DOI: 10.20103/j.stxb.202405241203

丁承浩,曾林辉,周蕾,蔡润鹏,迟永刚.基于全球长期通量观测网络的不同光合类型植被荧光与光合的关联.生态学报,2025,45(9):4446-4455. Ding C H,Zeng L H,Zhou L,Cai R P,Chi Y G.The relationships between vegetation fluorescence and photosynthesis in different photosynthetic types based on FLUXNET.Acta Ecologica Sinica,2025,45(9):4446-4455.

基于全球长期通量观测网络的不同光合类型植被荧光 与光合的关联

丁承浩,曾林辉,周 蕾,蔡润鹏,迟永刚*

浙江师范大学地理与环境科学学院,金华 321004

摘要:卫星反演的日光诱导叶绿素荧光(SIF)为生态系统总初级生产力(GPP)的估算提供了一种直接方法。然而,SIF 与 GPP 的关系是否受到光合类型的影响目前还不明确。基于 2007—2014 年 40 个全球长期通量观测网络(FLUXNET)站点 GPP 数据,结合 GOME-2 SIF、MODIS FPAR 以及 CERES PAR 数据,探索 C₃和 C₄两种光合类型植被荧光与光合的关联及其对环境的响应。结果表明,不同光合类型的植被 SIF-GPP 关系存在显著差异,C₄植被 SIF-GPP 斜率高于 C₃,C₄植被 SIF_{yield}-LUE 斜率是 C₃的 1.2 倍;空气温度、饱和水汽压亏损和短波辐射对 C₄植被 GPP/SIF 产生正面影响,但是对 C₃植被 GPP/SIF 产生负面影响;轮作种植相对于单一持续种植方式提高了两种光合类型植被 SIF-GPP 的相关性。研究结果可为基于 SIF 的 GPP 估算提供支持。 关键词:全球长期通量观测网络(FLUXNET);日光诱导叶绿素荧光;总初级生产力;C₄植被;环境调控;种植方式

The relationships between vegetation fluorescence and photosynthesis in different photosynthetic types based on FLUXNET

DING Chenghao, ZENG Linhui, ZHOU Lei, CAI Runpeng, CHI Yonggang* College of Geography and Eviromental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

Abstract: Satellite-derived Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) offers a direct approach for estimating Gross Primary Productivity (GPP). Yet, it remains uncertain if the relationship between SIF and GPP varies with photosynthetic types. This research investigated the correlations between vegetation fluorescence and photosynthesis among C_3 and C_4 photosynthetic types and their environmental responses, utilizing GPP data from 40 FLUXNET sites, along with GOME-2 SIF, MODIS FPAR, and CERES PAR data spanning 2007 to 2014. These findings revealed significant variations in SIF-GPP relationships across different photosynthetic types, with C_4 vegetation exhibiting a steeper SIF-GPP slope compared to C_3 , and a 1.2-fold greater SIF_{yield}-LUE slope in C_4 than in C_3 ; Air temperature, saturated vapor pressure deficit, and shortwave radiation had positive impacts on the GPP/SIF ratio of C_4 vegetation, but adverse effects on that of C_3 vegetation; For both C_3 and C_4 vegetation types, the SIF-GPP relationship was enhanced by crop rotation as opposed to continuous cropping practices.

Key Words: FLUXNET; Solar-induced Chlorophyll Fluorescence; Gross Primary Productivity; C₄ vegetation; environmental control; cropping strategies

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42371120);浙江省软科学研究计划项目(2024C35014)

收稿日期:2024-05-24; 网络出版日期:2025-03-04

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chiyonggang@ zjnu.cn

日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, SIF)提供了一种直接从太空监测区域植被 光合作用的手段^[1-4]。自 1992 年以来,不断改进的涡动相关技术可以较好地测量站点尺度植被碳通量^[5]。 虽然目前全球已经建立了 500 多个碳通量观测站,但是这些站点大部分集中在北半球中纬度地区,很难直接 观测全球尺度植被总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)^[6-8]。SIF 是植物在 650—800nm 光谱范 围内发出的光信号,它与光合活性密切相关,可以指示植被光合作用的真实状态^[9-11]。SIF 与传统的植被指 数(如归一化植被指数 NDVI 和增强型植被指数 EVI)相比,在监测陆地生态系统光合作用方面具有独特的优 势^[9,12-17]。研究表明,SIF 与 GPP 在冠层尺度具有很强的线性关系。Sun 等基于 OCO-2 SIF 和通量塔 GPP_ EC 数据,发现 SIF-GPP 在农田、草原和温带落叶林存在线性关系^[18]。Yang 等基于温带落叶林地面塔基 SIF 和通量站点 GPP,发现 SIF 与 GPP 在冠层尺度具有线性关系^[19]。在叶片尺度上,光合作用随着光照的增加 而逐渐饱和,导致 SIF-GPP 的关系在阳生叶呈非线性,在阴生叶保持线性关系^[20]。然而,SIF 与 GPP 的关系 是否受到光合类型的影响目前还不明确。

C₃和 C₄植被是气候—碳模型中的重要植被类型^[21]。已有研究利用高空间分辨率 SIF 产品分别建立了 C₃和 C₄植被 SIF-GPP 的关系。对于 C₃植被, He 等基于塔基观测和遥感数据对美国农作物估产的研究中表 明,大豆半小时尺度的 SIF-GPP 显示非线性关系然而水稻显示线性关系^[22]。Li 等基于 TROPOMI SIF 和 83 个通量站 GPP 数据探索美国 7 种植被类型 SIF-GPP 关系,结果表明 C₃农田 SIF-GPP 显示强线性关系^[23]。对 于 C₄植被,Li 等通过对商丘市玉米田地面测量,在生长季 8d 时间分辨率下,玉米 SIF 和 GPP 存在很强的线性 关系^[24]。Wu 等在 UIUC 能源农场对玉米和芒草两种 C₄植物实地测量,发现玉米和芒草 SIF-GPP 在半小时尺 度上显示线性关系^[25]。然而,比较 C₃和 C₄两种光合类型植被 SIF-GPP 关系的研究较少,仅仅 Liu 等在中国 北部 7 块小麦和玉米田观测实验中对两种植被 SIF-GPP 关系进行比较,结果表明玉米(C₄)SIF-GPP 线性关系 高于小麦(C₃)^[26]。

环境因素对 C_3 和 C_4 两种光合类型植被 SIF-GPP 关联的影响程度目前还不明确。Yang 等基于韩国铁原 水稻田观测实验的结果表明,光合有效辐射(PAR)是 C_3 植被 SIF 与 GPP 相关性的关键因素^[27]。Hu 等在中 国小汤山的 C_4 植被玉米田实验中也显示出相似的结果^[28]。但是,Bai 等基于大满超级站 C_4 植被玉米田实测 数据及 TROPMI SIF 和通量数据的研究结果表明,空气温度影响 C_4 植被玉米 SIF-GPP 关系^[29]。Wu 等在美国 芒草实地观测的研究中表明,高温、强光和饱和水汽压亏损会削弱 C_4 植被芒草 SIF-GPP 的关系^[25]。因此,比 较 C_3 和 C_4 植被 SIF-GPP 关联的影响因素,有助于提高基于 SIF 的 GPP 估算精度。

FLUXNET 是世界上最大的生态系统网络之一,使用涡度协方差技术来测量生物圈和大气之间碳、水和能量的循环。Zheng 等基于 FLUXNET GPP,通过改进光利用效率模型,再现全球 GPP 年际变化^[30]。Ben Bond-Lamberty 基于全球土壤呼吸数据库和 FLUXNET 2015 数据集的研究结果表明,全球土壤异养呼吸正在不断上 $\mathcal{H}^{[31]}$ 。Fu 等基于 FLUXNET 205 个通量站点数据,确定全球三类植被碳源阈值温度并预测未来阈值温度变化^[32]。本研究以 C₃和 C₄植被作为研究对象,利用 2007-2014 年 40 个 FLUXNET 站点 GPP 数据,结合 GOME-2 SIF、MODIS FPAR 以及 CERES PAR 数据,分析 C₃和 C₄两种光合类型植被荧光与光合的关联。研究目标是:1)揭示 C₃和 C₄植被光合时间变化特征;2)对比 C₃和 C₄植被 SIF-GPP、SIF_{yield}-LUE 以及不同种植方式下关系变化差异;3)明确影响 C₃和 C₄植被 SIF-GPP 关系主要环境因子。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 研究站点选择

本研究所使用的站点数据均来自于 FLUXNET 通量观测网络,选取所有农田站点以及部分草地站点,按照 植被不同的光合类型分类出 40 个站点,其中 C₃植被站点 28 个,C₄植被站点 14 个(图1)。另外,以植被的种植方 式单一持续、混作和轮作 3 种方式进行分类,其中单一持续种植站点 22 个,混作种植站点 9 个,轮作站点 9 个。



Fig.1 Global distribution of C_3 and C_4 vegetation sites

1.1.2 GPP 数据与环境数据

GPP 数据与环境数据均使用 FLUXNET2015 数据集^[33],GPP 数据根据 1.1.1 中选择的站点选用相应的日 尺度的"GPP_NT_VUT_REF"产品。根据 FLUXNET 网站的数据质量"QC"指标说明,对数据进行筛选。本研 究保留"QC"值大于等于 0.8 的 GPP 以及环境数据。环境数据根据对应站点选择日尺度的空气温度(TA_ F)、降水量(P_F)、饱和水气压亏缺(VPD_F)、短波辐射(SWIN_F)、风速(WS_F)、土壤温度(TS_F)和土壤含 水量(SWC_F)7 类数据。

1.1.3 SIF 数据

全球 SIF 数据使用的是由搭载在 MetOp-A 卫星的 GOME-2 传感器提供的 740nm 附近的二级(日尺度)远 红光荧光产品^[15],空间分辨率为 0.5°×0.5°。由于 GOME-2 SIF 是卫星过境时观测的瞬时值,而 FLUXNET GPP 是每天植被固定 CO₂的累积值,为了将两者匹配,瞬时的 SIF 需要校正到每日^[18]。在无云条件下,忽略 瑞利散射以及气体吸收,下行太阳辐射与太阳天顶角的余弦成线性关系^[34],日均 SIF 计算公式为:

$$\mathrm{SIF}_{\mathrm{daily}} = \mathrm{SIF}_{\mathrm{inst}} \times \frac{\int_{t_0}^{t_0+1} \cos(\mathrm{SZA}(t)) dt}{\cos(\mathrm{SZA}(t_0))}$$

式中,SIF_{daily}表示为每天的 SIF,SIF_{inst}表示为卫星过境时观测的瞬时 SIF, t_0 表示为卫星过境的当地时间,SZA 表示太阳天顶角。

1.1.4 PAR 与 FPAR 数据

PAR(光合有效辐射)数据使用 CERES 产品下 SYN1deg Ed4A 版本的全天空条件下的每日地表 PAR 和 散射 PAR 数据,空间分辨率为 1°× 1°。FPAR(吸收的光合有效辐射的比例)数据使用 MODIS 2001—2014 MOD15A2H 数据集,空间分辨率为 500m,时间分辨率为 8d。根据选取的通量站点,利用 ArcGIS 内置的 Python 语言开发脚本,批量提取各站点所处像元的日尺度 PAR、FPAR 数据。吸收的光合有效辐射 APAR 是 光合有效辐射和植被冠层吸收的光合有效辐射的比例的乘积^[35]。

APAR = PAR×FPAR

1.2 数据分析方法

基于光利用效率模型^[35],GPP 与 SIF 计算公式分别为:

 $GPP = LUE \times PAR \times FPAR$

$SIF = SIF_{vield} \times PAR \times FPAR$

其中,LUE 表示光合作用的光能利用率,SIF_{viel}表示 SIF 的产率,PAR 和 FPAR 分别表示光合有效辐射和植物

吸收光合有效辐射的比例。结合 GPP 与 SIF 计算公式, GPP-SIF 和 SIF_{viel}-LUE 线性斜率可以表示为:

GPP__LUE×APAR__LUE

 $\mathrm{SIF} \quad \mathrm{SIF}_{\mathrm{yield}}{\times} \mathrm{APAR} \quad \mathrm{SIF}_{\mathrm{yield}}$

GPP/SIF 是衡量植物光能分配的诊断指标,表示 GPP 和 SIF 光能利用关系的动态变化^[36],LUE/SIF_{yield}可以表示为 SIF_{yield}与 LUE 关系。

2 结果

2.1 C₃和 C₄植被光合时间序列

 C_3 和 C_4 植被 SIF 与 GPP 时间变化具有显著的季节特征。 C_3 和 C_4 植被的季节变化模式大致相同,总体呈现先上升后下降的趋势(图 2)。 C_3 植被 GPP 和 SIF 峰值出现时间早于 C_4 植被。 C_3 和 C_4 植被 SIF_{yield}变化幅度较大,但是没有明显的季节变化规律。 C_3 植被 LUE 最大值出现在 5 月份,然而 C_4 植被 LUE 最大值出现在 7 月份。



图 2 C_3 和 C_4 植被 GPP、SIF、SIF_{yield}和 LUE 季节变化 Fig.2 Seasonal changes in GPP, SIF, SIF_{yield} and LUE for C_3 and C_4 vegetation

C₃和 C₄植被站点环境因子季节变化呈现"单峰状"(图 3)。C₄站点气温整体高于 C₃站点,C₃站点降水量 峰值高于 C₄站点。C₄植被站点饱和水汽压亏损(VPD)始终高于 C₃站点且峰值略提前。不同植被站点风速在 春季达到峰值,C₄植被站点风速始终高于 C₃。C₄植被站点土壤温度从 4—12 月始终高于 C₃站点。C₃和 C₄植 被站点土壤含水量和短波辐射季节变化整体相似。

2.2 C₃和 C₄植被 SIF-GPP 以及 SIF_{vield}-LUE 关系

植被 SIF 与 APAR、GPP 与 APAR 均为显著正相关(P < 0.05)。C₄植被 SIF 与 APAR($R^2 = 0.53$)、GPP 与 APAR($R^2 = 0.54$)的线性关系始终高于 C₃植被($R^2 = 0.46$; $R^2 = 0.50$)。C₄植被 SIF、GPP 与 APAR 斜率是 C₃的 1.2 倍(图 4)。C₃和 C₄植被 SIF 与 GPP 呈显著正相关,C₄植被 SIF-GPP 相关性($R^2 = 0.52$)明显高于 C₃植被 ($R^2 = 0.29$)。C₃植被 LUE 与 SIF_{yield}的线性关系($R^2 = 0.40$)与 C₄植被($R^2 = 0.39$)差异不大,C₄植被 SIF_{yield}-LUE 斜率是 C₃植被的 1.2 倍。

2.3 不同种植方式下 C₃和 C₄植被 SIF-GPP 以及 SIF_{vield}-LUE 关系

在单一持续、混作以及轮作三种种植方式下, 植被 SIF 和 GPP 与 APAR 均为显著正相关(图 5)。轮作种



图 3 C₃和 C₄植被站点环境因子季节变化

Fig.3 Seasonal changes of environmental factors in C₃ and C₄ vegetation sites

植方式提高两种光合类型植被 SIF-APAR 和 GPP-APAR 相关性, C_3 植被 R^2 分别提高了 0.18 和 0.03, C_4 植被 R^2 分别提高了 0.21 和 0.06。轮作种植方式同样提高了两种光合类型植被 SIF-GPP 的相关性, R^2 差异分别为 0.31 和 0.36。

2.4 C₃和 C₄植被光合对环境因子的响应

环境因子对 C_3 和 C_4 植被光合的积极影响以温度因子(气温、短波辐射和土壤温度)为主,其次是水分因子(降水和饱和水汽压亏损)(图6)。 C_3 植被 GPP/SIF 与环境因子的相关关系与 C_4 植被相反,空气温度、饱和水汽压亏损和短波辐射对 C_4 植被 GPP/SIF 产生正面影响,但是对 C_3 植被 GPP/SIF 产生负面影响。





3 讨论

3.1 C₄植被 SIF-GPP 相关性比 C₃植被更强

本研究基于 40 个 FLUXNET 站点的数据表明, C_4 植被 SIF-GPP 比 C_3 植被具有更强的线性关系(图 4)。 Yang 等基于半小时和每天的时间分辨率的数据发现, SIF 和 GPP 与 APAR 的强相关性驱动了 SIF 和 GPP 的 线性关系^[27]。 C_4 植被"花环式"的叶片结构使卡尔文循环远离气孔, 比 C_3 植被具有更高的光合利用效 率^[37-39], 导致 C_4 植被 SIF-GPP 相关性比 C_3 植被更强。Liu 等基于中国北部 7 块小麦和玉米田观测实验, 对两 种植被 SIF-GPP 关系进行比较,结果表明 C_4 植被玉米 SIF-GPP 相关性高于 C_3 植被小麦^[26]。He 等基于美国 大豆-玉米地面和卫星遥感两组数据,结果表明 C_4 植被玉米 SIF-GPP 关系比 C_3 植被大豆更密切^[22]。

3.2 C₃和 C₄植被 SIF_{vield}-LUE 具有正相关关系

SIF_{yield}-LUE 的相关关系,国内外学者一直缺乏统一的认识。Porcar-Castell 等基于遥感数据的研究指出, SIF_{yield}与 LUE 在早上和傍晚时为负相关,在正午时为正相关^[40]。Li 等在研究玉米生长季 SIF_{yield}-LUE 关系时 表明,二者成正相关关系^[24]。但是也有学者认为二者之间不存在相关关系,例如 Zhu 等在中国红树林实验研 究中表明 SIF_{yield}-LUE 无明显相关性^[41]。本研究结果表明,C₃和 C₄植被 SIF_{yield}与 LUE 具有显著的正相关关系 (图 5)。并且,C₄植被 SIF_{yield}-LUE 斜率是 C₃植被的 1.2 倍。C₄植被 SIF_{yield}-LUE 关系斜率大于 C₃植被,原因可 能在于 C₄植被光能利用效率高于 C₃植被,在同样荧光产率水平下 C₄植被光化学产率更高。

3.3 环境因子对 C₃和 C₄植被的差异性影响

对于 C₄植被,GPP/SIF 随着空气温度、饱和水汽压亏损、短波辐射和土壤温度的增加而增加,然而这些环





境因子对 C₃植被 GPP/SIF 产生负面影响(图 6)。干旱胁迫下, C₄植被维管束鞘细胞中非光化学淬灭(non-photochemical quenching, NPQ)水平显著上升,高 NPQ 导致荧光产率的降低以及 SIF 的下降^[25],从而导致 GPP/SIF 比率上升。其次, C₄植被的 CO₂浓缩机制(CO₂ concentration mechanism, CCM)在强光环境下依旧保 持较高活性^[42-44],导致 GPP 上升斜率远高于 SIF 斜率从而增加了 GPP/SIF 比率。另外, C₃植被在高温环境 下叶片光合酶会降低对 CO₂的响应甚至 Rubisco 酶会失活,由此导致 GPP 的快速下降以及 GPP/SIF 比率的降

4452



图 6 C₃和 C₄植被光合与环境因子的偏相关关系



TA:空气温度 Air temperature;P:降水 Precipitation;VPD:饱和水汽压亏损 Vapour pressure deficit;WS:风速 Wind speed;SW_IN:短波辐射 Short-wave radiation;TS:土壤温度 Soil temperature;SWC:土壤含水量 Soil water content;SIF:日光诱导叶绿素荧光 Solar-induced Chlorophyll Fluorescence;GPP:总初级生产力 Gross Primary Productivity;SIF_y:日光诱导叶绿素荧光产率 Solar-induced Chlorophyll Fluorescence yield;LUE: 光能利用效率 Light use efficiency;星号(*):代表显著相关(P<0.05);双星号(**):代表极显著相关(P<0.01)

低; C_4 植被高浓度的 CO_2 大部分在叶肉中,叶绿体可以抵消这种负面影响^[45]。由此可见,由于植被生理特性的不同,导致 C_3 和 C_4 植被 GPP/SIF 对环境变化的差异性响应。

3.4 轮作提高了两种光合类型植被 SIF-GPP 的相关性

基于 GOME-2 SIF 和 FLUXNET GPP 的数据表明,两种光合类型植被 SIF-GPP 的关系受种植方式的影响 (图5)。轮作方式提高了 C₃和 C₄植被 SIF-GPP 的相关性。王海娣等基于甘肃定西 C₃胡麻田间长期实验的研 究表明,轮作提高了胡麻的净光合速率和水分利用效率,有效地增加了干物质的积累^[46]。Raya-Sereno 等在 西班牙 Chimenea 研究站对 C₃植被小麦-C₄植被玉米轮作实验表明,残留氮有利于农作物产量的提高^[47]。轮 作能够增加土壤酶活性,改善土壤理化性质以及作物根际环境,协调作物与土壤之间的关系,进而提高叶片光 合能力^[48-50]。因此,在基于 SIF 估算 GPP 的过程中需要考虑种植方式的影响。

4 结论

本研究以 C_3 和 C_4 植被为研究对象,基于 40 个 FLUXNET 站点 GPP 数据,结合 GOME-2 SIF、MODIS FPAR、CERES PAR 和环境数据,研究 C_3 和 C_4 植被在不同种植方式下的 SIF-GPP 关系。主要研究结论如下: 1)不同光合类型植被 SIF-GPP 关系存在差异, C_4 植被 SIF-GPP 比 C_3 植被具有更强的线性关系;2)不同种植方式下,轮作相对于单一持续种植方式提高了 C_3 和 C_4 植被 SIF-GPP 的相关性;3)空气温度、饱和水汽压亏损和 短波辐射对 C_4 植被 SIF-GPP 关系产生正面影响,但是对 C_3 植被产生负面影响。

此外,本研究 SIF 数据粗分辨率与站点通量 GPP 数据的匹配,可能会产生不确定性。未来希望可以利用 FLEX 卫星以及我国发射的"句芒号"卫星提供的高分辨率 SIF 数据,设计实施长期星-机-地同步观测实验进 行精细的研究。

参考文献(References):

^[1] 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.

- [2] 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.
- [3] Ryu Y, Berry J A, Baldocchi D D. What is global photosynthesis? History, uncertainties and opportunities. Remote Sensing of Environment, 2019, 223: 95-114.
- [4] Köehler P, Frankenberg C, Magney T S, Guanter L, Joiner J, Landgraf J. Global retrievals of solar induced chlorophyll fluorescence with TROPOMI: first results and inter-sensor comparison to OCO-2. Geophysical Research Letters, 2018, 45(19): 10456-10463.
- [5] Nie D, Kanemasu E T, Fritschen L J, Weaver H L, Smith E A, Verma S B, Field R T, Kustas W P, Stewart J B. An intercomparison of surface energy flux measurement systems used during FIFE 1987. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D17): 18715-18724.
- [6] Gilmanov T G, Aires L, Barcza Z, Baron V S, Belelli L, Beringer J, Billesbach D, Bonal D, Bradford J, Ceschia E, Cook D, Corradi C, Frank A, Gianelle D, Gimeno C, Gruenwald T, Guo H Q, Hanan N, Haszpra L, Heilman J, Jacobs A, Jones M B, Johnson D A, Kiely G, Li S G, Magliulo V, Moors E, Nagy Z, Nasyrov M, Owensby C, Pinter K, Pio C, Reichstein M, Sanz M J, Scott R, Soussana J F, Stoy P C, Svejcar T, Tuba Z, Zhou G S. Productivity, respiration, and light-response parameters of world grassland and agroecosystems derived from flux-tower measurements. Rangeland Ecology & Management, 2010, 63(1): 16-39.
- [7] Li F Q, Kustas W P, Anderson M C, Prueger J H, Scott R L. Effect of remote sensing spatial resolution on interpreting tower-based flux observations. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 337-349.
- [8] Pan S F, Tian H Q, Dangal S R S, Ouyang Z, Tao B, Ren W, Lu C Q, Running S. Modeling and monitoring terrestrial primary production in a changing global environment: toward a multiscale synthesis of observation and simulation. Advances in Meteorology, 2014, 2014; 965936.
- [9] 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.
- [10] Guan K Y, Berry J A, Zhang Y G, Joiner J, Guanter L, Badgley G, Lobell D B. Improving the monitoring of crop productivity using spaceborne solar-induced fluorescence. Global Change Biology, 2016, 22(2): 716-726.
- [11] Kimm H, Guan K Y, Burroughs C H, Peng B, Ainsworth E A, Bernacchi C J, Moore C E, Kumagai E, Yang X, Berry J A, Wu G H. Quantifying high-temperature stress on soybean canopy photosynthesis: the unique role of Sun-induced chlorophyll fluorescence. Global Change Biology, 2021, 27(11): 2403-2415.
- [12] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 89-113.
- [13] 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.
- [14] Garbulsky M F, Filella I, Verger A, Peñuelas J. Photosynthetic light use efficiency from satellite sensors: from global to Mediterranean vegetation. Environmental and Experimental Botany, 2014, 103: 3-11.
- [15] 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.
- [16] Walther S, Voigt M, Thum T, Gonsamo A, Zhang Y G, Köhler 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.
- [17] Zhang Y G, Guanter L, Berry J A, Joiner J, van der Tol C, Huete A, Gitelson A, Voigt M, Köhler P. Estimation of vegetation photosynthetic capacity from space-based measurements of chlorophyll fluorescence for terrestrial biosphere models. Global Change Biology, 2014, 20(12): 3727-3742.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Zhang Z Y, Chen J M, Zhang Y G, Li M C. Improving the ability of solar-induced chlorophyll fluorescence to track gross primary production through differentiating sunlit and shaded leaves. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 341: 109658.
- [21] Liu L Y. Monitoring the distribution of C3 and C4 grasses in a temperate grassland in Northern China using moderate resolution imaging spectroradiometer normalized difference vegetation index trajectories. Journal of Applied Remote Sensing, 2012, 6(1): 063535.
- [22] He L Y, Magney T, Dutta D, Yin Y, Köhler P, Grossmann K, Stutz J, Dold C, Hatfield J, Guan K Y, Peng B, Frankenberg C. From the ground to space: using solar-induced chlorophyll fluorescence to estimate crop productivity. Geophysical Research Letters, 2020, 47(7): e2020gl087474.
- [23] Li X, Xiao J F. TROPOMI observations allow for robust exploration of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence and terrestrial gross primary production. Remote Sensing of Environment, 2022, 268: 112748.
- [24] Li Z H, Zhang Q, Li J, Yang X, Wu Y F, Zhang Z Y, Wang S H, Wang H Z, Zhang Y G. Solar-induced chlorophyll fluorescence and its link to canopy photosynthesis in maize from continuous ground measurements. Remote Sensing of Environment, 2020, 236: 111420.

- [25] Wu G H, Guan K Y, Jiang C Y, Kimm H, Miao G F, Bernacchi C J, Moore C E, Ainsworth E A, Yang X, Berry J A, Frankenberg C, Chen M. Attributing differences of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF)-gross primary production (GPP) relationships between two C4 crops: corn and *Miscanthus*. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 323: 109046.
- [26] Liu L Y, Guan L L, Liu X J. Directly estimating diurnal changes in GPP for C3 and C4 crops using far-red Sun-induced chlorophyll fluorescence. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 1-9.
- [27] Yang K G, Ryu Y, Dechant B, Berry J A, Hwang Y, Jiang C Y, Kang M, Kim J, Kimm H, Kornfeld A, Yang X. Sun-induced chlorophyll fluorescence is more strongly related to absorbed light than to photosynthesis at half-hourly resolution in a rice paddy. Remote Sensing of Environment, 2018, 216: 658-673.
- [28] Hu J C, Liu L Y, Guo J, Du S S, Liu X J. Upscaling solar-induced chlorophyll fluorescence from an instantaneous to daily scale gives an improved estimation of the gross primary productivity. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1663.
- [29] Bai J, Zhang H L, Sun R, Liu X J, Liu L Y. The difference between the responses of gross primary production and Sun-induced chlorophyll fluorescence to the environment based on tower-based and TROPOMI SIF data. Applied Sciences, 2024, 14(2): 771.
- [30] Zheng Y, Shen R Q, Wang Y W, Li X Q, Liu S G, Liang S L, Chen J M, Ju W M, Zhang L, Yuan W P. Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation, 1982-2017. Earth System Science Data, 2020, 12(4): 2725-2746.
- [31] Bond-Lamberty B, Bailey V L, Chen M, Gough C M, Vargas R. Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. Nature, 2018, 560(7716): 80-83.
- [32] Fu C S, Wang G L, Yang Y T, Wu H W, Wu H H, Zhang H X, Xia Y. Temperature thresholds for carbon flux variation and warming-induced changes. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(21): e2023jd039747.
- [33] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X H, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [34] Zhang Y, Xiao X M, Zhang Y G, Wolf S, Zhou S, Joiner J, Guanter L, Verma M, Sun Y, Yang X, Paul-Limoges E, Gough C M, Wohlfahrt G, Gioli B, van der Tol C, Yann N, Lund M, de Grandcourt A. On the relationship between sub-daily instantaneous and daily total gross primary production: implications for interpreting satellite-based SIF retrievals. Remote Sensing of Environment, 2018, 205: 276-289.
- [35] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 164-176.
- [36] Verma M, Schimel D, Evans B, Frankenberg C, Beringer J, Drewry D T, Magney T, Marang I, Hutley L, Moore C, Eldering A. Effect of environmental conditions on the relationship between solar-induced fluorescence and gross primary productivity at an OzFlux grassland site. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, 122(3): 716-733.
- [37] 刘良云,关琳琳,彭代亮,胡勇,刘玲玲. C3、C4 作物的光保护机制差异的光谱探测研究. 遥感学报, 2012, 16(4): 783-795.
- [38] Sage R F, Zhu X G. Exploiting the engine of C(4) photosynthesis. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(9): 2989-3000.
- [39] Evans J R, Poorter H. Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: the relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain. Plant, Cell & Environment, 2001, 24(8): 755-767.
- [40] 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.
- [41] Zhu X D, Hou Y, Zhang Y G, Lu X L, Liu Z Q, Weng Q H. Potential of Sun induced chlorophyll fluorescence for indicating mangrove canopy photosynthesis. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(4): e2020jg006159.
- [42] Sage R F, Stata M. Photosynthetic diversity meets biodiversity: The C4 plant example. Journal of Plant Physiology, 2015, 172: 104-119.
- [43] Santiago L S, Silvera K, Andrade J L, Dawson T E. Functional strategies of tropical dry forest plants in relation to growth form and isotopic composition. Environmental Research Letters, 2017, 12(11): 115006.
- [44] Liang J Y, Xia J Y, Liu L L, Wan S Q. Global patterns of the responses of leaf-level photosynthesis and respiration in terrestrial plants to experimental warming. Journal of Plant Ecology, 2013, 6(6): 437-447.
- [45] Yang J D, Zhao H L, Zhang T H. Diurnal patterns of net photosynthetic rate, stomatal conductance, and chlorophyll fluorescence in leaves of fieldgrown mungbean(*Phaseolus radiatus*) and millet(*Setaria italica*). New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2004, 32(3): 273-279.
- [46] 王海娣,高玉红,吴兵,剡斌,崔政军,王一帆.轮作模式对旱地胡麻光合生理特性及其产量的影响.中国油料作物学报,2024,46(1): 155-165.
- [47] Raya-Sereno M D, Alonso-Ayuso M, Pancorbo J L, Gabriel J L, Camino C, Zarco-Tejada P J, Quemada M. Residual effect and N fertilizer rate detection by high-resolution VNIR-SWIR hyperspectral imagery and solar-induced chlorophyll fluorescence in wheat. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 4404017.
- [48] 刘妍,刘兆新,何美娟,刘婷如,杨坚群,甄晓宇,栗鑫鑫,李向东,杨东清.冬闲期耕作方式对连作花生叶片衰老和产量的影响.作物 学报,2019,45(1):131-143.
- [49] 李夏,妙佳源,高小丽,杨璞,高扬,冯佰利.连作条件下谷子叶片衰老与活性氧代谢研究.中国农业大学学报,2016,21(4):1-9.
- [50] 陈军, 王立光, 叶春雷, 李进京, 欧巧明, 罗俊杰. 耕作制度对胡麻土壤酶活性的影响. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 177-184, 214.