

DOI: 10.5846/stxb201410132015

徐博轩,陈报章,许光,陈婧,车明亮.基于不同叶面积指数产品估算植被总初级生产力的比较.生态学报,2016,36(12): - .

Xu B X, Chen B Z, Xu G, Chen J, Che M L. Comparison of Estimated Gross Primary Productivity Based on Different Global Leaf Area Index Products. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): - .

基于不同叶面积指数产品估算植被总初级生产力的比较

徐博轩^{1,2}, 陈报章^{1,2,*}, 许光^{2,3}, 陈婧², 车明亮^{2,3}

1 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116

2 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:长时间序列的陆地碳通量数据在全球生态环境变化研究中具有重要意义。采用 MODIS GPP (Gross Primary Productivity) 产品的算法, 基于 GIMMS LAI3g, MODIS15 和 Improved-MODIS15 三种叶面积指数 (leaf area index, LAI) 产品, 估算了全球 2000 至 2010 年的植被总初级生产力 (GPP)。该估算的 GPP 数值经过全球 20 个通量站点的验证, 并结合 MODIS17 分析了它们在时空变化上的异同。结果表明: (1) 4 种 GPP 精度如下: $GPP_{MOD17} > GPP_{impro_MOD15} > GPP_{LAI3g} > GPP_{MOD15}$ 。 (2) 4 种 GPP 整体上具有一致的季节波动, 冬季和夏季整体好于春季和秋季。GPP_{LAI3g} 的 4 个季节精度较相近, 而 GPP_{MOD17} 除了冬季外其它季节都较好。 (3) GPP_{LAI3g} 在中等 GPP 值分布区的估值相对较高, 其全球总 GPP 大体为 $(117 \pm 1.5) Pg C/a$, GPP_{MOD17} 和 GPP_{impro_MOD15} 相近且都低于该值。 (4) GPP_{LAI3g} 和 GPP_{impro_MOD15} 在大约 63.29% 的陆地上呈显著 ($P < 0.05$) 的正相关关系, 它们和 GPP_{MOD17} 在 LAI 不确定性小的地区呈显著的正相关关系。GPP_{LAI3g} 和 GPP_{MOD15} 正相关分布面积占比为 40.61%。

关键词:总初级生产力 (GPP); MODIS GPP 模型; GIMMS LAI3g; MODIS15; Improved-MODIS15

Comparison of Estimated Gross Primary Productivity Based on Different Global Leaf Area Index Products

XU Boxuan^{1,2}, CHEN Baozhang^{1,2,*}, XU Guang^{2,3}, CHEN Jing², CHE Mingliang^{2,3}

1 College of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

Abstract: Long-term, series gross primary production (GPP) data are important in carbon cycle research. The MOD17 algorithm, which is based on the radiation conversion efficiency concept of Monteith, has been used widely for estimating GPP. However, MODIS17 only provides the global GPP since 2000 due to the short time series of the MODIS leaf area index (LAI) product (MODIS15). LAI plays an important role in calculating the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by plants, and errors in LAI products will be propagated to GPP estimates. Three global LAI products are available: MODIS15, improved-MODIS15, and Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMAS) LAI3g. The improved-MODIS15 LAI product is more realistic and smoother than the MODIS15 because it uses quality control information and an integrated two-step method. The GIMMAS LAI3g is a new 30-year time series global LAI product

基金项目:中国科学院“气候变化:碳收支与相关问题”项目(XDA05040403);“中国国家高新技术研究与发展计划”项目(2013AA122002)

收稿日期:2014-10-13; **网络出版日期:**2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baozhang.chen@igsrr.ac.cn

(1981—2011). In this study, we compared the global GPP estimates during 2000—2010 by using the MODIS GPP algorithm based on the three global LAI products. The global GPP estimates based on GIMMS LAI3g, MODIS15, and improved-MODIS15 are referred to as GPP_{LAI3g} , GPP_{MOD15} , and GPP_{impro_MOD15} , respectively. We also compared remote sensing-based GPP estimates with eddy covariance (EC) flux tower-measured GPP. The representative EC flux towers were selected by considering major typical plant functional types. We also analyzed spatio-temporal patterns and their correlations with the three GPP estimates as well as the MODIS17 product. The results showed the following. (1) The overall accuracy of the four global GPP estimates may be ranked as $GPP_{MOD17} > GPP_{impro_MOD15} > GPP_{LAI3g} > GPP_{MOD15}$. (2) The four GPP estimates had high seasonal dynamic consistency. The estimated GPP values were closer to the flux tower-measured GPP in summer and winter than in spring and autumn. The accuracy of GPP_{LAI3g} was consistent for all seasons; GPP_{MOD17} was more accurate than GPP_{LAI3g} for all seasons except for winter. (3) GPP_{LAI3g} overestimated GPP for areas with moderate GPP values, i.e., the global total GPP value estimated by GPP_{LAI3g} was approximately (117 ± 1.5) Pg C/a, which was higher than GPP_{MOD17} and GPP_{impro_MOD15} . (4) The annual GPP values estimated by GPP_{LAI3g} were positively correlated with those by GPP_{impro_MOD15} , and approximately 63.29% of the global vegetated area had a significant correlation ($P < 0.05$). The GPP_{LAI3g} values were positively correlated with GPP_{MOD15} in regions with low LAI uncertainty. Approximately 40.61% of the global vegetated area was significantly correlated with GPP_{LAI3g} and GPP_{MOD15} . There were also several negatively correlated areas, which may have been related to uncertainties and errors in the LAI and meteorological data. Based on our comparison, we conclude that GIMMS LAI3g is an effective product for GPP simulation at the global scale, and thus, the 30-year long-term GPP series estimated using the GIMMS LAI3g and MODIS GPP algorithms are reasonably acceptable.

Key Words: GIMMS LAI3g; Gross Primary Productivity (GPP); Improved-MODIS15 LAI; MODIS15 LAI; MODIS GPP Algorithm

全球碳循环议题不仅是全球变化研究中的关键问题,而且可以为经济发展规划和气候政策制定提供科学支撑。植被总初级生产力(GPP)是指植物在单位时间内通过光合作用吸收太阳能产生有机物的总量^[1],是全球生态环境变化研究中的重要内容。大约一半的GPP被植物自养呼吸消耗,剩余的净吸收碳量被称为净初级生产力(NPP)^[2-3]。生产力与光合有效辐射间关系的理论^[4-5]建立起来的光能利用率模型是当前模拟生产力的主要方法之一。光能利用率模型中重要的输入数据包括气候数据和LAI,后者被作为与森林冠层能量和CO₂交换密切相关的植被结构参数。目前,许多研究也验证了生态系统生产力和植被指数之间存在着密切的关系^[6-8]。当前常用的MODIS(Moderate resolution Imaging Spectroradiometer)GPP产品^[9]只能提供自2000年至今的数据且存在一定的精度问题^[2,10-11],而GIMMS(Global Inventory Modeling and Mapping Studies)LAI3g^[12-15]能够提供过去30年的叶面积指数数据,研究 GPP_{LAI3g} 与其它LAI产品模拟的全球GPP在时空分布上的异同,有助于分析更长时间序列的全球生产力。

本文首先采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)的再分析资料,基于GIMMS LAI3g,MODIS15(MODIS LAI产品)以及Improved-MODIS15这3种LAI产品数据,驱动MODIS GPP模型进行全球GPP的估算,并使用通过特定的准则挑选的20个通量塔站点,在月尺度上对这3种GPP和MODIS17A2 GPP产品数据进行验证,分析了这4种GPP在时空分布上的异同,评价GIMMS LAI3g估算的GPP相比现有其他LAI估算的优劣性。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据

1.1.1 全球通量观测网络

全球通量观测网络FLUXNET(<http://fluxnet.ornl.gov/>)采用涡度相关技术,实时连续监测陆地生态系统

与大气间 CO_2 , 水和能量交换量^[16-17]。全球通量观测网络目前已经包括分布在欧洲 (CarboEurope), 美洲 (AmeriFlux 和 Fluxnet-Canada), 亚洲 (AsiaFlux 和 ChinaFLUX) 等地区的超过 500 个可供长期观测的通量站点。为了降低来自于观测值的潜在误差, 通过排除图像上提取到空值的站点以及遵循如下 3 个准则对获得的站点数据进行挑选^[18-19]: 能够提供 4 年或者更多年的连续数据, 能提供至少一年 90% 以上的半小时的各种气象和通量数据, 以及基本能够达到能量平衡。最终选取了代表 6 种植被功能类型和 2 种气候带的来自 20 个通量站点 95 个站点年的数据 (Table 1)。这些站点主要分布于北半球, 其中 13 个站点分布于温带地区, 7 个站点分布于北方森林区。

表 1 研究站点描述

Table 1 Descriptions of the study sites

序列 Number	站点 ID Site ID	纬度 (°N) Latitude	经度 (°E) Longitude	高程/m Elevation	生物类型 Biome Type	气候带 Climate Zone	站点年 Site-Years
1	CA-Ca1	49.867	-125.334	313	NEF	Temperate	2001-08 ^c
2	CA-Ca2	49.871	-125.291	170	NEF	Temperate	2007-10
3	CA-Ca3	49.535	-124.900	153	NEF	Temperate	2003-07
4	DE-Tha	50.964	13.567	380	NEF	Temperate	2001-05
5	US-Ho1	45.204	-68.740	72	NEF	Temperate	2003-04
6	CN-Qia	26.741	115.058	86	NEF	Temperate	2003-04, 2006-07
7	CA-Ojp	53.916	-104.692	518	NEF	Boreal	2007-10
8	CA-Obs	53.987	-105.118	598	NEF	Boreal	2001-05
9	CA-NS1	55.879	-98.484	253	NDF	Boreal	2002-06
10	FI-Hyy	61.847	24.295	185	NDF	Boreal	2005-08
11	FR-Pue	43.741	3.596	270	BEF	Temperate	2004-09
12	IT-Cpz	41.705	12.376	9	BEF	Temperate	2006-09
13	IT-Col	41.849	13.588	1645	BDF	Temperate	2004-07
14	US-MOz	38.744	-92.200	212	BDF	Temperate	2004-08
15	CA-Oas	53.629	-106.198	580	BDF	Boreal	2001-05
16	DK-Sor	55.487	11.646	40	BDF	Boreal	2003-05, 2008-09
17	CA-Mer	45.409	-75.519	65	BDS	Temperate	2004-07
18	US-Ivo	68.487	-155.748	557	BDS	Boreal	2002-06
19	AT-Neu	47.116	11.320	970	GRA	Temperate	2002-07
20	IE-Dri	51.987	-8.752	187	GRA	Temperate	2002-06

a 站点 ID 从 FLUXNET 获得。b 生物类型: 常绿针叶林 (NEF), 落叶针叶林 (NDF), 常绿阔叶林 (BEF), 落叶阔叶林 (BDF), 落叶阔叶灌木 (BDF), 以及草地 (GRA)。c 每个站点挑选出的年份。Note: a The site ID is taken from FLUXNET. b Biome types: needleleaf evergreen forest (NEF), needleleaf deciduous forest (NDF), broadleaf evergreen forest (BEF), broadleaf deciduous forest (BDF), broadleaf deciduous shrub (BDS), and grassland (GRA). c The selected years of each site. The number in parentheses is the representative year for analyzing

1.1.2 GPP 数据集

MODIS17 是美国蒙大拿大学使用 MODIS GPP 模型, 基于 MODIS15 以及 NASA 的资料同化部 (Data Assimilation Office, DAO) 再分析气候产品^[20] 计算得出。该数据从 <http://www.nts.gov> 免费获取, 提供 2000 年至 2013 年, 空间分辨率为 1 公里的全球 GPP/NPP 数据。土地覆盖使用 MODIS12Q1, 由于 MODIS17 算法的生物属性查找表 (Biome Properties Lookup Table, BPLUT) 使用 UMD (University of Maryland) 分类方案^[21], 这里提取 UMD 数据集。气候数据选取 ECMWF 气象数据, 包括 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的下表面太阳辐射, VPD (Vapor pressure deficit) 以及 2 米高气温^[22]。

GIMMS LAI3g 产品由 GIMMS NDVI3g 推导得出^[23]。GIMMS NDVI3g 数据是美国国家航空航天局基于 NOAA 卫星上的 AVHRR 传感器于 2013 年 11 月发布的最新全球植被指数变化数据, 能够提供 1981 年 7 月至 2011 年 12 月的数据。MODIS15A2^[24-25] 产品空间分辨率为 1 公里, 在每个像素点上都有一个质量控制

(Quality Control, QC)信息。为了消除云,季节性冰雪覆盖以及仪器和模型不确定性所导致的 LAI 数据在时空上的不连续不一致等问题, Yuan 等^[26]使用改进的瞬时空间滤波(modified Temporal Spatial Filter, mTSF)结合背景值以及 QC 信息对质量较低的值做简单的模拟,然后在此基础上使用 SG 滤波(Savitzky-Golay filter)得到 Improved-MODSI15 产品,改进后的数据相比 MODIS15 在时空上更连续一致。

1.2 GPP 遥感反演算法

本文使用的 MODIS GPP 模型^[10,22]根据 GPP 与植被吸收的光合有效辐射间的线性关系理论建立^[4-5,27-28],描述如下^[14]:

$$\text{GPP} = \varepsilon_{\max} \times f(T_{\text{amin}}) \times f(\text{VPD}) \times \text{APAR} \quad (1)$$

$$\text{APAR} = \text{SWRad} \times 0.45 \times (1 - e^{-k \times \text{LAI}}) \quad (2)$$

式中,GPP 为总初级生产力,单位为 $\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$; ε_{\max} 为最大光能利用率,单位为 kg C/MJ ; APAR 为植被吸收的光合有效辐射 $\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$,表示为 45%的入射短波辐射(SWRad)和植被冠层吸收的光合有效辐射比的乘积,该辐射比通过简单的 Beer 定律使用 LAI 求出,k 为冠层消光系数,一般取 0.5;(1)中的 $f(\text{VPD})$ 和 $f(T_{\text{amin}})$ 分别是蒸汽压差和 2m 高气温的订正因子,计算如下:

$$f(\text{VPD}) = \frac{\text{VPD}_{\max} - \text{VPD}}{\text{VPD}_{\max} - \text{VPD}_{\min}} \quad (3)$$

$$f(T_{\min}) = \frac{T_{\min} - T_{\min_{\min}}}{T_{\min_{\max}} - T_{\min_{\min}}} \quad (4)$$

式中, VPD_{\max} 和 $T_{\min_{\max}}$ 分别是在光合利用效率最大时的日最大蒸汽压差($^{\circ}\text{C}$)和日最高气温($^{\circ}\text{C}$), VPD_{\min} 和 $T_{\min_{\min}}$ 是当光合作用为 0 时的最小蒸汽压差(Pa)和最小气温($^{\circ}\text{C}$),这些参数使用的都是 BPLUT 表中的默认参数。

1.3 分析方法

在预处理阶段针对相应月份 11 年的数据,使用线性回归的方法插值出部分缺失的像元值,并将全部数据使用 3×3 像元窗口的均值插值法统一到 $0.0833^{\circ} \times 0.0833^{\circ}$ 的分辨率。数据和站点对比验证阶段再次使用到线性回归分析, R^2 能够表征方程的回归效果。Pearson 相关系数^[29]使用在相关性分析中对应像素点上的相关性分析,采用 0.05 的显著性水平检验。为综合评定相关性与偏差的分析效果,使用量值 Taylor skill^[19],计算公式如下:

$$\text{Bias} = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / n \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (P_i - O_i)^2 / \bar{O}} \quad (6)$$

$$S = 2 \times (1 + R) / (\sigma_{\text{norm}} + 1/\sigma_{\text{norm}})^2 \quad (7)$$

式中, P_i 和 O_i 表示模拟值和观测值, \bar{O} 表示观测值的平均值。R 表示线性相关系数, σ_{norm} 表示模拟值的标准差和观测值标准差的比。

2 结果与讨论

2.1 站点比对分析

使用线性回归分析比较了各个站点的 GPP 数据集同通量塔观测数据的一致性程度(图 1)。 $\text{GPP}_{\text{MOD17}}$ 、 $\text{GPP}_{\text{LAI3g}}$ 、 $\text{GPP}_{\text{impro_MOD15}}$ 以及 $\text{GPP}_{\text{MOD15}}$ 这四种 GPP 的斜率变化区间分别是: 0.414—1.588、0.35—1.26、0.373—1.322 以及 0.101—1.178,相应 R^2 的变化区间是: 0.39—0.91、0.43—0.83、0.53—0.82 以及 0.06—0.82。在落叶针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林和草地上 $\text{GPP}_{\text{MOD17}}$ 的斜率都大于 $\text{GPP}_{\text{LAI3g}}$ 和 $\text{GPP}_{\text{impro_MOD15}}$,其中针叶落叶林的 4 种 GPP 估算效果都很好, $\text{GPP}_{\text{MOD17}}$ 的斜率达到 0.978, R^2 达到 0.91, $\text{GPP}_{\text{LAI3g}}$ 的斜率达到 0.877, R^2 为 0.82。估

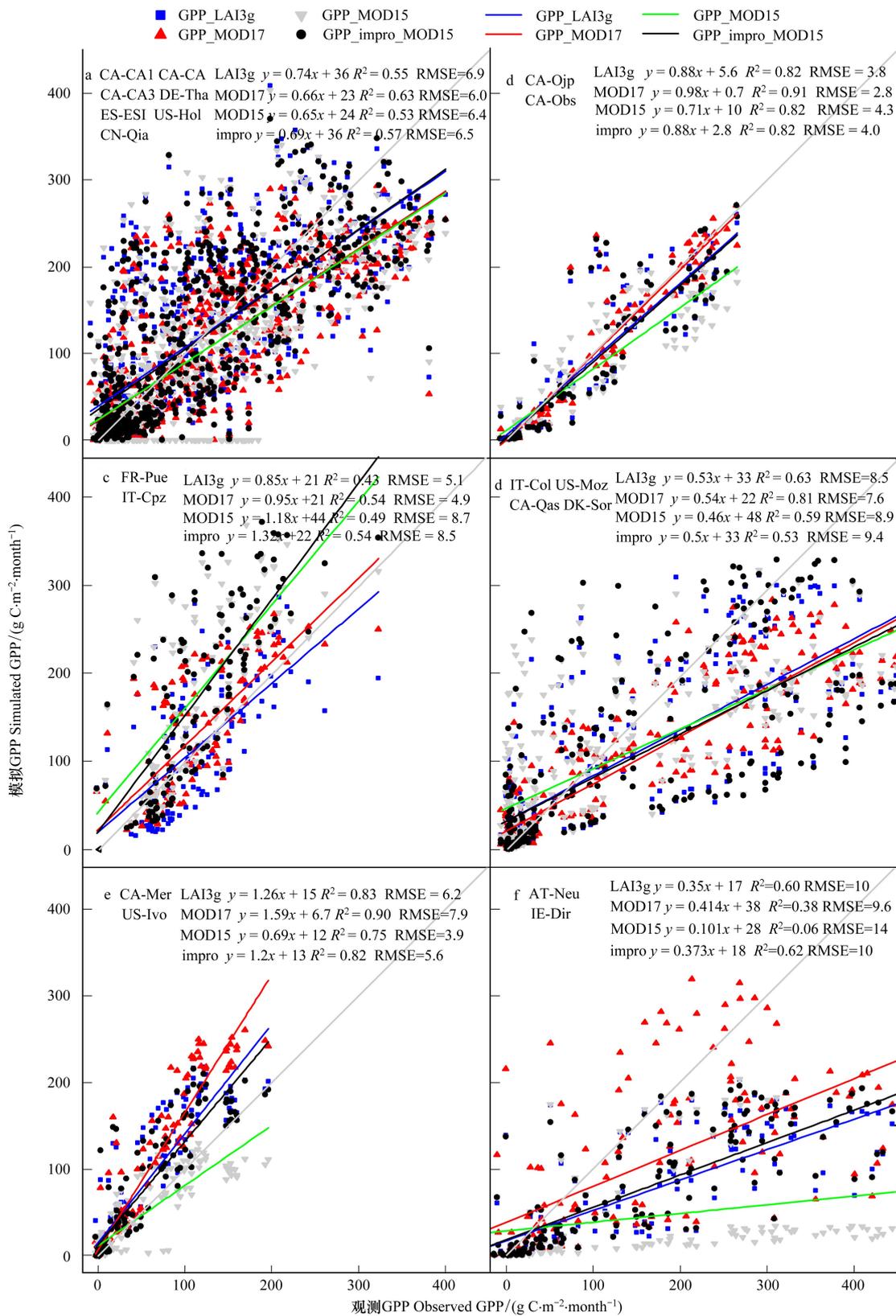


图 1 GPP_{LAI3g}, GPP_{MOD15}, GPP_{impro_MOD15}和 GPP_{MOD17}与通量观测值在不同植被类型的比较

Fig.1 Comparison of the observed and estimated GPP from GPP_{LAI3g}, GPP_{MOD15}, GPP_{impro_MOD15} and GPP_{MOD17} for different biome types

(a)常绿针叶林 needleleaf evergreen forest (NEF);(b)落叶针叶林 needleleaf deciduous forest (NDF);(c)常绿阔叶林 broadleaf evergreen forest (BEF);(d)落叶阔叶林 broadleaf deciduous forest (BDF);(e)落叶阔叶灌木 broadleaf deciduous shrub (BDS);(f)草地 grassland (GRA)

算效果最差的是草地,模拟较好的 GPP_{MOD17} 斜率也只有 0.414, R^2 只有 0.59, 而 GPP_{LAI3g} 斜率只有 0.35, R^2 是 0.59。Sjöström 等^[30] 比较 12 个站点数据,发现 10 个植被类型为热带草原和草原站点的 ϵ_{max} 高于 MOD17A2 中生物属性查找表的值,其中 6 个站点的 ϵ_{max} 相当于查找表中对应值的两倍,导致 MODIS17 在草地等低估生产力。此外,MODIS15A2 中的草地的错误分类也可能导致生物属性查找表中查找到错误的 ϵ_{max} ; 在常绿针叶林和落叶阔叶灌木丛上虽然 GPP_{LAI3g} 比 GPP_{MOD17} 回归效果稍好,但 R^2 却小于 GPP_{MOD17} , RMSE 大于 GPP_{MOD17} , Turner^[11] 研究发现 MODIS GPP 倾向于在低生产力的站点高估。这通常是因为 MODIS GPP 模型中输入的植被冠层吸收的光合有效辐射值较高,又由于 MODIS GPP 模型的模型自身存在光能利用率偏低的问题,进而低估高生产力的站点。所以落叶阔叶灌木丛的 GPP_{MOD17} 过分高估,斜率达到 1.588, R^2 也能达到 0.9, GPP_{LAI3g} 在种植被类型上也高估。在生产力较高的站点如常绿针叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林,几乎所有的估算值都比站点低估。 GPP_{LAI3g} 与 GPP_{impro_MOD15} 在某些植被类型上更好,整体较相近。总体上,这四种 GPP 中 GPP_{MOD17} 的回归效果最好,而 GPP_{LAI3g} 和 GPP_{impro_MOD15} 回归效果相当, GPP_{MOD15} 的最差。

2.2 GPP 时空变化分析

2.2.1 GPP 年际变化分析

因为原始的 LAI 数据存在部分像元值缺失以及分辨率统一过程中出现的一些问题,这里无法反应真实的 GPP 全球整体变化趋势。但是,通过统计 4 种 GPP 全球总值能够对比分析整体的估计效果。如表 2, GPP_{LAI3g} 大约 (117 ± 1.5) PgC/a, 比 MODIS17 的估计更大, GPP_{MOD15} 则大约 (98 ± 2) PgC/a, 比 GPP_{MOD17} 小。Zhao^[31] 分析了 MODIS GPP 模型对 3 种气候数据的响应特性,发现美国国家环境预报中心(NCEP)气象数据过度估计表面太阳辐射,并且低估气温和水汽压差,ECMWF 气象数据准确度最高但其表面太阳辐射在热带地区更低,DAO 气象数据准确度在这两种数据之间,与之相对应估算的 GPP 中, GPP_{NCEP} 最高, GPP_{ECMWF} 最低,而 GPP_{DAO} 则介于这两者之间。Improved-MODIS15 是在 MODIS15 基础上改进了 LAI 值并且补全了某些缺值,其估计的全球 GPP 值(大约 (107 ± 1.5) PgC/a)与 GPP_{MOD17} (大约 (107.5 ± 1.5) Pg C/a)相当。关于全球 GPP 总值的研究大多认为 GPP 大约为 120 Pg C/a^[32], 所以整体上 GPP_{LAI3g} 的年均全球 GPP 总值更接近该值。

表 2 2000 至 2010 年全球 GPP 总值
Table 2 Global GPP from 2000—2010

年份/Year	GPP_{LAI3g} (Pg C/a)	GPP_{MOD17} (Pg C/a)	GPP_{MOD15} (Pg C/a)	GPP_{impro_MOD15} (Pg C/a)
2000	118.481	109.098	100.244	108.422
2001	117.967	107.099	97.981	107.811
2002	116.644	106.216	97.625	106.123
2003	116.015	107.113	97.365	107.230
2004	116.986	108.262	98.044	107.731
2005	117.990	105.974	99.342	107.636
2006	116.514	107.482	97.343	107.084
2007	115.753	107.246	96.751	106.766
2008	115.464	107.011	96.561	104.870
2009	116.814	107.167	97.333	107.418
2010	118.740	107.366	97.681	107.056

2.2.2 GPP 季节变化分析

根据公式 7 可知, Taylor skill 为 1 时表明估计的 GPP 和站点最相近,但是因为各种不确定性使得只能尽可能的接近 1。将 4 种 GPP 按照 4 个季节做箱线图,并且按中值从大到小排列。如图 2, 4 种 GPP 对夏季 6—8 月份和冬季 12—2 月份模拟的效果最好,最差的是秋季 9—11 月份; GPP_{MOD17} 的 Taylor skill 除了秋季外其它季节相比其它数据都较大且集中,秋季的 GPP_{MOD17} 值最低,中值为 0.5。 GPP_{impro_MOD15} 和 GPP_{MOD15} 的 4 个季节上模拟的效果相差比较大, GPP_{impro_MOD15} 在冬季上最好,但是相比其它 3 种 GPP 四个季节分散更开; GPP_{LAI3g} 在

4 个季节上的均值在 0.63 ± 0.05 , 而且数据各季节模拟的相对比较集中, 不同的是 GPP_{LAI3g} 的秋季模拟效果比春季 3—5 月份好。MODIS GPP 模型能够较好的捕获生长季节时期的季节动态变动^[9,33], 而且 4 种 GPP 大体上具有相近的季节动态。在夏季, 上层灌木层活跃, MOD15 模型中有更少的不确定性, GPP 模拟效果最好; 冬季是一个低产时期, 此时的 GPP 模拟效果也较好; 春季开始万物复苏, 也是生长季节的开始, 由冬转春的生态系统变化迅速, 由此也会带来更多的不确定性, 尤其是气温以及叶面积指数的所带来的不确定性; 而秋季是由热转冷的过程, 叶落是所带来的影响应该被认为是较大的, 所以春季和秋季的估计效果相比来说是最差。Heinsch^[10]的结果也表明 GPP_{MOD17} 在夏季上与站点数据最接近, 而春季估计的效果最差。

2.2.3 GPP 年均值空间分布对比

取 2000 至 2010 年的均值分析 4 种 GPP 数据在全球尺度上的分布, 如图 3, 4 种大体上都有相同的空间分布, 年均 GPP 较高的都分布在亚马逊流域、非洲中部以及亚洲东南部地区, 这些地方的温度和湿度使得该地区的植物具有较高光合作用。较温暖的地区为中等的 GPP 值, 低值则主要分布于气温低并且干旱地区。北半球中高纬度地区的 GPP 普遍在 $400-1200 \text{gC} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 这是全球 GPP 分布比较均匀的地区, 且该地区数值占到全球 GPP 总量较大比重。不同点在于, GPP_{MOD15} 在北美北部, 俄罗斯北部以及西亚地区的估值更低; GPP_{MOD17} 与 GPP_{impro_MOD15} 的分布更相近, 而 GPP_{LAI3g} 在中等 GPP 值地区的估值相对较高, 尤其是北半球中高纬地区这也导致 4 种全球 GPP 中, GPP_{LAI3g} 的最高, GPP_{MOD17} 和 GPP_{impro_MOD15} 相近, GPP_{MOD15} 的最低。

使用光能利用率模型估计大尺度或者全球的生产力值时需要考虑模型的不确定性。这种不确定性主要来源于 2 方面: (1) 输入数据的不确定性, 包括观测误差, 预处理模型的误差以及数据缺失时插值所导致的误差; 气候数据不确定性带来的影响比植被类型分类误差的影响及其它的影响因素更大; (2) 模型的不确定性, 如最大光能利用率 (ϵ_{\max}) 在时空上是动态变化的, 本文使用的却是不同植被某一固定的值; 生物属性查找表中的一些参数值也待验证^[34]。结合前面的分析, MODIS GPP 模型能合理的模拟不同生物和气候类型的空间分布以及时间动态变化。

2.3 相关性分析

使用 Pearson 相关分析方法, 并且给出显著性为 0.05 的检验。4 种 GPP (2000—2010 年) 两两之间的相关系数如图 4 所示。最显著的相关性表现在 GPP_{LAI3g} 和 GPP_{impro_MOD15} 之间, 大约 63.29% 的陆地面积呈显著的相关关系; GPP_{LAI3g} 和 GPP_{MOD17} 有较差的相关关系, 大约只有 25.74% 的陆地面积显著相关, 相比之下 GPP_{impro_MOD15} 和 GPP_{MOD17} 显著相关的面积能达到 48.85%; GPP_{LAI3g} 和 GPP_{MOD15} 这一面积比为 40.61%。以上分析表明 GPP_{LAI3g} 与 GPP_{impro_MOD15} 是最相关的, 这可能是因为气候数据对 MODIS GPP 模型的影响最大所导致的。

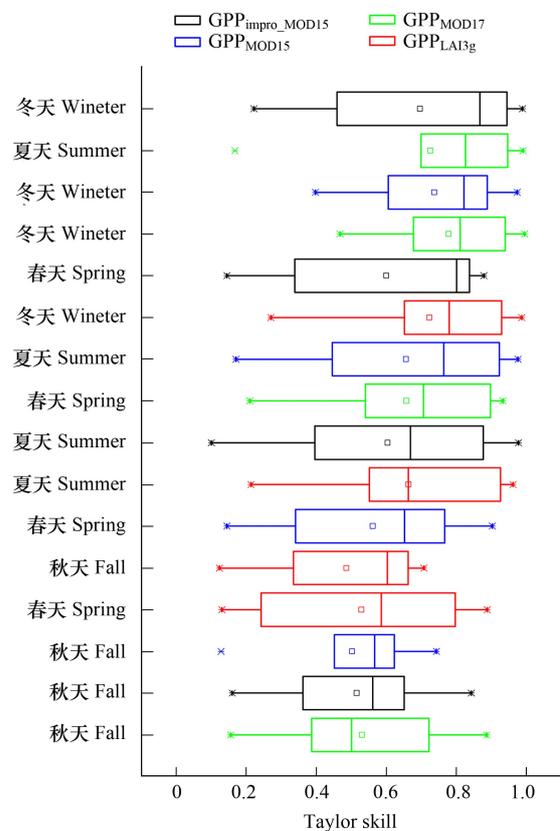


图 2 4 种 GPP 在常绿林上不同季节 Taylor skill (S) 的箱线图, 图中表示了四分位距 (箱), 均值 (正方形), 中值 (实线), 间距 (须线) 以及极端值 (交叉)

Fig.2 Boxplots of Taylor skill (S) for monthly GPP by models and seasons across evergreen forests, Panels show the interquartile range (box), mean (square), median (solid line), range (whiskers), and outliers (cross)

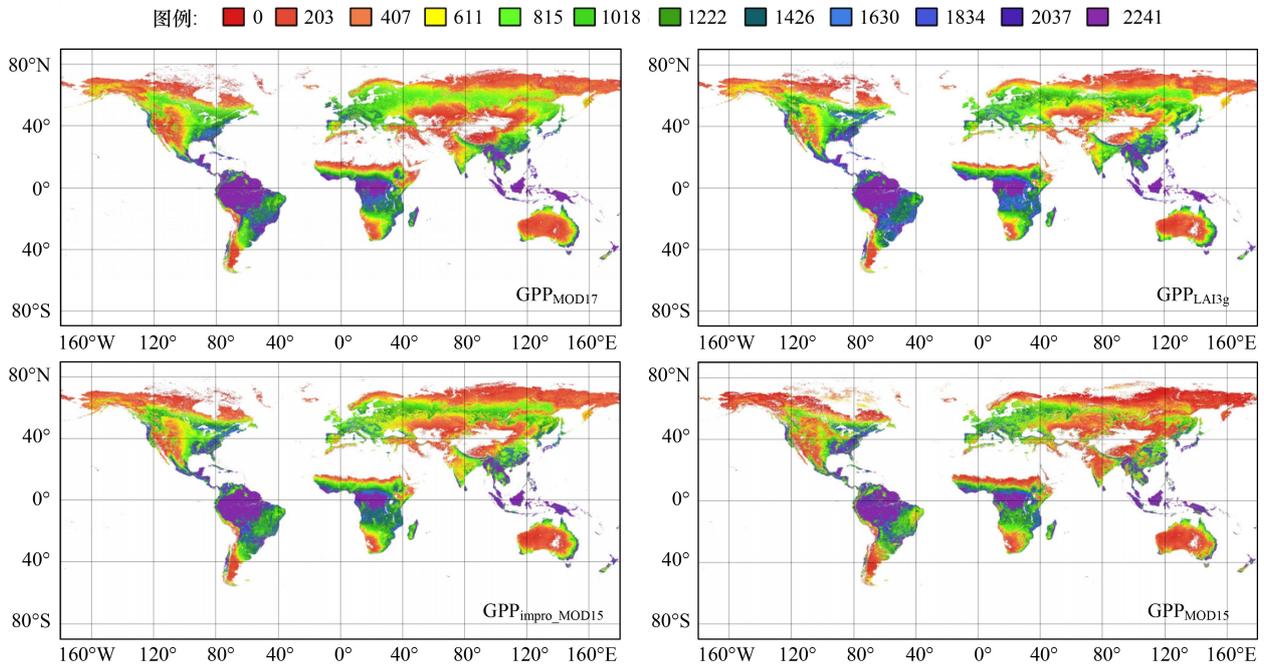


图3 分辨率为0.0833°的全球11年(2000—2010)平均GPP: (a) GPP_{MOD17} , (b) GPP_{LAI3g} , (c) GPP_{impro_MOD15} and (d) GPP_{MOD15}
 Fig.3 Eleven-year(2000—2010) mean global0.0833degree: (a) GPP_{MOD17} , (b) GPP_{LAI3g} , (c) GPP_{impro_MOD15} and (d) GPP_{MOD15}

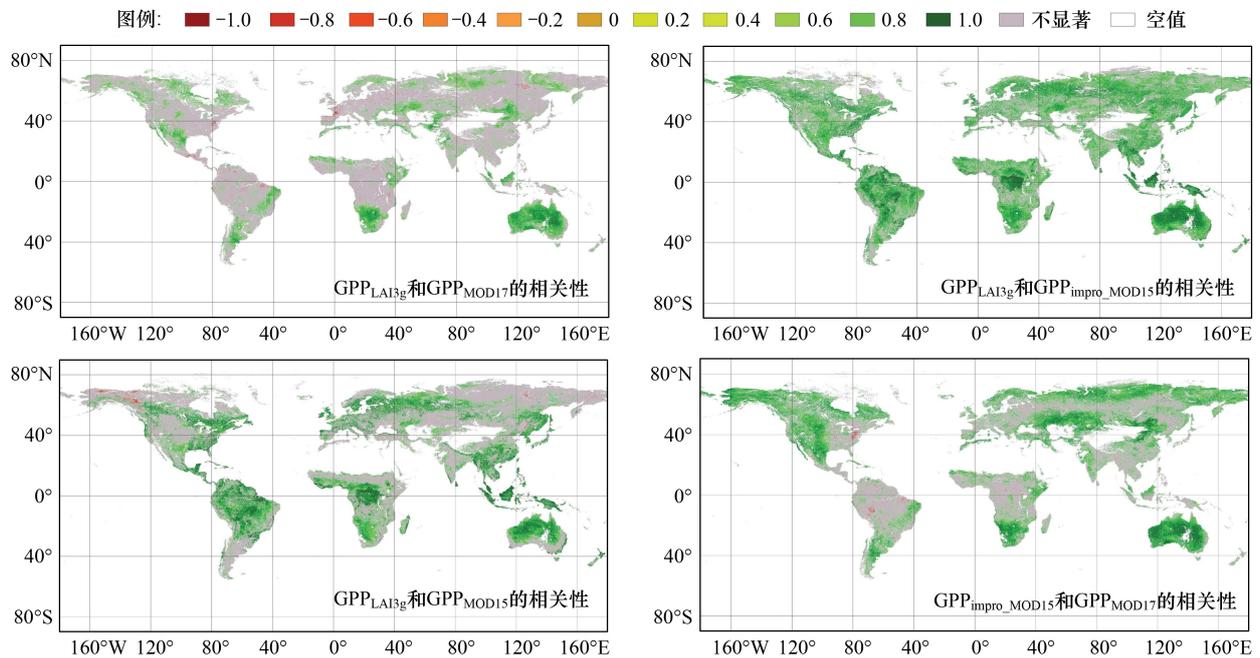


图4 4种GPP间的相关性分析

Fig.4 There are four pictures to show the correlation between the four GPP data

(a) GPP_{LAI3g} 和 GPP_{MOD17} 的相关性, (b) GPP_{LAI3g} 和 GPP_{impro_MOD15} 的相关性, (c) GPP_{LAI3g} 和 GPP_{MOD15} 的相关性以及 (d) GPP_{MOD17} 和 GPP_{impro_MOD15} 的相关性, 显著性水平为 ($P < 0.05$)。 (a) the correlation between GPP_{LAI3g} and GPP_{MOD17} , (b) the correlation between GPP_{LAI3g} and GPP_{impro_MOD15} , (c) the correlation between GPP_{LAI3g} and GPP_{MOD15} , and (d) the correlation between GPP_{impro_MOD15} and GPP_{MOD17} . we have the indicates significant level ($P < 0.05$)

图 4(a), 大约占比 97.95% 的 GPP_{LAI3g} 和 GPP_{MOD17} 之间显著相关面积中是正相关关系, 而只有大约 2.05% 的显著相关区域是负相关关系。正相关主要分布在稀疏灌木丛和热带稀树草原, 正相关分布与图 4(d) 相似, 因为在这些地方的 LAI 具有更低的不确定性^[35]。负相关主要分布于 LAI 不确定性较大的区域, Fang^[35] 等结果表明在北方森林和热带区域 MODIS LAI 具有较大的不确定性。气象数据的不同也可能导致显著的负相关。图 4(b) 显示 GPP_{LAI3g} 和 GPP_{impro_MOD15} 之间有显著的相关性, 尤其在植被覆盖度高的地区相关性更加明显, 比如亚马逊流域, 和非洲中部地区。在北半球中高纬度地区 ($50^{\circ}N - 70^{\circ}N$), 如拉斯维加斯和加拿大部分地区, 图(c) 出现较明显的负相关性, 这些地方 LAI 的不确定性是所有纬度中最大的^[35], 使用对 MODIS15 改进后模拟的 GPP_{impro_MOD15} , 如图(b), 能得到更好的正相关关系。

3 结论

(1) 站点数据验证显示, 4 种 GPP 的精度如下: $GPP_{MOD17} > GPP_{impro_MOD15} > GPP_{LAI3g} > GPP_{MOD15}$ 。GIMMS LAI3g 各站点的精度与 GPP_{impro_MOD15} 相近。4 种 GPP 在高产量的生物类型都能有较好的精度, 在草地上精度都最低, 为了提高这种植被类型的精度, 建议将 MODIS15 与其它可靠土地覆被数据进行融合分析且对 ϵ_{max} 参数进行优化。

(2) 四种 GPP 模拟的冬季和夏季整体好于春季和秋季, 而后两个季节都是由冷转热或者由热转冷这种不确定性因素较高的时期。总体上, GPP_{MOD17} 的 4 个季节除冬季外估算效果都较好, GPP_{LAI3g} 的 4 个季节精度较相近且较好。

(3) 4 种 GPP 年均值空间分布大体相近。不同点出现在: GPP_{MOD15} 在低生产力地区更低, 尤其在北美北部, 俄罗斯北部以及西亚地区的 GPP 值估值更低; GPP_{impro_MOD15} 与 GPP_{MOD17} 的总值都大约 (107 ± 1.5) Pg C/a, 空间分布也更接近, 而 GPP_{LAI3g} 在中高纬的估值相对较高, 总值大约 (117 ± 1.5) Pg C/a。

(4) 相关性分析表明 GPP_{LAI3g} 和 GPP_{impro_MOD15} 大约 63.29% 的陆地面积呈显著 ($P < 0.05$) 的正相关关系, 它们和 GPP_{MOD17} 在 LAI 不确定性小的地区呈显著的正相关关系。 GPP_{LAI3g} 和 GPP_{MOD15} 正相关分布面积占比为 40.61%。

综上所述, GIMMS LAI3g 能够较好地模拟全球 GPP, 并且在时空上与现有的 MODIS17 数据产品有较相近的水平。当然, 为了提高模拟的精度, 应该结合前面的分析对模拟的数据和参数加以改进和优化。

致谢: 感谢中国科学院“气候变化: 碳收支与相关问题”(XDA05040403) 项目与“中国国家高新技术研究与发展计划”(2013AA122002) 项目的资助; 感谢提供文中的通量观测数据的机构。感谢 ECMWF 提供再分析资料、美国 NASA 戈达德航天中心提供的 GIMMS 和 MODIS 数据、马里兰大学提供的 MODIS17 数据。感谢北京师范大学提供的 Improved-MODIS LAI 数据。

参考文献 (References):

- [1] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 陈安平. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.
- [2] Chapin F S III, Chapin M C, Matson P A, Vitousek P M. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer, 2011: 127-128.
- [3] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 王效科, 马泽清. 基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松 (*Pinus elliotii*) 人工林 GPP 和 NPP. 生态学报, 2008, 28(11): 5314-5321.
- [4] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747-766.
- [5] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 1977, 281(980): 277-294.
- [6] Tucker C J, Fung I Y, Keeling C D, Gammon R H. Relationship between atmospheric CO_2 variations and a satellite-derived vegetation index. Nature, 1986, 319(6050): 195-199.
- [7] Fung I Y, Tucker C J, Prentice K C. Application of advanced very high resolution radiometer vegetation index to study atmosphere-biosphere exchange of CO_2 . Journal of Geophysical Research, 1987, 92(D3): 2999-3015.

- [8] Box E O, Holben B N, Kalb V. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio*, 1989, 80(2): 71-89.
- [9] 赵晶晶, 刘良云, 徐自为, 焦全军, 彭代亮, 胡勇, 刘绍民. 华北平原冬小麦总初级生产力的遥感监测. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊1): 346-351.
- [10] Heinsch F A, Zhao M S, Running S W, Kimball J S, Nemani R R. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1908-1925.
- [11] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, Gower S T, Running S W, Zhao M S, Costa M H, Kirschbaum A A, Ham J M, Saleska S R, Ahl D E. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3/4): 282-292.
- [12] Bala G, Joshi J, Chaturvedi R K, Gangamani H V, Hashimoto H, Nemani R. Trends and variability of AVHRR-Derived NPP in India. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 810-829.
- [13] Ichii K, Kondo M, Okabe Y, Ueyama M, Kobayashi H, Lee S J, Saigusa N, Zhu Z C, Myneni R B. Recent changes in terrestrial gross primary productivity in Asia from 1982 to 2011. *Remote Sensing*, 2013, 5(11): 6043-6062.
- [14] Wang J, Dong J, Liu J, Huang M, Li G, Running S W, Smith W K, Harris W, Saigusa N, Kondo H, Liu Y F, Hirano T, Xiao X M. Comparison of gross primary productivity derived from GIMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in southeast Asia. *Remote Sensing*, 2014, 6(3): 2108-2133.
- [15] Zhu L K, Southworth J. Disentangling the Relationships between Net Primary Production and precipitation in southern Africa savannas using satellite observations from 1982 to 2010. *Remote Sensing*, 2013, 5(8): 3803-3825.
- [16] 王健, 孙林. 使用 FLUXNET 数据验证 GLASS 地表反照率. *山东建筑大学学报*, 2013, 28(1): 50-53.
- [17] 王绍强, 陈蝶聪, 周蕾, 何洪林, 石浩, 闫慧敏, 苏文. 中国陆地生态系统通量观测站点空间代表性. *生态学报*, 2013, 33(24): 7715-7728.
- [18] Wilson K B, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law B E, Kowalski, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223-243.
- [19] Chen J, Zhang H, Liu Z, Che M, Chen B. Evaluating parameter adjustment in the MODIS gross primary production algorithm based on eddy covariance tower measurements. *Remote Sensing*, 2014, 6(4): 3321-3348.
- [20] DAO. Data Assimilation Office (DAO) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Greenbelt, MD: Data Assimilation Office, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 2002.
- [21] Hansen M, DeFries R, Townshend J R G, Sohlberg R. UMD Global Land Cover Classification, 1 Kilometer, 1.0[D]. Maryland: Department of Geography, University of Maryland, College Park, 1998: 1981-1994.
- [22] Jung M, Vetter M, Herold M, Churkina G, Reichstein M, Zaehle S, Ciais P, Viovy N, Bondeau A, Chen Y M, Trusilova K, Feser F, Heimann M. Uncertainties of modeling gross primary productivity over Europe: A systematic study on the effects of using different drivers and terrestrial biosphere models. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(4): GB4021.
- [23] Zhu Z C, Bi J, Pan Y, Sangram Ganguly, Alessandro Anav, Xu L, Arindam Samanta, Piao S L, Nemani RR, Myneni RB. Global data sets of vegetation Leaf Area Index (LAI)3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR)3g Derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 927-948.
- [24] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 490-507.
- [25] Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R, Running S W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 214-231.
- [26] Yuan H, Dai Y J, Xiao Z Q, Ji D Y, Shangguan W. Reprocessing the MODIS leaf area index products for land surface and climate modelling. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(5): 1171-1187.
- [27] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, Zhao M S, Reeves M, Hashimoto H. A continuous satellite-derived measure of Global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, 54(6): 547-560.
- [28] Mekonnen Gebremichael, Ana P Barros. Evaluation of MODIS Gross Primary Productivity (GPP) in tropical monsoon regions. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 150-166.
- [29] Maselli F, Barbatì A, Chiesi M, Chirici G, Corona P. Use of remotely sensed and ancillary data for estimating forest gross primary productivity in Italy. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(4): 563-575.
- [30] Sjöström M, Zhao M, Archibald S, Arneth A, Cappelaere B, Falk U, de Grandcourt A, Hanan N, Kergoat L, Kutsch W, Merbold L, Mougin E,

- Nickless A, Nouvellon Y, Scholes R J, Veenendaal E M, Ardö J. Evaluation of MODIS gross primary productivity for Africa using eddy covariance data. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131(4): 275-286.
- [31] Zhao M S, Running S W, Nemani R R. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(G1): G01002.
- [32] Ciais P, Denning A S, Tans P P, Berry J A, Randall D A, Collatz GJ, Sellers P J, White J W C, Trolier M, Meijer H A J, Francev R J, Monfray P, Heimann M. A three-dimensional synthesis study of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric CO_2 : 1. Surface Fluxes. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D5): 5857-5872.
- [33] Nightingale J M, Coops N C, Waring R H, Hargrove W W. Comparison of MODIS gross primary production estimates for forests across the U.S.A. with those generated by a simple process model, 3-PCS. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(4): 500-509.
- [34] Zhao M S, Heinsch F A, Nemani R R, Running S W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 164-176.
- [35] Fang H L, Wei S S, Jiang C Y, Scipal K. Theoretical uncertainty analysis of global MODIS, CYCLOPES, and GLOBCARBON LAI products using a triple collocation method. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 610-621.