

文章编号: 1007 4619(2006)03 0387-10

# 红树林湿地植被生物量的雷达遥感估算

黎 夏<sup>1</sup>, 叶嘉安<sup>2</sup>, 王树功<sup>3</sup>, 刘 凯<sup>4,5</sup>, 刘小平<sup>1</sup>, 钱峻屏<sup>5</sup>,  
陈晓越<sup>2</sup>, 何执兼<sup>1</sup>, 覃朝锋<sup>3</sup>

(1. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 2 香港大学 城市规划及环境管理研究中心, 香港;  
3. 中山大学 环境科学研究所, 广东 广州 510275 4. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640  
5. 广州地理研究所, 广东 广州 510070)

**摘 要:** 根据雷达后向散射系数建立了红树林湿地植被生物量的估算模型, 并运用遗传算法确定其中非线性模型的最优参数。对比分析表明, 雷达后向散射系数模型比 *NDVI* 模型在植被生物量估算中有更高的精度。使用 *NDVI* 指数有可能导致某些植被类型的生物量估算出现较大的误差。这是因为一些具有密集冠层的草本植被(例如互花米草等)有比红树林高得多的 *NDVI* 值。而雷达遥感所具有的侧视特点及一定的穿透能力能有效地获取植被的垂直信息, 大大减低植被生物量估算的误差。

**关键词:** 雷达遥感; 遗传算法; 生物量; 红树林湿地; *NDVI*

**中图分类号:** TP79 X87 **文献标识码:** A

## Estimating Mangrove Wetland Biomass Using Radar Remote Sensing

LIXia<sup>1</sup>, Anthony GarOn Yeh<sup>2</sup>, WANG Shu-gong<sup>3</sup>, LIU Kai<sup>4,5</sup>, LIU Xiao-ping<sup>1</sup>,  
QIAN Jun-ping<sup>5</sup>, CHEN Xiao-yue<sup>2</sup>, HE Zhi-jian<sup>1</sup>, QN Chao-feng<sup>3</sup>

(1 School of Geography and Planning, Sun Yat sen University, Guangdong Guangzhou 510275 China;  
2 Centre of Urban Planning and Environmental Management, The University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China;  
3 Institute of Environmental Science, Sun Yat sen University, Guangdong Guangzhou 510275 China;  
4 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangdong Guangzhou 510640 China;  
5 Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Guangzhou 510070 China)

**Abstract** Guangdong in south China has the largest area of mangrove wetlands in China. However, the mangrove wetlands have been rapidly diminishing because of the rapid urbanization. Remote sensing can be used to provide important information for the protection of the mangrove wetlands. Traditional optical remote sensing has difficulties in monitoring the wetlands in this region because of frequent cloud covers. The well known *NDVI* index from optical remote sensing has drawbacks in obtaining the trunk information for mangrove forests. In this paper, comparisons were made between the *NDVI* models and backscatter models in estimating wetland biomass. Regression and analytical models were used to establish the relationships between remote sensing data and wetland biomass. The optimal parameter values for the analytical model were determined by using genetic algorithms. Experiments indicate that the models using radar remote sensing data have significant accuracy improvement in terms of Root Mean Square Error (RMSE). It is found that the use of the single *NDVI* index may produce serious errors in biomass estimation. The errors occur because some herbaceous species with dense canopy, such as *Spartina anglica*, may have much higher *NDVI* values than mangrove forests.

**Key words** radar remote sensing; genetic algorithm; biomass; mangrove wetland; *NDVI*

收稿日期: 2005-02-22 修订日期: 2005-10-08

基金项目: 广东省自然科学基金项目(031647)、“985工程”GIS与遥感的地学应用科技创新平台重大项目。

作者简介: 黎 夏(1962—), 男, 中山大学特聘教授, 博士生导师。1986年硕士获北京大学硕士学位, 1996年获香港大学博士学位, 1997—1998年在香港大学进行博士后研究。主要从事遥感和地理信息科学研究。已在国内外刊物上发表论文 120篇。E-mail: lixia@mail.sysu.edu.cn  
(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 1 引 言

湿地是生态系统中非常重要的组成部分,它为众多的生物提供了栖息地。生长在潮汐带及海陆相接的河口带的红树林是地球上具有很高生产力和极多生物多样性的湿地类型之一。红树林不仅为众多海洋和陆地动植物提供了栖息地,它还有助于减轻台风在浅海区的危害,而且能够吸收污染物作为自己的生长原料,从而净化水质。因此红树林对健康的海洋生态起着很大的作用。然而,这些独一无二的近海岸热带树林正遭受严重的破坏。

广东拥有中国最大面积的湿地资源,占了全国的近一半的数量<sup>[1]</sup>。由于高速的城市化进程,广东的湿地正在快速消失。在广东许多海岸地区,由于养殖业所进行的围垦工程,已经造成大批的红树林迅速消失,尤其是在珠江三角洲地区。保护湿地,特别是红树林,已经成为广东省政府的重要议程之一。最近,联合国环境署全球环境基金(UNEP GEF)已经启动了恢复广东省东海岸地区红树林湿地环境的计划。然而,关于广东湿地的精确、实时的信息却难以获取。传统的实地测量难以获取这些信息。因此,遥感技术成为监测该区域红树林的有力工具。

雷达遥感已经被用来进行包括湿地在内的植被定量研究,譬如农作物估产<sup>[2,3]</sup>、湿地森林结构<sup>[4]</sup>、北方森林的生物量<sup>[5]</sup>、红树林生物量<sup>[6]</sup>,以及湿地草类植被的生物量<sup>[7]</sup>等研究。雷达遥感具有侧视特点所使用的波长比光学遥感的要长,具有一定的穿透性,能获得更准确的植被立体信息。植被的生物量主要由树干和枝干来组成,它们通常占了60%以上的生物量<sup>[8]</sup>。因此,雷达遥感应该比光学遥感在植被生物量估算方面更有优势。

利用遥感影像对珠江口湿地进行定量研究的文献非常有限。何执兼等人利用遥感对广东海岸湿地的利用方式进行了研究<sup>[9]</sup>。这些研究基本采用肉眼解译的方法从遥感图像上勾画湿地的边界,其解译结果受主管因素影响很大;最近李天宏等人也利用光学遥感的方法对深圳河河口红树林变化进行了分析<sup>[10]</sup>。利用雷达遥感对本地区的湿地进行研究还没有报道。本研究目的在于对比雷达遥感和光学遥感估算红树林生物量的能力,并通过实验找出最优的红树林生物量估算模型。

## 2 研究方法

用实地测量的方法获取植被的生物量信息,工作量十分庞大而耗时,在交通不便的湿地地区也很不可行。许多学者提出了利用遥感方法来对植被生物量进行定量的方法<sup>[11-13]</sup>。目前,利用遥感技术获取生物量数据的方法主要有两种:光学遥感和雷达遥感。

### 2.1 光学遥感

在光学遥感中,已经有许多不同的指数用来反演植被信息,但最常用的还是 *NDVI* 指数<sup>[13,14]</sup>。*NDVI* 指数是根据植被在红光波段有着明显的吸收性,而在红外波段有着很强的反射性而设计的。不同类型的植被常常由于树叶形状、植株间隔、含水量以及土壤背景的不同而具有各自的特性。

对于 *TM* 影像,*NDVI* 指数可用下面的公式来表示<sup>[13]</sup>:

$$NDVI = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3} \quad (1)$$

研究表明,*NDVI* 指数对于适度密度的植被生物量监测是有效的<sup>[14]</sup>,它与初级生产力有着很高的相关性<sup>[15]</sup>。植被生物量与 *NDVI* 指数之间的相关性可用简单的线性模型来表示:

$$B = a_1 NDVI + a_0 \quad (2)$$

式中,*B* 表示植被的生物量,*a*<sub>1</sub> 是参数。

在许多情况下,*NDVI* 指数与植被生物量并不呈线性关系。可以用对数指数转换来处理它们的非线性关系<sup>[16]</sup>。基于对数指数的回归模型如下:

$$NDVI = a_1 \ln(B) + a_0 \quad (3)$$

或

$$B = a_0 e^{a_1 NDVI} \quad (4)$$

然而,对数转换在某些情况下可能并不适合复杂的非线性关系。在这种情况下,多项式模型可能更为有效。下面是二次多项式模型:

$$B = a_2 NDVI^2 + a_1 NDVI + a_0 \quad (5)$$

### 2.2 雷达遥感

传统 *NDVI* 指数反映的主要是植被冠层的信息,对于垂直方向上的特征(例如树高和树干直径等)则显得无能为力,不能全面地获取植被的立体信息。另外,*NDVI* 指数也只对适度密度的植被有效,对具有较高生物量的植被的敏感性不够。例如,

它对热带地区茂密森林的监测效果并不理想<sup>[17]</sup>。此外,在热带和亚热带多云地区,很难获得覆盖整个植被生长期的遥感数据,这也是影响运用 *NDVI* 指数监测热带和亚热带地区植被的另一个问题。

近年来,不少学者开始尝试用雷达遥感快速获取植被生物量信息<sup>[2]</sup>。雷达数据能够用来测量森林的某些生物特征,例如基部面积、树木高度、树木直径和密度<sup>[18]</sup>。这些数据能够为生态保护和林型优化等提供重要依据,也可为模拟人类环境和生态系统的全球变化模型提供重要的信息。

根据线性回归模型,可以建立雷达影像后向散射系数和红树林的生物量估算模型,包括简单的线性模型和对数指数转换模型:

$$B = a_1 \sigma^0 + a_0 \quad (6)$$

和

$$\sigma^0 = a_1 \ln(B) + a_0 \quad (7)$$

或

$$B = a_0 e^{a_1 \sigma^0} \quad (8)$$

在复杂的非线性情况下,可以利用二次多项式方程:

$$B = a_2 \sigma^{02} + a_1 \sigma^0 + a_0 \quad (9)$$

以上的回归模型都要求用经验数据来确定变量的系数,它们不能确定各个成分对生物量估算的影响(如土壤背景和植被)。而分析性(analytical)模型能够提供清晰的结构和思路来理解后向散射相互作用的物理机制,它往往能对研究对象提供更加合理的解析。

在这里,分析性模型的前提是假设红树林湿地的后向散射系数( $\sigma^0$ )能分解为两部分:(1)植被冠层的后向散射;(2)地面(包括树一地面和地表植被)后向散射。后向散射系数的计算公式如下:

$$\sigma^0 = \sigma_v^0 + \tau^2 \sigma_g^0 \quad (10)$$

式中, $\sigma_v^0$ 是植被冠层的后向散射系数, $\tau$ 是植被透过率, $\sigma_g^0$ 是地面的后向散射系数。

公式(10)能进一步表述如下<sup>[19]</sup>:

$$\sigma^0 = \frac{C_1}{-2C_2} (1 - e^{x_2 B}) + C_3 e^{x_2 B} \quad (11)$$

式中, $B$ 是生物量,参数 $C_1$ 和 $C_2$ 与植被湿度有关,参数 $C_3$ 代表了地面的后向散射。

公式(11)也可表达为:

$$B = \frac{1}{2C_2} \ln \left[ \frac{\sigma^0 + \frac{C_1}{2C_2}}{C_3 + \frac{C_1}{2C_2}} \right] \quad (12)$$

分析性模型对于理解后向散射的物理机制提供了清晰的思路。但由于一般的分析性模型其形式较复杂,且基本都是非线性的,因此难以用传统方法来确定方程式的参数值。因此,本文采用遗传算法(GA)来确定上式生物量模型的最优参数值。

遗传算法采用了“适者生存”的原则来获得问题的最优答案。其基本操作包括了交叉和变异<sup>[20]</sup>。遗传算法第一步是根据所要解决的问题来设计染色体。在本文中,染色体有3个基因,对应于 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ 这3个待确定的参数。进化过程的主要依据是使用适应度函数对每个个体进行评估。本适应度函数是计算由 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ 参数确定的生物量与实际生物量之间的差异(误差)。具有最小误差的参数组合(个体)能很好适应环境,也就有较高的概率产生更多的个体。新一代也将由此而具有更好的遗传特性。随着进化的进行,新的后代不断改良。最后,具有最好适应度值的个体就是(12)式的最优参数值。

## 3 应用

### 3.1 研究区概况

研究区选在珠江三角洲珠海的淇澳岛(图1)。淇澳岛面积约为24km<sup>2</sup>,位于亚热带地区,年平均气温为22℃—23℃,年降雨量为1700—2200mm。气候非常适宜于红树林的生长。该地区经常有云层覆盖,因而传统的光学遥感难以对植被状况进行实时监测。

中国曾有三个最大的红树林区,其中之一就位于珠海。然而,由于发展捕虾业而进行的围垦导致了该地区的红树林迅速萎缩。据政府统计,该岛在1999年之前已经消失了1360hm<sup>2</sup>的红树林,到1999年只剩下32hm<sup>2</sup>红树林。从1999年开始,珠海已经通过在该岛种植红树林来试图恢复原来的生态系统。该区域的红树林面积已经从1999年的32hm<sup>2</sup>增加到533hm<sup>2</sup>。

红树林主要位于该岛的西北地区。该地区常见的红树林树种有:秋茄-桐花树-老鼠勒群落(*Kandelia candelA egiceras comiculatum-A canthus ilicifolius*),桐花树-芦苇群落(*A egiceras comiculatum-Phragmites communis*),老鼠勒单优群落(*Acanthus ilicifolius*),无瓣海桑单优群落(*Sonneratia apetala*),木榄-银叶树群落(*Buguiera gymnohiza Heritiera littoralis*)。

无瓣海桑是一种生产快速的红树林树种。一株2年树的高度在3.5m左右,而3—4年树的高度可

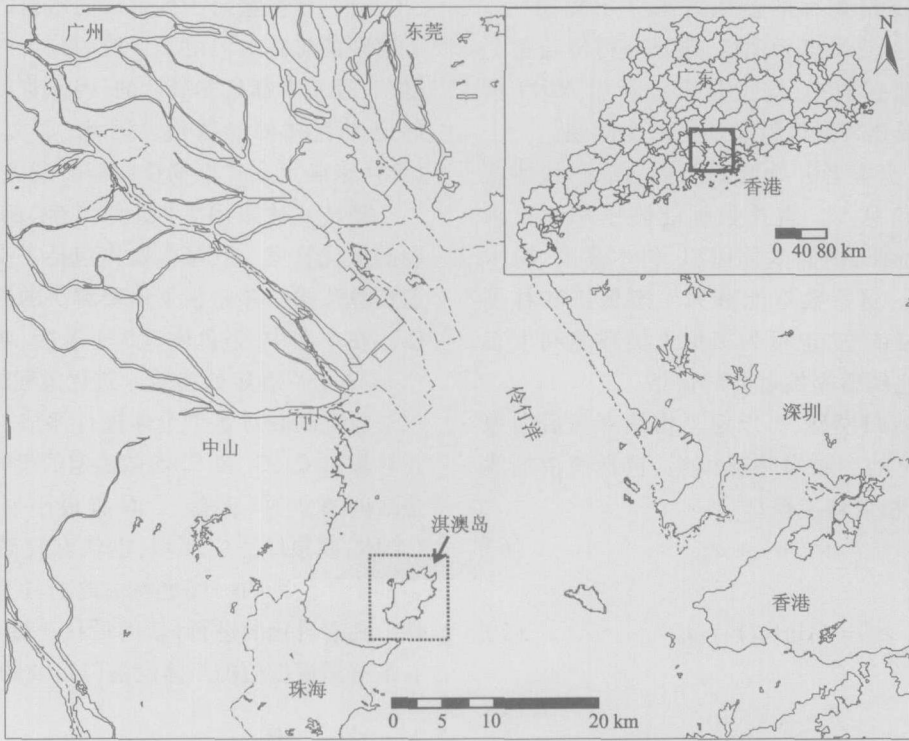


图 1 研究区在珠江三角洲的位置图

Fig 1 Location of the study area in the Pearl River Delta

达到 11.5m。雷达遥感可能是监测它快速生长最适宜的工具。无瓣海桑的生长可以控制互花米草群落 (*Spartina anglica*) 的入侵。互花米草对红树林地区的入侵, 已经导致了大面积的红树林死亡。在本研究区, 互花米草生长于近海湿地的边缘地带。该地需要用定量的方法来评估对互花米草的有效控制。红树林生物量和互花米草分布情况的测定能够为红树林保护提供有用信息, 而雷达遥感正是实现这些目标的重要工具。

### 3.2 遥感数据及数据处理

在本次实验中, 采用了 Radarsat 1 精细模式 ( $F_2$ ) 的图像来估算红树林生物量和测定互花米草的分布情况。该图像的分辨率为  $8.3\text{m} \times 8.4\text{m}$ , 扫描地面的宽度为 50km, 平均入射角范围为  $37^\circ - 41^\circ$ 。用光学遥感数据 (TM 影像) 来进行对比。表 1 列出了这些遥感数据的有关信息。

在数据用于湿地分析之前, 需要进行数据预处理。首先将雷达影像的 DN 值转为后向散射值。在许多定量分析中, 使用后向散射值能比原始的 DN 值获得更合理的分析结果。采用  $3 \times 3$  窗口的 Frost 滤波器来压抑雷达图像上的斑点; 使用控制点将雷达影

表 1 研究区所用遥感数据

Tab 1 Remote sensing data for the study area

遥感数据	过境时间
Landsat TM	2004-06-13
Radarsat 1 $F_2$	2004-05-15

像和 TM 影像与数字化的地形图进行配准, 将原始影像的行列坐标体系转为中国的大地坐标系 (CGO)。

### 3.3 训练数据

在 Radarsat 1 过境时进行地面生物物的同步测量, 以获取训练数据。采用经验公式, 通过对红树林的胸高 (1.3m) 处直径测量来确定其生物量<sup>[14]</sup>。在本文中, 采用非破坏性的双重采样方法<sup>[21]</sup>测定红树林生物量。在研究区内布置了 100 个采样点, 每个采样点的统计区域为  $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。在每个采样点实地测量了每棵树胸高位置的直径。研究区每棵红树林树木生物量的经验计算公式如下:

$$B_a = 3.396 \times 10^{-2} \times D_h^2 \quad (13)$$

式中,  $B_a$  是每棵红树林树木的干生物量 (kg),  $D_h$  是胸高位置处 (1.3m) 的直径 (cm)。

训练区的红树林生物量即为每棵树的生物量乘

以红树林的数目。同时, 采用称重的方法测量了该地区草类植物的生物量。每个测量点的坐标通过 GPS 记录下来, 这样便于在建立生物量模型时将实测数据与遥感数据一一对应。

### 3.4 NDVI 和后向散射系数估算湿地生物量的对比

对适度密度的植被, NDVI 是反映植被生长特征最好的指数之一。许多研究显示它与植被生物量<sup>[14]</sup>、农作物产量<sup>[12]</sup>之间具有很高的相关性。本

研究也建立了估算植被生物量的简单线性 NDVI 回归模型 (表 2)。该模型的相关系数 ( $R$ ) 为 0.626 估算的生物量 ( $B$ ) 均方根误差为  $0.99 \text{ kg m}^{-2}$ ; 也利用了对数指数转换模型来作为对比。但实验结果显示它的回归结果并不优于简单线性模型, 相关系数 ( $R$ ) 仅为 0.598 均方根误差为  $1.04 \text{ kg m}^{-2}$ 。这是由于这种转换可能并不是反映 NDVI 与生物量之间的非线性关系的最优模型。实际上, 二次多项式模型估算红树林生物量具有更高的精度, 它的相关系数 ( $R$ ) 为 0.668 均方根误差为  $0.95 \text{ kg m}^{-2}$ 。

表 2 使用 NDVI 和后向散射估算湿地生物量的各种模型

Tab 2 Models for estimating wetland biomass using NDVI and backscatter

估算模型	相关系数 $R$	RMSE $\text{kg m}^{-2}$
(1) 光学遥感 (NDVI)		
$B = 40.303NDVI - 12.546$	0.626	0.993
$B = 0.037403163 e^{0.918NDVI}$	0.598	1.042
$B = 117.308NDVI^2 - 68.821NDVI + 11.460$	0.668	0.946
(2) 雷达遥感 ( $\sigma^0$ )		
$B = 1.801\sigma^0 + 20.878$	0.726	0.868
$B = 49.94887588e^{0.361\sigma^0}$	0.741	0.857
$B = 0.357(\sigma^0)^2 + 7.775\sigma^0 + 43.042$	0.841	0.700
$B = \frac{1}{0.000107} \ln \left( \frac{\sigma^0 + 5173.696}{5162.104} \right)$		0.813
(3) 光学遥感和雷达遥感结合		
$B = 52.7100NDVI^2 - 24.1790NDVI + 0.0008(\sigma^0)^2 - 0.0839\sigma^0 + 3.7610$	0.769	0.738

实验显示, 利用雷达遥感估算湿地生物量的精度比光学遥感好 (见表 2)。在简单线性回归模型中, 后向散射系数方法的均方根误差值比 NDVI 方法减少了 14.1%; 在指数模型中, 前者比后者减少了 21.4%; 在二次多项式模型中, 则前者比后者的减少达 35.7% (表 3)。

表 3 雷达遥感与光学遥感的 RMSE 改进比较

Table 3 The comparison of RMSE improvement between radar remote sensing and optical remote sensing

后向散射系数比 NDVI 的均方根误差值减少百分比		
简单线性	指数	二次多项式
14.1%	21.4%	35.7%

使用后向散射的分析模型结果同样让人满意, 均方根误差值为  $0.813 \text{ kg m}^{-2}$ 。模型的最优参数值由遗传算法 (GA) 来确定, 借助了 GeneHunter 这个商业性的 GA 软件所提供的基本功能进行计算。在进化过程中, 50 代以后均方根误差值 (最优值) 的改

善趋于稳定, 程序终止, 最优参数的值得到确定。该模型比 NDVI 最优模型 (多项式模型) 的均方根误差值减少了 16.4%。

图 2 是 NDVI 生物量散点图与后向散射生物量散点图的比较。显然, 在湿地生物量的估算中, NDVI 模型比后向散射系数模型在更低的生物量值时趋近于饱和。这说明了后向散射系数模型比 NDVI 模型能适合更大的动态范围, 在涉及高生物量估算时能得到更精确的计算结果。该图也清楚地显示了它们的关系是非线性的。

其次, 进一步评价了雷达遥感和 TM 影像结合在估算湿地生物量的改善程度。在本次研究中, 采用了二次多项式模型来整合 NDVI 和后向散射系数这两个不同的变量。回归分析显示该综合模型的相关系数为 0.769 均方根误差值为  $0.738 \text{ kg m}^{-2}$ 。这表示它优于单纯的 NDVI 模型 (见表 2), 但并不优于多项式的后向散射系数模型。原因在于由 NDVI 引起的误差会降低湿地生物量估算的准确性。

实地调查也显示, 当使用 NDVI 模型估算生物

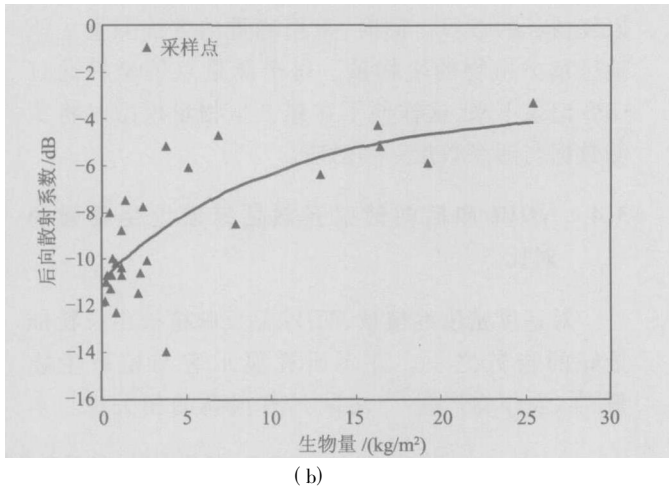
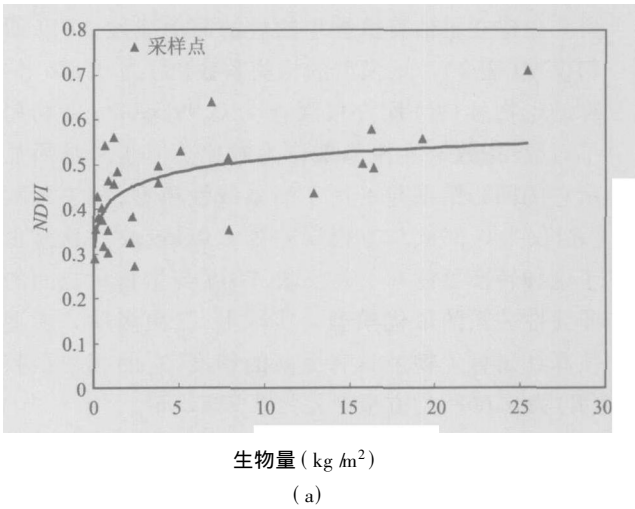


图 2 遥感指数与生物量的散点图

(a) *NDVI* (b) 后向散射系数

Fig 2 Scatter plot of remote sensing data and measured biomass

(a) *NDVI* index (b) Backscatter

量时, 估算结果跟实际情况有相当大的出入。 *NDVI* 值越高, 估算出的生物量也越高。但是对于某些密集草类植物, 例如互花米草, 由此估算出的生物量甚

至比木本的红树林还高。这是由于 *NDVI* 主要反映的是植被冠层顶部的信息, 它不能完全获取树干的信息。例如, 图 3 (a) 位置 *m* (互花米草) 比位置 *l*

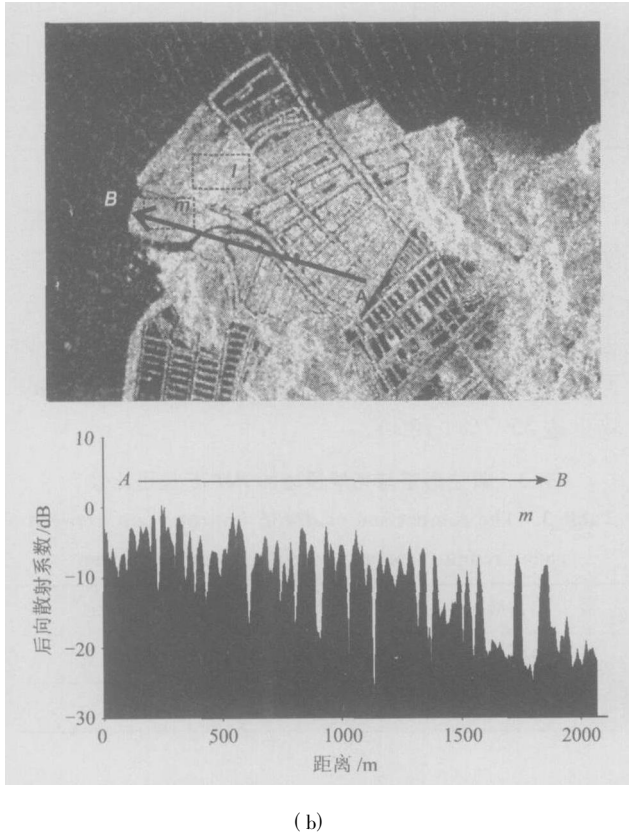
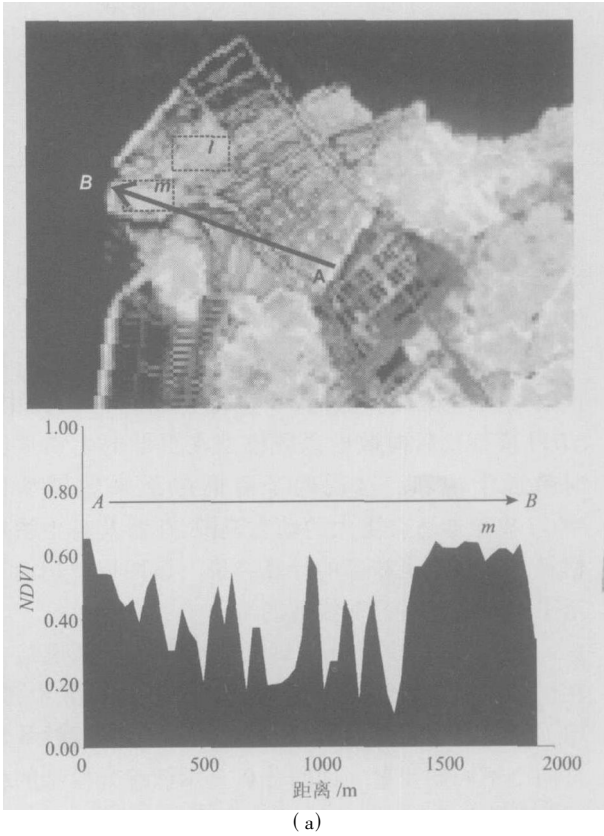
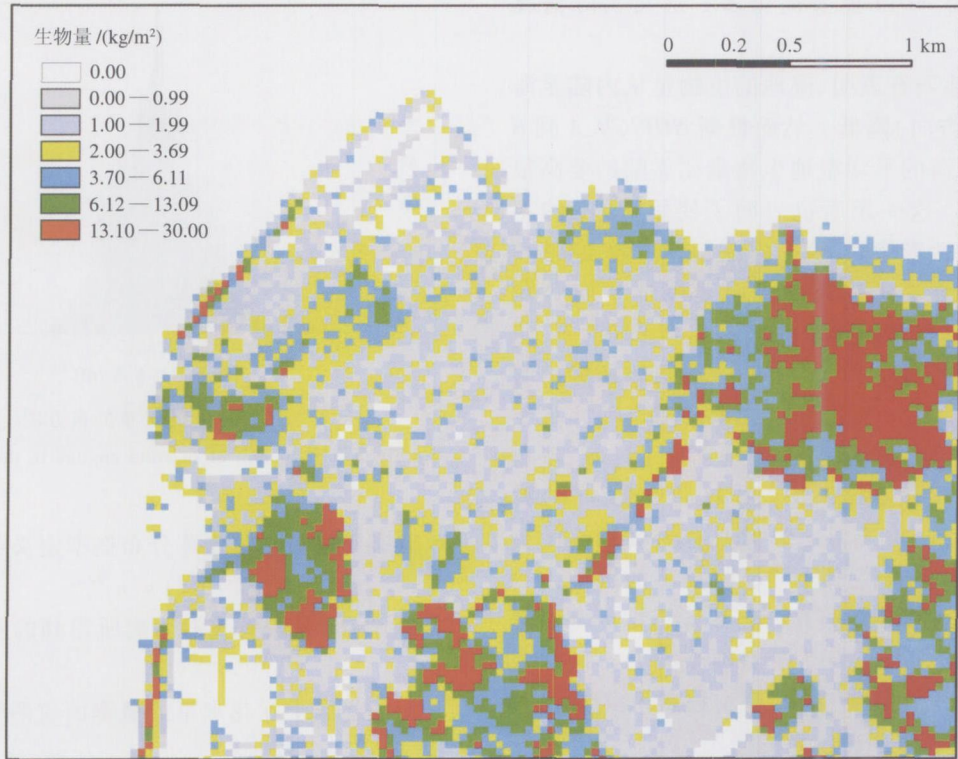


图 3 *NDVI* 和后向散射系数从内陆至海剖面图

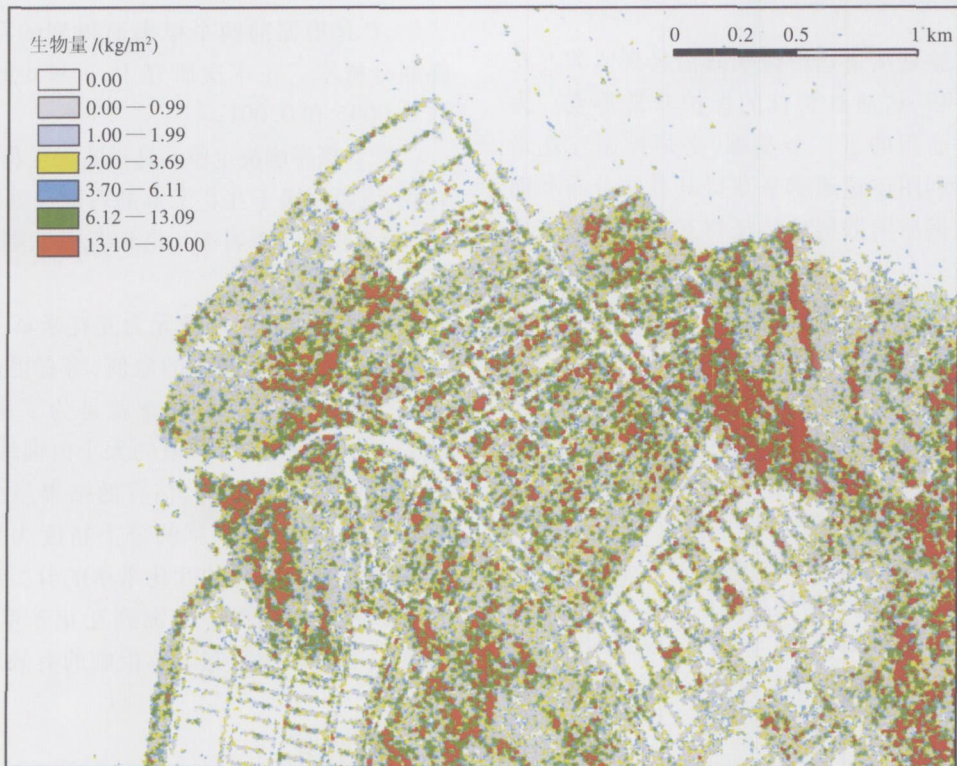
(a) *NDVI* (b) 后向散射系数

Fig 3 Profiles of *NDVI* and backscatter in the study area

(a) *NDVI* index (b) Backscatter



(a)



(b)

图 4 基于 *NDVI* 和后向散射系数的湿地生物量分布图

(a) *NDVI* (b) 后向散射系数

Fig 4 Biomass estimated from the *NDVI* and backscatter models

(a) *NDVI* index (b) Backscatter

(无瓣海桑)的  $NDVI$  值要高得多。这与实际情况不符。

另外,实地调查表明,湿地的生物量从内陆至海(从  $A$  到  $B$  的方向)降低。然而根据  $NDVI$  从  $A$  到  $B$  的方向显示靠海的平均湿地生物量比靠陆的要高很多(图 3(a))。这一矛盾也表明了使用  $NDVI$  的不足。当使用雷达影像时,这一问题得到了解决(图 3(b))。而且,由于雷达影像具有更高的空间分辨率,它还能提供更多的细节信息。

在估算模型建立以后,就可以绘制该地区的湿地生物量分布图。分别利用二次项模型,对基于  $NDVI$  和基于后向散射系数的方法进行了计算,获得了研究区生物量估算结果图(图 4(a)和图 4(b))。可以清楚地看到,由于雷达影像具有更高的空间分辨率,后向散射系数模型能够反映更多的湿地生物量的空间变化情况(图 4(b))。其计算结果与实地调查的结果相吻合。 $NDVI$  模型则获得的空间信息较少(图 4(a)),它在密集的草本植被和无瓣海桑的生物量估算方面存在较大的问题。

### 3.5 互花米草生长面积的测量

另一个实验是从雷达影像获取信息来监测互花米草的生长面积,这对红树林的保护非常重要。为了避免红树林面积的进一步萎缩,必须控制互花米草入侵。可以利用雷达遥感来获得其具体分布和面积等情况。根据后向散射的特征将互花米草从红树林中区分出来。

本研究是使用一个简单的专家决策系统将互花米草从雷达影像上识别出来的。在雷达影像上互花米草与红树林的后向散射系数的差别还是比较明显的。互花米草的后向散射系数一般在  $-8$ — $-9$  dB 之间,而周围红树林的后向散射系数为  $-4$ — $-5$  dB 之间,其中的无瓣海桑则可高达  $-1$ — $-2$  dB。

根据实地调查,先在雷达影像上确定互花米草的训练区。从训练数据可看到互花米草的后向散射系数直方图呈正态分布,平均值( $\sigma^0$ )为  $-8.662$  dB(图 5)。因此,某个像元属于互花米草的概率可以表达为:

$$P(\sigma^0) = e^{-a \sqrt{(\sigma^0 - \sigma^0)^2}} \quad (14)$$

式中,  $P(\sigma^0)$  是依据后向散射值( $\sigma^0$ )而得到的互花米草分布概率,这里( $\sigma^0$ ) =  $-8.662$

另外,实地调查显示互花米草仅生长在近海地区湿地的前缘地带。因此,引入一个表示离海距离的空间变量能够提高监测互花米草的准确性。随离

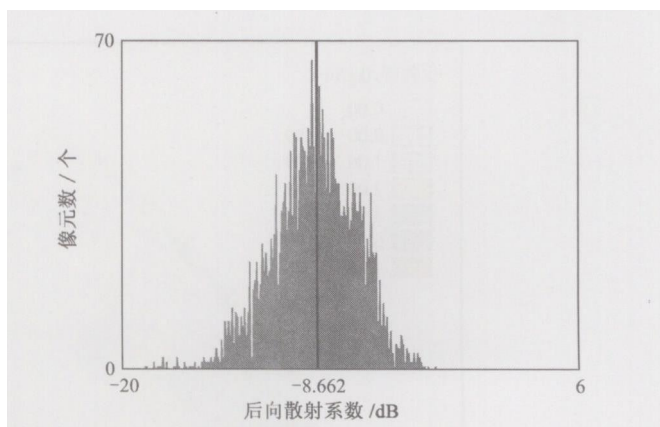


图 5 互花米草的直方图

Fig 5 Histogram of spartina anglica in the study area

海距离变化的互花米草分布概率定义如下:

$$P(d) = e^{-bd_{sea}} \quad (15)$$

式中,  $P(d)$  是根据离海距离所得到的互花米草分布概率。

最终属于互花米草的概率由这两个概率相乘而得,即:

$$P = P(\sigma^0) \times P(d) = e^{-a \sqrt{(\sigma^0 - \sigma^0)^2}} \times e^{-bd_{sea}} \quad (16)$$

式中,  $P$  是根据前两个概率而得到的互花米草的最终联合概率。在本次研究中,  $a$  和  $b$  的参数值分别取 0.0005 和 0.001。

联合概率能决定像元是否属于互花米草。概率值越高,该像元属于互花米草的可能性就越大。使用阈值( $T$ )来决定是否属于互花米草,其法则表述如下:

IF  $P > T$   
THEN 判断该像元为互花米草

很显然,降低阈值的取值,将有更多的像元归为互花米草。进行实地调查就是为了确定适当的阈值。在本次研究中,阈值的大小由训练数据来确定。实验显示,  $T=0.70$  时,估算的结果最令人满意。根据训练数据,互花米草的分类精度为 92.2%。图 6 是使用本规则获得的互花米草的分类结果。由此方法可以从雷达图像上监测到互花米草的生长面积,以评价有关控制互花米草措施的有效性。

## 4 结 论

研究表明雷达遥感较适宜进行湿地植物生物量的估算。由于雷达遥感具有侧视特点及一定的穿透力,它能比光学遥感更好地估算红树林的生物量。众多研究表明  $NDVI$  与植被参数间有着很高的相关性。

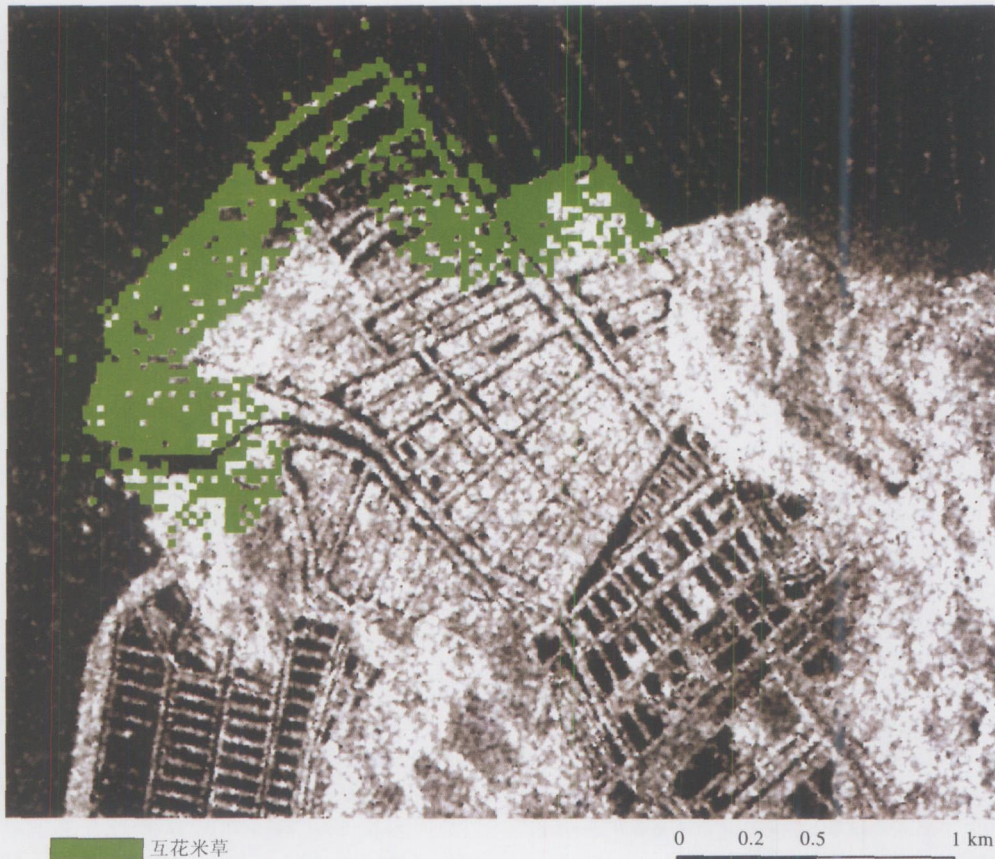


图 6 根据 SAR 图像的后向散射系数获得的互花米草分布图

Fig 6 Delineation of *Spartina anglica* according to the back scatters of the SAR image

然而, 本研究显示  $NDVI$  在估算湿地生物量中可能会有较大的偏差。根据实验, 使用  $NDVI$  指数明显高估了某些草本植物 (如互花米草) 的生物量, 而低估了某些木本红树林 (如无瓣海桑) 的生物量。其原因在于该地区的互花米草生长非常茂密, 它的光谱反射率非常高。由于光学遥感难以穿透植被,  $NDVI$  值主要反映植被冠层顶部的信息, 而反映红树林 (如无瓣海桑) 植株的高度信息则十分困难。因此, 互花米草的  $NDVI$  值要比无瓣海桑的  $NDVI$  值高得多。

分析表明, 简单线性模型并不是估算湿地生物量的最优方法。多项式模型在生物量估算中有更高的精度。但采用其他非线性模型 (如对数 指数模型) 的效果并不理想。

$NDVI$  模型在较低的湿地生物量情况下就可能趋于饱和。由于后向散射系数模型比  $NDVI$  模型能适合更大的动态范围, 因此使用后向散射系数模型能够得到更符合实际情况的估算结果。雷达遥感建立的估算模型比光学遥感建立的估算模型精度提高了 35.7%。但  $NDVI$  和后向散射系数的综合模型

并不能得到更好的估算结果, 这是由  $NDVI$  自身产生的误差所造成。

在某些情况下, 分析模型也许更具有合理性, 因为它能够提供更好的建模思路。然而, 使用非线性模型时, 参数值的确定非常困难, 回归分析难以推算出这些参数值。本次研究表明使用遗传算法可以方便地确定最优参数值。遗传算法得到的模型结果比其他模型结果具有更高的精度。

互花米草生长面积的监测能为红树林的保护提供有用的信息。互花米草是一种生长迅速的草本植物, 它会入侵红树林生长区域, 从而导致红树林死亡。使用雷达影像的后向散射系数模型能够对互花米草进行监测。互花米草在后向散射系数直方图上呈正态分布。根据训练数据定义互花米草分布的概率。由于互花米草仅仅存在于近海湿地的前缘地带, 所以引入另一个空间变量有助于将互花米草与其他草本植物区分开来。用这些变量得到的联合概率可定义一个简单的专家决策系统。实地调查证实了实验结果与实际情况趋于一致。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Wang S G, Chen X G. Status Quo of Coastal Wetlands and Their Protection in Guangdong Province [ J ]. *Chongqing Environmental Science* 1998 **20**( 1 ): 4—11 [ 王树功, 陈新庚. 广东省滨海湿地的现状与保护 [ J ]. 重庆环境科学, 1998 **20**( 1 ): 4—11 ]
- [ 2 ] Wigneron J, Femazoli P, Olibo A, *et al*. A Simple Approach to Monitor Crop Biomass from C-band Radar Data [ J ]. *Remote Sensing of Environment* 1999 **69**: 179—188
- [ 3 ] Le Toan T, Ribbes F, Wang L F, *et al*. Rice Crop Mapping and Monitoring Using ERS-1 Data Based on Experiment and Modeling Results [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1997 **35**( 1 ): 41—55.
- [ 4 ] Townsend P A. Estimating Forest Structure in Wetlands Using Multitemporal SAR [ J ]. *Remote Sensing of Environment* 2002 **79**: 288—304
- [ 5 ] Pulliainen J, Mäkelä P J, Hallikainen M T. Seasonal Dynamics of C-band Backscatter of Boreal Forests with Applications to Biomass and Soil Moisture Estimation [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1996 **34**( 3 ): 758—770.
- [ 6 ] Mougin E, Proisy G, Marty G, *et al*. Multifrequency and Multipolarization Radar Backscattering from Mangrove Forests [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1999 **37**( 1 ): 94—102.
- [ 7 ] Moreau S, Le Toan T. Biomass Quantification of Andean Wetland Forages Using ERS Satellite SAR Data for Optimizing Livestock Management [ J ]. *Remote Sensing of Environment* 2003 **84**: 477—492
- [ 8 ] Bergen K M, Dobson M C. Integration of Remotely Sensed Radar Imagery in Modeling and Mapping of Forest Biomass and Net Primary Production [ J ]. *Ecological Modelling* 1999 **122**: 257—274.
- [ 9 ] He Z J, Guan L J, Ke D, *et al*. Investigation, Exploitation and Management of Guangdong Coastal Wetland Using Remote Sensing [ J ]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* 2001 **5**: 122—128 [ 何执兼, 关履基, 柯栋等. 广东省海岸带湿地遥感调查与开发 [ J ]. 中山大学学报 ( 自然科学版 ), 2001 **5**: 122—128 ]
- [ 10 ] Li T H, Zhao Z J, Han P. Detection and Analysis of Mangrove Changes with Multi-temporal Remotely Sensed Imagery in the Shenzhen River Estuary [ J ]. *Journal of Remote Sensing* 2002 **6**( 5 ): 364—369 [ 李天宏, 赵智杰, 韩鹏. 深圳河河口红树林变化的多时相遥感分析 [ J ]. 遥感学报, 2002 **6**( 5 ): 364—369 ]
- [ 11 ] Huete A R. A Soil Adjusted Vegetation Index ( SAVI ) [ J ]. *Remote Sensing of Environment* 1988 **25**: 295—309
- [ 12 ] Li X. A Two-axis Adjusted Vegetation Index ( TWVI ) [ J ]. *International Journal of Remote Sensing* 1994 **15**( 7 ): 1447—1458.
- [ 13 ] Mather P M. Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction [ M ]. Chichester: John Wiley & Sons, 1999
- [ 14 ] Foody G M, Cutler M E, Morrow J, *et al*. Mapping the Biomass of Bornean Tropical Rain Forest from Remotely Sensed Data [ J ]. *Global Ecology & Biogeography*, 2001, **10**( 4 ): 379—386
- [ 15 ] Goward S, Tucker C J, Dye D. North American Vegetation Patterns Observed with the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer [ J ]. *Vegetation* 1985 **64**: 3—14.
- [ 16 ] De Jong S M S, Pebesma E J, Lacaze B. Above-ground Biomass Assessment of Mediterranean Forests Using Airborne Imaging Spectrometry: the DAIS Payne Experiment [ J ]. *International Journal of Remote Sensing* 2003 **24**( 7 ): 1505—1520.
- [ 17 ] Sader S A, Waide R B, Lawrence W T, *et al*. Tropical Forest Biomass and Successional Age Class Relationships to a Vegetation Index Derived from Landsat TM Data [ J ]. *Remote Sensing of Environment* 1989 **28**: 143—156.
- [ 18 ] Le Toan T, Beaudoin A, Rim J, *et al*. Relating Forest Biomass to SAR Data [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1992 **30**( 2 ): 403—411
- [ 19 ] Kurvonen I, Pulliainen J, Hallikainen M. Retrieval of Biomass in Boreal Forests from Multitemporal ERS-1 and JERS-1 SAR Images [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1999 **37**( 1 ): 198—205
- [ 20 ] Holland J. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence [ M ]. Cambridge, Mass: MIT Press, 1992
- [ 21 ] Bonham C D. Measurement for Terrestrial Vegetation [ M ]. USA: Wiley-Interscience, 1989