

国家自然科学基金与教育部骨干教师基金资助项目



可再生性资源 开发系统的 调控与最优化管理

当今世界正处于人口爆炸、生态环境恶化、资源匮乏等危机状态之中，可持续发展已成为全人类发展的共同目标。而实现可持续发展的一个关键就是可再生资源的保护与管理问题。

荆海英 著
辽宁人民出版社

国家自然科学基金与教育部骨干教师基金资助项目

可再生性资源开发系统的 调控与最优化管理

荆海英 著

辽宁人民出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生性资源开发系统的调控与最优化管理/荆海英
著. 沈阳: 辽宁人民出版社, 2002.12

ISBN 7-205-05476-1

I. 可… II. 荆… III. 再生资源—资源开发—研究 IV. F062.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 098885 号

辽宁人民出版社出版

(沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮政编码 110003)

沈阳市第一印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/32 字数: 190 千字 印张: 7.5
2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 张业宏 王丽竹 版式设计: 荆海英
封面设计: 张业宏 责任校对: 张 杰

定价: 13.50 元

前 言

地球已经存在上万亿年了。在浩瀚的历史长河中，人类上演了无数幕悲喜剧。岁月无情地摧毁着我们古老的地球。现代文明在建筑人类神话的同时，也在不知不觉中破坏了我们的环境。时至今日，我们赖以生存的地球已是千疮百孔。资源的匮乏以及压倒一切的环境恶化问题，迫使人类不得不正视这样一件事：如果人类继续按照原来的方式生存下去，其结果只能是资源枯竭，从而导致地球上的生态系统被破坏到不可修复的境地。

自然资源是有限的，而人类的欲望却是无限的。要解决这一对矛盾是很难的。但是，人类区别于其他生物的能力是具有理性的智慧，而可再生性资源又给了人类丰富的想像空间。能否处理好对可再生性资源的开发，使得它能够在不枯竭的前提下，为人类提供更多的物质，的确是一件令人兴奋不已的事情。从十九世纪开始，人类对环境的保护意识开始萌芽，最初是着眼于人口增长问题。一个多世纪以来，人类终于从朦胧中惊醒：实现对可再生性资源的最优管理与调控不再是仅由富国考虑的问题，而是全人类必须面对和重视的问题。

当今世界正处于人口爆炸、生态环境恶化、资源匮乏等危急状态之中，可持续发展已成为全人类发展的共同目标。而实现可持续发展的一个关键问题就是可再生资源的保护与管理问题。鱼类、森林、牧场、水资源以及土壤等都属于可再生资源，过量地捕捞、开采、放牧以及滥用都会导致资源的枯竭。在经济学家可能忽视资源的有限性，而生物学家可能忘记经济学原则的情形下，研究出一种科学的、基于经济学原则的资源开发与管理方法无疑

具有现实意义。

诚然，历史上还没有一种可再生性资源像本书提及的那样去管理过。但是，我们不能因为没有而不去做。本书的主要目的是尽可能理清表达可再生性资源开发模型的非线性生物经济系统所涉及的各种复杂关系，在此基础上，提出一种新型的对可再生性资源进行管理和调控的方法。

为了我们的地球不再伤痕累累，为了我们的子孙后代，让我们共同保护我们赖以生存的环境与自然资源吧！

绪 论

第一节 问题的提出

人类最早出现的生态退化是从六千年前开始的。幼发拉底河与底格里斯河流域的早期农业导致了古巴比伦文明的崩溃。与此同时，早期的牧业也最终导致了撒哈拉草原的迅速沙漠化。在我国，黄河的水土流失早在原始社会的仰韶文化时期就已开始。其后历代的屯垦和过牧使许多地区沙漠化和大片优质草原沦为荒漠或半荒漠。建国以后，我国曾出现过两次大的生态退化事件，其一是1958年的大跃进，为了大炼钢铁，许多地区砍光了森林；其二是文化大革命后期，在“以粮为纲”的政策驱动下，对草原与荒山的大规模开垦，加速了许多地区的沙漠化进程。近年来，我国近海地区的渔业资源如长江口的鳗鱼和蟹苗遭受了长期滥捕的厄运，而成千上万的淘金者的疯狂开采使青海的部分地区及北疆草原的植被遭受了严重的破坏。

导致环境恶化与资源滥用的原因很复杂。资源经济学者试图用“外部性”^①与“公共产品”的概念来解释这个问题。所谓“外部性”是指由个人或企业所采取的行动给其他人或企业带来的影响。资源经济学者的论点是：每一个公共资源竞争使用者根本不考虑其个人的行为会给他人或资源本身造成多大的损害。

西方经济学者认为，在“理性人”不可能故意损害自己巢穴的假定下，一个保护资源的合理化建议是资源私有化。但是资源经济学的理论与实践又告诉我们：资源拥有者渴望获得最大的投资回报率。如果森林、海洋生物以及牧场等不能有一个较高的回

^①外部性，亦称“外部成本”、外差因素。指的是市场交换对“毗邻”或“第三方”的影响，是一种根本不在市场交换的考虑之中的对某人或法人福利的影响。有利的“毗邻”效应被称为外部经济或肯定性的外差因素；有害的“毗邻”效应被称为外部不经济或否定性的外差因素。

报率，它的拥有者将倾向于过度开发这些资源。因此资源私有化并非一个完全正确的选择，至少对一部分可再生性资源是这样。西方在这方面的实践表明：赋税与配额制^①在克服过度开发资源问题上具有潜在的优越性。但前提是必须存在一个能高度监控这些资源的管理部门。

多年来，可再生性资源的管理目标是最大化可持续产量（Maximum Sustainable Yield），简称之为 MSY。这一概念产生的含义是：某个特定环境下的生物存量应该维持在某一水准上。高出这一标准的部分被称做剩余产量，应该全部被收获。如果不能及时收获这部分剩余产量，对应的生物存量就会增加，最终达到或超过环境的容纳度，从而破坏了环境，导致资源的灭绝。由这种概念可以知道，剩余产量等于可持续产出。MSY 是在剩余产量为最大时取得的。

然而，近年来西方的实践使人们认识到：MSY 的概念过于简单而不能作为大多数可再生性资源的管理目标。原因之一是 MSY 是仅对资源开发的利益而言的，而完全忽视了成本问题。这表明产出从资源开发的角度看是最优的，而从社会角度上看永远不是最优的。如果商业开发可能导致资源存量远低于 MSY 水平，则 MSY 可提供一个好的恢复点。从而将 MSY 视为约束条件，而不是开发的目标，将具有十分理想的作用。

既然 MSY 不能作为可再生性资源的管理目标，那么把管理目标定在一个合理的经济与生物指标上就变得极为重要。本书提出最优资源管理与调控的概念，试图使用定量的数学与控制论方法研究这个从未被人们真正重视的问题。除此之外，本书研究了可再生性资源开发模型的性质、反馈控制、资源规划、供需模型及永久持续生存等问题。我们期望这些可为管理与技术人员在决策时提供一个科学依据。

^①阿格纳罗和多纳里教授对美国大西洋和墨西哥湾海岸的牡蛎养殖场的研究得出了私人产权比公共产权效率高的证明。他们使用的是劳动生产率（每人每小时的产出）。结果发现，与公共的牡蛎养殖相比，在私人租用的养殖场中，劳动力得到了更具生产性的使用，平均收入比原先高 5%。这意味着一个相当大的福利损失应归咎于对公共产权的依赖。

第二节 研究现状

18 世纪的法国大科学家巴丰 (Buffon) 被认为是第一个研究生态退化与人类活动之间关系的学者。德国学者海克尔 (Haeckel) 于 1816 年创建了生态学。而生态系统的概念是在 19 世纪 30 年代形成的。此后, 借助于数学工具与在物理学力学中所熟知的动力学方法, 生物学家与数学家共同建立了各种生态动力学系统。

早在 100 多年前, Malthus (1834 年) 首次提出了人口模型

$$\dot{x}(t) = rx(t) \quad (0.2.1)$$

其中 $x(t)$ 表示时刻 t 时人口的密度。 r 表示人口密度随时间的相对增长率, 也称之为内禀增长率。由于该模型没有将环境因素考虑进去, 因此, 根据这一模型得出的“人口指数无穷增长”的论述是不正确的。1938 年, P.F. Verhulst 提出用如下 Logistic 模型

$$\dot{x}(t) = rx(t) \left(1 - \frac{x(t)}{k}\right) \quad (0.2.2)$$

来描绘人口或其他生物种群的增长规律。这里 r 是内禀增长率。 k 是环境的容纳量 ($k > 0$)。从该模型可以看出, $x=k$ 是模型的稳定的平衡点, 即种群将始终稳定在 $x=k$ 的水平上。然而, 多年的实践表明, 有些种群不但不会稳定在某一水平上, 反而会出现某种随机现象—混沌。这意味着 Logistic 模型不能用于描绘所有的种群。1974 年, May 将 Logistic 模型 (0.2.2)

差分化, 得到如下离散系统模型

$$x_{t+1} = x_t \left[1 + r \left(1 - \frac{x_t}{k}\right)\right] \quad (0.2.3)$$

并发现, 这一模型可以用于描述一些不能由模型 (0.2.2) 所描述的出现混沌现象的种群。

上述模型都是描述单一种群的模型。在自然界中, 许多种群都是生存在同一环境之中, 并相互作用, 相互影响的。因此, 描述两种群相互作用的模型应运而生。1925 年, 针对生物学家 D'Ancona 提出的问题, 著名数学家 Volterra 建立了大鱼与小鱼相互作用模型

$$\begin{aligned}\dot{x} &= ax - bxy \\ \dot{y} &= cxy - dy\end{aligned}\quad (0.2.4)$$

这里 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示大鱼与小鱼的密度。a 为小鱼种群的内禀增长率，d 为大鱼种群的死亡率，b 和 c 表示两种群相互作用的系数。使用这个模型，可以预测，生存在同一海域内大鱼的数量与小鱼的数量具有周期性：大鱼多时，小鱼的数量少，但过一段时间，大鱼数量变少，小鱼的数量则增多，再过一段时间，大鱼增多，小鱼减少，成周期振荡。另外，捕捞对小鱼的生长有利，而对大鱼不利。

1935 年，Gause 和 Witt 认为对于非常简单的种群（例如酵母，细胞），可以用如下方程来近似表示

$$\begin{aligned}\dot{x} &= x(b_1 + a_{11}x + a_{12}y) \\ \dot{y} &= y(b_2 + a_{21}x + a_{22}y)\end{aligned}\quad (0.2.5)$$

b_i ($i=1,2$) 分别表示两种群的内禀增长率； $a_{ii} < 0$ ($i=1,2$) 表示这两个种群都是密度制约的； a_{ij} ($i \neq j$) 是两种群相互作用的系数。研究表明，如果该模型存在局部稳定的正平衡点，则该正平衡点是全局渐近稳定的。但是，该模型不存在极限环和奇异极限环。

对于脊椎动物和无脊椎动物而言，捕食率通常为一个函数 $\varphi(x)$ ，其模型具有如下形式

$$\begin{aligned}\dot{x} &= x(b_1 - a_{11}x) - \varphi(x)y \\ \dot{y} &= y(-b_2 + k\varphi(x) - a_{22}y)\end{aligned}\quad (0.2.6)$$

如果

$$\varphi(x) = \frac{\alpha x}{1 + \beta x}$$

称该模型为 II 类功能性反应模型。如果

$$\varphi(x) = \frac{\alpha x^2}{1 + \beta x^2}$$

则称该模型为III类功能性反应模型。

在II类或III类功能性反应模型中,捕食率函数 $\varphi(x)$ 是 x 的单增函数,随着 x 的增加,捕食率逐步趋近一个稳态值。显然,这并不能反映所有的情况。有时,当食饵种群密度大到一定程度时,将形成群体防御,使得捕食种群难以捕捉食饵,因而捕食率具有如下形式

$$\varphi(x) = \frac{\alpha x}{1 + \omega x + \beta x^2}$$

或

$$\varphi(x) = \frac{\alpha x^2}{1 + \omega x + \beta x^2}$$

严格地说,种群在时刻 t 时的相对增长率应是在时刻 t 时成年的种群密度的函数,因为只有成年的种群才有能力繁殖后代。如果所考虑的种群成年期为 τ ,则该种群应满足如下方程

$$\dot{x}(t) = x(t)g(x(t-\tau)) \quad (0.2.7)$$

如果两个相互竞争的种群的成熟期都为 τ ,则它们将满足如下方程

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= x(t)f(x(t), y(t-\tau)) \\ \dot{y}(t) &= y(t)g(x(t-\tau), y(t)) \end{aligned} \quad (0.2.8)$$

称方程(0.2.7)与方程(0.2.8)为滞后效应模型。

由于对不同年龄的种群的个体,将有不同的生育率与死亡率,于是就产生了如下的年龄结构线性模型

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} + \mu(x)U(x, t) = 0$$

$$U(0, t) = \int_0^m b(x)U(x, t)dx,$$

$$U(x,0) = \varphi(x), 0 \leq x \leq m, t \geq 0$$

这里 x, t 分别表示年龄和时间, $U(x, t)$ 表示年龄为 x 的种群在时刻 t 时的密度, m 为个体存活的最大寿命, $\varphi(x)$ 表示年龄为 x 的种群的初始密度, $\mu(x)$ 和 $b(x)$ 分别表示 x 年龄的种群的死亡率与出生率。

生物动力学系统作为一个学科是在 20 世纪 70 年代中期形成的。借助于数学工具与在物理学、力学中所熟知的动力学方法, 生物学家与数学家共同建立了各种生态动力学系统。但是, 建模不是最终的目的, 利用所建立的模型去预测种群的发展与变化规律, 并在此基础上合理地使用与调控种群资源的发展过程与发展趋势才是人类最终的目标。到目前为止, 对种群动力学系统的研究主要有如下两个重要方面:

1. 研究种群随时间的演变规律。即研究种群的平衡点及其稳定性、解的有界性、空间周期解、极限环以及永久持续生存等问题[2-10];
2. 结合经济与生物意义来研究种群的保护、开发、利用等问题[1]。

从现有的结果看, 对第一个方面问题的研究是迄今为止数学在生态学理论中发展最为系统与成熟的, 而且还正处于方兴未艾之势, 但不足的是所做的研究大部分集中在个体的、低阶的、小范围的生物系统上, 还没有系统地研究种群动力学系统的能控性(包括能稳定性)等问题, 这使得许多生物现象不能给出合理而又令人满意的解释。对第二个方面问题的研究目前仍可算处于刚刚起步阶段。目前见诸于文献的结果大都仅涉及单种群或二种群的最优收获问题[1, 15-26], 而对于二种群最优收获问题的结果多半是针对较特殊的问题进行的讨论。例如仅研究有选择的收获问题[1]。对于二种群以上的多种群相互作用模型的最优开发与调控问题的研究还刚刚起步。另外, 在种群动力学系统中加上控制项, 以研究收获或投放对该系统永久持续生存问题的影响, 即研究在什么条件下一个原来不能持续生存的种群可以变成持续生存的问题属于一个还未开垦的领

域。由于非线性种群动力学系统包含许多不同的模型, 这些不同的模型又能够经过某种变换化成广义 Lotka-Volterra 形式[21], 因此寻求或建立一个适合于研究广义 Lotka-Volterra 模型的新方法或者说寻求或建立一个适合于研究非线性种群动力学系统新方法变得极为重要。除此之外, 在保证生态平衡的前提下, 根据经济学与生物学原则建立更合理的性能指标, 研究两种群以上的多种群相互作用模型的控制与最优开发问题, 研究经济参数和生物参数与最优平衡轨线之间的内在联系, 即研究采用什么样的收获量值可避免出现生物过度开发与经济过度开发无疑具有极为重要的理论意义与应用价值。

第三节 本书要研究的问题

综上所述, 本书将主要研究如下几个问题:

1. 研究可再生性资源开发模型的性质。对 1 阶模型而言, 我们重点研究了反馈增益 E 对开发系统的平衡点及产出函数的影响。对 2 阶系统而言, 我们重点研究了反馈增益对 Lotka-Volterra 系统、II 类功能性反应系统、III 类功能性反应系统等 3 种模型的正平衡点、稳定性以及极限环的影响。

2. 研究可再生性资源开发模型的能控与能观测性。在这个问题的讨论中, 我们发现, 表示开发力度的系数 q_i 对开发系统的能控性与能观测性有着重要的影响。这意味着开发对可再生性资源的影响是不能忽视的。显然, q_i 对能控性的影响只取决于它是否等于零, 而不取决于它的大小。但是, q_i 的大小对能观测性有直接的影响。其生物意义是, 只要 $q_i \neq 0$, 就意味着我们对第 i 个资源在进行调控。选取不同的 q_i 意味着开发的力度不同, 由此导致开发系统具有不同的资源密度。如果引起不同的产出, 则开发系统能通过产出估计资源密度的现状。

3. 研究可再生性资源开发模型的调控与最优管理问题。在肯定存在最优开发决策的前提下, 使用最大值原理推出了使带有折

扣率的可持续经济利润取最大值的最优开发策略。在纯补偿开发模型的情况下, 最优资源密度通常介于生态平衡点与零折扣率下有最大可持续经济利润的资源密度之间。与此同时, 我们还研究了再生性资源开发模型的动态性质。

4. 研究资源的市场价格对可再生性资源开发模型的影响。分别建立了开放式资源开发供需平衡模型与最优资源开发供需平衡模型。研究了折扣率 δ 与最优平衡供应曲线之间的关系。分别研究了开放式资源开发与最优资源开发两种情况下, 由于需求无弹性所带来的动态不稳定性。

5. 研究可再生性资源开发的宏观最优调控问题。

首先我们研究的是在无干预的自由竞争中 N 个开发商是如何对可再生性资源进行开发的。显然, 在这种情况下, 每一个开发商都在竭尽全力最大化自己的利润, 根本不去考虑他们的开发对未来资源存量的影响, 其结果必然是导致环境恶化、资源濒临灭绝。

然后, 我们分别研究了单资源开发模型和两种资源开发模型的最优调节问题。我们的结论是: 政府可以通过税收与配额制等财政手段克服由限制开发商个数所带来的弊病; 通过使用税收和配额制相结合的方法可以使经济利润分布在开发商与资源拥有者或管理部门之间。

6. 研究可再生性资源开发模型的变结构控制。

虽然变结构系统是针对调节问题发展起来的, 但是, 它也适合于解决运动跟踪、模型跟踪、自适应控制、不确定系统控制等更一般的问题。因此, 将变结构控制方法引入生态系统, 无疑具有重大意义。本章先就一般情况研究了生态系统的变结构控制, 然后, 讨论了 **Kolmogorov** 模型的直接变结构控制方法。最后, 讨论了几个典型生态系统的变结构控制。

7. 研究了作为可再生性资源模型的种群动力学系统的持续生存问题。

首先我们研究了 n 阶食物链反馈控制系统的稳定性与永久持续生存问题, 分别得到了该系统无反馈与有反馈两种情况下存在

惟一正平衡点和永久持续生存的几个充要条件。

Lotka-Volterra 系统是一个非常重要的生态模型。我们讨论了 n 种群 Lotka-Volterra 系统的非负平衡点的存在性、彼此之间的关系, 并给出了若干判别系统永久持续生存的必要条件、充分条件及充要条件。

目 录

前言	1
绪论	1
第一节 问题的提出	1
第二节 研究现状	3
第三节 本书要研究的问题	7
第一章 可再生性资源开发模型的性质	
第一节 逻辑增长模型: 纯补偿情况	1
第二节 广义逻辑增长模型: 非临界退偿与 临界退偿情况	3
第三节 2 阶 Lotka-Volterra 模型在状态反馈 控制下的性质	14
第四节 II 类功能性反应系统在状态反馈控 制下的性质	16
第五节 III 类功能性反应系统在状态反馈控 制下的性质	22
第六节 微生物连续培养模型在状态反馈控 制下的性质	27
本章小结	38
第二章 可再生性资源开发模型的能控性与能观测性	
第一节 数学准备工作	39
第二节 n 阶 Kolmogorov 系统的能控性	42
第三节 几个特殊资源开发系统的能控性	44
第四节 可再生性资源开发模型的局部弱能	

观测性·····	47
本章小结·····	53
第三章 单一资源开发模型的调控与最优管理	
第一节 开放式资源开发的基本概念·····	54
第二节 开放式资源开发系统的动态性质·····	58
第三节 最优资源开发策略·····	66
第四节 最优资源密度的性质·····	71
第五节 非线性条件下的最优解及其动态性质·····	78
本章小结·····	85
第四章 多资源相互作用模型的调控与最优管理	
第一节 两种资源相互作用模型的开放式开发·····	87
a) 生态独立的两种资源开发模型的调控 与最优管理·····	95
b) 最优到达路径·····	102
c) 两资源相互作用开发模型的调控与最 优管理·····	106
第五节 临界退偿开发模型的调控与最优管理·····	114
本章小结·····	120
第五章 资源开发模型的最优供需平衡	
第一节 开放式资源开发模型的平衡供应曲线·····	121
第二节 最优平衡供应曲线·····	128
第三节 供需平衡条件下最优解的存在性·····	134
第四节 供需平衡解的动态不稳定性·····	137
本章小结·····	143
第六章 纯竞争下的可再生性资源开发模型的最优 调控	
第一节 自由竞争下的可再生性资源的开发·····	145
第二节 单一资源开发模型的宏观最优调控·····	149

第三节	税收与配额迁移在资源开发中的作用·····	153
第四节	生态独立的多资源开发模型的宏观最优调控·····	160
本章小结	·····	165
第七章	可再生性资源开发模型的变结构控制	
第一节	变结构控制方法简介·····	166
第二节	可再生性资源开发模型的间接变结构控制方法·····	168
第三节	Kolmogorov 模型的直接变结构控制方法·····	171
第四节	两种资源开发系统的变结构控制·····	175
本章小结	·····	180
第八章	可再生性资源的永久持续生存	
第一节	预备定义与定理·····	182
第二节	n 阶食物链系统的永久持续生存 ·····	184
第三节	3 阶 Lotka-Volterra 系统的永久持续生存·····	196
第四节	n 阶 Lotka-Volterra 系统的永久持续生存·····	203
本章小结	·····	215
参考文献	·····	216
后记	·····	219