

垂直与倾斜相机观测对遥感物候参数验证影响的对比研究

许丽娜^{1,2}, 屈永华^{1,2}, 孙晨曦³, 万华伟³, 阿斯娅·曼力克⁴, 刘绍民⁵

1. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心 地理科学学部遥感科学与工程研究院, 北京 100875;

3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094;

4. 新疆畜牧科学院草业研究所 新疆畜牧科学院天山北坡草地生态环境野外定位观测研究站, 乌鲁木齐 830057;

5. 北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 基于卫星遥感的大尺度植被物候监测对于农业生产管理、气候变化响应等领域具有重要意义。卫星遥感提取的物候参数真实性检验常以近地面数字相机观测为数据源。以往验证研究大多关注观测尺度的差异造成的影响, 忽略了地面相机与卫星观测天顶角的不一致性。本文将获取的垂直 (PhotoNet) 与倾斜 (PhenoCam) 物候相机在相近纬度、同种植被类型的观测站点数据, 分别与 Sentinel-2 卫星提取的物候参数进行对比, 系统性地评估 2 种地面相机观测角度对卫星物候验证结果的影响。结果表明: 相机的观测角度是卫星遥感物候验证研究中的不确定性原因之一; 在多数情况下, 卫星遥感与垂直观测相机提取的物候期表现出更好一致性, 平均相差 9 d, 而与倾斜观测相机平均相差可达 19 d, 偏差天数受植被类型和生长阶段的影响; 在玉米凋落期至休眠期, 垂直观测偏差反而高于倾斜观测; 植被冠层方向反射特性和相机视场范围内目标组分差异是引起这种现象的主要原因。本研究证实了地面相机观测角度是卫星物候真实性检验中不可忽视的影响因素, 相机野外布设时应充分考虑角度效应带来的验证误差, 从而为卫星遥感物候监测提供更可靠的验证数据。

关键词: 遥感, 数字相机, 观测角度, 卫星物候, 近地物候, 植被绿度

中图分类号: X87/P2

引用格式: 许丽娜, 屈永华, 孙晨曦, 万华伟, 阿斯娅·曼力克, 刘绍民. 2024. 垂直与倾斜相机观测对遥感物候参数验证影响的对比研究. 遥感学报, 28(10): 2565-2581

Xu L N, Qu Y H, Sun C X, Wan H W, Asiya M and Liu S M. 2024. Comparison of vertical and inclined camera observations on the validation results of remote sensing phenological parameters. National Remote Sensing Bulletin, 28(10): 2565-2581 [DOI:10.11834/jrs.20232488]

1 引言

物候学是研究自然界植物、动物和环境条件的周期变化之间相互关系的科学 (竺可桢和宛敏渭, 1980)。植物物候是指植物生长发育过程中的周期性事件, 如展叶、开花、落叶等。植物物候不仅是植被自身的生理现象, 也是对外部环境条件的综合反应, 被认为是气候变化的重要生物学指标之一。因此, 准确而定量地描述植物物候具有重要意义 (郑景云等, 2003)。

遥感技术具有大规模、长时间连续观测的优点, 为监测全球尺度上的植物物候提供了一种经济高效的手段 (Xu 等, 2021)。目前, 多个遥感物候产品已投入了科学研究和实际应用, 如中低分辨率的产品有 GLP (GLASS-LAI-based phenology product) (向阳等, 2014)、MLCD (MODIS Global Land Cover Dynamics Product) (Zhang 等, 2006) 等。而面向大尺度精细作物物候研究更倾向于使用更高时空分辨率的卫星数据, 如 Sentinel-2 等 (Pan 等, 2015; Bolton 等, 2020; Moon 等, 2021)。

收稿日期: 2022-09-26; 预印本: 2023-03-07

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42192580, 42192581)

第一作者简介: 许丽娜, 研究方向为植被遥感。E-mail: xln@mail.bnu.edu.cn

通信作者简介: 屈永华, 研究方向为定量遥感、农业遥感和无线传感器网络。E-mail: qyh@bnu.edu.cn

卫星遥感仅能获取像元尺度的植物物候特征, 被称为“遥感地表物候”, 即 LSP (Land Surface Phenology) (de Beurs 和 Henebry, 2004), 为验证其提取的物候期精度, 研究者大多依托于人工传统测量或基于物候相机近地表遥感方法获取地面验证数据。其中, 传统测量手段能得到植被的生理物候, 但难以进行时空分析 (陈效逑和王林海, 2009)。基于数字重复摄影的近地表遥感在物候监测方面具备独特的优势, 物候相机的高分辨率、高频率成像技术弥补了卫星遥感和人工监测的不足, 能够评估和改进卫星遥感反演的物候指标。与卫星获取的辐亮度或反射率不同, 相机记录的 DN 值 (Digital Number) 不具备物理意义, 但大量研究表明, 相机植被指数时间序列数据的趋势能够反映植被生长状态变化, 具有监测植被物候的潜力, 并在地面物候观测领域得到了广泛应用 (Filippa 等, 2018; Richardson 等, 2009; Menzel 等, 2015; Thapa 等, 2021)。当前, 物候相机已经成为一种不可或缺的物候数据来源和地面验证手段。国内外建立了多个基于数字相机的物候观测网提供数据支持, 如美国的 PhenoCam (Seyednasrollah 等, 2019)、欧洲的 EuroPhen (Wingate 等, 2015)、日本的 PEN (Phenological Eyes Network) (Nasahara 和 Nagai, 2015) 等国外物候观测网, 以及国内物候观测网 PhotoNet 等。

当前, 利用地面相机验证卫星遥感物候时发现, 物候相机和卫星提取的物候指标具有较强的相关性, 但仍存在差异。如: White 等 (2014) 发现相机与卫星监测的物候期平均相差 10—30 d。已有研究从尺度效应 (Fisher 和 Mustard, 2007; Peng 等, 2017)、植被生长速度的异质性 (Liu 等, 2019)、感兴趣区 (ROI) 选取 (Hufkens 等, 2012; 周玉科, 2018) 等角度, 对上述差异做出了科学的解释。然而, 鲜有研究关注物候相机与卫星观测角度不一致对物候期验证结果的影响。

具体来说, 卫星遥感产品的观测角度通常为近天顶方向, 而传统物候相机一般采用倾斜观测以扩大视野, 进而获取更多的植被信息。以广泛应用的 PhenoCam 观测网相机的布置为例, 该相机在野外的安装没有严格的观测角度要求, 只需保证倾斜且不受非植被目标干扰即可, 但推荐倾斜观测, 且他们认为最佳倾角拍摄时的照片中植被与天空背景比例为 4 : 1 (Seyednasrollah 等, 2019)。然而, 由于植被冠层对太阳辐射的反射具有方向

性, 使得在近天顶与倾斜角度获取的反射率存在差异。同时, 不同角度观测的物质组分在图像中所占比例有所不同, 如土壤背景的所占比例、非光合组分的所占比例 (Vrieling 等, 2018)、林上与林下组分的所占比例等 (Klosterman 等, 2014) 都与观测角度有关。因此, 物候相机和卫星观测角度的不一致, 增加了物候期的地面验证的不确定性。

已有研究报道了观测角度差异对验证结果的影响。例如: Liu 等 (2017) 认为, 受残余物质的干扰, 近天顶观测的卫星比倾斜相机能获取更多草地发芽时的绿色信号; Cheng 等 (2020) 认为植被非光合组分 (如花、根茎等) 在倾斜视角中所占比例多于近天顶观测视角; Vrieling 等 (2018) 假设卫星与倾斜相机获取的植被图像, 其叶绿素含量不同, 并通过建立双层辐射传输模型, 进一步证明了观测角度的差异对物候期验证结果的影响。但现有的研究中, 由于缺乏垂直观测相机的数据, 无法实现两种观测角度相机对遥感产品验证结果差异的定量比较, 因此, 需要一种垂直观测相机补足这方面数据的空缺。

因此, 为探究观测角度差异对遥感产品验证的影响及内在原因, 本文拟基于北京师范大学研发的物候相机 (PhotoNet) 获取垂直观测的地面物候数据, 收集美国 PhenoCam 倾斜观测数据, 利用两种观测角度相机数据分别验证遥感卫星 Sentinel-2 的物候参数, 比较两种角度观测对遥感产品验证结果的影响, 从定性与定量两个方面描述, 并从辐射传输原理与相机成像过程两个方面解释这种影响的内在原因, 以期卫星遥感物候观测提供真实可靠的地面验证数据。

2 数据与方法

2.1 物候相机数据

本研究选择倾斜观测 PhenoCam 和垂直观测 PhotoNet 两种物候网相机数据, 探究相机观测角度对卫星遥感物候期验证结果的影响。由于少有站点同时布置垂直和倾斜两种观测角度的物候相机, 因此, 研究选择了两种物候网相机在相近纬度、同种植被类型的观测站点与 Sentinel-2 数据比较, 并进行统计分析。其中: PhotoNet 物候网络专注于中国陆地生态系统, 其物候相机仪器由北京师范大学自主研发; PhenoCam 物候观测网络数据

集集中于北美和欧洲，是目前覆盖范围最广、应用最多的数据集之一。本文所使用的相机图像为两个观测网络的RGB图像，图像成像模式均为自动曝光，图像像素数均为500万像素（长宽像素数为：2592×1944），两种相机具有不同的观测角度，详见

图1。PhenoCam相机在野外安装没有明确观测角度限制，但需遵循倾斜拍摄，照片中应包含>50%的植被和<50%的天空。而与传统物候相机不同，PhotoNet相机以垂直向下的观测方式采集数据。两种相机均选择图像中间区域作为ROI。

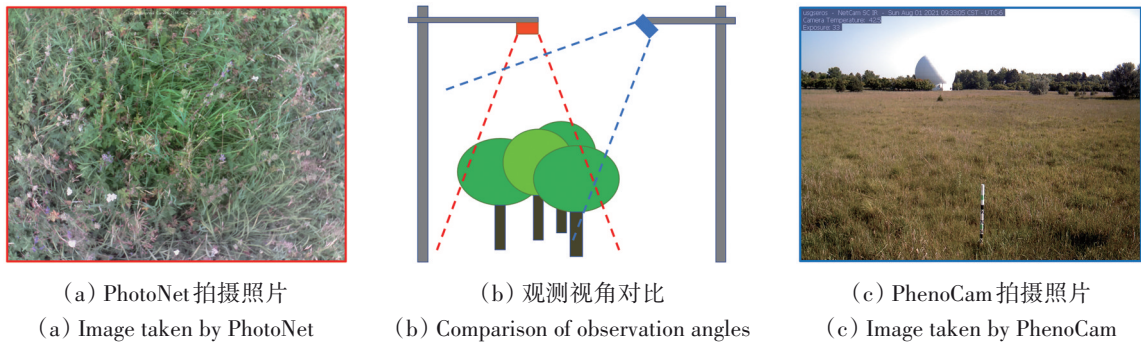
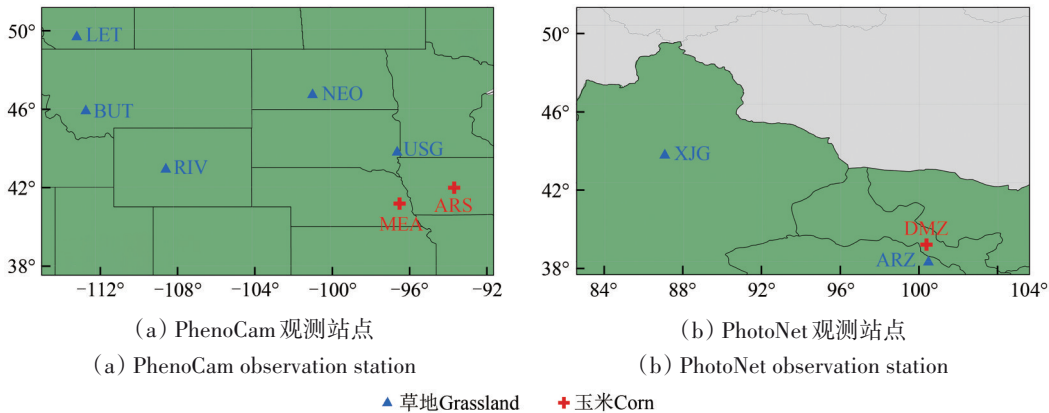


图1 PhotoNet与PhenoCam物候相机观测角度差异示意图
Fig.1 Diagram of observation angle difference between PhotoNet and PhenoCam camera

为了使不同地区的垂直与倾斜观测相机的验证结果具有可比性，本研究在选择 PhotoNet 和 PhenoCam 物候网站点时，遵循以下原则：首先，选取开阔且植被分布均匀的站点作为研究区，减小尺度效应对结果的影响（Liu 等，2017）；其次，在相近纬度的上选取两种物候网相机的观测站点，尽可能贴近同种气候条件；最后，植被处于明显生长季内，且均为一年生，满足于当前常用的物候期提取方法。

基于上述原则，在 PhotoNet 物候网中选择3个实验站作为研究区，包括1个玉米站和两个草地站（图2（b））。其中，玉米站位于甘肃省张掖市大满农田区（大满站，DMZ），草地站分别位于青海省祁连县阿柔草场（阿柔站，ARZ）与新疆天山北坡谢家沟实验站（共6个观测点，XJG1-6，每个观测点布置两台相机）。DMZ和ARZ数据下载自国家青藏高原科学数据中心（<http://data.tpdc.ac.cn>[2022-09-26]）（Liu 等，2018；刘绍民 等，2022a, b）。



注：ARS: Arsbrooks 站；MEA: Mead 站；LET: Lethbridge 站；NEO: NEON 站；USG: Usgseros 站；
BUT: Butte 站；RIV: Riverton 站；DMZ: 大满站；ARZ: 阿柔站；XJG: 谢家沟站

图2 研究区分布图

Fig.2 Distribution of research area

在 PhenoCam 物候网络中，选择与 PhotoNet 站点相近纬度、相同植被类型7个站点作为对比研究区（图2（a））。包括：两个玉米站，分别是Arsbrooks（ARS）和Mead（MEA）站，对应于PhotoNet的DMZ；5个草地站，其中Lethbridge（LET）、NEON（NEO）

和Usgseros（USG）站与PhotoNet的ARZ相对应，USG、Butte（BUT）和Riverton（RIV）站与XJG相对应。PhenoCam数据集均可在“<https://phenocam.sr.unh.edu/>[2022-09-26]”网站下载。各个站的具体经纬度与覆盖时间见表1。

表1 研究区站点信息
Table 1 Station information of research area

植被类型	PhotoNet			PhenoCam						
	站点	时间	经纬度	站点	时间	经纬度				
玉米	DMZ	2020-01-01—2020-12-31	100.367°E, 38.852°N	ARS	2020-01-01—2020-12-31	93.693°W, 41.974°N				
				MEA	2020-01-01—2020-12-31	96.476°W, 41.165°N				
草地	ARZ	2020-01-01—2020-12-31	100.464°E, 38.047°N	LET	2020-01-01—2020-12-31	112.940°W, 49.709°N				
				NEO	2020-01-01—2020-12-31	100.915°W, 46.769°N				
				USG	2020-01-01—2020-12-31	96.623°W, 43.734°N				
草地	XJG	1: 2021-04-29—2021-07-31 2: 2021-05-22—2021-08-22	87.043°E, 43.483°N	USG	2021-01-01—2021-12-31	96.623°W, 43.734°N				
		1: 2021-04-29—2021-07-31 2: 2021-05-19—2021-09-10								
		1: 2021-04-29—2021-10-17 2: 2021-05-22—2021-08-18	87.043°E, 43.483°N		BUT		2021-01-01—2021-12-31	112.479°W, 45.953°N		
		1: 2021-04-29—2021-09-12 2: 2021-05-22—2021-09-12								
		1: 2021-04-29—2021-09-12 2: 2021-04-29—2021-09-12	87.042°E, 43.482°N				RIV		2021-01-01—2021-12-31	108.400°W, 42.988°N
		1: 2021-04-29—2021-08-22 2: 2021-04-29—2021-10-17								

2.2 卫星遥感数据

Sentinel-2 是欧洲航天局 2015 年和 2017 年发射的两颗高分辨率多光谱卫星（2A 和 2B），在平均海拔 786 km 的太阳同步轨道上运行，观测天顶角为±10.3°，可以认为是近垂直观测，卫星携带了可见光空间分辨率为 10 m 的多光谱成像仪（MSI），在卫星轨道重叠观测区域内，每 3—5 d 可完成对地面同一区域的重复访问。

研究基于 GEE（Google Earth Engine）平台在线提取并处理了与地面站点对应位置的 Sentinel-2 数据。所使用的数据集名称为“COPERNICUS/S2_SR”，属于经过大气校正的 Level-2A 级地表反射率产品。在使用该数据前，利用该数据中的质量标识波段（QA60）对数据集进行去云处理。在去云后的 Sentinel-2 影像上，提取以地面站点经纬度为中心的 20 m×20 m 内像元反射率，计算其均值作为与地面站点对应位置的卫星遥感数据。

2.3 GCC 指数计算

GCC（Green Chromatic Coordinate）是描述植被冠层季节变化的稳健指标，能有效减少光照场景变化带来的噪声，是基于数字相机提取植被物候的常用绿度指标（Sonnentag 等，2012），计算公式为

$$GCC = \frac{G}{R + G + B} \tag{1}$$

式中，对于卫星遥感数据，*R*、*G*、*B* 分别为 Sentinel-2 的红、绿、蓝波段反射率值；对于物候相机，*R*、*G*、*B* 分别为相机传感器红、绿、蓝三通道 DN 值。据式（1）计算每张影像 ROI 的平均 GCC 值。其中，物候相机的日 GCC 值是由一天中有效图片 GCC 均值得到的。为减少噪音，对时间序列数据进行窗口为 3 d 的平均滤波处理。

$$GCC1_{DOYi} = GCC2_{DOYi} + Dvalue_{mean} \tag{2}$$

XJG 共 6 个观测点，各个观测点同时布置两台垂直向下观测相机，但相机非全年布置，且日期不统一，同时，受到光照条件影响，同一站点两台相机之间的 DN 值和 GCC 值不具有可比性，因此，对该实验站进行了数据预处理（图 3）。计算发现，同一观测点两台相机在交叉日期的 GCC 差值（D-value）的标准差为 0.009—0.021（图 3（a）），差值较为稳定，表明同一观测点相机的 GCC 数值虽然不同，但二者趋势一致。因此，通过计算 GCC 差值的均值（Dvalue_{mean}），即可估算两台相机非交叉日期的 GCC 值（式（2）），并取两台相机 GCC 均值作为该观测点的 GCC 值。例如，XJG1 的相机 1 布置 DOY（Day Of Year）为 119—212，相机 2 为 142—234。利用式（2）得出 GCC1_{DOY212} 至 GCC1_{DOY234} 与 GCC2_{DOY119} 至 GCC1_{DOY142}，通过计算两台相机的均值得出该观测点在 DOY 为 119—234 的 GCC 合成值（图 3（b））。

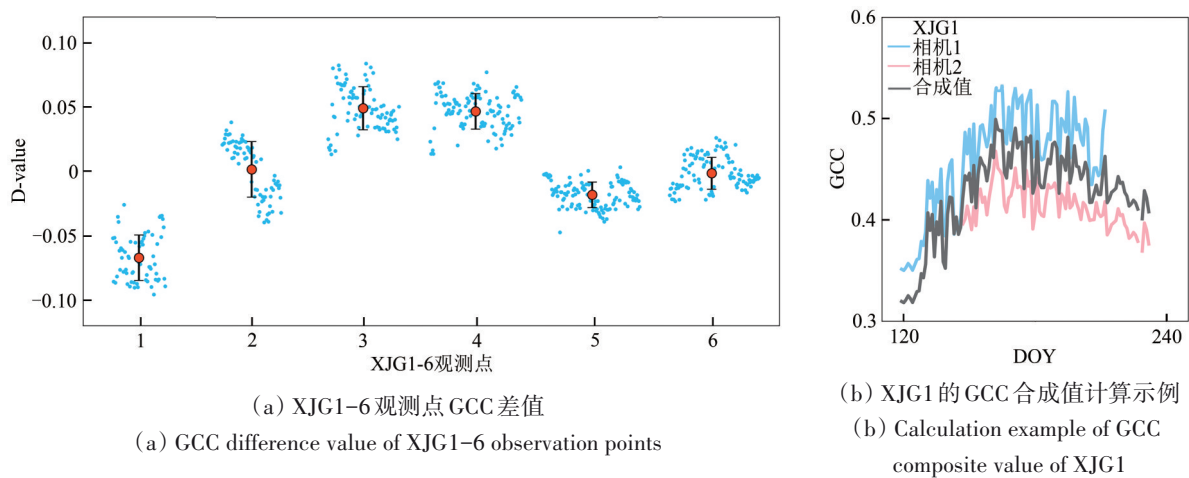


图3 XJG 数据预处理
Fig.3 Data preprocessing of XJG station

2.4 提取物候期参数

为了重建植被生长过程，使用双双正切曲线 (Double Hyperbolic Tangent Function) 拟合 GCC 时间序列数据，该函数对于植被的生长和衰落不对称的时间序列有较好的描述，与 Beck 等 (2006) 提出的 Double Logistic 模型类似，表达式为 (Meroni 等, 2014)：

$$GCC(t) = a_0 + a_1 \frac{\tanh((t - a_2) \times a_3) + 1}{2} + a_4 \frac{\tanh((t - a_5) \times a_6) + 1}{2} - a_4 \tag{3}$$

式中， t 为时间， $GCC(t)$ 为时间 t 时的 GCC 值，使用加权最小二乘法对数据进行拟合时 (Chen 等, 2004)，要求对参数进行估计并作为初始值输入使拟合结果易于收敛， a_0 — a_6 参数的初始值输入详见表 2。

表 2 a_0 — a_6 参数的初始值输入

Table 2 Initial value input of a_0 to a_6 parameter	
参数	初始值
a_0	时序前半段的 GCC_{min}
a_1, a_4	分别为时序前半段(后半段)的 GCC_{min} 与 GCC_{max} 之差
a_2, a_5	分别为时序开始(结束)时与 GCC_{max} 对应时间中点
a_3, a_6	分别为时序前半段(后半段)拐点处的斜率

物候期提取的常见方法为阈值法和曲率极值法。阈值法是计算拟合曲线振幅的 20%、50%、90% 作为物候期，阈值法概念简单，并且实现方便，是应用最广泛的方法之一 (White 等, 1997；

Vrieling 等, 2018)。曲率极值法的原理是指，当植被从一个生长阶段转向另一个生长阶段时，其拟合曲线从一个近线性趋势转向另一个近线性趋势 (Zhang 等, 2003)，通过计算拟合曲线的曲率极值作为关键物候期，曲率 K 的计算公式为

$$K = \frac{GCC''(t)}{(1 + (GCC'(t))^2)^{\frac{3}{2}}} \tag{4}$$

式中， $GCC'(t)$ 、 $GCC''(t)$ 分别为 $GCC(t)$ 曲线的一阶、二阶导数。再令曲率函数 K 的一阶导数 $K' = 0$ ，所求曲率极值对应的时间即为植被生长关键物候期。相比于阈值法是人为指定特定取值的方法，曲率极值法较为客观，不需要阈值等经验约束，且能应用于生长季时间不完整的时序曲线物候期的提取。但曲率极值法对时序重建方法要求较高，当植被指数时序曲线不是规则曲线或时序曲线过度拟合时，易造成没有极值的情况，因此函数拟合的准确性将直接影响物候期提取的准确性 (Zeng 等, 2020)。

本文综合考虑两种方法的优缺点，对时间序列完整的 DMZ 和 ARZ 以及对应的 PhenoCam 站点使用阈值法，对时序不完整的 XJG 以及近似同纬度的 PhenoCam 站点使用曲率极值法提取物候期。共提取了 5 个物候期，描述了植被生长过程中叶片从开始变绿至死亡的过程，分别为变绿期 (OG)、成熟期 (MG)、生长旺季 (PS_{90})、凋落期 (EG) 和休眠期 (DG) (Liu 等, 2017)，其具体意义和计算方法如表 3 所示。

表3 物候期定义
Table 3 Definition of phenology

物候期	代表意义	曲率极值法对应时间	阈值法对应时间
变绿期 OG(Onset of Greenup)	植被变绿,叶片生长	植被生长期第一个曲率极值	曲线前半段振幅的20%
成熟期 MG(Maturity of the Green canopy)	植被成熟,叶片生长最快	植被生长期第二个曲率极值	曲线前半段振幅的50%
生长旺季 PS ₉₀ (Peak of Season)	植被绿度达到最大值		曲线前半段振幅的90%
凋落期 EG(End of Greenness)	植被衰老,叶片凋落	植被衰老期第一个曲率极值	曲线后半段振幅的50%
休眠期 DG(Dormancy of the Green vegetation)	植被休眠,叶片死亡	植被衰老期第二个曲率极值	曲线后半段振幅的20%

2.5 数据分析方法

本文通过观测值与拟合值之间的 Pearson 相关系数 (r)、均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error), 评价双双正切曲线拟合时间序列数据的效果, r 值越接近于 1, RMSE 值越小, 表示拟合效果越好。

在比较相机与卫星遥感物候期时, 用两两数据集之间每个物候期 RMSE 来表现误差大小。RMSE 能够表征相机与卫星物候期监测的平均差异, 具体计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (DOY_1 - DOY_2)^2}{n}}$$
 (5)

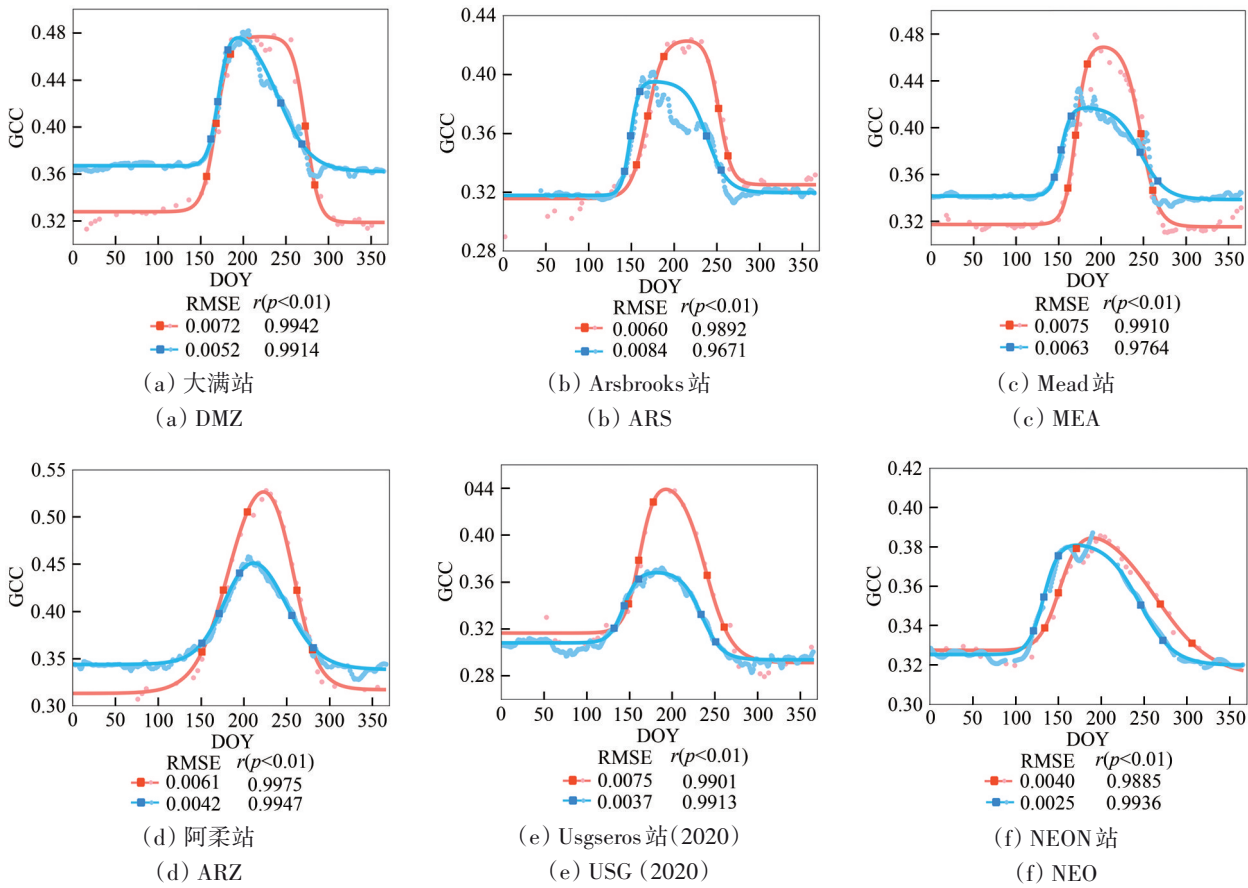
式中, DOY_1 与 DOY_2 分别代表两种数据集在某个

物候期的对应时间。

3 结果与分析

3.1 GCC 时序曲线拟合

研究区为一年生植被, 各个站点 GCC 时间序列有明显的季节性特征, GCC 值从平稳—上升—峰值—下降—平稳的变化, 反映了植被从休眠—变绿—生长旺季—凋落—休眠的过程 (图 4)。双双正切曲线由两个双曲正切函数组成, 其基本形态与植被 GCC 变化类似, 呈现先增长后下降的曲线形状, 能准确描述生长和衰落期变化不对称的植被, 符合研究区植被生长规律, 能够拟合波动的原始 GCC 值。



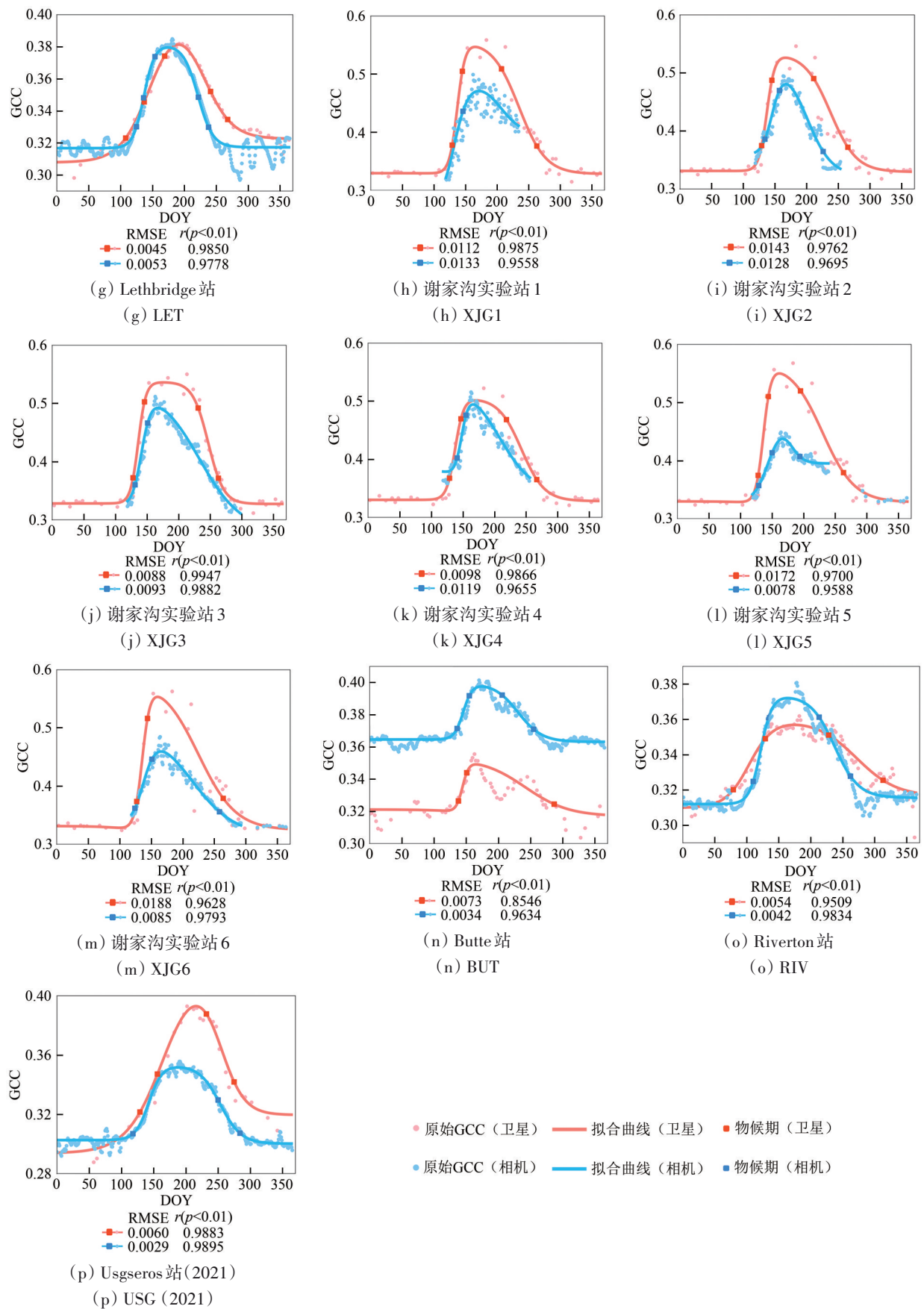


图4 各站点卫星与相机的GCC时间序列曲线

Fig. 4 GCC time series curves at each station

各个站点卫星和物候相机获取的GCC值以及曲线拟合和物候期提取情况见图4。其中：图4(a) — (c) 植被类型为玉米；图4(d) — (p) 为草地。由图4可见：16个观测点共32对观测值与拟合值数据之间拟合效果较好，平均Pearson相关系数为0.97 ($P < 0.01$)，平均RMSE仅为0.007；当GCC时间序列波动较大时，拟合效果相对变差，如XJG1-2的拟合误差为0.01左右(图4(h) — (i))，但观测与拟合值的相关性较好 ($0.95 < r < 0.99$)，且曲线拟合于GCC上包络线，研究关注于植被整体上的生长趋势变化，不影响物候期的提取(Chen等, 2004)。

玉米与草地的GCC时序曲线形态稍有不同，不同观测尺度下的玉米曲线形态也不同。草地的GCC时序曲线有明显的峰值，呈尖峰状，且卫星与相机观测值在趋势上近似(图4(d) — (p))。卫星观测玉米在生长旺季(PS_{90})处的GCC曲线形态为“平顶”，物候相机则在达到峰值后快速下降(图4(a) — (c))，这可能是由于植被类型和观测角度引起的，具体阐述见4.1节。

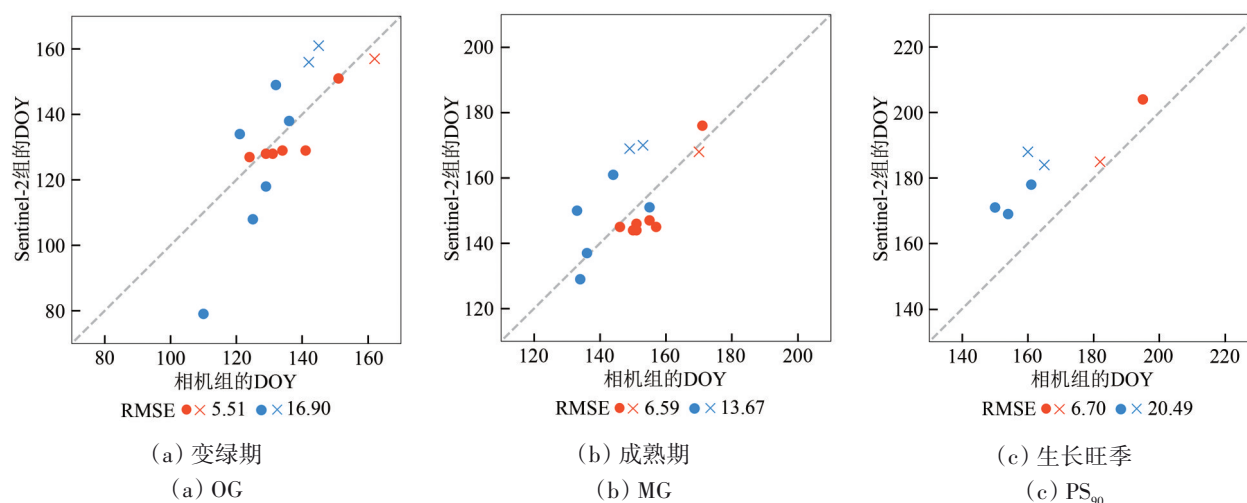
3.2 不同角度相机与卫星的物候期比较

依据双双正切函数拟合的GCC时间序列曲线，使用阈值法和曲率极值法提取了5个物候期，分别为变绿期(OG)、成熟期(MG)、生长旺季(PS_{90})、凋落期(EG)和休眠期(DG)。卫星与地面两个观测尺度的物候期之间具有强相关性，Sentinel-2与PhotoNet、PhenoCam的Pearson相关系数分别为0.99、0.97。卫星与地面监测物候期的偏差在各站点表现稍有不同，整体上的偏差天数为0—51 d，

其中，在相机为垂直观测的ARZ站，地面与卫星提取的变绿期日期一致，而相机为倾斜观测的RIV站，在预测休眠期时产生了51 d的偏差。

通过计算16个观测点获取的卫星与地面监测物候期RMSE，得出相机与卫星物候期监测的平均差异(图5)。整体上看，与Vrieling等(2018)研究发现一致，本研究提取的物候期均分布于1:1线附近，基于卫星的物候期，一开始早于物候相机的估算结果(OG、MG)，逐渐晚于物候相机的估算(PS_{90} 、EG、DG)。分别观察两种角度相机与卫星获取物候期的差异，发现不同角度相机的验证结果显著不同。如图5(f)，其中红色标记(PhotoNet观测站点)更接近于1:1线，蓝色标记(PhenoCam观测站点)则相对偏离1:1线，RMSE计算结果显示，垂直观测的物候相机与Sentinel-2的物候期平均差异约为9 d，倾斜观测的物候相机与卫星相差约19 d。

基于相机验证卫星遥感物候时，草地和玉米两种植被类型在垂直与倾斜观测角度相机中的表现也有不同(表4)。草地在生长过程中，垂直观测相机与卫星监测的物候期平均相差4—9 d，倾斜观测相机与卫星相差11—31 d，并且在各个物候期中，PhotoNet与Sentinel-2的监测结果差异均小于PhenoCam观测站点。玉米在不同生长阶段两种观测角度物候相机与卫星监测差异结果不同，在生长前期(OG、MG、 PS_{90})，PhotoNet与Sentinel-2监测的物候期相差2—5 d，PhenoCam相差15—23 d，在EG、DG两个物候期，PhenoCam与卫星物候期仅相差7—9 d，而PhotoNet相差15—29 d。这表明地面与卫星的物候期监测的差异还与植被特征有关。



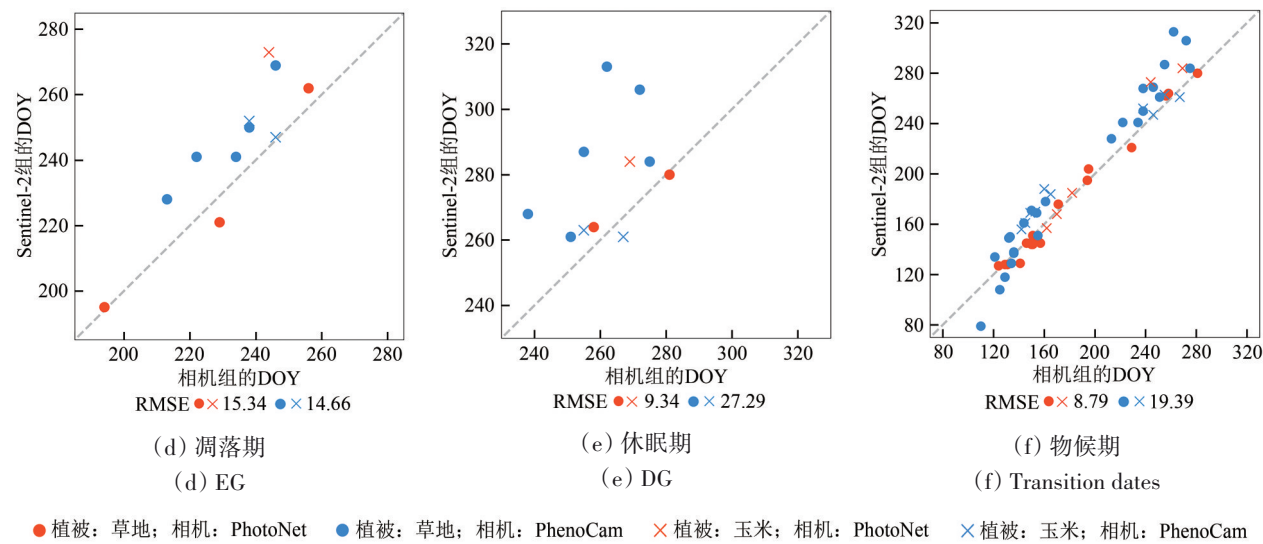


图5 卫星与物候相机的关键物候期比较
Fig.5 Comparison of key phenological periods between satellite and phenological camera

表4 玉米、草地各个物候期的平均差异
Table 4 Average difference of corn and grassland in each phenological period

物候期	玉米		草地	
	PhotoNet	PhenoCam	PhotoNet	PhenoCam
OG	5.00	15.03	5.59	17.47
MG	2.00	18.56	7.01	11.13
PS ₉₀	3.00	23.92	9.00	17.84
EG	29.00	9.92	5.80	16.17
DG	15.00	7.07	4.30	31.25

4 讨论

基于数码相机的物候监测兼顾了遥感与人工观测方法的优点，既能定点重复观测，又接近地面真值，为卫星遥感植被物候的地面验证提供了有效手段（范德芹 等，2016）。本研究验证结果表明，卫星与相机提取的物候指标存在显著的强相关性，但在不同物候期上平均存在5—27 d的差异（图5），这一结果与已有研究中的10—30 d的物候期差异（White 等，2014）近似。与已有研究不同，本文从物候相机的观测角度这一方面，定量地分析了相机验证卫星遥感物候期的差异。

4.1 观测角度对遥感物候期验证的影响

依据实验统计结果，垂直观测物候相机与Sentinel-2物候期平均相差约9 d，倾斜观测的物候相机与卫星可达到19 d（图5（f））。总体来说，使

用不同观测角度相机验证卫星遥感物候时，两种观测方法将引起的差异为10 d左右。本文将从辐射传输原理与相机成像特点两个方面解释这种差异的内在原因。

植被冠层具有二向反射特性，即物体表面反射光的能力与入射和反射光的方向有关，在不同观测角度获取的反射率存在差异，已有多个研究表明观测几何对植被指数计算的影响。例如，王迁（2016）通过监测不同观测天顶角的冬小麦植被指数发现，观测方位角的变化导致植被指数变化并不明显，而随着观测天顶角的增大，NDVI与EVI相对降低。帅艳民等（2021）基于无人机平台定量描述了地物反射率因观测几何造成的波动及其在植被指数中的传递，结果表明R、G、B三波段的方向反射率差异传递到后续可见光植被指数其相对误差可达62.08%。尽管少有学者探究植被的反射特性对物候监测的影响，但可以推断，当使用不同观测角度的相机提取植被物候期时，将引起各波段反射率以及植被指数的差异，这种差异将进一步传递到物候期的提取中。在卫星研究领域，植被冠层二向反射特性对观测结果的影响以及校准方法已有广泛的研究（Yang 等，2017；Tian 等，2021），在未来的研究中，应借鉴已有的卫星研究方法，校准地面相机的观测角度以消除二向反射特性的影响。

就相机成像特点而言，相机的成像过程是将现实世界压缩为二维影像，因此，在不同观测角

度下, 相机视场范围内的物质组分比例不同, 如图像中土壤背景、非光合组分、林上与林下组分的像素个数比例均与观测角度有关。已有研究已注意到这一因素对物候期验证的影响。例如: Klosterman 等 (2014) 以森林作为研究对象, 发现倾斜拍摄的物候相机仅能获取森林冠层的信息, 而卫星获取的为冠层和地面的综合信息, 这将引起相机验证卫星遥感物候期误差; Vrieling 等 (2018) 通过建立辐射传输模型模拟植被生长变化, 认为倾斜观测相机与卫星之间物候期差异是由于植被顶、底在生长过程中叶绿素含量不同引起。因此, 受不同角度视场范围内物质组分比例差异的影响, 相机垂直或倾斜提取的物候期存在偏差。

基于植被冠层二向反射特性和相机成像特点分析, 本研究发现两种观测方法引起 10 d 左右的差异, 但草地与玉米两种植被类型表现略有不同, 这与植被形态特征有关。草地为低矮植被, 其生长过程为: 叶片变绿—开花—花枯萎—叶片变黄, 且开花并不明显, 在垂直与倾斜观测视角中的变化不如玉米强烈。因此, 植被冠层的二向反射特性可能是引起草地垂直或倾斜观测相机验证卫星遥感数据结果不同的直接原因, 相比于倾斜观测相机, 垂直观测相机与卫星视角近似, 其获取的物候期一致性较高 ($RMSE=4-9$ d)。

玉米为禾本科植物, 与自然生长的草地有很大不同, 玉米的组分结构较为复杂, 株高约为 1.5—2.5 m, 生长过程中, 除了叶片颜色逐渐变化, 相机视场内的土壤占比、玉米非光合组分占比也是影响 GCC 变化的主要因素。在玉米生长前期 (OG、MG), 倾斜相机提取的物候期明显提前于卫星提取结果。例如, 在变绿期与成熟期时, MEA 站点倾斜相机提取的物候期相比于卫星分别提前了 20 d、17 d, 而 DMZ 站点垂直相机与卫星观测有较好的一致性, 在变绿期与成熟期分别相差 5 d、2 d (图 4(a)—(c))。相机垂直与倾斜观测视场内土壤占比不同是引起该结果的主导因素, 如图 6 所示, 倾斜视场时, 土壤占比较小, 相比于近天顶观测的 Sentinel-2, 倾斜布置的相机将提前感知植被的绿色变化, 因而倾斜相机提取物候期将会提前于卫星, 相比之下, 垂直相机所提取的植被物候期则与卫星遥感观测具有更高一致性 (图 6 (a))。在生长旺季 (PS_{90}) 转为凋落期 (EG) 的过程中, 玉米叶片边缘向内部逐渐变黄, 此现象在不同视角下观测结果明显不同。

PhotoNet 相机为中心投影, 由于叶片呈弯曲状, 图片中心的玉米边缘叶片所占比例较小, 在图片四周占比较大 (图 6 (b) PhotoNet), 而倾斜观测的 PhenoCam 相机则观测到更多的边缘叶片, 显示为黄色 (图 6 (b) PhenoCam), Sentinel-2 卫星为近天顶观测, 可视为垂直投影, 较少的捕捉到玉米叶片边缘黄色信息。因此, 玉米在由生长旺季转为凋落期的过程中, 卫星观测的 GCC 变化较慢, 倾斜物候相机的 GCC 变化最快 (图 4 (a)—(c))。由于玉米复杂的组分结构, 不同生长阶段的验证结果有所变化。在生长前期 (OG、MG、 PS_{90}), 不同观测角度相机得出的结论与草地一致, 而对于 EG 和 DG 这两个物候期而言, 垂直观测的偏差明显高于倾斜观测相机, PhotoNet 与 Sentinel-2 的差异分别为 29 d 和 15 d, PhenoCam 与 Sentinel-2 的差异分别为 10 d 和 7 d, 这不排除玉米曲线拟合精度的影响。在后续的实验, 应获取更多的玉米站点数据进一步验证上述结论, 例如, 可以在同一玉米样方内部署两个不同角度相机, 进一步解释玉米在 EG 和 DG 物候期时, PhotoNet 与卫星偏差更大的原因。

4.2 物候期提取方法对验证结果的不确定性分析

基于遥感物候期的提取分成以下步骤: 指标计算、时序重建和物候提取, 各个步骤均可采取不同的方法进行处理, 但不存在普适、绝对准确的提取物候期方法, 一般来说, 提取方法依赖于植被类型及其所处的地理条件 (王敏钰 等, 2022)。牟敏杰 (2012) 对比了不同方法对遥感物候的监测结果偏差最大可达 8 d。但本文研究重点不在于分析物候期提取方法, 因此, 选择了物候研究中常用的方法: GCC 作为植被季节变化指标、双双正切曲线重建时序、阈值法和曲率极值法提取关键物候期。

基于双双正切曲线对 GCC 进行时序重建发现, 不同植被的实际 GCC 时序曲线并非理想的 S 型曲线, 存在拟合不成功的情况, 从而导致监测精度的降低 (崔凯 等, 2012)。如图 4 (b)—(c), 当倾斜相机观测玉米时, GCC 达到峰值后迅速下降, 导致函数在局部上拟合效果较差。另外, 曲线拟合法是基于植被全年的生长状况进行时序重建, 在时序不完整的情况下曲线拟合存在误差。例如, 即便对 XJG 进行了预处理, 使 GCC 时序延长, 但

在XJG4的生长前期(图4(k))与XJG5的生长后期(图4(l))的曲线呈持平趋势, 与实际情况

不符, 这增加了时序曲线首、尾两端相关物候期的误差。

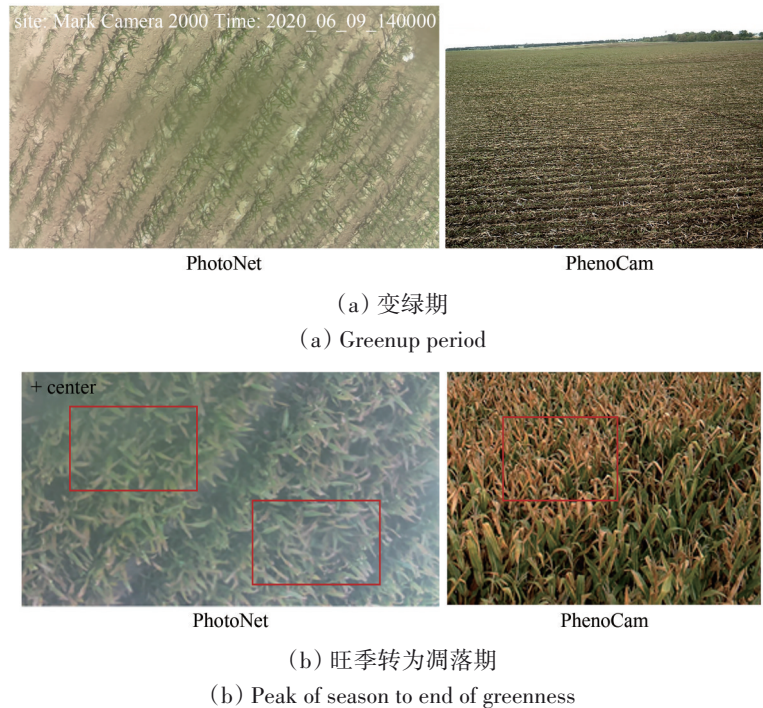


图6 变绿期、旺季转为凋落期的PhotoNet和PhenoCam图像对比中红框分别为垂直与倾斜视场下的特征区域
Fig. 6 Comparison of PhotoNet and PhenoCam images for greenup period and peak of season to end of greenness

阈值法和曲率极值法是提取物候期的常见方法, 综合考虑两种方法的优缺点, 本文对时序不完整的XJG及其对应的PhenoCam站点采用曲率极值法, 其余站点采用阈值法提取物候期。结果表明, 不同的提取方法能够得到相似的结果(图7), 对PhotoNet站点来说, 两种提取方法的偏差仅为1 d, PhenoCam约为4 d。但是, 当使用同样的方法验证卫星遥感物候时, 观测角度的差异造成的偏差可达到14—16 d。因此, 物候期在提取过程中虽然存在不确定性, 但相对于观测角度的影响, 提取方法造成的差异并不显著。

4.3 照明与卫星观测几何对验证结果的不确定性分析

已有研究已证实了观测或者太阳角度对地物反射率、植被指数以及物候期提取的影响(Li等, 2021; Ma等, 2020; Norris和Walker, 2020)。例如, Yang等(2017)发现在相同太阳天顶角、相对方位角时, MODIS红波段的反射率在不同的观测天顶角下相差15%。Norris和Walker(2020)通过分析稀疏冠层植被在冬季的NDVI峰值的影响因

素, 推断太阳和传感器的几何关系是引起植被物候期提取不确定性的原因。就本研究而言, Sentinel-2在786 km的太阳同步轨道上运行, 能获取同一地点相同时刻的数据, 观测角度在 $\pm 10.3^\circ$ 内变动, 太阳角度随着纬度、季节和昼夜更替发生变化, 照明与卫星观测几何为本研究的结论引入了不确定性。

Tian等(2021)考虑了观测天顶角对物候提取的影响, 发现基于校准前、后的Sentinel-2数据提取的物候期显示出强线性关系和相关性(斜率 > 0.93 ; $r > 0.93$), 表明观测角度对Sentinel-2提取物候期的影响有限。另外, 本研究目的在于发现相机与卫星的观测角度不一致对物候期验证结果的影响, 虽然Sentinel-2的观测角度在一定幅度内变化, 但垂直观测的PhotoNet仍更接近于卫星的观测视角, 明显区别于倾斜观测的PhenoCam。PhenoCam拍摄的最佳照片中植被与天空背景比例为4:1, 其观测天顶角显然与Sentinel-2、PhotoNet不同。因此, 使用未进行观测角度校正的Sentinel-2数据, 仍能实现本文的研究目的。

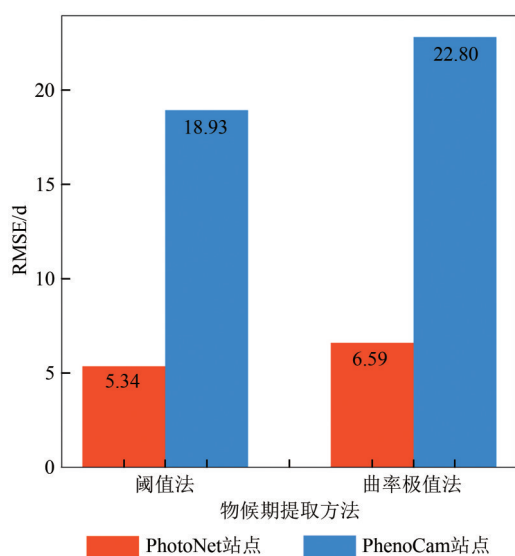
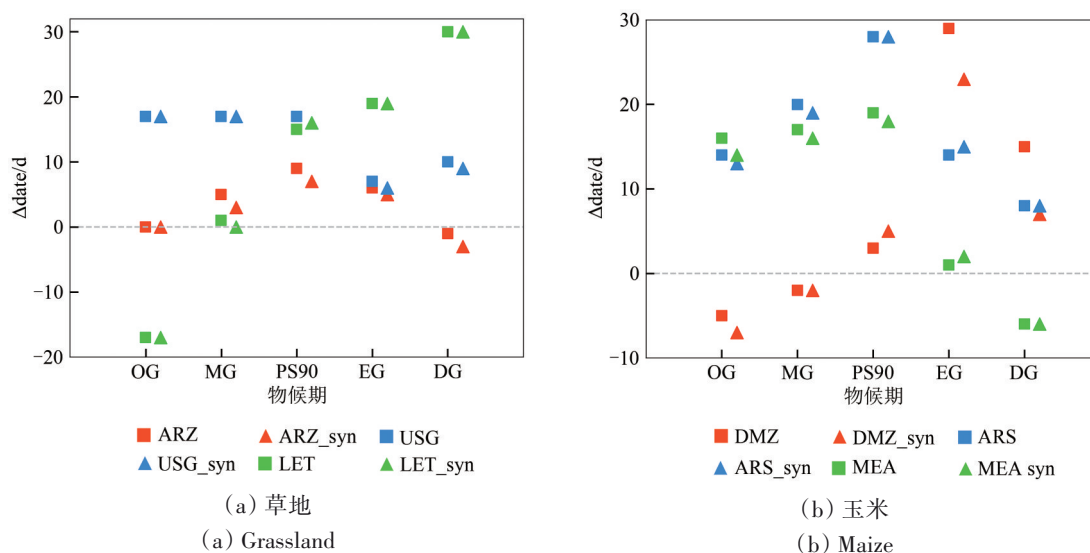


图7 阈值法和曲率极值法物候期提取对比

Fig.7 Comparison of phenological extraction methods using amplitude threshold and curvature extremum

太阳天顶角 SZA (Solar Zenith Angle) 指太阳光线入射方向和天顶方向的夹角。SZA 的变化主要体现在以下两个方面，一是对于给定地点，SZA 随昼夜和季节更替发生变化，二是对于给定时间，SZA 随纬度发生变化。由于本研究是为了发现相机与卫星的观测角度不一致对物候期验证结果的影响，因此，SZA 随纬度和季节的变化对同一站点的相机、卫星数据具有相同的影响效应，仅需要考虑昼夜变化对本文结论的影响。以往的研究中，

物候相机的日 GCC 值由一天中有效图片的 GCC 均值得到，该方法使 GCC 值趋于稳定以减小 SZA 变化带来的影响，Sentinel-2 则以一定时间间隔获取单个 SZA 下的 GCC 数据。为测试 SZA 变化对相机验证卫星遥感物候期的影响，通过计算时序较完整的站点 (ARZ、DMZ、USG、LET、ARS、MEA) 在卫星过境时间时基于提取的物候期 (Norris 和 Walker, 2020)，比较了该计算方法与 GCC 日均值法对验证结果的影响。结果表明，两种 GCC 计算方法提取的物候期差异较小，平均相差 1 d (图 8)。因此，基于地面相机提取物候期时，使用植被指数日均值数据，或与卫星同步观测时间数据均具有可行性。并且，相比于地面相机的布置角度引起的验证遥感物候参数的不确定性，太阳角度变化不是影响地面与卫星物候期差异的主要原因。值得注意的是，Norris 和 Walker (2020) 发现 PhenoCam 计算的植被指数具有明显的前向和后向散射效应，理论上垂直观测相机拍摄的图像能够最大限度减少前向和后向散射效应的影响。然而，DMZ 提取的 EG、DG 物候期，两种方法相差 6 d、8 d (图 8 (b))，且卫星同步观测的相机数据 (DMZ_syn) 更接近于卫星提取的物候期，该结果表明对于具有复杂三维结构的植被观测来说，垂直观测的相机需要考虑 SZA 的变化带来的影响，在未来的研究中需要进一步的论证。



$\Delta date$ 为相机与 Sentinel-2 提取的对应物候期差值；方块为基于相机日均 GCC 算法；

三角为基于卫星过境时相机 GCC 计算方法

图8 相机与 Sentinel-2 的草地和玉米物候期对比

Fig.8 Comparison of phenological periods between camera and Sentinel-2

4.4 展望

数字相机作为地面的主要数据来源之一，需逐步规范化其野外布置和参数设置以提供更准确的卫星遥感验证数据，本研究首次从物候相机观测角度这一影响因素出发，初步探索了垂直与倾斜观测相机对遥感产品验证结果的影响，在今后的研究中，仍需进一步探索观测角度的变化对物候期提取产生的不确定性，并从以下3个方面进行补充：

(1) 使相机在同一站点的不同角度观测代替相近纬度数据的选取。尽管本研究获取了相近纬度（纬度差异为 0.5°N — 11.5°N ）的两种观测角度相机数据以保证近似的气候条件，并且在比较分析时，使用的是相机与卫星监测物候期的平均差异数据，而非直接比较各站点之间的物候期不同，但外界环境和观测对象的变化使本研究的结果并不严格。Zhao等（2013）发现在 34°N — 36°N 内每变化 1° ，植被的生长季长度约变化5 d。当前，新一代的PhotoNet物候相机加入了多角度、可变焦的功能，能够获取同一样方内不同观测角度数据，将为进一步验证观测角度对物候期提取的影响提供了观测支持。

(2) 增加与相机配套的人工实测数据支持本研究的结论。实际上，与传统人工观测到的具体物候事件不同，卫星和数字相机是依据植物光谱响应随时间的变化提取物候期，二者分别被称为生理物候与光学物候。虽然物候相机缩小了卫星与地面的尺度差异，但仍难以建立两种物候的联系，因此，有研究建议不宜比较两种物候期的具体时间点，对比二者的时间变化趋势即可（范德芹等，2016）。而在传统的指导农业生产的物候研究中，其更关注于植被的生理物候，因此，虽然我们的结果表明垂直观测相机更适合验证卫星遥感数据，但我们并不能确认垂直与倾斜相机观测哪个更接近于生理物候，这需要在同一站点获取两种观测角度相机数据的同时，加入传统的人工实测数据进行验证。

(3) 提出消费级相机辐射校准算法。消费级相机具有监测植被物候的潜力，但其记录的DN值不具备物理意义，数值上难以与卫星的辐亮度值、反射率值相比较。部分研究通过建立基于相机与卫星的DN值与辐亮度值，或者二者计算的植被指

数线性模型，以实现相机与卫星在数值上的比较。例如，Petach等（2014）发现相机红通道的DN值与570—660 nm的平均反射率线性关系良好，二者具有极强的相关性（ $r=0.96$ ）。Filippa等（2018）发现落叶阔叶林和草地研究区，基于相机与卫星计算的NDVI具有较好的线性关系（ $0.52 < R^2 < 0.90$ ），但受到经验模型的限制，不同站点线性模型的斜率、截距存在差异。为了充分挖掘消费级相机在物候监测方面的潜力，在未来的研究中，需要重点关注以下两个方面：（1）提出消费级相机辐射校准算法，以解决相机计算的DN值不同于辐亮度或反射率，在数值上无法与卫星进行比较的问题；（2）进一步分析在不同相机布置方式下，相机是否校准引起的物候期提取的不确定性。

5 结 论

利用数码相机验证卫星遥感物候的应用日趋成熟，在实际应用中需要充分考虑和消除各种不确定性引起的误差。本研究比较了垂直与倾斜物候相机在验证卫星遥感物候中引起的差异，得出以下结论：

(1) 总的来说，两种观测角度的相机与卫星物候比较，倾斜比垂直观测能够带来多达10 d的偏差。其中，垂直观测的PhotoNet相机与Sentinel-2的物候期平均差异约为9 d，倾斜观测的PhenoCam相机与卫星相差19 d。

(2) 相机和卫星物候期差异与植被类型以及植被生长阶段有关，大多数情况下，垂直观测的偏差普遍低于倾斜观测相机，但在玉米的凋落期至休眠期，垂直观测的偏差明显高于倾斜观测相机。

本研究证实了地面相机观测角度是卫星物候真实性检验中不可忽视的影响因素，在未来的应用中，物候相机应采用标准和规范的野外布置，充分考虑角度效应带来的验证误差，建议与卫星近天顶的观测角度一致，为卫星遥感监测物候提供可靠的验证数据。

参考文献(References)

- 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]
- Bolton D K, Gray J M, Melaas E K, Moon M, Eklundh L and Friedl M A. 2020. Continental-scale land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111685 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111685]
- 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 X Q and Wang L H. 2009. Progress in remote sensing phenological research. *Progress in Geography*, 28(1): 33-40 (陈效迷, 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]
- 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]
- Cui K, Meng J H and Zuo T Y. 2012. Monitoring of crop phenology with remote sensing. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 40(10): 6279-6281, 6321 (崔凯, 蒙继华, 左廷英). 2012. 遥感作物物候监测方法研究. *安徽农业科学*, 40(10): 6279-6281, 6321 [DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2012.10.135]
- de Beurs K M and Henebry G M. 2004. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan. *Remote Sensing of Environment*, 89(4): 497-509 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.11.006]
- 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]
- 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]
- Fisher J I and Mustard J F. 2007. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109(3): 261-273 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.01.004]
- Hufkens K, Friedl M, Sonnentag O, Braswell B H, Milliman T and Richardson A D. 2012. Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. *Remote Sensing of Environment*, 117: 307-321 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.006]
- Klosterman S T, Hufkens K, Gray J M, Melaas E, Sonnentag O, Lavine I, Mitchell L, Norman R, Friedl M A and Richardson A D. 2014. Evaluating remote sensing of deciduous forest phenology at multiple spatial scales using PhenoCam imagery. *Biogeosciences*, 11(16): 4305-4320 [DOI: 10.5194/bg-11-4305-2014]
- Li Y, Jiao Z T, Zhao K G, Dong Y D, Zhou Y Y, Zeng Y L, Xu H Q, Zhang X N, Hu T X and Cui L. 2021. Influence of varying solar zenith angles on land surface phenology derived from vegetation indices: a case study in the Harvard Forest. *Remote Sensing*, 13(20): 4126 [DOI: 10.3390/RS13204126]
- 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 S M, Li X, Xu Z W, Che T, Xiao Q, Ma M G, Liu Q H, Jin R, Guo J W, Wang L X, Wang W Z, Qi Y, Li H Y, Xu T R, Ran Y H, Hu X L, Shi S J, Zhu Z L, Tan J L, Zhang Y and Ren Z G. 2018. The Heihe Integrated Observatory Network: a basin-scale land surface processes observatory in China. *Vadose Zone Journal*, 17(1): 1-21 [DOI: 10.2136/vzj2018.04.0072]
- Liu S M, Qu Y H, Che T, Xu Z W, Tan J L, Ren Z G and Li X. 2022a. Qilian Mountains integrated observatory network: Dataset of Heihe integrated observatory network (phenology camera observation data set of Daman Superstation-2021). *National Tibetan Plateau Data Center*. <https://doi.org/10.11888/Terre.tpd.272624> (刘绍民, 屈永华, 车涛, 徐自为, 谭俊磊, 任志国, 李新). 2022a. 祁连山综合观测网: 黑河流域地表过程综合观测网(大满超级站物候相机观测数据集-2021). 国家青藏高原科学数据中心. <https://doi.org/10.11888/Terre.tpd.272624>
- Liu S M, Qu Y H, Che T, Xu Z W, Zhang Y and Li X. 2022b. Qilian Mountains integrated observatory network: dataset of Heihe integrated observatory network (phenology camera observation data set of A'rou Superstation-2021). *National Tibetan Plateau Data Center*. <https://doi.org/10.11888/Terre.tpd.272626> (刘绍民, 屈永华, 车涛, 徐自为, 张阳, 李新). 2022b. 祁连山综合观测网: 黑河流域地表过程综合观测网(阿柔超级站物候相机观测数据集-2021). 国家青藏高原科学数据中心. <https://doi.org/10.11888/Terre.tpd.272626>
- Liu Y, Hill M J, Zhang X Y, Wang Z S, Richardson A D, Hufkens K, Filippa G, Baldocchi D D, Ma S Y, Verfaillie J and Schaaf C B. 2017. Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and PhenoCams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237-238: 311-325 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.02.026]
- Ma X L, Huete A, Tran N N, Bi J, Gao S C and Zeng Y L. 2020. Sun-angle effects on remote-sensing phenology observed and modelled using Himawari-8. *Remote Sensing*, 12(8): 1339 [DOI: 10.3390/rs12081339]
- Menzel A, Helm R and Zang C. 2015. Patterns of late spring frost leaf damage and recovery in a European beech (*Fagus sylvatica* L.)

- stand in south-eastern Germany based on repeated digital photographs. *Frontiers in Plant Science*, 6: 110 [DOI: 10.3389/fpls.2015.00110]
- Meroni M, Verstraete M M, Rembold F, Urbano F and Kayitakire F. 2014. A phenology-based method to derive biomass production anomalies for food security monitoring in the Horn of Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 35(7): 2472-2492 [DOI: 10.1080/01431161.2014.883090]
- 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]
- Mou M J. 2012. Effects of Remote Sensing Methods for Retrieving Vegetation Phenology on the Monitoring of Vegetation Phenology Shifts. Beijing: Beijing Normal University (牟敏杰. 2012. 植被物候遥感识别方法对植被物候变化监测的影响. 北京: 北京师范大学)
- 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]
- 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]
- Pan Z K, Huang J F, Zhou Q B, Wang L M, Cheng Y X, Zhang H K, Blackburn G A, Yan J and Liu J H. 2015. Mapping crop phenology using NDVI time-series derived from HJ-1 A/B data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34: 188-197 [DOI: 10.1016/j.jag.2014.08.011]
- 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. 2017. 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]
- Petach A R, Toomey M, Aubrecht D M and Richardson A D. 2014. Monitoring vegetation phenology using an infrared-enabled security camera. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196: 143-151 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.05.008]
- Richardson A D, Braswell B H, Hollinger D Y, Jenkins J P and Ollinger S V. 2009. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecological Applications: Ecological Society of America*, 19(6): 1417-1428 [DOI: 10.1890/08-2022.1]
- Seyednasrollah B, Young A M, Hufkens K, Milliman T, Friedl M A, Frolking S and Richardson A D. 2019. Tracking vegetation phenology across diverse biomes using Version 2.0 of the PhenoCam Dataset. *Scientific Data*, 6(1): 222 [DOI: 10.1038/s41597-019-0229-9]
- Shuai Y M, Yang J, Wu H, Shao Y C, Xu X C, Liu Y M, Liu T and Liang J. 2021. Variation of multi-angle reflectance collected by UAV over quadrats of paddy-field canopy. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(2): 342-352 (帅艳民, 杨健, 吴昊, 邵聪颖, 徐辛超, 刘明岳, 刘涛, 梁继. 2021. 基于无人机观测的水稻冠层样方多角度反射特点分析. 遥感技术与应用, 36(2): 342-352) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.2.0342]
- Sonnentag O, Hufkens K, Teshera-Sterne C, Young A M, Friedl M, Braswell B H, Milliman T, O'keefe J and Richardson A D. 2012. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152: 159-177 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.09.009]
- Thapa S, Garcia Millan V E and Eklundh L. 2021. Assessing forest phenology: A multi-scale comparison of near-surface (UAV, spectral reflectance sensor, PhenoCam) and satellite (MODIS, Sentinel-2) remote sensing. *Remote Sensing*, 13(8): 1597 [DOI: 10.3390/RS13081597]
- 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, Årdö J and Eklundh L. 2021. 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]
- Vrieling A, Meroni M, Darvishzadeh R, Skidmore A K, Wang T J, Zurita-Milla R, Oosterbeek K, O'connor B and Paganini M. 2018. Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sensing of Environment*, 215: 517-529 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.014]
- 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 (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) [DOI: 10.11834/jrs.20211601]
- Wang Q. 2016. Effect of Solar Radiation and Observation Angle on Canopy Reflectance Spectra for Winter Wheat. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (王迁. 2016. 太阳辐射与观测角度对冬小麦冠层反射光谱的影响. 南京: 南京信息工程大学) [DOI: 10.7666/d.Y3169815]
- White K, Pontius J and Schaberg P. 2014. Remote sensing of spring phenology in northeastern forests: a comparison of methods, field metrics and sources of uncertainty. *Remote Sensing of Environment*, 148: 97-107 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.017]
- White M A, Thornton P E and Running S W. 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2): 217-234 [DOI: 10.1029/97GB00330]
- Wingate L, Ogée J, Cremonese E, Filippa G, Mizunuma T, Migliavaca

- ca 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]
- 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 (in Chinese)*, 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]
- Xu X J, Tang Y, Qu Y L, Zhou Z S and Hu J G. 2021. Global vegetation photosynthetic phenology products based on MODIS vegetation greenness and temperature: modeling and evaluation. *Remote Sensing*, 13(24): 5080 [DOI: 10.3390/rs13245080]
- Yang A X, Zhong B, Wu S L and Liu Q H. 2017. Radiometric cross-calibration of GF-4 in multispectral bands. *Remote Sensing*, 9(3): 232 [DOI: 10.3390/rs9030232]
- 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 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, 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]
- Zhao J J, Wang Y Q, Hashimoto H, Melton F S, Hiatt S H, Zhang H Y and Nemani R R. 2013. The variation of land surface phenology from 1982 to 2006 along the Appalachian Trail. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(4): 2087-2095 [DOI: 10.1109/tgrs.2012.2217149]
- Zheng J Y, Ge Q S and Zhao H X. 2003. Changes of plant phenological period and its response to climate change for the last 40 years in China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 24(1): 28-32 (郑景云, 葛全胜, 赵会霞. 2003. 近40年中国植物物候对气候变化的响应研究. *中国农业气象*, 24(1): 28-32) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2003.01.009]
- 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方法比较研究. *地理科学进展*, 37(8): 1031-1044) [DOI: 10.18306/dlkxjz]
- Zhu K Z, Wan M W. 1980. *Phenology*. Beijing: Science Press. (竺可桢, 宛敏渭. 1980. *物候学*. 北京: 科学出版社)

Comparison of vertical and inclined camera observations on the validation results of remote sensing phenological parameters

XU Lina^{1,2}, QU Yonghua^{1,2}, SUN Chenxi³, WAN Huawei³, ASIYA Manlike⁴, LIU Shaomin⁵

1.State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing 10087, China;

2.Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3.Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 1000942, China;

4.Grassland Research Institute, Xinjiang Academy of Animal Husbandry Sciences Tianshan North Slope Grassland Ecological Environment Field Positioning Observation and Research Station, Wulumuqi 830057, China;

5.State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: In the fields of agricultural production management and climate change research, monitoring large-scale plant phenology with satellite-based remote sensing is crucial to reveal the interaction of biology and nature environment. During validation on remotely sensed phenology information, near-surface digital cameras are often employed as main data sources. However, more efforts were focused on the scale difference between ground and remotely sensed data and rarely on the difference of sensors viewing zenith, i.e., the satellites mainly adopted the near-nadir observation while cameras were mostly inclined in arrangement. Vertical (PhotoNet) and inclined (PhenoCam) camera observations were acquired at the similar latitude for the same vegetation type, and then these observations were compared with phenological parameters extracted from Sentinel-2 data to assess systematically the effects of camera observation angles on the results of satellite phenological verification. For 16 locations, we compared a Greenness Chromatic Coordinate (GCC) series derived from digital

cameras and Sentinel-2. A double hyperbolic tangent model was fitted for each series. The threshold method was applied to the annual complete modeled data, and the curvature extremum method was used for incomplete data to estimate the onset of greenup, the maturity of the green canopy, the peak of season, the end of greenness, and the dormancy of the green vegetation (OG/MG/PS90/EG/DG). Results showed that the viewing zenith of cameras is one of the uncertain sources to validate phenology information from satellite imagery. In most cases, the vertically observed camera showed improved agreement with the phenological parameters extracted by the satellite-based method, with an average bias of 9 days, while a larger bias of 19 days was observed for inclined camera observation. Therefore, the two camera observation methods result in the verification deviations of up to 10 days on average. However, the deviations might be vegetation type and growth stage dependently. The bias of vertical observation was remarkably higher than that of inclined observation during the end to dormant period for maize. The different results of the vertical and inclined cameras on the similar vegetation can be partly explained from the directional reflection characteristics of vegetation canopy and the difference of target components (e.g., different fractions of soil and vegetation, photosynthetic and nonphotosynthetic components of vegetation) within the camera field of view. Results demonstrate that the viewing zenith angle of the near-surface cameras is an important factor in the validation of satellite phenological parameters. In addition, the uncertainty of verification results caused by the phenological period extraction method, illumination, and satellite observation geometry is limited, which is not the main factor affecting the verification of satellite phenology parameters. As a result, the verification error introduced by the angle effect should be fully considered while near surface cameras are deployed in the field to provide more reliable verification data for satellite remote sensing monitoring.

Key words: remote sensing, digital camera, observation angle, remotely sensed phenology, near-surface phenology, vegetation greenness

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB3907401); National Natural Science Foundation of China (No. 42271359)