

SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区干旱演变中的对比分析¹

赵平伟¹, 郭萍¹, 李立印¹, 舒裙²

(1 . 云南省临沧市气象局, 云南临沧 677099 ; 2 . 中山大学环境科学与工程学
院大气科学系, 广东广州 510006)

【摘要】以滇西南地区为研究区, 计算出近 53a 该区及周边 44 个气象站点标准化降水蒸散指数 (SPEI) 和标准化降水指数 (SPI)。运用 M-K 突变检测和 Morlet 小波交换等方法, 对滇西南地区两种指数对应下的 4 种类型季节连旱变化特征进行系统分析。结果表明: 近 53a 中, 两种指数判定的同一时间尺度下的干旱事件次数和发生时间基本统一, 4 种类型季节连旱事件为 12-14 次, 多存在并发性; 4 个季节连旱时段上两种指数均存在 3a 左右显著周期变化; 同一时段上, 两种指数在趋势变化格局空间分布和变化程度上均存在着较大差异, 4 个时段上的干湿变化趋势也表现出 SPEI 呈变干趋势, SPI 则变干、变湿各为一半的明显不同, 这主要是由于期间研究区显著增温加剧了“降水量-蒸散”的水分平衡; 与 SPI 相比, SPEI 考虑了热量因子对潜在蒸散发的贡献, 能较好地对气候变暖背景下研究区干旱进行刻画。

【关键词】滇西南地区; 标准化降水指数; 标准化降水蒸散指数; 干旱演变

【中图分类号】P467

【文献标志码】A

【文章编号】1004-8227(2017)01-0142-08

【DOI】10.11870/cjlyzyyhj201701017

干旱的发生严重危害人民生活 and 工农业生产。因其成因复杂且易受人类活动影响, 较难准确量化干旱持续时间、发生强度和影响范围。目前, 全球和区域干旱监测与分析的研究普遍借助干旱指数展开进行[1-4]。近几年来, 西南地区发生了多次严重的干旱灾害, 国内一些学者利用引入潜在蒸散项构建的标准化降水蒸散指数 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) 对西南地区干旱事件进行分析并得到一些有意义的结果, 如王林等[5]通过与年鉴资料对比证明了 SPEI 指数在西南地区的适用性, 并进一步指出不同时间尺度的干旱叠加会导致极端干旱事件发生; 熊光洁等[6]通过对 SPEI、SPI 和相对湿度指数 M 在西南地区的适用性进行分析, 指出 SPEI 指数对西南地区季、半年和年尺度的干旱有更好的表征能力; 熊光洁等[7]基于 SPEI 对中国西南地区干旱特征的分析, 表明西南地区季、半年和年尺度的干旱频率变化趋势存在较大差异; 此外, 王东等[8]从干旱四季和年际变化趋势、干旱强度、干旱事件频次等多方面对西南地区近半个世纪的干旱时空

¹收稿日期: 2016-05-13

修回日期: 2016-06-25

基金项目: 云南省气象局预报员专项项目 (YBZ01Z15) [Special Project of yunnan Meteorological Bureau (YBZ01Z15)]

作者简介: 赵平伟 (1983-), 男, 工程师, 主要研究方向为气象数据数理统计分析及气象环境. E-mail: 7203956@qq.com

特征进行了系统分析。然而，以往利用 SPEI 指数对干旱事件的研究仅集中在月、季、半年和年时间尺度上，尚未对季节连旱进行深入分析。实际上，云南近 50a 来发生的影响较为严重的干旱事件基本为季节连旱[9, 10]。此外，在已有的关于西南地区干旱事件的研究中，在研究资料使用上云南区域气象站点近 40 站，滇西南地区不足 10 个，仅占全部站点的 1/3。站点资料应用不全，加上以往基于 SPEI 指数的西南地区的干旱研究大多建立在各站点干旱指数值的平均化处理基础上，研究结论势必使得小区域干旱事件特征被掩盖，只代表了西南地区整体干旱演变特征。

根据查阅到的《中国气象灾害大典》（云南卷）[10]中有关滇西南地区的历史干旱记录，发生在滇西南地区季节连旱时段主要为冬春、秋末冬春、冬春初夏和秋末冬春初夏。本文所指的季节连旱为指定时间段内，某区域久晴无雨或少雨，造成空气干燥、土壤缺水，影响农作物正常生长发育，人畜饮水困难的水分短缺现象。4 个时段季节连旱中，冬春连旱的发生是造成研究区小春作物低产的主要制约因素，而雨季开始偏晚形成的冬春初夏连旱，严重影响了大春作物栽播、烤烟移栽和菌期生长。本文以 SPEI 和 SPI 作为干旱指标，对滇西南地区 1961-2013 年 4 个时段季节连旱进行系统分析。以期分析两种指数在滇西南地区季节连旱演变中存在的异同的同时，为人们了解、监测及预测滇西南地区干旱发生，提升防灾减灾能力提供一些有意义的结论。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

滇西南地区位于 $21^{\circ} 08' - 25^{\circ} 51' N, 97^{\circ} 30' - 102^{\circ} 21' E$ ，包括德宏、西双版纳、保山、临沧、普洱 5 个州（市）。距孟加拉湾 600 多 km，北回归线穿境而过，处于东亚季风和西南季风共同影响区，形成了四季不分明，干雨季分明，立体型气候明显的气候特征。研究区年平均降水量 1451mm（各站点 915-2452mm），年平均气温 $18.70^{\circ}C$ （各站点 $15.0^{\circ}C - 22.6^{\circ}C$ ）。境内大部地区于 5 月中、下旬进入雨季，10 月上、中旬雨季结束，故 86.1% 的年降水量集中在 5-10 月。

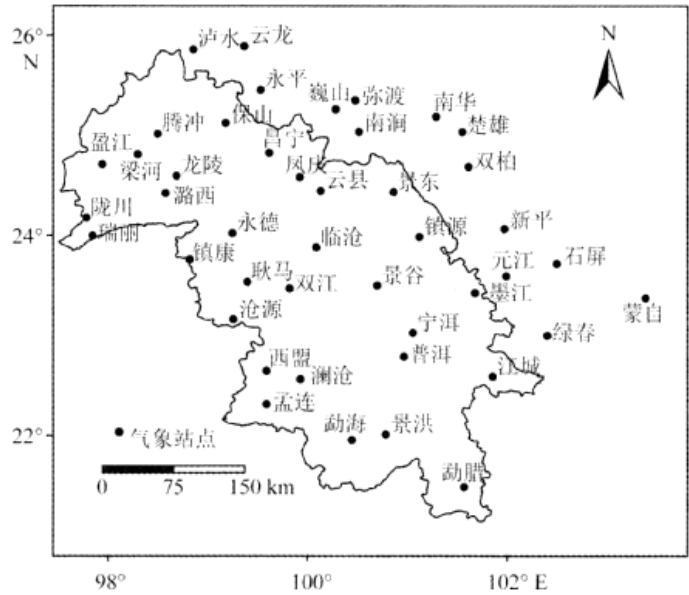


图 1 研究区范围及气象站点分布图

Fig.1 Map of Research Area Coverage and Observation Stations Distribution in Southwest Yunnan and Its Neighborhood

1.2 资料选取

本文所用的气象数据来源于所属州（市）气象局，为滇西南地区及周边 44 个气象站 1961-2013 年逐月降水和逐月平均气温。

1.3 研究方法

SPEI 的计算首先计算逐月降水量与潜在蒸散发的差值，以此来表示水分的盈亏。本文潜在蒸散发的计算采用 Thornthwaite 方法，SPEI 的具体计算步骤参见文献[11]，SPI 计算参见文献[12]。按 $-1.0 < \text{SPEI}(\text{SPI}) \leq -0.5$ 、 $-1.5 < \text{SPEI}(\text{SPI}) \leq -1.0$ 、 $-2.0 < \text{SPEI}(\text{SPI}) \leq -1.5$ 、 $\text{SPEI}(\text{SPI}) \leq -2.0$ 把干旱分为轻旱、中旱、重旱、特旱 4 个不同等级。参考文献[13, 14]，本文以 5 月份 6 个月尺度的 SPEI(SPI) 表示冬春干湿程度，该值为 12 月-次年 5 月共 6 个月的降水量进行累加，分布拟合并标准化的结果，可以较好地反映该时段的干湿状况。秋末冬春（11 月-次年 5 月）、冬春初夏（12 月-次年 6 月）和秋末冬春初夏（11 月-次年 6 月）的干湿状况分别以 5 月份 7 个月尺度，6 月份 7 个月尺度，6 月份 8 个月尺度的 SPEI(SPI) 表示。

此外，采用一元线性回归斜率分析滇西南地区不同时间段 SPEI(SPI) 值时间序列变化趋势，变化趋势显著性检验采用 F 检验；Man-Kendall 法分析时间突变点及其置信度；普通克里格 (Kriging) 对干湿变化趋势进行空间插值；Morlet 小波变换分析各时间段的干湿振荡特征。本文运用 Surfer10 软件结合 MATLAB 编程完成 Kriging 插值、一元线性回归斜率分析、M-K 突变检测和 Morlet, J、波交换的数据处理工作；SPI 和 SPEI 原始计算程序下载于网址 <http://d191tal.c51c.es/handle/10261/10006>, <http://digital.csic.es/handle/10261/10002?locale=en> [2013-11-30]。

2 滇西南地区干旱变化特征分析

2.1 干旱事件统计及其时间突变点检测

使用 SPEI 和 SPI 对滇西南地区 4 种类型季节连旱事件进行判定（图 2），发现两种指数判定得到的 4 个类型的季节连旱事件均为 12-14 次。判定出的同一类型季节连旱事件发生年份基本一致，仅 1-3 次干旱事件存在差异。不同在于，同一时段 20 世纪 90 年代前 SPI 判定出的干旱事件较 SPEI 重，90 年代后则表现相反。发生的季节连旱事件中，冬春连旱和秋末冬春连旱较冬春初夏和秋末冬春初夏严重。此外，4 种类型季节连旱的发生往往具有并发性，及同一年中 4 种类型的季节连旱并存。两种指数判定得到的 4 种类型季节连旱事件中，干旱程度较重的并发年份有：1968/1969、1978/1979、2004/2005、2012/2013 年。与有关滇西南地区历史干旱灾情记录[10, 15]较为吻合。4 个时间段 SPEI 和 SPI 值 M-K 法时序变化突变检验表明，仅秋末冬春初夏 SPEI 值在 2011 年左右发生突变，并于 2013 年超过显著性水平 0.0511 备界线。

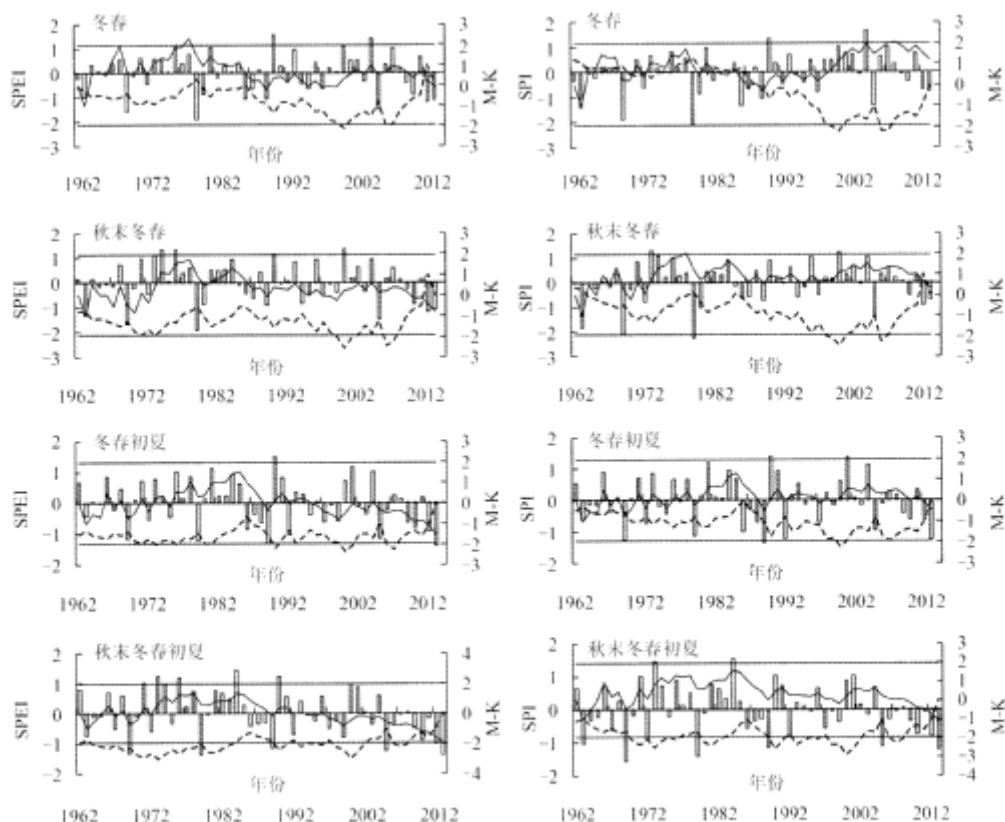


图2 1961–2013年滇西南地区4个季节连旱时段SPEI及SPI指数年际变化及M-K突变检测

Fig.2 At Four Time Periods, the Interannual Variation and M-K Mutation of the SPEI and SPI Index is Analyzed from 1961 to 2013

2.2 干湿时空变化趋势

对 1961–2013 年滇西南地区 4 个季节连旱时段 SPEI 值和 SPI 值变化趋势值进行计算（表 1）。我们发现，两种指数在冬春和秋末冬春 2 个时段上变化趋势相反，SPEI 呈变干趋势，SPI 呈变湿趋势；其余 2 个时间段两种指数均呈变干趋势，但变干程度差异明显。

表 1 滇西南地区4个时间段SPEI和SPI值变化趋势/(10 a)

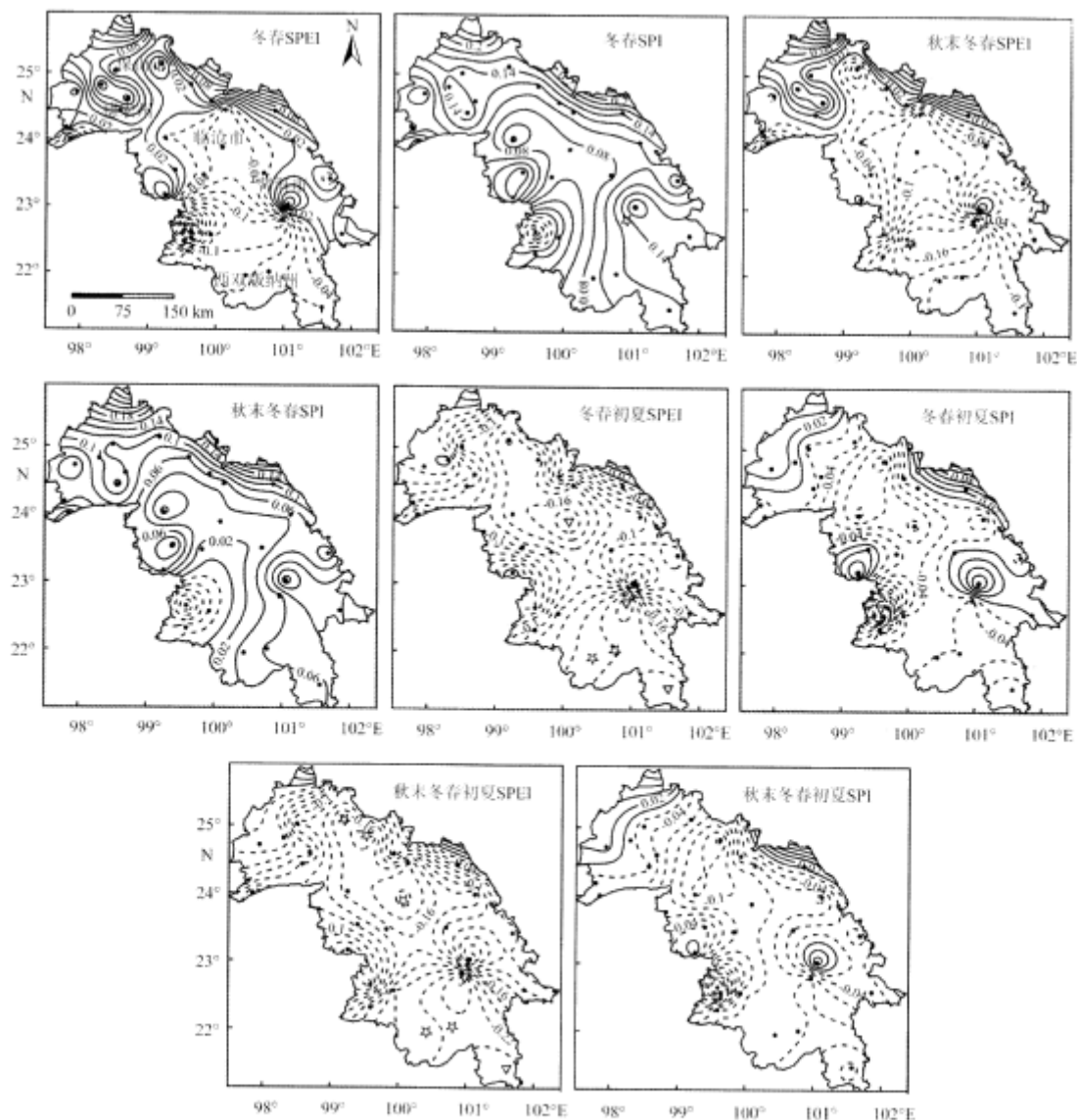
Tab.1 Changes of SPEI and SPI values in 4 Time Periods in Southwestern Yunnan (10 a⁻¹)

	冬春	秋末冬春	冬春初夏	秋末冬春初夏
SPEI/SPI	-0.01/0.09	-0.05/0.05	-0.11/-0.03	-0.13 [*] /-0.06

注：^{*}表示通过0.05显著性水平检验。

图 3 为滇西南地区各站点 4 个季节连旱时段对应的 SPEI 和 SPI 值变化趋势空间分布（图中实线部分为变湿区，虚线部分为变干区）。图 3 可见，4 个时段上两种指数得到的滇西南地区干湿变化格局空间分布和干湿变化程度均存在较大差异；就 SPEI 来看，整个研究区冬春初夏和秋末冬春初夏基本呈变干趋势；秋末冬春除德宏州大部地区和一些边缘地区外，其余区域为变干

趋势；冬春变湿区域较其余3个时段广，主要集中在德宏州和保山市。就SPI而言，4个时间段上的干湿变化差异较大，冬春初夏和秋末冬春初夏变干区域较变湿区域广；而冬春和秋末冬春只有普洱市的少数地区呈变干趋势，其余区域均为变湿。较SPEI，同一时段SPEI变干范围更广，强度更大。



注：●表示站点未通过显著性水平检验，☆表示站点通过0.05显著性水平检验，▽表示站点通过0.01显著性水平检验。

图3 滇西南地区4个时间段SPEI和SPI变化趋势空间分布(10 a)

Fig.3 Research the Change Trends of Precipitation and Temperature at each Station of Which the Drought is Occurred in Four Seasons

2.3 变化周期性分析

通过对4个季节连旱时段上的SPEI和SPI进行Moriet小波功率谱分析（为减少篇幅，本文仅列出SPEI小波功率谱图）。图4中，虚线所包围的范围通过了95%置信水平的红噪声标准谱检验，倒锥形线为影响锥（图中实划线），影响锥外的功率谱由于受到边界效应影响，表现出的周期特征存在较大不确定性。如图4所示，滇西南地区4个时间段SPEI主要表现为具有显著的2-sa的振荡周期，且此振荡周期具有全时域性。此外，冬春和秋末冬春初夏SPEI在1980-1986年还存在7-sa左右的显著振

荡周期；秋末冬春 SPEI 在 1973-1987 年还存在 6-ga 左右的显著振荡周期。通过分析时间平均功率谱（图略），4 个时间段 SPEI 仅 3a 左右的小波功率谱通过了显著性检验，说明 SPEI 变化存在稳定的 3a 左右的周期特征。与 SPEI 相比，同一时间段上的 SPI 也存在 3a 左右的显著周期变化特征，小波功率谱能量强弱时间分布上也具有较强的相似性。

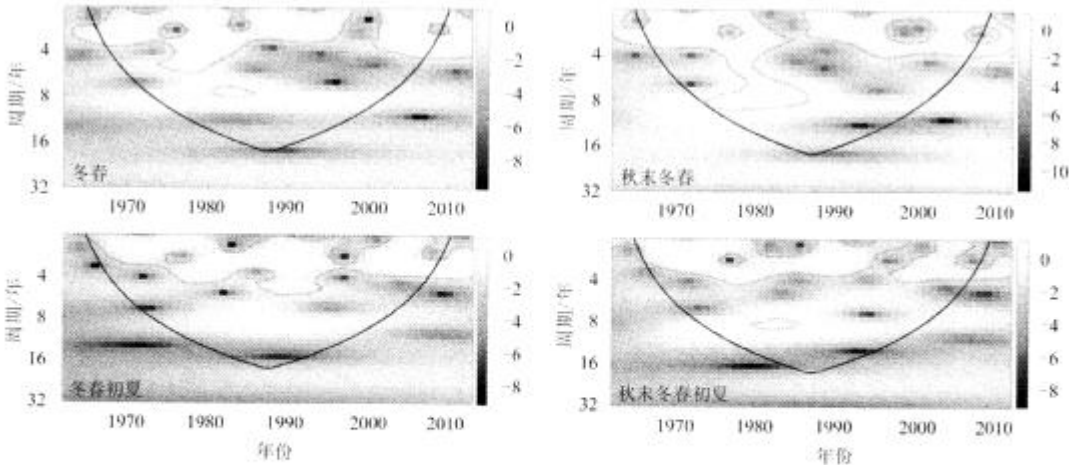
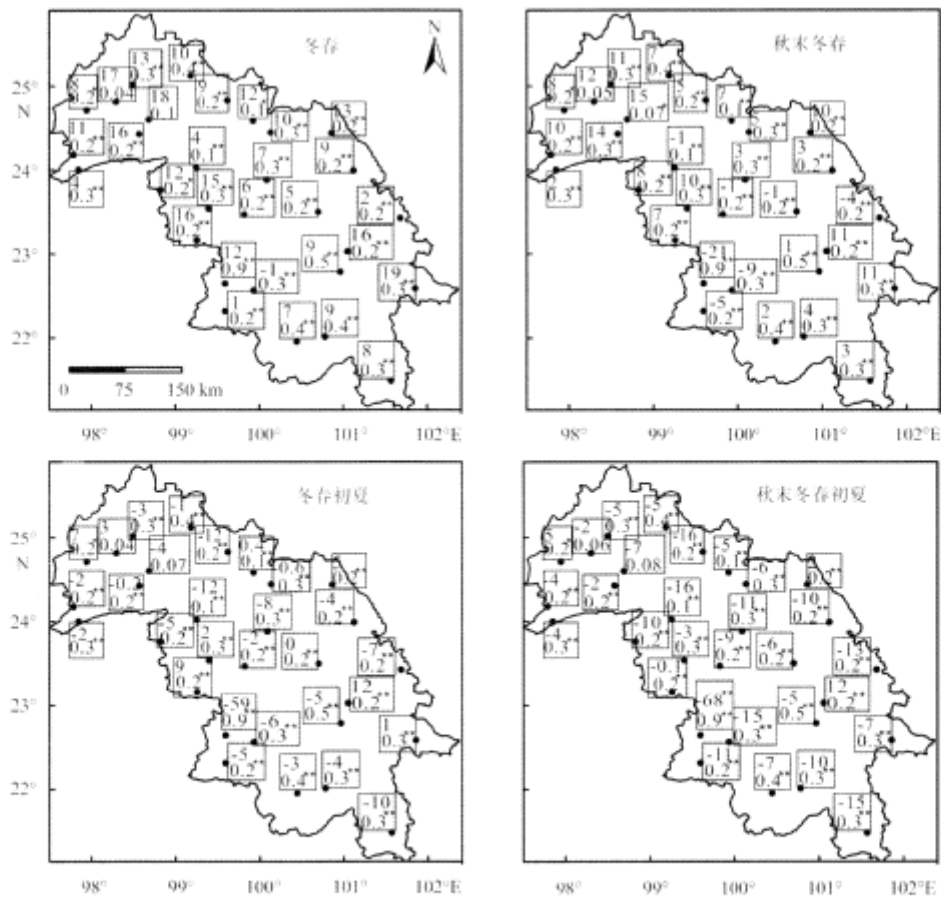


图4 滇西南地区4个时间段SPEI小波功率谱
Fig.4 At Four Time Periods, Wavelet Power Spectrum of SPEI Value in Southwest Yunnan.

3 SPI 和 SPEI 差异分析

3.1 降水量及气温变化对 SPI 和 SPEI 变化的影响

同一降水变化序列，两种指数在时空变化上存有明显差异。我们有必要将两种指数时空变化趋势与降水量和平均气温的时空变化趋势结果进行对比，以考察温度变化对滇西南地区干湿变化的影响。通过对滇西南地区 1961-2013 年 4 个季节连旱时段各站点降水量和平均气温变化趋势进行分析（图 5）。我们发现，冬春和秋末冬春研究区大多站点降水量呈弱的增加趋势，所有站点中除个别站点外平均气温呈显著增温趋势；冬春初夏和秋末冬春初夏研究区大多站点降水量则表现为弱的减少趋势，增温趋势仍显著。对比图 5，图 3 中 4 个时段 SPI 干湿变化趋势和降水呈减少、增多趋势的分布较为一致；而 SPEI 因考虑了热量因子对潜在蒸散发的贡献，其 4 个时间段上的变化趋势由于受到站点显著增温的影响，变化趋势空间分布和降水变化趋势差异较大。这解释了为什么同一降水变化序列下 SPEI 和 SPI 干湿时空变化格局空间分布和变化程度差异明显。



注：框内数据从上至下分别表示站点降水和温度变化趋势，*表示站点通过0.05显著性水平检验，**表示站点通过0.01显著性水平检验。

图5 滇西南地区4个季节连旱时间段各站点降水和气温变化趋势(mm/10 a、℃/10 a)

Fig.5 Research the Change Trends of Precipitation and Temperature at each Station of Which the Drought Is Occurred in Four Seasons

3.2 SPI 和 SPEI 时序变化比较分析

为了直观看到两种指数在滇西南地区干湿表达上存在的差异，我们对 1961-2013 年滇西南地区 3、6、12 和 24 个月 4 个时间尺度 SPEI 和 SPI 的差值(SPEI-SPI) 变化趋势进行比较。其中，3 个月和 6 个月时间尺度的 SPEI 值可反映季节性和干雨季的干湿变化，而 12 个月时间尺度的 SPEI 值则可反映干湿的年际变化。图 6 显示，两种指数对滇西南地区干旱的评定在 2 个历史阶段存在明显不同。以 1994 年为界，前 33a 中两种差值多为正值，表明 SPI 所判定的干湿状态较 SPEI 明显偏干。后 20a 中差值多为负值，SPEI 判定的干湿状态相比 SPI 更干。

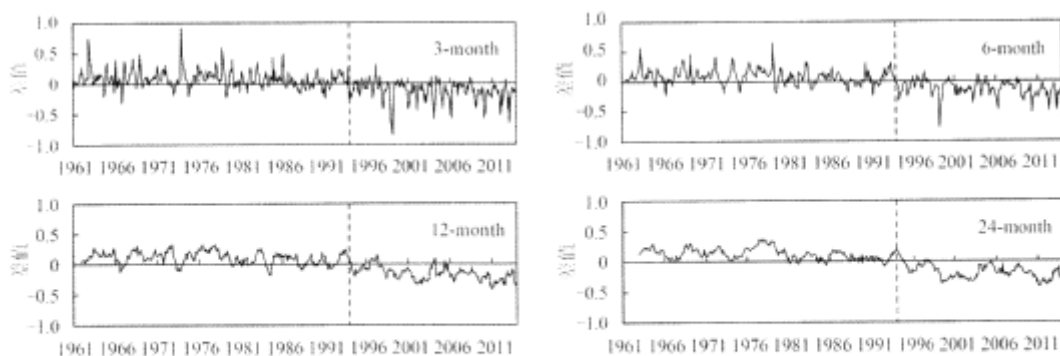


图 6 1961~2013年多时间尺度SPEI和SPI的差值(SPEI-SPI)变化趋势

Fig.6 Time Series of the Difference (SPEI minus SPI) Between Multiscalar SPEI and SPI from 1961 to 2013

3.3 SPI 和 SPEI 对历史季节连旱事件的判定对比

为对比两种指数在滇西南地区季节连旱事件判定中存在的不同,我们选取云南省近 50a 来干旱强度最大的 1962/1963 秋末冬春连旱(11-5 月)、1968/1969 秋末冬春连旱(11-5 月)、1978/1979 秋冬春连旱(9-5 月)、1992 春夏连旱(3-8 月)、2005 春旱(3-5 月)、2009/2010 秋冬春连旱(9-5 月)为待检验干旱事件 [9],对 SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区的适用性进行验证(表 2)。表 2 表明,前 4 次季节连旱中,SPEI 和 SPI 指数均能判定出滇西南地区为重旱或特旱,较好地检测出 4 次不同时段的季节连旱。对后 2 次干旱事件,SPEI 和 SPI 指数仅判定为中旱,较实际旱情程度有所偏小[16-18]。对不同时间尺度一下计算得到的 SPEI 和 SPI 指数值时序演变(图略)进行分析,发现滇西南地区不同时间尺度的干旱在部分时间段上存在相互叠加,这样的叠加在进入 21 世纪后的近 13a 表现尤为突出。这可能导致了滇西南地区后两次干旱事件实际旱象较两种指数判定的干旱程度重 [5]。

表 2 SPEI及SPI在滇西南地区6次干旱事件中的适用性检验

Tab.2 Adaptability of SPEI and SPI Index in Six Droughts of the Southwest Yunnan Area Is Tested.

	1962/1963年	1968/1969年	1978/1979年	1992年	2005年	2009/2010年
SPEI	-1.3(中旱)	-1.7(重旱)	-2.0(特旱)	-1.7(重旱)	-1.1(中旱)	-1.4(中旱)
SPI	-1.8(重旱)	-2.1(特旱)	-2.5(特旱)	-1.9(重旱)	-0.9(轻旱)	-1.2(中旱)

注:春夏连旱以8月份6个月尺度的SPEI(SPI)表示,秋冬春连旱以5月份9个月尺度的SPEI(SPI)表示.

综上所述表明,同一时段的干旱事件两种指数在强度上表现出 20 世纪 90 年代前 SPI 较 SPEI 重,90 年代后则表现相反的特征。分析研究区年和四季平均温度趋势变化(图略),发现滇西南地区年及四季平均温度随时间变化呈极显著增长趋势($P < 0.01$)。温度距平值变化的线性趋势方程中,预测值为零($y=0$, 线性趋势与 x 轴相交)的年份出现在 1990 年前后,此后,平均气温距平值多为正值,增温明显。研究区气温变化趋势与全球、北半球和中国变化趋势一致,与程建刚等[19]得到云南 20 世纪 90 年代后增温最为明显的研究结论统一。2.1 部分的研究还表明,气候变暖加剧了“降水量-蒸散, 的水分平衡,导致研究区 90 年代后 SPEI 判定的 4 个类型季节连旱事件发生频率增加(由 90 年代前的 1 次 / 4.3-sa 增加为 90 年代后的 1 次 / 2.9-3.8a)。可见,考虑了温度因素,引入地表蒸散变化影响的 SPEI 对 1990 年后滇西南地区气温快速上升导致的干旱变化更为敏感,对气候变暖背景下发生的干旱事件表现出更好的监测能力。

4 结论与讨论

(1) 近 53a, SPEI 和 SPI 两种指数判定得到的滇西南地区 4 种类型季节连旱事件为 12~14 次, 不同类型季节连旱的发生具有并发性; 时序突变的检验表明, 仅秋末冬春初夏 SPEI 值在 2011 年左右发生了突变; 4 个季节连旱时段上, SPEI 和 SPI 均存在 3a 左右的显著振荡周期。

(2) 时空变化趋势上, 两种指数在冬春初夏和秋末冬春初夏上均为变干, 而冬春和秋末冬春 2 个时段 SPEI 表现为变干趋势, SPI 则表现相反。同一时间段上两种指数判定得到的干湿空间变化趋势在干湿变化格局和干湿变化程度上均存在较大差异, SPEI 变干范围更广, 强度更大。

(3) 20 世纪 90 年代前 SPI 判定的滇西南地区干湿状态较 SPEI 偏干, 而 90 年代后则表现相反。

(4) 近 53a 以来, 滇西南地区增温趋势显著, 同一时段干旱事件的统计和对历史干旱事件的检测均表明气候变暖背景下引入地表蒸散变化影响的 SPEI 指数对研究区干旱具有更好的表征能力。

本文采用 SPI 和 SPEI 作为干旱指标, 对滇西南地区 4 种类型季节连旱演变特征进行对比分析, 得到同一时间段上两种指数统计出的干旱事件发生次数及发生年份基本统一, 两种指数同一时间段上均存在 3a 左右显著周期变化。表明 SPEI 指数中起决定性作用的因子是降水, 降水量的亏缺是造成研究区干旱的主要因素, 这与明博等 [13]、王林等 [20] 的研究结论较为一致。但是, 53a 中 SPEI 与 SPI 在时空变化趋势上存在的显著差异表明 SPEI 指数较 SPI 是有所改进的, 其考虑了热量因子对潜在蒸散发的贡献对研究区干旱造成的影响。鉴于 Thomthwaite 蒸散发算法仅考虑了热量因子对潜在蒸散发的贡献, 今后的研究可采用 Penman-Monteith 蒸散发算法的 SPEI 指数对研究区干旱演变进行分析, 以取得新的研究进展。

参考文献:

- [1] WUH , SVOBODA MD , HAYES MJ , et al . Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons [J] . Intemational Journal of Climatology , 2007, 27(1):65 — 79.
- [2] 唐宝琪, 延军平, 李双双, 等. 近 55 年来华东地区旱涝时空变化特征[J] . 长江流域资源与环境, 2016, 25(3):497 — 505.
- [3] 杨世刚, 杨德保, 赵桂香, 等. 三种干旱指数在山西省干旱分析中的比较[J] . 高原气象, 2011, 30(5):1406 — 1414.
- [4] 谢五三, 王胜, 唐为安, 等. 干旱指数在淮河流域的适用性对比[J] . 应用气象学报, 2014, 25(2):176 — 184.
- [5] 王林, 陈文. 近百年西南地区干旱的多时间尺度演变特征 [J] . 气象科技进展, 2012, 2(4):21 — 26 •
- [6] 熊光洁, 王式功, 李崇银, 等. 三种干旱指数对西南地区适用性分析[J] . 高原气象, 2014, 33(3):686 — 697.
- [7] 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961 — 2012 年干旱变化特征分析 [J] . 气候变化研究进展, 2013, 9(3):192 — 198.
- [8] 王东, 张勃, 安美玲, 等. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析 [J] . 自然资源学报, 2014, 29(6):1003 — 1016.

-
- [9] 张万诚, 郑建萌, 任菊章. 云南极端气候干旱的特征分析[月]. 灾害学. 2013, 28(1):59—64.
- [10] 温克刚, 刘建华. 中国气象灾害大典—云南卷[M]. 北京: 气象出版社—2006.
- [11] VILCENTE-SERENO, BEGUEIRIAS, LOPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Climate, 2009, 23(7):1696-1718.
- [12] MCKEE TB, DOESKEN NJ, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C] // Proceedings of the 11th Conference on Applied Climatology. Anaheim, California: American Meteorological Society, 1993:179-184.
- [13] 明博, 陶洪斌, 王璞. 基于标准化降水蒸散指数研究干旱对北京地区作物产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(5):28-36.
- [14] 许玲燕, 王慧敏, 段琪彩, 等. 基于 SPEI 的云南省夏玉米生长季干旱时空特征分析[J]. 资源科学, 2013, 35(5):1024-1034.
- [15] 胡学平, 王式功, 许平平, 等. 2009-2013 年中国西南地区连续干旱成因分析[J]. 气象, 2014, 40(10):1216-1229.
- [16] 云南减灾年鉴编委会. 云南减灾年鉴(2004-2005)[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2006.
- [17] 云南减灾三鉴编委会云南减灾年鉴(2008-2009)[M] 昆明: 云南科技出版社. 2010
- [18] 云南减灾年鉴编委会云南减灾年鉴(2010-2011)[M] 昆明: 云南科技出版社. 2010
- [19] 程建刚. 解明恩近 50 年云贵派域气候变化特征分析[J]. 地理科学进展, 2008, 27(5):19-26
- [20] 王林, 陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2):423-431