

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231656

“双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究

李璐^{1,2}, 张泽端¹, 毕贵红¹, 阚小瑞¹, 陈仕龙¹

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 布鲁内尔大学工程、设计与物理科学学院, 英国 伦敦 UB8 3PH)

摘要: 能源结构转型和碳减排政策是实现“双碳”目标的重要举措。本研究旨在探讨“双碳”背景下发电行业碳减排政策与市场交易机制的耦合作用。通过研究绿色证书市场交易机制、碳排放市场交易机制与电力市场机制间的耦合协同效应, 考虑了价格影响市场间机制、能源结构分析和技术创新等因素, 建立系统动力学模型并进行多情景仿真, 研究不同政策组合对市场均衡及电力行业碳减排的影响。通过对模型的敏感性分析, 评估了各种政策措施对系统行为的潜在影响, 对政策体系的作用机理及其协同机制进行分析, 明确不同政策间可能存在的冗余激励和效应冲抵等现象。研究得出: 有效的碳减排政策组合使得未来十年火电装机占比下降至45%, 可再生能源占比突破50%与传统能源持平甚至超过传统能源。建议碳减排政策的成功实施需要综合考虑市场监管、激励机制、技术创新等多方面因素。

关键词: 碳减排; 系统动力学; 绿色证书; 碳排放; 电力市场

Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets

LI Lu^{1,2}, ZHANG Zeduan¹, BI Guihong¹, KAN Xiaorui¹, CHEN Shilong¹

(1. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. School of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel University, London UB8 3PH, UK)

Abstract: Energy structure transformation and carbon emission reduction policies are important initiatives to realize the “dual-carbon” goal. This paper aims to explore the coupling role of carbon emission reduction policy and market trading mechanism in the power generation sector in a “dual-carbon” background. It studies the coupling and synergistic effect between the green certificate market trading, the carbon emission market trading and the power market mechanisms. It takes into account factors such as price influence inter-market mechanism, energy structure analysis and technological innovation, to set up a system dynamics model and carry out a multi-scenario simulation. This studies the impact of different combinations of policies on market equilibrium and carbon emission reduction in the power sector. Through the sensitivity analysis of the model, this paper evaluates the potential impact of various policy measures on system behavior, analyzes the mechanism of the policy system and its synergy mechanism, and clarifies the phenomena of redundant incentives and offsetting effect that may exist among different policies. It concludes that the effective combination of carbon emission reduction policies will enable the installed share of thermal power to fall to 45% in the next decade, and the share of renewable energy to exceed 50% to equal or even exceed that of traditional energy. It is suggested that the successful implementation of carbon emission reduction policies requires comprehensive consideration of market regulation, incentive mechanisms, technological innovation and other factors.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52067009).

Key words: carbon emission reduction; system dynamics; green certificate; carbon emission; electricity market

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52067009); 国家重点研发计划项目资助(2022YFB2703500); 昆明理工大学课程思政内涵式建设项目资助(2021KS009); 昆明理工大学在线开放课程(MOOC)建设项目资助(202107)

0 引言

面对全球变暖和化石燃料短缺的双重压力，我国于 2020 年正式提出“双碳”目标，自主承诺争取在 2030 年前实现减少二氧化碳排放的增涨，努力争取在 2060 年前实现碳中和目标，抵消二氧化碳排放量，使碳排放与吸收达到平衡状态。2021 年 3 月，中央财经委员会提出构建新型电力系统来改变电源结构、用电结构和生态系统。目前，配额制通过立法对发电总量中的可再生能源发电量份额做出强制规定，中国的绿证交易也是在一定时间后才与可再生能源配额制逐渐结合。二者共同促进可再生能源发展，由政府导向逐渐向市场导向过渡，并实现绿色能源低碳转型^[1-2]。现阶段，更多国内学者针对政策结合实施下的机制设计问题进行研究，文献[3-4]梳理配额制及绿证框架并研究其对碳减排路径的影响。文献[5-11]研究了可再生能源的低碳、高效的动态发展，从发电侧利润到消费侧成本，分析可再生能源发展带来的消纳。通过规划能源的博弈主体和不确定性价值，落实中央力度，为电力系统供给侧转型提供基础并演化至理想状态。文献[12]提出了光热电站市场参与碳排放权交易的竞价策略。文献[13-14]基于长三角城市群和广东省相关数据提出碳减排政策建议。文献[15-19]研究了单一政策实施或组合政策共同实施对碳减排政策的作用效果，探讨电力市场中上网电价的影响来完善新型电力系统。文献[20-24]梳理了近期中国碳交易市场的规划，分析如何规避不利于碳市场发展的风险，以及碳价的不稳定性对碳减排目标的实现产生不利影响。提出以碳配额拍卖逐步取代免费配发的方式、实施“低开端，动态渐进”的税率模式，在发展中寻求碳减排、调整产业结构和发电结构等政策建议。2023 年 4 月，“Fit for 55”相关提案正式被通过。碳市场改革作为欧盟脱碳议程的核心，具有里程碑意义。目前，各国均采用相关措施来发展碳市场。英国宣布将设立碳边境调节机制，对碳密集型产品征收关税。新西兰碳市场更新了价格稳定机制，设定了拍卖底价加成本控制的储备方式。加州碳市场提出当碳价触及上限，储备库将释放一定量配额到市场，以降低价格。韩国碳市场也采取拍卖结合免费发放的配额分配方式^[25]。

本文以绿电厂商作为绿证交易市场的主体，传统能源发电厂商作为碳排放权交易市场的主体，分别考虑绿证价格、碳价、各发电主体的电力供给及需求之间的联系。

目前，电力行业发电侧的碳减排政策以可再生

能源配额制、碳排放权交易机制和绿证交易机制为主^[26-30]，研究了碳价、绿证价格对整个电力市场交易的影响。各类能源包括以火电为主的传统能源，以风电、光伏、水电为主的可再生能源，而其他可再生能源如核电、生物质在可再生能源中占比较少。绿证兑换主要与风光发电有关，且绿证消纳交易量远不及绿证的核发电量。因此，暂不考虑涉及水力发电、核电以及其他可再生能源兑换绿证。但是，为了研究我国各类电源结构的趋势，水电大规模装机以及水电发电量不可忽略。最终将本文模型中的能源结构分为三部分，分别是传统能源的火电、可兑换绿证的可再生能源风电、光伏发电和不可兑换绿证的水电。本文研究各市场机制作用对我国发电行业的发电量、装机量等的影响，运用系统动力学搭建了量化模型，探讨政策下市场交易、发电能源占比和碳减排的发展，为实现我国发电行业的节能减排提出切实可行的建议。

1 系统动力学在电力市场能源结构规划的应用

系统动力学的核心在于如何定义系统的边界、理清各种因素之间的关系以及系统的因果循环。系统动力学以因果反馈和控制理论为基础，利用计算机仿真研究整个系统动态行为与结构功能之间的内在联系，深入探讨复杂因素间信息反馈行为，找到最优化的解决方案。系统动力学的研究步骤可分为五步并分别对应其在电力市场能源结构规划的应用，如图 1 所示。

2 基于系统动力学的发电行业市场型减排政策影响模型

2.1 系统边界及假设

构造模型并完善系统边界及规定假设条件如下所述。

1) 为了完善模型，本文构建的系统中除了包含火电、风电、光伏的装机容量及发电量情况，还增加了水电装机容量及发电量变化情况。模拟水电装机及变化量是为了探究电力行业能源结构及发电量占比，更具有说服力。

2) 绿证市场中绿证的供给方为可再生能源发电企业，绿色证书供给者统一为风力和光伏发电企业，考虑绿证的消纳问题，水电并不参与绿证供给。否则，绿证供给量上升影响供求关系不平衡，绿证价格大幅下降不利于可再生能源政策的发展。绿证求购者为火电和其他购电主体。

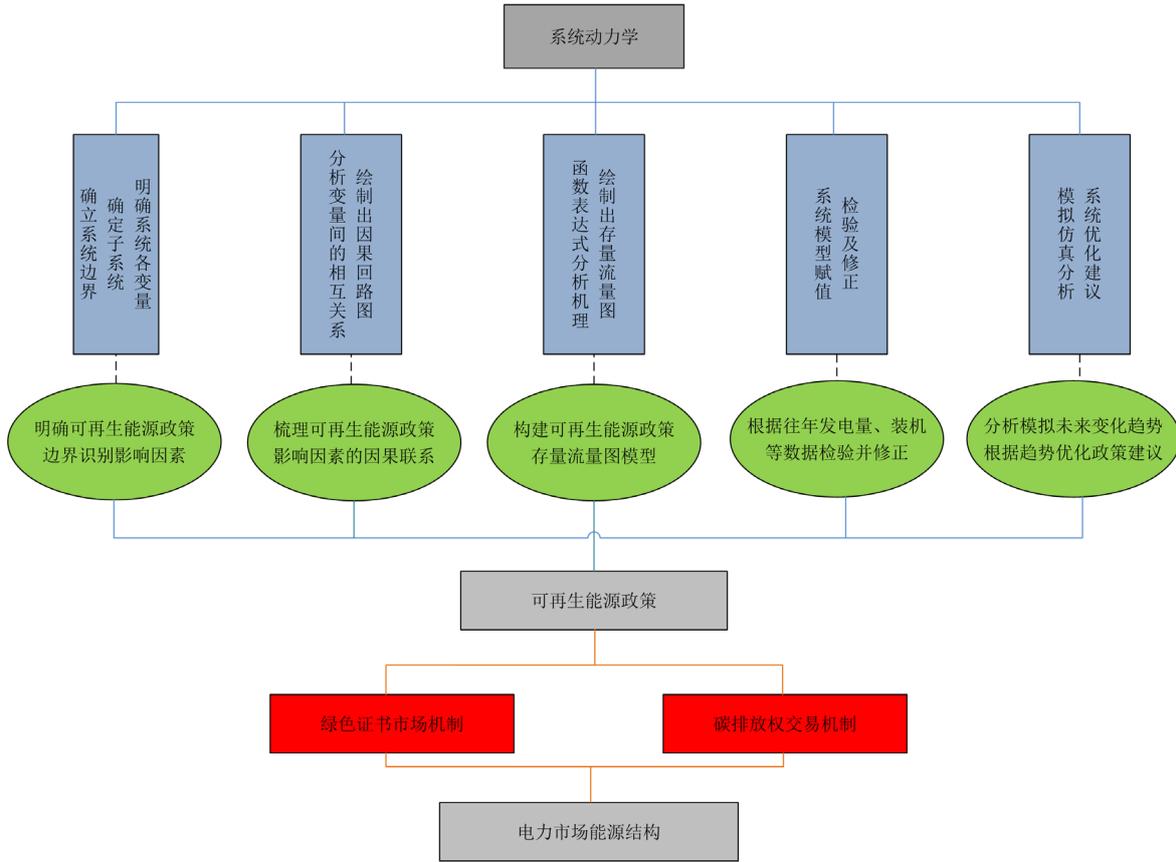


图1 系统动力学在电力市场能源结构规划的应用

Fig. 1 Application of system dynamics to energy structure planning for electricity market

3) 绿证交易和电力交易在不同市场分别开展, 不存在捆绑交易。

4) 绿证有效期为 12 个月, 并规定每个绿证兑换 1000 kWh 可再生能源电量, 不考虑各类能源发电的差异性。

5) 关于绿证市场方面, 为使绿证市场有效运行, 本文结合统计数据中可再生能源机组的现有容量和补贴水平, 绿证市场具体设定如下: 绿证初始价格为 220 元/MWh; 基准情境下的绿证约束配额比例约为 0.166; 上网电价初始值为 0.4 元/kWh; 碳价初始价格为 50 元/吨。

2.2 模型建立

根据市场运行规律, 价格影响利润, 利润影响投资建设装机。风光发电商的利润将随着电价和绿证价格的上涨而增加, 风光能源建设的投资增加促进了风光发电的发展, 最终导致绿证价格降低。同时, 风光发电量关系到电力市场的电力供给, 根据供求原理, 供大于求时, 电价降低。碳成本较高时, 减少火电厂商利润, 市场上的火力发电量下降, 促进火电厂商对发电技术改造或者投资新建可再生能

源机组, 对电力系统的供电结构优化、绿证市场的供求产生一定的影响。政府强制提升可再生能源的份额, 意味着在满足总的电力需求下会减少对火电的需求。考虑到配额制与绿证市场实施初期配额比例不会有太大改变, 火电所需的碳排放权将会减少, 从而导致碳价的下降。水电厂商只参与电力供给和能源结构装机占比。因果回路图如图 2 所示。

绿证市场和电力市场、碳排放权交易市场和电力交互市场的两市场主要的函数关系式如式(1)~式(28)所示。

$$\Delta P_g = P_{g0} + \int D_g dt \quad (1)$$

$$QS_g = QS_{g0} + \int (SU_g - TR_g) dt \quad (2)$$

$$QB_g = QB_{g0} + \int (TR_g - HO_g) dt \quad (3)$$

$$I_g = I_{g0} + \int I_g^n dt \quad (4)$$

$$SU_g = I_g \times k_1 \quad (5)$$

$$HO_g = \alpha(D_c \times k_1) \quad (6)$$

$$I_g^n = \text{DELAY FIXED}(IC_g, 8, 0) \quad (7)$$

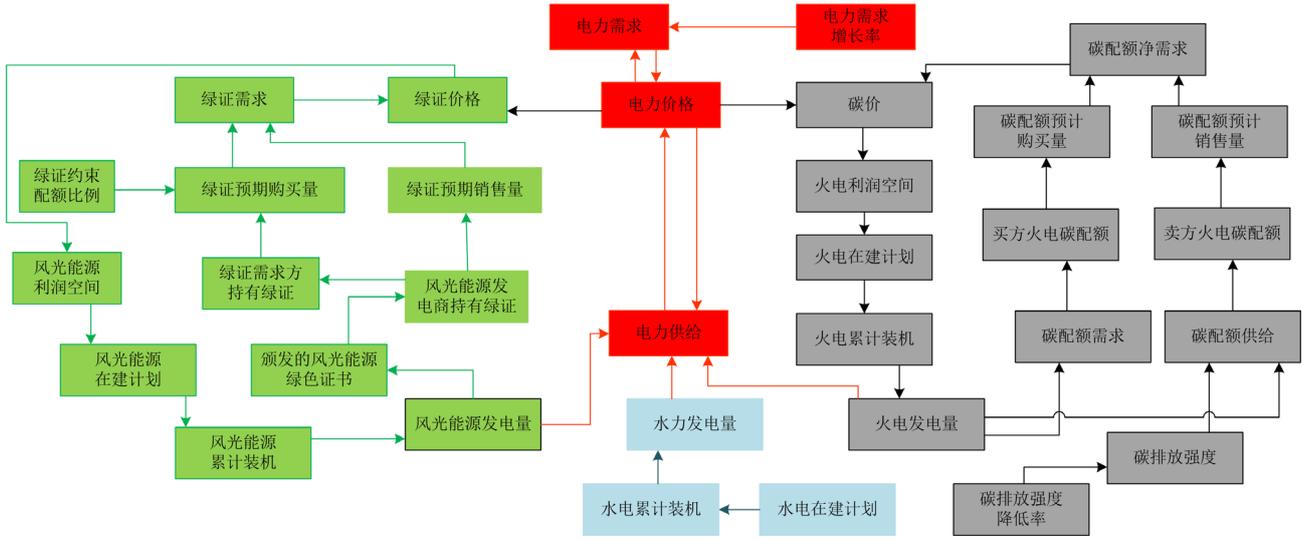


图2 因果回路图

Fig. 2 Causal loop diagram

$$P_g = \begin{cases} 450, \text{SMOOTH3I}(\Delta P_g, 3, 220) > 450, \\ 75, \text{SMOOTH3I}(\Delta P_g, 3, 220) < 75, \\ \text{SMOOTH3I}(\Delta P_g, 3, 220) \end{cases} \quad (8)$$

$$C_g = 0.3 + P_g / 10^3 \quad (9)$$

$$F_g = P_c + C_g \quad (10)$$

$$k_1 = E_g / S_c \quad (11)$$

$$k_2 = I_g / I \quad (12)$$

$$E_g = I_g \times t_g \quad (13)$$

式中： ΔP_g 为绿证价格变化； P_g 为绿证价格； P_{g0} 为绿证价格初值； D_g 为绿证需求； QS_g 为发电企业拥有的绿证数量； QS_{g0} 为发电企业拥有绿证初值； SU_g 为绿证供给； TR_g 为绿证销售； QB_g 为电网拥有的绿证数量； QB_{g0} 为电网拥有绿证初值； HO_g 为绿证上交； I_g 为风光装机容量； I_{g0} 为风光装机容量初值； I_g^n 为风光装机容量建设完成； k_1 为风光发电占比； α 为绿证约束配额比例； D_e 为电力需求； F_g 为风光能源利润； t_g 为风光平均利用小时数； C_g 为风光能源成本； P_e 为上网电价； E_g 为风光发电量； S_c 为电力供给； k_2 为风光能源装机占比； I 为总装机容量。

在绿证交易市场中，变量单位如下：绿证价格单位为元/MWh；与绿证数量相关的变量、电力需求及供给量、发电量单位为亿 kWh；装机容量单位为亿 kW；电价、成本及利润设定单位为元/kWh；

风光平均利用时间单位为 h；剩余变量单位为无量纲。

$$\Delta P_c = P_{c0} + \int D_c dt \quad (14)$$

$$QB_c = QB_{c0} + \int (TR_c - DE_c) dt \quad (15)$$

$$QS_c = QS_{c0} + \int (SU_c - TR_c) dt \quad (16)$$

$$I_c = I_{c0} + \int I_c^n dt \quad (17)$$

$$D_c = q_c \times 0.848 \quad (18)$$

$$SU_c = R_{GDP} \times B_c \times k_7 + q_c / 10^3 \times 0.848 \quad (19)$$

$$IC_c = D_c \times \Delta D_c \times F_c / t_c \quad (20)$$

$$I_c^n = \text{DELAY FIXED}(IC_c, 18, 0) \quad (21)$$

$$k_7 = E_c / S_c \quad (22)$$

$$k_8 = I_c / I \quad (23)$$

$$E_c = I_c \times t_c \quad (24)$$

$$F_c = P_c - C_c \quad (25)$$

$$M_s = M \times \sigma \quad (26)$$

$$P_c = \begin{cases} 300, \text{SMOOTHI}(\Delta P_c \times V_c, M_s, 50) > 300, \\ 20, \text{SMOOTHI}(\Delta P_c \times V_c, M_s, 50) < 20, \\ \text{SMOOTHI}(\Delta P_c \times V_c, M_s, 50) \end{cases} \quad (27)$$

$$B_c = B_{c0} + \int \beta dt \quad (28)$$

式中： P_c 为碳价； ΔP_c 为碳价变化； P_{c0} 为碳价初值； QB_{c0} 为买方火电需购碳配额初值； QS_{c0} 为卖方火电需购碳配额初值； F_c 为火电企业利润； SU_c 为碳配额供给； I_{c0} 为火电在建装机容量初值； I_c^n 为火电装机容量建设完成； DE_c 为碳配额净需求； q_c 为火电发电量； R_{GDP} 为实

际GDP; k_7 为火力发电占比; IC_c 为火电在建装机容量; I_c 为火电装机容量; E_c 为火电发电量; t_c 为火电平均利用小时数(时/年); ΔD_e 为电力需求增长率; M_s 为拍卖配额; M 为配额总量; σ 为拍卖比例; B_c 为碳排放强度; B_{c0} 为碳排放强度初值; β 为碳排放强度降低率。

在碳排放权交易市场中, 变量单位如下: 碳价单位为元/吨; 与碳配额数量相关的变量单位为亿吨; GDP单位为万亿元; 装机容量单位为亿kW; 火电发电量单位为亿kWh, 成本及利润设定单位为元/kWh; 火电平均利用时间单位为h; 剩余变量单位为无量纲。

绿证价格和碳价的约束如下: 绿证价格的初始价格为220元/MWh, 且 $75 < P_g < 450$ 元/MWh;

碳价初始价格为50元/吨, 且 $20 < P_c < 300$ 元/吨。若价格在上下限区间内波动则取实际价格, 高于价格上限则取价格上限, 低于价格下限则取价格下限。在约束条件中, 假设绿证价格与绿证价格变化、初值有关, 始终在绿证价格上下限内。同样, 碳价也始终在碳价上下限内。碳价则和碳价变化、电价波动、拍卖配额和碳价初值有关。可再生能源政策实施的初始阶段中, 风、光伏发电占比份额较小, 不考虑电价波动; 火电占比份额大, 电价影响受煤等原材料影响较大。所以, 碳价公式中电价波动因素更贴合实际。拍卖配额是政府补贴向市场导向转型的方式。

本文分别构建绿证市场和电力市场、碳排放权交易市场 and 电力交互市场的两市场模型, 如图3、图4所示。

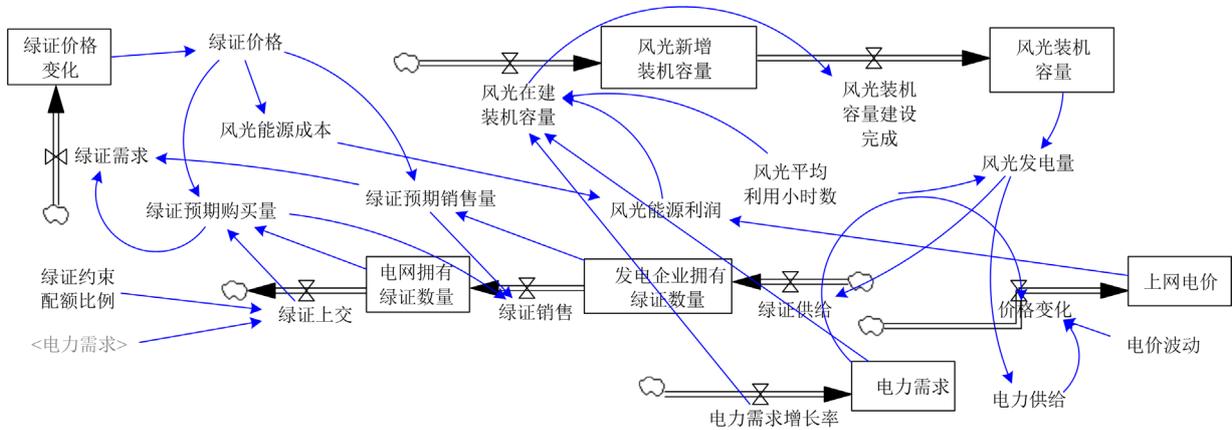


图3 绿证市场和电力市场的存量流量图

Fig. 3 Stock flow diagrams for the green certificate market and the electricity market

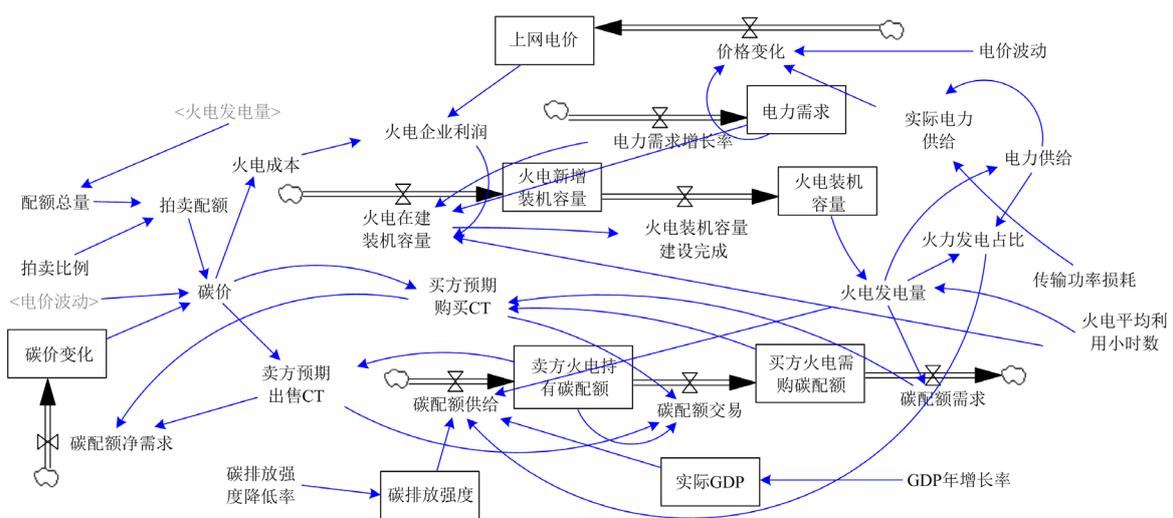


图4 碳排放权交易市场和电力市场的存量流量图

Fig. 4 Stock flow diagrams for the carbon emissions trading market and the electricity market

综合上述模型,为了研究我国能源发电量占比、能源装机占比的趋势,传统能源的火电、可兑换绿

证的可再生能源风电和光伏发电以及不可兑换绿证的水电和电力市场构建了三市场模型,如图5所示。

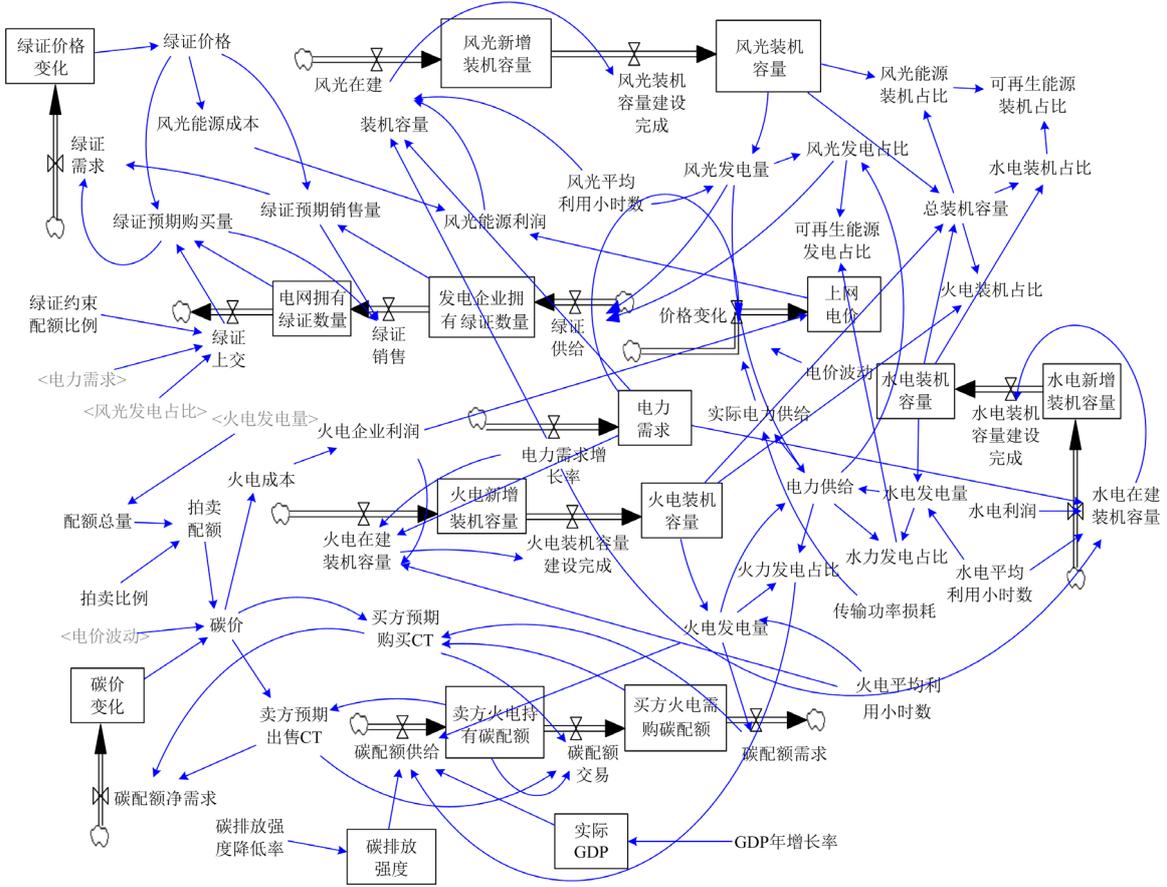


图5 三市场模型存量流量图

Fig. 5 Three markets model stock flow diagram

$$P_c = P_{c0} + \int \Delta P_c dt \quad (29)$$

$$IC_w = D_c \times (\Delta D_c / 12) \times F_w / t_w \quad (30)$$

$$I_w^n = \text{DELAY1I}(IC_w, 24, 0) \quad (31)$$

$$k_3 = E_w / S_c \quad (32)$$

$$k_4 = I_w / I \quad (33)$$

$$k_5 = k_1 + k_3 \quad (34)$$

$$k_6 = k_2 + k_4 \quad (35)$$

$$E_w = I_w \times t_w \quad (36)$$

$$I = I_g + I_w + I_c \quad (37)$$

$$S_c = E_c + E_w + E_g \quad (38)$$

$$R_{S_c} = S_c (1 - \gamma) \quad (39)$$

$$D_c = D_{c0} + \int [D_c \times (\Delta D_c / 12)] dt \quad (40)$$

$$R_{GDP} = GDP_0 / 12 + R_{GDP} \times \varepsilon / 12 \quad (41)$$

式中: P_c 为上网电价; P_{c0} 为上网电价初值; ΔP_c 为

价格变化; R_{S_c} 为实际电力供给; IC_w 为水电在建装机容量; F_w 为水电利润; t_w 为水电平均利用小时数; I_w^n 为水电装机容量建设完成; k_3 为水力发电占比; k_4 为水电装机占比; k_5 为可再生能源发电占比; k_6 为可再生能源发电装机占比; E_w 为水电发电量; I_w 为水电装机容量; γ 为传输功率损耗; GDP_0 为GDP初值; ε 为GDP年增长率。

三市场因素中未提及因素的变量单位如下: 水电装机容量单位为亿 kW; 水电发电量单位为 kWh, 利润设定单位为元/kWh; 剩余变量为无量纲单位。

2.3 数据收集并赋值

对模型设定的数据赋值,基于《中国统计年鉴》中的数据设定模拟时间为120个月,以2019年为起始年对模型进行仿真,得到2020年、2021年的仿真数据。对仿真、真实两组数据进行真实性检验,满足误差在允许范围内的认为该模型可以在实际中运

用,可用于后续的预测分析。具体设定如下:风光平均利用时间为 1543.7 h;火电平均利用时间为 4242 h;水电平均利用时间为 3638 h;2019 年全国初始 GDP 约为 99.1 亿元;由于 2019 年为模型验证起始年,所以能源新增装机量设为零。2019 年风光装机容量为 4.133 亿 kW;火电装机容量为 11.8957 亿 kW;水电装机容量为 3.5804 亿 kW。买方需要购买的碳配额为零,卖方火电需购碳配额为 39.504 亿吨。GDP 增长率为 6.11%,约 0.06;可再生设备周期为 8 个月;火电设备周期为 18 个月;水电设备周期为 24 个月。

2.4 真实性检验

建模的过程中可能涉及无法考虑的因素,因此允许模拟值与真实值存在误差不得超过 10%。真实性检验是否准确是衡量模型有效的重要标志^[31],见表 1。模拟各类发电机组容量、电力需求以及 GDP 的仿真值与年实际值对比,检验结果说明构建的模型较为准确。

表 1 真实性检验结果

Table 1 Authenticity test results

变量		2020 年	2021 年
风光能源装机容量/亿 kW	仿真值	4.885	6.78
	真实值	5.3521	6.2525
	误差/%	9.5	7.8
风光能源发电量/亿 kWh	仿真值	7439.19	10 325.4
	真实值	7276	9828
	误差/%	2.2	4.8
火电装机容量/亿 kW	仿真值	12.278	13.177
	真实值	12.496	12.974
	误差/%	1.8	1.5
火电发电量/亿 kWh	仿真值	52 084.9	55 517.3
	真实值	51 770	56 655
	误差/%	0.6	2
电力需求/亿 kWh	仿真值	77 341.5	82 111.8
	真实值	75 498	83 313
	误差/%	2.4	1.5
GDP/万亿元	仿真值	105.138	112.26
	真实值	101.36	114.92
	误差/%	3.6	2.4
水电装机容量/亿 kW	仿真值	3.944	4.28
	真实值	3.7028	3.9094
	误差/%	6.1	8.7
水电发电量/亿 kWh	仿真值	12 920.5	14 021.3
	真实值	13 553	13 399
	误差/%	4.9	4.4

3 仿真结果分析

3.1 两市场、三市场下的绿证市场主要因素实证结果对比分析

如图 6 所示,供需关系影响价格,绿证价格及

绿证价格变化的发展趋势为先升高后下降。在可再生能源政策的初始阶段,对绿证需求过高,投资商投资绿证大幅度增加。根据供小于求的原理,绿证价格持续上升直至绿证过于饱和,而绿证的消纳却比较少,绿证供大于求,绿证价格缓缓下降。绿证价格变化较绿证价格出现先停止上升的趋势,是因为市场信息有延迟,绿证价格经过一段延迟后再开始下降。

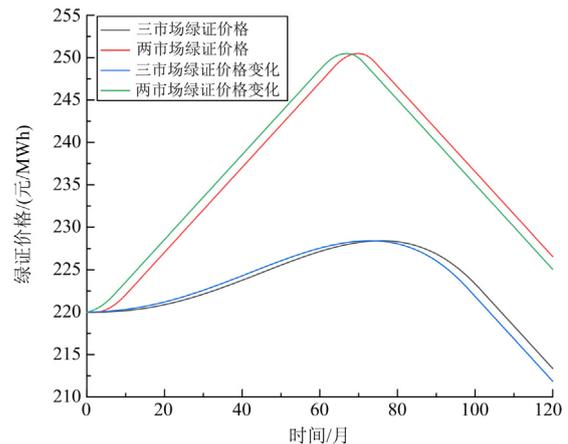


图 6 绿证价格及其价格变化的市场对比

Fig. 6 Market comparison of green certificate prices and their price changes

如图 7 所示,投资商依据风光发展趋势来投资绿证市场,直接影响风光能源装机建设。随着利润空间的扩大,投资者会进一步增加风光能源的建设计划,大幅度提高可再生能源装机容量,曲线呈现匀速上升的趋势。在建装机容量影响并促使新增装机容量和累计装机容量的完成。经过周期建设完成后,在建装机容量才可投入使用。由于在建装机容量是速率变量,而新增装机容量为存量,在建装机容量的大小是装机增长速率进行增长的过程。在建装机容量增加后,经过延迟为新增装机容量。因此,从初始到第一批周期建设完成的阶段,风、光新增装机容量为零。政府实施可再生能源政策后,风、光装机容量匀速上升,存在以下的函数关系:风光能源装机容量=风光能源新增装机容量+风光能源装机容量完成。因此,上述曲线满足风光能源装机量变化的趋势。

对比只加入可再生能源配额制政策下的绿色市场机制单一市场机制,两市场下的绿证价格和绿证价格变化有较为明显的促进。然而,在三市场模型中加入碳排放交易市场机制,一定程度地提高了电价,而绿证价格与电价呈负相关的关系,导致绿证价格相比于两市场较低。故提出以下建议:根据两

市场和三市场的变化趋势，两市场下的绿证需求曲线变化速率较快，不利于政府的干预，更不利于大力发展可再生能源政策。而且在引入绿色证书市场机制和碳排放市场机制下的初期，三市场耦合效应下的系统发展更稳定。两市场与三市场主要区别在于碳交易市场的引入，导致绿证供需及其价格变化有较大的变化。针对目前可再生能源消纳问题尚未得到妥善解决的情况，风光能源的装机迅速增加导致发电量的急剧扩大未必是件好事。

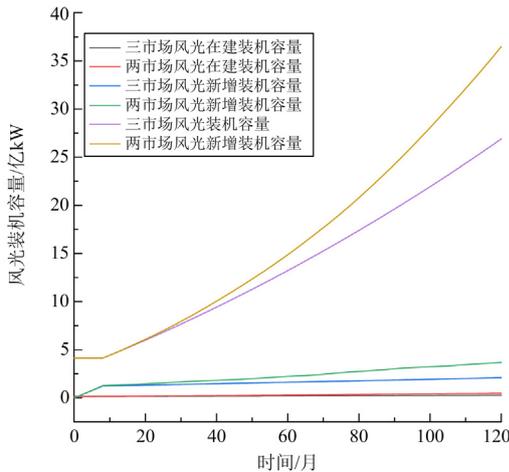


图 7 风光能源装机趋势变化图

Fig. 7 Trends in wind and solar energy installations

3.2 两市场与三市场下的碳排放权交易市场主要因素对比分析

如图 8、图 9 所示，碳价的波动不仅受电价波动的影响，还受碳价关系和碳配额需求的影响，而碳配额需求主要由卖方预期出售碳配额和买方预期购买碳配额共同决定。碳市场开展初期是碳市场发展趋势的观望阶段，碳价基本保持不变。随着碳市场的发展，碳价逐渐下降并趋于稳定。

在碳排放权交易市场初期，依据近一两年的煤电企业发电量和碳排放量来分配碳配额。2020 年开始大力发展可再生能源政策，往年的火电发电量和碳排放量有比较大的基数。买方发电企业预期购买碳配额的需求较大，很多企业观望到碳市场获利，便有更多的企业参与市场。在初期，国家政府对碳排放交易市场给予补贴和适当干预，市场活跃度适度增加交易量和提高交易频率。伴随着碳减排总体发展，碳价明显下降，可再生能源发电量增加，整个系统的碳排放总量降低，不再需要更多的碳排放权，买方预期购买量的波动较小，导致碳价不断下降。对于碳配额过剩，企业会选择出售多余的碳配额，造成碳配额供给增加使碳价下降并逐渐趋于稳定。

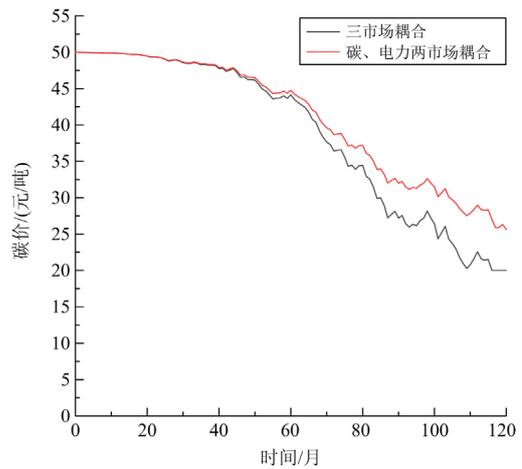


图 8 碳价的市场对比

Fig. 8 Market comparison of carbon prices

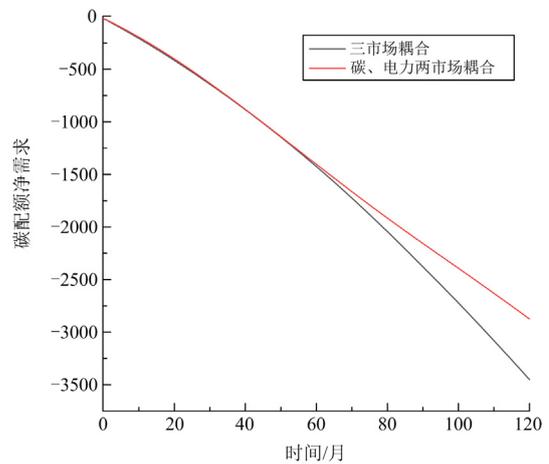


图 9 碳配额需求的市场对比

Fig. 9 Market comparison of carbon allowance demand

如图 10 所示，在建装机容量影响新增装机容量，火电新增装机容量趋势与在建装机容量相似，但稍有滞后。累计装机容量取决于原有装机容量和新增装机容量，因此火电累计装机初始值是在原有装机容量的基础上依据新增装机容量进行增长。在建装机容量投入使用有滞后性，随后快速增长。火电累计装机容量会影响发电量趋势，二者变化趋势基本相同，由保持稳定到快速发展。

两市场及三市场耦合下的上网电价变化趋势如图 11 所示。上网电价存在差异的主要原因是电价受绿证价格负相关和碳价正相关的影响，电价波动趋势较为平滑稳定。三市场下的上网电价在几分钱内上下波动，因此其关系到电力用户和电量销售的稳定性。

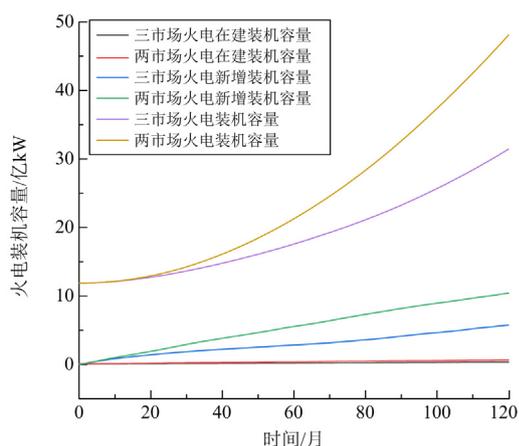


图 10 火电装机趋势的市场对比

Fig. 10 Market comparison of thermal power installation trends

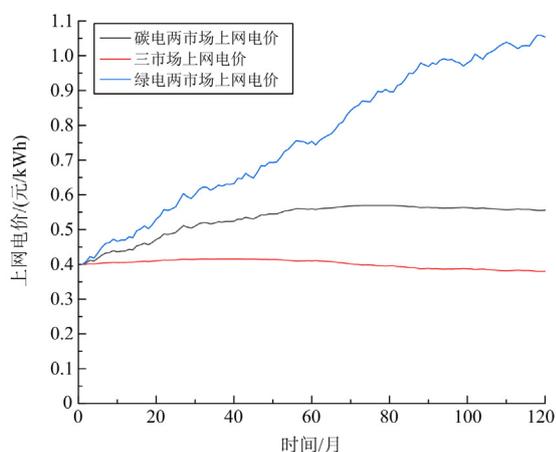


图 11 上网电价的市场对比

Fig. 11 Market comparison of feed-in tariffs

分析绿色证书市场与电力市场、碳排放权交易市场与电力市场的两市场模型和绿色证书市场、碳排放权交易市场与电力市场三市场模型可知, 三市场模型具有显著优势, 单一碳排放权交易政策下的电力市场虽然会抑制火电机组装机, 但效果比三市场模型较弱。

根据以上分析, 与两市场模型相比, 三市场模型下的火电装机容量和发电量呈平缓趋势。通过对比两市场模型和三市场模型中传统能源装机容量的变化趋势, 在考虑绿证价格因素的情况下, 火电装机容量有所下降, 火电发电量造成电力供给变化。在电力需求不变的情况下, 火电供给减少的差额由可再生能源发电补偿, 因此火电占比下降, 可再生能源占比上升。同时, 可再生能源发电量的增加, 意味着绿色能源占比大幅提升, 导致碳排放量的减少, 卖方更能提前完成碳配额目标, 首先影响的是

卖方火电持有的碳配额销售与供给, 因此卖方火电企业在提前完成碳配额目标的前提下可以供给更多的碳配额, 导致卖方碳配额供给增多, 进而导致价格的下降。

3.3 组合碳减排政策情景模拟仿真结果及分析

在三市场模型中, 政策因素间关系的改变导致未知的多样性和风险性, 可能产生对目标更有益的结果, 或者会产生抵消作用甚至低于单一政策效果, 本文通过设定情景分析确认政策的最佳效果^[32]。

在三市场耦合作用下, 改变单一变量、同时改变两个或三个变量, 可将模型分为低强度 3 种情景、中强度 3 种情景、高强度 2 种情景, 并将上述 8 种情景与基准情景对比, 共计 9 种, 如表 2 所示。图 12—图 16 分析了 9 种模拟变化趋势, 改变变量对绿证价格、碳价以及火电装机容量变化影响较大、风电装机容量影响较小、上网电价影响略小。

表 2 情景设计

Table 2 Scenario design

参数	绿证约束 配额比例/%	单位碳排 放强度	碳配额 拍卖比例
情景 1: 三市场耦合(基准)	16.6	-0.06	0.1
情景 2: 三市场耦合低强度 1	20	-0.06	0.1
情景 3: 三市场耦合低强度 2	16.6	-0.08	0.1
情景 4: 三市场耦合低强度 3	16.6	-0.06	0.2
情景 5: 三市场耦合中强度 1	16.6	-0.08	0.2
情景 6: 三市场耦合中强度 2	20	-0.06	0.2
情景 7: 三市场耦合中强度 3	20	-0.08	0.1
情景 8: 三市场耦合高强度 1	25	-0.08	0.25
情景 9: 三市场耦合高强度 2	30	-0.1	0.3

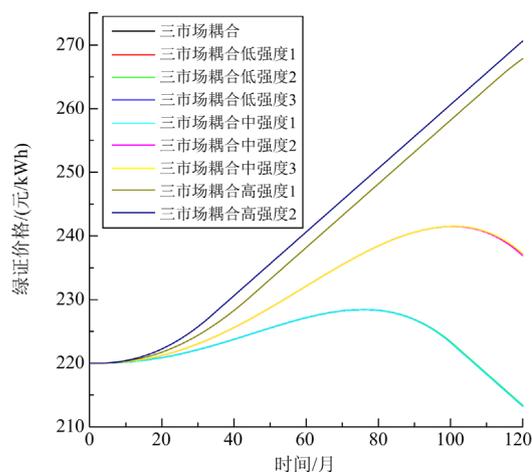


图 12 绿证价格

Fig. 12 Green certificates prices

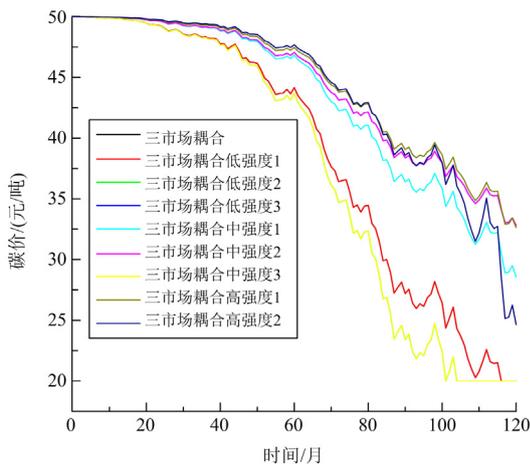


图 13 碳价
Fig. 13 Carbon price

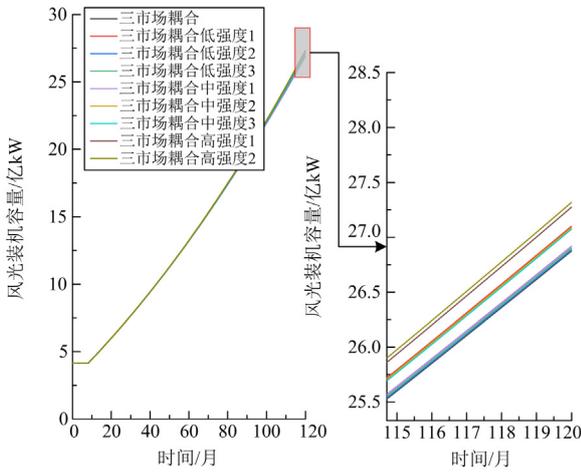


图 14 风光装机容量
Fig. 14 Installed wind and solar capacity

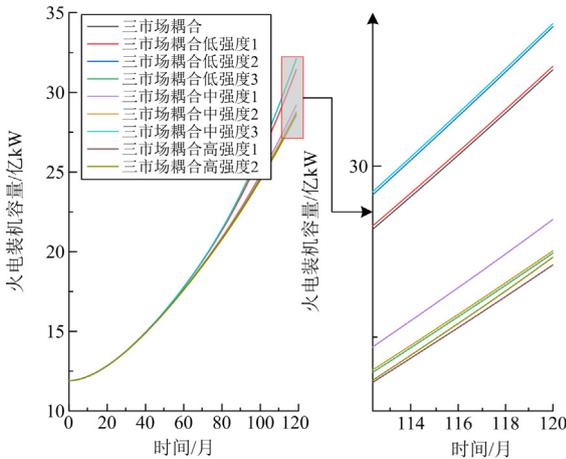


图 15 火电装机容量
Fig. 15 Installed thermal power capacity

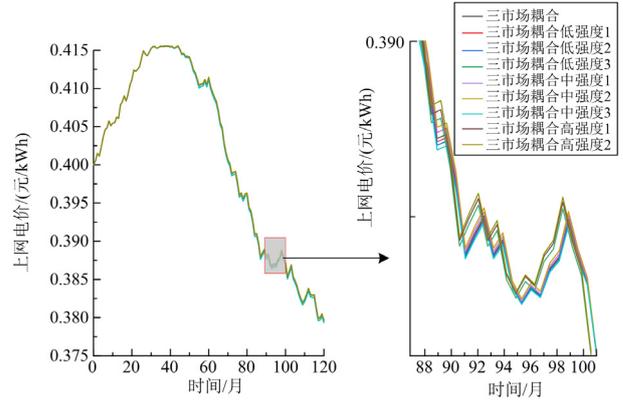


图 16 上网电价
Fig. 16 Feed-in tariff

情景 8、9 同时提高 3 个参数，情景 9 的模拟效果更优于情景 8。在这两类情景下，虽然对火电装机容量及发电量大量减少的模拟效果有显著作用，但是技术成本过高，因此这两类情景不予考虑。情景 3、4、5 分别只改变碳市场单一参数或同时改变两参数，导致绿证价格较低，对绿电抑制影响过大，不予考虑。

虽然，情景 7 下的绿证价格和碳价均保持在一定不错的水平，但对火电装机容量及其发电量不仅没有抑制反而促进了火电的发展，因此不能全盘否决这类情景，视政策发展趋势允许以下情况促进火电的发展。可再生能源发电量大量增加，考虑到可再生能源并网问题出现的不稳定性，影响电力系统的可靠性；或者在电力需求过大的情况下，允许增加火电装机容量及发电量以满足电力需求。

情景 2 和情景 6 模拟效果较优。考虑到发展趋势和技术，情景 2 只改变单一参数所带来的利益大于同时改变多个参数的情景下的政策效果，说明政策间出现冗余效果或是效益抵消。情景 2 相较于情景 6 对火电抑制作用不大，最终考虑情景 6。

4 结论与对策建议

基于政策的实施，本文根据仿真数据模拟出电源结构的调整、装机容量占比的预测，如图 17 和图 18 所示，依据模型仿真分析得出变量数据变化趋势，得到模拟效果的结论。

1) 风电、光伏发电以迅猛之势扩增。在可再生能源配额制的绿证市场下，国家政府对绿证市场的绿证价格补贴、干预以及实施可再生能源政策，这一系列举措取得了显著效果。但是，供需关系的平衡是影响价格的关键，妥善解决绿证的消纳问题是

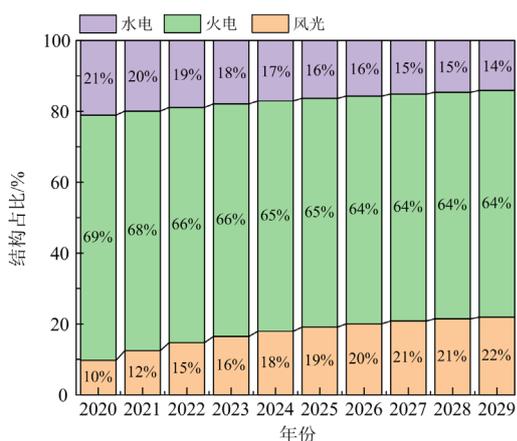


图 17 电源结构占比预测

Fig. 17 Power structure percentage forecast

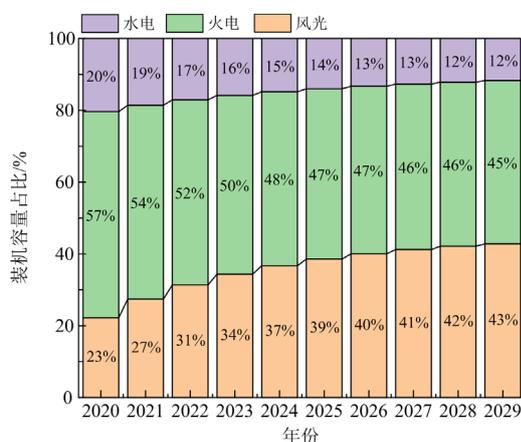


图 18 装机容量占比预测

Fig. 18 Installed base percentage forecast

重中之重。增加绿证供给的同时保证绿证的消纳，才能实现可再生能源的长远发展。

2) 水电作为我国目前可再生能源发电之一，水势充足的地区发电站相对饱和，目前对水电支持力度小于风电、光伏发电，故水电装机容量以缓慢的趋势递增，水电发电量增长速度较光伏发电相对缓慢。因此，水电占比呈略微的下降趋势。

3) 在政策实施的初期阶段，火电有缓慢下降的趋势。但在后面几年呈现出微弱且较为平稳增加的趋势，这属于正常现象。在政策刚实施时，国家干预作用明显。但火电作为我国发电的主力，实现大幅度下降还是比较困难的，预测几年之内火电发展呈微幅度下降。因此，为减少碳排放量，提出以下建议：减少火电在电源结构占比可以减少碳排放量，同时提高火电企业碳排放技术来改善碳排放量更为稳妥。由于风电、光伏发电的不稳定性，火电增长趋势略有回升。待可再生能源增长得到可靠消纳时，

火电发电量将会慢慢减少，呈下降趋势。

4) 以火电、风电、光伏发电、水电为主要能源完成对各类能源装机占比的预测，在模拟初期的政策把控下，风电、光伏发电发展迅速，且10年后装机容量有望与火电持平，实现2030年碳达峰的目标指日可待。火电装机容量占比将从2020年的57%下降至2029年的45%。其他可再生能源包括水电、核电以及生物质等占比将在2030年能突破50%，可以与传统能源持平甚至超过。为了尽早完成碳达峰目标，同时保证电力系统可靠性和稳定性，并分析发电量变化趋势，建议采取如下措施：维持火电企业是所有发电企业主导地位，不可大幅度减少火电发电量同时发展可再生能源，在此期间，根据火电灵活性的特点，同时提高碳排放技术，减少碳排放量。模拟风光发电和水电为主的可再生能源发电量占比约为36%，考虑现实因素，所有可再生能源发电量有望突破40%。

5) 考虑情景6同时提高碳排放强度和拍卖比例两个参数，提出以下建议：提高碳配额拍卖比例显著抑制了火电发电商的发展，对火电装机有一定的抑制作用，但是会造成绿证价格降低。因此，鼓励发电企业发展低碳节能减排技术，并提高碳排放强度才是发展的长久之计。

根据以上研究结果分析，实施绿证交易和碳排放权交易，一方面可以激励投资者加大可再生能源建设，另一方面能够减少煤电厂商发电量，通过发电厂商之间的交易以及发电厂商和电力市场之间的交易来实现可再生能源发展的目标，优化电源结构以达到减少碳排放和改善社会福利的美好愿景。

参考文献

- [1] TU Q, MO J, BETZ R, et al. Achieving grid parity of solar PV power in China — the role of tradable green certificate[J]. Energy Policy, 2020, 144.
- [2] YU B, ZHAO Z, ZHAO G, et al. Provincial renewable energy dispatch optimization in line with renewable portfolio standard policy in China[J]. Renewable Energy, 2021, 174: 236-252.
- [3] 刘文君, 张莉芳. 绿色证书交易市场、碳排放权交易市场对电力市场影响机理研究[J]. 生态经济, 2021, 37(10): 21-31.
LIU Wenjun, ZHANG Lifang. Research on the impact mechanism of green certificate trading market, carbon emission trading market on electricity market[J]. Ecological Economy, 2021, 37(10): 21-31.
- [4] 周秀秀. 不同市场型碳减排政策对发电行业碳排放的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.

- [5] 陈文淑乐, 向月, 彭光博, 等. “双碳”目标下电力系统供给侧形态发展系统动力学建模与分析[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1567-1576.
CHEN Wenxule, XIANG Yue, PENG Guangbo, et al. System dynamic modeling and analysis of power system supply side morphological development with “dual carbon” targets[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2021, 55(12): 1567-1576.
- [6] 杨立兵, 张汀荟, 李雅超, 等. 基于配额制的可再生能源电力交易系统动力学仿真[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(5): 497-507.
YANG Libing, ZHANG Dinghui, LI Yachao, et al. System dynamics simulation of renewable energy power trading based on renewable portfolio standard[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 497-507.
- [7] 余顺坤, 毕平平, 杨文茵, 等. 基于配额制的可再生能源动态发展系统动力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2599-2608.
YU Shunkun, BI Pingping, YANG Wenyin, et al. Dynamic development system dynamics of renewable energy considering renewable energy quota system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2599-2608.
- [8] 崔宁, 周宇, 赵晓亮. 四方主体参与碳减排的演化博弈研究[J]. 中国环境科学, 2023, 43(12): 6788-6802.
CUI Ning, ZHOU Yu, ZHAO Xiaoliang. Research on the evolutionary game of carbon emission reduction involving four entities[J]. China Environmental Science, 2023, 43(12): 6788-6802.
- [9] 谷金蔚, 卢阳洋. 中国绿证市场的现状分析与交易机制优化[J]. 电力建设, 2019, 40(10): 45-55.
GU Jinwei, LU Yangyang. Status analysis on Chinese tradable green certificate market and the optimization of trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(10): 45-55.
- [10] 张金良, 袁伟伟. 不同政策工具对发电企业碳减排的影响路径[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2017(4): 24-30.
ZHANG Jinliang, YUAN Weiwei. The influence path of different policy instruments for carbon emission reduction in power generation enterprises[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2017(4): 24-30.
- [11] 杨楠, 丁力, 刘钊, 等. 市场背景下考虑不确定性价值和全市场要素博弈的电力系统规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 11-23.
YANG Nan, DING Li, LIU Zhao, et al. Power system planning method considering uncertainty value and entire market element game under market background[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 11-23.
- [12] 马云聪, 武传涛, 林湘宁, 等. 计及碳排放权交易的光热电站市场竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 82-92.
MA Yuncong, WU Chuantao, LIN Xiangning, et al. Bidding strategy for a concentrated solar power plant participating in the electricity market with the background of carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 82-92.
- [13] 扶雪琴. “双碳”目标背景下长三角城市群区域碳减排政策量化评价研究[J/OL]. 科学与管理: 1-16[2024-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1020.G3.20231229.0903.002.html>.
FU Xueqin. Research on quantitative evaluation of regional carbon emission reduction policy of China's Yangtze river delta urban agglomeration towards the “carbon peak and carbon neutral” goal[J/OL]. Science and Management: 1-16[2024-02-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1020.G3.20231229.0903.002.html>.
- [14] 邓盛盛, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 发电商参与碳市场与电力中长期市场联合决策模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 1-10.
DENG Shengsheng, CHEN Haoyong, XIAO Dongliang, et al. A joint decision making model for power generators to participate in the carbon market and the medium-and long-term power markets[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 1-10.
- [15] 张金良, 周秀秀. 基于系统动力学的发电行业市场型碳减排政策影响分析[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 114-123.
ZHANG Jinliang, ZHOU Xiuxiu. Impact analysis of market-oriented carbon emission reduction policies in power generation industry based on system dynamics[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 114-123.
- [16] 于超, 何璞玉. 电力产业链节能减排政策模拟的经济系统动力学模型[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2014(5): 5-12.
YU Chao, HE Puyu. Economic system dynamics model for policy simulation of energy saving and emission reduction in power industry chain[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2014(5): 5-12.
- [17] 赵文会, 宋亚君, 张圣富, 等. 基于系统动力学的发电权与排污权组合交易分析[J]. 科技管理研究, 2017, 37(7): 172-181.
ZHAO Wenhui, SONG Yajun, ZHANG Shengfu, et al. Analysis of generation right trading and emission trading based on system dynamics[J]. Science and Technology Management Research, 2017, 37(7): 172-181.
- [18] 谭忠富, 刘文彦, 刘平阔. 绿色证书交易与碳排放权

- 交易对中国电力市场的政策效果[J]. 技术经济, 2014, 33(9): 74-84.
- TAN Zhongfu, LIU Wenyan, LIU Pingkuo. Policy effect of tradable green certificate and carbon emission trading on China's electric power market[J]. Journal of Technology Economics, 2014, 33(9): 74-84.
- [19] BALIETTI C A. Trader types and volatility of emission allowance prices. Evidence from EU ETS phase I[J]. Energy Policy, 2016, 98: 607-620.
- [20] ZHANG L, LI Y, JIA Z. Impact of carbon allowance allocation on power industry in China's carbon trading market: computable general equilibrium based analysis[J]. Applied Energy, 2018, 229: 814-827.
- [21] TAN X, WANG X. The market performance of carbon trading in China: a theoretical framework of structure-conduct-performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 159: 410-424.
- [22] 王喜平, 王玥玥. 基于系统动力学的电力行业碳排放预测[J]. 智慧电力, 2016, 44(6): 29-32, 58.
- WANG Xiping, WANG Yueyue. Power industry carbon emissions prediction based on system dynamics[J]. Smart Power, 2016, 44(6): 29-32, 58.
- [23] 王喜平, 王仕恒. 碳交易试点政策对电力碳减排的影响效应[J]. 分布式能源, 2023, 8(3): 10-16.
- WANG Xiping, WANG Shiheng. Effect of pilot carbon trading policy on carbon emission reduction of electricity[J]. Distributed Energy, 2023, 8(3): 10-16.
- [24] 吕雁琴, 达振华, 杨洋, 等. “双碳”背景下碳税设计及其对碳排放和宏观经济的影响[J]. 生态经济, 2023, 39(6): 25-31, 38.
- LÜ Yanqin, DA Zhenhua, YANG Yang, et al. Design of carbon tax and its impact on carbon emissions and macroeconomics under the background of “dual carbon” goal[J]. Ecological Economy, 2023, 39(6): 25-31, 38.
- [25] 王科, 吕晨. 中国碳市场建设成效与展望(2024)[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2024, 26(2): 16-27.
- WANG Ke, LÜ Chen. Achievements and prospect of China's national carbon market construction (2024)[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2024, 26(2): 16-27.
- [26] 贡保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
- YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a “dual carbon” mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.
- [27] 江岳文, 陈巍. 电-碳-配额制耦合交易综述与展望[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 1-13.
- JIANG Yuewen, CHEN Wei. Review and prospect of coupled electricity-carbon-renewable portfolios trading[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 1-13.
- [28] 朱玥荣, 张楠, 肖云鹏, 等. 基于卖方灵活合同的绿电与绿证中长期联合交易机制及其均衡分析[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(4): 398-405.
- ZHU Yuecong, ZHANG Nan, XIAO Yunpeng, et al. Medium-and long-term joint transaction mechanism of green electricity and green certificates based on sell-side flexible contracts and the equilibrium analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(4): 398-405.
- [29] 张虹, 孟庆尧, 马鸿君, 等. 面向提升绿证需求的跨区互联系统经济低碳调度策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 51-61.
- ZHANG Hong, MENG Qingyao, MA Hongjun, et al. Economic and low-carbon dispatching strategy of cross-region interconnected system for promoting green certificate demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 51-61.
- [30] YE Sizhe, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Cross-regional green certificate transaction strategies based on a double-layer game model[J]. Applied Energy, 2024, 356.
- [31] 刘丽娟, 王灵梅, 杨春. 火电企业节能减排的系统动力学仿真模型的建立[J]. 华东电力, 2010, 38(10): 1498-1500.
- LIU Lijuan, WANG Lingmei, YANG Chun. Establishing system dynamic model for energy saving and emission reduction in electric power enterprise[J]. East China Electric Power, 2010, 38(10): 1498-1500.
- [32] 李荣. 电力碳减排多重政策体系协同模型及效果评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
-
- 收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-03-04
- 作者简介:
- 李璐(1976—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力市场、可再生能源政策、能源经济; E-mail: 103586871@qq.com
- 张泽端(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、电力经济与管理、可再生能源并网; E-mail: 1213684594@qq.com
- 陈仕龙(1972—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、牵引供电系统。
- (编辑 姜新丽)