

碳排放权价格评估方法及实证研究

廖志高^{1,2} 许京怡¹ 简克蓉^{1,2}

(1. 广西科技大学经济与管理学院, 广西柳州 545006;

2. 广西工业高质量发展研究中心, 广西柳州 545006)

【摘要】：为更好地解决温室气体排放造成的环境污染问题，碳排放权交易成为各国控制二氧化碳排放的手段。中国碳排放权价格与国际上其他交易市场价格相比显著偏低，对碳排放权进行有效评估至关重要。论文首先对传统碳排放权评估方法适用性进行分析，通过引入碳排放配额中的公平原则提出改进碳排放权价格的影子价格模型，并以湖北省碳排放交易市场为例，对碳排放权价格进行预测，影子价格远高于国内真实值，与国际碳排放权价格相当，可以作为未来碳排放权定价的参考值。

【关键词】：碳排放权 影子价格 价值评估 公平原则

【中图分类号】：F062.2 **【文献标识码】：**A **【文章编号】：**1671-4407(2022)12-039-09

1 背景介绍

全球气候变暖现象受到了世界各国的关注，为控制温室气体排放浓度并减少气候剧烈变动对人类健康的危害，联合国相继制定并通过了《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》。其中，《京都议定书》提出建议，发达国家应当通过实践减少温室气体排放，发展中国家虽然不需要履行碳减排的义务，但是于2012年后也同样具有节能减排的责任。在碳排放权交易市场建设方面，欧盟成立了体制最为成熟的排放交易体系，美国在应对温室气体排放问题方面建立了自愿性交易机制——芝加哥气候交易所等。2003年澳大利亚成立了区域性的碳交易市场——新南威尔士减排体系。2015年通过的《巴黎协定》是对《京都议定书》的完善，同时也是继《京都议定书》后第二份有法律约束力的气候协议。至此，碳排放权的发展被各国所认可，进一步有效控制碳排放成为各国的努力目标。但由于各国国情存在差异，制度各具特色，各国所承担的减排责任与压力也存在差异，建立全球统一的碳排放权交易市场十分艰难。

从2007年开始，全球温室气体排放量中，中国占比最大。为进一步推动碳排放权交易市场的发展，中国于2011年发布了《关于开展碳排放交易试点工作的通知》，开始成立七个碳排放权交易试点，2016年建立了福建省碳排放权交易试点，成立了第八个碳排放权交易试点，并于2017年开始建立全国统一的碳排放权交易市场，中国碳排放权交易市场将从起步阶段步入成熟阶段。随着工业化发展、城市化发展的脚步进一步加快，中国能源消耗量进一步增大，2019年碳排放量继续上涨，碳排放量一直难以下降。中国作为发展中国家，一直积极践行节能减排活动，节能减排项目有自愿参与和强制性参加两种。截至2020年8月，

¹基金项目：2017年广西哲学社会科学基金项目“碳交易对西部制造业的影响及对策研究”（17FJY007）

第一作者简介：廖志高，博士，教授，研究方向为宏观经济管理与可持续发展、决策理论和方法。E-mail: liaozhigao@126.com

中国交易试点城市交易覆盖包括钢铁、水泥等在内的 20 多个行业，覆盖企业近 3000 家，试点城市成交量总计 4 亿多吨，成交额总计超过 90 亿元，各交易试点基本市场履约率达到 100%。碳排放权交易市场逐步渗入各行业，提高了试点城市温室气体减排的能力，也提高了各试点的工作效率。对于纳入的控排企业，必须完成国家的碳排放指标，践行自身的节能减排义务。2021 年 1 月 1 日起至 2021 年 12 月 31 日全国首个履约周期启动，中国从国家层面对应控排企业，碳排放权交易市场迎来高峰。新的交易管理办法文件也于 2021 年 2 月 1 日起正式施行。

目前，全球设立碳排放权交易市场的城市区域的国内生产总值（GDP）占全球 GDP 比重超过 50%，为了应对全球气候变化，各国政府纷纷制定碳减排政策。根据未来趋势分析，碳排放权交易市场将超越石油以及黄金交易市场，成为世界第一交易商品，成为经济可持续发展问题中的关键话题。发达国家由于对碳排放权的研究起步较早，掌握定价的主导权，也使得碳排放权交易市场的发展在发展中国家受到一定程度的限制。同时，以碳排放权为主体及其衍生产品组成的碳排放权交易场所，时常出现价格异常波动的现象，因此，合理评估碳排放权是当前研究的热点问题。

碳排放权交易市场发展初期多数研究集中于碳排放价格机制制定，目前资产评估协会也在评估方法领域进行探索，由于利用传统评估方法评估碳排放权有各自的不适应性，研究成果大多对传统评估方法进行适当的改进，由此进行评估。梁美健等^[1]认为碳排放权价值评估应当使用市场法，但前提是特征因素进行量化与修正。潘露^[2]在界定碳排放权属于无形资产的基础上，对比分析三大传统评估方法，认为对碳排放权性质的不同界定应当采取不同的评估方法，但从生产要素角度出发，利用超越对数生产函数计算相比传统评估方法更具有合理性。

而数学建模方法对于新兴的碳排放权资产评估具有优势。张立君^[3]以深圳能源为例，提出利用实物期权法与成本法对比分析，评估碳排放权的价值。张丹^[4]利用 GARCH 模型计算的收益波动率提高了计算结果的准确性，并对 B-S 模型进行修正然后对碳排放权价值进行评估。焦金金^[5]以北京碳排放权交易市场为案例进行分析，进一步探究碳排放权的内在价值，对工业行业以及交通运输的碳排放权价格分开核算，认为不同行业的碳排放权价格存在差异。陈小红^[6]从质押融资的角度出发，利用收益法结合蒙特卡洛模拟法预测碳排放权价格，运用市场法评估交易量大且价格稳定的碳排放权。孔祥云^[7]认为定价方法是任何市场定价机制建设和发展的核心，利用布莱克-斯科尔斯-墨顿模型评估碳排放权价格。饶欣^[8]以广东省为例构建方程模型，认为碳排放权价格具有聚集性与杠杆效应。黄岚^[9]以竹林碳汇项目为案例，利用改进的 B-S 期权模型更符合碳排放权交易市场发展状况。王昕婷等^[10]以火电企业为例，构建短期碳生产函数，验证模型的适用性。

利用影子价格模型对碳排放权评估的思路源自对排污权的评估，对碳排放权价格以及政府制定的环境保护政策具有指引作用。胡民^[11]认为在初次分配时影子价格有利于帮助政府定价，同时能够提高二级市场的定价效率。林云华^[12]认为在完全竞争市场的前提下，影子价格使用更为合理，同时在成熟市场交易体系下能够较为有效地进行碳排放权交易。王豫^[13]认为在不考虑价值波动以及时间因素的影响下，影子价格模型的制定在于对实际的交易价格产生指引作用。郭文和黄可欣^[14]利用影子价格结合 SBM 对偶规划模型，评估七个碳排放权交易试点城市的碳排放权价格，发现各城市的影子价格呈现逐步上升的状况，节能减排的难度也逐步上升，表明中国碳排放权价值具有空间异质性，同时各交易试点城市的交易价格较低，远远偏离其内在价值。

虽然国外碳排放权交易市场发展较为成熟，具备使用传统评估方法的前提条件，但过往研究学者往往将碳排放权定义为金融资产，使用期权模型进行评估。Liao 等^[15]以均衡价格作为切入点，认为影子价格模型适用于碳排放权的均衡价格评估。Daskalakis 等^[16]借鉴排污权，认为碳排放权具有在未来带来现金流的

潜力，应当使用期权法进行评估。Chevallier^[17]认为利用期权的方法评估碳排放权与传统方法相比更具优势。Atsalakis^[18]认为利用混合模糊神经网络形成的 PATSOS 方法与闭环反馈神经网络和自适应神经模糊推理系统两种方法相比，对碳排放权价格的预测结果更为准确。

综上所述，国外研究学者对碳排放权评估方法选择时，除了选择传统的评估方法进行评估外，大多通过建立模型进行实证分析，而由于国内碳排放权交易市场处于快速发展阶段，资产评估协会也在为挖掘碳排放权内在价值探索更为合适的方法。由于我国碳排放权交易市场不够成熟，不满足传统评估方法中自愿公平市场的前提条件，对于碳排放权资产而言我国没有完整的评估体系，起步较晚，研究不足，评估模型不够完善。国内外环境污染问题日趋严峻，碳排放权交易市场未来发展极具竞争力，由此，对于排放权评估问题，碳排放权模型建立还有待进一步研究完善。大多数学者认为我国碳交易价格与国际相比显著偏低，确认一个合理的碳排放权价格尤为重要，其有利于进一步促进我国碳排放权交易市场的完善。

2 传统碳排放权评估方法适用性分析

针对碳排放权作为新型资产的特殊性，目前评估协会还未对碳排放权规定统一的评估方法，并且每一种评估方法都具有各自的使用前提。本节对碳排放权的传统评估方法适用性进行分析。

2.1 成本法

成本法是以重置成本、贬值核算为基础的方法。重置成本是以评估时间节点的技术水平以及经济物价为评估基准，在此前提条件下，重新购买或者自行生产相同或者相似的资产所需要耗费的现金或现金等价物。要考虑现有条件下资产的重置成本，而且需要关注其贬值情况。其计算公式为：

$$\text{评估对象} = \text{重置成本} - \text{实体性贬值} - \text{功能性贬值} - \text{经济性贬值} \quad (1)$$

碳排放权资产具有特殊性，不能通过劳动量化来衡量其价值，国家政策的变化以及企业的参与度都会对碳排放权价格高低产生影响，难以量化。第一，从政府免费分配取得碳排放权与从二级市场购买取得碳排放权在重置成本的计量上存在一定的差异。当大部分碳排放权资产免费分配时，企业属于无偿取得，企业难以核算其取得成本。第二，碳排放权对于工业企业与其他行业来说，不同经营主体对其资产价值定义存在差异。第三，成本法需要被评估资产具有完善的成本资料，而碳排放权的成本数据在前期发展过程中存在较大缺失。

成本法中的贬值因素包括三个方面，第一，实体性贬值是资产磨损折旧等因素造成自身的贬值，功能性贬值是指资产具有功能性、技术性的落后，经济性贬值是指资产受外界经济环境造成的影响。碳排放权的贬值主要来自外部因素中的经济性贬值，导致经济性贬值的外部因素较为庞杂，难以确定。另外，成本法对于评估资产的时间价值具有一定的缺陷性，对于衡量碳排放权的内在价值较为困难，往往需要与其他方法协同使用更具有说服力。

2.2 收益法

利用收益法评估碳排放权，关键在于衡量碳排放权资产带来的未来现金流，对资产的未来预期时间内的收益进行估计。收益法的使用具有三个前提条件，第一，被评估的资产的未来收益是可以进行预测并能用货币衡量的。第二，资产的拥有者获得预期收益并承担的风险也是可以预测并能用货币衡量的。第三，

被评估资产预期未来可以获取收益的年限是可以预测的。

利用收益法评估碳排放权存在以下局限，首先，在衡量碳排放权价值的同时应当考虑其产生协同效应，碳排放权是企业的重要资产之一，同时碳排放权也会与企业的其他生产因素结合在一起产生间接收益，这一部分价值是难以衡量的。其次，运用收益法对碳排放权进行价值评估，难以考虑到碳排放权所具有的政策属性，没有考虑到区域、行业等因素对其价值有较大影响。最后，在评估碳排放权时，难以选择准确的折现率与资本化率，对结果的准确度会造成影响。其计算方式如下：

$$\begin{aligned} \text{被评估对象的价值} = & \frac{\text{第1年的预测现金流}}{(1+\text{折现率})} + \\ & \frac{\text{第2年的预测现金流}}{(1+\text{折现率})^2} + \dots + \\ & \frac{\text{第N年的预测现金流}}{(1+\text{折现率})^N} \end{aligned} \quad (2)$$

将碳排放权定义为无形资产属性时，使用收益法与另外两种传统方法相比更容易被大众所接受，但碳排放权作为企业的资产之一如何进行现金流预测，如何界定折现率都较为困难。由此采用此方法进行评估，缺乏普遍适用性。

2.3 市场法

市场法是选取与评估对象具有可比性的案例进行分析，通过对相似对象资产的调整分析，得出评估对象的价值。根据市场法的评估公式（3）所示，某评估对象拥有公开活跃的交易市场以及可比的交易案例是市场法应用的重要前提条件。评估结果需要遵循市场的发展规律，评估结果较为直观。碳排放权资产的市场法评估中，关键在于寻找合适的交易案例，以目前的碳排放权市场交易现状来看，市场中的交易案例数量适中但差异极大，可比性较弱，采取何种方式对碳排放权交易案例之间的差异进行调整还难以定论。

$$\begin{aligned} \text{评估对象价值} = & \text{参照物价值} \pm \text{调整差异 } 1 \pm \\ & \text{调整差异 } 2 \pm \text{调整差异 } 3 \pm \dots \pm \\ & \text{调整差异 } n \end{aligned} \quad (3)$$

虽然中国于 2017 年开始建立统一的碳交易市场，但与成熟的碳交易市场相比还有一定的差距，各地的行业、市场政策存在差异，市场内的行政管理制度导致碳交易市场的市场化条件有限，除了碳交易试点城市，国内碳交易市场较不满足其方法的使用前提，但随着碳交易市场的逐步完善，市场法在未来也将会被广泛使用。

3 改进碳排放权价格影子价格模型

中国碳交易市场处于未完善阶段，数据资料难以获得，采取传统评估方法说服性较差，本文选取影子价格方法对碳排放权价格进行评估，以碳排放权的边际产出值计算碳排放权影子价格，为其定价提供参考。影子价格的计算主要是由两种方法所组成：第一种以经济学中的边际理论为基础，建立改进的生产函数经济计量模型——超越对数生产函数，计算碳排放的边际生产力。第二种方式利用了数学理论中的线性规划

理论，对区域内最优利用前提下碳排放权的价格进行估计。

第一种方式，资本、劳动力、生产力三个变量之间关系，是传统生产函数所考虑的主要因素，超越对数生产函数是在过往研究基础上，加入碳排放投入变量。超越对数生产函数对原始的生产函数进行改进，包括投入因素的交叉项、对数项等，包容性更强，同时在原始资本和劳动力投入的基础上加入碳排放变量。考虑将碳排放作为投入变量是因为，工业企业为了扩大生产，很可能会产生大量二氧化碳排放，生产过程中二氧化碳等温室气体的排放必然会对环境造成破坏，国家为控制温室气体排放，减轻环境的承载压力，必然会对企业排污行为进行限制，此时碳排放则会给经济生产带来负外部性的影响，由此会对生产力产生影响。

第二种方式，传统的影子价格模型中的线性规划函数计算所有生产要素共同配合下的最大生产力，没有考虑总量的公平分配，改进的线性规划函数建立在碳配额公平分配的基础上，加入公平原则计量模型，计算某区域内一单位的碳排放权的使用给区域内带来的生产总值的贡献大小，从而为企业是否使用碳排放权提供参考。在线性规划的基础上增加公平分配原则的优势在于，中国正在全面建立统一的碳交易市场，若一味考虑高效节能减排，则忽略了不同地区的经济发展差异，尤其对于经济发展后梯队的区域，生产压力加上减排压力，往往会对其经济发展产生不利的影响。

3.1 改进的生产函数—超越对数生产函数

根据克拉克提出的影子价格定义，在其他生产因素不变的基础上，对其中一生产要素增加一单位的投入带来的经济产量作为此生产要素的影子价格。计算影子价格也是为了将碳排放权的边际生产力量化，本文利用超越对数生产函数是对生产函数的改进研究。

采取改进的超越对数生产函数模型，选取与过往研究成果中相类似的参数，在考虑固定资产和劳动力的基础上，探究碳排放量与生产总值之间的数据关系，本文认为污染物排放是经济发展中不可忽视的问题，环境问题也同属于经济发展问题，碳排放量与资本、劳动力一样都是企业正常生产经营的重要部分之一。同时，如今温室效应问题受到广泛关注，二氧化碳与劳动力、资本、固定资产投入一样都可以作为重要的生产要素，由此将二氧化碳因素引入生产函数模型，计算碳排放权的边际生产力——即增加一单位的二氧化碳排放对区域内生产总值的增加量。

将二氧化碳、资本与劳动一同作为自变量，固定资产在日常的生产经营中给予劳动力支持作用，而劳动力要素是生产经营正常开展的必不可少条件，各行各业在经济发展过程中不可避免会由能源消耗带来二氧化碳的排放，同时，为了践行保护环境的大国担当，在发展经济的同时理应考虑二氧化碳等温室气体的排放额度，将GDP作为产出变量，通过模型的回归分析，得出相应的参数值，反映每增加一单位二氧化碳的排放对GDP产生的影响。与传统的生产函数相比，超越对数生产函数模型具有更好的灵活性：

$$\begin{aligned} \ln Y_t = & \beta_K \ln K_t + \beta_L \ln L_t + \beta_E \ln E_t + \beta_{KL} \ln K_t \ln L_t + \\ & \beta_{LE} \ln L_t \ln E_t + \beta_{KE} \ln K_t \ln E_t + \beta_{KK} (\ln K_t)^2 + \\ & \beta_{LL} (\ln L_t)^2 + \beta_{EE} (\ln E_t)^2 + \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\ln Y_t$ 是对 GDP 变量第 t 年的对数化处理， $\ln K_t$ 是对固定资产变量第 t 年的对数化处理， $\ln L_t$ 是对劳动力变量第 t 年的对数化处理， $\ln E_t$ 是对二氧化碳排放量第 t 年的对数化处理， $\ln K_t \ln L_t$ 是对固定资产变量与劳动力变量对数化处理后第 t 年的交叉项处理， $\ln L_t \ln E_t$ 是对劳动力变量与二氧化碳排放量对

数化处理后第 t 年的交叉项处理, $\ln K_t \ln E_t$ 是对固定资产变量与二氧化碳排放量对数化处理后第 t 年的交叉项处理, $(\ln K_t)^2$ 是对固定资产变量第 t 年对数化的平方处理, $(\ln L_t)^2$ 是对劳动力变量第 t 年对数化的平方处理, $(\ln E_t)^2$ 是对二氧化碳排放量第 t 年对数化的平方处理, ϵ 表示随机误差项, β 表示需要估计的参数。对自变量二氧化碳进行求导, 计算二氧化碳排放量对于 GDP 的影响, 求导公式如下:

$$\frac{dY_t}{dE_t} = \frac{Y_t}{E_t} (\beta_E + \beta_{KE} \ln K_t + \beta_{LE} \ln L_t + 2\beta_{EE} \ln E_t) \quad (5)$$

3.2 改进的线性规划函数

对碳排放权的边际生产力进行估测, 计算碳排放权在区域内的价值贡献, 再利用影子价格中的第二种计算方式——线性规划函数, 进一步估测碳排放权的具体影子价格。线性规划函数被广泛使用在资源定价中, 往往将其与线性规划问题联系在一起, 间接计算资源的利润。

在计算影子价格时, 第一, 需要对区域内的碳排放总量进行限制, 才能体现碳排放权的资源稀缺性特点; 第二, 需要设定相关的假设条件才能使得结果更具说服性。其中假设条件如下:

假设条件 1: 政府对某公司限制其碳排放额度, 并且该地已经具备一定的碳排放权交易市场的前提条件, 假设某地二氧化碳的排放总量为 Q, 该地区共存在 n 个二氧化碳排放企业。

假设条件 2: 该地区的产值收益率为 A_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$), 年产值分别为 B_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$), 化石燃料燃烧会产生温室气体排放, 由于企业的生产总值与化石燃料燃烧成一定比例关系, 自身产量与碳排放量总是呈正比, 设定比例系数为 r, 由此 $Q=r \times B_i$ 。

根据研究对象的选取角度, 从企业角度出发, 设定不同的目标函数, 企业在向环境排放污染物时, 需要对排放总量进行控制, V 表示该区域内最高总产值, 使用拉格朗日乘子法对约束函数求偏导, 得出拉格朗日乘子 λ 即为某一区域内的影子价格。碳排放权价格由前文所述受到众多因素的影响。

$$\max V = \sum_{i=1}^n (A_i \times B_i) \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_i \leq Q \quad (7)$$

$$L = \sum_{i=1}^n (A_i \times \frac{Q_i}{r}) + \lambda(Q - \sum_{i=1}^n Q_i) \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{r} - \lambda n = 0 \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{r} = \frac{\bar{A}}{r} \quad (10)$$

通过以上公式分析得出, 碳排放权的评估影子价格应当等于产值收益率与碳排放强度的比值, 企业的生产经营状况影响碳排放权影子价格。

3.3 公平原则

在利用上述影子价格中第二种方式——线性规划函数计算碳排放权价值时，碳排放量作为重要变量选取极为重要，在计算碳排放量时考虑碳排放权配额的公平分配原则，将区域内的历史情况、人口规模以及经济状况考虑在内，兼顾碳排放权配额的公平性。最终将以上三个原则计算结果均值作为最终的碳排放量。历史平均原则的计算公式如下：

$$C_i = C \times \frac{C_i}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (11)$$

式中：C 表示全国碳排放量， C_i 表示湖北省碳排放量， C_j 表示目标年份碳排放量。

人口平均原则表示按照某区域内人口数量与全国人口数量的占比进行碳排放量分配。将人口数作为重要指标进行碳排放权均匀分配，人口平均原则计算公式为：

$$C_i = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} \times C \quad (12)$$

式中： P_i 表示某区域内的总人口数。

支付能力平均原则中以 GDP 作为重要的指标进行碳排放量指标区域分配，支付能力平均原则公式如下：

$$C_i = C \times \frac{P_i \left(\frac{GDP_i}{P_i} \right)^{-a}}{\sum_{j=1}^n P_j \left(\frac{GDP_j}{P_j} \right)^{-a}} \quad (13)$$

式中： GDP_j 表示 j 区域内的 GDP， a 的取值范围为 0~1，根据前人研究成果多选取 0.3 以及 0.5 作为 a 值，综合分析研究成果得出 a 取 0.5 结果更符合实际情况。

4 实证研究

本节以湖北省碳交易试点作为案例进行实证分析，通过影子价格模型对碳排放权价格进行估测。第一，采取超越对数生产函数的方式，得出每增加一单位二氧化碳的排放对湖北省 GDP 产生的影响，更有利于对资源的合理配置。第二，采取线性规划函数结合公平原则的方式，得出 2014—2017 年度湖北省碳排放权影子价格，并将影子价格与实际价格进行对比分析。

4.1 评估市场背景

湖北省位于中国的中部地区，根据 2019 年中国百强城市排名，湖北省省会武汉市位居全国前十，根据湖北省碳交易网最新数据显示，由于新型冠状病毒对生产造成的影响，2020 年第一季度全国减排量下降 11%，根据全国的统计数据，所有省份中湖北省贡献最大，其碳排放权交易市场规模全国第一。2019 年单位 GDP 资源消耗量目标为 2%，减排目标基本完成。2020 年的碳减排目标为二氧化碳排放量下降目标接近于 20%。

截至 2020 年年底，湖北省碳排放权成交总量 7803.7 万吨，占全国市场 32.9%，碳成交量与成交额居于全国首位，能源总量较大，其中省会城市武汉作为国家物流枢纽，工业生产保持稳定增长，节能减排工作稳步推进。但湖北省内经济结构发展依旧存在不平衡的现象，在未来的发展中需要投入大量减排技术成本，中国的温室气体减排同样需要各省份的共同努力。

根据湖北省 2016—2018 年任一年综合能耗 1 万吨标准煤及以上的工业企业碳排放核查的结果，确定 373 家企业作为 2019 年度纳入碳排放配额管理的企业。涉及电力、热力及热电联产、钢铁、水泥、化工等 16 个行业。2019 年纳入企业碳排放配额的总量为 2.7 亿吨。

4.2 超越对数生产函数

4.2.1 数据选取

由于二氧化碳排放量数据获取结果截至 2017 年，由此本文选取 1997—2017 年的相关数据，劳动力数量选取就业人口数量作为代表，其中，GDP、固定资产投资以及就业人口数量选自湖北省统计局，二氧化碳排放量数据来自 CEADS 数据库（表 1）。将劳动力数量、固定资产投资以及二氧化碳排放量作为投入变量，将 GDP 产值作为产出变量。为了减小数据间的多重共线性影响，对选取的数据进行对数化处理（表 2）。

表 1 建模数据选取表

年份	劳动力数量/万人	固定资产/亿元	GDP/亿元
1997	3311.20	1083.60	2856.47
1998	3328.20	1231.10	3114.02
1999	3358.10	1302.17	3229.29
2000	3384.90	1421.55	3545.39
2001	3414.50	1551.75	3880.53
2002	3443.00	1695.22	4212.82
2003	3476.00	1883.59	4757.45
2004	3507.00	2356.38	5633.24
2005	3537.00	2834.75	6590.19
2006	3564.00	3572.69	7531.80
2007	3584.00	4534.14	9451.39
2008	3607.00	5798.56	11497.46
2009	3622.00	8211.85	13192.14
2010	3645.00	10802.69	16226.94
2011	3672.00	12935.02	19942.45
2012	3687.00	16504.17	22590.89
2013	3692.00	20753.91	25378.01
2014	3687.50	25001.77	28242.13
2015	3658.00	29191.06	30344.00
2016	3633.00	29503.88	33353.00
2017	3610.00	31872.57	37235.00

表 2 1997—2017 年数据对数化处理表

年份	lnEt	lnLt	lnKt	lnLt lnKt	lnLt lnEt	lnKt lnEt	$(\ln Kt)^2$	$(\ln Lt)^2$	$(\ln Et)^2$
1997	8.13	3.52	3.03	10.68	28.61	24.66	9.21	12.39	66.04
1998	8.12	3.52	3.09	10.88	28.61	25.10	9.55	12.41	65.98
1999	8.13	3.53	3.11	10.98	28.67	25.32	9.70	12.43	66.10
2000	8.14	3.53	3.15	11.13	28.72	25.65	9.94	12.46	66.20
2001	8.13	3.53	3.19	11.27	28.73	25.94	10.18	12.48	66.11
2002	8.19	3.54	3.23	11.42	28.96	26.44	10.43	12.51	67.04
2003	8.22	3.54	3.27	11.60	29.10	26.91	10.73	12.54	67.54
2004	8.26	3.54	3.37	11.95	29.28	27.86	11.37	12.57	68.24
2005	8.28	3.55	3.45	12.25	29.37	28.58	11.92	12.59	68.51
2006	8.35	3.55	3.55	12.62	29.67	29.68	12.62	12.62	69.77
2007	8.40	3.55	3.66	13.00	29.85	30.71	13.37	12.63	70.52
2008	8.40	3.56	3.76	13.39	29.90	31.63	14.16	12.65	70.64
2009	8.44	3.56	3.91	13.93	30.04	33.04	15.32	12.67	71.23
2010	8.51	3.56	4.03	14.37	30.31	34.33	16.27	12.69	72.44
2011	8.57	3.56	4.11	14.66	30.56	35.25	16.91	12.71	73.49
2012	8.57	3.57	4.22	15.04	30.55	36.13	17.79	12.72	73.37
2013	8.49	3.57	4.32	15.40	30.29	36.65	18.64	12.73	72.08
2014	8.49	3.57	4.40	15.69	30.29	37.35	19.34	12.72	72.11
2015	8.49	3.56	4.47	15.91	30.25	37.90	19.94	12.70	72.06
2016	8.49	3.56	4.47	15.91	30.24	37.96	19.98	12.68	72.13
2017	8.51	3.56	4.50	16.02	30.28	38.33	20.28	12.66	72.45

4.2.2 碳排放权交易价格评估结果分析

采用 SPSS 软件进行数据处理，利用主成分回归的方式，减少估算所带来的误差，通过表 3 分析得出，主成分 1 得出的特征值为 8.623，方差贡献率为 95.810%，代表了原始数据的绝大部分信息，由此二氧化碳排放量可作为重要的主成分指标。

表 3 湖北省主成分分析结果表

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	总计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	8.623	95.810	95.810	8.623	95.810	95.810

提取方法为主成分分析法。模型拟合度高，残差存在自相关，根据主成分贡献大小得出主成分表达式如下式，结果见表 4。

$$\begin{aligned}
M = & 0.114 \ln E_t + 0.112 \ln L_t + 0.114 \ln K_t + 0.114 \ln K_t \ln L_t + \\
& 0.115 \ln L_t \ln E_t + 0.114 \ln K_t \ln E_t + 0.112 (\ln K_t)^2 + \\
& 0.112 (\ln L_t)^2 + 0.114 (\ln E_t)^2
\end{aligned} \quad (14)$$

表 4 变量对主成分的贡献大小

参数	成分	参数	成分
	1		1
lnEt	0.114	lnKtlnEt	0.114
lnLt	0.112	(lnKt) ²	0.112
lnKt	0.114	(lnLt) ²	0.112
lnLtlnt	0.114	(lnEt) ²	0.114
lnLtlnt	0.115	—	—

进一步验证，利用提取的主成分与 $\ln Y_t$ 数值进行回归分析，得出整体模型结果显著性如表 5、表 6 所示。

表 5 模型摘要

模型	R	R	调整后 R	标准	德宾-沃森
1	0.953	0.908	0.903	0.12025521	0.355

表 6 方差分析表

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性
回归	2.721	1	2.721	188.160	0.000
残差	0.275	19	0.014		
总计	2.996	20			

由于模型拟合条件较好，指标值显著，得出模型回归方程如下：

$$\ln Y_t = 0.953M + 8.623 \quad (15)$$

式中： $M = [0.114 \ln E_t + 0.112 \ln L_t + 0.114 \ln K_t + 0.114 \ln L_t \ln K_t + 0.115 \ln L_t \ln E_t + 0.114 \ln K_t \ln E_t + 0.112 (\ln K_t)^2 + 0.112 (\ln L_t)^2 + 0.114 (\ln E_t)^2]$ 。

将主成分表达式带入式 (15)，模型的回归方程如下：

$$\begin{aligned}\ln Y_t = & 0.953[0.114 \ln E_t + 0.112 \ln L_t + 0.114 \ln K_t + 0.114 \ln L_t \\ & \ln K_t + 0.115 \ln L_t \ln E_t + 0.114 \ln K_t \ln E_t + 0.112(\ln K_t)^2 + \\ & 0.112(\ln L_t)^2 + 0.114(\ln E_t)^2] + 8.623\end{aligned}\quad (16)$$

$$\begin{aligned}\ln Y_t = & 0.1086 \ln E_t + 0.1067 \ln L_t + 0.1086 \ln K_t + 0.1086 \\ & \ln L_t \ln K_t + 0.1096 \ln L_t \ln E_t, 0.1086 \ln K_t \ln E_t +\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 0.1067(\ln K_t)^2 + 0.1067(\ln L_t)^2 + 0.1086(\ln E_t)^2 + \\ & 8.623\end{aligned}\quad (17)$$

根据得出的方程式，湖北省碳交易市场模型各系数值如表 7 所示。

表 7 模型系数表

参数	数值	参数	数值
β_K	β_{KE}	β_{KE}	0.1086
β_L	0.1067	β_{KK}	0.1067
β_E	0.1086	β_{LL}	0.1067
β_{KL}	0.1086	β_{EE}	0.1086
β_{LE}	0.1096	—	—

将得出的指标系数值带入如下方程式，求出每一单位碳排放的边际生产力 P。

$$\frac{dY_t}{dE_t} = \frac{Y_t}{E_t} (\beta_E + \beta_{KE} \ln K_t + \beta_{LE} \ln L_t + 2\beta_{EE} \ln E_t) = P \quad (18)$$

P 值表示在资源最合理利用的前提下，第二产业（碳排放企业）使用一单位碳排放权对应企业生产成本中的减排成本大小。根据表 8 所示，随着年份的递增，二氧化碳排放对于 GDP 的影响是逐步递增的，而且递增速度不断上升，平均每减少一吨二氧化碳排放将对 GDP 的贡献减少 15099.28 元人民币，反映了碳减排的同时带来的经济成本。也可理解为碳排放消耗会带来经济利润增值，从 1997—2011 年，影响程度相对较小，根源在于不论是国家政策还是地方企业对于碳减排意识均有一定程度欠缺。从 2011 年之后，随着试点城市的碳交易政策逐步完善，二氧化碳排放量对于地区 GDP 产值的影响程度逐步加深，碳减排难度也进一步提升。可以看出，实现“绿水青山”的前提是保持“金山银山”，要达到资源的均衡是有一定难度的。

表 8 数据结果表

年份	M	P	年份	M	P
1997	26.66	5943.58	2008	29.02	13302.34
1998	26.77	6555.91	2009	29.46	14209.75
1999	26.85	6689.80	2010	29.93	14986.06
2000	26.95	7263.70	2011	30.29	16114.25

2001	27.02	8054.49	2012	30.52	18616.61
2002	27.25	7716.86	2013	30.54	24809.40
2003	27.44	8170.95	2014	30.73	27605.96
2004	27.76	8838.99	2015	30.88	29917.28
2005	27.98	9999.44	2016	30.89	32599.93
2006	28.41	9705.58	2017	31.02	34918.49
2007	28.76	11065.59	—	—	—

通过利用影子价格模型中的超越对数生产函数分析二氧化碳对GDP产值的影响后，可以发现碳排放权价格的制定对于整个交易体系起到了至关重要的作用。由于各区域内的经济发展存在差异，在对全国碳排放进行总量控制下进行地区分配符合当下的现实发展情况，由此，本文接下来结合公平分配使用影子价格的另一种方式——线性规划，对于碳排放权的影子价格进行估计。

4.3 线性规划函数

4.3.1 模型引入

影子价格模型的建立，使用了数学中的线性规划方法，碳减排制度的实施需要国家与企业两者的相互配合支持，国家使用碳减排策略为了降低温室气体排放，而碳排放权作为企业资产的一部分，企业希望实现企业价值最大化，必然需要正确认识碳排放权价值。由此，企业价值最大化作为一种目标函数，碳排放权则作为一种企业生产函数，而国家的碳配额总量作为一种约束函数。

公式（10）中的 λ 为碳排放权的影子价格，等于某区域内的平均利润与二氧化碳排放量的比例系数，当该地区的碳配额总量为一个确定的数值时，可得出资源配置下的最优价格。此价格为资源配置下的理论价值，并非等同于市场价格，从经济学的角度理解，可以认为每增加一单位的二氧化碳给对应企业带来的经济利润。从企业的角度出发，影子价格为企业投产带来一定的指引作用，当影子价格高于市场交易价格时，企业碳减排的成本低于碳排放权带来的收益，应该增加碳排放权使用，扩大企业的生产规模。政府部门在制定碳排放权交易价格时，可以使用影子价格作为参考。

4.3.2 数据选取

由于2014年4月湖北开始建立碳交易试点，并且全国碳排放权价格经历了小幅度的上升，因此，选取2014年为起始点进行分析。由于二氧化碳排放量的数据获取截至2017年，由此对2014—2017年的碳排放权价格进行分析。在过往研究中，在对碳排放权影子价格进行计算时，未考虑地区经济发展所带来的区域性差异。本文对影子价格的改进研究中加入公平视角原则对碳排放权影子价格进行计算。根据前述公平原则相关概念以及计算公式（10），其中公平原则下碳排放量计算分为历史平均原则、人口平均原则以及支付能力平均原则。

湖北省碳排放权影子价格计算涉及的两个重要指标是碳排放权强度和产值收益率。其中碳排放强度用来衡量某一地区经济发展与二氧化碳排放之间的关系，由此需要选取地区内经济发展GDP数据与地区内碳排放量，使用规模以上工业企业的利润总额代替地区利润总额，由于目前国家未对一定区域内的二氧化碳排放量数据进行准确公布，利用公平原则对于碳排放量进行估计。由于碳排放企业主要集中于第二产业，由此地区产量由工业产值所替代，湖北省人口数据来源于《湖北省统计年鉴》。

4.3.3 碳排放权交易价格评估结果分析

二氧化碳强度指的是单位GDP产值所产生的二氧化碳排放量，被用来衡量能源的使用效率。中国近几年进行深度减排，同时也提出了逐步降低二氧化碳排放强度的目标，如图1所示，近几年湖北省不断加强环境管理体制建设，大部分排污企业都进行相关的节能减排改革，这使得湖北省的碳排放强度呈现不断下降的趋势。

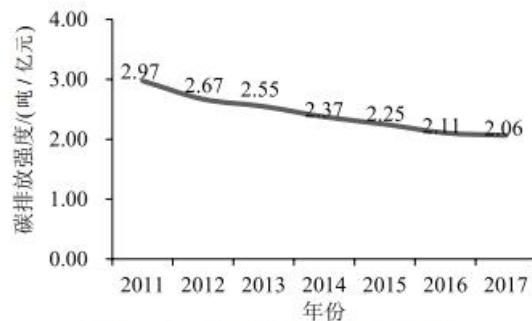


图1 2011—2017年湖北省碳排放强度

本文根据2011—2017年湖北省的经济发展现状，从公平视角对湖北省碳排放量进行估计分析，其中单纯使用历史平均原则进行估算忽视了区域内的未来发展潜力，人口平均原则与支付能力原则考虑区域内经济发展与人口规模相结合的情况，符合经济发展的同时需要兼顾环境保护的原则。表9为湖北省碳排放配额量估计结果。

根据图2所示，2014—2017年湖北省碳排放权交易价格呈现一定下降趋势，碳排放权的影子价格整体都呈现出逐年上升（表10），影子价格远高于交易价格，2014—2017年湖北省碳排放权最高价格不超过30元，而影子价格最高超过1000元，碳排放权交易价格与影子价格存在差异，也体现了中国交易市场的碳排放权价格偏低，内在价值扭曲。虽然影子价格不代表真实的价格，但也在制定价格方面有一定指导作用，并且也给企业是否购买碳排放权提供参考，当交易价格低于影子价格时，边际效益高，可以通过购买碳排放权或者出售过剩碳排放权获得收益。

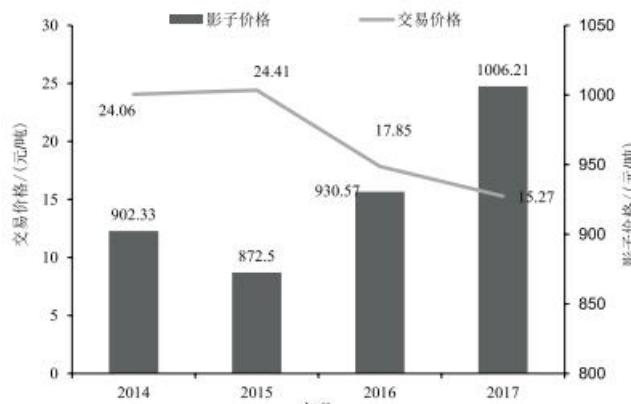


图2 湖北省2014—2017年碳排放权交易价格与影子价格对比图

尽管影子价格与实际的碳排放权价格不一致甚至存在较大的差异，存在原因可能是因为理论上的数据

以及假设条件不能代表实际情况，但在一定程度上反映了未来碳排放权价格的走向趋势，并能够反映区域内的二氧化碳排放与经济产值之间的关系，碳排放权影子价格意在表示资源充分利用下的最优价格，加上影子价格在经济学定义上运用于完全竞争市场，在现实情况下难以实现，非市场性的行政政策干预会在某些程度上影响碳排放权的实际交易价格。由于目前碳交易市场中的免费分配政策依然占据了一定比例，碳排放权的最优配置受到了一定的影响，目前交易市场还有待优化，国家应当加强碳交易市场发展的推进力度，规范第二产业中的企业污染物排放，企业应当加强节能减排技术改造。同时，本文对于二氧化碳排放总量的计算加入了公平分配原则，相对而言对于总量的控制较为严苛，也会导致影子价格在一定程度上高于实际价格。

表 9 2011—2017 年基于公平视角的湖北省碳排放配额量估计结果

年份	历史平均/吨	人口平均/吨	支付能力/吨	综合/吨
2011	346899931.56	422975248.75	2733238.55	257536139.62
2012	356516654.74	432644391.45	2759866.60	263973637.60
2013	356186466.82	430484513.64	2784815.97	263151932.14
2014	361698353.80	434292081.85	2817743.27	266269392.98
2015	361855943.49	430690311.50	2856676.87	265134310.62
2016	360767824.21	428125059.42	2882014.11	263924965.91
2017	370185684.21	435909927.69	2919917.00	269671842.97

表 10 2014—2017 年碳排放权影子价格计算结果

年份	2014	2015	2016	2017
工业生产总值/万元	112157333.55	117835379.19	125363888.78	130600800.00
二氧化碳排放量/吨	266269393.00	265134310.00	263924965.00	269671843.00
碳排放强度	2.37	2.25	2.11	2.06
利润总额/万元	24026300.00	23133000.00	24560000.00	27134600.00
产值收益率	0.21	0.20	0.20	0.21
影子价格/(元/吨)	902.33	872.50	930.57	1006.21
交易价格/(元/吨)	24.06	24.41	17.85	15.27

5 结论和政策建议

5.1 主要结论

首先，通过对全国统一碳排放权交易市场进行分析时得出，碳排放权作为国家温室减排的重要经济手段起到了一定的作用，除了国家宏观调控，企业的积极参与是十分重要的。其次，湖北碳排放权交易试点的影子价格评估结果与其实际价格具有一定差距，从理论上分析，影子价格应该远大于实际价格，影子价格只能作为初期的参考价格，真正交易的过程中，市场因素往往占据重要影响地位。最后，我国碳排放权数据监控还存在不足之处，应该将年度数据库与碳排放企业发展状况公开面向大众，使碳排放权的发展更有保障。

5.2 政策建议

(1) 借鉴国外碳排放权交易市场经验，完善中国碳排放权交易市场制度。各个交易试点的建设都是循序渐进逐步完善的过程，中国处于筹备全国碳交易市场的关键时期，立足于中国碳交易市场发展国情，应当发展可持续的碳排放权交易体系，设置合理的碳交易价格波动幅度，配额分配方法，控排企业覆盖范围。

碳排放权价格受外部经济影响较大，相关部门应当完善碳排放权价格预警机制，从而稳定碳交易市场。在公平分配的原则下控制碳配额总量，加强市场监管力度，建立有效的配额方案，尊重市场发展规则，建立公平的交易规则。

(2) 构建企业、个人环境保护意识和责任意识。工业企业无疑会受到国家的重点关注，但企业的减排意识还远远不够，企业应加快提高技术生产水平，积极学习低碳发展技术，加大对低碳技术的研发，调整能源的使用结构，利用清洁能源代替化石能源，节能减排。非控排企业也应当有自主减排意识，实现行业可持续发展。

(3) 提高国际间碳交易合作。从目前的发展现状来看，应当加强碳交易国家市场的对接，学习成熟的国际市场经验。鼓励国内外投资者参与中国统一的碳交易市场，扩大交易量，进一步拓宽交易市场的影响力。

(4) 对碳减排额度进行差异化管理。中国目前处于建立全国碳交易市场的第一个履约期，当把不同地域内的不同行业聚集于一个碳交易市场进行管理时，不同城市地区的经济发展差异较大，环境资源不同，工业行业在整个城市的占比大小也存在差异，统一的定价会加重欠发达地区企业经济负担，导致碳配额不公平的现象发生，解决区域城市的不平衡问题始终是工作的重点问题，节能减排目标需要考虑不同城市的差异，考虑分配公平性问题，各地区应当加强碳初始分配时的合作，促进试点城市之间的互动，制定各区域内的合理价格，才能更有力地推动全国统一的碳交易市场发展。

参考文献：

- [1] 梁美健, 贾颖逸, 李飞祥. 碳权资产市场法估值中特征因素的实证分析[J]. 中国资产评估, 2018(6): 10-19.
- [2] 潘露. 碳排放权价值评估方法研究[J]. 中国资产评估, 2020(3): 39-43.
- [3] 张立君. 期权定价模型在碳排放权评估中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [4] 张丹. 基于 B-S 模型对碳排放权价值评估研究[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [5] 焦金金. 碳排放权内在价值研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [6] 陈小红. 以质押为目的的企业碳排放权价值评估研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [7] 孔祥云. 我国碳排放权交易定价机制研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019.
- [8] 饶欣. 广东省碳排放权交易市场价格波动传导机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [9] 黄岚. 改进的 B-S 期权定价模型在碳排放权价值评估中的应用研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2020.

- [10] 王昕婷, 吴芷萱, 袁广达. 碳排放权价值评估模型构建——以大唐国际发电股份有限公司为例[J]. 财会月刊, 2020 (7) : 37-42.
- [11] 胡民. 排污权定价的影子价格模型分析[J]. 价格月刊, 2007 (2) : 19-22.
- [12] 林云华. 排污权影子价格模型的分析及启示[J]. 环境科学与管理, 2009 (2) : 16-19.
- [13] 王豫. 基于影子价格模型的碳资产评估[J]. 中国经贸导刊(中), 2019 (2) : 29-30.
- [14] 郭文, 黄可欣. 碳排放权交易背景下配额碳资产的价值评估研究[J]. 商业会计, 2019 (17) : 20-24.
- [15] Liao C N, Onal H, Chen M H. Average shadow price and equilibrium price: A case study of tradable pollution permit markets [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 196(3): 1207-1213.
- [16] Daskalakis G, Psychoyios D, Markellos R N. Modeling CO₂emission allowance prices and derivatives: Evidence from the European trading scheme [J]. Journal of Banking & Finance, 2009, 33(7) : 1230-1241.
- [17] Chevallier J. Modelling risk premia in CO₂ allowances spot and futures prices [J]. Economic Modelling, 2010, 27(3) : 717-729.
- [18] Atsalakis G S. Using computational intelligence to forecast carbon prices [J]. Applied Soft Computing, 2016, 43: 107-116