

引用格式:LI Yunlong, LI Jun, CHANG Ziyu. A comparative study on the extraction of phenological parameters in Chongqing Area based on different Vegetation Indices[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(4): 978-989. [李云龙, 李军, 常梓煜. 基于不同植被指数的重庆地区物候参数提取对比研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(4): 978-989.]

DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2023.4.0978

## 基于不同植被指数的重庆地区物候参数提取对比研究

李云龙<sup>1</sup>, 李 军<sup>1,2,3</sup>, 常梓煜<sup>1</sup>

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331;

2. 重庆市高校GIS应用研究重点实验室, 重庆 401331;

3. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

**摘要:**基于不同植被指数提取物候参数是分析长时间物候变化的重要基础。以多云雾的重庆地区为例,使用2010~2019年MODIS NDVI/EVI/EVI2共3种长时序的植被指数数据,通过D-L滤波方法分析了不同植被指数特征;并使用动态阈值法和趋势分析法,对比研究了基于3种植被指数提取物候参数结果及其随不同地形因子的分异规律,结果如下:①EVI和EVI2的时间序列拟合曲线比NDVI的拟合曲线更加平滑,3种植被指数原始值与拟合值的差值主要分布为NDVI(0.05~0.18)、EVI(0.03~0.11)、EVI2(0.03~0.1)。②基于3种植被指数提取物候参数在空间分布和变化趋势上呈现一致性,其中EVI和EVI2提取的植被指数参数皆相近,相差5d之内占比79%以上,SOSEVI2变化显著性区域所占比面积最高(16.36%),SOSNDVI最低为12.37%。③SOS随海拔升高而推迟,EOS随海拔升高先延后再提前,LOS随海拔升高先延长后缩短,且EOSNDVI、LOSNDVI随着海拔增加分别与EOSEVI/EOSEVI2、LOSEVI/LOSEVI2差异增大,不同植被类型上,EVI提取物候参数与EVI2相近,变化趋势具有一致性。与NDVI相比,EVI和EVI2能更好提取对云雾地区物候参数,结果相近;基于EVI和EVI2提取物候参数的地形效应更明显。

**关键词:**多云雾地区;MODIS植被指数;植被物候参数;地形因子

**中图分类号:**Q948;TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2023)04-0978-12

### 1 引言

植物物候指植物受到气候因子和其他环境因子等影响而出现的以年为周期的自然现象,其包含各类植物的发芽、展叶、凋落等<sup>[1]</sup>。植物物候变化是全球气候变化的“指示器”<sup>[2]</sup>,也是气候与自然环境变化的综合指标<sup>[3]</sup>。分析和对比基于不同植被指数的物候提取结果以及揭示物候对气候变化的响应

能够评估气候变化的影响。从20世纪90年代至今为全球气候变化物候时期,全球气候变化及其对生态系统的潜在影响受到学术研究的广泛关注;由于遥感技术的迅速发展和推广,植物物候研究的时间尺度和空间范围都有了明显增长和扩大<sup>[4]</sup>。从本世纪初,关于物候方面的研究逐渐增多,基于遥感数据大面积提取植物物候的文章发表量开始呈指数增长,更加促进了全球变化时期宏观物候学的发

收稿日期:2022-04-15;修订日期:2023-04-06

基金项目:重庆市前沿与应用基础研究计划一般项目(cstc2015jcyjA0332),国家自然科学基金(51308575),中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-TZ-18)资助。

作者简介:李云龙(1998—),男,四川攀枝花人,硕士研究生,主要从事植被遥感监测研究。E-mail:lyl16790@163.com

通讯作者:李 军(1974—),男,天津杨柳青人,博士,教授,主要从事农业遥感和地理信息系统应用研究。E-mail: junli@cqu.edu.cn

展<sup>[4-5]</sup>。通过提取长时间序列的物候变化可较明显地反映出全球或区域的气候变化,是研究全球或区域气候变化的重要内容之一<sup>[6-8]</sup>。

前人对于不同传感器的相同植被指数异同做了不少研究,全国尺度的MODIS/SPOT NDVI与GIMMS NDVI数据比较发现前两者相关性更高,但三者总体变化趋势较为一致<sup>[9]</sup>;黄土高原上3种传感器空间分布较为一致,季节之间的变化也表现为极显著相关性,年际上GIMMS NDVI数据却未能像前两者一样呈现显著变化<sup>[10]</sup>,在我国南方韩江流域的研究表明MODIS NDVI与AVHRR NDVI的线性回归关系预测更加贴合NDVI实测值<sup>[11]</sup>。其中MODIS数据由于其波段宽度窄、空间分辨率高、对地物分辨力高的特点更适用于我国南方混合植被较多的区域,但对于相同传感器也存在不同植被指数的差异。MODIS EVI数据相比于MODIS NDVI数据更进一步消除了气溶胶和土壤背景的影响,避免了在植被覆盖度高的区域NDVI的饱和性问题<sup>[12]</sup>,在内蒙古阿拉善左旗和喀斯特地区MODIS NDVI/EVI对多种气候因子的响应都显著相关,并且对多数气候因子存在明显的滞后性,其中NDVI的滞后性更明显,且滞后气候因子类型更多<sup>[13-14]</sup>。除上述两种植被指数外,EVI2也是一种能够很好表征植被生长状况的指数,其在EVI的基础上去除了蓝波段,可为使用更长时间序列的AVHRR传感器研究植被指数提供试验先例,相关研究表明在观测情况较好时EVI2可以代替EVI<sup>[15-16]</sup>。

我国诸多学者在黄土高原<sup>[17-18]</sup>、青藏高原<sup>[19-20]</sup>、秦岭<sup>[21-22]</sup>等地区已经开展了植物物候的研究,但在多云雾的重庆地区进行植被指数比较,分析物候参数提取精度的研究仍然较少。重庆地形地貌复杂多样,生态环境空间异质性强<sup>[23]</sup>,湿度大、云雾多、日照少,月日照时数最少时普遍低于35 h,且多雾期主要出现在每年的10月到次年1月,长时间的降水和阴雨天气给长时序植被遥感数据的连续性造成了一定的困难,必须选择适当的植被指数和遥感数据时间序列重建方法才能真实反映植被的长期变化特征。已有研究表明Double Logistics是描述季节动态最好的方法之一<sup>[24]</sup>,也有学者对重庆地区NDVI时间序列进行不同方式的拟合,认为Double Logistics方法较适合该地区的植被指数时间序列拟合,作者将采取该方法对本文的数据进行重建<sup>[24]</sup>。

已有学者对重庆地区的单点物候进行记录和研<sup>[25]</sup>,但对于区域性研究尚未成熟。综上所述,本文将围绕以下两个问题展开研究:①基于MODIS的NDVI、EVI和EVI2等3种植被指数对于提取重庆地区物候的适用性如何?②不同地形下,基于3种植被指数提取物候参数的差异是否明显?此前的研究多偏重于EVI和NDVI的对比,因此,采用MODIS NDVI/EVI/EVI2等3种植被指数进行提取物候,对比不同植被指数反应物候的差异情况,丰富遥感植被指数在重庆地区物候研究方面的应用,找到更适合反映重庆地区物候变化状况的植被指数;同时,研究多种植被指数在典型西南茂密植被区的适用性,可为提取植被覆盖高、数据缺失较多、云雨影响较大、混合像元较多区域的物候作为先行实验。

## 2 数据和研究方法

### 2.1 数据来源和预处理

#### 2.1.1 数据来源

植被遥感数据:研究选用2010~2020年的MODIS MOD13Q1遥感卫星产品数据,来源于NASA的EarthDATA官网(<https://www.earthdata.nasa.gov/>),包括地表反射红波段(b01\_red)、近红波段(b02\_nir)、蓝波段(b03\_blue)、绿波段(b04\_greed),时间分辨率为16 d,空间分辨率为250 m;土地利用数据:来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)西南山地分中心,时间为2015年,空间分辨率30 m;数字高程模型数据:SRTM-DEM 90M分辨率原始高程数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。植被分类数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)《1:100万中国植被图》,裁剪后得到重庆地区植被分类图。

#### 2.1.2 数据预处理

3种植被指数的提取等处理:使用MRT(MODIS Reprojection Tool)软件提取了研究时段内的NDVI和EVI两种植被指数的DN值、NIR(近红外)和R(红波段)的反射值,并进行批量拼接、投影转化和重采样,通过ENVI5.3/IDL8.5对进行波段运算和批量裁剪得到重庆地区NDVI、EVI、EVI2等3种植被指数11 a各253幅影像。

物候参数的提取:使用TIMESAT3.3软件进行

物候提取时,因第一和最后年物候提取不准确,将2010年数据重复一遍作为时间序列的第一年,2020年数据也一并输入作为最后一年无效值,最终得到2010~2019年10 a间的物候始期、物候末期和物候期长度的二进制图像。由于其时间序列为影像的个数编号,使用ENVI/IDL进行波段运算将时间转化为每年从1月1日起算的天数,并转为tif格式文件。

将物候始期统一简写为SOS(Start Of Season),物候末期为EOS(End Of Season),物候期长度为LOS(Length Of Season),不同植被指数提取的物候参数用下标代替,例如基于NDVI提取的物候始期为 $SOS_{NDVI}$ ,基于EVI提取的物候期长度为 $LOS_{EVI2}$ 。Double Logistics方法简写为D-L。

## 2.2 方法

### 2.2.1 动态阈值法

研究在提取物候时采用动态阈值法,阈值法主要是通过给植被指数设定阈值条件来确定作物生长季的开始和结束。与传统的固定阈值法比较,动态阈值法与每个像元的植被指数值的季节变化幅度紧密相关,根据研究区条件的不同,可以动态地确定阈值,并消除不同土壤背景值和植被类型的影响,借鉴何月等研究将生长季开始时间阈值设定为30%,结束时设定为10%<sup>[26]</sup>。

### 2.2.2 趋势分析

采用一元线性回归分析方法对每个栅格2010~2019年不同植被指数提取的物候变化趋势进行模拟。每个像元的值则表示这10 a间物候参数的变化趋势,SOS趋势值为负时提前,趋势值为正时SOS延后;对于EOS变化趋势为正时延后,反之,EOS提前;用正趋势来表示LOS加长,负趋势表示LOS减短。

## 3 分析与结果

### 3.1 不同植被指数在选取点上的比较

重庆地形地貌复杂,混合像元较多,为了比较不同植被指数的适宜程度,研究基于不同的土地覆被类型选点进行对比。对土地利用数据、高程数据进行重采样得到250 m分辨率的重庆市土地覆被类型和重庆市高程地形图;将土地覆被类型重分类为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用土地6种。研究选取重庆市覆被较多的耕地、林地和草地3种类型进行研究,在这3种覆被类型上分别选取20个测验点(如图1所示),通过ArcGIS10.5将波动

较大的2014~2017年4 a、3种不同的植被指数值提取至点,使用timesat3.3绘图得到不同覆被类型上的平均拟合曲线;再通过ArcGIS10.5将2010~2020年间的指定时间提取不同植被指数值提取至点,通过分析得到植被指数的统计特征。

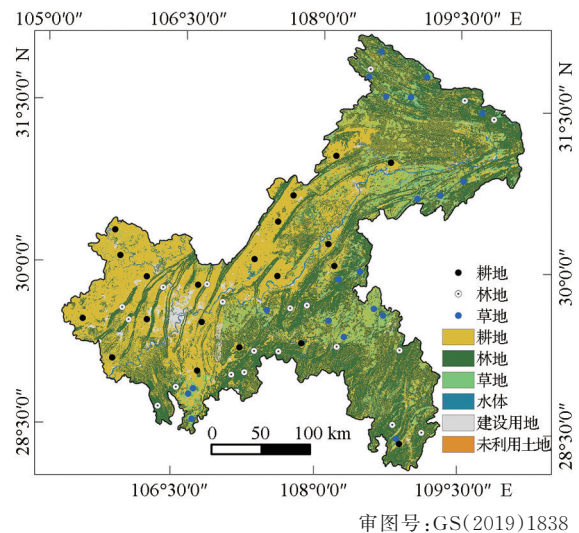


图1 植被覆盖及选点

Fig.1 Vegetation coverage and site selection

#### 3.1.1 植被指数的曲线特征

取各点多年平均数的曲线拟合值与原始值之差作为表征植被指数的离散情况(如林地上的EVI时间序列,将20个点的真实值平均后进行D-L曲线拟合,得到用于提取物候的拟合值,再对应每个时间节点上20个点的真实值,将其相减取绝对值得到差值)。利用差值绘制箱线图如下(图2),从同种植被指数比较不同覆被类型下的差值,发现林地的植被指数离散状况大于草地和耕地,且耕地和草地的变化程度相近,但草地的高差值更高,耕地的变化程度最小。从同种覆被类型进行不同植被指数的比较,NDVI差值的最大值大于EVI和EVI2,箱线图中上下四分位数的宽度也大于EVI和EVI2,总体来看,3种植被指数的离散程度分别是 $NDVI > EVI > EVI2$ 。

取上述60个点2013~2016年的数据值按照土地类型不同进行平均得到9个平均值的数列并进行D-L曲线拟合如下(图3~图5),其中红色为拟合曲线,蓝色为原始值的折线图。不同土地覆被下,植被指数平均值突变数量NDVI最大,EVI和EVI2较为相近,拟合曲线的平滑程度均为NDVI最小,而EVI和EVI2较为相近,通过植被指数提取物候正是通过平滑拟合曲线提取阈值,在数据缺失较多的



区域,EVI与EVI2时间序列更符合植被生长状况, 物候提取结果更准确。

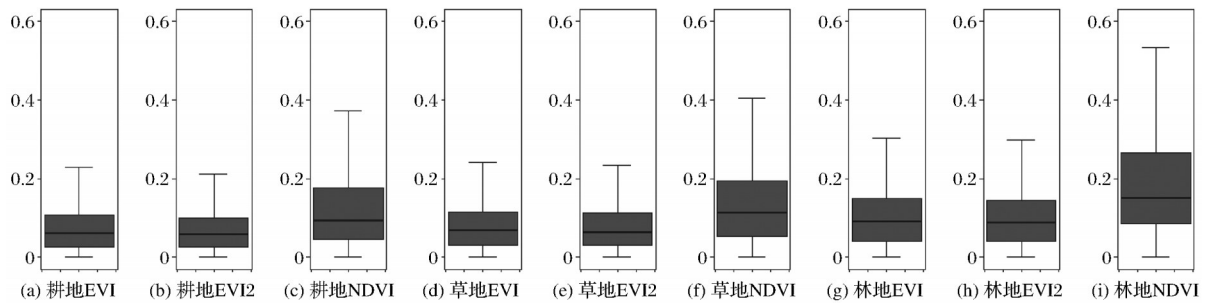


图2 曲线拟合值与原始值差异

Fig.2 Difference between curve fitting value and original value

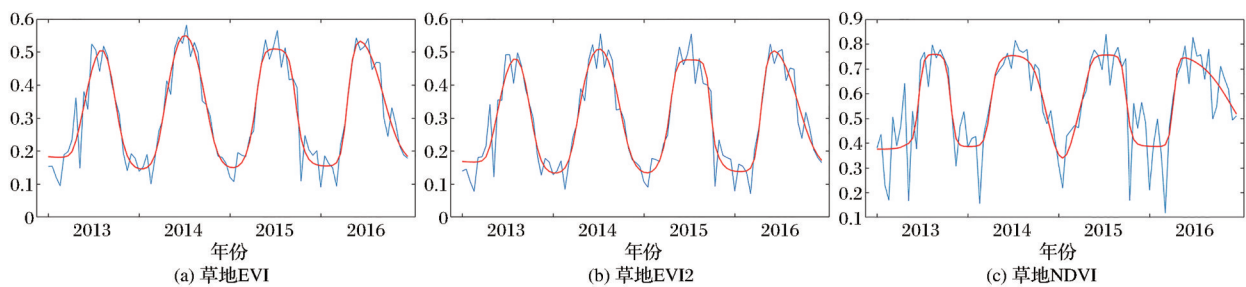


图3 草地EVI、EVI2、NDVI时序以及曲线拟合

Fig.3 Grassland EVI、EVI2、NDVI time series and curve fitting

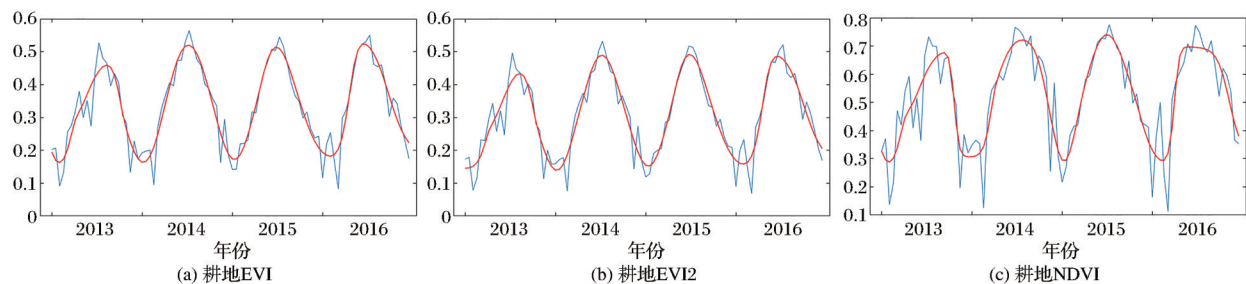


图4 耕地EVI、EVI2、NDVI时序以及曲线拟合

Fig.4 Cultivated land EVI、EVI2、NDVI time series and curve fitting

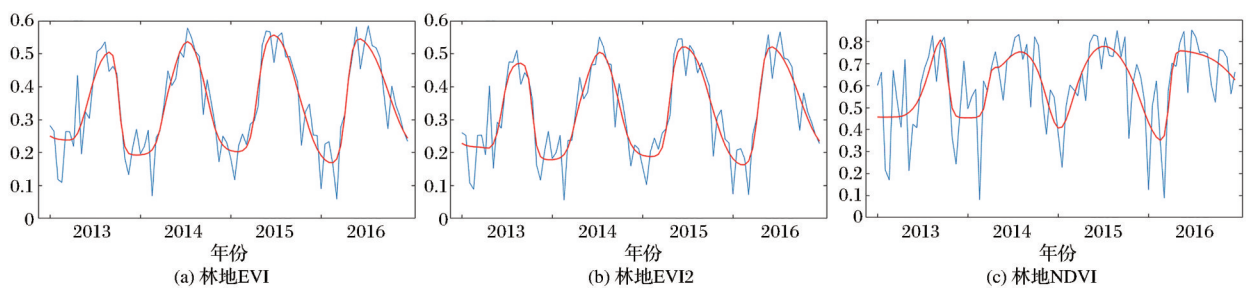


图5 林地EVI、EVI2、NDVI时序以及曲线拟合

Fig.5 Woodland EVI、EVI2、NDVI time series and curve fitting

### 3.2 区域内整体物候提取

#### 3.2.1 多年平均物候结果

提取重庆市10 a间物候情况发现基于EVI/EVI2所提取出的物候更加相近。结合实际来看,重庆地区虽然常有多种植被镶嵌区域,但由于海拔和

温度差较小,区域内物候提取值的差距较小。 $SOS_{NDVI}$ 要普遍早于 $SOS_{EVI}/SOS_{EVI2}$ , $EOS_{NDVI}$ 晚于 $EOS_{EVI}/EOS_{EVI2}$ ,因此 $LOS_{NDVI}$ 也长于 $LOS_{EVI}/LOS_{EVI2}$ 。

分析图6中的信息可发现, $SOS_{NDVI}$ 大多在每年的前80 d内,渝东南和渝东北的山区较晚, $SOS_{EVI}/$



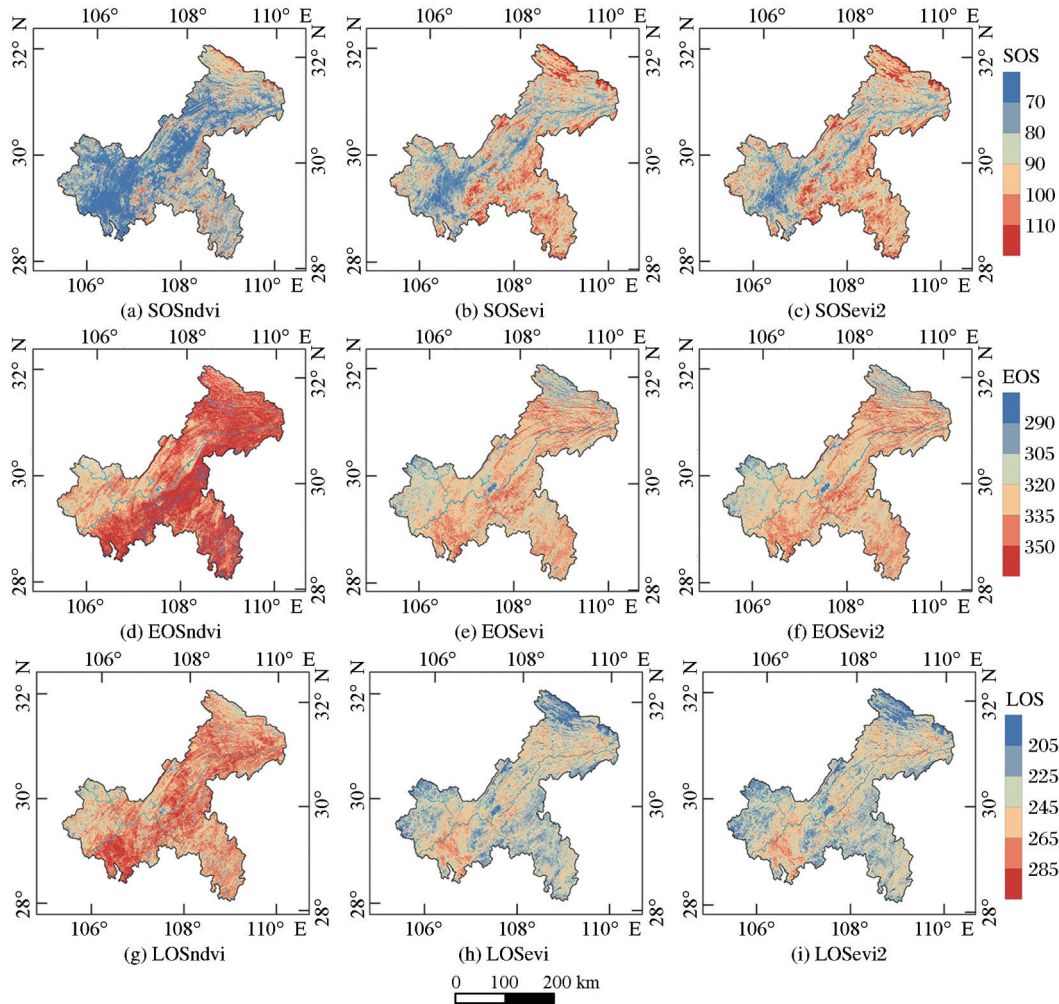
$SOS_{EVI2}$  大多在第 80~100 d 内,区域差距约为 10 d 左右; $EOS_{NDVI}$  大多在第 335 d 以后,且有大部在 350 d 以后, $EOS_{EVI}/EOS_{EVI2}$  大多在 320~350 d 内;从 LOS 来看  $LOS_{NDVI}$  大多在 245~285 d,  $LOS_{EVI}/LOS_{EVI2}$  多在于 225~265 d 之间,东北部秦巴山区的物候期较短。

### 3.2.2 近 10 a 物候变化情况

一元线性回归提取近 10 a 来重庆物候变化情况如图 7。从变化趋势来看,  $SOS_{NDVI}/SOS_{EVI}/SOS_{EVI2}$  变化趋势相近,渝西片区物候部分呈增长状态,即物候推迟;渝东北地区的秦巴山区有连片提前,其他大部提前,部分地区呈提前一延后交替出现,可

能是因为耕地与林地交叉区域导致;在 EOS 的提取上,渝中区域的北部和渝西区域的南部有集中物候末期推迟,其余地区大多为斜率-3~3 的微小变化交叉区域;从 LOS 上看重庆地区物候基本处于延长趋势,  $LOS_{NDVI}$  显示渝东南片区增长较为迅速,斜率达到 5~15,  $LOS_{EVI}/LOS_{EVI2}$  增长快速地区包括渝中区域的北部和渝西南一些区域,渝东南的西北区域也有较为明显的增长趋势。

在 timesat 软件中进行拟合时,会自动将植被指数的缺失时会以-0.3 代替,由于 NDVI 值普遍较大,相较于 EVI 和 EVI2,其缺失后的拟合值与真实值将会有更大的差异。



审图号:GS(2019)1838

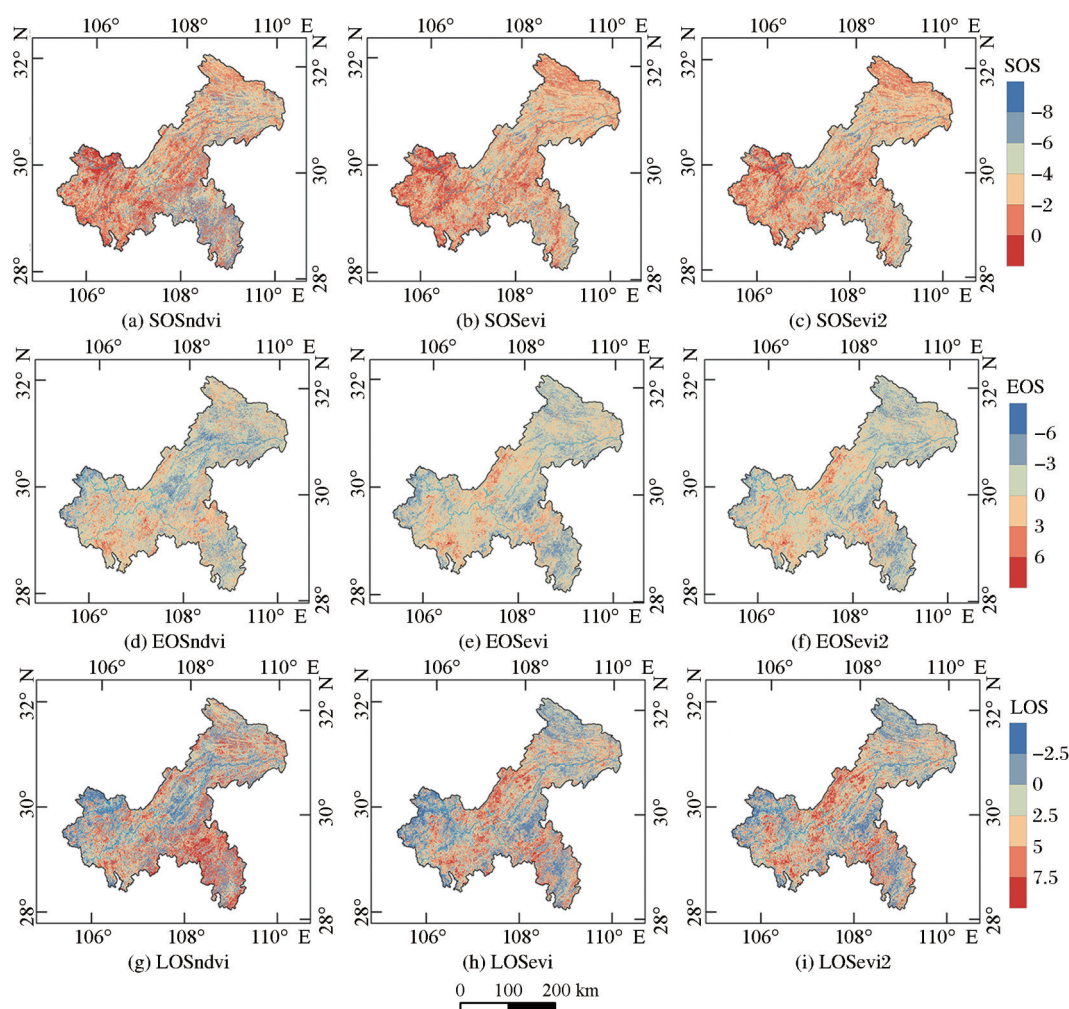
图 6 2010~2019 年关键物候参数 (SOS, EOS, LOS) 提取结果 (day)

Fig.6 Key phenological parameters (SOS, EOS, LOS) extraction results from 2010 to 2019(day)

### 3.2.3 物候结果的差异比较

将 3 种植被指数 10 a 间的 3 种物候参数结果分别相减,得到物候参数差值图(图 8)。由图可知,基于 EVI 和 EVI2 提取的物候参数差值相较于 NDVI

和 EVI、EVI2 的差值更小,两种植被指数物候结果更相近;在 SOS 上,  $SOS_{NDVI}$  与  $SOS_{EVI}/SOS_{EVI2}$  的差值面积最多在 -20~-5 d 之间,分别占 66.07% 和 68.95%,  $SOS_{EVI}/SOS_{EVI2}$  差值在 -5~5 d 之间的面积



审图号:GS(2019)1838

图7 2010~2019年关键物候参数(SOS,EOS,LOS)变化趋势(d·10a-1)

Fig.7 Changes in key phenological parameters (SOS, EOS, LOS) from 2010 to 2019 (d·10a-1)

占93.02%,负值更多源于 $SOS_{NDVI}$ 开始往往更早; $EOS_{NDVI}$ 与 $EOS_{EVI}/EOS_{EVI2}$ 差值最多为5~20 d和20 d以上,面积分别占82.97%(NDVI-EVI)、83.20%(NDVI-EVI2)样 $EOS_{EVI}$ 与 $EOS_{EVI2}$ 差值较小为-5~5 d,面积占89.79%;LOS与EOS相近, $LOS_{NDVI}$ 更长,大多长于 $LOS_{EVI}/LOS_{EVI2}$ (20 d以上,占74.40%和76.35%), $LOS_{EVI}$ 与 $LOS_{EVI2}$ 差值较小,-5~5 d占77.80%。

### 3.2.4 物候始期变化趋势显著性分析

以植被物候始期为例进行变化趋势显著性分析,如图9所示EVI、EVI2和NDVI均具有一致性,主要显著区域出现在渝东北山区和渝中部地区,且 $SOS_{EVI}$ 和 $SOS_{EVI2}$ 与山地走向接近,说明山区物候变化趋势的显著性更高。从显著性区域占比来看 $SOS_{NDVI}$ 显著性水平p值小于0.05占面积的12.37%,为最低,最高为 $SOS_{EVI2}$ 的16.36%, $SOS_{EVI}$

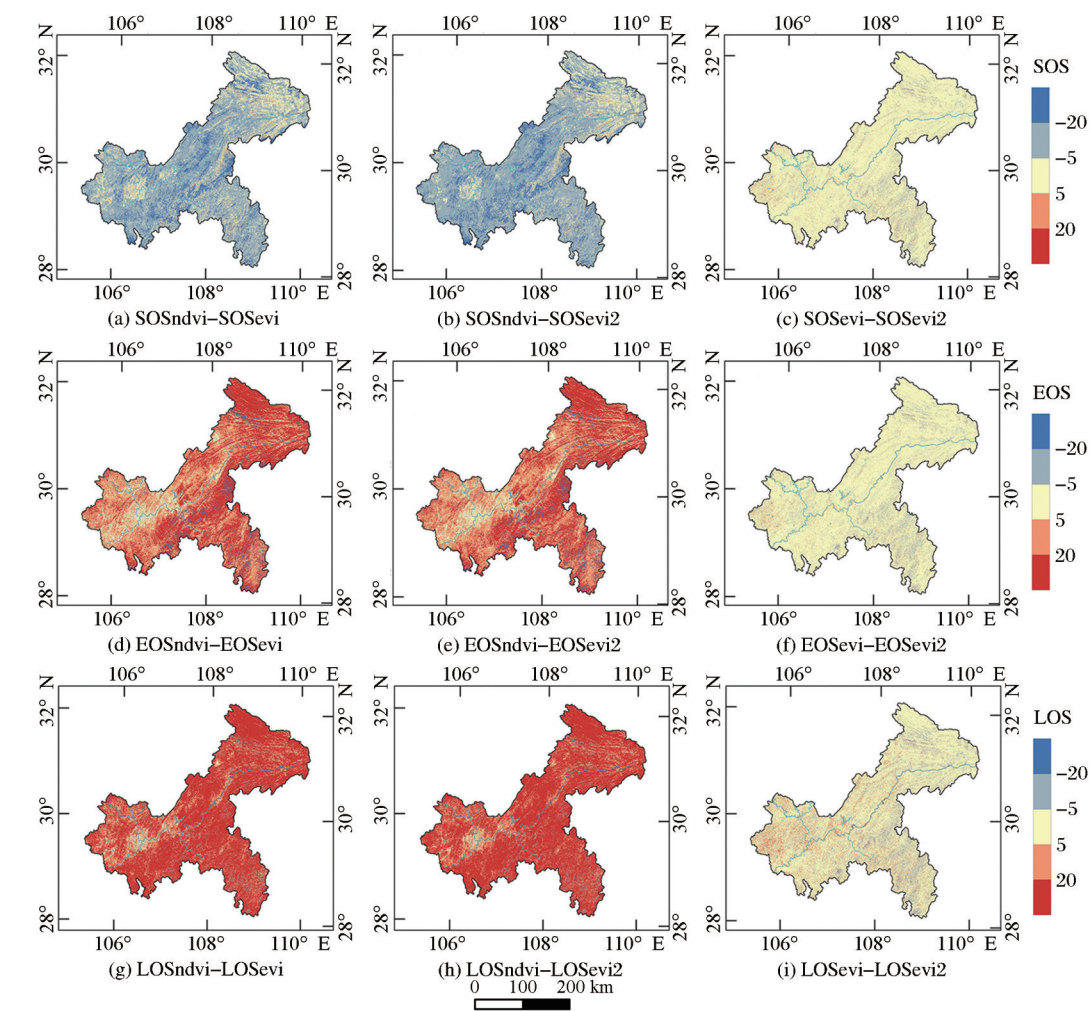
的14.92%居中。在变化显著性上依然为 $SOS_{EVI2} > SOS_{EVI} > SOS_{NDVI}$ ,即EVI2与EVI提取的物候参数更优于NDVI。

### 3.3 不同植被指数在物候结果上的差异

#### 3.3.1 物候缺失情况与不同区域差异

经过分析发现,物候提取结果中有部分不符合逻辑的参数,例如结束期超过每年的365 d、物候天数为负等,将全图132 027个像素点中不符合实际情况的值用0表示,经分析后得出表1,无论从SOS、EOS还是LOS上比较,3种植被指数的缺失值比例均为 $NDVI > EVI > EVI2$ ,从物候参数上看 $SOS > EOS > LOS$ 。

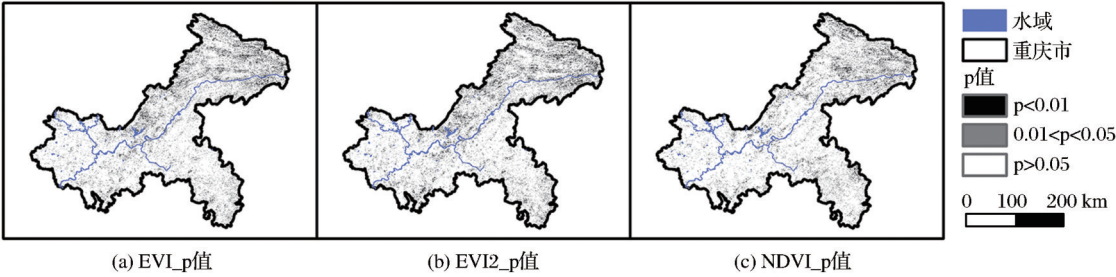
根据重庆市地理气象分区(图10),将重庆市分为东北部、东南部、中部、西北部和西南部5个区域,并根据区域计算物候参数平均值。从物候参数来看,3种植被指数对SOS的提取结果差异最大,其中



审图号:GS(2019)1838

图 8 基于不同植被指数提取的关键物候参数(SOS,EOS,LOS)之间的差值对比

Fig.8 Comparison of the difference between the key phenological parameters (SOS, EOS, LOS) extracted based on different vegetation indices



审图号:GS(2019)1838

图 9 物候始期(SOS)变化趋势显著性

Fig.9 The significance of SOS change trend

表 1 物候参数缺失占比

Table 1 Proportion of missing phenological parameters			
	NDVI	EVI	EVI2
SOS	3.76%	0.61%	0.58%
EOS	1.64%	0.35%	0.33%
LOS	0.01%	0.00%	0.00%

西南部 3 种植被指数的平均 SOS 最早为每年的第 78 d,主要原因在于这片区的  $SOS_{NDVI}$  过早(69 d),东南部 SOS 最晚达到第 93 d;EOS 提取上,除了西北部耕地较多导致的植被生长结束过早以外(321 d),其余地区物候参数相差不大,东北部 333 d、



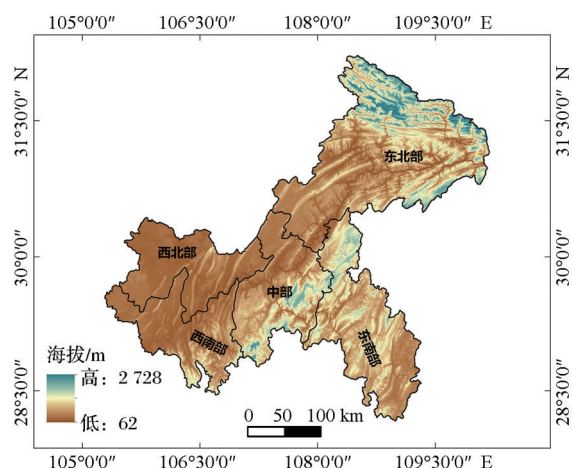


图10 重庆的气象地理分区

Fig.10 Meteorological Geographical Division in Chongqing

东南部 335 d、中部 335 d、西南部 331 d;从 LOS 上看,西北部地区 LOS 最短为 191 d,西南部 LOS 最长,达到 200 d。

对于不同植被指数在同一区域的物候参数结果进行分析,发现在西南部和中部,  $SOS_{NDVI}$  相较  $SOS_{EVI}/SOS_{EVI2}$  提前更多(13~15 d),在东南部提前 11~12 d,东北部和西北部提前 9~11 d;  $EOS_{NDVI}$  在东北部、东南部和中部相较于  $EOS_{EVI}/EOS_{EVI2}$  要晚约 20~23 d,西北部和西南部要分别晚约 10 d 和

16 d;LOS 上的差别与 EOS 相近,在西南部和西北部  $LOS_{NDVI}$  要长于  $LOS_{EVI}/LOS_{EVI2}$  约 17~21 d,东北部、东南部和中部  $LOS_{NDVI}$  普遍长于其余两种植被指数 33~36 d。

### 3.3.2 不同海拔高度上物候参数差异

为了清楚分析 3 种植被指数在不同海拔上的差异,将重庆市海拔高度分为 9 个等级并进行重分类,其中 300~500 m 所在像元数最多(345 656 个, 27.46%),1 500~1 700 m 中像元数最少(35 969 个, 2.86%)。

将结果按照不同物候参数来进行海拔差异比较(图 11)可知,研究区内 3 种植被指数的平均 SOS 从  $SOS_{NDVI}$ 、 $SOS_{EVI}$  到  $SOS_{EVI2}$  依次推迟,  $SOS_{NDVI}$  普遍提前 10 d 左右,随着海拔升高物候期推迟,符合常规认知;在 EOS 上,  $EOS_{NDVI}$  要晚于  $EOS_{EVI}/EOS_{EVI2}$ , 时间从 10~30 d 不等,并且随着海拔升高而先推迟再提前,  $EOS_{NDVI}$  随海拔上升而下降的不明显;从 LOS 上看,  $LOS_{NDVI}$  相比  $LOS_{EVI}/LOS_{EVI2}$  长约 22~50 d,并且差异较大,整体 LOS 随着海拔升高先略微平缓,而后下降较快。在海拔 1 800 m 左右, SOS 和 EOS 差距最大,  $SOS_{NDVI}$  早约 15 d,  $EOS_{NDVI}$  晚约 30 d,1 200 m 时 SOS 差距最小,  $SOS_{NDVI}$  较早 8 d,200 m 时 EOS 差距最小,  $EOS_{NDVI}$  晚 10 d。

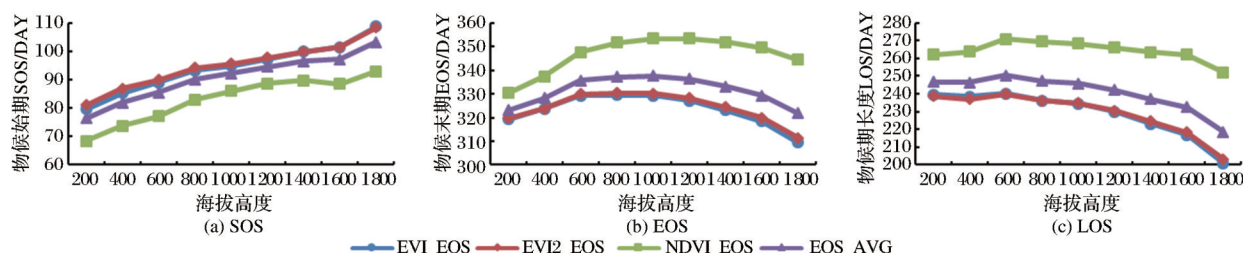


图11 不同海拔上物候参数差异

Fig.11 Differences in phenological parameters at different altitudes

### 3.3.3 不同植被类型上物候参数差异

将重庆主要植被类型分为针叶林、阔叶林、灌丛、草丛、草甸和栽培植物 6 类,计算各类的平均物候如图 12 所示。在物候始期上,物候期从针叶林向草丛逐渐延后,栽培植物略晚,  $EVI_{SOS}$  与  $EVI2_{SOS}$  相近,  $NDVI_{SOS}$  更早于前两者。物候末期差异较明显,针叶林略晚,阔叶林向草丛逐渐延后,  $NDVI_{EOS}$  略晚于  $EVI_{EOS}$  和  $EVI2_{EOS}$ 。从物候期长度看,3 种植被指数提取的物候期长度变化趋势一直,由针叶林先缩短,到阔叶林再向草丛不断延长,在草甸再次缩短,到栽培植物上再延长,其中  $NDVI_{LOS}$  普遍长于  $EVI_{LOS}$  和  $EVI2_{LOS}$  32 d。

特别是  $NDVI$  提取的草甸物候始末期与  $EVI$ 、 $EVI2$  提取的草甸始末期相较于其他植被类型的变化趋势不一致,但在物候期长度上却保持一致。

### 3.3.3 不同坡向和不同坡度上植被物候参数差异

重庆地区耕地、林地占大多数,耕地受人类活动影响较大,选取林地分析坡向与坡度对物候参数的影响差异。将高程地形图通过坡向、坡度计算,得到重庆市 250 m 分辨率坡向图和坡度图,并进行重分类(坡向:北坡 0~22.5°和 337.5~360°、东北坡 22.5~67.5°、东坡 67.5~112.5°、东南坡 112.5~157.5°、南坡 157.5~202.5°、西南坡 202.5~247.5°、西坡 247.5~292.5°、西北坡 292.5~337.5°、平面

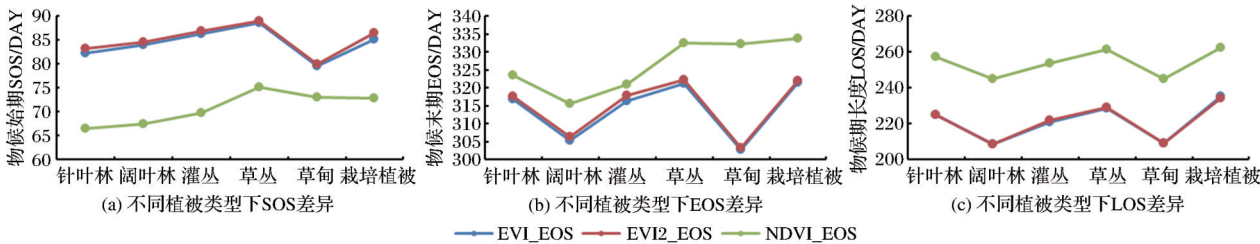


图 12 不同植被类型上物候参数差异

Fig.12 Differences in phenological parameters on different vegetation form

0°<sup>[27]</sup>;坡度:平坡 0~5°、缓坡 5~15°、斜坡 15~25°、陡坡 25~35°、急坡 35~45°<sup>[28]</sup>)。

将不同植被指数提取物候结果从其像素点所在地理位置的坡向上分析(表 2),3 种物候结果大多为偏南的坡向物候参数值更大,在 SOS 上,SOS<sub>NDVI</sub> 普遍早于 SOS<sub>EVI</sub>/SOS<sub>EVI2</sub>,并且均有明显坡向差异,其中 SOS<sub>NDVI</sub> 南向和西南向起始时间最晚,达到 83~84 d,东向最早达到 80 d,SOS<sub>EVI</sub>/SOS<sub>EVI2</sub> 相近,最早为北部的 91 d 和 92 d,依次随着方向向南递增至 95 d 左右;从 EOS 看 EOS<sub>NDVI</sub> 晚于其余两种植被指数物候结果,最晚可达到 350 d,EOS<sub>EVI</sub>/EOS<sub>EVI2</sub> 平均在 320~335 d 之间,整体上看,南坡和西南坡 EOS 最晚,西和东南坡次之,北坡最早,具有明显坡度差异性;分析 3 种植被指数提取的 LOS 发现,LOS<sub>NDVI</sub> 明显东西坡向更长,而南北坡向较短,究其原因是在处理异常值时将大于 365 d 的物候期长度去除,而 LOS<sub>NDVI</sub> 有相当一部分超过了 365 d,遂造成图中差异,LOS<sub>EVI</sub>/LOS<sub>EVI2</sub> 明显由北向南逐渐从 228 d 增长到 238 d。

在坡度分析上发现险坡数量较少,不具有参考意义,将其去掉。经分析得(图 13),3 种植被指数提取的 SOS 从平坡向陡坡逐渐延后(SOS<sub>NDVI</sub>:79~84 d、SOS<sub>EVI</sub>/SOS<sub>EVI2</sub>:约 92~94 d),在急坡上 3 种植被指数 SOS 略有提前 1 d 左右;从 EOS 看,EOS<sub>NDVI</sub>/EOS<sub>EVI</sub>/EOS<sub>EVI2</sub> 结果由平坡向斜坡延后,再向急坡逐渐提前,差别最大的为 EOS<sub>NDVI</sub> 平坡向缓坡的延后可达 5 d 左右;LOS 具有明显坡度分异性,从平

表 2 不同坡向上物候参数差异/d

Table 2 Differences of phenological parameters at all kinds of slopes/d

坡向物候参数	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北
SOS <sub>EVI</sub>	91	92	93	93	95	94	92	91
SOS <sub>EVI2</sub>	92	93	93	94	95	95	93	92
SOS <sub>NDVI</sub>	81	81	80	81	83	83	81	81
EOS <sub>EVI</sub>	319	321	327	331	333	331	328	323
EOS <sub>EVI2</sub>	320	322	328	332	334	332	329	324
EOS <sub>NDVI</sub>	348	348	348	349	350	351	350	349
LOS <sub>EVI</sub>	228	229	235	238	238	237	235	231
LOS <sub>EVI2</sub>	228	229	235	238	239	237	235	231
LOS <sub>NDVI</sub>	267	268	269	269	268	268	269	269

坡到缓坡略有延长,再到缓坡逐渐缩短,LOS<sub>NDVI</sub> 结果中物候期长度可达 265~269 d,LOS<sub>EVI</sub>/LOS<sub>EVI2</sub> 大约为 228~236 d。

4 讨论

数据上,先使用 MRT 软件对 MODIS 源数据进行裁剪、批处理、重投影等,未经滤波而直接进行物候参数提取是因 timesat3.3 软件中的拟合方法本身也是一种滤波方式。使用 ENVI5.3+IDL8.5 和 ArcGIS 进行波段运算等,由于 ENVI 和 ArcGIS 软件具体算法不一致,导致进行矢量裁剪时出现细小的栅格数据行列差异,但对于整体物候提出结果差距并不大,后续研究应当选用同一软件或方法进行数据处理。

植被物候会直接受到气温、降水等方面的影

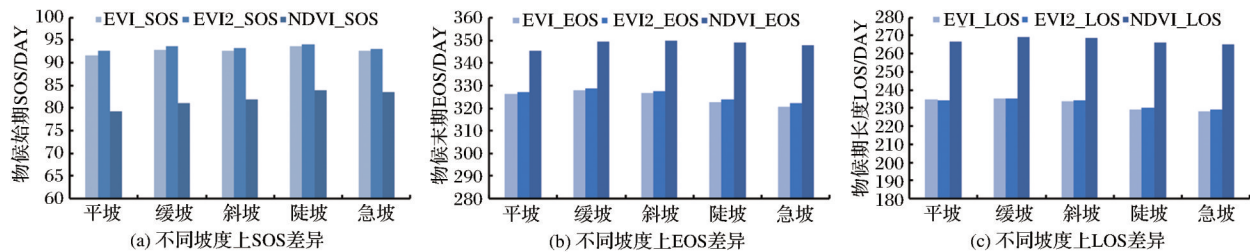


图 13 不同坡度上物候参数差异

Fig.13 Differences in phenological parameters on different slopes

响,为进一步分析其变化原因,选取部分气象要素对林地环境下的植被物候进行相关性研究结果如(如图14):在重庆地区,3月气温并不能显著影响SOS的变化,而九月份降水量对于EOS的影响较大,斜率可达-0.71(EVI,通过显著性检验),同样选取八月日照时数发现也与LOS显著相关,日照时间越长对LOS则越长,3种植被指数均通过显著性检验。

从物候提取结果来看,基于3种植被指数提取的物候参数差异较大,但变化趋势的差异不大,造成几种植被指数提出的物候参数变化差异较小主要是共同反应气候的变化,重在趋势上的改变,物

候提取的实际值则是NDVI大于EVI和EVI2;林地上,随坡向由北向南逐渐推迟,南坡为阳坡,温度较高,植被生长应提前,而结果却相反,可能与植物的冷激效应有关,需进一步深入研究。研究仅选取10 a进行植被指数分析,但往往是长时间物候的变化才更能体现气候的变化,而服役时间较长的传感器 AVHRR 并无蓝色波段,无法提取若 EVI 研究植物生长状况, EVI2 使用红波段和红外波段进行运算解决了 AVHRR 的问题,研究以重庆地区为例的多云雾区域 EVI 和 EVI2 提取物候的异同,有助于替代 NDVI 进行长时间研究物候。

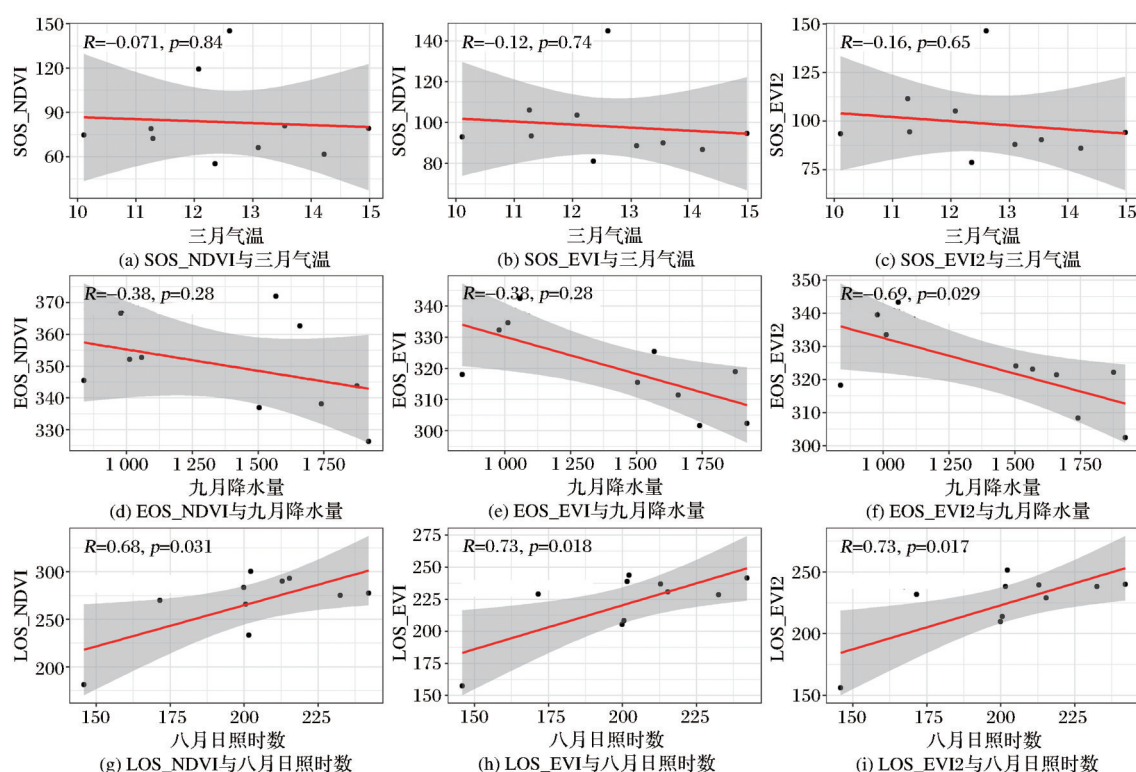


图14 林地上植被物候与气象因素的关系

Fig.14 Relationship between vegetation phenology and meteorological factors on forest land

## 5 结论

(1)在多云雾的重庆地区,由于NDVI存在过饱和现象,其值普遍偏高,且缺失值偏多;经过D-L方法拟合,发现拟合值与原始值之差的主要分布为NDVI(0.05~0.18)、EVI(0.03~0.11)、EVI2(0.03~0.1)。认为EVI和EVI2在该地区提取植被物候要好于NDVI。

(2)相比于EVI和EVI2提取的物候参数,SOS<sub>NDVI</sub>偏早约12 d,EOS<sub>NDVI</sub>偏晚16 d以上,LOS<sub>NDVI</sub>偏长约30 d;基于EVI和EVI2提取的物候参数相差5 d之内的面积比普遍大于77%;SOSNDVI的变化显著

区域占12.37%为最低,最高为SOSEVI2的16.36%,SOSEVI为14.92%。

(3)SOS随海拔升高而推迟,EOS和LOS随海拔升高先推迟和延长,后提前和缩短;LOS<sub>NDVI</sub>/LOS<sub>EVI</sub>/LOS<sub>EVI2</sub>的差值随海拔升高而更大,长约25~49 d。SOS在针叶林最早,草丛最晚;EOS在阔叶林最早,栽培植被和草丛最晚,阔叶林LOS最短,栽培植被最长。

## 参考文献(References):

- [1] GE Quansheng, DAI Junhu, ZHENG Jingyun. The progress



- of phenology studies and challenges to modern phenology research in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2010, 25(3): 310-316. [葛全胜, 戴君虎, 郑景云. 物候学研究进展及中国现代物候学面临的挑战[J]. 中国科学院院刊, 2010, 25(3): 310-316.]
- [2] LIU Changming, Zheng Du, CUI Peng, *et al.* Innovative development and prospect of physical geography [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(12): 2547-2569. [刘昌明, 郑度, 崔鹏, 等. 自然地理学创新发展与展望[J]. 地理学报, 2020, 75(12): 2547-2569.]
- [3] GE Quansheng, ZHENG Jingyun, ZHANG Xuexia, *et al.* Climate and phenology changes in China over the past 40 years [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(10): 42-47. [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.]
- [4] DAI Wujun, JIN Huiyin, ZHANG Yuhong, *et al.* Advances in plant phenology [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6705-6719. [代武君, 金慧颖, 张玉红, 等. 植物物候学研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6705-6719.]
- [5] DUARTE L, TEODORO A C, MONTEIRO A T, *et al.* QPhenoMetrics: An open source software application to assess vegetation phenology metrics [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 148(1): 82-94. DOI: 10.1016/j.compag.2018.03.007
- [6] ROETZER T, WITTENZELLER M, HAECKEL H, *et al.* Phenology in central Europe - differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas [J]. International Journal of Biometeorology, 2000, 44(2): 60-66. DOI: 10.1007/s004840000062
- [7] ZHANG Congcong, MENG Dan, LI Xiaojuan. Spatial and temporal changes of vegetation phenology and its response to urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 249-262. [张聪聪, 孟丹, 李小娟. 京津冀地区植被物候时空变化及其对城市化的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 249-262.]
- [8] LU Peiling, YU Qiang, HE Qingtang. Responses of plant phenology to climatic change [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 923-929. [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, 26(3): 923-929.]
- [9] ZHU Yixuan, ZHANG Yangjian, ZU Jiaying, *et al.* Performance evaluation of GIMMS NDVI based on MODIS NDVI and SPOT NDVI data [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 536-544. [朱艺璇, 张杨建, 祖佳星, 等. 基于 MODIS NDVI、SPOT NDVI 数据的 GIMMS NDVI 性能评价[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 536-544.]
- [10] SONG Fuqiang, KANG Muiyi, YANG Peng, *et al.* Comparison and validation of GIMMS, SPOT-VGT and MODIS global NDVI products in the Loess Plateau of northern Shaanxi Province, northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4): 72-80. [宋富强, 康慕谊, 杨朋, 等. 陕北地区 GIMMS、SPOT-VGT 和 MODIS 归一化植被指数的差异分析[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 72-80.]
- [11] LIU Yuan, ZHOU Maichun. A comparative analysis of AVHRR, SPOT-VGT and MODIS NDVI remote sensing data over Hanjiang River basin [J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(1): 106-112. [刘远, 周买春. AVHRR、SPOT-VGT 和 MODIS 3 种 NDVI 遥感数据在韩江流域的对比分析[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(1): 106-112.]
- [12] XIE Han, TONG Xiaojuan, LI Jun, *et al.* Changes of NDVI and EVI and their responses to climatic variables in the Yellow River Basin during the growing season of 2000-2018 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4536-4549. [解晗, 同小娟, 李俊, 等. 2000~2018 年黄河流域生长季植被指数变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(11): 4536-4549.]
- [13] PAN Xia, GAO Yong, WANG Ji. Response Differences of MODIS-NDVI and MODIS-EVI to climate factors [J]. Journal of Resources and Ecology, 2018, 9(6): 673-680. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2018.06.010
- [14] CHEN Yanli, LUO Yongming, MO Weihua, *et al.* Differences between MODIS NDVI and MODIS EVI in response to climatic factors [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(10): 1802-1812. [陈燕丽, 罗永明, 莫伟华, 等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1802-1812.]
- [15] FREITAS R M. Virtual laboratory of remote sensing time series: visualization of MODIS EVI2 data set over South America [J]. Journal of Computational Interdisciplinary Sciences, 2011, 2(1). DOI: 10.6062/jcis.2011.02.01.0032
- [16] XIE Ziang, ZHANG Chao, FENG Shaoyuan, *et al.* Reviews of methods for vegetation phenology monitoring from remote sensing data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(1): 1-14. [协子昂, 张超, 冯绍元, 等. 植被物候遥感监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(1): 1-14.]
- [17] JI Zhenxia, PEI Tingting, CHEN Ying, *et al.* Vegetation phenology change and its response to seasonal climate changes on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6600-6612. [吉珍霞, 裴婷婷, 陈英, 等. 黄土高原植被物候变化及其对季节性气候变化的响应[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6600-6612.]
- [18] LEI Jun, YAO Yubi, SUN Run, *et al.* Phenological variation and its response to climate warming in semi-arid region of Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(1): 1-8. [雷俊, 姚玉璧, 孙润, 等. 黄土高原半干旱区物候变化特征及其对气候变暖的响应[J]. 中国农业气象, 2017, 38(1): 1-8.]
- [19] WANG Zhigang, CAO Shengkui, CAO Guangchao. Analysis on the drive of temperature and precipitation changes to vegetation phenology of the Qinghai Lake Basin in the past 15 years [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 249-255. [王志刚, 曹生奎, 曹广超. 近 15 年来青海湖流域气温、降水变化对植被物候驱动分析[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 249-255.]
- [20] GUAN Qihui, DING Mingjun, ZHANG Huamin. Spatiotemporal variation of spring phenology in alpine grassland and response to climate changes on the Qinghai-Tibet, China [J]. Mountain Research, 2019, 37(5): 639-648. [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.]
- [21] YANG Qi, LI Shuheng, LI Jiahao, *et al.* Phenology of forest vegetation and its response to climate change in the Qinling Mountains [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1065-1074. [杨琪, 李书恒, 李家豪, 等. 秦岭森林植被物候及其对气象因子的响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1065-1074.]
- [22] DENG Chenhui, BAI Hongyin, GAO Shan, *et al.* Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qinling Mountains region during 1964-2015 [J]. Acta Geographica Si-

- nica, 2018, 73(5):917-931.[邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 1964-2015年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应[J]. 地理学报, 2018, 73(5):917-931.]
- [23] CAI Z, JÖNSSON P, JIN H, *et al.* Performance of smoothing methods for reconstructing NDVI time-series and estimating vegetation phenology from MODIS data[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12): 1271. DOI:10.3390/rs9121271
- [24] LI Jun, ZHU Hui. The reconstruction of MODIS/NDVI time series data in Chongqing[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(3):437-444.[李军, 朱慧. 重庆地区MODIS/NDVI时间序列数据重建研究[J]. 地理科学, 2017, 37(3):437-444.]
- [25] LAI Xiaohong, LI Mingyang, LIU Cong, *et al.* The phenological responses of plants to the heat island effect in the main urban area of Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19):7025-7034.[赖小红, 李名扬, 刘聪, 等. 植物物候对重庆主城区热岛效应的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(19):7025-7034.]
- [26] HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, *et al.* Vegetation phenological variation and its response to climate changes in Zhejiang Province[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(2): 220-233.[何月, 樊高峰, 张小伟, 等. 浙江省植被物候变化及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2013, 28(2):220-233.]
- [27] ZHANG Qian, YAO Baohui, WANG Chan, *et al.* Soil physical and chemical characteristics and microbial proportions in an alpine meadow with different slopes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9):3167-3174.[张倩, 姚宝辉, 王缠, 等. 不同坡向高寒草甸土壤理化特性和微生物数量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3167-3174.]
- [28] XU Shaojun, ZENG Bo, SU Xiaolei, *et al.* Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS / GIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7):2174-2184.[徐少君, 曾波, 苏晓磊, 等. 基于RS/GIS的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2174-2184.]

## A Comparative Study on the Extraction of Phenological Parameters in Chongqing Area based on Different Vegetation Indices

LI Yunlong<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2,3</sup>, CHANG Ziyu<sup>1</sup>

(1.College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

2.Key Laboratory of GIS Application of Chongqing, Chongqing 401331, China;

3.Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Processes and Environmental Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** It is an important basis of analyzing long-term phenological changes that extracting phenological parameters based on different vegetation indices. Takes the cloudy and foggy area, Chongqing, as an example. Three long-term vegetation index data of NDVI, EVI, and EVI2 are extracted based on MODIS remote sensing images from 2010 to 2019, and the characteristics of different vegetation indexes are analyzed through D-L filtering. The results, which is of phenological parameters extracted based on three vegetation indices, were studied using dynamic threshold method and trend analysis method, and their response relationships and differences to topographic factors are compared. The results are as follows: ① The time series fitting curve of EVI and EVI2 is smoother than the fitting curve of NDVI. The differences between the original values of the three vegetation indices and the fitted values are mainly distributed in NDVI (0.05~0.18), EVI (0.03~0.11), EVI2 (0.03~0.1). ② The spatial distribution and change trend of the phenological parameters extracted from the three plantations were consistent. The vegetation index parameters extracted from EVI and EVI2 were similar, accounting for more than 79% within 5 days, and the significant change area of  $SOS_{EVI2}$  was the highest (16.36%), while the lowest  $SOS_{NDVI}$  was 12.37%. ③  $SOS$  was delayed with the increase of altitude,  $EOS$  was delayed and then advanced with the increase of altitude,  $LOS$  was extended and then shortened with the increase of altitude, and  $EOS_{NDVI}$  and  $LOS_{NDVI}$  were significantly different from  $EO_{SEVI}/EO_{SEVI2}$  and  $LOS_{EVI}/LOS_{EVI2}$  with the increase of altitude, respectively. The phenological parameters extracted by EVI were similar to those of EVI2, and the variation trend was consistent. The phenological parameters can be better extracted based on EVI/EVI2 in cloud and fog areas, and the results are similar and can be used interchangeably. The phenological parameters extracted based on EVI and EVI2 have more obvious differences in altitude, slope, and slope direction.

**Key words:** Cloudy and foggy areas; MODIS vegetation index; Vegetation phenological parameters; Topographic factors