# 滇黔桂地区 NDVI 变化及其对 SPEI 的响应特征

## 靖娟利<sup>1,2</sup>王永锋<sup>1,2</sup>和彩霞<sup>11</sup>

(1. 桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004;

2. 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004)

【摘 要】: 滇黔桂地区生态环境脆弱,干旱频繁,研究植被对干旱的响应机制对区域水资源的管理调控和干旱综合应对具有重要意义。基于滇黔桂地区 1982~2015 年的 GIMMSNDVI 数据和多时间尺度 (1/3/6/9/12/24 个月)的标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)数据,运用趋势分析法和相关分析法研究植被变化及其对气象干旱的响应特征。结果表明: 1982~2015 年滇黔桂地区年际及季节 NDVI 增加趋势显著,岩溶区 NDVI 增长速率高于非岩溶区;岩溶区植被改善状况显著,但空间分布上具有差异性。年际 NDVI 对 6 种时间尺度 SPEI 的最大相关系数以正相关为主,绝大部分地区 NDVI 对 SPEI-1 和 SPEI-3 响应比较敏感,岩溶区尤为显著。季节 NDVI 与 6 种时间尺度 SPEI 的最大相关系数均以正相关占主导,且响应时间存在季节差异。生长季 NDVI 与 6 种时间尺度 SPEI 的最大相关系数均以正相关占主导,且响应时间存在季节差异。生长季 NDVI 与 6 种时间尺度 SPEI 的最大相关系数均以正相关占主导,且响应时间存在季节差异。生长季 NDVI 与 6 种时间尺度 SPEI 的最大相关系数均以正相关为主,随着 SPEI 时间尺度的推移最大相关系数呈正相关的区域呈减少趋势,表明 NDVI 对短时间尺度 SPEI 响应比较敏感;不同植被类型对 6 种时间尺度 SPEI 的响应存在差异性,但均与短时间尺度 SPEI 相关性最为明显。结果可为水资源的合理调控和干旱的综合应对提供理论参考。

【关键词】: 滇黔桂地区 标准化降水蒸散指数 NDVI 相关分析 响应特征

【中图分类号】: Q948; P461【文献标识码】: A【文章编号】: 1004-8227 (2022) 08-1763-13

植被在陆地生态系统中发挥着重要作用,是研究全球变化的"指示器"<sup>[1]</sup>。气候变化是植被变化的重要驱动因素,植被是气 候变化影响程度的重要反馈<sup>[2]</sup>。干旱是一个地区由于长时间内降水异常引起水分供求失衡而导致的一种自然灾害<sup>[3]</sup>。在气候变暖 背景下,我国干旱的影响范围和影响程度均有所加剧,尤其在西南地区,由于其特殊的地质环境背景,岩溶地貌广泛分布,加上 人类活动的干扰,极易发生干旱。因此,深入研究西南地区植被与干旱的关系对于提高岩溶生态系统对气候变化的响应关系的认 识具有重要意义。

归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能够有效地监测植被的动态变化,是反映大尺度地表植 被覆盖和生长状况的有效指标<sup>[4]</sup>。以往研究表明,2001~2015年西南地区植被覆盖呈波动增加趋势,但空间异质性显著,植被生 长与同期温度和降水以正相关为主<sup>[5]</sup>;2000~2017年西南林区植被覆盖呈显著上升趋势,不同类型林地 NDVI 具有显著差异,年 尺度上绝大多数林地与降水和温度呈正相关性,但与日照呈负相关<sup>[6]</sup>。20世纪 80年代以来,西南岩溶区植被覆盖度总体呈不显 著增加趋势,不同植被类型对气候变化的响应具有差异性,但气温变化对植被变化的影响要高于降水变化<sup>[7]</sup>;西南岩溶区植被覆 盖整体呈增长趋势,岩溶区增长趋势略优于非岩溶区,岩溶区植被生长易受气候差异及人类活动影响<sup>[8]</sup>。不同岩溶分布区植被变 化及其与气候因子的关系具有地域差异性,贵州植被 NDVI 增长趋势显著,岩溶区快于非岩溶区<sup>[9]</sup>,植被 NDVI 变化主要受人为因

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>作者简介: 靖娟利(1977~), 女, 副教授, 主要研究方向为资源环境遥感. E-mail: 2003080@glut. edu. cn

**基金项目:**国家自然科学基金项目(42161028);广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160);广西空间信息与测绘重点实验室 基金项目(16-380-25-08)

素影响,而与气候变化关系不显著<sup>[10]</sup>;黔桂岩溶山区大部分地区 NDVI 呈增长趋势,植被恢复向着良性方向发展<sup>[11]</sup>,气候变化是影 响 NDVI 变化的关键因素,其中降水对植被 NDVI 的影响大于气温<sup>[12]</sup>;广西 NDVI 年际变化呈增加趋势,且岩溶区增加速率稍快于 非岩溶区,NDVI 与前 2 个月降水及前 1 个月温度的相关系数最大,NDVI 对降水和温度最大响应的滞后期分别为 2~3 个月和 1~ 2 个月;岩溶区植被生长对降水和温度变化更敏感;不同植被类型受降水和温度的影响程度及其响应时间具有差异性,而同一植 被类型对温度变化的响应时间比降水短<sup>[13]</sup>。然而这些涉及到西南岩溶区植被对气候变化响应方面的研究中,大部分研究时间主 要集中在 2000 年以后,研究结果可以有效地评估系列生态修复工程对植被恢复的影响,但多数研究主要探讨植被变化与温度和 降水之间的关系以及时滞效应,对植被变化与气象干旱的响应机理尚不完全明确。

鉴于此,本文选择标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)来表征气象干旱, 该指数是 Vicente-Serrano 等<sup>[14]</sup>在 2010 年提出,SPEI 不仅考虑了降水对干旱的影响,同时综合了帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)对潜在蒸散变化的灵敏性,以及标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)的 多时间尺度优势,在干旱定量研究中广泛应用<sup>[15,16,17,18]</sup>。因此,本文基于滇黔桂地区 1982~2015 年月尺度 NDVI 和多时间尺度 SPEI, 探讨植被变化的基本特征及其对多时间尺度气象干旱的响应机理,以期为西南岩溶区植被变化对气候的响应机理提供理论支持。

## 1 研究区概况

滇黔桂地区(97.07°E~112.45°E、20.72°N~29.40°N)包括我国云南、贵州、广西3省(区),属于世界3大岩溶集中连 片分布区之一,生态环境十分脆弱,属于全球变化的敏感地带。岩溶区分布面积达3.21×10<sup>5</sup>km<sup>2</sup>,占全国岩溶分布面积的23.4%, 占三省(区)总面积的39.7%<sup>119]</sup>。该区位于热带、亚热带季风气候区,雨热同期,光热资源充足,降雨量丰沛,但降雨量季节和区 域差异明显。地势总体呈西高东低的分布格局,横跨广西盆地、云贵高原和横断山脉,岩溶地貌类型复杂多样。研究区内碳酸盐 岩大面积出露,地上地下具有双层水文地质结构,土壤瘠薄、持水性差;受岩溶区生境的影响和制约,植被具有石生、旱生、喜 钙的特点,多以矮小灌木居多,一旦遭到破坏则有石漠化风险。区域内水资源丰富,河流纵横,峡谷广布。研究区地理位置及岩 溶区空间分布如图1所示。



图 1 研究区地理位置(a) 及岩溶区分布图(b)

## 2数据及研究方法

2.1 数据来源及预处理

NDVI 数据来源于 1982~2015 年 GIMMSNDVI 数据集,其空间分辨率为 1/12°,时间分辨率为 15d。该数据集是美国航空航天 局全球监测与模型研究组最新发布的第 3 代全球植被指数产品,已在全球范围内植被变化的研究中得到广泛使用<sup>[20,21]</sup>。NDVI 数据的预处理包括格式转换、真值恢复、月最大值合成以及裁剪等步骤,经预处理最后得到 1982~2015 年研究区逐月 NDVI 数据 序列。

月尺度 SPEI 数据集(V2.6)源于气候研究委员会(Climate Research Unit)。SPEI 具有多时间尺度特征,可以表达 1~48 个 月的时间尺度,空间分辨率为 0.5°,时间跨度为 1901~2018 年,参考国家气象局《气象干旱等级 GB/T20481-2006》标准,当 SPEI 值小于 0 时,表示发生气象干旱,且数值越小则表示气象干旱越严重。本研究中使用的 SPEI 数据集为 1982~2015 年,研 究中用 SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-9、SPEI-12 和 SPEI-24 分别表示研究区 1/3/6/9/12/24 个月的气象干旱情况,为了与 NDVI 数据集进行空间分辨率匹配,将不同时间尺度的 SPEI 数据集空间分辨率重采样为 1/12°。

1:100 万植被类型数据,来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn),将研究区的植被类型重分类为林地、灌丛、草地和农作物。SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)DEM 数据来源于地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn/),空间分辨率为90m。

2.2 研究方法

2.2.1SPEI 计算

文中所用 SPEI 数据集是以月水分亏缺量(即降水量减去潜在蒸散发量)来表示水分的盈亏,计算过程中采用 CRUTS4.03 数据 集中的逐月栅格降水量数据和潜在蒸散发数据,具体计算步骤<sup>[22,23]</sup>如下:

(1)计算逐月降水量与潜在蒸散发量的差值 D<sub>i</sub>=P<sub>i</sub>-PET<sub>i</sub>, 其中 i 为月份。

(2)构建多时间尺度水分盈亏累积序列,并计算其概率分布。

$$D_{n}^{k} = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}), \quad n \ge k$$
 (1)

式中: k为月时间尺度, 1≤k≤48,n表示某个月。

(3)用 Log-logistic 分布对 D<sup>\*</sup>水分盈亏序列进行三参数拟合及正态化,计算给定时间尺度累计概率。三参数 Log-logistic 概率密度函数为:

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

式中: α、β、γ 分别为尺度、形状和位置参数,可以采用线性矩方法拟合得到。基于 Log-logistic 概率分布函数,可计 算给定时间尺度的累积概率如下:

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

(4) 对概率分布 F(x) 进行标准化处理,得到 SPEI 值。

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

$$W = \sqrt{-2\ln(P)}$$
(4)

当 P≤0.5 时, P=1-F(x);当 P>0.5 时, P=1-P,同时将 SPEI 的符号逆转。式中 C₀=2.515517,C₁=0.802853,C₂=0.010328, d₁=1.432788, d₂=0.189269, d₃=0.001308。

#### 2.2.2 趋势分析方法

Sen-Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验方法结合用于 NDVI 时间序列分析中,能够判断 NDVI 时间序列变化趋势的显著 性,具体计算方法参考文献[24,25]。当趋势度 β>0 时,表示 NDVI 时间序列呈上升趋势,反之则呈下降趋势;变化趋势的显著 性用 Mann-Kendall 方法中统计量 Z 进行检验。在给定置信水平 α 下,如果 |Z| ≥Z<sub>(1-α)/2</sub>,表示研究序列在 α 水平下变化趋势显 著。本文在给定 α=0.05 置信水平下,对 NDVI 时间序列变化趋势的显著性进行判断。

2.2.3 相关分析法

Pearson 相关系数可以定量分析滇黔桂地区 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 之间逐像元的相关性,用来反映 NDVI 变化对 SPEI 的响应特征。相关系数取值为-1 到 1,表明相关性从最大负相关到最大正相关,研究过程中选择 a=0.05 显著性水平。分别用 SPEI-1、SPEI-3、SPEI-6、SPEI-9、SPEI-12 和 SPEI-24 表示研究区 1/3/6/9/12/24 个月的干旱情况。为了进一步分析季节 NDVI 变化 对 SPEI 的响应特征,将研究时间中的 3~5 月划分为春季、6~8 月划分为夏季、9~11 月划分为秋季、12 月至次年 1~2 月划分 为冬季,4~10 月划分为生长季。具体分析过程为:计算逐月 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的相关系数,将对应月尺度的相关系数 进行最大值合成来表示年、季节、生长季 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的最大相关系数所对应的 SPEI 尺度即为 NDVI 对 SPEI 的最大响应时间。

$r_{ij} = corr(NDVI_i, SPEI_{ij})$	(5)
$r_{\max} = \max\left(r_{\bar{y}}\right)$	(6)

式中:r<sub>ij</sub>表示第 i 个月的 NDVI 与第 j 个时间尺度 SPEI 的逐像元相关系数;r<sub>max</sub>表示不同季节或年尺度所对应月相关系数的最大值。

## 3 结果分析

3.1NDVI 时空变化特征

#### 3.1.1NDVI 时间变化特征

图 2 为滇黔桂地区 NDVI 年际和季节时间变化特征折线图。从图 2 (a) 可知, 1982~2015 年间, 研究区 NDVI 整体呈增长趋势, 岩溶区 NDVI 整体低于非岩溶区,但岩溶区 NDVI 增长速率高于非岩溶区。岩溶区 NDVI 介于 0.73~0.80 之间,均值为 0.77,增长 速率为 0.014/10a;非岩溶区 NDVI 在 0.76~0.81 之间波动,均值为 0.79,增长速率为 0.01/10a;变化趋势均通过 P<0.01 显著性 检验。NDVI 最小值出现在 1991 年,最大值出现在 2007 年,NDVI 变化表现出明显的阶段特征,1982~2000 年之间震荡幅度较 大,2000 年以后呈波动上升态势。 从图 2(b~e)可以看出,季节 NDVI 均呈增长趋势,但表现出一定差异性,岩溶区 NDVI 整体低于非岩溶区,但增长速率均高于非岩溶区,NDVI 在春秋两季的增长速率高于夏冬两季。春秋两季,岩溶区和非岩溶区 NDVI 整体变化趋势与年际变化趋势相 似,但 NDVI 变化幅度较大,变化趋势均通过 P<0.01 显著性检验。夏季,岩溶区与非岩溶区 NDVI 差异较小,变化趋势基本一致,增长趋势均通过 P<0.01 显著性检验。冬季,NDVI 在岩溶区与非岩溶区差异较显著,岩溶区 NDVI 增长速率 0.011/10a 略高于非 岩溶区 0.009/10a;增长趋势均通过 p<0.05 显著性检验。从图 2(f)可以看出,生长季 NDVI 呈显著增长趋势,与年际变化趋势相 似,但 NDVI 变化幅度较大。岩溶区 NDVI 增长速率为 0.013/10a 高于非岩溶区 0.009/10a,变化趋势均通过 P<0.01 显著性检验。



图 2 NDVI 时间变化特征

以上分析表明,不同地质背景下,植被生长存在显著的年际和季节差异性。岩溶区地层以碳酸盐岩为主,地表土层贫薄,保水保肥能力较差,植被类型以低矮灌丛和草地为主,NDVI 整体低于非岩溶区,但在人类活动的正向作用促进下,岩溶区植被覆盖在 2000 年以后改善尤为显著,这主要归因于国家及地方政府实施了一系列生态保护政策。

3.1.2NDVI 空间变化趋势

从表 1 和图 3 (a) 可以看出,近 34 年来滇黔桂地区年际 NDVI 以增长趋势为主。其中,NDVI 呈显著增加趋势 (P<0.05) 的区域 占比 54.84%,主要分布在广西盆地、贵州中部及东部地区、云南东部、中部以北-横断山以南和中部-南部之间区域;NDVI 呈显著 减少 (P<0.05) 的区域占比仅为 3.67%,主要集中分布在横断山地区、云南中部及南部地区、贵州与云南西部接壤地区,在广西也 有零星分布。

从图 3 (b~e)和表 1 可以看出,研究区 NDVI 季节变化趋势空间分布具有区域差异性,整体以增加趋势为主,春季增加趋势 尤为显著。季节 NDVI 呈显著增加趋势 (P<0.05)的区域占比排序为:春季 (60.51%)>夏季 (47.38%)>秋季 (43.70%)>冬季 (32.40%); 空间分布上,春季集中分布在贵州及广西大部分地区;夏季以贵州东部、云南东部及广西大部分地区分布最广;秋季主要连片分 布在贵州东北部地区、广西盆地、云南横断山脉以南地区;冬季集中分布在广西东部及东南部地区,在云南大部分地区呈片状分 布。NDVI 呈显著减少 (P<0.05)的区域占比排序为:冬季 (4.28%)>夏季 (4.05%)>春季 (2.99%)>秋季 (2.28%),空间分布上总体以云 南地区为主,春冬两季呈离散状分布,夏秋两季集中分布在横断山脉地区、其它区域呈离散点状分布。从图 3 (f)可以看出,生 长季 NDVI 变化趋势空间分布与年际 NDVI 变化趋势空间分布相近,呈显著减少趋势的区域相较于年际尺度而言,在云贵高原和 横断山脉地区都有减少,而呈不显著增加趋势的区域在云贵高原和广西盆地均有增加。

β	Z	变化趋势	百分比%					
			全年	春季	夏季	秋季	冬季	生长季
<0	<-1.96	显著减少	3.67	2.99	4.05	2.28	4.28	2.86
<0	-1.96~1.96	不显著减少	12.55	11.93	16.21	15.13	20.56	13.75
>0	-1.96~1.96	不显著增加	28.94	24.57	32.37	38.88	42.76	33.46
>0	≥1.96	显著增加	54.84	60.51	47.38	43.70	32.40	49.93

表1 NDVI 变化趋势统计



图 3 NDVI 变化趋势空间分布

图 4 为岩溶区与非岩溶区 NDVI 在年际、季节和生长季的变化趋势统计。从年际尺度来看,岩溶区 NDVI 呈增加趋势的区域 (45.51%)高于非岩溶区(38.46%)。从季节尺度来看,岩溶区 NDVI 呈显著增加趋势(P<0.05)的区域占比在春(34.70%)、夏(26.26%)、 秋(23.02%)三季均高于非岩溶区(春夏秋三季分别为 25.79%、21.08%和 20.35%),但冬季(15.09%)略低于非岩溶区(17.24%);NDVI 呈显著减少趋势(P<0.05)的区域岩溶区略低于非岩溶区。从生长季来看,岩溶区 NDVI 呈增加趋势和显著增加趋势的区域占比分 别为 45.03%和 28.37%,均高于非岩溶区 38.47%和 21.57%。



图 4 年际和季节 NDVI 变化趋势统计

以上分析表明,在年际、季节和生长季岩溶区与非岩溶区 NDVI 均以增加趋势为主,岩溶区植被覆盖整体呈改善趋势的区域 多与非岩溶区,但 NDVI 变化趋势空间分布存在一定差异性。这不仅与地质背景、植被类型、地形环境等因素具有一定的相关性, 也说明人类活动对滇黔桂地区 NDVI 变化呈现正向促进作用。

3.2 NDVI 对 SPEI 的响应

3.2.1 年尺度 NDVI 对 SPEI 的响应

从年尺度来看,NDVI 与不同时间尺度 SPEI 最大相关系数在-0.050~0.680 之间波动,根据相关系数的显著性水平 a=0.05(r=0.339)和 a=0.01(r=0.436),将最大相关系数进行分级。从图 5(a)可以看出,NDVI 与不同时间尺度 SPEI 最大相关系数 以正相关为主,占比达 99.97%;呈显著正相关(P<0.05)的区域占比 40.08%,主要分布在研究区东部地区;呈极显著正相关(P<0.01)的区域占比 14.38%,集中分布在贵州北部、广西的东北部、中部和南部地区;表明这些地区 NDVI 变化与 SPEI 的相关性较高。相关系数小于 0 的区域零星分布在云南省,占比仅为 0.03%,且未通过 P<0.05 显著性检验。

从图 5(b)可知,最大相关系数对不同时间尺度 SPEI 的响应表现出空间差异性。其中,最大相关系数对应的 SPEI 时间尺度 主要以 SPEI-1 为主,占比 57.78%,主要分布在云南西南部、贵州北部及东南部、广西东北部地区。其次,时间尺度为 SPEI-3 的 区域占比 18.56%,主要分布在云南北部和东部地区、广西中北部地区、贵州南部地区。NDVI 对 SPEI 响应时间尺度为 SPEI-6、 SPEI-9、SPEI-12 和 SPEI-24 的区域占比分别为 4.65%、5.56%、3.93%和 9.52%,其中 SPEI-24 的区域集中分布在广西东南部及西 部地区、云南和贵州也有零散分布。

从图 6 统计分析结果可以看出,岩溶区和非岩溶区最大相关系数均以正相关为主,岩溶区最大相关系数呈显著正相关的区域占比高于非岩溶区。此外,岩溶区和非岩溶区 NDVI 均对 SPEI-1 的响应最强,其次为 SPEI-3,而对 6 个月至 12 个月尺度的 SPEI 响应较弱,部分地区 NDVI 对 SPEI-24 的响应较强。



图 5 年际 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 最大相关系数 (a) 和 SPEI 响应时间 (b) 空间分布



图 6 年际 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 最大相关系数 (a) 及响应时间 (b) 分区统计

以上分析表明,研究区 NDVI 变化与不同时间尺度 SPEI 以正相关为主,岩溶区最大相关系数呈显著正相关的区域占比高于 非岩溶区,表明岩溶区 NDVI 变化与 SPEI 关系比较密切。绝大部分地区 NDVI 对 SPEI-1 和 SPEI-3 的响应比较强烈,岩溶区尤为 显著;说明岩溶区 NDVI 对短时间尺度 SPEI 比较敏感。



图 7季节 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的最大相关系数空间分布

#### 3.2 季节尺度 NDVI 对 SPEI 的响应

图 7 为季节 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的最大相关系数空间分布。从图 7 可以看出,不同季节最大相关系数均以正相关占 主导,占比分别为 92.70% (春季)、99.47% (夏季)、95.40% (秋季)和 91.81% (冬季)。最大相关系数呈显著正相关 (p<0.05)的地区 在春季集中分布在广西中部及南部地区,夏季向贵州北部地区转移,秋季集中分布在研究区东部地区,冬季主要分布在贵州东北 部、广西中部及南部地区。最大相关系数呈极显著正相关 (p<0.01)的地区占比分别为 4.03% (春季)、6.79% (夏季)、11.88% (秋季) 和 9.92% (冬季),春季在广西中部及东南部散布,夏季集中分布在贵州北部地区、秋季向广西东北部及中部和南部转移,冬季与 春季分布趋势大致相同。最大相关系数呈不显著负相关 (p>0.05)的区域在冬季占比最高 (8.19%)、春季次之 (7.3%)、夏季最低 (0.53%),主要散布在云南地区。以上分析表明,季节 NDVI 变化与 SPEI 具有一定相关性,但相关程度存在季节差异。

从图 8 可知,最大相关系数对不同时间尺度 SPEI 的响应在季节尺度表现出显著的空间差异性。春季,最大相关系数对 SPEI 响应时间尺度以短期及长期为主,其中 SPEI-1(19.81%)和 SPEI-3(24.17%)主要分布在贵州中部和东部地区、云南高原及横断山 以南地区; SPEI-9(17.50%)、SPEI-12(10.45%)和 SPEI-24(24.60%)集中分布在广西盆地、贵州高原及横断山脉地区。夏季,最大相关系数对 SPEI 响应总体呈东南部响应时间长,其他地区响应时间较短的特征。响应时间以 SPEI-1(46.66%)和 SPEI-3(17.58%)为主的地区主要分布在云贵高原的大部分地区、以及广西盆地东北和西南部分地区;响应时间为 SPEI-24(24.68%)的地区集中分布在广西盆地,在云贵高原地区和横断山脉地区也有零散分布。秋季,最大相关系数对 SPEI 的响应以 SPEI-1(54.22%)和 SPEI-3(13.53%)为主,广泛分布于云南、广西,在贵州东部及西部地区也有分布。夏季,最大相关系数对 SPEI 的响应以 SPEI-9(30.59%)占比最大,其次为 SPEI-12(19.53%),SPEI-1、SPEI-3和 SPEI-6占比在 12.92%~16.61%之间波动。其中,响应时间为 SPEI-9的地区集中分布在贵州东部、广西-云南-贵州三省交接地区、云南也有多处分散分布;响应时间为 SPEI-12 的地区集中分布在广西东部及西部的周边地区、云贵高原及横断山脉地区也有连片分布。此外,云南南部地区、广西中部及北部地区主要以短期响应为主。以上分析表明,春冬两季 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应存在空间差异性;夏季在云南和贵州地区 NDVI 对短时间尺度 SPEI 响应敏感,秋季绝大部分区域 NDVI 对短时间尺度 SPEI 响应敏感.

图 9(a)统计结果表示,岩溶区和非岩溶区最大相关系数均以正相关为主,夏秋两季岩溶区最大相关系数呈显著正相关的区域占比略高于非岩溶区,而春冬两季最大相关系数呈显著正相关的区域占比略低于非岩溶区。9(b)统计结果表明,春夏秋三季 NDVI 对 SPEI-1 和 SPEI-3 的响应最为敏感,其中岩溶区三季的占比排序为夏季(66.57%)>秋季(65.21%)>春季(44.12%);非岩溶区 三季的占比排序为秋季(70.59%)>夏季(61.31%)>春季(44.12%)。冬季岩溶区 NDVI 对 SPEI-9 的响应最为敏感;非岩溶区 NDVI 对 SPEI-9 和 SPEI-24 的响应比较敏感。以上分析表明,春夏秋三季岩溶区和非岩溶区季节 NDVI 变化受短时间尺度 SPEI 影响比较明显,而非岩溶区 NDVI 受中长时间尺度 SPEI 的影响较大。



#### 图 8 SPEI 响应时间空间分布



图 9 季节 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的最大相关系数 (a) 和响应时间 (b) 分区统计

3.3 生长季 NDVI 对 SPEI 的响应

从图 10 可知, 生长季 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的最大相关系数以正相关为主。随着 SPEI 时间尺度的推移, 最大相关系数呈正相关的区域占比从 99.92%下降到 78.93%。相关系数高值区集中分布在贵州北部及东部、广西东北部和中南部地区, 相关性最好的时间尺度为 SPEI-1 和 SPEI-3, 表明在研究区内短时间尺度 SPEI 对植被生长起到关键作用。随着 SPEI 时间尺度的推移最大相关系数通过 p<0.05 显著性检验的区域占比逐渐减少, 从 24.27% (SPEI-1)下降到 9.72% (SPEI-12);通过 p<0.01 显著性检验的区域从 14.11% (SPEI-1)下降到 1.51% (SPEI-6)再回升到 2.41% (SPEI-12)。最大相关系数呈负相关的区域主要以不显著(p>0.05)负相关为主,集中分布在云南地区,随 SPEI 时间尺度的推移从零星分布 (SPEI-1、SPEI-3)转变为簇状分布 (SPEI-6、SPEI-9),最后形成片状分布区 (SPEI-12、SPEI-24)。



图 10 生长季 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的最大相关系数空间分布

从图 11 统计分析结果可知, 岩溶区与非岩溶区生长季 NDVI 均对 SPEI-1 和 SPEI-3 的响应最为敏感, NDVI 与不同时间尺度 SPEI 最大相关系数以不显著正相关占绝对优势,占比在 61.56%~82.60%之间;随着时间尺度的推移,最大相关系数呈显著正相 关和极显著正相关的占比在岩溶区呈减少趋势,而在非岩溶区呈先减少后增加的趋势。以上分析表明,生长季 NDVI 与不同时间 尺度 SPEI 以正相关为主,且对短时间尺度 SPEI 比较敏感。

进一步统计研究区生长季4种植被类型(林地、灌木、草地和农作物)NDVI 与不同时间尺度 SPEI 最大相关系数(表 2)可以看出,岩溶区和非岩溶区4种植被 NDVI 均对 SPEI-1和 SPEI-3 的响应比较敏感;随着时间尺度的推移,岩溶区4种植被 NDVI 对 SPEI 的响应依次减弱;非岩溶区呈先减弱后增强的趋势。以上分析表明,生长季大多数植被 NDVI 对短时间尺度 SPEI 比较敏感,岩溶区植被生长对 SPEI 的响应强于非岩溶区。



图 11 生长季 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的最大相关系显著性统计

	时间尺度	林地	灌木	草地	农作物
	SPEI-1	0.315	0.319	0.292	0.314
	SPEI-3	0.242	0.240	0.222	0.237
<b>-</b>	SPEI-6	0.197	0.208	0.163	0.188
石俗区	SPEI-9	0.181	0.209	0.137	0.177
	SPEI-12	0.162	0.184	0.113	0.158
	SPEI-24	0.148	0.164	0.110	0.142
	SPEI-1	0.316	0.290	0.305	0.303
	SPEI-3	0.231	0.204	0.232	0.206
北巴迩豆	SPEI-6	0.164	0.141	0.162	0.140
非石俗区	SPEI-9	0.166	0.137	0.143	0.142
	SPEI-12	0.157	0.112	0.121	0.133
	SPEI-24	0.167	0.120	0.123	0.136

表 2 生长季植被 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 的最大相关系数均值

## 4 讨论

基于 1982~2015 年 GIMMSNDVI 数据集分析了滇黔桂地区植被覆盖的时空变化特征,结果表明滇黔桂地区年际 NDVI 呈显著 增加趋势(P<0.01),岩溶区增长速率快于非岩溶区,这与以往的研究结果基本一致<sup>[8,11]</sup>;但岩溶区(0.014/10a)和非岩溶区 (0.010/10a)NDVI 增长速率均低于肖建勇等<sup>[8]</sup>西南八省岩溶区和非岩溶区 NDVI 的增长速率 0.028/10a 和 0.025/10a。主要原因之 一与研究范围、研究时间段和所用数据空间分辨率有关;其次,进一步分析 NDVI 变化趋势可知,滇黔桂地区 NDVI 变化存在明显 的阶段特征,1982~2000 年岩溶区和非岩溶区均呈不显著增加趋势(P>0.05),增加速率分别为 0.003/10a 和 0.005/10a;而 2000~ 2015 年岩溶区和非岩溶区 NDVI 均呈显著增加趋势(P<0.01),增加速率分别为 0.021/10a 和 0.014/10a。这说明国家和地方政府 实施了一系列退耕还林还草等生态修复政策<sup>[26]</sup>,对岩溶区植被的恢复起到了积极地促进作用,Tong 等<sup>[27]</sup>研究也指出西南岩溶区植 被恢复与生态工程的实施具有良好的一致性,这说明人类活动对滇黔桂地区 NDVI 变化呈现正效应。另一方面,《中国统计年鉴》 (数据来源于中国国家统计局)数据显示,2003~2015 年滇黔桂岩溶地区造林面积累计达到 110979.23km<sup>2</sup>,年均造林面积为 8536.86km<sup>2</sup>;与此同时,《中国岩溶地区石漠化状况公报》(数据来源于国家林业与草原局)数据也表明,2005~2011 年和 2011~ 2016 年两个时段,滇黔桂岩溶地区石漠化状况公报》(数据来源于国家林业与草原局)数据也表明,2005~2011 年和 2011~ 2016 年两个时段,滇黔桂岩溶地区石漠化大地分别减少 7870.00 和 14350.00km<sup>2</sup>,减少率分别为 9.87%和 20.0%。这也进一步证 明,人类活动在短期对植被恢复起到积极的促进作用,有效地遏制了石漠化的恶化趋势。此外,岩溶区 NDVI 总体低于非岩溶区, 这与岩溶区特殊的生态地质背景有很大的关系。滇黔桂岩溶区碳酸盐岩以纯灰岩为主,地表土壤厚度、肥力和保水条件均劣于非 岩溶区,且岩溶地貌微地形发育,对植被的空间分布及生长规律有着明显的控制作用<sup>[28]</sup>;植被具有石生、旱生、喜钙的特点,多 以低矮灌木居多且丰茂程度较低;因此生态地质背景对植被类型及空间分布具有重要影响。

滇黔桂地区 NDVI 与不同时间尺度 SPEI 整体呈正相关关系,NDVI 对 SPEI 的最大响应时间以1个月和3个月为主,表明研究 区 NDVI 变化对短时间尺度 SPEI 比较敏感。这与研究区的生态地质背景、植被类型等因素有很大关系。滇黔桂地区属于我国西南岩溶核心分布地区,地表地下存在特殊的二元水文地质结构,地表土壤瘠薄,保水能力差,极易发生干旱。其次,水热条件是植被空间分布的关键影响因子,不同气候分区植被对气象干旱的抵抗力和恢复力具有差异性<sup>[29,30]</sup>,因而不同植被类型对 SPEI 的响应也具有差异性。滇黔桂地区植被类型主要以灌草、农作物为主,根系分布较浅,无法直接吸收地下水维持植被生长<sup>[31]</sup>,对短时间尺度 SPEI 比较敏感。

此外,研究过程中仅考虑了气象干旱对植被生长的影响,人类活动、地形环境等因素对植被变化的影响有待进一步研究。植 被变化研究中基于 8km 分辨的 NDVI 数据,能从宏观上反映植被的整体变化趋势,但对描述植被变化的局部细节信息具有一定的 局限性。研究中采用空间分辨率为 0.5°的格网 SPEI 数据集,能在一定程度上弥补地面气象站点分布不均的问题,可以较好地 反映不同时间尺度气象干旱的空间分布特征,但由于空间分辨率相对较低,对有效描述气象干旱空间分布的细节信息有一定局 限性。因此,在后续研究中将深入探讨影响植被生长的多个因素,并基于较高空间分辨率的 NDVI 数据和格网 SPEI 数据研究植 被变化及其对气象干旱的响应机理。

### 5 结论

(1)1982~2015 年滇黔桂地区年际及季节 NDVI 整体呈增长趋势,岩溶区 NDVI 整体低于非岩溶区;年际尺度上岩溶区 NDVI 增长速率(0.014/10a)高于非岩溶区(0.010/10a);季节尺度上 NDVI 在春、秋两季的增长速率高于夏、冬两季;岩溶区 NDVI 增长速率均高于非岩溶区。

(2) 滇黔桂地区年际 NDVI 以增长趋势为主; 岩溶区 NDVI 呈增加趋势的区域(45.51%)高于非岩溶区(38.46%); NDVI 季节变化 趋势空间分布差异明显,整体以增加趋势为主,春季增加趋势尤为显著; 岩溶区 NDVI 呈显著增加趋势的区域占比在春、夏、秋 三季均高于非岩溶区,但冬季略低于非岩溶区; 岩溶区季节 NDVI 呈显著减少的区域略低于非岩溶区。

(3) 滇黔桂地区年际 NDVI 变化对 SPEI-1 和 SPEI-3 最为敏感;季节 NDVI 与 SPEI 以不显著正相关为主, NDVI 对 SPEI 的响应

12

时间尺度以短期(SPEI-1 和 SPEI-3)和长期(SPEI-9、SPEI-12 和 SPEI-24)为主且存在空间差异性; 生长季 NDVI 对短时间尺度 SPEI 比较敏感,不同植被类型 NDVI 对 SPEI 的敏感性表现出差异性。

#### 参考文献:

[1]ZHENG H F, SHEN G Q, HE X Y, et al. Spatial assessment of vegetation vulnerability to accumulated drought in Northeast China [J]. Regional Environmental Change, 2015, 15(8):1639-1650.

[2]ZHANG Y D,ZHANG X H,LIU S R.Correlation analysis on normalized difference vegetation index(NDVI) of different vegetations and climatic factors in Southwest China [J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(2): 323-330.

[3]VICENTE-SERRANO S M, GOUVEIA C, CAMARERO J J, et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(1):52-57.

[4]WANG J, MENG J J, CAI Y L. Assessing vegetation dynamics impacted by climate change in the southwestern karst region of China with AVHRR NDVI and AVHRR NPP time-series [J]. Environmental Geology, 2008, 54(6):1185-1195.

[5]李美丽, 尹礼昌, 张园, 等. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J]. 生态学报, 2021, 41 (3): 1138-1147.

[6] 曹云, 钱永兰, 孙应龙, 等. 基于 MODIS NDVI 的西南森林植被时空变化特征及其气候响应分析[J]. 生态环境学报, 2020, 29 (5):857-865.

[7]蒙吉军,王钧.20世纪80年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应[J].地理研究,2007,26(5):857-865.

[8]肖建勇,王世杰,白晓永,等.喀斯特关键带植被时空变化及其驱动因素[J].生态学报,2018,38(24):8799-8812.

[9]TIAN Y C, BAI X Y, WANG S J, et al. Spatial-temporal changes of vegetation cover in Guizhou Province, Southern China [J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(1):25-38.

[10]马士彬, 安裕伦, 杨广斌. 基于 GIS 的喀斯特区域不同岩性基底植被 NDVI 变化分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2):202-206, 212.

[11]刘梁美子,占车生,胡实,等.黔桂喀斯特山区植被变化及其地形效应 [J].地理研究, 2018, 37 (12):75-88.

[12]刘梁美子,占车生,胡实,等.黔桂喀斯特山区年 NDVI 变化的影响因素研究 [J].地理科学进展,2019,38(11):1783-1792.

[13] 王永锋,靖娟利. 广西近 15 a 植被覆盖变化及其对气候因子的响应 [J]. 农业现代化研究, 2017, 38 (6): 1086-1096.

[14]VICENTE-SERRANO S.M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset(1901-2006) of a multiscalar drought Index:comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity

Index [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(4):1033-1043.

[15] 王兆礼, 黄泽勤, 李军, 等. 基于 SPEI 和 NDVI 的中国流域尺度气象干旱及植被分布时空演变 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(14):177-186.

[16]罗新兰,李英歌,殷红,等.东北地区植被 NDVI 对不同时间尺度 SPEI 的响应 [J]. 生态学杂志, 2020, 39 (2): 412-421.

[17]张华,徐存刚,王浩.2001-2018年西北地区植被变化对气象干旱的响应 [J].地理科学,2020,40(6):1029-1038.

[18]齐贵增,白红英,赵婷,等.秦岭陕西段南北坡植被对干湿变化响应敏感性及空间差异 [J].地理学报,2021,76(1):44-56.

[19] 王钧,蒙吉军.西南喀斯特地区近45年来气候变化特征及趋势[J].北京大学学报(自然科学版),2007,43(2):223-229.

[20]BEGUERÍA S, VICENTE-SERRANO S M, ANGULO-MARTÍNEZ M. A multiscalar global drought dataset: The SPEIbase: A new gridded product for the analysis of drought variability and impacts [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91 (10):1351-1356.

[21]ZHOU Q W,LUO Y,ZHOU X, et al. Response of vegetation to water balance conditions at different time scales across the karst area of southwestern China: A remote sensing approach [J]. Science of the Total Environment, 2018, 645:460-470.

[22]VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.

[23]杨思遥,孟丹,李小娟,等.华北地区 2001-2014 年植被变化对 SPEI 气象干旱指数多尺度的响应 [J].生态学报, 2018,38(3):1028-1039.

[24]BURN D H, ELNUR M A H. Detection of hydrologic trends and variability [J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1): 107-122.

[25]ABDUL AZIZ O I, BURN D H. Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin [J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(1):282-294.

[26]罗旭玲,王世杰,白晓永,等.西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析 [J]. 生态学报, 2021, 41 (2):680-693.

[27] TONG X W, MARTIN B, Yue Y M, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering [J]. Nature Sustainability, 2018(1):44-50.

[28]李阳兵,邵景安,周国富,等.喀斯特山区石漠化成因的差异性定量研究——以贵州省盘县典型石漠化地区为例 [J].地理科学,2007,27(6):785-790.

[29]ZHANG Q,KONG D D,SINGH V P,et al.Response of vegetation to different time-scales drought across

China:Spatiotemporal patterns, causes and implications [J].Global and Planetary Change, 2017, 152:1-11.

[30]ENGELBRECHT B M J,COMITA L S,CONDIT R,et al.Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests [J].Nature,2007,447(7140):80-82.

[31]张更喜, 粟晓玲, 郝丽娜, 等. 基于 NDVI 和 scPDSI 研究 1982-2015 年中国植被对干旱的响应 [J]. 农业工程学报, 2019, 35 (20):145-151.