

东莞市针叶类森林生物量遥感模型研究*

阮兰君 杨燕琼

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要 基于 Landsat 8 影像数据, 对东莞市松树林 (*Pinus sp.*)、杉木林 (*Cunninghamia lanceolata*)、针叶混交林 3 种针叶类森林生物量进行估算, 利用相关分析、主成分分析和逐步回归分析, 建立针叶类森林生物量遥感估算模型, 其决定系数 (R^2) 值分别为 0.880 9、0.832 5、0.964 0, 均达显著水平。经适用性检验, 模型均达 0.05 显著水平, 可用于东莞市针叶类森林生物量估算。

关键词 遥感; 针叶林; 森林生物量; 回归分析

中图分类号: S758 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2018) 01-0032-05

The Study on the Remote Sensing Model of Dongguan Conifer Forest Biomass

RUAN Lanjun YANG Yanqiong

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agriculture University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract Based on Landsat 8 image data, this paper estimates the biomass of three coniferous forest in Dongguan, including *Pinus* forest, *Cunninghamia lanceolata* and coniferous mixed forest. By using correlation analysis, principal component analysis and stepwise regression, a remote sensing estimation model of coniferous forest biomass was established, and its determining coefficient (R^2) value were 0.880 9, 0.832 5 and 0.964 0 respectively, which reached a significant level. The applicability test showed that the model reached 0.05 significant levels and could be used for estimating the biomass of coniferous forest in Dongguan.

Key words remote sensing; coniferous forest; forest biomass; regression analysis

随着全球气候不断变化, 人们越来越重视森林的固碳能力^[1-2]。森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 在促进全球碳循环、降低温室气体浓度、保护全球气候系统等方面发挥着十分重要的作用^[3-5]。森林生物量是评估森林结构和功能变化、森林生态系统生产力以及陆地生态系统功能的重要指标, 为陆地生态系统碳汇研究提供基础数据, 与全球碳循环能力息息相关^[6-8]。遥感技术相比传统估算森林生物量的方法, 具有实时、快速、准确度高、范围大、多尺度的优越性, 可对森林生态系统进行动态监测^[9-10], 得到众多专家

的认可。

目前, 应用遥感技术估算森林生物量, 主要利用遥感数据结合样地调查, 采用回归分析、人工神经网络等数学方法构建森林生物量估算模型^[11]。Reese 等^[12]利用光学卫星数据与森林资源数据相结合, 提出了运用 K-最邻近算法估算森林生物量。Foody 等^[13]根据 Landsat 卫星数据, 运用神经网络对美国东北部的婆罗洲热带雨林进行森林生物量研究。Hall 等^[14]根据 Landsat 卫星数据与实地调查数据, 运用数学模型构建了森林地上生物量估算方程。国庆喜等^[15]用 TM 图像

* 第一作者: 阮兰君 (1991—), 女, 在读硕士研究生, 研究方向为森林可持续经营与资源监测, E-mail: 602973282@qq.com。

通信作者: 杨燕琼 (1964—), 女, 副教授, 主要从事 3S 技术在农林方面的应用研究, E-mail: lik@scau.edu.cn。

与森林资源一类调查数据建立了森林生物量多元回归方程和神经网络模型，估算小兴安岭森林生物量。王轶夫等^[16]探索并验证了BP神经网络模型在估算森林生物量中的适用性。刘芳等^[17]根据卫星影像数据和样地调查数据，构建相关数学模型反演北京市针叶林和阔叶林的森林生物量。

通过国内外研究可知，遥感技术可有效、快速提取森林相关信息，较好地动态监测森林状态。本研究以东莞市针叶类森林（松树林 *Pinus*、杉木林 *Cunninghamia lanceolata*、针叶混交林）为研究对象，采用2016年Landsat 8 TM遥感影像数据和东莞市二类调查数据，森林生物量是东莞林科所测定且提供，其中森林生物量包括乔木层、灌木层、草本层的生物量，从TM影像提取坡度、坡位、郁闭度、光谱值、植被指数等因子，构建针叶类森林生物量估算模型，并对模型进行适用性检验，分析东莞市针叶类森林生物量分布状况。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东莞市属于广东省直辖市，位于广东省南部，是广东省重要的经济发展区域和交通枢纽。地理坐标为113°31′~114°15′E，22°39′~23°09′N，陆地总面积246 500 hm²，森林覆盖率达37.4%。地处南亚热带，日照充足，雨量充沛，昼夜温差小，季风明显。雨量集中在4—9月份，年均降水量1 800 mm，年均气温22.1℃，海拔多在200~600 m，地势东南高、西北低。地貌以丘陵台地、冲积平原为主，丘陵台地占44.5%，冲积平原占43.3%，山地占6.2%，地形复杂，气候条件优越，拥有丰富的植被资源。东莞市植被主要为常绿针叶林、针叶混交林、典型常绿阔叶林、季风常绿阔叶林等^[18]。其中常见的裸子植物有7种，被子植物有1 498种，被子植物中双子叶植物有1 135种，单子叶植物有363种^[19-20]。

1.2 信息源与数据处理

由于东莞市属于多云、多雨、多雾地区，无云、清晰的卫星影像不易获取，且考虑卫星影像光谱分辨率、地面分辨率等因素，本文以2016年Landsat 8卫星影像为数据源，其具有陆地成像仪OLI和热红外传感器TIRS2个传感器，空间分辨率为30 m。光谱方面，有反映植物光合作用的红光和蓝光波段，植物反射的绿光波段，反映植被

类别的近红外波段，反映植物健康状况的短波红外波段，反映热环境的热红外等10个波段和全色波段。

影像数据需要经过处理才能提取出更多、更准确的植被信息。为了调节遥感影像的地物辐射亮度，提取真实的光谱值信息，准确表达地面的光谱反射率，降低森林生物量的估算误差，对遥感影像进行辐射定标和大气校正。同时，为了消除影像上的地物形状、尺寸等特征与参照物的表达差异，用ERDAS遥感影像处理软件的几何校正模块，以1:10 000比例尺地形图为基准，用二次多项式对遥感影像进行几何校正，中误差控制在1个像元内。通过图像增强，提高图像质量和数据的准确性。对卫星影像进行监督分类辅以目视判读，提取松树林、杉木林和针叶混交林信息及其光谱值、植被指数等因子。

植被指数是遥感影像两个或多个光谱波段光谱值通过线性或非线性组合算法，生成的有意义的专题数值^[21]。本文提取了TM1、TM2、TM3、比值植被指数、差值植被指数、归一化植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)等98个光谱因子和坡度、坡位、坡向、郁闭度等13个遥感影像可提取的外业调查因子(表1)。其中归一化植被指数是应用最多的一种植被指数，常用于植被覆盖度等研究，增强型植被指数可同时校正土壤和大气的影 响。外业调查数据和生物量测定数据由东莞市林业科学研究所提供，再进行GPS定位复查。

运用统计软件SPSS 19.0，先对数据进行相关分析，找出与森林生物量显著相关的因子。由于入选因子较多，为了减少信息冗长，更好地表达遥感因子对森林生物量的解释作用，再对入选因子进行主成分分析，筛选出与森林生物量密切相关的因子进行逐步回归分析，分别构建松树林、杉木林、针叶混交林的森林生物量遥感估算模型，并对估算模型进行适用性检验。适用性检验公式如下：

$$X^2 = \sum (\text{理论值} - \text{实际值})^2 / \text{理论值}$$

当 $X^2 < X_{0.05}^2(n-1)$ 时，则估算模型与实际值差异不显著。

2 结果与分析

2.1 针叶类森林遥感信息提取分析

将TM6、TM5、TM4波段分别赋以红、绿、

表1 东莞市针叶类生物量指标因子
Table 1 Indices of the coniferous biomass in Dongguan

项目 Item	类别 Catalogue	因子 Factors
光谱因子 Spectral factor	单一光谱值 Spectrum of value	TM1、TM2、TM3、TM4、TM5、TM7、TM9、TM10、TM11
	差值植被指数 Difference vegetation index	TM5-TM1、TM5-TM2、TM5-TM3、TM5-TM4、TM6-TM1、TM6-TM2、TM6-TM3、TM6-TM4、TM6-TM5、TM7-TM1、TM7-TM2、TM7-TM3、TM7-TM4、TM7-TM5、TM7-TM6、TM9-TM1、TM9-TM2、TM9-TM3、TM9-TM4、TM9-TM5、TM9-TM6、TM9-TM7、TM10-TM1、TM10-TM2、TM10-TM3、TM10-TM4、TM10-TM5、TM10-TM6、TM10-TM7、TM10-TM9、TM11-TM1、TM11-TM2、TM11-TM3、TM11-TM4、TM11-TM5、TM11-TM6、TM11-TM7、TM11-TM9、TM11-TM10
	比值植被指数 Ratio vegetation index	TM5/TM1、TM5/TM2、TM5/TM3、TM5/TM4、TM6/TM1、TM6/TM2、TM6/TM3、TM6/TM4、TM6/TM5、TM7/TM1、TM7/TM2、TM7/TM3、TM7/TM4、TM7/TM5、TM7/TM6、TM9/TM1、TM9/TM2、TM9/TM3、TM9/TM4、TM9/TM5、TM9/TM6、TM9/TM7、TM10/TM1、TM10/TM2、TM10/TM3、TM10/TM4、TM10/TM5、TM10/TM6、TM10/TM7、TM10/TM9、TM11/TM1、TM11/TM2、TM11/TM3、TM11/TM4、TM11/TM5、TM11/TM6、TM11/TM7、TM11/TM9、TM11/TM10
	其他植被指数 Other vegetation index	归一化植被指数 (NDVI)、再标准化植被指数 (RDVI)、绿色标准化植被指数 (GNDVI)、增强型植被指数 (EVI)、归一化差异绿度指数 (NDGI)、转换型植被指数 (TVI)、土壤调节植被指数 (SAVI)、优化土壤调节植被指数 (OSAVI)、修改型土壤调节植被指 (MSAVI)、垂直植被指数 (PVI)
外业调查因子 Investigation factor	立地因子 Site factor	地形、坡位、坡向、坡度、海拔
	其他因子 Other factor	郁闭度、龄组、平均高、平均胸径、公顷株数、公顷蓄积、总蓄积

表2 东莞市针叶类森林分类精度
Table 2 Classification accuracy of the coniferous forest in Dongguan

林分 Stand	样地 / 个 Sample plot number	判对 / 个 Number of correct matched plots	精度 Accuracy/%
松树林 Pine forest	292	267	91.14
杉木林 China fir forest	26	24	92.31
针叶混交林 Coniferous mixed forest	18	17	94.44

蓝色合成假彩色图。在 TM654 彩色合成图上, 松树林呈现绿色间有灰色, 主要分布在山顶; 杉木林呈现黑色或深蓝色, 主要分布在山的中下部、阴坡; 针叶林呈现深绿色且有颗粒感。遥感像元的分辨率为 30 m × 30 m, 松树林、杉木林和针叶

混交林总像元数分别为 38 245、3 148 和 2 057, 随机抽取 3/5 像元用于构建估算模型, 剩余像元随机抽取用于适用性检验。对所提取的 3 种针叶类森林进行分类的精度检验, 其结果如表 2。

从表 2 可见, 用监督分类辅以目视判读提取

针叶类森林精度均在 90% 以上，达到森林调查的要求，可用于因子的提取和森林生物量的分析研究。

2.2 松树林生物量遥感估算模型

运用统计软件 SPSS 19.0，以 98 个遥感因子以及 13 个外业调查因子与生物量进行相关分析，筛选出坡向、坡度、海拔、郁闭度、TM1、TM2、TM3 等 93 个与松树林生物量显著相关因子，将这 93 个因子和生物量进行主成分分析，认为用 10 个主成分能反映 93 个因子 91.993% 信息量。松树林的生物量主要由第一主成分、第三主成分、第四主成分反映，这三个主成分包括的主要因子有郁闭度、坡向、海拔、坡度、TM2、TM5/TM4、TM11/TM9、TM11-TM10、TM10-TM9 等 10 个因子，用这些因子作为自变量，生物量作为因变量，随机抽取 22 947 个像元进行逐步回归分析。建立回归方程为：

$$B = -799.509 + 551.898 \times (\text{TM11/TM9}) + 403.383 \times \text{郁闭度} - 3.561 \times (\text{TM10-TM9}) + 1.955 \times \text{海拔}$$

其中 B 为生物量，单位是 kg/hm^2 。模型的决定系数 (R^2) 为 0.880 9，在 0.05 水平上显著。模型统计量 F 值为 9.227，回归模型在 0.05 水平上显著。将未参与建模的 298 个松树林像元对估算模型进行适用性检验，得到 $X^2 = 322.92 < X^2_{0.05}(297)$ ，模型得到的松树林生物量值与实际测得的生物量值无显著差异，可用于松树林生物量估算。

2.3 杉木林生物量遥感估算模型

对遥感因子和外业调查因子进行相关分析，筛选出坡位、坡度、郁闭度、TM10-TM2、增强型植被指数等 11 个与杉木林生物量显著相关因子。将这 11 个因子和生物量进行主成分分析，认为用 4 个主成分能反映 11 个因子 82.571% 信息量。杉木林的生物量主要由第一主成分反映，第一主成分主要包括坡度、坡位、郁闭度、增强型植被指数、TM10-TM9 这 5 个因子，用这些因子作为自变量，以生物量作为因变量，随机抽取 1 889 个像元进行逐步回归分析。建立回归方程为：

$$B = 31.897 + 1.100 \times \text{增强型植被指数}$$

其中 B 为生物量，单位是 kg/hm^2 。模型的决定系数 (R^2) 为 0.832 5，在 0.05 水平上显著。模型统计量 F 值为 5.855，回归模型在 0.05 水平上显

著。将未参与建模的 31 个杉木林像元对估算模型进行适用性检验，得到 $X^2 = 37.42 < X^2_{0.05}(30)$ ，这说明模型得到的杉木林生物量值与实际测得的生物量值无显著差异，可用于杉木林生物量估算。

2.4 针叶混交林生物量遥感估算模型

对遥感因子和外业调查因子进行相关分析，筛选出坡位、坡度、郁闭度、TM6-TM1、TM6-TM2、TM6-TM3、TM6-TM4 等 24 个与针叶混交林生物量显著相关因子。将这 24 个因子和生物量进行主成分分析，认为 6 个主成分能反映 24 个因子 93.026% 信息量。针叶混交林的生物量主要由第一主成分、第二主成分反映，第一、二主成分主要包括坡度、坡位、海拔、郁闭度、TM6-TM1、TM6-TM2、TM6-TM3、TM7-TM4、TM9/TM1、增强型植被指数等 21 个因子，用这些因子作为自变量，以生物量作为因变量，随机抽取 1 234 个像元进行逐步回归分析。建立回归方程为：

$$B = -28.916 + 7.218 \times (\text{TM9/TM1}) + 2.491 \times (\text{TM7-TM4}) - 0.669 \times (\text{TM6-TM3}) - 0.170 \times \text{增强型植被指数}$$

其中 B 为生物量，单位是 kg/hm^2 。模型的决定系数 (R^2) 为 0.964 0，在 0.05 水平上显著。模型统计量 F 值为 22.739，回归模型在 0.01 水平上显著。将未参与建模的 43 个针叶混交林像元对估算模型进行适用性检验，得到 $X^2 = 18.13 < X^2_{0.05}(42)$ ，模型得到的针叶混交林生物量值与实际测得的生物量值无显著差异，可用于针叶混交林生物量估算。

3 结论与讨论

3.1 不同森林类型其森林生物量估算因子不同。松树林主要为 TM11/TM9、郁闭度、TM10-TM9、海拔；杉木林主要为增强型植被指数；针叶混交林主要为 TM9/TM1、TM7-TM4、TM6-TM3、增强型植被指数。杉木林与针叶混交林共有的估算因子为增强型植被指数。

3.2 松树林、杉木林、针叶混交林的森林生物量遥感估算模型分别为：B 松树林 = $-799.509 + 551.898 \times (\text{TM11/TM9}) + 403.383 \times \text{郁闭度} - 3.561 \times (\text{TM10-TM9}) + 1.955 \times \text{海拔}$ 、B 杉木林 = $31.897 + 1.100 \times \text{增强型植被指数}$ 、B 针叶混交林 = $-28.916 + 7.218 \times (\text{TM9/TM1}) + 2.491 \times (\text{TM7-TM4}) -$

$0.669 \times (TM6-TM3) - 0.170 \times$ 增强型植被指数, 决定系数 (R^2) 分别为 0.880 9、0.832 5、0.964 0, 均在 0.05 水平上显著。模型统计量 F 值分别为 9.227、5.855、22.739, 前两者回归模型在 0.05 水平上显著, 后者回归模型在 0.01 水平上显著。

3.3 模型适用性检验认为模型得到的生物量值与实际测得的生物量值无显著差异, 可用于估算东莞市松树、杉木、针叶混交林的森林生物量。松树林、杉木林、针叶混交林的森林生物量模型得到的 X^2 值分别为 322.92、37.42、18.13。

3.4 若时间充裕, 更高地面分辨率的卫星影像与 Landsat 遥感影像融合所到的影像, 既有高空间分辨率, 又有高光谱分辨率, 得到的结果会更好。

参考文献

- [1] FEARNSIDE P M. Global warming and tropical land-use change: greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation[J]. Climatic Change, 2000, 46(1-2): 115-158.
- [2] SABINE C L, HEIMANN M, ARTAXO P, et al. Current status and past trends of the global carbon cycle[J]. Science, 2004, 62(2004): 17-44.
- [3] WOODWELL G M, WHITTAKER R H, Reiners W A, et al. The biota and the world carbon budget[J]. Science, 1978, 199(4325): 141-146.
- [4] MOFFAT A S. Resurgent Forests Can Be Greenhouse Gas Sponges[J]. Science, 1997, 277(5324): 315-316.
- [5] LAL R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. Environment International, 2003, 29(4): 437-450.
- [6] EBERMAYER E. Die geamte Lechrder Waldtreu mit Rucksicht auf die chemiche statik des Waldbaues[J]. Berlin: J.pringer, 1876.
- [7] 薛立, 杨鹏. 森林生物量研究综述[J]. 福建林学院学报, 2004, 24(3): 283-288.
- [8] 马炜, 孙玉军. 我国的森林生物量研究[J]. 世界林业研究, 2009(5): 71-76.
- [9] 薛巍, 张秋良, 赵鹏翔, 等. 基于遥感技术的森林生物量估算应用[J]. 水土保持研究, 2009(2): 209-211.
- [10] 汤旭光, 刘殿伟, 王宗明, 等. 森林地上生物量遥感估算研究进展[J]. 生态学杂志, 2012(5): 1311-1318.
- [11] 何红艳, 郭志华, 肖文发. 遥感在森林地上生物量估算中的应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1317-1322.
- [12] REESE H, NILSSON M, Sandström P, et al. Applications using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2002, 37(1-3): 37-55.
- [13] FOODY G M, CUTLER M E, MCMORROW J, et al. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data[J]. Global Ecology and Biogeography, 2001, 10(4): 379-387.
- [14] HALL R J, SKAKUN R S, ARSENAULT E J, et al. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume[J]. FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT, 2006, 225(1-3): 378-390.
- [15] 国庆喜, 张锋. 基于遥感信息估测森林的生物量[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(2): 13-16.
- [16] 王轶夫, 孙玉军, 郭孝玉. 基于BP神经网络的马尾松立木生物量模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(2): 17-21.
- [17] 刘芳, 冯仲科, 赵芳, 等. 资源三号遥感卫星影像的生物量反演研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 175-181.
- [18] 王登峰, 曹洪麟. 东莞市主要植被类型与生态公益林建设[J]. 广东林业科技, 1999, 25(2): 23-28.
- [19] 沈德才, 杨燕琼, 吴振彪, 等. 基于Landsat8的东莞市热岛效应研究[J]. 广东林业科技, 2014, 30(6): 20-24.
- [20] 樊晶, 杨燕琼. 基于遥感的森林健康度分析——以东莞桉树林为例[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(1): 40-45.
- [21] 于延, 王建华, 段喜萍. 遥感数字影像中提取植被指数并行算法的研究与实现[J]. 科技通报, 2013, 29(2): 100-103.