

我国南方毛竹林生态系统碳储量的估算^①

张厚喜^{1,2}, 庄舜尧¹, 季海宝^{1,2}, 周 赛^{1,2}, 孙 波^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 竹林在我国南方分布广、生长快、再生能力强, 具有很高的固碳潜力。但是对于区域尺度竹林生态系统碳储量的估算方面仍然存在精度差、缺乏机理模型的不足。本研究针对福建、湖南、江西和浙江 4 省的毛竹林生态系统, 通过野外调查, 基于植被生长与温度、水分等因子的相关性原理分析毛竹林生态系统单位面积碳储量与纬度和海拔的关系, 构建二元线性回归模型; 采用数字高程模型 (digital elevation model, 简称 DEM) 和省级毛竹统计面积数据, 基于纬度和高程梯度划分统计单元, 估算我国南方 4 省毛竹林生态系统的碳储量。结果表明, 36 个采样点毛竹林生态系统单位面积碳储量为 C 78.7 ~ 252.6 t/hm², 其中土壤层(0 ~ 60 cm)的碳储量是主体, 占 66.9% ~ 87.0%; 由模型估算, 2009 年我国南方区域毛竹林生态系统碳储量的总和为 C 409.0 Tg, 福建、湖南、江西和浙江的碳储量分别为 C 109.1、102.1、88.6 和 109.2 Tg; 这 4 省毛竹林生态系统平均单位面积碳储量分别为 C 122.0、122.3、109.5 和 136.5 t/hm²。

关键词: 毛竹林; 碳储量; 海拔; 纬度; 二元线性回归模型

中图分类号: Q148

大气中 CO₂ 等温室气体浓度升高导致的气候变暖对人类生存造成巨大威胁, 减少温室气体排放和增加陆地生态系统碳汇是当前国际地球科学领域研究的热点^[1-3]。森林是陆地生态系统的主体, 维持着全球植被碳库的 86% 和土壤碳库的 73%, 因而在全球碳循环中发挥着重要的作用^[4-5]。竹林是重要的森林生态系统, 当今全球森林面积急剧下降, 而竹林面积却以每年 3% 左右的速度在递增, 这表明竹林是一个不断增大的碳汇^[6]。我国是世界上竹类资源最为丰富的国家, 竹子种类、竹林面积均占全世界的 1/3 左右。毛竹(*Phyllostachy edulis*)是竹林中最主要的类型, 第七次全国森林资源清查结果^[7]显示, 在我国约有毛竹 386.83 万 hm², 占竹林面积的 71.89%, 因此, 研究毛竹林生态系统固碳及增汇潜力有着重要的现实及科学意义。

近年来, 关于县域、省级甚至全国竹林碳储量估算的研究已有较多报道^[6, 8-11], 然而, 由于采用的数据和方法不同, 估算的结果存在较大差异, 因此, 降低竹林碳储量估算的不确定性, 才能提高估算精度。目前用于森林碳储量研究的方法主要有样地清查法、微气象学方法、地面同位素方法等^[12]。而最常用的

是样地清查法, 又可分为 3 种, 其中平均生物量法是指基于野外实测样地的平均生物量(密度)与该类型森林面积来求取森林生物量的方法。该方法由于实测资料的取样点较少, 直接用求取的平均值来代替整个研究区域, 没有考虑地形、气候、管理措施等因素对密度差异所造成的影响, 在应用于大区域时将导致森林生物量估计偏差^[12]。毛竹的生长发育受气象因子(温度、水分、光照等)和非气象因子(土壤体积质量即容重等)的影响, 而海拔和纬度则影响着气象因子和非气象因子的变化^[13-14]。由于海拔高度的不同使得温度、水分等因子的分布呈现垂直变化规律, 从而导致毛竹的生长也具有明显的垂直分布特征^[13, 15]。而土壤有机碳的积累主要受温度的影响, 随着海拔和纬度的增大, 温度则呈下降趋势, 土壤中有机质分解过程减弱, 有利于有机碳在土壤中的累积^[16]。前期的研究表明, 在区域尺度上, 单位面积毛竹林生态系统的碳储量(密度)与海拔和纬度表现出显著的相关性^[17-18]。目前, 我国仍然缺乏在区域尺度上精确估算竹林生态系统的模型方法。本文选择福建、湖南、江西和浙江这 4 个毛竹大省(2009 年这 4 省竹林面积占全国的 65%)为研究区, 通过建立毛竹林生态系统单位面积碳储量

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05070303)和科技基础性工作专项(2012FY111800)资助。

* 通讯作者(bsun@issas.ac.cn)

作者简介: 张厚喜(1985—), 男, 福建福州人, 博士研究生, 主要从事土壤碳循环方面研究。E-mail: zhanghouxi@126.com

与海拔和纬度的回归模型,利用数字高程模型(digital elevation model,简称DEM)数据,基于高程和纬度梯度划分模型估算的基础统计单元,通过提高毛竹林生态系统单位面积碳储量与面积的匹配度以增加估算的精确度,最终估算我国南方毛竹林生态系统的碳储量。本文具体的研究目的包括:利用福建、湖南、江西和浙江4省的毛竹调查采样数据,建立毛竹林生态系统单位面积碳储量与海拔及纬度之间的回归方程,并进行显著性检验;基于各省毛竹统计面积,利用DEM数据统计不同纬度梯度和高程梯度的毛竹林面积,结合建立的回归方程,估算我国南方毛竹林生态系统碳储量。

1 材料与方法

1.1 采样方法及数据来源

调查采样时间为2011年9月和2012年4月。本研究采样选择浙江省临安市、浙江省衢州市、福建省建瓯市、福建省华安县、江西省奉新县及湖南省桃江县等6个代表性县市,如图1所示。在每个所选县市中,分别选择6个不同海拔的有代表性的毛竹纯林样地(面积 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$),对样地毛竹进行枚目调查,记录每株毛竹的年龄和胸径;样地中土壤采样利用分层采样法,土壤层次分别为 $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60\text{ cm}$,同时对每层土壤进行环刀法体积质量(容重)取样,每样区都采用3次重复。

研究区4省2009年的毛竹林统计面积(hm^2)分别为:福建89.4,湖南83.5,江西80.9,浙江80.0(<http://www.hnfgw.gov.cn/>);研究区DEM是2000年由美国“奋进”号航天飞机搭载的SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)系统获得的雷达影像数据经过处理后制作而成,其分辨率为 90 m (<http://srtm.csi.cgiar.org/>)。

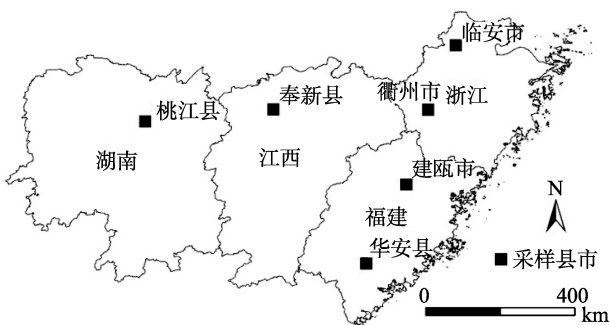


图1 野外调查采样县市空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling counties and cities

1.2 分析方法

本研究主要分析土壤体积质量、土壤有机质及毛

竹各器官含碳量。土壤体积质量采用环刀法测定,土壤有机质采用重铬酸钾氧化法^[19]分析,毛竹植株各部位含碳量用元素分析仪测定。

1.3 毛竹林生态系统单位面积碳量计算(野外采样)

1.3.1 毛竹林生物量及碳量计算 毛竹不同器官生物量与其碳含量的乘积为不同器官的碳储量;各器官碳储量之和为毛竹碳储量;毛竹生物量利用公式估算,再用实测值进行校正;所用公式^[20]为:

$$M = 747.787D^{2.771}[0.148A/(0.028 + A)]^{5.555} + 3.772 \quad (1)$$

式中: M 为毛竹单株生物量(kg), D 为胸径(cm), A 为毛竹度数(2年为一个度数)^[21]。累加样区内各毛竹单株生物量,可计算出单位面积内毛竹的碳储量(t/hm^2)。

1.3.2 土壤碳储量的计算 计算方法:土壤碳储量 $=\sum(\text{每层土壤体积质量} \times \text{采样深度} \times \text{碳含量}) \times \text{面积}$,用 t/hm^2 表示,其中碳含量由有机质含量乘以Bemmelen换算系数0.58得到^[22]。因为考虑毛竹生长的土壤深度,本研究计算的竹林土壤碳储量以 $0 \sim 60\text{ cm}$ 土壤深度为基础^[21]。

1.3.3 毛竹林生态系统单位面积碳储量 毛竹林生态系统单位面积碳储量(t/hm^2)为毛竹植株与土壤层碳储量之和。

1.4 毛竹林生态系统单位面积碳量计算(回归方法)

设毛竹林生态系统单位面积碳储量与海拔和纬度的线性回归方程为:

$$CD = aW + bH + c \quad (2)$$

其中: CD 为单位面积碳储量(t/hm^2); a, b, c 分别为回归系数; W 为纬度 $^\circ$; H 为海拔 m 。

利用野外采样获得的6个县总共36个样点的数据(海拔、纬度和生态系统单位面积碳储量)进行回归方程系数的求解。采用统计软件SPSS 17.0(2008)进行相关性分析、回归方程的求解及显著性检验。

1.5 省级毛竹林生态系统碳储量估算

研究假设:将该省的DEM按某一纬度间隔进行分割;然后将每个纬度梯度内的DEM,在适合毛竹生长的高程范围内按某一高程间隔(如按间隔 100 m)进行划分,这样就可得到处于不同纬度梯度不同高程梯度的统计单元,即作为本研究的计算单元,则可统计每个计算单元的土地面积,并将该单元所处的纬度梯度的中心纬度作为该单元的纬度和该单元所处的高程梯度的中心高程作为该单元的高程;每个计算单元的毛竹面积由该省毛竹面积乘以面积比例系数(该单元土地面积除以该省适合毛竹生长的所有不同纬度梯度和高程梯度的单元的土地总面积);最后,根据回归方程由该单元的高程和纬度可

计算出该单元的单位面积碳储量,并乘上计算所得的该单元的毛竹林面积,则可求出该单元的碳储量,累加不同单元的碳储量,即可得到全省的毛竹林碳量。最后再累加各省的碳储量即得到整个研究区的毛竹林碳储量。

省级毛竹林生态系统碳储量计算公式表示如下:

$$SM_{ij} = SM_{总} \times (ST_{ij} / \sum_{j=1}^{NH} \sum_{i=1}^{NW} ST_{ij}) \quad (3)$$

$$CT = \sum_{i=1}^{NW} \sum_{j=1}^{NH} (a \times W_i + b \times H_j + c) \times SM_{ij} \quad (4)$$

式中: SM_{ij} 表示处于纬度梯度为 i 高程梯度为 j 的统计单元的毛竹林面积(hm^2); $SM_{总}$ 为该省统计的毛竹林总面积(hm^2); ST_{ij} 为处于纬度梯度为 i 高程梯度为 j 的统计单元的土地面积(hm^2); NW 为该省所划分的纬度梯度数目; NH 为该省毛竹生长的高程范围所划分的高程梯度数目; CT 为该省毛竹林生态系统碳储量(t); a, b, c 为回归方程系数; W_i 为纬度梯度为 i 的中心纬度; H_j 为高程梯度为 j 的中心高程(m)。

适合毛竹生长的高程主要介于 $0 \sim 1\ 200\ m$ ^[23], 因此, 本文以 $100\ m$ 为间隔将其高程区间划分成 12 个高程梯度; 对 DEM 数据进行纬度分割和面积统计采用软件 ArcGIS 9.3(ESRI, 2009)。

2 结果与分析

2.1 采样点碳储量

6 个县市的 36 个采样点毛竹植株、土壤层及生态系统单位面积碳储量如表 1 所示。由表 1 可知, 毛竹植株单位面积碳储量变化较小, 其范围为 $C\ 13.5 \sim 49.4\ t/hm^2$, 平均为 $C\ 28.2\ t/hm^2$; 而土壤层($0 \sim 60\ cm$) 单位面积碳储量变化较大, 介于 $C\ 62.5 \sim 210.0\ t/hm^2$, 平均为 $C\ 111.5\ t/hm^2$; 生态系统单位面积碳储量为 $C\ 78.7 \sim 252\ t/hm^2$, 均值为 $C\ 139.8\ t/hm^2$ 。其中土壤层所占比例介于 $66.9\% \sim 87.0\%$, 平均为 79.6% , 高于周国模和姜培坤^[21]计算的浙江临安毛竹林土壤层($0 \sim 60\ cm$)所占毛竹林整个生态系统单位面积碳储量的比例(67.2%), 可见土壤层是毛竹林生态系统碳储量的主体。

表 1 36 个采样点毛竹植株和土壤单位面积碳储量(C, t/hm^2)
Table 1 Carbon density of moso bamboo plant and soil in 36 sampled sites

县市	海拔 (m)	纬度 (°)	单位面积碳储量			土壤层 所占比例 (%)	县市	海拔 (m)	纬度 (°)	单位面积碳储量			土壤层 所占比例 (%)
			植株	土壤	合计					植株	土壤	合计	
福建省 建瓯市	200	26.997	27.0	87.0	114.0	76.3	江西省 奉新县	171	28.817	19.3	82.9	102.2	81.1
	365	26.996	30.6	134.8	165.4	81.5		169	28.817	37.5	75.7	113.1	66.9
	447	27.008	30.3	96.7	126.9	76.2		310	28.826	39.9	105.4	145.3	72.5
	508	27.013	36.5	106.5	143.0	74.5		306	28.818	33.2	101.2	134.4	75.3
	652	27.027	24.8	72.7	97.5	74.5		315	28.827	26.7	88.6	115.2	76.8
福建省 华安县	761	26.997	36.3	131.0	167.3	78.3	317	28.827	34.4	102.3	136.6	74.8	
	721	25.084	23.7	100.8	124.5	80.9	浙江省 临安市	195	30.367	24.6	146.1	170.7	85.6
	599	25.085	20.4	117.2	137.6	85.2		345	30.355	23.3	133.1	156.4	85.1
	544	25.086	22.0	105.2	127.3	82.7		422	30.361	29.8	106.5	136.3	78.1
	373	25.071	13.9	87.0	100.9	86.2		531	30.357	30.1	150.9	181.0	83.4
383	24.966	23.1	68.5	91.6	74.8	628		30.363	48.2	168.9	217.1	77.8	
湖南省 桃江县	350	24.966	22.7	74.2	96.9	76.6	714	30.369	24.7	147.2	171.9	85.6	
	175	28.521	22.0	89.4	111.4	80.2	浙江省 衢州市	362	28.809	49.4	113.0	162.3	69.6
	212	28.520	13.5	90.1	103.5	87.0		482	28.766	33.7	184.9	218.6	84.6
	191	28.520	16.2	62.5	78.7	79.5		584	28.749	30.1	140.2	170.3	82.3
	219	28.519	14.1	78.6	92.7	84.8		685	28.735	29.8	131.6	161.5	81.5
229	28.520	18.0	76.3	94.3	80.9	779		28.726	42.6	210.0	252.6	83.1	
228	28.520	22.2	89.1	111.3	80.1	871	28.724	41.4	159.8	201.2	79.4		

2.2 相关分析、回归方程的建立及显著性检验

对 36 个样点的数据(海拔、纬度和生态系统单位面积碳储量)进行的相关分析表明, 毛竹林生态系统单位面积碳储量与海拔存在极显著相关($r = 0.616$,

$P < 0.01$), 而生态系统单位面积碳储量与纬度存在显著相关($r = 0.413$, $P < 0.05$)。

对 36 个样点的生态系统单位面积碳储量与海拔和纬度进行回归分析, 回归模型通过了 F 检验, 达到

极显著水平($P < 0.01$); 回归系数 a 、 b 和 c 通过了 T 检验, 也均达到极显著水平($P < 0.01$), 表明海拔和纬度应作为解释变量出现在方程中。因此, 线性回归方程为: $C = 11.96W + 0.136H - 254.1$ ($P < 0.01$, $R^2 = 0.622$) (5) 式中, C 生态系统单位面积碳储量(C , t/hm^2), W 为纬度($^\circ$), H 为海拔(m)。

通过比较 36 个采样点生态系统单位面积碳储量实测值与利用回归方程计算的回归值, 可得 36 个采样点的相对误差介于 0.1% ~ 61.9%(表 2), 平均相对误差为 13.0%; 该回归方程适用的范围是我国中亚热带地区($23^\circ 30' \sim 32^\circ 20' N$ 和 $104^\circ 30' \sim 122^\circ E$), 其适用的海拔范围为 0 ~ 1 200 m。

表 2 36 个采样点毛竹林生态系统单位面积碳储量实测值与回归值比较(C , t/hm^2)

Table 2 Comparison between measured value and regression value of carbon density of moso bamboo forest ecosystem of 36 sampled locations

县市	实测值	回归值	相对误差(%)	县市	实测值	回归值	相对误差(%)
福建省	114.0	96.0	15.8	江西省	102.2	113.8	11.4
建瓯市	165.4	118.4	28.4	奉新县	113.1	113.5	0.4
	126.9	129.7	2.2		145.3	132.8	8.6
	143.0	138.1	3.5		134.4	132.2	1.6
	97.5	157.8	61.9		115.2	133.5	15.9
	167.3	172.3	3.0		136.6	133.8	2.1
福建省	124.5	144.0	15.6	浙江省	170.7	135.6	20.5
华安县	137.6	127.4	7.4	临安市	156.4	155.9	0.3
	127.3	119.9	5.8		136.3	166.4	22.1
	100.9	96.5	4.4		181.0	181.2	0.1
	91.6	96.6	5.5		217.1	194.5	10.4
	96.9	92.1	4.9		171.9	206.2	20.0
湖南省	111.4	110.8	0.6	浙江省	162.3	139.7	13.9
桃江县	103.5	115.8	11.9	衢州市	218.6	155.5	28.9
	78.7	113.0	43.6		170.3	169.2	0.7
	92.7	116.8	26.0		161.5	182.7	13.2
	94.3	118.1	25.3		252.6	195.4	22.6
	111.3	118.0	6.1		201.2	207.9	3.3

2.3 碳储量估算

据估算, 2009 年我国南方(福建、湖南、江西和浙江)毛竹林生态系统碳储量总和为 $C 409.0 Tg$, 4 省毛竹林生态系统碳储量从高到低的顺序为: 浙江($109.2 Tg$) > 福建($109.1 Tg$) > 湖南($102.1 Tg$) > 江西($88.6 Tg$) ($1 Tg = 10^{12} g$)。其中, 江西最低, 而浙江、福建和湖南 3 省的碳储量较为接近, 分别比江西高出 23.25%、23.14% 和 15.24%。福建、湖南、江西和浙江毛竹林生态系统单位面积碳储量分别为 $C 122.0$ 、 122.3 、 109.5 和 $136.5 t/hm^2$, 四省平均为 $C 122.6 t/hm^2$, 大于周国模和姜培坤^[21]计算的浙江临安毛竹林生态系统(土壤层为 0 ~ 60 cm)单位面积碳储量 $C 106.4 t/hm^2$, 小于肖复明等^[24]计算的湖南会同毛竹林生态系统(0 ~ 60 cm)单位面积碳储量 $C 166.3 t/hm^2$ 。与其他林木生态系统单位面积碳储量相比, 大于苏南地区 27 年生的杉木林(0 ~ 80 cm)碳储量($C 117.7 t/hm^2$)^[25], 小于火炬松(0 ~ 80 cm)碳储量($C 164.0 t/hm^2$)^[25]和速生阶段杉木林(0 ~ 60 cm)碳储量($C 127.88 t/hm^2$)^[26]。

资料显示, 福建、湖南、江西和浙江 4 省的竹林面积约占全国的 60.7%^[27], 由第七次全国森林资源清查结果可知全国毛竹面积约占竹林面积的 71.89%, 故可推算我国竹林生态系统碳储量为 $C 937.3 Tg$ 。王兵等^[6]估算的我国竹林生态系统碳储量(1999—2003 年)为 $C 837.92 Tg$, 并预测 10 年后达 $C 947.54 Tg$, 低于本研究结果。陈先刚等^[9]对我国 50 年来竹林碳储量进行了估算, 认为 1999—2003 年土壤碳储量为 $C 299.65 Tg$, 竹林生物碳储量为 $C 333.93 Tg$, 合计为 $C 631.58 Tg$, 也低于本研究结果。这些不同结果说明, 在估算毛竹林生态系统碳储量时存在较大的出入, 有待深入的研究, 统一方法。

本研究将毛竹植株占毛竹林生态系统的比例(20.4%)作为竹林植株碳储量占竹林生态系统碳储量比例, 故根据本研究竹林生态系统碳储量估算结果可推算我国竹林植株碳储量约为 $C 195.8 Tg$ 。结合李海奎等^[28]由第七次全国森林资源连续清查的基础资料(2004—2008 年)估算的中国森林植被总碳储量 C

7 811.46 Tg,可算出我国竹林碳储量占森林植被碳储量的 2.4%,该结果与李海奎等^[28]由第七次全国森林资源连续清查的基础资料估算的全国竹林植株碳储量占森林植被碳储量比例(2.5%)很接近,但小于陈先刚等^[9]利用第六次森林资源清查资料估算的比例(5.1%)。尽管竹林植株碳储量占森林植被碳储量的比例不高,但由于竹林生长快,更新周期短,从长期来看,竹林植株碳储量并不低。

本文对中国南方毛竹林生态系统碳储量的估算,存在 2 个方面的不确定性:野外采样数据量不够。采样时,每个省只选择 1 到 2 个代表县市,且每个县市只选择 6 个不同海拔的样地,这样的数据无法涵盖所有不同海拔和不同纬度毛竹的立地状况,由此构建的二元回归方程可能存在误差,从而导致区域尺度碳储量估算的偏差。面积统计数据不够细化。本文面积数据采用的是省级统计数据,当对不同纬度和不同海拔梯度进行面积分配时,某些毛竹统计单元分配的面积可能与实际应有的面积存在较大偏差,采用县市一级的毛竹面积统计数据可以进一步提高估算精度。

3 结论

本文通过对我国南方福建、湖南、江西和浙江 4 省典型毛竹林的调查发现,毛竹林生态系统单位面积碳储量(碳密度)与纬度和海拔存在显著相关,据此建立了基于纬度和海拔的二元线性回归模型。结合 4 省 2009 年毛竹统计面积和 DEM 数据,估算出 4 省毛竹林生态系统的碳储量总量为 C 409.0 Tg,福建、湖南、江西和浙江省毛竹林生态系统的碳储量分别为 C 109.1、102.1、88.6 和 109.2 Tg,单位面积碳储量分别为 C 122.0、122.3、109.5 和 136.5 t/hm²。虽然我国竹林植株碳储量占森林植被碳储量的比例仅为 2.4%,但是由于竹林生长快,更新周期短,长期尺度上竹林植株碳储量潜力较高。与传统的平均生物量法(平度密度乘以总面积)相比,本研究在南方气候和地形条件下构建毛竹林碳密度与纬度和海拔的线性回归模型,精确匹配毛竹林碳密度与其相应统计单元的面积,最终基于统计单元估算区域尺度竹林碳储量,这可以有效提高我国南方毛竹林生态系统碳储量的估算精度。

参考文献:

- [1] Emran M, Gispert M, Pardini G. Comparing measurements methods of carbon dioxide fluxes in a soil sequence under land use and cover change in North Eastern Spain[J]. *Geoderma*, 2012, 170: 176–185
- [2] Gren IM, Carlsson M, Elofsson K, Munnich M. Stochastic carbon sinks for combating carbon dioxide emissions in the EU[J]. *Energy Economics*, 2012, 34(5): 1 523–1 531
- [3] Marek MV, Janous D, Taufarova K, Havrankova K, Pavelka M, Kaplan V, Markova I. Carbon exchange between ecosystems and atmosphere in the Czech Republic is affected by climate factors[J]. *Environ. Pollut.*, 2011, 159(5): 1 035–1 039
- [4] Olson JS, Watts JA, Allison LJ. Carbon in live vegetation of major world ecosystems[R]. Oak Ridge National Lab., TN (USA), 1983: 15–25
- [5] Post WM, Emanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG. Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, 298: 156–159
- [6] 王兵, 魏文俊, 邢兆凯, 李少宁, 白秀兰. 中国竹林生态系统的碳储量[J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1 680–1 684
- [7] 贾治邦. 中国森林资源报告——第七次全国森林资源清查[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009: 9–10
- [8] 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(博士学位论文)[D]. 浙江: 浙江大学, 2006: 50–70
- [9] 陈先刚, 张一平, 张小全, 郭颖. 过去 50 年中国竹林碳储量变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5 218–5 227
- [10] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 熊彩云, 申正其. 湖南会同毛竹林土壤碳循环特征[J]. *林业科学*, 2009, 45(6): 11–15
- [11] Yen TM, Lee JS. Comparing aboveground carbon sequestration between moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) and China fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests based on the allometric model[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(6): 995–1 002
- [12] 殷鸣放, 杨琳, 殷炜达, 毕刚蕊, 张艳会, 李智伟, 谭希斌. 森林固碳领域的研究方法及其最新进展[J]. *浙江林业科技*, 2010, 30(6): 78–86
- [13] 陈双林, 杨清平, 郭子武, 邹跃国. 海拔对毛竹林土壤物理性质和水分特性的影响[J]. *林业科技开发*, 2010(1): 60–64
- [14] 汪阳东, 韦德煌. 气象因素对毛竹秆形生长变异的影响[J]. *竹子研究汇刊*, 2002, 21(1): 46–52
- [15] 李应, 陈双林, 李迎春, 谢双喜. 气候因子对竹子生长的影响研究综述[J]. *竹子研究汇刊*, 2011, 30(3): 9–12
- [16] Garten CT, Hanson PJ. Measured forest soil C stocks and estimated turnover times along an elevation gradient[J]. *Geoderma*, 2006, 136(1/2): 342–352
- [17] 季海宝, 庄舜尧, 张厚喜, 孙波, 桂仁意. 我国毛竹林生态系统碳储量的地带性差异[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(1): 1–5
- [18] 庄舜尧, 季海宝, 张厚喜, 孙波, 桂仁意. 福建省建瓯市毛竹林生态系统固碳状态研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(7): 1 200–1 204
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 146–226
- [20] 范叶青, 周国模, 施拥军, 董德进, 周宇峰. 坡向坡位对毛竹林生物量与碳储量的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 29(3): 321–327
- [21] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳储量及其空间分布[J]. *林业科学*, 2004, 40(6): 20–24

- [22] 王绍强, 周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究, 1999, 18(4): 349–356
- [23] 周芳纯. 毛竹秆形结构的研究[J]. 南京林产工业学院学报, 1981(1): 16–59
- [24] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 熊彩云, 张池, 刘素萍, 张剑. 毛竹 (*Phyllostachy pubescens*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)人工林生态系统碳贮量及其分配特征[J]. 生态学报, 2007, (07): 2 794–2 801
- [25] 阮宏华, 姜志林, 高苏铭. 苏南丘陵主要森林类型碳循环研究 含量与分布规律[J]. 生态学杂志, 1997, 16(6): 18–22
- [26] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布[J]. 林业科学, 2002(3): 14–19
- [27] 夏恩龙, 徐斌, 李智勇. 中国竹林认证可行性分析[J]. 世界林业研究, 2009, 22(3): 72–75
- [28] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 7–12

Estimating Carbon Storage of Moso Bamboo Forest Ecosystem in Southern China

ZHANG Hou-xi^{1,2}, ZHUANG Shun-yao¹, JI Hai-bao^{1,2}, ZHOU Sai^{1,2}, SUN Bo^{1*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Bamboo has a high potential of carbon sequestration, which is fast growing, renewable and widespread in the southern China. In order to precisely estimate the carbon storage of bamboo ecosystems, it is necessary to establish an accurate estimation model. In this study, a field investigation was conducted in Fujian, Hunan, Jiangxi and Zhejiang provinces, the relationship between carbon density and latitude and altitude was analyzed, and a binary linear regression model was constructed. Using DEM (Digital Elevation Model) and provincial moso bamboo statistical data of research area, the statistical units were divided based on altitude and latitude gradient, and the carbon storage in the bamboo forest ecosystem in the four provinces was estimated. Finally, according to China's forest resource inventory data, carbon stocks in the Chinese bamboo forest ecosystem were calculated. The results showed that, the carbon densities of moso bamboo forest ecosystem for the 36 sampled locations ranged from C 78.7 to 252.6 t/hm². Carbon storage in the soil layer (0–60 cm) accounted for the majority of the total carbon as 66.9%–87.0%. The carbon storage of moso bamboo ecosystem in Fujian, Hunan, Jiangxi and Zhejiang were C 109.1, 102.1, 88.6 and 109.2 Tg, respectively, a total as 409.0 Tg C in Southern China. The carbon densities of moso bamboo forest ecosystem in the four provinces were C 122.0, 122.3, 109.5 and 136.5 t/hm², respectively.

Key words: Moso bamboo forest, Carbon storage, Altitude, Latitude, Binary linear regression model