

2001—2020 年南盘江流域植被物候时空 变化及其对气候的响应

栗凡婕^{1,2}, 王加胜^{1,2}, 王志敏^{2,3}, 陈鑫亚^{2,3}, 王丽蒙^{2,3}, 杨 昆^{1,2}

(1.云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2.西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心,
昆明 650500; 3.云南师范大学 信息学院, 昆明 650500)

摘 要:植被物候对气候敏感易观测,是观测生态变化与全球气候变化的重要指标,研究植被物候变化及其对气候的响应对了解全球气候变化与植被之间的复杂关系具有重要意义。为揭示近 20 年来南盘江流域植被物候时空变化及其对气候的响应特征,基于 2001—2020 年增强型植被指数(MOD13Q1-EVI),运用 S-G 滤波、动态阈值法、Sen 斜率分析法、相关性分析法等方法,获取了南盘江流域植被物候参数,分析其时空分布特征,利用偏相关系数分析了气候变化对 SOS、EOS 的影响。结果表明:(1) 2001—2020 年,南盘江流域物候特征变化较大,SOS(Start of the growing season)呈提前趋势,EOS(End of the growing season)和 LOS(Length of the growing season)呈推迟延长趋势,物候变化具有空间异质性,不同子流域植被物候存在较大差异。(2) 植被物候变化受到地形的影响,EOS 随海拔升高,结束时间提前;SOS 随海拔变化的规律与 LOS 的规律相反,都存在 1 000 m、2 000 m 和 2 600 m 分界线。(3) 南盘江流域 SOS 变化与气温、降水呈正相关关系,EOS 与气温呈正相关关系、与降水呈负相关关系。该研究可为南盘江流域的生态环境保护与植被资源可持续发展提供科学依据。

关键词:物候参数;南盘江流域;气候变化;时空变化特征

中图分类号:Q142.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0220-08

Temporal and Spatial Changes of Vegetation Phenology and Its Response to Climate Change in Nanpan River Basin from 2001 to 2020

SU Fanjie^{1,2}, WANG Jiasheng^{1,2}, WANG Zhiming^{2,3},
CHEN Xinya^{2,3}, WANG Limeng^{2,3}, YANG Kun^{1,2}

(1.Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2.The Engineering Research
Center of GIS Technology in Western China of Ministry of Education of China, Kunming 650500, China;
3.School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract:Vegetation phenology is sensitive to climate and easy to be observed, which is an important index for observing ecological change and global climate change. It is of great significance for understanding the complex relationship between global climate change and vegetation to study the changes of vegetation phenological and its response to climate. To reveal the spatial and temporal changes of vegetation phenology and its response to climate in the Nanpan River Basin in the past 20 years, based on EVI (MOD13Q1-EVI) of 2001—2020, we took Nanpan River Basin as the study area, obtained the parameters of vegetation phenology and analyzed spatio-temporal distribution characteristics using S-G filter, dynamic threshold method, Sen slope analysis method and correlation analysis method, and analyzed the impact of climate changes on SOS (start of the growing season), EOS(end of the growing season) and LOS(length of the growing season) using partial correlation coefficient. The results showed: (1) from 2001 to 2020, the phenological characteristics of Nanpan River Basin changed greatly, with SOS advancing, EOS and LOS delaying and extending; the phenological changes had spatial heterogeneity, and the phenology of vegetation in different sub-basins

收稿日期:2021-09-10

修回日期:2021-09-28

资助项目:国家自然科学基金(42071381,41961056)

第一作者:栗凡婕(1997—),女,广西桂林人,硕士研究生,主要从事遥感数字图像处理方面研究。E-mail:1075330080@qq.com

通信作者:杨昆(1963—),男,云南曲靖人,教授,博士导师,主要从事遥感数字图像处理方面研究。E-mail:kmdecynu@163.com

was quite different; (2) vegetation phenology changes were affected by terrain, and EOS ended earlier with elevation; the pattern of SOS changing with altitude was opposite to that of LOS, and there were boundaries of 1 000 m, 2 000 m and 2 600 m; (3) the change of SOS in Nanpan River Basin was positively correlated with temperature and precipitation, while EOS was positively correlated with temperature and negatively correlated with precipitation. This study can provide a scientific basis for the ecological environment protection and sustainable development of vegetation resources in the Nanpan River Basin.

Keywords: phenological parameters; Nanpanjiang River Basin; climate change; temporal and spatial change characteristics

植物物候期(植被萌芽、抽枝、展叶、开花、结果及落叶、休眠等)是指植被适应降水温度等气候条件的周期性变化,形成与此适应的生长规律^[1-3]。2021 年 8 月联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)正式发布第六次评估报告,该报告指出,全球气候仍将持续变暖,近十年全球地表温度比工业革命时期上升了 1.09℃^[4]。相关研究表明,气候变化会引起植物物候变化,直接影响全球碳循环、植被生产力、生物多样性等^[5-7]。由于植物物候变化对气候变化敏感且易观测,是评估气候变化对生态系统的重要指标^[6],因此监测植物物候变化及其对气候的响应具有重要意义,已成为当前全球气候变化研究的热点问题^[8-13]。

基于遥感数据^[14]和其他观测数据^[15]表明,在过去几十年中,受气候变暖的影响,普遍出现植被生长季开始时间提前,植被生长季结束时间推迟的现象。物候变化在不同区域受到不同的因素影响存在明显差异。大多数学者研究区域为北温带、青藏高原等地区,如 Yu 等^[16]研究青藏高原中草原的物候特征,发现冬季的气温升高会导致“迟春”现象。Gong 等^[17]研究内蒙古草原物候变化情况,发现 2002—2014 年研究区植被生长季开始时间提前,植被生长结束时间推后,植被生长长度延长。邵周玲等^[18]研究米仓山地区植物物候变化情况,发现 2003—2018 年来米仓山生长季开始时间呈提前趋势主要受到 3 月气温和 4 月降水影响,生长季结束时间呈提前趋势主要受到 10 月降水影响。肖芳等^[19]研究气候变化对内蒙古草原植物物候的影响,研究表明植被生长开始时间与 3 月和 4 月气温有关。

南盘江流域位于云贵高原,易受气候影响且具有明显干湿季,有着特殊的地理位置和气候条件。目前,南盘江流域的研究主要关注研究南盘江流域水质变化^[20]、气候变化^[21]、水文变化^[22]、具体植被种群空间格局分析等^[23],未见有对南盘江流域植被物候变化与气候响应等相关的研究。为此,本文选取南盘江流域为研究区,利用 MODIS-EVI 数据、高程数据、气象站点数据等分析南盘江流域植被物候与气温、降水

变化的响应关系,该研究可为南盘江流域的生态环境保护与植被资源可持续发展提供科学依据。

1 研究区及数据

1.1 研究区概况

南盘江流域是珠江流域源头之一,地处云贵高原,位于 102°10′—106°10′E, 23°04′—26°00′N,发源于曲靖市沾益马雄山,跨云南、广西、贵州三省,全长 936 km^[24],南盘江流域地势北高南低,海拔为 0~2 774 m。南盘江流域处于季风气候的过渡区,5—10 月受西南季风气候的影响,多雨且多暴雨,11 月一次年 4 月,受到干暖大陆气团的影响,出现干季^[25],南盘江流域干湿季节明显,常发生季节性干旱。南盘江流域为典型的喀斯特地貌,雨水会迅速通过裂缝进入地下,导致表层土壤缺水,这会对植被生长产生巨大威胁^[26],生态环境脆弱。参考相关文献^[27-28]提取流域的方法,将南盘江流域分成 6 个子流域,分别为:清水河子流域、黄泥河子流域、曲江—巴江子流域、甸溪河子流域、临安河子流域、清水江子流域。

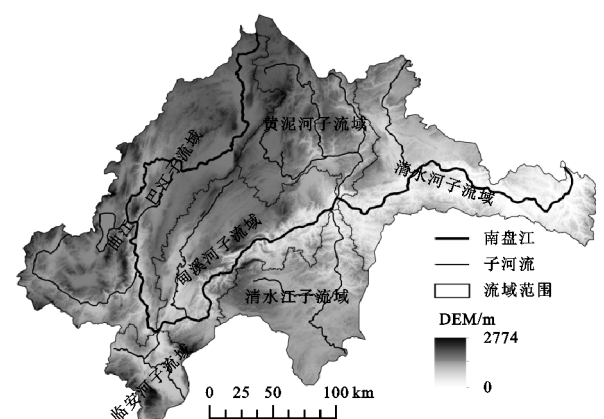


图 1 研究区高程分布及子流域划分

1.2 数据及预处理

1.2.1 数据 本文主要使用的数据包括 MODIS 数据、高程数据、气象数据,具体如下:

(1) MODIS 数据产品。本文主要采用 2001—2020 年 MOD13Q1 中增强型植被指数数据(MOD13Q1-EVI)。MOD13Q1,该产品数据时间分辨率为 16 d,空间分辨率

为 250 m,分幅号为 h27-v6,本文共提取 20 a 共 460 期遥感影像数据用于提取植被物候参数。

(2) 高程数据。采用 ASTER GDEM 30 M 分辨率数字高程数据,用于分析不同高程下响应特征。南盘江流域高程数据来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。

(3) 气象数据。用于分析流域气候变化,收集了 2001—2020 年的流域内气象站点数据。南盘江流域气象站点数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.gov.cn/>)。

1.2.2 数据预处理 为了本文后续的研究,先将收集的数据进行预处理:(1) 流域范围提取与子流域划分。参考 Mark 等^[28]提出的提取流域的方法,运用 ArcGIS 软件和高程数据,提取南盘江流域边界和子流域范围。(2) 气象数据插值。运用 ArcGIS 中反距离权重法(Inverse Distance Weight, IDW)对站点数据内气温、降水站点数据进行插值得到南盘江流域 2001—2020 年生长季月份月平均降水和气温数据集,并用南盘江流域边界对其进行裁剪。(3) 南盘江流域裁剪。将本文使用到的 MODIS-EVI、高程数据、气象插值后的数据集,将数据进行拼接,并用提取出来的流域边界对其进行裁剪。(4) 统一坐标系统和空间分辨率。将所有数据都转换为 WGS 1984UTM Zone48N 坐标系统,空间分辨率为 250 m。

2 研究方法

2.1 物候参数提取

2.1.1 基于 S-G 滤波的 EVI 时间序列重构 为了进一步降低噪声对 EVI 数据的影响,本文利用 S-G 滤波的方法对 2001—2020 年 EVI 数据进行拟合,便于南盘江流域植被物候提取^[18,29]。

$$Y_{evi} = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y}{2m+1}$$

式中: Y_{evi} 为拟合后的 EVI 值; C_i 为第 i 个 EVI 值的滤波系数; Y 为原始序列数据; $2m+1$ 为平滑窗口的大小。

2.1.2 物候参数提取 本文采用动态阈值的方法对南盘江流域植被物候信息进行提取。参考其他区域的物候研究^[7,30],运用 ENVI 软件将南盘江流域的植被动态阈值定为 20%,获取到 3 个主要的物候参数:植被生长开始时间(SOS, Start of the growing season),植被生长结束时间(EOS, End of the growing season),植被生长的长度(LOS, Length of the growing season)。本文研究只考虑一年只有一个生长季的情况(对于一年多季的生长期区域,只提取该区域植被生长最大值的生长期)。本文采用儒略日表

示 SOS 与 EOS 值,即 SOS 与 EOS 开始(结束)日期距离当年的 1 月 1 日的天数。计算公式如下:

$$EVI(SOS) = (EVI_{\max} - EVI_{\min1}) \times 20\%$$

$$EVI(EOS) = (EVI_{\max} - EVI_{\min2}) \times 20\%$$

$$EVI(LOS) = EVI_{EOS} - EVI_{SOS}$$

式中: EVI_{\max} 为一年中南盘江流域某个像元 EVI 最大的值; $EVI_{\min1}$ 为一年中 EVI 上升阶段最小值; $EVI_{\min2}$ 为南盘江流域 EVI 下降阶段的最小值,当一年中 EVI 值上升或者下降达到 20%时分别提取该像元的 SOS 和 EOS 的值,植被生长的长度(LOS)为植被生长结束时间减去植被生长开始的时间。

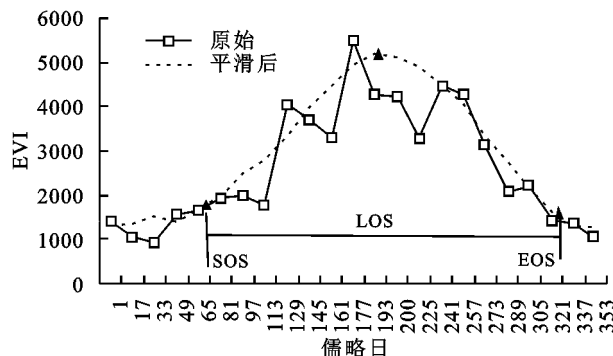


图 2 南盘江流域某像元 EVI 数据平滑前后对比图及其物候期图解

2.2 植被物候空间变化格局

本文采用 Theil-Sen Median (Sen 斜率) 计算南盘江流域 SOS, EOS, LOS 物候参数变化趋势, Sen 斜率是一种统计趋势方法,该方法对于测量误差和离散数据不敏感,该方法计算效率高,是一种非参数统计趋势方法^[31]。Sen 斜率计算趋势的方法可用来分析南盘江流域物候参数变化趋势,计算公式如下:

$$\beta_{evi} = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), 1 < i < j < 20$$

式中: β_{evi} 为 SOS, EOS, LOS 变化趋势;Median 为中位数;本文研究时间序列长度为 20, j, i 为年份数 1, 2, 3, 4, ..., 20; x_j, x_i 分别表示 j 年份和 i 年份对应的物候参数(SOS, EOS, LOS 值), j 和 i 大于 1 并小于等于 20; β_{evi} 大于 0 表示 20 a 以来研究的物候参数呈现上升趋势, β_{evi} 小于 0 表示 20 a 来研究的物候参数呈下降趋势。

2.3 植被物候变化与气候因子的响应

本文运用偏相关的方法探讨南盘江流域植被物候变化与气温、降水之间的响应。本文研究偏相关是指当气温、降水与物候参数(SOS, EOS)相关时,剔除其中气温的影响,分析物候参数与降水的相关程度;或者剔除降水的影响,分析物候参数与气温的相关关系^[18],其表达式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1-r_{xz}^2)}\sqrt{(1-r_{yz}^2)}}$$

式中: x,y,z 分别为物候参数(SOS,EOS)、气温栅格数据集、降水栅格数据集。 $R_{xy,z}$ 为控制变量 z 后, xy 的相关系数, r 为相关系数。本文主要指控制气温,分析降水分别与 SOS,EOS 的偏相关系数;控制降水,分析气温分别与 SOS,EOS 的偏相关系数。当 $-1 < R_{xy,z} < -0.1$ 之间为负相关, $-0.1 \leq R_{xy,z} \leq 0.1$ 为无明显相关, $0.1 < R_{xy,z} < 1$ 之间为正相关, R 的绝对值越大,相关性越强。

3 结果与分析

3.1 南盘江流域植被物候时空变化特征

基于 MODIS-EVI 数据,运用物候参数提取方法得到南盘江流域 2001—2020 年的 SOS,EOS,LOS 空间分布,进而计算每年南盘江流域平均 SOS,EOS,LOS 随时间变化趋势(图 3),从图上可知,20 a 间南盘江流域年平均 SOS 集中分布在第 85 天至 130 天,呈现提前趋势,提前幅度为 0.599 d/a;20 a 间南盘江流域年平均 EOS 集中在 285~310 d,且以 0.134 d/a 推迟幅度呈延长趋势;20 a 间南盘江流域年平均

LOS 集中在 160~200 d,呈延长趋势,延长幅度为 0.888 d/a。总体上,南盘江流域植被生长开始时间比南盘江流域植被生长结束时间变化趋势更明显,南盘江流域 SOS 主要呈提前趋势,EOS 主要呈推迟趋势,LOS 主要呈延长趋势。

基于上述方法计算得到,2001—2020 年南盘江流域植被物候参数空间分布格局见图 4。2001—2020 年南盘江流域 SOS 主要集中在第 90~180 天,占总面积的 75.43%,空间分布东低西高。EOS 主要集中在第 290~310 天,占总面积的 76.43%,LOS 主要集中在第 185~235 天,占总面积的 81.62%。

按照流域划分统计不同子流域的物候参数,见表 1。清水河子流域多年平均 SOS 最早,植被生长开始时间为第 86.6 天,同时该子流域多年平均 EOS 较晚,植被生长结束时间为第 301.08 天,该子流域植被平均生长长度为 214.07 d。曲江—巴江子流域多年平均 SOS 最晚,该子流域多年平均植被生长开始时间为第 122.33 天,该子流域多年平均植被结束时间较早,为第 296.14 天,植被生长长度为 176.26 d。

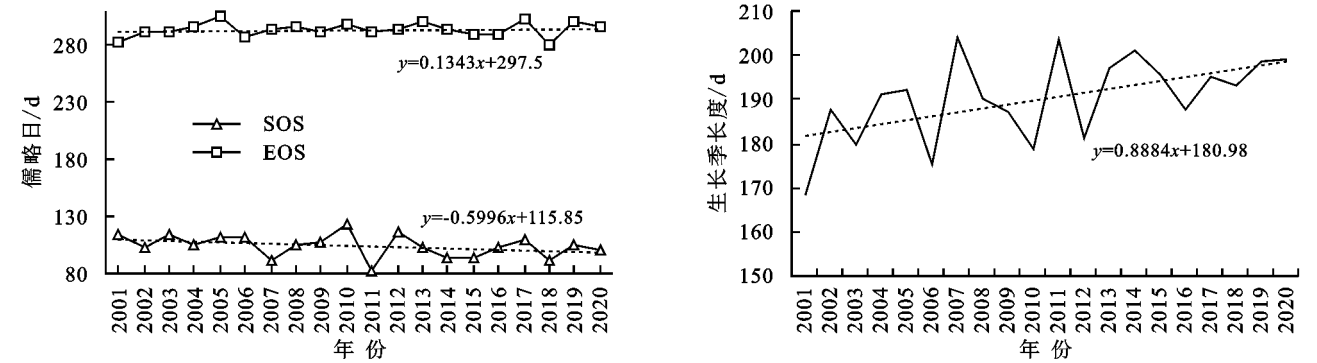


图 3 2001—2020 年南盘江流域植被物候年际变化趋势

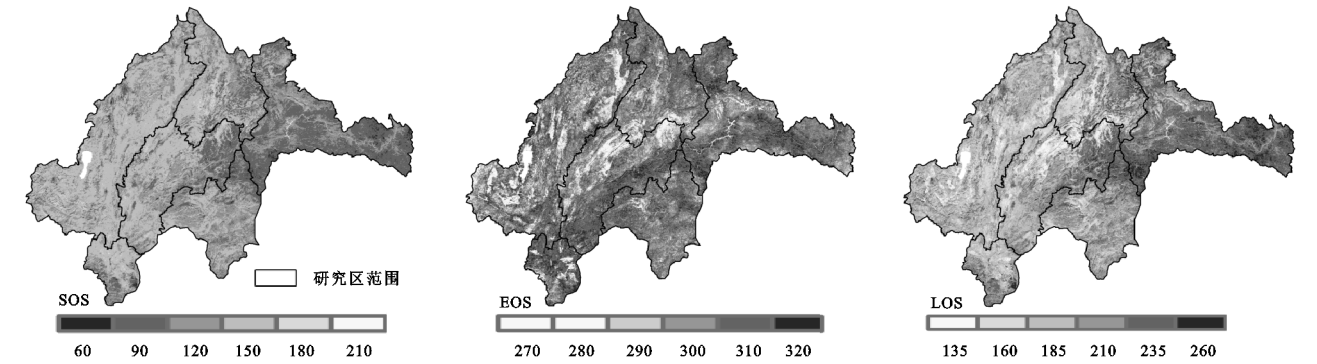


图 4 2001—2020 年南盘江流域物候均值空间分布特征

运用 Sen 趋势分析法,在像元尺度上分析南盘江流域 2001—2020 年植被物候变化趋势(表 2,图 5)所示。SOS,EOS,LOS 变化趋势出现空间异质性,其中 SOS 拟合斜率值在 $-7.7 \sim 8.5$ 之间,呈提前趋势的区域占比为 52.75%,说明南盘江流域大多数地区植被 SOS 呈提前趋势,其中,植被 SOS 呈提前趋势

的主要分布在黄泥河子流域、清水河子流域和清水江子流域,植被 SOS 呈推后趋势的主要分布在临安河子流域。EOS 拟合斜率值在 $-6.8 \sim 5.5$ 之间,呈推迟趋势的区域占比为 38.65%,主要分布在清水河子流域和清水江子流域,南盘江流域植被生长季结束时间呈提前趋势的主要分布在曲江—巴江子流域。

LOS 拟合斜率值在-8.7~11 之间,呈延长趋势的区域占比为 59.10%,南盘江流域植被生长季长度呈延

长趋势主要分布在清水河子流域,呈缩短趋势的主要分布在曲江—巴江子流域。

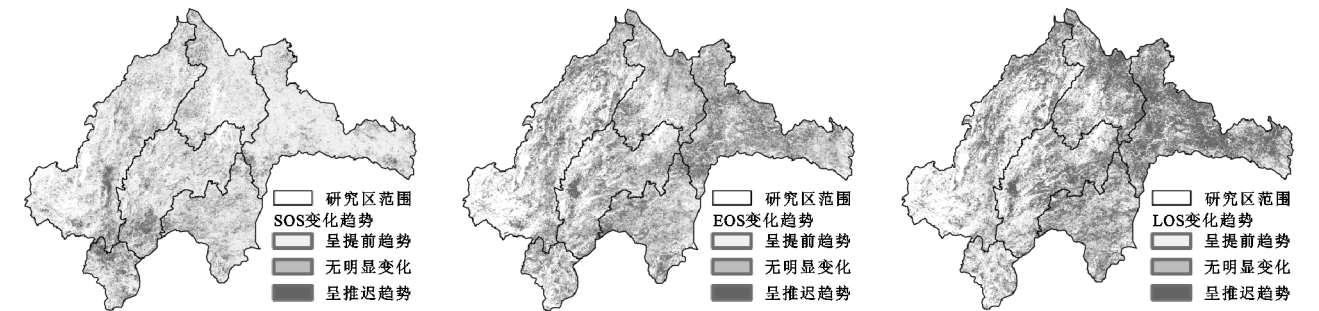


图 5 2001—2020 年南盘江流域植被物候年际变化空间分布

表 1 2001—2020 年南盘江不同子流域平均海拔及物候参数

子流域名称	平均海拔/m	SOS/d	EOS/d	LOS/d
临安河子流域	1 624.26	116.59	301.29	186.01
清水江子流域	1 570.25	106.74	300.32	193.38
清水河子流域	1 139.70	86.60	301.08	214.07
黄泥河子流域	1 879.19	113.60	297.89	184.16
甸溪河子流域	1 628.88	113.45	298.08	185.07
曲江—巴江子流域	1 889.57	122.33	296.14	176.26

表 2 南盘江流域不同物候参数变化趋势

变化趋势	斜率值范围	SOS/%	EOS/%	LOS/%
呈提前趋势	-8.5~0.5	52.75	15.06	16.52
无明显变化	-0.5~0.5	31.97	46.29	24.38
呈延迟趋势	0.5~11	15.28	38.65	59.10

3.2 南盘江流域植被物候与地形的关系

进一步分析南盘江流域植被物候参数分布特征,从水平方向上来看,南盘江流域跨越的纬度范围较小,植被物候参数及其变化可能受到地形、气候和不同植被覆盖类型的影响。通过前文分析得出南盘江

流域不同子流域物候参数及其年际变化明显,由表 1 可得各个子流域间高程分异明显,因此进一步分析南盘江流域植被物候变化与海拔的关系,南盘江流域不同海拔上植被物候参数变化情况见图 6。

南盘江流域 SOS 与海拔之间的关系有三条分界线,分别为 1 000 m、2 000 m 和 2 600 m,南盘江流域多年平均植被生长时间的在 1 000 m 以下的区域,随海拔升高 SOS 提前开始,南盘江流域海拔为 1 000 ~2 000 m 的区域,植被生长开始时间随海拔的升高植被开始时间延迟,南盘江流域海拔为 2 000~2 600 m 的区域,植被生长季开始时间随海拔升高而提前开始,南盘江流域海拔高于 2 600 m 的区域,植被生长随海拔升高而延迟。南盘江流域植被生长的长度随海拔变化的关系与植被生长季开始时间随海拔变化的关系大致相反,也存在三条明显的分界线。南盘江流域植被生长季结束时间随海拔变化存在明显的关系,南盘江流域 EOS 随海拔的升高而提前结束,其变化斜率为-0.0045,说明当海拔升高 1 m 植被物候结束期提前 0.0045 d。

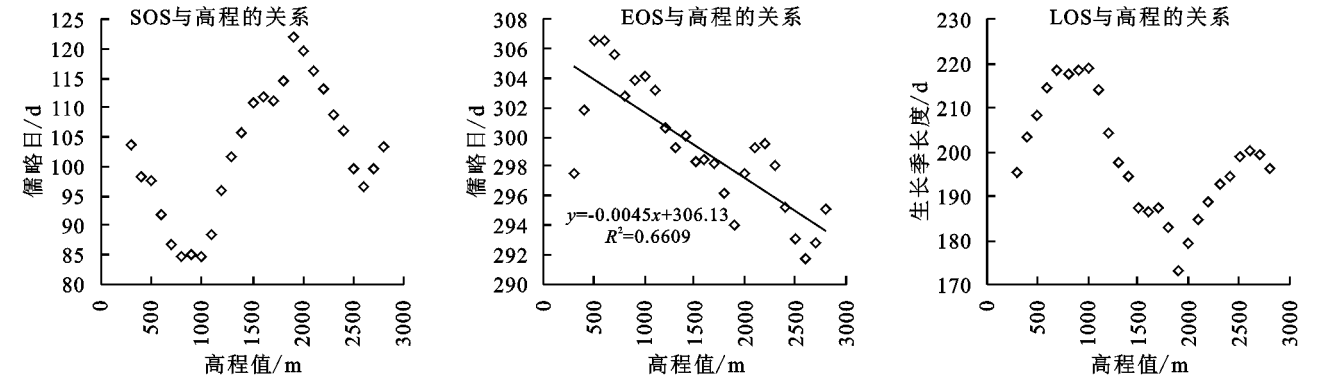


图 6 南盘江流域不同海拔上植被物候参数变化情况

3.3 南盘江流域植被物候对气候因子的响应

为了明确南盘江流域植被物候与气候因子的响应关系,运用 ArcGIS 统计南盘江流域中不同子流域 20 a 平均物候参数和气温降水值,运用 SPSS 软件分析不同子流域中物候参数(SOS,EOS)与气候因子(气温、降水)的偏相关系性(图 7)。

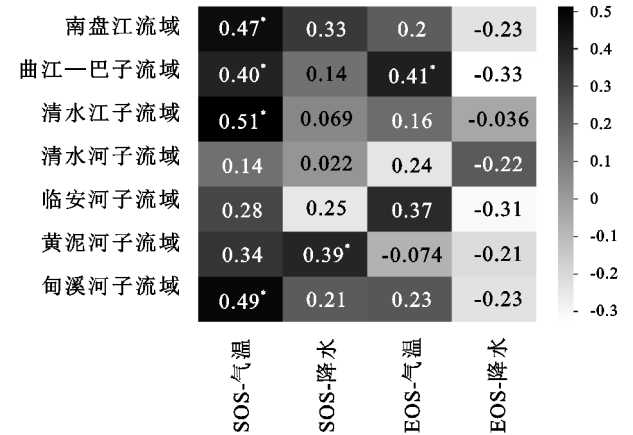
从整个南盘江流域来看,SOS 与生长季开始时间

(3—5 月)的气温呈显著正相关关系($p<0.05$),SOS 与生长季始期(3—5 月)的降水呈正相关关系;EOS 与生长季结束期的气温呈正相关关系,与结束期降水呈负相关关系,说明当南盘江流域植被生长季开始时间中气温上升同时降水增多可能会抑制南盘江流域植被生长,气温升高、降水减少会推迟植被结束时间。

南盘江流域不同子流域物候变化与气温降水的

响应不同,曲江—巴江子流域 SOS 与气温呈显著正相关($p<0.05$),与降水呈正相关关系;EOS 与气温呈显著正相关($p<0.05$),与降水呈负相关关系,说明在曲江—巴江子流域主要受到 3—5 月气温和 10—11 月降水的影响,如果 3—5 月气温升高会抑制植被生长,如果 10—11 月气温升高可能会延长植被生长时间。清水江子流域和甸溪河子流域 SOS 与气温呈显著正相关关系($p<0.05$),与降水呈正相关关系;EOS 与气温呈正相关关系,与降水呈负相关关系,清水江子流域和甸溪河子流域 SOS 变化主要受到 3—5 月气温的影响,气温升高可能会抑制植被生长。黄泥河子流域 SOS 与降水呈正相关关系($p<0.05$),与气温呈正相关关系,EOS 与气温降水都呈负相关关系,说明黄泥河子流域 SOS 主要受降水影响,降水增多会抑制植被生长,同时 10—11 月气温降低、降水减少可能会使该子流域植被结束时间推迟。清水河子流域 SOS 与气温降水呈正相关关系,该子流域 EOS 与气温呈负相关关系,与降水呈正相关关系,说明在植被生长结束期,该子流域植被生长结束时期,气温升高,降水减少会使植被提前结束。临安河子流域 SOS 与气温呈正相关关系,与降水呈负相关关系,EOS 与气温呈正相关关系,与降水呈负相关关系。

总的来看,南盘江流域中不同子流域对气候响应不同,南盘江流域 SOS 主要受气温的正向影响,曲江—巴江子流域 SOS 主要受的气温的正向影响,EOS 与气温呈正相关,清水江子流域 SOS 主要与气温呈正相关关系,黄泥河子流域 SOS 与降水呈显著正相关关系,甸溪河子流域 SOS 与气温呈显著正相关关系。



注: * 指在 0.05 级别,相关性显著。

图 7 不同子流域物候变化与气候的偏相关性系数

4 讨论

4.1 植被物候提取

本文运用 MOD13Q1-EVI 数据进行物候参数的提取,该数据空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 d,相

比以往关于物候的研究具有更高的空间分辨率^[32-33]。由于 MODIS 数据的空间分辨率较低,用该数据可能会影响物候信息的详细程度,会使提取物候信息的准确度会有所降低,同时提取物候数据也有一定时间分辨率的要求,更加精确的时间分辨率数据能捕获更加精确的物候状态^[34]。但同一个遥感产品不能同时满足高时间分辨率和高空间分辨率的要求,因此今后的研究关注点将高时间分辨率和高空间分辨率融合来提高遥感数据精度^[30],更准确地提取物候信息。

4.2 植被物候变化分析

采用以往研究的物候与本研究结果进行比较,本文提取物候参数与其他研究的结果^[35-36]较为一致,基本上植被生长开始时间主要集中在 85~130 d,植被生长结束时间主要集中在 285~310 d,表明本研究提取出来的南盘江流域植被物候信息用于分析植被物候参数变化特征是合理可行的。但由于受研究区地理位置,研究范围,提取的数据、提取的方式等不同,研究结果有一定的差异^[37-38]。

对比南盘江流域植被生长开始时间分布在 3 月初—6 月底,南盘江流域植被生长结束时间分布在 9 月—11 月,南盘江流域植被生长开始时间比植被生长结束时间持续时间长,表明南盘江流域植被生长初期对环境变化的反应较大,而生长末期对环境变化的反应较小,意味着这些结果与文献^[37]的研究较为一致。

从子流域角度来看植被物候变化,流域内不同子流域植被生长开始时间与结束时间有差异,清水河子流域植被生长季开始时间较早,植被生长长度较长,其原因可能是由于该子流域多为低山、河谷,海拔较低、气温较高,利于植被生长。曲江—巴江子流域植被生长季开始时间较晚,植被生长季结束时间较早,植被生长时间较短,其原因可能是由于该子流域多为高山,海拔较高、气候较低,植被活动时间较短。因此进一步分析南盘江流域植被与海拔的关系,发现南盘江流域植被生长开始时间和植被生长长度随海拔变化有 1 000 m,2 000 m 和 2 600 m 的分界线,南盘江流域植被生长结束时间与海拔关系密切,随着海拔升高植被生长提前结束,这与文献^[18,39]研究一致,植被物候随海拔变化而变化。探究南盘江流域植被随海拔变化的原因,这可能与南盘江流域内气温降水有关,气温随海拔升高而降低,降水随海拔升高而增加,达到最大降水量后而减少,这可能是与 SOS,LOS 随海拔变化有明显分界线的原因^[14]。

4.3 南盘江流域植被物候变化与气候因子的响应机制

许多研究表明,随着温度升高,出现 SOS 提前的现象^[40-42],但本研究发现在南盘江流域大部分区域随着温

度升高,SOS出现推迟的现象,这与Wu等^[43]研究中国物候变化与气候因子的结论和张艳可等^[35]研究云南北回归线植被物候变化的情况一致。南盘江流域为干湿季明显的区域,南盘江流域内11月—次年4月为旱季,当植被生长的季节气温升高可能会加剧干旱情况,可能会抑制南盘江流域植被生长^[44],使南盘江流域植被生长季开始时间推迟。Piao等^[45]提出气候变暖可能不会导致更早的SOS,因为在更温暖的冬季降低了植被在休眠期接受到的低温累积量(chilling requirements),并增加植被在春季的积温需求,使得春季植被生长季推迟。同时随着全球气候变暖,植被物候出现提前或推迟现象,这对全球碳固定、植被生产力变化产生重要影响,这将是后续关注点。

5 结论

本文以南盘江流域为研究区,基于2001—2020年增强型植被指数数据(MOD13Q1-EVI)、南盘江流域气候站点数据,运用S-G滤波、动态阈值法、Sen斜率分析法、相关性分析法等方法,获取了南盘江流域植被物候参数:生长季开始时间(SOS)、生长季结束时间(EOS)、生长季长度(LOS),分析了物候参数的时空分布特征,利用偏相关系数定量的确定气候因子对SOS,EOS的影响,得出以下结论:

(1) 2001—2020年南盘江流域植被平均SOS主要集中在85~130 d,EOS主要集中在285~310 d,LOS主要集中在160~200 d。20 a间南盘江流域植被SOS呈提前趋势,EOS呈延长趋势,LOS呈延长趋势,变化幅度分别为-0.599 6 d/a,0.134 3 d/a,0.888 4 d/a。

(2) 南盘江流域物候变化具有空间异质性,不同子流域物候变化存在差异,其中清水河子流域平均海拔最低,该子流域植被生长开始时间最早、植被生长结束时间最晚,植被生长长度最长。植被物候变化与地形有一定关系,EOS随海拔升高,结束时间提前;SOS随海拔变化的规律与LOS的规律相反,都存在1 000 m,2 000 m和2 600 m分界线。

(3) 南盘江流域内气温降水对植被物候有一定影响,从气温和降水与SOS和EOS的偏相关关系来看,SOS与生长季开始时间的平均气温、降水主要呈正相关关系,气温升高、降水增多可能会抑制植被生长,使植被生长时间推后。EOS与生长季结束时间的平均气温主要呈正相关关系,与降水主要呈负相关关系。不同的子流域植被物候与气温降水的关系有一定差异,其中曲江—巴江子流域SOS主要受的气温的正向影响,EOS与气温呈正相关,清水江子流域SOS主要与气温呈正相关关系,黄泥河子流域SOS

与降水呈显著正相关关系,甸溪河子流域SOS与气温呈显著正相关关系。

参考文献:

- [1] 夏传福,李静,柳钦火.植被物候遥感监测研究进展[J].遥感学报,2013,17(1):1-16.
- [2] Wang X, Xiao J, Li X, et al. No consistent evidence for advancing or delaying trends in spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017,122(12):3288-3305.
- [3] He Z, Du J, Zhao W, et al. Assessing temperature sensitivity of subalpine shrub phenology in semi-arid mountain regions of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015,213:42-52.
- [4] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. New York:Cambridge University Press, 2021.
- [5] Wang X, Gao Q, Wang C, et al. Spatiotemporal patterns of vegetation phenology change and relationships with climate in the two transects of east China[J]. Global Ecology and Conservation, 2017,10:206-219.
- [6] 李晓婷,陈骥,郭伟.不同气候类型下植物物候的影响因素综述[J].地球环境学报,2018,9(1):16-27.
- [7] 管琪卉,丁明军,张华敏.青藏地区高寒草地春季物候时空变化及其对气候变化的响应[J].山地学报,2019,37(5):639-648.
- [8] Mei L, Bao G, Tong S, et al. Elevation-dependent response of spring phenology to climate and its legacy effect on vegetation growth in the mountains of Northwest Mongolia[J]. Ecological Indicators, 2021,126:107640.DOI:10.1016/j.ecolind.2021.107640.
- [9] Fu Y, Campioli M, Vitasse Y, et al. Variation in leaf flushing date influences autumnal senescence and next year's flushing date in two temperate tree species[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014,111(20):7355-7360.
- [10] 李明,吴正方,杜海波,等.基于遥感方法的长白山地区植被物候期变化趋势研究[J].地理科学,2011,31(10):1242-1248.
- [11] 王莹莹.基于MODIS数据的中国温带地区植被物候期时空变化及对GPP的影响[D].石家庄:河北师范大学,2019.
- [12] 陆佩玲,于强,贺庆棠.植物物候对气候变化的响应[J].生态学报,2006,36(3):923-929.
- [13] 董晓宇,姚华荣,戴君虎,等.2000—2017年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响[J].地理科学进展,2020,39(1):24-35.
- [14] Piao S, Fang J, Zhou L, et al. Variations in Satellite-derived Phenology in China's Temperate Vegetation[J]. Global Change Biology, 2006,12(4):672-685.
- [15] Ge Q, Wang H, Rutishauser T, et al. Phenological re-

- sponse to climate change in China: A Meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 265-274.
- [16] Yu H, Luedeling E, Xu J. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [17] Gong Z, Kawamura K, Ishikawa N, et al. Modis normalized difference vegetation index(NDVI) and vegetation phenology dynamics in the Inner Mongolia Grassland[J]. *Solid Earth*, 2015, 6(4): 1185-1194.
- [18] 邵周玲, 周文佐, 李凤, 等. 2003—2018年米仓山地区植被物候时空变化及对气候的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3701-3712.
- [19] 肖芳, 桑婧, 王海梅. 气候变化对内蒙古鄂温克旗典型草原植物物候的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2784-2792.
- [20] 陈晓鸿, 李强, 喇优抓. 南盘江流域曲靖段土壤及农作物中重金属污染特征与生态风险评价[J]. *安徽农学通报*, 2020, 26(15): 126-132.
- [21] 柴素盈, 曹言, 窦小东, 等. 1964—2017年南盘江流域主要极端气候事件时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 151-160.
- [22] 窦小东, 彭启洋, 张万诚, 等. 基于情景分析的LUCC和气候变化对南盘江流域径流的影响[J]. *灾害学*, 2020, 35(1): 84-89.
- [23] 朱德意. 南盘江流域松栎混交林群落特征及主要种群空间格局研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [24] 贵州省地方志编纂委员会. 贵州省志[Z]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2006: 910-911.
- [25] 杨茂灵, 王龙, 高瑞, 等. 南盘江流域季节性干旱时空分布特征研究[J]. *人民长江*, 2013, 44(11): 5-8.
- [26] Long D, Shen Y, Sun A, et al. Drought and flood monitoring for a large karst plateau in southwest china using extended grace data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 155: 145-160.
- [27] 弥智娟, 郑涛, 姜宏雷, 等. 牛栏江流域上游保护区“四型”小流域水土流失治理模式[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 219-226.
- [28] O'callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1984, 28(3): 323-344.
- [29] 黄聪. 基于GIMMS NDVI3g数据东北地表物候变化研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.
- [30] 王贝贝, 周淑琴, 荆耀栋, 等. 山西省植被物候时空变化以及地形对物候的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1839-1848.
- [31] Liu Y, Wang Y, Peng J, et al. Correlations between urbanization and vegetation degradation across the world's metropolises using dmsp/ols nighttime light data[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 2067-2088.
- [32] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等. 中国北方草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4099-4107.
- [33] 黄文琳, 张强, 孔冬冬, 等. 1982—2013年内蒙古地区植被物候对于旱变化的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(13): 4953-4965.
- [34] Vrieling A, Meroni M, Darvishzadeh R, et al. Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island[J]. *Remote sensing of environment*, 2018, 215: 517-529.
- [35] 张艳可, 王金亮, 农兰萍, 等. 基于MODIS时序数据北回归线(云南段)地区植被物候时空变化及其对气候响应分析[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(2): 274-287.
- [36] Ge W, Han J, Zhang D, et al. Divergent impacts of droughts on vegetation phenology and productivity in the Yungui Plateau, Southwest China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107743. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107743.
- [37] 安淳淳. 基于MODIS数据的青藏高原植被物候监测及其对气候变化的响应研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所), 2019.
- [38] 谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等. 基于遥感的黄土高原植被物候监测及其对气候变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 153-160.
- [39] 李建豪, 陶建斌, 程波, 吴琪凡, 彭宏杰. 秦岭山区植被春季物候的海拔敏感性[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2089-2097.
- [40] Xu L, Myneni R B, Chapin Iii F S, et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands[J]. *Nature climate change*, 2013, 3(6): 581-586.
- [41] Wang X, Piao S, Ciais P, et al. Spring temperature change and its implication in the change of vegetation growth in north america from 1982 to 2006[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(4): 1240-1245.
- [42] Vitasse Y, François C, Delpierre N, et al. Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 969-980.
- [43] Wu C, Hou X, Peng D, et al. Land surface phenology of China's temperate ecosystems over 1999—2013: Spatial-temporal patterns, interaction effects, covariation with climate and implications for productivity[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216: 177-187.
- [44] Fu G, Zhang X, Zhang Y, et al. Experimental warming does not enhance gross primary production and above-ground biomass in the alpine meadow of Tibet[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1): 73505. DOI: 10.1117/1.JRS.7.073505.
- [45] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.