

三种干旱指标在泾惠渠灌区的适用性分析

刘彦平, 蔡焕杰

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室 中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了正确评价灌区的干旱状况, 利用泾惠渠灌溉试验站 1953—2011 年的降水资料, 分析了降水距平百分率、标准化降水指数 SPI 、降水 Z 指数三种干旱指标在灌区的适用性。结果表明, 三种指标均能较好地体现降水的年际变化趋势, 但 SPI 对于降水变化的反映比降水 Z 指数和降水距平百分率更准确。在干旱出现年份的判定方面, 三种指标得到的结果一致; 在干旱程度的判定上, 在发生中旱及以上干旱的 1969、1986、1993、2000 年, SPI 和降水 Z 指数比降水距平百分率判定准确, 在发生重旱的 1977、2000 年, SPI 的判定比 Z 指数更符合实际。分析泾惠渠灌区 SPI 变化趋势发现, 灌区在 1990 年后干旱发生次数占研究期内总干旱次数的 55.6%, 干旱程度也有增加的趋势, 采取合理措施抗旱将成为灌区未来发展的关键。

关键词: 农业干旱; 降水距平百分率 (P_a); 标准化降水指数 (SPI); 降水 Z 指数; 泾惠渠灌区

中图分类号: S165+.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)04-0236-06

Suitability analysis of three drought indices in Jinghuiqu irrigation district

LIU Yan-ping, CAI Huan-jie

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas of Ministry of Education/Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to assess the regional drought condition accurately, precipitation anomaly (P_a), standard precipitation index (SPI) and Z index were calculated and their suitability was compared based on the precipitation data of Jinghuiqu experimental station from 1953 to 2011. The results showed that all these indices could reflect the yearly change trends of precipitation, in which, SPI was more sensitive to the change of precipitation than Z index and P_a . In the judgment of drought occurrence, P_a , SPI and Z index showed consistent results; in the judgment of drought degree, SPI and Z index were more accurate than P_a in 1969, 1986, 1993 and 2000 in which moderate or heavy drought happened, while SPI conformed to reality better than Z index in 1977 and 2000 in which heavy drought happened. Through the analysis of SPI change trend in Jinghuiqu irrigation district, it was discovered that 55.6% of drought events occurred after 1990 and drought degree also tended to increase during the study period. In the future, it is of great importance to take rational measures to prevent and control drought in this district.

Keywords: agricultural drought; percentage of precipitation anomaly (P_a); standard precipitation index (SPI); Z index; Jinghuiqu irrigation district

干旱是影响我国农业生产的主要自然灾害之一, 具有发生频率高、持续时间长、影响范围广等特点。据统计, 1950—1999 年全国平均每年有 2 200 万 hm^2 农作物受旱, 成灾面积达 867 万 hm^2 ^[1]。随着经济的发展、人口压力的增加, 干旱发生的频率增加, 并且呈现出从华北向南方扩张的趋势^[2-3]。

农业干旱一般是指某一时段内, 农业供水不能

满足需水要求而导致的农作物缺水^[4]。干旱不同于其他的自然灾害, 导致其产生的因素很多, 而且干旱的发生过程缓慢, 需要经过相当长的一段时间才能显现出来。干旱指标可以量化地区的水分情况, 从而判定干旱的开始及程度, 进行区域之间干旱的对比^[5]。因此, 研究分析农业干旱的前提是选择合适的衡量指标。目前常用于农业干旱评价的指标大多

收稿日期: 2013-10-05

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2011BAD29B01); 国家自然科学基金项目(51179162); 高等学校学科创新引智计划项目(B12007)

作者简介: 刘彦平(1988—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: liuypp1988@163.com。

通信作者: 蔡焕杰(1962—), 男, 河北藁城人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水与水资源高效利用研究。E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn。

是从导致干旱的主要因素进行分析,如基于降水的标准化降水指数 SPI 、降水 Z 指数等,基于土壤含水量的指标,以及经过大量试验得到的作物受旱时生理、形态变化的指标。考虑到降水是农业生产的主要水分来源这一事实,降水量指标的研究及其在干旱分析评价中应用较多。付丽娟等^[6]利用 2006—2010 年间的气象资料比较了降水距平百分率、相对湿度干旱指数和标准化降水指数 (SPI) 在内蒙古地区的适用性。袁云等^[7]利用标准化降水指数 SPI 分析了各气候分区的干旱等级的气候变化。王宏等^[8]采用降水 Z 指数研究了河北省降水的多时间尺度变化特征。基于降水的干旱指标大多计算简单,不涉及复杂的干旱机理,但不同地区产生干旱的气候条件各异,这类指标划分的干旱等级在不同地区适用性不同^[9]。

本研究选取在我国应用广泛的标准化降水指数 SPI 、降水 Z 指数以及降水距平百分率,以泾惠渠灌区为例,比较了这三种指标分析干旱问题的适用性以及灌区干旱发展趋势,旨在选择合适的指标正确认识灌区干旱发展规律,为采取合理措施及时抗旱减灾提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

选取位于陕西省关中平原地区中部的泾惠渠灌区作为研究对象。灌区西、南、东三面有泾河、渭河、石川河环绕,范围涉及泾阳、三原、高陵、临潼、阎良、富平六县区,东西长约 70 km,南北宽约 20 km,地势西北高、东南低,地面坡降 1/300 ~ 1/600,排水条件良好。年平均降水量为 535 mm,年平均蒸发量为 1 212 mm,多年平均气温 13.4℃,属于大陆性半干旱季风气候区。灌区农作物以小麦、玉米和棉花为主,是陕西省的重要粮菜基地。

研究区内的三原、高陵、泾阳、富平、阎良县区均位于年降水 400.1 ~ 550 mm 区域^[10],而泾惠渠灌溉试验站位于研究区域的中心,承担灌区主要作物的灌溉用水计划的研究,具有代表性。选取泾阳、临潼、试验站的 2003—2011 年的降水数据进行相关分析,三者之间的关系均达到了显著水平 ($P < 0.05$)。因此,采用试验站 1953—2011 年的月降水资料为计算依据。

1.2 干旱指标的计算方法

1.2.1 降水距平百分率 (P_a) 降水距平百分率 (P_a) 反映的是某时段降水量与该时段多年平均值的偏离程度。不同的地区、时期的平均降水量存在

差异, P_a 消除了这种差异,使得降水在时空上具有了可比性。该指标与降尺度方法结合能够进行降水的预报。该指标的计算方法为:

$$P_a = \frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, P_i 为某时段降水 (mm); \bar{P} 为同时段多年平均降水量 (mm)。

1.2.2 标准化降水指数 (Standard Precipitation Index, SPI) 标准化降水指数 (SPI) 考虑到降水服从偏态分布这一事实,假设降水服从 Γ 分布,并将由此得到的降水量的累积概率进行正态标准化处理。 SPI 能够反映不同时间尺度和地区的旱涝状况以及干旱的际年变化^[11]。 SPI 的计算公式如下^[12]:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0} \quad (2)$$

式中, $t = \sqrt{\ln \frac{1}{H(x)^2}}$; x 是给定时间尺度的降水量 (mm); $H(x)$ 是对应于 x 的累积概率; S 是概率密度正负系数,当 $H(x) > 0.5$ 时, $S = 1$, 当 $H(x) \leq 0.5$ 时, $S = -1$; $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

$H(x)$ 由不完全 Γ 分布概率密度函数积分得到:

$$H(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} \int_0^x x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} dx \quad (3)$$

式中, $\beta > 0$, 为尺度参数; $\gamma > 0$, 为形状参数。可由极大似然估计法求的。

$$A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum \lg x_i \quad (4)$$

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\gamma}} \quad (6)$$

1.2.3 降水 Z 指数 (Z index) 考虑到降水量并不服从正态分布,降水 Z 指数就假设某时段降水服从 Pearson III 型分布,再对降水量进行正态化处理,即得到以 Z 为变量的标准正态分布:

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \varphi_i + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (7)$$

式中, C_s 为偏态系数; φ_i 为标准变量,可由下式求的:

$$C_s = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (9)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

各指标的干旱等级参照《气象干旱等级》^[12]和《干旱气象学》^[13]划分,具体见表 1。

表 1 降水距平百分率、标准化降水指数、降水 Z 指数干旱等级划分

Table 1 Classification grades of drought with P_a , SPI and Z index

等级 Grade	干旱程度 Degree of drought	降水距平百分率/% Percentage of precipitation anomaly (P_a)		标准化降水指数 Standard precipitation index (SPI)	降水 Z 指数 Z index
		季尺度 Seasonal scale	年尺度 Yearly scale		
		1	无旱 No drought		
2	轻旱 Slight drought	$-50 < P_a \leq -25$	$-30 < P_a \leq -15$	$-1.0 < SPI \leq -0.5$	$-1.036 < Z \leq -0.524$
3	中旱 Moderate drought	$-70 < P_a \leq -50$	$-40 < P_a \leq -30$	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	$-1.685 < Z < -1.036$
4	重旱 Heavy drought	$-80 < P_a \leq -70$	$-45 < P_a \leq -40$	$-2 < SPI \leq -1.5$	$Z \geq -1.685$
5	特旱 Extreme drought	$P_a \leq -80$	$P_a \leq -45$	$SPI \leq -2.0$	

1.3 滑动平均法

对于呈现无规律波动的要素进行趋势分析时,滑动平均法是最基础的一种方法。假设分析变量为 x , 当总的样本数为 n 时, 在确定了滑动步长 s ($s < n$) 之后, 依次对 $x_1 \sim x_s, x_2 \sim x_{(s+1)}, x_3 \sim x_{(s+2)} \dots x_{(n-2s+2)} \sim x_{(n-s+1)}$ 个数据进行线性拟合, 得到 $n - s + 1$ 个拟合方程:

$$Y_i = at + b \quad (11)$$

式中, t 为 x_i 对应的时间或序号。变量 x_i 的趋势值即为通过该点的拟合方程值的平均。

2 结果与分析

2.1 三种干旱指标与降水的趋势对比

降水作为农业生产的主要水分来源, 其多少在很大程度上决定了旱情。降水距平百分率、 SPI 、降水 Z 指数都是以长时间序列的降水为基础的, 三种干旱指标能够正确反映研究区域干旱情况的前提是保持与降水趋势的一致性, 同时能对于降水变化快速做出响应。

以年尺度为例, 分析三种干旱指标与降水变化之间的关系 (见图 1)。可以看出, 三种干旱指标对于降水的年际变化有极好的对应关系。降水距平百分率变化趋势与降水保持一致, 但整体上趋于平缓。与降水距平百分率相比, SPI 在反映降水趋势的同时, 对于降水的波动反映更明显。在 1954、1958、1969、1977、1983、1988、1997、2001、2003 年这几个水分波动大的年份 SPI 相应的波幅较大。降水 Z 指数在按照时间序列表现降水趋势变化方面与 SPI 十分一致。

降水距平百分率是由降水数据进行简单的变换而来, 计算时没有考虑过降水的分布特性, 反映的是时段降水与多年平均值的偏离程度。如果时段降水

与平均降水差距不大, 在与平均降水相除的过程中这种差距会进一步弱化。 SPI 和降水 Z 指数都考虑到了降水不服从正态分布这一事实, 而且又进行了正态标准化处理, 从理论上优于降水距平百分率。

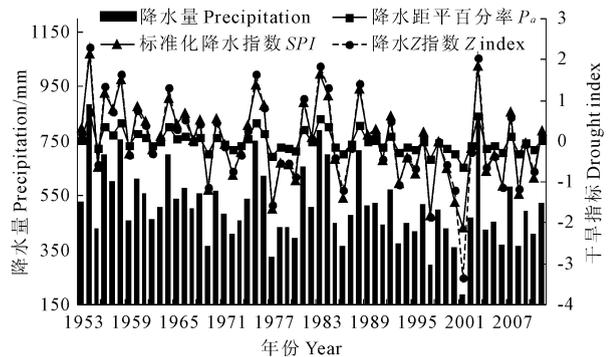


图 1 三种干旱指数及降水趋势

Fig. 1 Three drought indices and precipitation trend

将逐年降水及对应的年尺度的三种干旱指标进行升序排列 (见图 2), 以降水、降水距平百分率、 SPI 、降水 Z 指数作为因变量, 排列序号作为自变量, 采用最小二乘法进行曲线拟合, 计算四条曲线的拐点 (见表 2)。拐点是函数的特殊点, 函数的变化率在这点发生改变。虽然三种干旱指标都随着降水的增大呈现严格递增的趋势, 当降水的递增速率改变时三者的响应却不同。从表中可以看出, SPI 的拐点与降水量的拐点最为接近, 相差 1.20; 降水 Z 指数次之, 相差 4.26; 降水距平百分率最差, 与降水量的拐点差距达到 6.30。由此表明, 对于降水的波动变化, SPI 能及时做出响应, Z 指数反映稍慢。降水距平百分率的递增速率改变发生在降水趋势变化之前, 说明该指标对于降水的变化反映不稳定。因此, SPI 在反映降水变化方面比降水 Z 指数和降水距平百分率更准确。

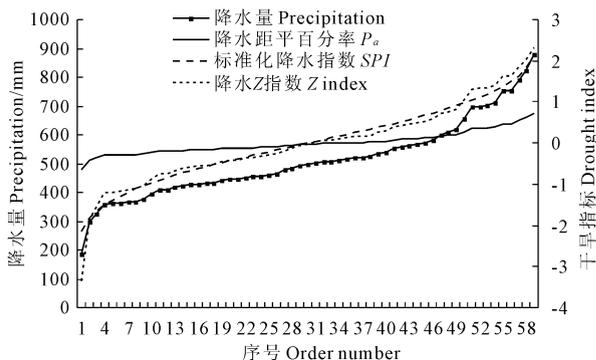


图 2 三种干旱指标与降水升序序列

Fig.2 Three drought indices and precipitation in ascending order

2.2 三种干旱指标对于干旱等级判定的对比

评价干旱指标优劣的最主要标准是对研究区域

干旱程度判定的准确性。降水距平百分率、标准化降水指数 *SPI*、降水 *Z* 指数都很好体现了降水趋势,但最终决定这三种指标是否适用于灌区的关键还是对于干旱程度的正确判定。

将三种干旱指标按照表 1 的标准划分干旱等级(见图 3)。就年尺度而言,降水距平百分率、*SPI* 和降水 *Z* 指数对于干旱出现年份的判定结果一致。在干旱的等级判定方面,降水距平百分率判定为轻旱的 15 年中,*SPI* 和降水 *Z* 指数对于 1969、1986、1993、2000、2006、2008 年的干旱程度的判定都比降水距平百分率高。*SPI* 和降水 *Z* 指数对于干旱响应速度一致,对于干旱程度的判定在 1977、2000、2001 年有差异。

表 2 降水量及三种干旱指标升序排列拟合方程及拐点

Table 2 Fitting equations and inflexions for precipitation and three drought indices in ascending order

降水及干旱指标 Precipitation and drought index	拟合方程 Fitting equation	相关系数 Correlation coefficient	拐点 Inflexion
降水 Precipitation	$y = 0.0081x^3 - 0.639x^2 + 19.89x + 248.36$	0.9875	$X_0 = 26.30$
降水距平百分率 Percentage of precipitation anomaly (P_a)	$y = 2 \times 10^{-5}x^3 - 0.0012x^2 + 0.0388x - 0.5155$	0.9857	$X_0 = 20.00$
标准化降水指数 Standard precipitation index	$y = 4 \times 10^{-5}x^3 - 0.0033x^2 + 0.1353x - 2.0563$	0.9967	$X_0 = 27.50$
降水 <i>Z</i> 指数 <i>Z</i> index	$y = 6 \times 10^{-5}x^3 - 0.0055x^2 + 0.1837x - 2.3124$	0.9630	$X_0 = 30.56$

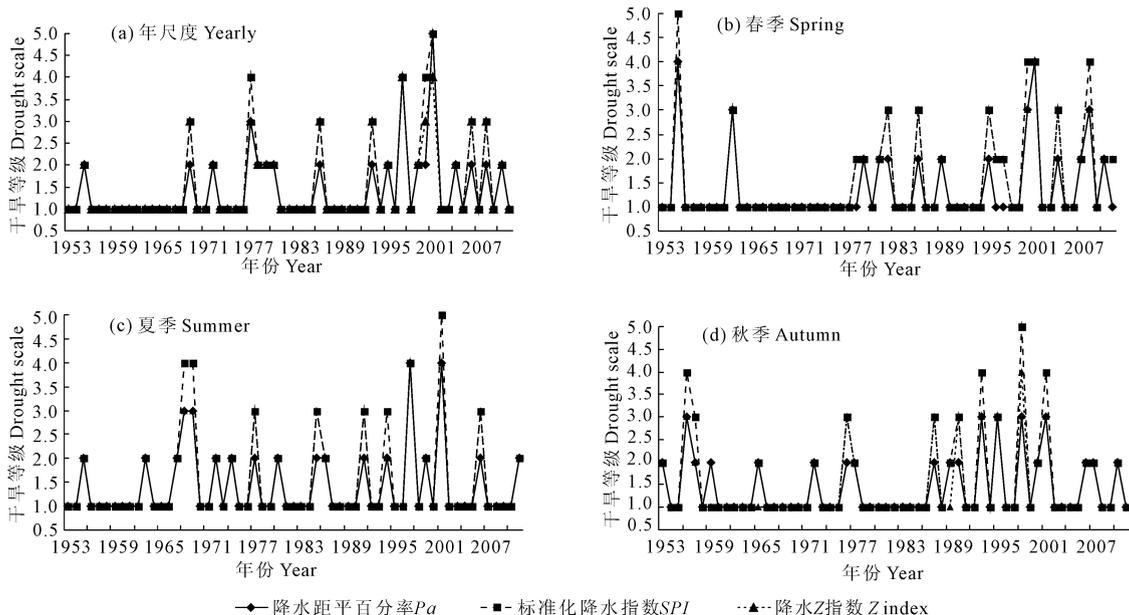


图 3 三种指标对不同时间尺度干旱等级划分的比较

Fig.3 Comparison of drought grade evaluated by three indices at different time scales

降水距平百分率、*SPI*、降水 *Z* 指数在计算时只考虑了降水,对于干旱程度判定的准确性必须结合实际情况进行分析。将上述结果与《中国气象灾害

大典:陕西卷》^[14]有记载的年份对比,如果以三者均判定为轻旱的 1962—1967 年的旱情作为标准,记载中 1969、1986、1993、2000 年干旱的持续时间更长,多

涉及灌区粮食作物的主要生育期,影响更大。因此,认定 *SPI* 和 *Z* 指数的判定比较合理。对于 1977、2000 年的干旱程度判定, *SPI* 都比 *Z* 指数高一级,结合历史资料分析,这种差异是由于二者的划分标准产生的。*SPI* 对于干旱等级的划分比 *Z* 指数细致,在判定中度干旱以上的情况时更具有优势。

根据资料记载^[14-15],关中平原 1955 年 1—5 月发生了重旱,导致夏粮减产了 1.5 成左右。从三种指标年尺度的判定结果来看仅发生了轻旱,显然与实际情况不符。参考三者春、夏、秋季的干旱等级判定,降水距平百分率和降水 *Z* 指数春季判定为重旱,夏季轻旱, *SPI* 春季判定为特旱,夏季为轻旱,结果与实际较为符合。这一现象的产生是由于三种指标对于年尺度干旱的判定均没有考虑降水的年内分布,在年际降水总体较高而年内分布异常的情况下会出现判定不准确的情况。

综上所述,降水距平百分率在判定干旱程度方面总体弱于 *SPI* 和降水 *Z* 指数,究其原因仍然是该指标对于降水平均值的依赖性。与降水距平百分率相比, *SPI* 和降水 *Z* 指数考虑到了降水的分布特征,计算时也仅需要降水资料,对于干旱出现时间的敏感性较好,二者在降水趋势分析和干旱判定中表现基本一致, *SPI* 划分细致的干旱等级在实际应用中比 *Z* 指数更具优势。

2.3 泾惠渠灌区干旱演变特征

采用年尺度 *SPI* 对灌区进行干旱演变特征分析。以 5 年作为滑动步长,对灌区 1953—2011 年的 *SPI* 值进行滑动趋势分析,结果见图 4。在 59 年的研究期内, *SPI* 趋势曲线呈现出 6 个波动周期,平均周期为 10 年。每个周期的波峰值较为接近,波谷值逐渐减小,且 *SPI* 在波动中呈现出整体递减的趋势。依据 *SPI* 趋势分析的结果,以 10 年作为一个周期统计灌区干旱情况(见表 3)。59 年内灌区共发生过 18 次干旱,轻旱 9 次,中旱 5 次,重旱 3 次,极旱 1 次。在第一个周期内,仅发生了 1 次轻旱,而接下来的几个周期内,干旱发生的次数以及等级都在逐渐提高。最近的两个周期发生的干旱次数达到了总干旱数的 55.6%,并且涵盖了干旱的所有等级。从灌区常发生干旱的春、夏、秋三季来看,干旱情况的变化趋势与年尺度的一致,发生的频率和等级都有显著提高。由此可见,泾惠渠灌区的干旱现象具有周期性波动的特性,并且朝着日趋干旱的方向发展,这种趋势在进入 20 世纪 90 年代后更加明显。

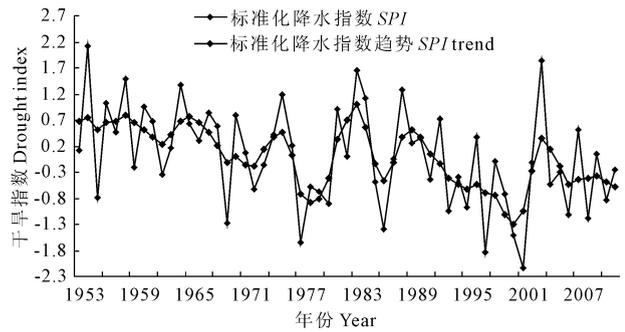


图 4 标准化降水指数趋势分析

Fig.4 Trend analysis of *SPI*

表 3 各周期干旱情况统计

Table 3 Drought distribution in various periods

年份 Year	干旱发生频率/% Drought occurrence frequency			
	轻旱 Slight drought	中旱 Moderate drought	重旱 Heavy drought	极旱 Extreme drought
1953—1962	10	0	0	0
1963—1972	10	10	0	0
1973—1982	30	0	10	0
1983—1992	0	10	0	0
1993—2002	20	10	20	10
2003—2011	20	20	0	0

3 结 论

在旱灾频发的今天,正确认识 and 了解干旱的发展情况十分重要。由于干旱产生机理复杂、影响因素广泛,到目前为止关于各种指标的地域和时间的适用性仍然没有统一的结论。本研究将降水距平百分率、*SPI* 和降水 *Z* 指数在泾惠渠灌区进行应用比较,得到了以下结论:

1) 降水距平百分率、*SPI* 和降水 *Z* 指数与灌区年际降水的变化趋势具有较好的一致性, *SPI* 对于降水的变化反映最准确,降水 *Z* 指数次之,降水距平百分率对于降水变化的响应具有不稳定性。

2) 在评价干旱情况的应用中,降水距平百分率对于干旱的出现不及其他两种指标敏感,对于干旱程度的判定也偏轻;降水距平百分率、*SPI* 和降水 *Z* 指数在判定干旱出现的年份上完全一致, *SPI* 在划分干旱程度上比 *Z* 指数更细致。降水距平百分率、*SPI*、*Z* 指数在进行具体的干旱分析时结合多时间尺度会更准确。

3) *SPI* 的滑动趋势分析显示泾惠渠灌区的干旱在研究期内具有 6 个周期,统计各周期内干旱发生次数及等级,结果表明在进入 20 世纪 90 年代后

干旱发生频繁,强度也在提高,灌区呈现出旱化的趋势。

在泾惠渠灌区的干旱分析中,*SPI*与降水距平百分率和降水*Z*指数的比较中显示了较好的适用性,对于灌区干旱演变特征的分析结果与刘招等^[16]采用Palmer旱度模式分析灌区干旱情况时得到的结论基本一致。因此,*SPI*对于灌区正确认识干旱,采取合理措施抗旱具有理论指导作用。*SPI*计算仅需降水资料,计算简单,算法稳定性好^[17],可以结合多时间尺度进行干旱分析,优点鲜明。但也有研究指出*SPI*在定义降水量极小的较小时间尺度的干旱时具有局限性^[18]。此外,干旱的影响因素涵盖了温度、蒸发、土壤水分亏缺、地下水供给等多个方面,虽然降水在这些因素中作用突出,但是这些因素是相互影响而不是各自独立的^[19]。因此,使用*SPI*仅从降水这一角度来分析灌区干旱还是具有一定局限性的。如何将多种因素科学地结合在干旱指标中,建立起统一规范的评价系统是未来准确评价干旱的关键。

参考文献:

- [1] 王春乙.中国重大农业气象灾害研究[M].北京:气象出版社,2010.
- [2] 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.
- [3] 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):655-663.
- [4] 王密侠,马成军,蔡焕杰.农业干旱指标研究与进展[J].旱地区农业研究,1998,16(3):119-124.
- [5] Quiring S M, Papakryiakou T N. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003,113:49-62.
- [6] 付丽娟,曹杰,德勒格日玛.三种气象干旱指标在内蒙古地区的适用性分析[J].干旱区资源与环境,2013,27(2):108-113.
- [7] 袁云,李栋梁,安迪.基于标准化降水指数的中国冬季旱分区及气候特征[J].中国沙漠,2010,30(4):917-925.
- [8] 王宏,余锦华,李宗涛,等.基于*Z*指数的河北省旱涝多尺度变化特征[J].气象与环境学报,2012,28(1):43-47.
- [9] 赵丽,冯宝平,张书花.国内外干旱及干旱指标研究进展[J].江苏农业科学,2012,40(8):345-348.
- [10] 郭兆夏,李星敏,朱琳,等.基于GIS的陕西省年降水量空间分布特征分析[J].中国农业气象,2010,31(增1):121-123.
- [11] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近58a演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59.
- [12] 国家气候中心.GB/T20481-2006.气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [13] 张书余.干旱气象学[M].北京:气象出版社,2008:76-77.
- [14] 温克刚,翟佑安.中国气象灾害大典:陕西卷[M].北京:气象出版社,2005:28-41.
- [15] 中央气象局气象科学研究所.中国近五百年旱涝分布图集[M].北京:地图出版社,1981:247-320.
- [16] 刘招,燕爱玲,乔长录.Palmer旱度模式在渭北旱塬泾惠渠灌区的应用研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):259-264.
- [17] 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.
- [18] 翟禄新,冯起.基于*SPI*的西北地区气候干湿变化[J].自然资源学报,2011,26(5):847-857.
- [19] Hi-Ryong Byun, Wilhite D A. Objective quantification of drought severity and duration[J]. Journal of Climate, 1999,12:2747-2756.

(上接第106页)

- [7] 王朝云,许香春,易永健,等.麻地膜覆盖对作物生长发育和产量影响的研究[J].中国麻业科学,2009,(3):191-197.
- [8] 赵燕,李淑芬,吴杏红,等.我国可降解地膜的应用现状及发展趋势[J].现代农业科技,2010,(23):105-107.
- [9] 于瑞德.造林生物降解膜节水种植方法:中国,CN101554129[P].2009-10-14.
- [10] 于瑞德.一种生物降解地膜:中国,CN102475046A[P].2012-05-30.
- [11] 沈新民.吐鲁番无核白葡萄常规栽培[J].中国林业,2008,(18):60-60.
- [12] 白云岗,董新光,张江辉,等.无核白葡萄叶面积及一年生枝条干物质质量简易测定方法研究[J].新疆农业科学,2010,09:1744-1748.
- [13] 张建兵,熊黑钢,李宝富,等.干旱区农田土壤水分地温变化规律及其相互关系[J].干旱地区农业研究,2013,02:127-133.
- [14] 周永浩,李向福.可降解地膜覆盖抗旱造林在生态建设中的作用[J].中国西部科技,2009,7(36):63.
- [15] 张永明.可降解地膜覆盖玉米试验[J].甘肃农业,2006,(01):207.
- [16] 何建斌,王振华,何新林,等.极端干旱区不同灌水量对滴灌葡萄生长及产量的影响[J].农学学报,2013,2:65-69.
- [17] 蒋端生.南岳森林土壤的研究. I. 基本特点和土壤紧实度[J].湖南林专学报,1995,01:44-50.
- [18] 赵超.不同海拔毛竹林土壤特征及肥力评价的研究[D].北京:北京林业大学,2011.