

基于 TM 遥感影像的湿地松林生物量研究

马泽清^{1,2}, 刘琪璟^{1*}, 徐雯佳^{1,2}, 李轩然^{1,2}, 刘迎春^{1,2}

(1 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 利用江西千烟洲地区 2005 年 Landsat5 TM 遥感图像数据和同期野外调查获得的 28 个样方湿地松 (*Pinus elliptica*) 各器官生物量数据, 分析了植被指数、影像变换 (主成分分析, 缨帽变换) 结果与森林各器官生物量之间的相关关系, 进而建立了光谱—植被指数与生物量多元回归模型。湿地松林各器官与遥感光谱、植被指数拟合相关性大小依次为: 叶生物量 > 枝生物量 > 地上生物量 > 树干生物量。通过多元回归模型计算出湿地松林叶生物量平均为 $573 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$; 地上生物量平均为 $6628 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 低于样地调查平均值。单一植被指数与生物量相关性较低, NDVI 并不适用于盖度较大的湿地松林; 遥感影像经主成分分析后生物量光谱模型的相关系数略有提高, 缨帽变换后反而使模型的相关系数降低。

关键词: 遥感; 植被指数; 森林; 生物量; 千烟洲

中图分类号: Q948 TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3037(2008)03-0467-12

森林是陆地生态系统最主要的碳库之一。准确地测定森林生物量, 是编制国家温室气体排放清单、进行陆地碳循环研究以及气候变化模型研究的需要^[1]。随着京都议定书的实施, 估算区域森林生物量成为一项尤为紧迫的工作。

区域生物量通常用样地清查法估算, 而样地调查只是在小尺度上测定碳储量, 要解决区域大尺度上森林固碳的问题, 必须借助遥感手段。 IPCC 强调利用图像光谱信息和生物量的相关关系来估测森林的碳储量, 此方法适合于区域尺度上的研究。如何有效利用有限的点观测数据评价区域生态系统碳循环机制是目前遥感应应用研究的重要课题之一。

遥感适用于大尺度土地利用变化以及森林碳库的估计, 特别是地上生物量的研究^[1]。利用卫星图像分析生态系统生物量是研究区域生态格局的重要手段。生物量光谱经验模型有较大适宜性, 能较好地反映出生物量空间分布格局。遥感数据中近红外波段和红光波段包含着大量的植被信息, 这些波段间的不同组合方式统被称为植被指数 (Vegetation indices, VI), 可以直接或间接地用于估算植被的绿色生物量和植被净第一性生产力等^[2]。运用植被指数和实地测量结果建立不同的线性和非线性模型, 可以估计地上生物量^[3-6]。有研究表明, 地上生物量与植物生长季节内最小的可见光反射率存在着负相关关系^[7], 可据此建立生物量遥感统计模型。通过光谱信息和地面实测数据建立的相关估算模型, 对于复杂的森林系统相关性分析较差^[8-10], 而对于单一的森林类型^[11]、湿地植被^[12]、干旱地区和半干旱地区植被生物量^[13, 14]以及草原生物量^[15, 16]的相关性分析效果较好。制作森林生物量分

收稿日期: 2006-11-09 修订日期: 2007-10-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (2002CB412506)。

第一作者简介: 马泽清 (1983-), 硕士, 主要从事植被生态及遥感的研究。 E-mail: mazz@gsnr.ac.cn

* 通讯作者简介: 刘琪璟, 博士, 研究员, 主要从事森林生态学及遥感应应用研究。 E-mail: liuqijun@mail.com

致谢: 感谢 Laum Edise 博士修改英文摘要。

布图主要有两种方法:一是直接根据光谱与生物量建立模型;二是根据生物量的关系对遥感专题图进行转化^[17]。

可见光和近红外波段与叶绿素作用明显;微波可以穿透天然植被和地表土壤的一定深度,可直接用于植被(尤其是树干、树枝生物量)的估算^[2,18],也可用来估测森林生物量。激光雷达估算生物量的方法也正逐步受到重视^[19,20],而应用光学和微波遥感相结合的方法估算复杂森林生态系统生物量的研究报道也越来越多^[21,22]。

Landsat TM影像共有7个通道,包括可见光、近红外、短波红外和热红外等,在生态学研究上有广泛的应用。该影像观测时间序列较长,对植被信息比较敏感,地面分辨率在30m左右,基本上满足森林调查的需要。如果单纯考虑光谱信息因素,在研究森林结构上TM优于分辨率较高的HRV SPOT卫星^[23]。国内也有不少用TM的波段数据建立森林生物量估算模型^[9,24],但往往借用地面基础数据,缺乏专门从地面到遥感影像的研究,涉及人工针叶林的生物量遥感研究则更少。归一化植被指数(NDVI)被广泛应用于解析植被生物量和生产力,但多数模型估计缺乏大量的实测数据验证。而要提高遥感模型在碳汇估测上的精度,充足的地面观测数据是必需的。第四次全国森林资源清查资料表明:我国针叶林面积($5.71 \times 10^7 \text{ hm}^2$)略高于阔叶林($5.66 \times 10^7 \text{ hm}^2$),有必要建立针叶林生物量遥感估测模型。

由于森林生态系统较为复杂,不仅由乔木、灌木和草本植物形成垂直结构,而且由于地形和光照等因素形成复杂的水平结构。乔木层又分化为树干、树枝和树叶等器官,大多数遥感应用研究只限于乔木层总生物量或蓄积,很少分器官进行讨论。

我国南方曾经大面积造林,其中湿地松(*Pinus elliotii*)原产于美国,生长快、松脂产量高,在亚热带地区被广泛引种^[25],已经成为红壤丘陵区重要的人工林树种。本文旨在通过野外调查,借用可靠的湿地松生物量模型,获得地面实测数据;通过高精度GPS定位,应用同期TM影像,结合空间信息技术建立遥感生物量估算模型,分析植被指数、影像变换(主成分分析,缨帽变换)结果与湿地松林各器官生物量之间的相关关系,阐明湿地松林生态系统生物量分布格局。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

干烟洲试验站位于江西省中部吉泰盆地典型红壤丘陵区,东经 $115^{\circ}04'13''$,北纬 $26^{\circ}44'48''$ 。试验区总面积约为 200 hm^2 。海拔多在100m左右,相对高度20~50m,属典型的红壤丘陵区。根据1985~2004年气象数据总结^①:试验区年平均气温 17.9°C ;平均降水量 1489 mm ;年日照时数 1406 h ;太阳年总辐射量 4349 MJ/m^2 ;具有典型的亚热带季风气候特征。主要土壤类型有红壤、水稻土、潮土、草甸土等,成土母质多为红色砂岩和砂砾岩^[26]。

试验区以1985年左右开始栽植的人工林为主,主要树种有湿地松、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schinus molle*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等,以及柑橘(*Citrus reticulata*)、橙(*Citrus sinensis*)、板栗(*Castanea mollissima*)等经济林果植物;灌丛以白栎(*Quercus fabri*)、櫟木(*Loropetalum chinense*)、美丽胡枝子(*Lespedeza formosa*)分布较广。草本植物以刺芒野古草(*Arundinella setosa*)、山芝麻(*Helicteres angustifolia*)为主,近年

① 刘琪璟,张时煌,杨风亭,等.干烟洲试验站气象要素分布特征综述之一—热量及水分条件.干烟洲生态试验站第四届学术年会论文集,2006:97~115.

以来耐阴蕨类生长十分旺盛, 物种已经超出 20 多种, 如扇叶铁线蕨 (*Adiantum flabellatum*)、狗脊蕨 (*Woodwardia japonica*)、阔鳞鳞毛蕨 (*Dryopteris championii*) 等^[27]。为便于对湿地松林的研究, 同时对试验区其他类型也进行了调查分析。

1.2 研究方法

1.2.1 地面数据获取和样地定位

2005年 8月至 10月, 共调查湿地松林样地 28 块。样地面积一般 $20\text{m} \times 20\text{m}$ 选在 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 范围内为均质的地段。对样地内的树木进行每木检尺, 根据湿地松各器官生物量模型^[28] 计算生物量。从中选择面积大于 100m^2 的 21 块样地, 对生物量与遥感影像灰度值和植被指数进行回归分析。

在每个样地的中心, 用托普康 (Topcon) 公司的 Tubo G2 差分 GPS (亚米级精度), 测 3 次平均后作为样地的坐标值。

1.2.2 图像处理

采用 2005-09-20 Landsat5 卫星接收的 TM 影像数据, 其轨道号为 P122/R41, 像元大小为 25m 。选用一景 2003-10-26 空间分辨率 4m 的 IKONOS 多光谱图像作为几何校正参考图像。根据千烟洲试验站形状和位置, 选出 32 个较为理想的地面控制点 (GCP)。使用托普康 (Topcon) 公司的 Tubo G2 差分 GPS (亚米级精度), 每个点测 3 次平均后作为控制点的坐标值。运用一次多项式模型、最近邻插值法, 对影像进行几何校正, 校正的整体误差小于 1 个像素, X 轴均方根误差 0.89 Y 轴均方根误差 0.75 。

利用校正好的 KONOS 图像作为参考图像, 选出 42 个地面控制点, 用最近邻法插值, 一次多项式模型对 TM 影像进行校正, 校正的整体误差 R_{RMSEY} 小于 0.35 个像素, X 轴均方根误差是 0.32 Y 轴均方根误差是 0.29 。使用经纬度投影, WGS1984 坐标系。

提取各样地的灰度值, 根据相关公式计算表观反射率^[37]。处理遥感图像, 利用波段数据分析光谱反射特征, 建立生物量—光谱反射率回归模型, 通过模型推算区域生物量和生产力。通过模型计算, 若出现负值等异常值, 则根据生物量范围 (叶生物量: $0 \sim 18.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 地上生物量: $0 \sim 103.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 进行设定^[17], 即小于最小值取最小值, 大于最大值取最大值。通过样地观测结果与遥感模型估算的生产力比较来评价模型的可靠性与实用性。

1.2.3 植被指数选取

植被指数是指由多光谱数据经线性与非线性组合构成的对植被有一定意义的各种数值^[29]。植物光谱中的近红外与可见光红波段两个典型的波段值, 已被广泛用于定性和定量评价植被覆盖及其生长活力。常见的植被指数有:

归一化植被指数 (NDVI): $\text{NDVI} = (\text{TM}_4 - \text{TM}_3) / (\text{TM}_4 + \text{TM}_3)$

比值植被指数 (RVI): $\text{RVI} = \text{TM}_4 / \text{TM}_3$

差值植被指数 (DVI): $\text{DVI} = \text{TM}_4 - \text{TM}_3$

正交植被指数 (PVI): $\text{PVI} = 0.939(\text{TM}_4) - 0.344(\text{TM}_3) + 0.09$

土壤校正植被指数 (SAVI): $\text{SAVI} = (1 + L) [(\text{TM}_4 - \text{TM}_3) / (\text{TM}_4 + \text{TM}_3 + L)]$

L 是土壤调节系数, 接近于 0.5 ^[30]。

1.2.4 地形因子提取

以经几何精校正的千烟洲 (1:5000) 地形图为底图, 对等高线进行矢量化, 对格式和坐标进行转化, 经过编辑处理, 生成数字高程图 (DEM), 并在 ARCGIS 中生成不规则三角形格网

(TN) 然后转化成规则格网 (Grid) 提取各样地的坡向 (0~360°的罗盘方向)、坡度和高程。

1.2.5 图像变换

对 TM 图像进行缨帽变化, 产生亮度 (Bright B)、绿度 (Green G) 和湿度 (Wet W) 如下式所示:

$$Bright = 0.3037 TM_1 + 0.2793 TM_2 + 0.4743 TM_3 + 0.5585 TM_4 + 0.5082 TM_5 + 0.1863 TM_7$$

$$Green = -0.2848 TM_1 - 0.2435 TM_2 - 0.5436 TM_3 + 0.7243 TM_4 + 0.0840 TM_5 - 0.1800 TM_7$$

$$Wet = 0.1509 TM_1 + 0.1973 TM_2 + 0.3279 TM_3 + 0.3406 TM_4 - 0.7112 TM_5 - 0.4572 TM_7$$

用 PC 遥感软件自带的主成分分析模块进行主成分变换, 使用 TM 图像的 6 个波段 (第 6 波段除外) 产生第一、二、三主成分的分量分别为 PCA₁、PCA₂ 和 PCA₃。

2 结果

2.1 不同森林类型光谱特征

不同森林类型灰度值和表观反射率见图 1。不同森林类型在 TM4 和 TM5 波段灰度值和表观反射率差别较大, 而在可见光波段光谱差别不大; 各林型的灰度值和反射率变化趋势是一致的。近红外波段 (TM4) 能对绿色植物能产生高反射, 主要是叶内组织在起作用, 这种差别随植被叶冠结构和覆盖度的变化而变化。天然马尾松林和灌木林灰度值和表观反射率较高, 是因为叶生物量较多^[39], 灌木层盖度较大; 阔叶林和橘林次之, 而针叶林的灰度值和反射率最小。在近红外光区, 阔叶树叶片中的海绵组织使它的反射明显高于没有海绵组织的针叶树^[31], 阔叶林的近红外辐射通常是针叶林的 1.5~2 倍^[32]。人工针叶林 (湿地松林、马尾松林和杉木林) 的波谱反射差异较小。针叶树种光谱与其叶片结构、叶绿素含量、针叶角度和叶分布等植被结构关系密切, 此外, 地形、植被覆盖率、大气和背景辐射等都会对其产生影响^[2]。

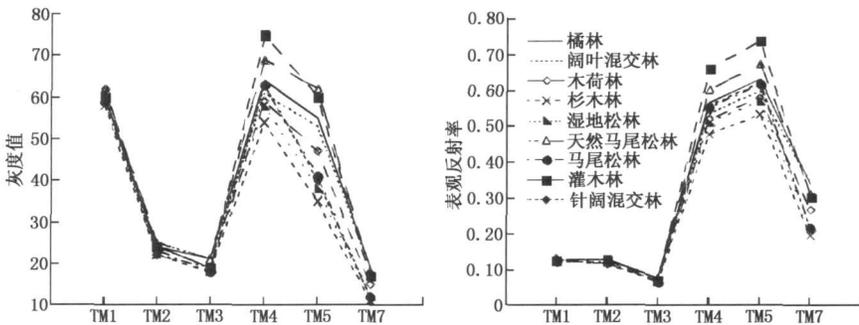


图 1 千烟洲不同森林类型 TM 影像灰度值和表观反射率曲线

Fig 1 Gray scale curves of TM image and apparent reflectance for different forest types in QYZ

2.2 植被指数与森林生物量相关性分析

植被指数和生物量计算结果见表 1。根据生物量模型和样地调查数据计算得出: 湿地松林叶生物量、枝生物量、树干生物量和总生物量分别为 713.1 632.4 805 和 7 432.8 m²。林分密度为 1 480 株·m⁻², 胸高断面积为 30.7 m²·hm⁻²。样地大小对单位面积生物量有一定的影响。样地面积过大, 工作量加大; 而样地面积过小, 则不能全面反映该样地森林的真实情况。样地面积设为 20m×20m 基本上满足了生物量估算模型建模的需要。

表 1 千烟洲湿地松林植被指数和生物量

Table 1 Vegetation indices and biomass of Pinellotti forest in QYZ

样方号	面积	NDVI	DVI	RV1	PVI	SAVI	密度	胸高断面面积	叶生物量	枝生物量	树干生物量	地上生物量
1	900	0.53	39.00	3.29	46.83	0.80	1.289	28	667	1.470	4.278	6.643
2	900	0.54	44.00	3.32	52.71	0.80	1.300	38	934	2.014	6.350	9.693
5	400	0.50	38.00	3.00	47.08	0.75	950	26	642	1.346	4.338	6.587
9	400	0.53	40.00	3.22	48.36	0.78	1.400	36	864	1.894	5.732	8.827
13	400	0.50	38.00	3.00	47.08	0.75	1.925	33	776	1.737	4.749	7.475
20	400	0.50	38.00	3.00	47.08	0.75	1.625	32	764	1.696	4.786	7.483
26	400	0.49	38.00	2.90	47.67	0.73	1.300	33	767	1.763	5.414	8.299
39	400	0.56	45.00	3.50	53.06	0.83	1.400	29	685	1.515	4.351	6.776
51	400	0.56	41.00	3.56	48.11	0.84	1.275	30	656	1.784	5.086	7.950
52	400	0.49	37.00	2.95	46.14	0.74	1.900	29	656	1.533	4.284	6.681
57	400	0.51	39.00	3.05	48.02	0.75	1.500	30	669	1.611	4.583	7.145
58	400	0.54	47.00	3.35	56.12	0.81	1.525	30	697	1.558	4.377	6.848
62	400	0.47	37.00	2.76	47.33	0.70	1.100	20	462	1.060	2.997	4.675
63	400	0.49	36.00	2.89	45.20	0.72	1.475	29	669	1.494	4.266	6.645
66	400	0.44	32.00	2.60	42.04	0.66	1.400	32	757	1.677	4.947	7.658
68	400	0.51	40.00	3.11	48.96	0.76	1.825	37	882	1.951	5.600	8.720
72	400	0.53	40.00	3.22	48.36	0.78	1.275	23	536	1.184	3.280	5.154
37	400	0.50	42.00	3.00	52.02	0.75	1.425	23	484	1.316	3.835	5.924
60	400	0.51	40.00	3.11	48.96	0.76	1.975	29	570	1.548	4.865	7.331
74	400	0.53	42.00	3.21	50.83	0.78	933	25	596	1.288	4.015	6.145
75	400	0.55	44.00	3.44	52.12	0.82	1.156	26	608	1.334	3.938	6.099
8	100	0.53	40.00	3.22	48.36	0.78	1.600	40	966	2.111	6.328	9.767
38	100	0.45	33.00	2.65	42.98	0.67	1.700	29	639	1.533	4.673	7.128
40	100	0.52	43.00	3.15	52.37	0.77	1600	40	952	2.086	6.183	9.569
42	100	0.53	43.00	3.26	51.77	0.79	2.000	39	896	2.037	5.844	9.087
43	100	0.53	46.00	3.30	55.18	0.80	2.000	32	669	1.829	5.186	8.078
45	100	0.51	37.00	3.06	45.54	0.76	1.100	33	793	1.703	5.457	8.296

注: 生物量单位为 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), 林分密度单位为 ($\text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$), 胸高断面面积单位为 ($\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$).

整体上看(表 2), 植被指数与生物量相关性较小, 均小于 0.4 说明不可以用单一的植被指数来估测林分生物量。众多植被指数中, PVI、NDVI 和 SAVI 对植被生物量相关性相对较好。波段数据中, 红光 (TM_3) 对生物量影响最为明显。 TM_2 、 TM_4 和 TM_7 波段对枝、树干和地上总生物量都是正相关, TM_3 、 TM_5 与各器官生物量呈负相关。正相关说明植被反射该波段光谱, 而负相关则相反。经主成分分析和缨帽变换后, 相关系数并没有提高, 反而有所降低。

2.3 湿地松林回归统计模型

通过光谱—植被指数生物量模型拟合发现, 仅用植被指数或光谱数据难以与生物量建立相关模型, 而使用多波段数据和植被指数多元回归则效果较好。湿地松林光谱—植被指数与各器官与拟合模型结果(表 3)中, 叶生物量与光谱相关性最明显, 多元线性回归后相关系数 (R) 可达 0.862 而地上总生物量与光谱的相关系数 (R) 为 0.716。生物量—光谱反射率回归模型对类型多样的南方人工针叶林而言并不理想, 但对纯林表现出了较强的相关性。森林的大部分生物量都是非绿色的, 而只有绿色的叶生物量与波段和植被指数相关性较高。相关性大小排序为: 叶生物量 > 枝生物量 > 地上生物量 > 树干生物量 > 林分密度。虽然叶生物量相关关系较显著, 但如果用叶生物量推算地上生物量, 可能造成较大的偏差, 因为叶生物量模型相关系数 (R^2) 只有 0.735^[28]。

表 2 湿地松林生物量与灰度值和植被指数相关系数

Table 2 Correlation coefficients for biomass estimation of *Pinus elliotii* forest by vegetation indices and spectral reflectance in digital number

相关系数	叶生物量	枝生物量	树干生物量	地上总生物量
TM ₁	0.083	-0.054	-0.118	-0.100
TM ₂	0.126	0.060	0.007	0.026
TM ₃	-0.243	-0.307	-0.257	-0.275
TM ₄	0.063	0.071	0.098	0.093
TM ₅	-0.204	-0.096	-0.156	-0.144
TM ₇	0.025	0.105	0.087	0.093
NDVI	0.266	0.344	0.318	0.331
DVI	0.169	0.204	0.213	0.214
RVI	0.248	0.329	0.301	0.314
PVI	0.102	0.120	0.141	0.138
SAVI	0.266	0.344	0.318	0.330
TM ₅ /TM ₇	-0.209	-0.231	-0.271	-0.268
TM ₅ -TM ₇	-0.341	-0.242	-0.320	-0.307
PCA ₁	-0.087	-0.049	-0.090	-0.081
PCA ₂	-0.040	0.054	0.070	0.065
PCA ₃	0.219	0.064	0.118	0.108
Height	-0.145	-0.127	-0.164	-0.157
Green	0.070	0.133	0.166	0.159
Wet	0.180	0.044	0.100	0.088

表 3 湿地松林各器官生物量回归最优模型

Table 3 The best fitted regressive models for organ specific biomass of *Pinus elliotii* forest

拟合项目	相关系数 R	判定系数 R ²	F值	显著性 Sig	回归模型
叶生物量	0.862	0.743	4.134	0.022	$11\ 594.663 + 33.145TM_1 + 60.515TM_2 - 768.449TM_3 + 225.790TM_4 - 27.689TM_5 + 50.638TM_7 - 4062.812RVI$
林分密度	0.642	0.412	1.003	0.482	$42\ 584.103 - 60.173TM_1 - 9.114TM_2 - 1\ 952.118TM_3 + 578.137TM_4 + 64.031TM_5 - 50.047TM_7 - 11\ 599.977RVI$
枝生物量	0.725	0.525	1.580	0.247	$18\ 970.701 + 31.795TM_1 + 87.984TM_2 - 1\ 179.758TM_3 + 342.428TM_4 - 39.941TM_5 + 92.166TM_7 - 6\ 047.201RVI$
树干生物量	0.702	0.492	1.385	0.309	$50\ 061.578 + 59.255TM_1 + 244.226TM_2 - 3077.428TM_3 + 931.190TM_4 - 164.759TM_5 + 323.572TM_7 - 15\ 757.713RVI$
地上生物量	0.716	0.513	1.504	0.269	$78\ 434.597 + 114.335TM_1 + 395.904TM_2 - 4\ 895.496TM_3 + 1\ 462.842TM_4 - 243.747TM_5 + 490.069TM_7 - 24\ 967.247RVI$

注: 生物量单位为 ($g \cdot m^{-2}$), 林分密度单位为 (株 $\cdot hm^{-2}$)。

野外调查数据与光谱数据、植被指数回归分析后, 筛选出最优叶生物量或地上生物量模型分别为:

$$B_{\text{leaf}} = 11594.663 + 33.145TM_1 + 60.515TM_2 - 768.449TM_3$$

$$+ 225.790 TM_4 - 27.689 TM_5 + 50.638 TM_7 - 4062.812 RVI \quad (1)$$

$$B_{above} = 78434.597 + 114.335 TM_1 + 395.904 TM_2 - 4895.496 TM_3 \quad (2)$$

$$+ 1462.842 TM_4 - 243.747 TM_5 + 490.069 TM_7 - 24967.247 RVI$$

2.4 湿地松林叶生物量遥感估算

湿地松林叶生物量与光谱相关较显著, 据此建立了叶生物量与各因子多元线形回归模型(表4)。

表4 湿地松林叶生物量回归模型

Table 4 Foliage biomass regression models of Pinus elliotii forest

判定系数 R ²	F值	显著性 Sig	回归模型
0.889	7.125	0.006	-1.255.177+30.507TM ₁ -1.437TM ₂ -61.157TM ₃ +24.915TM ₄ -43.838TM ₅ +72.564TM ₇ -9.095SLOPE+0.620ASPECT+6.751HT
0.767	2.93	0.072	3.914.141-191.326TM ₁ -87.452TM ₂ -228.572TM ₃ +90.436TM ₄ +35.306TM ₅ +28.507TM ₇ +116.610PCA ₁ -207.131PCA ₂ +157.141PCA ₃
0.743	4.134	0.022	11.594.663+33.145TM ₁ +60.515TM ₂ -768.449TM ₃ +225.790TM ₄ -27.689TM ₅ +50.638TM ₇ -4.062.812RVI
0.673	2.94	0.060	-4.336.741+35.476TM ₁ +67.174TM ₂ -55.974TM ₃ +17.274TM ₄ -109.258TM ₅ +240.574TM ₇ +802.878TM ₅ /TM ₇
0.648	2.63	0.081	24.760.245+37.851TM ₁ +37.015TM ₂ -1.054.348TM ₃ +315.62TM ₄ -27.85TM ₅ +53.881TM ₇ -49.630.841NDVI
0.628	1.499	0.29	18.970.745+54.823TM ₁ +49.385TM ₂ -68.695TM ₃ +156.992TM ₄ -25.241TM ₅ +6.921TM ₇ -165.643B-81.253G-49.825W
0.627	1.894	0.18	17.676.656+8.178TM ₁ -31.456TM ₂ -607.380TM ₃ +511.228TM ₄ -31.833TM ₅ +38.866TM ₇ -107.307G-154.553SAVI
0.575	1.525	0.271	-1.465.403+34.722TM ₂ -60.269TM ₃ +11.443TM ₄ -31.606TM ₅ +43.790TM ₇ -6.562SLOPE+0.339ASPECT
0.568	1.876	0.177	8.075.275+20.240TM ₁ +10.259TM ₂ -118.721TM ₃ +84.106TM ₄ -31.357TM ₅ +40.946TM ₇ -62.516G
0.557	2.308	0.102	-1909.1+44.858TM ₁ +37.979TM ₂ -68.218TM ₃ +17.981TM ₄ -37.74TM ₅ +52.916TM ₇
0.526	2.035	0.145	-2.827.901+45.444TM ₁ +36.332TM ₂ -13.948TM ₃ -37.248TM ₅ +51.488TM ₇ +305.535RVI
0.302	1.040	0.438	-267.760+32.411TM ₁ +9.283TM ₂ -70.431TM ₃ +9.520TM ₄ -145.284TM ₅ /TM ₇
0.280	1.265	0.333	16.230.962+1.031.46DVI-2.761.503RVI-859.615PVI-8.013.216SAVI

注: 生物量单位为 (g·m⁻²), 林分密度单位为 (株·hm⁻²)。

在拟合叶生物量回归模型过程中发现: 单纯的波段数据回归或用植被指数拟合效果并不是很好; 而把波段数据和植被指数相结合, 模型的判定系数较高。将各种植被指数作为自变量进行多元回归, 相关系数仅有 0.529 经方差分析, 该回归在 0.05 的水平上不显著; 直接用 TM 波段亮度值作为自变量进行回归, 相关系数是 0.747 该回归在 0.01 的水平上显著。用 TM 波段亮度值和比值植被指数 (RVI) 结合, 相关系数明显提高可达 0.862 经过方差分析, 在 0.05 的水平上显著; 用其他指数和各波段亮度值分析, 效果并不很理想。

由于研究区域在低山丘陵区, 地形对叶生物量估算影响较大。从 DEM 中提取各样方的坡度 (SLOPE)、坡向 (ASPECT)、高程 (HT), 将三者作为自变量估算湿地松林叶生物量, 多元统计分析后, 相关系数 (R) 从 0.862 上升到 0.943 该模型 (表 4) 在 0.01 水平上显著, 明显

提高了模型的可靠性。其中坡度对生物量回归模型影响最大,坡向次之;高程对丘陵区生物量影响较小。

用主成分分析结果和 TM波段亮度值一起作为自变量进行多元回归分析时,相关系数有所提高,达 0.876 该模型在 0.05 的水平上不显著;而用 TM各波段亮度值与缨帽变换后的绿度值(G),亮度值(L),湿度值(W)一起作为自变量分析多元回归分析时,相关系数有所降低,R值为 0.792 该回归在 0.05 的水平上不显著。缨帽变化后绿度和湿度值的引入,并没有提高模型的相关系数,反而使模型的相关系数有所降低。

2.5 千烟洲试验站生物量估算

千烟洲湿地松林共有像元 870 个 ($25\text{m} \times 25\text{m}$),面积为 54.4 km^2 。利用生物量光谱经验模型(1.1和 1.2)计算:湿地松林叶生物量平均 $573\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,共计 311.7;地上生物量平均 $6628\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,共计 3604.t 遥感模型估算结果相对于样地叶生物量 ($733\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)和地上生物量 ($7542\text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)偏小。

用地上生物量模型(2)计算出千烟洲生物量空间格局分布图(图2)。虽然分布趋势不明显,但从遥感图像中挖掘大量的空间信息,反映了生物量空间分布的连续性。在区域小尺度上,生物量空间分布格局更多地是受到地形因素的影响。地形起伏一方面对植物反射光谱产生了影响;另一方面森林乔木生物量积累与地形及其形成的小气候密切相关。

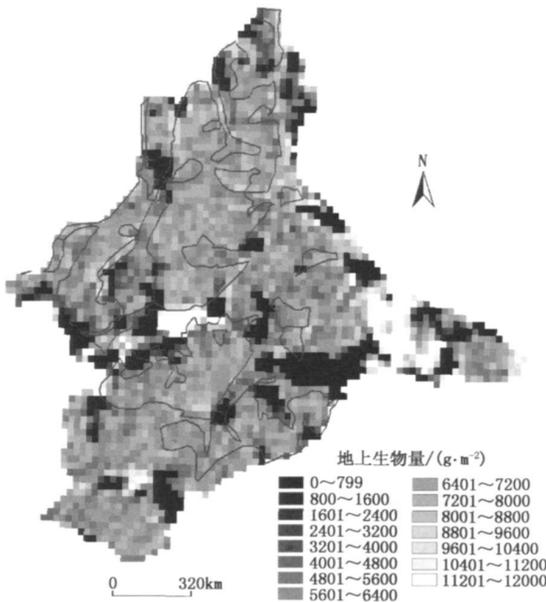


图 2 千烟洲湿地松林地上生物量分布

Fig 2 The map of aboveground biomass of *P. elliotii* forest in QYZ

3 讨论

本文利用 TM图像的灰度值和植被指数估算了湿地松林生物量,初步说明了基于地面

观测数据的遥感模型的有效性。遥感生物量模型估算结果(大尺度)小于样地生物量(点尺度)。遥感图像和植被指数、灰度值的相关分析结果表明, 相关系数大小依次是: 叶生物量 > 枝生物量 > 地上生物量 > 树干生物量。单一植被指数与生物量相关性较低, 主成分分析后相关系数略有提高, 缨帽变换后反而使模型的相关系数降低。

NDVI在解析植被生产力、生物量方面的应用比较广泛, 但仍仅限于模型的估计, 尚待大量的实测数据进行验证。本文研究结果表明: NDVI并不适用于郁闭度较大的湿地松林。湿地松林 NDVI等植被指数与生物量相关性(图 3)不高, 对于南方人工针叶林难以用单一植被指数明确地定量表达出植被信息, 这与 Ress等^[33]对北方针叶林研究结果一致: 植被指数并不适用盖度较高的针叶林。干烟洲针叶林的叶面积指数在 4~6之间^[38], 冠层结构较为复杂, LA和 NDVI相关性较低; 同时地形因素的影响不可小视。NDVI等植被指数能较好地反映群落总量的变化, 但是如果群落退化或演替只是在物种组成和群落结构方面发生变化, 而生物量、盖度高度等变化不大, 那么反映到 NDVI的变化就很小^[16]。

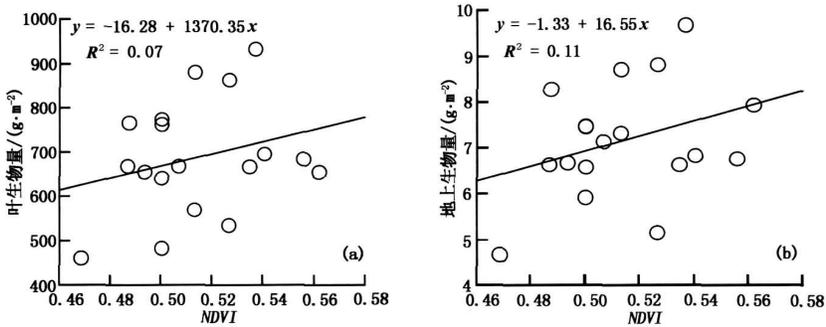


图 3 湿地松林 NDVI与叶生物量 (a)、地上生物量 (b)散点

Fig 3 Foliage biomass (a) and aboveground biomass (b) of Pinellottii forest in relation with NDVI

采用 KONOS图像作为参考图像对 TM遥感影像进行几何校正, 避免了地形图扫描等造成的诸多误差, 提高了精度。高精度 GPS的使用, 可以使样地准确定位。丰富的地面实测数据拓宽了模型应用的广度。对森林分器官进行估算, 深入地研究了湿地松林各器官生物量与多种植被指数、图像变换结果之间的关系。结合生态学调查、全球定位系统 (GPS)、数字高程地形 (DEM)、地理信息系统 (GIS)和遥感 (RS)等手段, 初步探讨了不同空间尺度生物量及影响因子。

将遥感影像的灰度值换算成表观辐射率 (ρ)和光谱辐射亮度 (L), 发现辐射率-生物量模型相关性较差, 这个结论需进一步探讨。不同的树种对光谱的反射率不同; 树木的叶、枝、干、根生物量随树种有较大差异, 这就决定了不能用一个模型去估测不同林型的生物量, 应该分树种分别建立模型。

尽管对图像进行了精确校正, 但当样地面积小于 TM图像的一个像素时, 像素与样地的对应关系仍然有错位的可能, 这就要求调查中样地尽量选择在均质范围内, 选用精度较高的 GPS来定位。可见光红外遥感在估测生物量方面有其自身的局限性, Muukkoner等^[34]使用 ASTER遥感数据 (9 bands), 用非线性回归和人工神经网络的手段和光谱反射率建立生物量估测模型, 相对估计误差分别为 44.7%和 41.0%。本文叶生物量估计与实际样地平均值相比误差是 -28.0%, 地上生物量误差为 -14.1%。由于在实际森林样地调查时, 一般都选取

生长较好的地段进行测定,其结果往往高估了森林生物量^[35-36],用遥感进行估测得出的结果势必会小一些。在今后的工作中需要加强可见光和微波遥感的研究,提高估测精度。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Good Practice Guidance for land use, land-use change and forestry [R]. Hayama, Japan: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2003: 1-295.
- [2] 戴小华, 于世孝. 遥感技术支持下的植被生产力与生物量研究进展 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 92~98. [DAI Xiao-hua, YU Shi-xiao. Advances in the estimation of vegetation productivity and biomass with the aids of remote sensing. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(4): 92-98.]
- [3] Holben B, Tucker C, Fan C. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, 46: 651-656.
- [4] Crow TR, Schläpfer BE. A guide to using regression equations for estimating tree biomass [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 1988, 5: 15-22.
- [5] Zheng D, Radmacher J, Chen JQ, 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: 402-411.
- [6] Hall R, Skatun R, Sarsant E, 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: 378-390.
- [7] Prince SD. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data [J]. Journal of Remote Sensing, 1991, 12(6): 1313-1330.
- [8] 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): 13~17. [GUO Qing-xi, ZHANG Feng. Estimation of forest biomass based on remote sensing. Journal of Northeast Forestry University, 2003, 31(2): 13-17.]
- [9] 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. [YANG Cun-jian, LIU Ji-yuan, ZHANG Zeng-xiang. Study on the estimation of the tropical forest vegetation biomass by using remote sensing data, meteorological data and topographic data. Geography and Geo-Information Science, 2004, 20(6): 22-25.]
- [10] 杨存建, 张增祥, 党承林, 等. 不同树种组的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]. 遥感技术与应用, 2004, 19(4): 231~234. [YANG Cun-jian, ZHANG Zeng-xiang, DANG Chen-lin, et al. The correlation analysis of the Landsat TM data, its derived data, meteorological data and topographic data with the biomass of the tropical forest vegetation of different forest. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(4): 231-234.]
- [11] 邢素丽, 张广录, 刘慧涛, 等. 基于 Landsat ETM+数据的落叶松林生物量估算模式 [J]. 福建林学院学报, 2004, 24(2): 153~156. [XING Su-li, ZHANG Guang-lu, LIU Hui-tao, et al. The estimating model of Larix sibirica forests biomass using Landsat ETM+ data. Journal of Fujian College of Forestry, 2004, 24(2): 153-156.]
- [12] 李仁东, 刘纪远. 应用 Landsat ETM+数据估算鄱阳湖湿生植被生物量 [J]. 地理学报, 2001, 56(5): 532~541. [LI Ren-dong, LIU Ji-yuan. An estimation of wetland vegetation biomass in the Poyang Lake using Landsat ETM+ Data. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(5): 532-541.]
- [13] Suganuma H, Abe Y, Taniguchi M, et al. Stand biomass estimation method by canopy coverage for application to remote sensing in an arid area of Western Australia [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 222: 75-87.
- [14] 刘卫国, 潘晓玲, 高炜, 等. 新疆阜康绿洲生态系统生物量遥感估算分析 [J]. 资源科学, 2005, 25(9): 134~141. [LIU Wei-guo, PAN Xiao-ling, GAO Wei, et al. Estimation of ecosystem biomass in Fukang Oasis of Xinjiang using remote sensing. Resources Science, 2005, 25(9): 134-141.]
- [15] 牛志春, 倪绍祥. 青海湖环湖地区草地植被生物量遥感监测模型 [J]. 地理学报, 2003, 58(5): 695~702. [NIU Zhi-chun, NI Shao-xiang. Study on models for monitoring of grassland biomass around Qinghai Lake assisted by remote sensing. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 695-702.]
- [16] 张剑, 李贵才, 刘先华, 等. 用群落调查及光谱观测数据的主成分分析方法研究草场各生物参数之间的关系 [J]. 遥感学报, 2005, 9(6): 725~732. [ZHANG Jian, LI Guicai, LIU Xianhua, et al. Relations of grassland bio-parameters based on PCA combining community survey and vegetation spectrum. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(6): 725-

- 732]
- [17] Labrecque S Fournier R A Luther J E et al. A comparison of four methods to map biomass from Landsat TM and inventory data in western Newfoundland [J. Forest Ecology and Management 2006 226: 129—144.
- [18] 廖静娟. 成像雷达在森林生态研究中的应用 [J. 遥感技术与应用, 1998 13(2): 57—63 [LIAO Jing juan. The imaging radars for forest ecological applications. Remote Sensing Technology and Application 1998 13(2): 57—63.]
- [19] Gaveau D L Balzier H Plummer S. Forest woody biomass classification with satellite based radar coherence over 900000 km² in Central Siberia [J. Forest Ecology and management 2003 174: 65—75.
- [20] Leiskym A Harding D Cohen W B. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland USA [J. Remote Sensing of Environment 1999 67: 83—99.
- [21] Leiskym A Turner T D Guzy P M et al. Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modeled forest productivity [J. Remote Sensing of Environment 2005 95: 549—558.
- [22] 齐家国, 王翠珍. 微波/光学植被散射模型及其在热带森林中的应用 [J. 电波科学学报, 2004 19(4): 409—418 [QI Jia guo WANG Cui zhen. A microwave/optical synergistic model and its applications in tropical forest canopies. Chinese Journal of Radio Science 2004 19(4): 409—418.]
- [23] Cohen W B Spies T A. Estimating structural attributes of Douglas fir western hemlock forest stands from Landsat and SPOT imagery [J. Remote Sensing of Environment 1992 41(1): 1—17.
- [24] 郭志华, 彭少麟, 王伯荪. 利用 TM数据提取粤西地区的森林生物量 [J. 生态学报, 2002 22(1): 1832—1839 [GUO Zhi hua PENG Shao lin WANG Bo sun. Estimating forest biomass in western Guangdong using Landsat TM data. Acta Ecologica Sinica 2002 22(1): 1832—1839.]
- [25] 张连水, 庄志贤, 李秀全. 湿地松地上生物量变化研究 [J. 林业科技开发, 2001 15(增刊): 42—43 [ZHANG Lian shui ZHUANG Zhi xian LI Xiu quan. Research on the changes of above ground biomass of Pinus elliptica. China Forest Science and Technology 2001 15(APP): 42—43.]
- [26] 中国科学院南方山区综合科学考察队, 江西省吉安地区自然资源开发治理办公室. 红壤丘陵开发和治理—千烟洲综合开发治理试验研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1989 1—23 [Scientific Investigation Team of Chinese Academy of Sciences for Southern Mountainous Areas Management Office of Natural Resources in Jian Prefecture of Jiangxi Province. Management and Development of Red Hill Area—Experimental Study in Qianyanzhou. Beijing: Science Press 1989 1—23.]
- [27] 刘琪璟, 胡理乐, 李轩然. 小流域治理 20 年后的千烟洲植物多样性 [J. 植物生态学报, 2005 29(5): 766—774 [LIU Qi jing HU Li le LI Xuan ran. Plant diversity in Qianyanzhou after 20 years of small watershed treatment. Acta Phytocologica Sinica 2005 29(5): 766—774.]
- [28] 李轩然, 刘琪璟, 陈永瑞, 等. 千烟洲人工林主要树种地上生物量的估算 [J. 应用生态学报, 2006 17(8): 1382—1388 [LI Xuan ran LIU Qi jing CHEN Yong rui et al. Aboveground biomass of three conifers in Qianyanzhou plantation. Chinese Journal of Applied Ecology 2006 17(8): 1382—1388.]
- [29] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展 [J. 地球科学进展, 1998 13(4): 327—333 [TIAN Qing jiu MIN Xiang jun. Advances in study on vegetation indices. Advances in Earth Science 1998 13(4): 327—333.]
- [30] Huete SR. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J. Remote Sensing of Environment 1988 25: 295—309.
- [31] 梅安新, 彭望球, 秦其明, 等. 遥感导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 243 [MEI An xin PENG Wang qiu QIN Qi ming et al. An Introduction to Remote Sensing. Beijing: Higher Education Press 2001. 243.]
- [32] Begeen K M Dobson M C. Integration of remotely sensed radar in agery in modeling and mapping of forest biomass and net primary production [J. Ecological Modelling 1999 122(3): 257—274.
- [33] Rees W G Golubeva E William S M. Are vegetation indices useful in the Arctic? [J. Polar Record 1998 34(191): 333—336.
- [34] 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: 434—447.
- [35] Brown S Iverson L R. Biomass estimates for tropical forests [J. World Resource Review 1992 4: 366—384.
- [36] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 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, 2001 12(1): 13—

- 16 [WANG Xiao.ke FENG Zongwei OUYANG Zhi Yun. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China. Chinese Journal of Applied Ecology 2001 12(1): 13-16.]
- [37] 池宏康, 周广胜, 许振柱, 等. 表观反射率及其在植被遥感中的应用[J]. 植物生态学报, 2005 29(1): 74~80. [CHI Hong.kang ZHOU Guang.sheng XU Zhen.zhu et al. Apparent reflectance and its application in vegetation remote sensing. Acta Phytocologica Sinica 2005 29(1): 74-80.]
- [38] 李轩然, 刘琪璟, 蔡哲, 等. 湿地松叶面积指数的测算[J]. 生态学报, 2006 26(12): 4099~4105 [LI Xuan.ran LU Qi.jing CAI Zhe et al. Leaf area index measurement of Pinus elliptica plantation. Acta Ecologica Sinica 2006 26(12): 4099-4105.]
- [39] 马泽清, 刘琪璟, 徐雯佳, 等. 江西千烟洲人工林生态系统碳蓄积特征研究[J]. 林业科学, 2007. [LI MA Ze.qing LU Qi.jing XU Wen.jia et al. Carbon storage of artificial forest in Qianyanzhou, Jiangxi Province. Scientia Silvae Sinicae 2007(In Press).]

Study on Biomass of Pinus elliptica Forest in Subtropical China Assisted with Remote Sensing

MA Ze-qing^{1, 2}, LU Qi-jing¹, XU Wen-jia^{1, 2}, LI Xuan-ran^{1, 2}, LU Ying-chun^{1, 2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

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

Abstract: Based on field survey data, TM imagery acquired in 2005 was applied for organ-specific biomass estimation of Pinus elliptica plantation as well as other forest types in Qianyanzhou of Jiangxi Province, China. A total of 28 plots was investigated and the relationship of biomass with vegetation indices was clarified using image analysis including PCA (Principal Component Analysis) and TASSEL (Tasseled cap transformation). A series of regression models comparing biomass and spectra or vegetation index were established. The sequence of correlation coefficients from high to low was foliage biomass > branch biomass > above-ground biomass > stem biomass. The average above-ground biomass of Pinus elliptica forest as estimated with multiple regression analysis was $6628 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, with leaf biomass of $573 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, less than the mean result by field survey. Correlation of biomass with a single vegetation index was quite low, indicating that NDVI alone is not sufficient for estimating biomass of densely closed forest. Results of regression analyses were slightly better using PCA and slightly worse with TASSEL.

Key words: remote sensing; vegetation index; forest biomass; Qianyanzhou