

# 气候变化对中国北方季风区生态系统 总初级生产量的影响评价

冯瑶 赵昕奕<sup>†</sup>

北京大学城市与环境学院, 教育部地表分析与模拟重点实验室, 北京 100871; <sup>†</sup> 通信作者, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

**摘要** 利用中国北方季风区 121 个地表气象观测站 2000—2013 年逐日气温和降水资料及 MODIS 遥感 8 天平均总初级生产量数据(MOD17A2), 分别建立了 14 年内 8 天累积平均、最低、最高气温和降雨量与累积总初级生产量的线性气候相关模型。基于模型所得区间的阈值和参数, 计算区域模式 RSM 本底时期 10 年(1996—2005 年)及未来 10 年(2041—2050 年)两种排放情景 RCP4.5 和 RCP8.5 下, 森林、草地和农田生态系统总初级生产量累积开始日期、累积时期、累积结束日期及累积速率变化, 分析平均、最高、最低气温和降水量变化对总初级生产量累积的影响, 并综合评价气候变化对生态系统总初级生产量累积的影响。结果表明: 平均气温和最低气温对总初级生产量的模拟精度高于最高气温和降雨量; 总初级生产量累积开始和结束日期对 4 类气候因子的变化均较敏感, 而累积时期和累积速率仅对平均气温和最高气温的变化较敏感; 未来气候变化将延长累积时期, 增加累积速率, 并提高总初级生产量。

**关键词** 气温; 降水; 总初级生产量; 累积变化

中图分类号 P467

## Assessment of Climate Change Impact on Gross Primary Productivity of Ecosystems in Temperate Northern China

FENG Yao, ZHAO Xinyi<sup>†</sup>

College of Urban and Environmental Sciences, Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), Peking University,  
Beijing 100871; <sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: sh-zhao@urban.pku.edu.cn

**Abstract** Observed daily temperature and precipitation from 121 meteorological stations and satellite-based 8-day average gross primary productivity (GPP) from MOD17A2 are utilized to develop the linear correlation models between 8-day accumulated average temperature, maximum temperature, minimum temperature, precipitation and accumulated GPP in the monsoon zone in Northern China during 2000–2013. Based on the derived thresholds and coefficients of these models, variability in the starting date of GPP accumulation, length of GPP accumulating period, ending date of GPP accumulation as well as GPP accumulation rate on forest, grassland and cropland ecosystems are investigated under two Representative Concentration Pathways (RCP4.5 and RCP8.5) of the Regional Spectral Model (RSM). Finally, the substantial impacts of climate changes including maximum, average, minimum temperature and precipitation on ecosystem productivity are evaluated. Results suggest that average and minimum temperature can predict GPP more accurately than maximum temperature and precipitation. Besides, the starting and ending dates of GPP accumulation are sensitive to the variability in four climatic factors whereas the GPP accumulation period and rate are more sensitive to the variability in average and maximum temperature. Additionally, future climate changes tend to prolong the GPP accumulation period and increase the GPP accumulation rate, thus increasing GPP.

**Key words** temperature; precipitation; gross primary productivity; variability in accumulation

国家自然科学基金(41471073)资助

收稿日期: 2016-12-25; 修回日期: 2017-12-02; 网络出版日期: 2018-05-10

自工业革命以来,全球大气中温室气体浓度迅速升高,由此引发的全球气候变暖问题备受关注<sup>[1]</sup>。陆地生态系统通过改变地表反照率、陆表水循环、温室气体源和汇及能量平衡过程影响区域及全球气候变化。生态系统生产量的研究最早可追溯到 19 世纪 Ebermayer<sup>[2]</sup>对巴伐利亚森林物质生产量的测定。Running 等<sup>[3]</sup>根据植被生长过程中的初级生产量和呼吸作用建立过程模型,基于归一化植被指数、叶面积指数和吸收光合有效辐射等遥感数据,综合考虑光照、温度和水对总初级生产量(gross primary productivity, GPP)的影响,估算全球陆地生物圈的初级生产量,并在计算根、叶等呼吸作用的基础上,估算年净初级生产量(net primary productivity, NPP)。Reeves 等<sup>[4]</sup>对比蒙大拿和北达科他州各城镇遥感产品(MODIS GPP)估算的小麦产量与实际观测小麦产量,验证了利用 MODIS GPP 数据预估小麦产量的有效性。此外,基于经验模型改进得到的生物地球化学模型(BIOME-BGC, CENTURY 和 TEM)及动态描述生态系统结构和功能对气候变化瞬时反映的生物地理模型(BIOME2, DOLY 和 MAPSS)也得到广泛的应用<sup>[5-7]</sup>。基于涡度通量观测塔的地表观测数据常用于验证 MODIS GPP 数据的准确性<sup>[8]</sup>。Rahman 等<sup>[9]</sup>基于涡度通量塔观测的总初级生产量,引入植被指数和地温,建立气温和绿度模型(TG 模型),估算落叶林和常绿林的总初级生产量,结果表明 TG 模型的估算比 MODIS GPP 更接近涡度通量塔的观测值。Zhang 等<sup>[10]</sup>分析不同生态系统类型、地理位置和气候对全球 NPP 与 GPP 比值的影响,表明该比值对气温、降雨及地理因素(如经纬度等)具有较高的依赖性。Weiskittel 等<sup>[11]</sup>对美国西部森林总初级生产量、气候和生境指数关系的研究中表明,GPP 与气候因子的相关性显著高于气候因子与生境指数的相关性。

随着 CO<sub>2</sub> 浓度增加,气温升高,呼吸、蒸腾作用等增强,养分的分解速率加快,叶片寿命及根的活动周期都将缩短,因此未来高温极可能威胁森林和草地的生长及生态系统生产量的累积<sup>[12-13]</sup>。Williams<sup>[14]</sup>利用地球系统模型研究生态系统生产量,结果表明,在气温升高、CO<sub>2</sub> 浓度增加的未来,热浪和极端干旱极有可能给生产量的提高带来压力。此外,Allen 等<sup>[15]</sup>对于干旱和热浪引起的树木死亡的研究也揭示了气候变化对森林生产量的潜在威胁。Zhao 等<sup>[16]</sup>发现 2000—2009 年间的干旱引起全球陆

地净初级生产量减少。除高温引起的干旱外,水分变化也会影响生态系统的总初级生产量。Mo 等<sup>[17]</sup>利用蒸散和遥感生产量数据,基于植被界面过程模型,分析中国东北松花江盆地蒸散变化对总初级生产量的影响及其时空分布。

现有研究大多基于观测数据或生态过程模型估算当下生态系统生产量的变化,较少涉及评价未来气候变化对生产量累积的影响。本文选取中国北方季风区内东北地区的森林生态系统、华北平原的农田生态系统及内蒙古干旱半干旱地区的草地生态系统,以 2000—2013 年地表观测气象资料(气温和降水)及基于遥感产品的 8 天平均总初级生产量数据(MOD17A2)为基础,选取气温和降水对总初级生产量影响最显著的区间,分别建立累积气温、降水与累积总初级生产量的相关模型,借助模型所得区间的阈值及参数,计算区域模式(RSM)本底时期 10 年(1996—2005 年)和未来 10 年(2041—2050 年)两种排放情景(RCP4.5 和 RCP8.5)下森林、草地和农田生态系统总初级生产量的累积开始和结束日期、累积时期以及累积速率的变化,分析气温和降水对总初级生产量累积的影响,并综合评价气候变化对生态系统总初级生产量累积的影响。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区域

研究区域位于中国北方季风区,地理坐标为 33°41'N—53°33'N, 97°32'E—135°05'E,主要包括东北地区的森林生态系统、华北地区的农田生态系统及内蒙古干旱与半干旱地区的草地生态系统。自南向北分别跨暖温带、中温带与寒温带,具有典型的温带季风性气候特征。自东向西,从湿润区、半湿润区过渡到半干旱地区,年降雨量自 1000 mm 降至 200 mm 以下。研究区域位置见图 1。

### 1.2 数据

#### 1.2.1 遥感数据

遥感土地覆被类型产品(MCD12Q1)中,马里兰大学的分类方法将土地覆被分为水体、常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、草地、农田和城市等 14 个大类([https://lpdaac.usgs.gov/products/modis\\_products\\_table/mcd12q1](https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table/mcd12q1))。该产品以较高空间分辨率(500m)覆盖全球,在以往研究中得到广泛应用<sup>[18-19]</sup>。本文基于该产品,提取研究区域 2010 年土地覆被类型信息。根据研究区域内

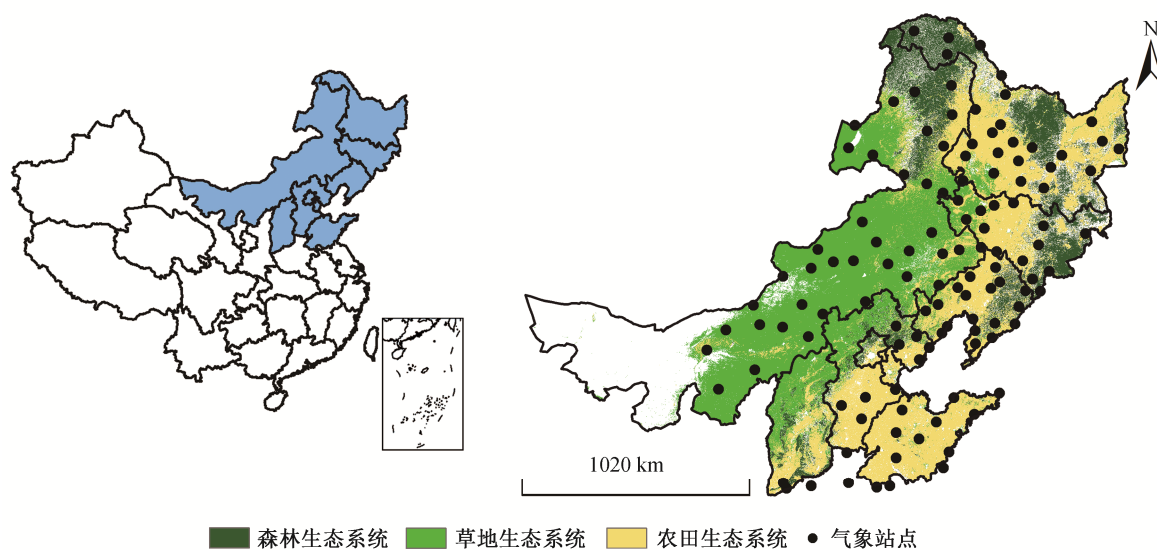


图 1 研究区域示意图及三大生态系统分布  
Fig. 1 Location of the study area and the distribution of three major ecosystems

植被类型的覆盖度,最终选取混交林(mixed forest, 14.06%)、草地(grassland, 33.84%)和农田(cropland, 31.75%)分别作为本文研究的森林(MF)、草地(GL)和农田(CL)三大生态系统(见图 1)。行政边界图来自国家基础地理信息中心(<http://ngcc.cn/article/sjcg/dlg/>)。

生态系统生产量数据采用 MODIS 总初级生产量/净初级生产量工程(MODIS GPP/NPP Project)提供的 2000—2013 年 8 天平均总初级生产量数据(MOD17A2, <http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod17>),空间分辨率为 1 km。Turner 等<sup>[20]</sup>选取极地苔原、阔叶林、草原、农田等 9 个样点,在生态系统尺度上,利用涡度相关通量塔和定点观测的净初级生产量验证 MOD17 总初级生产量和净初级生产量,结果表明 MODIS 计算总初级生产量和净初级生产量较准确。该套数据集在以往的研究中已得到广泛应用<sup>[21-23]</sup>。

### 1.2.2 气象数据

气象数据来自中国气象数据共享服务网公布的中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。经过质量控制后,相对于以往发布的地面同类数据产品,该数据集的质量及完整性明显提高,各要素数据的实有率普遍在 99%以上,数据的正确率均接近 100%。本文选取该数据集 2000—2013 年研究区域内 121 个气象站点逐日平均、最高、最低气温,日总降雨

量等基本气象要素资料(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。站点分布见图 1。

### 1.2.3 模式数据

本文选取区域模式(Regional Spectral Model, RSM)下本底时期 10 年(1996—2005 年)以及未来 10 年(2041—2050 年)两种代表性浓度路径 RCP4.5 和 RCP8.5 (representative concentration pathways, RCPs)提供的逐日平均、最高、最低气温(K)和降雨( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ),空间分辨率为  $0.44^\circ$ 。该区域模式由国家环境预测中心(NCEP)开发。RCP4.5 情景是通过一系列新技术和政策的使用,减少温室气体的排放,从而使总的辐射强迫变化在 2100 年以前稳定下来,是一种相对稳定的情景<sup>[24]</sup>;而 RCP8.5 情景下,温室气体排放持续增加,是温室气体浓度最高的代表性情景<sup>[25]</sup>。

## 1.3 研究方法

以站点所在及周围共计 9 个栅格的平均值代表气象站点所能代表的总初级生产量;提取站点所在栅格的气候模式属性值,建立站点未来气象数据序列;利用前后年份同期均值对气象资料中的异常值和缺测值进行插值;调整逐日气象资料时间分辨率为 8 天平均,并进行累加,计算累积气候因子。气候因子的选择主要借鉴作物生长对积温和水分的要求、高温事件对作物生长的影响及作物生长过程中有机质累积的思想,因此气候因子分别选取平均、

最高、最低气温和降雨量。

根据 121 个站点累积气候因子和累积总初级生产量的变化特征, 经过大量拟合实验后, 确定选择线性拟合较好的区间, 建立气候因子与总初级生产量的相关模型, 基于 121 个站点建立如式(1)所示的一元线性气候相关模型:

$$Y=aX+b, \tag{1}$$

其中,  $Y$  为累积总初级生产量,  $X$  为累积气候因子,  $a$  和  $b$  分别为模型参数。

建模区间定义如表 1 所示。定义选取的气候因子累积区间为区间 1, 选取的总初级生产量累积区间为区间 2。累积最低、平均气温和总初级生产量的模型区间选取遵循以下原则: 区间 1, 以累积气温最低值的日期为起点, 累积气温最高值的日期为终点; 区间 2, 总初级生产量开始累积的日期为起点, 总初级生产量的累积量达到最高并不再增加的日期为终点; 取两区间的相交区间为累积最低气温(平均气温)与累积总初级生产量的建模区间。累积最高气温、降雨量和累积总初级生产量的模型区间选取遵循以下原则: 区间 1, 累积最高气温或降雨量的增加量达到最大值的日期为起点, 累积气温或降雨增加至最高值并不再增加的日期为终点; 区间 2, 总初级生产量开始累积的日期为起点, 总初级生产量的累积量达到最高并不再增加的日期为终点; 取两区间的相交区间为累积最高气温(降雨量)与累积总初级生产量的建模区间。用拟合优度( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)评价模型的模拟效果。

表 1 中,  $acTmin$ ,  $acTavg$ ,  $acTmax$  和  $acprep$  分别为累积最低、平均、最高气温和降雨量。 $\Delta acTmax$  和  $\Delta acprep$  为累积最高气温和累积降雨量的增加量, 由式(2)计算得到:

$$\Delta acTmax=Tmax_i-Tmax_{i-1}, \Delta acprep=prep_i-prep_{i-1}, \tag{2}$$

$i$  为第  $i$  个 8 天,  $i-1$  为前一个 8 天, 并且  $1 < i \leq 46$ 。定义总初级生产量累积开始日期为建模区间起点,

累积结束日期为建模区间终点, 累积时期为区间长度, 累积速率为建模区间内累积总初级生产量与区间长度的比值。

用未来 10 年 4 类气候因子估算的总初级生产量累积开始日期、累积时期、累积结束日期和累积速率的均值( $\bar{F}_{10}^*$ )与模式 10 年本底时期相应变量的均值( $\bar{F}_{10}$ )之差  $\Delta F$  评价未来气候变化对总初级生产量累积的影响, 见式(3)~(6)。

$$\bar{F}_{10}^* = \frac{\sum_{i=1}^{10} F_i^*}{10}, \tag{3}$$

$$\bar{F}_{10} = \frac{\sum_{i=1}^{10} F_i}{10}, \tag{4}$$

$$\Delta F = \bar{F}_{10}^* - \bar{F}_{10}, \tag{5}$$

$$F = \frac{\Delta F_{Tavg} + \Delta F_{prep} + \Delta F_{Tmax} + \Delta F_{Tmin}}{4}, \tag{6}$$

其中,  $F_i^*$ ,  $F_i$  分别为模式未来 10 年和本底 10 年中第  $i$  年平均累积开始日期、累积时期、累积结束日期、累积速率和累积总初级生产量,  $\Delta F$  为未来不同气候因子对总初级生产量累积的影响,  $F$  为综合各气候因子的未来气候变化对总初级生产量累积的影响。在站点综合评价的基础上, 进一步分析气候变化对不同生态系统上总初级生产量的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 气候相关模型验证

气候相关模型检验结果表明: 121 个站点模型平均拟合优度( $R^2$ )按平均气温( $R^2=0.96$ )、最低气温( $R^2=0.95$ )、最高气温( $R^2=0.89$ )、降雨量( $R^2=0.66$ )的顺序依次降低, 而均方根误差(RMSE)按平均气温(RMSE=284.87 gC/m<sup>2</sup>)、最低气温(RMSE= 253.58 gC/m<sup>2</sup>)、最高气温(RMSE=317.17 gC/m<sup>2</sup>)、降雨量

表 1 气候相关模型建立原则  
Table 1 Principles on the construction of climate-GPP models

气候因子(区间 1)		总初级生产量(区间 2)		建模区间
起点	终点	起点	终点	
$acTmin/acTavg=Min.$	$acTmin/acTavg=Max.$	$acGPP>0$	$acGPP=Max.$	区间 1∩区间 2
$\Delta acTmax/\Delta acprep=Max.$	$acTmax/acprep=Max.$	$acGPP>0$	$acGPP=Max.$	

说明: Min. 和 Max. 代表各变量的最低和最高值。

(RMSE=549.04 gC/m<sup>2</sup>)的顺序依次增加(见图 2)。由此可知,平均气温和最低气温对总初级生产量的模拟精度高于最高气温和降雨量,虽然降雨量对总初级生产量的模拟精度较低,但其拟合优度仍在可接受范围内,因此本研究使用的建模方法适合该研究区域和研究阶段。

## 2.2 不同气候因子预估总初级生产量累积变化

不同气候因子预估区域总初级生产量累积变化的情况见图 3。平均气温、降雨量和最低气温预估累积开始日期均呈提前趋势,而最高气温预估累积开始日期呈推迟趋势,表明总初级生产量的累积开

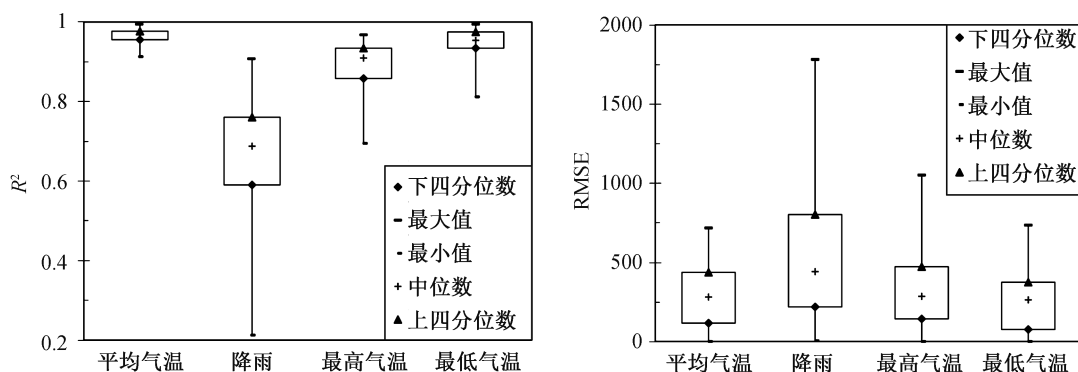
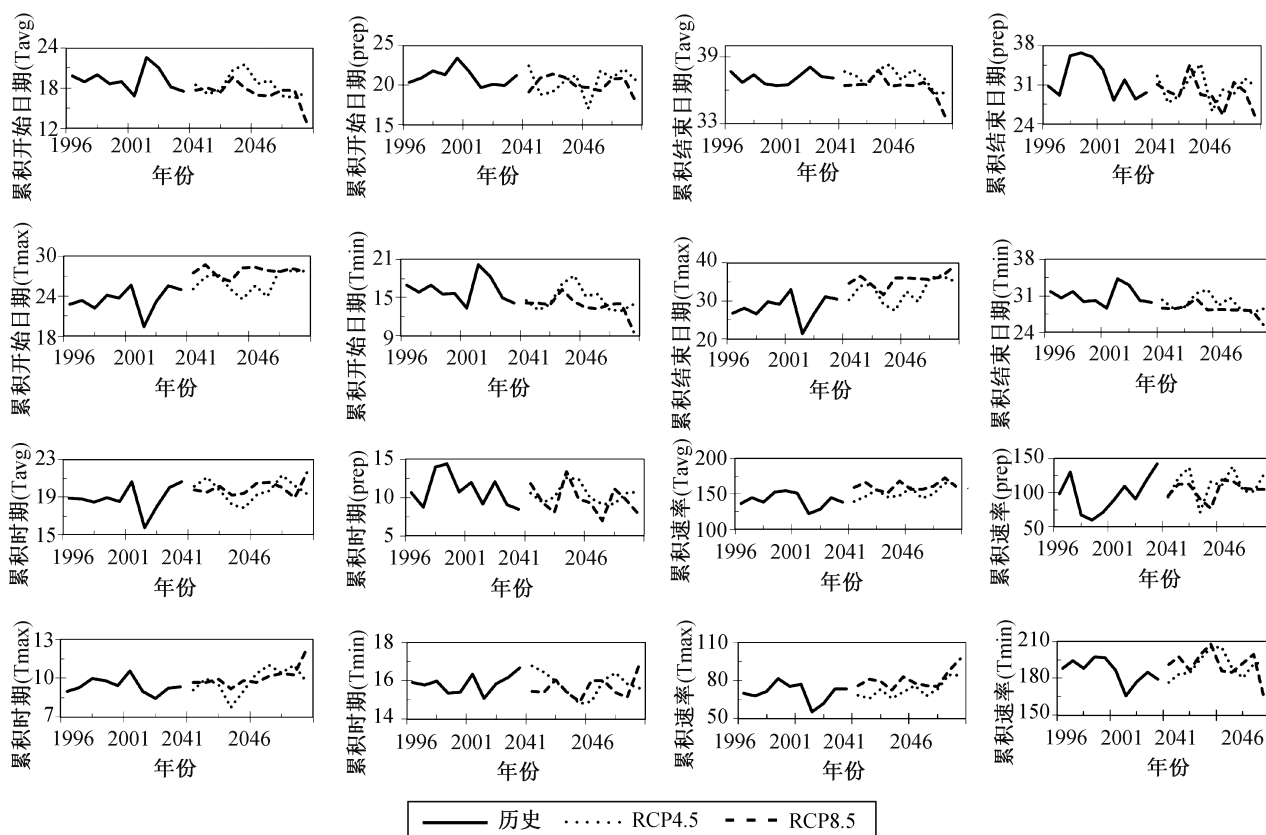


图 2 气候相关模型拟合优度和均方根误差综合评价  
Fig. 2 Comprehensive evaluation of  $R^2$  and RMSE of climate-GPP models



累积开始日期、累积时期、累积时期单位为 8 天,累积速率单位为 gC/(m<sup>2</sup>·8d)

图 3 不同气候因子预估 RSM 模式下 GPP 累积变化  
Fig. 3 Variability in the accumulation of GPP by four climatic factors

始日期对 4 类气候因子的变化均较敏感。平均气温和最高气温预估累积时期呈延长趋势, 降雨预估累积时期呈缩短趋势, 而最低气温预估累积时期无显著变化, 表明累积时期对平均气温和最高气温的变化较敏感。平均气温、降雨量和最低气温预估累积结束日期呈提前趋势, 而最高气温预估累积结束日期呈推迟趋势, 累积结束日期对 4 类气候因子的变化均较敏感。平均气温和最高气温预估累积速率呈增加趋势, 而降雨量与最低气温的预估结果无显著变化, 表明累积速率对平均气温和最高气温的变化较敏感。

### 2.3 不同生态系统总初级生产量累积差异

#### 2.3.1 平均气温模型预估生态系统总初级生产量累积变化

平均气温预估 RSM 模式中不同情景下各生态系统上总初级生产量累积变化如图 4 所示。其中, 累积开始和结束日期均呈提前趋势, 累积时期呈延长趋势, 累积速率呈增加趋势。不同生态系统中, RCP4.5 情景下, 草地生态系统累积开始日期提前趋势最大, 而 RCP8.5 情景下森林生态系统累积开始日期提前趋势最大。两类情景下, 草地生态系统累积时期延长趋势最大。森林生态系统累积结束日期提前趋势最大且累积速率增加趋势最大。

#### 2.3.2 降雨量模型预估生态系统总初级生产量累积变化

降雨量预估 RSM 模式中不同情景下各生态系统的总初级生产量累积变化如图 5 所示, 其中, RCP4.5 情景下, 森林和农田生态系统累积开始日

期呈推迟趋势, 草地生态系统累积开始日期呈提前趋势; 而 RCP8.5 情景下, 3 类生态系统累积开始日期均呈提前趋势。两类情景下森林和草地生态系统累积结束日期呈提前趋势, 而农田生态系统累积结束日期呈推迟趋势。3 类生态系统累积时期呈缩短趋势, 累积速率呈增加趋势。不同生态系统中, 两类情景下, 森林生态系统累积时期缩短趋势最大, 累积速率增加趋势最大。

#### 2.3.3 最高气温模型预估生态系统总初级生产量累积变化

最高气温预估 RSM 模式中不同情景下各生态系统上总初级生产量累积变化如图 6 所示。其中, 两类情景下, 各生态系统上累积开始和结束日期均呈推迟趋势, 累积时期呈延长趋势, 累积速率呈增加趋势。不同生态系统中, 两类情景下, 森林生态系统累积开始和结束日期推迟趋势最大, RCP4.5 情景下农田生态系统累积时期延长趋势最大, RCP8.5 情景下森林生态系统累积时期延长趋势最大, 两类情景下森林生态系统累积速率增加趋势最大。

#### 2.3.4 最低气温模型预估生态系统总初级生产量累积变化

最低气温预估 RSM 模式中不同情景下各生态系统上总初级生产量累积变化如图 7 所示, 其中, RCP4.5 情景下, 农田生态系统累积开始日期提前趋势最大, RCP8.5 情景下, 草地生态系统累积开始日期提前趋势最大。两种情景下, 森林生态系统累积时期缩短趋势最大, 农田生态系统累积结束日期提前趋势最大, 草地和农田生态系统累积速率呈增

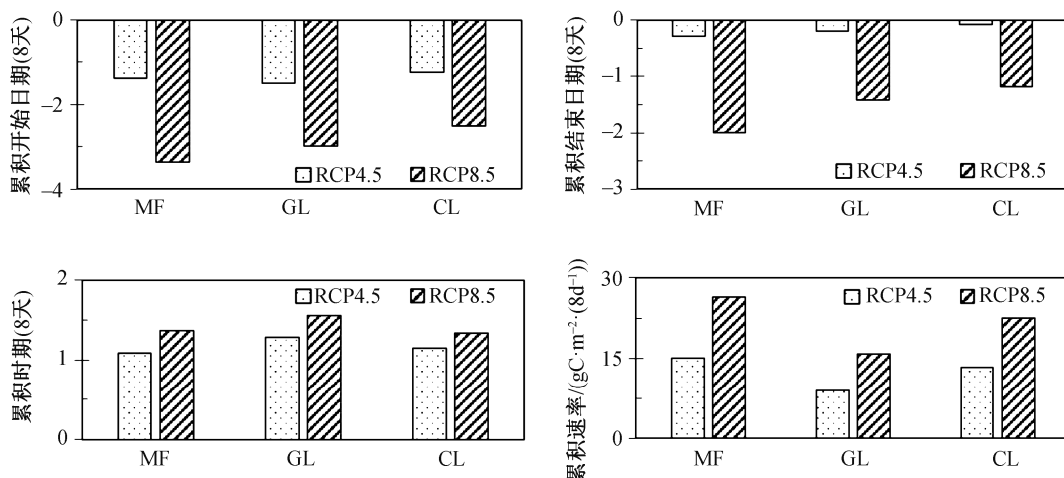


图 4 平均气温预估不同生态系统上总初级生产量累积差异

Fig. 4 Variability in GPP accumulation on different ecosystems estimated by average temperature

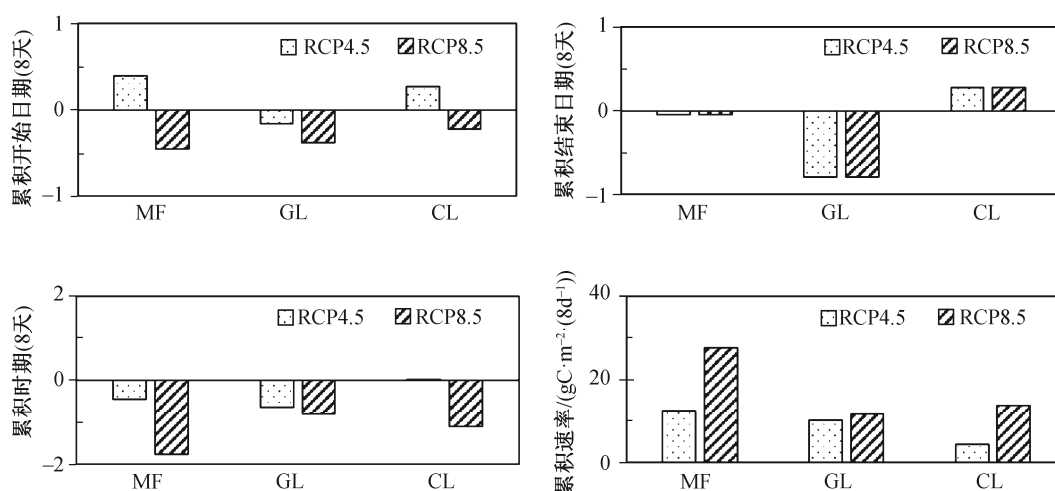


图 5 降雨量预估不同生态系统上总初级生产量累积差异

Fig. 5 Variability in GPP accumulation on different ecosystems estimated by precipitation

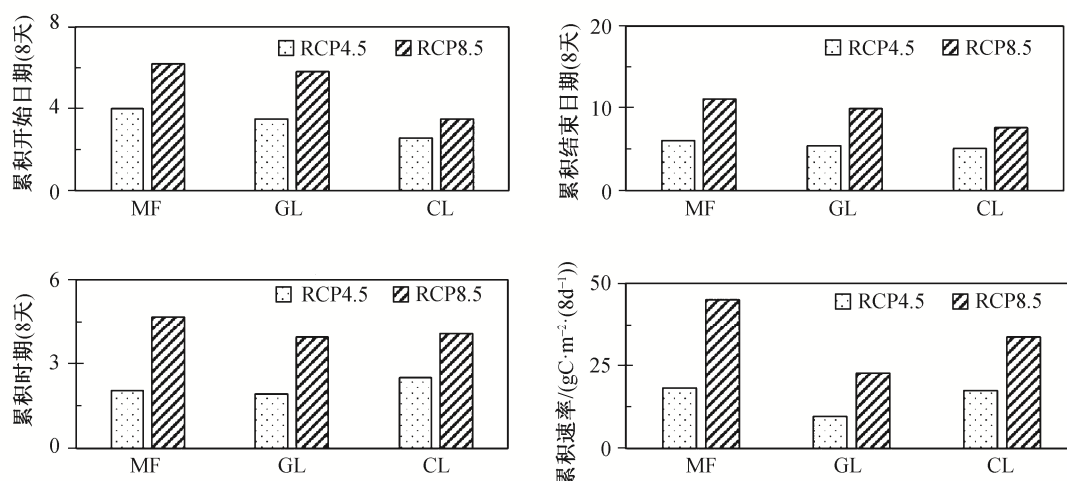


图 6 最高气温预估不同生态系统上总初级生产量累积差异

Fig. 6 Variability in GPP accumulation on different ecosystems estimated by maximum temperature

加趋势,而森林生态系统累积速率呈减小趋势。

### 2.3.5 综合评价

综合评价气候变化对不同生态系统总初级生产量累积的影响(图 8),其中,RCP4.5 情景下,森林、草地生态系统累积开始日期呈推迟趋势,而农田生态系统累积开始日期呈提前趋势;RCP8.5 情景下,3 类生态系统累积开始日期均呈提前趋势,其中农田生态系统上累积开始日期提前趋势最大;两类情景下,不同生态系统累积时期呈延长趋势。RCP4.5 情景下,农田生态系统累积时期延长趋势最大;而 RCP8.5 情景下,草地生态系统上累积时期延长趋

势最大;两类情景下,不同生态系统累积结束日期均呈推迟趋势,累积速率呈增加趋势,并且森林生态系统上累积结束日期推迟趋势最大、累积速率增加趋势最大。3 类生态系统总初级生产量均有增加趋势,并且 RCP4.5 情景下农田生态系统总初级生产量增加最多,而 RCP8.5 情景下森林生态系统总初级生产量增加趋势最多。对比两种情景,温室气体排放较大的 8.5 情景下,累积开始日期的提前趋势、累积时期的大延长趋势、累积结束日期的推迟趋势、累积速率的增加趋势及总初级生产量的增加趋势均较大。

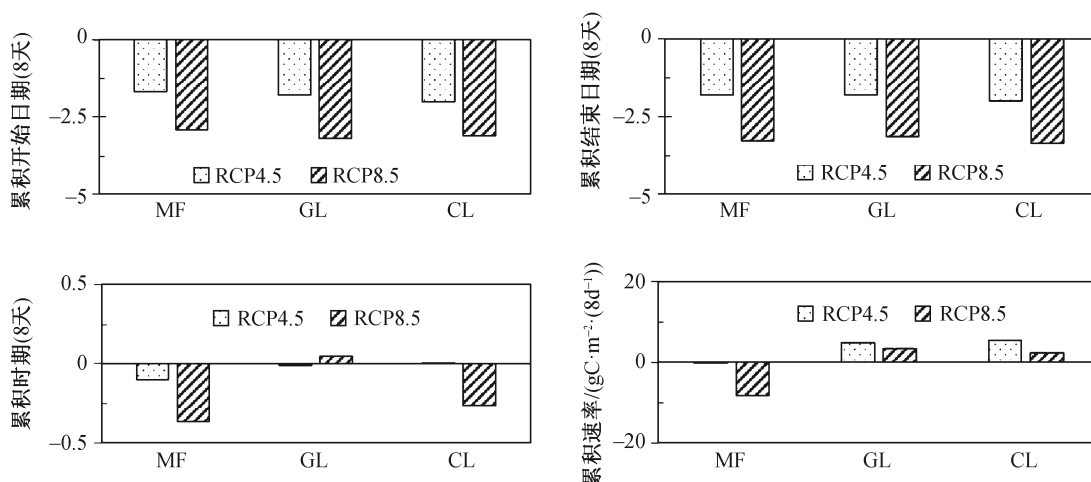


图 7 最低气温预估不同生态系统上总初级生产量累积差异  
Fig. 7 Variability in GPP accumulation on different ecosystems estimated by minimum temperature

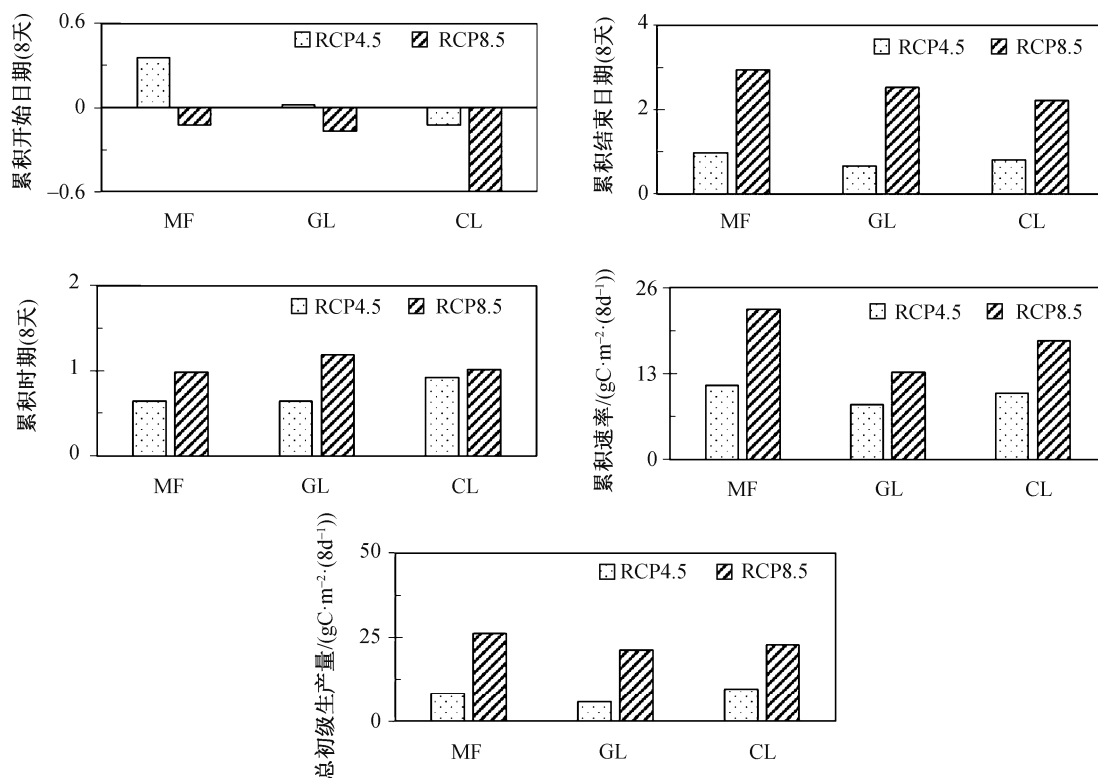


图 8 气候变化对不同生态系统总初级生产量累积的影响差异  
Fig. 8 Impact of climate change on GPP accumulation on different ecosystems

### 3 结论和讨论

本文利用 2000—2013 年 121 个气象站点气温和降水资料及遥感生产量产品(MOD17A2)中 8 天平均总初级生产量数据, 结合区域模式 RSM 本底

时期 10 年(1996—2005 年)以及未来 10 年(2041—2050 年)逐日气温和降水数据, 评价中国北方季风区气候变化对森林、草地和农田生态系统总初级生产量累积的影响, 得到如下结果。

1) 平均气温和最低气温对总初级生产量的模

拟精度高于最高气温和降雨量。

2) 总初级生产量累积开始和结束日期对 4 类气候因子的变化均较敏感, 而累积时期与累积速率仅对平均气温和最高气温的变化较敏感。

3) 平均气温模型预估未来总初级生产量累积开始和结束日期呈提前趋势, 累积时期呈延长趋势而累积速率呈增加趋势; 降雨量模型预估累积时期呈缩短趋势而累积速率呈增加趋势; 最高气温模型预估累积开始和结束日期呈推迟趋势, 累积时期呈延长趋势, 累积速率呈增加趋势; 最低气温模型预估累积开始和结束日期均呈提前趋势。

4) 综合评价气候变化对总初级生产量累积影响表明: 除 RCP4.5 情景下累积开始日期的变化因生态系统而异外, RCP8.5 情景下, 3 类生态系统累积开始日期均呈提前趋势; 两类情景下, 各生态系统上累积时期呈延长趋势, 累积结束日期呈推迟趋势, 累积速率呈增加趋势, 并且总初级生产量呈增加趋势。

本研究所选生态系统包括中国北方季风区内东北地区森林生态系统、内蒙古草地生态系统和华北平原农田生态系统。三大生态系统所在地区具有独特的气候特征, 如东北地区气温偏低, 内蒙古地区普遍干旱, 华北地区水热资源丰富。评价未来不同气候变化情景对不同生态系统总初级生产量的累积影响, 可间接地反映气候变化对研究区域林业、农业和畜牧业的影响。

由于模型的建立仅考虑累积总初级生产量和累积气温、降雨线性拟合较好的阶段, 因此本文所讨论的累积开始日期、结束日期、累积时期及累积速率并不与物候期严格地一一对应, 仅表示气温和降水对总初级生产量的累积影响最显著区间的开始和结束日期、区间长度以及该区间内平均总初级生产量累积速率。

### 参考文献

- [1] Earth System Research Laboratory. Carbon Dioxide at Mauna Loa reaches new milestone: top 400 ppm [EB/OL]. (2013-05-10) [2015-02-01]. <https://www.esrl.noaa.gov/news/2013/CO2400.html>
- [2] Ebermayer E. The entire doctrine of forest litter with regard to the chemical statics of silviculture: under the basis of the royal in the State Forests of Bavaria hired investigations. Springer, 1876
- [3] 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
- [4] Reeves M C, Zhao M S, Running S W. Usefulness and limits of MODIS GPP for estimating wheat yield. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(7): 1403-1421
- [5] 彭少麟, 侯爱敏, 周国逸. 气候变化对陆地生态系统第一性生产力的影响研究综述. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 717-722
- [6] VEMAP Member. Vegetation/ecosystem modeling and analysis project: comparing biogeochemistry models in a continental-scale of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO<sub>2</sub> doubling. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 407-437
- [7] Steffen W L. Global change and terrestrial ecosystem: integrative activities. *Global Change Report*, 1995, 95: 6-7
- [8] Heinsch F A, Zhao M S, Running S W, et al. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1908-1925
- [9] Rahman A F, Sims D A, Cordova V D, et al. Potential of MODIS EVI and surface temperature for directly estimating per-pixel ecosystem C fluxes. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(19): L19404
- [10] Zhang Y J, Ming X, Chen H, et al. Global pattern of NPP to GPP ratio derived from MODIS data: effects of ecosystem type, geographical location and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, 18(3): 280-290
- [11] Weiskittel A R, Crookston N L, Radtke P J. Linking climate, gross primary productivity and site index across forests of the western United States. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(8): 1710-1721
- [12] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, 437: 529-533
- [13] Wagle P, Xiao X M, Torn M S, et al. Sensitivity of vegetation indices and gross primary production of tallgrass prairie to severe drought. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 1-14

- [14] Williams C A. Heat and drought extremes likely to stress ecosystem productivity equally or more in a warmer, CO<sub>2</sub> rich future. *Environment Research Letter*, 2014, 9(10): 101002
- [15] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660–684
- [16] Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science*, 2010, 329: 940–943
- [17] Mo X G, Liu S X, Meng D J, et al. Exploring the interannual and spatial variations of ET and GPP with climate by a physical model and remote sensing data in a large basin of Northeast China. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(6): 1945–1963
- [18] Liang D, Zuo Y, Huang L, et al. Evaluation of the consistency of MODIS land cover product (MCD12Q1) based on Chinese 30 m GlobeLand30 Datasets: a case study in Anhui Province, China. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(4): 2519–2541
- [19] 夏文韬, 王莺, 冯琦胜, 等. 甘南地区 MODIS 土地覆盖产品精度评价. *草业科学*, 2010, 27(9): 11–18
- [20] Turner D P, Ritts W D, Warren B C, et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102(3/4): 282–292
- [21] 李登科, 范建中, 王娟. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2776–2782
- [22] Hunt E J. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(8): 1725–1730
- [23] Monteith J. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9(3): 747–766
- [24] Thomson A M, Calvin K V, Smith S J, et al. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 2011, 109(1/2): 77–94
- [25] Riahi K, Rao S, Krey V, et al. RCP 8.5 scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 2011, 109(1/2): 33–57