

DOI: 10.5846/stxb201501030006

刘世梁, 田韞钰, 尹艺洁, 安南南, 董世魁. 云南省植被 NDVI 的时间变化特征及其对干旱的响应. 生态学报, 2016, 36(15): - .

Liu S L, Tian Y Y, Yin Y J, An N N, Dong S K. Temporal dynamics of vegetation NDVI and its response to drought conditions in Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

云南省植被 NDVI 的时间变化特征及其对干旱的响应

刘世梁*, 田韞钰, 尹艺洁, 安南南, 董世魁

北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 基于云南省 74 个气象站点的 1997—2012 年逐日降水资料和逐旬 SPOT-NDVI 值, 利用标准化降水蒸散指数 (SPEI) 多尺度分析了云南省干旱时间和强度演变与 NDVI 时间动态特征与相关性分析, 进而探讨气候变化对植被的影响。结果表明, 1999—2013 年云南省年平均 NDVI 值和年最大 NDVI 值均呈现波浪式的发展趋势, 其趋势线斜率分别为 0.0017 和 0.0011; NDVI 年内各月变化情况大体上相同; 不同季节 NDVI 的年际变化特征呈现出显著差异。1997—2012 年不同时间尺度 SPEI 均体现出干旱化加剧的趋势, 并随 SPEI 的时间尺度增大而增大; 3 个月尺度的 SPEI 值 (SPEI3) 结果表明, 各月的变化呈现先增大后减小的趋势; SPEI3 反映出多年季节水平的干旱强度为: 冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季。总体上, 云南省的年均 NDVI 与 SPEI 的相关性极弱, 年最大 NDVI 与 SPEI 呈正相关; 多年月均 NDVI 与不同尺度 SPEI 的相关性较强且存在滞后性; 不同季节 NDVI 与 SPEI 的相关性及滞后性有较大差异, 其中冬季 NDVI、秋季 NDVI 与其当年当季 SPEI 的负相关性较强。

关键词: 标准化降水蒸散指数; NDVI; 时间序列; 云南省; 相关性

Temporal dynamics of vegetation NDVI and its response to drought conditions in Yunnan Province

LIU Shiliang*, TIAN Yunyu, YIN Yijie, AN Nannan, DONG Shikui

State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The characteristics of drought at different time scales between 1997 and 2012 in Yunnan Province were studied using a new drought index (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) calculated based on daily precipitation data from 74 weather stations. In addition, we used a time series data set (1999—2013) of the normalized difference vegetation index (NDVI) and time series analysis to assess temporal dynamics of the NDVI, and we explored the relationships between NDVI and SPEI. Correlations between NDVI and multiscale SPEI were examined, including annual, monthly, and seasonal long-term dynamics. Annual average and annual maximum NDVI in Yunnan Province showed an upward trending wave shape with slopes of 0.0017 and 0.0011, respectively. Monthly NDVI showed the same pattern, and the wave crest in each year was concentrated in July through September. Interannual variability in the NDVI showed significant seasonal differences, with higher NDVI in summer and autumn compared to spring and winter. A relatively consistent and dynamic trend was found in the time scales of mean annual SPEI. Drought intensity increased in small increments from 1997 to 2012, and the trend was more obvious at larger time scales. The 3-month SPEI value (SPEI3) initially increased and then decreased, and its wave crest was concentrated in May through July. The seasonal SPEI3 value reflected the level of drought strength as follows: winter > autumn > spring > summer. We found that the correlation between NDVI and SPEI at different time scales was complex and variable. The relationship between annual average NDVI

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571173); 国家科技支撑计划项目 (2014BAK19B06)

收稿日期: 2015-01-03; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shiliangliu@bnu.edu.cn

and annual SPEI was weak, while the annual maximum NDVI and annual SPEI were positively correlated, especially for SPEI3, SPEI6, and SPEI12. No significant correlation was observed between monthly NDVI and SPEI; in contrast, years with average monthly NDVI showed a strong response to SPEI at different time scales. The coefficients between years for average monthly NDVI and SPEI were strongly affected by the SPEI time scale, with a 1- and 2-month lag. The NDVI in autumn and winter showed a strong negative correlation with SPEI for the same season, and the autumn NDVI was slightly correlated with SPEI in summer of the same year. The lag effect was also found in other seasons to different extents.

Key Words: Standardized precipitation evapotranspiration index; NDVI; time series; Yunnan Province; correlation

植被是生态系统的重要组成部分。它不仅是重要自然资源,同时在一定的程度上能代表土地覆盖的变化。植被变化对全球变化较为敏感,具有指示作用。同时,地表植被被认为对全球的能量平衡、生物化学循环、水循环等起着调控作用,对气候系统变化有着深远的影响^[1]。植被与气候变化之间的关系是密不可分的,二者之间的相互作用主要表现在 2 个方面,即植被对气候的适应性与植被对于气候的反馈作用^[2]。因此在全球变化研究中,植被变化的监测与动态在地表覆盖与变化研究中一直备受重视。

干旱是对人类社会影响最为严重的气象灾害之一,影响范围广、造成危害大、涉及时间长。西南地区一直是我国干旱发生频率较高的区域,近年来干旱更加突出^[3-4],目前已经有研究针对西南地区干旱特征和变化趋势进行研究分析^[5-8]。在干旱的时空动态研究中^[9-11],应用最广泛的是 Vicente-Serrano 于 2010 年提出的标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),它不仅考虑了降水与蒸散,而且保留了 SPI、PDSI 指数等对温度降水的敏感度,又具备 SPI 适合多尺度、多空间比较的优点^[5]。由于气候是决定地球上植被类型及其分布的最主要因素,因此在全球变化与陆地生态系统关系的研究中,气候—植被关系的确定具有十分重要的实际意义^[12]。

在植被研究中,归一化差值植被指数(NDVI)由于其具有植被空间覆盖范围广、植物检测灵敏度高、能消除地形和群落结构的阴影和辐射干扰、削弱太阳高度角和大气所带来的噪音、数据具有高可比性等特点,在多种植被指数中应用最多最广泛^[1]。近年来国内外利用 NDVI 做了大量的植被研究,主要集中于区域植被的时空变化与气候因子的相互关系^[13-18]以及对气候变化的响应^[19-20],其中气候因子主要为温度和降水量,并不能综合反映气候变化,因此 NDVI 与单独的气候因子的相关性研究尺度单一且不全面,不足以确定气候-植被关系。而多时间尺度的 SPEI 值能够清楚地反映区域干湿演变与可获得水资源状况,因此本研究从多尺度研究了云南省 NDVI 和 SPEI 两大指数的时间序列变化规律,利用 SPEI 指数进一步分析了云南省的气候变化情况和干旱发生强度,同时利用 NDVI 指数分析了研究区域的植被变化情况。此外,本研究试图对云南省的 SPEI 与 NDVI 作了不同尺度上的相关性分析,进一步探讨了植被的变化趋势及其对气候变化的响应机制,为制定相应的对策提供了科学依据,具有重要的理论和现实意义。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

云南省北依亚洲大陆,南连位于太平洋和印度洋之间的东南亚半岛,处在东南季风和西南季风控制之下,又受西藏高原区的影响,从而形成了复杂多样的自然地理环境。(21°8'32"—29°15'8"N, 97°31'39"—106°11'47"E)。总面积 39.4 万 km²,平均海拔 2000m 左右。地理位置特殊,地形地貌复杂。由于大气环流的影响,冬季受干燥的大陆季风控制,夏季盛行湿润的海洋季风,属低纬山原季风气候。全省气候的区域差异。植被资源丰富,森林覆盖率 47.5%,植被 NDVI 分析与干旱的变化的研究具有可行性并有现实意义。

1.2 数据处理

1.2.1 气候数据前处理

选用 1998—2012 年云南省地面气象观测站逐年的日降水量的实测资料。对个别台站的缺测数据进行了

插补处理,主要采用的是均值替换法。首先对于明显错误数据进行检测,确定错误数据或者断点,剔除或用多年平均值取代错误或断点数据^[10]。经过订正处理后的各要素资料具有较好的连续性。

1.2.2 NDVI 数据处理

作为反映植被状况的一个重要遥感参数,归一化差值植被指数(NDVI)是植物生长状态和植被空间分布密度的指示因子,与植被分布密度呈线性相关,即 NDVI 值越高表明植被状况越好。利用 1999—2013 年的 SPOT VEGETATION 逐旬 NDVI 数据进行分析,共有 504 幅图像,空间分辨率为 1 km。NDVI 数据主要采用均值法和最大合成法进行处理,为避免某些极端值的影响,每月 NDVI 值由上、中、下三旬数据求平均值获得;每年 NDVI 值除了年均值还采用了国际通用的最大合成法获取,以进一步消除云、大气、太阳高度角等的部分干扰^[20]。

1.3 研究方法

标准化降水蒸散发指数 SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)是 Vicente-Serrano 在标准化降水指数 SPI 的基础上引入潜在蒸散项构建的,其融合了 SPI 和帕尔默干旱指数 PDSI 的优点,具体计算步骤如下^[21]:

第 1 步:计算潜在蒸散。Vicente-Serrano 采用的是 Thornthwaite 方法。

第 2 步:用公式(1)计算逐月降水与蒸散的差值:

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

式中: D_i 为降水与蒸散的差值, P_i 为月降水量, PET_i 为月蒸散量。

第 3 步:同 SPI 方法,对 D_i 数据序列进行正态化。由于原始数据序列 D_i 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:

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

式中:参数 α 、 β 、 γ 分别采用线性矩的方法拟合获得。

然后对累积概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \quad (3)$$

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时:

$$W = -2\ln(P) \quad (4)$$

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (5)$$

式中: W 为蒸散降水推导函数的累计概率函数值, $C_0 = 2.515517$, $C_1 = 0.802\ 853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001\ 308$ 。

当 $P > 0.5$ 时,以 $1-P$ 表示 P ,SPEI 变换符号。

本文中 SPEI 对应的干旱等级按照表 1 中的标准进行划分。

表 1 SPEI 对应的干旱等级划分

Table 1 Drought levels based on SPEI values in Southwest China

SPEI	<-2	[-2,-1.5)	[-1.5,-1)	[-1,0)
干旱等级 Drought levels	极端干旱	严重干旱	中等干旱	轻微干旱

SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)为标准化降水蒸散发指数

2 结果与分析

2.1 云南省不同尺度植被指数的时间序列变化分析

2.1.1 NDVI 的年际变化分析

对云南省 74 个气象台站同一年内各旬的 NDVI 取平均值,得到当年云南省平均 NDVI。年平均 NDVI 值

变化曲线及其趋势线见图 1,从图中可以清楚的看到,在 1999 年至 2013 年间,云南省年平均 NDVI 值呈现波浪式的发展趋势,而趋势线斜率为正,说明年均 NDVI 值总体略有增加。2003 年、2006 年、2013 年的年平均 NDVI 值相对较大,可能与当年降雨量丰富有关;云南省年平均 NDVI 值基本都保持在 0.385—0.425 之间,表明 NDVI 具有相对稳定性,总体植被状况较为乐观。

考虑到云、大气、太阳高度角等的部分干扰,通过最大合成法得到每年最大 NDVI 值。从图 1 可以看出,年最大 NDVI 值的波动情况与年均 NDVI 值相似,进一步表明了 1999—2013 年云南省 NDVI 的年际变化特征,即总体稳定,波动中略有增大。

2.1.2 NDVI 的月尺度变化分析

将 74 个气象站点的 NDVI 取月平均值如图 2 所示。可以看到云南省各年的 NDVI 年内各月变化情况大体上是相同的,波峰基本集中在 7—9 月份。各年之间波动情况相近,具有周期性,但周期内的变化曲线有时也会出现波动,最典型的是 2007 年 7 月和 2012 年 6 月出现异常,比其它年份同时期的 NDVI 值偏低。从 NDVI 的年内波动情况可以看出,NDVI 值与气温及降雨量有一定关系。

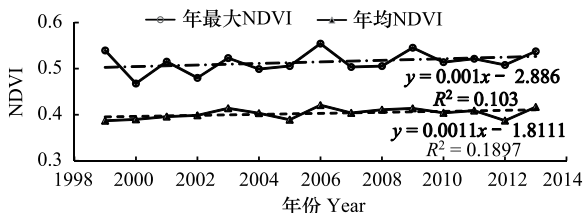


图 1 1999—2013 年云南省年均 NDVI 及年最大 NDVI 变化

Fig. 1 Variations of annual NDVI and maximum NDVI in Yunnan Province during 1999—2013

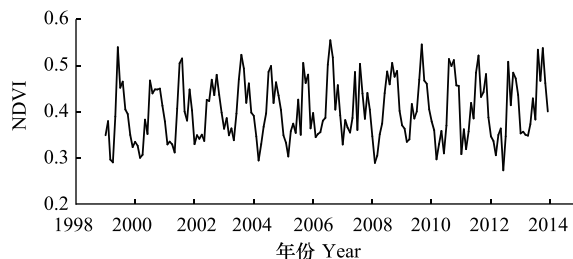


图 2 1999—2013 年云南省月平均 NDVI 变化

Fig. 2 Variations of monthly average NDVI in Yunnan Province during 1999—2013

2.1.3 NDVI 的季节变化规律分析

利用天文季节的划分方法来划分四季,即 3—5 月为春季,7—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。将 74 个站点取各季节 NDVI 的平均值,得到 1999—2013 年的季节变化时间序列(图 3)。从图 3 可以看出,云南省 NDVI 的年际变化呈现显著的季节性差异,夏季和秋季的 NDVI 值总体相对较高,其中夏季呈现起伏较大的波浪式发展趋势,在 0.35—0.5 间波动,可能是由于夏季气温高且降水量年差异较大;冬季和春季的 NDVI 值总体偏低,年际波动幅度相对较小,均在 0.3—0.4 之间波动。可见四季中 NDVI 的总体大小排序为:秋季>夏季>冬季>春季,从 NDVI 年内月尺度的波动情况也可以看出这一特点。

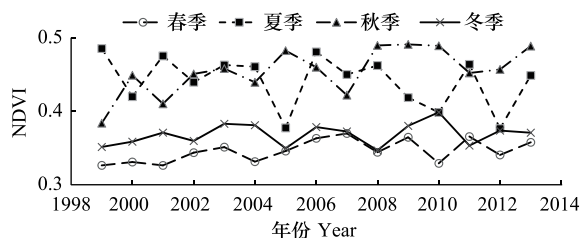


图 3 云南省季节尺度 NDVI 指数长期动态特征

Fig. 3 Long-term dynamic characteristics of NDVI for four seasons in Yunnan Province

2.2 云南省不同尺度 SPEI 指数的时间序列变化特征

2.2.1 基于不同尺度 SPEI 的气候变化特征

1997—2012 年云南省 74 个站点 SPEI 的平均值的变化趋势见图 4。从图 4 可以看出,不同时间尺度的 SPEI 值均呈现出一致的线性趋势,即干旱化趋势在加强,但其值随时间变化的敏感性明显不同,时间尺度越小,趋势线斜率的绝对值越小。

西南地区是典型的季风气候区,受季风系统影响,降水的季节分布极不均匀。如图 4 所示,SPEI3 因为对于短期降水和温度变化都比较敏感,其数值波动性较大;而 SPEI6 受多雨期和少雨期的影响,其数值波动幅度也很大,因此云南省的干旱持续时间达半年的干旱发生频率也比较高。SPEI12 和 SPEI24 能够更清楚地反映

1997—2012 年的干旱变化状况,即 2004—2008 年、2010—2012 年的干旱频率较高,其中 2004—2008 年为轻微干旱,2010—2012 年达到中等干旱甚至严重干旱,且干旱持续时间较长,出现数年连旱的现象。由此可见,SPEI6 和 SPEI12 对于下层土壤水分和河流径流量等有较好地反映,SPEI24 则更深入地涉及到地下水位、水库蓄水量乃至民生问题。综上所述,多时间尺度的 SPEI 值可以有效地反映云南省干旱程度及其持续时间,并且不同时间尺度的 SPEI 值表现出了不同程度的年际震荡和年代际变化特征。

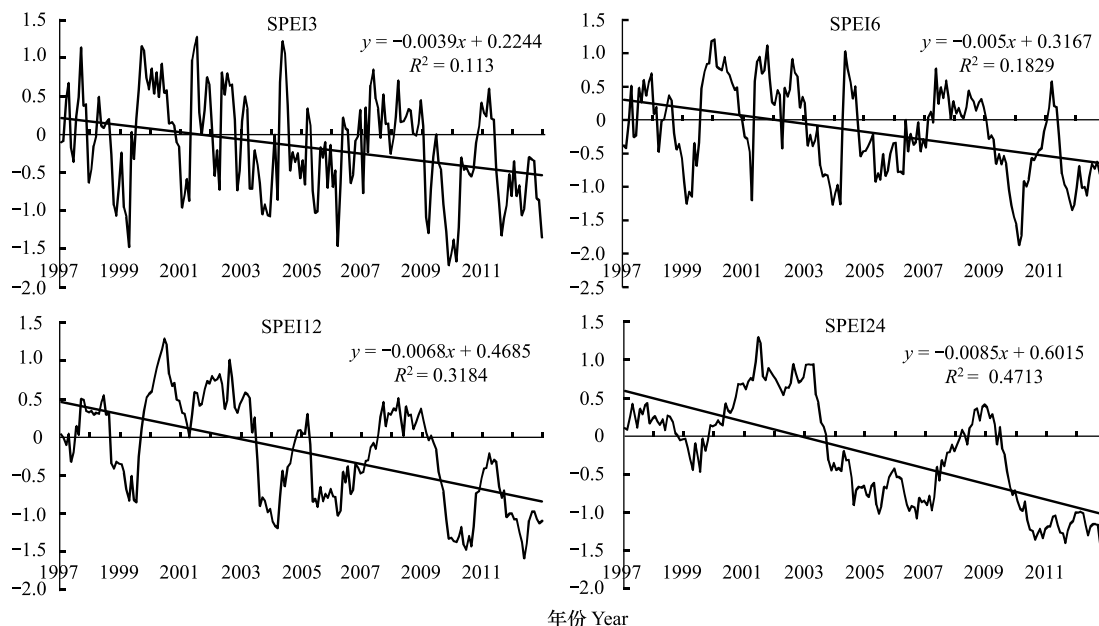


图 4 云南省多时间尺度标准化降水蒸散指数长期动态特征

Fig.4 Long-term dynamic characteristics of multi-time scale SPEI in Yunnan Province

2.2.2 SPEI 的月尺度变化分析

从图 4 可以看到,SPEI3 年内各月的变化情况年与年之间差别较大,峰值所在月份也不尽相同。将 74 个气象站点的 SPEI3 取月平均值,如图 5,可以看到 SPEI3 各月的变化呈现先增大后减小的趋势,峰值在 5—7 月份,并且其他月份均为轻微干旱,这与全年降雨量分布大体一致。

2.2.3 SPEI 的季节尺度变化分析

西南地区一般冬季干旱少雨,夏季雨量丰沛,春、秋季节是过渡阶段,大多数区域秋雨多于春雨。因而春、冬两季是发生旱灾的主要时节^[11],从图 5 也可以看出这一特点。

选取云南省各站四季 1997—2012 年的平均 SPEI3 和 SPEI24 值,分析 SPEI 在季节尺度上的变化规律(图 6)。从图 6 的 SPEI24 变化情况可以看出,云南省 SPEI 的年际变化在季节尺度上的差异性并不明显,均为接近半数的年份达到干旱,四季均在 2003—2006 年出现连年干旱的现象。从 SPEI3 的波动情况来看,冬季干旱最为严重,干旱频率较高,但年际间波动幅度相对较小;春季和秋季次之,波动幅度较大;夏季干旱的年份最少干旱强度较小。由此可见,不同尺度的 SPEI 值反映出来的季节变化规律不同,3 个月尺度的 SPEI 值更能反映出季节尺度的变化情况,多年季节水平的干旱强度为:冬季>秋季>春季>夏季。

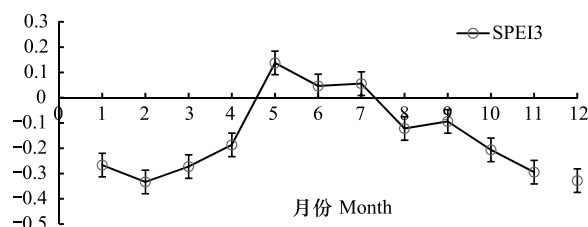


图 5 1997—2012 年云南省月平均 SPEI 变化

Fig.5 Variations of monthly average SPEI in Yunnan Province during 1997—2012

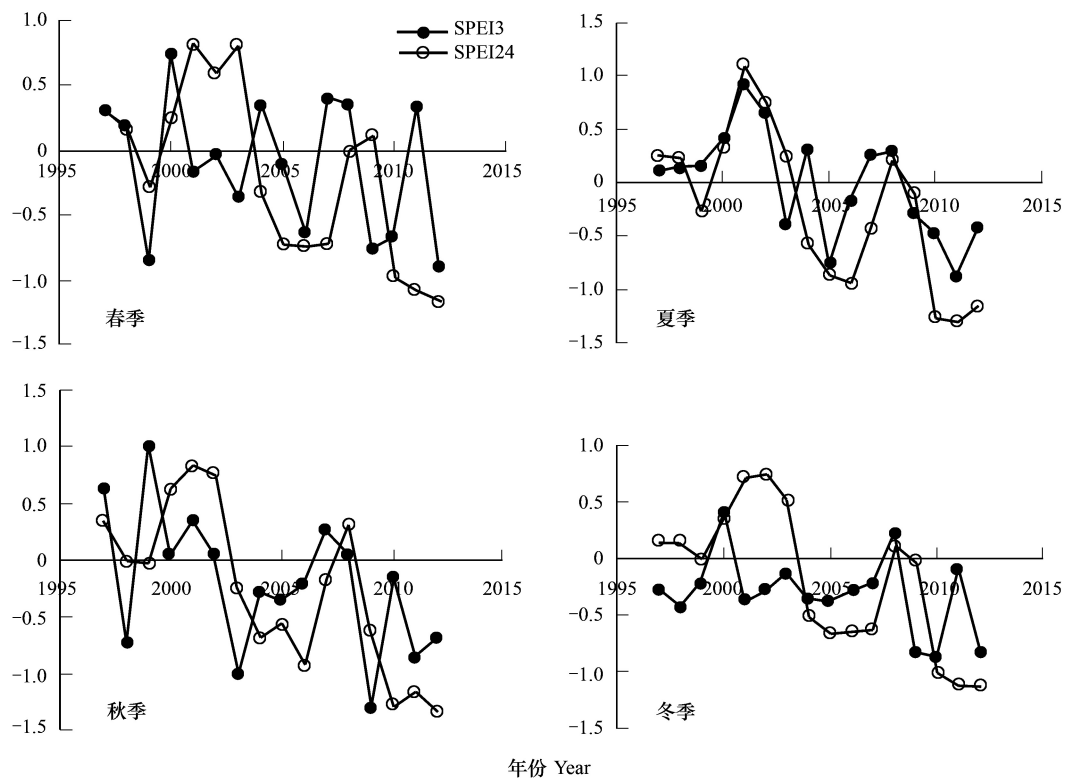


图 6 云南省季节尺度标准化降水蒸散指数长期动态特征
Fig.6 Long-term seasonal dynamic characteristics of SPEI in Yunnan Province

2.3 云南省植被 NDVI 动态变化与 SPEI 指数的关系

2.3.1 云南省 NDVI 与 SPEI 在年际变化上的相关性

利用云南省各站点 1998—2012 年的年均 SPEI 和 1999—2013 年的 NDVI 数据,分析不同年份二者之间的相关系数 r ,探讨二者在年际变化上的相关性和滞后性。当 $r>0$ 时,表示两变量正相关,当 $r<0$ 时,表示两变量为负相关, r 的绝对值大小代表相关程度。

表 2 列出了年平均 NDVI 与不同尺度年均 SPEI 的相关系数,包括同年间 (1999—2012) 以及 NDVI (1999—2013) 比 SPEI (1998—2012) 滞后一年的相关系数。从表 2 可以看到,NDVI 值与不同尺度 SPEI 值间的相关系数均为正值,并且 SPEI 的时间尺度越大,相关性越弱,且不同尺度的 SPEI 与当年 NDVI 的相关系数均小于 0.3,相关性不显著;滞后一年的 NDVI 与不同尺度 SPEI 的相关系数也很弱。可见云南省的年均 NDVI 与 SPEI 没有显著的正相关关系,滞后效应不明显。

考虑到云、大气、太阳高度角等的部分干扰可能对 NDVI 与 SPEI 的相关性造成影响,表 3 列出了年最大 NDVI 与不同尺度年均 SPEI 的相关系数,当年 NDVI 与滞后 NDVI 同表 2。从表 3 可以看到,年最大 NDVI 与 SPEI 的相关系数也均为正值,但明显比表 2 的数值大,相关程度更高;SPEI3、SPEI6、SPEI12 与当年 NDVI 的相关系数均大于 0.5。可见云南省的年最大 NDVI 与不同尺度年均 SPEI 存在一定的线性正相关关系,说明 SPEI 是 NDVI 的一大影响因素。

表 2 年平均 NDVI 与不同尺度 SPEI 的相关系数
Table 2 The correlation coefficients of annual NDVI and multi-time scale SPEI

归一化植被指数 NDVI	SPEI3	SPEI6	SPEI12	SPEI24
当年 NDVI NDVI in the same year	0.2538	0.1895	0.1300	0.0742
滞后 NDVI NDVI in the lag of one year	0.1942	0.1871	0.1338	0.1105

表 3 年最大 NDVI 与不同尺度 SPEI 的相关系数

Table 3 The correlation coefficients of annual maximum NDVI and multi-time scale SPEI				
NDVI	SPEI3	SPEI6	SPEI12	SPEI24
当年 NDVI NDVI in the same year	0.5534	0.5734	0.5321	0.3202
滞后 NDVI NDVI in the lag of one year	0.2317	0.1868	0.1044	0.2291

2.3.2 云南省 NDVI 与 SPEI 在月尺度变化上的相关性

通过比较 1999—2013 年 74 个台站的月平均 NDVI 与不同尺度 SPEI 的相关性发现 SPEI12 的相关系数相对最大,因此做出月平均 NDVI 与 SPEI12 的相关图。从图 7 可以看出,同年 NDVI、滞后一年的 NDVI 均与 SPEI24 存在一定的负相关,但相关性不显著。

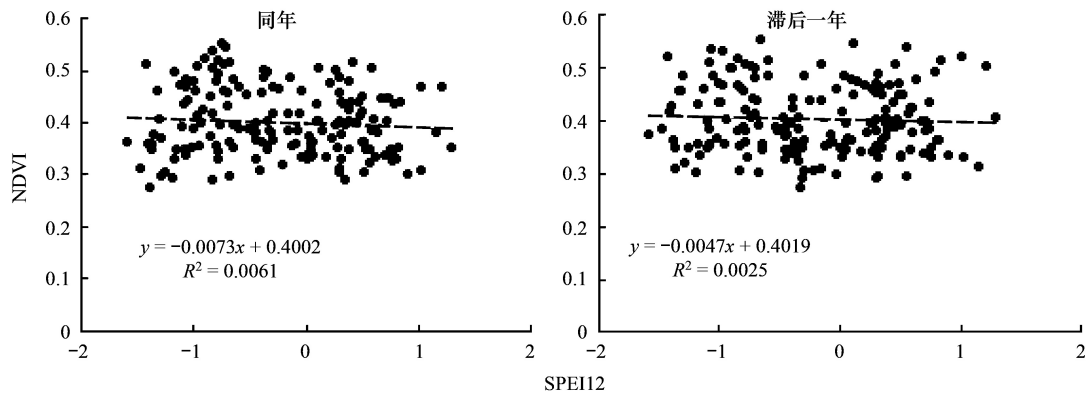


图 7 各站月平均 SPEI12 与 NDVI 的相关系数

Fig.7 The correlation coefficients of monthly mean NDVI and SPEI of 12 months

将各站点 12 个月多年平均的 NDVI 分别与对应月的 SPEI 进行相关分析,同时考虑到 NDVI 对 SPEI 的滞后效应,本研究还将 NDVI 分别滞后 1、2、3 个月 (NDVI1、NDVI2、NDVI3) 与 SPEI 进行相关分析,结果见表 4。从表 4 可以看出,NDVI 与不同尺度的 SPEI 相关性明显不同,其中 SPEI3、SPEI6 的相关系数大多为正值,而 SPEI12、SPEI24 则基本为负值;另外,同月 NDVI 与 SPEI12、SPEI24 的负相关性通过了 0.01 水平的显著性检验,滞后一个月的 NDVI 与 SPEI6 的正相关性以及与 SPEI12、SPEI24 的负相关性均通过了 0.01 水平显著性检验,滞后两个月的 NDVI 与 SPEI3、SPEI6 均为高度相关,滞后三个月的 NDVI 与 SPEI 的相关性则相对较弱。可见 NDVI 与 SPEI 在年内变化月尺度上的相关性较强,响应具有显著的滞后效应。

表 4 云南省 NDVI 与 SPEI 年内变化的相关系数

Table 4 The correlation coefficients of inter-annual change of NDVI and SPEI				
NDVI	SPEI3	SPEI6	SPEI12	SPEI24
NDVI	0.216	0.707 *	-0.849 **	-0.921 **
NDVI1	0.648 *	0.886 **	-0.769 **	-0.723 **
NDVI2	0.866 **	0.841 **	-0.572	-0.417
NDVI3	-0.186	0.562	-0.265	0.016

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

2.3.3 云南省 NDVI 与 SPEI 在季节尺度变化上的相关性

根据前面对 SPEI 季节尺度变化的研究可知,用 SPEI3 表征其季节变化更为恰当。因此,本研究利用 SPEI3 来研究 NDVI 与 SPEI 在季节尺度上的相关性。考虑到植被对气候的滞后效应,每个季节的植被 NDVI 除了与同季节 $SPEI_s$ 进行相关分析外,都同其上一个春季、夏季、秋季、冬季的 SPEI ($SPEI_{sp}$ 、 $SPEI_{su}$ 、 $SPEI_{au}$ 、 $SPEI_{wi}$) 进行了相关分析,得到的相关系数如表 5 所示。从表 5 可以清楚的看到春季的 NDVI 与 SPEI 的相关

性极弱,夏季的 NDVI 与当年夏季的 SPEI 呈不显著的正相关,滞后性则不太明显;秋季的 NDVI 与当年秋季 SPEI 的负相关性通过了 0.01 显著性检验,与当年夏季的 SPEI 呈负相关;冬季的 NDVI 与当年冬季 SPEI 的相关性通过了 0.05 显著性检验,与同年春季、秋季的 SPEI 呈负相关。

表 5 云南省季节 NDVI 与 SPEI 的相关系数
Table 5 The correlation coefficients of seasonal NDVI and SPEI

NDVI	SPEI _s	SPEI _{sp}	SPEI _{su}	SPEI _{au}	SPEI _{wi}
NDVI _{sp}	0.061	-0.136	-0.168	0.187	-0.141
NDVI _{su}	0.420	0.166	0.116	0.139	0.055
NDVI _{au}	-0.664 **	-0.045	-0.498	0.057	-0.169
NDVI _{wi}	-0.621 *	-0.397	-0.114	-0.339	0.059

*. 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; **. 在 .01 水平(双侧)上显著相关; SPEI_s是同年同季的 SPEI 值;SPEI_{sp}、SPEI_{su}、SPEI_{au}、SPEI_{wi} 分别是上一个春季、夏季、秋季、冬季的 SPEI 值

3 结论与讨论

3.1 讨论

1) 计算潜在蒸散的 Thornthwaite 方法没有考虑辐射的影响,但对于云南省来说,研究区域范围内的纬度只差几度,因此辐射的差异较小,而研究主要是关于变化趋势的相关分析,所以对结论的影响也较小。

2) 研究 SPEI 变化趋势的过程中,发现其时间变化特征与牛凯杰等人对西南地区的研究结论基本一致,其中多年季节水平的干旱强度为冬季>秋季>春季>夏季,而牛凯杰等人的研究得到的顺序为春、冬、秋、夏,可能是由于云南不能代表整个西南地区。

3) 在 NDVI 的变化研究中发现,2007 年 7 月和 2012 年 6 月出现异常,比其它年份同时期的 NDVI 值偏低。经查证,2007 年为灾害较重年,7 月植被的异常情况可能与洪涝灾害有关;6 月的 NDVI 值普遍不高,可能是因为云南省 6 月高温且降水少。

4) 在分析 NDVI 与 SPEI 相关性的过程中,发现两者年际变化的相关性较弱,而年内变化月尺度上的相关性较强,这可能是由于年尺度上气候对植被的影响很小,其他原因有待深入探讨。

5) 在季节尺度上,NDVI 与 SPEI 的关系较为复杂。对于云南来说,秋冬季负相关显著的可能解释是在多雨的状况下,气温的降低会促使植被落叶,叶片枯黄、脱落,从而降低 NDVI 数值,因此干旱情况会使得植被 NDVI 增加。另外,不同季节的耕作等也会影响两者的相关关系,其内在机理需要结合物候变化、空间分异特征等进行进一步的研究与验证。

3.2 结论

1) 1999—2013 年云南省年平均 NDVI 值和年最大 NDVI 值均呈现波浪式的发展趋势,总体略有增大;在月尺度上,NDVI 年内各月变化情况大体上相同且具有周期性,波峰基本集中在 7—9 月份;不同季节 NDVI 年际变化的总体大小排序为:秋季>夏季>冬季>春季。

2) 1997—2012 年云南省不同时间尺度的 SPEI 值均呈现出干旱化加强的线性趋势,时间尺度越大,变化趋势越大。在月尺度上,SPEI3 各月的变化呈现先增大后减小的趋势,峰值在 5—7 月份;SPEI3 反映出多年季节水平的干旱强度为:冬季>秋季>春季>夏季。

3) 云南省的年均 NDVI 与 SPEI 呈极弱的正相关关系,而年最大 NDVI 与不同尺度年均 SPEI 存在一定的线性正相关关系,SPEI 是 NDVI 的一大影响因素。

4) NDVI 与 SPEI 在月尺度上的相关性较为复杂,同月以及滞后一个月的 NDVI 与部分时间尺度的相关性通过了 0.01 水平或 0.05 水平显著性检验,因此 NDVI 与 SPEI 在年内变化月尺度上的相关性较强,响应具有显著的滞后效应。

5) 季节尺度上,春季以及夏季的 NDVI 与 SPEI 的相关性与滞后性均不显著,而秋季的 NDVI 与当年秋季

SPEI 的负相关性通过了 0.01 显著性检验,冬季的 NDVI 与当年冬季 SPEI 的相关性通过了 0.05 显著性检验,也有一定滞后效应。

参考文献 (References):

- [1] Lambin E F, Strahler A H. Indicators of land-cover change for change-vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 15(10): 2099-2119.
- [2] 郑玉坤. 多时相 AVHRR-NDVI 数据的时间序列分析及其在土地覆盖分类中的应用[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2002: 1-48.
- [3] 周丹, 张勃, 任培贵, 张春玲, 杨尚武, 季定民. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50a 干旱特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 677-688.
- [4] 张家发, 唐文坚, 李少龙. 中国西南易旱地区识别的探讨. *中国水利*, 2012, (5): 18-21.
- [5] 王东, 张勃, 安美玲, 张调风, 季定民, 任培贵. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析. *自然资源学报*, 2014, 29(6): 1003-1016.
- [6] 牛凯杰, 梁川, 赵璐, 詹存. 西南地区干旱时空变化特征. *灌溉排水学报*, 2014, 33(3): 1-6.
- [7] 王明田, 王翔, 黄晚华, 张玉芳, 马均. 基于相对湿润度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征. *农业工程学报*, 2012, 28(19): 85-92.
- [8] 董谢琼, 段旭. 西南地区降水量的气候特征及变化趋势. *气象科学*, 1998, 18(3): 239-247.
- [9] 苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系. *生态学报*, 2012, 32(17): 5467-5475.
- [10] 李亚飞, 刘高焕. 澜沧江流域植被覆盖变化特征及其与气候因子的关系. *资源科学*, 2012, 34(7): 1214-1221.
- [11] 何云玲, 张一平. 澜沧江干流河谷盆地气候特征及变化趋势. *山地学报*, 2004, 22(5): 539-548.
- [12] Li Z Q, Liu Z G, Chen Z Z, Yang Z G. The effects of climate changes on the productivity in the Inner Mongolia Steppe of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(1): 4-10.
- [13] Cong N, Piao S L, Chen A P, Wang X H, Lin X, Chen S P, Hang S J, Zhou G S, Zhang X P. Spring vegetation green-up date in China inferred from SPOT NDVI data: a multiple model analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 165: 104-113.
- [14] 李春晖, 杨志峰. 黄河流域 NDVI 时空变化及其与降水/径流关系. *地理研究*, 2004, 23(6): 753-759.
- [15] 吕洋, 董国涛, 陆胜天, 周秋文, 蔡明勇. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空变化及其与降水和高程的关系. *资源科学*, 2014, 36(3): 603-611.
- [16] 崔林丽, 史军, 肖风劲, 范文义. 中国东部 NDVI 的变化趋势及其与气候因子的相关分析. *资源科学*, 2010, 32(1): 124-131.
- [17] 毕晓丽, 王辉, 葛剑平. 植被归一化指数(NDVI)及气候因子相关起伏型时间序列变化分析. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 284-288.
- [18] 王青霞, 吕世华, 鲍艳, 马迪, 李瑞青. 青藏高原不同时间尺度植被变化特征及其与气候因子的关系分析. *高原气象*, 2014, 33(2): 301-312.
- [19] 侯美亭, 赵海燕, 王箬, 延晓冬. 基于卫星遥感的植被 NDVI 对气候变化响应的研究进展. *气候与环境研究*, 2013, 18(3): 353-364.
- [20] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究. *生态学报*, 2011, 31(19): 5495-5504.
- [21] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [22] 张培松. 气象因子与 NDVI 的相关性分析[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [23] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [24] 何月, 樊高峰, 张小伟, 柳苗, 高大伟. 浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应. *生态学报*, 2012, 32(14): 4352-4362.
- [25] 毛飞, 卢志光, 张佳华, 侯英雨. 近 20 年藏北地区 AVHRR NDVI 与气候因子的关系. *生态学报*, 2007, 27(8): 3198-3205.
- [26] Prentice I C. Vegetation responses to past climatic variation. *Vegetatio*, 1986, 67(2): 131-141.
- [27] 王宏, 李晓兵, 李霞, 莺歌, 符娜. 基于 NOAA NDVI 和 MSAVI 研究中国北方植被生长季变化. *生态学报*, 2007, 27(2): 504-515.
- [28] Kirilenko A P, Solomon A M. Modeling dynamic vegetation response to rapid climate change using bioclimatic classification. *Climatic Change*, 1998, 38(1): 15-49.
- [29] Bonan G B, Levis S, Sitch S, Vertenstein M, Oleson K W. A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics. *Global Change Biology*, 2003, 9(11): 1543-1566.
- [30] 赵建军. 阿帕拉契亚山植被动态变化及其对气候变化的响应研究[D]. 吉林: 东北师范大学, 2013.