

## 内 容 简 介

林地施肥和养分管理是近年来多学科交叉研究的热点,本书以江西省毛竹林为研究对象,应用平衡施肥理论技术,系统研究和深入探讨了集约经营毛竹林土壤——植物营养特征和养分管理技术。主要内容包括:采用国际上成熟先进的土壤养分状况系统研究法,以最小因子定律为基础开展温室盆栽试验,吸附试验,校验和确认毛竹林土壤养分限制因子及排序;以生态平衡施肥和养分需求平衡为依据,在毛竹林土壤及植株氮、磷、钾大量元素和中、微量元素全面测试分析基础上的施肥推荐优化技术;毛竹林叶片营养与土壤肥力和产量的回归关系分析及模型建立;毛竹叶片营养诊断方法比较;应用地统计学方法进行的毛竹林土壤养分空间异质性研究;毛竹林土壤肥力变化动态及评价;毛竹不同经营目标平衡施肥配比及施肥效应检验及综合评价;基于人工神经网络的毛竹林新竹平均胸径模拟预测模型技术方法及其效果检验;基于 GIS 的集约经营毛竹林养分管理信息系统构建等。研究结果为我国南方毛竹林养分管理与平衡施肥理论与技术体系的研究提供了有益的思路,初步形成了集土壤分析、叶片诊断、限制因子排序、盆栽验证、林地试验和不同区域养分管理模式等重要环节在内的平衡施肥与营养管理技术体系。

本书可作为科研院所、农林高校林学类和资源环境类研究生的辅助教材,也可作为从事森林土壤、林木营养、经济林栽培、地力维持等方面研究的专业技术人员、科研人员及本科生的主要参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

毛竹林平衡施肥与营养管理 / 郭晓敏等著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-035977-3

I. ①毛… II. ①郭… III. ①毛竹-施肥 IV. ①S795.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 263749 号

责任编辑:矫天扬 孙 青 王海光 / 责任校对:朱光兰

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:231 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

目前,林木营养管理在我国仍然是一个新兴而极具潜力的研究方向,营养管理已被广泛认为是人工林集约经营的重要栽培措施,而平衡施肥则是营养管理中添加养分供应的最佳方法之一。因此,在林地的营养管理中采用平衡施肥措施将有利于保持土壤养分的可持续性,改善土壤的物理性状并使林地以最少的肥料投入获得最佳的经济效果,从而实现施肥与环境间的平衡。

中国是世界上竹类资源最丰富的国家,其中毛竹以其生长快、成材早、产量高、用途广、收益大的特点,成为我国南方重要的森林资源。近年来,为缓解森林经济利用和生态环境的矛盾,毛竹笋用林、毛竹笋材两用林基地建设发展迅猛,作为加快绿化、改变林种结构、发展高产优质高效林业的重要举措,毛竹集约经营和资源利用开发已成为林区农民脱贫致富的有效途径和根本出路。由于毛竹具有的一些优良特性和经营特点,在毛竹的集约经营中,平衡施肥与营养管理对提高毛竹的产量和质量,维持毛竹林的土壤肥力及提高整个毛竹林的生态效益,实现毛竹林可持续发展更具有重要的意义。

本书是自1997年作者与加拿大钾磷研究所(PPIC)进行江西省毛竹林平衡施肥国际合作项目启动后,毛竹林养分平衡营养管理系列研究成果的总结。研究课题来源包括后续承担的国际植物营养研究所(IPNI)国际合作项目、国家自然科学基金、国家教育部博士点基金、国家农业成果转化资金、江西省主要学科学术带头人培养专项资金等多种渠道。研究过程中,国际先进的土壤养分状况系统研究法的引入,为研究团队对毛竹林地养分的研究开辟了新的视野,跨跃了多级台阶。

本书是在长期科研和实践经验积累基础上的编撰成果,具有立足于国内外毛竹林研究的前沿,理论与实践并重的特点。全书针对江西省毛竹林的特点,以平衡施肥理论为基础,系统研究了毛竹林土壤和叶片的营养状况,建立了毛竹林土壤养分丰缺指标和叶片营养诊断指标,筛选出最适宜的毛竹叶片营养诊断技术;将国际上先进的“土壤养分状况系统研究法”应用于毛竹林研究,确定并验证了毛竹林土壤养分限制因子及排序;利用地统计学模型系统开展了毛竹林土壤养分空间异质性研究,明确了毛竹林土壤的空间变异特征及其规律,提出了适合南方林区的毛竹林平衡施肥配方和配套施肥技术;用人工神经网络方法研究建立了毛竹林新竹平均胸径预测模型,并对施肥毛竹林胸径进行分析预测;应用“ArcGIS”软件,构建了毛竹林集约经营的养分管理平台,通过对毛竹林立地条件、土壤养分管理技术、变化过程和生产水平水平的图形化和信息化管理,探讨毛竹林精准管理的方法与技术

体系。

在本书撰写过程中,课题组成员虽然进行了卓有成效的资料整理和分析工作,但离不开众多同行专家的帮助和支持。特别要感谢江西省奉新县、铜鼓县、靖安县林业局相关技术人员,为该项目研究提供了很大帮助;感谢中国工程院院士尹伟伦先生欣然为本书作序;感谢江西农业大学杜天真教授、刘苑秋教授、张露教授、胡冬南教授、郭熙副教授,他们在研究和成书过程中给予了帮助和支持;感谢肖舜楨、王婷、张过师、周裕新、张斌等硕士生,他们在研究过程中付出的艰辛劳动;感谢以叶清、罗竞林等为代表的历届林学本科生参与野外调查付出的巨大努力;也借此机会,感谢为本书出版付出辛勤劳动的科学出版社编辑人员和所有为本书出版付出关心、爱心和支持帮助的同行业者和领导。

本书的出版得到国际植物营养研究所(IPNI)、国家自然科学基金项目(30860226)、江西省“赣鄱英才555工程”项目的资助,在此表示衷心感谢。

林木营养与施肥是森林培育学的一个重要领域,毛竹林高效经营和培育更有许多问题需要探讨,随着研究的不断深入,必将对毛竹营养管理理论体系的发展起到积极推动的作用。作者殷切期望本书的出版对林木养分管理研究的学者有所裨益,并共同推动林木营养管理领域向新的高度发展。可以预见,建立在植物对养分需求规律上的平衡施肥技术和先进的养分管理手段,将是未来林木培养、地力维持及可持续经营的发展方向。

由于作者理论水平和认知水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位专家、学者、同行批评指正。

郭晓敏

2012年11月

# 目 录

序	
前言	
<b>第 1 章 我国毛竹林养分管理研究现状与发展趋势</b>	1
1.1 毛竹林经营现状及问题	1
1.2 毛竹林施肥及其营养管理研究现状	2
1.2.1 毛竹林营养管理及施肥历史沿革	2
1.2.2 毛竹林营养与施肥研究进展	3
1.3 平衡施肥的含义、内容及原则	6
1.3.1 平衡施肥的含义及发展	6
1.3.2 平衡施肥与林业发展中的营养管理	7
1.3.3 平衡施肥技术与土壤养分状况系统研究法	8
1.4 林木营养诊断技术的作用及现状	9
1.4.1 林木营养诊断的意义	9
1.4.2 植物组织营养元素诊断法	9
1.5 土壤养分的空间变异研究	12
1.6 我国毛竹林地养分管理问题及发展趋势	13
<b>第 2 章 试验区概况与研究方法</b>	15
2.1 试验地基本情况	15
2.1.1 江西省奉新县试验点	15
2.1.2 江西省铜鼓县、靖安县试验点	16
2.2 研究技术路线	17
2.3 试验设计	17
2.3.1 试验设计方案	17
2.3.2 施肥方法	19
2.4 土壤样品的采集与处理	19
2.4.1 土壤样品采集	19
2.4.2 土壤样品的分析方法	19
2.5 毛竹林地上部分生物量的测定	20
2.5.1 标准竹的选取	20
2.5.2 标准竹地上部分生物量的测定	20

2.5.3	标准地退笋产量的测定	20
2.5.4	毛竹地上部分养分与生长测定	21
2.5.5	毛竹叶面积指数的测定	22
2.5.6	叶绿度的测定	22
2.5.7	笋期观测及竹林保护、管理	22
2.5.8	数据调整	23
2.6	统计分析方法	26
<b>第3章</b>	<b>毛竹林土壤养分限制因子研究</b>	<b>27</b>
3.1	吸附试验与盆栽试验	27
3.1.1	吸附试验	27
3.1.2	温室盆栽试验	27
3.2	毛竹林地土壤养分含量及评价	28
3.3	毛竹林土壤的吸附固定特性	30
3.4	毛竹林土壤温室盆栽试验结果与分析	32
3.5	小结	35
3.5.1	竹林土壤养分丰缺顺序	35
3.5.2	竹林土壤对养分的吸附固定性能	35
3.5.3	竹林土壤的养分限制因子	36
3.5.4	土壤养分状况系统研究法对毛竹施肥的指导	36
<b>第4章</b>	<b>毛竹林叶片营养与土壤肥力和产量的回归分析</b>	<b>37</b>
4.1	奉新竹林不同年龄竹叶养分含量变化	37
4.2	施肥竹林竹叶养分状况与土壤肥力的相关研究	39
4.2.1	竹叶中 P 养分状况与土壤肥力的回归分析	39
4.2.2	竹叶中 K 养分状况与土壤肥力的回归分析	40
4.2.3	竹叶中 N 养分状况与土壤肥力的回归分析	41
4.3	毛竹林产量与竹叶养分相关模型	42
4.4	小结	42
<b>第5章</b>	<b>毛竹叶片营养诊断方法研究</b>	<b>44</b>
5.1	临界值浓度法诊断	44
5.1.1	临界值浓度标准	44
5.1.2	诊断精度	46
5.2	综合诊断施肥法(DRIS)诊断	47
5.3	矢量诊断法	50
5.4	叶绿素仪快速诊断法	51
5.5	毛竹叶片营养元素间相互关系	52

5.6	诊断方法结果比较	53
5.7	小结	56
<b>第6章</b>	<b>毛竹林土壤养分空间异质性研究</b>	<b>57</b>
6.1	采样及半方差函数模型	57
6.2	竹林土壤养分的描述性统计分析	59
6.3	竹林土壤养分的空间结构特征	61
6.3.1	土壤养分空间变异的半方差分析	61
6.3.2	土壤养分空间变异的分数维分析	65
6.4	小结与讨论	68
6.4.1	小结	68
6.4.2	问题讨论	69
<b>第7章</b>	<b>毛竹林土壤肥力变化动态及评价研究</b>	<b>70</b>
7.1	奉新大小年竹林土壤养分变化动态	70
7.1.1	施肥前林分土壤肥力状况	70
7.1.2	施肥区总体肥力动态变化状况评价	71
7.1.3	各施肥处理林分土壤肥力状况	71
7.1.4	毛竹林地土壤养分之间的相互关系	77
7.1.5	平衡施肥毛竹林产量与土壤理化性质相关性	81
7.2	靖安均年竹林土壤养分动态变化	83
7.2.1	靖安竹林施肥区总体肥力动态变化状况评价	83
7.2.2	各施肥处理土壤肥力状况及与大小年竹林土壤肥力状况比较	83
7.2.3	靖安竹林各处理土壤有效性矿质元素动态变化	85
7.3	小结	86
7.3.1	奉新大小年竹林土壤养分动态变化	86
7.3.2	靖安均年竹林土壤养分动态变化	86
<b>第8章</b>	<b>平衡施肥与毛竹生长的相关性研究</b>	<b>88</b>
8.1	平衡施肥对毛竹出笋成竹的影响	88
8.1.1	施肥对奉新(大小年竹林)竹林出笋成竹的影响	88
8.1.2	施肥对铜鼓竹林(均年竹林)出笋成竹的影响	91
8.1.3	施肥对出笋规律的影响	92
8.2	平衡施肥对毛竹平均胸径的影响	93
8.2.1	施肥对奉新(大小年竹林)新竹平均胸径的影响	93
8.2.2	施肥对靖安(均年竹林)新竹平均胸径的影响	96
8.3	平衡施肥对毛竹林生物产量的影响	96
8.3.1	施肥对奉新(大小年竹林)竹林生物产量的影响	96

---

8.3.2	施肥对靖安、铜鼓(均年竹林)毛竹林生物产量的影响	98
8.4	平衡施肥对春笋品质和养分含量的影响	99
8.5	平衡施肥对毛竹林枯枝落叶量和养分含量的影响	100
8.6	平衡施肥对毛竹林叶面积指数的影响	102
8.7	毛竹生长相关性研究	103
8.7.1	竹笋生长相关性	104
8.7.2	竹笋、竹材产量与Ⅱ度竹的关系	106
8.7.3	出笋地径与前三度竹的株数及平均胸径的关系	108
8.8	小结	108
8.8.1	平衡施肥与大小年竹林生长	108
8.8.2	平衡施肥与均年竹林生长	110
8.8.3	竹林结构对毛竹地上部分生物量的影响	110
<b>第9章</b>	<b>毛竹林平衡施肥配方及经济效益综合评价研究</b>	<b>112</b>
9.1	平衡施肥毛竹林经济效益分析	112
9.1.1	奉新大小年竹林施肥经济效益分析	112
9.1.2	靖安均年竹林施肥经济效益分析	117
9.1.3	平衡施肥毛竹林持续效应分析	118
9.2	毛竹林生态系统养分平衡经营措施综合评价	119
9.2.1	可持续性生态平衡施肥养分管理最佳配方评价指标的选择	119
9.2.2	综合评价方法	120
9.2.3	评价结果	122
9.3	小结	123
9.3.1	平衡施肥的经济效益及持续效应	123
9.3.2	毛竹林生态系统养分平衡经营措施综合评价	124
<b>第10章</b>	<b>基于人工神经网络的毛竹林新竹平均胸径模拟预测模型及其效果检验研究</b>	<b>125</b>
10.1	人工神经网络的原理和实现	125
10.1.1	人工神经网络原理	125
10.1.2	人工神经网络的实现	125
10.2	平衡施肥毛竹林新竹平均胸径预测模型的建立	127
10.2.1	网络输入、输出变量的确定	127
10.2.2	网络参数的确定	128
10.2.3	模拟结果	128
10.3	讨论	130

---

<b>第 11 章 基于 GIS 的奉新、靖安集约经营毛竹林养分管理信息系统研究</b> .....	131
11.1 GIS 平台及基本图件 .....	131
11.2 图件矢量化及数据处理 .....	131
11.3 竹林养分管理信息系统的总体结构设计 .....	132
11.3.1 毛竹林平衡施肥养分管理的设计思想 .....	132
11.3.2 系统总体设计 .....	133
11.3.3 竹林养分管理信息系统子系统 .....	133
11.3.4 竹林养分管理信息系统要素体系 .....	135
11.3.5 竹林养分管理信息系统流程图 .....	136
11.4 GIS 支持下的竹林养分管理信息系统功能与应用 .....	136
11.4.1 竹林生长和养分动态变化监测和分析 .....	138
11.4.2 竹林养分管理空间数据库和查询 .....	139
11.4.3 竹林养分管理生长预测及分析 .....	140
11.4.4 竹林养分管理施肥推荐 .....	141
11.4.5 竹林养分管理可持续经营决策 .....	142
11.5 小结 .....	142
<b>第 12 章 结论与讨论</b> .....	143
12.1 毛竹林土壤养分限制因子及竹叶营养诊断研究 .....	143
12.2 毛竹林土壤养分空间异质性研究 .....	143
12.3 毛竹林土壤肥力动态变化及毛竹生长的相关性研究 .....	144
12.4 毛竹林平衡施肥配方及经济效益综合评价研究 .....	144
12.5 基于人工神经网络的毛竹林新竹平均胸径模拟预测模型 .....	145
12.6 奉新毛竹林计算机养分管理信息系统研究 .....	145
12.7 毛竹林养分管理可持续经营需继续研究的问题 .....	145
<b>参考文献</b> .....	147
<b>附录 1</b> .....	156
<b>附录 2</b> .....	164



# 第 1 章 我国毛竹林养分管理研究现状与发展趋势

中国竹类资源丰富,竹林总面积近 500 万  $\text{hm}^2$ ,其中毛竹林总面积为 300 万  $\text{hm}^2$ ,毛竹蓄积量 52.61 亿株,约占世界毛竹林总面积的 20%。

毛竹(*Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens*)是我国竹类植物中分布范围最广、栽培面积最大、蓄积量最多、经济价值最高的材用和笋用竹种,在我国林业生产中占有非常重要的地位。近 10 年来,我国竹林总面积以每年 5.1 万  $\text{hm}^2$  的速度递增,其中,毛竹林 5 年增加 7.6 万  $\text{hm}^2$ 。竹子在人类生产和生活中的作用不断增加,引起世界林业生产的普遍关注。竹子不仅提供工农业生产和人们生活所需的竹材、竹笋和竹副产品原材料,而且具有保持水土、涵养水源、调节气候、美化环境等作用。在我国天然林保护工程实施后,木材采伐量大幅度减少、供求失衡的背景下,毛竹林在满足国家以竹代木、以竹代塑的需求上发挥着不可替代的重要作用。目前,南方各省(自治区、直辖市)的竹业开发已为解决我国资源紧缺问题提供了广阔的前景,作为加快绿化、改变林种结构、发展高产优质高效林业的重要举措,毛竹林集约经营和资源开发已成为林区农民脱贫致富的有效途径和根本出路。

## 1.1 毛竹林经营现状及问题

从新中国成立至今,毛竹林经营整体集约化程度并不高。全国竹林中,第一类集约经营的竹林仅占 15%,第二类一般经营的竹林占 25%,第三类粗放经营的竹林占 30%,其余为自然或荒芜状。全国毛竹林平均蓄积量 1.6t/ $\text{hm}^2$ 。目前我国毛竹生产水平现状为,全国平均毛竹林立竹密度为 1800 株/ $\text{hm}^2$ ,大年产新竹 450 株/ $\text{hm}^2$ ,新竹秆重 7500~12 000kg/ $\text{hm}^2$ ,平均胸径 9.4cm。造成低产的主要原因一方面是经营粗放,只砍不抚,造成毛竹生长不良;另一方面是毛竹林地每年要伐竹采笋,竹材、竹笋和枝叶带走了大量营养物质,且残留的竹兜和根系腐烂分解慢,所含的养分大多为暂时不可用状态。正是这种“只取不予”的不合理的经营利用方式,使土壤中养分输出大于输入,竹子越砍越小,产量逐代下降,竹林土壤养分含量不同程度地下降,导致地力衰退严重,竹林生产力低下。

近年来,毛竹林的集约经营强度和范围随着市场竹笋、竹材需求量的增加而迅速提高,与此同时,集约经营毛竹林大量消耗养分导致林分生产力下降和地力衰退的现象也逐渐突显,由此而产生的对毛竹产区林业生产的影响和制约毛竹林持续经营的作用不可低估。集约经营毛竹林地力衰退的原因有很多,主要有:①人工集

约经营毛竹林群落结构过于单一,清杂、垦复的纯林经营方式使地表丧失了植被保护,林地水土流失导致地力下降;②竹林连年整株采伐移出的方式减少了人工竹林生态系统的养分总量;③“只取不予”的经营方式大量消耗竹林养分;④高强度经营竹林,盲目的施肥活动;⑤违背种群结构和年龄结构,采伐壮年竹的不合理采伐。以上这些问题大多是通过影响竹林生态系统营养物质循环而产生的,广义上讲也就是竹林植物营养管理问题。

实际上,竹林林地养分管理就是以提高森林生产力为目标,以竹林生态系统生物地球化学循环为基础的,自然的和以人工辅助措施为主要手段的土壤肥力保障与养分平衡的林地管理措施体系。这一措施体系是制订各项营林措施的基础,即使是涉及营林方针或需要从培育上改进的措施,也应该以营养管理为依据来确定。DeBell(1985)在《通过营养管理提高森林生产力》一文中将营养管理定义为:“营养管理的目标就是要巧妙地处理和利用森林营养资源以获得资源生产的最佳水平,它包括制订和修订培育措施,以此来确保森林的养分供应得到稳定、提高和利用”。并提出“稳定养分的中心问题与其说在于促进森林生产力的提高,不如说在于防止森林生产力下降”,即养分保持是营养管理中一个非常重要的方面,是林业决策中一个值得认真思考的问题。

## 1.2 毛竹林施肥及其营养管理研究现状

### 1.2.1 毛竹林营养管理及施肥历史沿革

国际上对林木施肥的研究始于19世纪末。法国是最早进行林木施肥试验的国家,德国在19世纪中叶最早重视林木对营养元素的需要和林地营养元素的循环,发现从林地收走枯枝落叶,会导致森林生产力急剧下降,因此开始林木施肥试验。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,北美洲、澳大利亚和日本等地区及国家也相继开展林木施肥试验研究。特别是第二次世界大战后,因世界经济的恢复和发展,对木材的需求不断增加,使得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。目前,国际上对林木施肥的研究越来越全面和深入,已从单一方向转向多层次、多功能的综合研究。

毛竹林施肥及养分研究是伴随着植物营养与施肥研究和林地施肥实践而发展起来的,其研究历史较短。20世纪50年代日本曾对竹林施肥做过比较系统的研究,确认了竹林氮(N)、磷(P)、钾(K)、硅(Si)四要素施肥的原则。我国毛竹施肥研究也始于50年代,但施肥面积很小,仅停留在经验施肥的试验阶段。70年代中期,随着消费市场竹笋需求量的剧增,雷竹等笋用竹林丰产技术研究开始起步。毛

竹林施肥研究进入初级阶段。至80年代,化肥开始广泛使用于集约经营毛竹林,毛竹营养与施肥研究也进入快速发展时期,国内研究者对毛竹施肥进行了从基础理论研究到高产施肥技术的系列探索。90年代是毛竹营养与施肥研究的兴旺发展时期,毛竹施肥进入实用阶段,专用肥、复混肥、微肥和一些先进的试验设计方法被陆续采用。研究者已开始注意到毛竹林经营的长久效益、养分平衡和地力维持问题,并开始针对竹林养分平衡中出现的问题进行更深入、细致的研究。进入21世纪,毛竹林施肥研究开始向应用技术及应用基础研究方向拓展,并为毛竹林集约经营提供了更广泛的技术和理论支撑。

毛竹主要分布于亚太竹区的亚热带地区,尤其是在中国南方有广泛分布和培育、利用的历史。因此,从世界范围来看,在此领域我国毛竹的研究和管理水平可代表世界先进水平。日本是亚洲研究毛竹林营养及施肥最早的国家,其集约经营水平也很高。但自20世纪50年代以来,日本竹林面积日益减少,其经营目的也相继改变,对毛竹林营养及施肥的研究也日趋减少。

## 1.2.2 毛竹林营养与施肥研究进展

### (1) 基础理论研究

毛竹生长必需的十几种化学元素是:碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、钾(K)、磷(P)、硅(Si)、硫(S)、钙(Ca)、镁(Mg)、铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、钴(Co)、锌(Zn)、钼(Mo)和硼(B)等。在这些元素中C、H、O从空气和水中获得,其他元素主要从土壤中吸收。毛竹对N的需要量比较多,但毛竹适生区的亚热带土壤中氮的含量普遍较低。毛竹对P的需要量虽然比N少,但土壤供给量也极其有限,由于强烈的脱硅富铝化作用,南方红壤中P、Ca、Mg等营养元素遭到强烈淋溶。K通常在花岗岩类母质的土壤中含量相对丰富,但由红砂岩、第四纪红土等母质发育的土壤普遍存在缺K现象。传统施肥一般都是以N、P、K肥为主。因而在过去的几十年中,大多数学者对毛竹施肥的研究大部分集中在N、P、K三要素上,有关微量元素的研究报道较少。

黄伯惠(1983)、裘福庚等(1986)、陈友地(1986)、刘耀荣等(1985)曾对毛竹所需矿质营养元素进行了测定分析。黄伯惠(1983)对毛竹矿质营养元素变化动态的研究结果表明,毛竹体内各部位积累的矿质元素量因部位不同而异,竹叶中积累的含量最高,竹鞭次之,竹秆最低,但K、Ca、Mn含量竹秆中大于竹鞭。裘福庚(1979)对毛竹P的吸收动态研究表明,竹腔内壁具有吸收营养元素的功能,这为养分的快速有效补充提供了新途径。胡炳堂等(1990;1994)研究了毛竹土壤有效Si及毛竹叶和其他器官Si的分布。张献义等(1995)采用定位法研究了毛竹林养分动态与产量的关系,从而为营养诊断和合理施肥提供了理论基础和依据。

土壤肥力状况也是毛竹林合理施肥、集约经营的重要依据。徐秋芳等

(2000b)研究了毛竹林土壤养分的动态变化,为不同生产力水平、不同经营时期的毛竹林合理施肥提供了指导意见。楼一平等(1997)对毛竹纯林不同经营时期的林地土壤肥力变化进行了调查分析。徐秋芳(2000a)对低产毛竹林地土壤理化性质做了分析比较,得出毛竹低产的主要原因是土壤养分总储量低,N多P少,尤其是20~40cm土层有效P严重缺乏。陈金林等(1996)通过进行毛竹林施肥试验,建立了毛竹林总产值与夏季土壤有效养分之间的多元回归方程,并提出了丰产毛竹林的土壤养分标准状态,从而指明了毛竹林合理施肥的方向和目标。陈乾富(1999)研究了毛竹林不同经营措施对林地土壤肥力的影响,建议竹林应提倡集约经营管理。

傅懋毅和方敏瑜(1989)、朱万泽(1990)、曹群根等(1997)分别开展了竹林养分循环研究和毛竹林凋落物分解机制研究,了解了毛竹林各元素的迁移率。

顾小平和吴晓丽(1994)在竹种根际联合固N研究方面取得成效,证实毛竹作为禾本科植物,也同样具有根际联合固N作用,为利用生物固N,最终解决竹类植物的N素供应带来了希望。

周芳纯(1998)也对毛竹体内营养元素的含量做了研究,提出了根据元素各自的含量大小及采伐量的大小确定合理施肥的经营思想。

竹类综合利用课题组(1991)对竹秆和竹叶中的微量元素的研究结果为,毛竹的竹秆中含有23种微量元素,竹叶中含有20种微量元素。

周兆祥(1991)对竹秆和竹叶中的微量元素的研究,结果为毛竹的竹秆中含有23种微量元素,竹叶中含有20种微量元素。

Shanmugharel(1997)研究了竹子生长过程中不同年龄期营养物质的平衡和转换关系,结果为毛竹年营养物质积累和富集速率随着竹龄的增加而提高,营养物质积累和富集速率大小顺序为 $K > N > Mg > Ca > P$ 。

在竹笋营养方面,胡宗超(1996)、胡春水等(1998)研究了毛竹不同笋龄营养成分的变化及毛竹冬笋的笋体营养元素成分的含量。

叶耿平等(2011)利用静态箱-气相色谱法研究了集约经营对毛竹林土壤呼吸速率的影响。杨清培等(2011)根据岛屿生物地理学理论及其物种-面积关系构建数学生态模型,研究了集约经营对毛竹林物种多样性的影响。刘广路(2011)以毛竹纯林、竹阔混交林和竹针混交林为对象,对其土壤理化性质及土壤酶活性特征进行了研究。徐秋芳等(2009)研究了不同绿肥对毛竹林土壤微生物特性的影响。高志勤(2009)选择毛竹材用林和笋用林开展了毛竹林土壤水分物理性质研究。周国模等(2006)研究了毛竹林集约经营过程中土壤活性有机碳库的演变,发现集约经营并未改变土壤各类碳含量的剖面特征,但集约经营会导致土壤碳的大量损失,并使土壤生物学性质明显下降。徐秋芳等(2003)研究了集约经营和粗放经营下,毛竹林土壤活性有机碳库的差异。

总之,毛竹施肥的基础理论研究在很大程度上为科学合理施肥提供了理论基础,使林业工作者在充分了解毛竹营养、生理特性的基础上,在符合森林养分循环规律的前提下,制定出经济、合理的施肥方法和制度。

## (2)毛竹施肥技术研究

毛竹施肥方法是否得当,对指导林业生产上的合理施肥和肥效的发挥有重要意义。石全太(1987)、陈植誉(1991)、夏小英等(1993)、彭九生等(2005)均研究并证实了毛竹增产剂及毛竹伐桩内施肥的优越性。华均健和金晓平(1989)、裘福庚等(1986)报道了飞机喷施和示踪原子法研究的初步结果。目前,对毛竹施肥次数的研究较多,多数研究者倾向于材用林可分春、秋两季施肥,笋用林则应采取3次或4次施肥,何元荪等(1998)、何均潮(1992)、傅懋毅等(1988)做了此方面的研究。

毛竹施肥配比的研究报道不多。洪顺山(1987)报道了N、P、K的最适配比为1:0.6:0.47。日本野中重之(1989)提出了N、P、K、Si四要素的配比为10:5:6:8。徐昌棠(1989)认为最好的N、P、K配比为4:3:1。洪伟等(1998a;b;c;d)应用回归旋转设计原理,选择5种毛竹生长所需的生长调节物质和微量元素,选出了生产上适用的最佳配方。胡冬南等(2004)提出了最佳的N、P、K笋用配方为1:0.30:0.22和材用配方为1:0.68:0.98。值得注意的是,对于不同林地不同用途的毛竹林,每项试验都有不同的配比,这些配比的差异很大且无规律。这也充分说明林木施肥与立地条件、树种本身特性关系紧密,情况复杂,必须探讨科学的施肥计量方法和营养诊断方法。

此外,许多学者探讨了毛竹林集约经营施肥效应。刘玮等(2011)研究了不同施肥处理对毛竹根际微生物的影响及其PCR-DGGE分析,刘广路等(2011)研究了施肥时间对毛竹林生产力分配格局及土壤性质的影响,廖飞勇和郭起荣(2010)、郭起荣和廖飞勇(2011)研究了人工施肥对景观竹林中植物多样性的影响,胡元斌等(2011)研究了施肥对毛竹林幼竹生长期光合特性的影响,王婷等(2010)开展了毛竹不同施肥处理对出笋效应的研究,邱晓东(2010)探讨了施肥种类对毛竹林地土壤性质及出笋成竹的影响,廖飞勇和郭起荣(2010)研究了施肥对毛竹林换叶期冠层形成及光合能力的影响,这一批应用性研究,在研究内容和深度上均有较大提升。此外,许多学者也在毛竹林精准施肥、毛竹林品质提升、毛竹林定向培育等相关领域开展了广泛研究。

尽管国内外学者近年来在竹林养分与施肥领域有了大量的研究实践,但大多数学者偏重于竹类的基础理论研究,而对毛竹施肥的研究则主要集中在N、P、K三要素上,有关中量、微量元素的研究报道较少,且多数研究仅侧重某些过程,缺乏系统性,并对毛竹林N、P、K养分特征及循环的一些关键步骤还没有进行较好地量化,与我国农业土壤养分和植物营养的研究水平相比,有较大的差距。不仅缺乏集约经营毛竹林生态系统中N、P、K养分在土壤中主要过程定量评价的系统数据

库,而且缺乏结合集约经营毛竹林培育方法和林木需肥规律而制订的毛竹林科学平衡施肥计划与合理的施肥配比,导致我国毛竹林施肥仍有较大的盲目性,N、P、K 养分利用率低下,还易引起严重的环境污染。因此,我们目前仍然需要集国内外林业集约经营和经营管理先进方法手段之大成,借鉴农业上平衡施肥和养分管理的成功经验,对毛竹林开展系统、深入的养分特征和养分管理研究。

## 1.3 平衡施肥的含义、内容及原则

### 1.3.1 平衡施肥的含义及发展

平衡施肥是指依据作物需肥规律、土壤供肥特性、肥料效应和环境保护的要求,合理选用不同肥料种类(有机肥、无机肥、生物肥等)和确定 N、P、K 和中量、微量元素的适宜用量和比例,并采用科学施用方法的施肥技术。平衡施肥的内涵包括很多方面:首先是植物所需营养元素间的平衡(静态的横向平衡),除 N、P、K 大量元素外,还要在中量、微量元素上求得平衡;其次是肥料类型和种类的平衡,既注重无机肥的施用,也重视有机肥、矿质肥和生物肥的配施;再次是施肥时间的平衡(动态的纵向平衡),即根据矿质元素的生理功能和植物的需肥规律,适时、适量、适法地施用;最后是以高效、经济、无污染为核心的肥料施用。在全球环境日益受到关注的今天,平衡施肥的内涵也在环境友好方面有了新的含义和更深化的内容。

早在 19 世纪 40 年代,德国著名科学家李比希(Justus von Liebig)就提出了矿质营养理论和最小养分定律,用以指导施肥。他认为,植物的原始养分只能是矿物质,植物以不同的方式从土壤中吸收矿质养分,使土壤中的养分减少,连续种植将会使土壤贫瘠,应该把植物吸收的养分归还给土壤,以保持土壤的生产能力,这种归还还是以施肥的方式完成的。同时,他指出,植物生长需要吸收多种养分,而决定产量的是土壤中对植物需要相对含量最小而非绝对含量最小的养分,在一定限度内产量随这种养分的增减而变化。因此,这种养分往往是我们在施肥时首先要考虑的。我国平衡施肥的实践在很大程度上是最小养分定律的体现和运用。

在国内外众多配方施肥方法中,平衡施肥法是最基本和最重要的方法。许多国家的专家学者认为化肥三要素施用的比例是衡量一个国家农业科学水平的重要标志。联合国粮食及农业组织 1996 年化肥年报报道,全世界化肥三要素的消耗比例 N : P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : K<sub>2</sub>O 平均为 1 : 0.47 : 0.37,发达国家为 1 : 0.57 : 0.55,发展中国家为 1 : 0.35 : 0.14,发展中国家 P 和 K 比例明显低于世界平均水平。

现代可持续农林业系统是打破传统农林业物质循环和能量转化相对封闭状态,增加生态系统以外的化学能投入,改进生产工具,提高农林产品科技含量,从而推动农林业系统内物质流、能量流的速度,提高作物产量和生产效率,使生产经营

进入一个崭新阶段的农林业系统。它是开放的农林业生态系统,具有高投入、高产出、高输入、高输出的特征。可确保农林业高产、稳产、优质、高效地良性发展。其中,化肥起着非常重要的作用。单施化肥不适应现代持续农林业发展的要求,单施有机肥只能维持固有的封闭式的物质循环,很难满足人口增长对农林产品增长所需养分的需求,因此,只有合理平衡施肥(包括化肥与有机肥配合施用、化肥与各养分元素之间合理平衡施用),才有利于全面调节土壤养分平衡,解决供需矛盾,实现用养结合。

### 1.3.2 平衡施肥与林业发展中的营养管理

平衡施肥技术在我国农业上研究比较多,已经形成一整套规范和成熟的技术体系,在生产中也已推广多年,并取得良好效果,明显地增加了农作物的产量,提高了农产品的品质,发挥了化肥的增产效益,但在林业上的研究和应用仍处于起步阶段。林木对营养元素的需求及养分元素的功能与农作物相比具有相似性。但因林木多年生和生长周期长以及生物量大等原因,自然生长的林木通过枯落物归还和根际微生物系统分解等生物地球化学循环过程,可在养分水平较低的立地环境生存。另外,林木根系分布范围深厚而广泛,吸收元素的能力强,对土壤养分丰缺的敏感程度不如农作物。因此,农业上平衡施肥的成功经验并不能直接应用于林业,还需在进行林地平衡施肥的实践中完善和发展适应林地养分规律的平衡施肥技术。鉴于高度集约化经营的林地是林业实现 21 世纪目标的关键所在,而不同母岩发育的土壤的营养元素含量各异,不同类别的树木和相同树木的不同生长阶段对营养元素的要求也有所差异,加上林地施肥具有的困难和长时效性,平衡施肥理论和技术对于林地培肥和树木生长都是迫切需要和有效的。应该指出的是,自然状态的林木和以高强度经营措施为主的人工林对养分的需求是明显不同的。前者可以不施肥或少施肥,而后者所追求的高产和高效则必须以合理的高投入(物质、能量和人力)作为支撑。没有这一基础,任何人工林的高产、高效都是暂时的和不可持续的。在当今“把山当做田来经营”的高度集约林业的速生林经营中,平衡施肥便是一项为林地补充物质和能量的必要技术。目前,营养管理已被广泛地认为是人工林集约经营的重要栽培措施之一,而平衡施肥又是营养管理中添加养分供应的最佳方法之一,是国际公认的现代化科学施肥技术。因此,在林地的养分管理中采用平衡施肥措施将有利于保持土壤养分的可持续性,改善土壤的物理性质并使林地以最少的肥料投入获得最佳的经济效果,从而实现施肥与环境间的平衡。基于此目的,将先进的平衡施肥技术和林地营养管理措施相结合,根据林地土壤测试或植株营养诊断结果、林木需肥规律、林地供肥能力和各种肥料效应,在施用有机肥的基础上,综合运用现代化农业科技成果,根据不同林木品种特性、土壤类型和气候条件,及时掌握林地土壤肥力状况,制订出不同植物 N、P、K 和微肥的最佳施

用比例、用量、时期,以及与之配套的相关技术,人为地调节林地土壤与林木之间养分供求矛盾,并推广先进的施肥方法和技术,做到平衡施肥、缺素补素,以平衡土壤养分状况,改善土壤条件,满足植物需求,将是确保我国林木生产优质、高效、低耗的重要措施。由于毛竹具有的一些优良特性和经营特点,在毛竹林的集约经营中,平衡施肥对提高毛竹的产量和质量,维持毛竹林的土壤肥力及提高整个毛竹林的生态效益,实现毛竹林可持续发展具有重要的意义。

### 1.3.3 平衡施肥技术与土壤养分状况系统研究法

目前,在平衡施肥多项应用技术中,有三种较常用的方法,即:①养分丰缺指标法;②肥料效应函数法;③测土配方养分平衡法。第一种方法的优点是直感性强,定肥简捷方便,缺点是施用量精确度差。第二种方法的缺点是以田间试验为基础,需要耗费一定的人力、资金和时间,且技术难度较大,一般不易掌握。第三种方法是以实现植物目标产量所需养分量与土壤供应养分量差额为施肥依据,以达到养分收支平衡的目的,是一项切实可行的技术,具有在实践中可对其参数进行调整和完善的优点,但需要以准确、快速的土壤测定为依托。这些方法在农业上都有成功的应用范例。然而,不论采用哪种方法,尽可能多地了解土壤养分信息,都是保证田间试验成功、实现平衡施肥的先决条件。因此,快速、准确、简便的土壤分析手段是平衡施肥技术得以实现和普及推广的保证。大量实践证明,土壤养分状况系统研究法符合大量土壤样品快速、准确测定的要求,在加拿大与中国 20 多年的平衡施肥研究推广工作中发挥了很大的作用。但到目前为止,该方法在林业上的应用还鲜有报道。

土壤养分状况系统研究法是在国际上土壤测试和推荐施肥研究的基础上逐步发展形成的,美国佛罗里达州国际农业服务中心(ASI)的 Hunter 博士在总结前人经验的基础上,于 1984 年正式提出了该方法,1988 年经加拿大钾磷研究所(PPIC)的 Portch 博士改进后介绍到中国,并很快在全国较大范围内应用,取得了大量有价值的资料。通过对土壤中 11 种营养元素有效含量及 pH、有机质、活性酸的测定,可以全面评价土壤肥力状况,找出土壤养分限制因子,从而提出合理的推荐施肥建议。同时,应用国际农业服务中心 ASI 联合浸提液和系列化操作,大大提高了实验室工作效率。此外,该方法在全面考虑土壤中大量、中量、微量元素状况及综合平衡的同时,还考虑土壤中主要营养元素的吸附固定特点和对施入肥料有效性的影响。这对正确了解土壤对养分的吸附固定能力、可靠地评价土壤养分状况、确定合适的施肥量非常重要,也使得我们在开展平衡施肥和耗资较大的肥料研究工作时,能对供试元素以外的养分障碍因子加以排除,对土壤养分状况有一个比较正确和全面的了解,从而使试验结果更为可靠,避免了以往肥料田间试验中存在的盲目性,实现真正意义上的平衡施肥。



## 1.4 林木营养诊断技术的作用及现状

### 1.4.1 林木营养诊断的意义

林地的平衡施肥随林木品种、土壤类型、气候因子、产量水平、采伐制度、施肥方法、施肥量和管理水平以及时间和空间的变化而有不同的平衡体系。因此,要实现林木平衡施肥,必须首先明确对某种林木要求达到某一产量指标时土壤中存在的或潜在的缺素问题,也需要对土壤和植物进行快速或经常性的营养诊断分析,发现存在的或潜在的养分障碍因子,以便提出和调整平衡施肥方案。

林木营养诊断是林地施肥措施中判断养分亏缺、平衡状况,预测、评价肥效和指导施肥的依据,是合理施肥的基本前提和基础,也是进行林地营养管理的关键技术。其道理正如医生的处方必须在了解病情的条件下才能开出一样。因此,其重要性是毋庸置疑的。

目前,营养诊断在我国研究较多,其诊断方法有多种,即植物外观症状诊断法、土壤养分分析法、生物栽培试验法、植物组织分析诊断法等。利用土壤测试、果树叶片分析、水稻叶色诊断等来指导施肥,已经在农业生产中发挥了重要作用。在林业生产上,由于林木生长对营养和环境需求的复杂性以及林业生产自身的特点,营养诊断技术的引入只是近二三十年的事情,虽也给林业生产带来了长足的进步,但与农业相比仍存在极大差距,仅有少量的树种得到了并不太完全的营养诊断的指标。指导林木施肥的营养诊断通常包含土壤测试、植物组织分析和田间试验三部分。近年来,植物组织营养诊断由于与林业生产特点更相吻合而备受林业工作者关注,成为研究的热点。

### 1.4.2 植物组织营养元素诊断法

植物营养诊断技术的关键是选择合适的诊断指标。植物自身的营养状况是土壤养分供应、植物对养分需求和植物吸收养分能力等营养遗传特性和环境条件的综合体现,当我们能够正确地判断和解释植物营养组分和含量时,就可以找到一个反映某一养分是否能够满足植物生长需要的较好的指标。通过对植物体内养分状况进行诊断来反映植物当时的营养状况,并以此进行施肥决策。早在19世纪30年代,Mary就开始利用植物分析诊断植物的营养状况,发现了特定植物组织中养分浓度和产量之间的良好的相关关系,并定量地研究这种关系和用来估计植物的营养状况(Ruter,1997)。目前,英国、法国、德国、美国等国已成功地应用植物营养诊断技术来指导农业生产(Admas et al.,1985;Justes et al.,1997;Wollring and Wehrmann,1981)。由于植物特定组织的营养组分和含量比土壤的养分含量能更