

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.11.020

基于不确定性分析的不同制氢方式 能源投入回报研究

郑玉华, 侯丹丹

中国石油大学(北京)经济管理学院, 北京 102249

摘要: 氢能被认为是未来能够替代化石能源的最具前景的清洁能源之一。从能源投入产出的角度, 使用能源投入回报(EROI)方法对两种化石能源制氢(煤和天然气)和两种可再生能源制氢(太阳能和风能)的 EROI 进行量化研究。结果显示, 不考虑环境投入时煤、天然气、太阳能和风能 4 种制氢方式的 EROI 均值分别为 0.78, 0.60, 4.0 和 5.69, 考虑环境投入时 EROI 均值分别为 0.69, 0.58, 3.7 和 5.58。通过不确定性分析, 得出影响化石能源制氢 EROI 的关键因素是原料投入量, 可再生能源制氢 EROI 主要取决于发电效率。综合考虑能源资源禀赋和 CCS 技术之后, 煤制氢相较于天然气制氢优势会进一步提升, 但两者仍不可持续, 可再生能源制氢环保优势显著且具可持续性, 是未来制氢产业发展的方向。

关键词: 可再生能源制氢; 化石能源制氢; 能源投入回报;
不确定性分析; 可持续性

中图分类号: TQ116.2 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2022)11-0219-09

Research on EROI of Different Hydrogen Production Methods Based on Uncertainty Analysis

ZHENG Yuhua, HOU Dandan

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

Abstract: Hydrogen energy is considered to be one of the most promising clean energy sources that can replace fossil energy in the future. From the perspective of energy input and output, energy return on investment (EROI) of two fossil energy sources (coal and natural gas) and two renewable energy sources (solar energy and wind energy) are quantitatively studied by using the EROI method. The results show that the average EROI of coal, natural gas, solar energy and wind energy are 0.78, 0.60, 4.0 and 5.69, respectively, without considering environmental input, and 0.69, 0.58, 3.7 and 5.58, respectively, with considering environmental input. Through the uncertainty analysis, it is concluded that the key factor affecting the EROI of hydrogen production from fossil energy is the input of raw materials, and the EROI of hydrogen production from renewable energy mainly depends on the efficiency of power generation. The

收稿日期: 2021-06-01

基金项目: 国家社科基金重大项目(21ZDA030).

作者简介: 郑玉华, 博士, 副教授, 主要从事能源项目技术经济评价、能源经济与管理的研究。

conclusion is that, considering the energy resource endowment and CCS technology, the advantages of hydrogen production from coal compared with natural gas will be further improved, but both are still unsustainable. The advantages of renewable energy for hydrogen production are significant and sustainable, which is the direction of future development of hydrogen production industry.

Key words: hydrogen production from renewable energy sources; hydrogen production from fossil energy; EROI; uncertainty analysis; sustainability

随着能源需求的持续增长,化石能源消费造成了巨大的环境问题,全球积极应对能源耗竭和气候变化问题的呼声日益高涨^[1-2].氢能以其清洁环保、来源广、能效高、可储能、用途多等优势被视为 21 世纪最具前景的清洁能源之一^[3-4].氢能与电能一样,属于二次能源,可由煤和天然气等化石能源制取,也可以由太阳能和风能等可再生能源制得.由化石能源制取的灰氢由于成本较低,是目前最重要的氢气来源,其中天然气制氢和煤制氢占比分别为 76%和 23%^[5],但灰氢制取过程会产生大量的 CO₂ 排放;由太阳能、风能等可再生能源电解水制得的绿氢,既能够实现碳的零排放,也能够促进可再生能源发电的消纳,带来可观的经济和环境效益^[6].

各种制氢方式的经济成本是研究关注的重点之一,黄格省等^[7]研究了化石能源制氢的经济性,得出煤制氢的成本为 10.2 元/kg,天然气制氢的成本为 12.8 元/kg;Wang 等^[8]通过对煤和生物质制氢进行技术经济分析,认为煤制氢的成本为 8.40 元/kg,生物质制氢的成本为 6.94 元/kg;Nguyen 等^[9]研究了德国大规模电解水生产氢气的经济性,结果显示电解水制氢的平均成本为 4.21~4.71 美元/kg,且通过提高容量系数最大化使电解系统还能够降低制氢成本.此外,不同制氢方式的环境影响是研究的另一个重点,相关研究大多运用生命周期评价的方法,如 Bhandari 等^[10]综合分析了 21 种制氢技术,发现与使用传统电网混合电力或化石燃料相比,使用风能发电或水力发电电解水制氢是对环境最友好的制氢技术;Siddiqui 等^[11]评价了美国 6 种制氢方式的生命周期排放,通过对比发现混合电力电解水制氢的全球变暖潜在影响相对较高,原因在于美国混合电力以煤和天然气发电为主,发电过程会排放大量温室气体,其次是煤气化制氢.上述研究从经济性和环境效益两方面评估了不同制氢方式的特点,对氢能的合理利用提出了探索性的建议,然而,目前尚缺乏从能源利用的角度对不同制氢方式投入产出的分析.能源投入回报(Energy return on investment, EROI)是从能源利用角度来分析能源生产活动综合效益的方法,该方法主要运用于一次能源的开发评价,例如很多学者研究了化石能源开采的能源投入回报^[12-15],也有学者对光伏发电的能源投入回报进行了研究^[16-18].在我国能源供应形势和减排压力日益严峻的背景下,研究制氢过程的能源投入回报以及能为社会提供的净能源,对氢能产业的可持续发展具有重要的现实意义.

本文基于净能源理论,运用能源投入回报方法研究不同制氢方式的综合效益.考虑到化石能源制氢短期内的主导地位以及可再生能源制氢的发展潜力,选取了煤气化制氢、天然气水蒸气重整制氢、太阳能光伏电解水制氢和风力发电电解水制氢 4 种制氢方式来进行对比分析.论文创新之处主要在于,综合考虑制氢工艺差异、技术发展、资源利用和工厂运行情况,对不同制氢方式的能源投入和产出参数进行了不确定性分析,使研究结果更具科学性.研究旨在为制氢方式的合理选择提供支持,由于目前对 EROI 的研究几乎都集中在化石能源和一次能源的开发上,所以本文也是该方法应用在二次能源评估中的探索.

1 研究方法 with 数据

1.1 研究方法

1.1.1 EROI 方法的原理

能源投入回报来源于净能源理论,表示在能源生产过程中每单位能量投入所产生的有用能量数量,反映了能源的生产效率.能源的 EROI 越低,表示产生输出能量所需的输入能量就越多,从而导致可供社会消费的净能量就越少^[19].

能源的 EROI 一般用能源生产过程中能源产出量与能源投入量的比值来计算,为了使投入和产出各部分具有可加性,需要对能量单位进行转化,常用的方法是使用热当量值.在实际计算时,首先需要明确研

究边界和投入层级, 目前广泛采用 Murphy 等^[20]对研究边界和投入层级的划分, 将其分为 3 层研究边界(能源开采、能源运输、能源利用)和 5 个投入层级(直接能源和材料投入、间接能源和材料投入、劳动力投入、配套服务投入、环境投入)。目前大多数研究都考虑了能源生产的直接和间接能源及材料投入, 因此也将据此计算出来的值称为标准 EROI, 记为 $E_{ROI, \text{std}}$ 。

1.1.2 制氢生命周期的 EROI 计算方法

本文所考虑的研究边界为制氢活动的整个生命周期, 包括工厂建设、工厂运行(氢气制备)和工厂退役 3 个阶段, 并假定为现场制氢, 故制氢生命周期不涉及煤和天然气等制氢原材料的运输, 光伏电解水制氢和风电电解水制氢采用离网发电并直接用于制氢的模式。在投入层级方面, 使用 $E_{ROI, \text{std}}$ 来评价不同制氢方式的能源投入回报, 以便与同类研究进行对比。同时还计算了考虑环境投入的 EROI, 记为 $E_{ROI, \text{env}}$, 研究环境治理投入对制氢能源投入回报的影响。计算公式如下:

$$E_{ROI, \text{std}} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{\sum E_{\text{out}}}{E_{\text{in},1} + E_{\text{in},2} + E_{\text{in},3}} \quad (1)$$

$$E_{ROI, \text{env}} = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \frac{\sum E_{\text{out}}}{E_{\text{in},1} + E_{\text{in},2} + E_{\text{in},3} + E_{\text{env}}} \quad (2)$$

式中, E_{out} 表示产出, E_{in} 表示投入, $E_{\text{in},1}$ 表示工厂建设阶段的投入, $E_{\text{in},2}$ 表示工厂运行阶段的投入, $E_{\text{in},3}$ 表示工厂退役阶段的投入, E_{env} 表示环境治理投入, 单位均为 MJ。

1.1.3 不同制氢方式投入产出的计算方法

1) 产出的量化

煤制氢和天然气制氢同时产生 H_2 和 CO_2 , 本文只将 H_2 视为最终产出, CO_2 作为温室气体, 是制氢过程考虑的主要污染物之一, 故为环境治理投入的一部分。光伏电解水制氢和风电电解水制氢生产 1 kg H_2 的同时生产约 8 kg O_2 ^[21], 由于 O_2 无污染且可以通过销售获取收益, 故在计算光伏和风电电解水制氢的 EROI 时将 H_2 和 O_2 均视为产出。在计算过程中, 存在以货币计量的产出, 如氧气销售收入等, 采用工业能源强度将其转换为能源标量。煤制氢和天然气制氢的产出取决于工厂规模和运行时间, 光伏电解水制氢和风电电解水制氢的产出可分别按式(3)~(8)计算:

$$E_{\text{out}}^{\text{S}} = E_{\text{H}_2}^{\text{S}} + E_{\text{O}_2}^{\text{S}} \quad (3)$$

$$E_{\text{H}_2}^{\text{S}} = (Q_{\text{bp}} \times S_{\text{ap}} \times I_{\text{sol}} \times E_{\text{con}} \times E_{\text{ele}}/39.4 \times L_{\text{sol}}) \times 142 \quad (4)$$

$$E_{\text{O}_2}^{\text{S}} = (Q_{\text{bp}} \times S_{\text{ap}} \times I_{\text{sol}} \times E_{\text{con}} \times E_{\text{ele}}/39.4 \times L_{\text{sol}}) \times 8 \times P_{\text{O}_2} \times I_{\text{EI}} \quad (5)$$

$$E_{\text{out}}^{\text{W}} = E_{\text{H}_2}^{\text{W}} + E_{\text{O}_2}^{\text{W}} \quad (6)$$

$$E_{\text{H}_2}^{\text{W}} = P_{\text{w}} \times H_{\text{ele}} \times E_{\text{ele}}/39.4 \times L_{\text{win}} \times 142 \quad (7)$$

$$E_{\text{O}_2}^{\text{W}} = P_{\text{w}} \times H_{\text{ele}} \times E_{\text{ele}}/39.4 \times L_{\text{win}} \times 8 \times P_{\text{O}_2} \times I_{\text{EI}} \quad (8)$$

式中, $E_{\text{out}}^{\text{S}}$ 表示光伏电解水制氢的产出, MJ; $E_{\text{H}_2}^{\text{S}}$ 和 $E_{\text{O}_2}^{\text{S}}$ 分别表示光伏电解水制氢中氢气和氧气的产出, MJ; Q_{bp} 表示光伏电池组件的数量, 个; S_{ap} 表示光伏单个组件孔径面积, m^2 ; I_{sol} 表示年太阳辐照度, $\text{kw} \cdot \text{h}/\text{m}^2$; E_{con} 表示太阳能到电能的转换效率, %; E_{ele} 表示电解槽效率, %; L_{sol} 表示光电制氢系统寿命, 年; P_{O_2} 表示氧气的价格, 元/kg; I_{EI} 表示工业能源强度, MJ/元; $E_{\text{out}}^{\text{W}}$ 表示风电电解水制氢的产出, MJ; $E_{\text{H}_2}^{\text{W}}$ 和 $E_{\text{O}_2}^{\text{W}}$ 分别表示风电电解水制氢中氢气和氧气的产出, MJ; P_{w} 表示风电场功率, kw; H_{ele} 表示年风力发电利用小时数, h; L_{win} 表示风电制氢系统寿命, 年; 常数 39.4 为 H_2 相对于电能的能量当量, $\text{kg}(\text{H}_2)/\text{kw} \cdot \text{h}$; 142 为 H_2 的热值, MJ/kg(H_2)。

2) 投入的量化

从生命周期的 3 个阶段对投入进行量化, 如式(9)所示:

$$E_{\text{in}} = E_{\text{in},1} + E_{\text{in},2} + E_{\text{in},3} + E_{\text{env}} \quad (9)$$

工厂建设阶段。直接和间接能源及材料投入反映在建设成本上, 总投入可用公式(10)来计算:

$$E_{\text{in},1} = T_{\text{Cl}} \times I_{\text{EI}} \quad (10)$$

式中, T_{Cl} 表示制氢厂总投资, 包括厂房建设成本、设备成本等。

工厂运行阶段. 对于煤制氢和天然气制氢而言, 该阶段包括制氢原料的获取和制氢活动两个过程, 其总投入(包括直接和间接投入)按式(11)计算, 光伏电解水制氢和风电电解水制氢总投入按式(12)计算.

$$E_{in,2} = \sum E_m^R + \sum E_n^{H_2} + C_{equ} \times I_{EI} \quad (11)$$

$$E'_{in,2} = \sum E_k^{H_2} \quad (12)$$

式中, E_m^R 表示煤或天然气开采过程中第 m 种能源的投入量, MJ; $E_n^{H_2}$ 表示煤或天然气制氢过程中第 n 种能源投入量, MJ; C_{equ} 表示煤或天然气开采的设备成本, 元; $E'_{in,2}$ 表示光伏和风电电解水制氢在工厂运行阶段的投入, $E_k^{H_2}$ 表示光伏或风电电解水制氢过程中第 k 种能源投入量, MJ.

工厂退役阶段. 考虑厂房及设备残值可进行回收, 运用公式(13)计算该部分投入:

$$E_{in,3} = -T_{Cl} \times R_{rv} \quad (13)$$

式中, R_{rv} 表示残值率, 结果为负值表示该部分资本回收可以从工厂总投资中减去.

环境投入. 这部分包含的因素非常多, 能源在开发和利用阶段会在很多方面对环境造成污染和破坏, 比如各种空气污染物, 不仅会对环境和空气造成负面影响, 同时也危害人类健康, 环境投入用式(14)计算:

$$E_{env} = \sum_i \sum_j E_{F,ij} \times E_{CF,ij} \times I_{EI} \quad (14)$$

式中, $E_{F,ij}$ 表示第 i 阶段第 j 种排放物的排放因子, kg; $E_{CF,ij}$ 表示第 i 阶段第 j 种排放物的外部成本因子, 即处理单位相关排放物所需的资金投入, 元/kg.

1.2 数据来源及说明

1) 煤制氢和天然气制氢

以制氢规模为 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ (保准状态下为 $8\ 037 \text{ kg/h}$)的国内典型制氢项目为例^[22], 煤制氢总投资约为 12.4 亿元, 天然气制氢总投资约为 6 亿元, 工厂寿命均假设为 20 年, 残值率为 5%. 工厂运行阶段的直接投入见表 1^[23-27]. 煤和天然气开采的间接投入由国家统计局网站^[28]数据计算得到, 其中, 煤开采间接投入用开采和洗选业固定资产投资除以煤炭总产量, 其值为 10.84×10^{-4} 元/MJ; 天然气开采的间接投入根据石油和天然气开采业固定资产投资, 按照天然气热量在油气总热量中的占比来分配^[23], 经计算为 11.75×10^{-4} 元/MJ. 生命周期排放数据及环境治理成本见表 2^[29-31].

2) 光伏电解水制氢和风电电解水制氢

选取与煤制氢投资规模相当的项目, 太阳能光伏电解水制氢以 Sadeghi 等^[32]的研究为例, 项目配备 464 000 个单晶硅电池光伏组件, 每个孔径面积为 1.6 m^2 , 总投资为 12.82 亿元. 根据张理等^[33]的研究, 建设 200 MW 风力发电场, 同时配备 30 台生产能力为 89.3 kg/h 的电解水装置和 30 台配套的压缩储存设备, 总投资约为 15.2 亿元. 采用碱性水电解槽, 电解槽效率为 70%, 能耗为 $56.3 \text{ kw} \cdot \text{h}/\text{kg}(\text{H}_2)$ ^[21], 残值率均假设为 5%^[34]. 光伏和风电电解水制氢在工厂运行阶段除电能以外的投入分别为 $0.037 \text{ MJ}/\text{MJ}(\text{H}_2)$ 和 $0.024 \text{ MJ}/\text{MJ}(\text{H}_2)$ ^[29]. 根据谢欣烁等^[35]的研究, 光伏电解水制氢系统的生命周期排放 CO_2 当量为 $2\ 400 \sim 6\ 800 \text{ g}/\text{kg}(\text{H}_2)$, 风电电解水制氢系统的生命周期排放 CO_2 当量为 $600 \sim 970 \text{ g}/\text{kg}(\text{H}_2)$.

此外, 工业能源强度数据来源于国家统计局网站, 经计算为 $3.03 \text{ MJ}/\text{元}$, 氧气销售价格假定为 $0.35 \text{ 元}/\text{kg}$ ^[22].

表 1 煤制氢和天然气制氢工厂运行阶段的直接能源投入

元

直接能源投入	煤气化制氢		天然气水蒸气重整制氢	
	开采每兆焦煤需投入/MJ	制每兆焦 H_2 需投入/MJ	开采每兆焦天然气需投入/MJ	制每兆焦 H_2 需投入/MJ
原煤	0.058	1.160	0.002 4	—
原油	—	—	0.014 5	—
天然气	0.001	—	0.094 0	1.440
柴油	0.001	—	0.012 1	—
汽油	0.001	—	0.004 3	—
电力	0.012	0.017	0.001 0	0.012

表 2 煤制氢和天然气制氢生命周期排放及污染物排放的外部成本

污染物类型	煤制每千克氢/g	天然气制每千克氢/g	外部成本/(元·kg ⁻²)
CO ₂	22 316	9 100	0.21
CH ₄	566.88	59.80	1.55
N ₂ O	—	0.03	29.11
SO ₂	28.34	4.57	25.94
CO	—	1.22	4.40
NO _x	37.79	4.04	33.84
VOC	3.64	5.57	23.16
PM	—	1.60	76.60

2 基于不确定性分析的不同制氢方式的 EROI 分析

由于制氢工艺、能源品质、自然条件和工厂运行情况存在差异,制氢生命周期能耗和排放数据具有不确定性,本文运用 Monte Carlo 模拟方法分析数据的变动范围及其对不同制氢方式能源投入回报不确定性的影响。

2.1 煤制氢和天然气制氢的 EROI 分析

氢气产量的不确定性主要来源于工厂年运行时间的变化,当制氢工厂年运行时间从 3 200 h 增加到 8 000 h 时, H₂ 产量就从每年 25 718 万吨增加到 64 296 万吨;能源投入的不确定性主要受原料品质以及技术水平的影响,根据文献[24,26],煤制氢在工厂运行阶段生产 1MJH₂ 需要煤的投入量约为 1.01~1.30 MJ,而文献[25,27]显示,天然气制氢在工厂运行阶段生产 1MJH₂ 需要天然气的投入量约为 1.36~1.52 MJ,根据以上数据范围,假设工厂运行时间和原料投入都服从均匀分布,对煤和天然气制氢 $E_{ROI, std}$ 和 $E_{ROI, env}$ 的影响进行模拟,结果见图 1。模拟结果显示两种制氢方式的 $E_{ROI, std}$ 和 $E_{ROI, env}$ 均小于 1,即煤制氢和天然气制氢整个生命周期的能源投入大于能源产出,从能源投入回报的角度来看,两种制氢方式都无法为社会提供净能源,主要原因是煤和天然气需要通过消耗一次化石能源的方式来制取氢能源,根据能量守恒原理,生产 1MJH₂ 最少需要投入 1MJ 能源。此外,由于工艺过程存在一定程度的能源损耗,同时原料开采也需要消耗能源,所以最终使得煤和天然气制氢的能源投入回报小于 1。从图 1 可以看出天然气制氢的 EROI 低于煤制氢的 EROI,主要原因在于天然气制氢在工厂运行阶段的原料投入量大于煤制氢在该阶段的原料投入,这可能与工艺有关,同时天然气开采阶段的能耗也大于煤开采阶段的能耗。进一步分析可发现,煤制氢和天然气制氢 $E_{ROI, env}$ 的均值连接线比 $E_{ROI, std}$ 的均值连接线相对平缓,也就是说在考虑了环境治理投入之后,煤制氢和天然气制氢的 EROI 差距有所缩小,可见天然气制氢在环保方面的优势比较明显。本文还分别考虑了外部性成本增长 10% 和 20% 的情景,由于煤和天然气制氢过程的原料投入占比达 80% 以上, $E_{ROI, env}$ 的均值在这两种情境下基本没有变化,说明计算结果具有一定的稳健性。

从经济性角度来看,虽然天然气制氢的工厂建设投资远低于煤制氢,但是由于天然气的价格高于煤,所以目前两种制氢方式的生命周期总成本比较接近^[35]。目前在世界范围内 3/4 以上的氢气都来自天然气制氢,但其在经济性方面的优势并不突出,同时其生命周期能源投入回报也低于煤制氢,在我国天然气资源有限且天然气进口依存度不断升高的前提下,并不适宜大规模应用于制氢产业。煤制氢虽然有较高的污染物排放,但制氢成本较低且我国煤炭资源丰富,如果未来引入煤制氢的碳捕获和封存技术,可使其环境效益得到提升。化石能源制氢可能在未来一段时间内仍会占据主导地位,但从能源投入回报的角度分析,并不具备可持续性。

2.2 光伏电解水制氢和风电电解水制氢的 EROI 分析

表 3 为模拟光伏电解水制氢和风电电解水制氢能源投入回报中关键输入参数的取值范围^[21,32,35-36],模拟过程设定参数服从均匀分布。

表 3 光伏和风电电解水制氢关键输入参数的变化范围

	光伏电解水制氢参数变化范围	风电电解水制氢参数变化范围
太阳辐照度/[$\text{kw} \cdot \text{h} \cdot (\text{m}^{-2} \cdot \text{年}^{-1})$]	1 400~2 100*	
风力发电利用小时数/h		1 800~2 800*
太阳能转换为电能效率/%	12~20	
碱性水电解槽效率/%	65~80	65~80
系统寿命/年	25~35	20~25
制每千克 H_2 排放 CO_2/kg	2.4~6.8	0.6~0.97

注：* 为调研数据。

光伏电解水制氢和风电电解水制氢 $E_{\text{ROI, std}}$ 和 $E_{\text{ROI, env}}$ 的不确定性分析结果见图 2, 这两种电解水制氢的 EROI 均大于 1, 且风电电解水制氢的能源投入回报高于光伏发电电解水制氢. 在考虑污染物排放之后, 两种制氢方式的 EROI 均有所下降, 光伏电解水制氢的 $E_{\text{ROI, env}}$ 相较于 $E_{\text{ROI, std}}$ 均值下降了 0.30, 风电电解水制氢的 $E_{\text{ROI, env}}$ 相较于 $E_{\text{ROI, std}}$ 下降了 0.11, 风电电解水制氢环境治理的能源投入相对更低.

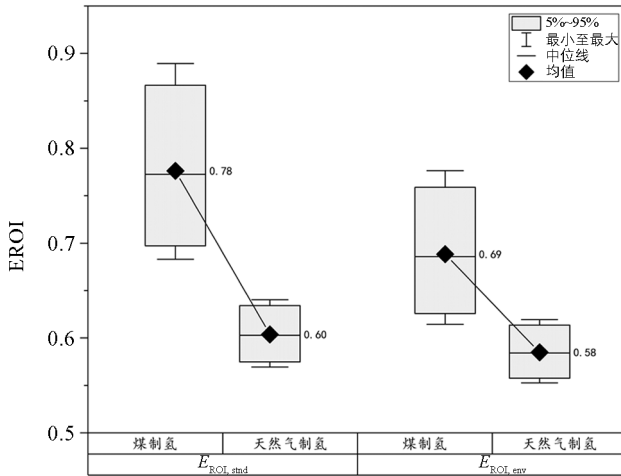


图 1 煤制氢和天然气制氢的 EROI 不确定性分析模拟结果

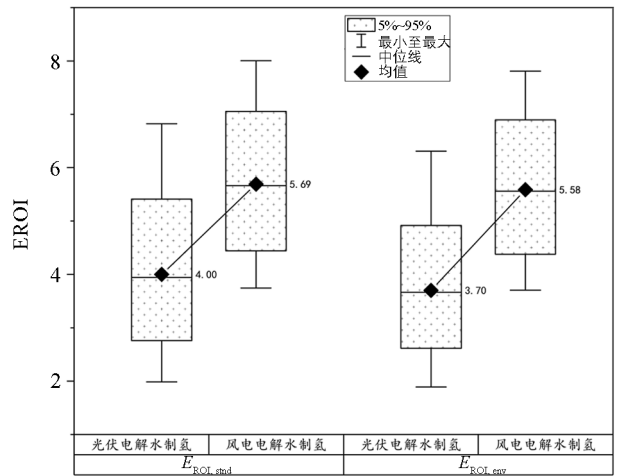


图 2 光伏和风电电解水制氢 EROI 不确定性分析模拟结果

Colla 等^[37] 将能源投入回报分为考虑可再生能源投入的系统能源回报 (System Energy Returned, SER) 和不考虑可再生能源投入的系统能源效率 (System Energy Efficiency, SEE). 图 2 中的计算结果为不考虑可再生能源投入的 SEE, 因为光伏电解水制氢和风电电解水制氢过程中消耗的电能来源于可再生的太阳能和风能, 当不考虑电能投入时, 可再生能源制氢的能源投入回报无论是 $E_{\text{ROI, std}}$ 还是 $E_{\text{ROI, env}}$ 均远大于 1. 但是, 如果按照 SER 的计算方法, 在光伏电解水制氢和风电电解水制氢过程中考虑可再生的电能作为能源投入, 在 90% 的概率下, 两种制氢方式 $E_{\text{ROI, std}}$ 分布范围分别为 0.58~0.64 和 0.63~0.66, 均值分别为 0.62 和 0.65, 比较接近于天然气水蒸气重整制氢的能源投入回报, 略低于煤制氢的能源投入回报. 因此, 从系统能源回报的视角来看, 可再生能源制氢过程的能源投入回报与煤和天然气制氢并无较大差异, 但从系统能源效率的视角来看, 由于制氢过程引入了可再生能源发电系统, 将太阳能和风能转化为可以利用的电能, 相当于增加了系统总体的能源供应量, 使其能源投入回报提高了 5 倍以上, 从而使这种能源转换方式变得更具可持续性.

通过不确定性分析得到了可再生能源制氢 EROI 的分布区间和概率, 本文在此基础上进一步分析了各变量不确定性的影响. 由上述分析可知, 可再生能源电解水制氢的污染物排放治理投入占生命周期总投入的比例较低, 因此仅针对不考虑环境投入的 $E_{\text{ROI, std}}$ 分析其影响因素. 应用 Monte Carlo 模拟独立地测试每个输入变量, 生成的龙卷风图显示输入变量对 $E_{\text{ROI, std}}$ 平均值的影响程度. 图 3 和图 4 分别为光

伏和风电电解水制氢的 $E_{ROI, std}$ 龙卷风图, 可见, 对于光伏电解水制氢而言, 太阳能到电能的转换效率对 $E_{ROI, std}$ 均值的不确定性影响最高, 其次为太阳辐照度以及光电制氢系统寿命; 对于风电电解水制氢, 对 $E_{ROI, std}$ 均值影响最大的是年风力发电利用小时数, 其次是风电制氢系统的寿命. 出现这一结果主要是这几个变量都是影响发电量的重要因素, 发电量的变化会使得 H_2 产量(即能源产出)发生较大变化, 从而影响最终的能源投入回报率. 太阳辐照度和风力发电利用小时数受自然条件制约, 所以在选址建厂时应充分考虑当地太阳能和风能资源的可用性. 对于光伏电解水制氢, 未来技术研发和进步的重点需要布局在提升太阳能到电能的转换效率上, 而对于风电制氢, 延长设备和材料的寿命将是有效提升能源投入回报的最优选择.

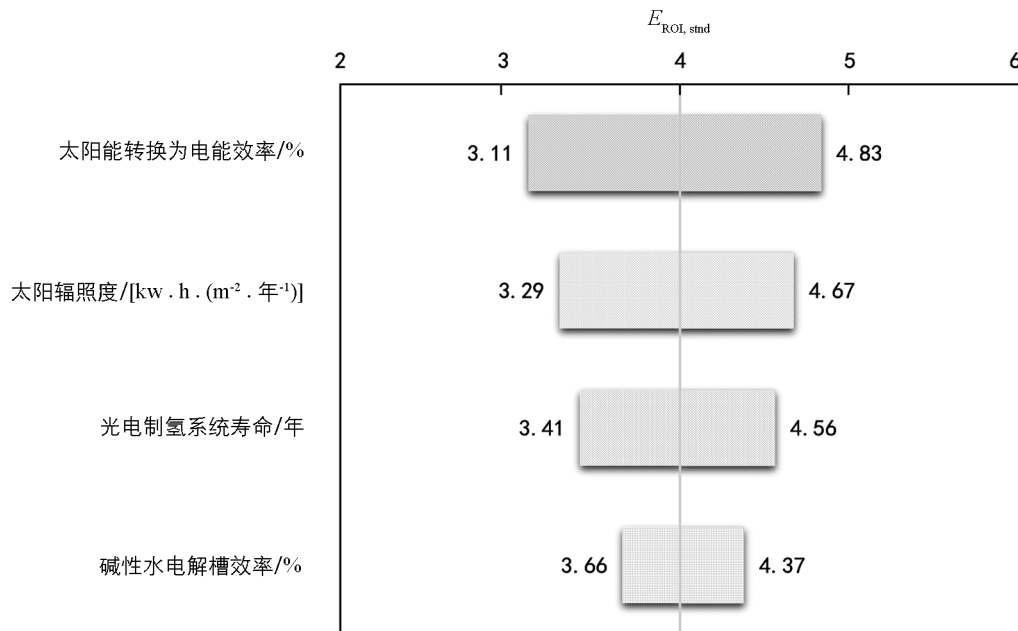


图 3 光伏电解水制氢的 $E_{ROI, std}$ 龙卷风图

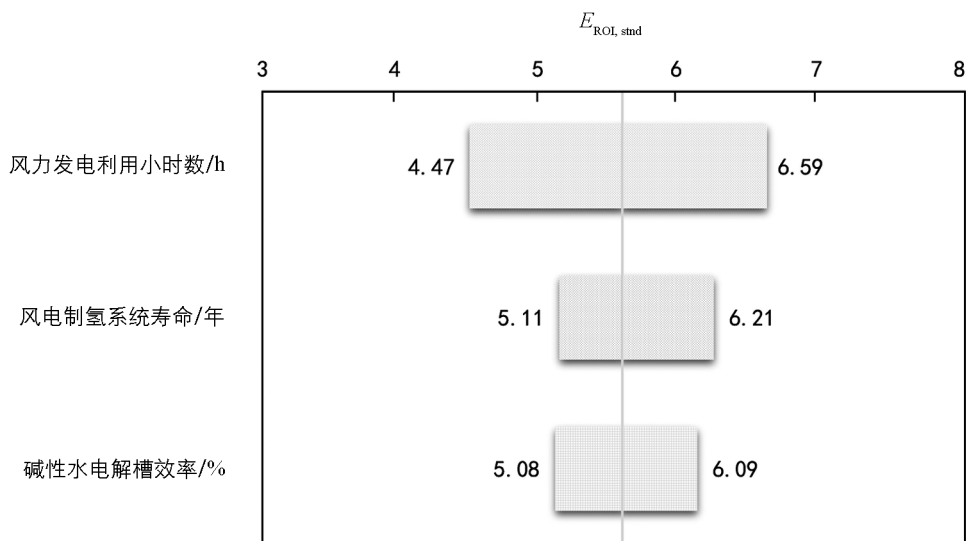


图 4 风电电解水制氢的 $E_{ROI, std}$ 龙卷风图

3 结论

从能源投入回报视角, 分别构建了煤、天然气、太阳能和风能 4 种能源制氢 $E_{ROI, std}$ 和 $E_{ROI, env}$ 的计

算方法. 考虑到投入和产出参数具有不确定性, 运用 Monte Carlo 模拟的方法分析了 $E_{ROI, std}$ 和 $E_{ROI, env}$ 的分布范围和概率, 得出以下结论:

1) 煤制氢的 $E_{ROI, env}$ 均值约为 0.69, 天然气制氢的 $E_{ROI, env}$ 均值约为 0.58, 从能源投入回报的视角来看, 这两种制氢方式都没有净能源产出, 特别是天然气制氢的能源投入回报相对更低. 天然气作为最清洁的化石能源, 从全社会能源投入回报角度看并不适宜用于制氢. 我国是煤炭储量和产量大国, 而天然气是相对稀缺的资源, 因此短期来看煤制氢可能是更适合的制氢方式, 特别是引入了 CCS 技术的煤制氢会更具环保优势.

2) 太阳能光伏电解水制氢和风电电解水制氢在考虑可再生能源投入的情况下其 $E_{ROI, std}$ 和 $E_{ROI, env}$ 略低于煤制氢, 与天然气制氢接近, 但在不考虑可再生能源投入时其 $E_{ROI, std}$ 和 $E_{ROI, env}$ 均远大于 1. 因此, 虽然可再生能源制氢目前在经济成本上处于劣势, 但从能源投入回报的角度分析, 其对社会可持续性能源供应具有重要意义.

3) 通过不确定性分析, 得出决定煤和天然气制氢 EROI 的主要因素是制氢过程中煤和天然气的消耗量, 通过改进工艺、提高原料品质可以相应提高两者的能源投入回报. 光伏和风电电解水制氢 EROI 主要受太阳辐照度、风能利用小时数等因素的影响, 对可再生能源制氢技术的研究应该重点关注提高电能转换效率和系统寿命, 国家政策也应有适当的倾斜.

能源投入回报作为一种从实物流的角度分析能源生产效率的方法, 可以作为传统经济评价方法的补充, 在对能源生产活动进行分析时做出更加全面的评估. 本文研究的不足之处在于, 并未将所有投入和产出都量化为能源形式, 部分采用货币形式计算的投入和产出可能会使得计算结果存在一定偏差. 此外, 未来还需结合最新的技术(碳捕捉与封存技术)以及最新的数据来完善此方面的研究.

参考文献:

- [1] 邵志刚, 衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状及展望 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 469-477.
- [2] 孟翔宇, 顾阿伦, 邬新国, 等. 中国氢能产业高质量发展前景 [J]. 科技导报, 2020, 38(14): 77-93.
- [3] 蒋敏华, 肖平, 刘入维, 等. 氢能在我国未来能源系统中的角色定位及“再电气化”路径初探 [J]. 热力发电, 2020, 49(1): 1-9.
- [4] 毛宗强. 世界氢能炙手可热 中国氢能蓄势待发 [J]. 太阳能, 2016(7): 16-19, 80.
- [5] 潘光胜, 顾伟, 张会岩, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 1-10.
- [6] 陶宇, 申俊, 杨薇. 空气污染视角下中国工业能源环境效率的空间效应及其影响因素研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(6): 107-117.
- [7] 黄格省, 李锦山, 魏寿祥, 等. 化石原料制氢技术发展现状与经济性分析 [J]. 化工进展, 2019, 38(12): 5217-5224.
- [8] WANG Y L, LI G X, LIU Z Q, et al. Techno-Economic Analysis of Biomass-to-Hydrogen Process in Comparison with Coal-to-Hydrogen Process [J]. Energy, 2019, 185: 1063-1075.
- [9] NGUYEN T, ABDIN Z, HOLM T, et al. Grid-Connected Hydrogen Production Via Large-Scale Water Electrolysis [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 200: 112108.
- [10] BHANDARI R, TRUDEWIND C A, ZAPP P. Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Via Electrolysis-a Review [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 85: 151-163.
- [11] SIDDIQUI O, DINCER I. A Well to Pump Life Cycle Environmental Impact Assessment of Some Hydrogen Production Routes [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(12): 5773-5786.
- [12] 孔朝阳, 鲁玺, 董秀成, 等. 基于能源投入回报方法的我国页岩油生产效率评价研究——以抚顺页岩油为例 [J]. 生态经济, 2018, 34(9): 94-98.
- [13] COURT V, FIZAIN F. Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions [J]. Ecological Economics, 2017, 138: 145-159.
- [14] 孔朝阳, 董秀成, 蒋庆哲, 等. 我国页岩气开发的能源投入回报研究——以涪陵页岩气为例 [J]. 生态经济, 2018, 34(11): 153-158.
- [15] 胡燕, 冯连勇, 齐超, 等. 能源投入回报率(EROI)评价方法及其在我国大庆油田的应用 [J]. 中国矿业, 2014, 23(9):

30-34.

- [16] PICKARD W F. A Simple Lower Bound on the EROI of Photovoltaic Electricity Generation [J]. *Energy Policy*, 2017, 107: 488-490.
- [17] KITTFNER N, GHEEWALA S H, KAMMEN D M. Energy Return on Investment (EROI) of Mini-Hydro and Solar PV Systems Designed for a Mini-Grid [J]. *Renewable Energy*, 2016, 99: 410-419.
- [18] 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.
- [19] KING L C, VAN DEN BERGH J C J M. Author Correction Implications of Net Energy-Return-on-Investment for a Low-Carbon Energy Transition [J]. *Nature Energy*, 2018, 3(4): 347.
- [20] MURPHY D J, HALL C A S, DALE M, et al. Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels [J]. *Sustainability*, 2011, 3(10): 1888-1907.
- [21] NICITA A, MAGGIO G, ANDALORO A P F, et al. Green Hydrogen as Feedstock: Financial Analysis of a Photovoltaic-Powered Electrolysis Plant [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(20): 11395-11408.
- [22] 张彩丽. 煤制氢与天然气制氢成本分析及发展建议 [J]. *石油炼制与化工*, 2018, 49(1): 94-98.
- [23] 丁宁, 杨建新. 中国化石能源生命周期清单分析 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(5): 1592-1600.
- [24] LI G X, CUI P Z, WANG Y L, et al. Life Cycle Energy Consumption and GHG Emissions of Biomass-to-Hydrogen Process in Comparison with Coal-to-Hydrogen Process [J]. *Energy*, 2020, 191: 116588.
- [25] REN L, ZHOU S, OU X M. Life-Cycle Energy Consumption and Greenhouse-Gas Emissions of Hydrogen Supply Chains for Fuel-Cell Vehicles in China [J]. *Energy*, 2020, 209: 118482.
- [26] WULF C, KALTSCHMITT M. Life Cycle Assessment of Hydrogen Supply Chain with Special Attention on Hydrogen Refuelling Stations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(21): 16711-16721.
- [27] 高有山, 权龙, 王爱红, 等. 天然气蒸汽重整制氢 WTT 阶段能量消耗及排放分析 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(8): 158-164.
- [28] 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.
- [29] CETINKAYA E, DINCER I, NATERER G F. Life Cycle Assessment of Various Hydrogen Production Methods [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(3): 2071-2080.
- [30] 程婉静, 李俊杰, 刘欢, 等. 两种技术路线的煤制氢产业链生命周期成本分析 [J]. *煤炭经济研究*, 2020, 40(3): 4-11.
- [31] PA A, BI X T, SOKHANSANJ S. Evaluation of Wood Pellet Application for Residential Heating in British Columbia Based on a Streamlined Life Cycle Analysis [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 49: 109-122.
- [32] SADEGHI S, GHANDEHARIUN S, ROSEN M A. Comparative Economic and Life Cycle Assessment of Solar-Based Hydrogen Production for Oil and Gas Industries [J]. *Energy*, 2020, 208: 118347.
- [33] 张理, 叶斌, 尹晨旭, 等. 风电制氢经济性与发展前景分析 [J]. *东北电力技术*, 2020, 41(7): 5-9, 37.
- [34] 刘庆超, 杨畅, 周正华. 光伏发电制氢技术经济可行性研究 [J]. *电力设备管理*, 2019(11): 92-93.
- [35] 谢欣烁, 杨卫娟, 施伟, 等. 制氢技术的生命周期评价研究进展 [J]. *化工进展*, 2018, 37(6): 2147-2158.
- [36] 罗承先. 世界可再生能源电力制氢现状 [J]. *中外能源*, 2017, 22(8): 25-32.
- [37] COLLA M, IOANNOU A, FALCONE G. Critical Review of Competitiveness Indicators for Energy Projects [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 125: 109794.

责任编辑 汤振金