

连平县林业生产中树种龄级最佳 控制 研 究

徐秀珍 陈俊廉 曾永强

(基础部) (连平县林业局)

摘要 本文应用状态空间分析法和最优控制理论,建立了林业生产中调整树种龄级的最佳控制模型,并给出了运用数学规划求解的实例。

关键词 最优控制; 树种龄级; 经理期; 蓄积量

林业的根本任务,是培育良好的森林资源充分地发挥森林的生态、经济、社会效益,把森林龄级结构调整适宜,是当前最为重要而又必须解决的问题。作者在参加连平县社会、经济和科技总体规划工作中,根据连平县林业生产中的实际情况,本研究运用状态空间分析法和最优控制理论及从善本的“树种龄级最优控制模型”^[3~5],从而建立了连平县林业生产中杉树、松树、阔叶树 3 个树种的龄级调整最佳控制数学规划模型。在 M340 中型计算机上反复多次计算调整,得到各经理期造林、采伐面积的最佳控制决策。近几年连平县林业局实施了该规划决策,收到了明显的效果:(1) 减少了木材蓄积消耗,消耗量从规划前的 20 万 $\text{m}^3/\text{年}$ 减少到 12 万 $\text{m}^3/\text{年}$; (2) 木材消耗量低于生长量,即木材年消耗量为 12 万 m^3 ,而木材年生长量是 15 万 m^3 ; (3) 实现了广东省委、省政府“五年消灭荒山,十年绿化广东”的号召,森林复盖率及经济效益均得到相应提高; (4) 规划为森林经营方案的编制提供了科学论证。因此该研究较满意地达到如期的目的。

1 建立模型

如果把某一林业生产系统中的某一林种按年龄划分成 K 个龄级, $A_1, A_2, \dots, A_K$ 表示调整期初各龄级面积, S_0 表示宜林荒山及疏林地面积,希望在 n 个经理期内通过合理采伐和造林,将该林种各龄级的面积调整均匀,或使各龄级的面积分布满足特定经营方式下的要求。根据林业生产的实际情况,显然, A_K 为过熟林面积, A_{K-1} 为成熟林面积;一般抚育间伐在第 I、第 III 龄级进行,这样,主伐龄级集为 $\{A_{K-1}, A_K\}$ 、间伐龄级集为 $\{A_2, A_3\}$;并假定在各经理期内采伐迹地、火烧迹地必须及时更新,全部宜林荒山必须按要求造林。在上述假定下,才能实现龄级结构的调整。为了方便,我们规定:

$A_i(t)$ 第 t 经理期初第 i 龄级面积 ($i=1, 2, \dots, K; t=1, 2, \dots, n$)

$S(t)$ 第 t 经理期宜林地面积

1990-02-21 收稿

- $M(t)$ 第 t 经理期过熟林主伐面积
 $N(t)$ 第 t 经理期成熟林主伐面积
 $B(t)$ 第 t 经理期宜林荒山造林面积
 $G(t)$ 第 t 经理期造林面积
 $\mu_i(t)$ 第 t 经理期、第 i 龄级损耗率
 $\eta(t)$ 第 t 经理期造林成活率
 $\alpha_i(t)$ 第 t 经理期第 i 龄级平均单位面积蓄积量

依上述规定, 可编制龄级状态转移框图^{[5]1}

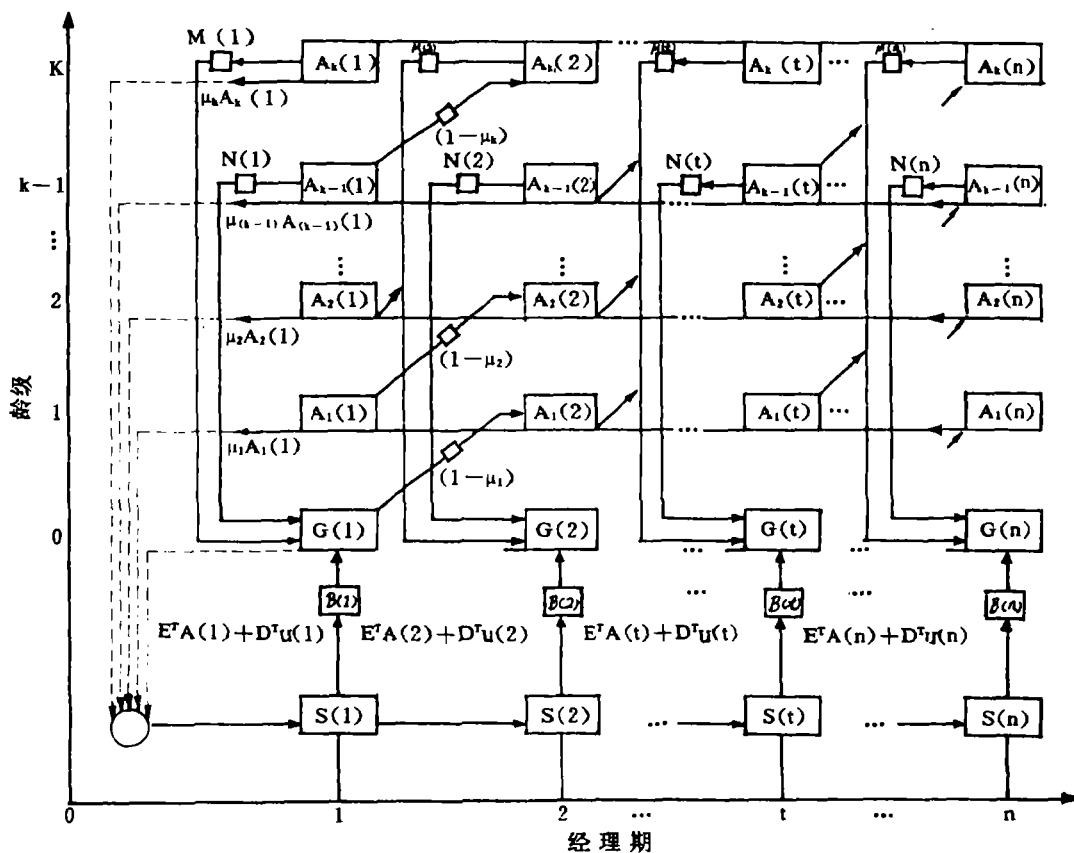


图1 龄级状态转移框图

从图1出发导出龄级状态转移方程如下:

$$A(t+1) = H(t)A(t) + C U(t) \quad (1)$$

式中 $A(t)$ 为龄级状态向量

$$A(t) = [A_1(t), A_2(t), \dots, A_k(t)]^T$$

$H(t)$ 为龄级状态转移矩阵

$$H(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 1-\mu_1(t) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-\mu_2(t) & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1-\mu_{k-2}(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1-\mu_{k-1}(t) & 1-\mu_k(t) \end{pmatrix}$$

$U(t)$ 为造林采伐向量

$$U(t) = [M(t), N(t), B(t)]^T$$

C 为造林采伐矩阵

宜林荒山转移方程为

$$C = \begin{pmatrix} \eta & \eta & \eta \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$S(t+1) = S(t) + E^T A(t) + D^T U(t) \quad (2)$$

其中, $E^T = [\mu_1(t), \mu_2(t), \cdots, \mu_k(t)]$

$$D^T = [(1-\eta), (1-\eta), (1-\eta)]$$

第 t 经理期的造林面积为

$$G(t) = M(t) + N(t) + B(t) \quad (3)$$

假设抚育间伐龄级集为

$$I_A = \{K_1, K_2, \cdots, K_m\} \quad (4)$$

又假设 $b_i (i \in I_A)$ 为 i 龄级单位面积间伐量, 那末整个调整期内给出了木材采伐总量关系式:

$$f = \sum_{t=1}^n \{ \alpha_k M(t) + \alpha_{k-1} N(t) + \sum_{i \in I_A} b_i A_i(t) \} \quad (5)$$

其中

$$M(t) = \begin{pmatrix} M(1) \\ M(2) \\ \vdots \\ M(n) \end{pmatrix} \quad N(t) = \begin{pmatrix} N(1) \\ N(2) \\ \vdots \\ N(n) \end{pmatrix}$$

因为森林在不同的经理期的经营水平不会相同, 因而单位面积活立木蓄积量也不会相同, 所以 α_k, α_{k-1} 分别应是一个系数集, 即

$$\alpha_k(t) = \{ \alpha_k(1), \alpha_k(2), \cdots, \alpha_k(n) \}$$

$$\alpha_{k-1}(t) = \{ \alpha_{k-1}(1), \alpha_{k-1}(2), \cdots, \alpha_{k-1}(n) \}$$

同理, b_i 也是个系数集, 即

$$b_i(t) = \{ b_i(1), b_i(2), \cdots, b_i(n) \}$$

那么(5)式应改为

$$f = \sum_{t=1}^n \{ \alpha_k(t) M(t) + \alpha_{k-1}(t) N(t) + \sum_{i \in I_A} b_i(t) A_i(t) \} \quad (5')$$

当且仅当抚育间伐只在某一特定集中进行时, (5')可改写为

$$f = \sum_{t=1}^n \{ \alpha_k(t) M(t) + \alpha_{k-1}(t) N(t) + b_i(t) A_i(t) \} \quad (5'')$$

现设 P 为单位面积造林费, L 为单位面积造林劳动力消耗, $L(t)$ 为第 t 经理期所能

提供造林劳动力总数, P^* 为整个调整期中所能提供的造林投资, 那么在全调整期内应满足下述劳力和资金的约束条件:

$$G(t) \leq L(t)/L \quad (t=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^n G(t) \leq P^*/P \quad (7)$$

综合(1)~(7)得下述合理造林、采伐及龄级调整的最佳控制模型:

$$\max f = \sum_{t=1}^n \alpha^T U(t) + \sum_{t=1}^n \beta^T X_t(t) \quad (8)$$

S, t

$$X(t+1) = \tilde{H}(t)X(t) + \tilde{C}U(t) \quad (9)$$

$$G(t) = \{1, 1, 1\}U(t) \quad (10)$$

$$G(t) \leq L(t)/L \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^n G(t) \leq P^*/P \quad (12)$$

$$q_i(X, U) \geq 0 \quad (13)$$

模型(8)式中, α 为主伐系数矩阵, β 为抚育间伐系数矩阵

$$\alpha(t) = \begin{bmatrix} \alpha_1(1), & \alpha_1(2), \dots, \alpha_1(n) \\ \alpha_{k-1}(1), \alpha_{k-1}(2), \dots, \alpha_{k-1}(n) \\ 0, & 0, \dots, 0 \end{bmatrix} \quad \beta_i(t) = \begin{bmatrix} \beta_1(1), & \beta_1(2), \dots, & \beta_1(n) \\ \beta_2(1), & \beta_2(2), \dots, & \beta_2(n) \\ \vdots, & \vdots, \dots, & \vdots \\ \beta_m(1), \beta_m(2), \dots, & \dots \\ 0, & 0, \dots, 0 \end{bmatrix}$$

其中

$$\beta_i = \begin{cases} b_i(t) & (i \in I_A) \\ 0 & (i \in \bar{I}_A) \end{cases}$$

$$X(t) = \begin{bmatrix} A(t) \\ \dots \\ S(t) \end{bmatrix} \quad \text{控制系统状态向量}$$

$$\tilde{H}(t) = \begin{bmatrix} H & 0 \\ E^T & 1 \end{bmatrix} \quad \text{系统状态转移矩阵}$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} C \\ \dots \\ D^T \end{bmatrix} \quad \text{系统控制矩阵}$$

(13) 式包含了林业生产过程需要满足的某些要求和变量内在的属性, 如采伐量不大于生长量, 主伐面积与造林面积的非负性等。当(13)式为线性方程时(8)~(13)式构成离散的线性最佳控制系统。

由于在林业生产中各经理期的造林投资不会相同, 因而造林面积也不会相同, 采伐系数矩阵受各种条件制约, 所以(8)~(13)式并非线性定常系数, 而是线性时变系数, 然而要想准确地估计 $\alpha(t)$ 及 $\beta(t)$ 的值要用微分方程等知识, 今后, 可进一步研究。为保险起见, 为使采伐总量最大值具有较高的可靠性, 这里假设采伐系数矩阵各元素是定常的, 不失一般性, 仍然可以把动态问题转化为静态问题, 从而应用线性规划求解。

2 数字实例

若把(9)式 $X(t+1)$ 按图1那样把“龄级状态维”、“经理期时间维”展开在一个平面上,且把控制向量 $U(t)$ 各元素在二维空间离散时刻上的取值为独立的标量变量,则最佳控制问题(8)~(13)变为静态的具有 Kn 个变量的线性规划问题,下面给出具体的应用实例。

用材林是连平县林业经济的支柱,以杉、松、阔叶林(杂)3个树种为主,由于长期以来滥伐现象严重,木材总蓄量由1958年的400万 m^3 下降到1985年的286.5万 m^3 ,人平均9.5 m^3 ,而且各树种龄级比例畸形。按照林分生长量0.12 m^3 /亩、年,蓄积量1.66 m^3 /亩推算,目前平均采伐林龄为 $1.66/0.12=14$ (年)。根据1984年二清查林龄按照树种平均为30年,照此推算30年才采伐,林木蓄积量亩平均就可达到3.6 m^3 ,从总的来看,目前采伐中、幼林是杀鸡取蛋,因此,在制定林业发展的长远规划,不但要对整个林业生产结构进行调整,而且必须制定合理采伐、造林计划,争取在调整期末把龄级结构调整适宜,从而实现森林生态效益,经济效益和社会效益的良性循环。

例1——杉木材

连平县现有集体属杉木林面积22万亩,蓄积198404 m^3 ,疏林2388亩,蓄积量2588 m^3 ,宜杉木生长的荒山24万亩,宜改种杉木的灌木林6万亩,总计可发展杉林52.4万亩,按杉树生长规律,将杉林划成5个龄级,各龄级为5年,达到第5龄级即近熟林后方可采伐,各龄级面积蓄积如表1

表1 连平县集体属杉木林面积蓄积表(1985年)

龄级	合 计	I	II	III	IV	V
面 积(亩)	221 551	83 150	85 447	47 638	4 580	736
亩平蓄积量(m^3 /亩)	0.9	0.2	0.9	1.9	2.6	7.3

今后造林,据区计划和作业设计,做到适地造林,速生丰产,以年生长量0.5 m^3 /亩计,预计新造林蓄积单产如表2

表2 连平县新造杉木林蓄积单产表

龄级	I	II	III	IV	V
单产蓄积(m^3 /亩)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5

对V龄级进行采伐,在I—III龄级进行抚育间伐,宜林地和调整期内造林完毕,且采伐迹地在当个经理期及时更新,那末,最佳控制模型中主伐龄级集为 $\{5\}$,间伐龄级集为 $\{1, 2\}$,于是造林采伐控制向量为: $U(t)=[M(t), B(t)]^T$

其中, $M(t)$ ——为第V龄级主伐面积

$B(t)$ ——为荒山造林面积

按表3设置变量

表3 杉木林变量设置表(单位:亩)

项目 \ 龄级	I	II	III	IV	V
近熟林 $M(t)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
宜林地 $B(t)$	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}

表3中 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 为1~5经理期近熟龄级主伐面积; $x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}$ 为1~5经理期荒山、灌木林、疏林造林面积。

如果设各龄级之损耗率为 $\mu_i(t) = 0$, 各龄级造林成活率为 $\eta = 100\%$, 则最佳控制模型为:

2.1 目标函数

木材采伐量最大 (单位: m^3)

$$\text{Max } f(x) = 7.3 \sum_{i=1}^5 x_i + 12.5 \sum_{i=6}^{10} x_i$$

2.2 约束条件 S, t

2.2.1 近熟林采伐面积约束 (单位: 亩)

$$x_1 \leq 736$$

$$x_1 + x_2 \leq 5316$$

$$x_1 + x_2 + x_3 \leq 52954$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \leq 138401$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \leq 221551$$

2.2.2 龄级状态控制约束 (单位: 亩)

$$152730 \leq x_1 + x_6 \leq 152740$$

$$156570 \leq x_2 + x_7 \leq 156580$$

$$47630 \leq x_3 + x_8 \leq 47648$$

$$85440 \leq x_4 + x_9 \leq 854517$$

$$83140 \leq x_5 + x_{10} \leq 83160$$

$$524000 \leq \sum_{i=1}^{10} x_i \leq 525550$$

2.2.3 荒山造林面积约束 (单位: 亩)

$$x_6 \leq 152000$$

$$\eta x_6 + x_7 - (1 - \eta) x_1 \leq 304736$$

$$\eta (x_6 + x_7) + x_8 - (1 - \eta) (x_1 + x_2) \leq 309316$$

$$\eta (x_6 + x_7 + x_8) + x_9 - (1 - \eta) (x_1 + x_2 + x_3) \leq 356954$$

$$\eta (x_6 + x_7 + x_8 + x_9) + x_{10} - (1 - \eta) (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \leq 442401$$

2.2.4 $x_i \geq 0, (i = 1, 2, \dots, 10)$

2.3 计算和计算结果分析

在富士通 M340 中型计算机上经反复多次计算, 得如下矩阵:

$(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}) = (736, 4\ 580, 47\ 638, 85\ 447, 83\ 150, 152\ 000, 152\ 000, 0, 0, 0)$

把上述结果列成表4、表5,并由它们可以看出,通过对采伐面积和造林面积的控制,杉木林在全调整期各经理期造林面积比例为:29:29.8:9:16.3:15.8;第5经理期末各龄级木材蓄积量比例为:4.65:9.56:8.35:42.7。显然龄级调整前Ⅳ、Ⅴ龄级只占各龄级总和的8.7%,而调整后上升到77.7%,从而使生长量大大超过采伐量,在上述约束条件满足下,到调查期末木材最大采伐量将达到541.73万 m^3 (这里只叙述其中一个方案)。

表4 杉木林合理采伐及造林(单位:亩, M^3)

项目 \ 经理期(t)	1	2	3	4	5	合 计
近熟林采伐面积(亩)	736	4 580	47 638	85 447	83 150	22 155
荒山造林面积(亩)	152 000	152 000	0	0	0	0
造林总面积(亩)	152 736	156 580	47 638	85 447	83 150	525 551
采伐总量	5 372.8	33 434	347 757.4	622 763.1	606 995	1617 322.3
造林面积比例	29.062	29.793 5	9.064	16.3	15.82	100

表5 第5经理期末龄级结构及木材蓄积量分布(单位:亩, M^3)

龄 级	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V	合 计
龄级状态(亩)	83 510	85 447	47 638	156 580	152 736	
蓄积量(m^3)	207 875	427 235	357 285	1 565 800	1 909 206	4 467 395
蓄积比例	4.653 15	9.563 4	7.997 61	35.049 5	42.736 31	100

另外,因篇幅所限马尾松林,阔叶林数字实例均未选入本文。

3 讨论

本文研究单一树种的龄级调整的最优控制问题,且以最大采伐量为最大目标,当然,也可以把调整期末的木材总蓄积最大为目标进行计算而得出相应方案;或者以木材蓄积量和木材采伐量最大为目标的多目标规划模型再进行计算同样得可行的或最优的决策方案;我们还可以改变文中模型右边约束条件从而获得各种决策以供选择。总之,根据数学模型,通过计算机模拟,从中选择最佳方案,相应制订实施方案的各种措施,并保证措施的执行,那末,九山半水半分田的连平山区县林业生产,必将取得可喜的生态效益,经济效益和社会效益。

致谢 本文承华南农业大学基础部陈振权副教授审阅并提出宝贵意见;广东省林业厅张梦琴工程师参加并指导;华南农业大学计算机室大力支持,谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 李维铮等. 运筹学. 北京:清华大学出版社,1985.15~31
- 2 何建坤等. 实用线性规划及计算机程序. 北京:清华大学出版社,1985.189~218
- 3 邓集贤等. 经济预测与决策的数学方法. 广州:中山大学出版社,1986.31~56.
- 4 魏权龄等. 数学规划与优化设计. 北京:国防工业出版社,1982.523~541
- 5 Stephen P Bradley. Applied Mathematical Programming. Addison- Wesley Publishing Company, 1977. 480~520

**OPTIMAL CONTROL OF AGE CLASS IN FORESTRY PRODUCTION AT
LIANPING COUNTY**

Xu Xiuzhen

Chen Junlian

Zeng Yongqiang

(Department of Basic Courses)

(Lianping Forestry Bureau, Guangdong Province)

Abstract This paper reports the use of state space analysis and the optimal controlling theory to set up an optimal controlling model for adjusting age class in forest management, and gives examples in using mathematical programming to solve problems.

Key words Optimal control; Tree species age-grade; Management-period; Growing stock