

森林生物量估算方法综述

胡 景

浙江师范大学生命科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年4月23日; 录用日期: 2023年5月24日; 发布日期: 2023年6月2日

摘 要

作为陆地生态系统的主要组成部分, 森林生态系统具有强大的固碳能力。森林生物量作为评价森林碳储存能力的一个重要指标, 其估算方法一直是生态学研究的一个热点。本文介绍了几种经典的生物量估算方法, 包括直接观测和间接估算法, 总结了它们的研究趋势和存在的不足, 同时指出了未来改进和完善的方向。在全球气候变暖的背景下, 了解和掌握森林生物量估算方法的研究趋势、正视各类森林估算方法存在的不足, 发展更加准确和可靠的森林生物量估算模型, 可以为全球气候变化应对提供科学依据和政策支持。

关键词

森林生物量, 生物量方程, 遥感反演

Review of Forest Biomass Estimation Methods

Jing Hu

College of Life Science, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Apr. 23rd, 2023; accepted: May 24th, 2023; published: Jun. 2nd, 2023

Abstract

As the main component of terrestrial ecosystem, forest ecosystem has strong carbon sequestration ability. Forest biomass is an important index to evaluate forest carbon storage capacity and its estimation method has been a hot topic in ecological research. This paper introduces several classical methods of biomass estimation, including direct observation and indirect estimation. And it summarizes their research trends and shortcomings. It also points out the direction of improvement and perfection in the future. In the context of global warming, it is significant to understand and master the research trend of forest biomass estimation methods. People should face up

to the shortcomings of various forest biomass estimation methods. And developing more accurate and reliable forest biomass estimation models can provide scientific basis and policy support for global climate change response.

Keywords

Forest Biomass, Biomass Equation, Remote Sensing Inversion

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变化导致地球环境发生不同程度的改变，其最明显的特征就是温室效应。 CO_2 等气体是造成温室效应的主要原因，而它们的排放量正以不同的速度持续增长。据统计，自 1990 年以来大气 CO_2 浓度已经从 285 ppmv 增加至 2020 年的 414 ppmv，全球平均温度也增加了 1.09°C [1] [2]。为了减缓由气候变暖带来的环境问题，“碳中和计划”应运而生，中国对此积极响应，习近平总书记在七十五届联合国大会中还提出“将在 2030 年前使 CO_2 排放量达到峰值，于 2060 年前实现碳中和目标” [3]。

陆地生态系统是大气 CO_2 的重要碳汇，而森林是陆地生态系统的主体部分，储存了陆地生态系统中超过 80% 的碳，在碳汇过程中具有重要作用。森林生物量作为衡量森林碳储能力的重要指标 [4]，也是生态领域内被广泛关注的重要研究方向，有效估算森林生物量对于森林资源清查、森林系统管理、减缓气候变暖等方面具有重要的现实意义 [5] [6]。

2. 国内外研究进展

森林生物量的研究最早记录于 1876 年，德国科学家 Ebermeyer [7] 测定森林几类器官与落叶的质量，以此分析了移去凋落物层对林下土壤及其林分生长的影响。在 20 世纪中期以前，森林生物量的研究仅处于萌芽阶段，相关研究内容单一。20 世纪 60 年代，全球经济的快速发展伴随着日益突出的环境问题，人类意识到牺牲环境换取经济发展的手段是不可取的，因此国际生物学计划 (IBP) 和生物圈计划 (MAB) 相继问世，在此背景下，森林生物量的研究也逐渐在全球范围内展开 [8] [9] [10] [11]。例如美国学者 Whittaker [12] 对森林初级生产力进行了研究；日本学者 Satoo [13] 探究了本国温带区域的森林生物量与生产力水平之间的关系；Dixon 等 [14] 总结了 1987~1990 年森林生态系统内土壤和植被的碳储量 [11] [15] [16] [17]。然而，森林碳储量在空间水平和林分类型上存在一定的差异，导致碳储量估算结果不尽相同，例如 Dixon [14] 估算出的世界森林碳储量为 395 Pg 左右，森林土壤碳储量约 787 Pg；而 Woodwell [10] 研究得到的森林碳储量是 744 Pg；Olson [18] 则认为森林地上生物量的碳储仅为 483 Pg [19]，由此研究者们开始探索准确估算森林生物量的各种方法。

中国的研究起步较晚，于 20 世纪 70 年代才逐渐开始，多数研究都是针对特定区域与树种开展，初期的研究以野外观测法为主，在此基础上建立简单的生物量方程，例如李意德等 [20] 采用皆伐法对我国海南岛尖峰岭热带山地雨林生物量进行了调查，取得了较精确的生物量数据；陈炳浩等 [21] 在国内较早地使用了标准木法对红皮云杉的群落生物量展开初步研究，并根据英国 Husley 氏的相对生长定律建立了红皮云杉各器官与生物量之间的回归方程。20 世纪 90 年代，森林生物量的研究尺度也逐渐从样地水平扩大

到区域水平,邓士坚等[22]就通过径阶标准木与收获法测量了中国杉木人工林各植被层的现存增长量,到了 90 年代中期,我国森林清查工作正在顺利实施,以森林清查数据为基础的大尺度生物量估算研究得以发展,方精云等[23]利用我国 4 次森林清查资料估算了中国不同时期的森林生物量与净生产力变化,为我国森林资源的可持续发展提供了重要的理论依据。

3. 森林生物量估算方法

森林生物量的估算方法主要包括直接观测法与间接估算法[24] [25],直接观测法包括皆伐法和标准木法,而常见的间接估算法为生物量模型法(生物相对生长方程法和生物量-蓄积量模型)和遥感监测法。

3.1. 直接观测法

直接观测法顾名思义,是用于观察测量特定样地尺度的森林生物量研究。常见的直接观测法为皆伐法和标准木法。皆伐法是最传统的野外测定方法,它是将单位面积内的林木逐个砍伐后再测定各组分(干、枝、叶、根等)鲜重,随后根据木材含水率换算为木材干重,再将树木各组分的干重合计后得到一棵树木的生物量。由于此方法对森林破坏性较大,研究者们进一步提出标准木法,以样地为单位,利用每木检尺资料计算出全部树木的平均胸径(cm)与树高(m),选出代表该样地平均水平的 3 株左右的标准木,砍伐后通过林分密度计算林分生物量[8]。由此可知,标准木法测量林木生长状态均一、林龄接近的林分时的结果更优,故研究对象多为人工林。由于此方法对森林破坏性小,缩短了一定的野外观测时间,节省了人力与物力,是目前生物量野外测定最普遍使用的方式。

3.2. 间接观测法

3.2.1. 生物量相对生长方程法

生物量相对方程是建立单株立木(或各组分)生物量与测树指标间的数量关系[24]。此方法可用于样地以及区域尺度的森林内单株立木生物量估算研究,它的出现在一定程度上提升了区域森林生物量的估算速度,是 20 世纪 70 年代以来最广泛使用的间接估算法[26]。相对生长的概念最早由生物学家 Huxley [27] 提出,此概念是指生物个体与自身结构具有特定的对应关系,此后相关研究常以数学模型来表达生物个体的异速生长规律。常见的生物量方程形式主要有三类[28],即线性模型(加性误差)、非线性模型(加性误差)与非线性模型(乘性误差),线性模型通常使用最小二乘法的多元线性回归进行估算,加性误差的非线性模型则使用迭代参数估计法的非线性回归方程进行估算,乘性误差的非线性模型通过需要对数转换为线性回归方程。生物量方程类型虽较为繁多,但对数或指数形式还是最为常见的,一般以 $W = aD^b$ 或 $W = a(D^2H)^b$ 表示,因为经过对数转换后的方程更便于统计分析,且转换后的数值可满足线性化的假设从而利用线性模型理论估计生物量,使得问题更加简化[29]。由于树种多样、研究区域不同以及树木参数的繁多导致生物量方程类型数不胜数,随着研究的发展,人们归纳了不同地区的生物量模型数据集,例如北美地区 803 个立木生物量方程[30]、欧洲地区 607 个生物量方程[31]以及全球范围 678 种木本植物生物量及其生物量方程的数据库 BAAD [32]。而国内的研究者们也在早期建立了不同地区的生物量方程[26] [33] [34],最新研究为 2020 年罗云建等[35]编制了 1978~2013 年中国生物量方程数据集,包含 200 余种树的 5900 多个生物量方程。

生物量相对生长方程法虽然被普遍使用,但目前也存在一定的问题。首先是上文提及的方程种类与参数十分多样,这导致了生物量方程只能用于特定区域、特定树种的生物量估算,很难以高效率在大尺度水平上进行快速估算;其次是研究者们常常将树木划分为不同组分(树干、枝、叶、根等)建立各分量方程,而目前面临的问题是各分量方程估算结果与总生物量方程估算结果并不一致,即分量与总量方程的

不兼容性问题[36]; 生物量相对生长方程多用于树木地上生物量的估算, 而较为经典的地下生物量模型的研究数量远少于地上生物量, 因为测定树木地下部分费时费力[37] [38], 且其测定办法还未统一; 最后, 该方面的研究缺少一定的创新性, 尤其广义相对生长方程的研究进程仍然处于探索阶段[24]。

3.2.2. 生物量 - 蓄积量模型

生物量 - 蓄积量模型多用于大尺度的林分生物量估算, 它是依据树木的树干生物量、材积与其他器官之间存在较强的相关性的原理[39] [40], 利用一定参数进行生物量数据的转换的过程[41]。此模型的使用需要充分了解当地林木类型、树龄、树高、胸径等生物学特征, 并结合实地测量、遥感数据等多种手段进行估算。其中生物量转换因子法与生物量转换因子连续函数法被广泛运用[42] [43] [44], 研究者将其总结为生物量 - 蓄积量模型的两个发展阶段, 生物量转换因子法(Biomass Expansion Factor, BEF)为第一阶段, 此阶段将生物量与蓄积量之间的比值视为一个常数, 其计算过程是将生物量与材积之比的平均值乘以该森林类型的总蓄积量后估算得到树木的总生物量, 研究表明所得结果的精度优于皆伐法[45], 但有学者认为不能简单地将林分生物量与蓄积量之间的比值看作一个常数, 因为 BEF 常常根据森林类型或研究样地的不同发生改变[1], 例如 BEF 的平均值可能随着温度带发生改变, 即寒温带至热带地区呈现逐渐增加的趋势; 从林分起源来看, 人工林的 BEF 平均值大于天然林, 而天然林的 BEF 与林龄、胸径之间具有正相关关系, 人工林则为负相关[46]; 由于树木对气温、水分和营养物质等非生物因素也表现出不同的生物量分配模式和适应性策略[47], 因此 BEF 也会随着非生物因素而变化。为了弥补上述方法存在的不足, 学者们又提出了生物量转换因子连续函数法[43], 它是生物量 - 蓄积量模型的第二阶段, 此方法认为生物量与蓄积量之比呈现出连续函数变化, 这个变化随着树木材积、森林类型、树种等的不同而发生改变, 利用这种变化规律, 可以有效测定一定时空的森林碳储量变化情况, 但具体还受何种因素的影响需要深入研究。

3.2.3. 遥感反演法

随着全球观测系统和分析技术的进步[48], 人造卫星的应用提供了更高分辨率的地球森林地图, 由此衍生的遥感反演技术可以帮助人类在更大尺度、更高效率的水平上估测森林生物量与碳储量[49] [50]。遥感反演主要包括遥感技术与激光雷达技术(LiDAR)。

遥感技术主要包括光学遥感、近红外遥感与微波遥感。用于森林遥感的估测数据包括 Landsat MSS、TM、MODIS 和 SPOT-5 等[51], 由于不同树种具有不同的光学和近红外光谱波段的反射值, 因此可用于勘察植被群落特征, 并以地面调查的数据和光谱值间的回归关系反演区域森林生物量[52], 例如 Suganuma 等[53]对比了不同树木指标估算澳大利亚地区森林生物量的效果, 结果表明叶面积指数与冠层郁闭度的反演效果较好, Soenen 等[54]利用 SPOT-5 数据反演森林生物量取得了较好效果。但光学遥感技术的不足在于其林分垂直结构分布只能提供有限信息, 在郁闭度较高的区域, 其获取的信息并不十分准确[55], 且其容易受到云雨天气的影响从而使得数据结果不具有可靠性。而微波遥感不依赖于天气条件, 可以穿透树木冠层, 与树叶、树干发生相关作用, 因此可以更加有效、准确、全面地估算森林生物量, 此技术便逐渐应用于地上生物量空间分布和森林生态系统碳储量有关的研究, 例如全球泛热带生物量地图[56]。微波遥感主要分为主动微波和被动微波, 被动微波具有重复观测频率高、数据处理简单、数据量小等优点, 但由于其空间分辨率低、易被影响等缺点使得该技术不能很好的运用于农作物识别与面积的测量, 而主动微波遥感技术在此方面就发挥了重要的作用[57]。激光雷达技术作为一种主动遥感系统, 近年来发展迅速, 其主要通过激光束对物体表面进行照后分析其返回信号, 对森林高度与垂直结构具有很强的探测能力, 具有高精度的、高效率的特性[58] [59], 被广泛用于大区域尺度的森林生物量的估算研究[60] [61] [62] [63]。

遥感反演技术适用于区域、全球尺度的森林生物量监测,可更加准确地获取森林环境与植被的垂直信息,但该技术也存在一定的不足。首先遥感反演处于新兴发展阶段,若想大面积覆盖监测,其成本过高;其次,由于该技术只能获取地表植被覆盖信息,因此无法估算树木地下生物量,也无法准确的区分植被类型等详细的林分信息;最后,虽然目前各个国家正在不断实施国家森林清查工作,但仍然缺少大量公开的、可靠的森林生物量数据用以验证遥感技术对生物量估测的可靠性。

4. 总结与展望

森林生态系统是全球陆地生态系统的重要碳汇,而森林生物量估算一直是生态学领域的热点问题[24][64]。随着科学技术的进步,研究手段和尺度也在不断变化。尺度上,从最初的样点尺度发展到区域、景观、生态系统乃至生物圈。伴随着尺度的扩大,研究手段从最初的野外直接观测法发展到快速估算的间接估算法,这两类方法都是基于野外实地数据获取后利用数学方法进行估算,而当研究尺度扩大到更大区域、景观乃至全球尺度时,人们基于卫星系统开发了遥感监测法获取森林生物量。

森林生物量估算研究一直是生态学的热点,但目前这几类研究方法还存在一定的不足:

- 1) 利用生物量方程法估算生物量的研究已处于白热化阶段,缺少一定的创新性,对大尺度森林生物量的估算准确性有待提高;
- 2) 遥感反演技术并不能直接获取生物量数据,而是通过一系列测量数据换算得到,因此需要大量实测数据来消除监测结果的不确定性;
- 3) 当前对于森林地上生物量的研究远多于地下生物量,树木地下根系生长状态复杂,即使是全根挖掘法也极易因根系获取发生断裂丢失的失误导致根系测定结果的不准确。

随着研究尺度的扩展,加之传统估算方法未能打破当前研究阶段面临的瓶颈,遥感反演法在生物量估算研究方面逐渐占据重要地位,是未来森林生物量研究不可缺少的重要手段。未来的森林生物量研究方向会更偏向于以估算手段作为基础,以此发展更多预测过去、未来时空的碳含量变化模型,从而便于国家做出更加有效的政策与措施应对全球气候变化。因此,森林生物量估算方法的发展及技术的提升对我国森林资源清查、碳通量观测网络以及应对气候变化等具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) The Physical Science Basis. Working Group III Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report (AR6). Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020, 1711(28): 5-7.
- [4] Jin, Y.Q., Liu, C.G., Qian, S.S., *et al.* (2022) Large-Scale Patterns of Understory Biomass and Its Allocation across China's Forests. *Science of the Total Environment*, **804**, Article ID: 150169. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150169>
- [5] 付晓, 张煜星, 王雪军. 2060年前我国森林生物量碳库及碳汇潜力预测[J]. 林业科学, 2022, 58(2): 32-41.
- [6] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [7] Ebermeyer, E. (1876) The Entire Teaching of Forest Litter with Regard to the Chemical Statics of Forest Construction. Springer, Berlin, 116 p.
- [8] Ovington, J.D. (1956) The Weights and Productivity of Trees Species Grown in Close Stands. *New Phytologist*, **55**, 289-304. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1956.tb05289.x>
- [9] Rochow, J.J. (1974) Estimates of Above-Ground Biomass and Primary Productivity in a Missouri Forest. *Journal of Ecology*, **62**, 567-577. <https://doi.org/10.2307/2258999>
- [10] Woodwell, G.M., Whittaker, R.H., Reiners, W.A., *et al.* (1978) The Biota and the World Carbon Budget: The Terre-

- strial Biomass Appears to Be a Net Source of Carbon Dioxide for the Atmosphere. *Science*, **199**, 141-146. <https://doi.org/10.1126/science.199.4325.141>
- [11] Birdsey, R.A. (1992) Carbon Storage and Accumulation United States Forest Ecosystems. United States Department of Agriculture Forest Service, General Technical Report.
- [12] Whittaker, R.H. (1961) Estimation of Net Primary Production of Forest and Shrub Communities. *Ecology*, **42**, 177-180. <https://doi.org/10.2307/1933283>
- [13] Satoo, T. (1973) A Synthesis of Studies by the Harvest Method: Primary Production Relations in the Temperate Deciduous Forests of Japan. In: Reichle, D.E., Ed., *Analysis of Temperate Forest Ecosystems. Ecological Studies*, Springer, Berlin, Heidelberg, 55-72.
- [14] Dixon, R.K., Solomon, A.M., Brown, S., *et al.* (1994) Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, **263**, 185-190. <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
- [15] Schroeder, P., Brown, S., Mo, J.M., *et al.* (1997) Biomass Estimate for Temperate Broadleaf Forests of the United States Using Inventory Data. *Forest Science*, **43**, 424-434.
- [16] Turner, D.P., Koerper, G.J., Harmon, M.E., *et al.* (1995) A Carbon Budget for Forests of the Conterminous United States. *Ecological Application*, **5**, 421-436. <https://doi.org/10.2307/1942033>
- [17] Houghton, R.A., Hackler, J.L. and Lawrence, K.T. (1999) The U.S. Carbon Budget: Contributions from Land-Use Change. *Science*, **285**, 574-578. <https://doi.org/10.1126/science.285.5427.574>
- [18] Olson, J.S., Watts, J.A. and Allison, L.J. (1983) Carbon in Live Vegetation of Major World Ecosystems. US Department of Energy, Washington DC.
- [19] 聂道平, 徐德应, 王兵. 全球碳循环与森林关系的研究——问题与进展[J]. 世界林业研究, 1997, 10(5): 33-40.
- [20] 李意德. 海南岛热带山地雨林林分生物量估测方法比较分析[J]. 生态学报, 1993(4): 313-320.
- [21] 陈炳浩, 陈楚莹. 沙地红皮云杉森林群落生物量和生产力的初步研究[J]. 林业科学, 1980(4): 269-278.
- [22] 邓士坚, 王开平, 高虹. 杉木老龄人工林生物产量和营养元素含量的分布[J]. 生态学杂志, 1988(1): 13-18.
- [23] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 12.
- [24] 罗云建, 张小全, 王效科, 等. 森林生物量的估算方法及其研究进展[J]. 林业科学, 2009, 12(8): 129-134.
- [25] West, P.W. (2009) *Tree and Forest Measurement*. Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-95966-3>
- [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[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 11-110.
- [27] Huxley, J.S. (1932) *Problems of Relative Growth*. Methuen, London, 276 p.
- [28] 王维枫, 雷渊才, 王雪峰, 等. 森林生物量模型综述[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(3): 58-63.
- [29] 胥辉, 张会儒. 林木生物量模型研究[M]. 昆明: 云南科学技术出版社, 2002.
- [30] Ter-Mikaelian, M.T. and Korzukhin, M.D. (1997) Biomass Equations for Sixty-Five North American Tree Species. *Forest Ecology and Management*, **97**, 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00019-4)
- [31] Zianis, D. and Mencuccini, M. (2004) On Simplifying Allometric Analyses of Forest Biomass. *Forest Ecology and Management*, **187**, 311-332. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.007>
- [32] Falster, D.S., Duursma, R.A., Ishihara, M.I., *et al.* (2015) BAAD: A Biomass and Allometry Database for Woody Plants. *Ecology*, **96**, 1445. <https://doi.org/10.1890/14-1889.1>
- [33] 陈传国. 红松人工林生物产量的回归方程[J]. 林业勘查设计, 1981, 1(2): 19-23.
- [34] Fang, J.Y., Chen, A.P., Peng, C.H., *et al.* (2001) Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**, 2320-2322. <https://doi.org/10.1126/science.1058629>
- [35] Luo, Y.J., Wang, X.K., Ouyang, Z.Y., *et al.* (2020) A Review of Biomass Equations for China's Tree Species. *Earth System Science Data*, **12**, 21-40. <https://doi.org/10.5194/essd-12-21-2020>
- [36] 胥辉, 刘伟平. 相容性生物量模型研究[J]. 福建林学院学报, 2001, 21(1): 18-23.
- [37] Lott, J.E., Howard, S.B., Black, C.R., *et al.* (2000) Allometric Estimation of Above-Ground Biomass and Leaf Area in Managed *Grevillea robusta* Agroforestry Systems. *Agroforestry Systems*, **49**, 1-15. <https://doi.org/10.1023/A:1006330830109>
- [38] Wang, J.R., Letchford, T., Comeau, P., *et al.* (2000) Above- and Below-Ground Biomass and Nutrient Distribution of a Paper Birch and Subalpine Fir Mixed-Species Stand in the Sub-Boreal Spruce Zone of British Columbia. *Forest Ecology and Management*, **130**, 17-26. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00193-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00193-0)
- [39] Whittaker, R.H. (1975) *Communities and Ecosystems*. 2nd Edition, Macmillan, New York.
- [40] Brown, S. (1997) *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer*. FAO Forest Paper, Roma,

134 p.

- [41] Luo, Y.J., Wang, X.K., Zhang, X.Q., *et al.* (2013) Variation in Biomass Expansion Factors for China's Forests in Relation to forest Type, Climate, and Stand Development. *Annals of Forest Science*, **70**, 589-599.
<https://doi.org/10.1007/s13595-013-0296-6>
- [42] Brown, S. and Lugo, A.E. (1984) Biomass of Tropical Forests: A New Estimate Based on Forest Volumes. *Science*, **233**, 1290-1293. <https://doi.org/10.1126/science.223.4642.1290>
- [43] Fang, J.Y., Wang, G.G., Liu, G.H., *et al.* (1998) Forest Biomass of China: An Estimate Based on the Biomass-Volume Relationship. *Ecological Applications*, **8**, 1084-1091.
[https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[1084:FBOCAE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[1084:FBOCAE]2.0.CO;2)
- [44] Zhou, G.S., Wang, Y.H., Jiang, Y.L., *et al.* (2002) Estimating Biomass and Net Primary Production from Forest Inventory Data: A Case Study of China's Larix Forests. *Forest Ecology and Management*, **169**, 149-157.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00305-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00305-5)
- [45] 赵敏, 周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1468-1472.
- [46] 罗云建, 张小全, 侯振宏, 等. 我国落叶松林生物量碳计量参数的初步研究[J]. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1111-1118.
- [47] Poorter, H., Niklas, K.J., Reich, P.B., *et al.* (2012) Biomass Allocation to Leaves, Stems, and Roots: Meta-Analysis of Interspecific Variation and Environmental Control. *New Phytologist*, **193**, 30-50.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- [48] Pan, Y.D., Birdsey, R.A., Phillips, O.L., *et al.* (2013) The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **44**, 593-622.
<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914>
- [49] Lefsky, M.A. (2010) A Global Forest Canopy Height Map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System. *Geophysical Research Letters*, **37**, L15401.
<https://doi.org/10.1029/2010GL043622>
- [50] Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., *et al.* (2011) Benchmark Map of Forest Carbon Stocks in Tropical Regions across Three Continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108**, 9899-9904.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- [51] 汤旭光. 基于激光雷达与多光谱遥感数据的森林地上生物量反演研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [52] Sellers, P.J. (1985) Canopy Reflectance, Photosynthesis, and Transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 1335-1372. <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>
- [53] Suganuma, H., Abe, Y., Taniguchi, M., *et al.* (2006) Stand Biomass Estimation Method by Canopy Coverage for Application to Remote Sensing in an Arid Area of Western Australia. *Forest Ecology and Management*, **222**, 75-87.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.014>
- [54] Soenen, S.A., Peddle, D.R., Hall, R.J., *et al.* (2010) Estimating Aboveground Forest Biomass from Canopy Reflectance Model Inversion in Mountainous Terrain. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 1325-1337.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.12.012>
- [55] Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J.O., *et al.* (2007) Monitoring and Estimating Tropical Forest Carbon Stocks: Making REDD a Reality. *Environmental Research Letters*, **2**, Article ID: 045023.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>
- [56] Blair, J.B. and Hofton, M.A. (1999) Modeling Laser Altimeter Return Waveforms over Complex Vegetation Using High-Resolution Elevation Data. *Geophysical Research Letters*, **26**, 2509-2512.
<https://doi.org/10.1029/1999GL010484>
- [57] 丁娅萍. 基于微波遥感的旱地作物识别及面积提取方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [58] 李德仁, 王长委, 胡月明, 等. 遥感技术估算森林生物量的研究进展[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(6): 631-635.
- [59] 曹林, 余光辉, 代劲松, 等. 激光雷达技术估测森林生物量的研究现状及展望[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 163-169.
- [60] Luckman, A., Baker, J., Honzak, M., *et al.* (1998) Tropical Forest Biomass Density Estimation Using JERS-1 SAR: Seasonal Variation, Confidence Limits, and Application to Image Mosaics. *Remote Sensing of Environment*, **63**, 126-139. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00133-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00133-8)
- [61] Kuplich, T.M., Salvatori, V. and Curran, P.J. (2000) JERS-1/SAR Backscatter and Its Relationship with Biomass of

- Regenerating Forests. *International Journal of Remote Sensing*, **21**, 2513-2518.
<https://doi.org/10.1080/01431160050030600>
- [62] Lim, K., Treitz, P., Wulder, M.A., *et al.* (2003) LiDAR Remote Sensing of Forest Structure. *Progress in Physical Geography*, **27**, 88-106. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp360ra>
- [63] Drake, J.B., Dubayah, R.O., Clark, D.B., *et al.* (2002) Estimation of Tropical Forest Structural Characteristics Using Large-Footprint LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, **79**, 305-319.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00281-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00281-4)
- [64] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574.