

# 红树林植物生物量研究进展

朱远辉<sup>1</sup>, 柳林<sup>1,2</sup>, 刘凯<sup>1\*</sup>, 王树功<sup>3</sup>, 艾彬<sup>4</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院 综合地理信息研究中心, 广东广州 510275; 2. Department of Geography,

University of Cincinnati, Cincinnati, OH 45221-0131, USA; 3. 中山大学科技发展研究院, 广东广州 510275;

4. 中山大学海洋学院, 广东广州 510275)

**摘要:** 红树林生长于热带、亚热带地区典型的生态交错带, 其植物群落具有很高的生物量。根据国内外相关研究, 综述了红树林植物地上、地下生物量研究成果及其相关的研究方法, 并探讨了不同纬度红树林植物生物量的分布规律及其影响因素。结果表明, 相关研究主要集中在运用异速生长法研究红树林植物地上部分生物量, 该方法适用于不同红树林树种, 可推广使用至相似生境的同一红树林树种; 红树林植物根系生物量研究较少, 且根系提取手段和处理技术差异较大, 导致研究成果对比参考性不高, 还有待进一步完善; 区域红树林植物生物量遥感估算逐渐成为研究热点, 但遥感估算模型仅仅依靠遥感图像的光谱特征和后向散射特征等信息, 对宽波段植被指数容易饱和、不同的红树林树种光谱差异较大等问题缺乏考虑, 在建模过程中忽略了植物的叶面积指数和树龄等, 高光谱、高分辨率影像数据及多极化雷达数据将成为未来红树林植物生物量估算研究的重要数据源; 随着纬度的增加, 热带和亚热带地区红树林植物生物量总体在减少; 红树林植物生物量主要受生境、树种、树龄和气候等因素的影响。

**关键词:** 红树林植物; 生物量; 分布规律; 影响因素; 遥感

**中图分类号:** Q948.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-5948(2014)04-515-12

全球大约75%的热带和亚热带国家分布有红树林, 红树林生态系统对热带—亚热带海岸带的生态系统平衡起着重要作用<sup>[1,2]</sup>。红树林具有重要的生态和社会效益, 能够净化海水和空气, 可以作为候鸟迁徙的中转站和鱼类的繁育所, 能够截留陆地和海洋之间的营养物质, 以及保护海岸线等<sup>[3,4]</sup>。由于红树林植物和沉积物能够长时间储存生物量和有机碳<sup>[5]</sup>, 具有较高的初级生产力, 因此被公认为是海陆边缘重要的绿化带和高效率的蓝色碳汇, 在减缓气候变化的过程中发挥着重要作用<sup>[6]</sup>。碳储量较高、对土地利用变化的敏感性和巨大的生态服务价值, 使得红树林生态系统成为减少发展中国家毁林及森林退化排放(Reduce Emissions from Deforestation and Forest Degradation and to Enhance Carbon Stocks, REDD+)和生态系统服务付费(Payments for Ecosystem Services, PES)策略

的重点对象之一<sup>[7]</sup>。在京都机制框架中, 红树林被认为是森林清洁发展机制(Clean Development Mechanism, CDM)的选择方案<sup>[8]</sup>。红树林植物生物量的量化研究是理解其生态系统结构和功能的基础, 能够反映群落利用自然的能力, 有助于分析热带和亚热带海岸带碳储量的分布格局, 对评价红树林生态系统生产力、探讨全球生态系统碳循环具有重要的理论意义, 同时也有利于指导未来与红树林相关的规划、修复和管理<sup>[9]</sup>。

1962年, Golley F等利用皆伐法对波多黎各大红树(*Rhizophora mangle*)群落的生物量进行研究<sup>[10]</sup>; 1977年, Briggs S V基于材积法研究了澳大利亚白骨壤(*Avicennia marina*)群落生物量<sup>[11]</sup>; 1985年, Woodroffe C D基于皆伐法建立了新西兰的白骨壤群落生物量和树高的关系模型<sup>[12]</sup>; 此后, 在国际生物学计划(IBP)和人与生物圈(MAB)的推动下, 红

收稿日期: 2013-09-27; 修订日期: 2014-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001291)、广东省科技计划项目(2010B030800003)、中山大学高校基本科研业务费专项资金项目(13lgpy61)和广东省教育厅育苗工程项目(LYM11002)资助。

作者简介: 朱远辉(1986-), 男, 广东省梅州人, 博士研究生, 主要研究方向为生态环境遥感。E-mail: 1986zhuyh@163.com

\*通讯作者: 刘凯, 副教授。E-mail: liuk6@mail.sysu.edu.cn

树林植物生物量研究迅速发展,研究方法多样化。面对如此大量的红树林植物生物量研究成果,很有必要对红树林植物生物量研究手段、分布规律和影响因素进行归纳、总结。2008年,Komiyama A等对红树林植物的异速生长方程和生物量进行了初步总结,但是缺乏对生物量测定方法的全面概述和对生物量分布规律、影响要素的梳理<sup>[13]</sup>。

红树林植物生物量与其碳汇功能紧密相连,结合传统的植物生物量测算和遥感技术,能够实现红树林植物生物量的研究从点到区域或全球尺度的过渡,探讨红树林植物生物量空间异质性和分布规律,有助于实现在全球尺度上研究红树林植物生物量,以期为全球碳循环研究提供基础数据。本文从红树林植物地上部分、地下部分两方面,综述利用传统测算方法和基于遥感技术的红树林植物生物量研究进展,探讨红树林植物生物量分布的空间异质性、分布规律及其影响因素。

## 1 红树林植物生物量的传统测算方法

### 1.1 植物地上部分生物量

红树林植物地上部分生物量测定多应用收获法。收获法可以大致分为3类:皆伐法、平均木法和异速生长法<sup>[14]</sup>。皆伐法是将一定单位面积上的林木逐个伐倒后,测定林木各部分的干质量,将各部分质量合计,即为林木生物量。皆伐法精度高,但伐倒单位面积的全部树木,需要消耗大量人力和物力,对红树林破坏较大,不适宜进行红树林植物生物量研究。平均木法是根据每木调查,计算出全部立木的平均胸径,筛选样地中最具有代表性的数株标准木,以计算生物量,然后估算出样地植物的生物量,该方法适用于具有小或中等离散度的正态分布的林分,例如人工修复的红树林植物群落<sup>[15]</sup>,但测树因子和样方选取对估算结果都有较大影响,因而精度不高。异速生长法是在样地每木调查的基础上,按照径级大小选取标准木,根据林木生物量与测树因子间的相关关系,建立林木生物量与测树因子的异速生长方程。异速生长法相对简单方便,精度较高,红树林植物生物量的研究多利用这种方法<sup>[16-19]</sup>。

已有研究表明,异速生长法不仅可以测定单一主干的树种,也可适用于多主干<sup>[20-22]</sup>和呈低矮灌木状树种<sup>[23]</sup>,例如常见到的红树属(*Rhizophora*)、秋茄属(*Kandelia*)、白骨壤属(*Avicennia*)、桐花树属

(*Aegiceras*)和海漆属(*Excoecaria*)等。建立异速生长方程,需要设置较多的样方,进行植物调查,测量树木的胸径和树高,在数据充足的情况下,才能建立相对准确的方程<sup>[24]</sup>。然而由于红树林非常茂密,难以估算其单株植被高度,因此也有研究只利用胸径建立异速生长方程<sup>[25-27]</sup>。但是综合考虑树高和胸径,才能使红树林植被生物量的估算精度更高<sup>[28-30]</sup>。红树林是一个相对复杂的生态系统,各种测树因子之间的关系也非常复杂,不同植物群落、生长环境和生长发育阶段,都可能导致红树林植物的相对生长规律发生变化,因此某个特定地点的特定树种的生长方程也会具有一定差异。但是一般来说,相同红树树种的异速生长关系区域差异较小,生物量差异主要由木质密度、树龄和生境等要素决定<sup>[13]</sup>。也有学者在测定不同红树树种的胸径和树干密度后,建立植物生物量普适异速生长方程,预测植物群落生物量<sup>[31,32]</sup>。

### 1.2 植物地下部分生物量

红树林植物生长于周期性潮汐浸淹的海岸地区,常受到风暴潮侵袭,这决定了红树林植物生物量和初级生产力的分配非常独特,有很大一部分储存在植物地下部分的根系中<sup>[33,34]</sup>,但从土壤中提取红树林植物根系非常繁琐和复杂,相比红树林植物地上部分生物量,根系生物量的研究相对较少。

有学者利用挖掘收获法、根冠比法、钻土芯法和壕沟法等<sup>[13,17]</sup>,研究红树林植物根系生物量。挖掘收获法是通过挖除植株的周围的土壤,以收获植株地下部分的生物量,是研究植物地下部分生物量最常用的方法。有学者利用挖掘收获法,研究了泰国南部木榄属(*Bruguiera*)和红树属<sup>[35]</sup>、雷州半岛无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)的根系生物量<sup>[36]</sup>。挖掘收获法提取根系的方法简单,测量结果精确,但是需要耗费大量人力和物力,对土壤和植物都会造成破坏,测量结果也难以进行时间动态的跟踪<sup>[37]</sup>。根冠比法是利用已经建立的地上与地下生物量的经验比例关系估测地下生物量的一种方法,如有学者利用根冠比法,估算澳大利亚正红树(*Rhizophora apiculata*)地下部分根系生物量<sup>[38]</sup>。根冠比法的精确度依赖于对植物根冠比关系的研究,但是植物的根冠比会随着树龄增长、盐度和物种间的差异发生变化,从而影响研究结果精度。钻土芯法是利用土钻采集含有根系的土样,对土样进行处理后,测量根系生物量的方法。有学者利用

钻土芯法,研究了澳大利亚布里斯班海榄雌属(*Avicennia*)根系的生物量<sup>[39]</sup>。但是,钻土芯法主要适用于植物细根,不适合整个根系,测量的精度还取决于土钻的直径、采样频率和数量。壕沟法是指在植物根部的外缘挖壕沟,并在壕沟内壁用根系观察框作方格,并用移植铲逐个方格剥露出根系,测量根系的生物量。有学者利用壕沟法,研究了泰国南部的木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)和海桑属(*Sonneratia*)植物地下部分生物量的分布情况<sup>[30]</sup>。但是,壕沟法要求样品体积足够大,且每个样品只能收集单棵树的根系,因技术方面的原因,实施难度较大。

已有研究普遍意识到红树林植物根系生物量估算的重要性,但是还没有方法可以精确测量根系生物量。根系挖掘方法和处理手段存在较大差异,大多数还是沿用传统的挖掘收获法,极大地制约了植物地下生物量的研究进展,因此,需要开发更为专业的根系提取手段及处理技术,也有必要探索红树林植物根系收集的有效方法,例如随着树龄的增长,红树林植物根系会产生大量的死根,因难以区分死根和活根,导致高估根系生物量<sup>[40]</sup>。微根区管法在最近几年发展迅速,充分利用了计算机、摄像机等现代化设备,能够对植物根系进行长时间定量监测,可以探讨其在测量红树林植物根系生物量方面应用的潜力<sup>[41]</sup>。综上所述,未来研究应进一步探讨红树林植物根系提取手段和处理技术,充分利用现代技术的发展,开拓新技术,促进植物地下部分生物量研究的发展。

红树林植物地上部分和地下部分生物量的相关研究主要集中在研究区域的优势树种生物量估算,而对林下灌木和草丛生物量的认识不足,例如红树树种老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)和卤蕨(*Acrostichum aureum*),直接影响区域红树林植物生物量估算的准确性<sup>[42,43]</sup>。因此,未来研究除了关注区域优势物种的生物量,也要对林下灌木、草丛的生物量进行进一步探索和完善,提高区域红树林植物生物量估算的精度。

## 2 基于遥感技术的红树林植物生物量研究

传统的红树林植物生物量测算方法只适用于估算某个特定区域的红树林植物生物量,难以实现大尺度的估算研究。红树林植物生物量会随着树

种、树龄、生境和气候等的变化而改变,某个特定区域的研究方法难以推广应用于其他地区<sup>[44-46]</sup>。兴起于20世纪60年代的遥感技术,具有大尺度、快速、同步和高频动态观测等优势,有助于实现大尺度的生态环境与陆地资源的宏观监测研究,尤其对于区域尺度上的红树林植物生物量研究,遥感技术已经成为理想的和可操作的研究方法。

对国内外采用遥感技术的部分红树林植物生物量研究中的数据源、估算参数、估算模型、研究区域和优势物种等进行了总结(表1)。目前,基于遥感数据的森林生物量估算方法主要包括遥感信息参数与生物量的回归分析、遥感数据与过程模型融合、基准样地法和人工神经网络法等,这些方法的适用范围和优缺点各异(表2),因此,在具体的应用中需要针对研究范围、可获取的参数和具体研究目的等选择合适的估算方法。

基于遥感数据的红树林植物生物量研究,采用的遥感数据源大部分是中、高分辨率多光谱遥感数据(Landsat、IKONOS和QuickBird)、单极化的雷达数据(Radarsar-1)和SRTM高程数据,能够提供更多红树林植物光谱特征的高光谱遥感数据目前还没有被用于红树林植物生物量的估算研究,主要是受高光谱遥感数据的数据源种类少、数据获取难度大的影响。

多极化、多波段的雷达遥感数据的应用还处于空白,不同极化方式和不同波段的雷达遥感数据能够提供红树林植物从树冠、树干和地面等多方面的后向散射信息和穿透能力,可以明显改善红树林植物生物量遥感估算的精度。

基于遥感数据进行红树林植物生物量研究时,不同红树林树种光谱特征具有一定的差异,宽波段的植被指数难以体现植物的生物物理和生物化学特性,在某个生物量密度和某个范围容易饱和,但相关研究对宽波段植被指数容易饱和<sup>[58]</sup>、不同的红树林树种光谱差异<sup>[59]</sup>等问题缺乏考虑。

研究已经证明,植被指数与叶面积指数之间、植被指数与生物量之间具有相关关系,但是,缺乏探讨叶面积指数与生物量之间的关系研究<sup>[60-64]</sup>。目前,大部分红树林植物生物量遥感估算参数仅仅依靠光学遥感数据的光谱特征(包括植被指数)和雷达遥感数据的后向散射特征等信息,忽略了一些重要的红树林植物生长参数(叶面积指数、树龄等)。



表1 基于遥感数据的一些红树林植物生物量研究文献的信息

Table 1 The information of some researches on biomass of plants of mangrove forests based on remote sensing data						
遥感数据源	分辨率	估算参数	估算模型	研究区	优势物种	参考文献
Landsat TM	30 m	纹理特征参数、波段值及其派生数据	基准样地法、逐步回归分析	北部湾	木榄—白骨壤混合群落、桐花树( <i>Aegiceras corniculatum</i> )	[47]
Landsat ETM+	30 m	植被指数、树龄	基于植被指数和树龄对生物量进行反演	泰国东部Trat	正红树、红茄冬( <i>Rhizophora mucronata</i> )	[48]
IKONOS	多光谱4 m	纹理特征	基于傅里叶变换提取的纹理特征对生物量进行回归分析	法国圭亚那	海榄雌属	[49]
QuickBird	多光谱2.44 m、全色0.61 m	亚像元分析	将QuickBird数据的混合象元分解为亚象元,用于监测量化红树林植物冠层郁闭度,并在此基础上估算红树林植物生物量	广西省北仑河口	木榄、秋茄( <i>Kandelia candel</i> )、白骨壤、桐花树	[50]
IKONOS、QuickBird	多光谱4 m、多光谱2.44 m	象元灰度	基于分水岭分割法提取每单棵树木的冠幅,利用QuickBird全色波段灰度值监测冠幅大小,并基于异速生长方程研究植物生物量的分布	泰国Ranong	正红树、红茄冬、柱果木榄( <i>Bruguiera cylindrica</i> )、木榄	[51]
Radarsat-1、TM	6 m、30 m	后向散射系数、植被指数	利用单极化后向散射系数、植被指数以及结合二者分别建立回归方程,并基于遗传算法确定回归方程的系数,估算红树林植物生物量	淇澳岛	秋茄、桐花树、无瓣海桑	[52]
SRTM(辅助ICESat/GLAS、Landsat ETM+)	90 m	通过地形数据校正后取植物冠层高度	利用ICESat/GLAS、Landsat ETM+等数据对SRTM数据进行校正,估算红树林植物冠层高度;根据红树林植物冠层高度和生物量经验公式,估算红树林植物地上生物量	非洲、莫桑比克	卤蕨、白骨壤、锥果木( <i>Conocarpus erectus</i> )、大红树等	[53,54]
SRTM(辅助USGS/SOFIA DEM数据和机载激光雷达数据、ICESat/GLAS)	30 m、90 m	通过地形数据校正后获取植被冠层高度	基于USGS/SOFIA DEM数据和机载激光雷达数据、ICESat/GLAS等数据对SRTM高程数据进行校正,估算红树林植物冠层高度;根据红树林植物冠层高度和生物量经验公式,模拟红树林植物地上生物量	佛罗里达埃弗格莱兹国家公园、加勒比海	白骨壤、拉关木( <i>Laguncularia racemosa</i> )、大红树、椎果木、大红树等	[55,56]

表2 基于遥感数据的森林生物量估算模型与应用对比<sup>[57]</sup>

Table 2 Comparison of various methods and their applications on forest biomass estimation using remote sensing data					
模 型	输入参数	研究对象	适用范围	主要优点	主要不足
回归分析	波段光谱信息、纹理特征、植被指数、背景因子等	生物量	区域尺度	经验公式、简洁直观	需大量样点观测数据、受树种和背景因子影响
遥感数据与过程模型融合	植被指数、叶面积指数等	净初级生产力	站点—区域—全球	能揭示生物量形成的生理生态过程	需要长时间尺度站点观测和数据验证
基准样地法	各波段光谱信息等	生物量	区域尺度	估算精度高	高度依赖观测样点尺度的分布,计算量大
人工神经网络法	波段光谱信息、纹理特征、植被指数、背景因子等	生物量	区域尺度	估算精度高	不能揭示生物量形成的内在机理,可能会产生过拟合,网络的学习和记忆具有不稳定性

基于遥感数据测定植物生物量的精度还受遥感估算模型的影响。大部分基于遥感数据的红树林植物生物量估算模型主要采用了回归模型,利用遥感数据与过程模型的融合和人工神经网络法对红树林植物生物量的研究还处于空白阶段,未来有必要开展这些方面的研究。

全球变化研究、PES 策略和 CDM 方案等要求对大区域的植物生物量进行精确估算,随着遥感技术的快速发展,以及遥感数据源、时空分辨率、数据可获取性和研究方法的不断改善,基于遥感数据的植物生物量精细化研究成为可能。因此,为了尽可能降低外部因素的干扰,实现红树林植物生物量的精确估算,应重点研究高分辨率和高光谱数据在红树林区域中树种水平的应用,引入叶面积指数和树龄等参数以建立红树林植物生物量估算模型,探讨不同估算模型在红树林植物生物量中的应用,关注基于多时相遥感数据的红树林植物生物量的时空分布格局,也有必要进一步探讨不受气候影响的雷达卫星数据在红树林植物生物量估算中的应用潜力。

### 3 红树林植物生物量分布规律和影响因素

研究表明,植物群落的生物量具有明显的地带性分布规律,从热带、亚热带到温带逐渐减少。红树林作为热带、亚热带海岸带典型的湿地生态系统,探讨其生物量空间分布规律对估算全球红树林植物生物量、理解植物生物量的空间分布水平具有重要意义。

#### 3.1 红树林植物地上部分生物量空间分布异质性

有关红树林植物地上部分生物量的研究主要集中在  $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 、 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$  和  $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$  区域,  $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$  和  $10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$  区域的相关研究相对较少。从表 3 可知,红树林植物地上部分平均生物量为  $148\text{ t/hm}^2$ <sup>[47]</sup>。Twieley R R 等的研究结果表明,红树林植物生物量随着纬度的升高在降低<sup>[65]</sup>。根据所掌握的研究结果估算,在  $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$  区域,红树林植物平均生物量为  $206.69\text{ t/hm}^2$ ; 在  $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$  和  $10^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{S}$  区域,红树林植物平均生物量为  $169.17\text{ t/hm}^2$ ; 在  $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$  和  $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$  区域,平均生物量仅为  $90.82\text{ t/hm}^2$ 。由于低纬度红树林植物的冠层高度和密度普遍要比高纬度高,因此在低纬度地区,红树林植物通常有更高的地上

部分生物量<sup>[66,67]</sup>。不同纬度间红树林植物生物量的差异主要是受气候等自然因素(温度、阳光辐射、降水和风暴潮的频率等)的影响。

在同一纬度范围内,红树林植物地上部分生物量分布也存在差异。其中,位于  $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$  的红树林植物地上部分生物量的波动幅度较大,这主要与赤道附近物种、生境和树龄等有关。已有研究表明,有稳定淡水输入的红树林植物生物量比其他地方的更高<sup>[87]</sup>,相同红树林树种在低盐度地区的植物生物量明显高于高盐度地区<sup>[46]</sup>,植物地上部分生物量在不同的演替系列下由近海向内陆逐渐增长<sup>[88,89]</sup>,红树林植物生物量因树龄不同差异较大<sup>[86]</sup>。总体上,在相同纬度中红树林的生境(盐度、营养状况、水文条件)、树种和树龄等会显著影响红树林的生长速度和生物量的累积<sup>[90-92]</sup>。

#### 3.2 红树林植物地下部分生物量空间分布异质性

红树林植物地下部分的生物量较高,其根系部分的平均生物量为  $90.43\text{ t/hm}^2$ 。其中,  $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$  区域的平均生物量为  $122.26\text{ t/hm}^2$ ,  $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$  和  $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$  区域的平均生物量为  $54.36\text{ t/hm}^2$ 。不同纬度红树林植物地下部分的生物量差异主要与区域的气候和环境有关。相同纬度红树林植物地下部分生物量的差异和影响因素与地上部分生物量类似<sup>[93,94]</sup>。研究证明,相对于陆地森林,红树林植物将更多的生物量分配到地下根系系统中<sup>[95,96]</sup>,这主要是因为红树林植物生长在柔软的土壤中,土壤湿度会促使根系生物量增长,而且如果没有庞大的根系系统,红树林植物很难支撑其地上部分的重量和抵抗风暴潮侵袭<sup>[97]</sup>。此外,盐度对红树林植物群落生物量的分配具有非常显著的影响,随着盐度的增加,植物地下部分生物量与地上部分生物量的比例大幅增加<sup>[98]</sup>,说明盐度在一定程度上控制着红树林的结构和植物生长,在盐度较高的区域,植物生物量更多地分配到地下部分。

#### 3.3 红树林植物地上、地下部分生物量比例分布的空间差异性

总体上,红树林植物地上部分生物量与地下部分生物量的比例是随着纬度增加而降低的。红树林植物地上部分生物量与地下部分生物量比例约为  $0.7\sim 4.5$ ,其平均值为  $1.97$ ,其中  $20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$  区域的平均值为  $2.22$ ,  $20^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{S}$  和  $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$  区域的平均值为  $1.68$ 。Cairns M A 等总结了世界各森林的植物根系生物量,发现陆地森林植物地上

部分生物量与地下部分生物量的比值约为 3.85<sup>[99]</sup>, 明显高于红树林的 1.97, 说明相对于陆地森林来说, 红树林植物群落将生物量更多地分配至地下部分<sup>[100]</sup>。

不同红树林树种之间地上与地下部分生物量的比例存在着一定的差异, 这些差异与红树林植物的生境有关。红树属植物、白骨壤、角果木、桐

花树等的地上与地下部分生物量比例较低, 这是因为红树属植物和白骨壤在红树林中是先锋物种, 通常在新沉积的沉积物中生长, 要求其具有更加强大的根系系统, 以适应环境<sup>[101]</sup>。角果木和桐花树多属于灌木类, 生长在潮间带, 要经常承受潮水的冲刷, 其生物量相对较小, 需要更加强大的根系系统, 以支撑其在特殊环境中生存。

表 3 一些研究中的红树林植物地上和地下部分生物量

Table 3 Aboveground and belowground biomass of plants of mangrove forests from some researches

研究区	优势物种	现状或树龄	地上生物量 (t/hm <sup>2</sup> )	地下生物量 (t/hm <sup>2</sup> )	地上生物量/ 地下生物量	参考文献
巴拿马	红树属	原生林	279.2	306.2	0.91	[13]
泰国南部普吉岛	正红树	15 a	159.0	—	—	[68]
马来西亚马当	正红树	>80 a	460.0	—	—	[69]
	正红树	>80 a	270.0	—	—	
泰国南部 Ranong	红树属	原生林	281.2	—	—	[13]
泰国南部 Ranong	木榄	原生林	281.2	106.3	2.65	[13]
	海桑属	原生林	281.2	68.1	4.13	
	红树属	原生林	298.5	272.9	1.09	
印尼哈马黑拉岛	木榄	原生林	436.4	180.7	2.42	[13]
	木榄	原生林	406.6	110.8	3.67	
	木榄	原生林	356.8	196.1	1.82	
	正红树	原生林	299.1	177.2	1.69	
	正红树	原生林	216.8	98.8	2.19	
	红海榄	原生林	178.2	94.0	1.90	
	海桑属	原生林	169.1	38.5	4.39	
10°S~ 10°N 印尼苏门答腊岛 东部	海莲	—	76.0	—	—	[13]
	海莲	—	178.8	—	—	
	海莲	—	279.0	—	—	
	小花鬼针草	—	42.9	—	—	
	正红树	—	40.7	—	—	
	海莲	—	89.7	—	—	
斯里兰卡	红树属	生长在河边	240.0	—	—	[13]
	白骨壤属	生长在河边	193.0	—	—	
	红树林群落区	生长在河边	172.0	—	—	
	红树林群落区	生长在河边	85.0	—	—	
	红树属	生长在岛上	71.0	—	—	
肯尼亚	大红树	原生林	249.0	—	—	[13]
	角果木	原生林	40.1	—	—	
法属圭亚那	拉关木属, 白骨壤属, 红树属	成熟林	315.0	—	—	[13]
	拉关木属, 白骨壤属	成熟林	188.6	—	—	
	拉关木属, 白骨壤属, 红树属	成熟林	180.0	—	—	
	红树属, 白骨壤属	过熟林	143.3	—	—	
	红树属, 白骨壤属	成熟林	122.2	—	—	
泰国南部沙敦	角果木	次生林	92.2	87.5	1.05	[13]
泰国南部 Pangnga	红树林群落区	次生林	62.2	28.0	2.22	[13]

续表

	研究区	优势物种	现状或树龄	地上生物量	地下生物量	地上生物量/ 地下生物量	参考文献
				(t/hm <sup>2</sup> )	(t/hm <sup>2</sup> )		
10° N ~ 20°N 或 10° S ~ 20°S	波多黎各	大红树	—	62.9	64.4	0.98	<sup>b</sup> [13]
	中国海南琼山县东寨港	海莲	55 a	248.5	171.8	1.45	<sup>b</sup> [70]
	中国海南省文昌县	木榄	—	63.3	26.8	2.36	<sup>b</sup> [71]
	印度安达曼群岛	红树属	原生林	214.0	—	—	[13]
		木榄属,角果木属	原生林	124.0	—	—	
	印尼爪哇岛	红茄苳	7 a	94.0	—	—	[72]
	泰国东部达叻	红树林群落区	过熟林	142.2	50.3	2.83	<sup>c</sup> [13]
	多米尼加共和国	大红树,拉关木,白骨壤属	50 a	233.0	—	—	[13]
	马来西亚	木榄属	—	289.0	—	—	[73]
	澳大利亚道格拉斯港	红海榄	低潮区	288.0	—	—	[74]
		角果木	—	102.0	—	—	
20° N ~ 30°N 或 20° S ~ 30°S	澳大利亚	白骨壤	15 a	144.5	147.3	0.98	<sup>b</sup> [13]
		白骨壤	原生林	112.3	160.3	0.70	
	日本冲绳岛	大红树	原生林	108.1	—	—	[13]
		木榄	原生林	97.6	—	—	
	中国福建九龙江口	秋茄	人工林	93.4	69.3	1.35	<sup>b</sup> [75]
	中国广西山口镇英罗湾	红海榄	70 a	196.2	95.4	2.06	<sup>c</sup> [76]
	中国广西北海大冠沙	白骨壤	—	26.9	25.8	1.04	<sup>b</sup> [77]
	澳大利亚	白骨壤	过熟林	341.0	121.0	2.82	<sup>c</sup> [13]
	南非	白骨壤,木榄	—	94.5	—	—	[13]
	中国福建厦门	白骨壤	—	19.8	23.7	1.19	<sup>b</sup> [78]
	中国广西龙门岛	桐花树	17 a	72.8	—	—	[79]
		桐花树	20 a	88.2	—	—	
	中国深圳福田	桐花树,秋茄	—	108.3	—	—	[80]
	中国深圳福田	白骨壤	56 a	11.1	5.5	2.01	<sup>b</sup> [81]
	中国广东湛江	红海榄	30 a	58.2	27.2	2.14	<sup>b</sup> [82]
		木榄	10 a	29.0	12.4	2.35	
	中国广西英罗港	白骨壤	44 a	17.0	—	—	[83,84]
		桐花树	30 a	29.8	—	—	
		秋茄	32 a	62.8	—	—	
		红海榄	36 a	92.3	—	—	
		木榄	40 a	75.2	—	—	
	美国佛罗里达	大红树,白骨壤属	生长在河边 8 a	56.0	—	—	[13]
		大红树,白骨壤属	矮小红树林	22.0	—	—	
	中国深圳福田	秋茄	6 a	11.6	8.5	1.37	<sup>b</sup> [84,85]
		无瓣海桑	6 a	22.3	7.3	3.05	
	美国佛罗里达	大红树	—	12.5	—	—	[13]
	日本冲绳岛	秋茄	12 a	80.5	71.8	1.12	<sup>b</sup> [18]
	中国北部湾沿海	木榄	—	529.1	—	—	[47]
		白骨壤	—	291.3	—	—	
		红树林群落区	—	192.2	—	—	
		红海榄	—	128.0	—	—	
		桐花树	—	35.3	—	—	
	中国闽东(福鼎市)	秋茄	原生林 150 a	32.9	25.4	1.30	<sup>b</sup> [86]
		秋茄	人工林 7 a	25.4	14.7	1.72	
	印度 Sundarbans 西部	无瓣海桑	低盐度	169.6	—	—	[46]
		海漆	低盐度	23.6	—	—	
		白海榄	低盐度	46.7	—	—	
		无瓣海桑	高盐度	35.0	—	—	
		海漆	高盐度	14.9	—	—	
		白海榄	高盐度	24.8	—	—	

注:“<sup>a</sup>”、“<sup>b</sup>”和“<sup>c</sup>”分别表示根系生物量研究方法为壕沟法、挖掘收获法、钻土芯法和未知方法。表中优势物种的学名分别为:红海榄(*Rhizophora stylosa*)、海莲(*Bru-guiera sexangula*)、小花鬼针草(*Bidens parviflora*)、角果木(*Ceriops tagal*)、拉关木属(*Laguncularia*)、角果木属(*Ceriops*)、海桑(*Sonneratia caselori*)、海漆(*Excoecaria agallocha*)和白海榄(*Avicennia alba*)。



## 4 结 语

红树林植物地上部分生物量研究成果相对较多,大多数采用建立异速生长方程,估算红树林植物地上部分生物量。该法简单方便,适合于不同树种,相同红树物种的异速生长关系区域差异较小,生物量间的差异主要由木质密度决定。因此,在具体的研究中,部分地区可能由于条件限制难以建立异速生长方程,可以考虑利用类似区域相同树种的异速生长方程,估算红树林植物生物量。

当前,对红树林植物地下部分生物量的研究相对有限,还没有方法可以精确估算根系生物量。由于植物根系提取的手段和处理技术的差异,导致研究结果无法对比。因此,红树林植物地下生物量的研究,应侧重于根系提取方法和处理技术的创新。

利用遥感手段研究红树林植物生物量,可以实现空间尺度的转换,但是受较多外部因素的干扰,红树林植物生物量遥感估算的精度还有待提高。未来研究应偏重于利用高分辨率的高光谱遥感数据,研究红树林植物生物量,进一步探索不受气候影响的雷达卫星数据,尤其是多极化或全极化模式的雷达卫星数据,在红树林植物生物量估算中的应用潜力,并在此过程中,注重红树林植物的生长参数提取和不同估算模型的综合应用,提高基于遥感估算的研究精度。

红树林植物生物量受诸多因素的影响。在宏观尺度上,其受气候因子(温度、太阳辐射、降水和风暴潮频率等)的影响,红树林植物生物量呈现一定的地带性规律。而在具体的研究区域中,其生物量主要受生境(盐度、营养状况和水文条件)、物种和树龄等因素的影响。各种影响因素对红树林植物生物量的影响具有综合性,并且影响效果存在差异。

## 参考文献

- [1]Diele K, Koch V, Saint-Paul U. Population structure, catch composition and CPUE of the artisanally harvested mangrove crab *Ucides cordatus* (Ocypodidae) in the Caeté estuary, North Brazil: Indications for overfishing?[J]. Aquatic Living Resources, 2005, **18**(2): 169-178.
- [2]Williams N. Tsunami insight to mangrove value[J]. Current Biology, 2005, **15**(3): 73.
- [3]Duke N C. Herbicides implicated as the cause of severe mangrove dieback in the Mackay region, NE Australia serious implications for marine plant habitats of the GBR World Heritage Area [J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, **56**(9): 1 668-1 670.
- [4]张和钰, 陈传明, 郑行洋, 等. 漳江口红树林国家级自然保护区湿地生态系统服务价值评估[J]. 湿地科学, 2013, **11**(1): 108~113.
- [5]朱耀军, 郭菊兰, 武高洁. 红树林湿地有机碳研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(10): 2 681~2 687.
- [6]段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力 [J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 463~469.
- [7]Kosoy N, Corbera E. Payments for ecosystem services as commodity fetishism[J]. Ecological Economics, 2010, **69**(6): 1 228-1 236.
- [8]Yee S M. REDD and BLUE Carbon: Carbon Payments for Mangrove Conservation[M]. Norway: Capstone Advisory Committee, 2010.
- [9]Alongi D M. Carbon sequestration in mangrove forests[J]. Carbon, 2012, **3**(3): 313-322.
- [10]Golley F, Odum H T, Wilson R F. The structure and metabolism of a Puerto Rican red mangrove forest in May[J]. Ecology, 1962, **43**(1): 9-19.
- [11]Briggs S V. Estimates of biomass in a temperate mangrove community[J]. Australian Journal of Ecology, 1977, **2**(3): 369-373.
- [12]Woodroffe C D. Studies of a mangrove basin, Tuff Crater, New Zealand: I. Mangrove biomass and production of detritus[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1985, **20**(3): 265-280.
- [13]Komiyama A, Ong J E, Pongpan S. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: A review[J]. Aquatic Botany, 2008, **89**(2): 128-137.
- [14]薛立, 杨鹏. 森林生物量研究综述[J]. 福建林学院学报, 2004, **24**(3): 283~288.
- [15]Ovington J D. The form, weights and productivity of tree species grown in close stands[J]. New Phytologist, 1956, **55**(3): 289-304.
- [16]Kauffman J B, Heider C, Cole T G, et al. Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests[J]. Wetlands, 2011, **31**(2): 343-352.
- [17]Comley B, McGuinness K A. Above-and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves[J]. Australian Journal Of Botany, 2005, **53**(5): 431-436.
- [18]Khan M N I, Suwa R, Hagihara A. Biomass and aboveground net primary production in a subtropical mangrove stand of *Kandelia obovata* (S., L.) Yong at Manko Wetland, Okinawa, Japan[J]. Wetlands Ecology and Management, 2009, **17**(6): 585-599.
- [19]Khan M N I, Suwa R, Hagihara A. Allometric relationships for estimating the aboveground phytomass and leaf area of mangrove *Kandelia candel* (L.) Druce trees in the Manko Wetland, Okinawa Island, Japan[J]. Trees-Structure and Function, 2005, **19**(3): 266-272.
- [20]Dahdouh-Guebas F, Koedam N. Empirical estimate of the reliability



- of the use of the Point-Centred Quarter Method (PCQM): Solutions to ambiguous field situations and description of the PCQM+ protocol[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **228** (1-3): 1-18.
- [21] Clough B F, Dalhaus O. Allometric relationships for estimating biomass in multi-stemmed mangrove trees[J]. *Australian Journal of Botany*, 1997, **45**(6): 1 023-1 031.
- [22] 金川, 王金旺, 郑坚, 等. 异速生长法计算秋茄红树林生物量[J]. *生态学报*, 2012, **32**(11): 3 414-3 422.
- [23] Ross M S, Ruiz P L, Telesnicki G J, *et al.* Estimating above-ground biomass and production in mangrove communities of Biscayne National Park, Florida (USA)[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2001, **9**(1): 27-37.
- [24] Clough B F, Scott K. Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species[J]. *Forest Ecology and Management*, 1989, **27**(2): 117-127.
- [25] Day J W, Conner W H, Ley-Lou F, *et al.* The productivity and composition of mangrove forests, Laguna de Terminos, Mexico [J]. *Aquatic Botany*, 1987, **27**(3): 267-284.
- [26] Amarasinghe M D, Balasubramaniam S. Net primary productivity of two mangrove forest stands on the northwestern coast of Sri Lanka[J]. *Hydrobiologia*, 1992, **247**(1): 37-47.
- [27] Ong J E, Gong W K, Wong C H. Allometry and partitioning of the mangrove, *Rhizophora apiculata*[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **188**(1-3): 395-408.
- [28] Suzuki E, Tagawa H. Biomass of a mangrove forest and a sedge marsh on Ishigaki Island, south Japan[J]. *Japanese Journal of Ecology (Japan)*, 1983.
- [29] Kusmana C, Sabiham S, Abe K, *et al.* An estimation of above ground tree biomass of a mangrove forest in East Sumatra, Indonesia[J]. *Tropics*, 1992, **1**(4): 243-257.
- [30] Komiyama A, Havanond S, Srisawatt W, *et al.* Top/root biomass ratio of a secondary mangrove (*Ceriops tagal* (Perr.) CB Rob.) forest[J]. *Forest ecology and management*, 2000, **139**(1-3): 127-134.
- [31] Komiyama A, Pongparn S, Kato S. Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2005, **21**(4): 471-477.
- [32] Chave J, Andalo C, Brown S, *et al.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests[J]. *Oecologia*, 2005, **145**(1): 87-99.
- [33] Komiyama A, Ogino K, Aksornkoae S, *et al.* Root biomass of a mangrove forest in southern Thailand. 1. Estimation by the trench method and the zonal structure of root biomass[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 1987, **3**(2): 97-108.
- [34] Tabuchi R. Fine-root amount of young mangrove stands in Trang Province, Thailand[J]. *Vegetation Science in Forestry*, 1995, **15**(2): 573-583.
- [35] Tamai S, Tabuchi R, Ogino K, *et al.* Standing biomass of mangrove forests in southern Thailand[J]. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 1986, **68**: 384-388.
- [36] 黄月琼, 吴小凤, 韩维栋, 等. 无瓣海桑人工林分生物量的研究[J]. *江西农业大学学报(自然科学)*, 2002, **24**(4): 533-536.
- [37] Kodr I K M. Distribution of root biomass and length in *Picea abies* ecosystem under different immission regimes[J]. *Plant and Soil*, 1994, **167**(2): 173-179.
- [38] Clough B F. Mangrove forest productivity and biomass accumulation in Hinchinbrook Channel, Australia[J]. *Mangroves and Salt Marshes*, 1998, **2**(4): 191-198.
- [39] Mackey A P. Biomass of the Mangrove *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh. Near Brisbane, South-eastern Queensland[J]. *Marine and Freshwater Research*, 1993, **44**(5): 721-725.
- [40] Clough B F. Primary productivity and growth of mangrove forests[M]// Robertson A I, Alongi D M. *Tropical Mangrove Ecosystems*. Washington D C: American Geophysical Union, 1992.
- [41] 黄建辉, 韩兴国, 陈灵芝. 森林生态系统根系生物量研究进展[J]. *生态学报*, 1999, **19**(2): 128-135.
- [42] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes[J]. *Science*, 1984, **223**(4642): 1 290.
- [43] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, **37**(6): 804~812.
- [44] Kirue B, Kairo J G, Karachi M. Allometric Equations for estimating above ground biomass of *Rhizophora mucronata* Lamk. (*Rhizophoraceae*) mangroves at Gaxi Bay, Kenya[J]. *Western Indian Ocean Journal of Marine Science*, 2007, **5**(1): 27-34.
- [45] Boto K J. Nutrient status and other soil factors affecting mangrove productivity in north-west Australia[J]. *Wetlands*, 2010, **3** (1): 45-50.
- [46] Mitra A, Sengupta K, Banerjee K. Standing biomass and carbon storage of above-ground structures in dominant mangrove trees in the Sundarbans[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, **261**(7): 1-11.
- [47] 曹庆先. 北部湾沿海红树林生物量和碳贮量的遥感估算[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [48] Ishil T, Tateda Y. Leaf area index and biomass estimation for mangrove plantation in Thailand[C]. *IEEE*, 2004: 2 323-2 326.
- [49] Proisy C, Coutron P, Fromard F. Predicting and mapping mangrove biomass from canopy grain analysis using Fourier-based textural ordination of IKONOS images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **109**(3): 379-392.
- [50] Ji M, Hu J, Feng J. Measuring mangrove biomass via remote sensing subpixel analysis[C]// *SPIE Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability VII*, International Society for Optics and Photonics, 2010: 780 901-780 907.

- [51]Hirata Y, Tabuchi R, Patanaponpaiboon P, *et al.* Estimation of aboveground biomass in mangrove forest damaged by the major tsunami disaster in 2004 in Thailand using high resolution satellite data[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2010, XXXVIII (Part 8): 643-646.
- [52]黎 夏, 叶嘉安, 王树功, 等. 红树林湿地植被生物量的雷达遥感估算[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 387~396.
- [53]Fatoyinbo T E, Simard M. Height and biomass of mangroves in Africa from ICESat/GLAS and SRTM[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(2): 668-681.
- [54]Fatoyinbo T E, Simard M. Landscape-scale extent, height, biomass, and carbon estimation of Mozambique's mangrove forests with Landsat ETM+ and Shuttle Radar Topography Mission elevation data[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113 (G02S06): 1-13.
- [55]Simard M, Zhang K, Rivera-Monroy V H, *et al.* Mapping height and biomass of mangrove forests in Everglades National Park with SRTM elevation data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2006, 72(3): 299-311.
- [56]Simard M, Rivera-Monroy V H, Mancera-Pineda J E, *et al.* A systematic method for 3D mapping of mangrove forests based on Shuttle Radar Topography Mission elevation data, ICESat/GLAS waveforms and field data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2 131-2 144.
- [57]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, (4): 122~128.
- [58]Chen J, Gu S, Shen M, *et al.* Estimating aboveground biomass of grassland having a high canopy cover: an exploratory analysis of in situ hyperspectral data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(24): 6 497-6 517.
- [59]Demuro M, Chisholm L. Assessment of Hyperion for characterizing mangrove communities[C]//Proceedings of the International Conference the AVIRIS 2003 Workshop, 2003.
- [60]Adam E, Mutanga O, Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: A review[J]. Wetlands Ecology and Management, 2010, 18(3): 281-296.
- [61]Kovacs J M, Francisco D S, Bastien J, *et al.* An Assessment of Mangroves in Guinea, West Africa, Using a Field and Remote Sensing Based Approach[J]. Wetlands, 2010, 30(4): 773-782.
- [62]Kovacs J M, King J M L, Flores De Santiago F, *et al.* Evaluating the condition of a mangrove forest of the Mexican Pacific based on an estimated leaf area index mapping approach[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 157(4): 137-149.
- [63]Kovacs J M, Wang J, Flores-Verdugo F. Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 62(2): 377-384.
- [64]廖宝文, 郑德璋, 郑松发. 海南岛清澜港红树林次生灌丛生物量与叶面积指数测定[J]. 林业科学研究, 1993, 6(6): 680~685.
- [65]Twilley R R, Chen R H, Hargis T. Carbon sinks in mangroves and their implications to carbon budget of tropical coastal ecosystems[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1992, 64(1): 265-288.
- [66]Saenger P, Snedaker S C. Pantropical trends in mangrove above-ground biomass and annual litterfall[J]. Oecologia, 1993, 96(3): 293-299.
- [67]Pool D J, Snedaker S C, Lugo A E. Structure of mangrove forests in Florida, Puerto Rico, Mexico, and Costa Rica[J]. Biotropica, 1977, 9(3): 195-212.
- [68]Christensen B O. Biomass and primary production of *Rhizophora apiculata* Bl. in a mangrove in southern Thailand[J]. Aquatic Botany, 1978, 4: 43-52.
- [69]Putz F E, Chan H T. Tree growth, dynamics, and productivity in a mature mangrove forest in Malaysia[J]. Forest Ecology and Management, 1986, 17(2-3): 211-230.
- [70]林 鹏, 卢昌义. 海莲红树林的生物量和生产力[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1990, 29(2): 209~213.
- [71]廖宝文, 郑德璋, 郑松发. 木榄林生物量和生产力的研究[J]. 林业科学研究, 1991, 4(1): 22~29.
- [72]Sukardjo S, Yamada I. Biomass and productivity of a *Rhizophora mucronata* Lamarck plantation in Tritih, Central Java, Indonesia [J]. Forest Ecology and Management, 1992, 49(3): 195-209.
- [73]Hossain M, Othman S, Bujang J S, *et al.* Net primary productivity of *Bruguiera parviflora* dominated mangrove forest at Kuala Selangor, Malaysia[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 179-182.
- [74]Alongi D. Patterns of Mangrove Wood and Litter Production Within a Beach Ridge-Fringing Reef Embayment, Northern Great Barrier Reef Coast[J]. Estuaries and Coasts, 2011, 34(1): 32-44.
- [75]林 鹏, 卢昌义, 林光辉, 等. 九龙江口红树林研究——I. 秋茄群落的生物量和生产力[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1985, 24(4): 508~514.
- [76]林 鹏, 卢昌义. 广西红海榄群落的生物量和生产力[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1992, 31(2): 199~202.
- [77]尹 毅, 范航清, 苏相洁. 广西白骨壤群落的生物量研究[J]. 广西科学院学报, 1993, 9(2): 19~24.
- [78]林 鹏, 胡宏友, 王文卿. 厦门东屿白骨壤群落生物量和能量 [J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1995, 34(2): 282~286.
- [79]宁世江, 蒋运生, 邓泽龙, 等. 广西龙门岛群桐花树天然林生物

- 量的初步研究[J]. 植物生态学报, 1996, **20**(1): 57~64.
- [80] Li M S. Nutrient dynamics of a Futian mangrove forest in Shenzhen, South China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, **45**(4): 463-472.
- [81] 林 鹏, 胡宏友, 郑文教, 等. 深圳福田白骨壤红树林生物量和能量研究[J]. 林业科学, 1998, **34**(1): 20~26.
- [82] 缪绅裕, 陈桂珠, 陈正桃, 等. 广东湛江保护区红树林种群的生物量及其分布格局[J]. 广西植物, 1998, **18**(1): 11~23.
- [83] 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.
- [84] 咎启杰, 王勇军, 廖宝文, 等. 无瓣海桑、海桑人工林的生物量及生产力研究[J]. 武汉植物学研究, 2001, **19**(5): 391~396.
- [85] 咎启杰, 王伯荪, 王勇军. 深圳福田无瓣海桑-海桑林能量的研究[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(2): 170~174.
- [86] 王 韧, 李晓景, 蔡金标, 等. 闽东沿海秋茄天然林与人工林生物量比较[J]. 西南林学院学报, 2010, **30**(1): 16~20.
- [87] Fatoyinbo T E, Washington A R, Simard M, *et al.* Landscape Scale Height, Biomass and Carbon Estimation of Mangrove Forests with SRTM Elevation Data[C]. 2006: 2.
- [88] Fromard F, Puig H, Mougin E, *et al.* Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana[J]. Oecologia, 1998, **115**(1): 39-53.
- [89] Komiyama A, Moriya H, Prawiroatmodjo S, *et al.* Forest primary productivity[M]//Ogino K, Chihara D M. Biological System of Mangroves, 1988: 97-117.
- [90] 郑海雷, 林 鹏. 培养盐度对海莲和木榄幼苗膜保护系统的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1998, **37**(2): 126~130.
- [91] 廖 岩, 陈桂珠. 盐度对红树植物影响研究[J]. 湿地科学, 2007, **5**(3): 266~273.
- [92] 谭芳林, 叶功富, 崔丽娟, 等. 泉州湾河口湿地红树林立地类型划分[J]. 湿地科学, 2010, **8**(4): 366~370.
- [93] Li C P, Xiao C W. Above-and belowground biomass of *Artemisia ordosica* communities in three contrasting habitats of the Mu Us desert, northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2007, **70**(2): 195-207.
- [94] 罗大庆, 郑维列, 王景生, 等. 西藏米拉山白桦种群生物量和生长量研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(8): 1 329~1 333.
- [95] Kauffman J B, Donato D, *et al.* Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests[J]. CIFOR Working Paper, 2012, (86): 1-40.
- [96] Soares M L G, Schaeffer-Novelli Y. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, **65**(2): 1-18.
- [97] Kauffman J B, Cole T G. Micronesian mangrove forest structure and tree responses to a severe typhoon[J]. Wetlands, 2010, **30**(6): 1 077-1 084.
- [98] Sherman R E, Fahey T J, Martinez P. Spatial patterns of biomass and aboveground net primary productivity in a mangrove ecosystem in the Dominican Republic[J]. Ecosystems, 2003, **6**(4): 384-398.
- [99] Cairns M A, Brown S, Helmer E H, *et al.* Root biomass allocation in the world's upland forests[J]. Oecologia, 1997, **111**(1): 1-11.
- [100] Bouillon S, Borges A V, Diele K, *et al.* Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, **22**(2): 1-12.
- [101] Kramer P J, Kozłowski T T. Physiology of Woody Plants[M]. Washington D C: Academic Press, 1979.



## Progress in Researches on Plant Biomass of Mangrove Forests

ZHU Yuan-Hui<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>1,2</sup>, LIU Kai<sup>1</sup>, WANG Shu-gong<sup>3</sup>, AI Bin<sup>4</sup>

(1. Center of Integrated Geographic Information Analysis, School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, P.R.China; 2. Department of Geography, University of Cincinnati, Cincinnati, OH 45221-0131, USA; 3. Office of Scientific Research and Development, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, P.R.China; 4. School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, P.R.China)

**Abstract:** As one of the most important type of natural wetlands, mangrove ecosystems mainly distribute in the intertidal zone of tropical and subtropical regions. Mangrove forests provide important ecological and societal benefits; including protecting the coastal zone and purifying air and water. Accurate estimation of biomass of mangrove forests is critical in assessing such benefits. To better protect and utilize mangrove ecosystems, it is necessary to understand the functions and production mechanism of mangrove forests. This paper systematically summarizes literature on estimation of the aboveground and belowground biomass, the spatial distribution and influencing factors of mangrove forests. Major findings are allometric equations are the most popular methodology for estimating aboveground biomass of mangrove ecosystems, they are based on the correlation between the trunk diameter at breast height (DBH, i.e., 1.3 m) and the height of the tree, they are applicable not only for multi-stemmed trees but also for shrubs such as mangrove trees; mangrove forests possess higher belowground biomass compared to the terrestrial trees. However, the few relevant studies have paid attention to belowground biomass of mangrove ecosystems, perhaps because of the difficulty in collecting roots. A few researchers have applied allometric equations to estimate belowground biomass of mangrove forests based on field investigation, but they have yet to fully assess the accuracy of their estimations; remote sensing is an effective tool for deriving characteristics of mangrove forests such as species, leaf area, canopy height, stand biomass, etc. Most applications have focused on spectral features from medium-low resolution optical images or back-scattering characteristics from single-polarized radar images, which cannot provide precise details for discriminating different types of mangrove plant communities, to achieve accurate biomass estimation on wide scale of mangrove plant community, growth parameters of vegetation should be integrated into the feature extraction, it is also beneficial to use hyper spectral and high-resolution images, as well as radar satellite images without climate influence, for mangrove biomass estimation; biomass of mangrove forests decreases with the increase of latitude in tropical and subtropical coasts, although the habitat, mangrove species, tree-age and climate are also main contributing factors. Toward the end of the paper, future research directions are proposed.

**Keywords:** plant of mangrove forests; biomass; distribution pattern; influencing factors; remote sensing