

引 用 格 式: Yan Zhirong, Liu Liangyun, Jing Xia. Spatiotemporal Variations of Satellite-based SIF and Its Climate Response in China from 2007 to 2018[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(3): 702-712. [严致荣, 刘良云, 竞霞. 中国区域 2007~2018 植被荧光时空变化与气候响应模式研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(3): 702-712.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.3.0702

中国区域 2007~2018 植被荧光时空变化与气候响应模式研究

严致荣^{1,2}, 刘良云², 竞霞¹

(1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101)

摘要: 基于 GOME-2 卫星日光诱导叶绿素荧光(SIF)产品数据集, 对 2007~2018 年中国区域 SIF 进行时空变化分析, 探讨了中国区域 SIF 对气温、降水、辐射等气候变化的响应。结果表明: ①中国植被区域 SIF 总体上呈现从东南向西北递减的空间分布, 12 a 间年均 SIF 增加了 20.2%, 增幅达 0.034 mW/m²/sr/nm, 增加区域占比为 80.3%, 呈显著增长区域占比 25.7%, 增长区域主要分布在植被较为密集的中国东部、南部和东北部。②季节尺度上, 夏季 SIF 增加的区域和幅度最大, 增幅达 0.065 mW/m²/sr/nm, 增加区域占比为 82.1%, 呈显著增长的区域占比 19.4%, SIF 增长区域与年均 SIF 的趋势基本一样。春季和秋季 SIF 总体也是呈增长的趋势, 而冬季只在中国南部增长趋势明显。③与气候因子的偏相关响应分析表明, 在寒温带针叶林区域, 气温是 SIF 增长主要的影响因子; 在暖温带及温带植被区域, 降水是 SIF 增长主要的影响因子; 在亚热带常绿阔叶林区域, 影响 SIF 增长的更可能是人类活动; 对处于较低纬度地区的热带季风雨林区域来说, 辐射是 SIF 增长的主要影响因子。研究结果揭示了 2007~2018 年间的中国区域植被荧光时空变化规律及其与气候变化间的响应关系, 可为全球碳循环研究提供必要的支撑。

关 键 词: 日光诱导叶绿素荧光; GOME-2 卫星; 趋势分析; 气候响应

中图分类号: Q948.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)03-0702-11

1 引 言

叶绿素荧光是指叶绿素分子吸收光量子(主要指蓝光和红光), 被激发的电子由受激态通过重新发射光子回到基态而产生的一种光信号。自然光条件下, 植被吸收的光合有效辐射(Absorbed Photosynthetic Active Radiation, APAR)一部分用于光合作用, 其他部分以热的形式向外耗散, 或者以长波(650~850 nm)形式发射叶绿素荧光信号, 这部分受激发射的光信号称为日光诱导叶绿素荧光(So-

lar-Induced Chlorophyll Fluorescence, SIF)^[1]。SIF 与植物的营养和生长状态密切相关^[2-4], 也对环境胁迫, 水或热应激^[5-6]的响应很敏感, 因此 SIF 不仅可以用于估测陆地植被生产力^[7-8], 还可以作为植被对生物和非生物因子胁迫相应的指标。

降水、温度、辐射等气候因子影响着植被生长, 从而改变卫星遥感观测的植被 SIF 信号^[9]。了解植被 SIF 时空变化能提高气候预测精度和更好地预测植被在异常气候下恢复能力^[10]。Detmers 等^[11]利用 GOSAT 卫星 SIF 数据分析了澳大利亚地区的碳吸

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2022-03-15

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRWZS-2019-1), 国家自然科学基金项目(41825002, 41871239)。

作者简介: 严致荣(1997—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要从事植被定量遥感研究。E-mail: 19210210070@stu.xust.edu.cn

通讯作者: 刘良云(1975—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 研究员, 主要从事植被定量遥感研究。E-mail: liuly@radi.ac.cn

收情况,发现降水增加导致植被的生长增强,从而导致生物圈碳吸收量大幅增加,与植被 SIF 水平的提高相一致。Green 等^[12]利用 GOME-2 SIF 数据分析了全球生物圈—大气反馈规律,发现 SIF 能解释反馈发生区域高达 30% 的降水和地面辐射变化。Li 等^[13]在生态系统水平上,基于涡旋协方差通量站点,观察到了 SIF 相比于 EVI 与气候因素有更强的相关性,在干旱和半干旱地区, SIF 比 EVI 对气候变化更敏感,在湿润地区, SIF 与太阳辐射呈正相关,而 EVI 与太阳辐射无显著相关性。在亚马逊湿地阔叶林生物群落的生态区中, SIF 季节变化的 76% 是由季节性辐射变化解释的,而降水和两者结合则解释了 13% 和 11%^[14]。Chen 等^[15]通过 GOME-2 卫星 SIF 分析发现 2014 年华北平原严重干旱区域的 GPP 下降了 10.6%,与统计单产数据估计的单产下降(9.1%)一致。众多研究表明,利用光学植被指数等遥感数据,发现中国区域植被呈显著增加趋势,如 Chen 等^[16]发现,根据 MODIS 的数据,2000~2017 年间每 10 a 全球叶片面积净增加 2.3%,而中国叶面积净增加量占全球的 25%,植被面积占全球的 6.6%。但中国区域植被 SIF 的时空变化规律如何,以及中国区域对气候变化的响应特征是什么,这些问题具有重要研究意义、而缺乏研究。

因此,研究基于 2007~2018 年中国区域的 GOME-2 卫星 SIF 产品数据集,分析我国的 SIF 时空变化特征,同时结合研究区气温、降水、辐射数据,分析 SIF 与气候因子在生长季的相关性,旨在探讨 SIF 对气候变化的响应特征、阐明不同生态区域 SIF 影响的关键气候因子,为气候变化情境下陆地植被光合响应与预测提供重要理论依据。

2 研究区概况

我国位于欧亚大陆东南部季风气候区,幅员辽阔,山地众多,地形复杂。不仅有从温带到热带、从湿润到干旱的不同气候带,也具有从寒冷的北方针叶林到温暖的亚热带常绿阔叶林和热带雨林的多样性自然植被。这种环境、气候和植被的多样性与复杂性为研究中国陆地植被 SIF 时空变化和气候变化响应提出了挑战。需要对不同区域植被 SIF 季节变化、年均变化等进行进一步分析,揭示各区域 SIF 对气候因子的响应特点,并对各区域之间的差异进行比较。采用中国植被气候分区资料(图 1),将中国地区分为亚热带常绿阔叶林区域、寒温带针叶林

区域、暖温带落叶阔叶林区域、温带草原区域、温带荒漠区域、温带针叶落叶阔叶混交林区域、热带季风雨林及雨林区域、青藏高原高寒植被区域等 8 个分区^[17]。在这些区域内部其植被覆盖比较一致,气候特征相似,可以将其作为一个整体讨论。

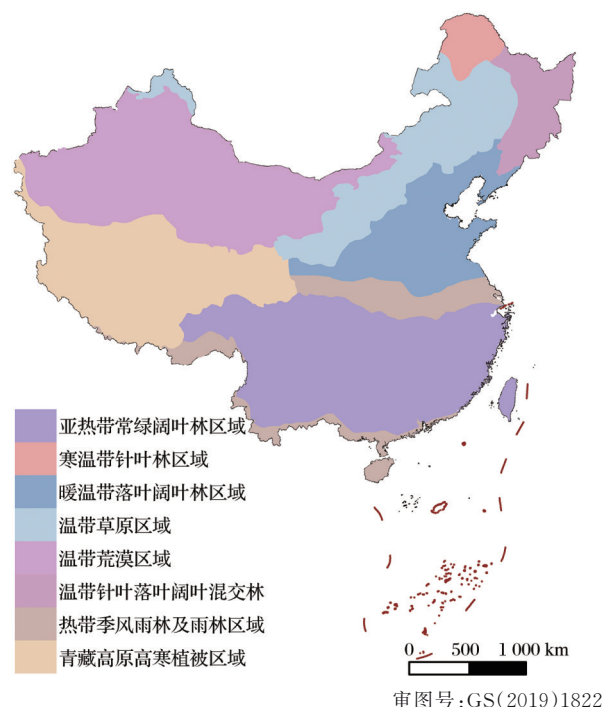


图1 中国气候分区图

Fig.1 China's climate zone map

3 数据与方法

3.1 GOME-2月值SIF产品

搭载在 MetOp-A/B 卫星的 GOME-2 传感器 Channel 4 通道覆盖了 590~790 nm 的波段范围,光谱分辨率达 0.5 nm,而且信噪比较高($\text{SNR} > 1\,000$),可用于 SIF 测量。该卫星像元大小约为 $40\text{ km} \times 180\text{ km}$,从 2013 年 7 月起 MetOp-A 的空间分辨率升为 $40\text{ km} \times 40\text{ km}$,过境时间为当地时间 9:30,重访周期为 1.5 d。Hu 等^[18]基于 Joiner 等^[19]生产的 GOME-2A 日值 SIF 产品,并结合 MERRA 同化短波辐射资料和 MODIS FAPAR 产品,采用基于 APAR 的时间升尺度模型,生产了全球 0.5° 网格的连续时间尺度月值 SIF 产品。而对于月均 SIF 的时间升尺度处理,是在一定的时序周期内(如一个月),可以假设同一种植被类型的冠层 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段的 SIF 与 APAR 的比值基本不变,APAR 可以作为 $\text{O}_2\text{-A}$ 波段 SIF 时间尺度扩展的驱动变量。在月尺度上,研究以 APAR 为时间尺度扩展的驱动变量,

认为 SIF 与 APAR 的比值为不变的常数 k 。该常数 k 可由一个月内 SIF 的瞬时观测值与对应的瞬时 APAR 的比值来计算。因此,利用一个月内多次观测瞬间晴空 SIF 及其对应的 PAR、FAPAR 等资料就可以计算升尺度的月均 SIF。

$$\text{SIF}_{\text{Mon}} \approx \left(\frac{1}{M} \times \sum_{\text{Mon}} \frac{\text{SIF}_{\text{ins}}}{\text{PAR}_{\text{ins}} \times \text{FAPAR}_{\text{ins}}} \right) \times (\text{PAR}_{\text{Mon}} \times \text{FAPAR}_{\text{Mon}}) \quad (1)$$

其中: M 为一个月内有有效卫星观测次数; SIF_{ins} 、 PAR_{ins} 、 $\text{FAPAR}_{\text{ins}}$ 分别一个月内的卫星瞬间观测 SIF、PAR 和 FAPAR 信号; PAR_{Mon} 和 $\text{FAPAR}_{\text{Mon}}$ 为月均 PAR 和 FAPAR; SIF_{Mon} 为升尺度的月均 SIF。已有研究表明,PAR 与 NDVI 之间有着显著地的线性相关关系,可以基于 FAPAR-NDVI 线性模型估算 FAPAR^[20-22]。因此,公式(1)中的 FAPAR 由 NDVI 所代替。

$$\text{SIF}_{\text{Mon}} \approx \left(\frac{1}{M} \times \sum_{\text{Mon}} \frac{\text{SIF}_{\text{ins}}}{\text{PAR}_{\text{ins}} \times \text{NDVI}_{\text{ins}}} \right) \times (\text{PAR}_{\text{Mon}} \times \text{NDVI}_{\text{Mon}}) \quad (2)$$

其中: NDVI_{ins} 和 NDVI_{Mon} 分别为卫星观测瞬间和月均 NDVI 值。此外,由于 GOME-2 存在一定时间衰减,星上辐亮度数据的时间衰减会线性传递到 SIF 反演产品,Liu 等^[23] 选用了撒哈拉沙漠中一处利比亚定标场的均质区域,基于该区域地表反射率不变的假设,获得了定标场区域星上辐亮度的时间衰减系数,对 SIF 产品进行了时间衰减校正,最终获得了时间衰减校正的 GOME-2 月值 SIF 产品数据集。GOME-2A 的时间退化趋势采用伪不变方法确定。在撒哈拉沙漠中一个非常均匀的亮地表区域(7.5°~8.5° E, 31°~32° N)被选作准不变地物,通过计算该不变地物星上(TOA)反射率的时间变化曲线来跟踪 GOME-2A 仪器的辐射性能衰减。若忽略 2007~2018 年该不变地物近红外波段光谱反射率和大气光学特性的时空变化,则可以认为 TOA 反射率的时间趋势等同于 TOA GOME-2A 仪器的辐射衰减。结果表明,从 2007 年 1 月到 2018 年 12 月 GOM-2A 仪器的性能下降了约 17.9%,并可以用二次多项式函数精确拟合仪器辐射衰减状况,如公式(3)所示。

$$\text{Norm}(\text{date}) = 106.401 \times \left(\frac{\text{date}}{100000} \right)^2 - 91.918 \times \frac{\text{date}}{100000} + 20.672, (R^2 = 0.921) \quad (3)$$

其中: $\text{Norm}(\text{date})$ 是 2007 年之后特定日期的校正系

数;“日期”等于自 1900 年 1 月 1 日以来的天数。

目前该产品可在 zenodo 网站免费下载(<http://doi.org/10.5281/zenodo.4433590>)。

3.2 非植被区域掩膜

MCD12 数据是利用 Terra 和 Aqua 两颗卫星遥感获得的土地覆盖类型数据,MCD12C1 是其中分辨率为 0.05° 的版本,可在 USGS 网站上免费下载(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12c1v006/>)。采用像素合并方法,统计各 0.5° 网格中的 0.05° 产品各地表覆盖类型比例,将最大比例地物设定为该网格的地表类型,从而实现 0.05° 到 0.5° 空间升尺度处理。

基于该 MODIS 地表覆盖对 GOME-2 SIF 产品的水体、城市建设用地、冰雪、裸地等非植被区域进行了掩膜处理。

3.3 气象与辐射数据

气象数据是在美国 NOAA 网站(<https://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/>)下载的中国 193 个站点的 2007~2018 年逐日降水,气温资料,辐射站点数据来自国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn>)的太阳辐射日均值数据集^[24-27]。

3.4 Sen+ Mann-Kendall 趋势分析法

Sen 趋势度分析方法是一种利用中位数函数研究长时间序列的方法,但其本身不能实现序列趋势显著性判断,而 Mann-Kendall 方法则无需样本数据服从特定的分布,也不受少数异常值的影响,对于测量误差(gross errors)和离群数据(outliers)有较好的规避能力,因此引入该方法对序列趋势进行显著性检验,得到 Sen+ Mann-Kendall 趋势分析方法^[28]。

Sen 趋势度 β 计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right)_{j > i} \quad (4)$$

趋势度 β 可判断时间序列趋势的升降,当 $\beta > 0$ 时,时间序列呈上升的趋势; $\beta < 0$ 时,时间序列呈下降的趋势。

Mann-Kendall 公式如下对于时间序列 $X(x_1, x_2, x_3, \dots)$:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

其中: n 为数据样本长度; sgn 为符号函数。 sgn 定义如下:

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} +1 & \theta > 0 \\ 0 & \theta = 0 \\ -1 & \theta < 0 \end{cases} \quad (6)$$

当 $n < 10$ 时,直接使用统计量 s 进行双边趋势检验;当 $n \geq 10$ 时,统计量大致服从正态分布,则使用检验统计量 Z 进行趋势检验。

Z 值计算公式为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/[Var(S)]^{1/2} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/[Var(S)]^{1/2} & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$Var(S) = \left(n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right) / 18$; m , 序列中结(重复出现的数据组)的个数; t_i , 结的宽度(第 i 组重复数据组中的重复数据个数)。

同样采用双边趋势检验,在给定显著性水平 α 下,当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时,接受原假设,即趋势不显著;当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,则拒绝原假设,即认为趋势显著。

4 结果与分析

4.1 中国植被区域SIF分布特征

2007~2018年中国区域SIF的空间分布,反映了中国区域12年来植被覆盖的基本特征。中国区

域植被12 a里年均SIF值为 $0.175 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$,春季、夏季、秋季和冬季的平均SIF值分别为 0.144 、 0.381 、 0.130 和 $0.044 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 。如图2(b)所示,中国区域年均SIF总体上呈现从东南向西北递减的空间分布。东部地区年均SIF值总体在 $0.1 \sim 0.3 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 之间,东南地区和华北平原有少量区域年均SIF大于 $0.3 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$,西部由于深居内陆,植被稀少,SIF总体小于 $0.1 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 。由夏季SIF空间分布(图2(d))可以看出,与多年平均态相比,中国东部地区植被更加繁密,SIF明显较大,总体大于 $0.3 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$,而东北和华北大部分地区超过了 $0.5 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 。SIF小于 $0.1 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 总体出现在青藏高原和西北地区。春季(图2(c))和秋季(图2(e))的植被覆盖区几乎都出现在较温暖的中国南部和东南部。而在冬季(图2(f)),中国区域由于气温和降雨的影响,植被稀少,整体SIF在 $0.1 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 以下。

4.2 中国植被区域SIF变化特征

对2007~2018年12年间中国植被区域的SIF年均值和春夏秋冬各季节SIF分别进行线性趋势拟

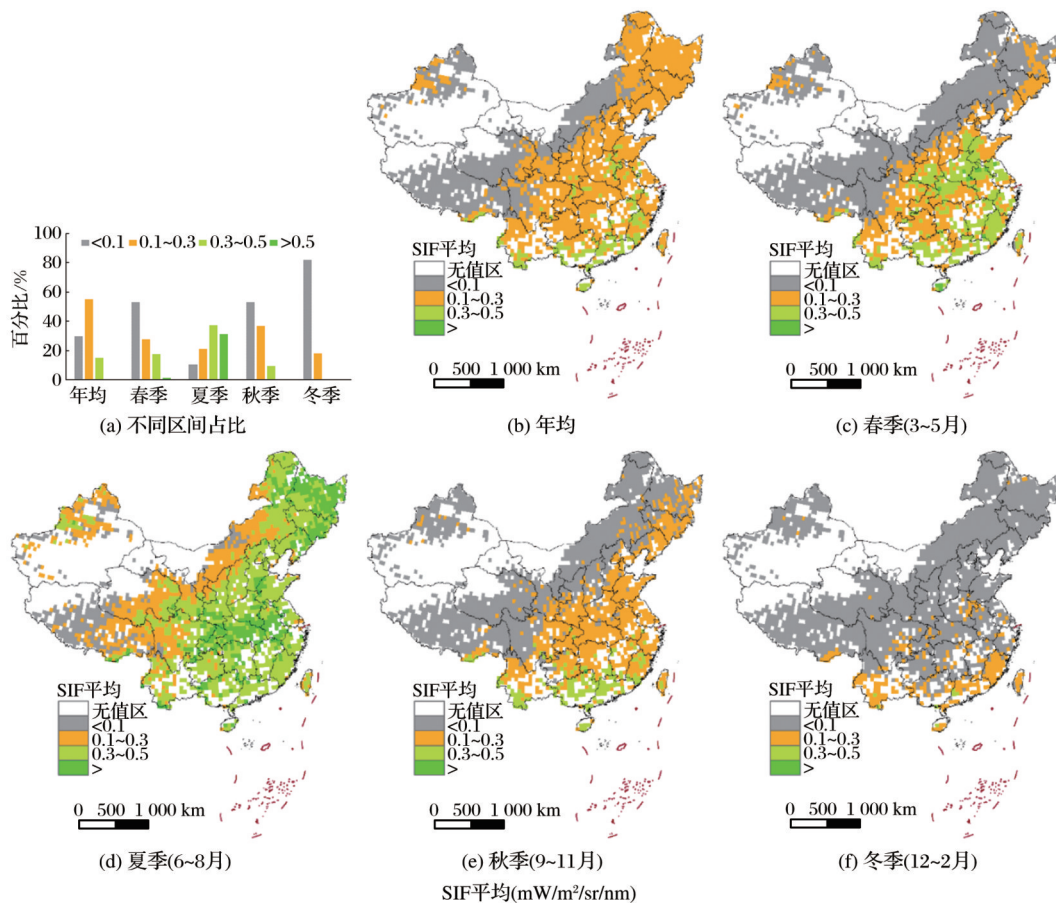


图2 2007~2018年间中国植被区域年均SIF和各季平均SIF

审图号:GS(2019)1822

Fig.2 Average annual and seasonal mean SIF of vegetation regions in China from 2007 to 2018

合,得到12 a中国植被区域SIF累计增幅(Δ SIF)。中国植被区域12 a里 Δ SIF为 $0.034 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$,春季、夏季、秋季和冬季的 Δ SIF分别为 0.033 、 0.065 、 0.023 和 $0.008 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 。年均值SIF的增幅如图3(b)所示,12 a间 Δ SIF大部分都在 $0 \sim 0.1 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 之间,占比为74.9%,年均SIF的变化趋势有很强的空间特征,增长的区域大多分布在植被较为密集的中国东部、南部和东北部。全国范围内,几乎没有 Δ SIF $<-0.1 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 的区域。

夏季SIF的增幅如图3(d)所示,与年均值增幅结果一样,SIF增长的区域同样大多分布在植被较为密集的中国东部、南部和东北部。但是 Δ SIF $>0.1 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 的区域有较大幅度的增加,由年均尺度的占比5.4%上升到夏季的占比29.6%。春季(图3(c))和秋季(图3(e))SIF总体也是呈增长的趋势,由于冬季植被覆盖稀疏,植被SIF信号弱,所以冬季植被的增长趋势会低很多,只在中国南部增长趋势明显。

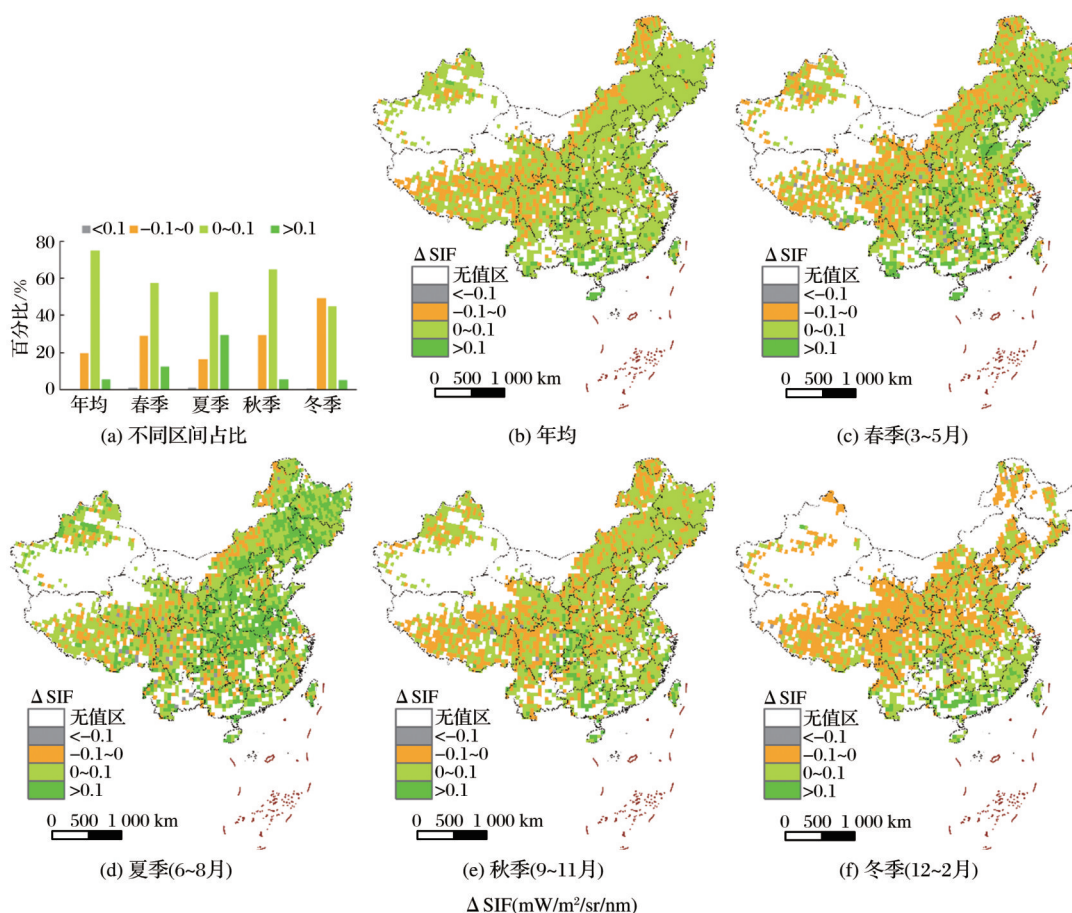


图3 2007~2018年间中国植被区域年均和各季 Δ SIF

审图号:GS(2019)1822

Fig. 3 Annual average and seasonal Δ SIF of vegetation region in China from 2007 to 2018

4.3 中国植被区域SIF显著性变化特征

利用Sen+ Mann-Kendall趋势分析法对12 a间中国区域植被年均和各季的SIF进行显著性分析,分为不显著变化($|Z| \leq 1.96$,未通过显著性95%检验),显著减小($\beta < 0$ 且 $|Z| > 1.96$,通过显著性95%检验)和显著增长($\beta > 0$ 且 $|Z| > 1.96$,通过95%的显著性检验)3个等级。如图4(a)所示,从各个等级所占的百分比来看,不管是年均值还是各季均值,SIF年际间变化总体上来说呈不显著变化,呈不显著变化的百分比均超过73%。年均值SIF的年

际变化显著性分析结果如图4(b)所示,年均值SIF呈显著增长的区域占比25.7%,主要分布在中国的南部、东部和东北部。夏季SIF年际变化显著性分析结果如图4(d)所示,夏季的SIF显著增长区域占比19.4%,主要分布在中国的东部和东北部,与年均尺度的SIF显著性增长趋势总体一样。而春季(图4(c))、秋季(图4(e))、冬季(图4(f))的SIF年际间变化显著性与年均尺度和夏季的SIF相比,显著增长的区域均不超过11%,且没有很强的空间分布性。说明夏季变化主导着全年的SIF变化趋势。

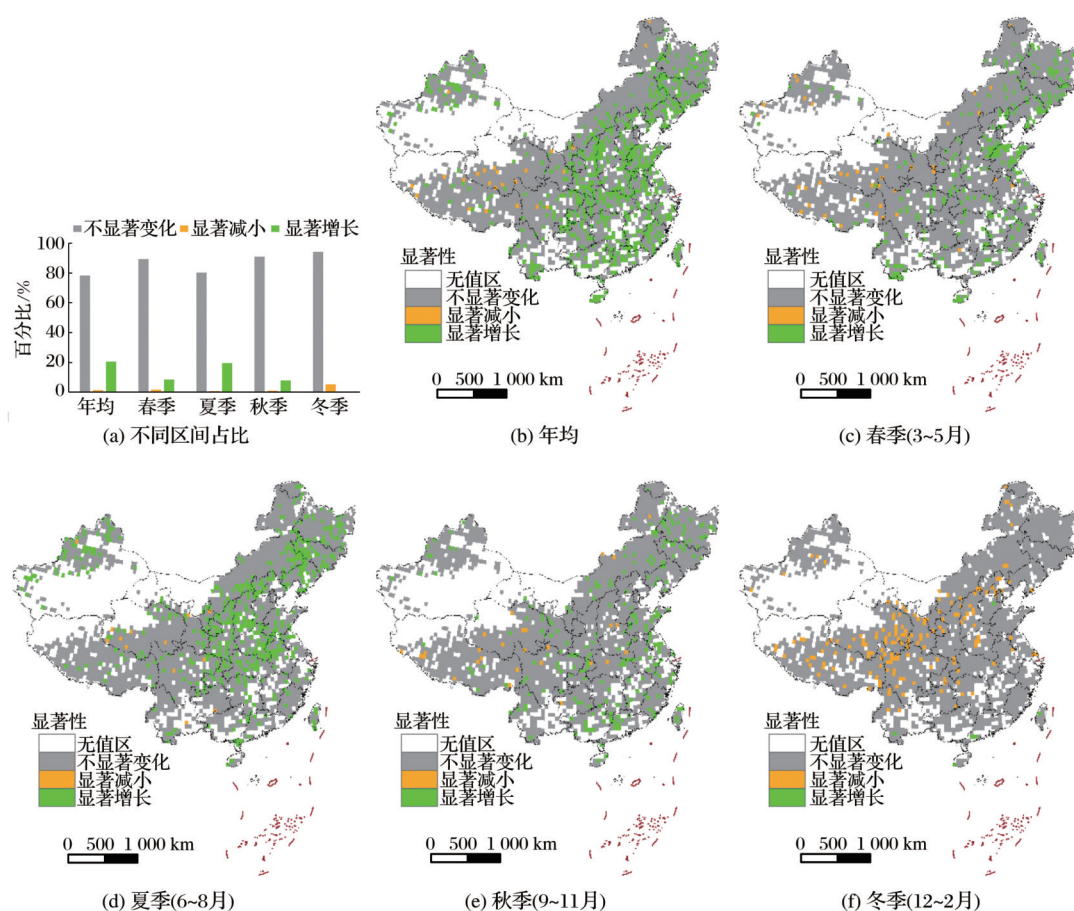


图4 2007~2018年间中国植被区域年均和各季SIF显著性变化

审图号:GS(2019)1822

Fig.4 Significant annual and seasonal variations of SIF in China's vegetation regions from 2007 to 2018

4.4 不同气候区域SIF和气候因子的年际变化

基于气象站点数据,分别对12 a来中国区域植被夏季(6月、7月、8月)的SIF、气温、降水和辐射进行一元线性拟合,去量纲化后,做变化趋势分析。如图5所示,12 a间SIF在各分区总体都是增长趋势;气温在暖温带落叶阔叶林区域、寒温带针叶林区域、青藏高原高寒植被区域、温带草原区域和热带季雨林区域增长趋势较为明显,在其他分区基本不变;降水在温带针叶落叶阔叶混交林区域、温带草原区域和温带荒漠区域增长趋势较为明显,在其他分区基本不变。辐射在温带针叶落叶阔叶混交林区域下降趋势较为明显,在暖温带落叶阔叶林区域、热带季雨林区域的增长趋势较为明显。

4.5 不同气候区域SIF对气候因子的响应关系

为了定量描述不同气候因子对中国不同气候类型植被SIF变化的贡献,利用偏相关系数箱形图方法,定量分析了中国八个气候区域的植被夏季SIF的气候变化响应特征。偏相关系数是在对其他变量的影响进行控制的条件下,衡量多个变量中某

两个变量之间的线性相关程度的指标^[29]。对八个气候区的每个站点做偏相关分析,可只分析SIF与其中一个气候因子之间的相关程度,而将其他气候因子的影响剔除。在寒温带针叶林区域,气温和降水都呈增加趋势,辐射呈降低趋势(图5),而气温和

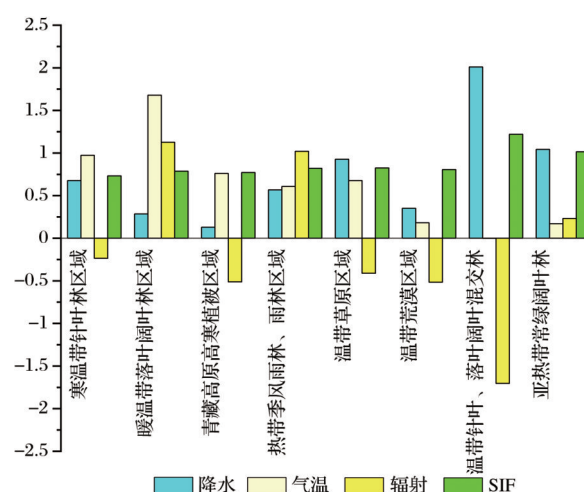


图5 气温、降水、辐射、SIF在八个分区的变化趋势

Fig.5 Changes in temperature, precipitation, radiation, and SIF in the eight regions

辐射与 SIF 呈正相关,降水与 SIF 总体呈不相关(图 6(a))。说明在寒温带针叶林区域,气温是 SIF 增长主要的影响因子。在温带针叶阔叶林混交林区域(图 6(b))、温带荒漠区域(图 6(c))和温带草原区域(图 6(d))等温带植被地区,12 a 来降水都成增加趋势,辐射都呈降低趋势,气温总体呈不变趋势,而降水都和 SIF 呈正相关,辐射都和 SIF 呈现负相关,SIF 总体是增长的,说明在这些温带植被地区,特别是温带荒漠区域和温带草原区域等干旱半干旱地区,气温在总体保持不变的情况下,相对于降水,辐射并不是 SIF 增长的主要影响因子,降水的提高更可以促进植被的增长,因此可以抵消掉辐射降低带来的对植被的影响。在暖温带阔叶林区域(图 6(e)),辐射总体呈不变的趋势,降水呈小幅增加趋势,气温增加趋势则更明显,辐射总体与 SIF 不相关,降水和气温与 SIF 呈正相关,且相关性相当。说明在暖温带阔叶林区域,在辐射保持总体不变的情况下,气温和降水的增长都会促进 SIF 的增长。但降水相比于气温,增长幅度更小,与 SIF 的相关性却相当,说明降水在暖温带阔叶林区域是比气温更重要的影响因子。在亚热带常绿阔叶林区域(图 6(g)),降水呈增加趋势,辐射和气温都呈基本不变趋势,而降水、气温和辐射与 SIF 都只有较微弱的相关性,一方面是由于降水、气温和辐射这些影响因子变化不大,另一方面也是因为亚热带常绿阔叶林区域水热条件适宜,相比于气候因子,人类活动对植被的影响更大。热带季风雨林、雨林区域(图 6(h)),气温、降水和辐射总体呈增加趋势,且增加幅度相当,辐射总体与 SIF

呈正相关,气温和降水总体与 SIF 呈不相关。说明辐射相对于气温和降水,对处于低纬度地区的热带季风雨林区域影响更显著。

5 讨 论

温度通常是限制湿润的温带或寒温带地区植被生长的因素^[30]。在全球变暖背景下,北方高纬度地区,如阿拉斯加,加拿大西北部和欧亚大陆北部的大部分地区都出现了明显的变暖现象^[31],因而这些区域的植被活动受温度变化的影响最为明显。通过研究 1981~1991 年间的全球 GIMMS AVHRR NDVI 数据发现,在北部高纬度地区,植被与温度变化存在显著的相关关系,夏冬季的较高温度促进了植物生长的增加^[32]。利用 AVHRR LAND NDVI 数据集分析了 1982~1990 年全球范围内年度和季节性植被活动的年际趋势,发现在北部中高纬度地区,由于温度逐渐升高,植被活动在广泛的区域增加了^[33]。分析了北方高纬度地区植被绿化率(RVG)在 1982~2016 年间的长期变化规律,发现高纬度变暖将推动植被的季节性向快速绿化和早熟的方向发展,从而增强气候与植被的相互作用^[34]。本文对我国寒温带针叶林区域 SIF 与气候因子的响应研究也发现,总体增长的气温相较于降水和辐射来说,是 SIF 增长的最大影响因子。

植被与降水的显著关系往往出现在干旱半干旱地区和干湿季气候差异明显地区,尤其是干旱半干旱生态系统植被生长的开始期和持续时间一般受降水控制^[35]。通过分析 1982~2003 年 NDVI 数据及相应的气候数据,发现中国西北部典型干旱地

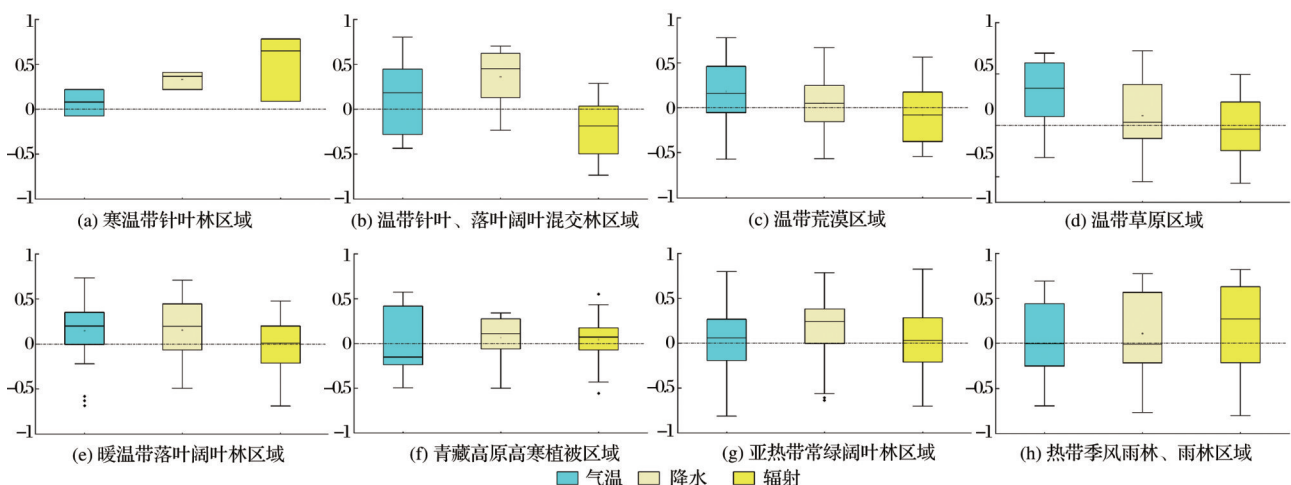


图 6 2007~2018 年间中国各分区生长季气温(temp)、降水(pre)、辐射(rad)与 SIF 的偏相关系数箱形图

Fig.6 Box plot of partial correlation coefficients of temperature, precipitation, radiation and SIF in growing seasons in different regions of China from 2007 to 2018

区NDVI的变化与生长期当前的降水和蒸散量高度相关,而与温度无关^[36]。Ning等^[37]通过分析黄土高原北部1998~2012年NDVI与气候因子的相关性,发现降水增加是年最大NDVI升高的主要原因,与温度相比,植被对该地区的降水变化更敏感。通过分析2000~2013年的遥感和气象数据,发现生长季降水及其季节分布是控制中国北方干旱地区植被年际变化的主要因素。其他因素,例如植物功能性状,先前的土壤湿度和人类活动,可能通过与水的相互作用而介导植被对降水变化的响应^[38]。本文对我国温带荒漠区域和温带草原区域等干旱半干旱地区SIF与气候因子的响应研究也发现,相较于气温和辐射,降水是SIF的最大影响因素。

在低纬度的降水不是限制因子的区域,植被会表现出对辐射变化的显著响应。最近的一项发现,全球辐射与来自GOME-2的SIF总体呈正相关^[39]。较高的辐射有利于热带雨林的生态系统生产力,这与深层自然^[40]和树木的茎干蓄水能力密切相关^[41]。Graham等^[42]对热带雨季云层覆盖和与拉尼娜相关的异常沉重云层进行光限制的实验测试发现,在热带森林的雨季期间,与降水和温度相比,由于云量增加导致的太阳辐射减少可能是阻碍植物生长的主要原因。在本文研究中,相较于气温和降水,总体而言,辐射在我国的热带季风雨林区域表现了对SIF更高的敏感性。

人类活动也是影响SIF变化不可忽略的因素之一,特别是近年来退耕还林、封山禁牧、天然林保护、三北防护林建设、南水北调和大面积农田灌溉等都改变植被覆盖状况^[43-45]。此外,由人类活动排放温室气体引起的气候变暖也会改变中国大尺度植被覆盖的变化^[46]。但现有大范围植被覆盖数据的时间尺度都比较短,也缺少人类活动改变植被覆盖的监测信息,目前还无法定量区分人类活动影响中国区域植被覆盖变化的相对贡献及其区域差异。

6 结 论

利用GOME-2_SIF产品数据集,对2007~2018年中国区域SIF进行时空变化分析,分析了2007~2018这12 a间中国区域植被荧光的时空变化特征以及对气温、降水、辐射等气候因子的响应,主要结论如下:

(1)中国区域年均SIF总体上呈现从东南向西北递减的空间分布。东部地区年均SIF值总体在

0.1~0.3 mW/m²/sr/nm之间,西部内陆区域植被稀少,SIF总体小于0.1 mW/m²/sr/nm。与多年平均态相比,在夏季,中国东部地区植被更加繁密,SIF明显较大,总体大于0.3 mW/m²/sr/nm,而东北和华北大部分地区超过了0.5 mW/m²/sr/nm。春季和秋季的植被覆盖区几乎都出现在较温暖的中国南部和东南部。而在冬季,中国区域由于温度和降雨的影响,植被稀少,整体SIF在0.1 mW/m²/sr/nm以下。

(2)中国区域植被SIF呈增加趋势,12 a间年均SIF增加了20.2%,年均值SIF的增量大部分位于0~0.1 mW/m²/sr/nm之间,占比为74.9%,增长区域大多分布在植被较为密集的中国东部、南部和东北部。全国范围内,几乎没有 $\Delta\text{SIF} < -0.1 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 的区域。而夏季SIF增长的区域同样大多分布在植被较为密集的中国东部、南部和东北部。但是 $\Delta\text{SIF} > 0.1 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$ 的区域有较大幅度的增加,由年均的占比5.4%上升到夏季的占比29.6%。

(3)不管是年均值还是各季SIF,SIF总体上来说呈不显著变化,占比均超过73%。年均值SIF呈显著增长的区域占比25.7%,主要分布在中国的南部、东部和东北部,夏季的SIF显著增长区域占比19.4%,主要分布在中国的东部和东北部。而春季、秋季、冬季的SIF与年均值和夏季的SIF相比,显著增长的区域均不超过11%。

(4)在寒温带针叶林区域,气温是SIF增长主要的影响因子。在暖温带阔叶林区域以及在温带植被地区,特别是温带荒漠区域和温带草原区域等干旱半干旱地区,降水是SIF增长主要的影响因子。而在亚热带常绿阔叶林区域,降水、气温和辐射与SIF都只有较微弱的相关性,影响SIF增长的更可能是人类活动。而对处于低纬度地区的热带季风雨林区域来说,辐射是SIF增长的主要影响因子。

本文基于GOME-2卫星日光诱导叶绿素荧光产品数据集,探究了2007~2018年中国区域SIF的时空变化规律,较为详细地探讨了中国区域SIF对气温、降水、辐射等气候变化的响应。但是,由于缺少与各气象站点同步观测的塔基SIF数据,因此并没有对SIF与气象因子之间的响应关系进行地面验证,可以在之后的工作中收集中国各区域的塔基SIF数据,从而对SIF的响应因素进行进一步的研究。

参考文献(References):

- [1] Liu Liangyun. Principles and applications of vegetation quantitative remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2014.[刘良云.植被定量遥感原理与应用[M].北京:科学出版社.2014.]
- [2] Zhang Yongjiang, Liu Liangyun, Wang Jihua, *et al.* Detection of fluorescence in reflection spectrum of blade by high spectrometer[J]. Optical Technology, 2007, 33(1): 119-121.[张永江,刘良云,王纪华,等.应用高光谱仪探测叶片反射光谱中的荧光[J].光学技术, 2007, 33(1): 119-121.]
- [3] Zhang Yongjiang, Zhao Chunjiang, Liu Liangyun, *et al.* Preliminary study on passive fluorescence detection of water stress on maize leaves[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(9): 39-43.[张永江,赵春江,刘良云,等.被动荧光探测水分胁迫对玉米叶片影响的初步研究[J], 农业工程学报, 2006, 22(9): 39-43.]
- [4] Zarco-Tejada P J, Berni J A, Suárez L, *et al.* Imaging Chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6): 1262-1275.
- [5] Lee J E, Frankenberg C, van der Tol C, *et al.* Forest productivity and water stress in Amazonia: Observations from GOSAT chlorophyll fluorescence[J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2013, 280 (1761): DOI: 10.1098/rspb.2013.0171.
- [6] Zhang Y, Guanter L, Berry J A, *et al.* Estimation of vegetation photosynthetic capacity from space-based measurements of chlorophyll fluorescence for terrestrial biosphere models[J]. Global Change Biology, 2014, 20(12): 3727-3742.
- [7] Du S, Liu L, Liu X, *et al.* First investigation of the relationship between solar-induced chlorophyll fluorescence observed by TanSat and gross primary productivity[J]. IEEE Journal of selected topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 11892-11902. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3128355.
- [8] Gao H, Liu S, Lu W, *et al.* Global analysis of the relationship between reconstructed solar-induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) and Gross Primary Production (GPP)[J]. Remote Sensing, 2021, 13(14): 2824. DOI: 10.3390/rs13142824.
- [9] Jovanić B, Radenković B, Despotović-Zrakić M, *et al.* Effect of UV-B radiation on chlorophyll fluorescence, photosynthetic activity and relative chlorophyll content of five different corn hybrids[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology, 2022: 100115. DOI: 10.1016/j.jpap.2022. 100115.
- [10] Cao J, An Q, Zhang X, *et al.* Is satellite sun-induced chlorophyll fluorescence more indicative than vegetation indices under drought condition? [J]. Science of The Total Environment, 2021, 792: 148396. DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2021. 148396.
- [11] Detmers R, Hasekamp O, Aben I, *et al.* Anomalous carbon uptake in Australia as seen by GOSAT[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(19): 8177-8184.
- [12] Green J K, Konings A G, Alemohammad S H, *et al.* Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(6): 410-414.
- [13] Li X, Xiao J. Global climatic controls on interannual variability of ecosystem productivity: Similarities and differences inferred from solar-induced chlorophyll fluorescence and enhanced vegetation index[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020(288): DOI: 10.1016/j. agrformet. 108018.
- [14] Bertani G, Wagner F H, Anderson L O, *et al.* Chlorophyll fluorescence data reveals climate-related photosynthesis seasonality in Amazonian forests[J]. Remote Sensing, 2017, 9(12): DOI: 10.3390/rs1275.
- [15] Chen X, Mo X, Zhang Y, *et al.* Drought detection and assessment with solar-induced chlorophyll fluorescence in summer maize growth period over North China Plain[J]. Ecological Indicators, 2019, 104: 347-356.
- [16] Chen C, Park T, Wang X, *et al.* China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [17] Wu Zhengyi. China vegetation[M]. Beijing: Science Press, 1980.[吴征镒.中国植被[M].北京:科学出版社, 1980.]
- [18] Hu J, Liu L, Guo J, *et al.* Upscaling solar-induced chlorophyll fluorescence from an instantaneous to daily scale gives an improved estimation of the gross primary productivity[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): DOI: 10.3390/rs10101663.
- [19] 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(2): 2803-2823.
- [20] Dong J, Naibin W, Xiaohuan Y, *et al.* Dynamic properties of absorbed photosynthetic active radiation and its relation to crop yield[J]. System Sciences and Comprehensive Studies In Agriculture, 2002, 18(1): 51-54.
- [21] Sellers P J, Tucker C J, Collatz G J, *et al.* A global 1 by 1 NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15 (17): 3519-3545.
- [22] 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.
- [23] Liu L. GOME-2 Monthly SIF with correction of temporal degradation[DB/OL]. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4433590>, 2021, 2021.
- [24] Tang W. Daily average solar radiation dataset of 716 weather stations in China (1961~2010) [DB/OL], National Tibetan Plateau Data Center, 2019, DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249399.file.[唐文君.中国716个气象站太阳辐射日均值数据集(1961~2010)[DB/OL].国家青藏高原科学数据中心, 2019, DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics. tpe. 249399. file.]
- [25] Tang W, Yang K, Qin J, *et al.* Development of a 50-year daily surface solar radiation dataset over China[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56 (9): 1555-1565.
- [26] Tang W-J, Yang K, Qin J, *et al.* Solar radiation trend across China in recent decades: A revisit with quality-controlled data [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11 (1): 393-406.

- [27] Yang K, Koike T, Ye B. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets [J], *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(1-2): 43-55.
- [28] Cai Bofeng, Yu Rong. Research progress and evaluation of vegetation long time series trend characteristics based on remote sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1170-1186. [蔡博峰, 于嵘. 基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1170-1186.]
- [29] Marrelec G, Krainik A, Duffau H, *et al.* Partial correlation for functional brain interactivity investigation in functional MRI [J]. *Neuroimage*, 2006, 32(1): 228-237.
- [30] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, *et al.* Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data [J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1133-1145.
- [31] Chapman W L, Walsh J E. Recent variations of sea ice and air temperature in high latitudes [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(1): 33-47.
- [32] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, *et al.* Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 [J]. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [33] Kawabata A, Ichii K, Yamaguchi Y. Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(7): 1377-1382.
- [34] Park H, Jeong S, Penuelas J. Accelerated rate of vegetation green-up related to warming at northern high latitudes [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6190-6202.
- [35] Spano D, Cesaraccio C, Duce P, *et al.* Phenological stages of natural species and their use as climate indicators [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42(3): 124-133.
- [36] Zhao X, Tan K, Zhao S, *et al.* Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the Northwestern China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 946-952.
- [37] Ning T, Liu W, Lin W, *et al.* NDVI variation and its responses to climate change on the Northern Loess Plateau of China from 1998 to 2012 [J]. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015(1): 1-10.
- [38] Xu H J, Wang X P. Effects of altered precipitation regimes on plant productivity in the arid region of Northern China [J]. *Ecological Informatics*, 2016, 31: 137-146.
- [39] Walther S, Duveiller G, Jung M, *et al.* Satellite observations of the contrasting response of trees and grasses to variations in water availability [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(3): 1429-1440.
- [40] Myneni R B, Yang W, Nemani R R, *et al.* Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(12): 4820-4823.
- [41] Matheny A M, Bohrer G, Garrity S R, *et al.* Observations of stem water storage in trees of opposing hydraulic strategies [J]. *Ecosphere*, 2015, 6(9): 1-13.
- [42] Graham E A, Mulkey S S, Kitajima K, *et al.* Cloud cover limits net CO₂ uptake and growth of a rainforest tree during tropical rainy seasons [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(2): 572-576.
- [43] Wang Qiang, Zhang Bo, Dai Shengpei, *et al.* Vegetation coverage changes and influencing factors in the Three North Shelterbelt project area [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7): 1302-1308. [王强, 张勃, 戴声佩, 等. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(7): 1302-1308.]
- [44] Song Fuqiang, Xing Kaixiong, Liu Yang, *et al.* Monitoring and evaluation of vegetation dynamics in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 354-363. [宋富强, 邢开雄, 刘阳, 等. 基于MODIS/NDVI的陕北地区植被动态监测与评价[J]. *生态学报*, 2011, 31(2): 354-363.]
- [45] He Yong, Dong Wenjie, Guo Xiaoyin, *et al.* NPP variation characteristics of terrestrial vegetation in the eastern route of the South-to-North Water Transfer Project in My Country [J]. *Climate Change Research Progress*, 2006, 2(5): 246-249. [何勇, 董文杰, 郭晓寅, 等. 我国南水北调东线地区陆地植被NPP变化特征[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(5): 246-249.]
- [46] Wang Futang. Several progress in research on the impact of climate warming in My Country in the past ten years [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 13(6): 755-766. [王馥棠. 近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(6): 755-766.]

Spatiotemporal Variations of Satellite-based SIF and Its Climate Response in China from 2007 to 2018

Yan Zhirong^{1,2}, Liu Liangyun², Jing Xia¹

(1. School of Surveying and Mapping Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Institute of Aerospace Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the GOME-2 satellite SIF dataset, we analyzed the spatial and temporal changes of SIF from 2007 to 2018 in China, and investigated the response of SIF to climate changes, such as temperature, pre-

precipitation, and radiation. The results showed that: (1) The SIF in China's vegetation region generally shows a decreasing distribution from southeast to northwest. The average annual SIF increases by 20.2% in last 12 years, with an amplitude of $0.034 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$, and the increase area accounts for 80.3% of the whole China. The area with significant growth of SIF accounts for 25.7%, which were mainly distributed in eastern, southern and northeastern China. (2) The SIF increase in summer season during last twelve years is the largest with an amplitude of $0.065 \text{ mW/m}^2/\text{sr/nm}$; the area with increased summer SIF accounts for 82.1% of the whole China, and the area with significant increase accounts for 19.4%. (3) The response of SIF to climate change was investigated using the partial correlation method. temperature is the main factor affecting the interannual variation of SIF; precipitation is the main driven factor for SIF in warm temperate and temperate vegetation regions; human activities are more likely to affect the growth of SIF in the green broad-leaved forest area; radiation is the driven factor for tropical monsoon rain forest areas located in low latitudes. The above results reveal the temporal and spatial changes of vegetation fluorescence in China from 2007 to 2018 and its response to climate change, which can provide important support for global carbon cycle research.

Key words: Sunlight-induced chlorophyll fluorescence; GOME-2 satellite; Trend analysis; Climate response

上接第 701 页

Spatiotemporal Patterns and Climate Regulation of Gross Primary Productivity and Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence of Terrestrial Vegetation in China from 2007 to 2018

Wang Yonglin, Chi Yonggang, Zhou Lei

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

Abstract: Sun-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF), as a surrogate indicator of Gross Primary Productivity (GPP), shows great potential in regional GPP estimation. The SIF and GPP have a good linear relationship, but the influence of different climate conditions on the SIF-GPP relationship is still unclear. In this study, we used MODIS GPP and GOME-2 SIF and environmental conditions (temperature, precipitation, radiation, etc.) in China during 2007~2018 to study the temporal and spatial patterns of GPP and SIF of terrestrial vegetation and the constraint of environmental factors. The results found that the spatial and temporal patterns of GPP and SIF of terrestrial vegetation are similar, but there are significant differences in the spatial distribution of GPP/SIF that act as a new indicator of light energy distribution. In addition, the yield of SIF ($\text{SIF}_{\text{yield}}$) is controlled by the environmental factors (minimum temperature, saturated vapor pressure difference, soil moisture, and APAR) that restrict GPP, which indirectly confirms the close connection between SIF and GPP. Therefore, since the relationship between SIF and GPP in time and space is regulated by environmental conditions, the use of satellite-based SIF to accurately estimate regional GPP should consider the constraints of environmental factors.

Key words: Gross Primary Production (GPP); Sun-Induced chlorophyll Fluorescence (SIF); GPP/SIF; Spatial-temporal pattern; Climate dependence