

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201611018

引文格式: 朱清波, 苏阿兰, 林勇明, 等. 福建省市域毛竹林碳储量及其影响因子 [J]. 广西植物, 2017, 37(7): 891-900

ZHU QB, SU AL, LIN YM, et al. Carbon storage and its influencing factors of *Phyllostachys edulis* forest in Fujian Province [J]. Guihaia, 2017, 37(7): 891-900

福建省市域毛竹林碳储量及其影响因子

朱清波¹, 苏阿兰¹, 林勇明¹, 吴承祯^{1,2*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2. 武夷学院 生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

摘 要: 森林碳汇能力是评价森林生态系统减缓全球气候变暖的主要依据, 该研究基于福建省 9 个地级市 1985 年、1996 年、2006 年的毛竹(*Phyllostachys edulis*)林碳储量、气温、降雨量、人口、GDP 等数据, 运用相关性分析和线性回归等方法, 探讨毛竹林碳储量与主要影响因子之间的关系。结果表明: 各因子对毛竹林碳储量均存在不同程度的影响。(1) 碳储量随降水增加而增加, 但相关性不显著($R = 0.281, P = 0.156$); 随气温上升而减少, 相关性显著($R = 0.748, P < 0.01$), 气温影响因子为 5.63, 降水影响因子为 1.46。(2) 人口密度对碳储量空间分布有显著的负相关关系($R = 0.693, P < 0.01$)。(3) GDP 对碳储量的空间分布具有相反的趋势, 表现为 GDP 等级高的地区, 碳储量相对偏低。该研究结果为提高区域毛竹林碳汇能力的立地选择提供了理论依据, 为碳交易市场界定提供借鉴信息。

关键词: 森林生态, 毛竹林, 碳储量, 气温, 降水, 人口密度, GDP

中图分类号: Q948, S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)07-0891-10

Carbon storage and its influencing factors of *Phyllostachys edulis* forest in Fujian Province

ZHU Qing-Bo¹, SU A-Lan¹, LIN Yong-Ming¹, WU Cheng-Zhen^{1,2*}

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, Fujian, China)

Abstract: Carbon sink capacity is the main basis for evaluating the effects of forest ecosystem on the reduction of global warming. Based on the data including *Phyllostachys edulis* forest carbon storage, climate, precipitation, density of population and gross domestic product in nine prefecture-level cities of Fujian Province in 1985, 1996 and 2006, we used correlation analysis and linear regression to analyze the relationship between *Phyllostachys edulis* forest carbon storage and main influencing factors. The results showed that influencing factors affected *Phyllostachys edulis* forest carbon storage as follows: (1) the carbon storage increased with the rising of precipitation without significant correlation ($R = 0.281, P = 0.156$), while it decreased with the rising of temperature with significant correlation ($R = 0.748, P <$

收稿日期: 2016-11-13 修回日期: 2016-12-27

基金项目: 福建省科技重大专项(2012NZ0001); 福建省科技重点项目(2011N0002) [Supported by major special Sci-tech Project of Fujian Province (2012NZ0001); the Key Sci-tech Project of Fujian Province(2011N0002)]。

作者简介: 朱清波(1990-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 从事森林生态学和植物地理学研究, (E-mail) 1148274680@qq.com。

* 通信作者: 吴承祯, 博士, 教授, 博导, 从事森林生态学和森林经理学研究, (E-mail) fjwcz@126.com。

0.01)。The influence factors of temperature and precipitation were 5.63 and 1.46 comparatively. (2) Population density had a significant negative correlation with carbon storage($R = 0.693, P < 0.01$). (3) Compared to the spatial distribution of carbon storage, GDP had the opposite pattern that the high level of GDP in prefecture-level cities relatively had low carbon reserve. Our results can provide theoretical basis for improving the site selection of carbon sequestration capacity of *Phyllostachys edulis* forest and useful information for carbon trading market.

Key words: forest ecology, *Phyllostachys edulis* forest, carbon storage, temperature, precipitation, density of population, gross domestic product.

近两个多世纪以来,大气中 CO₂ 等温室气体浓度的不断增加导致全球气候变暖,这一现象正威胁着全球生态、环境和人类自身的生存与发展(王兵和魏文俊,2007)。森林是陆地上最大的生态系统,其能够增加碳汇、吸收一部分 CO₂ 的排放、减缓温室效应(刘华等,2005),对改善全球环境问题具有不可替代的作用;同时森林本身也是一个巨大的碳库,约占全球植被碳库的 86%,并维持着全球土壤碳库的 73%,因而开展森林碳储量研究对探究碳平衡变化规律以及减少全球碳排放具有重要意义(Post et al,1982)。国内外学者对此进行了研究,其研究主要集中在大尺度区域(全球、区域、国家)(Fang & Chen,2001a;Rothstein et al,2004;徐小锋和宋长春,2004;Sampson et al,2006)。森林植被受到气候条件、植被类型、社会经济活动等因素的综合影响,其碳储量具有很大的不确定性和差异性,因此,为正确评价森林的碳汇能力,对某个小区域、某个树种的研究同样十分重要。

毛竹(*Phyllostachys edulis*)属禾本科刚竹属,异龄林,生长期短,可隔年接连采伐及永久利用,分布面积广、生产效益高(周国模,2006),年均固碳量达 $11.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (王兵等,2009),在固定和平衡大气 CO₂ 浓度中发挥重要作用。毛竹适生于年均温在 14℃ 以上、年降水量 1 000 mm 以上的地区,现已成为福建最主要的竹林种类之一(章朝聪等,2010)。鉴于此,国内学者着手研究竹林生态系统碳循环与碳汇能力,也取得了相应的研究成果(周国模,2006;申贵仓等,2013;张厚喜等,2014;张蕊等,2014)。现今对毛竹的研究主要集中在毛竹林生态与经济效益(章朝聪等,2010)、毛竹林生态系统碳储量的地带性差异(季海宝等,2013)、不同经营管理手段对毛竹生长的影响效应(朱琳琳等,2014)等方面,但从区域角度分析毛竹林碳储量时空分布的差异及

其影响因子的研究还不成熟,由于毛竹生长受到气温、降水、海拔、土壤养分等自然因素和人口密度、经营方式、人类活动等人为因素以及林分状况、郁闭度等林分条件的综合影响,且各因子之间也相互影响,以上因素作用于毛竹碳储量的作用过程与机理以及碳储量的空间异质性和时间复杂性,造成毛竹林碳储量具有很大的不确定性和随机性,很难得出解释其综合影响因子的答案(方精云等,1996;周玉荣等,2000;王效科等,2001)。因此,本研究拟以福建 9 个地级市在 1985 年、1996 年、2006 年的毛竹林为研究对象,对毛竹林碳储量及其主要影响因子进行深入观测与探究,旨在解释福建毛竹林生态系统碳储量的传递机理,从而为提高森林碳汇能力和估算我国东南地区森林植被碳储量提供理论依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

福建省位于 $23^{\circ}33' \sim 28^{\circ}20' \text{ N}$, $115^{\circ}50' \sim 120^{\circ}40' \text{ E}$ 之间,属亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和湿润。年平均气温在 $17 \sim 21^{\circ} \text{ C}$ 之间,大致从东南向西北递减,年均降水量在 $1\,400 \sim 2\,000 \text{ mm}$ 之间,无霜期为 $240 \sim 330 \text{ d}$ 。土壤类型主要为红壤、黄壤及砖红壤性红壤。自然植被类型主要有南亚热带季雨林、海岸红树林、中亚热带常绿阔叶林、常绿针叶林、亚热带滨海沙生植被、亚热带灌丛、竹林;人工植被类型主要有农田植被、亚热带果树、竹林、杉木林、马尾松林、园艺作物等。全省森林面积为 $7.666 \times 10^6 \text{ hm}^2$,森林覆盖率为 63.10%(冯健等,2014),位于全国首位,是中国的“绿色宝库”。福建省现有福州、厦门、泉州、莆田、三明、漳州、南平、宁德、龙岩 9 个地级市,各地经济条件发展不一。

1.2 研究方法

1.2.1 资料来源与计算方法 基于研究需要,笔者对不同年代福建省各地级市毛竹林碳储量分别与气候因子(气温、降水)、人口密度和 GDP 进行收集与计算。

(1)毛竹林碳储量计算:考虑到毛竹林各地生长条件的差异性,各个地级市资料的准确性和完整性,因此本研究拟用福建省 1985 年、1996 年、2006 年的森林资源二类清查资料总数据(包括各个地级市毛竹林面积和株数)计算相应地级市不同年份毛竹林碳储量。本研究计算的碳储量包括毛竹的乔木层、林下植被层、凋落物层和土壤层。

相关计算公式如下:

- ① 乔木层碳储量(t)=乔木层总生物量(t)×含碳率;
- ② 乔木层总生物量(t)=单位面积生物量($t \cdot \text{hm}^{-2}$)×毛竹面积(hm^2);
- ③ 林下植被碳储量(t)=单位面积碳密度($t \cdot \text{hm}^{-2}$)×毛竹面积(hm^2);
- ④ 凋落物碳储量(t)=单位面积碳密度($t \cdot \text{hm}^{-2}$)×毛竹面积(hm^2);
- ⑤ 土壤碳储量(t)=土壤平均碳密度($t \cdot \text{hm}^{-2}$)×毛竹面积(hm^2)。

(2)毛竹生物量有基于面积和株数两种计算方法,在此以面积为基数进行相关参数的计算。福建省毛竹单位面积生物量为 $37.6 t \cdot \text{hm}^{-2}$ (陈先刚等, 2008);毛竹林乔木层含碳量以 0.5 作为计算值 (Fang, 2000; Fang et al, 2001b);林下植被和凋落物的平均碳密度分别为 $0.161 t \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.594 t \cdot \text{hm}^{-2}$ (苏阿兰, 2011);土壤的平均碳密度为 $124.815 t \cdot \text{hm}^{-2}$ (苏阿兰, 2011)。

(3)其他数据来源:气象数据来源于福建省各个地级市的气象资料、福建省气象局网站以及相关文献(包括气温和降水);人口密度、GDP 数据来源于福建省 1986 年、1997 年、2007 年统计年鉴;研究区边界来源于福建省行政区划图(图 1),运用以上数据建立相关模型并分析它们之间的关系。

1.2.2 数据处理 线性回归分析是描述一个因变量与一个或多个自变量间的线性关系,分为一元线性回归(一个自变量)和多元线性回归(两个及其以上自变量)。

通过对各自然因素综合分析,求得热量与水分是导致森林植被碳储量空间分布差异的重要原因(张国斌, 2008)。因此,本研究运用线性回归的方

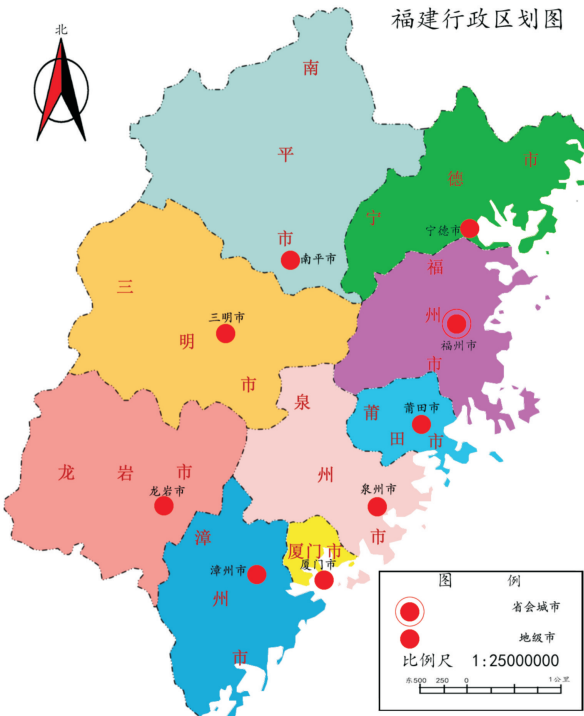


图 1 福建省行政区划图

Fig. 1 Administrative division map of Fujian Province

法,探讨 9 个地级市毛竹林碳储量与气温和降水之间的线性关系。对相关数据进行均值化后,探讨碳储量与年降水量和年均温的相关性,并建立线性回归分析模型。

利用相关性分析毛竹碳储量与人口密度和 GDP 的相关性与显著性,并利用一元线性回归建立毛竹碳储量与人口密度线性关系。以上数据统计处理均在 Excel 2010、SPSS 19.0 下进行。

2 结果与分析

2.1 福建省 9 个地级市毛竹林面积及碳储量时空动态变化

由表 1 可知,1985—1996 年间,福建省毛竹碳储量增加 3 520.58 万 t,总增长率为 41.20%,年增长 3.75%;1996—2006 年间,碳储量增加 2 252.98 万 t,总增长率为 18.67%,年增长 1.87%,增速较 1985—1996 年有所下降。在空间上,福建省毛竹面积分布不均,主要分布在以南平、龙岩和三明为主的闽西

表 1 福建省 9 个地级市 1985 年、1996 年、2006 年毛竹林面积和碳储量
Table 1 *Phyllostachys edulis* forest area and carbon storage of nine districts in Fujian in 1985, 1996, 2006

地级市 Prefecture-level city	1985		1996		2006	
	面积 Area (hm ²)	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)	面积 Area (hm ²)	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)	面积 Area (hm ²)	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)
厦门 Xiamen	37	0.534	182	2.628	292	4.216
莆田 Putian	12007	173.345	10677	154.144	11665	168.408
泉州 Quanzhou	16187	233.692	26670	385.035	28046	404.900
漳州 Zhangzhou	21067	304.144	21647	312.518	27022	390.117
宁德 Ningde	33227	479.698	48101	694.434	53825	777.072
福州 Fuzhou	34727	501.354	34140	492.879	37517	541.633
龙岩 Longyan	100567	1451.886	145282	2097.436	193773	2797.501
三明 Sanming	134440	1940.910	203475	2937.569	238949	3449.707
南平 Nanping	239693	3460.448	345636	4989.947	400777	5786.018

北地区,总体上西部多、东部少;北部多、南部少。碳储量最大的地区是南平市,其次是三明市和龙岩市,而闽东南地区碳储量均偏少,尤其是厦门市。在时间上,莆田市 1996 年毛竹面积较 1985 年下降 1 330 hm²,碳储量相应减少 19.20 万 t,到 2006 年毛竹面积较 1996 年增加 988 hm²,碳储量随之增加 14.26 万 t,但是总体而言毛竹面积和碳储量均较 1985 年有所下降;福州市 1996 年毛竹面积较 1985 年下降 587 hm²,其碳储量减少 8.48 万 t,到 2006 年,毛竹面积和碳储量较 1996 年分别增长 3 377 hm² 和 48.75 万 t,增幅较大,总体较 1985 年呈增长趋势;另外 7 个地级市在 1985—2006 年间,毛竹林面积和碳储量均呈增长趋势。总体上,毛竹林面积原本较大的地区,其碳储量增幅更快,以三明,龙岩,南平等地区表现最明显,因此这些地区成为福建省的重要森林碳汇区。

2.2 气候条件与毛竹林碳储量动态变化的关系

气候条件对植被的生长发育有重要影响,而这与植被碳密度和碳储量密切相关,所以对福建省 9 个地级市气候状况对毛竹碳汇能力的影响进行探讨尤为重要。首先对年均温和年降水量与碳储量进行相关性分析,结果表明年降水量与碳储量呈正相关,但相关性不显著($R = 0.281, P = 0.156$),年均温与碳储量呈显著负相关($R = 0.748, P < 0.01$)。在线性回归分析模型的基础上,求出福建省 9 个地级市毛竹碳储量

(表 1)与年均温的关系得一元关系方程:

$$y = - 16.547x + 17.547, R = 0.748$$

式中,y、x 分别表示福建省 9 个地级市毛竹碳储量和年均温。通过标准误差显著性检验,表明回归的整体效果较理想。根据标准系数法,从该回归方程的系数可以看出,毛竹碳储量随气温上升而递减。

利用因子分析法,求得气温,降水对福建省 9 个地级市毛竹碳储量影响因子分别为 5.63 和 1.46。影响因子越大,说明对福建省毛竹碳储量贡献越大,所以在福建省各地级市中,气温对毛竹林碳储量的影响大于降水对它的影响。

2.3 人口密度与毛竹林碳储量动态变化的关系

森林植被碳储量空间差异与人类过度的不合理行为紧密相关,而人口密度在一定程度上揭示人类对森林的影响与破坏程度。厦门是全省人口密度(表 2)最大的城市,其毛竹林碳储量全省最低;福州是省会城市,其平均人口密度为全省第四,平均碳储量位于全省第五;泉州、莆田、漳州人口聚集程度较高,碳储量占全省的比例相对较小;三明、龙岩、南平地区人口密度较小,碳储量所占比例却很高。通过分析计算,福建省的人口密度为以厦门为主的东南沿海地区高于以南平为主的西北地区,而毛竹林碳储量的分布情况却与此相反。通过相关性分析可知,各个年份的毛竹林碳储量分布规律与人口密度均呈负相关,且相关性显著($P < 0.05$)(表

表 2 福建省 9 个地级市 1985 年、1996 年、2006 年毛竹林碳储量和人口密度
Table 2 Carbon storage and population density of nine districts in Fujian in 1985, 1996 and 2006

地级市 Prefecture-level city	1985		1996		2006	
	人口密度 Population (人·km ⁻²)	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)	人口密度 Population density (人·km ⁻²)	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)	人口密度 Population density (人·km ⁻²)	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)
厦门 Xiamen	666	0.534	784	2.628	1 022	4.216
莆田 Putian	584	173.345	694	154.144	745	168.408
泉州 Quanzhou	474	233.692	586	385.035	609	404.900
福州 Fuzhou	407	501.354	468	492.879	512	541.633
漳州 Zhangzhou	300	304.144	338	312.518	356	390.117
宁德 Ningde	199	479.698	233	694.434	244	777.072
龙岩 Longyan	127	1 451.886	147	2 097.436	151	2 797.501
南平 Nanping	102	3 460.448	113	4 989.947	116	5 786.018
三明 Sanming	98	1 940.910	114	2 937.569	117	3 449.707

表 3 福建省 1985 年、1996 年、2006 年毛竹林
碳储量与人口密度相关性分析

Table 3 Analysis on the *Phyllostachys edulis* forest carbon storage in different population density in Fujian in 1985, 1996 and 2006

变量 X Variable X	变量 Y Variable Y	回归方程 Regression equation	R	P
1985 年人口密度 Population density in 1985	碳储量 Carbon storage	y= -4.002x+2264.3	0.754	0.019 *
1996 年人口密度 Population density in 1996	碳储量 Carbon storage	y= -4.935x+3247.1	0.754	0.019 *
2006 年人口密度 Population density in 2006	碳储量 Carbon storage	y= -4.585x+3563.5	0.730	0.026 *

注：* 在 0.05 水平上相关性显著。
Note: * Significant correlation at 0.05 level.

3), 即在同一年份, 人口密度越高的地区, 其毛竹碳储量越少。从年际变化看, 毛竹碳储量随人口密度的增加而增加, 经济发达地区人口密度增幅快, 碳储量增幅较慢, 经济欠发达地区, 人口密度增幅慢, 碳储量增幅较快。

本研究建立各地级市毛竹林碳储量与人口密度之间的相关关系如下:

$y = -4.276x + 2925.9, R = 0.693$

式中, y、x 分别表示毛竹林碳储量和人口密度。

表 4 福建省 1985 年、1996 年、2006 年
毛竹林碳储量和 GDP

Table 4 Carbon storage and GDP in Fujian in 1985, 1996 and 2006

年份 Year	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)	生产总值 GDP (10 ⁴ yuan)	林业生产总值 Forestry production GDP (10 ⁴ yuan)
1985	8 546	2 004 800	91 300
1996	12 067	26 501 600	669 400
2006	14 320	75 542 000	1 057 849

人口密度与毛竹林碳储量呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。表明在空间差异上, 毛竹碳储量随人口密度的提高会降低。

2.4 GDP 与毛竹林碳储量动态变化的关系

福建省三个年份 GDP 值与毛竹林碳储量动态变化见表 4。1985—2006 年间, 福建省经济实现快速发展, 2006 年 GDP 总量是 1985 年 GDP 总量的 37.7 倍, 其中林业生产总值是 1985 年的 11.58 倍。但是毛竹碳储量仅是 1985 年的 1.68 倍, 可见福建省毛竹碳储量增幅远远慢于 GDP 增幅和林业生产总值增幅。

通过表 5(以 1996 年、2006 年为例)可知, GDP 等级越高的地区, 其毛竹碳储量相对偏低, 福州、泉

表 5 福建省 9 个地级市 1996 年、2006 年
毛竹林碳储量和 GDP

地级市 Prefec- ture- level city	1996			2006		
	GDP (10 ⁸ 元)	百分比 Percentage (%)	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)	GDP (10 ⁸ 元)	百分比 Percentage (%)	碳储量 Carbon storage (10 ⁴ t)
福州 Fuzhou	629.810	23.76	492.879	1 664.050	22.03	541.633
泉州 Quanzhou	629.010	23.74	385.035	1 900.760	25.16	404.900
厦门 Xiamen	306.350	11.56	2.628	1 168.020	15.46	4.216
漳州 Zhangzhou	255.590	9.65	312.518	716.910	9.49	390.117
三明 Sanming	192.820	7.27	2 937.569	453.580	6.01	3 449.707
南平 Nanping	188.070	7.09	4 989.947	393.190	5.20	5 786.018
莆田 Putian	152.570	5.76	154.144	423.680	5.61	168.408
龙岩 Longyan	150.880	5.69	2 097.436	450.010	5.96	2 797.501
宁德 Ningde	145.060	5.48	694.434	384.000	5.08	777.072

州、厦门总产值在两个年份均较高,三市总产值分别占当年全省 GDP 总产值的 59.06%和 62.65%。其余各市总产值均小于 10%,除龙岩以外,剩余 5 市到 2006 年 GDP 所占份额均下降,其中以宁德产值最小且下降幅度最大。而在毛竹林生态系统碳储量中,南平、三明、龙岩等经济发展水平较低的地区碳储量大于以厦门为主的经济发达地区且增幅更快。通过相关性分析可知,GDP 与碳储量是负相关关系,但相关性不显著($R = 0.317, P = 0.199$)。从年际变化看,各地级市毛竹碳储量随 GDP 的增加而增加,经济发达地区 GDP 增速快,碳储量增速慢,经济欠发达地区,GDP 增幅慢,碳储量增幅快。

2.5 人口密度、GDP 与毛竹面积的关系

以福建省 1996 年、2006 年人口密度、GDP 和毛竹面积为例(表 6),综合分析社会经济因素对毛竹生长的影响。本研究建立人口密度、GDP 与毛竹面积之间的线性关系如下:

表 6 福建省 9 个地级市 1996 年、2006 年
人口密度、GDP 和毛竹面积

地级市 Prefec- ture- level city	1996			2006		
	人口密度 Population density (人·km ⁻²)	GDP (10 ⁸ 元)	面积 Area (hm ²)	人口密度 Population density (人·km ⁻²)	GDP (10 ⁸ 元)	面积 Area (hm ²)
厦门 Xiamen	784	306.350	182	1022	1 168.020	292
莆田 Putian	694	152.570	10 677	745	423.680	11 665
泉州 Quanzhou	586	629.010	26 670	609	1 900.760	28 046
漳州 Zhangzhou	338	255.590	21 647	356	716.910	27 022
宁德 Ningde	233	145.060	48 101	244	384.000	53 825
福州 Fuzhou	468	629.810	34 140	512	1 664.050	37 517
龙岩 Longyan	147	150.880	145 282	151	450.010	193 773
三明 Sanming	114	192.820	203 475	117	453.580	238 949
南平 Nanping	113	188.070	345 636	116	393.190	400 777

$y = - 322.486x_1 - 0.086x_2 + 233\ 249.932$
式中, x_1 、 x_2 分别代表人口密度和 GDP, y 代表森林面积。该方程通过 $a = 0.01$ 的标准误差显著性检验,表明回归的整体效果较好。从人口密度和 GDP 的回归系数可以看出,人口密度和 GDP 对毛竹面积均是负相关关系,即人口密度和 GDP 等级越高的地区,毛竹面积越少。

根据因子分析法可知,人口密度对毛竹面积的影响是 3.722,GDP 对毛竹面积的影响是 0.002。所以人口密度对毛竹面积的影响大于 GDP 对毛竹面积的影响。

3 讨论与结论

森林植被碳汇能力随时间不断增强(孙荣等,2010)。本研究发现,福建省毛竹碳储量从 1985—2006 年共增长 5 774 万 t,平均每年以 3.22%递增,

表明福建省毛竹林起到碳汇作用。莆田市从1985—1996年,人口不断增长,为了解决吃饭问题,农业用地不断扩大,从而导致森林面积减少;另一方面,为了促进当地经济发展,毁林开荒,使森林遭到破坏,种种原因导致这个时间段毛竹面积下降。从1996—2006年,毛竹面积又增长,是受国家“十五”计划的影响,其中一个重点目标就是发展竹业经济,扩大毛竹林种植面积(宋天英等,2001)。福州市从1985—1996年,毛竹面积和碳储量有所下降,很大一部分原因是迅速发展工业用材林和薪炭林的需要,这是当时福州林业发展的紧急任务,从而导致毛竹种植面积有所减少(谢知信,1987);从1996—2006年,毛竹面积增幅较大是因为福州市自2003年后,全面推进集体林权改革,毛竹产量大增(林贞庆,2007)。总的来说,各个地级市毛竹面积和碳储量呈增长趋势,可能是因为自20世纪90年代以后,福建省重视生态环境的保护,对森林资源制定了良好的经营管理政策。

毛竹碳储量存在明显的时空分布差异,除了与政府的政策有关,也与自然环境和人类经济活动密切相关。对福建省各地水热条件进行分析研究表明,碳储量与年降水量呈正相关,但相关性不显著,与年均温呈显著负相关。由于毛竹适生于年均温 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,降水量 $1\ 000\text{ mm}$ 以上的地区,福建省大部分地区都满足降水量要求,东部地区年均温约 $20\sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$,西部地区年均温约 $17\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$,其温度条件相对于东部而言更适合毛竹生长,东部地区温度增加在一定程度上降低水分利用效率,最终影响毛竹的生长发育,抑制其固碳能力,降低碳储量(林清山和洪伟,2009)。另外,水热条件对毛竹林碳储量的影响效应说明:年均温对碳储量的影响大于年降水量,这与蒋延龄和周广胜(2002)、赵敏和周广胜(2004)得出气温对森林植被碳储量的贡献大于降水的结论相似。

人类行为会影响到植被碳储量和碳密度的累积(Fang et al, 2001b)。对福建各市人口密度及其碳储量的研究表明,福建毛竹碳储量的分布空间差异显著,即人口密度等级高的区域,其碳储量偏少。究其原因,可能是由于人口密度较高区域,社会经济发展迅速,城市化进程快,人口过快增长,城市急剧扩展,致使森林用地不断转化为城市建设用地,

忽视林业发展,从而导致碳储量偏低,比如厦门、泉州等经济发达地区。反观人口密度等级低的区域,其主要为山区,距发达地区远,城市化水平低,且大量农民外出谋生,减少了对森林的干扰和破坏,森林资源多处于原生状态(胡序威,1997),如南平、三明等闽西北地区。这与杨昆等(2006)研究潭江流域、李红梅等(2005)研究西双版纳的研究结果相似。研究还发现,高人口密度区域毛竹碳储量增长缓慢,这是因为人口持续增长会导致建设用地面积不断增加,会使更多的森林用地转变成建设用地,从而使森林面积增长缓慢,导致碳储量增长缓慢;也有可能是毛竹受到越来越多人因素干扰,导致其林分质量下降,从而使森林固碳能力下降。研究还表明,2006年人口密度与碳储量的关系拟合效果较1985、1996年差,这可能由于低密度区域人口密度增长过慢,高密度区域人口密度增长过快,且各个地级市碳储量增幅也不一样。

经济发展趋势与碳储量空间分布趋势相反(李惠敏等,2004)。本研究中,福建省毛竹碳储量与GDP具有负相关关系,但相关性不显著。在空间上,福建省毛竹碳储量变化趋势为随GDP等级提高而逐渐降低,即在经济发展水平高的地方,其毛竹碳储量相对偏低,可能是因为GDP等级较高的区域重点发展经济,忽视了林业发展,也可能是林业发展速度缓慢所导致。在年际变化上,GDP等级较低区域比GDP等级较高区域森林碳储量增长更快(表5),造成这种现象可能是由于经济发展的需要,各种经济开发区、经济发展试验点相继建立,这种方式使东南沿海地区经济迅速发展,而闽西北地区经济发展减速,一方面有利于减少分散发展方式对森林资源的破坏,使各个地级市毛竹面积总体上均有不同程度的增长;另一方面经济活动更加集中在东南部经济发达地区,使西北部森林面积增加更快,碳储量增幅更大,而GDP等级较高的地区,本身的森林面积就相对偏少,再加上经济发展和城市化的需要,导致该区域用地紧张,森林面积增长缓慢,故而碳储量增幅较小。研究还发现,福建省西北部毛竹碳储量总体比东南部多,且增幅更快,关键原因是福建西北部存在大面积自然保护区和林场,再加上山地地形阻挡,距离较远,其森林植被保存相对完好,而东南部是福建省经济发展的重心,重视经

济发展,而森林资源则相对缺乏,林业资源分布两极化趋势愈加明显,经济活动更加趋向于经济发达地区,西北部则大力发展林业。随着经济发展,产业结构调整,经济增长方式转变,对薪柴依赖性降低,从而增加了森林种植面积,提高了森林碳汇能力(王艳萍等,2005)。因此,1985—2006年间各个地级市毛竹碳储量随GDP增长呈递增趋势,说明福建省地市区域经济发展与森林植被保护相对较为协调。

人口密度与森林面积呈负相关,而GDP对森林面积影响不大(张清等,2013)。在本研究中,福建省人口密度对毛竹面积空间分布具有显著的负相关关系,影响因子为3.722,说明人类活动影响森林的空间分布,主要表现为乱砍滥伐,毁林开荒,以及人为原因导致的森林火灾等。在无人为因素影响的情况下,自然环境不同所导致的水热条件的空间异质性不同地区森林植被产生差异的主要原因,随着人类文明的发展和进步,人类对森林的破坏便是造成森林植被空间分布差异的一个重要原因;而GDP对福建省毛竹面积空间分布具有相反的趋势,但影响因子仅为0.002,即对毛竹空间分布影响较小。福建省大部分地级市森林面积满足随GDP等级提高而减小,而另外一些地级市(如莆田市、宁德市),GDP等级较低,毛竹面积也偏少,说明GDP并不是影响福建省毛竹空间分布的主要因子。从年际变化看,9个地级市人口密度、GDP和毛竹面积均有不同程度的增长,这也验证了区域林业合理规范经营和人口、GDP相互协调发展可以共同实现。

毛竹林适生区域较普遍且碳汇能力强大,对其碳储量时空分布规律及其影响因子进行分析论证,有助于深入探讨毛竹林碳循环的原理。本文在研究气候因子与碳储量的关系时,笔者用该地级市的某几个气象站资料代表整个地级市的气候,其结果具有一定的误差和局限性。毛竹生长存在大小年的现象,本文未深入探讨大小年对碳储量的影响效应。在对毛竹林碳储量时空分布的自然环境因子及经济社会原因分析方面,只考虑了气温、降水、人口密度、GDP等4个因子,未涉及其他自然因子如海拔、坡度、坡向,社会因子如土地利用方式等,今后还需进行更深入全面的研究,从而为探明区域性森林碳汇能力的影响因素提供理论依据。

参考文献:

- CHEN XG, ZHANG YP, ZHANG XQ, et al, 2008. Carbon stock changes in bamboo stands in China over the last 50 years [J]. *Acta Ecol Sin*, 28 (11):5218–5227. [陈先刚, 张一平, 张小全, 等, 2008. 过去50年中国竹林碳储量变化 [J]. *生态学报*, 28 (11):5218–5227.]
- FANG JY, 2000. China forest productivity and its response to global climate change [J]. *J Plant Ecol*, 24 (5):513–517.
- FANG JY, CHEN AP, 2001a. Dynamic changes and significance of the forest vegetation carbon pool China [J]. *J Plant*, 43 (9):967–973.
- FANG JY, CHEN AP, PENG CH, et al, 2001b. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 292 (5525):2320–2322.
- FANG JY, LIU GH, XU CL, 1996. Biomass and net production of forest vegetation in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 16 (05):497–508. [方精云, 刘国华, 徐嵩龄, 1996. 我国森林植被的生物量和净生产量 [J]. *生态学报*, 16 (05):497–508.]
- FENG J, SU AL, WU CZ, et al, 2014. Spatial autocorrelation analysis on carbon storage of *Phyllostachys edulis* forest in Fujian Province [J]. *J Plant Resour Environ*, 23 (4):27–32. [冯健, 苏阿兰, 吴承祯, 等, 2014. 福建省毛竹林碳贮量的空间自相关分析 [J]. *植物资源与环境学报*, 23 (4):27–32.]
- HU XW, 1997. Study on the accumulation and diffusion of the economy and population in the Southeast of Fujian Province [M]. Hongkong: Research Institute of Chinese University in Hong Kong:121–122. [胡序威, 1997. 闽东南地区经济和人口空间集聚与扩散研究 [M]. 香港:香港中文大学研究所:121–122.]
- JI HB, ZHUANG XY, ZHANG HX, et al, 2013. Zonality variation of carbon storage in *Phyllostachy edulis* plantation ecosystems in China [J]. *Ecol Environ*, 22 (1):1–5. [季海宝, 庄舜尧, 张厚喜, 等, 2013. 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*, 22 (1):1–5.]
- JIANG YL, ZHOU GS, 2002. Carbon balance of *Larix Gmelini* forest and impacts of management practices [J]. *Acta Phy Sin*, 26 (3):317–322. [蒋延玲, 周广胜, 2002. 兴安落叶松林碳平衡及管理活动影响研究 [J]. *植物生态学报*, 26 (3):317–322.]
- LI HM, LU F, TANG SM, et al, 2004. Dynamic carbon sink of forests in Yuhang City with the development of urbanization [J]. *J Fudan Univ (Nat Sci Ed)*, 43 (6):1044–1050. [李惠敏, 陆帆, 唐仕敏, 等, 2004. 城市化过程中余杭市森林碳汇动态 [J]. *复旦学报(自然科学版)*, 43 (6):1044–1050.]
- LI HM, MA YX, GUO ZF, et al, 2005. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with affecting factors in Xishuangbanna [J]. *J For Environ*, 25 (4):368–372. [李红梅, 马友鑫, 郭宗峰, 等, 2005. 西双版纳森林植被的碳贮量及影响因素分析 [J]. *福建林学院学报*, 25 (4):368–372.]

- LIN QS, HONG W, 2009. Summary of research on forest carbon storage in China [J]. Chin Agric Sci Bull, 25 (6):220-224. [林清山, 洪伟, 2009. 中国森林碳储量研究综述 [J]. 中国农学通报, 25 (6):220-224.]
- LIN ZQ, 2007. Preliminary study on the development of bamboo industry in Fuzhou [J]. For Surv Des, (1):63-64. [林贞庆, 2007. 福州市竹业发展初探 [J]. 林业勘察设计, (1):63-64.]
- LIU H, LEI RD, HOU L, et al, 2005. Research on carbon storage and carbon density of main forest types at Huoditang Forestry region in the Qinling Mountains [J]. J NorthWest Sci Technol Univ Agric For (Nat Sci Ed), 21 (3):138-142. [刘华, 雷瑞德, 侯琳, 等, 2005. 秦岭火地塘林区主要森林类型的碳储量和碳密度 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 21 (3):138-142.]
- POST WM, EMANUEL WR, ZINKE PJ, et al, 1982. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 298 (5870):156-159.
- ROTHSTEIN DE, YERMAKOV Z, BUELL AL, 2004. Loss and recovery of ecosystem carbon pools following stand-replacing wildfire in Michigan jack pine forests [J]. Can J For Res, 34 (9):1908-1918.
- SAMPSON DA, WARING RH, MAIER CA, et al, 2006. Fertilization effects on forest carbon storage and exchange, and net primary production: A new hybrid process model for stand management [J]. Language & Speech, 221 (1-3):91-109.
- SHEN GC, ZHANG XD, ZHANG L, et al, 2013. Estimating the carbon stock and carbon sequestration of the *Pleioblastus amarus* forest ecosystem in southern of Sichuan [J]. Sci Silv Sin, 49 (3):78-84. [申贵仓, 张旭东, 张雷, 等, 2013. 蜀南苦竹林生态系统碳储量与碳汇能力估测 [J]. 林业科学, 49 (3):78-84.]
- SONG TY, CHEN RL, LIN JK, 2001. Thought of adjustment forestry structure in Putian City [J]. Iss For Econ, 21 (1):55-57. [宋天英, 陈瑞龙, 林金坤, 2001. 优化莆田市林业结构的思考 [J]. 林业经济问题, 21 (1):55-57.]
- SU AL, 2011. Analysis on the spatial and temporal variation characteristics of carbon sequestration in *Phyllostachys edulis* plantation ecosystem of Fujian [D]. Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University:1-66. [苏阿兰, 2011. 福建省毛竹林生态系统碳汇量时空变化特征分析 [D]. 福州:福建农林大学:1-66.]
- SUN R, YUAN XZ, LIAO ZJ, et al, 2010. Dynamic and spatial pattern of forest carbon storage in Chengyu economic region [J]. Res Environ Sci, 23 (12):1456-1463. [孙荣, 袁兴中, 廖正军, 等, 2010. 成渝经济区森林碳储量动态及空间格局特征 [J]. 环境科学研究, 23 (12):1456-1463.]
- WANG B, WANG Y, GUO H, et al, 2009. Carbon storage and spatial distribution in *Phyllostachys pubescens* forest in Dagangshan Mountain of Jiangxi Province [J]. J Beijing For Univ, 31 (6):39-42. [王兵, 王燕, 郭浩, 等, 2009. 江西大岗山毛竹林碳储量及其分配特征 [J]. 北京林业大学学报, 31 (6):39-42.]
- WANG B, WEI WJ, 2007. Carbon storage and density in Jiangxi Province [J]. Jiangxi Sci, 25 (6):681-687. [王兵, 魏文俊, 2007. 江西省森林碳储量与碳密度研究 [J]. 江西科学, 25 (6):681-687.]
- WANG XK, FENG ZW, OUYANG ZY, 2001. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China [J]. Chin J Appl Ecol, 12 (1):13-16. [王效科, 冯宗炜, 欧阳志云, 2001. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究 [J]. 应用生态学报, 12 (1):13-16.]
- WANG YP, GAO JX, WU Y, 2005. Analysis of the current status of forest resource and existing problems in Mid-Eastern China [J]. Res Environ Sci, 18 (6):103-105. [王艳萍, 高吉喜, 吴越, 2005. 中东部地区森林资源现状与问题分析 [J]. 环境科学研究, 18 (6):103-105.]
- XIE ZX, 1987. A breakthrough in the development of forestry and the countermeasures in Fuzhou [J]. Iss For Econ, (2):35-38. [谢知信, 1987. 福州市林业发展的突破及其实施对策 [J]. 林业经济问题, (2):35-38.]
- XU XF, SONG CC, 2004. Advances of the research on missing sink in global carbon cycling [J]. J Graduate School Chin Acad Sci, 21 (2):145-152. [徐小锋, 宋长春, 2004. 全球碳循环研究中“碳 sink”研究进展 [J]. 中国科学院研究生院学报, 21 (2):145-152.]
- YANG K, GUAN DS, ZHOU CH, 2006. Forest biomass carbon storage and its dynamics in Tanjiang River basin [J]. Chin J Appl Ecol, 17 (9):1579-1582. [杨昆, 管东生, 周春华, 2006. 潭江流域森林碳储量及其动态变化 [J]. 应用生态学报, 17 (9):1579-1582.]
- ZHANG GB, 2008. Forest carbon storage dynamics at the upper stream of Minjiang River [D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry:1-102. [张国斌, 2008. 岷江上游森林碳储量特征及动态分析 [D]. 北京:中国林业科学研究院:1-102.]
- ZHANG HX, ZHUANG XY, JI HB, et al, 2014. Estimating carbon storage of Moso Bamboo forest ecosystem in southern China [J]. Soils, 46(3):413-418. [张厚喜, 庄舜尧, 季海宝, 等, 2014. 我国南方毛竹林生态系统碳储量的估算 [J]. 土壤, 46 (3):413-418.]
- ZHANG Q, REN R, ZHAO L, 2013. Forest spatial distribution and influencing factors in Northeast China [J]. J NE For Univ, 41(2):25-28. [张清, 任茹, 赵亮, 2013. 东北地区森林的空间分布格局及影响因素 [J]. 东北林业大学学报, 41(2):25-28.]
- ZHANG R, SHEN GC, ZHANG XD, et al, 2014. carbon stock and sequestration of a *Phyllostachys edulis* in Changning, Sichuan province [J]. Acta Ecol Sin, 34(13):3592-3601. [张蕊, 申贵仓, 张旭东, 等, 2014. 四川长宁毛竹林碳储量与碳汇能力估测 [J]. 生态学报, 34 (13):3592-3601.]
- ZHANG ZC, WANG FS, LIU GH, 2010. *Phyllostachys edulis* forest evaluation of ecological functions in Fujian [J]. Subtrop Agric Res, 6 (1):38-42. [张朝聪, 王福升, 刘国华, 2010. 福建省毛竹林生态功能价值评价 [J]. 亚热带农业研

究, 6 (1):38-42.]

ZHAO M, ZHOU GS, 2004. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors [J]. *Sci Geogr Sin*, 24 (1):50-54. [赵敏, 周广胜, 2004. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析 [J]. *地理科学*, 24 (1):50-54.]

ZHOU GM, 2006. Carbon storage, fixation and distribution in mao bamboo stands ecosystem [D]. Hangzhou:Zhejiang University: 1-137. [周国模, 2006. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究 [D]. 杭州:浙江大学:1-137.]

ZHOU YR, YU ZL, ZHAO SD, 2000. Carbon storage and budget of major Chinese forest types [J]. *Acta Phy Sin*, 24 (5):518-522. [周玉荣, 于振良, 赵士洞, 2000. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡 [J]. *植物生态学报*, 24 (5):518-522.]

ZHU LL, ZHANG MX, ZHAO HF, et al, 2014. Effects of different management measures on biomass and carbon storage in *Phyllostachys pubescens* forest [J]. *Nonw For Res*, 32 (1): 58-64. [朱琳琳, 张萌新, 赵竑绯, 等, 2014. 不同经营措施对毛竹林生物量与碳储量的影响 [J]. *经济林研究*, 32 (1):58-64.]