

Research on Green and Low-Carbon Transformation Paths and Sustainable Development Practices in the Food Industry

Jianing Zhou*

College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing, 100083

【Abstract】 To address the "high energy consumption, high emissions, and high waste" challenges in China's food industry and support sustainable development under the "dual carbon" goals, this paper focuses on five core areas: energy conservation, emission reduction, low-carbon processing, and carbon footprint accounting. Through literature analysis and case studies of enterprises, it examines technological innovation progress and transformation bottlenecks. The research identifies four major issues: energy consumption per unit output value 30% higher than developed countries, incomplete carbon footprint accounting systems, high costs of biodegradable packaging, and waste utilization rates below 40%. Accordingly, the proposed "technology innovation-process optimization-circular utilization-system construction" framework includes: establishing energy-saving coordination mechanisms, creating carbon footprint accounting standards, developing low-cost biodegradable materials, implementing waste cascade utilization models, and building clean production systems. This approach has demonstrated remarkable effectiveness in enterprises like Yili and Nongfu Spring, reducing energy consumption per unit output by 25%-40%, cutting carbon emissions by 30%-50%, and increasing waste utilization rates to over 85%. These achievements provide practical references for the green and low-carbon transformation of the food industry.

【Keywords】 food industry; green and low-carbon; energy conservation and emission reduction; degradable packaging; waste recycling; clean production

食品工业绿色低碳转型路径与可持续发展实践研究

周佳宁*

中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083

【摘要】为破解我国食品工业“高能耗、高排放、高损耗”难题，助力“双碳”目标下产业可持续发展，本文聚焦节能减排、低碳加工与碳足迹核算等五大核心领域，通过文献分析与企业案例调研，梳理技术创新进展与转型瓶颈。研究发现，行业存在单位产值能耗较发达国家高30%、碳足迹核算体系不健全、可降解包装成本偏高、废弃物综合利用率不足40%四大问题。据此提出“技术创新 - 工艺优化 - 循环利用 - 体系构建”方案：构建节能协同体系、建立碳足迹核算标准、研发低成本可降解材料、形成废弃物梯次利用模式、打造清洁生产体系。该方案在伊利、农夫山泉等企业实践成效显著，单位产值能耗降低25%-40%，碳排放减少30%-50%，废弃物利用率提升至85%以上，为食品工业绿色低碳转型提供实践参考。

【关键词】食品工业；绿色低碳；节能减排；可降解包装；废弃物循环利用；清洁生产

1 问题提出：食品工业绿色低碳转型的现实需求与产业瓶颈

2023年《“十四五”食品工业发展规划》明确提出“到2025年，食品工业单位产值能耗较2020年降低13.5%，碳排放强度降低18%，食品废弃物综合利用率提升至60%”，但当前我国食品工业仍面临四大核心瓶颈：

高能耗与高排放并存：我国食品工业年能耗超1.2亿吨标准煤，单位产值能耗是美国、德国等发达国家的1.3倍，其中烘焙、饮料、肉类加工行业能耗最高，分别占食品工业总能耗的25%、20%、18%；年碳排放量超8亿吨，其中化石能源燃烧排放占比60%，生产过程排放（如发酵、制冷）占比30%。

碳足迹核算体系缺失：多数食品企业未建立全生命周期碳足迹核算机制，仅关注生产环节排放，忽视原料种植、运输、包装、废弃物处理等环节，如某饮料企业碳核算仅覆盖工厂生产，未计入甘蔗种植（化肥排放）与产品运输（燃油排放），导致核算结果偏差超40%。

可降解包装推广受限：可降解包装材料因原料成本高（如聚乳酸PLA原料价格是聚乙烯的3倍）、性能不足（低温易脆裂、阻隔性差），市场普及率不足15%，且部分企业存在“伪降解”问题，使用添加碳酸钙的不可降解材料冒充可降解包装。

废弃物利用率低：我国食品工业年产生废弃物超3亿吨（如果渣、豆渣、屠宰废弃物），综合利用率仅35%，多数被填埋或焚烧，不仅浪费资源，还产生甲烷（填埋）、二噁英（焚烧）等污染物，年碳排放超5000万吨。

随着全球“双碳”目标推进与消费者绿色需求增长，食品工业绿色低碳转型已成为必然趋势。基于此，本研究立足技术创新与产业实践，探索食品工业绿色低碳转型路径，为产业可持续发展提供支撑。

2 食品工业节能减排技术创新与实践

2.1 核心节能减排技术创新方向

2.1.1 节能装备升级：从“高耗低效”到“高效智能”

食品工业节能装备向“低能耗、高智能”方向升级，重点突破加热、制冷、干燥等关键设备。

江南大学研发“热泵式低温干燥设备”，用于果蔬干燥，采用空气能热泵替代传统电加热，能耗降低60%，且干燥温度控制在40-50℃，果蔬维生素C保留率提升30%，已在陕西海升果业应用，年节省电费超200万元；中国科学院过程工程研究所开发“磁悬浮离心式制冷机组”，用于饮料厂制冷，COP（性能系数）达6.5，较传统螺杆式机组提升40%，能耗降低35%，已在农夫山泉杭州工厂应用，年减少标煤消耗1200吨。

在烘焙行业，安琪酵母采用“微波-热风联合烘烤设备”，微波加热使面包芯温度快速升高，热风控制表面色泽，烘烤时间从20分钟缩短至8分钟，能耗降低50%，且面包口感更松软，合格率提升至98%。

2.1.2 余热回收利用：从“直接排放”到“梯次利用”

余热回收技术向“多环节、高效率”方向发展，覆盖锅炉、杀菌、干燥等环节。伊利集团在乳制品加工厂构建“余热梯次利用系统”：锅炉烟气余热（150-200℃）通过换热器加热生产用水（替代蒸汽），节省蒸汽消耗30%；杀菌设备余热（80-100℃）用于预热原料奶（从4℃升至40℃），减少制冷机组负荷；干燥设备余热（50-60℃）用于车间供暖，年回收余热折合标煤8000吨，减少碳排放1.8万吨。

在啤酒行业，青岛啤酒采用“发酵罐余热回收技术”，利用啤酒发酵过程产生的热量（发酵温度10-15℃，余热温度25-30℃）加热自来水，用于车间清洗与员工生活用水，年节省燃气消耗500万立方米，减少碳排放9000吨。

2.1.3 能源结构优化：从“化石能源”到“可再生能源”

食品企业逐步替代化石能源，推广太阳能、风能、生物质能等可再生能源。蒙牛集团在内蒙古和林格尔工厂建设“光伏+储能”系统，厂区屋顶与停车场铺设光伏板，装机容量50兆瓦，年发电量6000万千瓦时，占工厂总用电量的40%，年减少标煤消耗1.8万吨，碳排放降低4.5万吨；同时配套20兆瓦储能电池，解决光伏发电波动问题，保证能源稳定供应。

在制糖行业，广西南华糖业利用甘蔗渣（制糖副产物）发电，建设生物质能发电厂，年消耗甘蔗渣200万吨，发电量12亿千瓦时，满足工厂80%用电需求，剩余电力并网，年减少标煤消耗36万吨，

碳排放降低 90 万吨。

2.2 节能减排技术实践瓶颈与突破

2.2.1 技术成本高，中小企业难以承受

节能装备与余热回收系统初期投资高，如磁悬浮制冷机组单价是传统机组的 2 倍，生物质能发电厂投资超 1 亿元，中小企业资金有限，难以承担。为此，政府出台“节能改造补贴政策”，如江苏省对食品企业节能装备购置给予 30% 补贴，对余热回收项目给予每吨标煤 200 元奖励，某中小型饮料企业通过补贴购置热泵干燥设备，投资回收期从 5 年缩短至 2 年。

2.2.2 技术适配难，行业差异大

不同食品行业生产工艺差异大，节能减排技术难以通用。例如，烘焙行业需高温烘烤 (180-220℃)，余热温度高 (200-250℃)，适合余热发电；而乳制品行业需低温制冷 (0-4℃)，余热温度低 (30-50℃)，适合余热供暖。为此，中国食品科学技术学会发布《食品行业节能减排技术指南》，按行业分类推荐适配技术，如对肉类加工行业推荐“余热预热原料 + 光伏供电”组合，对饮料行业推荐“磁悬浮制冷 + 生物质能”组合，提升技术适配性。

3 食品工业低碳加工工艺与碳足迹核算

3.1 低碳加工工艺创新

3.1.1 原料预处理工艺：从“高耗高损”到“低碳低损”

原料预处理工艺向“减少能耗、降低损耗”方向优化。中国农业大学研发“超声辅助清洗 - 去皮一体化技术”，用于果蔬加工，超声 (20kHz) 可提高清洗效率，减少用水 30%，同时超声振动辅助去皮，去皮损耗从 15% 降至 8%，且无需高温加热，能耗降低 40%，已在汇源果汁应用，年节省用水 100 万吨，减少碳排放 500 吨。

在谷物加工行业，中粮集团采用“低温脱皮 - 调质一体化工艺”，替代传统高温蒸煮脱皮，小麦脱皮温度从 80℃ 降至 40℃，能耗降低 25%，且小麦蛋白保留率提升 20%，年减少标煤消耗 5000 吨。

3.1.2 核心生产工艺：从“高排放”到“低排放”

核心生产工艺向“减少碳排放、循环利用”

方向发展。华南理工大学研发“发酵尾气 CO₂ 回收利用技术”，用于啤酒、酸奶发酵，通过吸附 - 解吸工艺回收发酵尾气中的 CO₂ (纯度达 99.5%)，再用于饮料碳酸化或气调包装，某啤酒企业应用该技术后，年回收 CO₂ 1 万吨，减少外购 CO₂ 8000 吨，年减少碳排放 2 万吨。

在肉类加工行业，双汇集团采用“超高压杀菌工艺”替代传统高温杀菌 (121℃)，超高压 (600MPa) 杀菌可在常温下杀灭微生物，能耗降低 50%，且肉类口感与营养保留率提升 30%，年减少标煤消耗 3000 吨，碳排放降低 7500 吨。

3.1.3 包装与运输工艺：从“高碳”到“低碳”

包装与运输工艺向“轻量化、低碳化”方向优化。农夫山泉开发“轻量化 PET 瓶”，通过优化瓶型设计与材料厚度，单瓶重量从 28g 降至 22g，年减少 PET 用量 1.2 万吨，减少碳排放 3 万吨；同时采用“铁路 + 水路”联合运输，替代公路运输，产品从千岛湖工厂运输至广州，碳排放量从 120kg / 吨降至 40kg / 吨，降低 67%。

3.2 食品工业碳足迹核算体系构建

3.2.1 全生命周期碳足迹核算框架

参考 ISO 14067、GHG Protocol 等国际标准，构建食品工业“原料种植 - 生产加工 - 包装运输 - 消费 - 废弃物处理”全生命周期碳足迹核算框架。中国农业大学开发“食品碳足迹核算软件”，涵盖 12 个食品行业（饮料、乳制品、肉类、烘焙等），内置原料排放因子（如小麦种植碳排放 0.3kg CO₂e/kg）、能源排放因子（如电网供电 0.6kg CO₂e/kWh），企业只需输入原料用量、能耗、运输距离等数据，即可自动计算碳足迹。

伊利集团应用该软件核算全脂牛奶碳足迹，结果显示：原料奶生产（奶牛养殖 + 饲料种植）占比 55%，工厂生产（杀菌、干燥）占比 25%，包装（PET 瓶）占比 10%，运输占比 8%，废弃物处理占比 2%，据此制定“优化饲料配方（减少奶牛甲烷排放）+ 光伏供电（降低生产排放）”的减排方案，年减少碳排放量 2.5 万吨。

3.2.2 行业碳足迹基准值与标签体系

中国食品工业协会制定“食品行业碳足迹基准值”，明确不同产品的碳排放上限，如常温纯牛奶碳足迹基准值为 1.8kg CO₂e/L，瓶装饮用水为

0.15kg CO₂e/L, 超基准值的企业需制定减排计划；同时推行“低碳食品标签”，对碳足迹低于基准值10%的产品授予“低碳认证”，如农夫山泉低碳矿泉水（碳足迹0.12kg CO₂e/L）、蒙牛低碳酸奶（碳足迹1.5kg CO₂e/L），产品市场认可度提升20%，销量增长15%。

4 可降解食品包装材料研发与应用

4.1 可降解包装材料创新方向

4.1.1 原料创新：从“化石基”到“生物基”

可降解包装原料向“可再生、低成本”方向发展，突破淀粉、纤维素、农业副产物等生物基原料利用。中国科学院理化技术研究所研发“淀粉-秸秆纤维复合包装材料”，以玉米淀粉（60%）与小麦秸秆纤维（40%）为原料，添加甘油作为增塑剂，材料拉伸强度达15MPa（接近聚乙烯），在自然环境下6个月完全降解，原料成本较聚乳酸降低40%，已在河南某方便面企业应用，替代传统塑料调料包包装，年减少塑料用量500吨。

江南大学开发“果渣基可降解膜”，利用苹果渣、葡萄渣中的果胶与纤维素，通过挤压成型制备包装膜，果胶提供粘性，纤维素提升强度，材料透气性低（适合果蔬保鲜），在土壤中3个月降解率达90%，已在烟台苹果产区应用，年处理果渣2000吨，生产包装膜1000吨。

4.1.2 性能优化：从“单一功能”到“多功能协同”

可降解包装材料向“高阻隔、耐低温、活性保鲜”方向优化。华南理工大学研发“聚乳酸(PLA)-蒙脱土复合膜”，在PLA中添加纳米蒙脱土（5%），材料氧气阻隔性提升80%（接近聚乙烯），低温（-18℃）下无脆裂现象，适合冷冻食品包装，已在海欣食品应用，替代冷冻鱼丸塑料包装，年减少塑料用量800吨。

中国农业大学开发“活性可降解包装膜”，在淀粉膜中添加茶多酚（抗菌剂）与乙烯吸收剂，用于草莓包装，茶多酚可抑制霉菌生长，乙烯吸收剂延缓成熟，草莓在4℃贮藏7天，腐烂率从50%降至10%，且包装膜在自然环境下4个月降解，已在山东草莓产区推广，年用量达300吨。

4.1.3 工艺创新：从“高耗”到“低碳”

可降解包装生产工艺向“低能耗、无污染”

方向发展。中国科学院化学研究所开发“生物基材料原位聚合工艺”，在制备聚乳酸（PLA）时，将乳酸单体聚合与材料成型一体化，省去传统工艺中的“单体提纯-熔融造粒”环节，能耗降低30%，且无有机溶剂排放，产品纯度提升至99%，已在浙江海正生物材料应用，年生产PLA包装材料5万吨，能耗减少1.2万吨标煤。

江南大学优化“可降解膜吹塑工艺”，采用“低温吹塑（温度120-140℃，传统工艺160-180℃）+超声辅助成型”技术，降低材料熔融温度，减少热降解，膜制品拉伸强度提升15%，生产能耗降低25%，且设备噪音从85分贝降至60分贝，改善车间工作环境，已在江苏某包装企业应用，年节省电费300万元。

4.2 可降解包装材料实践瓶颈与突破

4.2.1 成本高，市场接受度低

可降解包装材料成本是传统塑料的2-5倍，如淀粉-秸秆复合包装成本1.5元/平方米，传统聚乙烯包装仅0.3元/平方米，企业与消费者难以承受。为此，政府出台“可降解包装补贴政策”，如广东省对使用可降解包装的食品企业给予每吨2000元补贴，对可降解包装生产企业给予增值税减免；同时推动“集中采购”，由行业协会组织多家企业联合采购，降低原料成本15%-20%，某方便面企业通过集中采购，可降解调料包成本从0.05元/个降至0.03元/个，实现规模化应用。

4.2.2 性能不足，应用场景受限

部分可降解材料存在“耐水性差、阻隔性低”问题，如纯淀粉膜遇水易溶解，无法用于液态食品包装；聚乳酸膜氧气阻隔性是聚乙烯的5倍，导致食品氧化变质速度加快。中国农业大学研发“多层复合可降解膜”，采用“PLA（外层，耐水）-淀粉-纳米二氧化硅（中层，阻隔）-PBAT（内层，柔韧）”结构，材料耐水性提升至传统聚乙烯水平，氧气阻隔性降低60%，可用于牛奶、果汁等液态食品包装，已在三元乳业应用，年减少塑料用量1000吨。

5 食品废弃物循环利用技术与实践

5.1 食品废弃物循环利用技术方向

5.1.1 资源化利用：从“废弃物”到“高值产品”

食品废弃物资源化向“分级提取、多产品开发”方向发展，覆盖果蔬、肉类、谷物加工废弃物。中国农业科学院研发“苹果渣全值利用技术”：先从苹果渣中提取果胶（得率12%，纯度90%），用于食品增稠剂；再从剩余残渣中提取膳食纤维（得率30%，纯度85%），用于保健食品；最后将提取后残渣制成生物质燃料（热值4000大卡/公斤），苹果渣利用率达98%，已在陕西海升果业应用，年处理苹果渣10万吨，生产果胶1200吨、膳食纤维3万吨、生物质燃料5万吨，产值超2亿元。

在肉类加工废弃物处理方面，双汇集团采用“酶解-膜分离”技术，从屠宰废弃物（骨、皮、内脏）中提取胶原蛋白肽（得率15%，纯度90%）与动物油脂（得率20%，纯度95%），胶原蛋白肽用于保健食品，动物油脂用于生物柴油生产，废弃物利用率达90%，年处理屠宰废弃物5万吨，产值超1亿元。

5.1.2 无害化处理：从“填埋焚烧”到“低碳降解”

食品废弃物无害化处理向“生物降解、减少污染”方向发展，重点推广厌氧发酵、好氧堆肥技术。上海环境集团建设“食品废弃物厌氧发酵处理厂”，采用“预处理-厌氧发酵-沼气利用”工艺，年处理食品废弃物50万吨，产生沼气2500万立方米，用于发电（年发电量5000万千瓦时）或提纯为生物天然气（纯度98%），供应城市燃气，年减少填埋量50万吨，减少甲烷排放12万吨（甲烷温室效应是CO₂的28倍）。

在农村地区，江苏省推广“小型好氧堆肥技术”，农户将果蔬废弃物、厨余垃圾投入小型堆肥箱（容量100L），添加微生物菌剂，20-30天可转化为有机肥料（有机质含量≥30%），用于农田施肥，年处理农村食品废弃物10万吨，减少化肥用量2000吨，改善土壤质量。

5.1.3 产业链协同：从“单点处理”到“循环共生”

食品废弃物循环利用向“产业链协同”方向发展，构建“生产-消费-处理”闭环。伊利集团与周边农户、有机肥企业建立“废弃物循环体系”：伊利工厂产生的乳清废水（含高蛋白）用于农户养殖奶牛（替代部分饲料）；奶牛粪便与工厂食品废弃物（如过期牛奶、果渣）送至有机肥企业，通过好氧堆肥生产有机肥料；有机肥料用于农户种植饲料作物（如玉米、苜蓿），再供应给伊利饲料厂，

形成“乳清-养殖-粪便-有机肥-种植-饲料”循环链，年减少废弃物排放10万吨，农户增收超500万元。

5.2 食品废弃物循环利用实践瓶颈与突破

5.2.1 分类收集难，杂质含量高

食品废弃物分类收集率低（我国城市分类收集率不足30%），且混入塑料、玻璃等杂质，影响处理效率与产品质量。为此，上海市推行“食品废弃物强制分类制度”，要求餐饮企业、超市、家庭必须将食品废弃物单独投放，配备专用收集容器与运输车辆，杂质含量从20%降至5%以下；同时开发“智能分类垃圾桶”，通过图像识别技术自动识别废弃物类型，对正确分类的居民给予积分奖励（可兑换日用品），分类收集率提升至60%。

5.2.2 技术成本高，盈利困难

食品废弃物处理设备投资高（如厌氧发酵处理厂投资超10亿元），且处理成本高（每吨处理成本300-500元），企业盈利困难。政府通过“垃圾处理费补贴+产品收益”双渠道支持，如北京市对食品废弃物处理企业给予每吨200元补贴，同时允许企业销售沼气发电、有机肥等产品；某厌氧发酵处理厂通过补贴与产品销售，年净利润达5000万元，投资回收期从15年缩短至8年。

6 清洁生产技术与绿色工厂建设

6.1 清洁生产技术创新与应用

6.1.1 生产过程清洁化：从“末端治理”到“源头控制”

食品生产向“源头减污、过程控污”方向发展，减少废水、废气、废渣排放。农夫山泉在饮用水生产中采用“全封闭无菌灌装技术”，生产车间实现“空气净化（万级洁净度）、设备无菌、原料无菌”，减少清洗用水与消毒剂使用，废水排放量降低40%，且产品合格率达99.99%；同时采用“膜过滤技术”替代传统活性炭过滤，减少废渣产生（活性炭废渣年减少500吨），且过滤效率提升30%。

在啤酒生产中，青岛啤酒采用“干法粉碎技术”替代传统湿法粉碎，减少用水90%（湿法粉碎每吨麦芽用水3吨，干法无需用水），年节省用水100万吨；同时采用“高效沉淀池+膜生物反应

器 (MBR) ” 处理废水, COD 去除率达 99%, 出水水质达到地表水 III 类标准, 可回用至车间清洗, 废水回用率提升至 60%。

6.1.2 水资源循环利用: 从 “一次性使用” 到 “梯次回用”

食品企业构建 “水资源梯次回用系统”, 提高用水效率。蒙牛集团在乳制品工厂建立 “三级用水体系”: 一级水 (自来水) 用于产品生产与设备精密清洗; 二级水 (一级水使用后) 用于车间地面清洗、设备冷却; 三级水 (二级水使用后) 用于厂区绿化、厕所冲洗; 同时采用 “雨水收集系统”, 收集厂区雨水 (年收集量 5 万吨) 用于绿化, 水资源重复利用率达 85%, 年节省自来水 100 万吨。

在制糖行业, 广西南华糖业采用 “冷凝水回收 - 废水处理回用” 技术, 蒸发冷凝水 (纯度高) 回用至锅炉供水 (节省软化水用量 60%), 制糖废水经处理后回用至甘蔗清洗 (回用率 70%), 年节省用水 200 万吨, 减少废水排放 150 万吨。

6.1.3 绿色供应链: 从 “企业单打独斗” 到 “全链协同”

食品企业推动绿色供应链建设, 带动上下游企业低碳转型。伊利集团制定 “绿色供应商标准”, 要求原料供应商 (如牧场、饲料厂) 采用低碳生产方式, 如牧场推广 “精准饲喂” 技术 (减少饲料浪费与甲烷排放) 、饲料厂使用可再生能源 (如光伏供电); 对符合标准的供应商给予 “优先采购” 与 “价格溢价” (溢价 5%-10%), 已培育 100 家绿色供应商, 供应链碳排放量降低 15%。

6.2 绿色工厂建设实践与评价

6.2.1 绿色工厂建设路径

食品企业按照 “规划 - 建设 - 运营 - 优化” 路径打造绿色工厂。伊利集团呼和浩特工厂从四方面推进:

能源优化: 建设光伏电站 (装机容量 30 兆瓦), 配套储能系统, 可再生能源占比达 35%;

资源循环: 构建 “废弃物循环体系”, 食品废弃物用于厌氧发酵产沼气, 包装废弃物回收再利用, 资源利用率达 90%;

环境治理: 采用 “生物滤池 + 活性炭吸附” 处理废气 (VOCs 去除率达 95%), 废水处理后回用率达 70%;

智能管理: 搭建 “绿色工厂智能监控平台”, 实时监测能耗、排放量、资源利用率, 自动预警异常数据, 实现精细化管理。

该工厂获评 “国家绿色工厂”, 单位产值能耗降低 40%, 碳排放量降低 50%, 废弃物利用率提升至 90%。

6.2.2 绿色工厂评价体系

中国工业和信息化部发布《绿色工厂评价要求》(GB/T 36132-2018), 从 “基础合规、能源资源利用、环境排放、环境管理” 四方面评价食品绿色工厂。其中关键指标包括: 单位产值能耗低于行业平均水平 20%、水资源重复利用率为 80%、废弃物综合利用率 ≥90%、VOCs 排放浓度低于行业标准 50%。

截至 2024 年, 我国食品行业已有 500 余家企业获评 “国家绿色工厂”, 覆盖乳制品、饮料、肉类、烘焙等行业, 绿色工厂单位产值能耗较行业平均水平低 25%, 碳排放量低 30%, 为食品工业绿色转型提供示范。

7 结论与展望

本研究通过系统梳理食品工业节能减排、低碳工艺与碳足迹核算、可降解包装、废弃物循环利用、清洁生产与绿色工厂建设五大领域的技术创新与实践, 提出 “技术创新 - 工艺优化 - 循环利用 - 体系构建” 的绿色低碳转型方案, 并结合伊利、农夫山泉、双汇等企业案例, 验证了方案的可行性。研究表明, 通过节能装备升级与余热回收, 食品企业单位产值能耗降低 25%-40%; 通过全生命周期碳足迹核算, 碳排放管控精度提升 40%; 通过可降解包装研发, 塑料用量减少 50%-80%; 通过废弃物 “资源化 - 无害化” 处理, 综合利用率提升至 85% 以上; 通过绿色工厂建设, 企业整体低碳水平提升 30%-50%。

未来, 食品工业绿色低碳转型将向三大方向发展: 一是 “智能化”, 结合人工智能、数字孪生技术, 构建 “全流程智能低碳管控系统”, 实现能耗、排放、资源利用的实时优化; 二是 “低碳化”, 研发 “零碳加工技术” (如太阳能驱动干燥、生物基原料替代), 推动食品工业从 “低碳” 向 “零碳” 转型; 三是 “全球化”, 依托 “一带一路” 建设, 将我国食品绿色低碳技术与标准推广至全球, 推动全球食品产业可持续发展。同时, 需进一步加强 “产

学研用”协同创新，突破核心技术瓶颈，完善政策标准体系，为食品工业绿色低碳转型提供更强支撑。

参考文献

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. “十四五”食品工业发展规划 [Z]. 北京: 工业和信息化部, 2023.
- [2] 中国食品工业协会. 中国食品工业绿色低碳发展报告 (2024) [R]. 北京: 中国食品工业协会, 2024.
- [3] 王加启, 李胜利. 乳制品工业节能减排技术研究进展 [J]. 农业工程学报, 2023, 39 (12): 1-10.
- [4] 陈坚, 刘立明. 食品废弃物资源化利用技术与实践 [J]. 中国食品学报, 2024, 24 (5): 1-15.
- [5] 江南大学食品科学与技术国家重点实验室. 热泵式低温干燥设备研发与应用 [R]. 无锡: 江南大学, 2024.
- [6] 中国农业大学食品科学与营养工程学院. 超声辅助清洗 - 去皮一体化技术研究 [J]. 农业机械学报, 2023, 54 (9): 398-406.
- [7] 伊利集团有限公司. 绿色工厂建设与低碳转型实践报告 [R]. 呼和浩特: 伊利集团有限公司, 2024.
- [8] 农夫山泉股份有限公司. 轻量化包装与水资源循环利用技术实践 [J]. 饮料工业, 2023, 26 (5): 34-38.
- [9] 中国科学院理化技术研究所. 淀粉 - 茄秆纤维复合包装材料研发报告 [R]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2024.
- [10] 上海环境集团有限公司. 食品废弃物厌氧发酵处理技术实践 [J]. 环境工程, 2024, 42 (4): 163-170.
- [11] 双汇集团技术研发中心. 肉类加工废弃物资源化利用技术研究 [J]. 肉类研究, 2024, 38 (3): 97-105.
- [12] 青岛啤酒股份有限公司. 啤酒工业清洁生产技术与实践 [J]. 食品与发酵工业, 2023, 49 (18): 289-296.
- [13] 中国工业和信息化部. 绿色工厂评价要求(GB/T 36132-2018) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [14] 国际标准化组织 (ISO) . ISO 14067:2018 Greenhouse gases - Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification and communication [Z]. Geneva: ISO, 2018.
- [15] 全球温室气体核算体系 (GHG Protocol) . GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard [R]. Washington D.C.: World Resources Institute, 2021.
- [16] 蒙牛集团有限公司. 光伏 + 储能系统在乳制品工厂的应用 [J]. 可再生能源, 2024, 42 (2): 234-240.
- [17] 广西南华糖业集团. 甘蔗渣生物质能发电技术实践 [J]. 中国糖料, 2023, 45 (6): 78-85.
- [18] 中国农业科学院农产品加工研究所. 苹果渣全值利用技术研发与产业化 [J]. 农业工程学报, 2024, 40 (5): 223-231.
- [19] 江苏省农业农村厅. 农村食品废弃物好氧堆肥技术推广报告 [R]. 南京: 江苏省农业农村厅, 2024.
- [20] 浙江海正生物材料股份有限公司. 聚乳酸可降解包装材料生产工艺优化 [J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40 (3): 156-163.
- [21] 陕西海升果业发展股份有限公司. 果蔬加工废弃物资源化利用实践 [J]. 食品工业科技, 2023, 44 (20): 389-396.
- [22] 中国食品科学技术学会. 食品行业节能减排技术指南 [R]. 北京: 中国食品科学技术学会, 2024.
- [23] 北京市城市管理委员会. 食品废弃物处理补贴政策实施报告 [R]. 北京: 北京市城市管理委员会, 2024.
- [24] 上海市绿化和市容管理局. 食品废弃物强制分类制度实施效果评估 [R]. 上海: 上海市绿化和市容管理局, 2024.