

前言

在全球应对气候变化的历史进程中，实现碳达峰碳中和已成为中国国家战略。科技创新是实现“双碳”目标的核心手段，低碳技术革命正在重塑能源系统、产业结构与经济发展方式。然而，低碳技术创新具有复杂性、长期性、非渐进性和高度不确定性，其演化过程受到政策、市场、社会认知等多重因素的共同作用。如何在复杂动态的环境中识别关键技术、判断发展方向、科学规划路径，成为实现“双碳”目标的重要科学命题。传统技术预见方法多依赖统计数据与专家判断，主观性较强、动态性不足，难以应对技术快速迭代和多源信息碎片化的挑战。进入大数据时代，多源异构数据打破了不同学科间的知识壁垒，为理解和预测低碳技术创新的扩散规律、演化方向与战略价值提供了新的可能。然而，这些数据同时呈现碎片化、非结构化和高噪声特征，使传统技术预见方法不再适用。如何在复杂的信息环境中高效挖掘知识内涵，构建面向低碳技术创新的大数据分析与智能预见体系，成为低碳科技管理与政策研究面临的关键科学问题。

本书面向国家能源绿色低碳转型的重大需求，立足大数据时代的技术演化特征，围绕低碳技术预见的核心科学问题，构建系统化研究框架，并以碳捕集、利用与封存(CCUS)技术为典型案例展开实证研究。全书围绕“识别关键技术、预测发展趋势、规划技术路径、分析社会舆情、模拟工程决策”等核心问题展开，力求在理论创新与实践应用之间建立桥梁，为低碳科技战略布局、政策设计与创新管理提供科学依据与方法工具。根据研究内容，本书共分为9章。

第1章：绪论。本章阐述了能源绿色低碳转型的迫切需求，指出在“双碳”目标下，低碳技术预见对重塑未来能源体系的重要作用。进一步分析大数据和人工智能的兴起为低碳技术预见带来的机遇与挑战，并明确本书研究的目的、意义和主要内容。

第2章：低碳技术预见文献评述。本章系统回顾低碳技术及其预见研究的发展历程，梳理主要理论范式与研究方法，总结不同类型低碳技术在预见研究中的差异性特征。结合大数据背景，总结低碳技术预见面临的新要求和新挑战，明确亟待解决的关键科学问题。

第3章：低碳技术主路径识别与监测方法及应用。本章利用专利大数据构建“前引全路径”动态规划算法，结合隐含狄利克雷分布(LDA)主题模型，实现技术发展全路径的动态监测与关键技术集群主题的智能化挖掘。以CCUS技术为例，构建广域开放式的低碳技术专利数据监测体系，预测颠覆性低碳技术的爆发性突破时间点与演化路径，为国家技术研发方向和科技战略布局提供量化参考。

第4章：低碳技术成本学习预测方法及应用。本章基于关键组件的学习曲线模型，提出适用于早期示范阶段低碳技术系统的成本预测方法，以中国电力部门的四条 CCS 技术路径为案例，分析不同技术路径的学习率与成本下降潜力，为后续技术经济评价和技术发展规划提供数据支撑和方法创新。

第5章：低碳技术发展路径规划方法及应用。本章将技术进步内生于自下而上的技术选择模型中，以决策期内系统总减排成本最小化为目标函数，建立基于技术学习视角的低碳技术路径规划模型。通过非线性规划优化不同技术发展情景下的技术发展路径，评估各类技术的减排贡献与系统成本构成，分析技术进步速度和成本水平对系统盈亏平衡碳价的影响，为低碳技术发展路径优化决策提供参考。

第6章：低碳技术社会舆情分析方法及应用。本章基于网络舆情大数据，构建基于社会认知盈余的低碳技术社会舆情分析模型，揭示公众对低碳技术的认知结构、热点话题、情感偏好与潜在社会风险。通过构建 CCUS 技术舆情曲线，分析不同国家和地区的公众态度与技术发展阶段，为低碳技术推广和社会舆情引导提供决策指导。

第7章：低碳工程决策模拟和可行性预测方法及应用。本章将社会学习过程引入重大能源工程项目研究中，结合随机森林算法，构建基于多源异构数据的 CCUS 工程决策模拟模型。通过模拟复杂能源工程系统的创新决策过程，识别关键影响因素，量化其对项目可行性与经济性的影响，为国家重大工程项目的瞻性布局提供科学支撑。

第8章：基于 LDA 与 BERT 融合的低碳技术机会识别方法。本章融合主题模型 (LDA) 与深度语义模型 (BERT)，构建改进的知识发现框架，识别关键技术领域并预测潜在技术突破机会。通过专利文本数据分析，结合高斯混合模型对聚类结果与技术离群点进行时间特征挖掘，实现未来低碳技术机会的智能识别与趋势预测。

第9章：研究结论与展望。本章总结主要研究结论和创新点，归纳形成的理论模型、方法体系与实证结论，并探讨低碳技术预见研究的未来方向。

本书旨在为低碳技术预见研究提供系统的理论框架与方法体系，探索如何在大数据时代实现对低碳技术创新的科学洞察与前瞻布局。希望本书能够为我国低碳科技规划布局与创新治理提供参考，助力实现绿色、低碳、可持续发展。

本书是北京理工大学能源与环境政策研究中心在长期开展低碳技术创新管理研究基础上形成的重要成果。全书由康佳宁负责总体框架设计、研究组织、内容撰写和统稿。刘力、赵阳、舒雅琳、刘胤彤、张嘉苒等共同参与了主要章节的撰写与校对工作。本书的研究和出版得到了国家自然科学基金项目 (72488101、72474023、72104025) 的支持。同时，在此也要衷心感谢魏一鸣教授、刘兰翠教授、唐葆君教授、廖华教授、余碧莹教授等专家学者在研究过程中给予的指导、支持和无私帮助。

特别感谢本书引文中的所有作者。限于我们的知识修养和学术水平，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请各位读者批评、指正，以助我们不断改进与完善。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 绿色发展是能源科技创新的重要方向	1
1.1.2 技术预见为能源领域科技创新规划提供科学依据	2
1.1.3 大数据时代低碳技术预见的机遇和挑战	3
1.2 研究目的和意义	4
1.3 主要内容	6
第 2 章 低碳技术预见文献评述	7
2.1 引言	7
2.2 低碳技术预见研究现状	8
2.2.1 研究时空发展特点	8
2.2.2 低碳技术预见研究的热点技术	9
2.2.3 低碳技术预见研究的范式演变	10
2.3 二氧化碳捕集、利用与封存技术预见研究	14
2.4 主要启示	15
第 3 章 低碳技术主路径识别与监测方法及应用	17
3.1 引言	17
3.2 技术主路径识别与潜在突破性技术监测模型	18
3.2.1 理论框架	18
3.2.2 “前引全路径”动态规划算法	19
3.2.3 隐含狄利克雷分布主题模型	22
3.3 应用及数据说明	23
3.4 结果分析与讨论	26
3.4.1 碳捕集、利用与封存技术专利市场发展趋势	26
3.4.2 碳捕集、利用与封存关键技术领域	30
3.4.3 关键集群技术主路径识别和潜在突破性技术监测	32
3.5 主要结论及建议	37
第 4 章 低碳技术成本学习预测方法及应用	40
4.1 引言	40
4.2 基于关键组件的技术学习预测模型	41
4.2.1 研究框架	41
4.2.2 基于关键组件的学习曲线模型	43
4.3 应用及数据说明	45

4.4	结果分析与讨论	48
4.4.1	四条技术路径减排潜力和成本优势	48
4.4.2	四条 CCS 技术路径的成本学习曲线	50
4.5	主要结论	54
第 5 章	低碳技术发展路径规划方法及应用	56
5.1	引言	56
5.2	非线性技术选择模型	57
5.2.1	研究框架	57
5.2.2	目标函数	59
5.2.3	约束条件	59
5.3	应用背景及数据说明	61
5.4	结果分析与讨论	63
5.4.1	技术部署路径和减排贡献	63
5.4.2	CO ₂ 减排成本	66
5.4.3	盈亏平衡碳价	68
5.5	主要结论及政策建议	70
第 6 章	低碳技术社会舆情分析方法及应用	72
6.1	引言	72
6.2	低碳技术社会舆情分析方法	73
6.2.1	语篇分析方法	74
6.2.2	技术炒作曲线	74
6.2.3	技术情感偏好分析	76
6.3	结果分析与讨论	76
6.3.1	热点舆情演化趋势	76
6.3.2	二氧化碳捕集、利用与封存技术炒作曲线	79
6.3.3	二氧化碳捕集、利用与封存技术舆情偏好	81
6.4	本章小结	82
第 7 章	低碳工程决策模拟与可行性预测方法及应用	83
7.1	引言	83
7.2	基于随机森林算法的 CCUS 工程社会学习模型	85
7.2.1	数据来源及说明	85
7.2.2	基于随机森林的社会学习模型	86
7.3	结果分析与讨论	88
7.3.1	CCUS 工程关键社会-技术特征因子及其影响	88
7.3.2	潜在 CCUS 示范工程结果预测	91
7.4	本章小结	92
第 8 章	基于 LDA 与 BERT 融合的低碳技术机会识别方法	94
8.1	引言	94
8.2	LDA-BERT 融合改进模型构建	95
8.2.1	构建知识元词集	96
8.2.2	关键技术识别	96

8.2.3 技术机会挖掘	97
8.3 应用与案例分析	99
8.3.1 数据来源	99
8.3.2 碳捕集技术演进发展特征	100
8.3.3 碳捕集专利关键技术热点	101
8.3.4 碳捕集专利知识流动与网络结构	103
8.3.5 碳捕集技术机会识别	105
8.4 主要结论与政策建议	109
第 9 章 研究结论与展望	111
9.1 主要研究结论	111
9.2 主要创新点	112
9.3 研究不足与展望	113
参考文献	114
附录	125

第1章 绪 论

1.1 研 究 背 景

能源是人类生存和文明发展的重要物质基础，是维持社会经济运行的动力，对于保障改善民生、推动经济社会可持续发展至关重要。当前，新一轮科技革命和产业变革深入发展，大数据、人工智能、区块链等新一代信息技术正加速与能源产业深度融合^[1]，有力推动能源消费、供给、技术和体制革命，加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系。

目前，全球能源结构正实现向绿色低碳发展，能源利用模式也逐步呈现智能化、自动化和清洁化的新特征^[2]。清洁低碳、安全高效、经济可行的新型能源体系正在逐步形成。在此背景下，开展面向新型能源体系的科学技术预测研究，准确把握能源转型方向，有序引导能源科技创新，合理规划科技布局，具有深远的现实意义与重要的理论价值。

1.1.1 绿色发展是能源科技创新的重要方向

科技创新是人类社会进步和发展的重要驱动力。能源科技创新深刻地影响着未来能源格局，并推动着能源系统的重塑和革新。过去十年间，低碳能源技术的创新和推广为能源系统低碳转型提供了坚实的科技支撑。未来，智能化、网络化和绿色化将成为新一轮能源技术变革的主要方向^[3]。多元化、分散化、数字化和互联化将成为未来颠覆性低碳能源技术的主要特征^[1]。

绿色发展是对生产方式、生活方式、思维方式和价值观念的全方位、革命性变革，是中国式现代化的显著特征。绿色技术是遵循生态原理和生态经济规律，节约资源和能源，避免、消除或减轻生态环境污染和破坏，生态负效应最小的“无公害化”或“少公害化”的技术、工艺和产品的总称^[4]。低碳技术则是相对于传统能源技术而提出的概念^[5]，是指以降低二氧化碳等温室气体排放为核心目标，涵盖能源节约，清洁能源替代，碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)等领域的技术、工艺和产品的总称^[6]。

构建低碳技术创新体系是实现清洁低碳、安全高效能源系统的基石，也是绿色发展的首要任务。一般来说，低碳技术创新主要通过作用于三方面推动能源系统向环境友好型方向发展：一是能源生产端的能效提高和绿色技术革新；二是能源消费端的清洁化发展和智能化利用；三是能源系统末端污染物的协同减排。

低碳技术创新体现了社会和能源系统追求高质量发展的诉求。当下,气候变化、能源安全、环境恶化和能源贫困等全球性挑战引发了广泛关注。同时,地缘政治变化、国际能源市场波动等因素也给全球社会经济系统带来新的考验,增加了未来能源系统发展的不确定性。具备节约资源、保护生态和环境治理等多种属性的低碳技术可以同时兼顾经济增长和可持续发展,在一定程度上抵御新兴挑战对社会和能源系统的冲击,是新一轮全球能源科技竞争与战略布局的重要方向。

1.1.2 技术预见为能源领域科技创新规划提供科学依据

技术预见是一种系统性、长期性的战略决策过程,它可以为国家、部门和企业识别可持续发展需要的关键技术,为科技布局指明方向。能源是现代化发展的重要基础和动力,具有重要地位。能源行业作为技术密集型行业之一,亦被众多技术预见工作视为重点研究对象。能源技术预见活动很早便在发达国家中占据重要的战略地位^[5]。为更好地减缓气候变化,发展中国家也相继加大了低碳和低碳技术的推广力度和能源消费重点领域的绿色技术预见活动强度^[7]。中国于1995年发布《国家关键技术选择研究》,首次明确了包括能源部门在内的国家优先布局的科技领域。

“十三五”以来,为更好地发挥能源技术预见在能源低碳创新和革命中的引领作用,政府相继颁布《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》和《国家重点节能低碳技术推广目录》(2017年本低碳部分),支撑国家中长期能源科技长远布局。

低碳技术预见则是基于复杂和不确定未来的系统性预见研究,包括对低碳技术的短期预测、长期预见和前瞻性技术评估。其主要任务包括^[8]:一是在能源安全、气候变化和经济发展等多种系统约束下选择最优的一个或一组前沿技术,并对其动态发展路径进行规划;二是支撑能源科技战略早期布局;三是研究和制定促进低碳技术有序发展的相关政策。低碳技术预见研究从应对气候变化、推动能源绿色低碳转型的紧迫需求出发,通过预测和模拟低碳技术的未来发展路径,为构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供科学支撑,对促进经济社会全面绿色转型和高质量发展具有重要意义^[9]。

重视前沿低碳技术创新和科技布局,才能决胜未来。低碳技术预见可以有效驱动未来能源系统创新,重塑国家能源格局,明确研发主攻方向。它主要具备以下特征。

(1)塑造未来(引导性)。预见未来最好的方法,就是塑造未来。预见不同于预言,低碳技术预见并不一定需要预测未来某一特定日期某一特定应用中技术的准确形式。它最重要的作用是考虑未来社会经济的不确定性后,帮助评估多条合理的低碳能源发展路径的可行性和重要性^[5],对低碳技术的发展情景构建和路线选择起到引导作用,以便管理者做出更好的决策。

(2)系统化方法(科学性)。系统化方法可以提高低碳技术预见的准确性和价值,它应该是一套系统化的结合定性和定量分析的综合方法论,它也应该是结构化的,

在特定前提条件下可重复的。低碳技术预见方法可以分为三类^[10]：一是定性化预见方法；二是半定量化预见方法；三是定量化预见方法。其中，定量化预见方法是通过智能化的检测和统计学方法对大量数据和指标进行处理和分析^[11]，它主要包括科学计量学、趋势外推、优化模型、数据挖掘和多主体仿真等^[12, 13]；定性化预见方法则更加强调经验学习和专家观点^[12, 14]，主要包括综述分析、情景构建和专家小组决策等。而现在大多数应用的方法是半定量化预见方法，将前两者的优势进行结合，定量化专家观点及经验^[15]，通过主客观性的相互平衡达到更好的预见效果^[16, 17]，这类方法主要有德尔菲法、技术路线图、多准则决策、模糊综合评价等。

(3) 知识融合(综合性)。一项“技术”并不是单一的不可改变的硬件或化学物质。它是将简单的知识(物理关系的知识)系统地应用于技术实体。低碳技术是环境、经济、社会和能源系统知识的综合产物^[18]。因此，低碳技术预见的开展更需要融合多学科的工具和知识，需要多方主体协同参与。在大数据时代，多源异构数据每天都在产生海量信息，这为能源行业的科技革新提供了数字化和智能化的解决方案，也为科学决策提供了多维度的知识支撑^[19]，对提高未来愿景、新趋势、新问题的综合认识，使预见结果更优，具有重要意义。

1.1.3 大数据时代低碳技术预见的机遇和挑战

能源系统的绿色革命具有复杂性、长期性和高度不确定性。计算机技术、互联网技术、人工智能、物联网等技术为能源转型提供了新思路和新方向^[2]。数字化和智能化技术不仅将为能源生产和能源消费提供快捷、精准、绿色的服务，同时为低碳技术预见带来了新的机遇和挑战。

国际能源署在《数字化与能源》中指出，数字化技术为能源各子系统间的相互耦合和重构架起了桥梁^[20]，破除了能源部门与其他社会经济部门的壁垒，可以高效、智能、稳定地保障能源系统在经济社会可承受的范围内向绿色低碳方向转型。例如，能源互联网的发展为分布式能源的即时接入和公平获取提供了支撑平台，为能源系统消纳清洁的可再生能源提供了基础架构^[21]。同时，大数据挖掘技术、智能化算法也被广泛地应用于智慧建筑和绿色建筑领域，它可以有效支撑建筑能耗的智能化控制和自动化管理，实现建筑空间的合理布局，从而降低绿色建筑的经济运行成本^[22]。庞杂的研究数据本身就凝练着不同研究团队的智慧结晶，随着深度学习算法的逐渐成熟，科学家可以更快捷和准确地分析数据背后蕴含的知识信息。这也启发实验科学开始借助这些新兴研究手段对材料、装备和技术进行高效预测。美国斯坦福大学针对现有锂离子电池的研究数据构建了深度学习模型，利用现有的锂离子电池文献中的所有实验数据，构建了具备深度学习能力的计算机预测模型^[23]，将固态电解质实验材料的筛选效率提高了百万倍。此外，互联网技术的普及催生了多种商业模式创新^[24]，提高了个人和企业主体在能源系统中的参与度和话语权，拓宽了能源技

术服务的对象范围和作用强度，为能源市场变革和能源科技创新注入了新的活力。

在数字化时代，数据被赋予了更深刻的内涵，它使得人们可以更快、更早地捕捉到能源系统中各主体的最新动向。数据大多是对客观事物的观察总结和逻辑归纳，通过科学的分析方法挖掘数据价值，发现现象背后客观的发展规律，使得数据成为现代社会经济系统的新生产要素，具有经济价值以及社会治理意义^[25]。大数据在创新系统中的作用也越来越重要，它催生着能源生产力向分布式多元协同方向发展，为低碳技术耦合到传统能源系统提供了技术支撑。而大数据所具备的即时产生、快速传播、形式多元、主体宽泛、客观性强等特点，使其在技术预见领域的战略价值愈发凸显。

低碳技术是社会进步过程中人类追求高质量生活和可持续发展的实体产物之一。低碳技术的产生和发展已经不局限于能源系统本身的需求，更涵盖了社会系统、经济系统、环境系统、科技系统的诸多发展诉求。多源异构数据打破了不同学科间的知识壁垒，这对于刻画和预测具有社会效益、经济可行、环境友好和颠覆性创新的低碳技术的扩散规律、发展方向、战略价值、政策制定具有里程碑式的意义。但是，海量的多源异构数据在收集、储存、处理和分析上都存在一定难度。信息来源多元直接导致了可分析的数据呈现碎片化和非结构化的特点。此外，实时增加的数据量也为低碳技术预见研究带来了更多的“数据噪声”^[26]。因此，在大数据时代，科学地挖掘多源异构数据蕴含的知识内涵，合理、高效、准确、智能地对低碳技术发展路径和方向预见进行理论建模和实证研究，真正发挥技术预见在能源系统绿色发展中的引领作用，是一项具有挑战性的工作，也可为推动构建清洁低碳、安全高效的能源体系和相关低碳能源政策的制定与实施提供重要支撑。

1.2 研究目的和意义

能源创新是推动能源系统可持续发展的核心动力，也是保障国家能源安全、应对气候变化、推动经济社会发展全面绿色转型的关键支撑。绿色发展是世界各国经济发展的最大公约数^[27]，以低碳技术创新为核心的新一轮能源革命正蓬勃开展。低碳技术是旨在减少温室气体排放、降低资源消耗、促进生态环境改善的综合性清洁技术体系^[8]。

低碳技术预见是一种面向社会、经济、环境、能源、科学和技术等多领域的动态远期发展情景，旨在为战略决策提供科学依据的探索性过程。其核心目标是在有限信息条件下，识别并选择能够最大化环境、经济与社会综合效益的低碳技术组合，以提升能源系统的整体性能，科学规划低碳技术发展的关键路径与科技布局，分析低碳技术发展对能源系统的动态影响，从而为低碳能源发展的战略规划提供依据。大数据、人工智能与互联网技术的迅速发展，为以能源绿色低碳转型为核心目标的

能源科技创新体系带来了前所未有的机遇,同时也提出了更加复杂而严峻的挑战。

掌握关键领域的科技话语权是提升国家战略科技力量、赢得发展主动权的关键。本书面向实现“双碳”目标、推动能源绿色低碳转型的重大战略需求,立足于低碳技术预见理论建模的国际研究前沿,结合大数据时代背景,围绕低碳技术预见领域开展理论建模,并选择 CCUS 作为典型实证研究对象,结合构建的理论方法开展具体的应用研究。本书的主要研究目的总结如下。

(1)构建低碳技术发展主路径识别模型,从复杂的专利技术发展网络中梳理和识别关键技术的主要发展路径。在此基础上,运用文本挖掘算法实现对主要发展路径上潜在突破性技术的动态监测。该研究不仅有助于分析技术发展水平,梳理技术演化规律,识别和监测关键技术领域,从而引导未来科技攻关布局;同时,也可分析相关低碳技术的发展趋势、研判关键技术路线、识别各国技术优势以及预见潜在技术热点提供参考依据,服务于国家绿色低碳发展战略。

(2)构建面向低碳技术进步和成本学习预测的理论方法。特别地,对于尚处于早期示范阶段的低碳技术,并没有充足的技术学习历史数据,通过对技术关键组件的学习效应进行建模与耦合,可以较为准确和科学地分析关键组件的技术进步如何影响一个复杂能源技术系统的总体运行和技术学习效果。同时,可以为基于技术经济视角下的低碳技术预见研究提供数据支撑和决策信息,从而为国家引导低碳技术创新、开展前瞻性的能源技术评估提供科学依据。

(3)构建基于技术学习内生视角下的低碳技术路径规划模型,分析未来在环境效益和经济效益最大化的双重约束下技术的非线性最优发展路径,进而核算系统中不同技术在不确定的技术进步速度下的减排贡献和成本投入,可以为低碳技术在短期、中期和长期的技术发展优先次序和路径部署策略提供参考依据,为国家制定低碳科技创新战略提供方向性的参考和借鉴。

(4)通过对低碳技术相关新闻和社交媒体的公共舆情数据进行热点话题监测和情感分析,可以明确各国低碳技术发展中的社会关注度、技术发展侧重点以及技术舆情偏好度,从社会认知盈余中总结当前低碳技术发展水平、潜在问题和所面临的社会挑战。另外,通过构建低碳技术舆情曲线,可有效研判低碳技术在世界各国的发展阶段,进而为我国低碳技术布局、政策制定、社会舆情引导以及提升公众对新兴技术的认知与接受度提供决策支持。

(5)构建基于社会学习视角的低碳工程创新预测模型。结合机器学习算法,从日益增多的海量多源异构数据中进行知识挖掘,从复杂工程系统创新的“黑匣子”中学习和总结由深思熟虑或默认做出的基本决策过程、关键决定因素,以及这些因素所导致的工程项目成效,并利用学习到的经验和规律指导未来的绿色能源工程项目,帮助完善和优化技术方案和顶层设计,从而指导国家重大能源工程绿色创新规划,为国家低碳科技创新战略前瞻性布局提出指导建议。

1.3 主要内容

本书面向实现“双碳”目标和推动能源绿色低碳转型的重大战略需求，综合运用科学计量分析、自然语言处理、学习曲线理论、技术舆情分析方法及机器学习算法，开展以下创新性研究工作。

(1) 针对传统技术路径识别与监测研究多基于静态、单层专利网络，对技术集群动态演化刻画不足的问题，利用专利大数据，构建“前引全路径”动态规划算法，结合文本挖掘方法，从复杂多层专利网络中识别关键技术集群与发展路径，实现对潜在突破性技术的动态监测。共识别出 27 个 CCUS 领域的关键技术集群，监测到 57 项潜在突破性技术。

(2) 针对处于早期示范阶段的低碳技术缺乏充分经验数据以拟合成本学习效应的研究难点，通过耦合关键组件的成本学习效应，构建了低碳技术成本学习预测模型，分析关键组件的技术进步对复杂技术系统整体运行的影响，为基于技术经济评估的低碳技术预见研究提供数据支持。

(3) 考虑到传统线性表达形式难以准确刻画低碳技术非渐进式的技术进步特征，研究构建了基于技术进步内生化的低碳技术路径规划模型，分析实现环境与经济效益最大化的技术组合最优发展路径，为技术发展优先级安排与路径部署提供科学依据。

(4) 传统技术公众接受度研究通常依赖调研与访谈，存在耗时、高成本和小样本的局限性。为克服此问题，本书利用在线媒体大数据，从社会认知盈余中实现舆情话题的动态监测，揭示主要国家的技术舆情偏好特征，从而支撑引导低碳技术的有序发展。

(5) 针对传统技术机会识别方法在语义深度理解与动态趋势捕捉方面的局限，融合隐含狄利克雷分布 (Latent Dirichlet Allocation, LDA) 主题模型与 BERT 深度语义模型，构建了一种改进的知识发现框架，实现对低碳技术领域潜在突破机会的智能识别。通过专利文本数据，结合高斯混合模型对技术主题聚类结果与离群点进行时间维度挖掘，增强技术机会预测的时效性与准确性，为低碳科技创新的前瞻性布局提供方法支撑与决策依据。

(6) 为填补工程技术社会学习模型的研究空白，构建了基于社会学习视角的低碳能源工程决策模拟与可行性预测模型，结合机器学习算法，从海量多源异构数据中进行知识挖掘与决策模拟，借助学习到的决策经验优化未来低碳工程项目的技术方案设计，从而为国家重大能源工程创新规划提供支持，并为低碳科技战略的前瞻性布局提出实施建议。

第2章 低碳技术预见文献评述

2.1 引言

Martin 将“技术预见”定义为一种长期的系统性研究过程，综合社会、经济和技术发展等多种因素，识别战略性和贡献性的重要关键技术^[28, 29]。当前，“科技”成为衡量世界各国综合国力的重要指标，掌握各领域的“关键核心技术”也逐渐上升到国家安全战略的高度，于是世界各国相继开展国家层面的技术预见活动。

能源是国家发展的重要基石。世界经济高速发展、人口增长以及社会生活质量的高追求，促进能源需求迅猛增加，但是能源安全问题和气候变化带来的重大环境问题日益突出，成为抑制各国发展的重要阻碍^[30]。各国正在积极地寻求和探索能源系统的绿色转型路径，并以能源技术革命和技术创新为抓手，掌握国际领先的绿色科技，提升在全球绿色技术领域的话语权。于是，低碳技术预见便成为解决上述问题的关键科学手段。

发达国家很早就意识到了能源技术预见的重要战略意义，最具代表性的是美国和日本^[29]。美国是技术预见的兴起之地，20 世纪早期美国成功应用技术预测规划本国国防科技政策。此后，美国的技术预见活动逐渐以企业为主要主体。而日本更加侧重国家层面的技术预见研究，自 1971 年起每五年便开展一次国家层面的技术预见活动，至今已经十二次，主要使用大规模德尔菲法^[31]。此外，英国、德国、土耳其、韩国等国家也相继开展了包含能源领域在内的技术预见活动。而我国的技术预见研究较晚，1995 年发布《国家关键技术选择研究》，首次明确了国家重点发展的关键技术，而针对低碳技术预见的研究直至 2003 年才开始。

当前能源技术预见研究更多强调传统技术预见方法在国家能源部门的具体应用^[32, 33]，对于低碳技术预见的关注较为缺乏，且缺少系统性的综述来对其科学内涵、演变过程、研究范式和未来方向进行深入的挖掘和思考。于是，本章采用文献计量方法，综述该研究领域的科研产出现状^[34, 35]，旨在探索低碳技术预见领域的研究热点和理论范式演变规律。据此，本章以“低碳技术预见”为主题词，采用文献计量方法分析低碳技术预见研究的时空分布特点和研究现状；通过对关键词词频和关键词共现网络进行分析^[36]，总结和归纳低碳技术预见领域的主要研究热点和方法。为进一步掌握该领域的发展前沿和未来工作的研究方向提供必不可少的支持和借鉴。

2.2 低碳技术预见研究现状

本章研究的综述文章全部来源于“Web of Science”数据库中的 SCI-E 和 SSCI 两个核心子库,检索了 SCI-E 数据库中 1970~2019 年和 SSCI 数据库中 2002~2019 年包含“技术预见”和“低碳技术”两大类关键词的文献^①,共得到 1301 篇原始文献,经过人工筛选并剔除不符合本章综述对象的文献后,剩余有效文献 79 篇。

2.2.1 研究时空发展特点

本节研究总结了当前低碳技术预见研究在时间进程和空间分布中呈现的发展规律。从时间角度(图 2.1),可以看出低碳技术预见研究呈现小幅震荡的增长趋势。从增幅角度来看,可将低碳技术预见研究划分为两个阶段,第一阶段是 1990~2005 年起步阶段,虽然低碳技术预见活动在美国和日本已经起步,但此阶段针对能源技术预见的学术研究较少,更多地聚焦于国家和企业层面的具体实践,较少以科研产出的形式体现和扩散;第二阶段是 2005 年至今兴起阶段,能源技术预见越来越受到学术界的关注,这主要是由于量化技术预见方法的兴起使得能源技术预见的科学研究范式更加清晰可循。虽然针对低碳技术的研究已在近些年成倍增长,但是对其进行科学合理的预见研究仍然较少。随着绿色转型成为能源系统发展的必然趋势,低碳技术预见研究也正在得到研究者越来越多的关注。

从低碳技术预见研究的时空分布特征看,当前研究集中分布在欧洲、北美洲和亚洲,其中美国和中国位居前两位。技术预见来源于美国和苏联在 20 世纪 40 年代的军事科技竞赛^[28, 37],而日本在 20 世纪 70 年代初启动的国家技术预见活动才真正推动了能源技术预见研究在科学界的传播和扩散,并对欧洲国家和地区产生重要影响。20 世纪 90 年代,英国、德国、荷兰等国相继仿效日本启动国家技术预见活动,并持续至今。美国通过关键能源技术预见实现了页岩油气开采的技术突破,为能源产业带来了颠覆性革命,这使得以中国、巴西等为代表的新兴发展中国家也开始重视能源技术预见,针对油气^[38]、可再生能源领域^[39, 40]开展了一系列低碳技术预见研究和实践,尤其关注低碳技术的前瞻性布局。

① 本章所使用的具体检索式为: TS=(“techn* foresight” OR “techn* frontier” OR “techn* foresee” OR “techn* forecast*” OR “techn* gap” OR “emerging techn*” OR “disruptive techn*” OR “disruptive innovation” OR “advanced techn*” OR “techn* outlook” OR “prospective techn*” OR “promising techn*” OR “techn* discovery” OR “innovational techn*” OR “innovative techn*” OR “techn* breakthrough” OR “future techn*” OR “techn* mining” OR “foresight” OR “techn* roadmap” OR “patent roadmap” OR “future-oriented techn*” OR “techn* strategy”) AND TS=(“low carbon techn*” OR “clean techn*” OR “green techn*” OR “renewable energy*” OR “sustaining techn*” OR “cleantech” OR “environmental techn*” OR “envirotech” OR “greentech” OR “sustainable energy” OR “clean energ*” OR “green energy*” OR “zero carbon” OR “carbon reduction techn*” OR “carbon storage” OR “sustainable techn*” OR “carbon utilization” OR “carbon capture” OR “non-fossil energy” OR “fuel* substitution techn*” OR “raw materials substitution techn*” OR “carbon sink techn*” OR “sustainable development” OR “energy transition” OR “climate change” OR “green transition” OR “clean transition” OR “energy innovation” OR “low carbon transition”) NOT TS=(“DEA” OR “EKC” OR “SBM” OR “metafrontier production function”)。文献类型选取具有较高研究质量的论文。检索时间是 2020 年 4 月 12 日。

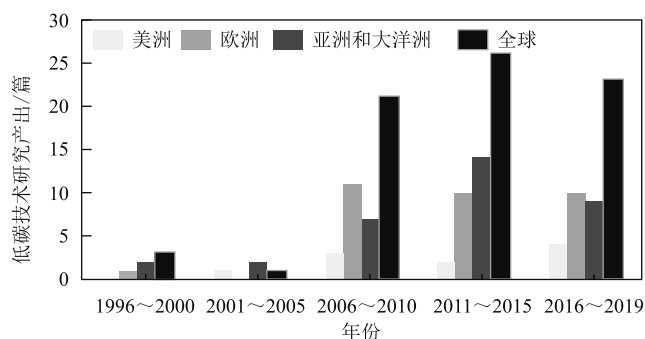


图 2.1 低碳技术预见研究的时空发展特点 (1996~2019 年)

2.2.2 低碳技术预见研究的热点技术

本节基于综述文献中的技术对象，总结了研究期内低碳技术预见领域所关注的热点技术。如图 2.2 所示，从技术领域来看，可再生能源^[41, 42]、生物质能技术^[43]、CCUS^[44]、能源综合系统以及氢能^[45-47]是预见研究的技术热点。从能源密集型部门来看，较多研究集中于电力和交通部门的前瞻性低碳技术，而对建筑部门和工业部门的探讨仍有待进一步深入。特别是在工业部门，现有预见研究多聚焦于化工和钢铁行业相关的低碳技术^[48]，其他工业子领域中的低碳技术发展路径与潜力研究仍显不足。

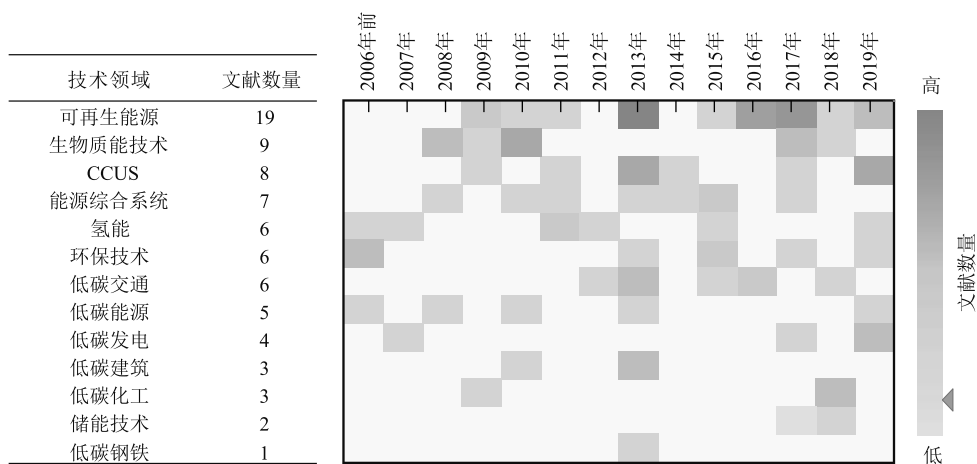


图 2.2 低碳技术预见研究的热点技术领域

从研究团队来看，低碳技术预见研究领域所显现出的代表性研究机构和团队较为集中，见表 2.1。美国波特兰州立大学 Tugrul U. Daim 团队在低碳技术路线图的编制方面积累了较为丰富的研究成果，其技术预见工作多聚焦于企业层面数据，主要预见对象是以风能、太阳能为主的可再生能源技术^[49, 50]。马斯达尔科学技术学院(阿联酋)依托当地首个无碳城市示范项目，在城市级可再生能源技术规划和负排放

技术预见研究方面开展了前瞻性工作^[42, 51]。希腊国立雅典理工大学的相关研究团队重点关注可持续能源系统和可再生能源电力系统的整体布局,主要开展针对光伏技术、燃料电池技术和离岸风力发电技术的预见研究^[52, 53]。日本作为能源技术预见的先驱者,其代表性机构主要关注可再生能源(光伏、燃料电池)和生物质能(生物柴油、氢能)相关的技术规划和前瞻性布局^[54]。荷兰的研究团队则侧重于从全生命周期视角,对生物化工技术和绿色交通领域的技术组合进行经济与环境影响综合评估,并将社会期望纳入低碳技术预见理论体系中^[55]。

表 2.1 低碳技术预见研究代表性机构和主要研究领域

机构名称	科研产出量	主要研究领域
美国波特兰州立大学	4	风能、技术路线图编制
丹麦科技大学	3	可再生能源
北京理工大学	3	低碳能源技术前沿 ^[56, 57]
马斯达尔科学技术学院(阿联酋)	2	无碳城市
日本经济产业省	2	光伏、燃料电池
希腊国立雅典理工大学	2	可持续电力系统
日本东京大学	2	生物柴油、氢能
荷兰乌得勒支大学	2	生物化工、绿色交通

2.2.3 低碳技术预见研究的范式演变

本节将低碳技术预见研究的预见对象以及所使用的理论方法进行可视化分析,可以得到低碳技术预见研究随时间的演变进程,如图 2.3 所示。

关于理论模型创新的文章共有 27 篇,其发展规律符合从定性向定量,由单一向组合发展。1996 年荷兰科学家首次提出结构化技术预见的概念,低碳技术预见的研究逐步科学化^[56]。前期,研究方法主要是通过定性地总结历史经验,由一个或一组专家提出预测观点,但专家观点深受所处学科背景限制,其预测结果的信服力有待验证。后来,结合半定性分析工具,技术预见研究主要通过多轮德尔菲调查、技术路线图、多准则决策分析等方法,量化不同专家的定性观点,通过主客观性的相互平衡达到更好的预见效果^[57]。虽然该类方法综合考虑了多学科领域专家的集体智慧识别技术变化的方向和路径选择,但该方法数据收集困难大、耗时长,预测结果的可信度依然取决于候选人的知识储备,在知识快速增长的今天,专家无法掌握和消化所有的前沿科技文献和研究成果,不可避免地对低碳技术存在认知偏差^[58]。因此,越来越多的研究人员开始通过量化的预见方法和理论建模,对大量科研数据和技术指标进行智能化和自动化的处理和分析,它包括但不限于专利分析、