

张可心,张谋草,刘翔,等. 基于 SPI 的陇东黄土高原干旱特征及对冬小麦产量的影响分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(23):233-240.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.23.047

# 基于 SPI 的陇东黄土高原干旱特征 及对冬小麦产量的影响分析

张可心,张谋草,刘翔,张洪芬,张天峰

(甘肃省庆阳市气象局,甘肃西峰 745000)

**摘要:**基于 1971—2018 年陇东地区的逐月气象资料,使用标准化降水指数(SPI)作为干旱指标,采用线性趋势和 Mann-Kendall 突变检验,多尺度定量分析陇东地区近 48 年的气象干旱特征,并结合冬小麦产量资料,研究 SPI 表征的气象干旱对冬小麦产量的影响。结果显示,1971—2018 年陇东地区发生干旱的概率约为 30%,发生中等以上强度干旱的概率为 15.8%;年 SPI 分析结果显示,陇东地区具有逐渐湿润化的趋势,20 世纪 90 年代(1990s)最干旱,2000 年后干旱显著缓解;季节 SPI 分析结果表明,春季干旱化趋势明显,且干旱化从 1990 年开始,其余季节均具有湿润化趋势,其中冬季的湿润化速度最快;春季、秋季干旱对冬小麦产量的影响最大,尤其是干旱强度对产量的影响最为显著,通过了 0.001 水平的显著检验。SPI 所表征的气象干旱指标与冬小麦的相关性高于降水量与其相关性,表明 SPI 对于农业干旱分析具有一定的指导意义。

**关键词:**陇东黄土高原;标准化降水指数(SPI);干旱特征;冬小麦产量;影响

**中图分类号:** S162.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)23-0233-08

干旱是对人类社会影响最为严重的气象灾害之一,造成干旱的直接原因有偶发性或周期性的降水量减少、蒸发量增大等<sup>[1]</sup>。在全球气候变暖的背景下,发生大范围干旱、高温的时间、频率和强度明

显增加,干旱化趋势也随之加剧,不但造成水资源短缺、荒漠化加剧、沙尘暴频发等诸多不利的生态影响,同时也对农业生产造成巨大损失<sup>[2]</sup>。西北地区处于干旱半干旱地区,对于全球气候变化的响应非常敏感,加强对干旱演变特征的研究有利于认识全球气候变化背景下的区域性响应,对生态文明建设及防灾减灾工作具有现实意义<sup>[3-4]</sup>。

目前,国内外研究者关于干旱指标已做了大量研究,各个指标本身各有利弊,研究区域也具有其

收稿日期:2020-04-09

基金项目:中国气象局兰州干旱气象研究所项目(编号:IAM201811);甘肃省科技计划(编号:20JR5RM626);甘肃省气象局科研项目。

作者简介:张可心(1995—),女,甘肃庆阳人,助理工程师,主要从事天气预报及气候变化研究。E-mail:337914611@qq.com。

产研究[J]. 中国农业科学,2008(8):2499-2505.

[20] Idso S B, Pinter P J, Jackson R D, et al. Estimation of grain yields by remote sensing of crop senescence rates[J]. Remote Sensing of Environment, 1980, 9(1): 87-91.

[21] 刘良云,王纪华,黄文江,等. 利用新型光谱指数改善冬小麦估产精度[J]. 农业工程学报,2004(1):172-175.

[22] 翟清云,张娟娟,熊淑萍,等. 基于不同土壤质地的小麦叶片氮含量高光谱差异及监测模型构建[J]. 中国农业科学,2013,46(13):2655-2667.

[23] 杨智,李映雪,徐德福,等. 冠层反射光谱与小麦产量及产量构成因素的定量关系[J]. 中国农业气象,2008(3):338-343,324.

[24] 刘冰峰,李军,赵刚峰,等. 夏玉米叶片全氮含量高光谱遥感估测模型研究[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(4):813-824.

[25] 王丽凤,张长利,赵越,等. 高光谱成像技术的玉米叶片氮含量检测模型[J]. 农机化研究,2017,39(11):140-147.

[26] 王孟和,李宝,汪光胜,等. 基于高光谱的玉米叶片氮含量监

测模型[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2018,39(1):91-96.

[27] Wen P F, He J, Ning F, et al. Estimating leaf nitrogen concentration considering unsynchronized maize growth stages with canopy hyperspectral technique [J]. Ecological Indicators, 2019, 107:105590.

[28] 贺婷,李建东,刘桂鹏,等. 基于高光谱遥感的玉米全氮含量估测模型[J]. 沈阳农业大学学报,2016,47(3):257-265.

[29] Marschner H. 高级植物营养学[M]. 曹一平,陆景陵,译. 北京:中国农业大学,2001.

[30] Zhang Y J, Wang L, Bai Y I, et al. Nitrogen nutrition diagnostic based on hyperspectral analysis about different layers leaves in maize [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9):2829-2835.

[31] 马晓蕾,范广博,李永玉,等. 精准施肥决策模型与数据库系统[J]. 农业机械学报,2011,42(5):193-197.

自身的自然特征及社会特征。因此,根据研究目的,扬长避短地选择合适的干旱指标是研究区域性干旱的基础<sup>[5]</sup>。基于降水量的干旱指标有标准化降水指标(SPI)、Z 指数<sup>[6]</sup>,基于多因子的干旱指标有地表湿润指数<sup>[7]</sup>、Palmer 指数等<sup>[8]</sup>。帕默尔干旱指标(palmer drought severity index,简称 PDSI)和标准化降水指标(standardized precipitation index,简称 SPI)是全球干旱研究中运用最广泛的 2 个指标。帕默尔干旱指标 PDSI 计算过程复杂,参数区域性较强,并且具有固定的时间尺度,而标准化降水指标只须以降水作为输入量,计算简便易行且具有多种时间尺度,使同一个指标可以反映不同时间尺度的干湿变化特征<sup>[9]</sup>。

基于 SPI 指数的干旱研究一般侧重于对于干旱时空分布特征的研究<sup>[10-12]</sup>,与粮食作物产量变化相结合的干旱特征检测与影响研究较少。刘维等研究了 SPI 与东北春玉米产量之间的关系发现,玉米成灾率随 SPI6 的变大而变小,当 SPI6 处于干旱或者过湿情况下将处于低产量水平<sup>[13]</sup>;朱玲玲等以 SPI 作为干旱指标对河南冬小麦生育期变化特征进行分析,发现河南省返青-抽穗-成熟期和全生育期干旱对冬小麦气候产量影响较大<sup>[14]</sup>。山西省关于玉米产量与 SPI 的研究发现,对其产量影响较大的是夏季干旱,中等以上强度的夏季干旱对玉米产量的影响更为显著<sup>[15]</sup>。甘肃省庆阳市地处陇东黄土高原,属于黄土高原丘陵沟壑区的生态脆弱区,以雨养农业为主,由降水量减少导致的干旱对陇东地区农业生产和生态环境的影响显著<sup>[16]</sup>。冬小麦是陇东地区最主要的粮食作物之一,在庆阳市种植面积最大,由于生长周期长,不同时段干旱变化对冬小麦产量都有一定的影响,而对冬小麦的影响同样也可以反映对其他作物的影响。本研究以 SPI 作为干旱评价指标,分析 1971—2018 年陇东黄土高原不同时间尺度的气象干旱特征及对冬小麦产量的影响,以期气象干旱检测、干旱灾害预防及冬小麦安全生产提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

陇东黄土高原属于黄河中游的内陆地区,东倚子午岭,西接六盘山,所在行政区域主要为甘肃省庆阳市(106°20′~108°45′E、35°15′~37°10′N),属于暖温带半干旱半湿润气候,光热条件适宜,年降

水量为 400~700 mm,是黄土高原区降水最多的地区。庆阳市马岭以北的环县、华池及庆城的中北部为黄土丘陵沟壑区,沟壑纵横,水土流失严重,马岭以南塬面平坦,其中董志塬面积为 910.7 km<sup>2</sup>,是我国最大、较完整的一片黄土塬地。陇东黄土高原塬地面积广,约占土地总面积的 1/3,坡度小,盛产小麦、玉米、油料作物及特色小杂粮,有“陇上粮仓”的美誉。

1.2 站点选择与资料

本研究采用庆阳市 8 个国家气象站 1971—2018 年的逐月降水量数据与庆阳市统计局 1978—2018 年冬小麦年产量数据,通过 MATLAB 计算得出 SPI 值及四季 SPI 的 Mann-Kendall(M-K)突变检验,SPI 时间变化趋势用气候倾向率进行计算,用 MATLAB、Excel 等软件绘制图表。在统计季节降水量时,3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。

1.3 标准化降水指数的计算

标准化降水指数的计算原理是 McKee 等在 1993 年提出的 1 个相对简便易行的干旱指数,该指数基于自然降水的  $\Gamma$  分布,基于正态分布标准化得出,计算过程详见文献[17-18]。SPI 的计算有多种尺度(1、3、6、12、24 月等),对于时间尺度短的 SPI,由于受短时间降水的影响,导致 SPI 上下波动频繁,值域也较大,从而可反映短期旱涝变化,而时间较长的 SPI 对短期降水的响应减慢,旱涝变化比较稳定,可反映长期旱涝的变化趋势<sup>[19]</sup>。本研究根据 CB/T 20481—2006《气象干旱等级标准》<sup>[20]</sup>,结合陇东地区的实际情况,划分出干旱等级(表 1)。

表 1 SPI 旱涝等级

SPI	等级
$SPI \geq 2.0$	极湿
$1.5 \leq SPI < 2.0$	重湿
$1.0 \leq SPI < 1.5$	中湿
$0.5 \leq SPI < 1.0$	轻湿
$-0.5 \leq SPI < 0.5$	正常
$-1.0 \leq SPI < -0.5$	轻旱
$-1.5 \leq SPI < -1.0$	中旱
$-2.0 \leq SPI < -1.5$	重旱
$SPI \leq -2.0$	极旱

1.4 干旱强度

某段时间内的干旱强度可以用 SPI 表示,在发生干旱( $SPI \leq -0.5$ )的情况下,SPI 绝对值越大,表

示干旱越严重。某区域的多年干旱程度可由下式表示:

$$S_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |SPI_i|。$$

式中:  $|SPI_i|$  为发生干旱时的 SPI 绝对值, 具体的干旱分级见表 1;  $m$  为发生干旱的时间(月数)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同时间尺度的 SPI 特征

不同时间尺度的 SPI 可以反映不同类型的旱涝情况, 通过多时间尺度的 SPI 综合分析可以进行综合旱涝情况分析<sup>[21]</sup>。为了对陇东地区的干旱情况进行综合评价, 本研究基于庆阳市 8 个气象站点 48 年的逐月降水量资料, 着重分析 SPI 的 1、3、6、12 月

尺度的干旱变化情况, 并对各个时间尺度的干旱等级进行划分。分析图 1-a 的 SPI1 指数可知, 出现干旱的概率为 31.9%, 其中中等以上等级干旱分布如下: 极旱 10 个月(1.7%), 重旱 15 个月(2.6%), 中旱 67 个月(11.6%)。分析图 1-b 的 SPI3 指数可知, 出现干旱的概率为 29.1%, 其中极旱 13 个月(2.3%), 重旱 29 个月(5.0%), 中旱 47 个月(8.2%)。分析图 1-c 的 SPI6 指数可知, 干旱发生概率为 32.1%, 其中极旱 9 个月(1.6%), 重旱 29 个月(5.0%), 中旱 51 个月(8.9%)。分析图 1-d 的 SPI12 指数可知, 干旱发生概率为 32.9%, 7 个月为极旱(1.2%), 33 个月为重旱(5.8%), 52 个月为中旱(9.2%)。由以上分析可以看出, 陇东干旱频发, 平均 30% 以上的月份发生不同程度的干旱,

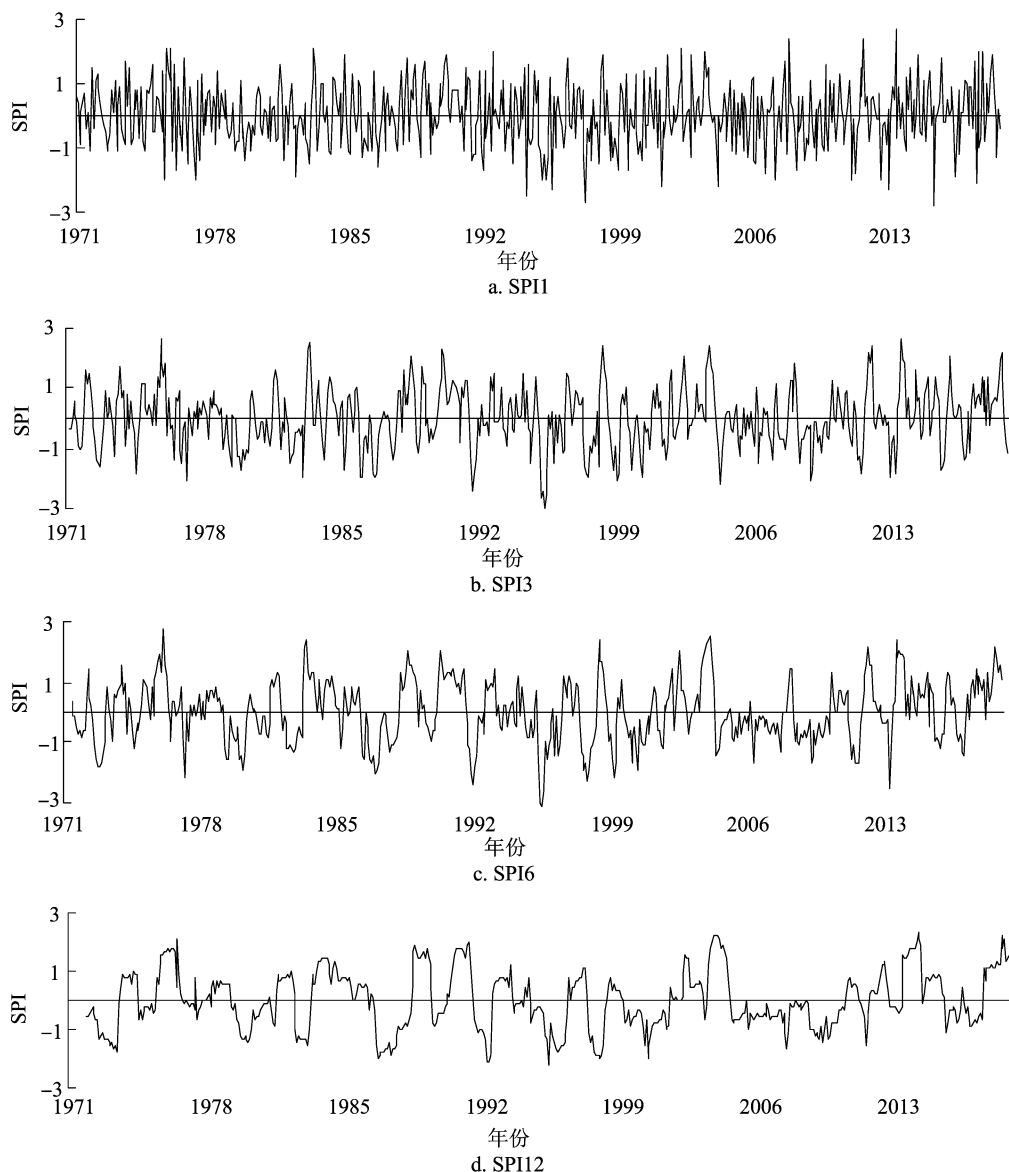


图1 1971—2018 年庆阳市多尺度 SPI 分析

用不同时间尺度表征的中等以上干旱状况较为一致,中等以上程度的干旱月份占比约为 15.8%,SPI 指数起伏较大,表明气候干湿变化波动幅度大,旱涝时间分布不均匀。

甘肃省气象灾害统计结果表明,1986—1987 年陇东出现了数十年一遇的持续性干旱,旱情严重,50% 以上的人畜饮水困难。SPI1 分析结果显示,1986 年 7—10 月和 1987 年 8—9 月出现了轻度以上干旱;SPI3 分析结果显示,1986、1987 年 8—10 月均出现中旱;SPI6 分析结果显示,1986 年 8 月至次年 2 月出现了重旱;而 SPI12 分析结果显示,1986 年 9 月至 1987 年底出现了连续性重旱。1995 年陇东地区出现春夏连旱的情况,农作物大量减产,冬小麦单位面积产量(简称单产)降至  $882 \text{ kg/hm}^2$ ,SPI1 分析结果显示,2—7 月出现了中等以上的干旱,5 月达到特旱;SPI3 分析结果显示,3—7 月出现了特旱。1997 年陇东地区出现了严重的夏秋连旱,SPI3 分析结果显示,1997 年 6—10 月出现了中等以上干旱,其中重旱以上的时间有 3 个月。不同时间尺度的 SPI 分析结果表明,1995、1997 年的干旱与 1986—1987 年的干旱具有相同特征,即随着时间尺度的增大,干旱开始时间和结束时间有相应推迟,并且干旱等级有所变化,反映了前期降水积累的影响因素。对于类似 1986—1987 年这种持续时间长的干旱,SPI12 表征的时间尺度与干旱程度较准确,而对于 1995、1997 年这种季节性干旱,与实况对应最好的是 SPI3。不同时间尺度的 SPI 表征的干旱年际变

化与陇东历史上实际发生的干旱年对应的年份一致,可见用 SPI 分析陇东地区的干旱变化是可行的<sup>[22]</sup>。

## 2.2 旱涝的年际变化特征

2.2.1 SPI 的年际变化特征 1971—2018 年陇东地区的年 SPI 总体变化趋势为波动升高(图 2),倾向率为  $0.061/10$  年,有 8 年出现中等程度及以上的干旱,其中发生中旱的时间为 5 年(1972、1979、1982、1987、2008 年),发生重旱的时间为 3 年(1986、1995、1997 年)。有 8 年出现中等程度以上的偏湿,其中中湿 4 年(1983、1988、2017、2018 年),重湿 4 年(1975、1990、2003、2013 年)。从干旱程度年代际的分布来看,1990s(20 世纪 90 年代)干旱程度最为严重,出现了 2 年重旱,其次是 1980s(20 世纪 80 年代),出现过 1 年重旱与 2 年中旱,1970s(20 世纪 70 年代)出现 2 年中旱;到了 21 世纪,中等程度及以上的干旱仅出现过 1 年。根据以上分析可知,陇东地区 1990s 最干旱,其次是 1980s、1970s 相对较湿润,2000s(21 世纪 00 年代)以后干旱程度大幅度减弱。中度及以上干湿年份占比为 33%,最干、最湿的年份分别为 1997 年( $-1.882$ ,重旱)、2003 年( $1.944$ ,重湿)。本研究结果与张可心等得出的“庆阳市 20 世纪 80 年代湿润,90 年代最干旱,2000 后恢复湿润”的结论<sup>[23]</sup>基本一致。由以上分析可知,陇东地区气候干湿程度的发展趋势具有波动中逐渐变湿润的趋势,这与黄小燕等的研究结论<sup>[24]</sup>一致。

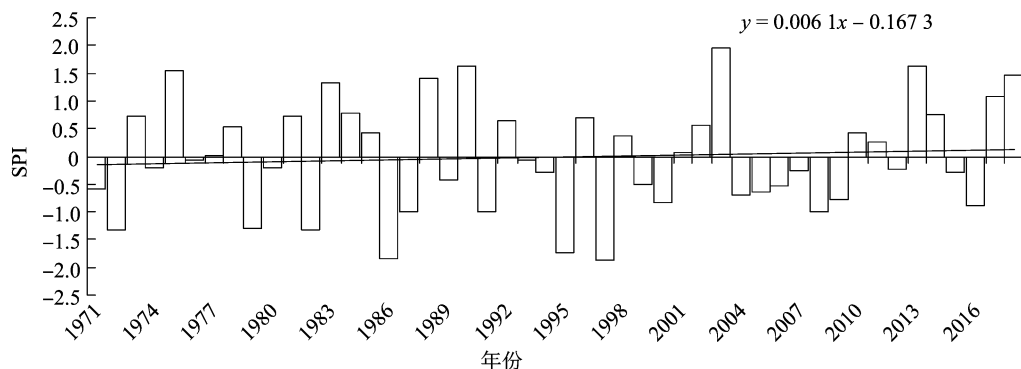


图2 庆阳市年 SPI 变化趋势

2.2.2 SPI 的季节变化特征 由图 3 可知,除春季以外,其余季节的 SPI 均呈现升高的趋势。春季 SPI 呈缓慢下降的趋势,变化倾向率为  $0.047/10$  年,表明春季有干旱化趋势,干旱发生频率为 27%,中等及以上干旱季与湿润季分别为 8、5 年,在 1992—

2011 年间出现高频率的干旱,其中最严重的是 1995 年,干旱等级为极旱( $SPI = -3.01$ ),最湿润的是 1998 年( $SPI = 2.11$ )。夏季 SPI 的变化倾向率为  $0.05/10$  年,干旱发生频率为 27%,中等及以上干旱季、湿润季均为 8 年,1997、2018 年的 SPI 值分别为

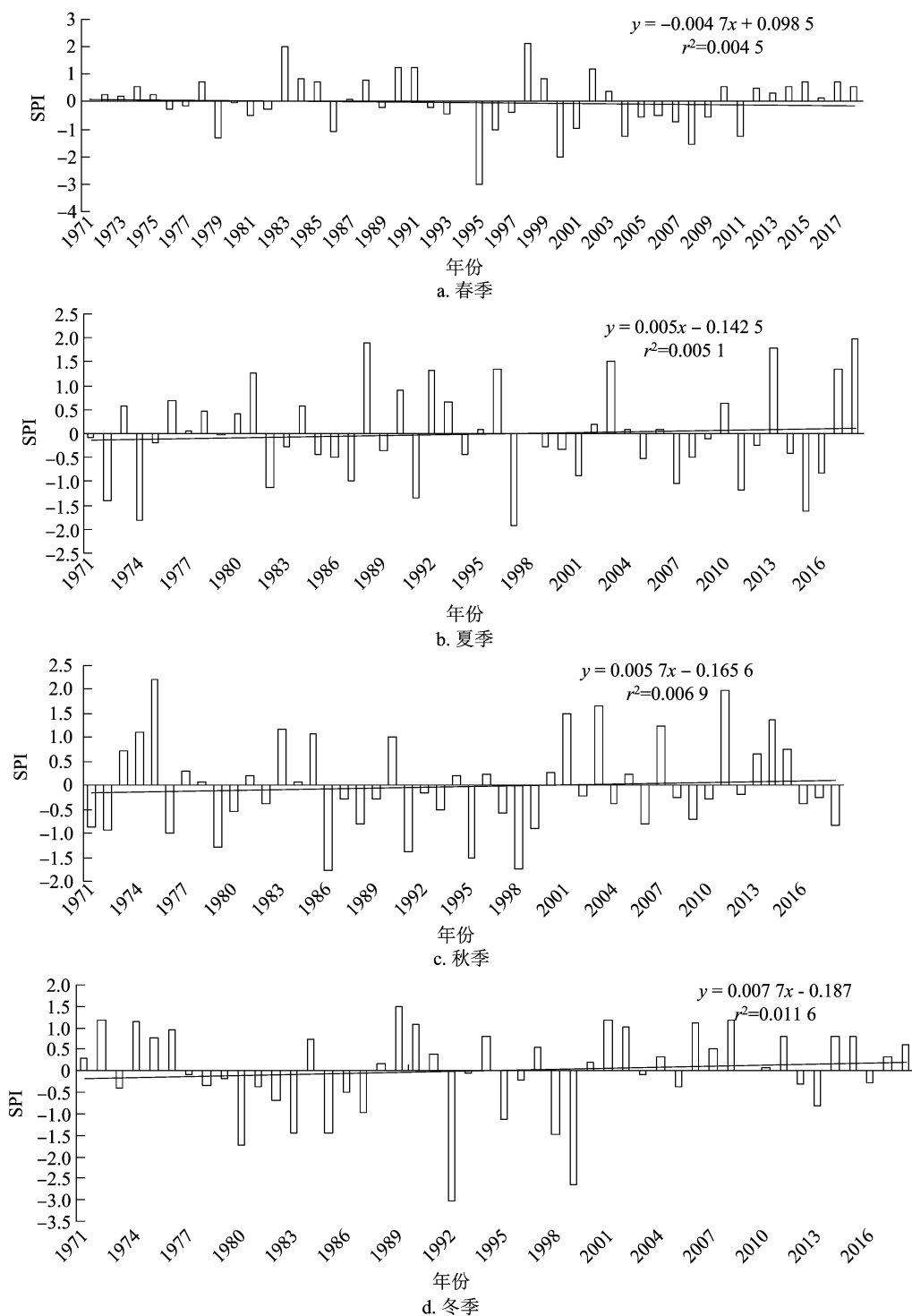


图3 庆阳市四季 SPI 变化趋势

-1.92(重旱)、1.99(重湿),这2年分别为夏季最干旱、最湿润的年份。秋季 SPI 的变化倾向率为 0.057/10 年,干旱发生频率为 31%,中等以上干旱季、湿润季分别为 5、10 年,秋季最干旱、最湿润年份分别为 1986、1975 年,SPI 值分别为 -1.97(重旱)、2.20(重湿)。冬季 SPI 的变化倾向率为 0.077/10 年,干旱发生频率为 21%,中等以上干旱季、湿润季

分别 7、8 年,1992、1999 年出现过 2 次极旱,1992、2008 年分别为最干旱、最湿润的年份,SPI 分别为 -3.92(极旱)、1.50(中湿),2000 年之后仅出现过 1 次轻旱,可见 21 世纪以后陇东地区冬季的干旱次数大幅度减少。以上分析结果表明,春季具有干旱化趋势,其余季节均具有湿润化趋势,冬季的湿润化趋势最为显著;干旱发生频率最高的是秋季,其

次是春季、夏季,最低的是冬季。秋季的干湿变化跨度大,正值冬小麦播种期,需要防范干旱的不利影响;冬季整体偏旱,但是由于冬季的农业活动少,加上湿润化趋势明显,因此对陇东地区农业的影响也相对较小。

**2.2.3 季节 SPI 的 M - K 检验** 通过 Mann - Kendall 突变分析 1971—2018 年陇东地区四季的 SPI 变化(图 4)可知,春季整体变化为下降—上升—下降,在 1990 年左右有 1 个突变点,在 1991—2018 年期间,UF 呈明显下降趋势,表明从 1990 年开始春季具有干旱化趋势;夏季 SPI 呈现出现上升后下降的趋势,在 2004 年左右有 1 个突变点,但曲线未超过信度线,表明陇东地区夏季具有干旱化趋势,但不明显。秋季 SPI 整体表现为先下降后上升的趋势,在 1976、2000 年 UF、UB 分别产生交点,表明 1974—1999 年间秋季具有干旱化趋势;2006 年也是 1 个突变点,2006—2018 年的  $UF > 0$ ,表明自 2006 年开始,秋季呈湿润化趋势。冬季的 UF 从 1971 年开始呈下降趋势,这种下降趋势超过了置信区间,干旱化趋势延续至 2005 年,表明冬季具有明显的干旱化时段(1971—2005 年),2005 年为 1 个突变点,此后冬季具有湿润化趋势。

### 2.3 对冬小麦产量的影响

对陇东地区冬小麦生长发育期进行统计可知,冬小麦生长期为 9 月下旬至次年 6 月下旬(表 2),可见四季的气候变化对其都有一定影响,主要体现在对其产量的影响上。由表 3 可以看出:(1)降水量、SPI 和产量呈正相关,干旱强度和产量呈负相关(因夏季所有指标相关性均很弱,因此不多做分析)。(2)春季和秋季干旱指标与冬小麦产量的相关性较强,并且秋季的相关性更强;春季和秋季的干旱强度与小麦气候产量的相关性均通过了 0.001 水平的极显著性检验,秋季其余指标的相关性均通过了 0.01 水平的显著性检验,春季降水量、SPI 与冬小麦单产的相关性较弱。(3)年均干旱强度与气候产量的相关性通过了 0.001 水平的显著性检验,表明某年的整体干旱强度对冬小麦产量也具有显著的影响。(4)年均降水量和 SPI、夏季干旱指标与冬小麦产量的影响最小,相关系数均未通过显著性检验。(5)冬季指标中只有降水量和 SPI 与冬小麦单产通过了 0.05 水平的显著性检验。(6)SPI 所表征的干旱指数与冬小麦产量的相关性高于与降水量的相关性,表明 SPI 所表征的气象干旱特征在农

业生产中更具有指导意义。

由以上分析可知,影响陇东地区冬小麦产量的主要因素是春季、秋季干旱,春季、秋季的降水量越大, SPI 越大,干旱强度越小,冬小麦产量越高,反之越低。春季冬小麦处于返青拔节期,对水分的需求量最大,秋季是冬小麦播种期及苗期生长期,秋旱直接影响种子出苗率,在此段时间内发生的干旱对冬小麦产量的影响严重。由于冬小麦属于越冬作物,冬季处于停止生长期,加上地表冻结,蒸发量小,由此可见冬季的干旱对冬小麦产量的影响较小。冬小麦收获期为夏初,因此夏季干旱对产量影响最小。随着农业科技的进步,农作物的抗旱性逐渐增强,因此低频的轻旱或中旱对于产量的影响有所减小。由游程理论可知,长历时的 SPI 小于 0 的情况也会导致干旱事件,从而影响小麦产量,如 1985、1992 年的冬小麦单位产量分别为 1 017、1 380 kg/hm<sup>2</sup>,与同期时段相比减产明显,但年均 SPI 评估显示大于 0,并未出现干旱,是由于 1984 年 11 月至 1985 年 4 月、1991 年 11 月至 1992 年 4 月出现 6 个月持续性 SPI 小于 0 事件。

### 3 结论与讨论

不同时间尺度的 SPI 分析结果表明,陇东地区旱涝分布不均,发生干旱的频率约为 30%,其中发生中等及以上干旱的频率为 15.8%;SPI 能较好地反映陇东地区的干旱情况,且不同时间尺度的 SPI 对于干旱的反应有差异, SPI3 对季节性干旱的反应最强, SPI12 对长期干旱的反应最强。SPI 年际变化趋势表明,陇东地区具有波动中逐渐湿润化的趋势,最干、最湿的年份分别为 1997、2003 年;1990s 最干旱,2000 年开始陇东地区的干旱程度大幅度减弱。春季干旱化趋势明显,其余季节均具有湿润化趋势,其中冬季的湿润化速度最快;干旱发生频率最高的是秋季(31%),最低的是冬季(21%)。

M - K 突变分析结果表明,春季的干旱化趋势始于 1990 年,秋季、冬季的湿润化趋势均在 2000 年之后,夏季突变不明显。冬小麦产量与 SPI 指数的相关性研究结果表明,降水量和 SPI 指数与冬小麦产量呈正相关,干旱强度与其呈负相关。春季和秋季干旱对冬小麦产量的影响最大,尤其是春季、秋季的干旱强度对产量的影响更加显著;年均干旱强度的相关性次之;再次是冬季;夏季干旱的影响最小。因此,对冬小麦产量的影响首先应考虑收获前

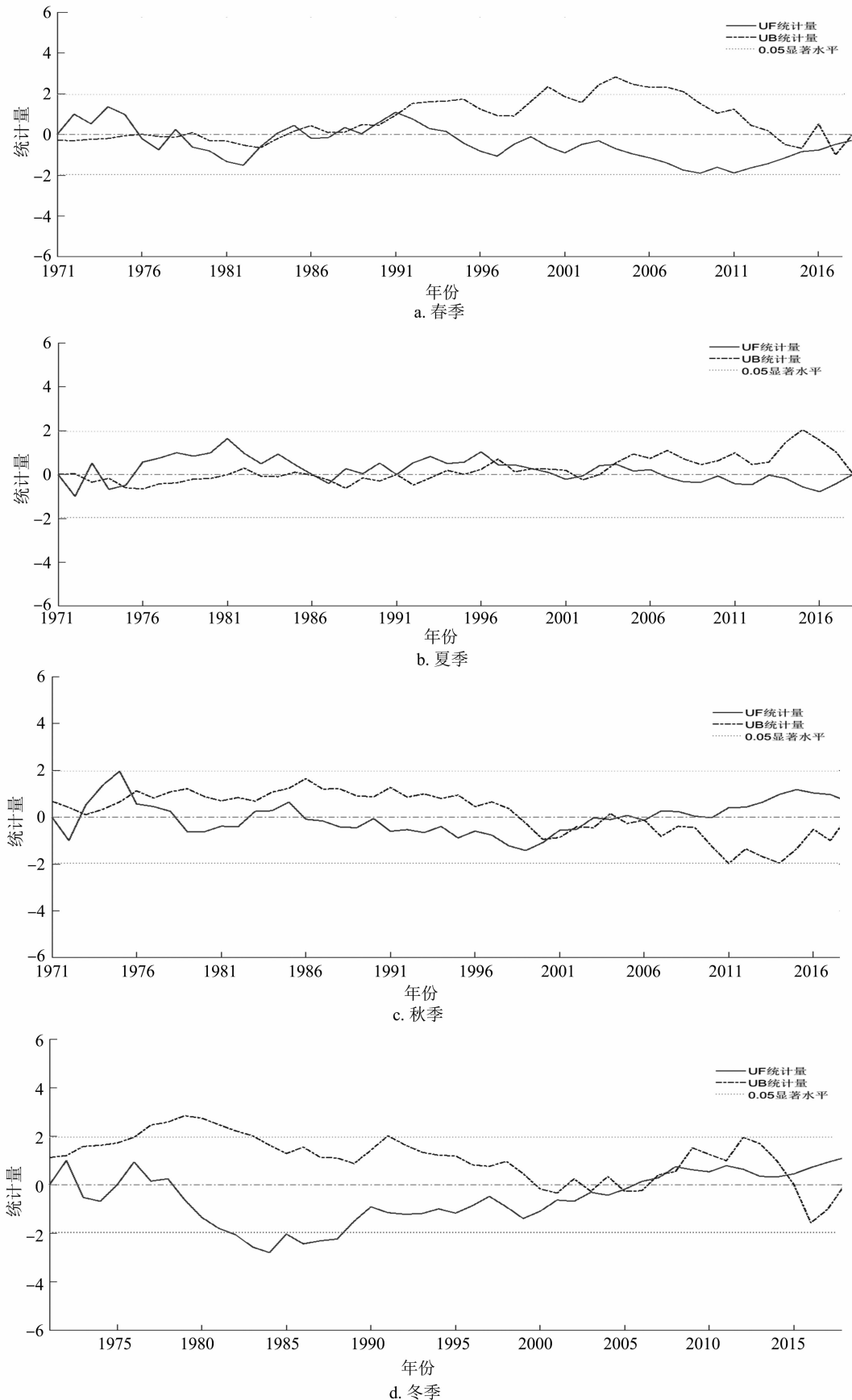


图4 春季、夏季、秋季、冬季 SPI 的 M-K 突变检验结果

表 2 冬小麦生长周期

发育阶段	时间
播种期	9 月下旬
苗生长期	10 月上旬至 11 月中旬
越冬期	11 月下旬至次年 3 月上旬
返青期	3 月上旬至中旬
起身期	3 月下旬
拔节期	4 月中旬至下旬
抽穗期	5 月上旬
开花期	5 月中旬
成熟期	6 月下旬

表 3 降水量、SPI 及干旱强度与冬小麦单产及气候产量的相关关系

季节	指数	相关系数	
		气候产量	单产
年均	降水量	0.179	0.203
	SPI	0.168	0.200
	干旱强度	-0.429 **	-0.317 *
春季	降水量	0.416 *	0.218
	SPI	0.480 **	0.285
	干旱强度	-0.513 ***	-0.376 *
夏季	降水量	0.019	0.027
	SPI	0.001	-0.010
	干旱强度	0.107	0.150
秋季	降水量	0.446 **	0.463 **
	SPI	0.477 **	0.477 **
	干旱强度	-0.485 ***	-0.466 **
冬季	降水量	0.107	0.321 *
	SPI	0.110	0.323 *
	干旱强度	-0.058	-0.244

注: $n=41$ 。\*、\*\*、\*\*\* 表示通过 0.05、0.01、0.001 水平的检验。

一年秋季及收获当年春季的干旱情况。研究发现，SPI 所表征的干旱指标与冬小麦的相关性高于降水量与其的相关性，表明 SPI 对农业干旱分析具有一定的指导意义。

参考文献：

[1] 蔡思扬,左德鹏,徐宗学,等. 基于 SPEI 干旱指数的东北地区干旱时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(5):15-21.

[2] 苏宏新,李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J]. 生态学报,2012,32(17):5467-5475.

[3] 沙莉,李施,沙莎,等. 基于 SPI 指数甘肃省河东地区干旱特征分析[J]. 气象与环境学报,2016,32(5):122-130.

[4] 祁俊青,于文金,谢涛,等. 云南省干旱灾害时空变化特征

[J]. 江苏农业学报,2019,35(3):631-638.

[5] 熊光洁,张博凯,李崇银,等. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961—2012 年干旱变化特征分析[J]. 气候变化研究进展,2013,9(3):192-198.

[6] 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.

[7] 卫捷,马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. 地理学报,2003(S1):117-124.

[8] 王劲松,黄玉霞,冯建英,等. 径流量 Z 指数与 Palmer 指数对河西干旱的监测[J]. 应用气象学报,2009,20(4):471-477.

[9] Mishra A K,Singh V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology,2010,391(1/2):202-216.

[10] 龚艳冰,张继国,刘高峰,等. 基于 SPI 指数与 R/S 分析的曲靖市干旱特征研究[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(3):273-277.

[11] 那音太. 基于 SPI 指数的近 50a 内蒙古地区干旱特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(5):161-166.

[12] 王江涛. 基于华北地区气象指数 SPI 干旱时空分析[J]. 水土保持研究,2019,26(4):203-207.

[13] 刘维,李祎君,何亮,等. 基于 SPI 判定的东北春玉米生长季干旱对产量的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(22):121-127.

[14] 朱玲玲,张竞竞,李治国,等. 基于 SPI 的河南省冬小麦生育期干旱时空变化特征分析[J]. 灌溉排水学报,2018,37(5):51-58.

[15] 郭伟,李莹,杜莉丽. 基于 SPI 的山西省 1972—2012 年春夏干旱特征及对玉米产量的影响分析[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(1):230-236.

[16] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等. 近 50 年陇东黄土高原干旱特征及未来变化趋势分析[J]. 干旱地区农业研究,2017,35(2):263-270.

[17] Edwards D C,McKee T B. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales[D]. USA:Colorado State University,1997:18-21.

[18] 袁文平,周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展 2004(6):982-991.

[19] 车少静,李春强,申双和,等. 基于 SPI 的近 41 年(1965—2005)河北省旱涝时空特征分析[J]. 中国农业气象,2010,31(1):137-143.

[20] 中国气象局. 气象干旱等级:GB/T 20481—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[21] 张利利,周俊菊,张恒玮,等. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报,2017,37(3):996-1007.

[22] 董安祥. 中国气象灾害大典:甘肃卷[M]. 北京:气象出版社,2005.

[23] 张可心,张谋草,杜军. 1981—2016 年庆阳市地表湿润状况时空变化特征分析[J]. 中国农学通报,2019,35(13):107-106.

[24] 黄小燕,张明军,贾文雄,等. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J]. 水科学进展,2011,22(2):151-159.