

树冠生物量研究综述^{*}

陈科屹 欧光龙 郑海妹 胥 辉

(西南林业大学西南地区生物多样性保育国家林业局重点实验室, 云南 昆明 650244)

摘要 树冠是树木进行光合作用、呼吸、蒸发等生理过程的场所,影响树木的生长和变化;树冠生物量是树木的重要属性,也是目前开展树冠研究的热点。文章从分配和分布、动态变化、研究方法 & 研究展望等方面综述了树冠生物量研究。

关键词 树冠;生物量;分配;动态变化;模型

中图分类号: S718 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006 - 4427 (2014) 04 - 0066 - 06

Reviews on Tree Crown Biomass

CHEN Keyi OU Guanglong ZHENG Haimei XU Hui

(Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, State Forest Administration, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract Tree crown, an important tissue of photosynthesis, respiration and evaporation for physiological processes, affects the growth and change of trees. Biomass is an important characteristic of the tree crown, and its research has been an focused topic. This paper reviewed from four aspects of tree crown biomass, such as its distribution and allocation, dynamic changes, research methods and prospect.

Key words tree crown; biomass; distribution; dynamic change; model

树冠是树木自身遗传特性和环境作用的综合体现,是树木进行光合作用、呼吸、蒸发等生理过程的场所,影响树木的生长和变化,也影响种群的分布格局、生物量及林带的动态变化^[1-3]。关于树冠的研究主要集中在其功能、结构和生物量等方面^[4-6]。生物量不仅反映了森林在物质循环、能量流动上的复杂关系,也反映了森林的经营水平和开发利用价值,是研究林业问题、生态问题的基础,也是开展碳储量研究的重要环节^[7-10]。树冠生物量是森林生物量研究的重要内容,在森林生物量中占有较大的比重,且其分配规律及变化能反映出森林的生长状态和对环境的动态响应。因此,树冠生物量分配和分布、动态变化及其测定和估计方法成为了学者们研究的热点。本综述从分布规律、动态变化和研究方法上总结了目前国内外树冠生物量的研究情况,并提出其存在的问题及今后的主要研究方向,以期 为树冠生物量的研究提供参考和借鉴。

1 树冠生物量分配规律

1.1 树冠生物量的总体分配状况

1.1.1 树冠生物量分配情况 通常情况下,单木水平上树冠生物量占总生物量的比重或林分水平上乔木层树冠生物量占总生物量的比重在 10% ~ 40%,各部分生物量分配比例为干 > 冠 > 根 > 皮^[11-13];但树冠生物量的分配会受到树木种类及基本测树因子、林分因子和环境因子的影响,并呈现规律性变化,如谢贤健等^[14]

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目(31160157),云南省基金应用基础研究计划项目(2012FD027),云南省教育厅基金(2012Y224)。

第一作者:陈科屹(1989-),男,硕士研究生,主要从事森林经理研究,E-mail:314838256@qq.com。

通信作者:胥辉(1960-),男,教授,博导,主要从事森林测计学研究,E-mail:zyxy213@126.com。

发现巨桉(*Eucalyptus grandis*)的分配比例为树干>树皮>树冠,这是由于巨桉生长极其迅速,2 a 生即可郁闭成林,之后林木个体没有充足的伸展发育空间从而导致强烈地自然整枝,故在生长中树冠的比例呈快速下降。

此外对不同生长型树种而言,针叶树比阔叶树的树冠生物量占全株生物量的比重要高。王宁等^[15]对比了晋西地区山杨(*Populus davidiana*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)生物量的分配格局,发现山杨的树冠生物量比例小于油松,阔叶树树冠生物量比重一般低于 20%,而针叶树树冠生物量比重通常在 20% 以上^[16-18]。

1.1.2 树冠内枝叶生物量分配情况 树冠内枝生物量与叶生物量的分配情况是反映树冠结构特征的重要因子,呈现规律性变化。根据树冠纵剖面的结构形态,学者们通常将树冠分为上、中、下 3 个层次,最大枝、叶生物量均出现在树冠的中下层。杨东等^[19]对甘肃武都五凤山林区 35 a 生油松人工林的生物量进行了研究,在林分内油松最大枝量位于树冠中下部,大约在树高的 7~8 m 处,其比重占总枝量的 62%;最大叶量位于树冠中部,约在树高的 6~9 m 处,占总叶量的 64%。闫明准等^[20]研究了樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林单木叶生物量的垂直分布规律,发现单木叶量最大值出现在相对着枝深度 0.36~0.85 的范围内。树冠生物量枝叶比呈现出上部枝叶比值较小,下部枝叶比值较大的变化规律。马长明等^[21]在研究华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林树冠生物量时发现,在林分水平上不同林龄的林分枝叶比差异不大,但从单木枝叶比来看,最大枝叶比值出现在下部,上部最小;董利虎等^[22]研究了红松(*Pinus koraiensis*)人工林的枝叶比,结果显示枝叶比最大值出现在树冠下部。

1.2 树冠生物量分配的变化情况

1.2.1 树种及林木因子对树冠生物量分配的影响 树冠生物量分配随林木因子的变化表现在树种内及树种之间,树种内及树种之间由于遗传特性及自身组织结构的不同,各器官分配情况存在很大差异。这些差异可以表现在树种内胸径、树高的不同,以及林木间的竞争情况,从而产生不同的器官分配情况。

由于胸径与树高之间具有较强的相关性,且树高的测定不如胸径方便、准确,所以学者们侧重研究不同胸径下树冠生物量的分配变化。一般来说,随着胸径的增大,树冠生物量呈逐渐增大的趋势,但其比重则表现为先升高后下降,如孙宝刚等^[23]在研究云南松(*Pinus yunnanensis*)树冠生物量时进行过讨论。但树冠内枝与叶的生物量变化趋势是不一致的,梁建萍等^[24]对不同胸径下的油松人工林树冠生物量进行了研究,结果表明随着胸径的增大,枝条生物量占全株生物量的比重逐渐增大,而叶生物量的比重则出现下降的趋势。

林木间的竞争强弱直接影响着树冠生物量的分配,竞争指数大的林木,由于树干生长抑制明显,致使树冠生物量的比重随林木竞争的增强反而变高,汪金松等^[25]探讨了林木竞争对臭冷杉(*Abies nephrolepis*)生物量分配的影响,随着竞争的增强,枝叶生物量比例逐渐增大,其中枝生物量的增长比叶生物量的增长显著。

1.2.2 林分因子对树冠生物量分配的影响 林分因子包括林分密度、立地质量、树种组成、林分起源等,不同的林分因子影响着林内树木的生长及相互之间的竞争,这造成了异样的林分结构,从而产生生物量分配上的差异。林分密度是影响林木生长的重要因素,对生物量的影响是学者们研究的重点^[26-28]。通常,林分密度小,林木生长空间充足,争取到的养分较多,这有利于树冠的生长;反之,在高密度林分内,林木间竞争激烈,树冠生长受到抑制。马伟等^[29]研究了长白落叶松林生物量在不同林分密度下的响应,结果显示在高密度林分,冠体窄小,树冠生物量的比重比低密度林区低。同一树种在不同的林分类型内生长,树冠生物量差异很大。黄秋嫻等^[30]对冀北山地华北落叶松桦木(*Betula* sp.)混交林、山杨桦木混交林、油松蒙古栎(*Quercus mongolica*)混交林 3 种林分类型的生物量分配情况进行了估算,虽然各林分内各器官生物量分配规律均为树干>树根>树枝>树叶,但具体比重各有差异;其中树枝生物量比例最大的是油松蒙古栎混交林中的油松,占 19.27%,最小的是落叶松桦木混交林中的落叶松,占 10.32%;叶生物量比例最大的是油松蒙古栎混交林中的油松,占 13.09%,最小的是落叶松桦木混交林中的桦木,占 4.23%。这说明同一树种与林分内其他共生树种间可能是促进关系,也可能是抑制关系,从而影响树种树冠生物量的分配。

1.2.3 环境因子对树冠生物量的影响 不同环境因子对树冠生物量的影响主要体现在水、肥、气、热 4 个方面的差异,不同的环境条件会在林木和林分的生长中得到响应,并进一步影响到树冠生物量的累积^[31-32]。

从大尺度上看,气候是影响树冠生物量分配最重要的因子。热带地区水热条件较温带、寒带地区优越,故热带地区树冠生物量更大,李高飞、刘世荣等^[33-34]对此进行过论证。对树冠生物量的比例变化而言,肖瑜^[35]研究发现,陕西不同气候区域的油松人工林树冠生物量的比例从南向北逐渐增大,究其原因这是由于陕北地区的日照较陕南和关中充足,但干旱多风,降雨量又不高,自然选择不会向加大树干生物量的方向发展,可见树冠生物量分配比例随气候因子呈现一定的规律性变化。

从局部范围来看,地形因子通过间接作用影响树冠生物量分配,其中坡位是导致树冠生物量产生差异的重要因素。有研究发现,下坡位的土壤有机质含量比上坡位的要高,且越深层的土壤有机质含量差异越大^[36-37]。随着坡位的下降,土壤含水量呈增加趋势^[38]。所以下坡位的树冠生物量要比上、中坡位树冠生物量大^[39-40]。但从比例上看,上、中坡位的树冠生物量比重反而较大^[41]。这是由于上、中坡位虽然立地质量较差,但树木为了满足自身对养分的需求,会加大树冠比重来增加光合作用面积、提高光合效率,故造成上、中坡位树冠生物量比重反而增大的现象。

2 树冠生物量动态变化

树冠生物量随年龄的增长呈现规律性变化,一般来说,树冠生物量会随年龄的增长而增加,但所占的比重则会不断减小。俞月凤等^[42]对6,16,23,32和50 a生5个林龄的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生物量的动态变化进行了分析,随着林龄的增长,树冠生物量呈逐渐增加的趋势。从分配比例来看,树冠生物量的比重随林龄的增大而呈下降趋势;Peichl等^[43]研究了加拿大南安大略地区2,15,30和65 a生4个林龄的雪松(*Cedrus deodara*)生物量随时间序列的变化情况,树冠生物量占整株生物量的比例随林龄的增长而减小;此外,许丰伟、刘广营、丁贵杰等^[44-46]的研究也验证了这一规律。

虽然树冠内枝生物量与叶生物量的比重均随林龄的增长而下降,但变化幅度有很大差异,叶生物量的比重随林龄的增长其下降幅度明显大于枝生物量。杜虎等^[47]研究了5,15,21,32和60 a生的5个不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)人工林的生物量,发现树枝和树叶生物量在林分乔木层中的比例随着林龄的增大而下降,但下降幅度有差异,树叶生物量的降幅明显大于树枝生物量的降幅,树叶生物量所占比重从23.65%下降到1.33%,而枝生物量所占比重从14.83%下降到11.75%。

3 树冠生物量研究方法

目前,从树冠生物量获取的途径来看,可将研究方法分为直接实测法和间接估算法。间接估算法又可分为基于实测数据的树冠生物量模型法和借助遥感数据估测树冠生物量的遥感法。

3.1 直接实测法

实测法可以分为皆伐法和标准木法。皆伐法就是在既定的环境条件下将树木逐个伐倒,然后测定各部分鲜重,再换算成干重;这种方法精度很高,但花费人力和时间多,且破坏性大,在面积较小的区域或者正在采伐的区域较为可行^[48]。标准木法就是在样地中根据调查数据,先选出能代表样地平均水平的样木(即标准木),再对标准木进行实际测量得出生物量,最后乘上样地内的林木株数即可得到总的生物量。总的来讲,实测法在点的测算上精度较高,但由于实测资料较少,在面积较大的区域使用此法其精度较难保证。通常情况下,由于进行实测所选取的林分是生长较好的样地,导致推算的森林生物量普遍偏大^[49-50]。

3.2 间接估算法

3.2.1 树冠生物量模型法 模型法是目前比较流行且精度能够有较高保证的一种极其重要的方法,虽然在前期工作中需要采集大量的样本以及处理海量的数据,但一旦成功建立模型,就可以将此模型用到其他相似地区进行估测工作^[51]。

相比标准木法,模型法在一定程度上提高了估测精度。郭孝玉等^[52]在研究长白山落叶松人工林树冠生物量时,对标准木法和模型法进行了对比分析,发现枝条模型法精度明显要优于标准木法;但总体来讲,现有树冠生物量模型的判定系数大部分为0.6~0.8^[53-54],模型精度仍有待进一步提高;有学者试图通过增加自变量来提高模型的预估精度^[55],但这种方式提高精度的效果十分有限^[56]。

从自变量的选择上看,主要考虑树木易测因子,其中胸径、树高、冠幅、冠长是最常用的自变量,Kit-tredge^[57]用胸径预测了白松(*Pinus sylvestrifomis*)等树种的叶生物量;另一种常见形式即易测因子的组合变量,Loomis等^[58]利用树冠比建立了短叶松(*Pinus banksiana*)等树种的树冠生物量模型,明安刚等^[59]则采用D²H的形式。然而树冠是树木自身遗传特性和环境作用的综合体现,仅仅考虑树木易测因子的树冠生物量模型是不全面的,目前还很少有学者将环境因子结合到树冠生物量模型构建当中。

此外,考虑林木变化的生长模型得到广泛研究^[60],涂洁等^[61]间接考虑时间变量建立了千烟洲湿地松(*Pinus elliotii*)中幼林树冠生物量生长模型。可见,树冠生物量生长的动态模型较少,树冠生长会随时间变化呈现规律性变化,因此,构建反映树冠生物量生长变化的动态模型具有较强的理论和实践意义。

3.2.2 树冠生物量遥感法 基于遥感技术的森林生物量估算方法在区域及全球尺度上应用广泛。就遥感数据源而言,用于生物量估测的遥感数据有光学遥感、热红外遥感、SAR 微波遥感、高光谱遥感和激光雷达遥感等^[62]。

光学遥感在树冠生物量估测方面应用较广泛,数据中的近红外波段和红光波段包含着大量的植被信息,这些信息能直接或间接地反映出植被的生物量状况^[63]。Curran 等^[64]研究了 TM 数据红外波段和近红外波段与叶生物量间的关系,发现两者具有较强的相关性。但有研究发现,仅用单纯的波段数据或植被指数建立的回归模型,其拟合效果并不理想,需要将两者结合^[65]。在此基础上再融入环境因子,其相关系数能得到进一步提高,马泽清等^[66]利用 TM 遥感影像研究湿地松林叶生物量时,将从 DEM 数据中提取出的地形因子纳入模型后,相关系数得到较大提高。

除了光学遥感,SAR 微波遥感在估测树冠生物量时也有其优势,适当波长和极化方式的 SAR 后向散射系数能反映出树冠生物量,Beaudion 等^[67]发现 VV 和 HV 的极化数据与树冠生物量之间存在较强的相关性。由于各类遥感数据在估测生物量时都有自身的优势,所以学者们开始尝试将不同的遥感数据进行融合从而实现优势互补^[68-69]。然而,目前将此类成果用于树冠生物量估测的还极少见。

虽然遥感技术在探索影响植物光谱特征的植物生理本质方面还有待完善,但其诸多优势使其成为当前及今后的研究热点^[70-72]。

4 研究展望

树冠生物量是树木的重要属性,目前虽然开展了不同树种树冠生物量分配及其动态变化的研究,但缺乏系统的树冠生物量分配及变化规律的研究;虽然采用了估算模型及遥感技术等进行了树冠生物量估算,但在如何提高模型估算精度,以及在大尺度上提高遥感技术在估算树冠生物量上的应用等方面尚需进一步研究。

4.1 系统研究树冠生物量分配规律

虽然目前开展了很多有关树冠生物量分配变化方面的研究,但较为零散,对阔叶树的研究明显不足,涉及天然林树冠方面的研究依然很少,没有全面分析不同树种树冠生物量在不同环境条件下的响应情况,很难为现代林业的经营管理提供可靠的理论依据。今后应在多个尺度水平上,系统研究林木树冠生物量分配规律,尤其是林木因子、林分因子、环境因子以及森林经营措施等对树冠生物量分配的影响及其响应机制,系统开展树冠生物量分配的理论及应用研究。

4.2 构建高精度的树冠生物量及其动态模型

综合考虑环境因子对模型构建的影响,构建环境灵敏型的树冠生物量模型;引入现代数学模型技术,构建更精确的树冠生物量模型,以及树冠生物量的生长模型。目前,树冠生物量模型研究方面存在模型解释变量较少考虑环境因子、缺乏树冠生物量动态变化模型、模型精度不高等问题,因此,构建高精度的树冠生物量及其动态模型具有重要的理论和实践意义,这就要求将现代生物数学模型技术引入到树冠生物量模型构建中,综合考虑环境因子对树冠生物量的影响,构建具有环境灵敏的树冠生物量模型及生长模型。

4.3 加强遥感技术在树冠生物量研究中的应用研究

应用遥感技术在大尺度上估算森林生物量具有不可替代的优势,建立基于遥感的树冠生物量精确估算模型具有重要意义。首先,加强不同遥感数据在融合应用方面的探索,充分发挥不同遥感数据源在估测树冠生物量上的优势,提高遥感估测的精度;其次,运用遥感技术,整合森林资源调查数据,构建遥感数据与树冠生物量之间的关系,以及通过相关林木树冠生物量反演遥感信息,分析植物光谱特征与遥感数据间的变化机制;第三,样地调查数据与影像像元大小间的关系会导致定位偏移,以及野外数据采集时间与遥感图像成图时间不一致,从而造成数据之间的不匹配,因此亟需解决遥感数据和地面调查数据的匹配问题,从而更好的整合遥感技术和样地调查数据,构建高精度的树冠生物量估测模型。

参考文献

- [1] 马克明,祖元刚. 兴安落叶松分枝格局的分形特征[J]. 植物研究,2000,20(2):235-241.
- [2] Wang Y P, Jarvis P G, Benson M L. Two-dimensional needle area density distribution within the crowns of *Pinus radiata*[J]. Forest Ecology and Management, 1990,32:217-237.

- [3] Ramer H. Crown development conifer stands in Scotland as influenced by initial spacing and subsequent thinning treatment [J]. Forestry, 1996,39(1):40-59.
- [4] 邓仕坚,陈楚莹,张家武,等. 树冠及叶凋落物对模拟酸雨缓冲能力的初探[J]. 环境科学,1992,13(3):10-17.
- [5] Popescu S C, Wynne R H, Nelson R F. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass[J]. Canadian journal of remote sensing, 2003,29(5):564-577.
- [6] Medhurst J L, Beadle C L. Crown structure and leaf area index development in thinned and unthinned Eucalyptus nitens plantations[J]. Tree Physiology, 2001,21(12-13):989-999.
- [7] 曾慧卿,刘琪璟,冯宗炜,等. 红壤丘陵区林下灌木生物量估算模型的建立及其应用[J]. 应用生态学报,2007,18(10):2185-2190.
- [8] 陈遐林,马钦彦,康峰峰,等. 山西太岳山典型灌木林生物量及生产力研究[J]. 林业科学研究,2002,15(3):304-309.
- [9] Alamgir M, Al-Amin M. Allometric models to estimate biomass organic carbon stock in forest vegetation [J]. Journal of Forestry Research, 2008,19(2):101-106.
- [10] Navar J, Mendez E, Najera A, et al. Biomass equations for shrub species of *Tamaulipan thornscrub* of North-eastern Mexico [J]. Journal of Arid Environments, 2004,59:657-674.
- [11] Ilvesniemi H, Liu C. Biomass distribution in a young Scots pine stand[J]. Boreal Environment Research, 2001,6(1):3-8.
- [12] 胡炎红,庞启亮. 鄂西地区杉木林生物量模拟及其分配格局[J]. 湖北林业科技,2012(3):6-9.
- [13] 高华业,周光益,周志平,等. 广东天井山 27a 生杉木人工林地上生物量研究[J]. 广东林业科技,2013,29(4):1-6.
- [14] 谢贤健,张健,赖挺,等. 短轮伐期巨桉人工林地上部分生物量和生产力研究[J]. 四川农业大学学报,2005,23(1):66-74.
- [15] 王宁,王百田,王瑞君,等. 晋西山杨和油松生物量分配格局及异速生长模型研究[J]. 水土保持通报,2013,33(2):151-159.
- [16] 明安刚,贾宏炎,陶怡,等. 桂西南 28 年生米老排人工林生物量及其分配特征[J]. 生态学杂志,2012,31(5):1050-1056.
- [17] 武会欣,史月桂,张宏芝. 八达岭林场油松林生物量的研究[J]. 河北林果研究,2006,21(3):240-242.
- [18] 刘延惠,王彦辉,于澎涛. 六盘山主要植被类型的生物量及其分配[J]. 林业科学研究,2011,24(4):443-452.
- [19] 杨东,杨秀琴. 甘肃武都五凤山林区油松人工林的生物量和生产力研究[J]. 西北师范大学学报:自然科学版,2004,40(1):70-75.
- [20] 闫明准,刘兆刚. 樟子松人工林单木叶量垂直分布规律[J]. 东北林业大学学报,2009,37(7):16-24.
- [21] 马长明,张艳华,赵国华,等. 燕山山地华北落叶松人工林乔木生物量空间分布格局[J]. 河北农业大学学报,2010,33(2):37-51.
- [22] 董利虎,李凤日,贾炜玮. 林木竞争对红松人工林立木生物量影响及模型研究[J]. 北京林业大学学报,2013,35(6):15-22.
- [23] 孙宝刚,陈飞,王健敏,等. 不同径级云南松各部位生物量及其分布规律[J]. 林业科学研究,2012,25(1):71-76.
- [24] 梁建萍,张变香,杨慧斌,等. 油松人工林林木生物量的研究[J]. 山西农业大学学报,2000,20(4):339-341.
- [25] 汪金松,范秀华,范娟,等. 林木竞争对臭冷杉生物量分配的影响[J]. 林业科学,2012,48(4):14-20.
- [26] 姚东和,杨民胜. 林分密度对巨尾桉生物产量及生产力的影响[J]. 中南林学院学报,2000,20(3):20-23.
- [27] 白静,田有亮,郭连生. 油松人工林地上生物量,叶面积指数与林分密度关系的研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(3):183-187.
- [28] Litton C M, Ryan M G, Tinker D B, et al. Belowground and aboveground biomass in young postfire lodgepole pine forests of contrasting tree density[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003,33(2):351-363.
- [29] 马炜,孙玉军. 长白落叶松中龄林生物量及其密度效应[J]. 东北林业大学学报,2013,41(8):13-17.
- [30] 黄秋娴,张健强,杨新兵. 冀北山地 3 种典型林分类型生物量分配格局研究[J]. 河北农业大学学报,2012,35(6):55-58.
- [31] 陈诗,李根前,孙睿. 不同光照处理对云南松苗木生长的影响[J]. 广东林业科技,2013,29(2):36-39.
- [32] 王明怀,陈建新,殷祚云,等. 广东省引种秃杉与杉木、柳杉对比试验[J]. 广东林业科技,2003,19(1):18-21.
- [33] 李高飞,任海. 中国不同气候带各类型森林的生物量和净第一性生产力[J]. 热带地理,2004,24(4):306-310.
- [34] 刘世荣,徐德应,王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 I:中国森林现实生产力的特征及地理分布格局[J]. 林业科学研究,1993,6(6):633-642.
- [35] 肖瑜. 陕西省不同气候区域油松人工林生物量和生产力的比较研究[J]. 植物生态学与地植物学学报,1990,14(3):237-246.
- [36] 曹靖,常雅君. 黄土高原半干旱区植被重建对不同坡位土壤肥力质量的影响[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(1):169-173.

- [37] 李俊清. 森林生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [38] 张益望. 半干旱区人工林生长与水分生态研究[J]. 水土保持通报,2006,26(3):18-22.
- [39] 孙巧玉,刘勇,李国雷,等. 坡位对油松人工林地上生物量分配格局的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(9):102-105.
- [40] 黄钦忠. 不同坡位9年生秃杉人工林生物量分布规律研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(4):2123-2125.
- [41] 胡永颜. 不同坡位对21年生闽楠人工林生长及生物量分配的影响[J]. 江苏林业科技,2012,39(4):6-8.
- [42] 俞月凤,宋同清,曾馥平. 杉木人工林生物量及其分配的动态变化[J]. 生态学杂志,2013,32(7):1660-1666.
- [43] Peichl M, Arain M A. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests[J]. Forest Ecology and Management, 2007,253(1):68-80.
- [44] 许丰伟,高艳平,何可权,等. 马尾松不同林龄林分生物量与净生产力研究[J]. 湖北农业科学,2013,52(8):1853-1858.
- [45] 刘广营,赵国华,王广海. 华北落叶松人工林生物量分配格局[J]. 河北林果研究,2011,26(3):222-226.
- [46] 丁贵杰,王鹏程. 马尾松人工林生物量及生产力变化规律研究[J]. 林业科学研究,2001,15(1):54-60.
- [47] 杜虎,宋同清,曾馥平. 桂东不同林龄马尾松人工林的生物量及其分配特征[J]. 西北植物学报,2013,33(2):0394-0400.
- [48] 董宇. 我国森林生物量估测方法研究进展[J]. 安徽农业科学,2011,39(34):21105-21106.
- [49] Busing R T, Clebsch E C, White P S. Biomass and production of southern Appalachian cove forests reexamined[J]. Canadian Journal Forest Research, 1992,23(4):760-765.
- [50] Birdsey R A, Plantinga A G, Heath L S. Past and prospective carbon storage in United States forests[J]. Forest Ecology Management, 1993,58(1):33-40.
- [51] 胥辉. 立木生物量模型构建及估计方法的研究[D]. 北京:北京林业大学,1998.
- [52] 郭孝玉,孙玉军,刘凤娇. 不同估算树冠生物量方法的比较——以长白落叶松林为例[J]. 林业资源管理,2010,10(5):41-47.
- [53] 侯振宏,张小全,徐德应. 杉木人工林生物量和生产力研究[J]. 中国农学通报,2009,25(5):97-103.
- [54] 王轶夫,孙玉军. 马尾松生物量模型的对比研究[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(10):29-33.
- [55] 王振亮,毕君,黄则舟. 刺槐树冠生物量估测模型的研究[J]. 河北林业科技,1994,12(4):4-6.
- [56] 曾伟生,肖前辉,胡觉. 中国南方马尾松立木生物量模型研建[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(5):50-56.
- [57] Kitterge J. Estimation of amount of foliage of trees and shrubs[J]. J Forest,1944,42:905-912.
- [58] Loomis R M, Phares R E, Crosby J S. Estimating foliage and branchwood quantities in shortleaf pine[J]. Forest Science, 1966,12(1):30-39.
- [59] 明安刚,唐继新,于浩龙,等. 桂西南米老排人工林单株生物量回归模型[J]. 林业资源管理,2012(6):83-87.
- [60] 刘平,王玉涛,杨帆. 基于单木生长模型的森林动态模拟系统研究进展[J]. 世界林业研究,2011,24(5):25-30.
- [61] 涂洁,刘琪璟,简敏菲. 千烟洲湿地松中幼林树冠生物量及生长量分析[J]. 浙江林学院学报,2008,25(2):206-210.
- [62] 张慧芳,张晓丽,黄瑜. 遥感技术支持下的森林生物量研究进展[J]. 世界林业研究,2007,20(4):30-34.
- [63] 戴小华,于世孝. 遥感技术支持下的植被生产力与生物量研究进展[J]. 生态学杂志,2004,23(4):92-98.
- [64] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Seasonal LAI in slash pine estimated with Landsat TM[J]. Remote Sensing of Environment, 1992,39(1):3-13.
- [65] 闵志强,孙玉军. 长白落叶松林生物量的模拟估测[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1359-1366.
- [66] 马泽清,刘琪璟,徐雯佳. 基于TM遥感影像的湿地松林生物量研究[J]. 自然资源学报,2008,23(3):467-478.
- [67] Beaudoin A, Le Toan T, Goze S, et al. Retrieval of forest biomass from SAR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994,15(14):2777-2796.
- [68] Amini J, Tetuko Sri Sumantyo J. Employing a method on SAR and optical images for forest biomass estimation[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2009,47(12):4020-4026.
- [69] Clark M L, Roberts D A, Ewel J J, et al. Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small-footprint lidar and hyperspectral sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(11):2931-2942.
- [70] 娄雪婷,曾源,吴炳方. 森林地上生物量遥感估测研究进展[J]. 国土资源遥感,2011,23(1):1-8.
- [71] Lefsky M A, Turner D P, Guzy M, et al. Combining lidar estimates of aboveground biomass and Landsat estimates of stand age for spatially extensive validation of modeled forest productivity[J]. Remote Sensing of Environment, 2005,95(4):549-558.
- [72] 齐家国,王翠珍. 微波/光学植被散射模型及其在热带森林中的应用[J]. 电波科学学报,2004,19(4):409-418.