

考虑信用评分机制的电力碳排放交易区块链模型

崔树银, 陆奕, 常啸

(上海电力学院经济与管理学院, 上海市 200090)

摘要: 区块链是一种新兴的共享数据库技术, 由于其去中心化、透明性、公平性的特点开始被研究应用到各个领域当中。在传统碳排放交易机制的基础上引入信用评分机制, 定义了交易优先权值, 进而提出了碳排放交易区块链网络 (blockchain-enabled emission trading network, BETN) 模型。此模型中结合碳排放交易机制建立了智能合约模型 (smart contract, SC), 从而实现了碳排放权和货币的自动计量。最后对3家有着不同碳排放权需求的电力企业进行模拟仿真, 结果表明: BENT模型可以更好地反映市场参与者的碳排放交易需求, 区块链技术能够保障信息的安全存储和交互; 引入信用评分机制有利于市场公平公正运行, 进一步约束市场参与者, 推动实现碳减排的目标。

关键词: 碳排放交易; 区块链; 信用评分机制; 交易优先权; 智能合约

Research on Model of Blockchain-enabled Power Carbon Emission Trade Considering Credit Scoring Mechanism

CUI Shuyin, LU Yi, CHANG Xiao

(School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

ABSTRACT: Blockchain is an emerging shared database technology. Due to its decentralization, transparency and fairness, it has been researched and applied in various fields. On the basis of the traditional carbon emission trading mechanism, a credit scoring mechanism is introduced to define the transaction priority value (PV), and then the carbon emission trading blockchain network model (BENT) is proposed. It is worth mentioning that a smart contract model (SC) combined with the carbon emission trading mechanism is established in this model, thus achieving automatic measurement of carbon emission rights and currency. Finally, simulations of three power companies with different carbon emission right requirements show that the BENT model can better reflect the carbon emission trading needs of market participants, and ensure the safe storage and interaction of information through blockchain technology and the scoring mechanism is conducive to fair and equitable operation of the market, further constraining market participants and promoting the goal of achieving carbon emission reduction.

This work is supported by the Project of Shanghai University Humanities and Social Sciences Key Research Base "One Belt, One Road" Energy and Power Management and Development Strategy Research Center (No. WKJD15004).

KEYWORDS: carbon emission trade; blockchain; credit scoring mechanism; transaction priority value; smart contract

中图分类号: TM 621; F 205

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2019)01-0104-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2019.01.013

0 引言

气候变化是21世纪人类面临的共同挑战, 低碳经济已经成为全球各国的发展新潮流。在美国宣布退出《巴黎协定》时, 中国又再一次表明将继续坚定履行减排承诺, 切实推进减排目标, 即到2030年CO₂

排放量达到峰值, 单位国内生产总值CO₂排放量比2005年下降60%~65%, 非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右, 森林蓄积量比2005年增加45亿m³左右^[1], 这对中国的能源发展提出了严峻的挑战。

电力是我国能源的重要组成部分, 2015年仅电力行业CO₂排放量就达到35.5亿t^[2]。2017年12月, 国家发改委发布《全国碳排放权交易市场建设方

基金项目: 上海高校人文社会科学重点研究基地“一带一路”能源电力管理与发展战略研究中心项目(WKJD15004)

案(发电行业)》^[3],以电力行业为突破口的全国碳交易市场正式启动,意味着中国成为全球规模最大的碳交易市场。碳交易机制的引入在为电力系统灵活处理其碳排放提供了有效途径的同时,也影响了电力系统运行的成本。文献[4-6]均在总成本中计及了碳交易成本,并分析了碳交易机制的引入对电力系统运行的影响。文献[7]在全面阐述低碳经济对电力系统规划运行的影响的基础上,建立了低碳经济模式下电力系统规划运行方法的整体研究框架。文献[8]结合国内外碳排放交易的发展情况从发电侧和电网侧分析了碳排放交易机制对发电行业的影响。文献[9]考虑了机组的碳排放权约束,并建议通过合作减排机制来获得较高收益。文献[10]提出了一种兼顾节能减排的竞价交易模式,分析了碳交易机制的实施对发电权交易的影响。文献[11-12]均基于多 Agent 模型研究了碳排放交易机制对经济和环境的影响。

以上文献对于在电力行业中实行碳交易机制均具有一定的借鉴意义,但也存在一定的问题:(1)碳排放交易数据的安全性问题;(2)利益分配机制不透明,信用成本增加;(3)碳交易市场方面买方与卖方信息不匹配,进行动态组合时难以达到理想的利用率,导致整体效益不高。

针对上述存在的问题,本文首先简要介绍碳排放交易,分析将区块链技术运用于碳交易市场的可能性;其次,针对碳排放交易区块链的去中心化的特点,在传统碳排放交易机制的基础上引入信用评分机制,定义交易优先权值;然后,建立基于区块链技术的碳排放交易模型;最后,利用含 3 个典型市场参与者的算例进行仿真并对结果进行分析。

1 碳排放交易与区块链技术

碳排放交易是以经济手段来控制碳排放量,究其本质是将碳排放空间分配到各排放主体,并在一定规则下允许市场化交易,各主体按照市场规律做出灵活选择,在交易过程中追求自身利益最大化,从而推动全社会在既定碳排放总量空间下实现最大的产出效益,最终达到碳减排的目的^[13]。

2008 年,北京、上海、天津相继成立环境资源交易所,2011 年,国家发改委批准建立北京、上海、天津、湖北、重庆、广东、深圳 7 个碳排放交易试点。2013 年至 2014 年,7 个试点的碳排放交易工作得到落实并实施。在这期间虽然积累了一些宝贵经验,但要在全国范围内扩展碳排放交易市场仍存在一系列的挑战和需求^[14-15]。

区块链作为比特币的底层技术,因其去中心化、

透明化、合约执行自动化、可追溯性等特点^[16]逐渐引起人们的关注。从数据角度来看,区块链是一个几乎无法篡改的数据库,相当于一个分布式账本,由系统参与者共同维护数据;从技术角度来看,区块链并非是一种单一的技术,是分布式数据存储、共识机制、加密算法等多种技术的融合,这些技术经过创新组合在一起形成了一种新的数据记录、存储和表达方式^[17]。区块链的出现恰恰为解决当前碳排放交易市场中存在的问题提供了一种可能。

首先,区块链技术为追踪碳足迹提供了一个技术平台,保证碳排放权的来源以及所有交易路径都可被追溯根源,确保交易的合法有效性,避免重复交易,这有利于约束市场参与者的交易行为,规范市场。其次是数据信息的公开透明,区块链可以在保持信息的可信度和一定隐私水平的前提下为其用户提供信息,保证交易的公平合理性,有助于市场的监管。最后,区块链技术的智能化与自动化保证了碳排放交易政策的执行力与落地的及时性,将不断推动碳排放交易市场向前发展。

2 融合信用评分机制和区块链技术的碳排放交易

2.1 基于区块链技术的碳排放交易流程

基于区块链技术的碳排放交易结构如图 1 所示。在以区块链为技术基础的碳排放交易中,碳排放交易区块链网络(blockchain-enabled emission trading network, BETN)作为整个碳交易市场的信息交互与数据存储中心,充分发挥区块链技术的去中心化特点,实现碳数据存储、确保信息安全等功能。BETN 中购买碳排放权的流程如图 2 所示。卖方将碳排放权出售额和售价等信息发布到 BETN 当中,由买方读取交易信息,形成报价单和可交易选择列表,从中选择满足自身要求的卖家。若交易达成则智能合约自动执行,自动交换货币并计量更新碳排放权;若不选择交易,买方可以将碳排放需求额和出价等信息发布到 BETN 中,以公开招标方式进行购买,由卖方读取招标信息并从中选择符合要求的买家,交易达成则同样执行智能合约。

2.2 基于信用评分的碳排放交易规则

由于区块链的去中心化特点,交易过程中不再有第三方管理、分类、匹配交易信息,也就是需要市场参与者自己收集交易信息并以此来寻找合适的交易方。那么,势必产生主动市场参与者和被动市场参与者^[18]。主动市场参与者指竭尽所能收集全面的交易信息并主动寻找合适的交易对象的参与者,而被动市

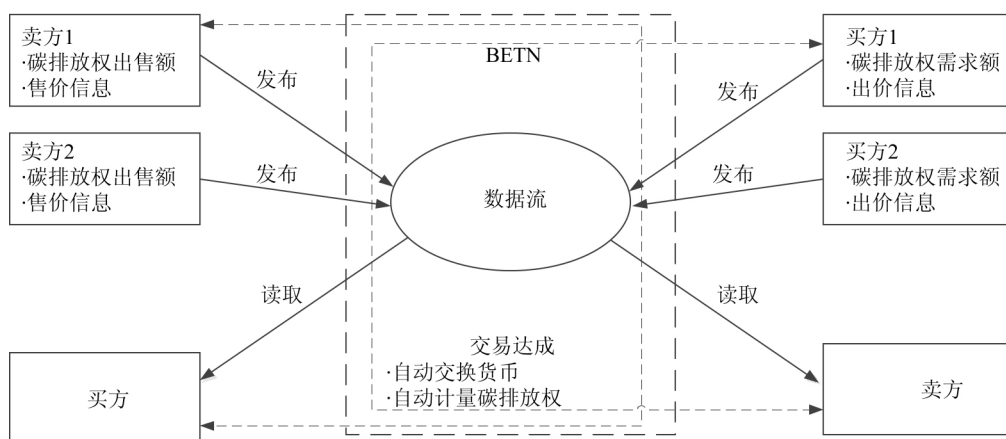


图1 基于区块链技术的碳排放权交易结构

Fig. 1 Structure diagram of carbon emission trading based on blockchain technology

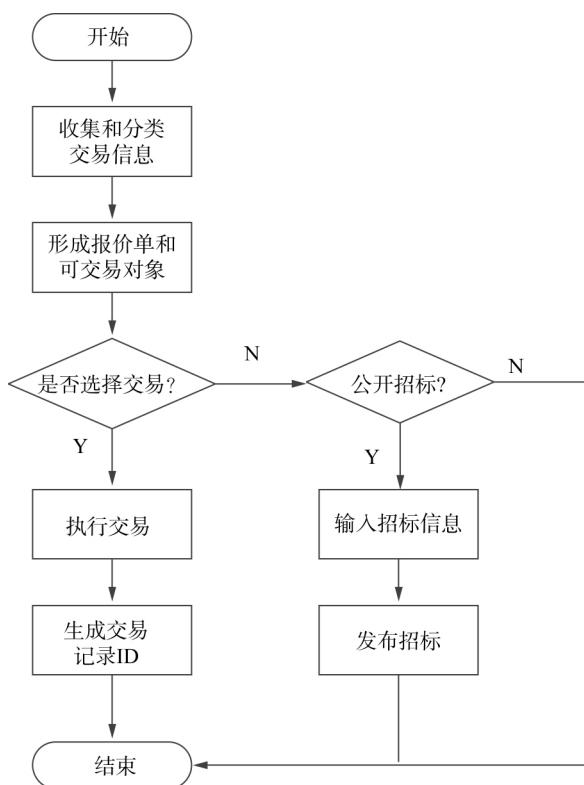


图2 BETN中购买碳排放权流程

Fig. 2 Buying process of emission trading in BETN

场参与者指发布交易信息后就等待其他参与者来与其交易的参与者。

为了调动市场参与者的积极性,落实碳排放交易制度,在传统碳排放交易中引入信用评级制度。根据区块链网络上的历史交易记录、历史碳排放量、历史履约情况等信息,由第三方评级机构对市场参与者进行信用评级,并发表在区块链网络中。不同的信用评级等级对应不同的交易信息获取权限,信用评级等级

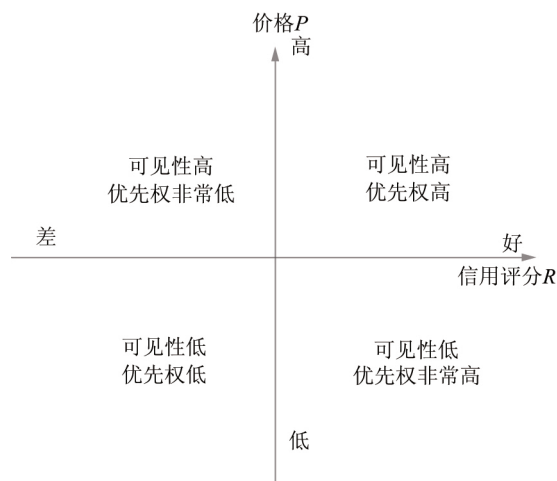
越高可获取信息的权限就越大,反之则获取信息的权限就越小。

此外,信用评分还会影响交易优先权。定义交易优先权值如下:

$$V_{tp} = \frac{P}{R} \quad (1)$$

式中: P 为价格; R 为信用评分。 V_{tp} 数值越小,代表交易优先权越高,即在可选择交易列表中的排名越靠前;反之,则在可选择交易列表中的排名越靠后。

对于被动卖方来说,需要综合考虑价格 P 和信用评分 R 对交易的影响。买方希望购买碳配额的价格越低越好,以此控制购买碳配额的成本,因此在读取卖家公布的交易信息时按照价格由高到低进行排序。如图3所示,当卖家售价高时,该售价的可见性也高,但并不代表该交易在卖家的交易列表排名靠前,因为交易优先权的高低还需考虑信用评分 R 的影

图3 信用评分 R 和价格 P 的关系图Fig. 3 Relationship between credit score R and price P

响。在同样的售价情况下, R 越高的卖家, 交易优先权也越高。

对于被动买方来说, 需要考虑的因素相对比较简单。此时卖方希望出售碳配额的价格越高越好, 以此获得更高的收益, 因此在读取买方公布的招标信息时按照从低到高进行排序。此时, 出价越高的买家在卖家的交易列表中的排名就越高, 出价成为卖家考虑交易的主要因素, 只有在出价相等的情况下, 优先考虑 R 较高的买家。

3 碳排放交易区块链网络模型

本文以文献 [19] 为基础, 并结合碳排放交易市场运行机制建立了碳排放交易的智能合约模型, 由此建立 BETN 模型如下:

$$\text{BETN} = (S, B, C_{\text{ETIB}}, SC, T, \alpha) \quad (2)$$

式中: $S = \{s_i | i \in N^+\}$ 为卖方有限集, i 为卖家编号; $B = \{b_j | j \in N^+\}$ 为买方有限集, j 为买家编号; C_{ETIB} 为碳排放交易索引区块链, 见下文定义 1; SC 为智能合约, 见下文定义 2; $T = \{t_k | k \in S \times B, k \in N^+\}$ 为碳排放交易集, 其中 $S \times B$ 为 S 和 B 的笛卡尔集, k 为交易编号; $\alpha: T \rightarrow C_{\text{ETIB}}$ 为 T 到 C_{ETIB} 的映射。

在碳排放交易区块链网络当中, 卖方与买方都有专属的 ID, 每个 ID 在注册时就提交相关信息, 例如账户、能源类型、地理位置、碳配额等, 以此作为参与碳排放交易的唯一身份标识。

定义 1: 碳排放交易索引区块链 (emission trading index blockchain, ETIB):

$$C_{\text{ETIB}} = (C, \text{ETCA}) \quad (3)$$

式中: C 为初始区块链; ETCA 为碳排放交易共识算法 (emission trading consensus algorithm, ETCA), 是根据动态授权拜占庭容错共识算法^[20] (dynamic delegated Byzantine fault tolerance, DDBFT) 提出的。ETCA 的大致原理^[20] 为: 利用授权机制在网络节点中选出共识记账代表节点, 经过共识提案和共识确认 2 个阶段最终达成共识形成新区块。算法流程如图 4 所示。

算法具体步骤如下:

(1) 交易发起者发起一笔交易, 向全网广播, 并附上发起者 ID。

(2) 所有节点独立监听 ETBN 全网数据, 在收到一笔交易后判断交易的合法性, 若合法则写入内存, 记录到区块数据结构的交易字段中; 若非法, 则直接丢弃。

(3) 共识记账代表节点在收到交易后, 按照当前配置信息 (编号为 c) 和前一个区块信息构造当前区块 b 。

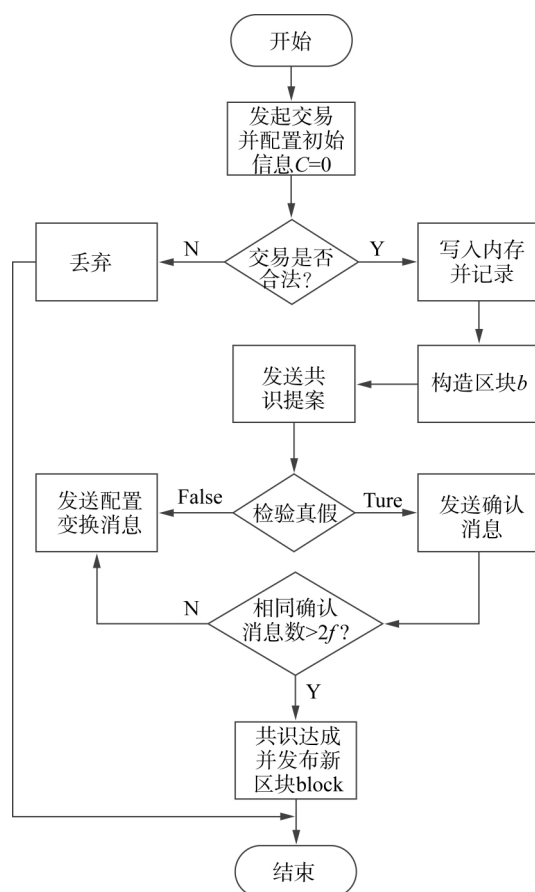


图 4 ETCA 算法流程

Fig. 4 Flowchart of ETCA

(4) 经过时间 t 后, 主节点 p (p 为主节点编号) 向共识从节点 m (m 为从节点编号) 广播发送共识提案 CP_p , 消息格式为 $\langle \langle \text{ConsensusProposal}, c, h, p, bd \rangle, block \rangle$, 其中 h 为当前所在区块高度; $block$ 为传播的区块信息; bd 为 $block$ 摘要, $bd = \langle \text{SID}, \text{BID}, P, R, V_{tp} \rangle$, SID 为卖家 ID, BID 为买家 ID。

(5) 所有从节点 m 在收到共识提案后进行检验, 若确认为真则向其他节点发送确认消息, 其消息格式为 $\langle \text{ConsensusConfirm}, c, h, m, bd \rangle$; 若判断不为真, 则发送配置变更消息。

(6) 当任意一个共识记账代表节点收到超过 $2f$ (f 为恶意节点个数, 与系统的容错能力有关) 个相同的确认消息后, 共识达成并发布新区块 $block$ 。

(7) 其余节点收到新区块 $block$ 后, 将之前的信息删除, 随后开始新一轮共识。

定义 2: 智能合约 (smart contract, SC):

$$SC = (C_E, C_T, F) \quad (4)$$

式中第 1 部分 C_E 为碳排放权累计消耗量, 表达式如下:

$$C_E = \sum_{i=1}^N e_i \quad (5)$$

式中 e_t 为时段 t 的碳排放权消耗量, 碳排放权计量周期 T 被分为 N 个时间段。

第2部分 C_T 为交易金额, 正号代表收益, 负号代表支出, 表达式如下:

$$C_T = - \sum_{k=1}^n P_k C_{Bk} \quad (6)$$

式中: P_k 为第 k 笔交易的成交价格; C_{Bk} 为第 k 笔交易的碳排放权成交量, 正号代表购买, 负号代表出售。

第3部分 F 为罚金, 表达式如下:

$$F = \begin{cases} f(C_E - C_C - C_B), & C_E > C_C + C_B \\ 0, & C_E \leq C_C + C_B \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_C 为免费发放的碳排放权; f 为单位碳排放权超额罚金。当碳排放权累计消耗量 C_E 超过免费发放的碳排放权 C_C 和市场上购买的碳排放权 C_B 的总和时, 智能合约自动执行, 对超标排放单位进行罚款; 反之, 则不需要缴纳罚款。

由此实现碳排放交易区块链网络对碳排放权的自动认证计量和碳排放交易政策的落地。

4 仿真算例

4.1 仿真实验

为验证所建模型, 本文采用 Matlab 构建了仿真程序, 并以3家不同碳排放需求的电力企业为例进行了仿真实验和对比分析。

本文算例设定了 A、B、C 3 个信用评分等级及其相应的信息获取权限, 如表1所示。所有市场参与者将交易信息发布至 BETN 中, 表2为所有参与碳排放交易的卖家及其相应的交易信息, 表3为所有公开招标的买方及其相应的交易信息。另外 $f = 100$ 元/t。

表1 信用评分与相应交易信息获取权限

Table 1 Credit score and corresponding acquisition authority for transaction information

信用评分	信用评分等级	买方权限 (售价从高到低)/%	卖方权限 (出价从低到高)/%
3.5~5.0	A	100	100
2.0~3.5	B	75	75
1.0~2.0	C	50	50

现有 X、Y、Z 3 家电力企业由于采用了不同的能源策略产生了不同的碳排放需求。如表4所示, 企业 X 由于未采取任何节能减排措施, $C_{EX} > C_{CX}$, 需要购买 100 t 碳排放权, 可接受的碳排放权售价不超过 19.50 元/t; 企业 Y 用新机组替代了部分老旧机组, 从而提高了能源利用率, 但是由于 $C_{EY} > C_{CY}$, 仍需要 60 t 碳排放权, 可接受的碳排放权售价不超过 19.80 元/t; 企业 Z 通过技术革新和淘汰老旧机组, 大大提高了节能减排

效果, $C_{EZ} < C_{CZ}$, 于是选择出售 20 t 碳排放权。

表2 所有卖家及相应交易信息

Table 2 Sellers with corresponding transaction information

卖家	碳排放权售价/ (元·t ⁻¹)	信用评分 R	交易优先权值	出售碳排放权总额/t
G	15.55	2.0	7.775	25
H	18.35	2.0	9.175	18
I	18.50	2.0	9.250	13
J	13.73	2.0	6.865	26
K	16.30	3.0	5.433	15
L	21.40	3.0	7.133	20
M	16.74	3.0	5.580	23
N	20.21	4.0	5.053	36
O	19.79	4.0	4.948	45
P	22.69	4.0	5.673	40

表3 所有买家及其相应招标信息

Table 3 Buyers with corresponding bidding information

买家	碳排放权售价/ (元·t ⁻¹)	信用评分 R	碳排放权需求/t
A	15.60	2.0	30
C	19.50	3.0	25
G	17.39	2.0	15
M	18.67	3.0	27
N	17.88	2.0	23
Q	18.28	2.0	18
R	20.10	4.0	18
U	17.54	4.0	36
V	19.21	3.0	14
W	16.63	4.0	40

表4 3家电力企业碳排放信息及相应需求

Table 4 Carbon emissions information and demands of three power companies

企业	免费碳排放权 C_C /t	碳排放权累计消耗量 C_E /t	碳排放权缺口/t	可接受价格/(元·t ⁻¹)	信用评分 R
X	400	500	100	≤ 19.50	2.0
Y	300	360	60	≤ 19.80	3.0
Z	350	330	20		4.0

4.2 实证结果

针对企业 X: 由于企业 X 的信用评分 $R = 2.0$, 信用评分等级为 C, 对照表1 企业 X 只有 50% 的交易信息权限。根据碳排放权售价和交易优先权值, 生成企业 X 的可选择交易列表, 如表5所示。但是由于价

格限制,最终企业 X 只能购买卖家 P 和 I 2 家总计 40 t 的碳配额,仍需要 60 t 的碳配额。

表 5 企业 X 可选择交易列表
Table 5 Alternative transaction list of company X

卖家	碳配额售价/ (元·t ⁻¹)	信用 评分 R	交易优先 权值	出售碳配 额总额/t
O	19.79	4.0	4.948	46
N	20.21	4.0	5.053	15
P	18.61	3.0	6.203	35
L	24.88	3.0	8.293	10
I	18.50	2.0	9.250	5

针对企业 Y: 由于企业 Y 的信用评分 $R=3.0$, 信用评分等级为 B, 对照表 1 企业 Y 有 75% 的交易信息权限。同样生成企业 Y 的可选择交易列表, 如表 6 所示。但是由于价格限制, 最终企业 Y 选择与卖家 O 和 M 交易, 交易均价为 18.773 元/t, 并且在满足自身碳配额需求情况下仍多余 9 t。

表 6 企业 Y 可选择交易列表
Table 6 Alternative transaction list of company Y

卖家	碳配额售价/ (元·t ⁻¹)	信用 评分 R	交易优先 权值	出售碳配 额总额/t
O	19.79	4.0	4.948	46
N	20.21	4.0	5.053	15
M	16.74	3.0	5.580	23
P	18.61	3.0	6.203	35
L	24.88	3.0	8.293	10
H	18.35	2.0	9.175	8
I	18.50	2.0	9.250	5

在购买了 69 t 碳配额后, 企业 Y 决定将多余的 9 t 出售; 而企业 X 为避免高额罚款, 选择以公开招标的方式来获得剩余的 60 t 碳配额缺额。企业 X 将相应的招标信息公布到 BETN 中, 等待卖家进行交易, 招标信息如表 7 所示。

表 7 企业 X 招标信息
Table 7 Bidding information of company X

买家	碳配额出价/ (元·t ⁻¹)	信用 评分 R	碳配额 需求/t
X	19.50	2	60

针对企业 Z: 由于企业 Z 的信用评分 $R=4.0$, 信用评分等级为 A, 对照表 1 企业 Z 有所有的交易信息权限, 也就是说企业 Z 可以看到包括企业 X 在内的所有 11 家买家及其交易信息。根据碳配额出价和信用评分, 交易排序为 $R \rightarrow C \rightarrow X \rightarrow V \rightarrow M \rightarrow Q \rightarrow N \rightarrow$

$U \rightarrow G \rightarrow W \rightarrow A$, 最终以 20.10 元/t 的价格与买家 R 达成交易。企业 X 位于企业 Z 可交易选择列表的第 3 位, 出价并非最优, 而且需求量过大无法满足。

针对企业 Y: 由于企业 Y 的信用评分 $R=3.0$, 信用评分等级为 B, 对照表 1 企业 Y 有 75% 的交易信息权限。根据碳配额出价和信用评分, 交易排序为 $V \rightarrow M \rightarrow Q \rightarrow N \rightarrow U \rightarrow G \rightarrow W \rightarrow A$ 。由于企业 Y 出售的碳配额量均无法满足可选择交易列表中各买家的需求, 所以无法成交。即使碳配额量满足需求, 仍需考虑企业 Y 购买碳配额的成本, 也就是说买家出价需高于 18.773 元/t, 企业 Y 才会考虑交易。另外, 企业 X 因出价过高并不在企业 Y 的可选择交易列表中。

若到履约季, 企业 X 仍未弥补 60 t 的碳配额缺额, 则智能合约自动执行, 企业 X 将缴纳 6 000 元罚金。

3 家企业的最终交易结果汇总如表 8 所示。每笔交易完成后, 生成对应的交易 ID, 通过 ETCA 算法共识形成新的碳排放交易区块。

表 8 3 家企业的最终交易结果
Table 8 Transaction results of three power companies

企业	成交 对象	碳配额 成交价/ (元·t ⁻¹)	碳配额 成交量 C_B/t	交易金 额 C_T /元	碳配额 结余/t	需缴纳 罚金 F /元
X	P	18.61	35	-743.85	-60	6 000
	I	18.50	5			
Y	O	19.79	46	-1 295.36	9	0
	M	16.74	23			
Z	R	20.10	-18	361.8	2	0

4.3 结果分析

从上述交易过程与结果中可以看出:

(1) 相较于传统碳排放交易, 考虑信用评分机制后企业 X 购买到足量的碳配额变得更加困难, 导致企业 X 的碳排放权违约成本上升, 这就有利于推动企业 X 进行技术革新以降低企业碳排放量从而起到推动全社会减排进程的作用。

(2) 在购买碳排放额时, 企业 X 和 Y 均为主动市场参与者, 信用评分 R 越高的企业在交易过程中拥有更大的购买优势; 在出售碳排放额时, 企业 Y 和 Z 为主动市场参与者, 企业 X 为被动市场参与者, 影响交易的因素为出价, 价格越高, 则交易排名越靠前, 信用评分只影响交易信息获取权限。

(3) BETN 是一个去中心化的网络, 所有交易信息均由 BETN 进行汇总, 网络中所有节点参与交易信息的共识, 最终形成一条碳排放交易区块链。此外, 通过信用评分 R 限制市场参与者查看交易信息的权

限智能合约自动计量认证碳排放权和进行货币交换。这就极大地保证了数据的安全性和市场的公平、公正性。

5 结论

本文基于区块链技术提出了碳排放交易区块链网络结构图,并且针对区块链的去中心化特点,将市场参与者分为被动市场参与者和主动市场参与者,引入了信用评分机制,进而提出了碳排放交易区块链网络模型。在此模型当中本文结合碳排放交易机制建立了智能合约模型,从而实现了碳排放权自动计量及货币的自动计量和交换。仿真算例表明,本文提出的模型可以更好地反映市场参与者的碳排放交易需求,区块链技术能够保障信息的安全存储和交互;引入信用评分机制更加有利于市场的公平、公正运行,进一步约束市场参与者,推动实现碳减排目标。

6 参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 强化应对气候变化行动: 中国国家自主贡献[R/OL]. (2015-11-18) [2018-05-26]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/2015/20151119/xgbd33811/Document/1455864/1455864.htm>.
- [2] 柴麒麟, 傅莎, 郑晓奇, 等. 中国重点部门和行业碳排放总量控制目标及政策研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(12): 1-7. CHAI Qimin, FU Sha, ZHENG Xiaoqi, et al. Carbon emission cap control target and policy study of selected sectors and industries in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(12): 1-7.
- [3] 中华人民共和国发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发《全国碳排放权交易市场建设方案(发电行业)》的通知[R/OL]. (2017-12-18) [2018-06-19]. http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201712/t20171220_871134.html.
- [4] 郑宇, 赵俊华, 孟科, 等. 计及碳交易机制的电力系统随机优化调度[J]. 电力建设, 2017, 38(6): 21-27. ZHENG Yu, ZHAO Junhua, MENG Ke, et al. Carbon trading based stochastic optimal dispatching of power system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(6): 21-27.
- [5] 狄开丽, 李鹏, 华浩瑞. 计及碳排放成本的交直流混合微网优化运行[J]. 电力建设, 2016, 37(7): 12-19. DI Kaili, LI Peng, HUA Haorui. Optimal operation of AC-DC hybrid microgrid considering carbon emission cost[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(7): 12-19.
- [6] 刘铠诚, 孙嘉麟, 周任军, 等. 碳市场下火电统一碳排放基准与减排效应分析[J]. 电力建设, 2018, 39(1): 113-118. LIU Kaicheng, SUN Jiagan, ZHOU Renjun, et al. A unified carbon emission benchmark for fossil-fueled units and its effect on carbon emission reduct[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(1): 113-118.
- [7] 娄素华, 卢斯煜, 吴耀武, 等. 低碳电力系统规划与运行优化研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1483-1490. LOU Suhua, LU Siyu, WU Yaowu, et al. An overview on low-carbon power system planning and operation optimization[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1483-1490.
- [8] 许小虎, 邵毅. 碳交易机制对电力行业影响分析[J]. 生态经济, 2016, 32(3): 92-96. XU Xiaohu, ZOU Yi. Analysis of impact of carbon trading on power industry[J]. Ecological Economy, 2016, 32(3): 92-96.
- [9] 梅天华, 边巧燕, 谢俊, 等. 考虑碳排放权的低碳电力调度及收益分摊[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 49-55. MEI Tianhua, BIAN Qiaoyan, XIE Jun, et al. Low-carbon power dispatching and benefit allocation considering carbon emission allowance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 49-55.
- [10] 李现忠, 蔡兴国, 付春梅. 碳交易机制下考虑节能减排的竞价交易模式[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 48-52. LI Xianzhong, CAI Xingguo, FU Chunmei. The bidding transaction mode considering energy saving and emission reduction under the carbon trading mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 48-52.
- [11] TANG Ling, WU Jiaqian, YU Lean, et al. Carbon emissions trading scheme exploration in China: A multi-agent-based model[J]. Energy Policy, 2015, 81(6): 152-169.
- [12] 蒋泽辉, 赵涛, 王娟, 等. 全国性碳交易市场对电力行业的潜在影响: 基于多 Agent 模型[J]. 现代电力, 2017, 34(4): 86-94. JIANG Zehui, ZHAO Tao, WANG Juan, et al. Potential effects of carbon emissions trading on china power generation sector based on multi-agent[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(4): 86-94.
- [13] 康艳兵, 熊小平, 赵盟. 碳交易本质与制度框架[J]. 中国发展观察, 2015(10): 32-35. KANG Yanbing, XIONG Xiaoping, ZHAO Meng. The nature of carbon trading and the institutional framework[J]. China Development Observation, 2015(10): 32-35.
- [14] 黄超, 李晓庆, 陈理飞. 我国碳排放交易市场建设存在的问题与对策[J]. 价值工程, 2016, 35(33): 233-235. HUANG Chao, LI Xiaoqing, CHEN Lifei. Problems and countermeasures in the construction of carbon emission trading market in China[J]. Value Engineering, 2016, 35(33): 233-235.
- [15] 潘家华. 碳排放交易体系的构建、挑战与市场拓展[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(8): 1-5. PAN Jiahua. Construction, challenges and market expansion of emissions trading system[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(8): 1-5.
- [16] 张宁, 王毅, 康重庆, 等. 能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4011-4023. ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: Preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4023.
- [17] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016, 40(1): 1-12.

2016 42(4):481-494.

YUAN Yong, WANG Feiyue. Blockchain: The state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica 2016 42(4):481-494.

- [18] KHAQQI K N, SIKORSKI J J, HADINOTO K, et al. Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application [J]. Applied Energy, 2018, 209(1):8-19.

- [19] 余维, 胡跃, 杨晓宇, 等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13):3729-3736.

SHE Wei, HU Yue, YANG Xiaoyu, et al. Virtual power plant operation and scheduling model based on energy blockchain network [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13):3729-3736.

- [20] 刘肖飞. 基于动态授权的拜占庭容错共识算法的区块链性能改进研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

LIU Xiaofei. Research on performance improvement of blockchain based on dynamic authorization of Byzantine fault tolerance consensus algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

收稿日期: 2018-07-16

作者简介:

崔树银(1968 年), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力能源经济等;

陆奕(1994 年), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力碳交易市场、电力系统规划运行;

常啸(1995 年), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区域综合能源系统。

(编辑 张小飞)