

晋西黄土区 人工林密度调控技术

玉宝 王百田 著

中国林业出版社

林业公益性行业科研专项经费项目

晋西黄土区 人工林密度调控技术

玉宝

常州大学图书馆
藏书章

国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

晋西黄土区人工林密度调控技术 / 玉宝, 王百田著. —北京: 中国林业出版社, 2011. 4
ISBN 978-7-5038-6112-3

I. ①晋… II. ①玉… ②王… III. ①黄土区-人工林-林分密度-调控-山西省
IV. ①S753.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 043311 号

出 版: 中国林业出版社 (100009 北京西城区德内大街刘海胡同 7 号)

E-mail: wildlife_cfph@163.com **电话:** (010) 83225764

发 行: 中国林业出版社

印 刷: 三河祥达印装厂

版 次: 2011 年 4 月第 1 版

印 次: 2011 年 4 月第 1 次

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 7.5

字 数: 187 千字

定 价: 36.00 元

前 言

Foreword

我国干旱、半干旱、亚湿润干旱区总面积为 331.7 万 km^2 ，占国土总面积的 34.6%。这些地区是属于我国生态环境建设重点和难点地区。加强生态建设，恢复植被，需要实施大面积人工造林，并确保造林成活率和保存率，关键是提高经营管理技术。我国人工林面积居世界首位，根据第七次全国森林资源清查结果，人工林保存面积达到了 6 168.84 万 hm^2 。但在部分地区，由于树种选择不科学，密度过大等原因，造成人工林地力衰退、林地干化、地下水位下降等问题日趋明显。在应对全球气候变化、碳汇效益的驱使下，我国现代林业建设对人工林的培育，提出了新的更高的要求，不仅要保证人工林面积的扩大，完善人工林的结构，提高人工林健康性和稳定性，更要充分发挥人工林以生态效益为主的多种效益和功能。因此，经营好人工林，对改善我国生态环境，维护生态安全，促进林业发展具有重要意义。

人工林经营不是简单的密度和产量关系问题，而是涉及到可持续和稳定性关系的问题，不能仅以产量和速度来衡量，应从森林生态系统的高度看待人工林的经营问题。林分密度管理一直是研究的热点问题，是一项系统工程，是人工林经营管理的关键技术之一，从幼林到成林的整个过程中，动态调控林分密度，生态控制林分结构，如何根据经营目的确定不同生长阶段的合理经营密度，并确保人工林生产力的提高和功能的最大发挥，这是人工林经营所面临的一项重要课题。现阶段我国人工林经营中，造林后期管护和抚育滞后，造林和营林脱节，造林和地下水资源开采不合理，造林和用水矛盾突出，这些现象在西部干旱半干旱区更明显。如果在 20 世纪 60 年代我国人工林高密度栽植是为了提高造林成活率，那么现代林业必须同时要考虑人工林功能和稳定性，尤其是生态公益林，提高其稳定性和持续发挥生态功能至关重要。

在干旱半干旱区，水分是培育人工林的关键限制因子，通过密度调控解决林分合理的耗水已成为缓解缺水矛盾的主要途径之一。必须遵守水资源环境容量原则，根据现降水条件、林地水量结合经营目标，调控不同生长阶段的林分密度、调整林分结构，才能充分发挥人工林各项效益。也是干旱半干旱区合理恢复和管理人工林的关键。目前，在国内人工林密度调控研究，主要集中在南方马尾松 *Pinus massoniana* Lamb.、杉木 *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. 等速生用材林，而对北方干旱半干旱区人工林缺乏系统性研究。现有的传统密

度调控技术以产量最高为目标,是处理密度和产量关系的控制系统,难以满足人工生态公益林的密度调控要求。所以需要探索适合干旱半干旱区的人工林密度调控技术和方法,有必要深入系统研究人工林围绕耗水量等水分因子的密度调控技术。

本书提出的基于“水分生产函数”的密度调控技术是以水分因子为切入点,遵守水分资源环境容量原则,根据林地水量适时调控密度,这是能使经济、生态和社会效益达到最佳的控制系统,属于生态控制系统范畴。有利于缓解人工造林中普遍存在的地力衰退、林地干化、地下水位下降等生态问题的加剧,更适合干旱半干旱区人工林密度管理,将弥补传统密度调控技术的不足。本书为林业公益性行业科研专项经费项目(200704031)的部分研究成果。在山西省方山县和吉县,以刺槐 *Robinia pseudoacacia* Linn. 和油松 *Pinus tabulaeformis* Carr. 人工林为研究对象,在搜集相关资料,查阅有关文献,分析国内外有关人工林密度调控研究现状的基础上,利用样地调查数据、解析木和气象资料,探讨了适合干旱半干旱区人工林密度调控技术问题。本书的内容包括基于水分生产函数的密度调控理论、晋西试验区概况、人工林生长特征、人工林生长对气候因子的响应、人工林耗水量、人工林水分生产函数、人工林综合密度效应、人工林密度调控模型等方面。编写这本书的主要目的是为广大林业工作者了解国内外人工林密度调控研究现状和趋势,了解我国干旱半干旱区人工林密度问题,定量分析人工林的耗水动态变化,掌握人工林水分生产函数和基于水分生产函数的密度调控技术等适合干旱半干旱区人工林密度调控的技术方法、新的理念和趋向,为干旱半干旱区人工林经营管理提供理论依据和新的思路。也为科研工作者和林业生产者在干旱半干旱区人工林抚育经营、密度调控和碳循环的进一步研究,以及干旱半干旱区植被恢复和生态环境建设等方面,提供理论依据和技术参考。

在这本书出版之际,对北京林业大学方山县试验基地、吉县试验基地及国营红旗林场工作人员在野外调查工作中的大力支持和帮助、提供的便利,在此深表谢意!也对课题组成员在野外调查和内业工作中,给予的热情帮助和支持,表示衷心的感谢!由于作者水平有限,时间仓促,错误和不妥之处在所难免,欢迎广大读者指正。

玉 宝

2010年11月8日

目 录

Contents

前言

第一章 基于水分生产函数的密度调控理论	(1)
第一节 人工林密度调控技术现状	(1)
一、传统密度调控技术现状	(1)
二、问题与趋势	(2)
第二节 基于水分生产函数的密度调控理论	(3)
一、理论框架	(3)
二、调控方法	(4)
三、技术途径	(6)
第二章 晋西试验区概况	(8)
第一节 山西方山县	(8)
一、地理位置	(8)
二、地质地貌	(8)
三、气候特点	(8)
四、土壤状况	(9)
五、植被分布	(9)
第二节 山西吉县	(10)
一、地理位置	(10)
二、地质地貌	(10)
三、气候特点	(10)
四、土壤状况	(11)
五、植被分布	(11)
第三节 吉县国营红旗林场	(12)
一、基本情况	(12)
二、土壤状况	(12)
三、气候特点	(12)
第三章 人工林生长特征	(13)
第一节 试验方法	(13)
一、样地设置	(13)
二、样地调查	(14)

三、树干解析	(15)
四、生物量的测定	(16)
五、数据统计分析	(16)
第二节 胸径生长特征	(17)
一、林分年龄的影响	(17)
二、林分密度的影响	(18)
三、立地条件的影响	(21)
四、胸径生长模型	(22)
第三节 树高生长特征	(24)
一、林分年龄的影响	(24)
二、林分密度的影响	(26)
三、立地条件的影响	(29)
四、树高生长模型	(31)
五、坡向、坡位	(32)
六、林分密度	(32)
第四节 人工林生长分化过程	(32)
一、相关研究现状	(32)
二、坡向对胸径生长的影响	(33)
三、林木分化过程	(33)
第五节 生物量及生产力	(35)
一、森林植物净第一性生产力研究现状	(35)
二、林分年龄的影响	(37)
三、林分密度的影响	(39)
四、生物量模型	(40)
第六节 树冠生长	(42)
一、冠幅	(42)
二、枝下高	(43)
第四章 人工林生长对气候因子的响应	(45)
第一节 温度和降水对树木年轮宽度影响研究现状	(45)
一、年轮宽度的影响因素	(45)
二、问题与展望	(47)
第二节 试验区气候特征分析	(48)
一、温度和降水量	(48)
二、干燥度指数	(48)
第三节 年轮宽度对气候变化响应	(49)
一、年轮宽度指数求算	(49)
二、树木年轮宽度与温度关系	(49)

三、树木年轮宽度与降水关系	(51)
四、温度和降水对树木年轮宽度的综合影响	(52)
五、树木年轮宽度指数模型	(53)
第四节 人工林气候生产潜力	(55)
一、气候生产力估算方法	(55)
二、气候生产力估算	(56)
三、气候变化对气候生产力的影响	(56)
第五章 人工林耗水量及水分生产函数	(59)
第一节 水分利用效率研究现状	(59)
第二节 人工林潜在蒸散量	(60)
一、潜在蒸散量估算方法	(60)
二、潜在蒸散量估算	(61)
第三节 耗水系数	(61)
第四节 人工林耗水量	(62)
一、林分耗水量估算方法	(62)
二、林分耗水量特征	(65)
三、与前人研究成果的比较	(67)
四、林分耗水量模型	(69)
第五节 人工林水分生产函数	(69)
一、水分生产函数研究现状	(69)
二、水分生产函数的界定	(70)
三、林分水分生产函数	(71)
第六章 人工林密度调控模型	(76)
第一节 人工林密度效应模型研究现状	(76)
一、模型类型与现状	(76)
二、存在问题与趋势	(79)
第二节 年龄与密度效应	(80)
一、刺槐人工林	(80)
二、油松人工林	(81)
第三节 胸径与密度效应	(82)
一、密度效应模型选择	(82)
二、模型参数求算	(82)
三、模型检验	(83)
四、直径结构	(83)
第四节 材积、生物量与密度效应	(88)
一、材积与密度效应	(88)
二、生物量与密度效应	(89)

第五节 密度对林下植被的影响	(89)
一、林下更新	(89)
二、植物多样性	(91)
第六节 人工林密度调控模型	(94)
一、模型选择	(94)
二、模型拟合	(96)
三、模型检验	(97)
四、密度调控对策	(97)
参考文献	(99)

第一节 人工林密度调控技术现状

一、传统密度调控技术现状

林分密度控制就是人为调控林分结构,充分发挥林木生长潜力,在实现速生、丰产、优质的同时发挥最大的生态效益。在一定立地条件下,密度是影响林分产量和质量的主要因子。林分生长过程中,由于自然稀疏或人工间伐,各年龄阶段都存在最佳林分密度,它不是常数,是一个随经营目的、造林树种、立地条件和栽培技术等因素改变而变化的数量范围(孙时轩,1992)。因此,密度问题是最优控制问题。林分密度控制的手段是间伐,控制林分密度,获取最大的效益,关键是要确定最适间伐强度。密度调控技术已成为造林后抚育间伐和森林经营管理的重要依据和关键技术。

人工林密度调控研究分为试验观测研究和数学模型研究两个阶段(洪伟等,1995;李梦等,1996;黄家荣等,1999;童书振等,2002;叶功富等,2005)。目前,国内外研究方式逐渐由实地观测研究转变为利用各种数学模型测算林分不同年龄阶段的最适密度。李梦等(1996)用动态规划法(Brodie J D *et al.*, 1979; Martin G L *et al.*, 1981; Buchman R G *et al.*, 1983; 丁宝永等, 1986; 1988; 张兴源, 1987)研究了长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)人工林最优密度控制技术。张彩琴等(2006)采用变分法和最优控制理论,得出了人工林间伐强度和蓄积密度的最优控制策略及其连续变化的数学模型。吴承祯等(1997; 1998; 2001)以净现值最大为标准,应用遗传算法来实现林分经营过程中的密度优化控制。洪伟等(1995)以林分生长模型为基础,将林分蓄积量年平均生长量作为目标函数,应用三次设计的方法建立杉木人工林经营过程控制系统。黄家荣等(1999)采用林分密度指数 *SDI* (Stand Density Index) 确定了马尾松纸浆林的适宜经营密度。

干旱半干旱区人工林密度调控研究主要围绕水分因子。集中体现在黄土高原半干旱区刺槐、油松等人工林密度与生物量关系(王百田等, 2005)、集水造林不同密度林分生长(王克勤等, 2002; 王百田等, 2004)、水分平衡与生产力关系(魏天兴等, 1999)、径流林业(王斌瑞等, 1996)等。陈丽华等(1995)根据林木水量平衡原理,确定了晋西地区合理的初植密度和成林密度。张建军等(2002)对晋西地区不同密度林地的水土保持作用对比分析认为,利用刺槐和油松营造水土保持林时密度应该以 3 000 株/hm² 为宜。武思宏等(2008)根据水量平衡原理,确定了晋西地区主要造林树种的合理林分密度,并提出了其计算方法。

叶面积指数 (*LAI*) 是群体结构的重要参数,也是衡量林分质量的重要指标(赵士洞

等, 1998)。很多学者研究叶面积指数与林分密度、生物量及生长的关系, 论证了叶面积指数在林分生长评价中的重要作用(王希群等, 2006; 白静等, 2007; 2008; 曾小平等, 2008)。赵士洞等(1998)指出叶面积指数是生产力模型尺度转换的连接点。王希群等(2006)认为林业生产中的格局和密度调控实际上调控的主要是林分 LAI , 使其达到最适的 LAI 。因此, 在干旱半干旱区植被恢复及人工林经营管理中, 除了林分密度外可应用叶面积指数来评价其合理性。

无论采取何种方法, 人工林密度调控就是确定不同年龄阶段的林分最优密度, 使林木在经营期内达到收获量最大, 从而优化筛选经营过程(造林密度、间伐时间、间伐强度、主伐时间等)的营林措施最优组合参数, 即制定人工林经营的最优决策方案。

二、问题与趋势

在全球 CO_2 浓度持续变化的过程中, 人们已意识到 CO_2 浓度升高、全球变暖和随之带来的水分和养分循环变化将影响到植被净第一生产力及其分布格局。在全球气候变化的背景下, 研究森林生物量生产力的变化趋势(Neilson R P, 1993; 高素华等, 1994; 潘亚茹等, 1994; 刘国华等, 2001; 闫淑君等, 2001; 郭建平等, 2002; 2003)、植物本身对全球变化的响应机制以及碳汇等是目前关注的焦点(Seino H U *et al*, 1992; Field C B *et al*, 1995; 王辉民等, 1995; 刘世荣等, 1998; 方精云, 2000; 朴世龙等, 2001)。在全球气候变化中, 最明显的为温度和降水量的变化, 不久的将来对人工林的影响也逐渐突出, 如造林树种选择、引种、造林密度、生物多样性、生产力的影响等等。遵循自然规律, 崇尚近自然林业, 科学经营人工林, 建立健康、稳定的人工林生态系统是必然的趋势。

现阶段我国人工林营造技术逐渐成熟, 但造林后期管护和抚育滞后, 造林和营林环节脱节, 造林和地下水资源开采不合理, 造林和用水矛盾突出, 这些现象在西部干旱半干旱区更明显。尽管一些地区已经具备了密度控制图(林小梅, 2002; 张惠光, 2006; 解开宏, 2006)等密度管理技术, 但不具普遍性, 适用性不强。密度管理技术中未考虑到当地造林成活和林木生长限制因子, 仅按照生产木材的培育目的进行密度管理, 造林和成林关键难点问题未得到解决。在干旱半干旱区, 一切林业活动主要围绕水分因子, 若初植密度不合理, 虽然在成活初期影响不明显, 但随着林分年龄增大, 密度效应随之显现出来。

在干旱半干旱区, 有必要深入研究以“水分生产函数”为基础的围绕水分因子的密度调控技术, 这有利于解决干旱半干旱区人工林培育中的关键问题, 该密度调控技术较传统密度调控技术更适合于干旱半干旱区人工林的密度管理, 也是今后干旱半干旱区人工林密度调控研究的发展趋势。

对人工林经营, 不能仅以产量和速度来衡量, 应从森林生态系统的高度看待人工林经营问题, 充分发挥其生态效益为主的各种效益更为重要。林分密度管理是一项系统工程, 从幼林到成林的整个过程中, 遵守“近自然林业”原则, 动态调控林分密度, 生态控制林分结构(关君蔚, 2007), 根据经营目的在不同生长阶段确定合理的经营密度, 促进养分、光照和水分等生长因子由不平衡状态到平衡状态, 提高人工林生态系统的生物多样性(蒋有绪等, 1996; Martin Holdgate, 1996; 彭少麟等, 2000; 长池卓男, 2002; 山浦悠一, 2004)、稳定性、健康性, 充分发挥其生态、经济和社会效益, 这是人工林经营所面临的一项重要课题, 也是必须解决的一系列问题。

第二节 基于水分生产函数的密度调控理论

一、理论框架

水资源日趋紧张已是全球性的生态问题（财团法人水利科学研究所，2002）。世界上50多个国家，1/3的陆地面积，全球43%的耕地面积处于干旱半干旱地区（许越先，1992）。我国的干旱、半干旱、亚湿润干旱地区的面积分别为142.7万 km^2 、113.9万 km^2 、75.1万 km^2 （于东升等，1998；中国可持续发展林业战略研究项目组，2003；石玉林等，2004），其总面积为331.7万 km^2 ，占国土总面积的34.6%。这些地区降水量小，水分蒸发量大，植被稀少，森林生物量生产力低，属于我国生态建设的重点和难点地区。加强生态建设，恢复植被，需要实施大面积人工造林，提高森林经营管理技术，确保较高的造林成活率和保存率。

根据第七次全国森林资源清查结果，我国人工林保存面积达到了6 168.84万 hm^2 ，居世界首位。但由于树种选择不科学，栽植密度过大等原因，造成人工林地力衰退、林地干化、地下水位下降等问题日趋明显（杨维西，1996；王克勤等，1998；王力等，2004）。人工林与天然林相比，具有生物多样性指数低、稳定性差、抗逆性差、树种单一、抗病虫害能力弱等诸多弊端。因此，经营好人工林，对改善我国生态环境、维护生态安全、促进林业发展具有重要意义。2003年12月召开的《联合国气候变化框架公约》第九次缔约方大会中，国际社会已就将造林再造林等林业活动纳入《京都议定书》的清洁发展机制（李怒云等，2006；2007）下的造林再造林碳汇项目（魏殿生，2006；李怒云等，2005；2007）达成了一致。我国第一个造林再造林碳汇项目即“中国东北部敖汉旗防治荒漠化青年造林项目”（李怒云等，2006）成功启动以来，在广西、云南、辽宁等地碳汇试点项目的相继实施，标志着我国人工造林事业有了新的发展和高度。我国虽然未被要求履行《京都议定书》的减排义务，但是应对全球气候变化以及基于人类共同的责任，将面临减排和碳汇任务。在这些重要战略举措中，人工造林将扮演重要角色，因此也对人工林营造和经营管理提出了新的更高的要求。

国内很多学者研究发现，目前影响我国森林生物量生产力的主要因子是水分因子（Uchijima Z *et al.*, 1985；周广胜等，1995，1998；方精云等，1996；王宗明等，2002），在干旱半干旱区尤为突出。水分因子是培育人工林的主要限制因子（Clarke J M, 2000），并且依靠人工灌溉进行大面积造林不符合生产实际。通过密度调控解决林分的合理耗水量，将成为缓解缺水矛盾的主要途径之一。林分密度一直是人工林研究的热点问题，也是林业生产必须解决的关键技术之一，是林木个体水分营养空间大小的决定因素（王百田等，2005）。密度是否合理，直接影响到人工林生产力的提高和最大功能的发挥，所以探索合理的栽植密度一直是森林培育研究及生产的重要课题之一（沈国防，2001）。

从国内目前研究的范围和树种来看，人工林研究主要集中在南方的马尾松（谌红辉等，2004；吴承祯等，2005）、杉木（洪伟等，1996；陈信旺，2006；王艳霞等，2007）等速生用材林上，而对北方干旱半干旱区人工林密度调控技术的研究却不多，且不具系统性，有必要深入、系统地进行研究。合理利用水分，科学调控造林密度，深入研究林木水

分消耗与生产力的关系,提高经济效益和生态效益,是干旱半干旱区人工造林和经营管理的关键。

近年来,由于人工林植被类型的选择不科学,栽植密度过大等原因(王斌瑞等,1996;王克勤等,2002;王百田等,2004),造成人工林地力衰退、林地干化(杨维西,1996;王克勤等,1998;魏天兴等,1999;张晓明等,2003;王力等,2004;孙中文等,2005)、地下水位下降等问题日趋明显,引起了林学界的高度重视(刘财富等,2001;宋永芳,2002)。由此开始,学者们对我国干旱半干旱区生态系统需水问题进行了研究(贾宝全等,2000;2002;左其亭,2002),并估算了一些地区的生态建设需水量(王礼先,2000;陈丽华等,2001;何永涛等,2004),为该地区生态建设提供了理论依据,但目前的研究还不系统。综上所述,传统的人工林密度调控方法多数为根据经营目标,以人工林生长量指标为主要依据进行密度调控。对处在干旱半干旱区等特殊环境条件中的人工林来说并不适合,更难以满足人工生态公益林的密度调控要求。目前在传统人工林密度调控方法中,仍然缺乏以影响人工林生长因子为主要依据的密度调控技术,必须探索出适合多项要求和追求多种效益(经济、生态、社会),以多种指标为依据的密度调控方法。也就是说必须由传统的以单一生长指标为依据的密度调控技术向从生长限制因子入手,以多种关键因子为依据的密度调控技术转变。换句话说,必须由适应追求单一效益(林产品)的密度调控技术向追求多种效益(经济、生态、社会)的密度调控技术转变。因此,在干旱半干旱区有必要深入研究以“水分生产函数”为基础,围绕水分因子的密度调控技术,这是突破传统的人工林密度调控方法的新型密度调控技术。

水分生产函数是属于气候生产力范畴,能够直接引入关键生长影响因子,可弥补气候生产力模型和传统的密度调控技术中的不足。传统的密度调控技术(图1-1)是以产量最高为目标,为处理密度和产量(胸径、树高、材积和蓄积)关系的控制系统。而以水分生产函数为基础的密度调控技术(图1-2)是以限制林木生长的水分因子为切入点,遵守水资源环境容量原则(王百田等,2004),根据林地水量适时调控密度,使经济、生态和社会效益达到最佳状态的控制系统,属于生态控制系统范畴(关君蔚,2007),解决了供水耗水矛盾等关键问题,能够缓解现阶段人工造林当中普遍存在的地力衰退、土壤干化、地下水位下降等诸多生态问题的加剧。虽然两种方法在形式上具有相似性,但两者的着手点和追求的目标不同,传统密度调控技术是以最高收获量为目标,基于水分生产函数的密度调控技术则以综合效益最佳为目标,两者具有本质上的区别。后者抓住了问题的根本,更具有解决实际问题的意义。因此,以水分生产函数为基础的密度调控技术更适合于干旱半干旱区的人工林密度管理,是今后干旱半干旱区人工林密度调控研究发展的趋势,具有广泛的应用前景。

山西省方山县和吉县,其降水时间、林分分布与人工林需水的耦合性较差,属于典型的干旱缺水地区。选择该地区的主要造林树种刺槐、油松人工林为研究对象,研究其人工林水分生产函数及密度效应规律,提出以水分生产函数为基础的密度调控技术理论和方法,为干旱半干旱区生态环境建设、植被恢复、人工林经营管理、密度调控技术、抚育间伐,以及森林碳循环的进一步研究,具有重要的理论依据和现实指导意义。

二、调控方法

基于水分生产函数的密度调控技术主要是从林分耗水量入手,在水资源环境容量原则

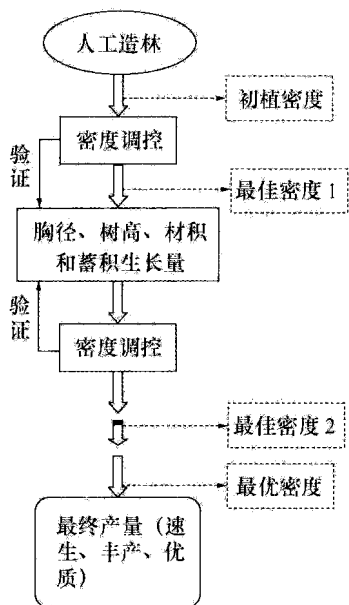


图 1-1 传统密度调控技术流程
Fig. 1-1 Traditional process of density control technology

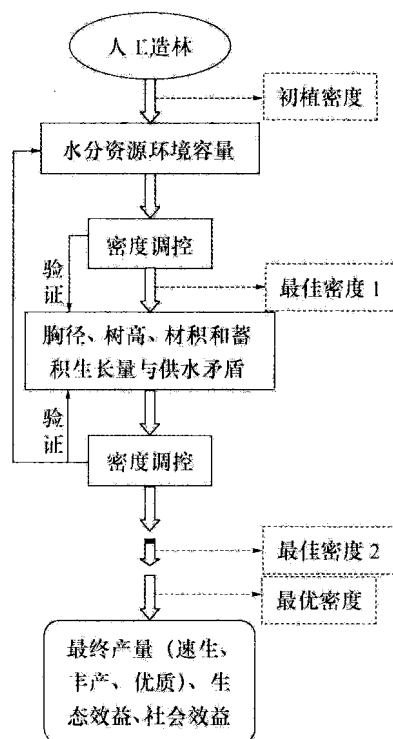


图 1-2 以水分生产函数为基础的密度调控技术流程
Fig. 1-2 The process of density control technology which based on the water production function

下，缓解林分耗水量与供水量（降水量）的矛盾。人工造林后随着林龄的增加，单株和林分耗水量都增加，使得林分耗水量与降水量的差距逐渐缩小，甚至耗水量超出降水量水平。这将导致林分生长量下降，出现林分结构不合理，林分健康性、稳定性、抗逆性差，林地干化等诸多问题。在这种情况下要调控林分密度，其直接依据是林分耗水量要小于降水量水平。因此，在干旱半干旱区人工林在不同林龄阶段都有合理的林分密度，而且这个密度必须是在现降水条件下的最佳密度。人工造林后形成初植密度，但该初植密度在林分郁闭后将逐渐出现不合理的现象，这时根据林分耗水量调控林分密度将得出最佳密度 1。并且对这个最佳密度 1 需要以单株、林分生长指标（胸径、树高、材积和蓄积量）和其他评价指标（经济效益、生态效益、社会效益、林下更新、植物多样性、病虫害）来验证是否合理（图 1-2）。若不合理则继续进行调控，以此类推可以确定在不同生长阶段的最佳密度，最后得出最优林分密度。在这个人工林培育过程中，不仅得到了经济效益，同时兼顾了生态效益和社会效益，因为该密度调控技术不只考虑了林分生长指标还考虑了限制影响林分生长的耗水量指标，同时考虑了林分更新、植物多样性等生态效益指标。那么从初植密度到不同林龄阶段的最佳密度一直到最后的最优密度，这是在现降水条件下的人工林整个林分培育密度调控方案。

三、技术途径

在分析国内外人工林密度调控技术研究的基础上,总结人工林传统密度调控技术的问题和不足,提出以水分生产函数为基础的密度调控技术方法,为干旱半干旱区人工林培育和抚育经营提供理论依据。在水分生产函数的人工林密度调控技术当中,关键问题是如何界定人工林水分生产函数及内涵,如何选定其应包含的因素,如何建立人工林水分生产函数等。本研究选择山西省方山县和吉县的主要造林树种刺槐、油松人工林,根据样地调查数据、解析木资料、试验区气象资料,分析不同结构人工林的生长特征,揭示密度效应规律,估算现有降水条件下的人工林耗水量,建立人工林水分生产函数。在此基础上,结合密度效应模型,阐述密度调控技术问题,最终建立人工林密度调控模型,其主要技术途径如图 1-3 所示。

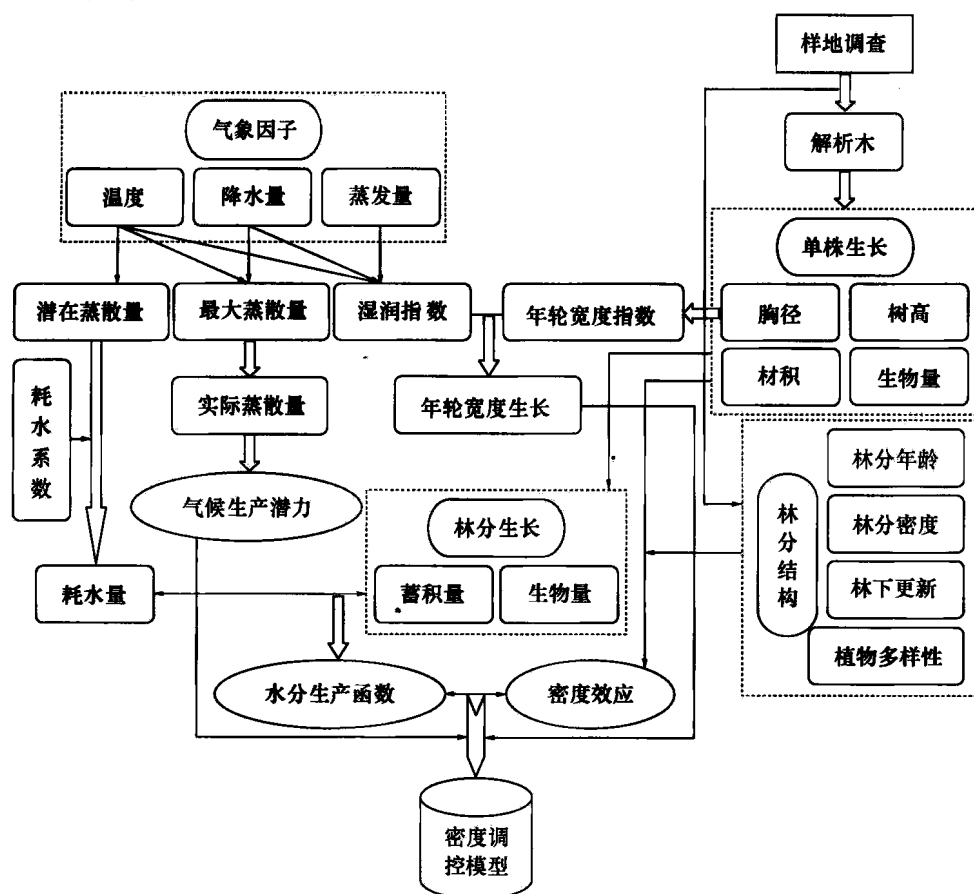


图 1-3 研究技术路线框架

Fig. 1-3 Frame diagram of research technique

(一) 人工林生长特征

主要分析生长在不同立地条件的刺槐、油松人工林的胸径、树高、冠幅生长和生物量、生产力特征以及生长分化过程,揭示其随林分年龄和密度变化规律。建立刺槐、油松人工林的单株胸径和树高总生长及总生长过程模型,为人工林其他各种模型的建立奠定基础。

（二）人工林生长对气候因子的响应

主要采用年轮宽度指数，分析温度、降水、湿润指数等因子对刺槐和油松林年轮宽度的影响。以月平均温度、月降水量、湿润指数建立年轮宽度指数模型。主要揭示温度和降水等因子对人工林生长的影响机制，为人工林水分生产函数、人工林密度调控模型的建立提供理论依据。

（三）人工林耗水量

根据人工林潜在蒸散量和耗水系数，估算人工林的耗水量，分析不同林龄林分的耗水特征，建立试验区刺槐、油松人工林耗水模型。这是建立人工林水分生产函数的前提条件，也是为最终建立人工林密度调控模型不可缺少的一个因子。

（四）人工林水分生产函数

界定人工林水分生产函数及内涵，以林分年耗水量为自变量，以林分生物量、蓄积量年增量为因变量，拟合人工林水分生产函数，为建立人工林密度调控模型打好基础。

（五）人工林密度效应

分析不同结构特征的林分密度效应规律。建立林分平均胸径、林分平均单株材积、林分平均单株地上生物量的密度效应模型，分析林分直径结构特征。分析林分密度对林分更新及林下植物多样性的影响，为建立人工林密度调控模型提供思路和依据。

（六）人工林密度调控模型

建立以单株胸径连年生长量、单株材积连年生长量、单株生物量年增量、林分蓄积量年增量、林分生物量年增量为因变量，以林分年龄、林分密度、林分年耗水量为自变量的人工林密度调控模型。包括胸径—密度系列，材积—密度系列，蓄积量—密度系列，生物量—密度系列等。主要是根据上述内容，在全面系统地归纳总结的基础上，建立基于水分生产函数的人工林密度调控模型。

试验区位于山西省吕梁地区方山县和临汾市吉县境内，同属于吕梁山脉的黄河中游黄土丘陵沟壑区。试验地分为方山县峪口镇，吉县蔡家川流域，吉县国营红旗林场西咀营林区等。方山县和吉县试验区概况分别引自贺康宁（2000）、杨文文（2006）等。

第一节 山西方山县

一、地理位置

方山试验基地位于山西省吕梁山西麓的方山县峪口镇东南 3km 的土桥沟流域（北纬 $37^{\circ}36'58''$ ，东经 $111^{\circ}02'55''$ ），属黄河中游黄土丘陵沟壑区，地处黄河一级支流北川河的三级阶地。流域呈东西走向，无常流水。

二、地质地貌

试验区属典型的黄土丘陵沟壑地貌，地表大部分为新生代第四纪马兰黄土所覆盖，厚度在 50 ~ 100m 之间，由于历史原因和人为破坏造成植被稀少，在地表径流长期冲刷的作用下，沟道下切，形成沟壑、梁、峁状独特的黄土地貌。沟谷切割的深度一般在 100 ~ 150m，有的甚至超过 200m。流域内最高海拔 1 446m，平均海拔 1 200m，平均坡度 $18^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

三、气候特点

该地区属暖温带大陆性季风气候，冬春寒冷干燥，秋季凉爽少雨，夏季降水集中。根据方山县气象站 1985 ~ 2007 年的统计资料，该地区年平均气温 7.93°C ，极端高温 38.3°C （2005 年 6 月），极端低温 -25.5°C （2005 年 1 月）， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $2\,819.7^{\circ}\text{C}$ ， $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 积温 $2\,223.5^{\circ}\text{C}$ 。年降水量 507.65mm，且年内分配非常不均匀，6 ~ 9 月份的降水量占全年的 70% 以上。多年平均陆面和水面蒸发量分别达 652.9mm 和 1 864.6mm。相对湿度为 50%，干燥度 1.3，无霜期 140 天。最大蒸发量出现在 4 ~ 6 月，明显大于同期降水量，同时期的大气相对湿度也是年内最低，表现出典型的北方严重春旱的特征（表 2-1）。

表 2-1 山西省方山县试验区年内气象要素

Tab. 2-1 The mean monthly meteorology elements in Fangshan station, Shanxi Province

月份	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	降水量 (mm)	蒸发量 (mm)	相对湿度 (%)	日照时数 (h)	风速 (m/s)	气压 (100Pa)	水汽压 (hPa)
1	-8.43	3.89	42.67	54.52	183.92	2.33	886.09	1.79
2	-3.78	6.00	64.00	48.56	181.30	2.44	884.38	2.58