

风电项目 CCER 碳排放权价值评估研究*

简克蓉 施茹芸
(广西科技大学, 柳州 545006)

摘要: 2024 年 1 月 22 日, 全国温室气体自愿减排交易市场正式重启, CCER 碳排放权交易迎来历史新阶段, 但其面临价格波动性较大、评估过程忽视环境收益等问题。为形成合理的 CCER 碳排放权价值评估方法, 选择内蒙古巴彦淖尔市乌兰伊力更风电场 300MW 风电特许权项目作为研究对象, 利用四川联合环境交易所 2016—2023 年的 CCER 交易价格数据, 在预期碳交易价格的基础上, 结合净现金流量折现法和 B-S 实物期权法, 分别对该风电项目 CCER 碳排放权的净现值和期权溢价进行评估, 二者之和就是 CCER 碳排放权的价值。根据模型计算得到该项目产生的 CCER 碳排放权价值为 1.41 亿元, 碳期权价值为 1.57 亿元, 项目的整体价值为 2.98 亿元。这说明碳资产的实物期权属性十分显著, 在风电项目价值评估中是不可忽视的。

关键词: 风电项目; CCER 碳排放权; B-S 实物期权模型

0 引言

随着经济高速发展, 世界各国对能源的需求不断增加。而传统能源消耗导致全球气候变化问题日益严重, 减少温室气体排放成为全球关注的焦点。为了积极应对气候变化, 各国大力推动清洁能源发展。此外, 国际上已经形成了成熟的碳交易市场机制和体系, 可通过碳排放权交易实现温室气体减排目标。中国碳交易市场建设经历了从区域试点迈向全国统一市场的演变过程。中国承诺加大国家自主贡献力度, 提出了“双碳”目标, 积极参与国际碳排放权交易合作, 并制定了一系列政策措施, 以降低碳排放, 推动全球气候治理。

传统能源资源稀缺且其消耗使用产生的温室气体对环境造成较大压力, 因此可再生能源发展越来越受到重视。中国作为能源消费大国, 也在积极推进风电等清洁能源项目的建设。其中, 风电项目作为可再生

能源项目, 是国家核证自愿减排量 (China Certified Emission Reduction, CCER) 的主要来源之一^[1-3]。风电项目通过安装风电机组和配套设施, 将风能转化为电能, 产生的电量流入电网供居民和企业使用, 具有清洁、高效、可再生的特点, 受到广泛关注。风电项目开发在建设不仅可以满足日益增长的能源需求, 减少化石能源的使用, 降低我国碳排放水平, 而且有助于促进我国经济与环境可持续发展, 助力实现 2030 年前“碳达峰”目标。

为了更好地衡量风电项目的环境价值和经济价值, 我国引入了碳排放权交易机制^[4-6]。自 2013 年开始, 我国在 9 个碳排放权交易试点区域陆续开展碳交易工作。2021 年 7 月, 全国碳交易市场开市, 标志着我国碳排放权交易进入一个新的发展阶段。除中国碳排放配额 (Chinese Emission Allowances, CEA) 交易外, 还可使用可再生能源项目产生的 CCER 来抵销碳排放量。然而, 由于 CCER 存在交易量较少、个别项目不规范、

* 基金项目: 四川省社会科学重点研究基地系统科学与企业发展研究中心重点项目“‘双碳’目标下我国城市群碳达峰预测及差异化减排路径研究”(XQ22B09)。

供需不平衡等问题,自 2017 年 3 月宣布暂停备案后,CCER 市场近 7 年时间未曾开放新的项目审批,但存量 CCER 仍可在市场交易。2024 年 1 月 22 日,全国温室气体自愿减排交易市场启动仪式在北京举行,标志着 CCER 交易市场正式重启。CCER 交易迎来新阶段,亟须形成估算 CCER 碳排放权价值的方法,为 CCER 定价提供合理的参考。

风电项目 CCER 碳排放权价值评估已经成为资产评估领域的重要方向。现有风电项目的减排量核算方法因项目方法学的选择而有差异,不利于项目碳减排量的确定;同时,在碳排放权交易市场中,CCER 交易价格呈现较大波动,给 CCER 碳排放权价值评估结果带来很大的不稳定性。因此,风电项目减排量的确定、CCER 交易价格合理水平的确定是价值评估中的关键环节。本文基于风电项目广阔的发展前景,对 CCER 价值进行评估。内蒙古自治区(以下简称“内蒙古”)拥有全国 57% 的风能资源,是我国风电第一大区域,同时也是风电项目开发建设的热土。故本文选择内蒙古巴彦淖尔市乌兰伊力更风电场 300MW 风电特许权项目(以下简称“伊力更风电项目”)作为案例进行研究。

现有研究主要集中于风电项目的经济性评估^[7],忽略了其环境效益和社会效益。本文参考董烁^[8]、江瑞^[9]和郭斐然^[10]的做法,构建 CCER 碳排放权价值评估模型。一方面,基于 CCER 的环境效益,提出 CCER 的碳减排价值,利用改进的收益法进行评估;另一方面,基于 CCER 碳排放权价格的不确定性和决策的灵活性,提出 CCER 的碳期权价值,利用 Black-Scholes(以下简称“B-S”)实物期权法进行估算。最后,将这两部分加总得到 CCER 碳排放权价值。评估结果能够为 CCER 碳排放权交易定价提供指导,不仅对完善我国碳市场建设具有重大意义,而且能促进企业碳资产的增值保值及“双碳”目标的实现。

1 CCER 碳排放权及价值评估方法

1.1 CCER 碳排放权概念与交易现状

1.1.1 CCER 碳排放权概念

碳排放权是指依法取得的向大气排放温室气体的权利,其作为一种在碳市场中交易的特殊商品,由买方通过向卖方支付一定金额而获得。当前,中国碳交易市场交易的碳排放权有两类:中国碳排放配额(CEA)和国家核证自愿减排量(CCER)。在全国碳排放权交易市场和 9 个试点碳交易市场中,交易的碳排放权以中国碳排放配额(CEA)为主,以国家核证自愿减排量(CCER)为辅。CCER 交易原理与抵销机制见图 1。

碳排放配额由政府向企业免费发放,只对少数限排企业开放。由于企业在生产商品、运输商品过程中会产生碳排放,而碳排放需要一定的碳排放额度进行抵销,拥有碳排放权就意味着企业等主体可以在规定的额度范围内排放二氧化碳等温室气体,就像获得了一张合法的“排放许可证”,其中碳排放配额可以抵销企业 95% 以上的应付碳排放额度^[11]。

在应对气候变化的大背景下,CCER 碳排放权应运而生。CCER 碳排放权由企业开展各类碳减排项目而产生,包括可再生能源项目(如太阳能、风能发电)、林业碳汇项目(植树造林吸收二氧化碳)、甲烷利用项目等。CCER 既记录了机构的减排行为,又可以作为政府推动所有控制和排放企业主动减少碳排放的有效工具。在不同的碳交易试点市场上,CCER 可抵销额占应付碳排放配额的比例略有不同,但基本上都不高于 5%。虽然目前 CCER 份额相对较低,但它却是企业、投资机构和个人积极参与碳排放交易市场的唯一途径。具体而言,对于一个符合要求的减排项目,需通过专业的方法进行减排量计算。例如,在可再生能源项目中,会考虑其替代传统高碳排放能源所减少的温室气体排放量。这个减排量经过严格的审定、核证等流程,确认

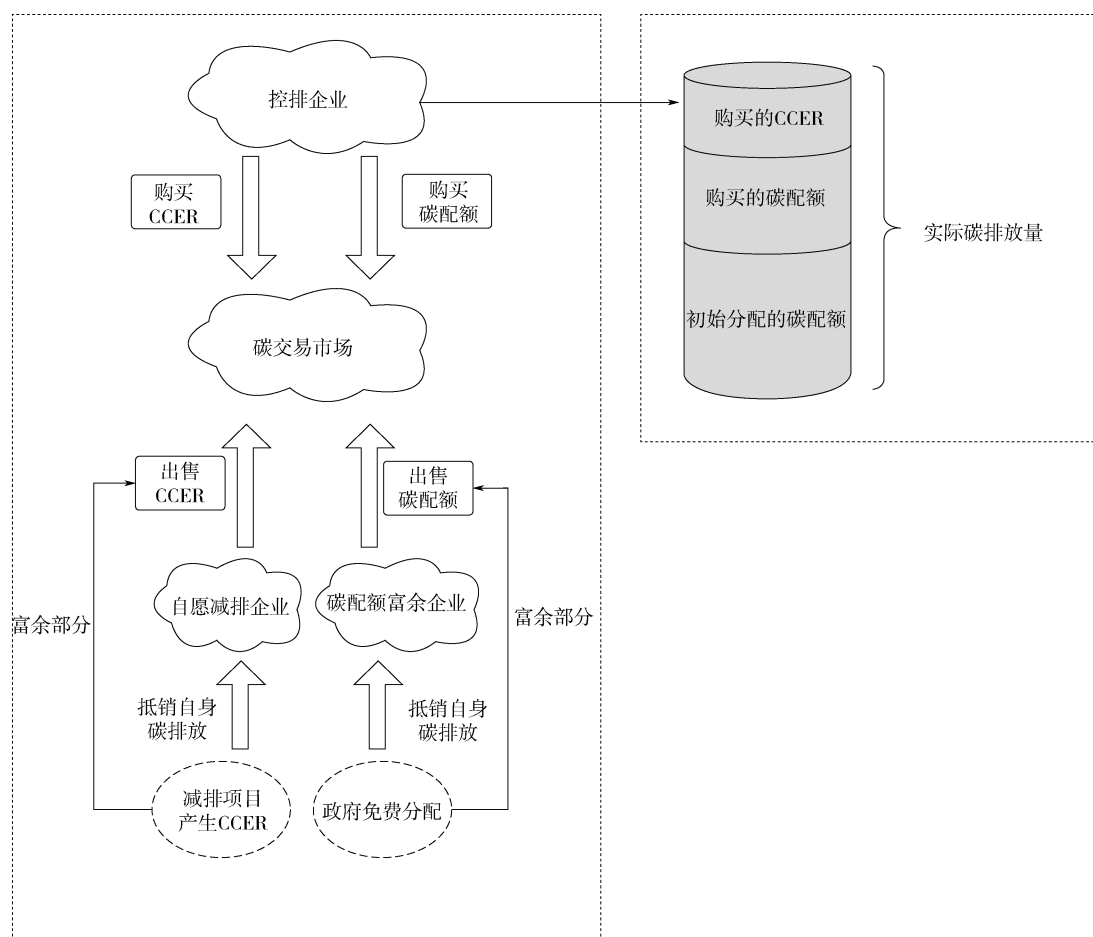


图1 CCER 交易原理与抵销机制

无误后，就成为 CCER。拥有 CCER 的主体（企业、组织或个人）可以将其用于交易。控排企业除使用政府分配的碳排放配额履约外，还可以通过购买 CCER 来抵销自身的碳排放量。这一方面使减排项目的开发者能够获得经济收益，从而激励更多的减排行动；另一方面也为控排企业提供了更灵活的履约方式，共同助力我国实现“碳达峰”“碳中和”的战略目标。

1.1.2 CCER 碳排放权交易现状

2012 年 1 月，北京、天津、上海、重庆、广东、湖北、深圳获准开展碳排放权交易试点，全国 9 家试点交易所也相继启动，见表 1。由于地方碳市场单个体量较小、多为区域性分割市场、市场流动性不足，无法形成有效、均衡的价格。2021 年 7 月 16 日，全国碳

排放权交易市场正式启动。根据全国碳排放权交易市场总体设计，将电力、石化、化工、建材、钢铁、有色金属、造纸、民航八大高能耗行业纳入其中。现阶段只有电力行业进入履约范围，其他七大行业仍只属于报告范围。

随着全国碳排放权交易市场正式启动上线交易，地方碳市场和全国碳市场处于并存状态。然而，全国碳市场无论是覆盖范围、制度设计还是市场运行都尚不完善。这就需要地方试点碳市场继续为全国碳市场提供先行先试的经验借鉴。从当前各地碳市场表现力看，地方碳市场活跃度相对较高，对推进地方能源转型和绿色低碳产业发展具有促进作用。

表 1 碳排放权交易所 CCER 交易信息披露情况

交易所	启动时间	交易时间	交易信息数量
北京绿色交易所	2013 年 11 月 28 日	2015 年 6 月至今	293 条
四川联合环境交易所	2016 年 5 月 6 日	2016 年 12 月至今	273 条
上海环境能源交易所	2013 年 11 月 26 日	2018 年 9 月至今	45 条
广州碳排放权交易所	2013 年 12 月 19 日	2021 年 5 月至今	80 条
深圳排放权交易所	2013 年 6 月 18 日	2015 年 6 月至今	未披露
天津排放权交易所	2013 年 12 月 26 日	2015 年 3 月至今	未披露
湖北碳排放权交易中心	2014 年 4 月 2 日	未披露	未披露
重庆碳排放权交易中心	2014 年 6 月 19 日	未披露	未披露
海峡股权交易中心——环境能源交易平台	2013 年 7 月 18 日	未披露	未披露

注：数据来源于各交易所官方网站，截至 2023 年 12 月。

通过对各交易试点官方网站所披露的 CCER 交易信息进行梳理后发现，在众多交易试点之中，仅有北京绿色交易所、上海环境能源交易所、广州碳排放权交易所及四川联合环境交易所这 4 个交易试点的官方网站公布了 CCER 碳排放权成交均价信息。考虑到 CCER 碳排放权交易价格数据的连续性及丰富性，选择四川联合环境交易所披露的 CCER 周成交均价作为深圳碳排放权交易所 CCER 交易价格的替代，见图 2。

1.2 CCER 碳排放权价值评估方法

1.2.1 CCER 碳排放权价值评估方法的背景

随着 20 世纪 90 年代提出低碳经济的理念，碳排

放权等相关问题成为学术研究的热点和难点。欧洲、美国的碳交易市场发展起步较早，较为发达成熟，故在碳价数据的可得性、碳排放权价值评估理论研究成果的丰富性等方面略胜一筹。

国内外学者在碳排放权相关研究中的侧重点有所不同：国外学者的研究集中在碳排放交易、定价及控排政策等问题上，并且已经进行了大量有关碳交易机制的探讨。而我国尚未形成成熟的碳排放权交易市场，许多相关研究受到限制。国内学者在 2012 年之前的研究多集中在讨论碳资产属性、碳排放权的会计处理问题上，近年来才开始对企业配额碳排放权、CCER 碳排放权的价值评估等方面展开研究。

1.2.2 国外 CCER 碳排放权价值评估

在碳排放权价值评估方面，国外学者主要评估在国际市场上交易的碳配额价值及核证减排量（CER）价值。学者从国外碳排放交易市场中获取历史碳价数据，构建相关模型进行实证检验，对比分析市场价格与实证结果，验证模型的精准度，形成了一系列较为丰富和合理的碳排放权价值评估研究成果。由于国外学者倾向于将碳排放权的资产属性确定为金融资产，因此实物期权法被广泛应用于各种自然资源项目的投资决策中。

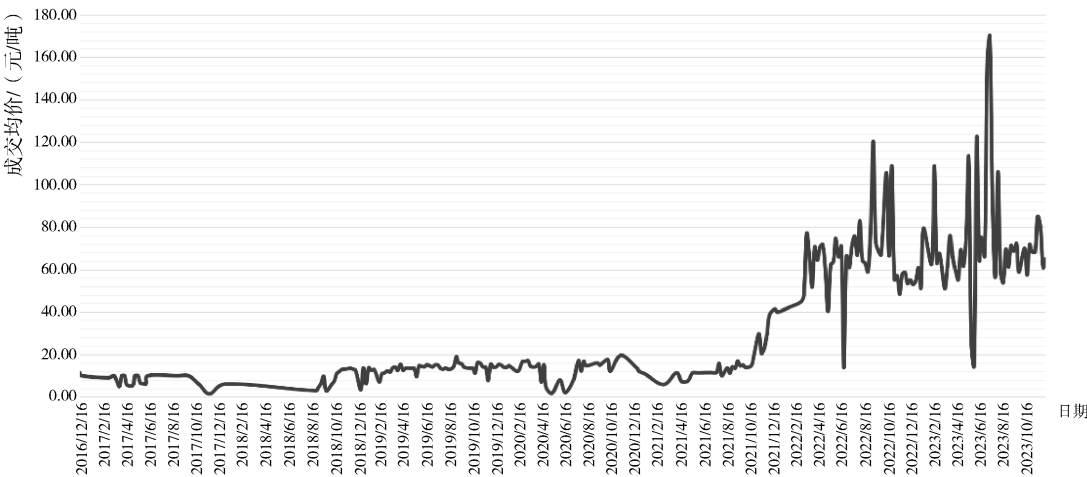


图 2 四川联合环境交易所 CCER 周成交均价走势（截图）

部分国外学者在价值评估模型建立的过程中,考虑到碳价的时间序列可能存在 ARCH (自回归条件异方差) 效应,故运用广义自回归条件异方差模型 (GARCH) 来消除异方差。Benz 和 Trück^[12]使用 Markov Switching 模型和 AR-GARCH 模型进行随机建模,分析了欧盟碳交易体系的短期现货价格。Paolella 和 Taschini^[13]提倡使用新的 GARCH 模型分析 EUAs (欧盟排放许可证) 内在的异方差动态,实现了对碳排放权进行精确的风险价值预测,提升了对未来碳价的预测能力。除了应用 GARCH 模型,国外学者还应用了正态非高斯分布过程、布朗运动等模型来研究国际碳排放权价格。Gorecki 和 Taschini^[14]对欧洲碳期权定价进行研究,发现正态非高斯分布过程能够对 EUAs 价格的变动进行有效分析。Daskalakis 等^[15]对碳配额现货价格进行研究,通过几何布朗运动模型对 EU-ETS (欧盟碳排放交易体系) 碳排放配额的 3 个主要市场的现货成交价格进行分析,近似拟合了碳配额现货价格。

1.2.3 国内 CCER 碳排放权价值评估

我国碳市场交易市场起步较晚且发展不成熟,导致国内关于碳排放权价值的研究落后于国外。目前,CCER 交易价格存在缺失和不可得性等问题,所以早期我国学者主要集中于研究配额碳排放权价值及国外的 CER 价值。受国际碳排放权交易市场的影响,早期国内学者将碳排放权界定为金融资产,利用改进或修正的 B-S 实物期权定价模型对碳排放权期权价值进行评估。韦伟和潘泽瀚^[16]结合 GARCH 类模型估计并预测碳期权的收益波动率,将预测的收益波动率代入 B-S 实物期权定价模型,从而提高了碳期权产品定价的精确度。黄衫^[17]基于 GARCH 模型和分形布朗运动的定价模型分别拟合碳期权收益波动率和碳期权实际价格的波动情况。李天雨^[18]结合 EGARCH (指数广义自回归条件异方差) 模型,对碳排放权波动率进行估计,从而改进了 B-S 实物期权定价模型。也有部分学者在 B-S 实物期权定价模型的基础上,引入其他一些影响

碳排放权价格的因素。赵小攀等^[19]考虑到区域因素对碳排放权价格的影响,修正了 B-S 实物期权定价模型。汪晓芬^[20]从理论上对碳排放权的初始分配方式与碳排放权价格形成进行分析,根据欧洲环境交易所公布的碳交易价格历史数据,运用 B-S 期权定价模型及 GARCH 模型对碳排放权交易进行定价分析,并对 CMD (联合国清洁发展机制) 项目的 CERs (核证减排量) 进行期权定价。

近十几年,我国先后成立了 9 个碳排放交易试点及全国碳排放权交易市场。学者展开了对 CCER 价值的评估。郭斐然^[10]结合净现金流量折现法和改进的考虑交易费用的 B-S 实物期权法,分别对神木风电场项目的 CCER 碳排放权的净现值和期权溢价进行评估,加总得到 CCER 碳排放权的价值。郝越^[21]认为,碳市场经过多年碳试点运行已经拥有较为开放的活跃市场,且具有大量可比案例,因此选用市场比较法对 CCER 碳排放权价值进行评估。董烁^[8]认为,CCER 碳排放权价值由碳减排价值和碳排放权期权价值两部分组成。其依据价值评估的基本理论,运用结合分数阶灰色预测模型的收益法评估碳减排价值,选用 B-S 期权定价法评估碳排放权期权价值,对卧虎石风电场 300MW 的 CCER 项目进行了价值评估。

1.2.4 CCER 碳排放权价值评估方法述评

综上所述,大多数学者认为,碳排放权价值不仅包括碳减排价值,还包括碳期权价值。目前,国内外学者在对碳排放权价值进行评估时主要采取的方法有:传统资产评估方法 (市场法、收益法、成本法)、影子价格法、Putty-clay Vintage 短期碳生产模型 (碳交易生产函数) 及期权定价方法 (实物期权法、二叉树模型)。

其中,对于碳减排价值的评估,学者大多采用收益法。对于碳期权的评估,学者大多选择 B-S 实物期权定价模型,因为该模型相较于二叉树、蒙特卡罗模拟法等其他模型具有更强的客观性。CCER 碳排放权价值评估方法对比见表 2。

表 2 CCER 碳排放权价值评估方法对比

评估方法	应用条件	适用性分析
市场法	一是存在足够多的可比项目在一个充分活跃的公开市场条件下进行交易；二是被评估项目与可比项目之间的对比指标应能够量化，且相关的必要信息容易获得	一方面，目前参与碳排放权交易的主要是一些高排放的重点企业及特定的机构投资者，市场主体的范围相对较窄，在寻找可比的交易案例时面临较大困难；另一方面，碳排放权交易在不同地区、不同行业之间的发展不平衡，降低了市场法的适用性
收益法	一是确保该项目在评估期限内能够持续经营产生收益且其收益能用货币计量；二是根据项目情况综合考虑市场需求、竞争环境等各方面的影响因素，对被评估项目的未来现金流进行合理的预测；三是考虑市场利率、风险溢价、项目运行状况等因素确定合理的折现率，这就要求项目预期收益所承担的风险是可以预测和度量的	CCER 项目具有一定的稳定性和可预测的收益，因此收益法具有一定的适用性。然而，传统的收益法只是机械地将未来划分为几个阶段，为每个阶段设置相同的收益额，使评估结果不具有准确性。由于 CCER 项目具有较长的收益期限，项目的未来风险波动可控制在一定的范围内，因此利用收益法准确评估 CCER 碳排放权价值的关键在于准确预测未来每期的收益
成本法	一是被评估资产的功能基本完好，可恢复到正常使用状态；二是历史成本数据可以准确获取；三是形成资产的各项支出都是必要性支出	CCER 碳排放权不存在物理实体的损耗，且其产生主要源于政府的配额分配或通过特定的项目开发，无法用传统的成本核算方式确定其重置成，其成本的确定缺乏统一的标准和可计量的投入要素。碳排放权不会因为使用或自然力的作用而出现磨损、老化等实体性贬值的情况，因而成本法不适用
B-S 实物期权法	B-S 实物期权法是一种将金融期权的理论和方法应用于实物资产投资决策和价值评估的方法。项目中面临的选择越多，其价值越高。由于 B-S 实物期权法考虑了发展的阶段性、决策的灵活性、管理战略的柔性，能更加客观、科学地通过概率分布预测现金流，弥补了传统评估方法没有考虑不确定性对价值影响的缺陷	B-S 实物期权法适用于 CCER 碳排放权价值评估。因为碳排放权的价值受到政策变化、市场供需关系、技术进步等多种因素影响，具有较高的不确定性，而 B-S 实物期权法能够很好地处理这种不确定性，通过期权定价模型将未来的不确定性转化为价值。与此同时，企业持有碳排放权具有一定的灵活性，如可以选择在合适时机出售以获取收益，或者保留以满足未来碳排放需求。这种类似于金融期权的选择权使得 B-S 实物期权法非常适合对碳排放权进行评估

2 构建 CCER 碳排放权价值评估模型

2.1 CCER 碳减排价值评估模型

碳减排价值指的是项目产生的碳减排量所产生的价值，核算模型为

$$V_{ER} = ER_x \times P_{CCER} \tag{1}$$

式中， V_{ER} 为碳减排价值； ER_x 为第 x 年减少的二氧化碳排放量，需要通过对比基准线情景与风电项目情景产生相同电量下减排量的大小来确定； P_{CCER} 为 CCER 碳排放权交易价格，需要利用趋势分析方法进行预测。

风电项目产生的 CCER 共有两部分价值：一部分为碳减排价值，是项目相较于基准情景而减少的二氧化碳排放量进行交易所形成的价值；另一部分是碳期权价值，是由于风电项目经营期长、项目不确定性大所形成的价值。

1. 基准线排放量计算

基准线排放量是指在项目活动不存在的情况下，被项目替代的化石燃料火电厂发电产生的二氧化碳排放量。对该排放量进行核算的模型为

$$BE_x = EG_{PJ,x} \times EF_{grid,CM,x} \tag{2}$$

$$EG_{PJ,x} = EG_{export,x} - EG_{import,x} \tag{3}$$

式中， BE_x 为第 x 年的项目基准线排放量，单位为吨二氧化碳（ tCO_2 ）； $EG_{PJ,x}$ 为第 x 年的项目（Project, PJ）净上网量，数值等于上网电量与下网电量之差，单位为兆瓦时（ $MW \cdot h$ ）； $EF_{grid,CM,x}$ 为第 x 年的项目所在区域电网的组合边际二氧化碳排放因子（Combined Margin CO_2 Emission Factor），单位为吨二氧化碳每兆瓦时（ $t CO_2/MW \cdot h$ ）； $EG_{export,x}$ 为第 x 年的项目输送至区域电网的上网电量，单位为兆瓦时（ $MW \cdot h$ ）； $EG_{import,x}$ 为第 x 年的区域电网输送至项目的下网电量，单位为兆瓦时（ $MW \cdot h$ ）^[22]。

2. 风电项目排放量计算

风电项目属于可再生能源项目，本身碳排放量小。同时，该类项目不会像太阳能发电厂在运营过程中使用化石燃料来产生电力，也不会像地热发电厂在运行中释放不凝性气体，几乎不产生碳排放（可忽略不计），故项目第 x 年排放量 $PE_x = 0$ 。

3. 项目泄漏排放量计算

风电项目有可能导致上游部门在开采、加工、运输等环节使用化石燃料等情形，与项目减排量相比，该泄漏排放量较小，可忽略不计，故项目第 x 年泄漏排放量 $LE_x = 0$ 。

4. 项目减排量核算

项目减排量 ER_x 核算模型为

$$ER_x = BE_x - PE_x - LE_x \tag{4}$$

式中， PE_x 为项目排放量（Project Emissions）； LE_x 为项目泄漏排放量（Leakage Emissions）。二者单位均为吨二氧化碳（tCO₂）。

2.2 CCER 碳期权价值评估模型

CCER 项目建成后，项目业主每年能获取一定数量的 CCER 资产。然而，受到经济、政策、气候等多种因素的影响，CCER 的价格随着时间变化而呈现较大的波动性。同时，CCER 项目的存续期往往长达 20 ~ 30 年，CCER 持有者可以在约定时间内任意时间点选择执

行和放弃出售该项资产。价格的不确定性和决策的灵活性都体现出 CCER 资产的实物期权特性^[23]。

目前实物期权方法主要包括二叉树期权定价模型、B-S 实物期权定价模型、蒙特卡洛模拟法及其他经过修正的实物期权定价模型^[24]。B-S 实物期权定价模型中的 5 个参数易于计量和获取，相较于其他模型更为客观，故选择该模型对 CCER 碳期权价值 V_{option} 进行核算评估：

$$V_{option} = C = SN(d_1) - Xe^{-rT}N(d_2) \tag{5}$$

$$d_1 = \frac{\ln\left(\frac{S}{X}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)T}{\sigma \sqrt{T}} \tag{6}$$

$$d_2 = d_1 - \sigma \sqrt{T} \tag{7}$$

式中， $N(d_1)$ 和 $N(d_2)$ 为关于参数 d_1 和 d_2 的标准正态分布累积概率分布函数； S 为标的资产的当前价格； X 为期权执行价格； T 为期权到期日； r 为无风险利率； σ 为标的资产收益波动率； C 为期权价值（ V_{option} ）。

2.3 CCER 碳排放权价值评估模型

CCER 碳排放权价值主要由碳减排价值与碳期权价值这两个关键部分所构成。通过将这两部分价值相加汇总，便能构建起 CCER 碳排放权价值评估模型

$$V_{CCER} = \sum_{x=1}^{21} \frac{V_{ER,x}}{(1+r)^x} + V_{option} \tag{8}$$

风力发电 CCER 项目价值评估模型框架见图 3。

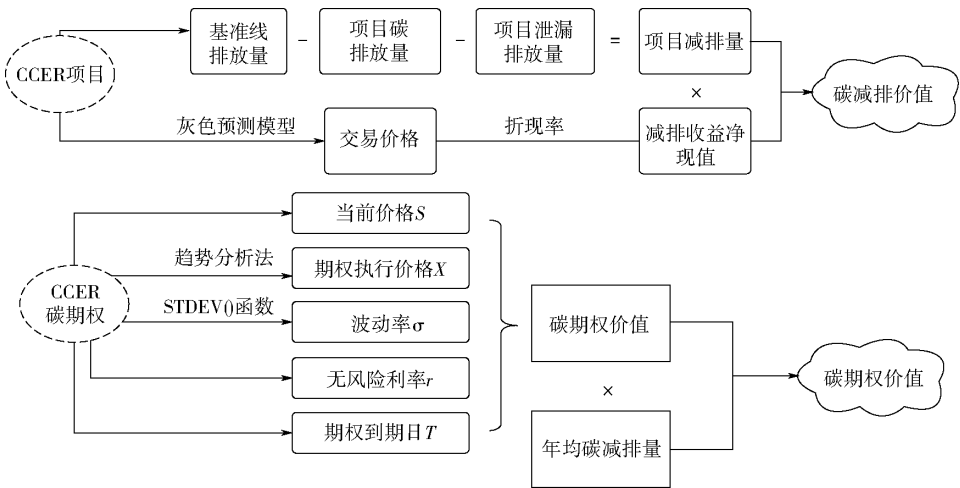


图 3 风力发电 CCER 项目价值评估模型框架

3 评估实例

3.1 评估案例简介

选择伊力更风电项目作为研究对象。该项目备案号为 0002，项目类型属于“（三）在联合国清洁发展机制执行理事会注册前就已经产生减排量的项目”，项目业主为内蒙古京能乌兰伊力更风力发电有限责任公司。项目场地位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特中旗川井苏木东北约 20km 处。该地区常年有风，风能资源十分丰富。

伊力更风电项目固定资产投资为 256 912 万元，总投资额为 271 391 万元。项目安装了 200 台型号为 JF77/1500 的风力发电机组，总装机容量为 300MW，设计年发电量约 8.8 亿 kW·h，年等效满负荷发电小时数为 2 945 小时。在实际运行中，由于各年之间风速差异较大，以及风电场存在限电情况，正式投产运行后，发电量可达到 6.6 亿 kW·h。项目通过替代华北电网的部分电力，实现温室气体减排。项目特许经营期为 25 年，包括建设期 3 年及生产期 22 年。该项目产生的 CCER 碳排放权在深圳排放权交易所上市并进行交易。伊力更风电项目的相关活动时间节点见表 3。

表 3 伊力更风电项目相关活动时间节点

时间	活动类型
2008 年 7 月 10 日	开工建设
2009 年 7 月 11 日	首台风力发电机组并网发电
2009 年 7 月 20 日	200 台风力发电机组相继进入 250 小时试运行
2009 年 11 月 26 日	最后 1 台风力发电机组吊装完成
2009 年 11 月 28 日	最后 1 台风力发电机组并网发电
2010 年 2 月 4 日	全部风力发电机组通过 250 小时试运行

3.2 评估的基本要素

3.2.1 评估目的

CCER 作为碳排放权交易的其中一种重要基础产

品，价格波动性较大，因此，亟须形成 CCER 碳排放权价值的估算方法，用以评估伊力更风电项目产生的 CCER 碳排放权价值，从而规范碳交易市场秩序，帮助企业做出对 CCER 项目的投资决策，实现经济效益的整体优化。

3.2.2 评估方法

选用改进的收益法和 B-S 实物期权法。

3.2.3 评估基准日

评估基准日设定为：2023 年 12 月 31 日。

3.2.4 评估假设

（1）持续经营假设。该项目自 2010 年 1 月 1 日起，能够持续经营至 2030 年 12 月 31 日项目寿命期结束。

（2）公开交易假设。CCER 碳排放权的交易市场被假定为一个充分竞争的市场，市场中有众多买家和卖家参与交易，没有任何一个参与者能够单独影响市场价格。

（3）国家对于新能源发电项目和 CCER 项目的相关政策在项目寿命期内不会发生大幅度的调整变化，或者变化不会对项目的评估价值产生严重影响。

（4）该项目每年的上网电量和自愿减排量是一个恒定的均值。

（5）市场无摩擦，不存在交易成本、税收及市场流动性等限制。

3.3 CCER 碳减排价值评估

3.3.1 计入期 CCER 交易价格的确定

1. CCER 历史交易价格的确定

在四川联合环境交易所，CCER 碳排放权具有定价点选、柜台交易、大宗交易及电子竞价 4 种交易方式，其中定价点选是交易者最常选择的交易方式，因此最终选择四川联合环境交易所定价点选为交易方式的 CCER 周成交均价。根据计算，2016—2023 年四川联合环境交易所 CCER 年成交均价见表 4。

表 4 2016—2023 年四川联合环境交易所 CCER 年成交均价

变量（指标）	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
x	1	2	3	4	5	6	7	8
成交均价/（元/t）	10.75	7.96	8.83	13.44	12.77	16.22	64.82	72.72

2. CCER 未来交易价格的确定

观察 CCER 历史交易价格（ y ），发现其总体上呈现增长趋势（见图 4），故采用 Excel 的趋势分析对 CCER 未来交易价格进行预测。令 2016 年为 $x=1$ ，以此类推，可以得到 CCER 交易价格变动趋势函数

$$y = 2.6821x^2 - 15.319x + 26.444 \quad (R^2 = 0.90) \quad (9)$$

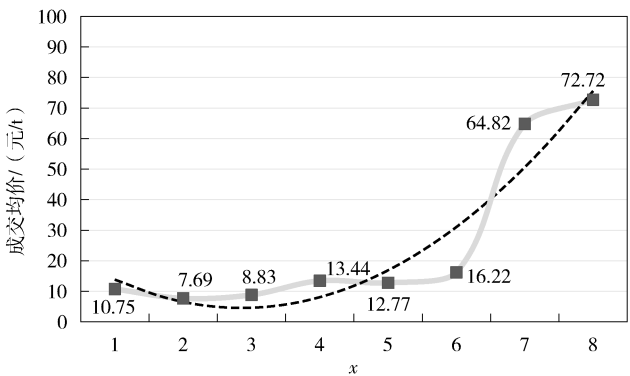


图 4 CCER 年成交均价变动趋势

根据式（9）进行预测，得到 CCER 在 2024—2030 年（ x 为 9~15）的交易价格，见表 5。

3. 计入期 CCER 交易价格的确定

计入期是指项目可以产生减排量的最长时间期限。以 2010 年 1 月 1 日为项目计入期开始时间，伊力更风

电项目选择“可更新的计入期”方式，即每个计入期为 7 年，可更新 2 次^[25]。该项目计入期分别为 2010 年 1 月 1 日—2016 年 12 月 31 日、2017 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日、2024 年 1 月 1 日—2030 年 12 月 31 日。

第一个计入期的 CCER 交易价格可按 2016 年历史成交价格进行替代，确定为 10.75 元/t。第二个计入期的 CCER 交易价格可按 2017—2023 年历史成交价格的平均值进行确定，为 $(7.96 + 8.83 + 13.44 + 12.77 + 16.22 + 64.82 + 72.72) / 7 = 28.07$ （元/t）。第三个计入期的 CCER 交易价格可按预测的未来交易价格的平均值进行确定，为 $(105.82 + 141.46 + 182.47 + 228.84 + 280.57 + 337.67 + 400.13) / 7 = 239.57$ （元/t）。各计入期的 CCER 交易价格见表 6。

3.3.2 项目减排量的确定

根据中环联合（北京）认证中心有限公司出具的《减排量核证报告》，伊力更风电项目第一次减排量备案监测期为 2009 年 7 月 11 日—2011 年 8 月 8 日。由于本项目是新建并网风力发电项目，不考虑排放量和泄漏量，因此 $PE_x = LE_x = 0$ ， $ER_x = BE_x$ 。经过计算，项目监测期（3 年）的核证减排量为 989 700.13tCO₂e（见表 7）。

表 5 2024—2030 年 CCER 交易价格预测结果

变量（指标）	2024 年	2025 年	2026 年	2027 年	2028 年	2029 年	2030 年
x	9	10	11	12	13	14	15
交易价格/（元/t）	105.82	141.46	182.47	228.84	280.57	337.67	400.13

表 6 各计入期的 CCER 交易价格

计入期	计入时间	CCER 交易价格/（元/t）
第一个计入期	2010 年 1 月 1 日—2016 年 12 月 31 日	10.75
第二个计入期	2017 年 1 月 1 日—2023 年 12 月 31 日	28.07
第三个计入期	2024 年 1 月 1 日—2030 年 12 月 31 日	239.57

表 7 监测期核证减排量 (单位: tCO₂e)

年份	上网电量	下网电量	净上网电量	排放因子	基准线排放量	减排量
	EG _{export,x}	EG _{import,x}	EG _{PJ,x}	EF _{grid,CM,x}	BE _x	ER _x
	A	B	C = A - B	D	E = C × D	F = E
2009	182 945. 95	428. 29	182 517. 66	0. 895 875	163 513. 01	163 513. 01
2010	559 127. 73	1 399. 35	557 728. 38	0. 900 075	501 997. 37	501 997. 37
2011	354 622. 00	11 177. 92	353 504. 08	0. 917 075	324 189. 75	324 189. 75
合计					989 700. 13	989 700. 13

根据广州赛宝认证中心服务有限公司于 2014 年备案的《内蒙古巴彦淖尔乌兰伊力更 300MW 风电项目审定报告》，伊力更风电项目建成后，预计每年的减排量均为 759 771tCO₂e（见表 8）。

表 8 计入期每年减排量估算 (单位: tCO₂e)

计入期	年基准线排放量	年排放量	年泄露排放量	年减排量
第一个计入期	759 771	0	0	759 771
第二个计入期	759 771	0	0	759 771
第三个计入期	759 771	0	0	759 771
年均值	759 771	0	0	759 771

3.3.3 折现率的确定

目前，我国发电行业采用基准内部收益率作为行业标准。CCER 额外性论证要求发电行业的基准收益率不高于 8%，满足额外性条件的风力发电项目需要严格遵守该准则。因此，采用 8% 的行业基准收益率作为 CCER 减排收益的净现值折现率。

3.3.4 CCER 碳减排价值评估

前文提到伊力更风电项目固定资产投资为 256 912 万元，总投资额为 271 391 万元。从数据可以看出，固定资产投资占总投资额的比例为 94.67%，而固定资产多为初期一次性投入，因此 I_0 可确定为 2 713 910 000 元。项目后期涉及的维护成本及 CCER 交易成本等因数值远远小于其收益，忽略不计。代入项目减排量及各个计入期的 CCER 交易价格，分别对 3 个计入期的 CCER 碳排放权收益进行折现，得到 CCER 碳减排价值

$$\begin{aligned} V_{\text{减排}} &= -I_0 + \sum_{x=1}^{21} \frac{V_{\text{ER}}}{(1+r)^x} \\ &= -I_0 + \sum_{x=1}^{21} \frac{\text{ER}_x \times P_{\text{CCER}}}{(1+r)^x} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= -271\,391\,000 + \sum_{x=1}^7 \frac{759\,771 \times 10.75}{(1+8\%)^x} + \\ &\quad \sum_{x=8}^{14} \frac{759\,771 \times 28.07}{(1+8\%)^x} + \sum_{x=15}^{21} \frac{759\,771 \times 235.97}{(1+8\%)^x} \\ &= -271\,391\,000 + 43\,041\,919 + 64\,787\,895.2 + 304\,323\,826 \\ &= 140\,762\,640.2(\text{元}) \end{aligned}$$

通过计算，得出伊力更风电项目的 CCER 碳减排价值为 140 762 640.2 元。

3.4 CCER 碳期权价值评估

我国交易试点的 CCER 交易价格具有差异，导致其持有者获得的收益具有不确定性：北京绿色交易所自 2015 年 6 月以来 CCER 历史交易均价为 42.23 元/t；上海环境能源交易所自 2018 年 9 月以来 CCER 历史交易均价为 31.2 元/t；广州碳排放权交易所履约 CCER 历史交易均价为 33.28 元/t，非履约 CCER 历史交易均价为 21.95 元/t；四川联合环境交易所自 2016 年 12 月以来 CCER 历史交易均价为 33.52 元/t。

价格的波动带来收益或成本的不确定性，从而赋予 CCER“期权”的特性，即企业能够在未来某个时期以某一确定价格出售或购买温室气体排放权指标，将 CCER 碳期权视为欧式看涨期权。本文默认 CCER 碳期权满足 B-S 期权定价模型的 7 个假设条件，并采用 B-S 期权定价模型对 CCER 碳期权价值进行评估。

3.4.1 当前价格 S 的确定

当前价格 S 选择评估时刻的 CCER 碳减排市场的碳价。由于 2013 年以来各交易试点才开始运行，2009 年 12 月 31 日未有任何交易试点形成 CCER 交易价格，故假设当前价格 S 为 10 元/t。

3.4.2 执行价格 X 的确定

结合上文分析并根据趋势分析方法确定未来收益期执行价格：2010—2016 年的执行价格 $X_{2010} \sim X_{2016}$ 为 10.75 元/t，2017—2023 年的执行价格 $X_{2017} \sim X_{2023}$ 为 28.07 元/t，2024—2030 年的执行价格 $X_{2024} \sim X_{2030}$ 为 235.97 元/t。

3.4.3 波动率 σ 的确定

根据历史 CCER 碳价交易数据，选取四川联合环境交易所披露的 2016 年 12 月 16 日—2023 年 12 月 31 日的 CCER 周成交均价数据，计算得到周波动率 $\sigma_{\text{周}}$ 为 0.460 6。根据周波动率 $\sigma_{\text{周}}$ 计算年波动率 $\sigma_{\text{年}}$ ，公式为

$$\sigma_{\text{年}} = \sigma_{\text{周}} \times \sqrt{239/7} \quad (10)$$

将 $\sigma_{\text{周}}$ 代入式 (10)， $\sigma_{\text{年}} = 0.460 6 \times \sqrt{\frac{239}{7}} = 2.69$ 。

3.4.4 无风险利率 r 的确定

选择 2023 年 12 月 31 日的 10 年期到期国债收益率 2.633 6% 作为无风险利率，因此 $r = 0.026 336$ 。

3.4.5 期权到期日 T 的确定

伊力更风电项目共 21 年的计入期， T 为 1 ~ 21 年。

3.4.6 CCER 碳期权价值评估

根据 B-S 实物期权定价模型，计算得到每年 CCER 碳期权的价值 $C_1 \sim C_{21}$ ，结果见表 9。

表 9 每年 CCER 碳期权价值

T	1	2	3	4	5	6	7
d_1	1.33	1.90	2.33	2.70	3.02	3.31	3.58
d_2	-1.36	-1.91	-2.33	-2.69	-3.00	-3.28	-3.54
$N(d_1)$	0.91	0.97	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
$N(d_2)$	0.09	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
$C_1 \sim C_7$	8.17	9.42	9.80	9.93	9.77	9.99	10.00
T	8	9	10	11	12	13	14
d_1	3.70	3.94	4.16	4.38	4.58	4.78	4.97
d_2	-3.91	-4.14	-4.35	-4.55	-4.74	-4.92	-5.10
$N(d_1)$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N(d_2)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$C_8 \sim C_{14}$	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
T	15	16	17	18	19	20	21
d_1	4.95	5.13	5.30	5.47	5.64	5.80	5.95
d_2	-5.48	-5.64	-5.79	-5.94	-6.09	-6.24	-6.38
$N(d_1)$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$N(d_2)$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$C_{15} \sim C_{21}$	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00

由于年减排量为 759 771 tCO₂e，因此 CCER 碳期权价值为

$$\begin{aligned} V_{\text{option}} &= \sum_{x=1}^{21} \text{ER}_x \times C_x \\ &= 759 771 \times (C_1 + C_2 + \cdots + C_{21}) \\ &= 759 771 \times (8.71 + 9.42 + \cdots + 10.00) \\ &= 759 771 \times 207.29 \\ &= 157 492 606.1 (\text{元}) \end{aligned}$$

3.5 CCER 碳排放权整体价值评估

$$\begin{aligned} V_{\text{CCER}} &= \sum_{x=1}^{21} \frac{V_{\text{ER},x}}{(1+r)^x} + V_{\text{option}} \\ &= 140 762 640.2 + 157 492 606.1 \\ &= 298 255 246.3 (\text{元}) \end{aligned}$$

综上所述，CCER 碳排放权价值由碳减排价值和碳期权价值共同构成。根据计算，碳减排价值为 1.41 亿元，碳期权价值为 1.57 亿元，进而得出 CCER 碳排放权总价值为 2.98 亿元。其中，CCER 交易所带来的潜在期权价值在该项目整体价值中的占比达到 52.8%，可知 CCER 碳期权价值高于碳减排价值。

4 结语

风力发电项目通过建设风力发电机组进行发电，相较于火力发电具有碳减排效果。风电项目的减排效果通过产生的 CCER 碳排放权数量进行衡量。CCER 碳排放权作为碳市场的基础交易产品，具有两部分价值，分别为碳减排价值和碳期权价值。在评估模型的选择上，采用收益法，再利用趋势分析法，预测未来 CCER 交易价格，并构建碳减排价值评估模型，对风电项目产生的 CCER 碳减排价值进行评估；采用 B-S 实物期权法对 CCER 碳期权价值进行评估。考虑到内蒙古风能资源十分丰富，选择伊力更风电项目作为案例。利用碳排放权价值评估模型进行计算，得到评估结果：伊力更风电项目的 CCER 碳排放权价值为 2.98 亿元。

运用风电项目价值评估模型对伊力更风电项目价

值进行评估的过程,体现出碳资产的实物期权属性十分显著,也在一定程度上证实了自愿碳减排潜在的期权价值在风电项目价值评估中是不可忽视的。这一结果表明,在 CCER 碳排放权价值体系中,碳期权价值占据重要地位,其重要性不容小觑。相较于碳减排价值而言,碳期权价值具有更为显著的影响力和潜在能量。这一特性在碳排放权的综合评估与实际应用中应给予充分重视和深入考量。

参考文献

- [1] 赵文会,李阮.考虑碳交易收益的风电项目价值评估[J].生态经济,2018,34(8):19-24.
- [2] 巨烨,王侃宏.碳资产交易:CCER项目开发与管理[J].中国财政,2023(11):84-85.
- [3] 吕喆.试析碳排放权交易的会计核算:基于巨化股份CDM项目[J].财会月刊,2012(34):61-63.
- [4] 田斌.内蒙古乌兰伊力更风力发电项目前评价[D].保定:华北电力大学,2010.
- [5] 高琨.乌兰伊力更风电建设项目经济效益评价与环境影响分析[D].保定:华北电力大学,2012.
- [6] 董军,冯天天.内蒙古乌兰伊力更风电场项目后评价研究[J].网友世界,2014(5):115,117.
- [7] 王素娟,周遵凯,肖宣炜.福建省陆上风电项目投资经济效益分析[J].能源与环境,2021(3):43-44,47.
- [8] 董烁.企业核证自愿减排量(CCER)碳排放权价值评估[D].青岛:青岛理工大学,2022.
- [9] 江瑞.基于蒙特卡罗模拟法的中国核证自愿减排量(CCER)碳排放权价值评估研究[D].重庆:重庆理工大学,2018.
- [10] 郭斐然.基于B-S实物期权法的CCER碳排放权价值评估:以神木风电场项目为例[D].武汉:中南财经政法大学,2022.
- [11] 许猛,黄瀚坤,胡雨聪,等.CCER现行体系及未来发展趋势[J].广州化工,2024,52(17):16-18,26.
- [12] BENZ E, TRÜCK S. Modeling the price dynamics of CO₂ emission allowances [J]. Energy Economics, 2009, 31(1): 4-15.
- [13] PAOLELLA M S, TASCHINI L. An econometric analysis of emission allowance prices [J]. Journal of Banking and Finance, 2008, 32(10): 2022-2032.
- [14] GORECKI P K, TASCHINI L. EU climate change policy 2013-2020: using the clean development mechanism more effectively [J]. Papers, 2009, 38(11): 7466-7475.
- [15] DASKALAKIS G, PSYCHOYIOS D, MARKELLOS R N. Modeling CO₂ emission allowance prices and derivatives: evidence from the European trading scheme [J]. Journal of Banking & Finance, 2009, 33(7): 1230-1241.
- [16] 王伟,潘泽瀚.基于Garch模型碳排放期权定价方法研究[J].中国外资,2014(2):131-132.
- [17] 黄杉.基于GARCH和分形布朗运动的碳期权定价研究[D].保定:华北电力大学,2021.
- [18] 李天雨.基于B-S模型在碳排放期权定价中的应用研究[D].北京:商务部国际贸易经济合作研究院,2022.
- [19] 赵小攀,李朝红,任晓鸽.基于Black-Scholes期权定价模型的碳排放权定价[J].商业会计,2016(7):28-31.
- [20] 汪晓芬.碳排放权定价研究[D].南昌:华东交通大学,2013.
- [21] 郝越.碳排放权价值评估中市场比较法应用研究:以我国碳市场试点为例[D].上海:上海财经大学,2023.
- [22] QIAO N, ZHANG C, ZHANG J S, et al. Research on the development and management of CCER methodology in Ningxia power grid enterprises: proceedings of the 2023 4th international conference on management science and engineering management (ICMSEM 2023) [C/OL]. Paris: Atlantis Press, 2023 [2024-12-25]. <https://www.atlantis-press.com/proceedings/icmsem-23/125992617>.
- [23] 朴哲勇,孟涛,郑雯元,等.碳交易视角下企业碳资产价值评估研究[J].价格理论与实践,2023(8):81-86.
- [24] 王嘉瑶.GARCH与实物期权法的互联网企业价值评估研究[J].商业会计,2020(4):63-67.
- [25] 夏冰.每吨拍到106元 全国首单“蓝碳”溢价逾两倍[N].每日经济新闻,2023-03-06(008).

收稿日期: 2025-01-08

作者简介:

简克蓉,女,1978年生,博士研究生在读,高级经济师,主要研究方向:低碳经济。

施茹芸,女,1999年生,硕士研究生在读,主要研究方向:金融资产评估。