

利用 TM 数据提取粤西地区的森林生物量

郭志华¹, 彭少麟^{2, 3 *}, 王伯荪²

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 中山大学生物系, 广州 510275; 3. 中国科学院华南植物所, 广州 510650)

摘要:通过样方调查获取森林材积,借助于 GPS 技术为调查样方准确定位.通过研究针叶林和阔叶林材积与 Landsat TM 数据各波段及 NDVI 和 RVI 等指数的相关性,筛选出估算针叶林和阔叶林材积的光谱因子.根据 TM 数据 7 个波段信息及其线形与非线形组合,应用逐步回归技术分别建立估算针叶林和阔叶林材积的最优光谱模型.进而研究了粤西及附近地区的森林生物量和森林覆盖.结果表明:若不计少量云层及地形影响,粤西及附近地区的森林覆盖率约为 47.8%.西江干流以北地区的森林覆盖率明显高于西江以南,阔叶林主要分布在西江以北,西江以南主要为针叶林.粤西及附近地区的森林生物量多介于 23~451 t·hm⁻²之间;在约 19 050km² 范围内,森林生物量共计 9.22×10⁷ t 左右.西江以北地区的森林生物量较高,西江以南的森林生物量较低.生物量>400 t·hm⁻²的森林主要分布在黑石顶自然保护区及附近、鼎湖山及附近、德庆东北部和广宁东部.

关键词:森林生物量;森林覆盖;建模;Landsat TM 数据;全球定位系统;粤西

Estimating Forest Biomass in Western Guangdong Using Landsat TM Data

GUO Zhi-Hua¹, PENG Shao-Lin^{2, 3}, WANG Bo-Sun² (1. *The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protects, CAF, Beijing 100091*; 2. *Department of Biology, Zhongshan University, Guangzhou 510275*; 3. *South China Institute of Botany, Chinese Academia Sinica, Guangzhou 510650*). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1832~1839.

Abstract: The effective absorption of radiation in the visible spectral range by chloroplasts and the high reflectance of the near infrared radiation by the cell walls of the plants are appropriate spectral features to estimate green biomass and LAI and etc.

In this paper, forest biomass in western Guangdong, China was estimated by using Landsat TM data. First, field measurements of stem volume (V) were obtained from 67 plots (30m×30m), including 28 plots for broadleaved forests and 37 plots for coniferous forests, respectively. All of plots were accurately positioned using Global Positioning System (Magellan GPS Field Pro V).

The Landsat TM image for western Guangdong area was acquired on May 8, 1995. The satellite image was processed in the following steps:

- ① radiometric calibration using dark-pixel subtraction.
- ② geometric correction to a map coordinate system in the Gauss-Krüger projection using ground control points, and the correction was based on the polynomial transformation. The mean square error of the method was about 10 m. The re-sampling method

基金项目:国家自然科学基金重大项目(39899370), 中国科学院 95 重大项目(KZ951-B1-110)和广东省自然科学基金重大基金(980952)资助项目、国家林业局重点实验室基金资助项目。

中山大学江必亮博士、叶伟男老师参加野外调查,特此致谢!

收稿日期:2001-11-10; **修订日期:**2002-06-12

作者简介:郭志华(1965~),男,四川仁寿人,博士,副研究员。主要从事 RS、GIS 和 GPS 在生态学中的应用研究。

guozhihua@yahoo.com.cn
万方数据

* 通信联系人 Author for correspondence

was nearest neighbor. The spectral features were given for the field plots by selecting the closest pixel to the plot. The spectral features included the spectral digital number(*DN*) values of *TM1* to *TM7*, *NDVI* and *RVI*. $NDVI=(TM4-TM3)/(TM4+TM3)$ is the normalized difference vegetation index. $RVI=(TM4/TM3)$ is the ratio vegetation index.

Because of the significant difference in spectral features between broadleaved trees and coniferous trees, the biomass of broadleaved forest and coniferous forest should be estimated by different models. Thus, using the supervised classification method, the whole area was firstly classified into two types: non-forest area and forest area, and then the forest area was further classified into broadleaved forests and coniferous forests. In order to select appropriate factors as variables for the stem volume spectral models, the correlations between *V* and 7 bands, *NDVI*, *RVI* and their combinations were calculated. According to these selected factors, the multiple linear and nonlinear models of stem volume (*V*) as a function of one or more bands or indices, such as *NDVI*, *RVI* and etc. , were tested by using the stepwise regression analysis technique, respectively. The most optimal models were chosen among the established models to model the stem volume. The coniferous forest stem volume spectral model was: $V=-33354.7+254148.1/TM3+7360.3\cdot\ln(TM3)$, and the broadleaved forest stem volume spectral model was: $V=9870.2+86.9\cdot TM3-3669.2\cdot\ln(TM3)+3.2\cdot(TM1+TM2+TM3+NDVI+RVI)$. Then, the forest biomass was estimated by the model: $Biomass_{total}(kg\cdot hm^{-2})=720(kg\cdot m^{-3})\times V(m^3\cdot hm^{-2})$.

The results showed that the forest cover ratio in western Guangdong was about 47.8% if the effects of the clouds and the shadow were neglected. The forest cover to the north of West River was significant larger than that to the south. The broadleaved forests were mainly distributed to the north of West River, while the coniferous forests were mainly distributed to the south of the river. The forest biomass in western Guangdong varied from 23~451t·hm⁻², and the total forest biomass was about 9.22×10⁷ t in the whole area of about 19 050 km². The forest biomass in the northern part of West River was higher than that in the southern part. The forest biomass with more than 400t·hm⁻² were mainly found in the Heishiding Nature Reserve and its nearby region, Dinghushan, the northeast of Deqing county and the east of Guangning county.

Key words: forest cover; forest biomass; modeling; landsat TM data; global positioning system; western Guangdong

文章编号:1000-0933(2002)11-1832-08 中图分类号:S718.55+7 文献标识码:A

森林是地球陆地最重要的生态系统,在全球C循环中居重要地位;良好的森林经营还可减少大气中的CO₂含量^[1]。在全球森林中,热带、亚热带森林的地位非常重要^[2],热带森林生物量的较小波动即可引起全球C循环的显著变化^[3]。Phillps 等对热带森林(>600 000 棵树)生物量进行了长达 20 多年的定位研究,结果表明:在美洲热带,多数样地正以 0.71±0.34 t C hm⁻²·a⁻¹ 的加速度累积 C,这意味着新热带森林可降低大气 CO₂ 的增加速率^[3]。因此,对森林生物量的研究、特别是长期定位研究有助于加深对全球 C 平衡变化的认识和理解。

全球多数亚热带地区的植被为荒漠或半荒漠,而在欧亚大陆东部却发育了全球面积最大的亚热带森林^[4]。过去对亚热带森林的研究主要集中在个体、种群、群落和生态系统及分子水平上^[5,6],而对大面积森林生物量的估算还存在许多不确定性。近来迅速发展的 3S 技术为大尺度的生物量估算提供了一条快捷、经济、方便和可靠的途径^[7]。

植物的光合作用表现为对红光和蓝紫光的强烈吸收而使其反射光谱曲线在该部分波段呈波谷形态,因此,植物的反射光谱特征反映了植物的叶绿素含量和生长状况。而叶绿素含量与叶生物量相关,叶生物量又与群落生物量相关。所以,可根据植物反射光谱特征、利用遥感数据来估算陆地植被活体生物量^[7]。

最初,人们用 Landsat MSS 来监测植被的叶面积指数和活体生物量^[8,9]。后来,更多的是利用 Landsat TM 和 NOAA AVHRR 数据来监测植被生长和生物量^[7,10~14]。如,结合地面调查和 TM、AVHRR 数据,对数百万平方公里欧洲森林生物量的成功估算^[12],利用 TM 数据对美国东 Colorado 矮草草原地上部分生物量的估算^[13],对美国 East Maryland 落叶林的地上部分生物量的估算^[14]等。近年来,各种星载和机载 SAR 数据已被广泛用于估算陆地植物生物量^[15~17],生物量估算已成为 SAR 数据的重要应用领域之一。

卫星遥感使人们能在大陆甚至全球尺度上监测自然资源^[18]。过去的研究主要集中在热带和北方针叶林区^[12]。

由于阔叶树和针叶树的反射光谱特征明显不同^[12,19],再加上复杂多变的季风气候和人类活动的影响,致使广东现有森林多为阔叶林、针叶林以及大量的混交林,这就为卫星影像的解译增加了难度。因此,有必要开发一种适合于亚热带森林生物量遥感估算的方法。

另一方面,由于卫星数字影像的几何校正、野外判读等均需获得准确的定位数据,并且准确定位的生态学野外调查还可大大增加数据的有效性和用途,因此,GPS 技术丰富了生态学的研究手段,这也是宏观生态学发展的一个趋势。

本文在使用 Magellan GPS Field Pro V 进行野外调查的基础上,利用 Landsat TM 数据研究了广东西部地区(以肇庆、云浮等地为主)约 19 050 km² 范围内的森林生物量。

1 数据与方法

1.1 数据

地面生物量数据根据野外调查获得。遥感数据为 Landsat 5 TM 数据肇庆幅。时间:1995 年 5 月 8 日。

1.2 方法

(1)森林生物量的野外调查主要在封开县黑石顶及附近地区和肇庆鼎湖山自然保护区及附近进行。共设样方 67 个,样方大小为 30×30 m² 或 20×20 m²,尽量与 TM 数据的地面几何分辨率一致。其中,阔叶林样方 28 个,针叶林样方 39 个。取样时间为 1998 年冬季。所做研究均假设从 1995 年 5 月至调查期间,调查地的森林生物量保持不变或变化不大。在每个样地,每木调查胸径和树高。

样地定位 用手持式 Magellan GPS Field Pro V 进行,并将 GPS 地定位坐标(WGS84 坐标)转化为北京 54 坐标。

在 TM 影像中,选择距样地坐标最近的像元代表该样地,并提取样地的反射光谱信息。

(2)遥感图像预处理 ①辐射校正,方法是减去最暗的像元值(dark-pixel subtraction)。每个波段的最暗象元值由直方图来确定。②几何校正,根据 1/50 000 地形图选地面控制点(GCP)30 个,平均标准误差(RMS)为 0.34(±0.15)个象元,即地面几何误差平均为 10.2 m。

(3)由于阔叶树和针叶树反射光谱特征上的差异,因此不能用相同的模型来估算不同类型森林的生物量,而应先将研究区进行分类。在 ERMapper 5.5 的支持下,在充分研究林地和非林地光谱特征的基础上,使用监督分类将研究区先划分为林地和非林地两大类,进而将林地划分为阔叶林和针叶林。

(4)生物量的计算 根据树干体积计算地上部分生物量的方法参考 Hame 等^[12]。若地下部分的森林生物量按占总生物量的 20% 计算^[7],则森林总生物量按下式计算:

$$\text{Biomass}_{\text{total}}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = 720(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \times \text{stem volume}(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}) \tag{1}$$

(5)利用 TM1~TM7 等波段的光谱特征及其各种线性和非线性组合来分别建立阔叶林和针叶林生物量的光谱估算模型。其中, $NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$, $RVI = TM4 / TM3$ 。

(6)所有统计分析均在 SAS 软件下进行。

2 结果与讨论

2.1 森林材积的光谱估算模型

为了便于模拟研究,将研究区的森林仅仅划分为两大类,即阔叶林和针叶林。

2.1.1 阔叶林材积与反射辐射(reflected optical radiation)的关系模型 (1)图 1 和表 1 反映了粤西地区阔叶林材积与反射辐射的关系。其中,波段 TM1、TM2、TM3 和 TM 6 与阔叶林材积之间呈极显著负相

关($p<0.01$);阔叶林材积与 $NDVI$ 、 RVI 间呈极显著正相关($p<0.01$)。

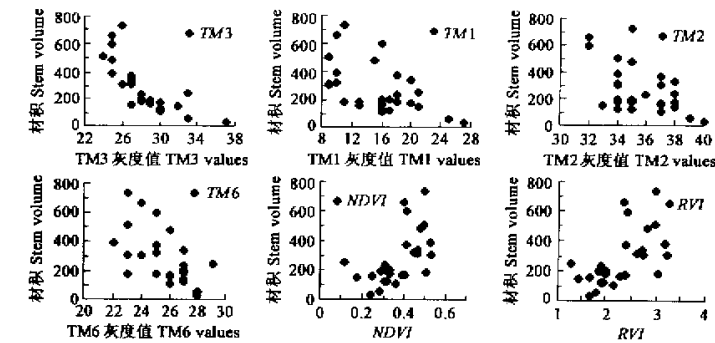


图 1 阔叶树材积(m^3)与 TM 各波段光谱特征的关系

Fig. 1 Broadleaved tree volume(m^3)versus spectral features

表 1 粤西地区阔叶林材积与 TM 数据的关系($n=28$)

Table 1 The correlation coefficients between broadleaved tree stem volume in western Guangdong and spectral features										
相关系数	$TM1$	$TM2$	$TM3$	$TM4$	$TM5$	$TM6$	$TM7$	$TM1\sim TM7$	$NDVI$	RVI
Correlation										
材积										
Stem Volume	-0.5443	-0.5228	-0.7485	0.3323	-0.0809	-0.5988	-0.1132	-0.2017	0.5625	0.5397

粤西地区阔叶林材积与各波段之间的负相关关系,与欧洲寒温带针叶林相似^[12],与农田和草地不同^[8]。此外, $NDVI$ 和 RVI 也与阔叶林材积有很显著的相关关系,可作为粤西地区阔叶林生物量的估算指标,这与欧洲寒温带针叶林略有不同^[12]。因此,可以先从这些因子中筛选重要因子,逐步建立阔叶林生物量估算的光谱模型。

在各波段信息中, $TM3$ 与阔叶林材积间相关性最强、关系最密切。 $TM3$ 为红光波段($0.63\sim0.69\mu m$),绿色植物叶绿素对这部分光强烈吸收而使植物的反射光谱曲线在这一光谱范围内呈波谷形态。因此, $TM3$ 数值的大小可以反映植被叶绿素含量的多少及生物量的大小。而 $NDVI$ 主要反映植被生产力的大小以及植被类型的差异,因此对粤西阔叶林生物量的指示作用不及 $TM3$ 。 $NDVI$ 与欧洲寒温带针叶林生物量的关系很弱,不能作为寒温带针叶林生物量的估算指标^[12]。

(2)从上述各因子及其组合中建立并选择阔叶林材积的光谱估算模型。结果见图 2。从图中可知:仅含 $TM3$ 数据的阔叶林材积光谱估算模型的复相关系数平方 R^2 与分别含有 $TM1$ 、 $TM2$ 、 $TM3$ 、 $TM6$ 及 $NDVI$ (图 2 中的模型 2~7)模型的 R^2 并无太大差别,模型均达到极显著水平。因此,仅用 $TM3$ 数据就可获得估算阔叶林材积的光谱模型,模型的常数项和系数也均达到 0.001 的显著水平,效果很好。模型为:

$$V(m^3 \cdot hm^{-2}) = 1575.85 - 45.75 \cdot TM3 \quad (n = 28, R^2 = 0.5603)$$

(2)

图 2 中,含有 $TM1\sim TM7$ 及 $NDVI$ 和 RVI 的模型,其 R^2 有较大的增加,达 0.8186。因此,含有 9 个自变量的阔叶林材积估算光谱模型具有更好的回归效果。模型为:

$$V = -778.32 + 13.18 \cdot TM1 + 0.01 \cdot TM2 + 36.95 \cdot TM3 - 39.46 \cdot TM4 - 17.68 \cdot TM5 - 3.15 \cdot TM6 - 25.95 \cdot TM7 + 354.14 \cdot NDVI + 1226.88 \cdot RVI \quad (n = 28, R^2 = 0.8186)$$

(3)

模型(3)的显著度虽然提高了,但模型多个系数的显著度不高,如常数项、 $TM1$ 、 $TM2$ 、 $TM3$ 、 $TM6$ 及 $NDVI$ 等项系数的显著度均在 0.2 以下,而且各个自变量间相互联系,再加上各个因子对阔叶林材积的影响程度不同,因此有必要找出对阔叶林材积影响最大的因子、使模型所含的自变量个数尽可能最少且同时又在一定程度上不降低模型的显著度。逐步回归的分析方法为此提供了可能^[20]。

本文根据 $TM1\sim TM7$ 等 7 个波段的信息及其线性和非线性组合,如 $NDVI,RVI, TM3+TM6, TM3+TM6+NDVI, TM1+TM3+TM6, TM1+TM2+TM3+TM6, TM1+TM3+TM6+NDVI, TM1+TM3+TM6+NDVI+RVI, TM1+TM2+TM3+TM6+NDVI+RVI, TM1+TM2+TM3+TM4+TM5+TM6+TM7, TM1+TM2+TM3+TM4+TM5+TM6+TM7+NDVI+RVI, \ln(TM3), e^{TM3}, 1/TM3, TM32$ 等 24 个自变量的 28 组数据,对影响阔叶林材积的因子进行逐步回归分析。将显著度水平为 0.15 作为挑选和剔除变量的条件,得以下回归模型:

$$V = -33354.7 + 254148.1/TM3 + 7360.3 \cdot \ln(TM3)$$

(4)

模型(4)的常数项和各系数的显著度水平均在 $p=0.05$ 以上,说明在 $TM3$ 波段灰度值的变化范围内,阔叶林材积随 $TM3$ 波段反射率的增加而降低,这与实际情况相符。

2.1.2 针叶林材积(V)的光谱估算模型 (1)表 2 和图 3 反映了粤西地区针叶林材积与反射辐射的关系。

其中, $TM1, TM2, TM3, TM6$ 和 $TM7$ 与针叶林材积之间呈极显著负相关($p<0.01$),与欧洲寒温带针叶林相似^[12];同样,针叶林材积与 $NDVI, RVI$ 间呈极显著正相关($p<0.01$),因此, $NDVI$ 和 RVI 可作为粤西地区针叶林生物量估算的指标,这与欧洲寒温带针叶林略有不同^[12]。

表 2 粤西地区针叶林材积与 TM 数据的关系($n=39$)

Table 2 The correlation coefficients between coniferous tree stem volume in western Guangdong and spectral features										
相关系数	$TM1$	$TM2$	$TM3$	$TM4$	$TM5$	$TM6$	$TM7$	$TM1\sim TM7$	$NDVI$	RVI
Correlation										
材积										
Stem volume	-0.7403	-0.8017	-0.8354	0.0970	-0.5314	-0.5801	-0.5293	-0.6696	0.6835	0.6585

(2)从上述各个因子及其组合中建立并选择估算针叶林材积的光谱模型。结果见图 4。从图中可知:仅含 $TM3$ 数据的针叶林材积光谱估算模型的 R^2 与分别含有 $TM1\sim TM7, NDVI$ 和 RVI (图 4 中的模型 2~8)的 R^2 并无太大差别,都达到极显著水平。因此,仅用 $TM3$ 数据就可获得针叶林材积的光谱模型,模型的常数项和系数也均达到 0.001 的显著水平,效果较好。模型为:

$$V(m^3 \cdot hm^{-2}) = 733.6 - 18.3 \cdot TM3$$

(5)

图 4 中,含有 $TM1\sim TM7$ 及 $NDVI$ 和 RVI 的模型,其 R^2 有较大的增加,达 0.8696。因此,含有 9 个自变量的针叶林材积估算光谱模型具有更好的回归效果。模型为:

$$V = -1093.0 + 5.12 \cdot TM1 + 2.78 \cdot TM2 + 39.65 \cdot TM3 - 35.62 \cdot TM4 - 0.91 \cdot TM5 - 5.02 \cdot TM6 - 2.08 \cdot TM7 + 1119.0 \cdot NDVI + 891.46 \cdot RVI$$

(6)

同样,模型(6)的多个系数的显著度不高,如 $TM2, TM2, TM5, TM6, TM7$ 及 $NDVI$ 等项系数的显著度均在 0.2 以下。相同地,用逐步回归分析的方法来找出最优的针叶林材积的光谱估算模型。

根据 $TM1\sim TM7$ 等 7 个波段的信息及其线性和非线性组合,如 $NDVI, RVI, TM2+TM3, TM1+TM2+TM3, TM1+TM2+TM3+NDVI, TM1+TM2+TM3+TM4+TM5+TM6+TM7, TM1+TM2+TM3+NDVI+RVI, TM1+TM2+TM3+TM6+NDVI+RVI, TM1+TM2+TM3+TM5+TM6+NDVI+RVI, TM1+TM2+TM3+TM4+TM5+TM6+NDVI+RVI, \ln(TM3), e^{TM3}, e^{NDVI}, 1/TM3,$

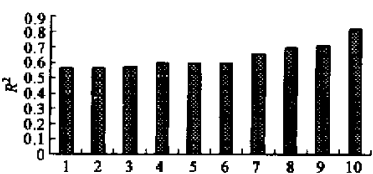


图 2 粤西阔叶树材积的 Landsat TM 模型的效果检验 (R^2)

Fig. 2 Performance (R^2) of best Landsat Models to estimate tree stem volume of broadleaved forests in western Guangdong

1: $TM3$; 2: $TM3+TM6$; 3: $TM3+TM6+NDVI$; 4: $TM1+TM3+TM6$; 5: $TM1+TM2+TM3+TM6$; 6: $TM1+TM3+TM6+NDVI$; 7: $TM1+TM3+TM6+NDVI+RVI$; 8: $TM1+TM2+TM3+TM+NDVI+RVI$; 9: $TM1+TM2+TM3+TM4+TM5+TM6+TM7$; 10: $TM1+TM2+TM3+TM4+TM5+TM6+TM7+NDVI+RVI$

TM3² 等 22 个自变量的 39 组数据,对影响针叶林材积的因子进行逐步回归分析。将显著度水平为 0.15 作为挑选和剔除变量的条件,得以下回归模型:

$$V = 9870.2 + 86.9 \cdot TM3 - 3669.2 \cdot \ln(TM3) + 3.2 \cdot (TM1 + TM2 + RVI) \tag{7}$$

模型(7)的效果较好,常数项和各系数的显著度水平均在 $p=0.05$ 以上,并表明,在 TM3 波段灰度值的变化范围内,针叶林材积随 TM3 波段反射率的增加而降低。

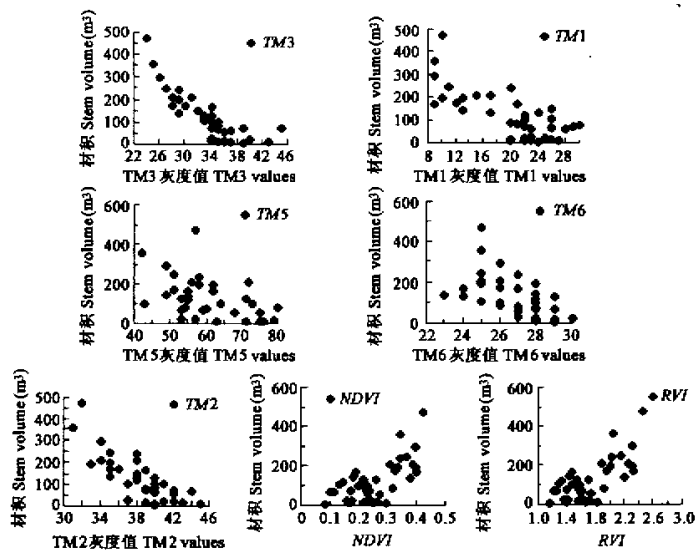


图 3 针叶林材积与 TM 各波段光谱特征的关系

Fig.3 Coniferus tree volume(m³)versus spectral features

2.2 粤西地区的森林生物量

将模型(4)及模型(7)分别代入方程(1),计算粤西地区的森林生物量(见书后彩版图 I)。结果表明,若忽略少量云层和山地阴影的影响,粤西附近地区的森林覆盖率约为 47.8%,针叶林面积远大于阔叶林。西江干流以北地区的森林覆盖率明显高于西江干流以南的地区。罗定盆地、西江干流附近、肇庆、三水等地农业区的森林覆盖率很低,西江干流以北的地区森林覆盖率明显较高。阔叶林多数分布在西江以北,西江以南主要为针叶林。

在彩版图 I 中,研究区森林材积介于 12.5~946 m³ · hm⁻²,即生物量介于 9~681 t · hm⁻²之间。其中 99.5% 的林地,其材积介于 32~626 m³ · hm⁻²,即生物量介于 23~451 t · hm⁻²,仅约 0.25% 的象元的生物量大于 450 t · hm⁻²。鼎湖山和黑石顶常绿阔叶林的生物量分别为 380 t · hm⁻²和 420 t · hm⁻²[5,6],这些地区森林生物量的遥感光谱模型估计值与实测值接近,估算结果较可靠。但是,由于北方针叶树种与亚热带树种的密度有差异,这样,将北方针叶树种地上部分生物量的估算公式直接应用到亚热带地区存在缺陷,因此,要获得更可靠的估算结果,还应做更多的实验。

若不计算少量云层影响,粤西及附近地区共有森林约 9116.7 km²,森林生物量的平均值为 101.1 t · hm⁻²,计有森林生物量约 9.22 × 10⁷ t。其中生物量 > 400 t · hm⁻² 的森林约 99.3 km²,占研究区总面积的 0.4%,森林面积的 1.1%。这些高生物量的森林集中分布在黑石顶及附近地区,其次是鼎湖山及附近、德庆至广宁一带。在新兴县西北部及新兴与开平接壤的天雾山地区,也有少量森林的生物量大于 400 t · hm⁻²。生物量在 300~400 t · hm⁻² 的森林约有 135.9 km²,占研究区面积的 0.5%、森林面积的 1.4%,主要分布在黑石顶、鼎湖山及附近、德庆至广宁一带。生物量在 200~300 t · hm⁻² 之间的森林约有 895.6 km²,

占研究区面积的 3.2%、森林面积的 9.8%，主要分布在西江干流以北、西江支流贺江以东。生物量在 $100\sim 200\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间的森林约有 2605.3 km^2 ，占研究区面积的 9.2%、森林面积的 28.6%，主要分布在西江以北，西江以南也分布较广。生物量 $<100\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的森林约有 5381.4 km^2 ，占研究区面积的 19.1%、森林的 59.0%，各地均有分布。

3 小结

- (1) 基于野外实地调查、利用遥感数据在大的空间尺度上对亚热带森林生物量进行有效估算是完全可能的。
- (2) 粤西及附近地区的森林覆盖率约为 47.8%。西江干流以北的地区森林覆盖率明显高于西江以南，阔叶林主要分布在西江以北，西江以南主要为针叶林。广东省西部地区的森林生物量多介于 $23\sim 451\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间，在约 $19\ 050\text{ 万 km}^2$ 的地区，森林生物量计约 $9.22\times 10^7\text{ t}$ 。西江以北地区的森林生物量较高，西江以南的森林生物量较低。生物量 $>400\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的森林主要分布在黑石顶自然保护区及附近、鼎湖山及附近、肇庆东北部和广宁东部。

(3) 要提高森林生物量的估算精度、减少误差，可以从以下几方面入手：① 大大增加野外样地调查的数量并提高其代表性。Hame 等(1997)用了近 2000 个样方资料来估算欧洲的寒温带针叶林^[12]。② 提高定位精度是关键。使用差分技术；或者在卫星信号弱时应尽量将 GPS 仪天线升高到森林冠层以上以获得准确定位，并采用取平均值的方法；将 GPS 的定位坐标(WGS84 系统)转变为我国的北京 54 坐标系统。③ 提高林地类型的分类精度。应准确区分森林和非森林及阔叶林和针叶林。只有在正确分类的基础上，才能正确地建立和运用模型。④ 建立更加有效且符合生态学意义的森林生物量光谱估算模型。本文仅以阔叶林和针叶林的光谱模型来模拟研究森林生物量，这不能很好地代表本区针阔叶混交林的生物量。因此，若能根据开发出反映针阔叶混交林生物量的遥感光谱模型，就可以提高研究精度、减少误差。

参考文献

[1] Moffat A S. Resurgent forests can be greenhouse gas sponges. *Science*, 1997, **277**: 315~316.

[2] Dixon R K, Brwn S B, Houghton R A, *et al.* Carbon pools and flux of global forest ecosystem. *Science*, 1994, **263**: 185~190.

[3] Phillips O L, Malhi Y, Higuchi N, *et al.* Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots. *Science*, 1998, **282**: 439~442.

[4] Wang B S(王伯荪), Peng S L(彭少麟). *Vegetation Ecology——Communities and Ecosystems* (in Chinese). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1997. 340~353.

[5] Peng S L(彭少麟), Zhang Z P(张祝平). Biomass, productivity and solar energy utilization of zonal vegetation on Mt. Dinghushan. *Chinese Science (B)* (in Chinese) (中国科学 B), 1994, **24**(5): 497~502

[6] Chen Z H(陈章和), Wang B S(王伯荪), Zhang H D(张宏达). *Productivity of the Lower Subtropical Evergreen Broad-leaved Forests*(in Chinese). Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 1996. 124~135.

[7] Peng S L(彭少麟), Guo Z H(郭志华), Wng B S(王伯荪). Applications of RS and GIS on terrestrial vegetation ecology. *Ecology*. (in Chinese) (生态学杂志), 1999, **18**(5): 52~64

[8] Tucker C J, Miller L D, Pearson R L. Shortgrass prairie spectral measurements. *Photogrammetric Engineering*

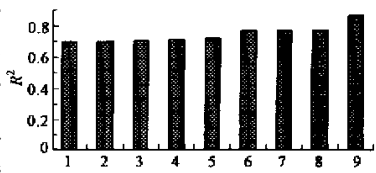


图4 粤西针叶林材积的 Landsat TM 模型的效果检验 (R^2)

Fig. 4 Performance (R^2) of best Landsat Models to estimate tree stem volume of coniferous forests in western Guangdong

1; TM_3 ; 2; TM_2+TM_3 ; 3; $TM_1+TM_2+TM_3$; 4; $TM_1+TM_2+TM_3+NDVI$; 5; $TM_1+TM_2+TM_3+TM_4+TM_5+TM_6+TM_7$; 6; $TM_1+TM_2+TM_3+NDVI+RVI$; 7; $TM_1+TM_2+TM_3+TM_6+NDVI+RVI$; 8; $TM_1+TM_2+TM_3+TM_5+TM_6+NDVI+RVI$; 9; $TM_1+TM_2+TM_3+TM_4+TM_5+TM_6+TM_7+NDVI+RVI$

and Remote Sensing, 1975,**41**: 1175~1183.

[9] Holben B, Tucker C J and Fan C-J. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1980, **46**: 651~656.

[10] Guo Z H(郭志华), Peng S L(彭少麟), Wang B S(王伯荪), *et al.* Estimation of radiation absorbed by Guangdong vegetation using GIS and RS. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese) (生态学报), 1999, **19**(4): 441~447.

[11] Guo Z H(郭志华), Peng S L(彭少麟), Wang B S(王伯荪). Combining multitemporal NOAA-AVHRR NDVI and ground auxiliary data for estimating terrestrial net primary production in Guangdong. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese) (生态学报), 2001,**21**(9): 1444~1449.

[12] Hame T, Salli A, Andersson K, *et al.* A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, 1997, **18**(15): 3211~3243.

[13] Todd S W, Hoffer R M and Milchunas D G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(3): 427~438.

[14] Lefsky M A, Harding D, Cohen W B, *et al.* Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sens. Environ.*, 1999, **67**: 83~98.

[15] Toan T L, Beaudoin A, Riom J, *et al.* Relating forest biomass to SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(2): 403~411.

[16] Imhoff M L. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **32**(2): 511~518.

[17] Fransson J E S and Israelsson H. Estimation of stem volume in boreal forests using ERS-1 C and JERS-1 L-band SAR data. *Int. J. Remote Sensing*, 1999, **20**(1): 213~138.

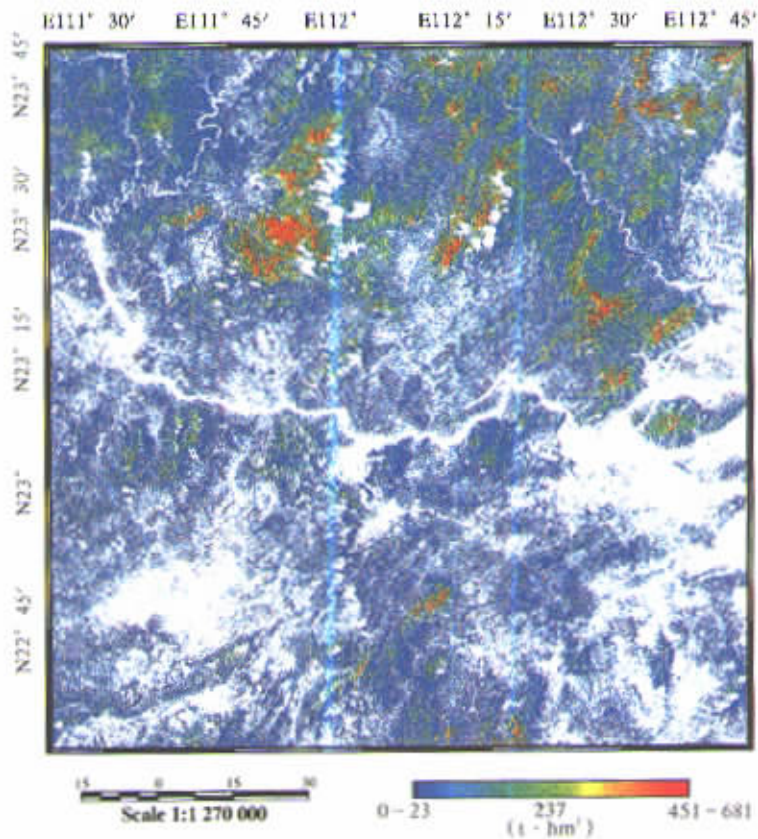
[18] Justice C O, Townshend J R G, Holben B N, *et al.* Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, 1985, **6**: 1271~1318.

[19] Hame T. Landsat-aided forest site type mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1984, **50**: 1175~1183.

[20] Guo Z H(郭志华),Zhang H D(张宏达),Li Z A(李志安), *et al.* The photosynthetic characteristics in leaves of *Liriodendron chinense* seedlings in Mt. Lushan. *Acta Ecologica Sinica*(in Chinese) (生态学报),1999, **19**(2): 164~169.

郭志华,等:利用TM数据提取粤西地区的森林生物量

GUO Zhi -Hua ,*et al*:Retrieving Forest Biomass in Western Guangdong Using Landsat TM Data



图版I 基于模型(4)、(7)的粤西地区森林生物量

Plate I Coniferous biomass of western Guangdong Province based on model(4),(7)

田友萍,等:云南石林碳酸岩表面气生蓝藻(蓝细菌)的研究

TIAN You-Ping, *et al*: A Study on Aerial Cyanophyta (Cyanobacteria) on the Surface of Carbonate Rock in Yunnan Stone Forest, Yunnan Province, China

