

DOI: 10.5846/stxb201408081584

徐小军, 周国模, 杜华强, 孙少波, 高国龙. 毛竹林总初级生产力年际变化及其驱动因素——以安吉县为例. 生态学报, 2016, 36(6): - .
Xu X J, Zhou G M, Du H Q, Sun S B, Gao G L. Interannual variability of Moso bamboo forest GPP and its driving factors: A Case Study of Anji County. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): - .

毛竹林总初级生产力年际变化及其驱动因素 ——以安吉县为例

徐小军^{1,2}, 周国模^{1,2}, 杜华强^{1,2,*}, 孙少波^{1,2}, 高国龙^{1,2}

1 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300

2 浙江农林大学 环境与资源学院, 临安 311300

摘要: 森林生态系统碳通量的年际变化及其驱动因素分析是了解森林碳收支动态变化以及预测未来气候变化对森林碳收支影响的重要理论基础, 对评估森林应对气候变化的贡献具有重要意义。结合 MODIS 叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 和归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 产品、MERRA 气象数据和通量塔观测数据, 采用光能利用率模型模拟 2004—2011 年安吉县毛竹林生态系统总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 空间分布, 并分析 GPP 年际变化及其驱动因素。结果表明: (1) 小年毛竹林 GPP 稍高于大年 GPP; (2) 2004—2011 年安吉县毛竹林年日均 GPP 呈下降趋势, 东部、西部和整个安吉县毛竹林年日均 GPP 变化速率分别为 -0.064 、 -0.033 和 $-0.045 \text{ g C m}^{-2} \text{ W}^{-1}$, 年均温度持续下降是主要驱动因素; (3) LAI 年际变化是 GPP 年际变化的主要驱动因素, 主要原因是毛竹林大小年交替规律引起了有效 LAI 年际间差异; (4) 西部 GPP 年际变化幅度大于东部, 环境和生物因素对 GPP 年际变化的作用方向决定了毛竹林 GPP 年际变化的幅度。

关键词: 总初级生产力; 年际变化; 叶面积指数; 毛竹林; 大小年

Interannual variability of Moso bamboo forest GPP and its driving factors: A Case Study of Anji County

XU Xiaojun^{1,2}, ZHOU Guomo^{1,2}, DU Huaqiang^{1,2,*}, SUN Shaobo^{1,2}, GAO Guolong^{1,2}

1 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an 311300, China

2 School of Environment and Resource, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Lin'an 311300, China

Abstract: Understanding the interannual variability of forest ecosystem carbon fluxes and its driving factors is important for understanding dynamic changes in forest carbon budgets and predicting the effects of future climate change on forest carbon budgets. In addition, it is a critical part of assessments of the contribution of forests to climate change mitigation. Using the MODIS Leaf Area Index (LAI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), MERRA reanalysis data, and flux tower observation data, the Eddy Covariance Light Use Efficiency (EC-LUE) model was calibrated and validated to estimate the spatial distribution of the Gross Primary Productivity (GPP) of the Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest in Anji County during 2004—2011. Then, the relationships between environmental and biological factors and the interannual variability of the GPP were analyzed, in order to identify the factors driving the interannual variability of the GPP. Our results show that: (1) the GPP is slightly greater in off-years (between mass flowering events) than that in on-years (years

基金项目: 国家林业局 948 (2013-4-71); 国家自然科学基金项目 (31370637); 浙江省杰出青年科学基金项目 (LR14C160001); 浙江省自然科学基金项目 (LQ15C160003); 浙江省教育厅项目 (Y201432350); 浙江农林大学科研发展基金人才启动项目 (2014FR025); 浙江省本科院校中青年学科带头人学术攀登项目 (pd2013239)

收稿日期: 2014-08-08; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dhqrs@126.com

with mass flowering events). The reasons for this are as follows: the leaves found on the culms during off-years are one year old, and thus have higher photosynthetic capacities than older leaves. The leaves of adult bamboo plants stay green in off-year winters and produce large quantities of photosynthates, which support the growth of new bamboo shoots through the rhizome system in the following year (an on 1 year); (2) the annual average daily GPP decreased from 2004 to 2011, at rates of -0.064 , -0.033 , and $-0.045 \text{ g C}/(\text{m}^2 \text{ d})$ per year in the eastern portion, western portion, and the entirety of Anji County, respectively. Annual average temperature was the main factor driving decreases in the annual average daily GPP; (3) interannual variability in the LAI is the main driving factor of interannual variability in the GPP, because the effective LAI changed noticeably from on-years to off-years; and (4) the interannual variability of the GPP in the western region was greater than that in the eastern region of Anji County, with coefficients of variation of 70% and 54%, respectively. The primary reason for this is that the effects of environmental factors on the interannual variability of the GPP are positively correlated with the effects of biological factors on the interannual variability of the GPP in the western region, so increases in both the environmental and biological factors increase the interannual variability of the GPP. In the eastern region, the effects of environmental factors on the interannual variability of the GPP are negatively correlated with the effects of biological factors on the interannual variability of the GPP, and thus both the environmental and biological factors decrease the interannual variability of the GPP in the east. Therefore, the interannual variability of the GPP is determined by both environmental and biological factors.

Key Words: gross primary productivity; interannual variability; leaf area index; moso bamboo; on-year and off-year

陆地生态系统是一个巨大的碳库且对气候变化极其敏感,在全球碳循环中起到重要的作用^[1]。森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,其每年碳固定量约占陆地生态系统植被碳固定量的 $2/3$ ^[2],通过物理、化学和生物过程调节地表和大气之间碳循环^[3]。近年来,气候变化变得异常,全球降水区域差异性明显以及亚热带和热带区域发生干旱的频率和强度在不断增加^[1,4]。另一方面,在太阳活动等自然外强迫作用下,全球增温开始出现减缓甚至停滞的趋势。在此复杂的气候变化背景下,森林生态系统碳收支的时空变化趋势及其与环境 and 生物因子之间的关联性存在极大的不确定性。

环境和生物因子是森林生态系统与大气之间碳通量的主要驱动因子^[5-6],不同时间尺度上,对森林生态系统碳通量变化起决定性的因素不同。在秒到小时尺度,大气湍流是碳通量变化的主要因素;在小时到月尺度,气象因子决定碳通量的变化,如气温、湿度和太阳辐射;在月到年尺度,季节性天气变化以及植被物候变化是碳通量变化的主要影响因素^[7]。目前,已有大量研究分析了森林生态系统总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)及净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)年际变化与环境 and 生物因子的关联性,如与年均温度正相关关系^[8-9]、年均温度负相关关系^[10]、降水量负相关关系^[10]、降水量正相关关系^[9,11-12]、夏季日均最大气温负相关关系^[13]、降水量和温度协同影响^[14]、厄尔尼诺与南方涛动的年代际变化影响^[15]。叶面积指数和温度分别控制着长白山阔叶红松林生态系统 GPP 的季节动态和年际差别^[16]。研究表明森林生态系统 GPP 和 NPP 年际变化对环境因子的响应方式存在不一致性,没有特定的机理来解释 GPP 和 NPP 年际变化^[17-18]。

竹林生态系统是森林生态系统的重要组成部分。毛竹(*Phyllostachys edulis*)是中国的主要竹种,其面积约占中国竹林面积的 70%,占世界毛竹林总面积的 80%^[19]。与其他森林类型相比,毛竹在生长和经营管理方面具有特殊性,是竹产区林农经济收入主要来源^[20-21]。国内外学者开展了大量毛竹林生态系统碳储量研究,结果表明毛竹林具有巨大的固碳和蒸腾潜力^[22-27],在固碳减排和缓解气候变化方面起到重要的贡献^[28]。安吉县毛竹林地上碳储量在 1986—2008 年期间呈增加趋势^[29]。福建省毛竹林生态系统碳储量在 1985—2006 年期间也呈上升趋势,年降雨量与碳储量具有正相关关系,年均温与碳储量呈负相关关系^[30]。但是针对毛竹林生态系统总初级生产力的长时间动态变化及其与环境 and 生物因子的关联性分析还很缺乏。

本研究基于涡度相关技术获取的毛竹林生态系统 GPP 和 MODIS 数据以及 MERRA (The Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications) 再分析数据,采用结合涡度相关技术的光能利用率模型 (Eddy Covariance Light Use Efficiency, EC-LUE) 估算 2004—2011 年安吉县毛竹林生态系统 GPP,分析安吉县毛竹林生态系统 GPP 变化趋势及其驱动因素,为了解和预测未来气候变化对毛竹林生态系统碳通量的影响提供理论依据。

1 研究区域与通量塔

安吉县位于浙江省西北部 (119°14′—119°52′E, 30°23′—30°53′N), 全县面积 1886.45 km²。气候属亚热带海洋性季风气候,总特征为光照充足、气候温和、雨量充沛、四季分明,年均降水量 1400 mm,年均气温 15.6 ℃。森林覆盖率达到 69.4%,拥有山林 13.2 × 10⁴ hm²,其中竹林面积 6.33 × 10⁴ hm²。毛竹林面积为 4.99 × 10⁴ hm²,占林地总面积的 37.8%,为全国著名的“中国竹乡”。安吉县毛竹林具有明显的大小年交替特征,逢奇数年东部区域为大年,西部区域为小年,逢偶数年则相反^[20]。毛竹林通量观测塔位于安吉县东南部的山川与天荒坪两个乡镇交界处。以观测塔为中心 1000 m 范围内主要森林类型为毛竹林,其平均冠层高度为 11 m,林分平均密度为每公顷 3235 株。此外,还有少量针阔混交林、农田、城镇和道路等地类。通量观测塔介绍详见文献^[31]。

2 数据来源与研究方法

2.1 通量塔数据处理

借助 EdiRe (<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/>) 和 Matlab 7.0 软件对 2011 年通量塔观测的原始数据进行数据处理,主要包括以下 3 个方面^[32]:通量数据校正、缺失数据插补和组分分解。通量数据校正包括二次坐标轴旋转^[33]、空气密度脉动影响校正^[34]、储存项校正^[16]、异常值剔除^[35-36]和摩擦风速校正。采用基于夜间数据的非线性回归法 (Lloyd & Taylor 和 Michaelis-Menten 模型) 进行缺失数据插补和组分分解^[37]。

2.2 GPP 空间分布估算

2.2.1 EC-LUE 模型

采用通量塔观测数据计算的 GPP 对 EC-LUE 模型进行参数化并估算 2004—2011 年安吉县毛竹林 GPP 空间分布。EC-LUE 模型属于光能利用率模型,它的一个独特之处在于采用蒸发系数 (Evaporative fraction, EF) 作为湿度对最大光能利用率进行调节,将 EF 引入模型后使碳通量和水通量得到耦合,提高了模型预测精度^[23]。EC-LUE 模型的输入变量主要包括归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、光合有效辐射 (Photosynthetically Available Radiation, PAR)、温度 (Temperature, T) 和波文比^[38]。Xu 等^[27]参照光响应曲线模型将 GPP 饱和效应引入 EC-LUE 模型,提高了预测精度,其模型表达式见式 (1)。

$$GPP = \frac{GPP_{\max} \times \varepsilon_{\max} \times (\min(T_s, EF) \times FPAR \times PAR)}{\varepsilon_{\max} \times (\min(T_s, EF) \times FPAR \times PAR) + GPP_{\max}} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{\max}$ 为最大光能利用率 (g C m⁻² W⁻¹ APAR); T_s 为温度对最大光能利用率的调节因子; EF 为蒸发系数,湿度对最大光能利用率的调节因子; PAR 为光合有效辐射 (W/m²); FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) 为光合有效辐射吸收比率; $GPP_{\max}$ 为最优环境因子条件下潜在 GPP。EC-LUE 模型各参数 $\varepsilon_{\max}$ 、最适温度 (T_{opt}) 和 $GPP_{\max}$ 分别为 0.42 g C m⁻² W⁻¹ APAR、24.98 ℃ 和 12 g C m⁻² W⁻¹^[27]。

2.2.2 模型输入变量

(1) 环境因子:从 MERRA 再分析数据集 (<http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/merra/>) 中获取 2004—2011 年环境因子,包括太阳入射短波辐射、净向下短波辐射、净向下长波辐射、比湿、10 m 处的气温和大气压。大气压的空间分辨率为 1.25°×1.25°,其它数据空间分辨率为纬度 0.5°×经度 0.667°,时间分辨率为天。

(2)生物因子:从美国橡树岭国家实验室(<http://daac.ornl.gov/MODIS/modis.shtml>)获取 2004—2011 年 1 km 空间分辨率的 8 d 合成 MODIS 叶面积指数(Leaf area index, LAI)(MOD15A2)和 250 m 空间分辨率 16 d 合成的 MODIS NDVI(MOD13Q1)产品数据。根据质量控制值来判断 LAI/NDVI 数据是否可靠。采用上边缘平滑方法对 MODIS LAI/NDVI 产品做平滑处理,修正不可靠数据^[39]。

2.3 毛竹林信息提取

采用 2008 年 Landsat TM(Thematic Mapper)影像 band1、band3、band4、band5 和 NDVI 作为特征变量,基于后向传播神经网络提取安吉县毛竹林信息,分类总体精度和 Kappa 系数分别为 91.8%和 0.89。根据样地调查实测数据精度评价得出毛竹林的分类精度为 82.19%,达到应用的要求。为了与 MODIS 数据空间尺度相一致,需要对 30 m 空间分辨率的分类图进行尺度上推处理。采用移动窗口平均法将 30 m ×30 m 分辨率分别上推至 250 m ×250 m(MOD13Q1)和 1 km ×1 km(MOD15A2)分辨率。首先,将 TM 影像分类图中毛竹林设为 1,其他地类为 0。其次,分别计算 8 ×8 像元窗口(250 m ×250 m)和 33 ×33 像元窗口(1 km ×1 km)内毛竹林面积百分比。最后,为了确保尺度上推后的像元内主要地类为毛竹林,将毛竹林面积百分比大于 80%的像元设定为 1,其他为 0。

3 结果与分析

3.1 GPP 空间分布

采用 EC-LUE 模型模拟 2004—2011 年安吉县毛竹林生态系统 GPP 空间分布(图 1)。GPP 在空间分布上表现为偶数年(如 2004)东部区域(小年)高于($P<0.01$)西部区域(大年),奇数年(如 2005)西部区域(小年)稍高于($P=0.26$)东部区域(大年)(图 2),即小年毛竹林生态系统 GPP 稍高于大年 GPP。2004—2011 年,安吉县毛竹林年日均 GPP 分别为 6.15、6.19、5.89、6.12、5.67、5.95、5.95 和 5.82 g C m⁻² W⁻¹。单样本 t 检验表明安吉毛竹林年均 GPP 在年际间不存在显著差异($P=0.66$)。根据毛竹林 GPP 空间分布统计出安吉县东西部毛竹林年日均 GPP,用于后续 GPP 年际变化及其驱动因素分析。

3.2 GPP 变化趋势及驱动因素

根据 2004—2011 年日均 GPP 与 LAI、T 和 PAR 的相关性分析,年尺度 GPP 与温度的相关性最高,但未达到 0.05 显著性水平(表 1),温度是驱动年尺度 GPP 变化的主要因素。2004—2011 年日均 GPP 呈下降趋势,东部、西部和整个安吉县毛竹林年日均 GPP 变化速率分别为-0.064、-0.033 和-0.045 g C m⁻² W⁻¹,东部毛竹林年日均 GPP 变化大于西部(图 3)。从年均温度和 GPP 变化趋势分析得出年均温度持续降低是导致年尺度 GPP 下降的主要驱动因素(图 3)。

表 1 年尺度 GPP 与 LAI、T 和 PAR 的相关性分析

Table 1 Relationships between annual GPP and LAI, T and PAR

环境与生物因子 Environmental and biological factors	东部 Eastern area	西部 Western area	安吉县 Anji County
叶面积指数 Leaf area index, LAI	0.53	0.44	0.36
温度 Temperature, T	0.59	0.66	0.68
光合有效辐射 Photosynthetically Active Radiation, PAR	0.37	0.51	0.49

3.3 GPP 年际变化及驱动因素

GPP 年际变化(年际差值)与 LAI、T 和 PAR 年际变化的相关性分析表明,安吉县东部和西部毛竹林 LAI 年际变化是 GPP 年际变化的主要驱动因素,整个安吉县温度和 LAI 年际变化对 GPP 年际变化起主要驱动作用,但均未达到 0.05 显著性水平(表 2)。东部和西部毛竹林 GPP 年际变化的变异系数分别为 54%和 70%,西

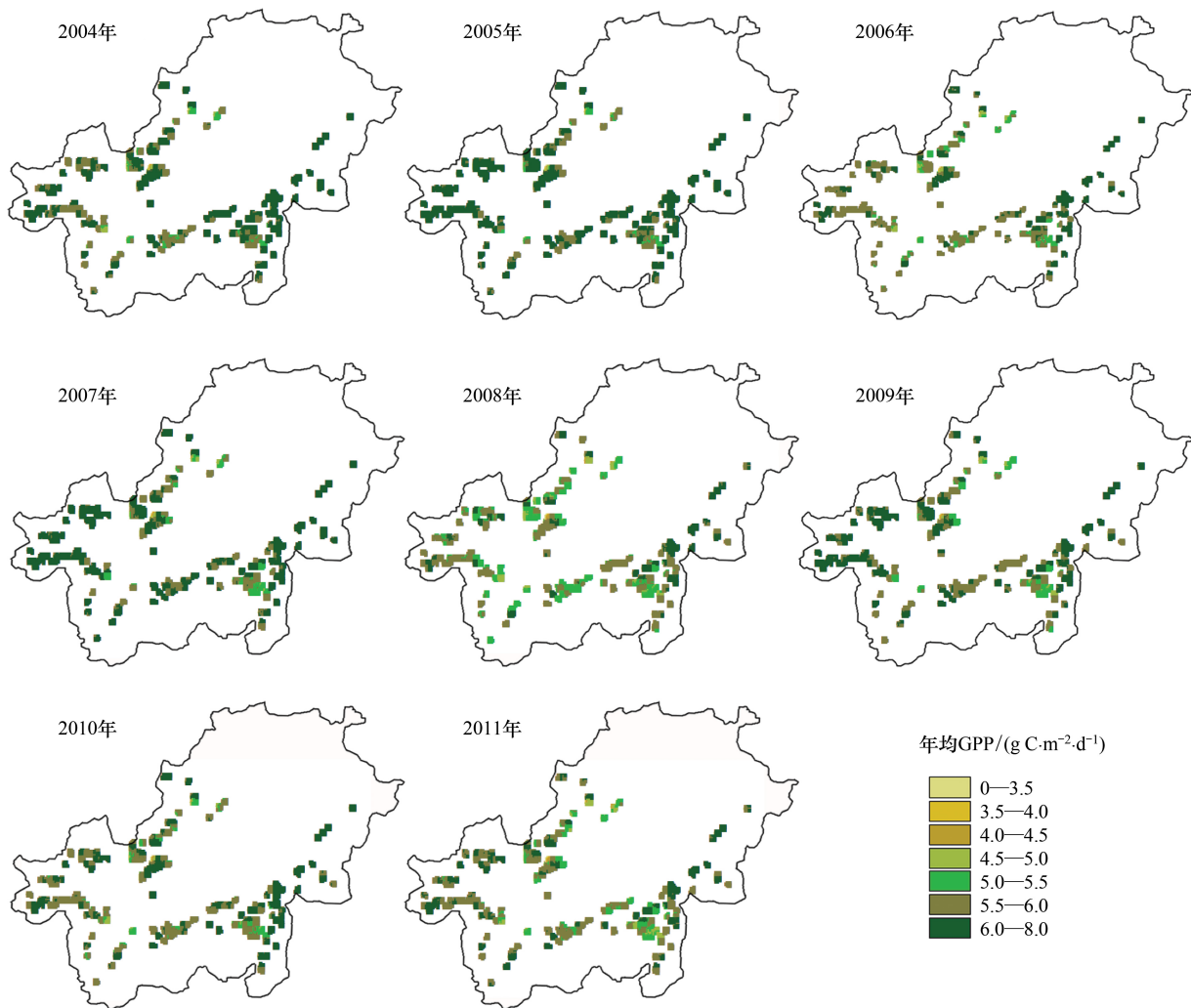


图 1 基于 EC-LUE 模型的安吉县毛竹林 GPP 空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution map of GPP for Moso bamboo in Anji County based on EC-LUE model

部毛竹林 GPP 年际变化幅度大于东部,这主要是由于西部环境因素和生物因素的驱动效应具有正相关关系,两者相互促进使得 GPP 年际变化幅度变大;然而东部环境因素和生物因素的驱动效应为负相关关系,两者之间相互抵消使得 GPP 年际变化幅度变小(图 4)。

4 讨论

安吉县毛竹林生态系统年尺度 GPP 在空间分布上东部和西部具有差异性,这主要是由于东部和西部毛竹林具有相反的大小年交替规律以及大小年毛竹林生理生态特征具有明显差异引起的。大年和小年毛竹林主要特征差异为:(1)采伐经营措施通常在大年进行,导致 LAI 降低;(2)小年毛竹林的竹叶为 1 龄叶,而大年除新竹竹叶外,其余为老龄叶。竹叶的光合作用能力随年龄增加而降低^[40],新叶的光合速率是老叶的 3 倍以上^[41],因此小年竹叶具有更强的光合能力;(3)小年竹林的叶片在冬季仍保持鲜绿,能储存大量的营养物质,

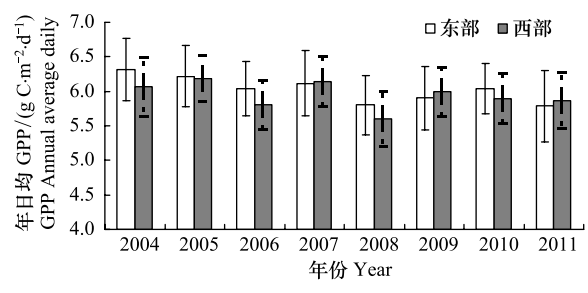


图 2 东部和西部毛竹林年日均 GPP 对比图

Fig. 2 Comparison of annual average daily GPP between eastern and western areas

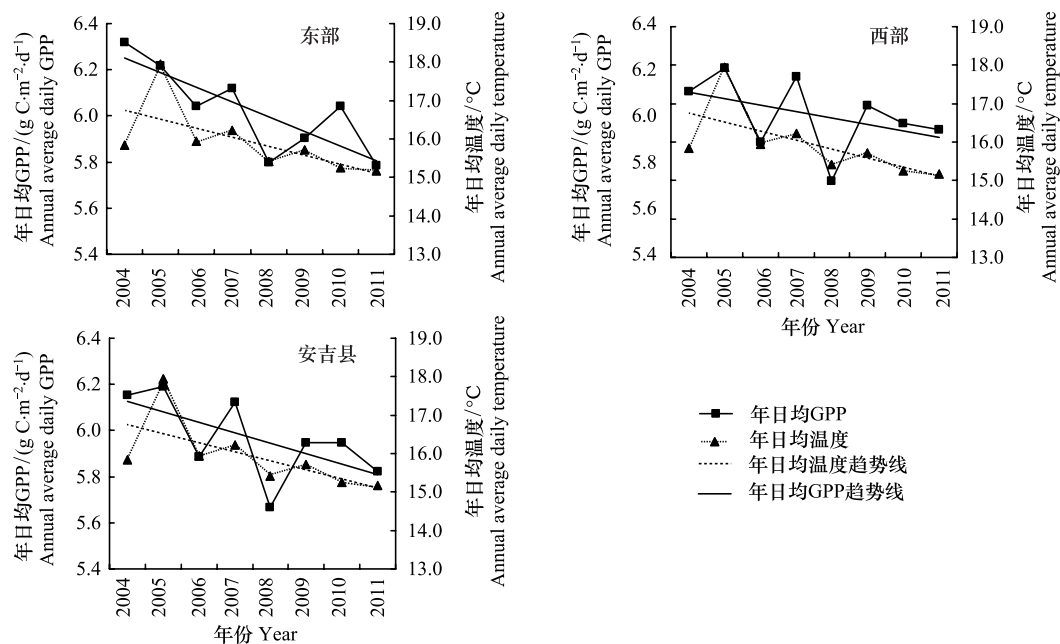


图3 2004—2011 年日均 GPP 和温度变化趋势及其关联性, (a) 东部, (b) 西部, (c) 安吉县

Fig. 3 Change trends of annual average daily GPP and temperature and their relationship from 2004 to 2011, (a) eastern, (b) western, and (c) Anji County

通过根系为次年新竹生长提供营养^[40,42-43]。从 MODIS LAI 产品数据分析中也证实小年的 LAI 确实要稍大于大年的 LAI。综上所述,小年毛竹林 GPP 高于大年的主要原因是小年具有更高的有效叶面积和叶片光合能力。

表2 GPP 年际变化与 LAI、T 和 PAR 年际变化的相关性分析

Table 2 Relationships between interannual variability of GPP and LAI, T and PAR

环境与生物因子 Environmental and biological factors	东部 Eastern area	西部 Western area	安吉县 Anji County
LAI	0.40	0.76	0.53
T	0.26	0.65	0.58
PAR	-0.10	0.48	0.35

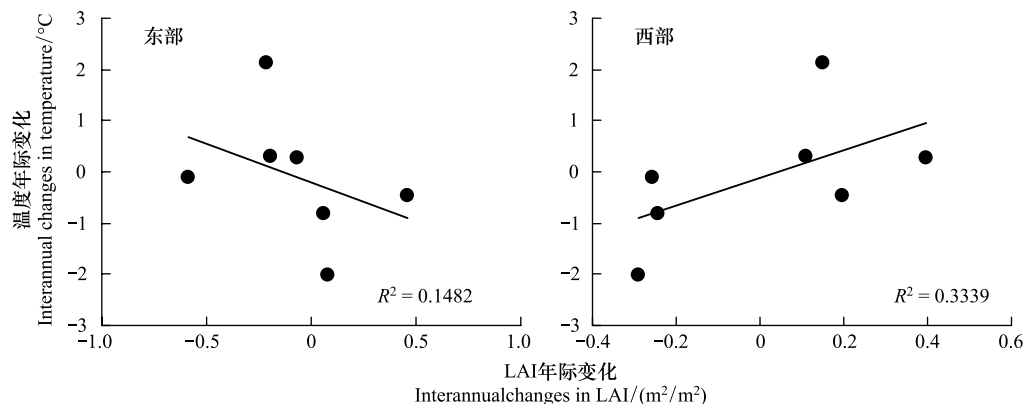


图4 安吉县 (a) 东部和 (b) 西部 LAI 年际变化与温度关系图

Fig. 4 Relationships between interannual variability of LAI and temperature in (a) eastern and (b) western Anji county

年均温度是 2004—2011 年安吉县毛竹林年日均 GPP 呈下降趋势的主要驱动因素。温度是影响植被光合效率三大环境因素之一。毛竹林光合效率的最适合温度在 20—30 °C 之间,随着温度降低,其光合效率呈下降趋势^[44-45]。政府间气候变化专门委员会第五次报告指出近 15 年来(1998—2012)全球温度上升出现减缓和停顿,主要原因是海洋表层温度上升的减弱和太阳活动的显著减弱等自然因素,该结论与根据 MERRA 数据得出的 2004—2011 年均温度呈下降趋势相一致。因此,该研究得出年均温度下降导致毛竹林年日均 GPP 下降的结论是有依据的。已有研究表明森林生态系统 GPP 随年均温度呈线性增加,而呼吸碳通量呈指数上升^[8]。年均温度降低时,呼吸碳通量和 GPP 同时降低,对净生态系统碳固定量的影响取决于两者的综合效应。因此,2004—2011 年安吉县毛竹林 GPP 呈下降趋势并不能表明近年来毛竹林生态系统净固碳量的下降。

LAI 是毛竹林 GPP 年际变化的主要驱动因素,该结论与其他森林类型一致^[46]。东部和西部区域 LAI 年际变化对 GPP 年际变化的贡献要高于温度,主要原因是大小年生理生态特征差异引起年际间 LAI 具有明显的规则变化规律。对于整个安吉县 LAI 和温度年际变化对 GPP 年际变化起到相当的贡献,这可能是整个安吉县东部和西部大小年相反均衡了 LAI 年际变化对 GPP 年际变化的影响。LAI 和温度分别控制着长白山阔叶红松林生态系统 GPP 的季节动态和年际差别^[16]。LAI 和温度对毛竹林 GPP 年际变化的作用方向决定了 GPP 年际变化波动幅度,当两者作用方向一致(同时为正或负效应)时,GPP 年际变化变异性较大。东部和西部大面积的大年或小年毛竹林中夹杂着小部分大小年相反的毛竹林^[20],另一方面,东部与西部大小年分割界线难以确定,本研究根据调查样地新竹量来确定东部和西部界线难免会造成大年竹和小年竹混在一起,使研究结果存在不确定性。自然干扰在很大程度上影响 GPP 年际变化^[47],因此 2008 年的冰雪灾害以及 2011 年春季干旱对 GPP 年际变化也造成一定的影响^[27,48]。此外,由于 MERRA 数据的空间分辨率较低,难以反映小尺度区域环境因子变化,对分析结果也带来不确定性。

5 结论

(1)毛竹林具有大小年交替的生理特征,由于大小年之间叶面积指数、叶片光合参数及其光合效率的差异造成了大小年之间 GPP 存在差异,同时也是 GPP 年际变化的主要驱动因素,因此深入了解该生理生态规律对毛竹林生态系统固碳量动态变化的影响具有重要意义。

(2)近 15 年来,由于自然因素原因,全球气温呈减缓甚至下降的趋势,使得安吉县毛竹林生态系统 GPP 呈下降趋势,该结论为解释毛竹林固碳能力和竹材产量的变化以及了解短期气候变化对 GPP 影响提供了参考依据。

(3)GPP 年际变化的波动幅度受环境和生物因素共同影响,当两者作用方向相同时,GPP 年际变化的波动幅度越大,该结论为解释毛竹林生态系统碳收支年际变化的波动性提供了理论基础。在今后研究中,还需进一步定量分析毛竹林大小年生理生态特征对其固碳能力影响以及环境和生物因素对 GPP 年际变化的贡献。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis // Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *BioScience*, 1981, 31(1): 29-33.
- [3] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [4] Lau W K M, Wu H T, Kim K M. A canonical response of precipitation characteristics to global warming from CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(12): 3163-3169.
- [5] Barford C C, Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, Pyle E H, Urbanski S P, Huttyra L, Saleska S R, Fitzjarrald D, Moore K. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 2001, 294(5547): 1688-1691.
- [6] Richardson A D, Hollinger D Y, Aber J D, Ollinger S V, Braswell B H. Environmental variation is directly responsible for short-but not long-term

- variation in forest-atmosphere carbon exchange. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 788-803.
- [7] Saito M, Kato T, Tang Y H. Temperature controls ecosystem CO₂ exchange of an alpine meadow on the northeastern Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2009, 15(1): 221-228.
- [8] 王兴昌, 王传宽, 于贵瑞. 基于全球尺度相关的森林碳交换的时空格局. *中国科学 D 辑; 地球科学*, 2008, 38(9): 1092-1102.
- [9] 徐浩杰, 杨太保. 黄河源区植被净初级生产力时空变化特征及其对气候要素的响应. *资源科学*, 2013, 35(10): 2024-2031.
- [10] Chen B, Arain M A, Khomik M, Trofymow J A, Grant R F, Kurz W A, Yeluripati J, Wang Z. Evaluating the impacts of climate variability and disturbance regimes on the historic carbon budget of a forest landscape. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 180(15): 265-280.
- [11] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 王效科, 马泽清. 基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松 (*Pinus elliotii*) 人工林 GPP 和 NPP. *生态学报*, 2008, 28(11): 5314-5321.
- [12] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响(II)——近 52 年秦岭南北植被净初级生产力. *中国水土保持科学*, 2012, 10(6): 45-51.
- [13] Wang Z, Grant R F, Arain M A, Chen B N, Coops N, Hember R, Kurz W A, Pricee D T, Stinson G, Trofymow J A, Yeluripati J, Chen Z. Evaluating weather effects on interannual variation in net ecosystem productivity of a coastal temperate forest landscape: a model intercomparison. *Ecological Modelling*, 2011, 222(17): 3236-3249.
- [14] 陈卓奇, 邵全琴, 刘纪远, 王军邦. 基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(3): 402-410.
- [15] 姜超, 徐永福, 季劲钧, 李阳春. ENSO 年代际变化对全球陆地生态系统碳通量的影响. *地学前缘*, 2011, 18(6): 107-116.
- [16] 张军辉, 于贵瑞, 韩士杰, 关德新, 孙晓敏. 长白山阔叶红松林 CO₂ 通量季节和年际变化特征及控制机制. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 60-69.
- [17] 孙善磊, 周铨铨, 薛根元, 姜伟平, 吉宗伟, 石建红. 环杭州湾地区自然植被净初级生产力的变化特征及其成因. *大气科学学报*, 2012, 34(6): 672-682.
- [18] Baker I T, Denning A S, Stöckli R. North American gross primary productivity: regional characterization and interannual variability. *Tellus B*, 2010, 62(5): 533-549.
- [19] 国家林业局. 第六次全国森林资源调查主要结果(1999—2003). <http://cfdb.forestry.gov.cn:443/showpdf.action>. 2006-09-28.
- [20] 裘福庚. 毛竹林大小年及其控制. *竹子研究汇刊*, 1984, 3(2): 62-69.
- [21] Lobovikov M, Paudel S, Piazza M, Ren H, Wu J Q. World bamboo resources: a thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment 2005. Rome: FAO, 2007.
- [22] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [23] 陈先刚, 张一平, 张小全, 郭颖. 过去 50 年中国竹林碳储量变化. *生态学报*, 2008, 28(11): 5218-5227.
- [24] Kume T, Onozawa Y, Komatsu H, Tsuruta K, Shinohara Y, Umebayashi T, Otsuki K. Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: (I) applicability of sap flux measurements. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(8): 1287-1294.
- [25] Du H Q, Zhou G M, Fan W Y, Ge H L, Xu X J, Shi Y J, Fan W L. Spatial Heterogeneity and Carbon Contribution of aboveground biomass of moso bamboo by using geostatistical theory. *Plant Ecology*, 2010, 207(1): 131-139.
- [26] Komatsu H, Onozawa Y, Kume T, Tsuruta K, Kumagai T, Shinohara Y, Otsuki K. Stand-scale transpiration estimates in a Moso bamboo forest: II. Comparison with coniferous forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(8): 1295-1302.
- [27] Xu X J, Zhou G M, Liu S G, Du H Q, Mo L F, Shi Y J, Jiang H, Zhou Y F, Liu E B. Implications of ice storm damages on the water and carbon cycle of bamboo forests in southeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 177: 35-45.
- [28] Lou Y P, Li Y X, Buckingham K, Henley G, Zhou G M. Bamboo and Climate Change Mitigation. Beijing: INBAR, 2010.
- [29] 崔瑞蕊, 杜华强, 周国模, 徐小军, 董德进, 吕玉龙. 近 30a 安吉县毛竹林动态遥感监测及碳储量变化. *浙江农林大学学报*, 2011, 28(3): 422-431.
- [30] 苏阿兰. 福建省毛竹林生态系统碳汇量时空变化特征分析. 福州: 福建农林大学, 2011.
- [31] 孙成, 江洪, 周国模, 杨爽, 陈云飞. 我国亚热带毛竹林 CO₂ 通量的变异特征. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2717-2724.
- [32] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 2006, 3: 571-583.
- [33] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [34] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [35] Sachs L. *Angewandte Statistik: Anwendung Statistischer Methoden*. Berlin: Springer, 1996.
- [36] Li Z Q, Yu G R, Wen X F, Zhang L M, Ren C Y, Fu Y L. Energy balance closure at ChinaFLUX sites. *Science in China Series D Earth*

- Sciences, 2005, 48(S1): 51-62.
- [37] Lasslop G, Reichstein M, Papale D, Richardson A D, Arneth A, Barr A, Stoy P, Wohlfahrt G. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 187-208.
- [38] Yuan W P, Liu S G, Zhou G S, Zhou G Y, Tieszen L L, Baldocchi D, Bernhofer C, Gholz H, Goldstein A H, Goulden M L, Hollinger D Y, Hu Y M, Law B E, Stoy P C, Vesala T, Wofsy S C, other AmeriFlux collaborators. 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): 189-207.
- [39] Gu Y X, Bélair S, Mahfouf J F, Deblonde G. Optimal interpolation analysis of leaf area index using MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(3): 283-296.
- [40] Kleinhenz V, Midmore D J. Aspects of bamboo agronomy. *Advances in Agronomy*, 2001, 74: 99-153.
- [41] 黄启民, 杨迪蝶, 高爱新, 沈允刚, 邱国雄, Long S P, Beadle C L, Hall D O, Scurlock J M O. 不同条件下毛竹光合作用的研究. *竹类研究*, 1989, 8(2): 8-18.
- [42] Isagi Y, Kawahara T, Kamo K, Ito H. Net production and carbon cycling in a bamboo *Phyllostachys pubescens* stand. *Plant Ecology*, 1997, 130(1): 41-52.
- [43] Liese W. Anatomy and utilisation of bamboos. *Eur. Bamboo Soc. J.* 1995, 6: 5-12.
- [44] 施建敏, 郭起荣, 杨光耀, 杜天真. 毛竹光合作用对环境因子的季节响应. *广西植物*, 2007, 27(6): 923-928.
- [45] 张利阳, 温国胜, 张汝民, 王电杰, 张俊. 毛竹光合生理对气候变化的短期响应模拟. *浙江农林大学学报*, 2011, 28(4): 555-561.
- [46] Higuchi K, Shashkov A, Chan D, Saigusa N, Murayama S, Yamamoto S, Kondo H, Chen J, Liu J, Chen B. Simulations of seasonal and inter-annual variability of gross primary productivity at Takayama with BEPS ecosystem model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 134(1): 143-150.
- [47] Liu S G, Bond-Lamberty B, Hicke J A, Vargas R, Zhao S Q, Chen J, Edburg S L, Hu Y M, Liu J X, McGuire A D, Xiao J F, Keane R, Yuan W P, Tang J W, Luo Y Q, Potter C, Oeding J. Simulating the impacts of disturbances on forest carbon cycling in North America: Processes, data, models, and challenges. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G4): G00K08.
- [48] Zhou B Z, Li Z C, Wang X M, Cao Y H, An Y F, Deng Z F, Letu G, Wang G, Gu L H. Impact of the 2008 ice storm on moso bamboo plantations in southeast China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences (2005—2012)*, 2011, 116(G3).