

基于1961—2100年SPI和SPEI的云南省干旱特征评估

刘小刚 冷险险 孙光照 彭有亮 黄一峰 杨启良

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 干旱是一个缓慢发展持续时间长的极端气候事件,而气候变化对干旱的影响尤为显著,评估气候变化对云南省干旱特征的影响尤为重要。使用多时间尺度的标准化降水指数(SPI)和标准降水蒸散指数(SPEI)分析了云南省的干旱状况,运用非超越概率和游程理论分别分析了SPI和SPEI的季节性变化和研究区域内的干旱特征。结果表明:1961—1995年冬季SPEI(1)小于等于-1.0的非超越概率为5.2%,但在2066—2100年增加到18.4%;SPEI(6)小于等于-1.0的非超越概率从4.4%增加到21.4%,SPEI(24)从7.0%增加到25.7%。表明由于气候变化,未来有可能发生严重干旱,且中长期干旱比短期干旱更严重。气候变化在1961—1995年和2066—2100年的冬季和夏季造成严重干旱,且中长期干旱严重程度在整个冬季和夏季尤为明显。将SPI和SPEI的时间序列应用于游程理论,发现1961—1995年SPEI(1)的干旱烈度为28.3,到2066—2100年达到60.9,表明气候变化使未来干旱加剧。本研究结果对云南省干旱预测、评估及其风险管理和应用决策具有指导性和实用性,同时可为未来旱作农业生态管理提供一定的依据。

关键词: 气候变化; 标准化降水指标; 标准化降水蒸发指标; 非超越概率; 游程理论; 云南省

中图分类号: P426.6; S271 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0236-10

Assessment of Drought Characteristics in Yunnan Province
Based on SPI and SPEI from 1961 to 2100

LIU Xiaogang LENG Xianxian SUN Guangzhao PENG Youliang HUANG Yifeng YANG Qiliang
(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Drought is an extreme climate event with long duration of slow development, and the impact of climate change on drought is particularly significant, drought has become a global problem in a changing climate. Assessing the impact of climate change on the drought characteristics of Yunnan Province is particularly important. The drought conditions in Yunnan Province were analyzed by using the multi-time scale standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). The seasonal variation of two indexes and the characteristics of drought in the region were analyzed by using non-exceedance probability and runs theory, respectively. The results showed that the non-exceedance probability of SPEI (1) below and equal to -1.0 in the winter of 1961—1995 was 5.2%, and it was increased to 18.4% from 2066 to 2100; the non-exceedance probability of SPEI (6) below and equal to -1.0 was increased from 4.4% to 21.4%, SPEI (24) was increased from 7.0% to 25.7%. It was showed that due to climate change, serious droughts may occur in the future, and the medium and long-term droughts were more serious than short-term droughts. Severe droughts caused by climate change during the winter and summer periods from 1961 to 1995 and from 2066 to 2100, and the severity of medium- and long-term droughts was particularly strong during winter and summer. SPI and SPEI time series were applied to the runs theory and it was found that the drought intensity determined by SPEI (1) from 1961 to 1995 was 28.3, which reached 60.9 by 2066 to 2100, indicating that the climate changes had exacerbated the future drought. The results were instructive and practical for drought prediction and assessment in Yunnan Province, as well as its risk management and application decisions. At the same time, it can provide a scientific reference for the future dry farming ecological management and drought evolution prediction.

Key words: climate change; standardized precipitation index; standardized precipitation evapotranspiration index; non-exceedance probability; runs theory; Yunan Province

0 引言

干旱是一个缓慢发展且持续时间长的极端气候事件,目前预测的可能性较低。在不断变化的气候中,干旱已成为全球性问题。云南省是中国和世界少有的“气候王国”,形成云南省干旱灾害的主要原因是季风气候的影响^[1]。近年来,在全球气候变化大背景下,特殊的地理环境以及地形使得云南省气候与生态环境的演变存在特殊性,表现出气温升高、降雨日数减少、极端气候事件增多等气候响应^[2],而干旱尤为突出。特别是在 2009—2012 年间,云南省出现史无前例的连年干旱,对农业生产、生态环境和经济社会造成巨大影响。因此,研究干旱的发生规律和变化特征,对于云南省适应气候变化以及防灾减灾决策具有重要的意义^[3]。彭贵芬等^[4]分析了云南地区干旱气候特征,认为云南地区春末夏初最易发生干旱,且干旱持续时间和强度均呈加重趋势。由于干旱成因复杂,易受人类活动影响,目前普遍使用干旱指数来描述干旱现象^[5]。其中,常用于干旱预测、预报的干旱指数有 PALMER^[6] 提出的帕尔默干旱强度指数, MCKEE 等^[7] 提出的标准化降水指数 (SPI), 曹永强等^[8]、李树岩等^[9] 和张调凤等^[10] 提出的综合气象干旱指数 (CI), 以及 VICENTE-SERRANO 等^[11] 提出的标准化降水蒸发指数 (SPEI) 等。目前干旱指数研究基本集中在利用历史气象资料进行预报、预测,如赵平伟等^[12] 基于 SPEI 和 SPI 指数对滇西南地区 1961—2013 年的气象数据进行季节连旱分析,黄中艳等^[13] 基于若干干旱指标对云南省 2009—2010 年进行农业干旱监测评估适用性分析,张雷等^[3] 基于 1961—2010 年气象资料对云南省的干旱变化特征进行分析。其中,也有利用国际耦合模式比较计划第 5 阶段 (CMIP5) 全球气候模式输出的气象数据对于旱变化的模拟分析,如 WANG 等^[14] 基于 CMIP5 模式对西南地区进行干旱评估,张冰等^[15] 利用 CMIP5 输出的未来气象数据对中国地区干旱变化模拟能力评估。少有研究将政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 上公布的 CMIP5 模式输出的未来气象预测数据^[16] 结合 SPI 和 SPEI 指数进行系统研究。

考虑代表性浓度路径 (RCPs) 情景,使用一般循环模型 (GCM) 模拟未来气候数据,在最近研究中得到大量应用。RCPs 可分为 RCP 8.5 (高排放)、RCP 6.0 (中高排放)、RCP 4.5 (中低排放) 和 RCP 2.6 (低排放),这些数字 (单位: W/m^2) 表示到 2100 年辐射强迫的水平。其中 RCP 4.5 是由美国太平洋西北国家实验室开发,发现 2100 年后,辐射强迫开

始稳定,与未来温室气体排放量相一致,比较符合未来较低的能源强度、减少农田和草地使用、严格的气候政策、稳定的甲烷排放,以及符合在 2040 年预期排放量下降之前 CO_2 排放量略有增加^[17]。IPCC 公布的一般循环模型 (GCM) 下包括多个气候模型,其中张武龙等^[18] 研究了在 RCP 4.5 情景下各模型 (CMIP5 模式) 对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估,发现无论是在干季或湿季,其中 HadGEM2-ES 模型下对西南地区降水的模拟效果较优。

本研究将运用 GCM 中 HadGEM2-ES 模型在中等代表性浓度路径 (RCP 4.5) 情景下输出的 2011—2100 年气象数据 (即 CMIP5 模式输出的未来气象数据),结合 SPI 和 SPEI 指数评估未来气候变化对云南省短期和中长期干旱的影响。计算多个时间尺度 (1、3、6、12、24 个月) 的 SPI 和 SPEI,分析季节性 SPI 和 SPEI 的统计值,利用条件概率分析 SPI 和 SPEI 之间的关系,运用非超越概率分析季节性 SPI 和 SPEI,以及应用游程理论分析研究区域内的干旱烈度、干旱历时和干旱强度,以评估未来气候变化对云南省干旱特征的影响,旨在为云南省未来干旱演变预测提供一定的科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

云南省 ($20^{\circ}8'32'' \sim 29^{\circ}15'8''N$, $97^{\circ}31'39'' \sim 106^{\circ}11'47''E$) 地处中国西南边疆,是一个高原山区省份,北回归线横贯南部,属低纬度的内陆地区。全省总面积 $3.94 \times 10^5 km^2$, 占全国陆地面积的 4.1%。云南省气候基本属于亚热带高原季风型,立体气候特点显著,类型众多、年温差小、日温差大、干湿季节分明。各地年平均降水量 560 ~ 2 300 mm,年平均气温 $6.9 \sim 27.1^{\circ}C$,湿季在 5—10 月,降水量约占全年 85%,干季在 11 月一次年 4 月,降水量约占全年 15%。其中,云南省气象站点分布及干旱预测选取气象站点 (根据《中国气象灾害大典》(云南卷)^[1] 中的轻旱灾区、中等旱灾区和重旱灾区 3 个干旱灾区,其中轻旱灾区主要有潞西、临沧、思茅和景洪,中等旱灾区主要有昆明、玉溪、曲靖、文山和保山,重旱灾区主要有蒙自、楚雄、丽江、昭通和中甸)。由于部分站点历史气象数据有所缺失,因此本研究对每个干旱灾区选取两个气象站点进行数据处理,以代表云南省分析其干旱特征,选取气象站点空间分布见图 1,选取气象站点信息见表 1。

1.2 数据来源与处理

本研究所用的数据主要有气象站数据与 GCM 数据。

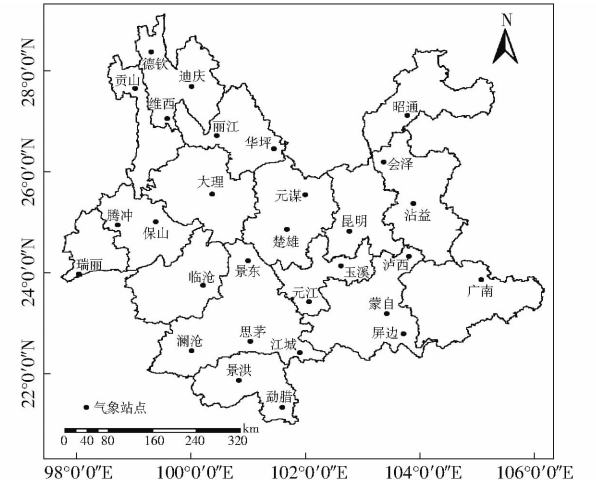


图 1 云南省内气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Yunnan Province

表 1 气象站点信息

Tab. 1 Meteorological stations information

气象站点	编号	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m
楚雄站	56768	101. 55	25. 03	1 824. 1
昆明站	56778	102. 68	25. 02	1 892. 4
临沧站	56951	100. 08	23. 88	1 502. 4
蒙自站	56985	103. 38	23. 38	1 300. 7
思茅站	56964	100. 97	22. 78	1 302. 1
玉溪站	56875	102. 55	24. 33	1 716. 9

实测气象站数据。选取了研究区内 6 个气象站(楚雄、昆明、临沧、蒙自、思茅和玉溪站)1961—2010 年的逐日气象观测数据,数据由中国气象资料共享服务网提供。

GCM 数据。来源于 PCMDI 提供的 IPCC AR5 (CMIP5)中 HadGEM2 – ES 模型 RCP 4.5 情景下输出的 1961—2010 年和 2011—2100 年逐月平均降水数据和气温数据,将数据统一双线性插值至对应站点输出气象数据,并对得到的数据进行修正,得到各站点修正后的气象数据,修正公式^[19]为

$$\hat{X}'_0 = \mu_0 + \frac{\sigma_0}{\sigma_m}(X'_m - \mu_m) \tag{1}$$

式中 $\hat{X}'_0$ ——模拟数据修正值
 μ_0 ——观测数据均值
 μ_m ——模拟数据均值
 σ_0 ——观测数据标准差
 σ_m ——模拟数据标准差
 X'_m ——模拟数据

1.3 研究方法

1.3.1 SPI 指数计算方法

SPI 指数是 MCKEE 等^[7]在评估美国科罗拉多州干旱状况时提出的,是表征某时段降水量出现概率的指标之一。假定降水量变化服从 Gamma 分布,

在计算出某一时段的 Γ 分布概率后,进行正态标准化处理,最终以标准化降水累积频率分布来划分干旱等级^[20],可对不同时段内降水量缺乏程度进行定量化表征。SPI 指数的构建过程如下:

假定某一时段降水量为 x ,其 Γ 分布的概率密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} x^{\gamma-1} e^{-x/\beta} \quad (x > 0) \tag{2}$$

式中 β ——尺度参数 γ ——形状参数
其中 β 和 γ 可用极大似然估计法求得,即

$$\hat{\gamma} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4C}{3}}}{4C} \tag{3}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\gamma}} \tag{4}$$

其中 $C = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \tag{5}$

式中 x_i ——降水资料样本
 $\bar{x}$ ——降水量气候平均值
 n ——计算序列长度

确定相关参数后,对于某一年降水量 x_0 ,可以求出随机变量 x 小于 x_0 事件的概率

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx \tag{6}$$

$$F(x = 0) = m/n' \tag{7}$$

式中 m ——降水量为 0 的样本
 n' ——总样本数

对 Γ 分布概率进行正态标准化处理,式(6)和式(7)求得概率值代入标准化正态分布函数中,可得

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-z^2/2} dz \tag{8}$$

将式(8)近似求解得

$$S_{PI} = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1} \tag{9}$$

其中 $t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}} \tag{10}$

式中 F ——与 Γ 函数相关的降水分布概率
 S ——概率密度正负系数
 $c_0、c_1、c_2、d_1、d_2、d_3$ ——分布函数转换为累积频率简化近似求解公式的计算参数

S_{PI} ——SPI 指数

当 $F > 0.5$ 时, $S = 1$; $F \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。 $c_0 = 2.515\ 517$ 、 $c_1 = 0.802\ 853$ 、 $c_2 = 0.010\ 328$ 、 $d_1 = 1.432\ 788$ 、 $d_2 = 0.189\ 269$ 、 $d_3 = 0.001\ 308$ 。

1.3.2 SPEI 指数计算方法

SPEI 指数是 VICENTE-SERRANO 等^[11,21]提出

的计算方法,在 SPI 的基础上,以简单水循环为支撑,考虑蒸散发对水分通量的影响。SPEI 计算原理是用水分亏缺量(月降水量与月潜在蒸散发量之差)取代 SPI 计算中的月降水量^[22],且 SPEI 基于 log-logistic 分布的频率值。SPEI 指数计算方法为

$$D_i = P_i - P_{ET_i}$$

(11)

其中

$$P_{ET_i} = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^{\lambda}$$

(12)

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

(13)

$$K = \frac{N}{12} \frac{N_{DM}}{30}$$

(14)

$$\lambda = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.492$$

(15)

式中 P_i ——月降水量,mm
 D_i ——月水分亏缺量,mm
 i ——月数 K ——修正系数
 P_{ET_i} ——月潜在蒸散发量,mm
 T ——月平均气温,℃
 I ——年热量指数 λ ——常数
 N ——最大日照时数,h
 N_{DM} ——一个月的天数,d

根据 log-logistic 概率分布函数计算水分亏缺量的概率分布

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

(16)

其中

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2}$$

(17)

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)}$$

(18)

$$\gamma = \omega_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)$$

(19)

$$\omega_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{l-0.35}{n} \right)^s X_l \quad (s=0,1,2)$$

(20)

式中 α ——位置参数
 $\omega_0、\omega_1、\omega_2$ ——概率权重
 X_l ——累计水分亏缺量, l 取 1,2,⋯,n

log-logistic 概率分布函数为

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

(21)

对 $F(x)$ 进行正态标准化处理。令 $f = 1 - F(x)$,则

$$S_{PEI} = \begin{cases} W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} & (f \leq 0.5) \\ \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} - W & (f > 0.5) \end{cases}$$

(22)

其中

$$W = \begin{cases} \sqrt{-2\ln f} & (f \leq 0.5) \\ \sqrt{-2\ln(1-f)} & (f > 0.5) \end{cases}$$

式中 S_{PEI} ——SPEI 指数

SPI 和 SPEI 具有多时间尺度的特征,计算 1、3、6、12、24 个月 5 个时间尺度的 SPI 值和 SPEI 值,分别用 SPI(1)、SPI(3)、SPI(6)、SPI(12)、SPI(24)、SPEI(1)、SPEI(3)、SPEI(6)、SPEI(12) 和 SPEI(24) 表示。

根据中国气象局制定的 SPI 和 SPEI 干旱等级划分标准^[23],将 SPI 和 SPEI 划分为 5 个等级,分别为无旱、轻微干旱、中等干旱、严重干旱和极端干旱,见表 2。

表 2 SPI 和 SPEI 干旱等级划分

Tab.2 Drought grade classification based on SPI and SPEI

等级	类型	SPI 和 SPEI 值
0	无旱	> -0.5
1	轻微干旱	-1.0 ~ -0.5
2	中等干旱	-1.5 ~ -1.0
3	严重干旱	-2.0 ~ -1.5
4	极端干旱	≤ -2.0

1.3.3 游程理论

干旱特征包括各种干旱条件,如持续时间,烈度和强度。YEVJEVICH^[24]提出运用游程理论来表征干旱特征,游程理论是指持续出现的同类事件,在其前和其后为另外的事件^[25],本研究基于 SPI 和 SPEI 指数运用游程理论分析干旱特征。

对于给定阈值运用游程理论来表征干旱特征(+R 和 -R 代表干旱指标值),见图 2。游程被定义为干旱变量时间序列中的一部分,其中所有的值均低于或高于所选择的阈值,也称为负或正游程^[26]。不同阈值的干旱历时、干旱烈度和干旱强度的各种统计指标能较好地描述干旱特征。干旱历时是指干旱过程从开始至结束所持续的时间,可用年、月、周或者其他时间段进行表示,且在此期间干旱指标值均低于临界水平^[17];干旱烈度是指干旱过程中干旱指标值与干旱阈值之差的累积和;干旱强度是

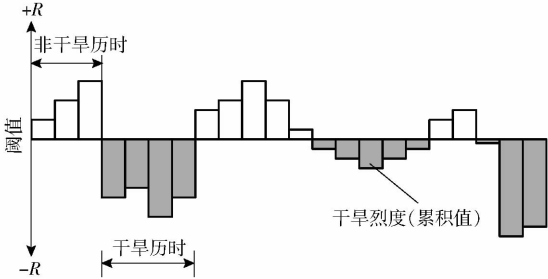


图 2 给定阈值游程理论的干旱特征

Fig.2 Drought characteristics using runs theory for a given threshold level

指干旱指标值低于阈值水平的均值,其值等于干旱烈度除以干旱历时。本研究使用 1961—2100 年的 SPI 和 SPEI 值和游程理论估算干旱历时、干旱烈度和干旱强度。

2 结果与分析

2.1 多时间尺度 SPI 和 SPEI 计算

用 1961—2010 年的观测气象数据和基于 RCP 4.5 情景下 2011—2100 年的模拟气象数据,计算得到 SPI 和 SPEI 多时间尺度的序列值变化(图 3)。不同时间尺度的 SPI 和 SPEI 值随时间变化的敏感性明显不同,时间尺度越小,干湿变化越显著。反之,时间尺度越大则干湿交替越平缓。相比于 2011 年以后,2011 年以前多时间尺度的 SPI 值不断减小;然而,SPEI 的最小值却在很远的未来。在同样气候条件下,SPI 和 SPEI 结果却产生了差异。因此,需要分析这种差异来源,以便处理未来干旱状况。本研究运用条件概率来分析 SPI 和 SPEI,条件概率是指给定事件 A 在另一个事件 B 已经发生条件下的发生概率,表示为 $P(A|B)$ 。

由于 1961—2010 年气象数据采用历史数据,2010 年以后采用模拟数据,为更好研究历史数据与模拟数据对于干旱特征影响的状况,本研究将 1961—2100 年共 140 a 分为 4 个时段(每个时段为 35 a),并对各时段的 1、3、6、12、24 个月 5 个时间尺度的 SPI 和 SPEI 值进行条件概率计算,见表 3。将 -1.0 作为 SPI 和 SPEI 干旱条件的阈值。因此,假定干旱事件(A 和 B)的概率为 SPI(小于等于 -1.0)和 SPEI(小于等于 -1.0),同时计算了在 SPEI(小于等于 -1.0)(或 SPI)已经发生条件下 SPI(小于等于

-1.0)(或 SPEI)的条件概率,分析气候变化对 SPI 和 SPEI 的影响。

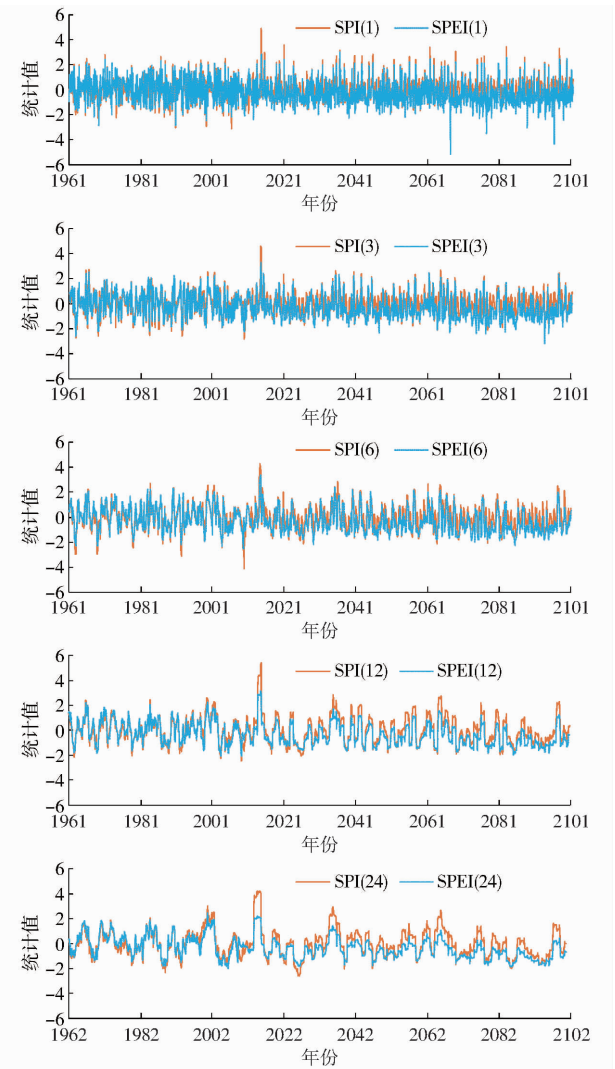


图 3 1961—2100 年不同时间尺度的 SPI 和 SPEI 变化
Fig.3 Changes of SPI and SPEI on different timescales from 1961 to 2100

表 3 多时间尺度 SPI 和 SPEI 的条件概率
Tab.3 Conditional probability of multiple timescale SPI and SPEI

条件概率 延迟时间	$P(A B)$					$P(B A)$				
	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月	24 个月	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月	24 个月
1961—1995 年	0.89	0.95	0.92	0.96	0.98	0.87	0.85	0.84	0.81	0.83
1996—2030 年	0.45	0.54	0.60	0.75	0.81	0.73	0.79	0.86	0.79	0.90
2031—2065 年	0.44	0.45	0.53	0.81	0.83	0.91	0.86	0.89	1.00	1.00
2066—2100 年	0.30	0.33	0.38	0.45	0.52	0.97	0.98	0.97	1.00	1.00

注:A 代表 SPI 小于等于 -1.0 的干旱事件,B 代表 SPEI 小于等于 -1.0 的干旱事件。

在 1961—1995 年 SPEI(1) 小于等于 -1.0 条件下,SPI(1) 小于等于 -1.0 的概率为 $P(A|B) = 0.89$;在 1961—1995 年 SPI(1) 小于等于 -1.0 条件下,SPEI(1) 小于等于 -1.0 的概率为 $P(B|A) = 0.87$ 。表明在 SPEI 确定干旱的条件下,SPI 的结果与 SPEI 确定的结果相差较小。同理,在 SPI 确定干

旱的条件下,SPEI 的结果与 SPI 确定的结果也相差较小。表明在相同历史时期,SPI 和 SPEI 能相互确定对方的干旱情况。但在 1996—2030 年、2031—2065 年、2066—2100 年,1 个月时间尺度的 SPI 和 SPEI 的条件概率却发生了变化, $P(A|B)$ 随着时间的推移逐渐变小,而 $P(B|A)$ 随着时间的推移却逐

渐增大,即从 1996—2030 年时间段后,SPEI 可以检测出在同一时期内 SPI 确定的干旱状况。1 个月时间尺度 SPI 和 SPEI 在 2031—2065 年的 $P(A|B)$ 为 0.44,在 2066—2100 年降到了 0.30。而 $P(B|A)$ 在未来却正好相反,对于 1 个月时间尺度的 SPI 和 SPEI, $P(B|A)$ 到 2066—2100 年增加到了 0.97,表明未来的气候变化使 SPI 和 SPEI 的关系颠倒。

2.2 季节性 SPI 和 SPEI 的短、中期干旱分析

上述将 1961—2100 年整个时期分为 4 个时段,对应的时间段为 1961—1995 年、1996—2030 年、2031—2065 年和 2066—2100 年。对每个时段内 SPI 和 SPEI 值按月份进行处理,各个月 SPI 和 SPEI 值为时段内该月多年平均值(图 4 和图 5)。对于 SPI(1) 在 1961—1995 年除了 1、3、5、7 月,其他月份的 SPI 均大于 0,但在 1996—2030 年从 6 月到 10 月有较明显的减小。表明在 1996—2030 年,由于气候的变化,月降水量在减少,每年从 6 月到 10 月期间的干旱情况变得更严峻。与 1961—1995 年和 1996—2030 年时段相比,2031—2065 年的 SPI(1) 从 6 月到 10 月减小更加显著,但在 1 月到 5 月期间及 11 月和 12 月,SPI(1) 均大于 0。在 2066—2100 年,从 5 月开始减小,持续到 10 月停止,其中 7 月、8 月和 9 月干旱情况非常明显,而其他月份 SPI(1) 均大于 0,2066—2100 年年均 SPI(1) 为 0.03,相比于 2031—2065 年的 0.09,小了 0.06,表明 2066—2100 年出现干旱次数比 2031—2065 年多。根据 SPI(1)、SPI(3) 和 SPI(6) 的结果表明,在 2031—2065 年和 2066—2100 年,干湿季分明,干季集中在 1—5 月及 11 月和 12 月,干季集中在 6—10 月。在 2031—2065 年年均 SPI(3) 为 0.11,SPI(3) 最小值出现在 8 月(−0.76);在 2066—2100 年年均 SPI(3) 为 −0.01,SPI(3) 最小值出现在 10 月(−0.78)。此外,在 2031—2065 年年均 SPI(6) 减小到 0.09,在 1 月和 9—12 月各月值均小于 0,最小值出现在 11 月(−0.75);2066—2100 年年均 SPI(6) 为 −0.11,SPI(6) 为负值主要出现在 1 月和 7—12 月,相比 2031—2065 年的 9—12 月提前了两个月。表明与短期干旱相比,气候变化对中期干旱影响更显著。

SPEI 与 SPI 在各个时段内所反映的值有所不同。从 1961—1995 年时段到 1996—2030 年时段年均 SPEI(1) 明显减小,如 1961—1995 年 11 月平均 SPEI(1) 为 0.22,到了 1996—2030 年 11 月平均 SPEI(1) 减小到 −0.31。减小趋势最大出现在晚秋和冬季。气候变化导致的干旱对秋冬季作物会有一定的影响。此外,SPEI(1) 减小最大出现在 2066—2100 年 7—12 月,表明在未来几乎整个夏、秋和初

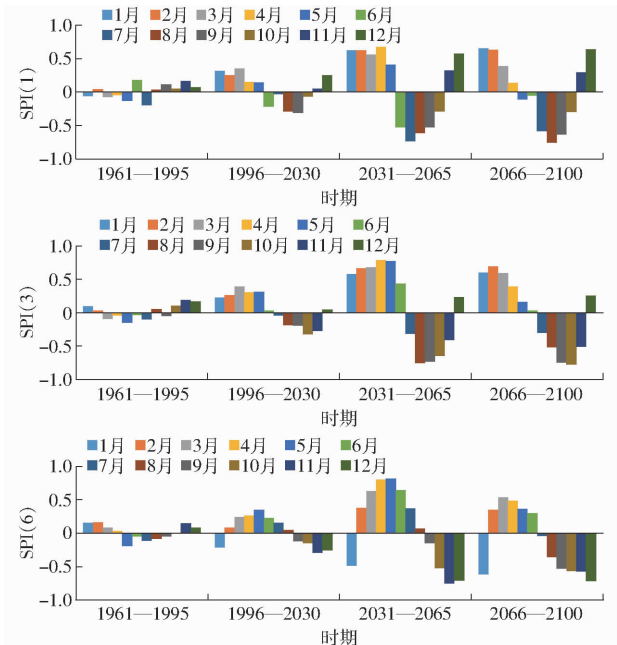


图 4 多时间尺度 SPI 各时段均值

Fig. 4 Mean SPI on multiple timescales for each period

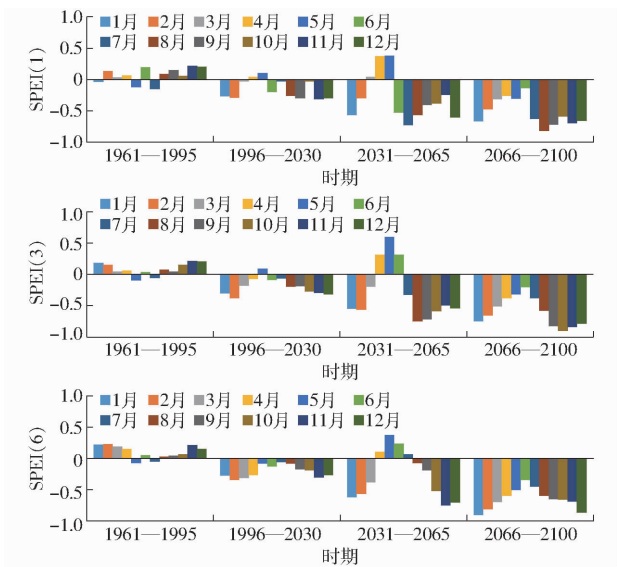


图 5 多时间尺度 SPEI 各时段均值

Fig. 5 Mean SPEI on multiple timescales for each period

冬季干旱均较为严重。对于 SPEI(3) 和 SPEI(6) 的中期干旱,表明平均 SPEI 减小趋势较 SPI(1) 更明显,如 1996—2030 年 SPEI(1) 的年均值为 −0.16,而 SPEI(3) 和 SPEI(6) 在 1996—2030 年年均值分别为 −0.19 和 −0.21。2066—2100 年平均 SPEI(6) 减小到 −0.65,是 SPEI(1)、SPEI(3) 和 SPEI(6) 中最小的,且最小的 SPI 值和 SPEI 值均出现在 2066—2100 年秋季。两个干旱指数表明,在未来中期干旱情况比短期干旱情况更加严重。

2.3 季节性 SPI 与 SPEI 的非超越概率分析

计算各季节的 SPI、SPEI 和 1、3、6、12、24 个月的 SPI 与 SPEI 累积值,由此计算各季节干旱指数小于等于 −1.0 的非超越概率,见表 4。当 SPI 小于等

于-1.0时,在1961—1995年冬季SPI(1)的非超越概率为7.1%,SPI(6)非超越概率减小到3.4%,而SPI(12)和SPI(24)分别增加到8.3%和7.5%;除了1961—1995年夏季外,SPI(6)小于等于-1.0的非超越概率均小于SPI(1)小于等于-1.0的非超越概率。1961—1995年夏季的SPI(3)小于等于-1.0非超越概率为9.5%,2031—2065年增加至13.8%,到2066—2100年(11.4%)稍有减少。1961—1995年秋季SPI(6)小于等于-1.0的非超越概率为5.7%,至2031—2065年增大到15.7%,2066—2100年较2031—2065年则下降了

0.5个百分点。对于长期干旱指数SPI(12)和SPI(24),1961年至2030年间各季节干旱情况在增加,1996年到2065年间各季节的非超越概率均减小,至2100年各季节SPI(12)小于等于-1.0与SPI(24)小于等于-1.0均在增加。结果表明,气候变化在夏、秋和冬季3个季节对中长期干旱的影响大于对短期干旱的影响;而在春季,除了1996—2030年,其他年份的SPI(6)小于等于-1.0的非超越概率均小于SPI(1)小于等于-1.0的非超越概率,意味着气候变化使春季短期干旱的影响较中长期干旱更显著。

表 4 多时间尺度 SPI 和 SPEI 小于等于 -1.0 的非超越概率

Tab.4 Non-exceedance probability of multiple timescales SPI and SPEI below and equal to -1.0 %											
时期	季节	SPI 小于等于 -1.0					SPEI 小于等于 -1.0				
		1 个月	3 个月	6 个月	12 个月	24 个月	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月	24 个月
1961—1995 年	春季(3—5 月)	8.6	8.6	6.9	7.4	7.6	9.0	7.6	5.4	7.4	6.6
	夏季(6—8 月)	8.6	9.5	10.5	8.3	6.6	8.1	8.6	8.6	6.9	5.6
	秋季(9—11 月)	7.6	7.1	5.7	9.3	8.1	8.6	6.7	5.7	7.4	6.1
	冬季(12—次年 2 月)	7.1	7.3	3.4	8.3	7.5	5.2	6.3	4.4	6.3	7.0
1996—2030 年	春季(3—5 月)	2.9	3.8	3.3	10.5	10.0	10.0	11.4	11.0	11.4	11.0
	夏季(6—8 月)	9.0	10.5	8.6	13.8	11.9	8.1	11.4	14.3	12.9	12.9
	秋季(9—11 月)	6.2	9.0	11.4	11.9	12.9	7.6	6.7	11.4	11.9	14.8
	冬季(12—次年 2 月)	4.8	3.9	6.8	11.7	11.7	11.0	10.7	6.3	14.1	12.6
2031—2065 年	春季(3—5 月)	1.0	0	0	10.5	5.7	6.2	8.1	10.5	11.9	8.1
	夏季(6—8 月)	16.7	13.8	7.1	11.0	5.2	16.7	16.2	11.9	15.2	7.1
	秋季(9—11 月)	3.8	10.0	15.7	11.4	7.1	7.6	10.5	15.7	14.3	7.1
	冬季(12—次年 2 月)	0	0	7.8	10.5	7.3	14.3	10.7	13.1	11.9	7.3
2066—2100 年	春季(3—5 月)	3.3	0.5	0	11.4	14.3	14.8	17.1	21.0	23.3	25.2
	夏季(6—8 月)	12.9	11.4	7.6	11.9	14.8	15.2	15.2	19.5	24.3	24.8
	秋季(9—11 月)	2.4	11.9	15.2	11.0	11.4	12.4	19.0	19.0	24.8	24.3
	冬季(12—次年 2 月)	0	0	8.7	10.2	11.7	18.4	19.9	21.4	26.2	25.7

1961—1995 年和 2066—2100 年冬季,SPEI(6)小于等于-1.0的非超越概率从4.4%增加到21.4%,而SPI仅增加到8.7%。在1961—1995年春季,SPEI(1)小于等于-1.0的非超越概率为9.0%,1996—2030年以后趋势为先增加后减小再增加的过程,至2066—2100年时段达到14.8%。1961—1995年和2066—2100年夏季,SPEI(1)小于等于-1.0的非超越概率分别为8.1%和15.2%。夏季的SPEI(1)和SPEI(6)的非超越概率与SPI(1)和SPI(6)的具有一定差异,SPEI在1961—1995年有更小的非超越概率,SPI则在2066—2100年达到最小值。当SPEI(12)和SPEI(24)小于等于-1.0,1978—2083年的非超越概率变化趋势为先增大后减小再增大的过程。SPEI小于等于-1.0的最大非

超越概率为26.2%(SPEI(12),2066—2100年冬季),比SPEI(1)和SPEI(6)都大。表明气候变化在1978—2083年冬季和夏季造成严重干旱,且中长期干旱严重程度在整个冬季和夏季尤为明显。

2.4 游程理论干旱特征分析

在气候变化情况下,运用游程理论分析多时间尺度的SPI和SPEI的干旱烈度、历时和强度(表5)。干旱特征阈值选用SPI等于-1.0和SPEI等于-1.0(据表2确定)。随着气候变化SPI(1)、SPI(3)和SPI(6)的干旱烈度在1961—2100年逐渐减小,而SPEI(1)、SPEI(3)和SPEI(6)的干旱烈度却在增加;对于SPI(12)和SPI(24)的干旱烈度随时间变化趋势为先增大后减小再增大,SPEI(12)干旱烈度随时间变化趋势为逐渐增大,而SPEI(24)的干

旱烈度随时间变化为先增大后减小再增大。SPI(6)的干旱烈度均大于 SPI(1)的干旱烈度, SPI(12)的干旱烈度除了 1961—1995 年外均大于 SPI(6)的; SPEI(6)干旱烈度在 1996—2030 年和 2066—2100 年大于 SPI(1)的干旱烈度,其余均小于 SPI(1)的, SPEI(12)的干旱烈度除了 1961—1995 年外均大于 SPEI(6)的干旱烈度。SPI 表明 1 个月干旱烈度的表现基本优于其他月份的干旱烈度, SPEI 则是 3 个月干旱烈度的表现基本优于其他月份的干旱烈度。在 2066—2100 年 SPEI(1)的干旱烈度约为 1961—1995 年干旱烈度的 2.15 倍,而 SPEI(24)的干旱烈度约为 1961—1995 年干旱烈度的 4.91 倍。因此在未来气候变化会造成更严重和更频繁的干旱状况。SPI 干旱强度基本在减小,而

SPEI 干旱强度基本在增大。1961—1995 年 SPI(1)小于等于 -1.0 的干旱历时为 67 月,到 2066—2100 年减小至 39 月,而 SPI(6)小于等于 -1.0 和 SPI(24)小于等于 -1.0 的结果却恰好相反, SPI(6)干旱历时从 55 月增加到 66 月, SPI(24)干旱历时从 59 月增加到了 109 月,而各个时间尺度 SPEI 小于等于 -1.0 干旱历时从 1961—1995 年时段至 2066—2100 年时段逐渐增加。结果表明,中长期干旱特征比短期干旱特征更显著,但 SPI 和 SPEI 得到的结果在某些方面并不一致,可能原因是影响干旱特征本身的气象因素较多, SPI 仅考虑了降水来确定干旱状况,而 SPEI 考虑了降水和气温因素来确定干旱状况,其结果精确性较 SPI 更高,且气候变化是多气象因素的变化,因此导致 SPI 与 SPEI 输出的结果出现差异。

表 5 多时间尺度 SPI 与 SPEI 的干旱烈度、历时和强度
Tab.5 Drought severity, duration and intensity of multiple-timescales SPI and SPEI

干旱 指数	时期	干旱烈度					干旱历时/月					干旱强度				
		1 个月	3 个月	6 个月	12 个月	24 个月	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月	24 个月	1 个月	3 个月	6 个月	12 个月	24 个月
SPI	1961—1995 年	32.9	40.8	35.0	25.3	26.4	67	68	55	68	59	0.49	0.60	0.64	0.37	0.45
	1996—2030 年	20.0	21.4	31.8	44.3	53.5	48	57	63	100	97	0.42	0.38	0.51	0.44	0.55
	2031—2065 年	10.7	13.1	19.4	32.7	14.9	45	50	64	91	53	0.24	0.26	0.30	0.36	0.28
	2066—2100 年	7.8	11.5	21.1	33.6	38.9	39	50	66	93	109	0.20	0.23	0.32	0.36	0.36
SPEI	1961—1995 年	28.3	30.7	25.4	17.1	15.4	65	61	50	57	50	0.44	0.50	0.51	0.30	0.31
	1996—2030 年	30.2	32.9	34.8	36.4	40.6	77	84	90	105	107	0.39	0.39	0.39	0.35	0.38
	2031—2065 年	33.1	27.5	30.2	38.1	17.3	94	95	107	113	64	0.35	0.29	0.28	0.34	0.27
	2066—2100 年	60.9	24.4	61.2	66.5	75.6	127	149	169	206	209	0.48	0.16	0.36	0.32	0.36

基于干旱烈度、干旱历时和干旱强度对云南省干旱特征分析,再结合上述结果可知 SPEI 更具代表性, SPEI 表明从 1961—1995 年到 2066—2100 年云南省干旱状况在逐渐增加,且未来气候变化将导致更加严重的干旱。其中,短期干旱对于气候变化更加敏感。与干旱强度相比, SPEI(12)在 1961—1995 年的干旱强度与 2066—2100 年的仅相差 0.02, SPI(12)之间仅相差 0.01,再综合 SPI 和 SPEI 干旱强度数据表明,中长期干旱与短期干旱均受气候变化影响。

3 讨论

气候变化可认定为严重影响未来干旱的因素。因作物易受到干旱的影响,干旱特征变化可能是灾难性的。由于 SPI 和 SPEI 可消除降水的时空差异,对于干旱变化反应敏感,能很好地反映不同区域和时段的干旱状况^[27]。因此,本研究用标准化降水指数(SPI)和标准化降水蒸散指数(SPEI)进行分析。目前大部分研究都是基于历史气象数据利用 SPI 和 SPEI 等干旱指数进行干旱评估及预测,也有部分研

究是基于 CMIP5 模式输出的降水和气温数据对未来干旱评估及预测,其中少有研究将 CMIP5 模式输出的未来气象预测数据结合 SPI 和 SPEI 指数进行系统研究。本研究利用 CMIP5 模式输出的未来气象数据计算多个时间尺度的 SPI 和 SPEI。分析季节性 SPI 和 SPEI 的统计值,运用条件概率分析 SPI 和 SPEI 之间的关系和非超越概率分析季节性 SPI 和 SPEI,并运用游程理论分析研究区域内的干旱烈度、干旱历时和干旱强度,以评估未来气候变化对云南省干旱特征的影响。

经 SPI 指数的非超越概率分析,夏季、秋季和冬季的中长期干旱将比气候变化导致的短期干旱更严重,春季期间的中长期干旱受气候变化的影响要小于短期干旱;经 SPEI 非超越概率分析,气候变化可能导致从 1961—1995 年和 2066—2100 年夏季和冬季出现严重干旱,1996—2030 年所有时期的春季和冬季的中期严重干旱可能会恶化,这与赵平伟等^[12]研究的 SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区干旱演变中的时空变化趋势基本一致。采用游程理论分析干旱特征,由于 1961—1995 年时段到 2066—2100 年时

段的气候变化,SPI 表明 1 个月的干旱烈度基本优于其他月份的干旱烈度;SPEI 则是 3 个月的干旱烈度基本优于其他月份的干旱烈度,SPEI(24)的干旱烈度约为 1961—1995 年干旱烈度的 4.91 倍,长期干旱严重程度在加剧,气候变化引起更严重、更频繁和更长持续时间的干旱。

云南省干湿变化表现为 5a 左右的振荡周期,且未来几年云南省地区仍表现为干周期^[3],并有长达 4—6 月的跨季节性严重持续干旱^[13]。在全球变暖背景下,云南省雨季有气候变干的趋势,干季多区域呈干旱略加强趋势^[28],本研究发现气候变化引起严重和长历时的干旱,这与左冬冬等^[29]运用游程理论分析中国西南地区历史数据干旱特征变化趋势的结果基本一致。云南省干旱灾害出现频繁、持续时间长,其分布具有一致性的特点,干旱出现的时段主要出现在冬、春及初夏季节,严重时则会出现冬春初夏连旱,而近年来秋季干旱呈频发之势^[30],这是由于当每年 10 月以后干季到来时,中纬度的西风带天气系统逐渐南伸扩展,青藏高原南部的南支西风气流建立并开始影响与控制云南省上空,强劲的西风气流切断了南部水汽的来源,形成了少雨、干旱的大气环流背景^[1, 30-35],与上述季节性干旱结果基本一致。

本研究结果对云南省干旱预测、评估及其风险管理和应用决策具有指导性和实用性,可为未来旱作农业生态管理提供一定的依据。但由于 SPI 和 SPEI 仅是气象干旱指标,研究区域的 SPI 和 SPEI 值是各气象站点 SPI 和 SPEI 值的平均,可能会降低气象站点之间的空间差异性,同时未来气象数据也是由模型模拟得到,致使数据本身具有一定的误差,因此用它们评估及预测干旱可能发生时间和严重程度

上存在一定差距,故需要考虑空间的差异性和提高未来气象数据模型模拟精度以进一步对干旱事件提供更加精确的预测,为今后研究的重要内容。

4 结 论

(1)SPI 和 SPEI 指数表明,未来云南省中期干旱状况将比短期干旱更加严重。根据 SPI 小于等于 -1.0 的非超越概率,夏季、秋季和冬季的中长期干旱将比气候变化导致的短期干旱更严重。但春季期间的中长期干旱受气候变化的影响要小于短期干旱;根据 SPEI 小于等于 -1.0 的非超越概率,1961—1995 年时段冬季 SPEI(1)的非超越概率为 5.2%,但在 2066—2100 年时段增加到 18.4%;SPEI(6)的非超越概率从 4.4% 增加到 21.4%,SPEI(24)的从 7.0% 增加到 25.7%。这说明由于气候变化,未来有可能发生严重干旱,且中长期干旱比短期干旱更严重。结合夏季 SPEI 的非超越概率分析可知,气候变化可能导致 1961—1995 年和 2066—2100 年夏季和冬季出现严重干旱。

(2)2066—2100 年时段 SPEI(24)的干旱烈度约为 1961—1995 年时段干旱烈度的 4.91 倍,长期干旱严重程度在加剧。此外,气候变化除了引起更严重和更频繁的干旱外,还将带来更长历时的干旱。SPI 在 1961—1995 年的干旱比 2066—2100 年预测的要多,而 SPEI(1)在 1961—1995 年的干旱烈度为 28.3,到 2066—2100 年达到 60.9,表明气候变化使未来干旱加剧。SPEI 综合考虑了气温和降水因素,其预测干旱状况更精确;SPI 和 SPEI 结果表明,短期干旱对气候变化更为敏感,而短期和中期干旱的强度都将受到气候变化的强烈影响。

参 考 文 献

1 温克华,刘建华. 中国气象灾害大典:云南卷[M]. 北京:气象出版社,2006.

2 李俊梅,李娟. 应对全球气候变化云南可持续发展对策研究[J]. 云南地理环境研究,2013,25(1):77-83.
LI Junmei, LI Juan. Study on sustainable development countermeasures of Yunnan under the background of global climate change [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2013, 25(1): 77-83. (in Chinese)

3 张雷,王杰,黄英,等. 1961—2010 年云南省基于 SPEI 的干旱变化特征分析[J]. 气象与环境学报,2015,31(5):141-146.
ZHANG Lei, WANG Jie, HUANG Ying, et al. Characteristics of drought based on standardized precipitation evapotranspiration index from 1961 to 2010 in Yunnan Province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(5): 141-146. (in Chinese)

4 彭贵芬,刘瑜,张一平. 云南干旱的气候特征及变化趋势研究[J]. 灾害学,2009,24(4):40-44.
PENG Guifeng, LIU Yu, ZHANG Yiping. Research on characteristics of drought and climatic trend in Yunnan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(4): 40-44. (in Chinese)

5 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.
LI Weiguang, YI Xue, HOU Meiting, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 643-649. (in Chinese)

6 PALMER W C P. Meteorological drought[M]. Washington, DC: US Department of Commerce, 1965.

7 MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology Boston, MA: American Meteorological Society, 1993, 17(22):179-183.

- 8 曹永强, 张兰霞, 张岳军, 等. 基于 CI 指数的辽宁省气象干旱特征分析[J]. 资源科学, 2012, 34(2): 265–272.
CAO Yongqiang, ZHANG Lanxia, ZHANG Yuejun, et al. Analysis of drought characteristics of Liaoning Province based on the CI index[J]. Resources Science, 2012, 34(2): 265–272. (in Chinese)
- 9 李树岩, 刘荣花, 师丽魁, 等. 基于 CI 指数的河南省近 40a 干旱特征分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 97–102.
LI Shuyan, LIU Ronghua, SHI Likuai, et al. Analysis on drought characteristic of He'nan in resent 40 year based on meteorological drought composite index[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(2): 97–102. (in Chinese)
- 10 张调风, 张勃, 王小敏, 等. 基于综合气象干旱指数(CI)的干旱时空动态格局分析:以甘肃省黄土高原区为例[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 13–20.
ZHANG Diaofeng, ZHANG Bo, WANG Xiaomin, et al. Temporal and spatial analysis of drought for recent 50 years in Loess Plateau of Gansu Province based on meteorological drought composite index[J]. Ecology and Environment Sciences, 2012, 21(1): 13–20. (in Chinese)
- 11 VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZMORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696–1718.
- 12 赵平伟, 郭萍, 李立印, 等. SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区干旱演变中的对比分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 142–149.
ZHAO Pingwei, GUO Ping, LI Liyin, et al. Comparison of SPEI and SPI index on account of the droughts of the southwest Yunnan area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(1): 142–149. (in Chinese)
- 13 黄中艳, 钟楚, 张明达, 等. 若干干旱指标在云南大旱年农业干旱监测评估中的适用性分析[J]. 中国农业气象, 2013, 34(2): 221–228.
HUANG Zhongyan, ZHONG Chu, ZHANG Mingda, et al. Applicability analysis for several drought indices to agricultural drought evaluation during the severe drought year in Yunnan[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(2): 221–228. (in Chinese)
- 14 WANG Lin, CHEN Wen, ZHOU Wen. Assessment of future drought in southwest China based on CMIP5 multimodel projections [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(5): 1035–1050.
- 15 张冰, 巩远发, 徐影, 等. CMIP5 全球气候模式对中国地区干旱变化模拟能力评估[J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 694–700.
ZHANG Bing, GONG Yuanfa, XU Ying, et al. Evaluation on the simulation of the drought change in China based on global climate models from CMIP5[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(5): 694–700. (in Chinese)
- 16 CHURCH J, CLARK P, CAZENAVE A, et al. Climate change 2013: the physical science basis contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Computational Geometry, 2013, 18(2): 95–123.
- 17 LEE S H, YOO S H, CHOI J Y, et al. Assessment of the impact of climate change on drought characteristics in the Hwanghae plain, North Korea using time series SPI and SPEI: 1981–2100[J]. Water, 2017, 579(9): 1–19.
- 18 张武龙, 张井勇, 范广洲. CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 559–570.
ZHANG Wulong, ZHANG Jingyong, FAN Guangzhou. Evaluation and projection of dry- and wet-season precipitation in southwestern China using CMIP5 models[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(3): 559–570. (in Chinese)
- 19 HO C K, STEPHENSON D B, COLLINS M, et al. Calibration strategies: a source of additional uncertainty in climate change projections[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(1): 21–26.
- 20 李思诺, 翁白莎, 严登明, 等. SPI 和 SPEI 在阿克苏河流域的适用性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 101–107.
LI Sinuo, WENG Baisha, YAN Dengming, et al. Applicability analysis of SPI and SPEI in Aksu river basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(1): 101–107. (in Chinese)
- 21 VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZMORENO J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer drought severity index[J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4): 1033–1043.
- 22 李洁, 莫淑红, 沈冰, 等. 基于 SPEI 的渭河流域干旱特征分析[J]. 西安理工大学学报, 2016, 32(1): 70–76.
LI Jie, MO Shuhong, SHEN Bing, et al. Analysis of drought characteristics of the Weihe river basin based on SPEI[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2016, 32(1): 70–76. (in Chinese)
- 23 中国气象科学研究院, 国家气象中心, 中国气象局预测减灾司. GB/T20481—2017 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- 24 YEVJEVICH V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts[M]. Denver: Colorado State University, 1967.
- 25 袁超. 渭河流域主要河流水文干旱特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- 26 MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1): 202–216.
- 27 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/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 155–163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160820&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.020.
ZHAO Xingkai, LI Zengyao, ZHU Qingke. Response of soil moisture on climate characteristics based on SPI and SPEI in loess region of Northern Shaanxi[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 155–163. (in Chinese)

species[J]. *Planta*,1980,149:78 – 90.

14 SUN J, YE M, PENG S, et al. Nitrogen can improve the rapid response of photosynthesis to changing irradiance in rice (*Oryza sativa* L.) plants[J]. *Scientific Reports*,2016,6:31305.

15 LU Z, REN T, PAN Y, et al. Differences on photosynthetic limitations between leaf margins and leaf centers under potassium deficiency for *Brassica napus* L.[J]. *Scientific Reports*,2016,6:21725.

16 MUIR C D, HANGARTER R P, MOYLE L C, et al. Morphological and anatomical determinants of mesophyll conductance in wild relatives of tomato (*Solanum* sect. *Lycopersicon*, sect. *Lycopersicoides*; Solanaceae) [J]. *Plant Cell and Environment*,2014, 37(6): 1415 – 1426.

17 XIONG D, DOUTHE C, FLEXAS J. Differential coordination of stomatal conductance, mesophyll conductance, and leaf hydraulic conductance in response to changing light across species[J]. *Plant Cell and Environment*,2018,41(2):436 – 450.

18 BUCKLEY T N. The control of stomata by water balance[J]. *New Phytologist*,2005,168(2):275 – 292.

19 BUCKLEY T N. Modeling stomatal conductance[J]. *Plant Physiology*,2017,174(2):572 – 582.

20 HASSIOTOU F, LUDWIG M, RENTON M, et al. Influence of leaf dry mass per area, CO₂, and irradiance on mesophyll conductance in sclerophylls[J]. *Journal of Experimental Botany*,2009,60(8):2303 – 2314.

21 PEGUERO-PINA J J, FLEXAS J, GALMES J, et al. Leaf anatomical properties in relation to differences in mesophyll conductance to CO₂ and photosynthesis in two related Mediterranean *Abies* species[J]. *Plant Cell and Environment*,2012,35(12):2121 – 2129.

22 LIU F, STÜTZEL H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress[J]. *Scientia Horticulturae*,2004,102(1):15 – 27.

23 SHIPLEY B. Net assimilation rate, specific leaf area and leaf mass ratio: which is most closely correlated with relative growth rate? A meta-analysis [J]. *Functional Ecology*,2006,20:565 – 574.

24 VANDELEUR R K, SULLIVAN W, ATHMAN A, et al. Rapid shoot-to-root signalling regulates root hydraulic conductance via aquaporins[J]. *Plant Cell and Environment*,2014,37(2):520 – 538.

25 GROSZMANN M, OSBORN H L, EVANS J R. Carbon dioxide and water transport through plant aquaporins[J]. *Plant Cell and Environment*,2017,40(6):938 – 961.

26 FLEXAS J, RIBAS-CARBÓ M, HANSON D T, et al. Tobacco aquaporin NtAQPI is involved in mesophyll conductance to CO₂ in vivo[J]. *The Plant Journal*,2006,48(3):427 – 439.

~~~~~

(上接第 245 页)

28 任菊章, 黄中艳, 郑建萌. 基于相对湿度度指数的云南干旱气候变化特征[J]. *中国农业气象*, 2014, 35(5): 567 – 574. REN Juzhang, HUANG Zhongyan, ZHENG Jianmeng. Analysis on drought climate change in Yunnan based on relative moisture index[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35(5): 567 – 574. (in Chinese)

29 左冬冬, 侯威, 颜鹏程, 等. 基于游程理论和两变量联合分布的中国西南地区干旱特征研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(23): 45 – 56. ZUO Dongdong, HOU Wei, YAN Pengcheng, et al. Research on drought in southwest China based on the theory of run and two-dimensional joint distribution theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(23): 45 – 56. (in Chinese)

30 张万诚, 郑建萌, 任菊章. 云南北端气候干旱的特征分析[J]. *灾害学*, 2013, 28(1): 59 – 64. ZHANG Wancheng, ZHENG Jianmeng, REN Juzhang. Climate characteristics of extreme drought events in Yunnan[J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(1): 59 – 64. (in Chinese)

31 刘瑜, 赵尔旭, 黄玮, 等. 2005 年初夏云南严重干旱的诊断分析[J]. *气象*, 1998, 24(8): 50 – 56. LIU Yu, ZHAO Erxu, HUANG Wei, et al. Diagnostic analysis of the severe drought over Yunnan area in the early summer of 2005[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1998, 24(8): 50 – 56. (in Chinese)

32 刘瑜, 赵尔旭, 彭贵芬, 等. 2005 年春末初夏云南异常干旱与中高纬度环流[J]. *干旱气象*, 2007, 25(1): 32 – 37. LIU Yu, ZHAO Erxu, PENG Guifen, et al. Severe drought in the early summer of 2005 in Yunnan and middle—high latitudes circulation[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2007, 25(1): 32 – 37. (in Chinese)

33 刘瑜, 赵尔旭, 孙丹, 等. 东南亚地区夏季风异常对云南 2005 年初夏干旱的影响[J]. *气象*, 2006, 32(6): 91 – 96. LIU Yu, ZHAO Erxu, SUN Dan, et al. Impacts of anomaly of summer monsoon over the Southeast Asia on the early summer drought of Yunnan in 2005[J]. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(6): 91 – 96. (in Chinese)

34 陶云, 郑建萌, 黄玮, 等. 云南春末夏初干旱的气候特征[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(1): 124 – 132. TAO Yun, ZHENG Jianmeng, HUANG Wei, et al. Climatic characteristics of Yunnan’s drought in later spring and early summer [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(1): 124 – 132. (in Chinese)

35 晏红明, 段旭, 程建刚. 2005 年春季云南异常干旱的成因分析[J]. *热带气象学报*, 2007, 23(3): 300 – 306. YAN Hongming, DUAN Xu, CHENG Jian’gang. Study on a severe drought event over Yunnan in spring 2005 [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, 23(3): 300 – 306. (in Chinese)