

王景红,张勇,刘璐. 2013. 基于多尺度标准化降水指数的陕西苹果主产区气象干旱分析. 气象,39(12):1656-1662.

# 基于多尺度标准化降水指数的陕西苹果主产区气象干旱分析<sup>\*</sup>

王景红 张 勇 刘 璐  
陕西省经济作物气象服务台,西安 710014

**提 要:** 利用陕西省 30 个苹果基地县气象站 1961—2010 年 50 年月降水资料,计算陕西苹果主产区 3、6、9 和 12 个月各尺度的标准化降水指数  $SPI_3$ 、 $SPI_6$ 、 $SPI_9$  和  $SPI_{12}$ 。结果表明陕西苹果主产区年  $SPI_{12}$ 、春夏秋  $SPI_9$  以及秋季  $SPI_3$  整体呈线性下降趋势( $P<0.05$ ),总体趋于干旱,且干旱强度有所加重。陕西苹果主产区轻度、中度、重度和极度气象干旱发生频率分别为 16%、6%、4%和 0%。使用克里格插值法绘制 1961—2010 年陕西苹果主产区年气象干旱频率分布图,其分布表现为自南向北间隔分布且关中果区干旱频率最高;春夏秋气象干旱频率分布上表现与年气象干旱频率近似;冬春气象干旱频率分布上大体表现为南高北低,东西中间低两边高,春夏气象干旱频率分布在东西南北上均大体表现为中间高两边低;季节气象干旱频率分布表现不一,总体上除春季关中果区气象干旱频率最高外,其余季节均为渭北东部果区气象干旱频率最高。加之陕西苹果基地县中 76.4%的苹果园不具备灌溉条件,故该研究对建立具有针对性的防旱抗旱措施及应急预案均具有重要意义。

**关键词:** 陕西苹果, 标准化降水指数, 气象干旱分析, 突变检验

**中图分类号:** S16      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.12.015

## Drought Analysis Based on Multi-Scale Standardized Precipitation Index of Apple Production Area in Shaanxi Province

WANG Jinghong ZHANG Yong LIU Lu  
Shaanxi Meteorological Service Observatory for Economical Crop, Xi'an 710014

**Abstract:** By using monthly precipitation data of 30 meteorological stations within the apple production area in Shaanxi Province from 1961 to 2010, the standardized precipitation index  $SPI_3$ ,  $SPI_6$ ,  $SPI_9$  and  $SPI_{12}$  were calculated. Results show that annual  $SPI_{12}$ , spring-summer-autumn  $SPI_9$  and autumn  $SPI_3$  have a significant linear downward trend ( $P<0.05$ ) and drought intensity tends to increase. The frequency of light drought, mild drought, severe drought and extreme drought in the study area are 16%, 6%, 4% and 0% correspondingly. Kriging interpolation method is used to draw drought frequency distribution map based on  $SPI$  value of the stations in the study area. The spatial distribution of annual drought frequency shows that four high drought frequency areas distribute with certain intervals from south to north and the drought frequency in Guanzhong Area is the highest. The spatial distribution of spring-summer-autumn drought frequency has a similar regulation with the frequency of annual drought. The distribution of winter-spring drought frequency generally shows the trend of being higher in south than in north. The distribution of winter-spring drought frequency shows that the frequency in middle is higher than in the both sides. The drought frequency in Guanzhong Area is the highest in spring, while that in the east of Weibei Area is the highest in the other seasons. In addition, 76.4% apple orchards do not have irrigation facilities.

<sup>\*</sup> 2011 年中国气象局气候变化专项(CCSF2011-4)资助  
2012 年 9 月 28 日收稿; 2012 年 12 月 11 日收修定稿  
第一作者:王景红,主要从事果树气象灾害风险研究及服务工作. Email:wangjh0406@163.com

ties, so this research is of some significance for establishing targeted drought-relief measures and emergency preplans.

**Key words:** Shaanxi apple production, standardized precipitation index, meteorological drought analysis, abrupt change analysis

## 引 言

以苹果为主的果业是陕西的优势特色和主导产业,目前全省已基本形成了渭北黄土高原苹果优势产业带。陕西苹果主产区已经成为全国最大、世界著名的苹果生产和加工基地。

干旱是陕西苹果主产区最主要的气象灾害之一,其往往发生在苹果关键生育期,春季干旱影响开花、坐果,夏季干旱影响果实膨大及花芽分化,严重干旱可导致果树死亡。陕西苹果果区位于渭北黄土高原“旱腰带”地区,全年均有可能发生干旱,其中以伏旱对苹果生产的影响最大,因为伏旱期正是苹果果实膨大期,此时既是果树需水临界期,又是光照强、气温高、农田蒸散量大的时期,尽管降水集中,但 80% 以上的阵性降水难以有效缓解旱情,极易引发干旱(姜创业等,2011),对果实产量、品质,尤其是商品率造成显著影响(王景红等,2010)。陕西苹果果区干旱严重,但灌溉条件差,据统计,陕西 30 个苹果生产基地县中,仅有 11 个县具有灌溉水利设施或集水窖,果园灌溉面积约 14.7 万  $\text{hm}^2$ , 占全省 62.3 万  $\text{hm}^2$  苹果种植面积的 23.6%, 其他 76.4% 的苹果果园均没有灌溉条件,所以开展陕西苹果果区气象干旱研究,明确干旱易发时间段,对建立具有针对性的防旱抗旱措施及应急预案均具有重要意义。

对于干旱研究,国内外学者先后提出了帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、地表水分供应指数(Surface Water Supply Index, SWSI)和标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)等干旱指标因子。其中标准化降水指数法(McKee et al, 1993)因计算简单、时间尺度灵活、经过标准化后在不同时间尺度以及不同区域间都具有可比性,对干旱时空变化指示效果较好等优点而被广泛应用(Zhang et al, 2009; Sims et al, 2002; 袁文平等, 2004; 王劲松等, 2007)。王彦集等(2007)利用不同时间尺度的 SPI 计算结果,对陕西的关中平原和渭北旱塬未来干旱状态做预测和分析。韩萍等(2008)也通过计算关中地区不同时间尺

度 SPI, 实现了对关中地区不同尺度的干旱预测和分析。李星敏等(2009)研究了干旱指标在陕西应用的敏感性,说明 SPI 在陕西具有良好的适用性。

本文利用陕西苹果主产区 30 个苹果基地县气象站点近 50 年的月降水资料计算不同时间尺度的 SPI 值,重点分析主产区年、春夏秋(苹果整个旺盛生长期)、冬春、春夏和四季气象干旱的时间动态变化和空间分布结构,并分析其变化趋势和分布特点。

## 1 材料与方法

### 1.1 资料来源

气象资料来源于陕西省气象信息网络中心,包括延安、渭北西部、渭北东部和关中果区等 30 个苹果基地县气象站点的 1961—2010 年 50 年的月降水资料。

### 1.2 SPI 的计算方法和原理

假设某时段降水量为随机变量  $x$ , 则其  $\Gamma$  分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad x > 0 \quad (1)$$

式中,  $\beta > 0$  和  $\gamma > 0$  分别为尺度和形状参数,  $\beta$  和  $\gamma$  可用极大似然估计方法求得:

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = \bar{x}/\hat{\gamma} \quad (3)$$

其中,  $A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i$ ,  $x_i$  为降水量资料样本,  $\bar{x}$  为降水量气候平均值。

确定概率密度函数中的参数后,一定时间尺度的累计频率由式(4)计算而得:

$$H(x) = u + (1 - u)G(x) \quad (4)$$

式中,  $G(x) = \frac{1}{\Gamma(\gamma)} \int_0^x t^{\gamma-1} e^{-t/\beta} dt$ ,  $t = \frac{x}{\beta}$ ;  $u$  是降水量 0 的概率,  $u = m/n$ ,  $m$  为序列中降水量为 0 的数量。

将累计概率  $H(x)$  转换为标准正态分布函数,

计算出  $SPI$ (Mckee et al,1993):

$$SPI = - \left( k - \frac{2.52 + 0.80k + 0.01k^2}{1 + 1.43k + 0.19k^2 + 0.001k^3} \right)$$

$0 < H(x) \leq 0.5$ (5)

$$SPI = \left( k - \frac{2.52 + 0.80k + 0.01k^2}{1 + 1.43k + 0.19k^2 + 0.001k^3} \right)$$

$0.5 < H(x) \leq 1$ (6)

其中  $k = \sqrt{\ln\{1/[H(x)]^2\}}$ ,  $0 < H(x) \leq 0.5$ ;  $k = \sqrt{\ln\{1/[1-H(x)]^2\}}$ ,  $0.5 < H(x) \leq 1$ 。

分别进行 3、6、9 和 12 个月尺度的  $SPI$  值的计算(结果分别记为  $SPI_3$ 、 $SPI_6$ 、 $SPI_9$  和  $SPI_{12}$ ),然后根据表 1 对应的《气象干旱等级》(张强等,2006)中的国家气象干旱等级标准对气象干旱进行统一等级划分,计算相应等级气象干旱发生的频率  $F$ =发生某一等级气象干旱的总数/总数。具体计算时,区域干旱计算是地区面积的加权平均值。季节气象干旱以  $SPI_3$  为基础,分别计算春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月至次年 2 月)各站点的  $SPI_3$  值;冬春和春夏气象干旱以  $SPI_6$  为基础,分别计算冬春季(12 月至次年 5 月)和春夏季(3—8 月)各站点的  $SPI_6$  值;春夏秋气象干旱以  $SPI_9$  为基础,计算春、夏、秋三季(3—11 月)各站点的  $SPI_9$  值。

表 1 标准化降水指数干旱等级划分  
Table 1 Drought classification of standardized precipitation indices

等级	类型	$SPI$
1	无旱	$-0.5 < SPI$
2	轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
5	特旱	$SPI \leq -2.0$

1.3 突变检验和分析

首先利用 Mann-Kendall (M-K) 法对各尺度  $SPI$  值进行突变检验,该方法具有检验范围宽、定量化程度高、人为性小等特点,是目前突变性检验方法中应用较多且理论意义最为明显的一种(符淙斌等,1992)。但是 M-K 法在检验跷跷板突变、转折突变和变率突变时不是很有效,有可能产生虚假的突变点(Wang et al,1992),可再利用滑动  $t$  检验(MTT)法和信噪比(Yamamoto)法,对可能的突变点进行信度检验,从而验证突变点的真伪,增强突变

分析结果的可信度(孙善磊等,2010)。

2 计算结果和分析

2.1 各时间尺度  $SPI$  的动态变化

如图 1a 所示,陕西苹果主产区 1961—2010 年  $SPI_{12}$  呈波动变化趋势(其中粗实线为 5 阶多项式回归趋势线,虚线为线性回归趋势线),有 1972—1977、1998—2005 年两个较为明显的相对干旱期,且年  $SPI_{12}$  整体呈下降趋势,线性倾向率为  $-0.016$  (通过  $\alpha=0.05$  显著性水平检验),说明陕西苹果主产区近 50 年总体趋于干旱,且干旱强度有所加重。通过 M-K 分析并结合 MTT 和 Yamamoto 检验对年  $SPI_{12}$  时间序列进行突变检验发现,陕西苹果主产区年  $SPI_{12}$  在 1969 年附近发生突变总体趋于干旱,1997 年后干旱趋势显著(见图 2a 和表 2)。如图 1b 所示,春夏秋  $SPI_9$  动态变化趋势与年  $SPI_{12}$  近似,相对干旱期时间接近,整体同样呈下降趋势线性倾向率为  $-0.017$  (通过  $\alpha=0.05$  水平检验),说明苹果整个旺盛生长期总体趋于干旱,对生产不利。春夏秋  $SPI_9$  突变检验的结果和年  $SPI_{12}$  基本一致(见图 2b 和表 2)。

如图 1c 和 1d 所示,陕西苹果主产区 1961—2010 年冬春和春夏  $SPI_6$  均存在较为显著的相对干旱期,线性变化均不显著,但存在整体趋于干旱的趋势。对冬春和春夏  $SPI_6$  时间序列进行突变检验发现,陕西苹果主产区冬春  $SPI_6$  在 20 世纪 70 年代中后期发生突变总体趋于干旱,但变化趋势不显著,春夏  $SPI_6$  则不存在显著突变(图 2c 和 2d 和表 2)。

如图 1e~1h 所示,陕西苹果主产区 1961—2010 年春、夏、秋、冬四季中,秋季  $SPI_3$  整体呈下降趋势,线性倾向率为  $-0.022$  (通过  $\alpha=0.01$  显著性水平检验),说明陕西苹果主产区近 50 年秋季总体趋于干旱,且干旱强度加重趋势明显;春、夏、冬三季  $SPI_3$  线性变化趋势则不显著。此外通过对四季  $SPI_3$  进行突变检验发现,除夏季  $SPI_3$  时间序列未有显著突变外,春、秋、冬三季均存在突变,分别为 1971 年附近、20 世纪 60 年代中期和 70 年代末,其中秋季  $SPI_3$  在 1985 年后下降趋势显著,1999 年后趋于缓解(见图 2e~2h 和表 2)。

2.2 气象干旱的年代际和强度动态变化

如图 3 所示,1961—2010 年陕西苹果主产区轻

度、中度、重度和极度气象干旱发生频率分别为 16%、6%、4%和 0%,以轻度气象干旱频率最高,其次是中旱和重旱,全区在 1961—2010 未发生极度气象干旱。1991—2000 年不仅气象干旱发生的频次最高而且干旱强度也为 50 年内最大的,1971—1980 年气象干旱发生的频次和强度仅次于1991—2000

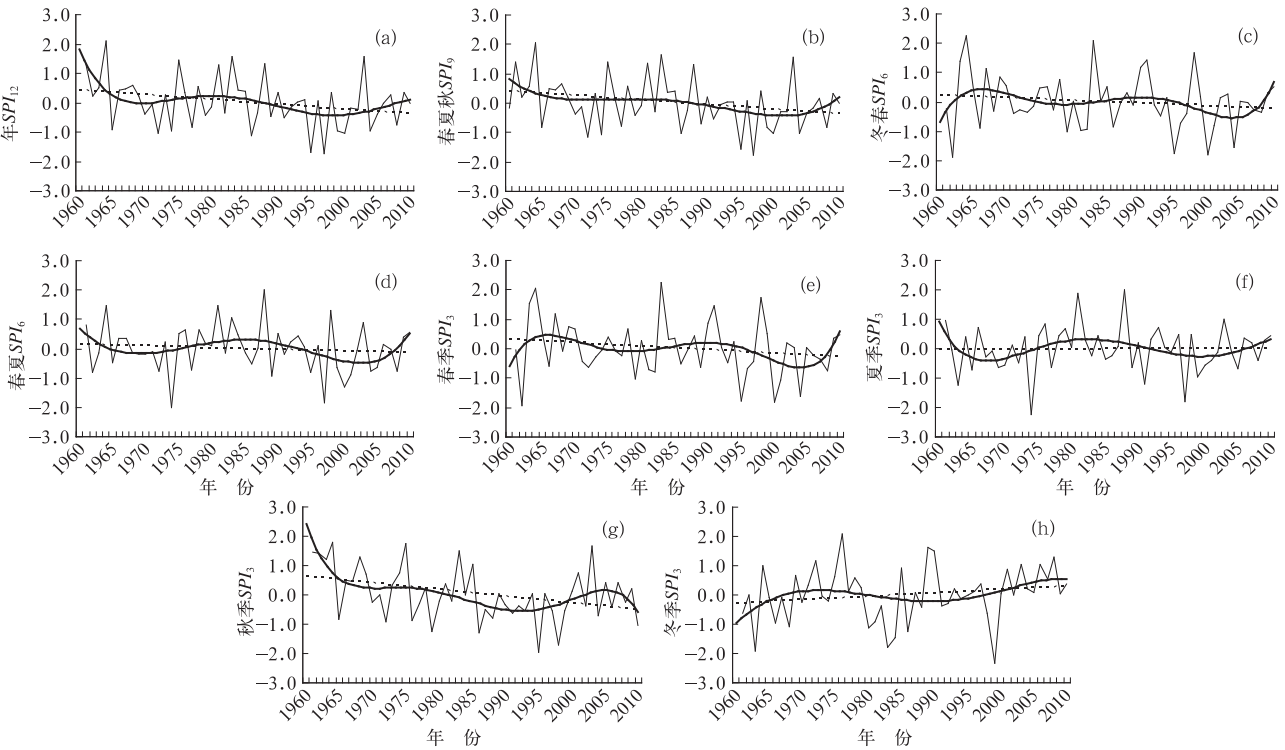


图 1 1961—2010 年陕西苹果主产区各时间尺度标准化降水指数动态变化

(a) 年  $SPI_{12}$ , (b) 春夏秋  $SPI_9$ , (c) 冬春  $SPI_6$ , (d) 春夏  $SPI_6$ , (e) 春季  $SPI_3$ , (f) 夏季  $SPI_3$ , (g) 秋季  $SPI_3$ , (h) 冬季  $SPI_3$

Fig. 1 Dynamic variations of SPI at different temporal scales during 1961–2010

(a) annual  $SPI_{12}$ , (b) spring-summer-autumn  $SPI_9$ , (c) winter-spring  $SPI_6$ , (d) spring-summer  $SPI_6$ , (e) spring  $SPI_3$ , (f) summer  $SPI_3$ , (g) autumn  $SPI_3$ , (h) winter  $SPI_3$

表 2 陕西苹果主产区标准化降水指数突变点的显著性检验(MTT 和 Yamamoto 法)

Table 2 Confidence level tests of standardized precipitation index of apple production area in Shaanxi Province (MTT, Yamamoto)

突变点/年	MTT ( $t_0$ )				Yamamoto ( $R_{SN}$ )			
	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$
年	1969	3.04 *	2.54 *	1.61	1.12	1.65 *	1.18	0.36
春夏秋	1969	2.91 *	2.42	1.73	1.23	1.78 *	1.12	0.39
冬春	1973	-2.79 *	-0.83	-0.54	-0.10	1.74 *	0.34	0.03
	1974	-1.93	-2.92 *	-0.59	-0.13	1.14	1.41 *	0.04
	1978	2.11	3.22 *	0.66	0.54	1.06	1.32 *	0.18
春季	1971	3.23 *	3.44 *	1.65	1.94	1.76 *	1.49 *	0.64
秋季	1964	3.02 *	2.42			1.66 *	1.14	
	1969	3.30 *	2.92 *	1.01	0.74	1.65 *	1.21	0.45
	1985	3.36 *	2.40	2.82 *	2.89 *	1.77 *	1.00	0.94 *
冬季	1978	2.13	2.70 *	2.75 *	3.15 *	1.08	1.12	1.00 *
	1979	4.45 *	3.40 *	4.42 **	2.67 *	2.28 *	1.42 *	0.85

注: \* 表示通过了  $\alpha=0.05$  的显著性检验; \*\* 表示通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验。

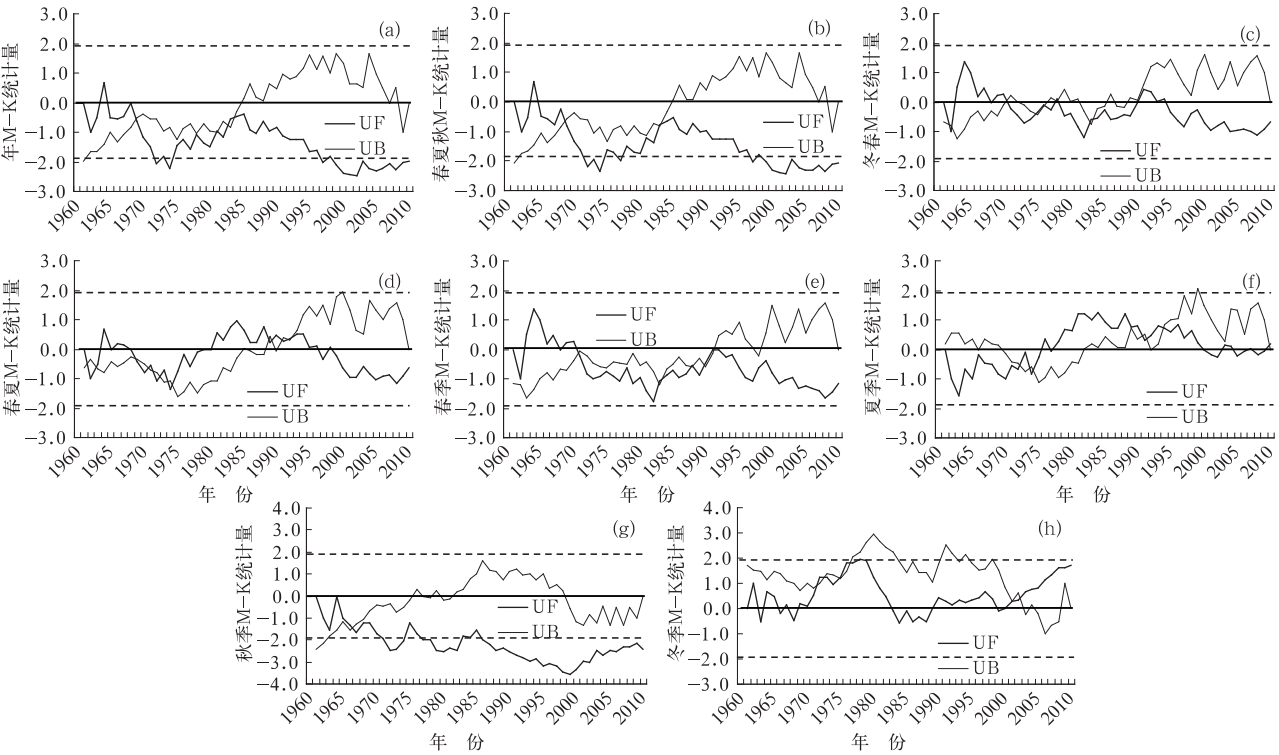


图 2 陕西苹果主产区各时间尺度标准化降水指数 M-K 统计量

(a) 年  $SPI_{12}$ , (b) 春夏秋  $SPI_9$ , (c) 冬春  $SPI_6$ , (d) 春夏  $SPI_6$ , (e) 春季  $SPI_3$ ,  
(f) 夏季  $SPI_3$ , (g) 秋季  $SPI_3$ , (h) 冬季  $SPI_3$

Fig. 2 Abrupt change analyses with Mann-Kendall method of SPI at different temporal scales

(a) annual  $SPI_{12}$ , (b) spring-summer-autumn  $SPI_9$ , (c) winter-spring  $SPI_6$ , (d) spring-summer  $SPI_6$ ,  
(e) spring  $SPI_3$ , (f) summer  $SPI_3$ , (g) autumn  $SPI_3$ , (h) winter  $SPI_3$

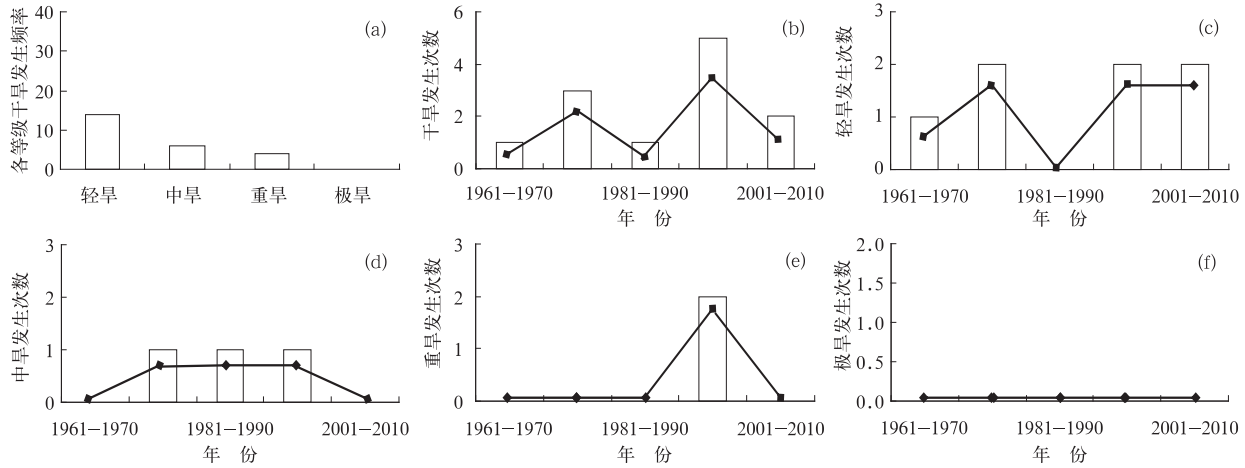


图 3 1961—2010 年陕西苹果主产区各等级干旱发生百分比及年代际发生次数变化

(a) 各等级气象干旱发生频率, (b) 干旱发生次数, (c) 轻旱发生次数, (d) 中旱发生次数,  
(e) 重旱发生次数, (f) 极旱发生次数

Fig. 3 Percentage of drought events in different grades and the inter-decadal variations during 1961—2010

(a) the frequency of drought in each grade, (b) times of drought events, (c) times of light droughts,  
(d) times of medium droughts, (e) times of severe droughts, (f) times of extreme droughts

年,2001—2010 年气象干旱发生的频次略高于 1981—1990 年,强度则相近,1961—1970 年气象干旱发生的频次和强度均为 50 年内最低的。

2.3 各时间尺度气象干旱频率的空间分布

如图 4a 所示,1961—2010 年陕西苹果主产区年气象干旱频率分布上表现为关中果区的陈仓、渭北西部的彬县、渭北东部的白水、延安的宝塔四个高值区自南向北间隔分布,总体表现为西高东低。区域上关中果区干旱频率最高,其次是渭北西部、渭北东部、延安果区,地区上关中果区的陈仓和渭北东部的白水干旱频率最高。如图 4b 所示,春夏秋气象干旱频率分布上表现与年气象干旱频率近似,总体表现为西高东低。区域上渭北西部果区干旱频率最高,其次是关中、延安、渭北东部果区,地区上渭北东

部果区的蒲城干旱频率最高。  
如图 4c 和 4d 所示,1961—2010 年主产区冬春干旱频率分布在东西方向上大体表现为中间低两边高,南北方向上则表现为南高北低;春夏干旱频率东西南北方向上均大体表现为中间高两边低。区域上关中果区冬春和春夏干旱频率均最高、地区上关中果区的岐山冬春干旱频率最高、渭北西部果区的淳化春夏干旱频率最高。

如图 4e~4h 所示,1961—2010 年主产区四季干旱频率分布表现不一。总体上,春季高值区自南向北间隔分布,大体为南高北低;夏、秋两季高值区自西向东间隔分布,以渭北地区为高值中心;冬季高值区自西向东间隔分布,大体为东高西低。总体上除春季关中果区干旱频率最高外,其余季节均为渭北东部果区干旱频率最高。

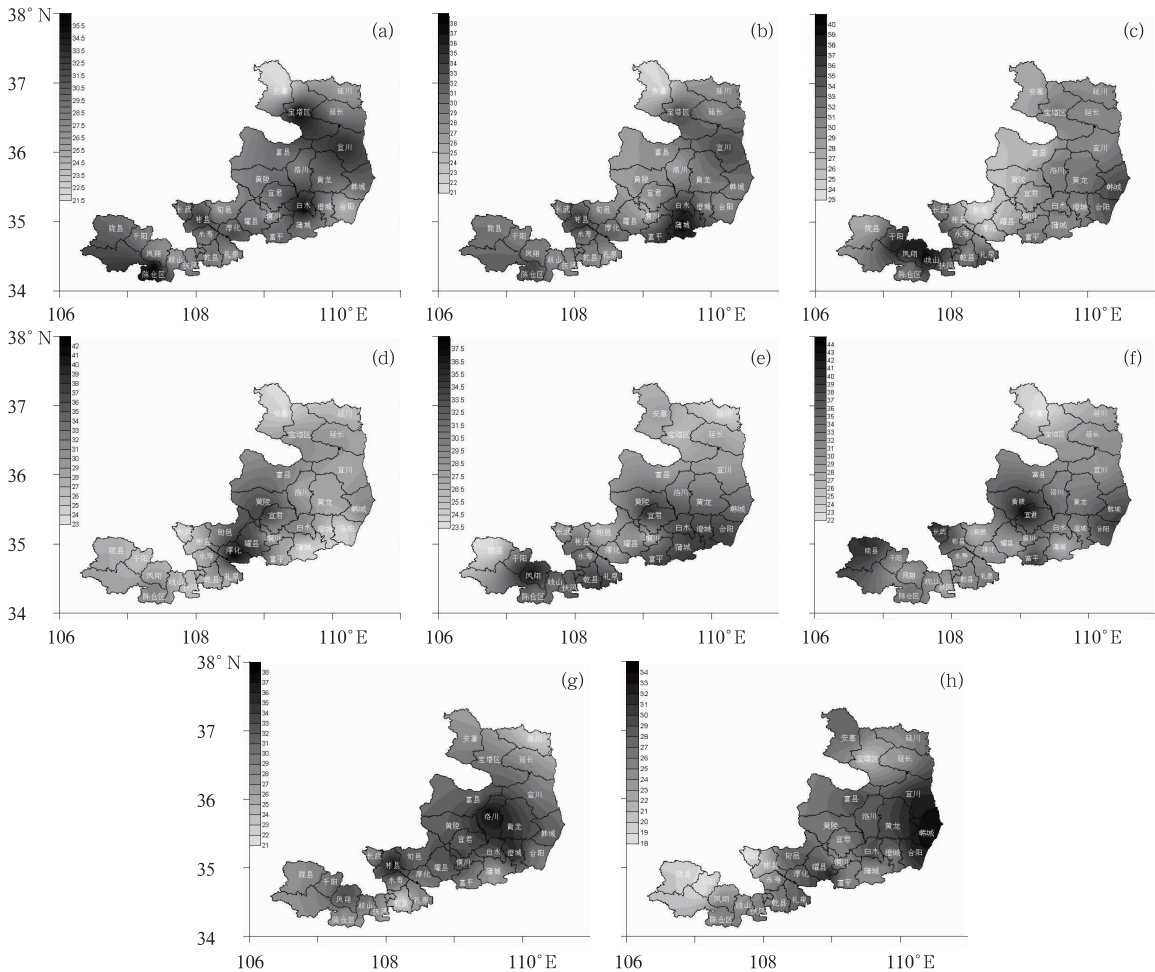


图 4 1961—2010 年苹果主产区干旱频率分布  
(a) 年, (b) 春夏秋, (c) 冬春, (d) 春夏, (e) 春季, (f) 夏季, (g) 秋季, (h) 冬季  
Fig. 4 Distribution of drought frequency in apple production area during 1961–2010  
(a) annual, (b) spring-summer-autumn, (c) winter-spring, (d) spring-summer, (e) spring, (f) summer, (g) autumn, (h) winter

### 3 结论与讨论

(1) 陕西苹果主产区 1961—2010 年  $SPI_{12}$ 、春夏秋  $SPI_9$ 、秋季  $SPI_3$  整体呈线性显著下降趋势, 总体趋于干旱, 且干旱有所加重。突变检验发现, 陕西苹果主产区年  $SPI_{12}$ 、春夏秋  $SPI_9$  在 1969 年附近发生突变总体趋于干旱; 冬春  $SPI_6$  在 20 世纪 70 年代中后期发生突变总体趋于干旱, 春夏  $SPI_6$  突变不显著; 春、秋、冬三季突变分别在 1971 年附近、20 世纪 60 年代中期及 70 年代末, 夏季突变不显著。

(2) 1961—2010 年陕西苹果主产区轻度、中度、重度和极度气象干旱发生频率分别为 16%、6%、4% 和 0, 以轻度气象干旱频率最高, 其次是中旱、重旱。1961—2010 年陕西苹果主产区全年、冬春、春夏及春季关中果区干旱频率均最高, 春夏秋干旱频率渭北西部果区最高, 夏、秋、冬季节均为渭北东部果区干旱频率最高。

(3) 陕西省苹果主产区年气象干旱发生频率较高, 且中、重度气象干旱时有发生对果业生产造成严重影响。其中夏季气象干旱频率和强度虽不如春旱, 但对处于幼果期和果实膨大期两个水分需求关键期的苹果影响最大, 多造成幼果脱落, 并影响果型、果个和内在品质等。春旱虽频率和强度最高, 但果树处于生长初期水分需求较低, 影响不及夏旱, 但仍会对苹果萌芽、开花、坐果造成严重影响。春夏旱是春旱和夏旱的综合反映, 对于处于水分需求关键生育期的苹果影响巨大, 是影响陕西苹果主产区增产、提质的关键气象灾害。秋旱则会阻碍苹果果实的进一步膨大期, 影响产量, 但因基础降水量较为充足, 影响并没有夏旱、春旱显著。

(4) 陕西苹果主产区不同时间尺度气象干旱发生区域和特点均有所不同, 应对高频次和高强度发生区域结合苹果生育期, 因地制宜, 开展有针对性的防御。对于夏季气象干旱高发区的渭北东部和渭北西部果区, 因其地处黄土高原, 黄土层深厚, 蓄水保墒能力强, 应狠抓春、夏两季的蓄水保墒工作, 可显著提高对夏旱的防御能力, 且有利于抗御来年冬春干旱; 关中和渭北西部果区是春夏旱的高发区, 不仅要重视夏秋和冬季的蓄水保墒工作, 还需在果园选址时多考虑灌溉条件, 以缓解苹果关键生育期的水分供需矛盾(温克刚等, 2005)。

(5) 在基于陕西苹果主产区近 50 年标准化降水指数分析的基础上可进一步完善, 进行苹果主产区的气象干旱监测分析和评价, 国内已在气象业务

使用多尺度标准化降水指数进行干旱监测分析和评价(邹旭恺等, 2005; 白永清等, 2005; 谢五三等, 2011)。利用时间序列模型和神经网络模型等结合天气分析方法还可建立苹果主产区标准化降水指数的短期和长期预测模型(张建兴等, 2008; 张丹等, 2010; 程玉琴等, 2010), 此方面仍待进一步研究。

### 参考文献

- 白永清, 智协飞, 祁海霞, 等. 2005. 基于多尺度 SPI 的中国南方大旱监测. 气象科学, 30(3): 292-300.
- 程玉琴, 张少文, 徐玉强. 2010. 赤峰地区夏季干旱强度预测方法研究. 气象, 36(1): 49-53.
- 符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 16(4): 482-493.
- 韩萍, 王鹏新, 王彦集, 等. 2008. 多尺度标准化降水指数的 ARIMA 模型干旱预测研究. 干旱地区农业研究, 26(2): 212-218.
- 姜创业, 蔡新玲, 吴素良, 等. 2011. 1961—2009 年陕西省极端强降水事件的时空演变. 干旱区研究, 28(1): 151-157.
- 李星敏, 杨文峰, 杨小丽, 等. 2009. 干旱指标在陕西应用的敏感性分析. 中国沙漠, 29(2): 342-347.
- 孙善磊, 周锁铨, 金博, 等. 2010. 淮海地区降水周期及突变特征分析. 气象科学, 30(2): 221-227.
- 王景红, 李艳丽, 刘璐, 等. 2010. 果树气象服务基础. 北京: 气象出版社, 71-73.
- 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 2007. 干旱指标研究的进展与展望. 干旱区地理, 30(1): 60-65.
- 王彦集, 刘峻明, 王鹏新, 等. 2007. 基于加权马尔可夫模型的标准化降水指数干旱预测研究. 干旱地区农业研究, 25(5): 198-203.
- 温克刚, 翟佑安. 2005. 中国气象灾害大典(陕西卷). 北京: 气象出版社, 8-17.
- 谢五三, 田红. 2011. 五种干旱指标在安徽省应用研究. 气象, 37(1): 503-507.
- 袁文平, 周广胜. 2004. 标准化降水指标与 Z 指数在我国的对比研究. 植物生态学报, 28(4): 523-529.
- 张丹, 周惠成. 2010. 基于指数权马尔可夫链及双原则干旱预测研究. 水电能源科学, 28(4): 5-8, 106.
- 张建兴, 马孝义, 赵文举, 等. 2008. 黄土高原地区干旱长期变化趋势及预测. 干旱地区农业研究, 26(3): 6, 22.
- 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. 2006. 气象干旱等级 GB/T204812. 北京: 中国标准出版社, 17.
- 邹旭恺, 张强, 王有民, 等. 2005. 干旱指标研究进展及中美两国国家级干旱监测. 气象, 31(7): 6-9.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Boston: American Meteorological Society, 179-184.
- Sims AP, Niyogi D d S, Raman S. 2002. Adopting drought indices for estimating soil moisture: A North Carolina case study. Geophysical Research Letters, 29(8): 1183-1186.
- Wang Qiang, Fu Congbin. 1992. The detection of climate abrupt change with Mann-Kendall rank statistics. Acta Meteorologica Sinica, 6(2): 254-260.
- Zhang Q, Xu C Y, Zhang Z X. 2009. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index. Theoretical and Applied Climatology, 98(1-2): 89-99.