

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

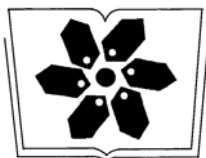
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 20 期 Vol.33 No.20 **2013**

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 33 卷 第 20 期 2013 年 10 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 中小尺度下西北太平洋柔鱼资源丰度的空间变异..... 杨铭霞,陈新军,冯永玖,等 (6427)
- 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响..... 王 丹,吕瑜良,徐 丽,等 (6436)
- 荒漠啮齿动物群落对开垦干扰的响应及其种群生态对策..... 袁 帅,付和平,武晓东,等 (6444)
- 转 Bt 基因棉花对烟粉虱天敌昆虫龟纹瓢虫的影响 周福才,顾爱祥,杨益众,等 (6455)
- 微地形改造的生态环境效应研究进展..... 卫 伟,余 韵,贾福岩,等 (6462)

个体与基础生态

- 丹顶鹤春迁期觅食栖息地多尺度选择——以双台河口保护区为例..... 吴庆明,邹红菲,金洪阳,等 (6470)
- 新疆石河子南山地区表土花粉研究..... 张 卉,张 芸,杨振京,等 (6478)
- 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征 郑艳明,尧 波,吴 琴,等 (6488)
- 基于高分辨率遥感影像的森林地上生物量估算..... 黄金龙,居为民,郑 光,等 (6497)
- 异质性光照下匍匐茎草本狗牙根克隆整合的耗益..... 陶应时,洪胜春,廖咏梅,等 (6509)
- 湘潭锰矿废弃地栎树人工林微量元素生物循环..... 罗赵慧,田大伦,田红灯,等 (6517)
- 接种彩色豆马勃对模拟酸沉降下马尾松幼苗生物量的影响 陈 展,王 琳,尚 鹤 (6526)
- 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响 陈心想,何绪生,耿增超,等 (6534)
- 延河流域植物功能性状变异来源分析 张 莉,温仲明,苗连朋 (6543)
- 榆紫叶甲赤眼蜂基础生物学特性及其实验种群生命表..... 王秀梅,臧连生,林宝庆,等 (6553)
- 几种生态因子对拟目乌贼胚胎发育的影响 彭瑞冰,蒋霞敏,于曙光,等 (6560)

种群、群落和生态系统

- 海南铜鼓岭灌木林稀疏规律..... 周 威,龙 成,杨小波,等 (6569)
- 青海三江源区果洛藏族自治州草地退化成因分析..... 赵志平,吴晓蕾,李 果,等 (6577)
- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物基质质量的影响..... 肖银龙,涂利华,胡庭兴,等 (6587)
- 基于光合色素的钦州湾平水期浮游植物群落结构研究 蓝文陆,黎明民,李天深 (6595)
- 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价..... 李修鹏,杨晓东,余树全,等 (6604)
- 北京西山地区大山雀与其它鸟类种群间联结分析..... 董大颖,范宗骥,李扎西姐,等 (6614)
- 被动式电子标签用于花鼠种群动态研究的可行性 杨 慧,马建章,戎 可 (6634)

景观、区域和全球生态

- 华北冬小麦降水亏缺变化特征及气候影响因素分析..... 刘 勤,梅旭荣,严昌荣,等 (6643)
- 基于 FAHP-TOPSIS 法的我国省域低碳发展水平评价 胡林林,贾俊松,毛端谦,等 (6652)
- 河漫滩湿地生态阈值——以二卡自然保护区为例..... 胡春明,刘 平,张利田,等 (6662)
- 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响 刘 雷,安韶山,黄华伟 (6670)
- 不同人为干扰下纳帕海湖滨湿地植被及土壤退化特征..... 唐明艳,杨永兴 (6681)

资源与产业生态

近 10 年北京极端高温天气条件下的地表温度变化及其对城市化的响应 李晓萌,孙永华,孟 丹,等 (6694)

三峡库区小江库湾鱼类食物网的稳定 C、N 同位素分析 李 斌,徐丹丹,王志坚,等 (6704)

研究简报

北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态及其环境控制因子..... 陈文婧,李春义,何桂梅,等 (6712)

植被恢复对洪雅县近 15 年景观格局的影响 王 鹏,李贤伟,赵安玖,等 (6721)

高盐下条斑紫菜光合特性和 S-腺苷甲硫氨酸合成酶基因表达的变化 ... 周向红,易乐飞,徐军田,等 (6730)

学术信息与动态

生态系统服务研究进展——2013 年第 11 届国际生态学大会 (INTECOL Congress) 会议述评 房学宁,赵文武 (6736)

生态系统服务评估——2013 年第 6 届生态系统服务伙伴国际学术年会述评 巩 杰,岳天祥 (6741)

回顾过去,引领未来——2013 年第 5 届国际生态恢复学会大会 (SER 2013) 简介..... 彭少麟,陈宝明,周 婷 (6744)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 320 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-10



封面图说: 荒漠旱獭——旱獭属啮齿目、松鼠科、旱獭属,是松鼠科中体型最大的一种。旱獭多栖息于平原、山地和荒漠草原地带,集群穴居,挖掘能力甚强,洞道深而复杂,多挖在岩石坡和沟谷灌丛下,从洞中推出的大量沙石堆在洞口附近,形成旱獭丘。荒漠啮齿动物是荒漠生态系统的重要成分,农业开垦对功能相对脆弱的荒漠生态系统的干扰极大,往往导致栖息地破碎化,对动植物种产生强烈影响,啮齿动物受到开垦干扰后对环境的响应及其群落的生态对策,是荒漠生态系统生物多样性及其功能维持稳定的重要基础。

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

DOI: 10.5846/stxb201212211841

黄金龙, 居为民, 郑光, 康婷婷. 基于高分辨率遥感影像的森林地上生物量估算. 生态学报, 2013, 33(20): 6497-6508.

Huang J L, Ju W M, Zheng G, Kang T T. Estimation of forest aboveground biomass using high spatial resolution remote sensing imagery. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6497-6508.

基于高分辨率遥感影像的森林地上生物量估算

黄金龙, 居为民*, 郑光, 康婷婷

(南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210046)

摘要:以南京市紫金山林区为研究区, 利用 e-Cognition 面向对象分类方法, 基于光谱和空间信息融合后的 IKONOS 影像提取单木树冠阳性冠幅 (PoCA) 信息, 并结合野外实测的样方生物量数据, 分别建立了针叶林和阔叶林地上生物量 (AGB) 的遥感估算模型, 并利用实测森林生物量数据对模型进行了验证。结果表明, 基于遥感影像提取的 PoCA 与实测 AGB 存在较好的非线性相关关系, 所建针叶林 AGB 估算模型的可靠性优于阔叶林模型。对建模样本而言, 估算的针叶林和阔叶林 AGB 与观测数据比较的 R^2 分别为 0.62 ($P < 0.01, n = 9$) 和 0.56 ($P < 0.01, n = 16$)。验证表明, 所建 AGB 估算模型的可靠性较好, 估算的针叶林和阔叶林 AGB 与观测数据比较的 R^2 分别为 0.55 ($P < 0.01, n = 6$) 和 0.52 ($P < 0.01, n = 10$), 但当 AGB 较低时, 模型结果偏高, AGB 较高时, 模型结果偏低。研究说明通过高分辨率遥感数据的融合、提取树冠信息进行生物量估算是可行性的。

关键词: 高分辨率遥感; 地上生物量; 面向对象; 阳性冠幅

Estimation of forest aboveground biomass using high spatial resolution remote sensing imagery

HUANG Jinlong, JU Weimin*, ZHENG Guang, KANG Tingting

International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China

Abstract: Forests are important terrestrial ecosystems and play an important role in maintaining ecological environment. Globally, they are acting as a carbon sink and a crucial player in alleviating global climate change. Forest AGB (Aboveground Biomass) is an important indicator of forest functioning and a key component of the carbon cycle in forest ecosystems. The accurate estimation of AGB is of importance for study the budget of global terrestrial ecosystems. However, it is challengeable to map AGB at regional and global scales. In recent years, various studies have been conducted to retrieve AGB using remote sensing data at regional scales due to the more effectiveness and lower cost of remote sensing compared with the traditional inventory method. This study took Zijin Mountain, located in the urban area of Nanjing city, as the study area to explore the applicability of high resolution remote sensing data in retrieving AGB. This study area is dominantly covered by various species of trees. The spectral and spatial information in an IKONOS image were first fused using the Brovey transformation method to generate images of green, red, near infrared bands at a spatial resolution of 1m. Then, positive crown area (PoCA) of individual trees was delineated using the reflectance of green, red, near infrared bands and normalized difference index retrieved from the fused images and the object-oriented classification method implemented in the e-Cognition platform. The classification rules were determined using the See 5 software. Meanwhile, field campaigns were conducted to record the number of trees, the height and diameter at breast height (DBH) of individual trees, tree species, geological coordinates, and topography at 41 representative plots (16 plots for coniferous forests and 25

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划项目 (2012AA12A306)

收稿日期: 2012-12-21; 修订日期: 2013-06-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: juweimin@nju.edu.cn

plots for broadleaf forests) with an area of 25 m×25m. For each plot, AGB was calculated using models developed in previous studies and field measured height and *DBH* of individual trees. These field samples were randomly selected for developing models (25 samples) and validating the developed models (16 samples). The retrieved PoCA data were used in conjunction with plot-level AGB measured to develop empirical models for estimating AGB. The developed models were further validated using measured AGB. The results show that PoCA retrieved from remote sensing data shows distinguishable spatial patterns and is tightly correlated with AGB. The developed empirical model is more applicable for coniferous forests than for broadleaf forests in retrieving AGB. As to the samples used to develop the models, the R^2 values of estimated AGB against field measurements are 0.62 ($P<0.01, n=9$) for coniferous forests and 0.56 ($P<0.01, n=16$) for broadleaf forests, respectively. The validation indicates that the developed models are reliable. The R^2 values of estimated AGB against measurements are 0.55 ($P<0.01, n=6$) for coniferous forests and 0.52 ($P<0.01, n=10$) for broadleaf forests, respectively. However, the models tend to overestimate AGB under the condition of low AGB and to underestimate AGB when AGB is high. This study indicates that it is practically feasible to estimate forest AGB using the tree canopy area information retrieved from fused high resolution remote sensing image.

Key Words: High spatial resolution remote sensing; AGB; object-oriented; positive crown area

森林是重要的陆地生态系统,在陆地生物圈层和大气圈层之间的碳循环交换过程中起着重要作用^[1]。森林生物量约占全球陆地植被生物量的 90%^[2],不仅是森林固碳能力的重要标志,也是评估森林碳收支的重要参数^[3]。森林生物量按来源的部位不同可分为根、干、枝和叶生物量。其中,干、枝、叶生物量合称为森林地上生物量^[4]。地上生物量是森林生态系统碳汇潜力评估的重要基础,如何快速、准确地获取森林地上生物量信息,成为近年来森林生态系统与全球气候变化研究的关键^[5]。

传统的森林地上生物量估算方法以野外实测数据为基础,这种方法精度较高,但通常只能获得观测点上的数据,且劳动强度大、成本高,不利于研究生物量的空间分布和动态变化。遥感技术具有宏观、大面积、动态、快速、可重复等特点,所收集的光谱信息和森林地上生物量具有一定的相关性,已经成为区域森林生物量估算的主要方法^[6]。

随着遥感技术的快速发展,多源遥感数据已经被用于各种尺度上的森林生物量估算。光学遥感数据最早被用于森林生物量的估算,Hame 等^[7]利用 AVHRR 数据提取 NDVI 植被指数,结合实地调查的生物量数据,在欧洲以针叶林为主的北方森林地区分别建立针叶林和落叶林生物量估算模型,进行区域生物量的估算。Zheng 等^[8]结合 Landsat7 ETM+数据和野外实测生物量数据估算了美国威斯康辛州确夸美光国家森林的地上生物量,并生成了生物量分布图。黄国胜等^[9]以 MODIS 数据为源数据驱动 Dong 模型,估测了我国东北地区的森林生物量。已有的利用光学遥感数据进行生物量估算的研究大部分采用的是中低空间分辨率的光学遥感数据,比如 AVHRR、MODIS 和 Landsat TM/ETM 等数据^[3,5],存在混合像元和野外实测样方面积与遥感影像像元大小难以匹配等突出问题,结果易存在不确定性。近年来,国内外学者开始借助微波雷达和激光雷达等遥感数据进行地上生物量的估算工作^[10-13]。

商用高空间分辨率卫星数据的出现,为人们利用遥感技术研究树冠结构提供了新的数据源^[14]。与低空间分辨率遥感影像相比,高空间分辨率遥感影像包含了大量的纹理、形状、位置等空间几何信息,具有细节更加清晰、信息更加丰富等特点。在高空间分辨率遥感影像上,森林中每棵树木的树冠都清晰可辨,纹理和细节信息非常明显,这对于高效而精准地提取森林参数十分有利^[15]。利用高空间分辨率卫星数据提取森林参数,国外已经进行了很多年的研究,取得了很多重要成果,而国内目前仍处于起步阶段^[16]。Hay 等^[17]针对高分辨率遥感影像提出了一种面向对象的多尺度分割方法,并通过实验表明该方法用于高分影像的树冠及林分信息的提取能够取得较好的效果。Read 等^[18]认为可利用高空间分辨率数据提取树冠大小进行生物量估算,他们利用 IKONOS 影像得到的树冠面积与胸径存在明显的相关性($R^2=0.84$)。大量研究都已证明胸径或生物

量与树冠大小有密切的关系^[19-20]。因此,用单木树冠自动提取方法得到的树冠直径或面积结合各种模型推算树木胸径和森林生物量是一个便捷可行的选择^[21]。目前国内在这方面的研究主要是利用高分辨率卫星数据提取森林参数^[22-23],而应用高空间分辨率数据进行森林地上生物量估算的研究还有待加强和深入。

在利用高分辨率遥感数据提取树冠大小进行生物量估算时会遇到这样的挑战,森林中树冠相互重叠的现象,利用现有的高分辨率遥感数据提取的不是树冠的真实冠幅,而是没有被遮挡的阳性冠幅(PoCA)。近年来,国内已有不少学者对 PoCA 的定义和应用进行了探讨^[24-26]。阳性冠是指四周与林木接触点最高处枝条基部以上的树冠部分,阳性冠的冠幅大小即称作 PoCA。通俗地说,阳性冠幅就是林分中单株林木垂直投影且不与其它林木重叠的那一部分冠幅^[25]。Ren 等^[27]认为,阳性冠幅部分光合效率最高,是树木体内光合有机产物的主要来源,而下部的枝条净光合效率低,对树木机体生长贡献很小。因此,PoCA 的大小真实体现了单株林木的营养空间,用其研究林分密度是最合适的^[26],从而可以应用于生物量的估算。

本文旨在发展一种利用高空间分辨率光学遥感数据估算森林地上生物量的方法,即利用高空间分辨率遥感影像,提取单木的 PoCA,结合野外实测生物量数据,建立研究区内森林 AGB 的遥感估算模型,并对模型可靠性进行验证,以期利用高分辨遥感数据估算森林生物量提供参考。

1 研究资料与研究方法

本研究的基本思路是在对 IKONOS 高分辨率遥感影像进行预处理的基础上,利用面向对象的分类软件 e-Cognition 对影像进行多尺度分割以及面向对象分析,提取出单木树冠的轮廓信息,然后结合野外实测生物量数据建立样地水平的阳性冠幅与地上生物量的回归模型,进行森林生物量的估算,技术流程图见图 1。由于 IKONOS 遥感影像太阳天顶角(8°)较小,可以将该景影像近似认为垂直投影成像,因此所提取的树冠可认为是阳性冠幅。

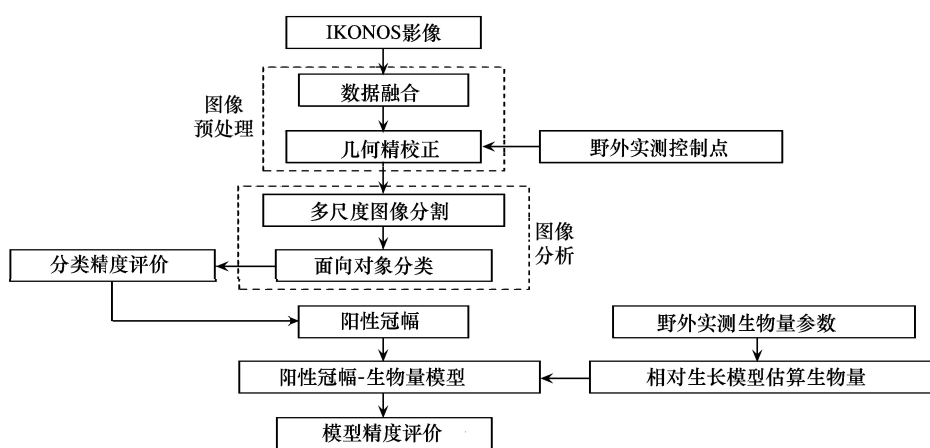


图 1 研究技术流程图

Fig.1 Flow chart of this study

1.1 研究区概况

本研究于南京市紫金山林区进行,紫金山位于江苏省南京市东部,地理位置为 $118^{\circ}48'24''$ — $118^{\circ}53'04''$ E, $32^{\circ}01'57''$ — $32^{\circ}16'15''$ N(图 2),属亚热带向暖温带过渡地带,四季分明,光能资源充足,年平均气温为 15.7°C ,年降水量平均为 1106 mm ,全年无霜期达 237 d 。总面积 3008.8 hm^2 ,其中森林面积有 2107.6 hm^2 ,森林郁闭度为 0.75 — 0.80 ,最高峰海拔 448.9 m ,是宁镇山脉的最高峰。降水量丰富,年平均降雨 117 d ,降雨量 1021 mm 左右,6月下旬到7月中旬的梅雨季节,有较长的阴沉多雨天气,夏季和秋季有西太平洋台风带来的大量雨水。夏季主导风向为东南、东风,冬季主导风向为东北、东风。土壤为黄棕壤和黄褐土类。目前紫金山植被的主要为人工林和天然恢复的次生林,各类植物资源比较丰富,乔木、灌木、藤本、草本共 113 科 600 种以上,各类树种所占比例为:40%的栎类、枫香树,21%的马尾松、黑松、火炬松、湿地松,32%的其他阔叶树,4%的刺槐,

1.5%的毛竹,其他树种 1.5%。

1.2 野外观测数据采集与处理

为了获得实测生物量数据,于 2011 年 11 月在研究区进行了地面样地调查。按不同立地条件、林型选取有代表性的标准样地,最终设置了 25 m×25 m 的标准样地 41 个(26 个阔叶林样地、15 个针叶林样地)。研究区内阔叶主要为麻栎和枫香,针叶主要为马尾松和黑松,所选样地基本包括了所有优势树种。对每个样地分别进行立地环境调查和每木检尺调查,记录胸径大于 6 cm 的每棵树的胸径,在每个样地中选取 3 棵标准木观测树高和真实冠幅,同时记录每个样地的坡度、坡向、海拔和中心位置等信息。

利用同时观测的树高和胸径数据,建立由胸径估算树高的模型,得到样地中每棵树的高度,再利用生物量方程计算单木生物量,使用的优势树种的生物量方程见表 1。

1.3 遥感数据的获取与预处理

本研究采用的是 2009 年 6 月 18 日获取的南京市 IKONOS 遥感影像,数据包括一个空间分辨率为 1 m 的全色波段和四个空间分辨率为 4 m 的多光谱波段(蓝色:0.45—0.52 μm;绿色:0.51—0.60 μm;红色:0.63—0.70 μm;近红外:0.76—0.85 μm;全色:0.45—0.90 μm)。影像数据质量很好,太阳天顶角为 8°,没有云覆盖。

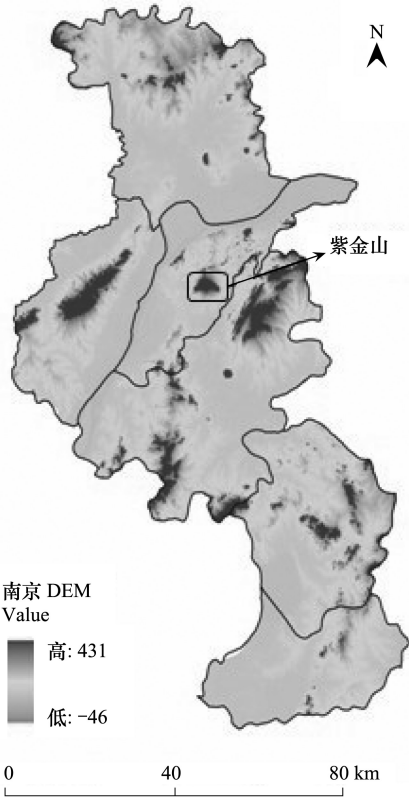


图 2 研究区示意图
Fig.2 Location of the study area

表 1 各优势树种生物量估算方程

Table 1 Allometric biomass equations of dominant species				
树种 Tree species	树干生物量 Stem biomass	树枝生物量 Branch biomass	树叶生物量 Leaf biomass	来源 Source
马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	$W_S = 0.0166 \times (D^2H)^{0.9586}$	$W_B = 0.0005 \times (D^2H)^{1.2225}$	$W_L = 0.00017 \times (D^2H)^{1.3029}$	[28]
黑松 <i>pinus thunbergii</i>	$W_S = 0.0957 \times (D^2H)^{2.2926}$	$W_B = 0.0006 \times (D^2H)^{1.2958}$	$W_L = 0.0276 \times D^{1.7541}$	[29]
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	$W_S = 0.12428 \times (D^2H)^{0.68}$	$W_B = 0.24338 \times D^{0.9467}$	$W_L = 0.85369 \times D^{0.5399}$	[30]
麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	$W_S = 0.0006571 \times D^{1.8473}H^{2.41}$	$W_B = 0.0001163 \times D^{2.9497}H^{1.3223}$	$W_L = 0.0032 \times D^{1.5148} \times H^{0.8821}$	[31]
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	$W_S = 1.5988 \times e^{0.2772D}$	$W_B = 0.0825 \times (D^2H)^{0.6492}$	$W_L = 1.0836 \times (D^2H)^{0.2166}$	[32]
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	$W_S = 0.02583 \times (D^2H)^{0.95406}$	$W_B = 0.00464 \times D^{3.21307}$	$W_L = 0.0234 \times D^{1.92768}$	[33]
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	$W_S = 0.04215 \times D^{2.56359}$	$W_B = 0.00379 \times D^{3.13611}$	$W_L = 0.00024 \times D^{3.18456}$	[34]

* 样地的总森林地上生物量计算为样地中所有胸径大于 6 cm 的单木生物量之和

对原始影像进行了几何和辐射校正,首先利用野外采集的研究区内 17 个控制点对影像进行几何精校正,校正误差控制在半个像元以内,采用二阶双线性内插法进行重采样,再完成全色波段和多光谱波段的相对配准。再采用 ENVI 4.7 软件对 IKONOS 数据进行辐射定标,消除传感器本身产生的误差;接着利用 FLAASH 模

块进行 IKONOS 数据的大气校正,从而消除大气的影响,得到地表反射率数据。

为了更好地利用 IKONOS 数据的高空间分辨率和光谱信息,对该影像数据进行了融合处理。目前有多种方法可以应用于 IKONOS 影像的融合^[35-37],本研究分别采用了 PC 变换法、Brovey 变换法和 Gram-schmidt 变换法对 IKONOS 全色和多光谱影像进行了融合处理,得到空间分辨率为 1m 的融合影像。通过目视比较和分析融合前后 NDVI 值的变化,发现采用 Brovey 变换法得到的融合影像效果最好(图 3)。因此,采用该方法融合生成的数据进行后续处理和计算。



图 3 原始影像(左)和用 Brovey 方法融合后的影像(右)(2、4、3 波段合成)

Fig.3 Comparison of the original image (left) and the image after fusion using the Brovey method (right) (Composition of bands 2, 4, and 3)

1.4 单木树冠轮廓提取

目前常用的单木树冠提取方法有局部最大值法、模版匹配法、种子区域生长法、分水岭分割法、谷地跟踪法和多尺度分割法^[21]。其中,多尺度分割法是一种从单像素对象开始的自下而上的区域合并技术,随后根据光谱同质性将小的对象与邻近像元合并为大的对象。分割尺度和同质性因子是影像分割的两个重要参数,其中影像分割尺度是一个表征多边形对象异质性最小的阈值,与空间分辨率是两个不同的概念,前者决定了生成的最小多边形的大小,分割尺度值越大,生成的影像对象多边形面积越大而数目越少。均质性因子包括颜色(光谱)和形状两个属性因子,其中形状因子又包括光滑度和紧致度两个因子。大多数情况下,光谱因子是生成对象最重要的因子,而形状因子则可以避免影像对象过于破碎,进行多尺度分割时,形状参数与颜色参数是相对的,这两个参数值之和为 1,形状参数设置的值越大,颜色(光谱)在分割时的权重相应就小。本研究采用 eCognition 软件的多尺度分割功能,对遥感影像进行图像分割处理。为找到最佳的分割尺度参数,分别将分割尺度设置为 1、2、3、4、5、8 和 10 进行试验,通过对分割结果分析对比发现,分割尺度设置为 2 时,分割效果最好。在分割过程中,还需要设置颜色因子,形状因子,光滑度参数和紧致度参数。在本研究中选择 Shape 因

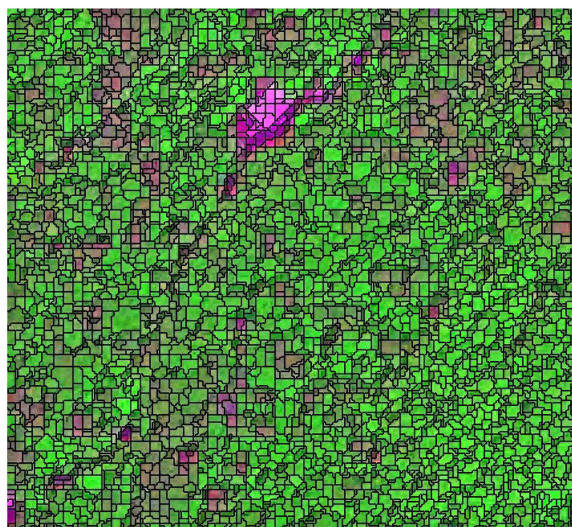


图 4 部分影像的分割结果(2、4、3 波段合成)

Fig.4 Part of the segmented image composed of bands 2, 4 and 3

子为 0.5, Compactness 为 0.7, 则 Color 因子为 0.5, Smoothness 为 0.3。部分影像的分割结果如图 4 所示。

1.5 面向对象分类

面向对象的遥感影像分类方法是针对高分辨率影像应用而兴起的一种新的遥感分类技术, 分类时不仅依靠地物的光谱特性, 而且根据像元的形状、纹理等几何特征和结构信息, 把具有相同特征的像元组成一个对象, 然后根据每一个对象的特征进行分类。因此, 可以有效地克服基于像元层次分类的不足。影像分割完成后, 影像的基本单元由单个像元上升到许多同质像元组成的多边形对象, 每个多边形对象可计算出所包含像元的平均光谱信息以及多边形的形状信息、纹理信息、位置信息和多边形间的拓扑关系等属性。分类规则的建立可以充分地利用对象所提供的各种信息进行组合, 以提取具体的地物。

在分类时, 特征参数值的选取比较困难, 通常需要基于先验知识, 反复尝试, 操作繁琐且分类效果难以理想^[38]。本研究使用了智能数据分析软件 See5^[39], 它是一个通过分析和快速训练样本, 并以决策树和规律集的形式来生成分类器的程序。使用 eCognition 在研究区内均匀地选择各类地物的样本进行训练, 经过 See5 的聚类分析后, 得到了各种地物类别的分类特征集 (图 5), 从而在 eCognition 中建立分类规则进行分类 (文中分别选取了亮度、绿光波段光谱值、红光波段光谱值、近红外波段光谱值和 NDVI 等的均值作为多边形对象的特征信息)。为了保证分类规则的精度, 在使用 See5 软件训练样本时要保证所选样本误差尽可能的小 ($\leq 3\%$)。

为了消除非植被的影响, 首先选取了一个分割尺度

(分割尺度为 4, Shape 为 0.5, Compactness 为 0.7, 则 Color 为 0.5, Smoothness 为 0.3) 进行植被的提取, 得到植被分布图, 然后选择一个最佳尺度 (分割尺度为 2, Shape 为 0.5, Compactness 为 0.7, 则 Color 为 0.5, Smoothness 为 0.3) 对植被区进行分割, 得到树冠阳性冠幅对象, 再对阳性冠幅对象进行面向对象分类。由于在研究区内绝大部分植被是森林, 因此将地物最终分为非植被、针叶林和阔叶林。分类完成后将分类结果导出成 shp 文件, 在 ArcGIS 软件中转为 img 格式文件, 导入到 ERDAS 软件中进行分类精度评价。得到满意分类精度后, 计算样地水平的阳性冠幅面积。

1.6 地上生物量估算模型的建立与验证

回归模型常常被用来建立生物量与各种实测树木生物物理参数 (胸径、树高、冠幅等) 之间的相关关系, 回归方程是地上生物量估算中常用的统计方法^[40]。研究中将样地观测数据按 60% 和 40% 比例随机选取, 分为用于模型建立和验证。在建立模型时, 以样地的总 PoCA 为自变量、AGB 为因变量, 建立线性和非线性 (指数和对数等) 模型, 以模拟的 AGB 与观测数据比较的 R^2 为指标选择模型。

2 结果与分析

2.1 分类精度评价及 PoCA 提取结果

对非植被、针叶林和阔叶林的分类精度评价在 ERDAS 软件中进行, 利用其精度评价模块, 在研究区遥感影像上随机选取 256 个样点, 生成误差矩阵。由分类精度评价结果 (表 2) 看出, 除了针叶林的生产者精度偏低外, 其他所有分类精度都达到 80% 以上, 总体精度为 83.20%, Kappa 系数为 0.7370, 分类精度较高。

图 6 是提取的部分研究区的 PoCA 分布图, 可以发现针叶林和阔叶林的单木 PoCA 都存在明显的空间变化, 具有较大 PoCA 的单木分布相对分散, 而具有较小 PoCA 的单木分布相对集中。表 3 给出了每个样地的实测生物量和阳性冠幅面积。在 41 个样方中, AGB 的变化范围为 4.57—29.21 kg/m², 其中针叶林样方的 AGB

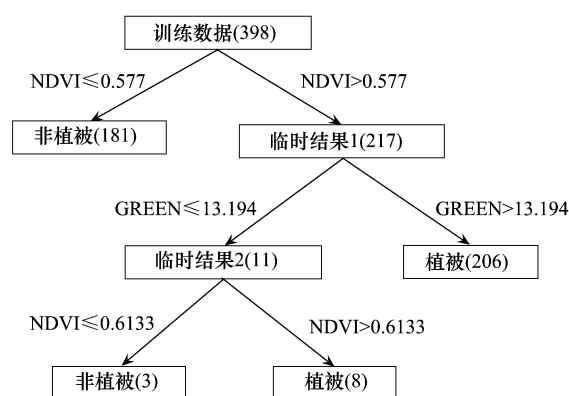


图 5 利用 see5 软件训练得到的分类规则 (括号中的数值为训练样本数)

Fig.5 Classification rule constructed by using the See5 program (Values in brackets represent the number of training samples)

平均值为 12.51 kg/m², 阔叶林样方的 AGB 平均值为 16.61 kg/m²。提取的 PoCA 的变化范围为 0.64—41.6 m², 其中针叶林样方的 PoCA 平均值为 11.32 m², 阔叶林样方的 PoCA 平均值为 12.78 m²。

表 2 面向对象分类精度评价
Table 2 Accuracy evaluation of Object-oriented classification

分类数据 Classified data	类别	参考数据 Reference data			样本数	用户精度/% User's accuracy
		非植被	针叶	阔叶		
Classified data	非植被	60	9	6	75	80.0
	针叶林	0	49	8	57	85.96
	阔叶林	6	14	104	124	83.87
	样本数	66	72	118	256	—
生产者精度/% Producer's accuracy		90.91	68.06	88.14	—	总体精度:83.20

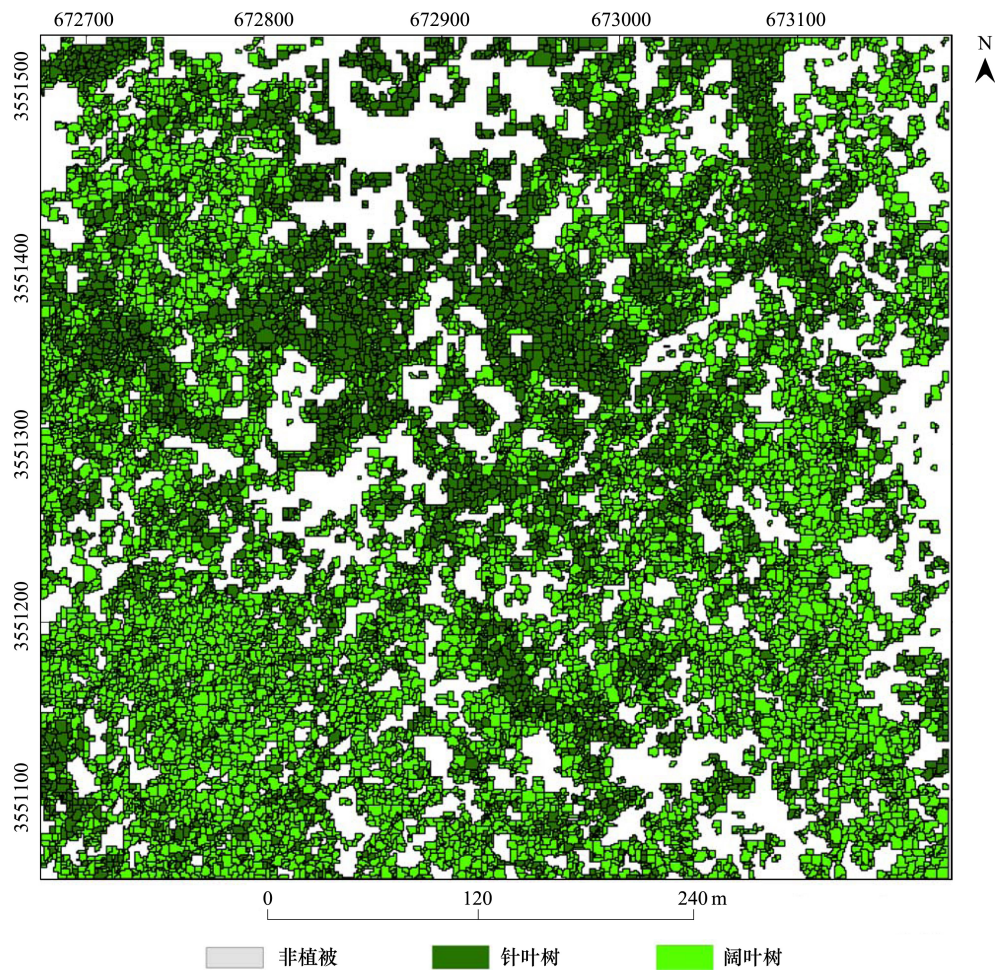


图 6 部分研究区阳性冠幅提取结果图
Fig.6 PoCA extraction results for part of the study area

2.2 基于 PoCA 的地上生物量估算模型

通过回归分析发现,样地水平的 PoCA 与 AGB 之间呈较好的相关关系, 建立针叶林和阔叶林的 AGB 估算模型分别为 $AGB = 10.148PoCA^{1.051}$ 和 $AGB = 3.0836PoCA^{1.245}$ 。模型估算的针叶林和阔叶林 AGB 与观测数据比较的 R^2 分别为 0.62 ($P < 0.01, n = 9$) 和 0.56 ($P < 0.01, n = 16$)。模型验证结果表明, 所建 AGB 估算模型的可

表 3 样方生物量和提取的阳性冠幅面积统计

Table 3 Statistical field measured AGB and extracted PoCA of every sample plot

样方号 Quadrat number	优势树种 Dominant Species	株数 Tree number	平均树高/m Average height	平均胸径 Average DBH/cm	样方生物量 Quadrat AGB /(kg/m ²)	样方总阳 性冠幅 Total quadrat POCA/m ²
01	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	46	21.67	31.0	9.97	524.42
02	喜树 <i>Camptotheca acuminata</i>	63	16.50	22.5	10.07	617.70
03	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	56	18.50	26.7	25.88	604.74
04	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	81	15.70	22.3	9.31	608.74
05	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	50	14.60	24.2	15.08	444.80
06	黑松 <i>pinus thunbergii</i>	57	12.50	24.4	8.34	354.56
07	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	26	19.50	34.5	24.98	602.88
08	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	91	21.00	33.6	16.23	302.88
09	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	86	13.87	18.8	9.61	443.53
10	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	89	13.67	18.8	8.77	417.92
11	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	24	20.33	28.9	25.95	610.56
12	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	37	16.00	22.1	7.31	569.44
13	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	48	15.50	24.8	13.55	608.64
14	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	42	17.25	25.9	20.34	606.72
15	栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	98	11.67	12.5	13.59	578.40
16	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	35	14.00	24.1	21.73	513.94
17	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	72	11.34	18.7	4.66	518.24
18	栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	67	11.63	15.7	11.80	522.88
19	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	46	14.00	20.6	13.22	464.48
20	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	31	10.50	23.0	29.21	598.42
21	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	94	8.67	19.2	10.44	525.74
22	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	83	11.40	16.9	8.23	528.08
23	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	50	13.20	25.1	7.07	278.40
24	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	59	8.20	20.2	4.57	338.56
25	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	98	9.13	14.4	7.50	401.92
26	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	78	13.63	25.3	13.69	413.72
27	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	55	9.90	24.3	12.60	420.28
28	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	56	10.17	23.1	17.01	547.20
29	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	92	11.34	23.9	12.01	311.04
30	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	60	12.40	20.7	19.80	573.44
31	麻栎 <i>Quercus acutissima</i>	44	10.33	20.3	21.47	568.32
32	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	47	10.00	23.8	7.96	326.40
33	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	52	11.50	19.0	8.95	427.52
34	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	57	10.35	19.4	10.55	349.44
35	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	68	10.67	15.0	8.14	358.40
36	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	37	14.77	21.6	15.24	436.85
37	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	58	10.56	18.7	11.76	601.60
38	马尾松 <i>pinus thunbergii</i>	31	13.03	18.8	6.17	378.88
39	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	72	12.00	16.9	12.05	617.60
40	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	41	12.15	36.0	22.37	615.68
41	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	42	11.24	18.7	12.65	618.24

AGB: Aboveground biomass

靠性较高,估算的针叶林和阔叶林 AGB 与观测数据比较的 R^2 分别为 0.55 ($P < 0.01, n = 5$) 和 0.52 (0.01, $n = 10$)。但地上生物量较低时,模型结果偏高;而地上生物量较高时,模型结果偏低。所建针叶林 AGB 估算模型优于阔叶林模型,这与树冠结构特征有关,针叶树冠形状较为规则,一般呈伞状,树木相互之间的重叠较少,

利用遥感数据提取的树冠轮廓精度较高,提取得到的 PoCA 基本近似于真实的树冠面积。而阔叶树的树冠很不规则,当林分郁闭度较高时树冠之间的重叠现象比较严重,导致自动提取的阔叶树 PoCA 与真实的树冠面积差别较大,估算的 AGB 误差较大(图 7)。

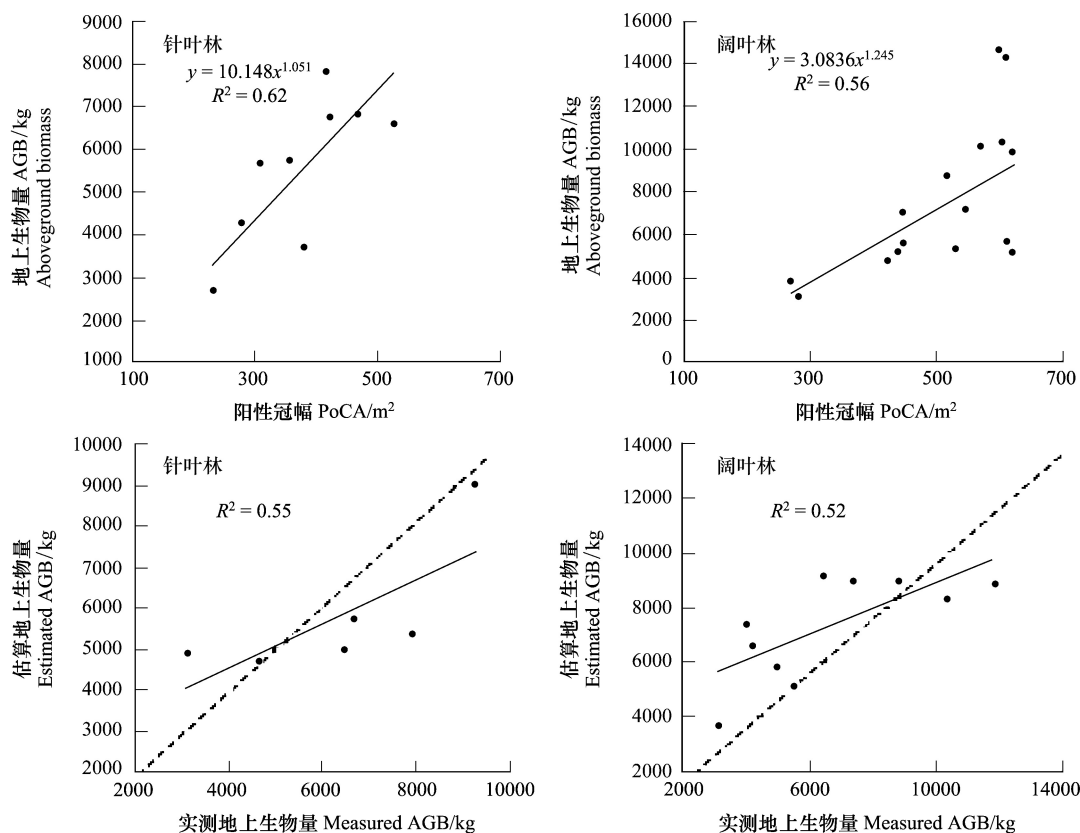


图 7 基于 PoCA 的 AGB 估算模型和模型验证结果

Fig.7 Empirical models for estimating AGB of conifer and broadleaf forests based on PoCA and validation of modeled AGB for conifer and broadleaf forests

最终,根据建立的生物量估算模型,进行森林地上生物量制图,生成了研究区内森林地上生物量空间分布图(图 8)。从图 8 可以看出,单木的 AGB 存在明显的空间变化特征,单木的 AGB 主要集中在 0—400 kg 之内,其空间分布相对集中;AGB 介于 400—700 kg 之间的单木数量较少,空间分布相对分散;而 AGB 高于 700 kg 的单木数目很少,空间分布很零散。

3 结论与讨论

本研究基于冠层冠幅可以估算 AGB,而阳性冠幅与冠层冠幅相关的事实,采用面向对象的图像分析方法,从融合的 IKONOS 影像中提取单木的阳性冠幅,用于估算生物量。结果表明,在经过充分训练后面向对象的分析方法应用于单木 PoCA 的提取具有较高精度(总体精度为 83.20%,Kappa 系数为 0.7370),在样地尺度, PoCA 与 AGB 之间具有较好的相关性,基于 PoCA 建立的针叶林和阔叶林 AGB 估算模型的 R^2 分别达到了 0.62 ($P < 0.01$, $n = 9$) 和 0.56 ($P < 0.01$, $n = 16$),模型验证也表明,所建模型具有较好的可靠性。从而说明,通过高分辨率遥感数据提取 PoCA 进行森林地上生物量的是可行性的。同时,针叶林 PoCA 与 AGB 之间的相关性优于阔叶林,表明这一方法更适用于针叶林地上生物量的遥感估算。

但是,本研究尚存在一些不足,需要进一步深入研究。

由于树冠之间的重叠,使得进行图像分割时分割尺度的选择存在一定的困难,分割尺度设置过小时会发生过度分割现象,而分割尺度设置过大时则会导致欠分割的问题。本研究采取尺度分割试验的方法确定该参数,具有一定的主观性。随着激光雷达的不断发展,今后可以考虑加入激光雷达数据,结合其高度信息,提高

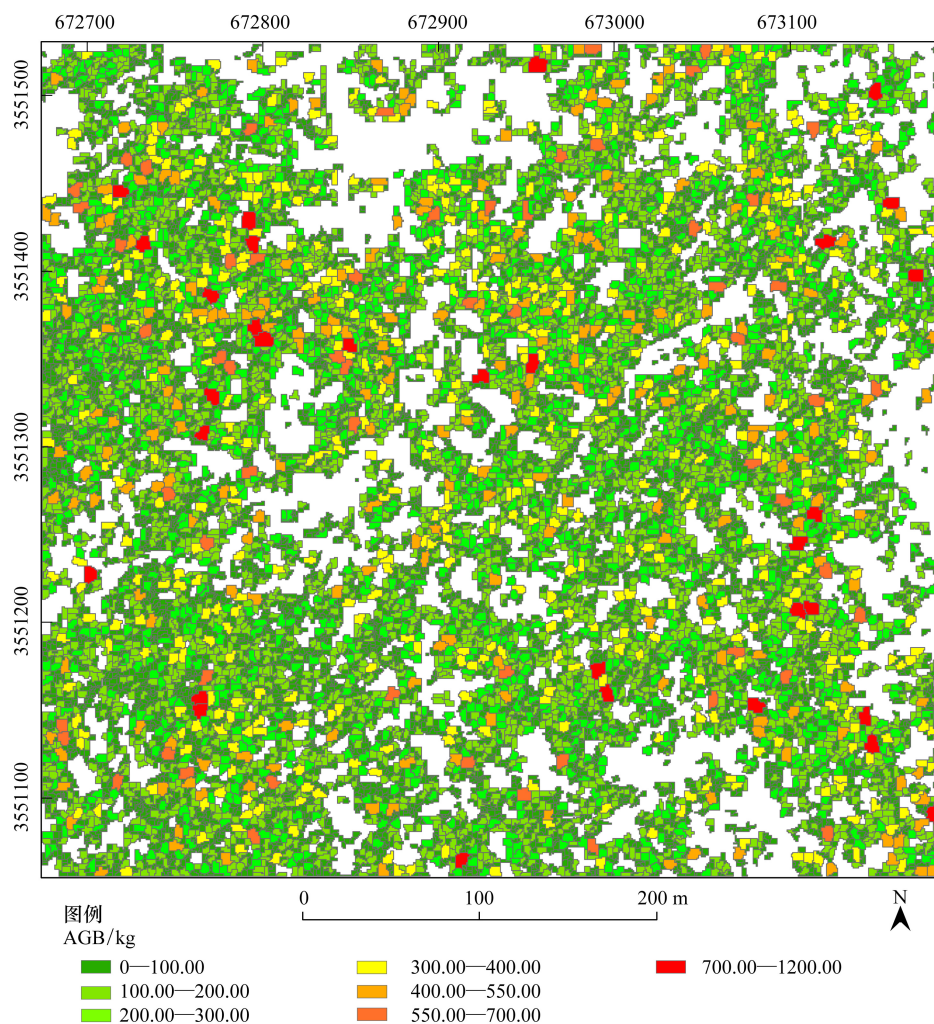


图8 部分研究区地上生物量分布图

Fig.8 AGB map for part of the study area

树冠分割精度。

图像分割是高分辨率遥感图像进行面向对象分析的前提和基础,图像分割结果的质量直接影响后续处理的精度,但是,目前还缺乏统一可靠的图像分割精度评价标准。因此,如何建立统一可靠的图像分割精度评价标准将是今后需要进一步研究的问题。

由于 IKONOS 数据的全色波段空间分辨率实际可达到 81 cm,理论上大于 81 cm 的单木树冠都可以通过相关的图像分析方法从影像上提取出来,由于卫星扫描姿态偏移以及太阳天顶角偏大等因素,图像上会存在地物阴影,影响树冠提取精度。本研究所采用的影像数据太阳天顶角较小,所以没有考虑阴影的影响。

在进行样地 AGB 计算时,使用的是文献中发表的生物量计算方程,其建模使用数据的样地条件与本研究的样地存在一定的差异,会导致 AGB 的计算结果的一定误差,从而在一定程度上影响到 AGB 估算模型的精度评价结果。加之由于观测条件的限制,野外观测数据样本数相对偏少,对提取的 PoCA 无法进行有效验证等缺陷。所以,本文所建立模型的适用性还有待进一步的验证。

冠幅与 AGB 之间关系随树种和森林年龄变化,由于植被冠层光谱的相似性,要从影像上对每一种树种进行分类在现研究阶段还很困难,本研究中只分为针叶林和阔叶林两大类,分别进行建模,也没有考虑森林年龄的作用。

References:

- [1] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 945-958.
- [2] Winjum J K, Dixon R K, Schroeder P E. Forest management and carbon storage: An analysis of 12 key forest nations. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, 70(1/4): 239-257.
- [3] Xu X L, Cao M K. An analysis of the applications of remote sensing method to the forest biomass estimation. *Geo-Information Science*, 2006, 8(4): 122-128.
- [4] 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 and Resources*, 2011, 23(1): 1-8.
- [5] Tang X G, Liu D W, Wang Z M, Jia M M, Dong Z Y, Liu J Y, Xu W M. Estimation of forest aboveground biomass based on remote sensing data: A review. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1311-1318.
- [6] Li D R, Wang C W, Hu Y M, Liu S G. General review on remote sensing-based biomass estimation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 631-635.
- [7] Hame T, Salli A, Andersson K, Lohi A. A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15): 3211-3243.
- [8] Zheng D L, Rademacher J, Chena J Q, Crow T, Bresee M, Moine J L, Ryu S R. Estimating aboveground biomass using landsat7 ETM+ data across a managed landscape in Northern Wisconsin, USA. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(3): 402-411.
- [9] Huang G S, Xia C Z. MODIS-based estimation of forest biomass in Northeast China. *Forest Resources Management*, 2005, (4): 40-44.
- [10] Solberg S, Astrup R, Gobakken T, Nasset E, Weydahl D J. Estimating spruce and pine biomass with interferometric X-band SAR. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2353-2360.
- [11] Yu Y, Fan W Y, Li M Z, Yang X G. Estimation of forest tree heights and biomass from GLAS data. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(9): 84-87.
- [12] 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(11): 2931-2942.
- [13] Song Q, Fan W Y. ALOS PALSAR estimation of vegetation biomass in Daxing'anling region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 303-308.
- [14] Qin X L, Li Z Y, Yi H R. Extraction method of tree crown using high-resolution satellite image. *Remote Sensing Technology and Application*, 2005, 20(2): 228-232.
- [15] Liu X S, Huang J W, Ju H B. Study on extraction of forest parameters by high spatial resolution remote sensing. *Forest Resources Management*, 2009, 4(2): 111-117.
- [16] Cui S W. Study on Individual Tree Crown Extraction based on High Resolution Remote Sensing [D]. Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2011.
- [17] Hay G J, Castilla G, Wulder M A, Ruiz J R. An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 7(4): 339-359.
- [18] Read J M, Clark D B, Venticinque E M, Moreira M P. Application of merged 1-m and 4-m resolution satellite data to research and management in tropical forests. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 592-600.
- [19] Shimano K. Analysis of the relationship between DBH and crown projection area using a new model. *Journal of Forest Research*, 1997, 2(4): 237-242.
- [20] Hemery G E, Savill P S, Pryor S N. Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. *Forest Ecology Management*, 2005, 215(1/3): 285-294.
- [21] Liu X S, Huang J W, Ju H B. Research progress in the methods and applications of individual tree crown's automatic extraction by high spatial resolution remote sensing. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2010, 27(1): 126-133.
- [22] Huang J W, Chen Y F, Ju H B. Study on tree crown extraction from QuickBird imagery based on object oriented approach in the project of converting cropland to forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(z1): 68-71.
- [23] Wang R W, Peng D L, Wu T, Xu D. Study on tree-crown extraction from QuickBird data based on object-oriented method. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(15): 128-134.
- [24] Wang D S, Song X M. A new single-tree competition measure-relative effective crown ratio. *Forest Research*, 1994, 7(3): 337-341.
- [25] Zhu X Q. Relationship between crown size and tree diameter breast height of *pinus sylvestris* var *mongovica*. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2001, 16(2): 124-124.
- [26] Shi M Z, Zhang F D. Studies on relationship between crown size and tree diameter at breast height of 107 *Populus*. *Journal of Fujian Science and Technology*, 2005, 32(4): 97-98.
- [27] Ren X B, Wang X T, Tadaki T, Shimizu K. Theoretical study of coexistence of ordering and spinodal decomposition. *Science in China (Series E)*, 1996, 39(4): 412-423.
- [28] Feng Z W, Chen C Y, Zhang J W, Wang K P, Zhao J L, Gao H. Determination of Biomass of *Pinus massoniana* stand in Huitong county, Hunan province. *Scientia Silvae Sinicae*, 1982, 18(2): 127-134.
- [29] Zhang X D, Wu Z M, Peng Z H. Mathematical models of the Biomass structure of *Pinus Thunbergii* plantation. *Journal of Biomathematics*, 1994, 9

(5): 60-65.

- [30] Ye J Z, Jiang Z L. A study on the above ground Biomass of Chinese fir forest in a hilly region of southern Jiangsu. Journal of Nanjing Forestry University, 1982, (3): 109-115.
- [31] Xu J H, Wang M L, Huang Q F, Gong S F. Study on aboveground biomass model of natural individual trees of *Quercus acutissima*. Anhui Forestry Science and Technology, 2011, 37(4): 3-6.
- [32] Qian G Q. Studies on the dynamic change of the net production quantity of *Liquidambar formosana* Plantation. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2000, 22(3): 399-404.
- [33] Zhang B L, Chen C G. Biomass and production of *Robinia pseudoacacia* plantation in Hongxing Tree Farm of Changwu county, Shaanxi Province. Shaanxi Forest Science and Technology, 1992, (3): 13-17.
- [34] Wang Z, Han Y J, Kang H Z, Huang D, Xue C Y, Yin S, Liu C J. Carbon storage of main tree species plantations for water resources conversation in upper reaches of Huangpu River, Shanghai. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(8): 1930-1935.
- [35] Weng Y L, Tian Q J, Hui F M. Research on the fusion effects of IKONOS high-resolution remote sensing image. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2004, 34(2): 274-277.
- [36] Song G X, Pan J J, Zhu W J. Study on optimum fusion technology of IKONOS image. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(2): 106-108.
- [37] Wang Z W, Liu S X, Chen X D. An automatic method of simulating low resolution panchromatic image in IKONOS image fusion. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(11): 1283-1287.
- [38] Xing B L. The effects of land cover change on net primary productivity of terrestrial ecosystems in Nanjing City [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [39] Liang K, Chang L Q. A study of construction and classification of decision tree classifiers based on See5. 0 Algorithm. Mine Surveying, 2009, (2): 41-43.
- [40] Lu D S. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(7): 1297-1328.

参考文献:

- [3] 徐新良, 曹明奎. 森林生物量遥感估算与应用分析. 地球信息科学, 2006, 8(4): 122-128.
- [4] 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, 23(1): 1-8.
- [5] 汤旭光, 刘殿伟, 王宗明, 贾明明, 董张玉, 刘婧怡, 徐文明. 森林地上生物量遥感估算研究进展. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1311-1318.
- [6] 李德仁, 王长委, 胡月明, 刘曙光. 遥感技术估算森林生物量的研究进展. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(6): 631-635.
- [9] 黄国胜, 夏朝宗. 基于 MODIS 的东北地区森林生物量研究. 林业资源管理, 2005, (4): 40-44.
- [11] 于颖, 范文义, 李明泽, 杨曦光. 利用大光斑激光雷达数据估测树高和生物量. 林业科学, 2010, 46(9): 84-87.
- [13] 宋茜, 范文义. 大兴安岭植被生物量的 ALOS PALSAR 估算. 应用生态学报, 2011, 22(2): 303-308.
- [14] 覃先林, 李增元, 易浩若. 高空间分辨率卫星遥感影像树冠信息提取方法研究. 遥感技术与应用, 2005, 20(2): 228-232.
- [15] 刘晓双, 黄建文, 鞠洪波. 高空间分辨率遥感森林参数提取探讨. 林业资源管理, 2009, 4(2): 111-117.
- [16] 崔少伟. 基于高分辨率遥感数据单木树冠提取研究 [D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2011.
- [21] 刘晓双, 黄建文, 鞠洪波. 高空间分辨率遥感的单木树冠自动提取方法与应用. 浙江林学院学报, 2010, 27(1): 126-133.
- [22] 黄建文, 陈永富, 鞠洪波. 基于面向对象技术的退耕还林树冠遥感信息提取研究. 林业科学, 2006, 42(z1): 68-71.
- [23] 王茹雯, 彭道黎, 吴涛, 徐定. 利用面向对象的技术进行树冠信息提取研究. 中国农学通报, 2010, 26(15): 128-134.
- [24] 王迪生, 宋新民. 一个新的单木竞争指标——相对有效冠幅比. 林业科学研究, 1994, 7(3): 337-341.
- [25] 朱晓青. 樟子松阳性冠幅与胸径关系的研究. 河北林果研究, 2001, 16(2): 124-124.
- [26] 时明芝, 张凡东. 107 杨树阳性冠幅与胸径关系的研究. 福建林业科技, 2005, 32(4): 97-98.
- [28] 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 王开平, 赵吉录, 高虹. 湖南会同地区马尾松林生物量的测定. 林业科学, 1982, 18(2): 127-134.
- [29] 张旭东, 吴泽民, 彭镇华. 黑松人工林生物量结构的数学模型. 生物数学学报, 1994, 9(5): 60-65.
- [30] 叶镜中, 姜志林. 苏南丘陵区杉木林地上部分生物量的研究. 南京林产工业学院学报, 1982, (3): 109-115.
- [31] 许剑辉, 汪茂林, 黄庆丰, 宫守飞. 天然麻栎单木地上生物量模型研究. 安徽林业科技, 2011, 37(4): 3-6.
- [32] 钱国钦. 枫香人工林净生产量动态变化研究. 江西农业大学学报, 2000, 22(3): 399-404.
- [33] 张柏林, 陈存根. 长武县红星林场刺槐人工林的生物量和生产量. 陕西林业科技, 1992, (3): 13-17.
- [34] 王哲, 韩玉洁, 康宏樟, 黄丹, 薛春燕, 殷杉, 刘春江. 黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量. 生态学杂志, 2012, 31(8): 1930-1935.
- [35] 翁永玲, 田庆久, 惠凤鸣. IKONOS 高分辨率遥感影像自身融合效果分析. 东南大学学报: 自然科学版, 2004, 34(2): 274-277.
- [36] 宋刚贤, 潘剑君, 朱文娟. IKONOS 影像的最佳融合技术研究. 测绘科学, 2009, 34(2): 106-108.
- [37] 王忠武, 刘顺喜, 陈晓东. IKONOS 图像融合中自动拟合低分辨率全色图像的方法. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(11): 1283-1287.
- [38] 邢白灵. 地表覆盖变化对南京市生态系统净初级生产力的影响 [D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [39] 梁坤, 常鲁群. 基于 See5. 0 算法的决策树构建与分类研究. 矿山测量, 2009, (2): 41-43.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.20 Oct., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatial variability of small and medium scales' resource abundance of *Ommastrephes bartramii* in Northwest Pacific YANG Mingxia, CHEN Xinjun, FENG Yongjiu, et al (6427)
- The effect of moisture and temperature on soil C mineralization in wetland and steppe of the Zoige region, China WANG Dan, LV Yuliang, XU Li, et al (6436)
- Response and population bionomic strategies of desert rodent communities towards disturbance of cultivation YUAN Shuai, FU Heping, WU Xiaodong, et al (6444)
- Effects of Bt-cotton on *Propylea japonica*, an Enemy Insect of *Bemisia tabaci* (Gennadius) ZHOU Fucui, GU Aixiang, YANG Yizhong, et al (6455)
- Research progress in the ecological effects of micro-landform modification WEI Wei, YU Yun, JIA Fuyan, et al (6462)

Autecology & Fundamentals

- A multi-scale feeding habitat selection of Red-crowned crane during spring migration at the Shuangtaihekou Nature Reserve, Liaoning Province, China WU Qingming, ZOU Hongfei, JIN Hongyang, et al (6470)
- Surface pollen research of Nanshan region, Shihezi City in Xinjiang ZHANG Hui, ZHANG Yun, YANG Zhenjing, et al (6478)
- Dynamics of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of two dominant species in a Poyang Lake wetland ZHENG Yanming, YAO Bo, WU Qin, et al (6488)
- Estimation of forest aboveground biomass using high spatial resolution remote sensing imagery HUANG Jinlong, JU Weimin, ZHENG Guang, et al (6497)
- Cost-benefits of the clonal integration of *Cynodon dactylon*, a stolon herbaceous plant, under heterogeneous lighting condition TAO Yingshi, HONG Shengchun, LIAO Yongmei, et al (6509)
- Biological cycling of *Koeleria paniculata* plantation microelements in Xiangtan Manganese Mine wasteland LUO Zhaohui, TIAN Dalun, TIAN Hongdeng, et al (6517)
- Effects of ectomycorrhizal fungi (*tinctorius* (Pers.) Coker & Couch) on the biomass of masson pine (*Pinus massoniana*) seedlings under simulated acid rain CHEN Zhan, WANG Lin, SHANG He (6526)
- Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield CHEN Xinxiang, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al (6534)
- Source of variation of plant functional traits in the Yanhe river watershed: the influence of environment and phylogenetic background ZHANG Li, WEN Zhongming, MIAO Lianpeng (6543)
- The general biology and experimental population life table about *Asynacta ambrostomae* WANG Xiumei, ZANG Liansheng, LIN Baoqing, et al (6553)
- Effect of several ecological factors on embryonic development of *Sepia lycidas* PENG Ruibing, JIANG Xiamin, YU Shuguang, et al (6560)

Population, Community and Ecosystem

- The thinning regular of the the shrubbery at Tongguling National Nature Reserve on Hainan Island, China ZHOU Wei, LONG Cheng, YANG Xiaobo, et al (6569)
- The cause of grassland degradation in Golog Tibetan Autonomous Prefecture in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai Province ZHAO Zhiping, WU Xiaopu, LI Guo, et al (6577)
- Effects of simulated nitrogen deposition on substrate quality of litterfall in a *Pleiblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (6587)
- Phytoplankton community structure based on pigment composition in Qinzhou bay during average water period LAN Wenlu, LI Mingmin, LI Tianshen (6595)
- Functional trait-based evaluation of plant fireproofing capability for subtropical evergreen broad-leaved woody plants LI Xiupeng, YANG Xiaodong, YU Shuquan, et al (6604)
- Interspecific associations between *Parus major* and other bird communities in Beijing Xishan region DONG Daying, FAN Zhongji, LI Zhaxijie, et al (6614)

- Feasibility analysis of passive integrated transponders in population ecology studies of Siberian chipmunk
 YANG Hui, MA Jianzhang, RONG Ke (6634)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Dynamic variation of water deficit of winter wheat and its possible climatic factors in Northern China
 LIU Qin, MEI Xurong, YAN Changrong, et al (6643)
- Study on the levels' evaluation of provincial low-carbon development in China based on the FAHP-TOPSIS method
 HU Linlin, JIA Junsong, MAO Duanqian, et al (6652)
- An investigation of the safety threshold of a floodplain wetland: a case study of the Er-Ka Nature Reserve, China
 HU Chunming, LIU Ping, ZHANG Litian, et al (6662)
- Application of le bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetaion on the loess plateau
 LIU Lei, AN Shaoshan, Huang Huawei (6670)
- Analysis of vegetation and soil degradation characteristics under different human disturbance in lakeside wetland, Napahai
 TANG Mingyan, YANG Yongxing (6681)

Resource and Industrial Ecology

- Changes of land surface temperature and its response to urbanization under the extreme high-temperature background in recent
 ten years of Beijing LI Xiaomeng, SUN Yonghua, MENG Dan, et al (6694)
- Stable isotope (^{13}C and ^{15}N) analysis of fish food web of the Xiaojiang Bay in Three Gorges Reservoir
 LI Bin, XU Dandan, WANG Zhijian, et al (6704)

Research Notes

- Dynamics of CO_2 exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Beijing Olympic Forest Park
 CHEN Wenjing, LI Chunyi, HE Guimei, et al (6712)
- Effects of vegetation restoration on landscape pattern of Hongya Country in recent 15 years
 WANG Peng, LI Xianwei, ZHAO Anjiu, et al (6721)
- Photosynthetic characteristics and SAMS gene expression in the red alga *Porphyra yezoensis* Ueda under high salinity
 ZHOU Xianghong, YI Lefei, XU Juntian, et al (6730)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 宋金明

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 33 卷 第 20 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 20 (October, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.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 90.00 元