

第一章 森林经济学思想简史

在我们深入研究森林资源经济学基础理论时，追溯和回顾森林经济思想的前史是非常重要的。为了让读者更好地了解最新模型的发展历程，本章将介绍这个领域的起源。

对于自然资源经济学的研究最早可以追溯到森林的轮伐，或者说是林主采伐森林的时间。如果一个人想描述森林经济学的历史，那么，各种不同假设条件下的最优轮伐期的研究是首先应该重视的。轮伐期的分析是本质上是分析一个单个林分（或同质林分）的最优采伐时间。对于由不同林分组成的森林来讲，轮伐期的分析更为复杂，即寻找决定在一块特定的土地上分配不同年龄的林分或者每一个同质林分的最佳轮伐期的方法。当我们从这一主线进行梳理的时候，我们发现传统林主管理多龄林分的目标是为了达到法正林（normal forest 法正林）。法正林的思想是很简单的，如果我们用 T^* 表示林木的稳定轮伐龄，那么一个法正林就有 $1/T^*$ 个龄阶，每一个龄阶中的林木具有相同的林龄（有时把森林储量的群体成为林分）。每一个时期采伐最老的林分并种植新的林分，刚种植的林分成为最小的林分，正是由于这个原因，法正林被称为“平稳收获”的林分。

最终，为了达到法正林状态的采伐森林经典方法被称为“森林调整”，但经济学家很少认同它，原因是这样一个森林的最优化方法几乎总是存在着这样或那样的问题。在本书的后面章节会看到，但最近经济学家发展出了法正林可能实现最优和有效率的稳态方法，但仍然存在许多问题，如法正林的结构不令人满意。

1.1 最优轮伐期经济学分析的前史

最早关于森林管理和最优轮伐期的文献可以追溯到中世纪，可能第一个系统讨论基本森林轮伐问题的时间是 17 世纪，而包含多个林分和林龄的模型最早是在 18 世纪。这是非常有趣的，在某种程度上这些理论的发展也是令人困惑的，因为林主和经济学家总是参与这些问题的讨论，但他们在描述“林木的最优轮伐龄”上经常使用不同的方法和提出完全不同的答案，发生在这两个全体之间的争论成为 Samuelson（1976）著名论著里的戏剧性穿插。有了这些信息，我们现在把这些轮伐龄的方法记录在早期的历史上。

为了寻找人类与森林经济关系的证据，我们可以追溯到比 17 世纪更早的时间，在 11 世纪德国摩尔蒙斯特的修道院是最早讨论森林砍伐的经济收益的。关于森林的正式立法出现在 13 世纪的德国和 15 世纪的意大利和法国。在 17 世纪前期，轮伐龄成为用于描述特定林分采伐年龄的通用词汇。最早采用科学方法处理森林管理问题的文献是 1713 年 Hans Carl von Carlowitz 的 *Sylvicultura Oeconomica*。

在 16 世纪和 17 世纪，轮伐龄、法正林和可持续采伐的概念已成为指导森林管理的原则，这些也成为法律制定标杆——法国首相 *Colbert* 森林法的基础。在普鲁士，*Fredrick* 国王隆重颁布森林的管理应该运用法正林的原则，每个林分的轮伐龄为 70 年。这些规则背后的目的是为了阻止毁林和确保造船用木材的稳定供应。

一般来讲，社会上对这个时期森林规程的经济争论保持怀疑态度。因为中欧的加速毁林，经济利益驱动的行为受到谴责。在 17 世纪，最优轮伐期的经济计算和最优间伐的林分间伐的分析首次出现：*Fernow* (1911) 认为第一个提出间伐含义的是德国的林主 *von Berlepsh*, *von Zanthier* 和 *Oettelt*。

在 17 世纪，丹麦和英国森林经济思想的发展是非常显著的。*Dane* , *Count Reventlow* 通过采用经济回报率作为森林管理的最优标准对树木增长进行了实证分析 (*Helles & Linddahl*, 1997)，英国的 *William Marshall* 计算了橡树的最优经济采伐年龄，根据最近的文献，他首次提出了在无论轮伐期的任何时间，最优的轮伐龄都应该通过比较“继续轮伐所带来的边际收益即下一期树木价值的增量”和“延迟采伐的机会成本”来决定 (*Scorgie & Kennedy*, 2000)。他也首次正确地表达了延迟采伐的机会成本的度量，首先是在下一期因放弃采伐而不能投资的利息收入损失，其次是树木占用土地的成本，所以不能很快开始下一个轮伐期。第二个成本是非常重要的，就是现在经济学家都知道的土地的机会成本或者土地租金。

1.2 最有轮伐期框架的起源

由于 *Marshall* 的早期贡献，18 世纪早期德国森林学校的科研人员发表了很多关于最优轮伐龄的分析著作。1824 年德国出版了世界上第一本森林科学的杂志 *《Die Allgemeine Forst- und Jagt Zeitung》*，到 1850 年这本杂志已成为森林经济学理论和实践的中心论坛，其中 *Cotta & Hartig*，年轻的德国林学家 *Gottlieb König*, *Johan Hundeshagen* 和 *Friedrich Pfeil* 都发表了有名的论文，他们对经济分析具有强烈的导向性。在 *König* 的 *《Die Forestmatematik》* 书中，他尝试着提出一个计算轮伐龄方法的经济学理论。在他的计算中虽然未能正确定义土地的机会成本，但它确实阐明了森林的本质是长期资本，还提出了采用价值增长的概念分析盈利性的方法，*Hundeshagen* 则对其进行了补充，并提出了计算投资林分的基础。*Hundeshagen* 是致力于发展森林统计学的第一人，而 *Pfeil* 则是提出森林管理应该建立在生态和立地条件基础上第一个科学家。

1849 年 *Edmune Von Gehren* 在 *《die Sllgemeine Forst- und Jagt Zeitung》* 书中提出了决定土地价值的因素和轮伐龄选择的重要性。*Von Gehren* 提出如果林主的林地被转化为耕地，那么他应该得到多少补偿，但他采用几何平均利息率来计算

林分的未贴现价值，而不是正确的贴现价值。仅仅两个月之后，另一个德国森林学家 *Martin Faustmann* 在同一杂志上发表了关于这篇文章的评论，*Faustmann* 批评了 *Von Gehren* 方法的缺陷，认为采用几何平均利息率将会导致土地价值偏高，并提出了一种计算基于贴现原则的裸地价值的新方法，他通过资本化来自于永续的种植采伐模式与无限轮伐期的收益来定义土地的价值。*Faustmann* 采用电子表格形式的分析表明任何林分的最优轮伐龄应该有最大化土地的净现值来决定。最初科学家 *Von Gehren* 和 *Ozezel* 猛烈的抨击 *Faustmann*，但 1850 年 *Max Pressler* 证明他的方法是正确的。*Pressler* 在《*Die Allgemeine Forst- und Jagt Zeitung*》提出了他的理论模型，首次采用数学方法解决了最优轮伐期的问题。

之后，*Faustmann* 用公式表达了轮伐期的问题以及在任何时期因延期采伐所带来所有相关的机会成本，但是，他是用举例的方式来说明的而不是采用一般的数学分析方法。*Pressler* 的数学分析框架首次提出了最优轮伐期和土地租金的定量表述。根据 *Pressler* 的论述，*Faustmann* 不是思路正确的唯一的人，*William Marshall* 也预想到了理论上的最优轮伐龄方法。但是 1921 年，一位与 *Pressler* 无关的年轻瑞典经济学家 *Bertil Ohlin* 也采用数学方法描述了最优轮伐龄的问题。如今 *Faustmann*，*Pressler*，*Ohlin* 被共同确认为森林经济学思想的奠基者。在这些文献出版之后，经济学家开始采用最大化土地的净现值，*Faustmann* 公式或模型来探讨最优轮伐龄。

Samuelson (1976) 认为森林学家和经济学家对 *Faustmann* 模型的认可并不是普遍的，*Faustmann* 和 *Pressler* 唤醒了两个重要而又相互竞争的学派。第一学派的学者主要是研究单一轮伐期模型，第二个学派的学者是生态学家，他们主张采用纯粹的生物学概念来定义最优的轮伐龄，他们的观点是建立在最大可持续持续产量模型的基础上。本书第二章将介绍这些基本的理论。

第一个学派的思想起源于 *Faustmann* 的研究成果发表之后不久的 1863 年德国著名的经济学家 *Von Thunen* 提出采用单一轮伐期来解释最优轮伐龄（*Von Thunen* 的思想细节，参见 *Manz*, 1986）。在 1871 年 *Stanley Jevons* 和 *Irving Fisher* 也得出了同 *Von Thunen* 相同的结论。单一轮伐期模型说明了最优轮伐期应该是一个时间段，即在林分的整个生命周期内森林蓄积量增长的价值等于市场利率，这个在不知情者看来貌似有理，因为在任何时期不采伐林木的投资机会成本损失等于采伐林木并在下一轮伐期按照市场利率投资的利息所得，而延期采伐的收益必须等于林主投资在“树桩”上生长的增量。当然它忽视了当林木采伐延期时，因林木占用土地而放弃其他用途机会成本的重要性。

早期对 *Faustmann* 最严峻的挑战来自于第二个学派的思想，更具 *Samuelson* (1976) 的记载，作为生态学原则的持续产量的概念首次出现在 1788 年澳大利

亚立法机构的价值评估方法中。简单来讲，最优轮伐龄就是在一定时期内单位土地上木材产量的最大化。持续产量的方法被频繁地应用于决定林地的“可允许采伐量”。根据这一学派的观点，任何林分的采伐量应该根据每英亩林地上最大化稳态的木材采伐量（和采伐收入）来对林分的平均林龄进行调整。

1.3 Faustmann 的复兴

Paul Samuelson 的关于森林经济学领域的著作起到了抛砖引玉的作用，之后基于 *Faustmann* 模型的文献开始大量出现，*Newman*（2002）证明在过去的三十年关于这一主题的论文至少有几百篇。在近些年环境和资源经济学的浪潮中，*Samuelson* 提供了研究森林问题的通行方法。与 *Samuelson* 的论文发表在同一期刊上的 *Richard Hartman*（1976）提出了包含森林提供公共利益在内的轮伐期延伸模型，把森林的价值随着区位变化情况公式化，就像森林蓄积一样。他认为这个价值对决定最优轮伐龄有重要影响，他的观点保留了制定森林政策的重要基础，如今成为了森林经济学领域引用频率最高的文献。本书第三章将介绍 *Hartman* 模型。

Samuelson 和 *Hartman* 的贡献在于引发了 19 世纪 80 年代关于 *Faustmann* 方法属性的研究，研究的问题包括灾难性事件（比如火灾）、未来价格和增长的不确定性、政策工具等对最优轮伐龄的影响。感兴趣的读者可以阅读本章的参考文献，这些文献都是在 *Samuelson*（1976）之后出现的，这些著作包括 *Newman*（1984，2000），*S.Chang*（1984），*Reed*（1986），*Wear & Parks*（1994），*Hyde & Newman*（1991），和 *Montgomery & Adams*（1996）。关于木材供给的文献包括 *Adams & Haynes*（1980），*Binkley*（1987b），和 *Wear & Parks*（1994）。

1.4 龄阶模型的复兴

Faustmann 模型及其衍生模型只能适用于单一的同龄林分。在早期文献中森林经济学家研究的更多问题是由不同龄阶组成的森林的最优采伐程序，这个问题的最古老的方式是靠直觉，不带有任何分析的成份。最简单的采伐规则是法正林，即森林蓄积长期平衡且每年有平稳的木材采伐量等（*Davis et al*，2001）。法正林是指龄阶分配——森林土地面积是平均分配在所有龄阶上的，每一期采伐最老的龄阶再种植最年轻的龄阶，每期通过采伐和种植延续采伐-种植循环。

自从 *Kemp* 和 *Moore*（1979）提出最佳森林模型是木材永续输出的长期均衡，近些年几乎所有的法正林理论研究都集中于此，但是，也没有人明确分析出最优的长期均衡状态。*Heap* 和 *Neher*（1979）提出了同质林地模型，假设林木的种植和采伐是同时进行的，但没有提出一个分析的方法。后来，*Heap*（1979）对这一模型进行了发展，通过采用连续时间模型把 *Faustmann* 模型加以推广，假

定采伐成本是采伐量的凸函数。*Heap* 证明了如果存在长期均衡，那么一定是法正林。

虽然 *Heap* (1984) 提出了连续时间-连续空间的模型，但是 *Lyon & Sedjo* (1983), *Sedjo&Lyon* (1990) 第一次提出了离散时间-连续空间模型。在这些模型中，为了把长期木材的供给作为稳态的结果，最优控制问题公式化，它被作为森林政策分析的基础频繁使用就是这类证据 (*Sedjo & Lyon*, 1990)。而且，在某种程度上，森林资源的利用具有季节性特征，这个模型与采伐是集中在某些特定的时期是相适应的。*Getz* 和 *Haight* (1989) 回顾了在林业中其他的离散时间模型，尤其是森林经济思想的早期的模型（读者也可以采用离散时间模型分析野生动物的管理问题）。

Mitra 和 *Wan* (1985, 1986) 也使用离散时间-连续空间模型分析了法正林，他们认为对于任何初始的森林结构，在零贴现和严格的凹效用函数情况下，法正林是渐进稳定平衡的，但是如果效用也贴现的话，*Mitra* 和 *Wan* (1985) 认为平衡的森林蓄积量是围绕法正林结构波动的。*Wan* (1994) 通过假设两个采伐期（年轻的林木和老的林木）简化了 *Mitra* 和 *Wan* 的模型，但他发现循环也是有可能的。我们将在后面的章节详细介绍。

第二章 Faustmann 轮伐模型

解决单一林轮伐龄的程序化方法最早来自于林学家提出的在一定时期特定立地条件下最大化平均木材产量的问题，该方法就是被称为“最大持续产量”或“**顶点原则**”。根据这个方法，一个林分的采伐时间是当平均森林增长量（每年平均增量）等于边际森林增长量（当年平均增量）时 (*Gregory*1987)。因此，森林增长量是决定最优轮伐龄的唯一因素，与价格、成本或实际利率都没有关系。虽然经济学家一直在评判这个原则，但是今天的森林管理和规划仍然在应用它，尤其是在最大可允许采伐的战略制定中。

林学家与经济学家定义最优采伐年龄的方法差异是非常大的。经济学家把森林看作是长期的经济资产，从采伐的角度来看，具有定期提供收入的能力。经济上的最优轮伐龄是当木材采伐的收入和因延期采伐把资本束缚林业（林分和土地）上而放弃其他投资所带来的机会成本相等时。因此，经济学家用经济资本理论取代了林学家的生物资本理论。

与林学家的顶点原则相对应的是经济学家所谓的 *Faustmann* 公式。1849 年，*Faustmann* 首次提出林分的采伐时间是当一定时间内延期采伐的边际收益等于基于林分和土地价值投资而放弃的利息所得。我们将会看到，放弃的利息所得在任何时期都是与延期采伐相关的机会成本，它有助于区分计算轮伐龄方法的经济模型与非经济模型。一百五十年以后，经济学家仍然认为 *Faustmann* 的最优轮伐

期方法是正确的。

本章首先在 2.1 中描述森林增长，也讨论 *Faustmann* 模型背后的经济假设。在 2.2 中，分析 *Faustmann* 轮伐龄的决定因素以及它与木材供给之间的关系。在 2.3 中，分析森林税对最优轮伐龄和木材供给的影响。在 2.4 中，描述 *Faustmann* 模型的修正，包括木材管理、对偶和轮伐龄模型，竞争性土地的用途和木材供应。本章最后介绍 *Faustmann* 模型与动态生命周期循环模型（dynamic lifecycle model）之间的关系。

2.1 森林生长技术

最早森林经济学基础是阐述的同龄林管理的。同龄林是指有相似林龄的林分组成的森林。在没有任何人为干涉的自然条件下，这种森林的更新是通过外部事件如火灾、冰雹或飓风来实现的。为了模拟自然的状态与确保森林的更新，假设在轮伐龄同龄林通常是皆伐（全部采伐）的，紧接着通过自然力或人为地种植新的林分。这种管理模式在寒带和温带是非常典型的，有时人们也将这种林分管理模式应用在同龄林分的管理上。

异龄林的管理有另外一种可供选择的管理模式，许多热带和温带硬阔森林就属于这种类型，由于生物多样性的考虑，它在寒带森林里也正变得更为普遍。伴随正树木的生长，树高和胸径都在增长，异龄林意味着在同样面积的土地上不同径阶树木的增长，也就是说，在一块特定的土地面积上有所有径阶（林龄）的树木，一次性全部采伐是不现实的，而是任何时间点都是根据管理目标，对不同径阶的林木进行择伐。因此，尽管每年都采伐但林地依然是被树木覆盖着的。

异龄林的森林增长是用不同径阶的树木增长量来计量的。生产和发育（ingrowth and upgrowth）是用来描述林木从一个径阶转移到另一径阶，异龄林是典型的择伐，比同龄林的采伐频率更高，可持续利用如今也成为一种新的管理手段。异龄林的可持续性是指一定时间内在保持不同径阶和同一径阶内株数恒定的情况下，林木可供采伐的次数和强度。一般来说，最优管理下的森林不同龄阶的树木数量呈现倒 J 型。

2.1.2 属性

在同龄林管理的理论描述中，假定同一林分所有的树木具有相似或相同的林龄，因此，一旦我们知道特定林分和特定林地上单一林木和林分上所有林木的生长函数，那么，也就知道了林木的蓄积量。森林计测学家也研究出了复杂的方法来测量和描述林木的增长，他们假定任何立地条件下林木的生产函数具有相同的属性，也就是说，把一定时期内林木的蓄积量描述在图中，则呈现 S 型增长。S 型增长意味着蓄积量的增长速度首先是递增的，其次是递减的，当森林开始枯损

时增长率就是负的，最终死去。

S 型增长在经济上可行的而且生物学上有道理，描述如下：用 $f(t)$ 表林木在时间 t 每立方米的蓄积量，假定林地条件不变，蓄积量随着林分的增长而增加，一定时期内林分蓄积量的变化用 $f'(t)$ 表示，因此林分的生长就是 $f'(t)$ ，具有以下的数学性质：

假设 2.1 森林生长函数

(a) 当 $t \leq t'$ 时， $f'(t) > 0$ ；但当 $t > t'$ 时， $f'(t) \leq 0$ ，其中 t' 表示林分的生理成熟期。

(b) 当 $t \leq \bar{t}$ 时， $Q(t) = a * b * 1.64 * (1 - 6.36^{\frac{t}{b}})^{3.897}$ ；当 $t > \bar{t}$ 时， $f''(t) < 0$ ，其中 \bar{t} 表示森林生长函数的拐点。

假设 2.1 (a) 隐含的含义是在林木生理成熟期以前森林蓄积量是递增函数，但过了生理成熟期以后，森林蓄积量开始下降。森林蓄积量开始下降是林分到了过度成熟期的标志，因为林分开始枯损。假设 2.1 (b) 是说在一定时期内森林增长函数先是凸函数再是凹函数，也就是，有一个点是区分森林蓄积量的增长速度是递增与递减的分界点。在经济上， $f(t)$ 是林木关于时间的经典生长函数，时间是基本的投入变量，林木的蓄积量是产出变量。

用以下三个词语来描述森林增长函数的基本属性；(1) 连年生长量 (CAI)，(2) 平均生长量 (MAI)；和 (3) 林分相对增长 (Pearse 1967, Gregory 1972)，林分相对增长有时也称为“定期平均生长量” (PAI)。在数学上，CAI 是蓄积量函数对时间 t 的一阶导数 $f'(t)$ ，因此，CAI 是用基本投入时间的边际产出是很容易解释的。MAI 是用总蓄积量除以时间来定义的， $f(t)/t$ ，因此，MAI 是在时间 t 内的平均产出。最后，PAI 使用 CAI 除以森林蓄积来定义的， $f'(t)/f(t)$ ，有时也指瞬时增长率。

这些概念在解释轮伐框架下的数学公式是非常有帮助的。在框 2.1 中采用两种不同的森林（斯堪的纳维亚的寒带森林和美国南部的松树林）生长函数计算了 CAI, MAI 和 PAI。

框 2.1 林分生长及其属性

林分生长的度量对森林管理是非常重要的。随着时间的推移，许多生长模型已经发展完善且应用普遍。他们可以分为两个主要的类型：要么是静态校准要么是基于过程模型。前者使用实证生长数据来估计增长函数的参数值。而基于过程模型则用已知的具有因果关系的生物过程和树木竞争机制来提供生长预测。这两类都非常有用，两者之间的选择主要取决于所讨论的问题。

在本书中，由于我们重点是在总体政策方面的，则选用统计上的生长函数，因而实证插图将更具教学意义且是定性的。为了说明本章以及其他章节中的一些概念，我们将采用同龄分的 Scandinavian 的寒带林和 U.S.南部温带林的生长函数为例。

在这个框中，我们将用图形来描述体积（Q）、MAI、CAI。

Scandinavian 寒带林: $Q(t) = a * b * 1.64 * (1 - 6.36^{\frac{T}{b}})^{3.897}$

其中 T 是指轮伐期，这个 Scandinavian 生长函数是有 Fridth 和 Nilsson（1980）完善的。参数 a 和 b 分别是指轮伐期内的平均增长和平均增长中的峰值时期。在我们的途中，我们用 a=4, b=80。此外，为了是增长没有那么快，我们用 3.897 代替 Fridth 和 Nilsson 中的 4.897 的指数值。接下来的 U.S.生长函数是指通常种植在整个美国南部的松木（火炬松）的体积。

U.S.南部温带林: $Q(t) = \exp\left(9.75 - \frac{3418.11}{d * T} - \frac{740.82}{T * 80} - \frac{34.01}{T^2} - \frac{1527.67}{80^2}\right)$

其中 80 是在树龄为 100 时的林地指数，d 为种植密度，d=300 即每英亩地上种植 300 棵树。这个生长函数已经被运用于一些经济分析中，其中第一次是 S.chang（1984）。这里给出的函数遵循了 Amacher 等（2005）的参数设置规则。

图 2.1 表示了由体积增量（y 轴）和时间（x 轴）构成的生长函数曲线。这是一个典型的 S 形曲线的自然增长，与假设 2.1 中的推测一致。在 Scandinavian 生长函数中，林木的生长是以一个越来越快的速度增长的，达到一个点后（这里是 50 年），则以下下降的速度增长。如图 2.2 所示，CAI 的峰值在 50 年，MAI 在 100 年是达到且与 CAI 相交于其峰值点。

U.S.的生长函数的值分别由图 2.3 中的林木生长总量和图 2.4 中的 MAI 和 CAI 给出。且与 Scandinavian 寒带林之间的差别非常大。在这里，CAI 峰值出现在 20 年时期，MAI 为 30 年，体现了更为快速的生长。

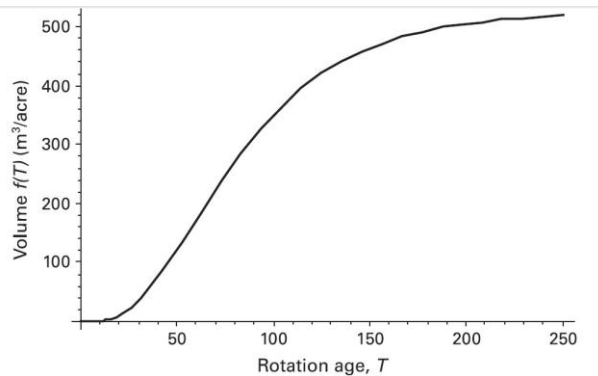


图 2.1 Scandinavian 寒带林生长函数

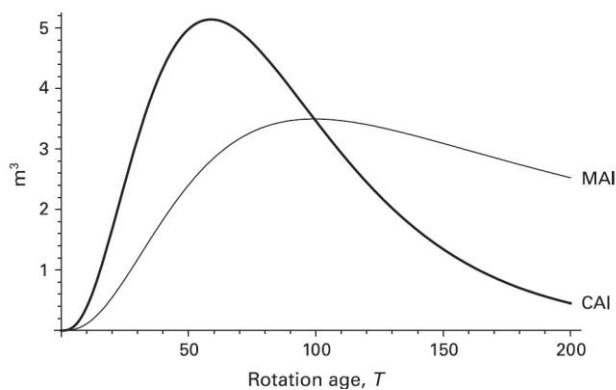


图 2.2 Scandinavian 寒带林：平均年增量（MAI）和连年生长量（CAI）

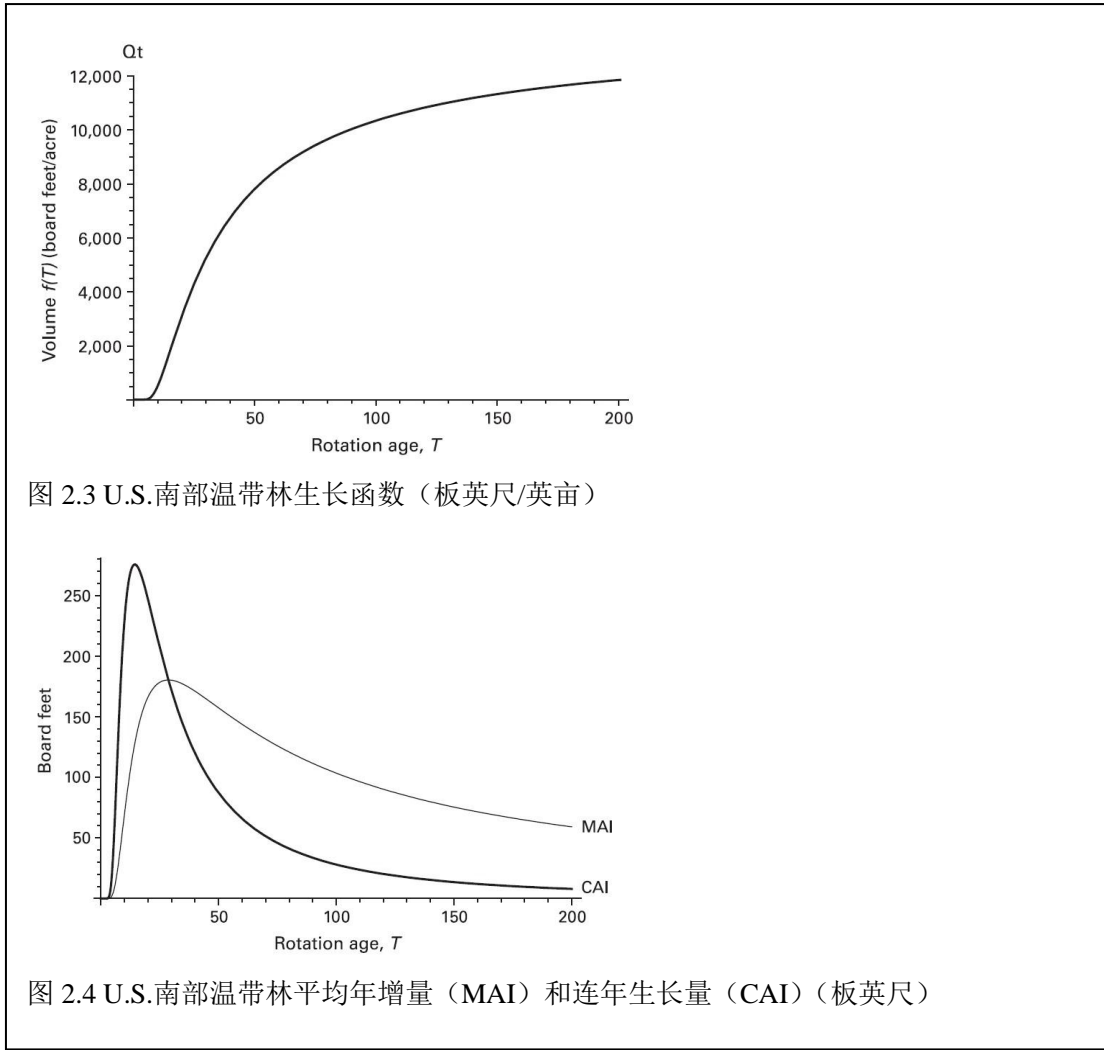


图 2.3 U.S.南部温带林生长函数（板英尺/英亩）

图 2.4 U.S.南部温带林平均年增量（MAI）和连年生长量（CAI）（板英尺）

间伐是同龄林一项非常重要的管理手段。在轮伐期内，林主选择性的地采伐一些林木，可以为未采伐的林木提供更好的生长条件。间伐经常是一项中间干预措施或提高林分质量的措施，因为间伐的时间是位于造林和成林之间的，其目标是为了提高采伐时高品质林木的比例和每立方米林木的价格。林分间伐的效果是用剪短的方式减少蓄积量，尽管如此，经过间伐的森林生长依然呈现的是非连续性的 S 型增长曲线。

2.1.2 林主偏好与消费

决策者是在任何经济模型中都是非常重要的，在最优轮伐龄和其他决策中，林主的偏好和林木生长的生理可能性是同等重要的。

在特定林地上，林主是决定如何管理森林的。假定森林增长符合前面所列出的属性，那么，当林主决定要采伐森林时，林主应该遵守什么样的准则呢？本章的答案是非常简单的。暂时不考虑林主的偏好和消费，林主的决策准则是轮伐期无限循环条件下采伐收入净现值的最大化。定义净现值需要遵循轮伐期分析的几个严格假设，这些假设确保林主对轮伐龄的选择是与消费是相互分离的，这里的

分离性就是 Fisherian 的分离定理 (Hirschleifer 1970, p63), 它是在生产与消费相互独立的条件下定义的。Samuelson (1976) 明确提出轮伐期分析的经典假设,。下面我们将介绍这些假设。

假设 2.2 轮伐期基础假设

- 1.活立木价格和更新成本是不变且已知的。
- 2.未来的利息率是不变且已知的。
- 3.林分的生长函数是已知的。
- 4.林地市场是完善的。
- 5.金融资本市场是完善的。

以上假设的含义是非常明显的, 林主能预期到轮伐期无限循环条件下未来采伐的收入。完善的资本市场的含义是林主可以在不打乱他森林管理计划的条件下利用市场为消费而融资。完善的土地市场的含义林主可以在任何时间以资本化的价值把土地卖掉。资本化的价值是指无限轮伐期内地租的净现值。这些可以激励林主对林分的管理是长期而有效率的。

2.2 最优轮伐期的计算

2.2.1 Faustmann 公式的发展

假定典型的私有林主是在特定的种植技术条件下在裸地上种植林木, 林主可以预期到不变的木材价格和利息率, 他选择轮伐年期的原则是轮伐期无限循环条件下的采伐收入净现值的最大化。用 r 表示实际利率, 用 c 表示更新成本, p 表示活立木采伐时的价格 (活立木价格和木材价格将交替使用), 它反映了文献中关于林木立地测量的价格, 比如, 未采伐树木的价格。因此, 林主所采伐林木的价格是指扣除付给伐木工的伐木成本之后的净值。

假设林木的管理是点投入-点采伐的生产技术, 也就是说, 有特定的森林成林 (种植) 技术, 而且除时间之外没有别的投入变量。林地生产的投入因素是有自然生产力的林地和种植新林木的固定劳动力投入。这些投入经常被认为是开始一个新的轮伐期所有基期投入指数。

用 T 表示林主的决策变量—轮伐龄, 轮伐龄是日历时间, 即林主采伐林木并在裸地上开始下一个轮伐期。根据假设 2.2, 林主在第一个轮伐期 T 采伐的净现值是 $pf(T)e^{-rT} - c$, 其中, e^{-rT} 是贴现因子, 是 $1/(1+r)^T$ 在时间趋于无限时的近似值。这里把未来的采伐收入全部贴现到林木种植的时间点 (时间点 0) 上。林木被采伐之后, 在裸地再种植的成本是 c , 第二个新的轮伐期开始了。根据假设 2.2 可知, 这个过程是同样轮伐龄的不断延续而且是无限的。因此, 无限连续的同样轮伐期的净现值表示如下:

$pf(T)e^{-rT} - c + [pf(T)e^{-rT} - c]e^{-rT} + [pf(T)e^{-rT} - c]e^{-2rT} + [pf(T)e^{-rT} - c]e^{-3rT} + \dots$
 提取公因子 $pf(T)e^{-rT} - c$ 之后剩余的部分是几何系列 $(1 + e^{-rT} + e^{-2rT} + e^{-3rT} + \dots)$ ，
 经过计算，几何系列等于 $(1 - e^{-rT})^{-1}$

用下面的等式表示第一期至此以后轮伐期的净现值：

$$V - (1 - e^{-rT})^{-1} [pf(T)e^{-rT} - c] \quad (2.1)$$

(2.1) 式的分子是单一轮伐期的净现值，分母是轮伐期趋于无限时的贴现因素。等式 (2.1) 有时被成为 Faustmann 公式，裸地价值 (BLV)，土地期望值 (LEV) 或者土壤期望价值 (SEV)。它通过假定在无限个轮伐期内不断地采伐再种植新的林分所带来的未来地租的净现值来测定林地的价值。当土地市场是完善的时候，这个价格也是裸地的市场均衡价格。

现在林主的经济问题就是在最大化 (2.1) 式的目标下选择 T ，看起来是非常复杂的，但一定时期内外生变量的不变性简化了分析的复杂性。可持续性也确保了轮伐龄在所有的轮伐期都是一样的。(2.1) 式对轮伐龄 T 求一阶导数：

$$V_T - pf'(T) - rpf(T) - rV = 0 \quad (2.2)$$

V 是 (2.1) 式定义的，最大化 V 的充分条件是轮伐龄的二阶导数满足

$$V_{TT} - pf''(T) - rpf'(T) < 0 \quad (2.3)$$

且一阶导数、 $=0$ 。由 (2.3) 式可知，最优的轮伐龄是位于生长函数的凹函数部分，即 $f''(T) < 0$ 是充分条件。一阶导数 (2.2) 式有两种表达方式：

$$pf'(T) - rpf(T) + rV \quad (2.4a)$$

或

$$\frac{f'(T)}{f(T)} - r + \frac{rV}{pf(T)} \quad (2.4b)$$

等式 (2.4a) 表示最优轮伐龄要满足由于延期采伐一个轮伐期的连年生长量 $pf'(T)$ 的价值 (等式左边或 LHS) 等于延期采伐的机会成本 (等式右边或 RHS)。机会成本等于林主在一个轮伐期内用采伐林木所得以利率 r 投资的收益 $rpf(T)$ 加上因未能采伐林木而开始下一个轮伐期的土地收益投资损失的净现值 rV ， V 是由 (2.1) 式计算得到的，是由当期开始至无限个轮伐期的裸地价值，也是用来测量固定生产因素 (土地) 产生的租金，因此，有时 rV 也被成为最优轮伐龄的“立地租金”或“土地租金”。等式 (2.4b) 是采用稍微不同的方式表示同样的条件。最优轮伐龄要满足等式左边的瞬时增长率 (FAI) 与等式右边的实际利率 (第一项) 和用采伐时林木的价值加权的土地租金 (第二项) 相等。

Faustmann 的采伐规则可以总结为以下几个方面：

命题 2.1 Faustmann 采伐规则 林主采伐同龄林的时间是当延期采伐的边际收益刚好等于延期采伐的机会成本时，机会成本等于林分和土地未来价值产生的租金损失。

框 2.2 轮伐龄与比较静态分析

表 2.1 寒带森林的 Faustmann 模型，von Thunen-Jevons 的单一轮伐模型和 MSY 模型的比较

	Faustmann 模型	单一轮伐模型	MSY 模型
基准	58.1	60.0	99.3
敏感性分析			
p=45 €	57.0	无影响	无影响
r=4%	52.0	51.0	无影响
c=800	58.7	无影响	无影响

对于给定的增长函数，且已知木材价格、真实利率和更新成本的条件下，轮伐期是很容易决定的。事实上，许多一般的电脑程序，像 Excel、Matlab、GAMS 或者类似数学软件都可以用来计算最有轮伐期。在这里，我们将利用框 2.1 中的 Scandinavian 和 U.S. 的生长函数，用 Faustmann 模型，von Thunen-Jevons 的单一轮伐模型和 MSY 模型算出不同的最有轮伐期。

Scandinavian 亚寒带林

我们选取 p=35 € 每立方米作为立木价格，使种植成本为 c=700 每公顷，假设实际利率为 3%。这些参数值的综合得出我们的基准线。对于敏感性分析（如比较静态），我们用如下值：立木价格 p=45 €，更新成本 c=800，实际利率为 4%。模型比较结果如表 2.1。

基准线的轮伐期证明了本文中的理论分析部分；Faustmann 模型得出的轮伐期是最短的，同时 MSY 模型则得出了最长的轮伐期。以亚寒带林区为例，Faustmann 模型与 MSY 模型得出的最有轮伐期相差 41.3 年。从命题 2.2 中可知外生变量对最优轮伐期也产生影响。一个高的价格和利率将缩短轮伐期，然而更高的更新成本则会增长轮伐期。需要注意的是在 von Thunen-Jevons 的单一轮伐模型中，只有实际利率对轮伐期有影响。

美国温带森林

对于美国温带森林，我们用 100\$ 没千板英尺作为立木价格，种植成本 84\$ 每英亩，实际利率仍为 0.03。敏感性分析计算结果所采用的变化量与 Scandinavian 亚寒带林区一样。

表 2.2 温带森林的 Faustmann 模型，von Thunen-Jevons 的单一轮伐模型和 MSY 模型的比较

	Faustmann 模型	单一轮伐模型	MSY 模型
基准	21.7	30.9	28.7
敏感性分析			
p=100\$	21.7	无影响	无影响
r=4%	20.3	26.87	无影响
c=84\$	21.7	无影响	无影响

表 2.2 中的结论再次证明了之前的理论。无论如何，他们证明了在 Faustmann 模型中，改变种植成本和木材价格对于轮伐期的影响只有较小差别，甚至在两位小数点上并不能看出来。只有实际利率对轮伐期产生了显著影响。同时，Faustmann 模型与 MSY 模型之间得出的轮伐期仍然较大，有 7 年的差距。

等式 (2.4a) 用图 2.5 表示。图 2.5 描述了框 2.2 中的根据最优轮伐龄采伐的基本产出曲线，左边的是边际收益曲线，右边的是机会成本曲线。因为假设即使是最小的林木也是可供销售的，所以边际收益曲线是从原点开始的。生产函数开

始是递增的，过了最大 CAI 的点之后开始递减。机会成本曲线也是刚开始是递增之后是递减的，在大约 58 年的时候 MR 与机会成本曲线相交，这个交点就是 Faustmann 的最优轮伐龄。

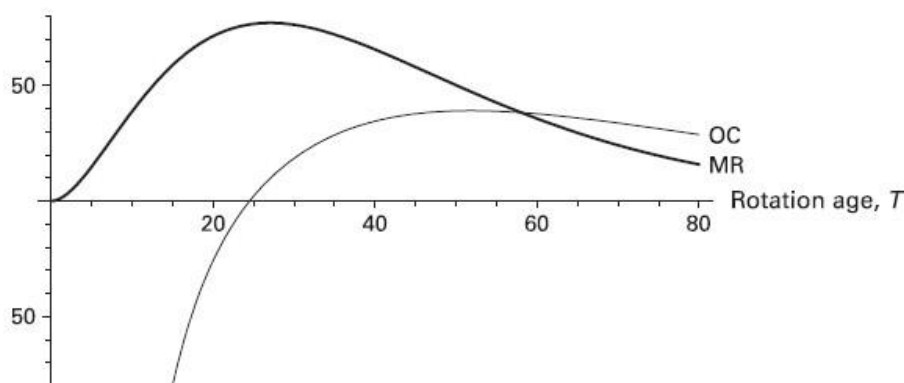


图 2.5 Faustmann 最优轮伐龄的确定

2.2.2 可选择方案的比较

我们对 Faustmann 模型和第一章所讨论的 von Thunen 和 Jevons 提出的单一轮伐期和林学家的 MSY 的比较尤其感兴趣。

单一轮伐期模型 von Thunen 和 Jevons 假定林主基于采伐收入净现值最大化的目标来决定轮伐龄的条件是充分的。单一轮伐期的净现值为

$$\max_T pf(T)e^{-rt} - c \quad (2.5)$$

对 T 求偏导数得到下面的采伐规则：

$$\frac{f'(T)}{f(T)} - r \quad (2.6)$$

它表明林分的采伐时间是当瞬时增长速度 PAI 等于实际利率时。等式 (2.6) 中用没有采伐的投资损失 $rf(T)$ 作为机会成本。因为忽略掉了未来的轮伐期，所以单一轮伐期的机会成本不包括土地租金损失。如果不考虑土地租金，那么木材的价格似乎对轮伐龄也没有影响。因此，从 (2.6) 式中得到的轮伐龄一般情况下与 Faustmann 的轮伐龄是不相等的。Faustmann 的轮伐龄确实包含一个更高的机会成本，因此，Faustmann 的轮伐龄一定比 von Thunen-Jevons 轮伐龄短。

最大持续产量：顶点原则 林学家的传统方法是建立在持续采伐基础上的一定时间内林分木材产量最大化。假定温带和寒带森林只有经过相对较长的一段时间之后才生物成熟，那么，它们的持续产量与渔业稍微有所不同，也就是说，在轮伐期内的平均产量（增长），比如，每年的平均增量。通过选择 T 来实现 MAI 的最大化，比如

$$\max_T \frac{f(T)}{T} \quad (2.7)$$

对 T 求一阶导数

$$f'(T) - \frac{f(T)}{T} \quad (2.8)$$

(2.8) 式的左边是 CAI，右边是 MAI（见图 2.1 和框 2.1）。根据以上条件可知，林分的采伐时间是当连年生长量等于每年平均生长量时。从图 2.2 和 2.4 的生产曲线中（见框 2.1）可知，这个时间点恰好就是 MAI 的顶点。我们在第一章讨论过，这个方法存在问题，因为它忽略了所有的机会成本和经济因素，比如价格、利率和更新成本，我们知道，如果林主考虑到经济回报，那么这些因素都会影响到最优轮伐龄。

Faustmann 轮伐期与最大可续产量的关系是怎样的呢？首先假定，在 Faustmann 模型和 (2.7) 式 MSY 公式的更新成本为 0。用 $p f'(T) - (p)f + T(p f'(T) - p f) e^{-rT}$ 表示 (2.2) 式，重新整理为

$$\frac{f'(T)}{f(T)} - \frac{r}{1 - e^{-rT}} \quad (2.9)$$

把 (2.8) 式重新表示为 $f'(T)/f(T) = 1/T$ ，这样，(2.9) 式的右边就等于 (2.8) 式的左边，那么， $r/(1 - e^{-rT}) = 1/T$ ，只有采用罗比达法则计算

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{r}{1 - e^{-rT}} = \frac{1}{T} \quad (2.10)$$

从 (2.10) 式可知，只有当更新成本和实际利率都等于 0 时，Faustmann 和 MSY 的轮伐龄才相等，而且，对任何正的实际利率 r ，(2.9) 式右边和 (2.10) 式是严格不等的，Faustmann 模型的采伐机会成本一定高于 MSY 采伐的机会成本的。这说明 Faustmann 轮伐龄总是比 MSY 轮伐龄要小。其次假设，更新成本是正数，Faustmann 轮伐龄的一阶导数可以表示为

$$f'(T)/f(T) - r \left(1 - \frac{c}{pf(T)} \right) / (1 - e^{-rT}) \quad (\text{Binkley 1987a}).$$

现在把

$$r \left(1 - \frac{c}{pf(T)} \right) / (1 - e^{-rT}) - \frac{1}{T}$$

进行重新整理后，可以得到

$$\frac{c}{p} - f(T) \left[1 - \frac{1 - e^{-rT}}{rT} \right] \quad (2.11)$$

如果再增加继续经营林业的土地租金也是正数的假设，比如 $c/p \leq f(T)e^{-rT}$ ，那么，可以得到 Faustmann 的轮伐龄大于等于 MSY 的轮伐龄：

$$(1 - e^{-rT})(rT - 1) \leq 0 \quad (2.12)$$

因为当 $r > 0$ 和 $T > 0$ 时， $(1 - e^{-rT}) > 0$ ，那么，可以得到 Faustmann 轮伐龄比 MSY 轮伐龄大的条件是 (2.12) 式的 $r \leq 1/T$ 。

现实中的哪些因素导致 Faustmann 轮伐龄是比 MSY 轮伐龄长的呢？Binkley (1987a) 认为，生长缓慢的树种比如道格拉斯冷杉，白松，MSY 轮伐龄大约在 100 年。其次，如果 Faustmann 轮伐龄超过 100 年，那么，实际贴现利率比 100 年的导数要小，或者 $r=0.01$ ，这种情况貌似不符合情理。但是，对于生长较快的树种，比如热带树种，在不到 20 年的时间里，MAI 就达到最大值，成本和价格参数有更大的浮动范围，因此，合理的实际利率是 5%，Faustmann 轮伐龄要大于 MSY 轮伐龄。

最后是单一轮伐模型与 Faustmann 模型的有趣转化，Samuelson (1976) 是第一个注意到单一轮伐模型是 Faustmann 模型的特殊形式。只需假定最优问题可以通过增加裸地的市场价值和林业的零利润条件来实现。市场的土地租金率用竞争性的非林用途的土地可得报酬来表示，用 δ 表示裸地的市场租金率，林主选择最优轮伐龄就是最大化

$$V - pf(T)e^{-rT} - c - \delta \int_0^T e^{-rs} ds \quad (2.13)$$

市场租金率在任何时期都用不采伐林木而占用林地的显性机会成本来表示。积分项表示每期因林木占用土地而失去的土地租金率。一阶导数满足 $pf'(T)e^{-rT} - rf(T) - \delta$ 的条件。在零利润的条件下， $V=0$ ，从 (2.13) 式可得

$$\delta = \frac{r[pf(T)e^{-rT} - c]}{1 - e^{-rT}} \quad (2.14)$$

把 (2.14) 式代入到 (2.13) 式的一阶导数条件就得到了 Faustmann 的必要条件。

2.2.3 比较静态分析

可以通过比较静态分析得到 Faustmann 模型的属性，这些结果表明在假定其

他参数不变的条件下，外生变量是如何影响轮伐龄的。运用比较静态分析首先需要对 T 和所有的参数求微分的全微分方程（2.2）式：

$$0 = [f'(T) - rf(T) - rf(T)e^{-rT}(1 - e^{-rT})^{-1}]dp + r(1 - e^{-rT})^{-1}dc - \left(V + \frac{d}{dr}V\right)dr + [pf''(T) - rpf'(T)]dT \quad (2.15)$$

用 T^F 表示 Faustmann 轮伐龄，对等式（2.15）运用隐函数定理就可得到比较静态的结果。

$$\frac{dT^F}{dp} = -\frac{[f'(T) - rf(T) - rf(T)e^{-rT}(1 - e^{-rT})^{-1}]}{[pf''(T) - rpf'(T)]} < 0 \quad (2.16a)$$

$$\frac{dT^F}{dr} = -\frac{pf(T) + V + \frac{d}{dr}V}{[pf''(T) - rpf'(T)]} < 0 \quad (2.16b)$$

$$\frac{dT^F}{dc} = -\frac{r(1 - e^{-rT})^{-1}}{[pf''(T) - rpf'(T)]} > 0 \quad (2.16c)$$

证明

价格的影响 假定分母是负的，那么，（2.16a）式的前面就有一个负号，同样也适用于分子。为了确定（2.16）式分子的负号，把（2.2）式的一阶导数条件重现表示为 $f'(T) - rf(T) - rf(T)(1 - e^{-rT})^{-1} = -p^{-1}[rc(1 - e^{-rT})^{-1}] < 0$

实际利率的影响 通过求导首先用

$$-pf(T) - V - r(1 - e^{-rT})^{-1}Tpf(T)e^{-rT} - T[pf(T)e^{-rT} - c]e^{-rT}$$

表示（2.16b）式的分母，重新表示为

$$-(pf(T) + V)\left(1 - \frac{rT}{e^{-rT} - 1}\right)$$

括号中的第一项是负的，运用罗比达法则，可以得到 $(1 - \frac{rT}{e^{-rT} - 1}) > 0$ ，因此，整项是负的，等式（2.16b）式也是负的。

以上结论总结如下：

命题 2.2 更新成本对 Faustmann 轮伐龄有正的影响，活立木价格和实际利率对其有负的影响。

活立木价格的上升对采伐边际收益的影响比不采伐的机会成本更大，其中包括林主缩短轮伐龄。利率的上升增加延期采伐的机会成本，因而会缩短轮伐龄。最后，更新成本的增加会减少土地的租金，因而会减少不采伐的机会成本，其中

包括林主延长轮伐龄。在框 2.2 中，用框 2.1 中斯堪的纳维亚和美国的林木的相关数据，表示了基准的轮伐龄和比较静态分析的结果。

2.2.4 从最优轮伐期到木材供给

到目前为止，我们只讨论了单一林分的轮伐龄问题。因为人们对木材的需求森林才有商业价值。我们很容易从轮伐模型中得到木材供应的函数，那么，轮伐龄和外生变量（比如活立木的价格）是如何影响供应函数的呢？

我们需要首先定义一个土地单元的木材供给概念，区分短期和长期的木材供给反应是常识（Conrad 1999, p58-77; Clark 1990）。短期供给反应是指由于轮伐龄的变化而引起的采伐量的瞬时变化。长期供给反应是指在整个轮伐期内年均采伐量的变化。年均采伐量定义如下：

$$S^F \equiv \frac{f(T^F)}{T^F} = \frac{f[T^F(p, r, c)]}{T^F(p, r, c)} \quad (2.17)$$

短期木材供应反应可以从外生变量对轮伐龄影响的比较静态分析中直接得到。当木材价格或实际利率上升时，林分将会很快被采伐，因此短期木材的供给增加。更新成本增加将会发生相反的情况。如果轮伐龄增加，木材供给将减少。

当木材价格、利率和更新成本按照影响短期木材供给反应的相反方向变化时，长期木材供给是如何变化的呢？首先，用向量 $\psi = p, r, c$ 表示外生变量，(2.17) 式对 ψ 求偏导数：

$$\frac{ds^F}{d\psi} \equiv \frac{T_\psi^F}{T^F} \left[f'(T^F) - \frac{f(T^F)}{T^F} \right] \quad (2.18)$$

从 (2.18) 式中可以，长期木材供应反应取决于两个因素，轮伐龄的变化时比较静态分析的结果 T_ψ^F ，林分的边际增长量与平均增长量的差异。如果原始的 Faustmann 轮伐龄比 MSY 的轮伐龄小的话，那么最后一项明显是正的。通常，木材价格和利率的上升对长期木材供应反应的影响是负向的，但是更新成本的增加影响则是正向的，比如

$$S^F = S^F \left(\underset{-}{p}, \underset{-}{r}, \underset{+}{c} \right)$$

当然，如果 Faustmann 轮伐龄碰巧比 MSY 轮伐龄大的话，因为 (2.18) 式中括号中项的符号是负数，所有符号刚好是相反的。这种情况的分析，读者可以参考 Binkley (1993)。

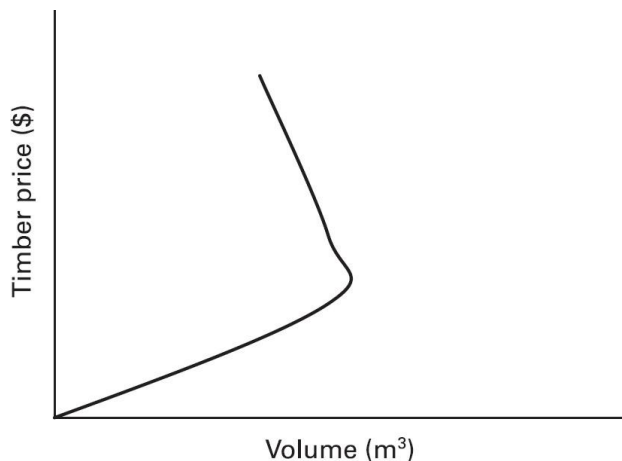


图 2.6 长期木材供给曲线

图 2.6 描述了活立木价格与长期木材供给的关系曲线。在比 MSY 点更长的整个时间段内，长期木材供给曲线是向后弯曲的，但在 MSY 点之前，随着活立木价格的上升木材供应增加。

非常寻常的后弯型长期木材供给曲线引起很多经济学家们的质疑。它明显地反映了在固定的土地上生产木材的有限能力。但对木材生产国，后弯型的木材长期供给曲线未必适合于综合市场供给函数。Johansson 和 Löfgren（1985）认为原因是 Faustmann 基本模型的供给函数假定所有的因素都是不变的，而在进行长期分析时，这些因素都是变化的事实。如果林主把土地投资于林业生产是一个内生选择变量的话，或者，把森林管理的努力看做是连续选择的话，那么，我们将得到一个一直向右上方倾斜的长期供给函数（见 1994 年 Wear & Parks 讨论立地条件是变化时的木材供给和 1983 年 S.Chang 的森林管理工作变化条件下的木材供给）。

2.3 森林税对 Faustmann 模型的影响

森林税是一项非常重要的政策工具，在森林经济学中，研究这一主题的论文大约超过 1000 篇。许多的税收工具影响林主对最优轮伐龄的选择，政府设置的森林税种是非常多的。通过中性或非中性来描述森林税是对轮伐龄的影响。中性税是不影响轮伐龄的，而非中性税对轮伐龄有影响。当我们在第五章中研究社会制度的最优设计时，它们之间的区别是非常重要的。在本章我们更感兴趣于，如何度量可供选择的税对林主的轮伐龄选择的影响，比如，税收的比较静态分析。

关于森林税对 Faustmann 轮伐龄的影响学者们（Amacher *et al*, 1991；Klemperer, 1976；S.Chang, 1982,1983；Johansson&Löfgren, 1985）已形成共识。Amacher（1997）综述了森林税的影响，森林税在文献和实践中都分为两大类：采伐税和财产税。采伐税包括针对采伐收入征收的收益税和针对采伐的木材蓄积

量征收的单位税（也称开采税）两种，而财产税是基于土地价值的评估而征收的税。在财产税中有两种典型的一次征收的税，一个是立地生产力税，需要每年都支付，征收额度是基于采伐潜力而与每年实际的采伐量无关。另一个是依据土地价值征收的比例税，也叫做立地价值税。财产税也可以对林木的价值征税，文献中称这种税为木材税。下面，用 \hat{V} 表示税后净现值，这个部分的证明部分是建立在 Koskela 和 Ollikainen 分析的基础上（2001a）。

2.3.1 采伐税

如果用对木材采伐征收收益税 τ 或者单位税 u ，那么轮伐期无限循环条件下的净现值为

$$\hat{V}(\tau, u) = [\hat{p}f(T)e^{-rT} - c](1 - e^{-rT})^{-1} \quad (2.19a)$$

用 $\hat{p} \equiv p(1 - \tau) - u$ 表示征收过收益税和单位税的税后活立木价格，从 \hat{p} 的定义中很容易看出随着木材价格的下降采伐税也下降。收益税和单位税的比较静态分析如下：

$$\frac{\partial T^F}{\partial \tau} = -\frac{p}{(1 - \tau)} T_p^F > 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial T^F}{\partial u} = -T_p^F > 0 \quad (2.19b)$$

因此，既然收益税单位税在本质上是对净活立木价格的减少，将会延长轮伐龄，因此它们将会减少下一个轮伐期的机会成本。

2.3.2 财产税

在立地价值税中，用 b 表示每年支付的税收，一定时期内支付的立地价值税的净现值如下

$$\int_0^\infty b e^{-rs} ds = \frac{b}{r} \quad (2.20)$$

如果林地价值的征税比例为 θ ，那么，从等式（2.20）中可得到 $b = r\theta V$ ，因此，林地的税后价值为 $U = (1 - e^{-rT})^{-1} \int_0^T pf(s)e^{-rT} ds$ （Johansson & Löfgren, 1985, p99）。最大化林地的税后价值就是轮伐龄 T 的一阶导数条件： $\hat{V}_T(\theta) = V_T = 0$ 因此， $\hat{V}_\theta = 0$ 和 $T_\theta^F = 0$ 立地价值税 θ 会引起林地租金净现值一次性的减少，但是对轮伐龄没有影响。

立地生产力税是行政部门根据林地的立地等级征收的税，用 $a(i)$ 表示，其中 i 表示立地等级的测量指标（比如立地指数）。税后土地价值为：

$$\hat{V}[a(i)] = V - \frac{a(i)}{r} \quad (2.21)$$

$a(i)/r$ 指征收立地生产力税的现值（与等式 2.20 相同）。因为 $\hat{V}_T[a(i)] = V_T = 0$ ，所以轮伐龄是不受立地生产力税的影响。

当每年对正在生长的木材蓄积量的立木价值征收木材税 α ，林主的目标函数为

$$\hat{V}(\alpha) = (1 - e^{-rT})^{-1} \left[V - \alpha \int_0^T pf(s) e^{-rs} ds \right] \quad (2.22a)$$

轮伐龄 T 的一阶倒数条件为

$$\hat{V}_T(\alpha) = pf'(T) - rf(T) - rV - \alpha [pf(T) - rU] = 0 \quad (2.22b)$$

其中

$$L_\lambda(E, T, \lambda) = \bar{F} - f(E, T) = 0 \implies w - \lambda f_E(E, T) = 0$$

表示木材收益的净现值， V 表示不包括木材税的土地价值。

税率 α 对最优轮伐龄的作用效果取决于 $[pf(T) - rU]$ 的符号，如果在经济上可行的时间段内假设 $f'(T) > 0$ ，那么可以得到

辅助定理 2.1 当 $f'(T) > 0$ 时， $pf(T) - rU > 0$

证明 把 $pf(T) - rU$ 重新表示为

$$pf(T) - rU = \int_0^T pf(s) e^{-rs} ds \left(\frac{pf(T)}{\int_0^T pf(s) e^{-rs} ds} - \frac{r}{(1 - e^{-rT})^{-1}} \right)$$

如果在经济上可行的轮伐期内， $f'(T) > 0$ ，可得

$$\begin{aligned} pf(T) \int_0^T e^{-rs} ds &> \int_0^T pf(s) e^{-rs} ds \Leftrightarrow pf(T) \left(\frac{1 - e^{-rT}}{r} \right) > \int_0^T pf(s) e^{-rs} ds \\ \Leftrightarrow \frac{pf(T)}{\int_0^T pf(s) e^{-rs} ds} &> \frac{r}{(1 - e^{-rT})} \end{aligned}$$

由辅助定理 2.1 的 $f'(T) > 0$ 可知，采伐时间点上木材的价值 $pf(T)$ 大于采伐的机会成本 rU 。由 (2.22b) 式的一阶倒数条件与辅助定理 2.1 的收益 $\hat{V}_{T\alpha}(\alpha) = -[pf(T) - rU] < 0$ 可得， $T_\alpha^F < 0$ 。因此，针对木材征收的财产税会缩短轮伐龄。

森林税对基本 Faustmann 模型中私人轮伐龄影响总结如下：

命题 2.3 森林税对 Faustmann 模型的影响

(a)作为采伐税，收益税和单位税将延长最优轮伐期。

(b)作为每年一次性征收的税，立地价值税和立地生产力税对轮伐期没有影响。

(c)每年对正在生长的活立木价值征收的木材税将缩短私人的轮伐期。

因采伐税会减少木材价格的净值，也依次减少延期采伐的边际收益和机会成本，但对后者的影响是主要的，因而轮伐期增加。一次性征收的财产税减少土地的价值但是对延期采伐的边际收益和边际机会成本的关系没有影响，因此轮伐期保持不变。最后，木材税会减少采伐时林木蓄积量的价值和采伐的机会成本，对前者的影响是主要的，因而轮伐期变短。

2.4 修正

回顾 2.1 的基本假设和木材供给函数，就很容易得到改变基本假设的 Faustmann 模型的修正版本。文献中经典的修正包括未来生长量、价格、成本和利率的不确定性，市场的不完善性，把森林管理作为林主一个的选择项等。这些议题在后面的章节将会加以讨论。这里讨论是在确定性和完善市场的范围之内。

首先，尽管我们对一些早期的修正讨论的比较少，但是他们确实非常值得注意的。McConnell *et al* (1983) 和 Newman *et al* (1985) 发现木材价格和更新成本在整个时期内是可以改变的，最优轮伐期取决于价格变化对下一个轮伐期机会成本的影响。Heaps (1984) 和 Heaps & Neher (1979) 认为各种假设的含义对采伐能力有影响，Kilki & Väisänen (1969)，Näslund (1969) 提出了 Faustmann 的间伐模型。在他们的模型中，林主在整个时期内必须维持最优的木材蓄积量。最优控制理论和变分方法的应用将在 12 章加以介绍。

由于篇幅限制，我们只讨论 Faustmann 模型修正中与政策相关的一小部分。许多在后面的章节中会讲到，但有一个没有涉及到就是 Hyytiäinen 和 Tahvonen (2001) 用芬兰的各种法律需求和建议与 Faustmann 的方法作比较。首先用 S.Chang (1983) 使用的管理努力修正模型，分析森林税对轮伐龄和管理强度的影响。其次，通过管理努力模型和 Brazee & Amacher (2000) 的成果，说明运用对偶理论是如何分析 Faustmann 轮伐龄问题，并通过把土地用途作为林主的一个选择变量来检验土地分配的简单模型，介绍这个模型的目的是为了重温木材供给的分析和为第 6 章的森林采伐建立基础。最后，介绍林主的一般生命周期模型，说明在假设 2.1 下森林管理问题实际上是独立的。

2.4.1 木材管理的努力

S.Chang (1982, 1983) 对 Faustmann 模型做了一个既有趣又有用的修正，他把造林活动也纳入到林主的选择范围内，并用管理努力来表示，扩大林主选择

范围的目的是非常明确的。Faustmann 模型假设时间是在相当长的时间跨度内，因此，在未来的所有轮伐期内森林技术保持不变是非常不现实的。林主往往改善林分的生长条件、林地的立地条件或者使用肥料来促进林分的生长。

Chang 把森林生长函数写为 $f(T, E)$ ，把管理努力 E 纳入到森林生长函数中，并假设 $f_E > 0$ ， $f_T > 0$ ， $f_{EE} < 0$ 和 $f_{TT} < 0$ 。交叉导数 $f_{ET} \leq (>) 0$ 不能表示出来，因为它依赖于林地的立地特征和管理努力类型（Amacher et al (1991) 也提到过）。用 w 表示努力的单位成本，现在林主的经济问题就是选择轮伐龄和管理努力：

$$\max_{T,E} V - [pf(T, E)r^{rT} - wE](1 - e^{-rT})^{-1} \quad (2.23)$$

(2.23) 式的一阶条件本质上是

$$V_T - pf_T(\cdot) - rf_T(\cdot) - rV = 0 \quad (2.24a)$$

和

$$V_E - pf_E(\cdot)e^{-rT} - w = 0 \quad (2.24b)$$

很明显，根据边际收益选择最优轮伐龄从定性上来看与 (2.2) 是一样的。等式 (2.24b) 成立时管理努力刚好处于努力的边际产品净现值与努力的单位成本相等的点。

(2.24a) 式和 (2.24b) 式表明，基于努力的 Faustmann 模型为解决轮伐龄和管理努力的问题，需要同时求解两个方程，而方程的解通过下面的方式依赖于外生变量：

$$T^F = T^F \left(\begin{matrix} p, r, c \\ +/-, +/-, +/ - \end{matrix} \right) \quad (2.25a)$$

$$E^F = E^F \left(\begin{matrix} p, r, c \\ +/ -, +/ -, - \end{matrix} \right) \quad (2.25b)$$

例外的是，符号的不确定性，而是取决于在木材生长中时间和努力是替代关系还是补充关系，因此，管理努力必须明确是哪一种，比如选择种植密度、疏松土壤、除草或施肥。Chang (1982) 和 Amacher et al (1991) 也分析了森林税对最优轮伐龄和管理努力的影响，认为立地生产力税对轮伐龄和管理努力都是中性的。表 2.3 列示了其他森林税的效果。

表 2.3 成本最小化与基于管理努力的 Faustmann 模型的比较

参数	基于管理努力的 Faustmann 模型		成本最小化	
	E*	T*	E ^C	T ^C
活立木价格	+/-	+/-	0	0
努力成本	-	+/-	-	+

利率	+/-	+/-	+/-	+/-
收益税	+/-	+/-	-	+
采伐所得税	+/-	+/-	-	+
森林增量税	+/-	+/-	+/-	+/

资料来源：a 来自于 S.Chang（1983）和 Amacher et al（1991）。b 来自于 Brazee 和 Amacher（2000）。

2.4.2 对偶

根据一般的经济学理论，任何给定的利润函数都有与之对偶的成本函数。在森林经济学的历史上，这个主题 Hansen 在字面上处理过这一问题（Helles 和 Linddal, 1997），Löfgren（1984）偶尔也关注这一主题。

最近 Brazee 和 Amacher（2000）对对偶问题进行了更细致的研究，我们这里主要介绍他们的成果。他们认为林主选择轮伐龄和管理努力的目标是成本净现值的最小化，因此，根据森林租金净现值函数导出与之对偶的成本函数，Brazee 和 Amacher 用把外生土地租金看做外生变量的单一轮伐模型的 Samulson 的公式取带了 Faustmann 公式。假设林主必须在产出 \bar{F} 一定的情况下实现成本的最小化，但在森林语境下产出一定未必容易定义。假设木材蓄积量是约束条件，因此在每一个轮伐期内，林主必须达到特定木材蓄积量（收入）。

$$\bar{F} - f(E, T) = 0 \quad (2.26)$$

在对偶理论中，(2.26) 式的约束条件与产出约束条件是平行的（Varian, 1992）。通过 (2.26) 式可以达到一个成本函数，这个成本函数形式与土地租金上涨相似，而土地租金的上涨是通过林主从另一个可选择的用途中得到的。那么，林主面临的成本最小化的问题是

$$C(r, w, \bar{F}) \equiv \min_{E, T} \{wE + (1 - e^{-rT})A\} \quad (2.27)$$

在 (2.26) 式中， $C(\cdot)$ 是成本函数， A 是土地的出售价格（外生变量，表示每个林主是土地市场价格的接受者），括号中的第一项表示在轮伐期开始时造林发生的相关成本，第二项表示每个轮伐期租金的资本化。

可以得到管理努力、轮伐龄的一阶条件，拉格朗日乘数乘以 (2.26) 式的约束条件

$$L_E(E, T, \lambda) = w - \lambda f_E(E, T) = 0 \quad (2.28a)$$

$$L_T(E, T, \lambda) = rAe^{-rT} - \lambda f_T(E, T) = 0 \quad (2.28b)$$

$$L_\lambda(E, T, \lambda) = \bar{F} - f(E, T) = 0 \quad (2.28c)$$

这些条件表明：第一，林主管理努力的边际成本等于管理努力的边际收益；第二，林主延期采伐的边际成本等于延期采伐的边际收益；第三，每个轮伐期蓄积量约束条件是满足。二阶条件满足（Brazee 和 Amacher, 2000）。

下面的对偶理论（Silberberg 1990, p256-277）是为寻找合适的成本函数，

必须明确在什么条件下满足 (2.28a) - (2.28c) 式的成本最小化等同于满足 Faustmann 模型 (2.24a) 式和 (2.24b) 式的收益净现值最大化。为此, 用 E^C 、 T^C 、 λ^C 表示成本最小化的变量, 相对应的 Faustmann 模型用 E^* 、 T^* 和 λ^* 表示, 如果成本最小化与利润最大化是等价的, 那么 (2.28a) - (2.28c) 式的约束条件就是简单的 $\bar{F} - f(E^*, T^*) = 0$ 因此, 只需要确定在什么时间 (2.28a) 式和 (2.28b) 式等价于 Faustmann 的努力和轮伐期的 (2.24a) 式和 (2.24b) 式。

在 (2.28) 式的两边同时乘以 $-(1 - e^{-rT^*})$, 重新整理, 再用最优产出替代, 相应的 Faustmann 一阶条件为

$$w - e^{-rT^*} pf_E(E^*, T^*) = w - \lambda f_E(E^*, T^*) \quad (2.29)$$

如果定义乘数 $\lambda = e^{-rT^*} p$, 并代入到 (2.28 式) 中, 重新整理 (具体见 Braze 和 Amacher, 2000), 得到 A 必须满足的条件:

$$A = \frac{pf(E^*, T^*) - wE^*}{(1 - e^{-rT^*})} \quad (2.30)$$

(2.30) 式需要满足: 最初的轮伐是现时采伐的无限轮伐期内净收入贴现值之和等于土地价格的资本化, (2.30) 式的正式解释是, A 等于 Samuelson 视角中 Faustmann 模型中的土地价格加上在土地出售之前第一个轮伐期的采伐收入。因此

$$A = \frac{e^{-rT^*} pf(E^*, T^*) - wE^*}{(1 - e^{-rT^*})} + pf(E^*, T^*) = \frac{pf(E^*, T^*) - wE^*}{(1 - e^{-rT^*})} \quad (2.31)$$

(2.27) 式的成本函数与 Faustmann 净现值函数对偶的充分条件是林主必须在第一个轮伐期期末出售土地, 并且同时得到土地和活立木的价值。从我们之前的讨论中可知, 这是完善土地市场的必然结果。

表 2.3 总结了 Braze & Amacher (2000) 与基于努力 Faustmann 模型的比较静态分析结果。两种类型税的效果不再含糊不清, 但森林增量税 (立地生产力税) 是特例, 这一点是非常有趣的。活立木价格对最优轮伐龄和努力的选择没有任何影响 (与预期的一样), 但利率的影响与基于努力的 Faustmann 模型一样, 仍然不明确。

2.4.3 竞争性土地的用途

到目前为止, 我们一直假设林业是土地的唯一用途, 但现实中, 林业是与其他土地用途相互竞争的, 比如农业。土地用途中任何相对利润的变化都会引起分配到每种用途上土地数量的变化, 进而影响到长期木材的供给, 这一点在前面讨

论过。通常情况下，土地用途是通过改变的土地质量（立地条件）或土地到市场的距离来优化的，而以上两种方法都会带来两种土地用途转化的经济边际增加。

学者们把森林采伐看作土地用途问题来分析，土地质量和距离的异质性模型是常用来分析这一问题的工具，比如，Barbier&Burgess（1997），Hardie & Parks（1997），Parks et al（1998）和 Amacher（2008）。Brazee & Amacher（2002）发现了一个有趣的特例，他们检验了专门生产木材的土地单元上的各种龄阶，下面我们将介绍 Amacher et al（2008）部分成果，但我们简化了他们的模型，假设土地只有农业和林业两种用途。

假设林主拥有一块质量变化的土地，这块地可以分成许多小块地，每小块地内部的土地质量相同但不同小块地土地质量不同且连续，林主的经济问题是以最大化土地收益为目标，把这块地在非林用途（农业）和林业用途之间进行分配。求解这个问题就是选择每小块地上的能带来更好净收益的最优生产用途。

在农业生产中，林主每期投入农业投入 l ，不变的边际成本 w ，每期的农业收入是投入变量的凹函数，即 $f(l;q)$ ，而 $f_l(l;q) > 0$ ， $f_{ll}(l;q) < 0$ 。投入的边际生产量随着土地质量 q 增加而增加，即 $f_{lq}(l;q) > 0$ 。用 P_a 表示农产品的价格，则任何一小块农地的利润净现值为：

$$\pi = \int_0^{\infty} [p_a f(l;q) - wl] e^{-rt} dt \quad (2.32)$$

林主在任何一时间点都根据一阶条件 $p_a f(l;q) - w = 0$ 来选择农业投入 l 来实现农业生产的最优化，这表明了决定最优投入 l 的因素， $\hat{l}^* = \hat{l}^*(p_a, w, q)$ 。把(2.32)式的最优投入 l 代入到每小块地净现值的利润函数中，可知函数具有下面的属性： $\pi^*(\underset{+}{p_a}, \underset{-}{w}, \underset{-}{r}, \underset{+}{q})$ 。

单位面积林地收益的净现值根据 Faustmann 公式求得。用 p_f 表示木材价格，包含土地质量的森林生长函数为 $F(T;q)$ ，而 $F_q(T;q) > 0$ ， $F_{Tq}(T;q) > 0$ 。那么，Faustmann 公式可以写为 $V = [p_f F(T;q) - c](1 - e^{-rT})^{-1}$ ，它拥有以前章节所导出的相同的属性。每小块地净现值的收入函数与外生变量的关系属性如下：

$$g(q) = G'(q) = G \max_{h_f} PV = \int_0^1 [V^* h_f + \pi^* (1 - h_f)] g(q) dq = \frac{\partial PV}{\partial h_f} - V^* - \pi^* = 0$$

$$L_a = \int_q^1 g(q) dq$$

为了把土地分配的决定公式化，我们按照 Lichtenberg（1999）的程序，用 q 表示土地质量等级， $0 \leq q \leq 1$ 。 q 的累计分布 $G(q)$ 表示质量等级最多为 q 小块地的集合， $g(q)$ 表示 $G(q)$ 的密度函数，即 $g(q) = G'(q)$ ，因此，土地的总量为：

$$G = \int_0^1 g(q) dq \quad (2.33)$$

林主分配土地面积 G 于农业和林业， $\pi_q^* > 0$ 和 $v_q^* > 0$ 表明两种类型的生产都是土地质量越高利润越高。为了确保土地是分配于最优的用途，我们做如下假设：

假设 2.3 对土地的质量与土地的用途，做如下关系的假设：

- (a) 当 $q=1$ 时， $V^* < \pi^*$ 和
- (b) 当 $q=0$ 时， $V^* > \pi^*$

假设（2.3a）和（2.3b）定义了林业和农业的相对利润，它们表明在高质量的土地上农业生产利润更高，而在低质量的土地上林业生产收益更高。根据以上两个假设，当土地质量连续时，农业和林业的土地租金曲线一定会相交。Ensuring that both agriculture and forestry are practiced in separate unique, compact land areas。在实践中，在农业和林业是分开的、独特的和紧凑的土地上。

用 h_f 表示土地面积中用于林业的部分，因此，用于农业的部分是 $h_a = 1 - h_f$ ，林主通过选择份额来决策：

$$\max_{h_f} PV = \int_0^1 [V^* h_f + \pi^* (1 - h_f)] g(q) dq \quad (2.34)$$

必要条件

$$\frac{\partial PV}{\partial h_f} - V^* - \pi^* = 0 \quad (2.35)$$

用 q^c 表示土地质量的临界值，按照土地质量把所有的土地分成两个连续而紧凑的部分（ L_f 和 L_a ），分别用于林业和农业：

$$L_f = \int_0^{q^c} g(q) dq \quad \text{和} \quad L_a = \int_{q^c}^1 g(q) dq \quad (2.36)$$

为进行土地用途的比较静态分析，需要首先定义外生变量向量 ψ ， $\psi = (p_a, p_f, c, r, w)$ ，（2.36）式对 ψ 求导数

$$\frac{dL_f}{d\psi} = g(q^c) \frac{\partial q^c}{\partial \psi}, \quad \frac{dL_a}{d\psi} = -g(q^c) \frac{\partial q^c}{\partial \psi} \quad (2.37)$$

根据（2.37）式可知，在土地数量固定不变且只有两种土地用途的情况下，一种土地数量的增加必然带来另外一种土地数量的减少。因此，一旦我们碰巧知道了林业用地的变化，那么也就知道了农业用地的变化。这需要检验土地的临界质量是如何随着参数变化而变化的。为了得到导数 $\partial q^c / \partial \psi$ ，对（2.35）式求全微分得到

$$\frac{\partial q^c}{\partial p_f} = -\frac{V_{p_f}^*}{\Delta} > 0 \quad \frac{\partial q^c}{\partial r} = -\frac{V_r^* - \pi_r^*}{\Delta} \geq 0 \quad \frac{\partial q^c}{\partial c} = -\frac{V_c^*}{\Delta} < 0 \quad (2.38a)$$

$$\frac{\partial q^c}{\partial p_a} = -\frac{\pi_{p_a}^*}{\Delta} < 0 \quad \frac{\partial q^c}{\partial w} = \frac{\pi_w^*}{\Delta} > 0 \quad (2.38b)$$

因为最优土地面积分配的二阶充分条件，所以 $\Delta = (V_q^* - \pi_q^*) < 0$ ，符号表示随着参数的变化临界土地质量转化的方向。

（2.38a）式、（2.38b）式和（2.37）式表明，随着木材价格（更新成本）的上升（下降）用于林业的土地数量增加。实际利率的影响仍然不明确，而是取决于利率对林业和农业利润的相对重要性，这一点是非常有趣的。我们也发现随着价格和投入成本的变化农业利润增加，而农业利润的增加引起林业用地的减少，反之亦然。这说明“外生”林业事件对长期木材供给的影响是可能的。除了最后一种情况，木材价格和更新成本对长期木材供给的影响也是不明确的，这是因为土地分配的影响效果与轮伐龄变化带来的影响效果刚好相反。长期供给曲线是否呈现向后弯曲的属性取决于两种效果的相对强度，这一点 Brazee 和 Amacher(2002)用不同的方式表述过。

2.4.4 一个生命周期的解释

在本章我们应用 Faustmann 模型的过程中，有点盲目地遵循假设 2.2 从来没有涉及到林主的其它目标，比如消费。现在我们假设一个私人的非产业化的林主用木材的收入和其他的外生收入来供给他的消费，许多文献已做了相关的经验研究（Amacher et al.2002 对这一领域的相关研究进行过回顾）。从理论上来看，需要一个林主需要在一定时期内选择他的消费方案和轮伐龄来供给他消费的模型，检验这种决策的自然框架是生命周期模型，林主在整个生命时间段内的最优化他的消费。Tahvonen 和 Salo（1999）发现了该类型模型应用林主的一个重要的例子，他们展示了如何从一个更一般的生命周期动态最优化模型导出 Faustmann 模型，这里简单介绍他们的生命周期模型。假设林主的后代一直繁衍，从宏观角度来看，模型与朝代更替相似，所有的林主后代具有相同的偏好，因此，第一代林主选择最优的消费方案和轮伐龄。

假设林主偏好的效用函数 $u[c(t)]$ 是凹函数， $u'[c(t)] > 0$ 但 $u''[c(t)] < 0$ ，用 ρ 表示林主时间偏好率，林主在整个时间段内根据效用最大化的目标选择消费方案 $c(t)$ 和轮伐龄 T ：

$$\max_{c,T} U = \int_0^{\infty} u[c(t)] e^{-\rho t} dt \quad (2.39)$$

林主的消费选择受到他的外生收入 m 和林业收入 V （根据 Faustmann 模型求得）的约束，在时间趋于无限时的跨时期预算约束为：

$$\int_0^{\infty} c(t) e^{-r t} dt = \int_0^{\infty} m(t) e^{-r t} dt + V \quad (2.40)$$

这个问题的拉格朗日函数为

$$L = \int_0^{\infty} u[c(t)] e^{-\rho t} dt + \lambda \left[\int_0^{\infty} m(t) e^{-r t} dt + V - \int_0^{\infty} c(t) e^{-r t} dt \right]$$

其中， λ 为预算约束乘数，选择消费和轮伐龄产生了下面的一阶条件：

$$\frac{\partial L}{\partial c(t)} - u'[c(t)] e^{-\rho t} - \lambda e^{-r t} = 0 \quad (2.41a)$$

$$\frac{\partial L}{\partial T} = \lambda V_T = 0 \Leftrightarrow \lambda [pf'(T) - rpf(T) - rV] = 0 \quad (2.41b)$$

条件（2.41a）式表达了在整个时期内最优消费路径的特征，重新表示为 $\lambda^{-1} u'[c(t)] = e^{-(r-\rho)t}$ ，表明消费的时间路径是不变的（ $r = \rho$ ），下降的（ $\rho > r$ ）或上升的（ $\rho < r$ ）。等式（2.41a）式决定了边际最优轮伐龄，明确地表示了根据效用决定林主的偏好不影响最优轮伐龄的选择，因为最优轮伐龄与 λ 是独立的（2.41b 中的括号项一定是 0），因此，Faustmann 方法确实是生命周期模型的最优方法，Fisherian 的分离定理也得以证明。为了说明表明消费和森林采伐的分离性将不成立的森林游憩价值，我们将在下章（3.62 部分）继续讨论这一模型。

2.5 小结

本章介绍了森林经济学基本理论的雏形，这些基本理论是大部分森林经济学的基础，或者至少是森林经济学的起源。介绍了解决最优轮伐龄基本方法背后的经济学家需要关心的森林技术和检验理论的基本假设，在基本假设条件下，我们发现 Faustmann 公式包括在一定时期内正在生长林木的所有机会成本，这一点有

别于其他所提到的公式。在这个模型中，利率和木材价格越高，最优轮伐龄越短，而更新成本越高，最优轮伐越长。这些因素对短期的木材供给有影响，但对长期的木材供给影响效果却相反。最优轮伐龄的确定及其对外生变量的依赖性，包括森林税，为更复杂的政策导向分析（比如为促进稳定的气候和生物多样性或减少世界剩余天然林采伐的最优税收或政策设计）提供基础和准绳，将在后面的章节中继续加以介绍。