

文章编号:1672-3961(2025)04-0138-11

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.344

基于多维效益评价的工农协同发展模式研究现状及展望

刘浩¹, 姜钰湛², 王庆松^{2*}, 李子杨², 董运龙², 张宇杰², 张慧斌²

(1.山东大学后勤保障部, 山东 济南 250100; 2.山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061)

摘要:当前基于多维效益评价协同模式的研究缺乏系统评估和前沿梳理,限制了效益评价视角下对该模式的全面了解。通过对工农协同低碳发展模式进行界定,基于文献调研、聚类分析等方法对当前协同路径、研究方法、效果评价等方面成果进行梳理,归纳了各研究维度的不足并进行展望。研究表明,多维效益视角下工农协同模式具有“多路径、高潜力、低风险”的特点,存在路径构建单一、研究过程整合弱及效果评价动态性弱等不足。从3个层面提出针对性的发展对策和建议,即在路径构建层面应构建多层次立体协同路径、研究方法层面应开展分阶段全周期研究、效果评价层面应构建动态评价体系。本研究可为该领域及相似领域的研究进一步深化和拓展提供有益的学术参考。

关键词:低碳;工农协同;发展模式;路径;文献分析

中图分类号:TK01+9

文献标志码:A

引用格式:刘浩,姜钰湛,王庆松,等.基于多维效益评价的工农协同发展模式研究现状及展望[J].山东大学学报(工学版),2025,55(4):138-148.

LIU Hao, JIANG Yuzhan, WANG Qingsong, et al. Research status and prospects of the industrial-agricultural collaborative development model based on a multi-dimensional benefit evaluation perspective[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(4):138-148.

Research status and prospects of the industrial-agricultural collaborative development model based on a multi-dimensional benefit evaluation perspective

LIU Hao¹, JIANG Yuzhan², WANG Qingsong^{2*}, LI Ziyang², DONG Yunlong², ZHANG Yujie², ZHANG Huibin²

(1. Logistics Support Department, Shandong University, Jinan 250100, Shandong, China; 2. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: The current research on collaborative models based on multi-dimensional benefit evaluation lacked systematic assessment and frontier review, which restricted the comprehensive understanding of the model from the perspective of benefit evaluation. By defining the low-carbon development model of industry-agriculture collaboration, summarizing the achievements in current collaborative paths, research methods, effect evaluation, and other aspects based on literature research, cluster analysis, and other methods, the deficiencies in each research dimension were summarized and prospected. The study showed that the industry-agriculture collaboration model from the perspective of multi-dimensional benefits was characterized by "multiple paths, high potential and low risk", with deficiencies such as single path construction, weak integration in the research process, and weak dynamics in effect evaluation. Targeted development countermeasures and suggestions were proposed at three levels. At the path construction level, a multi-level three-dimensional collaborative path should be constructed. At the research method level, phased full-cycle research should be carried out. At the effect evaluation level, a dynamic evaluation system should be constructed. This

收稿日期:2024-12-30

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2023MD079)

第一作者简介:刘浩(1971—),男,山东莱阳人,工程师,硕士,主要研究方向为能源管理。E-mail:liuhao@sdu.edu.cn

* 通信作者简介:王庆松(1971—),男,山东济南人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为可持续能源环境系统管理。

E-mail:wqs@sdu.edu.cn

study could provide useful academic references for the further deepening and expansion of research in this field and similar fields.

Keywords: low carbon; industry-agriculture collaboration; development model; pathway; literature analysis

0 引言

在全球气候危机日益严峻的背景下,冰川消融、海平面上升、气候变暖等现象给人类的生存环境带来严重威胁^[1]。有关研究表明,自工业革命以来全球气温已经上升了1.1℃,若不采取紧急行动,未来几十年内气温上升可能会超过2.0℃^[2]。这一趋势将导致极端气候事件频发,对生态环境及人类生活构成严重影响^[3]。过度碳排放视为造成威胁的“罪魁祸首”,低碳化逐步成为当前发展的内在要求。

把握主要碳源是实现低碳化发展的基础。当前,工业和农业生产是全球碳排放的主要来源^[4]。工业生产高能耗的特性导致了大规模的碳排放。根据国际能源署统计,2023年全球工业部门的碳排放占全球总排放的30%左右;农业生产同样带来大量碳排放,其排放量可达全球碳排放的1/4左右^[5]。减少工业、农业生产中的碳排放已成为实现低碳发展目标的核心任务之一^[6-7]。工农协同模式作为一种创新的资源整合手段为低碳发展提供了新的思路^[8-9]。一系列国家政策也持续强调工农协同的重要性与发展必要性。2023年2月3日,农业农村部发布《农业农村部关于落实党中央国务院2023年全面推进乡村振兴重点工作部署的实施意见》(农发〔2023〕1号)^[10],明确指出要协同推进产能提升和结构优化,为协同模式发展指明方向;2024年12月26日,农业农村部发布《关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见》(农规发〔2024〕27号)^[11],明确指出要加强农业资源集约利用、投入品减量增效、废弃物资源化利用等措施,同时助力工业与农业在资源利用、节能减排等方面深度协作,为协同模式注入新的活力;2025年1月22日,国务院发布了《乡村全面振兴规划(2024—2027年)》^[12],强调要加快形成工农互促、城乡互补、协调发展、共同繁荣的新型工农城乡关系,为协同模式发展绘制了新蓝图。

持续的可协同资源是模式发展的前提与基础,协同资源种类的多样性和供应的充足性决定行业间协同作用的广度与深度。相关研究表明,全球工业能耗中20%~50%的能量以余热形式损失^[13];低

品位余热的发电潜力估计可达500GW,占全球总发电能力的5%^[14-15];同时,全球工业部门每年产生的约70亿t工业废弃物中也包括大量可回收利用的资源^[16-18]。在农业生产过程中,全球每年产生的超过50亿t秸秆中,仍有约60%未被合理利用^[19];每年产生的约30亿t农林废弃物也具有较高的生物质能转化潜力^[20-21]。协同资源“多样性强、供给量大”的特点为协同模式奠定了良好的发展基础。如何推动工农协同模式的高效发展已成为国内外学术界的研究热点。为厘清效益评价视角下该模式的研究现状,本研究聚焦于多维效益评价视角下的工农协同模式。首先,基于文献调研法搜集、筛选相关研究成果;其次,基于聚类分析等方法,通过对国内外效益视角下工农协同模式研究在协同路径、研究方法及评价体系等方面的深入剖析,归纳上述研究方面存在的不足;最后,对于不足针对性地提出未来研究的方向与建议,以期给该领域的相关研究者提供有益的学术参考。

1 工农协同模式界定

工农协同模式是一种将工业与农业紧密结合,通过资源共享和循环利用,实现能源效率、经济效益与环境效益多方共赢的综合发展模式。协同模式的核心为协同路径的构建,通过构建合理的协同路径,提升整体生产效率,降低成本,减少对自然资源的依赖,进而降低环境污染^[22-23]。协同模式的主要特点为:将工农业生产中的副产品和废弃物进行协同利用,如利用工业余热为农业温室供暖、将农业废弃物转化为生物质能源为工业供能。协同模式为实现绿色低碳的可持续发展目标提供了新的路径和解决方案。

2 协同路径发展现状

在工农业协同模式中,协同路径多元化特征明显。现阶段协同路径涵盖了多种协同资源转化与利用技术,按照能/质来源可划分为工业源路径与农业源路径。各路径、相关成果及其实现方式如表1所示。

表1 当前阶段协同路径汇总
Table 1 Collaboration path summarization at the current stage

部门	协同路径	文献	路径描述
工业部门	余热供暖	[24-29]	回收工业生产过程中的余热(如电厂、炼钢厂)为农业设施(温室、渔业等)供暖,提高能源利用效率
	余热制冷	[30-31]	利用工业余热驱动吸收式制冷系统,为农业储藏和加工提供冷链支持,减少化石能源消耗
	余热发电	[32-33]	采用有机朗肯循环、蒸汽轮机等技术,将工业余热转换为电能,提升能源回收率
	固废协助生产	[34-35]	将工业固废(如粉煤灰、矿渣)作为农业生产材料用于土壤改良,减少资源浪费
	固废肥料生产	[36-37]	将工业有机废弃物(如糖蜜、废酵母)转化为有机肥,提升农业土壤肥力,减少化肥依赖
	固废建材生产	[32,35,38]	利用工业废弃物(如炉渣、建筑废料)生产农业温室建筑材料,降低成本并减少环境污染
	废水利用	[39]	对工业废水进行处理后用于农业灌溉,减少水资源浪费,并降低农业用水成本
农业部门	经济反哺 增加就业	[31,40-41] [32,42]	通过工业资本投资农业、利润共享机制,促进农业现代化和产业升级 通过农业-工业融合,创造就业机会,提升区域经济活力
	生物质能发电	[35,43-44]	利用农林废弃物(如秸秆、畜禽粪便)进行热电联产,减少废弃物排放并提供可再生能源
	CO ₂ 捕集	[45]	利用农业温室或生物质碳捕集技术,吸收工业排放的CO ₂ ,提高作物生长效率并减少碳排放
	厌氧发酵	[35]	利用农业废弃物(如畜禽粪便)进行厌氧发酵,生产沼气等可再生能源,同时减少污染
	生物质治理污染	[46-47]	利用生物质技术(如植物修复、微生物降解)处理农业和工业污染,提升生态环境质量

协同过程中各路径物质流、能量流交叉协同,不限于冷、热、电、气、水等,呈现多样化特征。例如,工业余热经换热器用于吸收式制冷或满足热需求,工业固废经粉碎机、压块机等处理后用于农业建材生产,工业污水经处理系统处理后用于农业生

产。同时,农业废物经粉碎、压块等处理后,可通过气化装置、液化装置、锅炉及汽轮机等设备转化为热能、电能等满足工业方面的需求,实现协同发展。基于当前研究现状,绘制了现阶段基于物质/能量流的典型协同路径示意图,如图1所示。

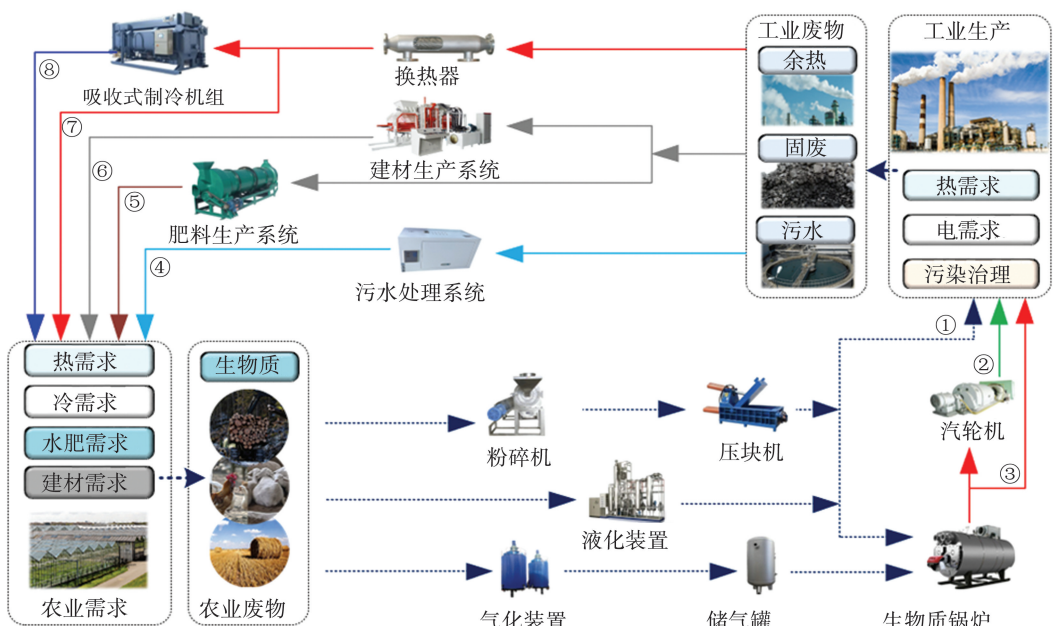


图1 基于物质/能量流的典型协同路径示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical collaboration paths based on material/energy flow

工业余热是指在工业生产过程中产生但未有效利用的热能,通常包括高温废气、废液、废蒸汽等,可利用温度范围广泛,从低温(如 50 ℃)到高温(如超过 500 ℃)不等^[48-50]。这些余热通过适当的路径回收并加以利用,在提升能源效率的同时减少环境污染、实现经济效益和环境效益的双赢^[51-52]。热电行业的高热损失特性是现阶段不可忽视的问题,但其产生的大量余热可用于农业、水产养殖等领域^[53]。早在 20 世纪 70 年代,文献[28]就提出计划在美国田纳西河流域利用发电站余热供给农业生产;文献[54]也研究了将余热从中央蒸汽发电厂输送至农业生产和水产养殖等领域的效果,证明热电余热利用的环境优势。其他工业余热量也十分可观,瑞典最大的番茄温室已实现利用瑞典弗罗维造纸厂余热进行供暖^[27]。随着研究的深入,学者们发现余热利用效果的影响因素众多。文献[29]发现余热利用的经济性受化石燃料-电力价格比、技术发展能力以及农业供暖辅助设备等因素影响较大。现阶段,常见的工业余热供热路径包括热交换器技术、热泵技术、蒸汽再压缩技术,常见的余热发电路径包括蒸汽透平、卡林那循环、有机朗肯循环、热电、压力差、闪蒸^[48, 55-58]等。在工业固废利用方面,如粉煤灰和矿渣可以加工成建筑材料或用于土壤改良。这种再利用路径有效减少了废弃物堆积问题,同时也为农业提供了有价值的资源。此外,工业企业产生大量的有机废弃物(如果渣、糖蜜、废酵母)可以作为有机肥生产的原料。在工业废水利用方面,废水经过物理、化学和生物处理后可以用于农业灌溉,不仅降低了工业对水资源的需求,还减少了废水对环境的污染。当前,在工农协同模式中应用最广泛的当属余热供暖路径,余热发电模式次之,固废生产、废气促产路径由于协同成本较高,现阶段应用较少。

农业源路径多样化特征明显^[59-64]。生物质燃料制备是当前应用最广泛的路径,也是生物质供热路径、生物质发电路径的基础。根据所制备燃料的类型可进行以下划分:(1)固体燃料制备。农业作物秸秆、作物枝叶、作物残渣等可直接利用的生物质资源,经“粉碎-压缩-黏合”制备高密度固体燃料。(2)气体燃料制备。不限于厌氧发酵生成的沼气及处理后获得的氢气、合成气气体燃料。(3)液体燃料制备。主要包括生物乙醇、生物柴油^[65-67]。生物炭生产作为一种新兴的协同路径,通过将农业废弃物转化为生物炭,可助力工业土壤改良、污染

物吸附。通过农业生产固碳也是当前农业源协同路径之一,农业生产大量吸收工业碳排放,协同工业减排的同时还可增强作物生长活力。当前阶段生物质供热、生物质发电、生物质燃料制备技术已趋于成熟,但生物炭生产、生物质工业材料生产、农业生产 CO₂ 吸收受到生产技术、碳捕集技术高成本的影响,尽管研究日益活跃但实际推广存在一定困难^[66, 68-69]。

通过对现有文献的梳理,发现由于当前工农协同发展模式的协同路径研究处于发展阶段,还存在以下不足:工农协同发展模式协同路径研究往往缺乏对区域资源、气候、产业结构等差异的量化研究;工农协同发展模式路径选择较为单一,集中在少数几个典型的协同路径(如余热利用、生物质燃烧供热等);对新兴协同路径的探索不足,限制了模式的多样化发展,未能充分发掘不同产业的协同发展潜力。

3 协同模式评价研究

3.1 研究方法

针对当前主要工农协同模式,研究方法主要有数值仿真、案例分析、情境分析、投入产出分析及网络分析等。

数值仿真是模式应用落地的研究基础,可以识别潜在风险、优化协同方案,常用于工农协同模式的效果评价与内在机理研究^[70-71]。在效果评价方面,文献[72]基于供需特征分析、考虑多元产业间协同,建立了乡村多能源综合体的能源需求模型,基于仿真结果对循环路径的优化效果进行了评估与分析。在机理研究方面,文献[73]开发了一个模型,在考虑气候变化的前提下,评估了温室和其他农业消费者对工业废热的使用效果,该模型可直接反映热能供应商和热能消费者组织的成本效应和相关收益/损失;文献[74]为量化工业余热的利用优势,通过 EnergyPlus 仿真建模进行了不同供能方式耗电量、效率的对比;文献[75]开发了一种建模工具,分析工业协同的热经济合理性,评估废热发电和废热温室供暖同时进行的可能性;文献[76]基于空间分析构建了一种包括工业废热利用模型和温室能源需求模型的仿真程序,基于仿真结果筛选了最佳协同路径。基于上述研究发现,开展效果评价时,需提升模型的适用性,以便校准假设与实际偏差;开展机理研究时,应重视动态演变,才可以实

现精准预判趋势与潜在问题发掘。

案例分析研究是模式推广研究过程中的重要方法,可以验证理论的适用性和解释力,并为理论提供反馈,常用于评估模式应用的可行性。文献[77]研究发现,在法国的一个低温工业废水耦合热泵的温室加温案例中,废水余热可成功满足番茄、黄瓜、花卉和草莓等作物的热需求;文献[78]针对一个公社熔铝厂烟道余热温室加温案例进行了分析,评估了案例内余热加温效果。基于上述研究发现,在可行性评估时应充分考虑案例时效性与地域局限性。

情境分析作为模式动态评估的重要手段,可客观、直接反映协同状态,常用于评估模式在不同发展状态下的应用效果。文献[71]基于构建的能源综合体框架,进行了不同协同比例下的多情境能源成本对比;文献[72]基于多能源系统规划模型,对比了不同情境下的废弃物处理效率;文献[79]利用所构建的农工共生网络,分析了“参考、短期、中期和长期”4种情境下废物流的利用情况;文献[80]所提出的一种“投资分红+劳务合作”的农-企协同情境,具有显著的多方收益提升效果。基于上述研究发现,在动态效果评估时务必考虑政策突变、市场异动等影响因素,避免评估过度理想化。

投入产出分析对模式发展的相关政策制定具有指导意义,能够量化资源流动与利用效率,常用于整体协同效率评估。中国普定县为深入构建工农生态产业,引入了多家研究公司进行循环经济规划,在此过程中详细分析了其经济性投入与预期产出情况^[38];基于微藻生产生物柴油的可持续性,文献[34]归纳了当前工业副产品培养微藻的可持续路径;为提升艾米利亚-罗马涅工农协同模式下废弃物的利用率,文献[35]通过对12家跨产业公司投入产出信息进行统计,评估了整体协同效率。基于上述研究发现,在整体效率评估时需拓宽数据渠道,多源验证确保数据精准完整,纳入关键变量以反映收益动态变化,保证整体评估的有效性与全面性。

网络分析法对模式内交互效益的研究具有重要意义,能够揭示系统内农业与工业之间的结构和互动关系,常用于评估资源流动和协同效率。文献[35]通过构建包括5家农业上游公司、7家加工下游公司的协同效应网络,量化了包括厌氧发酵、生物质发电厂能源回收、污泥化学产品制造、生产堆肥等协同路径所带来的效益;文献[79]基于在巴西

北部地区建设的生物炼油厂研究了农工共生网络的可持续潜力,证明了在发展中国家进行生物精炼整合可以促进工农协同生产地区的可持续发展。基于上述研究发现,在资源协同效率评估中,应着力保障数据质量与完整性,防止网络结构因数据偏差而失真。

3.2 效果评价

详实、全面的评价体系有助于客观评估工农协同模式的实施效果,现阶段研究已构建了涵盖环境、能源、经济和社会等多维度的评价体系。通过多维评价,能够全面揭示工农协同模式的环境友好性、经济可行性以及社会效益,为该模式的推广与优化提供科学依据。现阶段评价指标构建情况如表2所示。

表2 当前阶段工农协同主要评价指标
Table 2 Main evaluation indicators of industry-agriculture collaboration at the current stage

属性	指标	文献
环境	SO ₂ 减排量	[38]
	CO ₂ 捕集量	[45]
	CO ₂ 减排量	[32,70,79,81-82]
	固废减排量	[35,79,82]
	废水减排量	[39]
能源	标准煤节约量	[42,83]
	节能效果	[25]
	供给面积	[42,78,83-85]
	余热回收量	[85]
	余热利用量	[32,82]
	制冷量	[31]
	建材节约量	[32,82]
	热需求满足率	[39]
经济	耗电量	[74]
	协同成本	[73]
	节水量	[39]
	成本节约率	[76]
	额外收益	[34,36,86]
	成本节约量	[30,35,38]
	总收益	[32,71-72]
社会	投资回收期	[31]
	农业生产效率	[37,77,82]
	产量	[87]
	就业岗位	[30,42]
	就业收入	[30,86]
	集体收益	[38,42]
	民众满意度	[84,86]
	土地利用效率	[82]

环境效益作为当前的发展前提,是众多学者研究的重点。文献[88]研究了火力发电厂余热热泵

系统对于温室的加热性能和节能效果,在温室面积为 $5\,280\text{ m}^2$ 时,碳减排效果可达62%;文献[45]采用技术经济和生命周期手段评价温室中生产作物和回收工业废物的协同效果,发现每 m^2 温室最多可吸收约 500 kg CO_2 当量,并基于此提出通过减少对应作物的进口,实现 CO_2 当量负排放的低碳发展路径。

能源效益提升是工农协同的重要目标。节煤量、能源利用率、供给面积及比例是发展过程中最重要的能源效益评价指标。中国国家电投日照山钢余热综合利用项目中,大规模利用了钢铁公司高炉冲渣水等工业余热,通过多级换热手段可满足 120万 m^3 养殖水体用热需求,实现年节约标准煤 $8.58\text{万 t}^{[83]}$;中国察右前旗现代农业产业园成功实现了通过工业余热满足冬季80%左右的供热需求,显著提升了能源利用效率^[39];文献[89]通过对枣庄市某水泥厂余热回收系统进行改造,利用吸收式热泵、集热罩换热器、冷却器盘管换热器3种设备对4种工业余热进行了全面回收,整体余热利用率可达96.43%。

经济效益是工农协同模式发展的内在动力。协同模式下的成本节约可带动总收益的提升,同时可缩短投资回收期。文献[88]发现利用火力发电厂余热耦合热泵的温室加热系统,可使温室供热成本降低87%;文献[71]研究的多维协同情境,可使能源成本显著降低,区域整体收益可提升20%左右;文献[72]基于供需特征分析、考虑多元产业间协同,建立的综合能源需求模型可将垃圾处理收益提升6%以上;文献[75]研究了利用不同配置的有机朗肯循环,改善农业温室和工业废热源之间工业共生的方案,并将所提案例研究的回收期缩短至5 a内;文献[89]研究表明,工农协同模式耦合农业错峰生产模式,可实现 1.5亿元/a 的产值,产业园每亩可实现30万元的产值;文献[90]研究发现,在意大利超过90%的废热回收项目投资回收期都可在3 a以下。

社会效益是工农协同模式发展的内在要求,就业岗位、集体收益是协同过程不可忽视的社会效益^[42, 84]。中国枣庄智慧农业产业园利用工业废弃物提升生产效益,初次投资5亿元、占地600亩的协同产业园建成后年销售收入可达1.5亿元,可解决150余人的就业问题^[30];中国兰陵县墨铸管公司通过向农业部门出售蒸汽余热(15万 t/a)等手段,实现了企业产值3.6亿元,利税2 000万元^[32];中国聊

城信发农业产业园的186个樱桃种植温室,利用电厂粉煤灰加工的高保温性环保砌块建设而成,将土地利用效率提升至93.3%^[82];文献[89]研究的水泥厂余热全面回收利用路径,可提升工业产值至3亿元,利税6 000万元,其中智慧农业园项目可实现产值1.5亿元。

通过对当前工农协同模式评价过程中研究方法、研究体系及评价效果的文献梳理,在证明了协同模式发展潜力巨大、就地改造风险小等特点的同时,不难发现协同模式在研究方法、评价体系中还存在一些不足:(1)现有协同模式研究仅局限于路径设计阶段、路径实施阶段、路径优化阶段的某一阶段,致使各阶段之间的衔接和整体性不足,没有对该模式整个生命周期进行科学评估;(2)评价大多采用静态评价,无法动态反映协同发展模式的长期影响和随时间变化的绩效表现;(3)评价需深入考虑时间因素及长期效果,现阶段对环境效益和经济回报的长期评估仍存在不足。

4 协同模式前景展望

工农协同模式的发展前景广阔,尤其在全球面临资源紧缺、环境压力增大的背景下,其推广的必要性愈加凸显。基于对现有成果的总结及不足的归纳,本研究分别在路径构建、研究方法、效果评价三方面指出了未来的研究方向。

(1) 路径构建方面。一是加强协同资源量化方面的研究,整合多源数据,量化并深度挖掘其内在联系与潜在协同机会,为路径设计提供精准的数据基础;二是加强多层次工农协同网络体系的研究,突破单一的线性协同路径思维,构建多层次、多节点的工农协同网络体系;三是引导地区与企业优先考虑现有产业的协同潜力,通过共享资源和基础设施实现协同发展。

(2) 研究方法方面。一是增强分阶段方法研究,打破各研究阶段之间的信息壁垒,根据不同研究阶段选择不同的研究方法,形成生命周期研究模式;二是增强模式优化研究,针对已实施的协同模式,引入智能优化算法等方法加强工农协同模式效益的持续优化。

(3) 效果评价方面。一是构建全年动态评价体系,增强、细化不同时间节点及不同时间维度的协同效果评价,加强协同效益的动态变化机理研究;二是探讨不同系统在不同应用场景下的适用性,在

评价时应加强不同地区、不同政策环境下的表现差异分析。

5 结论

本研究基于对工农协同低碳发展模式的界定,通过对当前多维效益评价视角下工农协同模式研究成果在协同路径、研究方法、效果评价方面的系统性分析与归纳,得到当前效益评价视角下该模式研究的主要特点及不足,基于此指明了发展方向并进行了展望。研究的创新性贡献主要体现在对多维效益评价视角下模式研究现状的归纳、指出当前研究不足及针对性建议两方面。研究发现,工农协同模式具有“多路径、高潜力、低风险”的特点,在环境、经济、社会等层面都具有显著优势。其中,余热发电与生物质发电是应用最广泛的路径,数值仿真与案例分析是最常用的研究方法,环境评价与经济评价是备受重视的评价内容。

但现阶段工农协同低碳发展模式仍存在路径构建单一、研究过程整合弱及效果评价动态性不足等问题。基于此,在协同路径研究层面,应加强协同资源量化体系的构建以及多协同路径的耦合研究;在效益评价视角的模式研究方法层面,应综合各阶段特点,进行分阶段多方法协同的研究;在效益评价层面,应加强长时、动态评价。同时,还应探讨不同系统在不同应用场景下的适用性,在评价时应加强不同地区、不同政策环境下的表现差异分析。以上研究成果,可为该领域研究的进一步深化和拓展提供有益的学术参考,同时能为其他类型的产业协同(如服务业、建筑业等)提供方法基础。

参考文献:

- [1] OJALA M, CUNSOLO A, OGUNBODE C A, et al. Anxiety, worry, and grief in a time of environmental and climate crisis: a narrative review [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2021, 46(1): 35-58.
- [2] TESKE S. The 'Global Stocktake' and the remaining carbon budgets for G20 countries to limit global temperature rise to +1.5 °C [J]. *SN Applied Sciences*, 2023, 5(10): 256.
- [3] REN F R, TIAN Z, CHEN H S, et al. Energy consumption, CO₂ emissions, and agricultural disaster efficiency evaluation of China based on the two-stage dynamic DEA method [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(2): 1901-1918.
- [4] KAMYAB H, SABERIKAMARPOSHI M, HASHIM H, et al. Carbon dynamics in agricultural greenhouse gas emissions and removals: a comprehensive review [J]. *Carbon Letters*, 2024, 34(1): 265-289.
- [5] LIU Z, DENG Z, DAVIS S J, et al. Global carbon emissions in 2023 [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5(4): 253-254.
- [6] ARORA C, KAMAT A, SHANKER S, et al. Integrating agriculture and industry 4.0 under "agri-food 4.0" to analyze suitable technologies to overcome agronomical barriers [J]. *British Food Journal*, 2022, 124(7): 2061-2095.
- [7] BILGEN S, SARIKAYA I. Utilization of forestry and agricultural wastes [J]. *Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects*, 2016, 38(23): 3484-3490.
- [8] KUMAR SARANGI P, SUBUDHI S, BHATIA L, et al. Utilization of agricultural waste biomass and recycling toward circular bioeconomy [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(4): 8526-8539.
- [9] PENG X X, JIANG Y S, CHEN Z H, et al. Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy, fertilizers, food and construction materials, and economic feasibility: a review [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(2): 765-801.
- [10] 中华人民共和国农业农村部.《农业农村部关于落实党中央国务院2023年全面推进乡村振兴重点工作部署的实施意见》(农发〔2023〕1号) [EB/OL]. (2023-02-03) [2024-11-18]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-02/22/content_5742671.htm
- [11] 中华人民共和国农业农村部.《关于加快农业发展全面绿色转型促进乡村生态振兴的指导意见》(农规发〔2024〕27号) [EB/OL]. (2024-12-26) [2025-05-22]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202412/content_6995343.htm
- [12] 中华人民共和国国务院.《乡村全面振兴规划(2024—2027年)》 [EB/OL]. (2025-01-22) [2025-05-22]. https://www.gov.cn/gongbao/2025/issue_11846/202502/content_7002798.html
- [13] KOHNE T, SCHERFF J N, WEIGOLD M. Cascaded-heat merit order for industrial energy systems to evaluate district heating potential [J]. *Production Engineering*, 2023, 17(2): 307-318.
- [14] WANG X T, ZHANG M. The thermal economy of a circulating medium and low temperature waste heatrecovery system of industrial flue gas [J].

- International Journal of Heat and Technology, 2021, 39 (5): 1680-1688.
- [15] World Steel Association. Steel statistical yearbook [EB/OL]. (2022-11-24) [2024-11-18]. <https://worldsteel.org/media/press-releases/2024/2024-steel-statistical-yearbook-published/>
- [16] WANG N, CHAI X X, GUO Z Q, et al. Hierarchy performance assessment of industrial solid waste utilization: tracking resource recycling and utilization centers in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(35): 83330-83340.
- [17] 国家统计局. 中国电力消费量 [EB/OL]. (2024-09-25) [2024-11-18]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01&zb=A0700&sj=2022>
- [18] ZHANG W, WANG Y R, SONG M L, et al. Industrial structure upgrading, technological innovation and comprehensive utilisation of solid waste [J]. Technology Analysis & Strategic Management, 2024, 36 (11): 3637-3652.
- [19] FAO. Food and agriculture organization statistical yearbook [EB/OL]. (2025-01-08) [2025-05-22]. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/d784864f-7f28-49d2-903e-6680d09a9d97/content/cd2971en.html>
- [20] FAO. Global forest resources assessment [EB/OL]. (2020-07-15) [2024-11-18]. <https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/en/>
- [21] CHANG C C, LI R D. Agricultural waste [J]. Water Environment Research, 2019, 91(10): 1150-1167.
- [22] TANG X, FENG J W, MAO X Y, et al. Will technological innovation uncertainty affect the distribution of benefits from low-carbon innovation activities in industrial clusters? a study based on gray Shapley values [J]. Managerial and Decision Economics, 2024, 45(4): 1743-1755.
- [23] GUO H P, YI X, PAN C L, et al. Analysis on the temporal and spatial features of the coupling and coordination of industrialization and agricultural green development in China during 1990-2019 [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(16): 8320.
- [24] 杨旭,周涛,汝小龙,等. 核电厂温排水余热综合利用模式研究 [J]. 电力建设, 2013, 34(6): 56-59.
YANG Xu, ZHOU Tao, RU Xiaolong, et al. Comprehensive utilization mode of thermal discharge residual heat in nuclear power plants [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(6): 56-59.
- [25] 徐火根, 罗威. 核电厂温排水余热利用与集中供热供冷研究 [J]. 流体机械, 2024, 52(8): 100-104.
XU Huogen, LUO Wei. Research on utilization of waste heat from nuclear power plant and central heating and cooling [J]. Fluid Machinery, 2024, 52(8): 100-104.
- [26] GIORDANO L, BENEDETTI M. A methodology for the identification and characterization of low-temperature waste heat sources and sinks in industrial processes: application in the Italian dairy sector [J]. Energies, 2022, 15(1): 155.
- [27] BEATRICE O. Waste heat from BillerudKorsnäs enables green industrial project [EB/OL]. (2021-10-28) [2024-11-18]. <https://www.electronicsspecifier.com/industries/alternative-energy/waste-heat-from-billerudkorsn-s-enables-green-industrial-project>
- [28] SNIPES R L, COCKRUM L S, KEEVER S L, et al. TVA's waste heat program from technology developments to waste heat parks [J]. Proceedings of the American Power Conference, 1979, 41: 811-814.
- [29] HOFMANN R. Waste heat utilization of nuclear power stations [J]. Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, 1977, 68(16): 834-838.
- [30] 枣庄市人民政府. 全市乡村振兴暨脱贫攻坚工作现场推进会“观摩项目之七:华沃智慧农业产业园项目 [EB/OL]. (2020-11-10) [2024-11-18]. http://www.zaozhuang.gov.cn/ywdt/zzyw/202011/t20201110_1303668.html
- [31] 李金彬, 郭清华, 宋其非. 厂房余热改良农业大棚供热的热泵新技术实践 [J]. 建筑节能 (中英文), 2022, 50(8): 130-135.
LI Jinbin, GUO Qinghua, SONG Qifei. Retrofitted heat pump improving agricultural greenhouse heating with waste heat of the plant [J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(8): 130-135.
- [32] 兰陵县人民政府. 关于加快乡村产业振兴的提案的答复 [EB/OL]. (2024-08-12) [2024-11-18]. <http://www.lanling.gov.cn/info/1070/1267462.htm>
- [33] MIERNICKI E A, HEALD A L, HUFF K D, et al. Nuclear waste heat use in agriculture: history and opportunities in the United States [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 267: 121918.
- [34] MOSHOOD T D, NAWANIR G, ARIPIN N M, et al. Lean business model canvas and sustainable innovation business model based on the industrial synergy of microalgae cultivation [J]. Environmental Challenges, 2022, 6: 100418.
- [35] CUTAIA L, SCAGLIARINO C, MENCHERINI U, et al. Industrial symbiosis in Emilia-Romagna region: results from a first application in the agroindustry sector

- [J]. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 2014, 2(1): 11-36.
- [36] 介休市人民政府. “千万工程”调研行 | 山西介休: 工业反哺 激活乡村振兴“新引擎”[EB/OL]. (2024-08-12) [2024-11-18]. https://www.jiexiu.gov.cn/zwgk/bmxxgkml/kfqxzd/21jxmsz/fdzdnrgkmsz/gzdt21jxmsz/content_41654
- [37] 韩利红, 何余勇, 尹健康, 等. 烟草废弃物发酵制取有机肥及其在柑橘生产上的应用效果[J]. *肥料与健康*, 2023, 50(6): 53-57.
HAN Lihong, HE Yuyong, YIN Jiankang, et al. Preparation of organic fertilizer from tobacco waste and its application in citrus production [J]. *Fertilizer and Health*, 2023, 50(6): 53-57.
- [38] 安顺市人民政府. 安顺普定: “三个突出”助推绿色低碳循环发展[EB/OL]. (2024-10-23) [2024-11-18]. https://www.anshun.gov.cn/xwzx/xqzc/202410/t2024-1023_85968802.html
- [39] 乌兰察布市人民政府. 察右前旗: 创新利用企业余热和废水, 节能又环保[EB/OL]. (2024-01-05) [2024-11-18]. <https://www.wulanchabu.gov.cn/sqnggfwwqyxx/1463645.html>
- [40] 郝仪佳, 夏咏, 张扬, 等. 西北地区水-能源-粮食系统耦合协调发展时空动态及预测分析[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3): 251-259.
HAO Yijia, XIA Yong, ZHANG Yang, et al. Research and forecast analysis on the coupling coordinated development of Water-Energy-Food system in Northwest China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3): 251-259.
- [41] 邓秀新. 现代农业与农业发展[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2014, 33(1): 1-4.
DENG Xiuxin. Modern agriculture and agricultural development [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2014, 33(1): 1-4.
- [42] 李西玉. 产业融合视角下新泰市现代农业产业园现状及融合发展[J]. *农业科技通讯*, 2023(9): 7-10.
LI Xiyu. The present situation and integrated development of Xintai City modern agricultural industrial park from the perspective of industrial integration [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2023(9): 7-10.
- [43] QIAN R, GUO R, YANG Q X, et al. Can straw recycling achieve sustainable agriculture at the smallholder level? a case in a semi-arid region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 439: 140859.
- [44] JASIULEWICZ M. Possibility of liquid Bio-Fuels, electric and heat energy production from biomass in Polish agriculture [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2010, 19(3): 479-483.
- [45] MCDONALD L J, PINTO A S S, NAVEED ARSHAD M, et al. Synergy between industry and agriculture: techno-economic and life cycle assessments of waste recovery for crop growth in glasshouses [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 432: 139650.
- [46] KOO W K, SULAIMAN M A, SUBKI N S, et al. Treatment of oily waste using activated carbon from agriculture waste [J]. *Materials Science Forum*, 2016, 840: 432-437.
- [47] 金涌, 罗志波, 胡山鹰, 等. “第六产业”发展及其化工技术支撑[J]. *化工进展*, 2017, 36(4): 1155-1164.
JIN Yong, LUO Zhibo, HU Shanying, et al. Development of the "Sixth Industry" and its support by chemical technology [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(4): 1155-1164.
- [48] SONG J L, ZHANG H Y, ZHANG Y M, et al. Research progress on industrial waste heat recycling and seasonal energy storage [J]. *AIMS Energy*, 2025, 13(1): 147-187.
- [49] CHRISTODOULIDES P, AGATHOKLEOUS R, ARESTI L, et al. Waste heat recovery technologies revisited with emphasis on new solutions, including heat pipes, and case studies [J]. *Energies*, 2022, 15(1): 384.
- [50] TUREK V, KILKOVSKÝ B, DAXNER J, et al. Industrial waste heat utilization in the European union: an engineering-centric review [J]. *Energies*, 2024, 17(9): 2084.
- [51] OYEDEPO S O, FAKEYE B A. Waste heat recovery technologies: pathway to sustainable energy development [J]. *Journal of Thermal Engineering*, 2021, 7(1): 324-348.
- [52] ONONOGBO C, NWOSU E C, NWAKUBA N R, et al. Opportunities of waste heat recovery from various sources: review of technologies and implementation [J]. *Heliyon*, 2023, 9(2): e13590.
- [53] OCHIENG A O, MEGAHED T F, OOKAWARA S, et al. Comprehensive review in waste heat recovery in different thermal energy-consuming processes using thermoelectric generators for electrical power generation [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 162: 134-154.
- [54] BEALL S E, MILLER A J. Urban utilization of extracted heat and waste heat from central station power plants [R]. Oak Ridge, USA: Oak Ridge National Lab, 1972.

- [55] BHUKESH S K, GAWRE S K, KUMAR A. Review on advancement in solar and waste heat based thermoelectric generator [J]. *Energy Sources Part A: Recovery Utilization and Environmental Effects*, 2023, 45 (2): 4982-5002.
- [56] KONG L X, WU Z B, JIANG J L, et al. Characterization of a thermoelectric system based on a solar dish Stirling engine: a review [J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2024, 8(19) : 4399-4428.
- [57] ARJUNAN P, GNANA MUTHU J H, SOMANASAR RADHA S L, et al. Selection of working fluids for solar organic Rankine cycle: a review [J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(14) : 20573-20599.
- [58] GAROFALO E, BEVIONE M, CECCHINI L, et al. Waste heat to power: technologies, current applications, and future potential [J]. *Energy Technology*, 2020, 8 (11): 2000413.
- [59] POSKROBKO S, LACH J, KROL D. Research of calorimetric properties of some selected industrial wastes and fuels formed from wastes [J]. *Energetyka*, 2010, (3): 170-177.
- [60] WINANGUN K, MALYADI M, MASYKUR F, et al. Drying agricultural waste briquettes using microwave method [C] // Sixth International Conference of Mathematical Sciences (ICMS 2022). Istanbul, Türkiye: AIP, 2023: 040006.
- [61] GKOTSIS P, KOUGIAS P, MITRAKAS M, et al. Biogas upgrading technologies: recent advances in membrane-based processes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(10) : 3965-3993.
- [62] KUMAR J, VYAS S. Comprehensive review of biomass utilization and gasification for sustainable energy production [J]. *Environment Development and Sustainability*, 2025, 27(3) : 1-40.
- [63] ANATASYA A, UMIATI N A K, SUBAGIO A. The effect of binding types on the biomass briquette calorific value from cow manure as a solid energy source [J]. *E3S Web of Conferences*, 2019, 125(2) : 13004.
- [64] NANDITTA R V, GOYAL K, NAGULASH RAHUL B, et al. Review on process development and challenges in biomass pyrolysis [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2054(1) : 012043.
- [65] HASSAN T, RAHMAN M M, RAHMAN M A, et al. Opportunities and challenges for the application of biodiesel as automotive fuel in the 21st century [J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2022, 16(5) : 1353-1387.
- [66] KHERA A S, EL-GENDI H, EL-FAKHARANY E M, et al. A comprehensive overview of lignocellulosic biomass exploiting for sustainable bioethanol production: recent advances and emerging challenges towards commercial implementation [J]. *Egyptian Journal of Chemistry*, 2024, 67(13) : 2053-2072.
- [67] SABOOHI Z, HOSSEINI S E. Advancements in biogas production: process optimization and innovative plant operations [J]. *Clean Energy*, 2025, 9(2) : 52-65.
- [68] TEIXEIRA R S, SILVA A S, MOUTTA R O, et al. Biomass pretreatment: a critical choice for biomass utilization via biotechnological routes [J]. *BMC Proceedings*, 2014, 8(4) : O34.
- [69] ZHANG C Q, NIE J H, YAN X H. Estimation of biomass utilization potential in China and the impact on carbon peaking [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(41) : 94255-94275.
- [70] 张露青, 陈爱康, 顾玖, 等. 基于多能源网络路由算法的区域能源广域网协同规划 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(23) : 7499-7511.
- ZHANG Luqing, CHEN Aikang, GU Jiu, et al. Regional energy wide area network planning based on routing algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(23) : 7499-7511.
- [71] 滕云, 孙鹏, 张明理, 等. 基于农村新型产业结构的“能源-环境-经济”鲁棒优化模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(2) : 614-631.
- TENG Yun, SUN Peng, ZHANG Mingli, et al. Robust optimization model of "energy-environment-economy" based on the new rural industrial structure [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(2) : 614-631.
- [72] 李民, 刘钦浩, 赵冠, 等. 考虑多元产业协同的乡村综合能源系统规划 [J]. *中国电力*, 2022, 55(8) : 14-22.
- LI Min, LIU Qin hao, ZHAO Guan, et al. Rural integrated energy system planning considering multi-industry synergy [J]. *Electric Power*, 2022, 55(8) : 14-22.
- [73] FRANZ D, WEISE H. Multicriteria decision making in energy links between industrial and intensive agricultural production processes [J]. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Ilmenau*, 1987, 33(6) : 147-152.
- [74] HYUN I, LEE J, YOON Y, et al. The potential and utilization of unused energy sources for large-scale horticulture facility applications under Korean climatic conditions [J]. *Energies*, 2014, 7(8) : 4781-4801.
- [75] AHMADPOUR M, ROSHANDEL R, SHAFII M B. The effect of organic Rankine cycle system design on energy-based agro-industrial symbiosis [J]. *Energy*

- Efficiency, 2024, 17(5): 39.
- [76] REZAEI F, BURG V, PFISTER S, et al. Spatial optimization of industrial symbiosis for heat supply of agricultural greenhouses [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2024, 28(6): 1507-1523.
- [77] BALLIGAND P, LE GOUELLEC P, DUMONT M, et al. Experience gained in France on heat recovery from nuclear plants for agriculture and pisciculture [J]. *Nuclear Technology*, 1978, 38(1): 90-96.
- [78] 熊助功, 王化, 王林兴. 利用工厂余热加温温室栽培春黄瓜[J]. *上海农业科技*, 1980(6): 31-33.
- [79] SANTOS V E N, MAGRINI A. Biorefining and industrial symbiosis: a proposal for regional development in Brazil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 19-33.
- [80] 济宁市人民政府. 山东邹城: 蓄足村集体经济发展“源头活水” [EB/OL]. (2023-11-17) [2024-11-18]. http://www.zoucheng.gov.cn/art/2023/11/17/art_72291_2807806.html?xxgkhide=1
- [81] ALFARO J, MILLER S. Applying industrial symbiosis to smallholder farms[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(1): 145-154.
- [82] 茌平区人民政府. 一颗石子的六次变身:《山东新闻联播》播出信发集团发展循环经济典型经验[EB/OL]. (2024-06-03) [2024-11-18]. http://www.chiping.gov.cn/channel_64e8b63ed064d72c7b49859b/doc_665d65b-52f88c21055022469.html
- [83] 日照市人民政府. 东港区: 收集钢工业余热温暖八个社区的居民 [EB/OL]. (2023-12-15) [2024-11-18]. http://www.rizhao.gov.cn/art/2023/12/15/art_208352_10477796.html
- [84] 白雪. 加快供热领域碳减排应从源头降低碳排放强度 [N]. *中国改革报*, 2025-01-10(004).
- [85] VOURDOUBAS J. Possibilities of using industrial waste heat for heating greenhouses in northern Greece [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2018, 10(4): 116.
- [86] 伏山镇人民政府. 工业反哺农业 助力乡村振兴[EB/OL]. (2024-02-24) [2024-11-18]. <https://sdwx.iqilu.com/share/YS0yMS0xNTQwNzQ5Mg==.html>
- [87] LORIMER P, MILNER M, TOMSON F. Using waste and low carbon heat to power protected horticulture projects [C]// 11th International Conference on Renewable Power Generation-Meeting Net Zero Carbon (RPG 2022). London, UK: IET, 2022: 58-59.
- [88] KANG Y K, KANG S W, PAEK Y, et al. Heating performance analysis of the heat pump system for agricultural facilities using the waste heat of the thermal power plant as heat source [J]. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 2017, 26(4): 317-323.
- [89] 甘胜滕, 赵猛, 李琳, 等. 枣庄某水泥生产线余热农业高效利用实例分析[J]. *建筑节能(中英文)*, 2023, 51(5): 91-96.
- GAN Shengteng, ZHAO Meng, LI Lin, et al. An example of efficient utilization of waste heat from a cement production line in Zaozhuang, Shandong [J]. *Building Energy Efficiency*, 2023, 51(5): 91-96.
- [90] GIORDANO L, BENEDETTI M, SALVIO M. Estimating the potential for waste heat recovery in Italian dairy sector using a bottom-up approach and data from energy audits [J]. *Sustainability*, 2023, 15(12): 9719.

(编辑: 郭少华)