

高校碳资产管理智能决策支持系统的构建与实证研究

张恒¹, 刘易鑫², 翟夏妍³

(1. 武汉工商学院, 湖北 武汉 430070;

2. 河北传媒学院, 河北 石家庄 050299;

3. 新乡市礼仪文化研究会, 河南 新乡 453000)

摘要 针对高校碳资产管理需求, 本研究构建集成多源数据采集、实时监测、碳排放核算与多方案决策支持的碳资产管理智能决策支持系统(CDM-DSS)。通过物联网技术实现能源数据高效采集, 构建分层核算模型, 引入机器学习优化决策评估。实证显示: 系统核算误差率 $\leq 5\%$, 异常响应时间缩短50%, 决策支持使部门碳排放强度降低10%~15%。研究成果为高校绿色转型提供智能化解决方案。

关键词 CDM-DSS; 数据融合; 碳排放核算

基金项目: 本文系2024年武汉工商学院校级科研项目基金“高校碳资产管理系统: 高效与精确碳排放监控模型的研究与实践”(项目编号: A2024010)。

中图分类号: TP3; G647

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.028

0 引言

在“双碳”战略背景下, 高校能源管理数字化转型需求日益凸显。传统人工核算模式存在数据滞后、协同效率低等弊端, 且现有研究对高校这一特殊应用场景的适配性不足^[1]。本研究创新性地融合物联网感知、大数据分析、云计算与AI决策技术, 构建“感知—分析—决策—优化”的全链条智能管理系统, 重点突破多源异构数据融合、碳排放精准核算与动态优化决策等关键技术瓶颈, 为高校构建智慧化、低碳化的绿色校园管理体系提供可参考的解决方案。

1 高校碳资产管理智能决策支持系统的研究设计

1.1 理论框架

基于动态能力理论(Teece, 1997)与复杂适应系统理论, 构建“环境感知—资源整合—决策重构”三层架构。(1)环境感知层, 整合物联网与大数据技术, 实时捕获校园能源消耗、设备运行及政策变动等多元数据, 形成管理决策的数据基础^[2]。(2)运用数据融合算法消除部门间信息孤岛, 构建包含28项核心指标的碳资产管理资源池^[3]。(3)决策重构层, 基于自适应学习机制, 开发风险收益评估矩阵与多目标优化模型, 支持管理决策的动态迭代。该框架强调组织在碳资产管理中的动态学习能力, 通过物联网技术实现环境数

据实时捕获, 借助数据融合算法突破部门间信息壁垒, 最终依托风险收益评估矩阵实现管理决策的持续优化。

1.2 方法体系

本研究采用准实验设计, 选取国内某高校进行2019—2023年为期4年的追踪研究。通过倾向得分匹配(PSM)控制师生规模、学科结构等混杂变量, 构建双重差分模型(DID)量化系统效能:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 \text{Treat}_i + \beta_2 \text{Post}_t + \beta_3 (\text{Treat}_i \cdot \text{Post}_t) + \epsilon_{it}$$

其中, Treat_i 为处理变量(实验组=1, 对照组=0), Post_t 为时间虚拟变量(系统实施后=1), X_{it} 为控制变量(师生规模、学科结构、气候特征)。通过倾向得分匹配(PSM)控制组间异质性, 匹配后样本协变量标准化偏差均 $< 10\%$ 。

1.3 管理决策模型

高质量数据供给为管理决策模型的开发奠定基础, 但需通过科学的模型架构实现数据价值转化。本研究遵循“核算精准化→决策智能化→预警前瞻化”的递进逻辑, 在统一数据标准的基础上, 开发分级核算模型、多目标决策算法与复合预警系统, 形成完整的管理决策支持链条^[4]。

1. 碳排放核算模型。构建分级核算体系, 融合IPCC标准与高校管理实践:

$$CE_{total} = \sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i \times AF_i) + \epsilon$$

其中, AF_i 为部门活动水平修正因子, ε 为动态误差补偿项, 通过 LSTM 网络实现实时校准。

2. 多目标决策模型。建立包含经济性 (C)、环境性 (E)、可行性 (F) 的三维评估体系:

$$U = \max \left[w_1 \frac{C}{C_{\max}} + w_2 \frac{E}{E_{\max}} - w_3 \frac{Risk}{Risk_{\max}} \right]$$

采用 NSGA-II 算法求解帕累托最优解集, 支持决策者根据偏好选择减排方案^[5]。

3. 动态预警模型。开发基于 CUSUM 控制图与孤立森林算法的复合预警系统, 设定黄色预警 (响应阈值 $> 1.5\sigma$) 与红色预警 (响应阈值 $> 3\sigma$) 两级响应机制。

1.4 数据采集与变量测量

1. 数据来源。本研究数据涵盖电力、燃气等 6 类能源消耗数据, 设备运行日志及碳交易记录客观数据。对 236 名管理人员进行问卷调查 (Cronbach's $\alpha=0.87$), 采用 7 级 Likert 量表评估系统易用性与决策采纳率。在明确方法论框架后, 需构建适配管理学研究的测量体系。

2. 核心变量。以碳排放强度为核心因变量, 采用“部门碳排放量 / 建筑面积 (tCO_2/m^2)”的量化指标, 通过智能传感器实时采集数据。该指标设计体现了资源基础观的理论内涵, 能有效反映组织资源利用效率与环境绩效的关联关系。在自变量设计方面, 研究采用双重差分法 (DID) 的实验设计, 以系统干预效应的交互项系数 β_3 作为量化指标, 用于捕捉技术赋能对碳排放强度的净影响。调节变量聚焦管理者风险偏好, 基于前景理论框架, 通过问卷调查获取损失厌恶系数 λ 作为测度指标。同时控制气候因素的干扰, 选用“日均温度偏离历史均值 $\geq 2^\circ\text{C}$ 的天数”作为气候异常天数的操作化指标, 数据来源于专业气象 API 接口。该设计呼应高阶理论的核心主张, 能有效揭示管理者认知特征对技术赋能效果的边界影响。

1.5 技术实现

1. 技术实施路径。为实现理论模型向管理工具的转化, 本研究设计“四阶八步”技术实施路径。该路径以需求锚定为起点, 通过敏捷开发与迭代测试完成原型构建; 采用 RESTful API 接口实现与现有 OA、ERP 系统的无缝对接; 最终运用平衡计分卡 (BSC) 从财务、流程、学习、利益相关者四个维度进行综合绩效评价。这种技术路线既遵循软件开发规范, 又契合高校管理实际需求, 为后续实证研究奠定技术基础。本研究设计分阶段实施路线, 包含八个关键步骤: (1) 需求锚定, 通过 Kano 模型分析决策者需求优先级, 确定核心功能

模块; (2) 原型开发, 采用 Scrum 敏捷框架, 每两周进行迭代测试; (3) 系统集成, 构建标准化数据接口, 实现跨系统数据交换; (4) 效能评估, 运用 BSC 从财务、流程、学习、利益相关者四个维度进行综合评价;

(5) 试点运行, 选取 3 个典型校区进行为期 6 个月的试运行; (6) 参数调优, 基于试运行数据优化模型参数, 提升预测精度; (7) 全面推广, 在全校范围内部署系统, 开展管理人员培训; (8) 持续改进, 建立反馈机制, 每季度更新数据模型与决策规则。

2. 系统功能实现。本研究构建的 CDM-DSS 通过模块化设计实现“数据采集—核算监测—决策优化—闭环反馈”的全流程管理, 其核心功能模块及管理价值体现在以下四个维度 (见表 1)。

2 高校碳资产管理智能决策支持系统的实证分析

CDM-DSS 系统显著改善管理效能。核算精度, 实验组误差率 4.1% vs 对照组 9.3% ($\beta = -5.21***$)。响应速度, 预警响应时间 3.5 分钟 vs 18.2 分钟 ($\beta = -14.73***$)。减排效果, 实验组碳强度降幅 13.1% ($p < 0.01$) vs 对照组 4.2% ($\beta = 8.92***$)。

量化分析结果揭示了 CDM-DSS 系统的技术赋能效果, 但需进一步解析其内在管理机制。下文将从决策优化与组织学习两个维度, 探讨系统如何通过重构管理流程实现效能提升。

2.1 决策优化

NSGA-II 算法生成的帕累托解集使实验组减排成本降低 22.4%, 利用 DEA 模型测算, $\theta=0.78$ 。还利用风险偏好调节作用, 当损失厌恶系数 $\lambda > 2.3$ 时, 管理者对高风险减排方案的采纳率下降 37%, 其中调节效应检验: $\Delta R^2=0.15$, $p < 0.01$ 。

2.2 组织学习

系统使用 6 个月后, 整体决策效率提升 58% (Mann-Whitney $U=1325$, $p < 0.001$), 季度校准误差降低 42% (ARIMA 模型 $RMSE=0.38$), 管理成本节约 43.8 万元/年, ISO14064 认证达标率提升至 92%。

3 讨论与启示

3.1 理论贡献

动态能力理论通常应用于战略管理领域, 本研究将其延伸至碳资产管理场景, 证明组织通过技术赋能可构建“数据感知—算法决策—反馈学习”的新型动态能力。这一发现为数字化转型研究提供了跨领域理论接口。实时数据驱动机制 ($\beta=0.47$, $p < 0.01$) 支持 Teece (1997) 提出的“感知—seize—重构”动态

表1 CDM-DSS系统核心功能模块及管理价值体现

维度	功能设计	管理价值
数据整合与资源协同管理	<ol style="list-style-type: none"> 部署1250个智能传感器与IoT设备,构建覆盖电力、燃气、水务等6类能源消耗节点的实时数据采集网络 开发标准化数据接口(RESTful API),实现教务、科研、后勤等8个部门管理系统的无缝对接 设计设备自检→传输加密→格式转换→逻辑验证→人工抽检五级数据治理机制,数据可用率达98.7% 	<p>通过打破部门间数据壁垒,构建校园级碳数据资源池,传统模式下需人工协调耗时2~3天,使跨部门数据共享效率提升65%。该设计验证了资源基础观在碳资产管理领域的适用性,即通过异质性数据资源的整合形成可持续竞争优势</p>
动态核算与实时监测体系	<ol style="list-style-type: none"> 构建分层核算模型。包含IPCC标准基础核算、教学、科研、后勤部门核算、会议、差旅专项核算三级嵌套模型 开发实时监测看板,支持5分钟级数据更新,阈值$\geq \pm 15\%$自动标识异常波动 设计误差自校正机制,通过LSTM神经网络动态修正核算偏差,月均误差率控制在3.2%以内 	<p>相较于传统年度核算模式,系统实现碳排放数据的实时可视化与动态追踪,使管理部门能够及时识别高碳环节。该功能印证了动态能力理论的核心观点——组织需通过实时数据获取与处理能力应对外部环境变化</p>
智能决策与多方案优选	<ol style="list-style-type: none"> 开发碳配额智能评估模型:对比历史排放与分配额度,提前30天预警覆盖率92%的自动触发配额预警 构建碳交易决策树:集成全国碳市场价格指数、政策导向等变量,生成交易策略备选集 设计减排方案仿真系统:运用蒙特卡洛模拟评估不同减排组合的风险收益比, $ROR \geq 15\%$ 方案通过率89% 	<p>系统生成的决策方案使部门级碳排放强度降低12.7% ($p < 0.01$),验证了管理决策理论中“数据驱动决策”的有效性。特别是在实验室能效优化场景中,通过设备调度策略调整实现年均节电2.1万度,体现资源配置优化的管理效能</p>
闭环反馈与持续改进机制	<ol style="list-style-type: none"> 建立碳足迹动态监测平台,整合能源消耗、废弃物处理、绿色建筑等12类数据维度 开发固碳措施推荐系统,基于GIS地图推荐光伏安装点位年发电潜力达1.2MW 构建PDCA管理闭环,通过季度性数据回溯与模型校准,持续优化核算精度与决策效率 	<p>系统实施的“监测—评估—改进”循环机制,使高校碳资产管理水平提升至ISO14064认证标准,较传统管理模式节约管理成本43.8万元/年。该设计体现了组织学习理论的实践价值,即通过持续反馈提升组织适应能力</p>

循环,验证了动态能力理论。决策理论拓展,揭示风险偏好($\lambda=2.3$)与决策保守性的非线性关系($R^2=0.32$),完善前景理论在环境管理中的应用边界。资源基础观深化,数据资源异质性(HHI指数从0.68降至0.29)验证了Barney(1991)的VRIO框架在数字时代的适用性。

3.2 实践启示

系统使碳资产管理符合ISO14064标准的透明度要求,技术赋能制度创新,将合规率提升至92%。人机协同决策范式,决策者采纳率与系统解释性呈正相关($r=0.63, p < 0.001$),提示需增强算法可解释性设计。通过“数据可视化管理看板”降低部门协作摩擦成本,节约时间成本64%,实现组织惯性路径突破。尽管本研究取得显著成果,但仍需客观审视其局限性。

4 结论

本研究通过严谨的实验设计验证了CDM-DSS系统在提升高校碳资产管理效能、优化资源配置及促进组织学习方面的显著作用。实证结果表明,CDM-DSS系统使核算误差率降低55.9%,碳强度下降13.1%,决策响应

效率提升3.2倍,为高校落实“双碳”目标提供了可参考的智能化解决方案。研究不仅揭示了物联网与AI技术融合对管理流程的重构效应($\beta=0.62, p < 0.01$),还发现系统使用时长与碳减排效果呈显著正相关($R^2=0.47$)。这些发现为数字化转型背景下的高校碳资产管理提供了理论与实践参考。

参考文献:

- 程迈越,周莽,李梓源.博雅智慧打造数字化“双碳”服务品牌[J].企业管理,2023(08):90-94.
- 彭英.边缘计算在智慧校园物联网中的能效优化策略研究[J].智能物联技术,2024,56(02):48-52.
- 张伟杰,唐晓旭,王肖欣,等.碳排放核算方法综述[J].工程质量,2024,42(S2):167-169.
- 郭建军,廖权虹,白可,等.浅析碳核算数据模型及碳核算标准化体系建设[J].标准科学,2024(11):93-100.
- 刘树东,吴昊,丛佳,等.双碳目标下基于改进型NSGA-II算法的港口作业调度优化算法[J].计算机应用,2024(09):1-11.