

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0056

王洁,李王成,李晨,等.基于SPI指数的宁夏干旱特征[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):528-538. WANG J, LI W C, LI C, et al. Drought characteristics in Ningxia based on standardized precipitation index[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 528-538. (in Chinese)

基于 SPI 指数的宁夏干旱特征

王洁¹, 李王成^{1,2,3}, 李晨¹, 董亚萍¹, 赵广兴¹, 徐天渊¹, 李转¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 3. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021)

摘要:为研究宁夏干旱时空变化特征,选取1960—2018年宁夏10个国家级气象站点的气象资料,使用标准降水指数(SPI)、干旱频率、干旱强度和气候倾向率等指标进行分析,结果表明:宁夏1960—2018年降雨呈现出逐年减少趋势,而温度呈现出增加趋势;宁夏干旱持续时间长且较为频繁,年尺度干旱均呈现出减少趋势,而季节尺度上,除北部引黄灌区的夏季、中部干旱带和南部山区的夏秋两季以外,其余各研究区各季皆呈增加趋势。明确宁夏的干旱时空变化特征对该区域的旱情评估、预警及制订抗旱减灾对策具有重要意义。

关键词:气象;降水;温度;干旱;标准化降水指数

中图分类号:TV213:P429 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



干旱是由于某一地区某一时间段内的降水量低于正常年份的降水量所引起的一种极端气候现象,持续时间时短时长^[1]。近年来干旱这一复杂的自然灾害在全国发生的频率越来越高,持续时间逐渐拉长,并且对环境、社会和经济造成了严重的影响^[2]。形成干旱的原因错综复杂,其中降水量少、蒸发量大是形成干旱的直接原因^[3],气温的变化对降水、蒸发量的改变有显著的影响^[4]。此外,大气环流异常^[5]、暴雨增多和水土流失等均能造成干旱^[6]。目前,对干旱分析研究^[7]中,常用的干旱指数有55种之多,主要有基于降雨量的干旱指标(如标准化降水指数(SPI)^[8])、基于降水与蒸发量的指标(如标准化降水蒸散指数(SPEI)^[9])、基于降水与气温的指标(如德马顿干旱指标^[10])和考虑多种因素的干旱指标(如PDSI干旱指标^[11])等,这些指标在干旱评估中均取得了可观的成果^[12]。

目前,干旱研究在西南地区^[13]、长江^[14]、黄河流域^[15]以及全国诸多省份多有研究^[16-18],但对于几十年来一直受缺水和干旱挑战的宁夏的研究比较罕见^[19]。在上述干旱指标计算中,PDSI考虑的因子较多且计算复杂,在冬季和中高纬度地区的降雨计算存在偏差,而SPEI常采用的是潜在蒸发蒸散量,实际上流域中水分的支出应为实际蒸发蒸散量,而且在宁夏潜在蒸散量大部分都大于实际蒸散量,计算结果往往与实际存在差距^[20]。标准化降水指数(SPI)由MCKEE等^[21]提出,由于计算简单,资料获取容易,具有稳定的计算特性,可以很好地体现不同时段、地区、尺度的旱涝程度,是世界气象组织(WMO)推荐使用的干旱指数^[14],但在宁夏的应用研究鲜有报道。宁夏位于西北内陆,年降水量少且空间分布不均衡,蒸发强烈,极易形成旱灾^[22],给人民生活 and 经济发展带来很大困难。本文采用标准化降水指数

收稿日期:2020-07-03 修回日期:2020-12-10 网络出版时间:2021-04-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210422.1313.002.html

基金项目:国家自然科学基金(51869023);宁夏高等学校一流学科建设(水利工程学科)项目(NXYLXK2017A03);宁夏自治区级青年拔尖人才项目(030103030008);宁夏大学研究生创新项目(GIP2019024)

作者简介:王洁(1996—),女,宁夏银川人,主要从事水资源高效利用研究。E-mail:1247502980@qq.com

通信作者:李王成(1974—),男,陕西勉县人,教授,主要从事节水灌溉技术与理论、农业水资源高效利用研究。E-mail:liwangcheng@126.com

(SPI)为干旱指标,结合宁夏多年降水和平均温度,对宁夏各研究区多年干旱特征进行联合分析,旨在为全球变暖背景下的宁夏干旱监测和防灾减灾提供理论依据。

1 研究区概况

宁夏地处黄河上游(北纬 $35^{\circ}14' \sim 39^{\circ}14'$, 东经 $104^{\circ}17' \sim 109^{\circ}39'$), 根据不同的气象条件、地势特点,通常将其划分为北部引黄灌区、中部干旱带和南部山区。黄河从北部的中温带干旱区中顺流而下,因此该区域水资源量相对比较充足,植被覆盖率较高^[23],灌溉农业发达,称为北部引黄灌区^[24];中部地区大多处于中温带半干旱区,地势起伏不平,丘陵斜坡分布较多,除此以外,大多是植被破坏、水土流失较严重的草原和退化干草场,是典型的西部生态脆弱区,称之为中部干旱带^[25];南部山区丘陵地貌分布广泛,山间沟道纵横交错,自然灾害频发,处于温带半干旱区及半湿润区^[26-27],称之为南部山区^[28]。北部引黄灌区得益于黄河水资源的补给,灌溉技术手段先进,农产品较丰富,有“塞外江南”之美誉。中部干旱带大多以草原、养殖、农业为主,其农产品的产量很大程度上取决于降雨量多少。整个宁夏植被条件最好的地区为南部山区,当地的植被种类多种多样、生物群落较多且分布广泛,但该区域的经济状况相对于其他区域较落后且农业生产低下,造成这一现象的主要原因是过去很长一段时间人们不合理的土地开发利用以及自然灾害严重且频繁发生。南部山区是我国著名的“三西”贫困地区之一^[29]。

研究区地势从西南向东北逐渐倾斜,呈阶梯状下降。气候特征在空间和时间尺度上南北差异较大^[23]。降水少,南部山区年降水量 400 mm 以上,中部干旱带年降水量 200~400 mm,而北部引黄灌区年降水量不足 200 mm,呈现出由南向北递减的趋势^[30]。宁夏年平均气温在 $5.3 \sim 9.9^{\circ}\text{C}$,呈北高南低分布,南部山区在 7°C 以下,中部干旱带在 7°C 以上,北部地区 8°C 以上。

2 数据方法

2.1 数据来源

气象数据资料源于中国气象数据网,选取宁夏回族自治区数据较完整的 10 个气象站点 1960—2018 年月降雨资料。为保证所选气象数据资料的一致性和稳定性,数据处理中去除资料较少及缺测较多的站点。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水指数(SPI)

宁夏是西部地区典型的生态脆弱区和气候变化敏感区,其干旱半干旱气候特征是引起干旱频发的主要原因。标准化降水指数(SPI)不涉及具体的干旱机理,是一种简单的、易计算的干旱指数,广泛应用于不同气候区的干旱灾害分析^[31]。SPI 是基于计算出的某时段内降水量的 Γ 分布概率后,再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,具体计算过程^[13,33]如下:

假设研究区内某一时段的降水量为 x ,则其 Γ 分布的概率密度函数为

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

式中: β 为尺度参数; γ 为形状参数,用极大似然估计法求得,计算公式为

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

$$\hat{\beta} = \frac{x}{y} \quad (3)$$

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

式中: x_i 为研究区降水量,mm; \bar{x} 为多年平均降水量,mm; i 为序列号; n 为降水数据资料的时间序列长度。

确定概率密度函数中的各个参数后,对于某一年的降水量 x_0 可求出其随机变量 x 小于 x_0 时间的概率,公式为

$$p(x < x_0) = \int_x^{x_0} f(x) dx \quad (5)$$

降水为 0 时的概率计算为

$$P(x=0) = \frac{m}{n} \quad (6)$$

式中: m 为降水量为 0 的样本数; n 为样本总数。对 Γ 分布概率进行正态标准化处理,近似可得出^[33]

$$\delta_{\text{SPI}} = \frac{S_i - (c_2 t + c_1)_i + c_0}{(d_3 t + d_2) t + d_1 + 1.0} \quad (7)$$

式中: $t = \sqrt{\frac{\ln 1}{p}}$, P 为式(5)或(6)求得的概率,当 $P > 0.5$ 时 $S = 1$, 当 $P \leq 0.5$ 时 $S = -1$; $c_0 = 2.515 517$, $c_1 = 0.802 853$, $c_2 = 0.010 328$; $d_1 = 1.432 788$, $d_2 = 0.189 269$, $d_3 = 0.001 308$ 。 S 、 c_i 、 d_i ($i=0,1,2$) 均为计算过程时的参量。

不同地区和不同时段的气候特征状况可以由此值来反应。干旱等级可根据干旱等级标准(GB/T 20481—2017)划分见表 1。

表 1 干旱等级划分
Tab. 1 Division table of drought grades

干旱等级	SPI 值
无旱	$SPI > -0.5$
轻度干旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
中度干旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
重度干旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
特别干旱	$SPI \leq -2.0$

采用 SPI 方法,分别计算 3 个月(用 SPI_3 表示)和 12 个月(用 SPI_{12} 表示)尺度的 SPI 值。一般而言,气象干旱指数的时间尺度通常为 1 个月,农业干旱指数的时间尺度为 3 个月,而水文干旱指数的尺度较长,多为 12 个月^[32]。因此,选取 3 个月和 12 个月尺度的 SPI 值,分别分析宁夏的季节和年干旱特征。

2.2.2 干旱评估指标

根据宁夏气候、地理因素的不同,引用干旱频率、干旱强度来评估其干旱特征^[33]。

干旱频率(P_i)用来评估宁夏研究期内干旱发生的频率,计算公式为

$$P_i = (n_i / N) \times 100\% \quad (8)$$

式中: N 是计算年数,此次分析计算中 $N=58$; n_i 为 i 站出现干旱的年数,根据不同干旱等级的发生年数计算各自的发生频率^[1]。

干旱强度(S_{ij})是评价干旱严重程度的重要指标,计算公式为

$$S_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |\delta_{SPI_{ij}}| \quad (9)$$

式中: S_{ij} 为在 j 年发生干旱 i 站的 SPI 值; m 为发生干旱的站数; $0.5 < S_{ij} < 1$ 为轻旱, $1 < S_{ij} < 1.5$ 为中旱, $S_{ij} \geq 1.5$ 为重旱, S_{ij} 越大,干旱越严重。

变化趋势率(气候倾向率)即计算的研究区历年气候要素数据序列拟合直线的斜率再乘以 10 表示多年气候数据序列变化倾向率^[34]。

3 结果与分析

3.1 降水与气温特征分析

1960—2016 年宁夏各研究区春、夏、秋、冬月平均降水量、年降水量和气温变化见图 1,其变化特征见表 2。结合表 2 和图 1 可以看出,春夏秋冬四季各地区温度和降雨变化趋势大致相同。其中,降雨在年内呈现时空分配不均且年际差异明显的特征且降雨的显著增加或者减少,温度也有相应的变化。夏秋两季降雨最多(约占年内的 80.36%)而冬季最少(约占年内的 2%),春季次之(约占年内的 17.64%);降雨量在南部山区较多,中部干旱带较少,而北部引黄灌区最少。南部山区降水最多是因其地势较高,水汽在传输的过程中遇到山区时爬坡凝结上升,易形成降雨。研究期内,除北部引黄灌区秋季和 3 个地区冬季降雨量呈上升趋势外,其余均呈下降趋势且均通过 99% 的置信水平检验,其中减少趋势最大为南部山区的秋季,为 $-6.16 \text{ mm}/(10 \text{ a})$,涨幅最大的为南部山区的冬季,涨幅为 $1.145 \text{ mm}/(10 \text{ a})$ 。

表 2 1960—2018 年各研究区降水和气温特征
Tab. 2 Characteristics of precipitation and temperature in each study area from 1960 to 2018

季节	地区	平均降水量/mm	标准差	变化趋势/ $(\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1})$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	标准差	变化趋势/ $(^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1})$
春季	引黄灌区	31.23	2.69	-0.585^{**}	-6.01	1.47	0.50^{**}
	干旱带	52.05	4.35	-1.778^{**}	-5.23	1.41	0.41^{**}
	南部山区	77.19	4.68	-1.365^{**}	-6.43	1.26	0.41^{**}
夏季	引黄灌区	108.45	6.99	-1.978^{**}	10.81	1.17	0.49^{**}
	干旱带	159.68	8.93	-0.070^{**}	10.21	1.07	0.40^{**}
	南部山区	240.98	10.59	-4.260^{**}	7.45	1.01	0.36^{**}
秋季	引黄灌区	40.55	14.11	0.438^{**}	22.46	0.78	0.30^{**}
	干旱带	69.33	17.51	-2.597^{**}	21.29	0.78	0.27^{**}
	南部山区	106.90	25.95	-6.160^{**}	17.76	0.80	0.29^{**}
冬季	引黄灌区	3.15	7.27	0.367^{**}	8.93	0.89	0.32^{**}
	干旱带	6.33	9.95	0.697^{**}	8.56	0.90	0.33^{**}
	南部山区	8.96	14.27	1.145^{**}	6.25	0.85	0.32^{**}
年均	引黄灌区	183.38	51.45	-0.460^{**}	9.05	0.83	0.40^{**}
	干旱带	287.40	73.80	-2.200^{**}	8.71	0.78	0.35^{**}
	南部山区	434.02	96.96	-5.400^{**}	6.26	0.77	0.35^{**}

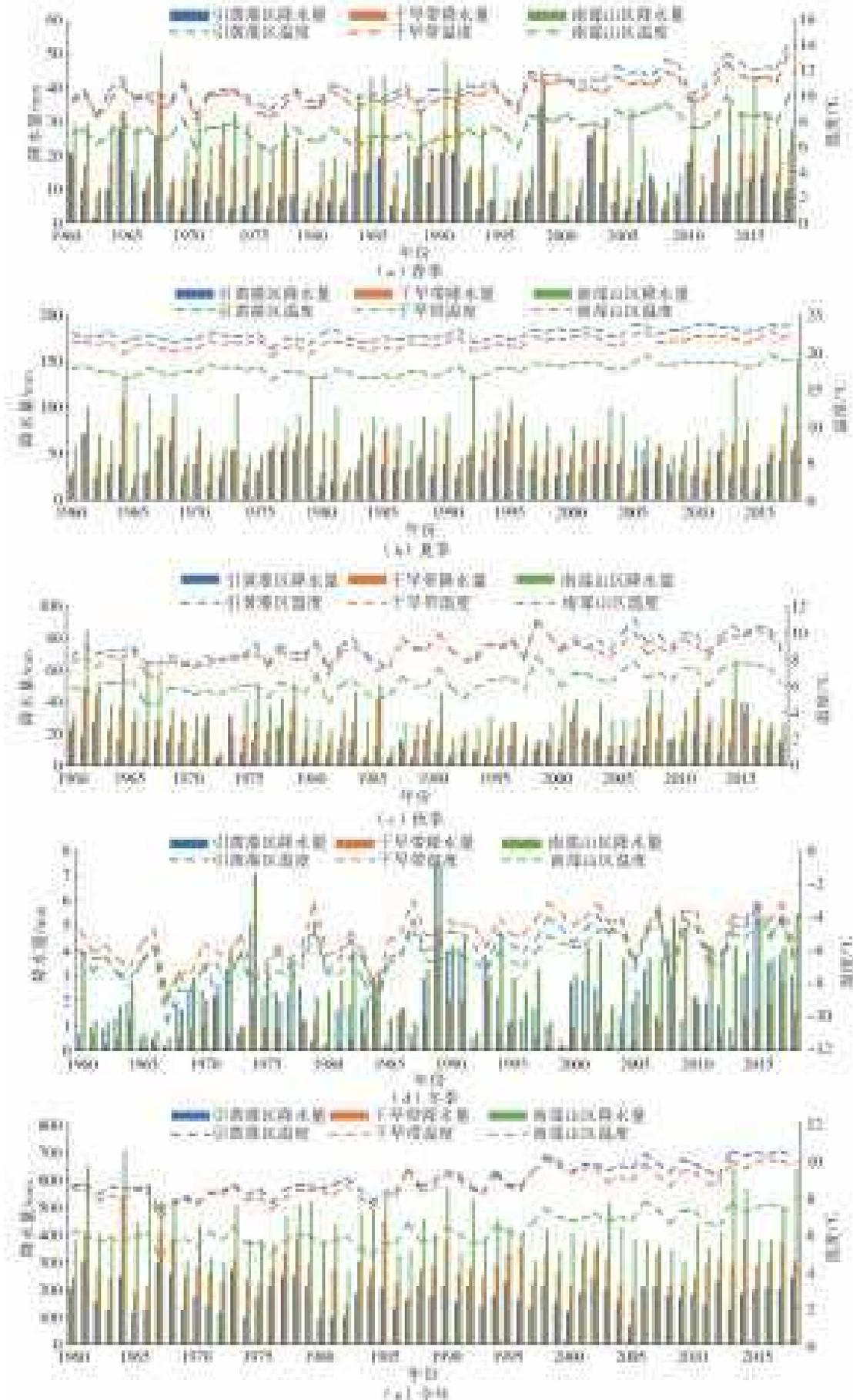


图 1 各研究区四季和全年的年降水量和温度变化特征

Fig. 1 Characteristics of annual precipitation and temperature change in four seasons and all over the study area

分析气温变化特征可知,宁夏温度年际变化差异不明显,且分布不均匀,各研究区温度春夏秋冬及年均温度均呈增加趋势,总体出现暖干化趋势^[35],且通过了 99% 的置信水平检验,其中,增幅最大的是春季的引黄灌区,增幅为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 。

3.2 SPI 发生时间和频率分析

图 2 为宁夏各研究区年尺度 SPI 时间变化特征,从图中可以看出各研究区 SPI 的变化特征基本一致,干旱较为频繁且持续时间较长。北部引

黄灌区共出现干旱 16 次,平均 3.6 a 出现 1 次;中部干旱带共出现干旱 17 次,平均每 3.4 a 出现 1 次;南部山区共出现干旱 20 次,平均每 2.9 a 出现 1 次。表 3 为 3 个研究区出现中旱、重旱和特旱的年份,结合表 3 和图 2 可以看出,宁夏 3 个研究区出现重旱和特旱的年份基本一致,出现重旱和特旱的年份基本在 20 世纪 70、80 年代和 2004 年,出现中、重旱的频率分别为 6.9%、5.17% 和 1.72%。

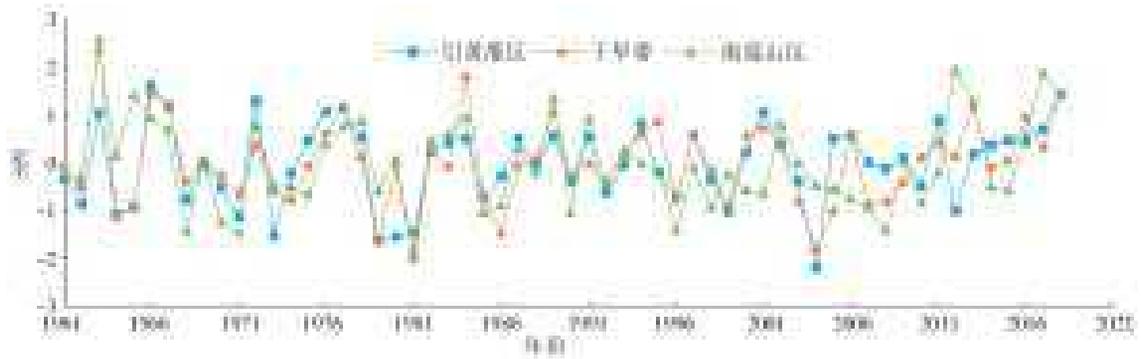


图 2 各研究区年 SPI 指数随时间的变化

Fig. 2 Temporal variation of annual SPI index in each study area

表 3 各研究区出现中旱、重旱和特旱的年份

Tab. 3 The years of moderate drought, severe drought, and extreme drought occurred in each study area

类型	引黄灌区	干旱带	南部山区
中旱	1964、1971、1981、1999、2012	1964、1986、2005	1968、1970、1971、1985、1990、1996、2008
重旱	1973、1979、1980	1979、2004	1981
特旱	2004	1981	无特旱年份

图 3 为各研究区不同季节 SPI 随时间的变化。由图 3 可知,干旱在不同季节不同研究区有不同特征,其中北部引黄灌区和中部干旱带在 1994、1999 年春季发生了两次特旱事件,其 SPI 分别达到了 -2.36 、 -2.28 和 -2.38 、 -2.40 ,发生频率均为 3.45%。

北部引黄灌区在 2004 年秋季发生了一次特旱事件,其 SPI 达到了 -2.43 ,发生频率为 1.72%,中部干旱带在 1998 年冬季发生了一次特旱事件,其 SPI 为 -2.98 ,发生频率为 1.72%,南部山区分别在 1994 年春季、1981 年夏季、1971、1985 年秋季和 1998 年冬季各发生一件特旱事件,其 SPI 值分别为 -2.17 、 -2.11 、 -2.61 、 -2.20 、 -3.25 ,发生频率分别为 77.59%、10.34%、5.17%、5.17% 和 1.72%。基于 SPI 计算的年尺度、季节尺度与实际干旱情况相符合,同时与方黎明等^[36]基于标准化降水蒸散指数(SPEI)计算出的干旱程度大致

相同,说明采用 SPI 来评估宁夏干旱程度是可行的。

3.3 干旱发生强度

对各研究区年尺度(图 4(e),表 4)和季度尺度(图 4(a)~4(d),表 5)干旱强度进行分析计算,从年尺度来看,各研究区干旱强度在 0.68~1.47 波动。干旱强度大于 0.5 的次数分别为 28、29 和 27 次,平均每 2.07、2 和 2.1 年发生 1 次干旱。各研究区干旱程度最大的年份分别是 2004、1981 和 1981 年,其强度分别达到了 2.22、2.04 和 1.84,干旱倾向率分别为 -0.064 、 -0.047 和 -0.023 ,表明从长期来看,各研究区的干旱强度均呈减小趋势。从年代来看,北部引黄灌区和中部干旱带干旱较为严重的年份为 20 世纪 70 年代,分别发生中度和重旱 3 次和 1 次,而南部山区出现较严重干旱的是 20 世纪 80 年代,发生重旱 1 次。

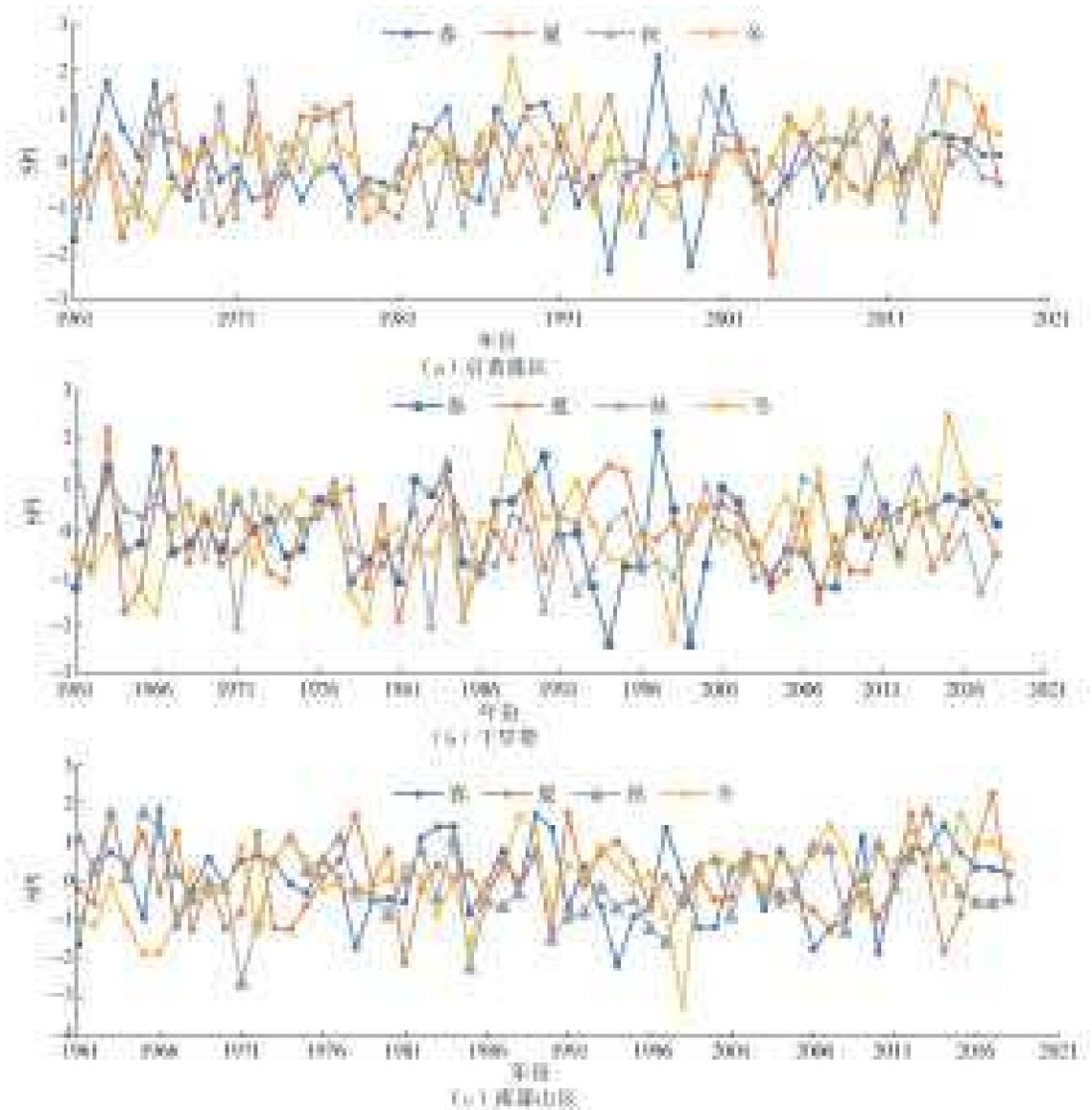


图 3 各研究区春夏秋冬四季 SPI 指数随时间的变化

Fig. 3 SPI index changes with time in spring, summer, autumn, and winter in each study area

表 4 各研究区年尺度干旱强度各年代比较

Tab. 4 Comparison of annual drought intensity in each study area

年代	引黄灌区	干旱带	南部山区
1961—1970	1.030	0.990	1.150
1971—1980	1.470	1.170	0.820
1981—1990	0.990	1.020	1.200
1991—2000	0.880	0.810	0.850
2001—2010	1.040	1.100	0.920
2011—2018	1.240	0.680	1.000
趋势率/(10 a)	-0.046	-0.047	-0.023
变化	减少	减少	减少

从季度尺度来看,北部引黄灌区、中部干旱带和南部山区春季干旱整体均呈增加趋势。干旱强度最大的年份均在 1994 年,其强度分别为 2.11 和 2.40 和 2.17,3 个研究区发生春旱较为严重的年代分别为 20 世纪 60、90 年代和 21 世纪前 10 年,其中分别

发生重度干旱 1 次、1 次和 2 次。各研究区夏季干旱均呈减小趋势,干旱强度最大的年份为 2004、2007 和 1980 年,其强度分别为 2.43、1.97 和 2.12;各研究区夏季干旱较严重的年代为 21 世纪前 10 年、20 世纪 60 年代和 80 年代。除北部引黄灌区外,其余 2 个研究区秋季干旱均呈减小趋势,干旱强度最大的年份为 2007、1971 和 1971 年,其强度分别为 1.97、2.03 和 2.61;各研究区秋季干旱较严重的年代为 20 世纪 80 年代和 70 年代,其中分别发生重度干旱 2 次、1 次和 0 次;各研究区冬季干旱均呈增加趋势,干旱强度最大的年份为 1966、1998 和 1998 年,其强度分别为 1.42、2.30 和 3.25。各研究区冬季干旱较严重的年代分别为 20 世纪 60、70 和 90 年代,分别发生重度旱灾 0 次、1 次和 1 次。在夏秋季干旱程度逐渐减弱是由于降雨大部分集中在夏秋 2 个季节,且降雨次数近年来较频繁。

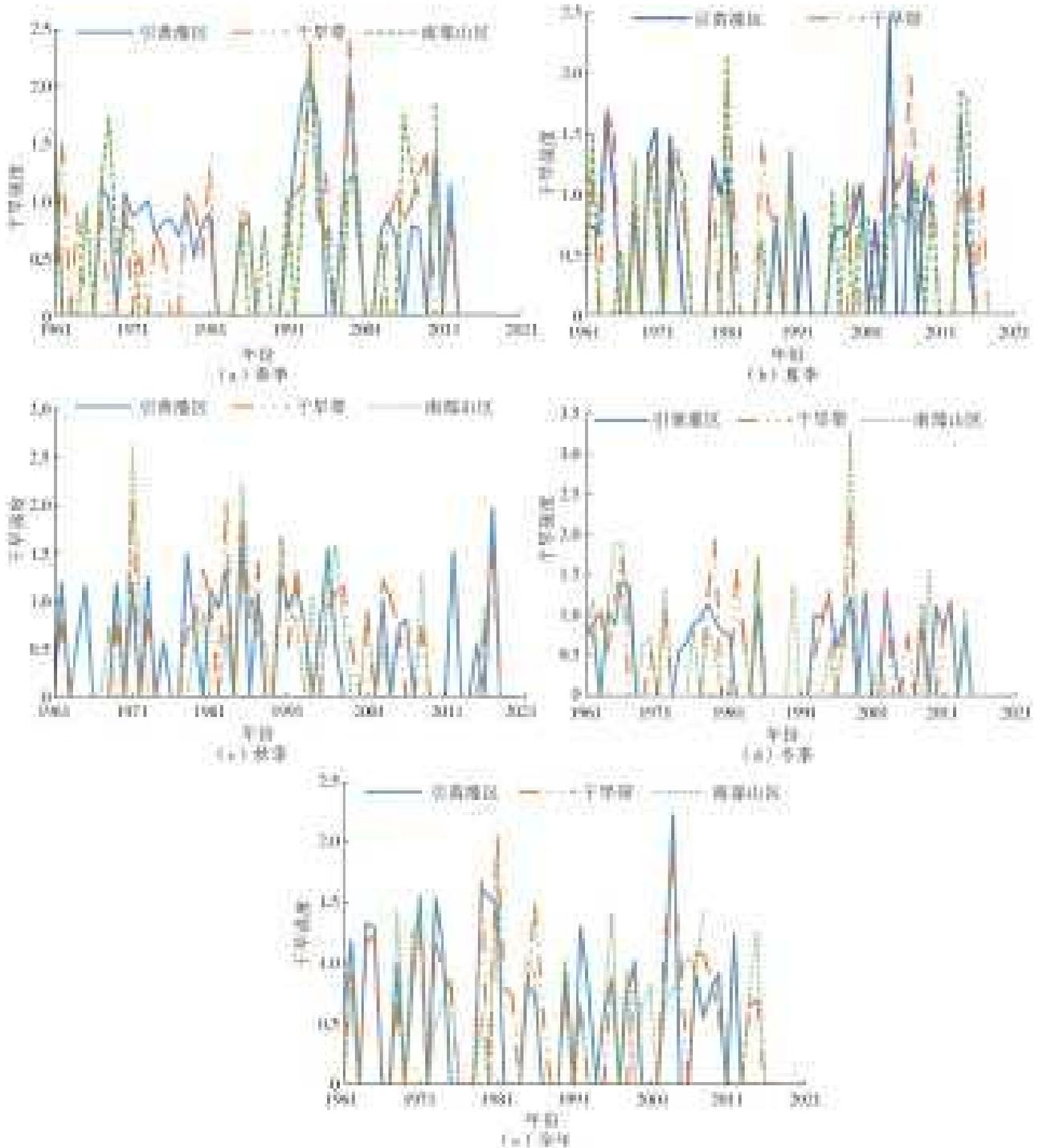


图 4 各研究区四季干旱强度随时间的变化

Fig. 4 The drought intensity changes with time in each study area in four season

表 5 各研究区春夏秋冬干旱强度各年代比较

Tab. 5 Comparison of drought intensity in spring, summer, autumn, and winter in each study area

年代	引黄灌区				干旱带				南部山区			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
1961—1970	1.220	1.010	1.030	1.060	1.060	1.270	0.770	0.960	1.250	1.130	0.700	1.170
1971—1980	0.810	1.210	1.040	0.860	0.720	1.140	1.120	1.440	1.010	1.100	1.280	0.890
1981—1990	0.830	1.130	1.220	0.900	1.020	1.170	1.460	1.340	0.790	1.350	1.070	1.320
1991—2000	1.430	0.790	0.940	1.030	1.350	1.060	0.900	1.130	1.180	0.970	1.040	1.560
2001—2010	0.870	1.270	0.850	0.970	1.050	1.240	0.920	1.080	1.320	0.870	0.890	1.030
2011—2018	1.140	0.980	1.340	0.940	0.820	1.010	0.870	1.010	0	1.810	0.970	1.060
趋势率/(10 a)	0.028	-0.004	0.014	0.005	0.068	-0.282	-0.149	0.020	0.044	-0.005	-0.062	0.032
变化	增加	减少	增加	增加	增加	减少	减少	增加	增加	减少	减少	增加

4 结 论

(1)宁夏降水和温度年内呈现出时空分配不均且年际差异明显的特征:年降水量呈显著减少趋势,季节降水除冬季和引黄灌区秋季呈上升趋势外,其余均呈下降趋势;年均气温及季节温度均呈增加趋势。

(2)北部引黄灌区、中部干旱带及南部山区 3 年尺度的干旱较为频繁且持续时间较长,干旱强度呈减小趋势。强度最大的年份分别为 2004、1981 和 1981 年。

(3)3 个研究区季节尺度干旱呈减小趋势的有夏季及干旱带和南部山区的秋季,其余的皆呈增加趋势。3 个研究区干旱强度最大的季节分别是 2007 年夏季、1994 年春季和 1998 年冬季。

参考文献(References):

- [1] 李明,王贵文,柴旭荣,等. 基于空间聚类的中国东北气候分区及其气象干旱时间变化特征[J]. 自然资源报, 2019,34(8):1682-1693. (LI M, WANG G W, CHAI X R, et al. Climatic regionalization and temporal variation characteristics of meteorological drought in northeast China based on spatial clustering[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34 (8): 1682-1693. (in Chinese)) DOI:10.31497/zrzyxb.20190809.
- [2] 程亮,金菊良. 干旱频率分析研究进展[J]. 水科学进展, 2013,23(2):296-302. (CHEN L, JIN J L. Research progress of drought frequency analysis[J]. Advances in Water Science, 2013. 23 (2): 296-302. (in Chinese)) DOI:10.14042/j.cnki.32.1309.2013.02.023.
- [3] 翟盘茂,邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005(1): 16-18. (ZHAI P M, ZOU X K. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951-2003[J]. Advances in Climate Change Research, 2005(1): 16-18. (in Chinese)) DOI:1673-1719 (2005)01-0016-03.
- [4] GIORGI F, BI X. Regional changes in surface climate inter annual variability for the 21st century from ensembles of global model simulations [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32 (13): L13701. DOI: 10.1029/2005GL023002.
- [5] 张强,黄荣辉,王胜,等. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005,20(4): 427-441. (ZHANG Q, HUANG R H, WANG S, et al. Land air interaction experiment (nwc-aliex) in arid area of northwest China and its research progress[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(4): 427-441 (in Chinese)) DOI:1001-8166(2005)04-0427-14.
- [6] 李树岩,刘荣花,马志红. 基于降水距平的黄淮平原夏玉米干旱评估指标研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(3):252-256. (LI S Y, LIU R H, MA Z H, Drought assessment index of summer maize in Huanghuai Plain based on precipitation anomaly [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30 (3): 252-256. (in Chinese) DOI:1000-7601(2012)03-0252-05.
- [7] 徐哈. 陕西省干旱时空演变特征分析及脆弱性评价[D]. 西安:长安大学, 2018. (XU H, Analysis of spatial and temporal characteristics of drought in Shaanxi Province and evaluation of vulnerability [D]. Xi'an, Chang'an University, 2018. (in Chinese))
- [8] HE Y, YE J Y, YANG X Y. Analysis of the spatio-temporal patterns of dry and wet conditions in the Huai River basin using the standardized precipitation index [J]. Atmospheric Research, 2015, 166: 120-128. DOI: 10.1016/j.atmosres.2015.06.022.
- [9] STAGGE J H, TALLAKSEN L M, GUDMUNDSSON L, et al. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI) [J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(13): 4027-4040. DOI: 10.1002/joc.4267.
- [10] 李柏贞,周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052. (LI B Z, ZHOU G S. Advance in the study on drought index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1043-1052 (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201210201457.
- [11] 宫兴龙,付强,王斌,等. 联合改进 TOPMODEL 和 PDSI 的半干旱区干旱评估模型构建[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 137-144. (GONG X L, FU Q, WANG B, et al. Construction of draught estimation model with combination of improved TOPMODEL and PDSI [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 137-144. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.017.
- [12] 王伟,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, 265. (WANG W, LI Y, DU L L. Characteristic of spring and summer drought variations and its relation with maize yield in Shanxi Province in 1972-2012 based on SPI [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36 (1): 230-236, 265. (in Chinese)) DOI: 10.7606/j.issn.1000-601.2018.01.34.
- [13] 王昊,姜超,王鹤松,等. 中国西南部地区雨季极端降水指数时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2019, 40(1): 1-14. (WANG H, JIANG C, WANG H S, et al. Spatial and temporal variation of extreme precipitation

- indices in southwestern China in the rainy season[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(1): 1-14. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2019. 01. 001.
- [14] 张午朝, 高冰, 马育军. 长江流域 1961—2015 年不同等级干旱时空变化分析[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 53-57. (ZHANG W Z, GAO B, MA Y J. Temporal and spatial variation characteristics of different drought grades from 1961 to 2015 in Yangtze River basin[J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 53-57. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2019. 02. 010.
- [15] 周帅, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1231-1241. (ZHOU S, WANG Y M, CHANG J X, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1231-1241. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxh. 20190348.
- [16] 王旭. 山东省水文干旱演变规律研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019. (WANG X, Evolution of hydrologic drought in Shandong Province[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019. (in Chinese))
- [17] 吴建峰, 张凤太, 卢海芬, 等. 基于标准化降水指数的贵州省近 54 年干旱时空特征分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 207-214. (WU J F, ZHANG F T, LU H F, et al. Spatial and temporal characteristics analysis of drought in Guizhou Province in recent 54 years based on standardized precipitation index[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(15): 207-214 (in Chinese)) DOI: 1671-1815 (2018) 015-0207-08.
- [18] 多普增. 三种气象干旱指数在青海省东部农业区的适用性分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017. (DUO P Z. Analysis adaptability of three drought index of agricultural region in eastern Qinghai Province[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese))
- [19] ZHAO Z Y, WANG H, WANG C, et al. Changes in reference evapotranspiration over northwest China from 1957 to 2018: Variation characteristics, cause analysis and relationships with atmospheric circulation[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 105958. DOI: https://doi.org/10. 1016/j. agwat. 2019. 105958.
- [20] 张宝庆. 黄土高原干旱时空变异及雨水资源化潜力研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014. (ZHANG B Q, Study on spatiotemporal variability of drought and rainwater harvesting potential on the Chinese Loess Plateau[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese))
- [21] MCKEE T B, DOESKENN J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993: 179-184.
- [22] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213. (ZHANG Q, YAO Y B, LI Y H, et al. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in northwest China[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(2): 196-213. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2015. 02. 0196.
- [23] 宫菲, 杜灵通, 孟晨, 等. 宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9068-9078. (GONG F, DU L T, MENG C, et al. Characteristics of water use efficiency in terrestrial ecosystems and its influence factors in Ningxia Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9068-9078. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stx6201810272316.
- [24] 李晨, 李王成, 董亚萍, 等. 宁夏地区潜在蒸散发变化特征及成因分析[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2): 186-192. (LI C, LI W C, DONG Y P, et al. Characteristics and causes of potential evapotranspiration in Ningxia Region[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(2): 186-192. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-8530. 19. 0076.
- [25] 郎勇设, 柳辉, 黄志刚. 宁夏生态功能区划研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2009(30): 85-90. (LANG Y S, LIU H, HUANG Z G. Ecological function regionalization and application of Ningxia municipality [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2009(30): 85-90. (in Chinese)) DOI: 0253-2828(2009)01-0085-06.
- [26] 冯克鹏. 宁夏水资源优化配置决策支持系统研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014. (FENG K P. Research on decision of support system for optimal allocation of water resources in Ningxia [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014. (in Chinese))
- [27] 李刚军. 宁夏水资源高效利用及水权分配研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009. (LI G J. Efficient utilization of water resources and allocation model of water rights in Ningxia [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [28] 杜灵通, 刘可, 胡悦, 等. 宁夏不同生态功能区 2000—2010 年生态干旱特征及驱动分析[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 149-156. (DU L T, LIU K, HU Y, et al. Ecological drought characteristics and analysis of

- driving factors of different ecological zones in Ningxia from 2000 to 2010[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(5): 149-156. (in Chinese) DOI: 10. 13577/j. jnd. 2017. 0517.
- [29] 陈晓光,李剑萍,韩颖娟,等. 宁夏近 20 年来植被覆盖度及其与气温降水的关系[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1375-1383. (CHEN X G, LI J P, HAN Y J, et al. Vegetation coverage and its relationship with temperature and precipitation in Ningxia in recent 20 years [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1375-1383. (in Chinese) DOI: 10. 13292/j. 1000-4890. 2007. 0241.
- [30] TAN C, YANG J, WANG X, et al. Drought disaster risks under CMIP5 RCP scenarios in Ningxia Hui Autonomous Region, China [J]. *Natural Hazards*, 2020, 100(3): 909-931. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03811-0>.
- [31] 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. (GONG Y B, ZHANG J G, LIU G F, et al. Research on the drought characteristics in Qujing City base on the SPI and R/S analysis [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(3): 273-277. (in chinese) DOI: 10. 7606/j. issn. 1000-7601. 2015. 03. 43.
- [32] 李斌,李丽娟,李海滨,等. 澜沧江流域干旱变化的时空特征[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 87-92, 393. (LI B, LI L J, LI H B, et al. Spatial and temporal variability of droughts in the Lancang River basin [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5): 87-92, 393. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2011. 05. 014.
- [33] 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. (HUANG W H, YANG X G, LI M S, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 50-59. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2010. 07. 009.
- [34] 张巧凤,刘桂香,于红博,等. 基于标准化降水指数的锡林郭勒盟干旱特征分析[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(5): 119-128. (ZHANG Q F, LIU G X, YU H B, et al. Analysis of drought characteristics in Xilingol League based on standardized precipitation index [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(5): 119-128. (in Chinese) DOI: 10. 13577/j. jnd. 2015. 0514.
- [35] ZHAO Z Y, WANG H, WANG C, et al. Impacts of climatic change on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of Ningxia at multi-time scales from 1957 to 2018 [J]. *Advances in Meteorology*, 2020: 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/3156460>.
- [36] 方黎明,王多银,房皓. 基于标准化降水蒸散指数的宁夏中部干旱带干旱趋势分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(14): 336-345. (FANG L M, WANG D Y, FANG H, Analysis of drought trend in arid zone of central Ningxia based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(14): 336-345. (in chinese) DOI: 1671-1815(2019)014-0336-10.

Drought characteristics in Ningxia based on standardized precipitation index

WANG Jie¹, LI Wangcheng^{1,2,3}, LI Chen¹, DONG Yaping¹, ZHAO Guangxing¹, XU Tianyuan¹, LI Zhuan¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Engineering Technology Research Center of Water-Saving and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural

Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Under the background of global warming, drought has become the foremost disaster endangering agricultural and animal husbandry production, thus it has an increasingly negative impact on human life. Ningxia is in the arid and semi-arid area, and has limited water resources and fragile ecology due to its unique climate. At present, studies on drought are mainly conducted in southwest China, the Yangtze River and Yellow River basins, and many provinces in China, while few in Ningxia, which has been threatened by water shortage and drought for decades. Therefore, it is of great significance to clarify the spatiotemporal variation characteristics of drought in Ningxia.

The standardized precipitation index (SPI) was used as the drought index, and the drought frequency and the drought intensity were used to evaluate the drought characteristics. Based on the distribution probability of precipitation during a certain period, SPI carries out the normal standardization processing. Then, the cumulative frequency distribution of standardized precipitation is used to divide the drought grade of the northern Yellow River irrigation area, the central arid zone and the southern mountainous area. The drought frequency is the frequency of drought occurring during the study period, while the drought in-

tensity is an important index to evaluate the severity of drought. The drought frequency and the drought intensity were analyzed and evaluated at seasonal and annual scales in each study area of Ningxia.

The results show that the variation trend of temperature and rainfall of different regions in spring, summer, autumn, and winter from 1960 to 2016 is almost the same; the inter-annual variation difference of temperature is not obvious, the distribution of temperature is not uniform, but the overall trend of warming and drying appears. In the autumn of 2004, a drought event happened in the Yellow River irrigation area, where the SPI index reached 2.43 and the frequency is 1.72%; in the winter of 1998, a drought event happened in the arid zone, where the SPI is 2.98 and the frequency is 1.72%. In the spring of 1994, the summer of 1981, the 1971, the autumn of 1985, and the winter of 1998, drought events happened in the southern mountain area, with the SPI value of 2.17, 2.11, 2.61, 2.20, 3.25, and the frequency of occurrence of 77.59%, 10.34%, 5.17%, 5.17% and 1.72%, respectively. For the SPI in the regional scale during the study period, the count of excessive drought events in the Yellow River irrigation area, the arid zone and the southern mountainous area increased. For the SPI value in the time scale, the frequency of excessive drought events decreased in recent years. According to the analysis and calculation of the annual and quarterly drought intensity in each region, the annual drought intensity fluctuated between 0.68 and 1.47. The times of drought intensity greater than 0.5 were 28, 29, and 27 times, respectively; the average drought occurred in 2.07 years, 2 years, and 2.1 years. From the perspective of seasonal scale, there are certain differences in different regions and different seasons.

The spatial and temporal distribution of rainfall and temperature in Ningxia was uneven and the inter-annual difference was obvious. The annual rainfall had a significant decreasing trend; the seasonal rainfall had an overall decreasing trend but a rising trend in winter and autumn of the irrigated area along the Yellow River. The average annual temperature and seasonal temperature showed an increasing trend. The annual drought was more frequent and lasted longer in the northern Yellow River irrigation area, the central arid zone, and the southern mountainous area; the drought intensity showed a decreasing trend. The years with the highest intensity were 2004, 1981, and 1981, respectively. In the three regions, the seasonal scale drought showed a decreasing trend in summer, autumn of the arid zone and southern mountainous area, while the rest showed an increasing trend. The decreasing degree of drought in summer and autumn was attributed to the fact that most of the rainfall was concentrated in summer and autumn, and the rainfall frequency was more frequent in recent years. The seasons with the greatest drought intensity in the three regions were the summer of 2007, spring of 1994, and winter of 1998.

Key words: meteorology; precipitation; temperature; drought; standardized precipitation index

