

基于自动做市商的新型碳交易模式

颜 拥^{1,2}, 赵 萍³, 叶吉超³, 谢天佑³, 王慕宾³, 潘梓彬⁴, 赵俊华⁴

1. 河海大学 能源与电气学院, 南京 211100;
2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014;
3. 国网浙江省电力有限公司丽水供电公司, 浙江 丽水 323050;
4. 深圳人工智能与机器人研究院, 广东 深圳 518129)

摘 要: 气候问题已受到全球关注, 建立和发展碳交易市场是各国实现低碳转型的重要措施。然而, 碳交易市场作为新型市场, 面临着数据信任和流动性不足的问题。首先, 分析了订单簿模式、询价单模式和拍卖模式等传统交易模式, 指出其无法有效解决流动性不足的问题; 随后, 借鉴虚拟能源货币的概念, 通过区块链将碳资产数字化, 解决碳资产和交易平台的数据信任问题; 然后, 提出了一种基于自动做市商的碳交易模式, 提高市场流动性; 最后, 研发了基于自动做市商的碳交易系统原型, 并且通过案例分析验证了所提模式的有效性。

关键词: 碳市场; 碳交易; 区块链; 自动做市商; 能源虚拟货币

DOI: 10.19585/j.zjdl.202309009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Novel carbon trading mode based on automated market maker

YAN Yong^{1,2}, ZHAO Ping³, YE Jichao³, XIE Tianyou³, WANG Mubin³, PAN Zibin⁴, ZHAO Junhua⁴

1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China;
3. State Grid Lishui Power Supply Company, Lishui, Zhejiang 323050, China;
4. Shenzhen Institute of Artificial Intelligence and Robotics for Society, Shenzhen, Guangdong 518129, China)

Abstract: The climate issue has attracted attention all over the world. Building and developing the carbon trading market is an important measure for countries to realize low-carbon transition. However, as a new kind of market, the carbon trading market faces the problems of insufficient data trust and liquidity. Firstly, traditional trading modes, such as order book, inquiry, and auction modes are analyzed, pointing out that they cannot solve the problem of insufficient liquidity. Then, by drawing on the concept of virtual energy currency, carbon assets are digitized through blockchain to solve the problem of trust in carbon assets and trading platforms. After that, a carbon trading mode based on automated market maker is proposed to increase the liquidity of the market. Finally, a carbon trading prototype system based on automated market maker is developed and the effectiveness of the proposed mode is analyzed by case studies.

Keywords: carbon market; carbon trading; blockchain; automated market maker; energy virtual currency

0 引言

自工业革命以来, 尤其是自 20 世纪中叶以来, 不断增长的温室气体排放加剧了全球气候变化, 温室效应日益严重^[1]。为履行《巴黎协定》^[2], 减少碳排放, 许多国家已经制定了与实现“碳中和”相关的目标。中国政府承诺尽其所能力争在 2030 年

之前实现“碳达峰”, 在 2060 年之前实现“碳中和”; 欧盟承诺在 2050 年之前实现二氧化碳净零排放^[3]; 美国总统拜登曾宣布: 在 2030 年让温室气体净排放量比 2005 年减少 50%~52%。碳交易是一种为控制全球以二氧化碳为代表的温室气体排放而采用的市场机制, 如今已成为国际气候变化政策的一个重要组成部分^[4]。2005 年 2 月 16 日正式生效的《京都协议书》明确了碳交易的概念, 即在各国排放总量控制的前提下, 温室气体排放权作为一种稀缺资源, 能够对富余的 CEA(碳配额)进行交

易。截至2021年,全球共有33个碳排放权交易体系已投入运行^[5],其中全国碳市场于2021年7月16日正式上线。

目前,碳交易都是采用传统的中心化交易所模式,存在流动性差、交易平台数据信任问题等。文献[6]提出,从总体上看,流动性差是目前碳市场的一个特点。此外,由于交易在传统中心化服务器进行,存在被入侵、篡改数据等风险^[7-8],这将降低市场参与者信心,进一步降低碳交易市场的流动性。碳交易市场流动性不足时,容易出现价格被操纵、打击市场信心等问题,会严重影响碳市场的健康发展,阻碍各国的低碳转型,因此解决碳交易市场流动性不足问题具有重大意义。

对于交易平台数据信任问题,目前许多研究提出采用区块链技术来解决。区块链具有可追溯、难以篡改、去中心化等优势,可有效解决数据信任问题,是解决碳交易市场信任问题的有效技术手段。区块链作为数字货币的底层技术,是当前实现虚拟能源货币的理想选择^[9]。目前已有不少基于区块链开展碳交易的研究。文献[10]提出基于雾计算、区块链及公证人机制的碳排放权交易和绿证交易,利用公证人制度把绿证换算为碳排放配额减免量,实现跨链记录。文献[11]提出一种考虑信用评分机制的电力碳排放交易区块链模型,可以保障信息的安全存储,有利于碳市场公平公正运行。文献[12]结合区块链技术,提出“泛双边”碳排放权交易机制,并设计了交易应用,为碳权交易提供去中心化交易平台的技术支撑,降低了碳交易市场的技术壁垒。文献[13]设计了一个基于区块链的碳权交易平台,能够保护用户交易安全,使市场交易更加透明。文献[14]通过分析认为区块链可以可靠地记录和传递碳交易信息,安全、公开、公正,有助于降低碳交易市场的准入门槛。

针对碳交易市场流动性差问题,目前相关的研究较少。欧盟提出将多国的碳市场兼容互连;文献[15]建议制定需求刺激政策。这些方法虽然在一定程度上可以提高市场流动性,但是这些方法的可操作性较低,难以有效快速解决当前的碳交易市场流动性差的问题。因此,本文针对碳交易的流动性差和信任问题,通过基于区块链的

AMM(自动做市商)构建新型碳交易模式,将碳交易权进行资产化,有效解决碳交易市场初期的市场流动性问题。

1 交易模式分析

1.1 传统交易模式

传统的交易模式主要包括挂牌协议交易、大宗协议交易和单项竞价3种交易模式^[16]。

1.1.1 挂牌协议交易

在该模式下的交易主体根据实时挂单行情,在交易对手方实时最优5个价位内以对手方价格为成交价依次选择,以价格优先的原则,提交申报完成交易^[16]。因此,交易订单只有在出价和要价相匹配时才能被完成,否则订单无法被完成。对于流动性差的市场,采用挂牌协议交易模式将会导致大额差价,由此反作用进一步降低了流动性,形成恶性循环。

1.1.2 大宗协议交易

在该模式下的交易主体通过发起买卖申报,或与已发起申报的交易对手方进行对话议价,或直接与对手方成交。交易双方就交易价格与交易数量等要素协商一致后确认成交。这种模式通常规定了一个较高的最小申报数量,交易群体较少,本身就是一个流动性非常差的市场交易模式。

1.1.3 单项竞价

在单项竞价模式下,卖家向交易机构提出卖出申请,交易机构发布竞价公告,符合条件的意向买家按照规定加价或减价,在约定时间内通过中心化的交易系统完成交易。其本质是一种拍卖,通常需要较长的时间完成,流动性较差。

通过以上分析可见,传统的交易模式不但无法有效改善市场流动性,反而可能加剧市场流动性问题。

1.2 做市商模式

做市商是解决流动性问题的主要手段,通常由独立证券经营法人充当特许交易商。做市商不断向投资者进行双向报价,以其自有资产和证券与投资者进行交易。因此,买卖双方不需要等待交易对手,而可以直接与做市商达成交易,因此做市商能够有效地提高市场的流动性^[17]。做市商制度在美国纳斯达克市场已经得到过充分实践,证实了它对于提高美国交易市场流动性作出的重

要贡献^[18]。经中国证监会批准, 首批科创板做市商于 2022 年 10 月 31 日正式开展股票做市交易业务, 旨在促进科创板交易的流动性。

1.3 AMM 模式

AMM 在传统金融市场是作为高频交易的一种方式, 主要是通过计算机系统和网络优势发现市场机会进行快速交易来获取订单差价。本文研究的 AMM 是基于区块链技术的 DeFi (去中心化金融) 中的一种底层协议^[19], 与传统金融交易市场的 AMM 有本质区别。目前 AMM 在数字货币领域已较为成熟, 已有许多成功的案例, 如 Bancor^[20]、Uniswap^[21]。通过算法提供价格, 交易员可以直接与 AMM 进行交易, 从而实现做市商的自动化。由于 AMM 是自动进行双向报价, 比做市商更能够增加流动性, 因此相比传统交易模式, AMM 在提高交易的流动性上更具优势。

如图 1 所示, AMM 交易模式通常包括用户、投资者和流动性池。流动性池是一个储备了两种或多种资产的智能合约, 用户通过直接向流动性池支付资产 A, 就能够得到资产 B。投资者可以往流动性池中注入资产 A 来提高流动性, 或从中取走本金和利润赚取收益。AMM 在买卖双方数量少的市场中优势尤其明显。因为此时买方愿意支付的最高价格和卖方愿意接受的最低价格可能会有很大的差距, 从而导致在传统的交易模式下交易无法完成。而当 AMM 作为所有交易的对手方时, 即使市场行情再差, 用户也能通过 AMM 进行正常交易。

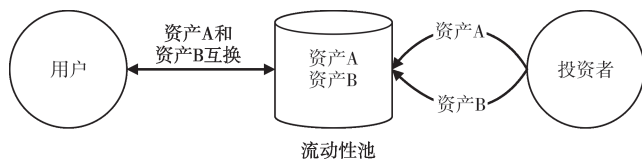


图 1 AMM 交易模式

Fig.1 AMM trading mode

AMM 包含 CPMM (恒定乘积做市商)、CSMM (恒定和做市商)、CMMM (恒定平均值做市) 等类型^[22]。其中, CSMM 规定两种资产的总和为一个常量, 会出现流动性池的一种资产归零的情况, 从而失去流动性, 因此很少被应用; CMMM 主要适用于两种以上的资产交易; CPMM 适用于两种资产之间的交易, 并且资产不会归零,

能够提供无限的流动性, 相比于前两者, 它更适用于应用在碳交易中。当有投资者向 AMM 协议发送两个等值的资产时, 就会创建或扩充流动性池。流动性池可用于将一种资产交换得到另一种资产。式(1)展示了 CPMM 流动性池中两种资产的数量关系。

$$xy = k \quad (1)$$

式中: x 和 y 分别为流动性池中原有的资产 A 和 B; k 为当前流动性池的恒定乘积。

交易的价格由式(2)给出。

$$\Delta y = y - \frac{k}{x + \Delta x(1 - \lambda)} \quad (2)$$

式中: Δx 为投资者想要买资产 B 时所投入资产 A 的量; Δy 为该用户能够获得的资产 B 的量; λ 为交易发生时需要向流动性池缴纳的手续费 (交易额的百分比)。假设手续费 $\lambda = 0$, 则恒定乘积 k 的值在两种资产的互兑交易前后是固定不变的。

图 2 展示了 CPMM 的流动性池中两种资产的关系及兑换资产 B 前后的流动性池的资产变化。

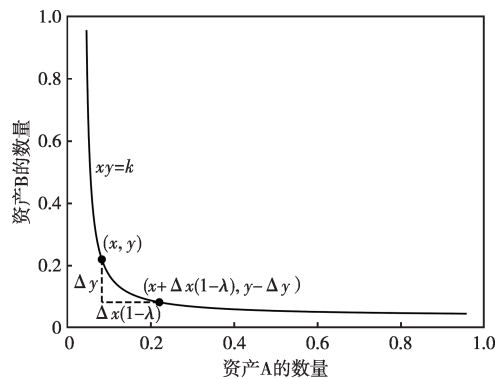


图 2 CPMM 的流动性池资产数量关系

Fig.2 Relationship between quantities of two assets in liquid pool of CPMM

在这样的交易机制下, 用户不仅可以向 AMM 买卖资产, 还能充当“流动性提供者”, 从而在后续能够从 AMM 协议中获得收益。当投资者取出资产时, 可按比例额外获取交易手续费, 形成收益。该投资者因手续费获得的利润 P 为:

$$P = \sum_{i=1}^n s_i R_i + \sum_{i=1}^n h_i S_i \quad (3)$$

式中: n 为假设该投资者从投资到撤资总共经过的交易周期数; s_i 和 h_i 分别为在第 i 轮交易周期里系统收取的手续费对应的资产 A 和资产 B; R_i 和 S_i

分别为该投资者所投的资产 A 和资产 B 在流动性池中的占比。

2 基于 AMM 的碳交易模式

2.1 碳资产

碳资产是指在强制碳排放权交易机制或者自愿碳排放权交易机制下,产生的可直接或间接影响组织温室气体排放的配额排放权、减排信用额及相关活动。碳资产包括 CEA 和 CCER(核证自愿减排量)。因目前国内 CCER 尚未重启,因此本文主要研究 CEA。CEA 是政府为完成控排目标,给控排企业发放的碳排放权凭证。若企业实际碳排放量小于政府分配的 CEA,则企业就拥有了可以用于交易的多余碳资产 CEA;若企业实际碳排放量超过其分配的 CEA,则需要市场上购买 CEA 来满足政府要求。

2.2 基于区块链的碳资产

区块链作为一种解决各方主体信任问题的技术,是将碳资产数字化的理想方式^[9]。目前基于区块链形成的数字资产已经获得了全球不少主体的认可,一种典型案例是基于区块链形成的数字货币,比如 BTC(比特币)、ETH(以太坊)、XRP(瑞波币)、USDT(泰达币)、LTC(莱特币)等。此外,NFT(非同质化通证)是另一种基于区块链实现资产数字化的典型案例,它是区块链网络中具有唯一性特点的可信数字权益凭证^[23]。由于 NFT 非同质化、不可拆分的特性,使得其可以和现实世界中的一些商品等进行绑定,即把资产数字化。以鲸探为例,它通过区块链技术对特定作品、艺术品和商品进行唯一标识,实现藏品的数字资产化,并支持购买与转赠^[24]。本文将碳交易商品进行资产数字化,所提的方法本质上可以泛化到其他国家及不同国家之间的碳交易,但是为简单起见,本文以中国的国情来设计基于区块链的碳资产交易,并且只考虑 CEA,不考虑 CCER。碳交易模型包含两种数字资产:ECNY 和 CEA。ECNY 指数字人民币,是由中国人民银行发行的数字形式的法定货币,由指定运营机构参与运营并向公众兑换^[25]。

2.3 基于 AMM 的碳交易流程

根据图 1 的 AMM 交易模式,可以推出基于

AMM 的碳交易模式,如图 3 所示。

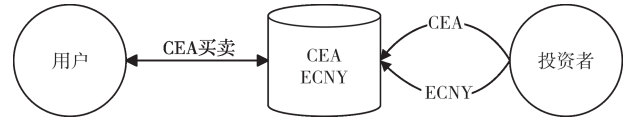


图 3 基于 AMM 的碳交易模式

Fig.3 AMM based carbon trading mode

1) 流动性池模块用于存储流通的 ECNY 和 CEA。拥有碳资产的用户,可以选择往流动性池里同时注入 CEA 和 ECNY 资产对来提供流动性,以赚取直接的手续费收益;或者是把碳资产兑换成 CEA 后卖出,获得 ECNY。每笔 ECNY 和 CEA 的兑换交易,都收取所投入资产一定比例作为手续费。该手续费随交易周期而累积,在流动性提供者提现套利时按式(3)给予其利润。

2) ECNY 与 CEA 两种资产互兑。当用户使用数字货币购买碳资产时,所购买的碳资产如式(4)所示。类似地,当用户销售碳资产时,所花费的数字货币如式(5)所示。

$$\Delta x_{\text{CEA}} = x_{\text{CEA}} - \frac{k}{x_{\text{ECNY}} + \Delta x_{\text{ECNY}}(1-\lambda)} \quad (4)$$

$$\Delta x_{\text{ECNY}} = x_{\text{ECNY}} - \frac{k}{x_{\text{CEA}} + \Delta x_{\text{CEA}}(1-\lambda)} \quad (5)$$

式中: Δx_{CEA} 为所购买的碳资产; Δx_{ECNY} 为所花费的数字货币; x_{ECNY} 为当前流动性池中的 ECNY 数量; x_{CEA} 为当前流动性池中的 CEA 数量; λ 为每笔交易的手续费占比,恒定乘积 $k = x_{\text{ECNY}} \cdot x_{\text{CEA}}$ 。

2.4 AMM 交易模式的滑点

通过 AMM 进行交易时需要注意的是:用户兑换时看到资产兑换价格往往会和实际兑换价格有偏差,通常采用滑点来衡量这个差异,滑点是交易者在通过 AMM 进行交易时需要关注的一个重要指标。以 ECNY 兑换 CEA 为例,滑点 H 的计算详见式(6)。滑点 H 越小对用户越有利,用户参与数字资产兑换的积极性会越高,能进一步增加市场的流动性。

$$H = \frac{\Delta x_{\text{ECNY}}}{\Delta x_{\text{CEA}}} - \frac{x_{\text{ECNY}}}{x_{\text{CEA}}} \quad (6)$$

由式(4)可得,当用户消耗 Δx_{ECNY} 换取 Δx_{CEA} 后,或者消耗 Δx_{CEA} 换取 Δx_{ECNY} 后,流动性池的恒定乘积 k 将变得更大,见式(7)。此外,流动性提

供者提供的流动性也能让恒定乘积 k 变大, 见式 (8), 随着恒定乘积 k 的增大, 能够降低 ECNY 和 CEA 兑换的交易滑点, 进一步使得流动性更好。

$$(x_{CEA} - \Delta x_{CEA})(x_{ECNY} + \Delta x_{ECNY}) = k \frac{x_{ECNY} + \Delta x_{ECNY}}{x_{ECNY} + \Delta x_{ECNY}(1 - \lambda)} > k \quad (7)$$

$$k' = (x_{CEA} + x'_{CEA})(x_{ECNY} + x'_{ECNY}) > k \quad (8)$$

式中: x'_{CEA} 和 x'_{ECNY} 分别为流动性提供者所投入的 CEA 和 ECNY 的数目, 其满足 $x'_{CEA} : x'_{ECNY} = x_{CEA} : x_{ECNY}$ 。

2.5 优势分析

相比于传统的中心化碳交易, 基于 AMM 的去中心化碳交易由于采用区块链作为底层技术, 具有交易安全可靠、可追溯、交易数据公开透明等诸多优势; 同时, 所采用的 AMM 模式可以有效提升市场流动性。

1) 用户资产更安全

在传统中心化碳交易系统中, 用户的资产往往存储在一个或数个服务器中, 由服务机构统一管理。用户的资产存在遭到盗取、篡改的风险。而在 AMM 碳交易系统, 用户的资产分布式存在区块链上, 用户拥有对自己资产的完全掌控权, 不用担心资产被服务商窃取, 并且去中心化的资产管理更难被黑客集中攻击。一旦某些区块被黑客攻击, 用户也可以从其他区块中同步数据, 保证自身资产的安全。

2) 交易过程更安全

AMM 碳交易系统比传统中心化的碳交易系统更安全。除了用户隐私数据外, 所有交易数据在区块链中公开。用户的交易数据被篡改、恶意下单的情况不容易出现。

3) 市场流动性更高, 碳价更稳定

基于 AMM 的智能合约具有数字资产兑换和提供流动性等功能, 与传统的碳交易系统相比, 不需要交易双方的互相等待即可完成交易, 因此流动性更高。另一方面, 用户可以通过投资成为流动性提供者, 能够从系统中赚取手续费收益, 这将激励更多的人投资扩充流动性池, 使得交易的滑点及 CEA 价格逐渐降低并趋于平稳, 进一步促进碳市场的流动性和增强碳市场的稳定性。

3 基于 AMM 的碳交易平台设计

基于 AMM 的碳交易平台架构由基础设施层、区块链层、服务层和应用层组成, 如图 4 所示。



图 4 AMM 碳交易平台技术架构

Fig.4 Technical architecture of carbon trading platform for AMM

1) 基础设施层

基础设施层包含通信服务、应用服务和存储服务的一些物理设施, 比如 PC 机、云等相关基础设施。

2) 区块链层

区块链层包括智能合约、ETH 虚拟机、区块链数据、分布式网络和共识机制等。区块链数据由数据区块及将数据区块以顺序方式相连的链式结构组成; 共识机制是各个节点实现共识的机制, 通常采用 PBFT (拜占庭容错共识)、POW (工作量证明)、POS (权益证明) 等共识机制; 智能合约是区块链所拥有的独特技术, 可执行各个主体认可的程序, AMM 的核心功能通过智能合约实现; ETH 虚拟机是提供给智能合约部署和执行的环境。

3) 服务层

服务层是核心层, 主要通过智能合约来实现相关服务, 主要包括资产兑换、流动性提供和收益分红等关键服务。

4) 应用层

应用层是实现具体的业务功能, 主要包括资产兑换、资产转账、资产提现、身份认证、交易查询和流动性管理等。身份认证模块用于验证用户的身份, 登录后才能进行资产兑换等业务操作; 资产转账和资产提现分别表示将 ECNY、CEA 等

资产转入或者提现到账户；资产兑换是用户进行碳资产买入或者卖出；交易查询是查询用户历史交易记录；流动性管理是用户添加到流动性池进行投资或者撤出流动性池获得收益分红。

4 算例分析

本文采用ETH作为区块链底层平台，采用solidity作为智能合约开发语言，React为前端开发框架，采用uniswap V2.0作为交易协议，并采用远程过程调用来实现前端和ETH的交互，搭建了基于AMM的碳交易原型系统。其中，每笔交易的手续费占比 λ 为0.3%。下面将分别从流动性、碳资产价格和交易滑点这3个方面进行分析。

4.1 流动性分析

根据《碳排放权交易管理规则(试行)》，挂牌协议交易的成交价格在上一个交易日收盘价的 $\pm 10\%$ 之间确定。如果某日因政府出台某项重大政策导致市场产生巨大波动，则当前碳交易市场跌停。此时，某用户想要通过挂牌交易的方式销售其拥有的CEA，则无法销售出去。

相比之下，在基于AMM的碳交易平台中，该用户可以顺利销售其持有的CEA。假设当前ECNY和CEA初始量分别为58万和1万，根据式(5)可以计算出该用户在基于AMM的碳交易平台上可以出售1 t CEA，并且获得了57.485 7个ECNY。用户的具体交易界面如图5所示，其显示了当前CEA和ECNY两种资产的余额。因为AMM的流动性池中并不需要用户报价，完全是由流动性池中的资产数量来确定价格，而且没有跌停设置，因此不论市场情况有多差，只要流动性池中的资产数量超过用户兑换资产数量，都可以顺利完成交易。可见，基于AMM的交易相比传统的挂牌交易模式具有更好的流动性。

4.2 碳资产价格分析

在AMM交易模式中，交易是由流动性池中的资产数量决定，因此需要分析流动性池资产数量对交易价格的影响。流动性池的恒定乘积 k 与CEA价格的关系如图6所示。在两种资产比例不变的情况下，随着恒定乘积 k 的增大，CEA的价格会逐渐降低，并趋于某个稳定值，约为58.175 5。当恒定乘积 k 逐渐变小，则CEA的价格会迅速上



图5 AMM碳交易平台兑换操作

Fig.5 Exchange operation in carbon trading platform of AMM

升，此时会吸引更多的投资者添加流动性池来获取利益，使得恒定乘积 k 变大，从而稳定市场交易价格。由此说明，流动性池的扩大有利于稳定碳市场的价格。

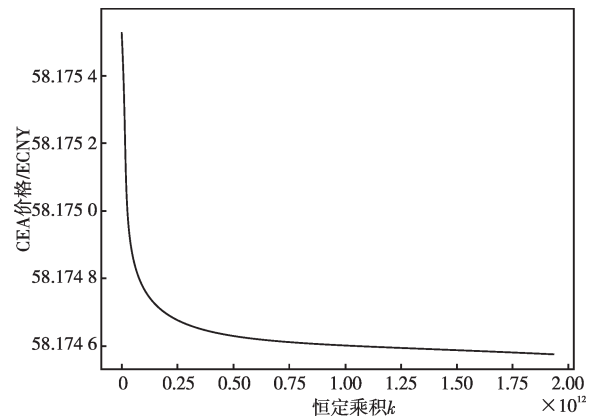


图6 CEA价格随恒定乘积 k 的变化过程

Fig.6 Changing process of CEA price vs. constant product k

4.3 交易滑点分析

实际上，在4.1节中，当前流动性池的ECNY和CEA两种资产比例是58:1，但是用户实际上兑换出来的价格是57.485 7个ECNY，可见出现了滑点，因此本节分析恒定乘积与滑点的关系。由式(5)和式(6)可知，交易滑点与恒定乘积之间的关系较为复杂，与流动性池中的资产量相关。为简单起见，基于之前资产比例的假设，计算得到不同恒定乘积 k 对应的交易滑点，如图7所示。可见随着恒定乘积 k 的增大，交易滑点逐步降低；反之，则交易滑点逐步升高。

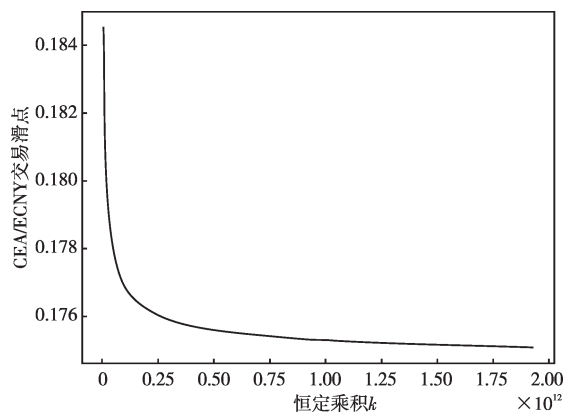


图7 CEA/ECNY滑点随恒定乘积变化过程

Fig.7 Changing process of CEA/ECNY slippage vs. constant product k

基于4.2和4.3 2节的分析可知,当流动性池的容量较小(即恒定乘积 k 较小)时,CEA价格较高,但滑点也高,此时为了吸引更多的CEA买家和卖家进场交易赚取手续费,会有更多的投资者投资成为流动性提供者,扩充流动性池,使得交易滑点降低、CEA价格更稳定,从而进一步提升流动性。而当流动性池容量较高时,CEA价格较低,投资者获得的手续费利润较小,此时它们将撤资。因此,在不考虑外部市场剧烈波动的情况下,流动性池会在一定范围内波动,基于AMM的碳交易模式能够促进市场价格的稳定。

5 结语

碳交易市场对能源生产、企业生产、政府规划等方面产生了深刻的影响。如何提高碳交易的流动性,是保障碳交易市场健康发展的重要问题。区块链的去中心化、难以篡改等特性为构建可信、去中心化的碳交易系统提供了有力的技术支撑,而AMM交易模式可以有效提高市场的流动性。本文通过区块链将碳资产数字化,提出一种基于AMM的新型碳交易模式,可以有效提升市场流动性和交易价格的稳定性,促进碳市场的稳健发展。下一步,将对基于AMM的碳交易平台性能、跨境碳交易等问题进行深入研究,推动AMM在碳交易的应用落地,促进碳交易市场的健康发展。

参考文献

[1] KWEKU D, BISMARCK O, MAXWELL A, et al. Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global

warming[J]. Journal of Scientific Research and Reports, 2018, 17(6): 1-9.

[2] 何建坤.《巴黎协定》新机制及其影响[J].世界环境, 2016(1): 16-18.
HE Jiankun. The new mechanism of Paris agreement and its influence[J]. World Environment, 2016(1): 16-18.

[3] 庄贵阳, 朱仙丽.《欧洲绿色协议》: 内涵、影响与借鉴意义[J].国际经济评论, 2021(1): 116-133.
ZHUANG Guiyang, ZHU Xianli. European green agreement: connotation, influence and reference significance[J]. International Economic Review, 2021(1): 116-133.

[4] CALEL R. Carbon markets: a historical overview [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2013, 4(2): 107-119.

[5] 王科, 李思阳. 中国碳市场回顾与展望(2022)[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2022, 24(2): 33-42.
WANG Ke, LI Siyang. China's carbon market: reviews and prospects (2022) [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2022, 24(2): 33-42.

[6] 邓茂芝, 任心原, 高淮, 等. 中国试点碳排放权交易市场流动性研究[J]. 华东经济管理, 2019, 33(9): 54-60.
DENG Maozhi, REN Xinyuan, GAO Huai, et al. Research on the liquidity of China's pilot carbon trading markets[J]. East China Economic Management, 2019, 33(9): 54-60.

[7] 李文献. 电子商务环境下证券交易的安全性策略及应用技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
LI Wenxian. Research on security strategy and application technology of securities trading in e-commerce environment[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003.

[8] 刘嵩, 晏强. 移动证券交易安全风险防护实践[J]. 金融电子化, 2014(1): 76-78.
LIU Song, YAN Qiang. Practice of security risk protection in mobile securities trading [J]. Financial Computerizing, 2014(1): 76-78.

[9] 颜拥, 陈星莺, 文福拴, 等. 从能源互联网到能源区块链: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 1-14.
YAN Yong, CHEN Xingying, WEN Fushuan, et al. From energy Internet to energy blockchain: basic concept and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 1-14.

[10] 王胜寒, 郭创新, 冯斌, 等. 区块链技术在电力系统中的应用: 前景与思路[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 10-24.
WANG Shenghan, GUO Chuangxin, FENG Bin, et al. Application of blockchain technology in power systems: prospects and ideas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 10-24.

- [11] 崔树银,陆奕,常啸.考虑信用评分机制的电力碳排放交易区块链模型[J].电力建设,2019,40(1):104-111.
CUI Shuyin, LU Yi, CHANG Xiao. Research on model of blockchain-enabled power carbon emission trade considering credit scoring mechanism[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(1): 104-111.
- [12] 吉斌,昌力,陈振寰,等.基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用[J].电力系统自动化,2021,45(12):1-10.
JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 1-10.
- [13] YUAN L L, DONG J, WANG N, et al. Blockchain-based carbon allowance trading market construction [C]//2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), December 23-25, 2021, Nanjing, China: 245-248.
- [14] PAN Y T, ZHANG X S, WANG Y, et al. Application of blockchain in carbon trading [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 4286-4291.
- [15] SONG Y Z, LIU T S, YE B, et al. Improving the liquidity of China's carbon market: insight from the effect of carbon price transmission under the policy release [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118049.
- [16] 上海环境能源交易所.关于全国碳排放权交易相关事项的公告[EB/OL]. [2021-06-22]. <https://www.cneex.com/c/2021-06-22/491198.shtml>.
- [17] 吴林祥.我国证券市场引入做市商制度的思考[J].证券市场导报,2005(1):72-77.
WU Linxiang. Reflection on introducing market making system in China securities market [J]. Securities Market Herald, 2005(1): 72-77.
- [18] 康奈尔大学.美国期权交易中的做市商制度[EB/OL]. [2013-01-01]. <http://rdbk1.ynlib.cn:6251/qw/Paper/485802>.
- [19] MOHAN V. Automated market makers and decentralized exchanges: a DeFi primer [J]. Financial Innovation, 2022, 8(1): 20.
- [20] HERTZOG E, BENARTZI G. Bancor protocol [J]. Continuous Liquidity for Cryptographic Tokens through their Smart Contracts, 2020, 1(1): 1-22.
- [21] FAN Z, MARMOLEJO-COSSÍO F J, ALTSCHULER B, et al. Differential liquidity provision in uniswap v3 and implications for contract design [C]//Proceedings of the Third ACM International Conference on AI in Finance, November 2-4, 2022, New York, USA: 9-17.
- [22] XU J H, PARUCH K, COUSAERT S, et al. SoK: decentralized exchanges (DEX) with automated market maker (AMM) protocols [EB/OL]. [2021-03-23]. <https://arxiv.org/abs/2103.12732>.
- [23] WANG Q, LI R J, WANG Q, et al. Non-fungible token (NFT): overview, evaluation, opportunities and challenges [EB/OL]. [2021-05-16]. <https://arxiv.org/abs/2105.07447>.
- [24] 李乔宇.鲸探拓展“大文化”收藏边界[N].证券日报,2022-01-29(A03).
- [25] 何德旭,姚博.人民币数字货币法定化的实践、影响及对策建议[J].金融评论,2019,11(5):38-50.
HE Dexu, YAO Bo. Legalization of RMB digital currency: practice, influence and policy [J]. Chinese Review of Financial Studies, 2019, 11(5): 38-50.

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-03-02

作者简介:

颜 拥(1986), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为区块链及其在能源行业的应用。

潘梓彬(1996), 男, 博士研究生, 主要研究方向为联邦学习、低碳技术。(通讯作者)

(本文编辑: 童 凯)