

文章编号: 1000-5692(2001)03-0233-05

# 森林可持续发展的动态优化模型

王胜奎

(浙江林学院 信息工程与基础科学系, 浙江 临安 311300)

**摘要:** 运用动态规划方法讨论森林可持续发展问题, 建立了森林自然发展模型和森林可持续发展的优化开发模型, 给出了相应的迭代公式, 并选用青冈-夏蜡梅群落进行模拟计算。结果表明经过一段时间的自然发展, 森林群落可达到稳定态, 夏蜡梅群落必将过渡到青冈-夏蜡梅稳定群落, 其后, 各阶段各树种的数量有微小变化, 但总体稳定, 且算法快速收敛于稳定点。图 3 表 2 参 4

**关键词:** 森林群落; 可持续发展; 数学模型; 优化

**中图分类号:** S711      **文献标识码:** A

## 1 概述

再生资源的开发要求适度, 一般的策略是在持续稳产的前提下追求最高产量或最优的经济效益<sup>[1]</sup>。但是, 大多有关再生资源的管理、开发和预测的模型, 把资源作为动态变化的整体, 从总体上进行数量变化的讨论, 而涉及其各阶段空间结构的讨论较少, 如 Scheafer 模型和 Volterra 模型。这就给开发再生资源的优化决策带来了困难。本文以森林资源为例, 意在建立可用于实际的森林可持续发展的动态优化模型, 为森林的规划、管理和开发提供决策方法。

植物群落不是孤立存在的, 是在一定的气候、基质和生物等因素综合作用下经过长期发展而形成的<sup>[2]</sup>。不同植物之间既有生态龛中的竞争现象, 也有相互依赖的关系, 并且常常两者同时共存于同一群落中(这种关系在下文中用相关系数来表示)。通过相互间的共同作用, 形成不同时期有所差别的森林结构。因此, 通过采伐、造林和改造等手段控制各时期各树种的结构(性状和数量), 可调整森林的时间分布和空间分布等动态结构, 在保证森林持续发展的条件下, 获得最大的效益。

## 2 建模思想

为了表达森林中树木在生长过程中的相互影响, 需对树木生长时所占据的空间进行分划, 可从垂直与水平面投影 2 个方面进行分析, 然后进行合成, 形成空间分层。

### 2.1 空间分布的垂直分层

依据树木之间相对高度对它生长的不同影响, 将树木依赖生存的空间划分为 4 层: A 层, B 层, C 层和 D 层。

### 2.2 空间分布的水平结构与空间分层

在水平结构中, 除考虑个体密度、盖度、物种多样性<sup>[2]</sup>、均匀度和生态优势度外, 需考虑树的生

存邻域(指该树生存时必需占有的生存空间在水平面上的投影。它的大小随树种和树龄的不同而变化)。第*i*种的第*j*年生树(以后简称第*i*种*j*年生树)垂直分层与生存邻域一起构成了它的空间分层*A<sub>ij</sub>*, *B<sub>ij</sub>*, *C<sub>ij</sub>*, *D<sub>ij</sub>*(图1)。

### 2.3 关系式的建立

树木之间的竞争与依赖关系表现在对它们的生态龛的争夺与供给和数量的变化上。设*r<sub>ij</sub>*表示第*i*种*j*年生树在该地域环境中作为纯林时的自然死亡率, *S<sub>ijkl</sub><sup>a</sup>* (*S<sub>ijkl</sub><sup>b</sup>*, *S<sub>ijkl</sub><sup>c</sup>*, *S<sub>ijkl</sub><sup>d</sup>*) 表示对于某株第*i*种*j*年生树, 它与位于它的 *A<sub>ij</sub>* (*B<sub>ij</sub>*, *C<sub>ij</sub>*, *D<sub>ij</sub>*) 中的第*k*种*l*年生树的相关系数(表示它们在成长中, 两者的相互影响关系), *x<sub>ij</sub>* 表示第*i*种*j*年生树的总量, *x<sub>ij</sub>[(n+1)<sup>-</sup>]* 表示第*n*阶段末的第*i*种*j*年生树的总量, *x* 为森林的生物总量, *u(i)* 为第*i*种树的成年树集, *f<sub>ij</sub>* 为第*i*种*j*年生树的繁殖率, *p<sub>i</sub>(x)* 为成活率。对森林的主要树种 *i* (*i* = 1, 2, …, *m*) 进行树龄和数量的分析, 得到如下关系:

$$\begin{aligned} \frac{dx_{ij}}{dt} &= -r_{ij}x_{ij} + \beta_{ij}x_{ij}; \\ x_{ij} &= p_i(x) \sum_{j \in u(i)} f_{ij}x_{ij}; \\ x_{ij+1}(n+1) &= x_{ij}[(n+1)^-]. \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\beta_{ij} = \sum_{kl} (S_{ijkl}^a x_{kl} + S_{ijkl}^b x_{kl} + S_{ijkl}^c x_{kl} + S_{ijkl}^d x_{kl})$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ 。

(1) 式中的系数与 2.1 和 2.2 所述的诸因素有关, 但对某一特定的森林, 可简化为各树种各树龄的数量关系上。一般 *r<sub>ij</sub>* 大于零。依据实际情形, *S<sub>ijkl</sub><sup>a</sup>* (*S<sub>ijkl</sub><sup>b</sup>*, *S<sub>ijkl</sub><sup>c</sup>*, *S<sub>ijkl</sub><sup>d</sup>*) 可能正, 也可能负。例如在不考虑树的个体差异的基础上, 若第*i*种树为青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 幼树, 因为青冈幼树为阳生性树种, 所以 *S<sub>ijkl</sub><sup>a</sup>* 小于零。若第*i*种树为夏蜡梅 (*Calycanthus chinensis*), 因为它在较隐蔽湿润的环境中生长旺盛, 所以 *S<sub>ijkl</sub><sup>a</sup>* 大于零。*S<sub>ijkl</sub><sup>a</sup>* 等的大小可通过对该片森林的树种、树龄和相应数量的数据统计, 代入后面的模型 (3) 进行搜索获得。

## 3 数学模型的建立与求解

### 3.1 森林自然发展模型

根据树木生长的规律, 一般将 1 a 作为 1 个阶段。综上所述, 可得森林自然增长的动态模型为:

$$\begin{aligned} \frac{dx_{ij}}{dt} &= -r_{ij}x_{ij} + \beta_{ij}x_{ij}; \\ x_{ij+1}(n+1) &= x_{ij}[(n+1)^-]; \\ x_{ij}(n+1) &= p_i[x(n+1)] \sum_{j \in u(i)} f_{ij}x_{ij}[(n+1)^-]; \\ x_{ij}(0) &= c_{ij}. \end{aligned}$$

其中:  $\beta_{ij} = \sum_{k,l} (S_{ijkl}^a x_{kl} + S_{ijkl}^b x_{kl} + S_{ijkl}^c x_{kl} + S_{ijkl}^d x_{kl})$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots$ 。 $c_{ij}$  表示第*i*种*j*年生树在开始时的数量。由 (1) 式得:

$$x_{ij}(t) = x_{ij}(0) e^{-r_{ij}t + \int_0^t \beta_{ij}(s) ds}. \quad (2)$$

3.1.1 算法讨论 由于 (2) 式运算困难, 考虑到树木在 1 个月内的变化缓慢, 若视树木数量在 1 个月内保持不变, 月末发生突变, 则可用时间分片法(把 1 a 划分为 12 个时间片, 每月作为 1 个时间片), 将 (2) 式近似为后面的迭代公式 (3) 式。

### 3.1.2 迭代公式

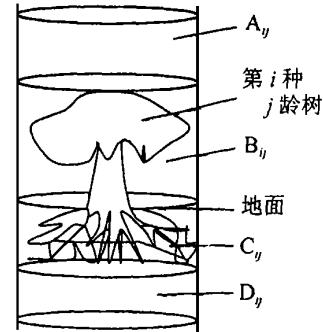


图 1 第*i*种*j*年生树的空间分层

Figure 1 Space lamination of the *i* species tree at *j* years old

$$\begin{aligned}
 y_{ij}(v+1) &= y_{ij}(v) e^{-r_{ij}/12} e^{w_{ij}(v)}; \\
 y_{ij}(0) &= x_{ij}(n); \\
 x_{ij+1}(n+1) &= y_{ij}(12); \\
 x_{ij}(n+1) &= p_i[x(n+1)] \sum_{j \in u(i)} f_{ij} x_{ij}[(n+1)^-]; \\
 x_{ij}(0) &= c_{ij}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

式中:  $w_{ij}(v) = [\sum_{k,l} (S_{ijk}^a y_{kl}(v) + S_{ijk}^b y_{kl}(v) + S_{ijk}^c y_{kl}(v) + S_{ijk}^d y_{kl}(v))] / 12$ ;  $v = 0, 1, 2, \dots, 11$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$ 。

3.1.3 解的讨论及其结果分析 对(3)选用夏蜡梅群落<sup>[3,4]</sup>进行拟合, 搜索得有关系数, 取初值<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned}
 x_{1j}(0) &= 100000/10j; \\
 x_{2j}(0) &= 300000/10j; \\
 x_{i1}(n) &= Z_i 400000/(4000000 + Z_i).
 \end{aligned}$$

其中:  $Z_i = \sum_{j \in [15, 30]} [100j x_{ij}(n)]$ ;  $i = 1, 2$ ;  $j = 1, 2, \dots, 30$ ;  $n = 1, 2, \dots, 125$ 。

然后进行模拟计算, 得  $x_{ij}(n)$  的部分运算结果为表 1, 表 2。图 2 为结果分析的部分图形 (图中只给了 28 年生夏蜡梅树的数量随时间变化的模拟结果, 3.2.2 中图 3 的含义类似, 以后不再说明)。从运算结果的数据变化趋势和图形显示来分析, 不论初始状况如何 (取不全为零), 经过一段时间的自然发展, 在各年龄、各树种的数量经过一定的波动后, 森林群落能够达到稳定态。在森林群落从初始态达到稳定态的过程中, 各年龄、各树种的数量波动加速减少, 这表明算法快速收敛。当然, 有关理论证明有待进一步讨论。因此, 从数据模拟可得以下结果:

①夏蜡梅群落必将过度到青冈-夏蜡梅稳定群落。与文献[3]结论一致。②群落达到青冈-夏蜡梅稳定群落后, 随上层高大乔木层集群分布, 造成林下光照和水分等资源的再分配, 使各阶段各树种的数量

表 1 设定森林中青冈的模拟计算结果

Table 1 Modeling calculation result of *Cyclobalanopsis glauca* in forest

| 阶段/a | 不同年龄青冈的株数 ( $\times 10^5$ ) / 株 |       |       |       |       |       |       |       |
|------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 1 a                             | 5 a   | 9 a   | 13 a  | 17 a  | 21 a  | 25 a  | 29 a  |
| 10   | 3 038                           | 0.175 | 0.035 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 40   | 3 029                           | 0.175 | 0.339 | 0.009 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| 85   | 3 038                           | 0.175 | 0.034 | 0.010 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| 90   | 3 038                           | 0.175 | 0.034 | 0.010 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |

表 2 设定森林中夏蜡梅的模拟计算结果

Table 2 Modeling calculation result of *Calycanthus chinensis* in forest

| 阶段/a | 不同年龄夏蜡梅的株数 ( $\times 10^5$ ) / 株 |       |       |       |       |       |       |       |
|------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 1 a                              | 5 a   | 9 a   | 13 a  | 17 a  | 21 a  | 25 a  | 29 a  |
| 10   | 3 715                            | 1.200 | 0.434 | 0.008 | 0.004 | 0.003 | 0.002 | 0.002 |
| 40   | 3 714                            | 1.200 | 0.441 | 0.155 | 0.056 | 0.021 | 0.008 | 0.004 |
| 85   | 3 715                            | 1.200 | 0.441 | 0.155 | 0.056 | 0.021 | 0.008 | 0.004 |
| 90   | 3 715                            | 1.200 | 0.441 | 0.155 | 0.056 | 0.021 | 0.008 | 0.004 |

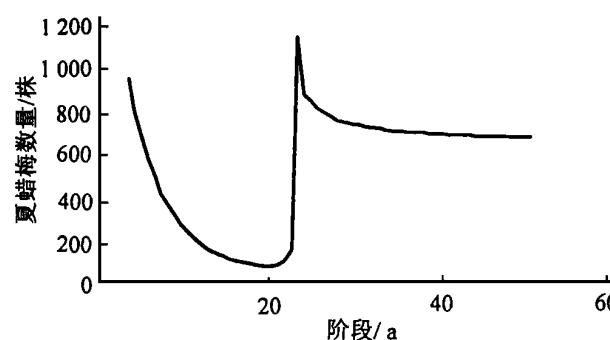


图 2 28 年生夏蜡梅树的数量随时间变化的模拟结果

Figure 2 Changes of the number of *Calycanthus chinensis* trees at 28-year-old

有微小变化, 但总体稳定。与文献[4]结论一致。③算法快速收敛于稳定点。

### 3.2 森林可持续发展的优化开发模型

3.2.1 模型与迭代公式 设对第  $i$  种  $j$  年生树的砍伐强度(可控制的参数)为  $k_{ij}$ , 砍伐系数(单位强度下的砍伐率)为  $q^{[1]}$ , 单位价值为  $h_{ij}$ , 出材率为  $\lambda_{ij}$ ,  $t$  时刻开始砍伐, 周期为  $T$ 。则在森林可持续发展的条件下, 获得最大经济效益  $g$  的模型为:

$$\begin{aligned} \max g &= \int_t^{t+T} \left( \sum_{i,j} h_{ij} k_{ij} q x_{ij} \lambda_{ij} \right) dt; \\ \text{s. t. } & \frac{dx_{ij}}{dt} = -r_{ij} x_{ij} - k_{ij} q x_{ij} + \beta_{ij} x_{ij}; \\ & x_{ij+1} = x_{ij}(1^-); \\ & x_{i1} = p_i(x) \sum_{j \in u(i)} f_{ij} x_{ij}(1^-). \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots$ 。由(4)式得,  $x_{ij}(t) = x_{ij}(0) e^{-r_{ij} t - k_{ij} q t + \int_0^t \beta_{ij}(t) dt}$ 。于是, 迭代公式为:

$$\begin{aligned} \max g &= \sum_{v=0}^{11} \left( \sum_{i,j} h_{ij} k_{ij} q y_{ij}(v) \lambda_{ij} \right); \\ y_{ij}(v+1) &= y_{ij}(v) e^{(-r_{ij} - k_{ij} q)/12} e^{w_{ij}(v)}; \\ y_{ij}(0) &= x_{ij}; \\ x_{ij+1} &= y_{ij}(12); \\ x_{i1} &= p_i \left( \sum_{i,j} x_{ij} \right) \sum_{j \in u(i)} f_{ij} x_{ij}(1^-); \\ w_{ij}(v) &= \left[ \sum_{k,l} (S_{ijkl}^a y_{kl}(v) + S_{ijkl}^b y_{kl}(v) + S_{ijkl}^c y_{kl}(v) + S_{ijkl}^d y_{kl}(v)) \right] / 12. \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $v = 0, 1, 2, \dots, 11; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots$ 。

### 3.2.2 模型的举例验证 模型(5)用

计算机搜索来解  $x_{i1}, k_{ij}$ 。对以上 3.1.3 所举的算例, 封山 10 a 后开发( $t = 10$ ), 取  $\lambda_{ij} = 1$ , 当  $j > 14$  时,  $k_{ij}q = p$ ,  $h_{ij} = 5 \times j(6 - i)$  元, 当  $j < 15$  时,  $k_{ij}q = 0$ ,  $h_{ij} = 0$ 。

运算结果的分析与 3.1.3 同理, 其图形分析见图 3(图中只给了 28 年生青冈树的数量随时间变化的模拟结果)。森林持续发展时取得最大经济效益的砍伐度  $p = k_{ij}q$  与各种 1 年生树的数量  $x_{11}, x_{21}$ , 年收获量  $g$  的搜索结果为:

$$p = 27.3, g = 2.3854 \times 10^8 \text{ 元}, x_{11}$$

= 2300 万株,  $x_{21} = 790$  万株。

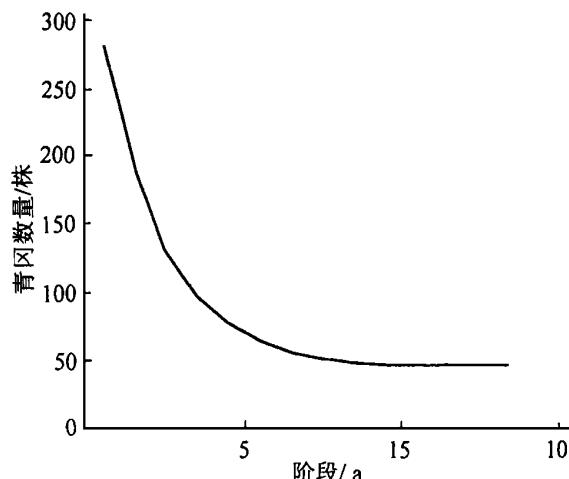


图 3 28 年生青冈树的数量随时间变化的模拟结果

Figure 3 Changes of the number of *Cyclobalanopsis glauca* trees at 28-year-old

### 参考文献:

- [1] 杨启凡, 方道元. 数学模型[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999. 100—109.
- [2] 余树全, 周国模, 韦新良, 等. 森林生物多样性保护与森林的持续发展[J]. 浙江林学院学报, 1997, 14(2): 187—192.
- [3] 徐耀良, 张若蕙, 周聘. 夏蜡梅的群落学研究[J]. 浙江林学院学报, 1997, 14(4): 355—362.
- [4] 符启杰, 李鸣光, 王伯荪, 等. 黑石顶针阔叶混交林演替过程中群落结构动态[J]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 1—4.

# Optimal model of sustainable development of forests

WANG Sheng-kui

(Department of Information Engineering and Basic Science, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300 Zhejiang, China)

**Abstract:** The problem of sustainable development of forests is discussed by the method of motion design, and the model of the natural development of forests and optimal developing model of the sustainable development of forests are established. The models select *Cyclobalanopsis glarca*-*Calycanthus chinensis* community to calculate and the results show that the forests can reach a stable stage after natural development of a time and *Calycanthus chinensis* community must transfer to *Cyclobalanopsis glauca*-*Calycanthus chinensis* community, after that, the amount of all kinds of trees in every stage will change a little, but the population mean is stable. The algorithm end as a stable point quickly.

**Key words:** forest collection; sustainable development; mathematical model; optimize

## 以实际行动贯彻浙江省农业科技大会精神 浙江林学院开展“院士行”科技服务活动

由2位中国工程院院士领衔的浙江林学院“院士行”科技服务活动7月7日结束。科技小分队由中国工程院院士、浙江林学院院长张齐生教授,中国工程院院士、浙江林学院学术委员会主任王明庥教授,副院长杨斌副教授,副院长方伟教授及从事经济林、林产品加工、生物技术、经济管理、山区开发、园林、林业信息和森林培育等研究的15位专家教授组成。这次“院士行”是浙江林学院认真贯彻落实全国林业科技大会和浙江省农业科学技术大会精神的实际行动。

自2001年7月2日起,整个科技服务活动为期1周,专家教授们巡回了浙江丽水、温州和台州等地区,进一步推进地方经济和社会可持续发展。在丽水,专家教授们冒着酷暑实地考察了百果园林场和滴水岩毛竹笋材两用基地,对百果园总体开发和毛竹笋材两用林经营及加工利用进行了指导。在丽水还举行了院士报告会,院士们向来自丽水市及各县的主要农林业领导和科技人员介绍了国际国内竹子深加工技术及林业发展的前景。在长期合作的基础上,浙江林学院院长张齐生院士与丽水市市长谢力群先生签署了“科技合作协议书”。同时学校科研处、资环系和竹类研究所等分别与丽水市科学技术局、丽水市林科所、松阳县人民政府、遂昌县人民政府等单位签订了共同开发竹类资源和开展竹林高效经营研究等4个合作协议。协议双方根据丽水市的林业特点,围绕建立生态农业、生态林业、生态旅游和生态城市等战略思路,重点在行业、绿色食品、森林旅游开发、生态经济林示范、城市绿化与花卉、森林病虫害防治、农特产品深加工和优良品种选育等领域进行技术攻关,共同建立现代农林科技示范园区和浙江省竹子现代科技园区,加快丽水农林和生态示范区建设的进程。

在温州,召开了学术研讨会,专家教授们围绕温州市“十五”林业科技发展计划进行论证指导,并实地考察了花卉基地、瑞安绿竹笋用林基地、温州家具市场和乐清鸿基科技有限公司,就温州城市绿化提供技术咨询。张齐生院士还应文成县人民政府邀请,考察了该县的竹产品加工开发情况。

在台州,专家教授们冒着大雨考察了椒江沿海防护林、东魁杨梅基地和德仁集团,就沿海防护林树种选优、经济林栽培和竹胶板生产技术进行指导。台州市领导当即要求与浙江林学院开展技术合作,以加快效益农业的发展。

(王长金, 沈正法, 凌申坤)