

综述文章

能源价值链在碳中和中的作用：综述

罗政^{1,2}, 林小杰^{1,2,*}, 吴燕玲^{1,2,*}, 钟崑^{1,2}¹ 能源工程学院, 浙江大学, 杭州市 310058, 浙江省, 中国² 上海高等研究院, 浙江大学, 上海市 201203, 中国* 通讯作者: 林小杰, xiaojie.lin@zju.edu.cn; 吴燕玲, shelleywu@zju.edu.cn

引用格式

罗政, 林小杰, 吴燕玲, 钟崑. 能源价值链在碳中和中的作用: 综述. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(4): 259. <https://doi.org/10.18686/cncest.v2i4.259>

Luo Z, Lin X, Wu Y, Zhong W. Role of energy value chain in carbon neutrality: A review (Chinese). Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(4): 259. <https://doi.org/10.18686/cncest.v2i4.259>

文章信息

收稿日期: 2024-07-15
录用日期: 2024-10-18
发表日期: 2024-10-29

版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由 Universe Scientific Publishing 出版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/192>

摘要: 价值链分析是企业优化运营和决策的重要工具。随着可持续发展理念在世界范围内得到认可, 价值链研究也越来越关注可持续性。传统上, 能源管理与价值管理并行不悖, 交集有限。然而, 自2015年《巴黎协定》提出实现净零排放的目标后, 碳管理已成为国家战略不可或缺的一部分, 传统价值链需要重新审视。本文引入“能源价值链”这一新概念, 将能源消耗与价值创造和碳排放融为一体, 强调“能源流”、“价值流”和“碳流”之间的耦合关系。通过对电力、钢铁、石油和交通运输等行业现有价值链的回顾, 定义了各行业特定的能源价值链, 并讨论了其合理性和有效性。这种集成分析方法为行业或企业优化能源消耗、减少碳排放、增强竞争优势提供了战略工具。

关键词: 能源价值链; 能源消耗; 价值创造; 碳排放

1. 引言

人类发展史可以简单地描述为能源利用史。然而, 随着自然资源日益枯竭, 能源消耗的管理也越来越精细化。世界各国政府和相关组织都出台了限制能源消耗的政策。2017年, 欧盟出台了《能源效率指令》, 旨在促使成员国设定效率目标, 促进高效能源消费 [1]。2015年, 中国提出以能源消费总量和强度为基础评估国家能源消费 [2]。在这股浪潮中, 企业作为政策实施者和创新引领者也在做出努力。例如, 西门子开发的 SIMATIC 能源管理软件, 集成了从数据记录到能源分析的所有功能, 有效帮助客户降低能源成本, 提高能源效率 [3]。施耐德电气的 EcoStruxure 平台集成了物联网、传感器和云计算技术, 实现智能能源管理和优化 [4]。全球都在努力提高能源的高效清洁利用。

价值链是 1985 年波特提出的 [5], 指出企业的竞争优势不仅来自于外部的市场环境, 也来自于企业内部活动的组织和管理。这些活动包括从原材料采购到生产、从销售到售后服务的每一个活动, 构成了一个价值创造过程, 即价值链。通过价值链分析, 企业可以识别出哪些活动是有利的, 哪些活动需要改进, 以获得长期的竞争优势。随着企业间竞争的加剧和 market 需求的日益复杂, 价值链分析从单个企业扩展到整个行业。企业开始认识到, 优化整个行业的价值链, 而不仅仅是内部的价值链, 可以带来更大的竞争优势。例如, 汽车行业中汽车制造商和零部件供应商之间的合作就是这种更广泛的价值链视角的应用 [6,7]。随着经济全球化的到来, 生产活动日益全球化, 价值链分析也从局部行业扩展到全球范围。全球价值链 (GVC) 的概念逐渐得到广泛的认可 [8]。GVC 关注的是全球范围内产品和服务的生产、分配和消费。GVC 分析强调全

球生产网络内不同国家和地区之间的分工与合作。如何通过 GVC 提升国家或地区经济竞争力，如何在 GVC 内实现更高的附加值，是当前研究者和政策制定者关注的重点。

全球能源和气候危机凸显了各行各业优先考虑清洁、高效和可持续发展的必要性。作为回应，价值链研究领域引入了各种概念，例如可持续价值链，它不仅强调价值创造，还强调节约和高效利用资源以确保长期可持续性。能源管理是可持续发展的重要组成部分，人们越来越认识到它对支持这些努力至关重要。然而，大多数企业能源管理战略仍然侧重于能源成本，缺乏研究能源消耗如何积极促进价值创造所需的战略深度。虽然一些研究试图将价值链分析与能源部门应用相结合 [9–11]，但这些研究工作往往仍停留在表面，侧重于基本应用，而不是深入研究能源消耗在价值创造中的复杂作用。具体而言，它们未能充分探讨“能量流”和“价值流”之间的关系。缺乏一个全面的分析框架来整合这两个关键流程，这是当前研究的一个重大空白。

随着全球气候变暖的到来和联合国社会发展目标的确立，碳排放成为影响工业和企业发展的重要因素，各国纷纷出台环境保护政策，在此背景下，碳排放管理也逐渐被纳入价值链管理 [12–14]，如欧盟《可持续产品生态设计条例》对所有投放市场或投入使用的产品的碳足迹进行限制 [15]。在能源、碳和价值的管理压力下，需要一种结合碳流、能源流和价值流的综合方法，但支持多目标管理的有效联合分析方法尚未出现。本研究通过回顾相关研究，定义了一个统一这些流的新框架——“能源价值链”，作为优化碳约束经济运营的战略工具。

本文的结构如下。第 1 节概述了能源价值链概念的背景，并简要介绍了价值链中能源管理和碳管理的现状。还分析了能源流-价值流-碳流多视角分析的可行性。

第 2 节借鉴现有研究，基于能源消费支持价值创造的观点，提出了能源价值链的具体定义。从不同利益相关者的角度分析了能源价值链的重要性。

第 3 节提出了由于不同行业独特的能源消费过程、生产工作流程和供应链结构而针对不同行业制定的更具体的能源价值链。还研究了能源价值链在这些行业中发挥的作用。

第 4 节总结了对能源价值链概念的分析，并展望了能源价值链管理的更具体的方法。

2. 能源价值链的定义及意义

2.1. 能源价值链的定义

传统价值链与能源价值链的结构基本相似，都描述了原材料采购-生产-销售的过程。但与传统价值链仅关注价值流相比，能源价值链更强调能源消费在价值创造活动中的支撑作用，更加强调能源流、价值流和碳流之间的相互作用 [16–18]。与能源流和价值流相比，碳流的定义更加模糊。在本研究中，碳流的定义具体是指能源网络内碳排放的移动。这种碳流被表示为一个虚拟网络，它

反映了能源网络的拓扑结构。与能源网络中的有形参数（其中节点和分支对应于能源消费者/生产者和传输参数，例如电压、液压或温度）不同，在这个虚拟碳网络中，节点代表与能源消费和生产相关的碳排放，而分支代表与能源传输相关的排放。借鉴传统价值链从企业到行业的发展模式，考虑到各层级利益相关者的利益差异，本研究将能源价值链的研究对象分为行业和企业两部分，并在此基础上对能源价值链进行广义和狭义两种定义，具体定义如下：

1) **广义能源价值链**：将一个行业视为一个整体，其能源价值链涵盖了能源消费支持的所有价值创造和转移活动，从基础原材料的开采到最终消费产品的形成。在广义能源价值链中，企业甚至企业集群被视为能源流、价值流和碳流的转换枢纽，创造和转移价值，如图 1 所示。

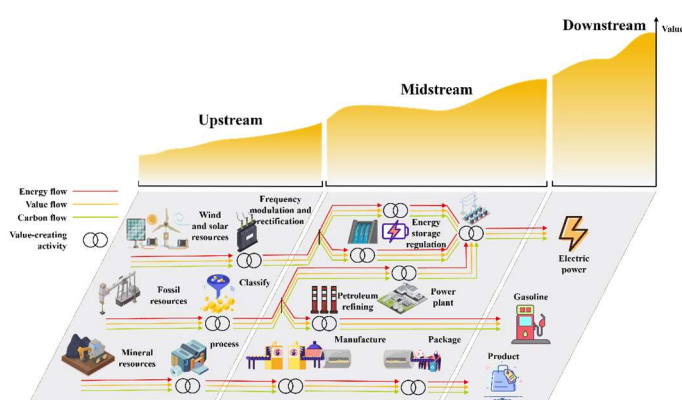


图 1. 能源价值链总体图。

Figure 1. General diagram of energy value chain.

2) **特殊能源价值链**：特殊能源价值链主要针对能源消耗高、价值创造活动密集的中游企业，将企业视为一个整体，涵盖从原材料采购到最终产品形成的所有以能源消耗为支撑的价值创造和转移活动。在特殊能源价值链中，生产过程的不同活动被视为能源流、价值流和碳流的转换枢纽，这些活动创造和转移了价值。与传统价值链相比，能源价值链的“上游-中游-下游”环节存在一些差异，具体如下 [17,19]：

- **上游**：在传统价值链中，上游活动通常侧重于原材料的开采和供应。然而，能源价值链通过整合能源相关产品和服务的生产过程来扩展这一范围。除了传统原材料外，这还包括可再生能源，如风能和太阳能。这些材料的获取涉及特定的提取过程，这是能源生产后续阶段的基础。在本研究中，为了简化展示并关注能源价值链的核心组成部分，行业之间的相互作用，特别是电力、石油和制造业，被简化以强调每个行业内不同的过程。
- **中游**：能源价值链的中游阶段主要涉及能源的产生和转换，这带来了高度的技术复杂性。这一阶段依赖于专门的基础设施，如发电厂，并受物理原理（如热力学第二定律）的支配，这限制了效率。这些技术限制与传统价值链中的中游运营存在显著差异，传统价值链中的中游运营通常不受物理定律的约束，更注重原材料的转化。

- **下游:** 传统价值链侧重于实物商品的分销, 而能源价值链的下游阶段则涉及电力和天然气等能源商品, 这些商品由于存储限制而面临独特挑战。这一阶段需要在供需之间实现微妙的平衡, 并需要复杂的管理系统来确保稳定性, 这与传统上对仓储和物流的关注形成了鲜明对比。

2.2. 能源价值链的意义

能源价值链分析针对的是不同的利益相关者, 能源价值链对各个利益相关者的作用和意义尚不十分明确。本节将从企业、行业、政府以及全球碳中和目标的角度, 详细论述能源价值链的作用和意义。

- 1) **企业:** 历史上, 企业往往孤立地考虑能源流、价值流和碳流, 忽视了企业作为行业环节对这些流耦合的影响。对能源价值链进行一般分析, 可以准确定位企业在行业能源流、价值流和“碳流”中的互动关系, 从而充分挖掘企业优势, 培育差异化竞争优势 [17,20,21]。特殊的能源价值链提供了一种分析原材料转化、制造、运输、储存和销售等各种活动的价值创造和能源消耗过程的工具。通过分析这些过程, 企业可以准确地识别关键的价值创造活动、低能源效率活动和高碳排放活动。这种分析支持战略决策, 优化价值链配置, 提升竞争力 [17,20,21]。
- 2) **行业:** 在全球能源危机的威胁下, 世界各国都在积极寻求更清洁、更可持续的能源 (例如氢能和核能)。这一进程的加速需要各行业的能源消费结构不断更新和迭代。在此背景下, 能源价值链可以从能源流、碳流和价值流的角度指导不同行业的能源消费结构转型 [19,20,22]。
- 3) **政府:** 首先, 能源价值链分析可以指导政府确定资源节约或污染减少的潜在领域, 这在环境可持续性和气候变化的背景下越来越重要 [16,17,22,23]。其次, 从经济角度来看, 能源价值链可以帮助发展中国家发现获取更大份额附加值的机会。这对于目前从事低价值、劳动密集型制造业的国家尤其重要, 因为它可以帮助它们避免陷入价值链的低价值环节 [16,17,22,23]。最后, 了解能源价值链可以帮助政府制定影响行业价值链规模、形态和形式的政策, 包括环境法规和税收 [16,17,22,23]。
- 4) **全球碳中和目标:** 能源价值链的发展可以做出多方面的贡献。首先, 优化能源价值链可以支持提高能源效率, 大幅减少碳排放。正如刘等人 [24]所提出的, 在正反馈循环中提高能源和环境效率可以从全球价值链的角度提供见解。其次, 能源价值链推动的清洁能源也有助于实现碳中和。例如, 中国二氧化碳排放量的结构性下降归因于工业和能源系统的转型 [25]。第三, 正如蔡等人 [26]所提出的, 能源价值链的发展可以涉及实施更严格的环境法规, 优化能源结构和提高能源效率。这有助于减少贸易中的净排放, 特别是对于高碳排放经济体。最后, 全球价值链在发达经济体和新兴经济体二氧化碳排放增长中的作用也很重要。因此, 了解和发展这些以碳减排为重点的价值链有助于实现全球碳中和目标。

3. 各行业能源价值链

与特殊能源价值链相比，广义能源价值链支持在行业层面进行综合分析，使结论更适用于不同行业。广义能源价值链涉及政府、行业和企业等多个利益相关者。本研究的一个关键问题是能源价值链如何使每个行业受益。因此，下文中的能源价值链均指广义能源价值链。

此外，由于不同行业的能源消费结构存在差异，使用单一的通用能源价值链进行分析并不切实际。开发适用于不同行业的特定能源价值链具有更深远的意义，原因如下 [22,27,28]:

- 1) **生产环节多样化:** 不同行业涉及不同类型的能源消耗和生产，单一的能源价值链不足以满足各行业对能源流和价值流的精细管理。
- 2) **能源转型:** 全球能源危机加速了从化石燃料向可再生能源的转变，这种转型往往会带来能源供应的波动。为每个行业制定特定的能源价值链，可以透彻分析能源消耗和每个环节的重要性，从而选择更稳定的化石燃料或更清洁的可再生能源来构建能源价值链。
- 3) **能源安全与效率:** 不同行业的特定能源价值链有助于解决确保能源安全、经济增长和效率的“不可能三角”。这在数字经济快速扩张的背景下尤为重要，需要探索能源行业、供应链和价值链的数字化治理。

本研究选取全球碳排放贡献最大、能源消耗和碳排放密度最高的四个行业——电力行业、钢铁行业、石油行业和交通运输行业作为研究对象 [29]，探讨了能源价值链在这些行业中的意义和作用。

3.1. 电力行业

对于电力行业，已经形成了涵盖源-网-荷-储四个环节的完整价值链。在此基础上，进一步构建了电力行业专属、详细的能源价值链 [30-32]，如图2所示。

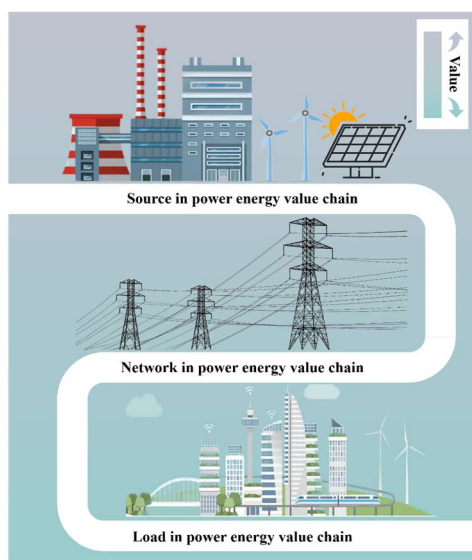


图 2. 电力行业的能源价值链。

Figure 2. Power industry's energy value chain.

- 1) **源头:** 这是电力行业能源价值链的初始环节, 主要负责能源生产。该环节的活动包括原材料(如煤炭、天然气或石油)的开采、可再生能源(如太阳能和风能)的利用以及电力生产(如燃煤电厂、核电站和水电站)。该环节的企业主要包括煤矿、油田和发电厂的所有者或管理者。
- 2) **网络:** 该环节主要负责电力的传输和分配。电网的结构因国家而异, 一般分为集中式和分散式。该环节的企业主要包括这些电网的所有者或管理者。
- 3) **负荷:** 该环节主要消耗能源。它涉及工业、交通、建筑等终端用户的能源使用。该环节由一系列复杂的企业组成, 几乎涵盖了所有业务。
- 4) **存储:** 该环节涉及能源存储。能源存储并不局限于特定环节, 可以存在于所有源头-网络-负荷环节中。每个实体可能会部署不同类型的储能系统以用于各种目的。

能源价值链的主要目标之一是确定在整个链条中创造最大价值的活动。传统上, 在电力行业中, 源头部分一直是创造价值的中心节点。然而, 随着分布式能源发电和存储技术创新的兴起, 电力行业的能源价值链正在发生根本性的转变。分布式发电、储能系统和电动汽车 (EV) 等技术在价值创造和资源管理中发挥着越来越重要的作用。这种从源头部分到负载部分的转变意味着整个链条上价值的重新分配, 改变了对价值创造地点的传统理解 [30]。

这种转变是由多种力量推动的, 包括对碳中和的日益增长的需求以及全球向更清洁能源的能源转型。由于电力行业占全球碳排放的很大一部分, 能源价值链提供了一个战略框架, 以使脱碳目标与经济效率保持一致。值得注意的是, 智能计量、分布式发电机和虚拟发电厂等创新技术的整合, 以及能源存储和电动汽车的深度融合, 为脱碳和提高效率提供了新的途径 [33]。这些创新不仅优化了能源分配、减少了浪费, 还有助于使能源部门与净零碳目标保持一致。此外, 能源行业的数字化正在促进新的商业模式, 这些模式利用电力网络中呈指数级增长的数据, 进一步使消费者能够参与能源优化工作 [34]。

电力行业净零转型的紧迫性因其巨大的碳强度而加剧。全面的能源价值链分析侧重于能源流、价值流和碳流之间的相互作用, 可以提供独特的见解, 了解链条的不同环节如何导致碳排放。价值链实现的一个关键机制是逆流概念, 即消费者(尤其是拥有可再生能源的消费者)将多余的能源回馈给电网。这一过程由分布式能源的普及而实现, 不仅减少了对化石燃料的依赖, 而且当输入电网的能源超过消耗时, 还会导致净碳减排 [34]。

此外, 能源价值链可以作为用低碳替代品替代高碳工艺的蓝图。例如, 集成智能电网技术可通过优化电力分配、减少能源损失并进而降低碳排放来提高能源效率 [31]。除了技术之外, 能源价值链还可以识别电力行业内的高碳环节, 使政策制定者和行业领导者能够瞄准并逐步淘汰或简化碳密集型工艺, 直接为实现碳中和目标做出贡献。

虽然价值创造历来以最大化效率和经济收益为中心, 但能源价值链提供了一个整体框架来平衡这些目标与可持续性和碳减排。例如, 能源价值链分析强调了信息和通信技术在提高运营效率和资产管理方面的关键作用。例如, 东京

电力公司已集成区块链技术来更有效地管理电力流，从而提高能源分配效率并显著降低成本 [35]。

此外，能源价值链对资源整合和分配的重视对于最大限度地降低运营成本至关重要，同时有助于减少碳排放。将分布式发电机纳入虚拟发电厂、开发智能电表以及集成电动汽车不仅可以简化生产流程，还可以增强电力行业实现碳中和的能力 [36]。通过这些举措，整个能源价值链正在发生转变，因为流程的数字化和清洁技术的进步重塑了价值创造的格局，使其与全球脱碳目标保持一致。

3.2. 钢铁行业

通过对钢铁行业价值链和冶炼过程的深入研究，提出将钢铁行业能源价值链划分为几个关键环节，定义如下 [37–39]，如图3所示：

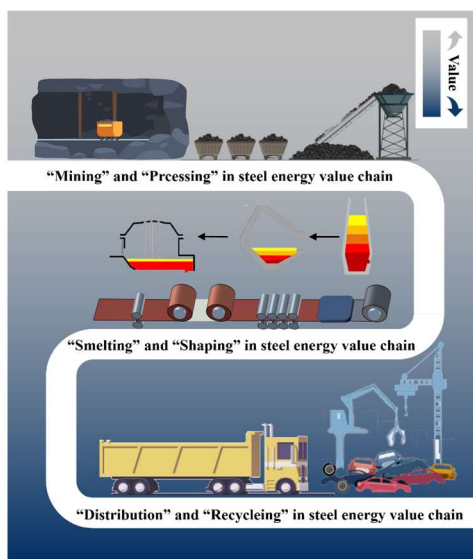


图 3. 钢铁行业的能源价值链。

Figure 3. Steel industry's energy value chain.

- 1) **采矿：** 钢铁行业能源价值链的第一步是原材料的开采，主要是铁矿石和煤炭。这一过程耗能大，需要使用重型机械进行采矿和运输，主要能源消耗是电力。
- 2) **加工：** 然后将原材料加工成适合钢铁生产的形式。这包括粉碎和清洗铁矿石以及炼焦煤以生产焦炭。这两个过程都需要大量能源，主要以热量的形式存在。
- 3) **冶炼：** 加工后的材料用于生产钢铁。这通常在高炉中进行，在高炉中通过在石灰石存在下燃烧焦炭将铁矿石还原为铁。然后在碱性氧气转炉中将铁转化为钢。这两个过程都是耗能大，需要大量的热量（来自煤炭燃烧）和电力。
- 4) **成型：** 然后将钢成型为各种形式，例如板材、棒材或梁。这通过各种工艺完成，例如轧制、锻造或挤压，所有这些工艺主要使用电力。
- 5) **分销：** 最终产品分销给各个行业使用。虽然这一环节的能源密集程度低于

前面几个环节，但它包括与运输行业的互动。

- 6) **回收:** 最后，钢铁可以在其生命周期结束时进行回收，从而减少对新原材料的需求以及提取和加工这些原材料所需的能源。这包括收集和分类废钢，然后将其熔化和重塑。

钢铁行业在其能源价值链的每个环节都提供了巨大的节能机会，使其成为实现碳中和的关键领域。通过深入研究能源价值链，可以发现每个环节都具有尚未开发的能源优化和碳减排潜力。

钢铁行业能源价值链的第一环节涉及铁矿石和煤炭等原材料的开采和加工，这些原材料特别耗能。这一阶段为降低能源消耗和减少碳排放提供了巨大的潜力。正如 Panasiyk 等人 [40] 和 Michaelis 和 Jackson [41,42] 所讨论的，材料流分析表明，能源价值链分析可以识别材料和能源使用中的低效率。这些低效率不仅是降低成本的机会，也是减少行业碳足迹的重要杠杆点。通过关注这一环节，能源价值链分析通过强调可以减少能源投入的领域，直接有助于实现碳中和的更广泛目标，从而降低相关排放。

第二个主要环节是冶炼，能源浪费非常普遍，尤其是以废热的形式。冶炼是钢铁生产中碳排放最密集的工艺之一，因为熔炼铁和去除杂质需要大量能源。能源价值链分析可以系统地量化每项生产活动中的能源浪费，从而为部署能源回收技术提供可行的见解。这些技术，如废热回收，不仅可以减少能源使用，还可以通过提高整体能源效率大幅减少碳排放 [38]。

钢铁行业能源价值链的最后部分涵盖成品钢的分销和使用。在此阶段，可以通过优化物流和运输以及鼓励钢铁的回收和再利用进一步降低能源成本和排放。回收在减少对能源密集型初级钢铁生产的需求方面发挥着关键作用，从而减少整个价值链的排放。通过促进钢铁行业的循环经济，能源价值链分析有助于减少产品生命周期内的能源消耗和碳排放。

与区域性特征较强的电力行业相比，钢铁行业更容易受到国际能源市场状况和政策的影响。能源价值链分析对于管理这些全球风险和不确定性至关重要。首先，它使钢铁行业能够更好地了解国际贸易动态，特别是生产所必需的能源投入。通过列出影响能源成本和可用性的关键因素，能源价值链为行业提供了预测和应对可能破坏能源供应的国际贸易政策变化的工具。在这方面，能源价值链分析是制定更具弹性和适应性的战略的基础，最终有助于实现行业的长期碳减排目标。

此外，能源价值链分析有助于钢铁行业应对全球能源分布的复杂性，特别是在地缘政治风险方面。例如，如果能源供应来自政治或经济条件不稳定的地区，该分析可以帮助钢铁公司实现能源来源多元化或提高能源效率，作为一种风险缓解策略。这些策略不仅可以确保能源供应，还可以减少对高碳能源的依赖，从而推进碳中和工作。

最后，能源价值链有助于引导钢铁行业了解全球政策趋势，特别是与能源和气候变化相关的政策趋势。随着世界各国政府采取更严格的碳排放法规，行业必须适应日益严格的环境标准。通过了解价值链中的能源和碳流动，钢铁制造商可以制定主动战略，例如投资减碳技术，以符合监管趋势并减轻与碳排放

相关的成本上升 [38,43]。这种前瞻性方法确保该行业不仅遵守全球脱碳政策，而且还在推进碳中和方面发挥积极作用。

3.3. 石油工业

通过对石油工业的全面回顾，石油工业的能源价值链定义如下 [44,45]，如图4所示：

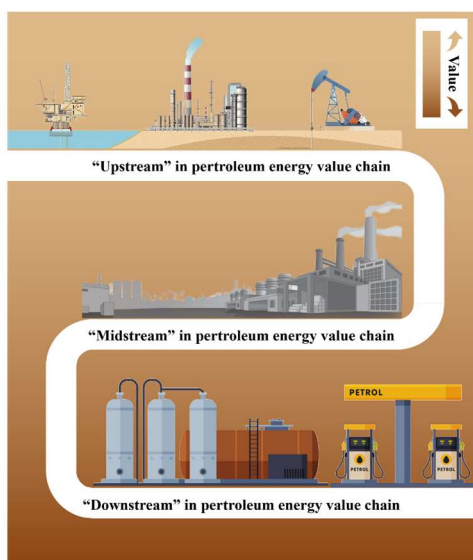


图 4. 石油工业的能源价值链。

Figure 4. Petroleum industry's energy value chain.

- 1) **上游:** 这是石油行业能源价值链的第一部分，涉及原油或天然气的勘探、开发和生产。勘探包括识别与石油或天然气矿床相关的岩层，并在潜在地点进行地质调查和地震测试。开发是建设阶段，在此期间钻井并准备开采天然气储层。生产是开采环节，从地下开采原油或天然气。
- 2) **中游:** 此环节涉及原油或精炼石油产品的运输、储存和批发营销。管道、卡车、轮船和铁路通常用于将石油和天然气运输到各个地点。存储设施用于存放大量石油和天然气，批发营销包括将石油产品出售给分销商。
- 3) **下游:** 这是石油行业能源价值链的最后一部分，涉及原油的精炼和原始天然气的加工和净化。它还包括石油衍生产品的营销和分销。下游行业通过各种产品到达消费者，例如汽油、煤油、航空燃料、柴油、取暖油、燃料油、润滑剂、蜡、沥青、天然气和液化石油气。

石油行业是全球重要的资源，由于直接受到地缘政治和市场波动的影响，因此它面临的国际环境风险比钢铁行业等行业更大。能源价值链框架提供了一个战略视角，行业可以通过它来应对这些复杂情况，特别是在应对市场适应和碳中和的双重挑战方面。首先，能源价值链促进创新资源与不断变化的市场需求的协调，例如对可再生能源和可持续性的日益重视。这种协调可能涉及提高炼油效率或开发符合全球向清洁能源转变的新产品。通过利用能源价值链，石油行业可以实现投资组合多元化，纳入可再生能源以减少对石油和天然气的依赖，从而减轻与政治和经济不稳定相关的风险。

除了多元化之外，能源价值链还可以指导行业重组其业务模式，以更有效地管理固有风险。这种重组可能包括投资基础设施弹性、确保供应链安全以及制定应急计划以应对潜在的中断。例如，通过识别能源流中的瓶颈，该行业可以实施主动风险管理策略，以缓冲全球波动的影响。此外，全球推动减缓气候变化的努力为该行业提供了创新机会，即采用风能、太阳能光伏和生物能源等可再生能源技术，这些技术正日益成为主流 [28,46]。

电动汽车的不断发展进一步加剧了石油和运输行业的脱钩，迫使石油行业进行重大转型。石油行业的能源价值链提供了一个强大的战略框架来促进这一转变，使该行业能够适应并利用电动汽车日益增长的主导地位。这种适应的一个关键方面是使用能源价值链中的碳流分析来评估将生物燃料、氢和电力整合到各个领域的可行性。通过推广多元化的能源替代品，能源价值链可以引导石油行业走向低碳、可持续的未来 [46]。

此外，能源价值链有助于将价值流重新导向电动汽车的能源生态系统。例如，石油公司可以利用其广泛的基础设施来支持电动汽车充电站清洁能源的开发。这不仅创造了新的收入来源，而且还使该行业成为向低碳经济转型的关键参与者。通过重新利用现有资产和专业技能，该行业可以在快速转变的能源格局中保持相关性，并在转型中发挥积极作用 [45,46]。

石油行业是全球碳排放的主要贡献者，面临着实现净零目标的巨大压力。能源价值链提供了一个全面的框架，用于确定可以减少排放的战略要点，从而使该行业与更广泛的碳中和目标保持一致。首先，投资碳捕获和储存 (CCS) 技术至关重要。通过关注关键排放点，例如开采地点和炼油厂，该行业可以显著减少其碳足迹。这种方法不仅可以确保遵守严格的监管要求，还可以加强该行业应对气候变化的承诺 [47]。

除了 CCS 之外，将可再生能源整合到运营组合中对于减少对化石燃料的依赖和最大限度地减少碳排放至关重要。这一战略支持行业向可持续发展转型，同时加强了能源价值链在推动系统变革方面的作用。通过在勘探、生产、炼油和运输阶段采用节能技术和做法来提高能源效率，也在降低排放方面发挥着关键作用。对能源价值链的分析可以发现效率低下的问题并指导干预措施，使这些做法成为减少该行业碳足迹最具成本效益的解决方案之一。

最后，该行业对低碳技术的投资必须持续并扩大。该领域的研究和开发对于保持可持续实践的领先地位至关重要，同时也为新的能源生产和利用方法开辟了道路。通过战略性地利用能源价值链，石油行业可以以有助于其经济竞争力和全球碳中和议程的方式进行创新 [46]。

3.4. 交通运输行业

通过全面审视交通运输行业整个产业链流程，提出交通运输行业能源价值链定义如下 [48]，如图5所示：

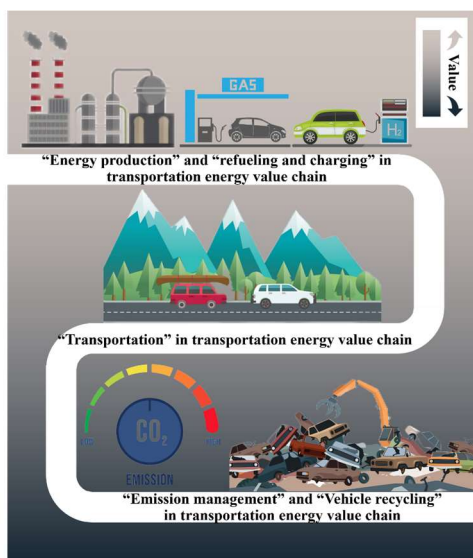


图 5. 运输行业的能源价值链。

Figure 5. Transportation industry's energy value chain.

- 1) **能源生产：**该部分涉及生产交通运输所需的各种能源。包括将原油精炼成汽油和柴油、将电能储存在电池中以及将可再生能源转化为车辆可用的氢气，以确保与不同交通方式的兼容性。
- 2) **加油和充电：**该部分涉及直接向车辆提供燃料所需的基础设施，包括加油站和电动汽车充电站。这种基础设施的发展是支持多样化车辆类型和更广泛采用清洁交通技术的关键。
- 3) **交通运输：**该部分的重点是车辆实际使用能源来实现移动性。在这里，提高能源效率涉及车辆设计和运行的技术进步，例如发动机改进和轻质材料的使用。
- 4) **排放管理：**鉴于交通运输带来的环境挑战，该部分侧重于通过先进技术减少排放并管理交通运输活动的整体环境足迹。
- 5) **车辆回收：**最后一个部分涉及对环境负责的车辆处置和回收，旨在回收有价值的材料并减轻车辆退役对环境的影响。

通过将能源价值链分解为生产、储存、分配和最终使用等基本组成部分，利益相关者可以确定直接有助于实现碳中和的创新关键点。这种结构化方法不仅能够整合多种能源，还能确保技术和基础设施针对当前和未来的能源需求进行优化，从而减少碳排放。例如，在生产阶段，提高效率的创新，如使用风能、太阳能和氢能等可再生能源，直接支持脱碳努力。在向更清洁的能源结构过渡的阶段，增强化石燃料的开采和加工方法也有助于降低能源强度和排放。在储存和分配方面，电池技术、氢存储解决方案和智能电网系统的进步发挥着重要作用。这些创新不仅有助于减少分配过程中的能源浪费，而且还能使可再生能源的清洁能源稳定流动，从而降低对碳密集型能源形式的依赖 [48,49]。

在终端使用阶段，尤其是在运输行业，集成多燃料系统和改进燃料电池技术可提高车辆效率，提高能源来源的灵活性，同时支持运输脱碳。全面的能源

价值链分析有助于制定鼓励采用清洁能源技术、通过多样化能源提高能源安全并最终根据全球气候目标降低排放的政策。

随着运输行业经历新技术的涌入，创新资源的合理分配变得至关重要。例如，电动汽车提供了显著减少碳排放的机会，但对其能源价值链的更深入分析揭示了必须解决的几个挑战才能充分发挥其潜力。电池技术改进、充电基础设施的扩展和消费者行为的变化等关键领域变得至关重要。这项分析还引起了人们对锂和钴等关键原材料的依赖的关注，这些原材料带来了重大的供应风险。同样，氢燃料技术在生产、储存和分配方面面临着独特的挑战，以及与现有天然气基础设施整合的需要。对这些挑战的分析有助于确定技术和资源投资在哪些方面可以产生最实质性的影响 [48]。

此外，能源价值链是政府和行业实现碳中和目标的战略工具。通过绘制不同阶段的能源流动图，利益相关者可以优先考虑最大限度减少排放的行动。例如，政策制定者可以专注于激励对能源存储技术的研究，或补贴从基于化石燃料的运输向电力和氢动力系统的过渡。此外，了解能源价值链使企业能够根据旨在减少碳排放的政府法规调整其生产和供应策略，从而确保合规，同时保持竞争力。

随着重型汽车制造商向电气化电力系统过渡，这种结构化方法还有助于对价值链进行批判性重新审视。这一转变要求行业重新配置装配线，投资电池生产技术，并解决当前基础设施的局限性。在能源价值链分析的指导下，这种重新评估可确保企业能够精简运营并降低成本，同时推进其碳中和目标 [48]。通过能源价值链洞察，运输公司还可以发现新兴清洁能源领域的新机遇。例如，与能源供应商和科技公司合作将沼气整合到重型运输和航运中，为创新、多样化和创造利润提供了新的途径 [48,50]。这些转变使运输行业与减缓气候变化和加速走向脱碳未来的更广泛努力保持一致。

3.5. 能源价值链在促进跨行业协同中的作用

在经济全球化、净零排放目标和国际形势变化（如俄乌冲突）的复杂背景下，行业间传统的合作模式发生了变化，新的合作模式逐渐出现。基于此背景，本节全面回顾了四个选定行业间合作关系的变化和趋势，并讨论了能源价值链的作用。

在碳排放的压力下，各行业都在追求更清洁、更低碳的能源形式。对于钢铁行业来说，传统的冶炼工艺主要消耗化石燃料燃烧产生的热能。然而，现在冶炼越来越多地利用电弧炉。与传统高炉相比，电弧炉可节省60%至70%的能源 [51]。在石油工业中，政府机构建议更广泛的电气化。有报告提到，惠州大亚湾石化园区试点大规模电力替代，可减少颗粒物、二氧化硫、氮氧化物和一氧化碳排放40%，挥发性有机物排放减少6% [52]。在交通运输领域，这种转变体现在电动汽车的广泛采用上，电动汽车的市场渗透率从2020年的4.2% [53]上升到2023年的17.1% [54]。在追求更清洁、更低碳的能源形式时，所有这些行业都没有忽视电气化这个关键概念，这反过来又给电力行业带来了更大的责任。电力行业长期以来一直致力于为各个行业提供低碳、绿色电力，截至2023

年，全球30% [55]的电力来自可再生能源。

这种电气化转型意味着电力行业与各个行业的互动更加频繁，能源、价值和碳的交换与转移增加。能源价值链作为能源、价值、碳联合建模和分析的方法，可以帮助企业更清晰地洞察行业发展趋势，从而做出更好的决策。

4. 总结与展望

本文在传统价值链概念的基础上，将能源价值链定义为整合能源流、价值流和碳流的产业链。通过综合回顾相关研究，探讨了能源价值链对不同利益相关者的意义、其具体定义及其在各行业中的作用，证实了能源价值链的有效性和合理性。讨论表明，能源价值链可以有效识别行业和企业内部能源效率低、碳排放高、价值创造低的活动，指导战略决策和价值链调整。但能源价值链研究也存在一些局限性，具体如下：

- 随着未来电力和碳交易市场的发展，行业和企业受市场波动的影响会更大，能源价值链作为能源流、价值流和碳流统一分析方法在此背景下的作用尚未得到验证。
- 各行业的能源价值链并不是独立存在的，它们之间的相互作用和影响尚未得到考虑和讨论。

致谢：本研究得到国家重点研发计划（批准号：2022YFB3304502）和国家自然科学基金（批准号：51806190）的支持。本研究还得到国家重点研发计划（批准号：2023YFE0108600）的支持。

利益冲突：作者声明没有潜在的利益冲突。

参考文献

1. European Commission. Energy efficiency directive. Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en (accessed on 10 October 2024).
2. 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于 2014 年国民经济和社会发展计划执行情况与 2015 年国民经济和社会发展计划草案的报告. 在线查阅: https://www.gov.cn/xinwen/2015-03/17/content_2835413.htm (2024 年 10 月 10 日访问).
- National Development and Reform Commission People's Republic of China. Report on the Implementation of the 2014 National Economic and Social Development Plan and the Draft Plan for 2015 (Chinese). Available online: https://www.gov.cn/xinwen/2015-03/17/content_2835413.htm (accessed on 10 October 2024).
3. Siemens. Simatic Industrial Automation Systems. Available online: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/5009999> (accessed on 10 October 2024).
4. Schneider Electric. EcoStruxure Platform. Available online: <https://www.se.com/ww/en/work/campaign/innovation/platform.jsp> (accessed on 10 October 2024).
5. Porter ME. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. Free Press; 1985.
6. Masiero G, Ogasavara MH, Jussani AC, et al. The global value chain of electric vehicles: A review of the Japanese, South Korean and Brazilian cases. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 80: 290-296. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.148
7. Nauhria Y, Kulkarni MS, Pandey S. Development of Strategic Value Chain Framework for Indian Car Manufacturing Industry. *Global Journal of Flexible Systems Management*. 2017; 19(S1): 21-40. doi: 10.1007/s40171-017-0179-z

8. European Union. Industrial Development Report 2002/2003: Competing Through Innovation and Learning. European Union; 2004.
9. Wang L, Yue Y, Xie R, et al. How global value chain participation affects China's energy intensity. *Journal of Environmental Management*. 2020; 260: 110041. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.110041
10. Yao X, Shah WUH, Yasmeen R, et al. The impact of trade on energy efficiency in the global value chain: A simultaneous equation approach. *Science of The Total Environment*. 2021; 765: 142759. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142759
11. Yang B, Liu B, Peng J, et al. The impact of the embedded global value chain position on energy-biased technology progress: Evidence from china's manufacturing. *Technology in Society*. 2022; 71: 102065. doi: 10.1016/j.techsoc.2022.102065
12. Zhang Z, Li J, Guan D. Value chain carbon footprints of Chinese listed companies. *Nature Communications*. 2023; 14(1). doi: 10.1038/s41467-023-38479-5
13. Liu C, Zhao G. Can global value chain participation affect embodied carbon emission intensity? *Journal of Cleaner Production*. 2021; 287: 125069. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125069
14. Zhao G, Liu C. Carbon emission intensity embodied in trade and its driving factors from the perspective of global value chain. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020; 27(25): 32062-32075. doi: 10.1007/s11356-020-09130-3
15. European Union. Ecodesign for sustainable products regulation. Available online: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en (accessed on 10 October 2024).
16. Dahlström K, Ekins P. Combining economic and environmental dimensions: Value chain analysis of UK iron and steel flows. *Ecological Economics*. 2006; 58(3): 507-519. doi: 10.1016/j.ecolecon.2005.07.024
17. Mokadmia Z, Rahmounib B. Electric energy value chain in Morocco. Available online: <https://www.semanticscholar.org/paper/Electric-Energy-Value-Chain-In-Morocco-MOKADMIa-RAHMOUNIb/41dc6de5411b462c0b3890f660961ffe61046d52> (accessed on 10 October 2024).
18. Breyer C, Tsupari E, Tikka V, et al. Power-to-Gas as an Emerging Profitable Business Through Creating an Integrated Value Chain. *Energy Procedia*. 2015; 73: 182-189. doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.668
19. Hörbe Emanuelsson A, Johnsson F. The Cost to Consumers of Carbon Capture and Storage—A Product Value Chain Analysis. *Energies*. 2023; 16(20): 7113. doi: 10.3390/en16207113
20. Attias D (editor). *The Automobile Revolution: Towards A New Electro-Mobility Paradigm*. Springer; 2016.
21. Jarvis SM, Samsatli S. Technologies and infrastructures underpinning future CO₂ value chains: A comprehensive review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018; 85: 46-68. doi: 10.1016/j.rser.2018.01.007
22. Wu G, Pu Y, Shu T. Features and evolution of global energy trade network based on domestic value-added decomposition of export. *Energy*. 2021; 228: 120486. doi: 10.1016/j.energy.2021.120486
23. Munasinghe M, Jayasinghe P, Ralapanawe V, et al. Supply/value chain analysis of carbon and energy footprint of garment manufacturing in Sri Lanka. *Sustainable Production and Consumption*. 2016; 5: 51-64. doi: 10.1016/j.spc.2015.12.001
24. Liu H, Li J, Long H, et al. Promoting energy and environmental efficiency within a positive feedback loop: Insights from global value chain. *Energy Policy*. 2018; 121: 175-184. doi: 10.1016/j.enpol.2018.06.024
25. Guan D, Meng J, Reiner DM, et al. Structural decline in China's CO₂ emissions through transitions in industry and energy systems. *Nature Geoscience*. 2018; 11(8): 551-555. doi: 10.1038/s41561-018-0161-1
26. Cai Y, Qian X, Nadeem M, et al. Tracing carbon emissions convergence along the way to participate in global value chains: A spatial econometric approach for emerging market countries. *Frontiers in Environmental Science*. 2022; 10. doi: 10.3389/fenvs.2022.1039620
27. Gamarra AR, Lechón Y, Escibano G, et al. Assessing dependence and governance as value chain risks: Natural gas versus concentrated solar power plants in Mexico. *Environmental Impact Assessment Review*. 2022; 93: 106708. doi: 10.1016/j.eiar.2021.106708
28. Pan L, Liu P, Li Z. A system dynamic analysis of China's oil supply chain: Over-capacity and energy security issues. *Applied Energy*. 2017; 188: 508-520. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.036
29. Fennell P, Driver J, Bataille C, et al. Cement and steel—Nine steps to net zero. *Nature*. 2022; 603(7902): 574-577. doi: 10.1038/d41586-022-00758-4
30. Smith R, MacGill I. The great rebalancing: Rattling the electricity value chain from behind the meter. In: Sioshansi FP (editor). *Innovation and Disruption at the Grid's Edge: How Distributed Energy Resources are Disrupting the Utility Business Model*. Elsevier; 2017. pp. 41-64. doi: 10.1016/b978-0-12-811758-3.00003-6

31. Peng J, Wen L, Xiao J, et al. Industrial Chain, Supply Chain and Value Chain in the Energy Industry: Opportunities and Challenges. MDPI; 2024. doi: 10.3390/books978-3-7258-1200-4
32. Gert B, Marius B, Anna P. Regulatory and institutional aspects of smart grids. In: Van Dinther C, Flath CM, Madlener R (editors). *Smart Grid Economics and Management*. Springer; 2022. pp. 107-135.
33. van Dinther C, Flath CM, Madlener R, et al. *Smart Grid Economics and Management*. Springer International Publishing; 2022. doi: 10.1007/978-3-030-84286-4
34. Park C, Heo W. Review of the changing electricity industry value chain in the ICT convergence era. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 258: 120743. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120743
35. Stapczynski S. Blockchain, drones are strategies for survival at Japan's Tepco. Available online: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-01-09/blockchain-drones-are-strategies-for-survival-at-japan-s-tepco> (accessed on 10 October 2024).
36. Appelrath HJ, Kagermann H, Mayer C, et al. *Future Energy Grid*. Springer Berlin Heidelberg; 2012. doi: 10.1007/978-3-642-27864-8
37. Wang RQ, Jiang L, Wang YD, et al. Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 274: 122997. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122997
38. Ghazinoory S, Fatemi M, Adab A. Iranian steel value chain: Advantageous but unsustainable. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022; 24(7): 2099-2115. doi: 10.1007/s10098-022-02300-6
39. Conejo AN, Birat JP, Dutta A. A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. *Journal of Environmental Management*. 2020; 259: 109782. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109782
40. Panasiyk D, Laratte B, Remy S. Steel Stock Analysis in Europe from 1945 to 2013. *Procedia CIRP*. 2016; 48: 348-351. doi: 10.1016/j.procir.2016.04.084
41. Michaelis P, Jackson T. Material and energy flow through the UK iron and steel sector. Part 1: 1954-1994. *Resources, Conservation and Recycling*. 2000; 29(1-2): 131-156. doi: 10.1016/S0921-3449(00)00048-3
42. Michaelis P, Jackson T. Material and energy flow through the UK iron and steel sector: Part 2: 1994-2019. *Resources, Conservation and Recycling*. 2000; 29(3): 209-230. doi: 10.1016/S0921-3449(00)00041-0
43. Peng J, Xie R, Lai M. Energy-related CO₂ emissions in the China's iron and steel industry: A global supply chain analysis. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 129: 392-401. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.019
44. Ahmad NKW, de Brito MP, Rezaei J, et al. An integrative framework for sustainable supply chain management practices in the oil and gas industry. *Journal of Environmental Planning and Management*. 2016; 60(4): 577-601. doi: 10.1080/09640568.2016.1178105
45. Hunt JD, Nascimento A, Nascimento N, et al. Possible pathways for oil and gas companies in a sustainable future: From the perspective of a hydrogen economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022; 160: 112291. doi: 10.1016/j.rser.2022.112291
46. Nurdiawati A, Urban F. Decarbonising the refinery sector: A socio-technical analysis of advanced biofuels, green hydrogen and carbon capture and storage developments in Sweden. *Energy Research & Social Science*. 2022; 84: 102358. doi: 10.1016/j.erss.2021.102358
47. Ramos G. Decarbonization for Oil and Gas Value Chain: An Update Review. *Angolan Industry and Chemical Engineering Journal*. 2021; 1(1). doi: 10.47444/aincej.v1i1.5
48. Nabati H, Fard MB. Production as a source of competitive advantage in the value chain of electrified heavy vehicles manufacturing companies. Available online: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1601129/FULLTEXT01.pdf> (accessed on 10 October 2024).
49. Salimi M, Hosseinpour M, Borhani TN. The role of clean hydrogen value chain in a successful energy transition of Japan. *Energies*. 2022; 15(16): 6064. doi: 10.3390/en15166064
50. Arfan M, Wang Z, Soam S, et al. Biogas as a Transport Fuel—A System Analysis of Value Chain Development in a Swedish Context. *Sustainability*. 2021; 13(8): 4560. doi: 10.3390/su13084560
51. Worldsteel Association. Energy use in the steel industry. Available online: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf> (accessed on 10 October 2024).
52. 魏佳琪. 油气行业低碳发展的必然选择——生产用能电气化. 在线查阅: http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2023-08/07/content_7072863.html (2024年10月10日访问).

- Wei J. The inevitable choice for low-carbon development in the oil and gas industry: Electrification of energy use in production (Chinese). Available online: http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2023-08/07/content_7072863.html (accessed on 10 October 2024).
53. Ritchie H. Tracking global data on electric vehicles. Available online: <https://ourworldindata.org/electric-car-sales> (accessed on 10 October 2024).
54. Low J. Global EV market forecasted to reach 17.5 million units with solid growth of 27% in 2024. Available online: <https://www.canalys.com/newsroom/global-ev-market-2024> (accessed on 10 October 2024).
55. Ritchie H, Rosado P. 30% of the world's electricity came from renewable sources in 2023. Available online: <https://ourworldindata.org/data-insights/renewable-electricity-2023> (accessed on 10 October 2024).

Review

Role of energy value chain in carbon neutrality: A review

Zheng Luo^{1,2}, Xiaojie Lin^{1,2,*}, Yanling Wu^{1,2,*}, Wei Zhong^{1,2}

¹ College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang Province, China

² Shanghai Institute for Advanced Study, Zhejiang University, Shanghai 201203, China

* **Corresponding authors:** Xiaojie Lin, xiaojie.lin@zju.edu.cn; Yanling Wu, shelleywu@zju.edu.cn

Abstract: Value chain analysis is an important tool for optimizing operations and decision-making in enterprises. As the concept of sustainable development gains recognition worldwide, research on value chains is increasingly focused on sustainability. Traditionally, energy management and value management have operated in parallel with limited intersections. However, after the 2015 Paris Agreement set the goal of achieving net-zero emissions, carbon management has become integral to national strategies, necessitating a re-evaluation of traditional value chains. In this paper, the “energy value chain” is introduced, a novel concept that integrates energy consumption with value creation and carbon emissions, emphasizing the coupling relationships among “energy flow”, “value flow”, and “carbon flow.” From a review of current value chains in the power, steel, petroleum, and transportation industries, the specific energy value chain for each industry is defined and its rationale and effectiveness are discussed. This integrated analytical method provides a strategic tool for industries or enterprises to optimize energy consumption, reduce carbon emissions, and enhance competitive advantage.

Keywords: energy value chain; energy consumption; value creation; carbon emissions