

目标规划与轮伐公式确定森林收获的比较分析

李婷婷¹, 陆元昌^{1*}, 刘宪钊^{1,2}, 王霞^{1,2}, 庞丽峰¹

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要:利用中国林科院热带林业实验研究中心 2009 年森林资源二类调查数据,分别利用目标线性规划与传统森林轮伐公式计算热林中心马尾松纯林和杉木纯林用材林年采伐量,比较分析同一个经理期(2009—2019 年)两种计算方法的不同;结果表明:轮伐公式计算的采伐量一般偏大,且目标规划单位面积年经济收益是轮伐公式获得经济效益的 10~20 倍。利用目标规划法在同时实现材积收获量最大、出材量最大、净现值收益最大的目标前提下,对森林结构进行调整,使资源分布满足可持续经营的要求,即尽可能达到法正状态。

关键词:目标规划;马尾松;杉木;轮伐公式;采伐量

中图分类号:S753.5

文献标识码:A

Comparison and Analysis of Using Goal Programming and Rotation Cutting Formulas to Determine Forest Harvest

LI Ting-ting¹, LU Yuan-chang¹, LIU Xian-zhao^{1,2}, WANG Xia^{1,2}, PANG Li-feng¹

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Based the forest resource inventory data of Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, the annual cut of Masson pine (*Pinus massoniana*) and Chinese-fir (*Cunninghamia lanceolata*) timber forests were calculated by multi-goal programming and traditional rotation cutting formulas separately, and the different results for the same management period (2009 – 2019) from these two approaches were discussed. It shows that the harvest is generally larger by rotation cutting formulas, and the annual economic benefits of unit area by goal programming is 10 – 20 times that by rotation cutting formulas. Application of goal programming in forest harvest can regulate forest structure for normal forest, make forest better and achieve the maximum timber harvest and production and maximum net present value.

Key words: goal programming; Masson pine; Chinese-fir; rotation cutting formulas; forest harvest

森林经营计划需要考虑在一个多准则框架内整合森林计划的多个经营目标,使得经营计划满足多功能可持续经营的要求。目标规划(GP)方法是适应于多功能森林经营计划的一种最优化方法,是传统线性规划(LP)的修正^[1]。最初的线性规划模型解决的重点问题是确定稀缺资源的优化配置,以满

足给定的目标。目标规划以类似的方法,得到最为接近具体目标的最优解或最满意的解。LP与GP两者都是处理约束优化问题,都是在有限的假设内,模型变量是无限可分且这些变量仅由线性关系连接起来^[2]。不同的是,GP是在实现多个目标的前提下得到一个满意的优化结果,而不是实现单一目标的优

收稿日期:2013-02-15

基金项目:公益性科研院所基金多功能森林经营动态监测及数据集成技术(IFRIT201101)课题和多功能经营案例(CAFYBB2010001-02)研究课题支持。

作者简介:李婷婷(1986—),女,在读博士,主要研究方向为森林多功能近自然经营理论与技术。E-mail:limuzi33@163.com

* 通讯作者:博士,研究员,研究方向为森林经理理论与技术。E-mail: ylu@caf.ac.cn

化过程,实质是决策者试图制定尽可能满足所有目标的一个解决方案^[3],而线性规划是寻找绝对满足约束条件的最优解,而许多实际问题只需要找到满意解就可以了^[4-5]。国内外已有一些多目标森林经营规划的研究,如 Bertomeu M. 等以轮伐体系目标如龄级分布均匀、每期材积收获均衡、材积净现值最大等,根据不同的目标优先级建立了多个规划模型,比较分析不同模型的最终资源分布情况^[2]; Misir. N 等同样采用线性目标规划,根据土壤流失最小、水生产最大、木材生产最大等目标不同的优先级建立了 4 个模型,优化每期的采伐面积^[3];陈增丰^[4]利用线性规划和目标规划二步优化法对松溪县的杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 阔叶林用材林进行了收获调整;陈伯贤等^[6]研究了森林资源管理中线性规划和目标规划联合应用的森林收获调整问题;刘伟、黄家荣等^[7]建立多目标规划模型,利用 matlab 和 excel 求解,对人工刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.) 用材林进行收获调整,取得较好结果;张贤良^[8]用多目标规划结合分层序列法将多目标简化成一个综合目标,即生态效益最大,对厦门生态公益林的林种结构进行优化;戎建涛、雷相东^[9]基于小班调查数据,以木材生产和碳增量净现值最大为目标,建立了多目标规划模型;Baskent E. Z.、Keles S.^[10-11]利用线性规划比较分析了不同材积与面积约束条件以及不同贴现率对木材生产量和净现值最大目标的影响,以木材产量、水产量和碳储量为目标,通过不同的目标组合或在不同的约束下的木材、水、碳的净收益最大,研究三者之间的交互影响。

森林经营单位级的采伐收获不再以获得最大经济效益为目的,还要兼顾资源的可持续利用,所以多目标规划法相对于线性规划更适合目前森林经营的

需求。本文的研究背景是在热林中心森林经营方案采伐规划中,利用热林中心森林资源 2009 年二类调查数据分别林种利用传统采伐量计算公式:区划轮伐法、成熟度公式、法正蓄积法和第一林龄公式^[12]分别计算各树种在一个经理期(10 年)内的年采伐量。但由于一种公式都只适用于某一特定条件下的森林经营单位,加上资源分布结构不合理,单纯用公式计算年采伐量没有考虑资源数量分布的动态变化,不利于资源合理利用与结构调整,尤其是用材林,作为经营单位的主要经济来源,通过集约经营,使用材林越采越多,越采越好,尤为重要。本文主要对马尾松用材林与杉木用材林的木材收获进行调整。利用目标规划法进行采伐规划,与利用轮伐公式计算的采伐量进行比较分析,为森林经营单位在选择采伐量计算方法上提供参考与数据支持。

1 研究区概况及数据

根据 2009 年的二类调查结果:热林中心林业用地总面积为 18 931.3 hm²,占土地总面积的 82.6%,其中有林地 13 317 hm²,灌木林地 2 338 hm²,未成林造林地 910.4 hm²,无林地 264.2 hm²(采伐迹地、火烧迹地、其它无立木林地),宜林地 151.7 hm²(宜林荒山荒地,宜林沙荒地、其它宜林地),辅助生产林地 356.2 hm²,被占用林地 1 568.6 hm²,苗圃地 25.1 hm²。其中有林地中一般用材林地 9 873.6 hm²,占用材林总面积的 91.4%,其它为短轮伐用材林和速生丰产林用材林。马尾松、杉木为一般用材林树种,其面积、蓄积及单位面积蓄积如表 1 所示。从表 1 可看出,马尾松与杉木均存在各龄级面积不均匀的龄级结构,尤以中幼龄林面积较大,成过熟林较少,通过调整使之尽快趋于永续利用,实现“越采越多、越采越好、合理利用、永续作业”。

表 1 马尾松与杉木各龄级面积、蓄积

| 龄级 | 马尾松 | | | 杉木 | | |
|------|--------------------|-------------------|--|--------------------|-------------------|--|
| | 面积/hm ² | 蓄积/m ³ | 单位蓄积/(m ³ ·hm ⁻²) | 面积/hm ² | 蓄积/m ³ | 单位蓄积/(m ³ ·hm ⁻²) |
| I | 1 405.5 | 39 124.0 | 27.8 | 10.5 | | |
| II | 3 405.7 | 428 389.0 | 125.8 | 44.5 | 428.0 | 9.6 |
| III | 1 765.8 | 304 478.0 | 172.4 | 63.1 | 6 828.0 | 108.2 |
| IV | 679.1 | 129 847.0 | 191.2 | 351.9 | 46 055.0 | 130.9 |
| V | 112.6 | 18 811.0 | 167.1 | 249.3 | 45 456.0 | 182.3 |
| VI | 11.2 | 2 848.0 | 254.3 | 136.5 | 25 274.0 | 185.2 |
| VII | | | | 40.6 | 5 900.0 | 145.3 |
| VIII | | | | 1.6 | 146.0 | 91.3 |
| IX | | | | 2.1 | 313.0 | 149.0 |
| X | | | | 0.2 | 18.0 | 90.0 |
| 合计 | 7 379.9 | 923 497.0 | | 900.3 | 130 418.0 | |

2 研究方法

(1) 目标规划: 根据目标规划的概念, 用偏差变量 (deviational variables) 来表示实际值与目标值之间的差异, 令 d^+ 为超出目标的差值, 称为正偏差变量; d^- 为未达到目标的差值, 称为负偏差变量。其中 d^+ 与 d^- 至少有一个为 0。当实际值超过目标值时, 有 $d^- = 0, d^+ > 0$; 当实际值未达到目标值时, 有 $d^+ = 0, d^- > 0$; 当实际值与目标值一致时, 有 $d^- + d^+ = 0$ 。

设 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$) 是目标规划的决策变量即每期各龄级的采伐面积, 共有 m 个约束是刚性约束, 可能是等式约束, 也可能是不等式约束, 如采伐面积约束、生长量约束、龄级面积均衡约束等。共有 5 个目标约束, 其目标规划约束的偏差为 d_k^+, d_k^- ($k=1, 2, \dots, 5$) 即木材收获量最大、木材出材量最大、净现值收益最大、收获均衡及龄级分布均衡 5 个目标。设有 q 个优先级别, 分别 p_1, p_2, \dots, p_q 。在同一个优先级 P_g 中, 有不同的权重, 分别记为 w_{gk}^+, w_{gk}^- ($k=1, 2, \dots, 5$)。本文中的 5 个目标为轮伐体系目标而且针对热林中心用材林经营目标即认为该 5 个目标同等重要, 故在本文中认为 5 个目标在同一个优先级, 且权重相同。因此目标规划模型的一般数学表达式为:

$$\begin{aligned} \min z &= \sum_{g=1}^q p_g \sum_{k=1}^5 (w_{gk}^- d_k^- + w_{gk}^+ d_k^+) \\ &\sum_{i=1}^n \alpha_{ij} x_{ij} \leq (=, \geq) b_i \\ &\sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} + d_k^- - d_k^+ = g_i, k = 1, 2, \dots, m \\ &x_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, \\ &d_k^-, d_k^+ \geq 0, k = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

模型求解都是在 LINGO 软件中, 编写程序进行求解。

(2) 采伐量计算公式: 目前世界各国计算森林采伐量的公式, 考虑森林资源条件多, 而考虑社会、经济因素则不足。通常在计算稳定森林主伐量时, 先要根据森林经营单位森林资源特点和林业生产条件, 选用几个适用公式分别计算, 得出几种不同数值的年伐量, 在此基础上, 对这些结果进行分析、比较和论证, 最后确定一个合理年伐量。常用的年采伐量计算公式有如下几种^[12]:

1) 区划轮伐法

$$L_{A(\text{轮伐})} = \Sigma f / U$$

$$L_{v(\text{轮伐})} = L_{A(\text{轮伐})} \times V$$

式中: $L_{A(\text{轮伐})}$ ——年伐面积 (hm^2)

Σf ——经营单位的总面积 (hm^2)

$L_{v(\text{轮伐})}$ ——年伐蓄积 ($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

U ——轮伐期 (a)

V ——成过熟林平均每公顷的蓄积量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2) 按成熟度计算的年伐量

$$L_{A(\text{成熟度})} = (f_{\text{成}} + f_{\text{过}}) / a$$

$$L_{v(\text{成熟度})} = (v_{\text{成}} + v_{\text{过}}) / a$$

式中: $f_{\text{成}}, f_{\text{过}}$ 分别为成、过熟林面积 (hm^2);

$v_{\text{成}}, v_{\text{过}}$ 分别为成、过熟林蓄积 (m^3);

a 为龄级期限。

3) 法正蓄积法

$$E_w = 2V_w / U \quad S_w = E_w / V$$

E_w, S_w 分别指年采伐蓄积、年采伐面积; V_w 为现实林分蓄积; U 为轮伐期, V 为成、过熟林平均每公顷蓄积量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

4) 第一林龄公式

$$L_A = (f_{\text{近}} + f_{\text{成}} + f_{\text{过}}) / 2a$$

$$L_v = L_A \times V$$

式中: $f_{\text{近}}, f_{\text{成}}, f_{\text{过}}$ 分别为近、成、过熟林面积, V 为成过熟林平均每公顷蓄积量。

3 多目标规划模型的建立与结果分析

3.1 蓄积量、出材量与生长量预测

3.1.1 蓄积量预测 根据其它学者的研究成果, 当林分龄级结构合理时, 单位面积蓄积随着年龄增长而稳定的增加, 如果实际调查数据, 单位面积蓄积随年龄变化有较大的波动, 为消除这种波动, 采用下列方程计算马尾松与杉木的理论单位蓄积^[4]。

$$\ln(Y_1) = a + b/A_1$$

$$\ln(Y_2) = \ln a + b \ln(A_2)$$

式中: Y_1, Y_2 分别为马尾松与杉木的理论单位蓄积 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$), A_1, A_2 分别为马尾松与杉木的年龄, 根据本文的实际调查数据, 进行方程拟合, 得到马尾松与杉木各龄级理论单位蓄积计算公式:

$$\ln(Y_1) = 5.57 - 11.23/A_1 \quad R^2 = 0.98$$

$$\ln(Y_2) = \ln 16.25 + 0.75 \ln(A_2) \quad R^2 = 0.94$$

R^2 为修正相关系数。用以上两个方程拟合得到马尾松与杉木各龄级的理论单位蓄积, 如表 2 所示。

表 2 马尾松与杉木各龄级理论单位蓄积

$m^3 \cdot hm^{-2}$

| 龄级 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
|-----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 马尾松 | 27.93 | 124.91 | 168.54 | 191.63 | 205.79 | 215.35 | 222.22 | | | |
| 杉木 | 32.31 | 73.65 | 108.03 | 139.04 | 167.88 | 195.14 | 221.19 | 246.25 | 270.49 | 294.02 |

3.1.2 出材量预测 热林中心国有林出材率必须依据 5 年的实际出材水平测算,集体林区和其他编限单位原则上参考“十一五”期间年森林采伐限额编制时确定的出材率如表 3 所示。马尾松与杉木的综合出材率分别为 67.5%、62.5%,由此得出各树种各龄级的出材量,如表 4 所示。

表 3 广西主要树种出材率

%

| 树种 | 区域 | 主伐 | 低改 | 间伐 |
|-----|---------|-------|-------|-------|
| 杉木 | 桂北 | 65~70 | 60~65 | 55~60 |
| | 桂南 | 60~65 | 55~60 | 53~58 |
| 马尾松 | 桂北和国有林场 | 65~70 | 60~65 | 45~50 |
| | 桂南 | 62~67 | 55~60 | 45~50 |
| 阔叶树 | 全区 | 55~60 | 50~55 | 40~45 |

表 4 马尾松与杉木各龄级出材量

$m^3 \cdot hm^{-2}$

| 龄级 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
|-----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 马尾松 | 18.85 | 84.31 | 113.76 | 129.35 | 138.91 | 145.36 | 150.00 | | | |
| 杉木 | 20.19 | 46.03 | 67.52 | 86.90 | 104.92 | 121.96 | 138.24 | 153.91 | 169.05 | 183.76 |

3.1.3 生长量预测 根据《广西“十二五”森林采伐实施细则》,热林中心马尾松与杉木生长率如表 5 所示,由此得出马尾松年蓄积生长量为 102 231 m^3 ,杉木年蓄积生长量为 23 358 m^3 ,根据采伐原则,每个分期的采伐量不能超过期间生长量。

表 5 马尾松与杉木各龄级生长率

%

| 树种 | 综合 | I | II | III | IV、V | VI |
|-----|-------|-------|--------|-------|--------|-----------|
| 马尾松 | 11.07 | 22.18 | 10.35 | 8.14 | 6.71 | 6.88 |
| 树种 | 综合 | I、II | III、IV | V | VI、VII | VIII、IX、X |
| 杉木 | 17.91 | 22.36 | 12.14 | 18.46 | 7.24 | 7.75 |

3.1.4 主伐年龄、调整期与调整分期

根据热林中心收集的资料得出,一般用材林马尾松主伐年龄为 31 年、杉木为 26 年,考虑到马尾松龄级分配较不均匀以及现有的林分结构,确定马尾松的调整期为 70 年,分为 7 个分期完成,从 IV 龄级开始采伐,VI 龄级以上全部采伐,目标龄级有 3 个;杉木调整期为 45 年,从 VI 龄级开始采,IX 龄级以上全部采完,目标龄级有 5 个,分为 9 个分期完成。

3.2 马尾松目标规划模型建立及结果分析

由于马尾松各龄级面积分配较不均匀,本文采用 7 个分期来进行收获调整,设 X_{ij} 为第 i 分期第 j 龄级的采伐面积($i=1,2,3 \dots 7, j=5,6,7$),根据现实林分条件和永续利用的条件及决策要求,约束条件有:(1)从 IV 龄级开始采,VI 龄级以上全部采伐;(2)采伐后在同一分期内造林更新;(3)各分期采伐量不能超过经理期(10 年)的生长量。构成目标:(1)调整期内的材积收获最大(目标 1);(2)调整期

内的材种出材量收获最大(目标 2);(3)实现调整期内木材净现收入(NPW)最大(目标 3);(4)实现调整期末各目标龄级面积具有相近的法定龄级分配(目标 4);(5)实现各调整期具有近似的均匀收获(目标 5)。

3.2.1 采伐条件约束

$$x_{17} = 11.2 \quad (1)$$

$$x_{16} + x_{27} = 112.6 \quad (2)$$

$$x_{15} + x_{26} + x_{37} = 679.1 \quad (3)$$

$$x_{25} + x_{36} + x_{47} = 1\,765.8 \quad (4)$$

$$x_{35} + x_{46} + x_{57} = 3\,405.7 \quad (5)$$

$$x_{45} + x_{56} + x_{67} = 1\,405.5 \quad (6)$$

$$x_{15} + x_{16} + x_{17} = x_{55} + x_{66} + x_{77} \quad (7)$$

$$x_{25} + x_{26} + x_{27} = x_{65} + x_{76} \quad (8)$$

$$x_{35} + x_{36} + x_{37} = x_{75} \quad (9)$$

$$191.2x_{15} + 167.1x_{16} + 254.3x_{17} < 1\,022\,310 \quad (10)$$

3.2.2 材积收获量最大目标约束

$$191.63 \sum_{i=1}^7 x_{i5} + 205.79 \sum_{i=1}^7 x_{i6} + 215.35 \sum_{i=1}^7 x_{i7} + d_1^- - d_1^+ = M_{\max} \quad (11)$$

3.2.3 出材量收获最大目标约束

$$129.35 \sum_{i=1}^7 x_{i5} + 138.91 \sum_{i=1}^7 x_{i6} + 145.36 \sum_{i=1}^7 x_{i7} + d_2^- - d_2^+ = V_{\max} \quad (12)$$

3.2.4 木材净现值收益最大目标约束

根据热林中心营林生产部所收集的数据资料所

得,马尾松造林费用(包括造林后前3年的抚育费用)为 $6\,750\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$,间伐收益与抚育间伐投入费用相当。马尾松主伐净收益为 $87\,000\text{元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。净现值计算公式为:

$$NPV = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=5}^7 \left[\frac{f_i x_{ij}}{(1+r)^{t_j}} - \frac{g_i x_{ij}}{(1+r)^{t_i}} \right]$$

式中: f_i 为单位面积主伐纯收益, g_i 为新造林费用, r 为贴现率取 8% ^[13], t_j 为贴现时间,取各龄级中值。调整期内木材净现值收益最大目标约束为:

$$\begin{aligned} & 597.64x_{25} - 1\,868.41x_{15} - 3\,331.49x_{16} - \\ & 4\,009.18x_{17} - 865.44x_{26} - 1\,543.12x_{27} + \\ & 1\,739.91x_{35} + 276.82x_{36} - 400.86x_{37} + \\ & 2\,268.99x_{45} + 805.91x_{46} + 128.22x_{47} + \\ & 2\,514.06x_{55} + 1\,050.98x_{56} + 373.29x_{57} + \\ & 2\,627.58x_{65} + 1\,164.50x_{66} + 486.81x_{67} + \\ & 2\,680.16x_{75} + 1\,217.08x_{76} + 539.39x_{77} - \\ & d_3^+ + d_3^- = NPV_{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

3.2.5 龄级面积调整目标约束

马尾松用材林总面积为 $7\,379.9\text{hm}^2$,在调整期末使其龄级分布尽量均匀,则每个龄级面积的正负偏差小于 200hm^2 ,则目标约束为:

$$\sum_{j=5}^7 x_{7j} + d_4^- - d_4^+ = 1\,475.98 \quad (14)$$

$$\sum_{j=5}^7 x_{6j} + d_5^- - d_5^+ = 1\,475.98 \quad (15)$$

$$\sum_{j=5}^7 x_{5j} + d_6^- - d_6^+ = 1\,475.98 \quad (16)$$

$$\sum_{j=5}^7 x_{4j} + d_7^- - d_7^+ = 1\,475.98 \quad (17)$$

$$d_i < 200 (i = 4, 5, 6, 7)$$

3.2.6 均衡收获目标约束

$$\sum_{j=5}^7 x_{1j} - \sum_{j=5}^7 x_{2j} + d_8^- - d_8^+ = 0 \quad (18)$$

$$\sum_{j=5}^7 x_{2j} - \sum_{j=5}^7 x_{3j} + d_9^- - d_9^+ = 0 \quad (19)$$

$$\sum_{j=5}^7 x_{3j} - \sum_{j=5}^7 x_{4j} + d_{10}^- - d_{10}^+ = 0 \quad (20)$$

$$\sum_{j=5}^7 x_{4j} - \sum_{j=5}^7 x_{5j} + d_{11}^- - d_{11}^+ = 0 \quad (21)$$

$$\sum_{j=5}^7 x_{5j} - \sum_{j=5}^7 x_{6j} + d_{12}^- - d_{12}^+ = 0 \quad (22)$$

$$\sum_{j=5}^7 x_{6j} - \sum_{j=5}^7 x_{7j} + d_{13}^- - d_{13}^+ = 0 \quad (23)$$

目标函数:

$$\begin{aligned} \min = & p_1 d_1^- + p_2 d_2^- + p_3 d_3^- + p_4 \sum_{k=4}^7 (d_k^+ + d_k^-) + \\ & p_5 \sum_{k=8}^{13} (d_k^+ + d_k^-) \end{aligned}$$

3.2.7 优化结果及分析 首先将 M_{\max} 、 V_{\max} 、 NPV_{\max} 在约束条件(1)~(10),利用LINGO软件分别根据单目标线性规划法求解,其最大值分别为 $2\,641\,455\text{m}^3$, $1\,782\,984\text{m}^3$, $25\,590\,830\text{元}$,然后根据此值编写LINGO程序运行多目标模型求解,在此视5个目标的优先级相同,即权重 P 均为 0.2 。优化结果如表6所示,除第一分期收获量较少外,其它6个分期每年的林木收获面积在 $164\sim 205\text{hm}^2$ 之间,年收获蓄积在 $39\,000\sim 40\,000\text{m}^3$ 之间,小于林分年蓄积生长量,且每个分期采伐后森林龄级分布动态变化如表7所示,龄级分布随调整时间趋于均匀,在调整期末,林分I~IV龄级即幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林面积分布较为均匀,有利于林分的可持续经营。调整期间,总收获蓄积量为 $2\,333\,616.5\text{m}^3$,相对于最大材积收获量 $2\,641\,455\text{m}^3$,相差 $307\,838.5\text{m}^3$,完成目标量的 88.3% 。净现值收益达到 $19\,264\,540\text{元}$,相对于最大净收益值 $25\,590\,830\text{元}$,相差 $6\,326\,290\text{元}$,完成目标值的 75.3% ,因此 $6\,326\,290\text{元}$ 可以认为是为了实现调整期内均衡的木材蓄积收获量的机会成本。

表6 马尾松各分期龄级收获结果

| 分期 | 龄级 | | | 总收获面积/ hm^2 | 年收获面积/ hm^2 | 总收获蓄积/ m^3 | 年收获蓄积/ m^3 |
|----|----------|-------|---------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | IV | V | VI | | | | |
| 1 | 512.5 | 0.0 | 11.2 | 523.7 | 52.4 | 100 622.3 | 10 062.2 |
| 2 | 1 765.8 | 166.6 | 112.6 | 2 045 | 204.5 | 396 913.3 | 39 691.3 |
| 3 | 2 045 | 0.0 | 0.0 | 2 045 | 204.5 | 391 883.4 | 39 188.3 |
| 4 | 1 405.5 | 239.4 | 0.0 | 1 644.9 | 164.5 | 318 602.1 | 31 860.2 |
| 5 | 523.7 | 0.0 | 1 121.3 | 1 645 | 164.5 | 341 828.6 | 34 182.9 |
| 6 | 2 045 | 0.0 | 0.0 | 2 045 | 204.5 | 391 883.4 | 39 188.3 |
| 7 | 2 045 | 0.0 | 0.0 | 2 045 | 204.5 | 391 883.4 | 39 188.3 |
| 总计 | 10 342.5 | 406.0 | 1 245.1 | 11 993.6 | 1 199.4 | 2 333 616.5 | 233 361.5 |

表 7 马尾松各分期龄级分布动态变化

hm²

| 龄 级 | 分期 | | | | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | I | II | III | IV | V | VI |
| 初始 | 1 405.5 | 3 405.7 | 1 765.8 | 679.1 | 112.6 | 11.2 |
| 1 | 523.7 | 1 405.5 | 3 405.7 | 1 765.8 | 166.6 | 112.6 |
| 2 | 2 045.0 | 523.7 | 1 405.5 | 3 405.7 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 2 045.0 | 2 045.0 | 523.7 | 1 405.5 | 1 360.7 | 0.0 |
| 4 | 1 644.9 | 2 045.0 | 2 045.0 | 523.7 | 0.0 | 1 121.3 |
| 5 | 1 645.0 | 1 644.9 | 2 045.0 | 2 045.0 | 0.0 | 0.0 |
| 6 | 2 045.0 | 1 645.0 | 1 644.9 | 2 045.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 2 045.0 | 2 045.0 | 1 645.0 | 1 644.9 | 0.0 | 0.0 |

3.3 杉木多目标规划模型的建立与结果分析

杉木林总面积小,共 900.3 hm²。杉木造林费用(包括造林后前三年的抚育费用)为 6 750 元·hm⁻²,间伐收益与抚育间伐投入费用相当。杉木主伐净收益为 76 500 元·hm⁻²。目标规划模型建立方法同马尾松,由于篇幅限制,直接列出优化结果表

8,调整期内龄级分布动态变化,如表 9 所示。经过调整期,杉木龄级分布为 1~6 个龄级,面积比较均匀,幼中龄林面积均为 170 hm²,近熟、成熟林面积为 118~142 hm²。实现净现值收益 4 856 302.3 元,占单目标净收益最大值 7 257 015 元的 66.9%,同样,相差的 2 400 712.7 元是实现均衡收益的机会成本。

表 8 杉木各分期最优林分收获量

| 分期 | 龄级 | | | | | 总收获面积/ hm ² | 年收获面积/ hm ² | 总收获蓄积/ m ³ | 年收获蓄积/ m ³ |
|----|-------|------|------|-----|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | VI | VII | VIII | IX | X | | | | |
| 1 | 136.5 | 29.7 | 1.6 | 2.1 | 0.2 | 170.1 | 34.0 | 34 227.2 | 6 845.4 |
| 2 | 159.2 | 0.0 | 10.9 | | | 170.1 | 34.0 | 33 750.9 | 6 750.2 |
| 3 | 170.1 | 0.0 | 0.0 | | | 170.1 | 34.0 | 33 193.8 | 6 638.8 |
| 4 | 0.0 | 51.8 | 90.1 | | | 141.9 | 28.4 | 33 644.8 | 6 729 |
| 5 | 0.0 | 0.0 | 130 | | | 130.0 | 26.0 | 32 012.5 | 6 402.5 |
| 6 | 10.5 | 44.5 | 63.1 | | | 118.1 | 23.6 | 27 430.4 | 5 486.1 |
| 7 | 170.1 | 0.0 | 0.0 | | | 170.1 | 34.0 | 33 193.8 | 6 638.8 |
| 8 | 170.1 | 0.0 | 0.0 | | | 170.1 | 34.0 | 33 193.8 | 6 638.8 |
| 9 | 170.1 | 0.0 | 0.0 | | | 170.1 | 34.0 | 33 193.8 | 6 638.8 |

表 9 杉木各分期龄级面积分布动态变化

hm²

| 龄级 | 分期 | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|-----|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
| 初始 | 10.5 | 44.5 | 63.1 | 351.9 | 249.3 | 136.5 | 40.6 | 1.6 | 2.1 | 0.2 |
| 1 | 170.1 | 10.5 | 44.5 | 63.1 | 351.9 | 249.3 | 0.0 | 10.9 | 0.0 | 0.0 |
| 2 | 170.1 | 170.1 | 10.5 | 44.5 | 63.1 | 351.9 | 90.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 170.1 | 170.1 | 170.1 | 10.5 | 44.5 | 63.1 | 181.8 | 90.1 | 0.0 | 0.0 |
| 4 | 141.9 | 170.1 | 170.1 | 170.1 | 10.5 | 44.5 | 63.1 | 130 | 0.0 | 0.0 |
| 5 | 130.0 | 141.9 | 170.1 | 170.1 | 170.1 | 10.5 | 44.5 | 63.1 | 0.0 | 0.0 |
| 6 | 118.1 | 130.0 | 141.9 | 170.1 | 170.1 | 170.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 7 | 170.1 | 118.1 | 130.0 | 141.9 | 170.1 | 170.1 | 170.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 8 | 170.1 | 170.1 | 118.1 | 130.0 | 141.9 | 170.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 9 | 170.1 | 170.1 | 170.1 | 118.1 | 130.0 | 141.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

4 采伐量公式计算结果

将表 1 数据代入 4 个采伐公式中计算马尾松与杉木用材林一个经理期(2009—2019 年)的年采伐量,结果如表 10 所示。可以看出采用目标规划计算

的年伐面积、年伐蓄积是最小的。

由表 1 可知马尾松幼龄林、中龄林、近熟林与成熟林所占面积比例分别为 19.04%、46.15%、23.93% 和 10.88%,即龄组分布极不均匀,且幼中龄林占优势,因此只有成熟度公式与目标规划第一分

表10 马尾松、杉木不同采伐公式计算结果

| 树种 | 区划轮伐法 | | 成熟度公式 | | 法正蓄积公式 | | 第一林龄公式 | | 目标规划法 | |
|-----|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | 面积/hm ² | 蓄积/m ³ | 面积/hm ² | 蓄积/m ³ | 面积/hm ² | 蓄积/m ³ | 面积/hm ² | 蓄积/m ³ | 面积/hm ² | 蓄积/m ³ |
| 马尾松 | 238.06 | 44 921.80 | 80.29 | 15 150.60 | 315.74 | 59 580.45 | 128.44 | 24 235.49 | 52.37 | 10 062.23 |
| 杉木 | 34.63 | 6 055.12 | 36.20 | 6 330.20 | 57.37 | 10 032.15 | 43.03 | 7 524.54 | 34.00 | 6 845.40 |

期(2009—2019年)的结果相近,其它公式计算的采伐量偏多,这是因为在龄级分布不均的情况下,区划轮伐法、法正蓄积公式及第一林龄公式会造成采伐部分幼中龄林,杉木幼中近熟林面积比分别为6.11%、46.10%、27.69%和20.10%,幼中龄林与近、成熟林所占比例相当,因此采用传统采伐公式计算结果与目标规划法优化结果相差不大,但是,根据净现值公式,按照目标规划计算的采伐量,马尾松单位面积林地上平均年收获效益为1 606.2元·hm⁻²,杉木单位面积年收益为1 722.1元·hm⁻²,按照轮伐公式计算的采伐量马尾松与杉木单位面积年收益分别为87.81元·hm⁻²和114.19元·hm⁻²。由此可以看出,在龄级分配不均的情况下,采用区划轮伐公式、法正蓄积公式、第一林龄公式是不合适的,成熟度公式相对合理,但经济收益差。另外根据目标规划得到马尾松7个经理期、杉木9个经理期各分期的收获量,以及期末资源分布情况,在森林可持续经营条件下,其它分期的采伐量能够在下一个经理期编制经营方案时提供采伐量数据参考,通过各分期的采伐收获,能够对马尾松、杉木人工用材林的资源动态变化有个初步了解。

5 结论与讨论

本研究利用的是中国林科院热林中心2009年的二类调查数据,数据是比较新的,对将来的森林采伐作业具有一定的指导意义,但在实际操作中,要根据林分的具体生长状况和外界因素的变化,不断调整采伐量。

本研究中视5个目标的优先级相同,不同的优先级具有不同的优化结果,因此,在实施过程中,要根据实际经营目标的优先级对模型进行修正。如果两个目标的优先级不同,每次都在前一目标最优解集内求下一个目标最优解,直到求出共同的最优解,当前应用的很多软件LINDO/LINGO、Forstat2.0等都能实现。

在森林资源龄级分配不均的情况下,不适合采用传统采伐量计算公式直接计算采伐量,而且得到的经济收益低,目标规划是一种有效计算采伐量的

方法,既可以获得较高的经济效益又有利于森林的可持续经营。

本研究中建立的模型,没有考虑环境约束,是因为暂时没有环境因子的调查数据,随着人们对人工用材林的生态效益,尤其是碳汇功能的重视,在以后的研究中需要进一步采集样地环境因子数据,同时在经营目标中,增加环境目标如林分水生产能力,碳储量目标等,得到能够使森林的经济效益、社会效益和生态效益充分发挥的森林资源优化模型。

参考文献:

- [1] Diaz - Balteiro L, Romero C. Modelling timber harvest scheduling problems with multiple criteria: An application in Spain[J]. Forest Sci, 1998, 44: 47 - 57
- [2] Bertomeu M, Diaz-Balteiro L, Gimenez J C. Forest management optimization in *Eucalyptus* plantations: a goal programming approach [J]. Can J For Res, 2009, 39: 356 - 366
- [3] Misir N, Misir M. Developing a Multi-Objective Forest Planning Process with Goal Programming: A Case Study [J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2007, 10(3): 514 - 522
- [4] 陈增丰. 目标规划和线性规划两步优化法在森林收获调整中的应用[J]. 福建林学院学报, 1994, 14(4): 329 - 338
- [5] 谢金星, 薛毅. 优化建模与LINDO/LINGO软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 322 - 333
- [6] 陈伯贤. 森林资源管理中线性规划和目标规划联合应用的研究[J]. 东北林业大学学报, 1991, 19(2): 36 - 41
- [7] 刘伟, 黄家荣, 阚龙攀, 等. 人工刺槐用材林多目标规划收获调整[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(6): 2491 - 2496
- [8] 张贤良. 多目标决策法在生态公益林资源优化配置中的应用研究[J]. 林业资源管理, 2002(6): 31 - 34
- [9] 戎建涛, 雷相东, 张会儒, 等. 兼顾碳贮量和木材生产目标的森林经营规划研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(2): 155 - 162
- [10] Baskent E Z, Keles S. Developing alternative wood harvesting strategies with linear programming in preparing forest management plans [J]. Turk J Agric For, 2006, 30: 67 - 79
- [11] Baskent E Z, Keles S. Developing alternative forest management planning strategies incorporating timber, water and carbon values: an examination of their interactions [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2009, 14(4): 467 - 480
- [12] 亢新刚. 森林资源经营管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 213 - 225
- [13] 白灵海, 唐继新, 明安刚, 等. 广西大青山米老排人工林经济效益分析[J]. 林业科学研究, 2011, 24(6): 784 - 787