

北半球植被生长季风云卫星物候参数逐年数据集 (2011–2019) 研发

王 宁^{1,2}, 吴 伶², 焦全军^{1*}, 黄文江^{1,3}, 张 兵^{1,3}

1. 中国科学院空天信息创新研究院遥感与数字地球全国重点实验室, 北京 100094;
2. 中国地质大学(北京)人工智能学院, 北京 100083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要: 植被生长季作为陆地生态系统响应气候变化的敏感指示器, 其关键参数的准确监测对揭示植被-环境相互作用机制、评估碳汇功能及理解全球气候变化生态效应具有重要意义。本数据集基于长时序的 FY-3B 卫星 NDVI 数据, 采用双基线动态阈值法获取北半球 2011–2019 年植被生长季物候参数信息, 包括生长季的起始日、终止日和长度。数据集内容包括: (1) 2011–2019 年逐年的植被生长季物候参数数据; (2) 多年平均的生长季物候参数数据。数据集的空间分辨率为 0.05°。数据集存储为.tif 格式, 由 30 个数据文件组成, 数据量为 652 MB (压缩为 1 个文件, 102 MB)。

关键词: 北半球; 植被生长季; 风云卫星; 动态阈值法

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2026.04.06>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.04.06>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2025.12.05.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.05.V1>.

1 前言

植被物候是指植被在生长过程中受气候与周围环境(如温度、降水、土壤、人类活动等)综合影响而产生的以年为周期的自然现象, 具体表现为植被从休眠、生长和衰老到再次休眠的周期性循环过程^[1]。作为陆地生态系统对全球气候变化响应的敏感指示器, 植被生长季物候不仅直接反映植被与环境的相互作用机制, 也是调控生态系统碳循环、水循环及能量平衡的关键生物学指标^[2]。因此, 准确监测植被生长季物候参数(如生长季开始/结束日期), 对于评估生态系统碳汇功能、揭示气候变化对生物圈的影响路径具有重要意义^[3]。

收稿日期: 2025-12-26; 修订日期: 2026-06-27; 出版日期: 2026-08-25

基金项目: 中国气象局风云卫星应用先行计划(FY-APP); 国家自然科学基金(42071330)

*通讯作者: 焦全军, 中国科学院空天信息创新研究院, jiaoqj@aircas.ac.cn

数据引用方式: [1] 王宁, 吴伶, 焦全军等. 北半球植被生长季风云卫星物候参数逐年数据集(2011–2019)研发[J]. 全球变化数据学报, 2026, 10(4): 442–451. <https://doi.org/10.3974/geodp.2026.04.06>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2026.04.06>.

[2] 王宁, 吴伶, 焦全军等. 北半球风云卫星植被生长季物候参数逐年数据集(2011–2019)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2025. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.12.05.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.05.V1>.

遥感技术凭借其持续、宏观的植被光谱监测能力,已成为实现大范围、长时序植被物候反演的关键手段。在全球与半球尺度研究中,常用的数据源包括 SPOT-VGT 传感器^[4]、Terra/Aqua 中分辨率成像光谱仪(MODIS)^[5]和 NOAA 先进甚高分辨率辐射计(AVHRR)^[6]。而在区域与局部地区尺度研究中,Landsat、Sentinel-2 及高时空融合数据的应用更为广泛。目前,基于归一化植被指数(NDVI)等生物物理特征的物候提取算法,已普遍用于获取植被生长季开始、结束日期等物候参数。

风云三号系列作为中国第二代极轨气象卫星,搭载可见光红外扫描辐射计(VIRR),能够获取全球、全天候的遥感观测数据。其中,风云三号 B 星(FY-3B)作为继承首星全部核心载荷,并进行优化升级的业务卫星,自 2011 年业务化运行以来,已在海面温度反演^[7]、土壤水分监测^[8]、积雪识别^[9]等气象与海洋领域取得显著成效。然而,该卫星在陆地生态系统,尤其是在植被物候参数提取方面的潜力尚未得到充分验证与挖掘,影响了国产卫星数据在生态遥感中的深入应用。

总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)作为全球碳循环中最大的 CO₂ 通量,与植被光合作用过程紧密关联,近年来已成为验证遥感反演物候结果的重要依据。基于 2011–2019 年 FY-3B 卫星遥感数据,结合 Hampel 滤波与 Savitzky-Golay 滤波重建植被指数时序数据,作者提出一种改进的双基线动态阈值算法,系统提取北半球植被关键物候参数,并利用 FLUXNET GPP 站点观测数据对提取的北半球植被物候参数进行了精度验证。研究旨在验证风云卫星在植被物候监测中的潜力,并通过与 MODIS 物候产品(MCD12Q2)^[10]的对比分析,揭示 2011–2019 年北半球植被生长季物候参数的时空格局与年际变化特征,以为风云卫星系列在陆地生态系统动态监测中的应用提供科学依据。

2 数据集元数据简介

表 1 列出了《北半球风云卫星植被生长季物候参数逐年数据集(2011–2019)》^[11]的基本信息,包括数据名称、作者、地理区域、时间跨度、时间与空间分辨率、数据集结构、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等内容。

3 数据研发方法

本数据集主要基于 FY-3B VIRR NDVI 产品产生^[13],FY-3B NDVI 数据产品的空间分辨率是 0.05°,时间分辨率为年。数据获取自国家气象中心风云卫星遥感数据服务网¹,时间范围为 2011–2019 年。

3.1 算法原理

(1) Hampel 滤波

对 FY-3B NDVI 数据首先使用 Hampel 滤波方法^[14]替换异常值。Hampel 滤波的核心思想是利用中位数和中位数绝对偏差(Median Absolute Deviation, MAD)对每个数据点进行局部异常判断,并对识别出的异常值进行替换,从而在保留信号主体特征的同时有效抑制离群点的影响。

¹ 国家卫星气象中心. 风云卫星遥感数据服务网. <https://satellite.nsmc.org.cn/DataPortal/cn/home/index.html>.

表 1 《北半球风云卫星植被生长季物候参数逐年数据集（2011–2019）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	北半球风云卫星植被生长季物候参数逐年数据集（2011–2019）
数据集短名	FY_GS_2011-2019
作者信息	王宁，中国科学院空天信息创新研究院，中国地质大学（北京），wangning981229@163.com 吴伶，中国地质大学（北京），wuling@cugb.edu.cn 焦全军，中国科学院空天信息创新研究院，jiaoqj@aircas.ac.cn 黄文江，中国科学院空天信息创新研究院，中国科学院大学，huangwj@aircas.ac.cn 张兵，中国科学院空天信息创新研究院，中国科学院大学，zhangbing@aircas.ac.cn
地理区域	0°N–90°N，–180°–180°
数据年代	2011–2019
时间分辨率	年
空间分辨率	0.05°×0.05°
数据格式	.tif
数据量	652 MB
数据集组成	2011–2019 年逐年的植被生长季物候参数数据；多年平均的生长季物候参数数据
基金项目	中国气象局风云卫星应用先行计划（FY-APP）；国家自然科学基金（42071330）
数据计算环境	Matlab 2021b
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[12]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC, OARL

（2）Savitzky-Golay 滤波

本数据集选择 Savitzky-Golay（S-G）滤波方法^[15]来拟合 NDVI 时间序列数据。S-G 滤波法能最大限度地保留曲线地原始形态，避免过度平滑。S-G 滤波计算方法如下：

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+1}}{2m+1} \tag{1}$$

式中， Y 表示 NDVI 的初始值， Y_j^* 是平滑后的 NDVI， C_i 是滤波系数， Y_{j+1} 是滑动窗口内第 j 个影像的 NDVI 值， $2m+1$ 是滑动窗口的宽度。 i 代表滑动窗口内的相对位置， m 为半窗口宽度。

（3）双基线动态阈值法

物候参数提取常采用动态阈值法^[16]，动态阈值法在计算植被指数阈值时使用全年一个最低值来识别所有物候参数，但其忽略了在实际情况中，由于植被指数最低值对应时间段

的残余绿色植被生长状况、关键温度降水、积雪覆盖、土壤湿度等因素存在年度差异, 植被生长季前/后(春季/秋季)的背景信号并不相同^[17]。因此, 本研究提出一种改进的双基线动态阈值法, 根据植被返青期和枯黄期 NDVI 不同的时序变化, 对生长季开始和结束分别基于各自的最低值统计振幅计算阈值。即在植被生长季开始阶段, 选择植被返青期的 NDVI 最低值来统计振幅计算生长季开始日期(start of the growing season, SOS); 在植被生长季结束阶段, 选择植被枯黄期的 NDVI 最低值统计来统计振幅计算生长季结束日期(end of the growing season, EOS), 两者相差为植被生长季长度(length of the growing season, LOS)。研究中将 NDVI 相对阈值设置为 40%, 计算公式如下:

$$NDVI_{ratio} = \frac{(NDVI_{t1} - NDVI_{S-Min})}{(NDVI_{Max} - NDVI_{S-Min})} \quad (2)$$

$$NDVI_{ratio} = \frac{(NDVI_{t2} - NDVI_{E-Min})}{(NDVI_{Max} - NDVI_{E-Min})} \quad (3)$$

式中, $NDVI_{ratio}$ 表示阈值比例, $NDVI_{t1}/NDVI_{t2}$ 表示返青期至生长顶峰 $t1$ /生长顶峰至枯黄期 $t2$ 时间的 NDVI 值, $NDVI_{Max}$ 表示一年生长顶峰 NDVI 的最大值, $NDVI_{S-Min}/NDVI_{E-Min}$ 表示 NDVI 在一年中上升/下降过程中的最小值, $NDVI_{Max}$ 与 $NDVI_{S-Min}/NDVI_{E-Min}$ 之差表示植被生长/衰落阶段 NDVI 的变化振幅, t 为儒略日(d)。

(4) 趋势分析方法

采用 Theil-Sen (TS) 和 Mann-Kendall (MK) 检验两种非参数方法^[18]研究北半球植被生长季物候参数的时空变化趋势。TS 检验用于分析时间序列数据的变化趋势, MK 检验评估时间序列中发生变化的显著性。两种方法具有良好的抗噪性, 不需要数据遵循特定的分布。

3.2 技术路线

数据集研发过程包括植被指数时间序列重建、植被生长季物候参数提取及其时空趋势分析 3 个环节, 如图 1 所示。

首先对原始数据做预处理, 其中 NDVI 值小于 0.2 的像素被移除, 这类低值区域通常表征为非植被区域^[19]。为了抑制噪声对 NDVI 时序数据的影响, 对数据进行插补和重建。利用 Hampel 滤波初步去噪, 识别异常值并用窗口中位数替换, 从而在保留信号主体特征的同时有效抑制离群点的影响。然后利用 Savitzky-Golay 滤波对插补后的时序数据做平滑处理, 并基于双基线动态阈值法提取植被物候参数, 将阈值设为最大和最小 NDVI 差值的 40% 动态值。最后, 将本数据集获取的物候信息与 MCD12Q2 物候产品比较, 分析北半球 2011–2019 年植被生长季物候参数的时空变化趋势。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

《北半球风云卫星植被生长季物候参数逐年数据集(2011–2019)》包括北半球 2011–2019 年植被生长季物候参数信息, 含生长季的起始日、终止日和日数。具体为逐年及

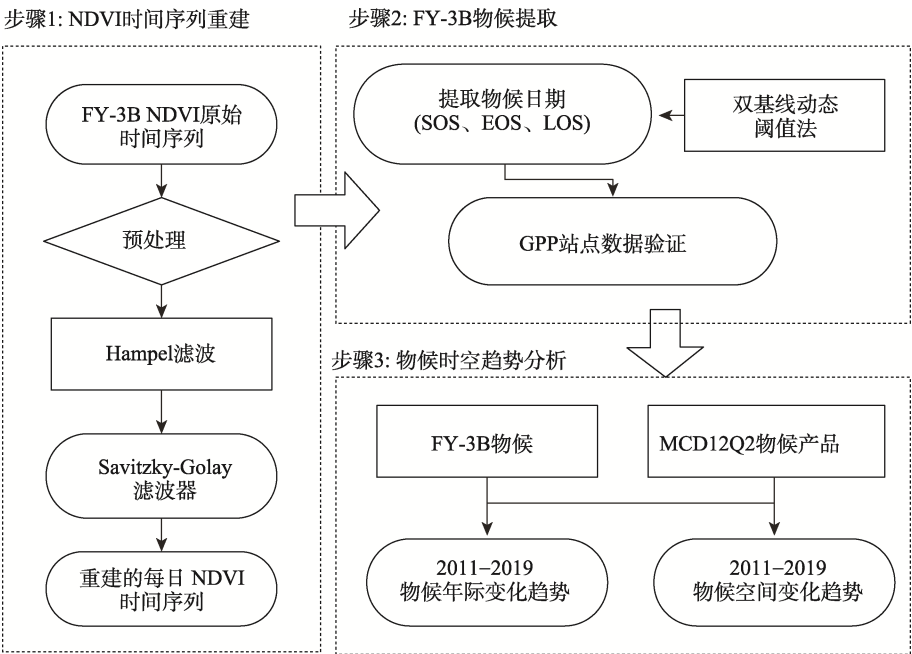


图 1 数据集研发流程图

多年平均 SOS、EOS 和 LOS 在内的 30 个数据文件,存储为.tif 格式,空间分辨率为 0.05° (表 2)。

表 2 数据集组成文件简表

组成文件	数据描述	文件个数	数据量
FY_SOSyyyy.tif	植被生长季开始	9	224 MB
FY_EOSyyyy.tif	植被生长季结束	9	224 MB
FY_LOSyyyy.tif	植被生长季长度	9	42.9 MB
FY_SOSMean.tif	植被生长季开始均值	1	53.4 MB
FY_EOSMean.tif	植被生长季结束均值	1	53.4 MB
FY_LOSMean.tif	植被生长季长度均值	1	53.4 MB

本数据集中植被生长季开始日期、植被生长季结束日期和植被生长季长度 3 种数据分别以 FY_SOSyyyy.tif、FY_EOSyyyy.tif、FY_LOSyyyy.tif 格式命名,植被生长季开始日期均值、植被生长季结束日期均值和植被生长季长度均值三种数据分别命名为 FY_SOSMean.tif、FY_EOSMean.tif、FY_LOSMean.tif。其中, FY 代表风云卫星植被生长季物候数据集; yyyy 指代年份。

4.2 数据结果分析

作者利用双基线动态阈值法从 FY-3B NDVI 时序数据中提取得到 2011–2019 年北半球逐年植被生长季物候参数数据集。基于该逐年结果,进一步计算 9 年平均植被生长季物候空间分布(图 2),发现北半球 2011–2019 年植被生长季开始时间主要集中在 105–125 d,

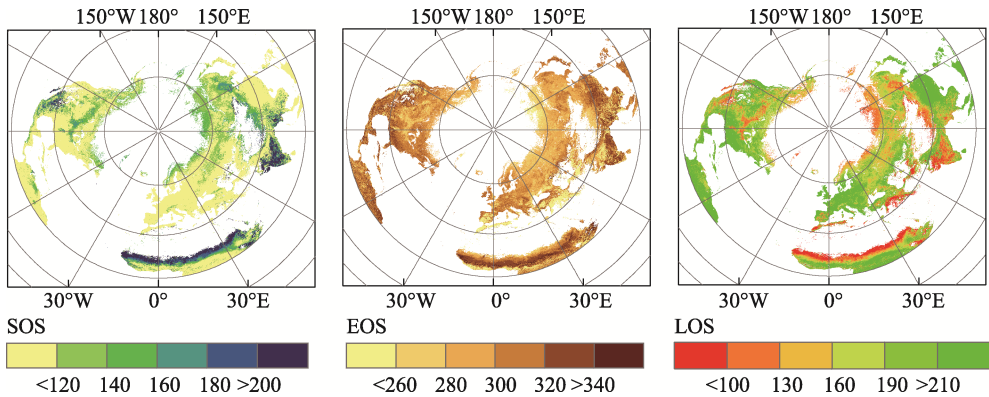


图2 2011–2019年北半球植被生长季物候参数均值图

植被生长季结束时间主要集中在 265–305 d, 整体在空间上呈现显著的纬度地带性规律与海陆分异特征。随着纬度的升高, 植被生长季开始时间逐渐推迟, 生长季结束时间则显著提前, 这一变化导致高纬度地区的生长季窗口更为紧凑, 整体长度自低纬度向高纬度逐渐缩短。该空间格局表明, 高纬度地区植被的生长季长度受温度限制更为显著。在海陆对比方面, 相同纬度带的植被物候特征因气候类型不同呈现显著差异。受海洋性气候调节的西欧地区, 由于冬季温度较高、春季回暖较早, 植被生长季开始时间普遍早于大陆性气候主导的东亚内陆地区, 体现了海洋对热力条件的缓冲作用; 大陆西岸海洋性气候区秋季降温缓慢, 生长季结束时间明显晚于同纬度大陆东岸地区。东西岸之间生长季长度的差异, 进一步凸显了海陆热力过程对植被物候年周期动态的重要影响。

4.3 数据结果验证

作者利用 GPP (总初级生产力) 的光合作用活性, 对卫星遥感数据反演的植被生长季物候期进行评估与验证。采用的 GPP 数据源自 FLUXNET 2015 Tier 1 数据集², 选取其中北半球地区通量塔站点的涡动协方差 (Eddy Covariance, EC) 观测数据。该数据集通过 EC 技术长期监测生态系统碳通量, 如净生态系统 CO₂ 交换 (Net Ecosystem Exchange, NEE), 并基于日间 (Daytime partitioning method, DT) 分割方法和可变 USTAR 阈值 (Variable Ustar Threshold, VUT) 筛选方法, 从填补后的 NEE 数据中估算得出日尺度的日间分区 GPP (GPP_DT_VUT_REF)^[20], 时间跨度为 2011–2014 年。作者将不同方法提取的 FY 物候与 GPP 站点的地面观测结果进行对比 (图 3), 结果表明: 双基线动态阈值法提取的生长季物候指标 (尤其是 EOS 和 LOS) 与传统动态阈值法相比, 精度明显提升, 具体表现为 R^2 有所提高, RMSE 和 MAE 均明显下降。由此, 基于双基线动态阈值法提取的北半球植被物候与地面 GPP 物候具有更好的一致性。

此外, 在植被物候遥感研究中, 利用多源遥感数据进行交叉对比验证是评估数据集可靠性、理解趋势不确定性的重要途径。为评估本数据集 (FY) 在揭示长期植被物候趋势方面的性能, 本研究将其与广泛应用的 MCD12Q2 物候产品进行对比分析。基于趋势分析法的比较结果显示 (图 4), 两个数据集提取的北半球 2011–2019 年植被

² <https://fluxnet.org/data/fluxnet2015-dataset/>.

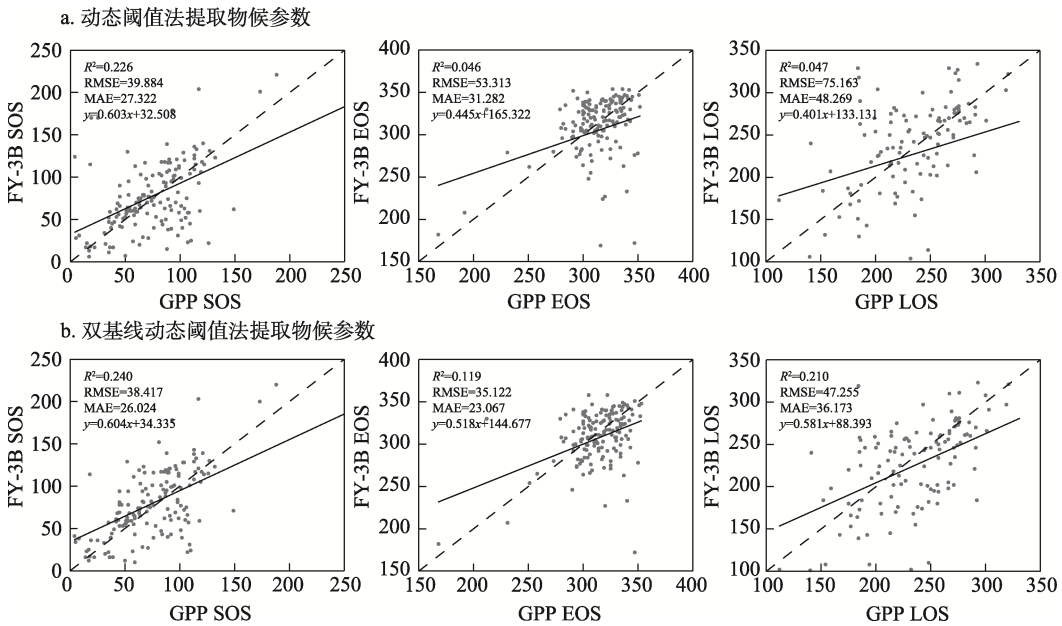


图 3 基于 GPP 物候数据的数据集精度验证图

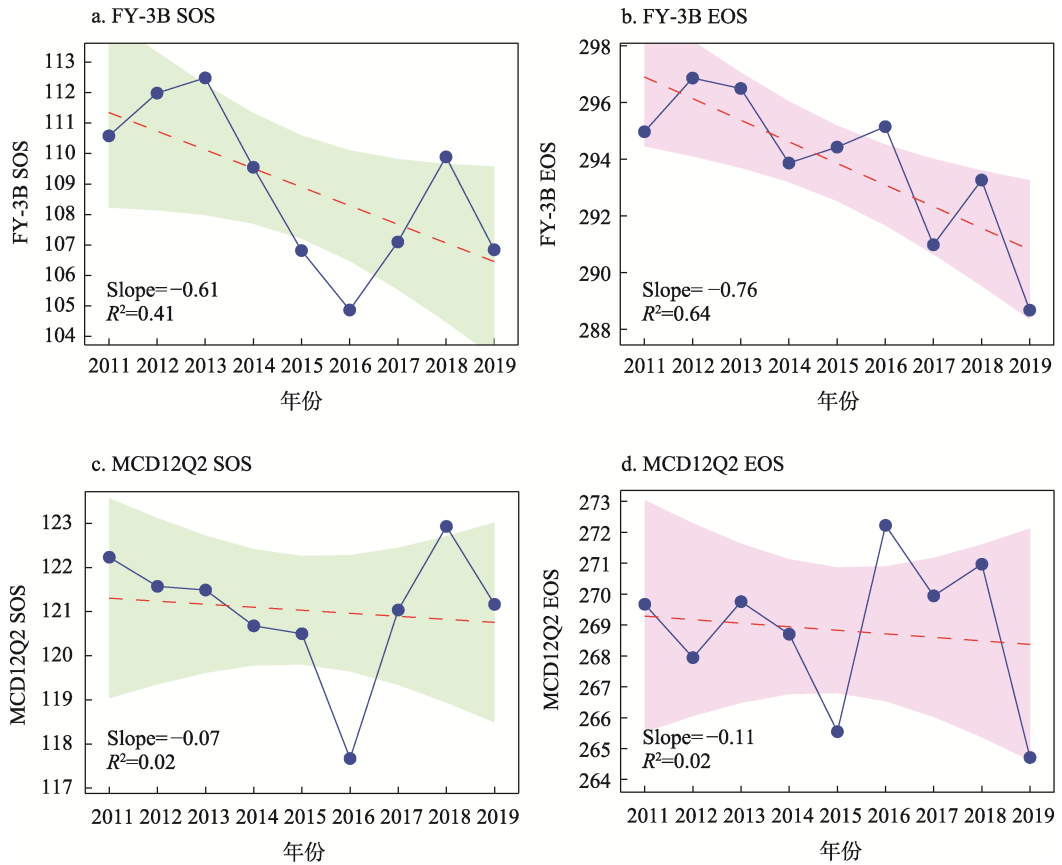


图 4 FY_GS 与 MCD12Q2 生长季物候参数的年际变化趋势对比分析图
(阴影区域表示 95% 置信区间)

生长季物候参数整体都随时间推移呈提前趋势，其时序变化规律与江博涵^[21]等的研究结果相同。

从北半球物候变化趋势的空间分布看（图 5），FY 与 MCD12Q2 两种数据集在大部分中高纬度地区提取的植被物候的年际变化趋势整体较为平缓；在美国中西部、欧洲地中海、印度等中纬度地区，以及非洲赤道附近和南美洲北部等低纬度地区，两种数据所提取的物候参数均表现出较显著的变化特征，这与所在地区植被对降水依赖较强、同时降水本身年际波动剧烈有关。总体而言，FY 卫星物候数据集与 MCD12Q2 产品在生长季物候参数的变化趋势上呈现出较为一致的规律，其空间分异格局反映出不同区域植被物候对气候驱动因子的响应机制存在差异。

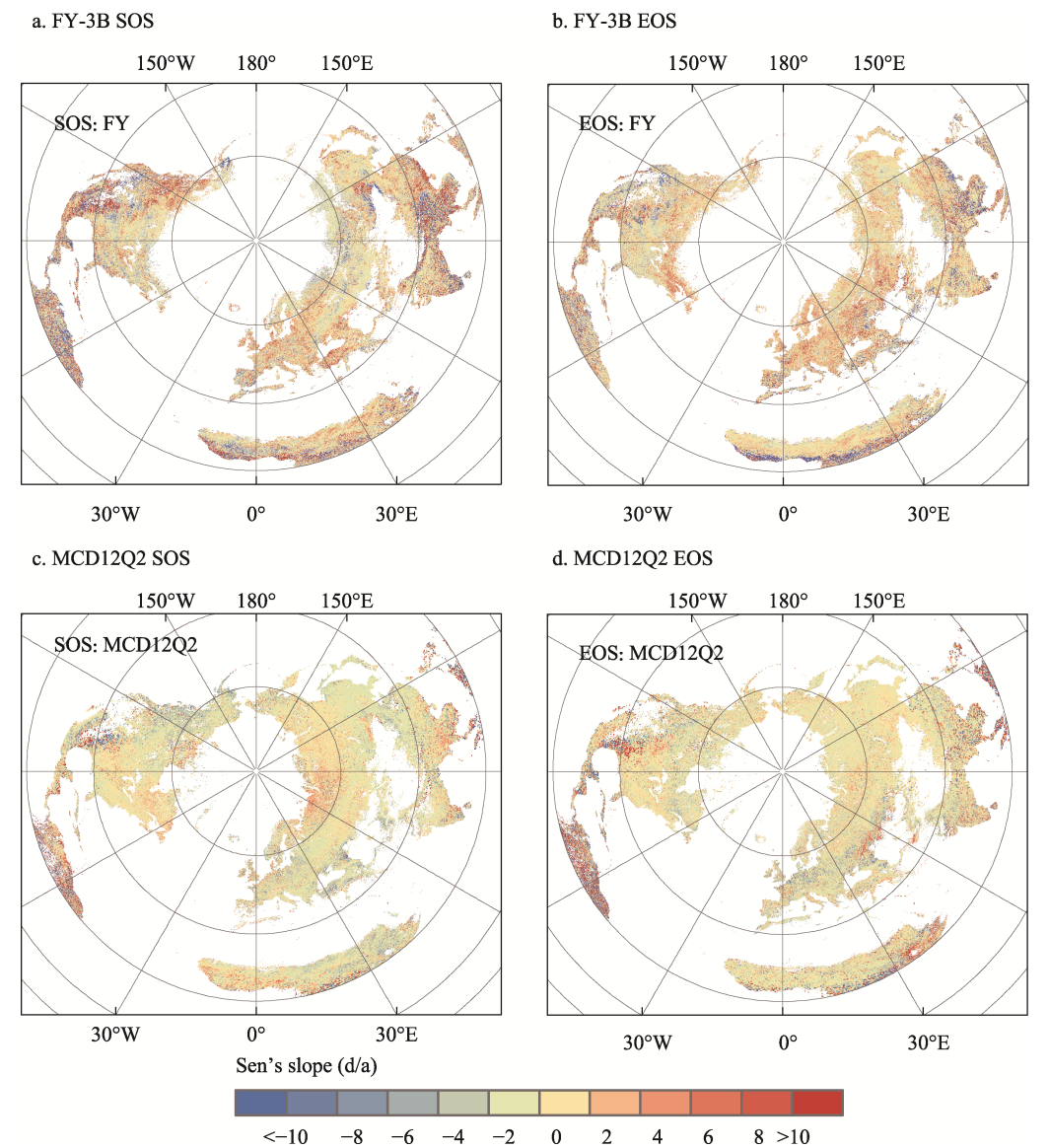


图 5 FY_GS 与 MCD12Q2 生长季物候参数的空间变化趋势对比分析图

5 讨论和总结

基于 FY-3B 卫星 NDVI 时序数据与改进的双基线动态阈值法, 作者研发了北半球 2011–2019 年植被生长季物候参数数据集。数据结果表明, 与传统的动态阈值法相比, 双基线动态阈值法提取的风云卫星主要生长季物候参数具有更高精度。本数据集验证了风云卫星在植被物候遥感监测研究领域的应用潜力, 揭示了北半球植被物候格局及其气候驱动机制。然而, 研究过程中也存在一些不足: 首先, 受云提取等因素影响, FY 卫星数据在北极圈附近及亚热带沿海部分区域缺失。其次, 在多熟制农业区(如华北平原冬小麦-夏玉米轮作区), 针对自然植被生长季特征设计的物候提取算法对复杂农田物候信号的解析仍存在不确定性, 未来可结合时序插值与作物生育期专项监测方法, 进一步提升数据集的完整性与区域适用性。

作者分工: 焦全军对数据集算法、产品研发和论文做了总体设计; 吴伶进行了技术方案优化和论文修改; 黄文江指导了产品应用分析; 张兵规划了产品研究方向; 王宁进行算法实现、产品生产并撰写了数据论文。

致谢: 感谢本研究使用的风云卫星数据提供方国家卫星气象中心及国家重点研发计划项目课题(2018YFB0504900, 2018YFB0504905)提供的处理技术支持。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Wang, Y. P., Liu, Q. Y., Li, R., *et al.* Remote sensing of vegetation phenology in the northern hemisphere from multi-channel passive microwave measurements of Chinese FengYun-3D satellite [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2025, 330: 114997.
- [2] Berra, E. F., Gaulton, R. Remote sensing of temperate and boreal forest phenology: a review of progress, challenges and opportunities in the intercomparison of in-situ and satellite phenological metrics [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 480: 118663.
- [3] Xie, Z. Y., Zhu, W. Q., He, B. K., *et al.* A background-free phenology index for improved monitoring of vegetation phenology [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 315: 108826.
- [4] 侯学会, 牛铮, 高帅等. 基于 SPOT-VGT NDVI 时间序列的农牧交错带植被物候监测[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 142–150.
- [5] Xu, W. F., Ma, H. Q., Wu, D. H., *et al.* Assessment of the daily cloud-free MODIS snow-cover product for monitoring the snow-cover phenology over the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 585.
- [6] Shao, Q., Huang, C., Xiao, Y. J., *et al.* Selecting of global phenological field observations for validating coarse AVHRR-derived forest phenology products based on spatial heterogeneity and temporal consistency [J]. *Ecological Informatics*, 2025: 103216.
- [7] Zhang, M., Chen, L., Xu, N., *et al.* Influences of earth incidence angle on FY-3/MWRI SST retrieval and evaluation of reprocessed SST [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2024, 30(3): 230–240.
- [8] 张鹏, 于红博, 张巧凤等. FY-3B/3C 和 AMSR2 土壤含水量产品在锡林郭勒草原地区的适用性评价[J]. *中国农业气象*, 2023, 44(3): 238–251.
- [9] 周舟, 朱灵龙, 张永宏等. 基于 FY-3B 被动微波数据的青藏高原降尺度机器学习雪深反演[J]. *冰川*

- 冻土, 2024, 46(2): 539–554.
- [10] D’Odorico, P., Gonsamo, A., Gough, C. M., *et al.* The match and mismatch between photosynthesis and land surface phenology of deciduous forests [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214: 25–38.
- [11] 王宁, 吴伶, 焦全军等. 北半球风云卫星植被生长季物候参数逐年数据集(2011–2019)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2025. <https://doi.org/10.3974/geodb.2025.12.05.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2025.12.05.V1>.
- [12] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [13] Xian, D., Zhang, P., Gao, L., *et al.* Fengyun meteorological satellite products for earth system science applications [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(8): 1267–1284.
- [14] Pearson, R. K., Neuvo, Y., Astola, J., *et al.* Generalized hamper filters [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016, 2016(1): 87.
- [15] Li, S., Xu, L., Jing, Y. H., *et al.* High-quality vegetation index product generation: a review of NDVI time series reconstruction techniques [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 105: 102640.
- [16] White, M. A., Thornton, P. E., Running, S. W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(2): 217–234.
- [17] Garrity, S. R., Bohrer, G., Maurer, K. D., *et al.* A comparison of multiple phenology data sources for estimating seasonal transitions in deciduous forest carbon exchange [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1741–1752.
- [18] Zhang, J., Zhao, J. J., Wang, Y. Q., *et al.* Comparison of land surface phenology in the Northern Hemisphere based on AVHRR GIMMS3g and MODIS datasets [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 169: 1–16.
- [19] 邵亚婷, 王卷乐. 蒙古国植被物候数据集(2001–2019)研发[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(2): 241–248. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.10>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.10>.
- [20] Zhou, L., Zhou, W., Chen, J. J., *et al.* Land surface phenology detections from multi-source remote sensing indices capturing canopy photosynthesis phenology across major land cover types in the Northern Hemisphere [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108579.
- [21] Jiang, B. H., Chen, W., Chen, S. Y., *et al.* Comparison of the capability and performance of “photosynthesis” and “structure” indices in retrieving vegetation phenology in the Northern Hemisphere [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2025, 62(1): 2473127.