



ZHANGZISONG RENGONGLIN SHUGUAN DONGTAI SANWEI TUXING MONI JISHU DE YANJIU

樟子松人工林

树冠动态三维图形模拟技术的研究



刘兆刚 著

黑龙江科学技术出版社

樟子松人工林树冠动态 三维图形模拟技术的研究

刘兆刚 著

黑龙江科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

樟子松人工林树冠动态三维图形模拟技术的研究 /
刘兆刚著. -- 哈尔滨 : 黑龙江科学技术出版社, 2011.1
ISBN 978-7-5388-6541-7

I. ①樟... II. ①刘... III. ①樟子松 - 人工林 - 植物
生长 - 计算机模拟 - 研究 IV. ①S791.253-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 240415 号

责任编辑 焦 琰 刘 洋
封面设计 刘 洋
版式设计 刘 畅

樟子松人工林树冠动态三维图形模拟技术的研究
ZHANGZISONG RENGONGLIN SHUGUAN DONGTAI SANWEI TUXING MONI JISHU DE YANJIU
刘兆刚 著

出 版	黑龙江科学技术出版社 (150001 哈尔滨市南岗区建设街 41 号) 电话 (0451) 53642106 传真 53642143 (发行部)
印 刷	哈尔滨天兴速达印务有限责任公司
发 行	全国新华书店
开 本	787×1092 1/16
印 张	22
字 数	398 000
版 次	2011 年 1 月第 1 版·2011 年 1 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5388-6541-7/S·778
定 价	46.00 元

前言

以东北林业大学帽儿山实验林场樟子松人工林为研究对象,采用树干解析、枝解析的方法,分别于2002年和2003年在老山施业区选择不同年龄、不同立地和不同密度的樟子松人工林有代表性的林分设置固定标准地15块(其中,2002年设置7块,2003年设置8块),共获取解析样木53株(其中生物量样木36株),实测了2298个一级枝活枝条变量因子(包括总着枝深度(DINC)、方位角(ϕ)、着枝角度(θ)、基径(BD)、枝长(BL)、弦长(BCL)、弓高(BAH))数据资料。基于理论或经验生长方程,建立了樟子松人工林树冠结构静态模型及树冠动态生长模型。采用VC++6.0语言为开发平台,结合OpenGL开放式图形库,将生长模型与形态结构模型结合,建立了樟子松人工林树冠动态三维图形可视化模拟系统。实现了基于实测数据和生长模型的静态、动态单木和林分的可视化模拟。

因此,基于生长模型的分可视化三维树冠动态模拟主要核心问题从两个方面进行研究,一是基于野外实测数据构建树冠结构静态和动态模型,二是利用编程语言实现模拟的过程。

本文详细研究工作包括以下内容:

(1) 樟子松人工林树冠结构静态模型的建立。主要从树冠形状模型和结构模型两方面进行了研究。采用野外实测樟子松一级枝条数据,利用总着枝深度枝条变量因子和林木胸径、树高变量建立了最优的反映树冠形状模型的枝条基径模型和枝长模型;着枝角度总体上是随着总着枝深度的增加而增大,但构建的模型精度过低,因此本文从着枝角度的总体分布方面对其进行了描述。树冠结构模型的研究包括一级枝条数量预估模型的构建以及枝叶的空间分布模型规律。结果表明:一级枝条个数在树冠有效冠内垂直方向上呈现一“多”一“少”的趋势,在有效冠以下,随着着枝深度的增加,枝条个数呈现直线下降趋势;枝条的水平分布可以用均匀圆形分布进行很好的拟合,也表明圆形分布统计量是用来分析枝条方位水平分布非常有用的工具。文中通过对树冠内一级枝条的空间分布规律的研究,可以为樟子松人工林树冠结构的动态模拟提供基础。基于实测各树冠变量,同时建立了基于林木和林分测定因子的全树冠叶量和单个枝条着叶量的预估模型,并对树冠内叶量的空间垂直分布规律进行了研究。结果表明:胸径(DBH)和冠长(CL)作为合适的树木变量,可以用来构建樟子松单木全树冠叶量的预估模型;单个枝条叶量与枝条基径、枝长和

枝条在树冠内相对高度 (BRH) 相关紧密, 其对数变换形式构建的单个枝条叶量模型有很好的预估效果; 树冠叶量的空间垂直分布可以用二参数 Weibull 分布函数进行描述。尺度参数 b 变化范围为 0.47~0.72 之间, 形状参数 c 变化范围在 2.01~4.52 之间, 所有样本均通过 t 检验, 相关指数 r^2 (0.958~0.997) 均大于 0.95。36 株样本中有 26 株样本形状参数 c 的 95% 置信区间包含 3.6, 表明这些样本的叶量在树冠上的垂直分布符合正态分布, 即大多数样本树冠叶量集中在中部, 较小级别的样本表现出树冠叶量向上部倾斜, 这是处于林冠下层的被压木, 为了获取更多光能以维持自身生命活动导致的结果。

(2) 樟子松人工林树冠结构动态模型的建立。在树冠静态模型的基础上, 为了反映树冠结构的动态变化, 根据实测样本一级枝条枝解析基径、枝条生长数据, 引入年龄因子作为自变量, 建立了树冠内一级枝条基径、枝条的动态生长模型。

由于树冠内的枝长和基径生长主要与树木的胸径、树高相关, 因此在研究树冠动态变化规律时有必要建立反映树高、胸径动态变化的生长模型。通过树干解析和查数轮枝高度获取了樟子松胸径和树高生长动态数据, 优选利用 Richards 理论生长方程建立了樟子松树高和胸径动态生长模型。检验结果表明: 所有样本的相关指数均在 99% 以上, 所以应用构建的 Richards 生长模型非常适合预估樟子松人工林树高、胸径生长。为了掌握樟子松人工林树冠枝下高和冠长动态变化情况, 本文引用现有的樟子松人工林枝下高和冠长动态生长模型用来预估枝下高和冠长动态生长模型。并对引进的模型进行了精度验证。

(3) 基于实测数据和生长模型的樟子松人工林树冠动态三维可视化图形模拟。本文利用基于少数几个参数和读取数据文件的方式 (由实测数据组成的 Excel 文件以及由生长模型生成), 采用简单几何建模方法, 利用 OpenGL 1.4 的可编程图形功能及 VC++6.0 开发语言建立了樟子松人工林树冠动态三维可视化模拟系统软件 (3DTree 1.0v), 实现了基于实测数据单木、林分三维图形静态重建以及基于生长模型的单木、林分静态和动态三维图形可视化模拟, 为实现虚拟间伐、整枝等三维可视化经营措施及景观设计等提供依据。

本书研究内容承蒙林业公益性行业科研专项经费项目“我国典型森林类型健康经营关键技术研究” (20100400207)、“东北林区主要树种基础模型系统的研究” (201004026)、中央高校基本科研业务费专项资金项目 (DL09CA11) 基金资助, 特致殷切谢意。

借此书出版之机, 衷心感谢导师李凤日教授的精心指导。他的言传身教将使我终生受益。他知识之渊博、治学之严谨, 谦逊之为人, 为我树立了学术品格的优秀典范。在此向尊敬的导师谨表真挚的谢忱和崇高的敬意。

本书是在笔者博士论文研究的基础上，修改完善而成，撰写过程中承蒙森林经理学科各位老师的关心和帮助，在本书即将付梓之际，感谢所有支持、帮助过我的师长、同学、同事、朋友和亲人们。

刘兆刚

2010年11月于东北林业大学

目 录

1 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 树冠结构研究概述.....	2
1.3 树冠结构的描述和模拟.....	4
1.3.1 树冠形状.....	4
1.3.2 分枝结构.....	7
1.3.3 枝叶的空间分布格局.....	8
1.3.4 树冠结构模型.....	10
1.4 树木三维图形可视化模拟.....	12
1.4.1 树木可视化图形模拟概述.....	13
1.4.2 树木生成方法及实现技术.....	14
1.5 国内外常见三维图形可视化模拟开发软件.....	25
1.5.1 林木三维图形可视化模拟开发软件.....	25
1.5.2 林分三维图形可视化模拟开发软件.....	29
1.6 主要研究内容及技术路线.....	31
2 研究地区概况及数据收集整理.....	33
2.1 研究地区概况.....	33
2.1.1 地理位置及地形地势.....	33
2.1.2 气候概况.....	35
2.1.3 土壤特点.....	35
2.1.4 资源状况.....	35
2.2 数据收集及整理.....	36
2.2.1 数据收集及测定.....	36
2.2.2 数据整理.....	41
2.3 生长方程及模型的拟合与检验.....	43
2.3.1 理论生长方程.....	43
2.3.2 经验生长方程.....	44

2.3.3 模型的拟合和检验	44
2.4 本章小结	48
3 樟子松人工林树冠结构静态模型	49
3.1 树冠形状预估模型	49
3.1.1 枝条基径模型	49
3.1.2 枝条长度模型	53
3.1.3 枝条着枝角度	56
3.1.4 枝条的弦长预估模型	58
3.1.5 树冠半径模型	59
3.1.6 树冠形状模型的检验	59
3.2 树冠结构预估模型	61
3.2.1 一级枝条数量预估模型	61
3.2.2 枝条的空间分布	65
3.2.3 枝叶的生物量分布	74
3.3 本章小结	81
4 樟子松人工林树冠结构动态模型	82
4.1 一级枝条基径生长模型	82
4.1.1 研究方法	83
4.1.2 结果与分析	84
4.1.3 一级枝条基径生长模型的检验	87
4.2 一级枝条长度生长模型	87
4.2.1 研究方法	87
4.2.2 结果与分析	88
4.2.3 一级枝条长度生长模型的检验	91
4.3 树高和胸径动态生长模型	91
4.3.1 研究方法	92
4.3.2 结果与分析	92
4.3.3 树高、胸径动态生长模型的检验	96
4.4 枝下高和冠长动态生长模型	97

4.4.1 研究方法.....	97
4.4.2 模型的检验.....	98
4.5 本章小结.....	98
5 基于实测数据樟子松人工林三维图形重构.....	100
5.1 树木形态结构组成.....	100
5.1.1 树干.....	101
5.1.2 枝条及分枝级数.....	102
5.1.3 叶子与叶簇.....	104
5.2 基于实测数据樟子松人工林三维图形重构.....	105
5.2.1 基于实测数据单木静态三维图形重构.....	106
5.2.2 基于实测数据樟子松林分静态三维图形重构.....	119
5.3 本章小结.....	124
6 基于少量实测因子和生长模型树冠静态三维图形模拟.....	125
6.1 数据文件结构.....	125
6.2 樟子松人工林静态模拟模型体系.....	126
6.3 基于生长模型樟子松人工林静态三维图形模拟.....	128
6.3.1 视图类定义.....	128
6.3.2 基于生长模型樟子松人工林静态模拟程序实现流程.....	128
6.3.3 基于生长模型樟子松人工林静态三维图形模拟实例.....	134
6.4 本章小结.....	137
7 基于生长模型树冠动态三维图形模拟.....	138
7.1 单木动态生长模型体系.....	138
7.2 樟子松人工林动态生长模拟程序实现流程.....	139
7.2.1 视图类定义.....	139
7.2.2 樟子松人工林单木动态生长模拟程序实现流程.....	140
7.2.3 樟子松人工林林分动态生长模拟程序实现代码.....	151
7.3 樟子松人工林林分动态三维图形模拟实例.....	152
7.3.1 樟子松单木生长的模拟.....	152
7.3.2 樟子松林分生长的模拟.....	153

7.4 本章小结.....	157
8 樟子松人工林树冠动态三维图形可视化模拟系统.....	158
8.1 系统开发环境.....	158
8.2 系统具体实现.....	158
8.3 树木的绘制与渲染.....	161
8.3.1 树干的绘制与渲染.....	161
8.3.2 树枝的绘制与渲染.....	169
8.3.3 树叶的绘制与渲染.....	175
8.3.4 全树的绘制与渲染.....	178
8.4 系统功能及说明.....	179
8.4.1 数据的加载.....	179
8.4.2 图形三维模拟.....	180
8.4.3 信息显示.....	180
8.4.4 图像的视窗缩放.....	181
8.5 本章小结.....	181
结论.....	182
附录 1: 3DTREEVIEW视图类程序代码.....	185
附录 2: STRUCTFILE树结构体程序代码.....	285
附录 3: TREE树类程序代码.....	304
附录 4: BRANCH树枝类程序代码.....	314
参考文献.....	326

1 绪论

1.1 引言

樟子松^[1] (*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.), 松科, 松属, 又名海拉尔松, 是欧洲赤松的地理变种。樟子松主要分布于夏凉冬冷且有适当降水的气候条件, 我国黑龙江大兴安岭、内蒙古海拉尔以西的部分山区和小兴安岭北部有分布, 其分布海拔下限 400m, 海拔上限 1000m。是荒山造林的先锋树种, 也是我国三北地区主要优良造林树种之一。

(1) 形态特征。常绿乔木, 树高 15~20m, 高达 30m, 胸径 80cm; 树干下部的树皮较厚, 灰褐色或黑褐色, 呈不规则的块状开裂, 上部的树皮黄色至黄褐色, 呈鳞片状脱落, 内皮金黄色, 冬芽长卵圆形, 褐色或淡黄褐色, 有树脂; 1年生枝淡黄色, 无毛。针叶 2 针一束, 坚硬, 稍扁, 常扭曲, 长 4~9cm, 宽 1.5~2mm。

(2) 生物学、生态学特性。樟子松分布区的气候夏凉冬冷, 年平均温度 0~6℃, 极端最低温度达-50~-40℃, 年降水量 300~500mm。樟子松为阳性树种, 根系非常发达, 具有耐旱、耐寒、抗风等特性。多生于较陡峻的阳坡或半阳坡上部; 能适应瘠薄土壤, 在砂丘上也有生长, 常呈团状分布, 多为纯林。樟子松是阳性树种, 树冠稀疏, 针叶多分布于树冠表面。樟子松抗逆性强, 寿命长一般为 150~200 年, 有的多达 250 年。

(3) 保护价值。材质较强, 纹理直, 可供建筑、家具等用材。树干可割树脂, 提取松香及松节油, 树皮可提取栲胶。树形及树干均较美观, 可作庭园观赏和绿化树种。由于具有耐寒、抗旱、耐瘠薄及抗风等特性, 可作三北地区防护林及固沙造林的主要树种。在东北三省人工林建设中已成为三大针叶造林树种(落叶松、红松、樟子松)之一。

(4) 栽培要点。种子繁殖。春季播种前要进行种子消毒和催芽处理, 注意防治立枯病。在苗床培育 2 年即可出圃。栽培后要连续抚育 3~4 年, 一般 10 年后即可郁闭成林。

我国从 20 世纪 50 年代开始营造樟子松人工林, 据国家森林清查资料统计, 截止 1993 年, 樟子松的引种面积已达 63 万 hm^2 , 仅东北三省的樟子松人工林面积就超过 37 万 hm^2 [2]。但由于缺乏合理的经营管理加之技术方法落后, 其自然整枝不良, 严重影响木材质量。对于现有的人工林, 寻求合理的有效的经营管理模式显得特别重要。因此利用模

型和模拟技术,建立树冠结构模型,准确描述不同林分条件下的樟子松树冠动态生长变化规律,以三维可视化方式模拟林分树冠动态生长对于实现可视化经营具有重大的理论和实践意义。

1.2 树冠结构研究概述

树冠是树木光合作用的主要场所,其大小体现了树木进行光合作用的面积和有机物传输的距离,决定了树木的生活力和生产力。树冠结构决定了叶片的排列、分布和林冠密度,进而影响光的截获、叶片温度、蒸发散、水分和养分分布以及碳同化与分布,同时树冠结构又是树木生长及其与环境相互作用、反馈调节的综合结果,也是经营措施对树木生长产生影响的具体表现。研究树冠结构是理解树木生理生态过程的基础,也是实现从叶片到林分不同尺度生理生态学过程转换的关键,对探讨林木的生长以及解释和估计经营措施对林木产生的效果具有重要意义。同时对于揭示林木产量及其生长机制、研究气候变化对树木生长的影响、建立以生理生态学过程为基础的模型、提高森林生态系统管理水平等都具有重大意义。

人们开始对树木结构特点的研究,最初的论述可以追溯到公元前3世纪古希腊时期的Aristotle和他的学生Theophrastus所做的一些相关研究工作^[3]。在19世纪以后,随着有关研究工作的不断增加,发展也逐渐加快。这个时期的研究主要集中在植物整体的观察、生长型的划分和植物体构造特点分析等方面。在20世纪四五十年代就有一些欧洲植物学家注意到了热带树木外貌与形态结构的多样性,结合传统的形态学和分类学对这些整体结构和外貌进行了初步的描述和分析。

20世纪70年代,关于树木结构的研究工作得到了迅速的发展。这个时期发表的一些论著,不仅对前人研究工作进行了总结,而且还开创了许多新的研究领域。1971年Zimmerman和Brown^[4]在其著作“Trees Structure and Function”中,对前人工作进行了系统的评述。他们不但将生长和形状特点联系起来进行了讨论,而且对树木生长和形状的固有格局及控制因素、形状的变异及影响因子、生长和形状的相关性等问题都进行了深入的探讨;尤其是有关树木结构对生长影响的论述,对以后树木结构的功能研究具有承上启下的作用,为植物结构的生理机制和功能的进一步研究奠定了基础。著名植物学家Halle和Oldeman^[5]在对热带树木近20年研究的基础上,1978年在美国植物学家Tomlinson的参与下,用英文出版了著作“Tropical Trees and Forests—An Architectural Analysis”,这部著作

被广泛认为是现代树木结构研究的新起点。它将全球的热带树木构筑模式分出 23 个基本类型, 编制出了热带树木结构的检索表, 对热带的一些重要树木进行了结构分析和描述。在这部著作中正式提出了结构的概念。他们从遗传和动态的角度, 将树木结构定义为“有机体生长和发育过程中基因的外在形态表现”。他们认为树木结构是具有动态特性的, 静态的结构特点只是其动态生长发育过程中的某个确定阶段, 而形体结构本身是一个决定着连续形体结构阶段的生长程序。这个概念的优点在于既考虑到树木结构的遗传性, 又将静态结构和动态过程有机地联系起来, 因此, 得到了广泛的承认和应用^[6]。

90 年代后, 美国著名林学家 Oliver 和 Larson^[7]出版了“Forest Stand Dynamics”一书, 他们不仅充分论述了枝条的生长发育格局和树冠形状特点, 而且对树冠和树木发育以及在生产上的应用等方面也都进行了详细的说明。荷兰著名林学家 R.A.A.Oldeman^[8]在“Forests: Elements of Silvolog”一书中以树木结构分析为基础, 系统全面地论述了它们在树木生长和森林经营中的重要作用, 这是迄今为止最重要、最权威的一部以树木结构分析为基础的森林经营学专著。

从我国的情况看, 虽然很早就注意到树木的形体结构对生长的重大影响, 并在树木形体结构的人为控制上取得了丰富的实践经验(例如果树修枝等), 但对树木结构的研究我国起步较晚。直到 20 世纪 80 年代以后, 有关树冠结构研究的重要性才开始得到逐步重视, 并且由于学科专业的不同, 人们对这些问题的认识途径和理解程度也不完全相同。在树冠结构特点对树木生长的影响, 以及树冠结构重要性的认识上, 主要来源于 Kramer 和 Kozlowski 的有关树木生理学和 Daniel et al 的森林经营原理等著作, 尤其是 1981 年以后, 这几部著作分别被译成中文, 更加推动了这些思想的传播, 使一些有关树木生长的研究工作注重和应用了树冠结构的特点^[9]。

90 年代后, 国内在树冠结构的专项研究上也做了大量工作。赵天傍(1990)^[10]通过对 1250 株 9 年生望春玉兰幼龄树的调查, 根据枝条分布状态、主侧枝多少、枝角大小和自然类型, 将其划分为疏枝型、密枝型和自然开心型等三种主要树体结构类型, 并研究了树体结构的成层规律、成层数与侧枝数分布规律、层枝数、棱角与光照强度的关系、枝量分布规律、冠层内叶片分布规律, 并就培养速生丰产树体结构提出了具体技术措施。祝宁和陈力(1994)^[11]对药用植物刺五加的构件和基本结构进行了统计分析。臧润国、蒋有绪(1998)^[12]简要叙述了热带树木构筑学的发展过程, 并介绍了热带树木的不同形成方式及构筑的主要要素, 并初步分析了热带树木的基本结构和热带树木结构的总体特点和基本规律。李俊清等(2001)^[13]在概述了树木构筑型研究的基础上, 系统说明了欧洲水青冈的构

筑型与形态多样性分析的步骤和意义。李凤日等(1996)^[14](2004)^[15,16]研究了长白落叶松的树冠形状、结构及林分动态。刘兆刚等(2005)^[17]对樟子松人工林树冠结构的分形进行了分析。

近几年一些学者从生理生态学角度开始对树冠结构进行研究,马钦彦(2000)^[18]等人对华北落叶松人工林的林冠结构、光合有效辐射分布规律进行了分析研究,试图通过对林冠结构、生长季中林内光合有效辐射日变化和季节变化的分析,为冠层辐射传输模型理论研究提供实测资料。徐程扬(2001)^[19]从冠形、侧枝和叶片在树冠中的空间分布角度对天然更新紫椴幼树的树冠结构进行了论述,认为紫椴幼树树冠对光照条件的变化有显著的可塑性响应。胡喜生(2006)^[20]对天然更新木荷幼苗光环境的影响的研究也得出了相同结论。

1.3 树冠结构的描述和模拟

无论是从生物生态学上,还是从树木生理机制上,树冠一直被认为是树木最重要的组成部分^[21]。这主要是因为组成树冠结构的枝叶是进行光合作用的重要器官,而且树冠的大小也直接反映了树木竞争能力及占有生长空间的大小。树冠结构是指树冠的整体构建结构,是树冠的总体外貌特征,包括冠形、分枝结构以及树体的组成部分——芽、枝、叶等的空间分布格局和枝、叶生物量构造组成及其配比结构等方面的内容。

研究树冠结构就是通过对组成树冠的各构件的大量统计,找出它们之间的相关关系,分析潜在的规律,进而描述和模拟该树冠的结构模型。树冠结构在不同的环境条件下会有不同的变化,也就是说,树冠结构是对其环境有一定的适应性的(Bell, 1979)^[22]。在20世纪70年代以后,随着对树冠结构研究工作的深入以及计算机技术的发展,有关树冠结构特点的描述和分析也由简单定性定量研究逐步向准确定量和精确模拟方向发展。

1.3.1 树冠形状

冠形能使人们对一棵树木的总体形象有一个最直观最明显的印象,因此,冠形不仅是树木分类学和树木形态学的一个重要组成部分,也是树冠结构分析中最常用到的一个要素。通过对不同条件下冠形变化的分析,人们不仅能认识一株树木的基本轮廓,而且还能了解树木对不同生态条件适应与变异的程度。

树冠形状常常分别从横断面和纵断面两个方面来研究。横断面形状是指树冠内部不同

高度处 H ($HCB \leq H \leq HT$) 的横断面形状, 一般情况下, 林分中的优势木或亚优势木各部位的树冠直径绕干轴是对称的, 近似为圆形; 但对于林分中的中庸木或被压木来讲, 树冠偏斜严重, 呈近似多边形或椭圆形。Mawson 等人 (1976) ^[23] 将树冠横断面分为圆形、椭圆形和三角形。许多学者对树冠的横断面研究大多采用简单的几何图形来近似地表示树冠形状。Wegar等在垂直于树干的上方, 用正方形表示树冠形状, 来对其进行简单描述^[24]; Kaltzler则采用的是椭圆形, 但与其他学者不同的是, 他所采用的不是一个简单的椭圆形, 而是由4个1/4的椭圆形来共同描述树冠形状的, 在树冠最宽处的上方和下方各用2个1/4的椭圆形对树冠形状进行表达。张思玉、胥辉(2001)^[25]则将树冠横断面看做是以东西长和南北长(冠长)为对角线的菱形, 但大多数学者则更倾向于将树冠形状视为圆形 (Mitchell, 1975^[26]; 猪濑光雄, 1982^[27], 1985^[28]; Biging和Wensel, 1990^[29], 刘兆刚, 2003^[30])。

树冠的纵断面形状, 多数学者认为呈抛物线体, 可用幂函数来表示(木尾原, 1975^[31]; 水永, 1992^[32]; 李凤日, 1995^[33])。也有人将树冠纵断面形状看做为非抛物线体等简单函数的立体曲面(Noda, 1982^[34])。姜志林等人^[35]则认为树冠冠形是随着年龄动态发生变化的, 不是一成不变的。他们在福建洋口和江苏宜兴地区调查研究了 3~23 年生杉木树冠的形态结构。发现杉木的树冠外形在幼龄、壮龄时期树冠近似圆锥形, 中龄时近似旋转抛物体形, 成熟龄时近似圆台形。

在冠形的描述上, 最初使用的都是二维的描述模型。有些学者在有关的研究中, 将树冠形状视为一些简单的几何体进行说明。其中较为主要的有 Horn(1971)^[36]对树冠横切面形状建立的二维描述方程, 得到了广泛的采用, 并在应用过程中衍生出其他一些类似的描述方法。直到最近, 还有人采用相似的方法建立树冠的二维描述模型。二维的树冠(体)描述模型, 虽然可以在纵切或横切面上给出树冠的基本形状特点, 满足视觉表达上的一些需要, 但它们不能对其树木生长动态有良好的表现, 故许多学者都在二维模型的基础上, 继续开展对树冠形状三维表达方式的研究。

最初步的三维模型, 是通过对二维的简单几何平面的旋转形成的, 这样构建的树冠模型实质上相当于用一些简单的几何体来表示树冠体, 其中最常用的是圆锥体, Satterlund(1983)、Hari (1985) 和 Mohren(1987)^[37~39]等人都使用过圆锥体表示树冠形状。Mawson 等人 (1976) ^[40]认为针叶树冠形主要由抛物线体构成, David W.Hann^[41]在研究花旗松树冠外形模型时, 将树冠分为上下 2 个部分, 在最大冠幅点以上部分认为树冠形状从圆锥形到抛物线变化, 在最大冠幅点以下树冠形状为圆柱体形状。但大多数学者认为阳树冠的表面形状呈抛物线体^[27,28,32,42]。从以往的研究结果上看, 针叶树大多具有圆锥体到二

次抛物体之间的树冠形状,阔叶树如白桦和栎树则趋于适用于二次抛物体和半球体(Koop, 1989^[43])。这些模型都是将树冠形状极为简单化的,虽然这样的描述有助于对一些问题的理解,但却不能完全真实地体现树冠结构的真实特点。Kajihara(1976)^[44]对 *Cryptomeria japonica* 人工林的树冠形态和维数进行了研究,认为树冠冠形由两部分组成,在林木树冠接触处以上的冠形为圆锥形,下半部分为圆柱形。李凤日(1996)^[45]针对落叶松人工林、Raulier(1996)^[46]针对黑云杉林分的研究也得出了相同的结论。Remphrey 等人(1987)^[47]研究了街道绿化树木的冠形特点,分为 3 种冠形,宽圆形、中间形、尖圆锥形。认为不同树冠冠形主要由顶端分生组织生长差异形成的。Hashimoto(1990)^[48]根据幼龄日本雪松枝条的特征研究了树冠冠形的变化,他得出结论光照环境是树冠冠形和结构变化的主要决定因子。还有许多学者根据不同的树木的属性因子直接应用回归方程预估树冠半径或冠幅(Mitchell 等, 1975^[26]; Baldwin 等, 1997^[49]; Hann, 1999^[50]; Gilmore, 2001^[51])。

在研究树冠大小与树木生长的关系中,冠形通常被假定符合某一种规则的几何体,直接量测冠幅和冠长。Hamilton(1969)^[52]采用圆锥体表示树冠冠形来计算西特喀云杉的树冠体积和树冠表面积; Takeshita(1985)^[53]假定树冠冠形为抛物线形状来分析日本雪松树冠体积和碳的同化作用。Maguire 和 Hann(1989)^[54]发现花旗松圆锥形树冠冠基部边材与外部表面积相关性比抛物线树冠冠形更紧密; Biging 和 Wensel(1990)^[29]通过建立方程来预估加利福尼亚北部 6 种针叶树种的树冠冠形,树冠体积由胸径、树高和冠长率非线性函数表示,由预估的树冠体积预估树冠内任意高度处累积树冠体积,通过积分变换预估表示树冠轮廓的树冠表面积和树冠横断面面积。

近几年有一些学者开始通过测量或考虑枝条的大小因子或分布格局来研究树冠的形状^[55]。Cluzeau 等人(1994)^[56]通过量测枝条变量因子(包括枝长、枝条着枝深度、枝条的水平投影和垂直投影距离)建立欧洲白蜡树树冠冠形模型,建立的树冠冠形预估系统用来描述白蜡树生长成熟过程中冠形由圆锥形向抛物线形状的变化。Deleuze(1996)等人^[57]应用不同密度的 4 株样木简单的树木变量因子(高生长和年龄)建立了欧洲云杉枝长和角度变化模型,以此来探讨树冠冠形受密度以及环境影响的动态变化; Randy 等人(1997)^[58]采用树木变量和树冠的着枝深度建立预估海岸花旗松枝条基径、枝长、着枝角度和树冠半径模型,拟合效果良好。李凤日(2004)^[15]以长白山地区 26 年生长白落叶松人工林为研究对象,采用枝解析的方法,测定了 25 株林木(直径 10.5 ~ 24.9cm)的树冠变量因子,并建立了预测树冠外侧形状的冠形模型,指出林木的胸径(DBH)和树高(HT)变量

能很好地反映不同大小树木的冠形变化。

1.3.2 分枝结构

枝条的分枝结构一直是树冠结构研究的重点。其中侧枝的分枝级数（数量）及其空间配置状态，不仅直接决定了树冠大小和形状，还影响着芽和叶的空间分布。另外，在综合反映树木生长过程和特性的树体形态结构生成模型的研究方面，树木的分枝结构作为最重要的树体形态生成和生长因子，在模型建造过程中具有极为重要的意义，其内容不仅涉及到侧枝数量、空间配置等静态指标，尤其重要的是要充分考虑到这些指标的时空动态过程^[59]。

植冠结构是植物光合生产力的一个主要决定性因素^[60]。由于枝条的伸长生长和分枝格局的建立最终决定了树冠的形状和叶的分布，因此，作为不同发育阶段的同质器官的芽和枝就成为高大乔木树冠形态建成的主要构件单元^[61]。根据 Maillette 和 J.L.Harper 等人的观点^[62,63]，树冠内的芽构成了一个具有出生和死亡特点的种群，该种群的不同存活状态决定着树木形体结构的特征，而该种群数量的动态变化，与植冠的分枝率密切相关。

关于分枝特性的研究人们更多主要关心的是农作物和果树产量与分枝级数及分枝率的关系，试图通过改善遗传特性或提高人工经营措施从机理上控制分枝级数来提高作物的产量^[64-66]。对于乔木树种，由于量测的方便，许多研究大多是基于幼树树冠分枝结构来进行的。Sylvie and Daniel (1999)^[67]根据 8 年生北非雪松为研究对象，探讨了芽的构筑位置对生长和枝条模式的影响；宋会兴等人 (2001)^[68]基于构件理论，对人工马尾松人工林苗木的分枝率动态进行了研究，认为马尾松树冠顶层对下层分枝率有明显的抑制作用。Laihuanlin 等人 (2002)^[69]也针对 5 年实生种子园马尾松的植株生长与分枝进行了详细的研究。

随着数学模型和计算机模拟技术在植物科学中的应用与渗透，有学者针对某些树木的分枝结构开展了模拟技术的研究，使树木结构的研究逐渐向量化和科学化发展。

树木的分枝结构在很大程度上决定了树冠形状及营养空间，因而对树木的生长、发育有着重大影响，对其深入研究不仅在理论上具有重要意义，而且对于了解树木各部位的生物产量，制定合理的丰产措施等都有指导作用。