

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

张志东^{1,2} 臧润国^{2*}

(1 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003)

(2 国家林业局森林生态环境重点实验室, 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要 热带森林在全球碳循环方面扮演着重要的角色, 预测其生物量分布可以加深对碳循环过程的理解。然而目前基于植被指数模拟技术进行热带森林生物量分布的研究报道较少。该文以海南岛霸王岭林区热带森林为研究对象, 在基于遥感影像和135个公里网格样地调查的基础上, 分别选取归一化差异植被指数(*NDVI*)、短红外湿度植被指数(*MVI5*)、中红外湿度植被指数(*MVI7*)和比值植被指数(*RVI*)与总物种生物量、顶极种生物量和先锋种生物量做相关分析, 并利用逐步线性回归分析分别构建了基于植被指数的生物量回归模型; 利用残差图对模型的有效性进行检验。结果表明, *MVI7*和*MVI5*与总物种和顶极种生物量关系显著, 而*NDVI*和*RVI*对先锋种生物量具有较好的指示作用; 总物种、顶极种和先锋种生物量预测精度较高的区域分别占总面积的69.24%、73.98%和88.08%, 表明3个生物量模型均具有较好的拟合精度; 模拟结果表明总物种和顶极种生物量主要集中于研究区中部、北部和西南部区域, 而先锋种生物量无明显的分布规律, 是不均衡地散布于整个研究区域, 反映了群落组成结构、干扰历史、地形及气候因素等的影响。

关键词 植被指数 地上生物量 模拟 热带森林 海南岛

MODELLING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF ABOVEGROUND BIOMASS BASED ON VEGETATION INDEX IN A TROPICAL FOREST IN BAWANGLING, HAINAN ISLAND, SOUTH CHINA

ZHANG Zhi-Dong^{1,2} and ZANG Run-Guo^{2*}

¹Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China, and ²Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, the State Forestry Administration; Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract *Aims* The biomass of tropical forests plays an important role in the global carbon cycle; however, the distribution of tropical forest biomass based on vegetation index is seldom explored. Our objectives were to evaluate relationships between biomass and vegetation indices and to determine the spatial distribution of the aboveground biomass of tropical forest in Bawangling, Hainan Island, South China.

Methods Using measurements of forest biomass from 135 sample plots distributed over the study area, we correlated four vegetation indices (normalized difference vegetation index (*NDVI*), moisture vegetation index using Landsat's 5 (*MVI5*), moisture vegetation index using Landsat's band 7 (*MVI7*) and ratio vegetation index (*RVI*)) with aboveground biomass (total biomass, climax species biomass and pioneer species biomass) using the Pearson correlation method. We also developed models describing the relationships between forest aboveground biomass and vegetation indices using stepwise linear regression analysis. Three maps of biomass components were produced using the developed models, and residual maps were used to test the validity of the models.

Important findings *MVI7* and *MVI5* are most effective for total biomass and climax species biomass, whereas *NDVI* and *RVI* seem to be good indices of pioneer species biomass. The strongly predictive

收稿日期: 2008-07-23 接受日期: 2009-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(30430570 和 30340047)和国家林业局 948 项目(2002-54)

外业调查过程中得到了海南霸王岭林业局的杨秀森高工、林瑞昌主任、陈小敏及王进强的帮助, 谨致谢意

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: zangrun@caf.ac.cn

percent areas for total species, climax species and pioneer species biomass models were 69.24, 73.98 and 88.08, respectively. Simulated biomasses of total species and climax species were distributed in the center, north and southwest parts of the study area; however, simulated biomass of pioneer species was scattered.

Key words vegetation index, aboveground biomass, modeling, tropical forest, Hainan Island

DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2009.05.001

作为表征森林生态系统的重要参数(Chave *et al.*, 2001), 生物量在估测森林植被C储量(Haripriya, 2000)、大尺度温室效应(Houghton *et al.*, 2000)、木材产量评估(Vanclay, 1995)等方面发挥着重要作用。然而以上功能的实现, 是以对森林生物量精确的测量和对其分布进行准确的预测为前提的。

对森林生物量进行估测的传统途径是在群落水平上采用基于样地生物量的估测方法, 如皆伐法、平均木法等; 此类方法是通过单株样木实测后建立生物量回归模型(李意德, 1993; Kitayama & Itow, 1999; Garkoti, 2008)。然而应用这些方法往往会破坏对样地植被造成一定的破坏, 而且需要大量的人力、资金和时间的投入。方法本身的局限性决定只适宜局域水平研究, 而不太适用于景观、区域或全球尺度的森林生物量估测和空间分布预测。鉴于以上原因, 在大的空间尺度上基于遥感和GIS技术开展热带森林生物量估测研究具有重要的理论和现实意义。

随着遥感技术的不断成熟, 借助遥感数据在景观水平上进行生物量估测和空间分布预测已成为可能。近几年来, 利用卫星遥感影像进行生物量估测的报道不断增多, 大多数研究通过探寻地上部分生物量和不同光谱波段的反射值之间的回归关系对生物量进行估测。植被指数由于综合了两个或更多光谱波段的信息, 显著地增强了植被信号, 因而对地面生物量的预测具有更高的敏感性(Carlson & Ripley, 1997)。许多植被指数已被广大学者用于地面植被生物量或其他生物物理特性的估测。如归一化差异植被指数(Normalized difference vegetation index, *NDVI*)被许多研究证明与植被生物量存在着较显著的相关关系, 涉及植被类型包括草原(Todd *et al.*, 1998; 李素英等, 2007), 也包括典型的森林植被(Dong *et al.*, 2003; Freitas *et al.*, 2005; Tan *et al.*, 2007)。然而其他研究表明在热带密林区中, *NDVI*对生物量或其他一

些生物物理特征的指示作用微弱(Boyd *et al.*, 1996; Freitas *et al.*, 2005)。针对此种情况, 一些学者又尝试了用不同的植被指数探讨与热带森林生物量或其他一些生物物理特征的关系。如Lu等(2004)在亚马逊东部盆地雨林利用4组植被指数即简化比率、归一化比率、复杂的植被指数和线性变换的植被指数分析与森林生物量等变量的关系, 结果表明由TM4和TM3波段组合而成的植被指数与森林样地变量关系较弱。相反, 包含TM5波段的植被指数和森林生物量等变量具有显著的相关关系; Freitas等(2005)在大西洋雨林研究发现, 相对*NDVI*, 分别由波段5和波段7组合而成的湿度植被指数(Moisture vegetation index, *MVI*)与平均基面积等变量在密林中关系显著。因此, 植被指数在预测森林生物量方面具有较好的指示作用。

虽然目前关于植被指数和森林生物量的研究呈现多元化, 然而众多学者在以下两方面获得了共识: 1)植被指数和森林生物量及其他生物物理特征的关系强弱依不同研究区域而异; 即使在同一研究区, 取样的数量及其所取样方的典型性也制约了研究结论的准确程度(Chave *et al.*, 2004); 2)与温带森林相比, 热带森林由于复杂的群落结构、较高的物种多样性、野外调查的困难以及异质性的生物物理环境, 对其相关的研究仍然相对缺乏, 亟待进一步补充(Lu *et al.*, 2004)。

海南岛热带森林分布于亚洲雨林的北缘, 在维持全岛的生态平衡和改善生态环境中具有不可替代的作用。然而高强度的森林采伐和大规模的刀耕火种已导致了森林C储量的急剧减少以及生物量分布格局的变化。虽然对该区森林生物量估测方面的研究已有少量报道(李意德, 1993), 但这些研究均是从群落水平上采用样地观察和实测数据对森林生物量进行总体评估, 目前尚无在景观水平上对海南岛热带森林生物量估测和空间分布预测的研究。本文以海南岛霸王岭林区为研究对

象, 在对该区进行大规模基于公里网格样方调查的基础上, 借助TM影像探寻植被指数和地上生物量的相互关系, 进而通过基于植被指数拟合的生物量模型对地上生物量的空间分布进行预测。本研究成果可为热带森林生物量变化监测、资源保护和管理提供借鉴。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区域自然概况

研究区域位于海南省西南部昌江县和白沙县境内的霸王岭林区, 总面积约4.8万 hm^2 , 地理坐标 $18^{\circ}53' \sim 19^{\circ}20' \text{N}$, $108^{\circ}58' \sim 109^{\circ}53' \text{E}$ 。区内地形复杂、河流交错, 有雅加大岭、猕猴岭、黄牛岭、斧头岭四大山脉, 形成王下、南七、七差三大流域。海拔范围为50~1 654 m, 土壤主要是以花岗岩和沙岩为母质发育而成的砖红壤、山地黄壤和山地草甸土, 土层一般在80~100 cm之间。该地区属热带季风气候, 干湿季明显。年均温为 24.2°C , 年平均降水量1 677.1 mm, 但分布不均, 5~11月为雨季, 12月~翌年4月为旱季。低地雨林、山地雨林、山地常绿林和高山矮林为其地带性优势植被类型(陆阳等, 1986; 蒋有绪等, 2002)。低地雨林和山地雨林是该地区分布最广的两个主要植被类型。霸王岭林区大部分的原始森林都经过了刀耕火种和商业性采伐的破坏, 自1994年海南岛实施全岛森林禁伐以来, 霸王岭的热带森林大部分都处于自然恢复状态, 只有少数的原始林片分布其中(臧润国等, 2004)。

1.2 样地调查及生物量计算

本研究调查样方的布设是采用在研究区内按公里网格机械布点的方法。根据地形图, 把霸王岭林区按照公里网格分区, 机械设置群落调查样地, 即以每个 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 或 $2 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的网格的节点处为中心, 各设置一个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 调查样地。在整个景观中共调查了135个天然林样地, 共计 5.4 hm^2 。利用GPS进行样地的定位; 在每个样方内记录所有胸径(DBH) $\geq 1 \text{ cm}$ 乔木和灌木的种名(无法确认的种则采集标本后再送交海南林业局植物研究室进行鉴定)、胸径及高度。草本数据没有调查。地上生物量采用以下公式进行计算: 对于原始林样地出现的样木, 我们采用李意德(1993)地上生物量回归拟合方程进行估算, 其回归模型如下: $W=0.042 086(D^2H)^{0.970 315}$, 对于季雨

林样地出现的样木, 所用模型如下: $W=0.113 121(D^2H)^{0.840 652}$, 其中 W 为地上部分单株生物量, D 为平均胸径, H 为平均树高。将各样地中各株样木的生物量相加, 得到各样地森林植被的生物量, 从 $250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 到 $1 072 400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 不等。

1.3 植被指数提取

本研究采用覆盖研究区的TM影像数据。首先对影像进行了配准工作, 具体步骤为: 将影像校正到1: 50 000地形图上, 坐标变换采用二阶变换, 重采样插值方法为最近邻点法, 经重新选点检验, 影像的校正误差在0.5个像元内。校正后图像的坐标为大地坐标, 地图投影采用横轴墨卡托(Transverse Mercator), 椭球体(Spheroid name)为克拉索夫斯基(Krasovsky), 像元点的空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 。将影像进行地理参考和几何校正后, 按照霸王岭自然区划边界对影像进行了裁剪操作, 最终得到了用于分析的影像图。

考虑到热带森林自身的结构特点和植被光谱反射的特征, 选取了以下适合本研究区的红色波段($0.63 \sim 0.69 \mu\text{m}$)、近红外波段($0.76 \sim 0.90 \mu\text{m}$)、短红外波段($1.55 \sim 1.75 \mu\text{m}$)和中红外波段($2.08 \sim 2.35 \mu\text{m}$)并进一步组合为4个不同的植被指数(表1), 分别为归一化差异植被指数(Normalized difference vegetation index, $NDVI$)、短红外湿度植被指数(Moisture vegetation index using Landsat's band 5, $MVI5$)、中红外湿度植被指数(Moisture vegetation index using Landsat's band 7, $MVI7$)和比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)(Freitas *et al.*, 2005; 李素英等, 2007)。在GIS软件和影像处理软件平台上, 我们对各样地的植被指数进行了提取。为了减小位置误差对分析的影响, 在各样地中心位置利用 3×3 像素窗口提取植被指数的平均值作为该样地的植被指数(Lu *et al.*, 2004)。

1.4 数据分析

在进行分析之前, 首先将调查的579个物种根据演替地位划分成先锋种和顶极种两大类功能群。木材密度和潜在生长率存在着一定程度的相关性。高木材密度的物种比小木材密度的物种有更矮的树干, 同时表现出低生长, 这在很大程度上决定了热带林物种存在由生长速率高和喜光性的物种向生长速率慢的耐阴性物种过度的变化规律, 是划分早期与后期演替种的重要标准之一(Verburg & van Eijk-Bos, 2003; Köhler *et al.*,

2000)。种子大小和种子扩散能力、种子休眠时间呈负相关,而与耐阴性呈强正相关关系,也是决定物种演替地位的重要指标(Coomes & Grubb, 2003; Dalling & Hubbell, 2002)。鉴于此,本文依据木材密度和种子大小确定物种的演替地位。在579个物种中,有89.5%的物种属于顶极种,仅有10.5%的物种属于先锋种。其次我们分别统计各样方中先锋种和顶极种的生物量。利用Pearson相关分析分别计算了总物种、先锋种和顶极种生物量与植被指数的关系;利用逐步多重线性回归分析构建了生物量与植被指数的回归模型。为了满足正态要求,将所有变量进行了对数转换处理(Freitas *et al.*, 2005)。所有统计分析在SPSS13.0 (SPSS, 2004)软件中进行;在ARCGIS8.3(ESRI, 2003)软件平台上,借助空间分析模块同时根据构建的生物量与植被指数的回归模型,分别对总物种、先锋种和顶极种生物量在研究区的空间分布进行了预测。利用残差图对生物量预测图的精

度进行评估(Dogan & Dogan, 2006)。其中残差由各样方中生物量模拟值和实测值之差所得。利用GIS(ESRI, 2003)软件中反距离权重插值方法(Inverse distance weighted interpolation, IDW)根据所计算的残差值构造残差图,此外,我们用不同残差类所覆盖的研究区的面积来表明模拟效果的优劣。

2 结果

2.1 生物量与植被指数的关系

以先锋种为优势的群落结构和与顶极种为优势的群落结构在光谱反射特征上存在差异。顶极种生物量和总生物量与TM影像的植被指数存在相似的相关性,均与植被指数 $MVI7$ 和 $MVI5$ 显著相关($p \leq 0.01$)而与 $NDVI$ 和 RVI 相关性较弱($p \leq 0.05$);先锋种生物量和 $NDVI$ 、 RVI 显著相关($p \leq 0.05$),而与 $MVI7$ 和 $MVI5$ 不存在显著的相关关系($p \geq 0.05$)(表2)。

表1 植被指数表
Table 1 The vegetation index

植被指数	Vegetation indices	缩写	Abbreviation	公式	Formula
归一化差异植被指数	Normalized difference vegetation index	$NDVI$		$(NIR-R)/(NIR+R)$	
短红外湿度植被指数	Moisture vegetation index using Landsat's band 5	$MVI5$		$(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$	
中红外湿度植被指数	Moisture vegetation index using Landsat's band 7	$MVI7$		$(NIR-MIR)/(NIR+MIR)$	
比值植被指数	Ratio vegetation index	RVI		NIR/R	

MIR : 中红外波段 Middle infrared band NIR : 近红外波段 Near infrared band R : 红光波段 Infrared band $SWIR$: 短红外波段 Short wave infrared band

表2 地上生物量与TM影像植被指数的相关分析
Table 2 Correlations between aboveground biomass and vegetation index

	$NDVI$	RVI	$MVI7$	$MVI5$
顶极种生物量 Climax species biomass	0.286*	0.249*	0.497**	0.503**
先锋种生物量 Pioneer species biomass	0.194*	0.214*	0.109	0.117
总生物量 Total biomass	0.284*	0.246*	0.511**	0.505**

* $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$ $NDVI$, RVI , $MVI7$, $MVI5$: 见表1 See Table 1

表3 植被指数与地上生物量的线性回归模型
Table 3 Linear regression models using aboveground biomass as the dependent variables and vegetation indices as the independent variables

模型	Model	R^2	F	p
总生物量	Total biomass $\ln(Y) = -53.186 + 11.325 \ln(MVI7)$	0.761	42.407	<0.000 1
顶极种生物量	Climax species biomass $\ln(Y) = -40.766 + 9.509 \ln(MVI5)$	0.753	40.579	<0.000 1
先锋种生物量	Pioneer species biomass $\ln(Y) = -36.072 + 7.674 \ln(RVI)$	0.446	5.765	0.018

RVI , $MVI7$, $MVI5$: 见表1 See Table 1

逐步线性回归分析表明(表3), 总生物量($R^2=0.761$)和顶极种生物量($R^2=0.753$)分别与植被指数 $MVI7$ 和 $MVI5$ 回归关系显著。而先锋种生物量($R^2=0.446$)和植被指数 RVI 回归关系相对较弱, 但 R^2 值也达到了0.446; 方差分析表明3个回归方程分别在0.01、0.01和0.05水平上显著(表3), 表明模拟效果较好。

2.2 生物量空间分布模拟

利用模拟出的回归模型(表3), 经过反对数变换处理, 利用GIS软件的空间分析模块分别获得了总物种生物量、顶极种生物量和先锋种生物量的空间分布预测图(图1a~1c)。研究区内地上生物量主要分布于中部、北部和西南部地区(图1a); 顶极种生物量也表现出相似的分佈格局(图1b); 与以上情况相反, 先锋种生物量无论从量上还是从分佈格局上均与总物种和顶极种生物量存在显著的差异。研究区大部分地区先锋种生物量普遍较低, 范围在0~29 900 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间且与先锋种生物量高的地区呈镶嵌分佈格局。

残差是评估模拟效果优劣的有效指标。低的残差值预示着模拟效果较好, 而高的残差值则表明模拟精度较低。我们用标准差值构造了3个模型的残差图, 并根据标准差范围分成了弱、中、强3个预测水平。对于总物种生物量模拟, 预测水平最差的面积仅占总面积的5.7%, 而预测水平最高的面积占总面积的69.24% (图1a); 对于顶极种生物量模拟, 预测水平最低的面积占总面积的5.65%, 预测水平最高的面积占总面积的73.98% (图1b); 先锋种生物量模拟效果最好, 其预测水平最低的面积仅占总面积的4.26%, 而预测水平最高的面积却占总面积的88.08% (图1c)。从总体上来看, 考虑到中、强预测水平所占的面积比例, 基于植被指数的总物种、顶极种和先锋种生物量预测模型的精度是可以接受的。

3 讨论

3.1 地上生物量与植被指数的关系

不同植被指数对地上生物量指示效应存在着显著的差异, 这一结果与植被指数本身的特性紧密相关。 $NDVI$ 是由红光波段和近红外波段构成, 而红光波段受植被覆盖度影响较大。随着植被覆盖度的增加, 叶绿素a吸收使红光通道很快饱和。另一方面, $NDVI$ 算式本身存在非线性问题, 当植

被越来越茂密时, $NDVI$ 指数无法同步增长, 产生“饱和”问题(王正兴等, 2003), 因而不能有效地反映植被特征的变化。大量的研究证明了这一点: 如Gamon等(1995)在美国加利福尼亚州研究发现, 从草地、灌丛到森林, $NDVI$ 指数对植被特征的反应逐渐微弱, Freitas等(2005)在大西洋雨林、Boyd等(1999)在喀麦隆热带森林也发现在密林中生物量与 $NDVI$ 之间的相关关系较弱; RVI 也是由红光波段和近红外波段构成, 但是和 $NDVI$ 算式上的差异有效地解决了容易“饱和”的问题。虽然本文研究表明 RVI 和 $NDVI$ 与顶极种、先锋种和总物种生物量均在0.05水平上相关(表2), 但是通过逐步线性回归分析表明, RVI 对先锋种生物量的指示作用明显好于 $NDVI$ (表3)。Gamon等(1995)在研究 RVI 和 $NDVI$ 与植被的化学成分时也发现类似结果; 短红外波段和中红外波段受大气的影响较小, 植物对其吸收率和叶片的透射率均较低, 具有较小的“饱和效应”。Foody等(2001)在Bornean热带森林中用光谱特征估测生物量的研究时发现, 短红外波段对估测森林生物量具有高的敏感性, 近红外波段其次, 而红光波段的敏感性最弱。针对此种情况, Foody等认为将高敏感性的波段组合成不同的植被指数优于用单波段(尤其是红光波段)对生物量估测的效果。这在Freitas等(2005)以及Lu等(2004)的研究中均得到了较好的证明。本研究分别将短红外波段和中红外波段与近红外波段组合成 $MVI5$ 和 $MVI7$, 研究结果表明这两个植被指数与总物种生物量和顶极种生物量均在0.01水平上显著相关(表2), 反映了较好的指示作用。

顶极种和先锋种生物量对植被指数反应上的差异还与它们不同的生活史策略紧密相关。先锋种功能群强喜光、易扩散、对干扰具有较强的适应能力(Swaine & Whitmore, 1988), 这些特性决定其在阳光充足、干燥贫瘠的生境中具有较高的分佈概率。因而先锋种占优势的群落往往是季雨林和遭受干扰后恢复的次生林; 顶极种功能群通常由长寿种组成, 具有高耐阴能力(Swaine & Whitmore, 1988), 它们构成了热带森林的主体, 在热带密林、原始林中具有高的发生频率。从以先锋种为优势的森林到以顶极种为优势的森林, 森林结构趋于复杂化, 植物湿度和土壤水分含量均不断增加, 从而增强森林对太阳辐射的吸收。

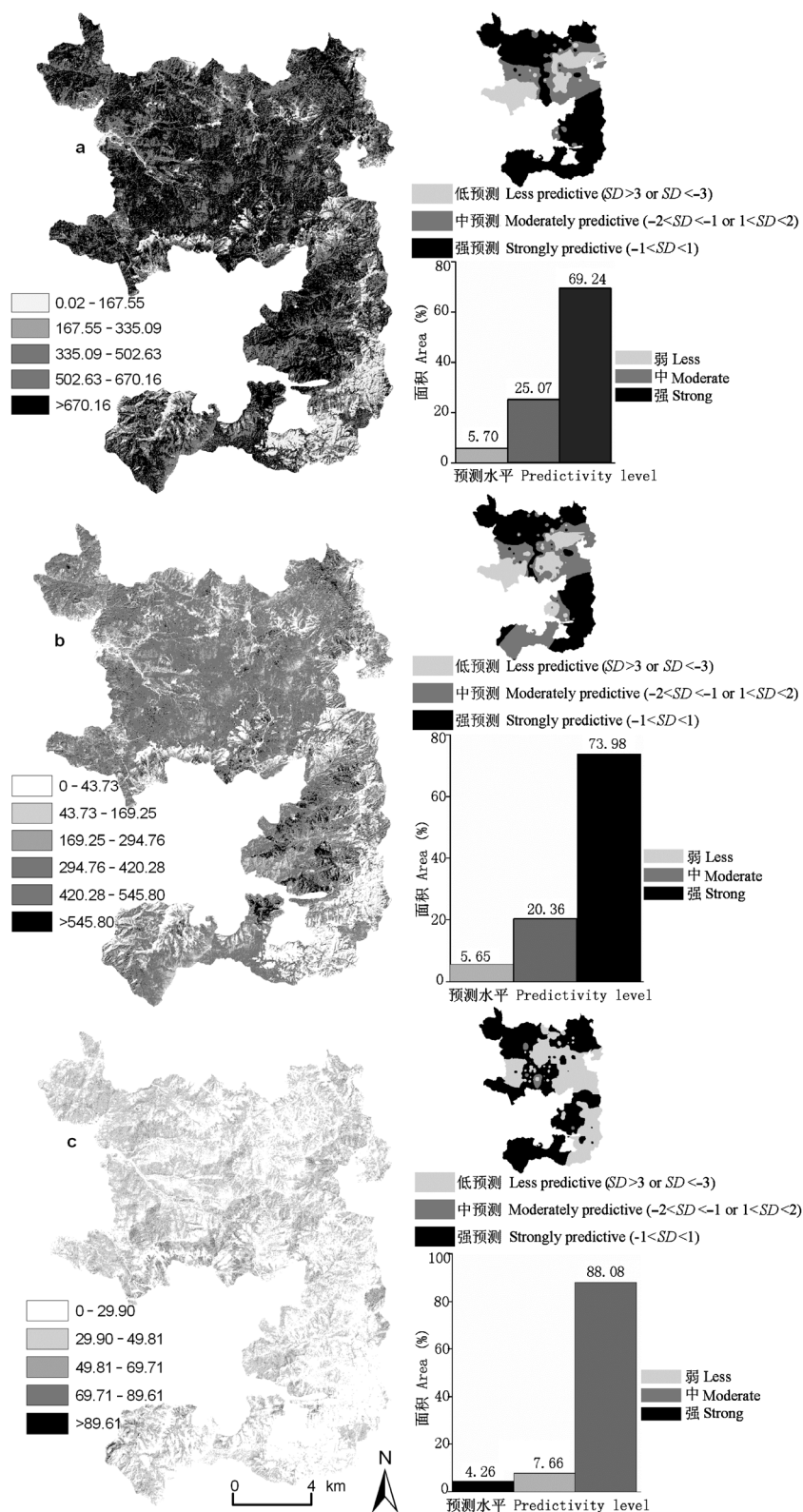


图1 总物种(a)、顶极种(b)和先锋种(c)地上生物量(1 000 kg·hm⁻²)分布与残差统计图
 Fig. 1 Aboveground biomass (1 000 kg·hm⁻²) distribution and residual statistics maps of total species (a), climax (b) and pioneer species (c)

湿度植被指数实质上是反映土壤湿度和冠层湿度敏感性的一个指标,潮湿的生境条件是导致短红外波段和中红外波段以及由它们所构成的湿度植被指数与生物物理特征强相关的主要因素(Phua & Saito, 2003)。本文的研究结果表明顶极种生物量与MVI7、MVI5相关显著($p \leq 0.01$),而与植被指数NDVI和RVI相关关系相对较弱($p \leq 0.05$);先锋种生物量和植被指数NDVI、RVI相关关系明显($p \leq 0.05$),而与植被指数MVI7和MVI5不存在明显的相关关系($p \geq 0.05$)。这一结论与一些学者研究的植被指数NDVI或RVI适合在温带地区(Todd *et al.*, 1998; 李素英等, 2007)以及在热带落叶林或干旱季雨林进行生物量或其他生物物理特征估测(Boyd *et al.*, 1996; Freitas *et al.*, 2005),而由波段5和波段7组合而成的湿度植被指数或其他植被指数则适合在热带密林中(Boyd *et al.*, 1996; Freitas *et al.*, 2005)的结论并不矛盾,而是从功能群途径出发进一步诠释了这些结论的正确性。

3.2 地上生物量空间分布模拟

本研究借助基于植被指数的回归模拟技术对热带天然林地上生物量空间分布进行了预测,从所得结果来看模拟精度是可以接受的(图1)。因此该模拟技术提供了一个有效的途径进行热带森林生物量空间分布预测。虽然此模拟途径进一步完善了以尺度外推为目的的生物量空间插值技术,但是它在实际应用时仍然受到了诸多方面的限制:一是生物量估测误差的影响。从样地水平胸径(DBH)和树高(H)的测量、生物量估测模型的选择、取样大小的不确定性和在景观水平研究样地的典型性(Chave *et al.*, 2004)等诸多方面均影响着生物量估测的准确性,进而影响了生物量空间分布的预测精度;二是所获影像质量以及不同学者影像处理技术的不同,导致对植被指数计算的精度出现差异;此外所获影像与样地调查时间是否相同、不同研究区植被组成和结构的差异等因素(Foody *et al.*, 2003)均会对模拟效果产生影响。解决以上热带森林地上生物量模拟技术的空间和时间异质性问题是我们将来努力的方向。

生物量空间分布格局是干扰、生态系统恢复以及区域或全球气候变化等因素共同作用的结果。在霸王岭热带林区,大部分原始森林都经过了刀耕火种和商业性采伐的破坏,而且干扰年代久远,如商业性采伐始于1957年,先后经历了皆

伐、径级择伐和采育择伐等不同的采伐方式和采伐强度。目前霸王岭林区已演变成由少量的原始林片段,大量的处于不同恢复阶段、不同干扰历史的次生林斑块,火烧和农耕撂荒后形成的灌丛、荒草地以及人工种植橡胶等经济作物后形成的低产人工林地等形成的斑块镶嵌体。不同的斑块类型形成了不同的先锋种和顶极种功能群的数量配比以及森林结构的差异,导致总物种、顶极种和先锋种地上生物量在草地、灌丛、不同恢复阶段的次生林以及残存的原始林斑块之间呈梯度分布的格局。区域气候对热带森林生物量的分布也起到了重要的作用。Saatchi等(2007)在亚马逊热带森林研究发现,生物量小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的森林绝大部分发生在旱季超过6个月的区域,而生物量在 $100 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的森林则发生在旱季不超过4个月的区域。研究区总物种、顶极种和先锋种生物量分布格局也反映了气候梯度的差异,顶极种生物量主要集中在温度较低和雨量丰富的区域,而先锋种生物量集中的区域则多为温度高、雨量较少、土壤干燥贫瘠的生境。从顶极种生物量集中的区域到先锋种生物量集中的区域也可能代表着温度递增和降雨量递减的气候变化格局。定量地进行顶极种和先锋种生物量分布与气候因子之间的相关分析是我们今后进一步开展的工作。

参 考 文 献

- Boyd DS, Foody GM, Curran PJ (1999). The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths ($3.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$). *International Journal of Remote Sensing*, 20, 1017-1023.
- Boyd DS, Foody GM, Curran PJ, Lucas RM, Honzák M (1996). An assessment of radiance in Landsat TM middle and thermal infrared wavebands for the detection of tropical forest regeneration. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 249-261.
- Carlson T, Ripley D (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62, 241-252.
- Chave J, Condit R, Aguilar S, Hernandez A, Lao S, Perez R (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, 359, 409-420.
- Chave J, Riéra B, Dubois MA (2001). Estimation of

- biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*, 17, 79–96.
- Coomes DA, Grubb PJ (2003). Colonization, tolerance, competition and seed-size variation within functional groups. *Trends in Ecology & Evolution*, 18, 283–291.
- Dalling JW, Hubbell SP (2002). Seed size, growth rate and gap microsite conditions as determinants of recruitment success for pioneer species. *Journal of Ecology*, 90, 557–568.
- Dogan H, Dogan M (2006). A new approach to diversity indices—Modeling and mapping plant biodiversity of nallihan (A3-Ankara/Turkey) forest ecosystem in frame of geographic information systems. *Biodiversity and Conservation*, 15, 855–878.
- Dong J, Kaufmann RK, Myneni RB, Tucker CJ, Kauppi PE, Liski J, Buermann W, Alexeyev V, Hughes MK (2003). Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 84, 393–410.
- ESRI (2003). *ARCGIS*. Environmental Systems Research Institute, Inc., Redcands, California, USA.
- Foody GM, Boyd DS, Cutler MEJ (2003). Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. *Remote Sensing of Environment*, 85, 463–474.
- Foody GM, Cutler ME, McMorro J, Pelz D, Tangki H, Boyd DS, Douglas I (2001). Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. *Global Ecology and Biogeography*, 10, 379–387.
- Freitas SR, Mello MCS, Cruz CBM (2005). Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic rainforest. *Forest Ecology and Management*, 218, 353–362.
- Gamon JA, Field CB, Goulden ML, Griffin KL, Hartley AE, Joel G, Penuelas J, Valentini R (1995). Relationships between *NDVI*, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*, 5, 28–41.
- Garkoti SC (2008). Estimates of biomass and primary productivity in a high-altitude maple forest of the west central Himalayas. *Ecological Research*, 23, 41–49.
- HariPriya G (2000). Estimates of biomass in Indian forests. *Biomass and Bioenergy*, 19, 245–258.
- Houghton RA, Skole DL, Nobre CA, Hackler JL, Lawrence KT, Chomentowski WH (2000). Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 403, 301–304.
- Jiang YX (蒋有绪), Wang BS (王伯荪), Zang RG (臧润国), Jin JH (金建华), Liao WB (廖文波) (2002). *Biodiversity and Mechanism of Maintenance of the Tropical Forest in Hainan Island* (海南岛热带林生物多样性及其形成机制). Science Press, Beijing, 219–324. (in Chinese)
- Kitayama K, Itow S (1999). Aboveground biomass and soil nutrient pools of a *Scalesia pedunculata* montane forest on Santa Cruz, Galápagos. *Ecological Research*, 14, 405–408.
- Köhler P, Ditzer T, Huth A (2000). Concepts for the aggregation of tropical tree species into functional types and application to Sabah's lowland rain forest. *Journal of Tropical Ecology*, 16, 591–602.
- Li YD (李意德) (1993). Comparative analysis for biomass measurement of tropical mountain rain forest in Hainan Island, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 13, 313–320. (in Chinese with English abstract)
- Li SY (李素英), Li XB (李晓兵), Ying G (莺歌), Fu N (符娜) (2007). Vegetation indexes-biomass models for typical semi-arid steppe—A case study for Xilinhot in Northern China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 31, 23–31. (in Chinese with English abstract)
- Lu D, Mausel P, Brondizio E, Moran E (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, 198, 149–167.
- Lu Y (陆阳), Li MG (李鸣光), Huang YW (黄雅文), Chen ZH (陈章和), Hu YJ (胡玉佳) (1986). Vegetation of Bawangling gibbon natural reserve, in Hainan Island. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica* (植物生态学与地植物学学报), 10, 106–114. (in Chinese with English abstract)
- Phua MH, Saito H (2003). Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29, 429–440.
- Saatchi SS, Houghton RA, Dos Santos Alvala RC, Soares JV, Yu Y (2007). Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 13, 816–837.
- SPSS (2004). *SPSS for windows*, Version 13.0. Chicago.
- Swaine MD, Whitmore TC (1988). On the definition of

- ecological species groups in tropical forests. *Vegetatio*, 75, 81–86.
- Tan K, Piao S, Peng C, Fang J (2007). Satellite-based estimation of biomass carbon stocks for northeast China's forests between 1982 and 1999. *Forest Ecology and Management*, 240, 114–121.
- Todd SW, Hoffer RM, Milchunas DG (1998). Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 427–438.
- Vanclay JK (1995). Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. *Forest Science*, 41, 7–42.
- Verburg R, van Eijk-Bos C (2003). Effects of selective logging on tree diversity, composition and plant functional type patterns in a Bornean rain forest. *Journal of Vegetation Science*, 14, 99–110.
- Wang ZX (王正兴), Liu C (刘闯), Huete AL (2003). From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 979–987. (in Chinese with English abstract)
- Zang RG (臧润国), An SQ (安树青), Tao JP (陶建平), Jiang YX (蒋有绪), Wang BX (王伯荪) (2004). *Biodiversity and Mechanism of Maintenance of the Tropical Forest in Hainan Island* (海南岛热带林生物多样性维持机制). Science Press, Beijing, 1–169. (in Chinese)

责任编辑: 安树青 责任编辑: 李 敏