

# SPEI 和植被遥感信息监测西南地区干旱差异分析

史晓亮 吴梦月 丁皓

(西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054)

**摘要:** 基于西南地区 2000—2018 年不同时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12),应用线性趋势法和曼肯德尔检验(Mann-Kendall test, M-K)法分析了西南地区气象干旱的时间变化特征,评价了日光诱导叶绿素荧光(SIF)、归一化植被指数(NDVI)以及增强型植被指数(EVI)等植被遥感数据对区域植被状况监测的有效性及其差异性。结果表明:2000—2018 年西南地区 SPEI 整体上呈微弱增加趋势,其中,2000—2013 年间,SPEI-12 呈下降趋势(趋势率为  $-0.05/(10a)$ ,  $R^2 = 0.295$ ),2014—2018 年间,SPEI-12 时间序列呈上升趋势(趋势率为  $0.04/(10a)$ ,  $R^2 = 0.094$ ),说明在气候变化背景下,近年来西南地区的干旱化趋势有所缓解。SPEI-12 的趋势突变点发生在 2016 年和 2017 年。相对于植被绿度指数 NDVI 和 EVI,SIF 对植被生长季发生的长期和短期干旱事件均表现出较大负异常,说明 SIF 可快速获取水分胁迫下的植被光合作用信息。森林、农田和草地的 SIF 与不同时间尺度气象干旱指数的相关性均高于 NDVI 和 EVI,SIF 对森林、农田及草地植被生态系统干旱监测的敏感性优于传统的植被绿度指数;草地的 SIF 与 SPEI-1 的相关性更高( $R = 0.859$ ,  $P < 0.01$ ),其光合作用对短期水分胁迫最为敏感。本研究可为西南地区干旱的综合应对、水资源管理调控及生态治理提供科学依据。

**关键词:** 干旱; 标准化降水蒸散指数; 日光诱导叶绿素荧光; 遥感; 西南地区

中图分类号: S423; S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0184-09

OSID:



## Difference Analysis of SPEI and Vegetation Remote Sensing Information in Drought Monitoring in Southwest China

SHI Xiaoliang WU Mengyue DING Hao

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Since 2000, drought has occurred frequently in Southwest China, which has seriously affected social production and ecological environment. Therefore, studying the temporal evolution characteristics of meteorological drought and its impact on vegetation growth can provide theoretical basis for scientific management of regional water resources and ecological control. Based on the monthly precipitation and temperature data of Southwest China from 2000 to 2018, the standardized precipitation evapotranspiration index of different time scales was calculated. The linear trend method and Mann-Kendall (M-K) test were used to analyze the temporal variation characteristics of meteorological drought in Southwest China. The effectiveness and difference of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF), normalized differential vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index (EVI) in vegetation stress monitoring were evaluated. Furthermore, the response of vegetation to drought was also explored. The results showed that SPEI values showed a weak increasing trend in all time scales from 2000 to 2018. From 2000 to 2013, SPEI-12 showed a downward trend (the trend rate was  $-0.05/(10a)$ ,  $R^2 = 0.295$ ), and from 2014 to 2018, SPEI-12 time series showed an increasing trend (the trend rate was  $0.04/(10a)$ ,  $R^2 = 0.094$ ), indicating that the drought trend in Southwest China was alleviated in recent years under the background of climate change. The turning point of SPEI-12 time series occurred in 2016 and 2017 respectively. Compared with NDVI and EVI, SIF showed obvious negative anomalies for both long-term and short-term drought events during vegetation growing season, and it can quickly obtain the information of vegetation photosynthesis under water stress. The correlation between SIF of forest, farmland and grassland and meteorological drought index at different time scales was higher than NDVI and EVI, which meant that

the sensitivity of SIF of forest, farmland and grassland vegetation ecosystem to drought monitoring was better than that of traditional vegetation greenness index. The correlation between SIF of grassland and SPEI - 1 was higher ( $R = 0.859$ ,  $P < 0.01$ ), which indicated the grassland photosynthesis was more sensitive to short-term water stress. The research results can provide scientific basis for comprehensive drought coping, water resources management and ecological control in Southwest China.

**Key words:** drought; standardized precipitation evapotranspiration index; solar-induced chlorophyll fluorescence; remote sensing; Southwest China

## 0 引言

干旱是一种由于长期缺乏降水或降水偏少引发供求失衡的水分短缺现象,是全球范围内最复杂、最常见的自然灾害之一<sup>[1]</sup>。目前,水资源短缺问题日益严重,干旱灾害呈现出广发、频发的态势,严重制约了社会经济可持续发展<sup>[2-3]</sup>。因此,有必要对区域干旱时空演变特征进行研究,从而为水资源调控与干旱综合应对提供科学依据。

目前,国内外相关研究主要利用各种干旱指标进行干旱定量评价,其中标准化降水指数(Standardized precipitation index, SPI)具有较好的时空可比性及多时间尺度特性,可识别不同类型的气象干旱<sup>[4-5]</sup>,因此得到了广泛应用<sup>[6]</sup>。但 SPI 仅考虑了降水因素,忽略了潜在蒸散的变化,无法反映气温变化对干旱的影响。在 SPI 的基础上, VICENTE 等<sup>[7]</sup>、BEGUERÍA 等<sup>[8]</sup>考虑蒸散作用提出了适用于气候变暖背景下的气象干旱指标——标准化降水蒸散指数(Standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),该指标可有效监测区域气象干旱事件<sup>[9-11]</sup>。对于陆地植被而言,干旱的生态胁迫效应还可能受到非气象因子的影响,一些研究采用归一化植被指数(Normalized differential vegetation index, NDVI)、增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)以及植被状态指数(Vegetation condition index, VCI)等分析干旱对陆地植被的影响<sup>[12-14]</sup>,也证实了干旱会显著影响植被生物量的变化,且其影响程度因植被类型、地形条件而异。这些研究多采用与植被生理状态间接相关的植被绿度指数,而当植被遭受水分胁迫时,其绿度并不能立刻发生变化,导致植被绿度指数对干旱的响应存在一定的延迟效应<sup>[15]</sup>。此外,由于这些植被指数仅与潜在的而非实际的植物光合作用有关,所以不能准确反映植被生产力的变化,故难以获取农业干旱的早期特征。

日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)作为植被光合作用吸收光后重新激发的能量,其与植被光合速率直接相关,可快速反映水分胁迫对植被生长的影响<sup>[16]</sup>。近年来,随着遥感技术的快速发展,卫星测量日光诱导叶绿素荧光

(SIF)已经成为大范围监测全球植被光合作用的有效方法之一<sup>[17]</sup>。相关研究显示,星载 SIF 信号与自然植被/作物的陆地总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)、通量站点碳吸收的季节变化高度相关<sup>[18]</sup>,这表明 SIF 是对植被冠层功能进行监测的重要的、相对更为直接的遥感手段。相关研究<sup>[19-20]</sup>多侧重于 SIF 对于 GPP 的模拟及其与土壤水分、光合有效辐射等环境因子的响应方面,对植被绿度指数和叶绿素荧光在区域植被状况监测中的差异性以及植被对干旱响应关系的研究鲜见报道。

本文基于降水、气温等气象数据,运用不同时间尺度的气象干旱指数 SPEI,探究 2000—2018 年西南地区干旱的时间变化趋势,并通过分析不同植被类型 NDVI/EVI、SIF 与 SPEI 的关系,以及干旱导致的标准化异常,进一步探讨在西南地区典型干旱事件中植被绿度指数和叶绿素荧光数据对区域植被状况监测的差异性,同时探究该地区植被对干旱的响应,以期为区域水资源管理调控、生态环境保护提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

西南地区( $20^{\circ}54' \sim 34^{\circ}19'N$ ,  $91^{\circ}21' \sim 112^{\circ}4'E$ )行政区划包括广西、云南、贵州、四川、重庆 5 省(市、区),总面积约为 136.4 万  $\text{km}^2$ ,是我国重要的生物多样性分布中心和生态安全屏障(图 1)。该区域地形以山地和高原为主,气候类型主要包括热带季风气候、亚热带季风气候、高原山地气候等,年降水量为 600 ~ 2 300 mm,主要集中在夏季,时空分布极为不均,干湿季分明,年均气温在 0 ~ 24℃ 之间。区域植被类型以森林、农田和草地为主<sup>[23]</sup>。在特殊地理位置、喀斯特地貌、气候和地质等因素的影响下,该区域面临着植被退化、水土流失等生态问题,生态系统非常脆弱,易受人类活动和气候变化的影响,属干旱频发区。

### 1.2 数据来源与处理

气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),包含西南地区 110 个气象站 2000—2018 年的逐月降水和气温数据,数据的集中缺测和部

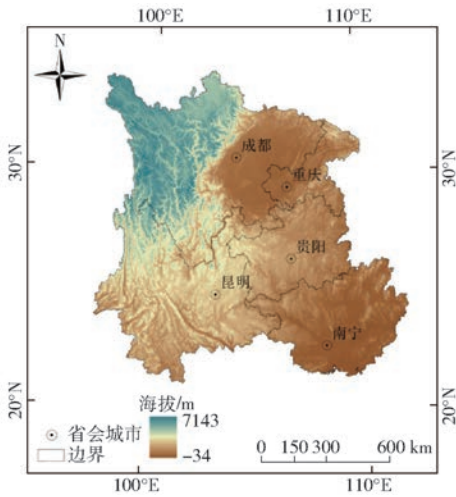


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

分异常值均通过算术平均值进行了插补。

叶绿素荧光数据采用全球臭氧监测实验-2 (Global ozone monitoring experiment -2, GOME-2) (<https://avdc.gsfc.nasa.gov/>) level 3 月尺度产品数据,时间尺度为2007—2013年,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

遥感数据来源于美国航空航天局 (<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 数据中心。MODIS (Moderate-resolution imaging spectroradiometer) 的月尺度 NDVI/EVI 植被指数产品数据 (MOD13A3) 的空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ,时间尺度为2007—2013年,与叶绿素荧光数据时间尺度保持一致。土地覆盖类型数据采用2010年西南地区的MODIS土地覆盖类型产品 (MCD12Q1),空间分辨率为500 m。遥感数据均采用MODIS重投影工具 (Modis reprojection tools, MRT) 软件对其进行镶嵌、格式与投影转换等预处理。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 标准化降水蒸散指数

SPEI 指数是对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<sup>[7]</sup>,其具体计算过程见文献<sup>[24]</sup>,其中潜在蒸散量 (Potential evapotranspiration, PET) 的计算采用以气温为输入数据的 Thornthwaite 方法<sup>[7-8]</sup>。参考 VICENTE 等<sup>[7]</sup>的研究,基于 SPEI 将气象干旱划分为5个等级 (无

旱: $(-0.5, +\infty)$ ;轻旱: $(-1, -0.5]$ ;中旱: $(-1.5, -1]$ ;重旱: $(-2, -1.5]$ ;特旱: $(-\infty, -2]$ 。

#### 1.3.2 标准化异常

通过计算 SIF、NDVI 和 EVI 的标准化异常,进一步分析 SIF 和植被绿度指数对西南地区植被状况监测的差异性。计算公式为

$$S_A(i,j) = \frac{V_{ar}(i,j) - \overline{V_{ar}(i,j)}}{S(V_{ar}(i,j))}$$

式中  $S_A(i,j)$ ——标准化异常值

$V_{ar}(i,j)$ ——某时段 NDVI/EVI/SIF 值

$\overline{V_{ar}(i,j)}$ ——2007—2013年同一时段 NDVI/EVI/SIF 的平均值

$S$ ——标准差

#### 1.3.3 其他研究方法

采用 Mann-Kendall 非参数检验法分析西南地区各尺度 SPEI 变化的显著性,当 $|Z| > 1.96$ 时,则表示通过了置信度水平 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。该方法不要求样本服从特定的分布且不受少数异常值和缺测值的影响,具有广泛适应性的特点<sup>[25]</sup>。采用干旱站次比 (研究区内干旱发生的站数占站点总数百分比) 分析西南地区气象干旱影响范围的变化特征<sup>[26]</sup>。采用相关性系数法分析不同植被类型的 SIF、NDVI/EVI 与各时间尺度 SPEI 的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于 SPEI 的西南地区干旱时间变化特征

不同时间尺度的 SPEI 时间序列变化趋势存在一定差异 (图2)。随着时间尺度的增大,SPEI 时间序列波动趋于平缓。SPEI-1 的波动较大,说明其对短期降水和气温的变化敏感;SPEI-3 的波动比 SPEI-1 小,反映出研究区干旱的季节变化特征;SPEI-12 则主要受到长期降水和气温的影响,可以较好地反映干旱的年际变化趋势。根据 SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12 的趋势线斜率可知,西南地区 SPEI 整体呈现微弱增加的趋势,说明研究区气象干旱有缓解的趋势。从 SPEI-12 的时间序列变化来看,西南地区发生的干旱年份有2006、2009、2010、2011年等。根据2005—2014年全国干旱信息记

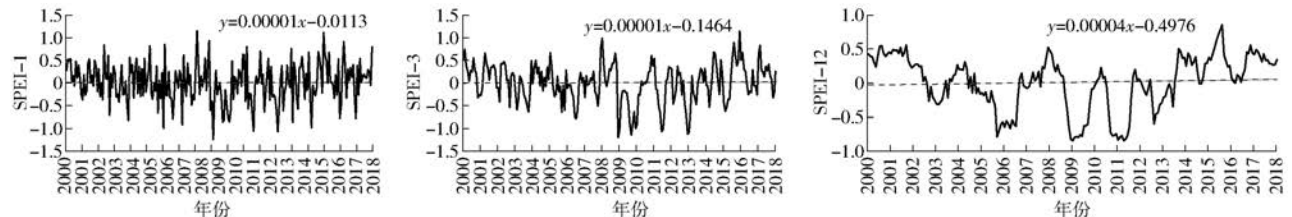


图2 西南地区2000—2018年不同时间尺度SPEI序列变化趋势

Fig.2 Trends of SPEI-1, SPEI-3 and SPEI-12 in Southwest China from 2000 to 2018

载,西南地区于 2006 年春、2009 年秋至 2010 年春和 2011 年夏均发生了全局性特大干旱<sup>[27]</sup>,这与 SPEI-12 的监测结果基本一致,说明 SPEI-12 可以准确反映区域干旱的年度变化特征。2000—2013 年间,SPEI-12 呈下降趋势(趋势率为  $-0.05/(10a)$ ,  $R^2 = 0.295$ ),表明在这一时间段西南地区呈干旱化趋势,这一结论与相关学者的研究结论一致<sup>[28-30]</sup>。2014—2018 年间,SPEI-12 时间序列呈上升趋势(趋势率为  $0.04/(10a)$ ,  $R^2 = 0.094$ )。

通过对 SPEI-1、SPEI-3、SPEI-12 进行显著性检验可知(图 3),2000—2018 年间,除 2000 年初外,SPEI-1、SPEI-3 在其余时间段的 UF 曲线均小于 0,呈下降趋势,且在 2001 年、2003—2004 年、

2006—2008 年、2009—2015 年间 UF 曲线超过了 0.05 显著性水平线,说明此时间段内西南地区 SPEI-1、SPEI-3 指数下降趋势显著,容易发生短期干旱和季节干旱。在 2000 年初虽 UF 值大于 0,但未超过  $\alpha = 0.05$  显著性水平线,说明上升趋势不显著。在 2000—2001 年、2002—2017 年间,SPEI-12 的 UF 值均小于 0,呈下降趋势,且在 2002—2012 年间 UF 曲线超过了 0.05 显著性水平线。2001—2002 年、2017—2018 年间,SPEI-12 的 UF 值大于 0,未超出  $\alpha = 0.05$  显著性水平线,表明该时间段内研究区的 SPEI 指数呈不显著增加趋势。SPEI-12 的趋势突变点发生在 2016 年和 2017 年,整体上看,近年来西南地区的干旱化趋势有所缓解。

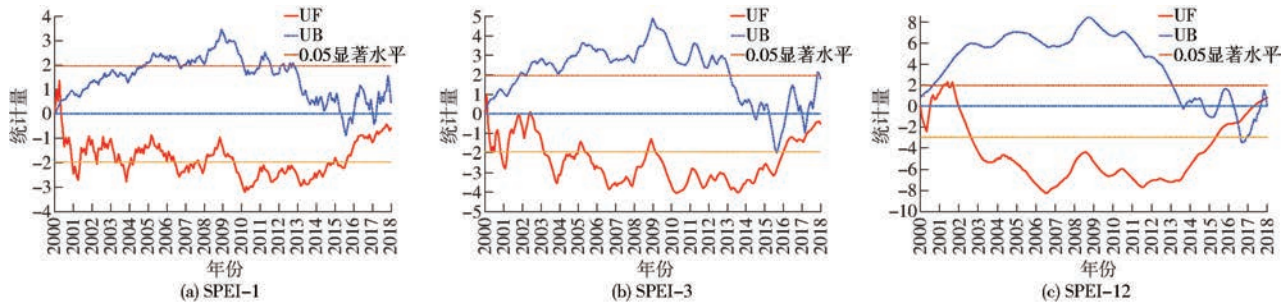


图 3 2000—2018 年西南地区不同时间尺度 SPEI 序列 M-K 检验

Fig. 3 M-K curves of SPEI-1, SPEI-3 and SPEI-12 sequences in Southwest China from 2000 to 2018

## 2.2 气象干旱影响范围变化特征

图 4 反映了西南地区气象干旱影响范围的时间变化特征,可以看出,2009—2010 年、2011 年间发生的干旱影响范围最大,均有 60% 以上的站点发生了干旱;2003、2006、2012—2013 年发生的干旱次之,干旱站次比在 40% ~ 60% 之间。同时结合 SPEI-12 的监测结果可得(图 2),2009—2010 年、2011 年发生的干旱事件明显呈现等级高、范围广的特点,故在后续分析中,将这两次干旱事件作为典型干旱年份,进一步分析干旱期间 SIF、NDVI/EVI 的表现特征。

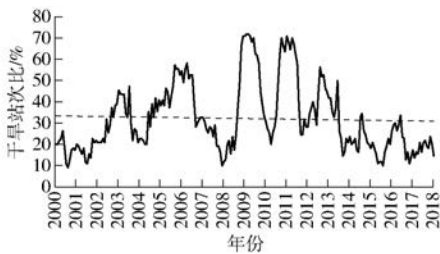


图 4 西南地区 2000—2018 年气象干旱影响范围变化趋势

Fig. 4 Variation trend of drought affected area in Southwest China from 2000 to 2018

## 2.3 NDVI/EVI、SIF 对西南地区典型年份干旱事件的响应

对植被绿度指数 NDVI/EVI 以及叶绿素荧光

SIF 在西南地区植被状况监测中的有效性及差异性作进一步分析(图 5),由于 SPEI 小于  $-0.5$  时认为发生了气象干旱,故根据 2009—2011 年 SPEI-1 的变化趋势可知,2009 年 2 月(SPEI 为  $-1.241$ )、2009 年 8—10 月(SPEI 在  $-0.854 \sim -0.803$  之间)和 2010 年 1—4 月(SPEI 在  $-0.849 \sim -0.629$  之间)以及 2011 年 7—9 月(SPEI 在  $-1.053 \sim -0.691$  之间)分别发生了不同等级的气象干旱。在 2009 年秋至 2010 年春和 2011 年夏发生的干旱事件中,NDVI/EVI 的变化趋势较为稳定,2009 年 11 月开始有微小的负异常现象,2010 年 3—7 月,NDVI 值均呈现出低于平均值的现象,但不明显。2011 年 7—9 月发生气象干旱期间,NDVI、EVI 无明显变化。EVI 变化虽与 NDVI 较为接近,但其负异常的变化幅度小于 NDVI。SIF 在 2009 年 11—12 月期间,实际值比平均值有微弱的负异常,但在此之后直到 2010 年 4 月,SIF 实际值则高于平均值,而在 2010 年 4—10 月即植被生长季期间<sup>[30]</sup>,SIF 呈现明显的负异常。整体上看,相比于 NDVI、EVI,SIF 表现出明显的负异常现象,能够有效、快速地反映植被遭受干旱胁迫的情况。

由图 6 可知,西南地区 2010 年 5—9 月发生的干旱严重影响了植被生长。从 5 月开始,除广西壮

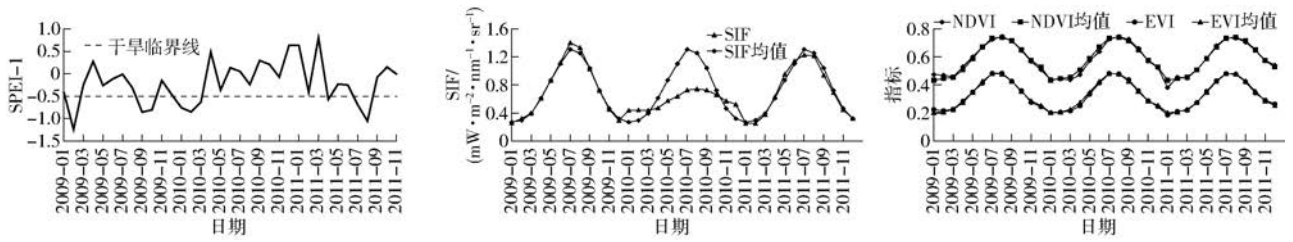


图5 西南地区2009—2011年SPEI-1、SIF、NDVI/EVI的年内变化趋势

Fig. 5 Annual variation trend of SPEI-1, NDVI/EVI and SIF in Southwest China from 2009 to 2011

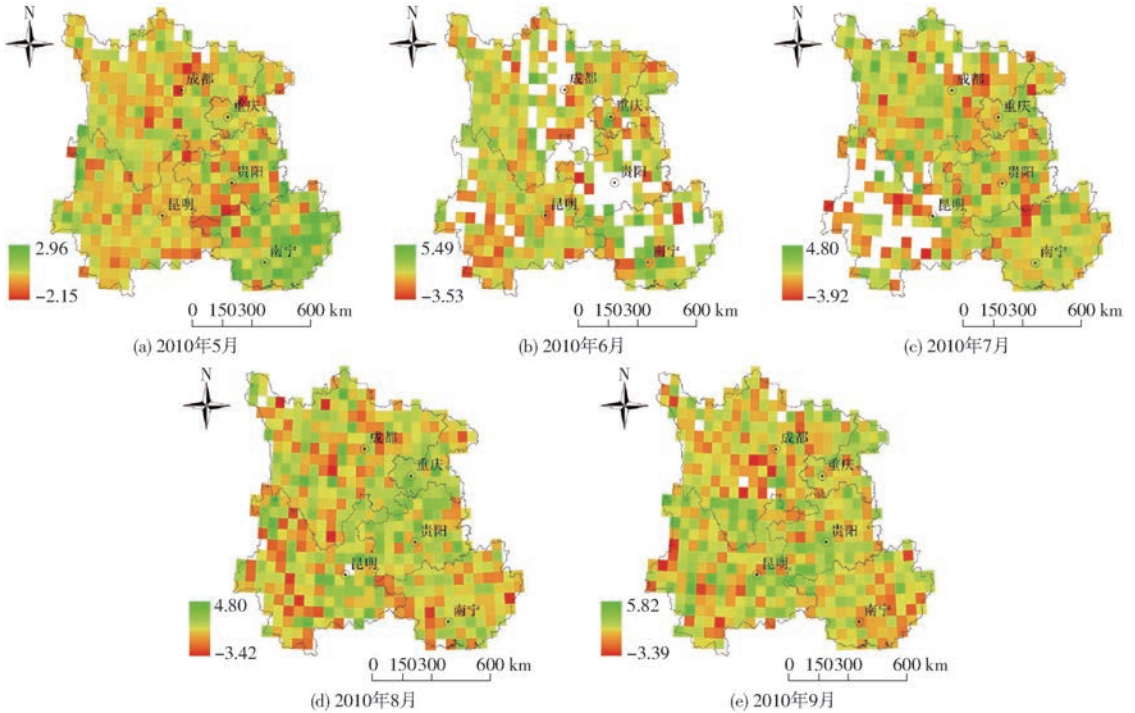


图6 2010年5—9月西南地区SIF的标准化异常值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of SIF standardized anomalies in Southwest China in 2010

族自治区南部地区外,西南地区的其他大部分区域SIF均呈现不同程度负异常。2010年6—7月,在四川省东部、重庆市的东北部以及云南省大部分区域SIF均显示较大的负异常。2010年8月,除贵州省东北部和重庆市西部外,四川省中部及西北部、云南省西部等地区的SIF呈现明显负异常。2010年9月,干旱导致的SIF负异常未表现出明显的缓解,在四川省南部及西部、重庆市中部以及广西壮族自治区的大部分地区,仍呈现SIF负异常。在整个植被生长季,广西壮族自治区SIF的负异常持续扩大,说明该地区植被受旱程度不断增加。

图7为NDVI、EVI的标准化异常的空间分布,与SIF负异常的空间分布较为相似,但是二者仍有一定差异。根据表1可知,2010年5—9月,随着干旱时间延长和程度增加,导致植被光合器官的光合活性降低,特别是在植被生长高峰期(7、8月),相对于NDVI和EVI,SIF明显减少。相关研究表明,NDVI存在一定“饱和效应”<sup>[31]</sup>,即在植被覆盖度较

高区域无法准确反映植被的生理生态变化,并且只有当水分胁迫严重阻碍作物生长时NDVI才会产生值的突变<sup>[32]</sup>,故其无法及时获取早期干旱的特征。EVI虽克服了NDVI在植被高覆盖区易饱和、植被低覆盖区受土壤背景影响较大的缺点<sup>[33]</sup>,但是整体上,与这两种植被绿度指数相比,干旱引发的SIF负异常更为突出。

通过选取2010年5—9月西南地区森林、草地、农田的NDVI/EVI以及SIF样本(NDVI和EVI样本数为30;SIF样本数为18),进一步分析不同植被类型的SIF、NDVI/EVI和SPEI-1及SPEI-3的相关性(图8)。森林、农田和草地的SIF与不同时间尺度气象干旱指数的相关性均高于NDVI和EVI,表现出SIF对森林、农田和草地植被生态系统所发生干旱的敏感性优于传统的植被绿度指数。森林和草地的NDVI与不同时间尺度SPEI的相关性均高于EVI,其中草地NDVI与SPEI的相关性最高( $R=0.60, P<0.01$ ;  $R=0.57, P<0.01$ )。农田EVI与SPEI-3的相关性最高( $R=0.49, P<0.01$ )。

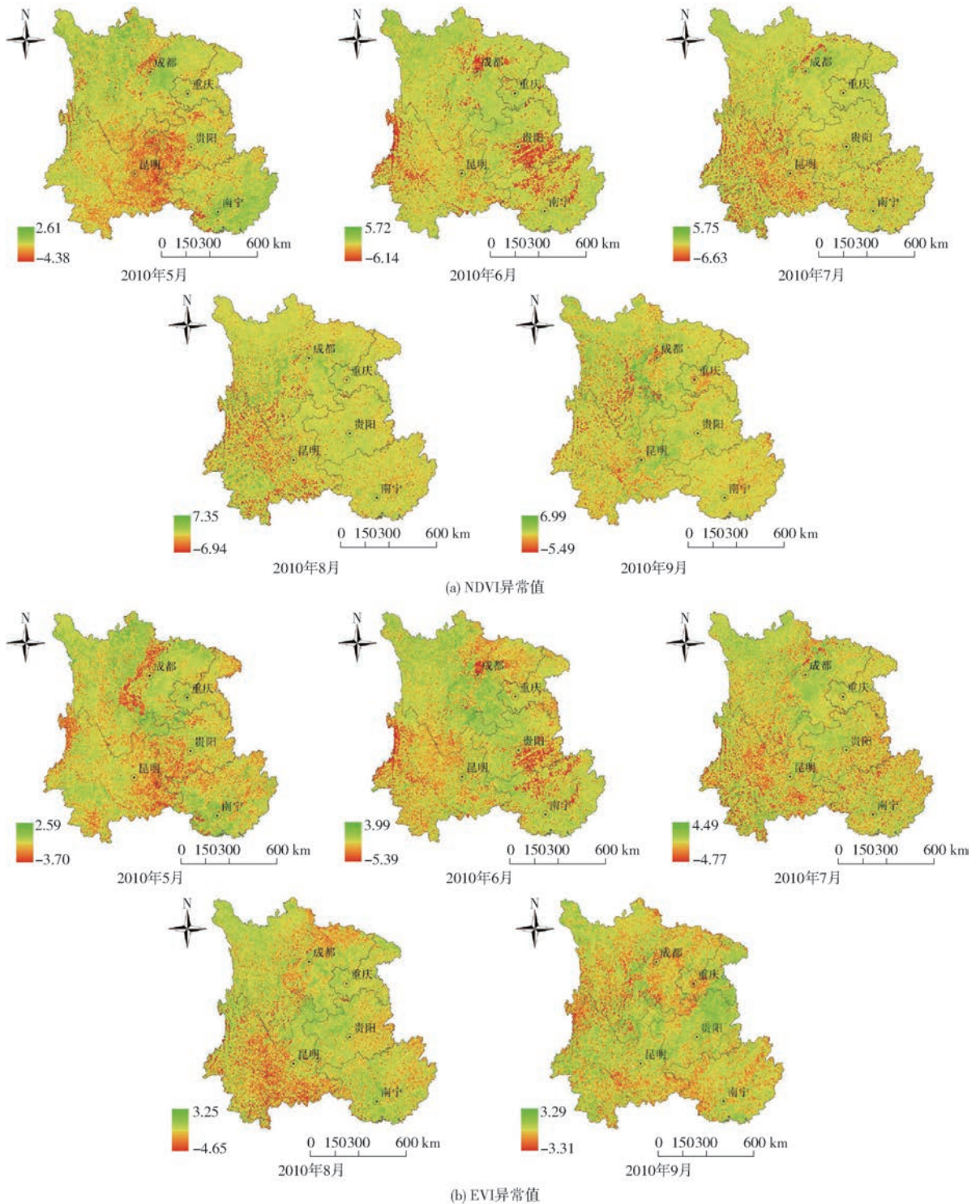


图 7 2010 年 5—9 月西南地区 NDVI、EVI 的标准化异常空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of NDVI and EVI standardized anomalies in Southwest China in 2010

表 1 2010 年 5—9 月 SIF、NDVI、EVI 标准化异常统计  
Tab. 1 Statistics of SIF, NDVI and EVI standardization anomalies from May to September in 2010

月份	标准化异常平均值			负异常面积占比/%		
	SIF	NDVI	EVI	SIF	NDVI	EVI
5	0.077	-0.109	-0.141	51.71	62.67	65.04
6	-0.286	-0.294	-0.118	61.03	54.76	52.78
7	-0.120	-0.061	0.019	52.26	43.07	45.10
8	-0.251	0.039	-0.001	58.12	38.94	46.46
9	0.213	0.096	0.104	40.32	32.69	40.61

### 3 讨论

#### 3.1 SIF、植被绿度指数对干旱敏感性的差异

由于 NDVI、EVI 对冠层结构和色素含量变化不敏感,只能间接反映植被生理变化。SIF 与植被的光合作用直接相关,可在干旱导致植被可见特征(绿度)变化之前获取植被的胁迫信息<sup>[22]</sup>,且 SIF 对于植被生长期间遭受的水分胁迫更为敏感<sup>[16]</sup>。根

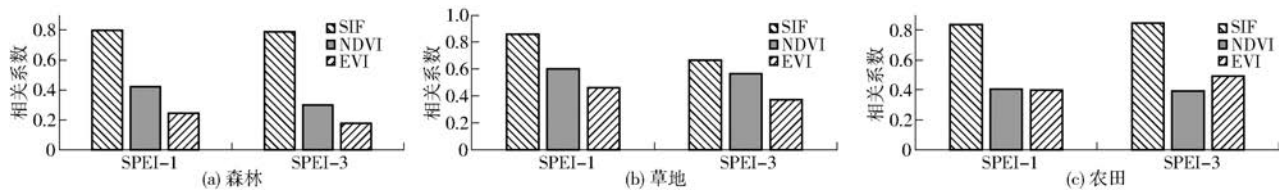


图8 SIF、NDVI/EVI与各时间尺度气象干旱指数SPEI的相关系数

Fig.8 Correlation between SIF, NDVI/EVI and SPEI of different time scales

据中国水旱灾害公报记载,2011年西南地区在5—10月上旬期间,由于降水持续偏少,气温持续升高,7—9月发生了短期气象干旱<sup>[34]</sup>,在9月中下旬后,随着区域有效降水的增加,农业干旱得到了解除<sup>[35]</sup>。在这一短期气象干旱期间,区域NDVI、EVI值均未出现负异常,而在此期间SIF的实际值则低于平均值。进一步说明短期干旱胁迫不能改变植被绿度,但受其影响的植被光合作用信息会通过SIF信号快速反映。并且在2010年植被生长季(4—10月)发生的干旱导致SIF异常更为明显,这也证明了相对于植被绿度指数,SIF更能有效反映植被遭受干旱胁迫的信息。区域干旱事件中,SIF异常主要源于干旱引起的植被吸收的光合有效辐射(Absorbed photosynthetically active radiation, APAR)的变化和叶绿素荧光量子产额的变化。一方面,干旱会引起植被叶面积指数(Leaf area index, LAI)减少,使得植被层对入射光合有效辐射的吸收比例(Fraction of photosynthetically active radiation, FPAR)相应减少,从而引起用于光合作用和叶绿素荧光激发的能量(SIF)也随之减少<sup>[21]</sup>。另一方面,干旱初期引起的叶片气孔关闭,减少了对光合作用底物CO<sub>2</sub>的吸收,引起光合速率下降,虽用于光合作用的APAR比例减少,但由于还存在热耗散机制,所以造成的荧光量子产额变化更为复杂。对于二者在西南地区干旱引发的SIF异常中的主导作用仍有待进一步探究。

### 3.2 植被对干旱的响应

2010年云南、广西、贵州交界地区均发生了严重的气象干旱,相应的上述区域在植被生长季期间NDVI、EVI、SIF均显示明显的负异常,表明气象干旱导致这些地区植被生长受到了水分和高温胁迫。但是在四川省中部和北部地区,未发生严重的气象干旱,可是NDVI、EVI、SIF却出现了负异常,说明由降水、气温变化主导的气象干旱事件不是抑制该区域植被生长的主要因素,可能与该区域地下水储量变化、水资源不合理利用有关。由于植被自身对其生存环境具有一定的适应和抵抗能力,所以气象干旱的发生到其影响植被光合和呼吸作用等生理过程存在一定的延迟效应。西南地区在2009年9月至

2010年4月发生气象干旱后,在2010年5—9月,研究区虽未发生严重的气象干旱,但由于前几个月气象干旱的累积效应,使得区域植被在生长季期间的生长出现停滞,大多数地区的SIF、NDVI、EVI均显示出负异常。

另外,对于不同植被生态系统而言,群落结构、用水策略的不同使其在遭受干旱胁迫时的表现也存在一定差异。西南地区森林、农田SIF与各时间尺度的SPEI指数相关性接近,而草地的SIF则与SPEI-1的相关性更高( $R=0.859$ ,  $P<0.01$ ),说明草地的光合作用受到短期水分胁迫的影响较大,对于生长季的水分亏缺更为敏感,抗旱性较弱。孔冬冬等<sup>[13]</sup>在对中国不同植被类型对干旱事件的响应分析中也发现草地对干旱的影响最为敏感。由于草地抗旱性弱且人工草地加剧土壤水分流失的特点<sup>[36]</sup>,西南地区应着重采取植树造林、节水灌溉等措施来改善区域的水土流失、植被退化等生态问题。

## 4 结论

(1)2000—2018年西南地区SPEI整体上呈微弱增加趋势,说明干旱有所缓解。在年际变化上,2000—2013年间,SPEI-12呈下降趋势(趋势率为 $-0.05/(10a)$ ,  $R^2=0.295$ ),2014—2018年间,SPEI-12时间序列呈上升趋势(趋势率为 $0.04/(10a)$ ,  $R^2=0.094$ )。SPEI-12的趋势突变点发生在2016、2017年。

(2)2010年植被生长季(5—9月)期间,西南地区干旱导致的SIF、NDVI、EVI异常具有一定的空间一致性。相对于植被绿度指数NDVI和EVI,SIF对植被生长季期间发生的长期和短期干旱事件均表现出较大负异常,说明SIF可快速获取水分胁迫下的植被光合作用信息。

(3)西南地区的森林、农田和草地的SIF与不同时间尺度的SPEI指数的相关性接近,且均高于NDVI、EVI和SPEI指数的相关性。草地SIF与SPEI-1的相关性更高( $R=0.859$ ,  $P<0.01$ ),其光合作用受短期水分胁迫的影响较大,对生长季的水分亏缺更为敏感,抗旱性较弱。

## 参 考 文 献

- [1] 高涛涛, 殷淑燕, 王水霞. 基于 SPEI 指数的秦岭南北地区干旱时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2018, 41(4):761-770.  
GAO Taotao, YIN Shuyan, WANG Shuixia. Spatial and temporal variations of drought in northern and southern regions of Qinling Mountains based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(4):761-770. (in Chinese)
- [2] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展, 2013, 24(3):449-456.  
PEI Yuansheng, JIANG Guiqin, ZHAI Jiaqi. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3):449-456. (in Chinese)
- [3] 刘文琨, 裴源生, 赵勇, 等. 区域气象干旱评估分析模式[J]. 水科学进展, 2014, 25(3):318-326.  
LIU Wenkun, PEI Yuansheng, ZHAO Yong, et al. Research of the meteorological drought assessment analysis model[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3):318-326. (in Chinese)
- [4] 方国华, 涂玉虹, 闻昕, 等. 1961—2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J]. 水利学报, 2019, 50(5):598-611.  
FANG Guohua, TU Yuhong, WEN Xin, et al. Study on the development process and evolution characteristics of meteorological drought in the Huaihe River Basin from 1961 to 2015[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(5):598-611. (in Chinese)
- [5] 周帅, 王义民, 畅建霞, 等. 黄河流域干旱时空演变的空间格局研究[J]. 水利学报, 2019, 50(10):1231-1241.  
ZHOU Shuai, WANG Yimin, CHANG Jianxia, et al. Research on spatio-temporal evolution of drought patterns in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10):1231-1241. (in Chinese)
- [6] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993, 17(22):179-183.
- [7] VICENTE S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [8] BEGUERÍA S, VICENTE S M, REIG F, et al. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(10):3001-3023.
- [9] WANG Qianfeng, SHI Peijun, LEI Tianjie, et al. The alleviating trend of drought in the Huang-Huai-Hai Plain of China based on the daily SPEI[J]. International Journal of Climatology, 2015, 35(13):3760-3769.
- [10] 赵兴凯, 李增尧, 朱清科. 基于 SPI 和 SPEI 陕北黄土区土壤水分对气候特征的响应[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8):155-163.  
ZHAO Xingkai, LI Zengyao, ZHU Qingke. Response of soil moisture on climate characteristics based on SPI and SPEI in Loess region of northern Shaanxi[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8):155-163. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160820&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160820&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.020. (in Chinese)
- [11] 刘小刚, 冷险险, 孙光照, 等. 基于 1961—2100 年 SPI 和 SPEI 的云南省干旱特征评估[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12):236-245.  
LIU Xiaogang, LENG Xianxian, SUN Guangzhao, et al. Assessment of drought characteristics in Yunnan Province based on SPI and SPEI from 1961 to 2100[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):236-245. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181229&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181229&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.029. (in Chinese)
- [12] 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.  
WANG Zhaoli, HUANG Zeqin, LI Jun, et al. Assessing impacts of meteorological drought on vegetation at catchment scale in China based on SPEI and NDVI[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14):177-186. (in Chinese)
- [13] 孔冬冬, 张强, 顾西辉, 等. 植被对不同时间尺度干旱事件的响应特征及成因分析[J]. 生态学报, 2016, 36(24):7908-7918.  
KONG Dongdong, ZHANG Qiang, GU Xihui, et al. Vegetation responses to drought at different time scales in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24):7908-7918. (in Chinese)
- [14] 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.  
YANG Siyao, MENG Dan, LI Xiaojuan, et al. Multi-scale response of vegetation changes relative to the SPEI meteorological drought index in North China in 2001—2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(3):1028-1039. (in Chinese)
- [15] 黄健熙, 张洁, 刘峻明, 等. 基于遥感 DSI 指数的干旱与冬小麦产量相关性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3):166-173.  
HUANG Jianxi, ZHANG Jie, LIU Junming, et al. Correlation analysis between drought and winter wheat yields based on remotely sensed drought severity index[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3):166-173. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150323&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150323&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.023. (in Chinese)
- [16] WANG Siheng, HUANG Changping, ZHANG Lifu, et al. Monitoring and assessing the 2012 drought in the great plains: analyzing satellite-retrieved solar-induced chlorophyll fluorescence, drought indices, and gross primary production[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2):61.
- [17] FRANKENBERG C, FISHER J B, WORDEN J, et al. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT;



- patterns of plant fluorescence with gross primary productivity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(17): L17706.
- [18] GUANTER L, ZHANG Y, JUNG M, et al. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(14): E1327 - E1333.
- [19] 郝勇, 姜海梅, 叶昊天, 等. 日光诱导叶绿素荧光在估算半干旱草原生态系统总初级生产力中的应用[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(2):154 - 162.  
HAO Yong, JIANG Haimei, YE Haotian, et al. Application of sun-induced chlorophyll fluorescence in estimating gross primary productivity of a semi-arid grassland ecosystem[J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(2):154 - 162. (in Chinese)
- [20] LEE J E, FRANKENBERG C, VAN DER TOL C, et al. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence[J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 280(1761): 20130171.
- [21] SUN Y, FU R, DICKINSON R, et al. Drought onset mechanisms revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from two contrasting extreme events[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(11): 2427 - 2440.
- [22] YOSHIDA Y, JOINER J, TUCKER C, et al. The 2010 Russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from modeling and comparisons with parameters derived from satellite reflectances[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 163 - 177.
- [23] 林子雁, 肖焱, 饶恩明, 等. 中国西南地区不同类型生态系统服务的关系[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(3):978 - 986.  
LIN Ziyuan, XIAO Yi, RAO Enming, et al. Relationships among different types of ecosystem service in Southwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3):978 - 986. (in Chinese)
- [24] SHI Benlin, ZHU Xinyu, HU Yunchuan, et al. Drought characteristics of Henan Province in 1961—2013 based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(3): 311 - 325.
- [25] 王景才, 郭佳香, 徐蛟, 等. 近 55 年淮河上中游流域气候要素多时间尺度演变特征及关联性分析[J]. *地理科学*, 2017, 37(4):611 - 619.  
WANG Jingcai, GUO Jiayang, XU Jiao, et al. Multi-time scales change characteristics and relationship of meteorological variables in the upper and middle regions of the Huaihe River Basin in recent 55 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(4):611 - 619. (in Chinese)
- [26] 黄晚华, 杨晓光, 曲辉辉, 等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(8):28 - 34.  
HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, QU Huihui, et al. Analysis of spatio-temporal characteristic on seasonal drought of spring maize based on crop water deficit index[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8): 28 - 34. (in Chinese)
- [27] 贺敏, 宋立生, 王展鹏, 等. 基于多源数据的干旱监测指数对比研究——以西南地区为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(7):1257 - 1269.  
HE Min, SONG Lisheng, WANG Zhanpeng, et al. Evaluation of drought monitoring indices based on multi-source data in Southwest China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7):1257 - 1269. (in Chinese)
- [28] ZHANG Li, XIAO Jingfeng, LI Jing, et al. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4):045706.
- [29] 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.  
WANG Dong, ZHANG Bo, AN Meiling, et al. Temporal and spatial distributions of drought in Southwest China over the past 53 years based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(6):1003 - 1016. (in Chinese)
- [30] 王亚林, 丁忆, 胡艳, 等. 中国灌木生态系统的干旱化趋势及其对植被生长的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(6):2054 - 2062.  
WANG Yalin, DING Yi, HU Yan, et al. The study of shrubland drought dynamics in China and its impacts on vegetation growth[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6):2054 - 2062. (in Chinese)
- [31] GU Yingxin, WYLIE B K, HOWARD D M, et al. NDVI saturation adjustment: a new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River Basin, USA[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 30: 1 - 6.
- [32] AWUMA K S, STUTH J W, KAITHO R, et al. Application of normalized differential vegetation index and geostatistical techniques in cattle diet quality mapping in Ghana[J]. *Outlook on Agriculture*, 2007, 36(3): 205 - 213.
- [33] 朱林富, 谢世友, 杨华, 等. 基于 MODIS - EVI 的重庆植被覆盖时空分异特征研究[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6992 - 7002.  
ZHU Linfu, XIE Shiyu, YANG Hua, et al. Study on the spatial-temporal variability of vegetation coverage based on MODIS - EVI in Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19):6992 - 7002. (in Chinese)
- [34] 刘冀, 张特, 魏榕, 等. 基于随机森林偏差校正的农业干旱遥感监测模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 170 - 177.  
LIU Ji, ZHANG Te, WEI Rong, et al. Development of agricultural drought monitoring model using remote sensing based on bias-correcting random forest[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7):170 - 177. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200720&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200720&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.020. (in Chinese)
- [35] 国家防汛抗旱总指挥部. 中国水旱灾害公报. 2011[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [36] 董颖苹, 熊康宁, 李开忠, 等. 中国西南喀斯特潮湿气候下干旱胁迫人工牧草地土壤水生态系统服务研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(9):116 - 122.  
DONG Yingping, XIONG Kangning, LI Kaizhong, et al. Water services of soil ecosystem provided by introduced grassland at arid season under humidity climate of southwestern China karst area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(9):116 - 122. (in Chinese)