

西南喀斯特断陷盆地植被物候动态变化及其与气候因子的响应

李 丹^{1,2}, 吴秀芹^{1,2}, 张靖宙^{1,2}, 于 洋³

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学

水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083; 3.中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100048)

摘 要: 为了解喀斯特断陷盆地植被物候格局以及植被物候变化的驱动机制, 基于 2001—2016 年 MOD13Q1 的 250 m 产品, 利用 TIMESAT 模型最大斜率法反演了西南喀斯特断陷盆地生长季始期(SOS)、生长季末期(EOS)和生长季的长度(LOS)及变化, 并深入分析了影响物候变化的主要气候因素。结果表明: (1) 2001—2016 年期间, 西南喀斯特断陷盆地生长季初期物候指标推迟了 7.7 d/10 a, 生长季末期物候指标推迟了 10 d/10 a, 生长季长度指标延长了 2.3 d/10 a。 (2) SOS 变化整体呈现西推迟东提前的变化趋势, 提前趋势显著的地区集中分布于研究区东部云贵边境; 大部分地区生长季结束日期推迟, 但安宁河谷、木里低海拔山谷等部分地区生长季结束日期显著提前。 (3) 物候指标对气温和降水的响应程度不同, 总体来讲, SOS 受气候因子的影响比 EOS 更强烈。春季气温和降水对植被 SOS 影响力普遍大于其他季节, SOS 的推迟现象主要受到春季温度升高的影响。夏季降水对 EOS 的影响较大, 表明植物生长受降水的影响存在一定的时滞作用。在增温增湿的气候背景下, 断陷盆地物候指标在呈现出东早西晚的空间分异情况下随之发生推迟的响应关系。水分是限制植被生长的主要因素, 且对植被的影响主要体现在春季和夏季。

关键词: 西南喀斯特断陷盆地; 植被物候; 气候变化; NDVI

中图分类号: K903; Q142.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)06-0168-06

Vegetation Phenology Change and Response to Climate Change in the Karst Faulted Basin of Southwest China

LI Dan^{1,2}, WU Xiuqin^{1,2}, ZHANG Jingzhou^{1,2}, YU Yang³

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation of State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3.Department of Sediment Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to understand the vegetation phenology pattern and explore the driving mechanism of vegetation phenology change in karst faulted basin, based on the 250 m product data of MOD13Q1 from 2001 to 2016, three vegetation phenological indices (the start of the growing season, the end of the growing season, the length of the growing season) were estimated to study the vegetation phenological changes by using TIMESAT model in southwest karst faulted basin. And then the main factors affecting phenology change were analyzed. The results showed that: (1) from 2001 to 2016, SOS of karst basin of southwest China experienced a delay of 7.7 d/decade, EOS experienced a delay of 10 d/decade, and LOS prolonged 2.3 d/decade; (2) the change of SOS in the research area reflected postponement in the west and advance in the east; the areas with significant advance trend concentrated in the Yunnan-Guizhou border of the eastern research area; in most regions, EOS presented the delay trend, but in a few regions, EOS presented the advance trend, such as Anning River valley, Muli low-elevation valley; (3) the response of phenological index to temperature and precipitation was different; in general, SOS was more strongly affected by climate factors than EOS; the influence of spring temperature and precipitation on SOS was generally greater than that in other seasons in the whole study area; the delay of SOS was mainly affected by the temperature rise in spring; summer precipitation had a great influence on EOS, which reflected that precipitation had a certain

收稿日期: 2019-12-30

修回日期: 2020-02-10

资助项目: 国家自然科学基金“荒漠化地区土地利用冲突机制与多利益主体协同的土地系统优化策略”(41671080)

第一作者: 李丹(1994—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为 3S 技术在资源环境中的应用。E-mail: 13121666483@qq.com

通信作者: 吴秀芹(1974—), 女, 辽宁阜新, 博士, 主要从事 GIS 应用以及土地利用变化研究。E-mail: wuxq@bjfu.edu.cn

time lag on plant growth. Under the climate background of increasing temperature and humidity, phenological indexes of faulted basins show the spatial differentiation of the early pattern in east and the later pattern in west and indicate the delayed response relationship with climate change. Water is the main factor limiting vegetation growth, and mainly presents the impact on vegetation in the spring and summer.

Keywords: karst faulted basin; vegetation phenology; climate change; NDVI

植被物候反映了植物在生命周期中不断适应季节变化形成与环境条件密切相关的生长发育节律^[1-2]。植被是自然环境的一面镜子,环境中水、土、气、生等组成成分的任何变化都会被覆盖在地表的植物群落以不同的形式表现出来,植被的动态变化蕴藏着气候和人类活动的变迁。气候的变化对生态系统的构造与性能产生显著影响,当代以增温为主要特征的全球气候变化问题,对地球环境产生了前所未有的影响,成为当代人类面临的重大难题之一^[3]。目前国内针对植被物候观测的方法有多种,不同植被物候观测技术具有各自适宜的时间和空间尺度,不同于以野外观测为基础的传统目视观察法,近 20 a 来,遥感技术的广泛应用为物候研究提供了新的角度和机遇。不同观测技术或不同取方法使获取的植被物候指标之间存在显著的差异性,在植被秋季物候指标上尤其明显。但基于地面监测和遥感观测的研究一致显示,全球尺度下气温的持续升高已经导致了部分地区植被春季物候始期提前、秋季物候末期推迟^[4-6]。

西南喀斯特断陷盆地地处低纬高原,地形复杂多样,生物资源丰富,生态环境对水热变化相当敏感。基于相关文献的统计,该地区近 50 a 的气候变化与全球气候变暖趋势相符,年平均气温呈上升趋势,升温速率略低于全国平均水平,略大于全球气候变化平均水平^[7]。但针对西南喀斯特断陷盆地物候方面的研究主要以人工观测法集中在小尺度、特定物种、短时序的研究^[8-10],缺少对区域尺度上宏观全面的认识。因此,本研究基于 2001—2016 年的 MOD13Q1 产品和气象数据,利用 Matlab 对长时间序列 NDVI 进行重构并提取物候参数,分析典型物候参数(SOS,EOS,LOS)的时空变化特征,揭示植被物候时空动态变化与气候因子的响应机制,重点围绕两个问题展开:(1)喀斯特断陷盆地植被物候变化如何。(2)气候因子对该地区植被物候产生了怎样的影响。研究结果为分析喀斯特断陷盆地植被物候的时空变化动态特征及其与气温、降水的响应关系提供科学依据,同时为该地区根据物候变化开展植被恢复提供理论支撑。

1 研究区概况

西南喀斯特断陷盆地(100°03'—105°10'E,22°39'—29°10'N)(图 1)地处云贵高原,南面中越边境,西临横断

山脉,北接青藏高原,是青藏高原隆升产生的断裂活动所引起的断块差异沉陷及溶蚀作用共同形成的山间盆地^[11],是中国西南地区重要的生态屏障和生态脆弱区。本研究区横跨云南、四川和贵州 3 省共 43 个区县,总面积达 11.04 万 km²。研究区属亚热带季风气候,全年分干湿两季,雨热同期,日照充足,部分高海拔山区的立体气候特征明显。其中,有滇东地面定株实测研究表明,该区域各物候期的平均温度和 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温对主要乡土物种的物候表现较为密切,植被多于 2 月气温达到 10℃时开始萌动,至 3 月气温增高至 15℃以上开始展叶,在 5 月温度超过 20℃时,绝大部分开始开花,果实成熟期分散在 4—12 月^[8]。

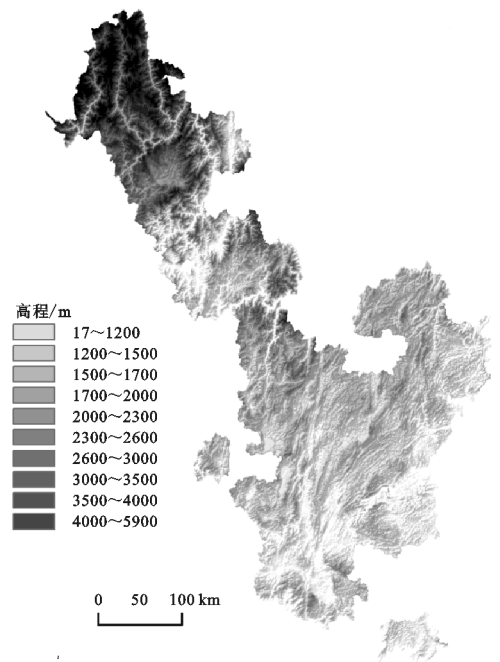


图 1 研究区位置

2 数据与方法

2.1 研究数据

归一化植被指数(NDVI)采用 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid 产品(简称 MOD13Q1),数据源从 2001 年 1 月 1 日—2016 年 12 月 19 日,每 16 d 提供一景,共 690 景影像。为消除 NDVI 时间序列的云影噪声影响,采用 TIMESAT 软件的 S-G 滤波法对数据进行降噪处理^[12]。气象产品是基于中国气象数据共享网站

(<http://data.cma.cn>)得到的 2001—2016 年西南喀斯特断陷盆地区域及周边的 43 个气象站点气温和降水数

据,通过克里金插值(Kriging)对年降水和年均气温数据进行插值为空间精度 250 m 的栅格数据集。

表 1 数据概况

数据类型	数据来源	数据说明
物候数据	NASA 官网	2001 年 1 月 1 日—2016 年 12 月 19 日的 MOD13Q1 产品,分辨率 250 m,研究位置为 h27v06 和 h26v06,共 690 景影像,通过 TIMESAT 软件计算所得物候指标
	(http://www.reverb.echo.nasa.gov)	
气象数据	中国气象数据共享网站 (http://data.cma.cn)	2001—2016 年研究区及周围的 43 个站点气象站点的气温和降水数据通过克里金插值所得

2.2 研究方法

(1) 植被物候指标提取方法。卫星遥感监测数据提取物候指标的常用方法有 NDVI 阈值法^[13]、Gu 法^[14]、移动平均法^[15]、最大斜率法^[16]。不同提取方法各有利弊,一定程度上体现出物候研究的不确定性,基于西南喀斯特区独特的地理特性,本研究选用 NDVI 曲线反演——最大斜率法进行物候参数提取,该方法是基于时间序列的 NDVI 曲线变化特征确定植被物候期^[17-18],如植被开始迅速生长或植被叶片脱落的时间点对 NDVI 曲线迅速增长和减小的时间点^[19]。计算公式如下:

$$NDVI_{ratio}(t)=[NDVI(t+1)-NDVI(t)/NDVI(t)]$$

(1)

式中: t 为具体日期,当 $NDVI_{ratio}$ 达到最大时对应的 $NDVI(t)$ 即为生长季始期,当 $NDVI_{ratio}$ 达到最小时对应的 $NDVI(t)$ 即为生长季末期。

$$NDVI(t)=a_0+a_1x^1+a_2x^2+\cdots+a_nx^n$$

(2)

式中: $NDVI(t)$ 是 x 的函数; x 为每年的第多少天,采用最小二乘法来计算天数。

(2) 趋势分析方法。采用一元线性回归方法建立气温、降水(y)与时间序列(x);物候参数(y)与时间序列(x)的一元线性回归方程,方程的斜率 b 用来表示方程的变化趋势。

$$y=a+bt+\epsilon$$

(3)

式中: y 为生长季始期或气象因子变量; t 为年时间序列; a 和 b 为系数,是拟合的残差。

$$slope=\frac{n\sum_{i=1}^n(i\times M)-\sum_{i=1}^ni\sum_{i=1}^nM}{n\sum_{i=1}^ni^2-(\sum_{i=1}^ni)^2}$$

(4)

式中: n 为累积年数,本研究为 16;变量 i 为年序号; M 为第 i 年的物候参数/气象数据值; $slope$ 为一元线性回归方程的斜率,某像元的斜率即为该像元多年的生长季始期气象数据均值变化的总趋势。

(3) 相关性分析方法。采用空间相关分析方法研究两个要素之间的相关关系,相关系数取值为 $[-1,1]$ 。

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(y_i-\bar{y})^2}}$$

(5)

式中: n 为研究时段年数; x,y 为相关分析的两个变量; x_i,y_i 分别为它们的样本值。

3 结果与分析

3.1 喀斯特断陷盆地植被物候变化趋势及空间分异

2001—2016 年,研究区内 3 项物候指标均呈推迟或延长趋势,变化率依次为 $EOS(10\text{ d}/10\text{ a})>SOS(7.7\text{ d}/10\text{ a})>LOS(2.3\text{ d}/10\text{ a})$ (图 2)。

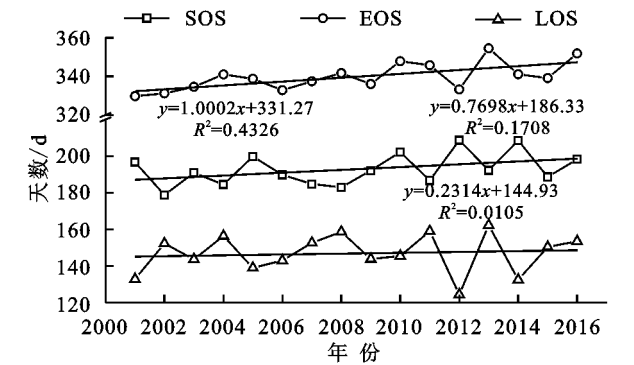


图 2 物候变化趋势

研究区多年 SOS 均值为第 192.41 天,空间上 SOS 表现出东早西晚的趋势(图 3)。约有 45.04% 的地区生长季开始于第 170~190 天(6 月中旬—7 月上旬),如木里河谷地带、盐源盆地、川滇边界、云南省东北部、昆明玉溪以东的南北向谷地和丘北南部等。24.91% 的地区 SOS 晚于第 200 天(7 月下旬),大多分布于青藏高原东部边缘的高海拔山区。研究区东南部、南盘江河谷地区也明显表现出 SOS 较早的现象。研究区多年 EOS 均值为第 339.31 天,空间上 EOS 表现出东早西晚的趋势。各地 EOS 时间分异跨度较长,近 100 d。最早的如盐源盆地、安宁河谷、泸西小江盆地、陆良南盘江水系,EOS 多发生在 300 d(10 月末)之前;最迟的如木里高海拔区、哀牢山东部等地,EOS 多晚于 400 d(次年 2 月初)。56.28% 的地区 EOS 发生在第 300~340 天(10 月末—12 月上旬),植被停止发育,生长季结束。海拔与物候期体现出较明显的相关性,随着海拔升高 LOS 会逐渐缩短,并且 SOS 会呈现明显推迟的趋势。这主要是高海拔地区分布的山地植被类型对季相变化的响应不强烈的表现。

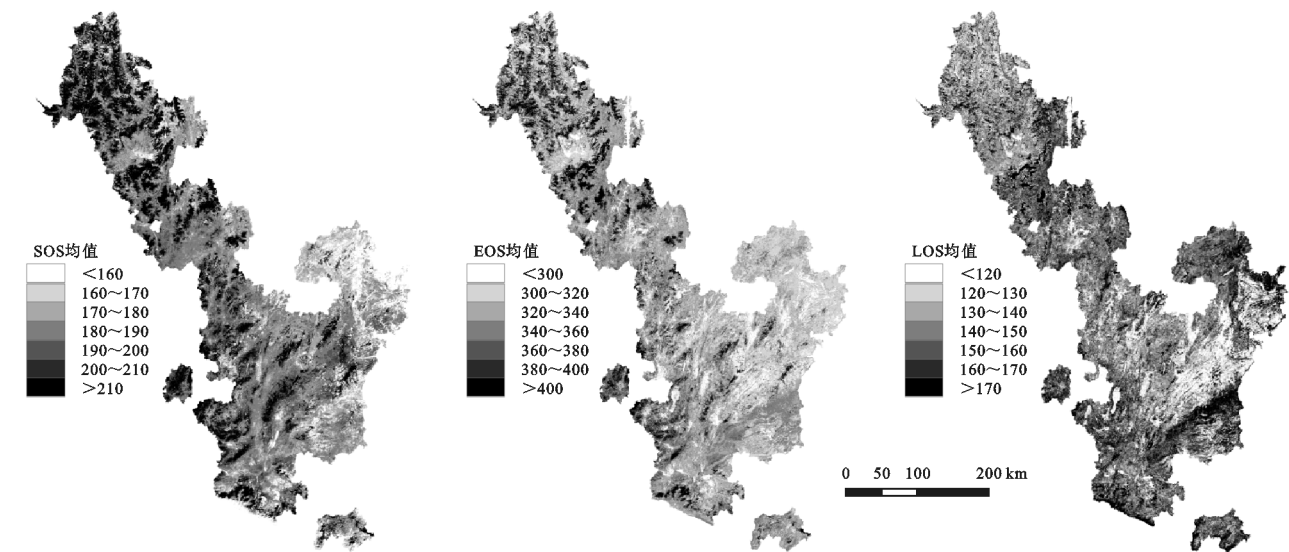


图 3 16 a 间 SOS,EOS,LOS 空间分布

研究区多年 LOS 平均为 146.91 d,范围在 140~160 d 的地区分布较多,占总面积的 37.22%。人类活动较少、气候条件优越的南盘江河谷、红江河谷、盘龙江河谷地区 LOS 长于 160 d。研究区内高海拔地区、部分城镇开发区(安宁河谷、蒙自市西北部等)、农事活动区、石漠化发育区的 LOS 多短于 120 d。

在空间上,大部分地区 SOS 发生了不同程度的

推迟现象(图 4),但相反,安宁河谷等部分地区 SOS 提前较为明显。除木里县低海拔谷地、蒙自市西北部等地区 EOS 发生提前,其他地区 EOS 均呈现出推迟现象。统计得出 LOS 发生延长的区域面积大于缩短的区域,延长的区域主要集中分布在盐源盆地、安宁河谷及研究区东北部等地,缩短主要分布在木里山谷低地、攀枝花东部、川滇边界周围地区等地。

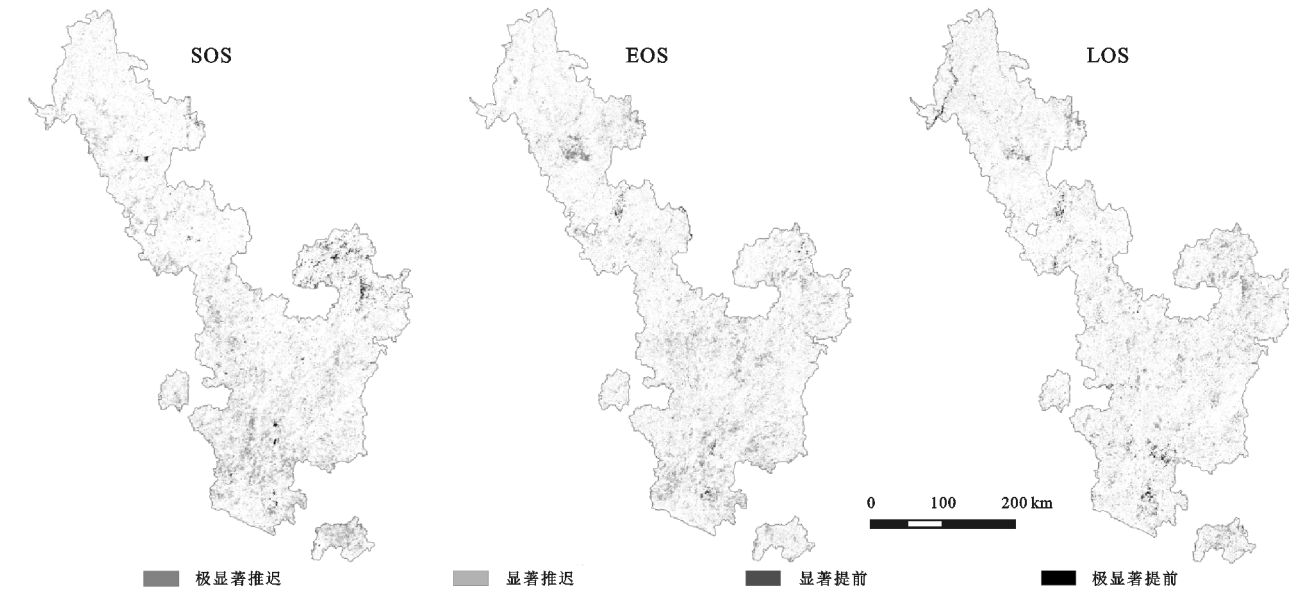


图 4 物候参数年变化的空间分布差异

3.2 2001—2016 年喀斯特断陷盆地气温和降水变化趋势

研究区多年年均气温为 15.06℃,在过去 16 a 中气温以 0.33℃/10 a 的速度增加。16 a 各年总降水量 947.04 mm,降水量波动较大,总体呈下降趋势,年降水量差异明显,2011 年当地旱灾是 16 a 来降水量最少的年份。2001—2016 年,在春季、夏季和秋季,研究区的年均气温均呈现上升趋势,变化幅度依次为

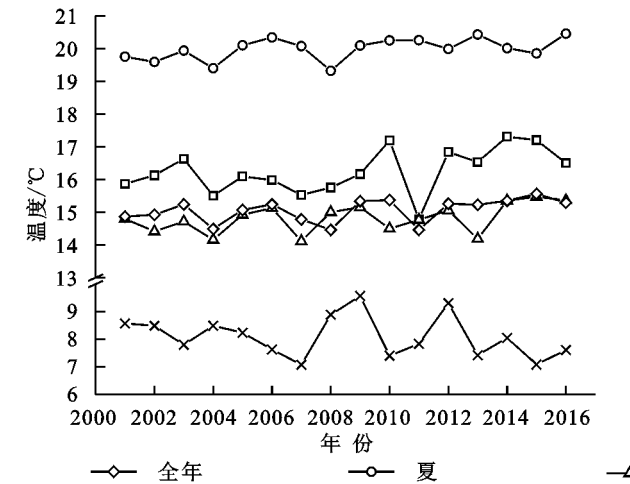
0.66,0.44,0.36℃/10 a。冬季气温呈下降趋势,降幅为-0.43℃/10 a。春、夏两季降水量总体呈下降趋势,春季变化率为-19.12 mm/10 a,夏季变化率为-18.21 mm/10 a。秋冬两季降水量呈现上升趋势,秋季变化率 14.63 mm/10 a,冬季变化率为 2.85 mm/10 a(图 5)。

3.3 喀斯特断陷盆地植被物候与气候因子相关性分析

研究分析气象要素与关键物候期参数的相关性有助于进一步认识喀斯特断陷盆地植被对气候变化

的响应机制。结合气候和物候动态变化趋势的研究结果,可以发现在 16 a 间,喀斯特断陷盆地气温和降水的变化对生长季始期和生长季末期的推迟都产生了较大影响(表 2)。

由表 2 可知,春季气候因子与 SOS 具有较强的相关性,春季降水对植被生长季提前的影响大于温度对其推迟的影响,说明研究区植被生长前期对水分的需求是促使植被生长开始的主要因素,16 a 来研究区春季温度升高加剧了植被的蒸腾作用,结合春季降水



减少进一步导致了植被 SOS 的推迟。全年来说温度对 SOS 的影响远大于降水对 SOS 的影响,SOS 的推迟与当年温度呈显著相关($p<0.05$)。EOS 受温度和降水的影响均不显著,总体来说,降水对 EOS 的影响大于温度对其的影响,且夏季降水减少会导致生长季推迟结束,但研究区 EOS 常开始发生于 10 月末之后,表明降水对土壤水分贮存及生长季末期均存在一定的时滞作用^[20-21]。综合来看,SOS 对气候因子的敏感性高于 EOS。

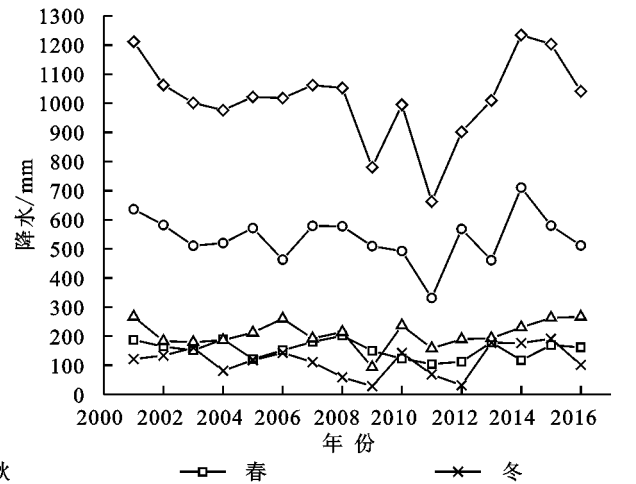


图 5 2001—2016 年温度、降水变化

表 2 植被物候与气候因子的相关分析

项目	生长季始期		生长季末期	
	温度	降水	温度	降水
春季	0.192952*	-0.216786	0.007545	-0.01415
夏季	0.123761	0.058297	0.080907	-0.10518
秋季	0.137195	0.061648	-0.0137	0.046181
冬季	0.036466	0.012122	-0.10039	0.009359
当年	0.153582*	-0.008836	0.003849	-0.02757

注:*表示 $p\leq 0.05$ 。

4 讨论

(1) 遥感技术的发展为植被物候研究提供了新手段,但依据遥感影像计算所得物候指标与人工目视实测数据存在一定差异^[22],且遥感多数据源的不同物候提取方法各有利弊,一定程度上体现了植被物候研究的不确定性。本研究区为亚热带地区,常绿阔叶林是常见的植被类型,终年常绿和季相变化不明显是该植被类型的特征,也是该区域利用遥感手段研究其物候变化的疑难点之一。本研究选取 NDVI 最大斜率法提取物候指标,最大化彰显了该区域植被生长变化趋势,宏观尺度上弥补了对西南喀斯特断陷盆地植被物候指标变化的规律性认知,但如何决策选取合适的方法提取物候参数,还需要通过研究者们深入挖掘植被物候自身特性,并尽可能考虑气候变化、地貌特征、人类活动

等多方面的影响因子,做出更精确的判断。

(2) 本研究结果所得研究区西北部高海拔地区植被生长季持续到了次年 2 月,高海拔地区植被生长代谢限制因子之间的相互关系复杂,关于植被生长受限机理存在众多争议,其中生长受限假说认为高海拔地区增温对植被呼吸的促进远大于光合的促进^[23],同时很多学者实测研究表明:在植物的生长季期间,植物叶片的净光合速率并没有受到生长季低温环境的影响而显著下降,这可能是研究区西北部高海拔地区植被生长季结束较晚的原因之一^[24-25]。

喀斯特断陷盆地因其独特且脆弱的生态环境,成为我国长期开展生态修复的重点地区,研究植被物候动态变化及其与气候因子的响应,对理解喀斯特断陷盆地环境下的植被物候格局、探明植被物候变化的驱动机制有着重要意义。植被物候作为自然生态环境变化的重要指示因子,将其纳入生态修复成效的评估指标将会促进评价体系进一步完善。

5 结论

(1) 西南喀斯特断陷盆地植被物候 SOS 和 EOS 均呈现东早西晚的空间分异特征,LOS 分异特征受海拔和人类活动的影响较大,三类物候指标均呈现不

同程度的推迟或延长趋势。(2)喀斯特断陷盆地生长季始期对气候的敏感性高于生长季末期,且温度是生长季始期发生推迟的主导自然因子。区分季节维度分析,春季气候因子对生长季始期的推迟影响最为显著,夏季气候因子对生长季末期的推迟影响尤为关键。研究揭示了气候变化背景下西南喀斯特断陷盆地水热条件对植被物候变化特征的影响趋势,有助于探明气候因子对区域植被变化的驱动机制,了解区域自然生态系统的结构和功能特性。

参考文献:

- [1] White M A, Thornton P E, Running S W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 217-234.
- [2] Visser M E, Caro S P, van Oers K, et al. Phenology, seasonal timing and circannual rhythms: Towards a unified framework[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 2010, 365(1555): 3113-3127.
- [3] Landman W. Climate change 2007: the physical science basis[J]. *South African Geographical Journal*, 2010, 92(1): 86-87.
- [4] Primack R B, Higuchi H, Miller-Rushing A J. The impact of climate change on cherry trees and other species in Japan[J]. *Bio-Logical Conservation*, 2009, 142(9): 1943-1949.
- [5] 仲舒颖,郑景云,葛全胜.近 40 年中国东部木本植物秋季叶全变色期变化[J].*中国农业气象*, 2010, 31(1): 1-4.
- [6] 葛全胜,郑景云,张学霞,等.过去 40 年中国气候与物候的变化研究[J].*自然科学进展*, 2003, 13(10): 42-47.
- [7] Fan Z X, Bräuning A, Thomas A, et al. Spatial and temporal temperature trends on the Yunnan Plateau (Southwest China) during 1961—2004[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(14): 2078-2090.
- [8] 吴毅,刘文耀,沈有信,等.云南石林景区主要乡土植物物候特征的初步研究[J].*山地学报*, 2006, 24(6): 647-653.
- [9] 樊辉,何大明.基于 MODIS EVI 时序数据的云南高原山地森林物候特征识别[J].*山地学报*, 2012, 30(1): 16-23.
- [10] 牟佳,陈中云,帅世殊.贵州近 20 a 部分物候现象变化与气象条件的关系[J].*贵州气象*, 2005, 29(2): 32-33.
- [11] 王宇,张华,张贵,等.喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J].*中国岩溶*, 2017, 36(3): 283-295.
- [12] 边金虎,李爱农,宋孟强,等. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构[J].*遥感学报*, 2010, 14(4): 725-741.
- [13] Neinavaz E, Skidmore A K, Darvishzadeh R. Effects of prediction accuracy of the proportion of vegetation cover on land surface emissivity and temperature using the NDVI threshold method[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2020, 85. DOI: org/10.1016/j.jag.2019.101984.
- [14] Filippa G, Cremonese E, Migliavacca M, et al. Phenopix: A R package for image-based vegetation phenology[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 141-150.
- [15] Ivits E, Cherlet M, Tóth G, et al. Combining satellite derived phenology with climate data for climate change impact assessment[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 88/89: 85-97.
- [16] Shen Z, Fu G, Yu C, et al. Relationship between the growing season maximum enhanced vegetation index and climatic factors on the tibetan plateau[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6: 6765-6789.
- [17] 李净,刘红兵,李彩云,等.基于 GIMMS 3g NDVI 的近 30 年中国北部植被生长季始期变化研究[J].*地理科学* 2017, 37(4): 620-629.
- [18] Garrity S R, Bohrer G, Maurer K D, et al. A comparison of multiple phenology data sources for estimating seasonal transitions in deciduous forest carbon exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1741-1752.
- [19] Garonna I, De Jong R, De Wit A J W, et al. Strong contribution of autumn phenology to changes in satellite-derived growing season length estimates across Europe (1982—2011) [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3457-3470.
- [20] 袁沫汐,邹玲,林爱文,等.湖北省地区植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J].*生态学报*, 2016, 36(17): 5315-5323.
- [21] 何云玲,李同艳,熊巧利,等.2000—2016 年云南地区植被覆盖时空变化及其对水热因子的响应[J].*生态学报*, 2018, 38(24): 8813-8821.
- [22] 曹沛雨,张雷明,李胜功,等.植被物候观测与指标提取方法研究进展[J].*地球科学进展*, 2016, 31(4): 365-376.
- [23] 李明财,罗天祥,朱教君,等.高山林线形成机理及植物相关生理生态学特性研究进展[J].*生态学报*, 2008, 28(11): 5583-5591.
- [24] Pohl M, Alig D, Korner C, et al. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems [J]. *Plant and Soil*, 2009, 324(1/2): 91-102.
- [25] Diemer C K. In situ photosynthetic responses to light, temperature and carbon dioxide in herbaceous plants from low and high altitude[J]. *Functional Ecology*, 1987, 1(3): 179-194.