DOI: 10.5846/stxb201901010004

周蕾,迟永刚,刘啸添,戴晓琴,杨风亭.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,2020,40(12):4114-4125. Zhou L, Chi Y G, Liu X T, Dai X Q, Yang F T. Land surface phenology tracked by remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence in subtropical evergreen coniferous forests. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12):4114-4125.

日光诱导叶绿素荧光对亚热带常绿针叶林物候的追踪

周 蕾^{1,2},迟永刚^{1,*},刘啸添³,戴晓琴²,杨风亭²

1浙江师范大学地理与环境科学学院,金华 321004
2 中国科学院地理科学与资源研究所,生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101
3 中国资源卫星应用中心,北京 100830

摘要:植被物候期(春季返青和秋季衰老)是表征生物响应和陆地碳循环的基础信息。由于常绿针叶林冠层绿度的季节变动较弱,遥感提取常绿针叶林的物候信息存在着较大的不确定性,是目前区域物候监测中的难点。利用 MODIS 植被指数(归一化植 被指数 NDVI 和增强型植被指数 EVI)、GOME-2 日光诱导叶绿素荧光(SIF)和通量数据(总初级生产力 GPP)估算 2007—2011 年亚热带常绿针叶林物候期,用来比较三类遥感指数估算常绿针叶林物候的差异。结果表明:基于表征光合作用物候的通量 GPP 数据估算得到5年内亚热带常绿针叶林生长季开始时间(SOS_{GPP})为第63天,生长季结束时间(EOS_{GPP})为第324天,生长季长度为272天;基于反映植被光合作用特征的 SIF 曲线获得物候信息要滞后 GPP 物候期,其中生长季开始时间滞后 19天,生 长季结束时间滞后 2天;基于传统植被指数 NDVI 和 EVI 的物候期滞后 GPP 物候期的时间要大于 SIF 滞后期,其中植被指数 SOS 滞后 SOS_{GPP}31天,植被指数 EOS 滞后 EOS_{GPP}10—17天。虽然基于3种遥感指数估算的春季和秋季物候都滞后于通量 GPP 的物候期,但是卫星 SIF 的物候信息能够更好地捕捉常绿针叶林的生长阶段。同时,春季温度是影响森林生长季开始时间 的最重要因素;秋季水分和辐射是影响生长季结束时间的关键因素。由此可见,SIF 估算的亚热带常绿针叶林的春季和秋季物 候的滞后时间要短于传统植被指数,能更好地追踪常绿林光合作用的季节性,为深入研究陆地生态系统碳循环及其对气候变化 的响应提供重要的基础。

关键词:日光诱导叶绿素荧光;植被指数;物候;通量;气候变化

Land surface phenology tracked by remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence in subtropical evergreen coniferous forests

ZHOU Lei^{1,2}, CHI Yonggang^{1,*}, LIU Xiaotian³, DAI Xiaoqin², YANG Fengting²

1 College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 China center for Resources Satellite Data And Application, Beijing 100830, China

Abstract: Vegetation phenology, the timing and the length of growing season, is sensitive indicator in response of terrestrial carbon, energy and water cycles to climate change. Understanding the changes of vegetation phenology as well as its response to climate change is of significance for predicting climate changes and global carbon cycle. Vegetation phenology are estimated mainly based on reflectance-calculated vegetation indexs (VIs), such as normalized difference vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index (EVI). However, large uncertainty exists in performance of VIs in land surface phenology due to small changes in seasonal variations of evergreen confers. The methodology of SIF to estimate land

收稿日期:2019-01-01; 网络出版日期:2020-04-09

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0504000);国家自然科学基金项目(41871084,31400393);浙江省自然科学基金(LY19C030004)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chiyongg@ mails.ucas.ac.cn

surface phenology has frequently been applied in deciduous forest. However, monitoring the phenology using SIF has not been sufficiently investigated in evergreen coniferous forest. In this study, we assessed the ability of reflectance-based vegetation indices (NDVI, EVI) and SIF datasets in monitoring the gross primary production (GPP)-based phenology in a subtropical evergreen coniferous forest. The vegetation indices were obtained from MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) products and the SIF is retrieved from Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) from 2007 to 2011. Our results indicated that the GPP-based phenology, such as the start of growing season (SOS), the end of growing season (EOS), and the length of growing season (LOS) of subtropical evergreen conifers were day of year (DOY) 63, DOY 324 and DOY 272. The phenological metrics derived from the SIF were later than those derived from eddy covariance GPP, and the time-lag SOS_{SIF} and EOS_{SIF} were 19 days and 2 days, respectively. The time-lag SOS from NDVI and EVI was about 31 days related to SOS_{CPP} ; meanwhile the time-lag EOS from NDVI and EVI was 10—17 days. The LOS derived from remotely sensed indexes were all shorter than the LOS_{CPP}, and GOME-2 SIF behaved better in capturing the growing stage of evergreen conifers in subtropical region of China. Spring temperature had the highest correlation with SOS, while water condition and solar radiation were determinants of the EOS at Qianyanzhou station. These results suggest that SIF, containing information of light-use efficiency, can accurately monitor the phenology of evergreen conifers and has important implications for biosphere models.

Key Words: sun-induced chlorophyll fluorescence; vegetation index; phenology; flux; climate change

常绿针叶林占全球森林面积的 26.9%^[1],占中国森林面积的 45%^[2],在森林固碳中发挥着重要的作 用^[3]。植被物候是森林对气候变化响应的关键因子,同时是碳水循环变化调节气候的驱动力^[4]。由于植被 光合作用是调节全球碳循环最重要的过程,植被物候表征了光合能力与叶片季节性出现和消亡的紧密联 系^[5]。目前基于多种遥感信息的陆表物候监测(LSP, Land surface phenology)^[6]可以较好地捕捉落叶林物候 期^[7],但是由于常绿针叶林冠层绿度的季节变动较弱,辨识常绿针叶林的季节变动时期仍旧存在巨大的 挑战^[8]。

遥感日光诱导叶绿素荧光(SIF, Sun-induced chlorophyll fluorescence)表现为光合作用更加可靠的替代因 子,用于监测大尺度植被物候^[7,9-10]。传统陆表物候监测主要通过反射率估算的植被指数(VI, Vegetation index),例如归一化植被指数 NDVI(Normalized difference vegetation index)和增强型植被指数 EVI(Enhanced vegetation index)^[11-12],仍旧存在着较大的不确定性,这主要归因于积雪对植被指数信号的影响以及常绿森林 冠层绿度季节变动的捕捉^[9,13-15]。随着遥感技术的飞速发展,卫星 SIF 提供了不同于植被绿度信息的生理功 能的新视角,在植被物候监测方法发挥着重要的优势^[9-10]。叶片叶绿素吸收光能量后有3种途径:光化学淬 灭(PQ, Photochemical quenching)、非光化学淬灭(NPQ, Non-photochemical quenching)以及 SIF^[16]。总初级生 产力 GPP(Gross primary productivity)和 SIF 通常可以用吸收的光合有效辐射和光能利用率或者荧光产量的乘 积来表达^[17-18]。因此, 植被 SIF 与 GPP 存在显著的相关性^[19], 可以从叶片^[20]、冠层^[7,21]和生态系统^[22-24]等多 种尺度上印证,同时覆盖 GOSAT (Greenhouse gases observing satellite)^[22-23]、GOME-2 (Global ozone monitoring experiment-2)^[25]和 OCO-2 (Orbiting carbon observatory 2)^[10,26]等多种卫星数据。SIF-GPP 的相关性理论促进 了基于 SIF 的植被物候监测的研究,并且已经运用在多种植被类型(比如落叶阔叶林和混交林)^[27],但利用 SIF 对常绿针叶林的物候监测还比较少。针叶林吸收的光合有效辐射比率的变异很小,但是却有明显的光能 利用率 LUE(Light-use efficiency)的季节变异^[28]。研究表明从小时尺度到周尺度上,常绿林 SIF 与 GPP 有很 好的相关性^[29]。同时 SIF 能够提供针叶林 LUE 的信息^[8,30],体现了其相比于其他传统遥感指数的优势。荧 光效率的季节波动能够捕捉光保护色素和光合系统 II 效率,进而能够准确追踪光合作用的季节性^[29]。研究 发现在高纬度常绿针叶林, GOME-2 SIF 估算的生长季长度要比 EVI 估算的结果长 6 周^[8]。而在中高纬度地 区(>42°N),常绿针叶林 SIF 估算的物候信息在春季返青期有滞后现象,但能准确追踪秋季衰老^[9]。因此,

SIF 在常绿针叶林物候监测中发挥着重要的作用,但是仍旧需要不同气候区更多的树种来验证 SIF 的植被物 候监测能力。

中国南方地区拥有全世界最大面积的亚热带森林,具有较高的固碳能力,在全球碳循环中起到重要的作用。基于长时间通量观测结果发现东亚季风区(20—40°N)亚热带森林净生态系统生产力(NEP, Net ecosystem productivity)平均为(362±39)gCm⁻²a⁻¹,高于亚洲热带和温带森林的NEP,也高于欧洲-非洲和北美同纬度地区森林的NEP^[31]。常绿针叶林是亚热带森林的重要组成部分,其物候期的变动影响森林固碳的能力。因此,本研究以亚热带常绿针叶林为研究对象,利用MODIS 植被指数和 GOME-2 SIF 数据来估算亚热带常绿针叶林的物候期,比较基于 SIF 和基于反射率观测的植被指数在监测光合作用物候的能力,评价 SIF 在亚热带常绿针叶林物候监测的重要性。

1 材料与方法

1.1 研究区域介绍

本研究位于千烟洲森林通量观测站,隶属于江西省吉安市泰和灌溪镇(26°44′29.1″N,115°03′29.2″E)。 该站微气象观测塔建立于 2002 年 8 月,塔四周的森林覆盖率在 90%以上。试验站现有的林分大多为 1985 年 前后营造的人工针叶林,主要树种为以马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、湿地松(*Pinus elliottii*)等为主的常绿 针叶林,约占土地总面积的 76%。站点下垫面坡度在 2.8—13.5°之间,属于典型亚热带季风气候^[32]。站区年 平均气温 17.9℃,平均年降水量 1542.4 mm,存在明显的干湿季,夏季 7、8 月高温干旱,年蒸发量 1110.3 mm, 年均相对湿度 84%^[33-34]。土壤类型为红壤^[32]。

1.2 数据来源和处理

1.2.1 植被指数(NDVI和EVI)数据

MODIS 植被指数数据均来自 LP DAAC 网站(https://lpdacsvc.cr.usgs.gov/appeears/),通过站点的经纬 度坐标提取出相应产品的时间序列数据以及质量控制文件。NDVI、EVI 植被指数产品采用 MOD13A2 V006 版本,16 天最大值合成,每年 23 期数据,空间分辨率 1 km,时间范围 2007—2011 年。遥感数据由于环境条 件、传感器精度等多种原因会导致数据中含有噪声影响,因此利用 MOD13A2 云掩膜、阴影、冰雪覆盖等质量 文件对 NDVI、EVI 数据进行质量控制^[35]。首先利用 MOD13A2 数据自带的数据可信度数据集,剔除了有冰雪 覆盖或者云遮挡可靠性差的数据,保留标识为 0(具有可信度)和 1(较有可信度)的数据;然后利用质量控制 数据集,剔除存在云、冰雪、气溶胶等噪声影响的数据;最后利用线性插补方法生成时序的 NDVI 和 EVI 数 据集。

1.2.2 日光诱导叶绿素荧光(SIF)数据

SIF 来自于搭载在 MetOp-A 卫星^[36]的 GOME-2 反演得到^[37]。GOME-2 传感器的风浪区为 40 km×80 km,其第四个通道 720—758 nm 的子通道用于 740 nm SIF 的估算^[37]。下载遥感反演的日尺度全球 SIF 产品 (ftp://ftp.gfz-potsdam.de/home/mefe/GlobFluo/),根据 16 天最大值合成生成 2007—2011 年 SIF 数据,空间 分辨率 0.5°×0.5°。根据通量站点坐标提取千烟洲 SIF 时序数据并利用残差平方和进行质量控制,并采用线 性插值方法插补缺失值进而生成时序的 SIF 数据集。

1.2.3 通量数据 GPP

涡度通量技术用来监测森林半小时尺度的 CO₂通量^[38]。在本研究中,采用与遥感指数时间范围一致 (2007—2011 年)的千烟洲森林通量站数据。首先需要采用坐标轴旋转、WPL 校正以及储存项校正以消除地 形、空气水热传输和观测高度对观测数据的影响^[39];同时采用摩擦风速 U*来剔除夜间湍流较弱情况下的数 据^[39]。最后将 CO₂通量数据拆分成 GPP 和生态系统总呼吸,通过 30 min 间隔的连续观测数据加和为每日的 GPP,进而得到 2007—2011 年每日 GPP 时序数据。

1.3 物候信息估算方法

16 天分辨率植被指数(NDVI 和 EVI)、16 天分辨率日光诱导叶绿素荧光 SIF 与日通量 GPP 的物候指标

的估算通过 TIMESAT 软件 3.2 版本。遥感指数的平滑通过 Savitzky-Golay (S-G) 滤波进行, 然后再采用双 Logistic 曲线(D-L)来估算物候参数。S-G 滤波法的原理是在每一个点的邻近域选取一定数量的数据点并进行多项式拟合然后替代该点数据,目的是使得曲线更加光滑。D-L 模型函数是一种半局部拟合方法,将全部时间序列划分为多个极大值、极小值区间分别进行函数拟合。两种方法采用 spike 方法来去除参数的异常值。最后采用动态阈值法提取森林的物候特征参数,设定阈值为 20%^[40-41]。物候参数包括生长季开始时间 (SOS, Start of growing season)和生长季结束时间(EOS, End of growing season)2个关键参数。

2 结果分析

2.1 植被指数、日光诱导叶绿素荧光和通量 GPP 时间序列变化

根据 2007—2011 年 3 种遥感指数和通量 GPP 的时间序列变化图可以看出,3 种遥感指数呈现明显的季节变化,并且季节变化与通量 GPP 的变异相似(图 1)。其中在大多数年份中 SIF 最高值出现明显早于 NDVI 和 EVI。

将3种遥感指数和通量 GPP 真实值和归一化值的多年平均值来代表各自曲线的季节变动形态(图2)。 GPP 在春季早于其他3种指数进入快速增加的阶段,但在秋季又早于其他3种指数进入快递下降的阶段;相 比于植被指数 NDVI 和 EVI,SIF 表现出在春季和秋季的生长季开始和结束的时间上更加贴近于 GPP 变异; NDVI 和 EVI 多年均值的季节变异相似,但是 NDVI 在生长季结束时间上都要略晚于 EVI,NDVI 和 EVI 的最 高值相对滞后。





NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; EVI: 增强型植被指数 Enhanced vegetation index; SIF: 日光诱导叶绿素荧光 Sun-induced chlorophyll fluorescence; GPP: 总初级生产力 Gross primary production

3 种遥感指数与通量 GPP 都表现为良好的线性关系(P<0.0001),体现季节变动相对吻合(图 3)。其中 SIF 与 GPP 的相关性最高, R²达到 0.808; NDVI 和 EVI 与 GPP 的相关性比 SIF-GPP 的相关性略低, R²分别是 0.702 和 0.748。

2.2 基于遥感信息的物候期与基于通量 GPP 的物候期比对

根据图 4 的 2007—2011 年 3 种遥感指数和通量 GPP 估算的物候信息对比发现:NDVI、EVI、SIF 和 GPP 的生长季开始时间(5 年均值)分别是第 94 天、第 94 天、第 82 天和第 63 天,呈现逐渐递减的趋势;四种指数的生长季结束时间(5 年均值)分别是第 350 天、第 344 天、第 336 天和第 324 天,同样是逐渐递减的趋势;四种指数的生长季长度(5 年均值)分别是 258 天,251 天,255 天,272 天。因此,SOS_{GPP}要早于 3 个遥感指数的





图 2 3 种遥感指数(NDVI、EVI和 SIF)与通量 GPP 多年平均值的季节变动

Fig.2 Seasonal trajectories of MODIS NDVI, MODIS EVI, GOME-2 SIF and GPP from eddy covariance flux in Qianyanzhou station





生长季开始时间(SOS_{NDVI}、SOS_{EVI}和SOS_{SF}),提前的时间分别是 31 天(NDVI),31 天(EVI)和 19 天(SIF); EOS_{GPP}要早于三个遥感指数的生长季结束时间(EOS_{NDVI}、EOS_{EVI}和EOS_{SIF}),提前的时间分别是17天(NDVI), 10 天(EVI)和2 天(SIF)。由此可见,对亚热带常绿针叶林而言,虽然3 种遥感指数的生长季长度都短于实际 光合作用,但是 SIF 相对于其他两个植被指数(NDVI 和 EVI)能够更好地追踪生长季的开始和结束时间;而植 被指数与光合作用之间存在着一定的滞后作用,包括春季的恢复和秋季的衰老都要晚于实际的光合作用。

2007—2011 年 3 种遥感指数物候信息与通量 GPP 物候时间序列的相关性分析(图 5)表明 SOS_{sF}与 SOS_{GPP} 年际变异相似,呈现为相关性的趋势($SOS_{GPP} = 1.094SOS_{SIF} - 27.044, R^2 = 0.728, P = 0.066$); $SOS_{NDVI}(P = 0.006)$; $SOS_{NDVI}(P = 0.006)$; S0.220)和SOS_{EVI}(P=0.448)与SOS_{GPP}没有显著的相关性;EOS_{NDVI}(P=0.864)、EOS_{EVI}(P=0.278)和EOS_{SIF} (P=0.920)与EOS_{GPP}都没有显著的相关性。

2.3 物候期与环境因子的关系

图 6 分析了环境因子(气温、降水、辐射、土壤温度、土壤含水量和饱和水汽压差)与基于 4 种变量(NDVL/ EVI/SIF/GPP)估算的物候期(SOS 和 EOS)的相关性。对于 SOS,考虑春季和冬季气候因子的影响;而对于 EOS,考虑夏季和秋季气候因子的影响。总体而言,春季的温度(包括气温和土壤温度)是影响亚热带常绿针 叶林生长季开始时间(SOS)最重要的因素,其次是春季水分和辐射的影响(图6);秋季的水分(土壤含水量和 降水)和辐射是影响生长季结束时间(EOS)最重要的气象因子(图 6)。4 种变量估算的物候期(SOS 和 EOS)

0.9

0.8

EVI

4118

与环境因子的相关性有较大的差异,其中4种变量估算的 SOS 与环境因子的相关关系的一致性强于 EOS。特别是 SOS_{SIF}和 SOF_{CPP}与环境因子的相关性相比其他两种指数更为接近。

3 讨论

3.1 SIF 能够捕捉亚热带常绿针叶林的物候信息

日光诱导叶绿素荧光除了能够估算陆地生态系统 生产力、监测植被胁迫状况,还在植被物候监测方面发 挥着重要的作用^[42]。第一,光合速率与发射的叶绿素 荧光有密切关系是 SIF 反演 GPP 的重要基础。很多研 究报道表征光反应系统 II(PSII)的 SIF 与表征 CO₂固定 的 GPP 有较好的正相关关系^[7,22,24-25,27],体现在叶片尺 度^[20]、冠层尺度^[7,21]、生态系统尺度^[22-24]到区域尺度 上^[22,43-44],从 GOSAT^[22-23]、GOME-2^[25]到 OCO-2^[10,26]多



4119

图 4 陆表物候与光合物候的比较

Fig.4 The start and end of the growing seasons determined by different remote sensing measurements and EC measurements





Fig.5 The relationship between remotely sensed SOS/EOS and observed photosynthesis metrics determined by eddy covariance measurements

种遥感平台上。第二,SIF可以用作植被对生物因子(氮等)和非生物因子(干旱、高温等)胁迫的指标。例如, Flexas 等^[45]发现 C3 叶片在水分胁迫下荧光产量下降。Daumard 等^[46]发现在干旱情况下冠层尺度荧光的下 降。2015/2016 年亚马逊干旱研究表明 SIF 在干旱季节出现大规模下降^[47]。第三,正因为 SIF 与 GPP 有着良 好的相关性,同时 SIF 能够快速反映胁迫的信息,开拓了遥感监测植被物候的新领域^[42]。例如,Joiner 等^[27] 首次利用 GOME-2 SIF 数据提取了落叶阔叶林、混合林和作物的物候信息;而后卫星 SIF 开始在常绿林和针叶 林的物候监测方面发挥重要的作用^[8-9,48]。研究表明常绿针叶林 CO₂交换与光反应系统 II 及其电子传输速率 在春季同时开始恢复^[14]。因此表征 PSII 电子传输速率的 SIF 与 GPP 在季节尺度上有着显著的正相关^[8]。 在高纬度常绿针叶林,GOME-2 SIF 很好地捕捉了植被的季节变动,特别是春季的恢复时期^[8]。基于地面光 谱仪和通量的同步观测发现常绿林 SIF 与叶黄素循环和光合系统 II 的最大量子效率存在着显著的相关 性^[29],因而可以证实常绿林 GPP 的季节性主要受到叶片光合效率和光保护色素适应的共同调节^[49]。本研究 中,利用 GOME-2 SIF 估算的陆表物候和通量 GPP 估算的光合作用物候的比对可以发现 SIF 能够追踪亚热带 常绿针叶林的物候信息。



图 6 亚热带常绿针叶林物候与环境因子的相关性

Fig.6 Correlation coefficients between phenology (SOS and EOS) and environmental factors at Qianyanzhou site

生长季开始时间(SOS)考虑冬季和秋季环境因子,生长季结束时间(EOS)考虑夏季和秋季环境因子;星号(*)代表显著相关(P<0.05); Winter_Tair: 冬季气温 Winter air temperature; Winter_Ts: 冬季土壤温度 Winter soil temperature; Winter_VPD: 冬季饱和水汽压差 Winter vapor pressure deficit; Winter_SWC: 冬季土壤含水量 Winter soil water content; Winter_SR: 冬季辐射 Winter solar radiation; Winter_Prec: 冬季降水 Winter precipitation; Spring_Tair: 春季气温 Spring air temperature; Spring _Ts: 春季土壤温度 Spring soil temperature; Spring_VPD: 春季饱和水 汽压差 Spring vapor pressure deficit; Spring_SWC: 春季土壤含水量 Spring soil water content; Spring _SR: 春季辐射 Spring solar radiation; Spring _Prec: 春季降水 Spring precipitation; Summer_Tair: 夏季气温 Summer air temperature; Summer_Ts: 夏季土壤温度 Summer soil temperature; Summer_VPD: 夏季饱和水汽压差 Summer vapor pressure deficit; Summer_SWC: 夏季土壤含水量 Summer soil water content; Summer _SR: 夏 季辐射 Summer solar radiation; Summer _Prec: 夏季降水 Summer precipitation; Autumn_Tair: 秋季气温 Autumn air temperature; Autumn_Ts: 秋 季土壤温度 Autumn soil temperature; Autumn_VPD: 秋季饱和水汽压差 Autumn vapor pressure deficit; Autumn_SWC: 秋季土壤含水量 Autumn soil water content; Autumn_SR: 秋季辐射 Autumn solar radiation; Autumn_Prec: 秋季降水 Autumn precipitation;

3.2 SIF 与其他遥感指数对常绿针叶林物候监测的差异

植被物候是研究植物周期性的生长特征变化(如发芽、开花、落叶等)以及这种生长变化如何受季节/年际气候变化的影响。其中生长季开始时间 SOS 和结束时间 EOS 对气候变化非常敏感,决定生长季的长度并对生态系统碳循环有重要启示,是植被物候中最受关注的参数^[4]。传统的地面观测方法可以精确记录特定站点和树种的物候时期,但是由于其覆盖范围有限,监测方法和手段的差异,很难应用到大区域长时间物候监测中。随着遥感技术的飞速发展,越来越多研究侧重于基于遥感观测数据来获取植被陆地表层的季节格局,也就是最常见的陆表物候(LSP)^[6],空间分辨率覆盖 250 m 到 25 km。涡度相关通量数据监测陆地生态系统和大气的 CO₂交换,可以用 GPP 来提取光合物候时间^[50-51]。研究表明遥感估算的陆表物候与通量 GPP 估算的光合物候有较好的一致性^[52]。因此用 GPP 估算的光合物候能够用来验证遥感提取的中分辨率到低分辨率的陆表物候^[5]。

传统的植被指数已被广泛应用于植被物候监测研究中,但是这些指数往往仅反映植被的绿度信息,而不能追踪实际的光合作用变化。由于遥感 SIF 与光合能力直接相关,并且对云和大气散射不敏感^[27],因此 SIF 不仅能反映植被的形态物候,同时也能追踪植被胁迫信息^[42]。在本研究中,基于表征森林实际生长的通量 GPP 数据估算得到 5 年内亚热带常绿针叶林生长季开始时间为第 63 天,结束时间为第 324 天,生长季长度为 272 天(图 4)。基于反映植被光合作用特征的 SIF 曲线获得物候信息都要滞后 GPP 物候期,其中 SOS_{SIF}滞后 SOS_{CPP} 19 天,EOS_{SIF}滞后 EOS_{CPP} 2 天;基于传统植被指数的物候期滞后 GPP 物候期的时间要大于 SIF 滞后期, 植被指数 SOS 滞后 SOS_{SIF} 12 天,植被指数 EOS 滞后 EOS_{SIF} 8—15 天。由此可见,对于亚热带常绿针叶林,基于

SIF 的陆表物候监测更加接近于光合作用物候期(SOS_{GPP}和EOS_{GPP})。

常绿针叶林生长季中树叶在颜色和总叶面积方面的季节性很弱^[33]。常绿针叶林新的枝芽只占生物量很 小一部分,芽伸长、针叶生长以及凋落等不能体现森林生产力/生物量的变化^[33-54]。同时常绿林常年保持绿 色器官,植被绿度(表现为 NDVI 和 EVI 等)在休眠阶段不会下降到 0,因此不能很好的提供实际光合作用发 生或停止的信号^[40]。以往许多实验结果表明森林春季恢复要早于植被绿度^[55-57]。在本研究中春季返青期绿 度增加信息要晚于光合作用第一信号 31 天。虽然针叶林在休眠时间保持绿色,但是低碳水化合物的需求会 导致光合效率的解耦^[58]。SIF 对常绿针叶林的季节性描述,更多地包含了光能利用率的信息^[8,25,28]。因此相 比于传统的植被指数 NDVI 和 EVI,SIF 能够更好地捕捉常绿林的生长阶段,SIF 物候的滞后期要短于植被指 数物候的滞后期。同时 3 种遥感指数 EOS 滞后于 GPP 的时间都短于 SOS,这与 Walther 等中北方常绿针叶林 相似^[8]。因此,相对于传统以反射率为基础的植被指数(NDVI、EVI 等),SIF 可以直接与"实际光合作用"相 联系,其变化早于叶绿素含量的下降及植物形态结构的变化,特别是在常绿群落、植被受胁迫的早期阶段、季 节性雪盖影响等区域^[28]。对于冬季休眠的针叶林来说,植被绿度指数很难去捕捉 GPP 的大小和时期,而 SIF 能够有效提高常绿林碳循环动态监测^[29]。

3.3 模型改进的启示

植被物候对生态系统模型有重要启示,提供模型所需要的物候变动信息^[59]。因此 SIF 与 GPP 的相关性 更多地可以应用在碳循环模型中,在模型中对叶片物候和光合功能方面的参数有很好的约束作用。研究表明 在早春和晚秋时期的低温状态,碳循环模型对植被生产力的模拟是不精确的^[60]。以往很多光能利用率模型 都采用植被指数来估算 GPP,SIF 可能提供模型更好的物候信息^[61-62]。而在生态系统过程模型中,SIF 能够有 效约束叶片物候光合方面的参数来提供可靠性的知识^[63]。很多研究表明日光诱导叶绿素荧光整合到陆面模 式可以提高 GPP 的模拟精度^[61,64]。因此,研究 SIF 追踪植被物候的能力可以有效地改进目前各类碳循环模 型中物候过程,减少模型模拟的不确定性。

3.4 不确定性分析

本研究通过 MODIS 植被指数和 GOME-2 SIF 来追踪亚热带地区常绿针叶林的植被物候,主要存在两方面 的不确定性。首先,植被物候遥感存在尺度效应。(1)空间分辨率方面:传统植被指数 NDVI 和 EVI,由于其 卫星数据覆盖时间较长,是估算陆表物候的最常用手段,空间分辨率通常 250 m 到 8 km^[65-66]。研究表明大区 域上春季物候对于 250 m 和 8 km 两种分辨率估算结果相似,差异小于 5 天,但是在某些地区可能有比较大的 差异^[67]。目前 GOME-2 SIF 产品分辨率较粗(0.5°×0.5°),而通量观测通常代表的是风浪区内(<1 km²)的碳 水交换,两者在空间尺度上并不完全匹配。但是通量观测通常所在的站点植被均质性较好,代表性较强。因 此有研究表明 SIF 反映的常绿林综合信息与通量塔的风浪区是比较一致的^[68]。(2)时间分辨率方面:通常估 算陆表物候的遥感数据时间分辨率 8—16 天,天尺度的遥感数据由于大气和传感器的影响并不可靠^[69]。研 究表明如果遥感数据的时间分辨率不低于 16 天,物候估算误差不超过 3 天,因此遥感数据空间分辨率 6—16 天能够准确估算植被物候^[69]。同时也有研究表明遥感数据在时间尺度整合过程中采用准确观测日期的数值 可以有效地减少低时间分辨率的不确定性^[70]。其次,遥感数据重建方法的误差。目前遥感数据最常用的重 建方法包括最佳指数斜率提取法(BISE)、S-G 滤波法、非对称高斯函数拟合法(AG)、时间序列谐波法 (HANTS)和双逻辑斯蒂函数拟合法(D-L)等。很多研究表明 S-G 滤波方法对噪声去除效果较好^[71-72]。最 后,当前的 SIF 产品仍旧存在着噪声,特别是春季 SIF 或者冬季 SIF,导致了物候监测的偏差。本研究使用的 SIF 产品噪声相对较低^[8]。

4 结论

本研究以亚热带常绿针叶林为研究对象,采用 MODIS NDVI/EVI、GOME-2 SIF 以及通量 GPP 来估算常 绿针叶林物候期,评价陆表物候与光合作用物候之间的吻合性,明确 SIF 在常绿针叶林物候监测的重要性。

结果表明 SIF 观测能够用来追踪亚热带常绿针叶林 GPP 的季节动态,其物候期相比于传统的植被指数更加 接近于光合作用物候;而表征绿度的植被指数估算的物候期与光合作用的春季恢复和秋季衰弱的滞后时间较 长。通过分析 NDVI、EVI、SIF 和 GPP 估算的物候期(SOS 和 EOS)和环境因子的相关性,结果表明春季温度 是驱动生长季开始时间的主要因素,而秋季水分和辐射是影响生长季结束时间的关键因素。

目前 SIF 的应用仍旧受到粗分辨率的限制,很难在小尺度上开展光合动态监测。随着 NASA OCO-2 卫星数据的发展,可以更好地探究高分辨率 SIF 和通量 GPP 的关系^[9],进而能够更加深入地评估 SIF 在监测光合作用物候的重要作用。同时 2017 年发射 TROPOMI(TROPOspheric Monitoring Instrument)以及 2022 年预计发射的 Flex(Fluorescence Explorer)都将能提供全球高分辨率的 SIF,可以更好地估算光合能力和季节性^[19,73-74]。

致谢: MODIS 植被指数数据来自于 LP DAAC 网站(https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/),GOME-2 SIF 来 自于 ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/mefe/GlobFluo/。中国生态系统网络 CERN 提供千烟洲森林站长期观测 数据。

参考文献(References):

- [1] Loveland T R, Reed B C, Brown J F, Ohlen D O, Zhu Z, Yang L, Merchant J W. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(6/7): 1303-1330.
- Yin G D, Zhang Y, Sun Y, Wang T, Zeng Z Z, Piao S L. MODIS based estimation of forest aboveground biomass in China. PLoS One, 2015, 10 (6): e0130143.
- [3] Wang Q, Zhao P, Ren H, Kakubari Y. Spatiotemporal dynamics of forest net primary production in China over the past two decades. Global and Planetary Change, 2008, 61(3/4): 267-274.
- [4] 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, Zhu X L. Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges. Global Change Biology, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [5] D'Odorico P, Gonsamo A, Gough C M, Bohrer G, Morison J, Wilkinson M, Hanson P J, Gianelle D, Fuentes J D, Buchmann N. The match and mismatch between photosynthesis and land surface phenology of deciduous forests. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 214-215: 25-38.
- [6] Gonsamo A, Chen J M, Wu C Y, Dragoni D. Predicting deciduous forest carbon uptake phenology by upscaling FLUXNET measurements using remote sensing data. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 165: 127-135.
- [7] Yang X, Tang J W, Mustard J F, Lee J E, Rossini M, Joiner J, Munger J W, Kornfeld A, Richardson A D. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest. Geophysical Research Letters, 2015, 42(8): 2977-2987.
- [8] Walther S, Voigt M, Thum T, Gonsamo A, Zhang Y G, Kohler P, Jung M, Varlagin A, Guanter L. Satellite chlorophyll fluorescence measurements reveal large-scale decoupling of photosynthesis and greenness dynamics in boreal evergreen forests. Global Change Biology, 2016, 22 (9): 2979-2996.
- [9] Lu X C, Cheng X, Li X L, Chen J Q, Sun M M, Ji M, He H, Wang S Y, Li S, Tang J W. Seasonal patterns of canopy photosynthesis captured by remotely sensed sun-induced fluorescence and vegetation indexes in mid-to-high latitude forests: a cross-platform comparison. Science of the Total Environment, 2018, 644: 439-451.
- [10] Li X, Xiao J F, He B B. Chlorophyll fluorescence observed by OCO-2 is strongly related to gross primary productivity estimated from flux towers in temperate forests. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 659-671.
- [11] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [12] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [13] Wu C Y, Gonsamo A, Gough C M, Chen J M, Xu S G. Modeling growing season phenology in North American forests using seasonal mean vegetation indices from MODIS. Remote Sensing of Environment, 2014, 147: 79-88.
- [14] Wong C Y S, Gamon J A. The photochemical reflectance index provides an optical indicator of spring photosynthetic activation in evergreen conifers. New Phytologist, 2015, 206(1): 196-208.
- [15] Hmimina G, Dufrêne E, Pontailler J Y, Delpierre N, Aubinet M, Caquet B, De Grandcourt A, Burban B, Flechard C, Granier A, Gross P, Heinesch B, Longdoz B, Moureaux C, Ourcival J M, Rambal S, Saint André L, Soudani K. Evaluation of the potential of MODIS satellite data to

4122

predict vegetation phenology in different biomes: an investigation using ground-based NDVI measurements. Remote Sensing of Environment, 2013, 132; 145-158.

- [16] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 89-113.
- [17] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747-766.
- [18] Yoshida Y, Joiner J, Tucker C, Berry J, Lee J E, Walker G, Reichle R, Koster R, Lyapustin A, Wang Y. The 2010 Russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from modeling and comparisons with parameters derived from satellite reflectances. Remote Sensing of Environment, 2015, 166: 163-177.
- [19] Mohammed G H, Colombo R, Middleton E M, Rascher U, Van Der Tol C, Nedbal L, Goulas Y, Pérez-Priego O, Damm A, Meroni M, Joiner J, Cogliati S, Verhoef W, Malenovský Z, Gastellu-Etchegorry J P, Miller J R, Guanter L, Moreno J, Moya I, Berry J A, Frankenberg C, Zarco-Tejada P J. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111177.
- [20] Meroni M, Picchi V, Rossini M, Cogliati S, Panigada C, Nali C, Lorenzini G, Colombo R. Leaf level early assessment of ozone injuries by passive fluorescence and photochemical reflectance index. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(17/18): 5409-5422.
- [21] Zarco-Tejada P J, Catalina A, González M R, Martín P. Relationships between net photosynthesis and steady-state chlorophyll fluorescence retrieved from airborne hyperspectral imagery. Remote Sensing of Environment, 2013, 136: 247-258.
- [22] Frankenberg C, Fisher J B, Worden J, Badgley G, Saatchi S S, Lee J E, Toon G C, Butz A, Jung M, Kuze A, Yokota T. New global observations of the terrestrial carbon cycle from GOSAT: patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. Geophysical Research Letters, 2011, 38 (17): L17706.
- [23] Guanter L, Frankenberg C, Dudhia A, Lewis P E, Gómez-Dans J, Kuze A, Suto H, Grainger R G. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements. Remote Sensing of Environment, 2012, 121: 236-251.
- [24] Guanter L, Zhang Y G, Jung M, Joiner J, Voigt M, Berry J A, Frankenberg C, Huete A R, Zarco-Tejada P, Lee J E, Moran M S, Ponce-Campos G, Beer C, Camps-Valls G, Buchmann N, Gianelle D, Klumpp K, Cescatti A, Baker J M, Griffis T J. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(14): E1327-E1333.
- [25] Zhang Y G, Guanter L, Berry J A, Van Der Tol C, Yang X, Tang J W, Zhang F M. Model-based analysis of the relationship between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production for remote sensing applications. Remote Sensing of Environment, 2016, 187: 145-155.
- [26] Sun Y, Frankenberg C, Jung M, Joiner J, Guanter L, Köhler P, Magney T. Overview of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) from the orbiting carbon observatory-2: retrieval, cross-mission comparison, and global monitoring for GPP. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 808-823.
- [27] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, Schaefer K, Jung M, Guanter L, Zhang Y, Garrity S, Middleton E M, Huemmrich K F, Gu L, Marchesini L B. The seasonal cycle of satellite chlorophyll fluorescence observations and its relationship to vegetation phenology and ecosystem atmosphere carbon exchange. Remote Sensing of Environment, 2014, 152: 375-391.
- [28] Porcar-Castell A, Tyystjärvi E, Atherton J, Van Der Tol C, Flexas J, Pfündel E E, Moreno J, Frankenberg C, Berry J A. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges. Journal of Experimental Botany, 2014, 65 (15): 4065-4095.
- [29] Magney T S, Bowling D R, Logan B A, Grossmann K, Stutz J, Blanken P D, Burns S P, Cheng R, Garcia M A, Khler P, Lopez S, Parazoo N C, Raczka B, Schimel D, Frankenberg C. Mechanistic evidence for tracking the seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(24): 11640-11645.
- [30] Zhang Y, Xiao X M, Jin C, Dong J W, Zhou S, Wagle P, Joiner J, Guanter L, Zhang Y G, Zhang G L, Qin Y W, Wang J, Moore III B. Consistency between sun-induced chlorophyll fluorescence and gross primary production of vegetation in North America. Remote Sensing of Environment, 2016, 183, 154-169.
- [31] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [32] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, Wang Y H, Song X, Li J, Sun X M, Yang F T, Chen Y R, Liu Q J. Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(S2): 99-109.
- [33] 陈建平,李艳,董思宏,徐慧慧,王明玉.江西千烟洲农业生态系统水环境氮污染研究.水资源与水工程学报,2012,23(6);51-54.
- [34] 涂洁,刘琪璟, 王辉民, 廖迎春, 李燕燕. 江西千烟洲木荷液流特征及其与气象因子的关系. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 267-273.
- [35] 刘啸添,周蕾,石浩,王绍强,迟永刚.基于多种遥感植被指数、叶绿素荧光与 CO,通量数据的温带针阔混交林物候特征对比分析.生态

http://www.ecologica.cn

学报, 2018, 38(10): 3482-3494.

- [36] Munro R, Eisinger M, Anderson C, Callies J, Corpaccioli E, Lang R, Lefèbvre A, Livschitz Y, Albinana A P. GOME-2 on MetOp//Proceeding of the 2006 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Helsinki, Finland: EUMETSAT, 2006: 12-16.
- [37] Köhler P, Guanter L, Joiner J. A linear method for the retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence from GOME-2 and SCIAMACHY data. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(6): 2589-2608.
- [38] Baldocchi D, Falge E, Wilson K. A spectral analysis of biosphere-atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 1-27.
- [39] Fu Y L, Yu G R, Sun X M, Li Y N, Wen X F, Zhang L M, Li Z Q, Zhao L, Hao Y B. Depression of net ecosystem CO₂ exchange in semi-arid Leymus chinensis steppe and alpine shrub. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(3/4): 234-244.
- [40] Karkauskaite P, Tagesson T, Fensholt R. Evaluation of the plant phenology index (PPI), NDVI and EVI for start-of-season trend analysis of the northern Hemisphere Boreal Zone. Remote Sensing, 2017, 9(5): 485.
- [41] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 131-147.
- [42] 章钊颖, 王松寒, 邱博, 宋练, 张永光. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展. 遥感学报, 2019, 23(1): 37-52.
- [43] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, Yoshida Y, Corp L A, Middleton E M. First observations of global and seasonal terrestrial chlorophyll fluorescence from space. Biogeosciences, 2011, 8(3): 637-651.
- [44] Joiner J, Guanter L, Lindstrot R, Voigt M, Vasilkov A P, Middleton E M, Huemmrich K F, Yoshida Y, Frankenberg C. Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate-spectral-resolution near-infrared satellite measurements: methodology, simulations, and application to GOME-2. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(10): 2803-2823.
- [45] Flexas J, Escalona J M, Evain S, Gulías J, Moya I, Osmond C B, Medrano H. Steady-state chlorophyll fluorescence (Fs) measurements as a tool to follow variations of net CO₂ assimilation and stomatal conductance during water-stress in C₃ plants. Physiologia Plantarum, 2002, 114(2): 231-240.
- [46] Daumard F, Champagne S, Fournier A, Goulas Y, Ounis A, Hanocq J F, Moya I. A field platform for continuous measurement of canopy fluorescence. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(9): 3358-3368.
- [47] Yang P Q, Van Der Tol C. Linking canopy scattering of far-red sun-induced chlorophyll fluorescence with reflectance. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 456-467.
- [48] Jeong S J, Schimel D, Frankenberg C, Drewry D T, Fisher J B, Verma M, Berry J A, Lee J E, Joiner J. 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, 2017, 190: 178-187.
- [49] Bowling D R, Logan B A, Hufkens K, Aubrecht D M, Richardson A D, Burns S P, Anderegg W R L, Blanken P D, Eiriksson D P. Limitations to winter and spring photosynthesis of a rocky mountain subalpine forest. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252: 241-255.
- [50] Garrity S R, Bohrer G, Maurer K D, Mueller K L, Vogel C S, Curtis P S. A comparison of multiple phenology data sources for estimating seasonal transitions in deciduous forest carbon exchange. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1741-1752.
- [51] Gonsamo A, Chen J M, Price D T, Kurz W A, Wu C Y. Land surface phenology from optical satellite measurement and CO₂ eddy covariance technique. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117(G3): G03032, doi: 10.1029/2012JG002070.
- [52] Balzarolo M, Vicca S, Nguy-Robertson A L, Bonal D, Elbers J A, Fu Y H, Grünwald T, Horemans J A, Papale D, Peñuelas J, Suyker A, Veroustraete F. Matching the phenology of Net Ecosystem Exchange and vegetation indices estimated with MODIS and FLUXNET in-situ observations. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 290-300.
- [53] Jönsson A M, Eklundh L, Hellström M, Bärring L, Jönsson P. Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2719-2730.
- [54] Böttcher K, Aurela M, Kervinen M, Markkanen T, Mattila O P, Kolari P, Metsämäki S, Aalto T, Arslan A N, Pulliainen J. MODIS time-seriesderived indicators for the beginning of the growing season in boreal coniferous forest — A comparison with CO₂ flux measurements and phenological observations in Finland. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 625-638.
- [55] Tanja S, Berninger F, Vesala T, Markkanen T, Hari P, Mäkelä A, Ilvesniemi H, Hänninen H, Nikinmaa E, Huttula T, Laurila T, Aurela M, Grelle A, Lindroth A, Arneth A, Shibistova O, Lloyd J. Air temperature triggers the recovery of evergreen boreal forest photosynthesis in spring. Global Change Biology, 2003, 9(10): 1410-1426.
- [56] Louis J, Ounis A, Ducruet J M, Evain S, Laurila T, Thum T, Aurela M, Wingsle G, Alonso L, Pedros R, Moya I. Remote sensing of sunlightinduced chlorophyll fluorescence and reflectance of Scots pine in the boreal forest during spring recovery. Remote Sensing of Environment, 2005, 96 (1): 37-48.

http://www.ecologica.cn

- [57] Melaas E K, Richardson A D, Friedl M A, Dragoni D, Gough C M, Herbst M, Montagnani L, Moors E. Using FLUXNET data to improve models of springtime vegetation activity onset in forest ecosystems. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 171-172: 46-56.
- [58] Ensminger I, Sveshnikov D, Campbell D A, Funk C, Jansson S, Lloyd J, Shibistova O, Öquist G. Intermittent low temperatures constrain spring recovery of photosynthesis in boreal Scots pine forests. Global Change Biology, 2004, 10(6): 995-1008.
- [59] 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, Xue Y K. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: results from the North American Carbon Program Site Synthesis. Global Change Biology, 2012, 18 (2): 566-584.
- [60] Schaefer K, Schwalm C R, Williams C, Arain M A, Barr A, Chen J M, Davis K J, Dimitrov D, Hilton T W, Hollinger D Y, Humphreys E, Poulter B, Raczka B M, Richardson A D, Sahoo A, Thornton P, Vargas R, Verbeeck H, Anderson R, Baker I, Black T A, Bolstad P, Chen J Q, Curtis P S, Desai A R, Dietze M, Dragoni D, Gough C, Grant R F, Gu L H, Jain A, Kucharik C, Law B, Liu S G, Lokipitiya E, Margolis H A, Matamala R, McCaughey J H, Monson R, Munger J W, Oechel W, Peng C H, Price D T, Ricciuto D, Riley W J, Roulet N, Tian H Q, Tonitto C, Torn M, Weng E S, Zhou X L. A model-data comparison of gross primary productivity: Results from the North American Carbon Program site synthesis. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117(G3): G03010.
- [61] 刘青瑞,居为民,张永光,张雷明,王绍强,周艳莲,赵风华,闫俊华,韩士杰,郝彦宾,陈世苹,李英年,项文化.日光诱导叶绿素荧光 估算中国典型生态系统总初级生产力的能力.遥感技术与应用,2017,32(2):363-373.
- [62] Luus K A, Commane R, Parazoo N C, Benmergui J, Euskirchen E S, Frankenberg C, Joiner J, Lindaas J, Miller C E, Oechel W C, Zona D, Wofsy S, Lin J C. Tundra photosynthesis captured by satellite-observed solar-induced chlorophyll fluorescence. Geophysical Research Letters, 2017, 44(3): 1564-1573.
- [63] Alemohammad S H, Fang B, Konings A G, Aires F, Green J K, Kolassa J, Miralles D, Prigent C, Gentine P. Water, Energy, and Carbon with Artificial Neural Networks (WECANN): a statistically based estimate of global surface turbulent fluxes and gross primary productivity using solarinduced fluorescence. Biogeosciences, 2017, 14(18): 4101-4124.
- [64] Van Der Tol C, Berry J A, Campbell P K E, Rascher U. Models of fluorescence and photosynthesis for interpreting measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(12): 2312-2327.
- [65] Peng D L, Wu C Y, Zhang X Y, Yu L, Huete A R, Wang F M, Luo S Z, Liu X J, Zhang H L. Scaling up spring phenology derived from remote sensing images. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256-257: 207-219.
- [66] Zhang X Y, Wang J M, Gao F, Liu Y, Schaaf C, Friedl M, Yu Y Y, Jayavelu S, Gray J, Liu L L, Yan D, Henebry G M. Exploration of scaling effects on coarse resolution land surface phenology. Remote Sensing of Environment, 2017, 190: 318-330.
- [67] 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, Zhang H L. Scaling effects on spring phenology detections from modis data at multiple spatial resolutions over the contiguous united states. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 132: 185-198.
- [68] Zuromski L M, Bowling D R, Köhler P, Frankenberg C, Goulden M L, Blanken P D, Lin J C. Solar-induced fluorescence detects interannual variation in gross primary production of coniferous forests in the western United States. Geophysical Research Letters, 2018, 45(14): 7184-7193.
- [69] Zhang X Y, Friedl M A, Schaaf C B. Sensitivity of vegetation phenology detection to the temporal resolution of satellite data. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(8): 2061-2074.
- [70] Kross A, Fernandes R, Seaquist J, Beaubien E. The effect of the temporal resolution of NDVI data on season onset dates and trends across Canadian broadleaf forests. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(6): 1564-1575.
- [71] Geng L Y, Ma M G, Wang X F, Yu W P, Jia S Z, Wang H B. Comparison of eight techniques for reconstructing multi-satellite sensor time-series NDVI data sets in the Heihe River Basin, China. Remote Sensing, 2014, 6(3): 2024-2049.
- [72] Michishita R, Jin Z Y, Chen J, Xu B. Empirical comparison of noise reduction techniques for NDVI time-series based on a new measure. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 91: 17-28.
- [73] Frankenberg C, O'Dell C, Berry J, Guanter L, Joiner J, Köhler P, Pollock R, Taylor T E. Prospects for chlorophyll fluorescence remote sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2. Remote Sensing of Environment, 2014, 147: 1-12.
- [74] Guanter L, Aben I, Tol P, Krijger J M, Hollstein A, Köhler P, Damm A, Joiner J, Frankenberg C, Landgraf J. Potential of the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel- 5 Precursor for the monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(3): 1337-1352.