

面向“双碳”目标的海洋牧场企业碳管理数字化平台初步研究

张奇发^{1*}, 王思琪^{2*}, 张 晴³, 张 琳¹, 尹增强^{1#}

¹大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁 大连

²山东师范大学生命科学学院, 山东 济南

³大连海洋大学机械与动力工程学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年7月7日; 录用日期: 2026年8月7日; 发布日期: 2026年8月17日

摘 要

“双碳”目标的实施是我国应对气候变化、促进可持续发展、维护生态环境和实现经济转型的关键战略，直接关系到国家未来与人类生存的可持续性。在此背景下，海洋渔业作为传统重能耗、高碳排产业，正面临着生产方式变革、技术创新突破与产业生态重构的系统性转型压力。海洋牧场企业作为海洋渔业主体，其碳管理能力的现代化是实现国家战略目标的关键。当前，海洋渔业企业在碳核算、减排路径规划及碳资产运营等方面面临数据基础薄弱、技术支撑不足、管理体系缺失等核心挑战。本文立足于国家碳核算标准体系，融合环境经济学、信息科学与管理学理论，提出一个集“监测 - 核算 - 管理 - 减排 - 评估 - 交易”于一体的海洋牧场企业碳管理数字化平台综合架构。平台以物联网、大数据、人工智能及区块链技术为数字底座，构建了涵盖精准碳核算、智慧能碳管理、系统性减排路径规划、碳资产开发与价值实现四大核心功能的体系。本文进一步提出了“数据驱动决策”、“产学研协同创新”与“碳金融深度融合”三大创新机制，并深入剖析了平台在零碳园区场景下的应用范式。同时梳理水产养殖LCA、蓝色碳汇核算、智慧渔业领域现有研究进展，识别现有研究缺口，新增海洋牧场碳汇计量监测模块，整合遥感、原位传感器、生物生长模型实现贝藻类固碳动态可信核算，并论证碳汇转化为可交易碳资产的实施路径，实现渔获追溯与海洋蓝碳价值核算一体化。最后，论文讨论了海洋牧场平台在数据质量、模型精度、商业模式及制度协同方面面临的挑战与未来演进方向，旨在为构建科学、高效、可持续的海洋牧场企业碳治理体系提供理论参考与实践指南。

关键词

双碳目标, 碳核算, 物联网, 人工智能, 海洋牧场, 蓝色碳汇

*共一作者。

#通讯作者。

A Preliminary Study on a Digital Platform for Corporate Carbon Management in Marine Pastures Aimed at the ‘Dual Carbon’ Targets

Qifa Zhang^{1*}, Siqi Wang^{2*}, Qing Zhang³, Lin Zhang¹, Zengqiang Yin^{1#}

¹College of Marine Science and Environment, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

²College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan Shandong

³College of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian Liaoning

Received: July 7, 2026; accepted: August 7, 2026; published: August 17, 2026

Abstract

The implementation of the “dual carbon” targets is a key strategy for China to address climate change, promote sustainable development, safeguard the ecological environment and achieve economic transformation; it is directly linked to the nation’s future and the sustainability of human existence. Against this backdrop, the marine fisheries sector—traditionally characterized by high energy consumption and high carbon emissions—is facing systemic pressures for transformation, including changes in production methods, breakthroughs in technological innovation and the restructuring of the industrial ecosystem. As the main players in the marine fisheries sector, the modernisation of carbon management capabilities among marine aquaculture enterprises is crucial to achieving national strategic objectives. Currently, marine fisheries enterprises face core challenges in areas such as carbon accounting, emissions reduction pathway planning and carbon asset management, including a weak data foundation, insufficient technical support and a lack of management systems. Based on the national carbon accounting standards framework and integrating theories from environmental economics, information science and management science, this paper proposes a comprehensive architectural framework for a digital carbon management platform for marine ranch enterprises that integrates “monitoring, accounting, management, emissions reduction, assessment and trading”. With the Internet of Things, big data, artificial intelligence and blockchain technologies serving as its digital foundation, the platform establishes a system encompassing four core functions: precise carbon accounting, smart energy and carbon management, systematic emission reduction pathway planning, and carbon asset development and value realisation. This paper further proposes three innovative mechanisms—“data-driven decision-making”, “collaborative innovation among industry, academia and research”, and “deep integration of carbon finance”—and provides an in-depth analysis of the platform’s application paradigm within the context of zero-carbon industrial parks. Finally, the paper discusses the challenges and future directions for the marine ranch platform in terms of data quality, model accuracy, business models and institutional coordination, with the aim of providing theoretical references and practical guidelines for establishing a scientific, efficient and sustainable carbon governance system for marine ranch enterprises.

Keywords

Dual Carbon Targets, Carbon Accounting, Internet of Things, Artificial Intelligence, Marine Ranches, Blue Carbon Sink



1. 引言

在全球气候变暖日益严峻的背景下,世界各国以及企业均加强了对碳排放管理的重视程度。“双碳”目标的提出不仅是中国对全球气候治理的积极贡献,更是推动国内经济社会高质量发展、构建生态文明的内在要求。渔业是碳排放的主要来源,渔业生产占渔业总能耗的 60%~70% [1]。海洋牧场是中国渔业应对气候变化、减少碳排放和增加碳汇的战略措施之一[2]。现有水产养殖生命周期评价(LCA)多聚焦养殖燃油、饵料等生产碳排放,未耦合贝藻生态系统碳汇,难以完整核算海洋牧场净碳收支;蓝色碳汇核算虽出台贝类、藻类计量规范,但计量依赖人工年度采样,缺少遥感、水下传感器协同的动态数字化测算工具,碳汇转化为 CCER 可交易资产的数字化链路尚未打通[3]。同时,电力、钢铁行业碳管理数字化平台已成熟落地,但面向海洋牧场、集成蓝碳汇计量的专属数字化系统仍存在研究空白。基于上述研究短板,本文在现有碳管理平台架构基础上,新增蓝碳汇一体化计量功能模块,完整覆盖碳汇动态监测、核算、碳资产开发交易全流程,弥补当前海洋牧场碳管理“只算排放、不算碳汇”的缺陷。然而,当前我国大多数海洋渔业企业在向低碳转型的进程中,仍面临诸多现实困境。在企业端,碳核算层面普遍存在核算能力缺乏、标准执行不一、数据质量不高且成本高昂的问题[4];碳管理层面,数字化碳管理体系不健全,数据收集匮乏,导致“碳家底”不清,碳资产不明[5];碳减排层面,减污降碳路径模糊,低碳技术研发周期长、投入大,与高校科研院所之间的产学研联动薄弱[6],同时,低碳项目和技术的融资需求与碳交易需求难以有效对接[7]。在政府端,地方层面的碳数据统计核算基础薄弱,碳管理人才短缺,宏观调控缺乏大数据支撑以精准模拟推演碳达峰路径,微观调控则缺乏科技支撑以明确重点行业的减排路径[4]。这些问题的存在,严重制约了企业碳管理效能与国家双碳战略的落地效率。

企业碳管理数字化平台技术已经在电力、水泥、钢铁、电子和油气田等领域得到应用,并取得较好效果[8]-[14]。然而,目前还没有发现关于海洋牧场零碳生产调控的直接研究结果。因此数字化、智能化技术作为引领新一轮科技和产业变革的关键力量,为破解上述难题提供了全新路径[15]。通过构建海洋牧场企业碳管理数字化平台,能够实现碳排放的全链条、精细化、智能化管理,有效降低核算成本,提升管理效率,明晰减排路径,激活碳资产价值。本研究较详细阐述其技术架构与功能模块,较深入探讨其背后的创新运行机制,并通过案例展望其应用前景,以期为推动我国海洋牧场企业碳管理数字化转型,提供一份兼具理论深度与实践价值的蓝图[16]。

2. 海洋牧场企业碳管理数字化平台的整体架构设计

海洋牧场企业碳管理数字化平台的建设,是一项融合了环境科学、信息科技与管理学的复杂系统工程。其设计超越了单一技术的简单堆砌,旨在构建一个数据驱动、业务协同、智能决策的有机整体。为实现这一目标,平台的设计必须严格遵循科学性、系统性、可扩展性和安全性四大核心原则。科学性是根基,确保平台的碳核算方法与减排路径符合国家与国际标准;系统性要求平台能够覆盖碳管理的全生命周期,形成闭环;可扩展性保证了平台能随政策、技术与业务需求的变化而灵活演进;安全性则是保障企业核心数据与碳资产安全的生命线。

在平台的顶层设计理念上,本研究创新性地提出了“碳流管理与价值创造相融合”的核心理念。从物理视角看,碳伴随能源与物料的消耗,在海洋牧场企业运营中如同血液般流动,构成“碳流”。平台的

核心任务之一,便是实现对这条“碳流”的精准监测、科学核算、高效管理与智能优化。从经济视角看,在日益严格的碳排放约束下,超额的碳排放已成为企业实实在在的成本,而通过努力产生的减排量(如CCER)则可能蜕变为宝贵的资产。因此,平台的更高层次使命,是赋能企业完成从“碳成本”中心到“碳资产”运营者的价值跃迁。这一理念深深植根于多学科交叉的理论沃土:它以环境核算理论为准则,确保核算的规范性与国际可比性;以能源系统工程理论为方法,对企业能源系统进行“源-网-荷-储”一体化协同优化;以数字孪生理论为手段,构建企业物理实体的虚拟镜像,实现过程的模拟、分析与前瞻预测;并以环境金融理论为延伸,将碳资产纳入企业资产负债表,积极探索其金融属性与价值实现路径[17]-[20]。

为实现上述理念,平台采用了一个分层解耦、能力聚合的技术架构。如图 1 所示,该架构自下而上可分为数据采集层、平台支撑层、应用功能层和交互展示层。数据采集层作为平台的“感官神经”,综合利用物联网技术,通过智能电表、传感器等设备自动采集能源消耗与关键过程数据,并融合手工录入、设备导入及已有系统对接,形成多源异构的数据入口。平台支撑层作为“大脑中枢”,基于云计算构建统一的数据仓库与大数据处理引擎,完成数据的清洗、融合、存储与管理,并引入数据湖概念存储原始数据,同时构建算法模型库,为上层应用提供智能支撑。应用功能层作为“业务心脏”,将核心业务逻辑封装成微服务化的功能模块,具体体现为精准碳核算、智慧能碳管理、系统性减排路径规划、碳资产开发与交易,四大系统[21]-[24]。最上层的交互展示层则作为“形象窗口”,通过 Web 端、移动 APP、数据大屏等形式,为不同用户提供个性化的数据可视化、风险预警和决策支持界面,致力于实现“一屏知碳、一键决策”的卓越用户体验。



Figure 1. Overall technical architecture of carbon management digital platform for marine ranching enterprises
图 1. 海洋牧场企业碳管理数字化平台整体技术架构图

3. 平台核心功能模块的深度解析与创新

3.1. 精准碳核算系统：从“被动填报”到“自动智能”

传统的碳核算模式高度依赖人工，从数据收集、排放因子查询到手动计算，整个流程不仅耗时费力，且极易出现错漏，已成为企业碳管理的主要瓶颈。本平台所构建的精准碳核算系统，致力于实现从“被动填报”到“自动智能”的转变。系统的创新性首先体现在构建了一个动态化、本地化的排放因子库。它绝非静态的数据库，而是除了涵盖 IPCC 和国家标准默认值外，更鼓励接入区域电网的实时平均排放因子、特定燃料的实测因子，甚至与顶尖科研机构合作，针对重点行业开发更具代表性的工艺过程排放因子，并通过 API 接口与权威数据源联动，确保核算基石的时效性与精准性。特别值得关注的是，系统引入了自然语言处理技术，可智能解析企业填报的复杂物料信息，自动匹配最佳核算路径，极大提升了易用性与自动化水平。最终，系统实现了核算-报告-核查的一体化无缝衔接，生成的报告可直接适配生态环境部要求的报送格式，实现“一键上报”；同时为第三方核查机构开设受控的审核端口，使其能在线追溯数据源头与计算过程，从而构建起连接企业、政府与核查机构的信任桥梁，大幅提升整个碳数据体系的运行效率与公信力。

3.2. 海洋牧场蓝碳汇动态计量与碳资产转化

平台依托现有碳核算底层框架，整合行业蓝碳汇计量标准，并开发适配复合海洋牧场的改良计量模型。

3.2.1. 多源协同碳汇动态监测核算

平台数据采集层接入卫星遥感、无人机高光谱、水下原位碳传感器，搭配贝藻类生物生长模型，自动获取海域藻类覆盖、贝类生物量、水体溶解碳、底泥埋藏碳实时数据；依托内置国标碳汇核算公式，自动扣除自然基线碳汇与碳泄漏，实现逐日动态固碳量核算，全部监测数据通过区块链存证，满足第三方核查溯源要求。

3.2.2. 蓝碳汇向可交易碳资产数字化转化

系统可自动识别牧场碳汇开发潜力区块，辅助完成 CCER 项目 PDD 编制、长期监测方案设计；核证后的碳汇量直接接入平台碳资产交易模块，对接全国碳市场行情，支持碳汇线上交易、碳质押融资，实现海洋牧场生态碳汇市场化价值变现。

3.3. 碳资产开发与交易系统：从“被动持有”到“主动经营”

在双碳背景下，碳配额与碳信用已明确成为企业的新型资产，如何有效管理和增值这些碳资产，是企业必须面对的新课题[25]。本系统旨在将碳资产从静态的合规工具，转变为企业可主动经营的价值增长点。系统首先具备碳资产的智能识别与开发辅助功能，能够自动筛查企业运营中可能产生 CCER、绿证等自愿减排资产的潜在项目，并对符合条件的项目提供从方法学选择、项目设计文件编写、监测计划制定到减排量核算的全流程数字化辅助，显著降低项目开发的专业门槛与时间成本。在资产存续期内，系统提供专业的碳资产组合管理与风险评估服务，对企业持有的各类碳资产进行统一登记、动态估值与风险监控，通过实时连接全国碳市场及试点市场行情，并运用金融模型评估资产组合的市场风险与流动性风险，为企业的持有或交易决策提供量化依据。更进一步，系统与气候投融资平台深度联动，扮演了智能交易撮合与金融服务对接的角色，能将拥有优质碳资产或减排项目的企业与潜在的绿色基金、碳信托等资金方进行精准匹配。同时，平台探索利用区块链技术实现碳资产的溯源与交易，确保数据不可篡改，增强市场公信力，并积极探索碳配额质押融资、碳远期等金融创新服务，从而全方位盘活企业碳资产，

实现环境效益与经济效益的最大化(图 2)。

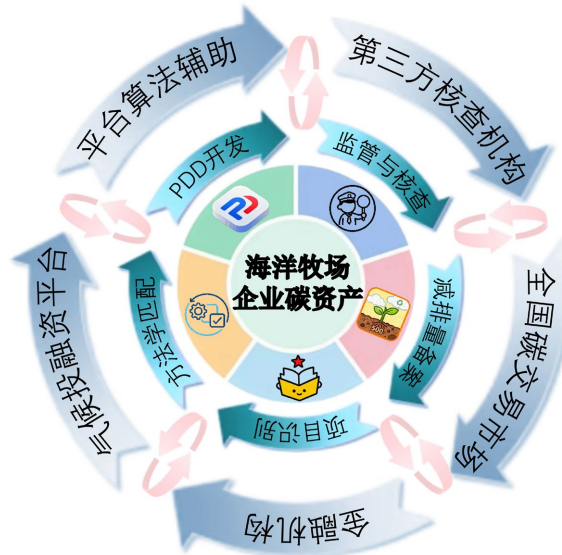


Figure 2. Carbon asset development and value realization process and ecosystem
图 2. 碳资产开发与价值实现流程及生态系统

4. 平台的创新运行机制

平台的强大功能依赖于其背后深度的、相互关联的创新机制。这些机制共同作用，确保了平台的生命力与持续进化能力。数据驱动决策机制是平台运行的底层逻辑。它推动企业的碳管理从基于历史数据的“事后统计”模式，彻底转向基于实时数据和预测模型的“事前预判”与“事中干预”模式。通过对海量数据进行深度挖掘，平台能够揭示出人眼难以察觉的复杂关联，例如特定生产工艺参数与碳排放强度之间的非线性关系，从而为优化生产操作提供精准指导。这本质上是将碳管理从边缘化的辅助职能，提升至企业精细化运营与战略决策的核心层面，并同步挖掘养殖环境与贝藻固碳效率的关联规律，指导牧场增汇优化。

产学研协同创新机制是平台保持技术先进性与解决方案适用性的活力源泉。平台在此机制中扮演了“创新枢纽”的关键角色。它不仅是成熟技术的应用方，更是产业一线新需求的提出方和前沿研究的组织方。高校与科研院所的实验室成果可以通过平台找到宝贵的工业试验场，加速从论文到产品的转化；与此同时，企业在生产实践中遇到的具体技术难题，可以迅速反馈给学术界，转化为富有价值的研究课题。这种“需求牵引、技术推动”的双向互动，极大地压缩了低碳技术从创新到应用的周期。

碳金融深度融合机制是平台实现价值闭环与市场化激励的核心。该机制旨在打破环境效益与经济效益之间长期存在的壁垒。通过将碳资产进行数字化、标准化重塑，使其成为可精准计量、可客观评估、可便捷交易的金融标的物，平台极大地增强了其对金融资本的吸引力。更重要的是，平台所提供的透明、可信、可追溯的数据基础，有效降低了投融资双方的信息不对称，使得绿色信贷、转型金融等资本能够更精准、更高效地配置到最急需资金支持且最具减排潜力的企业与项目中去，最终形成“减排产生资产，资产吸引金融，金融促进更深层次减排”的良性循环。

5. 挑战与展望

尽管海洋牧场企业碳管理数字化平台前景广阔，但其大规模推广应用与深度价值释放仍面临诸多亟

待解决的挑战。挑战来自于数据质量与互操作性, 现场传感器的精度与长期稳定性、各异构系统接口的标准不统一、以及数据采集的频率差异, 都会直接影响底层数据的质量与融合效果, 进而动摇平台可信度的基石。其次, 模型精度与场景适应性也是一大考验, 碳排放模型的通用性与特定行业、特定工艺的复杂性之间存在矛盾, 预测算法的精度需在持续迭代中提升, 方能满足高价值决策的需求。贝藻碳汇长期埋藏预测模型精度、海上多源监测数据融合标准仍有待完善。再次, 投资回报与可持续商业模式仍需市场进一步验证, 特别是对于资金实力相对薄弱的中小企业而言, 平台的建设与运维成本是必须考虑的现实因素, 需要形成清晰的价值主张和多元化的商业模式。最后, 制度与标准协同是平台健康发展的外部保障, 迫切需要国家在碳核算方法论、企业数据隐私保护、数字身份认证等领域出台更细化、更统一的标准与政策, 为平台的互联互通与数据安全流通营造良好的制度环境。

展望未来, 海洋牧场企业碳管理数字化平台将向着更加智能化、平台化、生态化的方向演进。人工智能将在碳管理的各个环节扮演更核心的角色, 实现更高级别的自动化与智能化。平台本身将趋向于更加开放, 通过提供标准的 API 接口和低代码开发环境, 吸引更多的第三方开发者基于其构建丰富的 SaaS 应用, 从而形成一个充满活力的碳管理应用生态。最终, 单个企业的碳管理平台将与城市、区域乃至国家的碳管理超级平台打通, 数据与业务相互赋能, 构成一个支撑全社会碳中和目标的、坚实而智慧的数字基础设施网络。

6. 结论

兼顾生产碳排放管控与贝藻蓝色碳汇量化增值的一体化数字化平台, 是海洋牧场企业应对全球气候挑战、把握绿色增长机遇的战略性举措与必然选择。本文所提出的综合架构, 通过系统集成精准碳核算、智慧能碳管理、系统性减排路径规划和碳资产开发四大核心功能, 并依托数据驱动决策、产学研协同创新和碳金融深度融合三大创新机制, 为海洋牧场企业提供了一套全面、高效且经济的碳管理综合解决方案。该平台能够有效助力企业摸清“碳家底”、找准“减排路”、盘活“碳资产”, 实现合规与发展的平衡, 在区域层面产生显著的协同减排效应与规模经济效益。面对未来的挑战, 需要政府、企业、科研机构与科技公司等多方力量共同努力, 持续推动技术创新、模式创新和制度创新, 方能克服障碍, 充分释放数字化技术在实现中国双碳宏伟目标中的巨大潜能。

参考文献

- [1] 黄一心, 鲍旭腾, 孟菲良, 等. 中国渔业节能减排状况及发展建议[J]. 渔业现代化, 2021, 48(3): 10-17.
- [2] 杨林, 沈春蕾. 海洋碳汇产品价值实现的困境与对策[J]. 东南学术, 2024(1): 92-102.
- [3] Zeng, N., Jiang, K., Han, P., Hausfather, Z., Cao, J., Kirk-Davidoff, D., *et al.* (2022) The Chinese Carbon-Neutral Goal: Challenges and Prospects. *Advances in Atmospheric Sciences*, **39**, 1229-1238. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1313-6>
- [4] 工业企业和园区数字化碳管理中心建设指南[J]. 中国信息化, 2025(3): 10-11, 33.
- [5] 杨博文. 数字赋能碳治理的逻辑理路与体系建构[J]. 行政管理改革, 2024(6): 50-59.
- [6] 谷丰, 李彤, 陈丽洁, 等. “双碳”目标下企业数字化治理与绿色发展协同优化问题研究[J]. 商业经济, 2025(9): 96-102.
- [7] 向纯洁, 赵隼鹤. 数智碳管理平台在物流企业中的采纳研究[EB/OL]. <https://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/202511-13>, 2025-11-11.
- [8] Wang, Q., Wang, B. and Liu, X. (2023) Optimal Allocation of Integrated Energy Systems in Industrial Parks under Zero Carbon Trading. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, **57**, 2294-2304.
- [9] Gu, Y.Q., Pan, C.C., Sui, Y.R., Wang, B., Jiang, Z., Wang, C., *et al.* (2023) CO₂ Emission Accounting and Emission Reduction Analysis of the Steel Production Process Based on the Material-Energy-Carbon Correlation Effect. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 124010-124027. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30830-z>

- [10] Khaiyum, M.Z., Sarker, S. and Kabir, G. (2023) Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context. *Sustainability*, **15**, Article 15407. <https://doi.org/10.3390/su152115407>
- [11] Ding, Y.C., Wang, J.J., Cai, J., *et al.* (2025) Study on Influence of Swirl Number of Multi-Channel Burner on Combustion Characteristics of High-Temperature Preheating Fuel in Rotary Kiln. *Clean Coal Technology*, **31**, 416-425.
- [12] Zhang, Y., Wang, Z., Wang, H. and Blaabjerg, F. (2020) Artificial Intelligence-Aided Thermal Model Considering Cross-Coupling Effects. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **35**, 9998-10002. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.2980240>
- [13] Sadeeq, M.A. and Zeebaree, S.R. (2023) Design and Implementation of an Energy Management System Based on Distributed IoT. *Computers and Electrical Engineering*, **109**, Article ID: 108775. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108775>
- [14] 崔学民, 李立伟, 马路遥, 等. 工业数字化碳管理服务平台实践与应用[C]//工业绿色低碳发展报告(2023-2024). 北京: 社会科学文献出版社, 2024: 128.
- [15] 张龙. 基于低碳经济的工业企业碳排放管理策略分析[J]. 生态与环境科学, 2025, 6(6): 148-150.
- [16] 郝盼盼, 王诗元, 原东良, 等. “双碳”目标下重污染企业绿色创新联动研究[J]. 科技进步与对策, 2025, 42(15): 98-107.
- [17] Saidur, R. and Mahlia, T.M.I. (2010) Energy, Economic and Environmental Benefits of Using High-Efficiency Motors to Replace Standard Motors for the Malaysian Industries. *Energy Policy*, **38**, 4617-4625. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.017>
- [18] Rahbari, H.R., Elmegaard, B., Bellos, E., Tzivanidis, C. and Arabkoohsar, A. (2025) Thermochemical Technologies for Industrial Waste Heat Recovery: A Comprehensive Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **215**, Article ID: 115598. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115598>
- [19] Liddle, B. (2024) To What Extent Do Alternative Energy Sources Displace Coal and Oil in Electricity Generation? A Mean-Group Panel Analysis. *Sustainability*, **16**, Article 5319. <https://doi.org/10.3390/su16135319>
- [20] Hassan, Q. (2025) Hybrid PV/T-Biomass Heating and Power System for Optimized Energy Management in Residential Units. *Energy Conversion and Management: X*, **27**, Article ID: 101186. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101186>
- [21] Viada, G., Mariotti, N., Galliano, S., Menozzi, A., Barolo, C. and Bonomo, M. (2025) Eco-Friendly and Ready-to-Market Polyurethanes: A Design of Experiment-Guided Substitution of Toxic Catalyst and Fossil-Based Isocyanate. *ChemSusChem*, **18**, e202402451. <https://doi.org/10.1002/cssc.202402451>
- [22] Arias, A., Ribeiro, J.M., Tsalidis, G., Renfrew, D., Dias, D., Avramidi, M., *et al.* (2025) Urban Wastewater Treatment Plants as Resource Hubs: Evaluating Circularity and Sustainability of Nutrient Recovery and Water Reuse. *Water Research*, **287**, Article ID: 124406. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124406>
- [23] Wei, Y. (2026) A Circular Economy-Oriented Network DEA Model for Evaluating and Improving the Efficiency of Industrial Water Recycling Systems in China. *Sustainability*, **18**, Article 555. <https://doi.org/10.3390/su18020555>
- [24] Victor, N. and Nichols, C. (2024) Impact of Carbon Dioxide Removal Technologies on Deep Decarbonization: EMF37 MARKAL-NETL Modeling Results. *Energy and Climate Change*, **5**, Article ID: 100143. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100143>
- [25] Yan, X., Tong, D., Davis, S.J., Liu, Y., Li, W., Wang, H., *et al.* (2025) Cost-Competitive Plant-by-Plant Strategy for Spatially Resolved CCUS Deployment toward Carbon Neutrality in Global Key Industries. *One Earth*, **8**, Article ID: 101378. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101378>