

基于区块链的物流碳足迹溯源平台研究

唐练哲¹, 白 贲²

¹南京邮电大学计算机学院、软件学院、网络空间安全学院, 江苏 南京

²南京邮电大学理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年10月25日; 录用日期: 2024年11月18日; 发布日期: 2024年11月25日

摘要

随着绿色物流目标的推进, 当前物流行业在碳数据溯源及碳交易过程中面临多方协调不一致、数据安全风险、信息单一及应用场景复杂等挑战。本文提出了一种基于区块链技术的物流碳足迹溯源平台方案, 旨在克服碳排放数据管理和交易中的难题。研究首先分析区块链在数据溯源中的应用现状, 提出并验证了碳足迹计算公式, 从平台架构设计、数据存储机制到碳足迹的精确计算与溯源进行了深入探讨。通过仿真实验对碳排放计算公式进行验证, 评估其在实际业务场景中的准确性与应用效果, 从而确保平台在实际操作中的可靠性。仿真结果表明, 平台能够有效实现物流碳排放的动态计算与精确管理, 推动绿色物流发展, 促进碳减排和可持续发展目标的实现。

关键词

碳足迹, 区块链技术, 碳排放计算, 碳足迹溯源平台

Research on Blockchain-Based Logistics Carbon Footprint Traceability

Lianzhe Tang¹, Yun Bai²

¹School of Cyberspace Security, School of Software, School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

²School of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu

Received: Oct. 25th, 2024; accepted: Nov. 18th, 2024; published: Nov. 25th, 2024

Abstract

As the goal of green logistics advances, the logistics industry faces challenges in carbon data traceability

and carbon trading, such as inconsistencies in multi-party coordination, data security risks, limited information sources, and complex real-world applications. This paper proposes a blockchain-based logistics carbon footprint traceability platform to address these challenges in carbon emission data management and trading. The study begins with an analysis of the current applications of blockchain in data traceability, proposing and validating a carbon footprint calculation formula. It further explores the platform's architectural design, data storage mechanisms, and methods for precise carbon footprint calculation and traceability. By building a highly reliable carbon footprint traceability platform, this research aims to promote the development of green logistics, facilitate carbon reduction initiatives, and achieve sustainable development goals (SDGs).

Keywords

Carbon Footprint, Blockchain Technology, Carbon Emission Calculation, Carbon Footprint Traceability System

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球应对气候变化的背景下，中国积极推动实现 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和的目标。作为碳排放的重要来源，物流行业需加快构建完善的碳排放认证和监测体系，推动绿色技术创新，从而助力“双碳”目标的实现[1]。在此背景下，构建物流碳足迹溯源平台具有重要意义。碳数据溯源能帮助企业明确掌握碳排放情况，制定减排计划，优化资源利用，提升绿色供应链管理和竞争力，同时透明可靠的数据支持企业参与碳市场交易，激励更多减排行动[2]。

然而，物流行业在碳数据溯源和碳市场交易中面临数据标准不统一、数据不一致性及篡改风险等挑战，影响了碳交易的公平性和顺利进行[3]。区块链技术凭借其去中心化、透明性和不可篡改性，为解决这些问题提供了新方案[4]。各参与方通过区块链安全共享物流环节中的关键数据，实现精准的碳足迹追踪和监管，增强了数据交换的安全性和可信度，为绿色物流转型提供了技术支持。

2. 相关工作

区块链技术，作为一种分布式账本技术，通过其去中心化、不可篡改及全透明的特性，为多个行业提供了全新的解决方案。其核心优势在于能够安全地记录、存储和传输数据，同时保证数据的真实性和不可更改性[5]。

在数据溯源领域，区块链技术特别适用于确保数据的完整性和透明度，这使得从原产地到消费者的每一个环节都能被准确追踪和验证。首先需明确定义数据溯源的界限，包含追踪对象与相关数据种类；随后构建数据溯源平台；最终，执行数据溯源流程以实现溯源目标[6]。数据可溯源被视为区块链技术落地的最佳性能之一，许多领域已成功运用区块链技术来实现数据溯源。在农业上，农产品安全成为社会热点，众多溯源系统相继出现。此外，目前有关区块链数据溯源的重要研究成果主要集中在溯源模型、溯源存储以及溯源应用等方面。刘家稷采用一种基于双链的防伪溯源系统方案，将私有链和公链的优势结合起来，解决产品标签复制、滥发以及质量问题定位难的挑战[7]。Amin 等建立了一个支持不可变交易和时间快照的区块链数据溯源信息存储系统，该存储系统通过在关系表中嵌入区块链，使系统数据库以防篡改的方式高效存储数据溯源相关信息[8]。

国内外学者正在探索区块链技术在碳减排和数据溯源方面的应用, 展现出技术融合的前沿进展。Lixuan Che 等人提出了一种基于区块链的碳核查机制, 通过“私有链+联盟链”的数据控制模型实现了核查数据的全程可追溯性[9]。

本研究旨在构建一个基于区块链技术的公路物流碳足迹追踪平台, 通过去中心化、数据不可篡改等特性, 确保碳排放数据的透明、真实与可追溯性。平台支持公路物流企业、监管机构及第三方认证机构的碳排放数据上传、存储、核验与共享, 实现碳减排与碳交易的自动化与透明化。通过该系统, 提升碳足迹管理效率, 推动绿色物流发展, 助力国家“双碳”目标的实现。

3. 本文模型

3.1. 物流碳足迹计算模型

公路物流碳足迹的计算区别于城市碳排放量的统计方法, 后者通常基于汇总数据并遵循通用的碳排放计算规则。相反, 公路物流碳足迹的测算是一种动态且涉及多重因素的实时计算过程, 旨在准确估算货车司机在公路行驶过程中产生的碳排放量[10]。此类计算需综合考虑包括货车类型、燃料类型、总行驶距离、满载及空载行程、天气状况以及路面情况等多个对碳排放具有影响的关键因素[11], 以建立具体的碳排放计算模型。关键数据, 如行驶距离、车辆类型、货物重量以及燃料的消耗量、净热值和二氧化碳排放系数等, 主要来源于对司机每个订单的详细记录。通过这种方法, 可以动态并准确地计算出司机在一个月内行驶的碳排放总量, 这种精确的预测为政府部门在公路运输碳排放统计及制定相关减碳政策提供了科学依据。本文基于现有文献总结归纳, 提出碳排放量的测算公式如下:

$$BE_y = \sum_i [VKT_{BL,i,j,y} \times EF_{BL,i,j,y} \times WIF_{i,j,y} \times CAF_y \times 10^{-3}] \quad (1)$$

上式中, i 表示货车使用的不同燃料类型, 包括燃油、燃气等; j 表示货车的不同车类; BE_y 表示对应货车第 y 月使用货车的碳排放量; $VKT_{BL,i,j,y}$ 表示货车第 y 月使用的燃料种类 i 的货车车类 j 完成的总行程; $EF_{BL,i,j,y}$ 表示货车第 y 月使用燃料种类 i 的营运货车车类 j 完成的每公里的排放因子; $WIF_{i,j,y}$ 表示是根据天气状况调整的影响系数; CAF_y 表示根据路况因素、驾驶行为、车辆维护状况、和货物类型的综合调整系数。

由于 $VKT_{BL,i,j,y}$ 以及 $EF_{BL,i,j,y}$ 均与货车实载率有关[12], 实在率即车辆在特定条件下的实际完成周转量与理论最大周转量的比例, 实际完成周转量为本月所有订单中每一段路程乘以实际载货重量的总和, 实在率的测算如公式:

$$LF_{BL,i,j,y} = \frac{\sum k d_k \times w_k}{w_{max} \times d_{total}} \quad (2)$$

该公式反映了车辆的效率和载货能力的利用程度, 式中, $LF_{BL,i,j,y}$ 货车第 y 月燃料种类 i 的营运货车车类 j 的实载率, k 表示为一系列订单, d_k 表示每个订单的行程为, w_k 表示相应的载货重量, w_{max} 表示车辆的最大载重, d_{total} 表示本月总行程。

1) $EF_{BL,i,j,y}$ 的计算

综合考虑实载率、空载时每公里排放因子占满载时每公里排放因子的比值以及满载时每公里排放因子, 货车第 y 月使用燃料种类 i 的营运货车车类 j 完成的每公里的碳排放因子表示如下:

$$EF_{BL,i,j,y} = [LF_{BL,i,j,y} + (1 - LF_{BL,i,j,y}) \times K_{i,j,y}] \times FC_{Full,i,j,y} \times NCV_i \times EF_{CO_2,i} \quad (3)$$

$LF_{BL,i,j,y}$ 表示货车第 y 月燃料种类 i 的营运货车车类 j 的实载率; $K_{i,j,y}$ 表示货车第 y 月燃料种类 i 的营运货车车类 j 空载时每公里排放因子占满载时每公里排放因子的比值; $FC_{Full,i,j,y}$ 表示货车第 y 月燃料

种类 i 的营运货车车类 j 满载时每公里的燃料消耗量; NCV_i 表示燃料种类 i 的净热值; $EF_{CO_2,i}$ 表示燃料种类 i 的 CO_2 单位热值的排放因子。

2) $WIF_{i,j,y}$ 的计算

考虑到天气对燃料效率的影响(如温度极低或极高时, 燃料消耗会增加, 风力也会影响燃料效率, 顺风时减少, 逆风时增加), 引入天气影响系数(Weather Impact Factor, WIF), 这个系数将基于天气状况(如温度、湿度、风速等)调整每公里的排放因子[13] [14]。根据上述文献基于 $WIF_{i,j,y}$ 以下几个参数构建:

温度调整因子 TAF : 温度对燃料效率有显著影响。极冷或极热的温度都会增加燃料消耗。

$$TAF_y = \alpha \times (T_{avg} - T_{opt}) \quad (4)$$

其中, T_{avg} 是该月的平均温度, T_{opt} 是燃料效率最优的温度, α 是温度变化对燃料效率影响的系数。

湿度调整因子 HAF : 湿度对燃油的燃烧效率也有影响, 尤其是在极端条件下。

$$HAF_y = \beta \times (H_{avg} - H_{opt}) \quad (5)$$

其中, H_{avg} 是该月的平均湿度, H_{opt} 是最优湿度值, β 是湿度变化对燃料效率影响的系数。

风速调整因子 WAF : 风力可以影响车辆行驶的阻力, 从而影响燃料效率。

$$WAF_y = \gamma \times W_{avg} \quad (6)$$

其中, W_{avg} 是该月的平均风速, γ 是风速对燃料效率影响的系数。

假设每个因素都独立对燃料效率产生影响, 且影响量是互相叠加的。通过这种方式, 将天气变化的影响整合到碳排放量的计算中, 从而提供更准确和具体情况适应的碳排放评估。即:

$$WIF_{ijy} = 1 + TAF_y + HAF_y + WAF_y \quad (7)$$

其中 TAF_y , HAF_y , WAF_y 分别是基于当地历史天气数据或预测数据计算得到的调整因子, 这些因子可以是正值也可以是负值, 具体取决于它们是增加还是减少碳排放。

结合订单时间的天气数据, 将每个订单的天气数据整合到月度综合数据中, 计算当月所有订单对应天气数据的加权平均值, 其中权重可以基于订单的行驶距离或货重。

3) 综合调整系数 CAF 的计算

虽然行程与燃料每公里碳排放量为主要碳排放量的因素, 但是路况因素、驾驶行为、车辆维护状况和货物类型也会燃料的效率以及排放量造成不可忽视的影响[15]。

合理结合路况因素 RCF 、驾驶行为 DBF 、车辆维护状况 MCF 、和货物类型 GTF 的影响, 引入一个综合调整系数 CAF , 采用一个加权几何平均的计算方法, 允许考虑到每个因素对碳排放量影响的不同程度, 由于因素往往是相互影响而非简单线性叠加, 通过几何平均, 能确保了所有因素的综合效应是乘性。 CAF 计算公式如下:

$$CAF_y = \left(RCF_y^{w_{RCF}} \cdot DBF_y^{w_{DBF}} \cdot MCF_y^{w_{MCF}} \cdot GTF_y^{w_{GTF}} \right)^{\frac{1}{w}} \quad (8)$$

其中, $W = w_{RCF} + w_{DBF} + w_{MCF} + w_{GTF}$ 是所有权重的总和, 确保了加权几何平均的标准化。

智慧物流碳足迹计算旨在通过收集订单相关数据并应用碳排放计算公式, 精确评估每笔订单在运输过程中的碳排放量, 帮助企业了解和管理物流运作的环境影响, 推动绿色物流发展, 实现碳减排目标。通过计算和分析, 企业可以采取相应措施, 优化物流运作, 减少碳排放, 促进可持续发展。

3.2. 基于区块链的物流碳足迹溯源平台模型

如图 1 所示, 物流碳足迹溯源平台主要基于区块链、智能合约、云计算等核心技术, 并结合高精度

地图与定位等技术作为数据收集的支撑。平台分为数据上链和链上数据展示两大模块。数据上链模块包括司机信息上链、司机汇总信息登记、订单信息修改等功能，用户在界面上通过输入司机 id、车型、车牌号、载重及颜色等信息，平台对输入参数进行合法性校验后，通过参数校验的数据将被保存到区块链中。而链上数据展示模块则分为司机信息展示、区块浏览器、以及溯源界面三个部分，通过输入司机的 id，可溯源当前链上的司机信息、汇总信息、相关的订单信息。

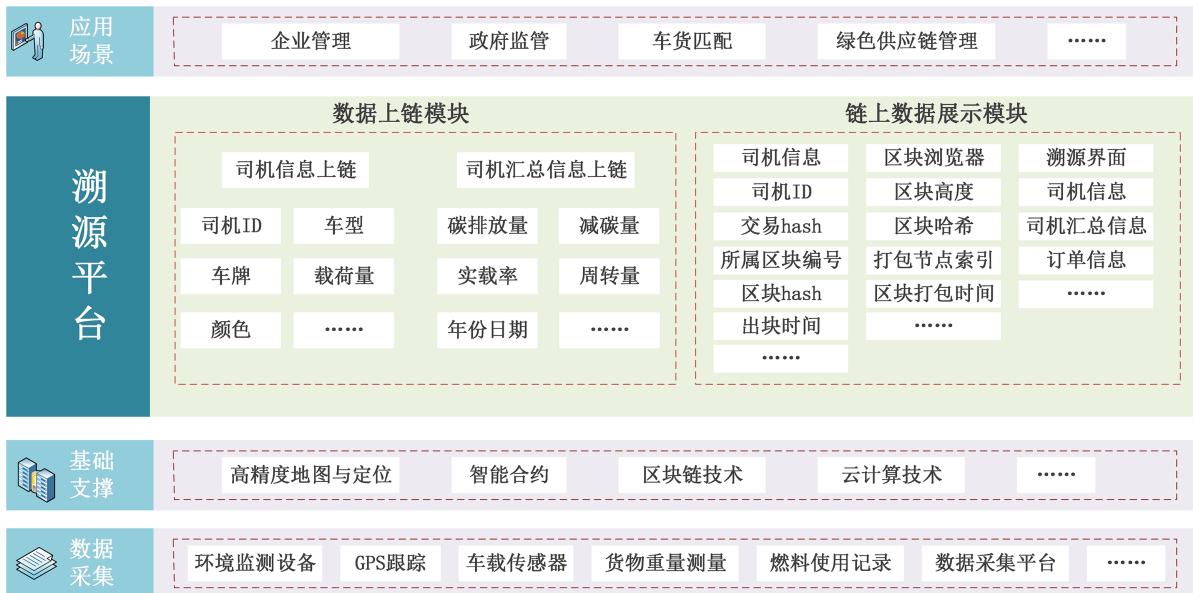


Figure 1. Blockchain-based logistics carbon footprint traceability platform model

图 1. 基于区块链的物流碳足迹溯源平台模型

数据采集层是平台的基础，包括环境监测设备、GPS 跟踪、车载传感器、货物重量测量等方式作为公路物流碳足迹溯源平台提供数据来源，帮助平台实时监测和评估运输过程中的碳排放情况。

3.3. 基于区块链的物流碳足迹溯源平台架构

本文构建了一个基于 FISCOBCOS 联盟链的物流碳足迹溯源体系框架，平台架构如图 2 所示。该框架自下而上包括感知层、区块链服务层、数据分析层、接口层以及应用层。

感知层：利用智能设备如 GPS 和摄像头等，此层负责捕获并记录物流全过程的碳足迹信息。

区块链服务层：该层主要基于 FISCO BCOS 作为基础的区块链服务，这一层由数据层、网络层、共识层以及合约层组成。数据层主要关注将物流碳数据采用时间戳和哈希算法加工后记录到区块链中，并运用数字签名及 Merkle 树确保数据完整性和不可篡改性，加密技术则保护了数据安全。网络层依托于 P2P 技术，构建了稳定的节点管理和传输验证机制。共识层采用 PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance) 算法，实现全网络节点间数据的一致性。共识过程中通过主节点维护全局视图和监听机制，以降低非诚信节点造成的风险。在合约层，通过智能合约实现数据的自动记录和物流碳足迹溯源共享应用的自动执行。在此过程中，需要建立相应的智能合约库，对智能合约进行管理与部署。

数据分析层：提供数据库服务以管理区块链上的数据，并运用先进算法进行数据训练、特征提取及分析，为碳足迹追溯提供决策支持。具体包括分析司机画像、计算碳足迹和估算碳资产等，以减少空载率，提高运输效率。

接口层: 提供标准化接口, 便于上层应用获取区块链存储的数据和数据分析层的洞察。

应用层: 该层实现了平台的核心功能, 包括信用评价、信息追溯、碳数据计算及碳资产认证等, 以支持物流行业的绿色发展和双碳目标的实现。



Figure 2. Architecture of the blockchain-based logistics carbon footprint traceability platform
图 2. 基于区块链的物流碳足迹溯源平台架构图

4. 实验

4.1. 碳排放量计算仿真

实验选取了某物流公司在 2023 年提供的 1000 条实际物流订单数据, 涵盖了不同类型的货车、燃料以及行驶路线。基于 3.1 中提出的物流碳排放计算公式, 对某企业提供的物流订单数据进行了详细的碳排放量仿真分析, 以评估该计算模型在实际应用场景中的表现。通过对比仿真得到的碳排放结果与实际数据, 验证计算公式的准确性及其在实际业务运作中的可行性。其中, 燃料的排放参数如表 1 所示。

Table 1. Fuel emission parameters
表 1. 燃料的排放参数表

燃料种类	燃料净热值	单位热值排放因子
柴油	46.05 MJ/kg	0.0741 (kg CO ₂ /MJ)
汽油	43.12 MJ/kg	0.0693 (kg CO ₂ /MJ)

如图 3 所示, 直观展示仿真计算与实际数据之间的对比, 图中详细展示了每个订单的模拟碳排放量与实际碳排放量。该图表不仅直观展示了模拟结果的一致性, 而且还突出了模型在各个订单数据点上的

表现, 为进一步的分析与优化提供了依据。

该模型计算得出的平均误差率为 0.0809, 结果表明仿真得到的碳排放量与实际数据之间具有较高的一致性。实验表明, 通过本文提出的计算方法, 能有效地计算实际物流中的碳排放量。

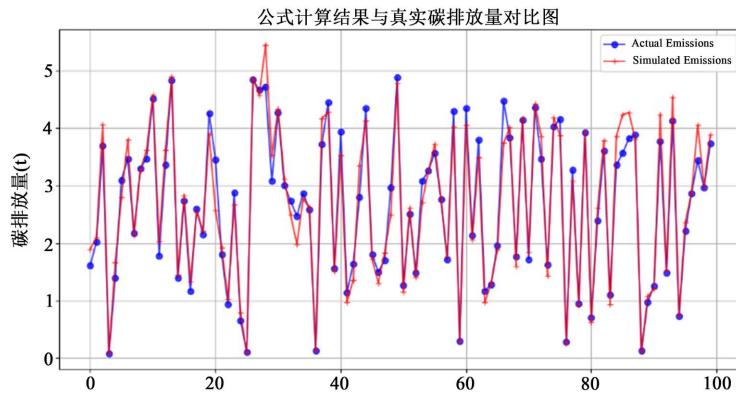


Figure 3. Comparison of results

图 3. 结果对比图

4.2. 平台搭建与应用

1) 区块链模块部署

区块链环境搭建在 VMware 虚拟机上, 运行 64 位的 Ubuntu 20.04 系统, 配置 8 GB 内存和 50 GB 硬盘空间。平台基于 FISCO BCOS 联盟链, 部署在 CentOS 7.9 环境中。智能合约使用 Solidity 语言编写, 每个合约工厂实现对应组织的服务, 并采用 PBFT (实用拜占庭容错) 共识机制, 确保数据一致性与安全性。

2) Web 服务及客户端服务部署

前端界面主要提供司机信息和物流碳足迹信息的管理功能, 通过服务接口与区块链网络相连。经过验证的参与方能通过节点 API 调用智能合约, 完成数据上链。平台采用 B/S 架构, 前后端分离, 运用 Spring Boot、My Batis、Vue、Element-ui 等技术, 并将 MySQL 作为链下数据库, 整合 FISCOBCOS 联盟链提供区块链技术支持。

3) 平台功能

平台主要有两个核心功能模块: 链上数据展示与数据上链模块。链上数据展示模块赋予用户查阅区块链上已存储的司机信息的能力, 此外, 区块链浏览器提供了实时的区块链动态与统计信息, 增强了数据的可视化和透明度。用户可以通过平台的直观界面, 轻松地访问司机的详尽资料, 包含身份标识、交易散列值、所归属的区块编号、区块散列值以及区块生成时间等关键信息。进一步点击, 便可深入探索司机关联的货车详细信息、累积信息和订单细节。溯源界面则提供了通过司机 ID 追溯查询的便捷通道, 以此可以回溯并审查当前链上的司机信息、汇总信息以及相应的订单数据。

5. 结论

本文基于区块链技术构建了一个创新的物流碳足迹溯源平台, 通过完善的系统架构和精准的碳足迹计算模型, 实现了碳排放数据的透明追踪和高效管理。平台的设计包括感知层、区块链服务层、数据分析层、接口层和应用层。感知层通过 GPS、车载传感器和环境监测设备等收集数据, 区块链服务层则确保了数据的完整性和安全性, 智能合约自动化了数据的记录与共享, 为各方的协同合作提供了有效支撑。数据分析层和接口层的设计使平台能够高效处理和传输数据, 并支持用户友好的可视化功能。

在碳足迹计算方面，本文提出的模型考虑了多种影响因素，包括车辆类型、燃料类型、行驶距离、天气状况和路况等。该模型在实际业务场景中的应用通过实验得到了验证，结果显示，模型的平均误差率仅为 0.0809，能够精准反映出实际运输过程中的碳排放情况，验证了其在不同业务场景下的适用性和稳定性。

本文所构建的物流碳足迹溯源平台，在区块链技术的支持下，实现了对碳排放数据的透明、高效管理，并提供了精准的碳足迹计算方法。实验验证表明，平台在多种业务场景下都展现出了高效、稳定的表现，为推动绿色物流和实现可持续发展提供了技术支持。未来研究将着眼于进一步优化平台的技术细节，提升其在国际碳市场中的适应性，并通过增强企业和公众的参与度，确保平台的长期发展和广泛应用。

基金项目

贵州省科技支撑项目([2023]一般 272)资助。

参考文献

- [1] 国务院关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(7): 39-43.
- [2] 刘然, 刘哲, 赵洁玉, 等. 我国物流企业碳排放管理体系建设研究[J]. 物流技术与应用, 2022, 27(7): 114-118.
- [3] 魏际刚, 漆云兰. 煤炭物流统一大市场建设的进展及对策研究[J]. 煤炭经济研究, 2023, 43(7): 29-33.
- [4] 王利朋, 关志, 李青山, 陈钟, 胡明生. 区块链数据安全服务综述[J]. 软件学报, 2023, 34(1): 1-32.
- [5] Nakamoto, S. (2009) Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- [6] 张鹏. 大数据背景下区块链技术在数据溯源中的应用研究[J]. 工业信息安全, 2023(4): 79-84.
- [7] 刘家稷, 杨挺, 汪文勇. 使用双区块链的防伪溯源系统[J]. 信息安全学报, 2018, 3(3): 17-29.
- [8] Beirami, A., Zhu, Y. and Pu, K. (2019) Trusted Relational Databases with Blockchain: Design and Optimization. *Procedia Computer Science*, **155**, 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.022>
- [9] Che, L., Li, E., Xin, H., Zhang, J., Xu, C., Li, Q., et al. (2023) A Carbon Emissions Verification Mechanism Based on Blockchain and Reverse Auction. 2023 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Blockchain Technology (AIBT), Zibo, 2-4 June 2023, 71-75. <https://doi.org/10.1109/aibt57480.2023.00021>
- [10] 胡月琪, 张玉召, 邓璐媛, 等. 铁路物流中心运营阶段碳排放计算方法[J/OL]. 铁道标准设计: 1-8. <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202307110001>, 2024-11-15.
- [11] 郑琰, 贲宇姝, 王康得, 等. 物流企业的碳排放效率评价及驱动因素分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 11-21.
- [12] 凌建群. 载重车油耗计算方法及分析[J]. 柴油机设计与制造, 2006, 14(1): 24-27.
- [13] Fafoutellis, P., Mantouka, E.G. and Vlahogianni, E.I. (2020) Eco-Driving and Its Impacts on Fuel Efficiency: An Overview of Technologies and Data-Driven Methods. *Sustainability*, **13**, Article 226. <https://doi.org/10.3390/su13010226>
- [14] Ye, T., Liao, Y., Ji, C., Yin, F. and Zhong, Z. (2022) A Carbon Emission Calculation Method Based on the Full Life Cycle of Wind Farms Considering Environmental Impact. 2022 Power System and Green Energy Conference (PSGEC), Shanghai, 25-27 August 2022, 415-419. <https://doi.org/10.1109/psgec54663.2022.9881146>
- [15] 林培群, 张扬, 罗芷晴, 等. 融合多源数据的高速公路路段车流碳排放精细测算方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(7): 100-108.