

中国陆地生态系统总初级生产力 VPM 遥感模型估算*

陈静清^{①②} 闫慧敏^① 王绍强^① 高艳妮^① 黄 玫^① 王军邦^① 肖向明^③

(^①中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ^②中国科学院大学, 北京 100049; ^③Department of Microbiology and Plant Biology, Center for Spatial Analysis, University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA)

摘要 陆地生态系统总初级生产力(Gross Primary Productivity, 简称 GPP)时空格局及其变化动态的准确监测是区域碳收支研究的核心问题之一, 遥感模型正在为区域碳通量监测提供更为实时、准确的模拟数据。基于中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, 简称 MODIS)遥感数据和涡度相关碳通量观测数据发展而来的 VPM 模型经过 10 年的努力, 目前已经在全球涵盖 10 类生态系统的 21 个站点上开展模型的校验与验证研究, 为区域 GPP 的准确估算与监测奠定了方法基础。本研究构建了评估 GPP 区域格局的 VPM 模型区域模式, 以空间分辨率 500m、时间步长 8 天的 MODIS 卫星影像数据以及相同时空分辨率的温度与光合有效辐射数据为模型输入数据, 模拟估算我国 2006~2008 年 GPP 及其空间分布格局。VPM 模型模拟的中国陆地生态系统 GPP 年总量平均值为 5.0Pg C/a, 其中森林、草地、农田和灌丛生态系统分别占 34%, 17%, 37% 和 12%。本研究模拟的全国 GPP 总量与多模型模拟的平均结果(5.40 Pg C/a)相当, 但不同模型估算的各类生态系统 GPP 存在较大差异。本研究通过利用遥感数据对 VPM 模型中的关键参数(最大光能利用率)进行参数空间化, 表达同一土地覆被类型内部光能利用率的空間异质性; 应用目前我国准确性最为可靠的土地利用与植被数据提取土地覆被数据, 并首次将农业多熟种植作为单独的植被类型引入模型中, 模型参数与输入数据的精度保障了模型模拟结果的可靠性。

主题词 VPM 模型 总初级生产力 最大光能利用率 MODIS

中图分类号 Q148, TP79 **文献标识码** A

1 引言

陆地生态系统总初级生产力(Gross Primary Productivity, 简称 GPP)是指在单位面积、单位时间内绿色植被通过光合作用所固定的有机碳量。它是碳素进入生态系统物质循环的开始, 也是表征生物圈与大气圈碳交换通量的主要指标^[1]。同时, GPP 作为食物、纤维和木材生产的基础, 关乎人类的福祉与发展^[2]。因此, 对区域尺度陆地生态系统 GPP 的时空变化进行准确、连续的监测, 能够为陆地碳收支评估和气候变化研究提供基础数据, 并为生态系统管理提供有用信息^[3]。目前, 利用模型估算区域生态系统生产力已成为一种重要而广泛接受的研究方法^[4], 传统的估算模型主要包括地理统计模型、生态过程模型和卫星遥感模型等。但是, 由于各类模型的模拟精度会受到诸如参数化方案、模拟时空分辨率以及输入数据质量等因素的影响^[5], 使

得各种模型模拟的结果会存在较大的差异。涡度相关法是在生态系统尺度连续监测碳通量最为可靠的方法, 并且已经在许多国家和地区开展联网观测^[6,7], 这为碳循环模拟的机理研究、模型构建、验证与评价提供了可靠数据。遥感模型具有模型参数少、驱动变量可由遥感数据直接或反演获得的优势, 适用于区域和全球尺度高时空分辨率的连续动态分析, 是近年来陆地生态系统生产力模型研究的一个重要发展方向^[8], 其中具有代表性的模型有: CASA 模型^[9]、GLO-PEM 模型^[10]、PSN 模型^[11]、VPM 模型^[12~14]等。然而, 准确的模拟需要应用通量观测数据在生态系统尺度上对各类生态系统进行充分的验证, 越来越多的研究证明目前对 GPP 的模拟尚存在较大的不确定性^[1], 如 MODIS GPP 产品(MOD17)由于没有将多熟种植以及 C₄ 植物作为一种单独的植被类型导致该类生态区模拟结果有较大程度的低估, 在青藏高原区也存在一定程度的低

第一作者简介: 陈静清 女 26 岁 硕士研究生 自然资源学专业 E-mail: chenjq.11s@igsrr.ac.cn

* 中国科学院战略性先导科技专项项目(批准号: XDA05050602)和中国科学院重点部署项目(批准号: KSZD-EW-Z-021-02)共同资助
2014-02-23 收稿, 2014-04-23 收修稿稿

通讯作者: 闫慧敏 土地利用变化与生态系统生产力研究 E-mail: yanhm@igsrr.ac.cn

估^[15], 在荒漠草原和干旱针叶林则存在明显的高估^[16]。陆地生态系统复杂的空间变异性是区域和全球碳收支计量中的主要挑战, 如何将生态系统尺度观测的碳通量数据与星载测量获取的空间信息有效融合从而实现碳收支时空分布的准确模拟是近年来碳循环研究科学家正在努力突破的课题^[4, 12, 17]。

VPM (Vegetation Photosynthesis Model) 是一个基于卫星遥感数据和通量观测数据发展起来的光能利用率模型。自 2004 年模型建立以来, 目前已经在 21 个站点涵盖 10 类生态系统上开展模型的校验与验证研究, 其中包括我国海北高寒灌丛和高寒湿地^[18]、内蒙古温带半干旱草原^[19]、长白山针阔混交林^[20, 21]、禹城通量站冬小麦-夏玉米轮作农田^[22]、通榆农田 (玉米) 站^[23] 等典型生态系统类型, 且表现出良好的模拟能力。因此, 在目前生态系统尺度发展而来的模型结构与参数集基础上, 进一步发展 VPM 模型的区域模式将会为认识陆地生态系统碳循环的时空动态形成机制以及推进我国陆地生态系统碳收支的准确估算提供新的模型方法与数据参考。本研究基于 VPM 模型的站点模式, 研究模型参数的空间化和多熟种植农田的模拟方法, 开发 VPM 模型的区域模式, 应用空间分辨率 500m 时间步长 8 天的 MODIS 数据模拟中国陆地生态系统 GPP。建立在中国区域得到较为充分验证的 GPP 模型, 并改善光能利用率模型对 C₄ 作物以及多熟农业区的明显低估问题, 为实现准确、可靠、空间表述清晰的陆地生态系统生产力遥感监测提供新的方法, 为建立我国陆地生态系统碳收支计量系统奠定基础。

2 模型结构与发展

2.1 VPM 模型原理

VPM 模型基于叶片和冠层可分为叶绿素部分 (Chlorophyll) 和非光合部分 (NPV) 这一概念, 将植被冠层吸收光合有效辐射的比例分为叶绿素吸收部分 (FPAR_{chl}) 和非光合植被吸收部分 (FPAR_{NPV}), 只有前者用于光合作用^[12, 13]。因此, VPM 模型可简单表示为:

$$GPP = \varepsilon_g \times FPAR_{chl} \times PAR \quad (1)$$

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \times T_{scalar} \times W_{scalar} \times P_{scalar} \quad (2)$$

公式 (1) 和 (2) 中, PAR (Photosynthetically Active Radiation, 简称 PAR) 是光合有效辐射 ($\mu\text{mol Photon}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), FPAR_{chl} 表示被植被光合部分吸收的

光合有效辐射比例, ε_g 表示光能利用率 ($\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$), ε_0 表示表观量子效率或最大光能利用率 ($\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$), T_{scalar} , W_{scalar} 和 P_{scalar} 分别表示温度、水分和叶物候期对最大光能利用率的调节系数。

在 VPM 模型中, FPAR_{chl} 被近似用增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, 简称 EVI) 的线性函数来表达:

$$FPAR_{chl} = a \times EVI \quad (3)$$

公式 (3) 中, a 为经验系数, 在目前的版本中取值为 1^[12, 13]。

T_{scalar} 表征温度对光合作用的影响, 采用陆地生态系统模型 (Terrestrial Ecosystem Model, 简称 TEM) 的算法^[24]:

$$T_{scalar} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{(T - T_{min})(T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2} \quad (4)$$

公式 (4) 中, T_{min} , T_{max} 和 T_{opt} 分别是植被进行光合作用时的最低、最高和最适温度。当空气温度小于最低光合温度时, T_{scalar} 设为 0。

W_{scalar} 表征水分对光合作用的影响, 在 VPM 模型中, 使用对水分敏感的陆地表面水分指数 (Land Surface Water Index, 简称 LSWI) 进行计算。植被水分因子的计算公式为:

$$W_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}} \quad (5)$$

公式 (5) 中, $LSWI_{max}$ 为单个像元内植被生长季最大的 LSWI。

P_{scalar} 表征叶龄对冠层尺度上光合作用的影响。 P_{scalar} 的计算方法取决于叶片寿命的长短, 对于叶片寿命为 1 年即经历出芽、舒展、枯萎和凋落过程的植被 (落叶林、玉米), 分为两个阶段计算, 在叶片出现到充分舒展阶段计算公式为:

$$P_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{2} \quad (6)$$

叶片舒展后, $P_{scalar} = 1.0$ 。

将树叶保持几个生长季, 冠层由不同叶龄的叶片组成的植被 (常绿针叶林等) 及在整个生长季中不断有新叶长出的植被 (苔原、草地、小麦等) 的 P_{scalar} 设为 1.0。

2.2 模型在各类生态系统的发展与验证

VPM 模型是基于通量数据和 MODIS 数据建立和发展起来的。自 2004 年第一次在美国缅因州 Howland 常绿针叶林通量站点验证了模型的结构与

理论后,陆续在美国、中国、非洲等不同区域的森林、草地、农田等典型生态系统上开展了模型的发展与验证研究工作(表 1)。目前 VPM 模型能够模拟常绿针叶林、落叶阔叶林、热带常绿森林、混交林、温带草原、多熟制农田、高寒草甸、高寒湿地、高寒灌丛、热带稀树草原等生态系统 GPP 的季节动态和年际变化,并形成了一套适宜于区域模拟的模型参数。

Table 1 Comparisons of the predicted GPP by VPM model and observed GPP at flux sites									
站点名称	生态系统类型	纬度	经度	模拟年份	实测值/g C·m ⁻² a ⁻¹		模拟值/g C·m ⁻² a ⁻¹		文献来源
					GPP [*] _{obs} (1~12)	GPP [*] _{obs} (生长季)	GPP _{pred} (1~12)	GPP _{pred} (生长季)	
Howland Forest (main tower)	常绿针叶林	45.20°N	68.74°W	1998	1418	1285		1171	[13]
				1999	1430	1262		1227	
				2000	1514	1384		1102	
				2001	1506	1379		1253	
Harvard Forest	落叶阔叶林	42.54°N	72.18°W	1998	1191	1164		1298	[12]
				1999	1391	1369		1486	
				2000	1424	1392		1169	
				2001	1580	1561		1416	
Xilinhot grassland	温带半干旱草原	43.55°N	116.68°E	2003~2005	604		642		[19]
Changbaishan	混交林	42.40°N	128.10°E	2003	1173		1193		[21]
				2004	1167		1183		
				2005	1017		1056		
Changbaishan	混交林	42.40°N	128.10°E	2003	1433		1312		[20]
				2004	1312		1189		
				2005	1490		1477		
Yucheng	农田 (冬小麦夏玉米)	36.95°N	116.60°E	2003	1409		1625		[22]
				小麦生长季		602		637	
				玉米生长季		789		928	
				2004	2132		1746		
				小麦生长季		729		561	
BT (alpine meadow site)	高寒草甸	37.61°N	101.31°E	2004	789(4月12月)	733	696	679	[18]
				SD (alpine swamp site)	高寒湿地	37.61°N	101.33°E	2004	
GCT (alpine shrub site)	高寒灌丛	37.67°N	101.33°E	2004	529	497	486	473	
Maun	稀树草原	19.92°S	23.56°E	1999~2000**	465		468		[25]
				2000~2001	710		753		
Mongu	稀树草原	15.44°S	23.25°E	2007~2008	1789		1759		[17]
				2008~2009	1487		1422		
A'Rou station	高寒草甸	38.03°N	100.45°E	2008~2009	853		872		[23]
Yingke station	农田(玉米)	38.85°N	100.42°E	2008~2009	1567		1264		
Tongyu cropland	农田(玉米)	44.57°N	122.92°E	2004	392		310		[23]
				2005	504		464		
				2006	437		360		
Tongyu grassland	退化草地	44.59°N	122.52°E	2004	292		252		[23]
				2005	331		298		
				2006	291		258		

* GPP_{obs}和 GPP_{pred}的下角标“(1~12)”代表从1月到12月的GPP观测值;**表示MODIS数据开始于2000年2月26日,站点数据也从此日开始

3 中国陆地生态系统 GPP 模拟

3.1 模型输入数据

3.1.1 MODIS 植被指数数据

模型运行所需的植被指数 EVI 和 LSWI 是由 MODIS 陆地产品第 5 版数据集中的地表反射率产品 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>, 空间分辨率 500m, 时间分辨率 8 天)计算得到的,计算公式为^[26,27]:

$$EVI = \frac{G \times (\rho_{nir} - \rho_{red})}{(\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L)} \quad (7)$$

$$LSWI = \frac{(\rho_{nir} - \rho_{swir})}{(\rho_{nir} + \rho_{swir})} \quad (8)$$

其中， $G = 2.5$ ， $C_1 = 6$ ， $C_2 = 7.5$ ， $L = 1$ ； ρ_{nir} ， ρ_{red} ， ρ_{blue} 和 ρ_{swir} 分别表示近红外波段、红波段、蓝波段和短波红外波段的地表反射率。

3.1.2 温度和 PAR 数据

温度数据是利用国家气象局气象观测站记录的 2006~2008 年逐日均气温 (该数据来自于中国气象科学数据共享服务网 2006~2008 年地面气候资料日值数据集)，采用 ANUSPLINE 气象插值软件，基于空间分辨率为 90m 的 DEM 栅格数据插值而成的时间分辨率为 8 天、空间分辨率为 500m 的平均气温栅格数据集。

利用 MODIS 1B 数据结合 MODIS 地表反射率产品和双向反射模型 (BRDF model) 参数产品，通过检索辐射传输模型计算出的查找表来反演得到 PAR 数据^[28]，结果以 HDF 格式存储为 DailyDiffusePAR，DailyDirectPAR 和 DailyRadiationPAR 文件，空间分辨率 1km，时间分辨率 16 天。模型所用 8 天合成的 PAR 由散射辐射中的光合有效辐射 (DailyDiffusePAR) 与直射辐射中的光合有效辐射 (DailyDirectPARDaily) 加和并乘以 8 得到。

3.1.3 土地覆被数据

土地覆被数据是以基于 30m 空间分辨率的 TM 影像开发的中国 1km 土地利用数据^[29]为基础，融合 1:1000000 中国植被图^[30]，1:1000000 中国草地资源图^[31]以及农田多熟种植分布图^[32]得到的 (图 1)。

3.2 模型植被水分与物候因子遥感提取

计算植被水分因子时需要用到生长季最大 LSWI ($LSWI_{max}$)，同时 $LSWI_{max}$ 出现的时间被用来表征叶片充分舒展的时间，用于物候因子计算公式的确定。对于多熟农田生态系统，首先要提取各季作物的生长起止时间，据此提取各季作物的 $LSWI_{max}$ 及 $LSWI_{max}$ 出现的时间。农业多熟种植及作物历提取方法在文献^[33~35]中有详细论述。在提取多熟种植和作物生长季信息过程中记录的各生长季 EVI 最大值 (EVI_{max}) 及其出现的时间还被用于计算 ϵ_0 。

3.3 模型参数

3.3.1 生态系统水平最大光能利用率 ϵ_0

各种生态系统类型 ϵ_0 值由涡度通量塔站点观测到的净生态系统交换 (Net Ecosystem Exchange, 简称 NEE) 和 PAR 数据计算获得^[36]。为了估计不同植被类型在生态系统水平上的 ϵ_0 值，通常由植被生长最旺盛时期 (7~8 月) 内 10 天的数据用米式

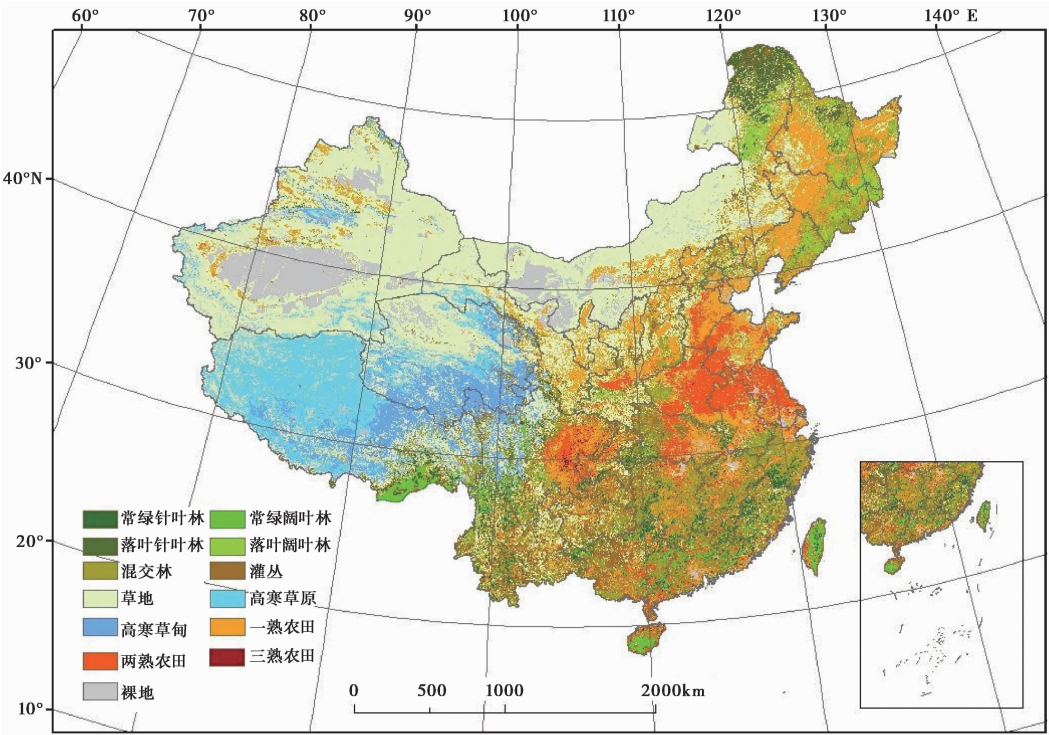


图 1 中国土地覆被图
Fig. 1 The landcover map of China

表 2 不同站点利用米氏方程拟合的 ε_0 ($\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$) 及站点所在栅格的 EVI_{max}

Table 2 ε_0 ($\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$) calculated from Michaelis-Menten function of different sites and EVI_{max} values of the grids where these sites located

站点	植被类型	纬度	经度	拟合时间	ε_0^*	文献来源	EVI_{max}
DYK (Dayekou)	常绿针叶林	38.53°N	110.25°E	2008	0.0475	[3]	0.59
CW (Changwu)	落叶阔叶林	35.25°N	107.68°E	2008	0.0326	[3]	0.53
MY (Miyun)	落叶阔叶林	40.63°N	117.32°E	2008	0.0543	[3]	0.59
CBS (Changbaishan)	混交林	42.40°N	128.10°E	2004	0.0520	[20]	0.64
CBS (Changbaishan)	混交林	42.40°N	128.10°E	2003	0.0660	[20]	0.72
CBS (Changbaishan)	混交林	42.40°N	128.10°E	2005	0.0690	[20]	0.6
CBS (Changbaishan)	混交林	42.40°N	128.10°E	2003	0.0450	[21]	0.72
GCT (alpine shrub site)	高寒灌丛	37.67°N	101.33°E	2004.7~8 月	0.0015	[18]	0.45
SD (alpine swamp site)	高寒湿地	37.61°N	101.33°E	2004.7~8 月	0.0014	[18]	0.54
BT (alpine meadow site)	高寒草甸	37.61°N	101.31°E	2004.7~8 月	0.0016	[18]	0.52
NMG (Neimenggu)	温带半干旱草原	43.55°N	116.68°E	2003.5~9 月	0.0167	[19]	0.29
NMG (Neimenggu)	温带半干旱草原	43.55°N	116.68°E	2004.5~9 月	0.0248	[19]	0.33
NMG (Neimenggu)	温带半干旱草原	43.55°N	116.68°E	2005.5~9 月	0.0054	[19]	0.3
YZ (Yuzhong)	典型草原	35.95°N	104.13°E	2008	0.0249	[3]	0.23
DW (East Ujimuqin)	典型草原	45.56°N	117.00°E	2006.5~9 月	0.0299	[37]	0.34
DW (East Ujimuqin)	典型草原	45.56°N	117.00°E	2007.5~9 月	0.0226	[37]	0.34
DS (Dongsu)	荒漠草原	44.08°N	113.57°E	2008	0.0141	[3]	0.32
NM (Naiman)	荒漠草原	42.93°N	120.70°E	2008	0.0182	[3]	0.51
ZY (Zhangye)	草原荒漠	39.08°N	100.27°E	2008	0.0133	[3]	0.42
TYG (Tongyu Grass)	退化的草甸草原	44.57°N	122.92°E	2008	0.0392	[3]	0.49
TY (Tongyu)	退化的草甸草原	44.59°N	122.52°E	2005.7~9 月	0.0308	[23]	0.45
AR (A'rou)	亚高山草甸草原	38.05°N	100.47°E	2008	0.0392	[3]	0.63
DX (Damxung)	高寒草甸	30.42°N	91.08°E	2003.7~10 月	0.0244	[38]	0.33
DX (Damxung)	高寒草甸	30.85°N	91.08°E	2003	0.0270	[39]	0.21
DX (Damxung)	高寒草甸	30.85°N	91.08°E	2004	0.0280	[39]	0.15
DX (Damxung)	高寒草甸	30.85°N	91.08°E	2005	0.0240	[39]	0.17
DX (Damxung)	农田 (小麦)	35.55°N	104.60°E	2008	0.0217	[3]	0.29
JZ (Jinzhou)	农田 (玉米)	41.15°N	121.20°E	2008	0.0650	[3]	0.67
YK (Yingke)	农田 (玉米)	38.85°N	100.25°E	2008	0.0443	[3]	0.26
TYC (Tongyu Crop)	农田 (向日葵)	44.58°N	122.87°E	2008	0.0326	[3]	0.49
YC (Yucheng)	小麦	36.95°N	116.6°E	2004	0.0760	[22]	0.47
YC (Yucheng)	玉米	36.95°N	116.6°E	2004	0.0920	[22]	0.81
TY (Tongyu)	玉米	44.57°N	122.92°E	2005.7~9 月	0.0467	[23]	0.47

* 最大光能利用率 ε_0 ($\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol PAR}$) 均采用米氏方程拟合得到

方程 (Michaelis-Menten function) 计算求得:

$$\text{NEE} = \frac{\alpha \times \text{PPFD} \times \text{GEE}_{\text{max}}}{\alpha \times \text{PPFD} + \text{GEE}_{\text{max}}} - \text{RE} \quad (9)$$

公式(9)中, α 是最大光能利用率或显在量子产量(随着 PPFD 接近于 0), PPFD 是光合量子通量密度, GEE_{max} 是最大的生态系统总交换量, RE 是生态系统呼吸。其中的 α 值是 VPM 模型中需要的 ε_0 值。

有研究证明, ε_0 与 EVI_{max} 存在较强的正相关关系^[3]。本研究从已发表文献中收集了多个站点利用 Michaelis-Menten 方程拟合的最大光能利用率(表 2), 并与各站点所在栅格的 EVI_{max} 进行拟合确定各栅格单元的 ε_0 (图 2)。

3.3.2 T_{min} , T_{max} 和 T_{opt}

用来估计温度限制函数 T_{scalar} 的 T_{min} , T_{max} 和 T_{opt}

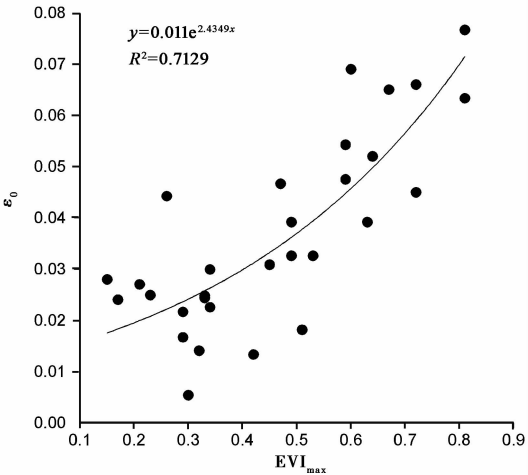


图 2 ε_0 和 EVI_{max} 的正相关关系及拟合方程

Fig. 2 The positive relationship of ε_0 and EVI_{max} with fitted equation

表 3 不同各植被类型 VPM 模型的 $T_{\min}$, $T_{\max}$ 和 T_{opt} 值

Table 3 $T_{\min}$, $T_{\max}$ and T_{opt} value of different vegetation types used in VPM model

植被类型	$T_{\min}$	$T_{\max}$	T_{opt}	文献来源
常绿针叶林	0	40	20	[13]
常绿阔叶林	2	48	28	[14]
落叶针叶林*	-10	35	25	—
落叶阔叶林	-1	40	20	[12]
混交林	0	35	20	[20]
灌木	0	35	20	[18]
农田(C_4 作物)	0	45	23	[22]
农田(C_3 作物)	-3	42	16	[22]
草地	6	21	17	[19]
高寒草原	0	35	20	[18]
高寒草甸	0	35	20	[18]

* 已发表文献中未发现 VPM 模型在落叶针叶林上的应用, 因此本文中采用的是通量站点的拟合值

也被称作绿色植物进行光合作用的“三基点”温度; “三基点”温度值来源于相关参考文献(表 3)。

4 模拟结果

2006~2008 年我国陆地生态系统 GPP 总量分别为 4.96Pg C/a, 5.16Pg C/a 和 4.87Pg C/a, 平均为 5.0Pg C/a。森林、草地、农田和灌丛生态系统 3 年的平均 GPP 总量分别为 1.70Pg C/a, 0.83Pg C/a, 1.85Pg C/a 和 0.59Pg C/a, 分别占全国的 34%, 17%, 37% 和 12%(图 3)。在研究时段内, 森林生态系统的 GPP 平均值相对较高, 其中常绿阔叶林最高, 为 1203g C/m²/a, 而分布在高纬度地区的落叶针叶林仅为 650g C/m²/a; 农田生态系统的 GPP 平均值为 1000g C/m²/a, 其中一熟制、二熟制和三熟制农田分别为 543g C/m²/a, 1154

g C/m²/a 和 1212g C/m²/a; 草地生态系统的 GPP 平均值较低, 仅为 180g C/m²/a, 其中高寒草原和高寒草甸分别为 50g C/m²/a 和 192g C/m²/a, 其他类型的草地为 210g C/m²/a。

全国 GPP 呈由东南沿海向西北内陆逐渐递减的空间格局(图 4), GPP 高值区主要位于东南沿海地区的福建省、广东省、海南省、广西东北部以及台湾东部地区, 这些地区受海洋性季风的影响最强, 水热条件充足, 自然植被类型以常绿阔叶林为主, 故植被生产力最高, GPP 高于 1000g C/m²/a。其次是华北地区, 这一地区的植被类型以冬小麦-夏玉米的两熟农田为主, GPP 高于 500g C/m²/a; 在以落叶阔叶林、针阔混交林等森林植被为主的大小兴安岭、长白山和秦岭地区, GPP 范围为 400~800g C/m²/a。GPP 低值区主要集中在西北内陆。此地区属于大陆性气候, 降水稀少、夏季高温干旱、自然植被稀疏, GPP 不足 100g C/m²/a。

5 讨论与结论

本研究发展的 VPM 模型区域模式集成了过去 10 年来基于碳通量观测站发展的生态系统尺度的模型结构与参数, 将农业多熟种植信息作为一种单独的覆被类型对其时空格局及其生态参数进行刻画, 通过生长季 EVI 最大值与最大光能利用率之间的强相关性实现模型参数 ϵ_0 空间化, 以 MODIS 原始遥感观测数据处理得到的空间分辨率 500m 时间步长 8 天的数据集和气象观测温度数据驱动模型, 估算了 2006~2008 年中国陆地生态系统的 GPP。模型估算的 2006~2008 年我国陆地生态系统 GPP 的年总量分别为 4.96Pg C/a, 5.16Pg C/a 和 4.87Pg C/a。全国森林、草地、灌丛和农田生态系

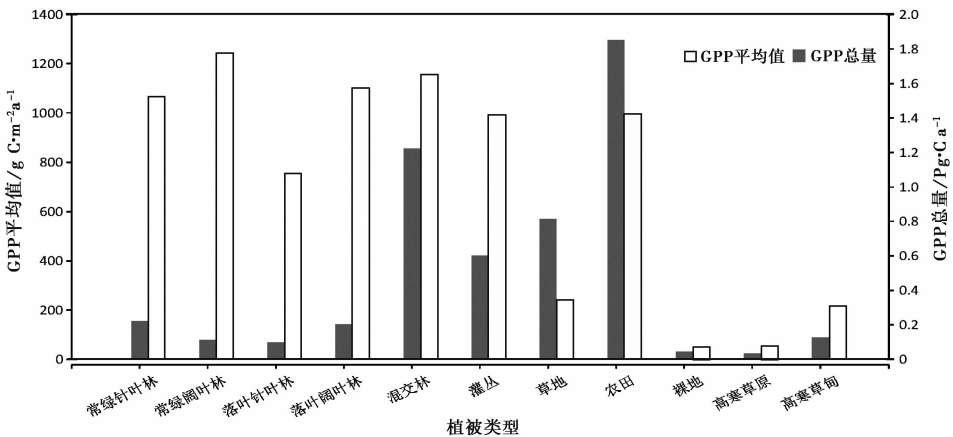


图 3 2006~2008 年我国不同植被类型的 GPP 总量和 GPP 平均值

Fig. 3 Estimations of total annual GPP amount and averaged annual GPP under different vegetation types of China from 2006 to 2008

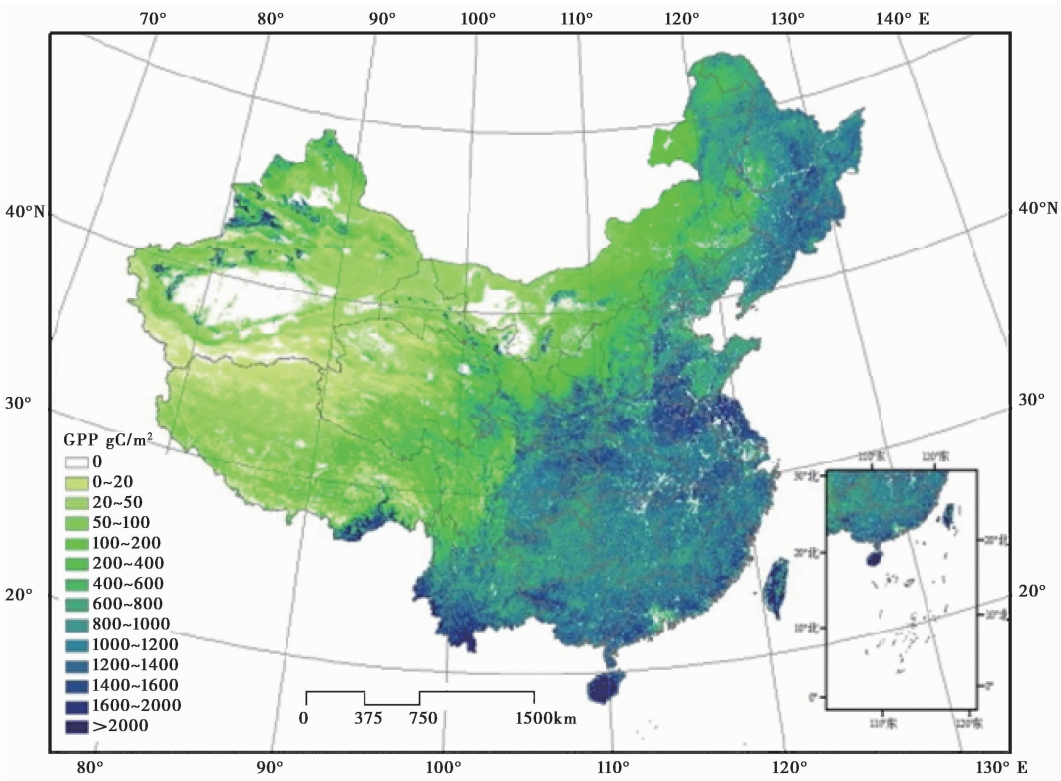


图 4 2006~2008 年中国陆地生态系统 GPP 平均值

Fig. 4 Spatial distribution of means of annual GPP in Chinese terrestrial ecosystems between 2006 and 2008

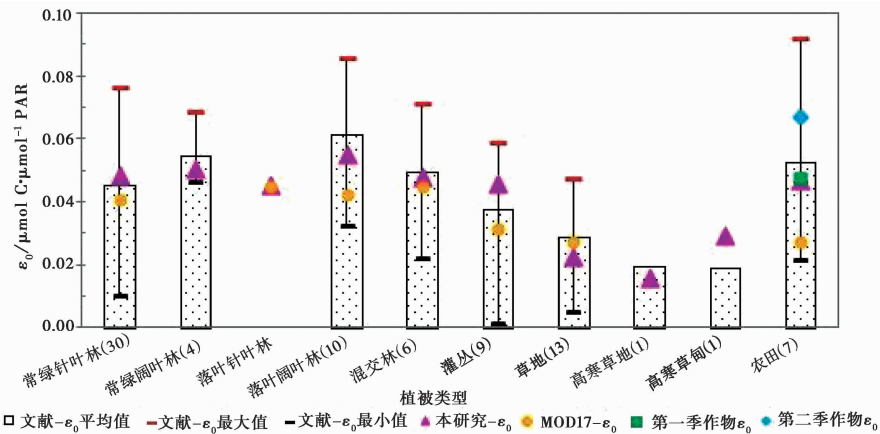


图 5 本研究、MOD17 查找表以及文献资料中中国主要陆地生态系统最大光能利用率的比较

文献中的最大光能利用率均为通量数据采取 Michaelis-Menten 方程进行表观量子拟合得到的，资料来自文献[3,12,14,18~23,37,40]；文献资料中未找到落叶针叶林的最大光能利用率，MOD17 算法查找表中缺乏常绿阔叶林、高寒草地和高寒草甸的最大光能利用率

Fig. 5 Comparison of maximum light use efficiency of main terrestrial ecosystems in China derived from this study. MOD 17 look-up tables and fitted values of flux data in literature

统 GPP 年总量的 3 年平均值分别为 1.70Pg C/a, 0.83Pg C/a, 1.85Pg C/a 和 0.59Pg C/a。GPP 在空间上呈现由东南沿海向西北内陆逐渐减小的格局。GPP 按照由大到小的顺序依次为常绿阔叶林、落叶阔叶林、混交林、三熟农田、二熟农田、一熟农田、常绿针叶林、灌丛、落叶针叶林、草地、高寒草甸和高寒草原。

为与其他同类模型的最大光能利用率进行对比，本文利用 EVI_{max} 计算得到的最大光能利用率按生态系统类型进行统计，得到各生态系统的平均值（本研究- ϵ_0 ）。同时收集了以往研究中利用通量观测数据经米氏方程拟合得到的中国区域各生态系统类型最大光能利用率（文献- ϵ_0 ），以及 MOD17 算法查找表中相应生态系统类型的最大光能利用率

(MOD17- ϵ_0)(图 5)。通过比较发现：本研究估算的 ϵ_0 在各生态系统上的平均值，在农田、落叶阔叶林和灌丛上远高于 MOD17- ϵ_0 ，而在草地生态系统上则略低于后者，在落叶针叶林上两者相差很小；但是较 MOD17- ϵ_0 更接近通量观测的值。在黄淮海多熟区农田生态系统，第二季作物 ϵ_0 的平均值远高于第一季作物 ϵ_0 的平均值，这说明该方法能够体现出 C_3 和 C_4 作物的最大光能利用率差异。

自 20 世纪 90 年代起，一系列生态系统过程模型和遥感模型被用于中国陆地生态系统生产力估算(表 4)，但由于不同模型的结构参数、研究时段、输入数据各不相同，研究结果间彼此差异很大。综合不同研究者的研究结果得到的我国陆地生态系统年均 GPP 为 $5.94 \pm 1.97 \text{ Pg C/a}$ 。2006 ~ 2008 年 MODIS GPP 产品的年总量分别为 5.41 Pg C/a 、 5.39 Pg C/a 和 5.40 Pg C/a ，平均值为 5.4 Pg C/a ，相比之下 VPM 区域模式模拟结果低 7%。

不同方法中对中国陆地生态系统同一植被类型 GPP 的估算结果有较大差别(表 5)。对常绿阔叶林的估计最高值可达 $1972 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ，而最低值仅为 $1122 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ；其他林地类型的模拟结果间相差较小，常绿针叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林和混交林的变化范围分别为 $710 \sim 1106 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ， $650 \sim 996 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ， $902 \sim 1286 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ 和 $1034 \sim 1338 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ 之间，其中 VPM 区域模式对落叶针叶林的估算结果较其他模型偏低。不同研究者对灌丛 GPP 的估算也存在较大差异，最低值为 $405 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ ，仅为最高值的 1/3，这可能是由于不同研究采用的植被类型图灌丛种类与分布的差异造成的。农田生态系统 GPP 的估算结果分布在 $724 \sim 1168 \text{ g C/m}^2/\text{a}$ 之间，以往的模型没有将多种种植作为一种单独的土地覆被类型进行模拟，VPM 区域

表 4 本文和已发表相关研究估算的中国陆地生态系统 GPP^{*}

Table 4 Estimation of GPP over the terrestrial ecosystems in China in this study and previous studies

模型	GPP/Pg C·a ⁻¹	研究时段	参考文献
TEM	7.31	1993~1996	[41]
CASA	3.9	1997	[42]
RSM	12.26	1990	[43]
CEVSA	5.78~6.74	1981~1998	[44]
BEPS	4.418	2001	[45]
BEPS	5.26~5.68	2000~2010	[5]
EC-LUE	5.63~6.39	2000~2009	[1]
GEOPRO	4.84	2000	[46]
CEVSA	6.26~7.36	1980~2000	[46]
CASA	5.14~5.92	1982~2003	[46]
GLOPEM	5.52~6.62	1981~2000	[46]
GEOLUE	5.68	2000~2004	[46]
CASA	2.66~3.16	1982~1999	[47]
Revised CASA	5.32~7.28	1989~1993	[48]
AVIM2	6.9	1981~2000	[49]
MOD17	5.4	2006~2008	http://www.edc.usgs.gov/
VPM	5.0	2006~2008	本研究
平均	5.94±1.97	—	—

^{*} 当文献中无 GPP 模拟结果时，用 NPP 乘以 2 来代替

模式估算的二熟和三熟区 GPP 位于其他多个模型的估算结果区间的上限，分别比其他模型的平均值高 28% 和 35%。以往的全国 GPP 模型中没有考虑草地生态系统内部的异质性，所用植被类型图通常将草地作为一种土地覆被类型，然而不同类型草地差距很大；VPM 区域模式将草地生态系统区分为 3 种土地覆被类型，包括典型草原以及分布于青藏高原地区的高寒草原和草甸，模拟的草地生态系统 GPP 值位于多种模型模拟的 GPP 区间下限，而高寒草原和高寒草甸的模拟结果仅为其他模型结果的一半，与其他模型结果一致的是高寒草原 GPP 仅

表 5 本文 GPP 估算结果与已发表相关研究结果在不同植被类型上的比较(GPP 单位: g C/m²/a)

Table 5 Comparison of estimated GPP among different vegetation types in this study and previous studies(g C/m ² /a)											
模型	常绿 针叶林	常绿 阔叶林	落叶 针叶林	落叶 阔叶林	混交林	灌丛	典型 草原	高寒 草原	高寒 草甸	农田	参考文献
VPM	954	1203	650	1045	1040	929	210	50	192	1000	本研究
EC-LUE	992	1430	829	1083	1273	405	382			839	[1]
BEPS	938	1480	844	998	1119	726	245			872	[45]
BEPS	1106	1620	770	1282	1034	560	220			1168	[5]
CASA	928	1122	996	1030	1092	984	490			724	[46]
GLOPEM	710	1436	734	902	1338	1232	290			948	[46]
Revised CASA	734	1972	878	1286		735	207~1015			853	[48]
CASA								112	377		[50]
TEM								128	429		[51]

当文献中无 GPP 模拟结果时，用 NPP 乘以 2 来代替

是高寒草甸的 1/4 至 1/3。

由于 VPM 模型在多个生态系统类型进行了充分的验证,其区域模式估算的各典型生态系统最大光能利用率参数值更接近由通量观测数据拟合的结果。但是,尽管本研究估算的全国 GPP 总量与多模型模拟的平均结果相当,事实上多个光能利用率模型估算的各类生态系统 GPP 仍存在很大的差异,全国总量估算结果不仅受到模型对各类生态系统模拟准确性的影响,还会受到模型所用土地覆盖数据差异的影响,尤其是对于应用查找表法进行各类生态系统参数值确定的模型,Landcover 的精确度对 GPP 的模拟结果影响更大。为了降低以往应用查找表法进行参数空间化使得同一土地覆被类型模型参数为同一值而产生的误差,本研究根据 EVI_{max} 与最大光能利用率的相关关系进行模型参数的空间化,该方法更能够体现同一土地覆被类型内部光能利用率的空間异质性。尽管本研究中应用目前所能获取的准确性最为可靠的 1:100000 土地利用与 1:1000000 植被数据提取土地覆被数据,且首次将农业多熟种植作为单独的植被类型输入至模型中,模型输入数据的精度保障了模型模拟结果的可靠性,未来的研究仍应通过模型模拟试验定量分析不同的参数化方案和土地覆被输入数据如何影响着模型模拟结果的准确性,进而为我国陆地生态系统碳收支评估提供更为科学可靠的方法和数据支持。

参考文献 (References)

1 Li Xianglan, Liang Shunlin, Yu Guirui *et al.* Estimation of gross primary production over the terrestrial ecosystems in China. *Ecological Modelling*, 2013, **261**~**262**: 80~92

2 Beer C, Reichstein M, Tomelleri E *et al.* Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, 2010, **329**(5993): 843~838

3 Wang Hesong, Jia Gensuo, Fu Congbin *et al.* Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(10): 2248~2258

4 朱文泉,陈云浩,徐 丹等. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. *生态学杂志*, 2005, **24**(3): 296~300

Zhu Wenquan, Chen Yunhao, Xu Dan *et al.* Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(3): 296~300

5 Liu Yiho, Ju Weimin, He Honglin *et al.* Changes of net primary productivity in China during recent 11 years using an ecological model driven by MODIS data. *Frontier of Earth Sciences*, 2013, **7**(1): 112~127

6 Baldocchi D, Falge E, Gu L *et al.* FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the*

American Meteorological Society, 2001, **82**(11): 2415~2434

7 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006.45~49

Yu Guirui, Sun Xiaomin. Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems. Beijing: Higher Education Press, 2006.45~49

8 Yuan Wenping, Liu Shuguang, Zhou Guangsheng *et al.* 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

9 Potter C S, Randerson J T, Field C B *et al.* Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(4): 811~841

10 Prince S D, Goward S N. Global primary production: A remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**(4~5): 815~835

11 Running S W, Nemani R R, Heinsch F A *et al.* A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, **54**(6): 547~560

12 Xiao Xiangming, Zhang Qingyuan, Braswell B *et al.* Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **91**(2): 256~270

13 Xiao Xiangming, Hollinger D, Aber J *et al.* Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle leaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**(4): 519~534

14 Xiao Xiangming, Zhang Qingyuan, Saleska S *et al.* Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**(1): 105~122

15 Zhang Yongqiang, Yu Qiang, Jiang Jie *et al.* Calibration of Terra/MODIS gross primary production over an irrigated cropland on the North China Plain and an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2008, **14**(4): 757~767

16 Turner D P, Ritts W D, Cohen W B *et al.* Site-level evaluation of satellite-based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biology*, 2005, **11**(4): 666~684

17 Wang Xufeng, Ma Mingguo, Huang Guanghui *et al.* Vegetation primary production estimation at maize and alpine meadow over the Heihe River basin, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, **17**: 94~101

18 Li Zhengquan, Yu Guirui, Xiao Xiangming *et al.* Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **107**(3): 510~519

19 伍卫星,王绍强,肖向明等. 利用 MODIS 影像和气候数据模拟中国内蒙古温带草原生态系统总初级生产力. *中国科学 (D 辑)*, 2008, **38**(8): 993~1004

Wu Weixing, Wang Shaoqiang, Xiao Xiangming *et al.* Modeling gross primary production of a temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia, China, using MODIS imagery and climate data. *Science in China (Series D)*, 2008, **51**(10): 1501~1512

20 Wu J B, Xiao X M, Guan D X *et al.* Estimation of the gross primary production of an old-growth temperate mixed forest using eddy covariance and remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, **30**(2): 463~479

21 Zhang Junhui, Hu Yanling, Xiao Xiangming *et al.* Satellite-based estimation of evapotranspiration of an old-growth temperate mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**(6): 976~984

22 Yan Huimin, Fu Yuling, Xiao Xiangming *et al.* Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO₂ eddy flux tower data. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, **129**(4): 391~400

23 Wang Zheng, Xiao Xiangming, Yan Xiaodong. Modeling gross primary production of maize cropland and degraded grassland in Northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**(9): 1160~1167

24 Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M *et al.* Potential net primary productivity in South America: Application of a global model. *Ecological Applications*, 1991, **1**(4): 399~429

25 Jin Cui, Xiao Xiangming, Merbold L *et al.* Phenology and gross primary production of two dominant savanna woodland ecosystems in Southern Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **135**: 189~201

26 Huete A R, Liu H Q, Batchily K *et al.* A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **59**(3): 440~451

27 Xiao X, Boles S, Frolking S *et al.* Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(15): 3009~3022

28 Liu Ronggao, Liang Shunlin, He Honglin *et al.* Mapping incident photosynthetically active radiation from MODIS data over China. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(3): 998~1009

29 刘纪远, 邵全琴, 延晓东等. 土地利用变化对全球气候影响的研究进展与方法初探. *地球科学进展*, 2011, **26**(10): 1015~1022

Liu Jiuyan, Shao Quanqin, Yan Xiaodong *et al.* An overview of the progress and research framework on the effects of land use change upon global climate. *Advances in Earth Science*, 2011, **26**(10): 1015~1022

30 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被数据集 (1:1000000). 北京: 地质出版社, 2007

Editorial Committee of Vegetation Map of China. Vegetation Map of People's Republic of China (1:1000000). Beijing: The Geological Publishing House, 2007

31 1:1000000 中国草地资源图编制委员会. 1:1000000 中国草地资源图图集. 北京: 中国地图出版社, 1993

Editorial Committee of Grassland Resource Map of China (1:1000000). Grassland Resource Map of People's Republic of China (1:1000000). Beijing: Sinomap Press, 1993

32 Yan Huimin, Xiao Xiangming, Huang Heqing *et al.* Multiple cropping intensity in China derived from agro-meteorological observations and MODIS data. *Chinese Geographical Science*, 2013, **24**(2): 205~219

33 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 近 20 年中国耕地复种指数的时空变化. *地理学报*, 2005, **60**(4): 559~566

Yan Huimin, Liu Jiuyan, Cao Mingkui. Remotely sensed multiple cropping index variations in China during 1981 ~ 2000. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **60**(4): 559~566

34 闫慧敏, 黄河清, 肖向明等. 鄱阳湖农业区多熟种植时空格局特征遥感分析. *生态学报*, 2008, **28**(9): 4517~4523

Yan Huimin, Huang Heqing, Xiao Xiangming *et al.* Spatio-temporal distribution of multiple cropping system s in the Poyang Lake region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(9): 4517~4523

35 闫慧敏, 肖向明, 黄河清. 黄淮海多熟种植农业区作物历遥感检测与时空特征. *生态学报*, 2010, **30**(9): 2416~2423

Yan Huimin, Xiao Xiangming, Huang Heqing. Satellite observed crop calendar and its spatio-temporal characteristics in multiple cropping area of Huang-Huai-Hai Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(9): 2416~2423

36 Goulden M L, Daube B C, Fan S M *et al.* Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102** (D24): 28987~28996

37 Liu Jianfeng, Sun Osbert Jianxin, Jin Hongmei *et al.* Application of two remote sensing GPP algorithms at a semiarid grassland site of North China. *Journal of Plant Ecology*, 2011, **4**(4): 302~312

38 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼等. 青藏高原高寒草甸生态系统表观量子产额和表观最大光合速率的确定. *中国科学 (D 辑)*, 2004, **34** (增刊 II): 125~130

Xu Lingling, Zhang Xianzhou, Shi Peili *et al.* The apparent quantum yield and the apparent maximum photosynthetic rate in the alpine meadow on Tibet Plateau. *Science in China (Series D)*, 2004, **34** (Suppl. II): 125~130

39 Fu Gang, Shen Zhenxi, Zhang Xianzhou *et al.* Modeling gross primary productivity of alpine meadow in the northern Tibet Plateau by using MODIS images and climate data. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(5): 264~269

40 朱旭东. 基于光能利用率模型的中国陆地生态系统初级生产力模拟. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所硕士论文, 2010.1~73

Zhu Xudong. Modeling of Gross Primary Productivity in China's Terrestrial Ecosystem Based on Light Use Efficiency Model. Beijing: The Master's Thesis of Institute of Geographical Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, 2010.1~73

41 Xiao Xiangming, Melillo J M, Kicklighter D W *et al.* Net primary production of terrestrial ecosystems in China and its equilibrium response to changes in climate and atmospheric CO₂ concentration. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22**(2): 97~118

42 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力. *植物生态学报*, 2001, **25**(5): 603~608

Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*, **25**(5): 603~608

43 陈利军, 刘高焕, 冯险峰. 运用遥感估算中国陆地植被净第一性生产力. *植物学报*, 2001, **43**(11): 1191~1198

Chen Lijun, Liu Gaohuan, Feng Xianfeng. Estimation of net primary productivity of terrestrial vegetation in China by remote sensing. *Acta Botanica Sinica*, 2001, **43**(11): 1191~1198

44 Tao Bo, Li Kerang, Shao Xuemei *et al.* The temporal and spatial patterns of terrestrial net primary productivity in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, **13**(2): 163~171

45 Feng X, Liu G, Chen J M *et al.* Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing. *Journal of Environmental Management*, 2007, **85**(3): 563~573

46 Gao Zhiqiang, Liu Jiuyan. Simulation study of China's net primary production. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(3): 434~445

47 Piao Shilong, Fang Jingyun, Zhou Liming *et al.* Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**(2): GB2027

48 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

Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(3): 413~424

49 黄 玫. 中国陆地生态系统水、能通量和碳循环模拟. 北京: 中国科学院博士论文, 2006.1~69

Huang Mei. China's terrestrial ecosystem on water, energy fluxes and carbon cycle simulation. Beijing: The Dissertation for Ph. D Degree of Chinese Academy of Sciences, 2006.1~69

50 张懿铨, 祁 威, 周才平等. 青藏高原高寒草地净初级生产力 (NPP) 时空分异. 地理学报, 2013, **68**(9): 1197~1211

Zhang Yili, Qi Wei, Zhou Caiping *et al.* Spatial and temporal variability in the net primary production (NPP) of alpine grassland on Tibetan Plateau from 1982 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(9): 1197~1211

51 周才平, 欧阳华, 王勤学等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算. 地理学报, 2004, **59**(1): 74~79

Zhou Caiping, Ouyang Hua, Wang Qinxue *et al.* Estimation of net primary productivity in Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2004, **59**(1): 74~79

ESTIMATION OF GROSS PRIMARY PRODUCTIVITY IN CHINESE TERRESTRIAL ECOSYSTEMS BY USING VPM MODEL

Chen Jingqing^{①②} Yan Huimin^① Wang Shaoqiang^① Gao Yanni^① Huang Mei^① Wang Junbang^① Xiao Xiangming^③
(^①Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101; ^②University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ^③Department of Microbiology and Plant Biology, Center for Spatial Analysis, University of Oklahoma, Norman, OK 73019, USA)

Abstract

Remote sensing model provides more real-time and more accurate simulation data for regional carbon flux observing. Accurate simulation needs sufficient validations of every ecosystem at the ecosystem scale by using flux observation data. More and more studies have shown that current gross primary productivity (GPP) simulation still has great uncertainty, for example, MODIS GPP product (MOD17) doesn't take multiple cropping and C₄ plant as separate vegetation types, therefore, the simulation results of such ecological zones have large underestimation.

VPM model has been developed based on MODIS data and flux observation data. After 10 years of effort, a series of studies on model calibration and validation has been carried out in 21 sites covering ten types of typical ecosystems throughout the world, including Haibei alpine shrub and alpine wetland, temperate semi-arid grasslands of Inner Mongolia, the Changbai Mountain conifer, winter wheat-maize rotation cropland of Yucheng flux station and Tongyu cropland (corn) station, which have shown good simulation capabilities and laid a scientific basis for the estimation of regional GPP.

In this study, we build the VPM model for regional pattern evaluation of gross primary productivity in terrestrial ecosystems. Then we estimate the spatial pattern and temporal variation of GPP in China during 2006~2008 using MODIS data, rasterized temperature and photosynthetically active radiation (PAR) data with a resolution of 500m at 8-day intervals as input data. The total annual GPP of China's terrestrial ecosystems is 5.0Pg C/a during the period of 2006~2008. Forests, grassland, cropland and shrub account for 34%, 17%, 37%, and 12%, respectively. These vegetation types can be arranged by GPP values in descending order as follows: evergreen broadleaf forest, deciduous broadleaf forest, mixed forest, triple-cropping cropland, double-cropping cropland, single-cropping cropland, evergreen needleleaf forest, shrub, deciduous needleleaf forest, grassland, alpine meadow and alpine grassland. The total annual GPP of China estimated in this study is close to the average of estimation results of other remote sensing models (5.40Pg C/a). There are great discrepancies among estimation results of various ecosystems by different light use efficiency models. In this study, remote sensing data is used for the spatialization of the maximum light use efficiency in order to describe the spatial heterogeneity of light use efficiency within the same land cover type. In this study, the land cover data is extracted from most reliable land use and vegetation type data at present, and multiple cropping is input into the model as a separate vegetation type, thus the accuracy of input data ensures the reliability of estimation results of VPM model.

Key words VPM, Gross Primary Productivity, maximum light use efficiency, MODIS