

# 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展

王敏钰<sup>1</sup>, 罗毅<sup>1</sup>, 张正阳<sup>1</sup>, 谢巧云<sup>2</sup>, 吴小丹<sup>1</sup>, 马轩龙<sup>1</sup>

1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000;

2. 悉尼科技大学 生命科学学院, 澳大利亚 悉尼 2007

**摘要:** 在气候变化背景下, 植被物候作为生态系统对环境变化响应的直接体现方式, 日益受到学界关注。获取长期、连续、多尺度的植被物候数据是物候研究的基础, 而利用卫星遥感手段获取的物候参数已经成为陆地生态系统变化研究的重要指标。遥感物候参数在农业生产管理、生态系统监测、土地利用类型制图、人类健康和生态系统气候变化响应等领域发挥着重要的作用。在此背景下, 有必要结合关键科学问题与重要应用领域, 系统梳理近些年来遥感物候参数提取、验证和产品研发方面的进展, 指出本领域目前存在的问题并对未来的发展趋势进行展望。首先, 探讨了植被指数、日光诱导叶绿素荧光和植被光学厚度等传统与新兴遥感指标在物候监测方面的应用趋势。其次, 分析评述了植被物候遥感方法体系中不同的时序数据预处理与物候期估算算法之间的优劣及适用性。然后, 从传统物候观测、物候相机、通量观测和无人机等方面的发展, 梳理出多源、多尺度验证方式的发展脉络。同时, 着重从产品算法和精度方面评述了近些年国内外物候遥感产品的发展现状。最后, 从数据预处理、参数提取方法和遥感数据源等不同角度对植被物候参数遥感提取结果中的不确定性和误差来源进行了系统探讨。在以上基础上, 本文指出未来植被物候遥感领域的研究应重点关注: (1) 从遥感数据源质量和时空一致性入手, 提高不同研究结果之间的可比性; (2) 发展具有更好普适性的物候参数提取算法, 减少提取过程中的主观性和经验性; (3) 以遥感真实性检验理论为基础, 完善遥感物候地面验证方法体系; (4) 积极拓展基于国产卫星的植被物候监测应用, 积累国产卫星的使用经验并逐步摆脱对国外卫星数据的过度依赖。通过以上发展, 最终满足实际应用中对于高分辨率、高精度、高时空一致性植被物候参数遥感产品的迫切需求。

**关键词:** 遥感, 植被物候, 生长季, 植被动态, 生态系统参数, 地面验证

引用格式: 王敏钰, 罗毅, 张正阳, 谢巧云, 吴小丹, 马轩龙. 2022. 植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展. 遥感学报, 26(3): 431-455

Wang M Y, Luo Y, Zhang Z Y, Xie Q Y, Wu X D and Ma X L. 2022. Recent advances in remote sensing of vegetation phenology: Retrieval algorithm and validation strategy. National Remote Sensing Bulletin, 26(3): 431-455[DOI:10.11834/jrs.20211601]

## 1 引言

植被物候是自然界植物受遗传因素与周围环境(气象、土壤、人类活动等)共同影响而产生周期性变化的生物学现象, 是表征生态系统动态及其对环境变化响应方式的重要生态系统参数(竺可桢和宛敏渭, 1973; Caparros-Santiago 等, 2021; Zhu 等, 2011)。在诸如粮食安全(袁婧薇和倪健, 2007; Lobell等, 2008)、霜冻灾害(Hänninen, 2006; Ge等, 2013; 戴君虎等, 2013)、干旱(Brown和

de Beurs, 2008; 牟成香等, 2013)、森林火灾风险(Westerling等, 2006)、生态系统碳平衡以及水分和能量交换(Running和Hunt, 1993; Xiao等, 2009; Wang等, 2021)等研究领域中, 植被物候都是重要的变量。气候变化, 尤其是温度变化, 对植被物候具有显著影响。譬如, 气候变暖可能通过扩大蒸发或加大植被活动层深度, 导致土壤水分流失加剧、水分有效性减少, 从而影响物候。植被生长季节的变化进一步影响了生态系统功能, 并有可能反作用于气候系统(Shen等,

收稿日期: 2021-09-10; 预印本: 2021-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42171305); 甘肃省自然科学基金(编号:21JR7RA499); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号:lzujbky-2021-ct11)

第一作者简介: 王敏钰, 研究方向为基于静止卫星的植被物候遥感应用。E-mail: wangminy2021@163.com

通信作者简介: 马轩龙, 研究方向为植被与生态遥感。E-mail: xlma@lzu.edu.cn

2015)。植被是气候变化的重要调控因子,对植被物候期的长期观测和准确描述,能够显著提高全球陆地生态模型对碳、水、能量循环的模拟和预测精度(White和Nemani, 2006; Zhang等, 2003; Richardson等, 2012)。植被物候信息还可以作为全球动态植被模型 DGVMs (Dynamic Global Vegetation Models) 和全球循环模型 GCMs (Global Circulation Models) 重要的输入参数(Running和 Hunt, 1993; 温刚和符淙斌, 2000)。

传统的植被物候研究主要基于野外实地观测,探究植株或物种尺度的生长周期事件如发芽、展叶、开花、结果等(Verhegghen等, 2014)。野外实地观测方式虽然比较直观,但同时也存在观测结果在空间尺度上不连续、易受观测者主观经验影响等问题,在构建大尺度和长时序的物候观测数据集等方面存在诸多挑战(葛全胜等, 2010; 陈效速和王林海, 2009; 武永峰等, 2008)。随着遥感技术的发展,星载多光谱传感器获取的多时相空间连续观测,能够弥补传统植被物候观测的局限性,使得在全球尺度上研究植被物候及其与气候变化和人类活动之间的关系成为可能。遥感提取的植被物候参数,实现了物候观测由“点”向“面”的空间尺度转换,日渐成为农牧业管理、气候变化响应、全球碳水循环等研究中不可或缺的技术手段(张学霞等, 2004; Piao等, 2008; 侯学会等, 2013; Piao等, 2019; Fu等, 2015; Shen等, 2015; 项铭涛等, 2018)。

卫星影像很难直接观察到单个植株的物候现象,因此需要一种能够量化像元尺度植被物候期的方式,即“遥感地表物候”LSP (Land Surface Phenology) (Henebry和de Beurs, 2013)。不同于传统地面物候监测主要基于个体尺度,遥感地表物候关注的是像元尺度(数米到数公里)上基于电磁波谱信号测量得到的宏观地表植被季节变化和物候特征(Reed等, 2009)。需要注意的是,像元尺度的遥感地表物候并不等于像元内所有植株物候期的简单算术平均,也就是遥感物候具有鲜明的“尺度效应”(Liu等, 2019)。像元尺度的遥感地表物候代表了由特定传感器所能够探测到的单个像元面积内所有植被及非植被组分(阴影、土壤背景)整体反射率及植被指数随时间变化信号中所提取出的关键时间节点(譬如曲率变化率极值)(Hanes等, 2014)。

近些年来,随着日光诱导叶绿素荧光 SIF (Sun/Solar-Induced chlorophyll Fluorescence)、微波植被光学厚度 VOD (Vegetation Optical Depth) 和近红外植被指数 (NIRv) 等新兴指数的发展,遥感物候监测的数据源日渐丰富。同时,诸如奇异谱分析 SSA (Singular Spectrum Analysis)、变化点检测 (change-point detection) 等数学方法的引入也丰富了遥感时序数据重构和物候参数提取的途径。此外,通量网络和物候相机等不同的地面观测数据,极大地丰富了遥感物候参数的验证数据来源。无人机技术的发展也为传统上困扰遥感物候验证的“点一面”尺度转换问题提供了新的解决思路。除了新数据、新方法和新的验证途径之外,学者们也致力于量化并减少遥感物候参数提取过程的不确定性,包括模型参数或阈值的设置(Reed等, 1994)、数据缺失与数据噪声(Moulin等, 1997)、提取方法适用度(Zeng等, 2020)、植物生理异质性(Zhou, 2019)、混合像元效应(Chen等, 2018)、太阳—传感器几何效应等(Ma等, 2020),以进一步提升植被物候遥感提取结果的准确性。此外,在科学数据共享的大趋势下,国内外相关专题产品也不断发布,得到了不同行业用户的广泛使用。在此背景下,有必要对近些年植被物候遥感研究领域的发展进行一个系统回顾和梳理。本文从数据源、处理方法、提取算法、验证方式和产品发展等主要技术层面入手,对研究领域现状、存在的问题以及未来的发展趋势进行深入讨论。

## 2 植物物候遥感技术发展

### 2.1 数据源

传统上,基于星载多光谱传感器获取的光学植被指数 SVI (Spectral Vegetation Indices) 是植被物候遥感的主要数据源(表1)。虽然归一化差值植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 是目前植被物候遥感中使用最为广泛的植被指数,但是其在热带雨林等地上生物量较高的地区会出现过饱和现象,而在低植被覆盖度时易受土壤背景影响(刘啸添等, 2018),这些因素都会造成 NDVI 时间序列形态的改变,进而在物候参数提取结果中引入一定的不确定性(Maeda和Galvão, 2015)。针对以上问题,MODIS 植被指数产品团队

开发了新的增强型植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index), 通过引入蓝光波段反射率并对计算公式进行数学变换, 减轻了大气气溶胶的散射和土壤背景辐射的影响 (Huete 等, 2002), 同时在很大程度上降低了 NDVI 过饱和所带来的问题。近些年来, EVI 及其双波段版本 EVI2 已经被广泛应用到植被物候遥感的研究中。譬如 MODIS 和 VIIRS 全球植被物候参数产品 (MCD12Q2, VNP12Q2) 均采用 EVI 的双波段版本 (EVI2) 作

为其数据源 (Zhang 等, 2004, 2018a)。但 EVI 也存在对草地等低生物量区域植被生长变化不够敏感的问题。此外, 部分研究发现 EVI 在热带雨林地区对太阳—传感器几何关系的变化所导致的 BRDF 效应非常敏感, 说明了在使用 EVI 研究植被季节变化和提取物候时间节点过程中考虑 BRDF 效应并对其进行有效订正的必要性 (Galvão 等, 2013; Petri 和 Galvão 等, 2019)。

表 1 植被物候遥感中的常用指数

Table 1 Indices commonly used in remote sensing of vegetation phenology

分类	指数	名称	计算公式	特点	参考文献
光学 植被 指数	NDVI	归一化差值 植被指数	$(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}})$	计算简单, 历史数据积累较长, 但容易饱和, 对高植被密度区敏感性低, 易受土壤背景影响	Rouse 等, 1973
	EVI	增强型植被 指数	$2.5(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{NIR}} + 6.0\rho_{\text{R}} - 7.5\rho_{\text{B}} + 1)$	同时减少来自大气和土壤噪声的影响, 对高植被密度区敏感性较低	Huete 等, 2002
	EVI2	双波段增强 型植被指数	$2.5(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{NIR}} + 2.4\rho_{\text{R}} + 1)$	大气影响小时, EVI2 可用于没有蓝波段的传感器, 替代 NDVI 作为长时序物候研究的指数	Jiang 等, 2007
	CCI	叶绿素含量 指数	$(\rho_{531} - \rho_{645}) / (\rho_{531} + \rho_{645})$ , $\rho_{531}$ 和 $\rho_{645}$ 分别是植物在 531 nm 和 645 nm 的反射率	能够跟踪细微季节性变化, 具有提取物候光合指标方面的潜力	Wong 等, 2019
	PRI	光化学反射 指数	$(\rho_{531} - \rho_{570}) / (\rho_{531} + \rho_{570})$ , $\rho_{531}$ 和 $\rho_{570}$ 分别是植物在 531 nm 和 570 nm 的反射率	用于跟踪光合物候和光能利用效率变化, 但易受土壤背景和植被冠层结构影响	Yin 等, 2020
	NIRv	近红外植被 指数	$\rho_{\text{NIR}} \cdot \text{NDVI}$	与 SIF 高度相关, 可用于研究全球气候变化和碳循环	王松寒和张永光, 2020
	PPI	植物物候 指数	$K$ 是增益因子, $M$ 是研究区冠层最大 DVI, $\text{DVI} = \rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}$ , DVI <sub>s</sub> 是土壤的 DVI $\text{PPI} = -K \cdot \ln((M - \text{DVI}) / (M - \text{DVI}_s))$	估计植物冠层生长的有效工具, 有效减少土壤和积雪背景影响, 适合于高纬度或高海拔地区积雪覆被时间较长的地区	Jin 和 Eklundh, 2014
	GCC (Green Chromatic Coordinate)	绿色坐标 指数	$\text{DN}_G / (\text{DN}_R + \text{DN}_C + \text{DN}_B)$	常用于物候相机, 用于表征植被颜色和活动的季节性轨迹, 抑制相片 DN 值的不利因素 (譬如曝光、太阳几何效应)	Richardson 等, 2018
	VCI (Vegetation Contrast Index)	植被对比 指数	$\text{DN}_C / (\text{DN}_B + \text{DN}_R)$	常用于相机网络, GCC 的非线性变换并提供了更大的动态范围	Zhang 等, 2018b
	其他 指数	VOD	微波植被 光学厚度	基于微波观测反演得到	能够反映植被冠层含水量和生物量, 不受大气和云覆盖的影响, 适用于云覆盖较多的地区
SIF		日光诱导 叶绿素荧光	基于高光谱观测反演得到	与光合过程关系较好, 通常与植被初级生产力具有线性关系	Jeong 等, 2017
LAI		叶面积指数	叶面积/土地面积, 可基于遥感手段反演得到	重要植被结构参数, 在一定范围内反映植被状态和能量交换等信息	向阳 等, 2014

近期一些研究发现, 对于常绿针叶林这样的生态系统, 季节内光合作用的变化主要是由冠层生理要素的变化驱动的, 因此类似叶绿素/胡萝卜素指数 CCI (Chlorophyll/Carotenoid Index)、光化学反射率指数 PRI (Photochemical Reflectance Index)

等生理指数 (physiological indices) 对于研究植被光合期物候来说比传统的结构指数 (structural indices) 更加适合 (Yin 等, 2020)。NIRv 是新发

全球尺度上与总初级生产力 GPP (Gross Primary Production) 的相关性优于 NDVI (Badgley 等, 2017)。此外, 与 NDVI 相比, NIRv 可以在高生物量区域使用, 有效减轻了植被—土壤混合像元的影响, 并与 EVI 紧密相关 (Hinojo-Hinojo 和 Goulden, 2020)。NDVI 对地形不敏感, 但是 EVI 和 NIRv 需要根据山地地形效应进行校正 (Chen 等, 2020a)。

此外, 与地表背景有关的一些指数也在植被物候参数提取中得到了应用。如归一化差值积雪指数 NDSI (Normalized Difference Snow Index) 和归一化差值物候指数 NDPI (Normalized Difference Phenology Index), 通过识别出积雪和冰的存在时间, 减小了积雪背景在植物春季物候提取中造成的不确定性 (Zhang 等, 2003; Wang 等, 2017a; Xu 等, 2021)。Jin 和 Eklundh (2014) 开发的植物物候指数 PPI (Plant Phenology Index), 其通过严谨的辐射传输物理过程推导, 有效减轻了土壤和积雪背景的影响, 提高了遥感提取常绿针叶林物候的精确度。Tian 等 (2021a) 在欧洲范围内的研究进一步发现, 使用 Sentinel-2 PPI 指数计算的物候期, 与地面物候观测之间的相关性要优于从 NDVI 和 EVI 中提取到的结果。

除了传统的光学植被指数, 一些新的遥感指标也被应用到植被物候遥感监测中, 比较有代表性的是日光诱导叶绿素荧光 (SIF) 和微波植被光学厚度 (VOD)。理论上, SIF 与植物光合作用的过程具有更直接的联系, 可以与光学植被指数在物候监测中形成很好的互补。Dannenberg 等 (2020) 的研究发现, 在地上生物量较低的情况下, 通过 SIF 估算的物候参数的像元数量虽然比借助 NDVI 的数量要少 (亦即提取成功率较低), 但 SIF 在捕获年内植被生长季动态方面的能力更强。现有的卫星 SIF 数据原始空间分辨率仍然较粗, 通过机器学习方法建立 SIF 与其他遥感指标之间的关系, 可以生产较高分辨率的 SIF 数据集, 譬如 CSIF (Contiguous SIF) (Zhang 等, 2018c) 和 SIF<sub>oc2\_005</sub> (Yu 等, 2019) 等。现有的 SIF 产品都是基于非专门设计的星载传感器, 未来欧洲空间局计划发射的专门用来反演 SIF 的 FLEX 星载传感器, 预期可以为研究生态系统光合物候提供空间分辨率更高、连续性更好、更为准确的 SIF 数据产品 (De Grave 等, 2020)。

微波遥感反演的 VOD 能够反映植被冠层含水量和生物量, 其在植被物候遥感方面也具有一定的应用潜力 (Tong 等, 2019; Alemu 和 Henebry, 2017; Jones 等, 2011)。相比较传统光学遥感, 卫星 VOD 较少受大气条件和云的影响, 在热带亚热带地区和降水量丰富的季节, 能够提供时空连续性更好的观测 (Fan 等, 2019)。卫星 VOD 所提供的独特的植被冠层含水量信息, 在解释植被叶片物候的时空动态方面具有一定的价值 (Tian 等, 2018)。目前卫星 VOD 产品的主要局限在于空间分辨率通常较粗, 无法反映精细尺度上地表植被物候变化。

除以上遥感指数之外, 激光雷达 (LiDAR) 可以提取包括森林高度、树木冠幅在内的植被结构参数, 可以用来研究植被物候尤其是叶片物候 (植被指数)、光合物候 (SIF) 与结构物候之间的联系。NASA 近些年发射了 GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) 星载激光雷达, 其在森林物候研究中的应用潜力已经得到关注 (Sala, 2021)。虽然激光雷达能够解析植被结构, 且与其他数据结合具有一定的物种分类潜力, 但由于可用性以及成本限制 (譬如时序数据较少), 数据的实际使用存在一定的困难 (Grabska 等, 2019)。此外, 目前全球尺度上时空连续的星载 LiDAR 数据仍然缺乏 (Qi 和 Dubayah, 2016)。数据融合技术是将星载激光雷达数据用于植被物候研究的一个有效技术途径, 譬如将 GEDI 与 TanDEM-X InSAR 数据进行融合以生成时空无缝的全球森林高度数据 (Qi 等, 2019)。

总体而言, 传统光学植被指数经过数十年的发展, 已经积累了长时间序列的观测数据, 仍然是研究植被物候对气候变化响应的主要数据源。且植被指数数据空间分辨率较高, 能够更好地满足农业等领域实际应用需求。新的遥感指数, 譬如 SIF, 在干旱生态系统或农田生态系统的物候监测中已经体现出了一定的价值, 但其潜力仍然有待充分挖掘。相比较光学指数, 基于微波遥感的 VOD 更适合对与亚热带或热带多云地区植被物候的监测, 但目前分辨率较粗是制约其广泛应用的主要因素。未来综合使用多源遥感指数对物候变化进行分析, 将有可能得到更加可靠和准确的结论, 并发现不同指数所描述的植被变化过程之间的内在联系。

## 2.2 遥感时序数据预处理方法

遥感数据在采集的过程中会受到来自大气条件和遥感平台的影响, 包括云、气溶胶、太阳—传感器观测几何、传感器退化问题等, 且这些因素在时间上的出现具有随机性, 进而在植被指数时序数据中引入一定的数据噪声(于信芳和庄大方, 2006)。由于数据噪声的存在, 植被指数季节曲线中常常存在异常值和缺失值等问题, 对准确提取物候期时间节点造成了困扰。通常需要对植被指数时序数据进行重构(reconstruction)和空值插补(gap-filling), 以达到增加数据连续性、平滑降噪、突显植被季节变化信号以利于物候参数提取的目的。

时序数据重构方法总体上可以归为两类——拟合(fitting)和滤波(filtering)。拟合法通过选择一个目标函数, 利用最小二乘法对时间序列逼近以达到平滑数据的目的。常用的拟合目标函数包括非对称高斯函数(asymmetric gaussian)(Jönsson和Eklundh, 2002)、双逻辑斯蒂函数(double-logic)(Beck等, 2006)、局部样条函数(local spline)(Cai等, 2017)、不同阶多项式函数(different order polynomial functions)(Zhu等, 2012; Piao等, 2006)等。而滤波法则是使用滤波器或窗口平滑方式去噪, 常用的滤波方法包括S-G滤波器(Savitzky-Golay filter)(Chen等, 2004)、惠泰克滤波器(Whitaker filter)、傅里叶变换(Fourier transformation)(Ibrahim等, 2018; 郭昱杉等, 2017)、小波变换(Wavelet transformation)(Sakamoto等, 2006)、滑动中值/均值滤波器(Moving median/mean)(Ganguly等, 2010)和奇异谱分析SSA(Singular Spectrum Analysis)(Ma等, 2013)等。

时序数据重构属于物候参数提取之前的数据预处理步骤。为了提高该项工作的效率, 降低非遥感领域研究者的门槛, 不同类型的时序数据重构开源软件相继被开发出来。除了TIMESAT(Jönsson和Eklundh, 2002)等图形化界面软件之外, 近些年来, 基于开源R或者Python计算机语言, 许多简便易用的物候参数提取软件包也被开发出来。譬如基于R语言的phenology软件包可实现数字图像处理 and 物候时间节点提取等功能(Filippa等, 2020)。再如同样是基于R语言, 由美国国家生态观测网络NEON(National Ecological

Observatory Network)发布的phenor软件包, 可用于对PhenoCam数据或其他物候观测数据进行处理和分析。基于Python的物候提取代码包有PhenoPY(<https://github.com/JavierLopatin/PhenoPY>[2021-09-10])、和Phenology(<https://github.com/lewistrotter/Phenology>[2021-09-10])。

总的来说, 目前遥感时序数据预处理的方法较多, 不同研究通常根据研究区植被生长特点和数据源质量采用最适用的方法。在定量比较了几种主要的时序数据重构方法之后, Atkinson等(2012)发现惠泰克滤波和傅立叶变换对于原始数据的平滑效果最好, 但是双逻辑斯蒂函数和傅立叶变换对于数据中的噪声具有更好的去除效果。同时, 针对干旱地区的落叶植被, 不同方法估算的生长季开始时间最大可相差3—4周, 而在常绿植被上差距较小, 但也在1周左右(Atkinson等, 2012)。对于青藏高原的高寒草地, 研究发现时序数据重构质量对于生长季开始时间的提取准确度有着决定性的影响(Li等, 2020)。比较不同时序重构方法, Li等(2020)得出的研究结论是NDVI时间序列谐波分析法HANTS(Harmonic Analysis of NDVI Time-Series)提取出的生长季开始时间与地面观测结果之间误差最小(RMSE在11—12 d)。迄今为止, 植被物候遥感中仍然不存在普遍采用的时序数据重构方法, 且这些方法或多或少都会引入一定的主观性(譬如平滑窗口大小的选择或者多项式阶数的设定等)。考虑到时序数据重构方法对物候参数提取结果具有显著影响, 未来急需寻求通用性更好的方法, 或者降低目前使用方法的主观性和随意性, 以便增加不同研究结果之间的可比性。

## 2.3 物候参数提取方法研究进展

### 2.3.1 生长季的划分

传统的植被物候监测基于研究人员的肉眼观测, 通过视觉特征记录单株或一个群落内多个植株物候事件(譬如展叶、始花、抽穗等)发生的时间节点。与之相比, 遥感物候通常根据植被指数季节曲线(seasonal profile)的形态特征来划分不同的生长期。因为研究对象不同, 植被生长期的定义和对应物候期参数的提取方法也不尽相同(表2)。

表2 以农作物为例的遥感物候期与传统物候观测时间节点的对应关系

Table 2 Correspondence between remote sensing phenological parameters and traditional phenological observational time nodes (Taking crops for example)

遥感物候期参数名称	定义	对应农业物候期名称	定义	参考文献
生长季开始	光合作用开始、绿叶面积开始上升的时期	出苗/展叶/返青期	幼苗出土的前后时期	Peng等,2017b; 闫洋和张楚婕,2020; 孔冬冬等,2017
成熟期	光合作用强度和绿叶面积快速上升的时期	成熟期	作物收获时期/作物叶片或茎秆发生规律性单调变化	蒙继华和吴炳方,2013
衰落期	光合作用强度和绿叶面积快速降低的时期	落叶/衰落期	植被叶片叶绿素含量降低,水分减少,叶片从绿变黄并下落	Zhang等,2003; 周柯妙等,2020
生长季结束	光合作用接近于0,绿叶面积降低至最小值的时期	枯黄期/(开始进入)越冬/休眠期	(如冬小麦)在入冬前平均气温稳定下降到0°C左右,基本停止生长/相对于其他时期叶绿素含量稳定	奚雪和赵庚星,2020; 孔冬冬等,2017

在MODIS全球物候产品中,Zhang等(2003)定义了4个关键的物候转换日期,即绿期(greenup)、成熟期(maturity)、衰落期(senescence)和休眠期(dormancy)。而针对水田和旱地作物,Zhang等(2004)划分了出苗期、抽穗期和收获期等生长期。其中,出苗期定义为植被指数曲线上升斜率的最大值处,抽穗期为作物生长季内植被指数最大值处,而收获期为植被指数曲线的下降斜率最大值处。针对高寒草地植被类型,马晓芳等(2016)设置了返青期和枯黄期两个生长期。考虑到热带稀树草原的树一草双层结构,且树多为常绿树种,草多为一年或多年生草种,Ma等(2013)认为遥感观测的像元尺度物候信息主要反映的是林下草的生长对于雨季的响应,而旱季的植被信号主要来自树木。

### 2.3.2 物候期参数遥感判定方法

遥感物候期时间节点判定的总体原则是基于植被指数时序数据的时间生长曲线形态,通过设定一定的阈值或者寻找曲率变化速率的极值点来确定。常用的有阈值法、滑动平均法和求导法3大类。

(1) 阈值法: 阈值法主要是通过设置植被指数的经验阈值来确定植被生长季开始或结束的日期,可分为绝对阈值法(White等,2009; Wei等,2019; Shen等,2012)、相对阈值法(马晓芳等,2016; 倪璐等,2020)、最大斜率阈值法(范德芹等,2016)、累积频率阈值法(陈效速和喻蓉,2007)等。绝对阈值法简单易行,是早期植被物候遥感中常用的方法。然而因为不同土壤类型和

植被结构类型在植被指数的绝对数值方面存在较大差异,绝对阈值的设定难免主观。相对阈值法通过在像元尺度上动态设定基于当季植被指数季节变化幅度的阈值,一定程度上避免了绝对阈值法的缺陷。此外,最大斜率阈值法也常被使用,其通过取植被指数拟合曲线的斜率最大时对应的植被指数数值作为阈值,将首次达到该阈值时对应的日期视为生长季开始时间(范德芹等,2016)。此外,累积频率阈值法基于地面观测数据而不单单从遥感角度出发,利用物候频率分布型法,即将地面物候观测数据转换成相对应的遥感物候阶段,进而再确定地面物候发生时对应的植被指数数值并取该值作为阈值,某种程度上为遥感和地面观测数据的有机结合提供了新思路(项铭涛等,2018; 夏传福等,2013)。

(2) 滑动平均法: 又称作延迟滑动平均算法DMA(Delayed Moving Average)。此方法基于植被指数时序曲线与其滑动平均值曲线的交叉点确定物候期关键时间点(Reed等,1994; 侯学会等,2017)。该方法的优点是应用简单,但缺点是对数据中的噪声、数据合成周期长度、滑动平均窗口大小的选择等经验参数比较敏感,特别是在原始时序数据中由于云覆盖等因素造成观测连续缺失时提取结果不确定性显著增大(Zeng等,2020)。在选取滑动平均窗口大小时应考虑不同植被类型的生长季节规律差异,尽量避免受前一个周期的影响。

(3) 求导方法: 求导法通过对平滑后的植被指数时序数据求二阶导数得到曲率变化率CCR(Curvature Change Rate),进而通过寻找CCR的极

值来确定物候期关键节点 (Zhang 等, 2003)。植被指数上升速率变化率最大处视为生长季开始时间, 下降速率变化率最大处视为生长季结束时间。求导法的优势是不需要人为设置阈值, 且提取出的阈值具有一定的物理意义, 可以较为客观的反映地表植被生长变化过程中的突变点。求导法的缺点是对原始数据中的噪音非常敏感, 需要对数据进行较大程度的降噪处理, 不可避免地存在过度平滑的风险。需要注意的是, 在早期版本的 MCD12Q2 MODIS 全球物候产品中, 求导法被作为物候参数提取方法 ([https://www.bu.edu/lcsc/files/2012/08/MCD12Q2\\_UserGuide.pdf](https://www.bu.edu/lcsc/files/2012/08/MCD12Q2_UserGuide.pdf) [2021-09-10])。最新版本 (c006) 的 MCD12Q2 中, 物候参数提取方法被更新为相对阈值法 (Gray 等, 2019b)。

(4) 其他方法: 除了以上 3 种常用的方法之外, 近些年也发展出了一些新的物候参数提取方法。Xie 和 Wilson (2020) 发展了一种基于变化点检测的物候期判定方法, 发现该方法在判定落叶森林生长季开始和结束时间方面能够得到比基于分段逻辑斯蒂函数拟合与求导法更好的精度。此外, 变化点检测法的一个优势是其能够提供每个物候期时间节点估算时的不确定性, 便于后期定量分析。为了更好地解决时序数据突变或者数据噪声的影响, Verbesselt 等 (2010) 发展了一种分离趋势和季节项的突变点检测方法 (BFAST)。该方法的一个优势是无需人为设定阈值, 尤其适合于基于长时间序列观测的物候期变化检测。

总的来说, 与其他地表参数的遥感反演一样, 针对物候参数提取也发展出了不同的技术路线和算法, 这在丰富研究手段的同时也客观上造成相互比较的困难。考虑到在目前的技术条件下, 卫星观测仍然难以直接记录植物物候现象, 以不同尺度的地面观测数据为辅助, 选择合适的物候期提取方法或阈值, 赋予提取出的遥感物候参数更加明确的生物物理意义, 而不仅仅是曲线上的某一个拐点, 应该是未来植被物候遥感急需解决的问题。

### 3 遥感物候验证方法最新进展

#### 3.1 传统物候观测数据

利用传统地面物候观测数据对遥感物候反演结果进行验证是最常用的方法。传统地面观测数据来源广泛, 涵盖来自行业部门的观测数据、统

计年鉴、典型调查数据 (包括观测日记) 等。譬如由竺可桢先生在 1963 年倡导建立的中国物候观测网 ([cpon.ac.cn](http://cpon.ac.cn) [2021-09-10]), 迄今为止记录了全国各省近 150 种的木本植物的物候期信息, 不仅可以用来验证遥感物候反演结果, 还可以用来研究长时间尺度下植被对气候变化的响应机制 (葛全胜 等, 2010)。除中国外, 美国的 National Phenology Network、芬兰的 MetINFO Phenology in Finland、欧洲的 Pan European Phenology Project, 也从国家/洲的尺度上提供了丰富多样的植被物候地面观测数据, 可以用来对遥感反演结果进行验证。

鉴于地面物候观测记录站点样本区内所有植物物种的物候期的发生时间, 与像元尺度的遥感物候结果不具有直接的可比性, 因此, 地面物候观测数据需要经过一定预处理 (尺度转换) 才可以用于验证遥感物候反演结果 (Liang 和 Schwartz, 2009; Tian 等, 2021b)。传统地面物候观测数据虽然准确度高, 但是存在物种层面无法直接向生态系统层面过渡的尺度问题。为了解决尺度转换的问题, Liang 等 (2011) 采用景观升尺度法, 通过在地面上大量布置观测样地, 从样地水平观测中计算景观物候指数并将其用来对卫星观测结果进行验证。

#### 3.2 物候相机观测网络

近地面自动延时数字相机 (automatic time-lapse digital camera, 亦即物候相机 PhenoCam) 可以获取样地尺度的可见光和近红外多时相观测, 基于此计算植被指数并进而提取物候时间节点, 也成为遥感物候观测验证的一个重要方法 (Richardson 等, 2019)。物候相机可根据其通道配置划分为可见光 (RGB)、多光谱 (通常除 RGB 之外, 增加近红外波段) 和高光谱相机, 研究者可以根据研究目标和预算选择不同配置的相机。通过物候相机观测, 可以计算包括绿色坐标指数 (GCC)、绿色—红色比值植被指数 (GRVI) 并提取植被物候期参数 (Richardson 等, 2018)。物候相机的观测尺度介于高分辨率卫星遥感和人工野外观测之间, 不仅有效减小了大气和混合像元的影响, 还增加了数据获取频率, 使结果更能够反映亚像元尺度下不同植被类型的物候期特征 (周惠慧 等, 2016)。

相比于传统肉眼观测和卫星遥感观测, 物候

相机能记录冠层、单个物种或个体尺度的植被连续变化信息,是连接物种尺度和冠层尺度物候的重要工具(Ahrends等,2009)。周玉科(2018)对MOD13Q1植被指数产品和物候相机数据使用相同的物候参数提取方法提取了多种物候期参数,证明了物候相机能更好地反映卫星亚像元尺度上群落甚至是个体之间的物候差异(亦即空间异质性)。

目前国际上物候相机观测网络发展非常迅速。比较著名的有美国物候相机观测网络(PhenoCam Network)(Richardson等,2018)、欧洲物候相机观测

网络(European Phenology Camera network)(Wingate等,2015)、日本物候相机观测网络(Phenological Eyes Network)(Nasahara和Nagai,2015;Nagai等,2016)、澳大利亚物候相机观测网络(Australian Phenocam Network)(Brown等,2016)和欧洲阿尔卑斯山物候相机观测网络(PhenoAlps)(Cremonese,2009)(表3)。依托中国物候观测网,覆盖中国主要植被类型的物候相机观测网络也正在加紧建设之中。

表3 国外主要物候相机观测网络

Table 3 Summary of the main PhenoCam networks around the world

观测网络名称	网址	国家/地区	观测区域	站点数量/个	数据产品时间/年
PhenoCam Network	<a href="https://phenocam.sr.unh.edu/webcam/">https://phenocam.sr.unh.edu/webcam/</a>	美国	主要为美国、欧洲。南美洲、中国等也有少量站点	718	2000年至今
European Phenology Camera Network	<a href="http://european-webcam-network.net">http://european-webcam-network.net</a>	欧洲	观测站点主要分布在西南欧不同生态系统,大多为欧洲ICOS综合碳观测网络站点	66	2008年至今
Phenological Eyes Network	<a href="http://pen.envr.tsukuba.ac.jp">http://pen.envr.tsukuba.ac.jp</a>	日本	主要为日本。韩国、泰国、俄罗斯西伯利亚等地也有少量站点	40+	1997年至今
Australian Phenocam Network	<a href="http://phenocam.org.au/">http://phenocam.org.au/</a>	澳大利亚	相机主要布设在澳大利亚生态系统研究网络(TERN)的通量观测站点(OzFlux)和超级站(SuperSites)	20+	2011年至今

以发展较早的美国物候相机网络为例,该网络的大多数站点在每天固定时间之内每30 min上传一次高质量数码相片,并经过包括离群值检测和专家检查在内的全方位处理以保证数据质量(Richardson等,2018)。在使用美国PhenoCam网络数据验证VIIRS遥感物候产品时,Zhang等(2018b)提出了一种新的植被对比度指数(VCI),该指数是GCC的非线性变换,并提供了比GCC更大的动态范围,更适合用来提取物候期时间节点。Zhang等(2018a)的研究发现,从VIIRS NDVI和EVI2植被指数提取的物候期开始时间与从PhenoCam GCC和VCI指数提取的时间具有较好的可比性(误差在7—11 d),但是在物候期结束时间方面的可比性较差(误差在10—13 d)。Hill等(2021)的研究发现,基于PhenoCam可见光波段的指数(譬如GCC和VCI)与通量数据得到的净生态系统生产力NEP(Net Ecosystem Productivity)之间的关系最好,而引入近红外波段的指数(NDVI和EVI)通常会低估生长季的开始时间并高估生长季的结束时间。Filippa等(2018)的研究

则发现,物候相机得到的GCC和NDVI指数在监测生态系统动态和物候参数提取方面具有一定的互补性,且在落叶阔叶森林生态系统两种指数都可以作为MODIS物候产品精度验证的数据源。此外,Filippa等(2018)还发现,在常绿森林生态系统,相机与卫星观测得到的物候时间节点之间存在较大的差异,强调了在此类生态系统上使用物候相机数据验证遥感物候提取结果方面的难度。Bórnez等(2020)使用物候相机数据验证了1999年—2017年SPOT-VEGETATION和PROBA-V两个卫星遥感物候产品,结果显示地面与卫星提取的生长季开始时间具有较高的相关性( $R^2>0.7$ , RMSE=9 d),比生长季结束时间的相关性要高且误差更小( $R^2>0.5$ , RMSE=12 d)。

除了MODIS或VIIRS等中分辨率卫星数据外,由于观测尺度相近,物候相机也常被用于验证高分辨率卫星遥感物候提取结果。譬如,Descals等(2020)从Sentinel-2数据中提取了生长季开始和结束时间并与物候相机提取的结果进行了比较,误差在3—6 d。Moon等(2021)系统地比较了包



括 PlanetScope、HLS (Harmonized Landsat 8 and Sentinel-2) 和 MODIS 在内的不同空间分辨率的卫星遥感物候与地面物候相机网络观测, 发现 PlanetScope (3 m 分辨率) 与 HLS (30 m 分辨率) 与物候相机之间的验证结果要显著优于 MODIS (250 m 分辨率), 说明了站点空间异质性是遥感物候验证时需要考虑的一个重要因素。

为了减小光照条件变化的影响, 在理想状态下物候相机通常选择背对太阳的方向进行拍摄。但由于不同区域的植被分布差异, 通常很难达到该理想状态, 因此物候相机往往会选择一个固定的拍摄时间段来降低光照或树冠 BRDF 的干扰, 以获取受云、光照影响较小的数据 (Gatis 等, 2017)。

目前物候相机由于成本相对较低, 且能减少传统物候观测中昂贵的人力成本投入, 因此被大量的布设到全球不同生态系统中。但是物候相机也存在一些问题, 譬如非专业相机对不同照明条件入射光的非线性响应导致捕获的照片失真 (Li 等, 2021)、因不同原因导致的观测数据不连续 (如在光照条件缺乏区域, 使用太阳能供电的物候相机常常存在数据获取缺失的问题)、不同站点间相机自身硬件的差异使相机定标不够严格等问题, 给定量研究植被物候的趋势变化以及不同站点之间的对比分析造成了一定的困难 (Macfarlane 等, 2014)。未来, 提高物候相机的定标精度, 采用尽可能标准和规范的波段设置和数据存储、预处理方案, 对观测元数据尽可能详细记录, 是提高物候相机观测量水平的一个重要思路。

### 3.3 通量观测网络

涡度相关 EC (Eddy Covariance) 技术能够直接测量生态系统尺度上陆地生态系统与大气之间的碳、水和能量交换速率, 具有时间分辨率高、观测尺度与中分辨率卫星像元尺度大小相近等特点 (Baldocchi, 2014)。通过从涡度相关碳通量数据中提取植物光合物候期参数, 可以对基于遥感光学植被指数或 SIF 等提取得到的物候参数进行验证。Ma 等 (2013) 在澳大利亚热带稀树草原的 3 个通量站点上基于 GPP 数据验证了 MODIS EVI 提取得到的物候参数, 发现两者之间在遥感数据完整性较好时相关性较高, 反之则存在较大偏差。刘啸添等 (2018) 通过对比卫星遥感获取的

NDVI、EVI、SIF 和通量塔测量的 GPP 数据之间的相关程度, 验证了卫星观测植被 GPP 季节变化的可靠性。周蕾等 (2020) 在亚热带常绿针叶林的研究发现, 相比较通量观测结果, SIF 估算的春秋季节物候的滞后时间要短于传统植被指数的估算结果, 说明 SIF 能更好地追踪常绿林光合作用的季节轨迹。Wang 等 (2019) 在北澳大利亚热带样带 NATT (North Australian Tropical Transect) 地区评估了卫星遥感数据提取的 SIF 捕获旱地植被物候动态变化的能力, 发现相对于 MODIS EVI, SIF 提取的物候期参数不受土壤背景影响, 更为准确地表征了植被物候沿降水梯度的时空变化趋势。

在使用通量数据验证遥感物候时, 有必要考虑通量数据观测足迹内的生态群落构成, 以便更好地理解与解释卫星数据和通量观测之间的差异。譬如热带稀树草原具有典型的树—灌木—草分层结构, 在雨季结束阶段草地生产力下降的同时会伴随树木 (主要是常绿树种) 生产力的上升, 出现 EVI 和 GPP 产生负相关的现象 (Restrepo-Coupe 等, 2016)。建立涡度相关通量塔时, 同步安装光学传感器以监测植被的物候变化, 有利于更好地理解植被物候与光合作用等季节节律的关系 (Wang 等, 2017b)。

### 3.4 其他新的验证途径

除了定点监测物候信息外, 无人机 UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) 在遥感植被监测中的应用, 为精细尺度上以低成本、高精度的方法监测植被动态并对遥感物候产品进行验证提供了新的方案。UAV 搭载的传感器能够获取厘米级分辨率的可见光、多 (高) 光谱影像或激光雷达点云, 可以用来更好地区分绿色植被和土壤背景, 并追踪从单个植株、物种到景观等不同尺度的生理和结构季节变化特征 (Taylor 等, 2021)。用户通过无人机可以在景观尺度上取得与卫星遥感像元尺度相近的观测, 是验证遥感物候产品非常好的数据源 (Klosterman 等, 2018)。Berra 等 (2017) 在森林样方尺度上对比了由 UAV 和 Landsat 8 获取的地表反射率和 NDVI, 并通过地面测量数据进行验证, 发现在针阔混交林区域, UAV 反演的地表反射率和 NDVI 能分别解释 84%—90% 的 Landsat 8 地表反射率与 95%—96% 的 Landsat 8 NDVI 变化, 这表明 UAV 在精细空间尺度下监测森林植被物候的潜力。

无人机已经被用于观察单个树冠尺度上森林冠层结构和植被物候动态变化 (Zahawi 等, 2015)。类似地, 同步搭载多光谱相机、激光雷达能够对样地尺度的生态系统物候实现高频次的监测 (Hilker 等, 2011), 从新的视角揭示生态系统物候动态变化, 有助于从机理层面理解生态系统过程及其形成机制 (郭庆华 等, 2020)。

除以上列举的验证方法之外, 考虑到植被对环境因素的敏感性, 还有利用环境因素进行模型筛选和精度验证的方法。譬如植物复苏 (返青期) 通常在 0—5 °C 的环境中, 可根据时间节点对应的地表温度 (草地) 或气温 (森林) 进行春季物候期的验证, 这种不同于传统验证方法的新的验证思路, 强调了物候与气候因子之间的关系是物候研究最重要的意义, 赋予遥感物候指数明确的生物气象学意义。这种关注物候过程, 而不是特殊物候事件的研究思路有助于更好地理解和分析植被物候对气候变化的响应 (Chen 等, 2020b)。

此外, 利用站点上连续的光谱观测数据, 也可以计算植被指数并用来对卫星遥感物候提取结果进行验证 (在确保站点植被异质性较低的前提下)。这方面国际上有 SpecNet 全球光谱观测网络 (<https://specnet.info> [2021-09-10]), 国内有 ChinaSpec 中国生态系统光谱观测研究网络 (<https://chinaspec.nju.edu.cn> [2021-09-10])。以这些年快速发展的 ChinaSpec 网络为例, 其各个站点上都安装有自动化的高光谱传感器 (通常也同步安装了物候相机), 可以对冠层尺度的反射率进行高频次的观测, 预期可以在植被物候遥感验证方面发挥重要作用 (Zhang 等, 2021)。

除了以上的验证途径外, 其他一些地面物候验证数据获取方式也在积极探索的过程中, 譬如通过志愿者或市民参与物候观测计划。瑞士的 PhenoNet 让学生、教师以及业余爱好者以年为单位观测其选定的植物物种, 规范记录该植物的生长季节变化信息, 并在平台上进行数据共享。再如, 美国的 National Phenology Network 鼓励志愿者们使用自然笔记本 (Nature's Notebook) 记录植被的物候信息并进行共享。这种志愿者参与的方式使得物候信息更加丰富, 也让不存在传统地面物候观测站点的区域也能够获取物候观测数据, 从而扩展了遥感物候验证的潜在数据源。当然, 如何确保这些非传统方式收集的物候信息的质量及

时空一致性等, 仍然是目前的一个重要研究方向。

总之, 近些年来, 随着传感器技术的进步和数据验证手段的发展, 遥感提取的植被物候参数在空间和时间分辨率上均有较大的提升, 为在精细时空尺度上探究生态系统动态及其与气候变化之间的关系提供非常好的验证数据源。但是, 遥感观测无论分辨率高低, 由于其并不直接对应单个植株或物种, 始终难以和传统上的地面物候现象进行对比, 需要综合大量的地面观测或者经验知识赋予遥感提取的物候期时间节点以明确的生物学意义。在地面验证手段方面, 除了继续拓展现有的物候观测网络之外, 也应该充分发展塔基物候相机和无人机等新型近地面遥感观测技术, 以这些景观尺度上的物候信息为基准, 结合微纳卫星星座获取的高时空分辨率卫星观测数据, 发展行之有效的“点 (植株)—面 (像元)”尺度转换技术路径。

综上所述, 地面验证的关键在于数据的空间和时间代表性, 积累来自不同生态系统类型和自然地理、气候条件下的长时序物候观测数据, 将会显著提升植被遥感验证的精度, 进而提高相关产品和应用可靠性。在同一个站点上获取不同类型的物候观测数据, 包括传统的肉眼观测、物候相机、通量测量和无人机观测等, 可以丰富验证数据源, 从不同角度对卫星遥感提取的物候结果进行验证。

## 4 遥感物候产品的发展趋势

随着植被物候遥感领域的不断发展, 越来越多的遥感植被物候专题产品被研发并投入科学研究和实际应用中 (表 4)。譬如基于 AVHRR 长时期观测的全球尺度 1 km RSP (Remote Sensing Phenology) 产品, 在研究全球植被物候对气候变化响应中的发挥着重要作用 (Ji 和 Brown, 2017)。MODIS 由于其优异的传感器性能和强大的传感器科学团队, 目前大部分遥感物候应用均以 MODIS 植被指数和叶面积指数产品为数据源。譬如 MODIS 全球物候产品 MLCD (MODIS Global Land Cover Dynamics Product), 自其发布以来已经得到了广泛应用, 并在 NASA 的资助下不断对产品进行调整和更新, 保证了较高的数据质量和数据连续性 (Moon 等, 2019; Wang 等, 2017c; Zhang 等, 2006)。鉴于对高分辨率植被物候遥感产品需

求的日益增加，Zhang等（2018a）依托HLS反射率产品开发出了一种生产30 m分辨率遥感物候产品的新算法。

表4 植被物候遥感主要产品介绍

Table 4 Summary of main remote sensing phenology products

数据集名称	产品代码	空间范围	时间范围	空间分辨率	数据源	参考文献
植被指数和物候VIP (Vegetation Index and Phenology)数据集	VIPPHEN_EVI2 v004	全球	1981-01-01— 2014-12-31	0.05° (5600 m)	AVHRR N07、N09、N11 和 N14 数据集 (1981 年—1999 年)、MOD09 地表反射率数据 (2000 年—2014 年)	Didan 和 Barreto, 2016
VIIRS/NPP 地表物候数据集	VNP22Q2v001/ VNP22C2v001	全球	2013-01-01— 2018-12-31	500 m、0.05° (5600 m)	VIIRS NBAR 天底反射率计算的 EVI 数据	Zhang 等, 2020
地表动态变化数据集	MCD12Q2 v006(MLCD)	全球	2001-01-01— 2018-12-31	500 m	MODIS NBAR 天底反射率计算的 EVI 数据	Gray 等, 2019a
基于全球陆地表面卫星叶面积指数的物候数据集	GLP(GLASS-LAI-based phenology product)	全球	2001-01-01— 2012-12-31	1 km、0.05° (5600 m)	AVHRR 地表反射率数据集 (2000 年以前)、MOD09 A1 和 CYCLOPES LAI (2000 年以后)	向阳 等, 2014
多源陆地成像(MUSLI)地表物候数据集	MSLSP30NAv001	北美	2016-01-01— 2018-12-31	30 m	Harmonized Landsat Sentinel-2(HLS)转换日期来自 Landsat 8(OLI)与 Sentinel 2A 和 2B(MSI)	Friedl, 2020
1 km 遥感物候数据集	1 km AVHRR RSP	美国本土	1989-01-01— 2014-12-31	1 km	AVHRR	Ji 和 Brown, 2017
植被物候指数数据集	PPI	欧洲与北非	2000-01-01— 2016-12-31	500 m	MODIS MCD43 NBAR	Jin 和 Eklundh, 2014
澳大利亚物候产品	TERN AusCover	澳大利亚	2000-01-01— 2015-12-31	0.05° (5600 m)	MOD13C1 EVI	Broich 等, 2015
中国 3 大主要农作物 (玉米、小麦和水稻) 1 km 物候数据集	ChinaCropPhen1km	中国	2000-01-01— 2015-12-31	1 km	GLASS-LAI	Luo 等, 2020
中国主要生态观测站植被物候数据集		中国	2001-01-01— 2016-12-31	2.25 km	MOD13Q1	周玉科和刘建文, 2017
2000 年—2010 年青藏高原植被物候数据集		青藏高原地区	2000-01-01— 2010-12-31	500 m	MOD09A1 和 MCD43A4	张丽 等, 2017
三江源国家公园 250 m 遥感物候产品数据集		三江源国家公园	2001-01-01— 2020-12-31	250 m	MOD13Q1	Wang 等, 2017c

除了全球尺度的遥感物候产品之外，许多国家和地区也有自己的物候产品可供用户下载使用。如：美国的 MSLSP (Multi-Source Land Imaging (MuSLI) 遥感物候产品 (Gao 等, 2021)、澳大利亚的 TERN AusCover 遥感物候产品 (Broich 等, 2015)、欧洲的 PPI (Plant Phenology Index time series) 产品 (Jin 和 Eklundh, 2014)、中国主要生态观测站遥感植被物候数据集 (周玉科和刘建文, 2017) 等。

GLASS-LAI 产品 GLASS (Global Land Surface Satellite product) 是由北京师范大学全球变化数据处理与分析中心发布的高质量叶面积指数数据集 (向阳 等, 2014)。以 GLASS-LAI 产品为基础，Luo 等 (2020) 提出了一种基于最优滤波的物候检测方法 OFP (optimal filter-based phenology detection)，界定了中国 3 种主要作物的关键物候阶段。Wang 等 (2017c) 使用 GLASS-LAI 产品以及通用多周期物候反演方法 UMPM (Universal Multi-Life-Cycle

Phenology Monitoring Method), 生产了一套全国尺度的遥感物候产品。此方法生成的产品整体上具有有效性(即数据缺失率低、稳定性高), 在利用地面观测数据进行结果验证时亦反映出较好的一致性。类似地, 李静等(2017)基于LAI数据和UMPM算法生产了中国—东盟地区1 km分辨率2013年的植被生长季长度数据集(MuSyQ-GSL-1 km-2013)。

为了降低单一算法造成的不确定性, 周玉科和刘建文(2017)从中国主要的生态系统研究网络中获取6个地理分区(荒漠、草原、森林、农田、沼泽、城市)站点尺度的野外观测数据, 使用3种方法(D-L、Spline、SSA)对2001—2016年MODIS EVI数据进行时序重构, 并采取导数法和阈值法提取出10种植被物候关键参数, 从而为研究人员提供了高质量的站点尺度遥感植被物候信息。

遥感物候产品的精度不仅和输入数据的质量有关, 譬如时间分辨率(Zhang等, 2009)、云污染(Tian等, 2021b)、积雪和土壤背景效应(Jin和Eklundh, 2014)等, 同时也和具体研究的地理位置、生态系统类型以及使用的物候验证数据源的类型和质量相关。在美国不同生态系统上, Peng等(2017a)使用地面物候观测(始叶期)数据系统评估了包括MODIS物候产品(MCD12Q2)、VIP物候产品(VIPPHENEVI2)和AVHRR物候产品(AVHRRP)等在估算生长季开始时间时的精度, 发现这些遥感物候产品的误差通常在20 d左右。Xiao等(2013)在轮作农田上基于地面观测对MODIS全球物候产品的精度进行了验证, 发现冬小麦和夏玉米的物候期估算误差分别是8.8 d和9.5 d左右。Zheng和Zhu(2017)在青藏高原高寒草甸站点上验证了C5和C6版本的MODIS全球物候产品, 发现对于估算生长季开始的误差在10 d左右, 但是对于估算生长季结束的误差达到了18 d以上。Moon等(2019)在北美洲不同生态系统类型上使用物候相机数据验证了MODIS和VIIRS全球物候产品的精度, 结果显示除了常绿针叶林之外, 卫星遥感得到的生长季开始时间与物候相机得到的结果一致性较好, 误差通常在5—12 d。但是对于生长季结束时间, 误差显著提高到11—41 d, 说明秋季物候的准确提取仍然是一个挑战。

总的来说, 现有的遥感物候产品以中分辨率

(100—1000 m)为主, 高分辨率的物候产品基本上是区域范围的, 更大尺度的高分辨率遥感物候产品目前尚比较缺乏。同时, 现有的遥感物候产品主要基于国外的对地观测卫星(譬如MODIS、AVHRR、Landsat、Sentinel等), 考虑到这些卫星有可能在未来退役或者数据不可获取, 急需探索国产卫星数据在遥感物候监测方面的应用潜力, 这包括高分辨率的国产卫星(高分、资源、环境系列等)以及中分辨率卫星(风云系列)。此外, 不同遥感物候产品不仅采用的输入数据源有可能不同, 提取方法也千差万别, 对于用户来说这客观上造成了结果解释方面的难度, 因为不同的产品有可能给出不同的时间变化趋势或空间分布格局。作为遥感物候研究者来说, 基于统一的数据处理方法和参数提取流程生产遥感物候产品, 并基于地面验证给出明确的不确定性量化指标, 可以促进不同研究结果之间的比较, 也方便用户使用。

## 5 植被物候遥感误差来源

明确植被物候遥感监测中的误差来源, 量化不同误差来源对提取结果造成的不确定性, 并有针对性地发展科学有效的不确定性减少方法, 是提高植被物候遥感提取结果准确度和可信度的重要手段。以下分别从监测方法和遥感数据源两个方面对遥感物候期参数提取结果的误差来源进行探讨。

### 5.1 监测方法

(1) 空值插补: 在遥感物候参数提取过程中, 对于空缺值的插补方式会对提取结果有较大的影响(Yu等, 2021)。植被在生长季初期或末期, 有可能在短时间内发生快速的植被结构或叶片生理生化性状变化, 如果在这些阶段数据中存在较多的连续缺值, 会导致插值结果不准确并进而在估算出的物候期时间节点中引入相当大的误差(武艳强和黄立人, 2004)。对云覆盖造成的时序数据中的空值进行插补的技术方法, 是目前植被物候遥感领域的一个重要研究方向(Chen等, 2021)。

(2) 时序数据重构: 不同的植被指数时序数据重构方法去除噪声的能力各不相同, 且噪声会对拟合后的时序曲线在极值、幅宽等多个方面造成影响(Atkinson等, 2012; 刘建文和周玉科,

2018)。对于重构方法的选择, 需要考虑不同研究区植被生长的特点, 过度拟合和拟合不到位都不利于极值点的提取, 并影响估算出的物候期准确度 (Cai 等, 2017)。另一方面, 鉴于植物生长季存在差异 (譬如一季稻和第三季稻), 为了更贴近地表真实植被生长特点, 往往需要考虑到植被指数

产品时间分辨率对重构方法的影响, 譬如 HANTS 法由于对曲线起伏波动敏感, 更适用于拟合时间分辨率较粗的数据 (周惠慧等, 2016)。表 5 列举了目前植被物候遥感中常用的时序重构方法及各自的适用性。

表 5 植被物候遥感中常用的滤波和拟合方法介绍

Table 5 Summary of commonly used filtering and fitting methods in remote sensing of vegetation phenology

方法	优点	缺点	参考文献
Savitzky-Golay 滤波器(S-G)	捕捉局部突变信息能力强, 不受数据时间、空间尺度和传感器的限制	窗口大小和多项式阶数的设置受主观经验影响	Chen 等, 2004; Cao 等, 2018
滑动中值/均值滤波器 (Moving median/mean)	适用于受大气干扰、BRDF 效应、数据传输错误、少量云覆盖而引起的时序曲线波动	窗口大小的设置受主观经验影响, 均值方法受异常值影响大	孙华生 等, 2012
傅里叶变换 (FT)	适用于具有规律性周期和较为平稳的植被生长时序数据	受限于正余弦函数参数设置, 滤波器的截止频率过高时生成的曲线与原曲线偏离程度较大	Sellers 等, 1994
小波变换 (WT)	适用于非周期的和不平稳信号的重构, 具备噪声中识别事件的能力	当截止频率较低时会出现过度拟合的现象, 出现局部高频信号与曲线波动较大时与原曲线偏离程度较大	Sakamoto 等, 2005
非对称高斯函数 (AG)	对于不完整的时间序列敏感性低, 描述整体趋势能力强, 可识别较小时间间隔	季节变化不明显的区域难以确定峰谷值点分布	Jönsson 和 Eklundh, 2002
双 Logistic 函数 (DL)	噪声处理与提取物候特征能力突出	需假设时序数据形态满足逻辑斯蒂增长方式, 在干旱/半干旱区等植被由于降水时间导致的迅速生长的区域适用性较差	Fischer, 1994; Beck 等, 2006
三阶样条插值法 (3rd-order Spline)	最大程度保留曲线原始形态	在保留曲线形态的同时, 也会漏掉对一些数据噪音的处理	Chen 等, 2006
奇异谱分析法 (SSA)	数据驱动的无参统计方法, 不需假设时序数据形态	通常需要多年数据进行稳定重构, 且窗口大小仍然需要通过经验设置	Ma 等, 2013

(3) 物候参数提取: 除了数据预处理过程中形成的不确定性之外, 物候提取方法本身也会引入一定的不确定性。针对前文 3 种植被物候参数提取方法, 阈值法虽然简单有效、应用广泛, 但是受主观因素影响程度较大 (譬如不同研究者给出的不同阈值导致生长季长度发生了明显变化), 难以全面考虑客观环境影响 (如土壤背景和植被类型差异) (Justice 等, 1985)。延迟滑动平均方法能有效降低云污染, 但是对噪声阈值、滑动窗口长度等经验参数敏感, 特别是当原始时间序列包含连续缺失数据时对结果造成的不确定性显著增加 (Reed 等, 1994)。求导法虽然无需设定阈值且具有一定的生物学意义, 但对数据噪音特别敏感, 因此在数据预处理过程中对平滑程度有着较高的

要求 (Moulin 等, 1997)。目前尚不存在具有全局适用性的物候参数提取算法 (Zeng 等, 2020)。未来急需探索具有更好的普适性的算法, 以提高不同区域、不同时间段提取出的物候参数结果的可比性和时空一致性。

由于环境的周期性变化, 植物本身在春季和秋季出现了完全不同的生理变化特征。植被生长季节曲线本身具有不对称性 (周玉科, 2019), 而现有研究中大多数都是基于同一种提取模型或阈值同时提取不同物候期 (譬如返青期和衰落期) (马晓芳等, 2016), 这导致了未充分考虑植物生理特性和规律而出现的误差, 也是现有研究中返青期的遥感提取精度普遍优于枯黄期的主要原因之一。植被物候不对称性存在一定的时空规律, 有

助于深入认识陆地生态系统的细节过程。Zhou (2019) 提出了物候不对称指数  $AsyR$ 、 $AsyL$  和  $AsyV$  (Asymmetry of growing Rate, Length, Vegetation index) 来展现春秋物候的不对称性, 可作为植被类型分类的辅助工具。

## 5.2 遥感数据

虽然通常用于植被物候遥感的数据产品已经经过了几何校正、地形校正和辐射校正等预处理, 但是仍然存在一些残余的数据噪声。未能去除掉的云污染、水汽、气溶胶, 水体和积雪背景效应, 以及由于太阳—传感器几何关系差异所产生的角度效应, 都会在植被指数数据中引入一定的数据噪音。生物和非生物因素如土壤条件、昆虫和水分胁迫引起的条件变化也可能影响 VI 时间序列并进而改变提取到的物候参数 (Gao 和 Zhang, 2021)。云遮掩会导致数据空值, 而气溶胶和角度效应等会导致数据出现波动, 造成物候节点提取结果精度降低 (Tian 等, 2021b)。此外, 由太阳—传感器几何关系导致的 BRDF 效应, 也会在植被物候参数提取结果中引入一定的不确定性 (Galvão 等, 2013; Ma 等, 2019; Norris 和 Walker, 2020)。BRDF 效应的存在会导致植被指数时序数据形态的变化, 并在物候参数估算中引入一定的偏差。由于 BRDF 效应, 原始的 MODIS NDVI/EVI 与订正到标准太阳—传感器几何 (天底观测、太阳角度恒定) 的 NDVI/EVI 之间会产生相移。譬如在澳大利亚北部研究区将原始 NDVI 和订正后的 NDVI 进行比较, 原始 NDVI 提取的物候参数 (生长季开始、峰值、结束时间) 偏差分别达到了 15.5 d, 21.6 d, 20.5 d (Ma 等, 2019), 在澳大利亚东部研究区 MODIS 原始观测 EVI 和 BRDF 订正后的 EVI 的平均季节变化 (生长季开始和结束时间差的平均值) 甚至达到了 45 d (Bhandari 等, 2011)。Norris 和 Walker (2020) 的研究则发现, 美国西部针叶林 MODIS NDVI 在冬季出现了一个“伪峰值”, 归其原因是由于太阳天顶角在冬季增加造成像元内阴影面积比例的增加, 而 NDVI 对阴影比例的变化尤为敏感。

## 6 结 语

综上所述, 植被物候遥感在经历了数十年的发展后, 无论是在数据源、提取算法和验证手段

上都日趋完善, 且相关产品开发和应用也在快速发展之中。同时, 植被物候遥感的一个重要发展动力是农业、生态、林业、环境、自然资源和全球变化等领域对高时空一致性植被物候变化信息的需求。虽然植被物候遥感领域发展迅速, 但目前还存在许多问题, 其中比较突出的几个问题是: (1) 数据时空分辨率不高, 难以满足实际农业和生态环境应用需求; (2) 物候参数提取算法普适度低, 难以适用于不同的数据集、植被类型和气候条件; (3) 验证方法不够完善, 验证数据源与卫星遥感结果在观测尺度和物候指标的定义上存在较大差异; (4) 基于国产卫星的物候遥感应用水平较低, 缺少针对国产传感器特性的算法, 在全球变化研究中对国外卫星观测数据依赖性过高。

针对以上问题, 未来植被物候遥感研究应对以下几个方面进行加强:

(1) 数据源质量的提升。包括数据时空分辨率、光谱分辨率在内的传感器性能的提高是新一代遥感数据源发展的方向。就提高数据时空分辨率的方法而言, 数据融合能够有效调节“空间分辨率—时间分辨率”这一对卫星遥感观测的固有矛盾, 实现空间分辨率和时间分辨率的同步提升。此外, 随着遥感硬件技术的发展, 未来会有更多的卫星遥感数据源, 譬如地球静止轨道卫星每 10—15 min 可以实现一次地球全圆盘观测, 显著提高遥感时序数据的时间分辨率, 实现对陆表变化的近实时监测 (Yan 等, 2019; Miura 等, 2019)。同时, 数十颗甚至数百颗微纳卫星 (micro/nano-satellite) 可以组成一个星座, 通过多星协同观测方式显著增加空间覆盖范围和时空分辨率。比较成功的案例有美国 Planet 公司的 PlanetScope 星座, 至今已发射了超过 200 颗微纳卫星, 在全球尺度上提供了逐日 3 m 分辨率无缝多光谱观测数据, 显著提升了遥感物候提取结果的空间解析能力 (Cheng 等, 2020; Wu 等, 2021)。此外, 虚拟卫星星座相关理论与技术也是一个值得关注的重要发展方向 (Wulder 等, 2015)。

(2) 物候参数提取算法的改进。不同数据集间不具备相同的处理算法, 这就使对来自不同传感器、不同环境、不同植被类型的遥感物候提取结果的分析与比较变得困难。因此, 开发一种通用性高、受人为干扰影响小的算法, 是植被物候遥感一个重要的发展方向。普适性算法的发展应

该综合考虑对数据噪声的敏感性、提取结果的生物学意义、地面验证的可行性等, 提取成功率只是判断标准之一。

(3) 验证方法的完善。遥感物候验证的根本问题是尺度匹配问题。尺度匹配不仅仅是空间尺度的匹配, 也是地面物候观测指标和卫星观测指标之间的匹配 (Liu 等, 2019; Peng 等, 2017b)。实现物候观测数据在不同空间尺度之间的相互转换, 使地面验证数据与卫星遥感观测数据能在相近的空间尺度下进行比较, 是目前物候遥感验证方法发展的重要方向 (Tian 等, 2021b), 这方面的发展可以和定量遥感真实性检验中尺度转换方面的最新理论成果结合起来 (吴小丹 等, 2015; 郝大磊 等, 2018; 万昌君 等, 2019)。使用一些新型的观测手段, 譬如无人机观测和高塔物候相机, 可以在卫星遥感和地面物候观测之间架设尺度转换的桥梁 (Klosterman 等, 2018; Berra 等, 2019)。同时, 考虑到尺度效应的复杂性, 计算机模拟可以作为地面观测实验的辅助, 从理论层面探讨植被物候遥感监测中尺度效应或者混合像元效应 (Chen 等, 2018)。此外, 对于中低分辨率遥感物候提取结果 (譬如 MODIS/VIIRS), 无人机或物候相机也很难在像元尺度上提供验证数据, 可以通过与更高空间分辨率的卫星提取结果进行比较, 已实现“间接验证”的目的 (Zhang 等, 2018a)。

(4) 积极推进国产卫星的应用深度。近年来国产卫星发展迅猛, 对于基于国产卫星物候参数反演能力的探索也有一些研究 (葛美香 等, 2017; 宋丹阳 等, 2018; 李晖 等, 2019)。中高分辨率的国产卫星, 如 HJ-1A/B 小卫星、GF-1/5 卫星、FY-3 系列等, 与国外常用传感器, 如 MODIS、TM/ETM+、OLI 等, 具有较好的一致性, 甚至在某些技术指标方面优于国外传感器。然而, 与国产卫星传感器硬件性能不匹配的是国产卫星观测的应用广度与深度。目前国产卫星传感器在物候参数提取方面的应用仍然局限在区域尺度, 且提取方法大都是基于通用的算法, 没有根据国产传感器特性或者中国植被类型特点提出具有针对性的算法或处理流程。

遥感学科发展成熟的一个标志是能够被广大用户直接使用的高质量、标准化业务产品的出现 (梁顺林, 2021)。很多国家都拥有自己的物候参

数产品, 如美国 MODIS 全球遥感物候参数产品 (MCD12Q2)、澳大利亚国家遥感物候参数产品 (TERN AusCover LSP) 和欧洲哨兵二号遥感物候产品等。面对 MODIS 等国外卫星即将退役且往期数据有可能不对中国用户开放等现状, 下一步应积极提升国产卫星在物候监测领域的应用水平, 探索并积累国产卫星用于植被物候监测的理论经验; 建立并维护基于国产卫星对中国及全球宏观尺度植被动态与物候变化可持续监测的能力; 重点探索针对不同国产传感器的物候参数反演算法, 开发并构建具有自主知识产权的算法; 最终形成基于国产卫星观测的系统全面的物候参数标准化产品, 在气候变化和全球碳循环等关键科学问题以及粮食安全等重大战略问题上减少对国外卫星数据的依赖。

遥感物候学是遥感科学与生态学交叉形成的一个新兴学科方向, 其学科源头在物候学本身, 其飞速发展得益于近几十年来遥感技术的突飞猛进。应该看到, 无论是物候参数提取方法、数据验证手段, 还是产品开发等, 都应该以服务于全球变化、生态、自然资源和农业等领域的研究和应用为目的, 紧扣这些领域的科学问题和用户需求。植被物候遥感的本质是通过卫星遥感具备的多时相重复观测能力, 对植被的季节变化和物候特征在全球尺度上进行持续的监测与研究, 这一方式是地面观测无法替代的。因此, 植被物候遥感监测能力的提升从根源上来需要卫星传感器在时空及光谱分辨率等硬件参数上的改进, 以及各种数据预处理方法的改良。不同于反射率、太阳辐射或地表温度等物理参量, 植被物候参数具有鲜明的生物学特征, 其空间尺度转换问题也比单纯的物理参量更为复杂。植被物候参数遥感产品的用户主要是非遥感研究群体, 因此植被物候遥感的发展不单纯是技术层面的发展, 也需要遥感与生态学和农学之间就参数定义及其生物学意义进行深入和广泛的讨论, 最终使得遥感获取的物候参数能够真正服务于全球变化、生态和农业等不同学科的研究与实际应用需求, 这才是遥感物候学这一学科持续发展的最原始动力。

## 参考文献 (References)

Ahrends H E, Etzold S, Kutsch W L, Stoeckli R, Bruegger R, Jeanner-

- et F, Wanner H, Buchmann N and Eugster W. 2009. Tree phenology and carbon dioxide fluxes: use of digital photography for process-based interpretation at the ecosystem scale. *Climate Research*, 39(3): 261-274 [DOI: 10.3354/cr00811]
- Alemu W G and Henebry G M. 2017. Comparing passive microwave with visible-to-near-infrared phenometrics in croplands of northern Eurasia. *Remote Sensing*, 9(6): 613 [DOI: 10.3390/rs9060613]
- Atkinson P M, Jeganathan C, Dash J and Atzberger C. 2012. Inter-comparison of four models for smoothing satellite sensor time-series data to estimate vegetation phenology. *Remote Sensing of Environment*, 123: 400-417 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.04.001]
- Badgley G, Field C B and Berry J A. 2017. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis. *Science Advances*, 3(3): e1602244 [DOI: 10.1126/sciadv.1602244]
- Baldocchi D. 2014. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere - the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology*, 20(12): 3600-3609 [DOI: 10.1111/gcb.12649]
- Beck P S A, Atzberger C, Høgda K A, Johansen B and Skidmore A K. 2006. Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: a new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100(3): 321-334 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.021]
- Berra E F, Gaulton R and Barr S. 2017. Commercial off-the-shelf digital cameras on unmanned aerial vehicles for multitemporal monitoring of vegetation reflectance and NDVI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9): 4878-4886 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2655365]
- Berra E F, Gaulton R and Barr S. 2019. Assessing spring phenology of a temperate woodland: a multiscale comparison of ground, unmanned aerial vehicle and Landsat satellite observations. *Remote Sensing of Environment*, 223: 229-242 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.010]
- Bhandari S, Phinn S and Gill T. 2011. Assessing viewing and illumination geometry effects on the MODIS vegetation index (MOD13Q1) time series: implications for monitoring phenology and disturbances in forest communities in Queensland, Australia. *International Journal of Remote Sensing*, 32(22): 7513-7538 [DOI: 10.1080/01431161.2010.524675]
- Bórnez K, Richardson A D, Verger A, Descals A and Peñuelas J. 2020. Evaluation of VEGETATION and PROBA-V phenology using PhenoCam and eddy covariance data. *Remote Sensing*, 12(18): 3077 [DOI: 10.3390/rs12183077]
- Broich M, Huete A, Paget M, Ma X L, Tulbure M, Coupe N R, Evans B, Beringer J, Devadas R, Davies K and Held A. 2015. A spatially explicit land surface phenology data product for science, monitoring and natural resources management applications. *Environmental Modelling and Software*, 64: 191-204 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.11.017]
- Brown M E and de Beurs K M. 2008. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall. *Remote Sensing of Environment*, 112(5): 2261-2271 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.10.008]
- Brown T B, Hultine K R, Steltzer H, Denny E G, Denslow M W, Granados J, Henderson S, Moore D, Nagai S, Sanclements M, Sánchez-Azofeifa A, Sonntag O, Tazik D and Richardson A D. 2016. Using phenocams to monitor our changing Earth: toward a global phenocam network. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(2): 84-93 [DOI: 10.1002/fee.1222]
- Cai Z Z, Jönsson P, Jin H X and Eklundh L. 2017. Performance of smoothing methods for reconstructing NDVI time-series and estimating vegetation phenology from MODIS data. *Remote Sensing*, 9(12): 1271 [DOI: 10.3390/rs9121271]
- Cao R Y, Chen Y, Shen M G, Chen J, Zhou J, Wang C and Yang W. 2018. A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 217: 244-257 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.022]
- Caparros-Santiago J A, Rodriguez-Galiano V and Dash J. 2021. Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: a systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171: 330-347 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.11.019]
- Chen J, Jönsson P, Tamura M, Gu Z H, Matsushita B and Eklundh L. 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky - Golay filter. *Remote sensing of Environment*, 91(3/4): 332-344 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.03.014]
- Chen J M, Deng F and Chen M Z. 2006. Locally adjusted cubic-spline capping for reconstructing seasonal trajectories of a satellite-derived surface parameter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2230-2238 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872089]
- Chen R, Yin G F, Liu G X, Li J and Verger A. 2020a. Evaluation and normalization of topographic effects on vegetation indices. *Remote Sensing*, 12(14): 2290 [DOI: 10.3390/rs12142290]
- Chen X H, Wang W Q, Chen J, Zhu X L, Shen M G, Gan L Q and Cao X. 2020b. Does any phenological event defined by remote sensing deserve particular attention? An examination of spring phenology of winter wheat in Northern China. *Ecological Indicators*, 116: 106456 [DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106456]
- Chen X Q, Wang D W, Chen J, Wang C and Shen M G. 2018. The mixed pixel effect in land surface phenology: a simulation study. *Remote Sensing of Environment*, 211: 338-344 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.030]
- Chen X Q and Wang L H. 2009. Progress in remote sensing phenological research. *Progress in Geography*, 28(1): 33-40 (陈效速, 王林海). 2009. 遥感物候学研究进展. *地理科学进展*, 28(1): 33-40 [DOI: 10.11820/dlkxjz.2009.01.005]
- Chen X Q and Yu R. 2007. Spatial and temporal variations of the vegetation growing season in warm-temperate Eastern China during 1982 to 1999. *Acta Geographica Sinica*, 62(1): 41-51 (陈效速, 喻蓉). 2007. 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, 62(1): 41-51 [DOI: 10.3321/j.issn:0375-5444.2007.01.005]
- Chen Y, Cao R Y, Chen J, Liu L C and Matsushita B. 2021. A practical approach to reconstruct high-quality Landsat NDVI time-series data by gap filling and the Savitzky – Golay filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180: 174-190 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.08.015]
- Cheng Y, Vrieling A, Fava F, Meroni M, Marshall M and Gachoki S. 2020. Phenology of short vegetation cycles in a Kenyan rangeland from PlanetScope and Sentinel-2. *Remote Sensing of Environment*, 248: 112004 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112004]
- Cremonese E. 2009. PHENOALP: a new project on phenology in the Western Alps. EGU General Assembly
- Dai J H, Wang H J and Ge Q S. 2013. Changes of spring frost risks during the flowering period of woody plants in temperate monsoon area of China over the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 68(5): 593-601 (戴君虎, 王焕炯, 葛全胜. 2013. 近50年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化. 地理学报, 68(5): 593-601) [DOI: 10.11821/xb201305002]
- Dannenberg M, Wang X, Yan D and Smith W. 2020. Phenological characteristics of global ecosystems based on optical, fluorescence, and microwave remote sensing. *Remote Sensing*, 12(4): 671 [DOI: 10.3390/rs12040671]
- De Grave C, Verrelst J, Morcillo-Pallarés P, Pipia L, Rivera-Caicedo J P, Amin E, Belda S and Moreno J. 2020. Quantifying vegetation biophysical variables from the Sentinel-3/FLEX tandem mission: Evaluation of the synergy of OLCI and FLORIS data sources. *Remote Sensing of Environment*, 251: 112101 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112101]
- Descals A, Verger A, Yin G F and Peñuelas J. 2020. Improved estimates of arctic land surface phenology using Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*, 12(22): 3738 [DOI: 10.3390/rs12223738]
- Didan K and Barreto A. 2016. Vegetation index and phenology (VIP) phenology EVI2 yearly global 0.05Deg CMG [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC [DOI: 10.5067/MEaSUREs/VIP/VIPPHEN\_EVI2.004]
- Fan D Q, Zhao X S, Zhu W Q and Zheng Z T. 2016. Review of influencing factors of accuracy of plant phenology monitoring based on remote sensing data. *Progress in Geography*, 35(3): 304-319 (范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 郑周涛. 2016. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. 地理科学进展, 35(3): 304-319) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.03.005]
- Fan L, Wigneron J P, Ciais P, Chave J, Brandt M, Fensholt R, Saatchi S S, Bastos A, Al-Yaari A, Hufkens K, Qin Y W, Xiao X M, Chen C, Myneni R B, Fernandez-Moran R, Mialon A, Rodriguez-Fernandez N J, Kerr Y, Tian F and Peñuelas J. 2019. Satellite-observed pantropical carbon dynamics. *Nature Plants*, 5(9): 944-951 [DOI: 10.1038/s41477-019-0478-9]
- Filippa G, Cremonese E, Migliavacca M, Galvagno M, Folker M, Richardson A D and Tomelleri E. 2020. phenopix: process digital images of a vegetation cover. R package version 2.4.2[EB/OL]. [2021-12-01]. <https://CRAN.R-project.org/package=phenopix>
- Filippa G, Cremonese E, Migliavacca M, Galvagno M, Sonnentag O, Humphreys E, Hufkens K, Ryu Y, Verfaillie J, di Cella U M and Richardson A D. 2018. NDVI derived from near-infrared-enabled digital cameras: applicability across different plant functional types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249: 275-285 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.11.003]
- Fischer A. 1994. A model for the seasonal variations of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters. *Remote Sensing of Environment*, 48(2): 220-230 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)90143-0]
- Friedl M. 2020. MuSLI Multi-Source Land Surface Phenology Yearly North America 30 m V001 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC [DOI: 10.5067/Community/MuSLI/MSLSP30NA.001]
- Fu Y H, Zhao H F, Piao S L, Peaucelle M, Peng S S, Zhou G Y, Ciais P, Huang M T, Menzel A, Peñuelas J, Song Y, Vitis Y, Zeng Z Z and Janssens I A. 2015. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526(7571): 104-107 [DOI: 10.1038/nature15402]
- Galvão L S, Breunig F M, dos Santos J R and de Moura Y M. 2013. View-illumination effects on hyperspectral vegetation indices in the Amazonian tropical forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21: 291-300 [DOI: 10.1016/j.jag.2012.07.005]
- Ganguly S, Friedl M A, Tan B, Zhang X Y and Verma M. 2010. Land surface phenology from MODIS: characterization of the Collection 5 global land cover dynamics Product. *Remote Sensing of Environment*, 114(8): 1805-1816 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.005]
- Gao F and Zhang X Y. 2021. Mapping crop phenology in near real-time using satellite remote sensing: challenges and opportunities. *Journal of Remote Sensing*, 2021: 8379391 [DOI: 10.34133/2021/8379391]
- Gao X J, Gray J M and Reich B J. 2021. Long-term, medium spatial resolution annual land surface phenology with a Bayesian hierarchical model. *Remote Sensing of Environment*, 261: 112484 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112484]
- Gatis N, Anderson K, Grand-Clement E, Luscombe D J, Hartley I P, Smith D and Brazier R E. 2017. Evaluating MODIS vegetation products using digital images for quantifying local peatland CO<sub>2</sub> gas fluxes. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 3(4): 217-231 [DOI: 10.1002/rse2.45]
- Ge M X, Zhao J, Zhong B and Yang A X. 2017. Comparison of the Vegetation Indexes between FY-3/VIRR, FY-3/MERSI and EOS/MODIS Data. *Remote Sensing Technology and Application*, 32(2): 262-273 (葛美香, 赵军, 仲波, 杨爱霞. 2017. FY-3/VIRR及MERSI与EOS/MODIS植被指数比较与差异原因分析. 遥感技术与应用, 32(2): 262-273) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.2.0262]
- Ge Q S, Dai J H and Zheng J Y. 2010. The progress of phenology studies and challenges to modern phenology research in China. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 25(3): 310-316 (葛全胜,

- 戴君虎, 郑景云. 2010. 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, 25(3): 310-316 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2010.03.013]
- Ge Q S, Wang H J and Dai J H. 2013. Shifts in spring phenophases, frost events and frost risk for woody plants in temperate China. *Climate Research*, 57(3): 249-258 [DOI: 10.3354/cr01182]
- Grabska E, Hostert P, Pflugmacher D and Ostapowicz K. 2019. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*, 11(10): 1197 [DOI: 10.3390/rs11101197]
- Gray J, Sulla-Menashe D and Friedl M. 2019a. MCD12Q2 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC [DOI: 10.5067/MODIS/MCD12Q2.006]
- Gray J, Sulla-Menashe D and Friedl M A. 2019b. User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover Dynamics (MCD12Q2) Product [EB/OL]. [2021-12-01]. [https://modis.ornl.gov/documentation/guides/mcd12q2\\_v6\\_user\\_guide.pdf](https://modis.ornl.gov/documentation/guides/mcd12q2_v6_user_guide.pdf)
- Guo Q H, Hu T Y, Ma Q, Xu K X, Yang Q L, Sun Q H, Li Y M and Su Y J. 2020. Advances for the new remote sensing technology in ecosystem ecology research. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44(4): 418-435 (郭庆华, 胡天宇, 马勤, 徐可心, 杨秋丽, 孙千惠, 李玉美, 苏艳军. 2020. 新一代遥感技术助力生态系统生态学研究. *植物生态学报*, 44(4): 418-435) [DOI: 10.17521/cjpe.2019.0206]
- Guo Y S, Liu Q S, Liu G H and Huang C. 2017. Extraction of main crops in yellow river delta based on MODIS NDVI time series. *Journal of Natural Resources*, 32(10): 1808-1818 (郭显杉, 刘庆生, 刘高焕, 黄翀. 2017. 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*, 32(10): 1808-1818) [DOI: 10.11849/zrzyxb.20160943]
- Hanes J M, Liang L and Morisette J T. 2014. Land surface phenology// *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing*. Berlin, Heidelberg: Springer: 99-125 [DOI: 10.1007/978-3-642-25047-7\_4]
- Hänninen H. 2006. Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits. *Tree Physiology*, 26(7): 889-898 [DOI: 10.1093/treephys/26.7.889]
- Hao D L, Xiao Q, Wen J G, You D Q, Wu X D, Lin X W and Wu S B. 2018. Advances in upscaling methods of quantitative remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 22(3): 408-423 (郝大磊, 肖青, 闻建光, 游冬琴, 吴小丹, 林兴稳, 吴胜标. 2018. 定量遥感升尺度转换方法研究进展. *遥感学报*, 22(3): 408-423) [DOI: 10.11834/jrs.20187070]
- Henebry G M and de Beurs K M. 2013. Remote sensing of land surface phenology: a prospectus//Schwartz M D. *Phenology: An Integrative Environmental Science*. 2nd ed. Dordrecht: Springer: 385-411 [DOI: 10.1007/978-94-007-6925-0\_21]
- Hilker T, Gitelson A, Coops N C, Hall F G and Black T A. 2011. Tracking plant physiological properties from multi-angular tower-based remote sensing. *Oecologia*, 165(4): 865-876 [DOI: 10.1007/s00442-010-1901-0]
- Hill A C, Vázquez-Lule A and Vargas R. 2021. Linking vegetation spectral reflectance with ecosystem carbon phenology in a temperate salt marsh. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307: 108481 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108481]
- Hinojo-Hinojo C and Goulden M L. 2020. Plant traits help explain the tight relationship between vegetation indices and gross primary production. *Remote Sensing*, 12(9): 1405 [DOI: 10.3390/rs12091405]
- Hou X H, Niu Z and Gao S and Huang N. 2013. Monitoring vegetation phenology in farming-pastoral zone using SPOT-VGT NDVI data. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(01): 142-150 (侯学会, 牛铮, 高帅, 黄妮. 2013. 基于SPOT-VGT NDVI时间序列的农牧交错带植被物候监测. *农业工程学报*, 29(01): 142-150) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.01.019]
- Hou X H, Sui X Y, Liang S Z, Wang M and Dong M. 2017. Comparison of five methods for phenology extraction of winter wheat. *Remote Sensing Information*, 32(6): 65-70 (侯学会, 隋学艳, 梁守真, 王猛, 董敏. 2017. 几种物候提取方法的小麦物候提取. *遥感信息*, 32(6): 65-70) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2017.06.011]
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X and Ferreira L G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 195-213 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2]
- Ibrahim S, Balzter H, Tansey K, Tsutsumida N and Mathieu R. 2018. Estimating fractional cover of plant functional types in African savannah from harmonic analysis of MODIS time-series data. *International Journal of Remote Sensing*, 39(9): 2718-2745 [DOI: 10.1080/01431161.2018.1430914]
- Jeong S J, Schimel D, Frankenberg C, Drewry D T, Fisher J B, Verma M, Berry J A, Lee J E and Joiner J. 2017. Application of satellite solar-induced chlorophyll fluorescence to understanding large-scale variations in vegetation phenology and function over northern high latitude forests. *Remote Sensing of Environment*, 190: 178-187 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.11.021]
- Ji L and Brown J F. 2017. Effect of NOAA satellite orbital drift on AVHRR-derived phenological metrics. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 62: 215-223 [DOI: 10.1016/j.jag.2017.06.013]
- Jiang Z Y, Huete A R, Kim Y and Didan K. 2007. 2-band enhanced vegetation index without a blue band and its application to AVHRR data//Proceedings Volume 6679, *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability IV*. San Diego, California, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.734933]
- Jin H X and Eklundh L. 2014. A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sensing of Environment*, 152: 512-525 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.07.010]
- Jones M O, Jones L A, Kimball J S and McDonald K C. 2011. Satellite passive microwave remote sensing for monitoring global land surface phenology. *Remote Sensing of Environment*, 115(4): 1102-1114 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.12.015]

- Jönsson P and Eklundh L. 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8): 1824-1832 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.802519]
- Justice C O, Townshend J R G, Holben B N and Tucker C J. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8): 1271-1318 [DOI: 10.1080/01431168508948281]
- Klosterman S, Melaas E, Wang J A, Martinez A, Frederick S, O'Keefe J, Orwig D A, Wang Z S, Sun Q S, Schaaf C, Friedl M and Richardson A D. 2018. Fine-scale perspectives on landscape phenology from unmanned aerial vehicle (UAV) photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248: 397-407 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.10.015]
- Kong D D, Zhang Q, Huang W L and Gu X H. 2017. Vegetation phenology change in Tibetan Plateau from 1982 to 2013 and its related meteorological factors. *Acta Geographica Sinica*, 72(1): 39-52 (孔冬冬, 张强, 黄文琳, 顾西辉. 2017. 1982-2013年青藏高原植被物候变化及气象因素影响. *地理学报*, 72(1): 39-52) [DOI: 10.11821/dlxb201701004]
- Li H, Peng R C, Li W K, Zhu X L, Huang Y T and Nie Q. 2019. Filtering algorithms of HJ-1 A/B NDVI time series data and phenology of typical tree species in Xiamen. *Chinese Journal of Ecology*, 38(11): 3460-3471 (李晖, 彭初超, 李万凯, 朱晓铃, 黄于同, 聂芹. 2019. 厦门典型树种的HJ-1A/B NDVI时序数据滤波算法及物候特性. *生态学杂志*, 38(11): 3460-3471) [DOI: 10.13292/j.1000-4890.201911.034]
- Li J, Xia C F, Liu Q H, Zhao J, Wang C and Peng J J. 2017. 1 km growing season length data product over China-ASEAN 2013. (*Journal of Global Change Data and Discovery*, 1(3): 278-281 李静, 夏传福, 柳钦火, 赵静, 王聪, 彭菁菁. 2017. 中国—东盟1 km分辨率植被生长季长度数据集 (2013). *全球变化数据学报(中英文)*, 1(3): 278-281) [DOI: 10.3974/geodp.2017.03.04]
- Li N, Zhan P, Pan Y Z, Zhu X F, Li M Y and Zhang D J. 2020. Comparison of remote sensing time-series smoothing methods for grassland spring phenology extraction on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 12(20): 3383 [DOI: 10.3390/rs12203383]
- Li Q, Shen M G, Chen X H, Wang C, Chen J, Cao X, Fei S L and Cui X H. 2021. Optimal color composition method for generating high-quality daily photographic time series from PhenoCam. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 6179-6193 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3087814]
- Liang L and Schwartz M D. 2009. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics. *Landscape Ecology*, 24(4): 465-472 [DOI: 10.1007/s10980-009-9328-x]
- Liang L, Schwartz M D and Fei S L. 2011. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment*, 115(1): 143-157 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.08.013]
- Liang S L. 2021. Some thoughts on the development of quantitative remote sensing in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9): 1889-1895 (梁顺林. 2021. 中国定量遥感发展的一些思考. *遥感学报*, 25(9): 1889-1895) [DOI: 10.11834/jrs.20211516]
- Liu J W and Zhou Y K. 2018. Comparison and application of NDVI time-series reconstruction methods at site scale on the Tibetan Plateau. *Progress in Geography*, 37(3): 427-437 (刘建文, 周玉科. 2018. 站点尺度的青藏高原时序NDVI重构方法比较与应用. *地理科学进展*, 37(3): 427-437) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.03.013]
- Liu L C, Cao R Y, Shen M G, Chen J, Wang J M and Zhang X Y. 2019. How does scale effect influence spring vegetation phenology estimated from satellite-derived vegetation indexes?. *Remote Sensing*, 11(18): 2137 [DOI: 10.3390/rs11182137]
- Liu X T, Zhou L, Shi H, Wang S Q and Chi Y G. 2018. Phenological characteristics of temperate coniferous and broad-leaved mixed forests based on multiple remote sensing vegetation indices, chlorophyll fluorescence and CO<sub>2</sub> flux data. *Acta Ecologica Sinica*, 38(10): 3482-3494 (刘啸添, 周蕾, 石浩, 王绍强, 迟永刚. 2018. 基于多种遥感植被指数、叶绿素荧光与CO<sub>2</sub>通量数据的温带针阔混交林物候特征对比分析. *生态学报*, 38(10): 3482-3494) [DOI: 10.5846/stxb201708211508]
- Lobell D B, Burke M B, Tebaldi C, Mastrandrea M D, Falcon W P and Naylor R L. 2008. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319(5863): 607-610 [DOI: 10.1126/science.1152339]
- Luo Y C, Zhang Z, Chen Y, Li Z Y and Tao F L. 2020. ChinaCrop-Phen1km: a high-resolution crop phenological dataset for three staple crops in China during 2000-2015 based on leaf area index (LAI) products. *Earth System Science Data*, 12(1): 197-214 [DOI: 10.5194/essd-12-197-2020]
- Ma X F, Chen S Y, Deng J, Feng Q S and Huang X D. 2016. Vegetation phenology dynamics and its response to climate change on the Tibetan Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 25(1): 13-21 (马晓芳, 陈思宇, 邓婕, 冯琦胜, 黄晓东. 2016. 青藏高原植被物候监测及其对气候变化的响应. *草业学报*, 25(1): 13-21) [DOI: 10.11686/cyxb2015089]
- Ma X L, Huete A, Moore C E, Cleverly J, Hutley L B, Beringer J, Leng S, Xie Z Y, Yu Q and Eamus D. 2020. Spatiotemporal partitioning of savanna plant functional type productivity along NATT. *Remote Sensing of Environment*, 246: 111855. [DOI 10.1016/j.rse.2020.111855]
- Ma X L, Huete A and Tran N N. 2019. Interaction of seasonal sun-angle and savanna phenology observed and modelled using MODIS. *Remote Sensing*, 11(12): 1398 [DOI: 10.3390/rs11121398]
- Ma X L, Huete A, Yu Q, Coupe N R, Davies K, Broich M, Ratana P, Beringer J, Hutley L B, Cleverly J, Boulain N and Eamus D. 2013. Spatial patterns and temporal dynamics in savanna vegetation phenology across the North Australian Tropical Transect. *Remote Sensing of Environment*, 139: 97-115 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.030]
- Macfarlane C, Ryu Y, Ogden G N and Sonntag O. 2014. Digital can-

- opy photography: exposed and in the raw. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197: 244-253 [DOI: 10.1016/j. agrformet. 2014. 05.014]
- Maeda E E and Galvão L S. 2015. Sun-sensor geometry effects on vegetation index anomalies in the Amazon rainforest. *GIScience and Remote Sensing*, 52(3): 332-343 [DOI: 10.1080/15481603.2015. 1038428]
- Meng J H and Wu B F. 2013. The feasibility analysis on satellite data based crop mature date prediction. *Remote Sensing Technology and Application*, 28(2): 165-173 (蒙继华, 吴炳方. 2013. 基于卫星遥感预测作物成熟期的可行性分析. *遥感技术与应用*, 28(2): 165-173) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2013.2.165]
- Miura T, Nagai S, Takeuchi M, Ichii K and Yoshioka H. 2019. Improved characterisation of vegetation and land surface seasonal dynamics in central Japan with Himawari-8 hypertemporal data. *Scientific Reports*, 9(1): 15692 [DOI: 10.1038/s41598-019-52076-x]
- Moon M, Richardson A D and Friedl M A. 2021. Multiscale assessment of land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2, PlanetScope, and PhenoCam imagery. *Remote Sensing of Environment*, 266: 112716 [DOI: 10.1016/j. rse. 2021. 112716]
- Moon M, Zhang X Y, Henebry G M, Liu L L, Gray J M, Melaas E K and Friedl M A. 2019. Long-term continuity in land surface phenology measurements: a comparative assessment of the MODIS land cover dynamics and VIIRS land surface phenology products. *Remote Sensing of Environment*, 226: 74-92 [DOI: 10.1016/j. rse. 2019.03.034]
- Mou C X, Sun G, Luo P, Wang Z Y and Luo G R. 2013. Flowering responses of alpine meadow plant in the Qinghai-Tibetan Plateau to extreme drought imposed in different periods. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 19(2): 272-279 (牟成香, 孙庚, 罗鹏, 王志远, 罗光荣. 2013. 青藏高原高寒草甸植物开花物候对极端干旱的响应. *应用与环境生物学报*, 19(2): 272-279) [DOI: 10.3724/SP.J.1145.2013.00272]
- Moulin S, Kergoat L, Viovy N and Dedieu G. 1997. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. *Journal of Climate*, 10(6): 1154-1170 [DOI: 10. 1175/1520-0442(1997)010<1154:GSAOVP>2.0.CO;2]
- Nagai S, Nasahara K N, Inoue T, Saitoh T M and Suzuki R. 2016. Review: advances in in situ and satellite phenological observations in Japan. *International Journal of Biometeorology*, 60(4): 615-627 [DOI: 10.1007/s00484-015-1053-3]
- Nasahara K N and Nagai S. 2015. Review: development of an in situ observation network for terrestrial ecological remote sensing: the Phenological Eyes Network (PEN). *Ecological Research*, 30(2): 211-223 [DOI: 10.1007/s11284-014-1239-x]
- Ni L, Wu J, Li C B, Qin G X, Li Z and Kong J. 2020. Temporal and spatial variations in natural grassland phenology in China over the last 30 years. *Acta Prataculturae Sinica*, 29(1): 1-12 (倪璐, 吴静, 李纯斌, 秦格霞, 李政, 孔婕. 2020. 近30年中国天然草地物候时空变化特征分析. *草业学报*, 29(1): 1-12) [DOI: 10.11686/ cyxb20190003]
- Norris J R and Walker J J. 2020. Solar and sensor geometry, not vegetation response, drive satellite NDVI phenology in widespread ecosystems of the western United States. *Remote Sensing of Environment*, 249: 112013 [DOI: 10.1016/j. rse.2020.112013]
- Peng D L, Zhang X Y, Wu C Y, Huang W J, Gonsamo A, Huete A R, Didan K, Tan B, Liu X J and Zhang B. 2017a. Intercomparison and evaluation of spring phenology products using National Phenology Network and AmeriFlux observations in the contiguous United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 242: 33-46 [DOI: 10.1016/j. agrformet.2017.04.009]
- Peng D L, Zhang X Y, Zhang B, Liu L Y, Liu X J, Huete A R, Huang W J, Wang S Y, Luo S Z, Zhang X and Zhang H L. 2017b. 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*, 132: 185-198 [DOI: 10.1016/j. isprsjprs.2017.09.002]
- Petri C A and Galvão L S. 2019. Sensitivity of seven MODIS vegetation indices to BRDF effects during the Amazonian dry season. *Remote Sensing*, 11(14): 1650 [DOI: 10.3390/rs11141650]
- Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Reichstein M, Luyssaert S, Margolis H, Fang J Y, Barr A, Chen A P, Grelle A, Hollinger D Y, Laurila T, Lindroth A, Richardson A D and Vesala T. 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature*, 451(7174): 49-52 [DOI: 10.1038/nature06444]
- Piao S L, Fang J Y, Zhou L M, Ciais P and Zhu B. 2006. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 12(4): 672-685 [DOI: 10.1111/j. 1365-2486. 2006.01123.x]
- Piao S L, Liu Q, Chen A P, Janssens I A, Fu Y S, Dai J H, Liu L L, Lian X, Shen M G and Zhu X L. 2019. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25(6): 1922-1940 [DOI: 10.1111/gcb.14619]
- Qi W L and Dubayah R O. 2016. Combining Tandem-X InSAR and simulated GEDI lidar observations for forest structure mapping. *Remote Sensing of Environment*, 187: 253-266 [DOI: 10.1016/j. rse.2016.10.018]
- Qi W L, Lee S K, Hancock S, Luthcke S, Tang H, Armston J and Dubayah R. 2019. Improved forest height estimation by fusion of simulated GEDI Lidar data and TanDEM-X InSAR data. *Remote Sensing of Environment*, 221: 621-634 [DOI: 10.1016/j. rse.2018. 11.035]
- Reed B C, Brown J F, Vanderzee D, Loveland T R, Merchant J W and Ohlen D O. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5(5): 703-714 [DOI: 10.2307/3235884]
- Reed B C, Schwartz M D and Xiao X M. 2009. Remote sensing phenology//Noormets A. *Phenology of Ecosystem Processes: Applications in Global Change Research*. New York, NY: Springer: 231-

- 246 [DOI: 10.1007/978-1-4419-0026-5\_10]
- Restrepo-Coupe N, Huete A, Davies K, Cleverly J, Beringer J, Eamus D, Van Gorsel E, Hutley L B and Meyer W S. 2016. MODIS vegetation products as proxies of photosynthetic potential along a gradient of meteorologically and biologically driven ecosystem productivity. *Biogeosciences*, 13(19): 5587-5608 [DOI: 10.5194/bg-13-5587-2016]
- Richardson A D, Anderson R S, Arain M A, Barr A G, Bohrer G, Chen G S, Chen J M, Ciais P, Davis K J, Desai A R, Dietze M C, Dragoni D, Garrity S R, Gough C M, Grant R, Hollinger D Y, Margolis H A, McCaughey H, Migliavacca M, Monson R K, Munger J W, Poulter B, Raczka B M, Ricciuto D M, Sahoo A K, Schaefer K, Tian H Q, Vargas R, Verbeeck H, Xiao J F and Xue Y K. 2012. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: results from the North American Carbon Program Site Synthesis. *Global Change Biology*, 18(2): 566-584 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02562.x]
- Richardson A D, Hufkens K, Li X L and Ault T R. 2019. Testing Hopkins' Bioclimatic Law with PhenoCam data. *Applications in Plant Sciences*, 7(3): e01228 [DOI: 10.1002/aps3.1228]
- Richardson A D, Hufkens K, Milliman T, Aubrecht D M, Chen M, Gray J M, Johnston M R, Keenan T F, Klosterman S T, Kosmala M, Melaas E K, Friedl M A and Frohling S. 2018. Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific Data*, 5(1): 180028 [DOI: 10.1038/sdata.2018.28]
- Rouse J W, Haas R H, Schell J A and Deering D W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS//3rd ERTS-1 Symposium. Washington: NASA: 309-317
- Running S W and Hunt E R. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models//Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe. San Diego, USA: Academic Press: 141-158 [DOI: 10.1016/B978-0-12-233440-5.50014-2]
- Sakamoto T, Van Nguyen N, Ohno H, Ishitsuka N and Yokozawa M. 2006. Spatio-temporal distribution of rice phenology and cropping systems in the Mekong Delta with special reference to the seasonal water flow of the Mekong and Bassac rivers. *Remote Sensing of Environment*, 100(1): 1-16 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.09.007]
- Sakamoto T, Yokozawa M, Toritani H, Shibayama M, Ishitsuka N and Ohno H. 2005. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 96(3/4): 366-374 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.008]
- Salas E A L. 2021. Waveform LiDAR concepts and applications for potential vegetation phenology monitoring and modeling: a comprehensive review. *Geo-spatial Information Science*, 24(2): 179-200 [DOI: 10.1080/10095020.2020.1761763]
- Sellers P J, Tucker C J, Collatz G J, Los S O, Justice C O, Dazlich D A and Randall D A. 1994. 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*, 15(7): 3519-3545 [DOI: 10.1080/01431169408954343]
- Shen M G, Piao S L, Dorji T, Liu Q, Cong N, Chen X Q, An S, Wang S P, Wang T and Zhang G X. 2015. Plant phenological responses to climate change on the Tibetan Plateau: research status and challenges. *National Science Review*, 2(4): 454-467 [DOI: 10.1093/nsr/nwv058]
- Shen M G, Tang Y H, Chen J and Yang W. 2012. Specification of thermal growing season in temperate China from 1960 to 2009. *Climatic Change*, 114(3/4): 783-798 [DOI: 10.1007/s10584-012-0434-4]
- Song D Y, Wang Z Y, Li Y and Hu Y. 2018. Cropland phenology detection based on HJ-1A/B CCD data in Jiangnan plain. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 41(3): 128-131, 134 (宋丹阳, 王征禹, 李跃, 胡勇. 2018. 基于HJ-1 A/B 卫星 CCD 数据的江汉平原农田物候探测. 测绘与空间地理信息, 41(3): 128-131, 134) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2018.03.040]
- Sun H S, Xu A G, Lin H and Zhang L P. 2012. Analysis of denoising effect of time series vegetation index based on different algorithms. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 40(5): 375-379 (孙华生, 徐爱功, 林卉, 张连蓬. 2012. 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, 40(5): 375-379) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-1302.2012.05.139]
- Taylor S D, Browning D M, Baca R A and Gao F. 2021. Constraints and opportunities for detecting land surface phenology in drylands. *Journal of Remote Sensing*, 2021: 9859103 [DOI: 10.34133/2021/9859103]
- Tian F, Cai Z Z, Jin H X, Hufkens K, Scheifinger H, Tagesson T, Smets B, Van Hoolst R, Bonte K, Ivits E, Tong X Y, Ardö J and Eklundh L. 2021a. Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112456 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112456]
- Tian F, Wigneron J P, Ciais P, Chave J, Ogée J, Peñuelas J, Ræbild A, Domec J C, Tong X Y, Brandt M, Mialon A, Rodriguez-Fernandez N, Tagesson T, Al-Yaari A, Kerr Y, Chen C, Myneni R B, Zhang W M, Ardö J and Fensholt R. 2018. Coupling of ecosystem-scale plant water storage and leaf phenology observed by satellite. *Nature Ecology and Evolution*, 2(9): 1428-1435 [DOI: 10.1038/s41559-018-0630-3]
- Tian J Q, Zhu X L, Chen J, Wang C, Shen M G, Yang W, Tan X Y, Xu S and Li Z L. 2021b. Improving the accuracy of spring phenology detection by optimally smoothing satellite vegetation index time series based on local cloud frequency. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180: 29-44 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.08.003]
- Tong X Y, Tian F, Brandt M, Liu Y, Zhang W M and Fensholt R. 2019. Trends of land surface phenology derived from passive microwave and optical remote sensing systems and associated drivers across the dry tropics 1992-2012. *Remote Sensing of Environment*, 232: 111307 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111307]

- Verbeest J, Hyndman R, Newnham G and Culvenor D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 106-115 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.08.014]
- Verhegghen A, Bontemps S and Defourny P. 2014. A global NDVI and EVI reference data set for land-surface phenology using 13 years of daily SPOT-VEGETATION observations. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7): 2440-2471 [DOI: 10.1080/01431161.2014.883105]
- Wan C J, Wu X D and Lin X W. 2019. Impact of spatial and temporal scales of remote sensing data on the spatiotemporal change in geographic elements. *Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1064-1077 (万昌君, 吴小丹, 林兴稳. 2019. 遥感数据时空尺度对地理要素时空变化分析的影响. *遥感学报*, 23(6): 1064-1077) [DOI: 10.11834/jrs.20198327]
- Wang C, Beringer J, Hutley L B, Cleverly J, Li J, Liu Q H and Sun Y. 2019. Phenology dynamics of dryland ecosystems along the North Australian tropical transect revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence. *Geophysical Research Letters*, 46(10): 5294-5302 [DOI: 10.1029/2019GL082716]
- Wang C, Chen J, Wu J, Tang Y H, Shi P J, Black T A and Zhu K. 2017a. A snow-free vegetation index for improved monitoring of vegetation spring green-up date in deciduous ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 196: 1-12 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.031]
- Wang C, Li J, Liu Q H, Zhong B, Wu S L and Xia C F. 2017b. Analysis of differences in phenology extracted from the enhanced vegetation index and the leaf area index. *Sensors*, 17(9): 1982 [DOI: 10.3390/s17091982]
- Wang S H and Zhang Y G. 2020. Long-term (1982-2018) global gross primary production dataset based on NIRv. National Tibetan Plateau Data Center (王松寒, 张永光. 2020. 基于遥感NIRv的全球生态系统总初级生产力(GPP)长时间序列数据(1982-2018). 国家青藏高原科学数据中心) [DOI: 10.6084/m9.figshare.12981977.v2]
- Wang X F, Xiao J F, Li X, Cheng G D, Ma M G, Che T, Dai L Y, Wang S Y and Wu J K. 2017c. No consistent evidence for advancing or delaying trends in spring phenology on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(12): 3288-3305 [DOI: 10.1002/2017JG003949]
- Wang Y W, Xu W F, Yuan W P, Chen X Z, Zhang B W, Fan L, He B, Hu Z M, Liu S G, Liu W and Piao S L. 2021. Higher plant photosynthetic capability in autumn responding to low atmospheric vapor pressure deficit. *The Innovation*, 2(4): 100163 [DOI: 10.1016/j.xinn.2021.100163]
- Wei J, Li Z Q, Peng Y R and Sun L. 2019. MODIS Collection 6.1 aerosol optical depth products over land and ocean: validation and comparison. *Atmospheric Environment*, 201: 428-440 [DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.12.004]
- Wen G and Fu C B. 2000. Large scale features of the seasonal phenological responses to the monsoon climate in East China: Multi-year average results. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 24(5): 676-682 (温刚, 符淙斌. 2000. 中国东部季风区植被物候季节变化对气候响应的大尺度特征: 多年平均结果. *大气科学*, 24(5): 676-682) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.05.12]
- Westerling A L, Hidalgo H G, Cayan D R and Swetnam T W. 2006. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity. *Science*, 313(5789): 940-943 [DOI: 10.1126/science.1128834]
- White M A, de Beurs K M, Didan K, Inouye D W, Richardson A D, Jensen O P, O'Keefe J, Zhang G, Nemani R R, Van Leeuwen W J D, Brown J F, De Wit A, Schaepman M, Lin X M, Dettinger M, Bailey A S, Kimball J, Schwartz M D, Baldocchi D D, Lee J T and Lauenroth W K. 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982-2006. *Global Change Biology*, 15(10): 2335-2359 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x]
- White M A and Nemani R R. 2006. Real-time monitoring and short-term forecasting of land surface phenology. *Remote Sensing of Environment*, 104(1): 43-49 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.04.014]
- Wingate L, Ogée J, Cremonese E, Filippa G, Mizunuma T, Migliavacca M, Moisy C, Wilkinson M, Moureaux C, Wohlfahrt G, Hammerle A, Hörtnagl L, Gimeno C, Porcar-Castell A, Galvagno M, Nakaji T, Morison J, Kolle O, Knohl A, Kutsch W, Kolari P, Nikinmaa E, Ibrom A, Gielen B, Eugster W, Balzarolo M, Papale D, Klumpp K, Köstner B, Grünwald T, Joffre R, Ourcival J M, Hellstrom M, Lindroth A, George C, Longdoz B, Genty B, Levula J, Heinesch B, Sprintsin M, Yakir D, Manise T, Guyon D, Ahrends H, Plaza-Aguilar A, Guan J H and Grace J. 2015. Interpreting canopy development and physiology using a European phenology camera network at flux sites. *Biogeosciences*, 12(20): 5995-6015 [DOI: 10.5194/bg-12-5995-2015]
- Wong C Y S, D'Odorico P, Bhatena Y, Arain M A and Ensminger I. 2019. Carotenoid based vegetation indices for accurate monitoring of the phenology of photosynthesis at the leaf-scale in deciduous and evergreen trees. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111407 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111407]
- Wu S B, Wang J, Yan Z B, Song G Q, Chen Y, Ma Q, Deng M F, Wu Y T, Zhao Y Y, Guo Z F, Yuan Z Q, Dai G H, Xu X T, Yang X, Su Y J, Liu L L and Wu J. 2021. Monitoring tree-crown scale autumn leaf phenology in a temperate forest with an integration of PlanetScope and drone remote sensing observations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171: 36-48 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.10.017]
- Wu X D, Wen J G, Xiao Q, Li X, Liu Q, Tang Y, Dou B C, Peng J J, You D Q and Li X W. 2015. Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters. *Journal of Remote Sensing*, 19(1): 75-92 (吴小丹, 闻建光, 肖青, 李新, 刘强, 唐勇, 窦宝成, 彭菁菁, 游冬琴, 李小文. 2015. 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展. *遥感学报*, 19(1): 75-92) [DOI: 10.11834/jrs.20154009]
- Wu Y F, Li M S and Song J Q. 2008. Advance in vegetation phenology monitoring based on remote sensing. *Journal of Meteorology and Environment*, 24(3): 51-58 (武永峰, 李茂松, 宋吉青. 2008. 植物

- 物候遥感监测研究进展. 气象与环境学报, 24(3): 51-58 [DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2008.03.011]
- Wu Y Q and Huang L R. 2004. A new interpolation method in time series analyzing. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24(4): 43-47 (武艳强, 黄立人. 2004. 时间序列处理的新插值方法. 大地测量与地球动力学, 24(4): 43-47) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2004.04.009]
- Wulder M A, Hilker T, White J C, Coops N C, Masek J G, Pflugmacher D and Crevier Y. 2015. Virtual constellations for global terrestrial monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 170(1): 62-76. ] DOI 10.1016/j.rse.2015.09.001]
- Xi X and Zhao G X. 2020. Chlorophyll content in winter wheat: inversion and monitoring based on UAV multi-spectral remote sensing. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 36(20): 119-126 (奚雪, 赵庚星. 2020. 基于无人机多光谱遥感的冬小麦叶绿素含量反演及监测. 中国农学通报, 36(20): 119-126) [DOI: 10.11924/j.issn.1000-6850.casb20190400050]
- Xia C F, Li J and Liu Q H. 2013. Review of advances in vegetation phenology monitoring by remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 17(1): 1-16 (夏传福, 李静, 柳钦火. 2013. 植被物候遥感监测研究进展. 遥感学报, 17(1): 1-16) [DOI: 10.11834/jrs.20131363]
- Xiang M T, Wei W and Wu W B. 2018. Review of vegetation phenology estimation by using remote sensing. *China Agricultural Information*, 30(1): 55-66 (项铭涛, 卫伟, 吴文斌. 2018. 植被物候参数遥感提取研究进展评述. 中国农业信息, 30(1): 55-66) [DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20180106]
- Xiang Y, Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D and Song J L. 2014. Validation of Global Land Surface Satellite (GLASS) leaf area index product. *Journal of Remote Sensing*, 18(3): 573-596 (向阳, 肖志强, 梁顺林, 王锦地, 宋金玲. 2014. GLASS叶面积指数产品验证. 遥感学报, 18(3): 573-596) [DOI: 10.11834/jrs.20143117]
- Xiao W W, Sun Z G, Wang Q X and Yang Y H. 2013. Evaluating MODIS phenology product for rotating croplands through ground observations. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1): 073562 [DOI: 10.1117/1.JRS.7.073562]
- Xiao X M, Zhang J H, Yan H M, Wu W X and Biradar C. 2009. Land surface phenology//Phenology of Ecosystem Processes. New York: Springer-Verlag: 247-270 [DOI: 10.1007/978-1-4419-0026-5\_11]
- Xie Y Y and Wilson A M. 2020. Change point estimation of deciduous forest land surface phenology. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111698 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111698]
- Xu D W, Wang C, Chen J, Shen M G, Shen B B, Yan R R, Li Z W, Karnieli A, Chen J Q, Yan Y C, Wang X, Chen B R, Yin D M and Xin X P. 2021. The superiority of the normalized difference phenology index (NDPI) for estimating grassland aboveground fresh biomass. *Remote Sensing of Environment*, 264: 112578 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112578]
- Yan D, Zhang X Y, Nagai S, Yu Y Y, Akitsu T, Nasahara K N, Ide R and Maeda T. 2019. Evaluating land surface phenology from the Advanced Himawari Imager using observations from MODIS and the Phenological Eyes Network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79: 71-83 [DOI: 10.1016/j.jag.2019.02.011]
- Yan Y and Zhang C J. 2020. Preliminary study on remote sensing monitoring of grassland returning green period in the north slope of Tianshan Mountain based on different vegetation indexes. *Grass-Feeding Livestock*, (2): 40-45 (闫洋, 张楚婕. 2020. 基于不同植被指数的天山北坡草地返青期遥感监测初探. 草食家畜, (2): 40-45) [DOI: 10.16863/j.cnki.1003-6377.2020.02.008]
- Yin G F, Verger A, Filella I, Descals A and Peñuelas J. 2020. Divergent estimates of forest photosynthetic phenology using structural and physiological vegetation indices. *Geophysical Research Letters*, 47(18): e2020GL089167 [DOI: 10.1029/2020gl089167]
- Yu L, Wen J, Chang C Y, Frankenberg C and Sun Y. 2019. High-resolution global contiguous SIF of OCO-2. *Geophysical Research Letters*, 46(3): 1449-1458 [DOI: 10.1029/2018gl081109]
- Yu W T, Li J, Liu Q H, Zhao J, Dong Y D, Zhu X R, Lin S R, Zhang H and Zhang Z X. 2021. Gap filling for historical Landsat NDVI time series by integrating climate data. *Remote Sensing*, 13(3): 484 [DOI: 10.3390/rs13030484]
- Yu X F and Zhuang D F. 2006. Monitoring forest phenophases of northeast China based on MODIS NDVI data. *Resources Science*, 28(4): 111-117 (于信芳, 庄大方. 2006. 基于MODIS NDVI数据的东北森林物候期监测. 资源科学, 28(4): 111-117) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2006.04.023]
- Yuan J W and Ni J. 2007. Plant signals and ecological evidences of climate change in China. *Arid Land Geography*, 30(4): 465-473 (袁婧薇, 倪健. 2007. 中国气候变化的植物信号和生态证据. 干旱区地理, 30(4): 465-473)
- Zahawi R A, Dandois J P, Holl K D, Nadwodny D, Reid J L and Ellis E C. 2015. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biological Conservation*, 186: 287-295 [DOI: 10.1016/j.biocon.2015.03.031]
- Zeng L L, Wardlow B D, Xiang D X, Hu S and Li D R. 2020. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111511 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111511]
- Zhang L, Wang C Z, Yang H X, Zhang B H and Zheng Y. 2017. Phenological metrics dataset, land cover types map for the Tibetan Plateau and grassland biomass dataset for Qinghai Lake Basin. *China Scientific Data*, 2(2): 79-94 (张丽, 王翠珍, 杨昊翔, 张炳华, 郑艺. 2017. 青藏高原地区物候数据集、地表覆盖种类图和青海湖环湖地区草地生物量数据集. 中国科学数据, 2(2): 79-94) [DOI: 10.11922/csdata.170.2017.0132]
- Zhang X Y, Friedl M A and Schaaf C B. 2006. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(G4): G04017 [DOI: 10.1029/2006JG000217]
- Zhang X Y, Friedl M A and Schaaf C B. 2009. Sensitivity of vegetation

- phenology detection to the temporal resolution of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(8): 2061-2074 [DOI: 10.1080/01431160802549237]
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B and Strahler A H. 2004. Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 10(7): 1133-1145 [DOI: 10.1111/j.1529-8817.2003.00784.x]
- Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B, Strahler A H, Hodges J C F, Gao F, Reed B C and Huete A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00135-9]
- Zhang X X, Ge Q S and Zheng J Y. 2004. Relationships between climate change and vegetation in Beijing using remote sensed data and phenological data. *Acta Phytocologica Sinica*, 28(4): 499-506 (张学霞, 葛全胜, 郑景云. 2004. 北京地区气候变化和植被的关系——基于遥感数据和物候资料的分析. *植物生态学报*, 28(4): 499-506) [DOI: 10.17521/cjpe.2004.0068]
- Zhang X Y, Jayavelu S, Liu L L, Friedl M A, Henebry G M, Liu Y, Schaaf C B, Richardson A D and Gray J. 2018b. Evaluation of land surface phenology from VIIRS data using time series of PhenoCam imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 256-257: 137-149 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.03.003]
- Zhang X Y, Liu L L, Liu Y, Jayavelu S, Wang J M, Moon M, Henebry G M, Friedl M A and Schaaf C B. 2018a. Generation and evaluation of the VIIRS land surface phenology product. *Remote Sensing of Environment*, 216: 212-229 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.047]
- Zhang X Y, Wang J M, Henebry G M and Gao F. 2020. Development and evaluation of a new algorithm for detecting 30 m land surface phenology from VIIRS and HLS time series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 161: 37-51 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.01.012]
- Zhang Y, Joiner J, Alemohammad S H, Zhou S and Gentile P. 2018c. A global spatially contiguous solar-induced fluorescence (CSIF) dataset using neural networks. *Biogeosciences*, 15(19): 5779-5800 [DOI: 10.5194/bg-15-5779-2018]
- Zhang Y G, Zhang Q, Liu L Y, Zhang Y J, Wang S Q, Ju W M, Zhou G S, Zhou L, Tang J W, Zhu X D, Wang F, Huang Y, Zhang Z Y, Qiu B, Zhang X K, Wang S H, Huang C P, Tang X G and Zhang J S. 2021. ChinaSpec: a network for long-term ground-based measurements of solar-induced fluorescence in China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(3): e2020JG006042 [DOI: 10.1029/2020jg006042]
- Zheng Z T and Zhu W Q. 2017. Uncertainty of Remote Sensing Data in Monitoring Vegetation Phenology: A Comparison of MODIS C5 and C6 Vegetation Index Products on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 9(12): 1288. [DOI: 10.3390/rs9121288]
- Zhou H H, Fu D J, Zhang L F, Wang W S, Cen Y and Wang J N. 2016. Modeling grassland phenology and analyzing relationship with corresponding meteorological factors based on digital camera. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(5): 966-974 (周惠慧, 付东杰, 张立福, 王文生, 岑奕, 王晋年. 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. *遥感技术与应用*, 31(5): 966-974) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.5.0966]
- Zhou K M, Lin H, Song R F, Jiang Q, Chen Z M and Du K. 2020. Comparison of two fitting methods for NDVI of the deciduous period of Ginkgo leaves. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 40(2): 95-101 (周柯妙, 林辉, 宋仁飞, 蒋仟, 陈忠明, 杜凯. 2020. 银杏落叶期叶片NDVI值2种拟合方法比较. *中南林业科技大学学报*, 40(2): 95-101) [DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.02.012]
- Zhou L, Chi Y G, Liu X T, Dai X Q and Yang F T. 2020. Land surface phenology tracked by remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence in subtropical evergreen coniferous forests. *Acta Ecologica Sinica*, 40(12): 4114-4125 (周蕾, 迟永刚, 刘啸添, 戴晓琴, 杨风亭. 2020. 日光诱导叶绿素荧光对亚热带常绿针叶林物候的追踪. *生态学报*, 40(12): 4114-4125) [DOI: 10.5846/stxb201901010004]
- Zhou Y K. 2018. Comparative study of vegetation phenology extraction methods based on digital images. *Progress in Geography*, 37(8): 1031-1044 (周玉科. 2018. 基于数码照片的植被物候提取多种方法比较研究. *地理科学进展*, 37(8): 1031-1044) [DOI: 10.18306/dlkxjz]
- Zhou Y K. 2019. Asymmetric behavior of vegetation seasonal growth and the climatic cause: evidence from long-term NDVI dataset in northeast China. *Remote Sensing*, 11(18): 2107 [DOI: 10.3390/rs11182107]
- Zhou Y K. 2019. Depicting the asymmetries of vegetation phenology over Northeast China using remote sensing NDVI dataset. *Remote Sensing Technology and Application*, 34(2): 345-354 (周玉科. 2019. 基于遥感的中国东北植被物候不对称特征分析. *遥感技术与应用*, 34(2): 345-354) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.2.0345]
- Zhou Y K and Liu J W. 2017. Vegetation phenological dataset of main ecological observation stations in China based on MODIS EVI. V1. [Science Data Bank]. (周玉科, 刘建文. 2017. 基于MODIS EVI的中国主要生态观测站植被物候数据集. V1.) [DOI: 10.11922/sciencedb.451]
- Zhu K Z and Wan M W. 1973. *Phenology*. Beijing: Science Publishing Press: 1-131 (竺可桢, 宛敏渭. 1973. *物候学*. 北京: 科学出版社: 1-131)
- Zhu W Q, Mou M J, Wang L L and Jiang N. 2012. Evaluation of phenology extracting methods from vegetation index time series// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE: 1158-1161 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351342]
- Zhu X G, Zhang G L, Tholen D, Wang Y, Xin C P and Song Q F. 2011. The next generation models for crops and agro-ecosystems. *Science China Information Sciences*, 54(3): 589-597 [DOI: 10.1007/s11432-011-4197-8]



## Recent advances in remote sensing of vegetation phenology : Retrieval algorithm and validation strategy

WANG Minyu<sup>1</sup>, LUO Yi<sup>1</sup>, ZHANG Zhengyang<sup>1</sup>, XIE Qiaoyun<sup>2</sup>, WU Xiaodan<sup>1</sup>, MA Xuanlong<sup>1</sup>

1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. School of Life Sciences, University of Technology Sydney, Sydney NSW 2007, Australia

**Abstract:** In the context of climate change, vegetation phenology, as a direct manifestation of the ecosystem's response to environmental changes, has attracted increasing attention from the academic community. Obtaining long-term, continuous, multi-scale vegetation phenology data is the basis of phenological research, and the phenological parameters obtained by satellite remote sensing have become an important indicator of terrestrial ecosystem change. Remote sensing phenological parameters play an important role in the fields of agricultural production management, ecosystem monitoring, land use type mapping, human health, and ecosystem climate change response. In this context, key scientific issues and application fields must be combined to systematically sort out the progress in remote sensing phenological parameter extraction, verification, and product development and to predict to future development trends. First, this article discussed the development of emerging sunlight-induced chlorophyll fluorescence and vegetation optical thickness in addition to the traditional vegetation indices in phenological monitoring. Second, this paper discusses the advantages, disadvantages, and applicability of different time series data preprocessing and phenological metrics retrieval algorithms. Then, this article sorts out the development context of multi-source and -scale verification methods from the development of traditional phenological observations, phenological cameras, flux observations, and unmanned aerial vehicles. Meanwhile, this article introduces the development status of domestic and foreign phenology remote sensing products in recent years, with emphasis on product accuracy. Finally, this article systematically discusses the propagation of errors to the retrieved phenological metrics resulting from different aspects of data preprocessing, parameter extraction methods, and remote sensing data sources. On this basis, this article points out that future research in the field of vegetation phenology remote sensing should focus on the following: (1) better comparability between different research results should be targeted by improving the quality of remote sensing data sources and spatial and temporal consistency; (2) the subjectivity in the phenological retrieval algorithms should be reduced by developing universal algorithms; (3) the complete ground validation scheme should be established by leveraging the development in theory and method of quantitative remote sensing validation field; (4) the experience of using Chinese satellite data for monitoring vegetation phenology should be accumulated by actively extending the application of different Chinese spaceborne sensors. Through the above development, the overarching aim is to meet the demand for high-quality vegetation phenology remote sensing products in various scientific and practical applications.

**Key words:** remote sensing, vegetation phenology, growing season, vegetation dynamics, ecosystem parameters, ground validation

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 42171305); Natural Science Foundation of Gansu Province, China (No. 21JR7RA499); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. lzujbky-2021-ct11)