

谢五三,唐为安,宋阿伟,2019. 多时间尺度 SPI 在安徽省气象干旱监测中的适用性研究[J]. 气象,45(11):1560-1568. Xie W S, Tang W A, Song A W, 2019. Applicability study of SPI in multiple time scales in meteorological drought monitoring in Anhui Province[J]. Meteor Mon, 45(11):1560-1568(in Chinese).

多时间尺度 SPI 在安徽省气象干旱监测中的适用性研究^{*}

谢五三^{1,2} 唐为安^{1,2} 宋阿伟¹

1 安徽省气候中心,合肥 230031

2 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥 230031

提 要: 基于安徽省 81 个气象站 1961—2017 年逐日降水数据及土壤墒情和干旱灾情资料,从诊断干旱日数年际变化、季节演变、空间分布、频率分布、典型干旱过程演变及与土壤墒情、干旱灾情的相关性等方面,研究 6 种时间尺度 SPI 在安徽省气象干旱监测效果。结果表明:不同时间尺度 SPI 在干旱监测中差异明显,6 种时间尺度 SPI 对于干旱日数年际变化、不同等级干旱频率分布具有较好的监测效果,但对于干旱日数季节演变和空间差异性诊断与实况存在偏差;从典型干旱过程诊断来看,时间尺度越短,降水权重越大(例如 SPI30、SPI60),SPI 监测曲线对降水的响应越敏感,而 SPI150、SPI180 等时间尺度长的 SPI 对降水的响应又过于“迟钝”;从与土壤墒情的相关性来看,时间尺度短的 SPI30 与 10 cm 表层土壤墒情相关性最好,相关系数达 0.91,时间尺度长的 SPI180 与 50 cm 深层土壤墒情相关性较好;在各时间尺度 SPI 与年降水量的负相关及与干旱灾情的正相关方面,相关系数随着时间尺度的增长均先增后减,时间尺度适中的 SPI120 相关性最好。总体来看,不同时间尺度 SPI 代表不同含义,针对不同时间尺度的气象干旱应采用不同时间尺度的 SPI 进行监测评估。

关键词: 标准化降水指数,多时间尺度,干旱监测,安徽省

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.006

Applicability Study of SPI in Multiple Time Scales in Meteorological Drought Monitoring in Anhui Province

XIE Wusan^{1,2} TANG Wei'an^{1,2} SONG Awei¹

1 Anhui Climate Centre, Hefei 230031

2 Anhui Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

Abstract: Based on daily precipitation data, soil moisture data and historical drought disaster data of 81 meteorological stations in Anhui Province from 1961 to 2017, this paper studies the applicability of SPI in six time scales in meteorological drought monitoring in Anhui Province, by analyzing the interannual variation, seasonal evolution, spatial distribution, and frequency distribution of the drought days, evolution of typical drought processes as well as correlations of drought days to soil moisture and to drought disaster. The results show that in drought monitoring there is significant difference in the SPI in different time scales. In interannual variation of drought days and frequency distribution of the drought at different grades, the diagnosis results got with SPI of each time scale are in accordance with the fact, but the results are not in accordance with the fact of seasonal variation and spatial difference of drought days. SPI of each

^{*} 中国气象局气候变化专项(CCSF201714)、淮河流域气象开放研究基金(HRM201607)、安徽省自然科学基金面上项目(1908085MD109)、安徽省重点研究和开发计划(201904a07020099)和安徽省气象局科研项目(KM201903)共同资助

2018 年 6 月 5 日收稿; 2019 年 5 月 10 日收修定稿

第一作者:谢五三,主要从事气候监测评估与气象灾害风险研究. Email: xiewusan_2008@sina.com

time scale has a good diagnostic effect on the interannual variation of drought days and frequency distribution of the drought at different grades, but it has a poor effect on the seasonal variation and spatial difference of drought days. From the perspective of diagnosis of typical drought processes, the shorter the time scale, the higher the weight of the precipitation, thus the SPI monitoring curve is too sensitive to precipitation, such as SPI30 and SPI60. However, the response of SPI150 and SPI180 of long-time scale to precipitation is too insensitive. From the perspective of correlation with soil moisture, the short-time scale SPI30 has close correlation with surface soil moisture of 10 cm depth and the correlation coefficient is 0.91, while the long-time scale SPI180 has close correlation with deep soil moisture of 50 cm depth. In the aspects of negative correlation between SPI in different time scales and annual precipitation and the positive correlation between them and drought disaster, correlation coefficients first increase and then decrease with the time scale prolonging, and the moderate-time scale SPI120 has the closest correlation to them. Overall, SPI in different time scales represent different meanings, and the drought in different time scales should be monitored and evaluated by SPI in different time scales.

Key words: standardized precipitation index, multiple time scale, drought monitoring, Anhui Province

引 言

干旱是我国最主要的气象灾害之一,因其出现频率高、持续时间长、波及范围大,对国民经济特别是农业生产造成严重影响(白永清等,2010),因此,研究干旱的成因、发生发展机制及时空演变规律,对于科学认识干旱灾害具有重要意义,也可为科学的水资源管理及灾害防治提供参考(张强等,2011)。近年来,国内外对于干旱的研究较多,但由于干旱成因复杂,影响因素众多,目前对其仍没有统一的定义,1997年美国气象学会将干旱分为4类:气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱(Richard and Heim,2002),相应的干旱监测指标也多种多样(侯威等,2012;邹旭恺等,2005),以降水为主要因子的气象干旱指标,如降水距平百分率、Z指数等(方茸等,2010);以地表径流和地下水位为主要因子的人文干旱指标,如径流距平百分率、地表水供给指数等(Dracup et al,1980;吴杰峰等,2017);以土壤水分和作物蒸散为主要因子的农业干旱指标,如土壤水分指数、作物水分指数等(王仰仁等,2010);以供水和需水为主要因子的社会经济干旱指标,如社会水安全指标、城市干旱指数等(Ohlsson,2000)。研究表明,不同类型的干旱在一定程度上反映了干旱发展的不同阶段,农业、水文和社会经济干旱从本质上讲都是气象干旱的影响结果,都应该比气象干旱发生得晚,相对而言,气象干旱较为敏感,发生得最早,结束也最早;农业干旱爆发晚于气象干旱的时间

取决于前期地表土壤水分状况,而水文干旱爆发晚于气象干旱的时间取决于水库和湖泊储水及产流过程;社会经济干旱又是气象、农业、水文干旱等所有干旱的最终影响结果,它将社会经济活动和商品供需与气象、农业和水文干旱相联系,比其他类型干旱发生得都晚(张强等,2011)。

标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)是目前应用最广泛的气象干旱指标之一,由 McKee et al(1993)在评估美国科罗拉多州干旱状况时提出的,该指标计算简单,时间尺度灵活,时空适应性强,计算结果稳定(Bordi et al,2004;Svoboda et al,2002),不同时间尺度 SPI 代表不同含义,体现气象、农业、水文和社会经济等不同类型的干旱,是评估多种类型干旱强度和干旱历时的重要工具(张强等,2015)。当前我国气象部门实时干旱监测与气候年景评估等业务使用的监测指数多是基于多时间尺度的 SPI,针对 SPI 指数在不同干旱地区的适用性研究(张利利等,2017;任余龙等,2013;刘敏等,2013)以及与多种干旱指标的对比分析(慈晖等,2015)已有不少成果,相关研究推动了我国干旱监测评估技术的快速发展(吴子君等,2017)。

安徽省地处南北气候过渡带,干旱灾害多发频发,是最主要的气象灾害之一,且存在明显的时空分布特点,空间上北部多于南部、平原多于山区,时间上秋旱最多,夏旱次之,冬、春旱相对较少,据近 50 年的资料,在成灾面积 10 万 hm^2 以上的各类气象灾害中,旱灾占出现总次数的 32%,仅小于水灾(占 42%)(温克刚和翟武全,2007),因而开展干旱监测

指标研究具有重要意义。当前, SPI 作为气象干旱监测指标之一, 所用资料的时间尺度固定为月尺度降水, 时间尺度较为单一, 对于干旱监测诊断的精细化程度不够, 难以满足多时间尺度的干旱监测业务需求。本文基于安徽省逐日降水资料, 建立逐日滚动的 SPI 长时间序列, 结合土壤墒情和干旱灾情资料, 精细化分析多种时间尺度 SPI 在安徽省气象干旱监测中的应用效果, 为面向实时防灾减灾的多时间尺度干旱监测业务及相关气象服务提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料

运用安徽省 81 个气象站 1961—2017 年逐日降水数据以及土壤墒情资料, 所有资料来自安徽省气象信息中心, 均经过质量控制, 且通过 0.01 显著性水平检验, 所有气象站降水资料通过 SNHT 检验(田红等, 2008), 满足研究需要, 安徽省各气象站及地形分布见图 1。干旱灾情资料来源于安徽省民政厅, 为 1996—2017 年安徽省历年干旱受灾情况, 包括农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失等灾情数据。

1.2 标准化降水指数

由于降水量的分布一般不是正态分布, 而是一种偏态分布, 所以在进行降水分析和干旱监测、评估中, 采用 Gamma 分布概率来描述降水量的变化。

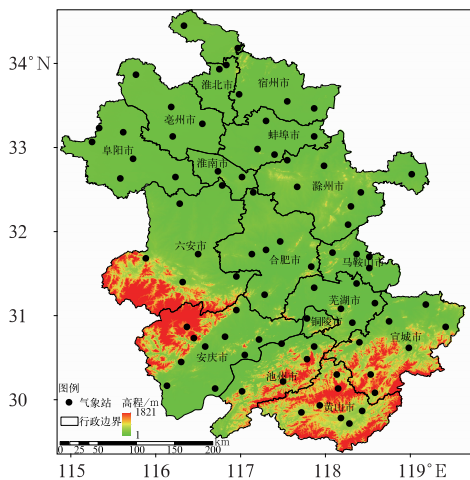


图 1 安徽省气象站及地形分布图

Fig. 1 Distribution of meteorological stations and terrain of Anhui Province

标准化降水指数的原理是计算出某时段内降水量的 Gamma 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(Guttman, 1998)如下:

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:

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

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (1)$$

式中, α 、 β 分别为形状参数和尺度参数, $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数。 α 、 β 可以采用最大似然法估算:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A}, \quad \beta = \frac{\bar{x}}{4A}$$

$$A = \lg(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (2)$$

式中, n 为样本长度, x_i 为降水量资料样本, $\bar{x}$ 为降水量气候平均值, 于是给定时间尺度的累积概率可计算如下:

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

令 $t = x/\beta$, 式(3)可变为不完全的 Gamma 函数:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (4)$$

由于 Gamma 方程不包含 $x=0$ 的情况, 而实际某时段的降水量 x 可以为 0, 所以累积概率可以表示为 $H(x) = q + (1-q)G(x)$, 式中 q 为降水量为 0 的概率。如果 m 表示降水序列中降水量为 0 的样本数, n 为总样本数, 则 $q = m/n$ 。累积概率 $H(x)$ 可以通过下式转换为标准正态分布函数:

当 $0 < H(x) \leq 0.5$ 时

$$SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{H(x)^2} \right]} \quad (5)$$

当 $0.5 < H(x) \leq 1$ 时

$$SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right)$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{1 - H(x)^2} \right]} \quad (6)$$

式中, c_0 、 c_1 、 c_2 和 d_1 、 d_2 、 d_3 分别为 Gamma 分布函数转换为累积频率简化近似求解公式的计算参数, $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。根据式(1)~式(6)即可求得任意时段 SPI, 根据干旱出现

的频率确定不同等级干旱对应的 SPI, SPI 干旱等级划分见表 1。

为与实时气象干旱监测业务接轨, 本文考虑 SPI 时间尺度分为 30、60、90、120、150 和 180 d 共 6 种时间尺度。将安徽省 81 个气象站 1961—2017 年逐日降水资料带入 SPI 计算公式, 计算出各站逐日 SPI30、SPI60、SPI90、SPI120、SPI150 和 SPI180 值, 例如某气象站某一日的 SPI30 是指该站从该日向前推 30 d, 统计该时段降水量及历史同期降水量, 构建出降水量资料样本序列, 再带入 SPI 计算公式, 也即拟合 Gamma 分布函数, 估算出形状参数和尺度参数, 再通过标准正态分布反函数转换为标准正态分布, 进而计算出该站该日的 SPI30 值。根据 SPI 干旱等级划分标准, 得到不同时间尺度 (30、60、90、120、150 和 180 d) SPI 对应各站逐日的干旱情况, 建立各站 1961—2017 年逐日干旱等级序列, 选用较为通用的克里金法 (Kriging) 由站点插值到区域, 进而分析 SPI30、SPI60、SPI90、SPI120、SPI150 和 SPI180 等不同时间尺度 SPI 在安徽省气象干旱监测中的应用。

表 1 SPI 干旱等级划分表
Table 1 Drought classification of SPI

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

2 结果分析

2.1 干旱年际变化

针对不同时间尺度 SPI 计算结果, 统计安徽省 81 个气象站 1961—2017 年每年各等级干旱的日数, 再计算全省平均值, 进而得到各时间尺度 SPI 对应的干旱日数年际变化特征 (图 2)。由图 2 可见, 不同时间尺度 SPI 计算出的干旱日数年际变化趋势基本一致, 干旱日数较多的年份有 1966、1968、1976、1978、1988、1992、1994、1997、1999、2001、2004 和 2011 年等, 这与中国气象灾害大典安徽卷 (温克刚和翟武全, 2007) 中关于安徽历史典型大旱年记录非常吻合, 表明各时间尺度 SPI 对安徽省典型旱年

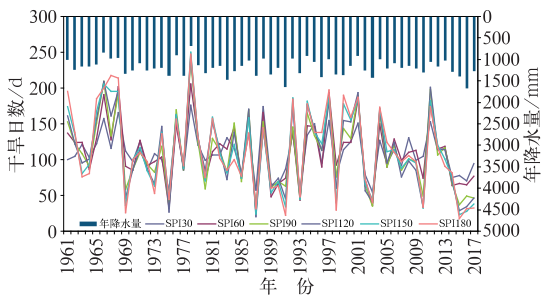


图 2 各时间尺度 SPI 对应的干旱日数年际变化
Fig. 2 Interannual variation of drought days corresponding to SPI in different time scales

都具有较好的诊断效果。

进一步计算各时间尺度 SPI 对应年干旱日数的均值、标准差、极差等统计特征及其与年降水量的相关性 (图 3), 分析各时间尺度 SPI 对年干旱日数诊断的差异性。由图 3 可见, 对于年干旱日数的均值, 各时间尺度 SPI 几乎没有差异; 而在标准差和极差方面, 不同时间尺度 SPI 存在差异, 随着 SPI 时间尺度的增长, 年干旱日数序列的标准差和极差都不同程度的增加, 表明干旱日数年际差异越来越大; 与年降水量的相关性方面, 负相关系数随着 SPI 时间尺度的增长而先增后减, SPI120 与年降水量的负相关性最高 (相关系数为 -0.82), SPI30 负相关性最低 (相关系数为 -0.76)。

2.2 干旱季节演变

根据不同时间尺度 SPI 计算出的各气象站 1961—2017 年逐日干旱等级, 计算各时间尺度 SPI 对应的各月干旱日数占年干旱日数百分比 (图 4),

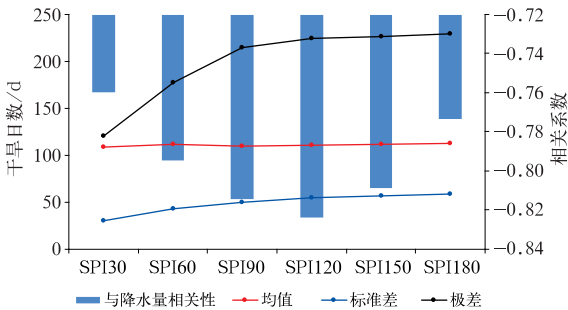


图 3 各时间尺度 SPI 对应的年干旱日数统计特征
Fig. 3 Statistical characteristics of drought days corresponding to SPI in different time scales

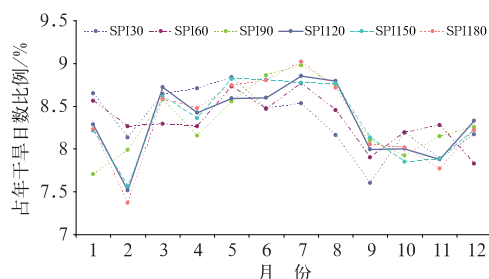


图 4 各时间尺度 SPI 对应的各月干旱日数占年干旱日数百分比

Fig. 4 Monthly percentage of drought days corresponding to SPI in different time scales

分析不同时间尺度 SPI 对干旱季节演变的诊断效果。由图 4 可见,各时间尺度 SPI 计算出各月干旱日数的变化趋势基本一致,1 月、3—8 月的干旱日数相对较多,而 2 月、9—12 月的干旱日数相对较少,这与温克刚和翟武全(2007)中根据安徽省多年各季节发生的干旱实况及相关灾情而总结出的结论(“秋旱最多,夏旱次之,冬、春旱较少”)存在偏差,实际记载的干旱事件较 SPI 监测结果存在一定的滞后效应,这是由于 SPI 只考虑降水因素,反映的是气象干旱(李剑锋等,2012),而国际公认的干旱类型有气象、农业、水文和社会经济干旱,它们随着时间的推移是一个逐渐传导的过程,气象干旱最早发生,再引发农业、水文或社会经济干旱等(张强等,2011)。《中国气象灾害大典-安徽卷》(温克刚和翟武全,2007)中关于干旱及相关灾情记录,大多是发生了农业干旱或是水文干旱等,其发生时间晚于气象干旱,因而记载时间较 SPI 监测时间存在一定的滞后;此外,徐一丹等(2017)研究表明,降水减少幅度较大的月份和地区, SPI 的适用性降低,安徽秋季处于降水大幅减少时期,因而造成 SPI 监测秋季干旱日数偏少。

2.3 干旱空间分布

针对不同时间尺度 SPI,计算各气象站 1961—2017 年年均干旱日数,进而绘制各时间尺度 SPI 对应的干旱日数空间分布(图 5),分析不同时间尺度 SPI 对安徽省干旱空间差异的诊断效果。由图 5 可见,随着 SPI 时间尺度的增长,各气象站干旱日数的差异性加大,大别山区和沿江出现干旱日数高值区,而沿淮中部出现干旱日数低值区,这与各时间尺度 SPI 对应年干旱日数统计特征结论是一致的,总体来看,各时间尺度 SPI 对应的干旱日数没有明显的

空间分布特征,事实上,根据安徽省历年干旱发生实况(温克刚和翟武全,2007)及气候态分布特征(安徽省气象局,2014),安徽省干旱地域分布特征为:干旱频率自北向南递减,沿淮淮北和江淮之间北部是干旱最容易发生发展地区,江淮分水岭地区由于地理原因,干旱也比较严重,而大别山区和皖南山区干旱相对较轻,显然,各时间尺度 SPI 计算出的干旱地域分布特征与之不相吻合,表明 SPI 对干旱空间分布诊断效果不佳。究其原因,主要是由于 SPI 只考虑降水,没有考虑区域气候特征、下垫面状况等影响干旱的因素,该指标假定所有地点干旱发生的概率相同,通过某时段降水量的概率密度函数求解累积概率,再将累积概率标准化,整个计算过程没有涉及与降水量时空分布特征有关的参数,因而消除了降水的空间差异(袁文平和周广胜,2004);此外, SPI 值是建立在单站长时间降水序列的基础上,某时段的干湿状况是同该站历史同一时期平均水平的比较,因而也无法准确反映干旱频发地区以及湿润区域之间的差异(Guttman,1998),使得 SPI 在诊断干旱空间差异上与实况不一致。

2.4 干旱频率分布

针对不同时间尺度 SPI,计算各等级干旱(轻旱、中旱、重旱、特旱)的发生频率,分析各时间尺度 SPI 对不同等级的干旱频率划分结果(图 6)。由图 6 可见,各时间尺度 SPI 对不同等级干旱发生频率计算结果基本一致,特旱占 2.3%~2.6%、重旱占 4.0%~4.5%、中旱占 8.6%~8.9%、轻旱占 14.0%~15.3%,这与安徽省干旱实际发生频率(温克刚和翟武全,2007)是一致的,也与 WMO 给出的用百分位数推算干旱阈值的累积频率是相符的。

2.5 典型干旱过程诊断

为进一步分析各时间尺度 SPI 对干旱的诊断效果,选取典型站的典型干旱过程进行诊断分析。典型代表站选取全国五个国家气候观象台之一的寿县站,该站资料翔实,可靠度和稳定性高,且为国家气候观象台中唯一一个代表农田生态观测系统的台站;典型干旱过程选取 1961 年有完整气象记录以来公认的安徽省最典型的两个旱年(1978 和 2011 年),各时间尺度 SPI 对于 1978 年 1 月 1 日至 12 月 31 日和 2011 年 1 月 1 日至 12 月 31 日两个典型干旱过程的逐日监测诊断见图 7。

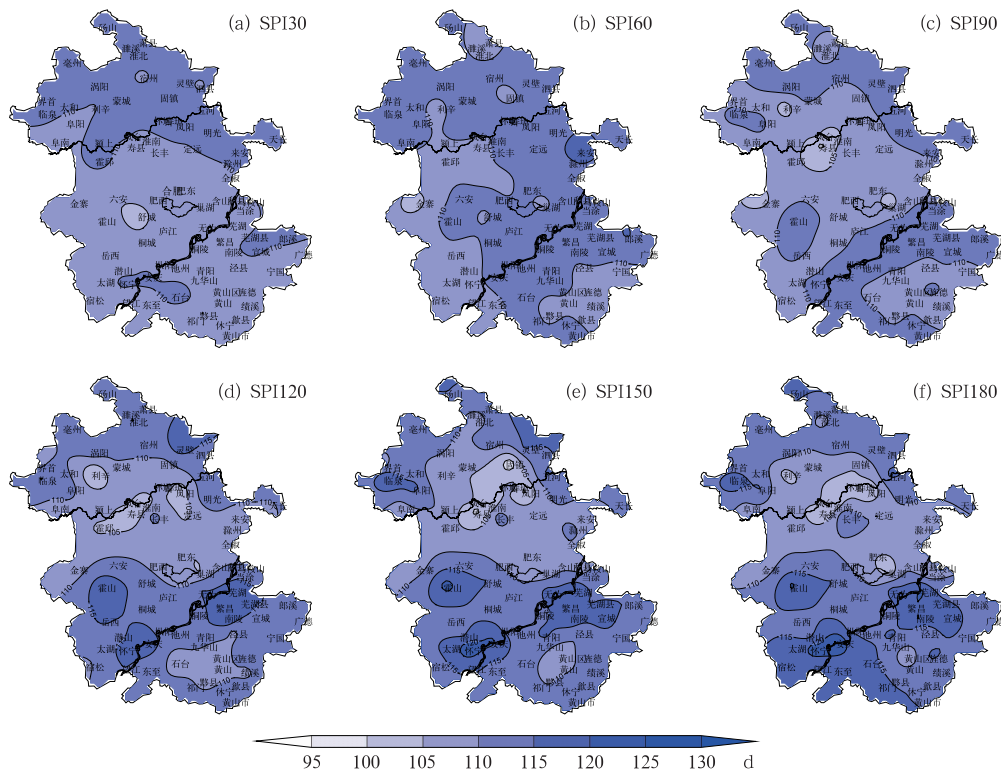


图 5 各时间尺度 SPI 对应的干旱日数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of drought days corresponding to SPI in different time scales

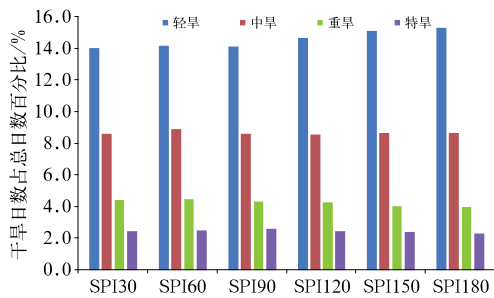


图 6 各时间尺度 SPI 对应的不同等级干旱频率

Fig. 6 Frequency of drought at different grades corresponding to SPI in different time scales

由图 7 可见,不同时间尺度 SPI 对于典型干旱过程的逐日诊断曲线存在明显差异。当降水稀少时,各时间尺度 SPI 曲线反映的干旱均不同程度的加重,众所周知,根据干旱的形成机理,干旱的发生发展应是一个循序渐进的过程,从诊断曲线上看,不该有剧烈跳跃(即干旱突然加重),而是一条循序渐进的“锯齿”状曲线,由图 7 可见, SPI 时间尺度越长,干旱诊断曲线越接近于“锯齿”状,不合理的剧烈

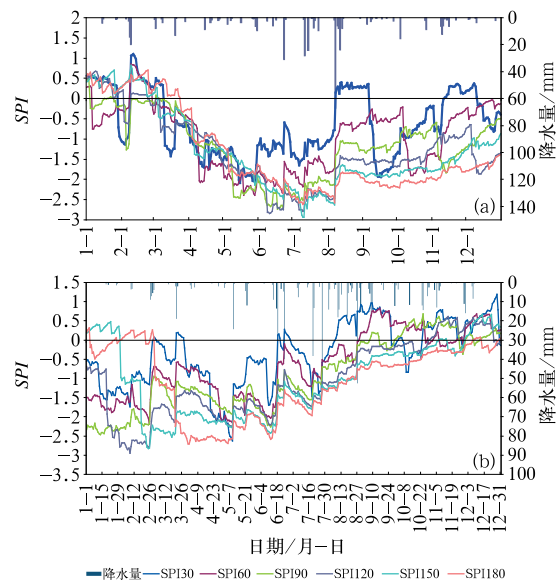


图 7 1978 年 1 月 1 日至 12 月 31 日 (a) 和 2011 年 1 月 1 日至 12 月 31 日 (b) 各时间尺度 SPI 对应典型干旱过程诊断分析

Fig. 7 Diagnostic analysis of typical drought processes corresponding to SPI in different time scales

(a) from 1 January to 31 December 1978, (b) from 1 January to 31 December 2011

跳跃越少,与干旱的发生发展机理愈加吻合。究其原因,不难看出这是由于降水量移出监测时间窗口所致,SPI 时间尺度越短,降水量所占的比重就越大,当同等降水移出时间窗口时,时间尺度短 SPI 监测曲线就会出现剧烈“抖动”,干旱“突然”加重,这与干旱的发生发展机理是不符的,而时间尺度长的 SPI,降水权重相对较小,监测曲线刻画出的干旱是“温和”加重,这更加符合干旱的发生发展机制。另一方面,当出现明显降水时,干旱缓解,由图 7 诊断曲线可以看出,各时间尺度 SPI 对于降水过程均出现不同程度的响应,SPI 时间尺度越短,对降水的敏感性越强,响应越“剧烈”,例如 SPI30、SPI60 等,时间尺度越长,响应越“迟钝”,干旱的缓解或解除越慢,例如 SPI150、SPI180 等。总体而言,不同时间尺度的 SPI 对干旱的反映是不一样的,针对不同时间尺度的干旱,应选择合适时间尺度的 SPI 进行监测评估。

2.6 与土壤墒情相关性

土壤墒情代表土壤的干湿状况,与干旱轻重程度密切相关,分析各时间尺度 SPI 与不同深度(10、20、30、40、50 cm)土壤墒情的相关性,进而比较不同时间尺度 SPI 在干旱监测中的应用效果。仍以寿县国家气候观象台为代表站,根据干旱过程的典型性及土壤墒情资料的完整性和可靠性(人工观测资料),典型干旱过程选取 2001 年 1 月 1 日至 6 月 30 日进行分析,各时间尺度 SPI 与不同深度土壤墒情的相关系数见图 8。纵向根据同一时间尺度 SPI、不同深度土壤来看,对于时间尺度较短的 SPI30,其与

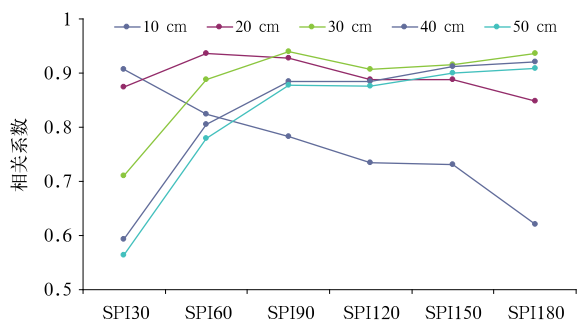


图 8 各时间尺度 SPI 与不同深度土壤墒情相关性

Fig. 8 Correlations between soil moisture in different depths and SPI in different time scales

10 cm 土壤墒情的相关系数为 0.91,与 50 cm 土壤墒情的相关系数为 0.56,随着土壤深度的增加,相关系数逐渐减小;而对于时间尺度较长的 SPI180,其与 10 cm 土壤墒情的相关系数为 0.62,与 50 cm 土壤墒情的相关系数为 0.91,相关系数随着土壤深度的增加而增大。横向根据同一深度土壤、不同时间尺度 SPI 来看,对于 10 cm 表层土壤来说,SPI 时间尺度越长,相关系数越小,而对于 50 cm 深层土壤来说,SPI 时间尺度越长,相关系数越大。究其原因,这是由于表层土壤(如 10 cm)对降水的响应时间很短,体现出短时间尺度的干旱变化,而随着土壤深度的增加,其对干旱的响应时间加长,因而时间尺度较长的 SPI 与土壤墒情的相关性更好,这也表明不同时间尺度的 SPI 代表不同含义,体现不同时间尺度的干旱。

2.7 与干旱相关灾情对比验证

干旱灾情是干旱造成的直接后果,体现干旱的轻重程度,分析各时间尺度 SPI 与安徽省历年(1996—2017 年)干旱灾情(包括农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失)的相关性,对比各时间尺度 SPI 在干旱监测中的应用效果。从各时间尺度 SPI 与农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失的相关系数(图 9)可以看出,随着 SPI 时间尺度的增长,各相关系数均是先增后减,各类灾情数据与 SPI120 的相关性最好(与农作物受灾面积相关系数为 0.70,与受灾人口相关系数为 0.74,与直接经济损失相关系数为 0.67),其次为 SPI150、SPI90 和 SPI180,与 SPI30 和 SPI60 相关性相对较差,各时间尺度 SPI 与干旱灾情相关性的差异也体现出不同时间尺度 SPI 与不同类型的干旱密切相关。

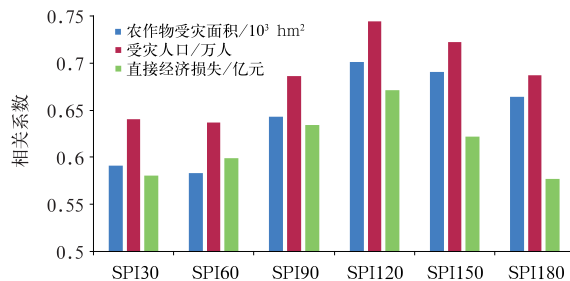


图 9 各时间尺度 SPI 与干旱灾情相关性

Fig. 9 Correlations between drought disasters and SPI in different time scales

3 结论与讨论

(1) 各时间尺度 SPI 对安徽省典型旱年和不同等级干旱发生频率的诊断结果高度一致,诊断出干旱日数较多的年份与历史典型大旱年非常吻合,不同等级干旱的发生频率与实况基本一致;而对于干旱季节演变的诊断结果与多年干旱实况及相关灾情而总结出的结果存在偏差,对于干旱空间差异性的诊断结果与安徽省干旱实际地域分布特征不相吻合。

(2) 各时间尺度 SPI 对于典型干旱过程的逐日诊断差异明显, SPI 时间尺度越短,降水量所占的比重就越大, SPI 监测曲线常出现“骤减”现象,干旱“突然”加重,不符合干旱的发生发展机制,而时间尺度长的 SPI 能更好地刻画出干旱的发生发展;另一方面,出现明显降水时,时间尺度短的 SPI 对降水的响应过于敏感,而时间尺度长的 SPI 对降水的响应又过于“迟钝”,总体来看,针对不同时间尺度的干旱,应采用不同时间尺度的 SPI 进行监测评估。

(3) 各时间尺度 SPI 与不同深度土壤墒情的相关性分析表明,对于时间尺度短的 SPI(如 SPI30),随着土壤深度的增加,相关系数逐渐减小,时间尺度较长的 SPI(如 SPI180),相关系数随着土壤深度的增加而增大,总体而言,时间尺度短的 SPI 更能体现表层土壤的干旱变化,而时间尺度长的 SPI 对于深层土壤的干旱变化具有更好的诊断效果。

(4) 各时间尺度 SPI 与农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失等干旱灾情的相关性分析表明,随着 SPI 时间尺度的增长,各相关系数均是先增后减, SPI120 与各类灾情数据的相关性最好, SPI150、SPI90 和 SPI180 次之, SPI30 和 SPI60 相关性最差。

SPI 在进行干旱监测评估时,其计算方法简便,资料可实时获取,对典型旱年、典型干旱过程、干旱发生频率等具有较好的监测效果,并与土壤墒情、干旱灾情等相关性较好,而且该指标时间尺度灵活多样,不同时间尺度 SPI 与年降水量、不同深度土壤墒情以及与农作物受灾面积、受灾人口和直接经济损失的不同关系,表明不同时间尺度 SPI 与不同类型的干旱密切相关,体现不同类型的干旱,总体而言,干旱是个多时间尺度问题,不同时间尺度干旱往往具有不同的物理机制和不同控制因子,针对不同时

间尺度的干旱应采用不同时间尺度的 SPI 进行监测评估,从与年降水量的负相关性以及与干旱灾情相关性的角度来看, SPI120 最优。此外,在众多影响干旱的因素中, SPI 指标仅考虑了降水盈亏,具有一定的局限性,而干旱是一个非常复杂的科学问题,与区域气候特征、下垫面状况、农作物生育期、土壤类型以及人工干预措施等多方面因素有关,只有从干旱的消生机出发,考虑多方面因素影响,综合多指标监测,才能对干旱作出更加客观、准确的研判。

参考文献

- 安徽省气象局, 2014. 安徽省气候图集[M]. 北京: 气象出版社: 139-145.
- Anhui Meteorological Bureau, 2014. Climatological Atlas of Anhui Province[M]. Beijing: China Meteorological Press: 139-145(in Chinese).
- 白永清, 智协飞, 祁海霞, 等, 2010. 基于多尺度 SPI 的中国南方大旱监测[J]. 气象科学, 30(3): 292-300. Bai Y Q, Zhi X F, Qi H X, et al, 2010. Severe drought monitoring in south China based on the standardized precipitation index at different scales[J]. Sci Meteor Sin, 30(3): 292-300(in Chinese).
- 慈晖, 张强, 白云岗, 等, 2015. 标准化降水指数与有效干旱指数在新疆干旱监测中的应用[J]. 水资源保护, 31(2): 7-14. Ci H, Zhang Q, Bai Y G, et al, 2015. Application of standardized precipitation index and effective drought index in drought monitoring in Xinjiang[J]. Water Resour Prot, 31(2): 7-14(in Chinese).
- 方茸, 周后福, 屈雅, 2010. 基于江淮分水岭地区的 Z 指数修正[J]. 气象, 36(10): 110-113. Fang R, Zhou H F, Qu Y, 2010. Adjustment of Z-Index based on Jianghuai Watershed Area[J]. Meteor Mon, 36(10): 110-113(in Chinese).
- 侯威, 张存杰, 高歌, 2012. 基于气候系统内在层次性的气象干旱指数研究[J]. 气象, 38(6): 701-711. Hou W, Zhang C J, Gao G, 2012. Research on the meteorological drought index based on the hierarchy of climate system[J]. Meteor Mon, 38(6): 701-711(in Chinese).
- 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等, 2012. 基于标准降水指标的新疆干旱特征演变[J]. 应用气象学报, 23(3): 322-330. Li J F, Zhang Q, Chen X H, et al, 2012. SPI-based drought variations in Xinjiang, China[J]. J Appl Meteor Sci, 23(3): 322-330(in Chinese).
- 刘敏, 秦鹏程, 刘可群, 等, 2013. 洪湖水位对不同时间尺度 SPEI/SPI 干旱指数的响应研究[J]. 气象, 39(9): 1163-1170. Liu M, Qin P C, Liu K Q, et al, 2013. Response of lake water level of Honghu Lake to SPEI/SPI drought indices at different time scales[J]. Meteor Mon, 39(9): 1163-1170(in Chinese).
- 任余龙, 石彦军, 王劲松, 等, 2013. 1961—2009 年西北地区基于 SPI 指数的干旱时空变化特征[J]. 冰川冻土, 35(4): 938-948. Ren Y L, Shi Y J, Wang J S, et al, 2013. Spatial and temporal variation characteristics of drought in Northwest China during 1961—2009 with standardized precipitation index[J]. J Glaciol Geocryol, 35(4): 938-948(in Chinese).

- 田红,江双五,鲁俊,2008. 江淮流域年降水量和温度的均一性检验[J]. 气象科学,28(2):227-231. Tian H, Jiang S W, Lu J, 2008. The homogeneity test on mean annual precipitation and temperature over the Changjiang River and the Huaihe River Basins[J]. Sci Meteor Sin, 28(2):227-231(in Chinese).
- 王仰仁,李松敏,王文龙,等,2010. 基于概念模型的麦田土壤水分动态模拟研究[J]. 气象,36(12):102-108. Wang Y R, Li S M, Wang W L, et al, 2010. Simulation of dynamic soil moisture of winter wheat based on conceptual model[J]. Meteor Mon, 36(12):102-108(in Chinese).
- 温克刚,翟武全,2007. 中国气象灾害大典-安徽卷[M]. 北京:气象出版社:10-73. Wen K G, Zhai W Q, 2007. China Meteorological Disaster Canon Anhui Volume[M]. Beijing, China Meteorological Press:10-73(in Chinese).
- 吴杰峰,陈兴伟,高路,2017. 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J]. 灾害学,32(1):199-204. Wu J F, Chen X W, Gao L, 2017. Response of hydrological drought to meteorological drought and its critical conditions[J]. J Catastrophol, 32(1):199-204(in Chinese).
- 吴子君,张强,石彦军,等,2017. 多种累积降水量分布函数在中国适用性的讨论[J]. 高原气象,36(5):1221-1233. Wu Z J, Zhang Q, Shi Y J, et al, 2017. The applicability of several distribution functions which used to describe the characteristics of cumulative precipitation in China[J]. Plateau Meteor, 36(5):1221-1233(in Chinese).
- 徐一丹,任传友,马熙达,等,2017. 基于 SPI/SPEI 指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析[J]. 干旱区研究,34(6):1250-1262. Xu Y D, Ren C Y, Ma X D, et al, 2017. Change of drought at multiple temporal scales based on SPI/SPEI in Northeast China[J]. Arid Zone Res, 34(6):1250-1262(in Chinese).
- 袁文平,周广胜,2004. 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,28(4):523-529. Yuan W P, Zhou G S, 2004. Comparison between standardized precipitation index and Z-index in China[J]. Acta Phytocool Sin, 28(4):523-529(in Chinese).
- 张利利,周俊菊,张恒玮,等,2017. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报,37(3):996-1007. Zhang L L, Zhou J J, Zhang H W, et al, 2017. Temporal and spatial patterns of climate drought-wet and drought event based on standard precipitation index in Shiyang River Basin[J]. Acta Ecol Sin, 37(3):996-1007(in Chinese).
- 张强,姚玉璧,李耀辉,等,2015. 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,30(2):196-213. Zhang Q, Yao Y B, Li Y H, et al, 2015. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in Northwest China[J]. Adv Earth Sci, 30(2):196-213(in Chinese).
- 张强,张良,崔显成,等,2011. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展,26(7):763-778. Zhang Q, Zhang L, Cui X C, et al, 2011. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring[J]. Adv Earth Sci, 26(7):763-778(in Chinese).
- 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[J]. 气象,31(7):6-9. Zou X K, Zhang Q, Wang Y M, et al, 2005. Drought indices and operational drought monitoring in the U. S. A. and China[J]. Meteor Mon, 31(7):6-9(in Chinese).
- Bordi I, Fraedrich K, Jiang J M, et al, 2004. Spatio-temporal variability of dry and wet periods in eastern China[J]. Theor Appl Climatol, 79(1/2):81-91.
- Dracup J A, Lee K S, Paulson Jr E G, 1980. On the definition of droughts[J]. Water Resour Res, 16(2):297-302.
- Guttman N B, 1998. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index[J]. J Amer Water Resour Assoc, 34(1):113-121.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim; American Meteorological Society:179-184.
- Ohlsson I, 2000. Water conflicts and social resource scarcity[J]. Phys Chem Earth Part B Hydrol Oceans Atmos, 25(3):213-220.
- Richard R, Heim J R, 2002. A review of twentieth-century drought index used in the United States. Bull Amer Meteor Soc, 83(8):1149-1165.
- Svoboda M, LeCompte D, Hayes M, et al, 2002. The drought monitor [J]. Bull Amer Meteor Soc, 83(8):1181-1190.