

渭河流域多尺度干旱时空特征分析

刘蕊娟¹, 王旭红¹, 赵会娟²

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

2. 北京大学深圳研究生院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055)

摘要: 基于渭河流域 23 个气象站 1959—2014 年的实测资料, 对比分析了标准化降水指数 (SPI) 和标准化降水蒸散指数 (SPEI) 在渭河流域的适用性, 得出 SPEI 的稳定性更佳。继而采用标准化降水蒸散指数 (SPEI) 研究该流域干旱发生频率与干旱强度, 分析了近 55 年渭河流域不同时间尺度干旱的时空变化特征。结果表明: 尺度越大, SPEI 波动的幅度越小。渭河流域 SPEI 在 1991 年发生突变, 1991 年后干旱加剧, 干旱的发生存在 14 a 和 7 a 左右周期变化。年尺度干旱的发生频率呈东高西低的分布, 中度以上干旱频率最高的地区为西吉、武功和天水周边, 频率分别为 14.28%、14.28%、12.5%; 季尺度上整体的秋旱相比其它季节的干旱发生频率高, 中度以上春、秋、冬三季干旱发生的频率天水盆地均最高, 频率分别为 21.4%、19.6% 和 8.9%, 中度以上夏季干旱发生频率最高的是平凉, 其频率为 16.1%; 月尺度上干旱强度的分布总体上是由东向西减小, 其中干旱强度最大的是南部佛坪地区, 干旱强度为 30%, 天水和海源地区近 55 年发生连续干旱过程的次数最多, 可达 22 a, 该过程中连续干旱的月数大多为 3~4 个月, 而吴旗站存在一次长达 9 个月的持续干旱过程。

关键词: 标准化降水指数 (SPI); 标准化降水蒸散指数 (SPEI); 多尺度干旱; 时空变化特征; 渭河流域
中图分类号: S423 **文献标志码:** A

Analysis of spatial-temporal characteristics of drought by multiple scales in Weihe River Basin

Liu Ruijuan¹, Wang Xuhong¹, Zhao Huijuan²

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China;

2. Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: Based on the measured data of 23 climate stations during 1959—2014 in Weihe River Basin, compared and analyzed the applicability of the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Weihe River Basin, obtained that stability of SPEI was more better. Afterwards using the SPEI, has researched the drought frequency and intensity, analyzed the spatial and temporal change characteristics of drought in recent 55 years by different time scale in Weihe River Basin. The results showed that: the more time scale, the smaller fluctuation of SPEI. The SPEI was mutated in 1991, hereafter the drought was become severe, and existed about 14 years and 7 years changing cycle in Weihe River Basin. The frequency of yearly scale drought was presented the distribution of high in east and low in west, the maximal drought frequency places above moderate drought were around Xiji, Wugong and Tianshui, the frequencies were 14.28%, 14.28% and 14.28% respectively. From the seasonal scale, the autumn drought frequency was higher than other seasons, the highest frequency of above moderate drought in spring, autumn and winter seasons was in Tianshui Basin, the frequency was 21.4%, 19.6% and 8.9% respectively. The highest frequency of above moderate drought in summer season was in Pingliang, its frequency was 16.1%. As a whole the distribution of monthly scale drought intensity was decreased from east to west, among them the biggest drought intensity was at the south Foping region, the drought intensity was 30%. In recent 55 years, the Tianshui and Haiyuan Regions were occurred the maximal numbers of continuous drought process, can be reached 22 years. The month numbers as continuous

drought process were mostly for 3 to 4 months, but there were one time of 9 months long continuous drought process in Wuqi station. Through the research for all kinds of drought characteristics by multiple time scales in this river basin, in order to provide guidance for drought control and resistance.

Keywords: standardized precipitation index (SPI); standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); multiple scale drought; spatial-temporal change characteristics; Weihe River Basin

全球气候变化是人类迄今为止面临的最主要的全球环境问题,这一挑战引起了世界各国的广泛关注^[1]。20世纪70年代以来,全球气候变暖导致的干旱等极端气候事件的频率和强度都呈显著增加趋势^[2]。全球气象灾害造成的损失经计算约占各类自然灾害损失的85%,其中干旱造成的损失占气象灾害的50%以上^[3]。由此,干旱已经成为各国政府和学者关注的焦点问题。

国际上通常将干旱划分为气象、农业、水文和社会经济干旱,四类干旱的本质均是由于降水不足而导致的水分亏缺现象^[3]。气象干旱表现在月尺度上降水量的减少;农业干旱是以季节为尺度来衡量土壤中的水分亏缺,继而表现为农作物减产或绝收,粮食供给失衡等;水文干旱以半年为尺度,表现为河流水库的水资源减少、地下水位下降等;以上三类干旱在一定程度上则会引发社会经济干旱^[4-5]。国内外众多学者对于干旱的研究逐步深入,从历史记载到定量分析、从数值统计到遥感监测。针对多时间尺度的干旱评价众多学者也提出了多种干旱监测指标,如Palmer干旱指数(PDSI)、Z指数、作物缺水指数(CWSI)、标准化降水量指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)等^[6-10]。通过对不同指数在不同区域的应用分析发现标准化蒸散指数(SPEI)在监测年尺度水文干旱和季尺度农业干旱方面的能力要优于其它干旱指标^[11-13]。目前SPEI在中国已有一些应用,庄少伟等^[12]研究了SPEI在中国区域的应用,表明在我国年均降水量大于200mm的区域各种尺度SPEI均适用;李伟光等^[13-14]分析了近60年中国和华南地区的干旱时空特征,得出的结果与其它干旱指标一致;任培贵、马琼^[15-16]等运用SPEI指标分析了西北地区和黄土高原地区的干旱特征,得出的结论与年鉴资料一致,说明SPEI在西北地区也具有较好的适用性。

渭河是黄河最大的支流,该流域大部分位于陕西省境内,集中了陕西省61%的人口、56%的耕地,72%的灌溉面积、68%的粮食产量和80%以上的国内生产总值,在陕西乃至西部经济社会发展中都具有十分重要的战略地位^[17-18]。但随着经济社会的快速发展,渭河流域水资源短缺,水质污染和水土流

失严重^[18]。渭河流域生态环境的恶化与旱涝灾害的频发成为众多学者的关注点。诸多学者依据各种干旱评价指标研究了渭河流域的干旱演变^[19-24],但对于多尺度干旱的空间分布研究还有待深入,因此本文运用不同尺度的SPI和SPEI对比分析其适用性,最终选取SPEI研究该流域的气象、农业和水文干旱演变特征,以期为该流域防旱抗旱提供指导。

1 研究区概况

渭河流域位于中国西北部(图1),是黄河的第一大支流,流经甘肃、陕西和宁夏三省。自然区划上其北部为黄土高原,南部为秦岭山脉,流经陇东黄土高原、天水盆地、宝鸡峡谷进入关中平原,流域面积134800km²。该流域属于大陆性气候,也是典型的干旱半干旱区,地处我国西北地区东部生态脆弱带^[17,25],自然灾害多发,其中旱灾发生频繁,且程度最重,危害最大,成为制约该地区国民经济,尤其是农业经济和农业可持续发展的主要因素。

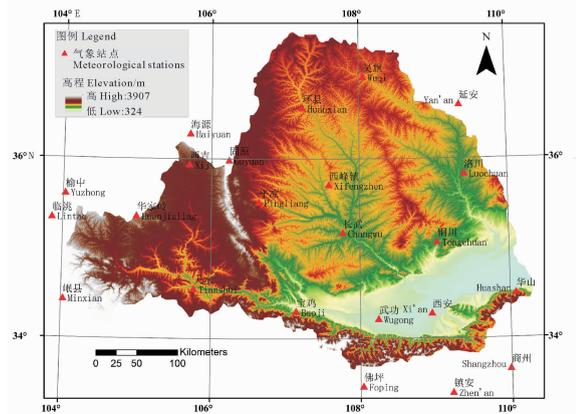


图1 渭河流域位置与气象站点分布
Fig.1 The location of Weihe River Basin and distribution of meteorological stations

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文选取了渭河流域及周边地区共23个气象站点1959—2014年逐月的降水和气温资料,主要来自中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>),天水站数据来自甘肃省气象局,西安站、宝鸡站2005

和 2006 年缺测数据均来自陕西省统计年鉴。主要利用均值替代方法对吴旗站和洛川站个别缺测数据进行了插补处理,经过订正后的各台站气象资料连续。本文的研究以年、季、月为尺度,季节的划分:3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月至翌年 2 月为冬季。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水指数(SPI) 标准化降水指数(SPI)认为降水量服从 Γ 分布,通过 Γ 分布概率密度函数求累计概率,再将累积的概率标准化。计算过程中因为不涉及不同地域的空间参数,因此在多

区域适用。具体计算步骤和划分等级可参见文献^[9,26-27],SPI 的干旱等级划分如表 1 所示。

2.2.2 标准化蒸散指数(SPEI) 标准化蒸散指数(SPEI)是以月降水量、月均温及气象站点的纬度作为输入值,采用 Vicente - Serrano 所述的 Thornthwaite 方法计算潜在蒸散发(PET),继而计算月降水量与潜在蒸散发量的差值,再通过差值的分布概率密度函数(log - logistic 函数)求累计概率,最后转化为标准正态分布来表征该区域不同时间尺度的旱涝状况,其详细步骤可参见文献^[12-16]。根据《气象干旱等级》规范^[28],将 SPEI 的干旱等级划分如表 1 所示。

表 1 SPI 和 SPEI 干旱等级划分与发生累积概率

Table 1 The drought gradation of SPI and SPEI and corresponding cumulative probability

序号 Number	SPI	SPEI	等级 Level	累积概率/% Cumulative probability
1	≤ -2.0	≤ -2.0	极端干旱 Extreme drought	2.28
2	$-2.0 \sim -1.5$	$-2.0 \sim -1.0$	中度干旱 Moderate drought	15.87
3	$-1.5 \sim -1.0$	$-1.0 \sim -0.5$	轻度干旱 Light drought	30.85
4	$-1.0 \sim 1.0$	$-0.5 \sim 0.5$	正常 Normal status	50

2.2.3 干旱评估方法 本文选用旱涝发生频率和强度指标来评估干旱^[27,29]

(1) 干旱频率 P_i : P_i 可按不同程度干旱发生的年数计算相应程序干旱频率,计算公式为:

$$P_i = (n/N) \times 100\% \quad (1)$$

式中, n 为某站点发生干旱的年数; N 为降水资料年数; i 为某站点。

(2) 干旱强度:当 SPEI 1 的数值连续 3 个月在轻度干旱以上,则发生一次连续干旱过程。干旱过程中各月的 SPEI 1 平均值为这次干旱过程的 SPEI 值,然后再根据各站点所有干旱过程累计概率求取平均值,则得到干旱过程的强度。平均值越小,干旱强度越强。本文的干旱等级和累计概率按照表 1 的标准来划分^[16,29-30]。

3 结果与分析

3.1 SPI 和 SPEI 的对比验证

根据《陕西省救灾年鉴》和陕西省地情网对旱情的统计资料,验证 SPI 和 SPEI 在渭河流域的适用性。根据记载,陕西省渭北和渭河流域关中地区历史上的干旱灾害频发,据统计 40 年中有 23 次旱灾,并且将关中中部划分为重伏旱区。1959—1962 年,西安、渭南、咸阳和安康四地旱象严重,整个陕西省受灾面积达 145.58 hm^2 。1994—1995 年关中 24 个

县(市)降水较历年偏少 5—7 成。

因此本文以渭河流域关中段的西安站为代表站,根据 SPI 和 SPEI 的月和年尺度的数值来表现干旱等级。由图 2 可知 SPI 和 SPEI 在月尺度(SPI 1/SPEI 1)与年尺度(SPI 12/SPEI 12)上变化有所不同。月尺度上,虽然 SPI 1 和 SPEI 1 的波动都相对较强,但在特殊年份的典型月份,如 1987 年 9 月和 1994 年 5 月以及 2002 年 7 月 SPI 1 的值都小于 SPEI, SPI 1 所反映的干旱等级高于 SPEI 1,虽然两者都考虑了累积效应,但是 SPI 1 的个别值和前后月份的值差距较大,波动明显,说明其只考虑降水而忽略温度和蒸散所得出的结果对干旱的反应过强。年尺度上 SPI 12 和 SPEI 12 两者具有很好的一致性,但是以 2013 年 SPI 12 和 SPEI 12 的值为例,统计后年平均的 SPEI 12 反映的干旱级别要重于 SPI 12,2013 年平均的 SPEI 12 反映的干旱等级为中度干旱,而 SPI 为正常等级。根据西安市气象台 2013 年 3 月发布的干旱黄色预警记载,西安市农田土壤相对湿度达到中度干旱等级,4 月旱情将持续发展。而图 2 统计的结果 SPEI 12 在 3 月和 4 月为中度干旱等级, SPI 12 在 3 月和 4 月为轻度干旱等级。因此, SPEI 1/SPEI 12 对干旱的评估更加准确,并且对于不同尺度的响应也更加符合实际。

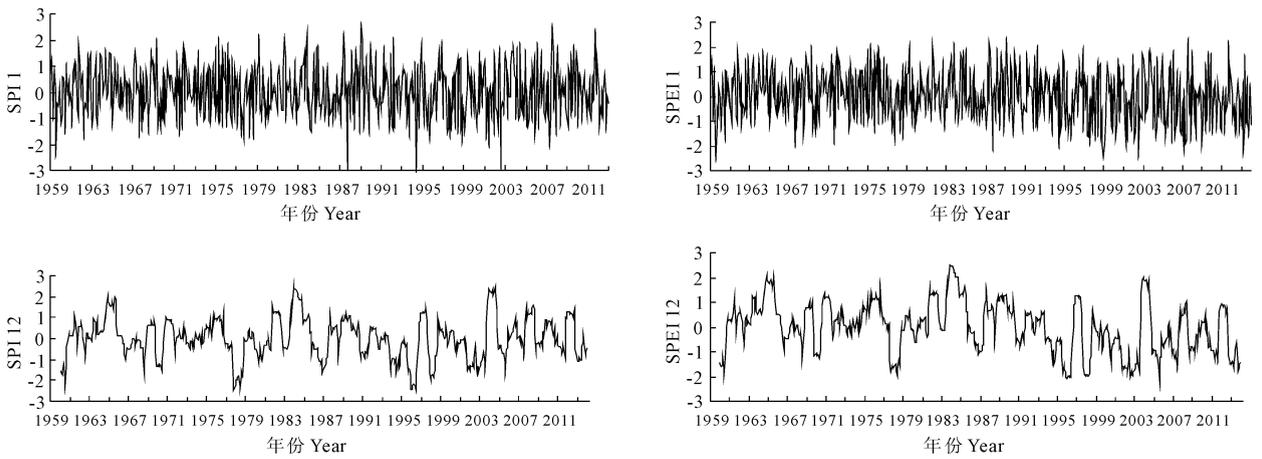


图 2 渭河流域西安站 1959—2013 年 SPI 和 SPEI 月尺度(SPEI 1/SPEI 1)和年尺度(SPEI 12/SPEI 12)比较

Fig.2 The comparison of monthly scale and yearly scale of SPI and SPEI of Xi'an station in Weihe River Basin during 1959 to 2013

3.2 基于 SPEI 的渭河流域干旱时间特征

3.2.1 SPEI 表征的不同时间尺度特征 渭河流域不同时间尺度的 SPEI 波动规律明显不同(图 3),月尺度(SPEI 1)的波动最强,随着时间尺度的增大,季尺度(SPEI 3)和年尺度(SPEI 12)的波动起伏减缓。SPEI 1 由于每月降水和温度的变化,能更准确地反映气象干旱和湿润情况;SPEI 3 受到季节降水和温度的变化,能反映土壤中的水分亏缺;SPEI 12 则反映出长期的水文旱情。根据年尺度(SPEI 12)每年

的旱涝指数可以得出 2000 年的 SPEI 12 的值最小,呈轻度干旱等级。以 2000 年的各尺度 SPEI 1/SPEI 3/SPEI 12 值为例,通过统计 SPEI 3 可以得出春季旱情最强,其值为 -1.329 ,属于中度干旱。月尺度 SPEI 1 则可以看出 2000 年的 7 月份的旱情最严重,SPEI 1 值为 -1.648 ,这和 SPEI 12 各月份的值中 7 月份的 SPEI 12 值最小(-1.834)相吻合。说明不同尺度 SPEI 反映不同类型的干旱。对于尺度的选择要根据干旱类型的研究来定夺。

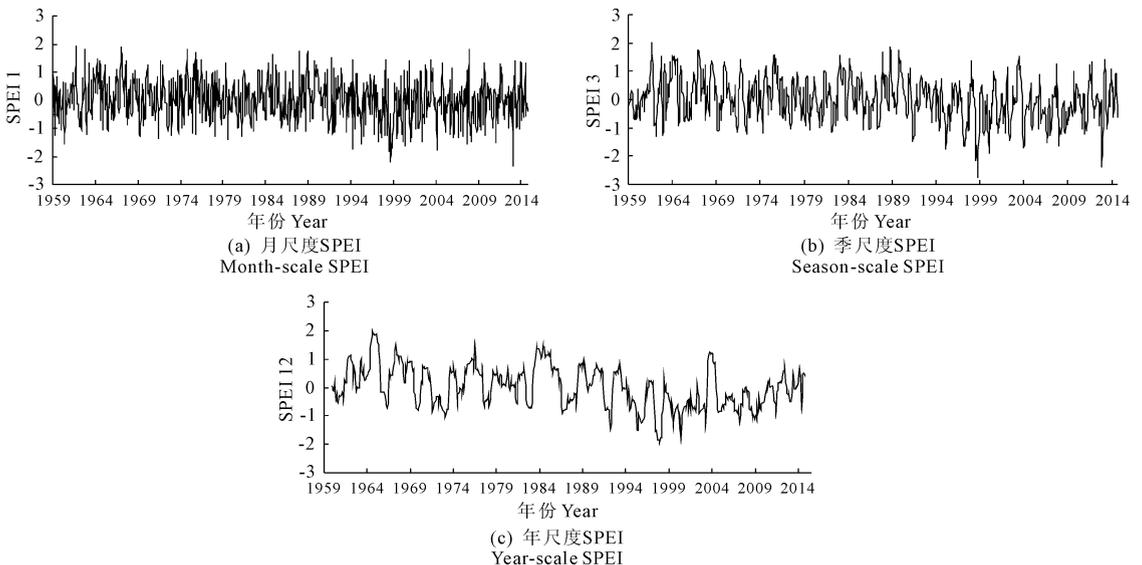


图 3 1959—2014 年渭河流域不同时间尺度历年 SPEI 值

Fig.3 The SPEI values with different time scale in Weihe River Basin during 1959 to 2014

3.2.2 年尺度干旱突变检验 对渭河流域 1959—2014 年的 SPEI 12 进行 Mann-Kendall 突变检验,结果如图 4 所示, UF 值在 1972 年之前都是大于 0 的,表明该 SPEI 序列呈上升趋势; UF 值在 1991 年之后都是小于 0 的,表明该 SPEI 序列呈下降趋势,尤其

是 1997 年之后 UF 曲线超出了置信区间,说明其下降趋势显著。在置信范围内 UF 曲线和 UB 曲线相交于 1991 年,说明其突变始于 1991 年;突变前 SPEI 的均值为 0.286 ,突变后 SPEI 的均值为 -0.373 ,间接说明自 1991 年后渭河流域的干旱加剧。

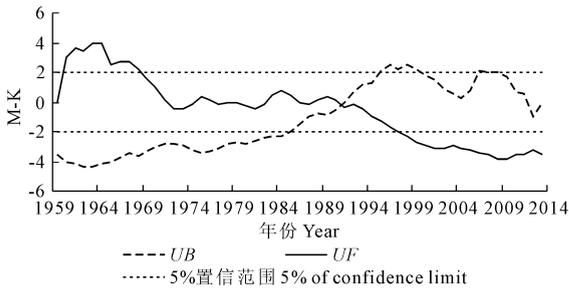


图4 渭河流域1959—2014年平均
SPEI指数的M-K突变检验

Fig.4 The Mann-Kendall mutation test for yearly mean
SPEI index during 1959 to 2014 in Weihe River Basin

3.2.3 年尺度干旱周期特征 为了进一步研究渭河流域干旱的周期特征,本文对渭河流域1959—2014年的SPEI值进行了小波分析,选用了水文气象常用的Morlet连续复小波变换,如图5(左)的小波实部等值线图,蓝色表示负值,红色表示正值,在流域旱涝演变过程中,明显存在着6—8 a和10—16 a的周期,在10—16 a的时间尺度上出现6次明显的旱涝交替;6—8 a的尺度上有明显的3次旱涝交替。又结合图5(右)小波方差图得知在7 a、11 a和14 a时间尺度上震荡明显,最终表明14 a、11 a和7 a分别为第一主周期和第二、三周期。根据小波实部图可以看出2014年虚线未完全闭合,值为正,属于湿润区间,说明目前正处在相对湿润的时期,接下来的一个周期内,则向负值过渡,是变干旱的趋势。

3.3 渭河流域干旱的空间分布特征

3.3.1 年、季尺度干旱发生频率 根据干旱频率的计算得出在渭河流域近60年各地区干旱发生的频率(图6)有所不同。在渭河上游甘肃段天水和平凉地区干旱频率较低,自西南向东北频率增强。支流北洛河上游的吴旗和延安周边地区干旱发生频率较高,分别为30.4%和32.1%。渭河流域中游关中断的长武年干旱发生频率较高为30.4%,铜川和西安附近干旱频率相较于长武较低,年干旱的发生频率分别为27.3%和29.1%,关中地区周边的华山和佛坪是整个流域年干旱发生频率最高的地区,在近56年中佛坪和华山附近分别发生了21个和19个年头的干旱,干旱频率分别可达37.5%和33.9%。但是总体而言,渭河流域干流关中段比其它地区发生干旱的频率要高,上游天水盆地附近干旱发生频率最低。其支流北洛河和泾河区域的年干旱发生频率要高于干流。

春旱(图7A)主要发生在陕西关中地区的西部

和中部,并且以关中地区为核心呈环状的频率高—低—高的局势,其中陇东黄土高原的春旱相比陕西黄土高原的干旱发生频率较低。春季干旱频率最大值出现在宝鸡附近,达33.9%,陇东黄土高原西峰和平凉附近的春旱频率约为23%~26%,天水地区发生春旱的频率最低,约为23%。夏季发生干旱的频率(图7B)在整个流域较春季高,并且大部分地区夏旱发生频率显著,尤以渭河上游岷县附近和天水地区最高,频率可达30%~32.1%;除此以外在关中平原北部的长武、关中西部的华山和黄土高原的环县附近频率较高,其频率可达30.4%;宁夏南部和甘肃华家岭附近地区夏季干旱发生的频率最低。秋旱的发生的频率(图7C)在渭河流域并不高,只有在渭河流域东北部延安地区频率能达到35%;在渭河流域的西北部,甘肃华家岭附近地区秋旱的频率也相对较高,可以达到33.9%;其余大部分地区秋旱发生的频率都分布在27%~31%,关中地区秋旱的频率相对其它地区较低。冬旱发生的频率(图7D)尤以关中地区最为严重,武功地区的冬旱发生频率约为25%~27%,陕西黄土高原的吴旗附近频率最低为17.9%,其它区域冬旱发生的频率为21%~23%。

3.3.2 中度以上干旱发生频率 年尺度方面中度以上干旱发生频率(图8)较高的地区分布在渭河流域西部和南部,尤其以宁夏南部和关中地区中部的中度以上干旱发生频率最高,其中西吉和武功周边的年尺度中度以上干旱频率最高可达14.28%;关中地区北部即黄土高原南部地区年尺度中度以上干旱反而较低,长武和铜川周边干旱的发生频率低至3.5%~5.5%,整个黄土高原地区除了陇东黄土高原的西峰以外地区,年尺度的干旱发生频率都相对较低,大多介于9%~10%,西峰地区干旱的发生频率可达12.5%。这与总体各个等级干旱的发生频率相较而言存在极大的差异,总的4个干旱等级上渭河流域上游的天水盆地是干旱发生频率较低的地区(图6),但是就中度以上干旱的发生频率而言,天水盆地附近却是中度和极端干旱发生的典型区域,说明天水地区的干旱虽发生频率低,但是强度大,等级高,旱情严重。

春季渭河流域中度以上干旱发生频率(图9a)9%~14.2%,渭河流域上游天水地区春季中度以上干旱的发生频率较高,整个时间段内天水盆地周边中度和极端干旱发生的频率高达

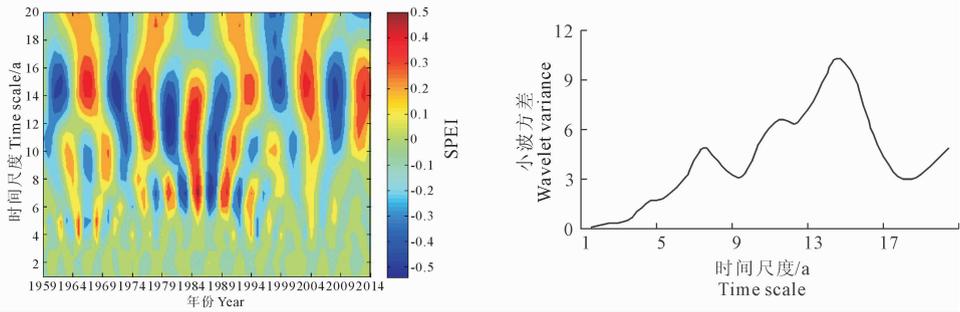


图 5 渭河流域 1959—2014 年平均 SPEI 指数小波实部图(左)和小波方差(右)

Fig.5 The wavelet real part and wavelet variance of yearly mean SPEI during 1959—2014 in Weihe River Basin

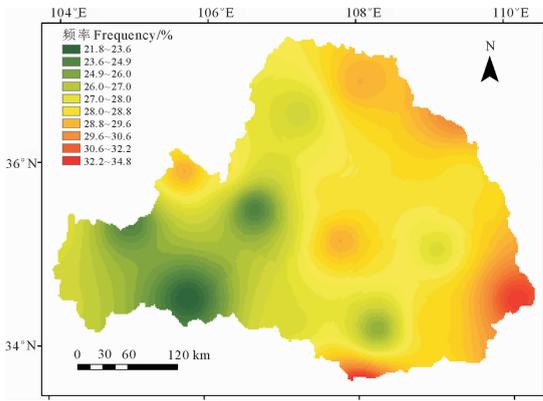


图 6 渭河流域年尺度干旱发生频率分布

Fig.6 The distribution of yearly scale drought frequency in Weihe River Basin

21.4%，成为全域内春季干旱级别最高、发生频率最强的地区。除此以外整个渭河流域的西峰和洛川附近属于春季中度以上干旱发生频率较高的地区。整体而言，渭河流域东南部比西部和北部春季中度以上干旱的发生频率略微要高。这与整个干旱等级春季干旱发生频率(图 7A)相比较也有差异，最明显的是天水 and 宝鸡地区，天水盆地各个等级干旱的发生频率为 23.2%，但是仅春季中度以上干旱可达 21.4%，说明天水盆地附近有严重的春旱；关中地区西部宝鸡附近各个等级干旱的发生频率为 33.9%，但中度以上的干旱仅为 14.5%，说明关中地区西部春季虽然有干旱，但是干旱等级相对较低。

夏季整个渭河流域中度以上干旱的发生频率

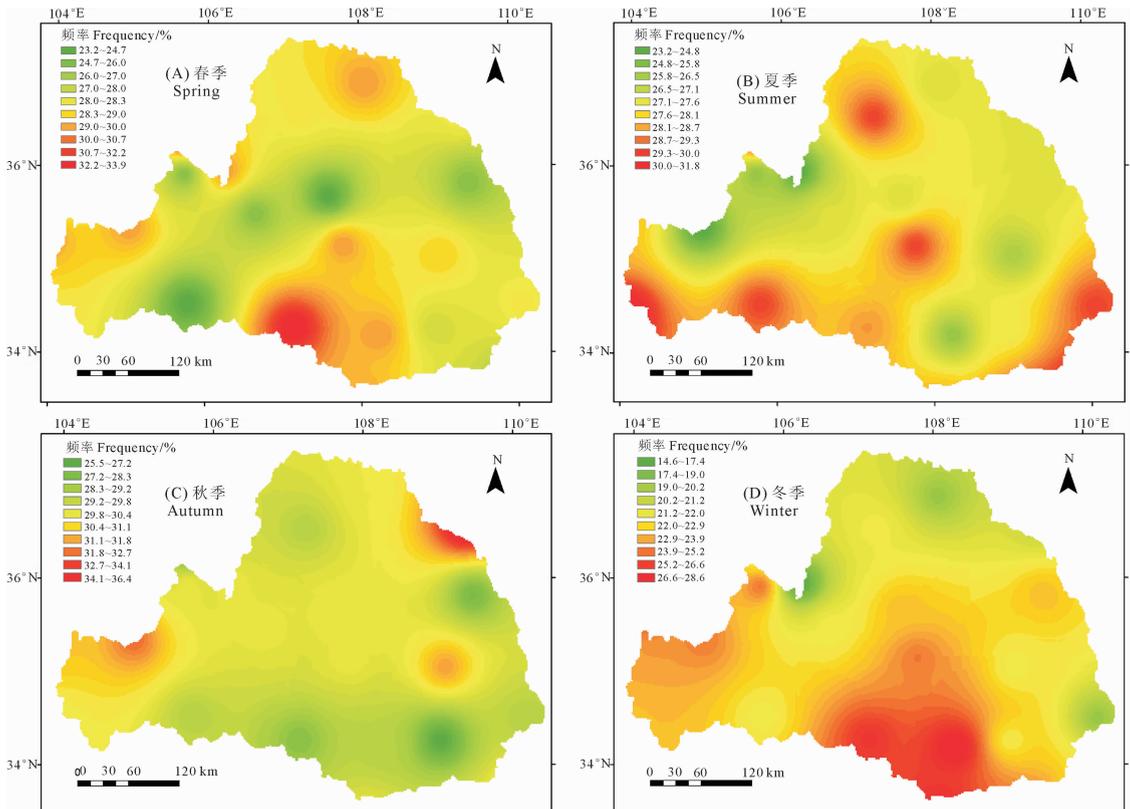


图 7 渭河流域季尺度干旱发生频率分布

Fig.7 The distribution of seasonal scale drought frequency in Weihe River Basin

(图 9b)存在明显的东西差异,西部陇东黄土高原的平凉和西吉地区中度以上干旱发生频率可达 16.1%,黄土高原中部吴旗地区和关中地区西部的宝鸡中度以上干旱发生频率为 14.3%,其它地区频率都较低。相比较总的 4 个等级夏季干旱发生的频率(图 7B),长武、天水、西吉和华山存在明显的差异,长武、华山和天水周边所有等级的干旱发生频率较高,但是中度和极端干旱的发生频率低,说明发生夏旱的频率高,但等级低。陇东黄土高原的平凉地区所有等级干旱的发生频率达 25%,相对其它地区较低,但是夏季中度和极端干旱发生频率 16.1%,是整个流域地区最高的,说明该地区发生夏旱的频率低,但是等级高,夏旱严重。

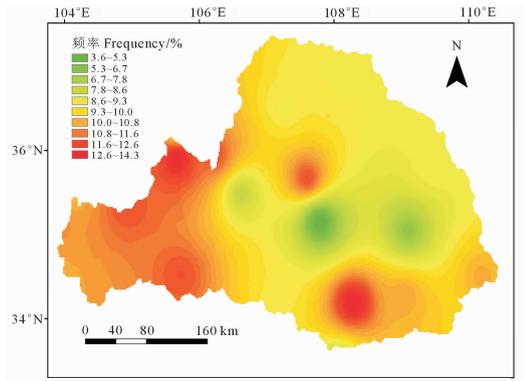


图 8 渭河流域年尺度中度以上干旱发生频率分布
Fig.8 The distribution of yearly scale above moderate drought frequency in Weihe River Basin

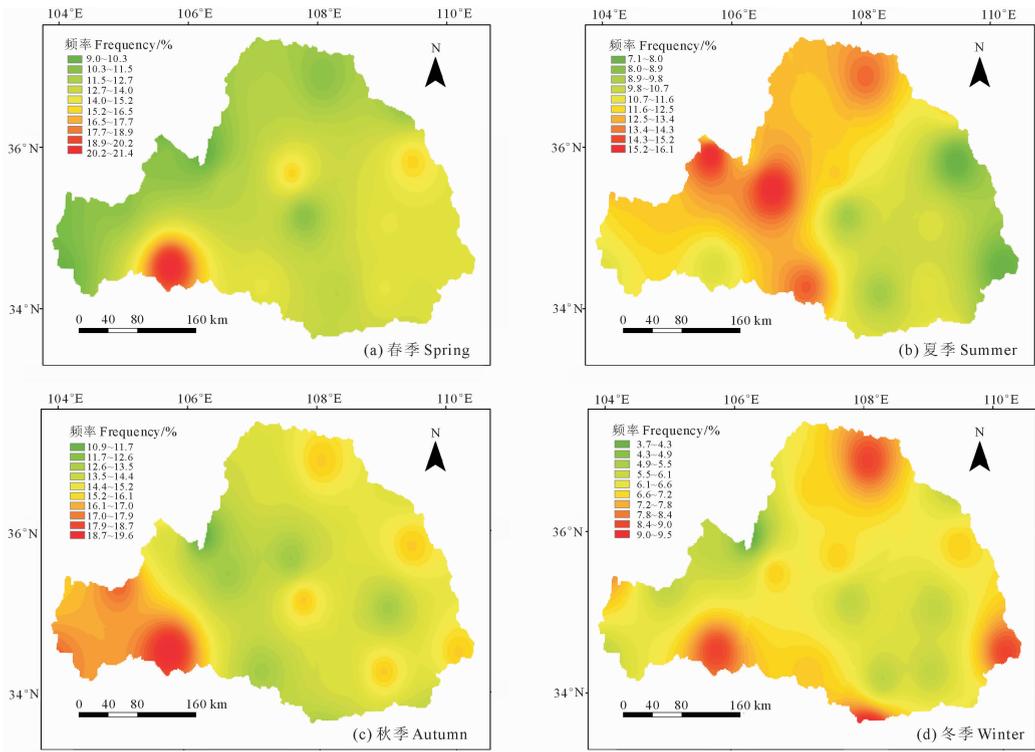


图 9 渭河流域年季尺度中度以上干旱发生频率分布

Fig.9 The distribution of seasonal scale above moderate drought frequency in Weihe River Basin

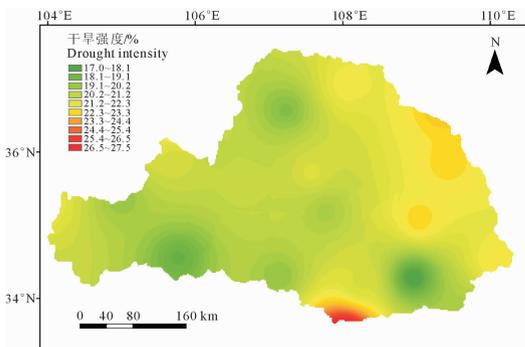


图 10 干旱发生强度分布

Fig.10 The distribution of drought intensity in Weihe River Basin

秋季整个渭河流域中度以上干旱的发生频率(图 9c)最高的区域分布于渭河流域甘肃段,其中天水地区中度以上干旱的发生频率最高,可达 19.6%;流域内其它地区中度以上干旱的发生频率为 11%~16%,无明显的差异,相较于各个干旱等级发生频率(图 7C),天水盆地附近是属于干旱发生等级高但频率较低的区域,陕西境内黄土高原东部延安地区虽然不同等级干旱的发生频率相对较高,但是中度以上干旱的发生频率低,说明该区域属于干旱发生等级低、频率高的地域。

冬季整个渭河流域中度以上干旱发生频率(图 9d)比其它季节都要低,整个区域内天水、华山和吴旗地区属于中度以上干旱发生频率较高的地区,其它地区中度以上干旱发生的频率都介于 3.7% ~ 7.8%。相比较所有干旱等级其冬季干旱的发生频率(图 7D),关中地区中西部属于干旱发生频率较高的地区,但是该地区中度和极端干旱的发生频率却很低,说明冬季该地区虽然容易发生干旱,但其干旱程度都相对较低。

3.3.3 基于月尺度的干旱发生强度 基于各站点 SPEI 1 数据和干旱强度的统计方法绘制出渭河流域干旱发生强度分布图(见 105 页图 10),最终统计得出在渭河流域干旱强度最大的是南部佛坪地区,干旱强度达 30%。其次干旱强度有明显的东西差异,东部支流北洛河流域附近延安、吴旗等地干旱强度可达 22% ~ 23%,其它地区强度低于 20%。天水和海源在近 55 年中发生连续干旱过程的次数最高,可达 22 a。但是这两个区域干旱过程连续的月数都是主要集中在连续 3 个月或者 4 个月,并无长期的连续,反之吴旗附近存在长达 9 个月的一次连续干旱过程。

4 结论与讨论

通过不同尺度 SPI 和 SPEI 指数对渭河流域近 56 a 的干旱时空分布特征的分析,得出以下结论:

(1) SPEI 相比 SPI 对渭河流域干旱的评估更加贴合实际。根据 SPEI 计算,发现尺度越大波动幅度越小,不同尺度的 SPEI 可以反映不同类型的干旱;渭河流域年平均 SPEI 在 1991 年发生突变,1991 年后干旱加剧;SPEI 存在 14 a 左右的第一主周期变化,14 a 周期内还包括 11 a 和 7 a 左右的小周期,目前正处于相对湿润的时期,接下来的一个周期有变干旱的趋势。

(2) 渭河流域年尺度干旱的发生频率呈东高西低的分布,其中天水盆地附近干旱发生频率较低,为 21.8%,渭河流域其支流北洛河和泾河附近干旱发生的频率较高,约为 30.4%;发生中度以上干旱频率较高的地区为西吉、武功和天水周边,分别为 14.28%、14.28% 和 12.5%,但是天水总的各个干旱等级的发生频率却相比其它地区低,说明天水干旱的发生虽然频率低,但强度大,等级高,旱情严重。

(3) 渭河流域季尺度秋季干旱发生频率相比其它三个季节要高,为 25.5% ~ 37.5%,主要分布于陕西关中地区西部和中部;夏旱的高发区为岷县和天水周边,频率分别为 32.1% 和 30.4%;秋旱发生频率较高区为北洛河延安周边,频率为 37.5%;冬旱

在关中平原频率最高,频率为 27.3% ~ 28.6%。就发生中度以上季节干旱而言,春季天水盆地周边是发生中度以上春旱最严重的地区,频率为 21.4%;夏季陇东黄土高原的平凉中度以上干旱严重,频率为 16.1%;秋季天水盆地干旱发生等级高、频率低,中度以上干旱发生频率为 19.6%,延安周边干旱发生的频率高但等级低,中度以上干旱发生频率 14.3%;冬季天水周边发生中度以上干旱频率较高,相反关中地区中西部干旱等级低。

(4) 渭河流域干旱强度的分布总体上是由东向西减小,其中干旱强度最大的是南部佛坪地区,干旱强度可达 30%;天水和海源地区发生连续干旱过程的次数最多,可达 22 次,但连续月数最长的是吴旗地区,统计期内存在长达 9 个月的一次连续干旱过程。

本文在研究干旱发生频率、周期、突变情况和中度以上干旱发生频率主要是基于年尺度(SPEI 12)而言,干旱强度和持续干旱月数是基于月尺度(SPEI 1),季节干旱发生频率是基于季尺度(SPEI 3),最终得出的结论和前人的研究结果基本一致^[20-24]。本文采用的 SPEI 虽然考虑了降水、温度和蒸散发,但大气环流和下垫面特征,如风速、地形等并未完全考虑,因此对于其成因和演变机制有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 叶笃正. 中国的全球变化预研究[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [2] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000,81(3):417-425.
- [3] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报,2015,70(11):1835-1848.
- [4] Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [5] 张强,韩兰英,张立阳,等. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略[J]. 地球科学进展,2014,29(1):80-91.
- [6] Palmer W C. Meteorological drought[M]. Washington, D C, USA: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [7] 么枕生,丁裕国. 气候统计[M]. 北京:科学出版社,1990.
- [8] Jackson R D, Kustas W P. A reexamination of the crop water stress index[J]. Irrigation Science, 1988,9(4):309-317.
- [9] McKee T B, Doesken N J, Kleist J, et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology: American Meteorological Society Boston, M A, 1993:179-183.
- [10] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.

- [8] 祝飞华,王益权,胡卫光,等.关中农田土壤剖面的主要物理性状研究[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):145-150.
- [9] 祁迎春,王益权,刘 军.关中地区土壤团聚体组成特征及稳定性研究[J].陕西农业科学,2011,(5):66-69.
- [10] 徐 爽,王益权,王 浩,等.不同肥力水平土壤团聚体的稳定性及对氮肥盐溶液的响应[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1135-11.
- [11] 郑必昭.土壤分析技术指南[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [12] 彭新华,张 斌,赵其国.红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2003,23(10):2176-2183.
- [13] 张 鹏,贾志宽,王 维,等.秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2012,45(8):1513-1520.
- [14] Шенн Е В, Гончаров В М. агрофизика Высшее Образование [M]. Ростов-на-Дону 《Феникс》. 2006.
- [15] 孙云蔚,王惠蕙.果园土壤管理[M].上海:上海科学技术出版社,1981.
- [16] 焦彩强,王益权,刘 军,等.关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):7-12.
- [17] 张忠学,曾赛星.东北半干旱抗旱灌溉区节水农业理论与实践[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [18] 张兴义,隋跃宇.土壤压实对农作物影响概述[J].农业机械学报,2005,36(10):161-164.
- [19] Ковда В А.土壤学原理[M].北京:科学出版社,1981:282.
- [20] 王立春,马 虹,郑金玉.东北春玉米耕地合理耕层构造研究[J].玉米科学,2008(4):13-17.
- [21] 宋家祥,庄恒扬,陈后庆,等.不同土壤紧实度对棉花根系生长的影响[J].作物学报.1997,23(6):719-726.
- [22] Шенн Е В, Гончаров В М. Агрофизика Высшее Образование [M]. Издательство Феникс,2006.
- [23] DE, Neve S, Hofman G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000,30(5-6):544-549.
- [24] Acuat L B, He X, Wade L J. Temporal variation in root genotypes through thin wax layers in contrasting water regimes and in the field [J]. Yield Crops Research, 2012,138:1-10.
- [25] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.
- [26] Douglas J T. Crawford C F. The response of a ryegrass toward to wheel traffic and applied nitrogen[J]. Grass and Forage Science, 1993,48(2):91-100.
- [27] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-420.

(上接第 106 页)

- [11] Vicente-Serrano S M, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. Earth Interactions, 2012,16(10):1-27.
- [12] 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.
- [13] 李伟光,易 雪,侯美亭,等.基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究[J].中国生态农业学报,2012,20(5):643-649.
- [14] 李伟光,侯美亭,陈汇林,等.基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究[J].自然灾害学报,2012,21(4):84-90.
- [15] 任培贵,张 勃,张调风,等.基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析[J].水土保持通报,2014,34(1):182-187,192.
- [16] 马 琼,张 勃,王 东,等.1960—2012 年甘肃黄土高原干旱时空变化特征分析——基于标准化降水蒸散指数[J].资源科学,2014,36(9):1834-1841.
- [17] 李景宜.陕西渭河流域主要环境问题及其治理[J].干旱区研究,2011,28(6):967-973.
- [18] Li Qi, Song Jinxi, Wei Anlei, et al. Changes in major factors affecting the ecosystem health of the Weihe River in Shaanxi Province, China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2013, 7(6):875-885.
- [19] 毕彩霞,穆兴民,赵广举,等.1960—2010 年渭河流域旱涝时空分布特征[J].水土保持通报,2013,33(2):281-284,290.
- [20] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.基于 SWAT 模型的渭河流域干旱时空分布[J].地理科学进展,2015,34(9):1156-1166.
- [21] 陈昱潼,杨建霞,黄生志,等.基于 PDSI 的渭河流域干旱变化特征[J].自然灾害学报,2014,23(5):29-37.
- [22] 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.
- [23] 马明卫,宋松柏.渭河流域干旱指标空间分布研究[J].干旱区研究,2012,4(29):681-691.
- [24] 田 甜,黄 强,郭爱军,等.基于标准化降水蒸散指数的渭河流域干旱演变特征分析[J].水利发电学报,2016,35(2):16-27.
- [25] 左德鹏,徐宗学,程 磊,等.渭河流域潜在蒸散量时空变化及其突变特征[J].资源科学,2011,33(5):975-982.
- [26] 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[J].植物生态学报,2004,28(4):523-529.
- [27] 杨晓静,左德鹏,徐宗学.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,2014,36(3):473-480.
- [28] 中国气象科学研究院,国家气象中心,中国气象局预测减灾司.气象干旱等级(GB/T20481-2006)[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [29] 包云轩,孟翠丽,申双和,等.基于 CI 指数的江苏省近 50 年干旱的时空分布规律[J].地理学报,2011,66(5):599-608.
- [30] 周 丹,张 勃,任培贵,等.基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 年干旱特征分析[J].自然资源学报,2014,29(4):677-688.