

# 基于 SPEI 的滇中季节性干旱时空特征分析<sup>\*</sup>

高 瑞, 王 龙<sup>\*\*</sup>, 张燕明, 雷腾云, 余 航  
(云南农业大学 水利学院, 云南昆明 650201)

**摘要:**【目的】干旱缺水是制约滇中发展的重要因素之一, 评价滇中干旱变化规律对制定区域抗旱对策、应对干旱缺水问题十分必要。【方法】以近 40 年来滇中 45 个气象站的月降水、气温资料作为基础数据, 采用降水蒸发差值 (P-PET) 初步衡量滇中地区水分盈亏状况, 然后以标准化降水蒸发指数 (SPEI) 作为干旱指标计算了滇中旱季 SPEI 的总体变化趋势、周期特征, 分析滇中地区干旱的时空变化特征。【结果】过去 40 年, 滇中地区冬春两季、干季水分亏缺较为严重, 除春季 SPEI 呈微弱上升趋势外, 冬季、干季均以下降趋势变化; 干季周期变化为 11、18、29 年, 春季周期变化为 6、12、24 年, 冬季为 8、12、18 年。滇中各季 SPEI 空间上具有较好的一致性, 表现为总体一致型。【结论】该研究结果可为滇中地区制定抗旱策略、科学合理配置水资源提供参考依据。

**关键词:** 标准化降水蒸发指数; 时空特征; 周期; 干旱; 滇中

中图分类号: S 161.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X (2019) 03-0516-06

## The Spatial-Temporal Distribution of Seasonal Drought in Central Yunnan Based on SPEI

GAO Rui, WANG Long, ZHANG Yanming, LEI Tengyun, YU Hang

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** [Purposes] Drought and water shortage is one of the important factors restricting the development of Central Yunnan, therefore, it is essential to evaluate drought space and time distribution for working out the drought preparedness plans. [Methods] According to the monthly data of precipitation and temperature collected from 45 meteorological stations of Central Yunnan, preliminarily measured water profit and loss with P-PET and with SPEI as drought index, we analyzed the spatio-temporal characteristic based on the change of SPEI and period character. [Results] Winter, spring and dry season had a serious water deficit, dry and winter SPEI had the decreasing trend except for spring and had the periods of 11, 18, 29 years and 8, 12, 18 years; and had the periods of 6, 12, 24 years for spring. Good agreement of SPEI in space showed general uniform type. [Conclusion] The results of the study can provide a reference for the establishment of drought resistance strategy and the rational allocation of water resources.

**Keywords:** standardized precipitation evapo-transpiration index (SPEI); spatial and temporal distribution; period; drought; Central Yunnan

---

收稿日期: 2018-07-28 修回日期: 2018-09-26 网络出版时间: 2019-03-20

\*基金项目: 云南省应用基础研究项目 (2015FD021)。

作者简介: 高瑞 (1989—), 女, 云南陆良人, 硕士, 讲师, 主要从事区域水资源开发与利用研究。

E-mail: 958366143@qq.com

\*\*通信作者 Corresponding author: 王龙 (1975—), 男, 四川射洪人, 硕士, 副教授, 主要从事区域水资源开发与利用研究。E-mail: ynndwl@126.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201807033](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201807033)



中国旱灾格局总体呈东西分布, 重旱灾区域在北方相对集中分布在黑龙江西部、内蒙古中部、河北北部、陕西北部和宁夏, 在南方主要分布在中部五省和四川东部、贵州和云南<sup>[1]</sup>。旱灾是影响云南农业生产最为严重的气象灾害。滇中地区是云南省的核心, 滇中经济发展直接关系到云南全省和中国西南地区的发展。同时滇中干旱灾害十分频繁, 影响范围大, 持续时间长, 近年来旱灾频次及危害程度呈上升趋势, 多以冬春连旱为主, 这对滇中的农业生产发展及社会经济发展造成很大影响。因此, 基于气象站点观测数据研究滇中区气象干旱及其演变规律, 全面正确地评价滇中干旱灾害的时空分布特征, 认识和掌握变化环境下旱灾的变化趋势及演变规律, 对滇中地区干旱预警及区域防灾减灾具有重要意义。

干旱指数是用于衡量某一地区干旱程度的度量指标, 是识别干旱的基础<sup>[2]</sup>。关于干旱指标已有大量研究, 但不同地区有着各自不同的自然条件和社会经济发展状况, 再加上干旱指数本身的时空局限性, 使得这些研究结论和价值难以广泛适用, 因此选择合适的干旱指标是研究区域干旱气候的基础<sup>[3]</sup>。笔者将目前运用较为广泛的干旱指标在南盘江流域的适用性进行对比分析, 从干旱和干旱等级识别能力来看, 标准化降水蒸发指数(SPEI)作为一种计算简便、考虑因子较全面的干旱指数更适合用于该地区的干旱监测和评价<sup>[4]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况和数据来源

滇中地区包括昆明、玉溪、楚雄、曲靖、大理、红河和丽江等7个市州, 地处云贵高原与横断山脉交接带, 位于东经 $99^{\circ}30' \sim 104^{\circ}14'$ 、北纬 $23^{\circ}12' \sim 26^{\circ}41'$ 。属北热带、南亚热带、中亚热带和北亚热带等6个气候区, 气候变化较为复杂, 降水时空分布不均, 冬干夏雨, 干湿分明, 夏秋季降水多而集中, 冬春季干燥少雨, 风速和蒸发量大。

本研究采用滇中45个气象站近40年的降水及气温资料作为基础数据构成研究所需的数据序列, 缺测数据采用相关分析法进行插补和延长。

季节划分: 春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—翌年2月)、干季(11—翌年4月)、湿季(5—10月)。

### 1.2 计算方法

(1) 水分盈亏指标: 本研究选用降水蒸发量差值(P-PET)作为衡量地表水分盈亏的指标来研究滇中地区的干湿状况, 当P-PET>0时, 表示该区域的降水量能够为潜在蒸散量提供充足水源, 水分存在盈余; 反之, 表示该区域的降水量难以满足潜在蒸散过程中所需要的水分, 水分处于亏缺状态<sup>[5]</sup>。

(2) 标准化降水蒸发指数(SPEI)利用降水和潜在蒸发量的差值作为输入因子, 计算得到不同时间尺度的 SPEI, 具体计算过程见文献[4, 6]。

(3) 采用线性回归和滑动平均来分析滇中各季的干旱变化趋势; 采用 Morlet 小波分析干旱的突变和周期特征<sup>[7]</sup>。

(4) 采用经验正交(EOF)、旋转经验正交(ROEOF)并应用 ArcGIS 插值分析滇中地区干旱的空间特征, 具体步骤详见文献[7]。

## 2 结果与分析

### 2.1 滇中各季节干湿状况分析

根据滇中地区各季节平均降水和潜在蒸发量序列, 计算该地区P-PET, 统计其均值、方差、标准差、偏态系数、峰态系数、最大值、最小值和范围值(最大值与最小值之差)(表1)。干湿季的年均P-PET分别为-118.78 mm、247.41 mm, 湿季年际变化较大, 为477.61 mm, 干季变化较小, 仅为湿季的一半, 为217.90 mm。四季中, 夏季的P-PET最大, 为212.83 mm, 秋、冬、春季依次减小, 分别为35.95 mm、-40.46 mm和-79.74 mm。同样, 夏季P-PET的年际变化最大, 变化值为322.50 mm, 冬季最小, 仅为104.95 mm。由滇中地区各时间尺度下P-PET均值大小可知: 滇中春季、冬季、干季处于水分亏缺状态, 故以下仅对春季、冬季、干季的干旱特征进行分析, 这与滇中冬春干旱频发实际相一致。

### 2.2 滇中旱季 SPEI 时间变化分析

滇中地区旱季 SPEI 时间变化如图1所示。除春季 SPEI 呈微弱上升趋势外, 干季与冬季均呈下降趋势, 表明在过去40年, 除春季外, 滇中地区均存在干旱化的趋势。就干季而言, 除1982年 SPEI 大于 0.5 外, 其余年份均小于 0.5, 几乎所有年份都发生干旱, 这与滇中地区降水时空分布不均(主要集中在5—10月)有很大关系。春季

表1 滇中地区1971—2012年P-PET序列的统计值

Tab. 1 Statistics for P-PET series from 1971 to 2012 in Central Yunnan mm

时间 time	均值 mean	方差 variance	标准差 standard deviation	偏态系数 coefficient of skew	峰态系数 coefficient of kurtosis	最大值 maximum value	最小值 minimum value	范围值 range
春季 spring	-79.74	2 539.18	50.39	0.420 5	2.661 8	50.71	-167.39	218.10
夏季 summer	212.83	7 152.07	84.57	-0.214 6	2.189 7	351.78	29.28	322.50
秋季 autumn	35.95	2 597.42	50.96	-0.243 4	2.918 1	137.55	-103.07	240.62
冬季 winter	-40.46	603.77	24.57	0.580 3	3.022 8	22.16	-82.79	104.95
干季 dry season	-118.78	2 341.79	48.39	0.414 1	2.876 6	10.31	-207.59	217.90
湿季 wet season	247.41	12 275.33	110.79	-0.098 5	2.452 6	465.73	-11.88	477.61

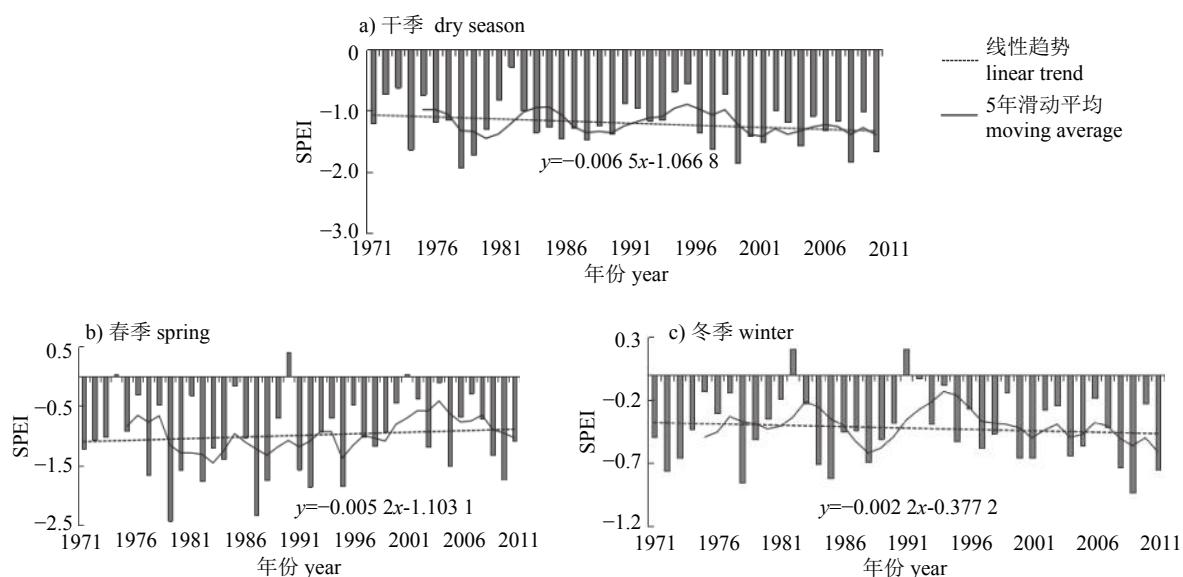


图1 1971—2012年滇中旱季的标准化降水蒸发指数(SPEI)时间变化

Fig. 1 Temporal variation of SPEI in Central Yunnan from 1971 to 2012

的 SPEI 呈上升趋势, 上升速率为 0.052/10 年, 表明在研究时段内, 滇中地区春季逐渐趋于湿润化, 1990 年 SPEI 最大, 为 0.40, 1963 年最小, 为-2.42, 其中, 共有 31 年发生干旱, 22 年发生中旱及中旱以上干旱, 中旱及以上干旱占 71%; 趋势系数未通过显著性检验, 故湿润化程度不明显; 5 年滑动平均在 1996 年上升较为明显, 其余时间变化相对平稳。冬季变化幅度最小, 下降速率为-0.022/10 年, 41 年来, 冬季 SPEI 下降了 0.09, 其中有 15 年发生干旱, 占研究年份的 37%。

由图 2 可知: 滇中旱季均存在 3 个特征时间尺度。干季分别是 11 年、18 年、29 年, 周期信号为全时域性, 周期变化比较规则; 春季表现为 6 年、12 年、24 年 3 个时间尺度, 均贯穿整个研究时段; 冬季表现为 8 年、12 年、18 年 3 个时间尺度, 1971—1996 年, 8 年时间尺度较为显著, 12 年和 18 年时间尺度在整个研究时段都很显著。

由图 3 可以判断出研究区内各季 SPEI 的增减变化和突变点。由干季小波实部变化过程可知: 在 11 年时间尺度上, 1973—1977 年、1981—1984 年、1988—1992 年、1995—1998 年及 2002—2006 年各时段为正相位, 表示偏涝期; 而其余各时段为负相位, 表示偏旱期; SPEI 变化的平均周期为 7.5 年左右, 大约经历了 5 次干湿变化。18 年时间尺度上, 有 4 个偏涝期(1974 年以前、1980—1986 年、1992—1997 年和 2003—2008 年)和 4 个偏旱期(1974—1980 年、1987—1991 年、1998—2003 年和 2008 年以后), 偏涝突变点在 1974、1980、1986、1992、1998、2003 和 2009 年; 平均变化周期为 12 年左右, 大约 4 次干湿变化。29 年时间尺度上, 分别有 3 个偏涝期和 2 个偏旱期, 偏涝突变点发生在 1979、1988、1998 和 2007 年, SPEI 平均变化周期为 18 年左右, 大约 3 次干湿变化。

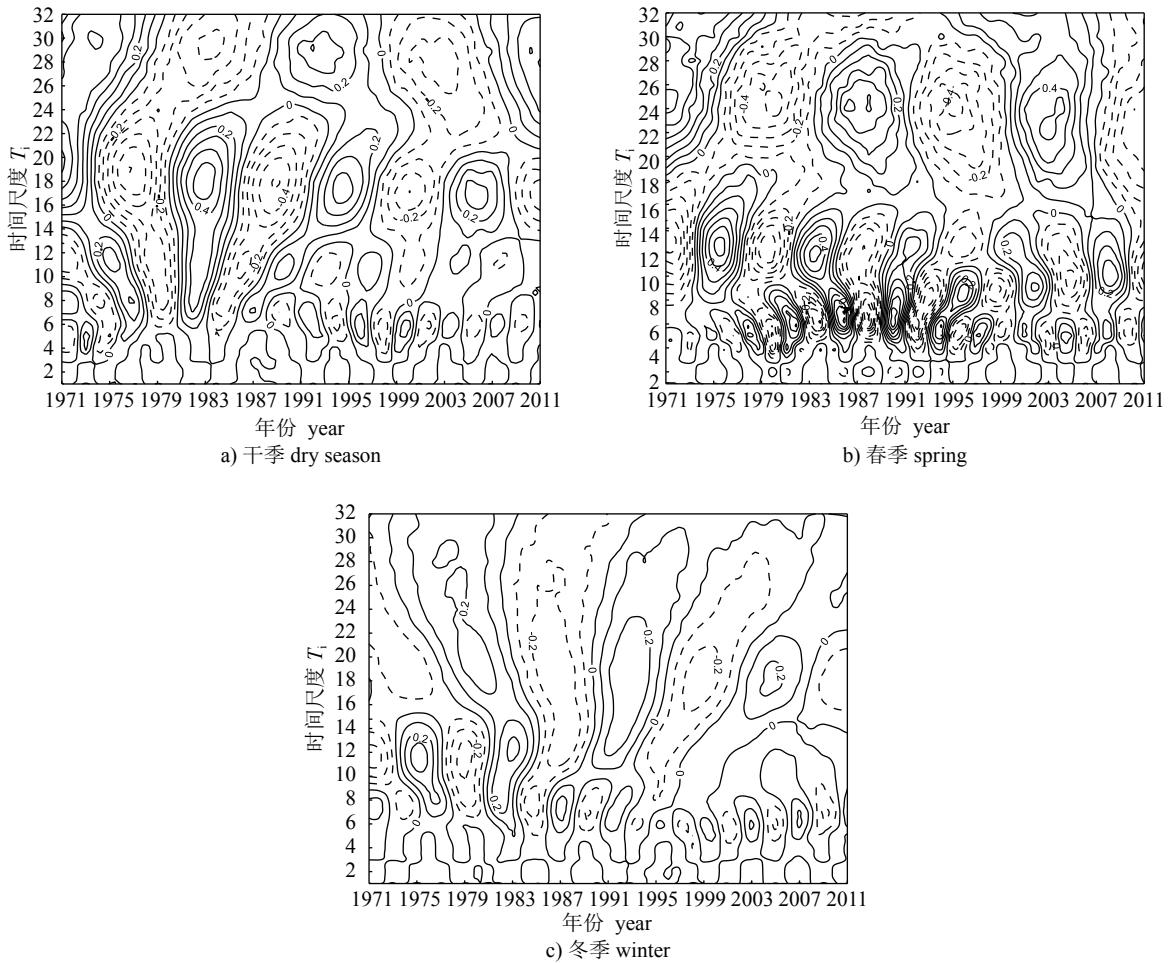


图 2 滇中旱季 SPEI 小波系数实部时频分布图

Fig. 2 Time-frequency distribution of wavelet coefficients real part in Central Yunnan

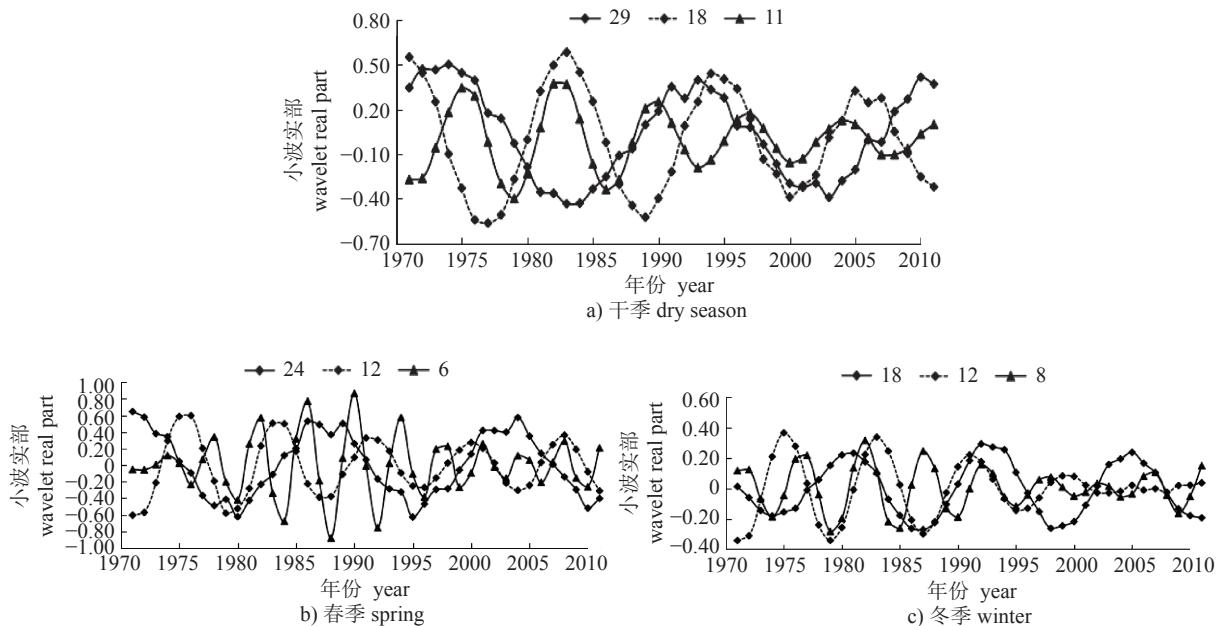


图 3 小波变换系数实部变化过程

Fig. 3 Change process of wavelet transform coefficients real part

春季：对于24年尺度(高层次)，系统存在5个突变点，分别是1975、1983、1991、1999和2007年，SPEI的平均变化周期为16年左右，根据变化曲线的趋势，下一个突变点在2011—2016年之间；对于12年尺度(中层次)，系统存在10个突变点，平均变化周期为8年左右；对于6年尺度(低层次)，系统存在更多突变点。

冬季：18年、12年和8年时间尺度依次存在7个、10个和16个突变点；平均变化周期分别为13年、7.5年和5年左右。

### 2.3 滇中旱季 SPEI 空间变化分析

由图4可知：滇中干季几乎各地区均为正值，表明干季 SPEI 变化表现为总体一致型。图4a

第1模态为干季 SPEI 的第1特征向量空间分布图，该特征向量的方差贡献率为 43.44%，旋转特征向量值自东向西递减，高值区位于滇中东南部，中心极值达 0.89，代表站为建水。第2特征向量空间分布呈现出与第1特征向量相反的分布规律，旋转特征值由西向东逐渐减小，高值区位于大理、南涧一带，中心值为 0.9，代表站为漾濞，该种空间分布特征占总方差贡献率的 34.47%。

根据滇中春季 SPEI 的第1、第2、第3特征向量空间分布图(图4b)可知：春季干湿状况也体现为总体一致型，即普遍干旱或普遍湿润。第1特征向量的方差贡献率为 32.44%，为春季最主要的空间分布型特征，旋转特征向量值自西向东

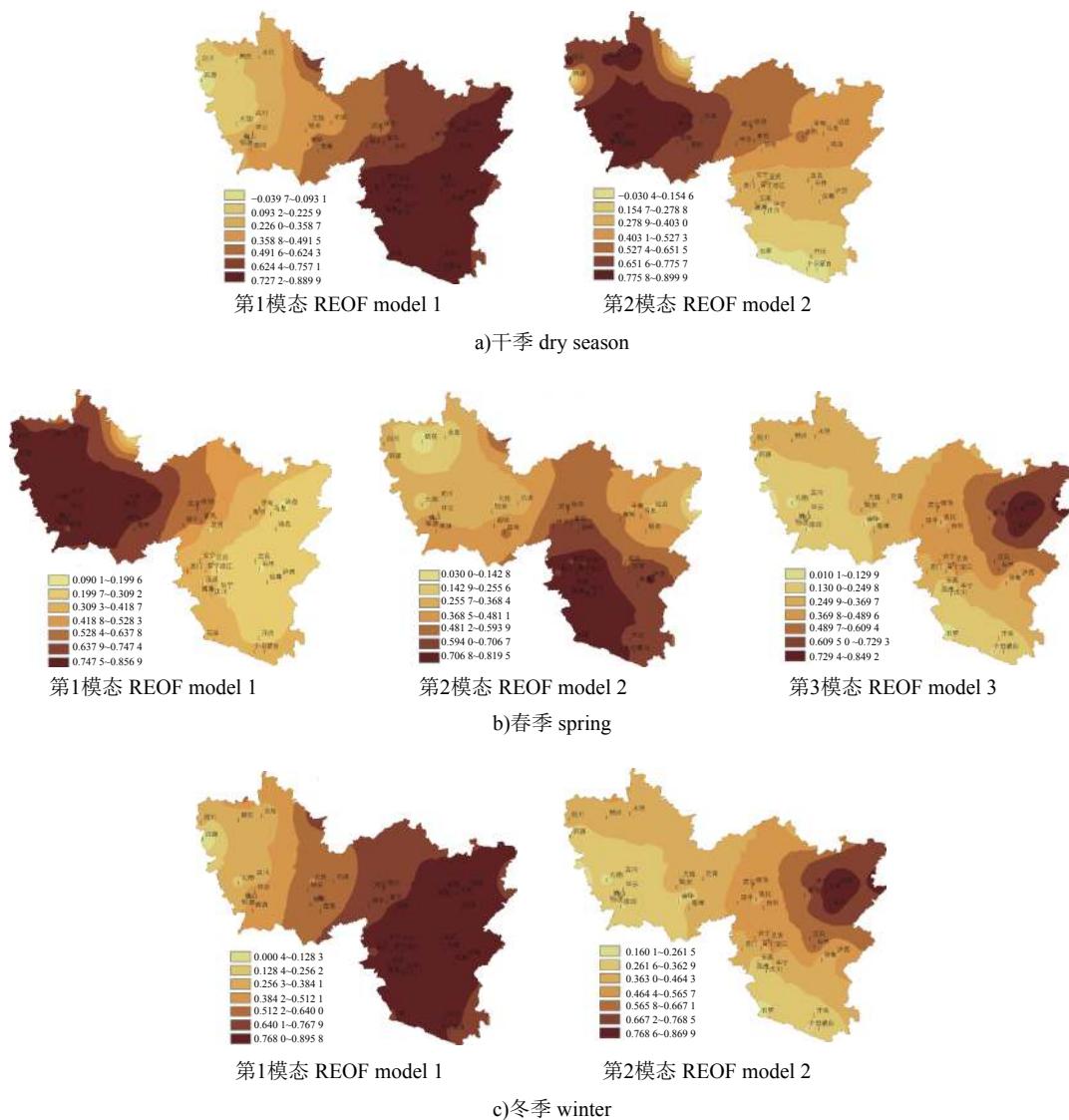


图 4 滇中各季 SPEI 特征向量

Fig. 4 The eigenvectors of SPEI in Central Yunnan

递减, 高值区位于滇中西部剑川、洱源、南华一带, 代表站为宾川, 中心值达 0.86。第 2 特征向量的方差贡献率为 30.53%, 因子荷载高值区位于东南部, 中心值为 0.82, 代表站为玉溪。第 3 特征向量空间分布的方差贡献为 14.81%, 荷载高值区位于滇中东北部沾益、马龙一带, 中心极值为 0.85, 代表站为沾益。

滇中冬季 SPEI 的前 2 个特征向量空间分布如图 4c 所示。冬季同样表现为总体一致型。第 1 特征向量为滇中冬季最主要的空间分布结构, 其方差贡献率达 47.13%, 荷载值由东南向西北逐渐减小, 以昆明作为分界, 昆明以东为荷载高值区, 以西为低值区, 中心极值为 0.9, 代表站为江川。第 2 特征向量的方差贡献率为 29.87%, 荷载高值区位于西部大理、祥云和巍山等地区, 代表站为漾濞, 中心值为 0.87。

### 3 讨论

SPEI 综合考虑了降水与潜在蒸散对干旱的影响, 具有更为灵活的时间尺度优势, 与 Palmer 指数<sup>[8]</sup>相比, SPEI 作为一种计算简便、考虑因子较全面的干旱指数更适合用于区域干旱的监测与评价。SPEI 原始计算过程中潜在蒸散量采用的是仅考虑温度因子的桑斯维特方法, 而彭曼公式计算蒸发量综合考虑了气温、相对湿度、日照时间和风速, 更适合用于评价全球气候变暖大背景下的区域干旱变化<sup>[9-10]</sup>, 因而本研究选用物理机制更为完善的彭曼公式计算潜在蒸散量更具有实际意义。目前, 对于云南干旱变化已有一定研究, 杨蕊等<sup>[11]</sup>针对云南省干旱特征进行分析发现滇中是季节性干旱的主要发生区域, 其次为滇东北、滇西南、滇东南, 但有关这方面更详细的研究相当缺乏。本研究对近 40 年滇中干旱时空演变进行详细研究, 为有效规划配置水资源, 科学合理实施工程措施、人力物力调度, 减少干旱灾害造成的损失奠定基础。干旱的研究不仅要考虑地表水分的收支, 还需兼顾地形地貌、植被变化、土壤性质以及作物需水量等诸多因素, SPEI 仍未能够解释干旱发生的机制, 还有待于进一步研究。

### 4 结论

(1) 滇中冬春季、干季的 P-PET 均为负值, 表明冬春季、干季水分亏缺较为严重, 这与研究区冬春干旱实际相符合。

(2) 过去 40 年, 除春季呈微弱上升趋势外, 冬季、干季均以下降趋势变化, 变化速率各不相同, 表明冬季、干季逐渐趋于干旱化, 而春季逐渐湿润。

(3) 干季特征时间尺度分别是 11、18 和 29 年, 春季表现为 6、12 和 24 年三个时间尺度; 冬季为 8、12 和 18 年三个时间尺度。

(4) 滇中旱季 SPEI 在各特征向量下均为正值, 表明滇中干旱在空间上具有较好的一致性, 表现为总体一致型。

### [参考文献]

- 王静爱, 孙恒, 徐伟, 等. 近 50 年中国旱灾的时空变化[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(2): 1.
- 詹存, 梁川, 赵璐. 川中丘陵区季节性干旱时空分布特征及成因分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 82. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.011.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.05.014.
- 高瑞, 王龙, 杨茂灵, 等. 三种干旱指数在南盘江流域识别干旱能力中的应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 9.
- 赵聚宝, 徐祝龄, 钟兆站, 等. 中国北方旱地农田水分平衡[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index-SPEI[J]. Journal of Climate, 2010 (23): 1696. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- PALMER W C. Meteorological drought US[R]. Weather Bureau Research Paper, 1965.
- PENMAN H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1948, 193(1032): 120. DOI: 10.2307/98151.
- ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- 杨蕊, 王龙, 高瑞, 等. 基于标准化降水指数的云南冬春干旱特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(4): 36.

责任编辑: 何承刚