



# 能源供给模型

刘江华

[liu.Jianghua@shufe.edu.cn](mailto:liu.Jianghua@shufe.edu.cn)



# 目录

- 可耗竭资源的供给模型理论
- 哈伯特峰值理论理论、应用和拓展

- 如何寻找、开发和生产化石燃料？

煤炭、石油和天然气等化石燃料都是由动植物遗骸在地下经过数百万年的转化过程形成的。寻找、开发和生产化石燃料的经济活动往往遵循下图的几个步骤，尽管这些步骤的顺序和相关性可能因燃料而异。

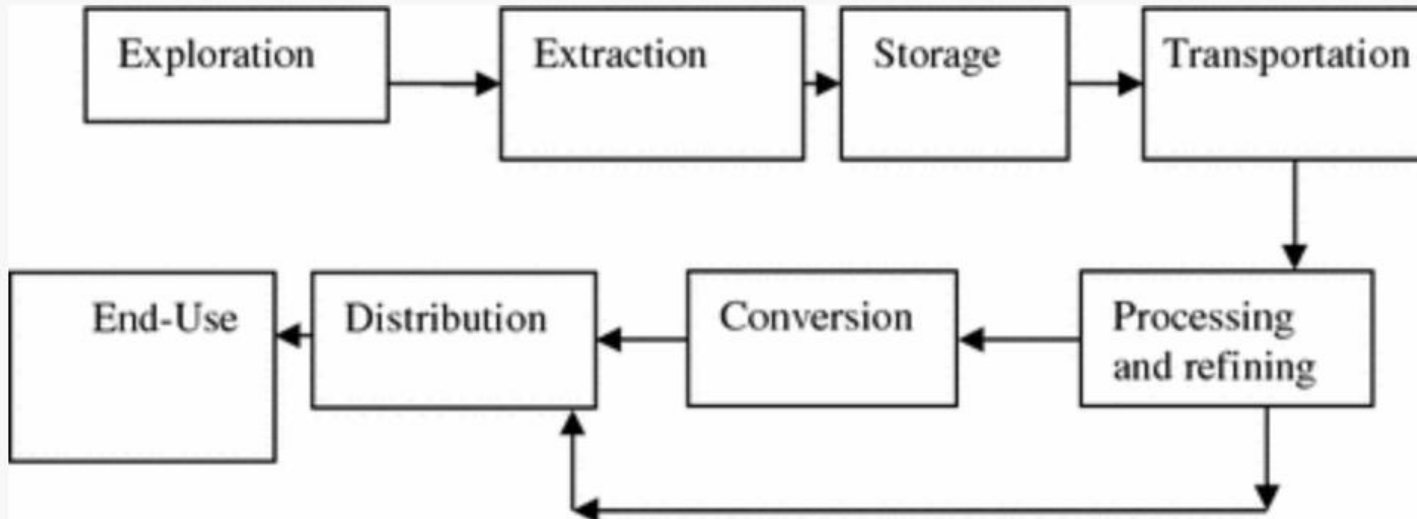


Fig. 8.1

Non-renewable energy supply system. Source Codoni et al. ([1985](#))



勘探（Exploration）、开采（Extraction）、储存（Storage）、运输（Transportation）、加工炼化（Processing and Refining）、转化（Conversion）、分配（Distribution）、终端使用（End-use）

任何一个环节受到冲击都会短期影响化石燃料的价格波动。

# Hotelling模型

能源供给理论核心·能源经济学硕士课程

# 一、研究背景

- 20世纪初工业化加速 → 化石能源需求激增
- 主流经济学未考虑资源有限性
- 1931年，哈罗德·霍特林 (Harold Hotelling) 发表了开创性论文《可竭资源的经济学》 (The Economics of Exhaustible Resources)，首次将严格的动态优化方法应用于资源开采问题。他的目标是回答一个规范性问题：“在竞争性市场中，稀缺资源的开采速率和价格应如何随时间变化才能实现社会福利（或资源所有者利润）最大化？”
- Hotelling 的结论表明，资源的稀缺性并不必然导致其价格暴涨或开采枯竭，而是会遵循一条可预测的路径。

## 二、模型假设

**研究目的：** 建立可耗竭资源（exhaustible resources）在时间维度上的最优开采与定价理论框架；

**方法创新：** 首次将动态最优化（dynamic optimization）和贴现收益最大化引入资源问题；

**模型假设：**

- 市场结构：完全竞争（所有资源供应者都是价格接受者，市场不存在垄断、寡头或价格操纵行为）；
- 固定储量 $S_0$ ，无勘探，无技术进步；
- 边际成本  $c$  为常数，与产量和时间无关；
- 所有决策者以贴现率  $r$ （等于市场利率）进行跨期比较；
- 资源所有者具有完全信息，能够理性预期未来价格走势；

# 三、模型推导

- 目标函数与约束 (Objective and Constraint)

资源所有者的优化问题为:

$$\max_{q(t)} \int_0^T [p(t) - c]q(t)e^{-rt} dt$$

subject to:

$$\dot{S}(t) = -q(t), \quad S(0) = S_0, \quad S(T) = 0$$

其中:

储量变化遵循:

$$\dot{S}(t) = -q(t), \quad S(0) = S_0, \quad S(T) = 0$$

即每期开采量都会减少剩余储量。

# 三、模型推导

- 均衡与跨期条件（Intertemporal Equilibrium Condition）

在最优条件下：

- 边际收益现值恒定：

$$[p(t) - c]e^{-rt} = \text{constant}$$

- 或者，资源净价格（稀缺租金）随时间以利率  $r$  增长：

$$\frac{d[p(t) - c]}{dt} = r[p(t) - c]$$

这即为 **Hotelling 法则 (Hotelling Rule)** 。

# 三、模型推导

分类	具体假设	经济意义
市场结构	完全竞争	企业无法影响市场价格
储量特征	固定储量、不可再生	开采总量受资源约束
成本结构	边际成本固定	无规模经济或技术变动
时间贴现	利率固定，跨期比较稳定	资源价值随贴现率增长
信息结构	完全信息、理性预期	决策基于未来价格预期
目标函数	最大化现值利润	权衡当前与未来收益
均衡条件	稀缺租金增长率 = 利率	跨期最优配置条件

## 四、经济含义

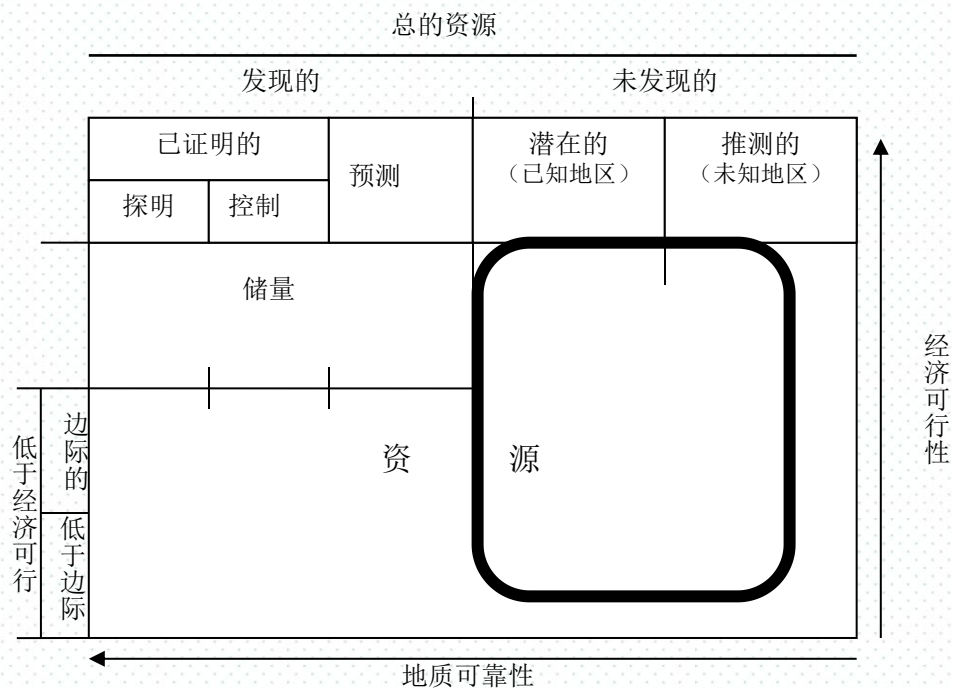
为了使总现值最大化，必须确保持有资源（作为资产）的收益率等于市场贴现率  $r$ 。持有资源的收益即为价格增长率。

- 稀缺租金 = 用户成本 = 未来收益影子价格
- 资源净价格以利率  $r$  增长
- 如果价格增长率低于  $r$ ，理性所有者会加速开采，将收益投资于更高收益的市场；如果价格增长率高于  $r$ ，所有者会囤积资源，等待价格更快上涨。只有当价格增长率恰好等于  $r$  时，所有者才会在任何时期都愿意开采。

# 五、模型拓展

## 一、能源开采的成本边际原则

经济可行性和地质可靠性两个方面的要求，使得资源勘探必须在两者之间做出权衡。



## 五、模型拓展

随着现有可采资源的逐步耗竭，开采深度和技术难度不断上升，边际采掘成本（**marginal extraction cost**）逐渐提高；与此同时，市场需求推动能源价格上升，使得原本高成本的资源也逐步具有经济开采可行性。

在这种情形下，价格可分解为：

$$P_t = C_t^{marginal} + U_t$$

其中：

- “ $C_t^{marginal}$ ：边际开采成本；”
- “ $U_t$ ：用户成本（User Cost），即为未来稀缺性支付的隐含代价。”

若考虑**勘探与技术进步**，模型进一步扩展为：

$$P_t = C_t^{marginal} + C_t^{exploration} + U_t$$

其中  $C_t^{exploration}$  为发现新资源的边际勘探成本，反映资源更新与替代行为的长期效应。

# 五、模型拓展

## 2、模型与现实的差别

### 1) 开采的投资约束

现实中，能源开采需大规模资本投入且具有不可逆性（**irreversibility**），导致初期投资规模通常偏小。由于产能调整存在时滞（**time lag**），资源供给对价格变动的响应较慢。

### 2) 不确定性（**Uncertainty**）

可耗竭资源的未来收益面临多重不确定性，包括未来市场价格、勘探与技术开发成本、新资源发现概率以及能源政策与碳约束的制度不确定性。因此，资源所有者的最优开采路径将偏离 **Hotelling** 理论中的确定性平滑路径。

### 3) 市场失灵与市场扭曲（**Market Imperfections**）

在现实中，资源市场常受多种扭曲影响，而，**Hotelling** 模型的“稀缺租金 = 利率 × 净价”关系仅在完全竞争与完全信息假设下成立。

## 六、主要参考文献

- Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39(2): 137–175.
- Dasgupta, P. & Heal, G. (1979). *Economic Theory and Exhaustible Resources*. Cambridge University Press.
- Solow, R. M. (1974). Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies*, 41: 29–45.
- Stiglitz, J. E. (1976). Monopoly and the Rate of Extraction of Exhaustible Resources. *American Economic Review*, 66(4): 655–661.
- Tietenberg, T., & Lewis, L. (2018). *Environmental and Natural Resource Economics* (11th Ed.). Pearson Education.

# Backstop模型：技术进步对稀缺性的约束

- 提出背景
  - Hotelling规则预测不可再生资源的净价格将永远上涨。但现实中，技术进步可以创造替代能源。如果石油价格涨得太高，人们会转向太阳能、核能或风能。**Backstop**模型就是为了将这种技术因素纳入Hotelling框架。
  - **Backstop**模型的概念主要由著名的经济学家、诺贝尔经济学奖得主 威廉·诺德豪斯(William D. Nordhaus)提出和系统阐述。该模型将资源经济学从单纯的 Hotelling 路径分析（价格无限上涨）中解放出来，使其更具现实意义，并为后续的气候变化和能源转型模型（包括诺德豪斯著名的 **DICE** 模型）奠定了基础。

# Backstop模型：技术进步对稀缺性的约束

- 模型假设
  - Hotelling基础假设成立：存在一个有限存量的不可再生资源。
  - Backstop资源存在：存在一种完美的替代资源或技术（如核聚变、高效太阳能）。
  - 无限供应与恒定成本：Backstop资源的供应量是无限的，且可以以恒定的边际成本 $c_{\text{backstop}}$ 进行生产或提供。
  - 无跳跃需求：市场需求是平稳连续的。

# Backstop模型：技术进步对稀缺性的约束

## 模型推导与核心规则

### A. 临界价格（价格天花板）

- **Hotelling 规则：**  $P_{\text{net},t} = (P_t - c_t) = P_{\text{net},0}e^{rt}$ （净价格随时间指数增长）。
- **价格约束：** 当不可再生资源的市场价格  $P_t$  达到或超过 Backstop 资源的边际成本  $c_{\text{backstop}}$  时，消费者将完全转向 Backstop 资源。
- **Backstop 规则：** Backstop 资源的成本  $c_{\text{backstop}}$  是不可再生资源价格的长期上限 (Terminal Price  $P_T$ )。

$$P^* = c_{\text{backstop}}$$

### B. 能源过渡路径

Backstop 模型描述的能源过渡分为三个阶段：

1. **稀缺期：**  $P_t < P^*$ 。Backstop 资源尚未进入市场。不可再生资源的价格和开采量严格遵循 Hotelling 规则。
2. **过渡期：**  $P_t = P^*$ 。不可再生资源价格被固定在  $P^*$ 。市场上，不可再生资源和 Backstop 资源 **共同满足需求**。此时，不可再生资源的开采速度不再由 Hotelling 规则决定，而是由剩余需求决定，开采速度急剧下降。
3. **Backstop 期：** 不可再生资源被完全耗尽或被永久保留。Backstop 资源成为唯一的能源来源，价格稳定在  $P^*$ 。

# Backstop模型：技术进步对稀缺性的约束

- 经济含义：

1. 资源价格的长期上限（价格天花板）

- 经济洞察：这意味着资源的长期稀缺性最终不是由地下的物理存量决定，而是由技术成本决定。一旦现有资源的价格超过替代技术成本，稀缺性问题就被技术解决了。
- 政策启示：政府和企业 在制定长期能源预测和投资决策时，应将 **Backstop**技术的成本视为一个关键的价格锚点。

2. 能源系统的根本性过渡（技术锁定与解除）

- 含义：**Backstop**模型描绘了人类能源使用从稀缺性燃料时代向无限供应时代的结构性转变。它预示着在某一点 **T**（切换日期），经济将从依赖不可再生资源转向主要依赖**Backstop**资源。
- 经济洞察：这种过渡不会是平稳的，当价格达到**P\***时，不可再生资源的开采速度会急剧下降，因为需求被技术替代品锁定。这解释了技术突破如何解除对旧有资源和技术的路径依赖。

# Backstop模型：技术进步对稀缺性的约束

## 3. 稀缺价值的终结与边际成本定价

- 含义：在Backstop时代，能源市场的定价机制发生了根本性变化。一旦Backstop资源成为主导，由于其供应无限且边际成本 $c_{\text{backstop}}$  恒定，能源价格将稳定在  $P^*$  。
- 经济洞察：在此阶段，Hotelling 租金（资源的稀缺价值）将归零。能源的价格将只反映其边际生产成本 $c_{\text{backstop}}$ ，而不再包含未来稀缺性的机会成本。这标志着对地球物理资源依赖的经济时代的终结。

## 4. 衡量技术进步的价值

- 含义：Backstop模型的价值在于量化了技术进步对社会经济的潜在贡献。任何能够降低Backstop成本 $c_{\text{backstop}}$ 的研发或创新，都将直接降低能源价格的长期上限。
- 经济洞察：创新能够通过降低  $P^*$  来抵消Hotelling规则带来的价格上涨压力，从而带来巨大的社会福利。因此，政府对基础能源技术（如核聚变、储能、高效光伏）的研发投入，可以视为对整个经济体系的保险，以避免资源耗尽带来的经济冲击。

# Hartwick规则：不可再生资源开采与代际公平

- 提出背景

Hotelling 模型关注私人开采的效率，但没有解决代际公平问题。Solow (1974) 和 Hartwick (1977) 提出了一个问题：一个依赖消耗不可再生资源的经济体，如何实现持续不变的人均消费水平（弱可持续性）？

弱可持续性的核心观点是：实现可持续发展，要求一个经济体必须将其总资本存量（**Total Capital Stock**）维持在或增加到足以维持人均福祉（**Welfare**）的水平。

# Hartwick规则：不可再生资源开采与代际公平

- 核心假设
  - 总资本恒定：经济增长理论的基本假设是，总资本（人造资本 $K$  + 自然资本 $S$ ）维持不变是实现可持续性的关键。
  - 资本完美替代（弱可持续性）：假设自然资本 $S$ （不可再生资源）和人造资本 $K$ （机器、基础设施、教育等）在生产中是可以相互替代的。
  - Hotelling规则成立：资源开采遵循Hotelling 最优路径，确保了效率。

# Hartwick规则：不可再生资源开采与代际公平

## 模型推导与核心规则

### A. Hartwick 规则 (Hartwick's Rule)

Hartwick 规则是实现弱可持续性的充要条件：

$$\Delta K + \Delta S = 0$$

$$\frac{dK}{dt} = -\frac{dS}{dt}$$

- $\Delta K$ ：人造资本的净变化量（净投资）。
- $\Delta S$ ：自然资本（资源）的净变化量（开采量的负值）。

### B. 规则的货币化表达（投资 Hotelling 租金）

通过 Hotelling 规则的货币化，Hartwick 规则可以表述为：

一个经济体必须将其从不可再生资源开采中获得的全部资源租金（即资源的净价格  $P_{\text{net}}$ ）全额重新投资于人造资本。

$$\text{净投资} = \text{稀缺租金} \times \text{开采量}$$

$$\frac{dK}{dt} = P_{\text{net}} \cdot q_t$$

- **逻辑**：开采资源 ( $q_t$ ) 导致自然资本 ( $S$ ) 减少，其价值损失为  $P_{\text{net}} \cdot q_t$ 。为了保持总价值不变，必须进行等量的投资  $\frac{dK}{dt}$  来增加人造资本  $K$ 。

# Hartwick规则：不可再生资源开采与代际公平

- 经济含义

- 弱可持续性：该规则是弱可持续性的最经典体现。它允许自然资本被消耗，只要这种消耗能够被人造资本的积累完美补偿。
- 跨代公平的策略：**Hartwick** 规则提供了一种实现代际公平的政策指引：当代人开采资源获得收益，但不能将全部收益消费掉，必须将稀缺租金部分留给后代作为人造资本（教育、基础设施、技术），以确保后代拥有与当代人相同的生产能力和消费机会。
- 主权财富基金：许多资源丰富的国家（如挪威、中东国家）设立的主权财富基金（**Sovereign Wealth Funds**）正是 **Hartwick** 规则在政策上的直接应用，目的是将石油收入转化为永久的金融或人造资本。

# Hartwick规则：不可再生资源开采与代际公平

为了更深刻地理解弱可持续性，必须将其与对立的**强可持续性**进行对比：

特征	弱可持续性 (Weak Sustainability)	强可持续性 (Strong Sustainability)
资本关系	<b>可替代性</b> (Natural Capital is Substitutable)	<b>不可替代性</b> (Natural Capital is Non-substitutable)
资本目标	保持 <b>总资本的价值</b> 不变 ( $\Delta K + \Delta S \geq 0$ )	保持 <b>关键的自然资本</b> 存量不变 ( $\Delta S_{\text{critical}} \geq 0$ )
关注焦点	<b>代际财富</b> 的公平分配。	<b>生态系统</b> 的完整性和弹性 (如生物多样性、气候稳定)。
政策倾向	允许消耗资源，但要求 <b>再投资</b> (例如，挪威的主权基金)。	严格限制资源消耗和污染排放 (例如，设定不可逾越的 <b>生态红线</b> )。

# 三个模型的总结与对比

## 一、三者的基本内容

模型/理论	核心贡献	关键假设	主要结论
Hotelling 模型 (1931)	提出了可耗竭资源的跨期最优开采规律	资源有限、市场完全竞争、无技术变迁、无替代能源	资源净价 (价格-开采成本) 随时间按利率增长: <b>Hotelling rule</b>
Backstop 模型 (Nordhaus, 1973/1979)	引入可再生替代技术 (backstop technology), 解决 Hotelling 模型中 “价格无限上升” 困境	存在一种成本恒定的替代能源 (如太阳能) 可无限供给	资源价格随稀缺性上升至替代技术的边际成本上限时停止上升; 出现转折点 (switch point)
Hartwick 规则 (Hartwick, 1977)	提出可持续发展条件: 资源租金投资于人造资本可保持恒定消费	完全竞争、无人口增长、无技术进步、单一资源经济	若资源租金 (rents) 全部投资于资本积累, 则总资本 (自然资本+人造资本) 不变, 可实现恒定消费路径 (“Hartwick’s rule of sustainability”)

# 三个模型的总结与对比

## 二、三者的逻辑关系与发展脉络

### 1. Hotelling → Backstop: 扩展了开采路径的终点条件

- Hotelling 模型只考虑有限资源，无外生替代，因此最终必然“枯竭”。
- Backstop 模型加入了“无限供给但高成本”的替代能源，使得价格不再无限上升，而是在**某一临界价格转向使用替代能源**。
- 两者的核心联系在于价格路径：Hotelling 轨迹决定了何时达到 Backstop 成本。

数学上，当  $p_t = p_B$  (Backstop 成本) 时，资源使用停止，系统进入可持续替代阶段。

### 2. Hotelling → Hartwick: 扩展了社会最优问题

- Hotelling 模型关注**个体利润最大化或社会最优资源配置**；
- Hartwick 将其延伸为**跨代福利最大化问题**，即如何配置资源租金使社会长期福利不下降；
- 若将 Hotelling 模型中的稀缺租金投资于资本积累，则总财富恒定，实现\*\*“弱可持续性”\*\*。

### 3. Backstop → Hartwick: 连接“可持续路径”的实现机制

- Backstop 模型提供了技术层面的可持续机制（替代能源的引入）；
- Hartwick 规则提供了资本积累层面的可持续机制（租金再投资）；
- 二者结合体现了“技术替代 + 投资转化”双重路径：
  - **短期**：通过租金投资维持消费；
  - **长期**：通过替代能源实现能源永续供应。

# 主要参考文献

- Nordhaus, W. D., “The Allocation of Energy Resources”, *Brookings Papers on Economic Activity* (1973), Vol. 4, No. 3, pp. 529-576.
- Aviel Verbruggen, “Backstop technology: model keystone or energy systems transition guide”, *Journal of Natural Resources Policy Research* (2015).
- Hartwick, J. M., “Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources”, *American Economic Review* 67 (5), 972-974 (1977).
- Withagen C., Asheim G. B., Characterizing sustainability: The converse of Hartwick’s rule”, *Journal of Economic Dynamics and Control* (1997)

# 哈伯特峰值理论

“资源并不会在物理意义上突然枯竭，而是在人类经济活动中逐渐‘失去可采性’。当资源的边际收益下降到等于机会成本时，我们所看到的——便是‘峰值’。”——  
M. King Hubbert (1956)。

## 课堂问题：

1. 为什么资源产量会呈“钟形”？
2. 峰值出现是否意味着能源危机？
3. 科技与政策如何推迟峰值？

## • 教学目标提示：

1. 从物理规律到经济解释：Logistic曲线的含义
2. 从美国经验到中国能源转型：实证与政策
3. 从静态模型到动态经济反馈：理论拓展

# 哈伯特峰值理论

## （一）研究背景

20世纪中期，随着二战后全球工业化加速，石油与煤炭等化石燃料的需求急剧增长。美国作为当时世界上最大的石油生产国和消费国，出现了两个明显趋势：

- 1、石油发现量逐年下降（declining discovery rate）；
- 2、开采量持续上升（increasing production rate）。

这引发了一个核心问题：如果资源储量有限、发现速率下降，那么产量是否也会出现峰值（peak）并最终下降？

在这一问题的推动下，美国地质学家 M. King Hubbert 于1956年在美国石油学会（API）会议上发表著名报告：《Nuclear Energy and the Fossil Fuels》，系统提出了“资源生产高峰理论（Hubbert Peak Theory）”。

# 哈伯特峰值理论

## （二）理论提出

Hubbert通过分析美国本土48州的石油发现与生产数据，发现两者都遵循类似的S形累积增长曲线（logistic curve）。

他由此提出假设：“在一个封闭的资源系统中，资源的累积产量遵循Logistic函数，其导数——即每期的开采量——呈钟形分布。

数学表达为：

$$\frac{dQ}{dt} = rQ \left(1 - \frac{Q}{Q_{max}}\right)$$

其中：

- $Q(t)$ : 累积产量 (Cumulative Production)
- $Q_{max}$ : 最终可采储量 (Ultimately Recoverable Resources, URR)
- $r$ : 增长率 (Growth rate of production)

求解得：

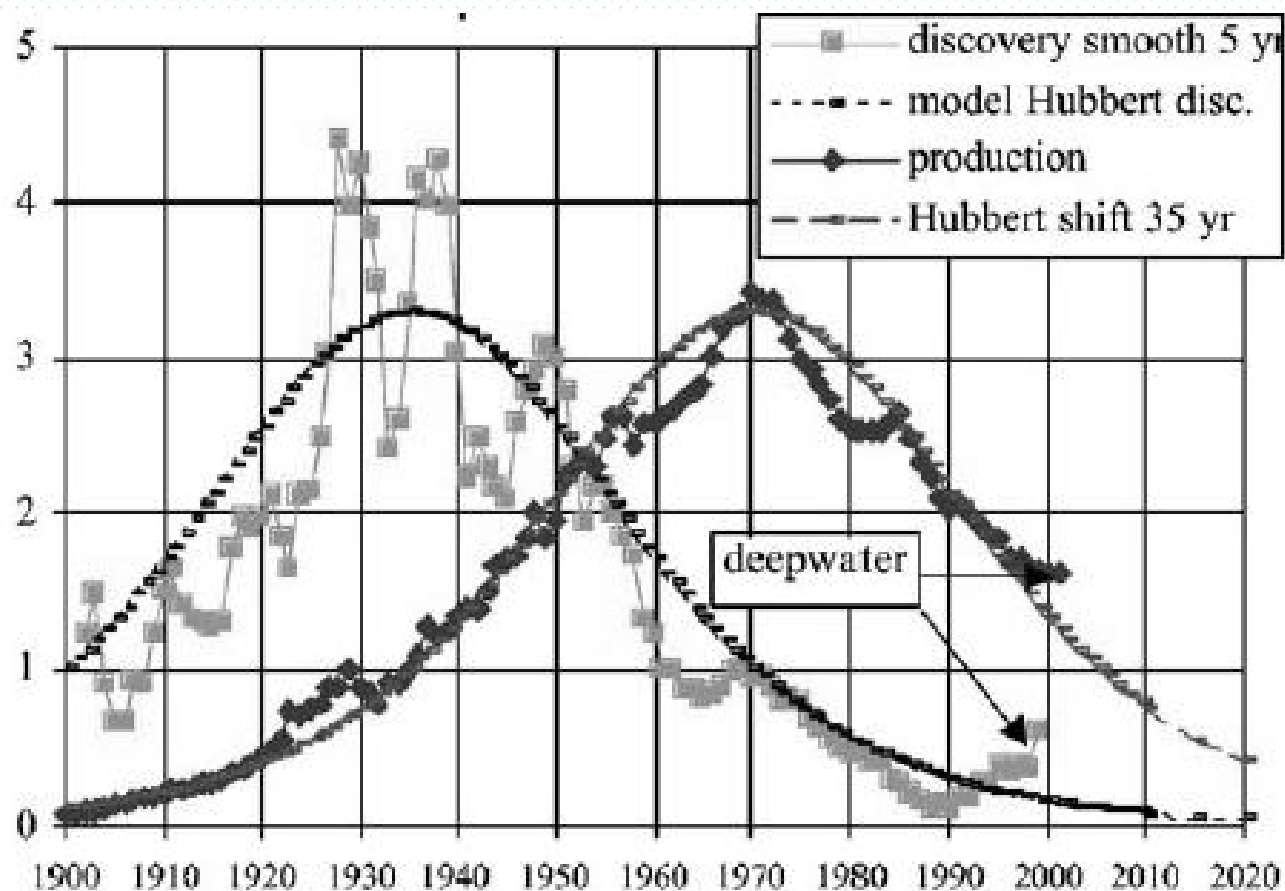
$$Q(t) = \frac{Q_{max}}{1 + e^{-r(t-t_{max})}}, \quad P(t) = \frac{rQ_{max}e^{-r(t-t_{max})}}{(1 + e^{-r(t-t_{max})})^2}$$

由此，Hubbert得出结论：

在给定资源总量与技术条件下，资源产量将在某一时点  $t_{max}$  达到峰值，之后因耗竭而不可避免地下降。

# 哈伯特峰值理论

- 该模型得到了美国石油生产历史的印证



# 哈伯特峰值理论

- 信息效应：勘探技术进步和经验积累使发现率上升。
- 耗竭效应：优质资源枯竭，剩余资源勘探难度上升。
- 两种效应共同作用，使产量曲线呈钟形分布。

Hubbert 模型的核心方程为：

$$\frac{dQ}{dt} = rQ \left(1 - \frac{Q}{Q_{\max}}\right)$$

其中：

- 第一项  $rQ$ ：体现**信息效应**（随时间积累的经验 and 规模效应）；
- 第二项  $(1 - Q/Q_{\max})$ ：体现**耗竭效应**（资源约束的反作用）。

因此：

- 在开采早期， $Q$  很小， $(1 - Q/Q_{\max}) \approx 1$ ，信息效应主导 → 产量指数式增长；
- 随着  $Q$  接近  $Q_{\max}/2$ ，两种效应相互抵消 → 达到峰值；
- 当  $Q \rightarrow Q_{\max}$ ，耗竭效应完全占主导 → 产量下降。

参考文献：Hubbert (1956); Rehl & Friedrich (2006); Tao & Li (2007); Lin & Liu (2010)

# 哈伯特峰值理论

## 二、中国煤炭生产的哈伯特高峰

一般认为，石油生产的哈伯特高峰是由石油的物理性质决定的：即随着油田生产规模扩大，地下压力不断下降，石油产量在经过一个高峰平台会后会逐渐下降。

较少会有人意识到哈伯特生产高峰适用于所有矿产品的生产，只是对于固体类矿产而言，经济因素所起的作用更强：在一定的资源储量条件下，当产能达到一定水平后，企业会减少产能扩大和安全方面的投资，甚至停止投资来回收成本，致使产量不断下降，甚至矿难频发，最终被关闭。

# 哈伯特峰值理论

Lin and Liu (2010)研究了中国煤炭生产的哈伯特高峰问题。

表3—1 中国经济增长速度假定

年份	高(%)	中(%)	低(%)
2007—2010	10	9	8
2011—2015	9	8	7
2015—2020	8	7	6
2021—2030	7	6	5

# 哈伯特峰值理论

- 表3—2 基于中国经济增长速度的煤炭需求预测

年	煤炭需求（亿吨）		
	低	中	高
2010	29.40	30.10	31.00
2015	34.70	37.00	39.40
2020	40.10	44.30	48.90
2025	43.50	49.90	57.00
2030	48.40	57.50	68.00

# 哈伯特峰值理论

随着中国经济发展和煤炭需求量增长，中国的煤炭进出品格局正在悄悄发生变化：从2003年起，中国煤炭出口逐渐下降而进口却在逐渐上升。中国政府也采取多方面的措施来限制煤炭出口：如逐步取消煤炭出口退税。

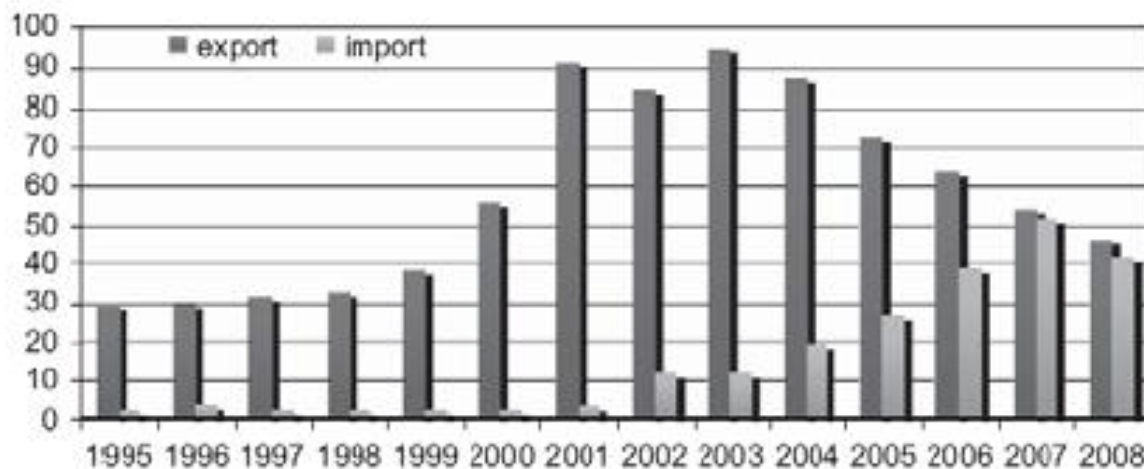


图 3-5 中国煤炭进出口变化情况

# 哈伯特峰值理论

Logistic 增长模型采用对历史数据的模拟来预测未来的产量：

$$Q = \frac{URR}{1 + e^{-(t-t_{\max})/w}}$$

其中Q是累积的煤炭产量，URR最终可回采资源量，t为时间年， $t_{\max}$ 煤炭生产高峰年，w用来最小化观测值和拟合值误差方差的参数。

该模型的不足之处在于，在长期一些经济因素，如价格对产量并不起作用，它忽略了经济周期、政策变动和其他因素的影响而成为一个纯粹的理论产量模型。

# 哈伯特峰值理论

- 另外，Gaussian曲线也可以用于模拟煤炭生产的历史数据并用于预测未来的煤炭产量。

$$P = -dQ / dt = [Q_{\infty} / (S(2p)^{1/2})] \exp[-(t_{\max} - t)^2 / (2S^2)]$$

- 其中P是每年的煤炭生产量；Q是未开发的可用资源量；是当时累积的煤炭生产量，即最终可回采的煤炭资源量（URR）。

# 哈伯特峰值理论

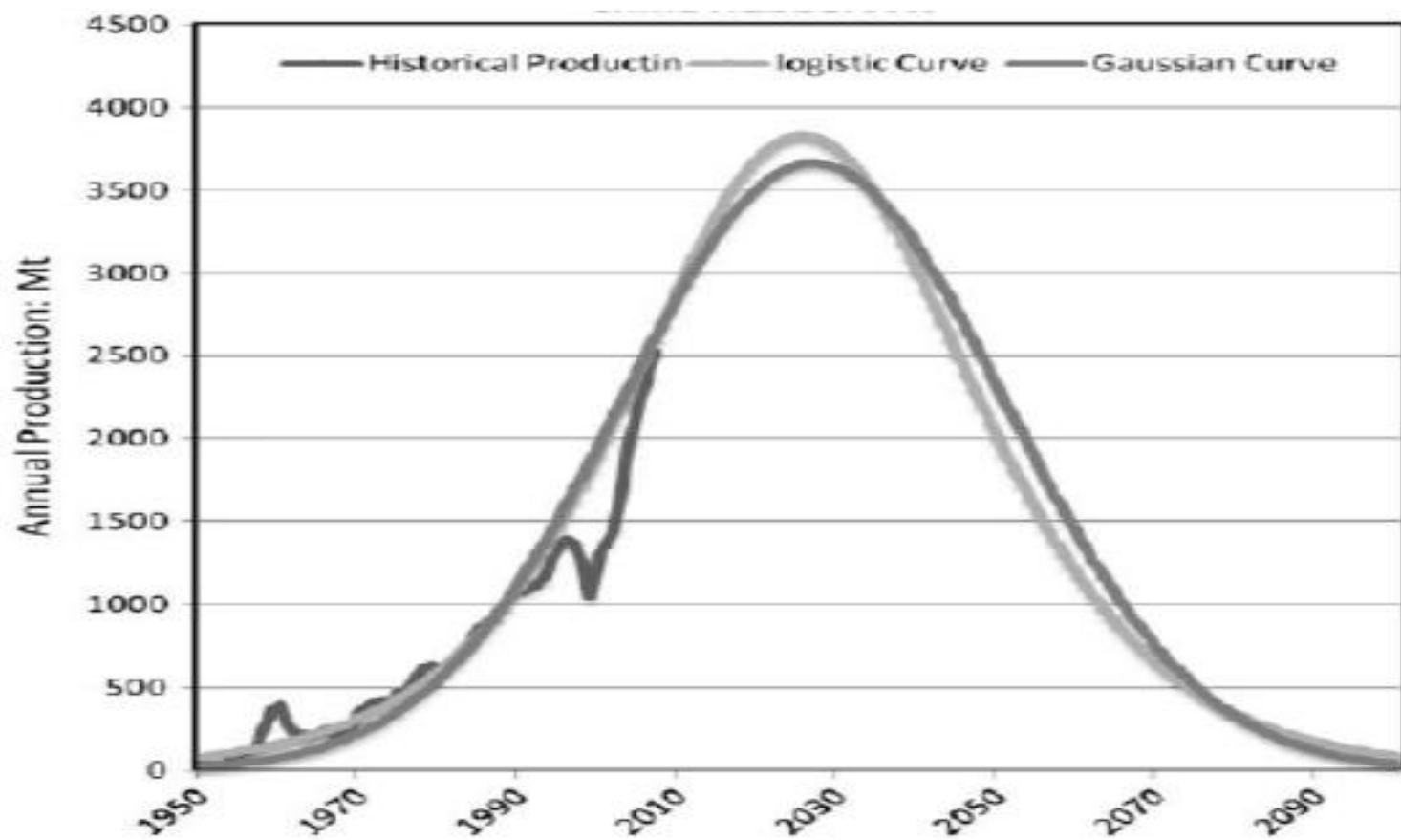


图 3—6 拟合的中国煤炭生产高峰图

# 哈伯特峰值理论

- 描述了logistic模型和Gaussian模型拟合的中国煤炭生产高峰趋势和中国实际煤炭产量的对比图
- 这与Tao and Li (2007)使用STELLA模型估计的结果基本一致

表 3-3 三个模型结果对比

模型	Logistic增长模型	Gaussian模型	STELLA模型		
			Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
资源量 (亿吨)	1886	1886	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
峰值年	2025	2027	2033	2029	2027
峰值产量 (亿吨)	38.30	36.65	33.39	37.84	42.29

# 哈伯特峰值理论

• 表3—4 生产峰值对资源量敏感度分析

模型	资源量（亿吨）	2086	1986	1886	1786	1686	1145
Logistic增长模型	峰值产量（亿吨）	41.31	39.85	38.30	37.08	36.35	30.46
	峰值年	2027	2026	2025	2024	2023	2016
Gaussian模型	峰值产量（亿吨）	38.51	37.58	36.65	35.72	34.79	30.10
	峰值年	2029	2028	2027	2026	2025	2017

# 哈伯特峰值理论拓展

- 哈伯特曲线与绿色GDP

哈伯特曲线（Hubbert Curve）是一个描述可耗竭资源产量随时间变化的动态模型。它告诉我们：化石能源的生产与消耗遵循“上升—峰值—下降”的规律。

而经济系统的增长（GDP）离不开能源投入（尤其是石油、煤炭、天然气等）。因此，Hubbert 曲线本质上提供了经济增长的**物理约束边界**。也就是说：**能源供给→生产能力→GDP增长潜力**。当能源生产进入下降阶段，经济增长也面临物理瓶颈。

这为“绿色GDP核算”提供了一个重要的理论基础——经济增长必须考虑资源耗竭与环境成本。Hubbert模型描述了“能源供给侧的物理约束”，而绿色GDP核算是在“经济核算侧”体现这种约束的结果。

# 哈伯特峰值理论拓展

## 1 传统GDP核算 (Conventional GDP)

$$GDP = C + I + G + (X - M)$$

它仅反映**市场化的经济活动**，而不计入：

- 自然资源消耗（如煤、油、气的枯竭）；
- 环境退化（如污染、碳排放导致的损失）。

## 2 绿色GDP核算 (Green GDP)

在绿色GDP体系中，应扣除资源和环境成本：

$$GDP_{green} = GDP_{market} - D_{resource} - D_{environment}$$

其中：

- $D_{resource}$ ：资源耗竭损失 (Depletion of Natural Resources) ；
- $D_{environment}$ ：环境退化成本 (Environmental Degradation) 。

这就使得：

当资源进入“Hubbert曲线”下降阶段时，资源耗竭项  $D_{resource}$  将迅速上升，从而导致绿色GDP低于传统GDP。

# 哈伯特峰值理论拓展

可以建立如下扩展形式:

$$GDP_{green}(t) = A(t)K(t)^\alpha L(t)^{1-\alpha} - \lambda_1 D_{resource}(t) - \lambda_2 D_{environment}(t)$$

其中:

- $A(t)$ : 全要素生产率 (包含能源效率) ;
- $D_{resource}(t)$ : 可由Hubbert模型计算的资源耗竭损失;
- $D_{environment}(t)$ : 与能源消费相关的排放与污染损失;
- $\lambda_1, \lambda_2$ : 资源与环境成本权重。

当  $P(t)$  下降、 $D_{resource}$  上升时,  $GDP_{green}$  将提前出现峰值,  
即所谓的“**绿色GDP峰值早于能源产量峰值**”现象 (Green GDP Peak Earlier) 。

## 经济学启示

- 1、资源峰值  $\neq$  经济终点: 若技术进步或能源替代有效, 绿色GDP可在能源峰值后保持增长。
- 2、能源效率与结构转型是核心变量: 能源强度下降 (能耗/GDP下降) 可缓冲资源耗竭的负效应。
- 3、绿色核算反映“真实增长”: 只有将资源与环境损失内部化, 才能反映经济可持续性。

# 哈伯特峰值理论拓展

Hubbert曲线刻画了能源资源的“物理峰值”，而绿色GDP核算则揭示了经济增长的“可持续峰值”。

二者共同说明：

- 经济增长不能脱离资源基础；
- 真正的“绿色增长”必须在能量约束下进行；
- 当资源耗竭与环境退化成本被计入GDP时，经济系统将自然趋向新的稳态平衡。

# 哈伯特峰值理论拓展

## 参考文献

- Hubbert, M. K. (1956). Nuclear Energy and the Fossil Fuels. Shell Development Company. Presented before the American Petroleum Institute, San Antonio, Texas.
- Cleveland, C. J., Costanza, R., Hall, C. A. S., & Kaufmann, R. K. (1984). Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective. *Science*, 225(4665), 890–897. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.225.4665.890>.
- Cleveland, C. J., Kaufmann, R. K., & Stern, D. I. (2000). Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*, 32(2), 301–317. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00113-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00113-5).

# 总结

Hotelling 模型、Backstop 模型、Hartwick 规则与 Hubbert 曲线（Hubbert peak theory）在能源经济学中存在深层的逻辑关联——它们从经济学—物理学—可持续性三个维度描述了同一问题：

“有限的化石能源在时间维度上将如何被开采、定价、替代和维持社会的可持续发展？”

## 一、理论起点不同但核心问题一致

理论/模型	研究出发点	核心问题	学科属性
Hotelling (1931)	经济理性假设：资源所有者在时间上如何最优地分配有限资源	“稀缺资源的价格与开采路径如何随时间演化？”	微观经济学/动态最优化
Hubbert (1956)	地质与物理约束：资源储量有限、生产速率遵循物理规律	“石油产量何时达到峰值？下降速度如何？”	地质学/系统动力学
Backstop (Nordhaus 1973)	技术替代：引入可再生能源的经济可行性	“稀缺资源价格上升到何时会触发替代能源？”	能源经济学/动态一般均衡
Hartwick (1977)	跨代公平：如何在资源枯竭下维持消费不下降	“稀缺资源收益如何再投资以实现可持续发展？”	资源经济学/可持续发展经济学

# Gordon–Schaefer模型

- 请同学们自行拓展学习。