

DOI: 10.5846/stxb201502110337

陆君, 刘亚风, 齐珂, 樊正球. 福州市森林碳储量定量估算及其对土地利用变化的响应. 生态学报, 2016, 36(17): - .

Lu J, Liu Y F, Qi K, Fan Z Q. The quantitative estimation of forest carbon storage and its response to land use change in Fuzhou, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

福州市森林碳储量定量估算及其对土地利用变化的响应

陆 君, 刘亚风, 齐 珂, 樊正球 *

复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433

摘要: 基于 RS 与 GIS 技术, 以遥感影像数据、土地利用数据、森林资源二类调查数据为主要数据源, 采用逐步回归法建立森林蓄积量定量估测模型。根据“蓄积量-生物量-碳储量”推算方法, 对福州市森林植被碳储量和碳密度进行估算。建立福州市土地利用转移矩阵, 分析 2000—2010 年土地利用变化影响下的福州市森林碳储量变化特征。结果表明: (1) 根据不同的森林类型, 即常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林分别建立的多元线性回归模型修正决定系数分别为 0.599、0.679、0.694, 通过模型适用性检验和精度验证。(2) 2000 年、2010 年福州市森林植被碳储量总量分别为 12.499Tg、12.642Tg, 植被碳密度分别为 18.694 t/hm²、18.708 t/hm², 森林植被碳储量增加了 1.430×10⁵t。(3) 福州市闽清县、永泰县、闽侯县的森林植被碳密度常年保持较高水平, 并呈现出增长趋势; 罗源县、长乐市、连江县森林植被碳密度较低, 并呈现下降趋势。(4) 2000—2010 年, 灌木和耕地是主要土地利用类型转出者, 森林和建设用地是主要土地利用类型转入者。森林主要由灌木和耕地转化, 主要向建设用地、耕地进行转化。由于土地利用变化, 十年间福州市总碳储量减少了 1.711×10⁴ t, 其中土壤碳储量减少 2.230×10³ t, 植被碳储量减少 1.489×10⁴ t。

关键词: 蓄积量; 碳储量; 碳密度; 土地利用变化; 福州市

The quantitative estimation of forest carbon storage and its response to land use change in Fuzhou, China

LU Jun, LIU Yafeng, QI Ke, FAN Zhengqiu *

Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract: In this study, remote sensing (RS) images, land-use data, and forest resource inventory data were used to build a quantitative estimation model of forest volume via the stepwise regression method. The carbon storage and carbon density of forest vegetation in Fuzhou from 2000 to 2010 were analyzed using the Biomass Expansion Factor (BEF) method to correlate forest volume with volume, biomass and carbon storage. A land use transition matrix was created, and used to study the variation of forest carbon storage in response to land use change in Fuzhou. The results showed that: (1) the results of quantitative estimation models of forest volume which were build according to different type of forest (Evergreen broad-leaved forest, Evergreen coniferous forest, Mixed broadleaf-conifer forest) turned out the effects with the adjusted R^2 being 0.599, 0.679, 0.694 respectively. All quantitative estimation models of forest volume passed the applicability and accuracy test. The calculated total forest volume in Fuzhou was $2.097 \times 10^7 \text{ m}^3$ in 2000 and $2.594 \times 10^7 \text{ m}^3$ in 2010, revealing an increase in volume over the course of a decade. Of all the geographical subdivisions of Fuzhou, Yongtai County maintained the greatest forest volume throughout the decade, while Changle County contained the lowest forest volume. (2) Total carbon storage by forest vegetation in Fuzhou city was 12.499 Tg in 2000 and 12.642 Tg in 2010. Thus, in ten years, forest

收稿日期: 2015-02-11; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqfan@fudan.edu.cn

vegetation carbon storage increased by 1.430×10^5 t. The vegetation carbon densities in 2000 and 2010 were 18.694 t/hm^2 and 18.708 t/hm^2 , respectively. (3) The carbon density of forest vegetation in Minqing County, Yongtai County, and Minhou County, which are located in western Fuzhou, remained high during this ten year period, and was observed to increase overall. In contrast, Luoyuan County, Changle County, and Lianjiang County, which are located in eastern Fuzhou, experienced declines in the carbon density of forest vegetation, as a result of increasing socio-economic and anthropogenic activity. (4) In these areas, the forest was mostly converted to shrub and crop land between 2000 and 2010. As a result of this change in land use, forest carbon storage in Fuzhou declined by 1.711×10^4 t overall. In addition, soil carbon storage and plant carbon storage decreased by 2.230×10^3 t and 1.489×10^4 t, respectively.

Key Words: forest volume; carbon storage; carbon density; land use change; Fuzhou city

森林在生态系统碳循环过程中发挥着十分重要的作用。森林碳储量是研究森林与大气之间碳交换的基本参数,也是计算碳排放和碳循环过程中的关键因子^[1-2],因此研究森林碳储量的估算方法具有十分重要的意义。近年来,运用以森林蓄积量为基础的生物量转换因子法(Biomass Expansion Factor, BEF)来估测植被碳储量得到了广泛应用^[3]。方精云等建立了“蓄积量-生物量”回归方程,并测算了不同优势树种的计算参数^[4-6],徐新良^[7]、曾伟生^[8]等又通过研究进一步提出了方程中参数 a 和 b 的优化取值。李海奎等以全国第六、七次森林资源连续清查资料为基础,研究比较了生物量转换因子法同其他方法在森林生物量和碳储量估算方面的异同^[9],为提高生态系统植被碳储量估算精度打下了基础,实现了森林植被生物量和碳储量估算方法由样地调查向区域推算尺度的转换。

传统蓄积量的调查方法主要通过周期性测定样地内的树木生长指标来估算^[10],这种方法精度较高,但野外工作量大,人力和资金成本较高,且很难满足大尺度以及实时的监测需求^[11]。随着遥感技术的发展,利用 3S 及其集成技术开展森林蓄积量的定量估测受到越来越多的关注^[12]。遥感数据能提供动态的植被覆盖信息,与森林清查数据相结合,能实现快速、连续、较准确的蓄积量估测及预报,极大提高了工作效率,诸多国内外学者在此基础上对森林蓄积量定量遥感估测开展研究^[13-14]。一些研究表明,对遥感影像的灰度值提取,其线性或非线性组合与森林蓄积量有较明显的相关性,以地面调查数据得到的蓄积量为因变量,以遥感数据若干波段的灰度值及其组合值作为自变量,同时综合考虑坡度、海拔等地理信息,可以建立起合适的森林蓄积量多元线性回归模型^[15-17]。

当前人类活动对陆地生态系统碳循环过程的影响越来越强烈,尤其是土地利用变化显著地影响了陆地生态系统的结构和功能,造成植被和土壤碳储量的变化,是对陆地生态系统碳循环影响的最大人为因素之一^[18-20]。研究表明,1850—1980 年间,约 180Pg 碳通过土地利用变化从陆地生态系统中排放到大气中,而森林面积减少导致近 100Pg 碳排放到大气中^[21]。20 世纪 80 年代以来,全球由于土地利用变化造成每年平均释放 1.6Pg 碳^[22]。因此,定量估算森林碳储量及其变化、评估碳储量对土地利用变化的响应不仅可以为森林资源经营管理和林业可持续发展提供重要科学依据,而且对碳排放及碳循环研究具有十分重要的意义。

本文主要对以下问题展开研究:(1)基于 RS 与 GIS 技术,从 Landsat5 TM 影像中提取不同波段灰度值及其组合,结合海拔、坡度等因子作为自变量,以福州市森林资源二类调查中的单位面积蓄积量数据为因变量,采用逐步回归法建立福州市森林蓄积量多元线性估测模型。(2)根据生物量转换因子法,对福州市森林植被碳储量和碳密度进行估算,分析 2000 年到 2010 年森林植被碳储量变化特征。(3)建立 2000 年至 2010 年福州市土地利用转移矩阵,并分析土地利用变化影响下的森林碳储量变化特征。研究结果旨在为福州市利用遥感影像数据监测及预测连续清查间隔期内森林资源的动态变化提供科学依据。

1 研究区概况

福州市位于福建省中部东端、闽江下游,介于北纬 $25^{\circ}15'$ — $26^{\circ}39'$ 、东经 $118^{\circ}08'$ — $120^{\circ}31'$ 之间,总面积

11968 km²,其中市区面积 1786 km²。行政区划为五区七县(市),包括市区(鼓楼区、台江区、仓山区、晋安区和马尾区)、闽清县、永泰县、闽侯县、连江县、罗源县、福清市、长乐市。

福州属亚热带季风气候,东临台湾海峡,温暖湿润,雨量充沛,四季常青。福州市横跨中国东部湿润森林区域中的两个植被带,即南亚热带雨林植被带和中亚热带照叶林植被带。福州天然植被包括常绿阔叶林、针叶林、针阔混交林、竹林和灌丛。常绿阔叶林为中亚热带地带性植被,植物种类以壳斗科栲属、石栎属为主,其它樟科、山茶科、杜鹃花科植物也占较多比例。针叶林为福州市分布最广、数量最多的植被类型,主要树种有马尾松、杉木、油杉、柳杉、黄山松、黑松等,其中马尾松、杉木覆盖面积最大,且多为纯林,基本上为人工营造。

2 材料与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究采用 Landsat5 TM 遥感影像数据、福州市土地利用数据、福州市森林资源二类调查数据、DEM 数据作为基本数据源。

2.1.1 Landsat TM 影像数据

TM 遥感影像来源于 2000 年和 2010 年,均为植被生长季数据,单景影像覆盖全市范围,平均云量小于 1%,噪音面积小于 10%,影像质量较好,适合进行遥感反演。为削弱不利因素对预测模型精度的影响,预先对 TM 影像数据进行大气校正、正射校正、几何校正。校正过程在 ENVI 5.0 软件中进行。

2.1.2 土地利用数据

福州市土地覆被数据是利用遥感影像等资料,通过计算机辅助分类软件和人工目视解译相结合生成,共 2000 年、2010 年两期数据。森林类型分类至二级生态系统,即常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林,并进行过野外核查修正,精度大于 90%。

土地利用分类体系采用政府间气候变化和专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)编著的《土地利用、土地利用变化和林业优良做法指南(GPG-LULUCF)》^[23]中使用的土地类别,即森林、耕地、草地、湿地、建设用地和未利用地,是目前公认的可以较全面、综合地评价土地利用对碳储量影响的土地分类体系。在此基础上,本文根据研究需要,增加灌木类别,共计七种土地利用类型。为和“灌木”区分,本研究中的“森林”土地利用类型特指乔木林。

2.1.3 地面调查数据

地面调查数据来源于 2010 年福州市森林资源二类调查数据(下文简称“二调数据”),森林小班为统计的基本单元,以矢量地理信息数据的形式储存。在进行研究前对数据进行预处理,针对小班出现自相交的情况,在 ArcGIS 10.2 软件中使用 Repair Geometry 工具进行修复。

2.2 自变量因子选择及提取

从遥感数据和 DEM 数据中提取适用于构建蓄积量定量估测模型的因子为备选自变量,具体包括遥感因子变量、植被因子变量、地理因子变量。

遥感因子变量根据 TM 影像 7 个波段具有不同的波谱特征,将 TM1-TM5、TM7 六个单波段设置为遥感因子。TM6 为热红外波段,本次研究不予考虑。除此之外,在借鉴前人研究的基础上,设置 TM5/TM4、TM5/TM7、TM7/TM3、TM3/(TM1+TM2+TM3+TM4+TM5+TM7)、(TM4+TM5-TM2)/(TM4+TM5+TM2)、(TM5+TM7-TM2)/(TM5+TM7+TM2)、TM3 * TM4/TM7 七个组合波段。此外由于缨帽变换中的土壤亮度指数(BI)、植被绿度指数(GI)、湿度指数(WI)三个分量与地物类型有密切关系,故亦采用作为遥感因子变量^[17, 24]。

植被因子变量采用当前比较常用的、能反映植被覆盖信息的重要植被指数,主要有归一化植被指数 NDVI、差值植被指数 DVI、比值植被指数 RVI。各植被指数在反映植被长势、生物量等方面具备各自优势。遥感因子变量和植被因子变量用 ENVI 5.0 软件进行提取。地理因子变量主要为海拔和坡度,从 DEM 数据中直接 ArcGIS 10.2 软件提取。

因变量来源于二调数据。森林小班根据林业管理需要呈现出不规则的面积形态,一个森林小班中往往包含许多个遥感灰度值不同的像元,因此需要在不规则的小班面积覆盖范围内提取唯一的像元灰度值。将小班矢量图层和提取出的每个自变量因子栅格图层在 ArcGIS 10.2 软件中进行叠置,利用 Spatial Statistics Tools 做统计分析,可得到小班内某个自变量因子所有像元的平均值,因而将任意小班内的自变量因子转换成唯一值。

2.3 样本数据筛选

运用标准差分析法对小班异常离群数据进行剔除,公式为: $|x_i - \bar{x}| > 2\sigma$ 。其中, x_i 为实测小班单位面积蓄积量数据, \bar{x} 为平均值, σ 为标准差。筛选过后的小班个数为:常绿阔叶林 1565 个;常绿针叶林 2722 个;针阔混交林 1045 个。考虑到样本数据的数量需满足建模要求,最终每个森林类型随机选取 400 个小班数据作为建模样本,选取 150 个小班数据作为验证样本。各森林类型的建模数据和验证数据样本点分布如图 1 所示。

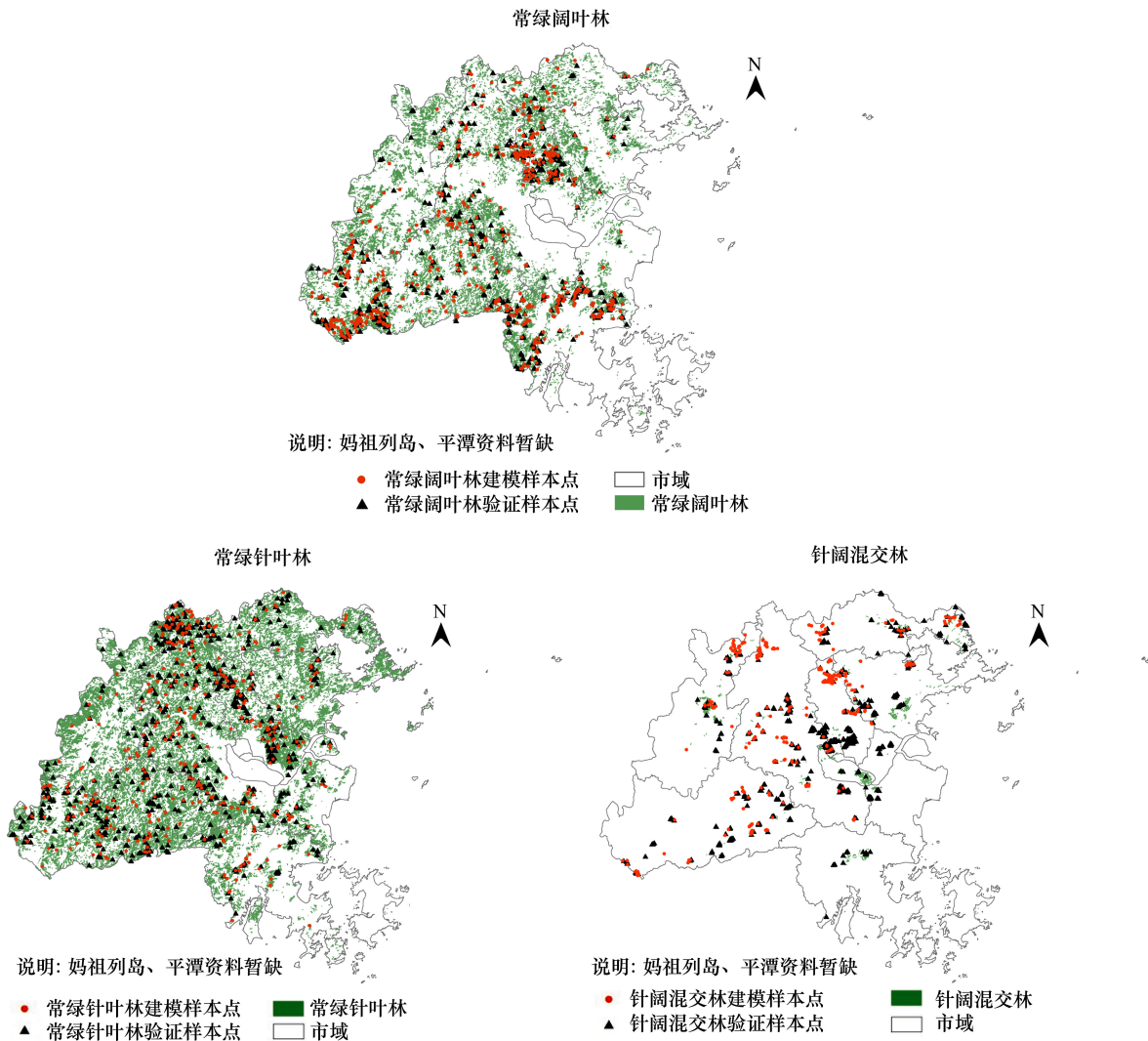


图 1 建模与验证样本点分布
Fig.1 Distribution of the Samples

2.4 逐步回归法

自变量个数及种类对模型估测精度的影响很大,需要克服备选变量间的共线性,筛选合适的自变量构建模型^[25]。在进行多元线性回归时,一般线性回归不论自变量对因变量的影响是否显著,都可以进入方程,这样会使方程估计的精度变低^[26],因此本研究采用逐步回归法避免上述问题。

逐次将 2.2 节中提取的 21 个备选变量选入方程,比较前后变量对方程的重要性。若后引入的变量使先

前变量失去了重要性,则将先前的变量淘汰,通过变量的引入和剔除,最终筛选出最适合建模的自变量^[27]。逐步回归中的每一步都进行 F 检验,以确保每次引入新的变量之前回归方程中只包含显著变量。以回归系数显著性检验中各自变量的 F 统计量的相伴概率值 $\text{Sig} \leq 0.05$ 和 F 统计量的相伴概率值 $\text{Sig} \geq 0.10$ 作为自变量是否引入模型或者从模型剔除的标准。当 $\text{Sig} \leq 0.05$, 认为该变量对因变量的影响是显著的, 应被引入回归方程; 当 $\text{Sig} \geq 0.10$ 时, 则认为该变量对因变量的影响是不显著的, 应从回归方程剔除。

2.5 基于蓄积量的森林碳储量估算

本研究采用 BEF 法估算森林植被生物量和碳储量, 该方法建立生物量与蓄积量之间的换算关系, 可以实现由样地调查向区域推算的尺度转换, 在国内城市森林的碳储量估算及碳汇评估中较为常见^[28], 其公式^[5]为:

$$B = a \cdot V + b$$

式中, B 为森林生物量(t), V 为森林蓄积量(m^3), a、b 为参数, 取值参照前人的研究成果(表 1)。

表 1 森林“蓄积量-生物量”回归方程系数

Table 1 The Exchange Parameters of Forest Volume-biomass

树种 Forest type	a	b	参考文献 References
阔叶类 Broad-leaved	0.8389	43.4173	[7]
针叶类 Coniferous	0.5894	24.5151	[8]
针阔混 Mixed conifer and deciduous	0.8136	18.4660	[29]

森林植被碳储量与碳密度计算采用公式: $C = B \cdot C_c$; $\rho = C/S$ 。C 为碳储量(t); C_c 为含碳率, 采用国内学者常用的系数 0.5^[30]; ρ 为碳密度(t/hm^2); S 为面积(hm^2)。

3 结果与讨论

3.1 蓄积量定量估测模型

经过逐步回归法对自变量因子的反复引入和剔除, 最终筛选出适合于常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林建模的自变量因子, 建立多元线性回归方程(表 2)。

表 2 模型公式及参数

Table 2 Regression Models and Parameters

森林类型 Forest type	模型公式 Models	R	R ²	修正 R ² Adjusted R ²
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	$Y = 110.23 - 0.039 \times TM5 + 0.069 \times BI + 0.079 \times GI + 0.184 \times RVI + 0.039 \times (TM5 + TM7 - TM2) / (TM5 + TM7 + TM2)$	0.790	0.612	0.599
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	$Y = 48.942 - 0.0584 \times TM4 + 0.0629 \times TM7 + 0.0106 \times DVI - 0.0529 \times TM5/TM4 + 0.0174 \times (TM5 + TM7 - TM2) / (TM5 + TM7 + TM2) + 0.038 \times TM3 \times TM4/TM7 + 0.046 \times \text{海拔}$	0.803	0.760	0.679
针阔混交林 Evergreen coniferous forest	$Y = 5.741 - 0.189 \times \text{坡度} - 0.111 \times TM2 + 0.196 \times TM1 + 0.497 \times WI + 0.145 \times \text{海拔}$	0.835	0.796	0.694

$\alpha = 0.05$ 的可靠性水平下, 各模型均通过 F 检验和 t 检验。常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林的回归模型中的复相关系数分别为 0.790、0.803、0.835, 修正决定系数分别为 0.599、0.679、0.694, 能较好地反映出蓄积量与建模因子之间的线性关系, 拟合效果较好。

3.2 模型适用性检验及精度验证

对所拟合的模型进行适用性检验, 用本研究建立的模型所估测出的蓄积量作为自变量, 以小班实测蓄积

量数据为因变量,建立二者的线性回归方程。三种不同森林类型的检验方程及 R^2 如图 2。

常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林的模型检验方程 R^2 分别为 0.881、0.969、0.962,结果表明,通过模型计算的林分蓄积量估测值与森林小班中的实测值无显著差异。

此外,对所拟合的模型进行精度验证。2010 年福州市森林蓄积量实际统计值为 2951 万 m^3 ,本研究中通过模型的估测值为 2593.95 万 m^3 ,总体精度为 $2593.95/2951 = 87.90\%$,预测结果较为理想。

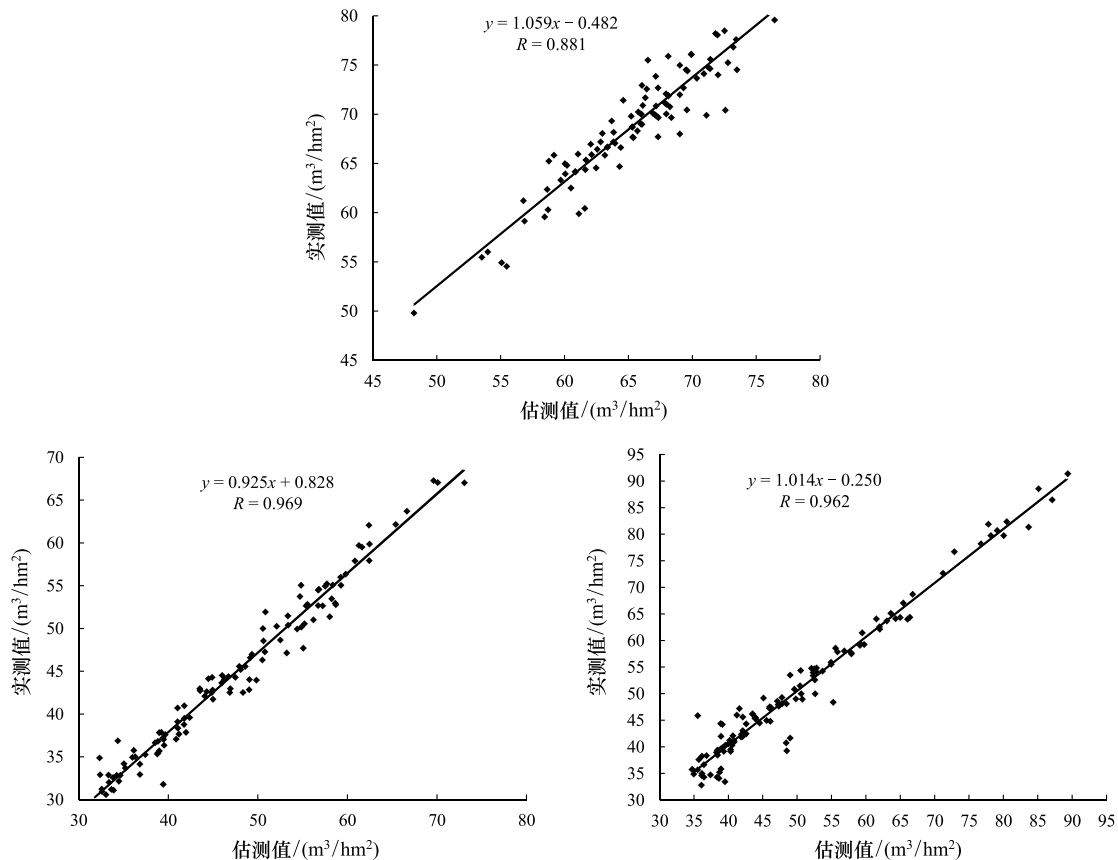


图 2 蓄积量实测值与估测值检验图

Fig.2 Actual and Predicted Value of the Forest Volume Samples

3.3 森林植被碳储量变化分析

采用 2.2 节同样方法提取 2000 年不同森林类型的建模因子。在 ArcGIS 软件中将参与蓄积量估测的因子变量栅格图分别用土地覆被矢量数据中的常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林掩膜裁剪,根据已建立的蓄积量估测模型和 TM 遥感影像反演值计算每个像元的蓄积量。根据 2.5 节的 BEF 法,得出 2000 年、2010 年福州市森林植被碳储量总量分别为:12.499Tg、12.642Tg,碳密度分别为 18.694 t/hm^2 、 18.708 t/hm^2 ,森林植被碳储量增加了 $1.44 \times 10^5 \text{ t}$,平均碳密度为 18.701 t/hm^2 。在 ArcGIS 软件支持下得到福州市 2000 年、2010 年森林植被碳密度分布图(图 3),并对十年间福州市各市县森林植被碳密度空间变化进行分析。

由图 3 可以看出,从 2000 年到 2010 年,福州市森林植被碳密度总体呈上升的趋势。在东部沿海区域,植被碳密度大于 25 t/hm^2 的像元总面积减少,在西部内陆地区,森林植被碳密度大于 25 t/hm^2 的像元总面积增加。福州市的各市县中,闽清县、永泰县、闽侯县的森林植被碳密度常年保持较高水平,并呈现出增长趋势。市区(包括鼓楼区、仓山区、台江区、晋安区、马尾区)的植被碳储量平均值为 18.91 t/hm^2 ,变化较小,总体上保持稳定。罗源县、长乐市、连江县森林植被碳密度较低,并呈现下降趋势。闽清县、永泰县、闽侯县地处福州市西部,地广人稀,经济欠发达,多山脉多林场,并分布有多个自然保护区和森林公园,森林生态系统受到较好保

护。该区域受人为负面干扰程度较小,森林植被碳储量常年保持较稳定增长的水平。处于沿海地区的各市县,如市区、长乐市、罗源县、福清市、连江县,随着社会经济的发展和建设用地对森林的侵占,森林植被碳密度有下降的趋势。

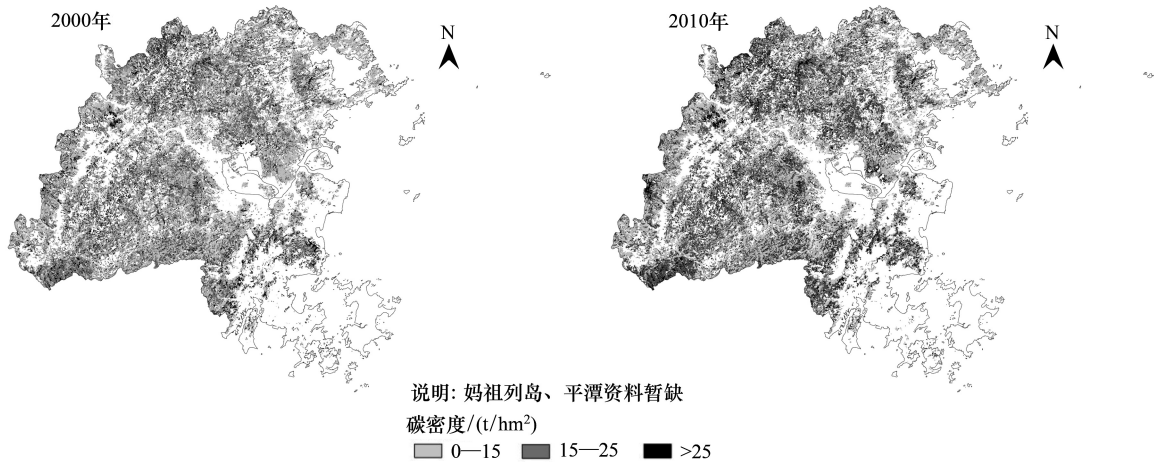


图3 福州市森林植被碳密度空间分布(t/hm²)

Fig.3 Classification Map of Forest Vegetation Carbon Density in Fuzhou

3.4 福州市土地利用变化分析

3.4.1 土地利用类型面积变化

2000年到2010年福州市土地利用面积变化见表3。福州市主要用地类型为森林,常年保持国土面积占比55%以上,其次为耕地和灌木。十年间,福州市土地利用面积发生较大变化,主要表现在:建设用地、森林、草地面积上升,其占福州市国土面积比例分别上升1.32%、0.60%、0.05%;灌木、耕地、湿地面积下降,占福州市国土面积比例分别下降1.25%、0.52%、1.05%。未利用地面积变化较小,变化仅0.01%。

表3 福州市2000—2010年土地利用面积变化

Table 3 Area Changes of Different Land Use from 2000 to 2010 in Fuzhou

年份 Year	森林 Forestland	灌木 Shrubland	草地 Grassland	湿地 Wetlands	耕地 Cropland	建设用地 Settlements	未利用地 Other land
2000	6685.90	1080.47	99.07	603.02	2674.04	819.49	5.63
2010	6757.83	931.11	104.65	577.27	2612.19	977.37	7.19

3.4.2 土地利用类型转化

在 ArcGIS 软件进行数据融合和叠置分析,得到土地利用转化关系图,将数据导出后在 Excel 表格中计算土地利用转移矩阵,结果见表4。

2000年到2010年,土地利用类型转化较明显。灌木和耕地是主要的转出者,灌木主要转化为森林,转化面积113.69 km²;耕地主要转化为建设用地和森林,转化面积分别为109.59 km²和61.38 km²。森林和建设用是主要的转入者,森林主要由灌木和耕地转化,建设用地主要由耕地和湿地转化。森林主要向建设用地、耕地进行了转化,转换面积为14.67 km²和88.85 km²。可以看出经济发展和城市扩张导致对建设用地的诉求强烈,耕地转换为建设用地的强度增大,耕地安全需得到保障。森林面积的持续上升对森林资源的健康可持续发展有利。

在森林和其它土地利用类型的相互转化过程中,耕地和灌木转化最为剧烈。森林向耕地转化了88.75 km²,同时耕地向森林转化了61.38 km²,相互转化幅度较大;灌木向森林转化了113.69 km²,在所有转化过程中面积最大,而森林向灌木只转化了1.59 km²。草地、湿地和森林之间都发生面积转化,但变化幅度均较小。

森林向建设用地转化 14.67 km²,而建设用地只向森林转化了 0.11 km²。

表 4 福州市 2000—2010 年土地利用转移矩阵(km²)

Table 4 Land Use Transition Matrix from 2000 to 2010 in Fuzhou

2010/2000	草地 Grassland	耕地 Cropland	灌木 Shrubland	未利用地 Other land	建设用地 Settlement	森林 Forestland	湿地 Wetlands	总计 Total
草地 Grassland	88.68	2.29	1.15	0.00	0.71	6.20	0.04	99.07
耕地 Cropland	7.01	2478.11	8.40	1.12	109.59	61.38	8.43	2674.04
灌木 Shrubland	2.89	36.20	919.92	0.16	6.85	113.69	0.77	1080.47
未利用地 Other land	—	0.00	—	5.63	0.00	—	—	5.63
建设用地 Settlement	0.02	0.69	0.03	0.00	818.61	0.11	0.02	819.49
森林 Forestland	6.05	88.75	1.59	0.28	14.67	6573.50	1.06	6685.90
湿地 Wetlands	0.00	6.14	0.03	—	26.93	2.95	566.96	603.02
总计 Total	104.65	2612.19	931.11	7.19	977.37	6757.83	577.27	11967.61

3.5 碳储量对土地利用变化的响应

根据土地利用类型转移矩阵及不同土地利用类型土壤碳密度和植被碳密度差异,估算福州市 2000 年至 2010 年森林碳储量变化对土地利用类型变化的响应。森林植被碳密度采用本文计算的平均值,其它不同土地利用类型碳密度来源于当地资料和相关文献^[31-34](表 5)。土地利用变化带来的森林碳储量变化见表 6。

表 5 不同土地利用类型土壤碳密度和植被碳密度(t/hm²)

Table 5 Soil Carbon Density and Vegetation Carbon Density of Different Land-use Type

土地利用类型 Land use type	土壤碳密度 Soil carbon density	植被碳密度 Vegetation carbon density
森林 Forestland	93.9	18.7
耕地 Cropland	89.0	8.4
草地 Grassland	90.6	13.9
灌木 Shrubland	91.9	16.9
建设用地 Settlement	86.1	9.7
湿地 Wetlands	91.2	13.3
未利用地 Other land	78.3	6.7

由于土地利用变化,2000 年到 2010 年福州市森林总碳储量减少了 1.711×10⁴ t,其中土壤碳储量减少 2.23×10³t,植被碳储量减少了 1.489×10⁴ t,土地利用变化总体上造成了碳排放。森林向其他用地类型转化表现为碳排放效应,总碳储量减少 1.49×10⁵ t。排放最多的为森林向耕地转化,总碳储量减少 1.17×10⁵ t,占减少碳储量总量的 79.07%;其次依次为森林向建设用地、草地、湿地、未利用地、灌木转化,碳储量减少量分别为 2.465×10⁴ t、4.90×10³ t、8.6×10² t、7.7×10²t、6.1×10² t。其他用地类型向森林的转化表现为碳吸收效应,总碳储量增加 1.32×10⁵t,吸收最多的为耕地向森林的转化,总碳储量增加 8.10×10⁴t;其次依次为灌木、草地、湿地、建设用地向森林转化,碳储量增加量分别为 4.32×10⁴t、5.02×10³t、2.39×10³t、1.90×10²t。耕地和森林之间的土地利用转换造成的碳储量变化十分剧烈,建设用地对森林的侵占造成的碳储量减少应该引起相应的重视。

4 结论

1)不同的森林类型,即常绿阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林蓄积量估测模型的复相关系数分别为 0.599、0.679、0.694,模拟效果较好,具有较高的估测精度。

2)2000 年、2010 年福州市森林植被碳储量总量分别为:12.499Tg、12.642Tg,碳密度分别为 18.694 t/hm²、18.708 t/hm²,森林植被碳储量增加了 1.44×10⁵t。闽清县、永泰县、闽侯县的森林植被碳密度常年保持较高水

平,并呈现出增长趋势。罗源县、长乐市、连江县森林植被碳密度较低,并呈现下降趋势。

表 6 土地利用变化影响下的森林碳储量变化
Table 6 Forest carbon storage change brought by LUCC

土地利用转移类型 Transition of land use type	面积 Area/km ²	土壤碳密度变化 △SCD/ (t/hm ²)	植被碳密度变化 △VCD/ (t/hm ²)	土壤碳储量变化 △SCS/ 10 ³ t	植被碳储量变化 △VCS/ 10 ³ t	总碳储量变化 △FCS/ 10 ³ t
森林→灌木 Forest land→shrub land	1.59	-2.0	-1.8	-0.32	-0.29	-0.61
森林→草地 Forest land→grass land	6.05	-3.3	-4.8	-2.00	-2.90	-4.90
森林→耕地 Forest land→crop land	88.75	-4.9	-8.3	-43.49	-73.66	-117.15
森林→建设用地 Forest land→settlement	14.67	-7.8	-9.0	-11.45	-13.21	-24.65
森林→湿地 Forest land→wetlands	1.06	-2.7	-5.4	-0.29	-0.57	-0.86
森林→未利用地 Forest land→other land	0.28	-15.6	-12.0	-0.44	-0.34	-0.77
灌木→森林 Shrub land→forest land	113.69	2.0	1.8	22.74	20.46	43.20
草地→森林 Grass land→forest land	6.20	3.3	4.8	2.05	2.98	5.02
耕地→森林 Crop land→forest land	61.38	4.9	8.3	30.08	50.95	81.02
建设用地→森林 Settlement→forest land	0.11	7.8	9.0	0.09	0.10	0.19
湿地→森林 Setlands→forest land	2.95	2.7	5.4	0.80	1.59	2.39
总计 Total	-2.23	-14.89	-17.11			

SCD:土壤碳密度 Soil Carbon Density;VCD:植被碳密度 Vegetation Carbon Density;SCS:土壤碳储量 Soil Carbon Storage;VCS:植被碳储量 Vegetation Carbon Storage;FCS:森林碳储量 Forest Carbon Storage

3)2000 年到 2010 年,福州市主要用地类型为森林,其次为耕地和灌木。土地利用面积变化和类型转化较明显。灌木和耕地是主要的转出者;森林和建设用地是主要的转入者。

4)由于土地利用变化,2000 年到 2010 年福州市总碳储量减少了 1.711×10^4 t,其中土壤碳储量减少 2.230×10^3 t,植被碳储量减少了 1.489×10^4 t,土地利用变化总体上造成了碳排放。耕地和森林之间的土地利用转换造成的碳储量变化十分剧烈,建设用地对森林的侵占造成的碳储量减少应该引起相应的重视。

参考文献 (References):

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexier M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] 林清山, 洪伟. 中国森林碳储量研究综述. *中国农学通报*, 2009, 25(6): 220-224.
- [3] Hu H F, Wang G G. Changes in forest biomass carbon storage in the South Carolina Piedmont between 1936 and 2005. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5/6): 1400-1408.
- [4] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [5] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43(9): 967-973.
- [6] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 *Science* 一文 (*Science*, 2001, 291: 2320—2322) 的若干说明. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [7] 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. *地理科学进展*, 2007, 26(6): 1-10.
- [8] 曾伟生. 云南省森林生物量与生产力研究. *中南林业调查规划*, 2005, 24(4): 1-3, 13-13.
- [9] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [10] Metsaranta J M, Lieffers V J. Using dendrochronology to obtain annual data for modelling stand development: a supplement to permanent sample plots. *Forestry*, 2009, 82(2): 163-173.
- [11] 袁凯先, 陈玉山, 包盈智, 赵宪文. 森林蓄积量的遥感估测. *林业资源管理*, 1996, (3): 13-17.
- [12] Meroberts R E, Tomppo E O. Remote sensing support for national forest inventories. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(4): 412-419.
- [13] 杨海军, 邵全琴, 陈卓奇, 张帅. 森林碳蓄积量估算方法及其应用分析. *地球信息科学*, 2007, 9(4): 5-12.
- [14] 刘志华, 常禹, 陈宏伟. 基于遥感、地理信息系统和人工神经网络的呼中林区森林蓄积量估测. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1891-1896.
- [15] 董斌, 冯仲科, 杜林芳, 唐雪海. 山东省黄河流域森林蓄积量遥感定量估测模型研究. *遥感技术与应用*, 2010, 25(4): 520-524.

- [16] 余坤勇, 林芳, 刘健, 元兴兰, 张世利. 基于 RS 的闽江流域马尾松林分蓄积量估测模型研究. 福建林业科技, 2006, 33(1): 16-19.
- [17] 王妮. 基于 3S 技术的森林资源变化动态监测[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [18] IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 5: Land Use Change and Forestry. Paris, France: IPCC/OECD/IEA, 1997.
- [19] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1385-1390.
- [20] Wijaya A, Kusnadi S, Gloaguen R, Heilmeyer H. Improved strategy for estimating stem volume and forest biomass using moderate resolution remote sensing data and GIS. Journal of Forestry Research, 2010, 21(1): 1-12.
- [21] Houghton R A. Land-use change and the carbon cycle. Global Change Biology, 1995, 1(4): 275-287.
- [22] 张兴榆, 黄贤金, 赵小风, 陆汝成, 赖力. 环太湖地区土地利用变化对植被碳储量的影响. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1343-1353.
- [23] IPCC. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Hayama, Japan: IPCC/IGES, 2003.
- [24] 张友静, 方有清. K-T 变换的林学意义及其在森林蓄积量估算中的应用. 环境遥感, 1992, 7(3): 163-171.
- [25] 黄伟平, 谭三清, 张贵, 李珺. 估测森林蓄积量的遥感因子选择研究. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(4): 112-115.
- [26] 徐萍, 徐天蜀. 森林蓄积量定量遥感估测模型研究. 林业建设, 2007, (6): 43-46.
- [27] 李亦秋, 冯仲科, 邓欧, 张冬有, 张彦林, 吴露露. 基于 3S 技术的山东省森林蓄积量估测. 林业科学, 2009, 45(9): 85-93.
- [28] 周健, 肖荣波, 庄长伟, 邓一荣. 城市森林碳汇及其核算方法研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3368-3377.
- [29] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.
- [30] 揣小伟, 黄贤金, 郑泽庆, 张梅, 廖启林, 赖力, 卢俊宇. 江苏省土地利用变化对陆地生态系统碳储量的影响. 资源科学, 2011, 33(10): 1932-1939.
- [31] 张梅, 赖力, 黄贤金, 揣小伟, 谈俊忠. 中国区域土地利用类型转变的碳排放强度研究. 资源科学, 2013, 35(4): 792-799.
- [32] 张旭辉, 李典友, 潘根兴, 李恋卿, 林凡, 许信旺. 中国湿地土壤碳库保护与气候变化问题. 气候变化研究进展, 2008, 4(4): 202-208.
- [33] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 傅伯杰. 中国主要灌丛植被碳储量. 植物生态学报, 2006, 30(4): 539-544.
- [34] 郑姚闽, 牛振国, 宫鹏, 戴永久, 上官微. 湿地碳计量方法及中国湿地有机碳库初步估计. 科学通报, 2013, 58(2): 170-180.