

引用格式: 苗玲, 冯连勇, 马跃. 碳中和背景下的能源投入和碳投入回报评价研究[J]. 世界石油工业, 2024, 31(2): 102-108.
MIAO L, FENG L Y, MA Y. Evaluation studies of EROI and CROI in the context of carbon neutrality[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(2): 102-108.

碳中和背景下能源投入和碳投入回报评价研究

苗玲, 冯连勇, 马跃

(中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249)

摘要: 能源投入回报(EROI)和碳投入回报(CROI)是评价能源效率和碳效率的重要指标。梳理EROI和CROI的理论发展、评价方法和应用领域, 归纳二者的相似性和关联性, 提出未来的研究发展方向。对比发现, EROI和CROI同为效率指标, 分别以系统内的能源流和二氧化碳流为基础; EROI与CROI在数值代表含义、评价结果对系统边界的敏感性和存在最小阈值等方面有很多相似点与关联性。在碳中和目标和能源转型背景下, 传统能源与新能源项目耦合后的EROI评价、分子级EROI测算及EROI影响经济发展的背后机理, 不同类型碳中和技术的CROI评价、最小CROI以及项目的EROI、CROI和净现值(NPV)多维评价等主题, 成为未来重点研究方向。

关键词: 能源转型; 碳中和; 能源投入回报; 碳投入回报; 评价方法

中图分类号: TE-9

文献标识码: A

文章编号: 1006-0030(2024)02-0102-007 **DOI:** 10.20114/j.issn.1006-0030.20230714001

Evaluation studies of EROI and CROI in the context of carbon neutrality

MIAO Ling, FENG Lianyong, MA Yue

(School of Economics and Management, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: Energy return on investment (EROI) and carbon return on investment (CROI) are important indicators for evaluating energy and carbon efficiency. Summarize the theoretical development, evaluation methods and application fields of EROI and CROI, inducing their similarities and correlations, the direction of future research direction is proposed. By comparison, it is found that EROI and CROI are both efficiency indicators based on energy flow and carbon dioxide flow in the system respectively; EROI and CROI have a lot of similarities and correlations in terms of the meaning of numerical representations, the sensitivity of the evaluation results to the system boundary, and the existence of minimum thresholds. In the context of carbon neutrality and energy transition, EROI evaluation after coupling traditional energy and new energy projects, the measurement of EROI at molecular level and the mechanism behind the influence of EROI on economic development, CROI evaluation and minimum CROI of different types of carbon neutrality technologies, and the multi-dimensional evaluation of EROI, CROI, and net present value (NPV) of the projects, etc., have become the key research directions in the future.

Keywords: energy transition; carbon neutrality; energy return on investment; carbon return on investment; evaluation method

0 引言

碳中和与能源转型是当前世界各国正在积极追求的目标。在实现碳中和与能源转型的进程中, 如何提升碳减排效率和能源效率, 成为全球关注的焦点问题。为保障碳中和目标的如期实现和能源转型的平稳过渡, 能源经济评价应加强构建覆盖二氧化碳相关产业链和能源产业链的效益评价体系, 形

成具有碳中和时代特色的技术评价标准。

传统的技术经济评价方法主要关注经济系统中的现金流, 以净现值(Net Present Value, NPV)和内部收益率(Internal Rate of Return, IRR)等指标作为衡量是否可投资的判断标准, 在评价过程中存在2点不足: (1)现金流的估算难以回避价格的预估问题, 而实际生产活动中的价格是高度不确定的, 尤其是石油、天然气等能源资源的价格极易受

收稿日期: 2023-07-14

修回日期: 2023-08-27

基金项目: 国家自然科学基金“基于净能源与碳投入回报的CO₂技术经济评价方法研究”(72274212); 国家自然科学基金“能源结构转型背景下中国能源系统净能源产出分析及其对经济发展的影响研究”(71874202)

第一作者: 苗玲(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事能源经济研究工作。E-mail: miaoling1014@163.com

通信作者: 冯连勇(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事能源经济研究工作。E-mail: fenglyenergy@163.com

到外部因素的扰动,且波动幅度较大,这加大了传统技术经济评价的有效性与难度;(2)传统的技术经济评价方法偏向于追求经济效益,忽略了产生的环境影响以及能源效益,而油气资源开发的能源效益和产生的碳排在碳中和目标下的重要性往往不亚于经济性指标。

能源投入回报(Energy Return on Investment, EROI)与碳投入回报(Carbon Return on Investment, CROI)评价分别基于系统的能源流和二氧化碳流,测度能源投入产出效率和碳减排效率,可以作为传统技术经济评价方法的有效补充和重要拓展,改善传统技术经济评价方法对现金流的过度依赖性。同时,将能源投入产出效率、碳减排效率与经济指标相结合,可较全面度量评价对象的综合效益,多层次考虑碳中和时代下的能源评价需求。本文研究了EROI和CROI评价的理论、方法和应用,分析了EROI和CROI的联系,并根据现有研究提出二者的未来研究方向。

1 EROI与CROI评价简介

1.1 EROI评价

EROI是衡量能源生产过程中能源产出与投入关系的指标。闫君等^[1]对早期EROI评价的发展做了较为全面的梳理。随着研究的深入,近年来EROI评价在内涵、核算方法和应用层面上又有新的拓展,如Moriarty和Honnery^[2]对绿色EROI评价的研究,丰富了碳中和目标下EROI评价的内涵;Chen等^[3]进一步发展了基于焓值的EROI评价方法;EROI评价在应用上的拓展主要是针对氢能、风电和光电等非化石能源项目^[4]。

根据系统边界和层级,EROI被划分为标准EROI、终端用户EROI、扩展EROI和社会EROI^[5]:(1)标准EROI表示能源总产出与付出的直接和间接投入能源的比值,系统边界通常只包含能源离开开采设施;(2)终端用户EROI的系统边界涵盖了能源开采、炼化和运输相关成本;(3)扩展EROI既考虑了获取能源所需要消耗的能量,又考虑了使用能源所需的能量;(4)社会EROI是一个国家或社会所有能源种类的总体EROI,理论上指的是通过能源所获得的所有收益与为此所付出的所有能源成本的比值,目前,社会EROI仅有理论推导,还没有量化研究。系统边界和层级的明确对于EROI评价

至关重要,只有当评价对象的EROI处于同一层级时,才具备可比性,各层级EROI的边界见图1。

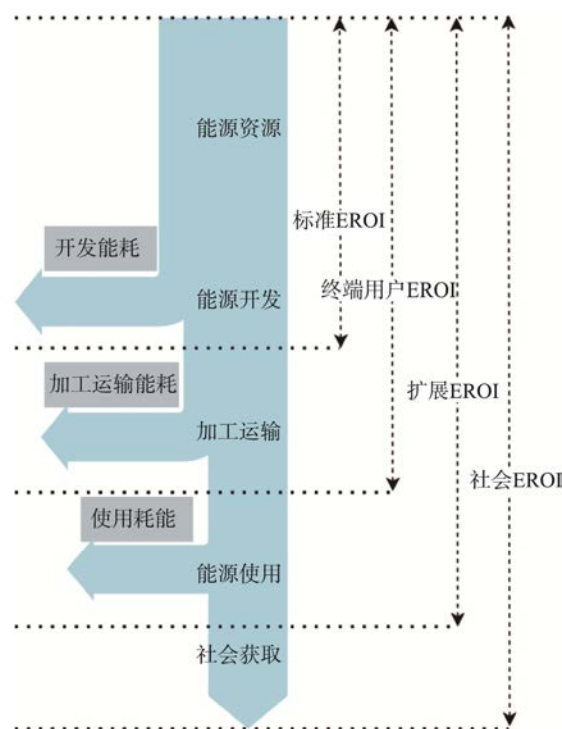


图1 各层级EROI及对应边界
Fig.1 EROI of each level and the corresponding boundary

EROI值的数学表达式为

$$EROI = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (1)$$

式中： E_{out} 和 E_{in} 分别为能源产出和能源投入。

EROI值与净能源的数学关系为

$$N = G(1 - \frac{1}{EROI}) \quad (2)$$

式中： N 和 G 分别为净能源和总能源。

EROI在实际量化过程中,重点在于系统边界内能源投入和能源产出的统计,主要有自上而下和自下而上2种方法:(1)自上而下方法通常是从宏观角度出发,适用于国家层面的EROI量化;(2)自下而上的方法较为微观,普通能源项目大多使用自下而上方法进行EROI量化。

1.2 CROI评价

Singh和Colosi^[6]于2021年提出CROI评价概念。广义上,CROI可指代碳捕集、利用与封存(CCUS)及其他与二氧化碳减排相关工艺中的二氧化碳总减排量与工艺过程排放量比值。在使用CROI评价的过程中,系统边界的清晰界定很重要,边界必

须包含对CROI有实质性影响的所有能量和物质流，最终反映为二氧化碳流^[7]。本文提供了一种针对CCUS技术的CROI评价边界（见图2）。CCUS技术离不开二氧化碳捕集和运输2个过程，但二氧化碳的最终去向区分了碳利用（CCU）、碳封存（CCS）、CCU和CCS的结合（主要是地质利用与封存的结合）。其中，CCU和CCS结合技术的CROI评价最复杂，此时系统中二氧化碳减排量不是单独的利用量、封存量或者二者简单加和，还需要考虑二氧化碳注入与系统内部二氧化碳回收等因素。

CROI评价的边界应根据二氧化碳的最终去向来选择，对于CCU技术来说，生产有用的产品需要消耗额外的能源，进一步产生碳排放；CCS技术最终是将二氧化碳封存，不会再涉及新的产物；CCU和CCS结合技术大多为二氧化碳地质利用与封存，消纳的二氧化碳是注入量，若考虑二氧化碳的回收因素，单程消纳的二氧化碳量应是注入量与回收量的差值。

CCU技术的CROI计算公式为

$$CROI_u = \frac{U_c}{\sum_{i=1}^n D_c^i + \sum_{i=1}^n I_c^i} \quad (3)$$

式中： $CROI_u$ 为系统边界内CCU技术的CROI值； U_c 为最终被利用的二氧化碳量； D_c^i 为CO₂的直接排放量； I_c^i 为CO₂的间接排放量； i 为系统内的技术环节， $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

CCS技术的CROI计算公式为

$$CROI_s = \frac{S_c}{\sum_{i=1}^n D_c^i + \sum_{i=1}^n I_c^i} \quad (4)$$

式中： $CROI_s$ 为系统边界内CCS技术的CROI值； S_c 为最终被封存的二氧化碳量。

CCU和CCS结合技术的CROI计算公式为

$$CROI_{s-u} = \frac{S_c + U_c}{\sum_{i=1}^n D_c^i + \sum_{i=1}^n I_c^i} \quad (5)$$

式中： $CROI_{s-u}$ 为CCU和CCS结合技术的CROI值。

计算得到CROI值用来检验CCUS技术的碳减排效率，以CCU和CCS结合技术为例，当 $CROI_{s-u} < 1$ 时，所评价项目尚未实现零碳排放或负碳排放，应继续改进；当 $CROI_{s-u} = 1$ 时，系统二氧化碳流入与流出刚好相等，可称为碳中和项目；当 $CROI_{s-u} > 1$ 时，表明所评价项目实现了负碳排放，项目的实行将有助于二氧化碳的消纳，属于应该大力发展的项目类型。

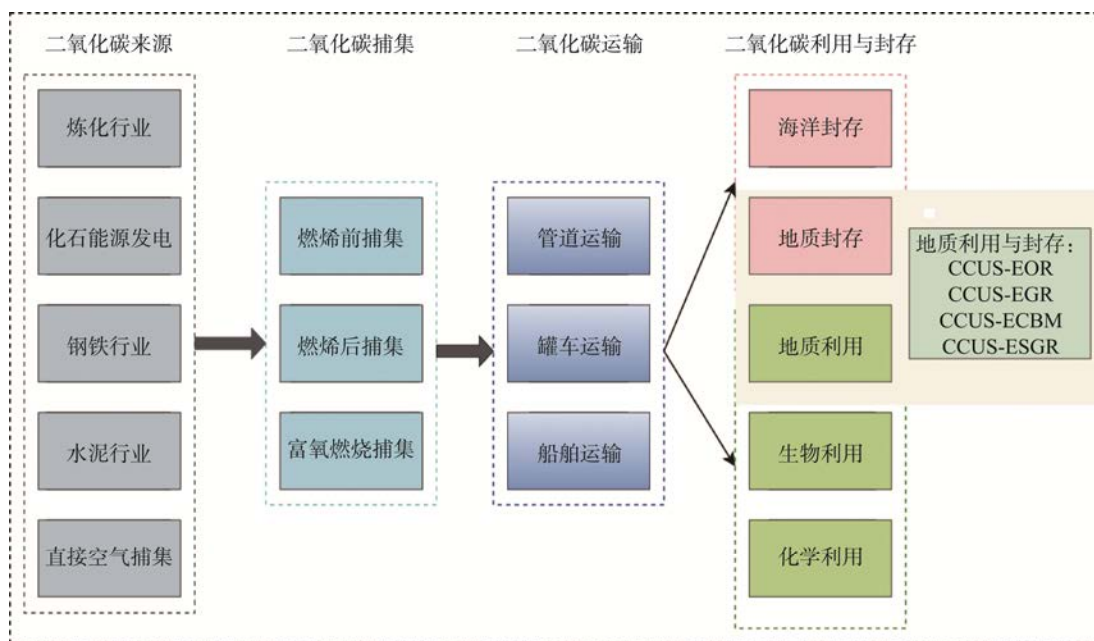


图2 CCUS技术的CROI评价边界

Fig.2 CROI evaluation boundary of CCUS technology

2 EROI与CROI评价应用

2.1 EROI评价应用领域

在化石能源长期占据能源地位绝对优势的社会发展进程中,EROI评价得以快速发展。近年来,在全球能源转型和碳中和时代背景下,EROI评价研究仍持续发展,基于国内外研究现状,EROI评价应用领域主要有3方面。

(1) EROI应用于能源效率评价,特别是在石油和天然气的开发阶段。目前对于EROI评价可大致分为以国家级EROI为代表的宏观评价和基于能源项目的微观评价。例如, Hu^[8]等以国家层面的EROI为评价指标,对中国化石燃料的EROI进行了全面分析。Huang^[9]等基于大庆油田和胜利油田项目层面的数据,评估其EROI。近年来,可再生能源的发展被寄予厚望,EROI也逐渐被引入用于可再生能源的评价^[10]。Feng等^[4]和Raugei等^[11]对风电和光伏发电分别使用EROI评价方法,以评估风能和光伏的净能源供应潜力。闫洪硕和冯连勇^[12]基于EROI评价方法,分析了光伏治沙模式的综合效益。

(2) 将EROI作为影响经济增长和社会发展的关键指标。Lambert等^[13]将EROI作为影响社会发展的关键指标,研究其与生活质量的关系,也有学者探讨由能源技术转型带来的EROI降低对经济的影响^[14]。Fabre和Adrien^[15]认为技术的EROI不是内在的,而是取决于经济的整体技术结构。有些学者呼吁计算可再生能源转型期间EROI值的演化,通过对EROI值的监测,避免突破经济发展的最小EROI阈值。然而,这种观点并不完全符合经济发展与EROI之间的关系。EROI能够对经济发展产生显著影响,而经济发展本身也能推动技术进步,进而改变EROI。

(3) 最小EROI值是学者关注的焦点。长期以来,经济的高速发展离不开可靠的能源保障。对于任意一种能源来说,随着EROI值的降低,总能源产出中的净能源产出将会出现缓慢下降,当EROI值低于临界值后,净能源产出在总一次能源供应中的占比将快速递减。根据净能源理论,在化石能源开采的过程中,往往优先开采的是质量好且开采难度低的资源,但随着开采力度的加大,投入的资源逐渐增加,导致EROI值会随着资源的不断开发而降低。

但经济的可持续增长和社会的平稳发展要求社会EROI不能低于某一阈值,这一阈值即为最小EROI。Fizaine和Court^[16]根据美国的能源强度,认为能够支撑美国经济增长的社会最小EROI值为11。社会EROI的下降可能源于能源生产水平的下降,这与能源峰值支持者们的观点一致,也有学者认为社会EROI下降是优质能源减少使得能源投入大幅提升的必然结果。当然,社会EROI值的下降可能是上述2种因素共同作用的结果。如果把社会EROI值作为经济可持续性发展的指标,就必须不惜一切代价防止其低于最小阈值。

EROI评价的核心思想是衡量净能源向社会转移的关系,目前学术界对于基于全生命周期的可再生能源EROI评价的研究较少,这也导致许多研究者认为,在现在的技术水平下,可再生能源的投入回报远远无法弥补化石能源下降产生的能源缺口,可再生能源EROI评价的系统边界问题在未来还需要深入研究。在全球能源转型的趋势下,生态成本、清洁能源的绿色溢价等问题不容忽视,有必要引入绿色EROI指标,对考虑了生态成本的能源投入产出回报进行重新评价。

2.2 EROI评价应用案例

EROI在化石能源和可再生能源评价上都有许多应用实例,基于已有评价基础,考虑环境投入因素,得到中国不同能源种类的EROI值分布区间^[12, 17](见图3)。

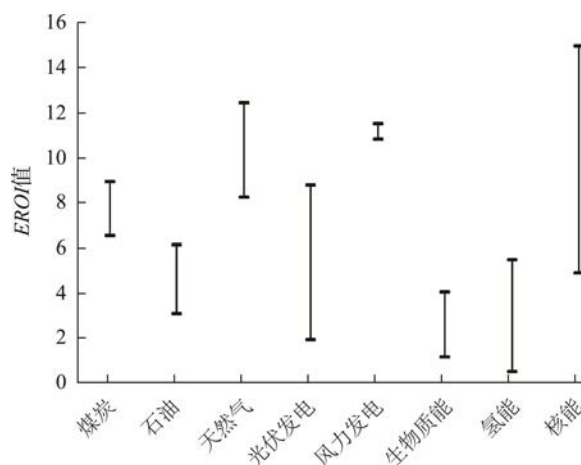


图3 不同能源种类的EROI值分布

Fig.3 EROI distribution of different types of energy

从图3可以看出,中国多种能源的 $EROI$ 分布在0~16之间,其中天然气、风力发电和核能的 $EROI$ 较其他能源更高,生物质能和氢能的 $EROI$ 偏低。综合当前的能源发展形势,中国仍应大力发展天然气、光伏、风电以及核能等过渡能源和新能源。

2.3 CROI评价应用领域

相比 $EROI$ 评价,CROI评价目前使用较少,研究成果过少,难以进行系统梳理。碳达峰、碳中和目标催生了新的技术,其中碳捕集、碳运输、碳利用与碳封存是实现二氧化碳减排的关键技术。CCUS技术虽然受到业界各领域专家的关注,但是在全球的推广并不是十分顺利。由于二氧化碳脱除、封存和利用等技术涉及的利益相关方关注点不相同,造成决策评价产生不少问题。根据现有文献的分析,目前对于CCUS评价的方法与准则并不成熟,评价大多侧重于技术、风险、经济、社会可接受度等其中某一方面,难以从根本上反映CCUS技术的碳减排效率。CROI评价则主要以CCUS等技术为主要评价对象,根据系统边界内二氧化碳流入与流出的关系,从根本上度量CCUS等碳中和技术体系的碳减排效率。

类比于最小 $EROI$ 值的确定,CCUS技术的最小CROI值对于政策的制定和技术的总体发展很有指导意义。确定最小CROI值,首先可以对CCUS技术做初步筛选,项目的最小CROI值一般综合考虑利益相关者对经济盈利性、能源效率的最低接受度。但宏观层面的最小CROI阈值确定相对复杂,因为宏观层面既要兼顾行业的整体发展水平,也要引导技术向前推进。宏观层面最小CROI值的确定,首先会更加关注社会需要追求的目标。例如,关注如何在全球2060年实现碳中和、全球升温幅度控制在 2°C 内目标下,确定社会所能接受的最小CROI阈值、CCUS技术的平均最小CROI值等。最小CROI值不是定值,随着技术逐步提升和社会进步呈现动态变化。

2.4 CROI评价应用案例

二氧化碳的化工利用是未来CCUS技术的重要方向之一,本文以二氧化碳作为原料生产醋酸为例,简单对其进行CROI评价。该生产工艺中,天然气既是原料投入,又作为燃料供能,CROI评价所用的数据参考相关实际生产数据以及项目实验数据(见表1)。

表1 二氧化碳生产醋酸相关数据

Tab.1 Relevant data of Acetic acid production from CO_2

项目名称	数值
生产规模	
醋酸/ $10^4 (\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	25
年操作小时/h	8 000
主要原材料用量	
天然气/ $10^4 (\text{Nm}^3\cdot\text{a}^{-1})$	5 334.92
二氧化碳/ $10^4 (\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	15
原料甲醇/ $10^4 (\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	13.5
公用工程及动力消耗	
一次水/ $10^4 (\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	8.83
电/ $10^4 (\text{kWh}\cdot\text{a}^{-1})$	5 803.11
蒸汽/ $10^4 (\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$	34.12

借助热化学分析软件HSC Chemistry、化工专用计算器,评估该醋酸生产工艺过程的二氧化碳排放情况,其中直接排放 $7.38\times 10^4 \text{ t}$,供能系统间接排放 $5.79\times 10^4 \text{ t}$ 。该生产工艺共投入 $15\times 10^4 \text{ t}$ 二氧化碳作为原料,实现 $1.83\times 10^4 \text{ t}$ 二氧化碳净利用,项目的CROI值为1.139,属于负碳技术项目,从碳减排效益角度考虑可大力发展该项目。

3 EROI与CROI的联系

3.1 相似性

$EROI$ 与CROI评价在应用领域上存在差异,但又有诸多相似之处。(1)从本质上看, $EROI$ 和CROI都是度量投入产出效率的相对值指标, $EROI$ 代表能源投入产出效率,CROI代表的是碳减排效率。(2)净能源理论中, $EROI$ 值越大表示能源投入产出回报率越高。CROI与之类似,CROI值越大表示对应CCUS项目的碳封存或碳利用效率越高。(3)对于能源投入产出回报,当 $EROI=1$ 时,代表能源项目的投入和产出达到盈亏平衡,净能源零产出;在碳投入回报领域,CROI=1相当于封存或利用的二氧化碳量与系统排放的二氧化碳量相等,意味着这是一个净零二氧化碳排放的系统。(4) $EROI$ 与CROI都对系统边界极为敏感,边界的错误划定可能导致错误评估所评价对象的真实能源价值和碳减排价值。(5) $EROI$ 与CROI都存在阈值,当 $EROI$ 低于最小阈值时,社会将进入经济停滞的状态,CROI低于最小阈值则会影

响碳中和目标的如期实现。

3.2 关联性

CROI的提出源于EROI,二者既存在差异性又有相似性,在未来的发展中可关联使用。项目决策中,单独的EROI评价会忽略项目的碳减排潜力,单独的CROI评价可能忽略项目的能源产出效率。有学者对直接空气捕集脱碳的4种候选技术进行了3次不同指标的比较^[18],3次比较研究所得的优劣性不一致,给技术选择者带来了困扰。以其中的碳工程技术为例,在利用单位二氧化碳所需的能量作为比较时,该技术的整体排名是最好的,但在深度脱碳的能源系统中进行CROI评价,该技术的整体排名则最差。这种差异表明,利用能源指标本身并不能提供足够多的信息来对脱碳模式进行更有意义的比较。在CCUS技术领域,用能源指标和CROI指标进行单独评价的结果可能会背道而驰,二者结合有助于决策者综合能源效率和碳减排效率,更理性地做出决策。

4 EROI与CROI评价的未来研究方向

EROI评价在理论、方法与应用方面都已形成体系,但在碳中和目标与能源转型的背景下,有必要拓展其评价方法与应用领域。CROI评价在学术界正处于起步阶段,本文仅粗浅探讨了理论与方法起源,未来还需在多个研究方向不断拓展CROI评价在理论、方法与应用等不同层面的深度和广度。

4.1 EROI评价的未来研究方向

(1) 传统能源与新能源项目耦合后的EROI评价研究。单独对传统化石能源或新能源项目进行EROI评价,结果大多显示为传统化石能源项目的EROI值高于新能源项目的EROI值。在能源转型的发展过程中,传统能源与新能源耦合协同发展的项目越来越多,有必要对其耦合项目进行EROI评价。

(2) 分子级EROI测算研究。目前学术界尚未出现相关研究,但分子级EROI测算在能源行业化工生产工艺过程中,能够起到初步评估工艺能效的作用。不同工艺过程的热力学熵、焓变化有所差异,导致同一化工产物在不同工艺下对能量的消耗各不相同。可以借助HSC Chemistry平台,在确定反应物与生成物的状态、反应条件后,根据输出的熵

变、焓变以及反应物与生成物所含能量变化等,进行分子级EROI测算。

(3) EROI影响经济发展的机理研究。已有EROI与人类生活质量、经济发展的研究中,都认为EROI的持续下降会降低人们的生活质量,阻碍经济高速发展,但是鲜有学者探究过EROI影响经济发展与人类生活质量的内在机理,深入研究该影响机理对于未来能源与经济的协同发展有重要的指导意义。

4.2 CROI评价的未来研究方向

(1) 不同类型碳中和技术的CROI评价研究。在众多碳中和技术中,二氧化碳的最终用途或去向有所差异,例如二氧化碳化工转化利用将产生新产物,而二氧化碳封存只是将二氧化碳做了转移,因此二氧化碳封存、利用或是二者结合所对应的CROI评价结果可能会有显著差异。目前已有的碳中和技术减排潜力不一,CROI的初步评价可用来快速判断碳中和技术的碳减排效率,为决策者提供决策支撑。

(2) 碳中和目标下社会所能接受的最小CROI值研究。中国CCUS等碳中和技术减排潜力巨大,但在碳中和目标驱动下,需要更精准地根据CCUS技术的规范性、减排贡献度设置不同情景,预估碳中和情景下CCUS技术理论上应该实现的最小CROI值。

4.3 项目的多维度评价

一项技术或项目的单维评价往往难以反映其综合效益。EROI和CROI评价能够从根本上评价项目或技术的能源投入产出效率和碳减排效率,此外项目本身的直观经济表现对于企业发展也至关重要,碳中和背景下项目的能源效率、碳减排效率以及经济效益3个维度的协同尤为重要。因此,将EROI、CROI和NPV等多维评价方法综合应用到能源项目或碳中和项目的评价中,研究其综合效益表现,是未来项目评价的重要方向。例如,对于二氧化碳驱油项目(CCUS-EOR),可通过EROI测度利用二氧化碳驱油后的能源投入回报,使用CROI评价该过程的碳减排效益和净碳减排情况,以NPV评价分析该项目的经济性。将评价结果与普通石油开采项目的能源投入回报、碳排放情况以及经济表现作对比,分析CCUS-EOR项目的竞争优势与碳中和贡献潜力,进而为碳中和背景下CCUS-EOR项目的发展提供参考。

5 结论

(1) EROI和CROI是能源转型和碳中和背景下同等重要的评价方法,二者在应用上有所差异,EROI评价主要应用于能源项目,考察能源流;CROI评价适用于碳减排项目,考察系统边界内的二氧化碳碳流。

(2) EROI和CROI有很多相似点与联系,二者均为效率指标,评价结果都能通过EROI与CROI数值直观反映评价对象优劣,评价结果对系统边界的敏感性很强。

(3) 碳中和目标和能源转型背景下,传统能源与新能源项目耦合后的EROI评价、分子级EROI测算以及EROI影响经济发展的机理等将成为未来的EROI研究重点;不同类型碳中和技术的CROI评价、碳中和目标下社会所能接受的最小CROI值等问题值得重点研究;同时,将EROI、CROI和NPV等多维评价方法综合应用到能源项目或碳中和项目的评价中,研究其综合效益表现,也是未来项目评价的重要方向。

参考文献:

- [1] 闫君, 冯连勇, 熊苡, 等. 净现值和能源投资回报方法比较研究[J]. 天然气与石油, 2020, 38(2): 126-130.
YAN J, FENG L Y, XIONG Y, et al. Comparative study of discounted cash flow and energy returns on investment[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(2): 126-130.
- [2] MORIARTY P, HONNERY D. Ecosystem maintenance energy and the need for a green EROI[J]. Energy Policy, 2019, 131: 229-234.
- [3] CHEN Y, FENG L, TANG S, et al. Extended-exergy based energy return on investment method and its application to shale gas extraction in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 120933.
- [4] FENG J, FENG L, WANG J, et al. Evaluation of the onshore wind energy potential in mainland China: Based on GIS modeling and EROI analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 152: 104484.
- [5] HALL C A S, LAMBERT J G, BALOGH S B. EROI of different fuels and the implications for society[J]. Energy policy, 2014, 64: 141-152.
- [6] SINGH U, COLOSI L M. The case for estimating carbon return on investment (CROI) for CCUS platforms[J]. Applied Energy, 2021, 285: 116394.
- [7] TANZER S E, RAMÍREZ A. When are negative emissions negative emissions?[J]. Energy & Environmental Science, 2019, 12(4): 1210-1218.
- [8] HU Y, HALL C A S, WANG J, et al. Energy return on investment (EROI) of China's conventional fossil fuels: Historical and future trends[J]. Energy, 2013, 54: 352-364.
- [9] HUANG C, GU B, CHEN Y, et al. Energy return on energy, carbon, and water investment in oil and gas resource extraction: Methods and applications to the Daqing and Shengli oilfields[J]. Energy Policy, 2019, 134: 110979.
- [10] WANG C, ZHANG L, CHANG Y, et al. Energy return on investment (EROI) of biomass conversion systems in China: Meta-analysis focused on system boundary unification[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110652.
- [11] RAUGEI M, FULLANA-I-PALMER P, FTHENAKIS V. The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles[J]. Energy Policy, 2012, 45: 576-582.
- [12] 闫洪硕, 冯连勇. 基于能源投入回报方法的光伏治沙模式综合效益分析[J]. 生态经济, 2020, 36(7): 170-175.
YAN H S, FENG L Y. Comprehensive benefit analysis of photovoltaic sand control based on EROI[J]. Ecological Economy, 2020, 36(7): 170-175.
- [13] LAMBERT J G, HALL C A S, BALOGH S, et al. Energy, EROI and quality of life[J]. Energy Policy, 2014, 64: 153-167.
- [14] JACKSON A, JACKSON T. Modelling energy transition risk: The impact of declining energy return on investment (EROI)[J]. Ecological economics, 2021, 185: 107023.
- [15] FABRE A. Evolution of EROIs of electricity until 2050: Estimation and implications on prices[J]. Ecological Economics, 2019, 164: 106351.
- [16] FIZAINE F, COURT V. Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society[J]. Energy Policy, 2016, 95: 172-186.
- [17] 王建萍, 冯连勇, 冯敬轩. 中国生物燃料乙醇替代汽油的净能源分析[J]. 中国能源, 2019, 41(4): 31-37.
WANG J P, FENG L Y, FENG J X. The net energy analysis of bioethanol instead of gasoline in China[J]. Energy of China, 2019, 41(4): 31-37.
- [18] VIEBAHN P, SCHOLZ A, ZELT O. The potential role of direct air capture in the German energy research program: Results of a multi-dimensional analysis[J]. Energies, 2019, 12(18): 3443.

(编辑: 王克楠)