

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.001

区块链技术下垃圾分类管理平台的 试验及熵权-云模型评价

熊鸿斌, 黄淑贤

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章基于区块链技术(blockchain technology, BT)的去中心化、可溯源性、不可篡改和激励机制 4 大特征, 构建具有积分激励、宣传教育、线上交易和数据溯源功能的区块链技术下垃圾分类管理平台, 并选取合肥市某垃圾分类试点小区进行试验, 通过 2022 年 1—9 月的问卷调查、实地采样和物理组分分析检验平台的垃圾分类管理效果。结果表明: 可回收垃圾回收潜力较试验前增长 20.4%, 厨余垃圾混杂率降低 23.5%; 截止到 9 月公众支持率和参与率超 95%, 违规事件成功溯源率达 83.2%。同时文章首次引入熵权-云模型对区块链平台的垃圾分类管理的试验效果进行评价分析, 结果表明, S1(1—3 月)、S2(4—6 月)、S3(7—9 月)试验阶段的垃圾分类管理综合确定度分别为 2.53、2.66、2.82, 综合评价等级分别为 IV(较差)、III(中等)和 II(良好)。区块链技术下垃圾分类管理平台能够解决垃圾分类过程中分类质量差、公众参与度低等普遍性问题, 适用于我国强制性垃圾分类的时代要求。熵权-云模型能考虑问卷调查和采样结果的随机性, 实现定性概念到定量数据的转变, 在垃圾分类管理领域具有创新性和可行性。

关键词:区块链技术(BT); 生活垃圾分类管理; 熵权法; 云模型

中图分类号: X820.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-5060(2024)02-0145-09

Experiments on a blockchain-based waste classification management platform and evaluation of entropy-cloud model

XIONG Hongbin, HUANG Shuxian

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Based on the four characteristics of blockchain technology (BT), namely decentralization, traceability, tamper-proofness and incentive mechanisms, this paper constructed a blockchain-based waste classification management platform with the functions of points incentive, publicity and education, online transaction and data traceability and selected a pilot district in Hefei City to test the effectiveness of the platform through questionnaire survey, field sampling and physical component analysis from January to September 2022. The results show that the recycling potential of recyclable waste increases by 20.4% compared to pre-test, and the food waste mixing rate decreases by 23.5%; the public support and participation rate exceeds 95% as of September 2022, and the successful traceability rate of violations reaches 83.2%. Meanwhile, the paper introduced the entropy-cloud model for the first time to evaluate the blockchain platform. The results show that the comprehensive determinations of waste classification management in the S1 (January-March), S2 (April-June) and S3 (July-September) trial phases are 2.53, 2.66 and 2.82, and the comprehensive evaluation grades are IV (poor), III (fair) and II (good), respectively. The platform can solve the universal problems of poor classification quality and low public participation, and meet the requirements of the era of mandatory waste classification in China. The entropy-cloud model can consider the randomness of questionnaire and

收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2023-06-11

基金项目: 安徽省科技攻关计划重大科技专项资助项目(08010302114)

作者简介: 熊鸿斌(1963—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

sampling results, and realize the transformation from qualitative concept to quantitative data, which is innovative and feasible in the field of waste classification management.

Key words: blockchain technology(BT); household waste classification management; entropy weight method; cloud model

生活垃圾是指在日常生活中或者为日常生活提供服务的活动中产生的固体废物及法律、行政法规规定视为生活垃圾的固体废物^[1]。2004 年我国已超过美国成为最大的城市生活垃圾生产国,2017 年城市生活垃圾产生量达 2.27×10^8 t, 占全球固体废物产量的 10%^[2-3]。然而我国 97% 的生活垃圾被混合填埋和焚烧,资源化效率远低于发达国家。文献[4]表明生活垃圾源头分类能提高垃圾处置效率,是实施废物转化能源技术(waste to energy, WtE)的关键一步。我国于 2021 年颁布《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》,规定到 2025 年底,全国城市生活垃圾资源化利用率要达到 60%,并要求健全区域协同机制、市场监管机制和居民激励机制。

以物联网为代表的垃圾分类管理技术通过射频技术、定位系统和传感设备实现垃圾种类的识别、垃圾桶状态的监测和清运活动的规划^[5-6]。文献[7]利用机器视觉技术开发设计垃圾自动分类系统,经测试和训练表明该方法能准确识别垃圾种类;文献[8]基于可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)技术为核心,利用传感器和物联网技术设计垃圾站智能管理系统,实现自动满桶更换、数据监控、联网管理等功能。此类垃圾分类管理技术侧重于生活垃圾的分类识别和收集,忽视参与主体的职责和协同,且多以理论建模和数据模拟为主,缺少实际场景的应用案例。

基于区块链技术(blockchain technology, BT)的垃圾分类管理研究在国外较为成熟,涉及数据追溯、固废交易、智能化决策甚至生活垃圾的全生命周期管理。文献[9]构建区块链技术的固废管理溯源模型,将数据收集、固废分类、堆肥处置和出售分配给不同的参与主体,通过成本分析及优化证明该模型在固废溯源和政府监管方面具有优势。然而,区块链在国内垃圾分类管理领域的应用主要集中在激励机制的设计和开发。文献[10]提出面向居民生活垃圾分类的区块链激励平台,将高价值垃圾的回收利益分配给垃圾分类的参与者,鼓励并规范居民的垃圾分类行为。

熵权法^[11-12]是一种较为常用的客观赋值法,强调多个样本之间的联系,可以削弱异常值的影

响,避免主观因素对指标权重的影响,具有计算过程清晰,结果客观可信等优点被用于废物管理评价。云模型^[13-14]广泛应用于水质评价和生态安全评价,其借助云反应发生器实现定性概念到定量数据的转换,在考虑概念与数据之间的模糊性和随机性方面具有一定的优势。在垃圾分类管理中,生活垃圾的采样和问卷调查具有随机性,评价指标体系中指标的选取和区间的划分也具有随机性。从理论意义上来说,云模型法适用于垃圾分类管理的综合评价,但与之相关的研究很少。

综上,本文尝试借助区块链技术完善垃圾分类和处理的管理体制机制;以物联网和集成技术为前端,在垃圾种类识别和信息录入的基础上,借助区块链的结构特征协调参与主体合作,实现积分激励、违规事件溯源、线上交易、宣传教育等功能。与理论建模不同,本研究将构建的区块链平台应用于垃圾分类试点小区,通过试验检验其实际的管理效果,首次引入云模型评价分析垃圾分类管理试验的效果,证实其在垃圾分类管理领域的可行性和创新性。

本文借助区块链技术构建垃圾分类管理平台,旨在解决试点城市生活垃圾数据记录难、公众参与度低、垃圾分类效果差以及政府监管效率低等问题,通过垃圾分类管理试验检验区块链平台的分类管理效果,完善和改进平台的功能内容。本研究的意义在于将区块链技术与垃圾分类管理相结合,丰富区块链在固废管理领域的研究,为决策者制定全民参与、社会监督和高效运作的垃圾分类管理方案提供区块链技术方面崭新的视角。

1 研究方法

1.1 研究区域

合肥市为安徽省省会,位于安徽省中部,江淮之间,地处东经 $116^{\circ}41' \sim 117^{\circ}58'$ 、北纬 $30^{\circ}57' \sim 32^{\circ}32'$ 之间,为住房和城乡建设部确定的 46 个垃圾分类试点城市之一。研究区域 J 小区位于合肥市长丰县,占地面积 $47\ 000\ \text{m}^2$,共计 1 256 户,生活垃圾产生量约 $2\ 500\ \text{kg/d}$,属于典型的中小城市住宅区。该小区地处经济开发区,地域空旷,交通便利,5 km 范围内建有可回收垃圾中转站和

厨余垃圾处置站,为生活垃圾分类管理的试点工程提供了设施条件。经前期实地调查,J 小区垃圾分类存在分类质量差、公众参与度低等普遍性问题。

1.2 数据收集与分析

问卷调查为每 3 个月开展一次,以纸质问卷为主,电子问卷为辅。问卷内容包括住户基本信息、小区垃圾分类的参与情况、线上回收的参与情况以及住户对设施条件、政府监管、激励机制的满意度作答。实地采样参考《生活垃圾采样和分析方法》^[15],采用“四分法”收集样品,以确定厨余垃圾和可回收垃圾的分类情况。其中厨余垃圾采样点为小区内厨余垃圾桶,最小采样量为 30 kg,按厨余垃圾和非厨余垃圾的类别对样品进行分拣,将分拣后的样品组分置于烘干箱中烘干,根据含水率确定样品物理组分。可回收垃圾采样点为可回收垃圾桶,最小采样量为 50 kg,样品分拣和物理组分的确定与厨余垃圾基本一致。此外,区块链平台作为记录生活垃圾流转数据的分布式账本,对居民投放行为的监视、垃圾桶容量的跟踪也为本试验提供数据来源。

1.3 区块链技术下垃圾分类管理平台

区块链使用密码学技术^[16]和分布式共识协议来确保网络访问和传输的安全,相比于传统数据库,其优势在于去中心化、不可篡改、可溯源性和激励机制 4 个方面。

1) 去中心化。区块链通常是一个去中心化和分布式的环境,基于通信节点之间的点对点通信。点对点的通信特点是在无信任关系的对等点之间实现工作分配与任务执行。移动设备的普及及为点对点应用降低了数据收集成本,也使去中心化能够利用所有贡献用户的处理能力,减少延迟并消除单点故障。

2) 不可篡改。与传统的集中式模式相比,区块链提供了公平的查阅权限,所有节点都可以访问所有交易的详细信息,且无法更改数据。

3) 可溯源性。垃圾分类管理体系下区块链的可溯源性将特定生活垃圾的种类数量,收集、运输和处置过程中的数据信息整合并写入区块链数据库,数据区块按照时间顺序连成链状,数据溯源只需根据时间戳逐层推断,便可还原完整的管理过程。

4) 激励机制。基于区块链构建的积分激励机制,实际上是建立一个让民众能参与、有获得感的公众平台,将垃圾回收产业的利润与每个参与者共享,并将原有的相对生硬的提倡、引导甚至政策干预,转变成通过系统内生的激励体系奖励民众的垃圾分类行为,使民众主动校正自身行为。

根据生活垃圾的管理环节和区块链的技术特点,可将该过程分为分类端、清运处置端、系统维护端和监测溯源端。区块链平台的流程框架如图 1 所示。

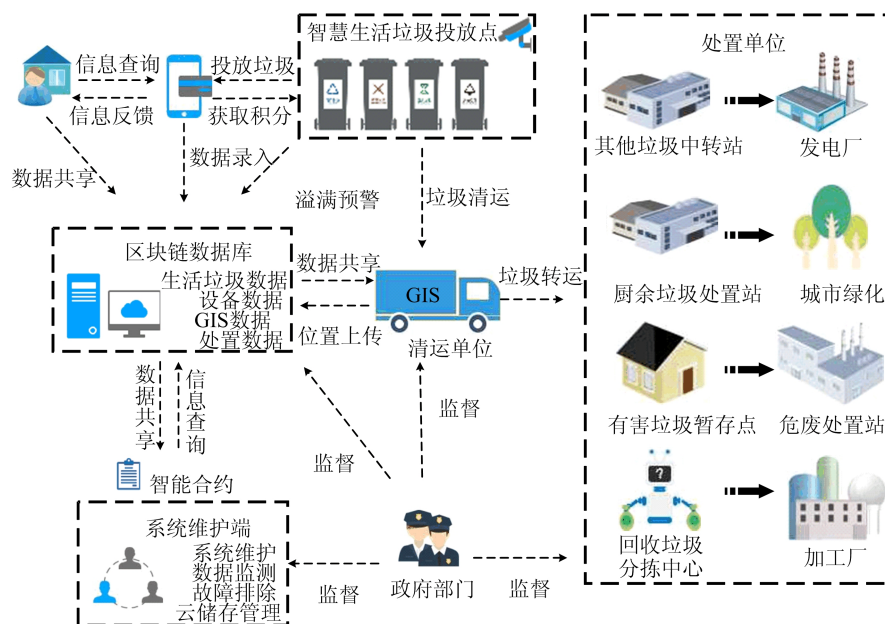


图 1 区块链技术下垃圾分类管理平台流程框架

1) 分类端。区块链技术下垃圾分类管理平台采用“一户一卡”的方式,提前录入居民身份信

息。居民在投放垃圾时需要在机器处验证身份码,识别成功后,投放的垃圾首先在检验台处识别种类,种类审核无误后称重计量,借助区块链的激励机制向住户奖励积分,积分可在站点兑换机中兑换商品。审核不合格的垃圾则无法投进,记录也会录入居民账号中,作为月底的量化考核。

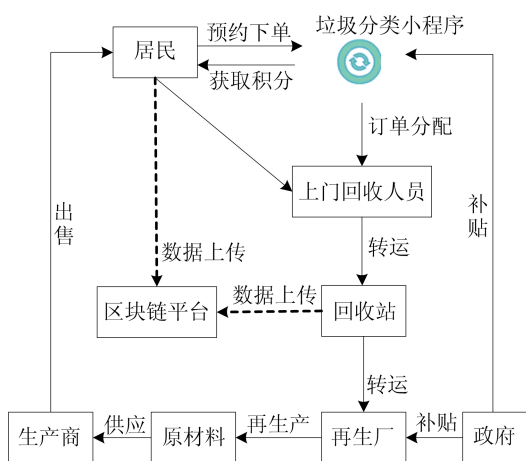
2) 清运处置端。桶内的传感设备将垃圾容量实时上传,一旦达到桶容量的 80%后,会触发溢满警报,清运单位收到提示后派遣清运人员将不同种类的生活垃圾运往各自处置场。中转站和处置场对生活垃圾进行压缩和处理,并将处置信息上传至区块链系统。

3) 系统维护端。系统维护人员配合政府部

门进行数据监测和云储存管理,排除系统故障,并根据前端反馈信息对第三方公司进行调度安排。

4) 监测溯源端。区块链溯源功能对垃圾分类投放、收集与运输环节的生活垃圾数据、参与人信息进行实时收集和监控,信息数据实时上传至区块链数据库,形成垃圾分类各环节分布式账本。

微信小程序“垃圾分类”作为面向公众的操作前端,一方面提供可回收垃圾交易,借助区块链保障交易的公开透明;另一方面提供通过环保动态、政策解读和分类技巧的宣传并提供拍照识别和搜索识别等功能满足公众日常的分类需求。“垃圾分类”线上交易流程图及界面示意图如图 2 所示。



(a) 可回收垃圾线上交易流程图



(b) “垃圾分类”小程序宣传教育界面示意图

图 2 “垃圾分类”线上流程图及界面示意图

1.4 垃圾分类管理综合评价

1.4.1 评价指标体系的构建

本文区块链技术下垃圾分类管理评价指标等级

见表 1 所列。垃圾分类管理评价指标参考《生活垃圾分类及其评价标准》^[17]、《合肥市生活垃圾分类管理条例实施细则》和《合肥市生活垃圾管理办法》。

表 1 垃圾分类管理效果评价指标等级

评价指标		评价指标等级				
一级指标	二级指标	优秀(I)	良好(II)	中等(III)	较差(IV)	差(V)
公众感知 A1	公众支持 C1	[95,100]	[85,95)	[75,85)	[65,75)	[0,65)
	设施条件 C2	[90,100]	[75,90)	[65,75)	[40,65)	[0,40)
	宣传教育 C3	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[50,70)	[0,50)
	激励机制 C4	[90,100]	[80,90)	[70,80)	[50,70)	[0,50)
公众参与 A2	公众参与 C5	[95,100]	[85,95)	[75,85)	[55,75)	[0,55)
	线上回收参与 C6	[85,100]	[75,85)	[65,75)	[45,65)	[0,45)
监督管理 A3	政府监督 C7	[85,100]	[75,85)	[65,75)	[45,65)	[0,45)
	违规事件溯源 C8	[90,100]	[80,90)	[60,80)	[40,60)	[0,40)
	垃圾溢满 C9	[0,5)	[5,15)	[15,35)	[35,55)	[55,100]
垃圾分类质量 A4	分类合格率 C10	[95,100]	[85,95)	[75,85)	[55,75)	[0,55)
	厨余垃圾混杂率 C11	[0,5)	[5,10)	[10,20)	[20,40)	[40,100]
	可回收垃圾回收潜力 C12	[95,100]	[85,95)	[75,85)	[55,75)	[0,55)

城市综合可持续废物管理“废物意识”基准指标^[18],并结合区块链技术特点^[19-20],从公众感知、公众参与、监督管理和垃圾分类质量4个方面共12个指标,构建基于区块链技术的垃圾分类管理评价指标体系。同时将评价语言分为5个等级,分别为I级、II级、III级、IV级、V级,相应的定性评价分别为优秀、良好、中等、较差、差。

1.4.2 熵权法的构建

邀请垃圾分类领域的专家对评价指标的重要性进行评判,答案采用李克特五分量表(非常同意、同意、中立、不同意、非常不同意)来衡量。确定评价对象为 x ,分为 m 级,有 n 个评价指标,构建初始矩阵 \mathbf{P} 表达式为:

$$\mathbf{P} = (r_{ij})_{n \times m} \quad (1)$$

采用隶属函数法^[21]对指标数值进行标准化处理。

正向指标为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij,\min}}{x_{ij,\max} - x_{ij,\min}} \quad (2)$$

逆向指标为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij,\max} - x_{ij}}{x_{ij,\max} - x_{ij,\min}} \quad (3)$$

其中, $x_{ij,\max}$ 和 $x_{ij,\min}$ 分别为函数的上界和函数的下界。

归一化处理后得到标准矩阵 $\mathbf{R} = (y_{ij})_{n \times m}$,确定评价指标 x_{ij} 的信息熵值 e_i ,其计算公式^[22]如下:

$$e_i = -\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (4)$$

$$f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^m y_{ij}} \quad (5)$$

其中,当 $f_{ij} = 0$ 时, $\ln f_{ij}$ 无意义,对定义进行修改:

$$f_{ij} = \frac{1 + y_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + y_{ij})} \quad (6)$$

确定信息效用值 d_i ,计算公式为:

$$d_i = 1 - e_i \quad (7)$$

确定评价指标 x_i 的熵权 w_i ,计算公式^[23]如下:

$$w_i = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^n e_i} \quad (8)$$

且满足:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (9)$$

确定评价指标 x_i 区分度 η_i ,计算公式为:

$$\eta_i = \frac{1 - e_i}{(n - \sum_{i=1}^n e_i) e_i} \quad (10)$$

1.4.3 云模型的构建

云发生器^[24-25]是云模型中最为关键、基础的算法,是定性概念和定量数值之间转化的工具。正向云发生器是指给定云的数字特征期望值 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e ,产生正态云模型的若干云滴的算法。

根据评价标准等级,建立评价标准云。设评价等级的区间为 $[V_{\min}, V_{\max}]$,则正态云模型的数字特征值(E_x, E_n, H_e)计算公式^[26]分别为:

$$E_x = \frac{V_{\min} + V_{\max}}{2} \quad (11)$$

$$\exp\left[-\frac{(V_{\max} - V_{\min})^2}{8(E_n')^2}\right] = 0.5 \quad (12)$$

$$E_n = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2.355} \quad (13)$$

$$H_e = kE_n \quad (14)$$

其中: V_{\max}, V_{\min} 分别为垃圾分类管理评价指标对应的评价标准区间的上、下限; k 为常数,取值在 $0.001 \sim 0.100$,根据定性评价的模糊程度,此处取 $k = 0.100$ 。

建立垃圾分类管理评价矩阵 \mathbf{Z} ,即

$$\mathbf{Z} = (Z_{ij})_{m \times n} \quad (15)$$

其中: n 为评价指标个数; m 为评价方案。

第 i 个云模型评价云为:

$$C_i(E_{xi}, E_{ni}, H_{ei}) \quad (16)$$

第 i 个评价指标 x_i 对于定性概念 X 的隶属度为:

$$\mu(x_i) = \exp\left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2(E_n')^2}\right] \quad (17)$$

综合判断矩阵 \mathbf{U} 为:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} & \mu_{15} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} & \mu_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \mu_{n3} & \mu_{n4} & \mu_{n5} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, $\mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3}, \mu_{i4}, \mu_{i5}$ 分别为第 i 个指标与第I、II、III、IV、V级云模型之间的隶属度。

垃圾分类管理效果的综合确定度 \mathbf{B} 为:

$$\mathbf{B} = \sum_{i=1}^n W_i \mathbf{U} \quad (19)$$

其中, W_i 为第 i 个指标的权重。

除了考虑到最大隶属度原则确定综合等级,本文还采用等级特征值 K 来量化评定结果。等级特征值 K 为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^m i K_i}{\sum_{j=1}^m K_j} \quad (20)$$

2 结果与讨论

2.1 垃圾分类管理试验结果分析

2.1.1 调查问卷

本次试验的问卷调查共开展 3 次,分别考察 2022 年的 1—3 月(S1)、4—6 月(S2)和 5—9 月(S3)试验阶段研究区域垃圾分类的参与情况以及居民对区块链平台相关设施条件、宣传方式、激励机制和监管的满意程度,调查问卷结果见表 2 所列。

表 2 研究区域满意程度调查问卷结果 %

一级指标	二级指标	试验阶段		
		S1	S2	S3
A1	C1	72.9	89.9	98.6
	C2	65.7	76.9	82.7
	C3	70.9	80.8	84.8
	C4	65.7	69.7	74.7
A2	C5	52.4	78.2	95.9
	C6	36.7	66.2	76.9
A3	C7	67.8	75.9	85.9

从表 2 可以看出,在 S1 阶段,72.9%的受访者支持垃圾分类,而不支持的原因集中在“不会分”“易混淆”“浪费时间”等方面。为此 S1 阶段本试验侧重于垃圾分类知识的宣传教育、小程序的推广和平台操作讲解。该阶段 70.9%的受访者表示小程序的宣传教育板块帮助他们快速、正确地分类。垃圾分类参与情况和参与动机的调查结果如图 3 所示。

由图 3a、图 3b 可知,S1 阶段垃圾分类参与率为 52.4%,其中 39.3%的受访者表示“分类-获取积分-兑换商品”的激励机制吸引他们参与垃圾分类。

图 3e、图 3f 中 S3 阶段 95.9%的分类参与者中以激励机制为参与动机的受访者为 32.7%。这表明,基于区块链平台建立的激励机制在分类前期能提高公众参与,随着垃圾分类的进行,以获取积分为目的的比率逐渐下降,但分类参与率由 78.1%(S2)上升至 95.9%(S3),以“改善环境、提高生活质量”的目的由 27.7%上升至 31.1%。当居民的环保意识和分类习惯养成后,激励机制不再成为分类的主要目的,相反公众更加关心环境

的改善和生活质量的提高。

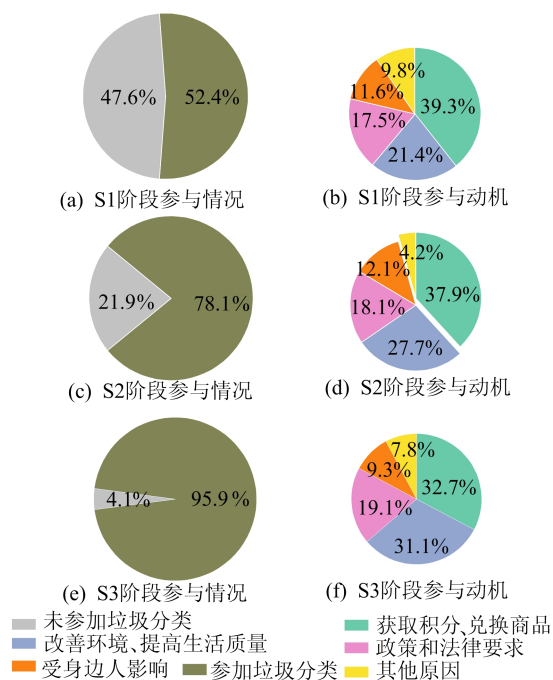
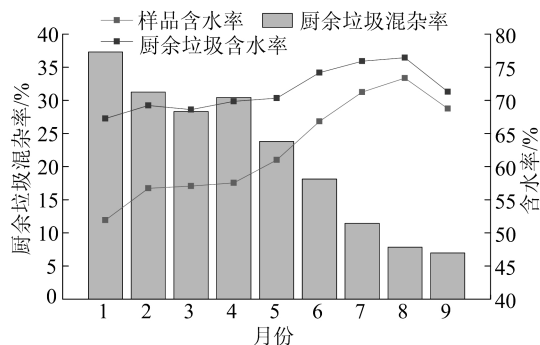


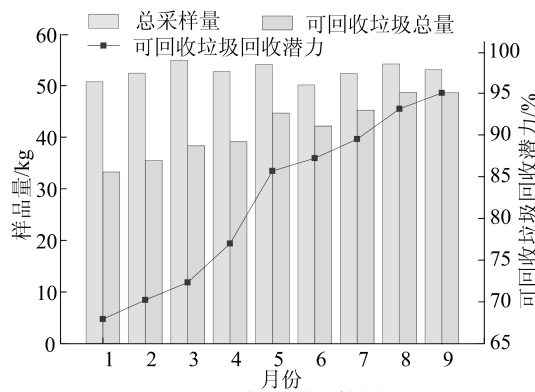
图 3 垃圾分类参与情况和参与动机调查结果

2.1.2 实地采样与物理组分分析

2022 年 1—9 月研究区域厨余垃圾和可回收垃圾的分类情况如图 4 所示。



(a) 厨余垃圾桶采样结果



(b) 可回收垃圾桶采样结果

图 4 研究区域生活垃圾采样结果

由图 4a 可知,厨余垃圾混杂率在 S1 阶段下降了 8.9%,因站点指导人员的撤离,4 月时混杂率上升至 30.4%,但政府协同区块链管理人员加强对乱投乱放等违规事件的追责,S2、S3 阶段混杂率整体呈下降趋势,在 9 月时仅为 6.9%。厨余垃圾含水率在第一季度稳定在 68.4%,5 月后呈上升趋势并在 8 月达到 76.5%,总体表现为春季低、夏季高。随着垃圾分类试验的进行,厨余垃圾混杂率降低并成为总样品的优势组分,两者含水率趋于一致。

可回收垃圾桶的采样结果如图 4b 所示。从图 4b 可以看出,S1 阶段可回收垃圾回收潜力平均为 70.2%,在 5 月出现 8.7%的增幅,并在垃圾分类试验的最后阶段达到 95.1%。总体来看,可回收垃圾的分类质量处于较高的水平,并且受指导人员撤离的影响较小,主要原因是可回收垃圾

在 4 种垃圾中经济价值最高且大部分子类被居民所熟知。

2.1.3 区块链平台的数据收集结果

区块链平台数据溯源率收集结果见表 3 所列。政府和物业部门通过区块链平台的投放记录和人像捕集对随意堆放垃圾、多次投放不合格的居民进行追溯,平均成功溯源率在 75.4%。因“撤桶并点”垃圾桶数量减少,集中投放站垃圾溢满频繁发生,数据收集结果显示 1 月时近 1/2 的垃圾桶出现溢满,且集中在其他垃圾桶和厨余垃圾桶。区块链联盟链赋予部分参与主体监督和利用生活垃圾分类、回收和清运数据,收集单位和清运公司通过区块链平台共同审视垃圾桶容量状态,相互配合提高清运收集效率。随着垃圾分类管理试验的进行,垃圾溢满现象逐渐改善,9 月时最多有 2 个垃圾桶出现溢满。

表 3 区块链平台数据溯源率收集结果

一级指标	二级指标	试验阶段									
		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	
A3	C8	58.6	67.8	73.7	75.8	76.4	79.1	81.4	82.5	83.2	
	C9	50.0	41.6	33.3	33.3	16.7	25.0	25.0	16.7	8.3	
A4	C10	63.4	68.7	71.8	66.7	74.3	80.7	83.0	91.9	96.1	

2.2 垃圾分类管理综合评价

2.2.1 指标权重分析

本文在试验预调查期邀请研究区域居民和垃圾分类领域的学者使用李克特五分量表对指标的重要性进行评判,结合式(1)~(10)得到指标权重见表 4 所列。

表 4 垃圾分类管理指标体系

一级指标	权重	二级指标	局部权重	全局权重
A1	0.330	C1	0.314	0.104
		C2	0.177	0.058
		C3	0.283	0.094
		C4	0.226	0.075
A2	0.225	C5	0.436	0.098
		C6	0.564	0.127
A3	0.236	C7	0.418	0.099
		C8	0.274	0.065
		C9	0.307	0.073
A4	0.208	C10	0.333	0.069
		C11	0.290	0.061
		C12	0.376	0.078

由表 4 可知:公众感知 A1 权重为 0.330,是影响垃圾分类管理效果最关键的因素,表明垃圾

分类设施、宣传方式和奖惩机制影响居民的分类意愿与态度;公众参与 A2 权重为 0.225,其中线上回收参与 C6 权重为 0.564,与以往的研究发现有所出处,说明该研究区域的垃圾分类管理需公开透明的回收交易和多样化的回收渠道;监督执法 A3 权重为 0.236,其中二级指标政府监督 C7 的局部权重最高,为 0.418,表明政府在垃圾分类管理中调控的重要性;垃圾分类质量 A4 权重为 0.208,其中可回收垃圾的回收质量 C12(可回收垃圾回收潜力)局部权重最高,为 0.376,可回收垃圾相对于其他 3 类垃圾具有更高的经济价值,因而更受关注。

2.2.2 云模型评价结果

本试验根据云模型原理和式(11)~(14),由云正向发生器生成评价指标云模型,具体见表 5 所列。

由垃圾分类管理试点小区 3 个试验阶段(S1、S2、S3)收集的指标数值和式(15)~(20),计算指标在各评价等级下的隶属度见表 6 所列。

从表 6 可以看出:根据隶属度最大原则,S1、S2 和 S3 的 3 个试验阶段垃圾分类管理效果评价

为Ⅳ(较差)、Ⅲ(中等)和Ⅱ(良好)。结合确定度,3个试验阶段垃圾分类管理效果评价由高到低依次为 S3、S2、S1。表明经过区块链技术下垃圾分

类管理模型的应用,试验阶段内试验小区的垃圾分类效果逐渐好转,该评价结果与实际结果一致,具有可信度与有效性。

表 5 垃圾分类管理评价指标云模型

指标	云模型(E_x, E_n, H_c)				
	优秀	良好	中等	较差	差
C1	(97.5,82.8,8.3)	(90.0,76.4,7.6)	(80.0,67.9,6.8)	(70.0,59.4,5.9)	(32.5,27.6,2.8)
C2	(95.0,80.7,8.1)	(82.5,70.1,7.0)	(70.0,59.4,5.9)	(52.5,44.6,4.5)	(20.0,17.0,1.7)
C3	(95.0,80.7,8.1)	(85.0,72.2,7.2)	(75.0,63.7,6.4)	(60.0,51.0,5.1)	(25.0,21.2,2.1)
C4	(95.0,80.7,8.1)	(85.0,72.2,7.2)	(75.0,63.7,6.4)	(60.0,51.0,5.1)	(25.0,21.2,2.1)
C5	(97.5,82.8,8.3)	(90.0,76.4,7.6)	(80.0,67.9,6.8)	(65.0,55.2,5.5)	(27.5,23.4,2.3)
C6	(92.5,78.6,7.9)	(80.0,67.9,6.8)	(70.0,59.4,5.9)	(55.0,46.7,4.7)	(22.5,19.1,1.9)
C7	(92.5,78.6,7.9)	(80.0,67.9,6.8)	(70.0,59.4,5.9)	(55.0,46.7,4.7)	(22.5,19.1,1.9)
C8	(95.0,80.7,8.1)	(85.0,72.2,7.2)	(70.0,59.4,5.9)	(50.0,42.5,4.2)	(20.0,17.0,1.7)
C9	(2.5,2.1,0.2)	(10.0,8.5,0.8)	(25.0,21.2,2.1)	(45.0,38.2,3.8)	(77.5,65.8,6.6)
C10	(97.5,82.8,8.3)	(90.0,76.4,7.6)	(80.0,67.9,6.8)	(65.0,55.2,5.5)	(27.5,23.4,2.3)
C11	(2.5,2.1,0.2)	(7.5,6.4,0.6)	(15.0,12.7,1.3)	(30.0,25.5,2.5)	(70.0,59.4,5.9)
C12	(97.5,82.8,8.3)	(90.0,76.4,7.6)	(80.0,67.9,6.8)	(65.0,55.2,5.5)	(27.5,23.4,2.3)

表 6 云模型垃圾分类管理综合评价结果

试验阶段	隶属度					等级特征值	综合等级
	I	II	III	IV	V		
S1	0.80	0.81	0.89	0.96	0.34	2.53	Ⅳ
S2	0.84	0.88	0.98	0.94	0.17	2.66	Ⅲ
S3	0.86	0.98	0.97	0.84	0.10	2.82	Ⅱ

3 结 论

1) 区块链技术下垃圾分类管理平台能解决试点小区公众参与度低、垃圾分类质量差和监督管理困难等问题。区块链平台的激励机制在垃圾分类初期能提高垃圾分类参与率,帮助公民培养环保意识;借助区块链平台构建面向公众操作端的“垃圾分类”小程序,通过政策解读、分类技巧、拍照识别和线上交易等功能,提高公众分类技能和垃圾分类质量;时间戳降低数据溯源成本,为政府监管执法提供存证上链;区块链平台的去中心化和智能合约协调垃圾收集公司和清运公司合作,改善垃圾溢满的发生。

2) 垃圾分类管理试验表明 J 小区在公众参与、监督管理和垃圾分类质量等方面得到改善。分类参与率由 52.4%(S1) 上升至 95.9%(S3),小程序“学习”和“帮助”宣传教育板块的满意度平均为 78.8%;试验小区厨余垃圾含水率总体表现为春季低、夏季高,并随着厨余垃圾混杂率的下降(S1 阶段为 32.3%,S3 阶段为 8.8%)与厨余垃圾桶总样含水率趋于一致;可回收垃圾回收潜力一

直处于上升趋势,并于 9 月达 95.1%;政府执法部门借助区块链平台存证上链对违规事件的成功溯源率达 82.4%(S3),同时 85.9%的受访人员对政府监督执法感到满意。

3) 熵权-云模型垃圾分类管理评价方面具有可信度和可行性,该方法能考虑指标选取和试验数据收集的模糊性和随机性,实现定性概念到定量数值间的转变。根据综合确定度 $2.82 > 2.66 > 2.53$,得出评价等级依次是 S1 为Ⅳ(较差)、S2 为Ⅲ(中等)、S3 为Ⅱ(良好)。

4) 本文为垃圾分类管理领域提供区块链技术的试验研究,在进一步的区块链技术下垃圾分类管理研究中可对生活垃圾末端处置和资源化等数据进行收集和对比分析。此外,后续工作会扩大试验范围,以减少区域性差异造成的结果偏差,从而获得更加丰富和具体的区块链技术下生活垃圾分类管理研究。

[参 考 文 献]

- [1] 上海市人民代表大会. 上海市生活垃圾管理条例[EB/OL]. [2023-02-10]. https://mzj.sh.gov.cn/sg-zcfcg/20200619/MZ_sgw78_1060.html.
- [2] HAVUKAINEN J, ZHAN M, DONG J, et al. Environmental impact assessment of Municipal solid waste management incorporating mechanical treatment of waste and incineration in Hangzhou, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141:453-461.
- [3] CHENG J, SHI F, YI J, et al. Analysis of the factors that affect the production of municipal solid waste in China[J].

- Journal of Cleaner Production, 2020, 259:120808.
- [4] VYAS S, PRAJAPATI P, SHAH A V, et al. Municipal solid waste management: dynamics, risk assessment, ecological influence, advancements, constraints and perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2022, 814:152802.
- [5] SOHAG M U, PODDER A K. Smart garbage management system for a sustainable urban life: an IoT based application [J]. Internet of Things, 2020, 11:100255.
- [6] PARDINI K, RODRIGUES J, DIALLO O, et al. A smart waste management solution geared towards citizens [J]. Sensors, 2020, 20:1-15.
- [7] 康庄, 杨杰, 郭濠奇. 基于机器视觉的垃圾自动分类系统设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(7):1272-1280, 1307.
- [8] 王珺, 苏俊恺, 翁小洁, 等. 高校园区垃圾分类站点智能管理系统模型设计探讨: 基于 PLC 技术基础的研究[J]. 海峡科技与产业, 2022, 35(4):57-59.
- [9] GOPALAKRISHNAN P K, HALL J, BEHDAD S. Cost analysis and optimization of Blockchain-based solid waste management traceability system [J]. Waste Management, 2021, 120:594-607.
- [10] 王忆同. 面向居民日常生活垃圾分类的区块链社区激励平台研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [11] DASH S, KALAMDHAD A S. Discussion on the existing methodology of entropy-weights in water quality indexing and proposal for a modification of the expected conflicts [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(38):53983-54001.
- [12] CUI T, SU X, ZHANG Y. Study on compulsory classification management and behavior synergy of Municipal solid waste [J]. Sustainability, 2021, 13(11):1-18.
- [13] YAN F, ZHANG Q, YE S, et al. A novel hybrid approach for landslide susceptibility mapping integrating analytical hierarchy process and normalized frequency ratio methods with the cloud model [J]. Geomorphology, 2019, 327:170-187.
- [14] FAN J, HU T, YU X, et al. Evaluation of freeze-thaw erosion in Tibet based on the cloud model [J]. Frontiers of Earth Science, 2021, 15(3):495-506.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 生活垃圾采样和分析方法: CJ/T 313—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-6.
- [16] MAKHDOOM I, ABOLHASAN M, ABBAS H, et al. Blockchain's adoption in IoT: the challenges, and a way forward [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2019, 125:251-279.
- [17] 广州市市容环境卫生局. 城市生活垃圾分类及其评价标准: CJJ/T 102—2004[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004:1-7.
- [18] WILSON D C, RODIC L, COWING M J, et al. 'Wasteaware' benchmark indicators for integrated sustainable waste management in cities [J]. Waste Management, 2015, 35:329-342.
- [19] SEN GUPTA Y, MUKHERJEE S, DUTTA R, et al. A Blockchain-based approach using smart contracts to develop a smart waste management system [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(8):7833-7856.
- [20] PAVITHRAN D, SHAALAN K, AL-KARAKI J N, et al. Towards building a blockchain framework for IoT [J]. Cluster Computing-the Journal of Networks Software Tools and Applications, 2020, 23(3):2089-2103.
- [21] 景梦园, 王立权, 李铁男, 等. 基于熵权物元可拓法的松花江干流哈尔滨段水质评价 [J]. 水利科技与经济, 2021, 27(7):16-21, 44.
- [22] WANG S, XU Y, WANG D, et al. Effects of industry structures on water quality in different urbanized regions using an improved entropy-weighted matter-element methodology [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(7):7549-7558.
- [23] WU X, LIU S, SUN Y, et al. Ecological security evaluation based on entropy matter-element model: A case study of Kunming city, southwest China [J]. Ecological Indicators, 2019, 102:469-478.
- [24] 禹熙, 李晓英, 吴少霖. 基于组合赋权: 云模型的珠江三角洲水资源可持续性动态评价 [J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1):75-83.
- [25] 马天行, 林允, 周晓斌, 等. 煤层底板突水危险性预测的熵权-正态云模型 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增刊1):171-177.
- [26] 陈虹兵, 王多宏. 基于 AHP-熵权-可拓云模型的城市轨道交通跨线运营效果评价 [J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(2):118-125.

(责任编辑 胡亚敏)