

福建省毛竹 NPP 遥感估算及其时空格局研究

官凤英,夏明鹏,范少辉*,刘广路,郜燕芳,周亚琦

(国际竹藤中心 竹藤科学与技术重点实验室,北京 100102)

摘要:以福建省 2006 年和 2012 年 2 期森林资源清查数据、气象数据、MODIS 影像(2012)及 DEM 数据为基础,利用地面调查数据,对毛竹最大光能利用率参数进行测定,基于改进的 CASA 模型为基础,估算了 2012 年福建省毛竹 NPP,并对其分布规律进行了分析。结果表明:毛竹最大光能利用率为 $2.3996\text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$,NPP 平均值为 $1\,169.10\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,毛竹碳累积量为 $1.0344 \times 10^9\text{ tC}$,毛竹 NPP 季节性变化明显,秋季>夏季>冬季>春季,分别为 45.51%、31.1%、13.8%、9.59%。不仅完善了国内主要植被类型(毛竹)的最大光能利用率参数的测定而且为区域尺度毛竹 NPP 估算及碳汇定量评价提供科学参考。

关键词:毛竹;净初级生产力;CASA 模型;最大光能利用率

中图分类号:S795.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)01-0218-06

Remote Sensing-based Estimation of *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* NPP and Its Spatio-temporal Variation Analysis in Fujian

GUAN Feng-ying,XIA Ming-peng,FAN Shao-hui*,LIU Guang-lu,GAO Yan-fang,ZHOU Ya-qi

(International Centre for Bamboo and Rattan,Key Laboratory of Science and Technology of Bamboo and Rattan,Beijing 100102,China)

Abstract:Based on the data from forest inventories in 2006 and 2012,meteorological data,MODIS,DEM and ground survey,the maximum energy efficiency of *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* was calculated for the first time in this study in Fujian Province. The net primary production (NPP) of *P. heterocycla* cv. *pubescens* in Fujian,and its spatiotemporal distribution in 2012 were estimated based on improved CASA model. The results showed that the maximum energy efficiency of *P. heterocycla* cv. *pubescens* plantation was $2.3996\text{ gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$,the amount of carbon accumulation was $1.0344 \times 10^9\text{ tC}$,in 2012,the average of *P. heterocycla* cv. *pubescens* NPP was $1\,169.10\text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,and the NPP of *P. heterocycla* cv. *pubescens* showed an obvious seasonal pattern of spring > summer > winter > spring,accounting for 45.51%,31.1%,13.8%,9.59% of the province's total carbon accumulation,respectively. The determination of the maximum energy efficiency of *P. heterocycla* cv. *pubescens* would provide a scientific reference for the estimation of NPP and the quantitative evaluation of carbon sink in regional scale.

Key words:*Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens*; NPP; CASA model; maximum energy efficiency

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是判断森林生态系统碳源、碳汇功能,评价生态系统可持续发展的重要因子,在全球气候变化及碳平衡中起到重要的作用,是碳循环研究的基础^[1,2]。

从 1876 年 Ebermayer 最早开始对植被净初级生产力研究以来^[3],NPP 研究逐步经历了站点实测、统计回归及模型模拟等阶段。随着 RS 和 GIS

收稿日期:2016-04-27 修回日期:2016-07-15

基金项目:国际竹藤中心科研业务费专项“毛竹林生物量遥感定量估测研究”(1632013010);“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD23B04);竹林立地质量评价与经营技术推广示范[2015]13 号;国家林业局林业科技成果推广项目:竹林立地质量评价与经营技术推广示范[2015]13 号。

作者简介:官凤英,女,副研究员,博士,研究方向:竹资源监测与管理技术。E-mail:guanfy@icbr.ac.cn

* 通信作者:范少辉,男,研究员,博士,研究方向:竹资源培育与经营。E-mail:fansh@icbr.ac.cn

的发展,利用光能利用率模型进行 NPP 估测研究已深入到很多领域。朱文泉^[4]等利用改进的光能利用率模型对 1989—1993 年中国陆地植被 NPP 进行了遥感估算。吴文浩^[5]等利用光能利用率模型对江苏省 2002 年植被净初级生产力的时空及地区分布进行研究。赵志平^[6]等基于 GLO-PEM 模型分析了 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度对植被净初级生产力的影响。尹锴^[7]等基于 CASA 模型分析了 2010 年北京植被生态系统净初级生产力的时空分布格局及其主要影响因素。李燕丽^[8]等基于光能利用率模型分析了广西植被净初级生产力时空变化规律,探讨了气象因子、植被类型、土壤类型、海拔高度及人类活动的影响。朴世龙^[9]等利用 CASA 模型估算了我国 1997 年植被净初级生产力及其分布。各种估算植被 NPP 的光能利用率模型原理基本一致,只是各参数的获取方法与取值、影响最大光能利用率因子的算法及模型应用尺度有差异。而在对众多光能利用率模型对比发现,CASA 模型相比其他光能利用率模型偏差较小^[10],是一个综合考虑了环境条件和植被本身特征的光能利用率模型。毛竹具有生产力高、固碳能力强、动态变化快等优点,其巨大的碳储量对全球碳平衡的贡献逐渐得到认可,动态变化与我国森林的碳汇功能在国家或区域尺度上对森林资源中具体森林类型的碳动态变化研究日益成为人们关注的重点^[11-12]。

竹林是我国南方重要的森林类型,根据第 8 次森林资源清查,我国竹林面积已经达到 620 万 hm²,其中超过 70%为毛竹^[13]。竹林碳储量占全国森林碳储量的 11%,因此竹林在缓解气候变化中起到重要作用^[14]。但是区域估算毛竹 NPP 还未见报道。因此本研究以福建省为例,结合样地实测数据,对福建省毛竹最大光能利用率参数进行模拟计算,建立适用于研究区毛竹光能利用率模型并构建 NPP 估算 CASA 模型,对福建省毛竹 NPP、空间分布、时间变化进行估算与分析,为区域尺度毛竹生态系统净初级生产力快速估算及动态变化监测提供科学的参考依据。

1 研究区概况

福建省地处中国东南沿海,位于 115°50′—120°43′E,23°31′—28°18′N,总陆域面积为 12.4 万 km²。地势西北高、东南低,境内山地丘陵面积占全省土地总面积的 90%。为暖热湿润的亚热带海洋性季风气候,雨量充沛,光照充足,年平均气温 17~21℃,平均降水量 1 400~2 000 mm,气候区域差异较大,是我国南方重点集体林区,其森林面积 766.6 万

hm²,竹林面积 88.5 万 hm²,其中毛竹面积 86 万 hm²,森林覆盖率 63.10%,位列全国第 1 位。

2 材料与方法

2.1 数据源及预处理

2.1.1 NDVI 遥感数据 遥感数据使用美国 USGS 的 MODIS 数据(250 m×250 m),数据共包含蓝光、红光、近红外、中红外波段、NDVI 及 EVI,4 个波段数据和 2 个植被指数产品,时间序列为 2012 年 1 月 1 日—2012 年 12 月 31 日,共 24 期数据。将所有数据进行投影变换为高斯-克里格投影,北京 54 坐标系。对每个月内的 2 期 MODIS 数据求平均,得到研究区月 MODIS 数据。

2.1.2 DEM 数据 数字高程模型(DEM)来源于 NASA 的 SRTM 数据,分辨率为 90 m,采用最邻近法重采样为 250 m×250 m,用于气象数据插值和太阳辐射计算。

2.1.3 气象数据 气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),包括福建省 22 个气象台站 2012 年 1—12 月,月均气温、降水、日照时数及 2 个太阳辐射观测站太阳辐射、平均水汽压月值数据。选用多元线性回归与残差分析相结合的方法对气象数据进行插值。在 ArcGIS 软件支持下运用初始值为晴天总辐射估算模型^[15]对福建省的太阳总辐射进行估算,模型公式如下:

$$Q=\hat{Q}_{ok}(a+bS_i) \tag{1}$$

式中: Q 为太阳总辐射, \hat{Q}_{ok} 为各月的最大晴天辐射月总量($k \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$)(k 取值为 1~12);其中 S_i 为各月的日照百分率(i 取值为 1~12);参数 a 、 b 的取值受纬度影响(表 1)。

上式中, \hat{Q}_{ok} 最大晴天辐射月总量($k \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$),其表达式如下:

$$\hat{Q}_{ok}=C_{ok}+C_{1k}\epsilon+C_{2k}H+C_{3k}e \tag{2}$$

式中: k 取值为 1~12(月), C_{ok} 、 C_{1k} 、 C_{2k} 、 C_{3k} 为方程待定系数, ϵ 为地理纬度(°), H 为海拔高度(m), e 表示平均水汽压(hPa);各月方程待定系数的取值参考中国科学院张炯远^[15]等研究成果。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

ϵ	a	b
$>25^\circ$	0.207	0.725
$<25^\circ$	0.229	0.679

2.1.4 森林资源清查数据 福建省竹林资源清查 2012 年度更新数据,并按省、市、县统计毛竹基本信息,福建省毛竹分布矢量图,外业调查内容包括:竹高、胸径、郁闭度、立竹度、年龄。

2.2 CASA 模型

CASA 模型中 NPP 主要由植被吸收的光合有效辐射和光能利用率这 2 个因素来确定的,CASA 模型是目前使用较多的光能利用率模型,是由 C. S. Potter^[16]等于 1993 年建立的,其表达式如下:

$$NPP=APAR\times\epsilon\tag{3}$$

式中:APAR 表示植被所吸收的光合有效辐射(MJ·m⁻²), ϵ 表示植被的实际光能利用率(gC·MJ⁻¹)。

植物所吸收的光合有效辐射 APAR 是由太阳总辐射的大小及植物本身的生理生态特征共同决定的,可以表示为:

$$APAR=SOL\times f\times 0.5\tag{4}$$

式中:SOL 为太阳总辐射(MJ·m⁻²),0.5 为植被对光合有效辐射的吸收比例。 f 为植被对光合有效辐射的吸收比例,其值受到植被类型及植被覆盖度影响,并随着植被生长阶段改变而变化,可以采用 EVI- f 模型^[17]进行福建省竹林参数 f 的计算:

$$f=\gamma\times EVI\tag{5}$$

$$EVI=2.5\times\frac{\rho_{NIR}-\rho_{RED}}{\rho_{NIR}+(6\times\rho_{RED}-7.5\times\rho_{BLU})+1}\tag{6}$$

γ 为调节系数,其值设置为 1.0^[18]。

光能利用率是 NPP 估算的关键参数,表示植被将吸收的光合有效辐射转换成有机物的效率,用 ϵ 表示,单位通常为 gC·MJ⁻¹。在现实条件下主要受温度和水分的影 响,其表达式如下:

$$\epsilon(x,t)=T_{\epsilon 1}(x,t)\times T_{\epsilon 2}(x,t)\times W_{\epsilon}(x,t)\times\epsilon_{\max}\tag{7}$$

式中: $T_{\epsilon 1}(x,t)$ 和 $T_{\epsilon 2}(x,t)$ 分别为低温和高温对光能利用率的影响, $W_{\epsilon}(x,t)$ 为水分胁迫影响系数,反应水分条件的影响; ϵ_{\max} 为理想条件下植被的最大光能利用率(gC·MJ⁻¹)。

2.3 毛竹最大光能利用率

结合已有在福建省永安市采伐的 172 株毛竹的生物量实测值与竹龄计算竹子的 NPP 数据,在 SPSS 中对 NPP 于胸径、年龄、竹高及生物量进行相关性分析,选择和毛竹 NPP 相关性最强的竹龄和胸径作为自变量,毛竹 NPP 作为因变量,建立单株毛竹的 NPP 线性回归方程:

$$NPP=Y\times(-1.464)+D\times1.322-3.678\tag{8}$$

式中: Y 表示毛竹的年龄(a), D 表示毛竹的平均胸径(cm)。

基于上述公式计算得到调查样地的毛竹 NPP 实测数据来计算毛竹最大光能利用率 ϵ_{\max} 值,首先假设福建省各区市间毛竹的最大光能利用率差别不

大,然后计算研究区样地所有像元的 APAR、温度、水分胁迫系数和毛竹 NPP 实测数据,最后根据公式(9)模拟得到福建省毛竹最大光能利用率值为 2.399 6 gC·MJ⁻¹。

$$\epsilon_{\max}=\frac{NPP}{APAR\times T_{\epsilon 1}\times T_{\epsilon 2}\times W_{\epsilon}}\tag{9}$$

3 结果与分析

3.1 福建省太阳总辐射值、年降水量及年平均气温空间分布规律

利用福建省 22 个气象站点离散分布的气象数据,对太阳辐射、年降水量及年平均气温的空间插值分别采用反距离权重插值法^[19]、普通克里金插值法^[20]、协同克里金插值法^[21]得到 2012 年福建省太阳总辐射值(图 1)、年降水量(图 2)及年平均气温(图 3)空间分布图。

图中可知:2012 年福建省太阳总辐射值在 3 840.77~4 898.27 MJ·m⁻²间变化,南部地区值>西北部地区值,整体趋势随纬度变化由北部高纬度向东南部低纬度逐渐增加。年降水量整体趋势表现为由东南部的最小值区域向西北方向逐步增加。年平均气温空间分布总体上表现为南高北低,其中中部地区气温值最低,东部和南部地区最高。

3.2 福建省毛竹 CASA 模型及其 NPP 空间分布

基于实测的毛竹净初级生产力数据,结合气象数据计算得到福建省毛竹的最大光能利用率 ϵ_{\max} 为 2.399 6 gC·MJ⁻¹,在参数的基础上构建了福建省毛竹 NPP 估算模型:

$$NPP=SOL\times f\times 0.5\times T_{\epsilon 1}\times T_{\epsilon 2}\times W_{\epsilon}\times 2.399\ 6\tag{10}$$

利用该模型估算得到 2012 年福建省毛竹碳累积量为 1.034 4×10⁹ tC,年 NPP 平均值为 1 169.10 gC·m⁻²·a⁻¹。从福建省毛竹 NPP 的空间分布状况(图 4)来看,总体上表现为西北部地区和东部地区毛竹 NPP 值比较低,南部地区和东北部地区毛竹 NPP 值比较高。其中福建省东南沿海厦门市、泉州市及部分区县,因为没有毛竹分布,其值为 0。最大值出现在福建省南部漳州市的云霄县,其值为 1 318.09 gC·m⁻²·a⁻¹,这主要是因为该地区全年具有较丰富的水热条件,气候适宜。由图 4 可知,福建省有毛竹分布的市县里,毛竹年 NPP 值处于 1 100~1 150 gC·m⁻²·a⁻¹等级之间的面积最多,占整个 NPP 分布面积的 47.8%,其次为处于 1 150~1 200 gC·m⁻²·a⁻¹之间,占 37.6%,其中>1 250 gC·m⁻²·a⁻¹等级占比最少,为 0.2%。

3.3 福建省毛竹 NPP 时间分布

3.3.1 福建省毛竹 NPP 月变化规律 基于构建

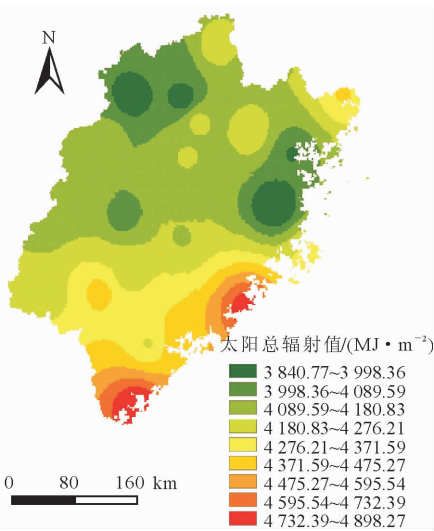


图 1 太阳辐射值

Fig. 1 Solar radiation

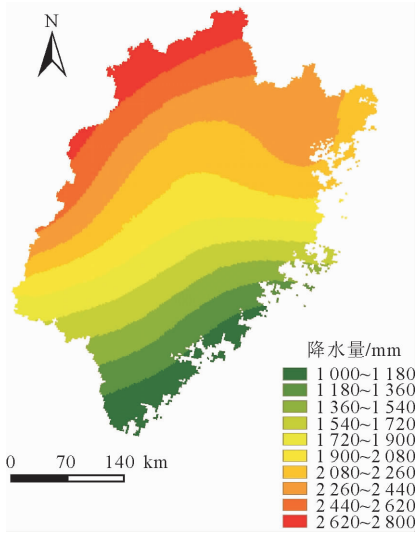


图 2 降水量

Fig. 2 Rainfall

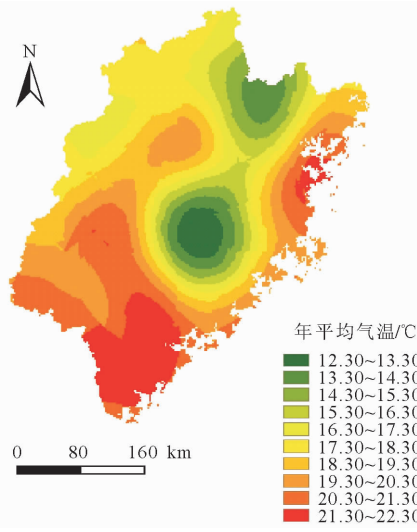


图 3 年平均气温

Fig. 3 Average temperature

的 CASA 模型估算得到 2012 年福建省 12 个月的 *NPP* 时间序列数据,并通过均值求取来具体分析。由图 5 看出,*NPP* 时间变化规律与植物长势规律基本一致。2012 年全年 12 个月福建省毛竹月均 *NPP* 的值呈现明显的曲线变化,月均 *NPP* 在 $30.41\sim194.78\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 间变动。其中 1 月和 2 月份月均 *NPP* 值较小,且最小值出现在 2 月份,值为 $30.41\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$,7 月和 8 月月均 *NPP* 值较大,最大值在 8 月份,值为 $194.78\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 。2 月份至 5 月份这段时间,随着气温、降水及太阳辐射等强度的逐渐增加,有利于植物的生长和有机物的积累,是毛竹 *NPP* 的累积过程。6 月及 7 月份由于受到台风等的影响,区域出现连续的阴雨天气,使得可以得到的太阳有效辐射大大降低,因而福建省大部分地区 *NPP* 出现缓慢下降。7 月下旬及 8 月份受到副热带高压的影响,福建省会连续晴热高温天气,毛竹的光合作用达到最强,其 *NPP* 值达到一年中最高,为 $194.78\text{ gC}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

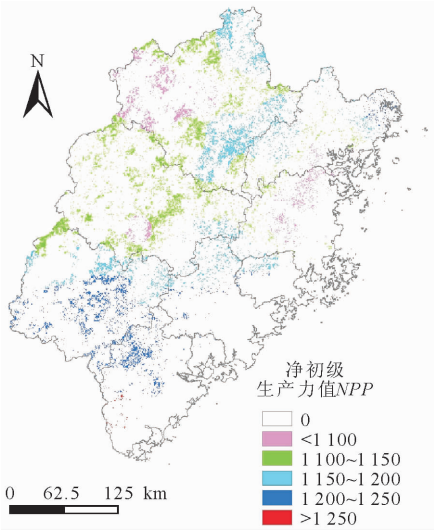


图 4 福建省毛竹年 *NPP* 空间分布

Fig. 4 Annual *NPP* grade distribution for *P. heterocycla* cv. *pubescens* in Fujian

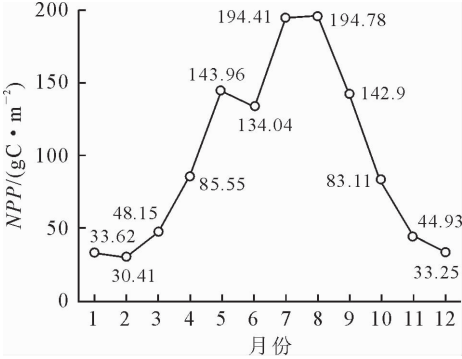


图 5 福建省毛竹月均 *NPP* 1—12 月变化

Fig. 5 *P. heterocycla* cv. *pubescens* *NPP* change table for 1—12 month

3.3.2 福建省毛竹 *NPP* 季节分布规律 将福建省 9 个区市的毛竹 *NPP* 分季节统计得到 4 个季节的毛竹 *NPP* 曲线图(图 6)。春、夏、秋、冬 4 个季度中,毛竹 *NPP* 值总体表现为:秋季>夏季>冬季>春季。其中,夏季各市间的毛竹 *NPP* 值差异最大,值在 111.70~132.79 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 间变化,其中福州市夏季 *NPP* 值最小,仅为 111.70 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$,漳州市值最大,为 132.79 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$;秋季变异程度次之,*NPP* 值在 170.64~180.32 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间;冬季和春季福建省整个区域毛竹净初级生产力分布较差异不大,图 7 所示近似于直线。由于 3 月份毛竹到了换叶的季节,叶子脱落,光合作用降低,所以会出现冬季 *NPP* 值大于春季。

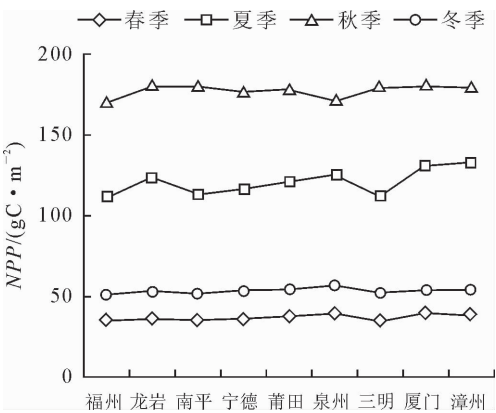


图 6 福建省毛竹 *NPP* 季节变化

Fig. 6 *P. heterocycla* cv. *pubescens* *NPP* quarterly change table

由此可见,植被净初级生产力受气候因子影响较大^[22],福建省毛竹净初级生产力也不例外,各市区间 *NPP* 随月份季节的变化与气象因子变化保持一致,尤其季节变化上福建省呈明显的干湿季,水热条件差异显著,秋季节毛竹 *NPP* 值为春季的 4.74 倍,2012 年中夏、秋 2 季毛竹 *NPP* 占全年净初级生产力的 76.61%,干湿季毛竹 *NPP* 值比高达 1:3。

4 结论与讨论

以 CASA 模型为基础,运用 RS 和 GIS 技术,结合森林资源清查数据、气象数据、MODIS/NDVI 数据以及地面调查数据,估算得到福建省 2012 年的 *NPP* 数据,结果表明,福建省毛竹最大光能利用率为 2.399 6 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$,2012 年福建省 *NPP* 平均值为 1 169.10 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,毛竹碳累积量为 $1.034 4 \times 10^9 \text{tC}$,毛竹 *NPP* 季节性变化明显,秋季>夏季>冬季>春季。

研究计算得到毛竹年 *NPP* 平均值为 1 169.10 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,这与周国模^[23]等认为集约经营的毛竹年 *NPP* 应在 737.1 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上相符,

与李慧^[20]利用 MODIS 数据基于光能利用率模型估算得到 2005 年福建省竹林年均 *NPP* 为 917.70 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 结果相近。说明利用改进的 CASA 模型能够快速准确地估算区域毛竹年均 *NPP*。李慧^[20]在对福建省森林生态系统 *NPP* 时空模拟研究得出:竹林年 *NPP*(917.70 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)>常绿阔叶林年 *NPP*(909.85 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)>常绿针叶林年 *NPP*(724.91 $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),由此可以说明,福建省森林类型中毛竹净初级生产力最高,相比其他森林类型具有更强的固碳能力,在福建省碳平衡中起到重要作用。毛竹作为森林生态系统一个重要类型和组成部分,对其碳汇能力的研究应进一步深化。CASA 模型虽然在草地、陆地植被等生态系统中得到很好的应用和验证,但是要精确估测毛竹 *NPP* 仍需要进一步的发展和细化参数,需要更多的研究者参与。

不同的植被类型,其最大光能利用率值是不同的。在现有的森林 *NPP* 研究中,针对毛竹 *NPP* 的研究相对较少,且缺乏相应的模型参数。本研究根据毛竹试验样地实测数据模拟得到的 ϵ_{max} 值为 2.399 6 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$,这与杨爽^[24]通过生态系统 CO_2 通量观测研究得到的浙江吉安毛竹光能利用率 ϵ 界与 0.8~2.8 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 之间和 A. Ruimy^[25] 等对 C_3 植物进行研究发现其最大光能利用率在 0.85~3.0 $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 之间的区间范围相吻合。由于采用的研究方法不同,毛竹最大光能利用率的具体数值是有区别的,但总体区间范围是一致的。本研究不仅完善了国内主要植被类型的最大光能利用率,而且对今后开展基于光能利用率模型的毛竹净初级生产力遥感估算研究提供参考。

CASA 模型来源于国外,直接将其用来估算研究区毛竹 *NPP* 是不可取的,基于外业调查中实测的毛竹 *NPP* 数据,对 CASA 模型中毛竹最大光能利用率进行计算和修正是本研究的关键。由于毛竹生长周期短,本研究对福建省毛竹净初级生产力分析的时间尺度较小,并未进一步对毛竹净初级生产力的年变化进行分析。随着遥感技术的发展,社会经济可持续性发展的不断要求,未来将会有更新的理论与技术运用于毛竹这一森林类型的碳循环研究中,毛竹的碳贡献研究将得到进一步完善。

参考文献:

[1] IMHOFF M L,BOUNOUA L,DEFRIES R,et al. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States[J]. Remote Sensing of Environment,2004,89(4):434-443.
[2] NEMANI R R,KEELING C D,HASHIMOTO H,et al. Cli-

mate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.

[3] EBERMAYER E. Die gesammte lehre der waldstreu mit rücksicht auf die chemische statik des waldbaues; unter zugrundlegung der in den Königl. staatsforsten Bayerns angestellten untersuchungen bearbeitet[M]. Berlin; Springer, 1876.

[4] 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[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.

ZHU W Q, PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424. (in Chinese)

[5] 吴文浩, 李明明, 卜子汇. 基于开放式数据库的江苏省植被净生产力遥感估测方法研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(5): 146-151.

WU W H, LI M Y, BU Z H. Estimation of Net Primary Productivity of vegetation in Jiangsu Province based on open datasets[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5): 146-151. (in Chinese)

[6] 赵志平, 吴晓蕾, 李果, 等. 2009-2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 350-360.

ZHAO Z P, WU X P, LI G, *et al.* Drought in southwestern China and its impact on the net primary productivity of vegetation from 2009-2011[J]. ACTA Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 350-360. (in Chinese)

[7] 尹锴, 田亦陈, 袁超, 等. 基于 CASA 模型的北京植被 NPP 时空格局及其因子解释[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1): 133-139.

[8] 李燕丽, 潘贤章, 王昌昆, 等. 2000-2011 年广西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5220-5228.

LI Y L, PAN X Z, WANG C K, *et al.* Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2011 in Guangxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5220-5228. (in Chinese)

[9] 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[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608.

[10] 赵育民, 牛树奎, 王军邦, 等. 植被光能利用率研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1471-1477.

ZHAO Y M, NIU S K, WANG J B, *et al.* Light use efficiency of vegetation a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9): 1471-1477. (in Chinese)

[11] 杜华强. 竹林生物量碳储量遥感定量估算[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[12] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.

LIU G H, FU B J, FANG J Y. Viewpoints on the study of economic thresholds of cotton bollworm[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 733-740. (in Chinese)

[13] 国家林业局. 中国森林资源报告-第八次国家森林资源清查[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 94.

[14] CHEN X G, ZHANG X Q, ZHANG Y P, *et al.* Changes of carbon stocks in bamboo stands in China during 100 years[J]. For. Ecol. Manag., 2009, 258(7): 1489-1496.

[15] 张炯远, 冯雪华, 倪建华. 用多元回归方程计算我国最大晴天总辐射能资源的研究[J]. 资源科学, 1981, (1): 38-46.

[16] POTTER C S, RANDERSON J T, FIELD C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.

[17] XIAO X, ZHANG Q, SALESKA S, *et al.* Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1): 105-122.

[18] XIAO X, ZHANG Q, BRASWELL B, *et al.* Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 256-270.

[19] 林忠辉, 莫兴国. 中国陆地区域气象要素的空间插值[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 47-56.

[20] 李慧. 福建省森林生态系统 NPP 和 NEP 时空模拟研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.

[21] 季青, 余明. 基于协同克里格插值法的年均温空间插值的参数选择研究[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2010(4): 81-87.

[22] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 等. 气候变化对陕南汉江流域植被净初级生产力的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 51-57.

JIANG C, WANG F, MU X M, *et al.* Effects of climate changes on Net Primary Productivity (NPP) of vegetation in Han River basin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 51-57. (in Chinese)

[23] 周国模, 吴家森, 姜培坤. 不同管理模式对毛竹林碳贮量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(6): 51-55.

ZHOU G M, WU J S, JIANG P K. Effects of different management models on carbon storage in *Phyllostachys pubescens* forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(6): 51-55. (in Chinese)

[24] 杨爽. 浙江安吉毛竹林生态系统 CO₂ 通量观测研究[D]. 临安: 浙江农林大学, 2012.

[25] RUIMY A, SAUGIER B, DEDIEU G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99(D3): 5263-5283.