



桉树土壤与 营养研究



Anshu Turang yu Yingyang Yanjiu

李淑仪 钟继洪 莫晓勇 廖观荣

林书蓉 蓝佩玲 廖新荣 著



广东省出版集团

广东科技出版社（全国优秀出版社）

桉树土壤与营养研究

李淑仪 钟继洪 莫晓勇 廖观荣 著
林书蓉 蓝佩玲 廖新荣

广东省出版集團
广东科技出版社
· 广 州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

桉树土壤与营养研究/李淑仪等著. —广州: 广东科技出版社, 2007.9

ISBN 978-7-5359-4257-9

I. 桉… II. 李… III. ①桉树属—土壤学—研究
②桉树属—植物营养—研究 IV. ①S792.39②S714

中国版本图书馆CIP数据核字 (2006) 第142024号

Anshu Turang yu Yingyang Yanjiu

责任编辑: 罗孝政

装帧设计: 陈维德

责任校对: C. S. H ZYX

责任印制: 严建伟

出版发行: 广东科技出版社

(广州市环市东路水荫路11号 邮码: 510075)

E-mail: gdkjzbb@21cn.com

http: //www.gdstp.com.cn

经 销: 广东新华发行集团股份有限公司

排 版: 广东科电有限公司

印 刷: 广州市岭美彩印有限公司

(广州市芳村花地大道南海南工商贸易区A幢 邮码: 510385)

规 格: 787mm × 1 092mm 1/16 印张18.75 插页4 字数400千

版 次: 2007年9月第1版

2007年9月第1次印刷

定 价: 108.00元

如发现印装质量问题影响阅读, 请与承印厂联系调换。

本书承

广东省科学技术厅资助出版

广东省优秀科技专著出版基金会推荐



广东省优秀科技专著出版基金会

广东省优秀科技专著出版基金会

顾问：钱伟长

(以姓氏笔画为序)

王 元	卢良恕	伍 杰	刘 杲
许运天	许学强	许溶烈	李 辰
李金培	李廷栋	肖纪美	吴良镛
汪家鼎	宋木文	宋叔和	陈元直
陈幼春	陈芳允	周 谊	钱迎倩
韩汝琦	焦树德		

评审委员会

主任：谢先德

委员：(以姓氏笔画为序)

卢永根	卢明高	伍尚忠	刘颂豪
刘焕彬	孙 玉	李宝健	张景中
张展霞	林浩然	罗绍基	赵元浩
钟南山	徐志伟	容柏生	黄达全
黄衍辉	黄洪章	彭文伟	傅家谟
谢先德	蔡荣波	欧阳莲	

前言

桉树生长迅速, 抗逆性强, 用途广泛, 受到全世界的重视, 发展迅猛, 已成为广泛引种和推广的速生丰产树种。据联合国粮农组织 (FAO) 的统计, 已有96个国家营造了桉树人工林600万 hm^2 以上, 约占世界人工林的1/3, 年木材生产量超过6 000万 m^3 。广东、广西是我国最早引种桉树的省份, 现全国已有10多个省份栽种桉树, 桉树人工林面积已达154万 hm^2 以上, 仅次于印度和巴西, 居世界第3位。巴西等国的桉树人工林产量是30~50 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 而我国的桉树人工林平均产量仅5~10 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 说明我国桉树在提高产量方面还大有潜力。桉树连栽和土壤管理不善引起的地力衰退问题日益严重, 给林业生产的持续发展造成威胁, 成为桉树速生丰产急需解决的问题。

近10多年来, 针对桉树人工林持续速生丰产, 林地土壤地力的维持与提高, 桉树对养分的需求量、人工林土壤类型及养分肥力现状、土壤科学管理与施肥等方面不断出现的新问题, 在广东省科技厅、广东省科学院及国营雷州林业局的资助下, 本课题组以雷州林业局桉树人工林基地为主要研究基地, 开展了包括“桉树施肥及土壤管理技术研究”、“雷州桉林—砖红壤水分循环特征及其调控”、“广东砖红壤磷肥防固定途径研究”、“桉树营养状况与叶片营养诊断研究”、“雷州半岛桉树施肥及人工林地生物改良试验研究”、“桉树人工林地力衰退防治技术研究”、“桉树林农复合经营研究”、“桉树系列专用肥研究”、“桉树施用微量元素技术研究”及“雷州林业局土壤普查”等内容的一系列研究; 较系统地探讨了雷州桉树人工林土壤类型和理化性质, 土壤养分和水分循环特点及调控技术, 立地土壤退化现状和成因及防治技术措施, 桉树营养特点、吸收分布规律和对养分需求量及比例, 桉树大量元素和微量元素营养诊断; 取得了桉树叶片中各大量营养元素和中微量元素的临界浓度和适宜浓度值, 氮、磷、钾DRIS诊断参数和指数; 建立了桉树叶片营养的大量元素和中微量元素诊断指标; 总结了桉树缺乏微量元素的形态症状; 揭示了N、P、K三要素施肥与立地、树种、肥料品种的关系及施肥对桉树生长和土壤肥力的作用; 提出了在浅海沉积物砖红壤地区施用微量元素肥料不仅可使刚果12W₅桉、尾叶桉、尾X细杂交桉, 桉树生长量大幅度提高, 还可防治桉树缺素生理病以及玄武岩土壤区桉树人工林土壤中的有效磷不仅与土壤中活性铁关系密切且与活性锰的关系更密切的论点, 提出防治桉树缺素生理病和提高桉树磷肥利用率的新技术, 建立桉树施肥管理的技术体系。

本专著是上述科研工作的系统总结。编写人员分工为: 第1章, 李淑仪、廖观荣、莫晓勇编写; 第2章, 廖观荣、莫晓勇、钟继洪编写; 第3章, 廖观荣、钟继洪编写; 第4章, 钟继洪、廖观荣编写; 第5章, 廖观荣、钟继洪编写; 第6、9章, 林书蓉、李淑仪编写; 第7、8章, 李淑仪、林书蓉、廖观荣编写; 第10章, 李淑仪、莫晓勇编写。全书由李淑仪、钟继洪统稿。

本专著是集体劳动成果, 参加相关研究工作的还有广东省生态环境与土壤所的蓝佩玲、廖新荣、徐胜光、骆伯胜、郭庆荣、谭军、林美莹、何小霞等, 国营雷州林业局的杨国清、王尚明、赵贵、简明、卢建等。本书承蒙广东省优秀科技专著出版基金的鼎力资助; 广东省科学院、广东省生态环境与土壤研究所、国营雷州林业局历届领导对我们的科

研究工作一直给予支持；广东省生态环境与土壤研究所许多化学分析人员、图书资料管理人员、业务和行政管理部门人员，雷州林业局的许多干部、职工，对有关研究工作的完成也给予了很大帮助。在此，我们谨对所有帮助过我们的领导、师长、同事、朋友致以衷心的感谢！

限于作者水平，书中难免有错误和不足之处，恳请读者批评指正！

作 者

2006年11月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 桉树人工林可持续发展的意义	1
1.2 我国桉树人工林立地土壤问题研究概况	2
1.3 桉树营养与施肥技术的发展	5
第2章 桉树人工林土壤及其特征	13
2.1 成土条件与成土过程	13
2.2 土壤分类与分布	18
2.3 土壤类型及其基本特征	23
2.4 桉树人工林土壤养分肥力评价	43
2.5 结语	55
第3章 桉树人工林土壤退化及其防治	57
3.1 桉树人工林土壤退化现状	57
3.2 桉树人工林土壤退化特征	59
3.3 桉树人工林土壤退化的成因	64
3.4 桉树人工林土壤防退化的对策	68
第4章 桉树人工林土壤水分循环与平衡	77
4.1 土壤水分对桉树生长的作用	77
4.2 桉树人工林的水文效应	82
4.3 桉树人工林土壤水分循环特征	91
4.4 桉树人工林土壤水量平衡及其调控	95
第5章 桉树人工林生态系统养分循环与平衡	99
5.1 桉树人工林生态系统内的养分贮存	99
5.2 桉树人工林生态系统的养分循环	105
5.3 桉树人工林生态系统的养分平衡	112
5.4 桉树人工林间种山毛豆对生态系统养分循环和平衡的影响	116
5.5 桉树人工林间种山毛豆对土壤肥力和林木生长的作用	120
第6章 桉树的生长特性与营养特性	124
6.1 桉树生长与土壤条件	124
6.2 桉树营养基本物质	127
6.3 桉树不同树种的营养特性	146
6.4 桉树不同树龄的营养特性	147
6.5 立地土壤与桉树营养的关系	151
6.6 桉树叶片中各营养元素间的相互关系	153
第7章 桉树营养元素的功能和分布转移及其营养调节	156

7.1 营养元素在桉树中的生理机能及其分布与转移	156
7.2 桉树的营养调节	169
第8章 桉树需肥诊断研究与实践	198
8.1 桉树营养元素缺乏的症状	198
8.2 桉树养分含量水平诊断	203
8.3 桉树人工林的土壤养分水平诊断	218
第9章 桉树合理施肥与营养失调的矫正	226
9.1 桉树施肥的特点	226
9.2 桉树施肥量和元素比例	234
9.3 桉树施肥方法	261
第10章 提高桉树磷肥利用率原理和方法	264
10.1 提高磷肥利用率的基本技术	264
10.2 提高桉树人工林磷肥利用率的机理	266
10.3 活化剂提高磷肥利用率的效果测定	275
10.4 桉树施用活化磷肥的增产效果实例	275
参考文献	284

第1章 绪 论

1.1 桉树人工林可持续发展的意义

桉树 (*Eucalyptus*) 属桃金娘科, 是桉树属的统称, 原产澳大利亚和帝汶岛, 自然分布于大洋洲大陆及华莱士线以东的太平洋岛屿, 但不包括新喀里多尼亚和新西兰 (Pryor, 1976)。桉树是世界著名的速生树种, 以其适应性强、容易繁育、用途广泛、经济价值高而为许多国家和地区引种栽培。

我国引种桉树始于1890年, 现已有17个省、市、自治区引种栽培, 主要集中于北纬23°以南的热带、亚热带地区, 即广东、广西、海南、福建、四川、云南等省区, 面积总计154万 hm^2 (刘寿坡等, 1997; 朱成庆等, 2005), 在世界上仅次于印度 (480万 hm^2)、巴西 (362万 hm^2), 是第三植桉大国。

在过去的几十年里, 全球林业经营目的发生了根本性变化, 首先是林业经营的主要目的从生产林产品转变成首先为社会提供各种服务, 其次才是生产林产品。天然林的经营不再是生产木材, 木材生产由过去的开采天然林转变为经营人工林。天然林对保护日益衰退的全球生物多样性起着关键的作用, 而天然林破坏后, 大量 CO_2 的释放将加速全球气候变暖。我国林业经营同世界林业发展趋势一样, 发生同样的转变。我国天然林所剩无几, 这些残存林分经营的主要目的将是生物多样性的保护, 而不是木材生产。东北林区由于过去不断开采, 所剩资源不多, 同时由于气候和树种特性所限, 木材生产能力有限。三北地区林业经营的主要目的是保护生态环境, 而不是生产木材。黄河流域以北林业经营的主要目的是涵养水源, 减少水土流失, 绝对不能是生产木材。整个西南和长江中上游流域, 林业经营的主要目的也是为该流域涵养水源, 减少水土流失和改善生态环境。最后, 剩下南方林区和华南沿海地区, 将不得不挑起为国民经济和人民生活提供木材的重担。桉树人工林因其轮伐期短, 产量高, 适于集约化经营, 在为国家提供木材的任务中起着重要的作用。

1.1.1 桉树是造纸的重要原料, 巨大的市场需求要求桉树人工林可持续发展

据报道, 我国年人均纸张消费已从1980年的6 kg增加到1996年的25 kg (徐大平等, 2000)。1995年我国的纸产量为2 400万t, 同年还进口纸类302万t。假如我国纸张人均消费与经济同步增长, 比较保守的估计, 到2015年我国年人均纸张消费将达到100 kg (日本现在年人均消费238 kg), 全国将消费1.6亿t。假如70%的原料来自废纸再循环和草浆, 还需约5 000万t纸浆, 需要1.5亿~2.5亿 m^3 的木材, 相当于我国目前的木材年采伐量。除国内市场外, 出口日本、韩国运输费用也较便宜, 具有一定的地理优势。巨大的市场需求要求桉树人工林发展走可持续发展的道路。

1.1.2 桉树人工林可持续发展, 是桉树人工林发展的必然选择

我国大规模发展桉树人工林是近几十年的事, 主要分布在热带、亚热带滨海台地、丘

陵山区和部分严重退化了的土地,面积很大,产量却很低。我国桉树人工林平均产量为 $5\text{ m}^3/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,高产林分为 $10\text{ m}^3/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$,远低于其他热带、亚热带国家的平均产量 $[20\text{ m}^3/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$,与巴西、南非、刚果和澳大利亚一些商业性经营桉树人工林的平均产量 $[30\sim 50\text{ m}^3/(\text{hm}^2\cdot\text{a})]$ 更是不能相比(徐大平等,2000)。我国桉树人工林多代经营后产量严重下降,已是不争的事实。在雷州半岛的桉树人工林2、3、4代木材蓄积量比第1代分别下降20.9%、38.7%和50.5%,生物量分别下降19.6%、26.7%和44.6%(余雪标,2000)。我国桉树人工林平均产量低及产量严重下降的原因主要是林地原有土壤肥力较低,在经营中又有相当长的一段时间采取了掠夺地力的经营方式,导致土壤肥力严重退化。我国桉树人工林近几十年来发展的事实已经证明,走可持续发展的道路才是桉树人工林发展惟一正确的道路。

1.1.3 桉树人工林可持续发展,是当今人类社会发展的要求

人类社会进入21世纪,科学技术迅猛发展,人类创造了辉煌的物质文明。但令人遗憾的是,在科学技术和经济发展的同时,肆意掠夺自然资源,破坏生态环境,使人类自身的生存环境受到了威胁,陷入了今天的困境。1972年联合国召开“人类环境会议”,在《只有一个地球》的报告中,提出了“可持续发展”的思想。1987年,世界环境与发展委员会(WCED)在《我们共同的未来》报告中系统地提出了可持续发展战略,并把可持续发展定义为这样一种模式,它既能满足当代人的需求,又不损害后代人满足他们自身需求的能力。1992年联合国在巴西召开第二次世界环境与发展大会,制定了《21世纪议程》。之后,各领域各行业相继提出了本行业可持续发展的概念。中国政府1994年发布了《中国21世纪议程——人口、资源和环境白皮书》,承诺把可持续发展作为国家发展的战略国策。在1997年第11届世界林业大会上,把“森林的可持续发展,迈向21世纪”作为大会的主题。林业可持续发展,已经成为各国的共识。

国内学者认为林业可持续发展有广泛的内涵。比较有代表性的概括是,林业可持续发展既要保持林业物质生产的持续增长,又要维持并不断改善社会对森林生态环境不断增加的福利性要求,即要满足当代人对林业的需求,更要考虑子孙后代对森林环境和林业物质生产需要的延续。桉树人工林是林业的重要组成部分,因此,桉树人工林的发展,必须以现代科学技术为基础,以持续增长的生产率,持续提高的土壤肥力,协调的森林生态环境和木材生产为目标,这是当今人类社会发展的要求。

1.2 我国桉树人工林立地土壤问题研究概况

我国引种桉树虽有100多年的历史,但在1949年以前,只有小规模引种试验及小面积的作为行道树、庭园观赏、“四旁”绿化的树种。建国后,为适应国家积极发展热带及亚热带经济作物与合理利用土地资源的需要,由华南垦殖局组织中国科学院有关研究所于20世纪50年代初进行海南岛、广东西南部和广西东南部的土壤调查,发表了多篇土壤调查报告(何金海等,1958;赵其国等,1958)。在上述调查区内,土壤肥力较高的荒地后来建成了许多国营橡胶农场,而土壤肥力较低的荒地则划归林业部门管理。国营雷州林业局从1954年建场,开创了我国大面积营造桉树人工林的历史,至2000年已发展到 4.9万 hm^2 ,成为我国最大的桉树工业用材林基地之一。

我国自20世纪50年代初开始大面积营造人工林,到80年代把大面积营造速生丰产林作为解决木材不足的战略任务之一。人们对造林不仅提出适地适树的要求,而且提出适地适品种的要求;同时要求提高选地精度,预测生产力和评估宜林地资源,以便对发展人工林,特别是速生丰产林做出正确的决策,在这个基础上逐步发展了森林立地分类与评价(张万儒,1997)。土壤性质与林木生长有十分密切的关系,因此,土壤是森林立地分类与评价的重要依据。在许多树种的土壤—立地关系研究中,揭示了土壤、地形和气候特征与立地质量之间的变化趋势,其中最重要的土壤特征是土层厚度(尤其是表土层厚度)、质地和排水状况。森林立地分类与评价的研究,为桉树人工林发展解决适地适树的问题,起到了指导作用。近年来,有关桉树生长与立地土壤因子关系的研究方法上有新的进展。吴继林(1999)采用相关分析和逐步回归分析方法研究闽中巨桉与土壤因子之间的关系,结果表明:制约巨桉人工林生长的主导因子为土壤田间持水量、有效锌、有效铁及有效磷。刘金福等(2001)采用人工神经网络方法,研究闽南山地巨尾桉生长的土壤主导因子,建立了巨尾桉生长与土壤主导因子关系的BP调控模型,结果表明:限制闽南山地巨尾桉速生丰产的土壤主导因子为土壤毛管持水量、腐殖质层厚度、土层厚度及有效磷。

我国最早大面积发展桉树人工林的雷州林业局,由于一直经营桉树纯林和土壤管理不善,导致土壤肥力不断下降,桉树生长一代不如一代,给桉树人工林的可持续发展造成了威胁。为了探讨桉树人工林地土壤肥力不断下降的原因,研究防治办法,雷州林业局和广东省生态环境与土壤研究所于1989年和1999年分别组织了桉树人工林土壤概查和桉树人工林土壤普查,对桉树人工林地土壤类型、性质和存在问题进行了细致的研究,提出了解决办法(林书蓉等,1995)。桉树人工林地力退化的原因,主要是桉树人工林生态系统本身的脆弱性,严重的水土流失以及在人为因素干扰下不合理的经营(凋落物不能回归土壤、全树利用、耕垦影响、养分收支失衡等)(余雪标等,2000;廖观荣等,2001,2002)。为了解决桉树人工林土壤退化问题,许多单位进行了多方面的研究,以增加桉树人工林生态系统生物多样性、提高系统的稳定性为目的,进行了桉树与固氮树种混交(肖文光等,1999b;杨曾奖等,1995;Dean S. deBell et al, 1989)和桉树人工林间种山毛豆、柱花草、菠萝等试验研究(廖观荣等,1995;黄锦龙等,1995;陈北光等,1995),均取得了明显效果。尤其是桉树与固氮树种混交,有可能从根本上解决桉树人工林土壤肥力退化问题,而且在经济效益上也优于桉树纯林(肖文光等,1999a;吴学士等,1995)。

整地是桉树人工林前期土壤管理的重要内容之一。雷州林业局桉树造林整地在20世纪50~60年代主要为牛耕、人垦,70年代为机耕全垦,80年代以后,经过多年生产实践总结出比较符合雷州实际的造林整地方式:机耕全垦深度达25 cm,再开植树沟,并在沟中开穴,规格为40 cm × 40 cm × 30 cm。这种整地方式对清除杂草,疏松土层,为桉树前期生长创造了较好的土壤环境,但加剧了水土流失,不利于创造良好的土壤结构等。为了克服上述负面影响,雷州林业局在部分林场试行改全垦为带垦,用自行设计的TLC-E型桉树头专用犁,在完成犁树头作业的同时完成带垦作业,大大提高了劳动效率,降低了生产成本(陈谭富等,1995),而且对减少水土和养分流失,改善土壤物理性状也有良好作用(廖观荣等,2001)。90年代后期,雷州林业局试行深松犁整地方式,既不要翻动表土,又可疏松土层,为此提供了一个两全其美的手段。除雷州林业局外,其他地区的整地方式也有报道(杨民胜,1997;吕月宝,2000),滨海平原、台地、低丘以人工挖树头后机耕全垦、开

沟造林为主,地势较复杂的丘陵低山难于采用机械整地,多采用人工挖大穴(80 cm × 80 cm × 50 cm)整地,或撩壕整地(沿等高线人工挖宽60 cm、深40 cm壕沟),回土后苗木定植在壕沟中间。对不同整地方式对桉树生长及经济效益的影响研究表明:不同整地方式对3~7年生林分在树高、胸径、蓄积量生长均呈极显著差异,机耕全垦整地方式对尾叶桉生长的促进作用明显优于人工挖穴,达到7年生轮伐期时,生长量排序为:机耕2次>机耕1次>人工挖穴;经济效益分析排序为:机耕1次>机耕2次>人工挖穴(徐建民等,2001)。但也有研究表明(杨曾奖等,1996):全垦、带垦和穴垦的整地方式对尾叶桉造林成活率和保存率均无明显影响,成活率为95%~98.8%,保存率为92.1%~97.7%;整地能改变土壤性状,如土壤孔隙度全垦为57.88%,穴垦为49.42%;对林木生长有促进作用,但效果很快减少,造林3年后的材积全垦、带垦分别为穴垦的136.4%和120.0%,5年后分别下降到116.5%和108.3%。

幼林抚育是桉树生长阶段土壤管理的主要内容。雷州林业局根据多年的实践经验,在造林后半年进行人工除草松土一次,松土深度为15 cm,并结合施肥;在造林后第2、第3年,分别机耕抚育一次,方法是按行间全部犁通,深度20 cm,同时结合施肥(杨民胜等,1997)。采取幼林抚育措施,可促进幼林生长,缩短轮伐期,提高经济效益。桉树人工林后期持续经营试验研究证明:4年生桉树人工林中耕、追肥对桉树后期生长有显著影响;中耕作用大于追肥,机械行间开沟比人工开沟增产显著(陆钊华等,2000)。

林地土壤肥力是决定桉树速生丰产的基本因子。茶正早等(2000)根据海南岛不同土壤类型桉树人工林的土壤肥力对桉树材积生长量影响的调查结果,用回归方程表达土壤养分参数对桉树叶片营养状况及桉树林分立木材积生长量影响的关系,提出了桉树速生丰产[材积生长量达到 $18 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]的土壤肥力指标,可作为指导桉树施肥和土壤管理的参考依据。不同土壤类型和不同桉树品种,应有不同的土壤肥力指标,进行这方面的深入研究对推动桉树速生丰产林的发展将有重要意义。

林地土壤肥力评价是一个复杂的过程,是科学造林、充分利用土地生产潜力、实现对现有森林资源进行科学管理和制定营林规划必备的基本手段。桉树林地土壤肥力评价方面论述还未见报道。廖观荣等(2000)在进行雷州林业局土壤普查时,对桉树林地土壤分析取得大量数据的基础上,采用主成分分析和因子分析等统计方法,研究各种营养元素对土壤肥力的累计贡献率,同时选择调查采样点林班的桉树林分年均立木材积量进行逐步回归和通径分析、灰色系统分析,综合考虑各土壤养分指标对土壤肥力和桉树生长量的贡献,根据其作用大小选择有代表性的土壤pH值、全氮、全磷、全钾、有效钾、交换性镁、有效铜和有效硼等8项指标,作为土壤养分综合肥力分析的指标;最后,采用模糊等价关系矩阵分类,将土壤肥力分等定级,将雷州林业局桉树人工林土壤分成5个肥力等级。实践证明,雷州林业局土壤肥力等级划分的结果是符合实际的,得到各林场领导和生产部门的认可。自2001年起,雷州林业局开始实施“小班经营法”,以小班土壤肥力等级为主要依据,确定小班的目标产量和投资水平,取得了较好的效果。

近十多年来,人们对桉树人工林生态系统养分循环和平衡的研究给予了愈来愈大的关注(徐大平等,1994,2000;李跃林等,2001;林德喜等,2002;廖观荣等,2003)。这是因为林地养分平衡状况,一方面从根本上决定着林地土壤肥力的发展方向,而土壤肥力又是桉树人工林可持续发展最基本的物质基础;另一方面,人们愈来愈重视林业生态系统养分循环和平衡对人类生活环境的影响。这方面的研究,为桉树人工林施肥和防治地力衰退

提供了科学依据,其理论价值和生产实际意义重大。深入了解桉树人工林生态系统养分循环特征,提高人类在调控养分循环方面的自觉性,使养分循环和平衡向着有利于桉树人工林可持续发展,这就是研究养分循环和平衡的根本目的。

1.3 桉树营养与施肥技术的发展

1.3.1 桉树营养状况研究

自从1843年Liebig提出“最低养分律”,即决定作物产量的是土壤中相对含量最低的植物有效养分含量这一规律以来,农作物和果树营养状况的研究已有大量报道,但对桉树营养状况的研究,国内一直极少报道。20世纪60年代初有柠檬桉苗期矿质营养试验的报道,80年代澳大利亚J. A. · 西姆森在广西东门林场进行桉树施肥试验时,做过桉树叶片的养分分析。80年代中期,周文龙等(1987, 1994)进行了桉树苗期和幼林施肥试验,结合桉树施肥试验对幼林叶片进行养分分析,同时对幼林个别植株出现的缺素症状进行土壤和叶片分析。90年代以后,桉树营养状况的试验研究逐渐增多,李淑仪等.(1996, 2003)结合桉树叶片营养诊断研究,研究了雷林1号桉(*Eucalyptus leizhouensis* No.1)、尾叶桉(*E. urophylla* S. T. Blake)和柠檬桉(*E. citriodora* Hook. f) 1年生和3年生植株不同器官养分浓度差异和变化趋势及其养分积累量。从桉树人工林生态系统的角度研究了尾叶桉、巨尾桉(*E. grandis* × *E. urophylla*)、刚果12号桉(*E. 12 ABL*)等树种的营养元素积累、分布、生物循环和平衡。通过桉树微肥施用试验,并应用化学分析和生物统计对桉树微量元素功能进行了研究,结果表明:尾叶桉叶片不同种类微量元素间大多有显著的正相关性,与磷、钾、钙、镁等大中量元素含量也呈显著的正相关;刚果桉叶片不同种类微量元素间大多无显著的相关性,与磷、钾、钙、镁大中量元素间也无显著相关性,但刚果桉叶片铁、铜、锰等微量元素与氮素呈显著正相关,对促进氮素吸收有积极影响,叶片微量元素含量与桉树材积均有显著的正相关和二次回归表达式的关系,但树种差异对微肥施用效果有一定的影响。在尾叶桉上施用不同种类的微肥效果相对均衡,材积增长量大致相当,并随着树龄的增长,微肥施用效果有增强的趋势。在刚果桉上微肥施用当年对生长有较大的促进作用,施硼肥效果明显好于铜、锌、铁、锰、钼等微肥,但随着树龄的增长,微肥施用效果并未增强。仲崇禄(1996)通过巨桉苗期矿质营养试验,用营养液培养的方法证明了N、P、K、Ca、Mg、Cu、Zn、Mn、B、Co、Mo、Na、Fe等元素为桉树生长所必需的营养元素。此外,尚有不少研究积累了田间桉树人工林营养缺乏症状的资料,对桉树缺乏大、中、微量元素所表现的症状作了较系统的描述(李淑仪, 2001; Malajczuk, 2000)。根据发表的文献,近十多年来桉树营养状况研究的进展可归纳为以下几方面:①从桉树植株的营养状况扩大到桉树人工林生态系统的养分循环;②从常量元素扩大到微量元素;③加强了指导生产的研究,例如桉树1号专用肥和2号专用肥的成果应用,仅在雷州林业局就累计推广了126 202 hm²。

1.3.2 桉树营养诊断研究

桉树营养诊断是预测、评价肥效和指导施肥的一种综合技术,包括缺素症状诊断、土壤分析、叶分析、盆栽试验和田间试验等。田间试验无疑是评价桉树生长潜力最可靠的方法。

法,但它要求技术熟练,调查面积大,确定肥效反应的时间长,所需成本也高(Timmer, 1984)。而叶分析成为桉树营养诊断最有前途的手段(Stone, 1973),目前流行的方法主要有DRIS法、临界值法和向量分析法(陈竣等, 1998)。近年来,加拿大人Khiari等应用营养组成诊断法(Compositional Nutrient Diagnosis, 简称CND)对玉米和马铃薯等作物进行营养诊断,并与临界值法和综合诊断施肥法比较,取得一系列营养诊断指标(Khiari, 2001a, b, c)。

我国桉树营养诊断研究起步较晚,直到最近十多年来才有报道。叶分析(叶片营养诊断)是通过测定叶片中营养元素含量来评价植株营养状况的一种方法,它以叶片中养分浓度和树木生长量间已知的相关性为基础。自1926年Lagatu和Maume首先提出叶片营养诊断的概念起(Everad, 1973),该法已有70余年的历史,但应用于树木营养诊断只有20多年,在桉树上应用则时间更短。对叶分析结果的解释,常用的方法有临界浓度法和最适浓度法(Bouma, 1983; Leaf, 1973)。临界值法(Critical Value Approach, 简称CVA法)是把叶片中的养分浓度和施用不同数量肥料后植株的反应联系起来,建立生长量或产量与叶片养分浓度的抛物线回归方程,并绘图;方程中生长量极值相应的养分浓度即为最适值,最高理论产量90%相应的养分浓度为临界值。用临界值养分浓度标准诊断林分的营养状况具有简单、直观的优点,但未综合考虑养分因子之间的交互作用,当几种养分都低于临界值标准时,仅比较养分浓度很难正确判断哪个养分是最关键的限制因子(陈道明等, 1996);同时往往受立地和林龄变化的影响,也未能诊断出需肥顺序(李淑仪, 1996; 李尚弟, 1999)。1973年Beaufils提出了诊断施肥综合法(Diagnosis and Recommendation Integrated System, 简称DRIS法),DRIS法的理论是依据养分平衡原理,当养分浓度恰当和保持适当平衡时可获得最佳生长量。该法按材积大小将调查桉树分为高产组和低产组,对高产组和低产组的桉树叶片的N、P、K浓度的不同表现形式(N、P、K、N/P、N/K、P/K、P/N、K/N、K/P、NP、NK、PK)进行统计,计算每种形式的平均值、标准差、变异系数、方差以及高产组和低产组的方差比。根据方差显著性,确定哪些表现形式为计算DRIS的重要参数。一种元素与其他元素的比值存在一个最适值,实测比值距最适值越近,说明养分越接近平衡。其最适值来自当地高产或健康群体叶分析元素比值的平均值。植物必需元素多达十几种,一种元素就有与另外十几种元素平衡的问题。DRIS法不强调把所有元素都用来考察,假如高产群体中的某两种元素比值变异程度很大,说明这两种元素的平衡不重要,可以忽略,而只把变异程度较小、比较重要的比值加以考察。这种变异程度的大小以相对应的低产群体变异程度来衡量,通过统计学上差异显著性检验,以确定某两种元素比值是重要的或不重要的。DRIS法的优点在于可以对作物营养元素的需求顺序进行判断,而且判断结果不受植株年龄、品种及采样部位的限制。大量研究表明,这种诊断方法的准确性大于目前普遍采用的临界值法(Jones et al, 1981)。虽然DRIS法被认为是临界值法的改良,但由于其指数与矫正营养缺乏的补充施肥之间关系不密切,如要把DRIS法用于指导施肥,还必须与临界值法相配合,或采用其他结果综合考虑(黄宗玉, 1990; 李淑仪, 1996)。

20世纪80年代中期,桉树叶片营养诊断尚处在摸索阶段,没有统一的或系统的研究方法,并缺乏可靠的诊断参数或营养诊断标准。周文龙等(1994)在尾叶桉施肥试验中,将出现严重缺素症状的叶片分析结果与最佳施肥处理林分叶片分析结果进行比较,发现N、P是影响尾叶桉幼龄林分生长的限制因子,而反映在叶片中的养分含量与土壤的养分供应量

十分吻合。对叶分析而言, 采样时间、部位、方法等均至关重要, 最适宜的采样时间应在树木对立地差异最敏感的时期, 即一年中树木变化最大的时期(李贻铨, 1991)。90年代中期, 李淑仪等(1997, 2003)研究了雷林1号桉、尾叶桉和柠檬桉叶片营养诊断的采样时间和诊断方法, 用临界值法和DRIS法诊断桉树施肥“中试”区的营养状况, 提出了上述3个树种营养诊断的最佳采样时间和N、P、K的临界浓度及最适浓度范围; 作为叶片营养诊断, 临界值的作用大于最适值; DRIS法诊断结果与临界值法基本一致; DRIS法的特点是可对养分需求顺序和营养平衡状况作出判断, 但在某种养分相对不足或过量时可能出现误诊, 同时该法的指数与施肥量没有必然联系, 故宜两法并用以提高确诊率。林钊沐等(1999)在研究桉树营养诊断指导施肥中, 确定了刚果12号桉适宜的采样时间和部位, 根据桉树叶片的养分含量及其比值与材积生长量关系的多元回归方程式推算, 提出桉树丰产的叶片养分指标。黄宗益等(1999, 2002)采用临界值法对尾叶桉幼林材积生长进行叶片营养诊断, 提出了氮、磷、钾、钙、镁、硼等营养元素的临界浓度和最适浓度范围; 试验还得到各营养元素比值的临界值和最适范围。李尚弟等(1999)应用相关值法、DRIS法和临界值法对尾叶桉进行营养诊断, 结果表明: 临界值法受立地、林龄变化的影响较大, 对尾叶桉各林龄的养分诊断不全面, 也未能诊断其需肥顺序; DRIS法同样受立地和林龄变化的影响, 且需要建立各种立地和林龄的高、低产林分的大量样本参数的数据库, 工作量和经济开支大, 难于在林木营养诊断方面普遍应用; 林木相关值营养诊断法不受立地和林龄的影响, 能全面诊断出尾叶桉各生长期对各养分的需求及需肥顺序, 比上述两种方法更能准确地诊断出最适施肥量, 而不会出现误诊。用土壤和叶片养分的相关值结合诊断, 其结果更为全面和准确, 该法简便易行, 只需4组以上数据(4个重复)就可进行诊断, 是林木营养诊断较好的方法。

总的看来, 营养诊断在定向培育短周期工业用材林中将起到重要作用, 但营养诊断在指导林地施肥方面尚未充分发挥作用, 主要是已有的诊断方法存在一些技术问题(李贻铨, 1991)。林木营养状况, 除受养分元素本身的影响外, 还受环境因子和林木生长的影响, 同时研究的人为因素如研究区域、采样数量、分析方法和研究手段等都影响着林木营养诊断标准的可靠性。树木、土壤养分在时空上的变异, 是准确诊断的难点。以叶诊断为例, 一年内不同季节、一天中不同时间、不同树龄阶段以及不同树冠部位和不同叶龄均有较大的变异。我国现有的一些营养诊断标准只是一种局部的结果, 要提出一个树种的营养诊断标准还有大量的系统工作要做。为了有效地指导施肥, 今后应开展系统施肥网的定位营养诊断研究, 从而建立叶分析数据库, 通过大量的信息积累, 建立营养诊断标准和模型, 为林分管理提供有力而可靠的技术支持, 这无疑是现代林业管理的重要标志之一(陈峻等, 1991, 1998)。

1.3.3 桉树施肥试验

植物营养与施肥研究始于19世纪末, 特别是1840年Liebig矿质营养学说的诞生促进了化肥工业的发展和化肥的使用。1930~1960年, 北美各国及澳大利亚和日本等开始森林施肥试验研究(Baule et al, 1970), 到20世纪50~60年代, 林地化肥施用有了较快发展(李贻铨, 1991)。第二次世界大战后, 因经济的恢复和发展, 对木材需求不断增加, 化肥成本的降低, 短轮伐期和全树利用等集约经营技术的出现, 使林木施肥成为营造速生丰产林的一种必不可少的基础技术措施。我国从70年代中期开始林木施肥试验和生产性施肥, 桉树施肥

试验也从此开始,但由于经济和技术条件以及历史背景等原因,进展十分缓慢,试验断续地进行,仅取得一些零星的资料,80年代中期以后开展了较系统的试验研究,并取得了较大进展。从发表的文献来看,主要集中在桉树幼林期施肥试验,桉树苗期施肥试验有3篇,树种则主要集中在尾叶桉及其无性系MLA,也有少量巨桉(*E. grandis* Hill ex maiden)、巨尾桉、刚果12号桉及其无性系W₅、柠檬桉、赤桉(*E. camaldulensis*)、蓝桉(*E. globulus* Labill)、雷林1号桉等树种的施肥试验报道。现将桉树施肥试验取得的结果和进展综合如下:

1.3.3.1 肥料种类及施肥量

许多桉树肥料试验(周文龙,1987,1994,1995;陈竣等,1998;林书蓉等,1998,1999;欧阳权,1992;李宝福,2000;吴晓芙,2002;梁南坤,1999,2002;陈少雄,1995;肖文光,1998;黄毓雄,1999;杨曾奖,1999,1997;陈代喜,1995;伍春魁,1995;黄龙杰,2002;何蓉,1999;曾芳群,1995;江松远,2002;Simpson,1989;黄秀美,2001)证明:桉树施肥应N、P、K配合施用,而单施N、P、K无显著肥效,甚至产生负效应。在浅海沉积物砖红壤上尾叶桉施肥试验结果说明,N、P、K全肥施用,材积生长量最大,在P、K肥基础上不施N,以4年龄计,材积生长量只有N、P、K全肥的67%,不施P的是全肥的42%,不施K的是全肥的28%,三大元素的施肥效应是 $K > P > N$ (林书蓉,1998,1999)。在砂岩坡积物赤红壤上,尾叶桉幼林的施肥效应是 $P > N > K$;N对高生长所起的作用大于P、K,而P、K对胸径、材积生长所起的作用大于N,它们的最佳配比($N : P_2O_5 : K_2O$)为2:3:1(周文龙,1995;陈代喜,1995)。而在同类土壤上另一试验的正交分析表明,尾叶桉各生长指标对N、P、K的敏感大小顺序归纳为:树高K、N、P,胸径K、P、N,材积K、P、N,尾叶桉树高、胸径和材积生长均对K素比较敏感,与土壤缺K密切相关(梁坤南,2002)。在花岗岩赤红壤上巨尾桉的施肥效应为 $P > N > K$ (陈少雄,1995;伍春魁,1995)。在石灰岩红壤地区,磷肥也是蓝桉增产的主要因素,经N、P、K对生长量贡献率分析,P对树高和胸径生长的贡献率分别为83.78%和63.19%,而N、K的贡献率在3%以下(曾芳群,1995)。

桉树施肥所用的肥料品种:氮肥以尿素为主,尿素含氮量高,无副成分,适用于各种类型土壤,也有使用碳酸氢铵的(黄秀美,2001),但肥效不如尿素;磷肥在生产上以过磷酸钙为主,但已有试验表明(陈竣,1998),在常用的磷肥品种中以钙镁磷肥肥效最佳,对尾叶桉肥效大小的顺序是:钙镁磷肥、过磷酸钙、磷酸氢二铵、磷矿粉。目前在生产上使用以过磷酸钙为主的原因,主要可能是钙镁磷肥难于在市场上买到;钾肥以氯化钾为主。近年有人已逐步使用三元复合肥和含各种元素的桉树专用肥。

桉树施肥量受立地土壤、树种特性、气候条件等诸多因素的影响。桉树氮、磷、钾施用量应在一定的范围内,过量施用对材积增长作用不大,甚至产生负效应。各植桉地区根据各自情况大致都有一定的施肥量,现将部分研究者经试验提出的主要树种的最佳施肥量列于表1-1。