

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

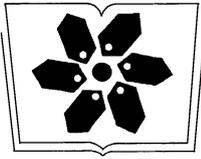
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期 2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等	(7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等	(7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等	(7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等	(7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等	(7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映壁,靖 磊,彭 磊,等	(7302)
基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等	(7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华	(7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星	(7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等	(7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉	(7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等	(7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利	(7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等	(7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等	(7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等	(7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成	(7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等	(7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等	(7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚	(7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等	(7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现	(7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等	(7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等	(7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等	(7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等	(7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等	(7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等	(7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等	(7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等	(7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等	(7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅	(7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等	(7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等	(7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等	(7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等	(7595)
专论与综述		
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智	(7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等	(7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203050298

宋巍巍, 管东生, 王刚. 地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例. 生态学报, 2012, 32(23): 7440-7451.

Song W W, Guan D S, Wang G. Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou, China. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7440-7451.

地形对植被生物量遥感反演的影响 ——以广州市为例

宋巍巍^{1,2,3}, 管东生^{1,2,*}, 王 刚^{1,2}

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室, 广州 510275;

3. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要:目前植被生物量遥感反演研究中的地形校正主要是校正地形变化对地表反射率的影响,较少考虑地形起伏引起的像元面积与实际地表面积的差异,而这种差异将导致植被生物量估算结果的偏差。在生物量遥感反演的基础上,结合地表面积计算模型和物质守恒定律,建立了生物量地形校正模型,定量分析和讨论了地形起伏对广州市植被类型面积提取和生物量准确估算的影响。结果表明:地形校正前后全市针叶林、阔叶林、草地、灌木林和园地面积分别增加 6.18%、3.70%、2.86%、1.92% 和 1.29%;在综合分析区域生物量遥感反演中的各种不确定性的基础上,建立的各种植被类型的生物量模型均具有较高精度,相关系数均接近或者超过 0.9,可以满足生物量反演的要求;全市植被生物量呈现出东、北高,西、南低的分布格局,像元实际代表的林地(阔叶林和针叶林)平均生物量为 61.86t/hm²,高于珠三角区域生物量平均值,但与亚热带林的顶级群落生物量水平有较大差距,林地生物量还有较大的增长空间;经过校正地形变化引起的像元面积和实际地表面积差异对生物量提取结果的影响后,植被总生物量比较校正前增加了 5.82%,5 种植物类型的总生物量有不同程度的增加,阔叶林、针叶林、草地、灌木林和园地分别增加了 7.74%、4.76%、3.34%、2.50% 和 1.58%。与其它的表面积计算模型相比,利用的像元地表面积模型具有较高的精度,可以满足生物量遥感估算中地形校正的需要。

关键词:地形校正;植被生物量;地表面积;遥感;广州市

Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China

SONG Weiwei^{1,2,3}, GUAN Dongsheng^{1,2,*}, WANG Gang^{1,2}

1 School of Environment Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology, Guangzhou 510275, China

3 Ministry of Environmental Protection, South China Institute of Environmental Sciences, Guang dong, Guangzhou 510655, China

Abstract: Terrain correction is typically used to adjust surface reflectivity for the influence of slope and aspect when plant biomass is estimated by remote sensing. There are very few studies on the differences between the pixel area of a remote sensing image and its real surface area. However, this difference inevitably influences the precision of quantitative remote sensing when the terrain is undulating. This paper addresses the effects of the difference between the pixel area of a remote sensing image and the real surface area of plant biomass obtained with remote sensing, when biomass-terrain correction model was calibrated according to surface-area calculation model and the law of the conservation of mass. The results show that the pixel area, influenced by undulating topography, was different from the actual surface area for Guangzhou city, China, and this accounted for 33.4% of the variability. Statistical values for the areas in different vegetation types were

基金项目:国家自然科学基金项目(40971054)

收稿日期:2012-03-05; 修订日期:2012-08-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: eesgds@mail.sysu.edu.cn

much higher after the terrain correction than before. The biggest proportions were for the coniferous forest and broad-leaved forest areas, at 6.18% and 3.70%, respectively. The grassland, shrubland, and orchard areas also increased by 2.86%, 1.92%, and 1.29%, respectively. Based on the uncertainty analysis for forest biomass estimation with remote sensing, remote sensing models with high accuracy were built for different vegetation types, and their correlation coefficients were close to or more than 0.9. Therefore, these models can be applied to estimating of plant biomass. Biomass of vegetation in the eastern and northern regions was much greater than that in the western and southern regions of Guangzhou. The average biomass of woodland (broad-leaved forest and coniferous forest) was 61.86 t/hm^2 . This value was more than the average biomass in Pear River Delta but much lower than the biomass of the climax community of southern subtropical forest in Dinghushan. This suggests that the studied woodland biomass has a large potential for growth. The difference in biomass distribution due to terrain undulation was given by the biomass model obtained from remote sensing and the biomass-terrain correction model. The biomass of different vegetation types increased with terrain correction. The broad-leaved forest biomass increased by 7.74% which was the highest rate of change. Biomass of coniferous forest increased by 4.76%, that of grassland by 3.34%, that of shrubland by 2.50%, and that of orchard by 1.58%. Total vegetation biomass of Guangzhou increased by 5.82%. We conclude that the impact of terrain cannot be ignored because it was an important factor affecting the precision of biomass conversions. Compared with other models of surface area calculation, the pixel surface area model could be used with high accuracy to correct for the terrain impact of plant biomass estimation with remote sensing.

Key Words: terrain correction; plant biomass; surface area; remote sensing; Guangzhou City

生物量是生态系统运行的能量基础与物质来源,特别是森林生态系统在陆地生物圈与大气圈之间的碳交换中发挥着重要作用^[1-2],其生物量约占陆地生态系统生物量的 90%,是陆地生态系统最主要的碳库之一^[3]。准确估算植被生物量是监测区域碳动态和理解全球碳循环的关键^[4-5]。由于遥感能够较为及时准确的反应地物变化,已成为生物量估算的重要手段^[6-7]。然而,当前研究将陆地植被分布作为二维平面进行处理,植被覆盖区的像元面积(投影面积)与对应像元的单位面积生物量之积为植被生物量^[8-9],对具有生态学意义的三维结构(如地形或高程等)少有关注^[10-11]。尤其在地形复杂的高山区域,由二维投影产生的像元地表面积和距离可能远低于实际地表面积和距离^[12-13]。但地形变化、树种组成和林分密度等因素影响着森林生物量遥感反演的准确性^[14]。由图 1 可知,虽然影像像元 A_1 与 B_1 面积相同,但是相对应的地表 A_2 与 B_2 面积相差较大,地形起伏较大的 A_2 面积明显大于 B_2 。在校正坡度坡向的影响后,遥感反演的生物量是像元对应的地表 A_2 与 B_2 的生物量,如果使用地表面积 A_2 与 B_2 的生物量作为像元面积 A_1 与 B_1 的生物量,那么像元植被生物量和对应的实际地表植被生物量不相等。刘蔚秋等在样地调查的基础上,采用 Arcinfo 的 2 种三维模型估算了黑石顶自然保护区森林的总生物量,二维尺度的计算结果较三维模型估算的约低 12%^[15],即忽略地形起伏对像元生物量空间分布的影响,将不可避免地导致生物量反演结果的偏差。

地形起伏引起地表面积的变化^[16],而地表面积是 GIS 技术模拟现实世界的重要参数之一^[17],因此正确计算实际地表面积具有重要的现实意义。为提取实际地表面积,国内外学者提出了各种基于数字高程模型 (DEM) 的地表面积计算模型^[18-20],主要有 TIN

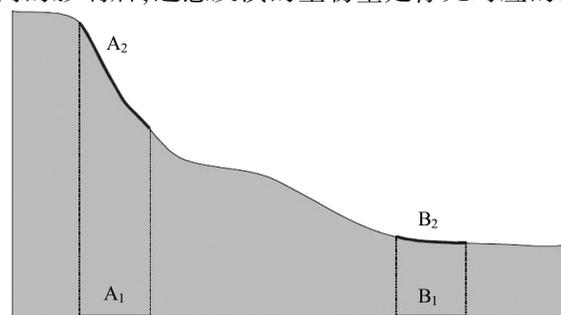


图 1 影像像元与相对应的地表*

Fig.1 Image pixels versus surface area

* 像元面积与实际地表面积相比: $A_1 < A_2$, $B_1 \approx B_2$ Comparing the pixel area with the actual surface area, it was found that $A_1 < A_2$, $B_1 \approx B_2$

(Triangular Irregular Network, 不规则三角网)模型、基于像元坡度的 Lattice 模型以及基于中心像元与相邻 8 个像元的地表面积计算模型。Zhang 等^[17]在对不同的地表面积的计算模型进行对比时发现基于中心像元与相邻 8 个像元的地表面积计算模型与 TIN 模型计算结果一致,而基于像元坡度的 Lattice 模型地表面积计算值偏小。基于中心像元与相邻 8 个像元的地表面积计算模型具有较高的计算精度^[18],且在计算中加入了邻域分析,具有计算速度快和输出稳定的优点,并可直接与遥感影像进行叠加分析。因此本文将利用该模型来提取研究区域的实际地表面积,定量研究地形起伏引起的地表面积变化对区域生物量估算的影响。

广州市作为中国改革开放的前沿,快速的工业化及城市化强烈影响着城市自然生态系统的结构与功能。如何准确估算该区域生物量是正确评价其生态系统结构与功能的重要前提,也是未来制定生态环境保护规划和决策的重要依据。然而,广州市坡度大于 15° 的区域像元数占总像元数的 19.7%,其中大于 25° 的像元数占总像元数的 6.3% (图 3);地形起伏引起的实际地表面积与像元面积差异的像元数占广州市总像元数的 33.34% (图 2)。因此,在该区域生物量反演或者地表实际面积提取时,地形起伏带来的影响不容忽视。综上所述,本文将在地表面积计算模型提取实际地表面积和生物量遥感反演的基础上,构建生物量地形校正模型,定量研究地形起伏引起的地表面积的变化对生物量估算的影响,为其它存在地形起伏的区域植被生物量遥感反演提供可借鉴的范例。

2 研究区域

广州市地处南亚热带,横跨北回归线,地处中国大陆南部,广东省中南部,珠江三角洲北缘。研究区海拔高度、坡度和坡向分布见图 3。全市最高海拔 1181.41m,地势呈明显的南低北高的态势;除了平坦区域外,坡向以东南方向和西南方向为主;坡度分布与海拔高度分布规律相一致,北部山地丘陵区坡度较大,南部地势比较平坦;坡度和海拔因素也是影响植被分布的重要因素之一,全市坡度大于 15° 的区域像元数占总像元数近 20%,这些区域受到人为活动影响相对较少,因而植被覆盖度较高。近年来,优越的自然条件和居民生态意识的提高,使得区域植被覆盖度得到不断提高,但仍受到不合理开发利用的影响。

3 研究方法

遥感数据为 2005 年 7 月 18 日摄录的轨道号为 122/044 的 Landsat TM 影像,以 1:50000DEM 数据为基础对 TM 影像进行地形校正,消除由于地形起伏引起的阴阳坡影像辐射亮度差异,使影像更好地反映地物光谱特征;利用大气辐射传输模型反演当日广州市 AOD(气溶胶光学厚度)空间分布^[21],并进行大气校正、坡度坡向影响校正^[22]以获取较准确地物反射率;对大气校正后的影像进行监督分类,获取广州市不同植被类型的空间分布;提取各种植被指数,结合野外生物量样方调查数据,根据不同的植被类型建立生物量反演逐步回归模型,获取广州市地形校正前植被生物量分布;基于广州市 1:50000 DEM 对植被生物量空间分布进行地形校正。

3.1 地面生物量数据

3.1.1 样方设置

地面样方生物量数据根据野外调查获得。调查时间为 2005 年 10 月—2006 年 2 月。样方调查时间与影

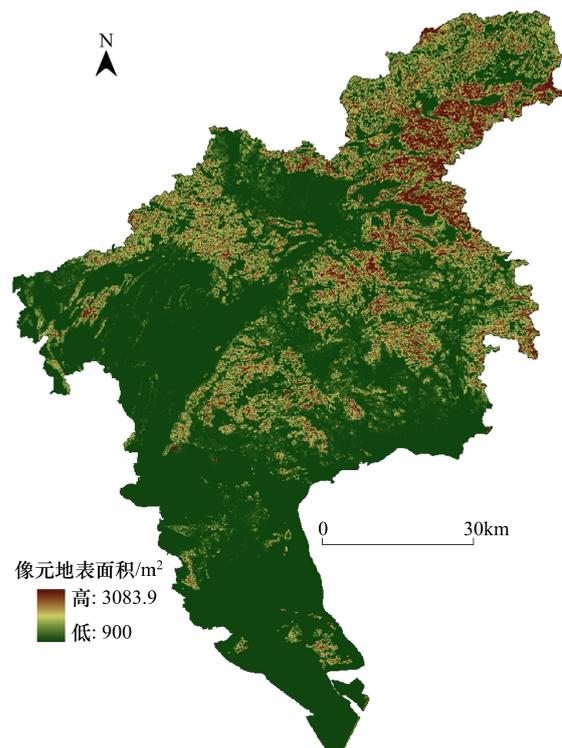


图 2 广州市像元地表面积分布图

Fig. 2 Pixel surface area map of Guangzhou

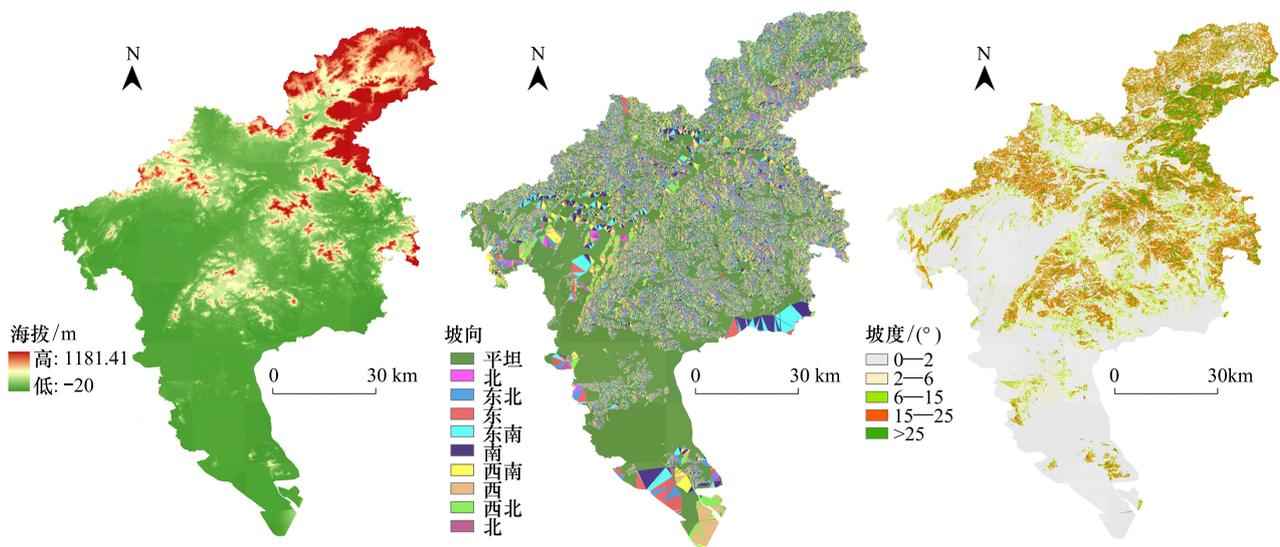


图3 广州市海拔、坡向和坡度分布

Fig. 3 Geographical distribution of altitude, aspect and slop in Guangzhou

像获取时间有一定时间差,但在较短时间内所调查的各主要测树因子变化较小,且本研究主要是针对南亚热带植被地上生物量部分,调查期内植被季节变化并不明显,因此样方生物量数据可以满足遥感反演的要求。在样方调查时,用手持式 Garmin Vista etrex GPS 进行样方定位,分乔木层、灌木层及草本层分别调查。最终在研究区域布设乔木植被样方 130 个(阔叶林 50 个,针叶林 50 个、园地 30 个),其它植被样方 40 个(灌木林 20 个、草地 20 个),野外样方位置示意图如图 4。矩形样方的短边长应大于林分的优势木的高^[23],同时考虑本研究所采用的 TM 遥感影像第 1—5、7 波段的空间分辨率为 30m,样方大小一般尽量设置为 30m×30m。记录样方的中心坐标。根据选取的生物量方程,测量出样方内所有乔木的树高(H)和胸径(D);调查样方内草本层和灌木层的平均高度(H)与盖度(P)。

3.1.2 样方生物量

阔叶林、针叶林以及园地中单株乔木生物量根据管东生^[24]在广州市流溪河水库林区 4 个林分类型的生物量与生产力研究中建立的生物量方程计算,森林林下植被以及草本、灌木的生物量根据杨昆等^[25]提出的森林林下植被生物量模型进行计算。

3.2 生物量遥感指示因子的选取

建立生物量反演回归模型最重要的一步是选择合适的遥感指示因子作为回归自变量,这些因子能科学、准确、简洁地反映研究区域不同植被生物量特征。结合 TM 数据各波段的性质以及各种植被类型生物量与单波段光谱信息的相关分析结果,单波段遥感指示因子选用 TM3、TM4 和 TM5 波段。研究发现广州市各种植被类型生物量与不同的植被指数间的相关性不同,即不同的植被指数对反演不同类型植被生物量潜力不同。所

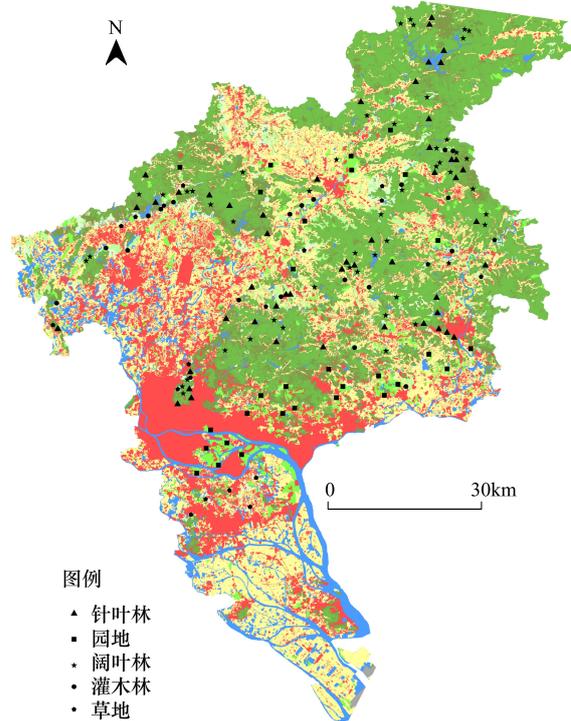


图4 样方分布图

Fig. 4 The sample plots map

以对于不同的植被类型,用于植被生物量反演的复合遥感指数的选择也不同。根据各复合遥感指数与生物量样方数据相关系数矩阵,阔叶林复合遥感指示因子选择 RVI、TM5/7、NDVI、ND54、VIS123、WI、1/TM3;针叶林复合遥感指示因子选择 TM5/7、ND57、VIS123、ln(TM3)、WI、1/TM3、1/TM4;园地生物量复合遥感指示因子选择 RVI、TM5/3、TM5/7、VIS123;灌木林生物量复合遥感指示因子选择 RVI、NDVI、VIS123、ln(TM3)、1/TM3;草地生物量复合遥感指示因子选择 RVI、NDVI、SAVI、MSAVI、1/TM4。

3.3 生物量地形校正模型

由于基于中心像元与相邻 8 个像元的地表面积计算模型能够更好的进行邻域分析,且计算速度快,输出稳定和精度较高等优点,因此本文采用该模型进行研究区域真实地表面积的提取^[17-18]。DEM 每一栅格像元(如像元 9 对应的三维四边形 A1C1E1G1)的实际地表面积估算示意图见图 5,实际地表面积计算模型利用像元 9 与其相邻的 1—8 像元的高程信息计算其实际地表面积。首先将像元 9 中心点与相邻的 1—8 像元的中心点相互相连,形成 8 个三维三角形(如 OAH),利用 9 个像元的中心点(A—H,O)计算每个三维三角形的边长,计算公式如下:

$$L_{SD} = \sqrt{(H_{DE})^2 + (L_{PD})^2} \tag{1}$$

式中, L_{SD} 是指 2 个像元中心点之间的地表距离, H_{DE} 是指 2 个像元中心点之间的高程差, L_{PD} 是指 2 个像元中心点之间的平面距离。

然后根据三维三角形的面积计算公式计算每个三维三角形的面积,公式如下:

$$S_{area} = s(s-a)(s-b)(s-c) \tag{2}$$

式中, S_{area} 是指单个三维三角形的面积, a 、 b 、 c 是按式 1 计算的三维三角形 3 个边的边长, $s = (a+b+c)/2$ 。

最后根据三角形相似法则,中心像元 9 所对应的 8 个三维三角形(如 OA1H1)面积是像元高程中心点互相相连的三维三角形(如 OAH)面积的 0.25 倍,因此根据式 2 计算获取的 8 个三维三角形面积之和的 1/4 便是像元 9 所对应的地表面积。具体过程由 Matlab 编程计算实现。

为获取像元实际代表的生物量,本文根据物质守恒定律构建了生物量地形校正模型(式 3)。其主要构建过程如下:根据物质守恒定律,地形校正前的像元生物量为地表生物量,其与像元地表面积的乘积,应与像元面积与像元实际代表的生物量乘积相等。地形校正后的像元生物量代表实际生物量。

$$B_r = B_s \times \frac{S_r}{900} \tag{3}$$

式中, B_s 是指地形校正前像元生物量 (t/hm^2),即地表生物量 (t/hm^2), B_r 是指地形校正后的像元实际代表的生物量 (t/hm^2), S_r 是指像元对应的真实地表面积 (m^2)。

4 结果

4.1 生物量模型的建立

将 2.2 中选择的 5 种植被类型生物量的遥感指示因子作为自变量,40 组阔叶林样方数据、40 组针叶林样方数据、23 组园地样方数据、15 组灌木地样方数据和 15 组草地样方数据(其余各植被类型样方数据用于相应模型的精度检验)分别作为不同模型的因变量,显著水平 0.15 作为挑选和提出变量的条件,进行逐步回归分析,得到 5 种不同植被类型的生物量回归模型如下,模型通过了 F 检验和 t 检验,常数项与各项系数的显著性均在 0.05 以上。

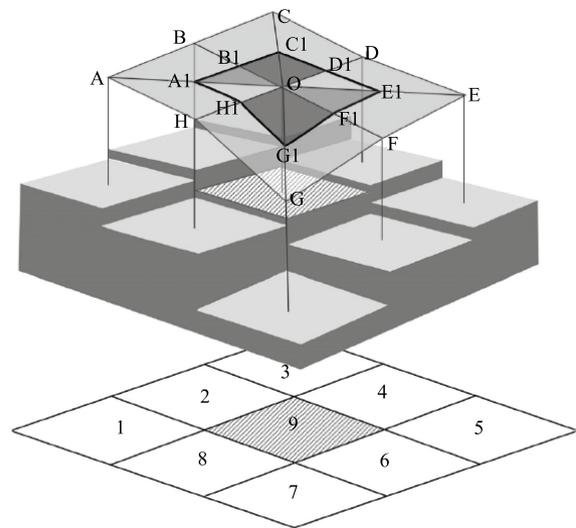


图 5 像元地表面积计算示意图

Fig. 5 Illustration of the applied method to determine pixel surface area

阔叶林

$$B = -90.31 + 72.31 \times (\text{NDVI}) + 4.57 \times (1/\text{TM3}) \quad (4)$$

针叶林

$$B = -80.92 + 5.42 \times (1/\text{TM3}) + 29.49 \times (\text{ND57}) \quad (5)$$

园地

$$B = 124.91 - 1002.35 \times (\text{TM3}) + 24.86 \times (\text{TM5}/7) - 248.94 \times (\text{VIS123}) \quad (6)$$

灌木林

$$B = 9.24 + 0.97 \times (1/\text{TM3}) - 20.33 \times (\text{ND54}) + 21.52 \times (\text{TM4}) \quad (7)$$

草地

$$B = -37.25 - 3.27 \times (1/\text{TM4}) + 22.73 \times (\text{SAVI}) \quad (8)$$

式中, B 为生物量(t/hm^2)。

表 1 各植被类型生物量逐步回归模型统计量

Table 1 Statistic value of three kinds of forest stepwise regression model

植被类型 Vegetation types	模型 Models	R^2	修正决定系数 R^2 Modified coefficient of determination R^2	P
阔叶林 Broad-leaved forest	(4)	0.867	0.860	<0.001
针叶林 Coniferous forest	(5)	0.831	0.822	<0.001
园地 Garden plot	(6)	0.805	0.774	<0.001
灌木林 Shrubbery	(7)	0.819	0.770	<0.001
草地 Grassland	(8)	0.774	0.736	<0.001

表 1 各植被类型生物量回归模型的确定系数(或修正决定系数) R^2 ^①均表明选取的遥感指示因子与生物量达到显著相关。利用各种植被类型随机选择的独立样方对模型进行精度检验,结果表明各种植被类型的生物量反演模型预测值与实测量值显著相关,其中阔叶林的相关系数为 0.923,平均偏差 5.17 t/hm^2 ;针叶林的相关系数为 0.915,平均偏差 5.32 t/hm^2 ;园地的相关系数为 0.892,平均偏差 3.70 t/hm^2 ;灌木林的相关系数为 0.904,平均偏差 3.53 t/hm^2 ;草地的相关系数为 0.871,平均偏差 2.02 t/hm^2 。相关系数均接近或者超过 0.9,说明五种植被类型的生物量反演模型模拟效果较好,利用遥感指示因子建立的生物量模型反演研究区域植被生物量能够得到较高的精度。

4.2 地形校正前后不同植被类型覆盖面积的变化

根据遥感影像分类结果,地形校正前广州市植被覆盖面积占总面积的 44.8%,其中面积最大的是阔叶林,其次是针叶林,园地和灌木林,最小的是草地所占面积;全市植被分布不均,呈现“北多南少,东多西少”的分布格局;在未考虑地形起伏的情况下,5种植被类型的统计面积如图 6,但此时各种植被统计面积只是真实地表的水平投影面积。若不考虑地形起伏所造成的实际地表面积的变化,特别是广州市北部地形较为复杂的区域,必将对不同植被类型面积的统计和生物量反演产生影响^[13]。图 7 列出了地形校正前后广州五种植被类型面积变化的比例,结果显示不同植被类型的统计面积均有不同程度的增加,其中针叶林和阔叶林的真实地表面积与其水平投影面积相差比率最高,分别为 6.18% 和 3.70%,其次是草地 2.86%、灌木林 1.92% 和园地 1.29%。这也说明广州市的植被(特别是针叶林和阔叶林)主要分布在地形较为复杂的山地区域,因而地表面积和水平投影面积之间的差异不可忽略,否则会造成植被面积和植被生物量遥感反演的显著误差。

① 修正决定系数考虑自变量个数,在“最优”回归方程建立时对自变量进行处罚,最终得到“最优”回归方程的决定系数即为修正决定系数

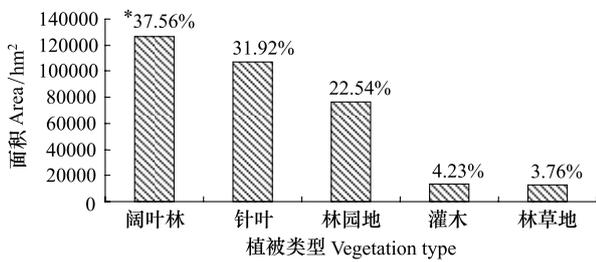


图6 地形校正前 TM 影像植被分类组成图

Fig. 6 The area of different vegetation types of before terrain effect corrected

* 不同类型植被覆盖面积占总的植被覆盖面积百分比

4.3 广州植被生物量

4.3.1 植被生物量分布

研究区域植被生物量的分布格局(图8)为东、北高,西、南低;海拔增加,居民点少的区域,植被生物量高;靠近道路、河流、城镇、村庄的植被生物量低。生物量的空间差异显著,形成多个以某一高值为中心,由内向外从高变低的圈带结构,主要由地形的高低分布及其复杂程度决定。地形校正后研究区域植被生物量估算结果表明(表2),广州市有40%以上像元实际代表的植被生物量低于50 t/hm²,低于100t/hm² 超过80%,部分原因是由于园地、灌木林和草地的生物量普遍较低,而园地、灌木林和草地所占面积比例较高,所以低生物量的植被面积所占比例较大。高于150t/hm²的植被面积占植被总面积的3.71%,其主要分布在流溪河林场、大岭山林场、白云山、帽峰山、从化和增城一些地区,以及广州西部的丫髻岭等地。

表2 地形校正后广州植被生物量分组统计结果

Table 2 The statistics of vegetation biomass and the areas with different groups after terrain correction

项目 Items	植被生物量分组 Group of vegetation biomass			
生物量等级范围 Range of biomass rank/(t/hm ²)	B<50	50 ≤ B<100	100 ≤ B<150	150 ≤ B
所占面积百分比 Area fraction/%	42.87	43.04	10.38	3.71

4.3.2 地形校正前后植被生物量变化

地形校正前后每公顷像元面积最大生物量由325.14 t增加到了430.28 t,地形校正前后每公顷像元面积最大生物量变化量为105.24 t;在广州市地形起伏比较大的北部和东部区域的生物量变化最为明显;以城市建设用地为主的西部和南部的大部分区域,由于地势较为平坦,地形校正对生物量的变化影响程度较小。生物量变化量分布格局与植被生物量分布格局基本一致,这是由于广州市的植被主要分布在地形较为复杂的山区。由表3可知地形校正后的广州市植被总生物量校正前增加了5.82%。地形校正后,阔叶林总生物量

表3 地形校正前后广州市植被生物量统计量

Table 3 Statistical values of broadleaf forest biomass before and after topographic correction

生物量 Biomass	阔叶林/t Broad-leaved forest	针叶林/t Coniferous forest	园地/t Garden plot	灌木林/t Shrubbery	草地/t Grassland	总生物量/t Total biomass
地形校正前 Before terrain correction	7719553	5932871	1737081	259314.3	155960.4	15804799.62
地形校正后 After terrain correction	8317073	6215133	1764485	265807.5	161320.8	16723855.59
前后生物量变化 Biomass variety before and after terrain correction	597520	282262.1	27403.56	6493.22	5360.34	919055.97
生物量变化百分比/% Percent of biomass variety	7.74	4.76	1.58	2.50	3.44	5.82

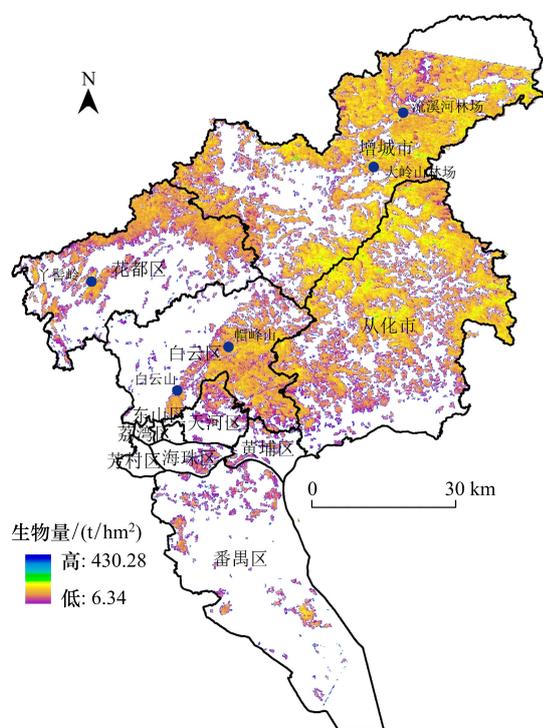


图 8 地形校正后广州市植被生物量分布图

Fig. 8 The vegetation biomass map after terrain correction

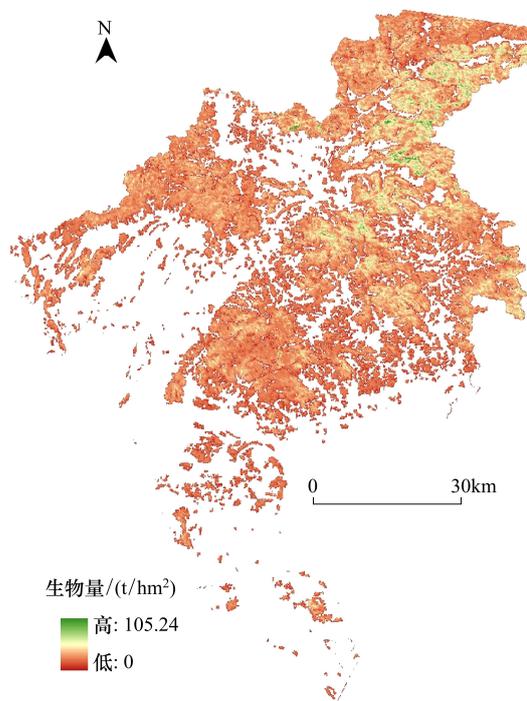


图 9 地形校正前后广州市植被生物量变化量

Fig. 9 The vegetation biomass change after terrain correction

增加幅度最高,增加了 7.74%,其次是针叶林、草地、灌木林和园地,分别增加了 4.76%、3.44%、2.50%、1.58%;地形校正后阔叶林、针叶林、园地、灌木林和草地的生物量变化量分别占植被生物量总变化量的 65.02%、30.71%、2.98%、0.71% 和 0.58%。因为在地表面积变化较大的区域地形起伏较大,受人为干扰相对较少,这些区域的生物量高于平均值,所以地形校正后,各植被类型生物量的增加比例高于其面积增加的比例。由此可见,地形(特别是复杂地形)对植被生物量遥感反演的影响不可忽视。

5 讨论

5.1 像元地表面积模型对比

目前计算像元地表面积的模型主要有 TIN 模型、基于中心像元与相邻 8 个像元的地表面积计算模型和 Lattice 模型等,其中 TIN 模型计算的像元地表面积往往作为实际地表面积对其它相关模型进行评价。与本研究采取的像元实际地表面积计算模型不同,TIN 表面模型是利用 TIN 数据与多边形矢量数据计算获取多边形矢量数据各多边形的表面积;Lattice 模型是将 DEM 数据转换成坡度分布,计算每个坡度的余弦值,进而获取每个像元的地表面积。Zhang 等^[17]利用不同模型提取山东省 6 个山区地表面积时发现基于中心像元与相邻八个像元的地表面积计算模型(即本文采用的模型)的计算结果与 TIN 表面模型的计算结果一致,在地形复杂的区域表面积计算精度较高^[20],在像元数大于 250 时与 TIN 表面模型计算的地表面积很接近,像元数越大二者之间的相差越小^[18],广州市特别是北部地区,地形较为复杂,且 DEM 像元数多于 1000 万个,因此可以认为 2 种模型获取的表面积相差很小,在实际应用中可以忽略二者之间的差别。本文的像元地表面积计算模型是基于像元模式,具有计算速度快和输出稳定的优点,且在计算中加入了邻域分析,可直接与遥感影像进行叠加分析,因此在生物量遥感反演研究中,基于像元的地表面积计算模型要优于 TIN 表面积计算模型。虽然 Lattice 模型也是基于像元模式,且具有计算简单的优点,但其精度相对较低,计算的像元地表面积与本研究地形校正模型有较大差异。Lattice 模型与本文像元地表面积模型计算的像元地表面积差值(绝对值)分布如图 10 所示。2 种校正模型有 75.25% 的像元地表面积相同,却有 24.75% 像元的地表面积存在差异,其中最大的

差异高达 7075.34m^2 , 是本研究地形校正模型获取的像元最大地表面积 3083.89m^2 的 2.29 倍。可见在地形起伏越大的区域, 加入邻域像元的分析, 可以提高地表面积的计算精度, 减少或防止基于单像元的 Lattice 模型极端像元地表面积计算值的出现。

5.2 广州生物量特征分析

20 世纪 70 年代初期, 由于火烧山和开垦方式不当等原因, 致使森林的自然结构遭到破坏, 出现大片荒山, 20 世纪 90 年代政府开始大规模的植树造林和封山育林使得广州市自然植被有所增加^[8], 但由于恢复时间相对较短, 大量植物群落尚处于演替早期, 植被生物量较小。植被生物量是具有一定空间分布的区域化变量, 受到各种人类活动及气候地形等因素影响, 冯宗炜等^[26]对我国森林生态系统生物量野外样地的分析表明, 人为干扰对生物量的分布影响巨大; Fang 等^[27]也认为, 植被碳密度(生物量)与人口密度有关。在人类聚集区附近的植被由于受到人为扰动的影响, 生物量普遍较低; 特别是园地, 由于经营方式的特殊性, 受到剧烈的人为干扰, 地形校正后像元实际代表的平均生物量仅为 $23.18\text{t}/\text{hm}^2$, 仅高于灌木和草地的平均生物量。位于流溪河林场、大岭山林场、白云山、帽峰山和增城部分区域的植被由于受到人为干扰较少, 其生物量明显高于其它区域。地形校正前后生物量变化较大的区域正是位于广州市北部和东部的生物量相对较高的区域, 这说明广州市植被主要分布于地形起伏较大的区域。研究发现地形校正后像元实际代表的阔叶林与针叶林的平均生

物量为 $61.86\text{t}/\text{hm}^2$, 低于方精云等^[28]根据 1999—2003 年的森林资源清查资料的森林面积与森林蓄积量估算的中国森林平均生物量 ($81.95\text{t}/\text{hm}^2$), 高于珠江三角洲地区森林平均生物量 ($47.35\text{t}/\text{hm}^2$)^[29], 说明广州市森林植被状况在珠江三角洲地区相对较好。但根据 Whittaker 等的研究^[30]亚热带常绿阔叶林的平均生物量为 $356\text{t}/\text{hm}^2$; 彭少麟等^[31]的研究也表明, 鼎湖山亚热带常绿阔叶林的顶级群落生物量为 $380\text{t}/\text{hm}^2$, 广州市林地平均生物量与这一标准差距较大。因此, 如果对广州现有林地进行更好的抚育与管理, 林地生物量存在较大的增长空间。

5.3 区域生物量遥感反演的不确定分析

植被的光谱特征反映了植被的叶绿素含量以及生长健康状况, 叶绿素含量与叶生物量相关, 而叶生物量与群落生物量又相关, 因而可以利用获取的植被光谱特征进行区域生物量的反演。由于卫星遥感光谱信息具有良好的综合性和现势性, 常常用于区域生物量的调查研究^[32-33]。但光学遥感数据主要反演植被冠层的状况, 而生物量包括了冠层和树干等信息, 因此利用光学遥感反演植被生物量仍存在较大的不确定性。首先生物量遥感反演模型的拟合精度, 以及 NDVI(归一化植被指数)在高植被覆盖度(或生物量)情况下容易饱和的缺陷影响着区域生物量估算的精度^[34]。本文研究显示利用遥感指示因子建立的不同植被类型生物量反演模型具有很高的拟合度(草地的相关系数最小为 0.871, 阔叶林相关系数最大达到 0.923), 平均偏差较小 ($2.02—5.32\text{t}/\text{hm}^2$), 各植被类型相对精度分别为阔叶林 5.6%, 针叶林 5.5%, 园地 7.8%, 灌木 18.9%, 草地 14.3%, 因此具有较高的精度; 同时选取生物量相关的多种遥感指示因子进行模型的构建, 尽可能克服饱和的缺陷。其次, 样方调查的数量、定位精度以及样方生物量的测定误差也是影响森林生物量估算精度的重

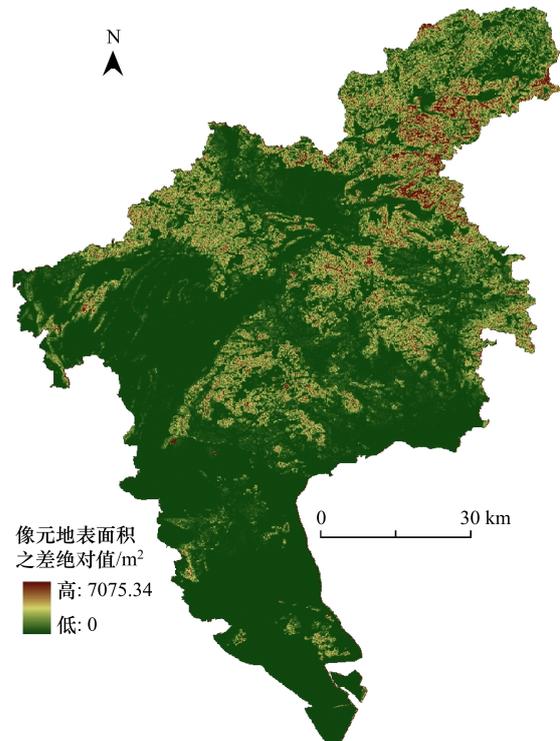


图 10 2 种地形校正模型的像元地表面积差值绝对值

Fig. 10 Absolute difference value of pixel surface area between two models

要因素^[35-36],本研究按照不同植被类型的实际分布进行了样方设置,总样方数 130 个,其中针叶林和阔叶林的样方数分别达到 50 个,大于郭志华等^[35]利用 TM 数据提取粤西地区的森林生物量样方调查数量;在样方定位和森林因子测量的时候,选择在样方的中心进行定位,并严格按照森林调查规范进行每木调查,减少定位误差和样地生物量测定误差影响估算精度。据报道,样方数据中包括区域中较小生物量和较大生物量的群落能够提高预测精度^[32],为此本文对大小生物量的群落都进行了相应的样方调查(其中阔叶林的生物量范围为 12.13—325.47 t/hm²,针叶林为 11.61—320.65 t/hm²,园地为 9.47—131.34 t/hm²,灌木林为 10.39—41.02 t/hm²,草地为 6.24—25.89 t/hm²)。尽管如此,准确估算森林生物量是个相当复杂的问题,涉及地面样地调查、遥感信息提取、模型构建及精度验证等,如何进一步提高大尺度森林生物量的遥感估算精度,是森林生态研究的难点之一^[33]。

6 结论

地形起伏造成像元面积小于相对应的实际地表面积,因此按照像元面积估算植被生物量,往往小于实际植被生物量。本文借助像元实际地表面积计算模型和 DEM 数据,按照物质守恒定律构建了生物量地形校正模型,定量分析了地形起伏对植被类型面积提取和生物量反演的影响,并对不同地表面积计算模型的优缺点和利用光学遥感反演植被生物量的不确定性进行了讨论。研究结果表明:1)利用遥感指示因子建立的生物量模型反演区域植被生物量能够取得较高的精度;2)全市植被呈现“北多南少,东多西少”的分布格局,主要植被类型特别是针叶林和阔叶林主要分布于地形较为复杂的山地区域,其地形校正后面积的增加比例也最高,分别为 6.18% 和 3.70%;3)大面积园地、灌木林和草地的存在,使低生物量的植被面积仍占较高比例,全市有 40% 以上的植被生物量低于 50t t/hm²,80% 以上植被生物量低于 100 t/hm²;4)地形校正前后不同植被类型生物量的增加比例也不相同,即阔叶林>针叶林>草地>灌木林>草地;5)在地形较为复杂的山区,受到人为干扰较少,植被生物量普遍较高,地形校正前后生物量变化比例也较大,地形起伏对该区域植被生物量反演的影响不可忽视。6)广州市森林植被平均生物量高于珠三角森林生物量平均值,但与鼎湖山南亚热带常绿阔叶林的顶级群落生物量相比尚有较大差距。因此,加强区域森林的抚育和管护,对广州森林植被的生物量增长将有积极的作用。

References:

- [1] Lou X T, Zeng Y, Wu B F. Advances in the estimation of above-ground biomass of forest using remote sensing. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011, (88): 1-8.
- [2] Jack K W, Robert K D, Paul E S. Forest management and carbon storage: an analysis of 12 key forest nations. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 70: 239-257.
- [3] Wang H Y, Gao Z H, Wang Q Y, Bai L N, Wu J J. Estimation of forest biomass in Fengning county by TM satellite images. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(32): 18472-18474.
- [4] Clark M L, Roberts D A, Ewel J J, Clark D B. Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small footprint lidar and hyperspectral sensors. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 2931-2942.
- [5] Powell S L, Cohen W B, Healey S P, Kennedy R E, Moisen G G, Pierce K B, Ohmann J L. Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 1053-1068.
- [6] Lu D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(7): 1297-1328.
- [7] Xu X J, Zhou G M, Du H Q, Dong D J, Cui R R, Zhou Y F, Shen Z M. Estimation of aboveground biomass of *Phyllostachys praecox* forest based on landsat thematic mapper image. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(9): 1-6.
- [8] Wang S J, Guan D S, Li X, Song W W. The temporal-spatial evolution and heterogeneity of forest carbon in Guangzhou, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(4): 778-785.
- [9] Wang H Y, Gao Z H, Wang F Y, Li S M, Bai L N. Estimation of vegetation biomass using SPOT5 satellite images in Fengning county, Hebei province. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(5): 639-646.

- [10] David N B, Miguel B A. Species richness, area and climate correlates. *Global Ecology and Biogeography*, 2006, (15): 152-460.
- [11] Zhang Z M, Luo Q P, Wang W L, Yin M, Sun Z H, Ou X K, Liu X K. A comparison of 2D and 3D landscape metrics for vegetation patterns change quantification in mountainous areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(21): 5886-5893.
- [12] Wang X Y, Chen Y, Zhou H H, Zhang Q. Application of DEM to calculating the surface area of forest land. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology)*, 2006, 6(1): 86-90.
- [13] Chen J L, Wu W, Liu H B. Calculation of the surface area of forest land using DEM. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 21(5): 1348-1352.
- [14] Tian X, Su Z B, Li Z Y, Christiaan V D T, Guo J P, He Q S. Estimation of forest above-ground biomass using multi-parameter remote sensing data over a cold and arid area. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 14: 160-168.
- [15] Liu W Q, Yu S X, Wang Y F, Lian J. Estimation of the forest biomass with 3-Dimensional model at Heishiding nature reserve, Guangdong. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(4): 66-69.
- [16] Cui B L, Li X Y, Jiang G H, Zhang S Y, Huang Y K. Study on land use/cover in mountain area based on the DEM—Taking the Qinghai lake basin as an Example. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 871-880.
- [17] Zhang Y, Zhang L N, Yang C D, Bao W D, Yuan X X. Surface area processing in GIS for different mountain regions. *Forestry Studies in China*, 2011, 13(4): 311-314.
- [18] Jenness J S. Calculating landscape surface area from digital elevation models. *Wildlife Society Bulletin*, 2004, 32(3): 829-839.
- [19] Rashid H. 3-D Surface-area computation of the state of Jammu & Kashmir using Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) data in Geographical Information System (GIS). *Journal of Geomatics*, 2010, 4(2): 77-82.
- [20] Tripathi S, Susaki J, Chen X. Fusion of DEM and satellite imagery for surface area calculation development of an algorithm and a tool for GRASS-GIS. [2012-05-15] <http://www.a-a-r-s.org/acrs/proceeding/ACRS2005/Papers/DTF-4.pdf>.
- [21] Song W W, Guan D S. The distribution of aerosol optical depth retrieved by TM imagery over Guangzhou, China. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(8): 1638-1645.
- [22] Chen X L, Zhao H M, Tian L Q. *Remote Sensing of Environment: Models and Application*. Wuhan: Wuhan university press, 2008.
- [23] Pande M C, Tandon V N, Negi M. Biomass production in plantation ecosystem of *Ailanthus excelsa* at five different ages in Utter Pradesh. *Indian Forest*, 1988, 114: 362-371.
- [24] Guan D S. The biomass and productivity of four stand types in Liuxihe reservoir. *Ecology Science*, 1986, 16(5): 45-52.
- [25] Yang K, Guan D S. Selection of gaining quadrat for harvesting the undergrowth vegetation and its biomass estimation modeling in forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 705-714.
- [26] Feng Z W, Wang X K, Wu G. *The Productivity and Biomass of Forest Ecosystems in China*. Beijing: Science Press, 1999.
- [27] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 392: 2320-2322.
- [28] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sink of 1981-2000 in China. *Science in China (D series)*, 2007, 37(6): 804-812.
- [29] Yang K, Guan D S. Forest biomass and its dynamics in Pearl River Delta. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 705-712.
- [30] Whittaker R H, Likens G E. Carbon in the biota. In: *Carbon and the biosphere* (eds. Woodwell GM). Virginia: Springfield, 1973: 281-302.
- [31] Peng S L, Zhang Z P. Biomass, productivity and energy useefficiency of climax vegetation on Dinghu mountains, Guangzhou China. *Sci China (series B)*, 1994, 24(5): 497-502.
- [32] Xu X J, Du H Q, Zhou G M, Fan W Y. Review on correlation analysis of independent variables in estimation models of vegetation biomass based on remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(2): 239-247.
- [33] He H Y, Guo Z H, Xiao W F. Application of remote sensing in forest aboveground biomass estimation. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8): 1317-1322.
- [34] Fan W Y, Zhang H Y, Yu Y, Mao X G, Yang J M. Comparison of three models of forest biomass estimation. *Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(4): 402-410.
- [35] Guo Z H, Peng S L, Wang B S. Estimating forest biomass in western Guangdong using landsat TM data. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1832-1839.
- [36] Feng Z K, Liu Y X. Precision analysis of forest biomass measuring. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(S2): 108-111.

参考文献:

- [1] 娄雪婷, 曾源, 吴炳方. 森林地上生物量遥感估测研究进展. *国土资源遥感*, 2011, (88): 1-8.

- [3] 王红岩,高志海,王琇瑜,白黎娜,吴俊君. 基于 TM 遥感影像丰宁县森林地上生物量估测研究. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18472-18474.
- [7] 徐小军,周国模,杜华强,董德进,崔瑞蕊,周宇峰,沈振明. 基于 Landsat TM 数据估算雷竹林地上生物量. 林业科学, 2011, 47(9): 1-6.
- [8] 王淑君,管东生,黎夏,宋巍巍. 广州森林碳储量时空演变及异质性分析. 环境科学学报, 2008, 28(4): 778-785.
- [9] 王红岩,高志海,王琇瑜,李世明,白黎娜. 基于 SPOT5 遥感影像丰宁县植被地上生物量估测研究. 遥感技术与应用, 2010, 25(5): 639-646.
- [11] 张志明,罗亲善,王文礼,尹梅,孙振华,欧晓昆,柳小康. 2D 与 3D 景观指数测定山区植被景观格局变化对比分析. 生态学报, 2010, 30(21): 5886-5893.
- [12] 王秀云,陈晔,周厚华,张强. DEM 在林地资源表面积调查中的应用. 南京师范大学学报(工程技术版), 2006, 6(1): 86-90.
- [13] 陈吉龙,武伟,刘洪斌. DEM 在林地表面积计算中的应用研究. 西南农业学报, 2008, 21(5): 1348-1352.
- [15] 刘蔚秋,余世孝,王永繁,练琚. 广东黑石顶森林生物量的三维估算. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(4): 66-69.
- [16] 崔步礼,李小雁,姜广辉,张思毅,黄央奎. 基于 DEM 的山地丘陵区土地利用/覆被研究——以青海湖流域为例. 自然资源学报, 2011, 26(5): 871-880.
- [21] 管东生,宋巍巍. 利用 TM 影像反演广州市气溶胶光学厚度空间分布. 环境科学学报, 2008, 28(8): 1638-1645.
- [22] 陈晓玲,赵红梅,田礼乔. 环境遥感模型与应用. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [24] 管东生. 流溪河水库林区四个林分类型的生物量与生产力. 生态科学, 1986, 16(5): 45-52.
- [25] 杨昆,管东生. 森林林下植被生物量收获的样方选择和模型. 生态学报, 2007, 27(2): 705-714.
- [26] 冯宗炜,王效科,吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [28] 方精云,郭兆迪,朴世龙,陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学(D), 2007, 37(6): 804-812.
- [29] 杨昆,管东生. 珠江三角洲地区森林生物量及其动态. 应用生态学报, 2007, 18(4): 705-712.
- [31] 彭少麟,张祝平. 鼎湖山地带性植被生物量、生产力和光能利用效率. 中国科学 B 辑, 1994, 24(5): 497-502.
- [32] 徐小军,杜华强,周国模,范文义. 基于遥感植被生物量估算模型自变量相关性分析综述. 遥感技术与应用, 2008, 23(2): 239-247.
- [33] 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. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1317-1322.
- [34] 范文义,张海玉,于颖,毛学刚,杨金明. 三种森林生物量估测模型的比较分析. 植物生态学报, 2011, 35(4): 402-410.
- [35] 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. 生态学报, 2002, 22(11): 1832-1839.
- [36] 冯仲科,刘永霞. 森林生物量测定精度分析. 北京林业大学学报, 2005, 27(增刊 2): 108-111.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (*Eumeces chinensis*): testing the maternal manipulation hypothesis LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)

Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (*Tamias sibiricus*) SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)

Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)

Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese *Anser indicus* wintering at Caohai Lake of Guizhou, China YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)

Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)

Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)

Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)

Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)

Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)

Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)

Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)

The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)

Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)

The dynamic variation of maize (*Setaria mays* L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)

Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)

Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)

Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)

Photosynthetic response of different ecotype of *Illicium lanceolatum* seedlings to drought stress and rewatering CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)

Seasonal variations in the stems of *Larix principis-rupprechtii* at the treeline of the Luya Mountains DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)

Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)

Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of *Catalpa bungei* clones WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)

Effects of fire damages on *Larix gmelinii* radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)

A model for water consumption by mountain jujube pear-like XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)

Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元