

近 50 年陇东黄土高原干旱特征及未来变化趋势分析

张耀宗^{1,2,3}, 张 勃², 刘艳艳^{1,3}, 张多勇^{1,3},
贾艳青², 唐 敏², 王国强², 马 彬²

(1. 陇东学院 历史与地理学院, 甘肃 庆阳 745000; 2. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;
3. 庆阳市荒漠化防治研究中心, 甘肃 庆阳 745000)

摘 要: 基于陇东黄土高原近 50 a 平均逐月降水和气温数据, 以标准化降水蒸散发指数(SPEI)作为干旱评价指标, 采用线性趋势方法、Mann – kendall 突变分析法, 小波分析法、R/S 分析法, 马尔科夫预测模型分析了陇东黄土高原近 50 a 来干旱变化周期特征及变化趋势, 预测了未来干旱趋势和发生的概率。研究显示: 近 50 a 陇东黄土高原 SPEI 线性倾向率小于 0, 整体呈干旱化趋势, 陇东黄土高原干旱变化的突变点在 1993 年左右; 通过小波分析, 年际尺度的 SPEI 存在 19、11、7、4、2 a 的主周期, 月尺度的 SPEI 存在 17、25、35、10、6 个月主周期; SPEI₁₂ 的 Hurst 值 0.64 > 0.5, 自相关系数 $R_t > 0$, 在未来一段时间内干旱化趋势将会持续; 通过 Markov 预测分析, 干旱状态演变过程中干旱极端化现象的概率会增多, 严重干旱状态的持续性将增强。

关键词: 陇东黄土高原; SPEI; 小波分析; R/S 分析法; 马尔科夫预测

中图分类号: S165 + .2; P429 **文献标志码:** A

Drought characteristics and trend in Longdong Loess Plateau in recent 50 years

ZHANG Yao-zong^{1,2,3}, ZHANG Bo², LIU Yan-yan^{1,3}, ZHANG Duo-yong^{1,3},
JIA Yan-qing², TANG Min², WANG Guo-qiang², MA Bin²

(1. College of Geography and History, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China;
2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Qingyang Centre for the Management and Combat of Desertification, Qingyang, Gansu 745000, China)

Abstract: Based on monthly precipitation and temperature data from 13 meteorological stations, the characteristics of drought in Longdong Loess Plateau were studied by means of different scales of Standard Precipitation Evapotranspiration Index, Mann – kendall test, R/S methods and Markov chain. The results showed that over the past 50 years, linear trend of SPEI in Longdong Loess Plateau was less than 0, which indicated the drought trend was very obvious, especially since 1990 s. Mann – kendall abrupt analysis confirmed that the drought trend was significant since 1990s. According to the wavelet analysis, the main periods of the SPEI in interannual scale were 19 a, 11 a, 7 a, 4 a, 2 a; the main periods of the SPEI in the monthly scale were 17, 25, 35, 10 and 6 months. Hurst of SPEI₁₂ in R/S prediction analysis, was 0.64 > 0.5, and auto correlation coefficient was $R_t > 0$. So in the next period of time, the drought trend would continue. According to Markov model, the probability of drought extremes would increase in the evolution process of drought state, and Persistence of severe drought state would increase.

Keywords: longdong loess plateau; standardized precipitation evapotranspiration index(SPEI); wavelet analysis; R/S methods; markov chain

收稿日期:2015-12-16
基金项目:国家自然科学基金项目(41561024,31460090);高校博士学科点专项科研基金项目(20136203110002);甘肃省高等学校科研项目(2016B – 101);陇东学院青年科技创新项目(XYSK1501,XYSK1601)
作者简介:张耀宗(1982—),男,甘肃华池人,讲师,博士,主要从事气候变化和地表过程研究。E-mail:yaozongzhang@163.com。
通信作者:张 勃,教授,博导。E-mail:zhangbo@nwnu.edu.cn。

干旱灾害是中国最主要的自然灾害之一,干旱对农业生产的影响尤为显著,中国每年干旱受灾面积占农作物总受灾面积的 50% 以上,严重干旱年份占 75% 以上^[1]。干旱往往和长时间降水少,气温高,蒸发量大相关,研究显示干旱通常被划分为气象干旱、水文干旱、农业干旱,社会经济干旱^[2]。近年来,干旱事件在全球频繁发生,干旱已经成为一种影响重大的自然灾害,IPCC 第五次报告指出近 100 年全球升温显著,全球陆地普遍存在着干旱化趋势,欧亚大陆、非洲大陆干旱化趋势最为严重^[3-6]。近 30 a 中国北方地区持续干旱化,东北地区、华北地区、西北地区东部干旱化趋势严重^[7-14],由此造成水资源匮乏,已严重威胁到这些地区生存环境和社会经济发展,因此干旱问题日益受到政府、学术机构、普通民众的关注。目前,干旱的检测主要是通过干旱指标来完成的,标准化蒸散发指数(SPEI)目前被认为是较理想的一种干旱指数,在全球和中国已经被广泛应用^[15-18]。陇东黄土高原是中国黄土高原的重要组成部分,地处黄河中上游黄土高原丘陵沟壑区,以雨养农业为主,也是水土流失严重的生态环境脆弱区,同时陇东黄土高原属于陕甘宁革命老区和六盘山连片贫困区交错地带,干旱不仅对陇东黄土高原农业生产与生态环境影响显著,而且对该地区特色农产品加工生产和农村脱贫致富,生计改善有重要的影响。研究近 50 a 陇东黄土高原干旱变化规律及未来发展趋势,对陇东黄土高原粮食安全、生态文明建设、脱贫致富有重要的现实意义。

黄斌等研究指出 1971—2005 年陇东的正宁、西峰地表湿润指数呈减小趋势,环县有所增加,春、秋季干旱化趋势明显^[13];杨晓华等使用 Z 指数研究指出陇东地区总体上是向干旱化发展,1990 s 以来干旱强度明显增强^[19];王媛媛使用 SPI 指数得出陇东地区 1971—2010 年呈干旱化趋势,春、秋、冬旱呈弱增加趋势^[20];张调风等使用 CI 指数指出甘肃黄土高原地区春、秋干旱率呈增加趋势,2000 年以来最为严重^[21],马琼等使用 SPEI 指数得出甘肃黄土高原四季呈干旱化趋势,秋季最明显^[22]。以上学者通过不同指数研究得出了陇东黄土高原近几十年来整体呈干旱化趋势,春、秋干旱化趋势明显。由于不同指数的适用性不同,结果间存在一定的差异,而关于干旱变化的突变点、周期,未来干旱变化的趋势和概率很少涉及。本文基于 SPEI 指数,研究陇东黄土高原地区近 50 a 干旱特征、突变点,周期,并使用 R/S

分析法和马尔科夫预测法分析陇东黄土高原未来干旱变化的趋势和概率。

1 研究区概况与数据方法

1.1 研究区概况

陇东黄土高原位于中国黄土高原的核心区域,范围包括六盘山以东和子午岭以西的甘肃黄土高原地区,行政区划上包括甘肃省庆阳市和平凉市所辖的 13 个县区,构造上属于陇东山间盆地,海拔在 1 400~2 000 m,地貌主要有黄土塬、台塬和梁塬。陇东黄土高原位于中国东部季风区的中纬度地带,具有大陆性季风气候冬季寒冷,夏季暖热,降水时间分配不均,降水集中,强度大等特点^[23]。

1.2 数据来源

本文基于陇东黄土高原地区 13 个气象站点 1960—2007 年月平均气温和月降水数据计算了 1 月、12 月尺度的 SPEI 值,分别表示为 $SPEI_1$, $SPEI_{12}$ 。 $SPEI_1$ 代表月尺度的 SPEI 值, $SPEI_{12}$ 表示年尺度的 SPEI 值,气象站点空间分布均匀,数据序列超过了 40 年,在统计上有意义。数据来源于中国气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)和甘肃省气象信息中心,数据经过了严格的质量控制,确保了数据的连续性和准确性。图 1 为研究区气象站点分布。

1.3 方法

1.3.1 标准化降水蒸散发指数 Standardized Precipitation Evapotranspiration Index(SPEI)是在标准化降水指数 SPI 的基础上发展来的,SPI 的优点在于计算相对简单、能反映出空间变化和长时间尺度变化,但只考虑了降水因素,SPEI 在 SPI 的基础上同时考虑了蒸散发和降水的影响,结合了 PSDI 指数气温对蒸散发敏感和 SPI 多时间尺度的优点,已经在全球大范围使用。

第一步计算潜在蒸散量(PET):

$$PET = 16.0 \times \left(\frac{10T_i}{H} \right)^A \tag{1}$$

式中,PET 为潜在蒸散量;T 为月平均温度;H 为年热量指数;A 为常数。

第二步计算逐月降水量与蒸散量的差值:

$$D_i = P_i - PET_i \tag{2}$$

式中, D_i 为降水量与蒸散量的差值; P_i 为月降水量; PET_i 为月蒸散量。

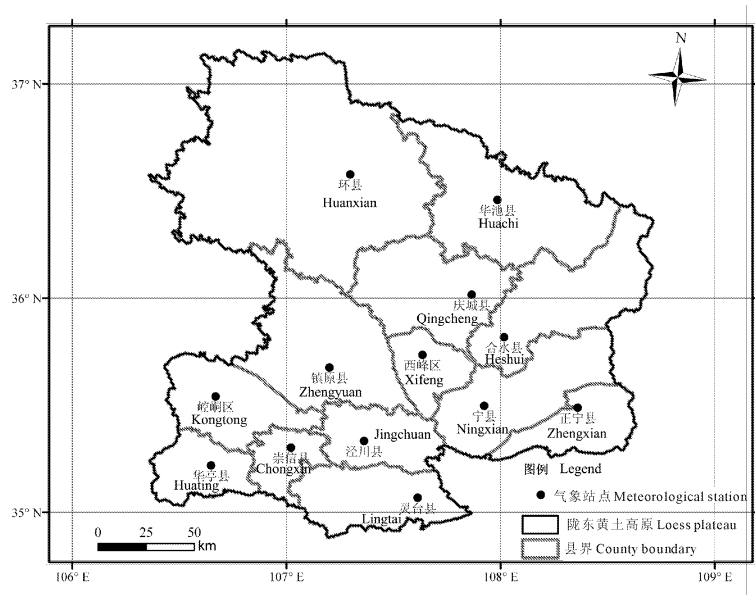


图 1 气象站点分布图

Fig.1 The station distribution and the location of the area in the study

第三步采用 3 个参数的 log - logistic 概率分布对 D_i 数据序列进行正态化,计算每个数值对应的 SPEI 指数:

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

式中,参数 α 、 β 、 γ 的计算如下:

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)} \tag{4}$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \tag{5}$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta) \tag{6}$$

式中, Γ 为阶乘函数, ω_0 、 ω_1 、 ω_2 为数据序列 D_i 的概率加权矩:

$$\omega_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i \tag{7}$$

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \tag{8}$$

式中, N 为参与计算的月份个数。

最后对累计概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \tag{9}$$

当累计概率 $P \leq 0.5$ 时:

$$\omega = \sqrt{-2\ln(P)} \tag{10}$$

$$SPEI = \omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \tag{11}$$

式中常数 $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

计算过程参照参考文献[12]和[15],干旱分类标准见表 1,干旱标准参考参考文献[15]和[24]。

表 1 SPEI 值的干旱等级分类

Table 1 Classification scales of meteorological drought for SPEI

SPEI	干旱等级分类 Drought classification
≥ 0.5	正常 Normal
$-0.49 \sim -1.49$	中等干旱 Moderate
≤ -1.5	严重干旱 Severe

1.3.2 Mann - Kendall 突变分析 Mann - Kendall 突变分析法用来检验 SPEI 序列的突变点, Mann - Kendall 突变分析法是一种用于检验时间序列变化趋势的非参数检验方法,优点在于无需证明数据资料服从一定的分布且允许缺测值的存在。根据公式计算出 UF 和 UB 的值,绘制 UF 和 UB 曲线图,如果 UF 或者 UB 的值大于 0,则表示上升的趋势,小于 0 表示下降的趋势。如果 UF 和 UB 曲线在临界范围有交点,并且超过了临界线,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间[25]。

1.3.3 R/S 分析方法 R/S 是由 H.E.Hurst 博士首先提出来的,R/S 分析方法是非线性时间序列分析的一种方法,也称为重新标度极差分析,R/S 分析主要借助 Hurst 指数。本文中 Hurst 指数由 H 表示,当 $H = 0.5$, $R_i = 0$,表明时间序列差分的自相关系数为 0,即时间序列的前后变化无关联;当 $H > 0.5$, $R_i > 0$,表明时间序列的差分自相关系数大于 0,时间序

列前后变化为正相关;当 $H < 0.5$, $R_t < 0$,表明时间序列的差分自相关系数小于 0,时间序列前后变化为负相关^[26]。

1.3.4 马尔科夫预测模型 马尔科夫预测方法是一种预测事件发生概率的方法,是基于马尔科夫链根据事件目前状况预测其将来各个时刻变动状况的一种方法,在干旱状态的预测中已有较多的应用,其具体的计算公式和应用不再一一列举^[27-28]。

2 结果分析

2.1 干旱年际变化特征分析

图 2 是陇东黄土高原各站点干旱过程演变图,分析可知,陇东黄土高原地区各个站点干旱的发生在时间上和空间上有较好的一致性,1960 s 只有 1960、1965、1969 有大范围干旱发生;1970 s 有 1971、1972、1979 年发生大范围干旱;1980 s 有 1982、1986、1987 年发生大范围干旱;1990 s 有 1991、1995、1997

发生大范围干旱,干旱的程度明显高于之前任何一个年代,2000 s 之后发生干旱的频率明显增加。

图 3 为近 50a 陇东黄土高原 SPEI 的变化趋势图,陇东黄土高原 SPEI 线性趋势呈显著下降趋势,线性倾向率为 $-0.21 \cdot 10a^{-1}$,通过了 0.05 的显著性检验,5 年滑动平均曲线在波动中呈现出下降的趋势,1995 年后波动的范围在 0 值以下。由此表明,近 50 a 来陇东黄土高原地区呈干旱化趋势,1990 s 以来干旱化趋势不断增强。近 50 a 陇东黄土高原各个站点 SPEI 的气候倾向率均呈下降趋势,变化幅度为 $-0.06 \cdot 10a^{-1} \sim -0.34 \cdot 10a^{-1}$,7 个站点通过了显著性检验,合水站的 SPEI 倾向率最大为 $-0.06 \cdot 10a^{-1}$,华池站的 SPEI 值倾向率最小为 $-0.34 \cdot 10a^{-1}$,在空间上陇东黄土高原北部地区的 SPEI 下降趋势大于南部地区,这和陇东地区地表湿润度指数由东南部向中部和北部减少的趋势是一致的^[12]。

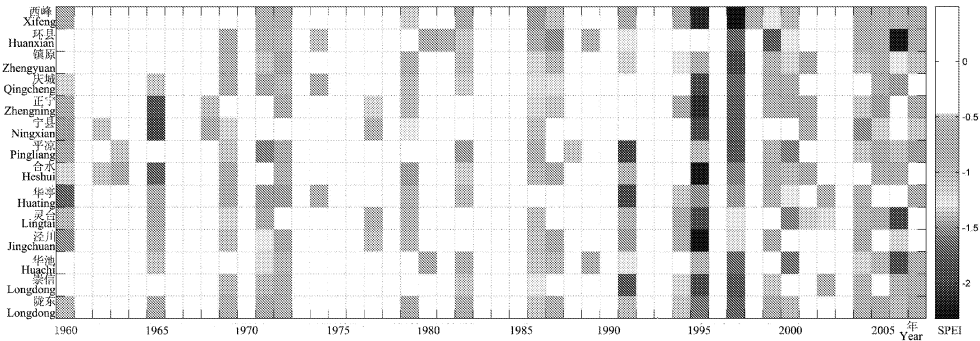


图 2 陇东黄土高原各站点干旱过程演变图

Fig.2 The evolution process of drought in Longdong Loess Plateau

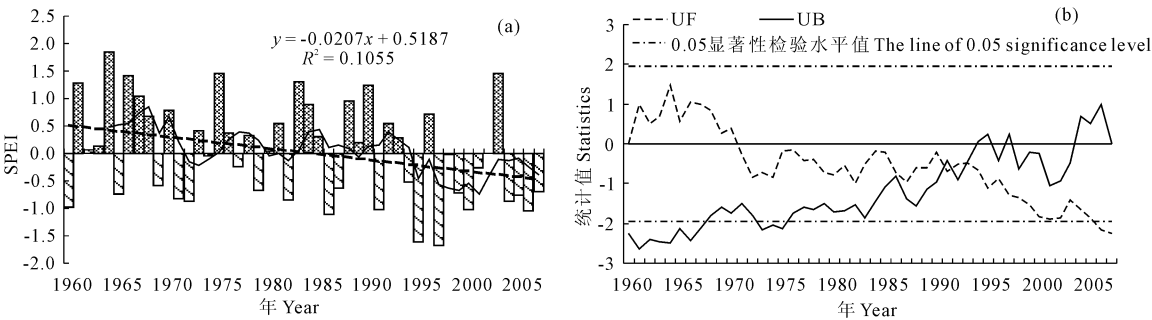


图 3 陇东黄土高原干旱趋势及突变分析图

Fig.3 Trend and abrupt analysis of drought in Longdong Loess Plateau

通过 Mann – Kendall 突变图分析可知,UF 线呈下降的趋势,表明陇东黄土高原出现干旱化趋势,UF 和 UB 在 1993 年有交点,交点在临界线范围之内,且通过了 0.05 的显著性检验,陇东黄土高原 SPEI 序列在 1993 年有突变点,和前面分析得出的 1990 s 以来干旱化趋势不断增强的结论是相同的。

各站点中,环县、庆城、西峰、泾川、华亭、灵台在 1993 年左右有突变点,只有灵台通过了显著性检验,华池和镇远站的突变较早,且华池通过了显著性检验;合水、宁县、平凉、崇信没有明显的突变点。研究显示陇东地区气温突变的时间为 1986 年,而降水突变的时间为 1993 年左右^[20],降水在 1990 s 以来

呈现出减少趋势^[29],陇东黄土高原 SPEI 的突变点和降水突变点较为一致^[30]。可见,陇东黄土高原干旱化的趋势可能受降水影响较大。

其他的学者通过使用不同的指数和方法,如 CI、SPI、Z 指数,干燥度指数得出本区域近几十年干旱化趋势明显,并且不断增强^[19,20-21],本文与其结果有很好的一致性。陇东黄土高原近几十年来升温迅速,而降水呈显著地下降趋势,下降速率高于全国平均水平,气候呈现出暖干化趋势^[14,31-32],这表明陇东黄土高原气候暖干化趋势和陇东黄土高原干旱化的趋势有很好的一致性^[12]。

2.2 干旱周期分析

本文运用小波分析方法,对陇东黄土高原 SPEI₁、SPEI₁₂时间尺度分别做周期分析,小波系数等值线图和小波方差如图 4、5 所示。月值 SPEI₁ 值在 25~40 个月的时间尺度上,1965—1972 年存在 6 次

高低震荡,1989—1997 年时间段上存在 6 次高低震荡;20~34 月的时间尺度上,1980—1985 年的时段上存在 6 次高低震荡,1997—2004 时间段上存在 8 次高低震荡;14~20 月的时间尺度上,在 1968—1976 年,1985—1991 年存在一系列的高低震荡;4~12 月的时间尺度上,在整个时间段上存在一系列的高低震荡。根据小波方差图可知,月时间尺度 SPEI 有 17、25、35、10 和 6 个月主周期。

年际尺度的 SPEI₁₂ 在 16~22 a 的时间尺度上,以 19a 为中心存在 8 次高低震荡;10~15 a 的周期嵌套于 16~22 a 周期中,1990 年后,10~15 a 的震荡消失,6~10 a 的震荡出现,以 7 a 为中心;3~6 a 的时间尺度上,以 4 a 为中心的高低震荡在近 50 a 一直存在,该震荡变化在 1960—1980 年振幅较强,由小波方差分析可知年际尺度的 SPEI 存在 19、11、7、4、2 a 的主周期。

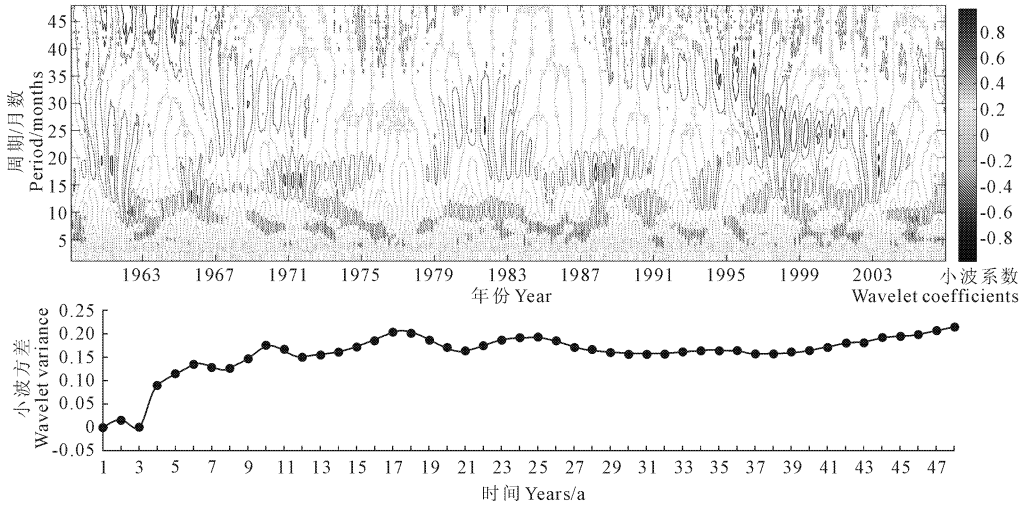


图 4 月际尺度陇东黄土高原 SPEI 小波分析图
Fig.4 Wavelet analysis of month scale in Longdong Loess Plateau

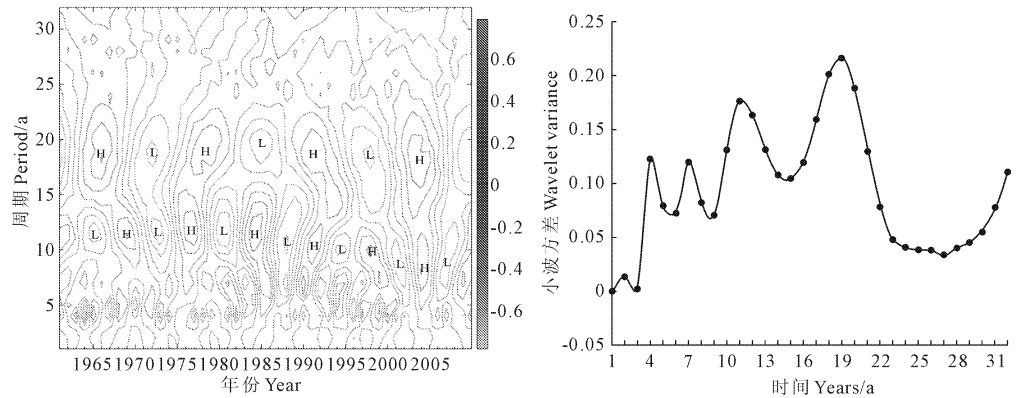


图 5 年际尺度陇东黄土高原 SPEI 小波分析图
Fig.5 Wavelet analysis of annual scale in Longdong Loess Plateau

2.3 干旱未来趋势分析

2.3.1 R/S 分析 对陇东黄土高原年际干旱和 1~12 月的干旱变化趋势进行了 R/S 预测分析,年际尺度 SPEI 的 Hurst 值为 $0.64 > 0.5$,自相关系数 $R_1 > 0$,表明时间序列差分的自相关系数大于 0,时间序列变化前后正相关,过去出现减小的趋势意味着未来一段时间内减小趋势还会出现,说明 $SPEI_{12}$ 在未来一段时间内呈减小趋势,陇东黄土高原干旱化趋势会持续。1—12 月的 SPEI 的 R/S 分析结果所示,除 7、8 月 Hurst 值 < 0.5 , $R_1 < 0$ 之外,其他各个月份的 R/S 分析预测的结果和 $SPEI_{12}$ 的结果一致, SPEI 值呈持续减小趋势,7、8 月时间序列前后变化负相关,陇东黄土高原 7、8 月份的干旱化趋势在未来一段时间内会有所缓解。

2.3.2 Markov 预测 表 3 为陇东黄土高原干旱概率转移矩阵,及稳定后的干旱概率分布。分析可知,稳定后正常状态占 62%,中等干旱占 26%,严重干旱占 13%。在干旱概率稳定的过程中,正常状态向

中等干旱转移的概率减小,正常状态向严重干旱转移的概率增加;中等干旱向正常状态转移的概率增加,中等干旱向严重干旱转移的概率减少,中等干旱向中等干旱的概率增加;严重干旱向正常状态和中等干旱转移的概率减少,严重干旱向严重干旱转移的概率增加较多,由此可知,今后陇东黄土高原干旱状态演变的过程中干旱极端化现象会增多,主要表现为干旱状态的跃变,由正常状态直接转严重干旱状态,同时严重干旱状态的持续性会增强。

表 2 R/S 分析结果统计表
Table 2 Statistical results of R/S analysis

月份 Month	H	R_1	月份 Month	H	R_1
1	0.65	0.22	7	0.48	-0.02
2	0.61	0.16	8	0.36	-0.17
3	0.81	0.54	9	0.87	0.67
4	0.65	0.23	10	0.53	0.04
5	0.54	0.05	11	0.64	0.21
6	0.81	0.55	12	0.53	0.04

表 3 干旱概率转移矩阵及稳定后的干旱概率分布/%

Table 3 Transfer matrix of drought probability and probability distribution of Stable drought state

干旱概率转移矩阵 Transition matrix of drought probability				稳定后的干旱概率分布 Stable probability distribution of drought			
	正常 Normal	中等干旱 Moderate	严重干旱 Severe		正常 Normal	中等干旱 Moderate	严重干旱 Severe
正常 Normal	62%	28%	10%	正常 Normal	62%	26%	13%
中等干旱 Moderate	58%	17%	25%	中等干旱 Moderate	62%	26%	13%
严重干旱 Severe	67%	33%	0	严重干旱 Severe	62%	26%	13%

图 6 为 1—12 月份,三个状态稳定后的干旱概率分布。各月转移概率矩阵稳定分布后,正常状态的比例在 58%~69% 之间,8 月份正常状态分布概率最少,5 月份最多;中等干旱的比例在 11%~31% 之间,9 月份比例最小,2 月份比例最大;严重干旱比例在 4%~21% 之间,2 月、7 月、8 月、分别小于 10%,4 月、9 月达 21%,分析可知,2 月、7 月、8 月中等干旱的比例将增大,严重干旱的比例将减少。由

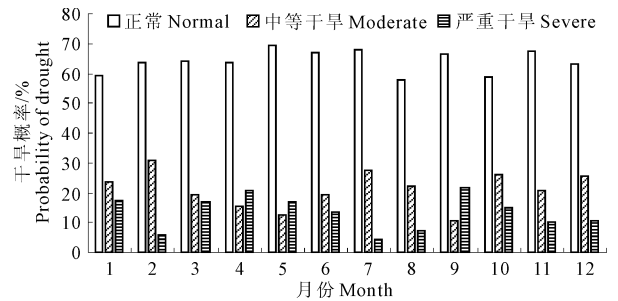


图 6 1—12 月稳定后的干旱概率分布

Fig.6 Probability distribution of Stable drought state in 12 month

前面的 R/S 预测分析可知,7、8 月的干旱趋势有所缓解和 Markov 预测到的结果有很好的一致性,而 4 和 9 月严重干旱比例将增加,意味着春旱和秋旱的严重程度可能会增加。

3 结 论

1) 陇东黄土高原各站点干旱的出现在时间上和空间上有较好的一致性,近 50 a 来陇东黄土高原干旱化趋势非常明显,尤其以 1990 年和 2000 年以来干旱化趋势最为显著;Mann - kendall 突变分析陇东黄土高原 SPEI 在 1993 年发生突变,之后干旱化趋势加强。

2) 通过小波分析可知,年际尺度的 SPEI 存在 19、11、7、4、2 a 的主周期;月尺度的 SPEI 存在 17、25、35、10、6 个月主周期,随着时间的推移,在不同的时间段,表现出不同的震荡周期,长时间尺度的主周期连续性较差。

3) $SPEI_{12}$ 的 H 值 $0.64 > 0.5$, 自相关系数 $R_1 > 0$, 时间序列差分的自相关系数大于 0, 时间序列变化前后正相关, 说明 $SPEI_{12}$ 在未来一段时间内呈降低趋势, 陇东黄土高原干旱化趋势会持续。除 7、8 月 H 值 < 0.5 , $R_1 < 0$ 之外, 其他各个月份的 R/S 分析预测的结果和 $SPEI_{12}$ 的结果一致, $SPEI$ 值呈持续减少趋势, 7、8 月时间序列前后变化负相关, 陇东黄土高原 7、8 月份的干旱化趋势在一定时间段内会有所缓解。

4) 稳定后的干旱概率分布, 正常的状态占 62%, 中等干旱占 26%, 严重干旱占 13%。今后陇东黄土高原干旱状态演变过程中干旱极端化现象将会增多, 主要表现为干旱状态由正常状态直接转变为严重等别的跃变, 严重干旱状态的持续性会增强。

4 讨 论

近 50 a 来陇东黄土高原干旱化的趋势和其他学者使用 SPI 、 CI 、 Z 指数、地表湿润度指数得出的结果有很好的-一致性^[13,19-21], 同时, 与中国北方地区、华北地区和黄土高原地区的干旱化趋势是一致的^[4-5,7-8,33]。陇东黄土高原 $SPEI$ 序列的突变点和陇东黄土高原地区气候变化的突变点基本相一致^[30,32], 因此, 近 50 a 陇东黄土高原气候的暖干化对干旱加剧有显著的影响^[31]。随着陇东黄土高原干旱化趋势的持续和严重干旱状态概率的增加, 春旱和秋旱的严重程度可能会增加。基于 $CMIP5$ 的模式预估表明 21 世纪中国尤其是北方干旱半干旱地区气温显著增加, 高排放情景下, 高端路径下增温更为显著^[34], 预估 21 世纪早期降水量增加 10% 并且概率均超过 70% 的地区位于西北大部分地区^[35], 极端降水增加, 气候预估表明未来一段时间内中国干旱半干旱区干旱风险可能将会增加^[36], 陇东黄土高原干旱增加将会给该地区水资源利用、农业生产、生态文明建设、扶贫开发造成潜在的危害, 应建立健全陇东黄土高原干旱灾害的预警机制, 增强应对干旱能力建设, 提早部署对于干旱敏感的水资源、农业、林业、水土保持等部门抗旱工作安排, 在后续的研究工作中要加强气象干旱——农业干旱——生态干旱转移过程和机制的研究, 做好陇东黄土高原干旱风险评估和管理的相关工作^[37]。

参 考 文 献:

[1] 丁一汇. 中国气象灾害大典·综合卷[M]. 北京: 气象出版社,

2008:157.
[2] Mishra AK, Singh VP. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010,391:204-216.
[3] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
[4] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. 大气科学, 2008, 32(4):752-760.
[5] 马柱国, 符淙斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(2):222-233.
[6] Zarcha MAA, Sivakumara B, Sharma A. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI) [J]. Journal of Hydrology, 2015,526:183-195.
[7] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年我国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20):2429-2439.
[8] 周磊, 武建军, 吕爱峰. 华北不同地表覆盖类型区干旱演变特征[J]. 地理研究, 2012, 31(4):597-607.
[9] 袭祝香, 杨雪艳, 刘实, 等. 东北地区夏季干旱风险评估与区划[J]. 地理科学, 2013, 33(6):735-740.
[10] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 1960—2012 年宁夏强干旱时空格局及影响因素分析[J]. 灾害学, 2016, 31(1):120-127.
[11] 高蓓, 姜彤, 苏布达, 等. 基于 $SPEI$ 的 1961—2012 年东北地区干旱演变特征分析[J]. 中国农业气象, 2014, 35(6):656-662.
[12] 张勃, 张耀宗, 任培贵, 等. 基于 $SPEI$ 法的陇东地区近 50a 干旱化时空特征分析[J]. 地理科学, 2015, 35(8):999-1006.
[13] 黄斌, 韩涛, 郭江勇. 陇东地表湿润指数的年际变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4):250-253, 259.
[14] 姚小英, 张强, 王劲松, 等. 甘肃冬小麦主产区 40 年干旱变化特征及影响风险评估[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2):1-6, 32.
[15] Vicente-Serrano S, Beguer'la S, L'opez-Moreno J. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
[16] Yu M X, Li Q F, Hayes M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951—2010? [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3):545-558.
[17] Potop V, Boroneant C, Mořny M, et al. Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic[J]. Theor. Appl. Climatol, 2014, 115:563-581.
[18] Xu K, Yang DW, Yang HB, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961—2012: A climatic perspective[J]. Journal of Hydrology, 2015,526:253-264.
[19] 杨晓华, 杨小利. 基于 Z 指数的陇东黄土高原干旱特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3):248-253.
[20] 王媛媛, 张勃. 基于标准化降水指数的近 40 a 陇东黄土高原旱涝时空特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(12):2135-2144.
[21] 张调风, 张勃. 1962—2010 年甘肃省黄土高原区干旱时空动态格局[J]. 生态学杂志, 2012, 31(8):2066-2074.

[22] 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.

[23] 中国科学院黄土高原综合科学考察队.黄土高原地区自然环境及其演变[M].北京:科学出版社,1991:23-36.

[24] 张 强,邹旭恺,肖风劲,等.气象干旱等级 GB/T20481 – 2006 [S].北京:中国标准出版社,2006.

[25] 魏凤英.现代气候诊断与预测技术(第二版)[M].北京:气象出版社,2007:63-65.

[26] 陈彦光.地理数学方法:基础和应用[M].北京:科学出版社,2011:463-472.

[27] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002:93-98.

[28] 燕玉超,张福平,刘 筱,等.山东省近 54 年的气候变化特征及旱涝灾害响应分析[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):245-252.

[29] 赵红岩,张旭东,王有恒,等.陇东黄土高原气候变化及其对水资源的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(6):262-268.

[30] 李 志,赵西宁.1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析[J].自然资源学报,2013,28(2):287-299.

[31] 姚玉璧,王毅荣,李耀辉.中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J].资源科学,2005,27(5):146-151.

[32] 赵一飞,张 勃,汪宝龙.近 54 a 来甘肃省河东地区气候时空变化特征[J].干旱区研究,2012,29(6):956-964.

[33] Zhao X N, Wu P T. Meteorological drought over the Chinese Loess Plateau: 1971—2010[J]. Natural Hazards, 2013,67:951-961.

[34] 杨 绚,李栋梁,汤 绪.基于 CMIP5 多模式集合资料的中国气温和降水预估及概率分析[J].中国沙漠,2014,34(3):795-804.

[35] 江志红,陈威霖,宋 洁,等.7 个 IPCC A R4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估[J].大气科学,2009,33(1):109-120.

[36] 江志红,丁裕国,陈威霖.21 世纪中国极端降水事件预估[J].气候变化研究进展,2007,3(4):202-207.

[37] 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,2014,9(1):80-91.

(上接第 226 页)

[4] 王旭清,王法宏,董玉红,等.不同种植方式麦田生态效应研究[J].中国生态农业学报,2005,13(3):119-122.

[5] 苗果园,高志强,张云亭,等.水肥对小麦根系整体影响及其与地上部相关的研究[J].作物学报,2002,28(4):445-450.

[6] Gewin V. Food: An underground revolution[J]. Nature, 2010,466:552-553.

[7] Bengough A Glyn, Mc Kenzie B M, Hallett P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. J Exp Bot, 2011,62(1):59-68.

[8] Cresswell H P, Kirkegaard J A. Subsoil amelioration by plant roots the process and the evidence[J]. Aust J Soil Res, 1995,33(2):221-239.

[9] 张喜英,袁小良.冬小麦根系吸水与土壤水分条件关系的田间试验研究[J].华北农学报,1995,10(4):99-104.

[10] 马瑞昆,蹇家利,贾秀领,等.供水深度与冬小麦根系发育的关系[J].干旱地区农业研究,1991,9(3):1-10.

[11] Kirkegaard J A, Lilley J M, Howe G N, et al. Impact of subsoil water use on wheat yield[J]. Aust J Agric Res, 2007,58(4):303-315.

[12] 康利允,李世清.分层供水施磷对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2012,45(1):85-92.

[13] 居 辉,兰 霞,李建民,等.不同灌溉制度下冬小麦产量效应与耗水特征研究[J].中国农业大学学报,2000,(5):23-29.

[14] 山 仑,邓西平,张岁歧.春小麦对有限灌溉的生理生态反应[C]//许越先,刘昌明,J.沙和伟.农业用水有效性研究.北京:科学出版社,1992:75.

[15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000:30-109.

[16] 刘战东.冬小麦降雨利用过程及其模拟[D].北京:中国农业科学院,2012.

[17] 刘增进,李宝萍,李远华,等.冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J].农业工程学报,2004,20(4):58-63.

[18] 杜太生,康绍忠,胡笑涛,等.根系分区交替滴灌对棉花产量和水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2005,38(10):2061-2068.

[19] 易立攀,于振文,张永丽,等.不同土层测墒补灌对冬小麦耗水特性及产量的影响[J].应用生态学报,2013,24(5):1361-1366.