

DOI: 10.5846/stxb202011263031

苏胜涛, 曾源, 赵旦, 郑朝菊, 吴兴华. 中国陆地植被净初级生产力估算模型优化与分析——基于中国生态系统研究网络数据. 生态学报, 2022, 42(4): 1276-1289.

Su S T, Zeng Y, Zhao D, Zheng Z J, Wu X H. Optimization of net primary productivity estimation model for terrestrial vegetation in China based on CERN data. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1276-1289.

中国陆地植被净初级生产力估算模型优化与分析 ——基于中国生态系统研究网络数据

苏胜涛^{1,2}, 曾源^{1,2,*}, 赵旦¹, 郑朝菊¹, 吴兴华³

1 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100089

摘要: 该研究基于中国生态系统研究网络(CERN)数据对传统 CASA 模型进行优化, 对比两叶模型与优化 CASA 模型在站点尺度和像元尺度对于 8 个典型生态站点的植被净初级生产力(NPP)估算精度, 选择在像元尺度表现更好的优化 CASA 模型, 结合中国土地覆被数据(ChinaCover)开展 2000—2019 年中国陆地植被 NPP 监测与分析。研究表明:(1)基于 FY2D PAR 的优化方案能够有效避免空间插值导致的不确定性问题, 显著提高了 PAR 估算精度;(2)在站点尺度上, 两叶模型用于估算典型森林、草地生态系统的 NPP 表现更好, 而在像元尺度上优化 CASA 模型估算精度更高;(3)在全国尺度上, 优化了最大光能利用率、水分胁迫系数以及光合有效辐射计算方法的 CASA 模型能够较好地模拟中国陆地植被 NPP, 近 20 年中国陆地植被 NPP 变化范围为 2.703—2.882 PgC/a, 在空间上呈西北低东南高的格局, 在时间上呈现波动中缓慢增加的趋势。

关键词: 净初级生产力; CERN; 优化 CASA 模型; 两叶模型

Optimization of net primary productivity estimation model for terrestrial vegetation in China based on CERN data

SU Shengtao^{1,2}, ZENG Yuan^{1,2,*}, ZHAO Dan¹, ZHENG Zhaoju¹, WU Xinghua³

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 China Three Gorges Corporation, Beijing 100089, China

Abstract: In this study, we optimized the traditional Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model based on China Ecosystem Research Network (CERN) datasets, and compared the estimation accuracy of the two-leaf model and the optimized CASA model at the site scale and pixel scale at eight CERN sites covering major ecosystem types. The optimized CASA model with better performance at the pixel scale combined with China Land Cover Data (ChinaCover) were employed for mapping and monitoring the spatio-temporal changes of terrestrial vegetation net primary production (NPP) in China from 2000 to 2019. The results show that: (1) the optimization for model input parameter of photosynthetically active radiation based on FY2D PAR can effectively avoid the uncertainty caused by the spatial interpolation, and significantly improve the accuracy of PAR estimation; (2) The two-leaf model shows higher NPP estimation accuracy at the site scale, while the optimized CASA model performs better for the NPP estimation at the pixel scale; (3) At the national scale, the CASA model with optimized maximum light energy use efficiency, water stress coefficient and photosynthetically active

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500201, 2016YFC0502102-02)和国家自然科学基金(41771464, 31761143018-2)

收稿日期: 2020-11-26; 网络出版日期: 2021-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengyuan@aircas.ac.cn

radiation can better simulate China's terrestrial vegetation NPP. The estimated total NPP in Chinese terrestrial vegetation ranges from 2.703 PgC/a to 2.882 PgC/a in the past 20 years and indicates a fluctuated and slow increasing trend. The spatial distribution of the NPP in China shows a general pattern of gradually increasing from northwest to southeast.

Key Words: net primary productivity; Chinese Ecosystem Research Network; optimized CASA model; TL-LUE model

植被净初级生产力(net primary production, NPP)是指绿色植被一定时间内光合作用所产生的有机物总量减去绿色植被自身维持呼吸和生长消耗以后的残余部分^[1]。它既能表征植被群落在自然环境条件下的生产能力,也能估算陆地生态系统碳源、碳汇,描述碳循环和能量的流动过程^[2]。因此,植被 NPP 的准确估算对生态环境治理、碳循环研究和自然资源合理开发利用均具有重要的理论与实践意义^[3-5]。

自 20 世纪 60 年代以来,各国学者对 NPP 的研究倍受重视,国际地圈-生物圈计划(IGBP)和京都协定(Kyoto Protocol)等均把植被 NPP 确定为核心内容之一^[6-7]。目前 NPP 估算方法主要有统计模型、参数模型和过程模型,其中以基于光能利用率的过程模型(CASA)应用最为广泛。Potter 等^[8]最早利用 CASA 估算了北美植被 NPP;朴世龙等^[9]利用 CASA 模型估算了我国 1997 年的陆地植被 NPP;Nayak 等^[10]利用 CASA 模型估算了印度 2003 年植被 NPP。经过验证发现,前期研究中使用的传统 CASA 模型估算中国 NPP 的结果普遍偏小,主要原因是模型中最大光能利用率(ϵ_{\max})的常规取值(0.389gC/MJ)不适用于中国区域^[11]。因此,后续研究重点在 CASA 模型的区域优化,例如朱文泉等^[12]引入植被覆盖分类数据,同时基于 NPP 实测数据模拟各植被类型的 ϵ_{\max} ,估算了全国 1989—1993 年 8 公里的植被 NPP;Yu 等^[13]和 Zhang 等^[14]分别基于改进 ϵ_{\max} 的 CASA 模型监测了东亚与中国京津冀地区的植被 NPP。此外,BAO 等^[15]利用地表湿润指数(LSWI)简化 CASA 模型的水分胁迫系数估算蒙古高原的草地 NPP;Liu 等^[16]利用土壤水分的叶水势代替传统 CASA 土壤水分子模型估算了广州市白云区的植被 NPP。由此可见,在对 CASA 模型进行区域优化时,往往聚焦在 ϵ_{\max} 取值和参数简化方面,却很少关注模型中另一关键因子光合有效辐射(PAR)计算方法的改进。对于 PAR 的计算,常规利用气象观测资料(太阳总辐射、日照时数等)来模拟并进行空间插值,但很难合理揭示 PAR 的空间分布特征。随着遥感数据源的不断丰富,可以直接利用遥感数据估算地表气象参量,例如 Bisht 等^[17]利用 MODIS 数据直接计算晴空条件下的日净辐射;Wu 等^[18]利用风云卫星数据估算了黑河流域的日照累积时数,避免空间插值的不确定性。因此,对于 CASA 模型的进一步改进,可以综合考虑最大光能利用率、参数简化以及光合有效辐射的同步优化。

另外一类估算 NPP 的方法可以通过 GPP 的转换得以实现。目前估算 GPP 的最新模型为 He 等^[19]提出的两叶光能利用率模型(TL-LUE),该模型的核心是将叶片分为阴叶和阳叶两部分,分别计算其光能利用率与 GPP。Zhou 等^[20]利用全球 98 个通量站点数据对 TL-LUE 模型进行验证,发现模型在站点尺度表现良好;Zan 等^[21]利用日光诱导叶绿素荧光数据(SIF)对 TL-LUE 模型进行验证,发现模型能够反映 GPP 时空变化。结合 NPP/GPP 的比率可将 GPP 转化为 NPP,即可通过两叶模型计算 NPP^[22]。两叶模型考虑了冠层散射辐射对植被生产力的影响,更加适用于植被茂密、叶片遮挡严重的林区,但在稀疏林、草等植被类型下的适用性尚未有定论,且 NPP/GPP 比率数据的尺度适用性及精度是影响 NPP 估算的关键。

对于估算植被 NPP 哪类方法更为适用,需要从监测尺度来分析。TL-LUE 模型在站点尺度上由于植被类型确定,NPP/GPP 比率更为准确,但随着研究尺度扩大,尤其是在植被覆盖类型多变的地区,会导致 NPP/GPP 比率数据及估算的 NPP 结果出现不确定性。改进的 CASA 模型因具有较强地域性更适用于像元尺度的植被 NPP 估算。然而,NPP 的估算精度需要地面实测数据的验证,随着涡度相关技术的发展和成熟,基于观测站点的通量数据计算的 NPP 是模型验证的主要数据源^[23-24]。此外,区域尺度的土地覆被数据可以提供不同生态系统类型的分布信息,为分区域分植被覆盖类型验证 NPP 提供了可能。因此,充分利用地面观测数据和详尽的植被分类数据,结合高时空分辨率遥感数据,选择适用于全国尺度的植被 NPP 估算模型,是有待研

究的问题。

中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)成立于1988年,目前共计有分布在不同生态区域的42个生态研究站,涵盖了农田、森林、草原、荒漠、湖泊、海湾、沼泽、喀斯特和城市9大类生态系统^[25-26]。CERN的观测以样点尺度的台站为核心,重点通过定位观测和控制试验,进行生态系统结构与功能、格局与过程的机理分析。一方面CERN可以为生态模型提供输入数据,如徐保东等^[27]以CERN站的LAI数据为基础评价了观测数据的空间代表性;颜绍堃等^[28]以CERN两个乔木生长数据集为例,挖掘生态质量评估的方法与指数;孙婉馨等^[29]基于1998—2017年CERN逐日气象数据计算了典型森林生态系统的潜在蒸散。另一方面,CERN提供了不同生态类型、时空连续的地面观测数据,是进行生态参数产品真实性检验的数据来源。此外,依托CERN建立的中国陆地生态系统通量观测研究网络(CiInaFLUX),通过微气象学的涡度相关法和箱式法进行典型陆地生态系统和大气间二氧化碳、水热通量的长期观测研究,目前已共享数据的8个典型生态站点,包括4个森林站(分别为长白山温带阔叶红松林通量观测研究站、千烟州中亚热带人工常绿针叶林通量观测研究站、鼎湖山亚热带季风混交林通量观测研究站和西双版纳热带季雨林通量观测研究站)、3个草地站(分别为内蒙古温带典型草原通量观测研究站、海北高寒草地通量观测研究站和当雄高寒草甸通量观测研究站)和1个农田站(禹城温带农田通量观测研究站),可为基于通量数据进行NPP估算的精度验证提供数据支撑^[30-32]。

本文在综合分析光能利用效率模型的基础上,利用CERN提供的典型生态系统光能利用效率数据、光合有效辐射逐日观测数据和30min连续通量观测数据,对传统CASA模型进行优化,对比两叶模型与改进后的CASA模型在站点尺度和像元尺度对于典型森林、草地和农田样区NPP的估算精度,随后选择在像元尺度表现更好的NPP模型结合中国土地覆被数据(ChinaCover)开展2000—2019年中国陆地植被NPP监测,并与同类数据进行对比分析。

1 数据源与预处理

1.1 遥感数据

NPP估算模型中的遥感数据来自美国国家航空航天局的MOD13Q1植被指数(NDVI)产品、MOD11A2地表温度(LST)产品以及MOD15A2叶面积指数(LAI)产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),利用MRT工具对数据进行投影转换、图像融合、S-G滤波等处理,以2000—2019年250m空间分辨率逐月的NDVI、LAI、近红外与短波红外等数据作为模型输入参数。用于计算日照时数的云分类数据来自国家卫星气象中心的风云2号卫星(<http://satellite.nsmc.org.cn>)。

1.2 CERN数据

CERN数据来自国家生态科学数据中心(<http://www.cnern.org.cn>)。其中,中国典型植被最大光能利用效率数据集(共126组样本)和2010年逐日光合有效辐射数据集用于优化CASA模型;日尺度气象数据与中国逐月散射光合有效辐射数据用于点尺度NPP估算模型输入;光合有效辐射数据集用于验证基于风云卫星计算PAR的精度;用于NPP估算模型精度验证的30min连续通量观测数据来自于ChinaFLUX中的8个典型生态站。

1.3 土地覆被数据

用于植被覆盖分类的全国土地覆被数据(ChinaCover)来自中科院空天信息创新研究院(<http://www.aircas.ac.cn>)^[33]。结合CERN典型植被光能利用率数据集,将ChinaCover数据中原有的26类植被类型重分类为常绿阔叶、常绿针叶、落叶阔叶、落叶针叶、针阔混交、灌丛、草地、耕地共八类,并将原有空间分辨率30m重采样至250m。

1.4 气象数据

用于NPP估算的气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>),时间为2000年1月至

2019年12月,包括753个台站的气温、相对湿度、日照时数。利用ETWatch^[34]软件对气象数据进行空间插值,生成空间分辨率为250m的栅格数据。

2 研究方法

2.1 改进 CASA 模型

本研究从最大光能利用率取值、参数简化以及光合有效辐射计算三方面对CASA模型进行同步优化。传统CASA模型的估算公式如下所示:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (1)$$

$$APAR(x, t) = PAR(x, t) \times FPAR(x, t) \quad (2)$$

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon_1}(x, t) \times T_{\varepsilon_2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

式中,APAR为植物吸收的光合有效辐射; ε 为实际光能利用率;PAR为光合有效辐射;FPAR为光合有效辐射吸收比例,通过NDVI来进行估算^[12]; T_{ε_1} 和 T_{ε_2} 表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用,选取MODIS NDVI最大值所对应月份的平均温度作为最适温度,计算公式参照文献^[8]; W_{ε} 为水分胁迫影响系数,反映水分条件的影响; x 代表单个像元, t 表示月份。

2.1.1 最大光能利用率优化

最大光能利用率(ε_{\max})是指植被在没有任何限制性的理想条件下对光合有效辐射的利用率,环境因子如气温、土壤水分状况等都会通过影响植物的光合能力,进而调节植被的生产力^[35]。

为确定本研究中的典型植被 ε_{\max} ,首先对CERN提供的典型植被最大光能利用效率数据集进行统计,随后与前人研究进行对比分析,其中只有朱文泉等^[35]在中国的研究和Running等^[36]在北美的研究中涵盖了本研究的全部8种植被类型,其他的研究只包括单一或几种植被类型,因此本研究在确定 ε_{\max} 取值时重点参考这两个研究。又发现样本平均值与中国的 ε_{\max} 最为接近,样本最大值与北美的 ε_{\max} 相近,一方面可以表明基于CERN统计的样本数据是在合理范围内,另一方面确定选择样本平均值作为优化后的 ε_{\max} ,且8种植被类型都采用平均值,具体取值详见表1。

表1 中国典型植被类型的最大光能利用率(ε_{\max})

Table 1 Maximum light use efficiency (ε_{\max}) of typical vegetation types in China

植被类型 Vegetation Type	样本数 Samples	最大值 Max	平均值 Mean	文献值 1 ^[35]	文献值 2 ^[36]	最大光能利用率 Maximum light use efficiency
				Literature value 1 ^[35]	Literature value 2 ^[36]	
ε_{\max} (gC/MJ)						
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest	18	1.25	0.86	0.98	1.259	0.86
常绿针叶林 Evergreen needle-leaf forest	12	1.16	0.74	0.38	1.044	0.74
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaf forest	10	1.13	0.83	0.69	1.008	0.83
落叶针叶林 Deciduous needle-leaf forest	13	1.03	0.52	0.48	1.103	0.52
针阔混交林 Needle and broad-leaf mixed forest	6	0.8	0.72	0.76	1.116	0.72
灌丛 Bush	6	0.26	0.23	0.42	0.768	0.23
草地 Grassland	34	0.61	0.16	0.54	0.608	0.16
耕地 Farmland	17	1.05	0.63	0.54	0.604	0.63

2.1.2 水分胁迫系数优化

水分胁迫系数(W_{ε})反映了植被所能利用的有效水分对光能利用率的影响。传统CASA模型中

$W_e(x, t)$ 由土壤水分子模型计算得到, 涉及众多复杂的土壤参数, 导致模型难以实现。地表水分指数 (LSWI) 是描述植被叶片水分含量的一项指标, Xiao 等^[37] 首次利用 LSWI 估算水分胁迫, 此后众多学者将 LSWI 引入 CASA 模型并取得了良好的效果^[38-39]。因此, 本研究使用 LSWI 对 $W_e(x, t)$ 进行估算, 计算公式如下:

$$W_e(x, t) = \frac{1 + \text{LSWI}}{1 + \text{LSWI}_{\max}} \quad (4)$$

$$\text{LSWI} = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{swir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{swir}}} \quad (5)$$

式中, LSWI_{\max} 表示单个像元生长期 LSWI 的最大值; ρ_{nir} 与 ρ_{swir} 分别代表 MOD13Q1 数据中的近红外与短波红外波段。

2.1 光合有效辐射优化

光合有效辐射 (PAR) 为太阳辐射中波长位于 0.4—0.7 μm 且能够被绿色植物用来进行光合作用的那部分太阳辐射能量。PAR 是不仅影响植物生长的重要生态因子, 也是光合作用模拟、植被初级生产力计算和生态系统大气 CO_2 交换研究的关键参数。因此 PAR 在时间、空间尺度上的变化直接影响着 NPP 时空变异性, 尤其是在基于光能利用率的家 CASA 和两叶模型中对 PAR 的估算精度要求更高。

依据世界粮农组织 (FAO) 给出的公式^[40-41] 计算 PAR:

$$\text{PAR}(x, t) = 0.48 \times \left(0.25 + \frac{0.5 \times n(t)}{N(t)} \right) \times K_{24}^{\downarrow \text{exo}}(t) \quad (6)$$

式中, $K_{24}^{\downarrow \text{exo}}(t)$ 表示地外辐射, 计算方法参照技术文档^[40]; $N(t)$ 为最大日照累积时数; $n(t)$ 为实际日照累积时数。

$n(t)$ 可以利用气象站点观测获得的日照累积时数通过空间插值算法获得全国尺度的日照累积时数; 还可以参考 Wu 等^[18] 提出的基于 FY-2D 气象卫星计算日照时数的方法, 得到全国尺度的日照累积时数。基于 FY-2D 气象卫星计算日照时数的公式为:

$$n(t) = \sum_{i=h_{sr}+0.25}^{i=h_{ss}-0.25} SF_i \times T_{\text{gap}} \quad (7)$$

式中, SF_i 为云型日照因子; T_{gap} 为时间间隔, 设为 1d; h_{sr} 与 h_{ss} 分别为日出和日落时间; i 表示日出与日落之间的时间序列。

基于上述两种方法, 利用 IDL 批处理分别得到 2010 年基于空间插值 PAR 与基于 FY-2D PAR 的全国逐月数据, 图 1 为 PAR 月均值结果的空间分布对比。空间插值 PAR 以各气象站点为中心出现较明显的圆形区域, 在空间分布上缺乏均质性。然而, 基于 FY-2D PAR 充分考虑了云层对太阳辐射的影响, 在全国范围内能更好的反映 PAR 的空间变化, 同时也避免了空间插值造成的结果不确定性。

利用在 CERN 选取的 8 个典型站点 PAR 观测数据对上述两种方法的估算结果进行精度验证, 详见图 2。基于 FY-2D PAR 的精度 ($\text{RMSE} = 77.46 \text{ MJ/m}^2$, $R^2 = 0.49$) 明显高于基于空间插值 PAR ($\text{RMSE} = 119.3 \text{ MJ/m}^2$, $R^2 = 0.25$)。因此, 将基于 FY-2D PAR 作为优化 CASA 模型的输入参数。

2.2 两叶模型

两叶光能利用率模型 (TL-LUE) 是进行 GPP 估算的常用模型, TL-LUE 计算公式如下:

$$\text{GPP} = (\varepsilon_{\text{msu}} \times \text{APAR}_{\text{sun}} + \varepsilon_{\text{msh}} \times \text{APAR}_{\text{msh}}) \times f(\text{VPD}) \times g(T_a) \quad (8)$$

式中, ε_{msu} 和 ε_{msh} 分别为阳叶和阴叶的最大光能利用率, 采用 Zhou 等^[20] 利用全球 98 个通量站观测数据优化之后的取值。APAR_{sun} 和 APAR_{msh} 分别为阳叶和阴叶的吸收 PAR, $f(\text{VPD})$ 和 $g(T_a)$ 分别为饱和汽压差 (VPD) 和最低气温 (T_a) 对光能利用率影响的修正因子, 在 0—1 之间变化, 计算公式为^[42-43]:

$$f(\text{VPD}) = \begin{cases} 0 & \text{VPD} \geq \text{VPD}_{\max} \\ \frac{\text{VPD}_{\max} - \text{VPD}}{\text{VPD}_{\max} - \text{VPD}_{\min}} & \text{VPD}_{\min} < \text{VPD} < \text{VPD}_{\max} \\ 1 & \text{VPD} \leq \text{VPD}_{\min} \end{cases} \quad (9)$$

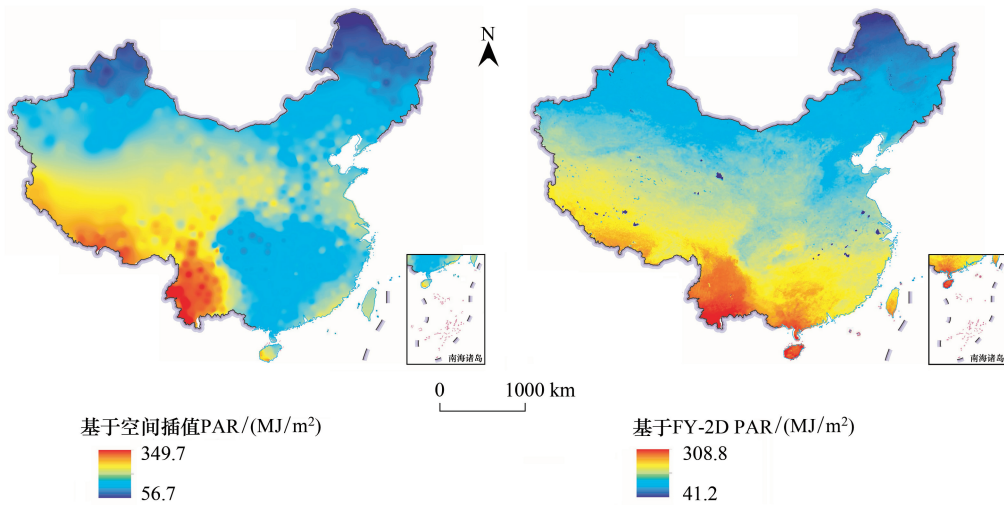


图 1 基于空间插值 PAR 和基于 FY-2D 的 PAR 结果对比

Fig.1 Comparison of national spatial interpolation based par and FY-2D par
PAR: 光合有效辐射 Photosynthetically available radiation

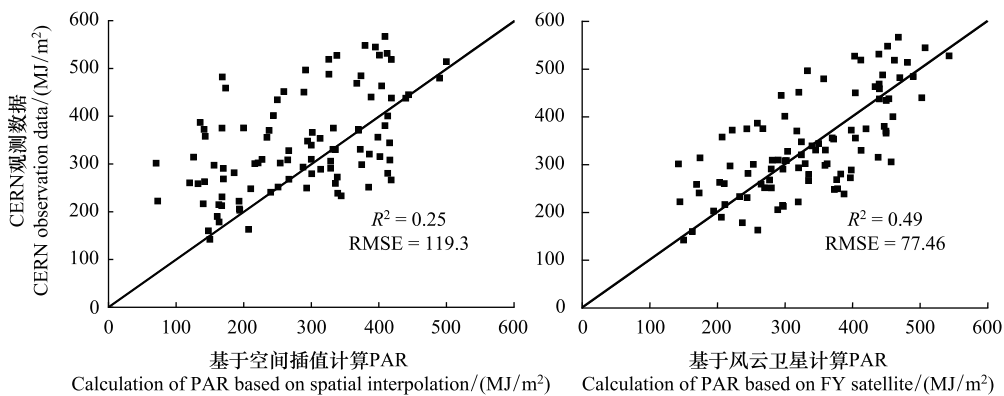


图 2 PAR 精度验证

Fig.2 Accuracy verification of PAR

CERN: 中国生态系统研究网络 Chinese ecosystem research network

$$g(T_a) = \begin{cases} 0 & T_a \leq T_{\min} \\ \frac{T_a - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} & T_{\min} < T_a < T_{\max} \\ 1 & VPD \leq VPD_{\min} \end{cases} \quad (10)$$

式中, VPD_{\max} 、 VPD_{\min} 等参数与植被类型相关。基于 NPP/GPP 比率数据可将 GPP 转化为 NPP, 即可通过两叶模型计算 NPP。

2.3 不同尺度 NPP 估算方法

站点尺度的研究方法是以 2010 年 8 个典型生态站的日尺度气象数据与光合有效辐射数据为数据源, 分别利用两叶模型与优化 CASA 模型估算日序列站点尺度 NPP (NPP_{TL} 与 NPP_{CASA}), 再利用站点的 30min 通量数据计算得到日序列 NPP_{EC} 视为实测值, 对 NPP_{TL} 与 NPP_{CASA} 进行验证与对比。其中, NPP_{EC} 的计算公式为:

$$GPP = R_e - NEE \quad (11)$$

$$NPP_{EC} = \alpha \times GPP \quad (12)$$

式中, R_e 是生态系统呼吸, NEE 是观测的生态系统与大气之间的 CO_2 净交换通量, α 代表 NPP 占 GPP 的比率, 取值参考已有研究的经验值^[44-46]。 NPP_{EC} 的具体计算流程为: 首先利用每 30min NEE 观测数据计算 GPP (gross primary productivity) 总初级生产力, 由于在夜间植被不进行光合作用时 R_e 与 NEE 相等, 所以利用夜间观测的温度建立 R_e 的估算方程, 再利用该方程和白天观测的温度计算得到白天的 R_e , 最后得到 GPP 并结合公式 12 将 GPP 转为 NPP_{EC} ^[47]。

像元尺度的研究方法是以前 8 个站点的通量塔为中心, 选取与遥感数据 1 个像元相匹配的缓冲区 (250m×250m), 分别利用两叶模型与优化 CASA 模型结合遥感数据估算逐月的像元尺度 NPP , 计算缓冲区内 NPP 平均值并记为 NPP_{TL_month} 与 NPP_{CASA_month} , 时间跨度为 2005—2010 年, 再将月尺度 NPP_{EC_month} 视为实测值, 分别对 NPP_{TL_month} 与 NPP_{CASA_month} 进行对比分析。

3 结果与分析

3.1 站点尺度 NPP 估算的结果与分析

利用站点通量数据对估算结果进行验证, 分别计算 R^2 和 $RMSE$ (图 3 和图 4)。结果表明在 4 个典型森林生态站点中, NPP_{TL} 与 NPP_{EC} 具有良好的相关性, R^2 的最小值为 0.92 (长白山与鼎湖山), 最大值为 0.94 (西双版纳)。 NPP_{CASA} 除了千烟州外 R^2 均低于 0.85, 其中长白山站点仅为 0.77。站点尺度中 NPP_{TL} 的 $RMSE$ 最小值为 1.68gC/d (鼎湖山), 其余站点 $RMSE$ 均小于 2.46gC/d。 NPP_{CASA} 的 $RMSE$ 最小值为 2.23gC/d (千烟州), 其余站点 $RMSE$ 均高于 2.28gC/d。这些指标均表明 TL-LUE 模型在典型森林站点估算精度高于优化 CASA 模型, 因为两叶模型充分考虑了植被阴叶和阳叶对光能利用效率的利用差异, 将冠层散射辐射引入模型中, 使得在植被覆盖度高的森林生态站点 NPP 估算精度提高, 而优化 CASA 模型中散点图明显偏向上半部分 (如鼎湖山和长白山), 说明优化 CASA 模型在森林等高植被覆盖的地区估算结果偏低。

在内蒙古、当雄和海北 3 个草地生态站点中, TL-LUE 在点尺度的估算优势不再明显, 甚至优化 CASA 模型在当雄站 ($R^2 = 0.90$, $RMSE = 0.90gC/d$) 和海北站 ($R^2 = 0.89$, $RMSE = 1.98gC/d$) 的估算精度高于两叶模型。可见在草地生态系统中由于植被覆盖降低, 阳叶与阴叶的区分不再显著, 冠层之间的散射辐射对 NPP 的贡献降低, 两叶估算存在高估现象 (如海北), 从而导致精度降低。尤其在冬季低温的月份, 两叶模型中单位 LAI 散射辐射项会出现负值, 显然不符合常理, 可见 TL-LUE 估算草地 NPP 对 LAI 精度要求很高^[30-31]。在禹城农田生态站中, TL-LUE 估算精度略低于优化 CASA 模型 ($RMSE$ 分别为 5.14gC/d 和 4.26gC/d)。因此在站点尺度上 TL-LUE 在森林生态系统中表现更好, 优化 CASA 模型在草地生态系统中估算精度更高。

3.2 像元尺度 NPP 估算结果与分析

利用站点通量数据对像元尺度估算结果进行验证, 分别计算 R^2 和 $RMSE$ (图 5 和图 6)。优化 CASA 模型在典型森林、草地和农田三类生态系统中表现均要好于 TL-LUE, 其中以鼎湖山 ($R^2 = 0.70$, $RMSE = 29.01gC/d$)、长白山 ($R^2 = 0.95$, $RMSE = 16.64gC/d$) 和海北 ($R^2 = 0.95$, $RMSE = 7.73gC/d$) 尤为显著。主要原因在于: (1) TL-LUE 模型在草地生态系统中适用性降低, LAI 精度对 NPP 估算结果具有显著影响; (2) TL-LUE 模型输入参数与优化 CASA 模型相比要复杂的多, 尤其在像元尺度因遥感数据的混合像元问题导致误差增大; (3) TL-LUE 模型无法直接估算 NPP , 只能通过前人研究的比率数据将 GPP 转换为 NPP , 因此在转换过程中也会产生误差。

验证结果说明 NPP 估算模型在不同尺度 (数据分辨率不同) 下的估算结果会出现明显差异, 在像元尺度中优化 CASA 模型表现整体好于 TL-LUE 模型。因此, 充分考虑两个模型在不同尺度上的适用性, 选择像元尺度表现更好的优化 CASA 模型对全国尺度植被 NPP 进行估算。

3.3 全国尺度 NPP 估算结果与分析

基于优化 CASA 模型估算了我国 2000—2019 年植被 NPP , 其时空分布见图 7。近 20 年全国植被平均

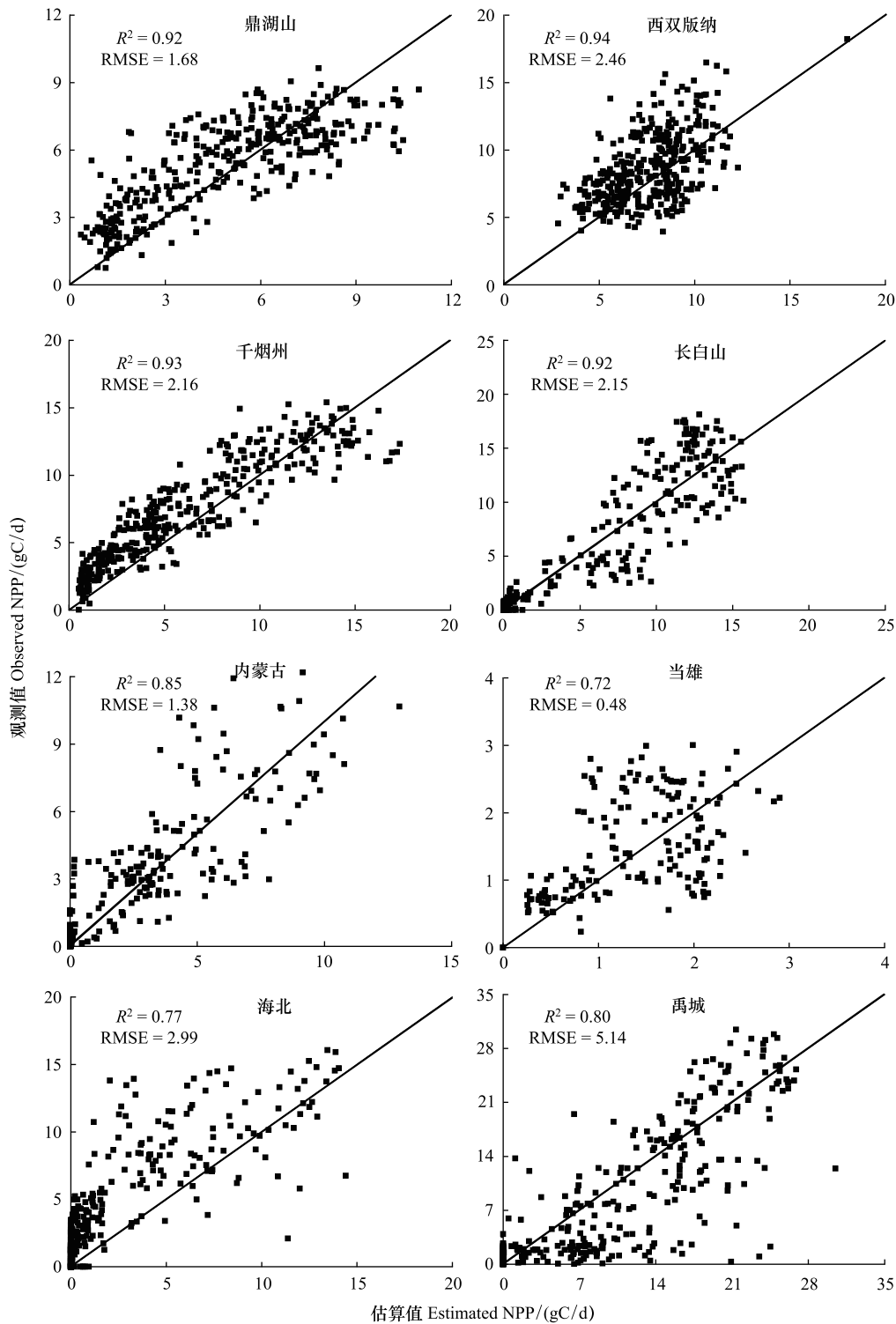


图 3 站点尺度两叶模型 NPP 估算精度验证

Fig.3 Validation of NPP estimation accuracy based on site scale of TL-LUE

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity

NPP 空间分布的地域性明显,总体上呈西北低东南高的分布格局。其中,西北沙漠地区的植被 NPP 年均值最小,基本都在 100gC/m²以下;福建、江西和湖南省的植被 NPP 年均值达到 1000gC/m²以上,广西、广东、海南和台湾省的植被 NPP 年均值更是可达 1500gC/m²以上。该空间分布与我国的“胡焕庸线”相吻合^[48],体现了中

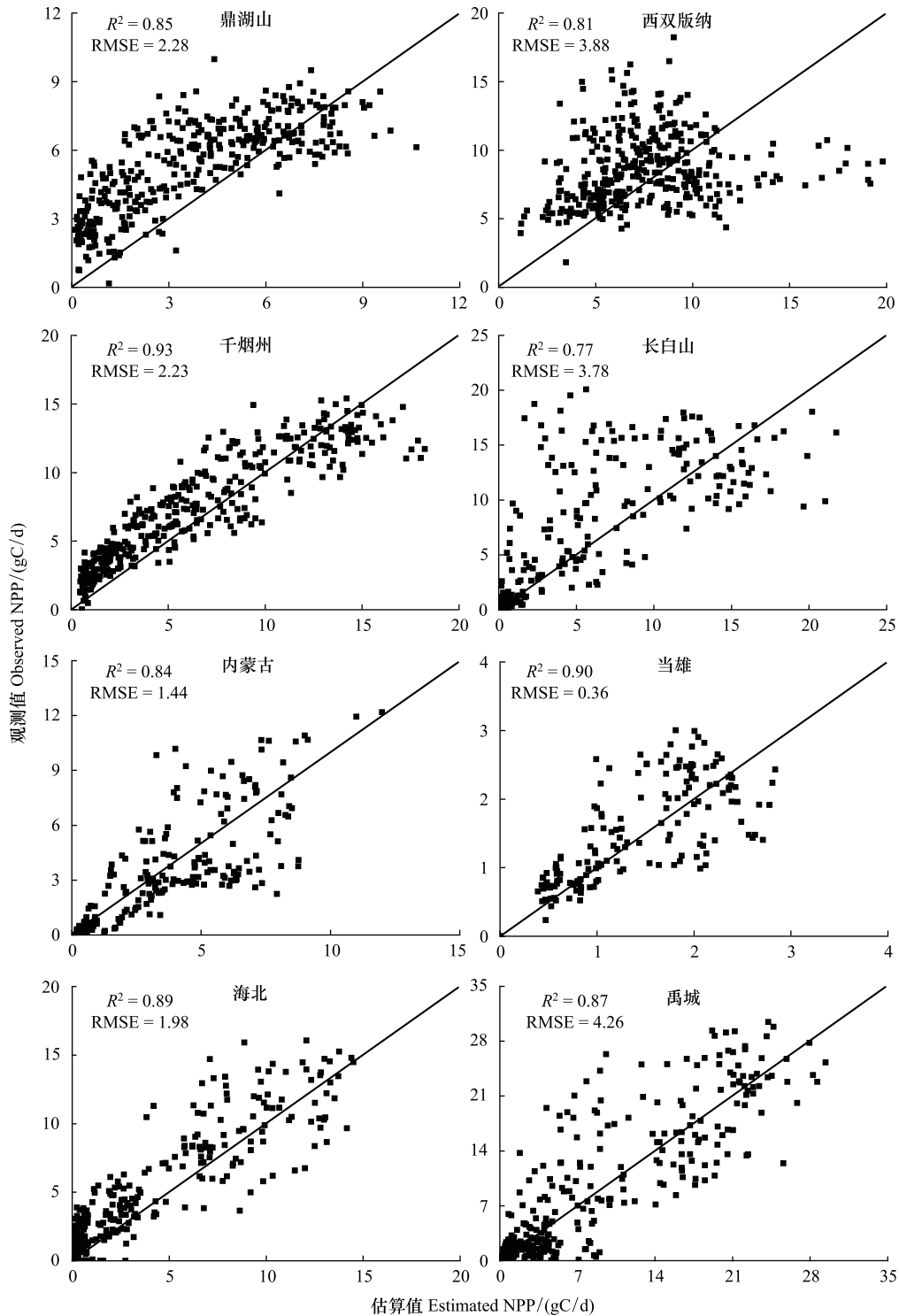


图4 站点尺度优化 CASA 模型估算 NPP 精度验证

Fig.4 Validation of NPP estimation accuracy based on site scale of optimized CASA

国西北与东南地区在地形、气候、植被类型以及人口密度等方面的显著差异。

如图 8 所示,全国 2000—2019 年 NPP 总体上呈波动增加趋势。NPP 总量变化范围在 2.703—2.882PgC/a,平均值为 2.787gC/m²。与前人的研究成果相比,如朴世龙等与朱文泉等为代表的学者^[12]均对 1981—2000 年中国陆地植被 NPP 进行了估算,所得 NPP 总量在波动中呈现缓慢增加趋势,本研究估算的 2000—2019 年

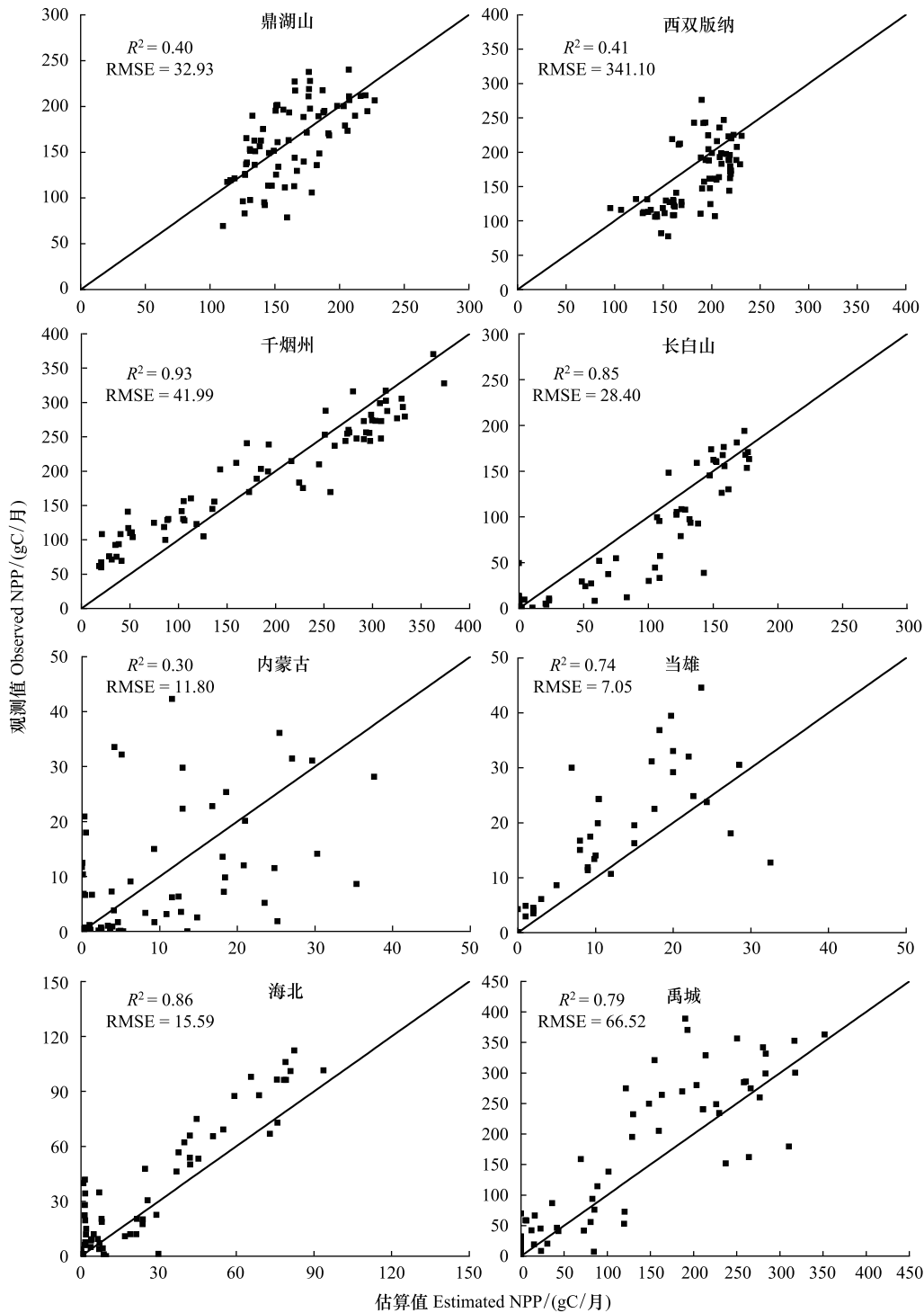


图 5 像元尺度两叶模型估算 NPP 精度验证

Fig.5 Validation of NPP estimation accuracy based on pixel scale of TL-LUE

中国陆地植被 NPP 延续了 1981—2000 年的基本走势;另外在 NPP 总量数值方面,李登科等^[49]对我国 2000—2015 年全国陆地植被 NPP 估算总量在 2.406—2.811PgC/a 之间波动,平均值为 2.635PgC/a,本研究近 15 年的 NPP 总量在 2.604—2.882PgC/a 之间波动,平均值为 2.782PgC/a,两者较为接近。近 20 年中国陆地植被 NPP 呈现该趋势主要是自然与人为因素综合作用的结果,一方面气候的暖湿化利于植被生长使得 NPP 增加,而逐年的降水、气温与地形的耦合作用导致了 NPP 的年际波动;另一方面人口迁移、社会经济发展以及众多

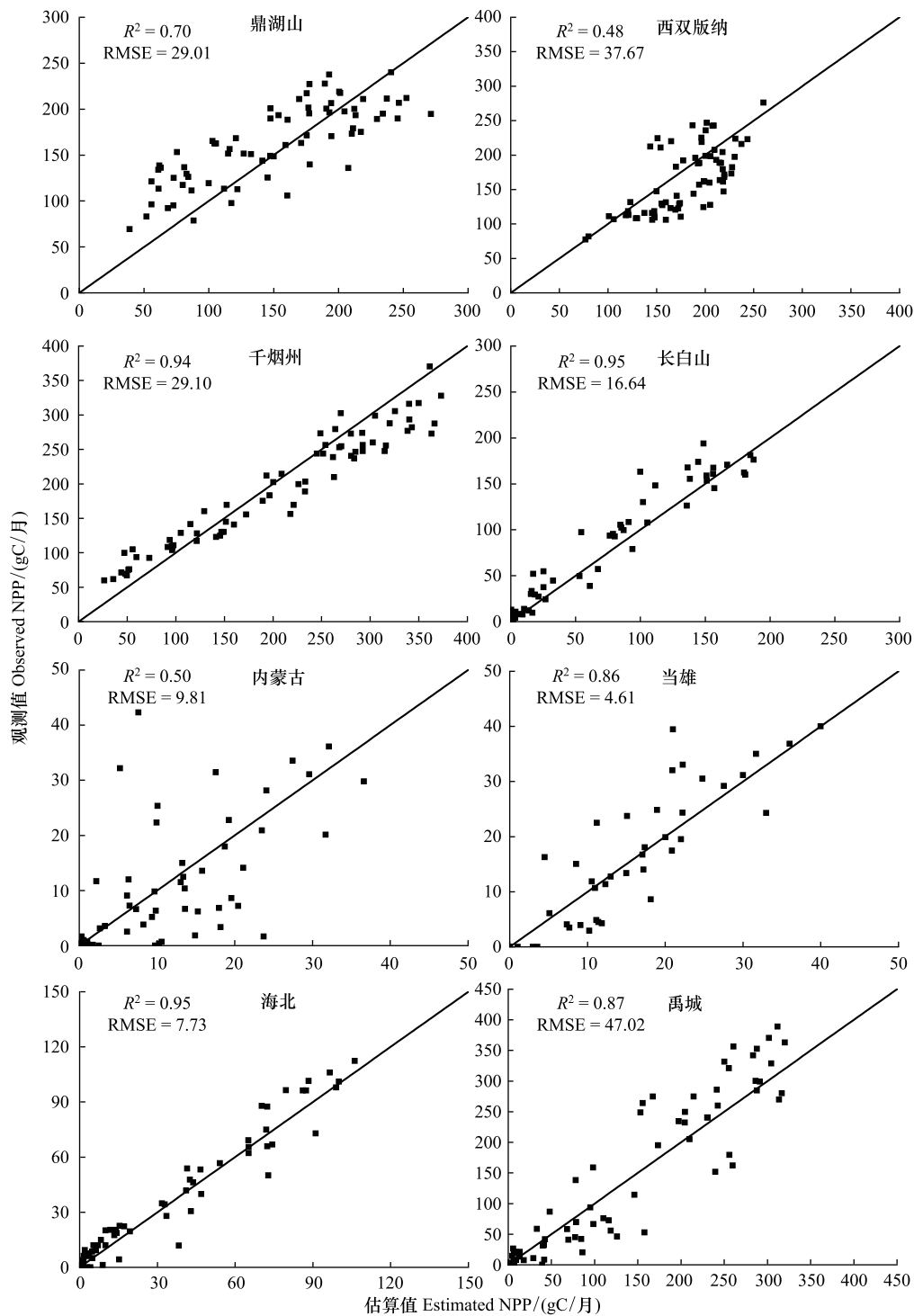


图6 像元尺度优化 CASA 模型估算 NPP 精度验证

Fig.6 Validation of NPP estimation accuracy based on pixel scale of optimized CASA

生态保护工程的实施对不同区域 NPP 的空间格局与趋势变化也存在不同程度的影响。

4 讨论

利用遥感模型进行 NPP 估算时,在不同研究尺度所得到的 NPP 模拟值存在明显的差异^[50-51]。在站点尺度上两叶模型在森林等高植被覆盖地区表现明显好于优化 CASA 模型,但两叶模型的限制性在于随着研究

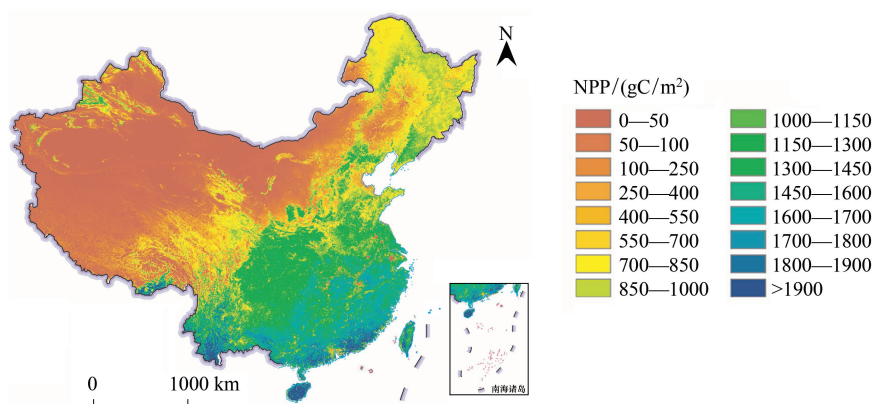


图 7 2000—2019 年中国陆地植被净初级生产力(NPP)平均值

Fig.7 Spatial distribution of mean net primary productivity (NPP) in Chinese terrestrial ecosystem between 2000 and 2019

尺度的增加,尤其是当一个植被类型中混合了大量其他植被类型时,NPP/GPP 比率以及其它参数精度降低,导致两叶模型会产生较大的估测误差。此外,由于两叶模型对 LAI 精度要求较高,在草地等阴阳叶区分不明显的植被覆盖较低区域会出现 NPP 负值。

优化 CASA 模型与两叶模型相比,最大的特点在于更加适用于区域尺度的 NPP 监测,并且可以依据地域特征、植被类型与最新的参数计算方法来进行模型简化与改进。在 250m 像元尺度的全国 NPP 监测中,优化 CASA 模型表现明显好于两叶模型。然而,CASA 模型用于更高精度的全国尺度 NPP 估算时(如 30m 分辨率)还存在局限性,主要原因在于部分模型输入数据,例如 Landsat 已经可以提供用于计算 NDVI 与 FPAR 的 30m 全国覆盖数据,但是陆表温度、光合有效辐射以及用于计算水分胁迫系数的近红外数据等,现阶段还只能

依靠 MODIS、风云等卫星(空间分辨率大于 250m)为数据源,无法获取在空间尺度上相匹配的所有模型输入数据。吴炳方等^[52]指出目前大量的中高分辨率光学遥感数据、微波遥感数据和激光雷达数据还没有成为生态参数监测的主流数据源,需要进一步突破多尺度数据融合和多源数据集成的技术将这些数据利用起来,进而提高产品精度。如欧盟从 2015 年哨兵 2 号传感器升空后就尝试生产高分辨率的生态参数,我国发射的高分系列卫星也已初步构成了高时空分辨率的对地观测系统,均旨在解决分辨率不匹配的问题。

中国生态系统研究网络是我国生态系统监测和生态环境研究基地,在我国的生态系统科学研究中具有重要意义与应用潜力^[53]。本研究中 8 个典型站点的观测数据为模型优化与验证提供了重要的数据支撑。然而针对全国尺度 NPP 的长时间序列监测,不是所有的 CERN 站点都具备通量观测的设备与条件,ChinaFLUX 只共享了部分站点的通量观测数据,很难在评价全国尺度 NPP 数据质量时全部依靠观测数据。从另一角度分析,由于 NPP 成分中的根系分泌、向根共生者的碳转移以及植物挥发性有机化合物的排放等部分难以测定,使得大多数 NPP 研究均采用与其他产品进行对比来评价数据质量,缺乏客观的精度验证数据。虽然基于通量数据计算的 NPP 可在研究中视作实测值,但真实性远不如此地测量数据。随着测量技术的不断发展,NPP 实测方法将会有新的突破,CERN 站点如能提供长时间序列 NPP 的地面实测数据集,并进一步开放数据共享

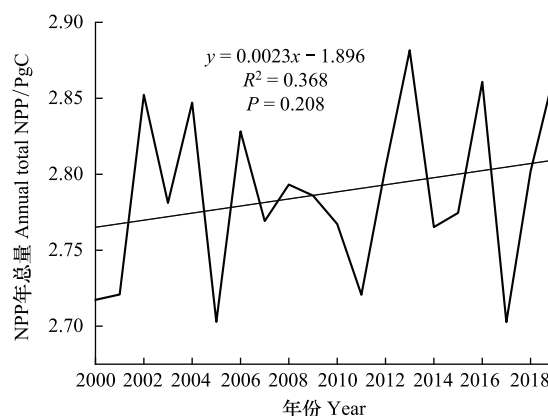


图 8 2000—2019 年中国陆地植被 NPP 总量变化曲线

Fig.8 Changes of vegetation total NPP in China from 2000 to 2019

机制,将更有利于区域尺度植被生产力的监测、验证与生态变化分析。

5 结论

本研究在综合分析光能利用效率模型的基础上,利用 CERN 提供的光合有效辐射数据、典型生态系统光能利用效率数据以及通量观测数据,对传统 CASA 模型中最大光能利用率、水分胁迫系数与 PAR 三个参数进行优化,发现基于典型生态系统光能利用效率数据优化后的植被最大光能利用率能够较好反映植被实际状况,基于 FY2D PAR 的优化方案显著提高了 PAR 的估算精度,且能够有效避免空间插值导致的不确定性问题的。

利用森林、草地和农田共计 8 个典型生态站的通量数据,对比分析两叶模型与优化 CASA 模型在站点尺度和像元尺度的 NPP 估算精度,发现两叶模型适用于高植被覆盖的森林地区,在站点尺度上估算精度高于优化 CASA 模型,而优化 CASA 模型在像元尺度上的表现整体好于两叶模型,适用于在全国尺度上估算陆地植被 NPP。基于优化 CASA 模型估算的 2000—2019 年逐月 250m 中国陆地植被 NPP 变化范围为 2.703—2.882 PgC/a,近 20 年的 NPP 均值为 2.787gC/m²,在空间分布上呈西北低东南高的格局,在时间尺度上呈现波动中缓慢增加的趋势。

致谢:中国生态系统研究网络和中国陆地生态系统通量观测研究网络提供观测数据。

参考文献(References):

- [1] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D3): 5263-5283.
- [2] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [3] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y, Peng C H, Ji W. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, 293(5536): 1723.
- [4] 刘风,曾永年.近 16 年青海高原植被 NPP 时空格局变化及气候与人为因素的影响. *生态学报*, 2019, 39(5): 1528-1540.
- [5] 潘竟虎,黄克军,李真. 2001-2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. *生态学报*, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [6] IGBP. The International Geosphere-Biosphere Programme: A Study of Global Change Stockholm: IGBP, 1990.
- [7] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 1998, 280(5368): 1393-1394.
- [8] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [9] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 373-380.
- [10] Nayak R K, Patel N R, Dadhwal V K. Estimation and analysis of terrestrial net primary productivity over India by remote-sensing-driven terrestrial biosphere model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1/4): 195-213.
- [11] 彭少麟,郭志华,王伯荪.利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率. *生态学报*, 2000, 20(6): 903-909.
- [12] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [13] Yu D Y, Shi P J, Shao H B, Zhu W Q, Pan Y Z. Modelling net primary productivity of terrestrial ecosystems in East Asia based on an improved CASA ecosystem model. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(18): 4851-4866.
- [14] Zhang Y, Zhang X L. Estimation of net primary productivity of different forest types based on improved CASA model in Jing-Jin-Ji region, China. *Journal of Sustainable Forestry*, 2017, 36(6): 568-582.
- [15] Bao G, Bao Y H, Qin Z H, Xin X P, Bao Y L, Bayarsaikan S, Zhou Y, Chuntai B. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 46: 84-93.
- [16] Liu Z H, Hu M Q, Wang G X. Estimation of net primary productivity of forests by modified CASA models and remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(4): 1092-1116.
- [17] Bisht G, Venturini V, Islam S, Jiang L. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate resolution imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(1): 52-67.
- [18] Wu B F, Liu S F, Zhu W W, Yu M Z, Yan N N, Xing Q. A method to estimate sunshine duration using cloud classification data from a geostationary meteorological satellite (FY-2D) over the Heihe river basin. *Sensors*, 2016, 16(11): 1859.
- [19] He M Z, Ju W M, Zhou Y L, Chen J M, He H L, Wang S Q, Wang H M, Guan D X, Yan J H, Li Y N, Hao Y B, Zhao F H. Development of a two-leaf light use efficiency model for improving the calculation of terrestrial gross primary productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 173: 28-39.

- [20] Zhou Y L, Wu X C, Ju W M, Chen J M, Wang S Q, Wang H M, Yuan W P, Black T A, Jassal R, Ibrom A, Han S J, Yan J H, Margolis H, Roupsard O, Li Y N, Zhao F H, Kiely G, Starr G, Pavelka M, Montagnani L, Wohlfahrt G, D'Odorico P, Cook D, Arain M A, Bonal D, Beringer J, Blanken P D, Loubet B, Leclerc M Y, Matteucci G, Nagy Z, Olejnik J, U K T P, Varlagin A. Global parameterization and validation of a two-leaf light use efficiency model for predicting gross primary production across FLUXNET sites. *Journal of Geophysical Research: Biogeoscience*, 2016, 121(4): 1045-1072.
- [21] Zan M, Zhou Y L, Ju W M, Zhang Y G, Zhang L M, Liu Y B. Performance of a two-leaf light use efficiency model for mapping gross primary productivity against remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence data. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 977-989.
- [22] 王昭生. 1949-2008 年东亚区域陆地生态系统 NPP 和 GPP 的时空格局演变. 湘潭: 湖南科技大学, 2012.
- [23] 孙金伟, 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 袁凤辉. 陆地植被净初级生产力研究进展. *世界林业研究*, 2012, 25(1): 1-6.
- [24] Wu C Y, William Munger J, Niu Z, Kuang D. Comparison of multiple models for estimating gross primary production using MODIS and eddy covariance data in Harvard Forest. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(12): 2925-2939.
- [25] Fu B J, Li S G, Yu X B, Yang P, Yu G R, Feng R G, Zhuang X L. Chinese ecosystem research network: progress and perspectives. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2): 225-233.
- [26] 于贵瑞, 于秀波. 中国生态系统研究网络与自然生态系统保护. *中国科学院院刊*, 2013, 28(2): 275-283.
- [27] 徐保东, 李静, 柳钦火, 曾也鲁, 尹高飞, 赵静, 杨乐. 地面站点叶面积指数观测的空间代表性评价——以 CERN 站网观测为例. *遥感学报*, 2015, 19(6): 910-927.
- [28] 颜绍疆, 吴冬秀, Singh A N, 李媛良, 韦文珊, 崔杨, 汪思龙, 徐广标. 一种新的生态监测数据质量评估方法——以 CERN 乔木生长数据为例. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1067-1074.
- [29] 孙婉鑫, 张黎, 任小丽, 何洪林, 吕妍, 牛忠恩, 常青青. 1998-2017 年中国典型森林生态系统潜在蒸散的变化趋势及成因. *资源科学*, 2020, 42(5): 920-932.
- [30] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [31] Yu G R, Wen X F, Sun X M, Tanner B D, Lee X, Chen J Y. Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 125-137.
- [32] Yu G R, Zhang L M, Sun X M, Fu Y L, Wen X F, Wang Q F, Li S G, Ren C Y, Song X, Liu Y F, Han S J, Yan J H. Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in eastern China. *Global Change Biology*, 2008, 14(11): 2555-2571.
- [33] 吴炳方, 钱金凯, 曾源. 中华人民共和国土地覆被地图集(1:100 万). 中国地图出版社, 2017.
- [34] 吴炳方, 熊隽, 闫娜娜. ETWatch 的模型与方法. *遥感学报*, 2011, 15(2): 224-239.
- [35] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德勇, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [36] Running S W, Thornton P E, Nemani R, Glassy J M. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system//Sala O E, Jackson R B, Mooney H A, Howarth R W, eds. *Methods in Ecosystem Science*. New York: Springer, 2000: 44-57.
- [37] Xiao X M, David H, Aber J, Goltz M, Davidson E A, Zhang Q Y, Moore III B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519-534.
- [38] 李传华, 曹红娟, 范也平, 韩海燕, 孙皓, 王玉涛. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例. *生态学报*, 2019, 39(5): 1616-1626.
- [39] 赵芬. 基于 CASA 模型的锡林郭勒盟草地净初级生产力遥感估算与验证[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [40] Raymond Hunt Jr E. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(8): 1725-1729.
- [41] McCrady R L, Jokela E J. Canopy dynamics, light interception, and radiation use efficiency of selected loblolly pine families. *Forest Science*, 1998, 44(1): 64-72.
- [42] 何明珠. 遥感数据与两叶光能利用率模型同化的总初级生产力模拟[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [43] 刘青瑞. 中国陆地生态系统总初级生产力变化趋势及成因分析[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [44] 马泽清, 刘琪璟, 王辉民, 李轩然, 曾慧卿, 徐雯佳. 中亚热带人工湿地松林(*Pinus elliottii*)生产力观测与模拟. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(8): 1005-1015.
- [45] 宋霞. 中亚热带人工针叶林生态系统水分利用效率的季节动态及其环境控制机制研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2007.
- [46] 王昭生. 1949-2008 年东亚区域陆地生态系统 NPP 和 GPP 的时空格局演变[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2012.
- [47] Yuan W P, Liu S G, Zhou G S, Zhou G Y, Tieszen L L, Baldocchi D, Bernhofer C, Gholz H, Goldstein A H, Goulden M L, Hollinger D Y, Hu Y M, Law B E, Stoy P C, Vesala T, Wofsy S C, other AmeriFlux collaborators. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(3/4): 189-207.
- [48] 郭华东, 王心源, 吴炳方, 李新武. 基于空间信息认知人口密度分界线——“胡焕庸线”. *中国科学院院刊*, 2016, 31(12): 1385-1394.
- [49] 李登科, 王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 397-405.
- [50] 卫亚星, 王莉雯. 应用遥感技术模拟净初级生产力的尺度效应研究进展. *地理科学进展*, 2010, 29(4): 471-477.
- [51] 米娜, 于贵瑞, 温学发, 孙晓敏. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)通量观测空间代表性初步研究. *中国科学 D 辑 地球科学*, 2006, 36(S1): 22-33.
- [52] 吴炳方, 曾源, 闫娜娜, 曾红伟, 赵旦, 张森. 生态系统遥感: 内涵与挑战. *遥感学报*, 2020, 24(6): 609-617.
- [53] 黄铁青, 牛栋. 中国生态系统研究网络(CERN): 概况、成就和展望. *地球科学进展*, 2005, 20(8): 895-902.