
可持续性 & 数字化： 区块链驱动的循环农业研究

陈奕廷¹ 李晔² 李存金¹ 李群³¹

(1. 北京理工大学 管理与经济学院, 北京 100081;

2. 南开大学 经济与社会发展研究院, 天津 300071;

3. 中国社会科学院 数量经济与技术经济研究所, 北京 100372)

【摘要】: 区块链技术作为一种颠覆性的数字技术, 具有去中心化、开放性、共享性、匿名性、可溯源性等特征, 它可以完善农产品的食品安全认证、优化农产品的物流体系结构、革新农业组织的分工合作模式, 但目前关于区块链应用于循环农业的研究尚不多见。论文研究搜索并梳理了相关文献知识, 根据循环农业以及区块链的技术特征, 以北京留民营生态农场为案例, 提出了一个基于区块链的数字化循环农业框架, 详细阐述了分布式账本、共识算法、代币机制、智能合约等区块链核心技术在框架中的应用。该框架将区块链的“数字化”赋能与循环农业的“可持续性”内涵相融合, 能够解决留民营有机蔬菜以次充好、农药残留、生产流程不规范等问题。最后探讨了研究的不足之处并提出未来研究方向, 为进一步深入探析区块链在循环农业中的应用研究提供了参考。

【关键词】: 社会-生态系统 循环农业 区块链 区块链驱动的循环农业

【中图分类号】: F062.2; F323.3 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)03-123-11

时代的变革及新兴技术的涌现, 使得人类社会正处于从工业经济社会向知识经济社会转型变革的复杂进程之中。当地球迈入拥挤的人类世之后, 生态与社会之间形成的互馈及耦合效应铸造了一个具有非线性、涌现性、复杂性、不确定性以及多层次嵌套结构的社会-生态系统 (social-ecological system, SES), 这一系统的出现为人类对生态的治理及环境的可持续管理带来了严峻挑战^[1,2,3]。因此, 生态治理领域的范式创新迫在眉睫。一方面, 社会-生态系统的形成给这种创新带来了模糊性 (ambiguity)、不确定性 (uncertainty)、复杂性 (complex) 以及易变性 (volatility)^[4]。另一方面, 除了系统结构的变迁, 人类的生态保护意识在复杂的社会变革中也经历了曲折的演进, 从农耕文明对自然怀有敬畏与极端崇拜的“谋事在人, 成事在天”, 到工业经济社会秉持牛顿原子论的“人定胜天”, 再到知识经济社会“复合人假设”^[5]前提下的“天人合一”意识, 人类也希望通过正向作用的方式减少经济发展给自然界带来的生态负担, 同时, 良好的生态环境又可以反哺人类, 为技术创新与经济的良好发展提供良好资源和环境保障, 从而形成一种绿色互利的共生观, 这种绿色互利的共生观并非对原始生产方式的回溯, 也不是对经济发展的负向

作者简介: 陈奕廷, 博士研究生, 副研究员, 研究方向为绿色可持续发展。E-mail: townjam_sovietnia@163.com; 李晔, 博士, 助理研究员, 南开大学经济与社会发展研究院博士后, 研究方向为绿色发展经济。E-mail: liye199203@126.com

基金项目: 科技部创新方法专项“新能源汽车产业中的创新方法应用研究与示范”(2015IM030100); 中国社会科学院大学(研究生院)研究生科研创新支持计划项目“基于可变云模型的京津冀地区绿色发展评价研究”(2020-KY-049)

制约，而是一类螺旋式的演进升华^[6]，是一种更高层次、更为系统、宏观、综合的可持续发展观。

伴随着不可可持续发展的劳动密集型农业以及高污染、高排放的机械化农业的衰败，信息革命后的科技冲击使得农业变得愈发繁荣^[7,8,9]，特别是精准农业、生态农业、循环农业、绿色农业等以可持续发展观为指导依据的可持续农业模式得到了蓬勃发展。不幸的是，正如莎士比亚在《哈姆雷特》中所说的“天地之间有许多事情是你的睿智所无法想象的”（There are more things in heaven and earth, Horatio, than are dreamt of in your philosophy）那样，受新冠肺炎疫情的影响，全球农业遭受了前所未有的冲击，导致了蔓延世界的粮食危机^[10,11,12,13,14]。这次全球性的粮食危机将迫使我国加快深化农业改革，除了用行政手段调整农业耕种政策，优化粮食种植类目外^[15]，深化农业技术创新，进一步强化技术对农业的创新驱动作用尤为重要。已有研究表明，新产品、新技术和新服务的出现能够提高生产水平，能够复苏行业市场^[16,17]。我国在远程遥感、人工智能、物联网、大数据、云计算、虚拟现实等技术上的开发研究与应用已形成系统、成熟的体系，并占据全球领先地位。这些前沿技术大多依靠数据驱动，因此也统称这些技术为数字技术，它们为中国农业的数字化转型提供了支撑。其中较为新颖的是区块链。区块链是“去中心化”这一概念的技术载体，它有着开放性、共享性、自治性等优势。数字化可以在经济、环境及社会层面促进农业的可持续发展^[18]。目前关于区块链在具有可持续性的循环农业中的应用研究较为罕见。因此，研究首先论证了区块链作为通用目的技术的渗透性，为其与传统循环农业模式的融合提供了理论依据。在此基础上，以北京留民营生态农场为例，根据北京留民营生态农场的发展现状及挑战，提出了一个基于区块链的数字化农业框架，这一框架在保留循环农业可持续性的同时赋予了其数字化属性，为该生态农场提供了一条发展数字化农业的路径，亦为今后进一步研究农业数字化及其实践提供了参考。

1 区块链及其在农业中的应用

区块链这一概念首次出现在比特币白皮书中^[19]，一经问世便引起了社会各界的关注，许多学者认为区块链是一门能够推动人类科学发展，且非常具有前景的技术^[20,21,22]。区块链目前已风靡全球，德勤在 2020 年的一份全球性区块链调查报告中指出，在被调查的 14 个国家中的 1488 名熟悉区块链和数字资产的高级管理人员中（包含 100 名直接从事区块链技术开发并且在上一学年度获得至少三百万美元风险投资的项目负责人员），高达 88% 的受访者认为区块链技术有广泛的可扩展性，并终将成为主流应用技术^[23]。信息和通信技术的最新进展促使传统计算机辅助产业迈向了以数据驱动进行决策的智能产业^[24]，而区块链则是这一发展进程中衍生出的一门数字技术，它具有去中心化、开放性、自治性、去信任、共享性等特点。然而，区块链迄今未有确切统一的定义，当前许多学者将其视为一种抽象的分布式账本技术^[25]。单纯从技术的角度看，区块链可以认为是多项技术的组合架构与集成产物，或可将它理解为一种以区块形式组成的分布式数据库为存储载体，以 P2P 网络为通讯载体，以密码学为隐私安全载体，通过分布式系统共识框架保障一致性，兼具去中心化、开放性、自治性、去信任、共享性等特点，旨在建构价值交换体系的数字技术，它可以应用于一切具有历史性或全局性数据记录需求的场景。

区块链如何应用于农业领域也激起了学术界的浓厚研究兴趣，一系列广泛的研究包括区块链作用于农业物联网^[26]，基于农业数据安全存储的区块链平台^[27]，食品安全溯源^[28]，区块链应用于食品供应链^[29]等。中国也非常重视区块链的发展，在 2019 年，中国政府在国家层面就出台了《区块链信息服务管理规定》《关于深化改革加强食品安全工作的意见》《产业结构调整指导目录（2019 年本）》等多项惠及区块链技术、应用、监管及其他方面的相关政策^[30]。在省级层面，各地政府于 2020 年也陆续出台了一系列区块链专项政策，提出了多个“落地”应用领域和场景，涉及金融、制造、民生、政务和通信等多个方向^[31]。在农业领域，通过“政府牵头，政企合作”的方式，一批农业区块链应用项目也纷纷落地，以安徽省砀山县良梨村为例^[32]，该村盛产著名的“砀山梨”，全村种植大量梨树并吸引游人旅游采摘。2020 年 9 月这个盛产梨子的小村庄成为中国首个“区块链村”，该项目是由安徽省砀山县人民政府、中国农业银行安徽省分行以及蚂蚁链（ANTCHAIN）三方共同签署的战略协议下打造出的国内首个基于区块链的乡村振兴样本。蚂蚁链提供了溯源认证服务，替良梨村生产的知名水果品牌“砀山梨”建立了全链路可查的销售网络，为品牌提供了品质保障，生产交易的商品流转、资金流转和信息流转会同步在链上发生，形成生产经营主体的可信数据资产，提升了流动资金效率的同时也为政府的精准服务和监管提供了可信的数据依据^[32]。目前鲜有区块链在循环农业中的应用研究案例，而将区块链作用于循环农业从而实现传统循环农业的数字化转型则需要实现二者的有机融合。因此，如果区块链作为一项通用目的技术且具备渗透性，那么它便可以作用于传统循环农业并与之融合。

2 区块链技术的渗透性

通用目的技术（general purpose technology, GPT）是指那些能够促进经济增长的技术创新^[33]，比如电力、蒸汽机、计算机等。在工程领域，任何技术都可以成为通用目的技术的候选，只要满足以下两个条件^[34]：第一，某些具体的应用发明制造了持续学习如何让技术变得“通用”的机会；第二，提高技术的通用知识能够使“新的具体的发明机会”（news pecific invention opportunities）成为可能。这一概念主要应用于技术创新领域且较为抽象。在此基础上，Carlaw & Lipsey^[35]提出了通用目的技术的三项基本特征：第一，能够与定义它或者支持它的技术形成互补；第二，能够与通过它才能实现的技术形成互补；第三，能够与一组政治、社会或经济的变革性的技术形成互补。

对照以上三项特征，区块链亦能够被认为是一项通用目的技术。首先，区块链符合第一项特征，这是因为区块链本身就是由分布式账本、智能合约、加密技术等多种技术集成的科技产物，以数据加密技术为例，它对区块链的安全性起到了支持，为了使数据的安全性进一步提升，区块链不仅采用了哈希计算、数字签名、非对称加密算法等数据加密技术，甚至在未来还会进一步采用量子通信技术。对于区块链而言，数据越多则越容易变得不安全^[36]，如果没有这些数据加密技术，区块链则丧失了安全性变得不再安全，因此，代表安全性的数据加密技术不仅可以支持区块链的发展，更可以与区块链形成互补。其次，区块链符合第二项特征，这是因为区块链能够实现灵活的线上交易，而交易量的激增也使得区块链必须拥有更高的技术规格来完善交易，比如利用分片技术，通过交易分片的方式提升交易处理效率；最后，区块链符合第三条特征，这是因为区块链在诸多行业场景皆有应用，并开始逐渐改变行业模式。以数字货币为例，它借助区块链技术，却可以给传统经济带来变革^[37]，而经济的变革（由传统货币经济发展为数字货币经济）也可以借由区块链技术完成。因此，区块链符合上述三项要求，是当之无愧的通用目的技术。

通用目的技术的关键特点是渗透性（pervasiveness）^[38]，具体来说，渗透性指的是某些特定技术能够与其他技术、社会各个行业、各个生产生活环节紧密相连并有机结合，从而带来革新的一种潜能^[39]。由于区块链是通用目的技术，因此其具备渗透性特点，能够与传统循环农业模式相结合。至此，研究论证了技术逻辑（渗透性）与可持续发展逻辑（循环农业）相契合的可行性，为搭建以区块链为中心的循环农业框架提供了完整的理论依据。

3 基于北京留民营生态农场的案例研究

3.1 案例背景介绍

北京留民营生态农场位于北京市大兴区长子营镇，整个生态农场占地面积 142 公顷。现有农户 260 户，人口 861 人。工、农业总产值达到 3 亿元，人均收入 18000 元。自 1982 年开始，留民营便开始建设循环农业体系，开发利用太阳能和生物能，通过几十年的陆续建设与改造，最终形成了以沼气为中心，串联种植、养殖、加工、生产、供给、销售、农业观光旅游一条龙的循环农业系统^[40]。循环农业中的“循环”是指事物周而复始的运动或变化，循环农业的思想源于对传统农业环境后果的反思以及循环经济思想的发展。在传统农业模式下，物质和能量的流动是单向的，农业系统从系统外部获得物质和能量，这些物质和能量进入农业系统，通过系统内的生物作用部分转换为人类所需要的农产品，在农业生产流程结束后，农业系统将向外部排放农业废弃物。而循环农业则有所不同，循环农业通过农业系统内部的合理组织，将农业废弃物视作可再生资源，通过“废弃物→资源”的对接方式将不同的农业生产环节耦合成一个物质能量的回流环，以达到资源的多次利用和减量化生产，即循环农业是一种由“资源→产品→再生资源→资源→产品→……”运营链条组成的闭环反馈式循环农业模式，而传统农业模式通常为“资源→产品→农业废弃物”的单链条线性模式，循环农业具有提高资源利用效率、消除环境外部不经济性问题、节约资源优化生态这三大特征。在生产环节、消费环节以及农业废弃物处理环节上。

传统农业模式下的物质及能量都是单向流动的，整个农业系统需要从外部汲取物质和能量，而无法在系统内部生成。当外部汲取的物质和能量进入农业系统后，则通过“资源→农产品→农业废弃物”的单链条线性模式向外部排出。而北京留民营生态农场采用的是生态农业中的循环农业模式，这一模式能够通过农业系统内部的合理组织，将部分可再生循环利用的农业废弃物

作为资源再次利用，从而将整个农业系统内部的农业生产环节耦合成一个物质和能量的回流闭环，从而达到资源的节约与多次利用，这一模式具有提高资源利用率、消除环境外部的经济不确定性、节约资源、优化农业生产环境等特征。

北京留民营生态农场充分利用秸秆饲料化、禽畜粪便堆肥、沼气发酵、太阳能、沼气发电等方式，将养牛场、养鸡场、养猪场、鱼塘、农田、苗圃、果园、食品加工厂、沼气池、旅店、商店等有机链接起来，而作为能源供给核心的沼气池节约了大量能耗并降低了对环境的破坏，使得整个生态农场可以每年减少 3000 吨标准煤的使用，4.6 吨 SO_2 排放、3.6 吨粉尘排放，以及 720 吨的 CO_2 排放^[41]。此外，禽畜粪便、人类粪便以及生活污水、农业污水、生活有机废物、种植作物秸秆均可以作为发酵原料用以制作复合有机肥料，而使用这些复合有机肥料可以进一步减少农产品的农药残留，并改善土壤的结构，这也是留民营生态农场盛产大量有机食品的主要原因，这些有机食品可以通过线下线上的销售平台面向公众出售，游客也可以通过生态采摘的方式获得这些有机食品，这进一步促进了农场的生态农业旅游等文娱项目，丰富了经营范围，同时能够吸引更多游客^[42]。

北京留民营生态农场的循环农业模式以及业务多元化经营方式为它赢得了诸多荣耀，包括“北京最美乡村”“全国绿色村庄”等荣誉称号。但随着时间的推移，一系列缺点也逐渐浮出水面，包括 2010 年被媒体曝光其下属农业公司使用虚假的产品质量追溯码、漏检农药残留量、用普通蔬菜冒充有机蔬菜以次充好^[43]；2014 年被媒体和专家质疑其有机蔬菜生产流程卫生条件较差，种植有机蔬菜使用的有机复合肥存在大肠杆菌超标，种植土壤存在抗生素残留等问题^[44]。此外，还存在中间商逐层分销赚取利润导致有机蔬菜价格过高、沼气臭味影响有机蔬菜生产环境和工人健康，水质土壤不理想，生产流程不规范，营销模式难以为继等问题^[45]。

这些问题的背后是北京留民营生态农场的数字化转型问题，虽然采用了绿色、环保的循环农业模式，但在包括产品生产、农业循环流程、市场营销等方面仍然缺少开放、透明、高效精准的有效管理，这不仅导致其品牌声誉受到损失，也使得其农业效率低下，有机农业的投入成本大、回报周期长，获得农产品有机认证需要经过 3 年的土壤改良，有机农产品产量较低，无法获得足够的利润预期来吸引投资商^[45]。因此，必须对留民营生态农场的农业模式进行改进，进而提升其农业水平。2018 年 10 月，留民营村党支部的领导在“留民营乡村振兴与党建工作联席会”上提出了实现留民营村“乡村治理现代化、科技化、信息化和产业转型升级”的目标，并号召与全球特色小镇联盟以及北京海淀信用产业联合会的密切合作，将留民营村打造成集低碳生态、数字智慧、智能宜居、文旅康养、幸福生活五位一体的科技新城^[46]。因此，基于这一背景，研究将充分利用区块链技术，提出了一个基于区块链的“去中心化”数字农业框架，这一框架具备区块链的一切技术优势，并可以最大限度地保留循环农业的可持续性，为该生态农场的循环农业模式提供一个可行的，能够提升农业水平的数字化转型方案。

3.2 基于区块链的数字循环农业架构

留民营生态农场的循环农业系统由多个部分组成，主要包括养鸡场、养牛场、养猪场、藕池、鱼塘、农田、谷物加工厂、沼气池和生活区。这些部分在日常运作中会产生大量的各类业务数据，这些业务数据通常由 Web、APP 或者智能传感器的形式收集并进行发送，比如奶牛身上用来监测牛瘟疫、炭疽病的可穿戴式智能健康监测设备（荷兰已有数家公司开发出此类智能传感设备），这一设备不仅可以监测奶牛的健康状况，还可以通过全球定位系统监测奶牛在养牛场的日常活动轨迹；安置在农田的农作物监测设备，比如常用的智能化“农田小气候站”，这一设备可以用来监测温度、湿度、日常强度、风力、农田土壤酸碱度；安置在蔬菜大棚的智能传感器，它可以测量蔬菜大棚中 CO_2 的浓度、 O_2 的浓度等，为蔬菜的温室种植提供精准的环境管控。

根据比特币以及以太坊（Ethereum）中的区块链技术，将北京留民营生态农场的养牛场、养牛场、养鸡场、养猪场、鱼塘、农田、苗圃、果园、食品加工厂、沼气池等每一个部分中的人员均视作节点，比如生活区中的游客、商店店员及宾馆服务人员、养猪场的农民等，这些人可以通过下载区块链专用的节点软件而变成节点。此外，对于动物、植物和其农业设施，如果它们有可穿戴式智能健康监测设备、农田小气候站，以及其他可以或经过改装后能够兼容区块链节点软件的电子设备，那么这些动物、植物和农业设施亦可以视作节点，这些节点可以是仅具备发出任务或接收信息的广播节点，也可以是具有“挖矿”功能的矿工节点（需要下载专门的挖掘器程序），还可以是具有完整功能与权限的完整节点，不论何种类型的节点均可以处于联机状态或

脱机状态,所有节点都遵循区块链的同步通信原则。当节点选定之后,研究依据开放式系统互联(open system interconnection, OSI)的七层协议标准以及已有研究^[47],提出一个由数据层、网络层、共识层、激励层、合约层及应用层一共六层构成的区块链技术架构体系。其中,应用层最好理解,它把区块链的各型应用场景和应用案例封装在内,是建立在区块链基础技术上的不同应用场景,在研究提出的区块链技术架构体系中,应用层封装的是北京留民营生态农场的案例信息。而区块链中的基础技术主要分布在其他各层。

数据层中封装了数据区块、链式结构、哈希函数、时间戳、默克尔(Merkle)树、非对称加密技术以及数字签名。若将区块链视作一个分布式账本,则每个分布式节点可以储存账本的副本,这一副本的数据结构由数据区块、链式结构以及操作数据构成,整个副本通过非对称加密来保证真实性与安全性。其中,操作数据又称为操作记录,是留民营生态农场中一系列行为产生的数据,比如沼气发酵池的使用次数、沼气的排放量、奶牛的产奶量、猪粪的重量等。数据区块则由区块头、区块体、计数器以及区块大小字段组成。区块头中封装了当前版本号、父区块哈希值、随机数、时间戳以及默克尔根信息。区块体中包含了从创世区块(Genesis Block)开始的,经过验证的所有操作记录。区块链中的每个分布式节点都可以通过特定的哈希算法和默克尔树结构将一定时期内接收到的操作数据封装到一个带有时间戳的数据区块中,并链接到长度最长的主区块链上形成最新的区块。哈希算法主要包括MD(Message Digest)系列算法、SHA(Secure Hash Algorithm)系列算法以及混合哈希算法等。默克尔树是一种大多数区块链系统常用的数据组织方式,其作用是快速归纳和校验区块数据的存在性和完整性,这里采用常用的二叉默克尔树,它将第一层的每两个相邻的哈希值合并为一个字符串,通过计算其哈希值作为第二层的非叶子节点的值,然后继续逐层往上进行相同操作,最终将所有操作的哈希值递归到默克尔树的根节点,也就是默克尔根,并将默克尔根存入区块头。时间戳用来记录区块数据的写入时间,并可以为区块数据提供数字公证服务证明数据的存在性,它可以保证留民营生态农场中所有操作的可记录性并可以溯源,防止出现信息不透明的现象。区块之间由链式结构组成网络,通常是线性链表或有向无环图。有向无环图的优点是能够满足多线程操作,缺点是操作的验证时间较长且容易导致双花问题,因此这里依然使用线性链表结构。非对称加密结构区分了加密系统的私钥与公钥,使得数据的发送者A可以通过B提供的公钥对数据加密后发送给B,而B则通过私钥开启解密,从而确保数据是由A发送的,而A则无法通过公钥推算出私钥,这种依赖于单向限门函数的加密技术能够保障区块链数据的安全性和不可篡改性。

以留民营生态农场中的猪圈为例,猪粪、以及人粪、干秸秆、麦麸、污泥、生活垃圾等废弃物通过进口存入沼气发酵设备进行发酵。产生的沼气通过沼气发电机产生电力,而太阳能可以作为沼气发电机的能源。沼气发酵后剩下的沼泥和沼渣则可以被罐车运走,作为肥料用于藕池、粮田和菜地。由于干秸秆、麦麸、污泥等废弃物来自藕池、粮田、菜地等留民营生态农场的其他区域,而沼泥和沼渣也被作为有机肥料用于藕池、粮田和菜地,因此便形成了一重循环。不仅是猪圈,沼气带来的电力还可以维持整个留民营生态农场的运作,太阳能发电也是一条供电途径。因此,留民营的循环农业采用清洁能源实现了物质循环。而在整个循环农业体系中,各个环节的生产操作数据可以通过布放在生态农场各处的智能传感设备上传至区块链。以猪圈为例,其在农业循环过程中的一切操作均可以作为数据录入区块,如图1所示。

网络层中含P2P网络、数据传播协议以及数据验证机制。通常情况下,P2P网络可分为三类^[48],即中心化覆盖,去中心化覆盖以及混合覆盖。在中心化覆盖的P2P网络中,中心节点起到促进其他叶节点之间相互交流的桥梁作用,不同于C/S(Client/Server)网络模式,虽然中心节点与叶节点之间的权力并不平等,但所有节点均可以自由加入或退出,但其中心化程度依然较高;去中心化覆盖的P2P网络中不存在固定的网络结构,也不存在中心节点,每个节点既是客户端又是服务端,节点地址也没有统一标准,节点与节点之间可以直接交换信息,这是完全中心化的一种网络结构;混合覆盖的P2P网络是一种分层拓扑结构,存在具有一定中心化的超级节点,这些节点局部服务于其负责的叶节点,每个超级节点负责服务若干个叶节点,叶节点之间的交流需要通过超级节点进行,超级节点保存了所有数据索引和存放位置的信息,叶节点A需要下载所需数据时,它需要链接到超级节点进行检索,并由超级节点返回存有相关数据的叶节点B的用户信息,然后叶节点A与叶节点B之间可以进行数据传输。混合覆盖的P2P网络同时具备中心化覆盖的P2P网络以及去中心化覆盖的P2P网络二者的优势,相比中心化覆盖的P2P网络,它拥有更好的可扩展性与可靠性,而相比去中心化覆盖的P2P网络,它对复杂查询的支持程度更高,如图2所示。

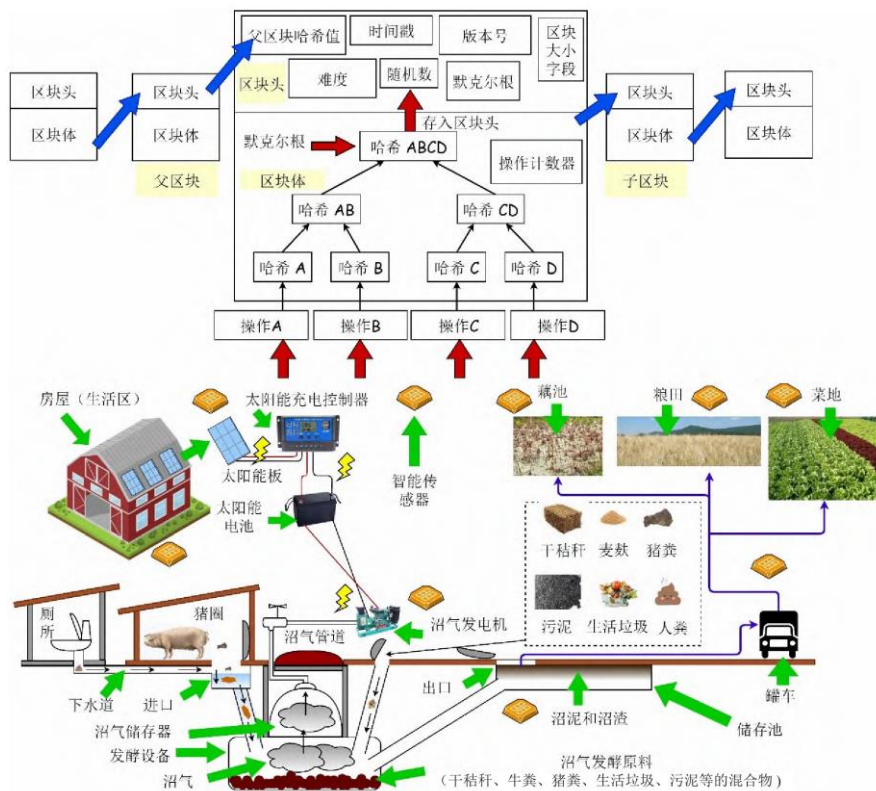


图 1 基于猪圈物质循环的区块链架构

为了让农场中的部分智能设备发挥超级节点的作用，因此采用混合覆盖型 P2P 网络，将其他智能设备、传感器的数据索引和位置保存在指定的智能设备中（比如小型的农业数据中心），当区块链中的各个节点之间需要进行数据传输时，则可以通过充当超级节点的智能设备进行检索并获得位置信息，但这些行为必须通过区块链网络的所有节点进行验证，从而实现信息透明；数据传播协议规定了节点之间的通信方式，通常采用 TCP(Transmission Control Protocol) 协议进行节点之间的初始连接，地址广播与发现，全节点同步区块数据等一系列操作；当新区块在区块链网络进行传播时，每个接收到区块的节点都需要对其进行独立验证，以此防止恶意数据或无效数据的传播。在留民营生态农场的区块链网络中，节点接收到邻近节点发来的数据后，矿工节点会收集并验证 P2P 网络中已被广播但尚未确认的数据，并从数据结构、语法规规范性、数字签名、输入和输出等方面进行校验，并将有效的数据整合到当前的区块中。

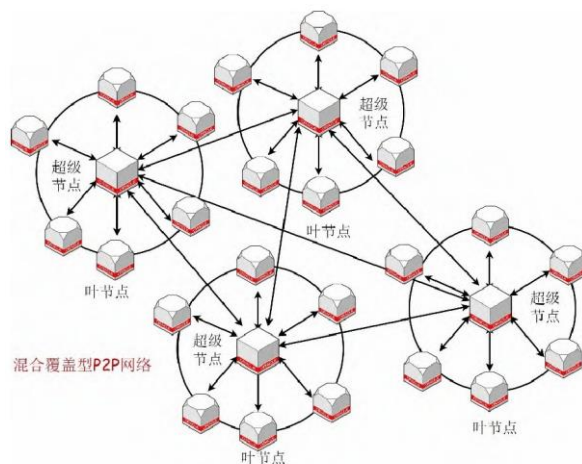


图 2 混合覆盖的 P2P 网络

共识层存在的目的是在分布式计算的情况下让区块链中的各节点高效地达成共识，虽然决策权越分散的系统民主化程度越高，且系统稳定性和满意程度越高，但达成共识的效率越低。反之，决策权越集中的系统民主化程度越低，且系统稳定性和满意程度也较低，但达成共识的效率越高。共识层中封装的各类共识算法可以让众多节点在决策分散的情况下高效达成共识，达成共识后全部节点具备了“一致性”。不同于传统的分布式共识算法，区块链的共识算法考虑了拜占庭容错问题，即假设存在恶意篡改和伪造数据的拜占庭节点。当前区块链中常用的共识算法包括 PBFT、PoW、PoS、Proof of activity、Proof of burn、dBFT、Proof of luck 等^[49]。其中，比特币采用的是 PoW 共识算法，它通过分布式节点的算力竞争来保证数据的一致性以及共识的安全性，矿工节点基于各自矿机设备的算力相互竞争来共同解决一个求解复杂但验证容易的 SHA256 (SHA 系列算法之一) 数学问题，它通过前一个区块的哈希值和随机数来计算下一个区块的哈希值，谁先找到随机数，谁就能最先计算出下一个区块的哈希值，而最快解决这一数学问题的矿工节点将自动获得下一区块的记账权和系统发行的比特币奖励，它实质上依赖于矿工节点解决数学问题的速度。PoW 共识算法的另外一个优势是它的容错率是 50%，也就是说只有不诚实的拜占庭节点控制 51% 及以上的算力才能对区块链发动攻击（比如“双花攻击”），这在实际操作中是非常困难的。由于 PoW 共识算法已有成熟的应用与发展，并且作为很多其他共识算法的基础算法存在，因此，在北京留民营生态农场的区块链技术架构中可以采用 PoW 共识算法。

激励层中含有发行机制与分配机制，负责代币 (Token) 的发行与分配，通常情况，代币有多种类型，比如股份、货币或商品等。这里采用数字货币的形式，将北京留民营生态农场发行的代币命名为“绿色低碳币” (greenlow-carboncoin, GLCC)，绿色低碳币的发行机制可采用总量有上限、总量无上限或者二者混合的方式进行发行，分配机制可以采用 EOS 或 FIL 分配机制。参考比特币的模式，结合绿色低碳币独特的发行定价方式，其生态圈由发行、流通与市场三个环节构成，如图 3 所示。

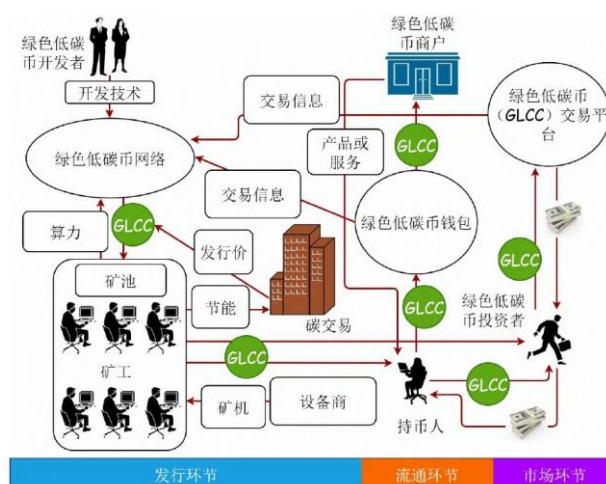


图 3 绿色低碳币生态图

在发行环节，绿色低碳币具有开源性，因此吸引了大量开发者贡献技术对其算法和机制不断进行完善。在整个绿色低碳币网络（一个区块链结构的网络）中，矿工节点提供算力来保证绿色低碳币的共识和安全性，而算力则来自设备商提供的矿机，而矿机的能源供应来自生态农场的太阳能发电与沼气发电。绿色低碳币网络为每个新发现的区块准备一定数量的绿色低碳币来奖励矿工节点，部分矿工节点可能为了提升算力而进行合作组建收益共享、风险共担的矿池，从而将零散的算力汇聚起来提高挖出绿色低碳币的概率。每一枚绿色低碳币的发行价格取决于节约的能量（比如使用太阳能发电与沼气发电），这些能量通过一定公式换算成碳排放量，再根据碳交易所实时确定的碳汇价格来定价。在流通环节，持币人通过特定的软件平台（比如绿色低碳币钱包）向商家支付绿色低碳币来换取商品或服务，比如留民营生态农场生产的有机蔬菜。在市场环节，由于绿色低碳币的发行价格取决于实时的碳汇价格，因此具有波动性，这使得它具备金融衍生品的属性，从而使得持币人可以将绿色低碳币出售给投资者，

而投资者则通过绿色低碳币交易平台进行交易，每一笔交易都将由全体矿工节点验证并计入区块链中。

合约层中主要封装有智能合约，它是一类运行在分布式账本上，预制规则，自动触发，具有状态和值，满足条件响应，可封装，可验证，可执行，能够有效完成价值转移、信息交换的计算机程序。智能合约作为一组情境应对型的程序化规则和逻辑，是部署在区块链上去中心化、可信共享的程序代码。签署合约的交易方必须就合约内容、违约条件、违约责任及外部核查数据源达成一致，还可以在触发合约之前检测试验合约代码是否有效。智能合约可以不依赖于任何中心机构或第三方监督，满足触发条件后将自动化代表各签署方触发并执行合约，且这一合约具有可编程特征，交易方可以根据约定增加任意复杂的条款。北京留民营生态农场中的智能合约运行机制如图 4 所示。

智能合约的构建与执行分以下几步：第一步，用户注册成为区块链的用户，区块链返回给用户一对公钥和私钥，公钥作为用户在区块链上的账户地址，私钥作为操作该账户的唯一钥匙；第二步，用户双方将各自承诺的权利义务等内容编写为电子化的机器语言，参与者分别用各自的私钥对合约签名，一份智能合约由此生成，它通常包括触发条件的代码、值和状态；第三步，签名后的智能合约传入区块链网络中，通过 P2P 的方式在区块链全网中传播；第四步，当用户发起交易后，智能合约被调用，合约中的代码会验证签名，并根据预言机提供的已验证和已加密的可信数据以及世界状态的检查信息，自动判断当前所处的场景是否满足智能合约的出发条件，以严格执行响应规则并更新世界状态（worldstate），执行合约代码通常在 EVM 沙箱中由矿工节点进行；第五步，若智能合约满足触发条件，则会自动执行并通知用户，当智能合约包括的所有交易都顺序执行完后，合约的状态（status）会被标记为完成并被移除；第六步，执行完毕的交易被打包进新的数据区块，在智能合约预设的激励机制作用下，矿工节点会利用 PoW 共识算法对新区块进行认证，经过认证后的新区块会链接到区块链主链，使得世界状态的更新生效。

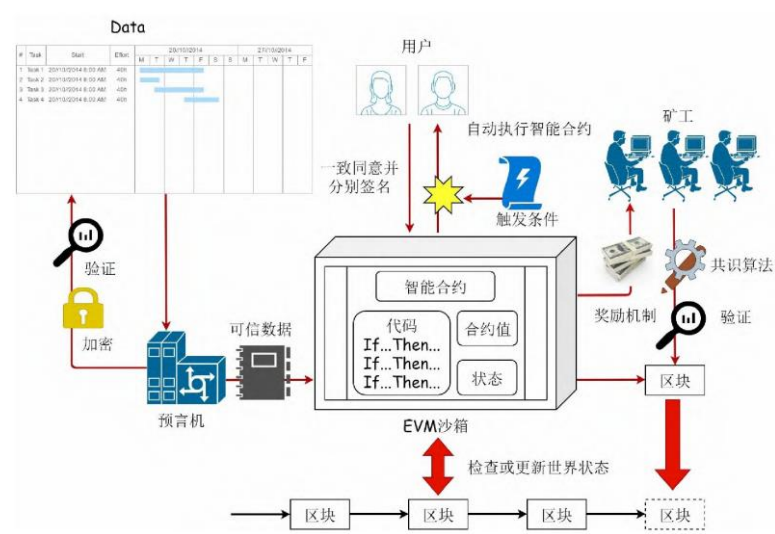


图 4 智能合约运行机制

3.3 数字化循环农业框架的优势

上一节介绍了提出的基于区块链的数字技术架构，这是一个去中心化的数字化农业框架，它可以帮助北京留民营生态农场降低技术成本、保护数据安全、实现数据管理智能化。使用区块链能够跟踪和链接生态农场的 IT 资产、电力供应系统、冷却系统和空间资源以及工作订单，进而管理全部系统数据并实现开放共享，并通过共识算法的一致性来减少运营维护中的操作错误。区块链还可以对生态农场的软硬件设备和线路进行监督，利用其可溯源、不可篡改、去信任、开放共享的数据管理方式对农场中各型生产操作设备的能耗进行精准化管理，实现生态农场的节能布局，打破数据孤岛，构建起覆盖所有智能设备的节能可信数据监测与采集网络，让能耗监控可以分时间、分阶段、分生产环节、分供应链地被自动收集和处理，从而进一步实现生态农场的节

能减排，并在设备采购、经营维护、环境监控等各个环节削减隐形成本，从而提升管理效率并大幅度降低留民营生态农场为实现数字化转型投入的技术成本；区块链的分布式账本模式以及强健的非对称加密技术、共识算法、数字签名等安全手段可以为生态农场存储的敏感数据提供多重保护。正因为区块链使用的非对称加密算法可以在多个服务器之间分发数据，加上每个区块通常仅包含前一个区块的加密散列函数，因此难以被黑客窃取全部数据。将数据存储设备作为节点纳入区块链，它便能够保存账本的副本，这种分散化的存储方式能够提升节点间通信的安全性，为生态农场中的信息流动提供高度安全的传输协议。同时，区块链技术的可溯源性能够记录生态农场日常运营中的一切记录和状态，便于其开展运维工作并实现数据管理的智能化。

除了上述优势以外，利用区块链技术还可以有效解决北京留民营生态农场的诸多问题。对于文献[43]中提到的利用普通蔬菜冒充有机蔬菜的问题，有机蔬菜从种植、培育、采摘、加工、销售等环节则可以利用区块链的可溯源性全部可溯，从而提升产品透明度供所有授权节点（区块链用户）进行查询或下载，杜绝以次充好的行为。对于文献[44]与[45]中提到的问题，一方面，可以通过区块链的智能合约来规范生产管理流程，比如将有机蔬菜认证标准的具体事项和要求写入智能合约，并在整个区块链网络中加以广播，一旦发生大肠杆菌超标、农药残留超标等违约事项，则自动触发惩罚措施，对失信人或失职人员加以惩戒，同时通知区块链网络上的所有节点（商户、客户、第三方机构等各类主体）并自动停止不合格农产品流入市场，避免给客户带来更多的健康危害；另一方面，依托区块链透明开放的流程管理也可以减少沼气发酵过程中的浪费与污染，进一步提高生态农场的环境质量。此外，挖掘绿色低碳币可以激励更多的用户参与，而随着用户人数的增加，矿工节点的数量也越来越多，挖币的难度增加，此时一般的PC无法提供挖币所需的算力，则设备商可以销售矿机设备给用户，而矿机虽然耗电量较高，但也可以利用留民营生态农场的太阳能发电与沼气发电，挖币行为能够进一步带动区块链用户在农场的生产经营、旅游观光等环节中开展节能减排与生态保护，维护并促进留民营生态农场的循环农业朝着“更绿色”（greener）的方向演进。

4 结语

虽然作为传统行业的农业一贯对新兴技术抱有审慎态度，但社会各界却普遍愿意拥抱“农业数字化”^[50]。除此之外，数字化可以帮助传统农业解决诸如“不断增长的粮食需求与日益趋紧的资源利用之间的矛盾”这样的挑战^[51]。随着农业数字化进程的跃升，人类与技术在农业价值链中的连接度（connectivity）将随着农业实践的透明度（transparency）的增加而持续增加，而农业系统的数字化则会对固有的农业利益相关者之前的利益平衡形成挑战^[52]。因此，对于传统行业的农业而言，在数字化浪潮奔涌澎湃的大势下，最为迫切的需求莫过于在数字技术与农业的交叉点开展跨学科研究，减少技术变革为农业带来的生态风险，探索数字化农业框架的架构以及这一框架如何支持及重塑传统农业模式，并力争在新农业模式下保留或进一步促进农业可持续性。研究在客观论证了区块链技术具有渗透性的基础上，以北京留民营生态农场的循环农业为例，提出了一个去中心化的数字化循环农业框架，该框架整合了传统循环农业的绿色可持续发展内涵与区块链的核心技术特征，为循环农业的数字化演进提供了可行的参考方案。然而，研究仍存在以下几项不足，这些不足值得思考并在未来的研究中进一步开拓探索：

第一，研究在理论层面提出了一个可行的技术框架，但仍缺少工程实践环节。未来可以通过实践的方法，譬如在比特币测试网络的 Docker 镜像、以太坊的 DApp(Decentralized App)等区块链应用开发平台架构完整的区块链，结合留民营生态农场的应用场景，对整个数字化农业框架进行实地测试与检验，并将测试结果实时反馈，从而进一步完善技术框架的细节并总结经验，不断修正实践方向，修葺生态农场的农业数字化路径。

第二，研究以北京留民营生态农场为典型案例进行了区块链技术架构，虽然将宏大的理论下放到具体应用场景中显得丰富生动并具有针对性，但研究的普适性与泛化性值得商榷。单从理论层面而论，任何农业场景利用区块链技术都可以实现数字化转型，但实现农业数字化转型的方式并非唯一，技术的选择也是多样化的。除火热的区块链技术外，云计算、物联网、人工智能、数字孪生、虚拟现实等数字技术也为农业的数字化转型提供了多样化的技术方案。此外，由于不同农业场景面临的现实问题不同，即便这些农业场景都采用区块链技术开展数字化转型，其技术架构的细节也会存在差异。今后，除研究提到的北京留民营生态农场外，还可以陆续开展更多的微观案例研究，比如研究北京蟹岛度假村、北京延庆区新华营村、北京怀柔北房镇苇里村的农业场景，提出更多基于区块链的循环农业数字化转型方案，将单案例研究拓展为多案例研究，从而丰富案例库，增强案例的效度

与技术方案的普适性。

第三,研究是基于传统循环农业的数字化架构,随着数字技术的蓬勃发展,农业数字化已成为农业未来的发展方向之一,而以绿色农业、精准农业、生态农业及循环农业为代表的可持续农业同样作为未来的农业发展方向之一,两种模式在目标与理念内涵上存在差异,且侧重点并不相同,这种差异性在具体实践中是否会产生碰撞,从而影响农业发展的实际效果,“数字化”与“可持续”之间的关系是否可以达到一个中庸均衡的状态,这些疑问在研究时并未给予过多探讨。未来,除了更具实践性的工程实践研究与丰富的多案例研究之外,还可以在宏观层面开展更多理论辨析与梳理,通过定性与定量研究相结合的方式,研究“农业数字化”与“可持续农业”二者在组织管理、生产效率、技术创新、环保外部性等问题上的一致与区别,并试图用“中庸”蕴含的哲学逻辑加以诠释,将哲学逻辑与技术逻辑再一次进行勇敢的“拥抱”,通过严谨的论证、归纳与总结,为未来农业的发展提供更多思考与建议。

参考文献:

- [1]Vitousek P M,Mooney H A,Lubchenco J M,et al.Human domination of earth' s ecosystems[J].Science,1997,277:494-499.
- [2]Vitousek P M,Aber J,Howarth R W,et al.Human alteration of the global nitrogen cycle:Sources and consequences[J].Ecological applications,1997,7(3):737-750.
- [3]Liu J G,Dietz T,Carpenter S R,et al.Coupled human and natural systems[J].Ambio,2007,36(8):639-649.
- [4]陈劲,曲冠楠,王璐瑶.基于系统整合观的战略管理新框架[J].经济管理,2019(7):5-19.
- [5]李萍,王伟.生态安全与治理:基于复杂系统理论嵌入经济学视角的分析[J].经济理论与经济管理,2012(1):36-43.
- [6]张智光.新时代发展观:中国及人类进程视域下的生态文明观[J].中国人口·资源与环境,2019(2):7-15.
- [7]Stone G D.Contradictions in the last mile:Suicide,culture,and E-agriculture in rural India[J].Science,Technology&Human Values,2011,36(6):759-790.
- [8]Wyckhuys K A G,Lu Y H,Zhou W W,et al.Ecological pest control fortifies agricultural growth in Asia-Pacific economies[J].Nature Ecology&Evolution,2020,4(11):1522-1530.
- [9]Hammond J,Rosenblum N,Breseman D,et al.Towards actionable farm typologies:Scaling adoption of agricultural inputs in Rwanda[J].Agricultural Systems,2020,183:102857.
- [10]Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO),International Fund for Agricultural Development (IFAD),United Nations International Children' s Emergency Fund(UNICEF),et al.The state of food security and nutrition in the world 2020:Transforming food systems for affordable healthy diets[EB/OL].[2021-01-30].<http://www.fao.org/3/ca9692en/online/ca9692en.html>.
- [11]United Nations World Food Programme (WFP).WFP Chief warns of hunger pandemic as COVID-19 spreads (Statement to UN Security Council).WFP[EB/OL].[2021-01-30].<https://www.wfp.org/news/wfp-chief-warns-hunger->

pandemic-covid-19-spreads-statement-un-security-council.

[12]Muangkaew T. “WTO bans countries from stopping export of food” due to Covid-19[EB/OL]. (2020-07-01).<https://www.nationthailand.com/news/30390580>.

[13]World Trade Organization (WTO).WTO report finds growing number of export restrictions in response to COVID-19 crisis[EB/OL]. [2021-01-30].https://www.wto.org/english/news_e/news20_e/rese_23apr20_e.htm.

[14]Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO),United Nations World Food Programme (WFP).FAO-WFPearly warning analysis of acute food insecurity hotspots[EB/OL]. (2020-07).<http://www.fao.org/3/cb0258en/CB0258EN.pdf>.

[15]United States Department of Agriculture (USDA),Global Agricultural Information Network (GAIN).Grain and food annual[EB/OL]. (2020-04-06).https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Grain%20and%20Feed%20Annual_Beijing_China%20-%20Peoples%20Republic%20of_04-01-2020.

[16]Archibugi D.Blade runner economics:Will innovation lead the economic recovery?[J].Research Policy,2017,46(3):535-543.

[17]Hauser M,Lindtner M.Organic agriculture in post-war Uganda:Emergence of pioneer-led niches between 1986 and1993[J].Renewable Agriculture and Food Systems,2017,32(2):169-178.

[18]Basso B,Antle J.Digital agriculture to design sustainable agricultural systems[J].Nature Sustainability,2020,3(4):254-256.

[19]Nakamoto S.Bitcoin:A peer-to-peer electronic cash system[EB/OL]. [2021-01-30].<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=051480446BB56691DB1BBA726F21AA37?doi=10.1.1.221.9986&rep=rep1&type=pdf>.

[20]Extance A.Technology blockchain moves to science[J].Nature,2017,552(7685):301-302.

[21]Johnson W G.Blockchain,meet genomics:Governance considerations for promoting food safety and public health[J/OL].Journal of Food Law&Policy,2019,15(1).<https://scholarworks.uark.edu/jflp/vol15/iss1/3>.

[22]Wong D R,Bhattacharya S,Butte A J.Prototype of running clinical trials in an untrustworthy environment using blockchain[J].Nature Communications,2019,10(1):1-8.

[23]Deloitte Insights.Deloitte’s 2020 global blockchain survey:From promise to reality[EB/OL]. [2021-01-30].https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/6608_2020-global-blockchain-survey/DI_CIR%202020%20global%20blockchain%20survey.pdf.

[24]Lade P,Ghosh R,Srinivasan S.Manufacturing analytics and industrial internet of things[J].Intelligent Systems, IEEE,2017,32(3):74-79.

-
- [25]Seow K T. Supervisory control of blockchain networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2019, 50(1):159-171.
- [26]Ferrag M A, Shu L, Yang X, et al. Security and privacy for green Io T-based agriculture: Review, blockchain solutions, and challenges[J]. IEEE Access, 2020. DOI:10.1109/ACCESS.2020.2973178.
- [27]Hang L, Ullah I, Kim D H. A secure fish farm platform based on blockchain for agriculture data integrity[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170:105251.
- [28]Ahmed S, Broek N T. Blockchain could boost food security[J]. Nature, 2020, 550(7674):43-43.
- [29]Köhler S, Pizzol M. Technology assessment of blockchainbased technologies in the food supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269:122193.
- [30]智能制造网. 国家牵头, 2019 年区块链相关政策一览! [EB/OL]. (2019-12-09). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1652432512833135574&wfr=spider&for=pc>.
- [31]中国经济网. 多地印发行动计划, 区块链专项政策相出台[EB/OL]. (2020-07-13). http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202007/13/t20200713_35304646.shtml.
- [32]澎湃新闻. 国内首个!“区块链村”落地宿州! [EB/OL]. (2020-09-19). https://www.thepaper.cn/news_Detail_forward_9252166.
- [33]Bresnahan T. General purpose technologies[J]. Handbook of the Economics of Innovation, 2010, 2:761-791.
- [34]Helpman E. General purpose technologies and economic growth[M]. Cambridge: MIT Press, 1998.
- [35]Carlaw K I, Lipsey R G. Externalities, technological complementarities and sustained economic growth[J]. Research Policy, 2002, 31(8-9):1305-1315.
- [36]Fan K, Pan Q, Zhang K, et al. A secure and verifiable data sharing scheme based on blockchain in vehicular social networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6):5826-5835.
- [37]Davidson S, De Filippi P, Potts J. Blockchains and the economic institutions of capitalism[J]. Journal of Institutional Economics, 2018, 14(4):639-658.
- [38]Korzinov V, Savin I. General purpose technologies as an emergent property[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2018, 129:88-104.
- [39]Bresnahan T F, Trajtenberg M. General purpose technologies “Engines of growth”? [J]. Journal of Econometrics, 1995, 65(1):83-108.
- [40]北京市大兴区人民政府. 留民营生态农场[EB/OL]. (2018-09-14). <http://www.bjdx.gov.cn/bjsdxqrmzf/zjdx/yzdx11/>

602656/index.html.

[41]张颂心. 我国农村可再生能源产业化: 现状·案例与对策[J]. 安徽农业科学, 2019(18):256-258, 261.

[42]留民营生态旅游度假村[EB/OL]. (2018-09-02). <http://www.lmylygg.com/>.

[43]徐治国, 李树峰. 京郊有机蔬菜基地调查: “有机食品”有农药[EB/OL]. (2010-02-03). https://news.qq.com/a/20100203/001242_1.htm.

[44]辽宁消费者维权网. 有机食品真相: 零污染是噱头生态农业村有腐臭味[EB/OL]. (2014-07-15). <http://xiaofei.nen.com.cn/system/2014/07/15/012452049.shtml>.

[45]《财经》杂志. 国内有机蔬菜为何要贵 3 至 5 倍: 普通蔬菜价格偏低[EB/OL]. (2014-07-14). <http://finance.sina.com.cn/consume/20140714/114819695880.shtml>.

[46]新全球化智库. 留民营乡村振兴党建先行, 机制创新增效兴业共致富[EB/OL]. (2018-10-30). https://www.sohu.com/a/272029538_532369.

[47]袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2016(4):481-494.

[48]Liu L, Özsu M T. Encyclopedia of database systems[M]. New York:Springer, 2009.

[49]袁勇, 王飞跃. 区块链理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.

[50]Pfeiffer J, Gabriel A, Gandorfer M. Understanding the public attitudinal acceptance of digital farming technologies: a nationwide survey in Germany[J]. Agriculture and Human Values, 2021, 38(1):107-128.

[51]Annosi M C, Brunetta F, Capo F, et al. Digitalization in the agri-food industry: The relationship between technology and sustainable development[J]. Management Decision, 2020. DOI:10.1108/MD-09-2019-1328.

[52]Fielke S, Taylor B, Jakku E. Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review[J]. Agricultural Systems, 2020, 180:102763.