

王苗苗,周蕾,王绍强,等.东北地区生长季长度变化及其对总初级生产力的影响分析[J].地理科学,2018,38(2):284-292.[Wang Miaomiao, Zhou Lei, Wang Shaoqiang et al. Change of Growing Season Length and Its Effects on Gross Primary Productivity in Northeast China. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(2): 284-292.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.02.015

# 东北地区生长季长度变化及其对 总初级生产力的影响分析

王苗苗<sup>1,2</sup>, 周蕾<sup>1</sup>, 王绍强<sup>1,2</sup>, 汪小钦<sup>3</sup>

(1.中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101;2.中国科学院  
大学资源与环境学院,北京 100190;3.福州大学空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室  
福建省空间信息工程研究中心,福建 福州 350002)

**摘要:**基于生态过程机理模型 BEPS(Boreal Ecosystem Productivity Simulator)和卫星遥感资料模拟了 2001~2010 年中国东北地区陆地生态系统总初级生产力(GPP)的时空分布特征,分析了生长季长度变化及其对东北地区陆地生态系统 GPP 的影响。研究表明:① 2001~2010 年东北地区生长季开始时间、结束时间及生长季长度均没有显著的变化趋势,生长季长度的变化主要受到春季温度的影响。② 东北地区陆地生态系统年均 GPP 总值为  $1\,057.8 \pm 44.6 \text{ TgC}$ ,其中生长季内 GPP 值约占总 GPP 值的 97.57%,即东北地区 GPP 主要是在生长季内固定的碳量。③ 东北地区 GPP 主要受降水量的调节,而生长季长度变化对 GPP 的影响并不显著。

**关键词:**生长季长度;总初级生产力;BEPS 模型;东北地区

**中图分类号:**Q14      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0690(2018)02-0284-09

IPCC 第五次评估报告指出,全球平均气温在过去 130 a 间升高了  $0.85^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>,而气候变暖将显著影响陆地生态系统的结构和功能<sup>[2]</sup>。在过去几十年里,基于地面和卫星的观测都表明北半球中高纬度地区生长季长度有明显的增加趋势<sup>[3,4]</sup>。生长季是生态系统功能发挥的重要控制因素,其长度变化通过改变陆地与大气间的相互作用<sup>[5]</sup>,从而改变生态系统碳水循环<sup>[6]</sup>。因此,研究生长季长度变化及其对陆地生态系统碳水循环的影响对应未来气候变化有重要的意义。

目前大多数研究认为植被的生产力受到温度的影响,一方面温度升高会在一定程度上促进植被的光合作用,增加陆地生态系统生产力;另一方面,温度升高会使生长季延长<sup>[7]</sup>,增加植被的生长时间,从而提高陆地生态系统的生产力<sup>[8,9]</sup>。但是植被光合作用受到多种因素的共同作用,气温升

高在延长生长季的同时所引发的干旱也会限制植被的光合速率,导致植被的生产力降低,从而影响全年陆地生态系统生产力<sup>[10,11]</sup>。因此,全球气候变暖导致的生长季长度变化对陆地生态系统生产力的影响还存在很大的不确定性。

生长季长度变化对植被生长有重要的影响<sup>[12-15]</sup>,可以直接影响陆地生态系统碳循环<sup>[16]</sup>。东北地区是中国森林、草地资源最为丰富的地区之一<sup>[17]</sup>,其中森林面积占全国森林总面积的 30%,森林碳储量占全国碳储量的 24%~31%<sup>[18]</sup>。因此东北地区陆地生态系统碳循环对中国陆地生态系统的演化、区域气候以及碳收支等方面都有较大的影响<sup>[19]</sup>。生态过程机理模型 BEPS(Boreal Ecosystem Productivity Simulator),从植被的生长机理出发,结合气候及遥感等数据,能够实时反映气候变化状态下陆地生态系统生产力的变化。因此,本文

**收稿日期:**2017-02-17; **修订日期:**2017-03-21

**基金项目:**国家重点研发计划(2017YFC0503803, 2016YFA0600202, 2016YFB0501501)、国家自然科学基金项目(41571192)资助。  
[Foundation: National Key Research and Development Program of China (2017YFC0503803, 2016YFA0600202, 2016YFB0501501), National Natural Science Foundation of China (41571192).]

**作者简介:**王苗苗(1991-),女,福建古田人,博士研究生,主要从事生态遥感及生态模型研究。E-mail: wangmm.16b@igsnrr.ac.cn

**通讯作者:**周蕾,助理研究员。E-mail: zhoulei@igsnrr.ac.cn

通过生态过程模型 BEPS, 结合气象、卫星遥感等数据模拟 2000~2010 年东北地区陆地生态系统总初级生产力(gross primary productivity, GPP)时空分布特征, 并分别从时间和空间尺度上分析中国东北地区生长季长度变化及其对陆地生态系统 GPP 的影响。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区概况

中国东北地区位于 115°5'~135°2'E 和 38°40'~53°30'N 之间<sup>[20]</sup>(图 1)。研究区总面积为 124.3×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>, 约占中国国土面积的 12.9%。研究区属大陆性季风型气候, 夏季温暖湿润, 冬季寒冷干燥。年均温度为 -7.3℃~12℃, 年总降水量范围为 180~926 mm(在东部高海拔地区降水量可达到 1 336 mm), 主要植被类型为落叶阔叶林、落叶针叶林、针阔混交林和草地。

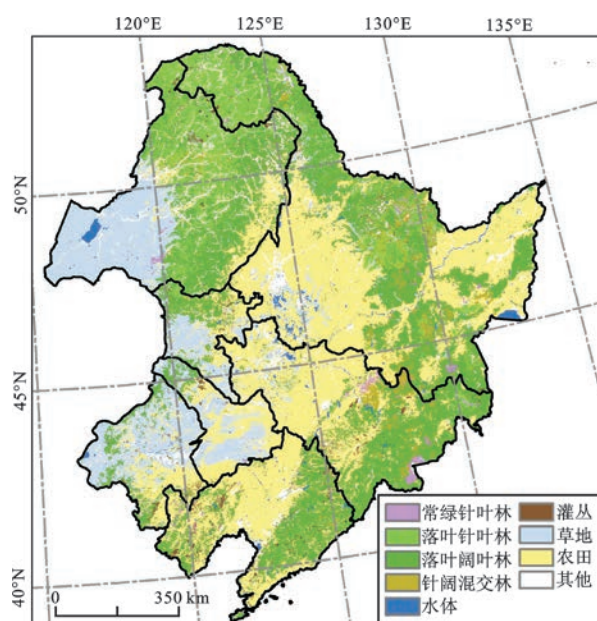


图 1 中国东北地区 2010 年土地覆被类型的空间分布

Fig.1 The spatial distribution of land cover in Northeast China in 2010

### 1.2 模型简介

BEPS 模型是 Liu 和 Chen 等人在 FOREST-BGC 模型的基础上发展起来的生态过程模型<sup>[21~23]</sup>, Farquhar 把叶片尺度瞬时光合作用模型<sup>[24]</sup>扩展到冠层尺度实现遥感数据与机理生态模型的结合<sup>[25]</sup>, 能够反映实际条件下植被的光合作用和蒸腾作用的

变化, 可用于模拟陆地生态系统每日碳水通量, 并被广泛应用于估算中国陆地生态系统碳水通量<sup>[26~30]</sup>。

GPP 的计算如公式 1~3 所示。

$$GPP = (A_{sun} LAI_{sun} + A_{shade} LAI_{shade}) \times \text{日长} \times \text{转换比例}_{GPP} \quad (1)$$

式中,  $A_{sun}$  和  $A_{shade}$  为单叶片的阳叶和阴叶的光合作用量;  $LAI_{sun}$  和  $LAI_{shade}$  表示单叶片的阳叶和阴叶的叶面积指数。

阳叶的叶面积指数:

$$LAI_{sun} = 2\cos\theta[1 - \exp(-0.5\sigma LAI/\cos\theta)] \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为太阳高度角;  $\sigma$  为叶聚集指数。

阴叶的叶面积指数:

$$LAI_{shade} = LAI - LAI_{sun} \quad (3)$$

### 1.3 数据来源与预处理

BEPS 模型主要的输入数据包括每日气象数据(日最高温度、日最低温度、日降水量、日相对湿度及日总辐射)、叶面积指数数据、土地覆盖数据及土壤质地数据等, 输出数据为陆地生态系统每日 GPP。

#### 1.3.1 气象数据

本研究使用的气象数据下载自中国气象科学数据共享服务网(<http://www.esi.cn/metadata/page/index.html>), 包括东北地区内气象站点(共 101 个)。逐日气象数据(包括日最高气温、日最低气温、日降水量、日均相对湿度), 利用 ANUSPLIN 软件<sup>[31,32]</sup>插值成 1 km 空间分辨率的栅格数据。由于东北地区辐射气象站点较少, 故首先下载气象站点日照时数数据, 通过太阳总辐射与日照时数的关系, 再通过 ANUSPLIN 算法插值成 1 km 空间分辨率的辐射数据<sup>[33]</sup>。

#### 1.3.2 叶面积指数数据

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI) 通常定义为单位地表面上绿叶总面积的一半<sup>[34]</sup>, 作为表征冠层结构的关键参数, LAI 是 BEPS 模型的重要输入参数。本研究使用的 LAI 数据采用 MOD09A1 及 MCD43A1 数据和基于 4 尺度几何光学模型的反演算法生成 2001~2010 年每 8 d 的 500 m 空间分辨率数据产品, 该 LAI 指数质量较高, 在全国范围内, 验证精度大于 70%<sup>[35]</sup>。

#### 1.3.3 土地覆盖数据

土地覆盖数据既为 BEPS 模型模拟不同土地覆盖类型的生态系统生产力赋予特定的生理生态参数, 也为典型森林生态系统的划分提供了依据。

本研究选用中国科学院遥感与数字地球研究所提供的中国土地覆盖数据 China Cover 2010。数据空间分辨率为 250 m<sup>[36]</sup>。东北地区各土地覆盖类型的空间分布如图 1 所示,其中农田受人为因素影响大,所以本文暂不研究生长季长度对农田生态系统的影响。

#### 1.3.4 土壤质地数据

土壤质地数据来源于北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院陆面过程和资源生态实验室的数据网站 (<http://globalchange.bnu.edu.cn/research/>)。

上述 BEPS 模型的输入数据都处理成具有相同的行列号及投影坐标,以保证像元一一对应。本研究统一采用 Albers 投影(第一标准纬线、第二标准纬线以及中央经线分别为 25°N、47°N、110°E),空间分辨率为 1 km。

### 1.4 研究方法

#### 1.4.1 生长季长度

研究中将生长季长度定义为某年日连续 5 d 滑动平均温度大于 5℃到日平均温度连续 5 d 小于 5℃时间段的总天数<sup>[37]</sup>。生长季开始定义为某年日连续 5 d 滑动平均温度大于 5℃的时间,某年日连续 5 d 滑动平均温度低于 5℃的时间定义为生长季结束,生长季长度为生长季结束时间与生长季开始时间之差。

5 d 滑动平均温度采用如下公式计算<sup>[38]</sup>:

$$RT_N = (T_{(N-2)} + T_{(N-1)} + T_N + T_{(N+1)} + T_{(N+2)})/5 \quad (4)$$

式中, $RT_N$ 为第  $N$  天的 5 d 滑动平均温度, $T_N$ 为原始的日均温度,若  $N$  为每年的 1 月 1 日或 1 月 2 日以及每年的 12 月 30 或 31 日时, $RT_N$ 等于  $T_N$ 。

#### 1.4.2 距平值计算方法

$$\Delta X_i = X_i - \bar{X} \quad (5)$$

式中, $\Delta X_i$ 为  $i$  年( $i=2001, 2002, \dots, 2010$ )GPP、生长季长度及降水量距平值; $X_i$ 为  $i$  年的 GPP、生长季长度及降水量; $\bar{X}$  为 GPP、生长季长度及降水量的多年均值。

#### 1.4.3 空间相关性拟合方法

为了研究东北地区陆地生态系统 GPP 与生长季长度及降水量的空间相关性,研究中分别以生长季长度及降水量为自变量  $x$ ,以 GPP 为因变量  $y$ ,线性拟合 GPP 与生长季长度及降水量的空间相关性。

## 2 结果分析

### 2.1 东北地区陆地生态系统 GPP 时空分布特征

#### 2.1.1 模拟结果验证

为了验证本次模拟结果的可靠性,研究中将 BEPS 模型的模拟结果与 2003~2010 年 ChinaFlux 的长白山站针阔混交林通量月尺度数据对比分析,以此验证模型模拟结果的可靠性。2003~2010 年长白山站 GPP 模拟结果与通量观测值的季节性动态变化趋势一致(图 2a),且模拟结果与观测值呈显著相关( $P<0.01$ ,  $R^2=0.97$ )(图 2b)。这表明 BEPS 模型能够较好地模拟东北地区陆地生态系统 GPP 季节变异,可用于分析生长季长度变化对陆地生态系统 GPP 的影响。

#### 2.1.2 2001~2010 年年总 GPP 时空分布规律

东北地区陆地生态系统 2001~2010 年年总 GPP 空间分布特点是东部地区高于西部地区(图 3a)。2001~2010 年东北地区陆地生态系统 GPP 呈波动上升趋势,年均 GPP 值为  $1\ 057.8 \pm 44.6$  TgC,平均每年以 6.9 TgC 的速率增加。生长季内 GPP 值变化趋势与全年 GPP 变化趋势相同,生长季内 GPP 10 a 均值为  $1\ 032.2 \pm 45.8$  TgC,每年以 7.1 TgC 的速率波动上升(图 3b)。生长季内 GPP 约占总 GPP 值的 97.6%,即东北地区陆地生态系统 GPP 主要是在生长季内所固定的碳量。

### 2.2 东北地区生长季长度时空变化特征

中国东北地区生长季一般在春季开始,在秋季结束,因此生长季开始时间及结束时间主要受春季及秋季温度的影响。因此本文分析了 2001~2010 年中国东北地区生长季开始时间与春季温度、生长季结束时间与秋季温度以及生长季长度与年均温的变化趋势及相关性,如图 4 所示。

由图 4a 可知,2001~2010 年东北地区生长季开始时间以及春季温度都没有显著的变化趋势( $R^2<0.19$ ,  $P>0.21$ );生长季开始时间为每年的第 90~119 天,变化较大,对生长季长度影响较大;生长季开始时间与春季温度呈显著相关( $R^2=0.74$ ,  $P=0.001$ ),说明东北地区生长季开始时间主要受春季温度的影响(图 4b)。生长季结束时间及秋季温度均没有显著的变化趋势( $R^2 \leq 0.08$ ,  $P \geq 0.44$ )(图 4c),生长季结束日期为每年的第 287~298 天,变化较小,对生长季长度影响小,且生长季结束时间与秋季温度间没有显著的相关性( $R^2=0.26$ ,  $P=0.13$ )



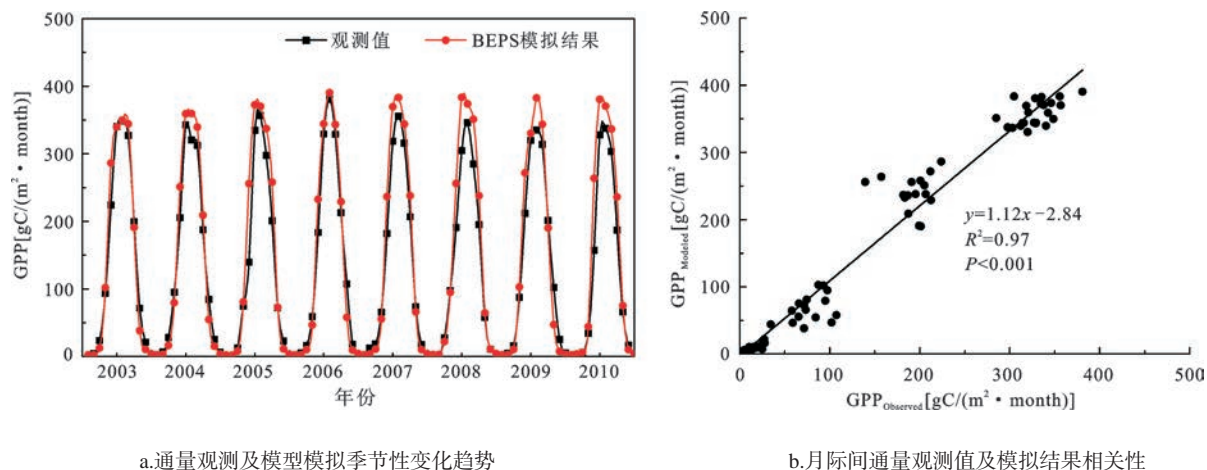


图2 2003~2010年长白山站模型模拟结果验证

Fig.2 Simulation results validation in Changbai Mountains site in 2003-2010

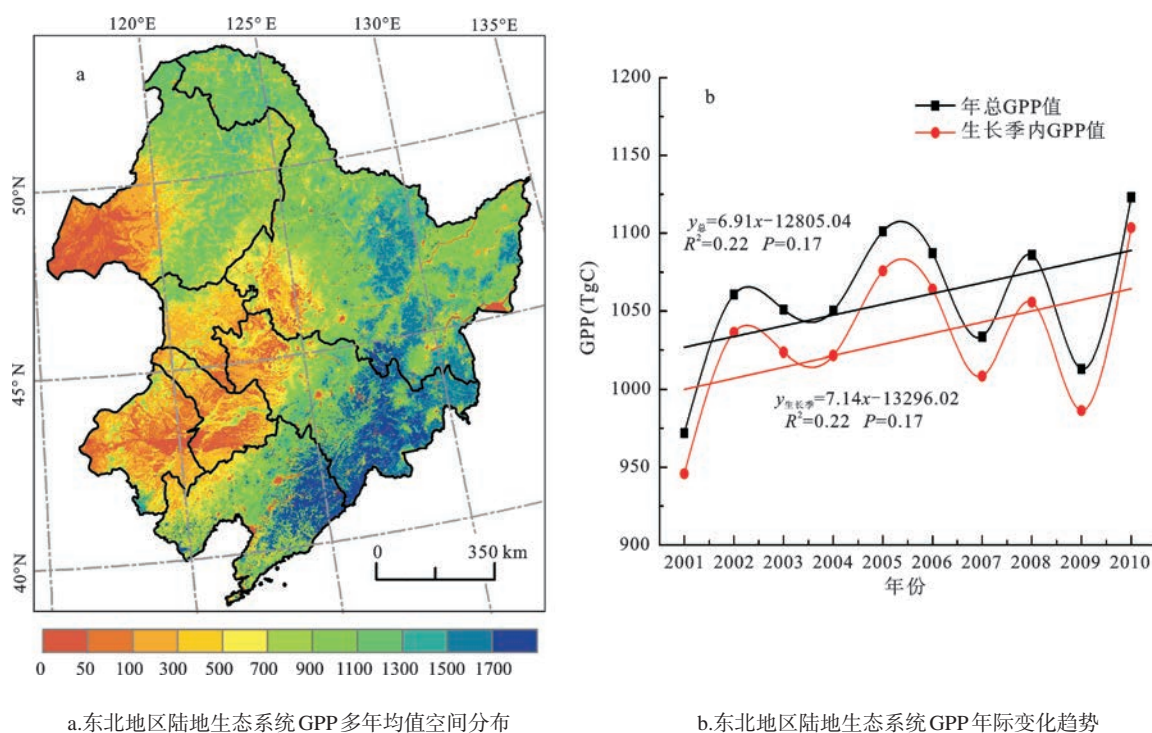


图3 中国东北地区陆地生态系统年均 GPP 时空分布格局

Fig.3 The spatial distribution of mean annual GPP of terrestrial ecosystem in Northeast China

(图4d),说明秋季温度的变化对生长季长度的影响较小;2001~2010年东北地区年均生长季长度约为  $188 \pm 10$  d,变化趋势不显著( $R^2=0.22$ ,  $P=0.17$ ) (图4e),且生长季长度与年均温度的相关性并不显著( $R^2=0.20$ ,  $P=0.19$ ) (图4f)。

综上所述,2001~2010年中国东北地区生长季开始时间、生长季结束时间以及生长季长度均没有显著的变化趋势;生长季开始时间对生长季长

度的影响较大,且生长季开始时间与春季温度间有显著的相关性,因此表明东北地区生长季长度主要受春季温度的影响。

### 2.3 生长季长度变化对中国东北地区 GPP 的影响

为了研究生长季长度变化对东北地区陆地生态系统 GPP 的影响,分析了2001~2010年东北地区陆地生态系统 GPP 距平值与生长季长度距平值及降水量距平值间的关系,如图5所示。

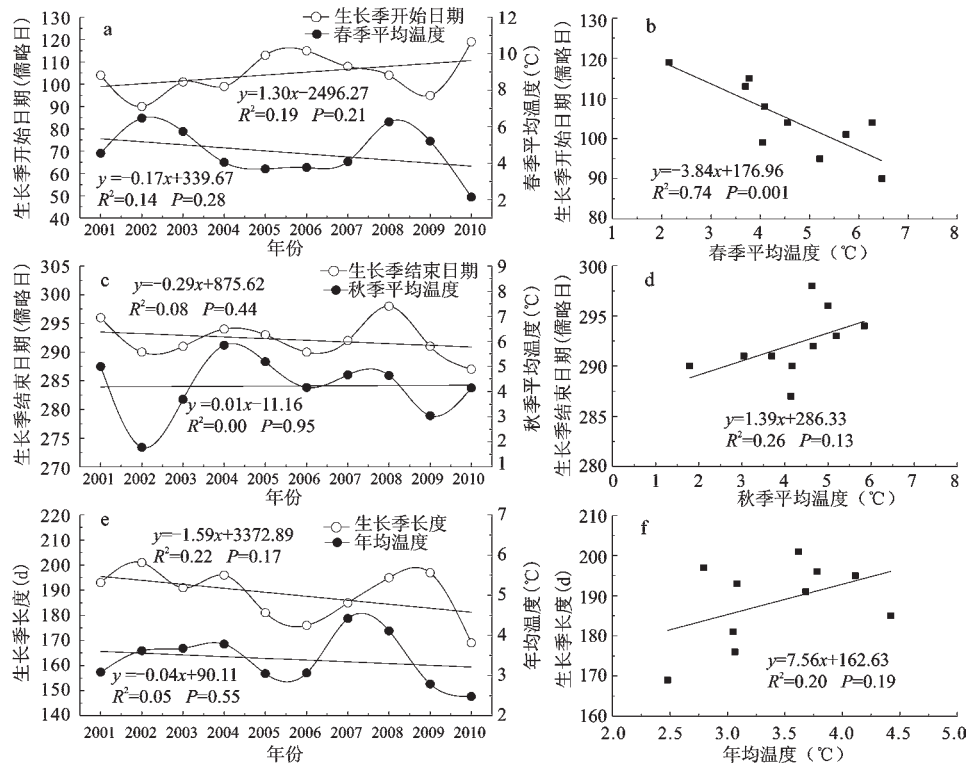


图4 2001~2010年生长季长度与温度相关性

Fig.4 The correlation between length of growing season and temperature

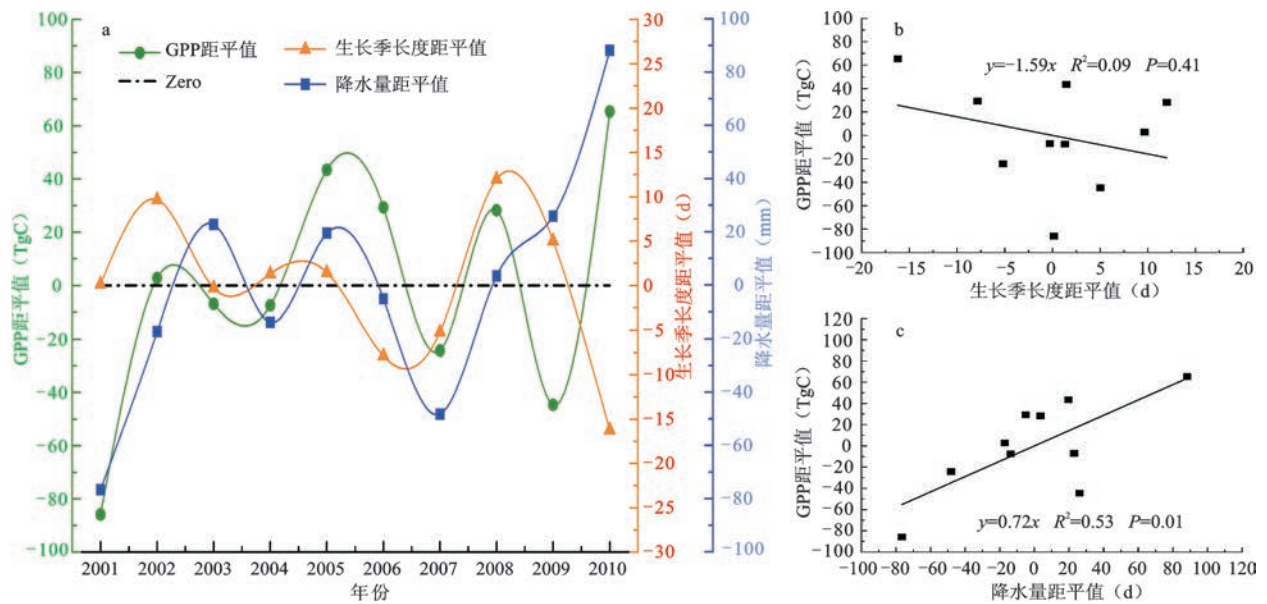


图5 GPP距平值与生长季长度及降水量距平值间的相关性

Fig.5 The correlation between GPP anomaly and anomaly of growing season length and precipitation

由图5a可知,2001、2002及2004年生长季长度都接近或高于10 a的均值,但受到降水量的限制,使其GPP值均较低。其中,2001年东北地区生

长季长度接近10 a均值,但是降水量为10 a最低值,使GPP值为10 a间最低值。另外,2010年生长季长度最短,但降水量为10 a间最大值,最终使东

北地区 GPP 总值达到 10 a 间最大值。2001~2010 年东北地区陆地生态系统 GPP 距平值与生长季长度距平值间的相关性较低(图 5b),但与降水距平值间呈显著相关(图 5c)。说明 2001~2010 年东北地区陆地生态系统 GPP 变化主要受降水量的影响。

在 GPP 与生长季长度的线性拟合中,植被覆盖范围内有 44.24% 区域的 GPP 与生长季长度呈现正相关,主要分布在大兴安岭南南部及内蒙古草原区域,其余大部分区域 GPP 与生长季长度间呈现负相关性(图 6a)。而在 GPP 与降水量的空间相关性上,植被覆盖范围内有 81.22% 区域的 GPP 与降水量间都呈

正相关关系(图 6b)。其中 GPP 与生长季长度呈现负相关的大部分区域与降水量呈现正相关关系,占比 45.63%。其中,东北地区主要植被类型的 GPP 距平值与生长季长度及降水量距平值的相关性如图 7 所示。2001~2010 年东北地区 4 种主要植被类型 GPP 距平值与生长季长度距平值间的相关性均不显著( $R^2 \leq 0.21, P \geq 0.19$ ),而落叶阔叶林、针阔混交林及草地的 GPP 距平值与降水量距平值都有较为显著的相关性( $R^2 \geq 0.39, P \leq 0.05$ )。因此,综合上述分析表明 2001~2010 年中国东北地区陆地生态系统 GPP 的年际变化趋势主要受年际间降水量变化的影响,生长季长度变化对 GPP 的影响受到降水量的限制。

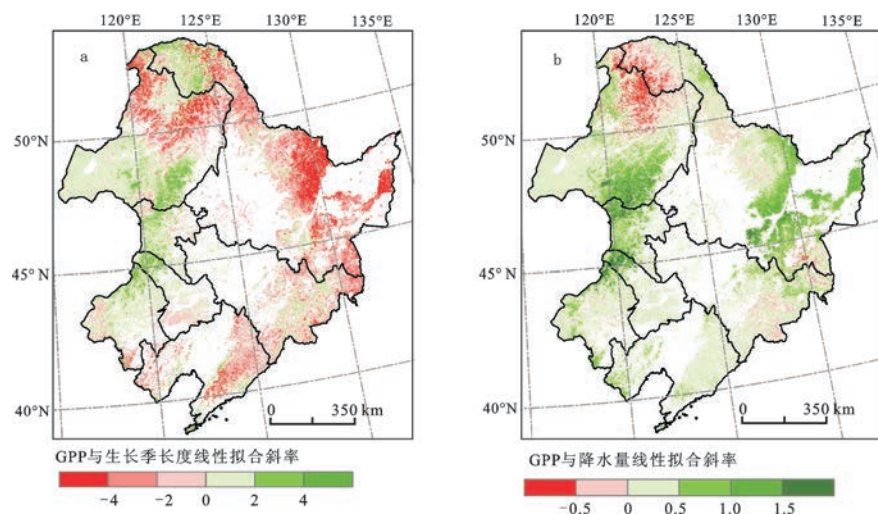


图6 GPP与生长季长度(a)及降水量(b)空间相关性

Fig.6 The spatial correlation between GPP and the length of growing season(a) and precipitation (b)

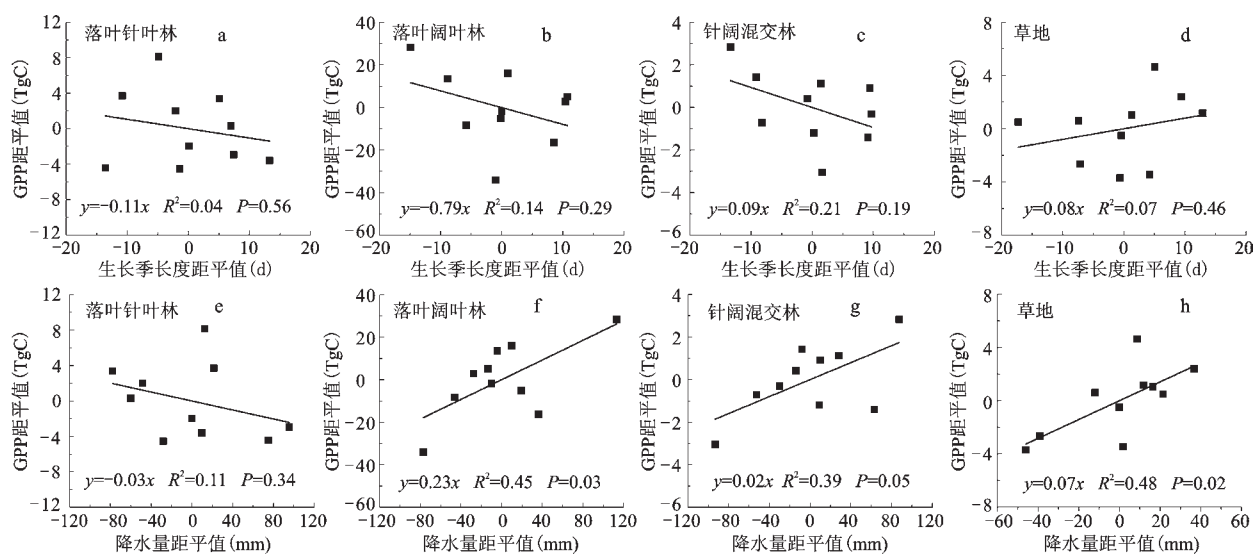


图7 不同植被类型 GPP 与生长季长度及降水量距平值间相关性

Fig.7 The correlation between GPP and growing season length and precipitation anomaly in different vegetation type



### 3 结论与讨论

本文利用生态过程模型 BEPS, 模拟了 2001~2010 年中国东北地区陆地生态系统 GPP 时空分布特征, 分析东北地区生长季长度变化及其对东北地区陆地生态系统 GPP 的影响。研究结果表明:

1) 2001~2010 年中国东北地区生长季开始时间、生长季结束时间及生长季长度均没有显著的变化趋势 ( $R^2 \leq 0.22, P \geq 0.17$ ), 生长季长度受生长季开始时间影响较大, 而生长季开始时间与春季温度呈显著相关性 ( $R^2 = 0.74, P = 0.001$ ), 表明东北地区生长季长度主要受春季温度的影响。

2) 东北地区陆地生态系统 GPP 总的分布特点是东部地区高于西部地区, 年均 GPP 总值为  $1\ 057.8 \pm 44.6\ \text{TgC}$ , 平均每年以  $6.91\ \text{TgC}$  的速率增加。其中生长季内 GPP 值约占总 GPP 值的 97.57%, 表明东北地区陆地生态系统 GPP 主要是在生长季内所固定的碳量。

3) 在时间尺度上, 东北地区大多数年份 GPP 主要受到降水量的影响, GPP 距平值与生长季长度距平值相关性较低 ( $R^2 = 0.09, P = 0.41$ ), 而与降水量距平值呈显著相关 ( $R^2 = 0.53, P = 0.01$ ); 在空间尺度上, 东北地区大部分区域 GPP 与生长季长度呈负相关 (56.1%), 而与降水量呈正相关 (83.0%), 且与生长季长度呈现负相关的大部分区域都与降水量呈现正相关; 另外, 东北地区 4 种主要植被类型的 GPP 距平值与生长季距平值的相关性不显著 ( $R^2 \leq 0.21, P \geq 0.19$ ), 而与降水量距平值呈显著相关 ( $R^2 \geq 0.39, P \leq 0.05$ ), 综合分析表明 2001~2010 年中国东北地区生长季长度对 GPP 的影响受到降水量的限制。

由于条件限制, 本文仅选用一种方法定义生长季长度, 分析结果可能存在一定偏差; 而且本文仅选择了 BEPS 模型进行试验分析, 没有采用更多的模型模拟结果进行对比分析, 并缺乏对模型模拟结果的不确定性分析, 因此今后的工作中将加强这一方面的研究。

### 参考文献(References):

- [1] IPCC, Climate change 2013: the physical science basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth assessment report, Final Draft Underlying Scientific-Technical Assessment (7 June, 2013). [http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UuWjbcOS0\\_4](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UuWjbcOS0_4), 2014.
- [2] Walther G R, Post E, Convey P et al. Ecological responses to recent climate change[J]. *Nature*, 2002, 416(6879): 389-395.
- [3] Ahas R J, Jaagus, and Aasa A. The phenological calendar of Estonia and its correlation with mean air temperature[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 44(4): 159-166.
- [4] Stockli R and Vidale P L. European plant phenology and climate seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(17): 3303-3330.
- [5] Chapin F S, Sturm M, Serreze M C et al. Role of land-surface changes in Arctic summer warming[J]. *Science*, 2005, 310 (5748): 657-660.
- [6] Niemand C, Koster B, Prasse H. Relating tree phenology with annual carbon fluxes at Tharandt forest[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, 14(2): 197-202.
- [7] Keenan T, Gray J, Friedl M et al. Net carbon uptake has increased through warming-induced changes in temperate forest phenology[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 598-604.
- [8] Piao S, Friedlingstein P, Ciais P et al. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): 1-11.
- [9] Richardson A, Black T, Ciais P et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2010, 365(1555): 3227-3246.
- [10] Buermann W, Bikash P, Jung M et al. Earlier springs decrease peak summer productivity in North American boreal forests[J]. *Environmental Research letter*, 2013, 8(2): 24-27.
- [11] Schwalm C, Williams C, Schaefer K et al. Reduction in carbon uptake during turn of the century drought in western North America[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(8): 551-556.
- [12] White M A, Running S W, Thornton P E. The impact of growing season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest[J]. *International Journal of Biometeorology*, 1999, 42(3): 139-145.
- [13] Walther A, Linderholm H W. A comparison of growing season indices for the Greater Baltic Area[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2006, 51 (2): 107-118.
- [14] 杨永辉, 王智平, 佐仓保夫, 等. 全球变暖对太行山植被生产力及土壤水分的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(6): 667-671. [Yang Yonghui, Wang Zhiping, Yasuo SAKURA et al. Effects of global warming on productivity and soil moisture in Taihang Mountain: A transplant study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6): 667-671.]
- [15] Bachelet D, Neilson R P, Lenihan J M et al. Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States[J]. *Ecosystems*, 2001, 4(3): 164-185.
- [16] Pan Y, Birdsey R, Fang J Y et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.

- [17] 叶瑜, 方修琦, 张学珍, 等. 过去300年东北地区林地和草地覆盖变化[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 137-144. [Ye Yu, Fang Xiuqi, Zhang Xuezheng et al. Coverage changes of forestland and grassland in northeastern China during the past 300 years. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 31(5): 137-144.]
- [18] Fang J Y, Chen A P, Peng C H et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [19] 董云社, 章申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  通量的同时观测及其日变化[J]. 科学通报, 2000, 45(3): 318-322. [Dong Yunshe, Zhang Shen, Qi Yuchun et al.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  fluxes observation and diurnal variation in Inner Mongolia grassland. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(3): 318-322.]
- [20] Wang X., Fang J, Tang Z et al. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in Northeast China[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 234(1-3): 264-274.
- [21] Liu J, Chen J, Cihlar J et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62 (2): 158-175.
- [22] Liu J, Chen J, Cihlar J et al. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (D22): 27735-27754.
- [23] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes[J]. Ecological Modelling, 1988, 42(2): 125-154.
- [24] Farquhar G D, Caemmerer S V and Berry J A. A biochemical-model of photosynthetic  $\text{CO}_2$  assimilation in leaves of  $\text{C}_3$  species[J]. Planta, 1980, 149(1): 78-90.
- [25] Chen J, Liu J, Cihlar J et al. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications[J]. Ecological Modelling, 1999, 124 (2-3): 99-119.
- [26] Sun R, Chen J M, Zhu Q J et al. Spatial distribution of net primary productivity and evapotranspiration in Changbaishan Natural Reserve, China, using Landsat ETM plus data[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(5): 731-742.
- [27] Wang Q F, Niu D, Yu G R et al. Simulating the exchanges of carbon dioxide, water vapor and heat over Changbai Mountains temperate broad leaved Korean pine mixed forest ecosystem[J]. Science in China Series D-earth sciences, 2005, 48(1): 148-159.
- [28] 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[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(3): 563-573.
- [29] Ju W M, Gao P, Wang J et al. Combining an ecological model with remote sensing and GIS techniques to monitor soil water content of croplands with a monsoon climate[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1221-1231.
- [30] Liu Y, Ju W, He H et al. Changes of net primary productivity in China during recent 11 years detected using an ecological model driven by MODIS data[J]. Frontiers of Earth Science, 2013, 7 (1): 112-127.
- [31] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plates-smoothing splines[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1995, 9: 385-403.
- [32] Hutchinson M F. ANUSPLIN Version 4.2 User Guide. Centre for resource and environment studies[J]. Australian National University, Canberra, 2002.
- [33] 朱旭东, 何洪林, 刘敏, 等. 近50年中国光合有效辐射的时空变化特征[J]. 地理学报, 2010, 65(3): 270-280. [Zhu Xudong, He Honglin, Liu Min et al. Spatio-temporal variation characteristics of photo synthetically active radiation in China in recent 50 years. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(3): 270-280.]
- [34] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves, Plant[J]. Cell and Environment, 1992, 15(4): 421-429.
- [35] 柳艺博, 居为民, 陈镜明, 等. 2000-2010年中国森林叶面积指数时空变化特征[J]. 科学通报, 2012, 57(16): 1435-1445. [Liu Yibo, Ju Weimin, Chen Jingming et al. Spatial and temporal variations of forest LAI in China during 2000-2010. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(16): 1435-1445]
- [36] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21世纪前十年的中国土地覆盖变化[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 723-731. [Wu Bingfang, Yuan Quanzhi, Yan Changzhen et al. Land cover changes of China from 2000 to 2010. Quaternary Sciences, 2014, 34(4): 723-731.]
- [37] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century[J]. Climate Research, 2002, 19(3): 193-212.
- [38] 郭灵辉, 吴绍洪, 赵东升, 等. 近50年内蒙古地区生长季变化趋势[J]. 地理科学, 2013, 33(4): 505-512. [Guo Linghui, Wu Shaohong, Zhao Dongsheng et al. Change trends of growing season over Inner Mongolia in the past 50 years. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(4): 505-512.]



## Change of Growing Season Length and Its Effects on Gross Primary Productivity in Northeast China

Wang Miaomiao<sup>1,2</sup>, Zhou Lei<sup>1</sup>, Wang Shaoqiang<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoqin<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Nature Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Spatial Information Research Center of Fujian Province, Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

**Abstract:** The globally averaged combined land and ocean surface temperature show a warming of 0.85°C over the period 1880 to 2012. This phenomenon is mainly due to the burning of oil, gas, coal and wood for energy since the industrial age. Climate change has already affected the carbon cycle of terrestrial ecosystems. An obviously observable effect of such ongoing changes is the timing of phenology events, such as bud-burst, flowering, leaf unfolding, and leaf coloration. Phenology studies based on ground and remote sensing observation indicate that the length of vegetation growing season has significantly increased over the past decades, principally through an earlier beginning and a later termination. So it is necessary to study the effects of changes in growing season length on gross primary productivity (GPP) of terrestrial ecosystem under the global warming in the middle and high latitude. Northeast China is located at middle latitudes in the northern Hemisphere and is an area that exhibits prominent climate changes. Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS) is an ecological process based model, which originally stemmed from the FOREST Bio-Geochemical Cycles (FOREST-BGC) model. This model includes photosynthesis, energy balance, hydrological, and soil biogeochemical modules. Stratifying canopies into sunlit and shaded leaves, it incorporates a new temporal and spatial scaling scheme into Farquhar's instantaneous leaf biochemical model to calculate daily carbon fixation. In this article, firstly, we run BEPS model, combined with meteorological data (including maximum and minimum air temperatures, precipitation, relative humidity and solar radiation), remote sensing data and soil data to simulate the spatial and temporal distribution of GPP in Northeast China during 2001-2010. Then, we analyzed the change of growing season length and its effect on GPP in Northeast China from 2001 to 2010. The results show that: ① There are no significant trends in the start, end and length of growing season in 2001-2010 ( $R^2 \leq 0.22$ ,  $P \geq 0.17$ ) in Northeast China. The length of growing season is more affected by the start of growing season, and the start of growing season have a significant correlation with spring temperature ( $R^2=0.74$ ,  $P=0.001$ ), so we can conclude that the length of growing season is mainly affected by spring temperature. ② The terrestrial ecosystem's annual mean GPP is about  $1\ 057.8 \pm 44.6$  TgC in Northeast China. There is about  $1\ 032.2 \pm 45.8$  TgC GPP in growing season, accounting for 97.5% in total. It means that Northeast China's GPP is mainly sequestered in growing season. ③ The interannual variation of GPP is not significantly affected by the change of growing season length, it is mainly regulated by precipitation in Northeast China. And the response of the main vegetation type to phenology is consistent with that of the whole Northeast China. However, there are also some uncertainties in GPP simulation and in growing season length definition, so we should take more models to simulate GPP and use more methods to define the length of growing season in the future research.

**Key words:** length of growing season; gross primary productivity; BEPS model; Northeast China