DOI: 10.5846/stxb201912092671

邵周玲,周文佐,李凤,周新尧,杨帆.2003—2018 年米仓山地区植被物候时空变化及对气候的响应.生态学报,2021,41(9):3701-3712. Shao Z L, Zhou W Z, Li F, Zhou X Y, Yang F.Spatiotemporal variation of vegetation phenophase and its response to climate change in Micang Mountains from 2003 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9):3701-3712.

2003—2018 年米仓山地区植被物候时空变化及对气候 的响应

邵周玲,周文佐*,李凤,周新尧,杨 帆

西南大学地理科学学院,遥感大数据应用重庆市工程研究中心,重庆 400715

摘要:植被物候直接反映了植被对环境变化响应的动态过程,对研究植被与气候的关系具有重要意义。基于遥感植被时序数据,探讨秦巴山区典型山地-米仓山地区植被物候变化及其对气候的响应。利用 MODIS NDVI 时序数据,采用动态阈值法获取 米仓山地区植被物候参数;借助于 Theil Sen 斜率、Mann Kendall 趋势检验方法结合植被类型数据分析研究区物候时空变化;采 用偏相关方法分析物候变化与气温和降水之间的关系。结果表明:(1)米仓山地区植被生长季始期(SOS)主要集中在第 80— 110d,海拔每上升 100m,SOS 大约推迟 0.6d;生长季末期(EOS)主要集中在第 250—300d;生长季长度(LOS)主要集中在 130— 210d。除低海拔区域受人类活动影响物候波动较大外,EOS 和 LOS 随海拔变化存在 2000m 分界线,其下物候随海拔升高物候 明显推迟或缩短,其上物候变化趋于平缓。(2)16a 来植被 SOS 呈提前趋势,提前幅度为 0.47d/a,提前的像元占 74.03%,其中, 达到显著提前的像元占 12.21%(P<0.1);EOS 整体呈提前趋势,提前幅度为 0.22d/a;LOS 略有延长,延长幅度为 0.26d/a。(3) 区域常绿型森林植被 SOS 晚于同垂直带的落叶型森林植被;草地、常绿阔叶灌木林 SOS 提前趋势最明显,变化率分别为-0.80、 -0.71d/a;EOS 提前趋势最明显的是针阔混交林和落叶阔叶林。(4)SOS 主要受 3 月平均气温和 4 月降水的影响,3 月平均气温 升高以及 4 月降水增加导致 SOS 提前;EOS 主要受 10 月降水的负向影响。 关键词;NDVI;物候参数;时空变化;米仓山

Spatiotemporal variation of vegetation phenophase and its response to climate change in Micang Mountains from 2003 to 2018

SHAO Zhouling, ZHOU Wenzuo*, LI Feng, ZHOU Xinyao, YANG Fan

Chongqing Engineering Research Center for Remote Sensing Big Data Application, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Vegetation phenophase directly reflects the dynamic process of vegetation response to environmental changes, and is of great importance to understand the relationship between vegetation and climate. This paper explored the spatiotemporal variability of vegetation phenophase and its response to climate changes in Micang Mountains, a classic example of Qinling-Daba Mountains, China. Based on the MODIS NDVI data from 2003 to 2018, the vegetation phenological parameters of the Micang Mountains were obtained by the Savitzky-Golay filtering method and the dynamic threshold method. The Theil Sen slope and Mann-Kendall trend test, combined with vegetation types, were used to analyze quantitatively the temporal and spatial variation of phenophase. The relations between vegetation phenological periods and monthly temperature and precipitation were explored also by partial correlation analysis. The results showed that the start of the growing season (SOS) ranged mainly from 80th to 110th day, and it delayed with the increasing elevation about 0.6 day every 100 m. The

基金项目:科技部科技基础资源调查专项(2017FY100900)第一课题第四专题(2017FY100901-4)

收稿日期:2019-12-09; 网络出版日期:2021-03-08

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhouwz@ swu.edu.cn

end of the growing season (EOS) ranged mainly from 250^{th} to 300^{th} day. The length of the growing season (LOS) ranged mainly from 130 to 210 day. The EOS and LOS had 2000 m boundary with the elevation changes, except for low-altitude areas where the phenophase fluctuated greatly affected by human activities. The phenophase below it significantly delayed or shortened with the elevation, and the phenological changes above it tended to be gentle. The SOS showed an advanced trend with 0.47 d/a, accounting for 74.03% of the total area, and significantly advanced area accounted for 12.21% (P < 0.1). The EOS showed an early trend totally with an advanced range of 0.22 d/a too. The LOS slightly extended with a rate of 0.26 d/a. The SOS of evergreen forest vegetation was later than that of deciduous forest vegetation in the same vertical belt. The advanced trends of SOS in grassland and evergreen broad-leaved shrub forest were the most obvious, and their changed rates were -0.80 d/a and -0.71 d/a, respectively. The most obviously advanced trend of EOS appeared in the coniferous and broad-leaved mixed forest and deciduous broad-leaved forest. The relation analysis revealed that the SOS was mainly affected by temperature in March and precipitation in April because the increased temperature and precipitation led to advance of SOS, and that the EOS was negatively influenced by precipitation in October that caused advance of EOS in Micang Mountains.

Key Words: Normalized Difference Vegetation Index; phenological parameters; temporal and spatial variations; Micang Mountains

物候是生物长期适应自然环境周期性变化,形成与此相适应的生长发育节律的现象,对研究植物和气候 关系具有重要意义^[1-3]。第五次 IPCC 报告指出在过去的 130 年间全球温度上升超过了 0.85℃^[4],全球气候 变暖会对陆地生态系统在季节和年际尺度上产生影响,如植物在不同时期出现发芽、展叶、开花、结果、枯叶等 物候现象,这些现象对环境变化敏感且容易观测,因此物候通常作为气候变化的生物感应器^[5-6]。植物生长 季的变化对全球碳的固定、CO₂浓度变化以及全球水气循环都有重要影响,揭示植物物候变化成为物候学当 前的热点研究问题^[7]。

在过去数十年中,受气候变暖影响全球普遍出现不同程度的春季物候提前、秋季物候推迟以及生长季延 长的现象,不同区域物候变化受自然环境差异影响存在明显的差异,气候变化对植物物候沿纬向和垂直方向 上的分布变化都有显著影响^[8-10]。我国学者对于植被物候的研究主要集中在中国的北温带以及高海拔地 区^[11-12],其中东北地区^[13-15]、青藏高原^[16-19]以及内蒙古^[20]是主要的研究区域。秦巴山区作为我国大陆南北 气候过渡带和重要生态廊道,同时也是气候变化敏感区和生态脆弱区,一直以来都是物候研究的重点区域。 目前,已有学者在秦岭做了相关研究并取得一定成果。王钊等^[21]、Xia 等^[22]对秦岭物候的研究发现生长季始 期和末期整体上分别出现提前和推迟,并随着海拔升高生长季始期、末期和长度分别出现推迟、提前和延长趋 势;邓晨晖等^[23]发现秦岭北坡的生长季始期较南坡早,生长季末期南坡则较北坡晚,在海拔>2700m 的高海拔 区,生长季始期、末期及生长季长度随海拔上升的波动幅度更强;张晓东等^[24]研究结果显示 2000—2015 年秦 岭东部伏牛山地区生长季始期和生长季末期总体呈推迟变化。气温和降水被认为是影响物候变化最直接的 因子^[25]。已有研究结果表明气温是影响秦岭物候变化最重要的因素,特别是同期气温升高对物候始期的提 前以及末期的推迟具有主导控制作用^[21,26-27]。

虽然目前对秦巴山区的物候研究已有初步的结论,但是由于区域植被类型丰富,垂直地带性差异显著,气 候变化对于秦巴山地不同垂直带的植被物候的影响还缺乏深入的研究。本文基于 2003—2018 年 MODIS NDVI 数据分析秦巴山区典型山地-米仓山地区的植被物候时空格局变化,并且对不同垂直带、不同植被类型 的物候时空特征进行研究,最后结合气象资料分析物候变化与主要气候因子的关系,为评价全球变化背景下 米仓山地区植被对于气候变化的响应提供科学依据。

1 研究区概况

米仓山地区(30°50′—33°16′N,105°50′—109°46′E)位于秦巴山区的南部,地处陕西省、四川省和重庆市

交界处,属于大巴山的西段,呈西北-东南走向,海拔在 200—2500m(图 1)。地处中国的北亚热带,受东南季风和西南季风的共同影响,年均温 15℃左右,年降水量达 1200mm 以上,气候温和湿润,四季分明。米仓山地区植被类型丰富,主要有常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶灌木林、常绿阔叶灌木林、针阔混交林以及草地。



图 1 研究区地形与主要植被类型分布 Fig.1 The landform and main vegetation types of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本文中植被指数数据采用美国国家航空航天局(https://earthdata.nasa.gov)的16d 合成250m MYD13Q1 数据产品。采用官方提供的MRT(MODIS Reprojection Tool)对数据进行预处理,最后裁切得到研究区2003— 2018年的NDVI数据。气候数据来源于中国气象科学数据中心(http://data.cma.cn),包括2003—2018年米 仓山地区及其附近共28个气象站点的平均气温和降水量日数据。先将气温和降水数据整理为月均温、月累 计降水量,再采用 ANUSPLIN 工具将气象数据插值为250m 的栅格数据。地形数据为30m分辨率的ASTER GDEM 数据(http://www.gscloud.cn),将其重采样为250m分辨率的DEM 数据。植被数据为来源于欧空局的 300m分辨率的陆地覆盖数据(https://www.esa.int),通过重采样将分辨率统一为250m。

2.2 研究方法

2.2.1 物候参数提取

利用 TIMESAT 软件中的 S-G 滤波(Savitzky-Golay filtering)方法^[28]对数据进行滤波平滑,去除时间序列中的随机噪声点,以便于物候参数提取。

$$Y_{j} = \frac{\sum_{i=-m}^{l=m} C_{i} Y_{j+1}}{N}$$
(1)

式中, Y_i为拟合后的 NDVI, Y 代表原始序列数据, C_i为第 i 个 NDVI 值的滤波系数, N 为平滑窗口的大小。

采取动态阈值法对米仓山地区植被物候期进行提取,参考伏牛山、秦岭等附近地区的物候研究^[23-24],将 阈值设置为 50%,得到三个关键物候参数:生长季始期(Start of the growing season, SOS)、生长季末期(End of the growing season, EOS)、生长季长度(Length of growing season, LOS)。采用年序日(Day of year, DOY)表示 物候参数,即距当年1月1日的实际天数。SOS 受 NDVI 的影响很大,植被稀少生长季不可能开始,提取物候 时应首先去除数据集中 NDVI<0.1 的这部分无效数据^[29]。

$$NDVI(SOS, EOS) = (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \times 50\%$$
(2)

式中,NDVI_{max}为一年中植被指数的最大值;NDVI_{min}为植被指数上升和下降阶段的最小值;当NDVI上升或者下降达到变化振幅的 50%时分别提取 SOS 和 EOS。

2.2.2 趋势分析

采用 Theil Sen(T-Sen)斜率分析米仓山地区植被物候变化趋势。T-Sen 斜率是一种非参数趋势度计算方法,通过计算长时间序列数据中任意两个时段的斜率,并选取中位数来表征该时段的变化趋势。T-Sen>0,则表明物候变化趋势是提前或缩短。T-Sen 计算结果结合 Mann-Kendall(M-K)统计检验(置信度为90%、95%、99%)将物候变化趋势划分为以下7类:极显著提前或缩短(T-Sen<0,P<0.01)、显著提前或缩短(T-Sen<0,0.01<P<0.05)、弱显著提前或缩短(T-Sen<0,0.05<P<0.1)、极显著推迟或延长(T-Sen>0,P<0.01)、显著推迟或延长(T-Sen>0,0.01<P<0.05)、弱显著推迟或延长(T-Sen>0,0.05<P<0.1)、极显

2.2.3 偏相关分析

分析物候与气温、降水的关系时采用偏相关系数来描述。多元相关分析中,简单相关分析可能不能够真 实反映两个变量之间的关系,偏相关是在排除其他变量的影响后计算两个变量之间的关系。其表达式如下:

$$R_{xy,z} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2)}\sqrt{(1 - r_{yz}^2)}}$$
(3)

式中, R_{xyz} 为控制变量 z 后 x 和 y 的相关系数, r_{xy} 、 r_{yz} 、 r_{xz} 分别为变量 x 和 y、y 和 z、x 和 z 的相关系数。

3 结果分析

3.1 植被多年平均物候期

为了研究米仓山地区物候总体状况的空间格局,通过 ArcGIS10.2 计算出 16a 的 SOS、EOS、LOS 均值 (图 2)。生长季始期主要集中在第 80—110d(3 月下旬到 4 月中旬),占总面积的 86.75%;生长季始期在第 70—90d 的区域主要分布在米仓山东北部,即汉江流域以南低海拔地区;生长季始期为第 110—125d 的区域 主要集中在米仓山南部和东部边缘,并且南部受地形影响呈纵列分布;此外,在一些河谷地带,由于地势较低, 少许植被生长季始期早于第 70d,而在中部和南部高海拔地带植被生长季始期较晚。生长季末期主要集中在 第 250—300d(9 月中旬至 10 月下旬),占总面积的 95.73%;其中北部和中部的东缘部分区域最早,主要集中 在第 270d 之前;在东北部边缘、中部以及南部边缘低海拔地区生长季末期最晚,主要集中在第 290—300d;其 他区域集中在第 270—290d。生长季长度主要集中在 130—210d,占区域面积的 96.13%;其中长于 195d 的区 域主要分布在东北部,与生长季始期在第 90d 以前的分布区域大致相同,主要分布在低海拔河谷平地区域;生 长季长度短于 130d 的区域呈点团状分布,除在南部呈点状零星散布以外,在嘉陵江以东和汉江以南区域也呈 团状聚集分布,并且与生长季末期在第 250d 以前的区域分布大致相同。从水平方向上,由于米仓山地区跨越 的纬度范围较小,主要受到地形和气候的影响,其物候变化规律不明显;垂直方向上,河谷、低山地区由于海拔 较低、气温较高,植被生长季始期较早,生长季长度较长;高山区域由于海拔较高、气温较低,植被生长季末期 较早,生长季长度较短。

米仓山地区物候期与海拔关系密切,利用 2013—2018 年 SOS、EOS、LOS 多年均值,选取 50m 高程为间隔 统计得到植被物候随海拔变化趋势(图 3)。由于 600m 以下区域主要为耕地,物候变化受人类活动影响较大, SOS 波动幅度较大,无明显规律;600m 以上区域 SOS 随着海拔升高而推迟。SOS 随海拔变化的一元线性斜率 为0.006,即海拔每上升 100m,SOS 大约推迟 0.6d。EOS 与海拔的关系较为复杂,1000m 以下区域随海拔变化 物候规律不明显;1000—2000m 区域 EOS 随海拔升高迅速提前;2000m 以上呈现波动延后现象。LOS 随海拔 升高的变化规律与 EOS 大致相同,存在 2000m 分界线。





3.2 物候年际变化趋势分析

利用 2003—2018 年米仓山地区各年份物候均值,得到 SOS、EOS、LOS 年际变化趋势(图 4)。由图可知, 年均物候期随时间均呈波动变化,整体上 SOS 有提前趋势,提前幅度为 0.47d/a,未通过显著性检验(*P* = 0.20),EOS 提前 0.22d/a,LOS 延长 0.25d/a,均通过 0.01 显著性检验。

基于 T-Sen 趋势分析方法在像元尺度上分析米仓山地区 2003—2018 年植被物候变化趋势,并结合 Mann -Kendall 统计法对结果进行显著性检验(图 5)。SOS 拟合斜率值介于-12.56—12.68 之间,斜率为负的区域 面积占比为 74.03%,表明整体上米仓山地区植被生长季始期呈提前趋势。其中,极显著提前、显著提前、弱显 著提前像元分别占 1.97%、6.27%、6.77%,主要在米仓山地区的重庆市境内以及汉中市南部分散分布。达到 显著性(P<0.1)延后的区域较少,极显著延后、显著延后、弱显著延后的像元共占 0.85%。从达到显著变化的 区域分布来看,显著性提前的区域约是显著性延后区域像元的 18 倍。EOS 拟合斜率值介于-23.18—22.33 之间,斜率为负的像元占比为 60.67%,表明大部分区域生长季末期呈提前趋势。其中,显著提前区域主要在汉中市、安康市、达州市的中部及北部、重庆市的东北部以及巴中市的中北部。生长季末期显著延后的区域主要 分布在达州市、巴中市、重庆市的南部以及广元市。LOS 拟合斜率值介于-16.93—15.25 之间,斜率为正的像 元占比为 53.25%,表明米仓山植被生长季长度整体呈延长趋势。其中,极显著延长、显著延长像 元占比分别为 2.21%、2.17%、0.59%,主要在重庆市、广元市、巴中市和达州市等地区分布。达到显著性(P<0.1)缩短的区域较少,主要分布在海拔较高的地区,如汉中市和巴中市的交界处,以及重庆市东北部。极显著





年份 Year

Fig.4 Inter-annual trends of phenophase from 2003 to 2018

缩短、显著缩短、弱显著缩短的像元共占2.33%。

- 3.3 不同植被类型物候空间分布及变化趋势
- 3.3.1 不同植被类型的物候期垂直变化

为了更加深入地探究植被物候的规律,将米仓山地区海拔以 500m 为间隔,划分为 5 个梯度带(<500、500—1000、1000—1500、1500—2000、>2000m)。根据米仓山地区植被垂直分布,进一步分析主要植被类型的 SOS、EOS、LOS 在各垂直带上的物候特征(图 6)。米仓山地区植被主要分布在 500—1500m,占总面积的 56.59%,2000m 以上占 1.14%。主要的植被类型为常绿阔叶林和落叶阔叶林,占总面积的 40.65%,其次是常 绿针叶林和落叶阔叶灌木林,分别占总面积的 9.38%和 7.04%。



图 5 2003—2018 年米仓山地区植被物候期年际变化空间分布

Fig.5 Spatial distribution of inter-annual variation of phenophase in Micang Mountains from 2003 to 2018



Fig.6 Area percentage of different vegetation types in different vertical belts

3707

不同植被类型在各级垂直带的物候期统计结果如表 1。随着海拔上升,不同植被均出现了 SOS 推迟的现象,但是不同植被变化趋势略有区别。落叶阔叶林 SOS 最早,早于同级垂直带其他植被类型 SOS 均值,而且 落叶阔叶林 SOS 随海拔升高推迟幅度最大,从<500m(94.2d)到>2000m(106.9d)的垂直带上推迟了 17.9d。 草地是 SOS 最迟的植被类型,迟于同级垂直带其他植被类型 SOS 均值。常绿型森林植被(常绿阔叶灌木林、 常绿阔叶林、常绿针叶林)SOS 迟于落叶型森林植被(落叶阔叶灌木林、落叶阔叶林),常绿型森林植被 SOS 均 值在 500—1000、1000—1500、1500—2000、>2000m 垂直带上晚于落叶型森林分别为 9.6、7.3、3.7、2.1d。500m 以上区域,随着海拔升高,不同植被间的 SOS 差距缩小。

随着垂直带的海拔升高各植被类型 EOS 均出现提前,草地提前幅度最小,为 16.5d;常绿阔叶灌木林提前 幅度最大,为 36.6d。常绿型森林植被与落叶型森林植被间的 EOS 差异不明显;在 500m 以上区域,不同植被 类型间 EOS 差异增加,分别在 500—1000、1000—1500、1500—2000、>2000m 垂直带上各植被类型间 EOS 极差 为 4.6、7.3、16.3、20.9d,即在 2000m 以上区域植被间的 EOS 差异最为明显。

随着垂直带的海拔升高各植被类型 LOS 缩短,缩短幅度为 27.9d—47.6d,即高、低海拔之间的 LOS 相差 一个多月。随着垂直带升高,草地 LOS 缩短幅度最小(27.9d),常绿阔叶林缩短幅度最大(47.6d)。常绿型森 林植被 LOS 普遍短于落叶型森林,在 500—1000、1000—1500、1500—2000、>2000m 垂直带上它们之间的差值 分别为 11.2、7.9、6.2、5.0d,主要由于常绿型森林植被的 SOS 晚于落叶型森林植被。

	Table 1	Pnen	opnase	or anne	erent ve	getatio	n types	in airr	erent v	ertical	beits				
高程/m	<500			500—1000			1000—1500			1500—2000			>2000		
Elevation	SOS	EOS	LOS	SOS	EOS	LOS	SOS	EOS	LOS	SOS	EOS	LOS	SOS	EOS	LOS
草地 Grassland	94.2	288.1	193.0	100.1	286.6	185.5	103.4	284.6	180.3	106.4	271.7	165.5	106.9	271.6	165.1
常绿阔叶灌木林 Evergreen broad-leaved shrub forest	93.4	285.7	191.3	97.8	285.0	186.1	102.2	282.5	179.5	105.8	264.4	159.5	107.6	252.7	148.8
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	92.4	287.3	194.0	96.8	285.5	187.7	100.6	279.4	177.8	103.0	260.2	156.5	105.7	250.7	146.4
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	92.8	285.3	191.5	97.0	285.1	187.1	100.9	281.3	179.6	103.8	264.0	160.0	105.3	259.6	155.7
落叶阔叶灌木林 Deciduous broad-leaved shrub forest	91.9	282.5	189.6	88.7	287.4	197.7	94.0	282.7	187.7	100.0	269.6	168.6	104.5	261.1	155.8
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	85.9	287.2	200.4	86.5	286.2	198.7	93.8	280.8	186.0	100.9	263.0	161.1	103.8	259.4	154.7
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	92.1	287.3	194.2	92.2	282.0	188.9	96.7	277.3	179.7	100.8	255.4	153.7	104.3	257.4	152.8

e 1 Phenophase of different vegetation types in different vertical

SOS:生长季始期 Start of the growing season; EOS:生长季末期 End of the growing season; LOS: 生长季长度 Length of the growing season

3.3.2 不同植被类型的物候期时间变化

将米仓山地区 2003—2018 年不同植被的物候期(SOS、EOS)进行线性回归分析并做显著性检验,得到 16a 物候期的变化趋势及显著性(图7)。草地、常绿阔叶灌木林的生长季始期提前趋势最明显,提前幅度分 别为-0.80、-0.71d/a、其中常绿阔叶灌木林达到显著提前(P<0.05)趋势;除此之外,常绿针叶林和常绿阔叶 林也呈提前趋势,提前速度分别为 0.49、0.43d/a。米仓山地区植被生长季末期均呈提前趋势,且通过 P<0.05 显著性检验,其中落叶阔叶林和针阔混交林生长季末期提前明显,年际变率分别为-0.46、-0.57d/a。总体上, 生长季始期相比生长季末期提前趋势更明显,生长季长度为生长季末期与始期之差,因此生长季长度延长主 要由于生长季始期的提前。

3.4 物候与气候因子间的相互关系

3.4.1 生长季始期对气温、降水的响应

生长季始期与 3—5 月的平均气温和降水逐像元做偏相关分析(P<0.05),得到其偏相关系数空间分布图



图 7 不同植被生长季始期和末期的年际变化

Fig.7 Inter-annual change trends of the starting and ending dates of different vegetation growth seasons in Micang Mountains

(图 8)。与气温的偏相关分析结果显示,2003—2018 年生长季始期与 3—5 月平均气温的偏相关系数均多为 负值,表明温度升高生长季始期提前。生长季始期与 3 月平均气温呈负相关的区域占比为 77.87%,多分布于 汉江以南低海拔地区以及研究区中部;生长季始期与 4 月平均气温呈负相关的区域占 67.59%,多分布于研究 区的东部。与降水的偏相关分析结果显示,生长季始期与 3 月和 5 月降水负相关系数像元占比分别为 55.08%、53.28%,在空间上正相关和负相关分布较为均匀。生长季始期与 4 月降水呈负相关的区域占 65.77%,表明 4 月降水增加生长季始期提前。在显著性水平上(P<0.05),生长季始期与 3 月平均气温的相关 性显著的像元最多(11.08%),其次是 4 月降水(9.42%),表明在大部分地区生长季始期主要受 3 月的平均气 温以及 4 月降水的影响。

3.4.2 生长季末期对气温、降水的响应

生长季末期与 8—10 月的平均气温和降水逐像元做偏相关分析,得到偏相关系数空间分布图(图 9)。与 气温的偏相关分析结果显示,2003—2018 年生长季末期与 8 月和 9 月平均气温的正负相关性较为平衡,其中



图 8 生长季始期与 3—5 月气温/降水的偏相关系数空间分布 Fig.8 Spatial distribution of partial correlation coefficients between SOS and temperature/precipitation in March, April and May

呈正相关的像元占比分别为 49.84%、42.58%,生长季末期与 8 月平均气温呈正相关区域主要分布于米仓山地 区南部,而与 9 月平均气温呈正相关区域主要在米仓山地区北部,到 10 月生长季末期与平均温度的正相关区 域占比有所增加,为 59.73%。与降水的偏相关分析结果显示,生长季末期与 8 月和 9 月降水的正负相关性相 差较小,正相关像元占比分别为 51.14%、57.59%。生长季末期与 10 月降水呈负相关的像元占88.41%,表明 大部分区域随着降水增加生长季末期提前。在显著性水平上(P<0.05),生长季末期与 8—10 月平均气温的 相关性显著的像元占比较少,分别为 1.29%、2.97%、3.24%。生长季末期与 8、9 月的降水相关性显著的像元 占 2.42%和 4.24%,而与 10 月降水相关性显著的像元最多(20.64%),多分布于米仓山地区的北部汉江流域、 中部的达州市和巴中市以及东部的安康市。表明在米仓山地区生长季末期主要受 10 月降水的负向影响。

4 讨论

米仓山地区植被物候特征差异主要取决于植被类型、高程、气候等因素。不同植被类型生长习性不同,物 候差异较大。然而,高程差异带来最明显的影响是水热分配不均,从而导致不同海拔物候差异。加之全球变 暖的大背景下,中纬度地区温度上升,导致物候始期提前^[11]。当前已有研究利用不同的数据和方法对秦巴山 区中秦岭的植被物候进行了分析,大多数研究结论表明区域植被物候存在 SOS 提前、EOS 推迟和 LOS 延长现 象,并且在垂直方向上物候期也呈现规律性变化^[30-32]。秦岭森林物候期结果表明海拔每升高 100m,SOS 推迟 2d,2200m 以下区域 EOS 提前明显,2200m 以上区域变化平缓,LOS 也有同样的现象^[32]。就整体来看,SOS 和 LOS 变化趋势与秦岭的物候研究保持一致,但是在米仓山地区 EOS 存在提前趋势。本文发现在米仓山地区 物候期对海拔的响应存在 2000m 界限,在海拔 2000m 以上区域 EOS 和 LOS 变化趋势相对较小,而其下区域 随海拔升高出现明显的 EOS 推迟和 LOS 缩短现象。探究其原因可能由于温度随着海拔升高以 0.65℃/100m 下降,降水量在一定高度内随着海拔升高而增加,而到达最大降水高度后降水量减少,造成 EOS 和 LOS 变化 趋势发生转折。2003—2018 年米仓山地区不同植被 SOS 提前趋势不同,其中草地提前幅度最大,说明区域内 草地对气候变化最敏感,这与丛楠等^[33]在北半球中高纬度地区的研究结果相同。



图 9 生长季末期与 8-10 月气温/降水的偏相关系数空间分布

Fig.9 Spatial distribution of partial correlation coefficients between EOS and temperature/precipitation in August, September and October

物候始期对气候变化的响应程度比末期更显著,在亚洲中低纬度区域较少受到水分胁迫的影响,春季气 温升高成为 SOS 提前的主要原因^[33]。相比于物候始期,温度对末期影响较弱,主要由于 EOS 受多种因子协 同影响。已有研究结果表明,植被的 SOS 主要受温度控制,而 EOS 则主要受降水的影响^[14,34]。例如,张晓东 等^[24]研究表明秦岭东部伏牛山植被 EOS 主要受9月降水的影响,Xie 等^[35]发现降水增加导致秋季物候不显 著提前。本文发现影响米仓山地区 SOS 提前最主要的因素是3月气温,其次是4月降水;而 EOS 提前主要受 10月降水的影响,其原因可能是当地秋末时节温度较低,降水增加加剧低温效应,从而导致 EOS 提前。

北半球春季温度升高,生长季始期提前以及生长季延长可能造成植被生产力增加。植被物候能反映气候 变化,不同区域的地理条件差异较大,不同的植被类型的物候对区域气候变化的响应也不一样。

5 结论

本文基于 2003—2018 年 MODIS NDVI 数据,采用 S-G 滤波和动态阈值法提取了米仓山地区物候参数,分 析了米仓山地区物候参数时空分布和变化趋势,并讨论了物候变化与水热条件的相互关系。2003—2018 年 米仓山地区植被 SOS 出现在 3 月下旬到 4 月中旬,海拔每上升 100m,SOS 大约推迟 0.6d;EOS 主要发生于 9 月中旬至 10 月下旬;LOS 主要集中在 130—210d。除低海拔地区受人类活动影响物候波动较大外,EOS 和 LOS 随海拔变化存在 2000m 分界线,其下随海拔升高物候 EOS 明显推迟或 LOS 缩短,而其上物候变化趋于平 缓。米仓山地区 16a 来 SOS 呈提前趋势,提前速度为 0.47d/a,提前区域占 74.03%;EOS 提前幅度为 0.22d/a, 通过显著性检验(*P*<0.05)区域仅有 4.9%;LOS 略有延长,延长幅度为 0.26d/a,呈延长趋势区域占 53.25%。

米仓山地区不同植被物候期差异明显,常绿型森林植被物候始期晚于落叶型森林植被;草地、常绿阔叶灌 木林 SOS 提前趋势最明显,提前幅度分别为-0.80d/a、-0.71d/a,相对于其他植被类型对气候变化更加敏感; EOS 提前趋势最明显的是针阔混交林和落叶阔叶林。米仓山地区 SOS 主要受 3 月平均气温和 4 月降水的影 响,3 月平均气温升高以及 4 月降水增加导致物候始期提前;EOS 提前主要受 10 月降水的影响。

- [1] 夏传福,李静,柳钦火. 植被物候遥感监测研究进展. 遥感学报, 2013, 17(1): 1-16.
- [2] 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.中国科学院院刊,2010,25(3):310-316.
- [3] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 长沙: 湖南教育出版社, 1999: 1-4.
- [4] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013; 3-10.
- [5] 陆佩玲, 于强, 贺庆棠. 植物物候对气候变化的响应. 生态学报, 2006, 26(3): 923-929.
- [6] 项铭涛, 卫炜, 吴文斌. 植被物候参数遥感提取研究进展评述. 中国农业信息, 2018, 30(1): 55-66.
- [7] 刘啸添,周蕾,石浩,王绍强,迟永刚.基于多种遥感植被指数、叶绿素荧光与 CO₂通量数据的温带针阔混交林物候特征对比分析.生态 学报,2018,38(10):3482-3494.
- [8] Karlsen S R, Høgda K A, Wielgolaski F E, Tolvanen A, Tømmervik H, Poikolainen J, Kubin E. Growing-season trends in Fennoscandia 1982-2006, determined from satellite and phenology data. Climate Research, 2009, 39(3): 275-286.
- [9] Gao M D, Piao S L, Chen A P, Yang H, Liu Q, Fu Y H, Janssens I A. Divergent changes in the elevational gradient of vegetation activities over the last 30 years. Nature Communications, 2019, 10(1): 2970.
- [10] Shen M G, Jiang N, Peng D L, Rao Y H, Huang Y, Fu Y H, Yang W, Zhu X L, Cao R Y, Chen X H, Chen J, Miao C Y, Wu C Y, Wang T, Liang E, Tang Y H. Can changes in autumn phenology facilitate earlier green-up date of northern vegetation? Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 291: 108077.
- [11] Ren S L, Li Y T, Peichl M. Diverse effects of climate at different times on grassland phenology in mid-latitude of the Northern Hemisphere. Ecological Indicators, 2020, 113: 106260.
- [12] 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.
- [13] 李明,吴正方,杜海波,宗盛伟,孟祥君,张莲芝.基于遥感方法的长白山地区植被物候期变化趋势研究.地理科学,2011,31(10): 1242-1248.
- [14] 俎佳星,杨健.东北地区植被物候时序变化.生态学报,2016,36(7):2015-2023.
- [15] Shen X J, Liu B H, Xue Z S, Jiang M, Lu X G, Zhang Q. Spatiotemporal variation in vegetation spring phenology and its response to climate change in freshwater marshes of Northeast China. Science of the Total Environment, 2019, 666: 1169-1177.
- [16] 丁明军, 张镱锂, 孙晓敏, 刘林山, 王兆锋. 近 10 年青藏高原高寒草地物候时空变化特征分析. 科学通报, 2012, 57(33): 3185-3194.
- [17] 宋春桥, 游松财, 柯灵红, 刘高焕, 钟新科. 藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究. 植物生态学报, 2011, 35(8): 853-863.
- [18] 杨元合,朴世龙.青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系.植物生态学报,2006,30(1):1-8.
- [19] 孔冬冬,张强,黄文琳,顾西辉. 1982—2013 年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. 地理学报, 2017, 72(1): 39-52.
- [20] 董晓宇,姚华荣,戴君虎,朱梦瑶. 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. 地理科学进展, 2020, 39 (1): 24-35.
- [21] 王钊, 彭艳, 权文婷, 何慧娟, 李登科. 秦岭森林物候时空分布特征及对水热条件的响应. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1048-1058.
- [22] Xia H M, Qin Y C, Feng G, Meng Q M, Cui Y P, Song H Q, Ouyang Y, Liu G J. Forest phenology dynamics to climate change and topography in a geographic and climate transition zone: the Qinling Mountains in central China. Forests, 2019, 10(11): 1007.
- [23] 邓晨晖. 气候变化背景下秦岭山地物候时空变化及其响应[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- [24] 张晓东,朱文博,张静静,朱连奇,赵芳,崔耀平.伏牛山地森林植被物候及其对气候变化的响应.地理学报,2018,73(1):41-53.
- [25] Waldau T, Chmielewski F M. Spatial and temporal changes of spring temperature, thermal growing season and spring phenology in Germany 1951-2015. Meteorologische Zeitschrift, 2018, 27(4): 335-342.
- [26] 邓晨晖,白红英,高山,黄晓月,孟清,赵婷,张扬,苏凯,郭少壮. 1964—2015 年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应. 地理 学报, 2018, 73(5): 917-931.
- [27] 马新萍, 白红英, 贺映娜, 秦进. 基于 NDVI 的秦岭山地植被遥感物候及其与气温的响应关系——以陕西境内为例. 地理科学, 2015, 35 (12): 1616-1621.
- [28] 边金虎,李爱农,宋孟强,马利群,蒋锦刚. MODIS 植被指数时间序列 Savitzky-Golay 滤波算法重构. 遥感学报, 2010, 14(4): 725-741.
- [29] 陈效逑, 王林海. 遥感物候学研究进展. 地理科学进展, 2009, 28(1): 33-40.
- [30] Fu Y, Chen H, Niu H H, Zhang S Q, Yang Y. Spatial and temporal variation of vegetation phenology and its response to climate changes in Qaidam Basin from 2000 to 2015. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(4): 400-414.
- [31] 贾文雄,赵珍,俎佳星,陈京华,王洁,丁丹.祁连山不同植被类型的物候变化及其对气候的响应.生态学报,2016,36(23):7826-7840.
- [32] 夏浩铭,李爱农,赵伟,边金虎,雷光斌. 2001-2010 年秦岭森林物候时空变化遥感监测. 地理科学进展, 2015, 34(10): 1297-1305.
- [33] 丛楠, 沈妙根. 1982—2009 年基于卫星数据的北半球中高纬地区植被春季物候动态及其与气候的关系. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2737-2746.
- [34] Yu H Y, Luedeling E, Xu J C. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(51): 22151-22156.
- [35] Xie Y Y, Wang X J, Silander Jr J A. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(44): 13585-13590.