林学基础研究系列



东北林区主要树种及林分类型生物量模型

董利虎　李凤日◎著

科学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

林学基础研究系列

东北林区主要树种及林分类型生物量模型

董利虎　李凤日　著

科学出版社

北　京

内 容 简 介

本书以我国东北林区主要树种及林分类型生物量为研究对象，采用近代先进的生物数学模型和统计分析方法，构建了东北林区主要树种和林分类型总量及各分项可加性生物量模型。内容主要包括生物量模型误差结构研究、单木可加性生物量模型研究、东北林区主要树种生物量分配及根茎比、东北林区主要树种生物量模型、东北林区主要林分类型生物量分配及根茎比和东北林区主要林分类型生物量估算模型研究 6 个方面。通过对东北林区主要树种及林分类型生物量的研究，以期为精确估算森林生物量、提高森林碳汇功能、减缓气候变化提供参考。

本书可供从事森林经理、林业建模工作者和高校相关专业的师生参考使用，也可供关注生态的各界人士参考。

图书在版编目（CIP）数据

东北林区主要树种及林分类型生物量模型 / 董利虎，李凤日著. —北京：科学出版社, 2017.6

（林学基础研究系列）

ISBN 978-7-03-052938-1

Ⅰ. ①东… Ⅱ.①董… ②李… Ⅲ. ①森林–生物量–研究–东北地区 Ⅳ.①S718.55

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 116061 号

责任编辑：张会格　岳漫宇 / 责任校对：邹慧卿

责任印制：张　伟 / 封面设计：刘新新

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行　各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第　一　版　开本：B5 (720×1000)

2017 年 6 月第一次印刷　印张：10 7/8

字数：300 000

定价：80.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

森林生物量作为森林生态系统性质、状态的重要特征，是研究森林碳储量与碳平衡等许多林业问题与生态问题的基础。在评价不同林分类型或区域的净初级生产力（NPP）和估计森林生态系统碳储量、碳通量的时候，都需要用到生物量。许多研究都表明，北半球是一个巨大的碳汇。但由于碳循环是一个极其复杂的生物学、化学和物理学过程，受到自然和人为活动的双重影响，因此目前的科学技术及其数据的积累尚不能准确地回答碳汇到底有多大，其区域分布如何。也就是说，碳汇问题仍存在着相当大的不确定性。因此，以目前的科学技术还不能准确地估算其具体数值，不同的学者得出的结论差异较大，很难说某一国家对碳汇的具体贡献有多大。由于森林碳储量和碳密度的变化可以直接或间接反映森林生长、演替及人为活动变化规律，因而我们必须准确估算及评价森林的碳储量和固碳能力，从而以此判定碳汇。因此，准确估算及评价森林碳储量及固碳能力对于全球陆地生态系统碳循环和碳储量控制机制研究，以及改善全球生态环境、缓解全球气候变化具有重要意义。此外，准确估算及预测长时间、大尺度上的森林碳储量及固碳能力，较为详细地掌握森林碳储量及其分布，对于制定公平合理的碳吸收、补偿相关政策，增加陆地生态系统碳储量及固碳能力也具有非常重要的意义。

东北林区作为全国最大的木材生产基地，森林面积和蓄积量均占全国总量的1/3 以上，在全国和区域碳平衡中起着至关重要的作用。同时，该地区也是中国气候变化最显著、植被对气候变化响应的敏感地带。过去 15 年中，该地区作为中国天然林保护工程实施的重点地区之一，其森林碳源、碳汇功能及其时空格局可能因经营活动和气候变化而发生变化。

本书以东北林区主要树种及林分类型生物量为研究对象，较为全面地分析东北林区主要树种及主要林分类型的生物量分配比例和根茎比变化规律，并构建了其总量及各分项可加性生物量模型。利用似然分析法判断各树种、林分类型总量及各分项生物量异速生长方程的误差结构（相加型和相乘型），而模型参数估计采用非线性似乎不相关回归模型方法，并采用“刀切法”来评价所建立的生物量模型。总的来说，本书从单木及林分生物量模型误差结构的确定、可加性生物量模型结构、生物量分配比例和根茎比变化规律等方面进行深入的研究，为全国性生物量和碳储量监测提供可靠的理论与技术知识。

本书共分为 9 章，第 1 章为森林生物量研究综述；第 2 章介绍了东北林区各区域的自然地理条件、动植物资源及生物量数据的调查、收集和整理；第 3 章介绍了生物量模型误差结构的确定方法；第 4 章介绍了单木可加性生物量模型的构建方法；第 5 章分析了东北林区主要树种生物量分配及根茎比变化规律；第 6 章利用似然分析法和聚合型可加性生物量模型来构建东北林区主要树种可加性生物量模型；第 7 章分析了东北林区主要林分类型生物量分配及根茎比变化规律；第 8 章分区域对东北林区主要林分类型生物量估算方法进行研究；第 9 章为结论与展望。

本书内容是国家自然科学基金项目（31600510、31570626）、国家“十二五”科技支撑计划项目（2015BAD09B03）及黑龙江省科学基金项目（LC20160007）共同资助的研究成果。本书在撰写过程中借鉴了国内外许多专家、学者的研究成果，在此一并予以感谢！

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

董利虎

2017 年 3 月 9 日

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　　录

第 1 章　绪论……1
1.1　森林生物量研究目的及意义……1
1.2　森林生物量研究历史……2
1.3　森林生物量估测方法……3
1.3.1　直接收获法……3
1.3.2　模型估测法……4
1.3.3　遥感估测法……5
1.4　森林生物量建模方法……6
1.4.1　单木生物量模型……6
1.4.2　林分生物量模型……9
1.4.3　生物量模型评价……11
1.5　生物量研究展望……12
1.6　研究内容……13
1.7　研究技术路线……14
第 2 章　研究区域概况及数据来源……16
2.1　研究地区概况……16
2.1.1　地理位置……16
2.1.2　气候……17
2.1.3　水系……17
2.1.4　土壤……17
2.1.5　动植物资源……18
2.2　单木生物量数据……19
2.2.1　样地设置……19
2.2.2　解析木选择……20
2.2.3　单木生物量测定及计算……21
2.3　林分生物量数据……23
2.3.1　固定样地数据……23

2.3.2 林分生物量计算……28
2.4 本章小结……28
第 3 章 生物量模型误差结构研究……29
3.1 异速生物量模型……29
3.2 生物量模型误差结构分析……30
3.2.1 数据与方法……30
3.2.2 误差结构结果分析……33
3.3 讨论……35
3.4 本章小结……36
第 4 章 单木可加性生物量模型研究……37
4.1 可加性生物量模型结构……37
4.1.1 分解型可加性生物量模型……37
4.1.2 聚合型可加性生物量模型……39
4.2 可加性生物量模型估计方法……40
4.3 不同可加性生物量模型结构评价……42
4.3.1 方法……42
4.3.2 不同结构模型拟合与检验结果……46
4.3.3 不同可加性生物量模型结构对比……47
4.4 讨论……50
4.5 本章小结……50
第 5 章 东北林区主要树种生物量分配及根茎比……52
5.1 数据……52
5.2 东北林区主要树种生物量分配……53
5.2.1 东北林区主要树种生物量分配统计……53
5.2.2 东北林区主要树种不同径级生物量分配……55
5.2.3 东北林区主要树种不同年龄生物量分配……60
5.3 东北林区主要树种生物量根茎比……61
5.3.1 东北林区主要树种生物量根茎比统计……61
5.3.2 东北林区主要树种地下生物量与地上生物量关系……63
5.4 讨论……66
5.5 本章小结……66
第 6 章 东北林区主要树种生物量模型……68
6.1 建模数据……68

6.2 模型构建……68
6.2.1 模型优选……68
6.2.2 可加性生物量模型构造……69
6.2.3 模型评价……72
6.2.4 校正系数……72
6.3 东北林区主要树种生物量模型构建……73
6.3.1 东北林区主要树种最优二元生物量模型选择……73
6.3.2 东北林区主要树种生物量模型误差结构分析……78
6.3.3 东北林区主要树种生物量模型……79
6.3.4 模型校正……91
6.4 讨论……97
6.4.1 生物量模型……97
6.4.2 不同生物量模型比较……98
6.5 本章小结……101
第 7 章 东北林区主要林分类型生物量分配及根茎比……103
7.1 数据统计……103
7.2 东北林区主要林分类型生物量分配……106
7.2.1 主要林分类型生物量分配统计……106
7.2.2 林分因素对生物量分配的影响……108
7.3 东北林区主要林分类型生物量根茎比……111
7.3.1 主要林分类型生物量根茎比统计……111
7.3.2 林分因素对生物量根茎比的影响……112
7.3.3 主要林分类型地上生物量与地下生物量关系……112
7.4 讨论……118
7.5 本章小结……118
第 8 章 东北林区主要林分类型生物量估算模型研究……120
8.1 数据……120
8.2 生物量-林分变量模型……120
8.2.1 生物量-林分变量模型构建方法……120
8.2.2 东北林区主要林分类型生物量-林分变量模型……121
8.3 生物量-蓄积量模型……130
8.3.1 生物量-蓄积量模型构建方法……130
8.3.2 东北林区主要林分类型生物量-蓄积量模型……130

8.4 林分生物量换算系数法……138
8.4.1 生物量换算系数定义……138
8.4.2 固定生物量换算系数法……139
8.4.3 生物量换算系数连续函数法……141
8.5 讨论……148
8.6 本章小结……153
第 9 章 结论与展望……154
9.1 结论……154
9.1.1 主要结论……154
9.1.2 主要创新点……155
9.1.3 主要不足之处……156
9.2 展望……156
参考文献……157

第 1 章　绪　　论

生物量作为生态系统的基本功能指标，是评价生态系统服务功能的基础参数，一直受到森林生态学家的高度关注。自 20 世纪 60 年代中期国际生物学计划（IBP）执行以来，对森林生态系统生物量的研究就没有间断过。在全球范围内，针对从北方针叶林、温带阔叶林、暖温带常绿阔叶林、地中海硬阔混交林一直到热带雨林都开展了森林生态系统生物量研究。

1.1　森林生物量研究目的及意义

众所周知，森林在地球圈层中起到缓冲器和碳汇的作用。总的来说，森林的光合作用、呼吸作用、枯损、生长等自然因素，以及人类活动因素（采伐、抚育和整枝等）都会影响森林生物量和碳储量的大小。因此，森林生态系统的生物量和碳储量变化可以直接或间接反映森林的演替、人类活动、自然干扰、气候变化和人为污染，森林的碳循环与碳储量在全球陆地生态系统碳循环中具有重要意义（李世东等，2013；王效科等，2011）。

森林生物量作为森林生态系统性质、状态的重要特征，是研究森林碳储量与碳平衡等许多林业问题与生态问题的基础。在评价不同林分类型或区域的净初级生产力（NPP）和估计森林生态系统碳储量、碳通量的时候，都需要用到生物量。许多研究都表明，北半球是一个巨大的碳汇。但由于碳循环是一个极其复杂的生物学、化学和物理学过程，受到自然和人为活动的双重作用，因而目前的科学技术及其数据的积累尚不能准确地回答碳汇到底有多大，以及其区域分布如何。也就是说，碳汇问题仍存在着相当大的不确定性。因此，以目前的科学技术还不能准确地估算其具体数值，不同的学者得出的结论差异较大，很难说某一国家对碳汇的具体贡献有多大（于贵瑞，2003）。

由于森林碳储量和碳密度的变化可以直接或间接反映森林生长、演替及人为活动变化规律，因而我们必须准确估算及评价森林的碳储量和固碳能力，从而以此判定碳汇。因此，准确估算及评价森林碳储量及固碳能力对于全球陆地生态系统碳循环和碳储量控制机制研究，以及对于改善全球生态环境、缓解全球气候变化具有重要意义。此外，准确估算及预测长时间、大尺度上的森林碳储量及固碳能力，较为详细地掌握森林碳储量及其分布，对于制定公平合理的碳吸收、补偿相关政策，增加陆地生态系统碳储量及固碳能力也具有非常重要的意义。

我国和世界大部分国家一样，森林资源宏观监测以国家森林资源清查为主。我国现行重复性的调查，对样地和解析木的调查数据，每 5 年产出一次累积性的统计成果。以森林资源清查统计数据为基础的生物量和碳储量计算，与现行森林资源清查体系一样，产出数据为每 5 年的累积性统计数据，数据采集时间存在不一致性，分析成果缺乏现实性和时效性。我国已经进行了 8 次全国森林资源清查，在人工林和天然林方面获取了大量宝贵的森林资源数据。方精云等（1996）研究表明，森林的生产力、生物量和碳储量与森林自身的生物学特性（蓄积量、林龄等）有着密切的联系。因此，如何充分利用这些连续、系统的大面积森林资源清查资料，探索基于森林资源清查数据的森林生物量和碳储量估测模型，进而估算、预测森林的碳储量和碳密度，这不仅有助于估算区域尺度的森林生产力及其碳收支，而且可以为森林生态系统的结构与功能评价提供一定的指标。因此，应以森林资源清查为基础，充分利用森林资源清查样地与解析木数据，借助遥感技术手段，寻求快速宏观监测森林资源的方法，从定时监测转向连续监测，从静态监测转向动态监测，提高监测的现实性和时效性。实时获取森林资源数量和碳储量的数据，对森林资源的可持续经营与利用，对于制定缓解森林碳流失政策具有重要的意义（王效科等，2011）。

1.2　森林生物量研究历史

森林生物量作为森林生态系统最基本的特征数据，是研究森林生态系统结构和功能的基础（West，1999），对于深入研究森林生态系统生物地球化学循环、水文学过程、碳循环和碳管理，以及评估系统生产力与环境的相互关系等都具有重要的科学价值（Konôpka et al.，2013；Fahey et al.，2009；Bondlamberty et al.，2004；方精云，2000）。此外，森林生物量还是国家温室气体清单、林业碳补偿项目等陆地生态系统碳计量与监测的核心问题。依据《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）及《京都议定书》，缔约方需定期提交土地利用变化和林业部门国家温室气体排放清单，而且经过核准的碳汇量可用于抵消温室气体的排放量。因此，对森林生物量的研究一直受到重视，从 20 世纪六七十年代的人与生物圈计划（MAB）和国际生物学计划（IBP）到最近的全球森林碳平衡再评估，有大量研究报道（Pan et al.，2011；Fang et al.，2001）。

在 MAB 和 IBP 的推动下，世界各国对陆地生态系统的不同森林类型生物量、碳储量、固碳能力、生产力及其分布规律，以及森林生产力与气候因子、森林群落分布之间的关系进行了详细的研究（Cannel，1982）。目前，国外对于生物量的研究处于领先地位，许多学者在小尺度及大尺度方面都有一定的研究成果，并开展了许多树种的生物量模型研究（Woodall et al.，2011；Lambert et al.，2005；Jenkins

需要全本请访问 www.ertongbook.com

et al.，2003）。而我国对于森林生物量和生产力的研究相对较晚，始于 20 世纪 70 年代末，这一时期的代表研究有杉木林、油松林、红皮云杉林等（陈炳浩和陈楚莹，1980；董世仁和关玉秀，1980；潘维俦等，1978）。此后，我国陆续开展了不同地带主要森林类型生物量和生产力的调查研究工作（冯宗伟等，1999）。经过 30 余年的发展，积累了丰富的生物量数据，遍布寒温带、温带、暖温带、亚热带和热带等气候区，为全面总结我国森林生物量研究的成果奠定了基础。许多学者还建立了某一区域或某类森林类型的生物量模型（冯宗伟等，1999；罗天祥，1996）。

1.3　森林生物量估测方法

1.3.1　直接收获法

森林生物量通常包括乔木层生物量（如树干、树枝、树叶和树根）和林下植被生物量（如灌木、草本、苔藓等）。通常采用直接收获的手段来获取各组分（如树干、树枝、树叶和树根）的生物量，测定方法主要包括皆伐法和标准木法两种常规方法（孟宪宇，2006；冯宗炜等，1999，1982）。

1.3.1.1　皆伐法

在某一林分内选择适当面积（至少应为 0.06hm^2）设置样地，将该样地内的各林层进行皆伐，测定所有器官的生物量，一次推算出单位面积各林层及各器官的生物量。采用该法测定的数据准确可靠，常作为真值与采用其他方法的估计值进行比较，但此法费时费力且具有巨大的破坏性，在实际操作中较少用于测定乔木层生物量，而常用于测定林下植被生物量。

1.3.1.2　标准木法

标准木法可以细分为平均标准木法和径级分层标准木法。

平均标准木法：在对标准地进行每木调查的基础上，选取能够代表群落平均特征的标准木，伐倒后测定标准木的器官生物量，然后乘以林分密度得到林分生物量。

径级分层标准木法：按不同径级或树高将标准地树木分成数层，然后在各层内选取标准木。将各层标准木伐倒后称其鲜重，之后结合各层的每公顷株数，最后得到林分生物量。

总的来说，标准木法比较适合于人工林，因为人工林的林木大小具有小的或中等离散度的正态分布。需要注意的是，根据不同的测树指标选取的标准木是不同的，进而推算的林分生物量值也存在一定的差异（Baskerville，1965），这也是标准木法误差产生的主要原因。因此，此方法选择标准木尤为关键，应同时考虑

林木的胸径、树高、干形。

1.3.2 模型估测法

1.3.2.1 异速生长模型法

通常来说，用于测定树木生物量的方法有皆伐法、平均标准木法、径级分层标准木法和异速生长模型法等。直接测量树木的生物量尽管是最为准确的，但是这个过程需要大量的人力、物力和财力，且具有一定的破坏性。目前，生物量模型估测法是比较常用的方法，它是利用林木易测因子来推算难以测定的立木生物量（特别是树根生物量），可以减少测定生物量的外业工作（Ketterings et al.，2001；Klinkhamer and Peter，1994）。根据文献统计，过去几十年全世界已经建立了涉及 100 个以上树种的 2300 个生物量模型（包括总量和各分项），但是以地上生物量模型居多，很少有人关注地下生物量（树根），主要的原因是树根很难挖取（董利虎等，2013b；曾伟生等，2010；Bondlamberty et al.，2002；Brown，2002；林开敏等，2001；Lott et al.，2000；Wang et al.，2000）。总之，异速生长模型法被广泛用于森林生物量和生产力的估测中（佟健等，2014；刘琦等，2013）。

Parresol（2001，1999）总结了许多文献中的异速生长方程后，归纳出最常见的异速生长方程，分为以下三类：非线性相加型误差结构方程、非线性相乘型误差结构方程和线性方程。异速生长方程根据自变量的多少，又可分为一元或多元模型，且一元模型是最常见的函数形式（Enquist and Niklas，2002；Ketterings et al.，2001）。非线性模型应用最为广泛，其中相对生长系数恒定模型（CAR）和相对生长系数变化模型（VAR）最具有代表性，是所有模型中应用最为普遍的两种模型。这两种模型可用于总量及各分项生物量的估计，自变量 X 根据各分项生物量的特点可选用不同的变量，如 D^2、$D^2 \cdot H$。除了胸径和树高之外，许多研究者又引入了其他因子，如林龄、材积、冠幅和冠长等（Tumwebaze et al.，2013；Sprizza，2005）。在统计学上自变量的增多一般会使生物量的估算更趋于准确（Sprizza，2005），但自变量数据的增多又会加大林分调查时基本数据获取的难度，降低了异速生长模型的实用性。因此，在建立异速生长模型时应充分考虑统计标准和实际应用之间的平衡（Klinkhamer and Peter，1994）。

在生物量模型构造方面，国内外研究者普遍采用的是按林木各分项（树干、树枝、树叶、树根）分别进行生物量模型的优选（包括模型形式和模型变量），然后根据各分项生物量与实际观测变量（如胸径和树高）分别拟合各分项生物量模型（如树干、树枝、树叶和树根）的参数值，即各分项生物量的模型估计都是独立进行的（Albert et al.，2014；Fatemifarrah et al.，2011；Basuki et al.，2009；Zeng et al.，2010；Socha and Wezyk，2007）。这种构造生物量模型的方法就造成了各分

项生物量模型间的不可加性或不相容性，也就是说，树干、树枝、树叶和树根 4 部分生物量之和不等于总生物量，树枝和树叶的生物量之和不等于树冠生物量，树冠和树干生物量之和不等于地上生物量。为了解决模型的可加性问题，Parresol（2001，1999）采用似乎不相关回归建立了总量及各分项可加性生物量模型，首次解决了以往生物量估算领域中各分项生物量模型间不相容的问题。唐守正等（2000）则采用度量误差模型，也实现了生物量模型和材积模型的兼容。

目前，大尺度森林生物量的估算方法是人们关注的焦点，建立林分尺度生物量模型变为一种趋势（Soares and Tomé，2004）。总的来说，单木生物量模型与林分生物量模型的建模思路是一样的，都可以采用异速生长方程来建立其生物量模型。

1.3.2.2　机理模型法

异速生长方程属于一种经验式，是一种统计模型。生物量机理模型是基于树木叶片光合作用、呼吸作用等主要生理过程及分析几何等的理论模型，以实现对生物量的估计，探索整个生物界的相对生长规律（Landsberg，2003；Enquist and Niklas，2002；West，1999）。但对于机理模型来说，建模时需要大量的环境气候数据且模型构造相对复杂，这就降低了其实用性，很难应用于森林生物量的估算（Stahl et al.，2004）。虽然研究机理模型是我们的最终目的，但目前这种方法还不能精确地估计生物量。

1.3.3　遥感估测法

直接收获法与模型估测法在估测森林生物量时具有一定的局限性，不能及时反映大面积宏观生态系统的动态变化及生态环境状况。但当高精度、大面积的森林生物量需要被估测时，传统生物量估测方法（直接收获法与模型估测法）无法满足现实中的需要。在这种情况下，人们开始利用遥感技术来代替传统的研究方法进行生物量的估测。

森林生物量的遥感估测大致可以分为三个阶段（李世东等，2013）：①利用单波段来估算森林生物量，其运算简单，然而受大气、土壤等因素影响强烈，因此其估测精度较低；②利用森林植被指数来估算森林生物量，因其方法简便、估测精度较高而广为应用，从使用高空间分辨率的 TM、MSS 数据等到使用高时间分辨率的 NOAA 数据，从小区域的精细研究（如一个实验区、一个县）到大尺度宏观研究（如全球尺度）；③利用主动微波遥感［如合成孔径雷达（SAR）］估算森林生物量，其估测精度较高。

到目前为止，国内外很多学者借助卫星遥感技术对森林的生物量进行了研究

（Trofymow et al.，2014；Anaya et al.，2009；Feldpausch et al.，2006；Suganuma et al.，2006；Van et al.，2005；Dong et al.，2003；Kasischke et al.，1997；Sun and Simonett，1988），如 Sun 和 Simonett（1988）、Kasischke 等（1997）分别利用航空和航天雷达数据研究表明雷达影像密度与生物量关系密切；Dong 等（2003）利用 ABHRR-NOAA 图像提取了 1981~1999 年 6 个国家 167 个省的生长季的归一化植被指数（NDVI），对 NDVI 与基于森林调查数据的森林生物量进行建模；Trofymow 等（2014）利用遥感的方法确定剩余燃烧木头堆的蓄积和生物量。随着对国外研究的借鉴，我国也有学者利用遥感技术对森林生物量进行了研究（Du et al.，2014；李明泽等，2014；翟晓江等，2014；黄金龙等，2013；余朝林等，2012；董德进等，2011；杨金明等，2011），杨金明等（2011）利用长白山林区的单木生物量模型及森林资源清查资料计算样地生物量并用 4 期遥感数据对此地区的生物量变化进行了分析；黄金龙等（2013）基于光谱和空间信息融合后的 IKONOS 影像提取单木水平的树冠冠幅信息，并利用外业中实测的小样方生物量数据，对南京市紫金山林区针叶林和阔叶林分别建立了地上生物量的遥感估算模型，还利用实测针叶林和阔叶林生物量数据对模型进行了验证；余朝林等（2012）基于外业实测生物量数据和 Landsat 5 TM 影像，分别建立浙江省临安、安吉、龙泉三个毛竹产区的毛竹林生物量遥感估算模型，并对 3 个区域的模型进行评价。

总的来说，对于森林生态系统的宏观监测来说，遥感技术是一种最为可靠的方法，其可以快速、准确、无破坏地对森林生物量进行估算。林业工作者利用遥感的多时相特点，可以准确定位分析同一区域、一段时间前后的变化情况，使对森林生物量动态监测成为可能。由于遥感技术（RS）和地理信息系统（GIS）的集成，更加推动了森林生物量遥感估算的进程，在地理信息系统环境下实现包括遥感信息在内的多种信息（如林分信息、立地因子和气候因素等）的结合，从而可以准确地建立森林生物量遥感估算模型。利用地理信息系统技术将高时相分辨率的卫星遥感数据和各种观察或实测数据结合在一起，可以对小尺度、大尺度及全球尺度的森林生物量进行准确估算及动态监测（汤旭光等，2012；娄雪婷等，2011；徐新良和曹明奎，2006）。

1.4 森林生物量建模方法

1.4.1 单木生物量模型

1.4.1.1 模型结构选择

自从芬兰及瑞典（1964 年）提出将整株林木的生物质（包括地上和地下两部分）全部予以收获利用的木材生产方式，即全树利用后，许多发达国家（如美国、

加拿大等）将森林生物量调查作为森林监测的一个重要内容，因此许多国家及研究者开始进行森林生物量模型的研究。迄今为止，许多研究者先后提出了许多形式的生物量模型，总结起来主要有以下三种模型类型（Parresol，2001，1999）。

非线性（误差相加）方程：$W = a_0 X_1^{a_1} X_2^{a_2} \cdots X_i^{a_i} + \varepsilon$　　（1-1）

非线性（误差相乘）方程：$W = a_0 X_1^{a_1} X_2^{a_2} \cdots X_i^{a_i} \cdot \varepsilon$　　（1-2）

线性方程：$W = a_0 + a_1 X_1 + \cdots a_i X_i + \varepsilon$　　（1-3）

式中，W 为生物量（kg）；自变量 X_1，X_2，…，X_i 为树木因子；a_0，a_1，a_2，…，a_i 为模型的参数；ε 为误差项。一些常用的自变量有：胸径（D，cm）、树高（H，m）、冠幅（C_W，m）、冠长率（C_R，%）、冠长（C_L，m）、D^2、$D^2 \cdot H$、年龄（T，年）和材积（V，m^3）等。

对于不同地区、不同树种的生物量模型，其方程形式可能不同。对于式（1-1）~式（1-3）来说，其最简单的方程是以胸径（D）作为唯一变量的一元生物量模型，其中国内外使用最多的模型形式为 $W=a \cdot D^b$。对于二元生物量模型，树高（H）经常被作为第二变量添加到模型中，其中应用最广的模型形式为 $W=a \cdot D^b \cdot H^c$ 和 $W=a \cdot (D^2 \cdot H)^b$。

1.4.1.2　模型误差结构

异速生长方程 $Y=a \cdot X^b$ 是一个数学函数（幂函数），经常被用作生物量模型。一些研究者（Packard，2009；Packard and Birchard，2008；Fattorini，2007）认为对数转换的线性模型有以下缺陷：①将原始数据对数转换是一个非线性的转换，从根本上改变了幂函数中 Y 和 X 之间的关系；②非线性模型的对数转换对数据中的小值和大值产生不成比例的权重，这会误导性地估计幂函数的参数；③对数转换的线性模型提供 ln$Y$ 的预测值，而不是 Y，将 ln$Y$ 反对数为 Y 时，会有一个偏差，因而对这个偏差的校正是有必要的。因此，原始数据应该用非线性幂函数来进行拟合（Bi et al.，2004）。另一些研究认为，异速生长方程的生物变异是成比例的，而不是绝对的数量级。此外，在实际中最小二乘法能够容易地得出对数转换的线性回归模型的参数估计值，且对数转换的线性模型能削弱异常值或强影响点的影响（Kerkhoff and Enquist，2009；Gingerich，2000）。总的来说，选择对数转换的线性回归还是非线性回归主要依赖于异速生长方程的误差结构。如果异速生长方程的误差项是相加型的，非线性回归最为合适，其主要通过非线性最小二乘法拟合原始数据；而如果异速生长方程的误差项是相乘型的，对数转换的线性回归最为合适。为了便于客观评价模型的误差结构，Bi 等（2004）提出用非线性回归与对数转换的线性回归的均方误差比值（MSE ratio）来判断异速生长方程的误差结构。Xiao 等（2011）和 Ballantyne（2013）提出用似然分析法（likelihood analysis）

去判定异速生长方程的误差结构，到目前为止，这个方法已被用于很多领域，但在林业界似然分析法还很少被人所知（Lai et al.，2013）。与均方误差比值法相比，似然分析法被认为更符合核心统计原则，更适合用来确定模型的误差结构（Ballantyne，2013）。

1.4.1.3　可加性生物量模型

林木总生物量应当等于各分项生物量之和。为了满足这一基本的逻辑关系，在同时建立树干、树枝、树叶、地下生物量和地上生物量方程时，必须保证各个方程之间具有可加性。为了实现生物量方程的可加性，有许多可加性模型结构可以被使用，尽管如此，生物量模型的可加性还是经常被忽视。在实际应用中，国内外有以下两种形式的可加性生物量模型（董利虎等，2013a；Li and Zhao，2013；董利虎等，2012；曾伟生和唐守正，2011a；Balboa-Murias et al.，2006）。

（1）分解型可加性生物量模型（董利虎等，2013a，2012；曾伟生和唐守正，2011a），通过构造总量与各分项生物量模型（函数）之间的相关关系来满足可加性，其通式如下：

$$\begin{cases} W_1 = \dfrac{F_1(X_1)}{F_1(X_1)+F_2(X_2)+\cdots+F_n(X_n)} \times F_{\text{total}}(X_{\text{total}}) \\ W_2 = \dfrac{F_2(X_2)}{F_1(X_1)+F_2(X_2)+\cdots+F_n(X_n)} \times F_{\text{total}}(X_{\text{total}}) \\ \vdots \\ W_n = \dfrac{F_n(X_n)}{F_1(X_1)+F_2(X_2)+\cdots+F_n(X_n)} \times F_{\text{total}}(X_{\text{total}}) \end{cases} \tag{1-4}$$

式（1-4）中总量及各分项生物量方程都有独自的自变量，由式（1-4）可以明显地看到总生物量等于各分项生物量之和。此外，式（1-4）还可以设置其他的约束条件（如树枝、树叶生物量之和等于树冠生物量）。

（2）聚合型可加性生物量模型（Li and Zhao，2013；Balboa-Murias et al.，2006），通过设定总量等于各分项生物量之和来满足可加性，其通式如下：

$$\begin{cases} W_1 = F_1(X_1) \\ W_2 = F_2(X_2) \\ \vdots \\ W_n = F_n(X_n) \\ W_{\text{total}} = W_1 + W_2 + \cdots + W_n \end{cases} \tag{1-5}$$

式（1-5）中各分项生物量方程都有独自的自变量，同理，式（1-5）也可以设置其他的约束条件。

需要全本请访问 www.ertongbook.com