doi. 10. 3724/1005-0566. 20261004

能源物质性、产业先导能力与能源转型

王　震,王晓光,丛　威
(中国海油集团能源经济研究院,北京　100013)

摘　要:本文提出从能源物质性出发研究能源转型的分析视角。能源物质性塑造了不同能源品种的特性,进而使得不同能源品种具有不同的产业先导能力,即塑造明晰市场结构和产业组织、带动其他产业萌发的能力。本文通过对煤炭、石油、电力、天然气、核能和氢能的对比分析发现:具有强大产业先导能力的能源可以进入能源消费结构,且难以被其他能源替代;而不具备这种能力的能源品种则发展缓慢、面临激烈市场竞争,即便其技术水平较高。

关键词:能源物质性;能源转型;产业先导;市场结构;产业组织
中图分类号:F426. 2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1005 - 0566(2026)10 - 0040 - 14

Energy materiality, industrial leading capacity and energy transition

WANG Zhen, WANG Xiaoguang, CONG Wei
(*CNOOC Energy Economics Institute*, *Beijing* 100013, *China*)

Abstract: The article argues the perspective of energy materiality should be employed to evaluate energy transition. Energy materiality forms characteristics of different energy kinds. These characteristics impose different levels of industrial leading capacity, including the stimulate birth of market, industrial organization and other new industries. Through the studies to coal, oil, electricity, gas, nuclear and hydrogen, the research finds the stronger industrial leading capacity certain energy has, the more possible it would be selected by society as mainstream energy.

Key words: energy materiality; energy transition; industrial leading; market structure; industrial organization

当前主流话语中,“能源转型”指可再生能源替代化石能源(煤炭、石油、天然气等)[1]。一方面,以降低碳排放和可再生能源发展为核心的能源转型在国际精英层面已经达成了的共识,部分国家转型迅速;另一方面,能源转型也受到质疑,尤其以民粹主义对其攻击尤为强烈。因此,能源转型的动因和机制就成为认识能源发展的核心,也是本文的研究问题。

能源的开发、使用和控制和人类文明发展息息相关。人类在很长的历史过程中主要使用人或者牲畜肌肉产生的机械能和燃烧薪柴产生的热能,后逐步掌握使用原始的水能、风能和化石能源等。能源产业在工业革命之后迎来大爆发:煤炭替代薪柴成为支撑第一次工业革命时代的能源基石,之后石油和电力使得人类生活和产业发生巨大的变化。二战后随着核能、天然气、可再生能源、氢能等能源品种的发展使得人类目前的能源消费结构空前多元[2]。

目前对历史上能源转型的认识可以大致分为两派,即替代说和增量说。替代说的主要观点是随着技术的发展,人类不断用新型的能源替换原有的能源,从而产生了“薪柴时代”“煤炭时代”和

作者简介:王震(1969—),男,甘肃会宁人,中国海油集团副总经济师兼能源经济研究院院长,英国能源学会会士,北京大学光华管理学院金融学博士,兼任中国石油大学(北京)教授、博士生导师,研究方向为能源经济与绿色金融、战略管理等。通信作者:丛威。

“油气时代”等[3]。王强等[4]将替代说和去碳化过程结合,主要认为人类能源使用从低碳走向高碳再走向低碳,或者从化石能源走向可再生能源,最终低碳的可再生能源会成为终极能源。增量说认为历史上并不存在一种能源对另一种能源的“替代”:由于人类能源消费的总量不断增加,新的能源品种提供增量。工业革命至今所有能源品种的消费量均呈上升趋势,不仅所有主要化石能源(煤炭、石油、天然气)的消费总量持续上升,甚至最原始的薪柴也如此[5]。因此增量说认为一个新的能源品种的兴起并不代表原有能源品种消失。替代说和增量说并非针锋相对,主要区别是替代说主要的观察对象是能源品种在能源结构中的比例,而增量说的观察对象是绝对消费量。因此无论是替代说还是增量说都无法评价能源发展和转型的趋势,其所总结的“高碳到低碳”“低能量密度到高能量密度”也都属于“追溯”式的总结:事实上,煤炭在能量密度上对比薪柴并没有压倒性优势,烟煤在能量密度上(18 ~ 25MJ/kg)和木炭(17 ~ 21MJ/kg)大致相同,品位更差的褐煤和泥炭甚至不如木炭,而且煤炭的系统性使用在几千年之前已经存在[6]。目前研究也认识到能源转型并不是一个线性过程,新旧能源之间的界限并不清晰,新出现的能源即使在技术上有所突破,克服原有能源体系带来的路径依附也需要很长时间[7]。

这样,对能源转型本质的认识就从能源的“技术先进”开始转向“社会接纳”。虽然经济—技术在能源转型中起到关键作用,但是技术的发展和应用并非自发独立形成,而是和社会存在着复杂的互动关系。有些研究指出,煤炭能够在与水能、石油等能源品种的竞争中胜出的主要原因是:煤炭具有成本优势和供应数量优势[8]。同时,技术往往在初期由于不成熟和不具备经济性而市场很小,必须依赖外部持续投资来提升技术水平,有些学者基于此建立了所谓的“社会—技术转型理论”(sociotechnical transitions theory),使用所谓宏观到微观的多层次视角(multilevel perspective)解释能源转型[9]。但是这种理论虽然看到了社会接受对于能源转型的重要性,但是其规划的“利基—体制—景观”(niche-regime-landscape)的路径在本质上仍然是技术中心的,社会因素更多地是如何培育、发展和接受新的技术利基的过程。

目前,对于能源转型的研究的问题至少存在于三个方面。第一,重视一次能源(能源资源),而相对轻视对二次能源(能源产品和应用)和能源产业的研究。对于能源供应的焦虑驱使研究将更多注意力放到能源资源上,而轻视了能源加工和产品对于能源消费和转型的重要影响,而能源开发、加工和应用才让能源产生“社会性”。第二,重视能源供给而轻视能源需求,甚至直接将能源转型视为“能源供给侧能源结构发生根本性的变革”[10],忽视了能源需求的能动性和选择自主。第三,重视技术维度而轻视社会维度,产业视角缺位。有些观点将能源转型直接归因为技术的进步,将技术水平高的能源视为先进甚至终极能源,而忽视了能源转型是一个高度社会化的过程[11],更缺乏以产业为核心的能源转型理论。且对于能源转型的驱动因素和中间机制不够清楚,特别是社会、经济和产业结构为能源结构变化提供的动力关注不足,而且缺乏简洁有力的理论作为结论。

一、能源物质性与能源社会研究

本文基于能源物质性对产业的影响,对能源转型提出新的解释。21 世纪初,“物质性”(materiality)开始作为一个正式的社会研究概念出现[12]。能源物质性(energy materiality)是能源社会科学研究中的新兴领域。借助“物质性”概念,学术界提出许多能源相关跨领域新议题[13]。能源物质性的视角虽然涉及多个学科,但都把物质问题不再视为既定和静态的要素,反而认为物质特性具有能动性,而且这种能动性不仅参与到自然过程中,同时也是社会—政治过程的一部分,可以对社会关系进行塑造和约束[14]。

能源物质性和能源转型息息相关,甚至目前还以能源物质的名称命名能源时期,如“煤炭时代”“石油时代”等。传统上,对能源的社会科学研究往往直接借用自然科学和工程学中关于能源的定义,而自然科学和工程学主要关注能源(能量)

的内在功能,即“做功的能力”(capacity of doing works),以及这种“做功的能力”的生产和转化。在自然科学和工程学视角下,能源在“做功的能力”上是具有可通约性,热量单位(卡、焦)、“百万英热单位”和物质转换单位“吨油(煤)当量”等都可以成为衡量能源的单位,而这一趋势随着集中式和电气化能源系统变的更加明显[15]。在这种框架下,能源的社会研究则仅仅是“做功的能力”的衍生品,如能源市场关注“做功的能力”的供给和需求的关系,能源管理是对“做功的能力”高效生产、运输和消费流程的优化,而能源安全则是确保获得“做功的能力”在经济和环境友好条件下的持续供给。

而能源物质性视角则关注的是能源作为一种“物质”对于社会的影响:在“做功的能力”之外,不同的能源的外在“物质”属性还会产生迥异的社会影响,如物理形式、气味、毒害性、能量密度、碳强度、能量释放方式等。这些物质性因素深刻影响不同能源品种的勘探、生产、运输和消费等环节的社会效应。例如,同样作为碳氢化合物,石油的液体形态使其相比天然气的气体形态更加便于抢劫和交易,因此石油比天然气更多卷入武装冲突和恐怖主义[16]。在对化石能源的研究中发现,产业链环节紧密且经济价值均衡的能源就更容易塑造国家之间的合作关系[17]。在对同样是可再生能源发电的研究中发现,太阳辐射产生光电效应和空气动力作用在涡轮机的发电方式不同,这导致光伏的影响更加不易察觉,进而让光伏更加容易被社会接受,因此光伏的技术改进和发展速度就快过风能[18]。在这里,石油和天然气,以及光伏和风能之间在“做功的能力”上并无本质区别,但是其外在的物质特性对塑造不同能源品种迥异的社会效果起到了关键的作用。

能源物质性必然对能源产业组织和更广泛的经济社会关系产生深刻影响。从马克思主义、韦伯的经济社会学派再到沃勒斯坦“世界体系理论”,经济活动和社会结构的互动关系一直就是社会科学的重要研究议题。科学、技术与社会研究(science, technology and society, STS)是从 20 世纪 70 年代兴起的跨学科研究范式[19]。该理论流派认为科学的发展、技术的提升和社会因素高度互动,而非一个自然和客观的发展。“社会”是大量“带有目的的行为体”(purposive actors)的关系网(actors-network),其中即使是非人的要素也具有能动性。在经过行为体网络确认之后,该技术会形成一个“锁定”效应,之后不断有资本和政策对其进行强化。在这种“路径依附”的背景下,新兴技术会不断得到“技术—社会系统”(technical-societal system)正向反馈的确认,从而成为成熟的技术。在能源领域,如果新的能源能创造新的产业和社会结构,这样会产生“锁定”效应,进一步吸引投资和扩大应用场景,使其能够成为主导能源,从而塑造能源转型。反之,如果一种能源无法创造新的优势产业和社会结构,那么其必然进入与原有能源品种的竞争中,而原有能源品种占据先发优势和成本上的规模效应,这样能源转型在原有的路径依赖下必然艰难。

本文不将能源转型视为纯粹的技术问题,而是透过能源产业和社会结构重塑思考能源转型问题。从能源物质性入手,探讨能源物质性对产业先导能力的影响,能够产生具有更能重塑社会结构的能源品种从而在能源转型中占得先机。这是本文研究的基本逻辑。

二、研究假设与变量指标

本文假设是能源物质性通过对产业和社会的塑造影响了能源转型。将能源物质性与能源社会研究视角相结合,将不同能源品种的物质性和产业的兴衰形成研究假设的“中观世界”。

本文将以比较案例为基础,通过对煤炭、石油、电力、核能、天然气、氢能六种能源的结构化比较,检验研究假设。在这里并没有将以水能、风能和太阳能(光伏)为主体的可再生能源囊括在内,主要原因是本研究视可再生能源为发展过程中的能源,而且不同可再生能源品种之间的物质性相距甚远,恰恰在“物质性”的理论视角下无法被视为统一的客体,目前暂不对其发展和结果作出结论性判断。

本文研究的自变量是不同能源品种的物质

性,包括但不限于物理形式、环境影响(气味、毒害性、易燃易爆性、放射性等)、能量密度、碳强度、能量释放方式。能源转型的效果是因变量,主要的指标是该品种能源是否是被绝大部分国家使用普世性能源,该品种能源是否能迅速占据能源消费市场替代原有的能源品种,同时长久地经受住其他能源品种对其份额的替代冲击。如果符合以上的特征,就认为其在能源转型中体现出强势地位,本研究定义其为“主导能源品种”,反之,则定义其为“补充能源品种”。

能源物质性塑造的产业先导能力是本文研究的中间变量,也是研究的重要创新点。产业先导能力是一种在先行首创、塑造市场、技术革新和带动其他产业方面的领导能力[20]。产业先导能力首先体现在对清晰市场结构和产业组织的塑造上。清晰的市场结构能够快速确定投资和收益的规则,有利于吸收投资和技术[21]。相关研究也显示,清晰稳定的市场规则可以被外部条件设计和塑造[22]。同时,和市场结构紧密相关的就是产业组织的形成,有学者通过对工业企业的研究发现,尽早形成有效的产业组织管理模式对获得产业先导能力有着重要的作用[23]。在本产业之外,有学者指出先导产业是“在国民经济体系中具有重要的战略地位,并在国民经济规划中先行发展以引导其他产业往某一战略目标方向发展的产业或产业群”[24]。也就是说,先导性也意味着该产业能够通过提供基础和要素溢出萌生新的产业,进而推动社会系统的改变[25]。该中间变量的三个重要的指标是该种能源因其物质性是否带动了新产业的萌发和竞争力的提升,以及颠覆性革新或带动其他新产业(见图1和表1、表2)。

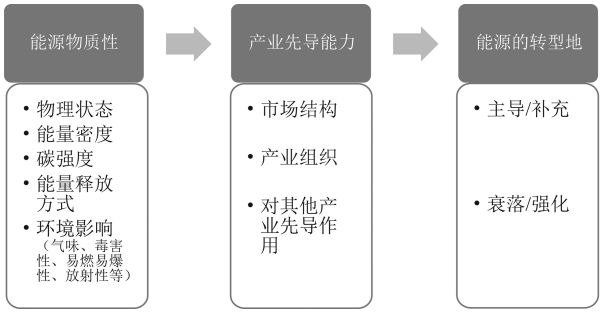

图1　能源物质性引领能源转型传导机制

表1　因变量的指标和测量

因变量	因变量指标	测量
能源转型效果（强/弱）	被绝大多数国家使用	是或否
	迅速进入能源消费并扩大份额	是或否
	长时间内难以被替代	是或否

表2　中介变量的指标和测量

中介变量	中介变量指标	测量
能源的产业先导能力	清晰市场结构	是或否
	明确有效的产业组织者	是或否
	带动新的产业萌发	是或否

三、主导能源品种:煤炭、石油、电力

本文将主导能源品种定义为能够深刻改变能源格局的能源品种,应用范围广,使用时间长,难以被其他能源取代,符合这种定义的能源包括煤炭、石油和电力。这三种能源品种对人类的文明发展产生了深远的影响。其中,煤炭和石油属于一次能源,分别引领而第一次和第二次工业革命;而电力是二次能源,同样被认为是第二次工业革命的标志,在低碳发展时代,电气化被认为是实现可再生能源转型和碳中和目标的重要途径。

(一)煤炭

煤炭被称为“工业的粮食”,被认为是产生工业革命的重要因素[26]。事实上,早在古罗马和中国汉代就已经有煤炭使用的纪录,而宋代已经有成熟的煤炭经济纪录[27]。今天,虽然污染和高碳排放使得煤炭广受垢弊,但是煤炭仍是能源消费结构中毫无疑问的主力品种,仍然占据全球四分之一的一次能源消费比重。煤炭在物质性上是沉重的固体,具有较高的能量密度,能量释放方式简单可控,当然也伴随着比较严重的环境和健康问题(碳排放、大气和水污染、尘肺病等)。

与当今主流论述不同,煤炭在工业革命初期并没有当作是必然的能源选择。在英国工业革命早期,当时工坊主要依靠的是河流产生的水能,很多技术改进也是围绕水力机械。资本主义的生产方式要求商品生产以交换为目的,而不是生产者自我使用,因此对商品生产距离消费市场和原料产地有着较为严格的要求,否则运输成本将吞噬利润。水能由于其物质性,只能在河流旁边获得和使用,而且对水流的冲击力与径流量等也有要求,这显然大大限制了生产地点的选择和生产的

扩大。煤炭的物质性(固体和高能量密度)使得煤炭可以实现便捷的运输,这让大规模生产成为可能。煤炭也广泛被认为是开启了工业时代的能源,最主要的原因就是其物质性可以突破传统的作坊,适应在靠近产品市场的人口稠密地区和城市使用,而这些地区也都是大型工厂和贸易集散地的所在地[28]。

煤炭的物质性导致开发前期基础设施投入较少,技术和资本的准入门槛较低,这些都使得煤炭行业很容易形成自由市场结构和社会主导的产业组织。在西方工业化国家,煤炭的生产和市场早期由社会自发主导[29],直到两次世界大战的战争刺激才开始了国有化的过程。随着二战结束和经济繁荣时期的到来,20 世纪后半期,许多国家开始放松对煤炭的管制。特别是伴随其他能源的兴起和应对气候变化,部分国家开启甚至完成退出煤炭开采和使用的进程。

几个世纪以来,煤炭因其物质性在多个领域体现出长时间的产业先导能力。随着煤炭大规模使用,一系列围绕着煤炭的新产业如雨后春笋,特别是机械、铁路和冶金,这些产业相互影响产生了第一次工业革命蔚为大观的景象[30]。蒸汽机和铁路原本就是源自煤炭矿山开发中使用的动力来源和运输工具,煤炭为蒸汽机提供动力,而运输煤炭刺激了蒸汽机和铁路的改进和发展,煤炭和蒸汽机以及铁路之间的共生关系建构了第一次工业革命的基础,同时也奠定了早期工业化国家的资本积累和技术创新[31]。

除了机械、铁路和冶金行业之外,煤炭历史上还对多个行业有着引领作用。由于煤炭本身沉重,煤炭运输依赖运河和铁路。无论是铁路还是运河,也都可以为其他产品的流通创造条件(甚至由于煤炭沉重导致单位能量运输成本过高,必须要有其他货物一起运输来平摊成本)。考虑到铁路和运河可较自由地在沿线挑选车站或者码头,因此煤炭的运输也就引领了当地的商品物流,如美国历史上从宾夕法尼亚东部到东海岸的煤炭、钢铁、制造业和商品贸易的共同繁荣[32]。同样,有研究表明欧洲的城市群落的长期发展仍然受到煤田位置的影响[33]。在 20 世纪初,煤炭的使用开始从工业生产拓展到民用采暖,后随着电力的出现,煤炭又开始成为热电行业的主力燃料来源,在 20 世纪中,煤炭提供了 50% 的电力增量。此外,煤炭也极大引领了当时尚处于幼年的化学工业。煤炭的产业影响力甚至体现在一些表面上看和煤炭并无直接关系的产业,如羊毛和纺织业[34]。最后,现代安全产业也脱胎于煤矿:区别于大多数能源,煤炭的物质性在生产过程中要求人员进行井下作业,面临着爆炸、坍塌、透水和气体中毒等多重风险和各种职业病的侵害,安全照明、通风和毒气检测、个人防护装备都在煤矿中成为安全生产的必备要件,工业安全生产规章制度的框架蓝本也出自煤矿[35]。

煤炭物质性还决定了煤炭对社会结构更为深远的塑造。煤炭的物质性也带来的生产安全风险,也带来的作业高度组织性,这些也使得煤炭产业孕育了人类最早的现代工会,煤炭工人的对安全、经济和社会权益的斗争对形成当今的现代政治、法律和监管制度都起到了关键的作用[36]。从另一个角度看,煤炭工人的社会组织也形成强大的对煤炭产业的“锁定”,甚至煤炭产业的利益仍然能够影响当今各国的政治[37]。

(二)石油

石油被称为是“工业的血液”,重要性无需赘述。对石油资源、生产、运输和市场的争夺构成了 20 世纪以来最重要的地缘经济博弈。石油的物质性首先体现在其在常温下的液体流动性,同时石油的能量密度明显高于煤炭和木炭,是常温常压下能量密度最高的物质,同时在单位体积(34 ~ 38 MJ/L)和单位重量(42 ~48 MJ/kg)能量密度相对均衡,这样的物质性使得石油便于以极为经济的成本进行运输和储存。石油和煤炭一样面临污染和碳强度高的问题,但相对轻微,甚至对比其他燃料还有环境上的优势。

石油在古代文献中的记载并不少见,从燃料、涂料、润滑剂、粘合剂、医药甚至巫术五花八门。1859 年美国宾夕法尼亚的“德雷克井”被认为是现代石油工业的开端。石油的现代产品有赖于洛克菲勒的标准石油公司,其对原油的炼制使得煤油、汽油和重油等产品开始出现[38]。煤油是最早的主

要目标产品,当时的用途主要是替代鲸油用于照明,主要是因为煤油比鲸油在成本、亮度、气味等物质属性方面具有优势,而汽油和重油在当时甚至被视为无用危险的副产品。

真正使得石油成为“工业的血液”是内燃机汽车的出现。19 世纪 80 年代之前全球石油生产高度集中于美国,年生产量只有 2 600 ~ 3 000 万桶(此数量在今天仅够全球消费几个小时)[39]。本茨在 1886 年发明汽车,福特生产方式使得汽车产量大幅增加[40],这样原来被视为废弃物的汽油反而取代煤油成为炼油的主要目标产品。之后随着喷气式飞机和船用燃油引擎的出现,石油以及其精练产品的物质性优势保证了液体燃料运输和加注的方便、高效和成本低廉。直到今天燃油汽车在与电动汽车的竞争中,石油产品在能量密度方面的物质性仍然是保持经济竞争力要素(锂电池能量密度在理论极限值上也不足汽油的 10%)。

与煤炭这种和社会高度融合的能源品种相比,石油因其独特的物质性凸显寡头竞争的市场结构和公司作为产业组织者。石油深藏地下的岩石孔隙之中,使得石油产业具有高经济风险、高技术和资本投入、长商业周期等特点,社会和政府难以担当作为产业的组织者。相比于煤炭可以对社会造成更多的溢出效应和对工人团体等塑造,石油开采的过程并不需要大量的劳动力,体现出与社会较低水平融合[41]。此外,石油具有更高的能量密度和流动性,因此石油的运输可以依赖更廉价的管道而非铁路或运河,但石油管道无法运输其他产品,而且几乎不会产生相关的生意,这和煤炭的运输形成鲜明对比[42]。由于石油物质性对产业特性带来的影响,石油工业从早期的“灯油”时代开始的市场结构就介于垄断和寡头竞争之间,具有资本和技术优势的石油公司成为主要的产业组织者。后来尽管经历过国内反垄断拆分和国际政治的风云变化,石油行业的垄断或寡头竞争特性几乎没有改变,即使是在今天为数不多的大型国际石油公司和国家石油公司依旧对石油行业有着支配性的影响。石油公司也一直是石油行业的产业组织者,即使在 20 世纪中叶之后出现的“国有化”浪潮,资源国纷纷将石油资源掌握在自己手中,但是资源国政府仍然选择公司的形式进行产业发展,成立本国的国家石油公司或者与国际石油公司(及石油技术服务公司)合作依然是资源国的常见选择。

石油直接带动了和内燃机和化学相关产业的兴起和发展。石油成就了多种现代交通工具的发明和改进,在交通运输业中石油的消费也最难以被其他能源取代。同时,石油也促使现代的化工业和农业出现了根本性的发展:石油革命性发展的化工行业,使得化工业进入了的“石油化工”时代,其主要产品塑料、合成纤维、合成橡胶、乙烯和化肥都对现代生活产生巨大影响,而作为化工原料的石油占消费比例 15% 左右,化工原料也普遍认为是后能源转型时代石油的重要用途。在农业领域,石油让农机具、农用塑料、农药和化肥等产品重塑的传统农业,进入了“现代农业”甚至“石油农业”时代,现代农业所能支撑的人口相比于传统农业大大增加。如果再算上由石化和现代农业带动的新行业则会更多,如现代纺织业和食品行业。

(三)电力

不同于煤炭和石油等能源资源(一次能源),电力属于人类加工生产之后的二次能源,这也使得对电力发生和发展的研究在能源转型研究中相对受到忽视。电力被认为是第二次工业革命的标志,同时电力成为现代能源体系中关键的一部分,在未来必将扮演更重要的角色。在物质性方面,不同于煤炭和石油,电力没有肉眼可见的物理形态,能量的传输可以在瞬时内完成,而且不会产生气味、污染和废物,电力一般也不需要使用者购置大型设施(仓库、油罐)进行存储。

1879 年爱迪生发明了电灯,被广泛认为是人类开始使用电力的标志。但事实上,爱迪生所使用的直流电输电距离近且损耗高,使用并不常见。在交流电出现后,随着变压器的使用,电力可以实现较远距离的传输。直到 19 世纪末,交流电的普遍使用和大规模电网的建设才标志“电力时代”的来临。

和煤炭和石油一样,电力发展初期就确定了明确的市场模式和产业组织者。如果煤炭基于社会而石油基于公司的资本和技术,那么电力的发

展模式则体现为能源体系和国家能力的结合。电力系统的物质性不同于其他能源形式,其中最突出的特点是电力系统要求生产、输送和使用的瞬时性平衡,也就是发电机的输出和用户的负荷必须在每个时刻都保持一致。因此,电力行业必须是“体系性”建设,而“体系性”建设对私人资本天然不友好:瞬时性平衡的要求使得传统自由经济学说的价格信息机制显得过于缓慢,而且“体系性”要求硬件和软件标准一致,建立竞争性的电力输配体系高度不经济(电网的自然垄断属性),电力对于社会的巨大的正外部性和高昂的沉没成本,使用过程对发电和运输系统持续而复杂的维护和协调,以及后期对产品价格的管制,这就使得电力的发展和管制型市场结构以及国家主义产业组织模式形成契合关系。

在实践中,尽管政治制度和国家形态存在不同,各国电力的大规模发展都离不开国家的规划、投资和管理,特别是在电力行业发展的关键期。奉行自由主义的英国早期私营的电力系统分散而混乱,使得政府逐步介入[43]。英国在 1882 年就通过了世界上第一部国家电力监管法《电力照明法》(electric lighting act 1882);1926 年发布的《电力供应法案》(electricity supply act 1926)开始在基础设施层面增加国家的参与,着手统一发电频率和构建国家电网;1947 年通过《电力法案》(electricity act 1947)成立英国电力局(british electricity authority),实现电力系统产权制度上的国有化[44]。德国早期的电力市场和英国情况相似,1935 年的《能源经济法》(energiewirtschaftsgesetz)确立了德国未来数十年的电力法律框架,特别是区域内非竞争性的垄断经营和受到政府管制的价格等原则[45]。受到政府监管的特许经营模式(konzessionsmodell)下的大型能源公司和市政电力系统并行成为至今德国电力行业的基本特征[46]。美国早期的电气化依赖私人金融资本和州政府的有限监督,但这使得美国的电力行业直到 20 世纪 30 年代都发展较为缓慢,直到罗斯福新政下联邦政府扩大的电力系统的所有权,1935 年通过《联邦电力法》(federal power act)确定了直到今天的美国电力市场制度框架,在电力领域建立了如“田纳西河谷管理局”(tennessee valley authority)等国有机构,快速推动了美国西南部的电气化[47]。同样,列宁在苏联的现代化设想中,也提出了“共产主义就是苏维埃加电气化”,苏联的“全苏维埃电气化计划”(GOELRO)则是通过国家指导下计划经济手段在短期内增加电力供应[48]。

电力对现代产业和生活产生了全面且颠覆性的革新。电力催生了一系列电器和电子信息工具的使用、发明和改造,这又促使几乎所有行业的产业形态发生了翻天覆地的变化,向着清洁和高效的方向进步。同时,电力驱动夜间照明系统、电梯、空调、轨道交通等设施的使用,在时间和空间上重新定义城市,城市单位空间内容纳的人口得以提升,使得超级城市化成为可能[49]。随着超级城市化的进程和人口密度的增加,电力的物质性提升人类生活空间的使用效率,进而促进人口不断聚集和生产环节中的领域细分,这也就催生了城市文化和现代服务业[50]。特别是对于现代医疗、传媒娱乐、IT 和电信、现代商务等行业,电力几乎是这些行业存在的前提。电力成为现代产业和生活的能源基石,就像煤炭对于铁路、蒸汽机和钢铁业和石油对于现代交通运输业、化工业和农业一样,而且其影响相较煤炭和石油更为深远。

四、补充能源品种:天然气、核能、氢能

相比于煤炭、石油和电力这些在人类能源演化中成功占据牢固地位并引领工业和社会革命的主导能源,天然气、核能和氢能等能源品种在进入人类能源消费中的过程中缓慢且艰难,面临其他能源品种的竞争,而且使用的范围相对有限,因此其可以被称为“补充能源”。核能的出现曾经被认为是可以比肩开创工业革命的煤炭。但是事实上,经过了几十年的发展,核能的价格居高不下,加上安全性的隐忧,目前核能是一种极具争议性的能源,使用的国家较少。天然气在“石油危机”之后逐步登上历史舞台,并以其低碳清洁的特点一度被认为是能源转型中的“过渡能源”,但事实上天然气市场(相比于石油市场)仍然有限,其所谓“清洁能源”的身份也并不稳固。氢能则和电力一样,属于二次能源,尽管问世较早,但目前商业大规模使用仍然处于探索阶段。

(一)天然气

与煤炭和石油相似,天然气在前工业时代就有发现和使用的纪录。但在20世纪70年代以前,现代天然气工业发展十分缓慢。在1973年“石油危机”之后,天然气的作用开始被重视起来,特别是大口径管道、天然气液化技术和页岩气技术也使得天然气产业加速发展。相比于石油成为一种世界性能源,天然气的生产和消费仍然呈现出很强的地域性。而且随着退出化石能源的趋势,天然气黄金时期过短,市场受到可再生能源冲击,前景充满不确定性。当然,虽然本文称其为“补充能源”,但仍可被认为是其中相对强势的品种:天然气在当今全球能源消费格局中达到23%,在清洁、碳排放和发电灵活性方面仍具有竞争力。

天然气在物质性上最明显的区别就是气态化石燃料,这使得天然气能量密度和碳强度都低。天然气对环境相对友好,是最为清洁的化石能源。天然气虽然在上游勘探开发和石油有相似之处,但是在中游储运环节开始天然气和石油有着非常大的区别。天然气的气态物质性非常依赖复杂的基础设施,这使得天然气的运输途径相对固定,在液化技术出现前,很难像石油一样转换销售目的地。因此,天然气在供应安全、价格波动、供应链管理和市场发展等方面有着独立于石油的特点[51]。

天然气也没有产生明确的市场结构和产业组织者,这主要是由于天然气在物质性上同时具有石油和电力的特点:天然气和石油在上游勘探开发有着相似的过程,高资本和高技术使得石油公司在天然气上游仍然保持着主导性地位。但是,天然气的中下游需要复杂的基础设施和相对固定的市场关系的特性则更体现出管制型市场的特点,技术和资本在其中难以获得决定性角色。天然气比石油更依赖长输管道,而需要铺设长输过境管道几乎必须得到各国政府的背书,而国内天然气管道系统在管制方面更类似电网而非石油管道系统[52]。因此,以上天然气的物质性带来的问题让企业和政府都难以单独扮演产业组织者的角色。从某种程度上说,天然气行业的发展与政府和企业之间的关系息息相关。如果能形成一方主导的产业格局,天然气行业发展就相对快速,前景较为明确:如政府支持下的旗舰型企业主导产业组织的中国[53]和俄罗斯[54]或者以企业为中心主导产业组织的美国。而欧洲天然气市场机构都经历过“拉抽屉”式的改革,天然气行业发展前景也相对暗淡:英国早期天然气产业由国有企业英国燃气公司组织,德国天然气产业原来由大企业卡特尔“燃气俱乐部”运营,但自20世纪八九十年代开始逐步进行自由化改革[55],且在地缘政治矛盾下又有重新国家化的倾向[56]。

天然气的出现并没有引领新的产业或者对旧有产业产生根本性变革,但是天然气对传统产业进行了改进和提升,虽然同为“补充能源”,但是其扮演的角色则比核能和氢能更为积极,可视为半主导能源。如天然气在发电调峰领域和抽水蓄能成为两大支柱,而且相比于抽水蓄能,天然气调峰也有不受地理条件的影响(可以在没有河流的地方和城市中心部署)和更少的前期投资等优势,这让天然气在与可再生能源共存方面占得先机[57]。在化工领域,天然气作为原料在化肥、乙烯和制氢领域扮演了主导角色。此外,液化天然气在汽车和船舶的燃料领域也开始占有一席之地,有望部分替代石油液体燃料。

(二)核能

核能出现于二战尾声,是20世纪最重要的科学发现之一,同时也对地缘政治格局产生重大影响。核能的物质性最大特点是通过链式反应使得很小质量的核材料在瞬间释发出巨大能量,同时带有放射性。正是核能的这种独特物质性,人类早期对核能的发展极具幻想色彩:核能当时被认为即将取代煤炭和石油全面重新塑造人类的生活,甚至在许多大众文化中被赋予超级力量的色彩。

但经历了80年多的发展,曾经被寄予厚望的核能的重要性更多体现在军事领域:核武器至今仍然是重要的战略威慑手段,核反应堆使得大型水面舰艇和潜艇可以实现长距离持续巡航。相比之下,作为民用核能的发展可以说是相形见绌,民用核能汽车、核能飞机研发失败,福特公司曾经在1958年提出以小型核反应堆为基础的汽车构想,

声称续航里程可达 5 000 英里以上[58]，一些军事领域的核技术也较少应用到民用领域（如核动力民用船极少）。在消费端，核能目前仅占全球一次能源消费的 4% 和发电量的 10%。与此同时，1979 年美国的三哩岛核事故、1986 年苏联的切尔诺贝利核事故和 2011 年日本福岛核事故凸显了核能的安全隐患，引发全球声势浩大的反核运动[59]。今天，核能的未来发展面临不确定性和两极分化的状况，一方面有些国家已经开启退核政策，另一方面很多国家仍然将核能视为解决能源供应和碳减排的选项。核能的命运还将取决于全球去碳的进程、竞争性能源的发展以及核技术的革命性突破（如可控核聚变）等。

民用核能在非核国家也没有产生明确的市场结构和产业组织者。核能前期投资巨大，技术门槛高，社会阻力大，这些注定了核能必须是垄断的市场结构和政府作为唯一有能力的产业组织者，在市场化融资部分也需要政府进行“去风险”[60]。核能的产业组织无疑已经超出了社会、技术和资本的范畴，而成为一个政治问题。现实是，目前世界上使用中和在建的核电站多数是由核武国家建设和运营：《不扩散核武器条约》中规定的五大合法拥有核武器的国家占据全球核发电能力的约 65%[61]，如果再算上事实拥有核武器的国家和具有核野心的国家，则这一比例无疑将更高。民用核能和核武器之间存在联系也已经被相关研究注意[62]，如俄罗斯的核设施和核材料在军民两用之间共享[63]，而美国核发电能力在冷战后增长明显停止，2016 年以来仅新建一座反应堆[64]。由于国际防核扩散机制的存在，核技术、核装备和核材料等几乎一切产业链要素的流动都在严密的国际制度监管之下。非核国家必须共同承担国际核规则带来的政治和经济成本，国际政治环境限制了非核国家组织核能产业的能力和意愿。同时，国内核能利益集团一致在发展核能上扮演了重要的角色，如法国的核能利益集团，由于非核国家在国内缺乏核能利益集团，核能对能源政策的影响力也更小[65]。可以看到，最近十几年中，非核武（和核野心的）国家宣布计划退核的越来越多，而尚未使用核能的非核武国家发展核能的意愿也不坚定。相比之下，如果是核武国家而且政府积极推进产业发展，核能发展就比较快。冷战后，新兴经济体中的核国家就取代了发达国家成为全球核能市场增量的主力[66]。

民用核能并没有产生新的产业或者对旧有产业形成革命性重塑，而且在和目前能源品种争夺发电市场方面面临重重阻力，这些都和核能的物质性紧密相关。核能最大而且独特的物质性是在短时间内释放巨大的能量和放射性，但是这个在军事领域备受推崇的物质性在民用领域难寻用武之地，甚至成为短板。目前核能主要的用途是用来提供热电，即利用核裂变产生的能量将水变成蒸汽，利用蒸汽的热能或让蒸汽推动汽轮机产生机械能，机械能切割磁力线产生电能。核能产生热电的原理和煤炭并无本质不同，虽然可以大量减少大气污染物和温室气体排放，但核安全和核废料的处理是更棘手的问题。就热电产业的效率而言，由于核能发电需要在几种能源之间不断转换，加上基于现有技术无法应对的核电站产生的大量废热，导致“核电站实际热效率比最先进的火电机组要低 10 个百分点，只有 36.7%”[67]。再加上核电站建设维护以及核废料的处理，核能发电成本不但没有发展初期预想的低廉，反而高于大多数能源品种。1954 年，美国原子能委员会主席斯特劳斯（lewis strauss）曾经展望核能将使“电费便宜到可以忽略不计”（too cheap to meter）[68]。但是，目前发达国家核电建设成本普遍在 6 000 美元/kWe 以上，在无政府补贴的情况下难以建设新的核电站[69]。此外，核电灵活性差，几乎只能作为基荷电能，难以和可再生能源协同发展。如果排除在军事和技术民族主义考虑，核能的吸引力可能会更低[70]。

（三）氢能

氢能和电力一样，属于二次能源。16 世纪斯就有对氢的纪录，1766 年英国科学家卡文迪什（henry cavendish）分离出氢并认识到其是独立的元素。与核能的情况相似，在极高的早期期望之下，到 20 个世纪 70 年代氢能都没有实质性突破。

氢能的能量产生方式是氢和氧在化合形成水的过程中释放出的能量。由于氢的化学性质活

泼,在自然界中极少存在氢单质供人类开采,因此氢实际上是其他能源的载体[71]。同时,由于氢在常温常压下单位体积能量密度极低(每立方米氢的能量可以忽略不计),但单位重量能量密度极高(每120 MJ/kg,是石油的三倍,液态氢常用作火箭燃料)。在理论上,氢能可以成为可再生能源极佳的调节能源和运输载体。但氢也有易燃易爆的物质性,安全生产和运输成为氢能使用中的核心问题。不同于电力,氢能无法使能量实现瞬时传送,当然氢能对基础设施和维护管理的要求也没有电力系统复杂。

氢能现在几乎没有形成成熟的大规模商业使用情境,因此对氢能的产业组织认识也不清楚。从目前来看,各种氢能的使用模式往往还处于实验室和示范阶段,而且中国国内已经出现了"高校、科研机构、企业之间各自为战,缺乏共同研发机制,低水平重复研究和建设导致效率较低"的问题[72]。在理论上,氢能的物质性带来的高资本和高技术特点似乎更支持类似石油的大型企业作为主要的产业组织者。但是由于氢能的成本居高不下,目前发展的主要理据来自降碳和环境保护等非商业目的,因此企业在等待政府提供更多的支持和协调,许多对氢能不吝赞美的文章在最后也经常把政府列为能让氢能大放异彩的最后推手[73]。但氢能的基础设施的建设和管理又不具备电力高度的"体系性",政府本身优势难以发挥。目前氢能发展的市场模式和产业组织依旧没有确定的答案。

尽管氢能被认为用途广泛而且前景光明[74],但目前氢能并没有带来新的产业也没有对旧有产业实现革命性更新。事实上,从20世纪后半叶开始,对氢能新产业的想象经历了由"核能氢"、"交通运输氢"到"绿氢"的几次幻想式的话语建构,但至今都没有在产业上实现[75]。目前的现实是,和天然气的情况类似,氢在一定的细分领域形成了自己的优势,特别是在炼油、化工和钢铁等行业,但这些优势领域过于细碎,缺乏行业规模的带动。2023年全球消费氢接近1亿吨,但尴尬的是目前氢消费和供给两端都由高碳产业主宰:氢消费仍然主要是由炼油和化工行业驱动的,在能源领域氢的应用边缘化(交通运输和储能行业需求占比不足1%);在供给端,绝大部分的氢产自化石能源(低碳氢产量不足100万吨),这和构想中和绿氢与可再生能源协同发展的愿景相距甚远[76]。可以说,目前氢的行业生态依旧是几十年前就形成的,作为能源的氢并没有带来新的行业。在能源领域,可以说氢还没有拿到入场券就已经在欧美国家面临市场运营问题,在储能领域也面临着来自电池、电磁和储热等方式的激烈竞争,成本、产业链协同和政策支持方面的不确定性成为主要问题。

五、分析

能源的使用并不是线性发展和演化的。事实上,很多能源品种在前工业时代甚至古代人类就已经发现和使用,先进技术产生的能源未见得就受青睐,先进能源取代落后能源的说法是缺乏事实依据的。本文认为,能源在科学和工程上"做功的能力"事实上是普遍存在的,不同能源品种之间存在竞争关系,而能源的物质性导致的产业差异是解释能源转型的原因。能源转型是一种社会层面的选择,能源的产业先导能力是构筑能源转型的中层理论的重要视角,而能源物质性是重要的驱动要素。

表3　不同能源品种的物质性、产业先导能力和能源转型效果

能源品种	物质性特点	带动新产业萌发	市场结构和产业组织	能源地位
煤炭	固体、开采容易、运输成本高	蒸汽机、铁路、航运、钢铁、化工	自由市场与社会	衰落中的主导能源
石油	液体、能量密度高、高技术、高资本	现代交通运输、石油化工、现代农业	寡头竞争和大型能源公司	主导能源
电力	能量瞬时传输,严格体系平衡,无污染和无视觉形态	全方位革新和产生大量新产业,特别是现代服务业(如传媒、电信、IT、医疗)	垄断和国家	强化中的主导能源
天然气	气体、低能量密度、低碳强度	部分新功能(减排、调峰),无行业规模的新产业	不统一,上下游之间分裂	强化中的半主导半补充能源
核能	瞬时释放大量能量、放射性	无行业规模的新产业	不统一,核国家和非核国家分裂	补充能源
氢能	单位质量能量密度极高,易燃易爆	无行业规模的新产业	初始阶段,各方面对产业发展意见不一	补充能源

萌生的新产业需要不断有市场并且以最低的交易成本进行组织[77]。由于物质性,某种能源品种能够产生明确的产业市场结构和产业组织者,就更容易在产业竞争中占得先机。在煤炭、石油和电力的案例中,能源物质性使得社会、垄断企业和国家分别能够在三种能源产业中快速成为组织者。在其中,煤炭行业的低技术和与社会契合紧密的特点使得社会能够发挥灵活多样快速动员的优势;石油的高技术、高资本和与社会疏离的特点使得垄断性企业能够发挥技术和资金优势,快速建立产业链和开拓市场;电力的开放性、高集成化、系统化、电网瞬时性平衡和的特点又使得政府成为合适的产业组织者。相比之下,受困于国际核不扩散制度的非核国家政府和产业界限不明确的天然气都限制了两种能源在能源发展中取得更为主体地位。

物质性能够萌生和塑造新的产业或者将旧有产业进行革命性更新,就意味着该能源品种创造自己的"蓝海"[78]。即使成本较高、技术有缺陷,产品也可以在"蓝海"中拥有甚至独占市场,有更多机会吸引投资和政策支持来降低成本、改进技术和扩大市场份额。其中最典型的案例是石油和航空业的关系。石油的物质性决定了它是航空业的唯一燃料来源,而航空至今仍是人类实现快速洲际旅行的唯一商业选择。航空业在问世之初成本昂贵,票价和火车和轮船相比毫无经济优势,市场自然很小[79]。但是因为以上的两个"唯一",资本和技术不断投入改进客机的燃油经济性和扩大航空市场,刺激更多的洲际旅行市场从客轮和火车转移到航空,航空业的成本逐步下降,如今航空业依然是石油最坚固的市场之一。相反,如果某种能源品种其物质性难以催生新的产业,只是简单提供能源增量,就不得不进入了所谓的"红海",即已经形成路径依赖的市场与已有能源进行竞争。如核能短时间内释放巨大能量的物质性在军用领域至今独树一帜,地位至今难以撼动。相比之下,这种物质性在民用领域并无优势,无法产生新产业,核能不得不进入已经高度竞争的热电行业,就必然面临其他能源品种在成本、可获得性、安全性和灵活性上的竞争,而核能的物质性还成为这方面的短板(废热、控制),造成核能在民用领域至今依旧边缘的地位。

正是由于不同能源品种之间可以就"做功的能力"进行转换,所以才凸显出能源物质性在塑造社会对能源品种选择中的重要作用。事实上,在漫长的能源开发和使用的实践中,产业和技术会扩大能源物质性的优势,通过能源转化和技术修正在物质性上的劣质。例如,如前文论证,石油的物质性价值体现在其液体性质和常温下的稳定的高能量密度,所以在能源实践中很少将石油用于发电。而在缺乏石油资源的地区和特殊时期,煤制油就成为重整煤炭物质性由固态到液态的手段[80]。同理,天然气在常温下的气态常被视为一种不利的物质性,所以能源实践中天然气发电成为消费天然气的重要途径用以转换天然气的物质性,同时利用液化技术重塑天然气的物质性应对长距离的输送。尽管成本高昂,但煤制油和天然气液化可以被视为一种"物质性对价",在战争、资源匮乏地区和能源危机下成为一种能源选项。

六、结论与建议

能源转型不是简单的技术革命,而是对产业和社会系统重塑。本研究以能源物质性为抓手,通过研究能源物质性对能源品种的产业先导能力的影响,探求能源转型的规律。本研究认为能源转型并非由技术先进能源替代技术落后能源或是低碳能源代替高碳能源的线性模式,能源转型是一个产业和社会发展对能源品种进行选择的过程,而能源的物质性则是关键原因,其内在机制是通过能源对产业的先导能力实现的。

通过对煤炭、石油、电力、天然气、核能和氢能六种能源的比较评估,本文研究发现能够在人类社会发展中快速被接受而且难以被取代的主导能源(煤炭、石油和电力)都有相似的特点:这些品种的能源的物质性在产业关系上可以塑造明确的市场结构和组织者,同时能够带动新产业的萌发。相比之下,无法产生明确的市场结构以及产业组织者和无法带动新产业萌发的能源品种则很难被社会接受,市场发育举步维艰,即使其科技水平在当时被认为是非常先进,核能和氢能则属于这类能源。天然气的情况则基本居于这两种情况的中

间状态。

“能源物质性”视角为我们勾勒出一条更为复杂和更具不确定性的能源转型道路,也为提供以下几点政策启示。第一,要坚定能源转型的方向与趋势,加快推动新型能源体系建设,融合主导能源与补充能源的错位优势,在转型进程中形成多能互补格局。但在促进能源转型的政策导向中要注意能源在物质性维度上的特征,即“完美”的能源并不存在,也不可能是以追寻所谓“完美”单一能源品种作为能源转型的尽头,某种物质性带来竞争优势也必然孕育风险。例如,在当今如火如荼的“电气化”趋势下,赋予电力竞争优势的“系统性”也必然带来相应的风险,需要化石能源(煤炭、天然气)、储能和分布式能源对基于“系统性”的电力风险进行快速响应和对冲。第二,在能源政策制定中要充分考虑能源的物质属性对社会的影响,能源转型不仅是一种产业发展现象,更不是粗暴的品种替代,而是一次深刻的社会系统重塑。要巧妙利用“能源物质性”带来的产业先导力和技术迁移,可以使得能源转型事半功倍。如氢能的发展可以依附于原来天然气管道网络基础设施,而海洋油气开发中的工程建设经验则可以迁移到海上风电的建设上,传统加油站则可以进化为综合能源服务站,基于矿山安全的措施也可以发展成全面的现代安全产业。第三,要充分认识到能源转型的长期性、复杂性,以及存量能源体系运行具有一定惯性。能源转型不可能一蹴而就,也不可能一“替”了之,要尊重行业规律稳健推进。以石油产业为例,石油在常温常压下最高的能量密度决定了石油的广泛使用和极长的石油产业链,石油在物质性上的优势在短时间难以消除,因此对石油的粗暴替代将带来大量资产搁浅和经济低效率等问题。石油将长期作为主导能源,与新兴清洁能源并行发展。第四,“能源物质性”决定了能源对国际地缘政治格局的影响力并不会随着可再生能源的发展而减少,目前基于油气安全的国际冲突还处于白热化阶段,而围绕着跨境水资源、关键矿产、电网互联和海洋治理等和可再生能源相关议题已经粉墨登场搅动全球经济安全的敏感神经。能源地缘安全问题将长期存在,但焦点可能从基于化石能源物质性的资源控制和运输安全转移到新型能源体系、基础设施建设和使用、环境、技术和时间维度上的安全。

参考文献:

[1] S&P GLOBAL. What is energy transition [EB/OL]. (2020-02-24) [2026-08-27]. https://www.spglobal.com/en/research-insights/articles/what-is-energy-transition.

[2] Energy and civilization: a history[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2017.

[3]於世为,胡星,何露,等. 新型能源体系的内涵诠释、逻辑必然与要素解析[J]. 中国地质大学学报(社会科学版),2025,25(4):77-94.

[4]王强,党牛,蒋子龙,等. 碳中和背景下能源转型研究综述与展望[J]. 地理学报, 2025, 80(3):586-604.

[5]FRESSOZ J B. More and more and more: an all-consuming history of energy[M]. New York: Harper, 2025.

[6]SMIL V. Energy and civilization: a history[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2017.

[7]斯米尔. 能源转型:数据、历史与未来[M]. 高峰, 江艾欣, 李宏达, 译. 北京: 科学出版社, 2018.

[8]MCNERNEY J, FARMER J D, TRANCIK J E. Historical costs of coal-fired electricity and implications for the future [J]. Energy policy, 2011, 39(6):3042-3054.

[9] GEELS F, Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study[J]. Research policy, 2002, 31(8/9): 1257-1274.

[10]范英;衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. 管理世界,2021,37(8):95-105.

[11] FISCHER-KOWALSKI M, ROVENSKAYA E, KRAUSMANN F, et al. Energy transitions and social revolutions[J]. Technological forecasting and social change, 2019, 138: 69-77.

[12]MILLER D. Materiality[M]. Durham: Duke University Press, 2005.

[13]BALMACEDA M, HOGSELIUS P, JOHNSON C, et al. Energy materiality: a conceptual review of multi-disciplinary approaches[J]. Energy research & social science, 2019, 56: 101220.

[14] BAKKER K, BRIDGE G. Material Worlds? resource geographies and the ‘matter of nature’[J]. Progress in human geography, 2006, 30(1): 5-27.

[15] PIERCE J, PAULOS E. Materializing energy [C]// Proceedings of the 8th Conference on Designing Interactive Systems, 2010: 113-122.

[16]SOYSA I. Oil and the ‘New Wars’: another look at the resource curse using alternative data[J]. Development studies

research, 2015, 2(1): 64-76.
[17]王晓光,富景筠. 能源物质性、产业链形态与经济关系的政治效果[J]. 国际论坛, 2025, 27(3): 79-99.
[18]HAYS A, TREUREN K. A study of power production and noise generation of a small wind turbine for an urban environment [J]. Journal of energy resources technology, 2019, 141(5): 051202.
[19]GOBO G, MARCHESELLI V. Science, technology and society: an introduction[M]. Cham: Springer, 2022.
[20]LIEBERMAN M, MONTGOMERY D. First-mover advantages [J]. Strategic management journal, 1988, 9(S1): 41-58.
[21]MASON E. Price and production policies of large-scale enterprise[J]. American economic review, 1939, 29: 61-74.
[22]ROTH A. The economist as engineer: game theory, experimentation, and computation as tools for design economics [J]. Econometrica, 2002, 70: 1341-1378.
[23]CHANDLER A. Organizational capabilities and the economic history of the industrial enterprise[J]. The journal of economic perspectives, 1992, 6(3): 79-100.
[24]许正中, 高常水. 后危机背景下先导产业发展路径探析[J]. 中国软科学, 2009(11): 19-24.
[25]迟红刚, 徐飞. 从技术创新到社会技术系统转型:工业革命先导产业创新驱动发展的历史启示[J]. 科技管理研究, 2016(24): 1-7.
[26]WRIGLEY E A. Energy and the english industrial revolution [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
[27]柴国生. 宋代能源经济发展论述[J]. 中州学刊, 2023(3): 148-155.
[28]MALM A. Fossil capital: the rise of steam power and the roots of global warming[M]. New York: Verso Books, 2016.
[29]SPEAR B. Coal-parent of the industrial revolution in Great Britain: the early patent history[J]. World patent information, 2014, 39: 85-88.
[30]BLACK B C. To have and have not: energy in world history[M]. Lanham: Rowman & Littlefield, 2022.
[31]KENNEDY C. The energy embodied in the first and second industrial revolutions[J]. Journal of industrial ecology, 2020, 24(4): 887-898.
[32]JONES C. The materiality of energy [J]. Canadian journal of history, 2018, 53(3): 378-394.
[33]FERNIHOUGH A, O'ROURKE K. Coal and European Industrial Revolution[J]. The economic journal, 2020, 131(635): 1135-1149.
[34]SUGDEN K, KEIBEK S, WELLS J, et al. Adam Smith's revisited:the relationship between the English woollen manufacture and the availability of coal before the use of steam power[J]. Continuity and change, 2023, 38(2): 163-191.
[35]TETZLAFF E J, GOGGINS K A, PEGORARO A L, et al. Safety culture: a retrospective analysis of occupational health and safety mining reports[J]. Safety and health at work, 2021, 12(2): 201-208.
[36]KAHLE T. Energy citizenship: coal and democracy in the American Century[M]. New York: Columbia University Press, 2024.
[37]OCELIK P. A contested transition toward a coal-free future: advocacy coalitions and coal policy in the Czech Republic[J]. Energy research & social science, 2019, 58: 101283.
[38]TARBELL I. The history of the Standard Oil Company [M]. New York: Dover Publications, 2003.
[39]Energy Information Administration. U. S. Petroleum & other liquids [R/OL]. https://www. eia. gov/dnav/pet/hist/LeafHandler. ashx? n = PET&s = MCRFPUS1&f = A.
[40]BACA G. Legend of Fordism: Between myth, history, and foregone conclusions[J]. Social analysis, 2004, 48(3): 169-178.
[41]MITCHELL T. Carbon democracy: political power in the age of oil[M]. London, New York: Verso Books, 2011.
[42]JONES C. The materiality of energy[J]. Canadian journal of history, 2018, 53(3): 378-394.
[43]Nature. Electricity power in London[J]. Nature, 1907, 75: 418-419.
[44]HYMAN L. Electricity acts[M]. New York: Public Utilities Reports, 2017.
[45]KEHRBERG J. Die Entwicklung des Elektrizitätsrechts in Deutschland: der Weg zum Energiewirtschaftsgesetz von 1935 [M]. Frankfurt am Main: Peter Lang GmbH, 1996.
[46]STRATMAN K. Netzagentur-Chef stellt Hoehere Renditen in Aussicht[N]. Handelsblatt, 2025-09-17.
[47]VAHEESAN S. Democracy in power: a history of electrification in the United States[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2024.
[48]COOPERSMITH J. The electrification of Russia, 1880 – 1926[M]. London: Cornell University Press, 1992.
[49]SCHIVELBUSCH W. Disenchanted night: the industrialization of light in the nineteenth century[M]. Berkeley: University of California Press, 1988.
[50]NYE D. Electrifying America: social meanings of a new technology, 1880-1940[M]. London: MIT Press, 1992.
[51]PALMA A, PALTRINIER A, GOODELL J, et al. The blackbox of natural gas market: past, present, and future[J]. International review of financial analysis, 2024, 94: 103260.
[52]BONZANNI A. The economics of energy networks[M]//

MANFRED H, LUCIANI G, eds. The Palgrave handbook of international energy economics. Cham: Palgrave Macmillan, 2022: 68.
[53]贾爱林, 王国亭, 李易隆. 中国天然气开发形势与远景展望[J]. 国际石油经济, 2025, 45(5): 31-42.
[54] LOE J. 'But it is our duty!' exploring Gazprom's reluctance to Russian gas sector reform [J]. Post-soviet affairs, 2018, 35(1): 63-76.
[55]OPELSKA I. The efficiency of liberalization and privatization in introducing competition into European natural gas markets[J]. Utilities policy, 2017, 48: 12-21.
[56]BABIC M, MERTENS D. Decarbonization under geoeconomic distress? energy shocks, carbon lock-ins, and Germany's pathway toward net zero[J]. Regulation & governance, 2025, 19(2): 448-468.
[57]史丹, 吴迪. 新型能源体系建设的观点评述与研究展望[J]. 兰州大学学报(社会科学版), 2025(3): 5-14.
[58] GILBOY J. Inside the impossible dream of the nuclear-powered 1958 Ford Nucleon[EB/OL]. (2021-07-05)[2026-08-28]. https://www.thedrive.com/news/41103/heres-why-the-nuclear-powered-1958-ford-nucleon-never-entered-production.
[59]WITTNER L. Confronting the bomb: a short history of the world nuclear disarmament[M]. Stanford: Stanford University Press, 2009.
[60]WEIBEZAHN J, STEIGERWALD B. Fission for funds: the financing of nuclear power plants [J]. Energy policy, 2024, 195: 114382.
[61] ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. Five countries account for 71% of the world's nuclear generation capacity[R/OL]. (2025-08-11)[2026-08-28]. https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php? id=65904.
[62] CARLESS T, REDUS K, DRYDEN R. Estimating nuclear proliferation and security risks in emerging markets using Bayesian belief networks [J]. Energy policy, 2021, 159: 112549.
[63]BUKHARIN O. Integration of the military and civilian nuclear fuel cycles in Russia[J]. Science & global security, 1994, 4(3): 385-406.
[64] Energy Information Administration. Nuclear explained: U.S. nuclear industry[R/OL]. [2026-08-29]. https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/us-nuclear-industry.php.
[65] PHILIP A. The governance of civil nuclear power in France: advantages and disadvantages of deep state involvement [J]. Journal of world energy law & business, 2022, 15(2): 151-166.
[66]ROTHWELL G. Projected electricity costs in international nuclear power markets[J]. Energy policy, 2022,164: 112905.
[67]冉永平, 赵秀芹, 丁怡婷, 等. 国家电投:融合发展撬动能源转型(深度观察)[N]. 人民日报, 2021-09-08 (18).
[68]WELLOCK T. "Too cheap to meter": a history of the phrase [EB/OL]. (2026-08-11) [2026-08-29]. https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/history-101/too-cheap-to-meter.
[69]ROTHWELL G. Projected electricity costs in international nuclear power markets[J]. Energy policy, 2022, 164: 112905.
[70] TOMPKINS A S. Better active than radioactive! anti-nuclear protest in 1970s France and West Germany [M]. Oxford: Oxford University Press, 2016.
[71] Energy Information Administration. Hydrogen explained [EB/OL]. [2026-08-29]. https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/.
[72]程一步. "氢"风破浪会有时[EB/OL]. (2025-09-01) [2026-08-29]. http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-09/01/content_7132262.html.
[73]BRANDO N, KURBAN Z. Clean energy and the hydrogen economy[J]. Philosophical transactions of the royal society a: mathematical, physical and engineering sciences, 2017, 375 (2098): 20160400.
[74]GOMONOV K, PERMANA C T, HANDOKO C T. The growing demand for hydrogen: current trends, sectoral analysis, and future projections [J]. Unconventional resources, 2025, 6: 100176.
[75] FROWLIJN L S F, BANEKE D, KRAMER G J. Imagining a hydrogen economy: from grand technological utopia to enabler of the energy transition in three waves since the 1970s[J]. Energy research & social science, 2025, 126:104084.
[76] International Energy Agency. Global hydrogen review 2024[R/OL]. [2026-08-29]. https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf.
[77]COASE R H. The nature of the firm[J]. Economica, 1937, 4(16): 386-405.
[78]KIM W C, MAUBORGNE R. Blue ocean strategy[J]. Harvard Business Review, 2004, 82(10): 76-84.
[79] BORENSTEIN S, ROSE N L. Competition and price dispersion in the US airline industry[J]. Journal of political economy, 1994, 102(4): 653-683.
[80] National Energy Technology Laboratory. Overview of coal-to-liquids: a historical perspective[R/OL]. [2026-08-29]. https://www.netl.doe.gov/sites/default/files.