

植被物候参数遥感提取研究进展评述*

项铭涛¹, 卫 炜², 吴文斌^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 农业部农业遥感重点实验室, 北京 100081;

2. 农业部规划设计研究院 / 农业部耕地利用遥感重点实验室, 北京 100125)

摘要:【目的】遥感方法提取植被物候具有宏观、高效、便捷的特点, 利用遥感提取植被物候结果可以从较大尺度上研究整个植被生态系统的物候特征。【方法】文章以植被物候遥感提取的过程为线索, 采用文献综述法, 对植被物候参数遥感提取的各个方面进行阐述。【结果】系统描述了植被物候提取的遥感数据资源, 包括遥感专题指数和遥感数据来源; 归纳了植被物候遥感提取的技术方法, 包括时序植被指数重构技术和植被物候参数提取方法; 总结了植被物候遥感提取结果验证途径和误差来源, 地面物候观测数据和模型模拟数据是直接验证的途径, 他人研究成果和植物生理参量的地面观测数据提供间接验证的途径, 误差来源于遥感数据的时间和空间分辨率以及植被物候提取技术方法。最后, 针对当前植被物候遥感提取存在的主要问题及未来的发展趋势, 从研究对象、数据来源、技术方法和结果验证这4个方面进行了探讨。【结论】尽管植被物候遥感提取的大量研究在理论、技术方法和应用方面都取得明显进展, 但在研究对象、数据来源、技术方法和结果验证这些方面仍然存在一些关键科学问题, 需要进一步进行深入研究。

关键词: 植被物候; 遥感监测; 植被指数重构; 物候信息提取; 验证

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20180106

0 引言

植被物候指植被受环境因子和人类活动影响出现的以年为周期的自然现象, 包括植被的发芽、展叶、开花、叶变色和落叶等^[1]。植被物候被称作为全球变化的积分仪和景观生态环境变化的指示器, 已成为全球变化领域的研究热点^[2]。传统的植被物候研究以野外观测为基础, 依靠人工观察和记录单株植被或物种物候信息, 虽然简单易行, 但费时费力、覆盖范围小, 难以进行区域物候时空分析。星载多光谱传感器具有大区域、快速、重复观测能力, 能够反映植被的季节性生长发育过程及其年际变化特点, 为大中尺度植被物候研究提供了有利条件。遥感技术使得受自然环境制约无法到达地区可以进行植被物候动态监测, 也使得物候观测对象从植被个体转变为植被生态系统, 由点向面的空间尺度转换^[3], 可实现从地区到全球尺度的植被物候变化研究, 有助于强化人们关于生

收稿日期: 2018-02-15

第一作者简介: 项铭涛(1994—), 女, 浙江台州人, 硕士研究生。研究方向: 农业遥感。Email: xiangmt_caas@163.com

※ 通信作者简介: 吴文斌(1976—), 男, 湖北潜江人, 研究员, 博士生导师。研究方向: 农业遥感和土地利用变化等方面研究。Email: wuwenbin@caas.cn

* 基金项目: 国家重点研发计划项目“小麦生产系统对气候变化的响应机制及其适应性栽培途径”(2017YFD0300200)

物圈与大气圈相互作用机理的认识、深入理解全球变化及其与陆地生态系统的作用关系。

植被物候遥感提取的主要原理是利用遥感特征参量探测发现植被在形态上发生显著变化所对应的日期，以及从生长开始到结束所经历的时间。国内外很多学者围绕植被物候参数遥感提取开展了很多研究，并对该领域有关重点技术方法进行了总结评述，然而，目前尚缺乏系统性梳理和总结植被物候参数遥感提取的综述性论文。基于此，文章拟对植被物候参数遥感提取遥感数据源、提取技术、结果验证途径等进行详细阐述、分析、归纳和总结，完整地描述了植被物候参数遥感提取的整个过程；最后从植被物候遥感提取的研究对象、数据来源、技术方法和结果验证等方面讨论了当前植被物候遥感提取存在的主要问题及未来的发展趋势。

1 植被物候遥感提取的数据源

1.1 遥感专题指数

归一化差异植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 能够很好地反映绿色植被的长势、生物量和覆盖度等信息，是植被物候遥感提取中使用最为广泛的植被指数^[4]。如 AVHRR-NDVI 应用于我国华北地区耕地种植制度和物候空间格局特征监测、中亚地区 27 年植被生长季开始日期、生长季长度、生长季 NDVI 峰值等物候参数提取^[5-6]；VGT-NDVI 数据被应用于华北和东北地区作物典型物候期、北方地区的耕地种植制度和不同生长季耕地物候的提取^[7-9]；MODIS-NDVI 数据应用于北半球植被生长季开始/结束日期以及生长季长度等物候参数提取^[10]；冯莉等^[11]比较了 HJ-1A-NDVI 和 MODIS-NDVI 提取植被物候特征的结果，提出 HJ-1A-NDVI 数据存在的问题。然而，需要说明的是，虽然 NDVI 对大气影响进行了一定程度的校正，但仍然存在着残留气溶胶引起的植被指数衰减问题；同时研究发现植被覆盖度为 25%~80% 时，NDVI 随植被生物量呈近似线性增长，植被覆盖度大于 80% 时，NDVI 呈现出饱和趋势，对植被检测的灵敏度下降^[12]。为此，增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 被提出，其引入蓝光波段反射率和土壤调节参数对残留气溶胶和土壤背景影响进行校正。刘珺等^[13]、徐岩岩等^[14]利用 MODIS-EVI 分别对黄淮海夏玉米、东北水稻的关键物候期进行了提取；MODIS-EVI 数据被分别应用于美国中西部玉米和大豆关键物候节点、非洲植被 2001~2015 返青期、成熟期、生育期长度 3 个主要物候参数的提取等^[15-16]。

除 NDVI 和 EVI 之外，其他植被指数也在物候提取研究中得到应用。如修正土壤调节植被指数 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)^[17-19] 和宽动态范围植被指数 (Wide Dynamic Range Vegetation Index)^[20-21]。一些专题指数如归一化差异水分指数 (Normalized Difference Water Index)^[22-23]、叶面积指数 (Leaf Area Index)^[24-26]、MERIS 陆地叶绿素指数 (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index)^[27]、微波植被光学厚度 (Vegetation Optical Depth)^[28] 等也应用于遥感提取植被物候。

1.2 遥感数据来源

在众多星载传感器中，NOAA/AVHRR、SPOT/VGT 和 EOS/MODIS 是目前获取时间序

2018年2月

列植被指数的主要传感器, Envisat/MERIS^[27] 和 HJ-1A、1B/CCD^[29-30] 等传感器也是部分研究植被指数的来源。已有研究大多直接使用标准植被指数产品, 避免了原始数据处理巨大的工作量, 也适用于进行对比分析^[31]; 部分研究则利用反射率数据通过自行处理获得时序植被指数^[32]。表1列举出了 NOAA/AVHRR、SPOT/VGT 和 EOS/MODIS 3种主要传感器常用于遥感物候提取的标准植被指数产品。AVHRR 时序植被指数标准产品中的 PAL 数据波段信息丰富, GIMMS 数据时间序列较长和较完整, 两者是大尺度植被物候遥感提取中广泛应用的 AVHRR 植被指数。VGT 时序植被指数标准产品主要包括 VGT-S 和 VGT-D 数据。VGT-S 数据进行了辐射、大气和几何校正等预处理, 包括反射率、植被指数以及辅助参数数据, 而 VGT-D 在 VGT-S 的基础上考虑了 BRDF 影响。MODIS 标准数据产品种类丰富, 包括标定产品、大气产品、海洋产品和陆地产品系列等, 其中植被指数产品主要为 MOD13 和 MYD13 系列, 可提供不同空间分辨率的标准数据产品, 目前植被物候遥感提取中较为常用的是 MOD13Q1、MOD13A1 和 MOD13A2 等^[33]。

表1 植被物候遥感提取中常用的传感器植被指数产品

Table 1 Data products of frequently-used sensors for vegetation phenology extraction by remote sensing				
产品名称	产品内容	传感器	时间范围	空间分辨率/时间分辨率
GIMMS	NDVI	AVHRR	1981年7月至2006年12月	8km/15d
PAL	分波段数据、NDVI、云检测、QA	AVHRR	1981年7月至2001年12月	8km/10d
VGT-S1	分波段数据、NDVI、辅助信息等	VGT	1998年4月至今	1km/1d
VGT-S10	分波段数据、NDVI、辅助信息等	VGT	1998年4月至今	1km/10d
VGT-D10	同上(加入考虑BRDF影响)	VGT	1998年4月至今	1km/10d
MOD13Q1	NDVI、EVI、QA	MODIS	2000年2月至今	250m/16d
MOD13A1	NDVI、EVI、QA	MODIS	2000年2月至今	500m/16d
MOD13A2	NDVI、EVI、QA	MODIS	2000年2月至今	1km/16d

2 植被物候遥感提取的技术方法

植被物候遥感提取主要利用时间序列植被指数是植被生长状况指示器的特征, 其能够表现出与植被生物学特征相关的周期变化, 呈现出一定的季节和年际规律^[34-35]。时间序列植被指数受到如太阳高度角、观测角、和云、水汽、气溶胶、冰雪等等多种因素干扰, 出现许多噪声、曲线呈现锯齿状的不规则波动, 无法直接进行趋势分析和信息提取, 所以有必要对时间序列植被指数数据进行去噪和平滑处理, 即时序植被指数重建^[36]。在重构后的时序植被指数曲线基础上, 可以利用数学算法提取描述植被生长关键物候期的特征节点, 实现植被物候参数的获取^[37]。

2.1 时序植被指数重构技术

虽然遥感标准数据产品进行了一定预处理, 但仍保留了很多噪声, 导致时间序列植被指数曲线周期性变化趋势不明显, 因此, 需要对时序植被指数进行去噪和平滑等预处理, 重构遥感数据的时间序列曲线^[38-39]。国内外研究者提出了很多时间序列遥感数据重构方法。顾娟等^[40]将时序植被指数重构方法分为时间域处理法和频率域处理法2类; 陈

效速等^[41]分为空间域处理法、时间域处理法和非时空域处理法 3 类；吴文斌等^[42]也归结为 3 类，即阈值去除法、基于滤波的平滑方法和非线性拟合法；侯东等^[43]根据重构方式将其分为基于信号处理的频域分析法和基于统计模型的分时段重构法 2 类。该文从不同方法各自的特点出发，将时间序列植被指数重构方法归纳为两大类，即滤波方法和函数拟合方法（表 2）。

滤波方法分为时域滤波和频域滤波。时域滤波是一种局部处理的方法，在给定大小的滤波窗口内采用某种方法对时序数据中的噪声进行处理，滤波窗口大小会影响最终的滤波效果；频域滤波则是通过数学变换将数据从时间域转换到频率域，通常噪声存在于高频部分，利用低通滤波器实现去噪目的，是一种整体处理的方法。常用的滤波方法包括 Savitzky-Golay 滤波法^[44-46]、最佳指数斜率提取法（Best Index Slope Extraction）^[47-48]、滑动中值/均值滤波法^[49-50]、时间窗口线性内插法（Temporal Window Operation）^[51]、中值/均值迭代滤波法^[52]、迭代插值数据重构法（Iterative Interpolation for Data Reconstruction）^[53]和基于傅里叶/小波变换的频域低通滤波法^[54-55]。此外，5 点平滑法^[56-57]、4253H 两次滤波法^[58]、3RSSH 两次滤波法^[59]等滤波方法也得到应用。函数拟合方法则是通过某种形式的函数对时序数据曲线进行最小二乘拟合，用拟合得到的平滑曲线代替原来的时序数据曲线，以此实现平滑去噪。同样，函数拟合方法存在局部处理和整体处理之分，其中经过局部拟合的曲线需要一个整体函数将它们连接起来以构成最终的拟合曲线。常用的函数拟合方法包括非对称高斯函数（Asymmetric Gaussian）拟合法^[60]、双 Logistic 函数（Double Logistic）拟合法^[61-62]和傅里叶函数拟合法（其中包括时间序列谐波分析法（Harmonic Analysis of Time Series））^[63-64]和 Sellers 算法^[65]及其改进方法^[66-67]。此外，如分段 Logistic 函数（Piecewise Logistic）拟合法^[68]、多项式拟合法^[69]和其他形式函数拟合法^[70-72]也得到应用。

表 2 时间序列植被指数重构方法分类

Table 2 Summary of time series data reconstruction methods

滤波方法	函数拟合方法
Savitzky-Golay (S-G) 滤波法	非对称高斯函数 (AG) 拟合法
最佳指数斜率提取法 (BISE) 及其改进算法	双 Logistic 函数 (DL) 拟合法
滑动中值/均值滤波法	傅里叶函数拟合法 (包括 HANTS 算法和 Sellers 算法及其改进方法)
时间窗口线性内插法 (TWO)	分段 Logistic 函数 (PL) 拟合法
中值/均值迭代滤波法	多项式拟合法
迭代插值数据重构法 (IDR)	其他形式函数拟合法
基于傅里叶/小波变换的频域低通滤波法	
其他滤波方法 (包括 5 点平滑法, 4253H 两次滤波法和 3RSSH 两次滤波法)	

2.2 植被物候参数提取方法

全球研究学者研发多种植被物候参数提取技术方法。Reed 等^[73]将其归结为 3 类，即阈值法、拐点法和曲线斜率法；武永峰等^[74]、李明等^[75]和侯学会等^[76]认为利用遥感手段提取植被物候参数的方法包括阈值方法、滑动平均方法、求导方法和拟合方法等 4 类；陈效速等^[41]划分为阈值法、时间序列法、物候期频率分布型—遥感综合法、主成

2018年2月

分分析法和曲线拟合法等5类；夏传福等^[24]则总结为6类，包括阈值法、滑动平均法、拟合法、最大斜率法、累积频率法和主成分分析法。上述不同的方法中拟合法多次提到，该方法是通过函数模型拟合时序遥感数据进而进行物候信息提取，严格上讲其属于时序数据预处理方法范畴。本文根据不同方法各自的特点并参考前述几种分类，将植被物候信息提取方法分为阈值法、曲线特征法和数学分析法3类（表3）。

阈值法的最大特点是利用植被指数达到某一阈值时所对应的日期确定植被物候期，包括固定阈值法^[77-79]和动态阈值法^[80-82]，物候累积频率法^[57, 83]由于涉及阈值也被划分到阈值法中。曲线特征法是对经过函数拟合得到的数据曲线进行分析，根据其变化特征来获取植被物候参数，常用的方法包括最大变化斜率法^[84]、曲率变化极值法^[68]和滑动平均法^[85]。数学分析法是通过数学模型或数学变换手段来提取包含在时序遥感数据中的植被物候信息，代表性方法有主成分分析法（包括奇异值分解法（Singular Value Decomposition）与模型结合法^[86]以及经验正交函数分析法（Empirical Orthogonal Function resolution）^[87]）、傅里叶谐波分析法（包括时间序列谐波分析法（HANTS）^[88]、季节趋势叠加分解法（Breaks For Additive Seasonal and Trend）^[89]）和经验公式法^[90]。

表3 植被物候参数遥感提取主要方法

Table 3 Summary of vegetation phenology extraction methods

阈值法	曲线特征法	数学分析法
固定阈值法	最大变化斜率法	主成分分析法（包括奇异值分解法（SVD）与模型结合法、经验正交函数分析法（EOF） 傅里叶谐波分析法（包括时间序列谐波分析法和季节趋势叠加分解法） 经验公式法
动态阈值法	曲率变化极值法	
物候累积频率法	滑动平均法	

3 植被物候遥感提取结果验证

3.1 验证方法

利用地面物候观测数据进行验证最常用的验证方法，但直接将地面物候观测数据用于遥感结果验证会存在一些问题。这是因为两种观测手段得到的物候数据所描述的对象不同，地面观测关注的是具有一定代表性的单株植被或物种的物候特征，而遥感物候描述的是像元内的植被群体整体的物候特征。因此，地面观测数据需要经过预处理后才可以用于遥感结果的验证，常用的处理方法包括典型物候期法、物候频率统计法和物候频率分布型法^[91]。典型物候期法是根据区域内生态系统的分布特点，选择具有代表性的植被物种及其特定的物候期与遥感监测关键物候节点相互对应^[90, 92]。物候频率统计法采用目标区域生态群落内所有植被某一物候现象发生日期的特定累积频率表征该生态群落整体的物候特征^[93]。物候频率分布型法是将地面物候观测数据转换成与遥感物候结果对应的数据，在此基础上再进行验证工作^[83]。此外，还可以通过计算物候特征的时空均值进行验证^[94]。

在地面观测数据缺失的情况下，利用模型模拟数据对遥感提取结果进行验证也是常用的验证方法。根据环境驱动因子可将物候模型分为气候经验模型和碳吸收模型。气候

经验模型根据植被与气候因子之间的经验关系模拟植被物候现象，通常由温度、水分和日照等作为气候经验模型的驱动因子。碳吸收模型是以植被同环境通过光合和呼吸作用进行的碳交换为基础构建的物候模型，能够反映植被物候的变化过程，降低了经验在模型构建中的作用，提高了模型对物候变化的预测水平。物候模型可以利用气候和环境数据模拟区域内植被的物候特征，能够较好地解释植被物候的变化或异常情况，其模拟结果可用于遥感提取植被物候结果的验证^[91]。然而，物候模型往往是针对特定的植被物种或特定的区域建立，应用于其他区域时其适用性需要重点关注。此外，物候模型需要诸多输入参数来驱动模型，在既缺乏地面观测数据又无法获取这些输入参数时，该方法应用会受到限制。

利用他人研究成果来验证植被物候遥感提取结果通常是在缺乏地面观测数据，同时也无法物候模拟数据的情况下使用。由于研究的目、方法以及时间和空间尺度上的差异，这种方法仅能反映出不同研究结果的总体趋势是否具有 consistency，而不能定量评价植被物候参数遥感提取精度。如李明等^[75]在基于遥感方法研究长白山地区植被物候期变化趋势时，采用了其他文献中的研究成果以及小部分气象局的物候观测资料与其提取的植被物候参数结果进行比较，发现与大多数的研究成果具有一致性。另外，也有研究使用遥感物候产品作为参考来验证所提取的植被物候参数^[24]。

此外，与植被物候存在较强关系的植物生理参量的观测数据也可作为植被物候遥感提取结果验证的间接数据^[95]。这些生理参量通常是一些与碳通量有关的参数，包括净生态系统交换（Net Ecosystem Exchange）^[92]、植物面积指数（Plant Area Index）、光合有效辐射（Photosynthetically Active Radiation）和光合有效辐射分量（Fraction of Photosynthetically Active Radiation）等。

3.2 误差来源

遥感数据的时间和空间分辨率对植被物候提取具有重要影响。多数学者采用多天合成的植被指数产品作为物候提取的数据源，合成算法和合成影像的时间间隔会影响数据源的时间分辨率，进而影响植被物候遥感监测结果。Zhou 等^[96]基于 MODIS-NDVI 数据研究时间分辨率、时间间隔数量、缺失数据对 HANTS 算法重构时间序列数据集准确性的影响。研究表明，时间分辨率、时间间隔数量在所有季节性和非季节性的情况下都不应太大，植被生长起点、终点和峰值点都是影响重构效果的关键位置。Zhang 等^[97]同样基于 MODIS-EVI 数据，研究时间分辨率和缺失数据对 Logistic 算法的影响。研究表明，当遥感数据源的时间分辨率在 6-16d 时，即使原始的逐日数据中存在不确定性，植被物候的遥感监测结果仍然能够达到较高精度；若植被生长起点日期附近缺失了数据，植被物候监测结果的精度将会大幅降低，当存在一个缺失数据时，相对误差将达 4%，当存在两个缺失数据时，相对误差将达到 20%。遥感提取的物候是像元内植被群体所组成的整体物候特征，遥感数据源的空间分辨率对于地表覆盖类别和地形复杂的空间描述具有重要作用，也会影响植被物候遥感提取结果。Peng 等^[98]基于 MODIS-EVI 数据，在美国本土地区，将 250m 空间分辨率重采样到不同空间分辨率的数据（2m × 250m、3m × 250m、4m × 250m、…、35m × 250m），研究植被生长起点监测的尺度效应。研究表明，在整个

2018年2月

生态系统区域, 总体植被生长起点大致相同, 相差不到 5d, 局部区域的植被生长起点差异很大, 并且东北部比南部和西部区域的差异小, 这是由于植被生长起点的尺度效应受土地景观片段、土地覆盖类型、尤其是绿度空间变化导致的植被类别异质性的影响。

除遥感数据的时间和空间分辨率外, 植被物候提取技术方法也对结果具有重要影响。不同监测方法的原理不同, 导致对噪声点的选择和处理方式不同, 重构的植被指数曲线及函数表达式均不同, 计算得到的物候参数值会有一定差异。Schwartz 等^[99]基于 MODIS-NDVI/EVI 产品, 采用 Logistic 函数法、DMA、双 Logistic 函数法、SMN 和 TIMESAT 这 5 种重构方法测算了植被的生长季起点, 利用 SI 的模拟结果和地面物候观测数据进行验证。结果表明, 不同方法得到的植被物候监测结果差异较大, 双 Logistic 函数法表现最佳。Cai 等^[37]基于 MODIS-NDVI 产品, 采用 Savitzky-Golay 滤波、局部加权回归散点图平滑、样条平滑、非对称高斯函数拟合、双 logistic 函数拟合这 5 种方法计算生长季起点、生长季终点、生长季长度、生长季植被指数积分, 利用地面塔测量 NDVI 和总初级生产力来验证。结果表明, 所有平滑方法都能降低噪声, 没有一个方法最有效, 其中, 当校准参数最优时, Savitzky-Golay 滤波和局部加权回归散点图平滑得到的结果非常准确, 当校准参数无法确定时, 非对称高斯函数拟合和双 logistic 函数拟合对季节的动态描述最好。可见, 监测方法的精度和表现不尽相同, 很难从现有的监测方法中找到对所有数据源和植被类型等均具有普适性的最好方法。

4 总结与展望

近年来, 目前国内外学者围绕植被物候遥感提取开展了大量研究, 在理论、技术方法和应用方面都取得明显进展。然而, 植被物候遥感提取仍然存在一些关键科学问题, 需要进一步进行深入研究。

(1) 研究对象。目前植被物候遥感提取研究多集中于森林、草原等自然植被物候, 以农业植被为对象的研究相对较少, 而且这些研究多是围绕特定作物类型开展。未来需要加强对农业植被物候参数遥感提取研究, 然而, 农业植被受到自然环境与人类活动的双重影响, 其复杂性、时空差异更强, 这给农业植被物候信息提取带来重大挑战。

(2) 数据来源。已有的研究多基于单一传感器数据, 单一数据源往往受到数据质量、时空连续性以及可获取性等因素的限制, 在大范围、长时间序列的植被物候遥感提取时明显不足。因此, 选择多传感器进行协同融合, 构建具有高时间分辨率、高空间分辨和高质量的时间序列数据集, 发展不依赖于特定传感器的植被物候多源遥感协同监测技术, 是未来提升植被物候参数遥感提取精度的有效途径。

(3) 技术方法。虽然不同学者研发了很多时序遥感数据重建和植被物候信息提取方法, 但目前还没有适合不同区域、不同植被类型、长时间序列植被物候遥感提取的统一方法。因此, 需要重点开展不同方法的适宜性研究, 考虑采用差异化策略构建针对不同区域和植被类型的时序遥感数据重建和植被物候信息提取技术体系, 是植被物候遥感提取研究未来一个重要的发展方向。

(4) 结果验证。利用地面观测数据、模型模拟数据以及其他研究成果是当前植被物候遥感提取结果验证的主要方法, 然而地面观测数据与遥感观测之间的不匹配、模型模拟的输入参数获取以及其他研究成果的不确定性等问题, 严重影响植被物候遥感提取结果验证。建立完整的、覆盖典型植被和气候类型的植被物候地面观测网络, 通过标准化的地面观测数据验证遥感提取结果将是未来的主要方向。

参考文献

- [1] 竺可桢, 宛敏渭. 物候学. 长沙: 湖南教育出版社, 1999.
- [2] 翟佳, 袁凤辉, 吴家兵. 植物物候变化研究进展. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3237~3243.
- [3] 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. 地理科学进展, 2016, 35(3): 304~319.
- [4] Skakun S, Franch B, Vermote E, et al. Early season large-area winter crop mapping using MODIS NDVI data, growing degree days information and a Gaussian mixture model. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195: 244~258.
- [5] Kariyeva J, Van Leeuwen W J D, Woodhouse C A. Impacts of climate gradients on the vegetation phenology of major land use types in Central Asia (1981–2008). *Frontiers of Earth Science*, 2012, 6(2): 206~225.
- [6] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 基于 NDVI 数据的华北地区耕地物候空间格局. 中国农业科学, 2009, 42(2): 552~560.
- [7] 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. 生态学报, 2009, 29(11): 6216~6226.
- [8] 李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 基于时序植被指数的东北地区耕地生长季特征识别与应用研究. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(5): 882~892.
- [9] 卫炜, 吴文斌, 李正国, 等. 基于 SPOT/VGT 数据的中国北方耕地物候提取研究. 中国农业资源与区划, 2016(04): 77~86.
- [10] Wang S Y, Yang B J, Yang Q C, et al. Temporal Trends and Spatial Variability of Vegetation Phenology over the Northern Hemisphere during 1982–2012. *PLOS ONE*, 2016, 11(6): 1~21.
- [11] 冯莉, 李柳华, 郭松, 等. HJ-1A NDVI 与 MODIS NDVI 时间序列提取植被物候特征对比研究. 遥感技术与应用, 2016, 6: 1158~1166.
- [12] Potdar M B. Sorghum yield modelling based on crop growth parameters determined from visible and near-IR channel NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(5): 895~905.
- [13] 刘珺, 田庆久, 黄彦, 等. 黄淮海夏玉米物候期遥感监测研究. 遥感信息, 2013, 28(3): 85~90.
- [14] 徐岩岩, 张佳华, YANG Limin. 基于 MODIS-EVI 数据和 Symlet11 小波识别东北地区水稻主要物候期. 生态学报, 2012, 32(7): 2091~2098.
- [15] Adole T, Dash J, Atkinson P M. Characterising the land surface phenology of Africa using 500m MODIS EVI. *Applied Geography*, 2018, 90: 187~199.
- [16] Ren J, Campbell J B, SHAO Y. Estimation of SOS and EOS for Midwestern US Corn and Soybean Crops. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 722.
- [17] Dye D, Middleton B, Vogel J, et al. Exploiting Differential Vegetation Phenology for Satellite-Based Mapping of Semiarid Grass Vegetation in the Southwestern United States and Northern Mexico. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 889.
- [18] Liaqat M U, Cheema M J M, Huang W, et al. Evaluation of MODIS and Landsat multiband vegetation indices used for wheat yield estimation in irrigated Indus Basin. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 138: 39~47.
- [19] 李敏, 赵庚星, 蔡明庆, 等. 县域棉花信息遥感提取与棉田精细化管理分区研究. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1971~1980.
- [20] Wu C Y, Gonsamo A, Gough C M, et al. Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 79~88.
- [21] Testa S, Soudani K, Boschetti L, et al. MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 64: 132~144.
- [22] Delbart N, Kergoat L, Le Toan T, et al. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized

2018年2月

- difference water index. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97 (1): 26~38.
- [23] 平跃鹏, 臧淑英. 基于 MODIS 时间序列及物候特征的农作物分类. *自然资源学报*, 2016, 31 (3): 503~513.
- [24] 夏传福, 李静, 柳钦火. 基于 MODIS 叶面积指数的遥感物候产品反演方法. *农业工程学报*, 2012, 28 (19): 103~109.
- [25] 李铮, 柏延臣, 何亚倩. 遥感叶面积指数产品提取自然植被物候期对比. *遥感技术与应用*, 2015, 30 (6): 1103~1112.
- [26] Wang C, Li J, Liu Q H, et al. Analysis of Differences in Phenology Extracted from the Enhanced Vegetation Index and the Leaf Area Index. *Sensors*, 2017, 17 (9): 1982.
- [27] Atkinson P M, Jeganathan C, Dash J, et al. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 400~417.
- [28] Momen M, Wood J D, Novick K A, et al. Interacting Effects of Leaf Water Potential and Biomass on Vegetation Optical Depth. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122 (11): 3031~3046.
- [29] Wang J, Huang J F, Wang X Z, et al. Estimation of rice phenology date using integrated HJ-1 CCD and Landsat-8 OLI vegetation indices time-series images. *Zhejiang Univ-Sci B (Biomed & Biotechnol)*, 2015, 16 (10): 832~844.
- [30] Pan Z K, Huang J F, Zhou Q B, et al. Mapping crop phenology using NDVI time-series derived from HJ-1 A/B data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 34: 188~197.
- [31] 李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 植被物候特征的遥感提取与农业应用综述. *中国农业资源与区划*, 2012, 33 (5): 20~28.
- [32] 宫攀, 陈仲新. 基于 MODIS 数据的东北地区植被物候参数提取. *土壤通报*, 2009, 40 (2): 213~217.
- [33] 马明国, 宋怡, 王旭峰, 等. AVHRR、VEGETATION 和 MODIS 时间系列遥感数据产品现状与应用研究进展. *遥感技术与应用*, 2012, 27 (5): 663~670.
- [34] 卫炜. MODIS 双星数据协同的耕地物候参数提取方法研究. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [35] 杨永民, 田静, 荣媛, 等. 基于遥感的黑河流域植被物候空间格局提取分析. *遥感技术与应用*, 2012, 27 (2): 282~288.
- [36] Zhang X Y. Reconstruction of a complete global time series of daily vegetation index trajectory from long-term AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156: 457~472.
- [37] Cai Z Z, Jönsson P, Jin H X, et al. Performance of Smoothing Methods for Reconstructing NDVI Time-Series and Estimating Vegetation Phenology from MODIS Data. *Remote Sensing*, 2017, 9 (12): 1271.
- [38] 王乾坤, 于信芳, 舒清志, 等. MODIS EVI 时序数据重建方法及拟合分析. *地球信息科学学报*, 2015, 17 (6): 732~741.
- [39] 孙华生, 徐爱功, 林卉, 等. 基于不同算法的时间序列植被指数去噪效果分析. *江苏农业科学*, 2012, 40 (5): 375~379.
- [40] 顾娟, 李新, 黄春林. NDVI 时间序列数据集重建方法述评. *遥感技术与应用*, 2006, 21 (4): 391~395.
- [41] 陈效速, 王林海. 遥感物候学研究进展. *地理科学进展*, 2009, 28 (1): 33~40.
- [42] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 两种 NDVI 时间序列数据拟合方法比较. *农业工程学报*, 2009, 25 (11): 183~188.
- [43] 侯东, 潘耀忠, 张锦水, 等. 农区 MODIS 植被指数时间序列数据重建. *农业工程学报*, 2010, 26 (S1): 206~212.
- [44] Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91 (3-4): 332~344.
- [45] 周增光, 唐娉. 基于质量权重的 Savitzky-Golay 时间序列滤波方法. *遥感技术与应用*, 2013, 28 (2): 232~239.
- [46] 李晓东, 曾发梁, 姜琦刚, 等. 1999~2013 年中国东北植被物候信息遥感监测. *自然资源学报*, 2017, 32 (2): 321~328.
- [47] Viovy N, Arino O, Belward A S. The best index slope extraction (BISE): a method for reducing noise in NDVI time-series. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13 (8): 1585~1590.
- [48] Xu X M, Conrad C, Doktor D. Optimising Phenological Metrics Extraction for Different Crop Types in Germany Using the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *Remote Sensing*, 2017, 9 (3): 1~16.
- [49] Sellers P J, Tucker C J, Collatz G J, et al. A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15 (17): 3519~3545.
- [50] Kogan F, Sullivan J. Development of global drought-watch system using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, 1993, 13 (5): 219~222.
- [51] Park J, Tateishi R. Correction of Time Series NDVI by the Method of Temporal Window Operation (TWO). *The 1998*

- Asian Conference on Remote Sensing*, 1998.
- [52] De Oliveira J, Epiphany J, Rennó C. Window Regression: A Spatial–Temporal Analysis to Estimate Pixels Classified as Low–Quality in MODIS NDVI Time Series. *Remote Sensing*, 2014, 6 (4): 3123–3142.
- [53] Liu R G, Shang R, Liu Y, et al. Global evaluation of gap–filling approaches for seasonal NDVI with considering vegetation growth trajectory, protection of key point, noise resistance and curve stability. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 189: 164–179.
- [54] Bush E R, Abernethy K A, Jeffery K, et al. Fourier analysis to detect phenological cycles using long–term tropical field data and simulations. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8 (5): 530–540.
- [55] Wang H S, Lin H, Munroe D K, et al. Reconstructing rice phenology curves with frequency–based analysis and multi–temporal NDVI in double–cropping area in Jiangsu, China. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10 (2): 292–302.
- [56] 丁登, 陈效速. 我国遥感植被生长季节的地面检验研究——以温带草原和暖温带落叶阔叶林区为例. 遥感技术与应用, 2007, 22 (3): 382–388.
- [57] 陈效速, 喻蓉. 1982~1999 年我国东部暖温带植被生长季节的时空变化. 地理学报, 2007, 62 (1): 41–51.
- [58] Velleman P. Definition and comparison of robust nonlinear data smoothing algorithms. *Journal of the American Statistical Association*, 1980, 75: 609–615.
- [59] Davis J C. *Statistics and Data Analysis in Geology*, 3rd Edition. New York: Wiley, 2002.
- [60] Liu S Y, Liu X N, Liu M L, et al. Extraction of Rice Phenological Differences under Heavy Metal Stress Using EVI Time–Series from HJ–1A/B Data. *Sensors*, 2017, 17 (6): 1243.
- [61] Liu J, Yang X, Liu H L, et al. Algorithms and Applications in Grass Growth Monitoring. *Abstract and Applied Analysis*, 2013, 2013: 1–7.
- [62] Li X C, Zhou Y Y, Asrar G R, et al. Characterizing spatiotemporal dynamics in phenology of urban ecosystems based on Landsat data. *Science of the Total Environment*, 2017, 605: 721–734.
- [63] Ibrahim S, Balzter H, Tansey K, et al. Estimating fractional cover of plant functional types in African savannah from harmonic analysis of MODIS time–series data. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39 (9): 2718.
- [64] 郭昱杉, 刘庆生, 刘高焕, 等. 基于 MODIS 时序 NDVI 主要农作物种植信息提取研究. 自然资源学报, 2017, 32 (10): 1808–1818.
- [65] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. 1. Model formulation. *Journal of Climate*, 1996, 9 (4): 676–705.
- [66] 林忠辉, 莫兴国. NDVI 时间序列谐波分析与地表物候信息获取. 农业工程学报, 2006, 22 (12): 138–144.
- [67] Zhang X, Li R, Yue Y M, et al. Improved algorithm for reconstructing vegetation index image time series based on Fourier Harmonic Analysis. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14 (3): 437–447.
- [68] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84 (3): 471–475.
- [69] 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. 自然资源学报, 2013, 28 (2): 220–233.
- [70] 王宏, 李晓兵, 李霞, 等. 基于 NOAA NDVI 和 MSAVI 研究中国北方植被生长季变化. 生态学报, 2007, 27 (2): 504–515.
- [71] 张晗, 任志远. 多种时序 NDVI 重建方法比较与应用分析. 中国农业科学, 2014, 47 (15): 2998–3008.
- [72] 张晗, 任志远. 基于 Whittaker 滤波的陕西省植被物候特征. 中国沙漠, 2015, 35 (4): 901–906.
- [73] Reed B C, Schwartz M D, Xiao X M. *Remote Sensing Phenology*. New York: Springer, 2009.
- [74] 武永峰, 何春阳, 马瑛, 等. 基于计算机模拟的植物返青期遥感监测方法比较研究. 地球科学进展, 2005, 20 (7): 724–731.
- [75] 李明, 吴正方, 杜海波, 等. 基于遥感方法的长白山地区植被物候期变化趋势研究. 地理科学, 2011 (10): 1242–1248.
- [76] 侯学会, 隋学艳, 梁守真, 等. 几种物候提取方法的小麦物候提取. 遥感信息, 2017, 32 (6): 65–70.
- [77] Crimmins T M, Crimmins M A, Gerst K L, et al. USA National Phenology Network’s volunteer–contributed observations yield predictive models of phenological transitions. *PLOS ONE*, 2017, 12 (8): 1–17.
- [78] Marais Sicre C, Inglada J, Fieuzal R, et al. Early Detection of Summer Crops Using High Spatial Resolution Optical Image Time Series. *Remote Sensing*, 2016, 8 (7): 591.
- [79] Shen M G, Tang Y H, Chen J, et al. Specification of thermal growing season in temperate China from 1960 to 2009. *Climatic Change*, 2012, 114 (3–4): 783–798.
- [80] 吴文斌, 杨鹏, 唐华俊, 等. 过去 20 年中国耕地生长季起始期的时空变化. 生态学报, 2009, 29 (4): 1777–1786.

2018年2月

- [81] 封敏, 李再明, 邱炳文, 等. 21 世纪初中国农作物与自然植被物候时空差异. 遥感技术与应用, 2016, 31 (5): 1003~1012.
- [82] 刘玲玲, 刘良云, 胡勇. 1982~2006 年欧亚大陆植被生长季开始时间遥感监测分析. 地理科学进展, 2012, 31 (11): 1433~1442.
- [83] 陈效速, 曹志萍. 植物物候期的频率分布型及其在季节划分中的应用. 地理科学, 1999, 19 (1): 22~28.
- [84] Wang L, Zhang F C, Jing Y S, et al. Multi-Temporal Detection of Rice Phenological Stages Using Canopy Spectrum. *Rice Science*, 2014, 21 (2): 108~115.
- [85] 范德芹, 赵学胜, 郑周涛. 内蒙古羊草草原物候及其对气候变化的响应. 地理与地理信息科学, 2016, 32 (6): 81~86.
- [86] Tucker C J, Slayback D A, Pinzon J E, et al. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *Int J Biometeorol*, 2001, 45 (4): 184~190.
- [87] Ge Q S, Dai J H, Cui H J, et al. Spatiotemporal Variability in Start and End of Growing Season in China Related to Climate Variability. *Remote Sensing*, 2016, 8 (5): 433.
- [88] Zhou J, Jia L, Menenti M. Reconstruction of global MODIS NDVI time series: Performance of Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS). *Remote Sensing of Environment*, 2015, 163: 217~228.
- [89] Xue Z H, Du P J, Feng L. Phenology-Driven Land Cover Classification and Trend Analysis Based on Long-term Remote Sensing Image Series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7 (4): 1142~1156.
- [90] Moulin S, Kergoat L, Viovy N, et al. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate*, 1997, 10 (6): 1154~1170.
- [91] Xia C F, Li J, Liu Q H. Review of advances in vegetation phenology monitoring by remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17 (1): 1~16.
- [92] 常清. 北半球及典型区遥感植被物候提取验证及动态研究. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [93] 杨国栋. 中国东部地区物候季节划分的初步探索. 河南师大学报 (自然科学版). 1983 (1): 69~76.
- [94] 李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 东北三省耕地物候期对热量资源变化的响应. 地理学报. 2011, 66 (7): 928~939.
- [95] Garrity S R, Bohrer G, Maurer K D, et al. A comparison of multiple phenology data sources for estimating seasonal transitions in deciduous forest carbon exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151 (12): 1741~1752.
- [96] Zhou J, Hu G C, Jia L, et al. Evaluation of Harmonic Analysis of Time Series (HANTS): impact of gaps on time series reconstruction. *The Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications*, 2012.
- [97] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B. Sensitivity of vegetation phenology detection to the temporal resolution of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30 (8): 2061~2074.
- [98] Peng D L, Zhang X Y, Zhang B, et al. Scaling effects on spring phenology detections from MODIS data at multiple spatial resolutions over the contiguous United States. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 132: 185~198.
- [99] Schwartz M D, Hanes J M. Intercomparing multiple measures of the onset of spring in eastern North America. *International Journal of Climatology*, 2010, 30 (11): 1614~1626.

Review of vegetation phenology estimation by using remote sensing

Xiang Mingtao¹, Wei Wei², Wu Wenbin^{1*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Key Laboratory of Cultivated Land Utilization and Remote Sensing, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Ministry of Agriculture, Beijing 100125)

Abstract: [Purpose] Detection of vegetation phenology using remote sensing data has the characteristics of macroscopic, efficient and convenient. With the help of remote sensing

measurements, we can capture the phenology characters of the whole vegetation ecosystem. [**Method**] In this article, based on the progress of vegetation phenology detection by remote sensing, we applied literature review method to expound vegetation phenology detection by remote sensing from various aspects. [**Result**] First, the frequently used remote sensing data resources were systematically, including remote sensing vegetation index and remote sensing data source. Second, the methods of time series data reconstruction method and vegetation phenology detection method were summarized. Third, the result validation methods and the error sources of vegetation phenology detection were illustrated. To be specific, ground phenological observation data and model simulation data are direct validation ways, while other research results and ground observation data of plant physiological parameters provide indirect ways. And the error sources are derived from temporal resolution and spatial resolution of remote sensing data as well as vegetation phenology detection method. In the end, we discussed the primary issues and future trends of vegetation phenology detection by remote sensing from four aspects of study objects, data sources, methods and results validation. [**Conclusion**] Although plenty of researchers about vegetation phenology detection by remote sensing making distinct progress on theory, methodology as well as application, it still needs further deep research on some key scientific problems such as study objects, data sources, methods and results validation.

Keywords: vegetation phenology; remote sensing; time series data reconstruction; phenology detection; validation