

doi: 10.19920/j.cnki.jmsc.2026.05.003

碳交易背景下电力上网方式与可再生能源投资^①

许 兰^{1,2}, 杨 俊^{2*}, 程继鑫³

(1. 四川农业大学经济学院, 成都 611130; 2. 重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400044;
3. 中南大学商学院, 长沙 410083)

摘要: 在电力市场化改革、新能源发电补贴取消以及碳市场交易等体制机制改革的交互作用下, 中国可再生能源发展的不确定性进一步加剧。本研究分析了可再生与化石电力平价上网以及竞争上网时的可再生能源投资决策问题, 并讨论了基于排放强度控制的碳交易以及发电间歇性等因素对能源投资和碳排放的影响; 同时, 基于中国电力市场和碳市场的相关数据, 本研究对理论分析结果进行了数值模拟验证, 并从边际减排成本的视角估算了碳价进一步上升的空间。结果表明, 1) 平价上网的情形下, 碳交易未对可再生电力投资产生直接的激励作用, 而其对化石电力投资的影响取决于化石电力碳排放强度与其基准碳排放率的相对大小; 2) 竞争上网时, 化石电力的基准碳排放率越低, 碳交易对可再生电力投资的促进作用和化石电力投资的抑制作用越显著; 3) 竞争上网时的可再生电力投资较平价上网时的情形有所下降, 但市场竞争下合理的碳排放定价可实现电力系统的低碳转型。本研究可为电力市场化改革背景下的能源结构转型以及电-碳市场的协同发展提供有益借鉴。

关键词: 可再生能源投资; 能源结构转型; 平价上网; 市场竞争; 碳交易; 碳排放

中图分类号: F424 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2026)05-0032-21

0 引言

在发电补贴以及技术进步等因素的驱动下, 中国可再生能源发电成本已有较大幅度的下降, 可再生电力装机量呈现出逐年上升的态势^[1]。例如, 中国风电、太阳能发电装机量分别从 2015 年底的 1.29×10^8 kW 和 0.43×10^8 kW 上升到了 2022 年底的 3.65×10^8 kW 和 3.93×10^8 kW。然而, 与传统化石电力相比, 可再生电力仍存在投资消纳成本高、供应不稳定等问题。一方面, 受制于气候、地理等自然条件, 太阳能、风能等可再生能源发电存在间歇性, 降低了可再生电力的投资优

势。另一方面, 尽管可再生电力发电成本已有了较大幅度的下降, 但在可再生能源发电补贴逐渐褪去的当下^②, 其成本优势并不显著。

同时, 随着电力市场化改革的推进, 中国正逐步建立电力现货交易机制, 以改变传统的计划调度方式^[2]。2018 年—2019 年, 中国第一批电力现货试点在广东、浙江、甘肃等八个地区启动了试运行; 2022 年, 第二批电力现货试点在上海、江苏、湖北等 6 省市启动了试运行。电力现货市场可通过市场化的电量平衡机制发现电力商品价格, 实现电力资源的市场化配置。完全竞争时, 在有效的竞价规则及算法的支撑下, 电力出清价格将等于

① 收稿日期: 2023-06-13; 修订日期: 2024-05-27。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72503159; 72303252; 72403148); 国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20252445); 四川省社会科学基金资助项目(SCJJ25QN03; SCJJ25ZD06)。

通讯作者: 杨俊(1972—), 男, 重庆铜梁人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: yangjun@cqu.edu.cn

② 例如, 据国家发改委发布的《2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》, 新核准的陆上风电、集中式光伏以及工商业分布式光伏项目自 2021 年起与煤电平价上网, 中央财政不再给予补贴。

最后一单位交易电力的边际生产成本。在竞争上网的环境中,可再生能源较低的边际生产成本在增加其竞争优势的同时也将降低交易价格,进而影响各类电力的投资决策。

碳排放定价是解决化石能源负外部性、提高可再生能源竞争力的一种有效手段^[3]。碳排放定价的目的在于内部化碳排放的负外部性成本,进而促进低碳投资、降低二氧化碳排放。碳税和碳市场是最常见的两种碳定价工具。中国自2011年起陆续在北京、上海、重庆等八个省(市)启动了地方性的碳交易试点,并于2021年启动了全国性的碳交易市场建设。据生态环境部发布的《2021、2022年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案》,全国碳交易市场实行以碳排放强度控制为基础的配额免费分配机制。该方案针对不同机组设定了相应的碳排放限值,称为碳排放基准值。若企业的碳排放强度高于碳排放基准值,则需从市场中购入排放配额并支付相应的成本;反之,若企业的碳排放强度低于碳排放基准值,则可将多余的配额售出并获取一定的收益。在该交易机制中,碳排放基准值的设定和碳价的高低将成为决定电力企业排放成本以及该机制有效性的关键因素。

在上述背景的交互作用下,存在以下亟须回答的问题:在平价上网以及市场竞争的环境中,可再生电力投资能否超过化石电力并实现电力系统的低碳转型?同时,基于排放强度控制的碳交易将如何影响电力企业的投资决策以及系统碳排放?碳交易价格的上升是否可抵消高投资成本、间歇性带给可再生电力的竞争劣势?对此,已有研究未给出充分阐释。本研究将在考虑可再生能源发电间歇性的前提下,对上述问题进行分析。具体地,本研究将使用理论模型对比分析平价上网及竞争上网时可再生和化石电力的投资变化,以及以排放强度控制为基础的碳交易对电力结构转型和碳排放的影响。同时,本研究将利用中国电力市场和碳交易市场的相关数据对理论分析结果进行数值模拟验证。最后,本研究将从边际减排成本的角度测算碳价上升的空间,并讨论碳价上升能否实现电力结构的清洁化转型。

相对于已有研究,本研究的边际贡献在于以下三个方面:1)在中国新能源上网补贴逐步取

消、电力市场化改革进一步加深的背景下,本研究对比分析了可再生与化石电力平价上网以及竞争上网时的均衡投资量及相关影响因素,可为中国电力市场化改革下的电力结构转型提供有益借鉴;2)本研究进一步分析了以排放强度控制为基础的碳交易市场中,碳价及碳排放基准值等关键变量的变化对可再生电力投资和碳排放的影响,可为碳交易市场与电力市场的联动提供理论借鉴;3)本研究从边际减排成本的角度测算了碳价上升的空间,并分析了碳价上升对电力结构和碳排放的影响,可为中国实现能源结构转型和“双碳”目标提供一定的实践指导。

1 文献综述

可再生能源的发电成本和技术特征是影响其投资的重要因素。与传统化石电力相比,可再生电力的成本特征表现为较高的初始投资成本和较低的边际生产成本^[4]。在“干中学”以及“研中学”等效应的作用下,中国风电、光伏等可再生电力的装机成本呈现出逐年下降的趋势,但仍缺乏相对于煤电的竞争优势^[5]。同时,可再生能源发电的间歇性特征也是影响其投资的主要因素^[6]。对此,相关研究从不同视角进行了探讨^[4,7,8]。例如,Aflaki和Netessine^[4]分析了发电间歇性对可再生能源投资和碳排放的影响。结果表明,若考虑可再生能源的发电间歇性,碳税的提高可能会降低可再生能源的投资份额。因此,本研究将在同时考虑可再生能源成本特征和发电间歇性的前提下对其投资问题进行分析。

此外,可再生能源投资也受到电力定价、电力市场结构等体制因素的影响^[9-11]。例如,Peura和Bunn^[9]建立了一个同时包含电力现货市场和远期市场的博弈模型。研究发现,一方面,风能较低的边际生产成本可降低电价水平;但另一方面,通过远期市场对冲,可再生电力有可能提升电价水平。Sunar和Birge^[10]研究了一个存在日前电力市场的情境。可再生能源和传统发电企业在日前市场报告其下期的产量计划,如果实际产量低于其承诺的产量,则对其处于一定的罚金。结果表明,施加罚金提高了可再生电力的承诺供给量,但降

低了电力供给的可靠性。结合中国电力市场从计划调度向市场竞争过渡的现实背景,本研究将对可再生与化石电力平价上网以及竞争上网时的投资决策问题进行对比分析。

最后,政策是可再生能源发展的最初驱动因素^[12]。按政策的作用对象划分,促进可再生能源投资的政策可分为直接性和间接性政策。其中,直接性政策指的是直接作用于可再生能源本身的政策,主要包括可再生能源配额制、上网电价制度、可交易绿色证书、税收优惠^[13-15]。其中,可再生能源配额制要求电力供应商提供一定比例的可再生能源,是一种数量驱动的配额制度^[16];上网电价则通过为生产者提供长期购电合同和稳定的电价来促进可再生能源的发展,是一种价格驱动的可再生能源促进政策^[17]。本研究讨论的可再生电力“平价上网”问题即属于一种上网电价政策。在相关政策的研究上,学者们从政策机制设计、政策效果评估以及政策之间协同与对比等视角进行了广泛的讨论^[5, 14, 18-22]。

间接性政策指的是间接促进可再生能源发展的一类政策,主要涉及碳税和碳交易^[23-25]。碳税和碳交易均有各自的优缺点和适用范围^[26]。本研究关注的是碳交易机制下的可再生能源发展问题。对此,学者们从不同视角进行了讨论^[27-30]。例如,程承等^[29]研究了碳交易机制中,可再生电力参与国家核证自愿减排时,可再生能源企业技术创新行为与政府激励行为间的演化博弈问题。Mo等^[28]以风电为例,使用实物期权模型评估了碳价、电价、碳市场风险、碳价上下限以及并网比例等变量促进风电投资的临界值。结果表明,设置碳价上下限有助于提高碳交易的政策效果,但目前中国碳交易试点的价格仍远低于支持风电投资的关键下限值。

聚焦到碳交易背景下的可再生能源投资问题,Chen等^[31]分析了发售电一体的垄断型公用事业公司在无碳交易、基于总量限定的碳交易以及基于排放强度的碳交易三种情形下的可再生能源投资。研究发现,相对于基于总量限定的碳交易,基于排放强度的碳交易可激励更多的可再生能源投资,但也产生了更多的碳排放。在Chen等^[31]的基础上,Yan等^[32]使用最优化模型对比了垄断企业在四种情景中(无政策、碳交易、可再

生能源配额、碳交易与可再生能源配额的组合)的可再生能源投资,发现碳交易与可再生能源配额制的组合更有利于可再生能源的发展。陈威等^[33]研究了基于总量限定的碳交易机制中,作为领导者的发电商与作为追随者的售电商组成的上下游企业分别投资于可再生电力时的均衡投资量。研究发现,售电商投资于可再生电力时的均衡投资量大于发电商投资于可再生电力时的情形。

上述研究对碳交易背景下的可再生能源投资问题进行了有益探索,但上述研究并未涉及平价和竞争上网时碳交易对可再生电力投资的影响。基于新能源发电补贴取消、电力市场化改革的现实背景,本研究将在考虑可再生能源成本特征以及发电间歇性等因素的基础上,分析可再生与化石电力平价上网以及竞争上网时的投资决策问题,并着重探讨基于排放强度的碳交易机制中碳排放基准值和碳价变化对可再生电力投资、电力结构以及碳排放的影响。此外,本研究将使用中国电力市场及碳交易市场的相关数据对理论结果进行数值模拟验证,并从边际减排成本的角度讨论碳价进一步上升的空间以及碳价上升对电力投资和碳排放的影响,以期为促进中国可再生能源发展提供有益借鉴。

2 理论模型

2.1 基准模型

假设投资者可投资于化石电力(如煤电)和可再生电力(如风电)两类发电技术,其中化石电力的投资量为 k_c ,可再生电力的投资量为 k_r 。投资于化石电力时,单位装机量的固定投资成本(包括固定维护成本)为 α_c ,单位电力产生的运营成本为 u_c ,且单位发电量产生 e_c 单位的碳排放。当前,碳配额的分配方式主要包括基于历史排放水平的总量法以及基于排放强度的基准法^[31]。相对于总量法,基准法下的碳配额将根据产出水平的变化而调整,可更加灵活地适应经济发展的波动性^[26]。因此,参考中国碳交易市场的实践,本研究使用基准法对初始排放配额进行免费发放。假设管理机构针对化石电力机组制定的基准排放率为 e_{c0} 。当 $e_c > e_{c0}$ 时,化石电力需从碳市场中购入排放配

额; 相反, 当 $e_c < e_{c0}$ 时, 化石电力可在碳市场中出售配额并获取相应收益; 当 $e_c = e_{c0}$ 时, 化石电力的碳排放成本为 0. 假设市场中的碳价为 a , 则化石电力的单位可变成本 $U_c = u_c + a(e_c - e_{c0})$.

可再生电力的单位投资成本为 α_r , 且可再生电力不产生碳排放. 由于可再生电力主要利用风能、太阳能等自然资源发电, 故其边际生产成本较低, 此处假设为 0^[9], 进而可得可再生电力的单位可变成本 $U_r = 0$. 受到气候、地理等自然条件的影响, 可再生能源发电具有一定的间歇性. 当可再生电力的装机量为 k_r 时, 只有 $v_r k_r$ 是可用的. 其中 $v_r \in [0, 1]$ 表示可再生能源发电的不确定因素. 为保持分析的简洁性, 本研究假设 v_r 服从概率为 q 的两点分布: $v_r = [1, q; 0, 1 - q]$, 即可再生电力在 q 的概率下可用, 在 $1 - q$ 的概率下不可用^[11].

电力需求 D 为随机变量, 其概率密度为 $f(\cdot)$, 分布函数为 $F(\cdot)$, 且 $F(\cdot)$ 具有失效率递增的性质^③. 在包含可再生能源的电力系统中, 系统不确定性主要来自于两个方面: 电力需求的波动性和可再生能源发电的间歇性. 因此, 电力系统需配备一定的备用调峰资源(如天然气机组、灵活性煤电机组)来满足峰值需求. 假设备用调峰资源的单位装机投资成本为 α_b , 单位电力产生的运营成本为 u_b 、碳排放强度为 e_b . 同时, 假设管理机构针对调峰机组设定的基准碳排放率为 e_{b0} , 则调峰电力的单位可变成本 $U_b = u_b + a(e_b - e_{b0})$. 由于调峰机组的使用频率和负荷率均较低, 调峰机组在运行时存在较高的效率损失, 故本研究假设 $U_b > \max\{U_c + \alpha_c, \alpha_r/q\}$. 各类发电技术的参数总结见表 1.

表 1 各类发电技术的成本参数

Table 1 Cost parameters of power generation technologies

发电技术	单位投资及固定维护成本	单位运营成本	单位碳排放成本(收益)	可用性
可再生电力 k_r	α_r	0	0	v_r
化石电力 k_c	α_c	u_c	$a(e_c - e_{c0})$	1
备用调峰电力 k_b	α_b	u_b	$a(e_b - e_{b0})$	1

在运营期内, 电力的需求和供给将同步实现以满足供需的瞬时平衡. 由于可再生电力的边际成本最低, 故可再生电力在调度顺序中处于第一顺位, 其次是化石电力, 最后是备用调峰电力^[4]. 优先调度可再生电力表明当可再生电力可用时, 将减少化石电力出力以优先消纳可再生电力; 当电力需求小于可再生和化石电力发电量之和时, 化石电力出力将随着电力需求的增加而增加; 当电力需求超过可再生和化石电力发电量之和, 即 $D > v_r k_r + k_c$ 时, 将进一步调用备用调峰资源满足电力需求.

化石电力和备用调峰电力的使用均会产生碳排放. 本模型中, 电力消费产生的碳排放为

$$CO_2 = E\{e_c \min[(D - v_r k_r)^+, k_c] + e_b (D - v_r k_r - k_c)^+\} \quad (1)$$

其中 E 表示期望值, $(x)^+ = \max\{x, 0\}$. 上式中, 第一项代表化石能源发电产生的碳排放, 第二项

代表备用调峰资源的使用产生的碳排放.

2.2 平价上网

中国自 2004 年起开始实行燃煤机组标杆上网电价制度, 各省(市)根据发电成本等因素制定了煤电上网的标杆电价. 作为电力市场化的过渡, 中国自 2020 年起开始实施“基准价 + 上下浮动”的煤电价格机制, 其中基准价按煤电的标杆价格确定. 可再生能源发电补贴取消后, 可再生电力将与煤电平价上网. 与上述政策背景相对应, 假设管理机构针对化石电力制定的基准价格为 P , 可再生与化石电力均按该基准价格结算^④. 其中 $P = (1 + \lambda_c)(\alpha_c + u_c)$, 即该价格以碳排放强度等于基准排放率($e_c = e_{c0}$)的化石电力机组为标准, 在其单位成本上按 λ_c 的比例加成. 此外, $P \in (\alpha_c + u_c, \alpha_b + u_b)$ 表示以 $e_c = e_{c0}$ 的化石电力以及 $e_b = e_{b0}$ 的调峰电力为参照, 该基准价大于化石电力的

③ 失效率递增性质下 $\phi(\cdot) = f(\cdot)/(1 - F(\cdot))$ 为递增函数.

④ 考虑到“基准价 + 上下浮动”的煤电价格机制主要是为了实现向电力市场化的过渡, 且在该机制中, 居民、农业用户的煤电需求按目录销售价结算, 故此处暂不考虑电价的浮动部分.

投资运营成本,但小于调峰电力的投资运营成本.

参考 Aflaki 和 Netessine [4],本研究定义两类发电技术的临界比率为 $A_i = \frac{\alpha_i}{E(v_i)(P-U_i)}$. 临界比率刻画了投资过度成本与投资不足的预期损失之比: 增加一单位产能需增加相应的投资成本 (α_i); 当投资不足且电力需求超过产能时,这种投资不足的预期单位损失为 $E(v_i)(P-U_i)$. 对于可再生电力 $A_r = \frac{\alpha_r}{qP}$; 对于化石电力 $A_c = \frac{\alpha_c}{P-U_c}$.

可再生能源发电商将通过选择可再生电力的投资量 k_r , 来使其自身利润最大化

$$\max \pi_r = \{ E_D E_v [P \times \min\{D, v, k_r\} - \alpha_r k_r] \} \quad (2)$$

结合可再生电力的间歇性特征和电力需求的分布函数,上式可表达为

$$\max \pi_r = q \left\{ P \int_0^{k_r} x f(x) dx + P k_r \int_{k_r}^{\infty} f(x) dx \right\} - \alpha_r k_r \quad (3)$$

式中{ } 内第一项和第二项分别表示可再生电力可用且需求分别位于 $(0, k_r]$ 以及 $(k_r, +\infty)$ 时发电商的收益,第三项为可再生能源的投资成本.

该利润最大化问题的一阶优化条件为

$$\frac{\partial \pi_r(k_r)}{\partial k_r} = qP \int_{k_r}^{\infty} f(x) dx - \alpha_r = 0 \quad (4)$$

经过简单变形可得

$$\frac{\alpha_r}{qP} = 1 - F(k_r) \quad (5)$$

记 $1 - F(\cdot) \equiv \bar{F}(\cdot)$, 上式可表达为

$$\frac{\alpha_r}{qP} = \bar{F}(k_r) \quad (6)$$

化石电力发电商的利润最大化问题为

$$\max \pi_c = \{ E_D E_v [(P - U_c) \times \min\{(D - v, k_r)^+, k_c\}] - \alpha_c k_c \} \quad (7)$$

上式可表达为

$$\begin{aligned} \max \pi_c = & q(P - U_c) \left[\int_{k_r}^{k_r+k_c} (x - k_r) f(x) dx + \right. \\ & \left. k_c \int_{k_r+k_c}^{\infty} f(x) dx \right] + (1 - q)(P - U_c) \times \\ & \left[\int_0^{k_c} x f(x) dx + k_c \int_{k_c}^{\infty} f(x) dx \right] - \alpha_c k_c \end{aligned} \quad (8)$$

其中上式第一项和第二项分别表示可再生电力可用以及不可用时化石电力发电商的收益(积分上

下限代表了电力需求的分布区间),最后一项为其装机投资成本. 该利润最大化问题的一阶优化条件为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_c(k_r, k_c)}{\partial k_c} = & q(P - U_c) \int_{k_r+k_c}^{\infty} f(x) dx + \\ & (1 - q)(P - U_c) \int_{k_c}^{\infty} f(x) dx - \alpha_c = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

经过化简可得

$$\frac{\alpha_c}{P - U_c} = q\bar{F}(k_r + k_c) + (1 - q)\bar{F}(k_c) \quad (10)$$

通过对可再生和化石电力发电商的利润最大化问题及其优化条件进行分析,可得命题 1.1 ~ 命题 1.5 如下.

命题 1.1 存在唯一最优的可再生电力投资量 k_r^* 和化石电力投资量 k_c^* , 且 k_r^* 、 k_c^* 满足以下联立方程组

$$\begin{aligned} A_r = & \bar{F}(k_r^*) \\ A_c = & q\bar{F}(k_r^* + k_c^*) + (1 - q)\bar{F}(k_c^*) \end{aligned} \quad (11)$$

命题 1.2 当 $A_r \leq A_c$ 时 $k_r^* \geq k_c^*$.

命题 1.3 固定价格平价上网时,可再生电力的最优投资水平 k_r^* 与碳价 a 不相关. 化石电力的最优投资水平 k_c^* 与碳价 a 的关系取决于化石电力碳排放强度 e_c 与其基准碳排放率 e_{c0} 的相对大小: 当 e_c 小于 e_{c0} 时, k_c^* 与 a 正相关; 当 e_c 大于 e_{c0} 时 k_c^* 与 a 负相关. 此外 k_r^* 与化石电力的基准碳排放率 e_{c0} 无关, 而 k_c^* 将随着 e_{c0} 的上升而增加.

命题 1.4 k_r^* 与可再生电力的可用性 q 、化石电力的投资成本 α_c 、运营成本 u_c 以及利润率 λ_c 正相关, 与其自身的投资成本 α_r 负相关.

命题 1.5 k_c^* 与可再生电力的可用性 q 负相关, 与其运营成本 u_c 以及利润率 λ_c 正相关, 与可再生电力的投资成本 α_r 无关. 此外, 当 $\lambda_c >$

$\frac{1}{q\bar{F}(k_r+k_c) + (1-q)\bar{F}(k_c)} - 1$ 时 k_c^* 与其装机投资成

本 α_c 正相关; 当 $\lambda_c < \frac{1}{q\bar{F}(k_r+k_c) + (1-q)\bar{F}(k_c)} - 1$

时 k_c^* 与 α_c 负相关.

证明 命题 1.1 ~ 命题 1.5 证明如下.

1) 因为需求分布函数 $F(\cdot)$ 失效率递增, 故 $\bar{F}(\cdot) \equiv 1 - F(\cdot)$ 是关于 k_r 和 k_c 的减函数. 此外, 在长期投资决策中 $P \leq U_c$ 的化石电力发电商将

选择不投资, 即只有 $P > U_c$ 的发电商才会选择投资. 由此可得 $\frac{\partial \pi_r(k_r)}{\partial k_r} = qP\bar{F}(k_r) - \alpha_r$ 是关于 k_r 的严格递减函数 $\frac{\partial \pi_c(k_c, k_r)}{\partial k_c} = q(P - U_c)\bar{F}(k_r + k_c) + (1 - q)(P - U_c)\bar{F}(k_c) - \alpha_c$ 是关于 k_r 和 k_c 的严格递减函数, 故 $\pi_r(k_r)$ 是关于 k_r 的严格凹函数, $\pi_c(k_c, k_r)$ 是关于 k_c 的严格凹函数. 因此, 一阶条件是求内部极值的充分条件且均衡解唯一.

2) 由 $A_r = \bar{F}(k_r^*)$, $A_c = q\bar{F}(k_r^* + k_c^*) + (1 - q)\bar{F}(k_c^*)$ 可知, 当 $A_r \leq A_c$ 时 $\bar{F}(k_r^*) \leq q\bar{F}(k_r^* + k_c^*) + (1 - q)\bar{F}(k_c^*)$. 同时, 由 $\bar{F}(\cdot)$ 递减可知 $\bar{F}(k_r^* + k_c^*) \leq \bar{F}(k_c^*)$. 故 $A_c = q\bar{F}(k_r^* + k_c^*) + (1 - q)\bar{F}(k_c^*) \leq q\bar{F}(k_c^*) + (1 - q)\bar{F}(k_c^*) = \bar{F}(k_c^*)$, 进而可得 $A_r = \bar{F}(k_r^*) \leq A_c = q\bar{F}(k_r^* + k_c^*) + (1 - q)\bar{F}(k_c^*) \leq \bar{F}(k_c^*)$, 即 $k_r^* \geq k_c^*$.

3) 由 $\frac{\partial \pi_r}{\partial k_r}$ 对 a 和 e_{c0} 求交叉偏导数可得 $\frac{\partial \pi_r}{\partial k_r \partial a} = 0$, $\frac{\partial \pi_r}{\partial k_r \partial e_{c0}} = 0$, 故 k_r^* 与 a 以及 e_{c0} 无关. 由 $\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c}$ 对 a 求交叉偏导数可得

$$\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c \partial a} = (e_{c0} - e_c) \left[q \int_{k_r+k_c}^{\infty} f(x) dx + (1 - q) \int_{k_c}^{\infty} f(x) dx \right] \quad (12)$$

因此, 当 $e_{c0} > e_c$ 时, $\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c \partial a} > 0$, k_c^* 与 a 正相关; 当 $e_{c0} < e_c$ 时, $\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c \partial a} < 0$, k_c^* 与 a 负相关. 同时, 由 $\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c}$ 对 e_{c0} 求交叉偏导数可得 $\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c \partial e_{c0}} = aq \times \int_{k_r+k_c}^{\infty} f(x) dx + a(1 - q) \times \int_{k_c}^{\infty} f(x) dx > 0$, 故 k_c^* 随着 e_{c0} 增加而增加.

命题 1.4 和命题 1.5 中 k_i^* 与参数 $q, \alpha_r, \alpha_c, u_c$ 以及 λ_c 的关系可通过求解 π_i 关于 k_i 和各参数的交叉导数并判断其符号得到. 由于篇幅限制, 此处不再展示, 有兴趣的读者可向作者索取. 命题 1.1 ~ 命题 1.5 证毕.

命题 1.1 表明, 最优投资水平 k_i^* 与临界比率 A_i ($i = r, c$) 负相关. A_i 越大, 技术 i 的投资吸引

力越低. 命题 1.2 进一步显示, 只有当可再生电力的临界比率 A_r 小于化石电力的临界比例 A_c 时, 可再生电力投资才会超过化石电力投资. 此处, 可再生电力的临界比率 $A_r = \frac{\alpha_r}{qP}$, 表明在取消上网补贴后, 可再生电力的投资成本、可用性以及上网价格将成为决定其投资水平的关键因素.

命题 1.3 显示, 在该固定价格平价上网机制下, 由于上网电价 P 与碳交易价格 a 以及化石电力的基准碳排放率 e_{c0} 无关, 故此时碳交易未对可再生电力投资产生直接的激励效应. 同时, 当管理机构按“基准法”对初始碳排放额进行分配时, 基准排放率的大小决定了碳交易对化石电力投资的作用方向: 当管理机构倾向于控制碳排放量并将基准排放率设置在较低水平时, 化石电力需为超过初始排放配额部分的碳排放购买额外的排放配额, 进而增加了发电商的排放成本并抑制了化石电力投资; 相反, 当化石电力的碳排放强度低于基准排放率时(管理机构更倾向于稳定经济发展或者发电商的节能减排技术较为领先), 发电商可在市场上出售剩余的排放配额并获取相应收益, 进而促进化石电力投资.

命题 1.4 显示, 可再生电力可用性 q 的增加可提高其最优投资规模 k_r^* , 表明可再生能源间歇性的降低有助于促进其发展. 同时, 降低可再生电力的投资成本 α_r 也将起到促进可再生电力投资的作用. 此外, 在该固定价格平价上网机制中, 电力价格 P 取决于化石电力的单位运营成本 u_c 、单位投资成本 α_c 以及利润率 λ_c . 当 u_c, α_c 和 λ_c 增加时, 可再生电力的上网电价也将上升, 从而激励可再生电力生产商增加投资和产能.

命题 1.5 表明, 化石电力的最优投资规模 k_c^* 将随着可再生能源可用性 q 的增加而降低. 其原因在于, 当可再生电力被优先调度时, 可再生电力的可用性越高, 电力系统对化石电力的需求越低, 故 k_c^* 与 q 负相关. 同时, 由于化石电力的上网价格 P 与其运营成本 u_c 以及利润率 λ_c 正相关, 故 k_c^* 也将随着 u_c 和 λ_c 的增加而增加. 此外, 虽然在该平价上网机制中化石电力投资成本 α_c 的增加可提高上网电价, 但化石电力投资与 α_c 的关系还取决于利润率 λ_c 、可再生电力的可用性 q 以及需求的

分布情况: 当 $\lambda_c < \frac{1}{q\bar{F}(k_r+k_c) + (1-q)\bar{F}(k_c)} - 1$ 时,

k_c^* 将随着 α_c 的增加而下降.

2.3 市场竞争

在竞争上网的电力市场中, 可再生及化石电力将通过各自的上网电量影响市场出清价格, 进而影响对方的长期投资决策^⑤. 在完全竞争且完全信息的电力现货市场中, 电力供给者向独立的管理机构(如电力交易平台)提交自身的供给报价, 同时需求者同步提交其需求报价. 管理机构对供应商的报价进行从低到高的排序, 在满足调度顺序的前提下对供给和需求进行匹配和调度. 在有效的竞价规则以及算法的支撑下, 电力出清价格将取决于最后一单位电力的边际生产成本^[34, 35]. 此时, 电力出清价格函数为

$$P = \begin{cases} 0 & D \leq v_r k_r \\ U_c & v_r k_r < D \leq v_r k_r + k_c \\ U_b & D > v_r k_r + k_c \end{cases} \quad (13)$$

上式表明, 当需求 D 小于等于可再生电力发电量时的电力出清价格为 0; 当需求大于可再生电力发电量、小于可再生与化石电力发电量之和时, 电力出清价格为化石电力的边际生产成本 U_c , 当市场需求大于可再生与化石电力发电量之和时, 电力出清价格为调峰资源的边际生产成本 U_b ^⑥. 此时, 定义发电技术的临界比率 $A_i' = \frac{\alpha_i}{E(v_i)(U_b - U_i)}$, 即市场竞争下投资不足的预期单位损失变为 $E(v_i)(U_b - U_i)$. 对于可再生电力,

$$A_r' = \frac{\alpha_r}{q U_b}; \text{ 对于化石电力 } A_c' = \frac{\alpha_c}{U_b - U_c}.$$

此时, 可再生电力发电商的利润最大化问题为

$$\max \pi_r = \{ E_D E_v [(P - U_r) \times \min\{ D, v_r k_r \}] - \alpha_r k_r \} \quad (14)$$

上式可表达为

$$\max \pi_r(k_r, k_c) = q [U_c k_r \int_{k_r}^{k_r+k_c} f(x) dx + U_b k_r \int_{k_r+k_c}^{\infty} f(x) dx] - \alpha_r k_r \quad (15)$$

其中 $U_c k_r \int_{k_r}^{k_r+k_c} f(x) dx$ 为需求大于 k_r 、小于等于 $k_r + k_c$ 时, 可再生电力发电商的收益, $U_b k_r \int_{k_r+k_c}^{\infty} f(x) dx$ 为需求大于 $k_r + k_c$ 时, 可再生电力发电商的收益. 当需求小于 k_r 时, 上网电价和收益均为 0.

可再生电力发电商利润最大化问题的一阶条件为

$$\frac{\partial \pi_r(k_r, k_c)}{\partial k_r} = q U_c [F(k_r + k_c) - F(k_r)] + q U_b [1 - F(k_r + k_c)] + q k_r (U_c - U_b) f(k_r + k_c) - q U_c k_r f(k_r) - \alpha_r = 0 \quad (16)$$

化石电力发电商的利润最大化问题为

$$\max \pi_c = \{ E_D E_v [(P - U_c) \times \min\{ (D - v_r k_r)^+, k_c \}] - \alpha_c k_c \} \quad (17)$$

上式可表达为

$$\max \pi_c(k_r, k_c) = q k_c (U_b - U_c) \int_{k_r+k_c}^{\infty} f(x) dx + (1-q) k_c (U_b - U_c) \int_{k_c}^{\infty} f(x) dx - \alpha_c k_c \quad (18)$$

其中 $q k_c (U_b - U_c) \int_{k_r+k_c}^{\infty} f(x) dx$ 为可再生电力可用时化石电力发电商的收益, $(1-q) k_c (U_b - U_c) \times \int_{k_c}^{\infty} f(x) dx$ 为可再生电力不可用时化石电力发电商的收益. 化石电力发电商利润最大化的一阶条件为

$$\frac{\partial \pi_c(k_r, k_c)}{\partial k_c} = q (U_b - U_c) [1 - F(k_r + k_c) - k_c f(k_r + k_c)] + (1-q) (U_b - U_c) \times [1 - F(k_c) - k_c f(k_c)] - \alpha_c = 0 \quad (19)$$

式(16)和式(19)中, 用 $\bar{F}(\cdot)$ 及 $\phi(\cdot)$ 代替 $f(\cdot)$ 并化简可得

$$\left(1 - \frac{U_c}{U_b} \right) \bar{F}(k_r + k_c) (1 - k_r \phi(k_r + k_c)) + \frac{U_c}{U_b} \bar{F}(k_r) (1 - k_r \phi(k_r)) = A_r' \quad (20)$$

⑤ 由于本研究关注的是竞争价格下的可再生电力投资问题, 因此暂不考虑电力生产者可投资于两类发电技术时的情形.

⑥ 当发电商的数量增加时, 分段的电力出清价格函数将逐渐变得连续.

$$q\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_c\phi(k_r + k_c)) + (1 - q)\bar{F}(k_c)(1 - k_c\phi(k_c)) = A'_c \quad (21)$$

竞争上网时,通过对可再生和化石电力发电商的利润最大化问题求解可得命题 2.1 ~ 命题 2.4 如下.

命题 2.1 该博弈存在唯一的纳什均衡解 k_r^* 、 k_c^* ,且 k_r^* 、 k_c^* 满足由式 (20) 和式 (21) 组成的联立方程组.

命题 2.2 当 $A'_r \leq A'_c$ 且 $q \geq 1 - \frac{U_c}{U_b}$ 时 $k_r^* \geq k_c^*$.

命题 2.3 当 $e_c > e_{c0}$ 、 $e_b > e_{b0}$ 时,或 $e_c < e_{c0}$ 、 $e_b > e_{b0}$ 且 $\frac{(e_b - e_{b0})}{(e_{c0} - e_c)} > \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r))}{\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c))} - 1$ 时,或 $e_c > e_{c0}$ 、 $e_b < e_{b0}$ 且 $\frac{(e_c - e_{c0})}{(e_{b0} - e_b)} > \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r))}{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r)) - \bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c))} - 1$

时,可再生电力的最优投资水平 k_r^* 与碳价 a 正相关;反之 k_r^* 与 a 负相关.当 $e_b - e_{b0} > e_c - e_{c0}$ 时,化石电力的最优投资水平 k_c^* 与碳价 a 正相关;当 $e_b - e_{b0} < e_c - e_{c0}$ 时,碳价的上升将降低化石电力的最优投资水平.

命题 2.4 k_r^* 与化石电力的基准排放率 e_{c0} 负相关,与化石电力的单位运营成本 u_c 正相关;相反 k_c^* 与 e_{c0} 正相关,与 u_c 负相关.

证明 命题 2.1 ~ 命题 2.4 的证明如下.

1) 由 $F(\cdot)$ 失效率递增可知 $\phi(\cdot) = f(\cdot)/(1 - F(\cdot)) = f(\cdot)/\bar{F}(\cdot)$ 为递增函数,故 $\partial\pi_r/\partial k_r$ 和 $\partial\pi_c/\partial k_c$ 均是关于 k_r 和 k_c 的严格递减函数,表明 π_r 是关于 k_r 的严格凹函数, π_c 是关于 k_c 的严格凹函数.因此,一阶条件是求内部极值的充分条件且存在唯一的纳什均衡.

2) 当 $A'_r \leq A'_c$ 且 $q \geq 1 - \frac{U_c}{U_b}$ 时,有不等式 $q\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c)) + (1 - q)\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r)) \leq \left(1 - \frac{U_c}{U_b}\right)\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c)) + \frac{U_c}{U_b}\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r)) = A'_r \leq q\bar{F}(k_r +$

$k_c)(1 - k_c\phi(k_r + k_c)) + (1 - q)\bar{F}(k_c)(1 - k_c\phi(k_c)) = A'_c$,进而可得 $q\bar{F}(k_r + k_c)\phi(k_r + k_c)(k_r - k_c) + (1 - q)[\bar{F}(k_c)(1 - k_c\phi(k_c)) - \bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r))] \geq 0$ 故 $k_r^* \geq k_c^*$.

3) 对于可再生电力

$$\frac{\partial\pi_r}{\partial k_r \partial a} = q\{ (e_b - e_{b0})\bar{F}(k_r + k_c) \times (1 - k_r\phi(k_r + k_c)) + (e_c - e_{c0}) \times [\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r)) - \bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c))] \} \quad (22)$$

因此,当 $e_c > e_{c0}$ 、 $e_b > e_{b0}$ 时,或 $e_c < e_{c0}$ 、 $e_b > e_{b0}$ 且 $\frac{(e_b - e_{b0})}{(e_{c0} - e_c)} > \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r))}{\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c))} - 1$

时,以及 $e_c > e_{c0}$ 、 $e_b < e_{b0}$ 且 $\frac{(e_c - e_{c0})}{(e_{b0} - e_b)} > \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r))}{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r)) - \bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c))} - 1$

时, $\frac{\partial\pi_r}{\partial k_r \partial a} > 0$ k_r^* 将随着 a 的增加而增加;相反,当 $e_c < e_{c0}$ 、 $e_b < e_{b0}$ 时,或 $e_c < e_{c0}$ 、 $e_b > e_{b0}$ 且 $\frac{(e_b - e_{b0})}{(e_{c0} - e_c)} < \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r))}{\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c))} - 1$

时,或 $e_c > e_{c0}$ 、 $e_b < e_{b0}$ 且 $\frac{(e_c - e_{c0})}{(e_{b0} - e_b)} < \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r))}{\bar{F}(k_r)(1 - k_r\phi(k_r)) - \bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r\phi(k_r + k_c))} - 1$

时, $\frac{\partial\pi_r}{\partial k_r \partial a} < 0$ k_r^* 将随着 a 的增加而降低.

对于化石电力

$$\frac{\partial\pi_c}{\partial k_c \partial a} = [(e_b - e_{b0}) - (e_c - e_{c0})] \times [q\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_c\phi(k_r + k_c)) + (1 - q)\bar{F}(k_c)(1 - k_c\phi(k_c))] \quad (23)$$

因此,当 $e_b - e_{b0} > e_c - e_{c0}$ 时, $\frac{\partial\pi_c}{\partial k_c \partial a} > 0$ k_c^*

与 a 正相关;当 $e_b - e_{b0} < e_c - e_{c0}$ 时, $\frac{\partial\pi_c}{\partial k_c \partial a} < 0$ k_c^* 与 a 负相关.

命题 2.4 中 k_i^* 与 e_{c0} 、 u_c 的关系可通过求解利润函数关于 k_i 和 e_{c0} 、 u_c 的交叉导数并判断其符号得到. 由于篇幅限制, 此处不再展示, 有兴趣的读者可向作者索取. 命题 2.1 ~ 命题 2.4 证毕.

命题 2.2 表明, 竞争上网时, 可再生电力的临界比率 A_r 较低且可用性 q 较高时, 其投资水平才会高于化石电力. 命题 2.3 表明, 在基于排放强度控制的碳交易机制中, 化石电力和调峰电力的基准排放率越低, 碳交易对可再生能源投资的促进作用越显著. 其内在机理在于, 化石及调峰电力的基准排放率越低, 发电商需付出的排放成本越高, 进而可再生电力的成本优势越显著. 此外, 碳交易对化石电力投资的作用取决于 $e_b - e_{b0}$ 与 $e_c - e_{c0}$ 间的相对大小: 当 $e_b - e_{b0}$ 大于 $e_c - e_{c0}$ 时, 碳价的上升将增加化石电力的单位边际贡献 ($U_b - U_c = a [(e_b - e_{b0}) - (e_c - e_{c0})] + (u_b - u_c)$), 进而促进化石电力投资; 相反, 若 $e_b - e_{b0}$ 小于 $e_c - e_{c0}$, 即化石电力的碳排放强度显著高于其基准排放率时, 碳交易更倾向于增加化石电力的排放成本, 进而抑制其投资.

命题 2.4 表明, 在竞争上网的环境中, 后调度者边际成本的上升有利于促进先调度者的投资量. 其原因在于, 当电力需求超过发电商在调度顺序中的总供给量时, 发电商将获得与后调度者边际成本等值的上网电价. 因此, 后调度者边际成本的上升将激励先调度者增加投资, 进而 k_r^* 与 u_c 正相关, k_c^* 与 u_c 负相关. 此外, 化石电力排放监管的放松 (即 e_{c0} 的增加) 将降低化石电力的排放成本、促进化石电力投资, 故 k_c^* 与 e_{c0} 正相关. 化石电力排放成本的下降意味着可再生电力上网电价的降低, 故 k_r^* 与 e_{c0} 负相关.

3 数值模拟

3.1 参数取值

本小节将基于中国能源及碳交易市场的相关数据, 模拟平价及竞争上网时电力投资和碳排放随碳价 a 以及化石电力基准排放率 e_{c0} 的变化趋势. 此处本研究将以陆上风电项目和煤电项目为

例, 模拟可再生及化石电力的投资变化. 可再生电力的间歇性要求备用调峰电力应具备较高的操作灵活性. 天然气发电的启动时间短、操作灵活, 且天然气较化石电力也更加清洁^[4,7], 故本研究假设电力系统以燃气联合循环调峰机组为备用调峰资源.

在可再生能源发电上, 参考彭博新能源财经发布的《2021 中国新能源发电分析报告》以及易晓亮等^[36]的研究, 假设风电项目的运营期为 20 年, 初始投资成本为 7 500 元/kW, 设备的年固定运维费用为 50 元/kW, 即风力发电设备的固定投资及运维费用为 48.52 元/MW·h. 另外, 据中电联发布的《2021 年—2022 年度全国电力供需形势分析预测报告》, 2021 年风电的年利用小时数为 2 232 h, 由此估算出风电的年平均可用性为 25%.

此外, 假设燃煤火电的初始投资成本为 4 000 元/kW, 发电设备的年固定运维费用为 200 元/kW (按投资成本的 5% 计算), 设备发电煤耗为 0.30 kg 标准煤/kW·h, 则煤电的初始投资成本为 45.66 元/MW·h. 当前, 中国煤炭价格实行的是“长协价”与“市场价”并行的双轨制, 且“长协煤”占煤炭供应的 80% 以上. 2022 年“长协煤”全年的平均价格约为 720 元/t, 故本研究暂取化石电力的燃煤成本为 720 元/t^①, 并由此可得煤电的单位燃料成本为 216 元/MW·h.

2022 年末, 全国碳交易市场挂牌协议交易的收盘价为 55 元/t CO₂, 故本研究在基准情形下取 a 的值为 55 元/t CO₂. 此外, 根据联合国气候变化专门委员会发布的数据, 煤电的平均碳排放强度为 1.001 kg CO₂/kW·h, 即 1.001 t CO₂/MW·h. 据生态环境部发布的《2021、2022 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案》, 2022 年 300MW 等级以上常规燃煤机组的基准碳排放率为 0.815 9 t CO₂/MW·h, 进而可得燃煤发电的碳排放成本为 10.18 元/MW·h.

燃气联合循环调峰机组的造价在 3 000 元/kW 左右^[37], 假设其年固定运维检修成本为 150 元/kW·h (按 5% 计算), 单位发电气耗为 0.19 m³/kW·h, 碳排放强度为 0.469 kg/kW·h, 即

① 数据来源: <http://www.chinapower.com.cn/>.

0.469 t CO₂/MW·h. 当前, 各地非居民天然气价格在 2.20 元/m³~2.70 元/m³之间, 本研究暂取天然气价格为 2.50 元/m³. 根据上述数据可估算出燃气机组的初始投资成本及固定运维费用为 34.52 元/MW·h, 燃料费用为 475 元/MW·h. 此外, 据生态环境部确定的碳配额分配方案, 2022 年燃气机组的碳排放基准值为 0.390 1 t CO₂/MW·h, 进而可得调峰

机组的碳排放成本为 4.34 元/MW·h.

据《中国电力统计年鉴》数据, 2022 年全年电力需求为 8.64 × 10¹² kW·h, 即平均每小时的电力需求为 98.63 × 10⁴ MW·h. 本研究假设电力需求服从对数正态分布, 且 $D \sim \text{LN}(4.5864, 0.1)$ (即 $E(\tilde{D}) = 98.63$).

本研究主要的参数取值如表 2 所示.

表 2 数值模拟参数取值

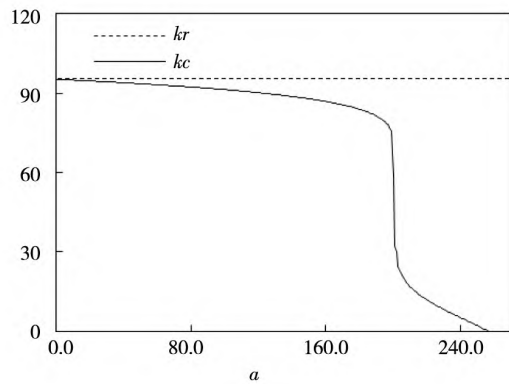
Table 2 Parameter values for numerical simulation

变量描述	模型参数	陆上风电	燃煤火电	燃气联合循环机组
可用性	$E(v_i)$	0.250 0	1.000 0	1.000 0
单位投资及固定维护成本(元/MW·h)	α_i	48.516 0	45.662 1	34.246 6
单位运营成本(元/MW·h)	u_i	0.000 0	216.000 0	475.000 0
碳排放强度(t CO ₂ /MW·h)	e_i	—	1.001 0	0.469 0
基准碳排放率(t CO ₂ /MW·h)	e_{i0}	—	0.815 9	0.390 1

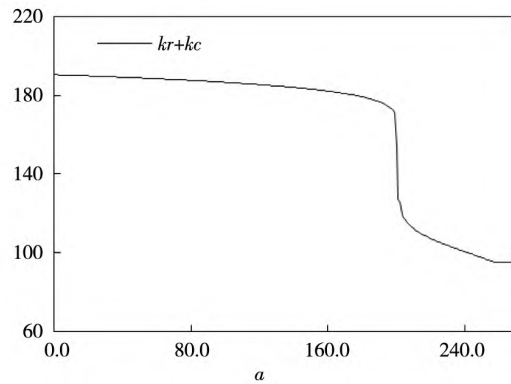
3.2 模拟结果

1) 平价上网. 本研究首先模拟了平价上网时电力投资及碳排放随碳价 a 的变化趋势(图 1).

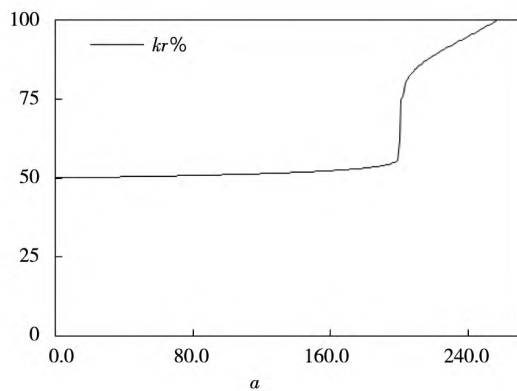
图 1(a) 显示, 当碳价 a 等于 0 元/t CO₂ 时, 可再生电力装机投资 (k_r) 为 95.24 × 10⁴ MW·h, 化石电力装机投资 (k_c) 为 95.16 × 10⁴ MW·h, 可再生电



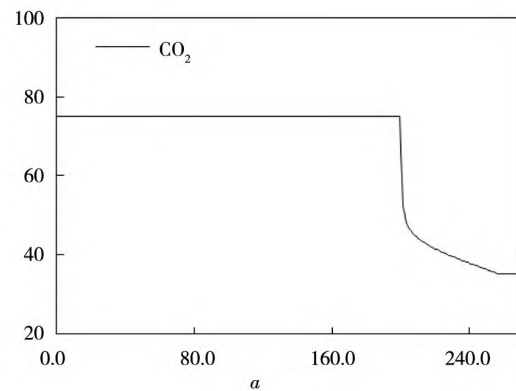
(a) k_r 及 k_c 投资量(10⁴ MW·h)



(b) 总投资量($k_r + k_c$, 10⁴ MW·h)



(c) k_r 占比 ($k_r / (k_r + k_c)$, %)



(d) 碳排放(10⁴t)

图 1 平价上网时 k_r 、 k_c 及碳排放随碳价 a 的变化趋势

Fig. 1 The trends of k_r , k_c and CO₂ emissions with carbon price a at grid parity

注: 此处化石电力和备用调峰资源的基准排放率分别为 0.815 9 t CO₂/MW·h 和 0.390 1 t CO₂/MW·h, 碳价 a 的单位为元/t CO₂.

力装机投资略高于化石电力. 此后, 随着 a 的上升, k_r 基本维持不变, 而 k_c 则呈现出逐渐下降的趋势, 并在 $a = 257$ 元/t CO₂ 时降低至 0. 理论分析结果显示, 当化石电力的碳排放强度 e_{c0} 大于其基准排放率 e_{c0} 时 k_c 与 a 负相关. 此处, 化石电力的碳排放强度为 1.001t CO₂/MW·h, 高于其基准排放率(0.815 9 t CO₂/MW·h), 故该结果与理论分析的结论一致.

图 1 (b) 及 (c) 显示, 随着 a 的上升, 总投资量将从 $a = 0$ 时的 190×10^4 MW·h 下降至 $a = 257$ 时的 95×10^4 MW·h, 而 k_r 占比将从 $a = 0$ 时的 50% 上升至 $a = 257$ 时的 100%. 图 1 (d) 显示, 随着碳价的上升, 碳排放总量先是维持不变, 随后呈现出逐渐下降的趋势, 其值则由 $a = 0$ 时的 75×10^4 t 左右下降至 $a = 257$ 时的 35×10^4 t 左右.

在碳价上升的初始阶段, 可再生和化石电力的供给之和大于电力需求, 化石电力机组未完全投入使用. 此时, 系统碳排放均来自于化石电力的使用, 且维持在 75×10^4 t 左右. 随着化石电力装机量的进一步下降, 可再生和化石电力的供给之和将小于电力需求, 进而需调度排放强度更低的备用调峰资源, 此时碳排放总量呈现出下降的趋势. 当碳价上升至 257 元/t CO₂ 时, 化石电力装机量降低为 0, 电力系统的碳排放均来自于备用调峰资源的使用. 上述结果表明, 在固定价格平价上网制度下, 碳交易可起到抑制化石电力投资、降低碳排放的作用. 然而, 由于缺乏对可再生电力的直接激励, 此时碳交易对可再生电力投资的促进作用并不显著.

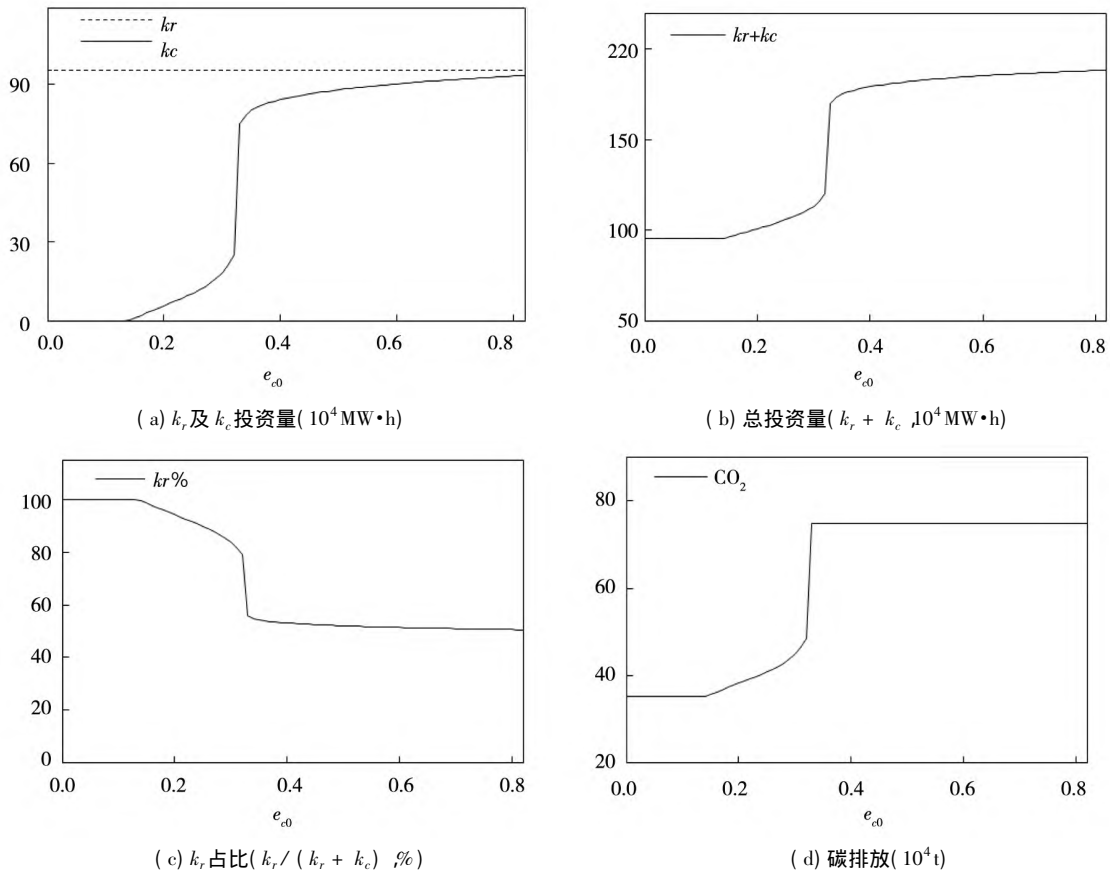


图 2 平价上网时 k_r 、 k_c 及碳排放随 e_{c0} 的变化趋势

Fig. 2 The trends of k_r , k_c and CO₂ emissions with e_{c0} at grid parity

注: 此处碳价 a 的取值为 55 元/t CO₂, e_{c0} 的单位为 t CO₂/MW·h.

图 2 展示了平价上网时, 电力投资及碳排放随化石电力的基准排放率 e_{c0} 的变化趋势. 此处, e_{c0} 的下降代表了基准排放率的收紧, 即免费配额减少、环境规制趋严, 而 e_{c0} 的上升则代表了环境

规制的放松. 由图 2 (a) 可知, 随着基准排放率 e_{c0} 的上升, 可再生电力投资维持在 95×10^4 MW·h 左右, 而化石电力投资则从 $e_{c0} = 0$ 时的 0 MW·h 增加到了 $e_{c0} = 0.82$ 时的 93×10^4 MW·h, 与理论分

析结果一致. 具体地, 当 e_{c0} 小于 0.14 时, 化石电力的投资量为 0; 当 e_{c0} 放松到 0.14 时, 化石电力投资开始为正且此后随着 e_{c0} 的增加而逐步上升. 由图 2(b) ~ 图 2(d) 可知, 随着基准排放率的收紧(即 e_{c0} 的下降), 可再生电力投资占比逐渐增加、总投资量逐渐减少、碳排放总量逐渐降低.

2) 竞争上网. 图 3 展示了竞争上网时可再生电力投资 (k_r')、化石电力投资 (k_c') 及碳排放总量 (CO_2') 随碳价 a 的变化趋势. 其中 k_r 、 k_c 及 CO_2 为平价上网时的电力投资和碳排放, 用以和市场竞争时的情况形成对比. 图 3(a) 显示, 市场竞争下, 随着碳价的上升, 可再生和化石电力投资分别呈现出缓慢上升和缓慢下降的趋势. 其中 k_r 由 $a = 0$ 时的 20×10^4 MW·h 上升到了 $a = 270$ 时的 24×10^4 MW·h, k_c 则由 $a = 0$ 时的 73×10^4 MW·h 下降至

了 $a = 270$ 时的 71×10^4 MW·h, 但化石电力装机投资始终高于可再生电力. 由理论分析结果可知, 当 $e_c > e_{c0}$ 、 $e_b > e_{b0}$ 时, k_r 与 a 正相关, 而当 $e_b - e_{b0} < e_c - e_{c0}$ 时, k_c 与 a 负相关. 此处, $e_c = 1.001$, $e_{c0} = 0.8159$, $e_b = 0.469$, $e_{b0} = 0.3901$, 表明上述条件均可被满足, 进而证明数值模拟和理论分析结果是一致的. 当 $e_c > e_{c0}$ 、 $e_b > e_{b0}$ 时, 电力出清价格 $U_c = a(e_c - e_{c0}) + u_c$ 和 $U_b = a(e_b - e_{b0}) + u_b$ 将随着碳价的上升而增加. 由于可再生电力不存在碳排放成本, 故可再生电力投资将随着碳价和电力出清价格的增加而增加. 对于化石电力, 由于 $e_b - e_{b0} < e_c - e_{c0}$, 碳价的上升降低了化石电力可获得的单位边际贡献 ($U_b - U_c = a[(e_b - e_{b0}) - (e_c - e_{c0})] + (u_b - u_c)$), 故化石电力投资将随着碳价的增加而降低.

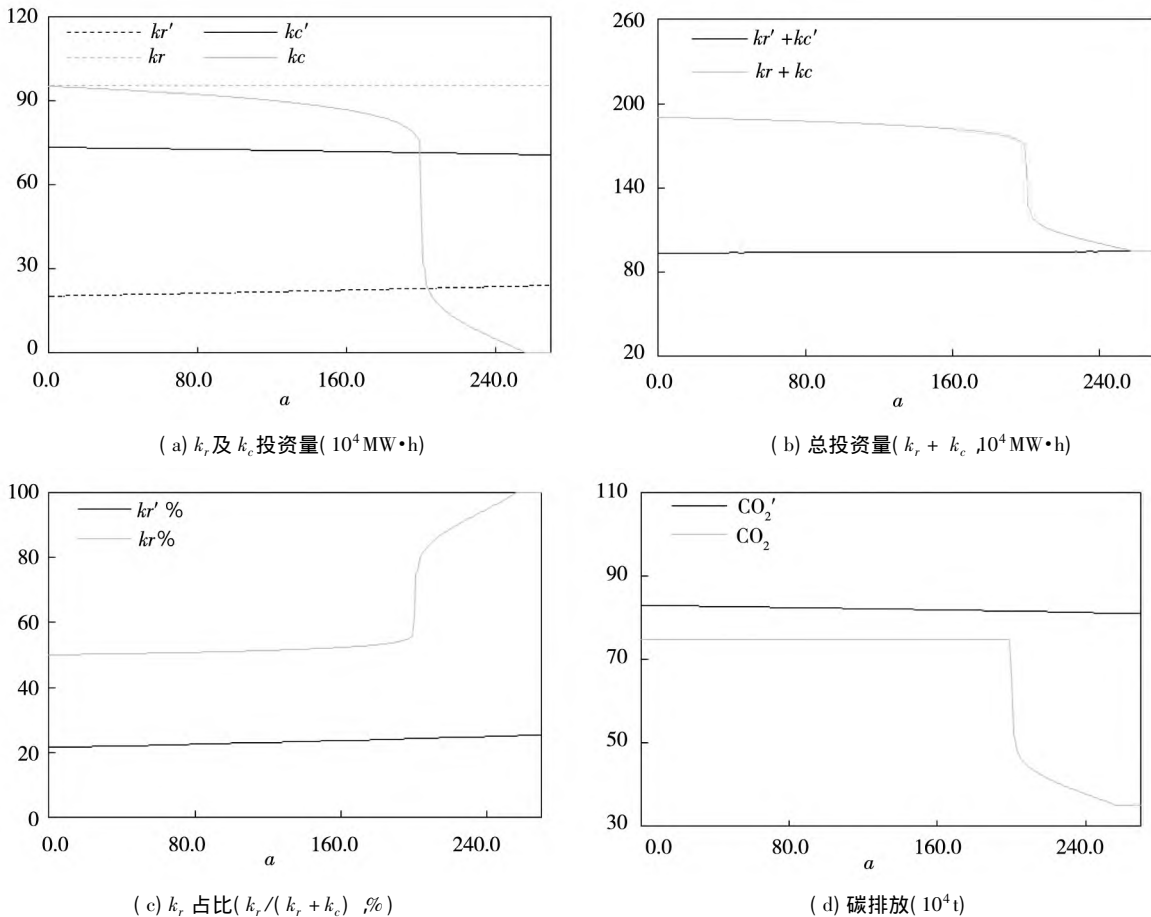


图 3 市场竞争下 k_r 、 k_c 及碳排放随碳价 a 的变化趋势

Fig. 3 The trends of k_r , k_c and CO_2 emissions with carbon price a under market competition

注: x' 和 x 分别代表了竞争上网和平价上网时的情形. 此处, 化石电力和备用调峰资源的基准排放率分别为 0.8159 t CO_2 / MW·h 和 0.3901 t CO_2 / MW·h. 碳价 a 的单位为元 / t CO_2 .

此外, 市场竞争下的可再生电力投资低于平价上网时的情形, 且当碳价低于 200 元 / t CO_2 时,

市场竞争下的化石电力投资也低于平价上网时的情形. 该结果与市场竞争下电力出清价格的形成机制有关, 即只有当需求超过可再生或化石电力在调度顺序中的供给量时, 发电商才会产生正利润. 因此, 市场竞争下, 可再生和化石电力生产商均存在为提高电力价格而降低投资的倾向.

图 3 (b) 显示, 随着碳价的上升, 竞争上网时的投资总量呈现出缓慢上升的态势, 而固定价格下的投资总量则以较快的速率下降. 当碳价上升至 270 元/t CO₂ 时, 二者将基本相等. 图 3 (c) 及图 3 (d) 显示, 市场竞争下, 随着碳价的增加, k_r' 占比和碳排放总量分别呈现出缓慢上升和缓慢下降的趋势. 其中 k_r' 占比从 $a = 0$ 时的 20% 上升到了 $a = 270$ 时的 24%, 碳排放总量从 $a = 0$ 时的 83×10^4 t 下降到了 $a = 270$ 时的 81×10^4 t. 此外,

市场竞争下的 k_r' 占比始终低于平价上网时的情形, 而碳排放则始终高于平价上网时的情形.

上述结果表明, 虽然基于排放强度控制的碳交易可起到促进电力结构转型的作用, 但当碳价较低时, 其作用效果较为有限. 现阶段, 中国碳交易市场中的碳价为 55 元/t CO₂ 左右, 仍处于较低水平. 在推进电力市场化改革的过程中, 需进一步促进电力市场和碳交易市场的联动并充分发挥碳市场的定价功能, 以更好地促进能源系统的清洁化转型.

图 4 展示了竞争上网时 k_r' 、 k_c' 及碳排放随化石电力基准排放率 $e_{c,0}$ 的变化趋势. 其中 x' 和 x 仍分别代表竞争上网和平价上网时的情形. 图 4 (a) 显示, 随着 $e_{c,0}$ 的下降 (排放配额的收紧), k_r' 和 k_c' 分别呈现出缓慢上升和缓慢下降的趋势, 与理论

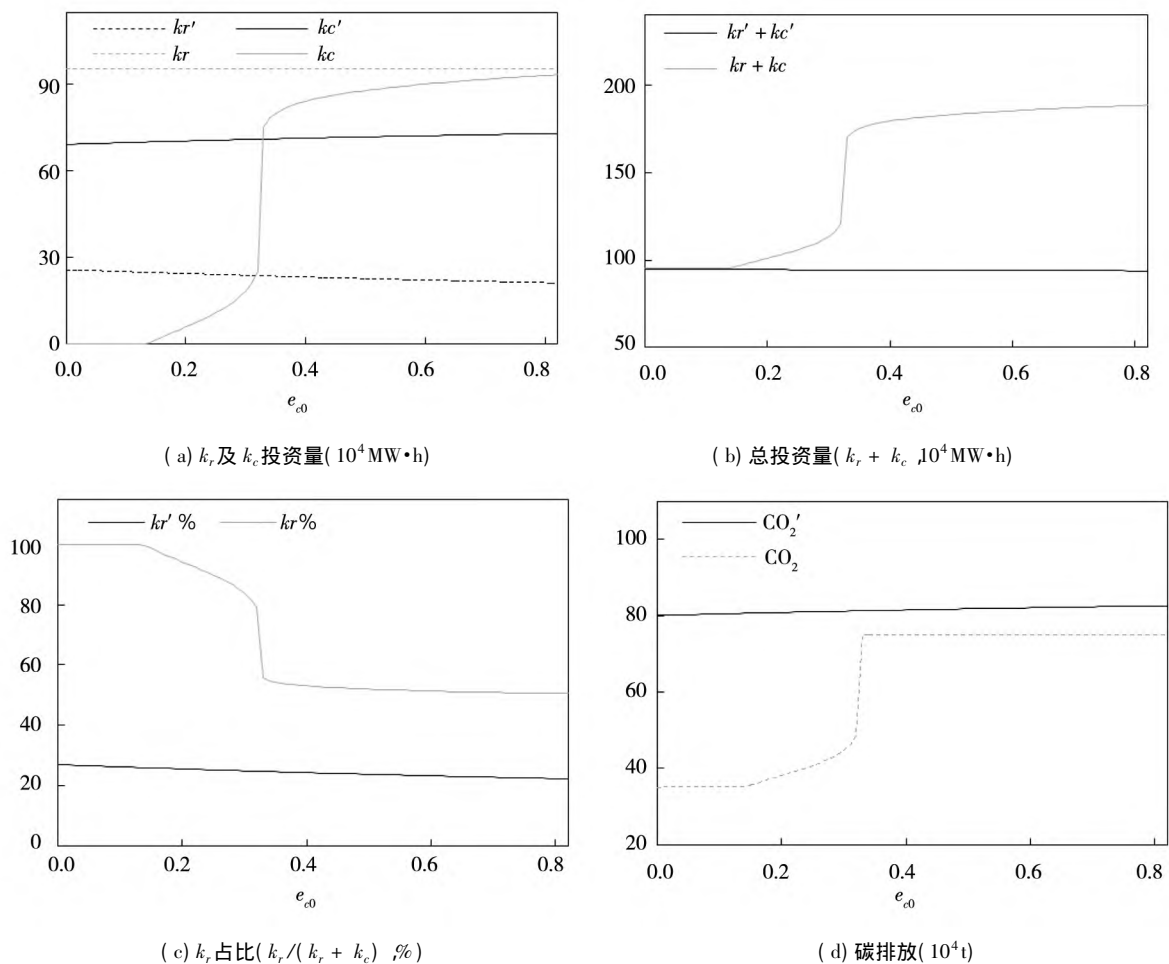


图 4 市场竞争下 k_r 、 k_c 及碳排放随 $e_{c,0}$ 的变化趋势

Fig. 4 The trends of k_r , k_c and CO₂ emissions with $e_{c,0}$ under market competition

注: x' 和 x 分别代表了竞争上网和平价上网时的情形; 此处碳价 a 的取值为 55 元/t CO₂; $e_{c,0}$ 的单位为 t CO₂/MW·h.

分析结果一致。当 $e_{c0} = 0.82$ 时 k_r' 和 k_c' 分别为 $21 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 和 $73 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$, 而当 $e_{c0} = 0$ 时, k_r' 和 k_c' 分别为 $26 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 和 $69 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。此外, 随着 e_{c0} 的降低, 市场竞争下 k_c' 的下降速率小于固定价格时 k_c 的下降速率。当 $e_{c0} = 0.13$ 时, 固定价格时的化石电力投资已降低至 0, 而市场竞争下的化石电力仍存在 $70 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 的投资量。图 4(c) ~ 图 4(d) 显示, 随着 e_{c0} 的下降, k_r' 占比和碳排放分别存在缓慢上升和缓慢下降的趋势。其中竞争上网时的碳排放总量将高于平价上网时的情形, 其原因在于此时既消耗了更多的化石电力, 也消耗了更多的备用调峰资源。

4 进一步讨论

4.1 碳价内生时的电力投资

在基准模型中, 本研究假设碳交易市场中的碳价 a 为外生给定。为检验该设定对结果的影响, 此处将进一步讨论竞争上网下碳市场均衡时的电力投资。在本模型中, 参与碳市场的排放主体为化石电力和备用调峰电力^⑧。当化石电力的碳排放强度 e_c 大于其基准排放率 e_{c0} 时, 化石电力将对碳配额形成需求; 相反, 当 $e_c < e_{c0}$ 时, 化石电力将对碳配额形成供给。化石电力的配额需求(或供给)为 $(e_c - e_{c0}) \min [(D - v_r k_r)^+, k_c]$ 。同样, 备用调峰电力的碳配额需求(或供给)为 $(e_b - e_{b0}) \times (D - v_r k_r - k_c)^+$ 。当碳市场均衡时, 配额的需求和供给相等(即净供给为零)^[38], 由此可得

$$E\{(e_c - e_{c0}) \min [(D - v_r k_r)^+, k_c] + (e_b - e_{b0}) (D - v_r k_r - k_c)^+\} = 0 \quad (24)$$

通常情况下, 电力需求是有限的, 故此假设电力需求 D 的最大值为 \bar{x} 且 $\bar{x} > k_r + k_c$ 。式(24)可进一步表达为

$$(e_c - e_{c0}) \left\{ q \left[\int_{k_r}^{k_r+k_c} (x - k_r) f(x) dx + k_c \int_{k_r+k_c}^{\bar{x}} f(x) dx \right] + (1 - q) \times \left[\int_0^{k_c} x f(x) dx + k_c \int_{k_c}^{\bar{x}} f(x) dx \right] \right\} +$$

$$(e_b - e_{b0}) \left\{ q \int_{k_r+k_c}^{\bar{x}} (x - k_c - k_r) \times f(x) dx + (1 - q) \int_{k_c}^{\bar{x}} (x - k_c) f(x) dx \right\} = 0 \quad (25)$$

式(25)经过化简可得^⑨

$$\frac{(e_b - e_{b0})}{(e_{c0} - e_c)} = \frac{k_c - q \int_{k_r}^{k_r+k_c} F(x) dx - (1 - q) \int_0^{k_c} F(x) dx}{\bar{x} - q k_r - k_c - q \int_{k_r+k_c}^{\bar{x}} F(x) dx - (1 - q) \int_{k_c}^{\bar{x}} F(x) dx} \quad (26)$$

由 $F(x) \leq 1$ 且 $\bar{x} > k_r + k_c$ 易知, 式(26)中分子项和分母项均大于 0, 故式(26)大于 0。记 $w \equiv$

$$\frac{k_c - q \int_{k_r}^{k_r+k_c} F(x) dx - (1 - q) \int_0^{k_c} F(x) dx}{\bar{x} - q k_r - k_c - q \int_{k_r+k_c}^{\bar{x}} F(x) dx - (1 - q) \int_{k_c}^{\bar{x}} F(x) dx}, \text{ 可}$$

得命题 3 如下。

命题 3 对于可再生能源, 当 $e_c > e_{c0}$ 且 $w < \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r \phi(k_r))}{\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r \phi(k_r + k_c))} - 1$ 时, 或 $e_c < e_{c0}$

且 $w > \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r \phi(k_r))}{\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r \phi(k_r + k_c))} - 1$ 时, k_r^*

与碳价 a 正相关。对于化石电力, 当 $e_c > e_{c0}$ 时 k_c^* 与 a 负相关; 当 $e_c < e_{c0}$ 时 k_c^* 与 a 正相关。

证明 将 $e_b - e_{b0} = -w(e_c - e_{c0})$ 代入式(22)可得

$$\frac{\partial \pi_r}{\partial k_r \partial a} = q(e_c - e_{c0}) \left\{ \bar{F}(k_r)(1 - k_r \phi(k_r)) - (1 + w) \bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r \phi(k_r + k_c)) \right\} \quad (27)$$

因此, 当 $e_c > e_{c0}$ 且 $w < \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r \phi(k_r))}{\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r \phi(k_r + k_c))} - 1$

时, 或 $e_c < e_{c0}$ 且 $w > \frac{\bar{F}(k_r)(1 - k_r \phi(k_r))}{\bar{F}(k_r + k_c)(1 - k_r \phi(k_r + k_c))} - 1$

时, $\frac{\partial \pi_r}{\partial k_r \partial a} > 0$, k_r^* 与 a 正相关。

同样将 $e_b - e_{b0} = -w(e_c - e_{c0})$ 代入式(23)可得

⑧ 此处假设碳市场仅覆盖了电力行业, 即暂不考虑其他行业的碳市场交易。

⑨ 由于篇幅限制, 此处省略推导过程, 有兴趣的读者可向作者索取。

$$\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c \partial a} = -(1+w)(e_c - e_{c0}) [q\bar{F}(k_r + k_c) \times (1 - k_c \phi(k_r + k_c)) + (1-q)\bar{F}(k_c) \times (1 - k_c \phi(k_c))] \quad (28)$$

因此,当 $e_c < e_{c0}$ 时, $\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c \partial a} > 0$ k_c^* 与 a 正相关;

当 $e_c > e_{c0}$ 时, $\frac{\partial \pi_c}{\partial k_c \partial a} < 0$ k_c^* 与 a 负相关. 命题3证毕.

命题3表明,市场竞争下,当考虑化石电力与备用调峰电力间的碳市场均衡时, $\frac{(e_b - e_{b0})}{(e_{c0} - e_c)}$ 将恒定为正,即化石电力和备用调峰电力间将形成碳配额的相对供给和需求. 此时,不会再出现 $e_b > e_{b0}$ 、 $e_c > e_{c0}$, 或 $e_b < e_{b0}$ 、 $e_c < e_{c0}$ 的情形. 因此,在碳交易促进可再生电力投资的条件下,排除了 $e_c > e_{c0}$ 、 $e_b > e_{b0}$ 这一可能性. 同时,碳市场均衡时,由于 $\frac{(e_b - e_{b0})}{(e_{c0} - e_c)}$ 恒定为正且满足特定的比例关系,碳价 a 对化石电力投资的作用将不再取决于 $e_b - e_{b0}$ 与 $e_c - e_{c0}$ 的相对大小. 此时,化石电力的基准排放率越低,其对碳配额的需求越高,进而碳交易价格越高,碳交易对化石电力投资的抑制作用也越显著.

4.2 碳价进一步上升时的电力投资

数值模拟部分的结果显示,市场竞争下碳交

易可促进可再生电力投资、抑制化石电力投资. 然而,当碳价较低时,碳交易对可再生和化石电力的作用效果较弱. 为探究碳价的上升是否可实现电力系统的清洁化转型,本部分将从边际减排成本 (marginal abatement cost, MAC) 的角度对碳价的上升空间进行测算和分析,并模拟市场竞争下碳价进一步上升时的电力投资和碳排放.

4.2.1 基于边际减排成本的碳价估算

碳排放的边际减排成本是决定其价格的关键因素. 在理想状态下,碳交易价格将等于边际减排成本^[39]⑩. 现有文献普遍使用碳排放的影子价格对其边际减排成本进行衡量^[40,41]. 影子价格是一种机会成本,衡量的是额外降低一单位碳排放所产生的经济损失. 根据是否设定距离函数的具体形式,影子价格的计算方式可分为参数法和非参数法. 利用中国碳核算数据库 (CEADs) 公布的地级市碳排放数据^[42,43],本研究同时使用基于二次型方向距离函数的参数化方法^[44]以及基于数据包络分析 (data envelopment analysis, DEA) 的非参数化方法^[45]对中国255个城市2006年—2019年碳排放的影子价格进行了测算,并以此作为度量碳排放边际减排成本的依据.

图5展示了2006年—2019年碳排放影子价格的均值变化趋势. 由图可知,两种方法下的影子价格均呈现逐年上升的趋势,表明减排的成本和

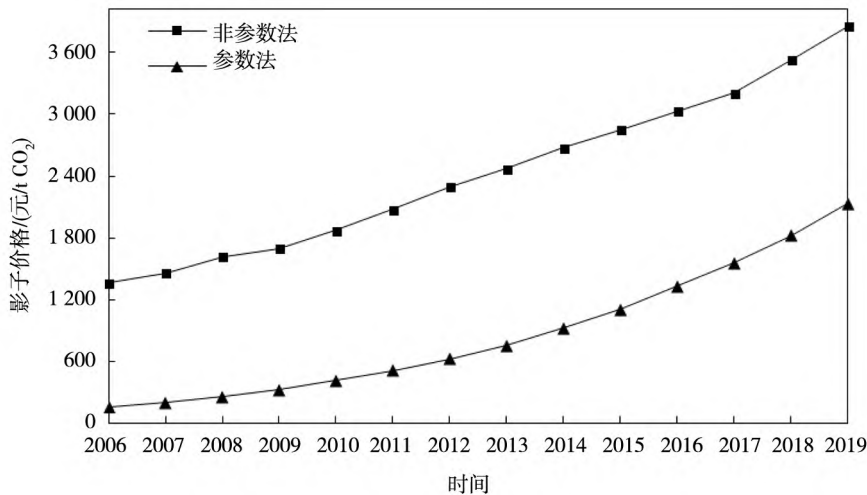


图5 2006年—2019年碳排放影子价格的均值变化

Fig. 5 The average shadow price of CO₂ emissions during 2006 - 2019

⑩ 其内在机理在于,当减排的边际成本高于市场中的交易价格时,企业将选择从市场中购入排放份额;反之,当减排的边际成本低于市场交易价格时,企业将选择减少自身排放,直至二者相等.

难度在逐渐增加. 非参数化方法下, 城市平均边际减排成本由 2006 年的 1 361 元/t CO₂ 上升到了 2019 年 3 857 元/t CO₂, 而参数化方法下, 平均边际减排成本由 2006 年的 155 元/t CO₂ 增加到了 2019 年的 2 137 元/t CO₂^①. 整体上, 两类方法下的边际减排成本估计值均高于当前碳交易市场中的成交价格. 此外, 影子价格衡量的是当前排放水平下的边际减排成本, 未来, 随着排放总量的收紧, 其值将进一步上升. 同时, 碳价的上升程度还将受制于碳捕集技术的发展. 据相关研究估计, 当碳价高于 300 美元/t CO₂ 时, 企业将选择使用碳捕集技术对碳排放进行捕集^[46]. 总体而言, 当前的碳交易价格远低于其边际减排成本以及碳捕集

技术成本, 表明碳价仍存在较大的上升空间.

4.2.2 碳价上升时的电力投资及碳排放

图 6 展示了竞争上网下碳价 a 进一步上升时的电力投资及碳排放. 图 6(a) 显示, 随着 a 的上升, k_r' 和 k_c' 分别呈现出逐渐增加和逐渐下降的趋势, 与上文的模拟结果一致. 当碳价上升到 2 006 元/t CO₂ 时, k_c' 将降低至 0, 而 k_r' 则增加到了 81.2×10^4 MW·h. 图 6(b) 显示, 在碳价上升的初始阶段, k_r' 上升的速率大于 k_c' 下降的速率, 总投资量从 $a=0$ 时 93.6×10^4 MW·h 增加到了 $a=1 736$ 时的 104.5×10^4 MW·h; 此后, 随着 k_c' 下降速率的加快, 总投资量将缓慢下降至 $a=2 006$ 时的 81.2×10^4 MW·h.

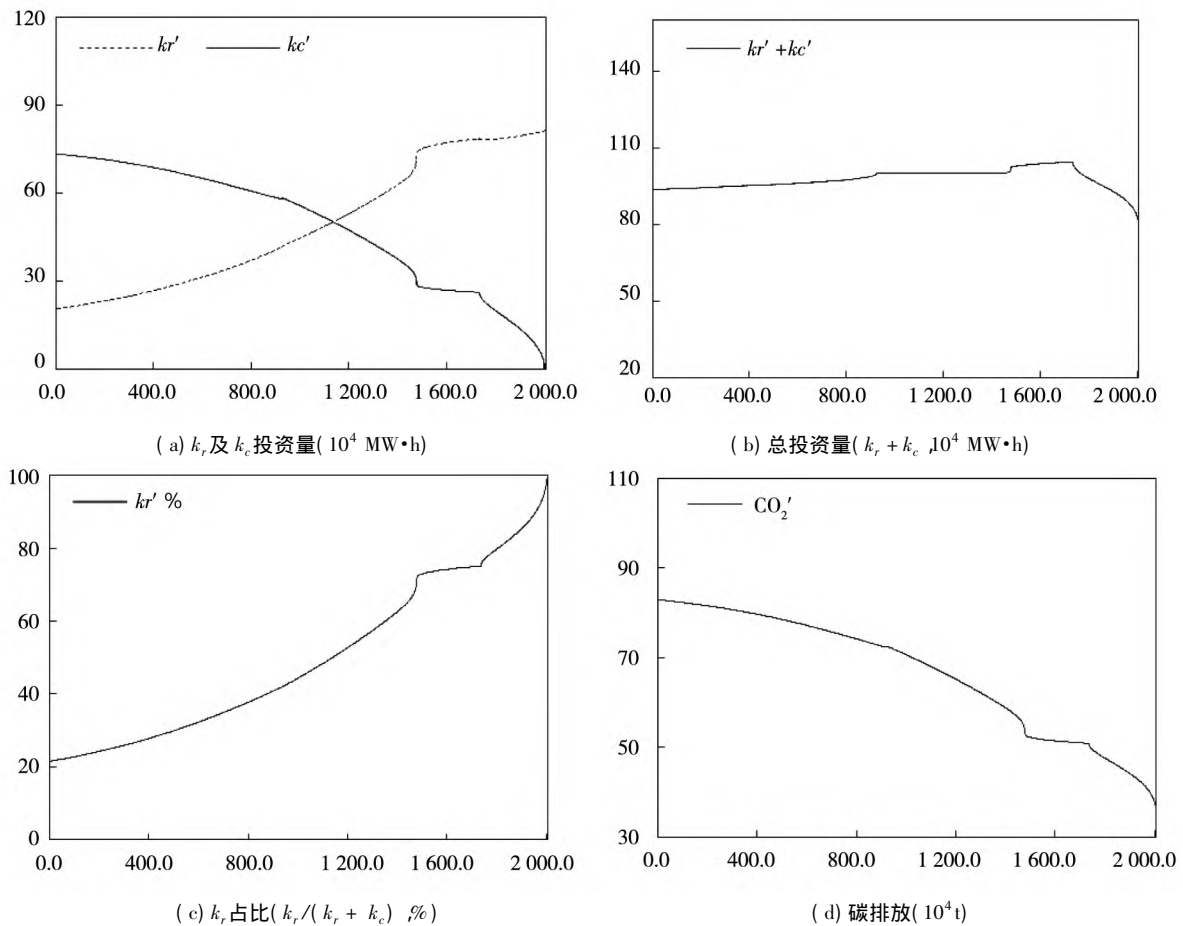


图 6 市场竞争下 a 进一步上升时 k_r' 、 k_c' 及碳排放的变化趋势

Fig. 6 The trends of k_r' , k_c' and CO₂ emissions when a further increases under market competition

注: 化石电力和备用调峰资源的基准排放率分别为 0.815 9 t CO₂/MW·h 和 0.390 1 t CO₂/MW·h, 碳价 a 的单位为元/t CO₂.

① 边际减排成本的数值等于生产技术前沿上对应点斜率的负数^[41]. 此处, 参数法和非参数法下边际减排成本的估计值存在差异的原因在于两种方法下的生产技术前沿不同. 其中, 参数化模型以二次型函数来表征方向性距离函数和生产技术前沿, 而非参数化模型则由数据包络而得, 其生产技术前沿由最外围的点构成. 因此, 当生产技术前沿不同时, 对应点斜率的负数也必然存在差异.

图 6(d) 显示 碳排放总量将随着 a 的上升而逐渐下降. 当 $a = 2.006$ 时 碳排放总量为 $37 \times 10^4 \text{ t}$, 且全部来自于备用调峰电力的使用. 本研究假设的备用调峰资源为燃气机组. 虽然燃气机组的排放强度低于煤电, 但仍会产生一定的碳排放. 未来, 随着清洁储能技术(如抽水蓄能、电化学储能)及碳捕集技术的发展, 则有望实现电力系统的净零排放. 整体上, 市场竞争下合理的碳交易定价可实现电力系统的低碳化转型.

5 结 束 语

本研究对比分析了可再生与化石电力平价及竞争上网时的投资决策问题, 以及基于排放强度控制的碳交易对电力投资和碳排放的影响. 理论分析结果表明: 平价上网时, 碳交易未能起到直接激励可再生电力投资的作用; 同时, 只有当化石电力的基准排放率低于其碳排放强度时, 碳交易才会发挥抑制化石电力投资的作用. 竞争上网时, 化石电力和调峰电力的基准排放率越低, 即环境规制越严格, 碳交易对可再生电力投资的促进作用越显著; 此时, 若化石电力的排放成本高于备用调峰资源, 则碳交易将起到抑制化石电力投资的作用.

数值模拟结果表明, 平价上网时, 化石电力投资将随着碳价的上升而下降, 并最终降低至 0. 市场竞争下, 可再生电力投资与碳价呈正相关关系, 但始终低于固定价格时的投资量; 化石电力投资与碳价呈负相关关系, 但其下降速率较为缓慢. 此外, 无论是平价上网还是竞争上网, 碳交易都可起到降低碳排放的作用. 从影子价格角度测算的边际碳减排成本显示, 当前的碳交易价格远低于其边际减排成本及碳捕集技术成本, 碳价仍存在较大的上升空间, 且合理的碳交易定价可实现电力系统的清洁化转型. 此外, 市场竞争下, 实现电力系统的净零排放不仅需要足够高的碳价信号, 同时也需要发展更加清洁的备用调峰资源及碳捕集技术来调节可再生电力的间歇性和电力需求的波动性. 本研究的政策启示如下.

(1) 固定价格平价上网时, 可再生电力的投

资成本、波动性和上网价格将成为决定其投资水平的关键因素. 作为电力市场化的过渡, 此时一方面应提高可再生能源发电的预测能力、降低其波动性; 另一方面, 应加大对可再生能源发电技术的研发投入力度, 降低其生产成本. 在竞争上网的环境中, 除了进一步降低可再生能源发电成本、提高其可用性外, 还应综合运用碳交易定价以及发展清洁调峰资源等方式促进电力结构的清洁化转型.

(2) 当前中国碳交易市场中的价格低于其边际减排成本, 表明碳价还处于被低估的区间, 难以实现碳资源的最优配置. 在碳交易市场的建设过程中, 应进一步通过完善覆盖范围、配额分配以及交易模式等方式发挥其碳定价功能, 进而充分内部化化石能源的负外部性成本. 同时, 需要注意的是, 虽然基准排放率的降低可起到抑制化石电力投资的作用, 但应注重可再生电力发展速度与化石电力退出速度的匹配, 避免基准排放率过低导致的电力供给短缺.

(3) 在以可再生能源为主的电力系统中, 备用调峰资源的需求将进一步加大. 此时, 备用调峰资源的选择不仅决定了可再生电力大规模接入电网的可能性, 更决定了碳交易对化石电力投资的作用方向. 因此, 应大力推进清洁储能调峰技术和碳捕集及封存技术的发展, 以最终实现电力结构转型下的净零排放.

(4) 中国电力市场化改革和碳交易市场建设都处于探索阶段, 两个市场的政策体系、交易规则等均未实现有效协同和衔接. 在电力市场化改革和碳交易市场建设过程中, 应推进电力市场和碳市场在管理机构、参与主体、交易产品、市场机制等方面的深度融合, 促进碳市场和电力市场协同发展, 让电价反映市场供需以及碳排放成本, 提高可再生电力的竞争性.

虽然本研究是对可再生能源及碳排放政策实践的简化分析, 但仍存在诸多不足之处. 例如, 本研究未考虑调峰成本在发电企业和电网公司之间的分配问题, 以及市场中存在多个投资者和能源生产者时的电力投资问题. 后续研究可进一步对上述问题进行讨论和分析.

参 考 文 献:

- [1]史连军,周琳,庞博,等. 中国促进清洁能源消纳的市场机制设计思路[J]. 电力系统自动化,2017,41(24): 83-89.
Shi Lianjun, Zhou Lin, Pang Bo, et al. Design ideas of electricity market mechanism to improve accommodation of clean energy in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 83-89. (in Chinese)
- [2]刘自敏,邓明艳,杨丹,等. 降低企业用能成本可以提高能源效率与社会福利吗——基于交叉补贴视角的分析[J]. 中国工业经济,2020,384(3): 100-118.
Liu Zimin, Deng Mingyan, Yang Dan, et al. Can reducing the energy cost of enterprises improve energy efficiency and social welfare: Analysis from the perspective of cross subsidy[J]. China Industrial Economics, 2020, 384(3): 100-118. (in Chinese)
- [3]莫建雷,段宏波,范英,等. 《巴黎协定》中我国能源和气候政策目标: 综合评估与政策选择[J]. 经济研究, 2018, 53(9): 168-181.
Mo Jianlei, Duan Hongbo, Fan Ying, et al. China's energy and climate targets in the Paris Agreement: Integrated assessment and policy options[J]. Economic Research Journal, 2018, 53(9): 168-181. (in Chinese)
- [4]Aflaki S, Netessine S. Strategic investment in renewable energy sources: The effect of supply intermittency[J]. M & Som-Manufacturing & Service Operations Management, 2017, 19(3): 489-507.
- [5]涂强,莫建雷,范英. 中国可再生能源政策演化、效果评估与未来展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 29-36.
Tu Qiang, Mo Jianlei, Fan Ying. The evolution and evaluation of China's renewable energy policies and their implications for the future[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(3): 29-36. (in Chinese)
- [6]衣博文,范英. 高比例可再生能源接入下的电力系统规划研究[J]. 管理科学学报, 2023, 26(10): 21-35.
Yi Bowen, Fan Ying. Power system planning with a high share of renewable energy[J]. Journal of Management Sciences in China, 2023, 26(10): 21-35. (in Chinese)
- [7]Kok A G, Shang K, Yucel S. Investments in renewable and conventional energy: The role of operational flexibility[J]. M & Som-Manufacturing & Service Operations Management, 2020, 22(5): 925-941.
- [8]Zhou Y, Scheller-Wolf A, Secomandi N, et al. Managing wind-based electricity generation in the presence of storage and transmission capacity[J]. Production and Operations Management, 2019, 28(4): 970-989.
- [9]Peura H, Bunn D W. Renewable power and electricity prices: The impact of forward markets[J]. Management Science, 2021, 67(8): 4772-4788.
- [10]Sunar N, Birge J R. Strategic commitment to a production schedule with uncertain supply and demand: Renewable energy in day-ahead electricity markets[J]. Management Science, 2019, 65(2): 714-734.
- [11]Kok A G, Shang K, Yucel S. Impact of electricity pricing policies on renewable energy investments and carbon emissions[J]. Management Science, 2018, 64(1): 131-148.
- [12]范英,衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. 管理世界, 2021, 37(8): 95-105.
Fan Ying, Yi Bowen. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition[J]. Journal of Management World, 2021, 37(8): 95-105. (in Chinese)
- [13]Ritzenhofen I, Birge J R, Spinler S. The structural impact of renewable portfolio standards and feed-in tariffs on electricity markets[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 255(1): 224-242.
- [14]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 evo-

- lution[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2019, 27(3): 168–179. (in Chinese)
- [15]张增凯,彭彬彬,解伟,等. 能源转型与管理领域的科学研究问题[J]. *管理科学学报*, 2021, 24(8): 147–153.
Zhang Zengkai, Peng Binbin, Xie Wei, et al. Scientific research issues in the field of energy transition and management [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2021, 24(8): 147–153. (in Chinese)
- [16]Wiser R, Barbose G, Holt E. Supporting solar power in renewables portfolio standards: Experience from the United States [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(7): 3894–3905.
- [17]Wang T, Gong Y, Jiang C W. A review on promoting share of renewable energy by green-trading mechanisms in power system [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 923–929.
- [18]Verbruggen A, Lauber V. Assessing the performance of renewable electricity support instruments [J]. *Energy Policy*, 2012, 45: 635–644.
- [19]Babich V, Lobel R, Yucel S. Promoting solar panel investments: Feed-in-tariff vs. tax-rebate policies [J]. *M & Som-Manufacturing & Service Operations Management*, 2020, 22(6): 1148–1164.
- [20]Alizamir S, de Vericourt F, Sun P. Efficient feed-in-tariff policies for renewable energy technologies [J]. *Operations Research*, 2016, 64(1): 52–66.
- [21]Couture T, Gagnon Y. An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(2): 955–965.
- [22]Aguirre M, Ibikunle G. Determinants of renewable energy growth: A global sample analysis [J]. *Energy Policy*, 2014, 69: 374–384.
- [23]Chai J, Zhang X J, Zhang X K, et al. Effects of scenario-based carbon pricing policies on China's dual climate change mitigation goals: Does policy design matter? [J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2023, 8(2): 167–175.
- [24]Rui Z B, Peng W C, Qin X M, et al. Assessing carbon cap-and-trade policies on hybrid renewable energy investments: Implications for pricing and capacity decisions [J]. *Resources Policy*, 2023: 86.
- [25]Bai J, Rub H. Carbon emissions trading and environmental protection: International evidence [J]. *Management Science*, 2024, 70(7): 11.
- [26]张希良,张达,余润心. 中国特色全国碳市场设计理论与实践 [J]. *管理世界*, 2021, 37(8): 80–95.
Zhang Xiliang, Zhang Da, Yu Runxin. Theory and practice of China's national carbon emissions trading system [J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(8): 80–95. (in Chinese)
- [27]Brauneis A, Mestel R, Palan S. Inducing low-carbon investment in the electric power industry through a price floor for emissions trading [J]. *Energy Policy*, 2013, 53: 190–204.
- [28]Mo J L, Agnolucci P, Jiang M R, et al. The impact of Chinese carbon emission trading scheme (ETS) on low carbon energy (LCE) investment [J]. *Energy Policy*, 2016, 89: 271–283.
- [29]程承,安润飞,董康银,等. 碳交易机制引导下可再生能源发电企业创新策略研究——基于演化博弈视角 [J]. *中国管理科学*, 2024, 32(3): 82–94.
Cheng Cheng, An Runfei, Dong Kangyin, et al. Research on innovation strategy for renewable power generation enterprises under the background of carbon trading mechanism: From the perspective of evolutionary game [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2024, 32(3): 82–94. (in Chinese)
- [30]周德群,周显扬,丁浩. 多市场协同下的可再生能源电力竞价策略研究 [J]. *中国管理科学*, 2023, 31(1): 248–255.
Zhou Dequn, Zhou Xianyang, Ding Hao. Research on renewable electricity bidding strategy under multi-market coordination [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(1): 248–255. (in Chinese)
- [31]Chen W, Chen J, Ma Y K. Renewable energy investment and carbon emissions under cap-and-trade mechanisms [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123341.
- [32]Yan Y, Sun M, Guo Z L. How do carbon cap-and-trade mechanisms and renewable portfolio standards affect renewable en-

- ergy investment? [J]. *Energy Policy*, 2022, 165: 112938.
- [33] 陈 威, 马永开, 白春光. 基于碳限额与交易机制的上下游企业可再生能源投资策略研究[J]. *中国管理科学*, 2023, 31(1): 70–80.
Chen Wei, Ma Yongkai, Bai Chunguang. Research on upstream and downstream enterprises of renewable energy investment under cap-and-trade mechanism [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2023, 31(1): 70–80. (in Chinese)
- [34] 刘国跃, 曾 鸣, 肖 霖, 等. 不同市场机制下发电投资周期性波动的模拟分析[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(1): 63–67.
Liu Guoyue, Zeng Ming, Xiao Lin, et al. Dynamic simulation and analysis of generation investment fluctuation under different market mechanisms [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(1): 63–67. (in Chinese)
- [35] 曾 鸣, 周 巍, 周 霞, 等. 中国电力工业市场化改革的3个问题研究与建议[J]. *电力系统自动化*, 2000, 19: 11–15.
Zeng Ming, Zhou Wei, Zhou Xia, et al. Three problems about deregulated power industry in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 19: 11–15. (in Chinese)
- [36] 易晓亮, 张志文, 黄 伟. 陆上风电场项目参考造价指标研究及成果应用[J]. *项目管理评论*, 2021, (2): 36–40.
Yi Xiaoliang, Zhang Zhiwen, Huang Wei. Research and application of cost index of onshore wind farm project [J]. *Project Management Review*, 2021, (2): 36–40. (in Chinese)
- [37] 朱 寰, 刘国静, 张 兴, 等. 天然气发电与电池储能调峰政策及经济性对比[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(6): 2392–2402.
Zhu Huan, Liu Guojing, Zhang Xing, et al. Policy and economy comparison of natural gas power generation and battery energy storage in peak regulation [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(6): 2392–2402. (in Chinese)
- [38] 谢家平, 魏礼红, 张为四, 等. 风电与火电的竞争性上网定价优化——碳约束政策的影响研究[J]. *管理科学学报*, 2022, 25(6): 100–126.
Xie Jiaping, Wei Lihong, Zhang Weisi, et al. Optimization of pricing strategies for competitive grid-connected wind power and thermal power: The impact of carbon constraint policies [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2022, 25(6): 100–126. (in Chinese)
- [39] Wu F, Ji D J, Zha D L, et al. A nonparametric distance function approach with endogenous direction for estimating marginal abatement costs of CO₂ emissions [J]. *Journal of Management Science and Engineering*, 2022, 7(2): 330–345.
- [40] Du L M, Hanley A, Zhang N. Environmental technical efficiency, technology gap and shadow price of coal-fuelled power plants in China: A parametric meta-frontier analysis [J]. *Resource and Energy Economics*, 2016, 43: 14–32.
- [41] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法[J]. *世界经济*, 2010, 33(8): 93–111.
Chen Shiyi. The shadow price of industrial carbon dioxide: Parametric and non-parametric methods [J]. *The Journal of World Economy*, 2010, 33(8): 93–111. (in Chinese)
- [42] Shan Y, Guan Y, Hang Y, et al. City-level emission peak and drivers in China [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(18): 1910–1920.
- [43] Shan Y, Liu J, Liu Z, et al. An emissions-socioeconomic inventory of Chinese cities [J]. *Scientific Data*, 2019, 6(1): 190027.
- [44] 杨子晖, 陈里璇, 罗 彤. 边际减排成本与区域差异性研究[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(2): 1–21.
Yang Zihui, Chen Lixuan, Luo Tong. Marginal cost of emission reduction and regional differences [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(2): 1–21. (in Chinese)
- [45] Xu L, Yang J, Cheng J, et al. How has China's low-carbon city pilot policy influenced its CO₂ abatement costs? Analysis from the perspective of the shadow price [J]. *Energy Economics*, 2022, 115: 106353.
- [46] 张希良, 黄晓丹, 张 达, 等. 碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J]. *管理世界*, 2022, 38: 35–66.

Zhang Xiliang , Huang Xiaodan , Zhang Da , et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality [J]. *Journal of Management World* , 2022 , 38: 35 – 66. (in Chinese)

Electricity feed-in patterns and renewable energy investment under carbon trading

XU Lan^{1,2} , *YANG Jun*^{2*} , *CHENG Ji-xin*³

1. College of Economics , Sichuan Agricultural University , Chengdu 611130 , China;
2. School of Economics and Business Administration , Chongqing University , Chongqing 400044 , China;
3. School of Business , Central South University , Changsha 410083 , China

Abstract: The uncertainty of renewable energy development in China has been exacerbated by institutional reforms including electricity marketization , the removal of subsidies for renewable power , and carbon emissions trading. This study analyses the investment decision of renewable energy when renewable and fossil power are connected at grid parity and in competition and discusses how intensity-based carbon trading and the intermittency of renewables affect energy investment and CO₂ emissions. Meanwhile , using data from China's electricity and carbon markets , it verifies the theoretical results with numerical simulations and estimates the scope for the further increase of the carbon price from the perspective of marginal abatement cost. The results suggest that: 1) Carbon trading does not provide a direct incentive for renewable energy investment in the grid-parity scenario , and its impact on fossil energy depends on the magnitude of the emission intensity of fossil power relative to its benchmark emission rate. 2) Under market competition , the lower the benchmark emission rate of fossil power , the more significant the incentive (disincentive) effect of carbon trading on renewable (fossil) energy investment. 3) Renewable energy investment under market competition is lower than the case at grid parity. However , reasonable carbon pricing under market competition can achieve a low-carbon transition of the power system. The research in this paper can provide a useful reference for the energy structure transition and the synergistic development of the electricity-carbon market.

Key words: renewable energy investment; energy structure transition; grid parity; market competition; carbon trading; CO₂ emissions