

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.04.007

# 基于标准化降水指数的渭河流域 多尺度干旱特征分析

苟非洲，强文博，程玉婷

(陕西省水务集团有限公司，陕西 西安 710004)

**摘要：**本文基于1个月、3个月和6个月时间尺度的SPI探究渭河流域的干旱特征，使用Mann-Kendall秩次检验法和重标极差分析法分析SPI序列的趋势性和持续性，识别干旱历时和烈度，计算“且”和“或”的联合重现期表征干旱风险，并分析其空间分布特征，得到如下结果：1)长时间尺度的SPI序列更加坦化，以渭河上游为例，6个月时间尺度较1个月时间尺度的识别结果，干旱场次减少了42场，而平均历时和平均烈度则分别增加了1.66和0.82；2)渭河上游干旱场次是五区中最小的，对应1个月、3个月和6个月时间尺度分别为76、47和34，历时和烈度是五个分区中最大的，北洛河和泾河呈相反的干旱特征，对应较大的干旱场次和较大的历时烈度；3)渭河干流1个月时间尺度的SPI和渭河中游6个月时间尺度的SPI存在显著下降趋势且有弱的正持续性，未来风险有增加的趋势；除严重干旱情景下的渭河中游、渭河下游和泾河外，其余类型、情景下短期干旱风险大于长期干旱风险。4)严重干旱情景下各区重现期差异较大，其中，1个月时间尺度下，渭河中游容易发生单变量较大的“或”类型干旱，短期干旱具有较大风险；3个月尺度下，渭河中游容易发生“且”类型干旱，一般干旱具有较大风险；6个月尺度下，泾河容易发生“且”类型的干旱，长期干旱具有较大风险。

**关键词：**干旱；标准化降水指数；渭河流域；干旱风险评估

**中图分类号：**P339      **文献标志码：**A      **文章编号：**1006-4710(2019)04-0443-09

## Analysis of multi-scale drought characteristics in Wei River Basin based on SPI

GOU Feizhou, QIANG Wenbo, CHENG Yuting

(Shaanxi Water Affair Group Co., LTD, Xi'an 710004, China)

**Abstract:** In this paper, we used SPI with 1 month, 3 months and 6 months timescale to explore the drought characteristics of the Wei River Basin. We analyze the trend and persistence of SPI time series by the Mann-Kendall rank test and Rescaled Range Analysis method. The results show that: 1) As the time scale increases, the SPI time series attenuate. Taking the upper Wei River as example, the drought number of 6 months timescale has 42 that is less than the drought number of 3 months timescale; the average duration and severity have 1.66 and 0.82 which are larger than another respectively. 2) In the upper Wei River, there are the smallest number of drought events, with corresponding timescales of 1 month, 3 months and 6 months being 76, 47 and 34, and larger drought duration and severity among the five subarea, while the Northern Luo River and Jing River show the opposite drought characteristics; except for the middle Wei River, the downstream of Wei River and the Jing river is under severe drought, and the risk of short-term drought is greater than that of long-term drought for all types and scenarios. 3) The SPI with 1 month time scale of the whole Wei River Basin and the SPI with 6 months time scale of the middle Wei River have a significant downtrend and a weak positive persistence, which reveal that risks are likely to increase in the future. 4) In severe drought situations, the return period varies greatly among different regions. Under the 1 month time scale, the middle Wei River tending to

收稿日期：2019-08-12

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51709221)

作者简介：苟非洲，男，高工，研究方向为水利市政项目投资运营管理。E-mail:1464405734@qq.com

“or” type drought, a short term drought shows a greater risk; under the 3 month time scale, the middle Wei River tending to “and” type drought, a general term drought shows a greater risk; under the 6 month time scale, the Jing River tending to “and” type drought, a long term drought shows a greater risk.

**Key words:** drought; SPI; Wei River Basin; drought risk assessment

干旱是我国主要的自然灾害之一,整体呈“北重南轻,中东部重西部轻”的分布格局<sup>[1-2]</sup>。20世纪以来,全球变暖和人类活动加剧,区域干旱特征发生了不同程度变化<sup>[3-4]</sup>,未来干旱风险有不断增加的趋势<sup>[5]</sup>。渭河流域是我国北方典型的干旱半干旱区域,也是我国重要的粮产区。有研究表明,半个世纪以来,渭河流域的降水和河川径流量在持续减少<sup>[6]</sup>,其平均气温也在不断上升<sup>[7]</sup>,这都进一步加剧了该区域本就严峻的干旱情势,威胁到当地的用水安全,严重制约了当地社会经济发展<sup>[8-10]</sup>。因此,探究渭河流域的干旱特征对于减轻旱灾危害来说至关重要。

干旱指数是定量化表征干旱的基础指标,为了探究不同类型、不同尺度的干旱,学者们提出了不同的干旱指数。目前,在干旱研究中应用较为广泛的是Pamler干旱指数(PDSI,Pamler Drought Severity Index)和标准化降水指数(SPI)。PDSI考虑了多种气象水文要素,在表征农业干旱上具有较好的发挥,但由于其具有固定的时间尺度,难以反映不同累积水平下的干旱情况,在使用时存在限制<sup>[3]</sup>。而考虑多时间尺度的SPI,在捕捉不同类型的干旱上具有优势,而被学者们广泛使用<sup>[11]</sup>。有研究表明,1

个月尺度的SPI可以表征气象干旱,3个月尺度和6个月尺度的SPI可以表征农业干旱<sup>[12]</sup>。基于此,本文采用1个月、3个月和6个月时间尺度的SPI表征干旱,对渭河流域不同时尺度下的干旱特征进行探究与分析,以期揭示区域干旱规律,为减轻干旱风险、降低旱灾危害提供理论基础。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

本文以渭河流域为研究对象。流域内地貌以黄土高原和关中盆地为主,地势西高东低起伏较大,海拔336~3 929 m,属于大陆性季风气候,多年平均降水量为559 mm,且主要集中于6~10月,时空分布严重不均,干旱是流域内主要的自然灾害之一。

### 1.2 资料来源

气象数据选自1960—2010年渭河流域21个气象站点的逐日降水资料,气象数据均来源于中国气象科学数据共享服务网。气象站点分布图见图1。

对数据进行预处理,将渭河流域分为渭河上游、渭河中游、渭河下游、泾河和北洛河五个子流域,使用算术平均法计算子流域的面降水数据,分区表见表1。

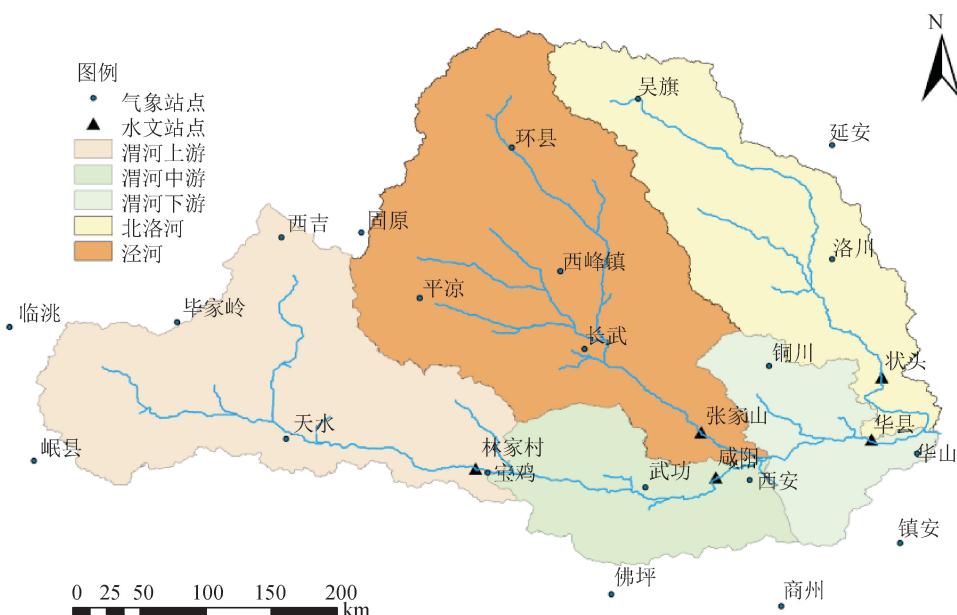


图1 渭河流域站点分布图

Fig. 1 Distribution of related meteorological stations in the Wei River Basin

表 1 渭河流域分区表

Tab. 1 Subarea and relevant meteorological stations in the Wei River Basin

分区	水文站			气象站		
渭河上游	林家村	华家岭	西吉	临洮	岷县	天水
渭河中游	咸阳	宝鸡	武功	佛坪	—	—
渭河下游	华县	西安	镇安	商县	华山	铜川
泾河	张家山	固原	平凉	环县	西峰镇	长武
北洛河	状头	吴旗	延安	洛川	—	—

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 标准化降水指数

基于不同累积时段长的降水数据,可得不同时间尺度的标准化降水指数 SPI。

本文选取 1 个月尺度、3 个月尺度和 6 个月尺度的降水数据计算 SPI。首先对降水数据进行 Gamma 分布拟合,使用极大似然法进行参数估计。然后进行标准正态化就可以得到 SPI,通常可使用标准正态化的近似公式<sup>[13]</sup>:

$$\left\{ \begin{array}{l} SPI = - \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \\ (0 < H(x) \leqslant 0.5) \\ SPI = + \left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \\ (0.5 < H(x) < 1) \end{array} \right. \quad (1)$$

式中:  $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。  
 $t$  的计算式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{(H(x))^2}\right]} \quad (0 < H(x) \leqslant 0.5) \\ t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{(1-H(x))^2}\right]} \quad (0.5 < H(x) < 1) \end{array} \right. \quad (2)$$

### 1.3.2 趋势分析

Mann-Kendall(M-K)秩次检验法是世界气象组织推荐并已经广泛使用的非参数检验方法,具有不受少数异常值影响、计算简便等特点,被广泛应用于水文、气象等非正态分布数据的趋势分析中<sup>[14]</sup>。具体方法如下<sup>[15]</sup>,假定有时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 原假设下时间序列独立、随机、同分布,构造统计量 S 如下:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{Sgn}(x_j - x_k) \quad (3)$$

$$\text{Sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & x_j - x_k > 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ -1 & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (5)$$

原假设下 S 服从正态分布,均值为 0,方差为

$\text{Var}(S)$ 。当  $n > 10$  时,对其进行转化,得到标准的正态统计变量为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

选取置信水平  $\alpha = 95\%$ ,双边检验中根据  $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$  确定拒绝域,当 Z 的绝对值大于 0 时,存在上升趋势;当 Z 的绝对值小于 0 时,存在下降趋势;当 Z 的绝对值大于 1.64 时,趋势是显著的,否则不显著。

### 1.3.3 重标极差分析法

重标极差分析法(Rescaled Range Analysis)也称 R/S 分析法<sup>[16]</sup>,这种方法可以通过 Hurst 指数来判断序列的持续性。

对于时间序列  $\{\xi(t)\}, t = 1, 2, \dots, n$ , 定义统计量如下。

#### 1) 均值序列:

$$(\xi)_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), \tau = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

#### 2) 累积离差序列:

$$x(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - (\xi)_{\tau}), 1 \leqslant t \leqslant \tau \quad (8)$$

#### 3) 极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leqslant t \leqslant \tau} x(t, \tau) - \min_{1 \leqslant t \leqslant \tau} x(t, \tau), \tau = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

#### 4) 标准差:

$$S(\tau) = \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - (\xi)_{\tau})^2 \right)^{1/2}, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

#### 5) Hurst 指数 H :

$$\ln(R/S) = H \ln \tau \quad (11)$$

#### 6) V 统计量:

$$V_{\tau} = \frac{(R/S)_{\tau}}{\sqrt{\tau}} \quad (12)$$

绘制  $\ln(R/S)-\ln(\tau)$  和  $V_{\tau}-\tau$  的图像,再使用最小二乘拟合就可以求出 Hurst 指数。

当  $H = 0.5$  时,时间序列无持续性,变化随机,V 统计量曲线呈水平线。

当  $0.5 < H < 1$  时,序列有正持续性,V 统计量曲线向上倾斜,  $H$  越接近于 1,正持续性越强。

当  $0 < H < 0.5$  时,序列有负持续性,V 统计量曲线向下倾斜,  $H$  越接近 0,负持续性越强。

Hurst 指数等于 0.35 和 0.65 是强持续性和弱持续性的边界值。

### 1.3.4 重现期

重现期是干旱频率分析中用以确定干旱概率特征的重要指标,其中较常用的干旱重现期为<sup>[17]</sup>:

$$T = \frac{1}{\lambda(1-P)} \quad (13)$$

式中:  $\lambda$  为干旱事件平均每年发生的次数,  $1-P$  为超标事件(干旱)的发生概率。

根据式(13),可以确定出与干旱发生概率对应的干旱重现期。

干旱是包括历时、烈度等多个特征变量的灾害事件,可以根据游程理论进行特征变量的提取,即选定一个固定的阈值,当 SPI 序列低于阈值时,认为干旱发生,当 SPI 序列高于阈值时,认为干旱结束,干旱历时就是干旱发生和结束之间的时长,计算干旱期间 SPI 的负累积,就可以得到该场干旱的烈度值。

基于气象干旱等级国家标准(GB/T 20481-2017)<sup>[18]</sup>,本文选取 SPI 等于 -1.0 作为干旱开始和结束的阈值。当发生一场干旱,其历时、烈度等共同决定了干旱的严重程度,仅针对单个干旱特征确定的重现期不能很好地描述干旱特征<sup>[19]</sup>。Salvadori 等<sup>[20]</sup>基于 copula 函数提出了 8 种两变量联合分布的情景。本文选取  $\{U > u\} \cap \{V > v\}$  和  $\{U > u\} \cup \{V > v\}$  两种情景来计算两变量联合重现期。拟合提取到的历时、烈度边缘分布,并通过 copula 函数确定其联合分布,计算重现期,基于 AIC 准则和 KS 检验,以五种常用分布和五种常用 copula 函数作为待选,进行优化选取,最终选取历时烈度的边缘分布和 copula 函数见表 2。

表 2 边缘分布及 copula 函数优选表

Tab. 2 Selection of marginal distribution and copula

尺度	类别	分布及 copula 函数类型	渭河上游	渭河中游	渭河下游	泾河	北洛河
D(AIC)	1 个月 尺度	Gamma 分布	-121.85	-226.51	-55.33	-140.09	-47.78
		指数分布	-112.68	-209.63	-32.43	-133.11	-29.43
		广义极值分布	-107.06	-202.05	-52.55	-118.07	-26.03
		Gumbel 分布	-126.02	-225.31	-49.78	-151.37	-47.67
		P3 分布	-112.16	-194.76	-33.50	-140.66	-26.01
		最优分布	Gauss 核分布				
S(AIC)	1 个月 尺度	Gamma 分布	-475.29	-468.29	-498.01	-280.74	-553.14
		指数分布	-577.96	-501.97	-554.36	-343.87	-575.11
		广义极值分布	-505.83	-499.27	-466.73	-375.15	-534.62
		Gumbel 分布	-558.48	-495.37	-575.94	-276.11	-564.72
		P3 分布	-492.06	-485.71	-435.01	-334.11	-502.75
		最优分布	指数分布	指数分布	指数分布	广义极值分布	指数分布
(AIC)	copula	Clayton copula	-246.66	-263.07	-253.95	-257.17	-260.28
		Frank copula	-234.77	-254.43	-243.88	-241.75	-247.46
		Gumbel copula	-243.13	-244.75	-238.78	-232.13	-243.60
		Gaussian copula	-242.40	-265.67	-261.92	-261.40	-263.72
		T copula	-239.69	-247.87	-239.73	-241.27	-249.75
		最优 copula	Clayton	Gaussian	Gaussian	Gaussian	Gaussian

续表 2

尺度	类别	分布及 copula 函数类型	渭河上游	渭河中游	渭河下游	泾河	北洛河
3 个 月 尺 度	D(AIC)	Gamma 分布	<u>-131.04</u>	<u>-208.91</u>	<u>-80.85</u>	<u>-148.50</u>	<u>-93.85</u>
		指数分布	<u>-125.59</u>	<u>-198.56</u>	<u>-79.60</u>	<u>-145.80</u>	<u>-87.17</u>
		广义极值分布	<u>-123.69</u>	<u>-188.75</u>	<u>-71.12</u>	<u>-140.83</u>	<u>-78.58</u>
		Gumbel 分布	<u>-126.77</u>	<u>-212.38</u>	<u>-78.69</u>	<u>-140.04</u>	<u>-84.10</u>
		P3 分布	<u>-124.43</u>	<u>-202.98</u>	<u>-80.53</u>	<u>-133.56</u>	<u>-88.34</u>
		最优分布	Gauss 核分布				
6 个 月 尺 度	S(AIC)	Gamma 分布	-303.34	-253.75	-318.94	-170.00	-343.57
		指数分布	-257.06	-239.16	-315.38	-167.81	-315.32
		广义极值分布	<u>-279.12</u>	<u>-236.02</u>	<u>-383.96</u>	<u>-165.50</u>	<u>-314.91</u>
		Gumbel 分布	<u>-269.33</u>	<u>-246.09</u>	<u>-345.09</u>	<u>-172.13</u>	<u>-304.63</u>
		P3 分布	-300.00	-267.32	-324.09	-164.84	-326.86
		最优分布	Gamma 分布	P3 分布	广义极值分布	Gamma 分布	Gamma 分布
12 个 月 尺 度	(AIC)	Clayton copula	-148.78	-199.03	-184.84	-186.08	-179.43
		Frank copula	-165.09	-190.36	-185.99	-192.16	-183.45
		Gumbel copula	-175.43	-202.86	-197.31	-199.97	-195.11
		Gaussian copula	-193.39	-220.50	-214.83	-216.69	-213.61
		T copula	-145.42	-203.32	-188.97	-188.71	-187.64
		最优 copula	Gaussian	Gaussian	Gaussian	Gaussian	Gaussian
24 个 月 尺 度	D(AIC)	Gamma 分布	<u>-106.20</u>	<u>-148.47</u>	<u>-71.96</u>	<u>-113.57</u>	<u>-81.19</u>
		指数分布	<u>-113.29</u>	<u>-166.92</u>	<u>-63.48</u>	<u>-124.47</u>	<u>-79.11</u>
		广义极值分布	<u>-100.97</u>	<u>-133.44</u>	<u>-67.42</u>	<u>-98.95</u>	<u>-78.25</u>
		Gumbel 分布	<u>-117.33</u>	<u>-174.85</u>	<u>-78.24</u>	<u>-124.63</u>	<u>-83.54</u>
		P3 分布	<u>-124.74</u>	<u>-179.99</u>	<u>-90.04</u>	<u>-124.60</u>	<u>-92.84</u>
		最优分布	Gauss 核分布				
36 个 月 尺 度	S(AIC)	Gamma 分布	-203.70	-166.83	-199.14	-132.72	-213.89
		指数分布	-231.65	<u>-173.09</u>	-270.63	<u>-133.65</u>	<u>-271.65</u>
		广义极值分布	-198.82	-131.37	-209.53	-105.34	-213.03
		Gumbel 分布	<u>-210.91</u>	<u>-162.20</u>	<u>-263.14</u>	<u>-145.56</u>	<u>-288.18</u>
		P3 分布	-231.58	-177.32	-287.96	-147.88	-266.05
		最优分布	指数分布	P3 分布	P3 分布	P3 分布	P3 分布
72 个 月 尺 度	(AIC)	Clayton copula	-160.57	-172.40	-168.82	-169.46	-168.93
		Frank copula	-120.83	-171.69	-159.82	-159.39	-158.02
		Gumbel copula	-141.88	-154.89	-153.32	-152.44	-152.01
		Gaussian copula	-149.13	-188.48	-189.41	-182.31	-183.46
		T copula	-175.99	-198.65	-196.61	-194.36	-194.12
		最优 copula	T	T	T	T	T

注: 其中斜体表示最小 AIC 值,下划线表示该分布未通过 KS 检验,当所有分布均未通过 KS 检验时,使用 Gauss 核分布进行概率计算。

通常将两种情景确定的重现期称为两变量“且”联合重现期和两变量“或”联合重现期,其计算公式为:

$$T_{\text{and}} = \frac{E}{P(\{U > u\} \cap \{V > v\})} = \frac{N}{n(1 - U - V + C(U, V))} \quad (14)$$

$$T_{\text{or}} = \frac{E}{P(\{U > u\} \cup \{V > v\})} = \frac{N}{n(1 - C(U, V))} \quad (15)$$

式中:  $E = \frac{N}{n}$  为干旱事件发生的平均间隔时间,  $N$  为总序列长度,  $n$  为干旱事件次数,  $U$  和  $V$  分别是历时和烈度的边缘分布累积概率,  $C(U, V)$  为 copula 函数值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同时间尺度干旱特征

为探究不同时间尺度下的干旱特征,选取 1 个月、3 个月和 6 个月尺度 SPI 表征干旱,以渭河上游为例,绘制 3 种尺度 SPI 序列见图 2。

由图 2 可以看出,小尺度的 SPI 序列波动更加明显,大尺度的 SPI 序列则更加坦化。进一步使用游程理论识别五个分区不同尺度下的干旱,结果见表 3,其中,场次反映了干旱的发生频率,平均历时和平均烈度反映了干旱的严重程度,最大历时和烈度则反映了极端干旱的严重程度。

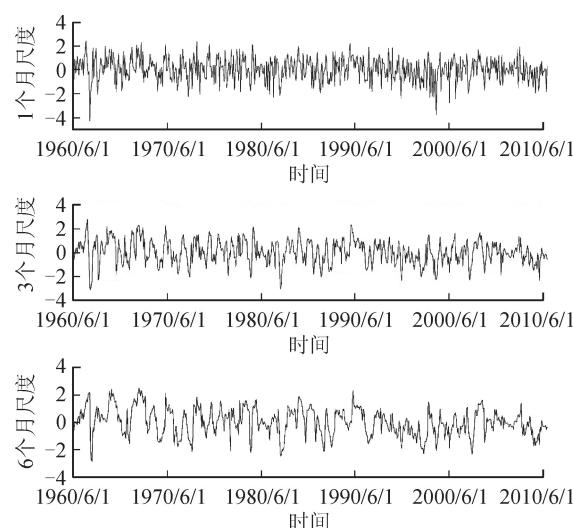


图 2 渭河上游 1 个月、3 个月和 6 个月尺度 SPI 序列

Fig. 2 SPI time series with 1 month, 3 months and 6 months timescale in the upper Wei River

由表 3 可知,随着时间尺度增大,干旱特征呈场次减少、历时和烈度增大的现象。各尺度下,渭河上游呈干旱场次较小、历时和烈度较大的干旱特征;北洛河和泾河则呈干旱场次较多、历时和烈度较小的干旱特征;3 个月尺度和 6 个月尺度下,渭河中游的极端干旱更加严重,最大历时和最大烈度是五区中最大的;1 个月尺度下,渭河中游呈场次较少,场均轻微的干旱特征,但在 3 个月尺度下,渭河中游呈场次少、场均严重的干旱特征。

表 3 渭河流域干旱特征值统计表  
Tab. 3 Drought statistics from the Wei River Basin

干旱参数	尺度	渭河上游	渭河中游	渭河下游	泾河	北洛河
场次	1 个月尺度	76.00	81.00	79.00	78.00	80.00
	3 个月尺度	47.00	47.00	51.00	51.00	48.00
	6 个月尺度	34.00	41.00	33.00	42.00	42.00
平均历时/月	1 个月尺度	1.22	1.15	1.13	1.27	1.19
	3 个月尺度	2.04	2.04	1.94	1.80	1.85
	6 个月尺度	2.88	2.24	2.76	2.26	2.36
平均烈度	1 个月尺度	0.77	0.65	0.69	0.67	0.55
	3 个月尺度	1.19	1.06	1.00	1.09	1.06
	6 个月尺度	1.59	1.15	1.46	1.13	1.10
最大历时/月	1 个月尺度	3.00	3.00	2.00	4.00	5.00
	3 个月尺度	7.00	7.00	7.00	5.00	5.00
	6 个月尺度	9.00	8.00	11.00	7.00	8.00
最大烈度	1 个月尺度	4.82	2.17	2.69	4.39	2.69
	3 个月尺度	7.36	6.74	7.64	6.29	5.54
	6 个月尺度	6.65	7.29	9.72	7.33	6.24

注:五分区中最大值用下划线标出,最小值用斜体标出。

## 2.2 干旱时间趋势分析

为揭示渭河流域各区干旱的演变规律,采用Mann-Kendall法对各区SPI年值序列进行趋势检验,检验结果见表4~6。可以看出,在1个月尺度下,渭河干流有显著的下降趋势,说明未来短期干旱加剧;3个月尺度下无显著趋势;6个月尺度下只有渭河中游发生显著下降趋势,其他研究有类似的结论<sup>[21-22]</sup>。

表4 1个月尺度 SPI 趋势分析表

Tab. 4 Trend analysis of SPI with 1 month timescale

分区	z统计量	p 值	显著性
渭河上游	-2.12	0.03	显著下降
渭河中游	-2.16	0.03	显著下降
渭河下游	-2.76	0.01	显著下降
泾河	-1.79	0.07	不显著
北洛河	-1.74	0.08	不显著

表5 3个月尺度 SPI 趋势分析表

Tab. 5 Trend analysis of SPI with 3 months timescale

分区	z统计量	p 值	显著性
渭河上游	-1.62	0.10	不显著
渭河中游	-1.82	0.07	不显著
渭河下游	-1.67	0.09	不显著
泾河	-1.64	0.10	不显著
北洛河	-1.15	0.25	不显著

表6 6个月尺度 SPI 趋势分析表

Tab. 6 Trend analysis of SPI with 6 months timescale

分区	z统计量	p 值	显著性
渭河上游	-1.17	0.24	不显著
渭河中游	-2.36	0.02	显著下降
渭河下游	-1.36	0.18	不显著
泾河	-1.19	0.23	不显著
北洛河	-1.92	0.05	不显著

## 2.3 干旱持续性分析

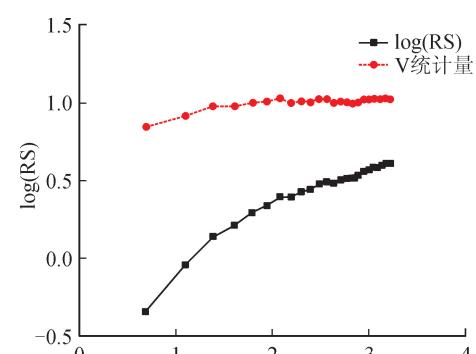
由于时间趋势的存在,需要进一步分析时间趋势的持续性。使用重标极差分析法对1个月尺度的渭河干流SPI年值序列和6个月持续的渭河中游SPI年值序列进行持续性分析,分析结果见图3,得到Hurst指数见表7。

由表7可以看出,Hurst指数均大于0.5小于0.65,即存在显著下降趋势的SPI序列均有弱的正持续性,未来显著下降趋势加剧。

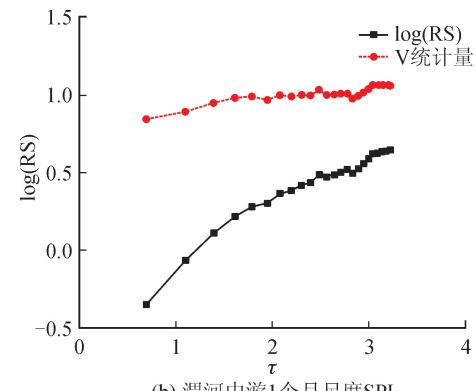
表7 持续性分析

Tab. 7 Persistence analysis of SPI time series in the Wei River Basin

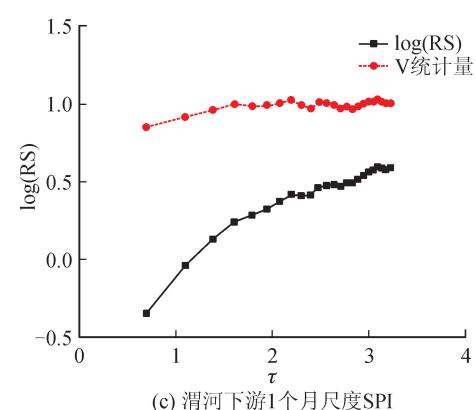
持续性分析	Hurst 指数
渭河上游-1个月尺度	0.60
渭河中游-1个月尺度	0.63
渭河下游-1个月尺度	0.59
渭河中游-6个月尺度	0.64



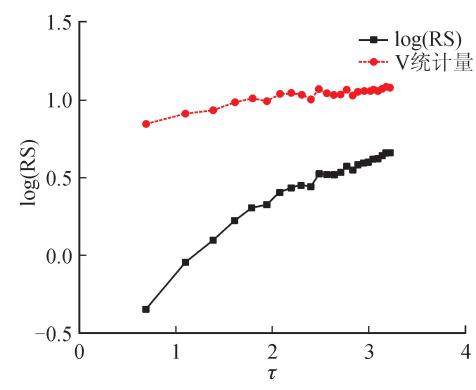
(a) 渭河上游1个月尺度SPI



(b) 渭河中游1个月尺度SPI



(c) 渭河下游1个月尺度SPI



(d) 渭河中游6个月尺度SPI持续性分析

图3 渭河流域 SPI 持续性分析图

Fig. 3 Persistence analysis of SPI in the Wei River Basin

## 2.4 干旱风险评估

进行风险评估是通过对长序列干旱事件进行分析,探究干旱发生的概率风险,可以为区域干旱风险

管理提供参考。选取各区 50%、75% 和 95% 累积概率对应的历时和烈度作为一般干旱、中等干旱和严重干旱情景,计算不同尺度下的“且”、“或”重现期以表征干旱风险,计算结果见表 8。

表 8 渭河流域五分区三情景两变量重现期

Tab. 8 Bivariate return period of five subareas in Wei River Basin on three Scenarios

重现期分类	干旱情景	尺度	渭河上游	渭河中游	渭河下游	泾河	北洛河
“且”重现期/年	一般干旱	1 个月尺度	1.82	1.90	1.92	1.86	1.81
		3 个月尺度	2.69	2.71	2.51	2.52	2.51
		6 个月尺度	3.47	2.92	3.68	3.04	2.92
	中等干旱	1 个月尺度	4.90	5.67	5.61	5.24	4.80
		3 个月尺度	6.70	6.38	6.33	6.36	5.99
		6 个月尺度	8.14	6.96	8.79	6.66	7.09
	严重干旱	1 个月尺度	73.03	98.58	95.12	83.81	42.66
		3 个月尺度	86.14	43.61	83.30	84.05	70.00
		6 个月尺度	90.95	80.58	105.17	35.65	86.21
“或”重现期/年	一般干旱	1 个月尺度	1.05	0.93	0.96	1.00	0.97
		3 个月尺度	1.80	1.79	1.64	1.64	1.82
		6 个月尺度	2.60	2.13	2.63	1.99	2.05
	中等干旱	1 个月尺度	1.83	1.60	1.66	1.72	1.72
		3 个月尺度	3.17	3.25	2.89	2.88	3.25
		6 个月尺度	4.69	3.82	4.71	3.78	3.65
	严重干旱	1 个月尺度	7.32	6.67	6.87	7.03	7.42
		3 个月尺度	12.30	14.29	11.26	11.25	12.41
		6 个月尺度	17.79	14.57	17.94	18.19	14.00

注:其中下划线表示随尺度变化重现期变化的例外情况。

“且”重现期表征了历时和烈度均大于边缘值的情况,对应了超越概率  $P(\{D > d\} \cap \{S > s\})$ ;“或”重现期表征了历时或烈度某一变量大于边缘值的情况,对应了超越概率  $P(\{D > d\} \cup \{S > s\})$ 。由表 8 可以看出,一般干旱和中等干旱情景中,渭河下游的重现期相对较大,风险较小,而泾河和北洛河的重现期较小,风险较大。这两种情景中,各区各尺度重现期差异不大。

严重干旱情景中,1 个月时间尺度下渭河中游在五区中“且”重现期最大,“或”重现期最小,说明渭河中游不容易发生两变量同时较大的“且”类型干旱,容易发生单变量较大的“或”类型干旱,而北洛河则刚好相反。同样的,3 个月尺度下,渭河中游则容易发生“且”类型干旱,不易发生“或”类型干旱。6 个月尺度下,泾河容易发生“且”类型的干旱,不易发生“或”类型的干旱。

由表 8 可知,除严重干旱情景下的渭河中游、渭河下游和泾河外(已用下划线标注),随着时间尺度增大,重现期增大,风险减小。即除严重干旱情景下的“且”类型干旱外,其余类型、情景下的短期干旱风险大于长期干旱。

重干旱情景,计算不同尺度下的“且”、“或”重现期以表征干旱风险,计算结果见表 8。

### 3 结 论

1) 以 1 个月、3 个月和 6 个月尺度下的 SPI 指数分析渭河流域的干旱特征。随着时间尺度的增大,SPI 序列更加坦化,干旱特征则呈场次减少、历时和烈度增大的现象。渭河流域各个分区在不同尺度下呈不同的干旱特征,但各尺度下渭河上游均呈干旱场次较少、历时和烈度较大的干旱特征;而北洛河和泾河则均呈干旱场次较多、历时和烈度较小的干旱特征。

2) 1 个月尺度下,渭河干流有显著的下降趋势,3 个月尺度下全流域无显著趋势,6 个月尺度下只有渭河中游发生显著下降趋势,且这种持续性均存在弱的正持续性,未来下降趋势加剧。总体来说,随着气候变化和人类活动加剧,渭河干流短期干旱加剧,中长期干旱相对稳定。

3) 一般干旱和中等干旱情景下,各区各尺度干旱风险差异不大。严重干旱情景下,不同时间尺度的干旱风险存在差异,1 个月时间尺度下渭河中游容易发生单变量较大的“或”类型干旱,不易发生两变量同时较大的“且”类型干旱,北洛河刚好相反;3 个月尺度下,渭河中游容易发生“且”类型干旱,不易

发生“或”类型干旱;6个月尺度下,泾河容易发生“且”类型的干旱,不易发生“或”类型的干旱。另外,除严重干旱情景下的渭河中游、渭河下游和泾河外,其余类型、情景下短期干旱风险大于长期干旱风险。

#### 参考文献:

- [1] 杨艳颖,毛克彪,韩秀珍,等. 1949—2016年中国旱灾规律及其对粮食产量的影响[J]. 中国农业信息, 2018, 30(5): 76-90.  
YANG Yanying, MAO Kebiao, HAN Xiuzhen, et al. Characteristics of drought disaster and its impact on grain production in China from 1949 to 2016[J]. China Agricultural Informatics, 2018, 30(5): 76-90.
- [2] 李茂松,李森,李育慧. 中国近50年旱灾灾情分析[J]. 中国农业气象,2003, 24(8): 7-10.  
LI Maosong, LI Sen, LI Yuhui. Studies on drought in the past 50 years in China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(1): 7-10.
- [3] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391 (1/2): 202-216.
- [4] DAI Aiguo. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58.
- [5] LANDMAN W. Climate change 2007: the physical science basis[J]. South African Geographical Journal Being A Record of the Proceedings of the South African Geographical Society, 2007, 92(1): 86-87.
- [6] 张迎,黄生志,黄强,等. 基于Copula函数的新型综合干旱指数构建与应用[J]. 水利学报, 2018, 49(6): 703-714.  
ZHANG Yin, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Construction and application of a new comprehensive drought index based on Copula function[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(6): 703-714.
- [7] 占车生,乔晨,徐宗学,等. 渭河流域近50年来气候变化趋势及突变分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(4): 399-405.  
ZHAN Chesheng, QIAO Chen, XU Zongxue, et al. Climate change and mutation analysis in Wei River basin in the last 50 years[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2012, 48(4): 399-405.
- [8] CIAIS P, REICHSTEIN M, VIOVY N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 [J]. Nature, 2005, 437 (7058): 529-561.
- [9] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Climate change. Stationarity is dead: whither water management? [J]. 2008, 319(5863): 573-576.
- [10] LONG Di, SCANLON B R, LONGUEVERGNE L, et al. GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40 (13): 3395-3401.
- [11] ALI Z, HUSSAIN I, FAISAL M, et al. Selection of appropriate time scale with Boruta algorithm for regional drought monitoring using multi-scaler drought index[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2019: 71(1): 1-16.
- [12] 黄生志,黄强,王义民,等. 基于SPI的渭河流域干旱特征演变研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24 (1): 15-22.  
HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Evolution of drought characteristics in the Wei River Basin based on standardized precipitation index [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24 (1): 15-22.
- [13] ABRAMOWITZ M, STEGUN I A. Handbook of mathematical functions [M]. Dover Publications, 1965.
- [14] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008, (5): 35-37.  
CAO Jieping, CHI Daocai, WU Liqiang, et al. Mann-Kendall examination and application in the analysis of precipitation trend[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2008, (5): 35-37.
- [15] STUART A, ORD J K, ARNOLD S, et al. Kendall's advanced theory of statistics [M]. London: Griffin, 1987.
- [16] QIAN Bo, RASHEED K. Hurst exponent and financial market predictability[C]//IASTED Conference on Financial Engineering and Applications, 2004: 203-209.
- [17] 程亮,金菊良,郦建强,等. 干旱频率分析研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 296-302.  
CHENG Liang, JIN Juliang, LI Jianqiang, et al. Advance in the study of drought frequency analysis[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 296-302.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 气象干旱等级:GB/T 20481—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [19] SHIAU J T, SHEN H W. Recurrence analysis of hydrologic droughts of differing severity[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, 127(1): 30-40.
- [20] SALVADORI G, DE MICHELE C. Frequency analysis via copulas: theoretical aspects and applications to hydrological events [J]. Water Resources Research, 2004, 40(12).
- [21] 李洁,莫淑红,沈冰,等. 基于SPEI的渭河流域干旱特征分析[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 70-76.  
LI Jie, MO Shuhong, SHEN Bing, et al. Analysis of drought characteristics of the Weihe River Basin based on SPEI[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1): 70-76.
- [22] 朱悦璐,畅建霞,刘宸岩. 渭河流域水文变异诊断研究[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(2): 170-174.  
ZHU Yuelu, CHANG Jianxia, LIU Chenyan. The research on the hydrological variation diagnosis of the Weihe River basin[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(2): 170-174.