

引用格式: Liu Qingrui, Ju Weimin, Zhang Yongguang, *et al.* Ability of Sun-induced Chlorophyll Fluorescence on Estimating Terrestrial Ecosystem Gross Primary Productivity in China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(2): 363-373. [刘青瑞, 居为民, 张永光, 等. 日光诱导叶绿素荧光估算中国典型生态系统总初级生产力的能力[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 363-373.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2017.2.0363

日光诱导叶绿素荧光估算 中国典型生态系统总初级生产力的能力

刘青瑞^{1,2}, 居为民^{1,3}, 张永光¹, 张雷明⁴, 王绍强⁴, 周艳莲^{2,3},
赵风华⁴, 闫俊华⁵, 韩士杰⁶, 郝彦宾⁷, 陈世莘⁸, 李英年⁹, 项文化¹⁰

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210023;

2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023;

3. 江苏省地理信息技术重点实验室, 江苏 南京 210023;

4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 5. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650;

6. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110000; 7. 中国科学院大学, 北京 100049;

8. 中国科学院植物研究所, 北京 100093; 9. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810008;

10. 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南 会同 438107)

摘要: 陆地生态系统总初级生产力(GPP, Gross Primary Productivity)是陆地生态系统碳循环的重要分量, 提高其估算精度具有重要的科学意义。由于受多种因子的影响, GPP 的时空变异明显, 其估算结果存在较大的不确定性。日光诱导叶绿素荧光(SIF, Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence)与 GPP 密切相关, 近年来被应用于估算区域和全球 GPP, 但其在中国生态系统的适用性尚不清楚。以中国 8 个典型植被生态系统为研究对象, 驱动两叶光能利用率模型(TL-LUE, Two-Leaf Light Use Efficiency Model)模拟以站点为中心 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 区域内的月 GPP, 验证 SIF 估算 GPP 的能力。结果表明, SIF 具有监测中国典型植被生态系统 GPP 的能力, 月 SIF 与 TL-LUE 模拟的月 GPP 之间显著相关, 其中 5 个生态系统中两者的 R^2 高于 0.8, 最高达到 0.91, GPP 与 SIF 变化的斜率随生态系统类型变化。模拟的 GPP 与 SIF 遥感数据的季节变化特征相同, 两者之间的一致性在生长季节好于非生长季节; SIF 能更好地监测农田 GPP 的季节变化。

关键词: 陆地生态系统总初级生产力; 日光诱导叶绿素荧光(SIF); 两叶光能利用率模型(TL-LUE)

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2017)02-0363-11

1 引 言

陆地生态系统碳循环是全球碳循环的重要组成部分, 在研究大气 CO_2 浓度和气候变化, 以及大气和生物圈之间相互作用方面具有重要作用^[1-2]。陆地生态系统总初级生产力(GPP, Gross Primary

Productivity)定义为植被光合过程中单位时间内固定碳的速率^[3], 是陆地生态系统碳循环的重要分量, 反映了自然环境下陆地生物圈的生产水平^[4]。精确计算 GPP 有助于理解陆地生态系统对气候变化和人类活动的响应。由于 GPP 受到多种因子的影响, 其计算结果存在着较大的不确定性。近年来, 遥感

收稿日期: 2016-06-01; 修订日期: 2017-03-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050602-1 和 XDA05050208), 国家自然科学基金面上项目(41371070)。

作者简介: 刘青瑞(1990-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事植被生态遥感研究。E-mail: 15261873536@163.com。

通讯作者: 周艳莲(1980-), 女, 湖北应城人, 副教授, 主要从事生态环境遥感研究。E-mail: zhouyl@nju.edu.cn。

信息被广泛应用于估算 GPP, 遥感数据驱动的光能利用率(LUE, Light Use Efficiency)模型是这方面的代表。这类模型将 GPP 计算为吸收的光合有效辐射(APAR, Absorbed Photosynthetically Active Radiation)和 LUE 的乘积^[5]。由于 APAR 是入射的光合有效辐射(PAR, Photosynthetically Active Radiation)与吸收的光合有效辐射比例(fPAR, fraction of Photosynthetically Active Radiation)的乘积, 计算的 GPP 随 PAR 线性变化, 会导致估算的 GPP 出现“跷跷板”现象(高值偏高、低值偏低)。为了解决这个问题, He 等^[6]提出了两叶光能利用率模型(TL-LUE, Two-Leaf Light Use Efficiency Model), 将冠层叶片分为阳叶和阴叶两部分, 分别计算各自的 APAR, 提高了 GPP 估算的精度。

植被吸收的 PAR 的去向分为三部分: 用于光合、发射的叶绿素荧光与热耗散。光合速率与发射的叶绿素荧光紧密耦合, 形成了利用日光诱导叶绿素荧光(SIF, Sun-Induced chlorophyll Fluorescence)估算 GPP 的理论基础。与 LUE 模型相比, SIF 估算 GPP 的模型具有机理性强、参数少的优势。目前, 全球的 SIF 数据通过一系列高光谱空间仪器获得, 比如 GOSAT's Fourier Transform Spectrometer^[7-9], ENVISAT/SCIAMACHY^[10], MetOp-A/GOME-2^[11]和 Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)^[12]。现有的研究已将 SIF 应用于草地^[13-14]、农田^[15-17]和森林^[18]等生态系统。且研究表明, 卫星 SIF 能可靠地估算冠层和生态系统尺度的 GPP^[15-18]。为遥感植被光合参数和植被实际光合作用之间建立直接联系, SIF 起到了桥梁作用^[15]。在农田方面, 基于遥感观测的 SIF 与其他植被参数相比, 对农作物的光合速率更敏感^[16]; 与传统的农作物产量估算方法相比, SIF 方法能够解译 C3、C4 农作物的光合方式路径的不同, 在估算农田生产力上更具优势, 并且 SIF 可用于探测植被受降水和温度的胁迫程度^[17]。在森林方面, SIF 与 GPP 和 APAR 保持较好的相关性和时空一致性^[18]。但是, SIF 遥感数据也存在空间分辨率相对较低的不足, 在中国等地表覆盖异质性较大的地区, 其估算 GPP 的效果如何尚有待验证。

本文选择中国通量网络 8 个典型通量站点为研究区, 验证 SIF 估算中国不同生态系统 GPP 的能力。由于所用 SIF 遥感数据的空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 不能直接将通量站观测的 GPP 与 SIF 进行比

较。为此, 先通过通量站观测的 GPP 验证 TL-LUE 模型模拟 GPP 的结果, 然后通过 TL-LUE 模型计算以通量站为中心的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 区域内 500 m 分辨率的 GPP, 对其求平均后与 SIF 进行比较分析, 评价利用 SIF 遥感数据估算中国典型生态系统 GPP 的潜力。

2 数据和方法

2.1 站点介绍

选择具有代表性的 8 个中国通量站点分析 SIF 估算 GPP 的能力, 包括 3 个草地站(海北, HB; 内蒙古, NMG; 多伦, DL); 4 个森林站(鼎湖山, DHS; 长白山, CBS; 会同, HT; 千烟洲, QYZ); 1 个农田站(禹城, YC), 这些通量站的基本信息见表 1。千烟洲通量观测站^[19]位于江西省泰和县千烟洲红壤丘陵农业综合开发实验站内, 具有典型的亚热带季风气候特征, 下垫面坡度在 $2.8^{\circ} \sim 13.5^{\circ}$ 之间, 塔四周的植被主要为人工针叶林, 森林覆盖率在 90% 以上。长白山温带红松阔叶林通量观测站^[20]位于吉林省延边朝鲜族自治州安图县二道白河镇, 海拔高度 738 m, 代表了中国温带针阔混交林生态类型。鼎湖山亚热带常绿阔叶林通量观测站^[21]位于鼎湖山森林生态系统定位站内, 地处低山丘陵, 海拔在 14~1 000 m 之间, 属亚热带季风湿润气候。会同^[22]杉木林通量站位于湖南省怀化市会同县广坪镇苏溪口村, 塔基海拔 313.5 m, 代表了中亚热带杉木林生态类型。海北高寒草甸生态系统通量观测站^[23]位于青藏高原东北隅祁连山北支冷龙岭东段南麓, 海拔 3 190 m, 地处于亚洲大陆腹地, 具有明显的高原大陆性气候, 气温极低, 干湿季分明。内蒙古温性典型草原通量观测站^[24]位于内蒙古自治区锡林郭勒盟白音锡勒牧场, 海拔 1 200 m, 属于大陆性温带半干旱草原气候, 冬春寒冷干燥, 夏秋温暖湿润。多伦站^[25]位于内蒙古自治区多伦县西南, 塔基海拔高度 1 350 m, 属于内陆干旱区和半干旱区, 冬季寒冷, 夏季干热, 雨热同季, 春天多大风。禹城暖温带半湿润旱作农田通量观测站^[26]位于中科院禹城综合农业试验站内, 平均海拔 28 m, 地貌类型为黄河冲积平原, 属于暖温带半湿润季风气候。He 等^[6]分析长白山、海北、千烟洲、禹城等站点 2003~2004 年通量观测 GPP 季节变化发现每个站点在每年的第 121~270 d 处于生长旺季。同时考虑到 8 个站点的气温, LAI 和 PAR 变化^[19, 23], 将每年的

表 1 8 个通量站点的基本信息

Table 1 Basic information of the 8 flux stations used in this study

| 站点 | 经度 | 纬度 | 数据时间 | 植被类型 | 简写 | 参考文献 |
|-----|----------------|----------------|-----------|------|-----|---------------------------|
| 长白山 | 128°05'45"E | 42°24'9"N | 2007~2011 | 森林 | CBS | Zhang <i>et al</i> (2006) |
| 鼎湖山 | 112°30'E | 23°09'N | 2007~2012 | 森林 | DHS | Yan <i>et al</i> (2014) |
| 会同 | 109°35'24.47"E | 26°47'23.844"N | 2008~2012 | 森林 | HT | Wen <i>et al</i> (2014) |
| 千烟洲 | 115°03'29.2"E | 26°44'29.1"N | 2007~2012 | 森林 | QYZ | Zhang <i>et al</i> (2006) |
| 多伦 | 116°17'E | 42°02'N | 2010~2012 | 草地 | DL | Zhang <i>et al</i> (2012) |
| 海北 | 101°19'E | 37°37'N | 2007~2012 | 草地 | HB | Zhang <i>et al</i> (2011) |
| 内蒙古 | 116°40'E | 43°32'N | 2007~2012 | 草地 | NMG | Hao <i>et al</i> (2010) |
| 禹城 | 116°34'E | 36°50'N | 2007~2012 | 农田 | YC | Li <i>et al</i> (2006) |

4~9 月份定义为每个站点的生长季,其他月份定义为非生长季。

2.2 数据

2.2.1 通量站 GPP 数据

利用获取的通量观测站每月的 GPP 数据验证 TL-LUE 模型结果。月 GPP 由基于通量观测数据得到的每 30 min NEE 求得。30 min 的 GPP 计算为^[27]:

$$GPP = R_e - NEE \quad (1)$$

其中: R_e 为生态系统呼吸, NEE 是观测的生态系统与大气之间的 CO_2 净交换通量。在夜间, R_e 与 NEE 相等,利用同时观测的温度建立 R_e 估算方程;在白天,利用该方程和观测的温度估算 R_e ,进而得到 GPP^[3]。

2.2.2 TL-LUE 模型输入数据

TL-LUE 模型模拟 GPP 所需输入数据有:全国地表覆被数据、全国叶面积指数 LAI(Leaf Area Index)数据、全国气象数据,包括日总辐射、日最低温(T_{amin})及日平均饱和水汽压差(VPD)。

本研究采用 2007~2012 年逐年 500 m 分辨率的 MODIS Collection 5 地表覆被数据集(MCD12Q1 V051)进行 LAI 反演和驱动 TL-LUE 模型。下载 MODIS 反射率数据反演生成 2007~2012 年每 8 d 的 MODIS LAI 序列,使用 MODIS Reprojection Tools(MRT)工具将下载数据的投影转换为 UTM/WGS 84 投影。使用 Locally Adjusted Cubic-spline Capping (LACC)方法^[28]对数据进行平滑插值去除云的影响。采用融合 MODIS LAI 数据和 4 尺度几何光学模型的 LAI 反演算法生成 2007~2012 年的 LAI 数据^[29]。气象数据(日总辐射、 T_{amin} 和 VPD)来自于柳艺博等^[29]利用全国 703

个基准气象站观测数据插值生成的 500 m 分辨率逐日气象要素场。

2.2.3 SIF 遥感数据

本研究使用由 GOME-2(Global Ozone Monitoring Experiment-2 satellite)传感器观测数据生成的以 740 nm 为提取中心 2007~2012 年的月 SIF 遥感数据^[11],该数据的空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,从网站(http://avdc.gsfc.nasa.gov/index.php?site=296832442&id=66&go=list&path=/GOME_F)下载。

2.3 TL-LUE 模型

两叶线性光能利用率模型 TL-LUE 将冠层分为阳叶和阴叶两部分,分别计算各自的 GPP^[6]。冠层 GPP 计算为:

$$GPP = (\epsilon_{msu} \times APAR_{msu} + \epsilon_{msh} \times APAR_{msh}) \times f(VPD) \times g(T_{amin}) \quad (2)$$

其中: ϵ_{msu} 和 ϵ_{msh} 分别为阳叶和阴叶的最大光能利用率, $APAR_{msu}$ 和 $APAR_{msh}$ 分别为阳叶和阴叶吸收的 $APAR$, LAI_{msu} 和 LAI_{msh} 分别为阳叶和阴叶的叶面积指数 LAI 。 $f(VPD)$ 和 $g(T_{amin})$ 分别为 VPD 和最低气温对 LUE 影响的修正因子,在 0~1 之间变化。

在(2)式中的 $APAR_{msu}$ 和 $APAR_{msh}$ 计算为:

$$APAR_{msu} = (1 - \alpha) \times \left[PAR_{dir} \times \frac{\cos\varphi}{\cos\theta} + \frac{PAR_{dif} - PAR_{dif,u}}{LAI} + C \right] \times LAI_{msu} \quad (3)$$

$$APAR_{msh} = (1 - \alpha) \times \left[\frac{PAR_{dif} - PAR_{dif,u}}{LAI} + C \right] \times LAI_{msh} \quad (4)$$

其中: α 为地表反照率; $PAR_{dif,u}$ 为冠层下方的散射

PAR , $(PAR_{dif} - PAR_{dif,u})/LAI$ 表示单位 LAI 面积冠层吸收的散射 PAR ; C 为直接辐射在冠层内部的多次散射贡献; φ 为叶倾角, 取值为 60° ^[30]; θ 为平均太阳天顶角。 PAR_{dif} 和 PAR_{dir} 分别为入射的散射和直接 PAR , 根据入射的总 PAR 和晴空指

数估算。

2.4 检验模型的标准

两个标准用于检验模型估算 GPP 的能力, 分别包括决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE)。计算公式分别为:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (GPP_{EC}(i) - \overline{GPP_{EC}}) (GPP_{TL}(i) - \overline{GPP_{TL}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (GPP_{EC}(i) - \overline{GPP_{EC}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (GPP_{TL}(i) - \overline{GPP_{TL}})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (GPP_{TL}(i) - GPP_{EC}(i))^2} \quad (6)$$

其中: GPP_{EC} 是通量塔观测 GPP , GPP_{TL} 是 TL-LUE 模型模拟 GPP , $\overline{GPP_{TL}}$ 和 $\overline{GPP_{EC}}$ 分别表示 GPP_{TL} 和 GPP_{EC} 的平均值。

3 结果和讨论

3.1 TL-LUE 模拟的 GPP_{TL} 与通量观测数据 GPP_{EC} 的比较

由于 TL-LUE 模型运行的空间分辨率为 500 m, 小于通量塔的风浪区 (Footprint)^[31], 所以将模型计算的通量塔周围 3×3 个像元的月 GPP 平均值 GPP_{TL} 与通量观测的 GPP_{EC} 进行比较, 分别计算了 8 个站点的 R^2 和 RMSE (图 1)。结果表明, GPP_{TL} 与 GPP_{EC} 之间有很好的相关性, R^2 的最小值为 0.62 (鼎湖山), 最大值为 0.92 (长白山)。除鼎湖山站以外的 3 个森林站, GPP_{TL} 与 GPP_{EC} 相关的 R^2 都高于 0.85。在 3 个草地站, 海北站的 R^2 最高为 0.89, 内蒙古的 R^2 最低为 0.65, 多伦站和禹城站的 R^2 均为 0.75。RMSE 的最小值为 $18.85 \text{ g C m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ (内蒙古), 最大值为 $85.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ (禹城)。除禹城站之外, 其余站点 RMSE 较低, 说明 TL-LUE 模型估算的 GPP_{TL} 与实际观测 GPP_{EC} 值偏离程度不大。这些指标表明, TL-LUE 模拟的 GPP_{TL} 与通量观测的 GPP_{EC} 具有较高的一致性。但是, 在多伦、内蒙古和禹城站, TL-LUE 模型的结果比通量观测数据明显偏低, 而在鼎湖山站 TL-LUE 模型结果明显偏高。造成这种现象的主要原因有: ① TL-LUE 模型中阴叶和阳叶的最大光能利用率参数随植被类型变化, 是利用全球不同站点通量数据优化结果的平均值^[32], 这样能保证模型的总体精度, 但在具体某个站点可能存在较大的误差; ② 驱动模型的 LAI 数据是利用 MODIS 反射率和 4 尺度几何光学模型反

演的, 在农田和草地的精度较低^[29]; ③ 驱动模型的气象数据由气象台站观测数据插值生成, 在气象台站稀疏地区也会存在一定的误差。

3.2 TL-LUE 模拟的 GPP_{TL} 与通量观测 GPP_{EC} 的季节变化比较

图 2 是 TL-LUE 模拟的 GPP_{TL} 与通量观测 GPP_{EC} 的季节变化特征。在长白山、会同、千烟洲和鼎湖山站 4 个森林站, GPP_{TL} 与 GPP_{EC} 的季节变化特征一致性较好。在会同和鼎湖山站, TL-LUE 模型会高估 GPP ; 而在千烟洲站, TL-LUE 模型低估 GPP , 这种低估主要是由于遥感反演的 LAI 在冬季偏低所致。在草地和农田站, 观测的 GPP_{EC} 在春季快速上升, TL-LUE 模拟的 GPP_{TL} 也上升, 但滞后于观测数据; 在秋季, TL-LUE 模拟的 GPP_{TL} 与通量观测 GPP_{EC} 之间一致性较好。TL-LUE 模型没有考虑植被光能利用率季节变化是导致 TL-LUE 模拟的 GPP_{TL} 与通量观测 GPP_{EC} 之间一致性存在季节变化差异的原因。在禹城站, 春季作物为冬小麦, 6 月份收获, GPP_{EC} 明显下降, 其后随着夏玉米的生长, GPP_{EC} 快速上升, TL-LUE 模拟的 GPP_{TL} 也具有这种季节变化特征, 但 4 月和 5 月模型明显低估。

3.3 SIF 遥感数据与 GPP_{TL} 之间的相关性

TL-LUE 估算的月 GPP_{TL} 与同期 SIF 之间的 R^2 较高 (图 3), 生长季、非生长季与全年等不同的数据时间上不同的站点 GPP_{TL} 与同期 SIF 的相关性不同 (表 2)。全年 R^2 最小值为 0.66 (内蒙古), 全年最大值为 0.91 (长白山), 生长季 R^2 最小值为 0.39 (鼎湖山), 最大值为 0.92 (多伦)。全年 GPP_{TL} 与同期 SIF 的 R^2 在 8 个站中有 5 个站的 R^2 大于 0.8, 相比农田和草地站, 森林站 SIF 与 GPP_{TL} 的 R^2 较高; 在草地站, 多伦站的 R^2 最高为 0.8, 内蒙古的 R^2 最低为 0.66, 海北站的 R^2 为 0.76; 禹城站的 R^2 是 0.84。在生长季 GPP_{TL} 与同期 SIF 的相关

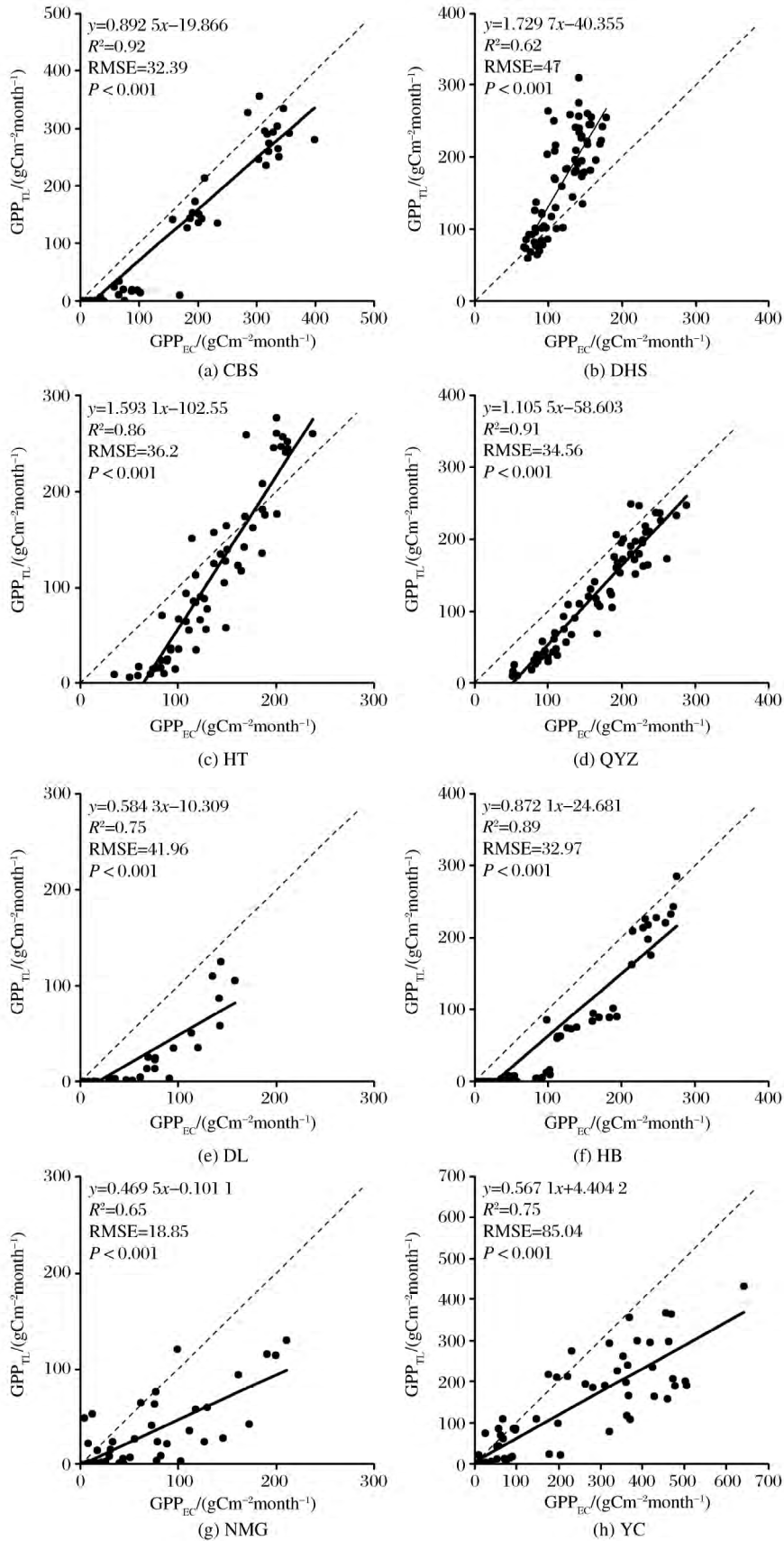


图 1 通量观测的月 GPP(GPP_{EC})与 TL-LUE 模型估算的月 GPP(GPP_{TL})比较的散点图

Fig.1 Comparisons between GPP derived from measurements of flux data (GPP_{EC}) and modeled GPP from TL-LUE model (GPP_{TL}) at monthly scale

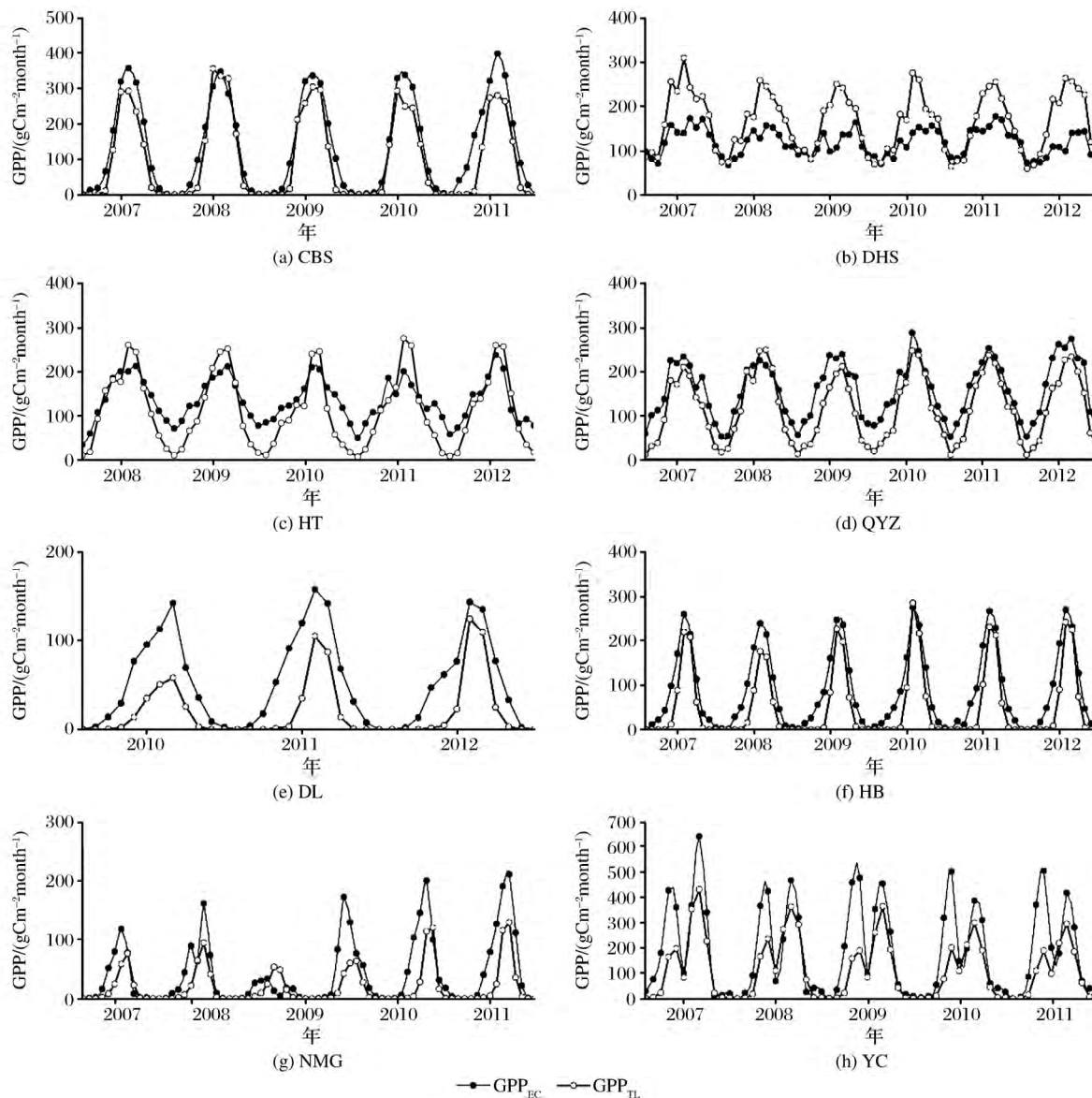


图 2 TL-LUE 模型估算的 GPP_{TL} 和实际观测 GPP_{EC} 的季节变化特征

Fig.2 Seasonal variations of GPP derived from measurements of flux data (GPP_{EC}) and modeled GPP from TL-LUE model (GPP_{TL})

表 2 TL-LUE 模型估算的生长季和非生长季月 GPP_{TL} 与同期 SIF 之间的关系

Table 2 Relationships between modeled GPP_{TL} from TL-LUE model and SIF during whole year, growing season and non-growing season, respectively

| R^2 | CBS | DHS | HT | QYZ | DL | HB | NMG | YC |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 全年 R^2 | 0.91*** | 0.72*** | 0.82*** | 0.85*** | 0.8*** | 0.76*** | 0.66*** | 0.84*** |
| 生长季 R^2 | 0.89*** | 0.39* | 0.65*** | 0.68*** | 0.92*** | 0.83*** | 0.84*** | 0.56*** |
| 非生长季 R^2 | 0.38* | 0.68*** | 0.4* | 0.52*** | 0.01 | 0.01 | 0.001 | 0.02 |

注: ***表示 $P < 0.001$, *表示 $P < 0.05$, 无*表示不显著

性,除鼎湖山站外,其他站点 R^2 均高于非生长季。在所有站点中,长白山的月 SIF 变化范围最大,为 $0 \sim 10 \text{ mWm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$, 多伦和内蒙古站的月

SIF 最大值小于 $1.5 \text{ mWm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ 。总体而言,草地站的 SIF 最大值小于森林和农田, GPP 与 SIF 之间关系斜率的变化范围为 37.94(长白山)到

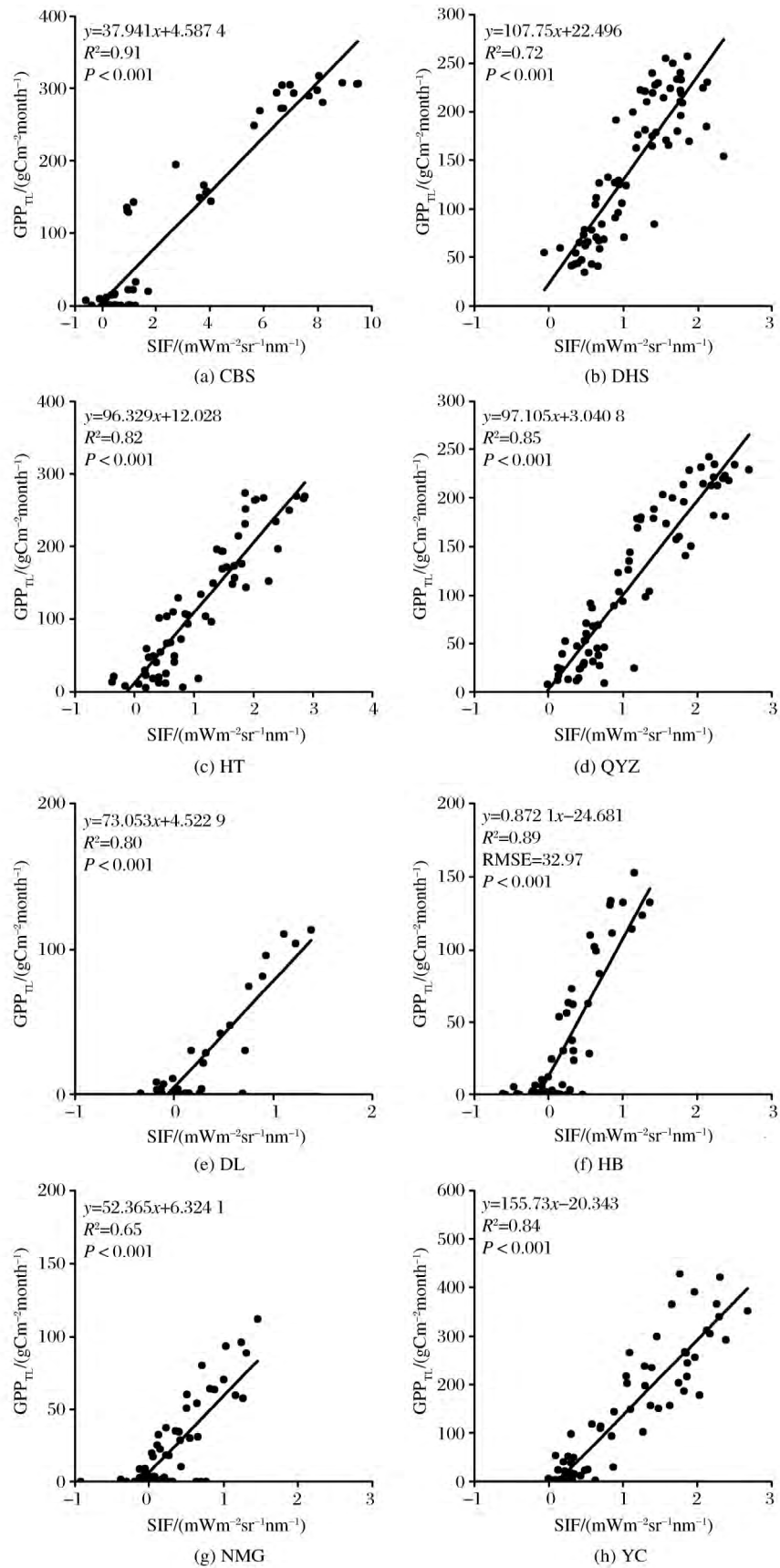


图 3 TL-LUE 模型估算的全年不同月份 GPP_{TL} 与同期 SIF 的相关性

Fig.3 Relationships between modeled GPP_{TL} from TL-LUE model and SIF during whole year

155.73(禹城)。结果表明可以用简单的线性模型和 SIF 遥感数据估算 GPP,但模型系数与生态系统类型有关。

3.4 SIF 遥感数据和 GPP 季节变化特征

TL-LUE 模拟的月 GPP_{TL} 与月 GPP_{EC} 以及同

期 SIF 的变化趋势如图 4 所示。三者的季节变化特征相同,但月 GPP_{TL} 是在 0.5° 的范围内估算的,月 SIF 数据是在 0.5° 的范围内提取的,月 GPP_{EC} 是在通量站点观测的,三者的空间尺度不同。在所有的站点, GPP_{TL} 与月 GPP_{EC} 和 SIF 同期达到峰值,开始

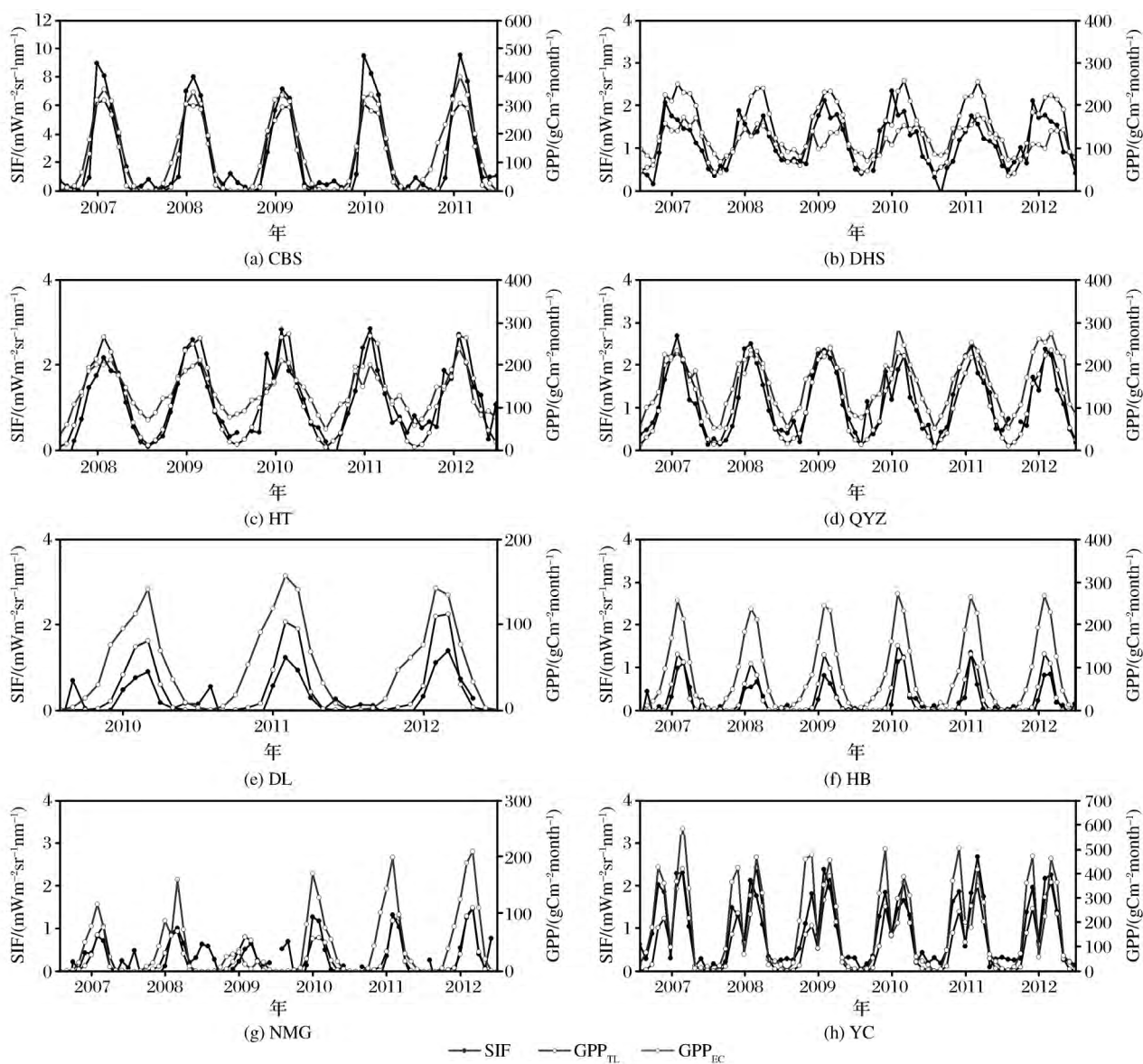


图 4 在 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 范围内,TL-LUE 模型估算的 GPP (GPP_{TL}) 和实际观测的 GPP (GPP_{EC}) 与 SIF 月尺度的季节性变化特征

Fig.4 Seasonal variations of GPP derived from measurements of flux data (GPP_{EC}) and modeled GPP from TL-LUE model (GPP_{TL}) with SIF at a scale of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

上升和下降的时间也基本相同。在生长季 GPP_{TL} 和 SIF 变化的一致性好于非生长季(表 2、图 4)。在非生长季, GPP_{EC} 和 GPP_{TL} 为 0 或接近于 0 时,SIF 值并不为 0,此时 3 个草地站的 SIF 在 $-0.5 \sim 0.5 \text{ mWm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ 之间波动,农田站 SIF 在 $0 \sim 0.5 \text{ mWm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}$ 之间波动,这种现象可能是

由于冬季地面积雪等原因导致的 SIF 遥感数据误差所致。在区域尺度应用 SIF 数据进行长时间 GPP 估算时应注意这一点。

观测数据显示,禹城农田站 4 月和 5 月冬季小麦生长旺季的 GPP_{EC} 接近甚至高于 7 月和 8 月玉米生长旺季的 GPP_{EC} ,TL-LUE 模型明显低估了 4 月

和 5 月的 GPP(图 2)。而 4 月和 5 月的 SIF 与 7 月和 8 月的 SIF 基本接近,表明 SIF 遥感数据比 TL-LUE 能更有效地监测农田 GPP 的季节变化。

4 结 语

本文以中国 8 个典型通量站为研究对象,分析了 GOME-2 SIF 遥感数据估算 GPP 的能力,主要结论如下:

(1) TL-LUE 模型能较好地估算通量站点的 GPP,但在不同类型生态系统估算的 GPP 与观测数据之间的一致性存在差别,森林好于农田和草地,TL-LUE 模拟会低估农田和部分草地站点的 GPP。

(2) SIF 遥感数据与 TL-LUE 模型估算的 GPP 具有显著相关性,但 GPP 随 SIF 变化的斜率随生态系统类型变化;SIF 遥感数据与 TL-LUE 模型模拟的 GPP 的季节变化特征相同,两者之间的一致性在生长季好于非生长季,两者达到峰值的时间相同。

(3) 相对于 TL-LUE 模型而言,SIF 遥感数据能更好地监测农田 GPP 的季节变化,纠正冬小麦生长旺季的 GPP 低估现象。

本研究证明了 SIF 遥感数据具有估算中国不同生态系统 GPP 的能力,由于数据所限,尚存在以下不足:①中国生态系统类型复杂多样,本文仅在 8 个通量站点验证了 SIF 遥感数据估算 GPP 的能力,结论的可靠性还有待在更多的生态系统验证;②本文发现 SIF 遥感数据在冬季存在噪音,需要发展其去除方法,以提高 SIF 遥感数据估算不同季节 GPP 的能力;③GPP 随 SIF 变化的斜率在不同站点存在较大差别,需要发展能适用于不同生态系统的 SIF 估算 GPP 的模型。

参考文献 (References):

[1] Ramakrishna R N, Charles D K, Hirofumi H, *et al.* Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003, 300: 1560-1563.

[2] Wu C Y, Munger J W, Niu Z, *et al.* Comparison of Multiple Models for Estimating Gross Primary Production Using Modis and Eddy Covariance Data in Harvard Forest[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 2925-2939.

[3] Wu C Y, Niu Z, Gao S. Gross Primary Production Estimation from Modis Data with Vegetation Index and Photosynthetically Active Radiation in Maize[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: 1-11.

[4] 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.

[5] Monteith J L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9: 747-766.

[6] He M Z, Ju W M, Zhou Y L, *et al.* Development of a Two-Leaf Light Use Efficiency Model for Improving the Calculation of Terrestrial Gross Primary Productivity[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 173: 28-39.

[7] 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: 10.1029/2011GL048738.

[8] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, *et al.* First Observations of Global and Seasonal Terrestrial Chlorophyll Fluorescence from Space[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8: 637-651.

[9] 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.

[10] Joiner J, Yoshida Y, Vasilkov A P, *et al.* Filling-in of Near-infrared Solar Lines by Terrestrial Fluorescence and Other Geophysical Effects: Simulations and Space-based Observations from SCIAMACHY and GOSAT[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5: 809-829.

[11] Joiner J, Guanter L, Lindstrom 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.

[12] Frankenberg C, Odell C, Berry J A, *et al.* Prospects for Chlorophyll Fluorescence Remote Sensing from the Orbiting Carbon Observatory-2 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 1-12.

[13] Rossini M, Nedbal L, Guanter L, *et al.* Red and far Red Sun-induced Chlorophyll Fluorescence as a Measure of Plant Photosynthesis[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42, doi: 10.1002/2014GL062943.

[14] Cogliati S, Rossini M, Julitta T, *et al.* Continuous and Long-Term Measurements of Reflectance and Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence by Using Novel Automated Field Spectroscopy Systems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 270-281.

[15] Zhang Y G, 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: 3727-3742.
- [16] Guanter L, Zhang Y G, Jung M, *et al.* Global and Time-resolved Monitoring of Crop Photosynthesis with Chlorophyll Fluorescence[J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2014, E1327-E1333.
- [17] Guan K Y, Berry J A, Zhang Y G, *et al.* Improving the Monitoring of Crop Productivity Using Spaceborne Solar-induced Fluorescence[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22: 716-726.
- [18] 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, doi: 10.1002/2015GL063201.
- [19] Zhang L M, Yu G R, Sun X M, *et al.* Seasonal Variation of Carbon Exchange of Typical Forest Ecosystems Along the Eastern Forest Transect in China[J]. *Science in China Series D; Earth Sciences*, 2006, 49: 47-62.
- [20] Zhang J H, Yu G R, Han S J, *et al.* Seasonal and Annual Variation of CO₂ Flux Above a Broadleaved Korean Pine Mixed Forest[J]. *Science in China Series D; Earth Sciences*, 2006, 49: 63-73.
- [21] Yan J H, Zhang W, Wang K Y, *et al.* Responses of CO₂, N₂O and CH₄ Fluxes Between Atmosphere and Forest Soil to Changes in Multiple Environmental Conditions [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20: 300-312.
- [22] Wen X D, Zhao Z G, Deng X W, *et al.* Applying an Artificial Neural Network to Simulate and Predict Chinese Fir (*Cunninghamia Lanceolata*) Plantation Carbon Flux in Subtropical China[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 294: 19-26 .
- [23] Zhang M, Yu G R, Zhuang J, *et al.* Effects of Cloudiness Change on Net Ecosystem Exchange, Light Use Efficiency, and Water Use Efficiency in Typical Ecosystems of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151: 803-816.
- [24] Hao Yanbin, Wang Yanfen, and Cui Xiaoyong. Drought Stress Reduces the Carbon Accumulation of the *Leymus Chinensis* Steppe in Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34 (8): 898-906. [郝彦宾, 王艳芬, 崔晓勇. 干旱胁迫降低了内蒙古羊草草原的碳累积[J]. *植物生态学报*, 2010, 34 (8): 898-906.]
- [25] Zhang P, Chen S P, Zhang W L, *et al.* Biophysical Regulations of Net Light Response in a Steppe and a Cropland in Inner Mongolia[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2012, 5: 238-248.
- [26] Li J Yu Q, Sun X M, *et al.* Carbon Dioxide Exchange and the Mechanism of Environmental Control in a Farmland Ecosystem in North China Plain[J]. *Science in China Series D; Earth Sciences*, 2006, 49: 226-240.
- [27] Yuan W P, Liu S G, Zhou G S, *et al.* Deriving a Light Use Efficiency Model from Eddy Covariance Flux Data for Predicting Daily Gross Primary Production Across Biomes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143: 189-207.
- [28] Chen J M, Deng F, Chen M Z. Locally Adjusted Cubic-spline Capping for Reconstructing Seasonal Trajectories of a Satellite-derived Surface Parameter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44: 2230-2238.
- [29] Liu Yibo, Ju Weimin, Chen Jingming, *et al.* Spatial and Temporal Variations of Forest LAI in China during 2000-2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57: 2846-2856. [柳艺博, 居为民, 陈镜明, 等. 2000~2010年中国森林叶面积指数时空变化特征[J]. *中国科学通报*, 2012, 57: 2846-2856.]
- [30] Chen J M, Liu J, Cihlar J, *et al.* Daily Canopy Photosynthesis Model Through Temporal and Spatial Scaling for Remote Sensing Applications[J]. *Ecological Modelling*, 1999, 124: 99-119.
- [31] Mi N, Yu G R, Wen X F, *et al.* A Preliminary Study for Spatial Representiveness of Flux Observation at ChinaFLUX sites[J]. *Science in China Series D; Earth Sciences*, 2006, 49: 24-35.
- [32] Zhou Y L, Wu X C, Ju W M, *et al.* Global Parameterization and Validation of a Two-Leaf Light Use Efficiency Model for Predicting Gross Primary Production Across FLUXNET Sites [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121, doi: 10.1002/2014JG002876.

Ability of Sun-induced Chlorophyll Fluorescence on Estimating Terrestrial Ecosystem Gross Primary Productivity in China

Liu Qingrui^{1,2}, Ju Weimin^{1,3}, Zhang Yongguang¹, Zhang Leiming⁴,
Wang Shaoqiang⁴, Zhou Yanlian^{2,3}, Zhao Fenghua⁴, Yan Junhua⁵,

Han Shijie⁶, Hao Yanbin⁷, Chen Shiping⁸, Li Yingnian⁹, Xiang Wenhua¹⁰

(1. *International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China*;

2. *School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China*;

3. *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China*;

4. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*;

5. *South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China*;

6. *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*;

7. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*;

8. *Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China*;

9. *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China*;

10. *Huitong National Field Station for Scientific Observation and Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong 438107, China*)

Abstract: Accurate estimation of terrestrial ecosystem Gross Primary Productivity (GPP) is of significance as it is a key component of terrestrial ecosystem carbon cycle. There were great uncertainties for GPP estimation as it was influenced by many factors and varied greatly at space and temporal scales. In recent years, Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) has been applied to estimate regional and global GPP. However, relationships between SIF and GPP in China were not clear. In this study, 8 typical ecosystems in China were selected, the Two-Leaf Light Use Efficiency model (TL-LUE) was used to simulate national GPP. Results showed that SIF has the ability of monitoring GPP in typical ecosystems in China. There were significant correlation between SIF and modeled GPP by using TL-LUE model. R^2 between SIF and GPP was higher than 0.8 in 5 ecosystems, and the highest R^2 was 0.91. The slope between SIF and GPP changed among different ecosystem types. There were similar seasonal variations between GPP and SIF, and consistency between GPP and SIF during growing season was better than that during non-growing season. SIF has the best ability on monitoring GPP seasonal variations on cropland.

Key words: Terrestrial ecosystem gross primary productivity(GPP); Sun-induced chlorophyll fluorescence (SIF); Two-Leaf Light Use Efficiency Model(TL-LUE)