

doi: 10.11707/j.1001-7488.LYKX20230266

聚集指数和最大羧化速率对基于遥感产品的植被生产力估算的影响*

李 琪 孙 睿 柏 佳 张静宇 张赫林

(遥感科学国家重点实验室 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心 北京师范大学地理科学学部 北京 100875)

摘 要: 【目的】明确聚集指数和最大羧化速率遥感产品对 BEPS 模型估算植被生产力的影响。【方法】利用中国陆地通量站点观测数据,分析 BEPS 模型中聚集指数(CI)和最大羧化速率(V_{cmax})的敏感性程度,并比较聚集指数和最大羧化速率遥感产品对植被生产力估算的精度提升作用。在此基础上估算 2012 年中国陆地生态系统植被生产力,通过与参数缺省值估算结果对比,研究 CI 和 V_{cmax} 的时空变化对模型估算结果的影响。【结果】1) CI 和 V_{cmax} 均为 BEPS 模型中较为敏感的参数,两者均与植被生产力呈正相关关系,且不同植被类型下 V_{cmax} 敏感性均高于 CI。2) 聚集指数和最大羧化速率遥感产品同时使用情况下,模拟结果的误差最小,精度最高,总初级生产力(GPP)均方根误差从 $665.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降至 $584.71 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均误差和相对平均误差均为 4 种模拟情况最低值。3) 2012 年中国陆地生态系统 GPP 和净初级生产力(NPP)总量分别为 5.21 和 $2.49 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$,受 CI 遥感产品(NDHD-CI)和 V_{cmax} 遥感产品(SIF- V_{cmax})的时空变化影响,GPP 和 NPP 估算分别较模型缺省值偏低 3.06% 和 4.72%。【结论】NDHD-CI 和 SIF- V_{cmax} 能够提升 BEPS 模型估算植被生产力的精度,未来可对其他高敏感度参数和模型机理进行优化改进。受 CI 和 V_{cmax} 时空变化影响,植被生产力估算结果略低于缺省情况。 V_{cmax} 对植被生产力估算影响高于 CI。

关键词: 植被生产力; BEPS 模型; 聚集指数; 最大羧化速率

中图分类号: S718.52 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2024)06-0025-12

Effects of Clumping Index and Maximum Carboxylation Rate on Vegetation Productivity Estimation Based on Remote Sensing Data

Li Qi Sun Rui Bai Jia Zhang Jingyu Zhang Helin

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products Institute of Remote Sensing Science and Engineering Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University Beijing 100875)

Abstract: 【Objective】This study aims to investigate the effect of clumping index (CI) and maximum carboxylation rate (V_{cmax}) from remote sensing products on estimation of vegetation productivity with the boreal ecosystem productivity simulator (BEPS) model. 【Method】The FLUXNET and ChinaFLUX data were used to analyze the sensitivities of CI and V_{cmax} in BEPS model, and compare the effects of CI and V_{cmax} on Gross Primary Productivity (GPP) estimation. On this basis, the vegetation productivity of terrestrial ecosystems in China in 2012 was estimated. By comparing with the estimated results of the default value, we determined the impact of the spatio-temporal changes of CI and V_{cmax} on the model performance. 【Result】1) The results showed that CI and V_{cmax} had high sensitivities in the BEPS model. They were positively correlated with vegetation productivity, and the sensitivity of V_{cmax} was higher than that of CI in different vegetation types. 2) When CI and V_{cmax} remote sensing products (NDHD-CI and SIF- V_{cmax}) were used simultaneously, the simulation results had the smallest error and the highest accuracy. The root mean square error (RMSE) of GPP decreased from $665.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ to $584.71 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the mean absolute error (MAE) and mean relative error (MRE) were the lowest in the four simulation cases. 3) In 2012, the total GPP and Net Primary Productivity (NPP) of terrestrial ecosystems in China were $5.21 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ and $2.49 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. Affected by the spatio-temporal dynamics in the CI and V_{cmax} , the GPP and NPP estimates were 3.06% and 4.72% lower than the default results of the model, respectively. 【Conclusion】Our results have demonstrated that NDHD-CI and SIF- V_{cmax} can improve the accuracy of BEPS models in estimating vegetation productivity, and other high-sensitivity parameters and model mechanisms can be optimized and improved in

收稿日期: 2023-06-27; 修回日期: 2023-12-19。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42271330); 国家重点研发计划课题(2021YFB3901201)。

* 孙睿为通讯作者。

the future. Affected by the temporal and spatial changes of CI and V_{cmax} , the estimation results of vegetation productivity are slightly lower than the default situation. The effect of V_{cmax} on vegetation productivity estimation is higher than that of CI.

Key words: vegetation productivity; BEPS model; clumping index; maximum carboxylation rate

陆地生态系统作为一个植被-土壤-大气-生物交互作用的复杂系统,在全球碳循环中扮演着重要角色,提高其碳收支和碳循环过程的模拟精度是分析碳源/汇分布、应对气候危机的前提(Friedlingstein *et al.*, 2006)。陆地植被生产力反映了陆生植物对大气 CO_2 的固定能力,准确模拟其时空变化特征对掌握陆地生态系统碳汇能力、应对气候变化和实现碳中和和目标等具有重要意义。

生理生态过程模型是植被生产力估算的常用方法之一。经典过程模型主要有 CENTURY (Parton *et al.*, 1988), TEM (terrestrial ecosystem model) (Melillo *et al.*, 1993), Biome-BGC (biome biogeochemical cycle) (Hunt *et al.*, 1996), SiB2 (simple biosphere model) (Sellers *et al.*, 1996), BEPS (boreal ecosystem productivity simulator) (Liu *et al.*, 1997) 和 CEVAS (carbon exchange between vegetation, soil, and the atmosphere) (Cao *et al.*, 1998) 等,已广泛应用于多种空间尺度植被生产力估算和碳循环模拟。其中, BEPS 模型能够详细描述植被生理生态过程并模拟不同时空尺度的碳通量变化特征,具有机理性强和综合度高的特点。该模型主要用来对陆地生态系统生产力进行模拟,包括对植被光合作用、呼吸作用、水分平衡和能量平衡的模拟。模型在碳水循环模拟上对植被冠层进行了分层设计,将植被冠层区分为阴叶和阳叶,分别计算光合和蒸散,在东亚地区和中国部分地区的陆地植被生态系统生产力模拟中都取得了很好的效果(康振山等, 2021)。然而,作为过程模型, BEPS 模型结构复杂,包含了大量植被生理参数,部分内部参数的默认值是基于加拿大北方森林的试验数据来确定(Luo *et al.*, 2001)。但由于气象因素、植被类型等时空差异性,在应用于区域陆地生态系统碳循环模拟时,直接使用参数默认值来估算可能会导致估算结果产生一定的不确定性。因此,一些学者通过数据同化等方式来优化参数,减小模拟误差。例如,使用集合卡尔曼滤波方法对 BEPS 模型中 V_{cmax} 等参数进行优化,结果表明 US-Ha1 和 FI-Hyy 站点 GPP 估算的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 值从 7.47 下降至 3.69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (Chen *et al.*, 2023)。利用迭代方法对最大羧化速率 (maximum carboxylation rate, V_{cmax}) 和最大电子传输速率 (J_{max}) 进行优化发现, RMSE 较采用模型

默认参数值下降了 33.33% (卢伟等, 2016)。

聚集指数 (clumping index, CI) 和 V_{cmax} 是 BEPS 模型的 2 个重要参数,其中 CI 为有效叶面积指数与真实叶面积指数的比值,在模型中用来计算阴、阳叶比例与阴叶接收的太阳辐射量。Chen 等 (2012) 定量分析 CI 对 GPP 估算的影响发现,忽略聚集效应会导致 12% 的低估。 V_{cmax} 指单位时间单位面积上植物能够固定的最大二氧化碳量 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),是光合过程中最重要的限速反应速率,对光合速率起决定性作用。为简化模型参数, BEPS 模型将 CI 和 V_{cmax} 简化为依赖于植被类型的固定参数,而实际上这 2 种植被生理结构参数不仅受到植被类型的影响,还受到自身生长状态和外在环境因素的影响,在时空分布上有明显差异,如农田的 CI 变化范围在 0.7~1.0 (朱高龙, 2016),叶片的 V_{cmax} 变化范围 6~194 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (张彦敏等, 2012; 张鑫磊等, 2020)。采用常数参数难以表征区域、全球等大尺度上的时空异质性,从而对植被生产力估算精度产生影响。因此,针对这一问题,本研究以通量观测站点为例,定量分析 CI 和 V_{cmax} 在 BEPS 模型众多参数中的敏感性程度,并通过遥感反演的 V_{cmax} 和 CI 2 种关键植被参数产品驱动模型,估算站点 GPP 并进行精度验证,探究 CI 和 V_{cmax} 对植被生产力模拟精度的影响,并进一步计算中国陆地生态系统植被生产力。

1 研究区概况

研究区为中国陆地生态系统(图 1),其植被与环境因子(降水、气温等)在空间上分布具有一致性。自北向南从落叶针叶林过渡为常绿阔叶林,西北内陆以草地和裸地为主。受人类活动影响,平原地区以耕地覆盖为主。地表覆盖类型包括植被类型均采用国际地圈生物圈计划 (international geosphere-biosphere program, IGBP) 体系。

2 数据与方法

2.1 数据来源和预处理

站点观测数据来自于全球长期通量观测网络 (FLUXNET) 和中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX),涉及的通量站点情况见表 1。

聚集指数遥感产品 (以下简称为 NDHD-CI) 来自

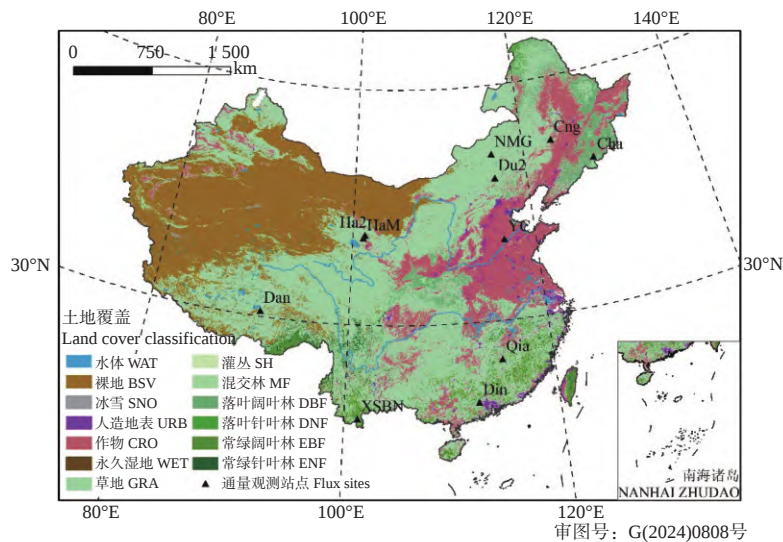


图 1 中国陆地生态系统地表覆盖类型

Fig. 1 Types of land cover of terrestrial ecosystems in China

Cha: 长白山 Changbaishan; Din: 鼎湖山 Dinghushan; Qia: 千烟洲 Qianyanzhou; Ha2: 海北 1 Haibei 1; Cng: 长岭 Changling; Dan: 当雄 Dangxiong; Du2: 多伦 Duolun; HaM: 海北 2 Haibei 2; NMG: 内蒙古 Neimenggu; YC: 禹城 Yucheng; XSBN: 西双版纳 Xishuangbanna; WAT: 水体 Water bodies; BSV: 裸地 Barren sparse vegetation; SNO: 冰雪 Snow and ice; URB: 人造地表 Urban and built-up lands; CRO: 作物 Croplands; WET: 永久湿地 Permanent wetlands; GRA: 草地 Grasslands; SH: 灌丛 Shrublands; MF: 混交林 Mixed forests; DBF: 落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forests; DNF: 落叶针叶林 Deciduous needle leaf forests; EBF: 常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forests; ENF: 常绿针叶林 Evergreen needle leaf forests.

MODIS 全球 500 米 8 天植被聚集指数产品 (<http://www.geodata.cn/index.html>) (Jiao *et al.*, 2018; Dong *et al.*, 2018)。最大羧化速率遥感产品 (以下简称为 $SIF-V_{cmax}$) 来自叶片最大羧化速率产品 (归一化至最适温度 25 °C) (He *et al.*, 2019)。叶面积指数来自 GLASS(global L and surface satellite) 叶面积指数产品 (Xiao *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2016; Xiao *et al.*, 2017), 气象数据来自第五代再分析数据集 ERA5-land(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=form>)。地表覆盖类型数据为 MODIS 数据 MCD12Q1(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>) (图 1)。根据气温、露点温度和辐射计算比湿(翟盘茂等, 1997), 将遥感影像均采样至 500 m 空间分辨率。

usgs.gov/products/mcd12q1v006/)(图 1)。根据气温、露点温度和辐射计算比湿(翟盘茂等, 1997), 将遥感影像均采样至 500 m 空间分辨率。

2.2 植被生产力计算

本文通过 BEPS 模型计算植被生产力, 该模型是在 FOREST-BGC 模型 (Running *et al.*, 1988) 基础上发展而来, 最早被用于加拿大北方森林植被生产力估算, 之后成功应用于中国等区域陆地生态系统植被生产力模拟。模型特点之一在于引入双叶模型将冠层叶片分为阴叶(只接收散射辐射)和阳叶(既接收

表 1 通量观测站点一览表^①

Tab. 1 Information of flux sites

站点 Site	经度 Longitude(E)	纬度 Latitude(N)	植被类型 Vegetation type	年份 Year
长白山 Changbaishan (Cha)	128.10°	42.40°	MF	2003—2010
鼎湖山 Dinghushan (Din)	112.54°	23.17°	EBF	2003—2006, 2008—2010
千烟洲 Qianyanzhou (Qia)	115.06°	26.74°	ENF	2003—2007, 2009
海北 1 Haibei 1 (Ha2)	101.33°	37.61°	WET	2003—2005
长岭 Changling (Cng)	123.51°	44.59°	GRA	2007—2010
当雄 Dangxiong (Dan)	91.07°	30.50°	GRA	2004—2005, 2007—2009
多伦 Duolun (Du2)	116.28°	42.05°	GRA	2007—2008
海北 2 Haibei 2 (HaM)	101.18°	37.37°	GRA	2003—2004
内蒙古 Neimenggu (NMG)	116.18°	44.08°	GRA	2004—2005, 2008
禹城 Yucheng (YC)	116.57°	36.83°	CRO	2003—2010
西双版纳 Xishuangbanna (XSBN)	101.25°	21.93°	EBF	2004

① MF: 混交林 Mixed forests; EBF: 常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forests; ENF: 常绿针叶林 Evergreen needle leaf forests; DBF: 落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forests; DNF: 落叶针叶林 Deciduous needle leaf forests; SH: 灌丛 Shrublands; WET: 永久湿地 Permanent wetlands; GRA: 草地 Grasslands; CRO: 作物 Croplands.

散射辐射也接收直射辐射)两部分。聚集指数主要用于计算阴、阳叶的叶面积指数与阴叶接收的太阳辐射量,公式如下:

$$LAI_{sun} = 2 \cos \theta (1 - e^{-0.5 \Omega LAI / \cos \theta}) \quad (1)$$

$$LAI_{sh} = LAI - LAI_{sun} \quad (2)$$

式中: LAI_{sun} , LAI_{sh} 分别为阳、阴叶的叶面积指数, LAI 为真实叶面积指数, θ 为太阳天顶角, Ω 为聚集指数。

阴叶接收的太阳辐射量 S_{shade} 为上部冠层截获的散射辐射与直射辐射的多次散射项之和。

$$S_{shade} = (S_{dif} - S_{dif,under}) / LAI + C \quad (3)$$

式中: S_{dif} 为散射辐射, $S_{dif,under}$ 为冠层下接收到的散射辐射, C 为多次散射项,可以由下式计算得到:

$$C = 0.07 \Omega S_{dif} (1.1 - 0.1 LAI) e^{-\cos \theta} \quad (4)$$

$$S_{dif,under} = S_{dif} e^{-0.5 \Omega LAI / \cos \theta} \quad (5)$$

$$\cos \bar{\theta} = 0.537 + 0.025 LAI \quad (6)$$

式中: S_{dif} 为直射辐射, $\bar{\theta}$ 是散射辐射传输的典型天顶角,近似为 57.5° 。

V_{cmax} 主要体现在光合速率的计算中。在碳反应中,核酮糖-1,5-二磷酸 (ribulose-1,5-bisphosphate, RuBP) 等在 Rubisco 羧化酶/加氧酶作用下进行与 CO_2 的羧化反应和与 O_2 的氧化反应。Rubisco 活性受光照强度和 CO_2 浓度影响。当 CO_2 浓度较低时, RuBP 充足,光合速率为受 Rubisco 活性限制的羧化速率 W_c 。随着 CO_2 浓度升高, RuBP 再生速率低于其消耗速率,此时光合速率为受 RuBP 再生能力限制的羧化速率 W_j (唐星林等, 2017)。在 BEPS 模型中具体体现为 V_{cmax} 和 J_{max} 2 个重要生理参数。受酶活性限制的光合速率 W_c 主要受到 V_{cmax} 影响, 受光照限制的光合速率 W_j 主要受到 J_{max} 制约, 分别计算这两种情况下的光合速率, 取其较小值作为实际的光合速率。

$$A = \min(W_c, W_j) - R_d \quad (7)$$

$$W_c = V_m \frac{C_i - \Gamma}{C_i + K} \quad (8)$$

$$W_j = J \frac{C_i - \Gamma}{4.5 C_i + 10.5 \Gamma} \quad (9)$$

$$V_m = V_{cmax} 2.4^{(T-25)/10} f(T) f(N) \quad (10)$$

$$f(N) = N / N_m \quad (11)$$

$$R_d = 0.015 V_m \quad (12)$$

$$J = J_{max} PPFD / (PPFD + 2.1 J_{max}) \quad (13)$$

式中: A 为净光合速率, R_d 为白天叶片的暗呼吸, C_i 为细胞间 CO_2 浓度, Γ 为 CO_2 补偿点, K 为酶动力学函数, V_m 是 Rubisco 饱和时的最大羧化速率, T 为温度, N 为叶片氮含量, $f(T)$ 和 $f(N)$ 分别为温度和氮含量校正函数, N_m 为最大氮含量, J 为电子传输速率, $PPFD$ 为光子通量密度。

为探究 NDHD-CI 和 SIF- V_{cmax} 2 种遥感产品时空变化相较于模型缺省值对植被生产力估算精度的影响, 选用不同参数组合模拟站点植被生产力, 组合方式见表 2。在模型程序对应模块进行参数修改, 得到不同参数下的模拟情况, 并以通量实测数据为参考进行模拟精度的对比验证。

2.3 参数敏感性分析

敏感性分析能够量化描述不同参数对输出结果的重要性程度 (蔡毅等, 2008), 据此可以在实际应用中调整参数, 重点考虑敏感性系数高的参数, 简化或去掉敏感性系数低的参数, 从而简化模型。根据敏感性分析的发展和作用范围, 主要分为局部敏感性分析和全局敏感性分析。由于 BEPS 模型涉及参数较多, 无法对所有参数进行全局优化, 为了从众多参数中快速确定敏感性较高的参数, 采用局部敏感性分析方法 OAT (one-at-a-time) 对模型典型参数进行分析, 确定后续参与全局敏感性分析的参数。

本文采用模型参数值上下浮动 10%、20% 和 30% 来进行模拟结果变化分析, 采用敏感性矩阵来

表 2 聚集指数和最大羧化速率参数组合^①

Tab. 2 Parameter combinations of clumping index (CI) and maximum carboxylation rate (V_{cmax})

参数组合 Parameter combinations	CI	$V_{cmax}/(\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$
组合 1 Combinations one	模型缺省值 BEPS model default	模型缺省值 BEPS model default
组合 2 Combination two	模型缺省值 BEPS model default	SIF- V_{cmax} 遥感产品 SIF- V_{cmax} remote sensing data
组合 3 Combination three	NDHD-CI 遥感产品 NDHD-CI remote sensing data	模型缺省值 BEPS model default
组合 4 Combination four	NDHD-CI 遥感产品 NDHD-CI remote sensing data	SIF- V_{cmax} 遥感产品 SIF- V_{cmax} remote sensing data

① CI 模型缺省值来自文献 (Chen *et al.*, 2012); V_{cmax} 模型缺省值来自文献 (Cui *et al.*, 2018)。The default values of the CI are from (Chen *et al.*, 2012); The default values of the V_{cmax} are from (Cui *et al.*, 2018)。

描述模型参数的敏感性 (Wang *et al.*, 2008; 李小文等, 1997)。

$$P_{\Delta GPP}^{\text{factor} \pm \Delta} = (GPP_{\text{factor} \pm \Delta} - GPP) / GPP \times 100\% \quad (14)$$

其中: $P_{\Delta GPP}^{\text{factor} \pm \Delta}$ 为参数 (factor) 变化 Δ 时 GPP 相对于参考值的变化量, 即该参数的敏感性, $GPP_{\text{factor} \pm \Delta}$ 为参数 (factor) 变化 Δ 时估算得到的 GPP 结果。

采用 EFAST (extended Fourier amplitude sensitivity test) 方法对模型进行全局敏感性分析。该方法是 Saltelli 等结合 Sobol' 方法的优点后对 FAST 方法的改进, 具有稳健、样本数低、计算效率高的优点。EFAST 方法通过分解参数变化产生的模型结果方差, 得到各参数及参数间耦合作用对总方差的贡献程度, 即敏感性指数 (Wang *et al.*, 2014)。

2.4 精度验证

本研究将使用不同源 CI 和 V_{cmax} 参数组合的模拟结果与通量站点观测结果进行比较来评价 NDHD-CI 和 SIF- V_{cmax} 对植被生产力估算精度的影响。为全面评估模拟结果和参考数据间的差异, 采用以下评价指标来对优化结果进行评价:

平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |GPP_i^* - GPP_i| \quad (15)$$

式中: GPP_i^* 为年尺度 GPP 模拟值, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; GPP_i 为通量站点观测结果, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; n 为对应年份的数量。

相对平均误差 (mean relative error, MRE)

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{GPP_i^* - GPP_i}{GPP_i} \right| \quad (16)$$

均方根误差 (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (GPP_i^* - GPP_i)^2} \quad (17)$$

3 结果与分析

3.1 参数敏感性分析

森林的碳汇能力较强, 为提高计算效率, 以长白山混交林站点为例, 针对模型中 87 个典型参数进行局部敏感性分析, 得到 10 个对模型模拟最敏感的参数, 结果如表 3 所示, 用于进一步探究参数对不同植被类型下植被生产力估算的全局敏感性, 以及定量分析 V_{cmax} 和 CI 的敏感性水平。

表 3 局部敏感性分析结果及含义

Tab. 3 Results of local sensitivity analysis and definitions

序号 No.	参数 Parameter	含义 Definition
1	V_{cmax} ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大羧化速率 (25 °C) Maximum carboxylation rate at 25 °C
2	CI	聚集指数 Clumping index
3	slope	羧化速率与叶片含氮量的关系斜率参数 The slope of the maximum carboxylation rate—the leaf nitrogen content curve
4	N ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	叶片氮含量 Leaf nitrogen content
5	LAI_max_o	冠层叶面积指数最大值 Maximum leaf area index for canopy
6	albedo_vis	冠层可见光反射率 Albedo of canopy in visible band
7	albedo_nir	冠层近红外反射率 Albedo of canopy in near infrared band
8	t_1	土壤水有效性因子参数 1 Parameter 1 that determines the sensitivity of root water uptake to soil temperature
9	t_2	土壤水有效性因子参数 2 Parameter 2 that determines the sensitivity of root water uptake to soil temperature
10	CO_2 ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	大气 CO_2 浓度 Atmospheric CO_2 concentration

不同通量站点 BEPS 参数 (表 3) 全局敏感性分析结果见图 2。从排序结果看, 全局敏感性排序一致性差异较小。slope 和 V_{cmax} 在所有站点对植被生产力的估算均十分敏感。slope 敏感性波动范围是 0.30~0.65, V_{cmax} 全局敏感性在 0.24~0.35 之间, 即该参数可以解释 GPP 和 NPP 估算变化方差的 24%~35%。影响植被生产力估算的关键敏感性参数还有 CI 和 CO_2 , 其中 CI 在多伦多 (Du2)、当雄 (Dan)、海北 2 (HaM)、长岭 (Cng)、长白山 (Cha)、和内蒙古 (NMG) 站点的敏感性高于 0.20, CO_2 在长岭 (Cng)、禹城 (YC)、千烟洲 (Qia)、多伦 (Du2)、西双版纳 (XSBN) 和长白山

(Cha) 站点的敏感性高于 0.20。受站点经纬度、海拔等的影响, 同种植被类型下, 不同站点间参数全局敏感性排序结果存在一定差别。 CO_2 在长岭 (Cng) 站点的敏感性最高, 但在海北 2 (HaM) 站点, 其敏感性低于 0.1。因此, 在站点参数优化时, 需要根据区域情况分别选取敏感度高的参数。总体而言, V_{cmax} 和 CI 对植被生产力模拟敏感性较高, 是模型在区域尺度应用时优先选择本土化的变量。

3.2 通量站点植被生产力估算结果

为进一步探究 CI 和 V_{cmax} 对植被生产力估算的影响, 分别使用模型参数缺省值和 SIF- V_{cmax} 及 NDHD-

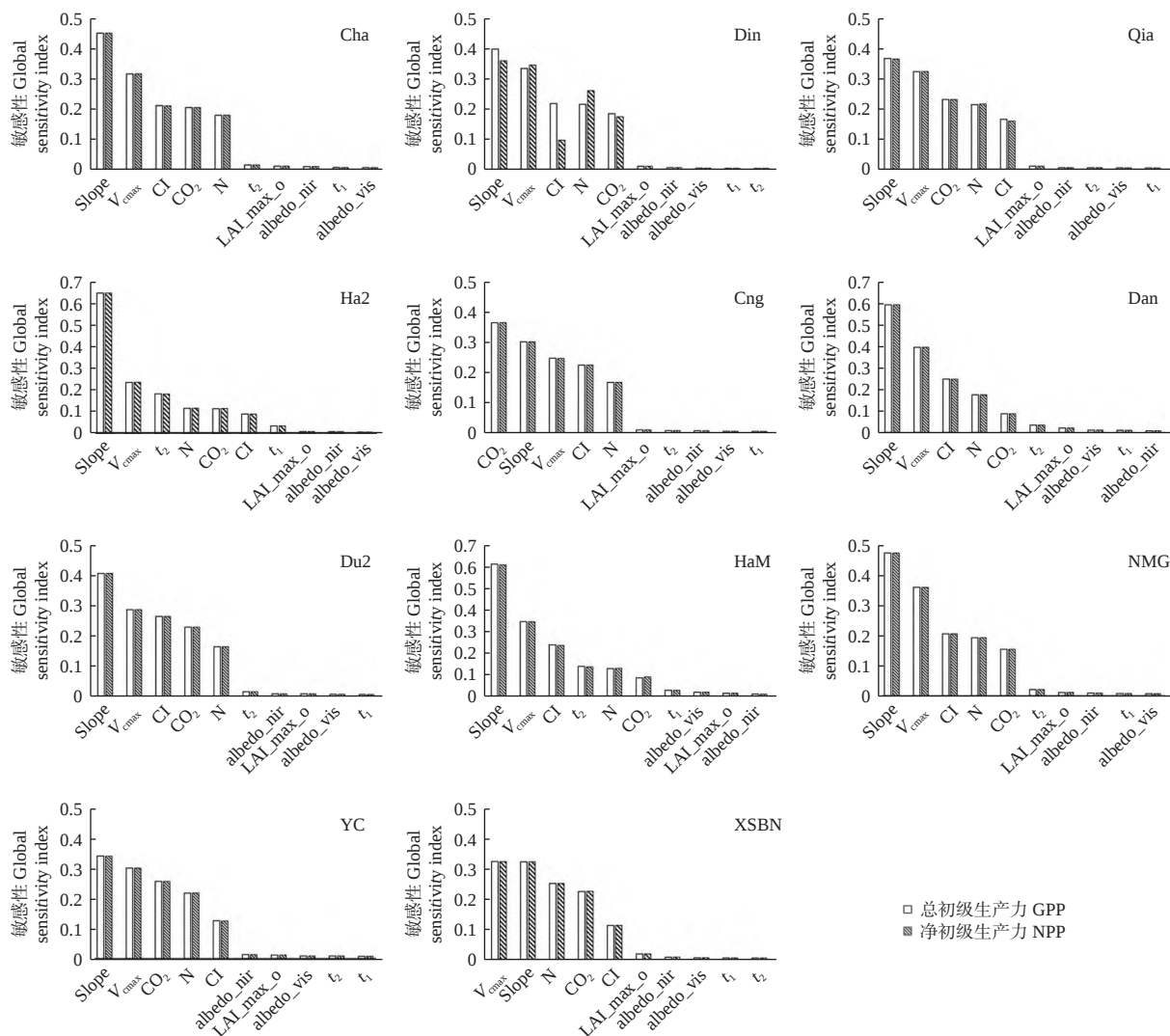


图2 不同站点植被生产力全局敏感性分析

Fig. 2 Global sensitivity analysis with different sites

Cha: 长白山 Changbaishan; Din: 鼎湖山 Dinghushan; Qia: 千烟洲 Qianyanzhou; Ha2: 海北 1 Haibei 1; Cng: 长岭 Changling; Dan: 当雄 Dangxiong; Du2: 多伦 Duolun; HaM: 海北 2 Haibei 2; NMG: 内蒙古 Neimenggu; YC: 禹城 Yucheng; XSBN: 西双版纳 Xishuangbanna; slope: 羧化速率与叶片含氮量的关系斜率参数 The slope of slope of maximum carboxylation rate—the leaf nitrogen content curve; V_{cmax} : 最大羧化速率 (25 °C) Maximum carboxylation rate at 25 °C; CI: 聚集指数 Clumping index; CO_2 : 大气 CO_2 浓度 Atmospheric CO_2 concentration; N: 叶片氮含量 Leaf nitrogen content; LAI_max_o: 冠层叶面积指数最大值 Maximum leaf area index for canopy; albedo_vis: 冠层可见光反照率 Albedo of canopy in visible band; albedo_nir: 冠层近红外反照率 Albedo of canopy in near infrared band; t_1 : 土壤水有效性因子参数 1 Parameter 1 that determines the sensitivity of root water uptake to soil temperature; t_2 : 土壤水有效性因子参数 2 Parameter 2 that determines the sensitivity of root water uptake to soil temperature.

CI 估算通量观测站点植被生产力, 与实测结果 (表 1) 进行比较, 通过平均误差 (MAE)、相对平均误差 (MRE) 和均方根误差 (RMSE) 来对比估算精度。结果如图 3 和表 4 所示。从模拟精度看, 使用 SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 2 种遥感产品的模拟精度最高, GPP 估算值的 MAE、MRE 和 RMSE 均低于其他模拟方式, 分别为 $454.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、0.70 和 $584.71 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。使用 SIF- V_{cmax} 的模拟精度次之, CI 和 V_{cmax} 均使用模型缺省值的模拟精度最低。SIF- V_{cmax} 对模拟精度提高作用优于 NDHD-CI, 2 种遥感产品同时使用时模拟精度最优。从拟合度来看, 使用 NDHD-CI 遥感产品 R^2 最高,

为 0.60, 但 4 种模拟情况拟合度相差不大。从模拟数值大小看, 4 种估算情况均存在低值部分高估的问题。

3.3 区域植被生产力估算结果

使用 SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 2 种遥感产品模拟 2012 年中国陆地生态系统 GPP 和 NPP, 空间分布如图 4 所示。GPP 总量为 $5.21 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$, NPP 总量为 $2.49 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$, NPP 与 GPP 比值为 0.48。有研究统计, 中国陆地生态系统 NPP 均值为 $(3.35 \pm 1.25) \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ (Shao *et al.*, 2016)。本研究估算的 NPP 在该均值误差范围内。

GPP 总体上呈现从西北到东南递增的趋势, 高值部分主要分布于植被覆盖度高的东部和南部, 低值

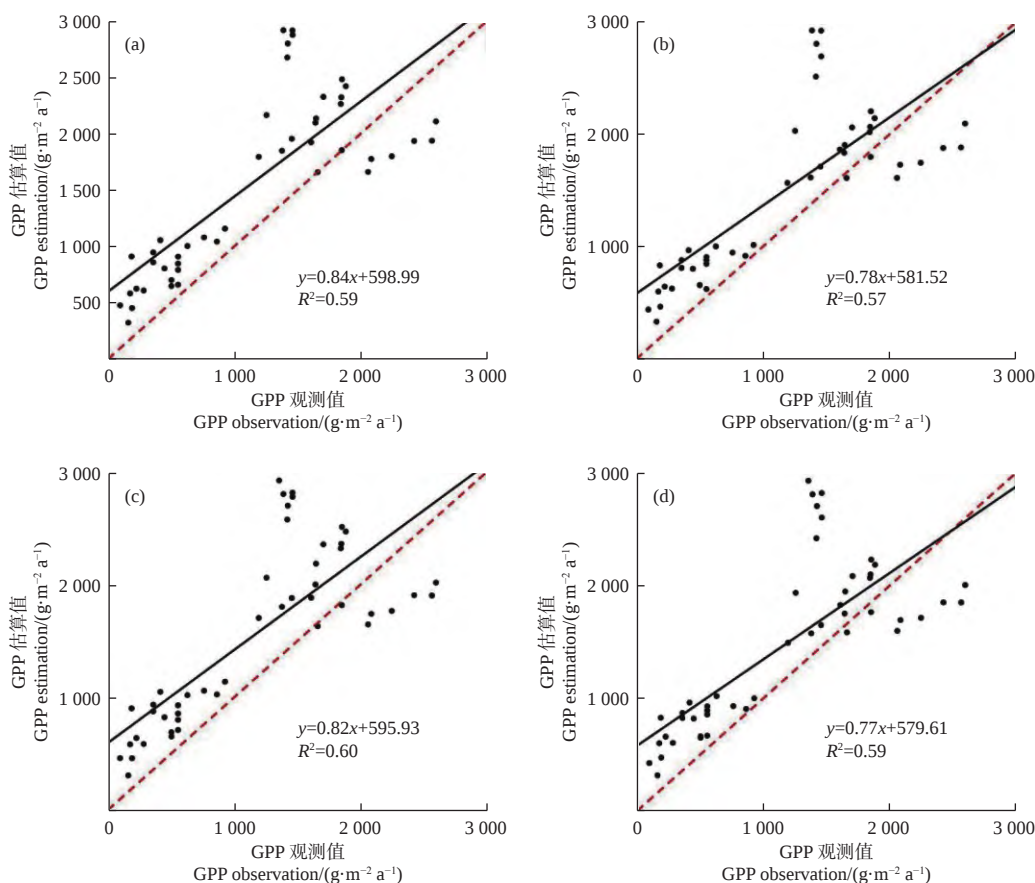


图3 中国通量站点 BEPS 模型 GPP 模拟结果

Fig. 3 GPP simulation results of BEPS model at flux sites

a: CI 和 V_{cmax} 均为缺省值; b: CI 为缺省值, V_{cmax} 为 SIF- V_{cmax} ; c: CI 为 NDHD-CI, V_{cmax} 为缺省值; d: V_{cmax} 为 SIF- V_{cmax} , CI 为 NDHD-CI. a: CI and V_{cmax} are both defaults; b: CI is the default, V_{cmax} is SIF- V_{cmax} ; c: CI is NDHD-CI, V_{cmax} is the default; d: V_{cmax} is SIF- V_{cmax} , CI is NDHD-CI.

表4 模拟结果误差对比

Tab. 4 Comparison of the accuracy of simulation results

	参数组合1 Parameter combination 1	参数组合2 Parameter combination 2	参数组合3 Parameter combination 3	参数组合4 Parameter combination 4
MAE/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	534.69	465.06	523.43	454.47
MRE	0.78	0.71	0.76	0.70
RMSE/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	665.60	612.57	636.95	584.71

部分主要集中在西北内陆, 与水热梯度变化一致。东北地区植被覆盖度较高, 受气温和辐射制约, GPP 多在 $500\sim 1\,000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 长白山地区 GPP 较高, 达到 $1\,500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上。西北内陆植被稀疏, 植被类型以草地和裸地为主, 气候干燥且容易受到低温胁迫, 生产力较低, 除天山地区可达 $1\,000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 外, 其他地区 GPP 均在 $500\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下。秦岭地区植被覆盖度较高, 其中森林植被占比很大, GPP 明显高于周围地区。南部地区地处温带半湿润、亚热带湿润季风气候区, 植被覆盖度高, 水热条件有利于植被生长, GPP 普遍在 $1\,000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上。海南岛和台湾岛 GPP

最高, 普遍达到 $2\,000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。NPP 为 GPP 减去植物自养呼吸, 空间变化趋势与 GPP 具有较高的一致性, 总体上同样呈现西北低、东南高的变化趋势。东北地区除长白山外, 其余地区 NPP 在 $600\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下。秦岭地区、云南南部、东南沿海、海南岛和台湾岛植被生长状况良好, NPP 达 $900\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以上。

森林 GPP 总量最高, 为 $2.73\text{ Pg}\cdot\text{a}^{-1}$, 占 GPP 总量的 52.43%。农田具有相对较高的 GPP, 为 $907.77\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 总量为 $1.32\text{ Pg}\cdot\text{a}^{-1}$, 占全国 GPP 总量 25.27%。草地面积广阔, 不同类型、生长环境差异较大, 全国草地单位面积 GPP 为 $380.84\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 总量为 $1.07\text{ Pg}\cdot\text{a}^{-1}$, 占全国 GPP 总量的 20.62%。不同植被类型 NPP 与 GPP 有类似规律, 整体上森林高于农田, 草地次之。

3.4 最大羧化速率和聚集指数对植被生产力估算影响

计算 SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 2 种遥感产品的年均值, 其空间分布结果如图 5 所示。其中 SIF- V_{cmax} (图 5a) 有明显空间差异, 呈现中部高、南部和东北次之的趋势, 这与水热分布状况有关。 V_{cmax} 受环境因素和植被生理因素的共同影响, 水分胁迫、高温胁迫

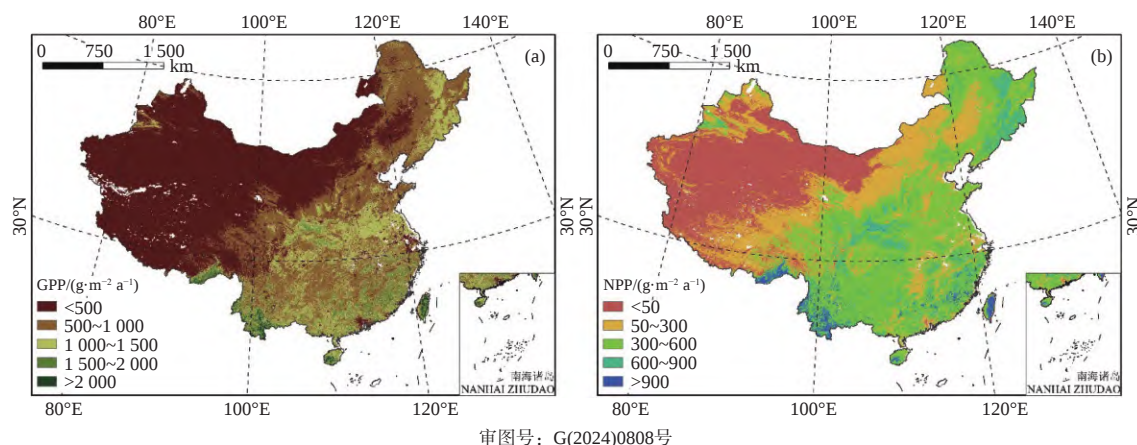


图 4 2012 年中国陆地生态系统 GPP(a)和 NPP(b)空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of GPP (a) and NPP (b) in 2012

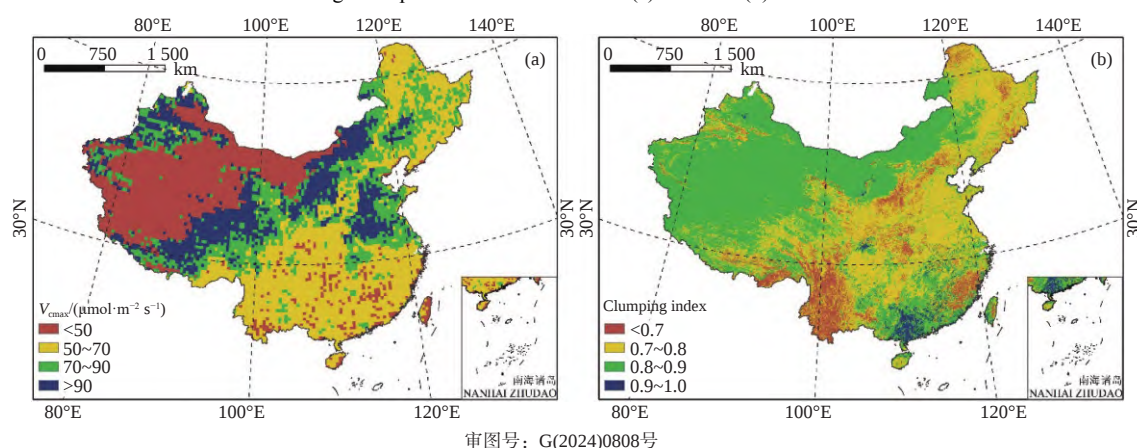


图 5 2012 年中国陆地生态系统 SIF- V_{cmax} 遥感产品(a)和 NDHD-CI 遥感产品(b)年均值空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of SIF- V_{cmax} remote sensing data (a) and NDHD-CI remote sensing data (b) in 2012
Clumping index 聚集指数

和强光胁迫都会导致叶片 V_{cmax} 降低(张彦敏等, 2012)。东北地区 SIF- V_{cmax} 数值在 50~90 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 华北平原地区 SIF- V_{cmax} 数值较高, 大部分高于 70 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 南部地区 SIF- V_{cmax} 集中在 50~70 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从植被类型看, 草地 SIF- V_{cmax} 数值最高, 为 86.20 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 农田次之, 为 75.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 森林为 58.45 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同种植被类型的 SIF- V_{cmax} 数值在不同生长环境下也存在差异, 草地 SIF- V_{cmax} 结果介于 29.94~120.81 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 农田和森林波动范围与草地相近。

就不同植被类型 CI 年均值(图 5b)而言, NDHD-CI 数值与缺省值变化特征相近, 均表现出草地>农田>森林的特征。草地和农田 NDHD-CI 年均值分别为 0.87 和 0.79。森林中, 其他森林(除针叶林和阔叶林以外的森林)年 CI 均值差异不大, NDHD-CI 与缺省值分别为 0.80 和 0.78, 主要分布在青藏高原以东秦岭-淮河以南地区。NDHD-CI 更能体现出针叶林针束构造的叶片聚集现象, 其 CI 年均值为 0.72, 低于阔叶林

的 0.76; 而缺省值中针叶林与阔叶林的 CI 年均值非常接近, 且均不到 0.7。空间分布上, 相较于缺省值, NDHD-CI 数据年均值整体偏低, 聚集效应更为明显。在东北三省、内蒙古中部、青藏高原和东南沿海地区, NDHD-CI 年均值高于缺省值, 其余大部分地区 CI 低于缺省值。所有植被类型均存在季节变化, 草地、农田和森林生长季 CI 均值低于年均值, 较年均值分别偏低 2.33%、2.34% 和 1.81%。一方面由于生长季叶片增密增厚, 聚集程度明显, 另一方面由于非生长季叶片覆盖率低, 算法反演噪声较大。

为了探究 SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 2 种遥感产品对不同植被类型 GPP 和 NPP 估算结果的影响, 进一步对 4 种情况下(表 2)的 GPP 和 NPP 进行模拟分析, 其中森林、草地和农田的生产力估算结果如表 5 所示。使用 SIF- V_{cmax} 估算 GPP 和 NPP 时, 农田估算结果与使用模型缺省值结果差异最大, 其中 NPP 影响更为明显, 较缺省值估算结果偏低 7.45%, GPP 影响稍弱, 偏低 3.98%。草地和森林受影响程度相近, NPP 较缺省

表 5 不同植被类型 GPP 和 NPP 估算结果对比

Tab. 5 Comparison of GPP and NPP estimates for different vegetation types

植被类型 Vegetation types	单位 Unit ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	参数组合 1 Parameter combination 1	参数组合 2 Parameter combination 2	参数组合 3 Parameter combination 3	参数组合 4 Parameter combination 4
常绿针叶林 Evergreen needle leaf forest	GPP	572.75	636.86	574.14	638.12
	NPP	338.51	386.59	339.55	387.54
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	GPP	812.57	807.22	825.34	819.64
	NPP	376.32	372.31	385.90	381.62
落叶针叶林 Deciduous needle leaf forest	GPP	628.90	691.50	627.06	688.89
	NPP	406.80	453.75	405.42	451.79
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	GPP	1 014.00	1 029.09	1 014.54	1 029.64
	NPP	572.65	583.96	573.05	584.38
混交林 Mixed forest	GPP	818.94	836.76	831.85	850.52
	NPP	444.31	457.68	454.00	468.00
草地 Grassland	GPP	395.87	384.19	391.99	380.84
	NPP	222.61	213.85	219.70	211.33
农田 Farmland	GPP	952.21	914.34	944.90	907.77
	NPP	386.33	357.54	380.77	352.54

值估算总量分别偏低 3.94% 和 3.13%，且二者 GPP 对 V_{cmax} 的空间差异敏感度略有下降，较缺省值分别偏低 2.95% 和 2.07%。 V_{cmax} 对植被生产力估算呈明显非线性关系，农田 $\text{SIF}-V_{\text{cmax}}$ 均值较缺省值偏低 15.19%，草地 $\text{SIF}-V_{\text{cmax}}$ 均值与缺省值较为接近，偏低 3.63%， $\text{SIF}-V_{\text{cmax}}$ 对二者 GPP 估算影响较缺省值估算结果均不到 4%。

NDHD-CI 对草地 GPP 估算影响最大，较缺省值估算结果低 0.98%，其次为农田，较缺省值偏低 0.77%，森林影响最小。不同森林种类间存在差异，常绿阔叶林和混交林受 CI 影响较大。常绿阔叶林主要分布在东南地区，其 NDHD-CI 均值较缺省值偏高 15.77%，GPP 均值为 $1\,759.32\text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，较缺省值估算结果高 1.42%。混交林跨度范围广，在东北、云南等全国多地均有分布，NDHD-CI 均值较缺省值高 17.62%，GPP 均值为 $1\,265.33\text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，估算结果较缺省值估算值高 1.51%。相较于常绿阔叶林，CI 对混交林的影响更大。NPP 对 CI 的时空变化更为敏感。NDHD-CI 估算的农田 NPP 总量较缺省值估算结果低 1.44%，其次为草地，估算结果偏低 1.31%，森林 NPP 估算差异与其 GPP 差异基本一致。

$\text{SIF}-V_{\text{cmax}}$ 和 NDHD-CI 2 种遥感产品对 NPP 的耦合影响高于 GPP。农田、草地、森林的 NPP 估算结果较使用缺省值分别偏低 8.74%、5.07% 和 3.00%，GPP 估算结果分别偏低 4.67%、3.80% 和 1.99%。空间分布上(图 6)，北部小兴安岭、长白山脉、阴山山脉、华北平原部分地区 GPP 和 NPP 估算结果相较于缺省值结果偏高，南部相对偏低。 $\text{SIF}-V_{\text{cmax}}$ 对植被生产力估算的影响要高于 NDHD-CI，这与之前的全局敏感性分析结果一致。

4 讨论

4.1 不同参数对植被生产力估算的影响

为量化参数对植被生产力模拟结果的敏感性程度，本文使用 EFAST 方法对 BEPS 模型进行全局敏感性分析。本研究表明，slope 是影响植被生产力最为敏感的参数之一，BEPS 模型中，slope 是连接叶片含氮量和光合速率的重要参数，根据现有理论和实验结果，大量的叶片氮会进入 Rubisco 中影响光合速率(Walker *et al.*, 2014)；作为高敏感性参数， V_{cmax} 不仅作用于受 Rubisco 活性限制的羧化速率，且驱动光合作用的酶动力学过程参数 J_{max} 和 V_{cmax} 间存在着较强的相关性，大多数模型将 J_{max} 描述为与 V_{cmax} 线性相关(Woodward *et al.*, 1995)。CI 敏感性较高是由于在双叶模型中，其决定了光照叶片和阴影叶片的光照分配比例，受光合有效辐射限制，阳叶光合速率高于阴叶。CI 越大，表明叶片分布更趋于随机分布，阳叶占比更高，总光合速率整体上越高(Chen *et al.*, 2012)。在不同站点中， V_{cmax} 敏感性程度均高于 CI，这与邹娴(2018)研究结果一致。各参数敏感性在不同站点的变化规律并不一致，其主要原因为：1) 不同站点的缺省值存在一定的差异，敏感性分析的取值范围由缺省值决定，而非线性参数间的耦合效应是确定敏感参数组合的关键(Gu *et al.*, 2016; 谭君位等, 2020; Sun *et al.*, 2023)；2) 模型中各参数的敏感性受气候区影响，经纬度、海拔等条件相差较大，模型通过参数来表达植被生产力对不同外界条件的响应存在差异(谭君位等, 2020; 兴安等, 2020; 何亮等, 2015)。此外，不同参数对 GPP 和 NPP 模拟的全局敏感性几乎相同，但鼎湖山站点存在一定的差异，这可能原因为鼎湖山地区的气候条件，4—9 月为雨季，大气湿度易饱和，

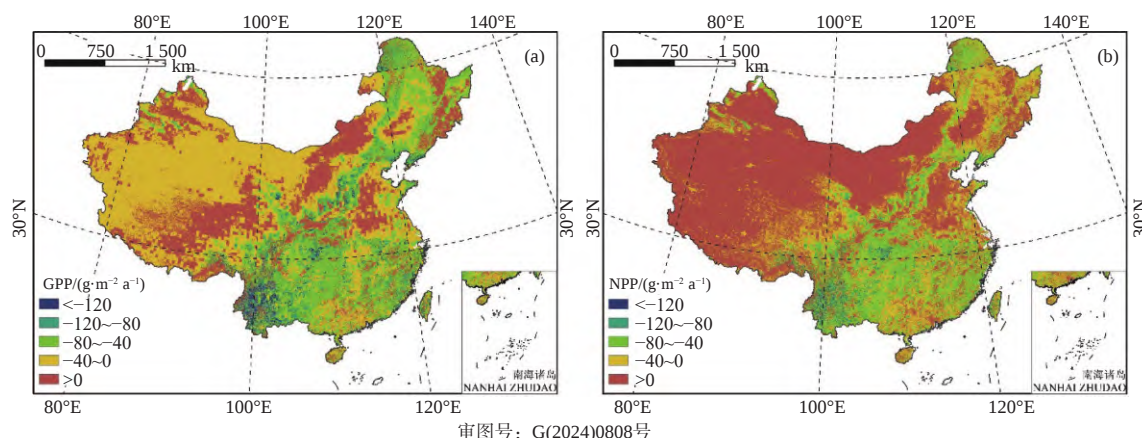


图 6 SIF- V_{cmax} 遥感产品和 NDHD-CI 遥感产品对 GPP 和 NPP 估算影响

Fig. 6 Influence of SIF- V_{cmax} remote sensing data and NDHD-CI remote sensing data on GPP and NPP estimation

a: 输入 SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 估算 GPP 与输入 BEPS 模型默认值估算 GPP 差值; b: 输入 SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 估算 NPP 与输入 BEPS 模型默认值估算 NPP 差值。a: Difference between GPP estimation with SIF- V_{cmax} and NDHD-CI and GPP estimation with BEPS model defaults; b: Difference between NPP estimation with SIF- V_{cmax} and NDHD-CI and NPP estimation with BEPS model defaults.

叶片表皮细胞吸水膨胀挤压保卫细胞,促使气孔关闭,导致不同参数对光合效率和呼吸作用的影响不一致(王三根, 2013)。

4.2 通量站点估算结果误差分析

在通量站点植被生产力模拟及对比中,鼎湖山站点(CN-Din)存在较为明显的高估[模拟结果 GPP 年均值: $(2\ 604.50 \pm 293.30) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 通量观测 GPP 年均值: $(1\ 394.02 \pm 67.01) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$]。不同树种、不同季节的 V_{cmax} 存在较大的不确定性是产生差异的主要原因。Zhang 等(2011)测量的亚热带本地树种 V_{cmax} 为 $62.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Wang 等(2020)测量亚热带常绿针叶林 V_{cmax} 季节变化范围 $35.7 \sim 84.95 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Lu 等(2022)测量的常绿针叶林 V_{cmax} 变化范围约 $40 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 还有研究的常绿林测量值范围是 $50 \sim 75 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Lin *et al.*, 2013)和 $20 \sim 40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Albert *et al.*, 2018)。基于以上对比可以发现亚热带常绿林的 V_{cmax} 测量值存在较大的波动范围。本研究鼎湖山站点所在像元 SIF- V_{cmax} 均值为 $52.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 在实测值范围内。但通量塔的覆盖范围约 500 m, 重点监测演替中期的针阔叶混交林群落, SIF- V_{cmax} 的空间分辨率为 36 km, 像元内包括演替初期的针叶林和演替后期的阔叶林, 该地区空间的异质性会导致点面之间的尺度不匹配(王静等, 2023)。受限于数据可获取性, 本研究只考虑了 V_{cmax} 的空间变化, 如参考 Wang 等(2020)观测值的季节变化规律, 鼎湖山 GPP 模拟结果将下降 8.32%, 这与 He 等(2019)研究结论一致, 使用季节不变的 V_{cmax} 会导致 GPP 的高估。误差与遥感反演和站点观测的差异同样有关。SIF- V_{cmax} 本身存在一定程度的高估, 这是由于该算法反演的 V_{cmax}

值代表的是冠层顶部, 高于冠层平均值(He *et al.*, 2019)。光饱和速率等其他参数未进行本地化, 使用缺省值同样会给模型估算带来误差(柳艺博, 2013)。此外, 通量塔观测数据的处理也会对精度评价带来影响。该站点 ChinaFLUX 数据 2003—2005 年均值为 $(1\ 377.72 \pm 109.19) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, FLUXNET 为 $(1\ 511.62 \pm 92.18) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 测量值的标准化处理偏差可以达到 9.72%。

5 结论

本研究基于 V_{cmax} 和 CI 遥感植被参数产品, 在站点尺度对 BEPS 模型精度进行了验证, 探究了上述参数的敏感性和对植被生产力模拟精度的影响。在此基础上, 估算了中国陆地生态系统植被生产力, 并分析了 V_{cmax} 和 CI 对植被生产力估算的影响, 得到以下结论:

1) V_{cmax} 和 CI 均为 BEPS 模型中对植被生产力估算变化较为敏感的参数, 与植被生产力呈正相关关系, 且不同植被类型下 V_{cmax} 敏感性均高于 CI。模型参数本地化过程中要考虑 2 种参数的时空变化。

2) 站点验证结果表明, SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 2 种遥感产品的输入能够将站点 GPP 模拟的均方根误差从 $665.60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 降至 $584.71 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均误差和相对平均误差均有所下降。SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 的时空变化特征能够提高植被生产力的模拟精度。

3) 2012 年中国陆地生态系统 GPP 和 NPP 总量分别为 5.21 和 $2.49 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$, 受 SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 综合影响, GPP 和 NPP 估算分别较模型缺省值偏低 3.06% 和 4.72%。使用 SIF- V_{cmax} 和 NDHD-CI 时, 农田、草地、

森林的 NPP 估算结果较使用缺省值分别偏低 8.74%、5.07% 和 3.00%, GPP 估算结果分别偏低 4.67%、3.80% 和 1.99%。

参 考 文 献

- 蔡 毅, 邢 岩, 胡 丹. 2008. 敏感性分析综述. 北京师范大学学报 (自然科学版), 44(1): 9–16.
- (Cai Y, Xing Y, Hu D. 2008. On sensitivity analysis. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 44(1): 9–16. [in Chinese])
- 何 亮, 赵 刚, 靳 宁, 等. 2015. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析. 农业工程学报, 31(14): 148–157.
- (He L, Zhao G, Jin N, *et al.* 2015. Global sensitivity analysis of APSIM-Wheat parameters in different climate zones and yield levels. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(14): 148–157. [in Chinese])
- 康振山, 张 莎, 白 雲, 等. 2021. 内蒙古草地净初级生产力时空变化及其对于干旱的响应. 草地学报, 29(1): 156–165.
- (Kang Z S, Zhang S, Bai Y, *et al.* 2021. Spatio-temporal changes of grassland net primary productivity (NPP) in Inner Mongolia and its response to drought. Acta Agrestia Sinica, 29(1): 156–165. [in Chinese])
- 李小文, 高 峰, 王锦地, 等. 1997. 遥感反演中参数的不确定性与敏感性矩阵. 遥感学报, 1(1): 5–14.
- (Li X W, Gao F, Wang J D, *et al.* 1997. Uncertainty and sensitivity matrix of parameters in inversion of physical BRDF model. Journal of Remote Sensing, 1(1): 5–14. [in Chinese])
- 柳艺博. 2013. 基于遥感和过程模型的中国陆地生态系统水分利用效率时空变化特征研究. 南京: 南京大学.
- (Liu Y B. 2013. The spatial and temporal variations of water use efficiency in China's terrestrial ecosystems simulated using remote sensing and a process-based model. Nanjing: Nanjing University. [in Chinese])
- 卢 伟, 范文义, 田 甜. 2016. 基于东北温带落叶阔叶林通量数据的 BEPS 模型参数优化. 应用生态学报, 27(5): 1353–1358.
- (Lu W, Fan W Y, Tian T. 2016. Parameter optimization of BEPS model based on the flux data of the temperate deciduous broad-leaved forest in Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 27(5): 1353–1358. [in Chinese])
- 谭君位, 崔远来, 汪文超. 2020. 中国不同水稻生长环境下 ORYZA(v3) 模型参数全局敏感性分析. 农业工程学报, 36(20): 153–163.
- (Tan J W, Cui Y L, Wang W C. 2020. Global sensitivity analysis for ORYZA(v3) model under different rice growing environments in China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 36(20): 153–163. [in Chinese])
- 唐星林, 曹永慧, 顾连宏, 等. 2017. 基于 FvCB 模型的叶片光合生理对环境因子的响应研究进展. 生态学报, 37(19): 6633–6645.
- (Tang X L, Cao Y H, Gu L H, *et al.* 2017. Advances in photo-physiological responses of leaves to environmental factors based on the FvCB model. Acta Ecologica Sinica, 37(19): 6633–6645. [in Chinese])
- 王 静, 车 涛, 戴礼云, 等. 2023. 被动微波遥感反演雪深与气象站观测雪深时空对比. 遥感学报, 27(9): 2060–2071.
- (Wang J, Che T, Dai L Y, *et al.* 2023. Spatio-temporal comparison of snow depth between passive microwave remote sensing inversion data and meteorological station observation data. National Remote Sensing Bulletin, 27(9): 2060–2071. [in Chinese])
- 王三根. 2013. 植物生理生化. 北京: 中国林业出版社.
- (Wang S G. 2013. Plant physiology and biochemistry. Beijing: China Forest Publishing House. [in Chinese])
- 兴 安, 卓志清, 赵云泽, 等. 2020. 基于 EFAST 的不同生产水平下 WOFOST 模型参数敏感性分析. 农业机械学报, 51(2): 161–171.
- (Xing A, Zhuo Z Q, Zhao Y Z, *et al.* 2020. Sensitivity analysis of WOFOST model crop parameters under different production levels based on EFAST method. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 51(2): 161–171. [in Chinese])
- 翟盘茂, 周琴芳. 1997. 中国大气水分气候变化研究. 应用气象学报, 8(3): 342–351.
- (Zhao P M, Zhou Q F. 1997. A study of climate changes of atmospheric water vapour in China. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 8(3): 342–351. [in Chinese])
- 张鑫磊, 刘连涛, 孙红春, 等. 2020. 不同施氮水平下棉花叶片最大羧化速率的高光谱估测. 农业工程学报, 36(11): 166–173.
- (Zhang X L, Liu L T, Sun C H, *et al.* 2020. Hyperspectral estimation of the maximum carboxylation rate of cotton leaves under different nitrogen levels. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 36(11): 166–173. [in Chinese])
- 张彦敏, 周广胜. 2012. 植物叶片最大羧化速率及其对环境因子响应的研究进展. 生态学报, 32(18): 5907–5917.
- (Zhang Y M, Zhou G S. 2012. Advances in leaf maximum carboxylation rate and its response to environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 32(18): 5907–5917. [in Chinese])
- 朱高龙. 2016. 2000–2013 年中国植被叶片聚集度系数时空变化特征. 科学通报, 61(14): 1595–1603.
- (Zhu G L. 2016. Spatial-temporal characteristics of foliage clumping index in China during 2000–2013. Chinese Science Bulletin, 61(14): 1595–1603. [in Chinese])
- 邹 娟. 2018. 基于遥感过程模型的农田 NPP 估算及参数敏感性研究. 南京: 南京信息工程大学.
- (Zou X. 2018. Simulation of NPP in farm lands and sensitivity analysis of parameters based on remote sensing and process-based model. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology. [in Chinese])
- Albert L P, Wu J, Prohaska N, *et al.* 2018. Age-dependent leaf physiology and consequences for crown-scale carbon uptake during the dry season in an Amazon evergreen forest. New Phytologist, 219(3): 870–884.
- Cao M K, Woodward F I. 1998. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. Global Change Biology, 4(2): 185–198.
- Chen B, Wang P Y, Wang S Q, *et al.* 2023. Simulating canopy carbonyl sulfide uptake of two forest stands through an improved ecosystem model and parameter optimization using an ensemble Kalman filter. Ecological Modelling, 475: 110212.
- Chen J M, Mo G, Pisek J, *et al.* 2012. Effects of foliage clumping on the estimation of global terrestrial gross primary productivity. Global Biogeochemical Cycles, 26: 18.
- Cui T X, Sun R. 2018. Spatially simulation of solar-induced chlorophyll fluorescence using an extended BEPS model. 7th Digital Earth Summit (DES-2018), 110–113.

- Dong Y D, Jiao Z T, Yin S Y, *et al.* 2018. Influence of snow on the magnitude and seasonal variation of the clumping index retrieved from MODIS BRDF products. *Remote Sensing*, 10(8): 15.
- Friedlingstein P, Cox P, Betts R, *et al.* 2006. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the (CMIP)-M-4 model intercomparison. *Journal of Climate*, 19(14): 3337–3353.
- Gu C Y, Du H Q, Mao F J, *et al.* 2016. Global sensitivity analysis of PROSAIL model parameters when simulating Moso bamboo forest canopy reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 37(22): 5270–5286.
- He L M, Chen J M, Liu J N, *et al.* 2019. Diverse photosynthetic capacity of global ecosystems mapped by satellite chlorophyll fluorescence measurements. *Remote Sensing of Environment*, 232: 10.
- Hunt E R, Piper S C, Nemani R, *et al.* 1996. Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO₂ concentrations predicted by an ecosystem process model and three-dimensional atmospheric transport model. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(3): 431–456.
- Jiao Z T, Dong Y D, Schaaf C B, *et al.* 2018. An algorithm for the retrieval of the clumping index (CI) from the MODIS BRDF product using an adjusted version of the kernel-driven BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, 209: 594–611.
- Lin Y S, Medlyn B E, De Kauwe M G, *et al.* 2013. Biochemical photosynthetic responses to temperature: how do interspecific differences compare with seasonal shifts? *Tree physiology*, 33(8): 793–806.
- Liu J, Chen J M, Cihlar J, *et al.* 1997. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 62(2): 158–175.
- Lu X, Croft H, Chen J M, *et al.* 2022. Estimating photosynthetic capacity from optimized Rubisco–chlorophyll relationships among vegetation types and under global change. *Environmental Research Letters*, 17(1): 014028.
- Luo Y Q, Wu L H, Andrews J A, *et al.* 2001. Elevated CO₂ differentiates ecosystem carbon processes: deconvolution analysis of Duke Forest FACE data. *Ecological Monographs*, 71(3): 357–376.
- Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 363(6426): 234–240.
- Parton W J, Stewart J W B, Cole C V. 1988. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils—a model. *Biogeochemistry*, 5(1): 109–131.
- Running S W, Coughlan J C. 1988. A general-model of forest ecosystem processes for regional applications. 1. Hydrologic balance, canopy gas-exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42(2): 125–154.
- Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, *et al.* 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. 1. Model formulation. *Journal of Climate*, 9(4): 676–705.
- Shao J, Zhou X H, Luo Y Q, *et al.* 2016. Uncertainty analysis of terrestrial net primary productivity and net biome productivity in China during 1901–2005. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 121(5): 1372–1393.
- Sun G D, Mu M. 2023. Applications of CNOP-P method to predictability studies of terrestrial ecosystems. *Atmosphere*, 14(4): 617.
- Walker A P, Beckerman A P, Gu L, *et al.* 2014. The relationship of leaf photosynthetic traits— V_{cmax} and J_{max} —to leaf nitrogen, leaf phosphorus, and specific leaf area: a meta-analysis and modeling study. *Ecology and Evolution*, 4(16): 3218–3235.
- Wang L J, Niu Z. 2014. Sensitivity analysis of vegetation parameters based on PROSAIL model. *Remote Sensing Technology and Application*, 29(2): 219–223.
- Wang P J, Xie D H, Zhang J H, *et al.* 2008. Sensitivity analysis for primary factors of the forest net primary productivity in Changbaishan Natural Reserve based on process model. *Geographical Research*, 27(2): 323–331.
- Wang S Q, Li Y, Ju W, *et al.* 2020. Estimation of leaf photosynthetic capacity from leaf chlorophyll content and leaf age in a subtropical evergreen coniferous plantation. *Journal of Geophysical Research:Biogeosciences*, 125(2): e2019JG005020.
- Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. 1995. A global land primary productivity and phytogeography mode. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(4): 471–490.
- Xiao Z Q, Liang S L, Jiang B. 2017. Evaluation of four long time-series global leaf area index products. *Agricultural and Forest Meteorology*, 246: 218–230.
- Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, *et al.* 2014. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1): 209–223.
- Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, *et al.* 2016. Long-time-series global land surface satellite leaf area index product derived from MODIS and AVHRR surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(9): 5301–5318.
- Zhang W W, Niu J F, Wang X K, *et al.* 2011. Effects of ozone exposure on growth and photosynthesis of the seedlings of *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg, a native tree species of subtropical China. *Photosynthetica*, 49: 29–36.

(责任编辑 万贤崇)