

陈燕丽,唐梅蓉,张 会,等.广西喀斯特地区植被覆盖度和净初级生产力对SPEI干旱指数的响应差异[J].干旱气象,2022,40(6):1042-1050, [CHEN Yanli, TANG Meirong, ZHANG Hui, et al. Response difference of fractional vegetation cover and net primary productivity to SPEI drought index in karst areas of Guangxi[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 1042-1050], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-06-1042

## 广西喀斯特地区植被覆盖度和净初级生产力对 SPEI干旱指数的响应差异

陈燕丽<sup>1</sup>,唐梅蓉<sup>2</sup>,张 会<sup>3</sup>,莫建飞<sup>1</sup>,钱 拴<sup>4</sup>

(1. 广西壮族自治区气象科学研究所,广西 南宁 530022; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所,广西 桂林 541004;  
3. 河北省保定市气象局,河北 保定 071000; 4. 国家气象中心,北京 100081)

**摘 要:**干旱是影响广西喀斯特地区植被的最主要气象灾害,选择合理的遥感植被参数能更客观地反映干旱对植被的影响。本研究选择植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)和净初级生产力(net primary productivity, NPP)分析喀斯特地区不同地形条件下和不同林种FVC和NPP对标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)的响应差异,为喀斯特地区植被干旱影响量化评估提供科学依据。结果表明:(1)喀斯特地区FVC和NPP对SPEI响应具有明显季节性差异,FVC和NPP对SPEI的响应一致性在春季最高,夏季次之,秋季差异最大。(2)不同林种FVC和NPP在年尺度上对SPEI响应差异小,但季节尺度响应差异大。年尺度上,FVC和NPP对SPEI响应敏感性大小分别为经济林>桉树类>松树类>阔叶林>杉木类>灌木林>竹林、经济林>松树类>桉树类>阔叶林>杉木类>灌木林>竹林,FVC和NPP对SPEI响应均以经济林最敏感,竹林最不敏感。季节尺度上,仅少部分林种具有相似性,夏季桉树类、秋季阔叶林的FVC和NPP对SPEI响应敏感性均最低,冬季桉树类的FVC和NPP对SPEI响应敏感性均最高。(3)不同地形条件下植被对SPEI响应也具有差异,但较不同林种小。年尺度上,FVC和NPP对SPEI响应敏感性分别为平原>山地>高山、平原>高山>山地,两者对SPEI响应的敏感性在平原地区均最高。季节尺度上,不同地形条件下FVC和NPP仅在夏季和冬季对SPEI响应敏感性大小有差异,夏季FVC对SPEI响应为平原>山地,冬季FVC对SPEI响应为平原>高山,NPP则相反。

**关键词:**喀斯特地区;标准化降水蒸散指数;植被覆盖度;植被净初级生产力;干旱响应

**文章编号:**1006-7639(2022)06-1042-09 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-06-1042

**中图分类号:**P461.7

**文献标志码:**A

### 引 言

喀斯特地貌区是我国四大生态环境脆弱区之一,该地区石漠化景观突出,土层浅薄,植被生境特殊,对气象灾害响应敏感且承灾能力弱。气候变化背景下干旱已趋常态化<sup>[1]</sup>,极端干旱发生频率增加,强度增强,已成为影响喀斯特地区最重要的气象灾害之一。开展喀斯特地区干旱影响评估对石漠化治理、植被保护修复、生态环境治理等具有重要意义。

植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)和净初级生产力(net primary productivity, NPP)是反映植物群落生长茂盛程度及其生态质量的两个关键特征量<sup>[2]</sup>。其中,FVC是单位面积内植被地上部分在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比<sup>[3]</sup>,NPP是绿色植物在单位面积和时间积累的有机物数量,表现为光合作用固定的有机碳扣除植物本身呼吸消耗部分<sup>[4]</sup>。植被生长与气象条件密切相关,干旱的发生会对植被造成不同程度的影响。标准化降水蒸散发指数(standardized precipita-

收稿日期:2021-09-29;改回日期:2022-05-06

基金项目:广西科技厅重点研发项目(桂科AB20159022、桂科AB21238010)和广西自然基金项目(2020GXNSFAA238046)共同资助

作者简介:陈燕丽(1982—),女,广西柳州人,博士,正研级高级工程师,主要从事生态遥感应用研究。E-mail:cyl0505@sina.com。

通信作者:钱拴(1964—),女,研究员,主要从事农业生态气象研究与应用。E-mail:qians@cma.gov.com。

tion evapotranspiration index, SPEI)常用来表征气象干旱,可以较客观地反映喀斯特地区旱情<sup>[5]</sup>。利用SPEI开展不同地区植被对干旱的响应研究,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是作为表征植被特征最常用的遥感参数<sup>[6-8]</sup>。近年来,利用FVC、NPP等研究植被对SPEI的响应,发现植被对SPEI的响应具有复杂性,普遍认为FVC对SPEI的响应在不同时间尺度、植被和地形具有显著差异,且FVC与SPEI多呈正相关关系<sup>[9-11]</sup>。降水和气温是NPP的主要驱动因子<sup>[12-13]</sup>,干旱强度增强会导致NPP下降,这一结论在以SPEI<sup>[14-19]</sup>、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)<sup>[20-21]</sup>、帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)<sup>[22-23]</sup>及其他气象干旱指标<sup>[24-25]</sup>的研究中均被证实。采用不同遥感植被参数监测同一地区植被状况时,其特征存在相似性和差异性<sup>[26]</sup>,且不同遥感植被参数对SPEI的响应特征也具有较大差异,其中NPP、NDVI、增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)和日光诱导叶绿素荧光(solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)对SPEI的响应差异已被证实<sup>[26-27]</sup>,但目前有关喀斯特地区FVC和NPP对SPEI响应差异研究较少。

选择合适的遥感植被参数能更客观地反映干旱对植被的影响,喀斯特地区特殊的岩溶地质地貌使其植被构成复杂,该地区植被对干旱的响应机制更具有复杂性,邹宇宁<sup>[28]</sup>研究发现云南喀斯特和非喀斯特地区优势树种的生长对不同时间尺度SPEI的响应存在差异在一定程度上证实了这一点。本研究选择FVC和NPP两个遥感植被参数,分析广西喀斯特地区不同时段、地形条件和林种FVC和NPP对SPEI的响应差异,为喀斯特地区植被干旱定量化评估提供科学依据。

## 1 研究区概况

广西壮族自治区(104° 26'E—112° 04'E, 20° 54'N—26° 24'N)地处中国南部,北回归线横贯中部。南濒热带海洋,北接南岭山地,西延云贵高原,具有周围高、中间低,山地多、平原少的地形特点,其中喀斯特地貌区面积占37.8%,山多地少,土地贫瘠,生态环境恶劣,石漠化现象突出。该区自然灾害严重,严重制约了当地经济发展,属于全国贫困落后地区。研究区林种及气象站点分布如图1所示。

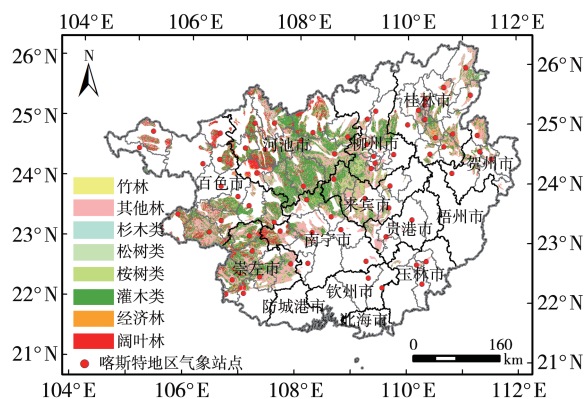


图1 研究区林种及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of forest species and meteorological stations in study area

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源和预处理

卫星遥感数据来自美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectro-radiometer, MODIS)反演的植被指数产品MOD13Q1, 250 m分辨率16 d合成,数据版本为V006,数据时段为2000—2019年。对研究区MOD13Q1遥感数据集进行图像镶嵌、数据格式转换、投影转换及质量检验等预处理,得到质量可靠的NDVI数据集,并进行月合成,获取月数据集。

气象数据为广西气象信息中心提供的70个气象站点2000—2019年逐月降水量和平均气温,数据集中缺测及异常值通过算术平均进行插补处理。

地理信息数据包括:广西喀斯特地区林种分布数据(由广西壮族自治区森林资源与生态环境监测中心提供)、广西数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据、广西县行政边界、广西喀斯特地区矢量边界、广西气象站点经纬度信息。文中附图涉及的地图基于国家测绘地理信息局审核批准的审图号为桂S(2017)47号的标准地图制作,底图无修改。

### 2.2 方法

NPP基于陆地生态系统碳通量(Terrestrial Ecosystem Carbon Budget, TEC)模型计算<sup>[2,29-30]</sup>,计算公式如下:

$$NPP_{ij} = GPP_{ij} - R_{ij} \quad (1)$$

$$GPP_{ij} = \varepsilon_{ij} \times FPAR \times PAR_{ij} \quad (2)$$

$$NPP_i = \sum_{j=1}^n NPP_{ij} \quad (3)$$

式中: $NPP_{ij}$ 、 $GPP_{ij}$ 、 $R_{ij}$  ( $gC \cdot m^{-2}$ )分别为第*i*年第*j*月的植被净初级生产力、总初级生产力、呼吸消耗量;

$\varepsilon_{ij}$  ( $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ) 为第  $i$  年第  $j$  月的光能实际利用率, 反映温度、水分等因子对光合作用的影响; FPAR 为植被吸收光合有效辐射比例;  $\text{PAR}_{ij}$  ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 为第  $i$  年第  $j$  月的入射光合有效辐射;  $\text{NPP}_i$  ( $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 为第  $i$  年植被净初级生产力;  $n$  为一年总月份数,  $n=12$ 。

FVC 计算公式如下:

$$\text{FVC}_{ij} = (\text{NDVI}_{ij} - \text{NDVI}_s) / (\text{NDVI}_v - \text{NDVI}_s) \quad (4)$$

$$\text{FVC}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{FVC}_{ij} \quad (5)$$

式中:  $\text{FVC}_{ij}$  (%) 为第  $i$  年第  $j$  月的植被覆盖度;  $\text{NDVI}_{ij}$  为第  $i$  年第  $j$  月的 NDVI;  $\text{NDVI}_s$ 、 $\text{NDVI}_v$  分别为纯土壤像元和纯植被像元的 NDVI 值, 根据经验我国植被特点设定  $\text{NDVI}_s=0.05$ ,  $\text{NDVI}_v=0.95$ <sup>[2]</sup>;  $\text{FVC}_i$  为第  $i$  年植被覆盖度。根据该公式,  $\text{NDVI} < 0.05$  时植被覆盖度为负值, 判定为无植被区。

SPEI 是降水量与潜在蒸散量差值序列的累积概率值进行正态标准化后的指数, 具体计算过程见文献[5]。分别计算年 SPEI 和季节 SPEI, 季节的划分以 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12 月至次年 2 月为冬季。

遥感数据与气象站数据匹配方法: 以县为单位, 计算每个县域内喀斯特地区所有像元的 FVC (NPP) 均值作为该县的 FVC (NPP) 值, 再计算各县年、四季的 FVC (NPP)。采用一元线性回归方程分析 SPEI、FVC 和 NPP 的长期变化, 并采用气候倾向率描述要素的变化趋势及幅度<sup>[31]</sup>。分别统计年尺度、季节尺度 FVC (NPP) 与同时段 SPEI 的相关系

数, 并进行 GIS 空间制图。

依托 GIS 空间分析工具, 根据喀斯特地区地形地貌特点, 利用 DEM 划分不同地形: 平原为小于 200 m, 山地为 200~1000 m, 高山为大于 1000 m。对喀斯特地区不同时间尺度 FVC (NPP) 与 SPEI 的相关性分析结果进行空间插值并分别与林种、地形进行空间叠加统计, 分析不同林种和地形条件的 FVC (NPP) 与 SPEI 的相关性差异。

### 3 结果分析

#### 3.1 SPEI、FVC 和 NPP 年际变化特征

2000—2019 年广西喀斯特地区年 SPEI 呈波动增加趋势, 每 10 a 上升 0.266 [图 2(a)]; 年 FVC 呈现显著上升趋势, 每 10 a 上升 3.98%, 20 a 均值为 69.59%, 年最大值 (76.76%) 出现在 2016 年, 年最小值 (62.17%) 出现在 2005 年 [图 2(b)]。研究区 FVC 表现为“夏秋高、冬春低”的特点, 其中, 秋季最高, 夏季次之, 冬季最低 (表 1)。2000—2019 年, 广西喀斯特地区年 NPP 总体呈现显著上升趋势 [图 2(c)], 每 10 a 上升 75.60  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 20 a 均值为 822.11  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ , 年最大值 (963.01  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 出现在 2016 年, 年最小值 (699.20  $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 出现在 2005 年。研究区植被 NPP 与 FVC 类似, 也表现为“夏秋高、冬春低”的特点, 其中, 夏季 NPP 最高, 秋季次之, 冬季最低 (表 1)。

#### 3.2 FVC 和 NPP 对 SPEI 响应差异

图 3 为 FVC 与同时段 SPEI 的相关性。可以看出, 广西喀斯特地区年平均 FVC 与年 SPEI 的相关系

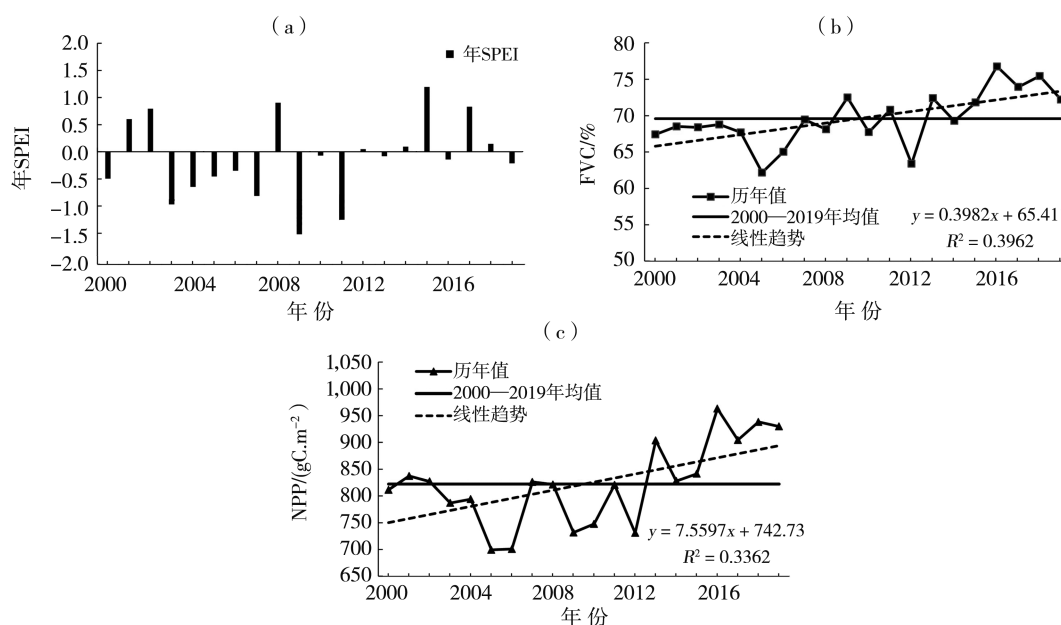


图 2 2000—2019 年广西喀斯特地区年尺度 SPEI (a)、FVC (b) 和 NPP (c) 变化

Fig. 2 The variation of SPEI (a), FVC (b) and NPP (c) at annual time scale in karst areas of Guangxi during 2000–2019



表1 研究区四季FVC和NPP统计

Tab. 1 Statistics of FVC and NPP in four seasons in study area

季节	FVC/%	NPP/(gC·m <sup>-2</sup> )
春季	48.69	204.02
夏季	61.39	297.51
秋季	67.21	249.65
冬季	41.35	95.31

数为-0.48~0.70,79%站点以正相关为主,但通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点仅9%。季节尺度上,FVC对同时段SPEI响应差异较大,秋季和冬季多数站点以正相关为主,两个季节的正相关站点分别占88%和73%。春季和夏季正、负相关站点数相当,其中春季正、负相关站点分别占48%、52%,夏季则分别占52%、48%。FVC与SPEI的相关性通过显著性检验

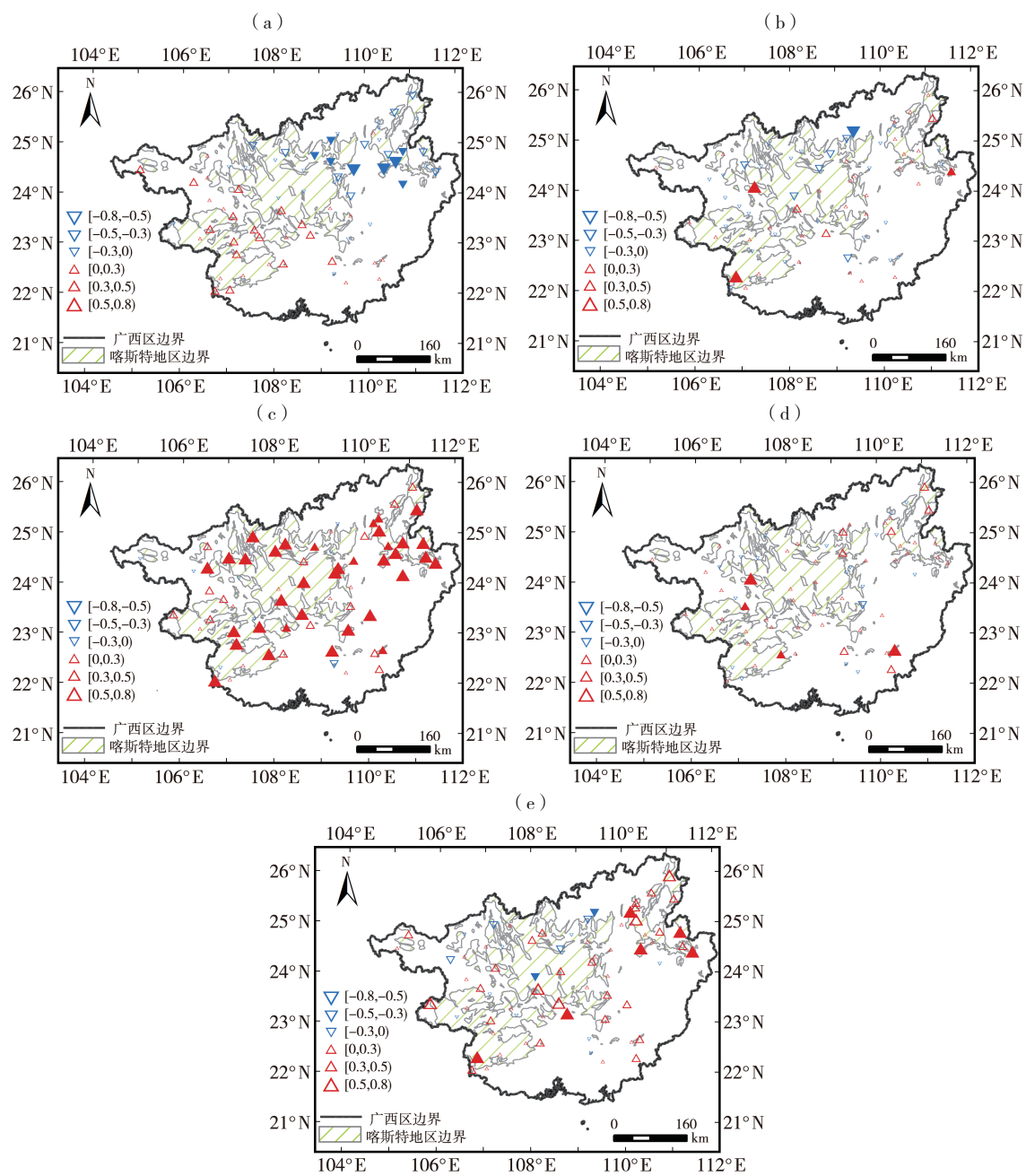


图3 FVC与同时段SPEI相关性

(a) 春季, (b) 夏季, (c) 秋季, (d) 冬季, (e) 全年

(填充三角通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验, 下同)

Fig. 3 Correlation between FVC and SPEI in the same period

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) the whole year

(the shaded triangle passing the  $\alpha=0.05$  significance test. the same as below)

的站点在秋季占52%,但其他季节均均少于12%。

图4为NPP与同时段SPEI的相关性。可以看出,年NPP与年SPEI的相关系数为-0.42~0.73,79%站点以正相关为主,但通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点仅15%。季节尺度上,NPP对同时段SPEI响应差异较大,秋季和冬季多数站点以正相关为主,两个季节正相关的站点分别占94%和66%。春季正、负相关站点数相当,正负相关站点分别占51%、

49%;夏季多数站点(64%)以负相关为主。NPP与SPEI的相关性通过显著性检验的站点在秋季达54%,但其他季节均较少,均少于10%。

对比发现,年、秋季和冬季,FVC和NPP对SPEI的响应多以正相关主导,春季两者与SPEI的正、负相关站点相当,夏季NPP对SPEI的响应以负相关为主,而FVC则为正、负相关相当。喀斯特地区FVC和NPP对SPEI的响应具有明显差异,FVC和NPP

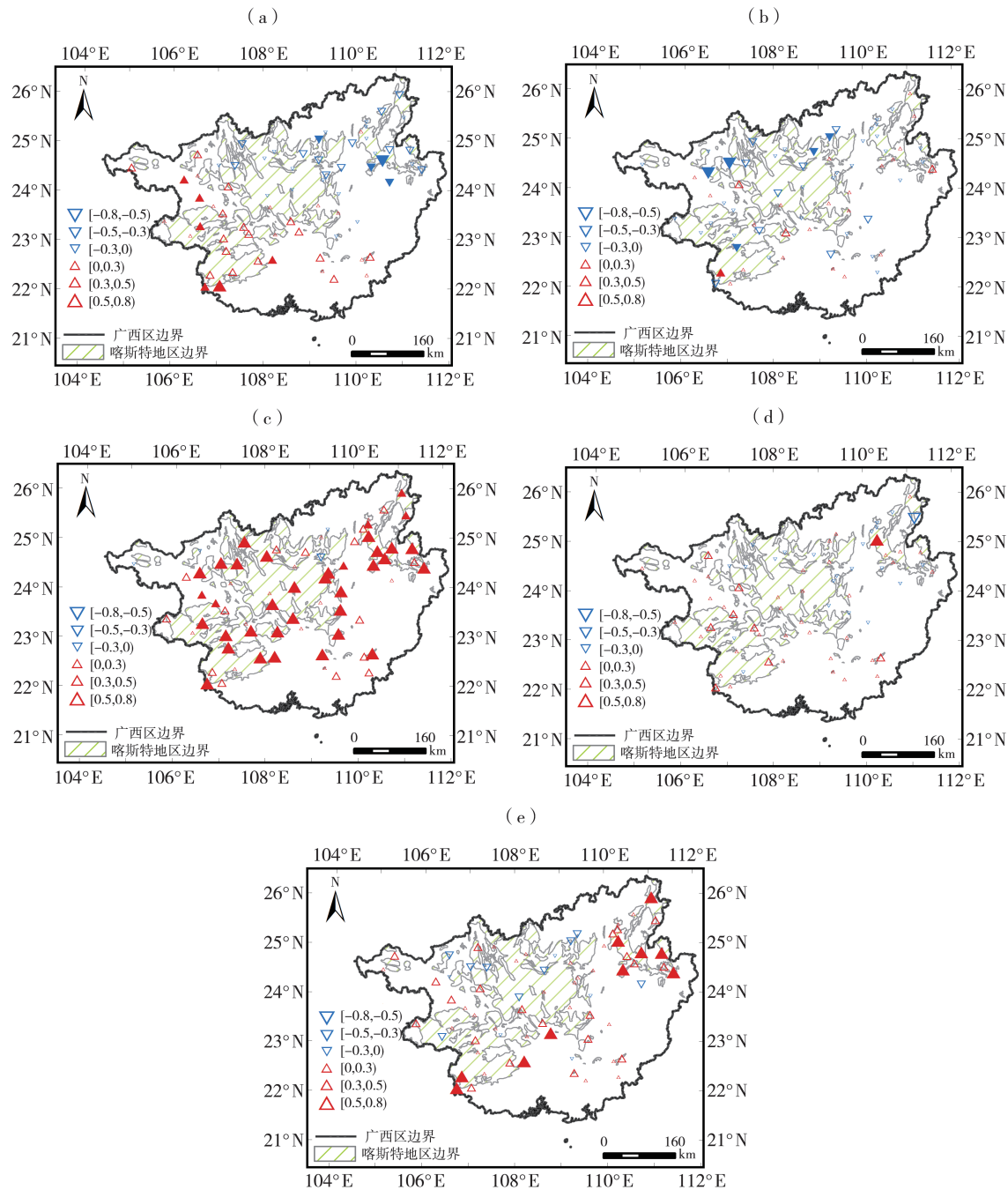


图4 NPP与同时段SPEI相关性

(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季,(e)全年

Fig. 4 Correlation between NPP and SPEI in the same period  
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) the whole year

在春季与SPEI的响应一致性最高,夏季次之,秋季差异最大。

### 3.3 不同林种FVC和NPP对SPEI响应差异

广西喀斯特地区的地形主要以山地为主,植被呈现多样化,灌木林分布最广泛(63.40%),阔叶林次之(17.19%),竹林最少(0.88%)。平原地区主要以灌木林和桉树类为主,山地和高山地区均以灌木林和阔叶林为主,其中山地地区灌木林占比远超过阔叶林,高山地区阔叶林和灌木林占比相当。三种地形的竹林分布均较少,且在高山地区,桉树类的分布最少(表2)。年尺度上,不同林种FVC对SPEI的响应敏感性有差异:经济林>桉树类>松树类>阔叶林>杉木类>灌木林>竹林。季节尺度上,不同林种FVC对SPEI响应的差异显著。春季为松树类>经济林>杉木类>阔叶林>桉树类>竹林>灌木林;夏季为杉木类>阔叶林>经济林>灌木林>竹林>松树类>桉树类;秋季为杉木类=松树类>经济林>桉树类>灌木林>竹林>阔叶林;冬季为桉树类>竹林>灌木林>经济林>松树类>阔叶林>杉木类。春夏季部分林种FVC与SPEI呈负相关关系(表3)。年尺度上,不同林种NPP对SPEI响应敏感性也有差异:经济林>松树类>桉树类>阔叶林>杉木类>灌木林>竹林。季节尺度上,不同林种NPP对SPEI响应的季节差异显著。春季为阔叶林>松树类>灌木林>杉木类>竹林>经济林>桉树类;夏季为经济林>杉木类>松树类>竹林>灌木林>阔叶林>桉树类;秋季为竹林>桉树类>松树类>灌木林>杉木类>经济林>阔叶林;冬季为桉树类>灌木林=竹林>阔叶林>杉木类>松树类>经济林。春、夏季部分林种NPP与SPEI呈负相关关系(表3)。

对比发现,不同林种的FVC和NPP在年尺度上对SPEI响应差异小,但季节尺度响应差异大。年尺

度上,两者对SPEI响应均以经济林最敏感,竹林最不敏感,仅桉树类和松树类略有差异。季节尺度上,仅在数林种上有相似性,夏季桉树类、秋季阔叶林的FVC和NPP对SPEI响应敏感性均最低,冬季桉树类的FVC和NPP对SPEI响应敏感性均最高。

表3 广西喀斯特地区不同林种FVC和NPP与SPEI相关性

Tab. 3 Correlation between FVC, NPP and SPEI in different forest species in karst areas of Guangxi						
参数	林种	全年	春季	夏季	秋季	冬季
FVC	杉木类	0.129	-0.105	-0.043	0.427***	0.089
	松树类	0.173	-0.114	-0.002	0.427***	0.113
	桉树类	0.175	-0.030	0.001	0.403***	0.156
	阔叶林	0.130	0.093	-0.019	0.373***	0.103
	竹林	0.121	0.018	-0.005	0.377***	0.130
	经济林	0.218*	-0.106	0.011	0.415***	0.116
	灌木林	0.125	0.017	-0.006	0.389***	0.124
	杉木类	0.110	-0.054	-0.069	0.246**	0.124
	松树类	0.162	-0.063	0.028	0.256**	0.123
	桉树类	0.145	-0.012	0.004	0.265**	0.183
NPP	阔叶林	0.113	0.143	-0.014	0.216*	0.157
	竹林	0.105	0.050	-0.022	0.268**	0.161
	经济林	0.227*	-0.035	0.098	0.238**	0.120
	灌木林	0.107	0.062	-0.020	0.248**	0.161

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示通过 $\alpha=0.1, 0.05, 0.01$ 的显著性检验。下同。

### 3.4 不同地形FVC和NPP对SPEI响应差异

喀斯特地区地形以山地为主,山地是各林种集中分布地区,82.1%林区分布在山地,其次是平原,占比11.73%,高山林种分布最少,仅6.17%(表2)。年尺度上,不同地形条件下FVC对SPEI响应敏感性不同:平原>山地>高山。季节尺度上,春季为高山>山地>平原,夏秋季相同为平原>山地>高山,其中春季平原、夏季山地FVC与SPEI呈负相关。年尺度上不同地形条件下NPP对SPEI响应敏感性也不同:平原>高山>山地。季节尺度上,春季和冬季相同为高山>山地>平原,夏季为山地>平原>高山,秋季为平原>山地>高山,其中夏季不同地形NPP与SPEI呈负相关(表3)。

对比发现,不同地形条件下FVC和NPP对SPEI响应也具有差异,但较不同林种小。年尺度上FVC和NPP对SPEI响应敏感性分别为平原>山地>高山、平原>高山>山地,两者对SPEI响应的敏感性在平原地区均最高。季节尺度上,不同地形条件下FVC和NPP仅夏季和冬季对SPEI响应具有差异,夏季FVC

表2 广西喀斯特地区不同地形的林种分布  
Tab. 2 Distribution of forest species in different landforms in karst areas of Guangxi

林种	单位: %			
	平原	山地	高山	合计
灌木林	7.37	53.25	2.78	63.40
阔叶林	0.59	13.79	2.81	17.19
桉树类	2.04	4.93	0.02	6.99
松树类	0.82	4.15	0.06	5.03
经济林	0.66	2.92	0.23	3.81
杉木类	0.12	2.34	0.24	2.70
竹林	0.11	0.74	0.03	0.88
合计	11.71	82.12	6.17	100.00



对 SPEI 响应为平原>山地,冬季 FVC 对 SPEI 的响应为平原>高山,NPP 则相反。

表 4 不同地形 FVC 和 NPP 与 SPEI 相关性  
Tab. 4 Correlation between FVC, NPP and SPEI in  
different terrain

参数	地形	全年	春季	夏季	秋季	冬季
FVC	平原	0.198*	-0.001	0.032	0.396***	0.129
	山地	0.133	0.005	-0.011	0.393***	0.125
	高山	0.086	0.191	0.007	0.288**	0.092
NPP	平原	0.216*	0.039	-0.050	0.445***	0.073
	山地	0.108	0.052	-0.115	0.427***	0.097
	高山	0.138	0.244	-0.043	0.336***	0.154

## 4 讨 论

目前已经发展了多种气象干旱监测指数,各种干旱指数有其适用监测的范围和时段<sup>[32]</sup>,综合考虑气温和降水共同效应的 SPEI 已被证实是监测广西喀斯特地区干旱较理想的指标<sup>[33,5]</sup>。广西喀斯特地区石漠化景观突出,不同区域基岩裸露率差异较大<sup>[34]</sup>,降水时空差异<sup>[35]</sup>及植被构成复杂<sup>[36]</sup>等多因素影响下,干旱发生对该地区植被的影响存在较大的时空异质性。评价的时间段不同,植被对干旱的响应有显著差异,本研究中发现喀斯特地区植被对年和四季的 SPEI 响应具有较大差异,这与对不同地区如天山北坡<sup>[9]</sup>、祁连山<sup>[10]</sup>、华北<sup>[11]</sup>、新疆<sup>[12-13]</sup>和内蒙古<sup>[16]</sup>植被对 SPEI 的响应研究结果相似。广西喀斯特地区降雨主要集中在 5—8 月,且以强降水为主,秋冬季节降水明显减少,降雨时空分布的不均匀可能是植被对干旱响应在不同时间段存在较大差异的主要原因。喀斯特地区植被稀疏,由于其较差的保水保墒能力,强降水并不利于植被生长甚至会加重水土流失<sup>[37]</sup>,春夏季研究区北部地区植被与 SPEI 以负相关为主,南部地区则以正相关为主,可能与当地植被构成差异有关。植被构成差异是干旱响应空间异质性的的重要因素之一。李艳菊等<sup>[9]</sup>发现天山北坡植被干旱响应中草地的敏感性远大于林地和耕地,康振山等<sup>[16]</sup>指出不同草原类型与 SEPI 的相关性也具有差异,本研究发现喀斯特地区不同林种对 SPEI 响应敏感性差异大。本研究以海拔为主要依据划分了三种地形,发现不同地形条件下植被对干旱的响应具有差异,姜萍等<sup>[13]</sup>的研究中也发现不同海拔条件下气象因子对植被的影响具有差异,由于目前研究中针对不同地形条件下植被对 SPEI 响应差异的相关研究报道较少,未能深入对

比。不同遥感植被参数在反映植被状况时并非完全相同,其对干旱的响应也具有差异,本研究也发现 FVC 和 NPP 对 SPEI 的响应在时间和空间上均有差异。

FVC 和 NPP 都能表征植被长势状况,对区域生态环境变化具有重要指示作用<sup>[38-39]</sup>,其中 NPP 还可以用于碳循环监测<sup>[40]</sup>,FVC 计算采用了混合像元分解法,是 NDVI 的函数,NPP 采用 TEC 模型,是 NDVI 和气象因子的函数<sup>[2]</sup>。尽管 FVC 和 NPP 都是基于 NDVI 反演的遥感参数,但不同遥感植被参数对 SPEI 的响应存在差异,如 SPEI 与 NPP 与的相关性多强于与 NDVI 的相关<sup>[26,41]</sup>性。本研究中发现秋季喀斯特地区植被对 SPEI 响应最显著,且不同林种 FVC 与 SPEI 的相关性高于 NPP,但不同地形条件下 NPP 与 SPEI 的相关性高于 FVC,喀斯特地区不同遥感植被参数对 SPEI 的响应具有复杂性。全球气候变化背景下,广西地区气温明显升高,但降水两极分化,极端强降水频率增加<sup>[42]</sup>,不同季节、植被种类和地理区域的植被对干旱响应的时空异质性将更加复杂,有待深入研究。此外,不同分析方法得到的结果可能会存在一定差异。目前有关植被对气象因子响应的研究中,植被参数和气象因子的匹配主要包括站点<sup>[21,43-44]</sup>和像元<sup>[10,27]</sup>两种方法。基于站点的方法可以同时分析植被参数和气象因子的相关性和显著性,也可以表达相关性的大致空间分布状况,均值统计还可以较好地反映某一空间域的主导特征。基于像元的匹配方法虽然可以更细致显示相关性的空间分布,但由于气象数据插值本身受地形地貌等多因素的影响,插值结果也存在较大的误差。

## 5 结 论

本研究通过分析广西喀斯特地区不同地形和林种条件下 FVC 和 NPP 对 SPEI 的响应差异,可为喀斯特地区植被干旱影响量化评估提供科学依据。研究发现喀斯特地区 FVC 和 NPP 对 SPEI 的响应具有明显差异,年和季节尺度 NPP 对 SPEI 的响应更敏感,两者与 SPEI 的相关性多为正相关,但春季东北部地区和夏季多为负相关。喀斯特地区不同林种植被在年尺度上对 SPEI 的响应差异小,但在季节尺度响应差异大,其中年尺度上经济林 FVC 和 NPP 对 SPEI 的响应均最敏感,竹林最不敏感。不同地形条件下植被对 SPEI 的年和季节尺度响应也具有差异,但较不同林种小。

## 参考文献:

- [1] 杨娜,段凯,刘梅,等.淮河流域气象干旱风险的区域特征分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(11):188-193.
- [2] 钱拴,延昊,吴门新,等.植被综合生态质量时空变化动态监测评价模型[J].生态学报,2020,40(18):6573-6583.
- [3] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.
- [4] 朴世龙,方精云,郭庆华.1982—1999年我国植被净第一性生产力及其时空变化[J].北京大学学报(自然科学版),2001,15(4):563-569.
- [5] VICENTE-SERRANO S M, BEGUER A S, LOPEZ-MORENO J. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2009, 23(7): 1696-1718.
- [6] 韩美娟,金额尔德木吐,郭恩亮,等.内蒙古四子王旗干旱变化特征及与植被覆盖关系研究[J].赤峰学院学报(自然科学版),2019,35(10):118-122.
- [7] 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.
- [8] 邓欢,程峰,王金亮.基于SPEI指数的滇中地区植被对干旱的响应特征研究[J].测绘与空间地理信息,2020,43(11):51-55.
- [9] 李艳菊,丁建丽,张钧泳,等.2001—2015年天山北坡植被覆盖对干旱的响应——基于土地利用/土地覆盖分析[J].生态学报,2019,39(17):6206-6217.
- [10] 刘佳茹,赵军,王建邦.2001—2016年祁连山地区植被覆盖度对干旱的响应[J].草业科学,2021,38(3):419-431.
- [11] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖.2001—2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J].地理学报,2015,70(5):717-729.
- [12] 兰小丽,孙慧兰,曹丽君,等.典型干旱区植被净初级生产力的变化特征与气候因子的相关性[J].东北林业大学学报,2021,49(5):76-83.
- [13] 姜萍,丁文广,肖静,等.新疆植被NPP及其对气候变化响应的海拔分异[J].干旱区地理,2021,44(3):849-857.
- [14] 史尚渝,王飞,金凯,等.黄土高原地区植被指数对干旱变化的响应[J].干旱气象,2020,38(1):1-13.
- [15] 张宏运.1961—2014年渭河流域干旱特征及其对植被净初级生产力的影响研究[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [16] 康振山,张莎,白雲,等.内蒙古草地净初级生产力时空变化及其对干旱的响应[J].草地学报,2021,29(1):156-165.
- [17] 许方岳.中国亚热带常绿阔叶林区域NPP对干旱的响应[D].南昌:江西农业大学,2020.
- [18] WANG H Y, HE B, ZHANG Y F, et al. Response of ecosystem productivity to dry/wet conditions indicated by different drought indices [J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 347-357.
- [19] SHOUVIK J, ROHIT S. Impact of drought on vegetation carbon storage in arid and semi-arid regions [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2018, 11: 22-29.
- [20] 李旺.东乌珠穆沁旗草原干旱对产草量的影响[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2021.
- [21] 王东.西南地区植被覆盖变化及对不同时间尺度气候特征的响应分析[D].兰州:西北师范大学,2014.
- [22] 于成龙,刘丹.基于MODIS的东北地区自然植被生产力对干旱的响应[J].生态学报,2019,39(11):3978-3990.
- [23] CHEN S L, HUANG Y F, WANG G Q. Detecting drought-induced GPP spatiotemporal variabilities with sun-induced chlorophyll fluorescence during the 2009/2010 droughts in China [J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107092. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107092.
- [24] 王玲玲,何巍,罗米娜,等.基于归一化旱情综合指数的川西高原草地伏旱监测分析[J].干旱气象,2021,39(6):884-893.
- [25] DENG Y, WANG X H, WANG K, et al. Responses of vegetation greenness and carbon cycle to extreme droughts in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 298, 108307. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.108307.
- [26] 徐泽华.山东省植被时空变化特征及其对气象干旱指数的响应[D].济南:山东师范大学,2019.
- [27] 史晓亮,吴梦月,丁皓.SPEI和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析[J].农业机械学报,2020,51(12):184-192.
- [28] 邹宇宁.云南大黑山典型乡土树种对气候变化的响应研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [29] YAN H, WANG S Q, BILLESBACH D, et al. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C3 and C4 plants [J]. Ecological Modelling, 2015, 297: 42-59.
- [30] YAN H, WANG S, WANG J, et al. Multimodel analysis of climate impacts on plant photosynthesis in China during 2000-2015 [J]. International Journal of Climatology, 2019, 39: 5539-5555.
- [31] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007:36-63.
- [32] 刘占明,陈子桑,黄强,等.7种干旱评估指标在广东北江流域应用中的对比分析[J].资源科学,2013,35(5):1007-1015.
- [33] 张景扬,卢远,李嘉力,等.基于SPEI的广西干旱时空



- 变化特征分析[J]. 云南地理环境研究, 2015, 27(6): 15–24.
- [34] 陈燕丽, 莫建飞, 莫伟华, 等. 近30年广西喀斯特地区石漠化时空演变[J]. 广西科学, 2018, 25(5): 625–631.
- [35] 孙桂凯, 杜焜, 杨爱萍, 等. 广西极端降水时空变化规律研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(2): 327–335.
- [36] 潘发光, 孙建飞, 王爱华. 广西天等县喀斯特石漠化地区植被恢复——以驮堪小流域为例[J]. 林业科技通讯, 2021(4): 15–19.
- [37] 陈燕丽, 莫伟华, 罗永明, 等. 基于气候信息的喀斯特地区植被 EVI 模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 187–194.
- [38] 陈虹, 郭兆成, 贺鹏. 1988—2018 年间洱海流域植被覆盖度时空变换特征探究[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 116–123.
- [39] 滑永春, 萨如拉, 王冰. 内蒙古草原 NPP 时空变化及驱动力[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 1–10.
- [40] 方精云, 唐艳鸿, 林俊达. 全球生态学: 气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [41] 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.
- [42] 何洁琳, 谢敏, 黄卓, 等. 广西气候变化事实[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(3): 11–15.
- [43] 王晓利. 中国沿海极端气候变化及其对 NDVI 的影响特征研究[D]. 烟台: 中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
- [44] 韩丹丹. 黄土高原植被变化及其对极端气候的响应[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2020.

## Response difference of fractional vegetation cover and net primary productivity to SPEI drought index in karst areas of Guangxi

CHEN Yanli<sup>1</sup>, TANG Meirong<sup>2</sup>, ZHANG Hui<sup>3</sup>, MO Jianfei<sup>1</sup>, QIAN Shuan<sup>4</sup>

(1. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China;

3. Baoding Meteorological Bureau of Hebei Province, Baoding 071000, Hebei, China;

4. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Drought is one of the most important meteorological disasters affecting vegetation in karst areas of Guangxi, and a reasonable remote sensing vegetation parameter can address the impact of drought on vegetation more objectively. To quantify the response of vegetation to drought, fractional vegetation cover (FVC) and net primary productivity (NPP) were selected to analyze the responses to standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) under different topography conditions and forest species. The results are as follows: (1) The responses of FVC and NPP to SPEI were significantly different in karst areas of Guangxi. The response of FVC and NPP to SPEI showed the highest consistency in spring, followed by summer and then autumn. (2) The difference of the response of different forest species to SPEI was small on an annual scale, but was large on a seasonal scale. At annual time scale, the response sensitivity for FVC to SPEI from large to small was economic forest, eucalyptus forest, pine forest, broad-leaved forest, Chinese fir forest, shrub forest, bamboo forest, and for NPP was economic forest, pine forest, eucalyptus forest, broad-leaved forest, Chinese fir forest, shrub forest, bamboo forest. The economic forest was most sensitive to SPEI and the bamboo forest was least. At the seasonal time scale, the sensitivity of FVC and NPP of eucalyptus forest in summer and broad-leaved forest in autumn to SPEI was lowest, and that of eucalyptus forest was highest in winter. (3) The response of vegetation under different terrain conditions to SPEI was also different, but it was smaller than that of different forest species. At annual time scale, the sensitivity of FVC to SPEI from large to small was plain, mountain region, alpine, and for NPP was plain, alpine, mountain region. The response sensitivity to SPEI was highest in the plain area for both FVC and NPP. At seasonal time scale, the response sensitivity of FVC and NPP to SPEI in different terrain conditions was only different in summer and winter. For FVC, its response to SPEI in summer was greater in plain than in mountain region and in winter was greater in plain than in alpine, and for NPP was opposite.

**Key words:** karst area; standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI); fractional vegetation cover; net primary productivity; drought

(责任编辑: 刘晓云; 校对: 蔡迪花)