

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.01.013

基于 SPEI 的渭河流域干旱特征分析

李 洁¹, 莫淑红^{1,2}, 沈 冰¹, 司海松¹, 王义民¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;
2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 本研究采用渭河流域 20 个气象站点 1961—2013 年的气象数据, 计算该流域多重时间尺度的 SPEI 值, 分析 SPEI 在该流域的应用情况, 同时基于 SPEI 分析渭河流域干旱时空分布特征。研究结果表明: 渭河流域 SPEI 值呈显著下降趋势, 干旱日趋严重。其中, 春秋干旱有明显加重的趋势, 夏旱及冬旱无明显变化。就总体分布而言, 干旱主要发生在西北部, 其中轻旱、中旱、重旱大部分主要分布在西北部地区。相反, 受 1995 年及 1997 年历史特大旱灾事件影响, 特旱主体分布在东南部地区。

关键词: 干旱; 标准化降水蒸发指数; 渭河流域

中图分类号: P426.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)01-0070-07

Analysis of drought characteristics of the Weihe River Basin based on SPEI

LI Jie¹, MO Shuhong^{1,2}, SHEN Bing¹, SI Haisong¹, WANG Yimin¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The meteorological data of 20 meteorological stations from 1961 to 2013 in Weihe River are used to calculate the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) at different scales and to analyze the application of SPEI in the basin. At the same time, drought distribution of time and space in Weihe River is analyzed by using SPEI index, and research results show that there is an obviously reducing trend of SPEI index in Weihe River, with drought increasingly tending towards severity. Spring and autumn drought have a significantly worsening trend, but summer and winter drought is of no obvious change. On the overall distribution purposes, droughts occur mainly in the northwest, among which most light droughts, moderate droughts and severe droughts occur mainly in the northwestern region. Conversely, due to the impact of historical severe drought event in 1995 and 1997, extra severe droughts often occurred in the southeastern region.

Key words: drought; SPEI; Weihe River

近年来, 由于全球气候变化, 导致干旱造成的影响越来越大。干旱是我国最主要的自然灾害之一, 每年造成的经济损失不计其数。我国干旱区面积占全国面积的 31%, 半干旱区占 22%。有研究表明, 2040 s 整个北方地区极端干旱频率增加、强度增强、影响范围明显扩大^[1]。渭河流域属于我国半干旱半湿润地区, 地处西北地区东部生态环境脆弱带, 是气

候变化的敏感区, 频繁发生自然灾害。尤其以旱灾发生最为严重, 是影响国民经济尤其是农业经济持续发展最重要的因素。半个世纪以来, 渭河流域水资源量和入黄河径流量持续减少^[2]。有研究表明, 渭河流域年均气温在时间上呈现出明显上升的趋势, 未来渭河流域年平均气温仍将持续升高^[3], 干旱情势有可能进一步加剧。因此探究渭河流域干旱时

收稿日期: 2015-10-29

基金项目: 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金(2014491911); 陕西省水利厅科技计划资助项目(2014slkj-01); 国家自然科学基金资助项目(51209169); 陕西高校省级重点实验室科研资助项目(12JS067)

作者简介: 李洁, 女, 硕士生, 研究方向为干旱区水文。E-mail: lijie_793@163.com

通讯作者: 莫淑红, 女, 副教授, 博士, 研究方向为旱区水文水资源。E-mail: moshuhong@xaut.edu.cn

空分布特征具有重要意义。

干旱指标是用来描述干旱特征的指标,不同于旱指标适用的地区与时间尺度也有所不同。干旱指标是研究干旱气候的基础,也是衡量干旱程度的关键环节^[4]。目前国内外应用较为广泛的干旱指标主要有标准化降水指数(SPI)^[5-7]、帕尔默干旱指数(PDSI)^[8]、Z 指数^[9]、综合气象干旱指数(CI)^[10]等。其中,1993 年 McKee 等人提出的 SPI 计算简单方便,应用广泛,其特点是只需要较长时间(一般应超过 30 年)的降水量资料^[11]。但在全球气候变暖的情况下,仅仅分析降水量的变化难以解释干旱,气温的升高已成为干旱加剧的重要原因之一^[12]。因此, Vicente-Serrano 等^[13]基于 SPI 提出了一个新的干旱指标:标准化降水蒸发指数(SPEI)。SPEI 是在 SPI 的基础上进一步考虑了蒸散发量来反映干旱的程度。庄少伟等^[14]研究了 SPEI 在中国区域的应用,王林等^[15]研究了 SPEI 对中国干旱的适用性,结果表明 SPEI 在中国的适用性很好,能够准确的表征干旱状况。有研究表明,渭河流域降雨序列有弱变异性^[16]。为充分认识渭河流域的干旱状况,本文分析 SPEI 在该流域的适应性,并且基于 SPEI 对该流域干旱时空分布特征进行研究,以期揭示该地区的气候变化规律,并为采取应对措施减轻旱涝灾害及其不利影响提供参考依据。

1 研究资料及方法

1.1 研究区域概况

渭河发源于今甘肃省定西市渭源县鸟鼠山,主要流经甘肃天水、陕西关中平原的宝鸡、咸阳、西安、渭南等地,至渭南市潼关县汇入黄河。渭河流域面积为 13.48 万 km²,西部为黄土丘陵沟壑区,东部为关中平原区。流域处于干旱地区和湿润地区的过渡地带,多年平均降水量 572 mm,降水量空间分布为南多北少。

1.2 资料来源

本次研究资料来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn/>),数据取自国家基本、基准地面气象观测站及自动站。选取渭河流域范围内宝鸡、佛坪、固原、华家岭、华山、环县、崆峒、临洮、洛川、岷县、商县、天水、铜川、吴旗、武功、西安、西峰镇、西吉、延安、长武 20 个气象站的月降水量以及月平均气温资料计算 SPEI 值,分析渭河流域干旱情况。对个别有缺测数据的站点,利用相邻站点相关性对资料进行了插补延长,使 20 个站点的时间序列均为 1961—2013 年。渭河流域气象站点分布如图 1 所示。

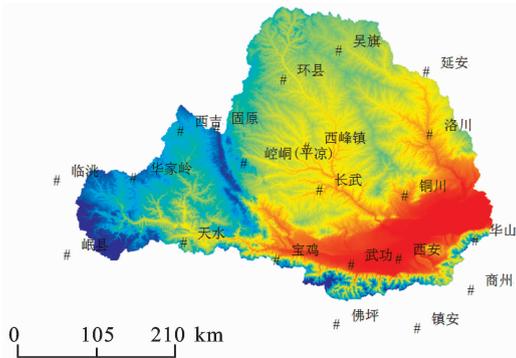


图 1 渭河流域 20 个气象站点分布
Fig. 1 20 meteorological stations distribution in Weihe River Basin

1.3 标准化降水蒸散发指数(SPEI)及其计算方法

标准化降水蒸散发指数(SPEI)在计算中以月水分亏缺量(月降水量与月潜在蒸散发量之差)代替了 SPI 计算中的月降水量。月潜在蒸散发量用 Thornthwaite 方法计算。与 SPI 基于 Gamma 分布不同, SPEI 是基于 log-logistic 分布的频率值。具体计算步骤分为 4 步。

1) 计算月潜在蒸散发量 P_E 。

$$P_E = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (1)$$

式中, P_E 为月潜在蒸散发量(mm), K 为修正系数, T 为月平均气温(°C), I 为年热量指数, m 为常数。

2) 计算月水分亏缺量 D_i 。

$$D_i = P_i - P_E \quad (2)$$

式中, P_i 为月降水量(mm), D_i 为月水分亏缺量(mm), i 为月数。

3) 基于 log-logistic 概率分布函数计算水分亏缺量的概率分布。

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (3)$$

式中, $f(x)$ 为概率密度函数, x 为自变量; α , β 和 γ 分别是尺度参数、形状参数和位置参数。计算公式如下:

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{(6w_1 - w_0 - 6w_2)} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (5)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (6)$$

式中, $\Gamma(\beta)$ 是 Gamma 函数, w_0 , w_1 和 w_2 为概率权重。计算公式如下:

$$w_s = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \left(1 - \frac{l-0.35}{n} \right)^s X_l \quad (7)$$

式中, w_s 是概率权重距(s 取 0, 1, 2), X_l 为累积水分亏缺量(l 取 1, 2, ..., n)。

log-logistic 概率分布函数为:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (8)$$

4) 对 $F(x)$ 进行标准化处理。

令 $f = 1 - F(x)$,

当 $f \leq 0.5$ 时, 参数 $W = \sqrt{-2\ln f}$,

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (9)$$

当 $f > 0.5$ 时, $W = \sqrt{-2\ln(1 - f)}$,

$$SPEI = \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} - W \quad (10)$$

式中, $c_0 = 2.515\ 517$, $c_1 = 0.802\ 853$, $c_2 = 0.010\ 328$, $d_1 = 1.432\ 788$, $d_2 = 0.189\ 269$, $d_3 = 0.001\ 308$ 。

SPEI 干旱等级分类如表 1 所示。

表 1 SPEI 干旱分级^[7]

Tab. 1 Drought grades classified with SPEI

干旱等级				
特旱	重旱	中旱	轻旱	无旱
$SPEI \leq -2$	$-2 < SPEI \leq -1.5$	$-1.5 < SPEI \leq -1$	$-1 < SPEI \leq -0.5$	$-0.5 < SPEI$

2 结果与分析

2.1 渭河流域干旱时间分布特征分析

2.1.1 流域年 SPEI 值年际变化特性

为研究渭河流域干旱变化趋势, 绘制流域年 SPEI 值线性趋势线及其 10 a 滑动平均线如图 2 所示。

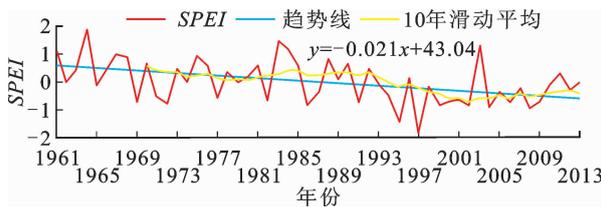


图 2 渭河流域年 SPEI 值年际变化

Fig. 2 Inter-annual variation of SPEI index of Weihe River Basin

由图 2 可以看出, 渭河流域 1961—2013 年期间的 SPEI 值呈下降趋势, 平均每 10 a 下降 0.21。根据 10a 滑动平均曲线进一步可知, 20 世纪 90 年代之前变幅较小, 90 年代之后降幅增加。且 1995 年以及 1997 年 SPEI 值达到最低, 通过查阅历史资料可知, 渭河流域 1995 年及 1997 年发生严重干旱事件, 这与 SPEI 分析得出的结论一致。

采用 Mann-Kendall 法检验流域年 SPEI 值年际变化趋势的显著性, 同时对其进行突变分析, 结果

如图 3 所示。

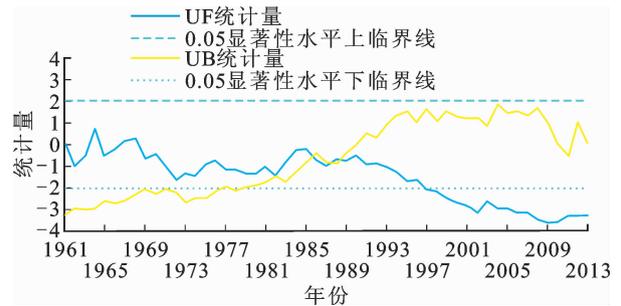


图 3 M-K 突变检验曲线

Fig. 3 Mann-Kendall test curve

由图 3 分析可知, 渭河流域年 SPEI 值在 1989 年附近发生突变, 该年份以后 SPEI 值下降趋势显著。渭河流域干旱趋于严重, 这与和宛林等^[18]的分析结果一致。

2.1.2 流域不同季节 SPEI 值年际变化特性

为了更好的揭示渭河流域干旱的季节性变化特性, 计算了流域不同季节的 SPEI 指数。图 4 分别为春、夏、秋、冬四个季节的 SPEI 指数变化过程线。图 5 为相应的 Mann-Kendall 突变点分析结果。

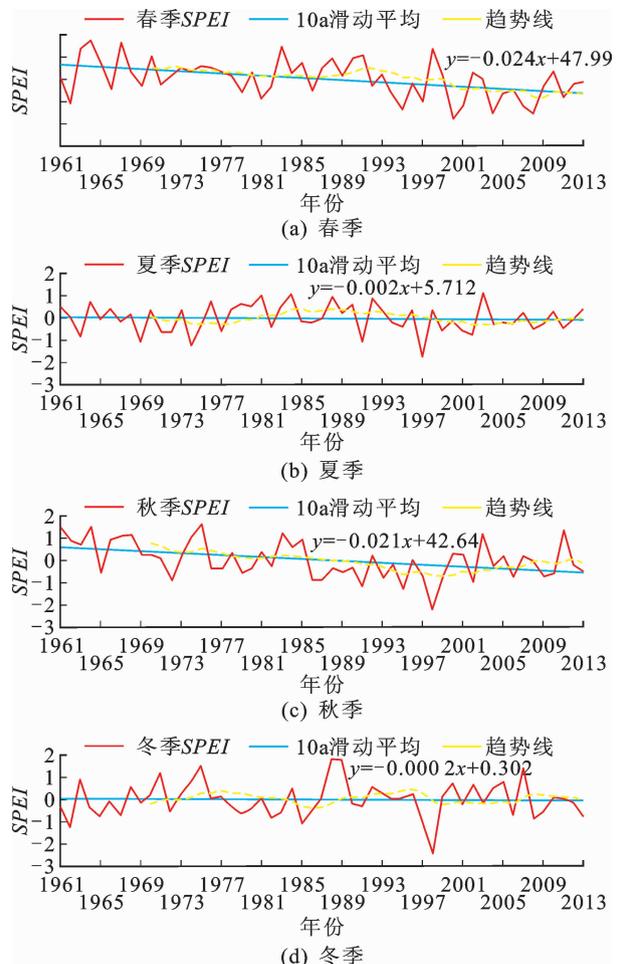


图 4 各季节 SPEI 指数变化过程线

Fig. 4 Variation curves of hydrograph of SPEI at seasonal scales

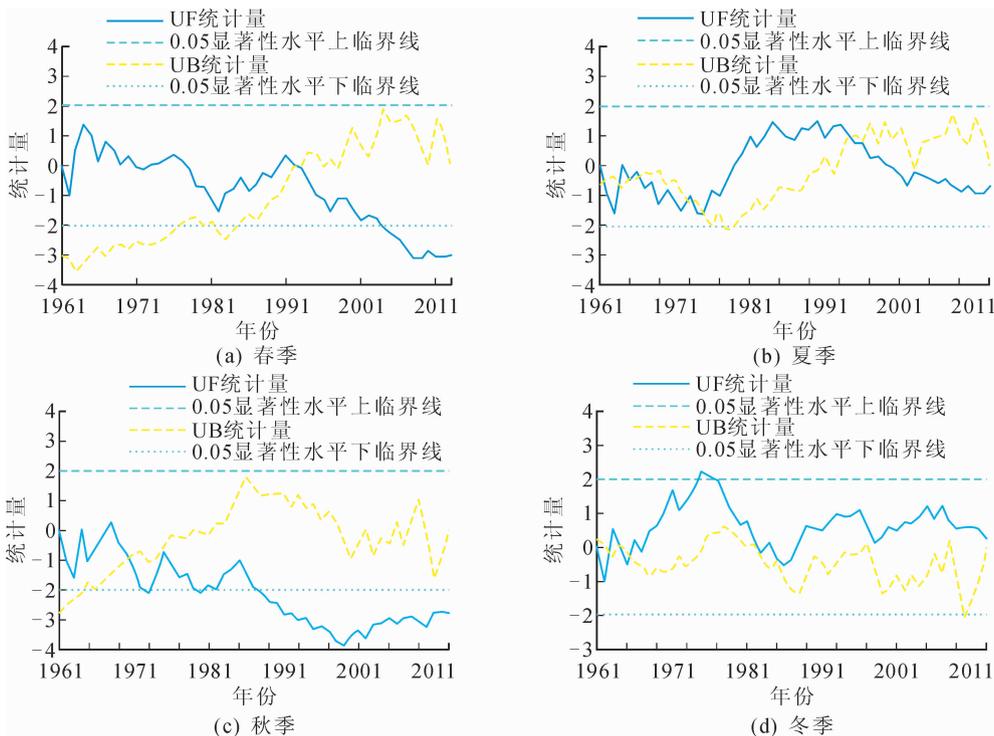


图5 各季节 SPEI 值的 M-K 突变检验曲线

Fig. 5 M-K test curves of SPEI at seasonal scales

由图 4(a)可知,渭河流域春季 SPEI 值以每 10 a 年 0.24 的变幅递减。20 世纪 80 年代之前春季 SPEI 值变幅较小,80 年代之后降幅增加。分析图 5(a)得出,春季 SPEI 值下降显著,在 2003 年达到 0.05 显著性水平临界线,并且在 1993 年发生突变。

由图 4(b)可知,夏季 SPEI 值在 20 世纪 60 年代以后缓慢下降,但在 70 年代到 80 年代又急剧上升,90 年代之后又缓慢下降。分析图 5(b)得出,夏季 SPEI 值整体下降趋势不显著,无明显突变。

由图 4(c)可知,秋季 SPEI 值大体呈下降趋势,并以每 10 a 年 0.21 的变幅递减。但在 2000 年之后有所上升。分析图 5(c)得出,秋季 SPEI 值下降趋势显著,在 1988 年达到 0.05 显著性水平,并且在 1970 年发生突变。

由图 4(d)可知,冬季 SPEI 值有所波动,但无明显变化趋势。分析图 5(d)得出,冬季 SPEI 值整体无显著变化趋势,无明显突变。

综合分析,渭河流域夏季以及冬季干旱无明显变化趋势。春季及秋季干旱趋于严重,其中春季干旱在 20 世纪 90 年代以后有加重的趋势,秋季干旱在 70 年代之后加重。

2.2 渭河流域干旱空间分布特征分析

计算渭河流域 20 个气象站点的干旱发生频率,流域平均值取站点算术平均值,结果如表 2 和图 6 所示。由表 2 及图 6 可知,渭河流域轻旱频率在 5.7%~22.6%之间,中旱频率在 3.8%~18.9%之

间,重旱频率在 1.9%~9.4%之间,特旱频率在 0~3.8%之间。总干旱频率在 26.4%~39.6%之间,平均频率为 32.5%,整体以轻中旱为主。其中干旱发生频率较低的站点为宝鸡、铜川、延安,干旱发生频率最高的站点为环县。

表2 渭河流域各站点干旱发生频率

Tab. 2 Drought frequency in Weihe River stations

站点	干旱频率/%				
	轻旱	中旱	重旱	特旱	干旱
宝鸡	7.5	11.3	7.5	0	26.3
佛坪	11.3	18.9	3.8	0	34.0
固原	15.1	17.0	5.7	0	37.8
华家岭	15.1	15.1	5.7	0	35.9
华山	17.0	9.4	7.5	0	33.9
环县	22.6	11.3	3.8	1.9	39.6
崆峒	9.4	13.2	7.5	0	30.1
临洮	15.1	7.5	5.7	1.9	30.2
洛川	13.2	11.3	1.9	3.8	30.2
岷县	18.9	13.2	3.8	1.9	37.8
商县	11.3	15.1	5.7	1.9	34.0
天水	17.0	13.2	7.5	0	37.7
铜川	7.5	11.3	3.8	3.8	26.4
吴旗	5.7	15.1	9.4	0	30.2
武功	13.2	7.5	7.5	1.9	30.1
西安	13.2	3.8	9.4	1.9	28.3
西峰镇	20.8	9.4	1.9	3.8	35.9
西吉	13.2	7.5	7.5	1.9	30.1
延安	7.5	9.4	7.5	1.9	26.3
长武	20.8	7.5	3.8	1.9	34.0
平均值	13.8	11.4	5.8	1.4	32.4

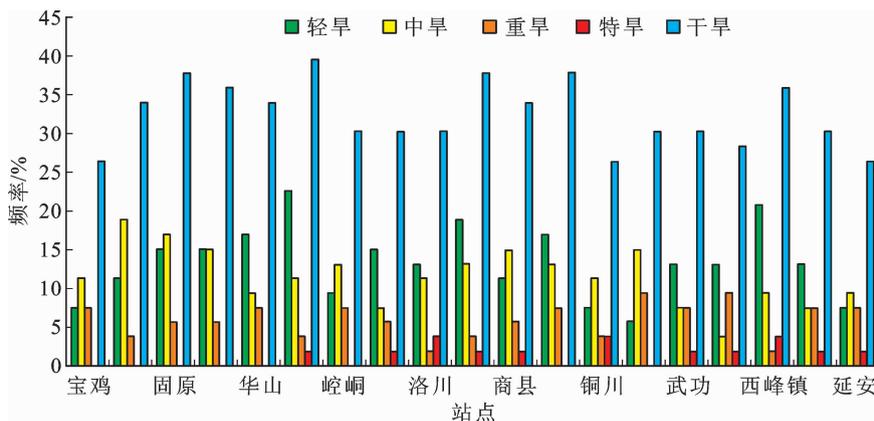


图 6 渭河流域各站点不同程度干旱频率

Fig. 6 Varying degrees of drought frequency in Weihe River stations

渭河流域不同程度干旱发生频率空间分布如图 7 所示。由图 7(a)可知,该流域干旱主要发生在西

北部地区,平均发生频率为 37.4%,东南部干旱程度相对较轻,平均发生频率为 29.5%。

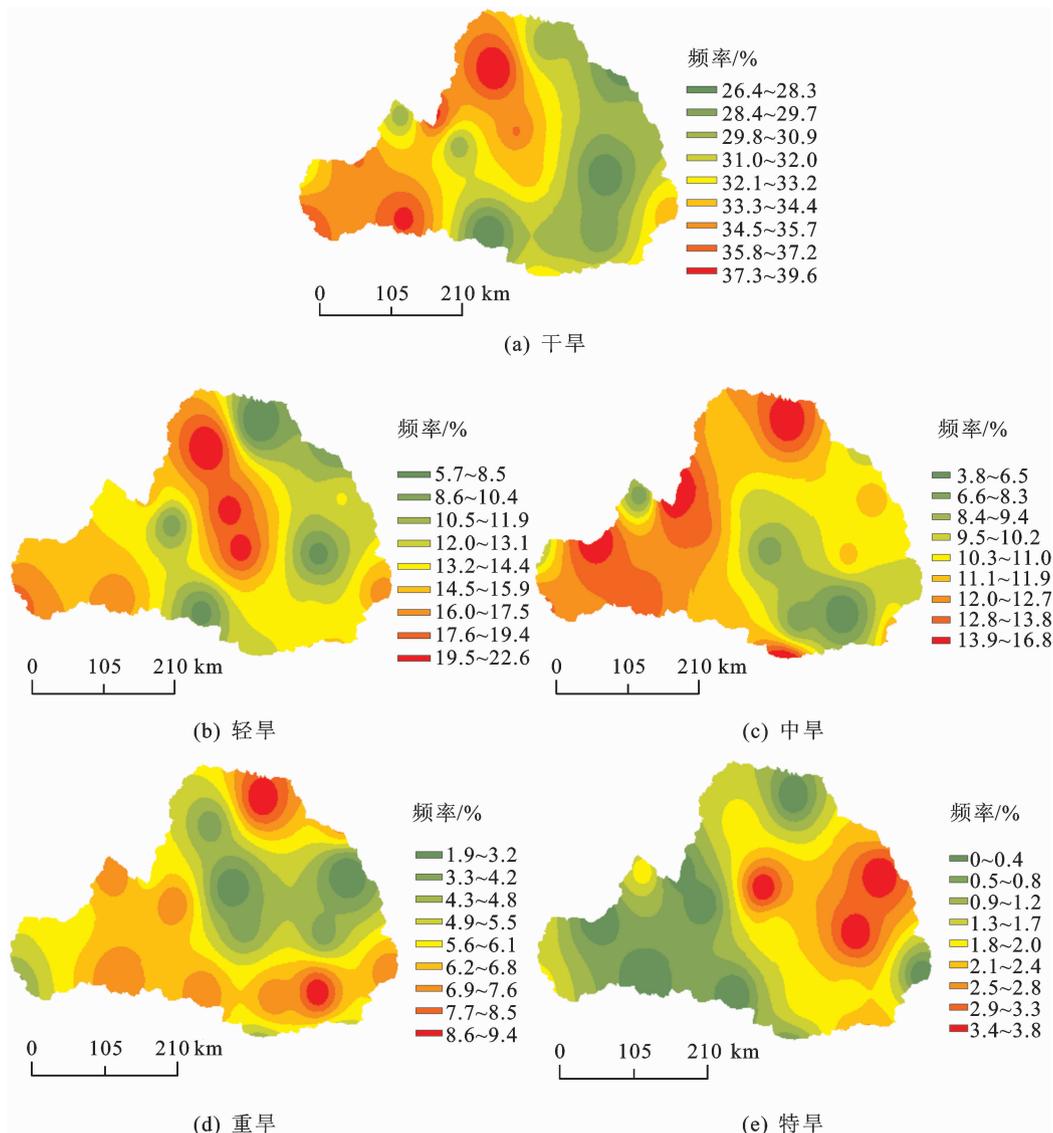


图 7 渭河流域不同程度干旱频率空间分布

Fig. 7 Varying degrees of drought frequency distribution in Weihe River Basin

由图 7(b)、(c)、(d)、(e)分析可知,渭河流域轻旱主要发生在渭河流域中部地区,其中最严重的站点是甘肃环县,达到了 22.6%;西部地区也较为严重,平均频率为 16.5%。中旱主要发生在西北地区,平均频率为 13.2%,比东南地区高 4%左右,其中较为严重的站点是固原、华家岭以及吴旗。重旱主要分布在中部偏西南部地区,最严重的站点是西安站以及位于北部的吴旗地区,均为 9.4%。渭河流域特旱主要发生在东部地区,最为严重的是铜川、

洛川及西峰镇地区,频率为 3.8%。

综上分析,渭河流域轻旱、中旱、重旱均在西北部地区更为严重,东南部地区相对较轻;而特旱却在东南部地区发生较多,这主要是受 1995 年以及 1997 年的特大干旱事件影响所致,1995 年及 1997 年的特旱主要发生在渭河东南部地区,由东南地区向西北部地区递减。图 8(a)、(b)分别为 1995 年、1997 年渭河流域干旱分布情况。

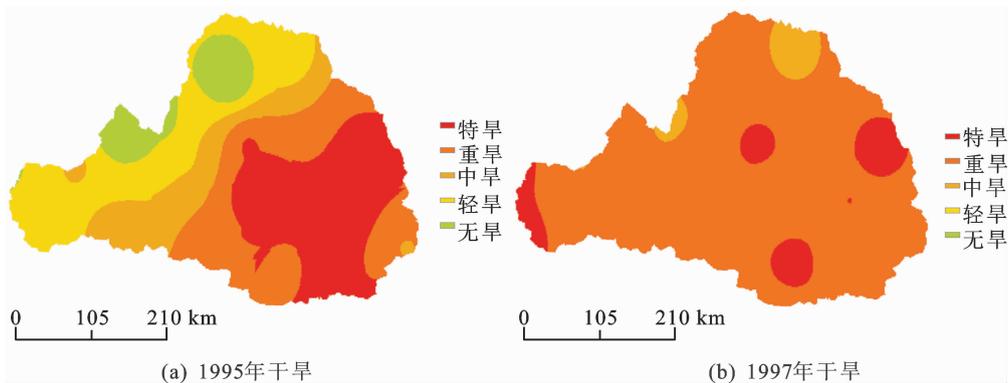


图 8 渭河流域 1995 年及 1997 年干旱分布

Fig. 8 Drought distribution in Weihe River Basin in 1995 and 1997

3 结 论

1) 利用 SPEI 指数分析渭河流域干旱状况可知,SPEI 在渭河流域适用性较好,渭河流域年 SPEI 值呈显著下降趋势,整体干旱趋于严重。流域夏季及冬季 SPEI 值无显著下降趋势,无明显突变,干旱状态无明显变化。春季以及秋季 SPEI 值均显著下降,其中春季在 1993 年发生突变,秋季在 1970 年发生突变,春秋干旱明显加重。

2) 渭河流域主要以轻中旱为主,干旱主要发生在西北部地区,平均干旱频率为 37.4%。其中,轻旱主要发生在渭河流域中部地区及西部地区,最严重的站点是甘肃环县;中旱主要发生在西北地区,较严重的站点是固原、华家岭以及吴旗;重旱主要分布在中部偏西南地区,最严重的站点是西安以及吴旗;与其它类干旱相反,特旱主要发生在东南部地区,最为严重的是铜川、洛川及西峰镇地区,这主要是受 1995 年以及 1997 年的特大干旱事件影响所致。

参考文献:

[1] 胡实,莫兴国,林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. 干旱区地理,2015,38(2):239-248.
HU Shi, MO Xingguo, LIN Zhonghui. Projections of

spatial-temporal variation of drought in north China[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(2):239-248.

- [2] 和宛林,徐宗学. 渭河流域干旱特征及干旱指数计算方法初探[J]. 气象,2006,32(1):24-29.
HE Wanlin, XU Zongxue. Analysis of drought and application of drought index in the Weihe River Basin [J]. Meteorological Monthly, 2006,32(1):24-29.
- [3] 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 Weihe River Basin in the last 50 years [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(4):399-405.
- [4] 王劲松,郭江勇,周跃武,等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理,2007,30(1):60-65.
WANG Jinsong, GUO Jiangyong, ZHOU Yuewu, et al. Progress and prospect on drought indices research [J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1):60-65.
- [5] American Meteorological Society. The relationship of drought frequency and duration to time scales[R]. Anaheim: American Meteorological Society, 1993.
- [6] HAYE M J, SVODOBA M D, WILHITE D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999,80(3):429-438.

- [7] 周扬, 李宁, 吉中会, 等. 基于 SPI 指数的 1981-2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10):1694-1706.
ZHOU Yang, LI Ning, JI Zhonghui, et al. Temporal and spatial patterns of droughts based on standard precipitation index (SPI) in inner Mongolia during 1981-2010[J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(10): 1694-1706.
- [8] PALMER W C. Meteorological research paper No. 45 [R]. Washington DC: U. S. Weather Bureau, 1965.
- [9] 曹永强, 路璐, 张兰霞, 等. 基于 Z 指数的辽宁省气象干旱时空特性分析[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1518-1525.
CAO Yongqiang, LU Lu, ZHANG Lanxia, et al. Spatio-temporal characteristics of meteorological drought in Liaoning province based on Z index[J]. Resources Science, 2012, 34(8):1518-1525.
- [10] 气象干旱等级. GB/T 20481, 中华人民共和国国家标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [11] 车少静, 李春强. 基于标准化降水指数的石家庄干旱时空特征[J]. 气象科技, 2010, 38(1):66-70.
CHE Shaojing, LI Chunqiang. Spatial-temporal characteristic of droughts based on standard precipitation index in Shijiazhuang [J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(1):66-70.
- [12] 章大全, 张璐, 杨杰, 等. 近 50 年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 654-663.
ZHANG Daquan, ZHANG lu, YANG Jie, et al. The impact of temperature and precipitation variation on drought in China in last 50 years [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 654-663.
- [13] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [14] 庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 等. 标准化降水蒸发指数在中国区域的应用[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(5):617-625.
ZHUANG Shaowei, ZUO Hongchao, REN Pengcheng, et al. Application of standardized precipitation evapotranspiration index in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2013, 18(5):617-625.
- [15] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2):423-431.
WANG Lin, CHEN Wen. Applicability analysis of standardized precipitation evapotranspiration index in drought monitoring in China [J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2):423-431.
- [16] 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, 186.
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, 186.
- [17] 高瑞, 王龙, 杨茂灵, 等. 基于 SPEI 的南盘江流域近 40 年冬春干旱时空特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3):67-70.
GAO Rui, WANG Long, YANG Maoling, et al. Spatio-temporal characteristic of winter and spring drought based on standardized precipitation evapotranspiration index in Nanpanjiang Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3):67-70.
- [18] 和宛琳, 徐宗学. 渭河流域近 40 年降水量变化规律及干旱预测[J]. 人民黄河, 2007, 29(1):36-37, 40.
HE Wanlin, XU zongxue. Precipitation variation and drought forecast in the past 40 years in the Weihe River Basin [J]. Yellow River, 2007, 29(1):36-37, 40.

(责任编辑 周 蓓)