

王鹤松, 贾根锁, 冯锦明, 等. 2010. 我国北方地区植被总初级生产力的空间分布与季节变化 [J]. 大气科学, 34 (5): 882–890. Wang Hesong, Jia Gensuo, Feng Jinming, et al. 2010. Spatial distribution and seasonality of gross primary production in northern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 882–890.

我国北方地区植被总初级生产力的空间分布与季节变化

王鹤松^{1, 2} 贾根锁¹ 冯锦明¹ 赵天保¹ 马柱国¹

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 本研究通过集成 Terra MODIS 卫星影像数据与地面通量台站的观测数据, 改进了基于遥感的 VPM 光能利用率模型, 模拟了我国北方地区 2008 年陆地生态系统总初级生产力 (GPP) 的空间分布与季节变化。研究表明: (1) 我国北方地区植被 GPP 在空间分布上表现为东高西低的特征, 年均值为 518.36 g/m^2 (C 重量, 下同)。(2) 我国北方地区主要植被类型的 GPP 有较强的季节动态, 大体上都表现出单峰变化趋势。GPP 值按照由大到小顺序依次为: 夏绿阔叶林 (DBF) > 针阔混交林 (MF) > 农田 (Crop) > 落叶针叶林 (DNF) > 常绿针叶林 (ENF) > 草地 (Grass) > 稀疏灌丛 (Oshrub) > 裸地或稀疏植被 (BSV)。(3) 整个区域的 GPP 季相变化表现为: 夏季最高, 达到 $32.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$, 为全年最大值; 春季 GPP 为 $5.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$, 与秋季的 $5.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$ 较为接近, 冬季 GPP 最弱, 仅为 $0.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$ 。与通量台站实测值及前人研究结果的比较表明, 本文所模拟的 GPP 与观测值之间的相对误差绝对值多小于 15%, 表明模拟结果具有较好的可靠性。这说明通过集成遥感观测数据与台站观测数据的方法来模拟 GPP, 可以较准确地模拟区域尺度的 GPP 空间分布与时间变化, 这为深入研究陆气相互作用提供了重要研究手段。

关键词 中等分辨率成像光谱仪 光能利用效率模型 植被总初级生产力 遥感 中国北方

文章编号 1006-9895 (2010) 05-0882-09

中图分类号 P461

文献标识码 A

Spatial Distribution and Seasonality of Gross Primary Production in Northern China

WANG Hesong^{1, 2}, JIA Gensuo¹, FENG Jinming¹, ZHAO Tianbao¹, and MA Zhuguo¹

1 Key Laboratory of Regional Climate – Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The gross primary production (GPP) of northern China in 2008 was modeled by integrating MODIS data and flux measurements to analyze its spatial distribution and seasonality. The GPP in this region is higher in the east and lower in the west in general. In 2008, the mean annual GPP was 518.36 g/m^2 (weight of carbon, the same below). The GPP of most vegetation types in northern China shows a single peak in seasonal curves. These vegetation

收稿日期 2009-09-07, 2010-02-04 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB723904 和 2006CB400500

作者简介 王鹤松, 男, 1981 年出生, 博士, 主要从事陆气相互作用研究。E-mail: wanghs@tea.ac.cn

通讯作者 贾根锁, E-mail: jiong@tea.ac.cn

types can be arranged in the values of GPP as follows: deciduous broadleaf forest (DBF) > mixed forests (MF) > croplands (Crop) > deciduous needleleaf forest (DNF) > evergreen needleleaf forest (ENF) > grasslands (Grass) > open shrublands (Oshrub) > barren or sparsely vegetated (BSV). The seasonality of GPP can be summarized as: the GPP reaches the highest value of $32.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$ in summer, drops to $5.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$ and $5.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$ for spring and autumn respectively, and had the lowest value of $0.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$ in winter-time. The VPM-simulated GPP in this paper was close to the observed GPP at flux stations. The absolute values of relative errors are mainly less than 15%. This demonstrates advantage of integrating remote sensing and flux measurements to study the spatial and temporal characters of GPP at regional scale, and it has great potential for investigating the interaction between land and atmosphere in the region.

Key words moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS), light use efficiency model, gross primary production (GPP), remote sensing, northern China

1 引言

陆地生态系统的总初级生产力(简称 GPP)是指陆地绿色植物通过光合作用,经过一系列的植物生理过程,将大气中的 CO_2 吸收同化到植物体自身所积累的有机物(Lieth and Whittaker, 1975)。由于 GPP 的生产过程吸收了在气候变化中起重要作用的温室气体 CO_2 , 进而影响了陆气相互作用中碳通量的变化,使其为科学家、政府决策者们所关注(朱文泉等, 2007; 高志强和刘纪远, 2008)。准确观测 GPP 的时空动态变化是了解其对陆气相互作用影响的前提(Jung et al., 2008; Coops et al., 2009)。目前,在台站尺度上涡动相关法(简称 EC 法)是公认的能够较准确地测量碳通量的方法,该方法通过推算夜间的土壤呼吸速率与土壤温度间的指数关系方程来计算白天的 GPP(Falge et al., 2002a, 2002b)。但由于地表植被在时间上和空间上的异质性以及 EC 法的贡献区(footprint)相对较小,使得应用站点的 GPP 观测数据估算区域 GPP 数据依然面临着很大的挑战(Maselli et al., 2009)。

遥感监测具有区域广、周期长和价格相对低廉等优势,已被广泛应用到陆地植被生产力的研究中(孙睿等, 2001; 张峰等, 2008; 黄攻等, 2008)。其中,基于光能利用率的生产力遥感估算是较多采用的一种方法,该方法将植被生产力的调控因子以相对简单的方法组合在一起,并且冠层所吸收的光合有效辐射比例 FPAR 可由遥感数据获得,模型简单实用。目前,基于遥感的光能利用率模型主要有 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) (Potter et al., 1993; Field et al., 1995)、GLO-PEM (Prince and Goward, 1995)、C-Fix (Verous-

traete et al., 2002)、MOD17 算法(Running et al., 2004)以及 VPM (Xiao et al., 2004a, 2004b)等模型。虽然 MODIS 陆地工作组已发布了近 10 年的 1 km 分辨率 GPP 产品(MOD17),但由于用来订正 MOD17 产品的实测通量数据在东亚地区较少,MOD17 在我国北方地区的模拟精度尚不能令人满意(朱文泉等, 2006; Yan et al., 2009)。VPM (Vegetation Photosynthesis Model) 已在我国北方森林、典型草原、草甸草原以及农田等典型植被类型广泛使用并在台站尺度上表现出良好的模拟能力(Xiao et al., 2004a, 2004b, 2005a, 2005b; Li et al., 2007; 伍卫星等, 2008; Wu et al., 2009; Yan et al., 2009),但由于模型中最大光能利用效率(ϵ_0)和温度限制因子在区域尺度上的表达尚存在困难,VPM 模型还未能在区域尺度上得到应用。

大多数光能利用率模型的运行需要通过地面观测来为其输入参数,集成地面观测与遥感观测的数据可为 GPP 的区域观测提供时间上和空间上都较满意的产品。本研究试图将基于站点尺度的 VPM 模型应用到区域尺度中。为此,在最大光能利用率上的确定上,通过集成多个台站的通量观测数据,提出了一种不依赖于植被分布类型的动态模拟植被最大光能利用率的方法。同时,本研究引入 CASA 模型中模拟温度限制因子的算法来模拟区域尺度的 GPP 分布。在具有较高空间(0.5 km)与时间(8 d)分辨率的 MODIS 数据和气象观测台站数据的支持下,模拟并分析了我国北方地区 2008 年的 GPP 空间分布特征与季节变化特征。

2 数据与方法

研究区域为我国北方地区,行政区划上包括了

新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西、山西、河北、河南、山东、北京、天津、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江等 15 个省、自治区和直辖市。其中地面 CO_2 通量数据由“北方干旱—半干旱区协同观测集成研究”项目中的 14 个通量台站提供, 2008 年的协同观测期为 7~9 月, 基本覆盖了各植被类型的生长盛期。

这 14 个站主要分布在我国北方的干旱与半干旱地区, 代表了我国北方的主要植被类型, 包括: 温带草原、农田、阔叶林以及针叶林。其中, 锦州、盈科和临泽为具备灌溉条件下种植玉米的农田站, 通榆农田站种植葵花, 而定西站种植小麦; 大野口为亚高山常绿针叶林站; 长武和密云为以落叶阔叶林为主的台站; 阿柔为亚高山草甸站, 张掖站为荒漠站, 榆中站为黄土高原草原站, 通榆草原站为退化的草甸草原站, 而奈曼和东苏站为荒漠化草原站 (图 1)。

2.1 VPM 模型简介

VPM 模型将植被的总初级生产力 (G) 表达为光能利用效率 (ϵ_g), 光合有效辐射 (P) 以及叶绿素所吸收的光合有效辐射比例 (F) 的乘积, 即:

$$G = \epsilon_g \times F \times P, \quad (1)$$

$$\epsilon_g = \epsilon_0 \times T_s \times W_s \times P_s, \quad (2)$$

其中, G 为总初级生产力, P 为光合有效辐射的通量密度 (单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), F 表示叶绿素所吸收的光合有效辐射比例, ϵ_g 为将吸收的光合有效辐射转换成碳的效率 (g/mol)。 ϵ_0 表示表观量子效率或最大光能利用效率 (g/mol)。 T_s 、 W_s 和 P_s 分别是温度、水分和叶片生长对光能利用效率的限制因子。

F 可以表示为:

$$F = \alpha \times E, \quad (3)$$

$$E = \frac{A \times (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}})}{\rho_{\text{nir}} + (C_1 \times \rho_{\text{red}} - C_2 \times \rho_{\text{blue}}) + B}, \quad (4)$$

式中, α 设定为 1, E 为增强型植被指数 (EVI), ρ_{red} 代表红波段反射率 (620~670 nm), ρ_{nir} 为近红外波段反射率 (841~876 nm), ρ_{blue} 为蓝波段反射率 (459~479 nm)。 EVI 计算中的常数分别设定为: $B=1$, $C_1=6$, $C_2=7.5$ 和 A (增益系数) $=2.5$ (Huete et al., 2002)。

T_s 采用下式计算:

$$T_s = \frac{(T - T_{\min})(T - T_{\max})}{(T - T_{\min})(T - T_{\max}) - (T - T_{\text{opt}})^2}, \quad (5)$$

其中, $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 、 T_{opt} 分别为绿色植物进行光合作用的最小、最高、最适温度, 即“三基点”温度。当空气温度低于最低光合作用温度时, T_s 设为 0。

W_s 通过地表水分指数 (LSWI) 估算:

$$W_s = \frac{1 + L}{1 + L_{\max}}, \quad (6)$$

$$L = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{swir}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{swir}}}, \quad (7)$$

式中, L 为地表水份指数, $L_{\max}$ 为每个像元地表水份指数在生长季内的最大值, ρ_{swir} 为短波红外反射率 (1628~1652 nm), ρ_{nir} 为近红外波段反射率 (841~876nm)。

P_s 表征在冠层尺度上叶片生长对绿色植物光合的影响, 按两个阶段表述, 分别为萌叶期

$$P_s = \frac{1 + L}{2} \quad (8)$$

和盛叶期

$$P_s = 1. \quad (9)$$

2.2 区域模型参数化

上面介绍的 VPM 模型适用于站点尺度上单一植被类型的生态系统。为了使其能在区域尺度上运行, 该模型中的一些关键参数需要重新表达, 包括: (1) 最大光能利用效率 (ϵ_0); (2) 温度对光能利用效率的限制因子 (T_s); (3) 叶片生长对光能利用效率的限制因子 (P_s)。

2.2.1 最大光能利用效率

台站尺度的 ϵ_0 根据 Michaelis-Menten 方程 (式 10) 计算:

$$G = \frac{\epsilon_0 \times P \times G_{\max}}{\epsilon_0 \times P + G_{\max}}, \quad (10)$$

其中, G 为总初级生产力, P (单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 为伴随的光合有效辐射通量密度, $G_{\max}$ 为生态系统总初级生产力的最大值。据此方程, 可以得到上述 14 个台站的 ϵ_0 。

在区域尺度上, ϵ_0 通过一个简单的动态模型模拟方法获得。相比于传统的基于植被类型赋予固定 ϵ_0 值的方法, 该方法可以更好地适应景观异质性高的区域 (如华北及东北的景观高度破碎化地区)。 ϵ_0 由反应植被光合生理过程的增强型植被指数 (EVI) 和植被物理特性的可见光反照率 (visible albedo) 表达:

$$\begin{cases} \epsilon_0 = \exp(1.428M_1 - 6.295M_2 - 1.211) \\ (r^2 = 0.86, p < 0.01), M_1 > 0.07, \\ \epsilon_0 = 0, M_1 \leq 0.07, \end{cases} \quad (11)$$

式中, M_1 为该像元 EVI 在生长季内的最大值, M_2 为生长季内可见光反照率的最小值。同时, 通过分析该区域的 EVI 季节变化曲线, 0.07 被设定为植被的边界值, 低于或等于该值的区域视为非植被区域。

2.2.2 温度限制因子

在区域尺度上, 很难获得每个像元的“三基点”温度信息, 故在计算 T_s 时, 引进 CASA 模型中的温度限制因子算法来替代原算法, 公式如下:

$$T_s = D \times (0.8 + 0.02T_{opt} - 0.0005T_{opt}^2) \times \frac{(1 + \exp(0.3 \times (T - T_{opt} - 10)))}{(1 + \exp(0.2 \times (T_{opt} - 10 - T)))}, \quad (12)$$

式中, T_{opt} 为最适气温, T 为某一时刻的气温, D 为常数, 本研究中取 D 为 1.2。各像元的 T_{opt} 为在生长季中 EVI 达到最大时所对应的温度。

2.2.3 叶片生长限制因子

以各像元的生长季植被指数 (EVI) 平均值为限, 认为 EVI 超过平均值的时期为展叶期, 对应像元的 P_s 等于 1, 其余时期, 像元 P_s 值为 $(1+L)/2$ 。

2.3 台站数据、区域气象数据和遥感数据

(1) 地面观测数据: 涡动相关系统主要安装在离冠层 1~25 m 的高度上, 包括三维超声风速仪和开路式红外气体分析仪。在协同观测前, 所有仪器都经过了统一的 H_2O 和 CO_2 标定以保证仪器在协同观测期得到的是良好、可信以及可比的数据。

(2) 区域气象数据: 区域尺度的气温和光合有效辐射 (PAR) 数据由中国气象局提供的我国北方地区 390 个气象观测站的数据通过 Surfer (8.0) 软件空间插值生成。其中 PAR (mol) 是由与台站观测的总辐射 (MJ) 通过乘以系数 2.05 换算而成 (Aber et al., 1996)。

(3) 遥感数据: 遥感数据主要采用了中等分辨率成像光谱仪 (MODIS) 陆地产品第 5 版数据集, 包括: 空间分辨率为 0.5 km 的地表反射率 (MOD09A1)

和空间分辨率为 1 km 的地表覆盖类型 (MCD12Q1) 数据。MOD09A1 主要用来计算 8 天时间间隔的植被指数与反照率, 而 MCD12Q1 则用来分析 GPP 在不同地表/植被类型下的季节变化特征。为使遥感产品的像元与通量观测数据的源区相匹配, 选用通量塔周围的 3×3 像元 ($1.5 \text{ km} \times 1.5 \text{ km}$) 的平均值来与通量数据相对应进行计算。

2.4 模拟结果验证

应用以上数据, 模型模拟了我国北方地区 2008 年, 时间分辨率为 8 d 的 GPP 分布。按照各台站的地理位置, 结合通量的贡献区分析, 将贡献区像元的 GPP 与台站在相应时段内 8 天累计 GPP 进行对比验证分析 (表 1)。

总体来看, 14 个台站的 GPP 模型模拟结果与本研究的通量实测值相关性较好, 相对误差较低, 且都通过了 0.01 水平的显著性检验。林地模拟精度相对较低, 这可能与其下垫面异质性总体较高有关。

通过该区域已有的 GPP 研究文献中地理坐标的记载 (见表 2), 结合谷歌地球的高分辨率地表影像, 可以较准确地找到先前研究的样点在本研究模拟 GPP 分布图中所在像元的位置。与已发表的实测值对比, 本研究的模拟值误差多小于 15%, 属于可以接受的误差范围之内。需要指出的是, 本研究的模拟结果是相关文献报道研究样点在 2008 年的 GPP 年值, 而这些研究的观测时间则集中在 2003~2005 年。年份之间存在的温度及降水量的差异会造成各样点在不同年份的 GPP 之间有较大的差异。如 Yan et al. (2009) 在同一站点 2004 年观测的农田 GPP 比 2003 年高出了近 50%。Wu et al. (2009) 在 2004 年对红松阔叶混交林的观测值也明显小于 2003 年和 2005 年。这种由不同年份引起的 GPP 差异, 是造成本研究模拟结果与文献报道

表 1 GPP 模拟结果与本研究观测结果比较
Table 1 Comparison between the simulated gross primary production (GPP) and the observed GPP in this study

	观测/ $g \cdot m^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$	模拟/ $g \cdot m^{-2} \cdot (8 \text{ d})^{-1}$	相关系数 R^2	相对误差
林地	36.47	42.96	0.60	17.80%
农田	65.76	61.06	0.69	-7.14%
草地	20.56	22.83	0.82	11.06%
全部类型	40.93	42.28	0.87	3.31%

注: 相对误差 = [(模拟 GPP - 观测 GPP) / 观测 GPP] $\times 100\%$ 。

表 2 GPP 模拟值与该区域已经发表的相关研究的实测值、模拟值结果比较

Table 2 Comparison among the simulated GPP in this study, EC(eddy covariance) observed GPP, and the GPP simulated by others

	植被类型	地理位置	GPP 年值/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$			本研究 相对误差
			观测值	其他作者模拟值	本研究模拟值	
2004 年	高寒草甸	(37. 62°N, 101. 31°E)	789. 2	696. 1 (Li et al., 2007)	824. 9	4. 52%
2004 年	高寒灌丛	(37. 69°N, 101. 34°E)	528. 5	485. 7 (Li et al., 2007)	583. 2	10. 35%
2004 年	沼泽化湿地	(37. 59°N, 101. 36°E)	508. 6	476. 9 (Li et al., 2007)	555. 1	9. 14%
2003 年	农田	(36. 96°N, 116. 49°E)	1409. 4	1624. 8 (Yan et al., 2009)	1569. 5	11. 36%
2004 年	农田	(36. 96°N, 116. 49°E)	2131. 8	1746 (Yan et al., 2009)	1569. 5	−26. 38%
2003 年	温带红松阔叶	(42. 41°N, 128. 09°E)	1433	1312 (Wu et al., 2009)	1645. 8	14. 85%
2004 年	温带红松阔叶林	(42. 41°N, 128. 09°E)	1132	1189 (Wu et al., 2009)	1645. 8	45. 39%
2005 年	温带红松阔叶林	(42. 41°N, 128. 09°E)	1490	1477 (Wu et al., 2009)	1645. 8	10. 46%
2003 年 4 月~ 2005 年 9 月	温带草原	(43. 54°N, 113. 66°E)	641. 5	603. 8 (伍卫星等, 2008)	766. 08*	19. 42%

* 2005 年仅包含了主要生长季内的 GPP, 不足 3 年, 故本研究模拟的年值乘以 2. 8 与之相对应。

观测结果的相对误差高于之前与 2008 年协同观测的相对误差的主要原因。本研究的模拟值与已报道的基于站点尺度的 VPM 模型模拟结果在不同的植被类型区具有类似的分布特征, 且二者模拟结果较为接近, 说明本研究所采用的扩展的 VPM 模型模拟方法在提升了尺度扩展能力的同时, 也保证了模拟 GPP 值的准确性。

3 结果

3.1 GPP 的空间分布特征

我国北方地区植被的 GPP 年值在空间分布上表现为东高西低的特征(图 1)。整个地区在 2008 年 GPP 年平均值为 518.36 g/m^2 (C 重量, 下同)。GPP 的高值区主要分布在东北和华北地区, 以森林和农田为主。森林主要由分布在大小兴安岭、长白山以及秦岭地区的夏绿阔叶林、常绿针叶林、落叶针叶林以及针阔混交林构成, 而农田主要由分布在华北平原一带的一年两熟、以种植冬小麦夏玉米(C4 植物)为主的农区构成。GPP 中值区主要分布在 GPP 高值向西部递减的过渡区, 植被类型以分布在内蒙古中部与东部和青海东部与南部的由典型草原和草甸草原构成的草地为主, 辅以新疆绿洲地区的一年一熟制农区以及亚高山常绿针叶林。GPP 低值区主要分布在新疆南部、青海西部以及内蒙古西部的荒漠与半荒漠地区, 主要由裸地或稀疏植被(BSV)以及低矮灌木(Oshrub)构成。

3.2 主要植被覆盖类型的季节动态

根据 MODIS 土地覆盖分类, 除裸地或稀疏植

被(BSV)外, 我国北方地区的各主要植被均表现出较强的季节动态, 大体上都表现出单峰趋势(图 2)。只不过由于温度、降水以及太阳有效辐射的影响, 生产力的动态变化在单峰趋势的基础上表现出不同程度的波动。相比于森林植被[包括夏绿阔叶林(DBF)、常绿针叶林(ENF)、落叶针叶林(DNF)和针阔混交林(MF)]和农田(Crop), 草地(Grass)和稀疏灌丛(Oshrub)的 GPP 启动时间较晚, 这主要是由于草地与稀疏灌丛主要分布于我国北方地区的北部以及西部, 适合植被生长的水热条件启动较晚。农田的 GPP 最大值虽然与林地较接近, 但其达到最大值时间明显延后, 这主要是由于占据农田主要面积的华北平原农区在 6、7 月份植被生长盛期时, 农田的冬小麦先进行收割后又播种了玉米, 使得农田 GPP 较弱, 达到峰值时间推迟到了 8 月。

综合全年(图 3)来看, 林地和农田的 GPP 较高, 草地和稀疏灌丛次之, 裸地或稀疏植被区 GPP 最弱。在林地中, ENF 由于主要分布在海拔或纬度较高的地区, GPP 受低温抑制影响较大, 值相对较低。草地的生产力较弱, 主要是由于在草地构成中, 荒漠化草原占的比重较大; 而稀疏灌丛多为半荒漠地区, 植被生产力也较弱。对于裸地或稀疏植被区, 由于植被稀少, 覆盖度极低, 故生产力最弱。

3.3 GPP 空间分布的季相变化

分别将 2008 年的 1 月、2 月、12 月, 3~5 月, 6~8 月以及 9~11 月的 GPP 累计值作为冬季、春

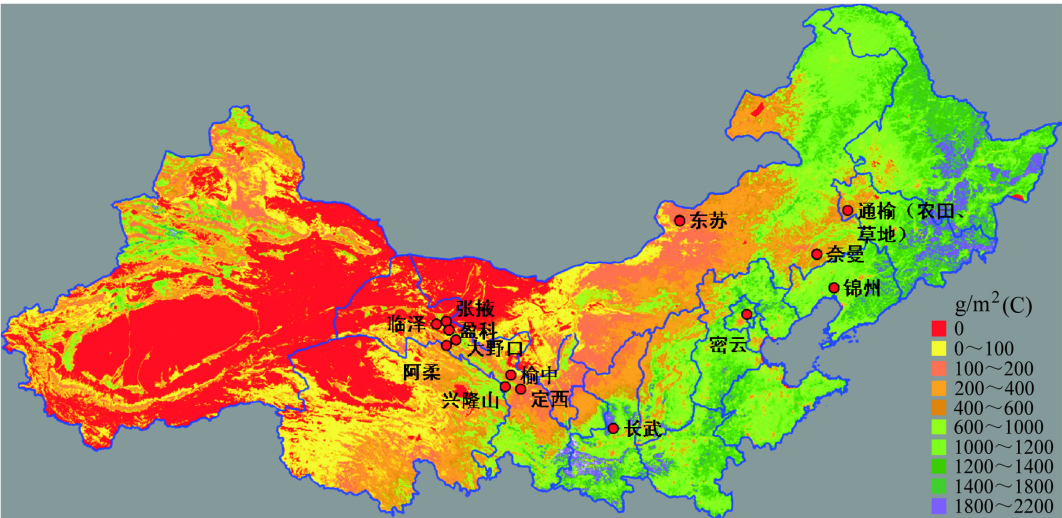


图1 本研究所选用台站的地理位置及我国北方地区 2008 年累计 GPP 空间分布
Fig.1 Location of the flux stations in this study and the spatial pattern of GPP over northern China in 2008

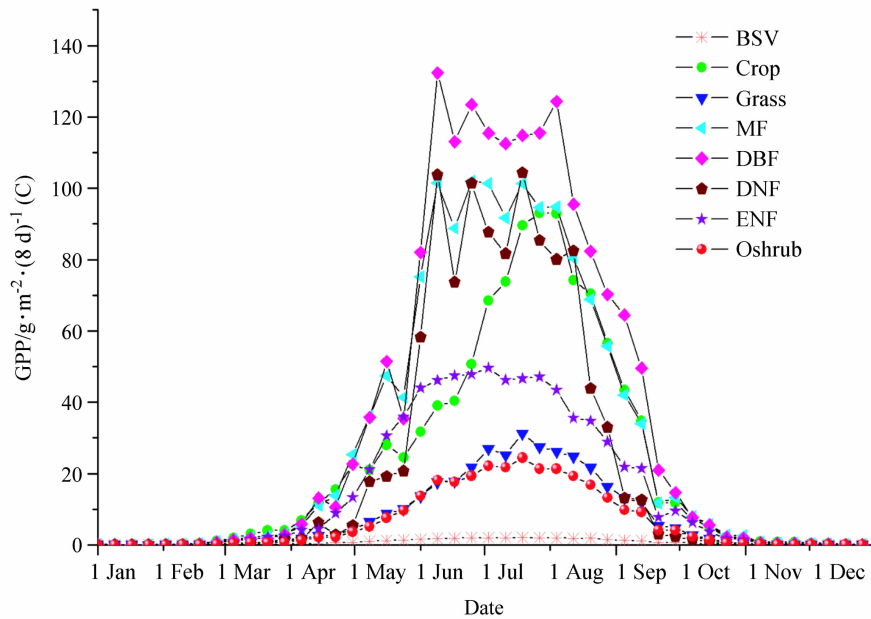


图2 我国北方典型植被类型的季节动态
Fig.2 Seasonal dynamics of GPP for major vegetation types in northern China

季、夏季以及秋季的 GPP 总值，以此来分析我国北方地区 GPP 的季相变化（图 4）。
在冬季，整个区域的 GPP 大多为 0 或小于 5 g/m^2 的低值，只有在河南以及陕西南部有较弱的生产力，范围在 10~20 g/m^2 之间，GPP 平均值为 0.07 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(8\text{ d})^{-1}$ 。在春季，GPP 平均值为 5.67 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(8\text{ d})^{-1}$ 。华北平原的冬小麦生长最为迅速，秦岭地区、东北南部以及新疆亚高山地区的森

林也有了不同程度的生长，GPP 主要集中在 200~400 g/m^2 之间。其他地区的生产力仍然较弱，不足 100 g/m^2 ，且仍有较大面积的区域小于 20 g/m^2 。在夏季，GPP 平均值为 32.80 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(8\text{ d})^{-1}$ 。整个区域植被 GPP 增长迅速，达到了全年最大值，以东北地区的森林生长最为迅速。在秋季，GPP 平均值为 5.08 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot(8\text{ d})^{-1}$ ，整个区域植被 GPP 都有明显下降，尤以东北和新疆的北部下降最为明显。华北

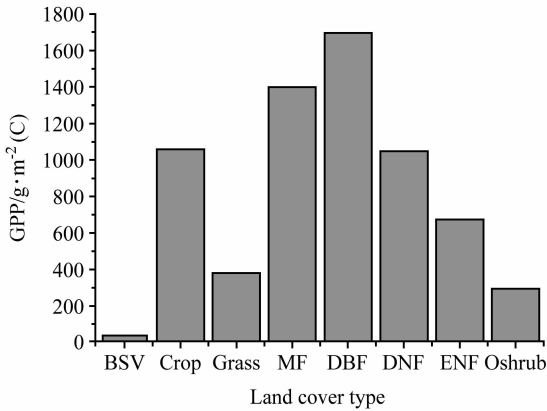


图3 2008年我国北方主要土地覆盖类型的GPP总量

Fig. 3 The gross primary productions (GPP) for the main land-cover types of northern China in 2008

平原农田以及东北地区南部、秦岭和新疆亚高山地带的森林GPP相对较高。

4 结论与讨论

本研究通过集成MODIS影像数据与“北方干旱—半干旱地区协同观测”项目中地面通量台站的观测数据,提出了一种基于动态光能利用率分布的方法,模拟并分析了我国北方地区GPP的空间分布与季相变化,得出以下结论:

(1) 我国北方地区植被GPP的空间分布特征为东高西低。其中,GPP的高值区主要分布在东北和华北地区,植被类型以农田和森林为主;GPP的中值区主要分布在上述高值区以西位于青海至内蒙古中部的过渡区,植被类型以草地为主;GPP的低值区主要分布在新疆南部、青海西部以及内蒙古西部等地区,植被类型以荒漠和半荒漠为主。

(2) 依照MODIS土地覆盖类型中我国北方地区的主要植被类型,这些植被大体上都表现出单峰趋势。GPP按照由大到小顺序依次为夏绿阔叶林(DBF)>针阔混交林(MF)>农田(Crop)>落叶针叶林(DNF)>常绿针叶林(ENF)>草地(Grass)>稀疏灌丛(Oshrub)>裸地或稀疏植被(BSV)。

(3) 利用时间分辨率为8d的GPP时间序列模拟结果在四个季节内累计求和表明,整个北方区域GPP有明显的季相差异。夏季生产力最高,植被生产力增长迅速,达到了全年最大值;秋季和春季的GPP接近,冬季的最小。

本研究提出了一种基于光能利用率方法来模拟

GPP,其关键步骤是年最大光能利用率(ϵ_0)空间分布的模拟。由于7~9月北方植被大多数达到了生长盛期,故可利用这一时期的协同观测数据,结合卫星数据来动态模拟整年 ϵ_0 的空间分布,进而利用VPM光能利用率模型模拟GPP。但 ϵ_0 是一种基于实际观测的变化值,即使在同一地区的不同年份,也会有较大差异。如伍卫星等(2008)在内蒙古草原连续观测了3个生长季草原的通量变化,得出的 ϵ_0 在不同年份有较大的差异。虽然,本研究采用的动态模拟方法克服了传统光能利用率模型中对混合像元光能利用率区分能力较弱的缺点,但由于 ϵ_0 的内在复杂性,仍需要更多的区域协同观测数据来进一步集成到多年长时间序列的GPP模拟研究中。

致谢 “北方干旱—半干旱地区协同观测”项目为本研究提供了宝贵的地面台站通量数据,在此向发起并组织协同观测项目的符淙斌院士表示感谢!

参考文献 (References)

- Aber J D, Reich P B, Goulden M L. 1996. Extrapolating leaf CO_2 exchange to the canopy: A generalized model of forest photosynthesis compared with measurements by eddy correlation [J]. *Oecologia*, 106: 257–265.
- Coops N C, Ferster C J, Waring R H, et al. 2009. Comparison of three models for predicting gross primary production across and within forested ecoregions in the contiguous United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 113: 680–690.
- Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, et al. 2002a. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 53–74.
- Falge E, Tenhunen J, Baldocchi D, et al. 2002b. Phase and amplitude of ecosystem carbon release and uptake potentials as derived from FLUXNET measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 75–95.
- Field C B, Randerson J T, Malmström C M. 1995. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 51 (1): 74–88.
- 高志强, 刘纪远. 2008. 中国植被净生产力的比较研究 [J]. *科学通报*, 53 (3): 317–326. Gao Zhiqiang, Liu Jiyuan. 2008. Simulation study of China's net primary production [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 53 (3): 317–326.
- 黄政, 季劲钧, 彭莉莉. 2008. 青藏高原1981~2000年植被净初级生产力对气候变化的响应 [J]. *气候与环境研究*, 13 (5): 608–616. Huang Mei, Ji Jinjun, Peng Lili. 2008. The response of vegetation net primary productivity to climate change during

- 1981–2000 in the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (5): 608–616.
- Huete A, Didan K, Miura T, et al. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 83: 195–213.
- Jung M, Verstraete M, Gobron N, et al. 2008. Diagnostic assessment of European gross primary production [J]. Global Change Biology, 14: 2349–2364.
- Li Z Q, Yu G R, Xiao X M, et al. 2007. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data [J]. Remote Sensing of Environment, 107: 510–519.
- Lieth H, Whittaker R H. 1975. Primary Productivity of the Biosphere [M]. New York: Springer-Verlag, Berlin. Maselli F, Papale D, Puletti N, et al. 2009. Combining remote sensing and ancillary data to monitor the gross productivity of water-limited forest ecosystems [J]. Remote Sensing of Environment, 113: 657–667.
- Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. 1993. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. Global Biogeochem. Cycles, 7 (4): 811–841.
- Prince S D, Goward S N. 1995. Global net primary production: A remote sensing approach [J]. Journal of Biogeography, 22 (6): 815–835.
- Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, et al. 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production [J]. Bioscience, 54 (6): 547–560.
- 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 2001. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系 [J]. 地理学报, 56 (6): 667–672. Sun Rui, Liu Changming, Zhu Qijiang. 2001. Relationship between the fractional vegetation cover change and rainfall in the Yellow River basin [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 56 (6): 667–672.
- Veroustraete F, Sabbe H, Eerens H. 2002. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data [J]. Remote Sensing of Environment, 83 (3): 376–399.
- Wu J B, Xiao X M, Guan D X, et al. 2009. Estimation of the gross primary production of an old-growth temperate mixed forest using eddy covariance and remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 30: 463–479.
- 伍卫星, 王绍强, 肖向明, 等. 2008. 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 [J]. 中国科学 (D 辑), 38 (8): 993–1004. Wu Weixing, Wang Shaoqiang, Xiao Xiangming, et al. 2008. Modeling gross primary production of a temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia, China, using MODIS imagery and climate data [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 38 (8): 993–1004.
- Xiao X M, Hollinger D, Aber J, et al. 2004a. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest [J]. Remote Sensing of Environment, 89: 519–534.
- Xiao X M, Zhang Q Y, Braswell B, et al. 2004b. Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data [J]. Remote Sensing of Environment, 91: 256–270.
- Xiao X M, Zhang Q Y, Hollinger D, et al. 2005a. Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data [J]. Ecological Applications, 15: 954–969.
- Xiao X M, Zhang Q Y, Saleska S, et al. 2005b. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest [J]. Remote Sensing of Environment, 94: 105–122.
- Yan H M, Fu Y L, Xiao X M, et al. 2009. Modeling gross primary productivity for winter wheat-maize double cropping system using MODIS time series and CO₂ eddy flux tower data [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 129: 391–400.
- 张峰, 周广胜, 王玉辉. 2008. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟 [J]. 植物生态学报, 32 (4): 786–797. Zhang Feng, Zhou Guangsheng, Wang Yuhui. 2008. Dynamics simulation of net primary productivity by a satellite data-driven CASA model in Inner Mongolian typical steppe, China [J]. Journal of Plant Ecology (in Chinese), 32 (4): 786–797.
- 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 2006. 中国典型植被最大光利用率模拟 [J]. 科学通报, 51 (6): 700–706. Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, He Hao, et al. 2006. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China [J]. Chinese Science Bulletin, 51 (4): 457–463.
- 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 2007. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. 植物生态学报, 31 (3): 413–424. Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Zhang Jinshui. 2007. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. Journal of Plant Ecology (in Chinese), 31 (3): 413–424.

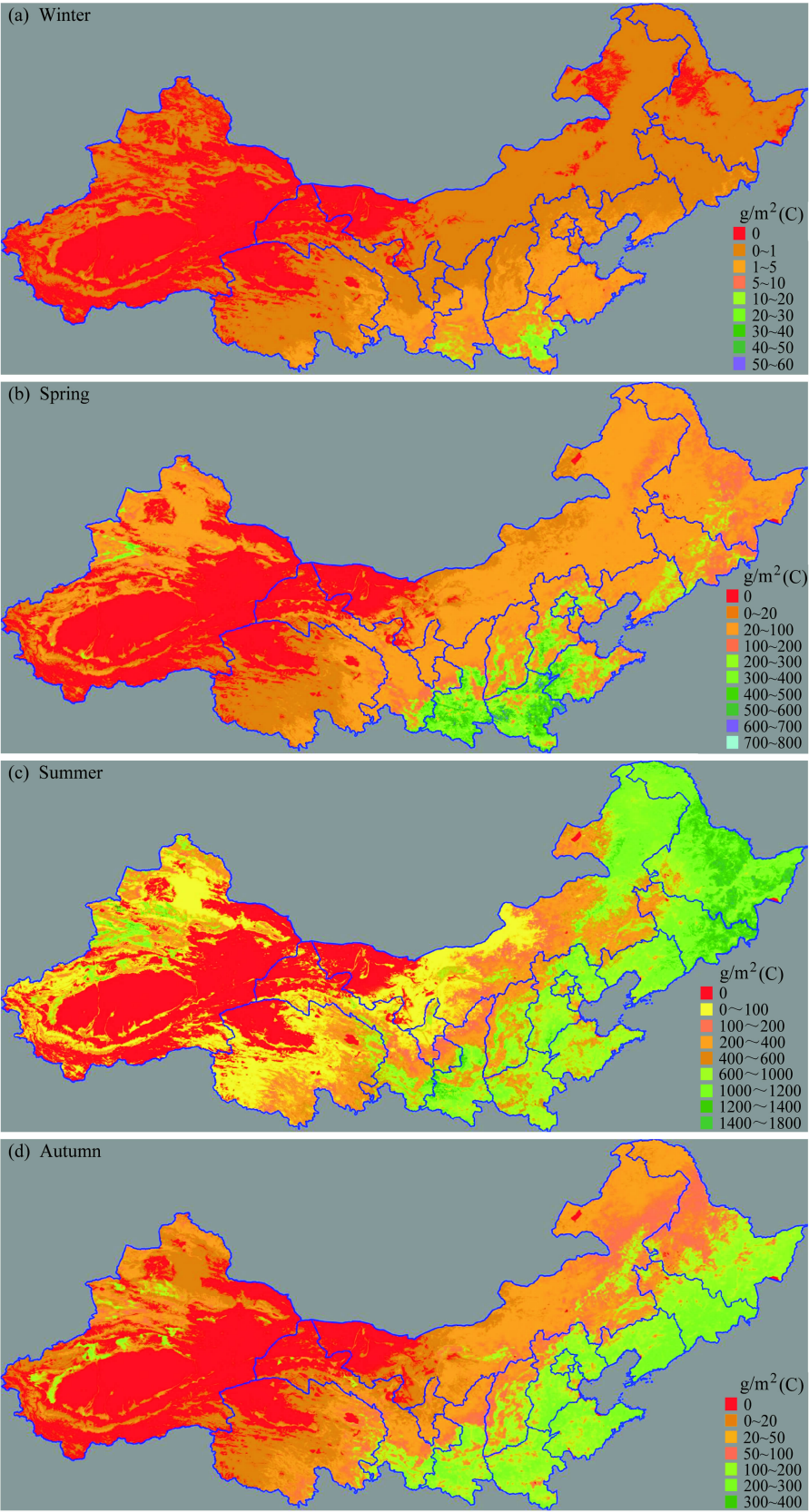


图 4 我国北方四个季节的 GPP 分布
Fig. 4 Spatial distribution of GPP in each season in northern China