◆新质生产力与产业态势◆

中国化工产业绿色低碳发展研究综述

谢　鑫，袁志宏，胡山鹰

（清华大学 化学工程系，北京　100084）

［摘　要］自然资源的开发利用是人类社会发展的重要过程，其中化工产业系统是复杂资源开发的关键性产业，在如今的“双碳”背景下，化工产业系统实现绿色低碳的发展转型十分重要。本研究综述发现，近年来关于产业系统可持续的相关研究的关注度持续上升，相关研究主要集中在物质代谢分析、环境影响评价、绿色低碳转型设计等方面，研究主要围绕以物质流分析、生命周期分析、复杂网络分析等方法展开，在全球、国家、区域、园区以及技术等多个层面全面评估各维度下化工产业系统绿色低碳转型的现状。产业的发展规划需要系统性的构建、评价方法，但现有的研究在化工产业系统的绿色低碳转型上仍然存在局限性，在面临多资源、多产业的情况下缺乏可广泛推广的系统性框架，难以借鉴成熟案例完成对复杂资源多重交互条件下的综合规划。因此本研究进一步开展了未来化工产业系统绿色低碳转型领域的展望分析，以促进更全面和有效的产业可持续发展策略。

［关键词］化工产业系统；绿色低碳转型；产业规划；可持续发展

［中图分类号］TQ-9　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2025）02-0001-11

Overview of research on green and low carbon development of China's chemical industry

XIE Xin，YUAN Zhihong，HU Shanying

（*Department of Chemical Engineering*，*Tsinghua University*，*Beijing* 100084，*China*）

Abstract：The development and utilization of natural resources is a critical process in human societal progress，and the chemical industry system serves as a pivotal sector in the exploitation of complex resources. Under the current carbon peaking and neutrality goals，achieving a green and low-carbon transition in the chemical industry system is of utmost importance. A review of recent studies reveals a growing interest in sustainable industrial systems，with research efforts largely focusing on material metabolism analysis，environmental impact assessment，and green low-carbon transition design. These studies frequently employ methods such as material flow analysis，life cycle assessment，and complex network analysis to evaluate，at multiple levels（global，national，regional，industrial park，and technological），the current status of green and low-carbon transitions within chemical industry systems. Although systematic construction and assessment methodologies are essential for industrial development planning，existing research on the green and low-carbon transition of chemical industry systems remains limited. Particularly，under conditions involving multiple resources and diverse industries，there is a lack of a widely applicable systematic framework. This constraint makes it challenging to adopt mature examples for integrated planning when facing complex，multi-resource interactive conditions. Consequently，this study further explores future prospects for green and low-carbon transitions in chemical industry systems，aiming to foster more comprehensive and effective sustainable development strategies.

Key words：chemical industry system；green low-carbon transition；industrial planning；sustainable development

0　引言

自然资源的开发利用是支撑现代社会发展的重要因素，其合理开发利用可以促进工业、农业、能源等各个领域的发展，保障社会的基本需求，提高人民生活水平。同时，通过合理规划和科学管理，自然资源的开发利用可以实现可持续发展，如作为关键自然资源的石油、天然气、钾、钠、锂等资源。在资源开发过程中，化工产业作为国民经济的

［收稿日期］2025-01-09

［作者简介］谢　鑫(1997-)，男，四川乐山人，在读博士研究生，从事生态工业学研究。

［通信作者］胡山鹰，男，教授，从事生态工业学研究。

［基金项目］“煤电化新”多元耦合园区/基地能源资源体系构建及关键技术(U24B6016)

重要支柱产业之一，是复杂资源开发的关键性产业。化工产业涉及煤炭、石油、天然气等各类资源的加工利用，例如，通过炼油和石油化工过程，将原油和天然气转化为各种化工产品；煤化工过程将煤炭转化为化工原料和产品，如甲醇、合成氨等；化工产业利用各种矿石资源，如稀土金属、有色金属等，生产各种化工材料和产品；盐湖化工利用盐湖卤水中富含的钾、钠、镁、锂等重要元素，生产钾肥、食用盐、锂电池等重要产品。同时，化工产业由于经济总量大、产业链条复杂、产品类型丰富且具有内在关联等诸多特点，其与国民经济状况的联系十分紧密，涉及的消费领域遍布于基础建设、房地产、农业、汽车、服装等众多经济部门。以产品的应用领域进行划分，化工产业包括多个子行业，例如农用化学品、电子化学品、新能源化学品、纺织化学品等。进一步按原料的类型划分，化工产业可细分为煤化工、磷化工、石油化工、氟化工等多个子产业类别。总体而言，化工产业系统的重要性不仅仅局限于单一领域，而是涵盖了社会经济系统的方方面面，因此其可持续发展是维护社会经济系统稳定运行的基石。

然而，随着人口的快速增长、新兴市场的蓬勃发展、技术进步以及产业升级等诸多因素，化工产业的高质量发展的需求不断增长，进一步加强了化工产业的蓬勃发展，但这也带来了不可忽视的影响：随着环保政策的逐渐增强，化工产业需要从原有的粗放的发展模式下不断优化生产工艺，减少污染物排放，提高资源利用率；由于产能增速大于市场需求增速，尤其是石油化工、煤化工和盐化工等领域，化工产业整体利润和开工率有所下降，导致严重的产能过剩问题；化工产业作为高碳排放行业，在如今“双碳”政策的背景下，需要大量资金进行技术改造、设备更新、原料替代、产业结构调整等诸多低碳转型的挑战。因此，探究化工产业绿色低碳的路径来实现产业的可持续性发展的研究十分紧迫。

在此背景下，本研究从研究热点、研究方法、空间尺度3个方面综述近些年化工产业系统可持续发展的研究进展，分析研究热点和研究领域，阐述现有研究的局限性，提出未来研究展望，希望以此提供化工产业系统绿色低碳发展的新思路。

1 化工产业系统绿色低碳发展研究方向

国内外近年来关注化工产业系统的可持续发展，开展了大量的研究工作。本部分将从多个视角深入探讨该领域的研究现状与最新进展。首先，通过大数据分析识别化工产业系统可持续发展领域的关注热点和研究领域，以此揭示产业系统可持续发展问题的关注度。其次，从研究方法的角度探讨目前的主流方法，包括物质流分析（Material Flow Analysis，MFA）、生命周期分析（Life Cycle Analysis，LCA）、指标评价分析（Indicator Evaluation）、数学建模优化（Mathematical Modeling Optimization）、网络分析（Network Analysis）等多种方法在产业系统可持续发展方面的关键作用，以及它们在评估产业系统资源效率、环境影响以及可持续发展的重要贡献。空间尺度上，本研究概述了从国家层面、区域层面、园区层面以及技术层面等多尺度下产业系统可持续发展的进展，展示国家层面的物质流分析、区域以及园区层面的构建和优化、技术层面的效率评价等不同尺度下的解决方法的多样性和深度。最后，从研究分析维度的视角，概述现有研究在产业系统可持续发展评价、复杂资源禀赋下的多产业构建、产业绿色低碳发展路径等维度的内容。通过从研究方法、空间尺度、研究维度等多视角的综合分析，为化工产业系统的可持续发展的相关研究奠定坚实基础。

1.1 化工产业系统可持续发展的关注热点和研究领域

化工产业系统的可持续发展的综合体现是其绿色低碳的转型，因此本研究关注的研究问题主要聚焦于化工产业绿色低碳发展的路径研究，更进一步地说，聚焦于化工产业系统的“绿色转型”、“环境与气候影响”、“碳减排潜力”、“产业结构调整”等方面。因此本部分首先对关注的领域研究的范围、现状和关注热点进行概览，采用相关领域的关键词，例如“Chemical industrial sustainable development”，“Carbon emissions”，“Industrial structure”，“Regional industrial development”等，在web of science上检索2010年至最新的相关文献，共计文献25 669篇。以论文发表时间来看，关于化工产业的绿色低碳转型的每年相关发文量在逐年上升，从2009年的650余篇上涨到2022年的2 900余篇，表明针对化工产业绿色低碳发展的相关问题逐渐受到重视。对于研究领域的关注问题解析，采用Vosviewer软件对关键词出现频率进行可视化网络分析，具体是将web of science上的检索结果对作者、标题、来源出版物和摘要内容进行结果记录，

将记录的文本导入到Vosviewer软件中对文献摘要内容的关键词出现频率进行筛选，剔除掉不必要的词汇后对出现频率靠前的词频进行可视化分析，如图1的文献词频分析所示。由图1可以看出，近期研究者主要关注化学工业发展导致的污染问题，例如气候变化问题“Climate change”，化学工业排放“Chemistry emissions”，海洋酸化“Ocean acidification”；化学工业可持续转型发展的问题，例如可持续“Chemistry sustainability”，绿色化学“Green chemistry”；化学工业经济发展与资源节约的问题，例如循环经济“Circular economy”；化学工业具体转型技术，例如二氧化碳捕集利用“CO_2 capture and utilization”，制氢技术“Hydrogen production”，生物质利用“Biomass utilization”等领域。以上分析表明化学工业可持续发展是一个综合性、多学科交叉、备受关注的重点领域。

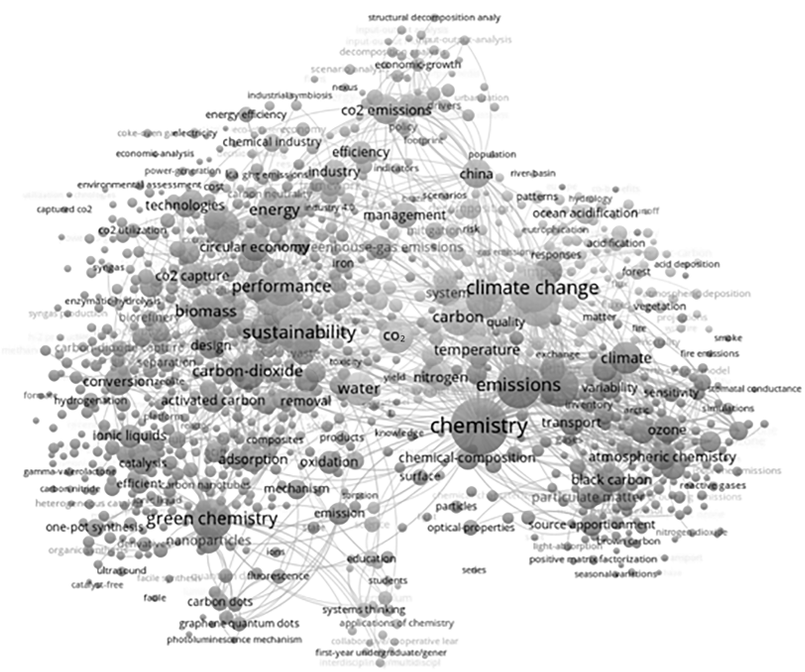

图1　以相关关键词在web of science上搜索文献，采用Vosviewer软件对关键词出现频率进行可视化网络分析

Fig. 1　Search literature on web of science with related keywords, and use Vosviewer software to visualize the frequency of keywords

1.2　化工产业系统绿色低碳主流研究方法

在当前的产业生态学理论框架内，学术界对于不同尺度下的产业可持续发展主要采用以下多种研究方法：物质流分析方法、生命周期评估方法、指标评价方法、网络分析方法、数学建模优化方法等（见图2）。其中在全球尺度或国家尺度的研究大多采用物质流分析方法、生命周期评估方法、网络分析方法来分析特定产业系统的物质代谢情况和关键影响因素。在区域或园区层面的研究大多采用物质流分析、数学建模优化和指标评价方法来分析和评价产业系统的可持续性、构建具有目标导向的产业系统等。

物质流分析是建立在物质守恒的基础上，定量评估特定时空边界内的经济–环境系统内的特定元素或物质的存量和流量，进而追踪关键物质在该边界内的流动情况的研究方法[1]。在化工产业系统中，物质流分析主要用来追踪特定产业或特定物质的代谢情况。通过物质流分析，现有研究从生产网络的视角，关注从化石燃料到初级化学品的加工过程的物质代谢情况[2]。一些研究关注特定产业的物质代谢情况并分析其上下游过程的环境影响，例如锂资源代谢网络[3]、磷资源代谢[4]、塑料[1, 5]、铜回收产业链等过程的物质代谢情况[6]，或深入分析特定的化学品，例如氢气[7]、铝金属[8]、PVC、PET塑料[9]、天然橡胶[10]等典型化学品的代谢情况。龚腾勇[11]结合循环经济理念和工业生态学，采用物质流分析和能量流分析定量分析了石化产业园的产业链设计。李娟娟[12]系统性地分析了煤化工产业链的工业代谢，阐明了煤化工产业园的发展模式，进一步优化了产业链的设计。通过从化学品

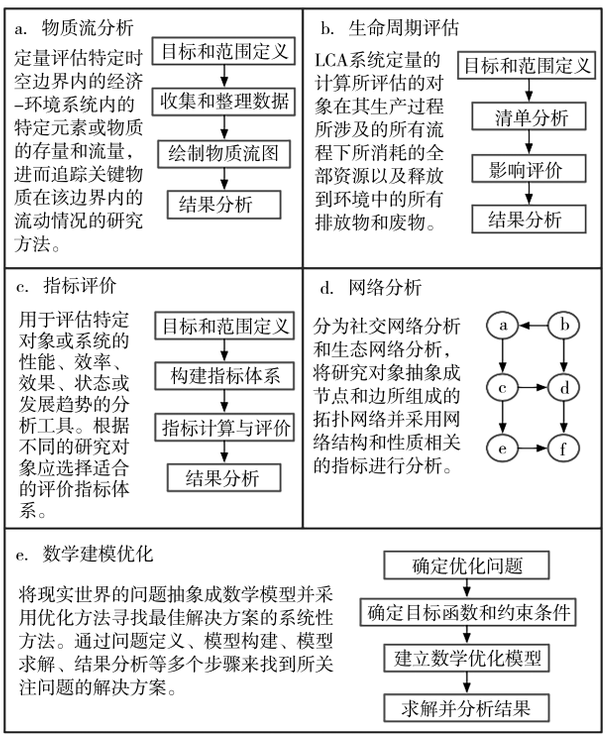

图 2 产业生态学常用方法汇总

Fig. 2 Summary of common methods in industrial ecology

生产、特定产业链以及关键化学品的物质代谢分析，可以通过跟踪和量化关键流量，确定特定资源或物质的利用和环境效益，识别关键的代谢环节和问题，以此对物质循环和污染控制等方面的需求提供对应的有效措施和关键性政策[2]。但传统的 MFA（多因素认证）方法通常聚焦于物质流或能量流，通常用于提供新的分析视角，但较难直接纳入经济成本或社会影响分析。

生命周期评估方法是一种系统性的评估方法，用于评估产品、过程或活动在其整个生命周期中的环境负荷，LCA 系统定量的计算所评估的对象在其生产过程所涉及的所有流程下所消耗的全部资源以及释放到环境中的所有排放物和废物[13]。生命周期工具的使用贯穿从技术层面到全球层面的多种产品、过程的环境影响评估，例如 UKIDWE 等[14]采用生命周期分析评估化学工业部门的资源强度以提高其环境可持续性。有研究系统评价特定的化学品，例如 PET 塑料[15]、塑料添加剂[16]、锂相关产品来识别这些化学品的特定生产环节中的环境影响[17]，以此来针对性地提出减缓环境影响的关键策略。BERKHOUT 等[18]以及 WANG 等[19]针对工业园区内的特定的生产路径进行生命周期评估来判断工业共生的环境影响减少潜力。生命周期分析可以量化产品“摇篮到坟墓”的对环境的全面影响，可以识别关键的环境负荷环节并针对性地提出政策建议，但传统 LCA 主要关注环境影响，同样缺乏经济成本、社会效益的等多维度的考量[13]。

指标评价方法是一种用于评估特定对象或系统的效率、状态或发展趋势的分析工具，具有客观性、可比性、系统性以及目的性等特点，根据不同的研究对象应选择适合的评价指标体系[20]。在产业系统的可持续发展评估中，通常采用技术经济性分析、社会经济指标评价或生态效率评价等方法。韩玉堂[21]结合生态效率、研究了生态产业链的构建和稳定性。ZHANG 等[22]采用生态效率评估中国工业部门的生态效率演变情况，展示了区域工业部门从传统的线性污染–治理模式转向循环经济发展模式的演变。同时，部分研究系统性的评价不同产业的生态效率，例如有色金属产业[23]、磷资源网络等[24]。也有研究采用生态效率指标来评价特定生产过程，例如制药过程[25]、造纸过程[26]、氢气生产[27]、盐湖资源利用技术等特定技术的效率[28]。指标评价方法为产业发展提供了新视角，通过不同指标体系的分析、识别和判断以诊断现有产业存在的问题以及进一步地判断关键措施的施行效果，但不同指标之间的彼此关联和动态影响较难在单一指标体系中得到充分展现，因此需要多维度评价。

数学建模优化方法是将现实世界的问题抽象成数学模型并采用优化方法寻找最佳解决方案的系统性方法。数学优化方法通常用于解决工业园区设计、工业共生等维度的问题。ZHU 等[29]和 FAN 等[30]基于交互式推理构建了面向工业共生网络的产业构建，并应用在柴达木试验区的产业规划中。CHAE 等[31]构建了数学模型来综合利用韩国蔚山的石油化工园区的废热网络来降低其能源成本，提高废热利用率。CIMREN 等[32]开发了基于采用副产品协同的最优网络应用于堪萨斯城的区域工业集群，以减少集群的生产成本和碳排放。HASAN 等[33]构建了二氧化碳捕集与封存的网络来分析得克萨斯州的二氧化碳综合利用的可行性，或综合考虑捕获技术、碳源位置、运输等多种因素，设计了最小成本的二氧化碳捕集与封存供应链网络。EDWARDS 等[34]提出了一个数学模型用于确定基于生物能源的最优工业共生配置，并应用于生物精炼厂来提高其盈利能力和减少其环境影响。LEE 等[35]和 LEONG 等[36–37]构建了水资源利用、能源利用模型来最小化工业集群的供水成本、供能成

本，或者基于工业共生的理念，在工业集群中采用能源交换与水交换来降低成本。曹隆祁[38]根据工业生态理论，构造了针对仁和工业园的园区规划模型，以内生动力和经济增长为目标构建了符合生态工业目标的园区规划。数学建模优化方法通过对产业的建模和分析，得到实体产业所对应的数学模型，并且能够得到分析、改善、优化现有局面的最优决策以定量的支撑产业发展，为产业的可持续发展提供系统定量的依据，但在产业规划层面，涉及多种资源、技术的决策以及数据参数的动态变化，针对性建模的优化模型难以考虑复杂资源与技术交互的复杂性和广泛的适应性。

网络分析方法中常见的分析方法包括复杂网络分析（Complex Network Analysis，CNA）、社交网络分析（Social Network Analysis，SNA）和生态网络分析（Ecological Network Analysis，ENA）。其中生态网络分析是基于网络理论，将生态系统中的生物群落和它们之间的相互关系视为一个复杂的网络，将物种之间的关系抽象成网络结构并研究其生态系统中的物质循环和能量流动。社交网络分析则是将研究社会实体（例如个人、组织等对象）之间的关系抽象成网络结构，进一步揭示信息流、影响力、社会地位和其他社会结构特征的方法[39]。在产业发展相关的研究中，LI等[40]和CHEN等[41]将复杂网络分析方法（CNA）和ENA结合，从韧性的角度研究1990年到2020年的磷资源网络以揭示韧性的改变所带来的影响。DU等[42]从园区的视角采用结合复杂网络分析和投入产出分析，研究2005年到2014年41个行业的间接碳排放网络来探究不同产业之间的相互关系。FAN等[43]以区域工业为研究对象，结合社会网络分析和生态网络分析来探究区域工业代谢网络，以合肥经济技术开发区委为研究对象来探究网络代谢的关键特征，以促进资源节约和减少环境影响。LAYTON等[44]从仿生设计（Biologically Inspired Design，BID）的视角，采用生态网络分析中的关键指标以模拟自然生态系统的属性来构建工业生产网络，提出了生物启发式的工业资源网络的设计原则。更多的研究关注特定产业例如煤、磷、氮等资源的代谢情况，从网络的视角分析其代谢情况和抵御干扰的能力，为研究提供新的视角[45-46]。但网络分析方法的结果是网络分析常抽象出关系结构，并不能直接转化为政策或规划方案，难以反映技术差异、资源配置等复杂要素，需要进一步结合其他分析方法。

综上所述，以上多种针对化工产业系统相关的多维度的主流研究方法各具特色，从不同的维度为探究产业系统可持续发展提供了宝贵的分析、评价和构建的有力工具。因此，对于不同的研究目标、研究尺度和关注维度应灵活选择或运用不同的方法，以期实现化工产业的可持续发展。

2　化工产业系统绿色低碳主要研究评述

丰富的资源禀赋对于工业经济发展十分重要，因此，需要高质量、可持续的资源利用系统来合理地优化和规划产业结构来实现绿色循环模式下的经济发展，以确定产业发展的最优路径。产业生态学（Industrial Ecology，IE）的概念是一门包含生态学、系统工程、数学建模、经济学的多领域学科，旨在构建可持续和稳定的产业发展模式[47-48]，产业生态学研究产业系统内及其与自然生态系统之间物质与能量的代谢、交换过程，以优化和调控等方法来实现产业系统高效、和谐发展的工业发展模式[49-50]。

1947年RENNER等发现了相互联系的产业系统内存在“产业共生”现象，提出了产业共生的概念，FROSCH等于1989年提出以“产业共生”为基础的产业发展新理念，随后，LIFSET等将产业共生拓展为一种全面的合作，而不仅指共处企业相互交换废物。产业共生（Industrial symbosis，IS）是源于产业生态的概念，是整合资源禀赋和产业技术，实现区域资源利用效益最大化的有效工具[47，51]，其关键要点是跨组织间的合作，通过对水、能源、材料副产品和废物的资源共享，来提升不同组织之间的环境效益和经济效益[52-54]。

在产业科学定量的规划方面，IS概念已被广泛用于评估区域范围内资源利用模式的可持续性[55]。目前在IS领域关注产业发展的研究主要集中在以下几个方面：定性、定量和系统规划。定性路线通常通过构建多维指标和全方位投入产出过程匹配[53-54，56]，通过自组织/自产生/偶然性和计划/设计/目标导向的方法来评价生态工业体系的形成和建设[57-58]，这被广泛用于评价某些工业园区（如卡伦堡和蔚山的工业园区）的园区发展体系形成[53，59]。然而，对于产业规划、发展的主要措施和方法仍然是基于当地现有工业基础下的专家规划和经验指导，缺乏适用性广、实用性强的可用于广泛资源丰富地区规划的通用方法，尤其是当规划内容涉及多种资源、产品和技术时[29-30]。目前的研究中，定量规划通常涉及两种或两种以上的资源优

化，如水[35-36]、能源、碳排放、特定物料[32, 60]，以及通过能量和质量平衡方法[61-63]，将这些方法结合起来。虽然分析关键资源在产业网络中的代谢过程可提供有关能源、物质和资源利用效率的相关信息，但要同时涵盖和优化多种资源类别并考虑其相互作用仍很困难[3, 15, 28, 64]。系统规划的基础是工业共生网络（Industrial symboisis network，ISNs）的构建，一些研究通过社会网络和生态网络方法，使用弹性和中心性等指标对园区的工业共生系统进行了评估[43, 65-66]。这些方法可以较好地理解对资源开发产业模式的系统性地描述，但由于网络的复杂性，在资源禀赋、现有产业条件、相关政策等因素的影响下，构建从自然资源到产品的完整可靠的ISNs是具有挑战性的[29-30]。

在产业可持续评价方面，已有研究从生态网络分析的视角，将自然资源的系统性转化过程与人类需求相结合，认为工业网络相较自然生态网络具备更高的效率[47, 67]。然而，若从满足人类需求的资源利用效率角度——例如“生态效率”这一概念来看，目前的工业网络仍表现出较低的效率[20, 23, 68]，这里，生态效率指在提供产品与服务、满足人类需求并提升生活质量的同时，尽量减少其生命周期对资源和环境的影响。此外，不同行业在产业链中的功能定位也会显著影响决策过程。从供给端来看，如电石、聚氯乙烯、塑料和化肥等加工过程所形成的工业网络，当地决策者通常依靠规模扩张来获取更高的经济收益，但这种策略往往导致低价值产出、高固体废弃物产出[24]。并进一步引发严重的环境影响、产能过剩和资源利用效率低下[69-71]。从需求端来看，则以锂资源加工、氟磷电子级加工等下游产业网络为典型代表。由于其经济和环境效益相对较佳，这些产业网络在研究与实践层面愈发受到关注[72-74]。然而，即便这些需求侧技术在效率上表现突出，面对供应链风险和市场波动时仍可能存在较高脆弱性[75-76]。同时，其上游产业在整个产品生命周期中往往需要承担相应的资源和环境负担，这也为可持续发展提出更高要求[17-18, 77]。

在绿色低碳发展方面，化工产业系统在实现“双碳”目标和推动产业低碳转型方面至关重要。化工产业的低碳转型发展是一个系统性工程，涉及原料绿色化、能源结构的调整、工艺流程优化、过程排放控制等多方面的研究。有研究系统性的核算和分析目前化工产业的直接碳排放和间接碳排放，并分析碳排放的主要驱动因素[78]。目前有研究从绿色能源利用出发，通过引入风能、太阳能、氢能等清洁能源作为化工过程中的替代能源，以此来降低传统化石燃料的占比，探究能源清洁化的减排潜力[79-80]。原料绿色化方面，有研究利用生物质、废弃物等途径合成化学品，探究替代化石原料的可能性[81]。有研究结合二氧化碳捕集与封存技术，探究高纯度二氧化碳用于化学品合成的可行性[82-83]。有研究系统性的分析中国煤化工产业的碳排放并为其低碳转型提供了具体的建议[84]。也有研究结合绿氢原料替代来探究煤化工产业与绿氢、绿电的耦合潜力[85]。综上所述，目前的研究关注绿色原料、能源结构转型和过程排放控制等多方面的研究，取得了诸多进展，但在产业规划转型方面的研究较少，在面对多资源禀赋下的产业绿色低碳转型问题则存在一定的局限性。

从空间尺度来分析，全球层面或国家层面的宏观研究通常采用物质流分析、投入产出分析以及网络分析方法。采用物质流分析来研究宏观制造业部门[86]、化学工业部门[14]、石油化工部门等过程的物质代谢情况[87]，例如初级化学品生产[2]、氢氟酸[88]、氢气[7]、聚氯乙烯（PVC）[5]、铝金属[8]、PET塑料[9]、钢铁[89]、锂资源等[3]。例如有研究采用物质流分析对中国锂资源原材料和产品的代谢情况，为锂电池材料的管理提供系统性策略[3]。多项研究分析了中国塑料相关产业的代谢情况，包括PVC、PET等单一的塑料以及多塑料的耦合，分析不同塑料的潜在的回收价值和环境影响[1, 5, 9]。也有研究采用生态效率和生命周期评估的结合评价波兰不同制造业（包含化工业）的生态效率演变情况，以支撑制造业的可持续发展[86]。在区域或园区层面的研究主要采用园区共生设计、环境影响评价等维度，例如以数学优化的方法对水资源网络[35]、副产品协同网络[32]、氢生产网络[62]、乙醇生产网络[56]、废热交换网络等的共生设计[90]。CHAE等[31]构建了工业集群废热交换网络的框架，研究韩国蔚山的石油化工集群的废热交换。KANTOR等[62]构建了氢气生产网络的优化框架以减少其原料产品相关的环境和经济成本[62]。有研究结合工业共生理念采用数学规划方法确定了副产品协同网络的最优设计和最小化总成本的物料流动，应用于堪萨斯城的工业集群[32]。许文来[91]结合“关键种、食物链、生态多样性”等原理，系统性分析了生态产业链的设计方法。在技术层面采用生命周期分析、技术经济性分析、物质流分析以及

生态效率等方法评估具体的技术，XIE和LUO等[28]结合生命周期评估与生态效率评价了盐湖资源利用技术。WANG等[92]构建了技术经济性框架评价具有碳捕集利用和封存的蓝氨生产技术，探索了现有的可再生路径哈勃固氮过程的技术可行性和经济性，总结了可持续氨路线的关键挑战和机遇。同样也有研究系统性评价了制药、造纸、部分化学品生产等过程[25-26, 93]。

总之，从产业链整体视角，通过系统且具通用性的科学方法来规划工业发展，并在全面系统的评价框架下提升产业网络整体的生态效率，对于实现资源、环境和经济的协同增效具有重要意义。当前，产业生态效率的研究多集中于国家或技术层面，常借助投入产出方法、物质流分析、生命周期分析等单一方法或多种方法的结合来衡量特定产业的效率及其动态演变[22-23, 68, 94-95]。部分研究聚焦特定技术指标来评估可持续性，强调技术进步或技术本身的评估[96-98]。但对单一技术的关注往往忽视了工业网络中多元主体之间的相互关联与协同效应。宏观尺度的研究为可持续发展提供了整体视角分析，但在产业网络分析方面多局限于能源[99-102]、深加工[37, 103]和初级资源加工[40-41, 45]。值得注意的是，从行星边界的视角，不同环境要素的影响程度并不一致：有些尚处于可接受范围，而另一些则已超越临界阈值[104-107]。基于此，构建兼具多产业视角、涵盖经济与环境多指标来分析和构建可持续的工业网络的通用性方法体系，已成为推动绿色转型与可持续发展的关键任务。

综上所述，目前的ISNs的研究仍缺乏一个用于设计多资源利用模式的可持续路径转型的系统、定量和通用的框架。目前在产业生态学中，国家层面、产业层面、区域层面和技术层面均有关注化工产业可持续发展的关键问题。例如国家层面关注化工产业相关的大尺度的物质流动、化工品进出口贸易、大尺度复杂模型、特定物质组成的网络的系统分析、化工产业与气候变化关系等。行业层面关注化工各子行业，例如石油化工、磷化工、煤化工、锂电、精细化工等行业领域，或者是特定的产品类别，例如塑料、肥料、农药、橡胶、纤维等，探究不同行业、不同化学品视角下如何实现绿色循环发展。区域层面关注化工相关的综合产业区、工业园区等，例如各类石化、磷化工、煤化工、精细化工、新材料相关的产业园区，对其进行系统评价，例如从园区整体的物质流动、能量流动、园区可持续发展评价等。而在技术层面，目前的研究关注化工相关的技术本身的迭代所带来的评价结果方面的变化，例如，从技术的效率、生命周期分析、技术经济性分析等多种方法。

3　分析和展望

产业发展需要系统性的构建、评价和规划方法。通过系统性的构建和评价来实现产业结构的转型和发展。虽然目前关于化工产业绿色循环发展的研究取得了显著成果，分析了产业代谢情况和影响因素，也提出了对应的政策建议。但是还存在以下不足之处具有可提升的空间：

（1）产业发展规划的存在方法局限。当今资源型产业的可持续发展迫切需要系统、定量的规划方法。然而，现有研究在宏观与微观两个层面上均存在明显不足。一方面，宏观尺度的研究多聚焦于物质流或能量流的代谢分析及环境影响评估，虽能从资源开采到废物管理的全流程揭示化工过程的环境负荷，但由于主要关注物质与能量平衡，往往难以纳入经济成本与社会影响等维度。此外，大部分宏观模型为“黑箱”或“灰箱”形式，缺乏可解释性与可操作性，难以为产业发展提供具体的规划决策依据。另一方面，微观尺度的研究通常针对特定化工园区或工艺过程开展产业网络优化与构建，能够针对具体问题进行精细化建模，但由于不同地区资源禀赋、产业基础及技术模式差异显著，缺乏可广泛推广的系统性框架，难以借鉴成熟案例完成对复杂资源多重交互条件下的综合规划，在实际产业规划中往往仍需依赖专家咨询与经验判断，尚未形成面向复杂资源禀赋和多产业协同发展的通用规划方法。

（2）资源型产业发展的评价范式单一，综合性不足。资源型产业绿色转型与可持续发展同样需要系统而直观的评价工具。当前研究多以统计数据分析生态效率，或运用生命周期评估（LCA）对特定产业或过程进行环境影响测度。这些方法在不同尺度（国家、行业、化工园区或具体过程）的生态与环境表现评价方面均取得了一定成果，然而由于不同指标之间存在关联性和动态演化特征，单一指标体系难以全面呈现产业发展在环境、资源与经济等多维度的真实状况。尤其在多产业耦合、复杂资源禀赋背景下，各种技术与资源要素的耦合效应尚未得到充分分析。目前亟须一种能够统筹“环境影响—资源开发—经济增长”等多维要素的综合评价方法，以实现对产业可持续发展水平的更加精准刻

画。更为重要的是，在完成评价后，还需进一步推动“分析—评价—构建”的系统流程，为多产业或区域的绿色转型提供可操作的发展路径，而现有研究在这一层面仍显不足。

在多资源与多技术并存，以及资源开发模式差异化的背景下，传统的人工决策方式已难以应对高复杂度的规划需求。与此同时，不同地区在经济发展水平、资源禀赋与环境承载力等方面存在显著差异，“一刀切”的规划模式往往难以奏效。因此，各区域及各层级的资源规划必须结合当地实际情况、因地制宜地制定适宜的发展策略，不能简单复制或套用统一方案。基于此，化工产业迈向绿色低碳转型亟需依托系统化、定量化的科学规划，并在模型构建、评价、分析与优化等环节形成系统性的框架流程，从而为产业转型与可持续发展提供可靠的路径选择。通过建立定量化的框架模型，综合考虑多资源禀赋与需求条件，能够推导出特定产业、特定区域的最优发展路径，并在宏观政策、物料平衡、产品技术路线选择与市场波动等多重约束条件下，实现产业方向、投资策略与环境效益的最优平衡。此外，绿色原料替代、绿色能源结构调整以及二氧化碳捕集与封存等措施也是实现产业绿色低碳发展的重要措施，对其减排潜力和可行性展开深入研究具有重要意义。通过绿色原料逐步替代传统化石燃料，可使化工产业从源头摆脱对化石能源的过度依赖，转向以可再生能源为主要原料。与此同时，借助产业链延伸与高端化转型，化工生产可逐步从初级化学品加工向高附加值化学品制造升级。结合负碳技术实现全流程排放控制，并利用捕集的二氧化碳生产绿色化学品，为进一步降低碳排放和提升产业附加值提供了可行途径。通过上述系统性规划与技术集成，化工产业将逐步实现高端化转型与绿色低碳发展，为实现“双碳”目标提供坚实保障。

[参考文献]

[1] NAKAMURA S, NAKAJIMA K, YOSHIZAWA Y. et al. Analyzing polyvinyl chloride in Japan with the waste input-output material flow analysis model [J]. Journal of Industrial Ecology, 2009, 13 (5):706-717.

[2] LEVI P G, CULLEN J M. Mapping global flows of chemicals: from fossil fuel feedstocks to chemical products [J]. Environmental science & technology, 2018, 52 (4):1725-1734.

[3] SONG J, YAN W, CAO H, et al. Material flow analysis on critical raw materials of lithium-ion batteries in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215:570-581.

[4] MATSUBAE-YOKOYAMA K, KUBO H, NAKAJIMA K, et al. A material flow analysis of phosphorus in Japan: The iron and steel industry as a major phosphorus source [J]. Journal of Industrial Ecology, 2009, 13 (5):687-705.

[5] ZHOU Y, YANG N, HU S. Industrial metabolism of PVC in China: A dynamic material flow analysis [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 73:33-40.

[6] LOIBL A, ESPINOZA L A T. Current challenges in copper recycling: aligning insights from material flow analysis with technological research developments and industry issues in Europe and North America [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169:105462.

[7] OZALP N. Energy and material flow models of hydrogen production in the US Chemical Industry [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33 (19):5020-5034.

[8] DING N, YANG J, LIU J. Substance flow analysis of aluminum industry in mainland China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 133:1167-1180.

[9] CHU J, CAI Y, LI C, et al. Dynamic flows of polyethylene terephthalate (PET) plastic in China [J]. Waste Management, 2021, 124:273-282.

[10] DUNUWILA P, RODRIGO V, GOTO N. Financial and environmental sustainability in manufacturing of crepe rubber in terms of material flow analysis, material flow cost accounting and life cycle assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 182:587-599.

[11] 龚腾勇.基于循环经济理念的石化生态工业园区产业链设计研究[D].北京:北京化工大学,2018.
GONG T Y. Stduies of desingn of the industry chain of the petrochemical eco-industrypark based on the concept of circular economy [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.

[12] 李娟娟.煤炭生态工业园产业链构建[D].天津:天津大学,2006.
LI J J. Ecological industry chain design of coal eco-industry park [D]. Tianjin:Tianjin University,2006.

[13] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL, T, et al. Recent developments in life cycle assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91 (1):1-21.

[14] UKIDWE N U, BAKSHI B R. Resource intensities of chemical industry sectors in the United States via input-output network models [J]. Computers & Chemical Engineering, 2008, 32 (9): 2050-2064.

[15] REN Y, SHI L, BARDOW A, et al. Life-cycle environmental implications of China's ban on post-consumer plastics import [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 156:104699.

[16] ZHAO K, WANG X, ZHANG Z, et al. Life-Cycle Environmental Impacts of Additive-Related Chemicals in Polyvinyl Chloride Plastics and the Mitigation Potential [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58 (37):16386-16398.

[17] JIANG S, ZHANG L, LI F, et al. Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262:110253.

[18] BERKHOUT F, HOWES R. The adoption of life-cycle approaches by industry: patterns and impacts [J]. Resources, conservation

and recycling, 1997, 20 (2):71-94.

[19] WANG S, LU C, GAO Y, et al. Life cycle assessment of reduction of environmental impacts via industrial symbiosis in an energy-intensive industrial park in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241:118358.

[20] CAIADO R G G, DE FREITAS D R, MATTOS L V, et al. Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency-A systematic literature review [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165:890-904.

[21] 韩玉堂.生态工业园中的生态产业链系统构建研究[D].青岛:中国海洋大学,2009.
HAN Y T. A research on construction of eco-industrial chain (EIC) system in eco-industrial parks (EIPs) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.

[22] ZHANG J, LIU Y, CHANG Y, et al. Industrial eco-efficiency in China: A provincial quantification using three-stage data envelopment analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143:238-249.

[23] CHEN X,LIN B. Assessment of eco-efficiency change considering energy and environment: A study of China's non-ferrous metals industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277:123388.

[24] MA S, HU S, CHEN D, et al. A case study of a phosphorus chemical firm's application of resource efficiency and eco-efficiency in industrial metabolism under circular economy [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87:839-849.

[25] VAN DER VORST G, AELTERMAN W, VAN BROECK P, et al. Comparison of two pharmaceutical production processes using different eco-efficiency measuring methods [J]. Sustainable Chemistry, 2011, 154:11.

[26] YU C,SHI L, WANG Y, et al. The eco-efficiency of pulp and paper industry in China: an assessment based on slacks-based measure and Malmquist-Luenberger index [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 127:511-521.

[27] KHAN M H A, DAIYAN R, NEAL P, et al. A framework for assessing economics of blue hydrogen production from steam methane reforming using carbon capture storage & utilisation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (44): 22685-22706.

[28] XIE X,LUO M,HU S. Green Assessment Method for Industrial Technology: A Case Study of the Saline Lake Industry[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10 (4):1544-1553.

[29] ZHU Q, HU S. Improved interactive inference approach for constructing a complex multi-industrial symbiosis network [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28 (39): 55401-55418.

[30] FAN J, HU S, CHEN D, et al. Study on the construction and optimization of a resource-based industrial ecosystem [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 119:97-108.

[31] CHAE S H, KIM S H, YOON S G, et al. Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park [J]. Applied Energy, 2010, 87 (6):1978-1988.

[32] CIMREN E, FIKSEL J, POSNER M E, et al. Material flow optimization in by-product synergy networks [J]. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15 (2):315-332.

[33] HASAN M F, FIRST E L, BOUKOUVALA F, et al. A multi-scale framework for CO_2 capture, utilization, and sequestration: CCUS and CCU [J]. Computers & Chemical Engineering, 2015, 81: 2-21.

[34] EDWARDS R W, CELIA M A. Infrastructure to enable deployment of carbon capture, utilization, and storage in the United States [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115 (38):E8815-E8824.

[35] LEE J Y, CHEN C L, LIN C Y, et al. A two-stage approach for the synthesis of inter-plant water networks involving continuous and batch units [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2014, 92 (5):941-953.

[36] LEONG Y T, LEE J Y, CHEW I M L. Incorporating timesharing scheme in ecoindustrial multiperiod chilled and cooling water network design [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55 (1):197-209.

[37] LEONG Y T, LEE J Y, TAN R R, et al. Multi-objective optimization for resource network synthesis in eco-industrial parks using an integrated analytic hierarchy process [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143:1268-1283.

[38] 曹隆祁.基于多目标优化的生态工业园区产业规划研究——以仁和生态工业园区为例[D].西安:西北大学,2016.
CAO L Q. Research on the planning of eco industrial park industrial multi-objective optimization—a case of Renhe eco-industrial park[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.

[39] ASHTON W. Understanding the organization of industrial ecosystems: A social network approach [J]. Journal of Industrial Ecology, 2008, 12 (1):34-51.

[40] LI B, NG S J, HAN J C, et al. Network evolution and risk assessment of the global phosphorus trade [J]. Science of The Total Environment, 2023, 860:160433.

[41] CHEN Y, CHEN M. Evolution of the global phosphorus trade network: A production perspective on resilience [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 405:136843.

[42] DU Q, XU Y, WU M, et al. A network analysis of indirect carbon emission flows among different industries in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 24469-24487.

[43] FAN Y, QIAO Q, CHEN W. Unified network analysis on the organization of an industrial metabolic system [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017,125:9-16.

[44] LAYTON A, BRAS B, WEISSBURG M. Designing industrial networks using ecological food web metrics [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50 (20):11243-11252.

[45] WANG W, LI Z, CHENG X. Evolution of the global coal trade network: A complex network analysis [J]. Resources Policy, 2019, 62:496-506.

[46] LU Y, CHEN B, FENG K, et al. Ecological network analysis for carbon metabolism of eco-industrial parks: a case study of a typical eco-industrial park in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49 (12):7254-7264.

[47] ERKMAN S. Industrial ecology: an historical view [J]. Journal of Cleaner Production, 1997, 5 (1-2):1-10.

[48] SAAVEDRA Y M, IRITANI D R, PAVAN A L, et al.Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy [J].

Journal of Cleaner Production, 2018, 170:1514-1522.
[49] EHRENFELD J. Industrial ecology: a new field or only a metaphor?[J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12 (8-10): 825-831.
[50] LOWE E A, EVANS L K. Industrial ecology and industrial ecosystems[J]. Journal of Cleaner Production, 1995, 3 (1-2): 47-53.
[51] HARPER E, GRAEDEL T. Industrial ecology: a teenager's progress[J]. Technology in Society, 2004, 26 (2-3):433-445.
[52] ALBINO V, FRACCASCIA L, SAVINO T. Industrial symbiosis for a sustainable city: technical, economical and organizational issues[J]. Procedia Engineering, 2015, 118:950-957.
[53] CHERTOW M R. "Uncovering" industrial symbiosis[J]. Journal of Industrial Ecology, 2007, 11 (1):11-30.
[54] GIBBS D, DEUTZ P. Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15 (17):1683-1695.
[55] NEVES A, GODINA R, AZEVEDO S G, et al. A comprehensive review of industrial symbiosis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247:119113.
[56] GONELA V, ZHANG J. Design of the optimal industrial symbiosis system to improve bioethanol production[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 64:513-534.
[57] HEERES R, VERMEULEN W J, DE WALLE F. Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons [J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12 (8-10):985-995.
[58] SARACENI A V, RESENDE L M, DE ANDRADE JÚNIOR P P, et al. Pilot testing model to uncover industrial symbiosis in Brazilian industrial clusters [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24:11618-11629.
[59] EHRENFELD J, GERTLER N. Industrial ecology in practice: The evolution of interdependence at Kalundborg[J]. Journal of Industrial Ecology, 1997, 1 (1):67-79.
[60] RAMOS M, BOIX M, AUSSEL D, et al. Optimal design of water exchanges in eco-industrial parks through a game theory approach[J]. In Computer Aided Chemical Engineering, 2016, 38:1177-1182.
[61] KANTOR I, ELKAMEL A, FOWLER M W. Optimisation of material and energy exchange in an eco-park network considering three fuel sources [J]. International Journal of Advanced Operations Management, 2014, 6 (4):285-308.
[62] KANTOR I, FOWLER M, ELKAMEL A. Optimized production of hydrogen in an eco-park network accounting for life-cycle emissions and profit [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37 (6):5347-5359.
[63] MAMOUNE A, YASSINE A. Creating an inductive model of industrial development with optimized flows for reducing its environmental impacts[J]. Energy Procedia, 2011, 6: 396-403.
[64] SIMÕES C L, COSTA PINTO L M, SIMOES R, et al. Integrating environmental and economic life cycle analysis in product development: a material selection case study[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18:1734-1746.
[65] SONG X, GENG Y, DONG H, et al.Social network analysis on industrial symbiosis: A case of Gujiao eco-industrial park[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 193:414-423.
[66] VALENZUELA-VENEGAS G, VERA-HOFMANN G, DÍAZ-ALVARADO F A. Design of sustainable and resilient eco-industrial parks: Planning the flows integration network through multi-objective optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243:118610.
[67] PATALA S, HÄMÄLÄINEN S, JALKALA A, et al. Towards a broader perspective on the forms of eco-industrial networks. Journal of Cleaner Production, 2014, 82:166-178.
[68] BIANCHI M, DEL VALLE I, TAPIA C. Measuring eco-efficiency in European regions: Evidence from a territorial perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276:123246.
[69] ZHANG Q, ETIENNE X L, WANG Z. Reducing coal overcapacity in China: a new perspective of optimizing local officials' promotion system [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29 (60):90364-90377.
[70] FENG C, HUANG J B, WANG M. The sustainability of China's metal industries: features, challenges and future focuses [J]. Resources Policy, 2019, 60:215-224.
[71] LUO Z, MA S, HU S, et al. Towards the sustainable development of the regional phosphorus resources industry in China: A system dynamics approach [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 126:186-197.
[72 BRIDGE G, FAIGEN E. Towards the lithium-ion battery production network: Thinking beyond mineral supply chains[J]. Energy Research & Social Science, 2022, 89:102659.
[73] XIA Q, DU D, CAO W, et al. Who is the core? Reveal the heterogeneity of global rare earth trade structure from the perspective of industrial chain[J]. Resources Policy, 2023, 82: 103532.
[74] DOU S, XU D, ZHU Y, et al. Critical mineral sustainable supply: Challenges and governance[J]. Futures, 2023, 146:103101.
[75] GARCIA D J, YOU F. Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities [J]. Computers & Chemical Engineering, 2015, 81:153-170.
[76] TRKMAN P, MCCORMACK K. Supply chain risk in turbulent environments—A conceptual model for managing supply chain network risk[J]. International Journal of Production Economics, 2009, 119 (2):247-258.
[77] RIECKHOF R, GUENTHER E. Integrating life cycle assessment and material flow cost accounting to account for resource productivity and economic-environmental performance[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2018, 23: 1491-1506.
[78] LI Z, YANG F, HUANG B. The assessment of energy-related greenhouse gas emissions in China´s chemical industry [J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 37:112-125.
[79] MENG W, WANG D, ZHOU H, 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.
[80] CHEN C, LU Y, BANARES-ALCANTARA R. Direct and indirect electrification of chemical industry using methanol production as a case study[J]. Applied Energy, 2019, 243:71-90.
[81] HUO J, WANG Z, LAURI P, et al. Region-specific sourcing

of lignocellulose residues as renewable feedstocks for a net-zero chemical industry[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(31):13748-13759.

[82] KÄTELHÖN A, MEYS R, DEUTZ S, et al. Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(23):11187-11194.

[83] GABRIELLI P, GAZZANI M, MAZZOTTI M. The role of carbon capture and utilization, carbon capture and storage, and biomass to enable a net-zero-CO_2 emissions chemical industry[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(15): 7033-7045.

[84] LI Q, WEI Y N, CHEN Z A. Water-CCUS nexus: challenges and opportunities of China's coal chemical industry[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016, 18:775-786.

[85] 赵阳,张宁,刘金存,等.煤化工与新能源耦合绿色低碳发展路径研究[J].煤炭经济研究,2024,44(12):106-113.
ZHAO Y, ZHANG N, LIU J C, et al. Research on the green and low-carbon development path for integrating thecoal chemical industry with new energy[J]. Coal Economic Research, 2024, 44(12):106-113.

[86] RYBACZEWSKA-BŁA-EJOWSKA M, MASTERNAK-JANUS A. Assessing and Improving the Eco-Efficiency of Manufacturing: Learning and Challenges from a Polish Case Study[J]. Energies, 2021, 14(23):8125.

[87] LI L. Construction of Evaluation Index System of Petrochemical Industry Based on Material Flow Analysis Method[J]. Chemical Engineering Transactions, 2017, 62:1489-1494.

[88] KIM J, HWANG Y, YOO M, et al. Hydrogen fluoride (HF) substance flow analysis for safe and sustainable chemical industry[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24:25137-25145.

[89] DING Y, GENG X, LIU X, et al.Material resource decoupling dilemma: Convergence and traps of in-use stock productivity in national economy development[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351:119617.

[90] HIPÓLITO-VALENCIA B J, RUBIO-CASTRO E, PONCE-ORTEGA J M, et al. Optimal design of inter-plant waste energy integration[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 633-652.

[91] 许文来.基于循环经济的工业园区生态产业链构建研究[D].成都:西南交通大学,2007.
XU W L. Research on designment of eco-industrial chains in industry park based on the circulation economy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.

[92] WANG M, KHAN M A, MOHSIN I, et al. Can sustainable ammonia synthesis pathways compete with fossil-fuel based Haber-Bosch processes?[J].Energy & Environmental Science, 2021, 14(5):2535-2548.

[93] SHONNARD D R, KICHERER A, SALING P. Industrial applications using BASF eco-efficiency analysis: perspectives on green engineering principles[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(23):5340-5348.

[94] ZURANO-CERVELLÓ P, POZO C, MATEO-SANZ J M, et al. Eco-efficiency assessment of EU manufacturing sectors combining input-output tables and data envelopment analysis following production and consumption-based accounting approaches[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 174: 1161-1189.

[95] YU Y, HUANG J, ZHANG N. Industrial eco-efficiency, regional disparity, and spatial convergence of China's regions[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 204:872-887.

[96] SINGH R K, MURTY H R, GUPTA S K, et al. An overview of sustainability assessment methodologies[J]. Ecological indicators, 2012, 15(1):281-299.

[97] STERGIOU E, KOUNETAS K E. Eco-efficiency convergence and technology spillovers of European industries[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 283:111972.

[98] HELLWEG S, DOKA G, FINNVEDEN G, et al. Assessing the eco-efficiency of end-of-pipe technologies with the environmental cost efficiency indicator[J]. Journal of industrial Ecology, 2005, 9(4):189-203.

[99] TIWARI S. Supply chain integration and Industry 4.0: a systematic literature review[J]. Benchmarking: An International Journal, 2021, 28(3):990-1030.

[100] WU Q, REN H, GAO W, et al. Multi-objective optimization of a distributed energy network integrated with heating interchange[J]. Energy, 2016, 109:353-364.

[101] WANG Y, WANG Y, HUANG Y, et al. Operation optimization of regional integrated energy system based on the modeling of electricity-thermal-natural gas network[J]. Applied Energy, 2019, 251:113410.

[102] JING R, WANG M, LIANG H, et al. Multi-objective optimization of a neighborhood-level urban energy network: Considering Game-theory inspired multi-benefit allocation constraints[J]. Applied Energy, 2018, 231:534-548.

[103] TABELIN C B, DALLAS J, CASANOVA S, et al. Towards a low-carbon society: A review of lithium resource availability, challenges and innovations in mining, extraction and recycling, and future perspectives[J]. Minerals Engineering, 2021, 163:106743.

[104] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet[J]. Science, 2015, 347(6223):1259855.

[105] DIAMOND M L, DE WIT C A, MOLANDER S, et al. Exploring the planetary boundary for chemical pollution[J]. Environment International, 2015, 78:8-15.

[106] CARPENTER S R, BENNETT E M. Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus[J]. Environmental Research Letters, 2011, 6(1):014009.

[107] ROCKSTRÖM J, STEFFEN W, NOONE K, et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity[J]. Ecology and Society, 2009, 14(2):32.