

胡燕 冯连勇 李锐 齐超 著



ENERGY RETURN ON
INVESTMENT

EROI

能源回报
理论与方法



社会科学文献出版社
SOCIAL SCIENCES ACADEMIC PRESS (CHINA)

胡燕 冯连勇 李锐 齐超 著

ENERGY RETURN ON
INVESTMENT

EROI

能源回报
理论与方法

图书在版编目(CIP)数据

能源回报理论与方法/胡燕等著. —北京:社会科学文献出版社, 2015. 1

ISBN 978 - 7 - 5097 - 5154 - 1

I. ①能… II. ①胡… III. ①能源经济 - 研究 - 中国
IV. ①F426. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 262322 号

能源回报理论与方法



著 者 / 胡 燕 编 著: 胡连勇 李 锐 齐 超

出 版 人 / 谢寿光

项目统筹 / 恽 薇

责任编辑 / 林 尧 杨丽霞

出 版 / 社会科学文献出版社·经济与管理出版分社(010)59367226

地址: 北京市北三环中路甲 29 号院华龙大厦 邮编: 100029

网址: www.ssap.com.cn

发 行 / 市场营销中心 (010) 59367081 59367090

读者服务中心 (010) 59367028

印 装 / 三河市尚艺印装有限公司

规 格 / 开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 12.5 字 数: 144 千字

版 次 / 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

书 号 / ISBN 978 - 7 - 5097 - 5154 - 1

定 价 / 59.00 元

本书如有破损、缺页、装订错误, 请与本社读者服务中心联系更换

 版权所有 翻印必究

本书得到国家自然科学基金委项目（编号：71373285/71303258）
和国家社科基金重大项目（编号：11&ZD164/13&ZD159）支持。

前 言

煤炭、石油和天然气都是由数百万年甚至是数亿年前的生物遗体经过复杂的物理化学过程转化而成的。众所周知，这些丰富的不可再生资源在社会经济发展中起着基础作用，但正是其自身体现出的“有限性”以及在人类发展中体现出的“生命周期性”，使得它们的短缺必然是全人类面临的重大问题。关于能源问题及其解决方案的研究角度有很多，比如能源峰值的角度、气候变化的角度、生态环境的角度等。近些年，能源回报（Energy Return on Investment, EROI）作为一种新的角度也出现在研究领域和公众视野中。EROI 是指在某一能源生产过程中能源产出与相同边界下由于生产造成的能源消耗量的比值。随着开采难度的增加，能源生产过程中的能源消耗量也不断增长，真正为经济社会使用的能源量应当是能源产出量减去为产出而消耗的能源量，即净能源量。

有很多人认为，全球化石能源的已知量很丰富，并且受到技术进步、投资增加以及价格上涨等因素的影响，供应量会继续增加，未来完全能够满足全球的需求，短缺仅存在于局部地区或者受短期的非正常因素影响，如战争爆发、极端天气产生、运输通道受阻等。但进入 21 世纪后，常规化石能源产量状况使得我们不得不思考未来的供应问题，我们应当转变传统的观念，认识到以

石油为代表的化石能源峰值即将到来，世界将在相当长的时期内处于供应的自然短缺状态，直到新能源能够大规模替代现有能源为止。此外，碳排放成为目前国际社会最为关注和重要的话题之一，也是未来制约非常规油气开发的重要因素之一，传统以物理产出量为关注重点并以追求经济效益最大化为评价目标而忽略碳排放等环境问题的油气评价方法难以满足新形势及背景下的非常规油气开发需求。与之伴随的问题还有经济发展，在拥有大量廉价能源的时代，以货币为衡量单位，以追求经济效益最大化为目标的经济的发展理论无可厚非，但进入化石能源短缺的时代后，经济发展应高度重视能源的基础作用。几乎所有产品的生产均与能源有关，这里面也包括能源自身的生产，如勘探、开发、生产、运输，它同样需要能源的投入。随着能源生产设备先进程度的提高，与之相关的能源消耗也会逐渐增长，可以说剥离能源消耗而单纯追求能源产量升高的评价方法是片面的。

探寻一种能够显现能源生产本质价值的、反映碳排放等环境约束的、测度对经济社会影响的评价方法尤为重要和必要。EROI 从一种新的角度告诉我们能源的基础性作用，告诉我们能源回报量、净能源的贡献量、生态环境约束的影响。完整地计算 EROI 值的方法不仅包含了能源生产所需要的必要投入，比如直接投入和间接投入，还囊括了劳动力投入、环境治理的投入等所有投入。EROI 值能够综合反映净能源供应、技术进步、气候变化等情况。例如，非常规油气勘探开发过程中的碳排放作为一种负产出间接影响 EROI 值，也就是说为了防止或减少该过程中的碳排放，额外采取相关技术或措施而引起的投入增加和产出变化，也会影响 EROI 值的计算结果。近十年来，EROI 方法在国外得到了快速发展

并应用于各种能源生产的评价中，结果显示：常规化石能源 EROI 值基本高于非常规化石能源，常规化石能源 EROI 值总体呈下降趋势，新能源 EROI 值大部分处于 1 : 1 左右。但是，截至目前，EROI 值的计算还未形成标准的、统一的体系，计算结果也多种多样、难以比较。虽然我国研究者有过计算，但并没有交代清楚计算边界、数据选取、计算方式等内容，尤其是有关我国能源生产的 EROI 值分析计算基本属于空白。因此，本书作者介绍了 EROI 的理论体系、计算方法，并以不同能源对象为例详细说明了计算过程，最后提出关于 EROI 未来的研究方向，目的是希望有兴趣的读者能够对 EROI 有所认识、有所研究、有所发展！本书尽可能将参考的文献都标注出来，但也难免有疏漏之处和不当之处，敬请谅解。

目 录

第一章 绪论	001
第一节 什么是能源回报	001
第二节 能源回报的研究情况	015
第二章 能源回报与净能源	023
第一节 净能源	023
第二节 能源回报与净能源	028
第三章 能源回报与化石能源峰值	031
第一节 化石能源峰值	031
第二节 化石能源峰值在我国的不同观点	041
第三节 能源回报与化石能源峰值	052
第四章 能源回报的测算方法	062
第一节 计算边界	062
第二节 计算公式与计算方法	066
第三节 关键要素	068
第四节 建立标准	076

第五章 能源回报在我国能源领域的应用	080
第一节 大庆油田的能源回报	080
第二节 生物柴油的能源回报	095
第三节 化石能源的能源回报	103
第六章 我国化石能源能源回报对经济增长的影响	122
第一节 理论基础	122
第二节 化石能源供应净量的预测	127
第三节 化石能源供应净量对经济增长潜力的预测	131
第七章 能源回报的未来研究方向	141
第八章 生物物理经济学初探	151
第一节 经济学流派与能源作用	151
第二节 新古典主义经济学的主要问题	155
第三节 生物物理经济学理论初探	164

第一章 绪论

第一节 什么是能源回报

一 起源与定义

1955 年, Cottrell^[1] 提出“能源净产量”的概念, 也被称为“能源盈余”, 即能源产出与能源投入之差, 他认为这才是人类社会发
展所能真正利用的能源。可以说, 能源总产量的一部分需要通过经济
系统返回能源生产过程中, 其余部分才能真正进入如工业、农业、
服务业等行业的消耗中。后来, 此理论与生态学中的最适捕食理论
和单位付出收获量的概念相结合就形成了 EROI 的基本雏形。1973
年, 美国生态学家 Odum^[2] 首次涉及净能源的概念。1974 年, 这个概
念得到美国《联邦非核能源研究和发展法案》的认可和引用, 随之
引发了研究热潮。1975 年, Gilliland^[3] 在 *Science* 上发表文章, 分析
了 EROI 方法的优越性并认为它是净能源评价中最适合的方法之一。
1984 年, Cleveland 等^[4] 同样在 *Science* 上发表文章, 阐述了 EROI 方
法对社会发展和经济增长研究的重要意义, 正式提出了 EROI (En-
ergy Return on Investment) 的概念, 即“能源回报”。然而, 受到国

际石油市场和价格处于较稳定状态以及相关市场繁荣发展的影响，EROI 方法在随后的 20 年内并没有得到应有的重视。近年来，随着金融危机的爆发、国际石油市场环境的不断变化、石油价格的较大波动，净能源以及 EROI 方法又重新得到西方学术界以及政府的关注。

“总量”和“净量”并不是 EROI 所特有的，一些指标如收入和利润就是从总量和净量角度的描述，往往利润指标更具决策意义，但是能源领域“净量”的研究并不多见。相对于国内来说，EROI 和净能源领域研究已在国外得到不断发展。目前，搜索 2000 年以后的国外学术期刊文章，以 EROI 和 Net Energy 为关键词的文章已经多达 16 万篇^[5]。其中，多数 EROI 方法都是伴随着净能源分析出现的，已被广泛用于石油、天然气等领域的研究中，同时也应用于生物燃料、核能、乙醇、木材燃料和其他替代能源的能效评价中。在这些文章中，研究者根据不同的研究内容和目标不断改变对 EROI 的表述，如 Energy Return on Investment、Energy Return on Energy Investment、Energy Return on Water Investment 等。

本书综合上述定义形式将 EROI 归纳简述为能源生产过程中能源产出和能源投入（或消耗）的比值，英文全称为 Energy Return on Investment。某边界下能源生产的 EROI 值越高，表明为经济活动所创造的“功”就越多。目前，我国对 EROI 的研究也渐渐出现，在期刊报纸中将其翻译成“能源投资回报率”，本书认为译成“能源投入回报值”或“能源回报”更能反映出 EROI 的本质，即从能源角度出发，而非财务角度，是比值，而非百分率。

二 示意图

能源回报研究的整个边界是能源资源的生产至使用过程，既

可以是静态的时点分析，也可以是动态的整个时间段上的分析。据此下述两种分析示意图，以便更好地理解 EROI 值的计算过程。

（一）静态示意图

如图 1-1 所示， E_{gross} 为石油探明储量； $E_{\text{purchased}}$ 为直接能源投入和间接能源投入总和，其中直接能源投入是指以能源形式表现的投入（如石油、风力、电力等），间接能源投入包括资本支出、原材料等货币或非能源的实物形式的投入； E_{self} 为能源生产中的自消耗； E_{net} 为净能源量。

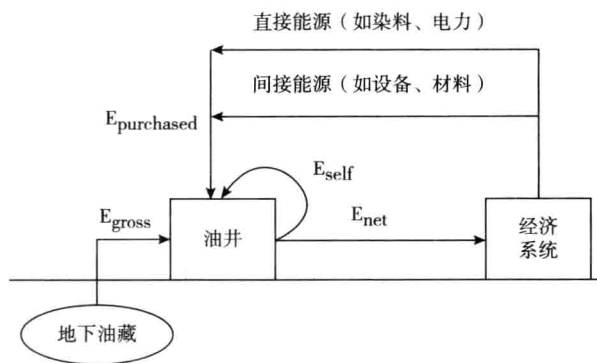


图 1-1 生产实践中的 EROI

资料来源：The Encyclopedia of Earth, [http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_\(EROI\)](http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_(EROI))。

图 1-2 表示用 Odum 能量系统语言描述的 EROI。方框为系统边界；圆圈代表流入系统的外部驱动力，如太阳能；边界内的方框表示生产者，也就是界定的能源生产的某一过程；水滴状表示能源储存库，能源产出全部储存到这里；在整个边界范围内也会伴随热耗失。

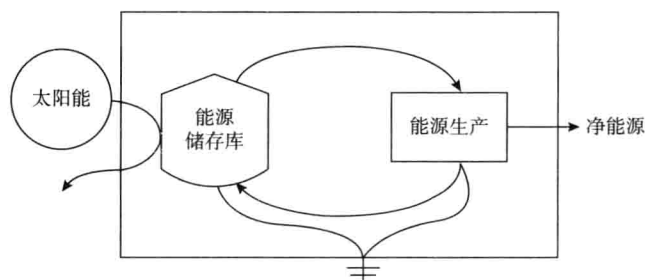


图 1-2 用 Odum 能量系统语言描述的 EROI

(二) 动态示意图

在进行 EROI 测算之前需确定项目起点与终点，其中整个时间段又可分为不同阶段，如建设阶段、实施阶段、退出阶段（见图 1-3）。整个时间轴上方表示能源的产出量，分为两部分：自我利用的能量量和用于经济社会的能量量；时间轴下方表示能源投入量或能源成本。

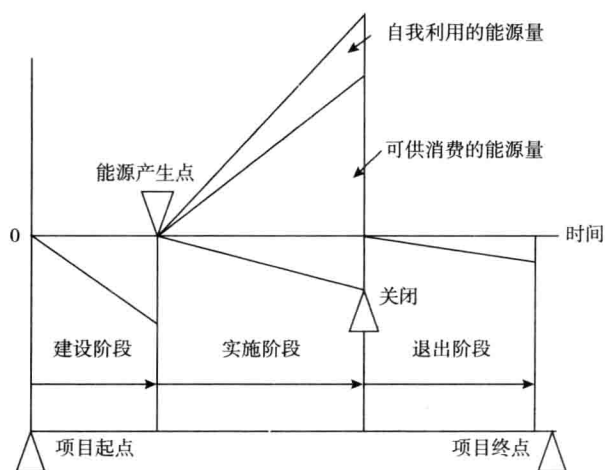


图 1-3 整个项目过程中的 EROI

资料来源：The Encyclopedia of Earth, [http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_\(EROI\)_for_wind_energy](http://www.eoearth.org/article/Energy_return_on_investment_(EROI)_for_wind_energy)。

三 优势与作用

(一) 比较能源生产价值的大小

EROI 作为一种新的衡量指标,可应用在不同能源技术的比选上。EROI 值的表示形式为 $X:1$, 其中 1 表示投入量, X 代表不同能源生产过程的产出量。例如,石油生产汽油的 EROI 值为 $10:1 \sim 20:1$, 玉米生产乙醇的 EROI 值低于 $2:1$ ^[5-8]。EROI 值可以明确表示出,在投入相等的情况下,前者的产出是后者的 5 倍,因此后者的生产价值远远不如前者的生产价值。

(二) 评价能源质量的变动情况

能源质量是衡量单位热当量的能源转变为产品或服务的能力^[9]。在条件相同的情况下,EROI 值越高,说明用于生产该种能源所需的能源量越少,为经济所提供的产出就越多。例如,加拿大油砂的原油探明储量约为 1700 亿桶,但其原油开采的 EROI 值仅约为 $3:1$ ^[10], 因此最终能为经济活动所利用的净能源仅为 1700 亿桶的 $3/4$ 。

(三) 说明能源耗竭与技术进步之间的关系

一直以来,很多反对石油峰值的专家学者认为技术进步可以解决未来的能源问题^[11, 12]。但是,历年来 EROI 值下降的趋势揭示了技术进步并不能阻止能源的耗竭。虽然技术的发展往往能够促使生产成本下降,但近年来全球油气 EROI 值却仍处于下降趋势

中，这说明能源产出的速度并没有赶超技术进步的速度，或者说能源耗竭的速度远大于技术进步的速度。

（四）提供了一个比较不同新能源生产技术的综合指标

EROI 从多方位多角度为决策者、政策制定者提供了一个较为综合的指标。以往的研究中有的关注了产量、成本、质量，有的从经济角度进行评价，有的从能源流角度进行分析^[6]，更有从温室气体排放的角度进行研究。尤其是目前，温室气体排放的大小更是大部分研究者普遍采用的指标^[13]。EROI 将上述分析角度进行结合，利用统一的计算单位更加全面地衡量了新能源生产技术。

四 与类似指标比较

（一）EROI 的类似指标

目前，我国有几类能源效率指标^[14]，如能源强度、单位产品能耗等。这些指标的计算方法都是投入与产出的比值，只是分子与分母所考虑的角度不同。

1. 能源强度

能源强度定义为单位 GDP 能耗，即生产一单位的 GDP 所消耗的能源，该指标一般以吨标准煤/万元作为计量单位。计算公式表示为：

$$\text{能源强度} = \frac{\text{能源消耗总量}}{\text{GDP}}$$

式中，GDP 以货币单位进行计量，能源消耗总量通过热值法和发电煤耗法计算。其中，热值法是指能源所包含的热量，不考

虑品位高低；发电煤耗法是单独将电力按照发电的平均煤耗折合成标煤，热力和其他种类能源仍按照热值法来换算^[15]。这一指标衡量的是一个国家、地区或行业的总体能源效率水平，能源强度越低，单位产值能耗就越低。

2. 单位产品能耗

单位产品能耗定义为某一时期内生产某种产品所消耗的各种能源总量与该产品产量之比。其中，产品的能耗包括热耗（如燃料）和电耗（如电力），以热当量法和发电煤耗法计算。产品产量具有不同单位，例如，吨钢综合能耗、吨炼铁能耗单位为万吨标准煤/吨等。计算公式表示为：

$$\text{单位产品能耗} = \frac{\text{能源消耗总量}}{\text{产品总量（钢铁、水泥、原煤等）}}$$

该指标用于衡量某个行业或部门的技术装备和管理水平以及能源消耗量，测度其经营状况和生产成本的高低，并根据该指标淘汰落后设备和工艺，达到提高能源利用效率、减少单位产品能耗的目的；也用于具有相同生产结构或者相同产品的企业或国家间的比较，目前我国这一指标与国际水平比较还存在明显差距^[16]。

3. 中间环节效率和终端利用效率

中间环节效率定义为在生产过程中除去加工、转换和储运过程中的损失、自用能源后的能源与一次能源消费量之比。分子和分母均以能源单位进行计量，结果以百分比表示。该指标衡量项目或生产过程中损失的与自用的能源量，反映能源耗散以及能源利用情况。例如，1989年我国能源中间环节效率为72.4%，2007年为68.4%，中间环节能源利用效率大幅降低。计算公式

表示为：

$$\text{中间环节效率} = 1 - \frac{\text{中间环节损失和自用能源}}{\text{一次能源消费量}}$$

终端利用效率定义为终端用户得到的有用能源量与过程开始输入的能源量之比，分子和分母均以能源单位进行计量，结果以百分比表示。这一指标更多地应用在热能工程等工业上，与技术进步及生产设备密切相关。计算公式表示为：

$$\text{终端利用效率} = \frac{\text{输入社会的有用能源量}}{\text{投入的能源量}}$$

中间环节效率和终端利用效率这两个指标本身存在重复性，因为终端利用效率有时包含了中间环节损失的能源，但是由于数据的可获得性较差，只能忽略数据的缺陷而得出近似结果。

4. 能源加工转换率

能源加工转换效率定义为一定时期内能源经过加工、转换后，产出的各种能源产品的数量与同期内投入加工、转换的各种能源数量的比率。其中，分子和分母单位相同，结果无单位。计算公式表示为：

$$\begin{aligned}\text{能源加工转换率} &= \frac{\text{能源加工转换净产出量}}{\text{能源加工转换净投入量}} \times 100\% \\ &= (1 - \text{能源加工转换损失率}) \times 100\%\end{aligned}$$

该指标已经成为衡量我国宏观经济的重要指标之一，用于观察能源加工转换装置、生产工艺的先进与落后以及管理水平的高低，定量研究加工转换过程中的能源投入与产出之间的数量关系，为能源平衡提供依据^[17]。

5. 生产率

简单地讲，生产率就是产出与投入的比率，其中包括劳动生