

文章编号: 1001-1498(2010)03-0472-06

干旱半干旱区人工林密度调控技术研究现状及趋势

玉宝^{1,2}, 王百田^{1*}, 乌吉斯古楞³

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 国家林业局管理干部学院, 北京 102600;

3. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

关键词: 干旱半干旱区; 人工林; 密度调控

中图分类号: S728.2

文献标识码: A

Research Status and Trend on Plantation Density Control Techniques in Arid and Semi-arid Regions

YU Bao^{1,2}, WANG Bai-tian¹, WU Ji-si-gu-leng³

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Academy of Forestry Administration,

Beijing 102600, China; 3. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: This article reviewed the research status of the plantation density control techniques based on domestic literature, and discussed the technical issues on plantation density control in the arid and semi-arid region. Nowadays, more studies focused on modeling study, but with less mechanism; more on the pure plantation with similar ages and site conditions, rather than mixed forests; and more on the fast-growing timber plantation in South, but less on the plantation in arid and semi-arid regions. It was imperative to study the density control techniques which focused on the water factors, such as the techniques of water production function in the arid and semi-arid regions. The traditional density control techniques aimed to attain the highest production by relating the system density and production. The density control techniques based on water production function set the point of entry with the water factors, complied with the principle of water supporting capacity. The timely density control based on the amount of available water in the plantation ecosystem could ensure the best balance among the economic, ecological and social benefits of forests. It would be also beneficial to avoid from or reduce the problems of soil degradation, soil drying and groundwater decreasing caused by improper afforestation, and more suitable for the density management of plantation in the arid and semi-arid region.

Key words: arid and semi-arid region; plantation; density control

水资源日趋紧张已是全球性生态问题。我国的干旱、半干旱、亚湿润干旱地区的面积分别为 142.7、113.9、75.1 万 km²。其总面积为 331.7 万 km², 占国土总面积的 34.6%^[1]。这些地区降水量小, 蒸发量大, 植被稀少, 生物量生产力低, 属我国生态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, 提高经营管理技术, 确保高的造林成活率和保存率。

我国人工林面积世界第一, 截至 2004 年, 已达 5 364.99 万 hm²^[2]。但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^[3-5]。因此, 经营好人工林, 对

收稿日期: 2009-05-26

基金项目: 林业公益性行业科研专项(200704031)

作者简介: 玉宝(1976—), 男, 蒙古族, 内蒙古通辽人, 博士生, 从事生态学理论与生态控制技术研究. E-mail: nmlyb8@sina.com

* 通讯作者: 王百田(1958—), 男, 教授, 从事林业生态工程教学与研究.

改善我国生态环境、生态安全及林业发展具有重要意义。

国内学者研究发现,目前影响我国森林生物量生产力的主要因子是水分因子^[6-7],这在干旱半干旱区尤为突出,通过密度调控解决缺水问题已成为主要途径之一。林分密度一直是研究的热点问题,是林木个体水分营养空间大小的决定因素^[8]。密度是否合理,直接影响到人工林生产力的提高和功能的最大发挥,所以探索合理密度一直是森林培育研究及生产的重要课题之一。从国内目前研究的范围和树种来看,主要集中在南方的马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)^[9-10]、杉木(*Cunninghamia lanceolata*(Lamb.) Hook.)^[11-13]等速生用材林,而对北方干旱半干旱区人工林密度调控技术研究还不多,也不具系统性,有必要深入系统研究。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。

本文主要从人工林密度效应、水分生产函数、水分利用效率等几个方面,总结分析了国内外人工林密度调控研究现状及趋势,探讨了适合干旱半干旱区人工林密度调控技术研究方法和趋向,旨在为干旱半干旱区人工林经营管理提供理论依据和思路。

1 人工林密度调控研究

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变动而变化的数量范围,密度问题是最优控制问题。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,可以分为试验观测研究^[14-15]和数学模型研究^[16-17]两个阶段。目前,国内外研究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^[18]用动态规划法研究了长白落叶松(*Larix olgensis* Henry)人工林最优密度控制技术。张彩琴等^[19]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^[20]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^[17]以林分生长模型为基础,将林分蓄积量年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^[15]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(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)等人工林密度与生物量关系^[8]、集水造林不同密度林分生长^[21-22]、水分平衡与生产力关系^[23]、径流林业^[24]等。陈丽华等^[25]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^[26]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 $3\ 000\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜。武思宏等^[27]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*(Leave Area Index) 是群体结构的重要参数,也是衡量林分质量的重要指标^[28]。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^[29-32]。赵士洞等^[28]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^[29]认为林业生产中的格局和密度调控实际上主要调控的是林分 *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。

2 人工林密度效应模型研究

日本学者吉良竜夫 1953 年时在 1 年生草本群落中发现了密度效应法则^[33],此后许多学者研究表明,密度效应法则也适用于多年生木本植物群落。经过大量研究提出了表述平均单株材积(v)、平均胸高直径(D)、单位面积蓄积量(V)等表示平均个体或群体的大小与立木密度(N)之间关系的数学模型,即密度效应模型。常见的有:密度效应倒数模型^[9,34]、密度效应乘积模型^[35-36]、密度二次效应^[12,37-40]、竞争密度效应^[9,11,34,41-43]、生产函数密度效应^[44-45]等。

人工林密度效应研究方法主要有两种:一是固定样地定位观测,该方法需要时间长、费用高,但精度高,可信度大;二是设置临时样地,用空间代替时间方法,即在相同立地条件下,形成年龄和密度梯度,建立林分密度效应模型,该方法操作简单、易行、但精度不高。无论何种研究方法,目前国内外研究普遍认为在一定条件和一定密度范围内,林分单位面积蓄积量与林分密度呈正相关。但到一定年龄时,高密度的林分单位面积蓄积量有下降趋势^[14];林分密度与林木平均直径和单株材积呈负相关;林分密度对平均树高的影响不明显。在密度管理方法中,基于林分密度与立木单株材积及单位面积产量之间的关系,即密度效应规律为基础,建立各种数学模型编制了林分密度控制图^[37, 46 - 47]。

人工林密度效应模型是将林木或林分生长量以立木密度与林分优势木高度的数学关系式表述^[12, 25, 39, 45],其缺点是未充分考虑影响林木生长的因子。从目前研究进展来看,由同一立地条件下,同龄人工用材林的密度控制逐步研究建立了在不同立地条件、不同类型林分各个发育阶段的密度效应模型。但主要研究南方马尾松、杉木等速生用材林,而北方干旱半干旱区人工林密度效应研究不多。尽管国内外学者已经研究建立了多种模型,但模型机理性研究不够,传统林分密度效应研究局限于相同立地的同龄人工纯林,而不同立地、年龄的人工林和天然林密度效应研究甚少,对混交林的近似同龄林及异龄林的密度效应规律等,有必要深入探讨。

3 水分利用效率研究

由于林业生产主要依靠天然降水的特殊性,对水分利用效率研究起步较晚。王斌瑞等^[24]关于集水造林技术研究认为,随着林分密度增大,树高生长量和蓄积量减小与常规造林及天然林的研究结果有较大差别^[8, 21, 34, 38, 48 - 49]。从而进一步证明了干旱半干旱区林木生长主要与水分的时空分配有关。

干旱半干旱区的林木生长与水分关系研究^[50 - 51],主要应用生物量^[8]、蓄积量^[8]、蒸腾耗水量^[48 - 49, 51 - 53]、水分有效利用率^[49]、水分利用效率^[54]、水分生产效率、蒸腾系数^[55]、耗雨系数^[23]等指标。而林分生长与水分关系^[23, 56],尤其林分生长、密度与水分关系研究甚少。在测算林木蒸腾耗水方面,国内外开展了许多研究^[57 - 63]。其测定技术不但能够动态地掌握单株树木的蒸腾耗水规律,还与生态学尺度转换

方法有机结合,为实现直接测定林分的蒸腾耗水量提供了条件,并为自然条件尤其是降水量不同的地区适宜耗水量的树种选择提供了重要的理论依据^[64 - 67]。尽管很多学者运用彭曼公式(Penman formula)和桑斯维特公式(Thomthwaite formula)研究了黄土高原主要造林树种耗水量,但单株和林分耗水量的研究不够系统性,只测算需水量,未结合林分密度对其同等水分情况下生物量生产力进行评价^[50 - 51, 68 - 70]。因此,不同年龄阶段单株耗水特性,不同年龄、密度的林分耗水特性等方面,还需深入研究。

在干旱半干旱区,满足水量平衡的造林密度和后期适宜的林分密度调控,是保持防护林林分生长稳定的关键。武思宏等^[27]以降水量平衡原理确定了黄土区主要造林树种不同年龄阶段的合理密度,提出了“量水植树”原则,首次比较系统地提出水分因子为基础的人工林合理密度问题。郭忠升等^[71]认为,土壤水分植被承载力为土壤水分承载植物的最大负荷,是指在较长时期内,当根层土壤水分消耗量等于或小于降水补给量时,所能维持特定植物群落健康生长的最大密度。曹军胜等^[72]认为,土壤水分植被承载力是黄土高原地区土壤水分与植物生长关系调控、合理利用水土资源和生态植被建设的核心问题之一,必须优先考虑。张永涛等^[73]用水量平衡理论研究认为,目前黄土高原 10 年生侧柏(*Platycladus orientalis*(L.) Franco)的造林密度不合理,应进行适当调整。王力等^[74]认为,黄土高原降水稀少,水资源贫乏,水分承载力处于较低的水平,实际栽植密度超出了水分承载力。陈洪松等^[75]认为,有必要深入开展植被的生态需水和土壤水分的植被承载力等方面的研究,制定合理的退耕还林还草措施,才能避免干燥化土层的形成。刘晨峰等^[76]认为,每一种林分都应根据当地环境的水分承载力,保持适度的密度。

4 水分生产函数研究

在农业领域,关于作物水分生产函数(Crop water production function)的研究广泛,已经逐渐成熟。作物产量与水分因子之间的数学关系称为作物水分生产函数^[77]。在国外,从 20 世纪 60 年代以来围绕小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、棉花(*Gossypium hirsutum* L.)、洋葱(*Allium cepa* L.)等作物水分生产函数进行了大量的研究^[78 - 79]。在国内,主要对水稻(*Oryza sativa* L.)、冬小麦、夏玉米、棉花、大豆(*Glycine max*(Linn.) Merr.)、蚕豆(*Vicia*

faba L.) 等农作物的水分生产函数进行了研究^[77, 80-83]。

在林业上,关于水分生产函数的研究几乎空白,直接应用“水分生产函数”名称少见^[56]。王克勤等^[56]关于集水造林^[24]水分生产力的研究认为,植物物质生产与水分关系直接表现为生产量与蒸腾量间的密切关系;不同造林密度,单株林木年生物增量与其蒸腾量之间存在相应的函数关系;林分密度从高到低,林木水分生产函数曲线由直线转为对数曲线,并且年生物量增量随蒸腾量的变化量由小逐渐增大^[56]。关于林木与水分生产力关系研究,更多地体现在气候生产力^[6-7, 84-87],但气候生产力主要依靠各种模型,针对某一地区的生产力大范围估算,误差较大,与林木实际生长要素相结合的较少,对于具体小范围地区来说欠适用。

5 讨论与结论

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会逐渐突出。如对造林树种选择、引种、造林密度、生物多样性、生产力的影响等等。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^[47]等密度管理技术,但不具普遍性,适用性不强等缺点。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,造林和成林关键问

题未得到解决。在干旱半干旱区一切林业活动均要围绕水分因子,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。

笔者认为,在干旱半干旱区有必要深入研究“水分生产函数”等围绕水分因子的密度调控技术。水分生产函数也属于气候生产力范畴,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密度调控技术中的不足。传统的密度调控技术(图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^[22]原则,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,是属于生态控制系统^[88]范畴,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^[89]。虽然两种方法在形式上具有相似性,但追求的目标不同,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,有了本质上的区别。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。以水分承载力为依据的水分生产函数密度调控技术是今后干旱半干旱区人工林密度调控研究发展趋势,具有广泛的应用前景。同时,在干旱半干旱区植被恢复及人工林经营管理中,除了林分密度外还可应用叶面积指数来评价其合理性。

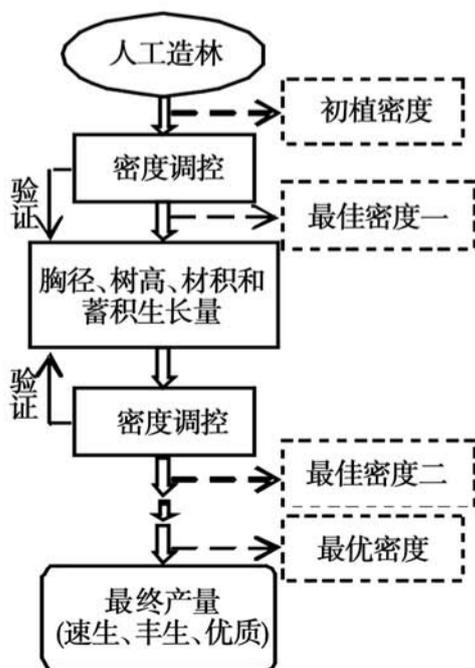


图1 传统密度调控技术流程

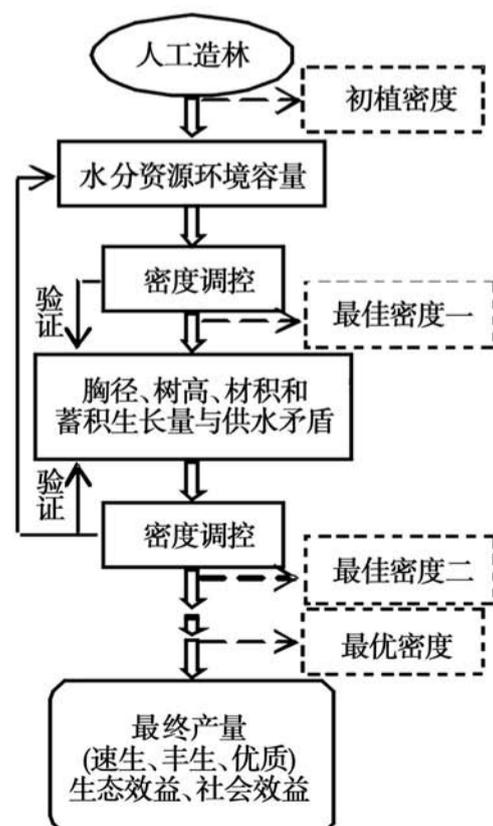


图2 以水分生产函数为基础的密度调控技术流程

对人工林经营,笔者认为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,动态调控林分密度,生态控制林分结构,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达到平衡状态,提高人工林生态系统的生物多样性、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。

参考文献:

- [1] 中国可持续发展林业战略研究项目组. 中国可持续发展林业战略研究(战略卷)[M]. 北京:中国林业出版社,2003:181-187
- [2] 国家林业局. 中国林业统计年鉴[M]. 北京:中国林业出版社,2005
- [3] 王克勤,王斌瑞. 集水造林防止人工林植被土壤干化的初步研究[J]. 林业科学,1998,34(4):14-21
- [4] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题[J]. 林业科学,1996,32(1):78-85
- [5] 王力,邵明安,李裕元. 陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究[J]. 林业科学,2004,39(1):84-91
- [6] 方精云,刘国华,徐高龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报,1996,16(5):497-508
- [7] 周广胜,郑元润,罗天祥,等. 自然植被净第一性生产力模型及其应用[J]. 林业科学,1998,34(5):2-11
- [8] 王百田,王颖,郭江红,等. 黄土高原半干旱地区刺槐人工林密度与地上生物量效应[J]. 中国水土保持科学,2005,3(3):35-39
- [9] 吴承祯,洪伟,柳江,等. 封育次生马尾松(*Pinus massoniana*)林优势种群竞争密度效应[J]. 应用与环境生物学报,2005,11(1):14-17
- [10] 秦国峰,周志春,金国庆,等. 马尾松速生丰产林不同培育目标的适宜造林密度[J]. 林业科学研究,1999,12(6):620-627
- [11] 王艳霞,吴承祯,洪伟,等. 杉木人工林生长对密度效应的响应[J]. 福建林学院学报,2007,27(1):25-29
- [12] 陈信旺. 杉木人工林最优经营密度模型的研究[J]. 林业勘察设计,2006(1):7-10
- [13] 洪伟,吴承祯. 闽北杉木人工林密度效应新模型[J]. 浙江林学院学报,1996,13(1):15-20
- [14] 童书振,盛炜彤,张建国. 杉木林分密度效应研究[J]. 林业科学研究,2002,15(1):66-75
- [15] 黄家荣,温佐吾. 贵州马尾松人工林密度和结构控制初步研究[J]. 贵州林业科技,1999,27(2):16-20
- [16] 李梦,匡莹,刘刚,等. 长白落叶松人工林最优密度及其控制技术的研究(一)[J]. 林业勘察设计,1996,97(1):1-5
- [17] 洪伟,曾强,吴承祯,等. 杉木人工林经营过程最优控制研究[J]. 福建林学院学报,1995,15(2):123-128
- [18] 李梦,穆树山,匡莹,等. 长白落叶松人工林最优密度及其控制技术的研究[J]. 林业勘察设计,1995,96(4):1-5
- [19] 张彩琴,郝敦元,李海平. 人工林林分密度最优控制策略的数学模型[J]. 东北林业大学学报,2006,34(2):24-26
- [20] 吴承祯,洪伟. 马尾松人工林经营过程密度优化研究[J]. 林业科学,2001,37(专刊1):72-77
- [21] 王克勤,王百田,王斌瑞,等. 集水造林不同密度林分生长研究[J]. 林业科学,2002,38(2):54-60
- [22] 王百田,贺康宁,史常青,等. 节水抗旱造林[M]. 北京:中国林业出版社,2004
- [23] 魏天兴,朱金兆. 黄土区人工林地水分供耗特点与林分生产力研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(4):45-51
- [24] 王斌瑞,王百田. 黄土高原径流林业[M]. 北京:中国林业出版社,1996:103-122
- [25] 陈丽华,余新晓. 晋西黄土地区合理造林密度的确定[J]. 林业科技通讯,1995(1):22-23
- [26] 张建军,毕华兴,魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(3):50-53
- [27] 武思宏,朱清科,余新晓,等. 晋西黄土区主要造林树种合理林分密度计算与分析[J]. 水土保持研究,2008,15(1):83-86
- [28] 赵士洞,罗天祥. 区域尺度陆地生态系统生物生产力研究方法[J]. 资源科学,1998,20(1):23-34
- [29] 王希群,马履一,张永福. 北京地区油松、侧柏人工林叶面积指数变化规律[J]. 生态学杂志,2006,25(12):1486-1489
- [30] 白静,田有亮,韩照日格图,等. 油松人工林叶面积指数与其生物量及生长因子关系的研究[J]. 林业资源管理,2007(4):52-56
- [31] 白静,田有亮,韩照日格图,等. 油松人工林地上生物量、叶面积指数与林分密度关系的研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(3):183-187
- [32] 曾小平,赵平,饶兴权,等. 鹤山丘陵3种人工林叶面积指数的测定及其季节变化[J]. 北京林业大学学报,2008,30(5):33-38
- [33] 吉良竜夫. 競争密度效果な基にした干材積収穫予測[J]. 林試科学,1963,154:1-19
- [34] Shinozaki K, Kira T. Intraspecific competition among higher plants: Logistic theory of the C-D effect[J]. Journal of Institute of Polytechnics, 1956, 7:35-72
- [35] Yoda. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions[J]. J Biol Osaka City University, 1963, 14:107-129
- [36] Silvertown J W. Introduction of plant population ecology[M]. London and New York: Longman, 1982:7-8
- [37] 尹泰龙. 林分密度控制图[M]. 北京:中国林业出版社,1984:1-26
- [38] Chen C M, Rose D W, Leary R A. Derivation of optimal stand density over time—a discrete stage, continuous state dynamic programming solution[J]. For Sci, 1980, 26(2):217-227
- [39] 洪伟,吴承祯. 闽北杉木人工林密度控制连续状态的动态规划研究[J]. 福建林学院学报,1996,16(1):1-4
- [40] 黄家荣. 人工用材林最优密度控制模型[J]. 浙江林学院学报,2001,18(1):36-40
- [41] 方精云,菅诚,山仓拓夫. 日本落叶松模拟种群生长与密度的关系[J]. 植物学报,1991,33(12):949-957
- [42] 薛立,荻原秋男. 杉木竞争密度效果分析[J]. 应用生态学报,2001,12(2):171-174

- [43] Xue L, Hagihara A. Growth analysis of the self-thinning stands distribution in of *Pinus Densiflora* Sieb. et Zucc [J]. *Ecology Research*, 1998, 14: 49 - 58
- [44] 陈 辉, 何忠明, 洪 伟. 杉木人工林密度效应模型研究 [J]. *福建林学院学报*, 1992, 12(3): 277 - 282
- [45] 张惠光. 巨尾桉人工林密度效应模型的研究 [J]. *林业勘察设计*, 2006(2): 4 - 7
- [46] 盛炜彤. 杉木林的密度管理与长期生产力研究 [J]. *林业科学*, 2001, 37(5): 2 - 9
- [47] 马钦彦. 油松林生物量-密度管理图 [J]. *北京林业大学学报*, 1988, 10(3): 69 - 78
- [48] 张 华, 王百田, 郑培龙. 黄土半干旱区不同土壤水分条件下刺槐蒸腾速率的研究 [J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 122 - 125
- [49] 田晶会, 贺康宁, 王百田, 等. 黄土半干旱区侧柏蒸腾作用及其与环境因子的关系 [J]. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 53 - 56
- [50] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土高原主要造林树种需水定额计算与分析 [J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1): 36 - 40
- [51] 马义虎, 陈丽华, 余新晓. 晋南人工刺槐林需水量计算及分析 [J]. *水土保持研究*, 2005, 12(6): 89 - 91
- [52] 张友焱, 刘致远, 周泽福, 等. 环境因子对毛乌素沙地紫穗槐光合、蒸腾速率的影响 [J]. *林业科学研究*, 2006, 19(4): 463 - 466
- [53] 张晓明, 余新晓, 张学培, 等. 晋西黄土区主要造林树种单株耗水量研究 [J]. *林业科学*, 2006, 42(9): 17 - 23
- [54] 王克勤, 王斌瑞, 王震洪. 金矮生苹果水分利用效率研究 [J]. *生态学报*, 2002, 22(5): 723 - 728
- [55] 郭连生, 田有亮. 4种针叶幼树光合速率、蒸腾速率与土壤含水量的关系及其抗旱性研究 [J]. *应用生态学报*, 1994, 5(1): 32 - 36
- [56] 王克勤, 王斌瑞. 集水造林林分水分生产力研究 [J]. *林业科学*, 2000, 36(专刊): 1 - 9
- [57] 孙长忠, 黄宝龙. 单株平衡法的建立 [J]. *林业科学*, 1996, 32(4): 378 - 381
- [58] 石 青, 余新晓, 李文宇, 等. 水源涵养林林木耗水称重法试验研究 [J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(2): 84 - 87
- [59] Lachenaud P H, Montagnon C. Competition effects in cocoa (*Theobroma cacao* L.) hybrid trials [J]. *Euphytica*, 2002, 128(1): 97 - 104
- [60] Alarc on J J, Domingo R, Green S R, et al. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees [J]. *Plant and Soil*, 2000, 227: 77 - 85
- [61] Green S, Clothier B. The root zone dynamics of water uptake by a mature apple tree [J]. *Plant and Soil*, 2003, 206: 61 - 77
- [62] Ferrara G, Flore J A. Comparison between different methods for measuring transpiration in potted apple trees [J]. *Biologia Plantarum*, 2003, 46(1): 41 - 47
- [63] 魏天兴, 朱金兆, 张学培, 等. 晋西南黄土区刺槐油松林地耗水规律的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 1998, 20(4): 36 - 40
- [64] 马履一, 王华田. 油松边材液流时空变化及其影响因子的研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24(4): 23 - 37
- [65] 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究 [J]. *林业科学*, 1997, 33(2): 117 - 126
- [66] 王华田. 林木耗水性研究述评 [J]. *世界林业研究*, 2003, 16(2): 23 - 27
- [67] 苏建平, 康博文. 我国树木蒸腾耗水研究进展 [J]. *水土保持研究*, 2004, 11(2): 177 - 179, 186
- [68] 李 洁, 郭小平, 朱金兆, 等. 山西吉县梨、李子土壤水分动态变化及其耗水研究 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(3): 132 - 134
- [69] 周泽福, 刘致远, 张光灿. 黄土丘陵区金矮生苹果园土壤水分有效性及生产力分级 [J]. *林业科学研究*, 2005, 18(1): 10 - 15
- [70] 侯振宏, 贺康宁, 张小全. 晋西黄土高原半干旱区刺槐林分需水量的研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 180 - 183
- [71] 郭忠升, 邵明安. 雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 522 - 528
- [72] 曹军胜, 朱清科, 薛智德. 黄土高原地区土地植被承载力与植被生态恢复建设 [J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(1): 39 - 43
- [73] 张永涛, 杨吉华. 黄土高原降水资源环境容量下侧柏合理密度的研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 156 - 162
- [74] 王 力, 邵明安. 黄土高原退耕还林条件下的土壤干化问题 [J]. *世界林业研究*, 2004, 17(4): 57 - 60
- [75] 陈洪松, 王克林, 邵明安. 黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展 [J]. *林业科学*, 2005, 41(4): 155 - 161
- [76] 刘晨峰, 尹 婧, 贺康宁. 林下植被对半干旱区不同密度刺槐林地土壤水分环境的指示作用 [J]. *中国水土保持科学*, 2004, 2(2): 62 - 67, 79
- [77] 茆 智, 崔远来, 李新健. 我国南方水稻水分生产函数试验研究 [J]. *水利学报*, 1994, 9: 21 - 31
- [78] Rajput G S, Singh J. Water production function for wheat under different environmental conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 1986, 11: 319 - 332
- [79] Morgan T H, Biere A W, Kanemasu E T. A dynamic model of com yield response to water [J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(6): 59 - 64
- [80] 迟道才, 王 瑄, 夏桂敏, 等. 北方水稻动态水分生产函数研究 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20(3): 30 - 34
- [81] 刘昌明, 周长青, 张士锋, 等. 小麦水分生产函数及其效益的研究 [J]. *地理研究*, 2005, 24(1): 1 - 10
- [82] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展 [J]. *水科学研究进展*, 2000, 11(1): 99 - 104
- [83] 罗遵兰, 冯绍元, 左海萍. 山西省冬小麦水分生产函数模型初步分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(1): 16 - 19
- [84] Lieth, H. Modeling the primary productivity of the world [M] // Lieth H, Whittaker R H. *Primary Productivity of the Biosphere*. Berlin: Springer Verlag, 1975: 237 - 263
- [85] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布 [J]. *自然资源*, 1992(1): 15 - 21
- [86] Zhang Xinshi and Yang Dianan. Radiative dryness index and potential productivity of vegetation in China [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 1990, 2(4): 95 - 109
- [87] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究 [J]. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 11 - 19, 463 - 466
- [88] 关君蔚. 生态控制系统工程 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007
- [89] 盛炜彤, 范少辉. 人工林长期生产力保持机制研究的背景、现状和趋势 [J]. *林业科学研究*, 2004, 17(1): 106 - 115