

上海市工业用能碳足迹情景分析

邓双梅¹, 陆嘉麒², 李光辉²

(1.上海市节能中心,上海 200083;2.上海工程技术大学 化学化工学院,上海 201620)

摘要:上海市作为我国的经济中心,近10年高质量发展水平稳步增长,但低碳可持续转型仍面临较大挑战。基于统计年鉴等公开数据,分析上海市2010—2020年能源演化趋势,并结合排放因子、投入产出等方法识别工业部门用能的碳足迹。通过设定3种情景预测未来脱碳进程,包括电网脱碳、能源使用电气化和氢能生产情景分析,深入探讨上海市工业部门用能减排潜力。研究发现上海市总体用能中煤炭和石油的年均消费占比超过60%,仍是用能主要来源。上海工业部门的能效水平虽已大幅提升,但严重依赖化石能源的输入,并存在大量损耗,如电能损失。工业部门中化学产品行业电力隐含碳足迹占比最高为30.9%,需要持续做好节能降耗及绿能替代的工作。情景分析揭示了终端用能电气化或氢能替代的减排效果依赖其上游产业链的全过程降碳,不同制氢技术的情景中最具减排潜力的风电制氢情景减排达24.5%。

关键词:能碳分析;用能碳足迹;工业脱碳;情景分析;碳减排

中图分类号:F206;X24

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2024)05-0084-07

工业部门用能加速了碳排放,通过技术创新、能源效率提升、可再生能源替代等手段,可以在应对气候变化的同时实现经济增长^[1]。随着欧盟逐步推进基于产品碳足迹的“绿色贸易壁垒”,中国需尽快推动工业生产脱碳以保证出口竞争力^[2]。上海市作为全国第二大经济城市,近10年经济水平稳步增长,用电量从2010年1 296亿kW·h增加到2020年1 576亿kW·h,年均增幅达到2.16%,研究表明,未来上海市电力需求将会持续增加^[3]。同时人均能源消耗量也在持续增加,这导致上海市环境承载力逐年上涨,节能减排和低碳发展面临较大挑战。因此,在电力需求增加的同时,要减少电力部门的电力碳排放,这就需要大幅增加可再生能源占比。现阶段全球大部分电力生产仍然以化石能源为主。例如,2018年在美国83%的电力是使用热技术(主要是天然气、煤炭和核能)生产^[4]。但在全球变暖的情况下,火力发电作为主要电力生产方式与可再生能源发电对比,其优势相形见绌。

就目前而言,上海市经济发展所需能源主要为煤炭、石油、天然气、电力4大类。为应对气候变化,在“十四五”期间,要进一步优化能源结构和产业结构,有效控制二氧化碳排放,稳步推进“碳达峰”和“碳中和”。“双碳”目标明确了可再生能源电力的未来发展,非化石能源占一次能源消费比重至2030年、2060年分别达到25%左右、80%以上^[4]。非化石能源发电装机规模的增大使得电力更低碳。然而,为了进一步提高能源利用效率、减少能量转化过程中的热量损失,电力系统需要通过电气化的手段增加低碳电力的发电量。不论是在火力发电还是可再生能源发电领域,电气化在能源系统中发挥关键作用,使整体的能源利用效率能够保持在65%

收稿日期:2024-01-01;**修回日期:**2024-01-20.

基金项目:国家自然科学基金(22306025);上海市地方院校能力建设项目(21010501400).

作者简介:邓双梅(1987—),女,四川乐山人,上海市节能中心工程师,研究方向为智慧能源及碳排放管理,E-mail:dengsm@secsc.cn.

通信作者:陆嘉麒(1993—),男,上海工程技术大学讲师,博士,研究方向为生命周期评价与过程集成优化,E-mail:wilsherelu@foxmail.com.

引用本文:邓双梅,陆嘉麒,李光辉.上海市工业用能碳足迹情景分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(5):84-90.(Deng Shuangmei,Lu Jiaqi,Li Guanghui.Scenario analysis on carbon footprint of industrial energy consumption in Shanghai[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(5):84-90.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.01.01.0001.)

以上^[4].因此,通过电气化,能源的传输、转换和利用变得更加高效,有助于最大限度地提高能源利用效率、减少能耗.这对于提升可再生能源的整体贡献具有积极影响.

目前,基于城市角度对未来工业部门用能的混合电网电力碳足迹情景预测分析仍是研究空白.为确保研究的准确性和全面性,本文对上海市的工业部门结构以及包含的各个行业进行划分,将上海市的能源结构与各行业的用能情况相结合.这不仅包括了对各类一次能源和二次能源在各行业中应用情况的考察,也涵盖了对各行业用能和碳排放效率的评估.依据上海市 2010—2020 年的综合能源消费量,分析近 10 年内能源消费总量和结构变化,推演出上海市能源流动的时空演化规律,预测电网工业用能碳足迹的变化,不但可以加速上海市总体用能碳减排,还可以作为示范案例为其他地区节能减排提供经验.

1 研究方法

1.1 研究目标和范围定义

基于上海市 2010—2020 年总体用能数据分析近 10 年上海市总体能碳情况,并进一步结合 2010—2020 年工业部门内包含的各个行业数据,得出上海市工业部门能源消耗与碳排放趋势,并以此为依据探索未来能源转型对上海市工业部门用能碳足迹的影响.

核算范围为上海市及其工业部门近 10 年总体用能,分析计算碳排放和电力碳足迹.上海市能源结构包括一次能源和二次能源 2 大类.一次能源主要指自然界中直接获得的能源,包括化石能源(如煤炭、石油、天然气)和可再生能源(如太阳能、风能、水能等).这些能源是上海市能源供应的基础,直接影响着整个城市的能源安全和经济发展.二次能源主要指通过一次能源转换得到的能源,例如从外省市调入的电力.这部分能源在上海市的能源结构中占有重要地位,尤其是在保障城市电力供应和优化能源结构方面发挥着关键作用.

研究依据 2021 年中国城市尺度多区域投入产出表对工业部门内各行业进行划分,该投入产出表基于熵值模型,包含中国大陆地区 313 个行政单位,309 个地级行政单位与直辖市,4 个省份,覆盖全国 95%以上的人口与 97%以上的 GDP,囊括 42 个社会经济行业,5 个最终消费(农村居民消费、城镇居民消费、政府消费、资本形成、存货变动)^[5].划分结果如表 1 所示.

表 1 上海市工业部门内各行业划分

Tab. 1 Classification of various industries within the industrial sector of Shanghai

序号	行业名称	涵盖行业	序号	行业名称	涵盖行业
1	纺织服装业	纺织品 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品	5	电气与通信电子设备业	电气机械和器材 通信设备、计算机和其他电子设备
2	木制品、纸制品和文教体育用品	木材加工品和家具 造纸印刷和文教体育用品	6	其他	仪器仪表 其他制造产品
3	金属冶炼、加工和产品部门	金属冶炼和压延加工品 金属制品			废品废料 金属制品、机械和设备修理服务
4	通用、专用与交通设备业	通用设备 专用设备 交通运输设备	7	食品和烟草	—
			8	化学产品	—
			9	非金属矿物制品	—

1.2 计算方法

目前,全球范围内的碳足迹计算方法包括 IPCC 算法、生命周期评价法(LCA)、投入产出评价法(IOA)和碳足迹计算器等^[6].其中,最简单的是排放因子法,排放因子法一般是指通过活动水平数据和相关参数之间的计算来获得排放主体温室气体排放量的方法.本文采用排放因子法,计算上海市总体用能和使用传统能碳的工业部门的碳排放.

碳排放的温室气体总量按照 $GHG_{(总)} = GHG_{(燃烧)} + GHG_{(过程)} + GHG_{(间接)}$ 计算,式中: $GHG_{(总)}$ 包括直接排放与间接排放, $GHG_{(燃烧)}$ 和 $GHG_{(过程)}$ 共同组成 GHG 直接排放, $GHG_{(间接)}$ 主要包括电力和热力排放.

$GHG_{(燃烧)} = \sum_i [(消耗量_i \times 低位热值_i \times 单位热值含碳量_i \times 氧化率_i \times \frac{44}{12})]$, 式中, i : 不同燃料类型.

$GHG_{(过程)} = \sum_j [活动水平数据_j \times 过程排放因子_j]$, 式中, j : 不同种类的原材料、产品或半成品.

$GHG_{(间接)} = \sum_k [(活动水平数据_k \times 排放因子_k)]$, 式中, k : 电力和热力等.

本文根据自产和外省输入的电力对上海电力碳足迹进行计算^[7]. 电力碳足迹通常是用电量乘以对应的每千瓦·时电力碳足迹, 由 $Ch = E + EF$ 计算, 式中, E : 本市自用电量或外购外省电量; EF : 省级所在的区域电网每千瓦·时电力碳足迹.

1.3 工业部门用能碳足迹情景分析

工业部门用能碳足迹是指工业活动在直接消耗化石能源(如煤炭、石油和天然气)以及消费的电力在其生产过程中的碳排放总和. 这包括两个主要部分: 一是工业直接消费的化石能源对应的碳排放, 即在生产过程中直接燃烧化石能源所释放的二氧化碳; 二是消耗的电力从生产(摇篮)到使用(大门)过程中的间接排放, 即上游电力生产和传输等过程中产生的碳足迹. 工业用能碳足迹是一个系统地衡量工业部门的能源消耗对环境影响的重要指标^[8].

电网脱碳化情景是指增大可再生能源占比对未来电网能源结构下电网电力碳足迹进行预测分析. 可再生能源在不同情景下占比参考文献对上海电力的预测研究^[3,9], 不同可再生能源电足迹数据来源于 Ecoinvent. 用能电气化情景是指在低碳电网背景下, 2020 年上海市的总体电气化率已经达到 38%, 通过近中远期上海经济发展和能源电力预测文献^[11], 预计 2035 年总体电气化率将达到 48% 以更高水平电气化加速上海市整体用能脱碳, 计算过程以电网脱碳化情景下预测出的 2030 年和 2035 年混合电网电力碳足迹为基础, 能量转换过程中的损耗考虑用能产生蒸汽效率和蒸汽热利用效率. 用能氢能替代情景是指我国能源结构正在逐步向绿色化、低碳化发展, 氢能作为最环保、最清洁的燃料有可能在未来大幅度供应, 而未来绿色产氢需要先进制氢技术支撑^[10], 因此制定三种相关的制氢情景, 电网制氢、甲烷重整和风电制氢. 计算过程是基于 2020 年预测使用不同情景制氢技术下的电网工业用能碳足迹混合电网电力碳足迹和不同制氢技术的碳足迹.

1.4 数据来源

本文为准确把握上海市工业部门近年来用能情况和碳排放量, 严格按照上海市统计局《上海统计年鉴》、国家统计局《中国统计年鉴》、《上海市温室气体排放核算与报告指南》等发布的相关数据^[11-12]. 选取 2010—2020 年上海市用能数据进行研究. 参考《中国能源统计年鉴》, 将研究所用能源分为煤炭、石油、天然气、电力、其他能源 5 大类^[13]. 电力碳足迹计算部分引用文献^[9].

工业用能情景分析中, 不同情景下各数值及数据来源如表 2 所示.

表 2 不同情景数值及数据来源

Tab. 2 Different scenarios values and data sources

情景	技术路径	数值	单位	数据来源	情景	技术路径	数值	单位	数据来源
电网脱碳化	光伏	0.077 23	kg CO ₂ -eq	Ecoinvent	电气化	外电入沪	0.63	kg CO ₂ -eq	文献[9]
	风力	0.019 58	kg CO ₂ -eq	Ecoinvent		用能产生蒸汽效率	90	%	文献[14]
	生物质	0.228 96	kg CO ₂ -eq	Ecoinvent		蒸汽热利用效率	40	%	文献[14]
	煤	1.032 29	kg CO ₂ -eq	Ecoinvent	氢能	电网制氢	28	kg CO ₂ -eq	文献[15]
	天然气	1.101 18	kg CO ₂ -eq	Ecoinvent		甲烷重整	11.5	kg CO ₂ -eq	文献[15]
	水力	0.004 02	kg CO ₂ -eq	Ecoinvent		风电制氢	0.5	kg CO ₂ -eq	文献[15]
	核能	0.007 58	kg CO ₂ -eq	Ecoinvent					

2 结果与分析

2.1 上海市总体用能情况和碳排放分析

如图 1 所示, 上海市总体用能呈上升态势, 年增长率最高达 5.26%. 其中, 煤炭和石油的年均消费占比超过 60%, 可再生能源占比在逐年增加. 这反映了上海市逐渐减少对化石能源的依赖, 转向清洁能源. 煤炭消费

虽然仍然主导上海的能源结构,但其峰值消费量已经从 2011 年的 4 710.65 万 t 降低到 2020 年的 3 501.40 万 t,降幅为 25.67%。天然气和电力占比在逐年增加。天然气消费量从 2010 年的 559.28 亿 m³ 增至 2020 年的 1 214.30 亿 m³,占比从 5% 提高到 11%。电力消费量占比增加 9%。虽然近 10 年来上海市用能总量持续增加,但总的碳排放量却在 2019 年达到峰值 2.665 2 亿 t 后增势放缓,于 2020 年降至 2.504 4 亿 t。这可能归因于上海的政策、技术进步以及能源和产业结构的优化,一定程度上实现阶段碳减排。但化石能源碳排放占比超过 50% 始终处于主导地位。随着电力需求的增大而目前电力生产技术还是基于化石能源,所以化石能源虽然用能占比逐年上升,碳排放的总量却在低碳电网的可再生能源占比增大下逐渐减少。

2.2 上海市工业部门传统能碳分析

选取 2010—2020 年工业部门用能与单位 GDP 能耗进行对比分析这 10 年间上海市工业部门用能情况与碳排放趋势,如图 2 所示,上海市工业部门能源消耗总量整体呈下降趋势,这可能随着生产技术的提高,同时可再生能源占比增大导致能源结构变动减少碳排放。单位 GDP 能耗持续降低,这可能是上海市工业部门采取了一系列的策略,例如工业结构、技术水平和政策措施等多种因素共同影响。

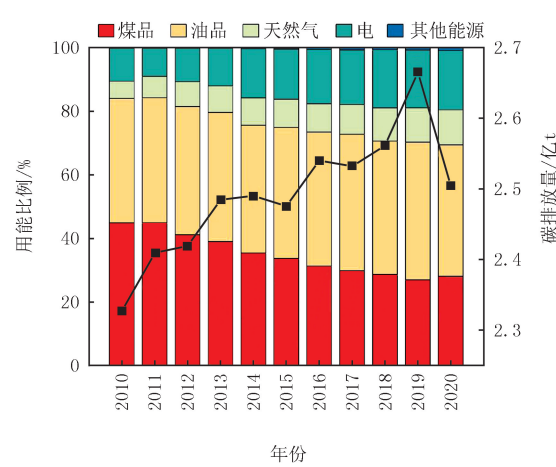


图1 上海市总体用能百分比和整体碳排放图

Fig.1 Overall energy consumption percentage and overall carbon emissions map of Shanghai

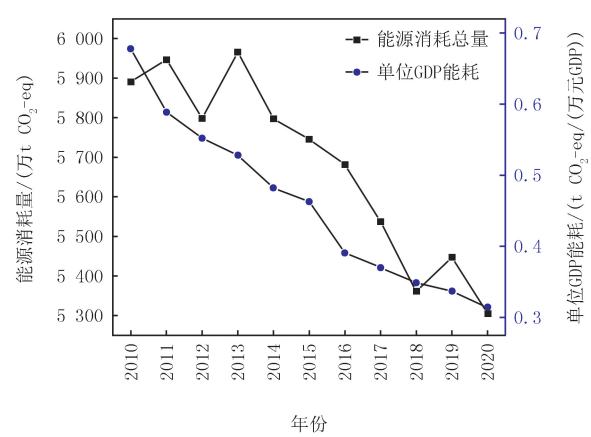


图2 工业能源消耗量与单位GDP能耗对比图

Fig.2 Comparison of industrial energy consumption and energy consumption per unit GDP

上海市工业部门的能碳流桑基图在上文研究工业总体用能的基础上研究工业部门内各行业用能情况,清晰展示不同能源的具体流向,可以清晰地识别出能源消耗大户和碳排放重点行业,为制定针对性的能源政策和减排措施提供依据。如图 3 所示,化学产品用能最多,其后是金属冶炼与加工。石油主要用于油品生产和部分化学、金属加工。煤炭的 50% 供电力与热力生产,43% 供金属冶炼,明显超过其他行业,成为煤炭的主要用途。焦炭和天然气在工业中也有消耗。高能耗和碳排放主要集中在钢铁、水泥和化工等高污染行业,受经济、能源强度、能源及工业结构影响。

2.3 上海市工业用能隐含碳足迹分析

往常传统对工业部门电力分析只注重实体物质流,能源的消耗过程是以物质实体流向显示分析,即从化石能源角度对电力碳足迹分析是直接从能源消耗到排放,不考虑电力以隐含碳足迹形式于工业部门各行业体现。本文对工业部门电力碳足迹分析,是以上海市工业部门总体电力碳足迹为基础,进一步考虑隐含碳足迹的流向。

如图 4 所示,从 2017 年上海市工业部门电力隐含碳足迹占比可以得出化学产品,电气与通用电子设备业,通用、专用与交通设备业,金属冶炼、加工和产品制造这 4 个行业占主导地位,其中化学产品占比最大为 30.9%,其次是电气与通用电子设备业占 18.2%,纺织服务业最少仅有 2.2%,以上工业部门内不同行业电力隐含碳足迹占比主要与行业生产方式、产业结构有关。

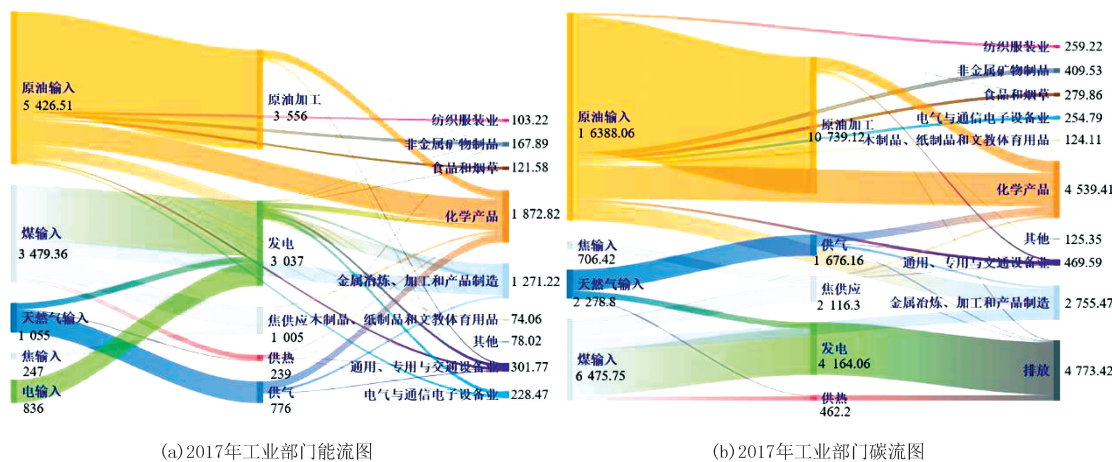


图3 上海市工业部门能流图与碳流图

Fig.3 Energy flow chart and carbon flow chart for the industrial sector of Shanghai in 2017

3 工业用能情景分析

3.1 上海市电网脱碳的情景分析

基于 2020 年、2030 年、2035 年的数据,考虑了上海市的电力结构与电量结构,对上海市每千瓦混合电网电力碳足迹进行预测,如表 3 所示,所预测得出的每千瓦混合电网电力碳足迹均低于华东电网的 0.703 5 kg CO₂-eq/(kW·h).

通过对上海市能源结构未来电网脱碳化变化趋势的预测,上述预测值虽比现阶段华东电网碳足迹低,这可能得益于上海在国内较高清洁能源比例和先进的碳排放控制技术,但仍高于欧洲各城市的电力碳足迹^[16],这可能归因于欧洲各城市可再生能源占比大以及对其碳排放的严格控制.

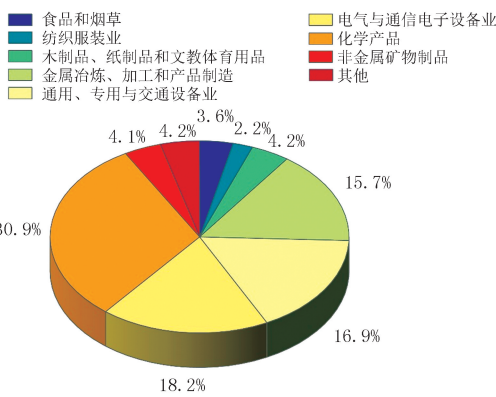


图4 上海市工业部门电力隐含碳足迹

Fig.4 The implied carbon footprint of electricity in the industrial sector of Shanghai

表 3 2020 年,2030 年,2035 年每千瓦混合电网电力碳足迹

Tab. 3 Carbon footprint per kilowatt of power grid in 2020, 2030, and 2035			kg/(kW·h)		
年份	电网碳足迹	年份	电网碳足迹	年份	电网碳足迹
2020	0.665 838	2030	0.615 594	2035	0.518 884

“十四五”规划中,上海作为电力消费大户,电量需求将持续增长.上海着眼于自身新能源开发和低碳能源输入,改善电力结构,提高能源效率,迈向更绿色的电力供应路径^[3],电网脱碳对工业部门中各行业用能碳足迹情景分析结果如图 5 所示.

纯电网脱碳化情景下,工业用能整体碳足迹逐年下降,其中影响最大的行业是化学产品,从需求侧角度进行分析,这归结于化学产品需求量大,导致其生产过程能耗较高,所以该行业的碳足迹占比大,需要优化生产设备,提高原料及能源的利用效率,才能进一步降低该行业碳足迹.纯电网脱碳化下影响最小的工业行业是纺织服装业,纺织服装业通常被认为是一种污染行业,但是由于经济全球化纺织品大量进口,并实施生态设计方法提高报废产品的价值在生产端降碳^[17],所以对于纺织服装业来说,纯电网脱碳下的影响远小于其

他行业,但是为了实现碳中和,每一个行业都需要更为低碳电力组合的生产工艺,从生产端降低电网碳足迹。

3.2 工业用能电气化的情景分析

如图 6(a)所示,就目前基准年而言,随着用能电气化率增加并未出现工业用能碳足迹下降,相反呈现出小幅度上升趋势。与此同时,所预期的 2030 年情景下也呈现类似态势,但整体增幅不大,趋于平缓,2035 年情景下呈整体下降趋势,这说明从短期来看用能电气化并不会立即降低工业用能碳足迹,可能是因为设备及可再生能源的使用效率有限,同时其中转化损失量大,不能很好通过电气化实现降低工业用能碳足迹的初衷,需要进一步提升能源利用效率。从长期来看,利用电气化降低工业用能碳足迹总体趋势可观,具备巨大发展前景与潜力,因此要同步推进用能电气化、供电脱碳和提高能源效率,才能更清洁、更快、更高效地转型为低碳电网。

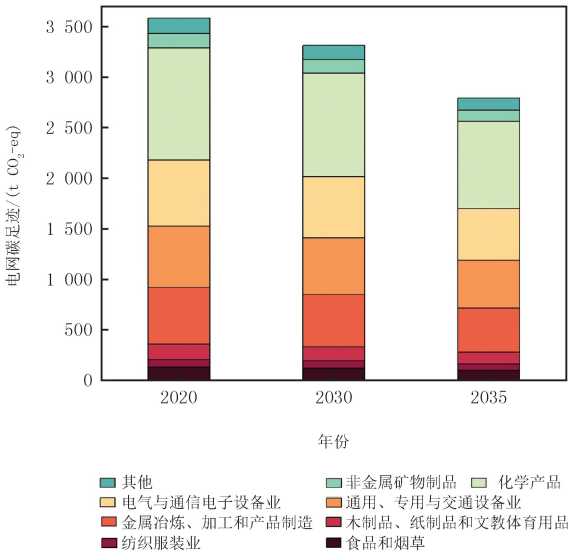


图5 各行业电网脱碳化的情景分析

Fig.5 Scenario analysis of decarbonization in industrial power grids

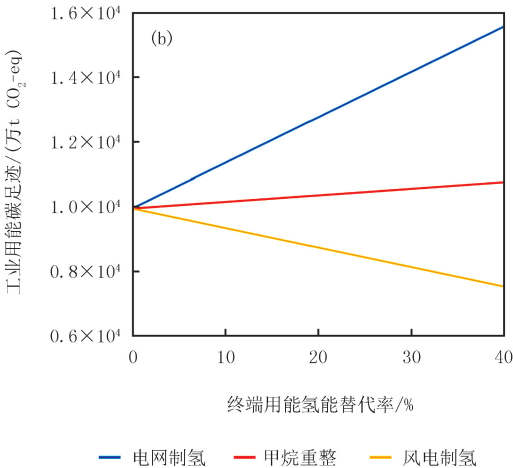
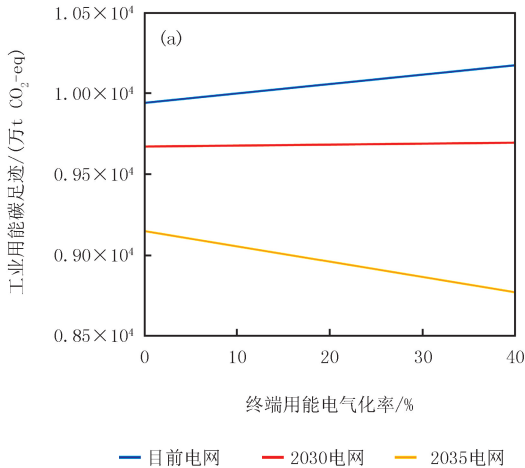


图6 工业用能电气化和氢能替代的情景分析

Fig.6 Scenario analysis of electrification in the industrial sector

3.3 工业用能氢能替代的情景分析

如图 6(b)所示,基于不同制氢技术的情景分析结果表明,情景 3 风电制氢具有显著的降碳效益,随着终端氢能替代率的增加,呈下降趋势,情景 1 电网制氢和情景 2 甲烷重整制氢均呈上升趋势,同时情景 1 相较于情景 2 增幅显著。采用碳足迹评价工业用能的氢能替代是更客观且全面的,情景 1 与情景 2 制氢的碳足迹分析显示,通过电网电解水和甲烷重整制氢,其全链条的碳排放显著高于直接使用化石能源,而不是额外增加工序制氢气再使用。风电制氢所使用的是可再生能源,即便考虑其全生命周期温室气体排放,也拥有巨大的低碳优势,因此称之为“绿氢”。但即便情景 3 工业用能碳足迹低,目前其技术的限制和成本的高昂,作为可再生资源制氢的实际产量太少,达不到现阶段工业终端用能所需。因此,尽管传统制氢方法的工业用能碳足迹偏高,目前仍是主流的制氢方法。从长远来看,电力可再生性的提高往往会使得制氢技术更符合脱碳能源部门的要求,因此利用风电等可再生能源制氢是未来发展趋势。

4 结 语

为实现可持续发展,上海应深化经济结构转型,出台低碳政策,完善碳市场,进一步节约能源、提升能源效率、调整能源结构.例如,可以通过能源系统的数字化管理和建模优化节约能源;基于碳足迹的评价减少原材料的使用来降碳;废弃物循环利用,产业链协同减排;减少高碳能源输出,增加光伏等绿色电力消纳能力,强化环境监管,逐渐减少对重工业的依赖;采纳生态设计、清洁生产促进低能源密集型转变,增强节能和可持续发展的能力等.

参 考 文 献

[1] 薛悦鑫,谢静超,怀超平,等.北京市能源碳排放影响因素分解分析[J].建筑节能,2022(9):128-132.
XUE Y X,XIE J C,HUAI C P,et al.Decomposition analysis of influencing factors of energy related carbon emission in Beijing[J].Building Energy Efficiency,2022(9):128-132.

[2] 徐艳,刘娟,顾江源,等.产品环境足迹:新的潜在绿色贸易壁垒[J].环境与可持续发展,2019,44(6):123-125.
XU Y,LIU J,GU J Y,et al.Product environmental footprint:new potential green trade barriers[J].Environment and Sustainable Development,2019,44(6):123-125.

[3] 上海市发展和改革委员会.关于印发《上海市能源电力领域碳达峰实施方案》的通知 [EB/OL].(2022-08-11)[2023-12-11].<https://www.shanghai.gov.cn/gwk/search/content/9d34b9bc81a745a8be9c0b4368a70de1>.

[4] COFFEL E D,MANKIN J S.Thermal power generation is disadvantaged in a warming world[J].Environmental Research Letters,2021,16(2):024043.

[5] ZHENG H,TÖBBEN J,DIETZENBACHER E,et al.Entropy-based Chinese city-level MRIO table framework[J].Economic Systems Research,2021,34(4):519-44.

[6] 郭铠源,李文迪,黄晨丹,等.“双碳”背景下碳足迹调查研究:以北京市居民用能行为为例[J].低碳世界,2023,13(1):16-20.
GUO K Y,LI W D,HUANG C D,et al.Investigation and study on carbon footprint under the background of "double carbon":taking Beijing residents' energy consumption behavior as an example[J].Low Carbon World,2023,13(1):16-20.

[7] 宁礼哲,任家琪,张哲,等.2020 年中国区域及省级电网电力碳足迹研究[J].环境工程,2023,41(3):229-236.
NING L Z,REN J Q,ZHANG Z,et al.Carbon footprint of China's regional and provincial power grids in 2020[J].Environmental Engineering,2023,41(3):229-236.

[8] 崔嘉慧,侯丽娜,袁欣萌,等.山东省县域碳排放演变特征与影响因素分析[J].中国集体经济,2024(2):92-95.

[9] 闫晶.上海平衡好本地电与外来电、清洁电与常规电“两个结构”的建议[J].上海节能,2023(5):553-558.
YAN J.Suggestions for balancing "two structures" of local electricity and external electricity, clean electricity and conventional electricity in Shanghai[J].Shanghai Energy Saving,2023(5):553-558.

[10] LE P A,TRUNG V D,NGUYEN P L,et al.The current status of hydrogen energy:an overview[J].RSC Advances,2023,13(40):28262-28267.

[11] LIU Z,GUAN D B,WEI W,et al.Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J].Nature,2015,524(7565):335-338.

[12] GUAN Y,SHAN Y,HUANG Q,et al.Assessment to China's Recent Emission Pattern Shifts[J].Earth's Future,2021,9(11):e2021EF002241.

[13] 李闻卓.基于能源消费碳排放影响因素分解的青岛市碳排放预测与减碳措施研究[D].青岛:青岛理工大学,2022.
LI W Z.Research on Carbon Emission Prediction and Carbon Reduction Measures in Qingdao Based on Decomposition of Influencing Factors of Energy Consumption Carbon Emission[D].Qingdao:Qingdao Tehcnology University,2022.

[14] ADHYARU S S A D M.Boiler efficiency analysis using direct method[C]//2011 Nirma university international conference on engineering.IEEE,2011:1-5.

[15] VALENTE A,IRIBARREN D,DUFOUR J.Prospective carbon footprint comparison of hydrogen options[J].The Science of the Total Environment,2020,728:138212.

[16] MASIELLO R,FIORAVANTI R,CHALAMALA B,et al.Electrification,decarbonization,and the future carbon-free grid:the role of energy storage in the electric grid infrastructure[J].Proceedings of the IEEE,2022,110(3):324-333.

[17] STEPHENS J C.Electrification:opportunities for social justice and social innovation[J].MRS Bulletin,2021,46(12):1205-1209.