

# 利用异速生长关系和地统计方法估算 武夷山南麓毛竹林生物量

张 宇 岳祥华 漆良华 江泽慧 石 雷\*

(国际竹藤中心, 北京 100102)

**摘 要** 澄清毛竹(*Phyllostachys edulis*)生物量与胸径之间的异速生长关系及毛竹林生物量密度与叶面积指数之间的关系有助于准确估算毛竹林生物量。本文结合异速生长关系和地统计方法对中尺度毛竹林生物量进行估算。利用收获法在武夷山南麓毛竹林分布区砍伐 103 棵标准竹,并用冠层分析仪获取毛竹林叶面积指数,建立毛竹生物量与胸径、林分生物量密度与叶面积指数的异速生长关系;再利用地统计方法对黄坑镇毛竹林生物量的空间分布进行模拟。结果表明:武夷山南麓毛竹单株生物量与胸径之间存在明显的幂函数关系( $R^2=0.585$ ,  $P=0.002$ );毛竹林生物量密度与叶面积指数间也存在着显著的幂函数关系( $R^2=0.525$ ,  $P=0.002$ );利用建立的异速生长方程和地统计方法对黄坑镇毛竹林地上生物量的模拟结果表明,黄坑镇毛竹林平均地上生物量密度为  $53.49 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,全镇毛竹林地上生物量约为 0.62 Tg。

**关键词** 异速生长关系; 鱼眼摄像机; 毛竹; 幂函数关系

**Estimation of *Phyllostachys edulis* forest biomass in southern Wuyishan Mountain using allometric equation and geostatistical technique.** ZHANG Yu, YUE Xiang-hua, QI Liang-hua, JIANG Ze-hui, SHI Lei\* (International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China).

**Abstract:** The allometric equations of biomass-diameter at breast height (DBH) and stand biomass density-leaf area index (LAI) of *Phyllostachys edulis* forests are helpful for biomass estimation with great accuracy. Here, the two fitted allometric equations, together with geostatistical technique, were employed to estimate biomass of moso bamboo forest in Huangkeng Town, southern Wuyishan Mountain, Fujian Province. A total of 103 moso bamboo culms were cut in Huangkeng Town to fit the allometric relationship between aboveground biomass and DBH at individual level. Stand-level LAI was derived from fisheye camera, which was used to develop equation between stand biomass density and LAI. Then geostatistical technique was used to estimate biomass of moso bamboo forest of the whole town. Significant power function relationships were found between aboveground biomass and culm DBH ( $R^2=0.585$ ,  $P=0.002$ ), and between stand biomass density and LAI ( $R^2=0.525$ ,  $P=0.002$ ). Based on the two fitted allometric equations and geostatistical technique, the mean biomass density of moso bamboo forest in Huangkeng Town was estimated as  $53.49 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the total biomass of the whole town was 0.62 Tg.

**Key words:** allometric equation; fisheye camera; moso bamboo; power function.

森林作为陆地生态系统的主体,在维护全球气候系统、调节全球碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有特殊的作用(Woodwell *et al.*, 1978)。在全球气候变化的背景下,迫切需要了解森林在全球碳循环中的角色定位,而准确估算森林生物量是其关键环节之一。森林生物量的估算,常常需要在野外开展标准木生物量的测定工作;直接称取植物各器官重量无疑是最准确的方法,但是此方法耗时耗力,且对林地具有破坏性,故只适用于小范围内的较少数量林木的研究(陶波等, 2001)。异速生长关系能减少对森林生态系统的破坏,并且能够节省劳动力和提高效率而得到广泛应用。植物体的某一器官与另一器官,或某一属性与植物体个体大小具有相关生长关系,这种关系被称为异速生长关系(Enquist *et al.*, 2001)。这种关系可通过数学模型表达,  $y = ax^b$  是最简单的异速生长模型。其中  $y$  表示植物体的某一器官或某一属性(如材积或蓄积量),  $x$  表示某一器官或植物体个体大小(如胸径),  $a$  和  $b$  是系数。自 Huxley 提出相对生长概念和 Kitterge (1944) 研究了胸径和叶生物量的相关关系后,国内外采用异速生长模型估算森林生物量已有大量报道(Michael *et al.*, 1997; 冯宗炜, 1999; Wang, 2006), 毛竹生物量的估算也主要依靠立竹水平建立的异速生长关系(Gao *et al.*, 2015; Qi *et al.*, 2016), 但林分尺度利用异速生长关系估算竹林生物量的研究未见报道。叶面积指数与植被的光合和蒸腾、生物量等密切相关(王修信等, 2014), 也是预测林分、区域尺度上碳动态的一个重要指标(王希群等, 2005)。森林受物理环境、自然干扰等因素及其相互作用的影响,具有异质性和空间相关性,因此地统计学也常用于森林生态学等方面的研究(张峰等, 2012)。地统计学可用于研究在空间分布上既有随机性又有结构性或空间相关的自然现象,已成为研究自然界具有随机性和规律性双重特征变量的不可或缺的科学方法(冯益明等, 2004)。目前,利用地统计方法估算森林生物量的研究层出不穷(Barra *et al.*, 2015; Yadav *et al.*, 2015)。毛竹主要通过地下鞭根进行克隆生长,从而形成毛竹林。这种克隆特性使地统计方法应用于竹林生物量的估算成为可能。事实上,利用地统计方法估算毛竹林生物量的研究已有报道,如 Du (2010) 利用地统计方法估算了浙江省毛竹林的地上生物量。

毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 是中国南方热带和亚

热带地区的一种重要森林资源,具有生长快、成材周期短、一次成林可长久利用等特点。中国竹林面积虽然只占森林总面积的 3%, 但生物量却占到中国森林总生物量的 10% 以上(Chen *et al.*, 2009)。毛竹是中国竹林生态系统的主体,与杉木等速生树种相比,毛竹具有更高的固碳潜力(Yen *et al.*, 2011)。根据第八次森林资源清查,福建省约有毛竹林  $1.00 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ , 占全省总森林面积的 12.52%, 因此迫切需要对福建省毛竹林生物量的估算开展研究。本文以福建省建阳市武夷山南麓毛竹林为研究对象,构建了毛竹胸径与地上生物量、林分叶面积与地上生物量密度之间的异速生长模型,在此基础上估算了武夷山南麓黄坑镇毛竹林的地上生物量,为未来利用叶面积指数反演福建省毛竹林地上生物量提供模型参考和理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 野外调查

福建省建阳市黄坑镇位于北亚热带,地处  $26^{\circ}14' \text{N} - 28^{\circ}20' \text{N}$ ,  $117^{\circ}02' \text{E} - 119^{\circ}07' \text{E}$ , 雨量充沛,光照充足。黄坑镇十分适宜毛竹生长,在 350 ~ 1350 m 的海拔跨度上均有毛竹林分布。2014 年 7—8 月和 2015 年 9 月在黄坑镇桂林村分别选取调查经营水平和立地条件相似的毛竹纯林样地 60 和 149 块,样地面积大小  $100 \text{ m}^2$  ( $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ )。对 2 年选取的 209 块样地内所有毛竹和胸径  $\geq 3 \text{ cm}$  的林木进行每竹(木)检尺。

### 1.2 毛竹林叶面积指数和毛竹地上生物量的获取

在太阳光不强烈(如阴天、日出前和日落后)时,用 360 度鱼镜头和高清晰度数码相机(HemiView, 英国 DELTA-T 公司)在每块样地中沿对角线等距拍摄毛竹林冠层,室内使用 HemiView 2.1 SR4 软件分析照片,计算各样地的叶面积指数。在 2014 年选取的样地中每 2 个样地内随机选择一个  $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  的小样方,共 30 个;将小样方内所有毛竹砍倒,分秆、枝、叶、莖、莖根、鞭、鞭根器官称取其鲜重,并分别采集样品带回实验室测得含水率,以计算毛竹生物量。共计砍伐 103 棵毛竹,获得毛竹生物量数据 103 组。

鉴于毛竹林地下鞭根系统的复杂性,本文所指毛竹地上生物量是叶、枝、秆、莖和莖根(着生在竹莖上的根)的生物量之和,不含竹鞭和鞭根(着生在竹鞭上的根)的生物量。

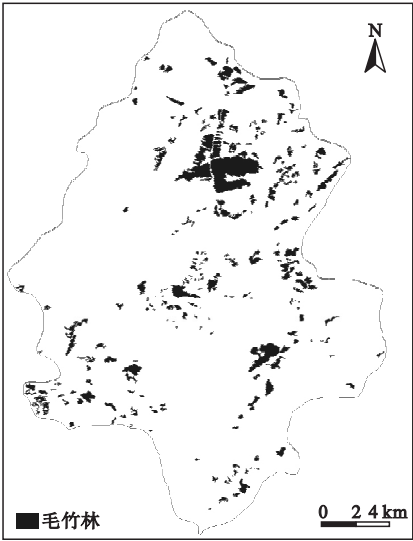


图 1 福建武夷山南麓黄坑镇毛竹林分布示意图  
Fig.1 Moso bamboo forest distribution in Huangkeng, southern Wuyishan Mountain, Fujian Province

1.3 毛竹林分布图的制作

在实地调查的基础上,以小班勾绘的方式在谷歌地球软件中制作出毛竹林分布矢量图。黄坑镇森林主要由杉木、毛竹和其他一些阔叶树种组成,毛竹林在谷歌地球上颜色呈翠绿,具有区别于其他树种的特征。共勾绘出毛竹林斑块 259 个(图 1)。

1.4 统计方法

利用 SPSS 软件(IBM SPSS Statistics 20)计算胸径、生物量等变量的描述性统计特征值及对数据进行检验分析;在 GS<sup>+</sup> 9.0(GeoStatistics for the Environmental Sciences)软件中对毛竹林地上生物量密度数据预处理,计算地统计分析中变异函数的参数(块金、基台、变程等),在 ArcGIS 9.3 软件的地统计分析模块中利用获得的变异函数参数进行 kriging 插值并绘图。

2 结果与分析

2.1 黄坑镇毛竹胸径与地上生物量之间的关系

本文根据实测的胸径和地上生物量数据,利用 SPSS 20.0 软件拟合黄坑镇毛竹地上生物量与胸径之间的关系。黄坑镇毛竹林地上生物量与胸径之间存在着幂函数关系(图 2),方程表达式  $y=0.712x^{1.477}$  ( $R^2=0.585, n=103, P=0.002$ )。黄坑镇毛竹胸径与地上生物量有着较强的异速生长关系,因而可通过该异速生长方程用林分调查的胸径推算林分中每个立株的地上生物量,进而得到林分的生物量密度。

2.2 黄坑镇毛竹林叶面积指数与地上生物量密度之间的关系

为分析黄坑镇毛竹林叶面积指数与地上生物量密度之间的关系,将 60 组样方实测数据中的胸径带入胸径-地上生物量异速生长方程  $y=0.712x^{1.477}$  中计算出 2014 年 57 个样方的总生物量,再将总地上生物量除以样地面积得出样方地上生物量密度。利用 SPSS 20.0 软件拟合毛竹林叶面积指数与地上生物量密度之间的关系,黄坑镇毛竹林叶面积指数与地上生物量密度之间同样存在着较好的幂函数关系,方程表达式  $y=2.825x^{1.730}$  ( $R^2=0.525, n=57, P=0.002$ )(图 3)。利用图 2 中的异速生长方程计算得出的地上生物量密度与基于鱼眼摄像机计算的叶面积指数存在着较好的相关性,因而用毛竹林叶面积指数,可反演黄坑镇毛竹林的地上生物量密度。

2.3 对两组异速生长模型的验证

在 SPSS 软件中两组模型的估算结果进行配对样本 T 检验验证,验证结果显示,两组模型估算出

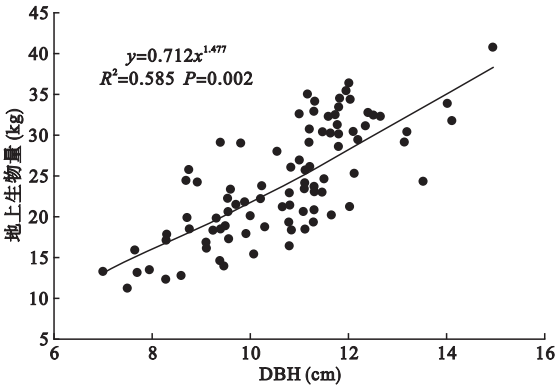


图 2 毛竹林地上生物量与胸径之间的关系  
Fig.2 Relationship between aboveground biomass and the diameter at breast height of moso bamboo forest

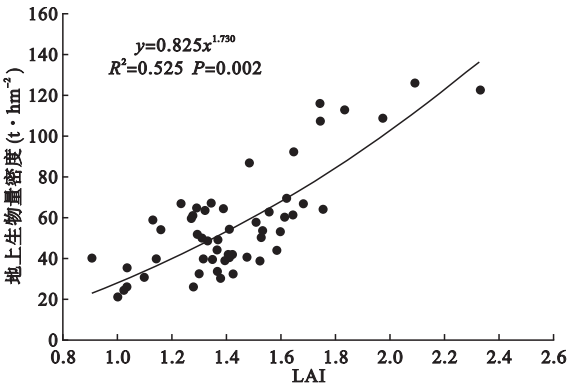


图 3 毛竹林叶面积指数与地上生物量密度之间的关系  
Fig.3 Relationship between aboveground biomass density and leaf area index (LAI) of moso bamboo forest

表 1 两组模型的验证  
Table 1 Validation of two models

	均值	标准差	均值的标准误差	相关系数	P 值
模型 1	56.300	14.424	2.726		
模型 2	58.977	13.758	2.600		
成对样本相关系数				0.825	<0.001

的地上生物量密度相关系数为 0.825,  $P<0.001$ 。两组模型具有较好的相关性,说明像其他非克隆林木一样,诸如毛竹克隆植物的毛竹林分叶面积同样和地上生物量之间存在着明显的异速生长关系,因而用叶面积指数-地上生物量密度模型估算毛竹林地上生物量密度是可行的。

2.4 估算黄坑镇毛竹林地上生物量及其碳储量

2.4.1 空间插值参数的获取 在  $GS^+$  9.0 软件中确定 kriging 插值的半变异函数模型和参数,生物量密度数据需满足正态分布的前提条件。因此,对基于叶面积获得的毛竹林生物量密度数据进行检验。不难看出,黄坑镇毛竹林地上生物量密度数据近似呈现正态分布(图 4),满足地统计分析的条件,可以构建变异函数模型,进行拟合。

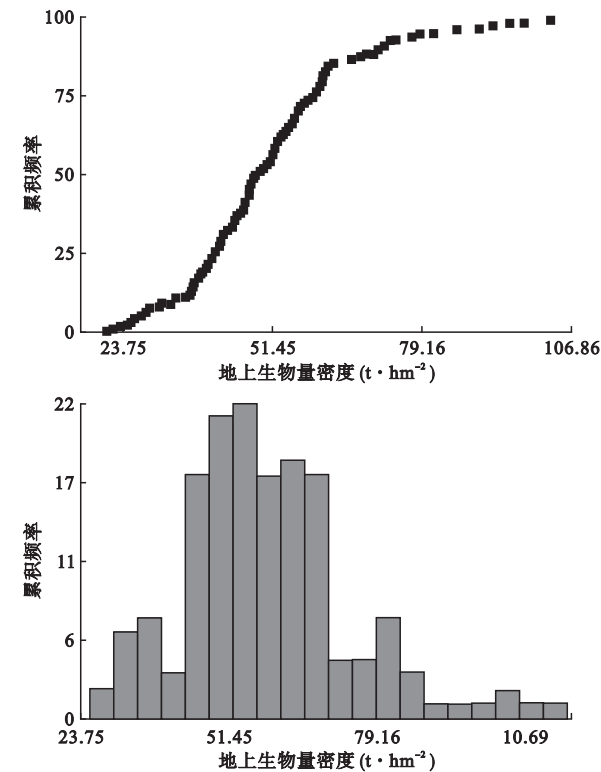


图 4 黄坑镇毛竹林地上生物量密度的累积频率和频率分布  
Fig. 4 Frequency of cumulative percentage and aboveground biomass density of moso bamboo forests in Huangkeng Town

表 2 半变异函数 4 种模型的参数  
Table 2 Parameters of four kinds of semivariogram models

	块金	基台	变程	残差	块金比	$R^2$
线性	193.47	292.91	0.0948	3927	0.661	0.694
球形	23.10	254.60	0.0130	6533	0.091	0.491
指数	159.10	318.30	0.0600	3441	0.500	0.755
高斯	43.90	254.40	0.0104	6511	0.173	0.492

在  $GS^+$  软件中利用常用的线性、球形、指数和高斯模型优化半变异函数模型(表 2),结果发现,指数模型的决定系数最高,残差最小,效果最好。因此,在 ArcGIS 中选用指数模型作为变异函数模型。

2.4.2 毛竹林地上生物量密度的空间插值 用 ArcGIS 的地统计模块对毛竹林地上生物量密度的空间分布进行拟合,变程约为 1.85 km,预测误差的均值为 0.10,预测误差标准均方根为 0.98。如图 5 所示,黄坑镇毛竹林地上生物量密度主要分布范围在 42~63 t · hm<sup>-2</sup>,西北地区较东南地区生物量密度高,这反映黄坑镇不同区域毛竹林经营水平的差异,结合黄坑镇毛竹林分布图计算出黄坑镇各处毛竹林地上生物量密度,平均值为 53.49 t · hm<sup>-2</sup>,黄坑镇约有毛竹林 11590.93 hm<sup>2</sup>,因此黄坑镇毛竹林地上生物量约为 0.62 Tg。

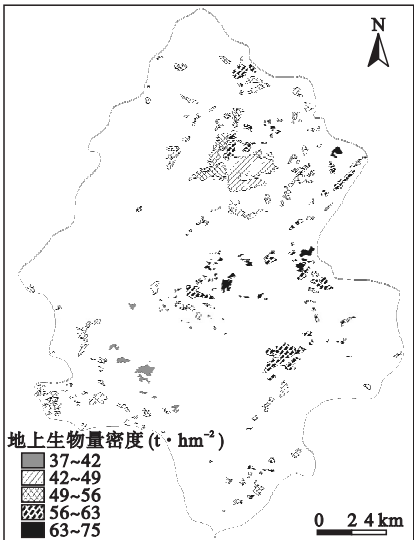


图 5 黄坑镇毛竹林地上生物量密度分布示意图  
Fig. 5 Distribution of aboveground biomass density of moso bamboo forests in Huangkeng Town, Fujian Province

3 讨论

研究表明,以胸径为变量建立的林木异速生长模型要优于其他变量如树高或胸径-树高等 (Michael *et al.*, 1997; 代海军等, 2013), 基于易获得的胸

径建立生物量估算模型是林分尺度上生物量估算的有力手段。也有研究指出,树木采用其胸径与全株生物量的关系去估算林分生物量,所得生物量数据误差较大,但毛竹采用竹秆胸径与全株生物量之间的关系来估算林分生物量所得的结果误差小,可行性高(黄启民等,1993)。异速生长关系参数会随着树种和立地条件的改变而变化(Wang,2006),更准确地估测林木生物量需要针对林木不同生长阶段或者不同径级建立相应的生物量模型(董点等,2014),例如 Gao 等(2015)指出,竹林生物量异速生长模型系数在不同生长阶段具有明显的差异。本文没有考虑不同生长阶段对毛竹林异速生长关系系数的影响,可能会带来一定的估算误差。在 Gao 等(2015)研究中,没有给出误差大小,也未见有相关研究的报道;另外,由于野外调查时毛竹立竹年龄难以辨认,每竹检尺时我们没有调查和记录每个立竹年龄,本文无法提供由不同生长阶段异速生长系数变化导致的生物量估算误差。在今后的研究中,需加强该方面的研究。

LAI 作为一种重要的植被结构参数,在一定程度上能反应群落生物量高低(白静等,2008;朱高龙等,2010;咎梅等,2013),因此常用于陆地植被的生物量反演。本文使用 Hemiview 冠层分析仪测量毛竹林叶面积,是通过计算太阳辐射透过系数、冠层空隙大小、间隙率参数等来推算有效 LAI,未考虑毛竹叶片的集聚效应。

刘晓梅(2011)、毛学刚(2011)利用地统计插值估算出区域水平的森林生物量,而毛竹是一种克隆植物,使用地统计方法估算林木生物量是否适用于区域水平的克隆植物种群也还未见报道。同时,kriging 插值只是一种局部估算方法,对估算值的整体空间相关性考虑不够,虽然它保证了数据的估算局部最优,却不能保证总体最优,同时 kriging 插值为减小估计方差而对真实观测数据的离散性进行了平滑处理,虽然可以得到由于光滑而更美观的等值线图或三维图,但一些极端值也可能被处理了,不能够很好地解释一些极端观测值。本文使用指数模型作为半变异函数的块金比为 0.500,说明由随机因素和空间自相关所引起的空间异质性各占一半,这与曾宏达(2005)在武夷山的研究结果相似,这些随机因素与地形差异、气候因子和经营水平有着很大的关系。

森林生物量的估算方法主要有异速生长关系法

(Gao *et al.*, 2015)、平均生物量法(Guo *et al.*, 2010)、地统计法(Barra *et al.*, 2015; Yadav *et al.*, 2015)、胸径分布模型法(Qi *et al.*, 2016)和遥感估算法(石雷,2011)等。Qi 等(2016)利用异速生长关系和胸径分布模型法在林分尺度上对皖南毛竹林的生物量进行估算,发现前者估算结果小于后者,估算误差相差 2%。从黄坑镇整个毛竹林生物量密度来看,平均生物量法高于地统计法估算的平均生物量密度(分别为 56.61 和 53.49 t · hm<sup>-2</sup>),估算误差相差 5.83%。林分生物量调查点有限,且常设置生长状况较好的林分,因而平均生物量法易造成高估(Dixon *et al.*, 1994; Fang *et al.*, 2005)。胸径分布模型把林分结构整合到生物量估算中,因而比仅靠异速生长关系为基础的平均生物量方法估算精度较高(Qi *et al.*, 2016)。

**致谢** 在野外调查和样本采集过程中,得到福建建阳林业局徐乐勤副局长的帮助,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献

- 白 静,田有亮,韩照日格图. 2008. 油松人工林地上生物量-叶面积指数与林分密度关系的研究. 干旱区资源与环境, **22**(3): 183-187.
- 代海军,何怀红,赵秀海,等. 2013. 阔叶红松林两种主要树种的生物量分配格局及异速生长模型. 应用与环境生物学报, **19**(4): 718-722.
- 董 点,林天喜,唐景毅,等. 2014. 紫椴生物量分配格局及异速生长方程. 北京林业大学学报, **36**(4): 54-63.
- 冯益明,唐守正,李增元,等. 2004. 空间统计分析在林业中的应用. 林业科学, **40**(3): 149-155.
- 冯宗炜,王效科,吴 刚,等. 1999. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社.
- 黄启民,杨迪蝶. 1993. 毛竹林的初级生产力研究. 林业科学研究, **6**(5): 536-540.
- 刘晓梅,布仁仓,邓华卫,等. 2011. 基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析. 生态学报, **31**(16): 4783-4790.
- 毛学刚,李明泽,范文义,等. 2011. 近 30 年来小兴安岭地区生物量变化及地统计分析. 地理研究, **30**(6): 1110-1120.
- 石 雷. 2011. 近 25 年来新疆森林的动态变化. 干旱区研究, **28**(1): 17-24.
- 陶 波,葛全胜,李克让,等. 2001. 陆地生态系统碳储量研究进展. 地理研究, **20**(5): 564-574.
- 王希群,马履一,贾忠奎,等. 2005. 叶面积指数的研究和应用进展. 生态学杂志, **24**(5): 537-541.
- 王修信,孙 涛,朱启疆,等. 2014. 林地叶面积指数遥感估算方法适用分析. 生态学报, **34**(16): 4612-4619.
- 咎 梅,李登秋,居为民,等. 2013. 新疆喀纳斯国家自然保

- 护区植被叶面积指数观测与遥感估算. 生态学报, **33** (15): 4744–4757.
- 曾宏达. 2005. 基于 DEM 和地统计的森林资源空间格局分析——以武夷山山区为例. 地球信息科学, **7**(2): 82–88.
- 张峰, 杜群, 葛宏立, 等. 2012. 基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究. 生态学报, **32**(16): 5275–5286.
- 朱高龙, 居为民, 范文义, 等. 2010. 帽儿山地区森林冠层叶面积指数的地面观测与遥感反演. 应用生态学报, **21** (8): 2117–2124.
- Barra M, Petitgas P, Bonanno A. 2015. Interannual changes in biomass affect the spatial aggregations of anchovy and sardine as evidenced by geostatistical and spatial Indicators. *PLoS ONE*, **10**: e0135808.
- Chen XG, Zhang XQ, Zhang YP, *et al.* 2009. Changes of carbon stocks in bamboo stands in China during 100 years. *Forest Ecology and Management*, **258**: 1489–1496.
- Dixon RK, Brown S, Houghton, RA, *et al.* 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, **263**: 185–190.
- Du HQ, Zhou GM, Fan WY, *et al.* 2010. Spatial heterogeneity and carbon contribution of aboveground biomass of moso bamboo by using geostatistical theory. *Plant Ecology*, **207**: 131–139.
- Enquist BJ, Niklas KJ. 2001. Invariant scaling relations across tree-dominated communities. *Nature*, **410**: 655–660.
- Fang JY, Oikawa T, Kato T, *et al.* 2005. Biomass carbon accumulation by Japan's forests from 1947 to 1995. *Global Biogeochemical Cycles*, **19**: Gb2004.
- Gao X, Jiang ZH, Guo QR, *et al.* 2015. Allometry and biomass production of *Phyllostachys edulis* across the whole lifespan. *Polish Journal of Environmental Studies*, **24**: 511–517.
- Guo ZD, Fang JY, Pan YD, *et al.* 2010. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecology and Management*, **259**: 1225–1231.
- Kitterge J. 1944. Estimation of amount of foliage of trees and shrubs. *Journal of Forestry*, **42**: 905–922.
- Michael TT, Michael DK. 1997. Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, **97**: 1–24.
- Qi LH, Liu XJ, Jiang ZH, *et al.* 2016. Combining diameter-distribution function with allometric equation in biomass estimates: A case study of *Phyllostachys edulis* forests in South Anhui, China. *Agroforestry Systems*, doi:10.1007/s10457-015-9887-6.
- Wang C. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, **222**: 9–16.
- Woodwell GM, Whittaker R, Reiners W, *et al.* 1978. The biota and the world carbon budget. *Science*, **199**: 141–146.
- Yadav BKV, Nandy S. 2015. Mapping aboveground woody biomass using forest inventory, remote sensing and geostatistical techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, doi: 10.1007/s10661-015-4551-1.
- Yen TM, Lee JS. 2011. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model. *Forest Ecology and Management*, **261**: 995–1002.

---

作者简介 张宇,男,1992年生,硕士研究生,研究方向为植物生态学. E-mail: alexyu1718@sina.com

责任编辑 张敏

---