大数据环境下我国未来区块链碳市场体系设计*

叶　强　高超越　姜广鑫

摘要：碳市场建设是完成“双碳”目标的重要保障，而个人级碳交易作为目前企业级碳交易的有效补充，将会助力“双碳”目标的高效达成。本文拟利用区块链技术赋能碳市场建设，面向未来大数据环境下的碳市场，设计碳市场区块链系统架构，提出了区块链碳市场中个人碳资产价格驱动机制模型。本文首先分析了碳市场的发展趋势，指出个人级碳交易的重要性；进而利用区块链公链技术与侧链扩容技术，提出“公链+侧链”的碳市场体系设计方案，即公链上进行企业级碳交易，侧链上进行高频小额的个人级碳交易。该方案利用区块链技术的诸多优点降低管理成本、加强监管力度的同时，解决了个人碳资产大数据导致的公链拥堵问题，实现了个人碳资产聚合，保证了交易效率。各侧链生态可以根据区域或项目特色编制智能合约进行自治化运行，既实现了“因地制宜”，又降低了运行成本，还可以保证用户隐私与数据提供商的数据资产安全。最后，本文对该方案进行了经济学建模分析，通过模型推导和数据模拟论证了其社会效益，为政府决策提供了参考依据。

关键词：大数据　区块链　碳交易　碳普惠　侧链
DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2022.0017

一、引言

气候变化是人类面临的共同挑战。我国作为负责任和有影响力的大国，在碳减排方面一直在付出努力并取得了显著成效（Jotzo et al.，2018；Wang and Wang，2017），承诺“二氧化碳排放力争于2030年前达峰，并努力争取2060年前实现碳中和”（简称双碳目标）。碳排放权交易（简称碳交易①）是实现这一目标的重要方式（张希良等，2021；Gallagher et al.，2019），因此，建设统一高效的碳排放权交易市场（简称碳市场）受到国家有关部门的重视。2021年7月，我国在原有7个区域性试点碳市场的基础上启动了全国统一碳市场，并力争在“十四五”期间碳市场覆盖8个重点高能耗行业。

我国当下的碳市场以企业级的碳交易②为主，市场建设以一种“自上而下”的方式（即以控制在能源消耗上游的碳排放为主要目的）进行。国家主管部门通过适当的分配原则将碳排放配额分配给企业，企业根据自身所处行业、技术、管理方式等特征，制订减排目标与计划。减排高效的企业可以将剩余的碳排放配额（简称碳配额，即相关部门规定的二氧化碳排放指标）出售给减排困难或者减排成本高的企业，通过市场化配置推进企业的低碳转型（Caro et al.，2013；Chen et al.，2011；Zhao et al.，2010）。但目前的碳市场还没有覆盖到个体层面的碳排放。研究表明，个人和家庭直接或间接导致的碳排放约占全球碳排放总量的72%（Hertwich and Peters，2009）。在国家层面上，中国35%的碳足迹与家庭碳消费行为有关（Tian et al.，2014）；新加坡约有1/4的碳排放量是由于居民生活行为产生（Su et al.，2017）；美国归因于消费者需求的碳排放总量占国家二氧化碳排放总量的80%以上（Jones and Kammen，2014）。因此，个人层面的碳减排对于高效达成“双碳”目标意义重大。

个人级碳交易是指通过量化个人碳排放量并进行交易从而达到碳减排效果的政策形式，是一种“自下而上”的方式（即以控制在能源消耗下游的碳排放为主要目的）。个人级碳交易形式的选择是各国政府面临的难题。欧洲市场的相关经验表明，强制性的个人碳交易在落地过程中存在分配不均衡和监督执行等方面的困难

*本文得到国家自然科学基金集成项目“大数据驱动的公共管理决策创新模式与集成示范平台”（基金号91846301）、国家自然科学基金应急项目“基于新兴金融科技的风险分析与监管科技创新研究”（基金号71850013）、国家自然科学基金创新群体项目“基于大数据的管理科学研究”（基金号72121001）的资助。姜广鑫为本文通讯作者。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(Fawcett and Parag,2010)。相比之下,以激励形式引导公民自愿参与碳减排的碳普惠制度[③]更加适用于我国国情(Tan et al.,2019)。因此,本文提到的个人级碳交易主要指自愿性个人级碳交易,碳普惠制度是自愿性个人碳交易的一种政策形式。目前,我国部分地方政府和企业初步探索了一些个人级碳交易形式,多以区域性项目的方式运行,如广东省的"碳普惠"项目等。这些项目虽然对个人的碳减排起到了一定的促进作用,但距离形成完善的个人级碳市场还有一定的差距。

无论是目前运行的企业级碳市场还是正在探索的个人级碳市场,在实际运行中都存在一定的问题。企业级的碳市场主要依托中心化交易所进行交易,存在诸如数据造假、虚假交易、监管不透明、管理部门核查成本高等中心化交易的弊端(Csóka and Jean-Jacques Herings,2018),并且在大数据管理中,过于中心化会导致数据安全性差和管理成本较高等问题。个人级碳交易体系的建设也存在一些关键问题,包括激励方式的设计、用户隐私保护和不同商家的数据资产共享等。其中,制约个人级碳交易全国推广的主要障碍是海量个人碳资产[④]数据的管理成本问题。快速发展的区块链技术(Chod et al.,2020;Olsen and Tomlin,2020)为解决上述问题提供了新思路。区块链可以记录碳配额的发放、上报和履约等全过程数据,其不可篡改和可追溯的特性将会降低企业瞒报排放量、个人或者数据管理机构篡改数据等行为发生的概率,降低虚假数据、虚假交易产生的可能性,极大降低政府部门的核查成本(张宁等,2016);区块链的可编程特性,即智能合约,可以满足不同的区域、不同场景下的碳普惠政策推行,完善的智能合约可以自动运行、无需维护,将极大减少碳普惠建设过程中的数据统计、碳积分发放与回收等工作的管理成本(吉斌等,2021)。通过区块链的侧链扩容技术,还可以将"自上而下"和"自下而上"建设的企业级和个人级碳市场有机整合为统一的碳市场。

本文面向未来企业级和个人级碳市场的统一建设需求,提出了在未来大数据环境特征下,利用区块链技术手段设计的碳市场体系。大数据环境的管理问题将会激发决策范式的转变与业务模式创新(陈国青等,2020)。本文拟利用公链技术及其侧链扩容技术设计满足企业级碳交易与个人碳交易性能需求的交易体系架构,利用公链的去中心化、可追溯、不可篡改、数据公开透明和可编程等特性保证企业级碳交易的真实可信,降低管理成本,并通过侧链聚合个人碳资产,将高频小额的个人级碳交易转移到交易吞吐量更大的侧链中进行。进而根据主链与侧链的耦合关系,利用经济学模型对侧链中流通的个人级碳交易进行合理定价,并利用模拟数据说明交易体系、定价模型的合理性。本文的主要贡献体现在以下3个方面:(1)论述了个人级碳交易的重要性,并面向未来提出了融合企业级和个人级碳交易的统一碳市场建设思路。(2)面向未来大数据环境下的碳市场,提出了公链+侧链的区块链碳市场体系设计方案。公链上实现企业节点与区域生态运营节点之间的交易,侧链上实现区域生态中的个人碳资产的产生与交易,利用区块链技术形成了融合企业级与个人级碳交易的统一碳市场。(3)建立了区块链碳市场中个人碳资产价格驱动机制模型,通过分析侧链生态中个人碳资产价格与重要参数之间的关系,阐释价格变动机理,为政府部门进行政策调控给出了建议。

本文整体结构如下:在第二章中,我们首先分析我国碳市场的演变过程,指出建立企业级与个人级统一碳市场的趋势与必要性;在第三章中,我们考虑面向未来大数据的场景,根据市场需求分析、技术范式分析进行市场体系设计,提出公链+侧链技术的方案;在第四章中,我们考虑侧链生态中碳价格机制设计,建立了生态流通碳价格的定价模型,并做了相应的数据模拟分析,说明模型的用途和有效性;第五章进行了总结与展望。

二、我国未来碳市场发展趋势分析

(一)我国企业级碳交易现状及趋势分析

碳排放权交易的快速发展始于1997年12月通过的《京都议定书》。在2005~2015年的10年期间,分布在4个不同大洲的17个碳交易市场建设完成。我国碳交易的开展可以追溯到2005年,其发展历程可以分为3个阶段:(1)2005年开始参与国际清洁发展机制(Clean Development Mechanism,CDM)项目[⑤]。(2)2013年开始建设碳交易试点市场,涵盖北京、上海、天津、重庆、湖北、广东、深圳、福建8个省市。(3)2021年开始建设统一的全国碳市场,首批纳入2225家电力企业。当前我国统一碳市场和试点碳市场并存运营,试点碳市场采用碳配

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

额交易和中国核证自愿减排量项目(Chinese Certified Emission Reduction,CCER)抵消机制并存的方式。

整体来讲,我国碳市场的碳价格和交易活跃度相比国际碳市场较低。参照欧盟等成熟碳市场的发展历程,未来我国碳市场的覆盖范围将进一步扩大,免费配额分配将逐渐被有偿分配取代,CCER将广泛进入碳市场,CCER抵消比例将进一步扩大,从而增加可交易减排量。但是CCER项目的审批需要符合一定的国家标准,未来的审批标准会进一步严格,仅有部分符合标准的行业和达到一定体量的企业可以获得审批资格。然而,我国经济结构体系近年来对碳密集行业的依赖性较强(Guan et al.,2014),且2020年碳排放总量为120亿吨,即使未来企业级碳交易市场成熟之后可以覆盖60%~70%的比例,要实现"双碳"目标,也存在一定的压力。因此,补充发展企业级碳交易之外的接受度高、成本有效的政策工具,是未来我国碳市场发展重要趋势。

(二)个人级碳交易的现状及发展趋势

个人级碳交易作为一种"自下而上"的碳减排政策,引起了多国政府关注,但是由于早期强制性的个人碳交易社会接受度较低、管理成本过高等原因,并未大规模推广成功。然而,相关学者认为个人级碳交易并不是一个超前的概念,是高质量实现碳减排的有效途径之一(Fawcett,2010)。相关研究指出,虽然在个人级碳交易政策下,个人碳排放额度的平均分配存在一定的不公平性(Burgess,2016),但是其可以有效地改变个体的行为决策,提高低碳意识(Li et al.,2018)。在中国进行的一个案例研究表明,个人和家庭参与的碳市场可以分别减少45.5%乡村地区的碳排放和28.1%城市地区的碳排放,节约的碳减排成本达到13.60%~14.01%(An et al.,2021)。

由于个人级碳交易的巨大潜力,当前已经有多个政府机构和相关企业结合我国国情发起了多个碳普惠实践项目,比如广东省的"碳普惠"项目、支付宝蚂蚁森林等。如表1所示,此类项目通过以金钱或者荣誉激励为主的形式,鼓励公民自愿参与碳市场,避开了强制性个人级碳交易存在的一些推广障碍(自然资源保护协会,2021)。但是目前推行碳普惠试点的城市或者公司,大都是针对绿色出行场景,由于数据限制,难以覆盖到居民生活全场景,而且运行状况良好的项目大都是引入市场外部激励机制。低碳行为数据折合成碳积分到碳交易市场进行交易获利的模式,比单独政策引导或发放优惠券的模式运行更为出色,证实了市场化激励反馈的积极作用。此外,蚂蚁森林的案例说明了公民的低碳行为意愿强烈,在数据可以通过平台自动收集的前提下,仅通过合理的荣誉激励,便有如此巨大的用户群体和显著的减排效果。

根据目前地方政府和企业的实际试点情况,碳普惠制度的推广还存在一定问题,主要体现在以下4个方面:(1)数据规模过于庞大,管理效率需要提高。在我国推行碳普惠制度,小微企业、社区、家庭、个体节点数目

表1 碳普惠相关项目的运行模式及问题

项目名称	项目概况	存在的问题
碳宝包 (武汉)	运行期间市民可以通过公交、共享单车或者步行的方式兑换碳币,碳币可以用于兑换电影票和团购券等。	操作的便捷性低,市民需要单独上传小票等证明;兑换产品不符合市民期望值。
碳账户 (深圳)	通过机动车自愿停止驾驶、使用特定充电桩充电和使用塑料回收机3个活动,鼓励居民获取碳积分能量激励。积分可以兑换生活用品和各种消费券。	存在的问题与武汉的碳宝包类似。
碳普惠 (广东省)	小微企业和居民家庭的减碳行为可以被量化,兑换为碳币。碳普惠平台的特色是与碳交易平台对接,自愿行为可以通过核证转化为碳普惠核证自愿减排量(PHCER),在碳交易市场上进行交易获利。现在已经有碳减排项目20个,会员两万多人,累计减碳量近1.7万吨。	用户数据难以获得,仅政府控制的公交系统、水电气等系统可以与碳普惠平台打通,其他企业将用户的行为数据看作一种资产,不愿意与碳普惠平台进行共享。
我的南京 (南京)	用户通过绿色低碳出行等方式获得绿色积分,可以直接在绿色商城兑换实物奖励,也可以在当地的苏果超市抵扣现金。项目获得碳减排量可以在北京碳市场交易,交易获得资金用于系统运转。	存在的问题与广东碳普惠项目类似,部分企业数据难以接入。
我自愿每周再少开一天车 (北京)	用户手动上传停驶车辆照片,审核通过后可以获得停驶减排量,获得与在北京碳交易市场交易对应的收益。	用户操作成本高,无法直接获得停驶数据。
绿色出行碳普惠 (北京)	用户只要采用绿色出行方式时使用高德地图和百度地图进行导航,便可获得碳能量。由高德地图、百度地图汇总用户碳能量在碳交易市场进行交易,交易所得按用户贡献比分发给用户。	难以统一覆盖用户生活的各个方面,难以建立统一的碳账户。
蚂蚁森林 (支付宝)	蚂蚁森林自2016年上线来,通过统计支付宝用户的低碳行为折算成绿色能量,并捐赠累计能量进行公益活动。借助支付宝广大的用户基础,通过精神激励的方式,促进了用户的低碳行为方式选择意愿。	尚未与碳市场进行对接。
绿普惠 (绿普惠网络科技公司)	绿普惠通过与保险公司、车企等合作,使用车联网减排设备记录个人停驶行为,并将个人停驶行为进行量化,给予碳积分奖励。碳积分可以在碳交易市场进行交易,也可以直接与保险公司兑换现金奖励。	推广程度较差,碳积分总数较少,价值较低。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

过多，全面推广之后将面临规模庞大的数据和高昂的管理成本。(2)数据真实性、安全性、可追溯性需要增强。虽然移动互联网的普及使个人数据的收集变得便捷，但是涉及数据的真实性与隐私性的尺度较难把握，且数据溯源的难度较大。(3)数据认定与激励兑换的方法不完善。诸多低碳行为比如公共交通、步行、植树等行为如何兑换成碳积分，其换算方法尚未成熟。(4)不同企业的个体行为大数据难以共享，存在“数据孤岛”问题。在大数据时代，企业用户数据是企业的核心资产，如果不能在安全可靠的前提下实现数据的共享，便难以全面、便捷的统计量化低碳行为数据。因此，如何处理上述问题是碳普惠制度推广的关键。

(三)未来碳交易市场的演变趋势分析

根据上节分析，在“双碳”目标的驱动下，我国碳市场未来在“自上而下”推进企业级碳交易的同时，需要兼顾“自下而上”的个人级碳交易的推广与实施。从现行阶段到未来全民参与的统一碳市场，还要经过一段时间的建设和迭代。图1展示了未来碳市场演变过程的4个主要阶段。

第一阶段：全国碳市场启动期。

启动初期，首批2225家发电企业进行碳配额交易，与七大地方性试点市场并存运行。本阶段的主要任务是实现全国统一碳市场的平稳运行，使碳价稳中有进。同时，逐步实现地方碳市场企业到全国统一碳市场的过度，逐步扩大八大行业中纳入统一碳市场的规模。

第二阶段：全国碳市场发展期。

碳市场覆盖规模向多个行业扩展，开始纳入CCER项目。八大重点控排行业(发电、石化、化工、建材、钢铁、有色金属、造纸和国内民用航空)共有企业数目7000~8000家，绝大部分进入全国碳交易市场。截至2021年4月，国家发改委公示的CCER审定项目累计2871个，备案项目861个，进行减排量备案的项目254个。因此，本阶段预计将有千余个CCER项目在市场上进行交易。全国碳交易市场节点数目将达到万级。碳普惠项目在各地区开始试点，暂不列入全国碳交易市场节点计数。

第三阶段：全国碳市场成熟期。

企业级碳市场趋于成熟，个人级碳市场协同补充。八大行业企业全部进入碳市场；CCER项目数接近峰值；碳普惠项目区域性逐渐普及，开始尝试在全国碳市场进行交易；考虑碳普惠项目节点数目，以北京市的公交出行为例，全市每天的公交出行人数约为610万人，假设以某个区为试点，个人碳资产账户数目至少在百万级别，所以该阶段全市场节点数目达到百万到千万级。

第四阶段：全国碳市场完善期。

全国碳市场涵盖碳配额交易、CCER交易与PHCER(碳普惠核证自愿减排量)交易，中国进入全民碳普惠时代。在这一阶段全市场节点数可以参考蚂蚁森林数据进行估计。蚂蚁森林2016年8月上线，2017年1月用户规模达到2亿，于2019年11月用户规模突破5亿，约占支付宝用户总数的50%左右。蚂蚁森林相关的数据均是以个人自愿减排为前提，碳普惠制度不但可以满足个体的环保意愿，还起到了经济激励的作用，所以预估未来碳普惠制度的普及程度会高于蚂蚁森林的普及程度。因此，预测未来企业级碳账户与个人级碳账户数目将达到10亿级。假设个人碳账户每天有一笔数据更新，平均每人每天发起一笔交易，平均每天的交易量在20亿笔以上。未来的碳市场建设将面临个人碳资产大数据的管理压力。

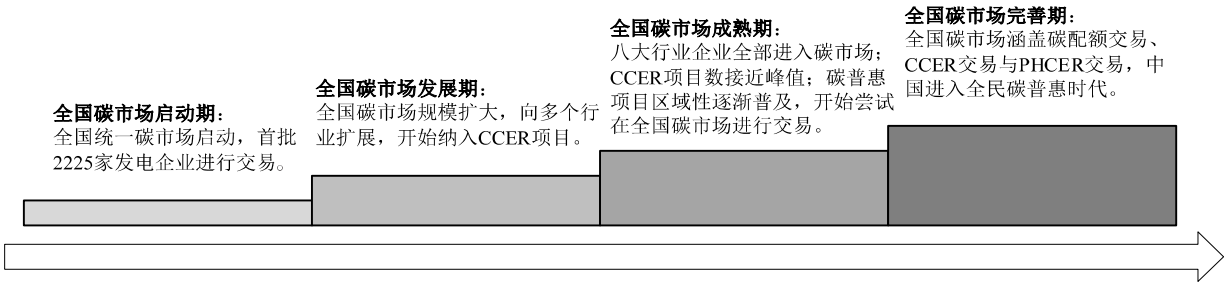


图1 未来碳交易市场演变过程阶段图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

三、基于区块链技术的未来碳市场系统架构设计

根据上节分析，未来我国碳市场的完善建设过程中将面临大数据的管理问题。长期视角下我国能源转型需要以创新驱动为引领，并基于数字技术进行商业运营模式的改进（范英、衣博文，2021）。区块链技术具有解决未来大数据环境下我国碳市场面临的系统运行效率、管理成本、数据资产安全和虚假交易等问题的优势。因此，本节将引入区块链技术进行未来我国碳市场系统架构设计。

（一）大数据环境下传统区块链技术方案的应用前景分析

区块链技术是通过去中心化和去信任的方式集体维护一个可靠数据库的技术方案，具有匿名性、自治性、开放性、可编程性、可追溯性和不可篡改等优良特性（邵奇峰等，2018；袁勇、王飞跃，2016）。根据信息的公开程度、节点的权限和去中心化程度，区块链技术主要分为公链（公有链）、联盟链和私有链3种。公链是所有人都可以读取数据、发送交易、参与共识的区块链，其去中心化程度最高，数据安全性最高，但是交易速度最慢。联盟链是有多个组织机构共同参与、共同管理的区块链网络，其中数据的读写只对链中的各个组织机构开放，其交易速度较快，但是去中心化程度和数据安全性较差（李芳等，2019）。私有链是一个私有的区块链数据库，中心化程度高，数据访问权限通常仅对中心机构认证的用户开放，其数据处理速度最快，但是数据安全性最差。

表2是基于不同的区块链技术方案的碳市场与基于中心化交易所的碳市场特性对比表。其中私有链和中心化交易所类似，均是由中心机构主导，数据安全性和公开性在区块链技术方案中最差，但是私有链相比中心化交易所，在数据可追溯方面有明显的优势。公链方案的问题主要是交易速度和管理成本，交易速度受限于其共识机制导致的区块确认速度，管理成本来自碳普惠时代全部节点上链后带来的交易成本和运营成本。相比公链，联盟链虽然有运行效率方面的相对优势，但是其中心化程度较高，数据安全性和公开性较差，也无法满足企业级碳交易和个人级碳交易的数据公开性差异需求。

面向未来碳市场建设的大数据场景，区块链技术的商业模式应用可以极大地降低企业进行数据篡改、虚假信息操纵的可能性（龚强等，2021）。然而，新场景引出了诸多新挑战，未来碳市场需要在保证系统运行效率的同时，兼顾企业交易数据透明可监督和个人数据资产隐私需求，还需要控制系统的管理运营成本。区块链技术发展至今，存在“不可能三角”的问题，即去中心化程度、速度和安全性不可兼具。公链、联盟链与私有链各有侧重，但均无法同时满足大数据场景下碳市场建设的复杂需求。

（二）大数据环境下区块链碳市场系统结构的分层设计方案

大数据环境下公链技术方案的运行效率瓶颈问题在比特币和以太坊等公链的交易场景中早有体现。随着区块链技术的普及，传统公链的吞吐量无法满足爆炸式增长的交易需求，因此出现了多种区块链扩容技术。侧链技术作为其中的一种分层解决方案（Wang et al.，2021），具备独立区块账本、共识机制与定制化智能合约，通过与主链（侧链的锚定链，比如比特币、以太坊等）的双向锚定，既可以满足数据资产的跨链需求，又可以在内部进行独立的金融创新与技术创新，更重要的是可以缓解大数据环境下主链的拥堵问题。例如Loom[⑥]作为一种基于以太坊的侧链协议，通过DPOS的共识机制实现了高性能吞吐量，并可以使数据资产在Loom与以太坊之间安全的跨链转移，由此小额交易可以在Loom侧链上进行，提高了网络吞吐量且为用户降低了手续费。同时，Loom支持智能合约的定制化部署，每条Loom侧链可以有不同的智能合约，支持面向多场景的模式创新。

表2 基于不同的区块链技术方案与中心化交易所的碳市场特性对比

	中心化交易所	公链	联盟链	私有链
中心化程度	中心化	去中心化	半中心化	中心化
交易速度可以满足未来碳交易市场演变过程阶段的要求	第四阶段	视公链性能：第二或者第三阶段	视联盟链性能：第三或者第四阶段	第四阶段
数据安全性	差	优	良	差
可追溯性	无	有	有	有
数据公开性	不公开	公开	半公开	不公开
管理成本	高	高	高	高

当前侧链技术较多的应用于比特币和以太坊的跨链资产转移，基于侧链技术的应用模式创新较少。针对大数据环境下我国未来碳市场的建设，尚无区块链技术角度的研究探讨。根据第

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

二章中碳市场的发展趋势分析，本研究认为主侧链结合的技术方案与我国未来碳市场建设需求紧密契合。主侧链分别支撑企业级碳交易和个人级碳交易，有以下几点优势：(1)提高系统运行效率。企业级碳交易有大额低频的特性，个人级碳交易有小额高频的特性。小额高频的个人级碳交易在高吞吐量的侧链中进行，可以极大的提高系统运行效率。(2)降低系统管理成本。主侧链智能合约的自动化执行可以减少政府管理部门的工作量。(3)数据安全需求分层满足。企业级碳交易对交易安全性和稳定性要求较高，个人级碳交易对个人和数据服务提供商的数据资产安全要求较高，主侧链分层制定智能合约可以满足不同的数据安全需求。(4)多样低碳场景需求定制化满足。一条主链可以与多条侧链双向锚定，所以可以面向不同区域的不同低碳场景、不同行为数据折算方式，定制不同的智能合约，灵活应对多样化需求。同时区域性侧链的实施还可以聚合区域小额个人碳资产，降低运营管理成本。

侧链技术在扩容方面的发展主要是面向公链，但是也不乏对多类型链之间进行链接的技术方案出现(李芳等，2019)。私有链由于牺牲去中心化程度获得的高吞吐量，并无扩容需求，不直接采用私有链技术的原因已在上节中进行了阐述。联盟链虽然部分牺牲了中心化，但是其吞吐量仍然难以满足大数据框架下的高并发需求，比如Hyperledger Fabric的吞吐量为不到2000TPS(邵奇峰等，2018)。所以本研究的主侧链方案主要是在“公链+侧链”和“联盟链+侧链”之间进行分析选择。面向未来的大数据环境下碳市场的企业级碳交易建设需求，公链和联盟链的特性对比如下：(1)数据公开程度。公链的数据面向全网络公开，联盟链只面向联盟中的节点。数据公开透明可以使企业交易数据面向大众接受监督，极大程度降低虚假数据、虚假交易的可能性。针对本研究中的场景，在网络建设初期企业节点较少时，如果采用联盟链的架构，由于各个企业节点均存在利益关系，存在不同节点之间进行合谋的隐患。联盟链中交易监管只能依赖网络中的监管节点，依然难以解决监管效率低下、监管不彻底等问题。(2)交易速度需求。根据我国试点碳市场和全国统一碳市场的交易节点数目和交易情况，同时考虑到未来碳市场企业级节点的数目，当前公链的吞吐量完全可以支撑企业级节点(八大行业企业节点、CCER项目节点和碳普惠项目节点)之间的交易。(3)可实施性。当前的联盟链技术尚没有统一标准，存在Hyperledger/Fabric、JPMorgan Quorum和R3 Corda等解决方案，具体行业统一框架的形成还需要一定的时间。基于当前行业发展现状，打造一个国家级应用的联盟链需要的时间成本和其他成本巨大。而公链已经有以比特币、以太坊为代表的多种成熟开源技术方案，可实施性相对更强。

(三)基于公链和侧链技术的区块链碳市场结构设计

通过上节的分析，本研究基于公链和侧链技术提出如图2所示的区块链碳市场结构。其中公链的业务节点主要是各大企业节点、交易所节点、CCER项目节点和碳普惠项目节点。核查节点为相关的政府部门，拥有核查同意相关申请的权限。各业务节点之间可以协议交易，协议交易的数据均记录在区块链中。各业务节点也可以将自己的碳资产充值到交易所，在交易所中进行挂单交易，交易所中的交易记录在交易所的侧链中。各业务节点与交易所节点之间的充提碳资产操作记录在公链上。上述模式保证了公链仅记录企业级业务节点之间的交易，保证了公链的处理效率。

侧链生态的碳积分认证可以设置一套基本办法，生态运行方可以根据该办法灵活设置运行政策，编写智能合约。智能合约通过国家的认证后，生态中的碳积分便可以依据合约规则在区域侧链生态中流通。碳普惠项目运营节点回收聚合管理区域的个人碳资产，聚合之后到企业级碳交易市场进行交易，从下至上层次化管理，减少了管理成本。以某区域绿色出行减排项目为例，侧链生态运行方可以根据区域内的实际情况，制定绿色出行兑换碳积分的规则。该规则通过国家相关部门认证之后，区域的碳普惠项目便可以依据智能合约开始运营。生态中有3种不同节点，分别拥有不同的权限和功能，生态运营方根据区域中个体绿色出行行为发放碳积分，然后根据公链上PHCER(碳普惠核证自愿减排量)[7]的价格设置收购价格回购碳积分，最后聚合碳积分申请国家认证兑换为PHCER在主链上进行交易。个人节点的功能主要是通过低碳行为获得碳积分、利用碳积分在生态中换取商家的服务或者直接出售碳积分。生态中的商家可以以服务或者资金的形式收购碳积分，再将碳积分卖给生态运行方。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图3是传统中心化交易模式与“公链+侧链”模式的对比。如图3所示，侧链除了提供智能合约编写的灵活性之外，还承担了绝大部分高频率、小额的交易量，最终实现了个人碳资产聚合到生态运行节点，相比统一管理的模式，极大地降低了成本，保证公链上主要发生大额交易，提高了公链的运行效率。而且侧链通过限制普通用户节点的权限，保证了用户数据的隐私性。智能合约还可以保护提供个体行为数据的企业的数据资产权益，实现用户低碳行为全方位的聚合，同时接入平台的数据提供方不用担心企业数据资产泄露的问题。

图4为本研究提出的“区块链+侧链”运行模式的系统架构图。其中主链进行企业节点、CCER项目节点与碳普惠节点之间的交易，数据去中心化链式存储，安全可追溯且公开便于监管。基于高效的共识机制搭建侧链生态，交互层兼容移动设备、城市一卡通和Web客户端等，实现个人低碳数据的全方位记录。智能合约可以保护用户与数据提供商的数据资产安全，同时实现自动高效的个人碳资产数据聚合。

图5为本研究设计的区块链碳市场业务流程图。主链可以实现碳配额发放、碳排放记录、碳交易和碳履约的企业级碳交易全过程记录，利用智能合约提高交易效率、降低管理成本，并实现交易数据公开透明易监督。侧链记录高频小额个人级碳交易业务数据，实现全过程数据可追溯，并可以通过智能合约实现个人数据的隐

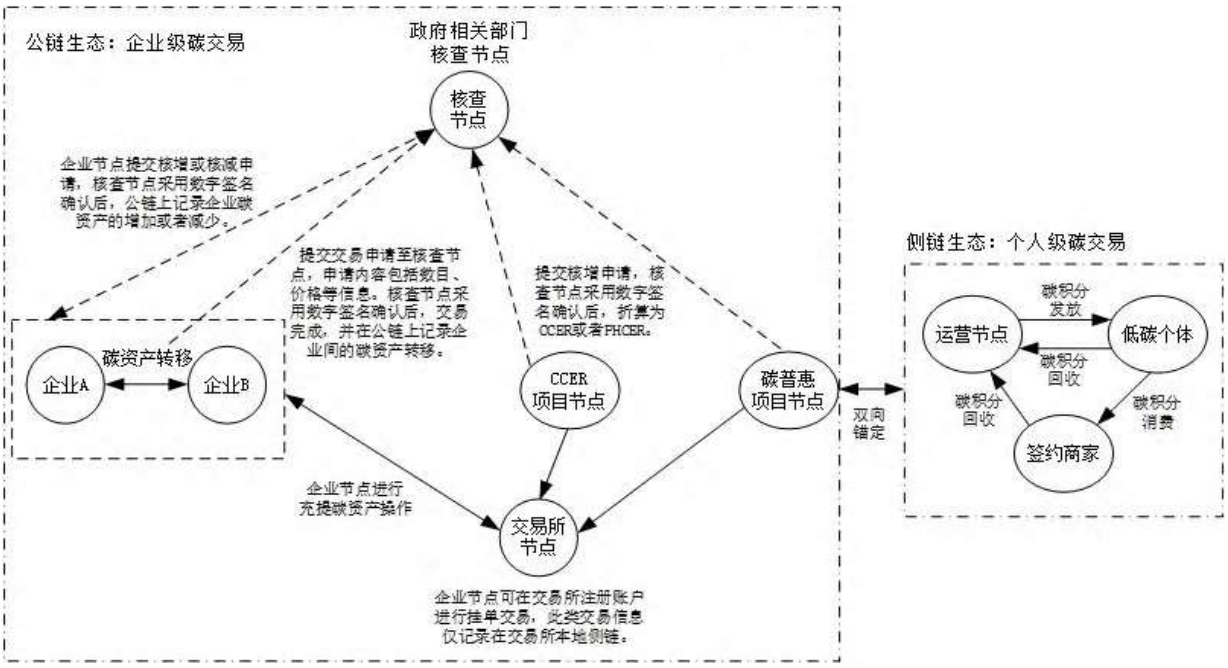


图2 基于公链和侧链技术的区块链碳市场生态结构图

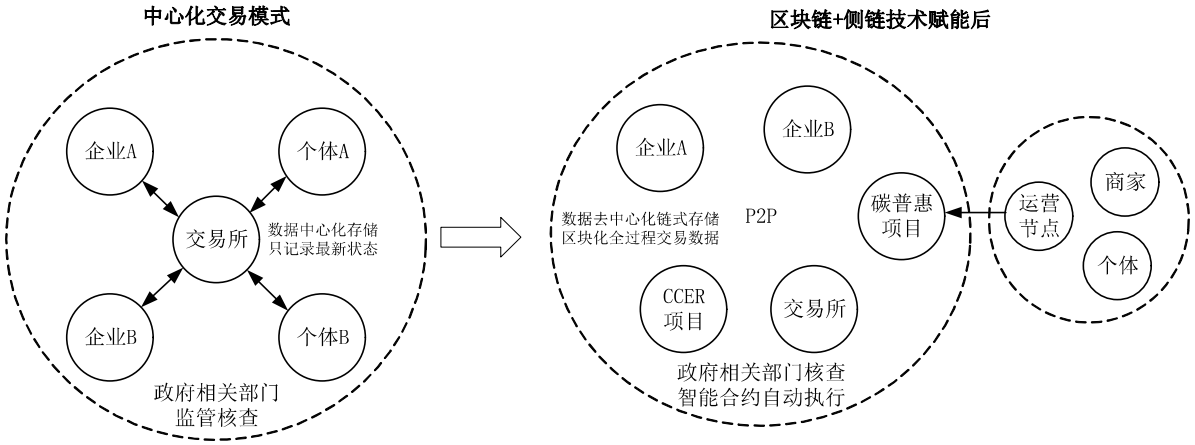


图3 传统中心化交易模式与“区块链+侧链”模式的对比

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

私保护与企业的数据资产安全保护。

（四）实验结果对比分析

以太坊作为区块链2.0时代的技术代表，提供了一个可以便捷构建各种区块链应用的平台。因此，本研究基于该平台构建了一个区域碳普惠生态运行示例。示例项目主要使用React作为前端开发技术栈配合Redux作为中心数据管理，后端采用Express提供接口服务，搭建交易平台的基本框架，完成基本的假定用户需求（Antonopoulos and Wood，2018）。合约相关的功能有碳积分的发放、交易、绿色出行里程与碳积分的兑换、法币的充值与提现、余额查询等。相应的合约可见《管理世界》网络发行版附录和该DAPP的测试地址⑧。

关于侧链的实际运行效率，我们做了进一步实验。图6是本研究构建的智能合约分别在以太坊和Loom上的运行效率对比表。上文中提到Loom是一种以太坊侧链拓展解决方案，采用DPOS共识机制，其可以实现侧链DAPP的构建、侧链中的高并发交易、侧链与主链的锚定交互等，而且其DAPP构建完全支持以太坊solidity合约，迁移比较方便，因此本研究选择该侧链方案作为测试场景。以太坊网络的吞吐量是15TPS左右，Loom侧链内部的吞吐量在百万级TPS。为了尽量模拟真实以太坊网络，我们基于以太坊的测试网络ropsten进行测试。由于有其他交易同时存在，难以直接对比全负荷吞吐量，因此本研究对比连续逐笔交易确认时间来说明公链和侧链运行效率的差异。从图6可以看出，侧链中构建碳普惠DAPP运行效率远高于以太坊主链中直接构建DAPP。

四、侧链生态个人碳资产价格驱动机制模型

通过上文的分析，基于“公链+侧链”的技术模式一方面可以满足海量交易的需求，另一方面也能保留区块链技术诸多的优势。在这一节中，我们讨论在侧链生态中碳积分的定价问题。这里我们假设在主链上的碳价格是由市场因素（考虑政府排放许可限制、企业排放需求、含碳产品定价等因素）确定的，而侧链生态中的碳价格则需要根据主链上的碳价格和生态内的交易逻辑、供需关系来确定。该价格可为政府相关部门制定政策提供决策参考依据。

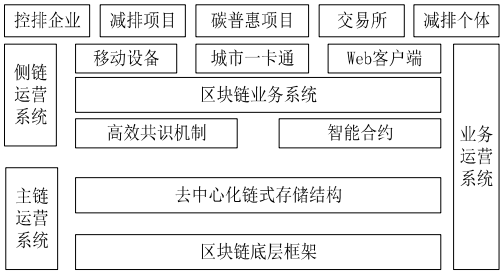


图4 “区块链+侧链”碳交易市场系统架构图

交易笔数	以太坊网络交易时间(s)	Loom侧链交易时间(s)
100	1620.034	40.686
200	5,603.421	87.531
300	8,253.675	128.428
400	11,613.331	175.560
500	14,250.958	226.610

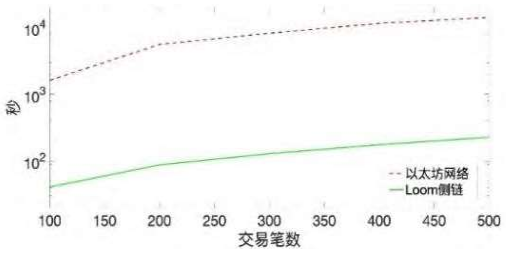


图6 碳普惠生态DAPP以太坊网络运行和Loom侧链运行的效率对比

（一）基本假设

图7描述了碳交易市场中碳配额、CCER、PHCER与碳积分的价格关系。在企业级碳交易市场中，假设存在3类节点：企业节点、CCER或者碳普惠项目节点（对应侧链中的运营节点）、侧链生态中的低碳减排个体或者签约商家。其中侧链生

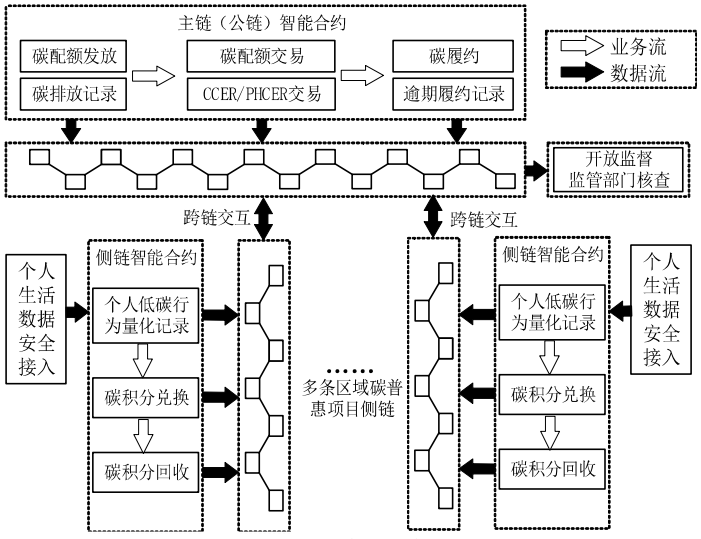


图5 区块链碳市场业务流程图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

态中的低碳减排个体或者签约商家将碳积分以一定的价格出售给碳普惠项目运营节点，碳普惠项目（CCER项目）运营节点将PHCER（CCER）出售给减排企业，用于碳排放量的抵消。基于此，做出如下假设。

假设1：市场中碳配额的单位价格为P；碳普惠项目（CCER项目）运营节点出售给企业的PHCER（CCER）价格为P_c；侧链生态中流通的单位碳减排量的价格为P_{ph}（即生态运营方的回购价格）。

假设2：市场中所需的碳排放量总额为N，国家规定可以用CCER或PHCER抵销的比例为δ。

假设3：生态中的减排者个体效用为u_i，即：

$$u_i=(P_{ph}-\theta_i e)D_i \tag{1}$$

其中，θ_i为个体感知系数，服从均匀分布，即$\theta_i \sim U(0,1)$；e为个体获得单位碳积分付出成本的价值度量，D_i为个体的碳减排量。若$u_i \geqslant 0$，则个体减排者加入市场，即：

$$\theta \leqslant \theta^* \triangleq \frac{P_{ph}}{e} \tag{2}$$

假设4：整个市场供需平衡，即：

$$D_{all}=N\delta \tag{3}$$

其中，D_{all}为生态中个人可交易碳积分的总和，国家规定可以用CCER或PHCER抵消碳排放量的比例为δ。

假设5：生态中个体总数为W，所有个体减排量均值为D，则生态中的减排总量D_{all}为：

$$D_{all}=\sum_{i=0}^{W}D_i=W\int_0^{\theta^*}D\mathrm{d}\theta=\frac{P_{ph}}{e}DW \tag{4}$$

（二）均衡分析

当个体减排者加入市场，则生态运营方的运营收益π为：

$$\pi(P_{ph})=(P_c-P_{ph}-c)D_{all}=\frac{DW}{e}(P_c-P_{ph}-c)P_{ph} \tag{5}$$

其中，c为生态运营方的单位运营成本。从运营方的角度，其通过对生态中流通的碳积分价格P_{ph}进行调整，来最大化运营收益，即求解：

$$\max_{P_{ph}}\frac{DW}{e}(P_c-P_{ph}-c)P_{ph}$$

解此最优化问题，并将结果结合（3）和（4）式，得到命题1。

命题1. 使碳普惠项目运营方利润最大化的最优价格P^*_{ph}与相应的P_c分别为：

$$P^*_{ph}=\frac{1}{2}(P_c-c),\quad P_c=\frac{2N\delta e}{DW}+c$$

由命题1可以看出，国家根据市场条件和个人减排效用情况，可以通过设定CCER或PHCER抵消比例δ来调节市场价格，从而调节生态中碳积分的价格。DW反映了区域碳普惠项目供给量，$N\delta$为碳市场对于PHCER的总需求量，价格随需求增加而增加。

同时，根据上述假设和命题1，可分别得出生态中的减排者效用剩余（6）和生态运营方的社会福利（7）

$$U=\sum_{i=0}^{W}u_i=\int_0^{\theta^*}(P_{ph}-\theta e)DW\mathrm{d}\theta=\frac{eN^2\delta^2}{2DW} \tag{6}$$

$$\pi+U=\frac{3eN^2\delta^2}{2DW} \tag{7}$$

根据生态运行方的社会福利表达式可知，CCER或PHCER的抵销比例δ越大，社

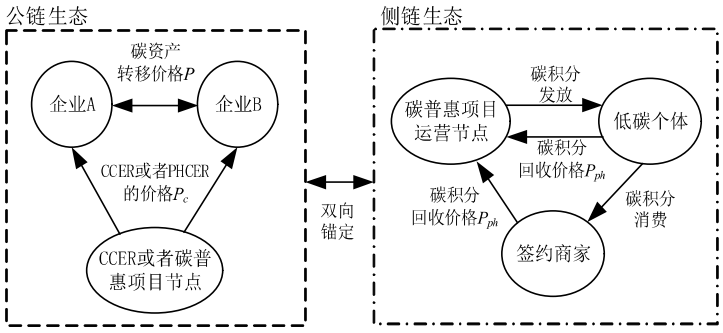


图7 碳交易市场中价格关系示意图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

会福利越大。但是由于市场上碳配额的价格一般高于CCER或PHCER的价格，履约企业会优先配置CCER或PHCER，抵销比例δ越大，通过减排节约碳配额的企业获取的福利效用越低，所以进一步将减排企业的效益考虑进模型中，有下式(8)，其中c_1为节约单位的碳配额付出的减排成本，π_b为减排企业的社会效益，则：

$$\pi_b=(P-c_1)N(1-\delta) \tag{8}$$

假设6：假设碳交易市场中减排企业付出的单位减排成本与节约的碳配额之间是线性关系，即$kc_1=N(1-\delta)$。其中，k越大，减排越容易，k越小，减排越难。

则整个生态网的社会福利为

$$\pi_b=(P-\frac{N(1-\delta)}{k})N(1-\delta)+\frac{3eN^2\delta^2}{2DW}=(\frac{3eN^2}{2DW}-\frac{N^2}{k})\delta^2+(\frac{2N^2}{k}-PN)\delta-\frac{N^2}{k}+PN \tag{9}$$

根据(9)式，减排企业的社会效益π_b是关于δ的二次函数，因此，在满足一定条件时，才会存在δ在(0，1)之间的局部最优解，即命题2。

命题2.政策制定者应该控制配额的发放，使其满足下列条件：

条件(1) $k<\min(\frac{2N}{P},\frac{2DW}{3ek})$；条件(2) $N<\frac{DWP}{3e}$

从而保证最优δ^*满足$0<\delta^*<1$，使全市场节点福利最大化。否则，当$\delta^*=0$时，市场中的减排企业会偏向于将全部碳排放量用碳配额抵消；当$\delta^*=1$时，倾向于将全部排放量用CCER或者PHCER抵消。以上两种情况均难以实现市场均衡健康发展。

(三)数据模拟

我国碳交易市场起步较晚，数据与定价中的关键参数统计不足，因此根据上述的定价模型，我们进行数据模拟分析。首先，我们考虑碳配额的单位价格。根据全国碳市场与各试点市场的碳价情况，设定“十四五”初期的碳价格为50元/吨(约8美元/吨)，并考虑在“十四五”末可能达到64元/吨(约10美元/吨)。根据中国碳价调查的预测趋势和欧盟的碳价格发展趋势，预测我国在2030年实现碳达峰目标时碳价格达到90元/吨，在2060年实现碳中和时翻倍，达到180元/吨。其次，我们考虑碳排放总额。目前，发电行业重点排放单位被纳入全国碳交易市场，年覆盖排放总额45亿吨，未来纳入钢铁、建材、石油等工业行业，年覆盖排放总额约70亿吨。按配额发放略低于企业排放总量计算，假设全国碳交易市场开通初始一段时间纳入企业的排放总量40亿吨，“十四五”时期末达到60亿吨。根据成熟碳市场的覆盖比例，同时考虑未来中国的经济增速，预计2030年纳入排放总量可达100亿吨，2060年可达120亿吨。再次，我们考虑人均碳减排量。根据中国绿色碳汇基金会公布的碳足迹数据，中国人均碳足迹为6.23吨/年，我们假设目前人均每年可以减排1吨二氧化碳，到“十四五”末，碳普惠方法学相对完善，人们碳减排意识增强，人均每年可以减排1.2吨二氧化碳。到2030年碳普惠进一步覆盖，预计可以减排1.5吨，至2060年全面覆盖后，预计人均碳减排可达2吨。对于其他参数，我们做如下假定：根据第三节的分析，假设个人碳账户数目随时间的推移将阶梯式达到W=6亿的规模；生态运营方的单位运营成本c和个体实现单位减排付出的成本e均为10元/吨，即中国目前全经济尺度的边际减排成本约40元/吨(7美元/吨)的1/4；抵销比例δ随着市场对交易量的需求增长进一步扩大，到2060年达到20%。

表3 未来我国碳市场不同阶段模拟参数设定

	N	D	W	c	e	δ
模拟阶段1：“十四五”初	40	1	1	10	10	5%
模拟阶段2：“十四五”末	60	1.2	2			10%
模拟阶段3：2030年	100	1.5	4			15%
模拟阶段4：2060年	120	2	6			20%

综上，本文的数据模拟的设定和结果如表3所示，碳价格的静态数值模拟结果和动态数值模拟结果分别如图8和图9所示。理论公式和数值模拟结果表明，生态运营方可以以较低的价格聚合个人碳减排量，并以相对较高的价格接入到主链上的碳交易市场，因此生态运营方有持续运营的动力。但

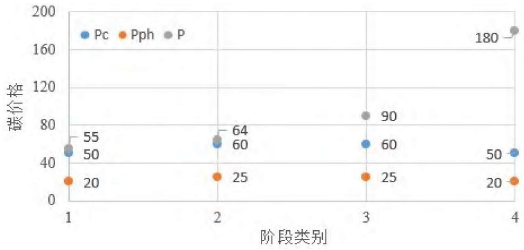


图8 未来碳市场不同阶段碳价格静态数值模拟图

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

另一方面，该价格低于碳配额价格，因此企业有动力去购买CCER或PHCER所带来的碳减排量。个人碳减排的单位收益大于单位减排成本，因此个人有动力参与碳普惠项目。这样的机制设定有助于整个“公链+侧链”生态的持续发展。随着时间的增长和碳普惠项目的逐渐普及，个体参与低碳行为会从激励导向转变为习惯导向。此时，由于参与者增多，个体减排量增多，市场上PHCER增多，其价格会有一定程度的下降。因此本研究数值模拟结果预测未来P_c和P_{ph}达到一定高度后会有所下降。此外，碳普惠时代中，对个人单位减排量的付出成本和生态运行节点的单位减排成本进行合理估算是十分必要的，并且政府可以通过调控CCER或PHCER的抵消比例调控市场价格，引导市场良性发展。

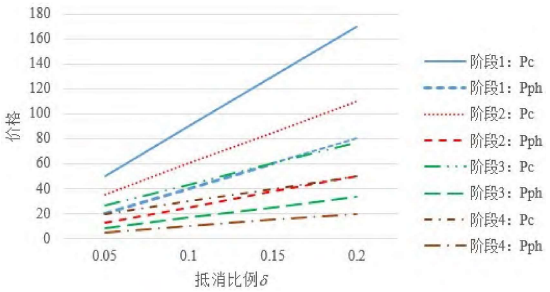


图9 未来碳市场不同阶段碳价格动态数值模拟图

五、总结与展望

本文通过分析我国未来碳市场的发展趋势，指出了建设融合企业级和个人级碳交易的碳市场是我国快速实现“双碳”目标的重要途径。根据目前各试点碳交易市场和全国统一碳交易市场的建设现状，碳交易的过程中存在监管难度大和管理成本高等突出问题。同时，一些地区开展的碳普惠相关的试点项目也突出地体现了个人级碳交易过程中存在的数据体量大、管理成本高和数据孤岛等问题。面向未来大数据的场景，本文提出了基于公链+侧链技术的碳市场体系设计方案，说明了公链和侧链技术应用到碳市场中的独特优势。该方案可以保证公链节点交易数据的真实可靠、可追溯与不可篡改。同时通过侧链技术解决海量个人碳资产数据导致的主链拥堵问题，实现个人碳资产数据的聚合，降低管理成本。侧链的智能合约可以根据区域特色定制化执行，保证灵活性的同时还可以解决数据孤岛的问题。本文还展示了基于以太坊构建的智能合约运行示例，实验结果说明了侧链的运行效率。最后对侧链生态中的碳价格进行了价格驱动机制模型分析，分析结果为政府部门进行宏观政策调控提供了参考依据。本篇文章的主要创新之处在于：(1)面向未来大数据场景，构建了碳市场区块链系统架构设计方案；(2)针对区块链系统侧链中流通的个人碳资产，提出了价格驱动机制模型。

本文基于未来碳市场的海量交易数据视角提出并分析了区块链在实际应用中的技术方案，这是区块链赋能实际应用的一方面。从区块链技术角度来看，其技术本身的发展也存在诸多的研究机会，例如建立自主创新的区块链基础理论体系，开发区块链系统构建共性关键技术，建设自主可控区块链软硬件平台，提出区块链安全技术与监控方法，以及开展在金融、能源、智慧城市建设等重点领域的示范应用。根据“把区块链作为核心技术自主创新重要突破口”的重要指示，我们要加快研发新的区块链技术。新的区块链技术可以促进重要产业技术转型，帮助企业寻找新的商业运营模式，从而助力国民经济发展。

（作者单位：哈尔滨工业大学经济与管理学院）

注释

①国际定义为温室气体排放权交易的统称，指对相关温室气体进行排放总量控制，从而使之具备商品属性。本文以二氧化碳排放权交易为例进行说明。

②企业级碳交易指企业之间为了满足履约要求进行的碳配额、CCER、PHCER交易。

③碳普惠制度是政府相关部门对小型企业、居民社区、家庭和个人的低碳行为数据进行收集和量化，通过积分制度赋予其价值认证，且允许该价值认证在社区生态、碳交易市场流通的正向引导机制。

④碳资产是可交易二氧化碳排放指标的统称，包括碳配额、CCER、PHCER、碳普惠生态中的碳积分。碳积分指个人通过低碳减排行为获取的可交易碳减排量数据记录。个人碳资产特指碳积分。

⑤清洁发展机制起源于《京都议定书》约定的碳抵消机制体系，该体系包括国际排放贸易机制(International Emissions Trading，IET)，即发达国家之间碳排放指标的交易，联合履约机制(Joint Implementation，JI)，即发达国家之间通过项目级的合作实现碳排放指标的转让，以及CDM项目。CDM主要是由发达国家为发展中国家提供技术和资金，在发展中国家建设清洁能源项目，再通过一定的费用购买清洁能源项目产生的核证减排量(certified emission reduction，CER)用以抵消本国碳排放量。

⑥https://github.com/loomnetwork.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

⑦CCER(国家核证自愿减排量)与PHCER(碳普惠核证自愿减排量)的产生途径有所差异,但是在企业清缴配额时作用相同。在政策规定的抵消比例范围内,1吨二氧化碳当量的CCER或PHCER可抵消1吨碳排放量。

⑧测试网络地址为https://ropsten.etherscan.io/address/0x5b922f4c73173bd5f8a14f337a42e899e1479a80。

参考文献

(1)陈国青、曾大军、卫强、张明月、郭迅华:《大数据环境下的决策范式转变与使能创新》,《管理世界》,2020年第2期。

(2)范英、衣博文:《能源转型的规律、驱动机制与中国路径》,《管理世界》,2021年第8期。

(3)龚强、班铭媛、张一林:《区块链、企业数字化与供应链金融创新》,《管理世界》,2021年第2期。

(4)吉斌、昌力、陈振寰、刘妍、朱东海、朱丽叶:《基于区块链技术的电力碳排放权交易应用与市场机制设计》,《电力系统自动化》,2021年第12期。

(5)李芳、李卓然、赵赫:《区块链跨链技术进展研究》,《软件学报》,2019年第6期。

(6)邵奇峰、金澈清、张召、钱卫宁、周傲英:《区块链技术:架构及进展》,《计算机学报》,2018年第5期。

(7)袁勇、王飞跃:《区块链技术发展现状与展望》,《自动化学报》,2016年第4期。

(8)张宁、王毅、康重庆、程将南、贺大玮:《能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探》,《中国电机工程学报》,2016年第15期。

(9)张希良、张达、余润心:《中国特色全国碳市场设计理论与实践》,《管理世界》,2021年第8期。

(10)自然资源保护协会:《政府与企业促进个人低碳消费的案例研究》,自然保护协会北京代表处,2021年。

(11)An, K., Zhang, S., Huang, H., Liu, Y., Cai, W. and Wang, C., 2021, "Socioeconomic Impacts of Household Participation in Emission Trading Scheme: A Computable General Equilibrium-based Case Study", *Applied Energy*, Vol.288, No.116647.

(12)Antonopoulos, A. M. and Wood, G., 2018, "Mastering Ethereum: Building Smart Contracts and Dapps", O'reilly Media.

(13)Burgess, M., 2016, "Personal Carbon Allowances: A Revised Model to Alleviate Distributional Issues", *Ecological Economics*, Vol.130, pp.316~327.

(14)Caro, F., Corbett, C. J., Tan, T. and Zuidwijk, R., 2013, "Double Counting in Supply Chain Carbon Footprinting", *Manufacturing Service Operations Management*, Vol.15(4), pp.545~558.

(15)Chen, Y., Liu, A. L. and Hobbs, B. F., 2011, "Economic and Emissions Implications of Load-based, Source-based, and First-seller Emissions Trading Programs under California AB32", *Operations Research*, Vol.59(3), pp.696~712.

(16)Chod, J., Trichakis, N., Tsoukalas, G., Aspegren, H. and Weber, M., 2020, "On the Financing Benefits of Supply Chain Transparency and Blockchain Adoption", *Management Science*, Vol.66(10), pp.4378~4396.

(17)Csóka, P. and Jean-Jacques Herings, P., 2018, "Decentralized Clearing in Financial Networks", *Management Science*, Vol.64(10), pp.4681~4699.

(18)Fawcett, T., 2010, "Personal Carbon Trading: A Policy Ahead of Its Time?", *Energy Policy*, Vol.38(11), pp.6868~6876.

(19)Fawcett, T. and Parag, Y., 2010, "An Introduction to Personal Carbon Trading", *Climate Policy*, Vol.10(4), pp.329~338.

(20)Gallagher, K. S., Zhang, F., Orvis, R., Rissman, J. and Liu, Q., 2019, "Assessing the Policy Gaps for Achieving China's Climate Targets in the Paris Agreement", *Nature Communications*, Vol.10(1), pp.1~10.

(21)Guan, D., Klasen, S., Hubacek, K., Feng, K., Liu, Z., He, K., Geng, Y. and Zhang, Q., 2014, "Determinants of Stagnating Carbon Intensity in China", *Nature Climate Change*, Vol.4(11), pp.1017~1023.

(22)Hertwich, E. G. and Peters, G. P., 2009, "Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-linked Analysis", *Environmental Science Technology*, Vol.43(16), pp.6414~6420.

(23)Jones, C. and Kammen, D. M., 2014, "Spatial Distribution of Us Household Carbon Footprints Reveals Suburbanization Undermines Greenhouse Gas Benefits of Urban Population Density", *Environmental Science Technology*, Vol.48(2), pp.895~902.

(24)Jotzo, F., Karplus, V., Grubb, M., Löschel, A., Neuhoff, K., Wu, L. and Teng, F., 2018, "China's Emissions Trading Takes Steps Towards Big Ambitions", *Nature Climate Change*, Vol.8(4), pp.265~267.

(25)Li, W., Long, R., Chen, H., Yang, T., Geng, J. and Yang, M., 2018, "Effects of Personal Carbon Trading on the Decision to Adopt Battery Electric Vehicles: Analysis Based on A Choice Experiment in Jiangsu, China", *Applied Energy*, Vol.209, pp.478~488.

(26)Olsen, T. L. and Tomlin, B., 2020, "Industry 4.0: Opportunities and Challenges for Operations Management", *Manufacturing Service Operations Management*, Vol.22(1), pp.113~122.

(27)Su, B., Ang, B. and Li, Y., 2017, "Input-output and Structural Decomposition Analysis of Singapore's Carbon Emissions", *Energy Policy*, Vol.105, pp.484~492.

(28)Tan, X., Wang, X. and Zaidi, S. H. A., 2019, "What Drives Public Willingness to Participate in the Voluntary Personal Carbon-trading Scheme? A Case Study of Guangzhou Pilot, China", *Ecological Economics*, Vol.165, pp.106389.

(29)Tian, X., Chang, M., Lin, C. and Tanikawa, H., 2014, "China's Carbon Footprint: A Regional Perspective on the Effect of Transitions in Consumption and Production Patterns", *Applied Energy*, Vol.123, pp.19~28.

(30)Wang, C. and Wang, F., 2017, "China Can Lead on Climate Change", *Science*, Vol.357(6353), pp.764.

(31)Wang, Z., Jiang, G. and Ye, Q., 2021, "On Fair Designs of Cross-chain Exchange for Cryptocurrencies Via Monte Carlo Simulation", *Naval Research Logistics*, doi: https://doi.org/10.1002/nav.21989.

(32)Zhao, J., Hobbs, B. F. and Pang, J.-S., 2010, "Long-run Equilibrium Modeling of Emissions Allowance Allocation Systems in Electric Power Markets", *Operations Research*, Vol.58(3), pp.529~548.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

The Structure Design of China Blockchain Carbon Market for the Future Big Data Environment

Ye Qiang, Gao Chaoyue and Jiang Guangxin

(School of Management, Harbin Institute of Technology)

Summary: Climate change is a common challenge for humanity. The government of China has been committed to leading the way in carbon emission reduction. Carbon trading is an important way to reduce carbon emission. However, China's current carbon trading market is dominated by enterprise-level carbon trading, which has not yet covered personal carbon trading. The experience from the European countries shows that compulsory personal carbon trading is not feasible because the carbon emission quotas may not be assigned fairly, and the supervision of the trading is difficult. Instead, the Carbon Generalized System of Preferences (CGSP), which encourages citizens to participate in carbon emission reduction voluntarily, is more suitable for China's national circumstances. Currently, enterprise-level carbon trading has drawbacks in data fraud, fake trading, opaque regulation, etc. The personal carbon trading market will face the challenge of massive trading data in the future big data environment. Therefore, it is necessary to design a market structure that integrates enterprise-level and individual-level carbon trading to make the carbon trading market operate efficiently and reliably in the future big data environment. The rapid development of blockchain technology provides a new insight to solve the above problems.

In this paper, a carbon trading market structure based on blockchain technology is proposed for the future demand of integrating enterprise-level and individual-level carbon trading. Specifically, we use public chain and sidechain to design a market architecture. The public chain has decentralized, traceable, immutable, and programmable features, ensuring the authenticity of the enterprise-level carbon trading and reducing administrative costs. The sidechain can aggregate the individual carbon assets, and record high-frequency and small-amount individual-level carbon trading. By involving sidechain, we enlarge the trading throughput to meet the massive individual-level carbon trading demand. In the sidechain, the ecosystem can compile the smart contract automatically based on the regional or project characteristics, which adopts personalized and local conditions and reduces operating costs. In addition, the sidechain ecosystem can ensure user privacy and the data asset security of data providers. The scheme and economic model also provide insights to build and improve a unified carbon market. The advantages of sidechain technology in the big data environment are illustrated by using a data experiment on Ethereum. The sidechain ecosystem dynamics analysis and simulation are carried out using an economic model. The parameters in the models are from the carbon trading market in China and the forecast based on the domestic policies and foreign development trends.

The main contribution of this paper lies in the following three aspects. Firstly, we demonstrate the importance of individual-level carbon trading, and propose to establish a unified carbon market by integrating the enterprise-level and individual-level carbon trading for the future. Secondly, for the future big data environment, we provide the design scheme of blockchain carbon market based on "public chain and sidechain". In the public chain, the transaction is carried out by enterprise nodes and regional ecological operation nodes, and in the sidechain, the generation and transaction of individual carbon assets are carried out regionally. Thirdly, the economic model of the individual carbon asset price in the blockchain carbon market is established, which explains the price mechanism by analyzing the relationship between individual carbon asset price and other parameters in the sidechain ecosystem, and provides references for the government's decision-making.

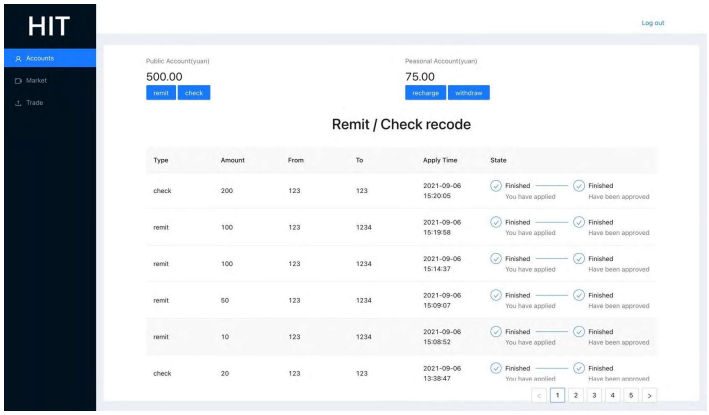
Keywords: big data; blockchain; carbon trading; carbon generalized system of preferences; sidechain

JEL Classification: C8, L86, Q56

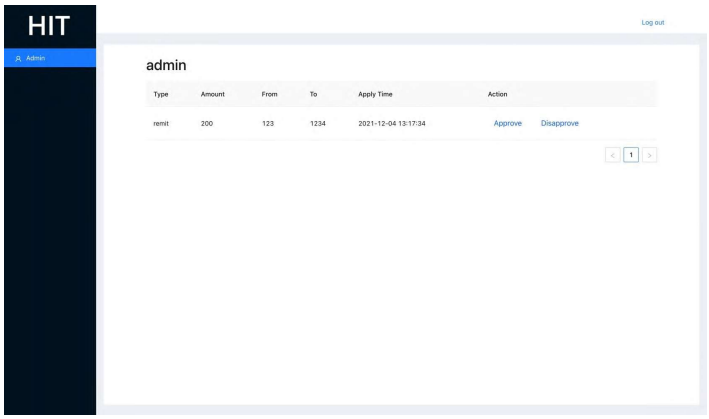
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

《大数据环境下我国未来区块链碳市场体系设计》附录

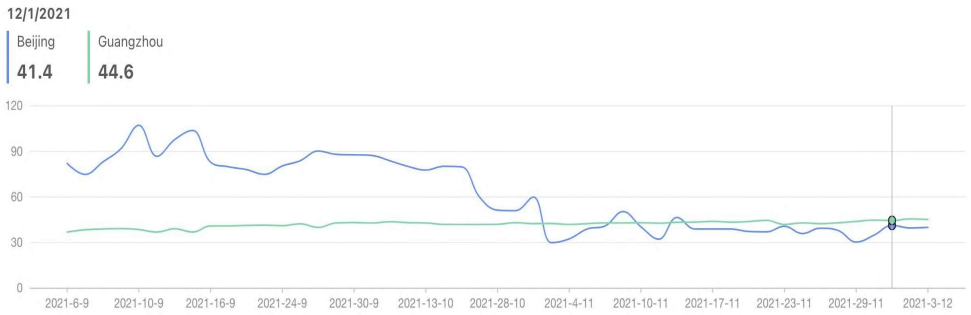
（一）区域碳普惠运行生态去中心化应用（DAPP）示例说明



附图1 侧链DAPP用户碳资产账户前端页面



附图2 侧链DAPP生态运行节点前端页面



附图3 不同地区碳价走势页面

附图1为侧链DAPP个人节点碳资产前端页面，如附图1所示。Public account为资产账户上的碳资产，Personal account为资产账户上的现金资产；Remit为请求及时更新个人低碳行为数据折算的碳资产，如不主动点击，资产数据每天更新一次；Check为请求申诉核查自身碳积分发放；Recharge发送碳积分至生态运行节点，换取现金资产；Withdraw为提现现金资产。附图2为DAPP审核节点的前端界面，碳积分的自动发放、现金与碳积分的兑换和现金提现均为智能合约自动执行。涉及用户申诉等操作需要DAPP生态运行节点审批执行。附图3是不同地区的碳价走势图，用户在折算碳积分为现金时，可以参考所在地区碳价，进一步进行决策。

本文中所建立的DAPP基于合约，可以实现碳积分的发放、交易、绿色出行里程与碳积分的兑换、法币的充值与提现、余额查询等功能。下述提供某用户Alice的运行实例，为了展示合约操作细节，下述过程记录均基于remix编译器。

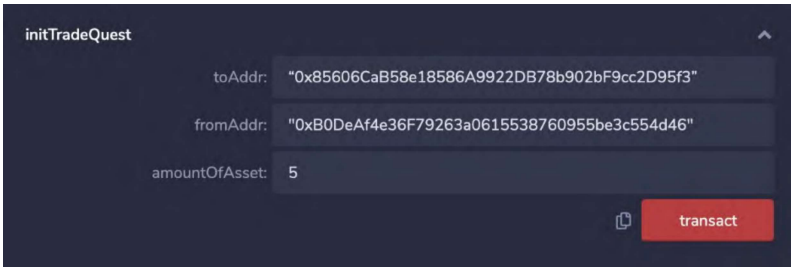
（1）Alice作为环保人士，在2021年8月17号选择绿色出行，今天采用公共交通和共享骑行方式的他，累积了50公里的“绿色里程”。本研究构建的DAPP会在当天23:59:59秒利用web3调用addMileage函数，获取Alice的里程数据，并将该数据记录在智能合约

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中。调用addMileage接口和利用mileageOf查询上链结果如下图所示：

（2）第二天，Alice醒来发现自己的个人碳账户中多了50公里的“绿色里程”，她非常高兴，想把这些里程兑换成碳积分进行交易，换取现金来支持环保事业。于是她点击了“兑换碳积分”按钮。此时后台DAPP调用exchangeMileageOf函数，信息上链之后，Alice的碳账户显示其绿色里程为0，碳积分为5个。

（3）Alice为了获取现金以支持环保事业，把个人碳账户中的碳积分出售以获取现金。此时市场中存在潜在买家Bob，地址为0x85606CaB58e18586A9922DB78b902bF9cc2D95f3。Alice根据市场价格提起了碳积分交易请求，DAPP调用合约的initTradeQuest函数，等待Bob同意该请求。



（4）Bob在个人的碳账户中看到了该交易请求，觉得价格比较合适，于是点击approve按钮，同意该请求，此时Alice的账户中碳积分归零，现金增加。Bob的账户中碳积分增加，现金减少。

（5）Alice通过提现按钮成功将碳账户中的现金提现。

上述是一个典型的交易成功案例，此处不详细展开介绍每个环节的其他情况。所有交易环节均通过调用智能合约自动执行，可以极大的降低管理成本。所有交易均在链上可见，基本杜绝了虚假数据、虚假交易发生的可能性。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（二）区域碳普惠运行生态去中心化应用（DAPP）智能合约代码

```
pragma solidity 0.5.16;
pragma experimental ABIEncoderV2;


// ----------------------------------------------------------------------------
// Safe maths
// ----------------------------------------------------------------------------
contract SafeMath {
    function safeAdd(uint a, uint b) public pure returns (uint c) {
        c = a + b;
        require(c >= a);
    }
    function safeSub(uint a, uint b) public pure returns (uint c) {
        require(b <= a);
        c = a - b;
    }
    function safeMul(uint a, uint b) public pure returns (uint c) {
        c = a * b;
        require(a == 0 || c / a == b);
    }
    function safeDiv(uint a, uint b) public pure returns (uint c) {
        require(b > 0);
        c = a / b;
    }
}


// ----------------------------------------------------------------------------
// ERC Token Standard #20 Interface
// https://github.com/ethereum/EIPs/blob/master/EIPS/eip-20-token-standard.md
// ----------------------------------------------------------------------------
contract ERC20Interface {
    function totalSupply() public view returns (uint);
    function balanceOf(address tokenOwner) public view returns (uint balance);
    function allowance(address tokenOwner, address spender) public view returns (uint remaining);
    function transfer(address to, uint tokens) public returns (bool success);
    function approve(address spender, uint tokens) public returns (bool success);
    function transferFrom(address from, address to, uint tokens) public returns (bool success);

    event Transfer(address indexed from, address indexed to, uint tokens);
    event Approval(address indexed tokenOwner, address indexed spender, uint tokens);
}


// ----------------------------------------------------------------------------
// Contract function to receive approval and execute function in one call
//
// Borrowed from MiniMeToken
// ----------------------------------------------------------------------------
contract ApproveAndCallFallBack {
    function receiveApproval(address from, uint256 tokens, address token, bytes memory data) public;
}


// ----------------------------------------------------------------------------
// Owned contract
```


(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

```
57. // ----------------------------------------------------------------------------
58. contract Owned {
59.         address public owner;
60.         address public newOwner;
61.
62.         event OwnershipTransferred(address indexed _from, address indexed _to);
63.
64.         constructor() public {
65.                 owner = msg.sender;
66.         }
67.
68.         modifier onlyOwner {
69.                 require(msg.sender == owner);
70.                 _;
71.         }
72.
73.         function transferOwnership(address _newOwner) public onlyOwner {
74.                 newOwner = _newOwner;
75.         }
76.
77.         function acceptOwnership() public {
78.                 require(msg.sender == newOwner);
79.                 emit OwnershipTransferred(owner, newOwner);
80.                 owner = newOwner;
81.                 newOwner = address(0);
82.         }
83. }
84.
85.
86. contract CarbonToken is ERC20Interface, Owned, SafeMath {
87.
88.         string public symbol;
89.         string public name;
90.         uint8 public decimals;
91.         uint public _totalSupply;
92.
93.         address[] corpList;
94.
95.         mapping(address => uint) balances;
96.         mapping(address => mapping(address => uint)) allowed;
97.
98.         mapping(address => uint) mileage;
99.         mapping(address => uint) fiat;
100.        mapping(address => mapping(address => uint)) tradeQuestAmountMap;
101.        mapping(address => mapping(address => uint)) tradeQuestFiatMap;
102.        mapping(address => mapping(address => bool)) tradeQuestType;
103.
104.        function initTradeQuest(address toAddr, address fromAddr, bool tmpTradeQuestType, uint amountOfAsset, uint
amountOfFiat) public payable returns (bool) {
105.                require(fromAddr == msg.sender);
106.                tradeQuestType[toAddr][fromAddr] = tmpTradeQuestType;
107.                tradeQuestAmountMap[toAddr][fromAddr] = amountOfAsset;
108.                tradeQuestFiatMap[toAddr][fromAddr] = amountOfFiat;
109.                return true;
110.        }
111.
112.        function queryTradeQuestAmount(address toAddr, address fromAddr) public view returns (uint) {
```


(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

```
113.            return tradeQuestAmountMap[toAddr][fromAddr];
114.        }
115.
116.        function queryTradeQuestFiat(address toAddr, address fromAddr) public view returns (uint) {
117.            return tradeQuestFiatMap[toAddr][fromAddr];
118.        }
119.
120.        function queryTradeQuestType(address toAddr, address fromAddr) public view returns (bool) {
121.            return tradeQuestType[toAddr][fromAddr];
122.        }
123.
124.        function replyTradeQuest(address toAddr, address fromAddr) public {
125.            require(fromAddr == msg.sender);
126.            // 确认回复者身份
127.            uint tmpQuest = tradeQuestAmountMap[fromAddr][toAddr];
128.            uint tmpFiat = tradeQuestFiatMap[fromAddr][toAddr];
129.            if (tradeQuestType[fromAddr][toAddr] == true) { // sell
130.                // 调用方 ,C+,Fiat-
131.                fiat[toAddr] = safeAdd(fiat[toAddr], tmpFiat);
132.                fiat[fromAddr] = safeSub(fiat[fromAddr], tmpFiat);
133.                // transferFrom(toAddr, fromAddr, tmpQuest);
134.                balances[toAddr] = safeSub(balances[toAddr], tmpQuest);
135.                balances[fromAddr] = safeAdd(balances[fromAddr], tmpQuest);
136.            }
137.            else { // buy
138.                fiat[toAddr] = safeSub(fiat[toAddr], tmpFiat);
139.                fiat[fromAddr] = safeAdd(fiat[fromAddr], tmpFiat);
140.                // transferFrom(fromAddr, toAddr, tmpQuest);
141.                balances[toAddr] = safeAdd(balances[toAddr], tmpQuest);
142.                balances[fromAddr] = safeSub(balances[fromAddr], tmpQuest);
143.            }
144.            delete tradeQuestAmountMap[fromAddr][toAddr];
145.            delete tradeQuestFiatMap[fromAddr][toAddr];
146.            delete tradeQuestType[fromAddr][toAddr];
147.        }
148.
149.        // function replyTradeQuest(address toAddr, address fromAddr) public {
150.        //     // require(fromAddr == msg.sender);
151.        //     // 确认回复者身份
152.        //     transferFrom(toAddr, fromAddr, tradeQuestAmountMap[fromAddr][toAddr]);
153.        //     delete tradeQuestAmountMap[fromAddr][toAddr];
154.        // }
155.
156.        function addMileage(address user, uint amount) public {
157.            require(msg.sender == owner);
158.            mileage[user] = safeAdd(mileage[user], amount);
159.        }
160.
161.        function exchangeMileageOf(address user) public {
162.            require(msg.sender == owner);
163.            transfer(user, safeDiv(mileage[user], 10));
164.            emit Transfer(msg.sender, user, safeDiv(mileage[user], 10));
165.            mileage[user] = 0;
166.        }
167.
168.        function mileageOf(address mileageOwner) public view returns (uint) {
169.            return mileage[mileageOwner];
```


(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

```
    }

    // 充值接口
    function addFiat(address user, uint amount) public {
        require(msg.sender == owner);
        fiat[user] = safeAdd(fiat[user], amount);
    }

    // 提款接口
    function withdrawFiat(address user, uint amount) public {
        require(msg.sender == owner);
        fiat[user] = safeSub(fiat[user], amount);
    }


    // 查询现金余额接口
    function fiatOf(address fiatOwner) public view returns (uint) {
        return fiat[fiatOwner];
    }


    // ------------------------------------------------------------------------
    // Constructor
    // ------------------------------------------------------------------------
    constructor() public {
        symbol = "C";
        name = "CarbonToken";
        decimals = 18;
        _totalSupply = 100000000000000000000000000;
        balances[owner] = _totalSupply;
        emit Transfer(address(0), owner, _totalSupply);
    }

    // ------------------------------------------------------------------------
    // Total supply
    // ------------------------------------------------------------------------
    function totalSupply() public view returns (uint) {
        return _totalSupply  - balances[address(0)];
    }

    // ------------------------------------------------------------------------
    // Get the token balance for account tokenOwner
    // ------------------------------------------------------------------------
    function balanceOf(address tokenOwner) public view returns (uint balance) {
        return balances[tokenOwner];
    }

    // ------------------------------------------------------------------------
    // Returns the amount of tokens approved by the owner that can be
    // transferred to the spender's account
    // ------------------------------------------------------------------------
    function allowance(address tokenOwner, address spender) public view returns (uint remaining) {
        return allowed[tokenOwner][spender];
    }

    // ------------------------------------------------------------------------
    // Transfer the balance from token owner's account to to account
```


(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

```
227.    // - Owner's account must have sufficient balance to transfer
228.    // - 0 value transfers are allowed
229.    // ------------------------------------------------------------------------
230.    function transfer(address to, uint tokens) public returns (bool success) {
231.        balances[msg.sender] = safeSub(balances[msg.sender], tokens);
232.        balances[to] = safeAdd(balances[to], tokens);
233.        emit Transfer(msg.sender, to, tokens);
234.        return true;
235.    }
236.
237.    // ------------------------------------------------------------------------
238.    // Token owner can approve for spender to transferFrom(...) tokens
239.    // from the token owner's account
240.    //
241.    // https://github.com/ethereum/EIPs/blob/master/EIPS/eip-20-token-standard.md
242.    // recommends that there are no checks for the approval double-spend attack
243.    // as this should be implemented in user interfaces
244.    // ------------------------------------------------------------------------
245.    function approve(address spender, uint tokens) public returns (bool success) {
246.        allowed[msg.sender][spender] = tokens;
247.        emit Approval(msg.sender, spender, tokens);
248.        return true;
249.    }
250.
251.    // ------------------------------------------------------------------------
252.    // Transfer tokens from the from account to the to account
253.    //
254.    // The calling account must already have sufficient tokens approve(...)-d
255.    // for spending from the from account and
256.    // - From account must have sufficient balance to transfer
257.    // - Spender must have sufficient allowance to transfer
258.    // - 0 value transfers are allowed
259.    // ------------------------------------------------------------------------
260.    function transferFrom(address from, address to, uint tokens) public returns (bool success) {
261.        balances[from] = safeSub(balances[from], tokens);
262.        allowed[from][msg.sender] = safeSub(allowed[from][msg.sender], tokens);
263.        balances[to] = safeAdd(balances[to], tokens);
264.        emit Transfer(from, to, tokens);
265.        return true;
266.    }
267.
268.    // ------------------------------------------------------------------------
269.    // Don't accept ETH
270.    // ------------------------------------------------------------------------
271.    function () external payable {
272.        revert();
273.    }
274.
275.    // ------------------------------------------------------------------------
276.    // Token owner can approve for spender to transferFrom(...) tokens
277.    // from the token owner's account. The spender contract function
278.    // receiveApproval(...) is then executed
279.    // ------------------------------------------------------------------------
280.    function approveAndCall(address spender, uint tokens, bytes memory data) public returns (bool success) {
281.        allowed[msg.sender][spender] = tokens;
282.                emit Approval(msg.sender, spender, tokens);
283.                ApproveAndCallFallBack(spender).receiveApproval(msg.sender, tokens, address(0), data);
```


(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

```
284.                         return true;
285.             }
286.
287.             // ------------------------------------------------------------------------
288.             // Owner can transfer out any accidentally sent ERC20 tokens
289.             // ------------------------------------------------------------------------
290.             function transferAnyERC20Token(address tokenAddress, uint tokens) public onlyOwner returns
(bool success) {
291.                         return ERC20Interface(tokenAddress).transfer(owner, tokens);
292.             }
293. }
```


(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net