

贵州省不同地貌类型下植被物候时空 变化及其对气候的响应

任荣仪 贺中华 夏传花 张浪 杨铭珂¹

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025)

【摘要】: 为研究贵州省物候变化特征及其影响因素, 基于 2002~2017 年 MCD12Q2 数据和气候资料, 采用数理统计方法对贵州省植被变化及其对气候变化的响应进行探讨。结果显示: (1) 贵州省植被生长始期(SOS)呈现出由东向西逐渐延迟的经向空间分布特征; 在各地貌区中, SOS 相对较早的是 I 区, 而相对较晚的是 VI 区。生长末期(EOS)较早的地区相对集中于 II、V、VI 区的西部地区, 而较晚集中于 V 区的东部及北部和 IV 区的西南部。生长季长度(LOS)偏短的地区集中分布于 III、V 区的西部及 VI 区, LOS 较长的地区集中分布于 I、IV 区的西部及 V 区的东部。(2) 贵州省多年平均 SOS 为第 86d, VI 区最晚, I 区最早。多年平均 EOS 为第 333d, 其中 V 区最晚, II 区最早。16 年平均 LOS 为 247d, IV 区最长, VI 区最短。(3) SOS 平均以 $4.2d \cdot (10a)^{-1}$ 的速率不显著提前; VI 区提早速率最大; IV 区提早速率最小。EOS 以 $3.9d \cdot (10a)^{-1}$ 的速率不显著推迟, V 区的推迟速率最大, II 区推迟速率最小。LOS 以 $2.8d \cdot (10a)^{-1}$ 的速率延长; VI 区延长速率最大, I 区延长速率最小。(4) 贵州省物候期受海拔的影响, 海拔每上升 1000m 会导致 SOS 推迟 15d, EOS 提前 4d, LOS 缩短 20d 左右。(5) SOS 与 6 月气温之间存在极显著负相关性, EOS 与 9 月降水存在显著正相关。研究结果发现了贵州省植被物候的变化特征、变化趋势和变化速率, 分析发现物候的变化和海拔、6 月气温和 9 月降水存在密切联系。

【关键词】: 植被物候 时空变化 地貌 气候 贵州省

【中图分类号】: Q948 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)01-0113-11

植被物候是指自然界中的植物在受到气候或其他环境因子的影响, 出现以年为周期的重复性变化的生物现象, 是植被长期适应季节性变化和环境影响而形成的生长发育节律^[1], 因此, 植被物候可以直观的反映气候变化和环境变化特征, 是衡量气候与环境变化的重要指标^[2]。

传统的物候观测主要是通过人工进行野外实地观测^[3,4], 它能够准确客观的记录植被的生长变化, 但无法实现连续覆盖大范围区域的研究^[5], 而卫星遥感数据具有时效性好、覆盖范围广、信息获取方便等特点, 在很大程度上弥补了传统观测的缺点, 成为研究大尺度区域的植物物候研究的重要手段^[6,7]。

不少学者将卫星遥感数据对不同尺度区域的植物物候进行探讨, 一些研究表明全球尺度植被季节性的空间分布主要受到纬度气候、植被类型和地形要素的综合影响, 北半球中高纬地区受光和热的影响更强烈^[8,9], 欧洲大陆和北部地区生长季延长幅度最大, 大西洋和草原地带的生长季平均长度缩短趋势, 其生长季始期(Start of Season; SOS)、生长季末期(End of Season; EOS)

作者简介: 任荣仪(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水资源遥感与 GIS 应用. E-mail: renrongyi@126.com; 贺中华 E-mail: zhonghuahe@gznu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(u1612441; 41471032); 贵州省水利厅自然科技项目(KT201402)

的物候发生了广泛变化^[10];1992~2012年整个热带干旱地区的 SOS、EOS 总体呈现延迟倾向,有 50%的区域具有十分明显的物候变化,研究发现降水变化和木本植被变化是热带干燥生物群落物候趋势的主要驱动变量,而火灾事件和土地覆盖变化被认为是次要驱动变量^[11];中国温带地区植物生长季长度 (Length of Season; LOS) 呈现增长,春季呈现提前,秋季呈现延迟的变化趋势^[12];中国的松嫩平原和辽河平原等地区的淡水沼泽中,降水是决定物候始期的主要因素,冬季和春季降水的增加会促进 SOS 的提前;1~4 月降水减少,3 月和 4 月气温下降会导致内蒙古东部的淡水沼泽的 SOS 延迟^[13];青藏高原秋季物候受环境变化的影响,生长季长度的变化在空间上呈现出差异性,秋季的平均气温,降水和日照时长对生长季产生积极影响,而夏季平均温度和人日照时长影响作用则相反^[14];华北地区农作物物候期在空间和数量上受外界环境(温度、降水及光照等)的影响,在不同生长季呈现出显著的差异性,其空间分布存在较为显著的纬度地带性,即纬度递减作物种植类型呈现出由简单向复杂变化的趋势^[15];西北地区农业植被物候在海拔低于 2km 区域主要受人类活动的影响,物候始期相对提前,物候末期呈现推迟,生长季的长度增长;而随海拔的升高,温度下降,物候始期出现推迟,物候末期提前,植被生长季长度缩短^[16];陕西省植被物候空间分布受地形地貌的影响较为明显,具有较好的一致性,且由纬度变化引起的南北差异明显^[2];秦岭地区植被物候受春秋季节温度的影响比较明显,研究发现 3 月的温度每增加 1℃ 会促进物候始期提前 2.1d,而 9 月的温度每增加 1℃ 物候末期会延迟 1.5d^[17];贵州省森林物候变化受纬度地带性影响较弱;经度地带性对生长始期、长度的影响较为显著,但对物候末期影响不大,垂直(海拔)地带性对物候影响十分显著^[18],不同森林类型对温度、降水的响应存在差异性,总体而言,降水对森林物候期的影响程度大于温度,冬季干旱会导致生长季始期推迟,而春冬季降水增加的同时秋季出现小幅度增温,植被物候始期会提前而末期会推迟^[19],石漠化程度在一定程度上对植被物候产生影响,呈现出石漠化程度越高生长季结束越早,但地形和气候对物候的影响比石漠化更为显著^[20]。综合看来,植被物候存在地域差异,而在相同地区不同时间段,对物候产生影响的主导因子也不一样,因此精细的研究中尺度区域的物候变化及其驱动因子,对于区域生态环境的了解和环境保护有深远意义。

本文基于 2002~2017 年的 MODISMCD12Q2 数据分析贵州省不同地貌类型的物候时空变化特征,利用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验分析各物候参数变化趋势结合海拔、气温和降水等因子做相关性分析,以期发现研究区物候的地域变化特征及影响因子,为环境评估及保护提供科学的依据。

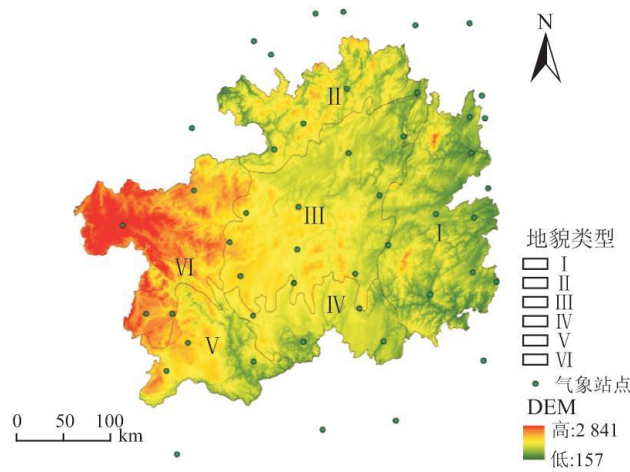


图 1 贵州地形、地貌区划及气象站点分布

1 研究区概况

贵州省位于中国西南喀斯特地区的中心区域,区域内碳酸盐岩广泛分布,其面积约占贵州省总面积的 73%左右,是桂北、滇东、湘西、及川东等喀斯特集中连片区的中心,区域内喀斯特地貌发育强烈,类型齐全,分布广泛,是喀斯特地貌类型庞杂纷繁的自然综合体^[21, 22, 23];由于长期强烈的岩溶作用形成了有别于其它地区的特殊的二元三维结构,这种结构对水分保持能力很差、

水资源漏失、深埋,再加上喀斯特地区土壤层薄、土壤贫瘠等特点,其生态系统十分脆弱,植被的生长条件恶劣;其地形起伏大,地势西高东低,海拔在 157~2841m 之间;气候属于亚热带湿润季风,多年年均降水量约为 1142mm 左右,年均气温在 16℃左右。在水文地貌区划中,根据贵州省的地形起伏、地势变化和河流切割等自然因素的综合作用,将其划分为:黔东南山地丘陵(I)、黔北中山峡谷(II)、黔中山原丘陵宽谷盆坝(III)、黔南山地谷盆(IV)、黔西南高原山地峡谷(V)、黔西北高原中山(VI)6个地貌区(图 1);其中 I 区的平均海拔为 745.16m,是平均海拔最低的区域;VI 区为 1778.69m,其平均海拔最大;其余区域平均海拔分别为 II 区 982.43m;III 区 1080.55m;IV 区 936.89m;V 区 1128.52m;海拔高度自东向西增大。

2 数据与方法

2.1 数据来源

(1)MCD12Q2 数据:来源于美国国家航空航天局的 MODIS 地面覆盖产品数据(<https://lpdaac.usgs.gov/>),时间分辨率为 2002~2017 年,空间分辨率为 500m×500m。该物候产品是以 MODISEVI 作为数据源,对 EVI 数据进行云、气溶胶、雪和观测角等去异常值等预处理,采用固定窗口(连续 5 个时相 EVI 值)来判断时间序列中植被持续增长和持续下降的时间区间,当所在时间区间极大值和振幅达到阈值条件后,即可判断出植被的有效周期。对每一个生长周期,均采用分段 Logistic 函数拟合,根据区曲率变化的极值点,确定物候始期、EVI 持续增加的点、植被成熟期、峰值期、EVI 持续下降的点、物候末期等关键时间节点。产品一年最多纪录两个生长周期^[24]。(2)气温、降水数据:来源于中国气象网(<http://data.cma.cn/>)的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),该数据集在发布前已经过质量完整性检测,数据正确率接近 100%;文章选取贵州省及其周边地区逐日的气象站点作为基础数据。(3)DEM 数据:来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30m×30m。

2.2 数据预处理

(1)MCD12Q2 数据:利用 MRT 软件对影像数据转化格式并重新定义投影坐标,利用贵州省矢量边界裁剪出研究区范围,物候主要针对植被,裁剪过后会出现一些无植被的空白区域。(2)气候数据:月均和年均温度数据是利用各站点逐日平均气温相加求平均所得;月降水数据是利用各站点逐日累计降水求和获取,年均降水数据是利用月降水求平均,基于 ArcGIS 软件,利用 Spline 函数插值法生成 500m×500m 的气象栅格数据集。(3)DEM 数据:利用 ArcGIS 软件对其重采样,获取与物候数据相同分辨率的栅格数据集。

2.3 研究方法

2.3.1 Theil-SenMedian 趋势分析和 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验可用于计算长时间序列的趋势性和显著性,已广泛适用于植被的长时间序列分析^[25,26,27],其最大的优点是数据不需要服从一定的分布,且对数据误差具有较强的抵抗能力,对显著水平的检验具有较为坚实的统计学理论基础,其结果较为科学可行。文章利用 IDL 语言,计算 2002~2017 年物候参数的变化趋势和显著性检验;当 Theil-Sen Median 趋势的斜率 $Slope > 0$ 时,表示 SOS 或 EOS 具有延迟趋势,LOS 具有增长倾向;反之则有提前或缩短的趋势。Mann-Kendall 检验用于检测变化趋势的显著性,一般情况,显著水平 $P \leq 0.01$,统计量 $|Z| \geq 2.58$; $P \leq 0.05$, $|Z| \geq 1.96$;结合二者结果划分为:极显著提前\缩短 ($Slope \leq 0, P \leq 0.01$),显著提前\缩短 ($Slope \leq 0, 0.01 < P \leq 0.05$),不显著提前\缩短 ($Slope \leq 0, P > 0.05$),不显著延迟\增长 ($Slope > 0, P > 0.05$),显著延迟\增长 ($Slope > 0, 0.01 < P \leq 0.05$),极显著延迟\增长 ($Slope > 0, P \leq 0.01$)6 种变化类型。Theil-SenMedian 趋势分析和 Mann-Kendall 统计检验方法的计算公式详见文献[28]。

2.3.2 相关性分析

相关性分析用于定量分析自变量降水或气温与因变量物候始末期的相关性，找到与物候始末期较为显著的控制因子，在逐像元分析具有显著相关的物候期与气象因子之间的关系，相关系数 $|r|=\pm 1$, $r\leq 0$ 表示负相关, $r>0$ 表示正相关; 利用 F 检验对相关系数的结果做显著性检验, 当显著水平 $P\leq 0.01$ 时表示极显著, 当 $0.01<P\leq 0.05$ 表示显著, $P>0.05$ 表示不显著; 即: 极显著负相关 ($r\leq 0, P\leq 0.01$), 显著负相关 ($r\leq 0, 0.01<P\leq 0.05$), 不显著负相关 ($r\leq 0, P>0.05$), 不显著正相关 ($r>0, P>0.05$), 显著正相关 ($r>0, 0.01<P\leq 0.05$), 极显著正相关 ($r>0, P\leq 0.01$) 6 种相关关系。计算公式详见文献[29]。

3 研究结果

3.1 植被物候变化特征

3.1.1 植被物候多年均值的空间分布特征

图 2 展示了贵州省遥感植被物候 2002~2017 年间平均值的空间分布, 总体上植被物候在空间分布存在东西差异; 各物候期随地貌差异出现区域性差异, 其空间分布特征与贵州省不同的地形地貌分布有较好的一致性。文章分析考虑到不同地貌分区面积不同, 在统计不同物候时间段所占面积统计时, 采用对应时间段面积比上对应地貌总面积的百分比作为比较指标。

不同的物候期, 贵州省遥感植被物候的空间分布差异不同。从图 2a 可以看出植被的 SOS 表现出由东向西逐渐延迟的经向分布特征, 不同地貌类型间存在差异性; VI 区的西部和 V 区的西部及北部是 SOS 较晚的主要集中区域, 其中大于 120 天的区域面积占对应地貌区面积的 3.97% 和 2.18% (图 2b) 而其余地貌的面积比例均未超过 0.1%; VI 区物候始期主要集中于 80~90d (33.78%) 和 90~100d (27.30%), V 区物候始期主要集中在 70~80d (32.97%) 和 80~90d (29.75%); III 区和 II 区物候始期分布较为集中, 大部分区域的时间在 70~80d 和 80~90d, 但二者物候期比例存在差异性, III 区的面积比例为 64.01% 和 21.07% 而 II 的为 47.76% 和 43.84%。I 区物候始期来得更早一些, 其时间主要集中在 60~70d (19.23%) 和 70~80d (63.77%)。

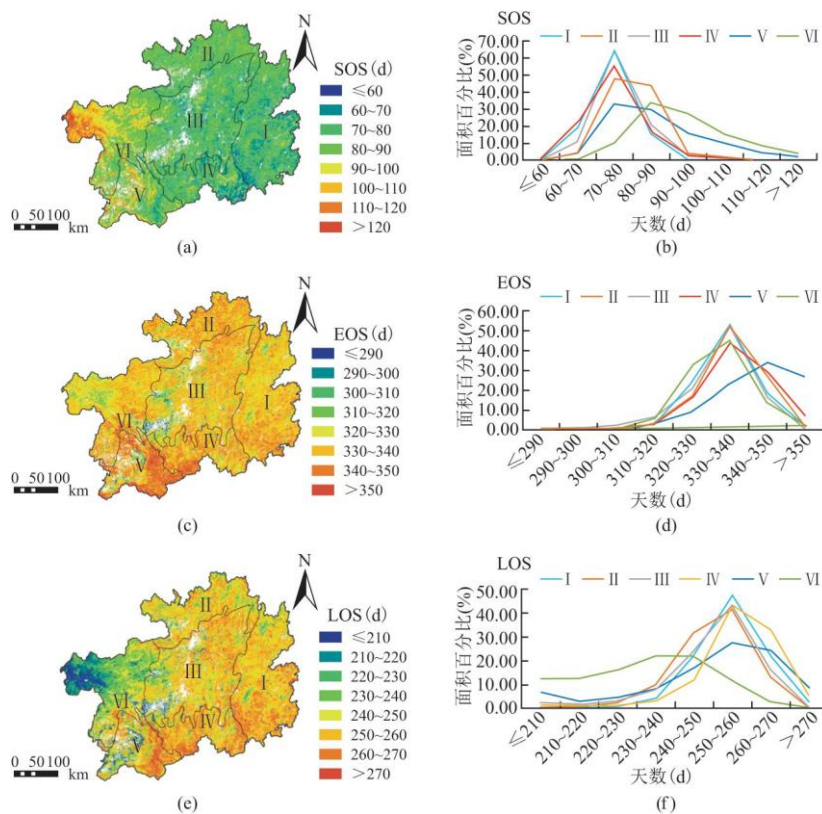


图 2 遥感植被物候 2002~2017 年间均值的空间分布特征及面积占比

EOS 的空间分布差异不如 SOS 明显, 根据图 2c, 可以分析出空间上 V 区的西部, III 区西北部、西部及西南部和 VI 区的西部地区是物候末期来得较早且集中的地区, 而物候末期晚的集中区域在 V 区的东部及北部和 IV 的西南部, II 的物候末期偏晚但分布较为分散。结合图 2d 可分析出不同地貌的物候末期的变化情况存在异同性, 各地貌的物候末期随时间推移面积比例先增加后减少, I、II、III、IV、VI 区物候末期在 330~340d 区域的面积均占对应地貌面积的 1/2 左右; 其中 I、II、III 区的变化接近“单峰”型, VI 区次峰值在 320~330d, 而 IV 区的次峰值在 340~350d, 其面积比均接近该地貌的 1/3。V 区的时间是最晚的, 末期时间 >350d 的区域面积比超过该地貌的 1/4 (26.49%), 其余地貌在此时间段的面积比均未达 10%; 而 V 区面积占比最大的时间段在 340~250d, 为 33.70%。

LOS 受 SOS 和 EOS 的共同影响, III 区的西部及西南部、V 区的西部和 VI 区大部分地区生长季长度较短的集中地区, I 区西南部、IV 区的西部和 V 区的东部及东南部则是生长季长度较长的集中区域 (图 2e)。根据图 2f 可知 VI 区生长季长度变化较为平缓, 其峰值为 22.02%, 时间长度为 230~240d 之间, 而次峰值为 21.94%, 时间长度在 240~250d, 而晚于 270d 的区域面积比仅为 0.25%, 说明此区域生长季时间持续不长且面积比例相差不大。其余地貌区面积占比最大集中在 250~206d 期间, 其中 II 区 31.54% 的区域生长季长度分布于 240~205d, 而 IV 区的则有 32.88% 的区域生长季长度延长到 250~260d。这样的空间分布特征可能是对应地貌的海拔、温度和降水共同作用的结果。

3.1.2 植被物候年际变化特征分析

图 3 展现了 2001~2017 年贵州省及不同地貌类型下遥感物候的平均变化特征。由图 3a 可以看出各地貌区的生长始期均有提前趋势, 发现除 VI 区变化速率通过显著性检验 ($P=0.05$), 其余地区均未通过检验, VI 区的提早速率是最大的, 为 $7.7d \cdot (10a)^{-1}$; IV 区是提早速率最小的, 为 $1.8d \cdot (10a)^{-1}$; 贵州省平均提早 $4.2d \cdot (10a)^{-1}$ 。16 年全省平均始期为第 86d (3 月 27 日左右), 变化范围为第 76~99d (3 月 16 日~4 月 9 日); 各地貌区中 SOS 最晚的地区是 VI 区, 为 100 天 (4 月 10 日), 变化范围为第 90~113 天 (3 月 30 日~4 月 23 日), SOS 开始最早是 I 区, 为第 80d (3 月 20 日), 变化范围为第 69~88d (3 月 9 日~29 日), 提早速率为 $3.2d \cdot (10a)^{-1}$; 最晚地区与最早地区物候相差近一个月, 结合 I 与 VI 可分析分析出贵州省东部与西部物候相差 1 个月。

图 3b 反映了生长季末期年均变化情况, 各地区的生长季末期主要呈现推迟的趋势, 其中 III、V、VI 区通过了显著性检验 ($P<0.05$), 贵州省平均推迟 $3.9d \cdot (10a)^{-1}$, 推迟速率最大的是 V 区, 为 $6.7d \cdot (10a)^{-1}$; 最小推迟速率是 II 区, 为 $0.60d \cdot (10a)^{-1}$; 贵州省多年年均生长季末期为第 333d (11 月 30 日), 变化范围为第 327~341d (11 月 24 日~12 月 9 日); V 区的平均物候末期为 339d (12 月 6 日), 变化范围为第 328~349d (11 月 23 日~12 月 16 日), 是物候末期相对较晚的地区; 而 II 区则是相对较早的地区, 其平均物候末期在第 335d (12 月 2 日), 变化范围为第 329~343d (11 月 26 日~12 月 10 日)。

研究时间段内生长季的长度年际变化具有延长的倾向, 其中贵州省平均延长 $2.8d \cdot (10a)^{-1}$, V 区平均延长 $10.4d \cdot (10a)^{-1}$, VI 区平均延长 $14.2d \cdot (10a)^{-1}$, 三者均通过了显著性检验 ($P<0.05$) 其中 VI 区变化速率最大, 而 I 区最小变化速率为 $4d \cdot (10a)^{-1}$ ($P>0.05$); 16 年平均生长季长度为 247d, 波动范围为 234~258d; IV 区的平均生长期是最长的, 为 255d, 波动范围在 244~274d; VI 区的平均生长期长度最短, 为 231d, 波动范围在 213~246d。

3.1.3 物候年际变化趋势空间分布

根据图 4a 可知, 贵州省大部分地区生长始期变化不显著, 极显著提前和显著提前的区域主要集中在研究区西部的 VI 地貌区, 该变化趋势的面积分别占 VI 区总面积的 12.10% 和 16.12%, 通过显著性检验的区域面积之和超过 VI 区面积的 1/4, 而其余地貌则不超过 1/8; 极显著推迟和显著推迟的区域面积占比均不大, 其中 V 区的东南地区是极显著推迟和显著推迟的相对集中区域, 其面积分别占 V 区总面积的 1.05% 和 3.07, 其余地貌面积占比相对较小, 均不超过对应地貌区总面积的 1.1%。

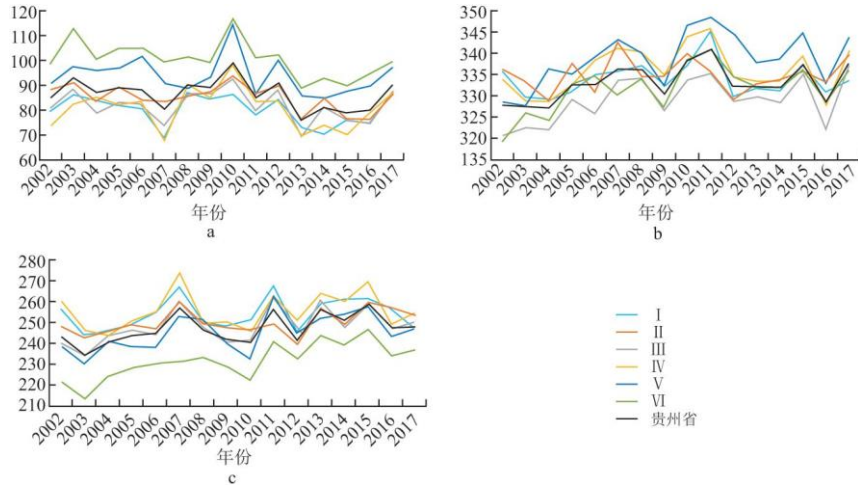


图 3 2002~2017 年贵州省不同地貌类型下植被遥感物候年际变化

贵州省大部分地区的生长季末期变化不显著，极显著提前和显著提前的区域面积占比均减少，各地貌区极显著提前区域的面积占比均不足 1%，而显著提前的区域面积占比最大的为 3.40%，分布于研究区的北部地区的 II 地貌区，总体上通过显著检验的提前趋势的面积占比小且空间分布不明显；极显著推迟和显著推迟面积比最大约为 9.76%和 10.63% (VI区)，主要集中在分布在 VI区的西北部和东南部区域，其余地貌区的面积占比均未超过该地貌区面积的 1/8，其中面积占比最小的分别为 0.75%和 2.83% (I区)。空间上，贵州省自东北向西南 EOS 的变化趋势由提前向延迟过渡 (图 4b)。

贵州省大部分地区生长季长度具有增长的趋势，其中不显著增长所占面积占比比较大接近 1/2 左右，其中通过显著性检验区域的面积占比最大的是位于研究区西部的 VI地貌区，其面积占比为 35.91%，其中极显著增长的面积比为 19.68%及显著增长的为 16.23%；而其余地貌通过显著性检验的面积最大未超过 15%，集中分布在 V区的西部、北部和东北部地区；最小仅为 4.57% (I区)。极显著缩短和显著缩短的面积占比均很小，不足 3%，分布最集中的是在 V区的南部区域 (图 4c)。

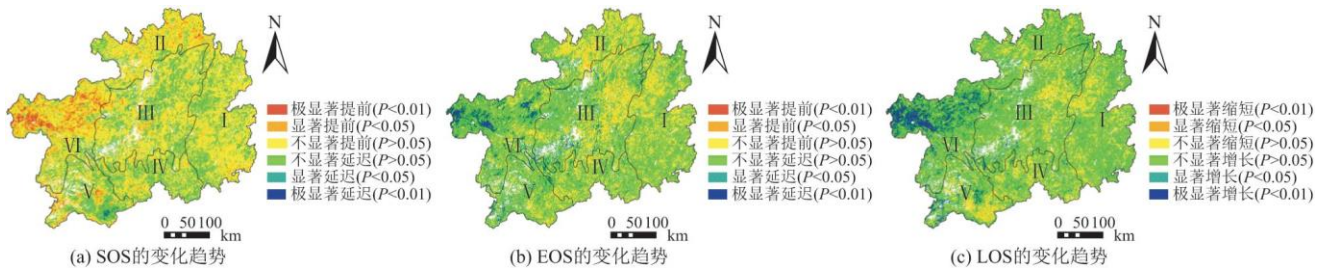


图 4 生长始期 (a)、末期 (b) 及长度 (c) 年际变化趋势

3.1.4 物候年际变化速率分布

各地貌区大部分区域的物候始期变化速率在在 $-3 \sim 1d \cdot (10a)^{-1}a$ 之间，其面积均占对应地貌区面积的 85%以上，其中 II 的面积占比最大，高达 98.37%，V 区的面积比最小，但面积比也达到了 87.36%。而变化速率在 $-3 \sim 0d \cdot (10a)^{-1}$ 之间的面积占比相对较大，面积占比最大的地貌区是 VI区，为 85.76%，该地貌的南部分布相对较少其余地区分布均比较集中；最小的是 V区，其面积比超过该地貌区面积的一半，为 52.51%，主要集中在该地貌区的中部和西南部地区。 $0 \sim 1d \cdot (10a)^{-1}$ 之间的区域的面积比差异较大，V区的面积占比最大 (34.85%)，相对集中的分布在该地貌区的中部和东南部地区；VI区的面积比最小 (11.43%)，主要分布在南

部和东南部(图 5a)。

各地貌区物候末期变化速率在 $-3\sim 3d \cdot (10a)^{-1}$ 之间的区域的面积分别占对应地貌区总面积的 95%以上,其中变化速率在 $-3\sim -1d \cdot (10a)^{-1}$ 和 $-1\sim 0d \cdot (10a)^{-1}$ 之间区域面积占比最大是 II 区(11.64%和 45.44%),其分布较为离散;而面积占比最小的是 VI 区,其面积比分别为 1.48%和 26.05%,主要分布在该区的东南部的小部分地区。变化速率在 $0\sim 3d \cdot (10a)^{-1}$ 的面积比最大高达 71.19%(VI 区)而最小的低至 42.34%(I 区);其中速率在 $0\sim 1d \cdot (10a)^{-1}$ 的面积比最大的仍然在 VI 区(48.43%),而最小在 II 区(31.15%),均集中分布在对应地貌的西部地区;速率在 $1\sim 3d/10a$ 的面积比例最大在 V 区(25.05%),离散分布于 V 区;最小在 I 区(10.49%),主要分布于 I 区的东北部地区(图 5b)。

各地貌区物候的生长期长度变化速率主要集中在 $-3\sim 3d \cdot (10a)^{-1}$ 之间,该区间的面积占对应地貌区面积的 85%以上,其中 $3\sim 0d \cdot (10a)^{-1}$ 之间区域的面积比最大的是 IV 区(41.27%),主要分布于该区南部;最小是 VI 区(13.82%),相对集中分布在该区的东南地区;其余地貌面积比均超过 30%。生长期长度变化速率为 $0\sim 3d \cdot (10a)^{-1}$ 占比最大的是 VI 区(76.11%)。

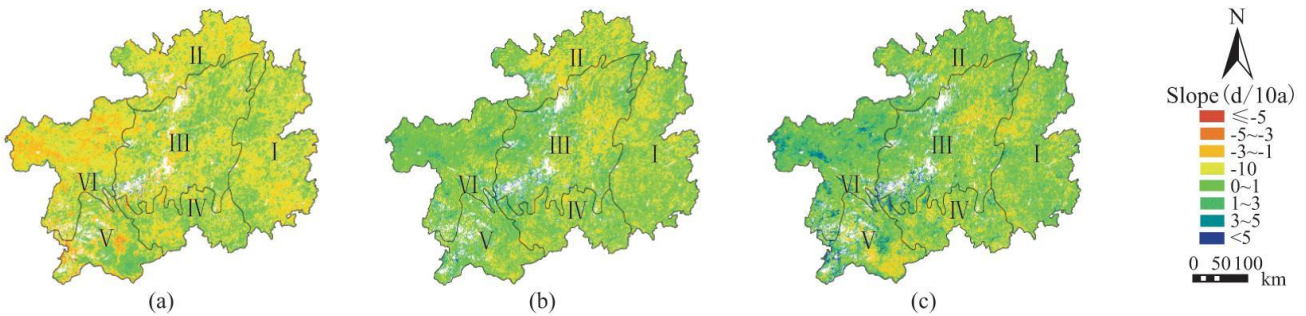


图 5 生长期(a)、末期(b)及长度(c)年际变化速率

3.2 植被物候与海拔高度的关系

由不同海拔的生长期始期的平均值变化图(图 6a)可以看出,生长期始期随海拔高的升高而推迟。海拔高度为 1000m 左右时,生长期在第 77d 左右,海拔高低上升到 2000m 左右时,生长期推迟到第 97d 左右,海拔每升高 1000m 生长期推迟 15d($P<0.01$)。

生长末期随海拔的变化出现了小范围的波动,但整体上呈现出生长末期随海拔升高而提前的变化趋势,海拔高度为 1000m 时,生长末期在第 335 天左右,海拔高度为 2000m 时,生长末期提前至 330d 左右,海拔每升高 1000m 生长末期提前 4d($P<0.01$) (图 6b)。

生长期长度随海拔升高而缩短,海拔高度小于 1050m 的平均生长长度约为 254d;海拔在 1050~2250m 之间,生长长度缩短较快,由 251d 减少到 215d;当海拔高度大于 2250m 平均生长长度为 213d 左右;海拔每升高 1000m 生长期长度缩短 20d($P<0.01$)。

3.3 物候与气候的关系

气候因素对植被的生长有影响作用,尤其是气温和降水很大。温度控制着植被生长所需的热量,降水量控制着植被生长的水分,为了进一步确定植被物候期变化的时间段和影响因子,对贵州省 16 年平均生长期、末期与各个月份的平均气温、平均降水量进行相关性分析。研究发现,生长期与 6 月气温之间具有极显著的相关性($P<0.01$),生长期末期与 9 月的降水存在显著的相关关系($P<0.05$)。说明 6 月气温是影响研究区生长期始期的因子。9 月降水量是影响研究区生长期末期的因子。

逐像元计算生长始期与6月气温的相关系数,由图7a可知,研究区大部分地区生长季始期与6月气温呈现负相关,其面积占总面积的89.61,其中显著负相关占17.55%,主要分布在研究区的西部和南部地区;而仅有10.33%的区域呈现正相关,其中通过显著性检验区域的面积不足0.2%。说明贵州省大部分地区随6月气温的升高生长始期具不显著提前结束的趋势,而有1/5的地区呈现出显著提前结束的趋势。

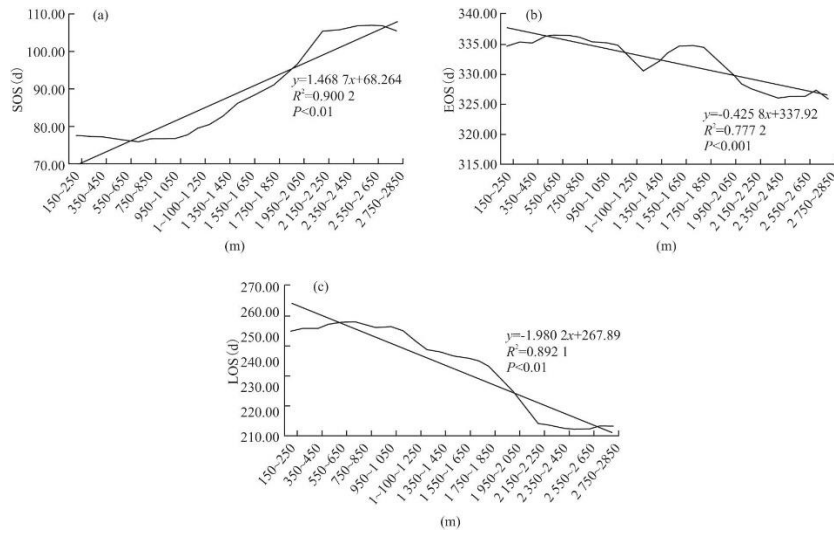


图6 生长始期(a)、末期(b)及长度(c)与海拔的关系

生长季末期与9月降水的相关性及显著性如图7b所示,不显著相关研究区大部分地区,其面积占比为91.94%,其中不显著负相关占33.96%和不显著正相关57.98%;极显著负相关和显著负相关的区域仅占0.26%和1.16%;极显著正相关和显著正相关的区域面积占1.66%和4.97%。说明贵州省大部分地区生长季末期随9月降水量增加具有不显著推迟的趋势,仅有1/16的地区呈现出显著推迟的趋势。

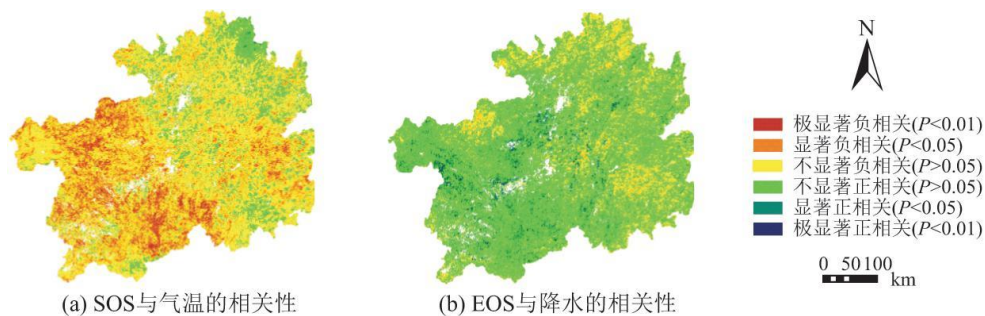


图7 SOS与6月气温(a)和EOS月9月降水(b)相关关系空间分布

4 结论

(1) 贵州省植被 SOS 呈现出由东向西逐渐延迟的经向空间分布特征; SOS 相对较早的是 I 区而相对较晚的是 VI 区。EOS 的空间分布不如 SOS 明显, EOS 比较早且集中的区域主要分布于 V 区的西部, III 区西北部、西部及西南部和 VI 区的西部地区, 而 EOS 较晚的集中区域分布在 V 区的东部及北部和 IV 的西南部。LOS 受 SOS 和 EOS 的共同影响, 生长季长度较短的地区集中分布于 III 区的西部及西南部、V 区的西部和 VI 区大部分地区, 而则是生长季长度较长的集中的区域为 I 区西南部、IV 区的西部和 V 区的东

部及东南部地区。

(2) 16年间,贵州省多年平均SOS为第86d(3月27日左右),变化范围为第76~99d(3月16日~4月9日);各地貌区中SOS最晚的地区是VI区,为第100d(4月10日),变化范围为第90~113d(3月30~4月23日);最早是I区,为第80d(3月20日),变化范围为第69~88d(3月9日~29日)。贵州省多年平均EOS为第333d(11月30日),变化范围为第327~341d(11月24日~12月9日);各地貌区中EOS最晚的是V区为第339d(12月6日),变化范围为第328~349天(11月23日~12月16日);而II区则是相对较早的地区,其平均物候末期在第335d(12月2日),变化范围为第329~343d(11月26日~12月10日)。16年平均生长季长度为247d,波动范围为234~258d;IV区的平均生长期是最长的,为255d,波动范围在244~274d;VI区的平均生长期长度最短,为231d,波动范围在213~246d。

(3) 16年间,贵州省植物物候SOS总体呈现不显著提前趋势,平均提前速率为 $4.2d \cdot (10a)^{-1}$,各岩溶区中VI区提早速率最大,为 $7.7d \cdot (10a)^{-1}$ ($P=0.05$),IV区提早速率最小,为 $1.8d \cdot (10a)^{-1}$ ($P>0.05$);EOS主要呈现不显著推迟,推迟速率为 $3.9d \cdot (10a)^{-1}$;V区的推迟速率最大,为 $6.7d \cdot (10a)^{-1}$ ($P<0.05$);II区推迟速率最小,为 $0.60d \cdot (10a)^{-1}$ 。LOS年际变化具有显著延长的倾向,贵州省平均延长 $2.8d \cdot (10a)^{-1}$ ($P<0.05$),其中VI区平均延长 $14.2d \cdot (10a)^{-1}$ ($P<0.05$),延长速率最大;而I区最小变化速率为 $4d \cdot (10a)^{-1}$ ($P>0.05$)延长速率最小。

(4) 贵州省物候期受海拔的影响,海拔每上升1000m会导致SOS推迟15d($P<0.01$),EOS提前4d($P<0.01$),LOS缩短20d($P<0.01$)。

(5) 贵州省植被SOS与6月份气温之间相关性极为显著($P<0.01$),大部分地区随6月温度升高SOS具有不显著提前结束的趋势,而有1/5的地区呈现出显著提前结束的趋势。EOS与9月降水之间相关性显著($P<0.05$),大部分地区生长季末期随9月降水量增加具有不显著推迟的趋势,仅有1/16的地区呈现出显著推迟的趋势。

参考文献:

- [1]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):6705-6.
- [2]韩红珠,白建军,张波,等.基于MODIS时序的陕西省植被物候时空变化特征分析[J].国土资源遥感,2018,30(4):125-131.
- [3]王力,张强.近20年青藏高原典型高寒草甸化草原植物物候变化特征[J].高原气象,2018,37(6):1528-1534.
- [4]崔耀平,肖登攀,刘素洁,等.中国夏玉米和冬小麦近年生育期变化及其与气候的关系[J].中国生态农业学报,2018,26(3):388-396.
- [5]陈效述,王林海.遥感物候学研究进展[J].地理科学进展,2009,28(1):33-40.
- [6]ZHANG X,FRIEDL M A,SCHAAF C B,et al.Monitoring vegetation phenology using MODIS[J].Remote Sensing of Environment,2003,84(3):471-475.
- [7]REED B C,BROWN J F.Trend analysis of time-series phenology derived from satellite data[C].International Workshop on Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images,2005:166-168.
- [8]VERGER A,BARET F,WEISS M,et al.GEOCLIM:A global climatology of LAI,FAPAR,and FCOVER from VEGETATION

observations for 1999–2010[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 166:126–137.

[9] VERGER A, FILELLA I, BARET F, et al. Vegetation baseline phenology from kilometric global LAI satellite products[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178:1–14.

[10] GARONNA I, DE J R, DE W A, 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.

[11] TONG X, TIAN F, BRANDT M, et al. Trends of land surface phenology derived from passive microwave and optical remote sensing systems and associated drivers across the dry tropics 1992–2012[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232:111307.

[12] 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.

[13] SHEN X, LIU B, XUE Z, et al. Spatiotemporal variation in vegetation spring phenology and its response to climate change in freshwater marshes of Northeast China[J]. Science of The Total Environment, 2019, 666:1169–1177.

[14] LI P, PENG C, WANG M, et al. Dynamics of vegetation autumn phenology and its response to multiple environmental factors from 1982 to 2012 on Qinghai-Tibetan Plateau in China[J]. Science of The Total Environment, 2018, 637–638:855–864.

[15] 李正国, 杨鹏, 周清波, 等. 基于时序植被指数的华北地区作物物候期/种植制度的时空格局特征[J]. 生态学报, 2009, 29(11):6216–6226.

[16] 杨光, 宋戈, 韦振锋, 等. 基于时序指数西北植被物候时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6):213–218.

[17] 李登科, 王钊. 基于 MCD12Q2 的秦岭植被物候时空变化及对气候的响应[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1):11–22.

[18] 张延兵, 陶建斌, 刘鹏程, 等. 基于时间序列 MODIS 数据的贵州省森林物候地域分异[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(11):1891–1897.

[19] 曾业隆. 贵州森林物候遥感监测及其对气候变化的响应[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.

[20] 刘娇. 贵州省石漠化与植被物候特征耦合关系研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019.

[21] 王兴富, 曹人升, 吴先亮, 等. 喀斯特山地废弃矿区土壤重金属污染评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(5):29–35.

[22] 吴清林, 梁虹, 熊康宁, 等. 喀斯特地区水土流失监测方法评述[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2020, 38(3):30–38.

[23] 钱莉莉, 贺中华, 梁虹, 等. 基于降水 Z 指数的贵州省农业干旱时空演化特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(1):10–14.

[24] JOSH G, DAMIEN S M, MARK A F. User guide to collection 6 MODIS land cover dynamics (MCD12Q2) product [DB/OL]. [2019-01-15]. https://lpdaac.usgs.gov/documents/218/mcd12q2_v6_user_guide.pdf.

[25] 崔利芳, 王伦澈, 屈赛, 等. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响 [J]. 地球科学, 2020, 45 (6) : 1905-1917.

[26] 方利, 王文杰, 蒋卫国, 等. 2000~2014 年黑龙江流域 (中国) 植被覆盖时空变化及其对气候变化的响应 [J]. 地理科学, 2017, 37 (11) : 1745-1754.

[27] 张继, 周旭, 蒋啸, 等. 生态工程建设背景下贵州高原的植被变化及影响因素分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28 (7) : 1623-1633.

[28] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000-2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化 [J]. 生态学报, 2013, 33 (24) : 7798-7806.

[29] 何云玲, 熊巧利, 余岚, 等. 基于 NDVI 云南地区植被生态系统对气候变化的适应性分析 [J]. 生态科学, 2019, 38 (6) : 165-172.