

文章编号:1001-1498(2011)02-0144-07

基于 TM 影像纹理与光谱特征和 KNN 方法估算 5 种红树林群落生物量*

曹庆先^{1,2}, 徐太平², 鞠洪波³

(1. 广西红树林研究中心, 广西红树林保护重点实验室, 广西 北海 536000; 2. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520;
3. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要:为研究红树林生物量的遥感估算方法, 本文提取广西和海南部分红树林 TM 遥感影像光谱及纹理特征, 结合同地区地面调查的生物量数据, 应用 KNN 方法, 对生物量进行了遥感估算, 并和多元逐步回归分析方法比较。研究表明: 应用 KNN 方法估测精度随尺度的增大而增大, 且 K 值取 10 优于 K 值取 5; 在像元尺度上, 回归方法估测生物量优于 KNN 方法。

关键词:纹理; KNN; 生物量估算; 均方根误差; 平均误差; 预估计精度

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

Biomass Estimation of Five Kinds of Mangrove Community with the KNN Method Based on the Spectral Information and Textural Features of TM Images

CAO Qing-xian^{1,2}, XU Da-ping¹, JU Hong-bo³

(1. Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Key Lab for Mangrove Conservation, Beihai 536000, Guangxi, China;
2. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;
3. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to research the biomass of mangrove based on remote sensing, the biomass of mangrove with the method of KNN was estimated by extracting spectral information and textural features from TM images, combining the field survey biomass data and compared with that of multiple regression analysis. The results showed that with KNN method, the accuracy increased with the extension of the scale, and $K = 10$ was better than $K = 5$ in the accuracy. Estimating biomass of mangrove in the pixel scale, the multiple regression analysis was better than that by using KNN method.

Key words: texture; KNN; biomass estimating; root-mean-square error; mean error; predication estimation accuracy

红树林生态系统是地球上生产力最高的生态系统之一^[1], 尽管它们只覆盖了地球表面 0.1% 的面积, 却固定了相当于大气中 5% 的碳^[2], 在碳循环方面的作用不容忽视。红树林是潮汐类沼泽, 其地面调查极其艰难, 基于遥感影像进行红树林生物量估测的研究并不多见, 且纹理特征值和 KNN 方法在遥

感估算生物量研究领域应用也极少, 将其用于红树林遥感估测的研究还未见相关报道。纹理是复杂的视觉实体或子模式的组合, 有亮度、色彩、陡度、大小等特征^[3], 可以帮助抑制异物同谱、同物异谱现象的发生^[4]。2003 年 Dengsheng Lu^[5] 应用 TM 影像研究热带森林发现, 应用纹理特征值结合波段值或植被

收稿日期: 2010-03-31

基金项目: 广西科学院专项“基于遥感影像的红树林生物量、碳贮量的研究”(08YJ16HS01); 广西科学基金项目(桂科基 0575025)

作者简介: 曹庆先(1981—), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 从事生态学 3S 技术应用研究。

* 感谢中国林科院资源信息所张怀清老师等给予数据和技术上的支持。

指数来估测森林生物量时,其精度比单独应用遥感影像的波段值或植被指数精度有较大提高,取得较好的效果。2006年,李明诗等^[6]对 SPOT5 HRG 影像进行纹理分析,结合研究区地形特征,分别对 5 个森林类型实现其生物量估算模型辨识与验证,结果发现,纹理特征值在回归方程中有较大贡献。Haralick^[7]定义了 14 种纹理特征,最常用的用于提取遥感图像中纹理信息的特征统计量主要有:均值(ME)、方差(VA)、均匀性(HO)、对比度(CO)、相异性(DI)、熵(EN)、二阶矩(SM)、灰度相关(CR) 8 种。KNN 被称为基准样地法(RSP)^[8-10],该方法也可看作反距离权重法^[11],应用遥感影像的不同波段值来计算特征空间之间的距离,每一个特征空间按照特定的规则分配一个权重,其规则根据与其最相似光谱信息的特征空间来决定^[12]。本研究是基于 TM 影像纹理与光谱特征,应用 KNN (K-Nearest Neighbor) 方法进行 5 种红树林生物量的估算,探讨这种估算方法的可行性。

1 地面调查

本研究共有 5 种红树群落 126 个样地,其中,木榄(*Bruguiera gymnorhiza* (L.) Lamk.) 样地 21 个,红海榄(*Rhizophora stylosa* Griff.) 样地 16 个,秋茄(*Kandelia candel* (L.) Druce) 样地 23 个,桐花树(*Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco) 样地 38 个,白骨壤(*Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.) 样地 28 个。广西红树林样地主要分布在 4 个海湾:珍珠湾、钦州湾、廉州湾、铁山港湾。为能综合反映各湾内各树种的分布与生长状况,在每个海湾内,选择 3 个具有代表性的红树林断面开展红树林群落调查,每条断面设置向陆林带、中间林带和向海林带 3 个调查站位,每一站位设置 3 个 20 m × 20 m 的样地进行群落调查,样地选取植被类型均一旦连续的区域。每个断面 9 个样地,每个海湾 3 个断面 27 个样地基本可以代表该湾的红树林状况,共 108 个样地。另外,由于上述样地中红海榄、木榄样地较少,又在山口红树林保护区设置 8 个红海榄样地,在海南东寨港红树林保护区设置 10 个木榄样地。所有样地进行每木检尺,并测得覆盖度、叶面积指数、土壤盐度等,用 GPS 记录样地中心点坐标。样地调查时间为 2004—2008 年。

对于红树群落叶生物量及地上部分总生物量的计算,本研究采用广西大学林学院温远光^[13]老师的广西英罗港 5 种红树植物群落的生物量方程。

2 数据处理与信息提取

2.1 遥感影像预处理

本研究共有 3 副 TM 影像,广西西段、广西东段、海南东寨港,均为 2004 年 10 月拍摄。遥感影像预处理包括几何精校正和影像裁切两部分,鉴于红树林分布区域地形较平坦,本研究没有对影像做地形校正。

几何精校正以 WGS84 地理坐标的 1:10 000 矢量地形图为基准,每幅图选取 50 个明显地物点,采用三次多项式模型校正,校正误差控制在 0.5 个像元以内,采用最近邻插值方法进行重采样,以尽量留原始影像像素值^[14]。

影像裁切即应用红树林矢量分布图裁切遥感影像,得到研究区红树林分布范围内的遥感影像。本研究尤其应该注意被水淹没红树林区影像(红树林矢量分布范围内归一化植被指数($NDVI \leq 0$ 的区域)的切除。

2.2 实测 GPS 点数据处理

为了与遥感影像的校正基于同一标准,作者以用来校正遥感影像的数据对 126 个样地点做仿射变换,这样可以大大减少样地点坐标与相应影像的匹配误差。

将样地数据与上一步裁切得到的红树林影像进行叠加,检验是否所有样地点都落在红树林影像范围内。

2.3 遥感影像信息提取

对精校正和裁切后的影像,分别进行缨帽变换(KT)、主成分变换(PC)以及多种植被指数变换。考虑到图像几何校正误差和 GPS 本身的误差,利用 ArcGIS 的 Sample 工具,提取样地点所在像元及其周围 4 个像元的灰度值(DN),取 5 个值的平均做为该样地遥感信息源,这样虽然会带来一定误差,但会使样地数据距离实际值的波动更小。

2.3.1 波段值提取 本研究提取的 TM 影像单波段的数据和其派生数据有:TM1、TM2、TM3、TM4、TM5、TM6、TM7、TM1/TM2、TM1/TM3、TM2/TM3、TM1/TM4、TM3/TM4、TM2/TM4、TM1/TM5、TM2/TM5、TM3/TM5、TM4/TM5、TM1/TM7、TM2/TM7、TM3/TM7、TM4/TM7、TM5/TM7、 $TM(4+5-2)/TM(4+5+2)$ 、 $TM(4 \times 3)/7$ 、 $TM3/TM(1+2+3+4+5+7)$ 、 $1/TM1$ 、 $1/TM2$ 、 $1/TM3$ 、 $1/TM4$ 、 $1/TM5$ 、 $1/TM7$,共 31 个因子。

2.3.2 植被指数、缨帽变换和主成分变换指数提取

比值植被指数: $RVI = TM4/TM3$;

归一化植被指数: $NDVI = (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3)$;

环境植被指数: $DVI = TM4 - TM3$;

调整土壤亮度的植被指数: $SAVI = (1 + 0.5) \times (TM4 - TM3)/(TM4 + TM3 + 0.5)$;

垂直植被指数: $PVI = 0.939(TM4) - 0.344(TM3) + 0.09$ 。

式中 $TM3$ 、 $TM4$ 分别表示 TM 影像第三、第四波段灰度值。

缨帽变换(KT):提取亮度指数(BRIGHT)、绿色指数(GREEN)、湿度指数(WET)指数值;主成分变换(PC):经主成分变换,前3个主成分PC1、PC2、

PC3 包含了 TM 影像 95% 以上的信息,取 PC1、PC2、PC3 作为研究变量。

2.3.3 纹理特征提取 作者采用基于灰度共生矩阵(GLCM)的方法分别提取 TM7 个波段的常用的 8 种纹理特征值,选择步距为 1,3 × 3 窗口,0°、45°、90°、135°四个方向的平均值,共 56 个值作为研究变量。

3 生物量估测

本研究采用 KNN 方法与回归分析方法对红海榄、木榄、白骨壤、桐花树、秋茄和混合(不分群落类型所有样地一起参与估测,下同)各群落类型进行生物量的估算,并对 2 种方法的估测精度进行比较评价,流程如图 1。

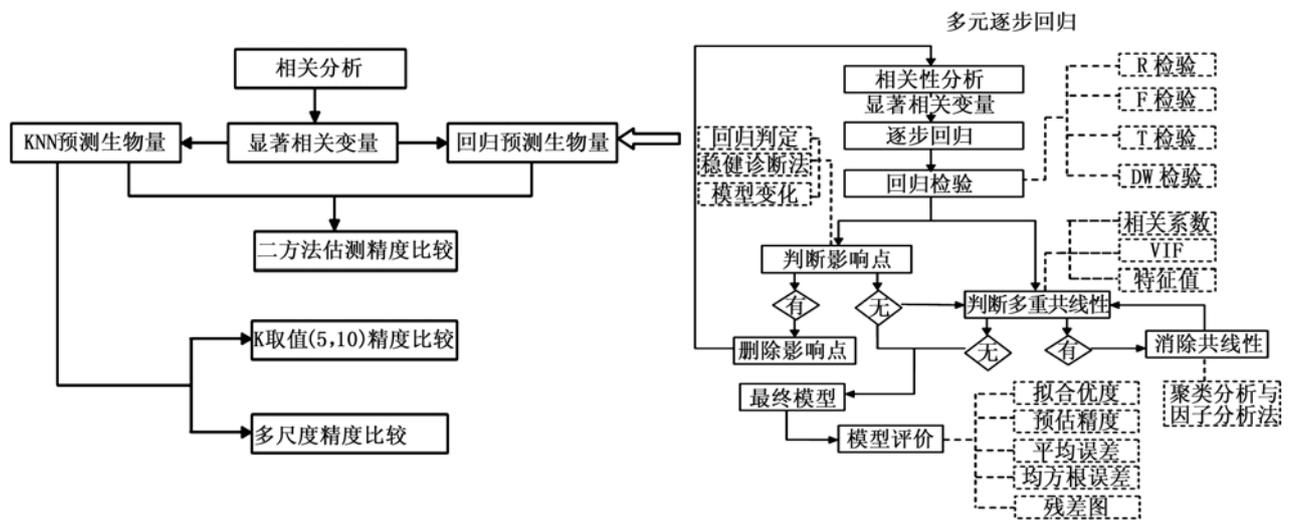


图1 生物量遥感估算流程图

本研究中,环境因子和遥感影像提取的自变量多达 101 个,只有与因变量显著相关的才有资格参与估测。作者通过偏相关性分析(控制覆盖度)来筛选变量。因样地覆盖度是影响生物量与其它变量相关关系的主要因素,所以,要在控制覆盖度的前提下,求算生物量与自变量的偏相关系数。

秋茄样地生物量和各变量因子之间相关性较小,未能筛选出显著相关变量,无法进行 KNN 预测,也不能得到回归模型。这可能与其在近红外波段起反射率较低或者其它因素有关。

3.1 基于 KNN 的生物量估测方法

KNN,K 最近邻分类法,即如果一个样本在特征空间的 K 个最相似的样本中大多数属于某一个类别,则该样本也属于这个类别,该方法可以避免样本的不平衡问题^[15]。利用 KNN 方法估算红树林生物

量,是综合考虑某像元最近邻的 K 个实测样地生物量影响权重的基础上计算的。

应用与叶生物量显著相关的因子来计算像元之间的马氏距离,距离越近,表示对待估像元的影响越大。每一个参与估测的像元都有一个影响权重,以该像元到待估像元马氏距离的平方的倒数占距待估像元最近的 K 个像元的马氏距离平方的倒数之和的比例作为其权重。K 个像元的生物量与其权重的乘积之和即为待估像元生物量值。公式如下:

$$B_p = \sum_{j=1}^k W_{j,p} \times B_{j,p} \quad W_{j,p} = (1/d_{j,p}^2) / \sum_{j=1}^k 1/d_{j,p}^2$$

式中: B_p :待估像元 P 生物量; $W_{j,p}$:第 j 个参考点对待估像元 P 生物量影响的权重; $B_{j,p}$:第 j 个参考点生物量值; $d_{j,p}$:第 j 个参考点到待估像元 P 的马氏距离。

研究表明,KNN 方法的估测精度随着 K 值的增大而增大^[6],但当 $K > 10$ 时,精度不再增加^[16],所以本研究对 $K = 5$ 和 $K = 10$ 两种情况进行估测。

3.2 回归分析方法预测生物量

本研究另外采用多元逐步回归分析方法进行生物量模型的构建,去除奇异值影响点并消除多重共线性,除秋茄未能拟合,得到其它各树种及混合生物量遥感估算模型,各模型均通过检验。过程见图 1 右。

3.3 估测精度评价方法

3.3.1 均方根误差 (RMSE) 和平均误差 (\bar{e}) 本研究样地较少,在像元尺度,精度的评价采用交叉评价方法进行。设样地总数为 n ,每次从 n 个样地中不重复地抽出一个样地,利用剩余的 $n - 1$ 个样地采用 KNN 估测样地 i 所在像元的生物量值。重复该过程,计算各样地预测生物量值,根据生物量实测值和预测值,计算均方根误差 (RMSE) 和平均误差 (\bar{e})。公式^[17]如下:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}}}{\bar{X}} \times 100 \quad \bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)}{N}$$

式中: N 为样地数; X_i 为实测样地生物量; \bar{X} 是 X_i 的均值; Y_i 为回归模型估测样地生物量。

3.3.2 预估计精度 (P) 预估计精度 P 越大,说明模型净度越高。

$$P = \left(1 - \frac{t_a \sqrt{\frac{\sum (w_i - \hat{w}_i)^2}{\hat{w} \sqrt{n(n-t)}}}}{\hat{w}}\right) \times 100\% \quad \hat{w} = \frac{1}{n} \sum \hat{w}_i$$

式中: w_i 为实测值; \hat{w}_i 为估计值; \hat{w} 为估计值均值; n 为样本容量; t_a 为置信水平为 $a = 0.05$ 时的 t 分布值; t 为回归模型中参数个数。

4 结果与分析

本研究仅对叶生物量遥感估算模型进行估测精度评价,因为只有叶生物量模型是直接由遥感因子反演而得,地上总生物量模型是根据与叶生物量内在的关系间接得到,此处进行模型评价意义不大。

4.1 单个像元尺度评价

在像元尺度上,分别计算 $K = 5$ 和 $K = 10$ 时单位面积上的平均误差 (\bar{e}) ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)、均方根误差 (RMSE)、预估计精度 (P),并和回归方法所得结果进行比较。

表 1 像元尺度 KNN 和多元回归分析方法平均误差比较

$t \cdot \text{hm}^{-2}$

树种	KNN 方法					回归分析方法		
	实测平均	K = 5		K = 10		实测平均	预测平均	平均误差 (\bar{e})
		预测平均	平均误差 (\bar{e})	预测平均	平均误差 (\bar{e})			
混合	16.174 0	17.499 8	1.325 8	17.404 7	1.231 0	18.223 0	18.730 1	0.510 0
红海榄	13.850 0	13.850 0	0.000 0	13.850 0	0.000 0	13.892 5	14.359 3	0.470 0
木榄	51.565 5	53.060 5	1.495 1	53.722 6	2.157 1	49.683 3	48.267 4	-1.420 0
白骨壤	26.281 4	29.923 4	3.642 1	28.676 2	3.087 5	25.588 6	25.588 6	0.000 0
桐花树	6.452 4	6.192 2	-0.260 3	6.096 1	-0.382 2	5.438 6	5.311 2	-0.130 0

注:KNN 与回归实测平均值不一致是因为多元逐步回归过程中删除了少量奇异之影响点。

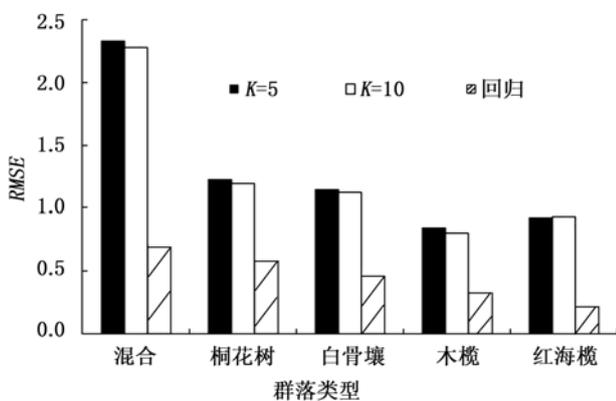


图 2 像元尺度 KNN 和回归方法均方根误差 (RMSE) 比较

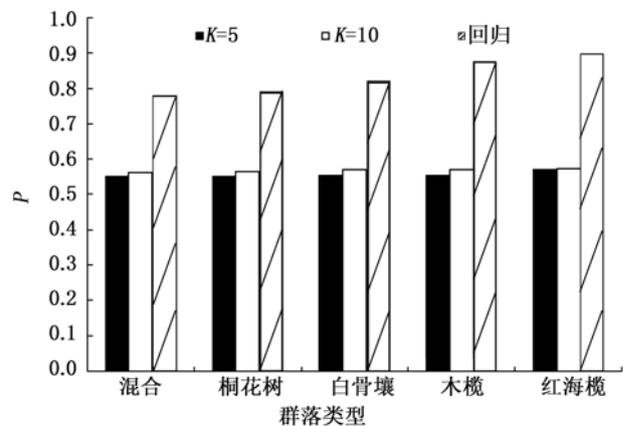


图 3 像元尺度 KNN 和回归方法预估计精度 (P) 比较

由表1和图2、3可得:(1)应用KNN方法估测红海榄群落生物量,平均误差(\bar{e})、均方根误差($RMSE$)和预估计精度(P)对于 $K=5$ 和 $K=10$ 是相近的,这可能是由于样地状况过于类似,使得样地所在像元光谱信息一致,待估测样地到各样地距离与权重值均相等,从而导致 K 取值不影响估测值。(2)应用回归方法估测红树林生物量,除红海榄外,各树种的 \bar{e} 均比应用KNN($K=5$ 和 $K=10$)方法的低; $RMSE$ 都远低于KNN($K=5$ 和 $K=10$)方法, P 都远高于KNN($K=5$ 和 $K=10$)方法。(3)应用回归方法估测红树林生物量,树种间从 $RMSE$ 和 P 来判断,优劣变化趋势均为:红海榄>木榄>白骨壤>桐花树>混合,红海榄优于木榄;应用KNN($K=5$ 和 $K=10$)方法,树种间从 $RMSE$ 和 P 来判断,优劣变化趋势均为:木榄>红海榄>白骨壤>桐花树>混合,木榄略优于红海榄。(4)应用KNN法估测红树林生物量, K 取10的 $RMSE$ 略小于 K 取5; K 取10的 P 略大于 K 取5。

4.2 多尺度评价

根据红树林样地的分布,将估测尺度划分为5、10、20、30、40、50 hm^2 6个,每个尺度单位内,至少包含2个样地。以尺度单位内多个样地单位面积实测生物量的均值作为该尺度单位生物量实测值,以尺度单位内多个样地单位面积生物量KNN方法遥感预测值的均值作为该尺度单位生物量预测值,计算各尺度单位生物量估测的均方根误差($RMSE$)和预估计精度(P),并从 K 值选择和红树树种2个方面进行精度的比较评价。

4.2.1 K 值选择的比较 在多个尺度上,从 $RMSE$ 和 P 2个方面,比较评价KNN方法估测混合、红海榄、木榄、桐花树、白骨壤生物量时 K 取5和 K 取10的估测精度。由图4~8可知:不管是混合群落还是单个树种,随着尺度的增大, K 取5和 K 取10的 $RMSE$ 都逐渐减小, P 都逐渐增大;在各个尺度上, K 取10 $RMSE$ 较低, P 较高,估测效果明显优于 K 取5。

4.2.2 树种间估测精度比较 在多个尺度上,从均方根误差($RMSE$)和预估计精度(P)2个方面,比较评价应用KNN方法($K=5$ 和 $K=10$)估测各种红树群落生物量的精度。由图9~12树种间 $RMSE$ 和 P 趋势比较图可得:(1)混合树种、木榄、红海榄、桐花树、白骨壤的 $RMSE$ 均随尺度的增大而减小,预估计精度均随尺度增大而增大;从 $RMSE$ 和 P 2个方面

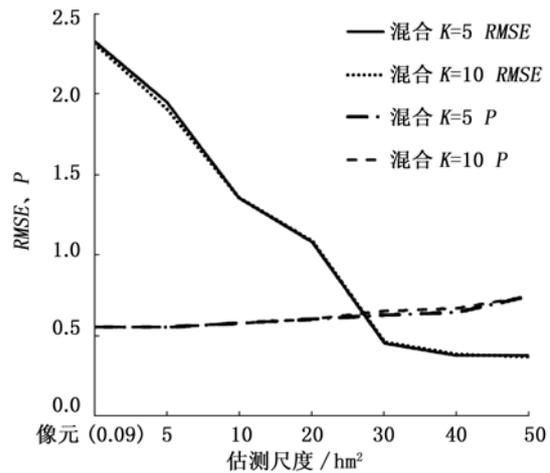


图4 混合树种多尺度不同 K 值均方根误差($RMSE$)、预估计精度(P)趋势

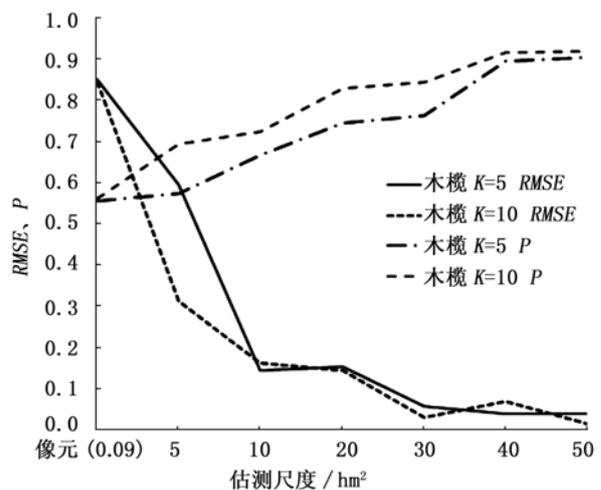


图5 木榄多尺度不同 K 值均方根误差($RMSE$)、预估计精度(P)趋势

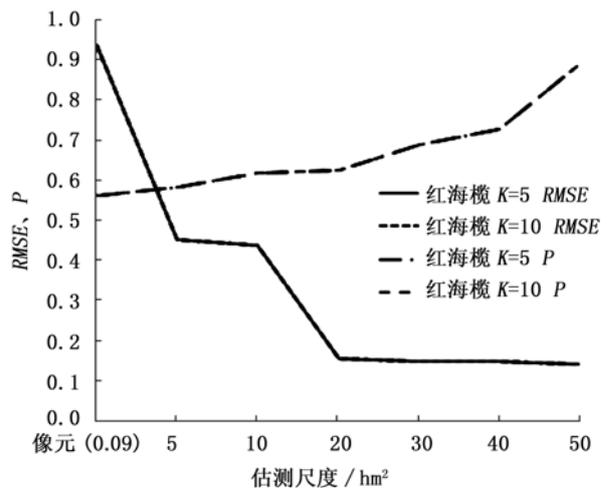


图6 红海榄多尺度不同 K 值均方根误差($RMSE$)、预估计精度(P)趋势

判断,木榄估计效果最好,混合树种估测效果最差。
 (2) 树种间 *RMSE* 的变化高低趋势基本遵循:混合树种 > 桐花树 > 白骨壤 > 红海榄 > 木榄,即估测效果木榄 > 红海榄 > 白骨壤 > 桐花树 > 混合树种。
 (3) 白骨壤、红海榄、桐花树树种间预估计精度的变化高低趋势不明显,但在最高和最低尺度上,*P* 高低排序都遵循木榄 > 红海榄 > 白骨壤 > 桐花树 > 混合树种(表 2)。

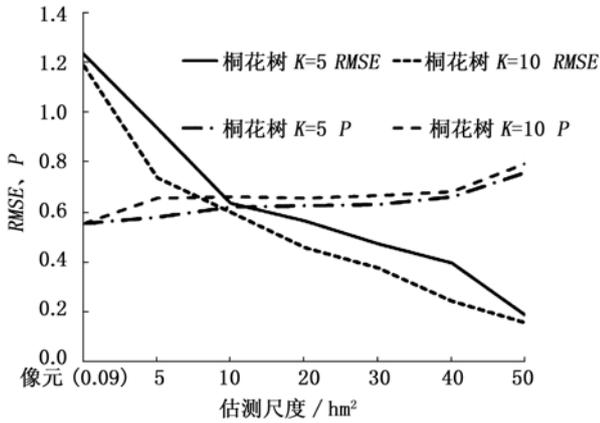


图 7 桐花树多尺度不同 *K* 值均方根误差 (*RMSE*)、预估计精度 (*P*) 趋势

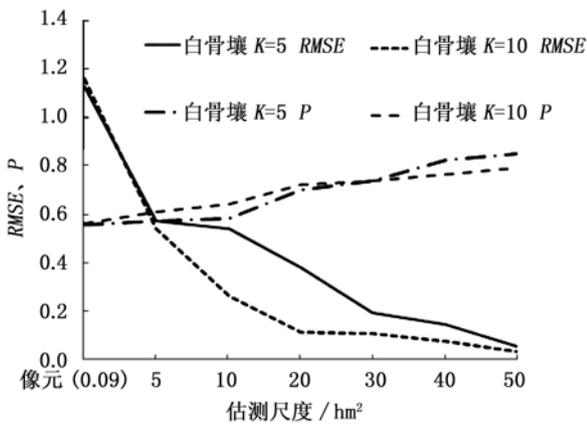


图 8 白骨壤多尺度不同 *K* 值均方根误差 (*RMSE*)、预估计精度 (*P*) 趋势

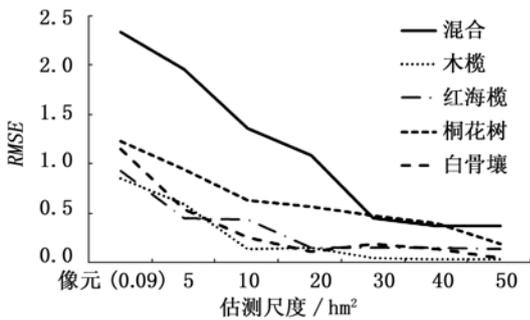


图 9 *K* 取 5 树种间均方根误差 (*RMSE*) 趋势

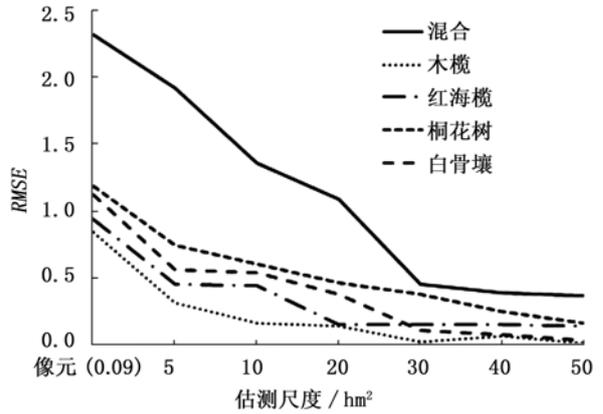


图 10 *K* 取 10 树种间均方根误差 (*RMSE*) 趋势

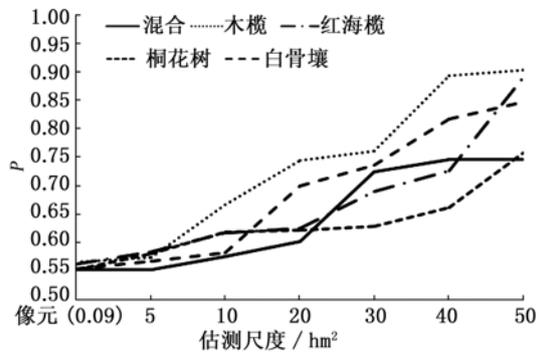


图 11 *K* 取 5 树种间预估计精度 (*P*) 趋势

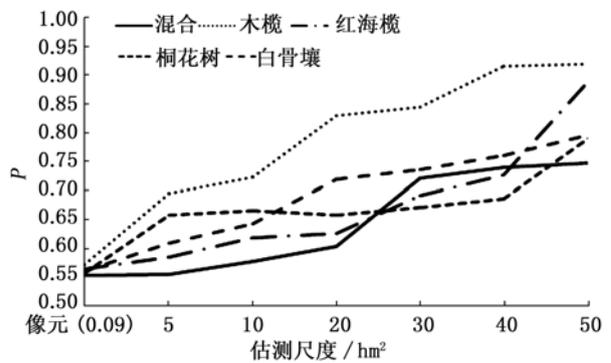


图 12 *K* 取 10 树种间预估计精度 (*P*) 趋势

5 结论与讨论

(1) 本研究采用广西海南两地的 2004 年红树林 TM 影像和红树林群落样地调查数据,应用 KNN 方法进行生物量估测,并和多元逐步回归分析方法进行精度比较,结果显示:在像元尺度上,应用多元逐步回归分析方法估测红树林生物量优于 KNN (*K* = 5 和 *K* = 10) 方法,但 KNN 方法的预测精度随尺度的增大而增大,且 *K* 值取 10 优于 *K* 值取 5。

表2 各群落类型最大、最小尺度上估测精度(P)

尺度/hm ²	估测精度(P)									
	K=5					K=10				
	混合	木榄	红海榄	桐花树	白骨壤	混合	木榄	红海榄	桐花树	白骨壤
像元(0.09)	0.552 0	0.566 1	0.562 3	0.552 9	0.553 8	0.552 5	0.570 1	0.562 3	0.555 3	0.559 7
50	0.747 2	0.903 7	0.890 9	0.758 8	0.847 4	0.747 1	0.920 0	0.890 9	0.790 1	0.796 4

(2)由于红树林分布区清晰的遥感影像难以获得,且地面调查比较艰难,本研究样地面积小于一个像元且与遥感数据有一定的时间差,对结果有一定的误差影响。

(3)个别树种因无法找到其地上生物量计算方程,只能采用与其相近树种的方程,使得地面生物量调查数据存在一定误差。

(4)TM 传感器只能与森林的树叶部分发生直接作用,所以先研究得到树叶生物量的遥感估测模型,通过树叶与树木地上部分的内在关系进而推算地上部分总生物量的计算方法更具现实意义。本研究不同于以往森林生物量遥感估测研究中采用森林地上部分总生物量与遥感影像光谱信息直接建模。

(5)纹理特征在以往生物量遥感估测中应用很少,本研究显示,生物量与归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)、TM3、TM4 等常用生物量遥感估测的自变量基本不相关,而与多个纹理特征存在较好的相关性,但其内在机理还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 范航清. 红树林—海岸环保卫士[M]. 广西: 广西科技出版社, 2000
- [2] 汤天波编译. 红树林在碳循环方面的作用不容忽视[EB/OL]. (2009-05-15) [2010-03-01]. <http://www.aims.gov.au/docs/media/news2009/20090422.html>
- [3] Rosenfeld A, Kak A. Digital Picture Processing (2nd edition)[M]. Washington: Academic Press, 1982
- [4] Lee J, Philpot W. Spectral textures pattern matching: A classifier for digital imagery[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1991, 29: 545-548
- [5] Dengsheng Lu. Estimation of Forest Stand Parameters Using Landsat TM Images in the Brazilian Amazon Basin[C]. International Symposium on Remote Sensing of Environment: Information for Risk Man-

- agement and Sustainable Development; 2003-11-10-14; Honolulu, HI; US
- [6] 李明诗, 谭莹, 潘洁. 结合光谱、纹理及地形特征的森林生物量建模研究[J]. 遥感信息, 2006(6): 6-9
- [7] Haralick R M. Statistical and Structural Approaches to Texture[J]. Proceeding of the IEEE, 1979, 67: 786-804
- [8] Killki P, Paivinen R. Reference sample plots to combine field measurements and satellite data in forest inventory[C]// SNS and Taksattoriklubi, Remote Sensing-Aidec Forest Inventory. Hyttiala, Finland, 1987: 209-212
- [9] Muinonen E, Tokola T. An application of remote sensing for communal forest inventory[C]// SNS/IUFRO Workshop. The Usability of Remote Sensing for Forest Inventory and Planning, Umea, 1990: 35-42
- [10] Tokola T, Pitkanen J, Partien J, et al. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials[J]. J Rem Sensing, 1996, 17: 2333-2351
- [11] Isaaks E H, Srivastava R M. Applied Geostatistics[M]. London, Oxford University Press, 1989
- [12] Fazakas Z, Nilsson M, Olsson H. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1999, 98: 417-425
- [13] 温远光. 广西英罗港5种红树植物群落的生物量和生产力[J]. 广西科学, 1999, 6(2): 142-147
- [14] 方红亮, 张健挺, 刘卫国. ERDAS 遥感图像处理教程[M]. 北京: 中国科学院地理研究所资源环境信息系统国家重点实验室, 1998
- [15] 徐新良, 曹明奎. 森林生物量遥感估算与应用分析[J]. 地球信息科学, 2006, 8(4): 122-128
- [16] 陈尔学, 李增元, 武红敢. 基于 K-NN 和 Landsat 数据的小面积统计单元森林蓄积估测方法[J]. 林业科学研究, 2008, 21(6): 745-750
- [17] Nilsson M. Simultaneous estimation of forest variables using Landsat TM data[D]. Stockholm, Swedish University of Agricultural Sciences, 1997