

3 种干旱指数在宁夏中部干旱带的适用性分析

关 静¹, 梁 川¹, 赵 璐^{1,2}, 崔宁博^{1,2}, 王春懿¹

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室

水利水电学院, 成都 610065; 2. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066)

摘 要:利用宁夏中部干旱带盐池、中宁、同心、海原 4 个站点 1960—2015 年共 56 年的气候资料月值数据, 计算了各个站点春、夏、秋、冬及作物生长季的标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)和 K 干旱指数, 并比较了 3 种干旱指数的评估结果。结果表明: (1) 除冬季外, 3 种干旱指数在其他时间尺度上相关性均较好, SPI 和 SPEI, SPEI 和 K 指数在冬季的相关性较差。 (2) 春、夏及作物生长季, SPEI 和 K 指数判别的干旱情况较接近, SPI 判别的干旱程度略轻; 秋冬两季, K 指数判别的干旱程度最高, SPEI 判别的干旱程度最轻。 (3) 4 个站点春、夏、秋、冬及作物生长季的 SPI、SPEI 和 K 指数序列 M-K 法趋势分析结果相似, 均能表示出宁夏中部干旱带干旱的变化趋势。 (4) 结合历史旱情资料, 发现 K 指数相比于 SPI、SPEI 更能有效反映宁夏中部干旱带的干旱情况, 其评估结果基本与历史干旱事实相符。

关键词:干旱指数; 宁夏中部干旱带; 适用性; SPI 指数; SPEI 指数; K 指数

中图分类号: P462.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0122-06

Analysis of Applicability of Three Drought Indices in the Arid Area of Central Ningxia

GUAN Jing¹, LIANG Chuan¹, ZHAO Lu^{1,2}, CUI Ningbo^{1,2}, WANG Chunyi¹

(1. State Key Lab of Hydraulics and Mountain River Engineering & College of Water

Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Provincial Key

Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hilly Areas of South China, Chengdu 610066, China)

Abstract: Based on the monthly meteorological data of four meteorological stations from 1960 to 2015 of the arid area of central Ningxia, indices of SPI, SPEI, and K of spring, summer, autumn, winter and crop growing season were calculated, and the assessment results of the three drought indices were compared. The results showed that: (1) three drought indices had good correlation each other at all time scales except winter and the correlations between SPI and SPEI, between SPEI and K index were poor in winter; (2) indices of SPEI and K were relatively similar in identification of drought in spring, summer and crop growing season, and K index had the highest degree of drought assessment in autumn and winter, followed by indices of SPI and SPEI; (3) M-K trend analysis results from the three drought indices were similar, which can indicate the trend of drought in the arid area of central Ningxia; (4) K index was more effective than SPI and SPEI, and its assessment results were basically consistent with historical drought facts.

Keywords: drought index; the arid area in central Ningxia; applicability; SPI; SPEI; K index

宁夏地处西北地区东部, 属干旱、半干旱地区, 是气候变化的敏感区, 也是生态环境极其脆弱的地区^[1]。一直以来, 干旱都是困扰宁夏中部干旱带农业生产及经济发展的重要因素^[2]。干旱指数是研究干旱气候的基础, 也是衡量干旱程度的关键环节^[3]。选用合理有效的干旱指数将能更加准确地反映干旱过程。

目前, 干旱研究中, 选取的干旱指数通常有降水

量距平百分率指数(Pa)^[4], z 指数^[5], 干燥度指数(AD)^[6], 相对湿润度指数(M)^[7], 帕尔默干旱指数(PDSI)^[8], 标准化降水指数(SPI)^[9], 标准化降水蒸散指数(SPEI)^[10], K 指数^[3]等等。其中, SPI 是世界气象组织(World Meteorological Organization)推荐使用的干旱指数, 计算简单, 对降水比较敏感, 但未考虑其他可能会影响干旱的变量, 如蒸发蒸腾、风速等;

西班牙学者 Vicente—Serrano^[11-12] 通过在 SPI 中引入蒸散发,提出了标准化降水蒸散指数(SPEI);K 指数由王劲松等^[3,13-14] 提出,并在西北地区干旱分析中得到了应用。目前,SPI、SPEI 和 K 指数这 3 种干旱指数均得到了广泛的应用。马国飞等^[15] 采用 SPI 分析了宁夏山区干旱演变特征,结果表明宁夏山区年季干旱强度呈现降低趋势,但干旱发生频率和干旱面积增加;赵兴凯等^[16] 通过计算 SPI 和 SPEI 分析陕北吴起县 1957—2014 年的降水和气温,发现两指数均能较准确反映吴起县气候特征;王劲松等^[3] 采用 K 指数对西北地区春旱进行分析,发现 K 指数对西北地区的干旱监测有较好的效果;王素艳等^[2] 分析了 Pa、K、SPI、PDSI 和 CI 这几种干旱指数与宁夏实况干旱等级差异,发现 K 指数和 CI 综合干旱指数评估效果较好,但需进一步改进以适宜宁夏应用。

尽管目前已有很多关于干旱指数的研究,但很少有学者专门针对宁夏中部干旱带进行干旱指数的适用性研究,本文拟采用在宁夏及西北地区应用较好的 SPI、SPEI 和 K 指数对宁夏中部干旱带的干旱情况进行适用性分析,得出一种更适合宁夏中部干旱带干旱监测的干旱指数。

1 研究区域及数据

1.1 研究区概况

宁夏位于我国大陆的西北腹地,居黄河中游上段,位于北纬 35°14'—39°23',东经 104°17'—107°39',与甘肃、内蒙古、陕西等省毗邻。全区水资源总量 11.633 亿 m³,人均占有量 190 m³,是全国平均值的 1/12。中部干旱带主要是指年降水 200~400 mm 之间的干旱区,主要包括红寺堡、同心县、盐池县和海原县全部,以及中卫市、中宁县、灵武市、青铜峡市吴忠市利通区的山区部分,总面积为 3.51 万 km²,总人口 131.34 万人。

中部干旱带地处黄土高原和鄂尔多斯台地东部,地势南高北低,东高西低,地貌类型南部以黄土丘陵沟壑区为主,北部为丘陵台地,海拔高程 1 300~2 400 m,自南向北由中温带半干旱区向干旱区过渡,有明显的大陆性气候特征。降水时空分布不均,多集中在 7—9 月,约占全年总降水量的 60%~70%,并多以暴雨、冰雹等灾害形式出现。干旱带年平均气温 6.3℃,最高气温出现在 7 月,极端最高温度 41.4℃,极端低温天气 -29.6℃。年辐射热平均 594.5 kJ/cm²,日照时数 2 750~3 000 h^[17]。

根据宁夏中部干旱地形地貌及气象资料的完整性,特选取盐池、中宁、海原、同心 4 个代表站点,站点的地理描述见表 1。

表 1 宁夏中部干旱带气象站点地理描述

站点名称	纬度/(°)	经度/(°)	海拔高度/m
盐池	37.80	107.38	1349.3
中宁	37.48	105.68	1183.4
海原	36.57	105.65	1854.2
同心	37.00	105.90	1339.3

1.2 数据来源

研究区内盐池、中宁、同心、海原 4 个国家基本气象站 1960—2015 年的气候资料月值数据来自中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn/site/index.html>),包括降水量(P)、平均温度(T)、最低温度(T_{min})、最高温度(T_{max})、相对湿度(RH)、日照时数(n)和平均风速(u),以及站点的经纬度及海拔高度。对少量缺失数据采用平均值法以及相邻站点插值法予以插值。

2 方法

2.1 3 种指数的计算

2.1.1 SPI SPI 采用 Γ 分布概率来描述降水量的变化,将偏态概率分布的降水量进行正态标准化处理,最终用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级^[9]。SPI 可用公式(1)求得:

SPI=S \frac{t-(c_2t+c_1)+c_0}{((d_3t+d_2)t+d_1)t+1.0} \tag{1}

式中:t=√ln \frac{1}{G(x)^2}, G(x) 是与 Γ 函数相关的降水分布概率;x 是降水量样本值;S 是概率密度正负系数。当 G(x)>0.5 时,G(x)=1.0-G(x),S=1;当 G(x)≤0.5 时,S=-1。G(x) 由以下 Γ 函数概率密度积分公式得到

G(x)=\frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)}\int_0^x x^{\alpha-1}e^{-x/\beta}dx \quad x>0 \tag{2}

式中:α>0,β>0 分别为 Γ 函数的形状参数和尺度参数,最佳的 α,β 估计值可用极大似然估计的方法求得;c₀,c₁,c₂ 和 d₁,d₂,d₃ 是 Γ 函数转换为累积频率简化近似求解公式的计算参数,其取值如下:c₀=2.515 517,c₁=0.802 853,c₂=0.010 328,d₁=1.432 788,d₂=0.189 269,d₃=0.001 308。

2.1.2 SPEI 标准化降水蒸散指数(SPEI)是通过在 SPI 中引入蒸散发,计算降水量与蒸散量的差值并进行正态标准化处理得到的^[16],本文采用 FAO-56 Penman-Monteith 公式计算所得潜在蒸发量 ET₀代替实际蒸发量 E 进行计算。

(1) 首先采用 FAO—56 Penman-Monteith^[18] 公式计算 ET₀。

ET_0=ET_{0rad}+ET_{0aero}=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{237+T}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \tag{3}

式中:ET₀ 为参考作物蒸发蒸腾量(mm/d);ET_{0rad} 为辐射项(mm/d);ET_{0aero} 为空气动力学项(mm/d);R_n 为净辐射[(MJ/(m²·d))];G 为土壤热通量[(MJ/(m²·d))];T 为平均气温(℃);e_s 为饱和水气压(Kpa);e_a 为实际水气压(Kpa);Δ 为饱和水气压—温度曲线斜率(KPa/℃);γ 为湿度计常数(KPa/℃);u₂ 为距地面 2 m 高处的风速(m/s)。

则蒸发量月值 PET_j = NDM × ET₀, 其中 NDM 为各月天数;月水分亏缺量 D_j = P_j - PET_j, 其中 P_j 为月降水量, PET_j 为月蒸发量。

(2) 构造不同时间尺度的累积水分亏缺量序列

$$D_{i,j}^k = \begin{cases} \sum_{l=13-k+j}^{12} D_{i-1,l} + \sum_{l=1}^j D_{i-1,l} & j < k \\ \sum_{l=j-k+1}^{12} D_{i-1,l} & j \geq k \end{cases} \quad (4)$$

式中:k 代表了不同的时间尺度。

(3) 引入三参数 log-logistic 概率分布函数计算累积水分亏缺量序列的概率分布

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right) \left[1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha} \right) \right]^{-2} \quad (5)$$

式中:γ 为 Γ 函数位置参数,可用极大似然估计的方法求得。

三参数 log-logistic 概率分布函数为

$$F(x) = [1 + (\frac{x-\gamma}{\alpha})^\beta]^{-1} \quad (6)$$

(4) 对各月累积水分亏缺量序列的概率分布 F(x) 进行标准正态分布转换,得 SPEI 计算值

$$SPEI = \begin{cases} \frac{w - \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3}}{\frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} - w} & 1 - F(x) \leq 0.5 \\ \frac{c_0 + c_1 w + c_2 w^2}{1 + d_1 w + d_2 w^2 + d_3 w^3} - w & 1 - F(x) > 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $w = \begin{cases} \sqrt{-2\ln(1-F(x))} & 1 - F(x) \leq 0.5 \\ \sqrt{-2\ln F(x)} & 1 - F(x) > 0.5 \end{cases}$

2.1.3 K 指数 K 指数用降水变率和蒸发变率的比值来描述干旱^[2,13-14],用公式(8)求得

$$K = P' - E' \quad (8)$$

式中:P' 为所计算时段降水量的相对变率, P' = P/ \bar{P} ; P 为该时段的降水量; \bar{P} 为该时段降水量的平均值; E' 为所计算时段蒸发量的相对变率; E' = E/ \bar{E} , 其中, E 为该时段的蒸发量; \bar{E} 为该时段蒸发量的平均值; K 即为所计算时段的 K 指数。从式(8)可见,当降水相对变率越小、蒸发相对变率越大时, K 值越小,干旱越严重;当降水相对变率越大、蒸发相对变率越小时, K 值越大,干旱就不明显。

2.2 干旱等级划分标准

参考国家标准《气象干旱等级》^[19]中提出的干旱分级指标, SPI、SPEI 和 K 指数的干旱等级划分见表 2。

表 2 SPI、SPEI 和 K 指数的干旱等级划分

干旱类型	SPI/SPEI	K 指数
无旱	SPI>-0.5	K>1.5
轻旱	-1.0<SPI≤-0.5	1.0<K≤1.5
中旱	-1.5<SPI≤-1.0	0.5<K≤1.0
重旱	-2.0<SPI≤-1.5	0.2<K≤0.5
特旱	SPI≤-2.0	K≤0.2

2.3 Mann-kendall 检验法

在时间序列趋势分析中, Mann-Kendall 检验^[20]是 WMO 推荐并已广泛使用的非参数检验方法。Mann-Kendall 检验不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于水文、气象等非正态分布的数据,计算简便。本文采用 Mann-kendall 检验法对降水和蒸发的时间序列进行趋势分析和突变分析。

3 结果与分析

3.1 P 和 ET₀ 的年际变化趋势分析及突变检验

通过对 4 个站点 P 和 ET₀ 进行比较,发现中宁站 P(205 mm)最少,海原站 P(376 m)最多,后者较前者增加了约 83%;海原站 ET₀(1071 mm)最少,同心站 ET₀(1179 mm)最多,后者较前者增加了约 10%。可见,宁夏中部干旱带 4 个站点的 P 差异较大, ET₀ 相对稳定。通过对 4 个站点的 P 和 ET₀ 的 M-K 趋势检验,发现除了盐池的 P 有增加趋势外,其他 3 个站点的 P 均呈减少趋势;盐池和海原的 ET₀ 有减少趋势,同心和中宁的 ET₀ 均呈增加趋势,且增加趋势通过了 95% 的显著检验。总的来说,宁夏中部干旱带 P 减少, ET₀ 增加,干旱呈加重的趋势。

用 4 个站点 P 和 ET₀ 的平均值代表宁夏中部干旱带的 P 和 ET₀。可见宁夏中部干旱带 P 和 ET₀ 的年际变化曲线及 M-K 突变检验结果见图 1—4,图 2 和图 4 中二水平虚线代表置信度为 95%, UF(K) 为顺序时间序列统计曲线, UB(K) 为逆序时间序列统计曲线。由图 1 可知,宁夏中部干旱带 P 多年平均值为 285 mm,波动范围为 149~543 mm,最大、最小值分别出现在 1964 年(543 mm)和 1982 年(149 mm);1960—2015 年, P 随时间呈减少趋势,倾向率为 -5 mm/10 a,无明显波动。由图 2 可以看出,宁夏中部干旱带 P 无显著突变点。

由图 3 可知,宁夏中部干旱带 ET₀ 多年平均值为 1 132 mm,波动范围为 1 002~1 247 mm,最大、最小值分别出现在 1997 年(1 247 mm)和 1967 年(1 002 mm);1960—2015 年, ET₀ 随时间呈增加趋势,倾向率为 5 mm/10 a,在 2000 年左右有较大起伏。由图 4 可知,1960—1970 年宁夏中部干旱带 ET₀ 呈小幅减少模式,

1971 年之后开始增加,2000—2008 年增幅达显著水平($p<0.05$)。其中, ET_0 突变开始于 1969 年。

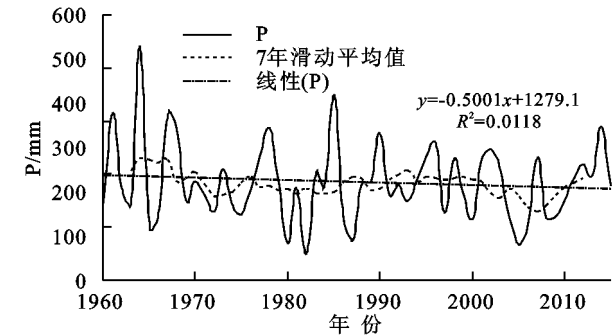


图 1 宁夏中部干旱带年降水量年际变化

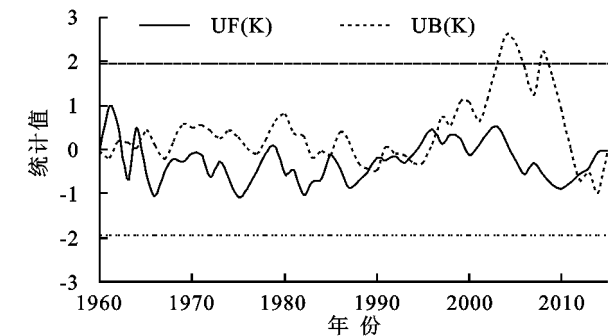


图 2 宁夏中部干旱带年降水量 Mann-Kendall 突变检验

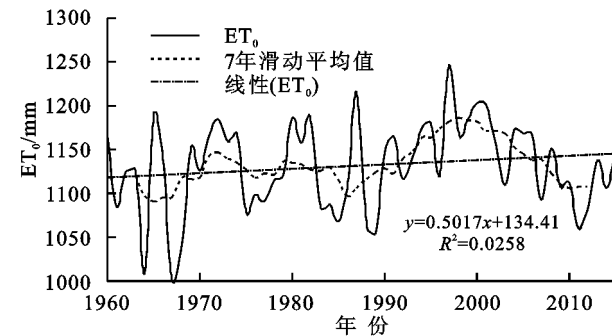


图 3 宁夏中部干旱带年蒸发量年际变化

3.2 3 种干旱指数的对比分析

每年的 3—10 月是宁夏农作物生长发育和产量形成的关键时期^[17],故这个时间段的干旱情况尤为重要。所以本文在时间尺度上划分为春、夏、秋、冬及作物生长季(3—10 月)对宁夏中部干旱带的干旱情况进行评估。

3.2.1 3 种干旱指数在不同时间尺度的相关性分析

为了衡量 3 种干旱指数之间的相关性,计算 3 种干旱指数在宁夏中部干旱带不同时间尺度的相关系数(表 3)。可以看出,SPI 和 SPEI 之间的相关系数除了冬季为 0.2915 以外,其他时间尺度的相关系数均在 0.9~0.95;SPI 和 K 指数之间的相关系数除了冬季为 0.848 3 以外,其他时间尺度的相关系数均在 0.95 以上;SPEI 和 K 指数之间的相关系数除了冬季为 0.402 4 以外,其他时间尺度的相关系数均在 0.95

以上。由此可见,除冬季外,3 种干旱指数在其他时间尺度上的相关系数均比较高。

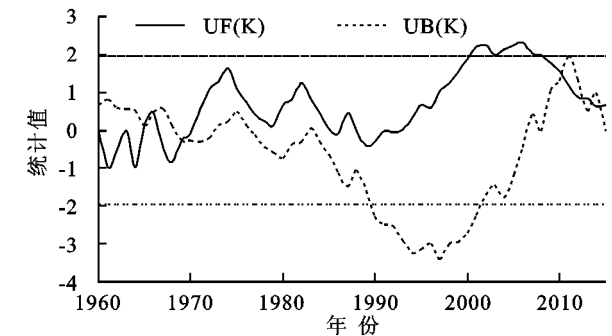


图 4 宁夏中部干旱带年蒸发量年际变化

表 3 3 种干旱指数在不同时间尺度上的相关系数

时间尺度	SPI 和 SPEI	SPI 和 K 指数	SPEI 和 K 指数
春	0.9086 **	0.9535 **	0.9637 **
夏	0.9400 **	0.9804 **	0.9866 **
秋	0.9389 **	0.9560 **	0.9787 **
冬	0.2915 *	0.8483 **	0.4024 **
作物生长季	0.9418 **	0.9787 **	0.9817 **

注: * 表示相关性通过了 95% 的显著性检验; ** 表示相关性通过了 99% 的显著性检验。

3.2.2 3 种干旱指数在不同时间尺度的干旱频率及干旱程度比较 为了比较 SPI、SPEI 和 K 指数对干旱发生评定的差异性,分别计算这 3 种干旱指数在宁夏中部干旱带不同时间尺度的干旱频率,见表 4。由表 4 可以看出,夏、春及作物生长季,SPEI 和 K 指数判别的干旱情况比较接近,SPI 判别的干旱程度略轻,发生的干旱类型主要为轻旱和中旱;秋季和冬季,3 种指数判别的干旱情况差异较大,其中 K 指数判别的干旱程度最高,其次是 SPI、SPEI 判别的干旱程度最轻。可见,K 指数对干旱强度判别的敏感性最强。根据中国气象灾害大典·宁夏卷^[21]记载,宁夏中部干旱带春季大风扬沙天气频繁,每年都发生有不同程度的春旱,SPEI 和 K 指数对春季干旱判别结果中轻旱及轻旱以上发生频率超过 80%,而 SPI 判别结果仅为 30%,由此可以看出 SPEI 和 K 指数比 SPI 更适合宁夏中部干旱带春季的干旱监测。

为进一步了解 SPI、SPEI 和 K 干旱指数对宁夏中部干旱带干旱等级的判别差异,本文分析了这 3 种干旱指数在不同时间尺度的干旱等级差异年数,得出以下结论:春、夏及作物生长季主要表现为 SPEI 和 K 指数判别干旱等级比 SPI 高一级;秋冬季节主要表现为 SPI 和 K 指数判别干旱等级比 SPEI 高;总的来说,K 指数判别的干旱等级比 SPI 和 SPEI 高。

表 4 3 种干旱指数在不同时间尺度的干旱频率

时间 尺度	干旱 类型	轻旱	中旱	重旱	特旱	轻旱及 以上
春	SPI	14	13	0	4	30
	SPEI	45	36	2	0	82
	K	29	39	14	4	86
夏	SPI	20	11	4	2	36
	SPEI	32	32	20	0	84
	K	41	45	5	0	91
秋	SPI	18	5	4	5	32
	SPEI	2	0	0	0	2
	K	27	41	13	0	80
冬	SPI	11	4	5	4	24
	SPEI	0	0	0	0	0
	K	16	16	7	6	45
作物生长季	SPI	23	4	5	2	34
	SPEI	30	29	16	7	82
	K	41	50	2	0	93

3.2.3 3 种干旱指数在不同时间尺度的趋势分析 对宁夏中部干旱带 4 个站点在不同时间尺度的 SPI、SPEI 和 K 指数序列进行 M-K 法趋势分析,分析这 3 种指数的变化趋势。干旱指数序列若有增加趋势,则表明该区有逐渐变湿的趋势;干旱指数序列若有减小趋势,则表明该区有干旱化的趋势。由表 5 可以看出,4 个站点在不同时间尺度的 SPI、SPEI 和 K 指数序列的 M-K 法趋势分析结果相似,均能反映宁夏中部干旱带在不同时间尺度干旱的变化趋势。春季,4 个站点的 SPI、SPEI 和 K 指数均有减小趋势,说明春早有增加的趋势,其中中宁站的 SPEI,同心县的 SPEI 和 K 指数有显著的减小趋势。夏季,盐池、海源和同心站的 SPI、SPEI 和 K 指数均有不显著的增加趋势,说明这 3 个站点的夏早有减少的趋势;中宁站的 SPI、SPEI 和 K 指数均有不显著的减小趋势,说明中宁的夏早有增加趋势。秋季,4 个站点的 SPI、SPEI 和 K 指数均有不显著的减小趋势,说明秋早有增加趋势。冬季,盐池和中宁站的 SPI 和 K 指数有减小趋势,而 SPEI 有增加趋势;海原站 SPI、SPEI 和 K 指数均有增加趋势;同心站 SPI、SPEI 和 K 指数均有减小趋势。作物生长季,盐池站的 SPI、SPEI 和 K 指数均有增加趋势,另外 3 个站点的 SPI、SPEI 和 K 指数均有减小的趋势,其中中宁站的 SPEI 值有显著减小的趋势。

3.2.4 3 种干旱指数的适用性验证 现将 SPI、SPEI 和 K 指数对宁夏中部干旱带干旱的监测情况与当地历史灾情资料^[21-22]联系起来,对 3 种干旱指数在宁夏中部干旱带的适用性进行验证。相关文献记载,1982 年,是历史上少见的干旱严重年份,出现春、夏、秋连旱;1987 年,全区各地 P 比常年平均值少 1~5 成,除 6 月偏多外,其余 11 个月均比常年少,出

现冬、春、夏、秋连旱,是 1949 年以来第 3 个大旱年;2009 年 3 月至 7 月末期,发生严重春、夏连旱。

表 5 3 种干旱指数在不同时间尺度的趋势分析

时间 尺度	干旱 指数	盐池	中宁	同心	海原
春	SPI	-0.52	-0.46	-1.46	-0.81
	SPEI	-0.63	-2.01*	-2.13*	-0.49
	K	-0.54	-0.63	-1.68*	-0.47
夏	SPI	0.15	-0.49	0.19	0.04
	SPEI	0.67	-1.49	0.09	0.54
	K	0.35	-0.86	0.11	0.40
秋	SPI	-0.42	-0.43	-1.53	-1.04
	SPEI	-0.29	-1.12	-1.63	-0.76
	K	-0.37	-0.64	-1.63	-0.95
冬	SPI	0.58	1.46	-0.02	2.10*
	SPEI	-0.14	-1.45	-1.84*	1.50
	K	0.24	1.12	-0.34	2.26*
作物 生长季	SPI	0.69	-0.52	-0.52	-0.75
	SPEI	1.01	-1.92*	-0.83	-0.02
	K	0.90	-0.81	-0.69	-0.33

注:* 表示通过了 95% 的显著性检验。

以盐池站为例,1982 年,春季 P 偏少 39%,ET₀ 偏多 5%,夏季 P 偏少 56%,ET₀ 偏多 9%,秋季 P 偏少 19%,ET₀ 偏少 3%,SPI 在春、夏、秋季的监测结果为无旱、重旱、无旱,SPEI 监测结果为中旱、重旱、无旱,K 指数监测结果为中旱、重旱、中旱,显然 K 指数监测结果更符合历史事实,SPEI 在春夏两季监测结果较好,秋季监测结果过轻;1987 年,冬季 P 偏多 7%,ET₀ 偏多 10%,春季 P 偏少 49%,ET₀ 偏多 5%,夏季 P 偏少 17%,ET₀ 偏多 5%,秋季 P 偏少 46%,ET₀ 偏多 10%,SPI 在冬、春、夏、秋季的监测结果为无旱、中旱、无旱、轻旱,SPEI 监测结果为无旱、中旱、中旱、无旱,K 指数监测结果为中旱、重旱、中旱、重旱,可以看出 K 指数监测结果更符合历史事实,SPI 和 SPEI 指数监测结果过轻;2009 年,春季 P 偏少 33%,ET₀ 偏多 1%,夏季 P 偏多 22%,ET₀ 偏少 5%,SPI 在春、夏季的监测结果均为无旱,SPEI 监测结果均为轻旱,K 指数监测结果为中旱、轻旱,可见 K 指数和 SPEI 监测结果更符合历史事实,SPI 监测结果过轻。

表 6 宁夏中部干旱带不同时间尺度 P 和 ET₀ 等统计参数

项目	春	夏	秋	冬	作物生长季
P/mm	52	158	70	6	273
ET ₀ /mm	342	472	219	99	987
(P-ET ₀)/mm	-290	-314	-149	-93	-714

以上分析表明,SPI 是对某一时间尺度(比如 1 月、3 月、6 月)的累计降水量进行正态标准化得到的,对 P 比较敏感,适合多尺度多空间比较,但是宁夏中部干旱带 P 年内分配很不均匀,所以其对春、夏、秋、冬及作物生长

季的评估效果略差;SPEI 是通过计算某一时间尺度 P 与 ET_0 的差值并进行正态标准化处理得到的,但是本文中通过 FAO-56 Penman-Monteith 公式计算所得 ET_0 基本为 P 的 3~10 倍(表 6), P 与 ET_0 的差值主要由 ET_0 来决定,如此进行干旱评估有些放大 ET_0 在干旱中的作用,故 SPEI 并不适合宁夏中部干旱带在各个时间尺度的干旱评估; K 指数是 P 、 ET_0 等气象要素的综合反映,能够有效反应宁夏中部干旱带的干旱情况,其评估结果基本与历史事实相符。总的来说, K 指数是 P 的相对变率与 ET_0 相对变率的比值,这相当于对指数进行了标准化,消除了由于不同时空 P 、 ET_0 量级不同而产生的影响,使得干旱标准便于统一,能够有效反应宁夏中部干旱带的干旱情况,其评估结果基本与历史干旱事实相符。

4 结论

(1) 3 种干旱指数在春、夏、秋及作物生长季对干旱发生及其等级的综合评价没有显著差异,在冬季的相关系数偏低,其中 SPI 和 SPEI、SPEI 和 K 指数在冬季的相关系数尤其低。

(2) 春、夏及作物生长季,SPEI 和 K 指数判别的干旱情况比较接近,SPI 判别的干旱程度略轻,秋季和冬季,3 种指数判别的干旱情况差异较大,其中 K 指数判别的干旱程度最高,其次是 SPI、SPEI 判别的干旱程度最轻;综合来看, K 指数对干旱强度判别的敏感性最强。

(3) 4 个站点春、夏、秋、冬及作物生长季的 SPI、SPEI 和 K 指数序列的 M-K 法趋势分析结果相似,均能表示出宁夏中部干旱带干旱的变化趋势。

(4) K 指数是 P 、 ET_0 等气象要素的综合反映,相比于 SPI、SPEI 能够有效反映宁夏中部干旱带的干旱情况,其评估结果基本与历史干旱事实相符。

本文所得出的结论与王素艳等^[2]用几种干旱指数在宁夏的应用分析结果相一致,但是本文中并未研究 K 指数是否放大了宁夏中部干旱带的干旱事实,其干旱等级划分标准是否需要修正还需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 杨建玲,冯建民,郑广芬,等.宁夏中南部地区干旱变化趋势分析[J].中国沙漠,2012,32(3):842-851.
- [2] 王素艳,郑广芬,杨洁,等.几种干旱评估指标在宁夏的应用对比分析[J].中国沙漠,2012,32(2):517-524.
- [3] 王劲松,郭江勇,倾继祖.一种 K 干旱指数在西北地区春旱分析中的应用[J].自然资源学报,2007,22(5):709-717.
- [4] 王劲松,李忆平,任余龙,等.多种干旱监测指标在黄河流域应用的比较[J].自然资源学报,2013,28(8):1337-1349.
- [5] 叶天舒,钱忠华,余锦华,等.3 种干旱指数在云南省的

适用性分析[J].扬州大学学报:自然科学版,2013(3):41-46.

- [6] 张济,杨秀春,李亚云,等.基于干燥度指数的辽西北土地风蚀荒漠化判别[J].地理研究,2011,30(12):2239-2246.
- [7] 龙贻东,梁川,景楠,等.基于云模型和相对湿度指数的干旱时空分布特征分析[J].灌溉排水学报,2015,34(8):67-71.
- [8] 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,2003,58(S):117-124.
- [9] 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 58 a 演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):50-59.
- [10] 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 a 干旱特征分析[J].自然资源学报,2014,29(4):677-688.
- [11] Vicenteserrano S M, Begueria S, Lópezmoreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [12] Vicenteserrano S M, Begueria S, Lópezmoreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset(1901-2006)of a multiscale drought index: Comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010,11(4):1033-1043.
- [13] 张天峰,王劲松,郭江勇.西北地区秋季干旱指数的变化特征[J].干旱区研究,2007,24(1):87-92.
- [14] 吴爱敏,郭江勇,王劲松.中国西北地区伏期干旱指数及干旱分析[J].干旱区研究,2007,24(2):227-233.
- [15] 马国飞,张晓煜,段晓风,等.基于标准化降水指数分析宁夏山区干旱演变特征[J].西北农业学报,2010,19(10):101-106.
- [16] 赵兴凯,李增尧,朱清科.基于 SPI 和 SPEI 陕北黄土区土壤水分对气候特征的响应[J].农业机械学报,2016,47(8):155-163.
- [17] 张凌青.宁夏中部干旱带近 30 年气候变化及其对农业的影响[D].银川:宁夏大学,2011.
- [18] Allan R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Irrigation and Drainage Paper 56,1998.
- [19] 中国气象局. GB/T20481-2006 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [20] 赵璐,崔宁博,梁川,等.基于云模型的四川省潜在蒸散量时空分布研究[J].四川大学学报工程科学版,2013,45(1):91-97.
- [21] 温克刚.中国气象灾害大典:宁夏卷[M].北京:气象出版社,2007.
- [22] 中国气象局.中国气象灾害年鉴[M].北京:气象出版社,2010.