

西双版纳地区橡胶林生物量的遥感估算^{*}

徐万荣^{1,2}, 马友鑫¹, 李红梅¹, 刘文俊¹

(1. 中国科学院 西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 10049)

摘要: 以西双版纳地区橡胶林为对象, 设置 93 个 900 m² 样地并测量每株胸径等数据, 根据经验式计算样地生物量, 并分析了生物量与样地调查时间接近的 2010 年 Landsat TM 影像的反射率和植被指数的相关性, 建立生物量估算模型, 计算了该地区橡胶林生物量。结果表明: ① 生物量与可见光波段(TM1, TM2, TM3) ($P < 0.01$) 和中红外波段(TM5, TM7) 反射率呈显著负相关($P < 0.05$), 与 NDVI, RVI 和 GI 植被指数则呈显著正相关($P < 0.01$); ② GI 植被指数是生物量的最佳估算因子; ③ 橡胶林生物量变化在 1~291 t·hm⁻² 之间, 平均值为 (75.90 ± 58.75) t·hm⁻², 总生物量为 1.97×10^7 t; ④ 生物量在景洪市和勐腊县南部地区较高, 且随海拔升高呈现出先增加后减少趋势, 最大值出现在 600~700 m。

关键词: 橡胶林; 生物量; 遥感; 反射率; 植被指数

中图分类号: S 718 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7971(2011) S1-0317-07

橡胶树(*Hevea brasiliensis*) 原产于巴西亚马逊流域热带雨林中, 喜高温、降雨充沛的环境, 是热带地区特有的经济树种, 自上世纪 50 年代引入西双版纳以后, 种植面积不断增大, 从 1976 年的 2.49×10^4 hm² 增长到 2007 年的 2.26×10^5 hm², 占有林地面积的 27.06%^[1], 已成为该地区的主要林型。准确估算橡胶林的生物量, 对理解我国热带地区植被碳储量和固碳潜力具有重要意义^[2-3]。

目前对西双版纳橡胶林生物量的研究主要是在样地尺度上, 通过实测方法进行。如唐建维等^[4]通过收获法实测了橡胶样木的生物量, 建立了以胸径平方乘以树高为自变量的生物量相对生长方程; 贾开心等^[5]认为海拔对生物量具有较大影响, 选伐不同海拔段的样木, 建立了适合计算低、中、高海拔段橡胶树生物量的生长方程。这些实测数据和生长方程已被广泛应用于西双版纳橡胶林生物量、碳储量和固碳潜力的研究中^[6,3]。

传统实测方法获得的生物量准确可靠, 但只能在样地尺度上进行, 在区域尺度, 该法耗时耗力, 难

以实现, 而遥感技术是一种有效、快捷获取区域尺度生物量分布信息的方法, 广泛用于生物量的估算研究^[7-9]。目前遥感估算生物量的方法主要有回归分析法、人工神经网络法和数学模型法^[10]。如郭志华等^[11]利用逐步回归技术分别建立粤西地区针叶林和阔叶林蓄积量估算模型, 进而估算了粤西地区的森林生物量; 王立海和邢艳秋^[12]利用神经网络法模拟了吉林省汪清天然林的生物量; Muukkonen 和 Heiskanen^[13]利用 ASTER 数据第 2 波段和第 3 波段建立了芬兰南部针叶林生物量的数学模型。而热带地区生物量的精确估算一直是遥感应用的一大难题^[14], 因为热带地区植被群落结构复杂, 地物反射率受很多因素的影响, 生物量与遥感数据的相关性较低, 建立精度较高的生物量估算模型比较困难。如杨存建等^[15]用回归分析法建立西双版纳天然林生物量估算模型时, 模型的复相关系数仅为 0.118。但准确估算热带地区森林植被的生物量至关重要^[16]。为此, 本研究以橡胶林为例, 分析生物量与 TM 影像各波段反射率、植被指数的相关性,

* 收稿日期: 2011-03-28

基金项目: 中国科学院“创新 2020”战略性先导科技专项(XDA05050200)。

作者简介: 徐万荣(1985-), 男, 云南人, 硕士生, 主要从事景观生态学方面的研究。

通讯作者: 马友鑫, 男, 博士, 研究员, 主要从事景观生态学方面的研究, E-mail: may@xtbg.ac.cn。

建立生物量的遥感估算模型并绘制生物量分布图,为热带地区生物量的遥感估算提供借鉴和参考,同时为我国森林碳储量和固碳潜力的研究提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况 西双版纳(21°09′~22°36′N, 99°58′~101°50′E)地处东南亚热带北缘,属于东亚季风区,与缅甸、老挝接壤(图1),属于无量山脉和怒山山脉的余脉,整个地势为周围高,中部低,境内地势起伏较大,最高海拔2429 m,最低海拔475 m^[1]. 年平均气温21.4℃,年均降雨量1539 mm,分为明显的雨季(5~10月)和旱季(11月~次年4月),雨季降水量为1256 mm,占总降雨量的82%,旱季降水283 mm,占总降雨量的18%^[17]. 主要的植被类型有热带季节雨林、热带山地雨林和南亚热带季风常绿阔叶林. 该地区温度高、降水充沛、低风速等自然条件,是种植橡胶的良好地区,截止2007年,植胶面积已占总面积的11.8%,主要集中在海

拔400~1000 m范围内,种植海拔上限达1400 m^[1].

1.2 研究方法 本研究采用逐步线性回归分析,以Landsat TM影像的反射率和植被指数为自变量,构建生物量的遥感估算模型.

1.2.1 样地生物量 据2007年西双版纳地区遥感影像解译的土地利用图^[1],于2010年3~4月在橡胶林均质斑块内设置样地共93个(图1),每个样地距离林缘至少200 m,样地水平投影面积为30 m×30 m. 考虑样地的代表性,选择的样地包括了不同林龄(对应不同径级)、不同海拔、不同坡度(表1). 在样地内进行每木检尺,测量胸径(离地1.3 m处),记录坡度、海拔、林龄等信息,并用高精度GPS对样地进行定位.

样地单株橡胶树生物量采用下式计算^[18]:

$$W = 0.136D^{2.437}, \quad (1)$$

式中 W 为每株干重(kg); D 为胸径(cm).

然后,计算样地橡胶树生物量,并转换成单位面积生物量($t \cdot hm^{-2}$).

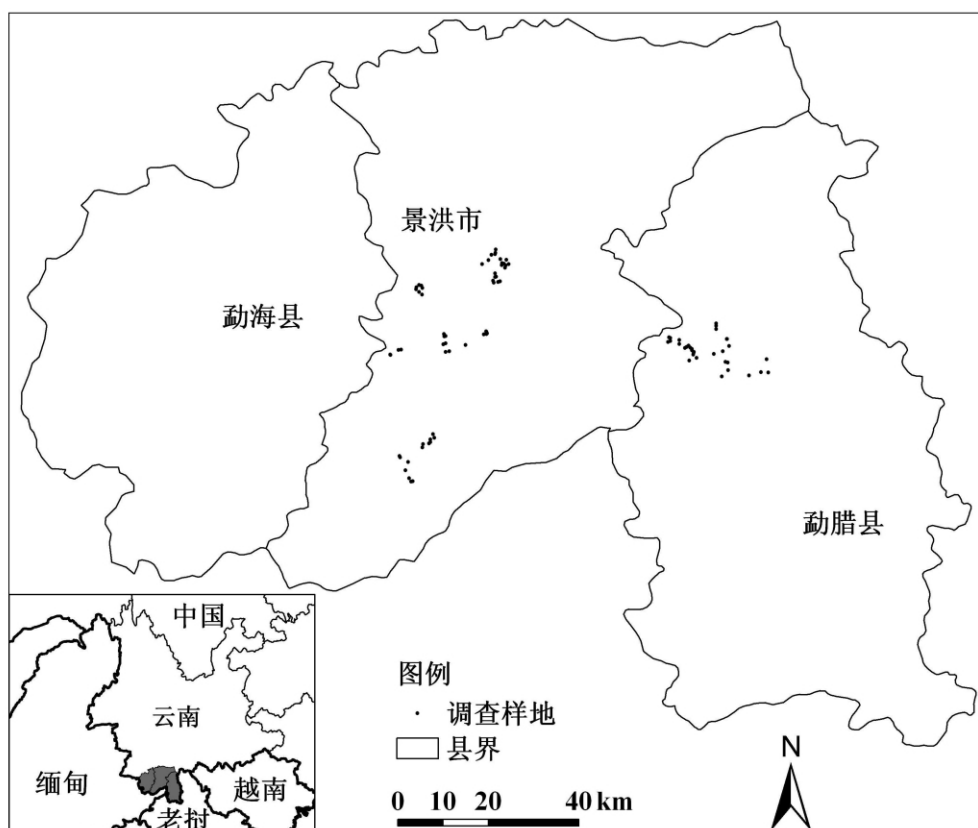


图1 研究区和样地分布图

Fig. 1 Study area and distribution of sample plots in Xishuangbanna

表 1 样地概况 (n=93)

Tab. 1 Description of sample plots of rubber plantations in Xishuangbanna (n=93)

	林龄/a	平均胸径/ cm	海拔/m	坡度/(°)
平均值	18.3	20.09	710.8	15.7
标准差	10.1	5.26	101.48	10.8
最小值	2	3.17	529	0
最大值	45	32.01	990	37

1.2.2 TM 影像反射率和植被指数 选择 2010 年 4 月 3 日的 Landsat TM 影像,行列号为 p130r45,几乎覆盖研究区所有橡胶林,云量小于 1%。对影像进行如下校正。

(1) 正射校正 应用 Erdas 9.1 的 Landsat 正射校正模块,以研究区 1999 年 12 月 25 日的 ETM+ 影像为参考,在 TM 影像上选择 32 个均匀分布的地面控制点(主要为道路交叉口、桥梁等明显地物),平均误差为 0.58 个像元,以西双版纳地区 DEM (Digital Elevation Model) 数据作为海拔输入数据,对影像进行正射校正,消除地形的影响,用 3 次卷积法重采样到 30 m 分辨率,输出投影选择 UTM 投影,椭球体为 WGS 84。其中 ETM+ 影像为经过地形校正的 L1T (Level 1 Terrain Correction) 产品,源于美国地质调查局 (USGS) 网站 (<http://landsat.usgs.gov/index.php>); DEM 数据分辨率 30 m,源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn/>)。

(2) 大气校正 为消除大气对地物真实反射率的影响,需要对影像进行大气校正。大气校正前,采用 USGS 文档提供的方法进行辐射定标^[9],将影像的 DN 值转换为具有实际意义的光谱辐射值,再利用最暗像元去除法 (Dark object subtraction) 进行大气校正^[9],把光谱辐射值转换为地物反射率。

根据大气校正得到的反射率计算植被指数。考虑热带地区橡胶林的结构特点和影像的光谱特征,选择适合本研究的红波段 (TM3)、近红外波段 (TM4) 和中红外波段 (TM5, TM7) 组成植被指数,包括归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI)、比值植被指数 (Ratio vegetation index, RVI) 和绿度植被指数 (Green index, GI),这些植被指数对热带地区生物量变化敏感,对橡胶林

生物量具有较好的指示作用^[21-22],算式如下:

$$\text{DNVI} = \frac{\text{TM4} - \text{TM3}}{\text{TM4} + \text{TM3}}, \quad (2)$$

$$\text{RVI} = \frac{\text{TM4}}{\text{TM3}}, \quad (3)$$

$$\text{GI} = \frac{\text{TM4}}{\text{TM4} + \text{TM5} + \text{TM7}}, \quad (4)$$

式中 TM3 ~ TM7 为 TM 影像相应波段的反射率。

以西双版纳地区 2007 年土地利用图为参考^[1],采用最大似然监督分类法^[23]对 TM 影像进行分类,得到 2010 年土地利用图,并提取橡胶林分布面积,用于橡胶林生物量分布图的绘制。

1.2.3 生物量估算模型 根据样地的经度和纬度,在 GIS 环境下提取样地的反射率和植被指数。为减小样地与像元的位置误差,以样地周围 3 × 3 像素窗口的平均值代表样地的植被指数^[24-25]。将 93 个样地按 2:1 随机分为 2 组,一组为建模组 (65 个样地),用于生物量与遥感数据的相关性分析以及生物量估算模型的建立,一组为检验组 (28 个样地),用于模型精度的检验。

分析建模组生物量与 TM 影像反射率、植被指数的相关性,以反射率和植被指数为自变量,生物量为因变量,利用逐步线性回归分析方法,建立生物量估算模型。为满足正态要求,将所有变量进行对数转换^[23]:

$$\ln(Y) = b_0 + b_1 \ln(X_1) + \dots + b_n \ln(X_n), \quad (5)$$

式中 Y 为因变量 (生物量), $X_1 \sim X_n$ 为自变量 (反射率或植被指数), $b_0 \sim b_n$ 为回归系数。

用模型计算检验组样地的生物量,并和实测值进行比较,利用平均相对误差 (Mean relative error, MRE) 对模型进行检验^[26],并绘制实测值与预测值之间的关系图。MRE 的计算公式为:

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|, \quad (6)$$

式中, n 为检验样本数, y_i 为样地实测值, $\hat{y}_i$ 为模型预测值。

2 结果与分析

2.1 相关性分析 从表 2 看出,生物量与可见光波段反射率 (TM1, TM2 和 TM3) 呈显著负相关 ($P < 0.01$),与中红外波段反射率 (TM5, TM7) 也呈显著负相关 ($P < 0.05$),尤其与可见光波段反射率相

关性较高.同时还看出,生物量与 NDVI, RVI 和 GI 植被指数均成显著正相关 ($P < 0.01$), 其中与 GI 植被指数的相关性最高.

2.2 生物量估算模型的建立 基于公式(5), 在 SPSS 16.0 环境下, 通过对上述 6 个波段的反射率和 3 个植被指数共 9 个变量的逐步回归分析(将显著水平 0.05 作为筛选和剔除变量的条件), 得到如下生物量估算模型:

$$\ln(B) = 10.30 \ln(GI) + 10.82, \quad (7)$$

式中 B 为生物量, GI 为绿度植被指数, 决定系数 R^2

为 0.524 ($P < 0.0001$).

GI 植被指数对生物量具有最好的指示作用, 从模型评价结果来看(图2), 模型对低生物量地区模拟偏高, 对高生物量地区有估算偏低趋势, 平均相对误差 MRE 为 39.8%.

2.3 生物量空间格局 根据影像解译结果, 西双版纳地区橡胶林面积为 $2.6 \times 10^5 \text{ hm}^{-2}$. 结合遥感数据, 根据公式(7) 计算生物量, 并绘制成该地区生物量分布图(图3).

表2 生物量与反射率、植被指数的相关性($n=65$)

Tabl. 2 Pearson's correlation coefficients among reflectance, vegetation indices and biomass ($n=65$)

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	NDVI	RVI	GI
生物量	-0.407 ^b	-0.324 ^b	-0.423 ^b	0.209	-0.255 ^a	-0.311 ^a	0.396 ^b	0.365 ^b	0.407 ^b

a: $P < 0.05$; b: $P < 0.01$; TM1 ~ TM7: TM 影像相应波段的反射率

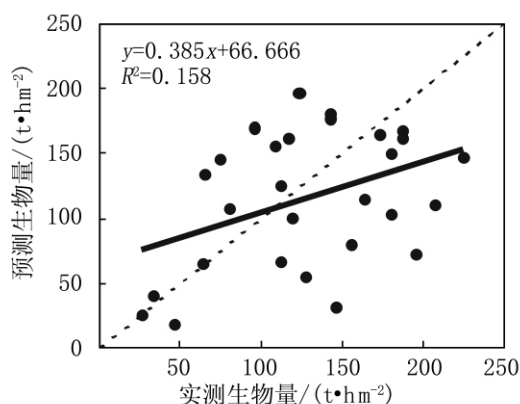


图2 生物量实测值与预测值比较,虚线为 1:1 线

Fig. 2 Observed versus predicted values of biomass, the dashed line is the 1:1 line

由图3看出,橡胶林生物量分布在 $1 \sim 291 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,平均值为 $(75.90 \pm 58.75) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 总生物量为 $1.97 \times 10^7 \text{ t}$ 干物质. 按面积统计, 7.15% 的橡胶林生物量介于 $1 \sim 100 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 30.13% 的橡胶林生物量在 $101 \sim 200 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间. 水平方向上,景洪市和勐腊县南部生物量较高, 总体上该地区生物量表现出从中心向四周逐渐递减的趋势. 将海拔高度 600 m 以下划分为一个等级, 1 000 m 以上因橡胶林面积较少划分为一个等级外, 中间每隔 100 m 划分一个等级, 共 6 个海拔等级, 按此统计橡胶林生物量和面积. 由图4看出,

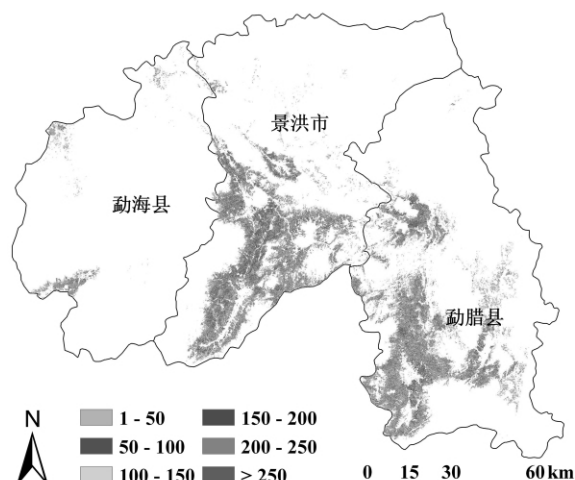


图3 橡胶林生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 分布图

Fig. 3 Map of biomass ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) for rubber trees in Xishuangbanna

随着海拔的增加,橡胶林面积、总生物量呈现出先增加、后减少趋势,橡胶林种植面积在 700 ~ 800 m 达最大,而生物量及总生物量最大值出现在 600 ~ 700 m 高度.

3 讨论

橡胶林生物量与 TM 影像 6 个波段反射率的相关系数在 $-0.423 \sim 0.209$ 之间,与可见光 3 个波段的相关性均达到 0.01 显著水平,与中红外 2 个波段的相关性均达到 0.05 显著水平,而该地区天然林生物量与 TM 影像 7 个波段的相关系数

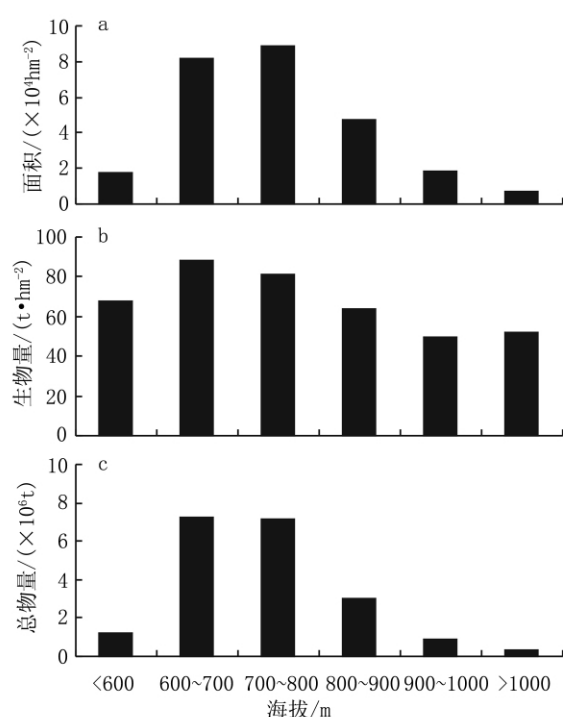


图4 橡胶林面积(a)、总生物量(b)和生物量(c)随海拔分布

Fig. 4 Altitudinal variation in area (a), biomass (b) and total biomass (c) of rubber plantations

在 $-0.201 \sim 0.032$ 之间,只有 TM5 与生物量的相关性达到 0.05 显著水平^[27]。可见,对于西双版纳地区,橡胶林生物量与遥感数据的相关性高于天然林生物量与遥感数据的相关性。一方面是因为橡胶林林冠结构相对单一,比天然林简单,冠层反射率的影响因素较少^[14];另一方面是橡胶林为人工林,林相整齐,林内几乎没有灌木、杂草等,样地生物量的调查更准确、可靠。

植被对可见光尤其是红波段(TM3)具有强烈的吸收作用,而对近红外波段(TM4)表现为高反射,两个波段的反射率及其衍生的植被指数(如NDVI植被指数)是生物量遥感反演中最常用的估算因子^[28],但NDVI的算式是非线性的,存在“饱和”问题,即植被越来越茂密时,NDVI植被指数无法同步增长,而中红外波段(TM5, TM7)受大气的影响较小,植被对其吸收率和叶片的透射率均较低,具有较小的“饱和”效应^[22]。Suratman等^[21]研究表明,中红外波段对橡胶林的林龄和蓄积量具有很好的指示作用。本研究选用上述波段构成植被指数,其中GI植被指数根据TM4, TM5和TM7计算,与生物量的相关性高于NDVI和RVI植被指数与

生物量的相关性,对生物量具有较好的指示作用。利用GI植被指数即可建立生物量估算模型,模型的决定系数 R^2 为0.524,远高于该地区天然林生物量遥感估算模型的决定系数0.118^[13]。

西双版纳地区大部分橡胶林(97.28%)的生物量小于 $200 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,这与唐建维等^[13]实测的生物量结果(47年的橡胶林生物量为 $250.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)接近。该地区生物量平均值为 $(75.90 \pm 58.75) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,总生物量为 $1.97 \times 10^7 \text{ t}$,而Li等^[2]估算的2003年橡胶林生物量碳储量为 $1.21 \times 10^7 \text{ t}$,相当于生物量 $2.42 \times 10^7 \text{ t}$,宋清海和张一平^[3]在此基础上估算得到2008年总生物量值为 $3.31 \times 10^7 \text{ t}$,本研究结果偏低,主要是估算方法不同、使用的数据源不同造成的。如Li等^[2]分别根据不同海拔段(海拔800 m以下、海拔800~1000 m和海拔1000 m以上)的生物量碳密度和面积推算橡胶林碳储量,本研究则是在像元尺度($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$)研究生物量,根据生物量分布图估算总生物量。

海拔是影响橡胶林生物量分布格局的主要因素。研究表明,海拔升高引起的气温降低会对植物生长和干物质积累产生负面影响^[29]。西双版纳山地气温随海拔的递减率为每100 m下降 $0.53 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ^[30],橡胶林生物量随着海拔的升高而减小^[3]。本研究中,橡胶林生物量在海拔600 m以上随海拔的升高而减小,海拔900 m以后生物量基本保持稳定,与以往研究结果相似。但值得注意的是,生物量最大值($88.13 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)并没有出现在最低海拔段(600 m以下),而是在海拔600~700 m之间,这和实际情况并不矛盾。因为西双版纳地区存在明显的山地逆温现象^[31],低洼地区每隔数年或十几年有可能出现霜冻,高出谷底几十米或几百米的山坡上,最低气温反而比谷底高 $4 \sim 6 \text{ } ^\circ\text{C}$ ^[32],因此低海拔区(600 m以下)并不是橡胶树生长的最适地段,高出谷底100~400 m而海拔小于800~1000 m的坡地,更适合橡胶树的生长^[32]。

林龄对橡胶林生物量具有重要影响,生物量随林龄的增加不断积累^[13]。西双版纳地区橡胶林面积是由内往外逐年扩展,中心区林龄较大,往外林龄减小,与此相应,生物量水平方向上表现出从中心向四周逐渐减小的趋势。

综上所述,遥感数据对橡胶林生物量具有较好的指示作用,而生物量和海拔、林龄密切相关,今后模拟生物量分布格局时,除利用遥感数据外,增加

海拔和林龄作为预测因子,将有助于预测精度的提高^[28].

参考文献:

- [1] 李增加,马友鑫,李红梅,等. 西双版纳土地利用/覆盖变化与地形的关系 [J]. 植物生态学报,2008,32(5):1 091-1 103.
- [2] LI HM, MA Y X, AIDE T M, et al. Past, present and future land-use in Xishuangbanna, China and the implications for carbon dynamics [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 16-24.
- [3] 宋清海,张一平. 西双版纳地区人工橡胶林生物量、固碳现状及潜力 [J]. 生态学杂志,2010,29(10): 1 887-1 891.
- [4] 唐建维,张建候,宋启示,等. 西双版纳热带人工雨林生物量及净第一性生产力的研究 [J]. 应用生态学报,2003,14(1): 1-6.
- [5] 贾开心,郑征,张一平. 西双版纳橡胶林生物量随海拔梯度的变化 [J]. 生态学杂志,2006,9(25): 1 028-1 032.
- [6] 杨景成,黄建辉,唐建维,等. 西双版纳农田弃耕后橡胶园的建立对碳的固存作用 [J]. 植物生态学报,2005,29(2): 296-303.
- [7] 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.
- [8] DONG J, KAUFMANN R K, MYNENI R B, et al. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(3): 393-410.
- [9] ANAYA J A, CHUVIECO E, PALACIOS - ORUETA A. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(4): 1 237-1 246.
- [10] 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): 1 317-1 322.
- [11] 郭志华,彭少麟,王伯苏. 利用 TM 数据提取粤西地区的森林生物量 [J]. 生态学报,2002,22(11): 1 832-1 839.
- [12] 王立海,邢艳秋. 基于人工神经网络的天然林生物量遥感估测 [J]. 应用生态学报,2008,19(2): 261-266.
- [13] MUUKKONEN P, HEISKANEN J. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99(4): 434-447.
- [14] LU D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(7): 1 297-1 328.
- [15] 杨存建,刘纪远,张增祥. 热带森林植被生物量遥感估算探讨 [J]. 地理与地理信息科学,2004,20(6): 22-25.
- [16] FOODY G M, BOYD D S, CUTLER M E J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(4): 463-474.
- [17] CAO M, ZHANG J H. Tree species diversity of tropical forest vegetation in Xishuangbanna, SW China [J]. Biodiversity and Conservation, 1997, 6(7): 995-1 006.
- [18] 唐建维,庞家平,陈明勇,等. 西双版纳橡胶林的生物量及其模型 [J]. 生态学杂志,2009,10(28): 1 942-1 948.
- [19] CHANDER G, MARKHAM B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges [J]. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 2003, 41(11): 2 674-2 677.
- [20] SONG C, WOODCOCK C, SETO K, et al. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75(2): 230-244.
- [21] SURATMAN MN, BULL G Q, LECKIE DG, et al. Prediction models for estimating the area, volume, and age of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations in Malaysia using Landsat TM data [J]. International Forestry Review, 2004, 6(1): 1-12.
- [22] 张志东,臧润国. 基于植被指数的海南岛霸王岭热带森林地上生物量空间分布模拟 [J]. 植物生态学报,2009,33(5): 833-841.
- [23] WIJAYA A, LIESENBERG V, GLOAGUEN R. Retrieval of forest attributes in complex successional forests of Central Indonesia: Modeling and estimation of bitemporal data [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(12): 2 315-2 326.
- [24] LU D, MAUSEL P, BROND ZIO E, et al. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 198(1/3): 149-167.
- [25] 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 Man-

- agement, 2006, 225(1/3): 378-390.
- [26] 闵志强, 孙玉军. 长白落叶松林生物量的模拟估测 [J]. 应用生态学报, 2010, 6(21): 1 359-1 366.
- [27] 杨存建, 刘纪远, 黄河, 等. 热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析 [J]. 地理研究, 2005, 24(3): 473-479.
- [28] ZHENG D, RADEMACHER J, CHEN J, et al. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a managed landscape in northern Wisconsin, USA [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(3): 402-411.
- [29] TANNER E V J, KAPOV V, FRESKOS S, et al. Nitrogen and phosphorus fertilization of *Jamaican montane forest trees* [J]. Journal of Tropical Ecology, 1990, 6(2): 231-238.
- [30] 郑征, 李佑荣, 刘宏茂, 等. 西双版纳不同海拔热带雨林凋落量变化研究 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 884-893.
- [31] 王科, 郭玉清, 钟绍怀. 西双版纳山地逆温的研究 [J]. 云南热作科技, 1991, 14(4): 1-11.
- [32] 林茂. 地面逆温与植被倒置 [J]. 气象, 1977, 3(1): 16-18.

Estimating biomass for rubber plantations in Xishuangbanna using remote sensing data

XU Wan-rong^{1,2}, MA You-xin¹, LI Hong-mei¹, LIU Wen-jun¹

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden,

Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Biomass of 93 sample plots for rubber plantations in Xishuangbanna was calculated from field measurements of diameter at breast height (DBH) using an allometric equation. The biomass was correlated with reflectance and various vegetation indices derived from Landsat TM image with acquisition time close to the field campaign time using the Pearson correlation method. An estimation model for biomass was developed using step-wise linear regression analysis and a spatially explicit biomass map of rubber plantations was produced. The results showed that biomass was negatively correlated with the visible bands (TM1, TM2 and TM3) at the 0.01 level, negatively correlated with TM5 and TM7 at the 0.05 level and positively correlated with the normalized difference vegetation index (NDVI), ratio vegetation index (RVI) and green index (GI) at the 0.05 level. GI was the best estimator for biomass. Simulated biomass ranged from 1 to 291 t · hm⁻² with an average of 75.90 and standard deviation of 58.75 t · hm⁻². The total amount of biomass was estimated as 1.97 × 10⁷ t. High biomass values were distributed in the southern parts of Jinghong City and Mengla County. Biomass first increased and then decreased with increasing elevation and had the highest value between 600 and 700 m.

Key words: rubber plantations; biomass; remote sensing; reflectance; vegetation indices