第 50 卷 第 12 期：5505-5516 高电压技术 Vol.50, No.12: 5505-5516
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231474

随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场均衡分析

陈 荃[1]，张丹宏[1]，胡宇凡[2]，李 阳[1]，余 达[1]，朱建全[2]
（1. 广东电网有限责任公司，广州 510699；2. 华南理工大学电力学院，广州 510640）

摘 要：为促进电力行业的低碳化和清洁化发展，中国相继建立碳市场和绿证市场，对电力市场产生显著影响。在此背景下，提出了一种随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场均衡分析方法。首先，综合考虑发电机组报价约束、碳配额约束、绿证量价关系和风电的随机性，建立了一个新的双层电力市场均衡分析模型。其次，利用最优性条件替代下层问题，将单个发电商的双层模型转化为均衡约束规划问题(mathematical program with equilibrium constraints，MPEC)。为求解多主体的市场均衡，将所有发电商对应的 MPEC 等效为库恩-塔克条件，从而构建均衡约束-均衡规划问题(equilibrium problem with equilibrium constraints，EPEC)，并采用大 M 法和二进制展开法等线性化手段加以求解。最后，通过算例模拟了不同绿证与碳配额约束下的电力市场均衡状态，验证了所提方法的有效性。

关键词：碳配额；绿证；随机性；电力市场均衡；双层模型

Equilibrium Analysis of Electricity Market Considering Green Certificate and Carbon Quota Constraints in Stochastic Environment

CHEN Quan[1], ZHANG Danhong[1], HU Yufan[2], LI Yang[1], YU Da[1], ZHU Jianquan[2]
(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510699, China;
2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to promote the low-carbon and clean development of the power industry, carbon market and green certificate market have been established in China, which have a significant impact on the electricity market. Therefore , we proposed an electricity market equilibrium analysis method considering green certificate and carbon quota constraints in stochastic environment. Firstly, the constraints of generator bid prices, carbon quota constraints, green certificate quantity-price relationship, and the randomness of wind power production were taken into consideration, and a new bilevel electricity market equilibrium analysis model was established. Secondly, by using optimality conditions to replace the lower level problem, the bilevel model of a single power producer is transformed into a mathematical program with equilibrium constraints(MPEC). To achieve an equilibrium of multiple market entities, the MPECs of all power producers are combined into an equilibrium problem with equilibrium constraints(EPEC), and the problem is solved through linearization methods such as large M method and binary expansion method. Finally, a numerical example is used to simulate the equilibrium state of the electricity market under different green certificates and carbon quota constraints, verifying the effectiveness of the proposed method.

Key words: carbon quota; green certificate; uncertainty; electricity market equilibrium; bilevel model

0 引言

近年来，全球气候变暖问题日益突出，减排控温已刻不容缓[1]。在我国，电力行业的碳排放超过总排放量的 1/3，居碳排放的八大主要行业之首，其低碳化转型对全社会碳减排具有重要意义[2-3]。为了有效减少碳排放，我国以电力行业为突破口率先启动了全国碳排放权交易市场[4]。与此同时，绿色证书交易市场作为激励可再生能源发电上网的重要经济手段，也得到了快速发展[5]。在此背景下，碳市场和绿证市场将给电力市场带来显著影响，亟待开展深入研究。

目前，已有部分关于碳市场和绿证市场对电力

基金资助项目：国家自然科学基金(51977081)；广东电网有限责任公司科技项目(0300002022030201GH00033)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977081), Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Corporation(0300002022030201GH00033).

市场影响的研究。其中，碳市场对电力市场的影响主要体现为增加传统火电机组的碳排放成本，并以碳配额总量约束机组出力。文献[6]采用古诺模型对考虑碳排放价格的电力市场均衡问题进行研究，分析了碳排放价格对电力市场均衡结果及发电商利润的影响。文献[7]基于纳什均衡理论，建立了考虑碳交易的寡头电力市场双层均衡模型，并详细分析了发电商在电力市场和碳市场中的博弈行为。文献[8]建立了计及碳排放权和碳价约束的发电商策略竞价双层优化模型，并分析了碳排放限额对发电机组报价策略的影响。然而，上述文献并未考虑碳配额总量约束，不能完全反映碳市场对电力市场均衡的影响。文献[9]综合考虑碳成本和碳配额总量约束，利用日前电力市场两阶段出清模型分析了碳排放交易对日前调度结果的影响。

绿证市场对电力市场的影响主要体现为增加可再生能源发电商收益，提高其市场竞争力。文献[10]构建了可再生能源配额制与发电厂商策略行为演化博弈模型，分析了绿证交易成本对发电商利润及策略行为的影响。文献[11]对可再生能源配额制下电力批发商和电力用户等多主体进行动态博弈建模，分析了不同配额比例对多主体决策行为和市场均衡结果的影响。文献[12]建立了计及可再生能源配额制的双层博弈优化模型，并通过算例验证了绿证交易对绿电商市场竞争力的提升作用。部分文献还考虑了电力市场与绿证市场之间的相互作用，如文献[13]基于寡头竞争均衡理论，建立了一个考虑绿证市场和电力批发市场的两阶段联合均衡模型，并分析了 2 个市场间的相互影响关系。文献[14]从消纳考核要求出发，构建了绿证市场与日前电力市场出清模型，以实现 2 者的协调均衡。

上述研究各有特色，但在建模过程中一般只考虑绿证或碳配额的影响，无法全面模拟不同绿证与碳配额约束强度下的电力市场均衡状态。此外，上述研究均集中于确定性环境下的博弈均衡分析，无法反映可再生能源波动性对市场主体决策和市场均衡的影响。为了解决这 2 方面的问题，本文构建了随机环境下计及绿证与碳配额约束的两阶段电力市场均衡分析模型，并根据最优性条件、库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件等理论提出了相应的求解方法。最后，通过算例模拟了不同绿证及碳配额约束下的电力市场均衡状态，以期为我国电力市场建设提供参考，推动电力行业绿色低碳转型。

1 绿证与碳配额约束下的电力市场均衡分析框架

本文所考虑的绿证与碳配额约束下的电力市场框架如图 1 所示。其中，电力市场采用 pool 模式，包括日前出清和实时出清 2 个阶段。在日前出清阶段，电力市场收集发电商和电力用户的申报信息，出清后便可确定成交电量和出清价格。考虑到风电出力的不确定性，实时出清阶段在日前出清结果的基础上，对不同风电出力场景下的系统不平衡电量进行调节，以模拟风电随机性对电力市场均衡状态的影响。

为考虑碳配额的影响，本文基于单位基准线法确定发电商的免费碳排放额度[15-19]。对于碳排放额度不足或剩余部分，可通过碳市场进行购买或出售。具体地，若某发电商的碳排放量超出免费碳排放额度，则该发电商被视为买方，从碳市场购买额外的碳配额；反之，则该发电商被视为卖方，可向市场出售剩余碳配额获利。

在绿证方面，本文采用强制配额交易和自愿认购相结合的绿证交易方式，以充分考虑不同市场主体的需求。其中，区域内采用强制配额交易，交易主体为发电商。这些发电商需缴纳与自身发电量成一定比例的绿证(本文称其为绿证比例系数)。区域外采用自愿交易模式，交易主体主要为企事业单位及个人。这些主体可通过挂牌交易的方式自愿购买区域内的绿证，其购买需求受绿证价格影响[20]。

基于上述市场框架，进一步提出随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场均衡分析理论架

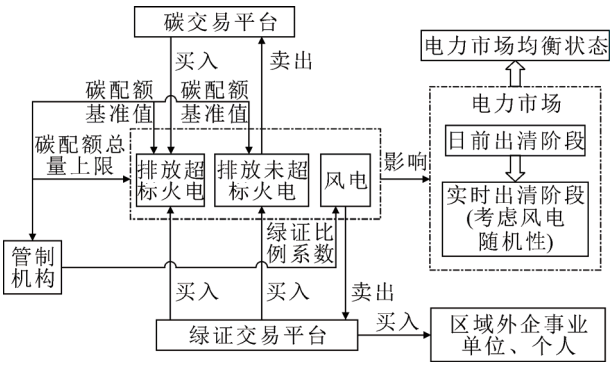


图 1 随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场均衡分析框架

Fig.1 Framework for equilibrium analysis of electricity market considering green certificate and carbon quota constraints in stochastic environment

构，如附录 A 图 A1 所示。首先，针对单个发电商建立了随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场双层博弈模型。其次，利用最优性条件替代下层模型，将双层模型转换为单层模型，构成带均衡约束的数学规划(mathematical program with equilibrium constraints, MPEC)问题。接着，将所有发电商对应的 MPEC 问题等效为 KKT 条件，从而构建均衡约束均衡规划(equilibrium problem with equilibrium constraints, EPEC)问题。最后，基于二进制展开法和大 M 法将 EPEC 问题转化为混合整数线性规划问题进行求解。

2　随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场均衡分析模型

2.1　双层模型

本节首先以单个发电商的市场行为为例，建立随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场双层博弈模型。考虑到发电商在市场环境下的逐利性，上层模型以发电商利润最大化为目标，考虑电力市场、碳配额和绿证相关约束；下层模型以日前、实时市场社会福利最大化为目标，考虑功率平衡约束、机组出力上下限等系统运行约束。与文献[21-23]类似，本文侧重研究各主体在绿证与碳配额约束下的市场均衡关系，并未考虑时段间的耦合情况，因而仅基于一个时段开展分析。

2.1.1　上层模型：发电商利润最大化模型

1）目标函数

在上层模型中，各发电商以负利润最小(正利润最大)为决策目标。其中，发电商的利润由日前市场的利润、实时市场的利润、绿证交易利润和碳交易成本组成。具体如下：

$$\begin{aligned}\min_{\Xi^{\mathrm{UL}}}\Bigg(&-\sum_{i\in J}P_i^{\mathrm{DA}}\left(\lambda^{\mathrm{DA}}-C_i\right)-\sum_{k\in J}W_k^{\mathrm{DA}}\lambda^{\mathrm{DA}}-\\&\sum_{\omega}\phi_\omega\Bigg(\sum_{i\in J}\left(r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}\right)\left(\lambda_\omega^{\mathrm{RT}}-C_i\right)+\\&\sum_{k\in J}\left(W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}-W_k^{\mathrm{DA}}-W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}}\right)\lambda_\omega^{\mathrm{RT}}\Bigg)-\\&\sum_{\omega}\phi_\omega\Bigg(p_\omega^{\mathrm{TGC}}q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}+p^{\mathrm{CO_2}}\sum_{i\in J}q_{i,\omega}^{\mathrm{CO_2}}+\\&\lambda^{\mathrm{TGC}}\sum_{i\in J}p_\omega^{\mathrm{TGC}}(P_i^{\mathrm{DA}}+r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}})\Bigg)\Bigg)\end{aligned}\tag{1}$$

式中：Ξ^{UL} 为上层模型的变量集合；J 为发电商 j 的火电机组及风电场的集合；λ^{DA} 为日前市场的出清电价；P_i^{DA}、W_k^{DA} 分别为火电机组 i、风电场 k 在日前市场的出力；C_i 为火电机组 i 的边际成本；$\lambda_\omega^{\mathrm{RT}}$ 为实时市场场景 ω 下的出清电价；ϕ_ω 为场景 ω 的概率；$r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}$、$r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}$ 分别为场景 ω 下火电机组 i 的上、下旋转备用容量；$W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}$ 为场景 ω 下风电场 k 的出力；$W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}}$ 为场景 ω 下风电场 k 的弃风量；p_ω^{TGC} 为场景 ω 下的绿证价格；$q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}$ 为发电商 j 在场景 ω 下出售的绿证数量；$p^{\mathrm{CO_2}}$ 为碳价；$q_{i,\omega}^{\mathrm{CO_2}}$ 为火电机组 i 在场景 ω 下实际买入或卖出的碳配额；λ^{TGC} 为绿证比例系数。

根据文献[24]，绿证价格可采用古诺模型进行计算：

$$p_\omega^{\mathrm{TGC}}=\sigma-\tau P_\omega^{\mathrm{over}}\Delta t\tag{2}$$

式中：σ、τ 分别为绿证价格函数的常数项、一次项系数，均>0；P_ω^{over} 为单位时间内场景 ω 下的超额风电量；$P_\omega^{\mathrm{over}}\Delta t$ 为 Δt 时段区域内全部风电量与区域内发电商应承担生产的可再生电量之差，由于 1 MWh 风电对应 1 张绿证，因此该项也相当于区域剩余绿证数量。根据市场供需关系，当绿证供给量大于需求量即 $P_\omega^{\mathrm{over}}>0$ 时，绿证价格下跌；当绿证供给量小于需求量即 $P_\omega^{\mathrm{over}}<0$ 时，绿证价格上涨[20]。

2）约束条件

①报价约束

发电商在决策过程中需要考虑内部火电机组和风电场在日前与实时市场的报价约束，即：

$$O_i^{\mathrm{DA,dis}}\geq 0,\quad \forall i\in J\tag{3}$$

$$O_{i,\omega}^{\mathrm{RT,dis}}\geq 0,\quad \forall i\in J,\forall\omega\tag{4}$$

$$O_k^{\mathrm{DA,wind}}\geq 0,\quad \forall k\in J\tag{5}$$

$$O_{k,\omega}^{\mathrm{RT,wind}}\geq 0,\quad \forall k\in J,\forall\omega\tag{6}$$

式中：$O_i^{\mathrm{DA,dis}}$ 为火电机组 i 在日前市场的报价；$O_{i,\omega}^{\mathrm{RT,dis}}$ 为火电机组 i 在实时市场场景 ω 下的报价；$O_k^{\mathrm{DA,wind}}$ 为风电场 k 在日前市场的报价；$O_{k,\omega}^{\mathrm{RT,wind}}$ 为风电场 k 在实时市场场景 ω 下的报价。

②绿证与碳配额约束

火电机组的碳配额交易约束为：

$$q_{i,\omega}^{\mathrm{CO_2}}-(P_i^{\mathrm{DA}}+r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}})(\delta_{b,i}-\delta_b^*)=0,\forall i,\forall\omega,\forall b\tag{7}$$

式中：$\delta_{b,i}$ 为 b 类火电机组 i 的单位碳排放系数；δ_b^* 为 b 类火电机组的碳配额基准值(采用基准线法对碳配额进行分配，各类机组具有不同的碳配额基准)。

区域免费碳配额约束为：

$$Q_{\omega}^{\mathrm{CO_2}}=\sum_{b}\delta_{b}^{*}\sum_{i\in b}(P_{i}^{\mathrm{DA}}+r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}),\ \forall\omega \tag{8}$$

$$Q_{\omega}^{\mathrm{CO_2}}\le L^{\mathrm{CO_2}},\ \forall\omega \tag{9}$$

式中：$Q_{\omega}^{\mathrm{CO_2}}$ 为场景 ω 下的免费碳配额总量；$L^{\mathrm{CO_2}}$ 为管制机构规定的碳配额总量上限。

区域实际碳排放总量约束为：

$$Q_{\omega}^{\mathrm{sj}}=\sum_{b}\sum_{i\in b}\delta_{b,i}(P_{i}^{\mathrm{DA}}+r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}),\ \forall\omega \tag{10}$$

$$Q_{\omega}^{\mathrm{sj}}\le Q_{\omega}^{\mathrm{CO_2}},\ \forall\omega \tag{11}$$

式中：Q_{ω}^{sj} 为场景 ω 下区域内火电机组实际碳排放量。

发电商绿证出售量约束为：

$$\begin{aligned}P_{\omega}^{\mathrm{over}}=&(1-\lambda^{\mathrm{TGC}})\sum_{k}(W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}-W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}})-\\&\lambda^{\mathrm{TGC}}\sum_{i}(P_{i}^{\mathrm{DA}}+r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}),\ \forall\omega\end{aligned} \tag{12}$$

$$q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}=\begin{cases}(1-\lambda^{\mathrm{TGC}})\sum_{k\in J}(W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}-W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}}),\ P_{\omega}^{\mathrm{over}}\le 0,\ \forall j,\forall\omega\\(1-\lambda^{\mathrm{TGC}})\sum_{k\in J}(W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}-W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}})-\alpha p_{\omega}^{\mathrm{TGC}},\\\qquad\qquad P_{\omega}^{\mathrm{over}}>0,\forall j,\forall\omega\end{cases} \tag{13}$$

式中：α 为>0 的参数(本/元)，表示当区域绿证供给过剩时绿证价格增加导致发电商 j 的绿证出售量减少。

由于上、下层模型为嵌套结构，上层模型的变量集合 Ξ^{UL} 包括 $O_{i}^{\mathrm{DA,dis}}$、$O_{i,\omega}^{\mathrm{RT,dis}}$、$O_{k}^{\mathrm{DA,wind}}$、$O_{k,\omega}^{\mathrm{RT,wind}}$、$q_{i,\omega}^{\mathrm{CO_2}}$、$q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}$、$Q_{\omega}^{\mathrm{CO_2}}$、$Q_{\omega}^{\mathrm{sj}}$、$P_{\omega}^{\mathrm{over}}$，以及下层模型的变量集合 $\Xi_{\mathrm{DA}}^{\mathrm{Primal}}$、$\Xi_{\mathrm{DA}}^{\mathrm{Dual}}$、$\Xi_{\mathrm{RT}}^{\mathrm{Primal}}$、$\Xi_{\mathrm{RT}}^{\mathrm{Dual}}$。

2.1.2 下层模型 1：日前市场出清阶段

1）目标函数

日前市场以负社会福利最小(正社会福利最大)为目标进行出清，具体如下：

$$\min_{\Xi_{\mathrm{DA}}^{\mathrm{Primal}}}\sum_{i}O_{i}^{\mathrm{DA,dis}}P_{i}^{\mathrm{DA}}+\sum_{k}O_{k}^{\mathrm{DA,wind}}W_{k}^{\mathrm{DA}}-\sum_{d}U_{d}L_{d} \tag{14}$$

式中：U_d 为负荷 d 的投标价格；L_d 为负荷 d 在日前市场的中标量；$\Xi_{\mathrm{DA}}^{\mathrm{Primal}}$ 为日前市场各原始变量组成的集合，即 $\Xi_{\mathrm{DA}}^{\mathrm{Primal}}=\left\{P_{i}^{\mathrm{DA}},W_{k}^{\mathrm{DA}},L_{d}\right\}$。

2）约束条件

功率平衡约束为：

$$\sum_{d}L_{d}-\sum_{i}P_{i}^{\mathrm{DA}}-\sum_{k}W_{k}^{\mathrm{DA}}=0:\lambda^{\mathrm{DA}} \tag{15}$$

火电机组出力约束为：

$$0\le P_{i}^{\mathrm{DA}}\le P_{i}^{\max}:\mu_{i}^{\min},\mu_{i}^{\max},\ \forall i \tag{16}$$

式中：$P_i^{\max}$ 为火电机组 i 的容量。

风电场出力约束为：

$$0\le W_{k}^{\mathrm{DA}}\le W_{k}^{\max}:\rho_{k}^{\min},\rho_{k}^{\max},\forall k \tag{17}$$

式中：$W_k^{\max}$ 为风电场 k 在日前市场的最大出力，假设其与预期发电量相同，即 $W_{k}^{\max}=\sum_{\omega}\phi_{\omega}W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}$。

负荷上下限约束为：

$$0\le L_{d}\le L_{d}^{\max}:\xi_{d}^{\min},\xi_{d}^{\max},\ \forall d \tag{18}$$

式中：$L_d^{\max}$ 为负荷 d 的上限值。

在约束条件式(15)—(18)中，冒号后的各个对偶变量可组成一个对偶变量集合 $\Xi_{\mathrm{DA}}^{\mathrm{Dual}}$，即 $\Xi_{\mathrm{DA}}^{\mathrm{Dual}}=\left\{\lambda^{\mathrm{DA}},\mu_{i}^{\min},\mu_{i}^{\max},\rho_{k}^{\min},\rho_{k}^{\max},\ \xi_{d}^{\min},\xi_{d}^{\max}\right\}$。

2.1.3 下层模型 2：实时市场出清阶段

实时市场在日前出清的基础上，根据风电出力的随机性对系统不平衡电量进行调整，这也将在一定程度上改变市场的均衡状态。

1）目标函数

实时市场仍以负社会福利最小(正社会福利最大)为目标进行出清，具体计算式为：

$$\begin{aligned}\min_{\Xi_{\mathrm{RT}}^{\mathrm{Primal}}}\Bigg(&\sum_{i}O_{i,\omega}^{\mathrm{RT,dis}}\left(r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}\right)+\sum_{d}C_{d}^{\mathrm{L}}L_{d,\omega}^{\mathrm{C}}+\\&\sum_{k}O_{k,\omega}^{\mathrm{RT,wind}}\left(W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}-W_{k}^{\mathrm{DA}}-W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}}\right)\Bigg),\ \forall\omega\end{aligned} \tag{19}$$

式中：$L_{d,\omega}^{\mathrm{C}}$ 为场景 ω 下负荷 d 的削减量；C_d^{L} 为负荷 d 的削减成本；$\Xi_{\mathrm{RT}}^{\mathrm{Primal}}$ 为实时市场各原始变量组成的集合，即 $\Xi_{\mathrm{RT}}^{\mathrm{Primal}}=\left\{r_{i,\omega}^{\mathrm{U}},r_{i,\omega}^{\mathrm{D}},L_{d,\omega}^{\mathrm{C}},W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}}\right\}$。

2）约束条件

功率平衡约束为：

$$\begin{aligned}&\sum_{i}\left(r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}\right)-\sum_{k}\left(W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}-W_{k}^{\mathrm{DA}}-W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}}\right)-\\&\sum_{d}L_{d,\omega}^{\mathrm{C}}=0:\lambda_{\omega}^{\mathrm{RT}},\ \forall\omega\end{aligned} \tag{20}$$

火电机组备用容量约束为：

$$0\le r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}\le R_{i}^{\mathrm{U}^{\max}}:\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\min}},\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\max}},\forall i,\forall\omega \tag{21}$$

$$0\le r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}\le R_{i}^{\mathrm{D}^{\max}}:\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\min}},\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\max}},\forall i,\forall\omega \tag{22}$$

$$P_{i}^{\mathrm{DA}}+r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}\le P_{i}^{\max}:\eta_{i,\omega}^{\mathrm{U}},\forall i,\forall\omega \tag{23}$$

$$r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}-P_{i}^{\mathrm{DA}}\le 0:\eta_{i,\omega}^{\mathrm{D}},\forall i,\forall\omega \tag{24}$$

式中：$R_i^{\mathrm{U}^{\max}}$、$R_i^{\mathrm{D}^{\max}}$ 分别为火电机组 i 的最大上、下旋转备用容量。

负荷削减量约束为：

$$0\le L_{d,\omega}^{\mathrm{C}}\le L_{d}:\beta_{d,\omega}^{\min},\beta_{d,\omega}^{\max},\forall d,\forall\omega \tag{25}$$

弃风量约束为：

$$0\le W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}}\le W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}:\gamma_{k,\omega}^{\min},\gamma_{k,\omega}^{\max},\ \forall k,\forall\omega \tag{26}$$

与日前市场类似，实时市场的约束条件式(20)—(26)中，冒号后的各个对偶变量可组成一个对偶变量集合 $\Xi_{\mathrm{RT}}^{\mathrm{Dual}}$，即 $\Xi_{\mathrm{RT}}^{\mathrm{Dual}}=\{\lambda_{\omega}^{\mathrm{RT}},\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\min}},\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\max}},\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\min}},$

$\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\max}},\eta_{i,\omega}^{\mathrm{U}},\eta_{i,\omega}^{\mathrm{D}},\beta_{d,\omega}^{\min},\beta_{d,\omega}^{\max},\gamma_{k,\omega}^{\min},\gamma_{k,\omega}^{\max}\}$。

2.2　MPEC 模型

为简化上述双层模型，利用最优性条件替代下层问题，将其转化为 MPEC 模型。该模型的目标函数为式(27)，约束条件包括：原始约束式(3)—(13)、(15)—(18)、(20)—(26)，对偶约束(28)—(33)、(35)—(43)，以及相应的强对偶等式(34)、(44)。

$$\min_{\Xi^{\mathrm{UL}}} \text{式(1)} \tag{27}$$

$$O_i^{\mathrm{DA,dis}}-\lambda^{\mathrm{DA}}+\mu_i^{\max}-\mu_i^{\min}=0,\forall i \tag{28}$$

$$O_k^{\mathrm{DA,wind}}-\lambda^{\mathrm{DA}}+\rho_k^{\max}-\rho_k^{\min}=0,\forall k \tag{29}$$

$$-U_d+\lambda^{\mathrm{DA}}+\xi_d^{\max}-\xi_d^{\min}=0,\forall d \tag{30}$$

$$\mu_i^{\min}\ge 0;\ \ \mu_i^{\max}\ge 0,\forall i \tag{31}$$

$$\rho_k^{\min}\ge 0;\ \ \rho_k^{\max}\ge 0,\forall k \tag{32}$$

$$\xi_d^{\min}\ge 0;\ \ \xi_d^{\max}\ge 0,\forall d \tag{33}$$

$$\begin{aligned}&\sum_i O_i^{\mathrm{DA,dis}}P_i^{\mathrm{DA}}+\sum_k O_k^{\mathrm{DA,wind}}W_k^{\mathrm{DA}}-\sum_d U_d L_d+\\&\sum_i P_i^{\max}\mu_i^{\max}+\sum_k W_k^{\max}\rho_k^{\max}+\sum_d L_d^{\max}\xi_d^{\max}=0\end{aligned} \tag{34}$$

$$O_{i,\omega}^{\mathrm{RT,dis}}-\lambda_\omega^{\mathrm{RT}}+\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\max}}-\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\min}}+\eta_{i,\omega}^{\mathrm{U}}=0,\ \forall i,\forall\omega \tag{35}$$

$$-O_{i,\omega}^{\mathrm{RT,dis}}+\lambda_\omega^{\mathrm{RT}}+\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\max}}-\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\min}}+\eta_{i,\omega}^{\mathrm{D}}=0,\ \forall i,\forall\omega \tag{36}$$

$$C_d^{\mathrm{L}}-\lambda_\omega^{\mathrm{RT}}+\beta_{d,\omega}^{\max}-\beta_{d,\omega}^{\min}=0,\ \forall d,\forall\omega \tag{37}$$

$$-O_{k,\omega}^{\mathrm{RT,wind}}+\lambda_\omega^{\mathrm{RT}}+\gamma_{k,\omega}^{\max}-\gamma_{k,\omega}^{\min}=0,\ \forall k,\forall\omega \tag{38}$$

$$\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\min}}\ge 0;\ \alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\max}}\ge 0,\ \forall i,\forall\omega \tag{39}$$

$$\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\min}}\ge 0;\ \alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\max}}\ge 0,\ \forall i,\forall\omega \tag{40}$$

$$\eta_{i,\omega}^{\mathrm{D}}\ge 0;\ \eta_{i,\omega}^{\mathrm{U}}\ge 0,\ \forall i,\forall\omega \tag{41}$$

$$\beta_{d,\omega}^{\min}\ge 0;\ \beta_{d,\omega}^{\max}\ge 0,\ \forall d,\forall\omega \tag{42}$$

$$\gamma_{k,\omega}^{\min}\ge 0;\ \gamma_{k,\omega}^{\max}\ge 0,\ \forall k,\forall\omega \tag{43}$$

$$\begin{aligned}&\sum_i O_{i,\omega}^{\mathrm{RT,dis}}\left(r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}\right)+\sum_d C_d^{\mathrm{L}}L_{d,\omega}^{\mathrm{C}}+\\&\sum_k O_{k,\omega}^{\mathrm{RT,wind}}\left(W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}-W_k^{\mathrm{DA}}-W_{k,\omega}^{\mathrm{SP}}\right)+\\&\sum_k\left(W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}-W_k^{\mathrm{DA}}\right)\lambda_\omega^{\mathrm{RT}}+\sum_i R_i^{\mathrm{U}^{\max}}\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{U}^{\max}}+\\&\sum_i R_i^{\mathrm{D}^{\max}}\alpha_{i,\omega}^{\mathrm{D}^{\max}}+\sum_i\left(P_i^{\max}-P_i^{\mathrm{DA}}\right)\eta_{i,\omega}^{\mathrm{U}}+\\&\sum_i P_i^{\mathrm{DA}}\eta_{i,\omega}^{\mathrm{D}}+\sum_d L_d\beta_{d,\omega}^{\max}+\sum_k W_{k,\omega}^{\mathrm{RT}}\gamma_{k,\omega}^{\max}=0,\forall\omega\end{aligned} \tag{44}$$

2.3　EPEC 模型

在电力市场中，某个发电商的策略行为会对其他发电商产生影响[25]。在上述单个发电商对应的 MPEC 模型基础上，为进一步求解多主体电力市场的均衡问题，将所有发电商对应的 MPEC 问题用其 KKT 条件替代，形成一个 EPEC 模型。该模型的最优性条件包括以下 3 类：

第 1 类等式约束可通过计算每个 MPEC 的拉格朗日函数关于 Ξ^{UL} 中变量的导数得到，以 $O_i^{\mathrm{DA,dis}}$ 为例，有：

$$\frac{\partial L_j}{\partial O_i^{\mathrm{DA,dis}}}=-\underline{O}_{j,i}^{\mathrm{DA,dis}}+\underline{P}_{j,i}^{\mathrm{DA}}+\Delta_j^{\mathrm{DA}}P_i^{\mathrm{DA}}=0,\forall j,\forall i\in J \tag{45}$$

$$\frac{\partial L_j}{\partial O_i^{\mathrm{DA,dis}}}=\underline{P}_{j,i}^{\mathrm{DA}}+\Delta_j^{\mathrm{DA}}P_i^{\mathrm{DA}}=0,\forall j,\forall i\notin J \tag{46}$$

式中：$\underline{O}_{j,i}^{\mathrm{DA,dis}}$、$\underline{P}_{j,i}^{\mathrm{DA}}$、$\Delta_j^{\mathrm{DA}}$ 分别为式(3)、(28)、(34)的对偶变量。

第 2 类原始等式约束与式(7)、(8)、(10)、(12)、(13)、(15)、(20)、(28)—(30)、(34)—(38)、(44)相同。

第 3 类为对应不等式约束(3)—(6)、(9)、(11)、(16)—(18)、(21)—(26)、(31)—(33)、(39)—(43)的互补松弛条件。以式(3)为例，其互补松弛条件为：

$$0\le O_i^{\mathrm{DA,dis}}\perp\underline{O}_{j,i}^{\mathrm{DA,dis}}\ge 0,\forall j,\forall i\in J \tag{47}$$

此外，同一火电机组不能同时作为上旋转备用和下旋转备用，因此需满足：

$$0\le r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}\perp r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}\ge 0,\ \forall i,\forall\omega \tag{48}$$

2.4　模型的线性化处理

由于模型中存在 2 个连续型变量乘积项等非线性项，难以直接求解，故采用以下方法将模型线性化。

第 1 类非线性条件为互补松弛条件，通过引入二进制变量和使用大 M 法进行线性化[26]。以 $0\le a\perp b\ge 0$ 为例，可将其线性化为：$a\ge 0,b\ge 0,a\le\psi M,b\le(1-\psi)M$，其中 ψ 和 M 分别为二进制变量和足够大的正数。

第 2 类为强对偶等式(34)、(44)，先根据原始对偶变换和 KKT 条件的等价性将式(34)、(44)转化为一系列互补松弛条件，再使用第 1 类的方法进行线性化。以式(34)为例，转化为互补松弛条件为：

$$0\le P_i^{\mathrm{DA}}\perp\mu_i^{\min}\ge 0,\ \forall i \tag{49}$$

$$0\le P_i^{\max}-P_i^{\mathrm{DA}}\perp\mu_i^{\max}\ge 0,\forall i \tag{50}$$

$$0\le W_k^{\mathrm{DA}}\perp\rho_k^{\min}\ge 0,\forall k \tag{51}$$

$$0\le W_k^{\max}-W_k^{\mathrm{DA}}\perp\rho_k^{\max}\ge 0,\forall k \tag{52}$$

$$0\le L_d\perp\xi_d^{\min}\ge 0,\forall d \tag{53}$$

$$0\le L_d^{\max}-L_d\perp\xi_d^{\max}\ge 0,\ \forall d \tag{54}$$

第 3 类为与变量 Δ_j^{DA}、$\Delta_{j,\omega}^{\mathrm{RT}}$ 相关的非线性项，需将 Δ_j^{DA}、$\Delta_{j,\omega}^{\mathrm{RT}}$ 进行参数化。其中，$\Delta_{j,\omega}^{\mathrm{RT}}$ 为式(44)的对偶变量。

第 4 类为目标函数中与绿证相关的非线性项，利用二进制展开法进行线性化。首先，对绿证交易

价格函数进行分段处理[20]，即：

$$p_{\omega}^{\mathrm{TGC}}=\begin{cases}p_0, l_0-2q_0\le P_{\omega}^{\mathrm{over}}\le l_0\\ p_1, l_0<P_{\omega}^{\mathrm{over}}\le l_0+q_0\\ p_2, l_0+q_0<P_{\omega}^{\mathrm{over}}\le l_0+2q_0\\ p_3, l_0+2q_0<P_{\omega}^{\mathrm{over}}\le l_0+3q_0\\ p_4, l_0+3q_0<P_{\omega}^{\mathrm{over}}\end{cases}\tag{55}$$

式中：$\forall\omega$；p_0、p_1、p_2、p_3、p_4表示该区域不同绿证供需场景下的绿证价格。

其次，以$p_{\omega}^{\mathrm{TGC}}q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}$为例，将$p_{\omega}^{\mathrm{TGC}}$近似为 N+1 个 0-1 变量构成的项，即：

$$p_{\omega}^{\mathrm{TGC}}=p_4+\frac{p_0-p_4}{N}\sum_{n=0}^{N}ny_{j,\omega,n}\tag{56}$$

式中：$y_{j,\omega,n}$为 0-1 变量，应满足：

$$\sum_{n=0}^{N}y_{j,\omega,n}=1\tag{57}$$

则$p_{\omega}^{\mathrm{TGC}}q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}$可线性化为：

$$p_{\omega}^{\mathrm{TGC}}q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}=p_4q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}+\frac{p_0-p_4}{N}\sum_{n=0}^{N}nt_{j,\omega,n}\tag{58}$$

式中$t_{j,\omega,n}$应满足：

$$\begin{cases}q_{j,\omega,\min}^{\mathrm{TGC}}\left(1-y_{j,\omega,n}\right)\le q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}-t_{j,\omega,n}\le q_{j,\omega,\max}^{\mathrm{TGC}}\left(1-y_{j,\omega,n}\right)\\ q_{j,\omega,\min}^{\mathrm{TGC}}y_{j,\omega,n}\le t_{j,\omega,n}\le q_{j,\omega,\max}^{\mathrm{TGC}}y_{j,\omega,n}\end{cases}\tag{59}$$

2.5 辅助目标函数的引入

上述得到了一系列最优性条件，将其线性化后可获得线性最优性条件集合。该集合在本质上表示市场均衡的可行域，为寻求可行域中有意义的解，需要在此基础上加入辅助目标函数。参照文献[27]，本文设定 EPEC 模型的目标函数为所有发电商总利润最大化，其数学表达式为：

$$\begin{aligned}\max\Pi=&\sum_{d}\left(L_dU_d-L_d^{\max}\xi_d^{\max}\right)-\sum_{i,\omega}\phi_{\omega}C_i\left(r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}}\right)-\\ &\sum_{d,\omega}\phi_{\omega}\left(C_d^{\mathrm{L}}L_{d,\omega}^{\mathrm{C}}+L_d^{\max}\beta_{d,\omega}^{\max}\right)-\sum_{i}C_iP_i^{\mathrm{DA}}+\\ &\sum_{j,\omega}\phi_{\omega}p_{\omega}^{\mathrm{TGC}}q_{j,\omega}^{\mathrm{TGC}}-p^{\mathrm{CO_2}}\sum_{i,\omega}\phi_{\omega}q_{i,\omega}^{\mathrm{CO_2}}-\\ &\lambda^{\mathrm{TGC}}\sum_{i,\omega}\phi_{\omega}p_{\omega}^{\mathrm{TGC}}(P_i^{\mathrm{DA}}+r_{i,\omega}^{\mathrm{U}}-r_{i,\omega}^{\mathrm{D}})\end{aligned}\tag{60}$$

3 算例分析

3.1 参数设置

本文假设区域内有4台火电机组和2个风电场，其中火电机组i_1、i_2与风电场k_2属于发电商j_1；火电机组i_3、i_4与风电场k_1属于发电商j_2。火电机组的相关技术经济参数见附录 B 表 B1。根据机组类型和容量的差异，将火电i_1、i_3划分为一类火电机组，将火电i_2、碳捕集火电i_4划分为二类火电机组，分别对应基准值δ_1^*=0.63 t/MWh、δ_2^*=0.5 t/MWh。2 个风电场k_1、k_2的最大出力分别为 500、250 MW；风力发电各场景参数见附录 B 表 B2。

此外，用户总负荷为 2 000 MW，分为 2 部分向电力市场投标，其中 1 300 MW 以 500 元/MWh 的价格投标，700 MW 以 400 元/MWh 的价格投标。负荷的削减成本是相应投标价格的 2 倍(因电力供需失衡而削减负荷时，给予其双倍投标价格的补偿)。碳配额及绿证相关参数见附录 B 表 B3。

本文的全部仿真分析均在 GAMS 42.5 平台编程实现。计算机配置为：Intel Core-i7 处理器，内存为 16 GB。

3.2 结果分析

3.2.1 市场均衡分析

表 1 展示了有无绿证与碳配额约束情况下日前与实时 2 个阶段的电力市场均衡结果。在日前出清阶段，有无绿证与碳配额约束情况下的出清价格相同，但考虑绿证与碳配额约束后机组i_2的中标量显著下降，而机组i_4中标量大大提高。其原因在于：引入碳配额约束后，排放系数最高的机组i_2因碳排放超标导致边际成本上升，其中标出力也相应降低。相对而言，机组i_4因具有碳捕集功能而显著降低了碳排放水平。在这种情况下，机组i_4的碳排放并未超标，因而可在增加中标出力的同时，出售剩余碳配额获利。这表明考虑配额约束会改变机组的边际成本，提高低排放机组的市场竞争力。

在实时出清阶段，绿证与碳配额约束下排放系数最低的机组i_4依然维持了较高的出力水平，以实现利润最大化。此外，当风电实际出力大于预测的风电量(如场景ω_1)时，发电商将优先选择其他排放系数较高的下旋转备用机组，以降低配额约束的影响。同时，在系统旋转备用机组的支撑下，实时出清阶段能够较好地应对风电的随机性，实现电量实时平衡。

表 2 进一步展示了各主体碳配额交易和绿证交易的收益情况。由表 2 可知，在碳配额交易中，机组i_4因碳排放未超标能够出售多余碳配额获利，使发电商j_2的利润增加。而机组i_1和i_2因碳排放超标需要购买相应的碳配额以满足考核要求，使发电商

j_1 的成本增加。在绿证交易中，风电场 k_1 和 k_2 能够通过出售绿证获取额外收益，使发电商 j_1 和 j_2 利润提高。这表明绿证与碳配额约束的引入能够增加绿色低碳发电企业的利润，并抑制高排放企业发展。

3.2.2　碳配额约束对电力市场的影响

1）不同碳配额总量的影响

表 3 对比了不同碳配额总量约束下的市场出清结果。由表 3 可知，当碳配额总量较大时，碳排放超标机组 i_3 的中标出力相应提高，导致区域实际碳排放量增加；当碳配额总量变小后，碳排放未超标机组 i_4 的竞争力增强，中标出力明显提高，区域实际碳排放量也相应减少。这表明通过碳配额总量设置可以改变机组出力和市场均衡状态，进而影响碳减排效果。

需要说明的是，随着碳配额约束收紧，系统可能无法满足负荷需求，出现削负荷现象。这是因为碳配额总量减小使得碳排放超标机组出力受限，系统只能通过削减部分负荷以维持电力实时平衡。由此可见，碳配额总量的设置需要综合考虑碳减排目标和用户的用电需求。

2）不同碳配额基准值的影响

为研究碳配额基准值对电力市场的影响，将一类碳配额基准值以 0.01 t/MWh 为步长，从 0.67 t/MWh 递减至 0.63 t/MWh；二类碳配额基准

表 1　有无绿证与碳配额约束下的市场均衡结果

Table 1　Market equilibrium results with/without green certificate and carbon quota constraints

分析参数	考虑绿证与碳配额约束	不考虑绿证与碳配额约束
所有发电商总利润/元	530 098.42	508 300
发电商 j_1 利润/元	246 133.194	283 500
发电商 j_2 利润/元	283 965.226	224 800
日前出清阶段电价/(元·MWh^{-1})	400	400
日前出清阶段火电机组中标量/MW	(700，0，600，250)	(700，250，600，0)
日前出清阶段风电场中标量/MW	(300，150)	(300，150)
实时出清阶段各场景电价/(元·MWh^{-1})	(0；800；800)	(0；800；800)
实时出清阶段各场景上/下旋转备用量/MW	(−120，0，−120，−60；0，0，0，0；0，+90，0，+60)	(−90，−90，−120，0；0，0，0，0；0，+90，0，+60)

注：实时出清阶段机组备用量为正值表示该机组为上旋转备用机组，为负值表示该机组为下旋转备用机组。

表 2　碳配额交易与绿证交易的收益情况

Table 2　Profit of carbon quota trading and green certificate trading

实时风电出力场景	机组碳交易收益/元	风电场绿证交易收益/元
ω_1	(−2 430，0，−2 304，4 734)	(31 500，65 250)
ω_2	(−2 934，0，−2 880，6 222)	(19 040，40 640)
ω_3	(−2 940，−1 620，−2 880，7 674)	(12 960，29 160)

表 3 不同碳配额总量下的市场均衡结果

Table 3　Market equilibrium results under different carbon quotas

分析参数	碳配额总量较大 (L^{CO_2}=1 100 t)	碳配额总量较小 (L^{CO_2}=980 t)
所有发电商总利润/元	530 098.42	512 912.355
发电商 j_1 利润/元	246 133.194	223 798.133
发电商 j_2 利润/元	283 965.226	289 114.222
日前出清阶段电价/(元·MWh^{-1})	400	400
日前出清阶段火电机组中标量/MW	(700，0，600，250)	(700，42，458，350)
日前出清阶段风电场中标量/MW	(300，150)	(300，150)
实时出清阶段各场景电价/(元·MWh^{-1})	(0；800；800)	(0；0；800)
实时出清阶段各场景上/下旋转备用量/MW	(−120，0，−120，−60；0，0，0，0；0，+90，0，+60)	(−48，−42，−120，−90；0，0，+90，−90；0，−42，+120，+60)
实时出清阶段各场景负荷削减量/MW	(0，0；0，0；0，0)	(0，0；0，0；0，72)
各场景下区域实际碳排放总量/t	(762.6；937.1；1 015)	(719.1；935.5；930.8)

值以 0.01 t/MWh 为步长，从 0.54 t/MWh 递减至 0.5 t/MWh，结果见表 4。由表 4 可知，随着碳配额基准值降低，碳排放超标机组i_2的出力逐渐减小，而碳排放未超标机组i_4的出力则相应增大。这是因为基准值的降低使得碳排放超标机组i_2的碳成本上升，市场竞争力下降；相反地，碳排放未超标机组i_4的市场竞争力随碳配额基准值的降低而增强，中标出力也相应增加。

图 2 和图 3 进一步展示了不同碳配额基准值下的碳交易量和区域实际碳排放量。由图 2、3 可知，随着基准值的减小，机组i_1、i_3的碳交易量逐渐增加。这是因为碳配额基准值越小，机组单位出力对应的超排量就越大，需要购买的碳配额量也越多。另一方面，随着碳配额基准值的减小，区域实际碳排放量逐渐下降。这表明降低碳配额基准值能够促进碳减排。

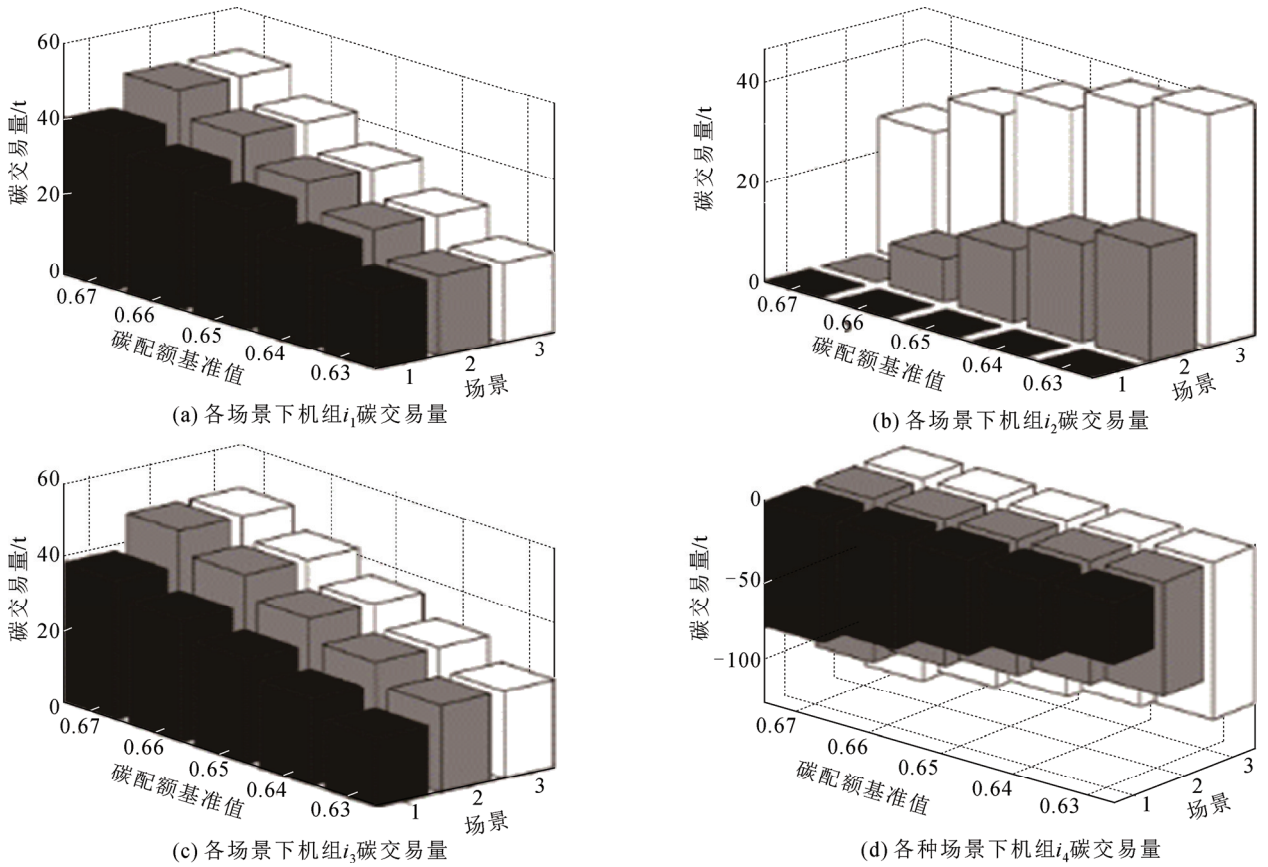
3.2.3 绿证比例系数对电力市场的影响

表 5 对比了不同绿证比例系数下的市场出清结果。由表 5 可知，随着绿证比例系数的增大，火电机组的绿证购买成本逐渐增多，风电场出售绿证的收益也相应提高。这是因为随着绿证比例系数的增大，相同出力下火电机组需要缴纳更多的绿证以完

表 4 不同碳配额基准值下的机组出力情况

Table 4 Output of units under different carbon quota benchmarks

一、二类碳配额基准/(t·MWh^{-1})	日前市场机组出力/MW	实时市场机组备用情况/MW
0.67，0.54	(700，90，600，160)	(−18，−90，−120，−72；0，0，0，0；0，+90，0，+60)
0.66，0.53	(700，74，600，176)	(−44，−74，−120，−62；0，0，0，0；0，+90，0，+60)
0.65，0.52	(700，52，600，198)	(−70，−52，−120，−58；0，0，0，0；0，+90，0，+60)
0.64，0.51	(700，30，600，220)	(−96，−30，−120，−54；0，0，0，0；0，+89，0，+61)
0.63，0.5	(700，0，600，250)	(−120，0，−120，−60；0，0，0，0；0，+90，0，+60)



(a) 各场景下机组i_1碳交易量

(b) 各场景下机组i_2碳交易量

(c) 各场景下机组i_3碳交易量

(d) 各种场景下机组i_4碳交易量

图 2 不同碳配额基准值下各机组的碳交易量

Fig.2 Carbon trading results of units under different carbon quota benchmarks

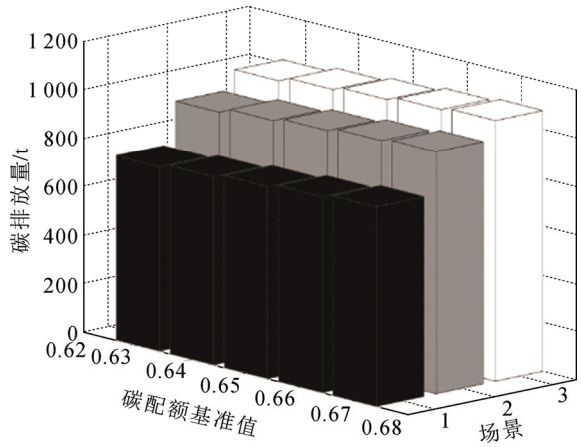


图 3　不同碳配额基准值下区域的碳排放

Fig.3　Regional carbon emissions under different carbon quota benchmarks

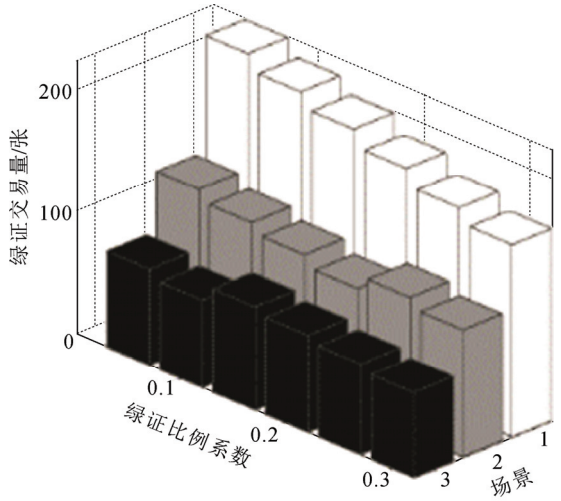
表 5　不同绿证比例系数下的市场均衡结果

Table 5　Market equilibrium results under different renewable energy quotas

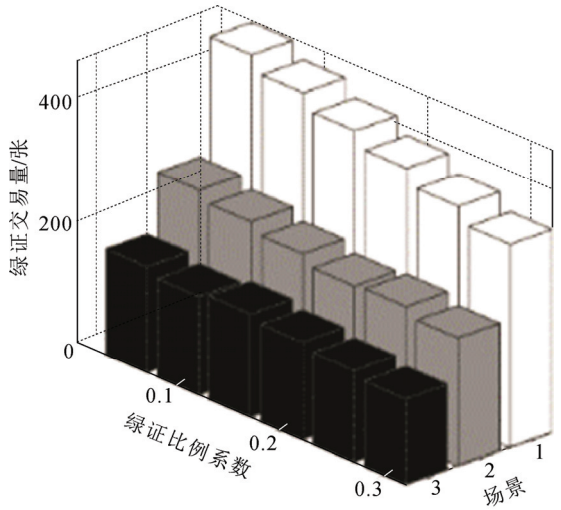
分析参数	λ^{TGC}=0.05	λ^{TGC}=0.15
所有发电商总利润/元	544 496.338	516 426.42
发电商 j_1 利润/元	253 632.934	240 225.059
发电商 j_2 利润/元	290 863.404	276 201.361
日前出清阶段电价/(元·MWh^{-1})	400	400
日前出清阶段火电机组中标量/MW	(700，0，600，250)	(700，0，600，250)
日前出清阶段风电场中标量/MW	(300，150)	(300，150)
实时出清阶段电价/(元·MWh^{-1})	(0；800；800)	(0；800；800)
实时出清阶段各场景上/下旋转备用量/MW	(−120，0，−120，−60；0，0，0，0；0，+90，0，+60)	(−120，0，−120，−60；0，0，0，0；0，+90，0，+60)

成可再生电能配额考核要求，使其绿证购买成本增多；而火电机组绿证购买需求的增大也导致绿证价格上涨，使得风电场出售绿证的收益增加。然而，由于发电商拥有的火电装机容量较大，风电场售出绿证的收益不足以抵消火电机组的绿证购买成本，导致发电商总利润随绿证比例系数的增大而降低。由此可见，绿证比例系数的增加使可再生能源机组收益和传统能源机组成本相应增大，能够优化发电商的机组配置，促进能源低碳化、清洁化发展。

图 4 和图 5 进一步展示了不同绿证比例系数下的绿证交易量和交易价格。由图 4、5 可知，随着绿证比例系数的增大，绿证交易量逐渐减少，而绿证价格相应上升。这是因为绿证比例系数的增大会导致绿证供给量减少，进而降低绿证交易量。另一方



(a) 各场景下发电商j_1的绿证交易量



(b) 各场景下发电商j_2的绿证交易量

图 4　不同绿证比例系数下发电商的绿证交易量

Fig.4　Green certificate trading quantity of power generation companies with different renewable energy quotas

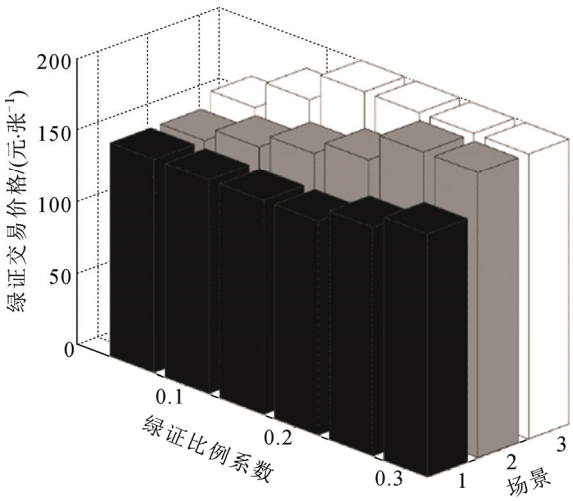


图 5　不同绿证比例系数下的绿证交易价格

Fig.5　Green certificate trading price of power generation companies with different renewable energy quotas

面，绿证比例系数的增大提高了火电机组的绿证需求量。受此供需关系影响，绿证价格也相应升高。

4 结论

本文提出一种随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场均衡分析方法，主要结论如下：

1）在绿证与碳配额约束下，各机组边际成本发生改变，高排放机组出力受限，碳减排机组与可再生能源机组市场竞争力上升，区域实际碳排放明显降低。

2）通过收紧碳配额总量和降低碳配额基准值，能够限制高排放机组出力，提升减排企业的竞争力，并降低区域实际碳排放。

3）通过提高绿证比例系数，可以影响绿证供需关系和市场价格，增加传统能源机组成本及可再生能源机组收益，促进能源结构向低碳化、清洁化转型。

4）如何在本文所提方法框架下考虑更详细的机组运行特性和更多样化的需求响应形式将是后续的主要研究方向。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[2] 黎观海，朱建全，赵文猛，等. 考虑灵活性不足风险的园区综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术，2024，50(2)：704-713.
LI Guanhai, ZHU Jianquan, ZHAO Wenmeng, et al. Optimal dispatch of park-level integrated energy systems considering the risk of insufficient operational flexibility[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 704-713.

[3] 朱建全，刘海欣，叶汉芳，等. 园区综合能源系统优化运行研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2469-2482.
ZHU Jianquan, LIU Haixin, YE Hanfang, et al. Review on optimal operation of park-level integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2469-2482.

[4] 魏震波，魏平桉，郭 毅，等. 考虑需求侧管理和碳交易的电-气互联网络分散式低碳经济调度[J]. 高电压技术，2021，47(1)：33-47.
WEI Zhenbo, WEI Ping'an, GUO Yi, et al. Decentralized low-carbon economic dispatch of electricity-gas network in consideration of demand-side management and carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 33-47.

[5] 孙瑜歌，丁 涛，黄雨涵，等. 高比例新能源电力市场不同发展阶段划分及形态结构演进[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2725-2743.
SUN Yuge, DING Tao, HUANG Yuhan, et al. Development stage division and morphological evolution of power market with high proportion of renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2725-2743.

[6] 张晓龙，杜松怀，苏 娟，等. 考虑碳排放价格的电力市场均衡分析[J]. 智能电网，2015，3(9)：818-822.
ZHANG Xiaolong, DU Songhuai, SU Juan, et al. Cournot equilibrium analysis of electricity markets considering carbon emission price[J]. Smart Grid, 2015, 3(9): 818-822.

[7] 邓盛盛，陈皓勇，肖东亮，等. 考虑碳市场交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 南方电网技术，2024，18(1)：143-152.
DENG Shengsheng, CHEN Haoyong, XIAO Dongliang, et al. Equilibrium analysis of oligopoly electricity market considering carbon market trading[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 143-152.

[8] 陈丽霞，周 云，方 陈，等. 考虑碳交易的发电商和电力用户竞价博弈[J]. 电力系统及其自动化学报，2019，31(10)：66-72.
CHEN Lixia, ZHOU Yun, FANG Chen, et al. Bidding game between power generation companies and consumers considering carbon trade[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10): 66-72.

[9] 卢治霖，刘明波，尚 楠，等. 考虑碳排放权交易市场影响的日前电力市场两阶段出清模型[J]. 电力系统自动化，2022，46(10)：159-170.
LU Zhilin, LIU Mingbo, SHANG Nan, et al. Two-stage clearing model for day-ahead electricity market considering impact of carbon emissions trading market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 159-170.

[10] 赵新刚，任领志，万 冠. 可再生能源配额制、发电厂商的策略行为与演化[J]. 中国管理科学，2019，27(3)：168-179.
ZHAO Xingang, REN Lingzhi, WAN Guan. Renewable portfolio standards, the strategic behavior of power producers and evolution[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(3): 168-179.

[11] XU L, DONG X L, TAN H H, et al. A multi-participant dynamic game model in electricity market under renewable portfolio standard and green certificates trading[C]//Proceedings of 2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Taiyuan, China: IEEE, 2021: 3477-3482.

[12] 李 飞，李咸善，鲁明芳，等. 计及配额考核约束的发电商与大用户直购电博弈优化模型[J]. 高电压技术，2023，49(1)：128-137.
LI Fei, LI Xianshan, LU Mingfang, et al. Optimization model of power generation and large users directly purchasing electricity considering quota assessment constraints[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 128-137.

[13] 安学娜，张少华，李 雪. 考虑绿色证书交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 电力系统自动化，2017，41(9)：84-89.
AN Xuena, ZHANG Shaohua, LI Xue. Equilibrium analysis of oligopolistic electricity markets considering tradable green certificates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 84-89.

[14] 彭 谦，周晓洁，杨 睿. 国家绿色电力证书交易市场与省级日前电力市场协调均衡机制设计[J]. 电网技术，2020，44(7)：2565-2571.
PENG Qian, ZHOU Xiaojie, YANG Rui. Design of coordination and balance mechanism between national green power certificate trading market and provincial day-ahead power market[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2565-2571.

[15] 李秋航，李华强，何永祥，等. 计及碳排放成本的输电网与风电分布鲁棒协同扩展规划[J]. 电力信息与通信技术，2023，21(1)：62-70.
LI Qiuhang, LI Huaqiang, HE Yongxiang, et al. A distributionally robust joint expansion planning for transmission network and wind power considering carbon emissions cost[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(1): 62-70.

[16] 董福贵，郗来昊，孟子航. 考虑碳交易的电力现货市场出清多阶段优化模型研究[J]. 电网技术，2024，48(1)：79-90.

DONG Fugui, XI Laihao, MENG Zihang. Multi-stage optimization model for electricity spot market clearing considering carbon trading[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 79-90.

[17] 张　刚，张　峰，张　利，等. 考虑碳排放交易的日前调度双阶段鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5490-5499.
ZHANG Gang, ZHANG Feng, ZHANG Li, et al. Two-stage robust optimization model of day-ahead scheduling considering carbon emissions trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5490-5499.

[18] 杨明杰，胡扬宇，千海霞，等. 计及碳排放的综合能源配网日前与日内多时间尺度优化调度[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(5)：96-106.
YANG Mingjie, HU Yangyu, QIAN Haixia, et al. Optimization of day-ahead and intra-day multi-time scale scheduling for integrated power-gas energy system considering carbon emission[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 96-106.

[19] 中国电力企业联合会规划发展部. 全国碳市场发电行业配额分配制度浅析[J]. 中国电力企业管理，2021(19)：19-21.
Analysis of the quota allocation system for the national carbon market power generation industry[J]. China Electric Power Enterprise Management, 2021(19): 19-21.

[20] 陈　巍，江岳文. 碳-绿证-电量市场耦合交易优化研究[J]. 电网技术，2023，47(6)：2273-2284.
CHEN Wei, JIANG Yuewen. Trading optimization of carbon-green certificate-electricity market coupling[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2273-2284.

[21] ZUGNO M, MORALES J M, PINSON P, et al. Pool strategy of a price-maker wind power producer[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3440-3450.

[22] PRETE C L, GUO N C, SHANBHAG U V. Virtual bidding and financial transmission rights: an equilibrium model for cross-product manipulation in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(2): 953-967.

[23] ZHAO T Y, YI H L, CHEN M H, et al. Efficient and robust equilibrium strategies of utilities in day-ahead market with load uncertainty[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(4): 5246-5257.

[24] GUO H Y, CHEN Q X, XIA Q, et al. Modeling strategic behaviors of renewable energy with joint consideration on energy and tradable green certificate markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 1898-1910.

[25] KAZEMPOUR S J, ZAREIPOUR H. Equilibria in an oligopolistic market with wind power production[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 686-697.

[26] 段声志，陈皓勇，郑晓东，等. 碳市场背景下发电商竞价策略及电力市场均衡分析[J]. 电测与仪表，2022，59(5)：33-41.
DUAN Shengzhi, CHEN Haoyong, ZHENG Xiaodong, et al. Bidding strategy of electricity generation and electricity market equilibrium analysis under the background of carbon market[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 33-41.

[27] RUIZ C, CONEJO A J. Pool strategy of a producer with endogenous formation of locational marginal prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(4): 1855-1866.



陈　荃
1981—，女，硕士，高工
主要从事电力市场、电网规划和清洁能源方面的研究
E-mail: chenquan300@163.com

CHENG Quan
Senior engineer



朱建全(通信作者)
1982—，男，博士，教授，博导
主要从事电力系统建模、分析与优化及电力市场等方面的研究
E-mail: zhujianquan@scut.edu.cn

ZHU Jianquan
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-08-11　修回日期　2024-04-07　　编辑　程子丰

附录 A

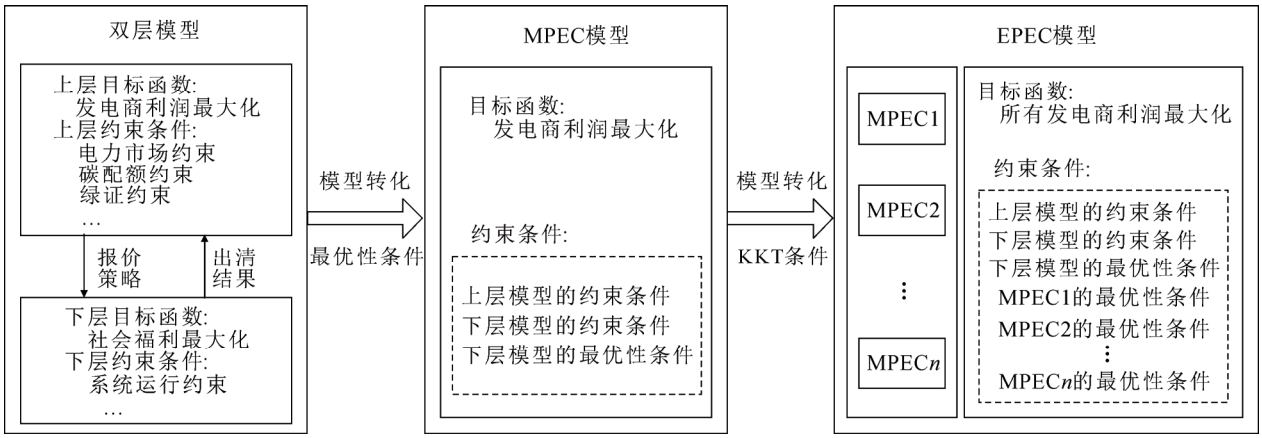


图 A1　所提方法的理论架构

Fig. A1　Theoretical framework of the proposed method

附录 B

表 B1　火电机组相关技术经济参数

Table B1　Technical and economic parameters of thermal power units

机组类别	$P_i^{\max}$ /MW	C_i /(元·MWh^{-1})	$R_i^{U^{\max}}$ /MW	$R_i^{D^{\max}}$ /MW	$\delta_{b,i}$ /(t·MWh^{-1})
火电 i_1	700	150	120	120	0.7
火电 i_2	400	250	90	90	0.8
火电 i_3	600	200	120	120	0.71
碳捕集火电 i_4	350	300	90	90	0.087 5

表 B2　风力发电场景参数

Table B2　Parameters of wind power generation scenarios

场景	概率	风电场 k_1 发电功率/MW	风电场 k_2 发电功率/MW
ω_1	0.2	500	250
ω_2	0.4	300	150
ω_3	0.4	200	100

表 B3　碳配额与绿证相关参数

Table B3　Carbon quota and green certificate related parameters

相关参数	数值	相关参数	数值
L^{CO_2} /t	1 100	p_2 /(元·张$^{-1}$)	170
p^{CO_2} /(元·t^{-1})	60	p_3 /(元·张$^{-1}$)	160
λ^{TGC}	0.1	p_4 /(元·张$^{-1}$)	150
α /(张·元$^{-1}$)	0.1	l_0 /(元·张$^{-1}$)	0
p_0 /(元·张$^{-1}$)	200	q_0 /(元·张$^{-1}$)	100
p_1 /(元·张$^{-1}$)	180		