

doi: 10.6046/zrzyyg.2023268

引用格式: 赵子方, 梁艾琳. 基于日光诱导叶绿素荧光的东北林区森林碳汇估算[J]. 自然资源遥感, 2025, 37(1): 204–212.  
(Zhao Z F, Liang A L. Estimating forest carbon sink in the forest region of Northeast China using solar-induced chlorophyll fluorescence[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(1): 204–212.)

# 基于日光诱导叶绿素荧光的东北林区森林碳汇估算

赵子方, 梁艾琳

(南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044)

**摘要:** 森林碳汇是维持地球生态平衡和应对气候变化的重要因素。森林碳汇吸收大量二氧化碳并储存碳元素, 有助于减缓气候变化, 在全球碳循环中扮演着关键角色。同时, 森林碳汇也提供了生物多样性保护、水资源调节和土壤保持等重要生态服务, 因此对于森林碳汇的估算十分重要。该文选取我国东北林区为研究区域, 基于日光诱导叶绿素荧光(solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)运用植被总初级生产力(gross primary productivity, GPP)作为中间变量来估算2011—2020年6—9月植被生长期的森林碳汇。结果显示: 东北林区森林碳汇与SIF在空间上存在较强相关性; 东北林区的SIF值和碳汇分布相似, 长白山地区的碳汇能力较强, 而大兴安岭地区的碳汇能力较弱; 在时间分布上, 植被生长期的6—9月, 碳汇能力总体呈先递增后递减的趋势。总的来说, 利用SIF来估算碳汇在东北林区具有较高的可行性。

**关键词:** 森林碳汇; SIF; GPP

**中图分类号:** TP 79 **文献标志码:** A

**文章编号:** 2097-034X(2025)01-0204-09

## 0 引言

森林系统是应对气候变化的一个关键因素, 在碳汇过程中发挥着不可替代的作用。森林碳汇不仅可以缓解全球气候变暖的问题, 而且在一定程度上具备净化空气、减少雾霾、保护生物多样性等多方面的作用。在经济成本方面, 增加森林碳汇成本较低, 实施起来也比较方便, 因而成为如今最有效的净化空气方法。我国针对气候变化出台了“双碳”政策, 大力倡导绿色、环保、低碳的生活方式, 加快降低碳排放步伐, 而其中森林碳汇的重要地位越发显现。因此, 在“双碳”的实行过程中, 正确地估算森林碳汇并根据森林碳汇的当前状况和未来趋势来进行合理规划分析尤为重要。

目前针对森林碳汇的估算和分析是国内外研究的热点问题之一, 当前的森林碳汇估算方法大致可分为3类: 样地清查法、模型模拟法和遥感监测法。样地清查法的核心是估算生物量, 毕君等<sup>[1]</sup>依据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)指南, 采用样地清查法对

河北省森林碳汇进行研究。样地清查法相较于其他方法所需要的实测数据量大、调查周期长, 需要耗费大量的人力物力, 且易受到空间的制约。模型模拟法是通过构建相对应的数学模型来对森林系统的碳储量进行估算, 主要的代表模型有Biome-BGC, LPJ和FORCCHN等, 吕富成等<sup>[2]</sup>运用FORCCHN模型模拟中国典型森林生态系统碳通量; 梅晓丹等<sup>[3]</sup>运用Biome-BGC模型模拟小兴安岭碳通量, 模型模拟的精度相对较高, 效果较好, 但是在某些方面也有一定的局限性。随着遥感技术的高速发展, 遥感卫星能获取宏观、连续、大范围、高精度的遥感监测数据, 结合地面站点的监测数据来进行校正, 这使得遥感监测法的适用性和实用性更强。

遥感监测法是基于日光诱导叶绿素荧光(solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)来进行森林碳汇估算。SIF是植物在太阳光照射下发出的光谱信号<sup>[4]</sup>, 包括红光(约690 nm)和近红外光(约740 nm)2个波峰。叶绿素荧光在植被光合生理探测方面具有独特的优势, SIF能够直接反映植物实际光合作用的动态变化, 因此被认为是植物光合作用的有效指标。目前SIF遥感技术已经被广泛应用于估算生

收稿日期: 2023-09-01; 修订日期: 2023-11-30

**基金项目:** 江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目“星载CO<sub>2</sub>-IPDA的高精度探测方法研究”(编号: BK20190779)和国家自然科学基金青年科学基金项目“基于星载多波长差分吸收激光雷达的二氧化碳高精度反演方法研究”(编号: 42001273)共同资助。

**第一作者:** 赵子方(2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事测绘遥感与碳排放领域研究。Email: 1192624116@qq.com。

**通信作者:** 梁艾琳(1991-), 女, 博士, 讲师, 主要从事环境遥感领域研究。Email: ireneliang@nuist.edu.cn。

态系统过程中的关键生理生化参数、植被总初级生产力(gross primary productivity, GPP)、植被蒸腾作用等。

由于植被的光合作用就是固碳的过程,而 SIF 作为与植物光合作用过程的伴生产物与光合作用直接相关,所以用 SIF 来估算森林碳汇就成为了可能。SIF 在陆地生态系统监测的应用现状中多用来与 GPP 建立联系,大量研究证实二者呈强线性相关<sup>[5-10]</sup>,但 SIF 不太容易与森林碳汇建立直接关系,所以本文用 GPP 作为中间量,来估算森林碳汇。借助 SIF 遥感产品,利用光能利用率模型和基于最大光合作用效率的遥感生态系统呼吸模型,研究估算了 2011—2020 年东北林区 6—9 月生长期的碳汇模型,可为实现我国的“双碳”政策提供相对应的参考价值。

## 1 研究区概况及数据源

### 1.1 研究区概况

研究区域为中国东北林区,包括黑龙江省、吉林省、辽宁省以及内蒙古自治区的呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市和赤峰市。东北林区是我国最大的天然林区,大致分为大兴安岭、小兴安岭和长白山脉 3 部分。大兴安岭东北起自黑龙江省漠河市北部黑龙江主河道南岸,西南止于内蒙古自治区赤峰市北部西拉木伦河上游谷地,呈东北—西南走向,地理坐标介于  $N43^{\circ}00' \sim 53^{\circ}30'$ ,  $E117^{\circ}20' \sim 126^{\circ}00'$  之间;小兴安岭位于黑龙江省东北部,处于  $N46^{\circ}28' \sim 49^{\circ}21'$ ,  $E127^{\circ}42' \sim 130^{\circ}14'$ ,北部以黑龙江中心航线为界,是中国东北边疆的重要门户;长白山脉位于吉林省东南部地区,东起乌苏里江的完达山下,地理坐标为  $N41^{\circ}42' \sim 42^{\circ}25'$ ,  $E127^{\circ}28' \sim 128^{\circ}16'$ ,是中朝两国界山,区域总面积 19.64 万  $hm^2$ 。东北林区主要以中温带针叶—落叶阔叶混交林为主。据近年统计资料,全区共有森林面积 4 533.33 万  $hm^2$ ,占全国森林总面积的 37%,所以估算东北林区碳汇量对实现“碳达峰、碳中和”有重大意义。

### 1.2 森林面积数据

东北林区森林面积数据为 2013 年中国土地利用现状遥感监测数据,由中国科学院资源与环境科学数据中心提供,数据的空间分辨率为 1 km。本研究仅选择密度大于 30% 的林地作为实验林地,下载黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古自治区部分地区(通辽市、赤峰市、呼伦贝尔市、兴安盟)数据组成东北林区,图 1 所示绿色区域为森林面积。

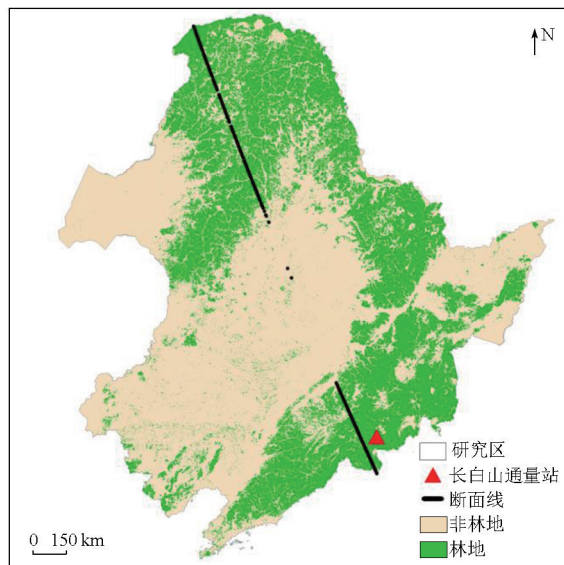


图 1 东北林区森林区域

Fig.1 Forest region of Northeast China

### 1.3 通量数据

本研究所采用的地面通量数据主要来自于全球通量观测网发布的 FLUXNET 数据集,该数据集包括了 GPP、生态系统呼吸等碳通量和能量交换数据。本文选取长白山温带红松阔叶林通量观测站的 2003—2010 年站点的月 GPP 数据和 2003—2005 年的日生态系统呼吸数据。长白山观测站地处长白山自然保护区,经纬度为  $E128^{\circ}05'45''$ ,  $N42^{\circ}24'9''$ (图 1),海拔为 738 m。该站代表了中国温带针阔混交林生态类型。

### 1.4 SIF 数据

由于卫星直接观测的 SIF 数据产品多为离散数据产品,其缺点有空间连续性差、幅宽较窄、轨道间隔较大,并且本文所用的通量站数据为 2003—2010 年的通量站数据,估算的碳汇为 2011—2020 年大面积东北林区的碳汇数据,时间跨度较大,直接的卫星观测产品不能满足需求,所以本文选取的是 SIF 扩展产品。SIF 数据来源于 Li 等<sup>[11]</sup>基于离散 OCO-2 SIF 的探测数据、中分辨率成像光谱仪数据和气象数据建立的高时空分辨率( $0.05^{\circ}$ , 8 d)的全球“OCO-2”SIF(GOSIF)数据集。已有大量研究论证<sup>[12-14]</sup>该数据线性变化较小,稳定性较好且连续。选取了 2003—2020 年月尺度 GOSIF 数据作为 SIF 原始数据。

### 1.5 数据预处理

由于 GOSIF 数据分辨率为  $0.05^{\circ}$ ,相对过于粗糙,用于和 GPP 数据拟合需要进行分辨率调整。将其他数据都通过重采样调整至与 GOSIF 数据同一分辨率并进行几何纠正,方便拟合计算。

将 MODIS 数据进行批量拼接,拼接后将时间分

辨率为 8 d 数据转化为与 GOSIF 时间分辨率相同的 30 d 时间分辨率数据。

## 2 研究方法

由于 SIF 数据的不确定因素较多,不适合直接对森林碳汇进行估算,所以采用 GPP 作为中间变量,先用 SIF 估算 GPP,再进行森林碳汇的估算。

净生态系统生产力 (net ecosystem productivity, NEP) 是指净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 中减去异养生物呼吸消耗光合产物之后的部分, NPP 表示植被固定的碳中扣除呼吸所消耗的部分,其公式为:

$$NPP = GPP - R_{GPP}, \quad (1)$$

$$NEP = NPP - R_{EOM} = GPP - R_{GPP} - R_{EOM} = GPP - R_{eco}, \quad (2)$$

式中:  $R_{GPP}$  为自养生物本身呼吸所消耗的同化产物;  $R_{EOM}$  为异养生物呼吸消耗量;  $R_{eco}$  为生态系统呼吸所消耗的能量;  $NEP$  为碳的净贮存,其数值可以为正也可以为负。当  $NEP > 0$  时表示该生态系统为碳汇,反之则为碳源。

### 2.1 MODIS 数据

本文利用 MOD09A1 产品来计算植被指数。基于地区的经纬度信息,提取地区位置的反射率,使用其中蓝光、红光、近红外、短波红外 4 个波段的数据,计算地表水分指数 (land surface water index, LSWI) 和增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI)。计算公式<sup>[15]</sup>分别为:

$$EVI = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + 1 + 6.0 \rho_{red} + 7.5 \rho_{blue}}, \quad (3)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}, \quad (4)$$

式中:  $LSWI$  为地表水分指数;  $EVI$  为增强型植被指数;  $\rho_{blue}$  为蓝光波段地表反射率;  $\rho_{SWIR}$  为短波红外波段地表反射率;  $\rho_{NIR}$  为近红外波段地表反射率;  $\rho_{red}$  为红光波段地表反射率。

### 2.2 GPP 估算

GPP 由植被吸收的光合有效辐射 (absorbed photosynthetically active radiation, APAR) 和光能利用率  $\varepsilon$  确定,计算公式为:

$$GPP = APAR \varepsilon, \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon$  为植被光合作用的实际光能利用率,即植被吸收光和有效辐射转化成有机碳的效率。

SIF 包含  $\varepsilon$  和  $APAR$  的信息,其公式为:

$$SIF = APAR \varepsilon_F(\lambda) f_{esc}(\lambda), \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为光谱波长;  $\varepsilon_F$  为荧光量子产量;  $f_{esc}(\lambda)$  为叶绿体发射的荧光可以逃逸出冠层的比例。结合上述公式<sup>[16]</sup>可得:

$$GPP = SIF \frac{\varepsilon}{\varepsilon_F(\lambda) f_{esc}(\lambda)}. \quad (7)$$

当卫星重复覆盖的植被区域在一定的时间内冠层结构没有发生改变,则可以假定  $f_{esc}(\lambda)$  是常数值 1。GPP 与 SIF 的关系决定于 2 个光能利用率的比值,即:

$$\frac{GPP}{SIF} = \frac{APAR \varepsilon}{APAR \varepsilon_F(\lambda) f_{esc}(\lambda)} = S, \quad (8)$$

$$GPP = SIF \frac{\varepsilon}{\varepsilon_F(\lambda) f_{esc}(\lambda)} = SIF \cdot S, \quad (9)$$

式中:  $S$  为 GPP 与 SIF 的拟合系数。求出  $S$  即可以用 SIF 来估算 GPP。

### 2.3 遥感生态系统呼吸模型

$R_{eco}$  可以分为  $R_{GPP}$  和  $R_{EOM}$  2 部分<sup>[17]</sup>,其中植物体呼吸部分与植被的生长状况及水分条件有关,即:

$$R_{eco} = R_{GPP} + R_{EOM}. \quad (10)$$

根据 Gao 等<sup>[18]</sup>的研究,  $R_{GPP}$  与  $EVI$  影响函数 ( $EVI_s$ ) 以及水分对最大光能利用效率的影响函数 ( $W_s$ ) 的关系可表示为:

$$R_{GPP} = \alpha PC_{max} EVI_s W_s, \quad (11)$$

式中:  $\alpha$  为待拟合的模型参数;  $PC_{max}$  为植被最大光合作用能力,不同植被类型的  $PC_{max}$  值不同, Gao 等推算出温带针叶-落叶阔叶混交林的  $PC_{max}$  值为  $2.61 \text{ mol C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

$EVI_s$  表示植被对光合作用能力的影响,为  $EVI$  的函数,其公式为:

$$EVI_s = EVI - 0.1. \quad (12)$$

当  $EVI$  趋近 0.1 时,  $GPP$  趋近 0。 $W_s$  为水分对光合作用的影响,通常表示为土壤水分和水汽压差的函数,在 Gao 等<sup>[18]</sup>的模型中用  $LSWI$  替代,其公式为:

$$W_s = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}}. \quad (13)$$

$W_s$  标量可以反映湿度条件的时间动态和空间格局。在本研究中取  $LSWI_{max}$  的值为 1,以便进行空间比较。

$R_{EOM}$  与地表温度 (land surface temperature, LST) 的关系参考 L-T 方程<sup>[19]</sup>,即

$$R_{\text{EOM}} = R_{\text{ref}} e^{\left[ E_0 \left( \frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{LST - T_0} \right) \right]} \quad (14)$$

式中:  $R_{\text{ref}}$  为处于参考温度  $T_{\text{ref}}$  ( $10^\circ\text{C}$ ) 时的生态系统有机质及土壤微生物的  $R_{\text{EOM}}$ ;  $E_0$  为活化能相关参数;  $T_0$  ( $-46.02^\circ\text{C}$ ) 为  $R_{\text{EOM}}$  为 0 时对应的温度。因此,遥感生态系统呼吸模型可表示为:

$$R_{\text{eco}} = \alpha PC_{\text{max}} EVI_s W_s + R_{\text{ref}} e^{\left[ E_0 \left( \frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{LST - T_0} \right) \right]} \quad (15)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 重采样后的 GPP 数据精度检验

因为 SIF 数据较粗,和 GPP 进行拟合来求解拟合系数会产生一定的误差,所以将重采样前后的 GPP 数据进行精度对比。将重采样前 500 m 分辨率的 GPP 数据与重采样后 0.05° 分辨率的 GPP 数据做散点图如图 2 所示,可以看出采样前与采样后的 GPP 精度相差不大。

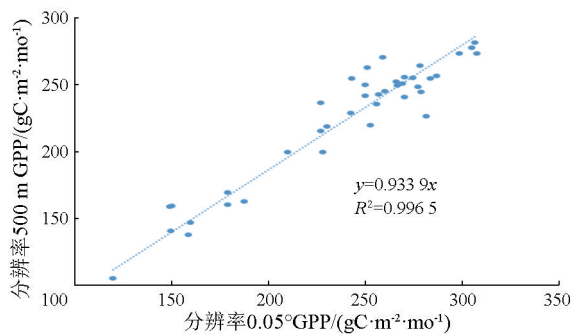


图2 GPP 采样前后对比

Fig.2 Comparison before and after GPP sampling

#### 3.2 GPP 与 SIF 拟合系数

##### 3.2.1 获取拟合系数

获取的 2003—2010 年的通量站实测 GPP 数据与提取的对应经纬度的 GOSIF 数据做散点图如图 3

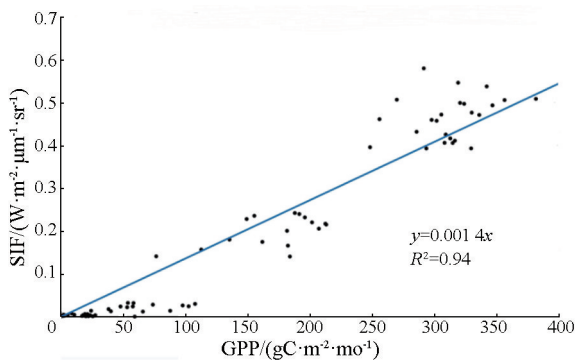


图3 通量站 GPP 与对应 GOSIF 数据

Fig.3 Flux station GPP and corresponding GOSIF data

所示,可以看出 GPP 与 SIF 呈现较强线性相关特性,  $R^2 = 0.94$ 。根据图 3 散点图数据求出 2003—2010 年各月的 GPP/SIF 拟合系数,得出图 4,可以看出虽然年份之间的个别数据相差较大,但是每年各月份的拟合系数总体呈现出先递减后递增的周期性变化趋势。

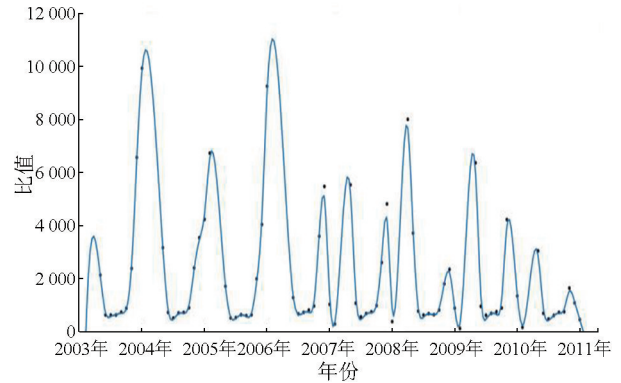


图4 各月 GPP/SIF 比值

Fig.4 GPP/SIF ratio by month

每月之间的拟合系数不同,将各月份拟合系数和拟合系数趋势线分别放在一起(如图 5 所示)可以发现,1 a 之内的拟合系数呈现先递增后递减趋于稳定后再递增再递减的总体趋势,在 1—3 月份升高,3 月份达到最大值后 3—5 月份递减,6—9 月份趋势平缓且稳定,9—11 月份持续递增,11—12 月再递减,总体来说夏季植被生长期拟合系数最稳定且全年最低。

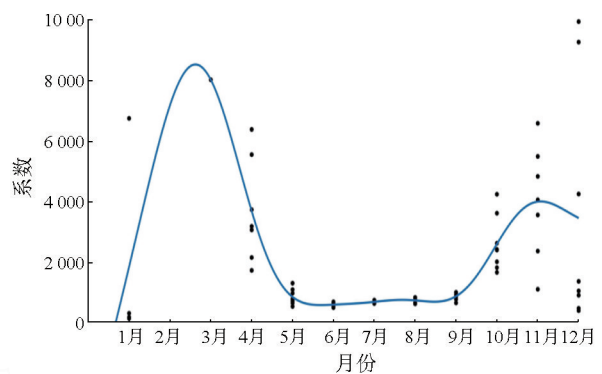


图5 各月份拟合系数

Fig.5 Fitting coefficient for each month

因为 2003—2010 年植被生长期 6—9 月的拟合系数较为稳定,各年份之间相差较小,所以选择植被生长期 6—9 月这 4 个月进行研究。求出的拟合系数如表 1 所示,可以看出 6—9 月的拟合参数平均值呈现递增趋势。

表 1 生长期拟合系数值  
Tab.1 Growth period fitting coefficient value

| 月份  | 2003 年 | 2004 年 | 2005 年 | 2006 年 | 2007 年 | 2008 年 | 2009 年 | 2010 年 | 平均     |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 6 月 | 646.72 | 531.34 | 553.64 | 691.06 | 582.78 | 646.25 | 641.01 | 501.61 | 559.30 |
| 7 月 | 650.26 | 725.42 | 658.26 | 748.72 | 703.31 | 701.11 | 711.89 | 634.87 | 691.73 |
| 8 月 | 757.39 | 745.63 | 726.14 | 836.85 | 768.28 | 660.30 | 774.13 | 749.51 | 727.28 |
| 9 月 | 903.72 | 924.27 | 757.62 | 988.51 | 995.61 | 842.98 | 913.32 | 774.14 | 900.02 |

3.2.2 获取拟合系数

依靠 MOD17A2H 的 8 d 合成 GPP 500 m 分辨率产品,经过预处理后对所求出的拟合系数进行精度验证。建立 SIF 估算 GPP 点与 MODIS GPP 点之间的联系,得到拟合精度,如图 6 所示。可以发现,模拟 GPP 精度相对较高, $R^2=0.72$ 。

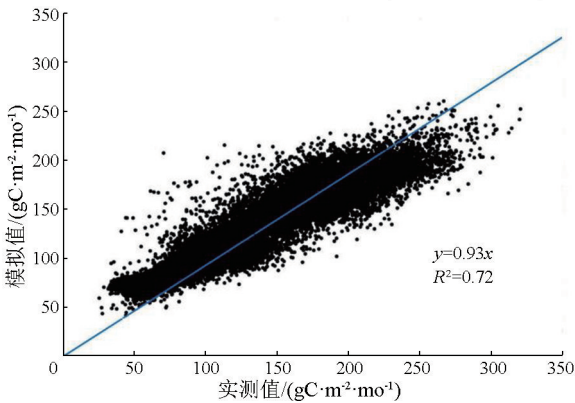


图 6 估算 GPP 与实测 GPP 散点图

Fig.6 Estimated GPP and measured GPP scatter plots

3.3 生态系统呼吸模型拟合参数

根据式(15)可知式中有  $\alpha$ ,  $R_{ref}$ ,  $E_0$  这 3 个待拟合参数。利用 2003—2005 年间的 80% 的数据进行拟合,用 20% 的数据进行精度验证与评估。经过参数拟合得出结果为  $\alpha$  为 3.89,  $R_{ref}$  为 5.53  $\text{gC}/\text{m}^2$ ,  $E_0$  为 166.21 K,图 7 给出拟合参数的精度检验散点图。而针对东北林区的不同森林类型,一般来说,不同森林类型的呼吸作用可能会有所不同,这是由于不同的树种和森林结构对光合作用和土壤呼吸的影响。然而,这些差异可能会被气候、土壤类型等因素

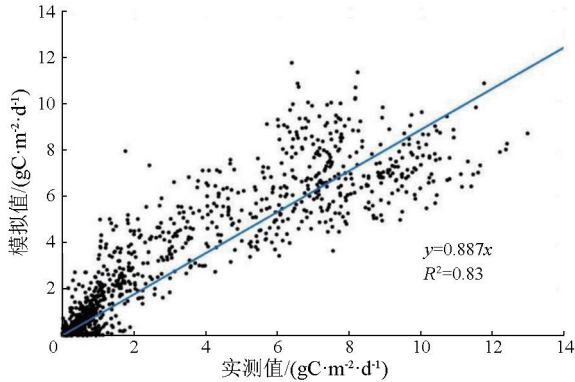


图 7 拟合值与实测值散点图

Fig.7 Scatter plot of fitted and measured values

所抵消<sup>[20-21]</sup>,因此在整个东北林区这种较大尺度上,不同森林类型对地区碳汇的影响并不显著。

3.4 遥感东北林区碳汇模拟结果分析

通过模型模拟,获得了 2011—2020 年 6—9 月的东北林区森林碳汇模拟结果,示例如图 8 所示。

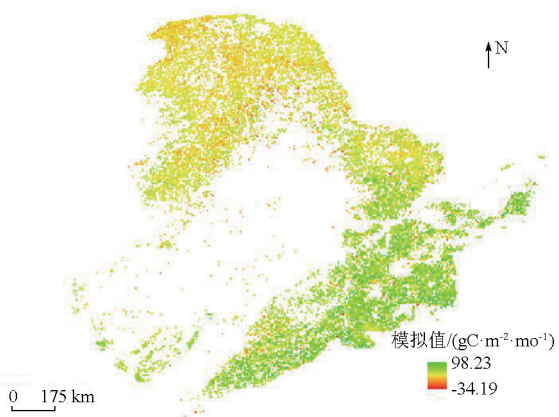


图 8 东北林区碳汇模型结果示例

Fig.8 Example of carbon sink model results in the forest region of Northeast China

3.4.1 碳汇总量与 SIF 平均值

东北林区月碳汇平均值与 SIF 平均值对比如图 9 所示,可以看出碳汇量与 SIF 的值呈现较强相关性,说明在生长期碳汇与 SIF 较强相关,为基于 SIF 估算森林碳汇的可行性提出了很好的佐证。森林碳汇和 SIF 值趋势大致相同都是先递增再递减,6—9 月的生长期期间在 7—8 月份达到顶峰然后下降。

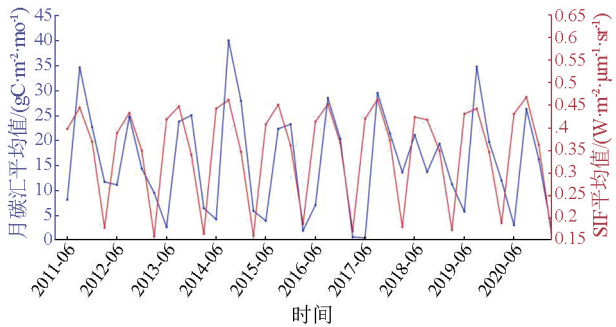


图 9 月碳汇平均值与 SIF 平均值

Fig.9 Average monthly carbon sink and SIF

3.4.2 东北林区碳汇模拟结果时空分布分析

从时间维度来看,2011—2020 年的 6—9 月生长期期间东北林区碳汇总量呈现下降趋势(图 10(a)),碳汇总量从 2011 年最初的 77.09  $\text{TgC}$  降至

2020年的48.04 TgC,主要从2011—2012年、2014—2015年、2019—2020年这3个时间段下降较大。从各月来看7月的碳汇量总体高于其他3个月,8月

碳汇量高于6月和9月,6月和9月相差不大,原因可能是7月和8月正值夏季光照最强的时间段,森林系统光合作用最强所以碳汇量最大。

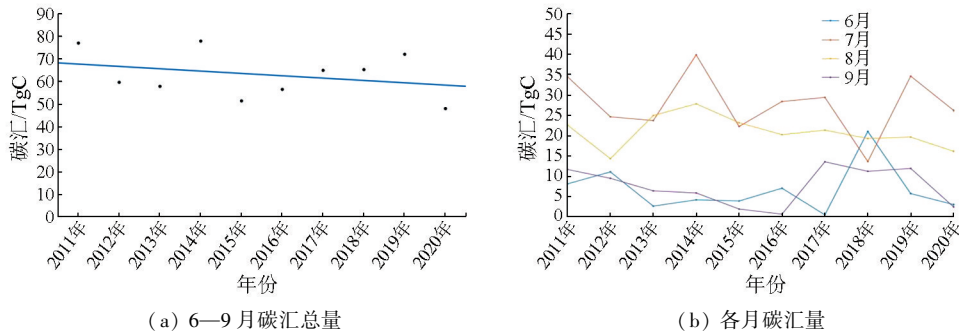


图10 月碳汇量

Fig.10 Monthly carbon sink

从空间维度来看可看出,东北林区碳汇量总体呈现“东南高、西北低”的分布特征(图8)。主要影响因素可能有降水和气温2方面。东北全年降水主要集中在夏季,平均降水量约为300~400 mm<sup>[22-24]</sup>,空间上呈现东南多(最大可达600 mm以上)、西北少的分布特征;西南部分长白山夏季平均温度为17~25℃,东北部分大兴安岭夏季平均温度是8.0~23.0℃。降水和气温这两大影响因素的变化规律都与SIF和碳源/汇的变化规律相同,都是呈现东南高西北低的

分布特征。

如图1断面线所示,在内蒙古自治区呼伦贝尔市与黑龙江省大兴安岭市的最北边交界点和吉林省白山市最东南角画一条连接线,做各参数在该线上的断面分析。这条线不仅包括了大兴安岭和长白山地区的主要森林,还包含了长白上的高峰地区。SIF、碳汇、GPP、降水、温度和高程这6个参数在该线上的断面折线图如图11所示。从图11可以看出东北林区从西北向东南方向碳汇量逐渐增加,而降

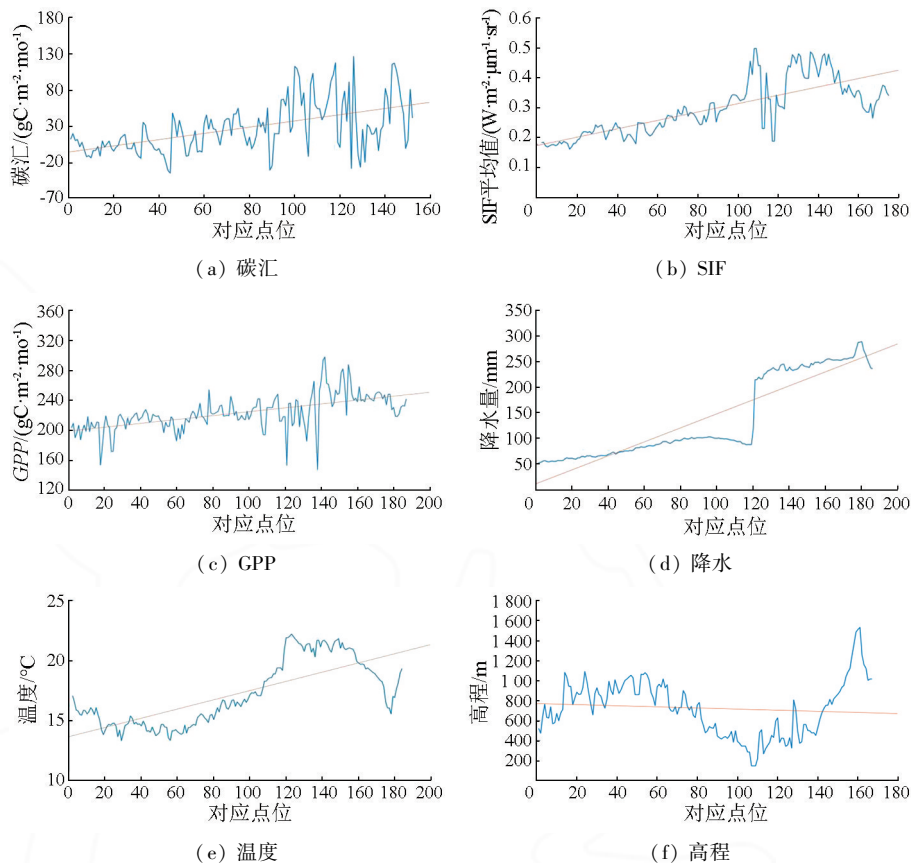


图11 各参数断面图

Fig.11 Profile of each parameter

水、温度、GPP 和 SIF 都与碳汇的趋势线相似,都是逐渐增加,进而可以说明这 4 个参数都与碳汇量相关。高程和碳汇的趋势线相似性不强,与碳汇的相关性不强。

将碳汇进行聚类分析,分为大、小兴安岭和长白山 2 个部分,做地区碳汇平均值折线图(图 12),从图

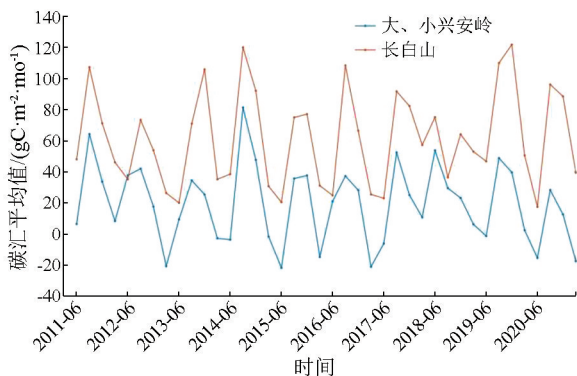


图 12 大、小兴安岭和长白山地区的碳汇平均值

Fig.12 Average carbon sink in the Greater and Lesser Hinggan Mountains and Changbai Mountains

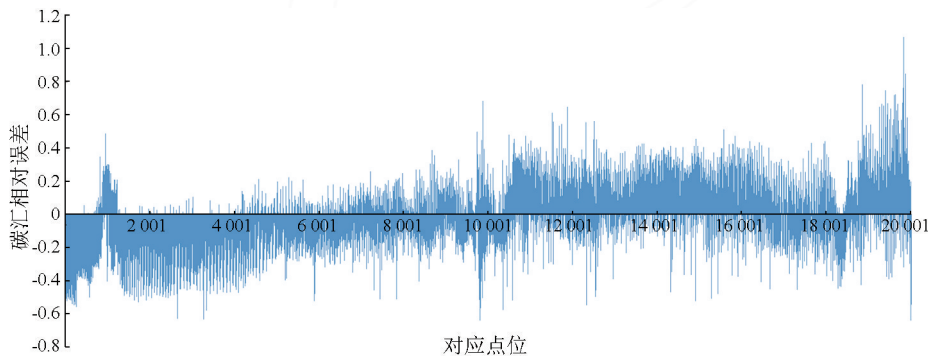


图 13 碳汇相对误差

Fig.13 Carbon sink relative error

#### 3.4.4 碳汇数据对比检验

当前大范围的碳汇检验数据较为欠缺,因此采用长白山通量站点的碳汇数据进行对比检验,如图 14 所示,前 8 条曲线是 2003—2010 年的实测 6—9 月碳汇数据,后面的 10 条为 2011—2020 年的估算 6—9 月碳汇数据。可以看出碳汇数据主要分为 2 种类型:第一种是 2003 年、2004 年、2006 年、2008 年、2009 年的碳汇曲线,在 6—9 月逐渐递减;第二种是 2005 年、2007 年、2010 年的碳汇曲线,在 6—7 月递增,7—9 月递减。实测的碳汇最大值在 2008 年 6 月为  $126.84 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mo}^{-1}$ ,最小值在 2004 年 9 月为  $4.50 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mo}^{-1}$ 。图 14 后 10 条为估算数据,2011 年、2012 年、2015 年、2018 年、2019 年与实测数据第一种碳汇曲线增减性相似,6—9 月逐渐递减;2013 年、2014 年、2016 年、2020 年与实测数据第二种碳汇曲线增减性相似,6—7 月递增,7—9 月递减;2017 年碳汇曲线与其他年份都不相似,6—

中可以看出,整体上大、小兴安岭和长白山地区的碳汇增减性相同,且整体长白山平均碳汇值高于大、小兴安岭碳汇值。

碳源/汇的变化规律与光合作用的强弱密不可分,降水量和温度都是光合作用的重要参数,而 SIF 值是植物光合作用的有效指标,吉林省和辽宁省的长白山脉 SIF 值相对较高,说明该地区光合作用更强,碳汇量也相对较大。而西北部的大兴安岭地区不管是温度、降水量还是 SIF 值都相对较低,碳汇量也相对较低。

#### 3.4.3 碳汇相对误差

碳汇相对误差规律如图 13 所示。根据图像发现相对误差呈现轻微波动,且中间会出现断层现象,对比发现是碳汇点的不同点位产生的这种问题,中间相对误差较为平缓的地区多为中间森林密集区域;相对误差过高或过低的区域为森林边缘、分散的林地或者沿海的岛屿。总体来说,在森林密集区域,碳汇误差相对稳定且在合适范围内。

7 月递增,7—8 月递减,8—9 月再递增。从总体来看,估算数据与实测数据增减趋势和数值区间相似性都比较高。

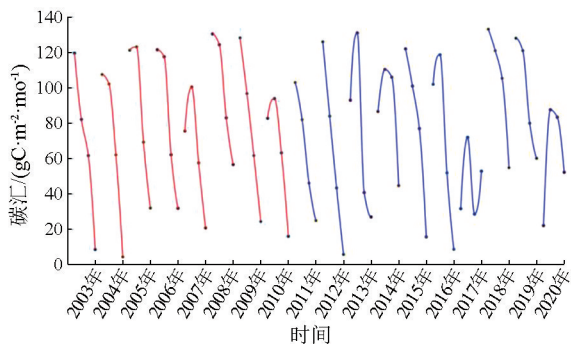


图 14 碳汇数据对比

Fig.14 Carbon sink data comparison

## 4 结论

基于日光诱导叶绿素荧光的森林碳汇估算旨在

用一种植被类型的通量站实测数据求出拟合函数来估算相同植被类型的大面积森林碳汇。主要得到如下结论: SIF 与森林碳汇呈现较强相关性。空间维度上,东北林区的 SIF 和碳汇分布相似,东南方向的长白山地区碳汇能力较强,西北方向的大兴安岭地区碳汇能力较弱且有些地方为碳源,也有可能是大兴安岭距离长白山通量观测点太远,且植被类型有差别所以估算不准确。时间维度上,6—9月这4个月的植被生长期,碳汇能力总体呈先递增再递减的趋势。不同年份相同月份间 SIF, GPP 和碳汇曲线都呈现相似性。总的来说,利用 SIF 来估算东北林区碳汇能力较好,可行性较强。

但是,研究中仍存在一些可以后续改进的地方。首先需要考虑到 GOSIF 作为合成产品,其精度虽然较高,但与直接实测产品相比仍然存在一定的误差,这可能对数据结果产生一定的影响。其次,通过使用单个通量站点数据来估测大面积数据的模式本身就存在很大的不确定性。尽管这个通量站点位于长白山地区,与大兴安岭地区在自然环境方面相差不大,但仍然会有一些相应的影响。并且在估算 GPP 时,采用的方法相对粗糙。虽然大量的研究已经论证了 SIF 与 GPP 之间的强相关性,但本研究的估算方法仍有改进空间。未来的研究可以增加通量站数据,或者在估算时加入水汽、温度等因素以提高估算的准确性。

本文研究区域仅限于东北林区,不能进一步说明 SIF 与森林碳汇之间的较强相关性,有一定的局限性。并且本文研究区内的森林类型是大类研究,根据中国科学院资源与环境科学数据中心提供的森林数据把东北林区的森林类型概括为温带针阔混交林,对于东北林区的其他不同森林类型是否对呼吸作用乃至碳汇产生影响没有提及,不同类型森林的植物种类、生长速度、生物量等特征都有所不同,这些特征都会影响森林的呼吸作用和碳汇功能。因此,在后期的研究中,可以选取不同地区、不同森林系统并对森林类型进行森林碳汇更加详细的估算,进一步分析用 SIF 估算森林碳汇的可行性,也有助于更好地理解 and 预测全球碳循环,对于气候变化研究和森林管理也有着重要的指导意义。

## 参考文献 (References):

- [1] 毕君,王超,尤海舟.基于温室气体清单的河北省森林碳汇量研究[J].生态科学,2016,35(4):113-118.  
Bi J, Wang C, You H Z. Forest carbon sequestration estimation based on Greenhouse Gases Inventory in Hebei Province[J]. Ecological Science, 2016, 35(4): 113-118.
- [2] 吕富成,马建勇,曹云,等.基于 FORCCHN 模型的中国典型森林生态系统碳通量模拟[J].生态学报,2022,42(7):2810-2821.  
Lyu F C, Ma J Y, Cao Y, et al. Carbon fluxes simulation of China's typical forest ecosystem based on FORCCHN model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2810-2821.
- [3] 梅晓丹,李丹,王强,等.基于 Biome-BGC 模型的小兴安岭森林碳通量时空分析[J].测绘与空间地理信息,2021,44(11):7-10.  
Mei X D, Li D, Wang Q, et al. Spatial-temporal analysis of forest carbon flux of in Xiaoxing'anling based on biome-BGC model[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2021, 44(11): 7-10.
- [4] Magney T S, Bowling D R, Logan B A, et al. Mechanistic evidence for tracking the seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(24): 11640-11645.
- [5] Wang M, Zhang L. Synchronous changes of GPP and solar-induced chlorophyll fluorescence in a subtropical evergreen coniferous forest[J]. Plants, 2023, 12(11): 2224.
- [6] 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(17): L17706.
- [7] Frankenberg C, O'dell C, Guanter L, et al. Remote sensing of near-infrared chlorophyll fluorescence from space in scattering atmospheres: Implications for its retrieval and interferences with atmospheric CO<sub>2</sub> retrievals[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(8): 2081-2094.
- [8] 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(9): 3990-4008.
- [9] 李月,孙政国.基于叶绿素荧光遥感监测的蒙古高原草地生产力时空动态分析[J].江苏农业科学,2021,49(13):219-226.  
Li Y, Sun Z G. Temporal and spatial dynamic analysis of grassland productivity in Mongolian Plateau based on chlorophyll fluorescence remote sensing monitoring[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(13): 219-226.
- [10] 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.  
Wang Y N, Wei J, Tang X G, 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.
- [11] Li X, Xiao J. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(5): 517.
- [12] 张心竹,王鹤松,延昊,等.2001—2018年中国总初级生产力时空变化的遥感研究[J].生态学报,2021,41(16):6351-6362.  
Zhang X Z, Wang H S, Yan H, et al. Analysis of spatio-temporal changes of gross primary productivity in China from 2001 to 2018 based on Remote Sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6351-6362.
- [13] 谢鹏飞.基于日光诱导叶绿素荧光的干旱遥感监测研究[D].合肥:安徽农业大学,2022.  
Xie P F. Remote sensing monitoring of drought based on solar-induced chlorophyll fluorescence[D]. Hefei: Anhui Agricultural Uni-

- versity, 2022.
- [14] 安映荷, 张润卿, 刘文杰, 等. 海南岛橡胶林区域不同 SIF 产品的差异性分析及其对 GPP 估算的影响[J]. 热带生物学报, 2023, 14(4): 412-423.
- An Y H, Zhang R Q, Liu W J, et al. Analysis of different satellite-based SIF products of the rubber plantations in Hainan Island and their effects on GPP estimate[J]. Journal of Tropical Biology, 2023, 14(4): 412-423.
- [15] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity mapped for Canada at 1-km resolution[J]. Global Ecology and Biogeography, 2002, 11(2): 115-129.
- [16] 周 敏. 基于叶绿素荧光的中國植被总初级生产力估算[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- Zhou M. Estimation of gross primary production using sun-induced chlorophyll fluorescence in China[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.
- [17] 姜海梅, 叶昊天, 王若静, 等. 基于 MODIS 产品的生态系统呼吸模型在内蒙古半干旱草原的验证[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 1029-1037.
- Jiang H M, Ye H T, Wang R J, et al. A validation study of MODIS-based ecosystem respiration model in a semi-arid grassland of Inner Mongolia [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(6): 1029-1037.
- [18] Gao Y, Yu G, Yan H, et al. A MODIS-based photosynthetic capacity model to estimate gross primary production in Northern China and the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 148: 108-118.
- [19] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315.
- [20] 闫世琦, 赵正勇, 杨 旗, 等. 基于有限样点和大尺度模型的区域土壤呼吸模型研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 865-872.
- Yan S Q, Zhao Z Y, Yang Q, et al. Regional soil respiration modeling based on the finite sample points and the large-scale model [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 865-872.
- [21] 马 芮. 基于模型—数据融合的中国区域碳通量动态模拟及分析[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2018.
- Ma R. Dynamic simulation and analysis of carbon and water fluxes in China based on model-data fusion [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [22] 韩艳凤, 江志红, 王 冀, 等. 东北地区夏季降水时空变化特征[J]. 气象科技, 2005, 33(2): 136-141.
- Han Y F, Jiang Z H, Wang J, et al. Temporal and spatial characteristics of summer rainfall in Northeast China [J]. Meteorological Science and Technology, 2005, 33(2): 136-141.
- [23] 龚 强, 汪宏宇, 王盘兴. 东北夏季降水的气候及异常特征分析[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 387-393.
- Gong Q, Wang H Y, Wang P X. Analysis of climate and anomaly features of summer precipitation in Northeast China [J]. Meteorological Science and Technology, 2006, 34(4): 387-393.
- [24] 张 雷. 近 50 年东北地区夏季降水变化特征[J]. 黑龙江农业科学, 2017(10): 15-16, 20.
- Zhang L. Characteristics of summer precipitation variability in Northeast China in recent 50 years [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2017(10): 15-16, 20.

## Estimating forest carbon sink in the forest region of Northeast China using solar-induced chlorophyll fluorescence

ZHAO Zifang, LIANG Ailin

(School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Forest carbon sink, an important factor in maintaining the ecological balance of the earth and coping with climate change, plays a key role in the global carbon cycle. It absorbs large amounts of carbon dioxide and stores carbon element, helping mitigate climate change. Additionally, forest carbon sink provides essential ecological services, such as biodiversity conservation, water resource regulation, and soil conservation. Therefore, the estimation of forest carbon sink is critical. Based on solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) and using the gross primary productivity (GPP) as an intermediate variable, this study estimated forest carbon sink in the forest region of Northeast China during the vegetation growth period (i.e., from June to September) between 2011 and 2020. The results reveal a strong spatial correlation between forest carbon sink and SIF in this region. The similar distributions of SIF values and carbon sink in the forest region of Northeast China indicate that the Changbai Mountains and the Da Hinggan Mountains had high and low carbon sink capacities, respectively. Over the vegetation growth period from June to September, the carbon sink capacity in the region showed a gradual upward trend initially, followed by a gradual downward trend. Overall, it is highly feasible to estimate carbon sink using SIF in the forest region of Northeast China.

**Keywords:** forest carbon sink; solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF); gross primary productivity (GPP)

(责任编辑: 陈昊旻)