续到21世纪;近50年来,淮河流域干旱发生面积有逐年递减而发生强度呈增强趋势。

4.2 结论

本文采用SPI作为气象干旱评价因子,对1986—2015年渭北黄土高原干旱的时空变化特征进行了研究,得出以下主要结论:

(1)通过对渭北黄土高原近30年逐月降水资料计算SPI值,结果显示,该地区SPI和降水量的变化趋势基本相近,都呈规律性的波动变化,但有些月份差异比较大。

(2)应用标准化降水指数SPI能够明确地反映渭北黄土高原的干旱变化状况。不同尺度的SPI可以较好地反映干旱洪涝的发展演变状况和趋势。短时间尺度如1个月能够反映逐月的干旱变化,3个月能够反映季节的干旱变化,而12个月长时间尺度的SPI可反映水分的滞后性作用,对于监测评价农业干旱非常有用。通过对多时间尺度SPI的时间序列分析可以发现,渭北黄土高原总体上有变湿的趋势,且随着时间尺度的增加SPI的随机性在减弱,持续性在加强。与气候变化相对应,全区干旱频次有总体下降的趋势。

(3)在年份上,渭北黄土高原干旱在波动中基本呈缓慢下降趋势,突变点较多,干旱主要出现在1993、1994、1997、1998、2001年。在年内,渭北黄土高原地区一年四季均有干旱发生,但以春季和夏季干旱发生频率略高,秋季和冬季干旱频率略低。干季干旱频率较高,湿季干旱频率较低。

(4)渭北黄土高原不同地区干旱具有相对一致的趋势,即3个地区降水偏少的干旱期发生的时段相同,都为1997和1998年。

本文利用SPI指数来评判渭北黄土高原的干旱特征,结果显示SPI反应的渭北黄土高原的干旱状况与实际非常相符,使用SPI指数分析该地区的干旱也是合适的。但是由于干旱作为一个复杂的现象,是大气圈、水圈、岩石圈和生物圈综合作用的过程,本文仅从降水量的因素分析研究了渭北黄土高原的干旱特征,没有考虑地表的水文过程以及人类活动如灌溉等其他因素的共同影响。如何从地球表层系统的角度出发,以干旱事件为对象,研究更长(数年)和更多时间尺度以及不同干旱等级水平上干旱的时空分布将是本研究需进一步深入的工作。

参考文献:

- GUTTMAN N B. 1998. Comparing the Palmer drought severity index and the standardized precipitation index [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 113-121.
- HAYES M J, SVODOBA M D, WILHITE D A, et al. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. *Bullet in of the American Meteorological Society*, 80(3): 429-438.
- LEI J, ALBERT J P. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 87(1): 85-98.
- LIVADA I, ASSIMAKOPOULOS V D. 2007. Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI) [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 89(3-4): 143-153.
- MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]. *Applied Climatology*, (1): 17-22.
- MCKEE T B N, DOESKEN N J, KLEIST J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales[C]. *Applied Climatology*, (1): 233-236.
- MIHAJLOVIC D. 2006. Monitoring the 2003-2004 meteorological drought over Pannonian part of Croatia [J]. *International Journal of Climatology*, 26(15): 213-225.
- PALMER W C. 1965. Meteorological drought[R]. Research Paper No.45. Washington, DC: U.S. Department of Commerce, Weather Bureau: 45-58.
- SHAFFER B A, DEZMAN L E. 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snow pack runoff areas[C]. *Proceedings of the Western Snow Conference*, Colorado State University, Fort Collins, Colorado: 164-175.
- 陈莹, 陈兴伟. 2011. 福建省近50年旱涝时空特征演变—基于标准化降水指数分析[J]. *自然灾害学报*, 20(3): 57-63.
- 程亮, 金菊良. 2013. 干旱频率分析研究进展[J]. *水科学进展*, 23(2): 296-302.
- 何卓马, 李琳, 马学连, 等. 2010. 近48年青海干旱的时空特征分析[J]. *青海科技*, 1(2): 47-50.
- 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 2003. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究[J]. *大气科学*, 27(4): 770-787.
- 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 2010. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱58a演变特征[J]. *农业工程学报*, 26(7): 50-59.
- 黄志生, 黄强, 王义民, 等. 2015. 基于SPI的渭河流域干旱特征演变研究[J]. *自然灾害学报*, 24(1): 15-22.
- 姜大膀, 富元海. 2012. 2℃全球变暖背景下中国未来气候变化预估[J]. *大气科学*, 36(2): 234-246.
- 李春兰, 俞立中, 张继权, 等. 2014. 基于SPI的1961-2011年锡林郭勒盟气象干旱时空特征分析[C]//风险分析和危机反应中的信息技术-中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会: 501-506.

- 李春强, 姚树然, 董占强, 等. 2008. 基于标准化降水指数(SPI)的河北省旱涝分析[A]//粮食安全与现代农业气象业务发展[C]/2008 年全国农业气象学术年会: 212-215..
- 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 2009. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. 中国生态农业学报, 17(1):178-182
- 茅海洋. 2012. 五种干旱指数在淮河流域的适用性研究[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 秦大河. 2014. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 33(7): 874-883.
- 任余龙, 石彦军, 王劲松, 等. 2013. 1961-2009 年西北地区基于 SPI 指数的干旱时空变化特征[J]. 冰川冻土, 35(4): 938-948.
- 谭学志, 栗晓玲, 邵东国. 2011. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J]. 干旱区域农业研究, 29(2): 224-229.
- 王宏, 李晓兵, 李霞, 等. 2008. 中国北方草原对气候干旱的响应[J]. 生态学报, 28(1): 172-182.
- 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 2006. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 25(6): 1031-1040.
- 王莺, 李耀辉, 胡田田. 2014. 基于 SPI 指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析[J]. 中国沙漠, 34(1): 244-253
- 王允, 刘普幸, 曹立国, 等. 2014. 基于 SPI 的近 53 a 宁夏干旱时空演变特征研究[J]. 水土保持通报, 34(1): 298-302.
- 闫峰, 王艳姣, 吴波. 2010. 近 50 年河北省干旱时空分布特征[J]. 地理研究, 29(3): 423-430.
- 杨晓静, 左德鹏, 徐宗学. 2014. 基于标准化降水指数的云南省近 55 年旱涝演变特征[J]. 资源科学, 36(3): 473-480.
- 姚玉璧, 张存杰, 邓振镛, 等. 2007. 气象、农业干旱指标综述[J]. 干旱地区农业研究, 25(1): 185-189.
- 冶明珠, 李林, 王振宇. 2007. SPI 指数在青海东部地区干旱监测中的应用及检验[J]. 青海气象, (4): 21-24.
- 袁文平, 周广胜. 2004. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 28(4): 523-529.
- 翟禄新, 冯起. 2011. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化[J]. 自然资源学报, 26(5): 847-857.
- 张俊, 陈桂亚, 杨文发. 2011. 国内外干旱研究进展综述[J]. 人民长江, 42(10): 65-69.
- 张晓煜, 杨晓光, 李茂松, 等. 2011. 农业干旱预警研究现状及发展趋势[J]. 干旱区资源与环境, 25(11):18-22.
- 赵桂香. 2008. 干旱化趋势对山西省水资源的影响分析[J]. 干旱区研究, 25(4): 492-496.
- 郑晓东, 鲁帆, 马静, 等. 2012. 基于标准化降水指数的淮河流域干旱演变特征分析[J]. 水利水电技术, 43(4): 102-106.
- 郑远长. 2000. 全球自然灾害概述[J]. 中国减灾, 10(1): 14-19.
- 周丹, 张勃, 任培贵, 等. 2014. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 29(4): 677-688.

Temporal and Spatial Characteristics of Drought Based on Standardized Precipitation Index in Weibei Loess Plateau

WANG Xiaofeng^{1,2*}, HU Chunyan^{1,3}, WEI Wei³, YU Yang³

1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism simulation, Baoji 721016, China;

3. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, CAS, Beijing 100085, China;

Abstract: Weibei Loess Plateau is an important grain production base of Shaanxi Province. In this study, in order to promote the ability for coping with drought, daily precipitation data from 1986 to 2015 of this region were selected, and the standardized precipitation index (SPI) was calculated as an indicator to quantitatively analyze the temporal and spatial characteristics of drought in this area. Results showed that: (1) In the recent 30 years, SPI varied with the precipitation except some particular months. That is because the sensitivity of SPI to precipitation differed in different time scales. (2) Dividing the SPI into different time scales, can better reflect the development status and trend of drought and flooding. The short time scale (1 month) was used to reflect the drought variation monthly, while the medial scale (3 months) can be used to reflect the drought variation by season. In addition, the longtime scale (12 months) was observed to reflect the moisture hysteresis effect. Through the analysis of SPI in multiple time scales, the Weibei Loess Plateau presented a tendency of being wet, and the randomness of SPI declined with the increase of time scales, whereas the duration strengthened. Corresponded to the climate change, the drought frequency declined. (3) It was tested to be drought in 1993, 1994, 1997, 1998 and 2001, in this area. Meanwhile, according to the SPI, the spring and summer are much more prone to be drought than the autumn and winter, which can be concluded to be higher frequency during dry seasons. (4) The drought condition was relatively consistent within the whole Weibei Loess Plateau. The results for Weibei Loess Plateau will provide a scientific basis for agricultural drought management and decision-making.

Key words: SPI; Weibei Loess Plateau; drought; hysteresis; drought frequency