

引 用 格 式: Wang Yonglin, Chi Yonggang, Zhou Lei. Spatiotemporal Patterns and Climate Regulation of Gross Primary Productivity and Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence of Terrestrial Vegetation in China from 2007 to 2018[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(3): 692-701. [王永琳, 迟永刚, 周蕾. 2007~2018 年中国陆地植被总初级生产力与日光诱导叶绿素荧光的时空格局及其气候调控[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(3): 692-701.] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.3.0692

2007~2018 年中国陆地植被总初级生产力与日光诱导叶绿素荧光的时空格局及其气候调控

王永琳, 迟永刚, 周 蕾

(浙江师范大学 地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004)

摘要: 日光诱导叶绿素荧光(SIF)作为总初级生产力(GPP)的替代指标,在区域 GPP 估算上表现出巨大的潜力。植被 SIF 和 GPP 具有较好的线性关系,但是不同的气候条件对 SIF-GPP 关系的影响仍不清晰。利用 2007~2018 年 MODIS GPP 和 GOME-2 SIF 以及环境条件(温度、降水、辐射等)研究中国陆地植被 GPP 和 SIF 的时空格局以及环境因子的调控。结果发现中国陆地植被 GPP 和 SIF 时空格局是一致的,但是作为表征光能分配的新指标 GPP/SIF 在空间分布上存在显著的差异。此外, SIF 产量(SIF_{yield})受到约束 GPP 的环境因子(最小温度、饱和水汽压差、土壤水分和 APAR)的共同调控,间接证实了 SIF 和 GPP 紧密的联系。因此,由于在时间和空间上 SIF 与 GPP 的关系受到环境条件的调控,使用基于卫星的 SIF 准确估算区域 GPP 应该考虑环境因子的约束。

关 键 词: 总初级生产力(GPP);日光诱导叶绿素荧光(SIF);GPP/SIF;时空格局;气候控制

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)03-0692-10

1 引 言

总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)是陆地植物通过光合作用吸收的碳量,是陆地生物圈与大气之间最大的 CO_2 通量,在全球碳循环和气候变化中发挥着重要作用^[1-2]。因此准确量化区域 GPP 对于理解陆地生态系统和大气的作用至关重要^[3]。但是遥感驱动的 GPP 估算模型大多依赖于传统的遥感指数,仍存在较大的不确定性^[4]。近 10 a 以来,由于植物叶绿素荧光与光合作用在生理上的紧密联系^[5-6],卫星反演的日光诱导叶绿素荧光(Sun-Induced chlorophyll Fluorescence, SIF)成为区域尺度估算植被光合作用和生产力的新手段^[7-8]。这主要归因于来自光反应机制的叶绿

素荧光能够表征植物光合活性,而基于“绿度”的植被指数仅能够反应植被的潜在光合信息^[8]。因此,基于卫星 SIF 为区域 GPP 估算提供了更好的前景,探究区域尺度上 SIF 与 GPP 的关联机制以及气候响应至关重要的。

以往的研究发现在冠层和区域尺度 SIF 与 GPP 的关系是线性的^[9-13],但是这种线性关系受到了环境因子的调节^[4]。研究表明 SIF 和 GPP 关联性很大程度上依赖于植物吸收的光合有效辐射(sorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR),这主要由于荧光和光合是植被吸收光能后的三大途径中的两个过程^[6,14]。同时,也有研究表明高光照和高水汽压差(Vapor Pressure Deficit, VPD)会导致农田和森林生态系统 SIF 的减少^[15],而环境条件会

收稿日期:2021-01-07;修订日期:2022-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(418710843),浙江省软科学研究计划项目(2022C35095),金华市科技计划项目(2020-4-184 和 2021-4-340)和浙江师范大学自主设计科研项目(2021ZS0702)。

作者简介:王永琳(1996—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事植被生态遥感研究。E-mail: wyl520725@163.com

通讯作者:周 蕾(1983—),女,浙江嘉兴人,副教授,主要从事全球变化生态学研究。E-mail: zhoulei@zjnu.cn

影响草地生态系统基于卫星的SIF与通量塔的GPP的关系^[16]。除此以外,越来越多的研究报告区域尺度上的气候干旱会导致SIF的减少^[17-19]。尽管先前的研究表明SIF受到限制光合作用光利用率(Light Use Efficiency, LUE)的环境应力的影响,但是环境条件对于SIF和GPP关系的影响仍需要进一步探究。

GPP/SIF被作为衡量GPP与SIF关系的新指标,包含光能分配的信息^[4]。在基于LUE的GPP模型中^[20],GPP可以通过公式(1)计算,而SIF可以表示为公式(2):

$$GPP = LUE \times PAR \times fPAR = LUE \times APAR \quad (1)$$

$$SIF = SIF_{Yield} \times PAR \times fPAR = SIF_{Yield} \times APAR \quad (2)$$

其中:LUE表示为光合作用的光能利用率, SIF_{Yield} 表示为SIF的产量,PAR和fPAR分别表示为光合有效辐射和植物吸收光合有效辐射的比例^[12,20]。植物吸收的光能有3个利用途径:叶绿素荧光,光合作用和热耗散(Non-Photochemical Quenching, NPQ),叶绿素荧光与光合作用的关系通过复杂的耗散机制调节^[5-6,21]。但是目前,使用GPP/SIF表征的光能分配的时空格局仍不清晰,不同环境应力对于SIF和GPP关系的影响仍需进一步的探究。

采用2007~2018年中国GOME-2 SIF与MODIS GPP协同环境条件(温度、降水和辐射)以及气候限制因子(最小温度、VPD,土壤水分和APAR)来研究GPP与SIF关系的时空格局以及探讨环境条件对于GPP和SIF关系的影响。主要目的在于:①揭示中国陆地生态系统GPP与SIF关系的时空格局;②探究环境应力对于陆地生态系统GPP与SIF关系的调控机制。

2 数据与方法

2.1 数据

2.1.1 SIF数据

研究采用了2007~2018年V28的3级月尺度GOME-2 SIF数据^[22],空间分辨率 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,下载自NASA的AVDC (https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/MetOp/GOME_F/v28/MetOp-A/level3/aura)。GOME-2搭载在MetOp-A卫星上,过境时间约为9:30,使用主成分分析算法在740 nm波长附近反演了SIF数据^[22]。本研究中由于噪声导致的负值被处理成0。

2.1.2 GPP数据

GPP数据来自MODIS的MOD17A2产品,下载自NASA的LAADS DAAC (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MOD17A2H--6>),具有1 km的空间分辨率^[20]。为了与SIF数据匹配,8 d分辨率的MODIS GPP数据整合到月尺度,并重采样到 0.5° 。

2.1.3 气象数据

2007~2018年每日平均温度,每日平均最小温度(tmn),降水和水汽压数据来自CRU(Climatic Research Unit)TS4.04数据集(<https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/89e1e34ec3554dc98594a5732622bce9>),1901~2019年每月网格化的气候数据是使用ADW(Angular-Distance Weighting)插值生成的,具有 0.5° 的空间分辨率。

2007~2018年中国光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)数据来自CERES(Clouds Earth's Radiant energy system)的SYN1deg-Month Ed4A产品(<https://asdc.larc.nasa.gov/project/CERES>)。每月PAR数据具有 1° 的空间分辨率,将其重采样到 0.5° 以匹配其他数据集。

2007~2018年中国VPD是利用CRU的每月的温度和水汽压数据计算得到,表征饱和水汽压与实际水汽压的差值。研究采用温度数据作为Goff-Gratch公式^[24]的输入参数计算饱和水汽压。

2007~2018年土壤含水量(Soil Moisture, SM)数据来自MERRA-2(Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) avgM_2d_lnd_Nx数据集的根区土壤水分数据(0~1 m)。本研究将每月网格化的土壤水分数据从 $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ 重采样到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

2.1.4 MODIS数据

2007~2018年中国植物吸收光合有效辐射的比例(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, fPAR)数据来自MODIS的MOD15A2H产品。8 d分辨率的fPAR数据整合到每月,并重采样到 0.5° 。

2007~2018年中国归一化差异植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据和近红外反射率(Near-Infrared Reflectance, NIR)数据来自MODIS的MOD13A3产品。该数据具有1 km的空间分辨率和每月的时间分辨率,将其重采样到 0.5° 。

2.2 方法

2.2.1 计算每日 SIF

由于 GOME-2 SIF 是卫星过境时的瞬时观测值,而 MODIS GPP 是每天植物固定 CO₂ 的累计值,为了将两者匹配,瞬时的 SIF 需要校正到每日^[25]。尤其是在高纬度地区,由于 GOME-2 本地

过境时间可能与 9:30 略有偏离并且白天的长度和太阳天顶角的可变性,因此无法直接将过境时间的荧光信号与 GPP 进行比较^[12]。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^[26]。每日平均 SIF 可以计算为公式(3):

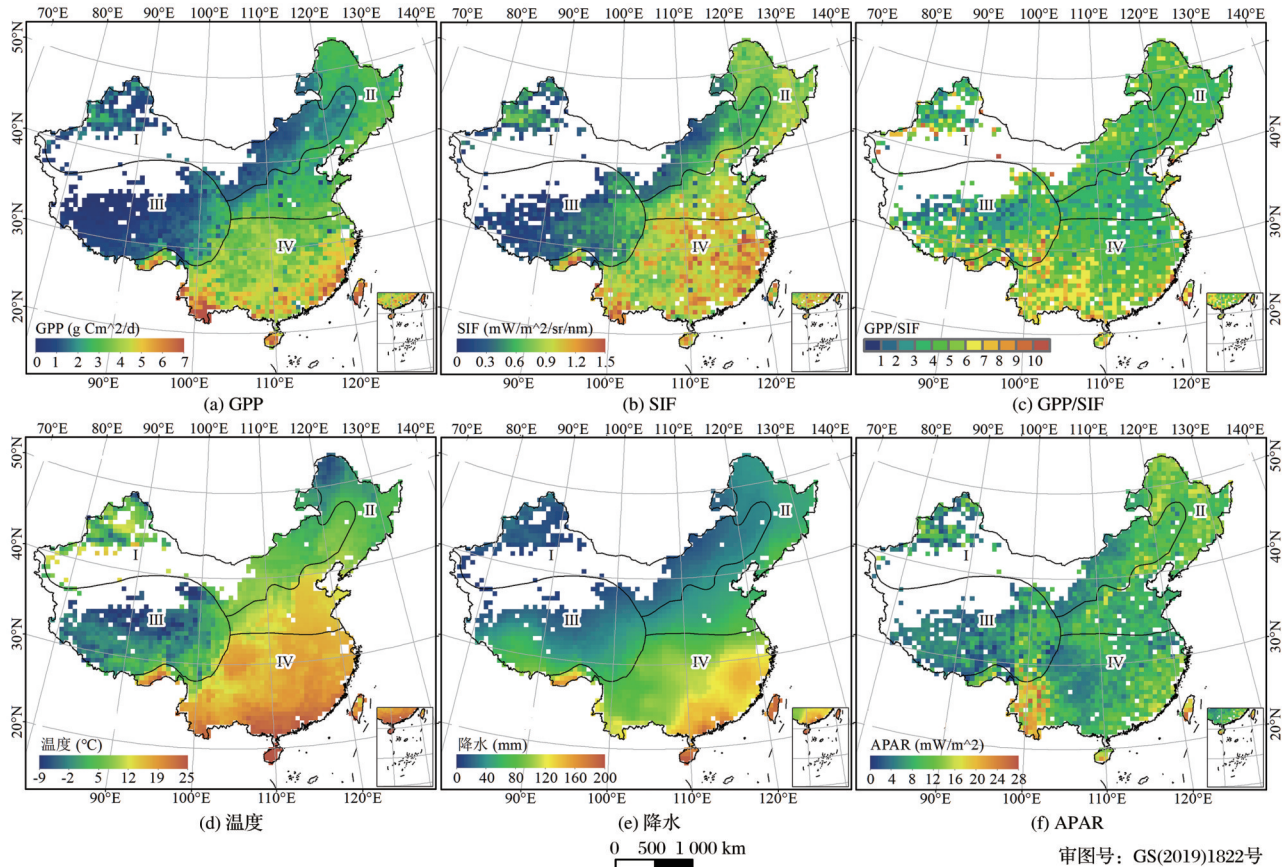


图1 2007~2018年中国 GPP, SIF, GPP/SIF 和气候条件(温度,降水和 APAR)多年均值的空间格局

Fig.1 The spatial pattern of multi-year average GPP, SIF, GPP/SIF, and climatic conditions (temperature, precipitation, and APAR) in China during 2007 to 2018

$$\text{SIF}_{\text{daily}} = \text{SIF}_{\text{inst}} \times \frac{\int_0^{24} \text{COS}(\text{SZA}(t)) dt}{\text{COS}(\text{SZA}(t_0))} \quad (3)$$

其中: $\text{SIF}_{\text{daily}}$ 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, $\text{COS}(\text{SZA}(t_0))$ 表示为卫星过境时太阳天顶角的余弦, 卫星过境当天太阳天顶角的每日积分的积分间隔被设置为 10 min, 并去除夜间数据^[25]。SIF 从瞬时到每日的校正因子随着时间和纬度变化^[26]。

2.2.2 总冠层 SIF

基于卫星监测的离开冠层的 SIF 仅代表植物冠层中所有叶子释放的荧光的一部分^[27]。荧光释放后, 会在冠层内重新吸收或散射, 因此在观测方向

上只有一定比例的荧光被监测到^[28]。根据 Zeng 等 (2019) 的研究, 冠层 SIF 的逃逸概率可以用公式(4)计算:

$$f_{\text{esc}} = \frac{\text{NIR}_v}{f\text{PAR}} = \frac{\text{NIR} \times \text{NDVI}}{f\text{PAR}} \quad (4)$$

其中: f_{esc} 表示植物释放的 SIF 离开冠层的概率(范围在 0~1 之间), NIR_v 表示植被的近红外反射率指数, NIR 表示近红外反射率, NDVI 表示归一化差异植被指数。因此总冠层 SIF ($\text{SIF}_{\text{total}}$) 可以被表示为公式(5):

$$\text{SIF}_{\text{total}} = \frac{\text{SIF}_{\text{obs}}}{f_{\text{esc}}} = \text{SIF}_{\text{obs}} \times \frac{f\text{PAR}}{\text{NIR}_v} \quad (5)$$

其中: $\text{SIF}_{\text{total}}$ 表示为植物释放的总冠层 SIF, SIF_{obs} 表示从卫星观测的 SIF。

2.2.3 统计方法

由于中国气候多样、地形复杂,研究将中国划分为4个气候区域^[29-30]。如图1所示,分别为温带大陆性季风气候区(I)、温带季风气候区(II)、高原山地气候区(III)、亚热带-热带季风气候区(IV)。

首先使用每日校正因子将瞬时SIF校正到每日均值SIF,然后使用逃逸概率计算为总冠层SIF。将经过两次校正的GOME-2 SIF数据统一表示为SIF。首先计算了2007~2018年每月每个像元的GPP/SIF,去除SIF为零值的像元。在此基础上计算GPP、SIF、GPP/SIF、温度、降水和APAR数据多年平均值来探究其空间分布特征。同时计算了LUE、 SIF_{Yield} 、GPP/SIF分别与tmn、VPD、SM和APAR的偏相关关系来探究环境因子对于SIF和GPP关系的影响,并且将剩余的环境因子设置为控制变量来减少环境因子之间交互影响。最后分别计算了tmn($1^{\circ}C$)、VPD(0.05 kPa)、SM($0.01\text{ m}^3/\text{m}^3$)和APAR($2\text{ W}/\text{m}^2$)在固定间隔内LUE、 SIF_{Yield} 和

GPP/SIF的均值来探究对于环境因子响应规律,并且去除单位间隔内数量少于100的均值以获得相对可靠的变化曲线。

3 结果与分析

3.1 GPP、SIF和GPP/SIF的时空分布格局

中国陆地生态系统2017~2018年GPP、SIF、GPP/SIF以及气候因子(温度、降水和APAR)多年均值空间分布格局如图1所示。结果表明GPP与SIF具有一致的空间分布,高GPP与SIF主要分布在华南和华北平原(图1(a)和图1(b))。但是GPP/SIF的空间分布与GPP和SIF不同,高GPP/SIF主要分布在中国西南和东南区域,而GPP/SIF的低值主要分布在华北平原和青藏高原(图1(c))。温度和降水的空间分布与GPP和SIF相似(图1(d)和图1(e)),在华南具有高温和多雨的气候条件,但是高APAR主要集中在中国西南、东南和东北区域(图1(f))。

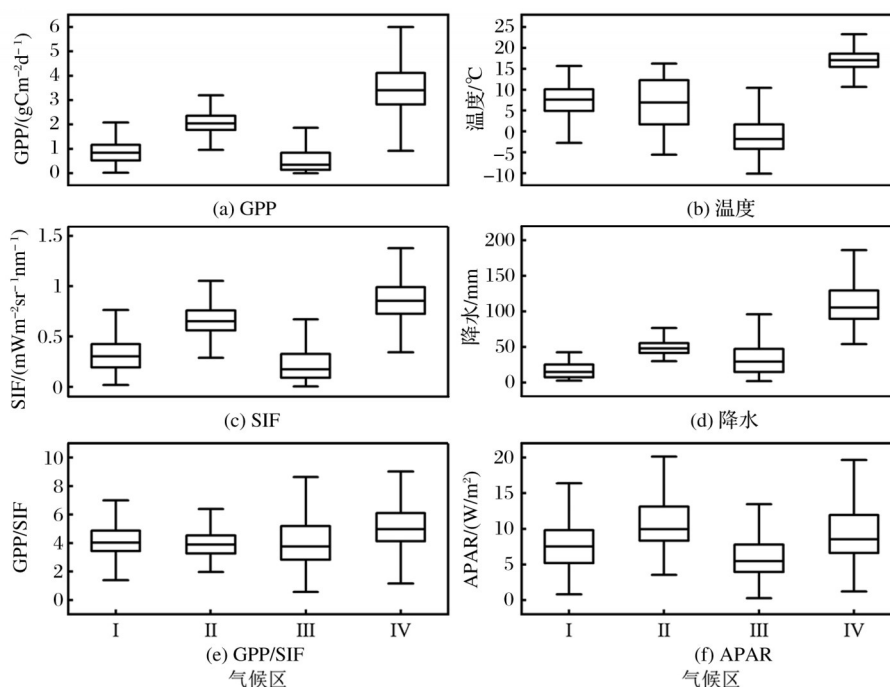


图2 不同气候区GPP、SIF、GPP/SIF和气候条件(温度、降水和APAR)的箱线图

Fig.2 Box plots of GPP, SIF, GPP/SIF and climatic conditions (temperature, precipitation, and APAR) in different climate zones

不同气候区之间环境条件具有明显差异,亚热带-热带季风气候区(IV)表现为高温、高降水和高APAR(图2(b)、图2(d)和图2(f))。研究发现高GPP分布在亚热带-热带季风气候区(IV),其次是温带季风气候区(II),高原山地气候区(III)表现为

最低的GPP(图2(a))。而且SIF在不同气候区的分布与GPP是一致的(图2(c))。在不同气候区中GPP/SIF并没有表现出明显的差异,GPP/SIF在亚热带-热带季风气候区(IV)表现出相对较高的均值(图2(e))。

2007~2018 年 GPP/SIF 多年均值的季节变化表现出双峰曲线,分别出现在 5 月和 10 月,而低谷出现在 7 月(图 3(a))。GPP 与 SIF 的季节变化是高度一致的,尽管 SIF 的峰值比 GPP 的峰值提早 1 个

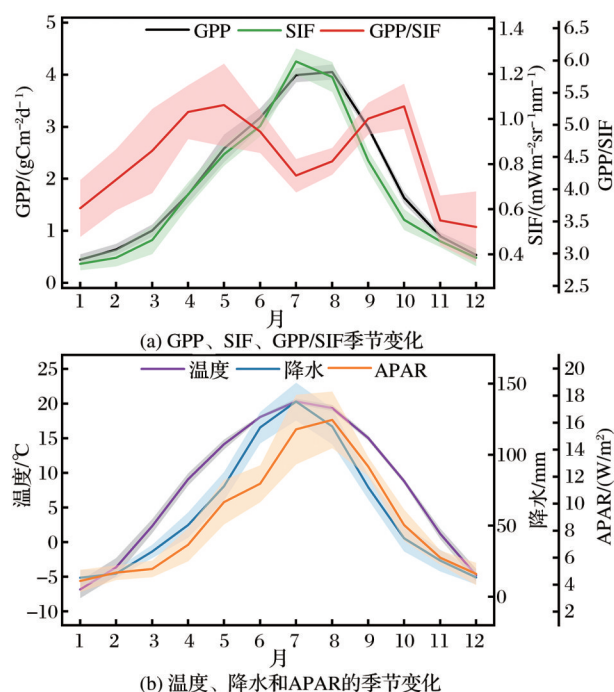


图 3 2007~2018 年中国 GPP、SIF、GPP/SIF 和气候条件 (温度,降水和 APAR)的季节变化

Fig.3 Seasonal changes GPP, SIF, GPP/SIF, and climate conditions (temperature, precipitation, and APAR) in China from 2007 to 2018)

月。温度、降水和 APAR 的季节动态呈现单峰曲线,峰值出现在 7 月,而 APAR 的峰值出现在 8 月(图 3(b)),与 GPP 的季节动态具有高度的一致性。

3.2 LUE、SIF_{Yield}和 GPP/SIF 对于环境条件的响应

根据 2007~2018 年中国 LUE、SIF_{Yield}、GPP/SIF 与环境因子(tmn, VPD, SM 和 APAR)的偏相关分析,发现环境因子调控 LUE、SIF_{Yield}和 GPP/SIF 的季节变化(图 4)。LUE 与环境因子的偏相关关系的空间分布存在明显的差异。LUE 与 tmn 在中国北方显著正相关,而 APAR 对于 LUE 限制的空间格局与 tmn 相反,表现出显著的负相关。在华北区域 VPD 与 LUE 负相关,而 SM 与 LUE 在青藏高原和华北区域正相关。同时, SIF_{Yield} 与环境因子的偏相关关系的空间格局与 LUE 相似,但是 SIF_{Yield} 与环境因子的偏相关系数低于 LUE。在华北区域 APAR 与 SIF_{Yield} 正相关,而与 LUE 负相关。此外, GPP/SIF 与环境因子的偏相关关系的空间格局与 LUE 和 SIF_{Yield} 不同(图 4)。在空间上, GPP/SIF 与

tmn 在华北和东北区域正相关,也与 VPD 在中国东北区域正相关,而 GPP/SIF 与 APAR 负相关。

不同气候区的 LUE、SIF_{Yield}、GPP/SIF 与环境因子的偏相关关系如图 5 所示,发现 LUE 和 SIF_{Yield} 与 tmn 和 APAR 具有更高的偏相关系数,其次是 VPD 和 SM。在温带大陆性气候区(Ⅰ)和温带季风气候区(Ⅱ)LUE 与 tmn 具有更高的偏相关关系,但是在温带大陆性气候区(Ⅰ)SIF_{Yield} 与 tmn 的偏相关系数较低。SIF_{Yield} 与 APAR 的偏相关系数在亚热带-热带季风气候区(Ⅳ)具有较高的数值,其次是高原山地气候区(Ⅲ)。SIF_{Yield} 在不同气候区与环境因子的相关性要比 LUE 小。GPP/SIF 在不同气候区与环境条件的偏相关关系最高值出现在温带季风气候区(Ⅱ)的 tmn,其次是 APAR 和 VPD。但是 GPP/SIF 与环境因子的相关性比 LUE 和 SIF_{Yield} 要弱很多。

如图 6 所示, LUE、SIF_{Yield} 和 GPP/SIF 在不同环境条下的具有明显的变化趋势。研究发现 LUE、SIF_{Yield} 对于 tmn、VPD、SM 和 APAR 的响应是高度一致的。随着 tmn 的增加而增加,直到 22 $^{\circ}\text{C}$ 后出现减少。随着 VPD 的增加而减少,直到 0.9 kPa 后趋于平缓。随着 SM 的增加而增加,但是在低 SM ($< 0.16 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 条件下变化并不显著。随着 APAR 的增加而减少。而 GPP/SIF 对于 tmn 和 VPD 的响应与 LUE 和 SIF_{Yield} 存在明显差异。GPP/SIF 随着 tmn 增加,直到 5 $^{\circ}\text{C}$ 后缓慢减少。在低 VPD ($< 0.7 \text{ kPa}$) 条件下, GPP/SIF 趋于平缓,随后增加至 1 kPa 处的峰值又迅速减少。GPP/SIF 对于 SM 和 APAR 的响应与 LUE 和 SIF_{Yield} 相似。GPP/SIF 随着 SM 增加,但是在低 SM ($< 0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$) 条件下出现波动。GPP/SIF 在低 APAR ($< 8 \text{ W/m}^2$) 条件下先增加,然后逐渐减少。

4 讨论

4.1 GPP/SIF 的时空格局

研究发现 GPP 和 SIF 具有一致的空间格局,高值主要集中在温带季风气候区和热带-亚热带季风气候区(图 1)。同时 SIF 和 GPP 还具有一致的季节动态,在追踪生产力季节变化上表现出巨大的潜力(图 3)。GPP/SIF 可以表示为 LUE 和 SIF_{Yield} 的比值,能够表征光能分配的信息,被作为研究 GPP 和 SIF 关系新指标^[4]。结果表明 GPP/SIF 的时空格局与 GPP 和 SIF 不同,而且具有明显的空间异质性,高值出现在中国西南和东南区域,低值则集中

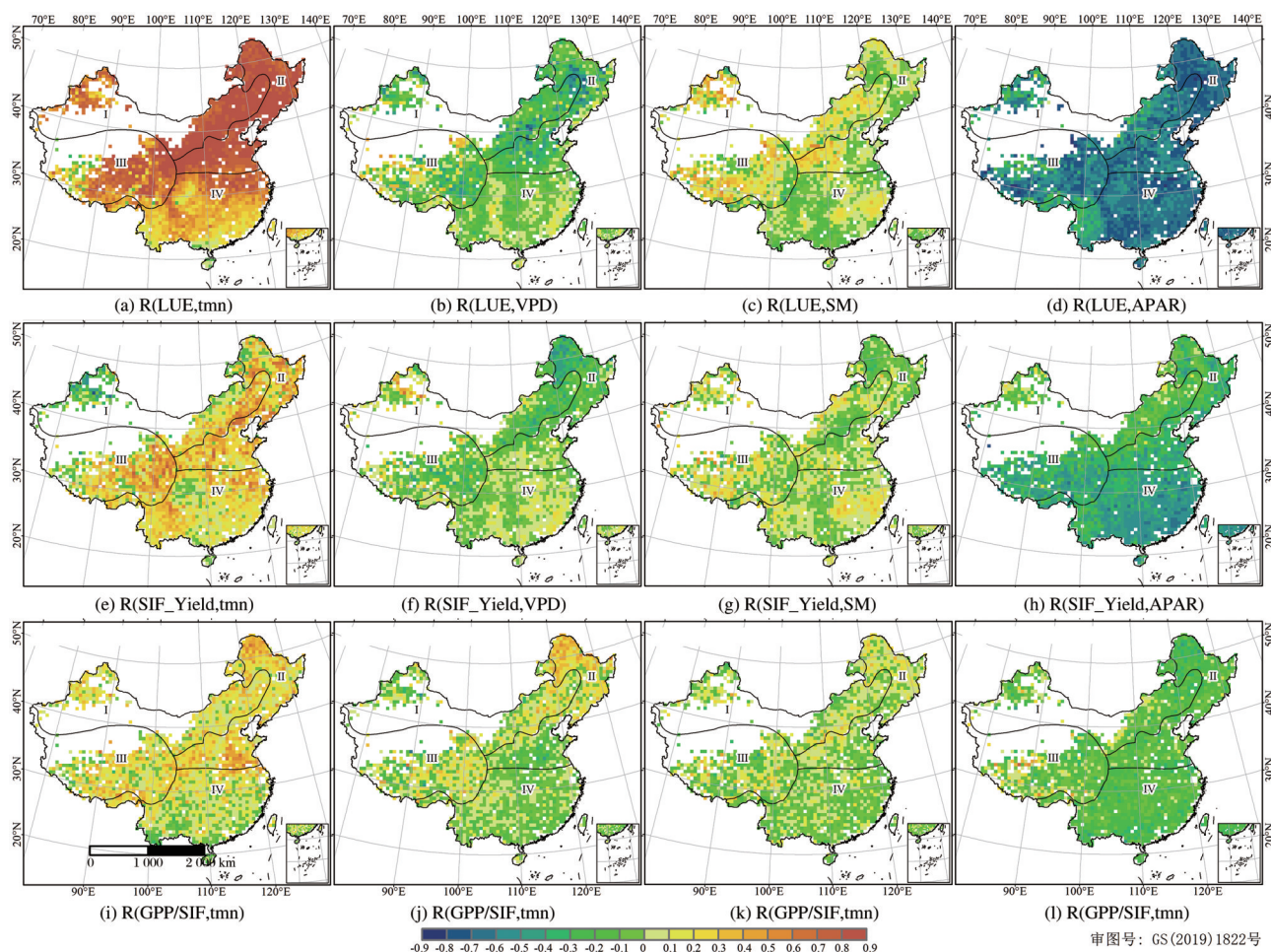


图4 2007~2018年中国LUE、SIF_{Yield}、GPP/SIF分别与tmn、VPD、SM、APAR的偏相关关系的空间分布

Fig.4 The spatial distribution of the partial correlation between LUE, SIF_{Yield}, GPP/SIF and tmn, VPD, SM, and APAR in China from 2007 to 2018

在华北平原和青藏高原。GPP/SIF与APAR和降水的多年均值具有相似的空间格局。在高植物吸收光有效辐射辐射和高降水的区域,更多的能量分配给植物光合作用,导致较高的GPP/SIF。在环境条件受到限制的区域,吸收的能量通常会发生竞争^[12,31-33]。Chen等^[4](2020)研究表明在空间上GPP/SIF从冷湿气候到干热气候逐渐下降。随着水分供应的减少,干旱胁迫会更大程度的限制GPP,因此表现出较低的GPP/SIF。因此,使用基于卫星的SIF估算GPP时,如果不考虑区域之间环境条件的巨大差异,通用的SIF-GPP线性关系可能会导致植被生产力估算出现误差。GPP/SIF的季节动态表现出显著的双峰曲线,这揭示了荧光和光合作用在季节上能量竞争的动态过程。当植物开始生长时,更多的能量用于光合作用。但是在高APAR的时候,光合作用光利用率可能比叶绿素荧光产量受到更多的限制,导致GPP/SIF下降,随着

辐射限制的减弱,GPP/SIF又逐渐上升,当植物生长季节结束时候,用于光合作用的能量减少,导致GPP/SIF的减少。植物光合作用能量竞争过程的机理的研究需要进一步针对不同生物群落和气候区的研究。

研究使用卫星过境时间的太阳天顶角的余弦计算的每日校正因子将瞬时SIF估算为每天平均SIF^[12,25-26],减少了时间和纬度对于计算GPP/SIF的误差。此外,有研究报道森林复杂的冠层结构会由于荧光信号的重吸收、散射和碰撞只有少量的SIF离开冠层被观测到^[27-28],导致森林的GPP/SIF高于农田和草地。研究使用通过NIRv和fPAR计算的逃逸概率估算总冠层SIF^[28],很大程度上减少了冠层结构的影响,仍发现GPP/SIF的具有明显空间变异。关于不同生物群落之间GPP与SIF是否具有通用的线性关系存在很大争议^[9,25,27,34-35],有研究报道不同植被功能类型(C3和C4)的GPP和SIF

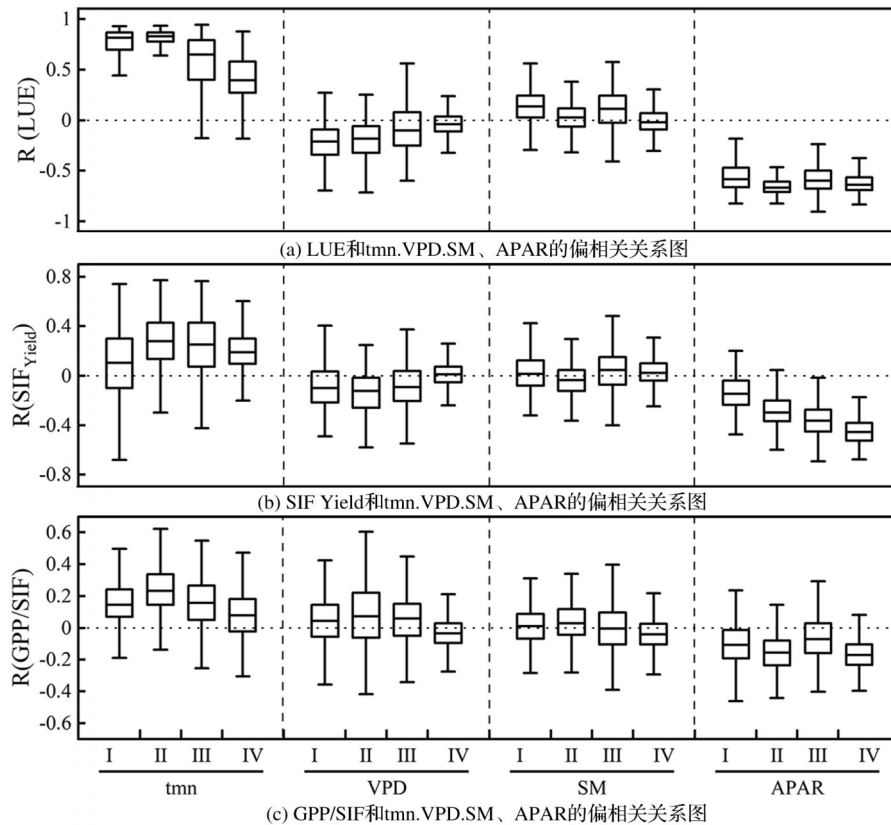


图 5 不同气候区 LUE、SIF_{Yield}、GPP/SIF 分别和 tmn、VPD、SM、APAR 的偏相关关系的箱线图

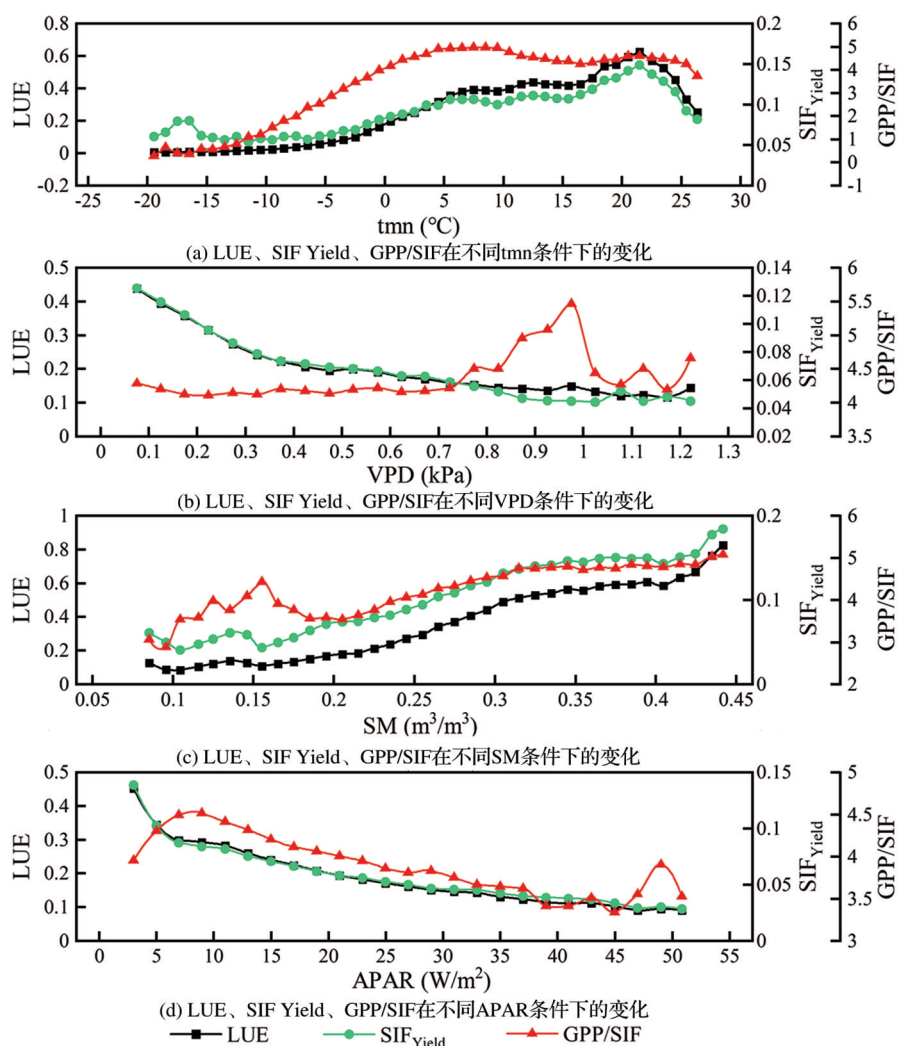
Fig.5 Box plot of the partial correlation between LUE, SIF_{Yield}, GPP/SIF and environmental conditions (tmn, VPD, SM, and APAR) in different climate regions

的线性关系的斜率存在明显的差异^[27,37],具有更高光合光利用率的 C4 植物会表现更高的 GPP/SIF。也有研究报道混合像元会影响 GPP 和 SIF 关系^[27],非均匀像元之间的 GPP 和 SIF 线性关系的斜率具有更小的变异。GOME-2 SIF 数据在高太阳天顶角时会产生不可避免的正偏差^[25],这可能会导致高纬度冬季 GPP/SIF 偏低。因此,更准确地描述 GPP 和 SIF 的关系需要具有更加精细的时空分辨率的 SIF 数据和更加准确校正方法以及基于生理机制的理解。尽管本研究粗糙的空间分辨率和不可避免的系统误差可能会对 GPP 和 SIF 关系的空间格局的研究造成一些误差,但是经过了校正的数据在表征 GPP/SIF 空间格局上仍具有重要的参考价值。

4.2 环境条件调控 GPP 和 SIF 的关系

研究发现环境条件会调控 GPP 和 SIF 的关系。首先,SIF 的季节变化主要依赖于 APAR,这决定了 SIF 与 GPP 紧密的联系^[14]。同时 SIF 产量还受到环境因子的限制(图 4),而且 SIF 产量与 GPP 的光能利用率在不同的环境因子条件下具有一致的响应(图 6)。最近的一项研究也表明 SIF 在空间上受到

SM 与 VPD 的限制^[37-38]。这表明 SIF 还包含约束 GPP 的环境因子的信息,证明了 SIF 和 GPP 之间更紧密的联系。先前的一项研究使用 SIF 与 PAR 的比值作为生产力的代理研究环境条件的控制^[31]。但是本研究发现环境因子对于 SIF 产量和 GPP 光利用率的空间控制的格局存在差异(图 4),因此直接使用 SIF 研究生产力的气候驱动存在不确定性。最后,研究发现 GPP/SIF 还受到 tmn 和 APAR 的显著控制,以及水分条件的限制。当水分亏缺时,植物通过调节气孔减少水分流失,所限制的光合作用速率,也减少了作为光合作用副产品叶绿素荧光的产生。在高辐射条件下,过量的能量通过自我保护机制 NPQ 向外辐射热量以避免损伤植物,这导致另外两个光利用途径(光合作用和叶绿素荧光)的减少。在环境应力条件下,NPQ 的增加可能会导致荧光和光合作用的关系发生变化,如果荧光和光合作用成比例协同变化,则两者关系保持稳定,否则会发生变异^[16]。而且,有研究表明 PRI(光化学植被指数)作为 NPQ 的代理能够改善 GPP 和 SIF 的关系^[39]。环境应力条件导致的 NPQ 的变异以及对于

图6 2007~2018年中国LUE、SIF_{Yield}、GPP/SIF在不同 t_{mn} 、VPD、SM、APAR条件下的变化Fig.6 Changes LUE, SIF_{Yield}, GPP/SIF under different environmental conditions (t_{mn} , VPD, SM, and APAR) in China from 2007 to 2018

GPP和SIF的关系的调控机制仍需要进一步基于生理机理的研究。因此,环境条件对于GPP和SIF关系的影响是不可忽视的,使用基于卫星SIF估算GPP需要考虑将环境因子纳入约束条件。

4.3 不确定性分析

研究使用的GOME-2 SIF数据的时间分辨率是每月,空间分辨率是 0.5° 。为了与SIF数据匹配,将其他数据均重采样到 0.5° 并聚合到每月。其次,GOME-2监测的SIF值对绝对太阳辐射度敏感,GOME-2仪器在使用期限内会退化,因此会对长时间序列的分析造成一定的影响。Joiner等(2013)试图通过监测太阳辐射度值的降低来解释,但是对数据的调整可能仍不完善,目前长时间序列的卫星SIF和GPP的关联研究仍采用GOME-2 SIF^[3-4]。最后,在计算SIF逃逸概率时,为了能够表示SIF逃

逸概率的方向性,近红外反射率应与SIF同步获取来获得相同的成像几何条件,但是研究使用的GOME-2 SIF是每月的格网化产品,无法对其进行方向性校正。虽然没有计算出精确的逃逸概率,但是近红外SIF在冠层内的重吸收较少,使用MODIS NIR_v和FPAR估算的逃逸概率可以对减少冠层结构的影响起到一定作用^[39]。基于前人的研究^[3-4],GOME-2 SIF数据仍具有较高的可靠性,尤其是本研究使用经过两次校正的SIF数据,减少了时间、纬度和冠层结构的影响。

5 结 论

研究表明:①在时空尺度上,GPP和SIF都有较好的一致性,但是GPP/SIF具有明显的空间异质性,主要表现为高值出现在中国的东南,西南区域,

低值出现在华北平原和青藏高原。同时 GPP/SIF 的季节动态呈现表现为双峰曲线,表征了植物生长过程中能量分配的季节变化。②SIF_{Yield} 受到的环境调控,环境条件对于 SIF_{Yield} 和 LUE 相似的控制格局和响应趋势证明了 SIF 和 GPP 的紧密联系以及使用 SIF 代理 GPP 的潜力。但是 tmn、APAR 和水分条件也会约束 GPP/SIF 的变化,进而影响 GPP-SIF 的相关性。因此,厘清 GPP-SIF 相关性在区域、时间和气候空间内的变异机制有助于理解和预测 GPP-SIF 的关系,同时也能在未来气候变化中提高 GPP 的模拟精度。

参考文献 (References):

- [1] Schimel D, Pavlick R, Fisher J B, *et al.* Observing terrestrial ecosystems and the carbon cycle from space[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21, 1762-1776. DOI: 10.1111/gcb.12822.
- [2] Quéré C L, Moriarty R, Andrew R M, *et al.* Global carbon Budget 2015[J]. *Earth System Science Data*, 2015, 7: 349-396. DOI: 10.5194/essd-7-349-2015.
- [3] Ma J, Xiao X M, Zhang Y, *et al.* Spatial-temporal consistency between gross primary productivity and solar-induced chlorophyll fluorescence of vegetation in China during 2007~2014 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1241-1253. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.245.
- [4] Chen A, Mao J, Ricciuto D, *et al.* Moisture availability mediates the relationship between terrestrial gross primary production and solar-induced chlorophyll fluorescence: Insights from global-scale variations[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27: 1144-1156, DOI: 10.1111/gcb.15373.
- [5] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, 59: 89-113. DOI: 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759.
- [6] Porcar-Castell A, Tyystjarvi E, Atherton J, *et al.* Linking Chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: Mechanisms and challenges [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65: 4065-4095. DOI: 10.1093/jxb/eru191.
- [7] Wang Yanan, Wei Jin, Tang Xuguang, *et al.* Progress of using the chlorophyll fluorescence to estimate terrestrial gross primary production[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(5): 975-989.[王雅楠, 韦瑾, 汤旭光, 等. 应用叶绿素荧光估算植被总初级生产力研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(5): 975-989.]
- [8] Zhang Zhaoying, Wang Songhan, Qiu Bo, *et al.* Retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence and dvancements in carbon cycle[J]. *Application Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(1): 37-52.[章钊颖, 王松寒, 邱博, 等. 2019. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展[J]. *遥感学报*, 2019, 23(1): 37-52.]
- [9] Sun Y, Frankenberg C, Wood J D, *et al.* OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence [J]. *Science*, 2017, 358: 5747. DOI: 10.1126/science.aam5747.
- [10] Guanter L, Zhang Y, Jung M, *et al.* Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111: 1327-1333. DOI: 10.1073/pnas.1320008111.
- [11] Guanter L, Frankenberg C, Dudhia A, *et al.* Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from gosat space measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 236-251. DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.006.
- [12] Frankenberg C, Fisher J B, Worden J, *et al.* New Global observations of the terrestrial carbon cycle from gosat: Patterns of plant fluorescence with gross primary productivity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: DOI: Artn L1770610. 1029/2011gl048738.
- [13] Yang X, Tang J W, Mustard J F, *et al.* Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 2977-2987. DOI: 10.1002/2015gl063201.
- [14] 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[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204: 659-671. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.034.
- [15] Paul-Limoges E, Damm A, Hueni A, *et al.* Effect of environmental conditions on sun-induced fluorescence in a mixed forest and a cropland[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 310-323. DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.018.
- [16] Verma M, Schimel D, Evans B, *et al.* Effect of environmental conditions on the relationship between solar-induced fluorescence and gross primary productivity at an ozflux grassland site[J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2017, 122: 716-733. DOI: 10.1002/2016jg003580.
- [17] Wang S H, Huang C P, Zhang L F, *et al.* Monitoring and assessing the 2012 drought in the great plains: Analyzing satellite-retrieved solar-induced chlorophyll fluorescence, drought indices, and gross primary production [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8: 61. DOI: ARTN 6110.3390/rs8020061.
- [18] Yoshida Y, Joiner J, Tucker C, *et al.* The 2010 russian drought impact on satellite measurements of solar-induced chlorophyll fluorescence: Insights from modeling and comparisons with parameters derived from satellite reflectances [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 163-177. DOI: 10.1016/j.rse.2015.06.008.
- [19] Sun Y, Fu R, Dickinson R, *et al.* Drought onset mechanisms

- revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence: insights from two contrasting extreme events [J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2015, 120: 2427-2440. DOI:10.1002/2015jg003150.
- [20] Zhao M, Heinsch F A, Nemani R R, *et al.* Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set [J]. *Remote sensing of Environment*, 2005, 95: 164-176. DOI:10.1016/j.rse.2004.12.011.
- [21] Mohammed G H, Colombo R, Middleton E M, *et al.* Remote sensing of Solar-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF) in vegetation: 50 years of progress [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111177. DOI: 10.1016/j.rse. 2019. 04.030.
- [22] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A, *et al.* The seasonal cycle of satellite chlorophyll fluorescence observations and its relationship to vegetation phenology and ecosystem atmosphere carbon exchange [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 375-391. DOI: 10.1016/j.rse.2014.06.022.
- [23] Joiner J, Guanter L, Lindström R, *et al.* Global monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence from moderate-spectral-resolution near-infrared satellite measurements: Methodology, simulations, and application to GOME-2 [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6: 2803-2823. DOI: 10. 5194/ amt-6-2803-2013.
- [24] Goff J A. Saturation pressure of water on the new Kelvin temperature scale [J]. *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, 1957: 347-354.
- [25] Sun Y, Frankenberg C, Jung M, *et al.* Overview of Solar-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF) from the orbiting carbon observatory-2: Retrieval, cross-mission comparison, and global monitoring for GPP [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 808-823. DOI:10.1016/j.rse.2018.02.016.
- [26] Zhang Y, Xiao X, Zhang Y, *et al.* On the relationship between sub-daily instantaneous and daily total gross primary production: Implications for interpreting satellite-based SIF retrievals [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205: 276-289. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.009.
- [27] Zhang Z, Zhang Y, Porcar-Castell A, *et al.* Reduction of structural impacts and distinction of photosynthetic pathways in a global estimation of GPP from space-borne solar-induced chlorophyll fluorescence [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111722. DOI: 10.5194/bg-15-5779-2018.
- [28] Zeng Y, Badgley G, Dechant B, *et al.* A practical approach for estimating the escape ratio of near-infrared solar-induced chlorophyll fluorescence [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 232: 111209. DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.028.
- [29] Editorial Committee. The 3rd National Assessment Report of climatic changes [M]. Beijing: Science Press, 2015. [编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2015]
- [30] He H L, Wang S Q, Zhang L, *et al.* Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus [J]. *National Science Review*, 2019, 6: 505-514. DOI:10.1093/nsr/nwz021.
- [31] Madani N, Kimball J S, Jones L A, *et al.* Global analysis of bioclimatic controls on ecosystem productivity using satellite observations of Solar-Induced chlorophyll Fluorescence [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9: 530. DOI: ARTN 53010.3390/rs9060530.
- [32] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, *et al.* Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 [J]. *Science*, 2003, 300: 1560-1563. DOI: 10.1126/science.1082750.
- [33] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, *et al.* A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production [J]. *BioScience*, 2004, 54: 547-560. DOI: 10.1641/0006-3568(2004)054[0547: Acsmog]2.0.Co;2.
- [34] Damm A, Guanter L, Paul-Limoges E, *et al.* Far-red sun-induced chlorophyll fluorescence shows ecosystem-specific relationships to gross primary production: An assessment based on observational and modeling approaches [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 91-105. DOI: 10.1016/j.rse. 2015.06.004.
- [35] Li X, Xiao J, He B, *et al.* Solar-induced Chlorophyll fluorescence is strongly correlated with terrestrial photosynthesis for a wide variety of biomes: First global analysis based on Oco-2 and flux tower observations [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24: 3990-4008. DOI:10.1111/gcb.14297.
- [36] Liu L, Guan L, Liu X. Directly estimating diurnal changes in GPP for C3 and C4 crops using far-red sun-induced chlorophyll fluorescence [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 1-9. DOI:10.1016/j.agrformet.2016.06.014.
- [37] Liu L, Gudmundsson L, Hauser M, *et al.* Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4892. DOI: 10.1038/s41467-020-18631-1.
- [38] Song Y, Wang L, Wang J. Improved understanding of the spatially-heterogeneous relationship between satellite solar-induced chlorophyll fluorescence and ecosystem productivity [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107949. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111888.
- [39] Wang X, Chen J M, Ju W. Photochemical Reflectance Index (PRI) can be used to improve the relationship between Gross Primary Productivity (GPP) and Sun-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 246: 111888. DOI:10.1016/j.rse.2020.111888.