

# 基于 SPEI 的贵州省近 60 年干旱时空特征分析

李月<sup>1,2,3</sup>, 白晓永<sup>1,3</sup>, 周运超<sup>2,3</sup>, 田义超<sup>1,3,4</sup>, 秦罗义<sup>1,3</sup>, 罗光杰<sup>1,3,4</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵州 贵阳 550002;  
2. 贵州大学 林学院 贵州 贵阳 550000; 3. 中国科学院 普定喀斯特生态系统观测研究站 贵州 普定 562100;  
4. 中国科学院大学 北京 100049)

[关键词] 标准化降水蒸散指数; 干旱; 时空特征; 贵州省

[摘要] 基于贵州省 19 个气象站点 1960—2013 年实测气象资料, 利用标准化降水蒸散指数(SPEI), 通过计算各站历年逐月的 SPEI 指数值, 统计近 60 年各站点出现的干旱过程, 分析了贵州省历年、历年各季尺度上的干旱年际变化趋势、四季变化趋势和干旱频率, 揭示了贵州省干旱发生的时空演变特征。研究结果表明: 近 60 年来尤其是 1990 年以来贵州省干旱化趋势较为明显; 在空间尺度上, 贵州省在年和春、夏、秋、冬尺度上均有干旱发生, 干旱频率较高的区域主要集中在遵义市东部地区、铜仁大部分地区、黔东南北部和习水、赤水地区; 在年代际变化方面, 贵州省以 2009—2013 年干旱最为严重, 发生干旱高频区向东北部和西部转移。干旱事件的发生呈现明显的季节性和区域性, 总体分布呈现从西南向东北递增的特点。

[中图分类号] P462 [文献标识码] A [文章编号] 1000-0941(2015)07-0057-04

DOI:10.14123/j.cnki.swcc.2015.0195

近年来干旱事件在全球频繁发生, 严重危及人类的生存, 引起了学术界的关注<sup>[1-6]</sup>。目前学者们普遍使用干旱指数(PDSI)、作物水分指数和标准化降水指数(SPI)等对干旱事件进行研究和评价。PDSI 以水分供需平衡为基础, 结合前期的湿度、蒸发、降水、水文等因子, 将极端干旱和湿润测量变为可能, 但其在使用中存在一些局限, 比如使用区域主要集中在干旱、半干旱地区, 旱情等级界定存在较为明显的主观因素<sup>[7-8]</sup>。SPI 指数能较好地反映干旱的持续时间和强度, 应用过程简便, 但仅考虑了降水资料, 未考虑温度、蒸散量等因素影响<sup>[8]</sup>。2010 年 Vicente-Serrano<sup>[9]</sup>等在 SPI 的基础上引入潜在蒸散, 构建了新的适用于气候变暖背景下干旱监测与评估的气候指数 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), 它是通过降水和蒸散量来反映干旱的程度, 是全球变暖背景下研究干旱的新的理想指数, 被许多专家和学者采用。如王林等<sup>[10]</sup>以干旱变化的不同时间尺度特征为出发点, 利用具有多时间尺度变化并考虑温度影响的 SPEI 指数对我国西南地区近百年的干旱演变特征进行了分析; 李伟光等<sup>[11]</sup>运用 SPEI 指数分析了我国华南地区的干旱变化特征; 石崇等<sup>[12]</sup>用 SPEI 指数对东半球陆地干旱变化特征进行了研究; 周丹等<sup>[8]</sup>基于 SPEI 指数揭示了陕西省干旱发生的时空和强度演变特征; 秦鹏程等<sup>[13]</sup>应用 SPEI 指数分析了在全球气候变暖背景下东北地区玉米生长季的干旱演变特征。

SPEI 指数基于降水与蒸散, 既保留了 PDSI 考虑

蒸散、对温度敏感的特点, 又具备 SPI 指数适合多尺度、多空间比较、准确性较高的优点, 但之前的研究区域主要集中在非喀斯特地区, 尤其是运用 SPEI 指数分析下垫面分散破碎的典型喀斯特地区在长时间序列下的干旱变化趋势的研究相对较少。鉴于此, 本研究选取贵州省作为研究区, 运用 SPEI 指数反演该地区近 60 年来的干旱特征, 对干旱的时空变化趋势进行系统分析, 以期对贵州省气候变化研究和干旱减灾决策提供依据和参考。

## 1 研究区概况和数据来源

贵州省地处中国西南云贵高原东部山区, 位于 E103°36′~109°35′、N24°37′~29°13′, 境内地势西高东低, 自中部向北、东、南三面倾斜, 平均海拔 1 100 m 左右, 地形地貌复杂。属亚热带湿润季风气候区, 年平均气温 15℃左右, 降水较多, 雨季明显, 阴天多, 日照少, 年阴天日数一般超过 150 d, 常年相对湿度在 70% 以上。受大气环流、地形等影响, 气候地域差异较大, 气候不稳定, 灾害性天气种类较多。

选用贵州省 19 个国家基准台站(威宁、望谟、兴义、罗甸、独山、凯里、榕江、三穗、遵义、思南、铜仁、毕节、安顺、贵阳、湄潭、习水、黔西、盘县、桐梓) 1960—2013 年的逐月降水和气温等常规观测数据, 对个别台站的缺测数据采用均值替换法进行插补处理。对有明显错误的数据进行检测, 确定错误数据或者断点, 给予剔除或用多年平均值取代, 订正处理后各台站的要素

资料具有较好的连续性。分别以年、季作为研究尺度，以当年的 1、2 月和上一年的 12 月为冬季 3—5 月为春季 6—8 月为夏季 9—11 月为秋季。

### 2 研究方法

(1) 标准化降水蒸散指数。SPEI 指数计算方法原理是用降水量与蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱程度<sup>[14]</sup>。具体步骤如下：

第一步，计算潜在蒸散。Vicente-Serrano 采用 Thornthwaite 方法

$$PET = 16.0 \times (10T_i/H)^A \quad (1)$$

式中：PET 为可能蒸散量； $T_i$  为月平均气温， $^{\circ}\text{C}$ ， $i = 1, 2, \dots, 12$ ； $H$  为年热量指数； $A$  为常数。

第二步，计算逐月降水与蒸散的差值

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

式中： $D_i$  为降水量与蒸散量的差值，mm； $P_i$  为月降水量，mm； $PET_i$  为月蒸散量，mm； $i = 1, 2, \dots, 12$ 。

第三步，同 SPI 方法，对数据序列进行正态化，计算每个数值对应的 SPEI 指数。由于原始数据序列中可能存在负值，所以 SPEI 指数采用了 3 个参数的 log-logistic 概率分布。log-logistic 概率分布的累积函数为

$$F(X) = [1 + (\frac{\alpha}{x - \gamma})^{-\beta}]^{-1} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (5)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta) \quad (6)$$

上四式中： $\alpha, \beta, \gamma$  为参数； $\Gamma$  为阶乘函数； $w_0, w_1, w_2$  为原始数据序列  $D_i$  概率加权矩。

对累积概率密度  $P$  进行标准化

$$P = 1 - F(x) \quad (7)$$

当累积概率  $P \leq 0.5$  时

$$w = \sqrt{-2\ln P} \quad (8)$$

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1w + c_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3} \quad (9)$$

当  $P > 0.5$  时

$$SPEI = - (w - \frac{c_0 + c_1w + c_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3}) \quad (10)$$

上三式中： $w$  为原始数据序列的概率加权矩； $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$  为参数， $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。

SPEI 具有多时间尺度（1、3、6、12、24、36 个月等）特征，选用 3、12 个月时间尺度的 SPEI 分析研究区季

节和年际干旱时空演变特征。

(2) 干旱发生频率。统计了近 60 年来贵州省历年及历年各季干旱事件 ( $SPEI < -0.5$ )，干旱发生频率  $P$  的计算公式为

$$P = n/N \times 100\% \quad (11)$$

式中： $n$  为实际有干旱发生的次数； $N$  为资料序列数。

(3) SPEI 指数干旱等级划分标准。基于 SPEI 多时间尺度的特征，主要分析 3 个月、12 个月尺度的季节干旱状况。干旱等级划分标准见表 1<sup>[15]</sup>。

表 1 SPEI 指数干旱等级划分标准

等级	类型	SPEI 值
1	正常年份	$-0.5 < SPEI < 0.5$
2	轻度干旱	$-1.0 < SPEI \leq -0.5$
3	中度干旱	$-2.0 < SPEI \leq -1.0$
4	极度干旱	$SPEI \leq -2.0$

### 3 结果与分析

#### 3.1 平均 SPEI 指数年际变化

图 1 反映了 1960—2013 年贵州省平均 SPEI 指数的年际变化。贵州省年平均 SPEI 指数值是全省 19 个气象站年平均 SPEI 值的平均值，各台站均匀分布在省内各地区，因而数据具有很好的代表性。从图 1 可以看出，1960—2013 年贵州省的年平均 SPEI 指数总体上呈逐渐下降趋势。5 年滑动平均曲线表明，SPEI 指数值是在波动中逐渐下降的，其中 1963—1968 年、1986—1994 年呈上升趋势，1996 年以后下降趋势较为明显。2000 年以来，曾于 2006 年出现严重干旱，之后 2009 年一次新的厄尔尼诺现象导致印度季风衰退，贵州受其影响降水偏少<sup>[16]</sup>，在这样的气候趋势下，2011、2013 年均出现严重干旱事件。

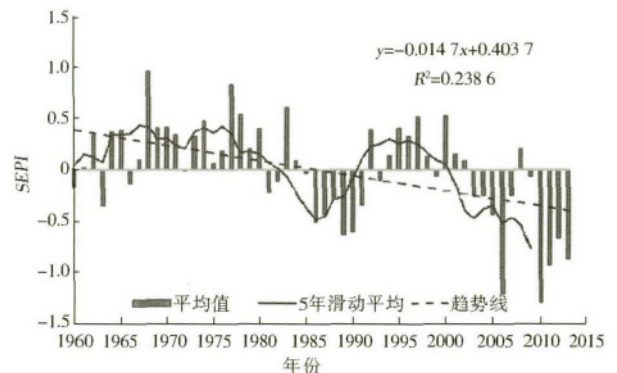


图 1 贵州省平均 SPEI 指数年际变化

#### 3.2 干旱的时间变化特征

3 个月时间尺度的 SPEI 指数可以反映干旱的季节特征。1960—2013 年贵州省 SPEI 指数的四季变化趋势见图 2。由图 2 知，近 60 年贵州省四季 SPEI 指数均呈现不同程度的下降趋势，即四季均呈干旱趋势，其

中夏季最为明显。春季[图 2(a)]在 20 世纪 80 年代之前干旱趋势不是特别明显,但从 1994 年开始 5 年滑动平均曲线发生转折,SPEI 指数值呈现明显下降趋势,表明干旱频发,以 2006 年最为明显 (SPEI = -1.08)。夏季[图 2(b)]干旱趋势较春季明显,趋势线斜率为 -0.12/10a,干旱趋势较为显著,其中 1986 年 (SPEI = -2.01) 发生了极端干旱事件,从 1988 年开始滑动平均曲线波动缓慢上升,但轻度和中度干旱

仍频繁发生。秋季[图 2(c)]干旱趋势较春季不明显,但根据 5 年滑动平均曲线 2001 年以后 SPEI 指数呈明显下降趋势,主要是由于影响我国西南地区降水的主要天气系统——南支槽活动较弱,导致我国西南地区降水偏少,秋旱发生频率升高。冬季[图 2(d)]SPEI 指数以 0.1/10a 的速度下降,但干旱少有发生,可能是因为冬季温度低、蒸发少所致。

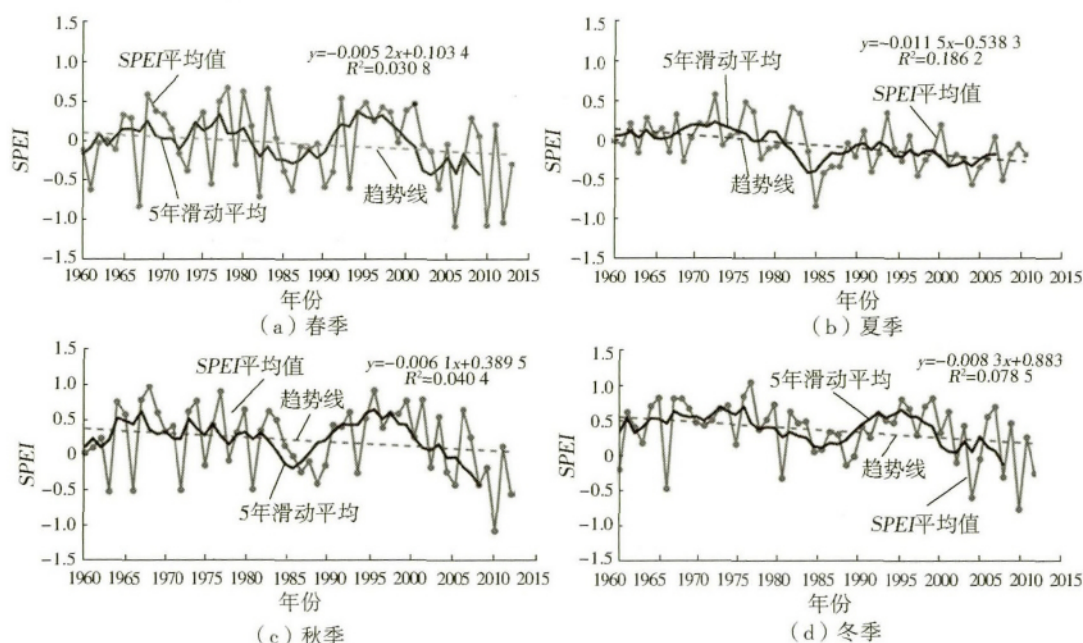


图 2 1960—2013 年贵州省 SPEI 四季变化趋势

### 3.3 连续干旱分布特征

当 SPEI 月尺度数值连续 3 个月为轻度干旱以上,则确定为发生一次连续干旱过程<sup>[8]</sup>。表 2 为 1961—2013 年贵州省各站点干旱持续时间。由表 2 知,干旱持续时间达到 3 个月以上次数最多的是铜仁地区,近 60 年来出现了 34 次干旱;次数最少的是兴义地区,只有 8 次。最长时间的持续干旱为 10 个月,出现过 15 次,出现次数最多的是威宁地区,分别出现在 2005、2006 和 2010 年;干旱持续时间超过 8 个月的出现过 28 次,均发生在 2000 年之后,由此可见 2000 年以来全省发生了多次大范围的持续性干旱。

### 3.4 干旱的空间分布特征

从空间分布上看,贵州省干旱分布呈现自东北向西南逐渐减少的特点,铜仁、湄潭、毕节地区发生频率最高,达 25% 以上,安顺、望谟、罗甸以南地区普遍偏低,最低 20% 左右,其余地区多在 22% ~ 25%。春季干旱呈东多西少的分布规律,干旱主要发生在黔东南地区,发生频率在 22% 以上,发生频率最高的是三穗、铜仁地区,达 25% 以上,其余地区为 12% ~ 18%,发生

表 2 1960—2013 年贵州省各站点干旱持续时间统计

站点名称	连续干旱月数(个)									
	3	4	5	6	7	8	9	10		
安顺	5	3	9	3	2	3	0	1		
桐梓	7	6	2	7	1	4	1	0		
毕节	6	5	7	3	2	0	2	2		
遵义	9	3	3	3	3	2	1	0		
湄潭	5	5	3	3	4	2	0	1		
思南	9	3	5	3	4	1	1	1		
铜仁	9	6	11	5	1	2	0	0		
贵阳	8	3	7	7	3	2	0	1		
独山	1	1	6	4	1	3	0	0		
威宁	4	5	5	5	1	0	1	3		
盘县	4	6	4	4	2	1	0	0		
习水	6	1	6	3	3	3	2	2		
凯里	5	3	8	4	1	1	2	0		
三穗	8	5	2	5	1	1	2	1		
望谟	3	1	8	3	3	1	1	0		
榕江	6	6	3	5	2	1	0	0		
黔西	5	5	6	6	2	2	0	1		
兴义	1	1	2	2	0	1	0	1		
罗甸	4	6	9	5	3	0	0	1		

频率最低的是黔西南地区,不到 10%。夏季受副热带

暖性高压控制,干旱主要发生在贵州省东北的部分地区,发生频率在 45% 以上,发生频率最高的是安顺、毕节、盘县地区,达 55% 以上,发生频率最低的是黔西南州地区,约为 20%,其余地区为 20% ~ 35%。秋季干旱呈现南少北多的特点,全省差异不是很大,主要发生在贵州省北部和中部地区,发生频率最高的是铜仁、思南地区,达 20% 以上,北部地区为 18% ~ 23%,黔东南地区为 10% ~ 15%,发生频率最低的是望谟和罗甸地区,在 8% ~ 10%,其余地区为 16% ~ 20%。冬季干旱西多东少的特点比较明显,全省差异很大,主要发生在贵州省北部、西部的部分地区,发生频率为 15% ~ 17%,发生频率最高的是毕节、思南地区,达 18% 以上,发生频率最低的是罗甸、铜仁、习水地区,不到 5%,其余地区在 10% ~ 15%。

#### 4 结论与讨论

通过计算各站历年逐月 SPEI 值,揭示了贵州省近 60 年干旱时空分布变化规律,得到以下结论:①近 60 年来,贵州省干旱发生频率呈较为明显的增长趋势,尤其是 20 世纪 80 年代以来干旱发生频率明显增多,强度也呈现加剧趋势。②研究时段内时间尺度上,贵州省干旱发生频率的季节性十分明显,春、夏季区域性干旱频率明显高于其他季节;空间尺度上,干旱发生区域差异显著,干旱发生集中于东部地区,并呈现自西南向东北递增的分布特点。

从研究结果还可以看出春夏季干旱对贵州省影响最大,故有关部门应充分重视春夏季干旱对农业生产造成的损失和影响。值得注意的是,虽然 SPEI 指数在运用过程中考虑了降水、持续时间和蒸散量因素,但是干旱事件的出现还受到地形、植被、风速和环流等综合因素的影响,而目前 SPEI 指数针对干旱发生的驱动机制还不能给予很好的解释,加之影响贵州地区干旱的因素较多,物理机制较为复杂,因此在今后的研究中,对贵州地区干旱发生的机制和干旱的预测还需进一步分析和研究。

#### [参考文献]

- [1] Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability in the central United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(12): 2693 - 2714.
- [2] 陈莉, 蔡雄飞, 王济, 等. 西南特大干旱条件下贵州西部山地土壤含水量变化研究 [J]. 中国水土保持, 2014(11): 60 - 63.

- [3] 张调风, 张勃, 张苗, 等. 1962—2010 年甘肃省黄土高原区干旱时空动态格局 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(8): 2066 - 2074.
- [4] 李雪华, 李晓兰, 蒋德明, 等. 干旱半干旱荒漠地区一年生植物研究综述 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(7): 851 - 856.
- [5] 张军红, 吴波. 干旱、半干旱地区土壤水分研究进展 [J]. 中国水土保持, 2012(2): 40 - 42.
- [6] 李超. 干旱半干旱地区抗旱造林技术探讨 [J]. 中国水土保持, 2010(11): 26 - 29.
- [7] 杨小利, 杨兴国, 马鹏里, 等. PDSI 在甘肃中东部地区的修正和应用 [J]. 地球科学进展, 2005, 9(20): 1022 - 1028.
- [8] 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.
- [9] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-Moreno J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696 - 1718.
- [10] 王林, 陈文. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征 [J]. 气象科学进展, 2012, 2(4): 21 - 26.
- [11] 李伟光, 侯美婷, 陈汇林, 等. 基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究 [J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 84 - 90.
- [12] 石崇, 刘晓东. 1947—2006 年东半球陆地干旱化特征——基于 SPEI 数据的分析 [J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1691 - 1701.
- [13] 秦鹏程, 姚凤梅, 张佳华, 等. 基于 SPEI 指数的近 50 年东北玉米生长季干旱演变特征 [C]//中国气象学会. 第 28 届中国气象学会年会论文集. 中国气象学会, 2011: 9.
- [14] 李伟光, 易雪, 侯美婷, 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.
- [15] 任培贵, 张勃, 张调风, 等. 基于 SPEI 的中国西北地区气象干旱变化趋势分析 [J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 182 - 187.
- [16] 李柏杉. 贵州省气象局提出措施积极应对干旱情势 [EB/OL]. (2010 - 03 - 09). <http://www.gog.cn/zonghe/system/2010/03/09/010754340.shtml>.

[作者简介] 李月(1991—), 女, 贵州贵阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持; 通信作者白晓永(1978—), 男, 河北石家庄市人, 副研究员, 博士, 主要研究方向为岩溶环境与水土保持。

[收稿日期] 2015 - 02 - 25

(责任编辑 李杨杨)