

基于数码照片的植被物候提取多方法比较研究

周玉科

(中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 植被物候能反映植被生长状况及其对气候变化的响应, 在景观或更小尺度上自动化观测分析植被物候的演化是对大尺度遥感分析和单株植物人工观测的有效补充。基于物候相机观测网络(PhenoCam)中3种典型植被类型(森林、草地和农作物)站点数据, 首先在群落尺度的感兴趣区(region of interesting, ROI)和像素2个尺度上计算植被指数, 然后利用多种曲线拟合植被生长轨迹, 提取关键物候参数, 最后对相机物候参数进行了不确定性分析和卫星遥感物候的比较验证。结果表明: 自定义ROI区域可以精确划定植被聚集区域, 减少天空、地面等非植被要素的干扰; 多方法的生长曲线拟合实验表明双逻辑斯蒂拟合比较适用于单生长期植被, 样条法较适用于多生长期植被; 单生长期植被可直接采用多种物候参数提取方法(Klosterman, Gu, TRS, Derivatives)从生长曲线上提取关键物候参数, 而多生长期植被可先用样条法拟合生长轨迹, 然后采用变化点方法提取关键物候参数; 生长曲线拟合与物候参数提取组合方法的不确定性分析发现, Klosterman方法具有较好的鲁棒性, 各组合方法模拟实验的均方根误差均小于0.005; 相机物候参数与MODIS EVI提取的遥感物候参数对比验证表明, 二者在森林、农作物上的物候参数比较一致; 像素级返青期参数的探索性分析发现, 在像素尺度上能够识别群落内物种及个体间的物候差异, 未来经过更深入的不确定性分析后, 可尝试作为自动化分析群落尺度生物多样性的方法。

关键词: 植被物候; 物候相机; 感兴趣区; 生长期开始点; 生长期结束点; 双逻辑斯蒂曲线; 阈值法; 导数法

1 引言

植被在全球物质与能量循环过程、调节全球碳平衡、减缓大气中温室气体浓度上升以及维护全球气候稳定等方面发挥着重要作用(宛敏渭, 1986; 宛敏渭等, 1987; 武永峰等, 2008; Chuine et al, 2010)。植被物候是植被形态上发生显著变化所对应的日期, 已经成为研究植被生命周期及其与气候变化关系的重要参量(White et al, 1997; 宫攀等, 2009), 其变化可以反映陆地生物圈对气候与水文等因素在季节及年际尺度变化的响应(Zhang et al, 2003), 广泛应用于气候变化对陆地生态系统影响的研究。

植被物候观测手段主要包括传统的人工观测和遥感影像分析2种。人工观测是植被物候研究领域长期采用的方法, 但是观测结果容易受观测者个

人经验等主观因素影响; 遥感影像为区域尺度的植被物候分析提供了可靠数据来源, 比如 NOAA/AVHRR、MODIS、Landsat TM、SPOT/VEGETATION、HJ-CDD等传感器数据被用来计算归一化差异植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)和叶面积指数(LAI)、光合辐射吸收指数(FAPAR)等, 进而有效提取植被的返青期、枯黄期、生长季长度和气候驱动物候模型等(王宏等, 2006; 鹿琳琳等, 2009; 刘玲玲等, 2012; 康峻等, 2014; 范德芹等, 2016)。然而遥感影像时空分辨率较低, 只能综合分析大尺度范围内(百米-千米)的植被物候状况, 分析结果的不确定性比较大, 难以识别不同植被群落和物种的物候差异。

基于数码相机照片的植被群落物候监测具有面向小尺度观测、过程自动化的特点, 既可以验证

收稿日期: 2017-11-21; 修订日期: 2018-05-10。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500103); 国家自然科学基金项目(41601478); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目(2016) [Foundation: National Key R&D Program of China, No.2016YFC0500103; National Natural Science Foundation of China, No.41601478; LREIS Open Fund, No.2016]。

作者简介: 周玉科(1984-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为生态遥感, E-mail: zhouyk@igsrr.ac.cn。

引用格式: 周玉科. 2018. 基于数码照片的植被物候提取多方法比较研究[J]. 地理科学进展, 37(8): 1031-1044. [Zhou Y K. 2018. Comparative study of vegetation phenology extraction methods based on digital images[J]. Progress in Geography, 37(8): 1031-1044.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.08.003

遥感的大尺度植被物候分析,又可从小群落、个体物种上实现精细物候特征观测,已经成为弥补人工观测与遥感分析不足的有力手段。文献资料表明,采用多种方法处理分析植被冠层的数字图像,可以减少植被季节性生长曲线中的噪声(Migliavacca et al, 2011; Klosterman et al, 2014),提升物候时间序列平滑及曲线拟合的效果(Ide et al, 2010; Julitta et al, 2014)。国内基于数码相机图像的植被物候研究已经取得一定进展:周磊、何洪林、张黎等(2012)和 Zhou 等(2013)分别选取西藏当雄高寒草地和长白山阔叶红松林为研究对象,探讨了近地面数字相机图像在高寒草地群落季相监测以及群落尺度物候模型改进方面中的应用;周磊、何洪林、孙晓敏等(2012)依托中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX),研究了数字相机在监测冬小麦生长状况及生态系统碳交换方面的作用;周惠慧等(2016)以北美地区瓦瑞牧场为研究区,利用近地面数字相机对该地区植被的春季生长情况进行监测,通过获取的影像计算相对绿度指数并模拟植被春季物候。这些基于数码相机照片的植被物候研究,通常选取整幅照片作为研究区域,忽略了土壤、天空等背景信息对植被物候参数提取结果的影响(Rodrigues et al, 2011);植被生长曲线拟合与物候参数提取方法也以多项式拟合法和简单阈值法为主,对不同植被类型物候特征分析的适应性较差。因此探索数码照片上可任意定制的感兴趣区(region of interest, ROI)划分,在此基础上实现多样化的植被生长曲线拟合和关键物候参数提取算法,值得深入研究。

本文选用生态系统物候相机观测网络美国地区部分站点的数码照片,包括森林、草地和农作物3种不同植被类型,实现在自定义的ROI区域内进行物候分析:介绍在ROI和单像素2种尺度下,基于时间序列照片计算每个站点一年周期内的多种植被

指数,经数据平滑与曲线拟合后,最终提取3种不同类型植被的关键物候参数,并分析数码照片提取物候参数的不确定性。本文成果可以为近地面植被物候分析提供新思路和方法上的参考。

2 数据与方法

2.1 物候相机数据及预处理

数码照片数据来源于生态系统物候相机观测网络(<https://phenocam.sr.unh.edu>),实验选取的物候观测站点分布见图1。为了分析不同植被覆盖类型的物候特征,选用了森林(含林地)、草地和农作物(玉米)3种类型的物候相机观测站点。物候相机观测网络站点的照片采集设备为StarDot NetCam SC型网络数码相机,照片的拍摄时间段为8:00-16:00,拍摄频率为30分钟一次。各物候相机观测点的地理位置、高程等详细信息见表1。

数据预处理过程包括:首先对采集的照片进行筛选,排除模糊、光线过强或过弱等质量差的站点年份数据;然后检查每个站点日期的连续性,数据

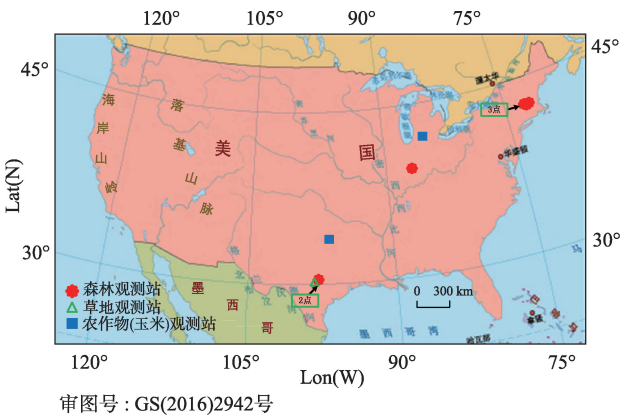


图1 物候数码相机观测站点分布图
Fig.1 Spatial distribution of the PhenoCam sites

表1 物候数码相机观测站点详细信息
Tab.1 Information of the PhenoCam sites

植被类型	站点名	纬度(N)	经度(W)	高程/m	站点描述
草地	Freemangrass	29.9300	98.0100	243	德克萨斯州,圣马可斯弗里曼农场(德克萨斯州立大学草原站点)
森林	Freemanwood	29.9400	97.9900	254	德克萨斯州,圣马可斯弗里曼农场(德克萨斯州立大学林地站点)
	Harvard	42.5378	72.1715	340	马萨诸塞州,彼得舍姆哈佛森林的EMS塔
	Harvardbarn	42.5353	72.1899	350	马萨诸塞州,彼得舍姆哈佛森林的Barn塔相机1
	Harvardbarn2	42.5353	72.1899	350	马萨诸塞州,彼得舍姆哈佛森林的Barn塔相机2
	Morganmonroe	39.3231	86.4131	275	印第安纳州摩根门罗州森林
农作物	Kelloggcorn	42.4375	85.3225	288	密歇根州Kellogg生物站
	Southerngreatplains	36.6970	97.4870	314	俄克拉荷马州比林斯ARM南部大平原中央设施

空缺严重的站点年份进行二次排除,对有较少日期遗漏的站点年份进行插补,插补方法为采用最邻近时期照片替换;最终选取出8个站点共18个年份的数码照片,照片命名格式为“站点名_年_月_日_时分秒”。

2.2 分析方法

实验分析的主要技术流程如图2所示,涵盖了从数据预处理到算法不确定性评估的一套完整的数据处理流程。首先,对相机数据预处理,对数据来源进行质量控制;然后利用参考影像选取ROI多边形提取多种植被指数时序数据,并采用Max、Night和Spline方法进行去噪处理;其次,对比 Klosterman、Spline、Gu、Beck 和 Elmore 方法拟合植被生

长曲线效果,通过与 TRS、Derivatives、Klosterman 和 Gu 方法的优化组合进行关键物候参数提取;最后进行相机物候参数提取的不确定性评估;此外,还探索性地分析了像素尺度上的植被物候参数。

2.2.1 区域选取与像素值计算

基于预处理后的数码照片,采用2种尺度的ROI作为植被物候提取的研究区域:自定义ROI区域和ROI内单个像素。

ROI的划分首先选取一张质量较好的照片作为该站点的参考,加载参考影像后选取多个点围成封闭的ROI区域(可划分多个ROI),然后将选取的ROI区域存储为多边形,继而用该多边形自动裁剪时间序列照片获取相应的ROI区域,提取ROI区域的数值组成连续的时间序列,并应用于后续物候参数提取过程。

(1) ROI区域分析是对整个ROI中的像素值进行平均,即分别计算每幅图像ROI的RGB 3个波段的平均数值(Digital Number, DN),计算方法如下。

$$DN_c = (\text{Sum}DN)_c / N_c \quad (1)$$

式中: c 表示为红(R)、绿(G)、蓝(B)中某一波段, DN 表示各波段的数值, $\text{Sum}DN$ 指ROI内某一波段的所有像素数值之和, N 为ROI包含像素数量。

(2) 像素分析可以认为是自定义ROI的极限最小值,作为最小尺度的分析,可获取物候参数空间分布并具有识别物种间、个体间物候差异的能力。该方法通过图像二值化提取ROI内像素,“0”表示ROI外像素,“1”表示ROI内像素,对“1”标记的像素进行后续物候提取与分析。由于逐像素计算量较大,为保证算法的执行效率,采取数据分治的策略将ROI划分为多个子区域,并行计算各子区域像素的物候参数,当各子区域均完成逐像素物候参数计算后,最终合并各子区域结果,得到物候参数的像素空间分布结果。

2.2.2 植被指数计算

植被指数是通过植被光谱反射和吸收特征来描述每个像元的绿度,能够准确反映植被生长状况。物候研究常用的植被指数包括归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、相对绿度指数(green chromatic coordinate, Gcc)、绝对绿度指数(excess green index, ExG)、比值绿度指数(G/R)、剩余绿度指数(greenness excess index, GEI)、相对蓝度指数(blue chromatic coordinate, Bcc)、相对红度指数(red chromatic coordinate, Rcc)等。本研究根据所用数码照片的特点,选取4个相

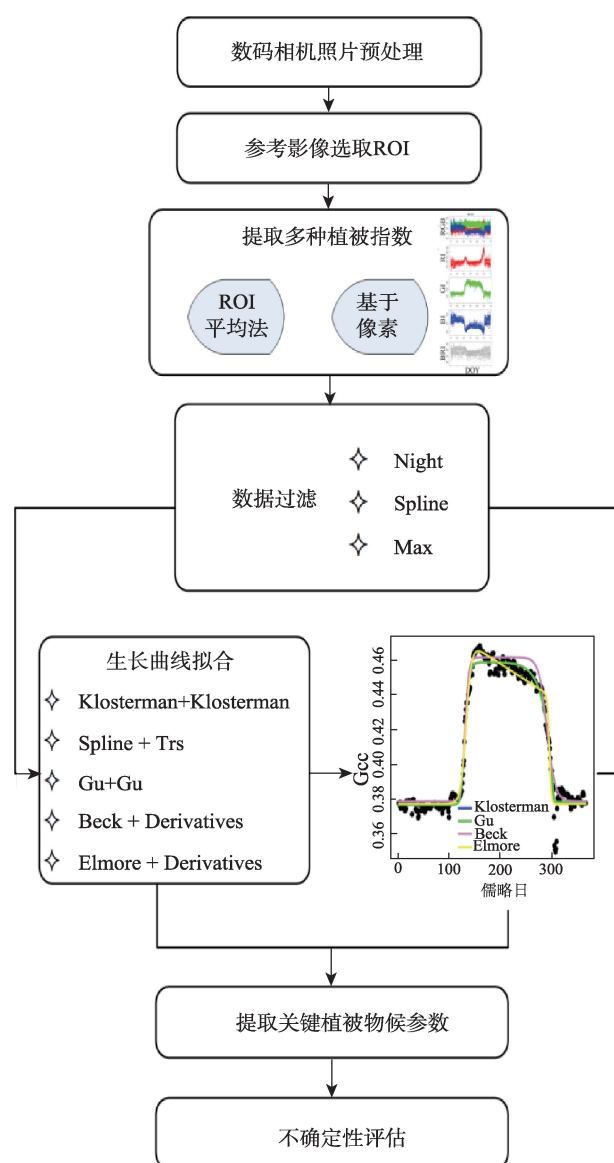


图2 技术流程图

Fig.2 Flowchart of data analysis

对指数(Gcc, Bcc, Rcc 和 BRI)作为模拟植被生长曲线的指标(式2),其中, G_{DN} 、 R_{DN} 、 B_{DN} 分别指上一步获得的区域上绿、红、蓝3个波段的数值。

$$\begin{cases} Gcc = \frac{G_{DN}}{R_{DN} + G_{DN} + B_{DN}} \\ Bcc = \frac{B_{DN}}{R_{DN} + G_{DN} + B_{DN}} \\ Rcc = \frac{R_{DN}}{R_{DN} + G_{DN} + B_{DN}} \\ BRI = \frac{B_{DN} + R_{DN}}{R_{DN} + G_{DN} + B_{DN}} \end{cases} \quad (2)$$

2.2.3 时序数据过滤

为了减少原始观测数据因天气、仪器等原因产生的噪声影响,需要对植被指数时序数据进行平滑过滤。根据数码照片的特点和以往研究基础,提出3种针对不同噪声来源的数据过滤方法(Filippa et al, 2015):

(1) 最大值过滤法:识别3天滑动窗口内第90个百分位值为最大值,即定义图像被90%云层覆盖时为阴天无直接光照,图像云层小于10%时森林冠层被阳光直射(Sonnentag et al, 2012)。

(2) 固定阈值法:通过删除Gcc中低于特定阈值的记录去除光照不足或夜间数据,阈值默认为0.2。

(3) 样条过滤法:基于递归样条平滑和残差计算去除落在特定区域外的异常值(Klosterman et al, 2014)。

ROI尺度下,选取各典型站点一年内时间序列照片计算Gcc植被指数,并分别采用以上3种方法进行数据过滤,各站点的参照图像及典型的年内Gcc指数的时间序列如图3所示;参考图像中黑色方框部分为选取ROI,黑色点代表原始值,红色点代表固定阈值方法结果,绿色点代表样条方法结果,蓝色点代表最大值方法结果。

通过对比3种方法的过滤结果可知,由于本文实验数据设定时间段不包含夜晚,固定阈值法未能较好发挥作用;样条方法同样过滤效果较差;而最大值方法可有效地最小化场景照明变化带来的噪声影响,因此后续拟合数据主要是基于该方法的过滤结果。

2.2.4 数据拟合

植被生长曲线拟合常用方法包括Logistic函数拟合法、非对称性高斯函数拟合法和多项式拟合法等。其中双逻辑斯蒂(Double Logistic, D-L)方法具有无需人为设置阈值、适用于提取不同类型植被物候的特点,广泛应用于植被生长过程模拟研究。本

文选取了4种基于双逻辑斯蒂方法的植被生长曲线拟合模型(Beck, Gu, Elmore, Klosterman模型),探索它们在不同植被类型下,利用数码照片生成的绿色指数模拟植被生长过程的适用性。

(1) Beck方法是通过双逻辑函数来拟合一年内NDVI时间序列曲线,将NDVI做为时间 t 的函数(Beck et al, 2006),包括以下6个参数:冬季NDVI(w_{NDVI})、最大NDVI(m_{NDVI})、曲线上升(S)和下降(A)时的拐点、速率增加或减少曲线拐点处的点(mS, mA)。

$$NDVI(t) = (m_{NDVI} - w_{NDVI}) \left(\frac{1}{[1 + \exp(-mS \times (t - S))] + \frac{1}{[1 + \exp(-mA \times (t - A))] - 1}} + w_{NDVI} \right) \quad (3)$$

$$w_{NDVI} = \sqrt{\max(IMGn_1) \times \max(IMGn_2)}$$

除冬季NDVI外的其余5个参数采用非线性最小二乘法迭代计算。 $IMGn_1$ 、 $IMGn_2$ 表示10月和11月的NDVI。

(2) Gu方法是基于植被冠层光合能力指数(canopy photosynthetic capacity, CPC)对植被生长轨迹进行建模的方法(Gu et al, 2009)。

$$A(t) = y_0 + \frac{a_1}{\left[1 + \exp\left(-\frac{t - t_1}{b_1}\right)\right]^{c_1}} - \frac{a_1}{\left[1 + \exp\left(-\frac{t - t_2}{b_2}\right)\right]^{c_1}} \quad (4)$$

式中: $A(t)$ 是第 t 天的植被冠层光合能力指数, $y_0, a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, t_1$ 和 t_2 为经验估计参数。此模型优点是灵活,可适应植物群落光合作用的不同季节周期,能够同时描述植被恢复和衰老的生长过程。

(3) Elmore方法基于光合植被分数(FPV)时间序列进行拟合,可以有效避免早期低估夏季初的观测值和夏季晚期过度预测(Elmore et al, 2012)。其中, m_1 代表冬季的FPV均值, m_2 代表夏季FPV与冬季的差值, m_3, m_4 和 m_5, m_6 分别是调整春季和秋季季节生长曲线形状的参数, m_3' 代表春季绿度开始上升的拐点, m_5' 代表秋季绿度开始下降的拐点, m_7 代表夏季绿度趋势。

$$v(t, m) = m_1 + (m_2 - m_7 \cdot t) \left(\frac{1}{\left[1 + \exp\left(\frac{m_3' - t}{m_4'}\right)\right]} - \frac{1}{\left[1 + \exp\left(\frac{m_5' - t}{m_6'}\right)\right]} \right) \quad (5)$$

式中: $m_3' = m_3/m_4; m_4' = 1/m_4; m_5' = m_5/m_6; m_6' = 1/m_6$ 。

(4) Klosterman方法是在Elmore方法的研究基础上,引入2个附加的广义S形公式参数(q_i 和 v_i),使曲线上升和下降的渐近线取不同的斜率,通过许多

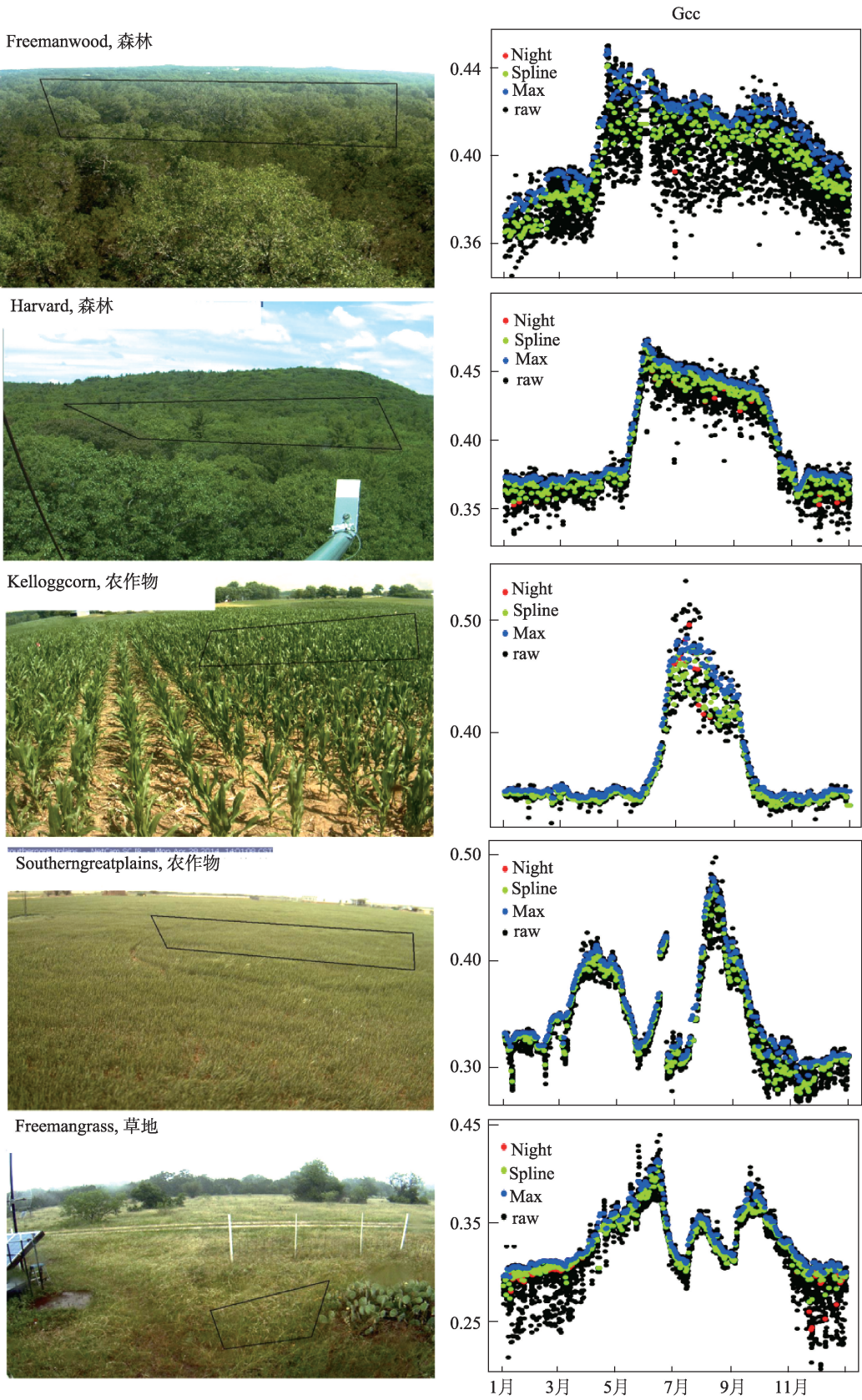


图3 各观测站点示例图像及其Gcc分布

Fig.3 Sample images of the PhenoCam sites and distribution of green chromatic coordinate(Gcc)

站点年观测数据(参数 a_2 和 b_2),或通过参数 a_1 表示休眠季节值的变化, h_1 和 h_2 为经验拟合参数(Klosterman et al, 2014)。

$$f(t) = (a_1 t + b_1) + (a_2 t^2 + b_2 t + c)$$

$$\left[\frac{1}{[1 + q_1 \exp(-h_1(t - n_1))]^{n_1}} - \frac{1}{[1 + q_2 \exp(-h_2(t - n_2))]^{n_2}} \right] \quad (6)$$

2.2.5 物候参数提取方法

本文提取的植被物候参数主要包括 SOS(start of growing season, 生长季开始期)、EOS(end of growing season, 生长季结束期)、LOS(length of growing season, 生长季长度)、POP(peak of season position, 生长旺季)、Peak(maximum seasonal Gcc, 生长峰值)等植被生长过程的关键事件点和返青速率、衰落速率等参数,根据选用的具体方法(TRS, Derivatives, Klosterman 和 Gu 4种方法)各阶段参数意义有少许差别。这些方法大体可分为动态阈值法和曲率最大值法两大类,其基本原理简介如下:

(1) 曲率最大值法是在植物生长阶段得到的2个极值点,分别对应返青期和成熟期;在衰老阶段中得到的2个极值点,分别对应衰老期与休眠。拟合曲线曲率计算方法如式(7)所示(于信芳, 2005)。

$$\rho(t) = \left| \frac{g''(t)}{(1 + g'(t)^2)^{3/2}} \right| \quad (7)$$

式中: $\rho(t)$ 为曲率, $g(t)'$ 是关于 t 的一阶导数, $g(t)''$ 是关于 t 的二阶导数。

(2) 动态阈值法(Jonsson et al, 2002)将植被指数增长达到当年该指数振幅一定百分比的时刻定义为生长季的开始时间,而该指数降低到当年振幅一定百分比的时刻定义为生长季的结束时间,一般约为年振幅的20%。此方法利用植被指数与其当年振幅的动态比值形式设置阈值,在时间和空间上都有更好的适用性。

其中, TRS 方法为阈值法,能够提取 SOS、EOS、LOS、POP、Peak 等参数; Derivatives 方法基于一阶导数局部极值提取以上参数和 rsp(rate of spring greenup, 春季生长率)、rau(rate of autumn senescence, 秋季衰落率); Klosterman 方法根据曲率变化率的局部极值提取 Greenup(返青期)、Maturity(成熟期)、Senescence(落叶期)、Dormancy(休眠期)4个参数; Gu 方法基于一阶导数中局部最大值的组合提取 UD(upturn date, 返青期)、SD(stabilisation date, 稳定期)、DD(downturn date, 落叶期)、RD(recession date, 休眠期)、prp(peak recovery rate, 峰值恢复速率)、psr(peak senescence rate, 峰值衰落速率)。

2.2.6 不确定性评估与对比研究

为了检验拟合方法的稳定性,本文主要对双逻辑斯蒂拟合方法进行不确定性估计。主要原理是利用拟合结果与观测数据之间的残差生成随机噪声,递归地对添加随机噪声的原始数据进行拟合,进而对拟合的生长曲线和提取参数进行不确定性评估。实验随机模拟500次生长季节轨迹曲线,利用模拟值与观测值之间的 RMSE(root mean squared error, 均方根误差)评估不确定性。

此外,为了验证本文中物候提取参数的准确度,将相机数据物候参数提取结果与 MODIS 卫星遥感物候提取结果进行对比分析。利用 MODIS EVI 产品(MOD13Q1, 250 m 空间分辨率, 16 天时间分辨率),以观测站点坐标为中心取周围 3×3 像素的平均值作为该站点的 EVI 值,构成 EVI 时间序列并按照物候相机同样方法提取物候参数,作为该站点相机物候的对比研究。

3 结果和分析

3.1 不同植被类型生长曲线拟合与关键物候参数提取结果对比分析

采用 Klosterman, Gu, Beck 和 Elmore 方法对 MAX 过滤法处理后的不同类型植被的植被指数时间序列进行拟合,不同植被的 Gcc 拟合结果如图4所示。

由图4可知不同植被类型的年内生长轨迹具有显著差异。林地生长季最长,森林其次,玉米的生长季最短,并且远小于另外3种植被类型,其中草地生长轨迹出现了2个生长季高峰,夏季出现了休眠期,这是由于该草地站点位于半湿润与半干旱的过渡带地区,生长环境长期受高温和干旱制约,因此草种需适应当地气候,属于冷季型草坪草,有春秋2个生长高峰期。4种植被类型的返青期开始由早到晚依次为草地、林地、森林和玉米作物;衰落期开始依次为玉米、森林、草地和林地;玉米的休眠期最长,生长期大约集中在儒略日160~260天之间;林地由于其植被类型为常绿阔叶混交林,休眠期最短,生长期约为儒略日110~340天之间;而森林的生长期略短于林地,儒略日区间为150~280天。此外,不同拟合方法对于不同植被类型的植被指数时间序列数据拟合效果存在不同程度的差异,由图4可知,4种拟合方法(Beck, Elmore, Klosterman, Gu)对于农作物时序数据拟合效果差异较小,对草地和林地时

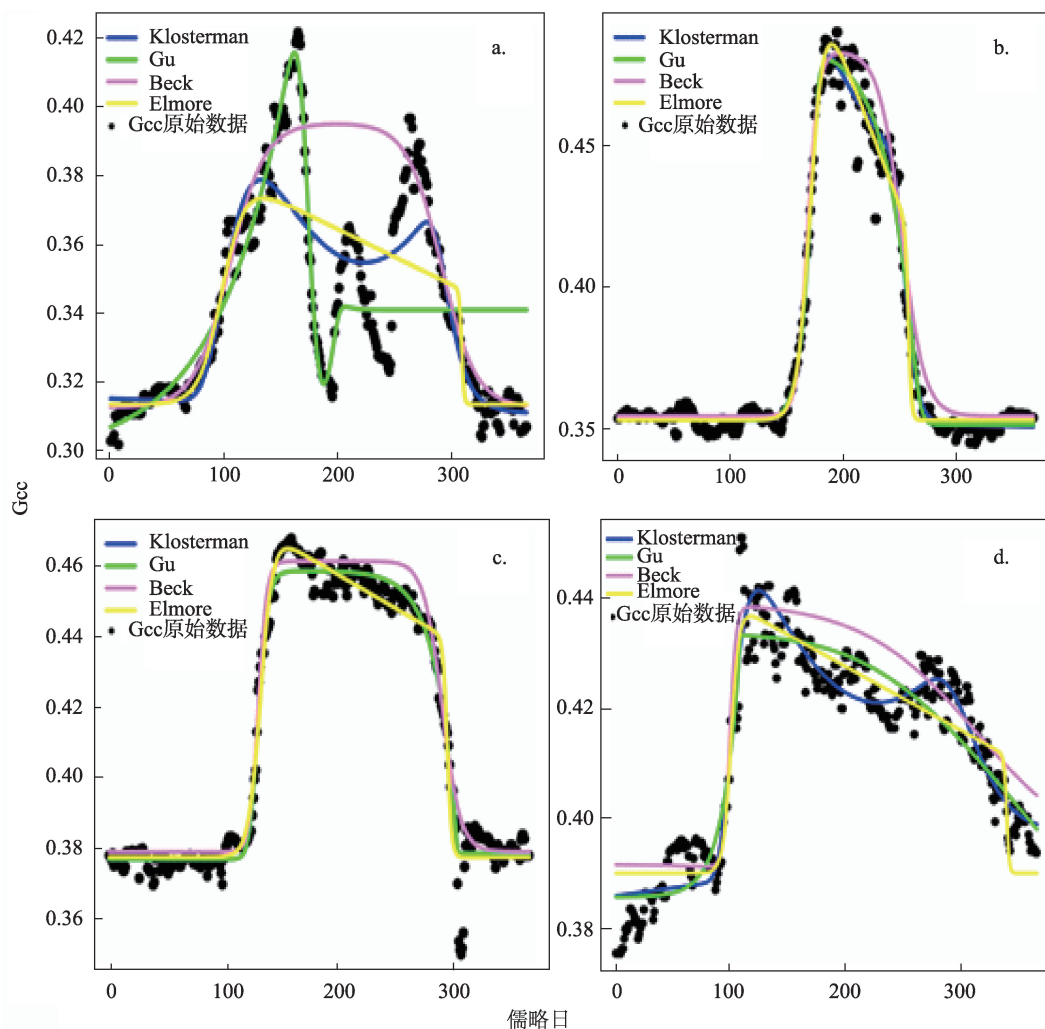


图4 不同类型植被生长曲线拟合方法对比图

(a. 草地 Freemangrass, 2013; b. 玉米 Kelloggcorn, 2016; c. 森林 Harvard, 2016; d. 林地 Freemanwood, 2013)

Fig.4 Comparison of four growth curve fitting methods for different vegetation types (a. grass; b. corn; c. forest; d. woodland)

序数据拟合效果差异较大;Elmore方法拟合结果较为符合农作物时序数据的原有趋势特征;Klosterman方法在不同季节交替时绿度发生变化的拐点处理较为合理,综合效果优于其他3种方法。

数码照片中的噪声或弱信号会导致Gcc值较低,从而引起植被生长幅度较低,而双逻辑斯蒂方程对这种情况适应性差。因此,本文采用多种物候参数提取方法(TRS, Derivatives, Klosterman, Gu)对基于Spline, Beck, Elmore, Klosterman, Gu方法拟合后的草地、森林和农作物生长轨迹曲线分别提取其关键物候参数,不同拟合方法与物候参数提取方法的结果对比如图5所示。通过分析不同拟合方法的模拟值与提取植被指数之间的RMSE,可为植被指数时间序列数据选择合适的生长曲线拟合提取方法。

图5进一步反映出不同拟合方法效果的差异,根据拟合结果与观测值之间的均方根误差可知,草地较为适合采用Spline拟合方法,该方法拟合的均方根误差远小于另外4种双逻辑斯蒂拟合法;Klosterman方法是适用于森林的最佳拟合方法,其均方根误差仅为0.002;各方法对农作物生长轨迹的拟合效果差异较小,除Elmore和Beck误差稍大,另外3种方法的RMSE相同,均为0.005。单从植被生长曲线拟合的效果来看,Spline样条法能很好地拟合出多生长季的植被生长过程,其他拟合方法基本都是简单的钟形曲线,忽略了生长过程中的波动情况。以筛选后的最佳曲线拟合方法为基础检验4种物候参数提取法的效果,结果表明在同一拟合方法下TRS和Derivatives提取方法可得到植被的SOS、

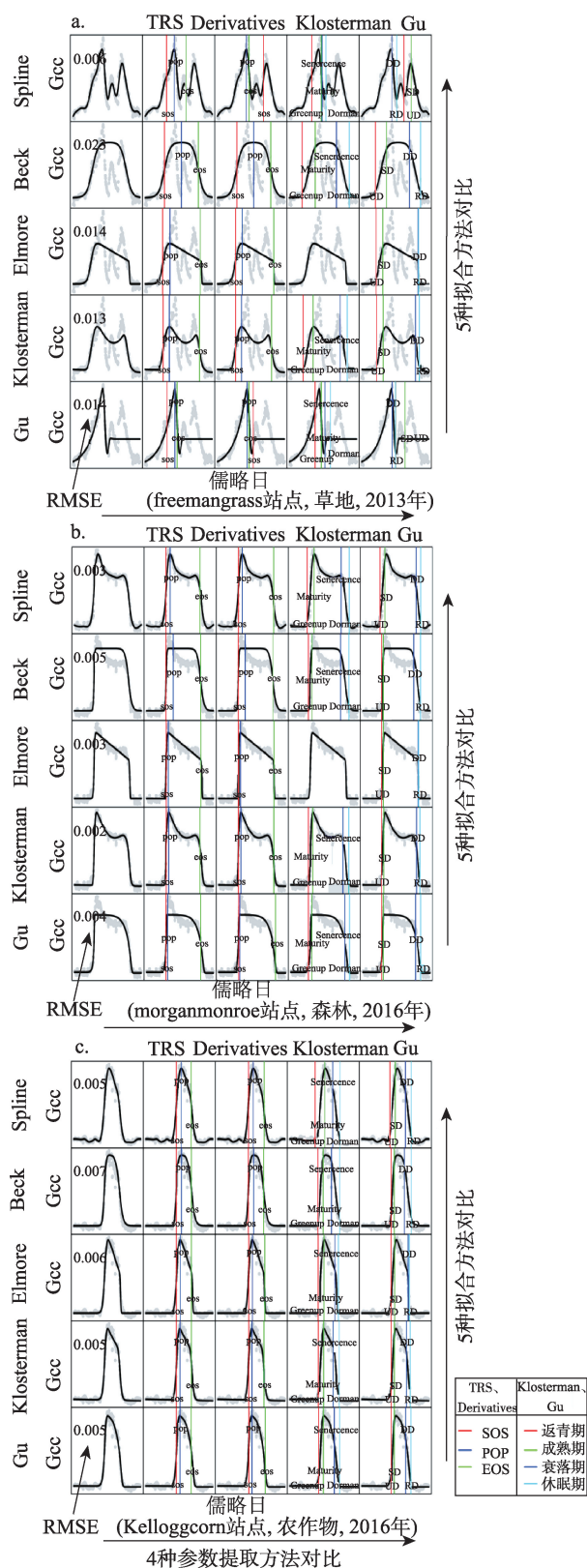


图5 不同植被类型下生长曲线拟合方法与参数提取方法组合结果对比图

Fig.5 Comparison of four growth curve fitting methods for different vegetation types

POP和EOS参数,且提取结果一致,因此在合适的拟合方法下,两者均可使用;而Klosterman和Gu方法可得到返青期、成熟期(稳定期)、衰落期和休眠期4个参数,提取结果略有差异,但Klosterman和Klosterman、Gu和Gu同种拟合和提取方法较为匹配,结果精确度较高。因此可根据需要选择合适的拟合和提取方法组合,如Klosterman和Klosterman、Gu和Gu、Spline和TRS或Derivatives、Spline和Klosterman或Gu,以上方法组合可得到森林和玉米较为精确的物候参数。

3.2 站点相机物候参数结果

为了进一步分析各拟合方法和提取方法的结果,将各实验站点基于较为适合的拟合结果的不同提取方法得到的SOS、LOS和EOS进行可视化,由于各提取算法物候参数定义存在差异,将Greenup和UD归为SOS, Dormancy和RD归为EOS,并补充计算得到各站点年的LOS,统计结果如图6所示。图中各子图左向右采用参数提取方法依次为TRS、Derivatives、Klosterman和Gu,各箱线图的箱体上端及下端的横线分别对应上下四分位数,中间的横线代表中位数;箱体外延伸的线段表示数据分布区间;若站点仅有一年数据则用横线表示。

由图6可知,Harvard森林站点2014–2016年基于Klosterman拟合曲线提取的物候参数较为稳定,SOS在第117~136儒略日,EOS在第270~287儒略日,生长期区间为142~150天;Freemanwood林地站点2013年内TRS和Derivatives结果较为一致,SOS约在儒略日第100天,EOS约在儒略日第310天,生长期为210天;Kelloggcorn农作物站点2016年4种参数提取方法计算得到的生长期在81~89天范围内,差异较小,其中SOS在第157~171儒略日,EOS在第243~260儒略日;Southerngreatplains农作物站点2013–2015年SOS约在儒略日70~91天之间,EOS在儒略日143~167天之间,生长期约为70~90天;对于Freemangrass草地站点2013年数据,基于Spline拟合曲线后用4种方法提取的物候结果差异较大,不同方法间提取的SOS相差50天,EOS相差约60天,生长期相差40天。由于该草地生长轨迹具有多个生长季,采用以上方法提取的物候参数结果与草地实际生长情况出现较大的偏差。

针对多生长季草地的情况,采用变化点方法提取关键物候参数(图7)。变化点方法是根据植被实际生长轨迹中的趋势转折点,提取得到关键物候参数。如图7所示,在生长曲线上共识别出4个变化

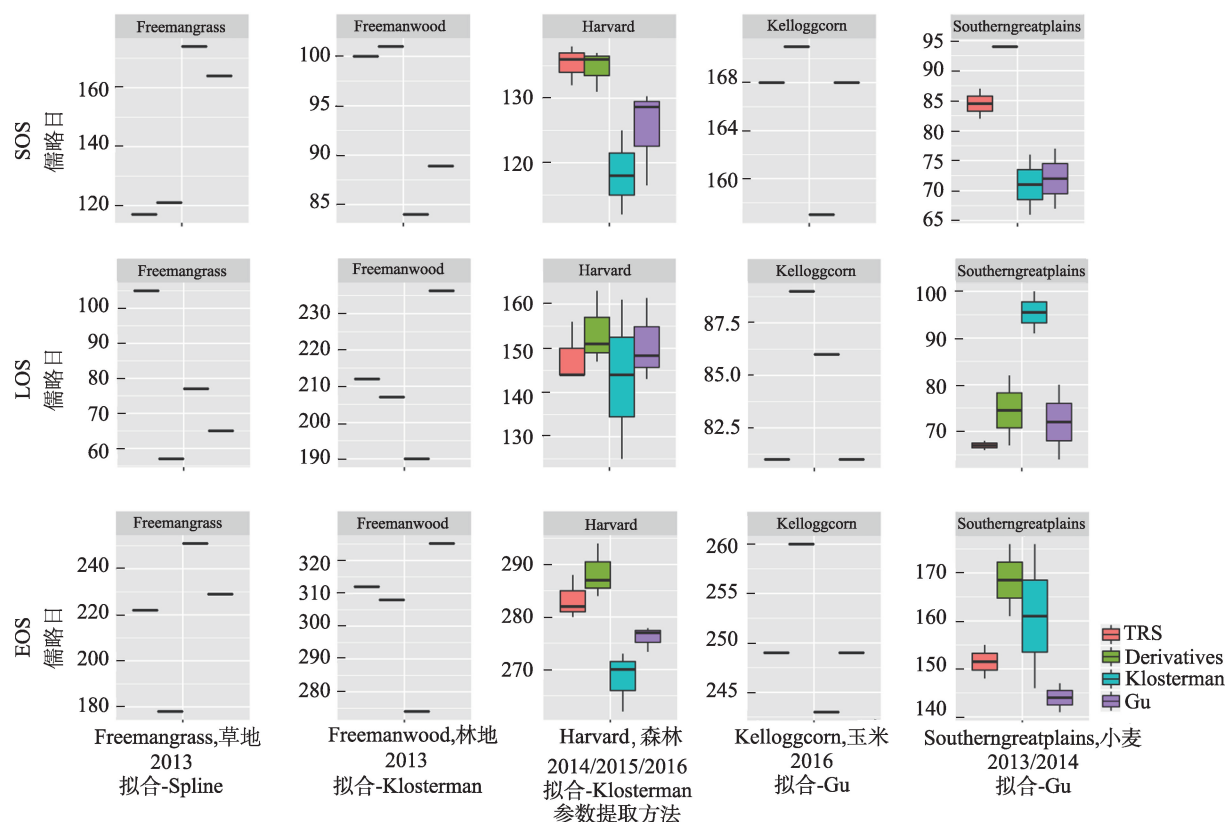


图6 不同方法下各站点相机物候参数结果(SOS, LOS, EOS, 黑色横线表示站点只有一年数据)

Fig.6 Phenology parameters for each site inferred from different extraction methods

点构成2个显著的生长季。SOS出现在4月初,6月中旬和9月中旬出现2个生长峰值,6月底-9月初处于休眠期,7月-9月存在一个小的生长峰值。总体来看,变化点检测方法能反映该草地的实际生长轨迹中的关键物候事件,表明该方法较为适合有多个生长峰值的植被,能弥补上述方法组合的不足。由于变化点的设置需要不断的人工调优,因此该方法还需要进一步改进,使该过程自动化。

3.3 不确定性分析

(1) 生长曲线拟合不确定性评估

为了评估生长曲线拟合和关键物候参数提取组合方法的鲁棒性,对不同公式下曲线拟合的效果进行不确定性评估。选取2016年Harvard森林数据为例,首先将拟合曲线和观测值之间的残差生成随机噪声,然后对混入随机噪声的原始数据进行递归的生长轨迹曲线拟合,最后生成一系列的拟合曲线,拟合参数的不确定性自动传递给后面的物候参数提取过程,因此曲线的拟合和物候参数提取效果可反映各种方法的不确定性(图8)。

从植被指数的散点分布特征可以看出,植被生长过程在春季呈现快速的返青速率,生长开始期

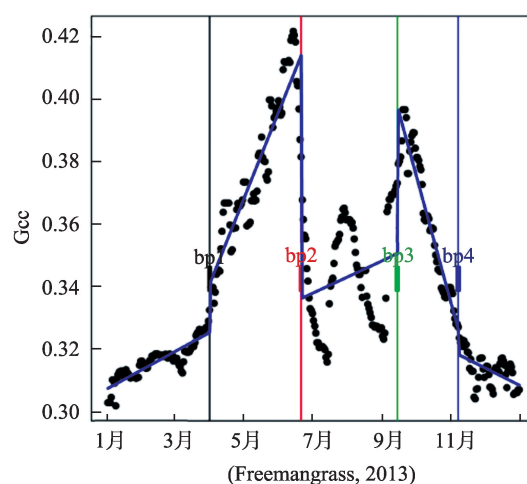


图7 变化点方法提取草地物候参数示意图

Fig.7 Results of extracting grassland phenophases based on changing points method

(SOS)大约都在120~140天范围内,在150天左右达到生长期峰值(POP),生长期结束在280~300天区间内,且生长峰值期有短期突出的植被指数出现(图8)。从多次拟合的效果来看,Klosterman拟合的生长曲线形态和原始观测数据最贴近(图8a),关键

物候参数在曲线中的位置也比较合理。其次与原始观测数据比较贴近的是 Elmore 曲线拟合方法,其物候提取方法为 Derivatives 导数阈值法。这2种方法均可提取出植被返青生长率,显著优点是拟合出生长期顶点短期的峰值区域。图 8b 和图 8c 的拟合过程在植被成熟期生长曲线比较平稳,与实际植被生长中的快速衰落过程不符。综上所述,在北方森林各种方法在物候关键参数的提取差距不大,Gu 和 Beck 方法对北方森林这种不对称生长过程的衰落期拟合效果较差,适合提取返青期阶段的关键物候参数,Klosterman 和 Elmore 方法总体效果较好。

(2) 卫星遥感物候对比研究

为进一步分析相机照片提取关键物候参数结果的效果,基于 MODIS EVI 数据,通过 TRS 和 Derivatives 方法拟合提取了各站点植被的 SOS, EOS 和 LOS,各参数结果如图 9 所示(对应图 6 物候相机

结果)。由于物候提取算法对观测数据的适用性问题,本文只选择了 TRS 和 Derivatives 方法处理 MODIS EVI 数据,并作为相机物候提取结果的对比。

由图 9 可知,Harvard 森林站点 2014–2016 年基于 MODIS EVI 产品提取的 SOS 约在第 115~140 儒略日,EOS 在第 274~280 儒略日,LOS 为第 132~152 儒略日,与相机数据提取的各参数相差 2~10 儒略日;Freemanwood 林地站点 2013 年内,MODIS 产品提取的 SOS 约在第 72~77 儒略日,EOS 约在第 302~312 儒略日,LOS 为第 230~236 儒略日,SOS 与相机提取物候参数相差约 23 个儒略日,而 EOS 两者几乎相等;Kelloggcorn 农作物站点 2016 年 MODIS-EVI 提取 SOS 为第 110~122 儒略日,EOS 在第 300~325 儒略日内,LOS 约为 190~202 儒略日,与相机 LOS 结果约差 80~110 儒略日;Southerngreatplains 农作物站点 2013–2015 年 SOS 约在第 60~110 儒略

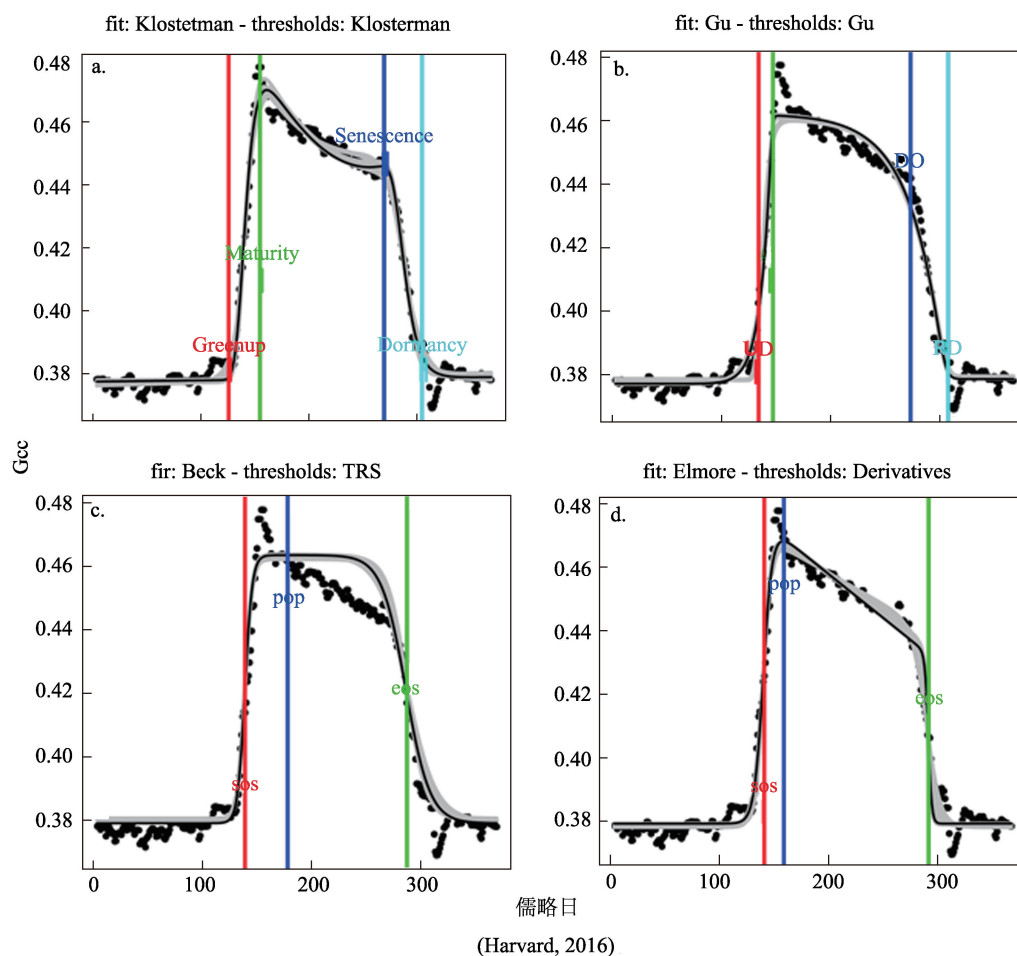


图 8 拟合与物候提取方法组合的不确定性估计(2016 年, Harvard 森林)

(a. Klosterman + Klosterman; b. Gu + Gu; c. Beck + TRS; d. Elmore + Derivatives)

Fig.8 Uncertainty estimation of four combinations methods (fitting and phenology extraction methods)

(a. Klosterman+thresholds: Klosterman; b. Gu+ thresholds: Gu; c. Beck+ thresholds: TRS; d. Elmore+ thresholds: Derivatives)

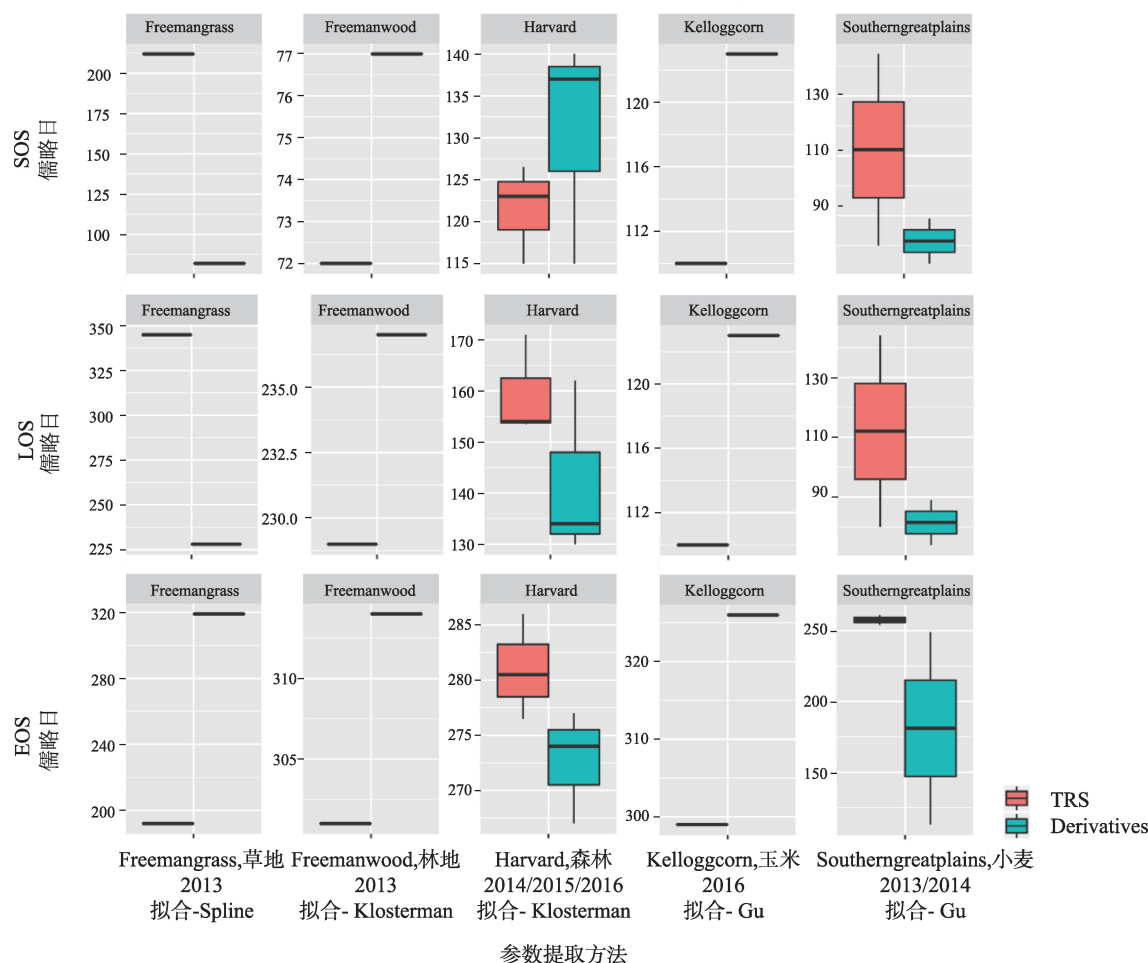


图9 基于MODIS EVI产品提取的各站点物候参数结果(SOS, LOS, EOS)

Fig.9 Phenology parameter results for each site using two extraction methods based on MODIS EVI (SOS, LOS, EOS)

日, EOS在第141~250儒略日, LOS约为第90~140儒略日, 各参数与相机物候参数相差约20儒略日; Freemangrass草地站点2013年MODIS EVI 2种提取结果差异较大, 每个参数2种方法间提取结果SOS相差100儒略日左右; 由图6可知通过相机提取草地物候参数各方法间差相约40~60儒略日。本文基于相机数据提取的物候参数与MODIS EVI提取结果基本一致, 但由于MODIS数据时空尺度远大于近地面相机数据, 且两者均受数据质量和外界气象条件影响, 因此结果存在一定的差异。

3.4 像素尺度物候

虽然基于近地面影像ROI的群落尺度物候分析已是较小尺度的研究, 但是由于群落组成的多样性, 其仍是比较综合性的物候分析。为探索植物个体间甚至个体内的物候差异, 以Harvard森林返青开始日期为例进行像素尺度分析, 对选取的ROI内49307个像素逐个进行计算提取分析。运算过程中

为保证系统运算流畅性及速度, 将其划分成10个子区域, 前9个子区域像素个数均为4930, 第10个子区域像素个数为4937, 按子区域计算完成后, 最终进行数据合并。最终植被返青期(Greenup)参数结果如图10所示。

图10中ROI内大部分区域的返青期出现在100~120儒略日之间, 但右下方区域、右上方和上方小部分区域的返青期较早, 约在40~60儒略日内, 该结果反映了群落尺度内不同物种及个体间的物候差异。与参考图像同一位置对比发现, ROI内大部分树种为落叶阔叶树种, 而返青期出现较早的区域大多为常绿针叶树种, 明显反映出群落尺度下物种的物候参数差异化; 此外, 同一树种不同层及不同个体的返青期也略有差异, 这为同一物种间的空间变异性识别提供了途径。因此对于大多数混交林群落内的物候研究, 基于像素级别提取分析是一种较为精确的技术途径, 但此种方法的缺点在于计算

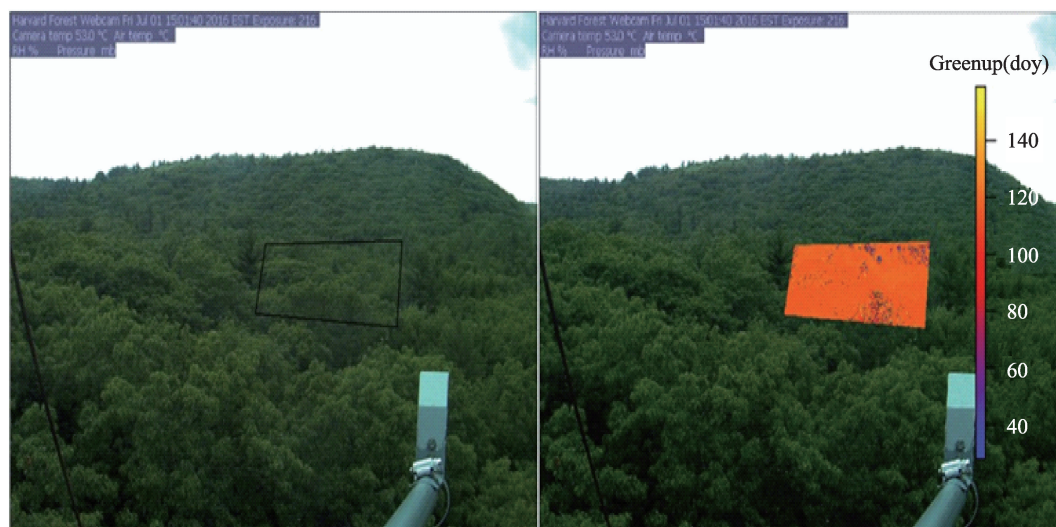


图10 返青期群落尺度空间分布(Harvard森林)

Fig.10 Spatial analysis of Greenup at community scale

量大,若要实现高效提取对计算设备的要求较高。该案例研究表明,在北方森林区域常绿针叶林返青期显著早于阔叶林。植被物候的多样性间接地反映了生态系统的生物多样性,逐像素的物候分析使自动化的认识生态系统生物多样性的空间分布和物种的聚类情况成为可能。

4 结论与展望

本文基于不同植被类型站点的数码照片,通过构建ROI研究区域,利用多种方法组合对ROI尺度和像素尺度下植被物候参数进行提取分析,得出如下结论:

(1) ROI尺度下基于RGB波段的平均亮度值计算不同植被指数,对草地、森林、玉米的植被指数时间序列图像进行数据滤波、生长过程拟合以及进行关键物候参数提取。结果表明,Klosterman、Gu双逻辑斯蒂方程法适用于单生长期植被的生长轨迹拟合,而样条法适合多生长期植被生长轨迹拟合;Klosterman、Gu、TRS、Derivatives参数提取方法与Klosterman、Gu双逻辑斯蒂拟合方法组合可有效提取单生长峰值植被关键物候参数,其均方根误差均小于0.005。而多生长峰值植被物候时间序列可根据样条法拟合后的生长轨迹采用变化点方法,通过设置合理的变化点个数来提取关键物候参数。

(2) 根据多种生长曲线拟合及物候参数提取组合方法的不确定性评估可知,其拟合提取结果与多

次随机模拟曲线及参数提取结果无显著差异,说明以上方法组合具有较强的鲁棒性。与MODIS EVI物候参数提取结果对比,二者在森林和农作物的物候参数比较一致,而多生长季植被物候参数结果相差较大。

(3) 不同植物物种的关键物候参数出现时间点不同,采用ROI内逐像素的物候参数提取方法,不仅可以有效识别同一群落内物种间差异,有利于物种特异性物候研究;而且因个体间物候的差异还可检验同一生态系统的空间变异性以及森林冠层与林下叶层间的物候差异。

总之,基于数码相机的植被物候观测作为近地面遥感的一种手段,可作为卫星遥感植被物候分析结果的有效验证。本文基于数码照片ROI区域提取分析不同植被的关键物候参数,计算过程中仍然存在一些不确定性因素,如照片数据质量、拍照环境(光照、天气)、分析方法等,在今后的应用中还需要继续改进,减少数据和方法引起的不确定性,增强方法的普适性。此外,由于像素尺度的物候分析计算量大,还未实现全面的物候参数提取与不确定性分析,在未来的工作中将继续探索该方面的应用,尝试在像素尺度上分析植物个体或物种间的物候差异。

致谢:感谢美国相机物候观测网络(PhenoCam)提供站点数码照片观测数据;本文受Andrew D. Richardson研究的启发,在此向其本人和团队表示致谢。

参考文献(References)

- 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 2016. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述[J]. 地理科学进展, 35(3): 304-319. [Fan D Q, Zhao X S, Zhu W Q, et al. 2016. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data. *Progress in Geography*, 35(3): 304-319.]
- 宫攀, 陈仲新. 2009. 基于MODIS数据的东北地区植被物候参数提取[J]. 土壤通报, 40(2): 213-217. [Gong P, Chen Z X. 2009. Regional vegetation phenology monitoring based on MODIS[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 40(2): 213-217.]
- 康峻, 侯学会, 牛铮, 等. 2014. 基于拟合物候参数的植被遥感决策树分类[J]. 农业工程学报, 30(9): 148-156. [Kang J, Hou X H, Niu Z, et al. 2014. Decision tree classification based on fitted phenology parameters from remotely sensed vegetation data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(9): 148-156.]
- 刘玲玲, 刘良云, 胡勇. 2012. 基于AVHRR和MODIS数据的全球植被物候比较分析[J]. 遥感技术与应用, 27(5): 754-762. [Liu L L, Liu L Y, Hu Y. 2012. Comparative analysis of global vegetation phenology based on AVHRR and MODIS[J]. *Remote Sensing Technology & Application*, 27(5): 754-762.]
- 鹿琳琳, 郭华东. 2009. 基于SPOT/VEGETATION时间序列的冬小麦物候提取方法[J]. 农业工程学报, 25(6): 174-179. [Lu L L, Guo H D. 2009. Extraction method of winter wheat phenology from time series of SPOT/VEGETATION data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25(6): 174-179.]
- 宛敏渭. 1986. 中国自然历选编[M]. 北京: 科学出版社. [Wan M W. 1986. *Chinese natural history collection*[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 宛敏渭, 刘秀珍. 1987. 中国物候观测方法[M]. 北京: 科学出版社. [Wan M W, Liu X Z. 1987. *Phenological observation methods in China*[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 王宏, 李晓兵, 莺歌, 等. 2006. 基于NOAA NDVI的植被生长季模拟方法研究[J]. 地理科学进展, 25(6): 21-30. [Wang H, Li X B, Ying G, et al. 2006. The methods of simulating vegetation growing season based on NOAA NDVI[J]. *Progress in Geography*, 25(6): 21-32.]
- 武永峰, 李茂松, 宋吉青. 2008. 植物物候遥感监测研究进展[J]. 气象与环境学报, 24(3): 51-58. [Wu Y F, Li M S, Song J Q. 2008. Advance in vegetation phenology monitoring based on remote sensing[J]. *Journal of Meteorology & Environment*, 24(3): 51-58.]
- 于信芳. 2005. 基于MODIS数据的森林物候期遥感监测及森林类型识别研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所: 10-12. [Yu X F. 2005. *Forest phenological monitoring and forest type identifying using multi-temporal MODIS data*[D]. Beijing, China: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS: 10-12.]
- 周惠慧, 付东杰, 张立福, 等. 2016. 基于数字相机的草地物候模拟及其与气象因子关系的研究[J]. 遥感技术与应用, 31(5): 966-974. [Zhou H H, Fu D J, Zhang L F, et al. 2016. Modeling grassland phenology and analyzing relationship with corresponding meteorological factors based on digital camera[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(5): 966-974.]
- 周磊, 何洪林, 孙晓敏, 等. 2012. 基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测[J]. 生态学报, 32(16): 5146-5153. [Zhou L, He H L, Sun X M, et al. 2012. Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO₂ uptake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 32(16): 5146-5153.]
- 周磊, 何洪林, 张黎, 等. 2012. 基于数字相机图像的西藏当雄高寒草地群落物候模拟[J]. 植物生态学报, 36(11): 1125-1135. [Zhou L, He H L, Zhang L, et al. 2012. Simulations of phenology in alpine grassland communities in Damxung, Xizang, based on digital camera images[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36(11): 1125-1135.]
- Beck P S, Atzberger T C, Høgda K A, et al. 2006. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI[J]. *Remote Sensing of Environment*, 99(3): 321-334.
- Chuine I, Cambon G, Comtois P. 2010. Scaling phenology from the local to the regional level: Advances from species-specific phenological models[J]. *Global Change Biology*, 6(8): 943-952.
- Elmore A J, Guinn S M, Minsley B J. 2012. Landscape controls on the timing of spring, autumn, and growing season length in mid-Atlantic forests[J]. *Global Change Biology*, 18(2): 656-674.
- Filippa G, Cremonese E, Galvagno M, et al. 2015. Five years of phenological monitoring in a mountain grassland: Inter-annual patterns and evaluation of the sampling protocol[J]. *International Journal of Biometeorology*, 59(12): 1927-1937.
- Gu L, Post W M, Baldocchi D D, et al. 2009. Characterizing the seasonal dynamics of plant community photosynthesis across a range of vegetation types[M]//Noormets A. *Phenology of Ecosystem Processes*. New York: Springer: 35-58.
- Ide R, Oguma H. 2010. Use of digital cameras for phenological observations[J]. *Ecological Informatics*, 5: 339-347.
- Jonsson P, Eklundh L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 40: 1824-1832.
- Julitta T, Cremonese E, Migliavacca M, et al. 2014. Using digi-

- tal camera images to analyses snowmelt and phenology of a subalpine grassland[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 198-199: 116-125.
- Klosterman S, Hufkens K, Gray J, et al. 2014. Evaluating remote sensing of deciduous forest phenology at multiple spatial scales using PhenoCam imagery[J]. *Biogeosciences*, 11(16): 4305-4320.
- Migliavacca M, Galvagnob M, Cremonesec E, et al. 2011. Using digital repeat photography and eddy covariance data to model grassland phenology and photosynthetic CO₂ uptake [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10): 1325-1337.
- Rodrigues A, Marcal A R S, Cunha M. 2011. PhenoSat: A tool for vegetation temporal analysis from satellite image data [C]//6th International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images. Trento, Italy: IEEE: 45-48.
- Sonnentag O, Hufkens K, Teshera-Sterne C, et al. 2012. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 152(1): 159-177.
- White M A, Thomton P E, Running S W. 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2): 217-234.
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475.
- Zhou L, He H, Sun X, et al. 2013. Species and community-scale simulation of the phenology of a temperate forest in Changbai Mountain based on digital camera images[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 4(4): 317-326.

Comparative study of vegetation phenology extraction methods based on digital images

ZHOU Yuke

(Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Vegetation phenology is an effective index that reflects the growth condition of vegetation and their response to climate change. Analyzing vegetation phenology at landscape or smaller scale will be a powerful supplement to remote-sensing based and artificial observed phenological studies. In this study, we applied the time series digital images from typical observation stations in camera-based phenology network (PhenoCam) to fit the seasonal growth curves at region of interest (ROI) and pixel scales. Key vegetation phenological parameters on the growth curve were extracted using multiple methods. First, we realized the custom definition of ROI by arbitrarily drawing polygons on the image and growth curve fitting based on the greenness index in the ROI. The results indicate that double logistic method is adapted for modeling the vegetation growing process at middle-high latitude that have a single growth peak. The spline method shows a good performance for fitting growth curves of vegetation that has multiple growth seasons. Second, based on the fitted curve, we used four models (Klosterman, Gu, TRS, and Derivatives) to derive the key phenological parameters for vegetation having single growth season. MODIS EVI-based phenological parameters were extracted as a comparison with camera based phenological parameters. We found that their capabilities in detecting phenological parameters in forest and cropland were consistent. For the vegetation with more than one growth season, the growth curve was fitted with spline method, then the change point detection method was applied to determine growth seasons on the curve and extract the key phenological parameters. The uncertainty of the fitting methods and phenology methods were estimated, with all of the RMSE less than 0.005. Klosterman method is identified as the most robust. Vegetation greenup date was extracted for each pixel in the ROI that can be useful for distinguishing the phenological diversity between different species. Pixel level vegetation phenology analysis could be used to identify biodiversity at landscape scale in the future.

Key words: vegetation phenology; phenology camera; ROI(region of interesting); SOS(start of growing season); EOS(end of growing season); double Logistic curve; threshold method; derivatives method