

美国目标树经营体系及其经营效果研究进展*

张晓红 张会儒 卢 军 雷相东

(中国林业科学研究院资源信息研究所,北京 100091)

摘要:目标树经营是一种通过降低邻木冠层竞争、增加目标树生长空间来提高单株木质量的营林技术,可以看作是一种特殊的抚育间伐。文中从目标树选择标准、目标树密度、树冠重叠释放作业和作业时间等方面阐述了目标树经营体系,并综述了目标树经营对单株目标树生长(直径、蓄积、树高、树冠)的影响和成本效益分析等研究进展,以期为我国森林经营实践提供借鉴。

关键词:目标树经营,经营效果,树冠重叠释放,美国

中图分类号:S75

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2016)01-0091-06

DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2016.01.011

Research Progress in Crop Tree Release and Its Effect in the United States

Zhang Xiaohong Zhang Huiru Lu Jun Lei Xiangdong

(Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Crop tree release (CTR) is an intermediate silvicultural treatment intended to provide increased growing space to selected trees and improve the quality of individual tree through the removal of crown competition from adjacent trees. Thus it is often assumed to be synonymous with thinning, improvement cutting or timber stand improvement. The paper described the CTR in terms of selection criteria, number of crop trees to release, the “crown-touching” release and timing to release were presented, and reviewed the research progress in the effect of CTR on the growth of individual targeted tree in relation to diameter growth, volume, height growth and crown growth as well as its cost-benefit. The study was expected to provide certain references for forest management practices in China.

Key words: crop tree release (CTR), management effect, “crown-touching” release, the United States

美国森林资源比较丰富,现有森林面积 3.10 亿 hm^2 , 约占国土面积的 1/3, 主要分布在北部、南部、西部落基山脉和太平洋沿岸 4 个地区^[1]。美国是年产木材最多的国家,每年采伐量近 5 亿 m^3 , 木材年产量始终保持在世界产材总量的 15% 左右^[2-3]。用材林是美国重要的木材生产林,根据最近一次美国森林资源评估报告(2007 年)统计,用材林面积为 2.11 亿 hm^2 , 占森林总面积的 68%, 蓄积量为 283 亿 m^3 。从所有权来看,用材林分为公有林和私有林 2 种形式。其中私有林面积占用材林面积的 73%, 主要分布在以阔叶林为主的密西西比河东部地区,包括私营企业

所管辖的森林及小私有林所有者的林地,年采伐量占总采伐量的 82%, 主要树种包括栎属、胡桃属、北美鹅掌楸和糖槭等^[4]。由于私有林所有制受国家法律保护,长期稳定不变,私有林主实施自主经营,因此政府通过一系列扶持政策来激励私有林主的营林积极性,并对私有林营林技术提供免费咨询等服务^[5]。针对大部分私有林所有者的林地面积规模较小、过于分散、难于进行集约化经营的特点,联邦政府林业部门提出了针对单株木作业的经营体系——目标树经营(CTR)体系^[6-7]。近年来,随着私有林主对森林资源经营管理关注度的提高,作为容易理解、作业简单、

* 收稿日期:2015-08-03;修回日期:2015-09-15。

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD22B0201)。

作者简介:张晓红(1981-),山东邹平人,女,助理研究员,博士,研究方向为森林可持续经营理论与技术,E-mail:zhangxh@ifrit.ac.cn。

能满足多种经营目标的目标树经营体系已经在西弗吉尼亚州、伊利诺伊州、密歇根州、北卡罗来纳州、南卡罗来纳州、威斯康辛州和安大略州等美国东部各州得到应用和推广^[8-10]。本文从定义、起源、技术要素、经营效果影响研究等方面阐述美国目标树经营体系,希望能为我国的森林经营提供借鉴。

1 目标树经营的定义与起源

目标树经营是一种通过降低邻木冠层竞争、增加目标树生长空间来提高单株木质量的营林技术,可以看作是一种特殊的疏伐或抚育间伐^[11]。“目标树”是指表现出促进实现经营目标的理想特征,有能力应对各种干扰,并保持多年竞争力的林木^[12]。

目标树经营体系最初来源于上层疏伐法和透光伐作业,是指砍伐与优良上层木相竞争的居于林冠上、中层的林木,也砍伐林冠下层的濒死木和枯立木。在20世纪50年代美国大规模人工造林的背景下,针对北方硬木林主要为同龄幼龄林的特点,1958年出版的《新英格兰北方硬木林经营指南》在上层疏伐法和透光伐作业的基础上提出了用于指导北方硬木林分抚育的目标树疏伐法^[13],具体指采伐影响目的树种生长的亚优势木或中等木。之后,为研究目标树疏伐法对同龄硬木林分的影响,G. R. Trimble于1971年提出了“目标树经营”一词^[14]。基于长期研究成

果,A. W. Perkey等于1994出版了《东部硬木林目标树经营实用手册》,根据木材、野生动植物、美学和水质等不同经营目标,提出相应的目标树选择标准和经营措施,用于指导美国东部私有林经营^[9]。随着目标树经营技术在各州不同森林类型中的广泛应用,多位学者进行总结,形成了系统的方法体系^[7,11]。

2 目标树经营的技术要素

2.1 目标树的选择标准

经营目标(木材生产、野生动物栖息地、景观游憩林等)不同,目标树的选择标准也不同^[15]。目标树选择需要考虑的主要特征包括树种、树冠级、起源、树干质量、活力和风险以及立地质量(见表1)^[11]。理想的目标树应该是树干通直、树高5.18 m(17英尺)以下内无分叉、无病虫害、树冠健康、活冠率达30%以上且没有枯梢迹象的林木^[8]。

树种应选择市场价值较高、能满足经营目标、适应立地条件、对生物多样性维持起重要作用的树种。通常是处于主林层上层的群落树种,并且冠型饱满、树冠高度至少应达到1/4树高,无明显机械损伤和病虫害危害的优势木或亚优势木、实生树或萌生树。美国新泽西州的硬木目标树种包括糖槭、白蜡、橡树、黄桦和鹅掌楸^[16]。《东北部森林目标树经营实用手册》介绍了可作为目标树的16种树种的识别特征^[17]。

表1 满足经营目标的目标树特征

特征指标	经营目标		
	野生动物 ^①	木材	多样性
树种	为野生动物提供食物、且产量大的树种	在当地市场具有相对较高价值的商品材种	不一定满足野生动物或木材目标的其他树种
冠层等级	优势木、亚优势木、中等木	优势木、亚优势木、中等木	优势木、亚优势木、中等木
冠形	活冠率 > 30%	均匀分布、活冠率 > 30%	活冠率 > 30%
树干特征	树皮纹理正常、健康、显示出较好的生活力	通直、树皮纹理清晰、木材完好、无病虫害	不重要
风险	健康、有活力,无低叉、溃疡及其他不能满足经营目标的生长迹象	健康、有活力,无低叉、溃疡及其他不能满足经营目标的生长迹象	健康、有活力,无低叉、溃疡及其他不能满足经营目标的生长迹象
林龄	任何年龄、能够达到满足目标的预期年龄	任何年龄、能够达到满足目标的预期年龄	任何年龄、能够达到满足目标的预期年龄
其他	适合蝙蝠栖息、昆虫依附、鸟类筑巢	无影响木材质量的嫩枝或病害等明显特征	有相对稀有的物种,多样性包括树种、年龄、林分结构等

注①:以提高野生动物栖息地多样性为总目标。

2.2 目标树密度

确定目标树密度的基本原则是忽略目标树的分布,尽可能选择上层林冠的林木(优势木和亚优势木)。总数不超过 $150 \sim 175$ 株/ hm^2 ($60 \sim 70$ 株/英亩)^[18-19],具体株数因林分结构和演替阶段而定。幼龄林林分密度大,可适当提高目标树的密度,并在之后的疏伐中逐渐伐去部分目标树。

2.3 “树冠重叠”释放作业技术

“树冠重叠”释放作业技术的核心是通过抑制或伐除与目标树树冠相重叠的竞争木,为目标树提供更多的生长空间^[20-22]。根据目标树释放后能够自由生长的树冠比例,“树冠重叠”释放作业技术可以分为1个方向、2个方向、3个方向和4个方向释放4种情况。如图1所示,以目标树为中心,用虚拟的2条相互垂直的线段将目标树的树冠划分为4个象限,如果伐除N个象限周围的邻木,则表示目标树经过N个方向的释放,获得N个方向的自由生长空间,N值可为1、2、3或4(见图1)。完整的(4个方向)“树冠重叠”释放作业技术主要是针对幼树和速生树种(如黄杨),不完整的(1、2或3个方向)“树冠重叠”释放作业技术可用于原木用材树种,以降低嫩芽分支的风险,提高木材质量。值得注意的是,“树冠重叠”释放作业技术仅伐除或抑制与目标树树冠重叠、树冠级大于目标树的邻木,在不影响经营目标的前提下,应尽可能地保留目标树树冠以下的邻木,这对于保护目标树、提高林分综合效益具有重要作用^[11]。

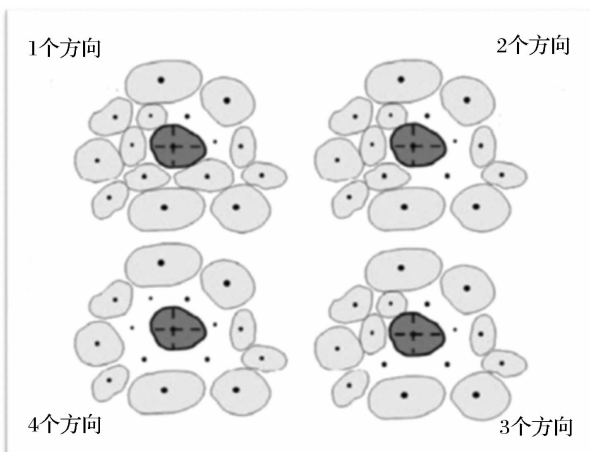


图1 经过不同程度释放的目标树树冠投影图

2.4 实施时间

阔叶幼龄林实施CTR处理的最佳时间是林分开始郁闭和郁闭后10~15年。立地质量不同,林冠郁闭时间也不相同。立地质量好的林分林冠在8~10

年郁闭,立地质量差的林分在13~15年郁闭。林龄较大、接近大径材或小锯材尺度时仍有机会释放目标树,目的是在林分成熟过程中提高林木生活力和生长量,但是当林龄超过25~30仍未实施CTR,那么目标树种的密度将会持续下降。对于锯材林分,CTR可结合商业间伐来实施,从而有利于选择目标树、提高木材销售价格,补偿其他经营成本。例如,Trimble^[14]在1971年指出,实施目标树经营的最佳林龄为9~12年;Voorhis^[23]在1990年指出,在立地指数为55的美国北方硬木混交林中,8年生纸皮桦是实施目标树经营的最佳时间。由于成熟林分的蓄积量和林分价值主要集中在优势木和亚优势木中^[18],因此在幼龄林阶段选择目标树并应用CTR能够通过提高上层林冠林木比例来提高林分成熟时的价值。

3 目标树经营效果研究

美国关于目标树经营效果研究始于20世纪70年代,重点是目标树释放对东部硬木幼龄林单株木直径生长和林分蓄积量的影响^[24-26]。随着目标树经营体系的不断完善、应用和推广,目标树经营对林木生长量、林分生长量和林分结构的影响研究也逐渐增多。

3.1 对单株目标树直径生长量和蓄积生长量的影响

目标树经营能够显著提高单株目标树的直径生长量和蓄积生长量^[14,27-28],目标树的直径生长量与释放程度呈线性正相关^[29]。1990年Voorhis^[23]对8年生北方硬木混交林进行目标树疏伐实验表明,目标树疏伐均能促进目标树的直径生长,但是不同树种对于目标树疏伐的反应不同(见表2)。1995年Ward^[30]分析了目标树经营对美国康涅狄格州坡地硬木幼龄林的短期影响,发现经过“树冠重叠”释放的北方红橡、黑橡/棕橡、红枫和黑桦与未释放的林木相比,4年间直径定期生长量分别提高了86%,65%,56%和52%。加拿大不列颠哥伦比亚省9~13年生纸皮桦幼龄林在实施目标树经营5年后,单株木平均蓄积量比未释放的单株木提高了80%^[31]。2006年Schuler^[32]在北方红橡和黑樱桃混交林中选择北方红橡作为目标树进行释放,与未释放的林分相比,北方红橡10年间直径定期生长量约为对照林分的2倍。对林分年龄为22~99年的黑桦纯林目标树经营研究表明,8年后经过释放的目标树的直径生长量和蓄积生长量是对照的2倍^[33]。

表2 目标树经营后7年的平均胸径生长量

树种	平均胸径生长量/cm		
	对照	低强度经营	高强度经营
纸皮桦	3.38a	4.62b	5.21b
黄桦	3.66a	4.55b	5.46c
糖槭	2.82a	3.71a	4.65a

注:低强度经营和高强度经营分别是指释放目标树树冠周边1.2 m(4英尺)和2.4 m(8英尺)范围内的干扰木。同一树种不同处理结果后的不同字母(a, b, c)表示差异显著($p = 0.05$),如纸皮桦对照处理的平均胸径生长量(3.38a)与低强度经营处理的平均胸径生长量(4.62b)之间差异显著,而低强度经营(4.62b)与高强度经营(5.21b)之间差异不显著。

目标树经营不仅能促进幼龄林单株木的直径生长,也对成熟林单株木的直径生长产生显著影响。例如,74~94年生北方红橡成熟林经“树冠重叠”释放后6年间直径定期生长量提高53%^[28];美国夏威夷25年生寇阿相思树次生林实施目标树经营后,3年间平均直径生长量提高180%,达到1.4 cm/年^[34]。

3.2 对树高的影响

目前关于目标树经营对树高生长量的影响尚未有一致的结论。1986年Sonderman^[35]指出,目标树经营能够提高林分的树高生长量,其他研究则表明树高生长量没有显著变化^[30,36]或者降低了^[37]。1983年Lamson^[38]指出,目标树经营对橡树树高的影响分2个阶段,前5年的树高生长量是下降的,但是10年后的树高生长量与未释放的橡树相比无明显差异。2006年Schuler^[32]研究了目标树经营对黑樱桃—红橡混交林的影响,发现目标树释放后5年内黑樱桃的树高生长量下降,而北方红橡的树高生长量提高。

3.3 对树冠生长量的影响

目标树经营能够显著提高单株目标树的树冠生长量^[32],但是在北方硬木混交林中不同树种的树冠生长量变化不同(见表3)^[23]。

表3 目标树释放7年后的平均树冠生长量

树种	平均树冠生长量/m		
	对照	低强度经营	高强度经营
纸皮桦	0.29a	0.79b	1.03b
黄桦	0.32a	0.76b	1.40c
糖槭	0.65a	0.57a	0.98b

注:低强度经营、高强度经营分别是指释放目标树树冠周边1.2 m(4英尺)和2.4 m(8英尺)范围内的干扰木。同一树种不同处理结果后的不同字母(a, b, c)表示差异显著($p = 0.05$),如纸皮桦对照处理的平均树冠生长量(0.29a)与低强

度经营处理的平均树冠生长量(0.79b)之间差异显著,而低强度经营(0.79b)与高强度经营(1.03b)之间差异不显著。

3.4 成本效益研究

目标树经营的投资回报率取决于林分经营目标和收获期^[39-40]。目标树经营适用于投资收获期长、以生产高价值产品如原木为目标的林分,而对收获期短、生产锯材或其他低价值产品的林分实施目标树经营投资是不合理的。低强度目标树经营[目标树密度为922株/hm²,共伐除干扰木326株,保留木平均断面积为165.28 m²/hm²(72平方英尺/英亩)]的投资回报率高于高强度目标树经营[目标树密度为946株/hm²,共伐除干扰木615株,保留木平均断面积为128.55 m²/hm²(56平方英尺/英亩)]^[41]。

目标树经营能够提高林分经济效益(木材生产)和生态效益(适合野生动物栖息地的树种)。模拟预测目标树经营对不同林龄(21~25, 26~30, 31~35年)橡树林的成本效益得出,目标树经营表现出较高的净现值,投资回报率在8.4%以上,并且林龄为21~25年的样地显示出更高的净现值。同时由于目标树经营提高了目标树的生长率和干形质量,因此经过CTR处理的林分经济成熟龄延缓了5~10年^[42]。

3.5 其他研究

有研究关注了目标树经营对林分结构和邻木竞争的影响,认为CTR能够提高目标树的邻体竞争力^[32]及亚优势木和中等木的成活率^[43-44]。也有学者认为不同程度的目标树经营能在短期内改变林分密度、结构和物种组成^[45],但从长期来看与对照处理无明显差异^[46]。

4 结语与启示

目标树经营体系的核心是根据林木个体差异按照一定标准选择少数具有培育前途的林木个体作为目标树,通过伐除树冠触及目标树的干扰木,为目标树释放更多的生长空间,从而实现多种经营的目标。目标树经营体系来源于上层疏伐和透光伐,并在实践中综合了生长伐等多种抚育类型,适用于幼林开始郁闭至林分成熟之前各个林龄阶段,可看作一种特殊的间伐,这与我国2009年发布的《森林抚育规程》提到森林抚育采伐的种类与方法是一致的。在我国65%的森林是中幼龄林^①以及对木材资源的刚性需求和

① 第八次全国森林资源清查主要结果(2009-2013年),国家林业局,2014年发布。

对森林生态与社会服务的结构性需求的大背景下,已经在北美多种森林类型中推广的目标树经营体系将为探索适合我国的中幼龄林抚育模式提供有益借鉴。

前面提到的目标树选择标准、密度、作业时间、干扰树伐除措施等技术要素是在对美国硬木林(尤其是东部用材林)长期研究的基础上确定的,具体作业标准是因林(不同树种组成、密度、立地条件)、因时(不同林龄)而定的。因此,还需要针对目标树选择标准、目标树密度、干扰木伐除时间等技术要素进行研究,以建立符合我国森林经营的目标树经营体系。

目标树经营对目标树单株木和林分的影响因树种、林龄、释放时间、释放强度等因素而异。现有研究表明,目标树经营能够显著提高目标树单株木的直径生长量、蓄积生长量和树冠生长量,但对树高生长量的影响尚未有一致的结论。目标树经营能在短期内改变林分密度、结构和物种组成,但关于目标树经营对林分的长期影响还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] USDA. National report on sustainable forests - 2010; USDA forest service report FS - 979 [R]. Washington DC: USDA Forest Service, 2011; 1 - 214.
- [2] 李卫东. 美国的森林资源极其利用现状[J]. 世界林业研究, 2006, 19(4): 61 - 64.
- [3] OSWALT S N, SMITH W B, MILES P D, et al. Forest resources of the United States - 2012: general technical report WO - 91 [R]. Washington DC: USDA Forest Service, 2014; 1 - 218.
- [4] SMITH W B, MILES P D, PERRY C H, et al. Forest resources of the United States - 2007: general technical report WO - 78 [R]. Washington DC: USDA Forest Service, 2009; 1 - 336.
- [5] 张煜星, 胡培兴, 何时珍. 美国的林业政策和制度[J]. 世界林业研究, 2005, 18(1): 65 - 67.
- [6] BENJAMIN A R, SAMUEL F G. Even - aged silviculture for upland central hardwoods; USDA agriculture handbook 355 [R]. Upper Darby, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1968; 1 - 10.
- [7] LEAK W B, SOLMON D S, DeBALD P S. Silvicultural guide for northern hardwood types in the Northease (revised): research paper NE - 603 [R]. Broomall, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1987; 1 - 40.
- [8] APSLEY D K, HEILIGMANN R. Crop tree management; a new tool to help you achieve your woodland goals; Ohio State University fact sheet F - 50 - 02 [R/OL]. (2002) [2015 - 06 - 06]. <http://ohioline.osu.edu/for-fact/pdf/0050.pdf>.
- [9] PERKEY A W, WILKINS B L, SMITH H C. Crop tree management in eastern hardwoods; USDA research paper NATP - 19 - 93 [R]. Morgantown, WV: Northeastern Area State and Private Forestry, USDA Forest Service, 1994; 1 - 108.
- [10] MEADOWS J S, STANTURF J A. Silvicultural systems for southern bottomland hardwood forests [J]. Forest Ecology and Management, 1997, 90(2/3): 127 - 140.
- [11] MILLE G W, STRINGER J W, MERCKER D C. Technical guide to crop tree release in hardwood forests; the University of Tennessee Agricultural Extension Service publication series PB1774 [R/OL], Knoxville, USA: University of Tennessee. (2007) [2015 - 06 - 08]. http://trace.tennessee.edu/utk_agexfores/19.
- [12] STRINGER J W, MILLER G W, WITTWER R F. Applying a crop - tree release in small - sawtimber white oak stands; Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 620 [R]. Broomall, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1988; 1 - 15.
- [13] ADRIAN M G, VIAOR S J. A management guide for northern hardwoods in New England; Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 112 [R]. Upper Darby, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1958; 1 - 22.
- [14] TRIMBLE G R. Early crop - tree release in even - aged stands of Appalachian hardwoods; Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 203 [R]. Radnor, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1971; 1 - 12.
- [15] HOUSTON A E, BUCKNER E R, MEADOWS J S. Romancing the crop tree: new perspectives for the private nonindustrial landowner [J]. Forest Farmer, 1995, 54(5): 32 - 34.
- [16] VODAK M C, FOX G L. Crop tree management practice standards: New Jersey forest stewardship series FS032 [R/OL]. New Brunswick, NJ: New Jersey Agricultural Experiment Station. (2004) [2015 - 06 - 16]. <http://njaes.rutgers.edu/pubs/subcategory.asp?cat=6&sub=46>.
- [17] PERKEY A W, WILKINS B L. Crop tree field guide: selecting and managing crop trees in the Central Appalachians; Northeastern Area State & Private Forestry technical paper NA - TP - 10 - 01 [R]. Morgantown, WV: Northeastern Area State and Private Forestry, USDA Forest Service, 2001.
- [18] LAMSON N I. Dbh/crown diameter relationships in mixed Appalachian hardwood stands; Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 610 [R]. Broomall, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1987; 1 - 3.
- [19] MILLER G W, KOCHENDERFER J N, FEKEDULGN D B. Influence of individual reserve trees on nearby reproduction in two-aged Appalachian hardwood stands [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224(3): 241 - 251.
- [20] LAMSON N I, SMITH H C, PERKEY A W, et al. Crown release increases growth of crop trees; Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 635 [R]. Broomall, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1990; 1 - 8.
- [21] HEALY W M, LEWIS A M, BOOSE E F. Variation of red oak acorn production [J]. Forest Ecology and Management, 1999, 116(1/2/

- 3): 1 - 11.
- [22] JOHNSON P S, SHIFLEY S R, ROGERS R. The ecology and silviculture of oaks[M]. New York: CABI Publishing, 2002: 503.
- [23] VOORHIS N G. Precommercial crop-tree thinning in a mixed northern hardwood stand: Northeastern Forest Experiment Station NE - 640 [R]. Broomall, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1990: 1 - 4.
- [24] PHARES R E, WILLIAMS R D. Crown release promotes faster diameter growth of pole-sized black walnut: North Center Forest Range Experiment Station research note NC - 124[R]. Radnor, PA: USDA Forest Service North Center Forest Range Experiment Station, 1971: 5 - 8.
- [25] TRIMBLE G. R. Summaries of some silvical characteristics of several Appalachian hardwood trees: Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 16 [R]. Radnor, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1975: 1 - 5.
- [26] HEITZMAN E, NYLAND R D. Cleaning and early crop - tree release in northern hardwoods: a review [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 1991, 8(3): 111 - 115.
- [27] KOCHENDERFER J D, ZEDAKER S M, JOHNSON J E, et al. Herbicide hardwood crop tree release in central west Virginia [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2001, 18(2): 46 - 54.
- [28] WARD J S. Crop tree release increases growth of mature red oak sawtimber [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2002, 19(4): 149 - 154.
- [29] ELLIS R C. Response of crop trees of sugar maple, white ash, and black cherry to release and fertilization [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1979, 9(2): 179 - 188. DOI:10.1139/x79-032.
- [30] WARD J S. Intensity of precommercial crop-tree release increases diameter and crown growth in upland hardwoods: Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 197 [R]. Broomall, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station Research, 1995: 388 - 398.
- [31] SIMARD S W, BLENNER - HASSETT T, CAMERON I R. Precommercial thinning effects on growth, yield and mortality in even-aged paper birch stands in British Columbia [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 190(2/3): 163 - 178.
- [32] SCHULER T M. Crop tree release improves competitiveness of northern red oak growing in association with black cherry [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2006, 23(2): 77 - 82.
- [33] WARD J S. Crop - tree release increases growth of black birch (*Betula lenta* L.) in southern New England [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2007, 24(2): 117 - 122.
- [34] PATRICK J B, ANDREW P R, EWEL J J. Sudden and sustained response of *Acacia koa* crop trees to crown release in stagnant stands [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2008, 38(4): 656 - 666. DOI:10.1139/X07-137.
- [35] SONDERNNAN D L. Changes in stem quality on young thinned hardwoods: Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 576 [R]. Broomall, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1986: 1 - 5.
- [36] TRIMBLE G R. Response to crop-tree release by 7-year-old stems of red maple stump sprouts and northern red oak advance reproduction: Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 303 [R]. Radnor, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1974: 1 - 6.
- [37] ALLEN R H, MARQUIS D A. Effect of thinning on height and diameter growth of oak and yellow-poplar saplings: Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 173 [R]. Radnor, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1970: 10.
- [38] LAMSON N I. Precommercial thinning increases diameter growth of Appalachian hardwood stump sprouts [J]. Southern Journal of Applied Forestry, 1983, 7(2): 93 - 97.
- [39] McCAULEY O D, MARQUIS D A. Investment in precommercial thinning of northern hardwoods: Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 245 [R]. Radnor, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1972: 1 - 13.
- [40] STRINGER J W, MILLER G W, WITTWER R F. Applying a crop-tree release in small-sawntimber White Oak stands: Northeastern Forest Experiment Station research paper NE - 620 [R]. Broomall, PA: USDA Forest Service Northeastern Forest Experiment Station, 1988: 1 - 15.
- [41] SENDAK P E, LEAK W B. Early crop-tree release and species cleaning in young northern hardwoods: Northern Research Station research paper NRS - 6 [R]. Newtown Square, PA: USDA Forest Service Northern Research Station, 2009: 1 - 17.
- [42] MORRISSEY R C, SAUNDERS M R, HOOVER W L. Financial and wildlife benefits from crop tree release in pole-sized central hardwood oak stands [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2011, 28(1): 5 - 12.
- [43] WARD J S. Intensity of precommercial crop tree release increases diameter growth and survival of upland oaks [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(1): 118 - 130.
- [44] WARD J S. Precommercial crop tree release increases upper canopy persistence and diameter growth of oak saplings [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2013, 30(4): 156 - 163.
- [45] ZENNER E K, PUETTSMANN K J. Contrasting release approaches for a mixed paper birch (*Betula papyrifera*) - quaking aspen (*Populus tremuloides*) stand [J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2008, 25(3): 124 - 132.
- [46] LEAK W B, SMITH M L. Long-term species and structural changes after cleaning young even-aged northern hardwoods in New Hampshire, USA [J]. Forest Ecology and Management, 1997, 95(1): 11 - 20.