“煤电化新”系统重构驱动的煤化工园区零碳建设技术路径研究

师曜[1]，严坤[1]，肖皓[1]，田金平[1,2,3*]，陈吕军[1,2]

（1. 清华大学环境学院，北京 100084；2. 清华大学生态文明研究中心，北京 100084；
3. 清华大学碳中和研究院，北京 100084）

【摘　要】煤炭、电力、煤化工、新能源（简称“煤电化新”）一体化发展和系统重构，是持续推进煤基产业绿色低碳高质量发展和煤化工全产业链碳减排的重要突破口，对促进煤炭清洁高效利用、保障国家能源安全、实现碳达峰碳中和具有重大意义。本文首先解析了“煤电化新”多元资源耦合建设煤化工零碳园区的重大意义和现实需求，综述了“煤电化新”相关产业技术的发展动态；进而从面向煤化工过程的异质能源时空互补技术和智能优化技术两方面探讨了系统重构建设零碳园区面临的主要挑战，提出了资源能源构效关系精准建模、产业生态系统动态自适应规划和煤化工产业链网系统仿真优化等破解“煤电化新”系统重构技术挑战的策略；最后，针对上述挑战深入探讨了“煤电化新”系统重构的关键技术路径，以期为我国煤化工园区落实国家“碳排放双控”政策，迈向零碳化建设提供技术指导，加快推动煤基产业集群的绿色低碳转型。

【关键词】煤化工；煤电化新；零碳园区；多能互补；系统重构

【中图分类号】X32；X7；X5　　【文章编号】1674-6252（2025）05-0027-11

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2025.05.027

引言

工业园区是我国经济发展的主战场，也是碳排放的重要来源。国家层面已针对工业园区开展了生态工业示范园区、循环化改造示范园区、低碳园区、绿色园区等系列示范试点，园区绿色低碳发展已形成广泛共识和多样化实践。随着碳达峰碳中和系列政策的出台和深入实施，零碳园区建设成为园区发展新的战略目标[1-3]。2024 年中央经济工作会议首次提出“建立一批零碳园区”，2025 年政府工作报告进一步明确“建立一批零碳园区、零碳工厂”。2025 年 6 月，国家发展改革委等部门联合印发《关于开展零碳园区建设的通知》，明确了零碳园区建设的基本条件、重点任务和保障措施，将单位能耗碳排放列为核心指标，推动零碳园区建设驶入“快车道”。

我国煤化工产业园区化发展的特点十分鲜明，且煤化工行业是典型的碳排放集中及难减排行业[4,5]。近年来，国家持续推动化工项目向园区集中，在内蒙古鄂尔多斯、陕西榆林、宁夏宁东、新疆准东等地规划建设现代煤化工产业示范区，以产业园区化、

资助项目：国家自然科学基金（72274103）；气候变化与碳中和国际合作联合行动项目“工业园区降碳减污智慧化管控模型开发”；美国环保协会项目“鄂尔多斯煤化工园区绿色低碳转型路径研究”。

作者简介：师曜（1999—），男，博士研究生，研究方向为产业生态学、工业园区绿色发展等，E-mail：shi-y21@mails.tsinghua.edu.cn。

*** 责任作者：**田金平（1974—），男，博士，研究员，研究方向为工业污染防治、产业生态学等，E-mail：tianjp@tsinghua.edu.cn。

装置大型化、产品多元化的方式推动产业集聚发展，逐步形成世界一流的现代煤化工产业园区 [6]。据统计，2022 年我国煤化工行业年碳排放量约为 5.99 亿 t，占全国能源消费相关碳排放的 5%[4]。并且，国家碳排放双控政策要求煤化工行业进一步完善碳排放核算机制，制定产品碳足迹核算标准。如何实现高端化、多元化、低碳化发展，甚至实现零碳建设，是我国煤化工园区转型建设的“必答题”。

工业园区在基础设施共享的同时，企业间通过首尾相连、互为供需、互联互通等方式建立循环共生产业链网，能显著提高资源能源效率，推动减污降碳协同增效 [7,8]。煤化工园区除了提高自身的能源加工转化利用效率、资源转化效率，还可运用系统工程思想，通过多行业耦合实现系统重构，这也是实现深度脱碳的重要途径 [9, 10]。本研究从煤炭、煤电、煤化工、新能源（简称“煤电化新”）多元产业耦合发展的角度，探讨煤化工与可再生能源、绿氢、CO_2 捕集利用等耦合发展，建设低碳零碳煤化工园区的技术路径，以期实现“用炭不排碳，零碳煤化工”的目标，为园区管理和行业发展提供决策参考。

1 煤化工园区零碳建设的重大意义和现实需求

1.1 “煤电化新”产业耦合是煤炭清洁高效利用政策发展的重要趋势

我国能源资源禀赋的显著特点是以煤为主，加之国际地缘政治因素的影响，煤炭作为我国主体能源的地位短期内不会发生根本性变化 [11]。近五年来，我国煤炭消费量占能源消费总量的比重下降了 3.6%，但依然保持在 50% 以上 [12]。发达国家的发展历程也表明，碳达峰后仍会使用煤炭，但用途发生改变，实现碳达峰碳中和仍需清洁煤炭发挥兜底保障和支撑调节作用 [13]。图 1 系统分析了近 20 年来国家出台的一系列推动煤炭全过程全要素清洁低碳利用、促进煤化工园区低碳零碳发展的政策文件。整体来看，煤炭清洁高效利用仍是当前和今后一个时期煤炭产业的主基调，煤炭在能源供应体系中“压舱石”和“稳定器”的作用进一步凸显，同时强调在煤炭开发、生产、储运和使用的全产业链过程中控制和减少污染物及碳排放，合理有序发展煤化工等煤炭新型利用方式，加强传统化石能源与风光新能源多能互补，提高煤炭利用效率。

1.2 创新“煤电化新”系统重构技术是煤化工园区绿色低碳发展新动能

煤化工园区碳排放量大，但碳排放环节集中，特别是合成气变换工序在现代煤化工工艺中普遍存在，这一环节产生的高浓度 CO_2 适合作为碳捕集利用技术的原料来源。除了末端碳捕集，利用风光新能源产生的绿电制氢，补充调节煤化工工艺的碳氢比，“以氢替煤”源头降碳也是煤化工减少碳排放的重要技术路径 [4,9,14]。我国规划建设的现代煤化工产业示范区与风光资源富集区分布较为一致，具备

图 1　近 20 年国家层面推动煤炭清洁高效利用提出的主要政策

“煤电化新”多元耦合园区化发展的资源优势和产业基础[15]。2023年，国家发展改革委等六部门印发的《关于推动现代煤化工产业健康发展的通知》明确：在资源禀赋和产业基础较好的地区，推动现代煤化工与可再生能源、绿氢、CO_2捕集利用与封存（Carbon Capture Utilization and Storage，CCUS）等耦合创新发展，同时加快高浓度CO_2大规模低能耗捕集利用与封存、制备高附加值化学品技术开发和工业化应用。

1.3 “煤电化新”多元耦合园区化发展是推动能源技术革命的重要载体

“煤电化新”多元耦合园区化发展的关键在于加强传统能源与新能源综合开发利用，推动能源技术革命，保障园区用能清洁安全。园区的稳定生产需要稳定的能源供给，以风光为主的新能源电力存在波动性与间歇性的问题，需要发挥煤电的基础保障和系统调节作用[16]。“煤电化新”系统重构能够建立多能互补的园区能源供应体系，实现煤炭、风光等异质能源的时空互补与耦合集成，提升新能源的就地消纳比例，提高能源供需互动协调能力，保证产业系统用能的平稳有序[17]。国家发展改革委和国家能源局在《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》中强调“煤电化新”集成耦合，系统性开发煤基产业绿色低碳技术。特别是突破煤化工制（用）氢系统与风光发电制氢集成、煤与生物质和垃圾共气化、煤化工与可再生能源电力储能和调峰集成、煤化工与整体煤气化联合循环发电集成、煤化工与CCUS耦合等关键技术[18]。

2 “煤电化新”系统重构技术发展动态

当前煤炭工程、煤电技术、煤化工技术和新能源技术均已经取得显著成效，从系统工程与全局视角促进“煤电化新”系统重构，既要建立在各领域技术进步的基础上，也要重点突破异质能源时空互补和复杂能源资源系统的智能调控等关键技术。下面对各领域的主要技术进展进行概述，并进一步讨论“煤电化新”系统重构面临的主要挑战。

2.1 煤基产业工程科技主要技术进展概述

我国煤炭工程领域在智能开采与分析、重大装备研发示范和煤炭清洁高效利用等相关技术方面已取得一系列关键进展[19-21]，并通过优化布局与保障供应相结合、数字经济与煤炭经济相结合、产业集群与区域经济发展相结合，创新产业集群发展模式，以煤炭资源开发为源头推动煤电、煤化工、煤基新材料等上下游产业链集聚融合。煤炭工程领域技术发展趋势更加突出以煤炭绿色低碳开发和清洁高效利用为核心，持续完善煤炭全产业链、全要素协同发展技术体系，例如创新煤炭开发地下水保护利用与矿区地表生态修复、主蒸汽700℃乃至更高参数超超临界燃煤发电、新一代集成气化联合循环（Integrated Gasification Combined Cycle，IGCC）与整体煤气化燃料电池联合发电（Integrated Gasification Fuel Cell Combined Cycle，IGFC）多联产、燃煤电厂污染物近零排放、先进CCUS等重大技术[20]。煤炭转化则以煤基烯烃等高附加值现代煤化工技术开发、可持续水管理、废物循环利用和碳减排为重大关键工程技术发展方向[22-25]。

近年来，我国现代煤化工产业规模显著增长，发展了大批关键工艺和核心技术，产业生态化水平不断提高，但“双碳”背景下煤化工产业碳减排的压力仍然突出，亟须针对产业链开展补链延链强链，特别是开发一步法短流程制高附加值产品核心技术，提升行业整体技术创新能力[26]。例如，煤基烯烃产业强链延链能够有力支撑产业链自主安全，促进煤炭消费低碳转型。据统计，2023年我国高端聚烯烃塑料产量850万t，产品自给率达到56.7%，但距离《化工新材料产业“十四五”发展指南》提出的2025年高端聚烯烃塑料自给率近70%的目标尚有一定差距[27]。这些重大科技问题的研究与突破，必将对“煤电化新”系统重构体系的资源能源代谢产生显著影响。

2.2 煤化工与绿氢耦合技术发展特点

目前已有研究深入分析了煤化工与新能源耦合发展的必要性与可行性，特别是与绿氢耦合的具体路径，提出了构建绿电—绿氢—储氢/储能—煤化工一体化示范基地的建议[10,21,28]。煤化工与新能源耦合发展一方面可以促进可再生能源的就地消纳，减少对化石能源的消耗，另一方面可再生能源制绿氢可以调节原料碳氢比，减小合成气变换和空分装

置规模，从而有效压缩工程建设和能源使用的经济成本，大幅降低生产系统的碳排放。Guo 等 [15] 运用生命周期评价和技术经济分析方法开展了煤化工与绿氢耦合的碳减排效益研究，结果显示我国煤化工部门就近部署风光制氢，2030 年可分别削减全生命周期温室气体排放的 53% 和 55%。其中，内蒙古、陕西、宁夏、新疆部署可再生能源制氢用于煤化工生产，可贡献 52% 的碳减排潜力，具有正向环境效益。

截至 2020 年底，煤制甲醇行业能效低于《煤炭清洁高效利用重点领域标杆水平和基准水平（2022 年版）》基准水平的产能约占 25%，煤制乙二醇行业为 40%，合成氨行业为 19%，焦化行业为 40%。同时，国家要求上述产能 2025 年基本清零，煤化工行业整体能效优化提升任务艰巨 [29]。煤化工与绿氢耦合生产高附加值化学品成为近年来的研究热点。美国霍尼韦尔 UOP 的 Green Jet Fuel 技术以及欧洲 Johnson Matthey 的 HyCOgen 技术可实现 CO/CO_2 与绿氢相结合制造生物燃料和化学品 [30,31]。清华大学魏飞教授团队开发了利用 CO/CO_2 和光伏电解水产生的绿氢耦合短流程一步法生产高能量密度的航空燃料（CO_2 to Aviation Fuel，CO_2AF）技术，并完成万吨级工业应用示范 [32,33]。CO_2 与绿氢耦合转化为甲醇（又称“液态阳光”）近年来备受关注，主要工艺技术有直接加氢、光催化还原、电催化还原、生物催化还原等方法 [34,35]。目前已有 10 余个国家开展 2 万 ~20 万 t/ 年 CO_2 加绿氢制甲醇工业化示范，国内也已经有多项数十万吨级项目开工建设，未来有望进一步走向百万吨级大规模商业化应用。表 1 为目前国内外多项典型的 CO_2 加绿氢制甲醇千吨级规模中试装置技术比较 [36]。例如，中国中煤在内蒙古鄂尔多斯布局建设 10 万 t/ 年液态阳光项目，建成后预期每年可直接消纳 15 万 t 现有低温甲醇洗工序排放的 CO_2 尾气，相比于传统工艺路线，每年可间接减排约 30 万 t CO_2[37]。以 10 万 t/ 年液态阳光项目为例，甲醇综合成本约 3800 元 /t，较煤制甲醇、天然气制甲醇高 1000 元以上，其中绿电和绿氢成本是主要影响因素 [35]。

表 1 部分国内外液态阳光工程技术比较 [36,37]

项目	中国科学院大连化学物理研究所	中国科学院上海高研院	西南化工研究设计院	冰岛碳循环国际公司
反应温度 /℃	220～260	—	230～270	220～280
反应压力 /MPa	4.0～6.0	7.0～8.0	5.0～8.0	7.0
反应空速 /（h^{-1}）	6000～12000	—	10000	—
循环比	3～5	3～6	—	3～5
总转化率	98%	90%	98%	95%
总选择性	99%	95%	98%	99%
催化剂组成	锌锆基	铜锌铝	铜锌铝	铜锌铝
催化剂来源	国产自研	国产自研	国产自研	英国进口
知识产权	原创	改进	改进	—
工程规模 /（t/ 年）	1200	5000	5000	4000
技术路线	光伏发电—电解水制氢—CO_2 加氢制甲醇	富碳天然气综合利用	两段式—CO/CO_2 共加氢制甲醇	地热能发电—电解水制氢—CO_2 加氢制甲醇
应用时间 / 年	2020	2020	2023	2012 年投产，2015 年扩建
应用地点	甘肃兰州新区	海南东方	山东聊城	冰岛雷克雅未克
应用企业	兰州新区石投集团	中海油富岛公司	鲁西化工	冰岛 George Olah 可再生甲醇工厂

2.3 “煤电化新”系统重构的技术挑战

2.3.1 面向煤化工过程的异质能源时空互补技术

构建多能互补的“煤电化新”耦合系统，需要考虑煤化工系统和区域空间的资源匹配、能量互补以及环境协调 [38-40]。例如，蔡睿等 [41] 提出化石能源清洁高效利用与耦合替代、非化石能源多能互补与规模应用、工业低碳 / 零碳流程再造、数字化 / 智能化集成优化等多能融合的科技路径和实施建议；Chen 等 [42] 提出了一种煤化工行业综合能源系统并分析了其在中美两国的碳减排潜力和经济可行性；Gabrielli 等 [43] 在国家层面评估了化工行业与新能源耦合

的不同净零排放路径的资源承载力。这些研究在资源潜量评估与降碳减污综合效益分析方面进行了积极的探索，但进一步针对化工过程面临的复杂工艺调节需求和容量匹配空间，提高异质能源互补和调控的时空精度仍是当前面临的主要技术挑战。

在化工用能模拟方面，已有研究构建了可再生能源与煤化工耦合的工艺系统模型，并基于系统的物质能量流动过程开展了技术经济环境效益分析[44-46]。特别是为了解决可再生能源的时空波动性与化工过程用能匹配的问题，针对多种储能系统的技术经济成本分析也是当前多能互补研究的热点。例如王靖等[47]针对电—氢协调储能系统的研究表明，当化工系统的氢气需求全部由可再生能源发电制氢提供时，在系统中同时采用电池和氢气储罐储能可有效降低系统的总费用。然而，由于煤化工产业链网的复杂特性，在用能端往往难以精准刻画异质能源需求和工艺的变动性，有关异质能源时空互补供需匹配的研究尚需强化。

2.3.2 “煤电化新”多元耦合园区的系统评价及智能调控技术

针对“煤电化新”多元耦合园区的能源资源利用情况，开展及时、有效、全面的评价是实现系统规划与智能调控的重要基础，也是推动减污降碳协同增效、建设零碳园区的重要抓手。当前，已有研究基于定量化、科学性、系统性原则，结合工业园区运行的实际情况和发展需求，从经济、技术、环境、社会等多方面建立指标体系，评价园区发展的经济性、能源利用、环境保护、安全可靠性、社会影响等情况[48,49]。相应地，层次分析法、聚类分析、熵权算法、改进云物元模型等评价方法也在园区能源资源评价领域不断发展和完善[50]。关于工业园区绿色低碳循环发展的评价体系研究工作也非常丰富，国家层面针对生态工业园区、绿色园区、循环化改造园区等不同示范试点项目均制定了相应的标准或指标体系[51,52]。但以往的评价体系多数未将碳排放双控作为核心指标，未来仍需以国家政策为导向，强化碳排放总量和强度双控的评价考核作用。

《现代煤化工产业创新发展布局方案》指出，现代煤化工企业应开展智能制造示范，使企业生产运营具备全面自感知、自分析、自决策和自执行能力，以信息化、智能化手段提高企业安全环保水平[6]。近年来，国家层面推动研发风光制氢合成甲醇及甲醇制烯烃等相关衍生产品的一体化智慧管控平台，实现风光发电、电解水制氢、储氢及下游绿色甲醇等子系统的统一协调控制及优化运行，包括对各系统的运行进行数据采集、数据分析、优化决策、负荷预测、生产安排、运行管理、产品管理、能效管理等，实现全系统的可视化监测和智慧化管控。也有研究将智能算法与化工反应网络研究融合，将实际工业过程执行可视化，为相关工业生产提质增效提供了决策依据[53]。但“煤电化新”多元耦合园区能源资源智能调控问题具有显著的系统复杂性和非线性特征，运用传统数学优化方法显式求解难度较大，以深度强化学习为代表的深度学习方法由于其较强的隐式学习能力和数据拟合能力，有望成为新的解决方案[54,55]。

3 破解“煤电化新”系统重构技术挑战的若干策略

全面精准刻画“煤电化新”系统重构下园区的物质、能量流动情况，动态评估产业生态系统的能源资源利用效率和环境影响，并针对生产过程和发展策略进行智能调控和动态规划，是破解“煤电化新”系统重构技术挑战的关键策略。

3.1 资源能源构效关系精准建模

“煤电化新”多元耦合园区物质流能量流特征与产业系统的组成、结构、过程、效应密切相关。影响园区物质能量流动的因素复杂多样，物质能量流动的调控措施与流动过程改变相应的环境绩效之间存在时空滞后性。加之实践中三级计量基础薄弱，缺乏对系统构效关系数据驱动的精准刻画和动态分析，致使在理解园区物质能量流动的动力机制、阐明物质代谢动态演化机理等方面仍面临很大挑战。此外，园区物质流能量流调控需要跳出园区的系统边界，统筹行业及区域的发展定位、多样化产业基础、环境承载力、土地资源、资源能源等多视角，定量阐明多要素、多层级、多利益相关方之间的近远程耦合和博弈关系，从系统工程角度建立

物质流能量流调控模型。

3.2 产业生态系统动态自适应规划

面向现代煤化工产业示范区建设的国家需求，“煤电化新”多元耦合园区需有意识并理性地规划建设产业生态系统，在实践中解决好多种平衡关系，包括：产业链条长度和产业链网丰度的平衡、产业系统的复杂性和韧性之间的平衡、区域产业基础和资源禀赋承载力的平衡，同时需要定量甄别物质流—能量流—碳流—价值流—信息流等大并发多源复杂数据间的关系。面向煤基资源全量化应用、高值化利用目标，统筹异质能源时空耦合动态互补、能碳双控目标、资源能源产出率、土地—水—环境承载力、产品能效等多种约束条件，建立“煤电化新”产业生产系统共生网络和复杂系统动态自适应规划方法。

3.3 煤化工产业链网系统仿真优化

煤化工具有显著的流程工业特点，工艺链长、不同单元过程的柔性、刚性各异，运行工况耐冲击性、流程产出的可切换性迥异，从系统工程视角进行建模优化，需要攻克煤化工产业系统“质—能—碳—污”高维度输入流、中间流、输出流的精确刻画难题，以及系统内多层级间交互的定量表征，这为系统仿真建模带来极大挑战。实现对“煤电化新”园区“质—能—碳—污”的智能调控，一方面需要建立能够准确描述“煤电化新”系统及其能质转化规律的数字孪生环境，对物理实体进行智能感知，准确反映该实体的实时状态，并对系统状态的转移规律实现准确刻画，进而根据多指标评价体系对系统状态进行评价反馈；另一方面，需搭建与“煤电化新”系统相匹配的深度学习模型，引入考虑领域知识的训练策略，并利用物质流—能量流—碳流—价值流数据库对模型进行参数优化，结合预先定义的目标函数和优化方向，迭代优化模型参数，利用智能决策体输出最优评价指标，提升决策水平。

4 煤化工园区零碳建设的技术路径

“煤电化新”系统重构驱动的零碳园区建设的核心思路是基于“以煤定碳，物尽其用”原则，以煤制长寿命高附加值化学品 / 化工材料及 CO_2 制化学品短流程一步法工艺为核心技术，形成碳循环体系（图 2）。通过绿氢调节原料气碳氢比，缩减甚至取消净化变化和空分装置等技术更新与流程再造措施，构建资源能源有序代谢的产业生态系统，以“可再生能源发电 + 储能储热”构建多能融合的清洁能源支撑系统，同步建设产业数字孪生体实现系统重构的智能评价与调控，最终形成以“用炭不排碳，零碳煤化工”为特征的现代煤基产业体系。

4.1 开展多流耦合分析，促进资源有序代谢

有序代谢的目标是在物质、能量加工转化过程高效的同时，实现物尽其用和元素全量利用、能量高质高用和梯级利用，以及物质能量的价值增值最大化。有序代谢的底层逻辑是在物质平衡和能量平衡的基础上，追求系统效率效益的最大化，既要实现小系统的效率优化，更要实现大系统的效率优

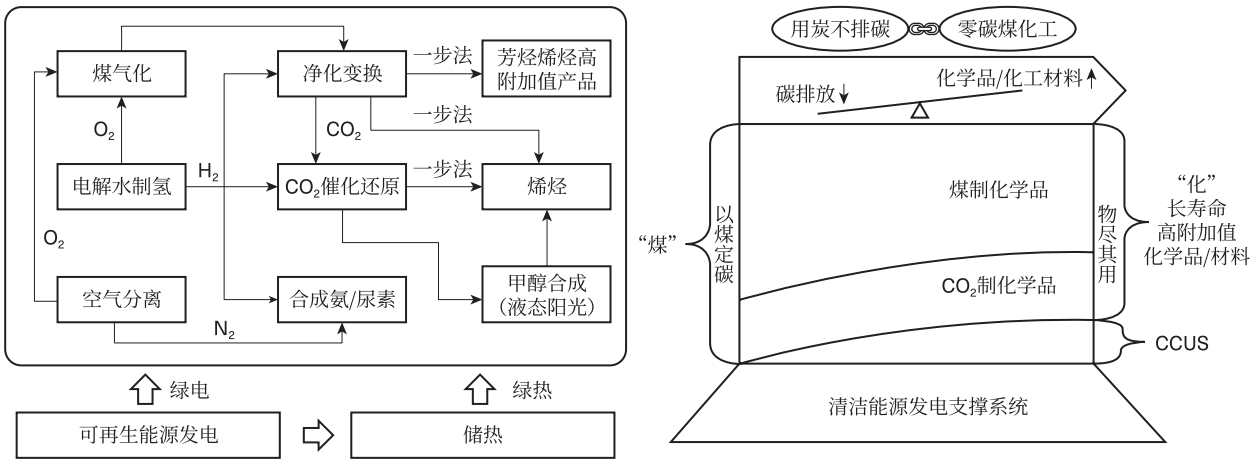


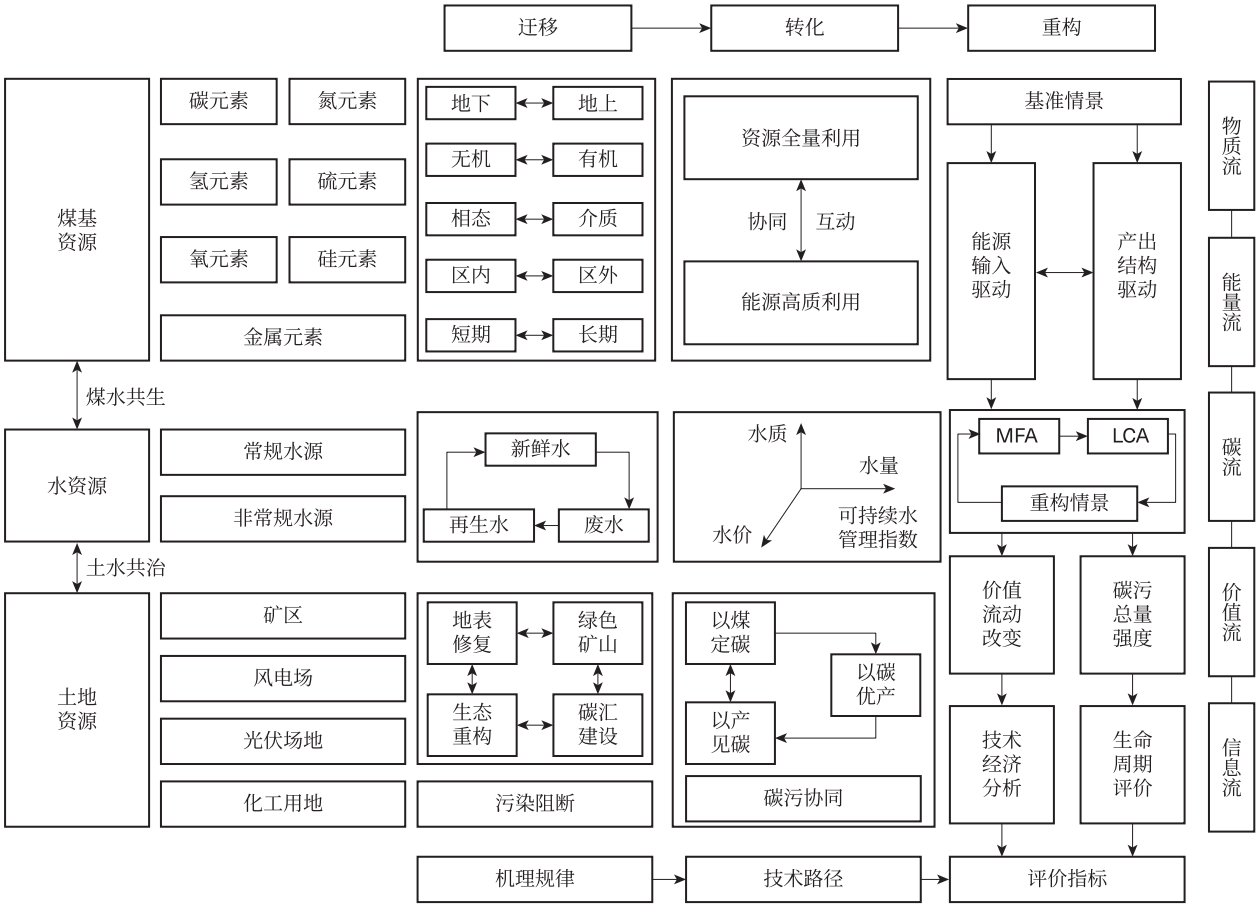
图 2　“煤电化新”系统重构驱动的碳循环体系

化。基于此，研究提出图 3 所示的“煤电化新”多元资源有序代谢系统设计和优化思路，通过构建物质—能量多层嵌套模型，刻画资源时空流动和价值增值过程，追踪关键元素代谢特征及利用效率，识别资源流动、元素代谢关键节点。定量分析碳、氢、氧等元素在火力发电、煤化工、绿氢生产、CO_2 制化学品等子系统中的流动特征和转化效率。同时，集成碳—氢—氧平衡、碳—氢—氧比例动态变化、碳效率和碳生产率等指标，建立碳、氢、氧预算管理方法。具体可从三个方面开展研究。

一是定量分析煤基资源、水资源、土地资源的代谢过程和承载能力。煤基资源重点分析碳、氢、氧、氮、硫、硅和金属元素的多维迁移特点，从资源全量利用和能源高值利用两方面建立协同互动机制；水资源集成常规水源和矿井水、工业废水等非常规水源，建立水循环体系，综合水量—水质—水价建立可持续水管理指数；土地资源统筹矿区、风电场、光伏场地和化工用地，矿区地上空间开展生态修复，并研究地下空间开发利用潜力及化工场地的污染阻断。

二是开展模块化的物质流—能量流—碳流—价值流—信息流分析。基于煤基化学品的工艺流程建立最小基准流程模块数字化标识，建立可视化动态图景，定量刻画煤炭、煤电、煤化工、可再生能源等系统各自的能源资源转化与代谢的主要流程，识别系统间物质、能量流动和共生链接的关键节点和时空特征，构建高精度、可扩展、动态化的碳足迹核算模型，以产品碳足迹精准核算助推煤基全产业链精准降碳，为识别园区碳、污排放重要节点、甄选适用减排措施奠定基础。

三是运用生命周期评价和技术经济分析方法，基于“以煤定碳—以产见碳—以碳优产”思路，研究能源输入和产出结构双驱动力下，低碳生产系统不同重构情景的物质能量流动变化、环境影响、价值流动、碳排放和污染物的总量强度变化，在产品、工厂、园区等多层面开展国内外对标分析，建



注：MFA 指物质流分析，LCA 指生命周期评价。

图 3 “煤电化新”多元资源有序代谢系统设计

立资源有序代谢与多流程耦合技术路径。在此基础上，面向物尽其用、能尽其用、经济低碳、安全高效目标，设计能质耦合和过程匹配的最优方案，实现“煤电化新”多元资源的有序代谢。

4.2 建设清洁能源系统，推动能源时空互补

图 4 为支撑“煤电化新”系统的异质能源时空互补与耦合集成分析示意。重点从三个方面建立相应的支撑技术。

一是建立基于决策树方法的异质能源时空互补和耦合集成优化技术。建立典型地区一次能源、二次能源清单及煤化工体系的工艺过程可回收能量列表，研究其数量、质量和流动方向等特性及约束条件。一次能源主要考虑煤炭、矿井瓦斯和风光发电，二次能源涉及燃煤、瓦斯热电联产和太阳能光热发电，同时做好余热余压和精馏冷凝热等工艺过程能量的回收。

二是在定量评估风光制氢潜力的基础上建设“风光火储”一体化新型电力能源系统。以风光资源高分辨率数据清单为基础，结合空间地理模型和大数据分析方法，定量刻画园区风光资源的时间演化规律和空间分布特征。建立风光发电电解水制氢技术学习曲线，研究制氢技术发展动态演化趋势，针对其经济可行性和环境效益开展分析。同时，发展绿氢储存、储能电池、熔盐储热等多元储能储热技术，增强能源系统稳定性和灵活性。

三是构建“煤炭开采—火电碳捕集—化工消纳—风光制氢”耦合系统综合用能效益动态评估与优化决策支撑技术。充分考虑资源禀赋和园区用能，通过“传统煤化工—新能源耦合煤化工—CO_2 资源化新型化工”集成多过程模拟，精准刻画能源供应端和化工过程需求端的能量变化特征，分析不同可再生能源渗透率情景下煤化工—可再生能源—灵活碳捕集耦合系统构建策略，评估“煤电化新”集成的经济环境效益 [56]。

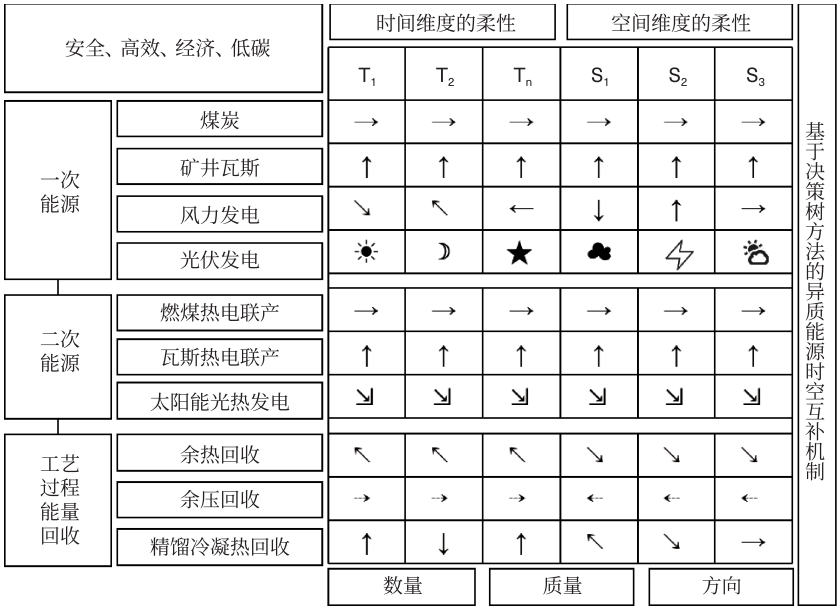
4.3 构建数字孪生体系，实现智能评价调控

运用数字化、模型化、规范化的方法，表征“煤电化新”产业系统，开发深度学习技术，开展物质能量代谢分析和多目标优化智能调控（图 5）。

一是建立支撑“煤电化新”园区系统评价和智能调控的数字孪生体。利用园区资源系统、能源系统、信息系统和产品系统，综合运用时空基础数据、现场统计数据、在线监控数据和模型模拟数据建立“煤电化新”园区孪生数据库，全面刻画物质流、能量流、碳流、信息流和价值流等多流数据流动情况，对物理实体实现低碳化智能感知与分析。

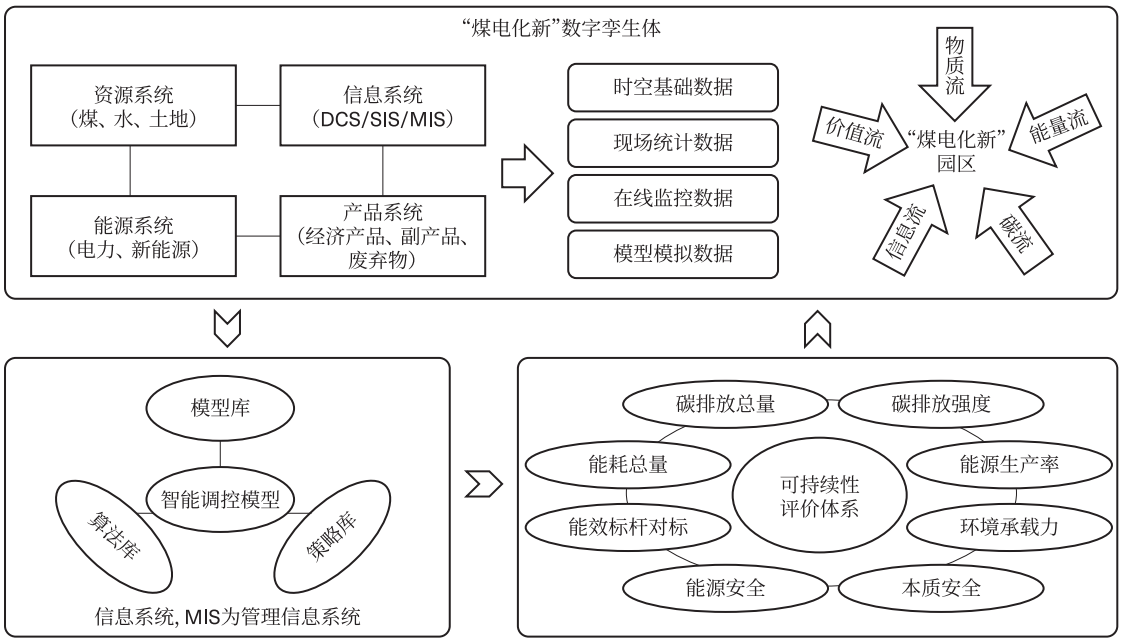
二是开发“煤电化新”资源能源一体化智能调控模型。通过工业大数据和人工智能技术方法分别搭建与智能感知和决策相关的模型库，运用化学品多元路径网络和元启发式算法，训练深度强化学习智能决策模型，有意识并理性地设计动态自适应的产业生态系统，规划强链补链延链关键节点，建立园区及区域多产业之间的共生耦合优化策略。

三是建立科学合理的“煤电化新”能源资源耦合系统可持续性评价体系。能源资源转化与代谢体系优化宜以碳排放总量和强度指标为重点，特别是产品碳足迹等指标的运用，综合考虑能耗总量、能源生产率、产品能效标



注：图中箭头为随机示意。

图 4 “煤电化新”异质能源时空互补与耦合集成分析



注：DCS 为集散控制系统，SIS 为监控。

图 5 “煤电化新”能源资源体系系统评价智能调控示意

杆对标、环境承载力、能源安全、化工过程本质安全等方面，建立可持续性评价指标体系，用科学合理的评估方法推动“煤电化新”耦合绿色低碳煤基产业园区高质量建设。

5 结论与建议

突破“煤电化新”系统重构技术和园区化示范应用，促进煤化工园区高质量发展，符合推动煤炭清洁高效利用，实现国家能源技术革命的战略导向。在实现“双碳”目标的过程中，煤化工园区要推动煤炭逐步实现从主体能源到储备能源的转变，从煤炭的燃料化利用到原料化运用的转变，统筹好“减”的工作与“保”的职责，在“煤电化新”系统重构中实现低碳零碳建设，确保国家能源供应系统安全。

面向“十五五”乃至更长时期的煤化工产业发展需要，建议从以下方面加快推进“煤电化新”系统重构的零碳园区建设研究：

（1）通过技术革新和流程再造促进资源有序代谢。积极探索高浓度 CO_2 的工质化和原料化利用，加快 CO_2 短流程一步法制芳烃等高附加值产品工艺技术研发和工艺示范。完善绿氢与煤化工耦合全流程的技术工艺创新，研究制定风光制氢设备选型和参数设计等标准和规范，进一步推动绿电和绿氢成本降低，提升煤化工产品的经济竞争力。

（2）优化用能结构，促进异质能源时空互补。面向煤基产业用能的安全性、稳定性、灵活性和经济性等多元需求，综合运用可再生能源发电、储能、储热、虚拟电厂、煤化工产业电气化等方式，在保障园区综合能源系统安全稳定的同时，持续提高新能源占比，打造“绿电可持续稳定供应 + 长寿命高附加值产品生产 + 高效 CCUS”等减污降碳协同创新路径。

（3）推动“人工智能 + 煤化工”产业深度融合。建设园区数字孪生体系，加强能源资源可持续性评价，建立智能调控模型，对园区的能源消耗、资源利用、环境排放和经济效益进行全面核算与主动调整，在物质流和能量流精细化智慧化管理中构建低碳零碳产业链。

总而言之，“煤电化新”系统重构驱动的煤化工园区零碳建设将为我国零碳园区工作的推进提供技术支撑和案例示范，未来需要进一步强化产学研融合，加强相关科学研究和应用落地的探索。

参考文献

[1] GUO Y, TIAN J P, CHEN L J. Managing energy infrastructure to decarbonize industrial parks in China[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 981.

[2] 陈吕军 . “双碳”目标指引中国工业园区绿色发展 [J]. 中国环境管理 , 2021, 13(6): 5-6.

[3] 清华大学习近平新时代中国特色社会主义思想研究院 . 建立一批零碳园区推进工业领域生态文明建设 [J]. 环境与可持续发展 , 2025, 50(2): 60-66.

[4] 姜华 , 李艳萍 , 高健 . 双碳背景下煤基产业绿色低碳转型之路 [J]. 环境工程技术学报 , 2022, 12(5): 1580-1583.
[5] 田原宇 , 谢克昌 , 乔英云 , 等 . 碳中和约束下的煤化工产业展望 [J]. 中外能源 , 2022, 27(5): 17-23.
[6] 国家发展和改革委员会 , 工业和信息化部 . 现代煤化工产业创新发展布局方案 [EB/OL]. (2017-03-23).[2024-12-24]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/cyfz/zcyfz/201703/t20170323_1149896.html.
[7] 工业和信息化部 , 国家发展改革委 , 生态环境部 . 关于印发工业领域碳达峰实施方案的通知 [EB/OL]. (2022-07-07).[2025-03-10]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content_5703910.htm.
[8] 陆安慧 , 王辉跃 . “双碳”目标下我国煤炭利用面临的挑战与机遇——立足能源与材料双视角 , 探讨煤炭综合利用新途径 [J]. 中国发展 , 2024, 24(4): 10-16.
[9] 谢克昌 . 新型能源体系发展背景下煤炭清洁高效转化的挑战及途径 [J]. 煤炭学报 , 2024, 49(1): 47-56.
[10] 范玮 . “双碳”背景下现代煤化工与新能源耦合发展路径研究 [J]. 煤炭经济研究 , 2023, 43(5): 74-81.
[11] 姜大霖 , 于淼 , 陈语 . 碳中和下煤炭清洁高效利用与经济社会转型发展 [M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2023.
[12] 国家统计局 . 中华人民共和国 2024 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2025-02-28).[2025-07-09]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228_1958817.html.
[13] 黄震 , 谢晓敏 , 张庭婷 . “双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究 [J]. 中国工程科学 , 2022, 24(6): 8-18.
[14] 李文超 . 煤化工行业物质代谢及资源环境问题研究——以国内某大型煤化工园区为例 [D]. 天津 : 南开大学 , 2016.
[15] GUO Y, PENG L Q, TIAN J P, et al. Deploying green hydrogen to decarbonize China’s coal chemical sector[J]. Nature communications, 2023, 14(1): 8104.
[16] 程超 , 高丹 , 张衡 , 等 . 煤炭与新能源融合发展场景与关键技术 [J]. 中国工程科学 , 2024, 26(4): 52-62.
[17] 唐学用 , 赵卓立 , 李庆生 , 等 . 产业园区综合能源系统形态特征与演化路线 [J]. 南方电网技术 , 2018, 12(3): 9-17.
[18] 国家发展改革委 , 国家能源局 . 能源技术革命创新行动计划 (2016—2030 年)[EB/OL]. (2016-06-01).[2024-12-23]. https://www.nea.gov.cn/2016-06/01/c_135404377.htm.
[19] 侯宗余 , 宋惟然 , 宋玉洲 , 等 . 激光诱导击穿光谱煤质在线分析技术现状与展望 [J]. 煤质技术 , 2023, 38(1): 1-12.
[20] “中国工程科技 2035 发展战略研究”项目组 . 中国工程科技 2035 发展战略 : 能源与矿业领域报告 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2019.
[21] LI Z L, WANG J J, QU Y Z, et al. Highly selective conversion of carbon dioxide to lower olefins[J]. ACS catalysis, 2017, 7(12): 8544-8548.
[22] 陈文会 , 鲁玺 . 碳中和目标下中国燃煤电厂 CCUS 集群部署优化研究 [J]. 气候变化研究进展 , 2022, 18(3): 261-271.
[23] 王双明 , 耿济世 , 李鹏飞 , 等 . 煤炭绿色开发地质保障体系的构建 [J]. 煤田地质与勘探 , 2023, 51(1): 33-43.
[24] 吴长江 . 我国聚烯烃产业技术的现状与发展建议 [J]. 科学通报 , 2022, 67(17): 1853-1862.
[25] XU Y X, CHEN E Q, TANG J W. Photocatalytic methane conversion to high-value chemicals[J]. Carbon future, 2024, 1(1): 9200004.
[26] 张胜利 , 焦洪桥 , 杨靖华 , 等 . 碳中和背景下现代煤化工产业生态链布局和创新发展路径 [J]. 中国煤炭 , 2022, 48(8): 7-13.
[27] 中国石油和化学工业联合会化工新材料专委会 . 中国化工新材料产业发展报告 (2024)[M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2025.
[28] GARG S, BISWAS A N, CHEN J G. Opportunities for CO_2 upgrading to C_3 oxygenates using tandem electrocatalytic-thermocatalytic processes[J]. Carbon future, 2024, 1(1): 9200002.
[29] 徐向梅 . 推动煤炭清洁高效利用 [N]. 经济日报 , 2022-08-15(11).
[30] GAO P, LI S G, BU X N, et al. Direct conversion of CO_2 into liquid fuels with high selectivity over a bifunctional catalyst[J]. Nature chemistry, 2017, 9(10): 1019-1024.
[31] HANDLER R M, CANTER C E, KALNES T N, et al. Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts[J]. Algal research, 2012, 1(1): 83-92.
[32] ARSLAN M T, TIAN G, ALI B, et al. Highly selective conversion of CO_2 or CO into precursors for kerosene-based aviation fuel via an aldol-aromatic mechanism[J]. ACS catalysis, 2022, 12(3): 2023-2033.
[33] SHEN B Y, CHEN X, FAN X Y, et al. Resolving atomic SAPO-34/18 intergrowth architectures for methanol conversion by identifying light atoms and bonds[J]. Nature communications, 2021, 12(1): 2212.
[34] SOLLAI S, PORCU A, TOLA V, et al. Renewable methanol production from green hydrogen and captured CO_2: a techno-economic assessment[J]. Journal of CO_2 utilization, 2023, 68: 102345.
[35] 周君 , 安娟 , 杨宽辉 , 等 . 现代能源体系耦合绿氢化工应用的研究进展 [J]. 低碳化学与化工 , 2023, 48(4): 46-54.
[36] WANG J J, LI G N, LI Z L, et al. A highly selective and stable ZnO-ZrO_2 solid solution catalyst for CO_2 hydrogenation to methanol[J]. Science advances, 2017, 3(10): e1701290.
[37] 朱稳樑 . 绿色低碳转型助力能源强国建设的央企实践 [J]. 中国煤炭工业 , 2023(1): 44-45.
[38] 王子琳 , 鲁玺 , 庄明浩 , 等 . 中国三北地区风—光互补发电系统空间优化研究 [J]. 全球能源互联网 , 2020, 3(1): 97-104.
[39] CHEN S, LU X, MIAO Y F, et al. The potential of photovoltaics to power the belt and road initiative[J].

Joule, 2019, 3(8): 1895-1912.
[40] TONELLI D, ROSA L, GABRIELLI P, et al. Global land and water limits to electrolytic hydrogen production using wind and solar resources[J]. Nature communications, 2023, 14(1): 5532.
[41] 蔡睿 , 朱汉雄 , 李婉君 , 等 . “双碳”目标下能源科技的多能融合发展路径研究 [J]. 中国科学院院刊 , 2022, 37(4): 502-510.
[42] CHEN Q Q, LV M, GU Y, et al. Hybrid energy system for a coal-based chemical industry[J]. Joule, 2018, 2(4): 607-620.
[43] GABRIELLI P, ROSA L, GAZZANI M, et al. Net-zero emissions chemical industry in a world of limited resources[J]. One earth, 2023, 6(6): 682-704.
[44] MENG W L, WANG D L, ZHOU H R, et al. Design and analysis for chemical process electrification based on renewable electricity: coal-to-methanol process as a case study[J]. Energy conversion and management, 2023, 292: 117424.
[45] WANG D L, MENG W L, ZHOU H R, et al. Green hydrogen coupling with CO_2 utilization of coal-to-methanol for high methanol productivity and low CO_2 emission[J]. Energy, 2021, 231: 120970.
[46] ZHAO Y J, LIU Q, DUAN Y Y, et al. A multi-dimensional feasibility analysis of coal to methanol assisted by green hydrogen from a life cycle viewpoint[J]. Energy conversion and management, 2022, 268: 115992.
[47] 王靖 , 康丽霞 , 刘永忠 . 化工系统消纳可再生能源的电 – 氢协调储能系统优化设计 [J]. 化工学报 , 2020, 71(3): 1131-1142.
[48] 高洋 , 桑晶 , 臧娜 , 等 . 国家级经济技术开发区发展绩效及时空演变分析 [J]. 环境科学研究 , 2023, 36(6): 1245-1254.
[49] LYU Y Z, FENG Z A, JI T S, et al. Networking chemicals flows: efficiency-value-environment functionalized symbiosis algorithms and application[J]. Environmental science & technology, 2023, 57(46): 18225-18235.
[50] WANG Y L, MA Y Z, SONG F H, et al. Economic and efficient multi-objective operation optimization of integrated energy system considering electro-thermal demand response[J]. Energy, 2020, 205: 118022.
[51] 杜真 , 陈吕军 , 田金平 . 我国工业园区生态化轨迹及政策变迁 [J]. 中国环境管理 , 2019, 11(6): 107-112.
[52] 田金平 , 臧娜 , 许杨 , 等 . 国家级经济技术开发区绿色发展指数研究 [J]. 生态学报 , 2018, 38(19): 7082-7092.
[53] 毕可鑫 , 邱彤 . 深入探索智能算法与反应网络研究的融合 [J]. 化工进展 , 2022, 41(6): 2818-2825.
[54] SPECHT J M, MADLENER R. Deep reinforcement learning for the optimized operation of large amounts of distributed renewable energy assets[J]. Energy and AI, 2023, 11: 100215.
[55] XIE J H, AJAGEKAR A, YOU F Q. Attention based multi-agent reinforcement learning for demand response in grid-responsive buildings[C]//Proceedings of 2023 IEEE Conference on Control Technology and Applications. Bridgetown: IEEE, 2023: 118-123.
[56] 林光平 , 刘兆川 , 聂立 , 等 . 煤与可再生能源深度耦合的典型零碳综合能源系统构建 [J]. 洁净煤技术 , 2022, 28(11): 90-104.

Driving Zero-Carbon Transition in Coal Chemical Parks via Coal-Electricity-Chemical-New Energy System Reconfiguration

SHI Yao[1], YAN Kun[1], XIAO Hao[1], TIAN Jinping[1,2,3*], CHEN Lyujun[1,2]

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Center for Ecological Civilization, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Carbon Neutrality Research Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The integrated development and systemic reconfiguration of coal, electricity, coal chemicals, and new energy (CECNE) serve as a crucial breakthroughs for continuously advancing the green, low-carbon, and high-quality development of coal-based industries and achieving carbon emission reduction across the entire coal chemical industry chain. This integration holds significant implications for promoting the clean and efficient utilization of coal, safeguarding national energy security, and realizing carbon peak and neutrality goals. This paper first elucidates the strategic importance and practical necessity of constructing zero-carbon coal chemical parks through the synergistic coupling of diverse CECNE resources. It subsequently reviews recent technological advancements within the relevant CECNE sectors. Furthermore, the major challenges in systemic reconfiguration for zero-carbon industrial park development are explored from two perspectives: spatio-temporal complementary technologies for heterogeneous energy sources tailored to coal chemical processes, and intelligent optimization technologies. Strategies to address these technical challenges are proposed, including precise modeling of resource-energy structure-performance relationships, dynamic adaptive planning of industrial ecosystems, and system simulation and optimization of the coal chemical industrial chain network. Finally, key technological pathways for CECNE systemic reconfiguration are discussed in depth to provide technical guidance for establishing zero-carbon coal chemical parks in China to implement the national “dual control of carbon emissions” policy and move towards zero-carbon construction, accelerating the low-carbon transformation of coal-based industrial clusters.

Keywords: coal chemical industry; coal-electricity-coal chemicals-new energy; zero-carbon industrial park; multi-energy complementary; systemic reconfiguration