

# “双碳”目标下电力系统风电装机与投资发展动力学推演及分析

彭光博, 向月, 陈文淑乐, 徐博涵, 刘俊勇

(四川大学电气工程学院, 四川成都 610065)

**摘要:**为推演“双碳”目标下风电的发展,利用系统动力学具有动态性、系统性的特点,建立了未来电力系统风电发展的系统动力学推演模型。通过历史数据验证了模型的有效性,通过仿真得到了未来风电发展趋势,并结合政策激励与技术发展过程,构建差异化场景分析不同条件下未来风电发电量、上网电量、风电消费占比及碳减排量。仿真结果表明,政策支持相比技术进步对风电装机发展及绿色证书市场交易的激励作用更强,对风电长期稳定发展具有显著的促进作用;技术进步相比政策支持对碳减排的效果更明显。同时,前期技术进步对于风电发电量、上网电量及消费量的促进作用要高于政策支持,并且在政策力度较低的情况下,高技术进步率在前期对风电投资积极性的影响要高于后期。

**关键词:**“双碳”目标;风电;系统动力学;投资意愿;政策激励

**中图分类号:**TM 614;F 123.9

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202205013

## 0 引言

当前,我国能源转型正加速推进,大力发展新能源已成为顺应我国能源生产和消费革命的发展方向。2020年9月,习近平总书记在第75届联合国大会正式向世界承诺实现“双碳”目标。风电作为一种低碳环保、成本持续走低的可再生能源,对减少碳排放以及促进电力系统清洁化发展具有重要的作用<sup>[1]</sup>。2021年4月,国家能源局综合司发布《关于2021年风电开发建设有关事项的通知(征求意见稿)》,表明了国家对风电等新能源发电的重视以及发展风电的决心。因此,分析风电未来的发展对我国“双碳”目标能否顺利实现具有重要意义。

目前,化石能源的燃烧给环境带来了极大的危害,化石能源燃烧产生的温室气体是全球气候变暖的主要元凶<sup>[2-3]</sup>,许多学者对清洁能源的发展进行了大量的研究。文献[4]采用了计及灵活性平衡的全局灵敏度分析方法,考虑影响演化路径的多重不确定性,分析了中国高比例可再生能源发展的演化路径。文献[5]提出了一种基于滚动优化方法的规划模型,分析了中远期我国发电结构的演化。文献[6]

在低碳环保的前提下兼顾风电消纳与经济运行,提出了一种考虑碳交易机制的光热电站与风电系统低碳经济调度策略。然而,上述文献都没有考虑政策对清洁能源发展的激励作用,同时也没有考虑不同场景下的发展过程。为了量化分析政策对能源发展的影响,文献[7]分析了芬兰可再生能源政策在能源转型过程中的影响;文献[8]建立了不同场景下的系统动力学模型,探讨了政策激励下我国光伏发电的发展情况。文献[7-8]虽然从定量的角度考虑了政策对于可再生能源发展的影响机理,但是并没有考虑碳排放流在能源转型过程中与清洁能源发展的耦合作用。为此,文献[9]应用基于情景的分析方法,利用长期能源替代规划模型,探讨了尼日利亚在2010—2040年的未来能源需求、供应和相关的温室气体排放。文献[10]利用系统动力学模型对未来40年中国风电市场规模进行了预测和情景分析,同时预测了2020—2060年风电开发累计碳减排量。文献[11]从系统论的观点出发,提出了一种评估太阳能发电系统可再生性的量化框架。上述文献虽然考虑了政策的影响机理,同时定量分析了可再生能源对碳减排的影响,但是在分析时都没有重视电力经济性问题,例如新能源企业成本以及电价等因素。

为了更合理、全面地分析风电的发展,尤其是在当下碳中和愿景下,量化分析政策对风电发展规模的激励作用,分析其对碳减排的影响是十分重要的。由于系统动力学可以有效摆脱传统分析模式的束缚,能够通过情景对比进行客观与深入的分析,更能反映未来特定发展的道路选择<sup>[12]</sup>。因此,本文建立了差异化场景下计及风电企业发展经济性指标,考虑政策影响的系统动力学推演模型,探究未来风电

收稿日期:2021-07-30;修回日期:2022-03-18

在线出版日期:2022-04-13

基金项目:国家电网公司总部科技项目(多目标动态平衡的电网投资规划技术与价值衍生评估研究)(1400-202157215A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (Research on Power Grid Investment Planning Technology and Value Derivative Evaluation Based on Multi-objective Dynamic Balance) (1400-202157215A-0-0-00)

装机容量及投资的发展趋势,以及未来风电发展规模对碳减排的影响。

## 1 风电发展背景

目前,我国风电装机已覆盖全国 31 个省份。受风资源分布和建设条件的影响,陆上风电装机主要分布在“三北”地区。风电历年发展数据及详细政策背景见附录 A。2012 年起,国家能源局采取了大幅增加电网投产规模、优化电力调度等措施,由电网发展滞后、跨区通道能力不足导致的弃风限电情况得到改善。近 10 年来,由于相关产业设备的普及、相关技术的进步等原因,风电发电成本逐渐大幅下降,风电投资稳步增长。然而,目前风电在我国电源结构中占比仍然较低,风电消费占比同样不高。为了全面推动风光等新能源的大力发展,2021 年起我国不再补贴新建风电项目,全面实现平价上网。此外,随着绿色证书交易市场及辅助服务市场日趋完善,风电企业收益将更加多元化。

## 2 风电发展系统动力学建模

本文主要考虑政策激励和技术发展的双重作用,结合风电企业经济性因素,探究未来风电装机容量及投资规模的发展趋势,量化分析未来风电发展对碳减排的影响。

### 2.1 因果关系分析

系统动力学分析的系统行为是基于系统内部各因素相互作用而产生的,并假定系统外部环境变化不会给系统行为带来本质的影响,同时不受系统内部因素的控制<sup>[13]</sup>,风电的发展受政策驱动、经济水平、技术发展、环保压力等多方面复杂因素制约。因此模型内部需要筛选关键因素,排除界限外部的概念与变量。

1) 从社会角度而言,随着经济社会的不断发展,国内生产总值 GDP(Gross Domestic Product)和人口稳步增长,用电需求不断增大,导致电能消费量不断增加。由于我国已承诺提高非化石能源在一次能源消费中的比重,风电消费量占总用电量的比重是一个重要指标。因此,主要选取总人口、GDP、人口增长率、GDP 增长率、用电强度、总用电量等指标作为关键因素。

2) 从经济性角度而言,风电的经济效益主要取决于资产回报率这一经济性指标,这一指标由企业净利润和平均资产总额决定,而净利润取决于企业的总收入和风电发电成本。因此,主要选取资产回报率、风电平准化度电成本、上网电价、企业利润等经济性指标以及售电收入、辅助服务收入等与电力市场成熟度相关的指标作为关键因素。

3) 从节能减排角度而言,目前我国电力行业碳

排放主要来源于煤电的化石燃料燃烧。在当前碳中和政策背景下,大力发展风光等清洁能源对碳减排有积极的促进作用。同时,随着科技的不断进步,碳捕获、利用与封存 CCUS(Carbon Capture, Utilization and Storage)等发电新技术的普及也能够在较大程度上抑制 CO<sub>2</sub> 的排放。因此,主要选取化石能源装机占比、发电煤耗量、CCUS 技术普及率、CO<sub>2</sub> 排放量等指标作为关键因素。

4) 从风电发展角度而言,政策因素是激励风电行业发展的主要原因,投资是驱动风电装机容量增长的主要因素。厂用电率、最大负荷利用小时数、线损率等是影响风电上网电量、风电发电量及风电消费量的内部因素。因此,主要选取风电累计装机容量、新增投资、风电发电量、风电上网电量、风电消费量、厂用电率、最大负荷利用小时数、线损率等指标作为关键因素。

经过上述分析,得到风电发展推演的因果关系图如图 1 所示。图中,“+”、“-”分别表示某一因素对另一因素具有积极和消极的影响。

### 2.2 框架与子模块的建立

筛选出关键因素后,对风电发展进行建模。本文具体将风电发展模型分为电力消费子模块、经济性子模块、碳减排子模块以及风电发展子模块这 4 个子模块。电力消费子模块模拟分析在人口变化以及经济稳步发展情况下的电力消费量;经济性子模块则重点针对影响风电企业的成本与利润等经济性因素,探究风电投资的影响机理;碳减排子模块模拟分析随着未来风电的不断发展以及技术进步对 CO<sub>2</sub> 排放的影响;风电发展子模块推演在政策激励和技术发展的条件下,未来风电装机与发电量的规模以及风电消费量占电力消费量的比重。

各子模块具体见附录 B 图 B1—B4,模型的主要输出在图中用红色标出,影响主要输出的主要输入用蓝色标出,图中方框内的变量为存量,在 VensimPLE 软件中定义为速率变量(指向存量)的积分。

#### 1) 电力消费子模块。

经济和社会的发展是驱动能源消费增长的主要因素。电力消费子模块主要考虑了 GDP、人口数量以及用电强度对电力消费的影响。在该模块中,参考文献[8]的思想,将 GDP、电能消费量、用电强度分为第一产业、第二产业、第三产业,该模块主要输出为总用电量。电力消费子模块的反馈模型见附录 B 图 B1。

电力消费子模块主要公式及方程如下:

$$S_{\text{GDP}}^{\text{total}}(t) = \sum_{t=t_0}^T S_{\text{GC}}(t) + S_{\text{GDP}}^{\text{total}}(t_0) \quad (1)$$

$$S_{\text{GC}}(t) = S_{\text{GDP}}^{\text{total}}(t) r_{\text{GDP}}(t) \quad (2)$$

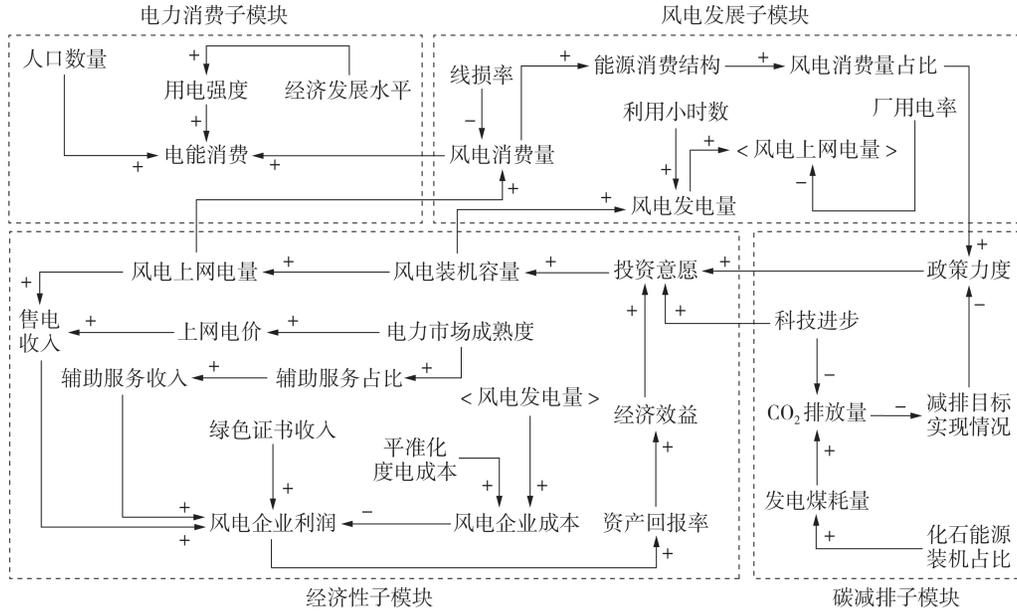


图1 风电发展推演的因果关系图

Fig.1 Casual loop diagram of wind power development evolution

$$S_{\text{POP}}^{\text{total}}(t) = \sum_{t=t_0}^T S_{\text{PC}}(t) + S_{\text{POP}}^{\text{total}}(t_0) \quad (3)$$

$$S_{\text{PC}}(t) = S_{\text{POP}}^{\text{total}}(t) r_{\text{POP}}(t) \quad (4)$$

$$S_{\text{GDP}}^{\text{pc}}(t) = S_{\text{GDP}}^{\text{total}}(t) / S_{\text{POP}}^{\text{total}}(t) \quad (5)$$

$$V_i(t) = S_{\text{GDP}}^{\text{total}}(t) \delta_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$E_i(t) = I_i^{\text{EC}}(t) V_i(t) \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

$$I_i^{\text{EC}}(t) = a_i S_{\text{GDP}}^{\text{pc}}(t) + b_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$E^{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^3 E_i(t) \quad (9)$$

式中:  $t_0$  表示初始时间;  $T$  为仿真年限;  $S_{\text{GDP}}^{\text{total}}(t)$  为 GDP 总量, 是 GDP 增长量  $S_{\text{GC}}(t)$  的积分和, GDP 增长量为 GDP 总量与 GDP 增长率  $r_{\text{GDP}}(t)$  的乘积,  $r_{\text{GDP}}(t)$  的取值来源于《中国统计年鉴》, GDP 与 GDP 增长量之间存在反馈作用<sup>[14]</sup>;  $S_{\text{POP}}^{\text{total}}(t)$ 、 $S_{\text{PC}}(t)$ 、 $r_{\text{POP}}(t)$  分别为人口总量、人口增长量和人口自然增长率, 这三者之间的数学关系与 GDP 类似;  $S_{\text{GDP}}^{\text{pc}}(t)$  为人均 GDP;  $V_i(t)$  为不同产业产值, 其中  $i=1, 2, 3$ ,  $V_1(t)$  为第一产业产值, 其他类似;  $\delta_i$  为不同产业产值占比,  $\delta_i$  的取值来源于《中国统计年鉴》;  $E_i(t)$  为不同产业电能消费量, 取值为不同产业用电强度  $I_i^{\text{EC}}(t)$  与不同产业产值  $V_i(t)$  的乘积;  $I_i^{\text{EC}}(t)$  的计算方法参考了文献[15]的思想, 从线性的角度判别电力消费与经济增长之间的因果关系;  $a_i$ 、 $b_i$  为通过回归分析拟合得到的常数;  $E^{\text{total}}(t)$  为总用电量。

## 2) 经济性子模块。

风电企业获得的利润是驱动风电规模化发展的主要因素, 经济性子模块主要考虑了风电上网的电力市场因素以及风电企业的经济效益。随着电力市场成熟度日趋提高, 辅助服务收入也会随之增长。

2020年1月,《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》正式提出全面推行绿色证书交易机制, 企业可通过绿色证书交易获得收入替代原先财政补贴。因此绿色证书收入也将成为风电企业收入来源之一。风电企业总成本主要包括风电发电成本与机组投资成本, 风电发电成本由风电平准化度电成本驱动。在该模块中, 衡量风电企业经济效益的指标主要为资产回报率, 它由风电企业净利润以及平均资产总额共同决定, 而平均资产总额的主要输入(风电累计装机容量)则是后续风电发展子模块的主要输出。经济性子模块的反馈模型见附录 B 图 B2。

经济性子模块的主要公式及方程如下:

$$H_{\text{TCC}}^{\text{total}}(t) = \sum_{t=t_0}^T (B_{\text{TCC}}(t) - Q_{\text{TCC}}(t)) + H_{\text{TCC}}^{\text{total}}(t_0) \quad (10)$$

$$R_{\text{TCC}}(t) = H_{\text{TCC}}^{\text{total}}(t) p_{\text{TCC}}(t) \quad (11)$$

$$R_s(t) = E_{\text{WP}}^{\text{og}}(t) p_{\text{WP}}(t) \quad (12)$$

$$R_{\text{AS}}(t) = R_s(t) s_A(t) \quad (13)$$

$$R_{\text{WP}}^{\text{total}}(t) = R_s(t) + R_{\text{TCC}}(t) + R_{\text{AS}}(t) \quad (14)$$

$$C_{\text{WP}}^{\text{L}}(t) = \alpha_1 e^{-l(t)\alpha_2} \quad (15)$$

$$l(t) = \frac{\alpha_3}{1 + \alpha_4 e^{-\alpha_5 t}} \quad (16)$$

$$C_{\text{WP}}^{\text{total}}(t) = C_{\text{WP}}^{\text{L}}(t) E_{\text{WP}}^{\text{g}}(t) + C_{\text{WP}}^{\text{u}}(t) \quad (17)$$

$$f_{\text{WP}}^{\text{np}}(t) = R_{\text{WP}}^{\text{total}}(t) - C_{\text{WP}}^{\text{total}}(t) \quad (18)$$

$$\lambda(t) = f_{\text{WP}}^{\text{np}}(t) / S_{\text{ATA}}(t) \quad (19)$$

$$S_{\text{ATA}}(t) = C_{\text{WP}}^{\text{u}}(t) f_{\text{WP}}^{\text{cap}}(t) \quad (20)$$

$$f_{\text{FB}}(t) = S_{\text{ATA}}(t) \eta_1 \quad (21)$$

式中:  $H_{\text{TCC}}^{\text{total}}(t)$  为企业绿色证书持有量, 由绿色证书获得量  $B_{\text{TCC}}(t)$  和绿色证书售出量  $Q_{\text{TCC}}(t)$  共同决定,

$R_{TCC}(t)$  为绿色证书收入;  $p_{TCC}(t)$  为绿色证书价格;  $R_S(t)$  为售电收入;  $R_{AS}(t)$  为辅助服务收入;  $s_A(t)$  为辅助服务占比;  $R_{WP}^{total}(t)$  为风电企业总收入, 基于我国电力市场现状, 本文将风电企业总收入定义为售电收入、辅助服务收入和绿色证书收入之和;  $C_{WP}^L(t)$  为风电平准化度电成本, 由全生命周期  $l(t)$  决定,  $C_{WP}^L(t)$ 、 $l(t)$  的具体计算公式推导见文献[16], 为简化分析, 本文将二者进行回归分析;  $\alpha_1 - \alpha_5$  为通过历史数据回归分析拟合得到的常数;  $C_{WP}^{total}(t)$  为风电企业总成本, 为简化分析, 本文将其定义为风电发电成本与机组投资成本  $C_{WP}^u(t)$  之和, 风电发电成本为风电发电量  $E_{WP}^s(t)$  与  $C_{WP}^L(t)$  的乘积;  $f_{WP}^{net}(t)$  为风电企业净利润;  $\lambda(t)$  为资产回报率, 取值为  $f_{WP}^{net}(t)$  与平均资产总额  $S_{ATA}(t)$  的比值;  $f_{FB}(t)$  为经济效益;  $\eta_1$  为经济效益因子, 其值来源于文献[17]。

### 3) 碳减排子模块。

我国的资源禀赋、发电能源结构和发输电技术的差异都是造成发电煤耗偏高的原因, 煤耗的降低对于  $CO_2$  排放起到直接的抑制作用。发电新技术(如 CCUS 技术的普及)也能够有效降低  $CO_2$  排放量。同时, 随着“双碳”目标的不断推进, 风电等清洁能源消费量占终端电能消费比例越高, 对  $CO_2$  排放的抑制效果越明显。碳减排子模块中, 影响碳减排的因素主要考虑了 CCUS 技术普及率、煤耗成本、化石能源装机占比、碳排放系数及风电用电量<sup>[12]</sup>, 风电用电量这一指标在碳减排子模块和风电发展子模块中均作为重要输入。碳减排子模块的反馈模型见附录 B 图 B3。

碳减排子模块的主要公式及方程如下:

$$f_{CER}(t) = E_{WP}^{con}(t)\theta + C_{COAL}(t)e^{-(\xi(t)+\omega(t))} \quad (22)$$

$$C_{COAL}(t) = p_{COAL}(t)S_{COAL}^{total}(t) \quad (23)$$

$$S_{COAL}^{total}(t) = f_{COAL}^{st}(t)\eta_2 \quad (24)$$

$$\xi(t) = \frac{\beta_1}{1 + \beta_2 e^{-\beta_3 t}} \quad (25)$$

$$\omega(t) = \beta_4 e^{-\beta_5 t} \quad (26)$$

式中:  $f_{CER}(t)$  为碳减排量, 主要由风电用电量  $E_{WP}^{con}(t)$ 、碳排放系数  $\theta$ 、煤耗成本  $C_{COAL}(t)$ 、CCUS 技术普及率  $\xi(t)$  和化石能源装机占比  $\omega(t)$  决定, 其计算公式由历史数据进行回归分析得到<sup>[12]</sup>,  $\theta$  取值来源于文献[12];  $p_{COAL}(t)$  为煤价;  $S_{COAL}^{total}(t)$ 、 $f_{COAL}^{st}(t)$  分别为发电总煤耗和供电标准煤耗;  $\eta_2$  为耗煤因子, 其值来源于文献[12];  $\beta_1 - \beta_3$  为常数, 其发展趋势参照技术发展的客观规律, 为“S”型生长曲线, 生长曲线上的拐点是 CCUS 技术生命周期的转折点<sup>[13]</sup>;  $\beta_4$ 、 $\beta_5$  为常数, 由历史数据及未来发展趋势拟合得到。

### 4) 风电发展子模块。

风电未来装机容量的增长由风电新增投资驱

动, 而经济效益是影响投资意愿的主要因素。在风电发展子模块中, 量化考虑了政策激励的影响。政策力度、投资意愿是影响风电发展的外部因素, 而最大负荷利用小时数、厂用电率、线损率是影响风电发展的内部因素。随着技术的不断进步, 风电最大负荷利用小时数将逐渐提升, 线损率和厂用电率将逐渐降低。风电发电量与最大负荷利用小时数呈正相关, 风电用电量、风电上网电量与线损率和厂用电率呈负相关。

我国正向以新能源为主体的新型电力系统高速迈进, 未来电力供给侧结构逐渐以风光等新能源为主, 因此, 风电消费量占总用电量比例是衡量我国能否顺利实现“双碳”目标的重要指标之一。该指标作为本模块的主要输出之一, 其主要输入(总用电量)则是电力消费子模块的主要输出, 体现了系统动力学模型的反馈关系与系统性。风电发展子系统的反馈模型见附录 B 图 B4。

风电发展子模块的主要公式及方程如下:

$$f_{WP}^{cap}(t) = \sum_{t=t_0}^T S_{CC}(t) + f_{WP}^{cap}(t_0) \quad (27)$$

$$S_{CC}(t) = f_{WP}^{inv}(t)/C_{WP}^u(t) \quad (28)$$

$$\phi(t) = \varepsilon(t)f_{FB}(t)/\eta_3 \quad (29)$$

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \sigma_1 & t \leq t_1 \\ \sigma_2 & t_1 < t \leq t_2 \\ \vdots & \\ \sigma_{k+1} & t \geq t_k \end{cases} \quad (30)$$

$$E_{WP}^s(t) = f_{WP}^{cap}(t)\tau_{WP}^{max}(t) \quad (31)$$

$$E_{WP}^{og}(t) = E_{WP}^s(t)(1 - g(t)) \quad (32)$$

$$E_{WP}^{con}(t) = E_{WP}^{og}(t)(1 - k(t)) \quad (33)$$

$$s_{WP}(t) = E_{WP}^{con}(t)/E^{total}(t) \quad (34)$$

式中:  $f_{WP}^{cap}(t)$  为风电累计装机容量;  $S_{CC}(t)$  为装机容量增长量, 由风电新增投资  $f_{WP}^{inv}(t)$  与  $C_{WP}^u(t)$  共同决定;  $\phi(t)$  为投资意愿, 由政策力度  $\varepsilon(t)$  与  $f_{FB}(t)$  共同决定,  $\eta_3$  为政策激励因子, 其取值见文献[13];  $\varepsilon(t)$  的量化思想见文献[8],  $\sigma_1 - \sigma_{k+1}$  的取值由风电历年装机增长率结合当年政策强度得到; 为简化分析, 本文将风电发电量  $E_{WP}^s(t)$  定义为风电机组最大负荷利用小时数  $\tau_{WP}^{max}$  与  $f_{WP}^{cap}(t)$  的乘积;  $g(t)$  为厂用电率;  $k(t)$  为线损率;  $s_{WP}(t)$  为风电消费占总用电量比例。

## 3 算例分析

### 3.1 模型真实性检验

为了使系统动力学模型能够合理地量化分析各变量之间的关系, 准确模拟我国未来风电的发展路径, 应对模型进行真实性检验。通过历史数据验证动态系统行为的真实性。本文计算模拟了 2006—2020 年的风电装机容量以及风电发电量, 并与真实

数据进行比较,如附录B表B1所示。仿真参数初始值、数据真实值来源于国家统计局《中国统计年鉴》、中国电力企业联合会以及国家能源局发布的《2006—2020电力工业统计基本数据》。仿真结果显示仿真值与真实值间的误差均在10%以内,这说明本文所建立的模型可以真实反映电力系统未来风电发展情况。

### 3.2 算例基础数据

本文将模型初始仿真年限设定为2020年(标杆电价退坡后),设定模拟时间为10a,即2021—2030年。化石能源装机占比、GDP及人口数据初始值来源于《中国统计年鉴》,绿色证书持有量、绿色证书价格等初始值来源于文献[18-19],上网电价数据来源于国家发展和改革委员会,风电累计装机容量及风电最大负荷利用小时数来源于中国电力企业联合会的统计数据。煤价取自中央财政煤炭企业商品煤平均售价2011—2020的历年数值,在此基础上保守预测2021—2030年的价格,尽量减少煤炭价格不确定因素对模型精度的影响。通过仿真软件Vensim PLE进行仿真模拟。算例参数初始值如表1所示。

表1 参数初始值

Table 1 Initial value of parameters

参数	初始值
GDP / 亿元	1015986
总人口数	$1.4118 \times 10^9$
绿色证书持有量 / (MW·h)	52500
绿色证书价格 / [元·(MW·h) <sup>-1</sup> ]	120
上网电价 / [元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.29
风电累计装机容量 / GW	281
风电最大负荷利用小时数 / h	2300

### 3.3 场景参数设置

政策激励与技术进步是促进风电发展的主要因素。从历史数据可以看出,不同的政策强度能够直接影响风电行业的投资意愿,技术发展的快慢也会影响风电的发展。

本文综合考虑了以下4种不同场景:场景1,低政策力度和低技术进步率;场景2,低政策力度和高技术进步率;场景3,高政策力度和低技术进步率;场景4,高政策力度和高技术进步率。

在低政策力度下,我国保持现有的风电政策激励程度不变;在高政策力度下,我国为了更快地实现“双碳”的美好愿景,将在政策层面大力支持风电的发展,增强投资意愿,完善电力市场化改革、碳交易市场建设以及绿色证书交易体系,加速新型电力系统转型。在低技术进步率下,中国风电行业保持现有技术发展程度,逐步退出火力发电,部分减碳效果明显的发电新技术并未全面普及;在高技术进步率下,随着技术的革新,风电厂运行效率提高,机组成

本降低,CCUS等技术全面普及,火电供电标准煤耗相应降低,减碳效果会更加明显。其中,不同场景下的辅助服务占比、GDP增长率、CCUS技术普及率、线损率、厂用电率、供电标准煤耗及风电最大负荷利用小时数取自文献[12]。政策力度场景及技术进步场景参数设置见附录B表B2和表B3。

### 3.4 仿真结果分析

#### 1) 装机容量及投资分析。

图2给出了4种差异化场景下的风电累计装机容量(柱形图)及新增投资(折线图)。

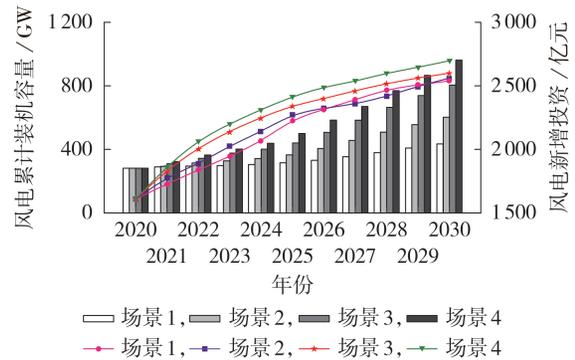


图2 不同场景下风电累计装机容量及新增投资  
Fig.2 Cumulative installed capacity and new-added investment of wind power under various scenarios

由图2可知:在场景1下,风电累计装机容量发展最慢,2030年达到434.8 GW,在场景4下,风电累计装机容量发展最快,2030年达到958.6 GW,这说明在政策的激励下,技术的进步可以更好地促进风电的发展;而在场景3下2030年风电累计装机容量为804.3 GW,远高于场景2的602.7 GW,该结果充分说明了政策强度对于风电装机容量的激励程度要大于技术进步。

出现这种现象可能有以下3种原因。第一,近几年来,风力发电技术已经日趋完善且成熟,在较短的时间内很难有重大技术突破与创新。并且除了技术进步以外,风力发电受制于风速的波动性以及风力资源的间歇性,具有很强的不确定性,目前风力发电主要集中在我国风力资源丰富的“三北”地区。因此,要提高风电在其他地区的覆盖率,政策导向是至关重要的。第二,由于风电具有消纳困难的特点,部分地区电网接纳能力不足,我国弃风限电情况较为严重,因而对于风电企业利益相关者而言,保证风电的经济效益以及克服风电所带来的不利影响需要相关政策来协调。第三,实现“双碳”目标势必要对电力体制进行改革建设。然而,目前我国的碳市场仍处于起步阶段,电力市场成熟度不够高,而风电的发展与碳排放权交易体系、绿色证书交易体系以及辅助服务建设等方面息息相关,因此还需要配套政策完善相关体制建设。

此外,由图 2 可知:在场景 1 下,2030 年风电新增投资达 2 632.4 亿元,为 4 种场景中最低;在场景 4 下,2030 年风电新增投资达 2 806.1 亿元,为 4 种情景中最高。风电新增投资是风电装机容量不断增长的直接驱动因素。从仿真结果可以看出,场景 3 及场景 4 的风电新增投资高于场景 1 和场景 2,这说明政策激励对风电投资的促进作用仍大于技术进步。而对比场景 1 与场景 2 的仿真结果可以看出,在 2021—2026 年,高技术进步率对风电新增投资具有一定的促进作用,投资额要高于低技术进步率的场景。

出现这种现象可能有以下 2 种原因。第一,随着技术进步,风电的最大负荷利用小时数提高,风电机组的建设成本降低,将会提高风电投资意愿。第二,随着电力系统灵活性的提升以及源网的协调推进,弃风问题将得到有效控制,因此在初期投资增长率较高。然而,从 2025 年以后,场景 2 的投资增长率开始逐步趋缓,在 2027—2029 年,场景 2 的新增投资额甚至低于场景 1。这可能是因为在技术进步场景下,前期由于风电建设成本较低等因素大幅促进了风电新增投资以及装机容量的发展,前期的投入及建设为后续使用提供了便利,因此会影响后期投资的积极性,造成增长率偏低;而在场景 1 下,由于前期技术进步率较低导致风电投资积极性较低,加之风电累计装机容量增长速度较慢,为了顺利实现“双碳”目标,势必要加大对风电的投资,因此出现了后期新增投资甚至高于场景 2 高技术进步率的情况。

## 2) 风电发电量及风电消费占比分析。

图 3 给出了 4 种差异化场景下风电发电量(柱形图)及风电消费量占总用电量比例(折线图)。由图 3 可知:在场景 1 下,未来 10 年风电发电量及风电消费量占比均是 4 种场景中最低的,风电发电量在 2030 年达到 10 304.5 亿 kW·h,相比 2020 年增加了 5 661.5 亿 kW·h,风电消费量占比达到 13.82%,相

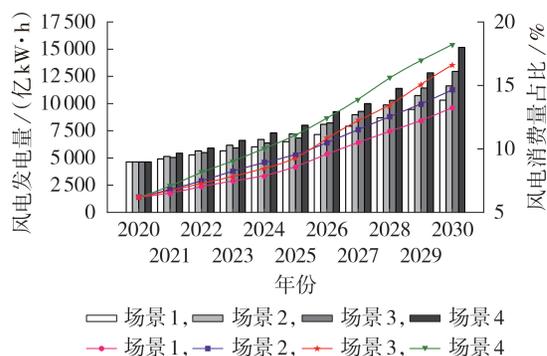


图 3 不同场景下风电发电量及风电消费量占比

Fig.3 Wind power generation and proportion of wind power consumption under various scenarios

比 2020 年增长了 7.55%;在场景 4 下,风电发电量在 2030 年达到 15 165.9 亿 kW·h,相比 2020 年增加了 10 522.9 亿 kW·h;风电消费量占比达到 19.18%,相比 2020 年增长了 12.91%;尽管在 2021—2025 年时段内,场景 2 下的风电累计装机容量要低于场景 3,但是场景 2 下的风电发电量以及风电消费量占比却高于场景 3。这可能是因为在高技术进步率场景下,随着科技不断发展,风电机组的故障率不断降低,机组可靠运行时间不断提升,变压器损耗以及线损等场内损耗不断降低,使得风电最大负荷利用小时数得到提高,从而提高了发电效率。同时,随着特高压交直流输电技术的不断成熟,输电线损率不断降低,从而提高了输电效率,促进了风电消费量,进而提高了风电消费量占比。然而,2025 年以后,高政策力度使得风电装机容量大幅提高,其对风电发电量的促进作用要超过高技术进步率下风电发电效率提升对发电量的促进作用。这表明在前期,技术进步对风电发电量及风电消费量的促进作用要高于政策力度,而在后期,政策力度的促进作用要超过技术进步带来的优势。

## 3) 碳减排量分析。

附录 B 图 B5 给出了 4 种不同场景下风电发展对碳减排的影响。由图 B5 可知:场景 1 下受风电发展影响的碳减排量最少,在 2030 年达到 7.09 亿 t,相比 2020 年增加了 3.42 亿 t;在场景 4 政策力度以及技术进步率均较高的情况下,2030 年碳减排量达到了 12.84 亿 t,相较 2020 年增加了 9.17 亿 t;场景 2 下受风电影响的碳减排量一直高于场景 3,这说明相比政策力度,技术进步带来的碳减排效果更加明显。这是因为目前我国 CO<sub>2</sub> 主要排放源自于化石燃料的燃烧,从化石能源入手是减少 CO<sub>2</sub> 排放量最直接有效的办法。随着科技的发展,发电用能效率不断提升,发电经济性不断提高,电力系统逐渐向新型电力系统转型,小容量的火电机组逐步关停,加之 CCUS 技术、整体煤气化联合循环发电机组等传统化石能源的发电新技术全面普及,能够直接从发电侧抑制 CO<sub>2</sub> 的排放。故而技术进步对碳减排量的激励程度要大于政策激励。同时,在 2030 年,场景 4 有政策力度与技术进步双重促进下的碳减排量比场景 2 仅有技术进步情况下的碳减排量高 2.56 亿 t,而场景 2 下的碳减排量仅比只有高政策力度激励的场景 3 下的减排量高 1.16 亿 t。这说明若想将 CO<sub>2</sub> 的减排效果发挥得更好,相关政策的激励与技术的进步都是不可或缺的,不能偏重偏废。

## 4) 上网电量及绿色证书持有量分析。

附录 B 图 B6 给出了 4 种不同场景下风电上网电量(柱形图)及风电企业绿色证书持有量(折线图)。由图 B6 可知:在场景 1 下,未来 10 年风电上网电量

为4种场景中最低,2030年达到9954.15亿kW·h,相比2020年增加了5476.77亿kW·h;而在场景4下,2030年风电上网电量达到14730.64亿kW·h,相比2020年增长了10253.26亿kW·h;与风电发电量类似,在2021—2025年时段内场景2下的风电累计装机容量要低于场景3,但场景2下的风电上网电量仍高于场景3,这是由于风电上网电量与风电发电量二者呈正相关,因此出现这种现象的原因与上述分析风电发电量时类似,此处不再赘述。

风电企业绿色证书持有量主要受风电上网电量的影响。在场景1下,企业绿色证书持有量为4种场景中最低,2030年达到101746.23MW·h,相比2020年增加了49246.23MW·h。而在场景4下,2030年企业绿色证书持有量达到160732.7MW·h,为4种场景中最高,相比2020年增长了108232.7MW·h。从图B6可以看出,场景3与场景1(技术进步率固定)之间的差距要远大于场景2与场景1(政策力度固定)之间的差距,场景4与场景2之间的差距同样远大于场景4与场景3之间的差距。这表明政策力度对于企业绿色证书持有量的促进作用要远高于技术进步。

在实现“双碳”目标的过程中,尽管风电等新能源在发电技术成本上已具有一定的竞争力,但考虑调峰、备用以及灵活性等外部成本时与传统能源相比仍较为逊色。因此,当务之急是要完善电力体制建设,培养新能源健康发展的政策沃土<sup>[20]</sup>。绿色证书市场交易作为电力体制改革内容的重要一环,主要靠国家政策驱动发展,绿色证书市场交易的成熟度与国家政策力度呈强相关关系;而技术进步会影响厂用电率、线损等因素,进而影响上网电量,从而间接影响企业绿色证书持有量。因此,政策力度对绿色证书持有量的促进作用要大于技术进步。

## 4 结论

本文基于系统动力学方法,建立了包含电力消费者模块、经济性子模块、碳减排子模块以及风电发展子模块的电力系统风电发展模型,通过仿真验证了模型的有效性。并通过设置差异化政策力度与技术进步率场景,对未来10年风电的动态发展路径进行了推演。通过算例分析,得到如下结论:

1)政策力度对未来风电装机容量及投资发展的激励程度要高于技术进步,当政策力度较低时,技术进步在前期对投资意愿的促进作用要高于后期;

2)前期技术进步对风电发电量、上网电量及风电消费量的激励程度要高于政策力度,而后期政策力度对其激励程度要超过技术进步;

3)技术进步对碳减排的激励程度要高于政策力度,政策力度与技术进步的双重作用能够使碳减排

效果更明显;

4)政策力度对风电企业绿色证书持有量的促进作用要远高于技术进步。

本文所建立的模型能够为我国未来风电的发展提供指导,并能为相关政策制定者提供参考。未来的研究可进一步考虑其他能源对风电的影响作用,更加细化地讨论多能源系统耦合下的综合效益。同时,我国未来将大力发展分布式风电,后续研究应深化对集中式、分布式风电比例等问题的探讨。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 谭忠富,鞠立伟. 中国风电发展综述:历史、现状、趋势及政策[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2013(2):1-7.  
TAN Zhongfu, JU Liwei. Review of China's wind power development: history, current status, trends and policy[J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2013(2):1-7.
- [2] 石元春. 我国生物质能源发展综述[J]. 智慧电力,2017,45(7):1-5,42.  
SHI Yuanchun. Overview of biomass energy development in China[J]. Smart Power, 2017,45(7):1-5,42.
- [3] 赵曰浩,李知艺,鞠平,等. 低碳化转型下综合能源电力系统弹性:综述与展望[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):13-23,47.  
ZHAO Yuehao, LI Zhiyi, JU Ping, et al. Resilience of power system with integrated energy in context of low-carbon energy transition: review and prospects[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(9):13-23,47.
- [4] 鲁宗相,李昊,乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网,2021,4(1):12-18.  
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021,4(1):12-18.
- [5] TANG Lei, GUO Jue, ZHAO Boyang, et al. Power generation mix evolution based on rolling horizon optimal approach: a system dynamics analysis[J]. Energy, 2021,224:120075.
- [6] 崔杨,邓贵波,王铮,等. 计及碳交易的光热电站与风电系统低碳经济调度策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(9):232-239.  
CUI Yang, DENG Guibo, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic scheduling strategy for power system with concentrated solar power plant and wind power considering carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(9):232-239.
- [7] ASLANI A, HELO P, NAARANOJA M. Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: system dynamics approach[J]. Applied Energy, 2014,113:758-765.
- [8] GUO Xiaodan, GUO Xiaopeng. China's photovoltaic power development under policy incentives: a system dynamics analysis[J]. Energy, 2015,93(12):589-598.
- [9] EMODI N V, EMODI C C, MURTHY G P, et al. Energy policy for low carbon development in Nigeria: a LEAP model application[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,68(10):247-261.
- [10] 王恰. 2020—2060年中国风电装机规模及其CO<sub>2</sub>减排预测[J]. 生态经济,2021,37(7):13-21.  
WANG Qia. Forecast of China's wind power installed capacity and corresponding CO<sub>2</sub> reduction from 2020 to 2060[J]. Ecological Economy, 2021,37(7):13-21.

- [11] WU Xudong, LI Chaohui, SHAO Ling, et al. Is solar power renewable and carbon-neutral: evidence from a pilot solar power plant in China under a systems view[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 1-14.
- [12] 孙伟, 王敬敏. 电力低碳管理模型及政策评价研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017: 39-58.
- [13] 周昊, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于系统动力学的电动汽车规模推演分析与仿真[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(8): 1-7.  
ZHOU Hao, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Analysis and simulation of electric vehicles scale evolution based on system dynamics[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(8): 1-7.
- [14] 钟永光, 贾晓菁, 李旭. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 89-102.
- [15] 光峰涛. 中国电力消费的多维度特征研究与需求预测[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.  
GUANG Fengtao. Multi-dimensional analysis of the characteristics and demand prediction of China's electricity consumption[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [16] 三一重能. 适用于我国风电场平准化度电成本的计算方法[EB/OL]. [2021-08-19]. <https://news.bjx.com.cn/html/20190110/955768.shtml>.
- [17] LIU Dunnan, ZHAO Weidong, LI Zhihao, et al. Can hydro-power develop as expected in China? A scenario analysis based on system dynamics model[J]. *Energy*, 2018, 161: 118-129.
- [18] 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.
- [19] 余顺坤, 周黎莎, 李晨. 基于可再生能源配额制的绿色证书交易SD模型设计[J]. *华东电力*, 2013, 41(2): 281-285.  
YU Shunkun, ZHOU Lisha, LI Chen. System dynamic model design for green certificate trading based on renewable portfolio standard[J]. *East China Electric Power*, 2013, 41(2): 281-285.
- [20] 何勇健. 新型电力系统的冲击、演进与重塑[EB/OL]. [2021-08-19]. <https://www.163.com/dy/article/GHPEKSN7051111A0.html>.

#### 作者简介:



彭光博

彭光博(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为电网投资与发展分析(E-mail: pgbscu@163.com);

向月(1987—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电网投资与规划(E-mail: xiang@scu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

## Kinetic deduction and analysis of installed capacity and investment development for wind power in power system under “dual carbon” target

PENG Guangbo, XIANG Yue, CHEN Wenxule, XU Bohan, LIU Junyong

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to deduce the development of wind power under the “dual carbon” target, the dynamics deduction model for the future development of wind power in power system is established by using the dynamic and systematic characteristics of system dynamics. The validity of the model is verified by historical data, and the future development trend of wind power is obtained through simulations. The model is combined with policy incentives and technological development progress for setting up differentiated scenarios to analyze the future wind power generation electricity, on-grid electricity, proportion of wind power consumption and carbon emission reduction under different conditions. Simulative results show that the policy support has a stronger incentive effect on the development of wind power installed capacity and green certificate market transactions than technological progress, and it has a significant promotion effect on the long-term stable development of wind power. And the technological progress has a more obvious effect on carbon emission reduction than policy support. Meanwhile, the technological progress in the early stage has a higher promotion impact on wind power generation electricity, on-grid electricity and consumption than that of policy support, and the higher rate of technological progress has a higher impact on wind power investment willingness in the early stage than that in the later stage under the condition of low policy support effort.

**Key words:** “dual carbon” target; wind power; system dynamics; investment willingness; policy incentive

## 附录 A

截至 2020 年年底，全国风电累计装机容量 2.81 亿 kW（其中，陆上风电约 2.71 亿 kW，海上风电约 900 万 kW），为 2005 年的 225 倍，占我国全部发电装机的 12.8%，占全球风电总装机规模的 36.3% 左右。目前，风电装机已覆盖全国 31 个省份。风电历年累计装机容量及增速如图 A1 所示，可以看出，风电装机容量增速从“十一五”时期后持续走低，而累计装机容量在从“十二五”期间开始一直以低增速稳步增长。2020 年“双碳”目标正式提出以后，风电装机增速远超“十四五”其他年份，体现了政策对于风电发展的促进作用。

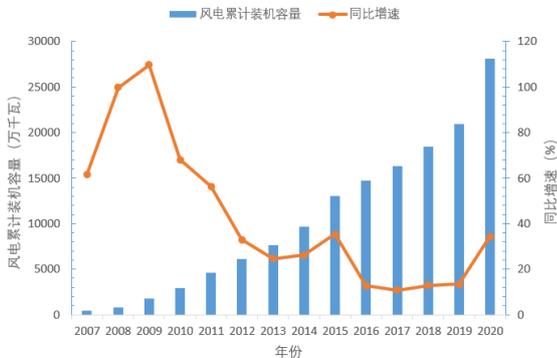


图 A1 风电历年累计装机容量及增速

Fig.A1 Annual cumulative installed capacity and growth rate of wind power

风电历年发电量及同比增速如图 A2 所示。2020 年，全国风电发电量约为 4643 亿 kW h，占全国用电总量的 6.3% 左右，占全部可再生能源发电量的 21.1% 左右。从 2011 年起，受电网发展滞后、跨区通道能力不足的问题，弃风限电情况日趋严重。从 2012 年起，国家能源局采取了一系列应对措施：基于风电项目布局优化、配套电网投产规模增加、电力调度优化、就地消纳空间拓展等一系列措施，弃风限电情况在 2013 年得到明显改善。2020 年全国弃风量约 144 亿 kW h，平均弃风率 3% 左右，为 2011 年来最低。然而，风电在我国电源结构中占比仍然较低，风电消费占比同样不高。在当前能源转型背景下，提高风电消费占比对于顺利实现碳达峰、碳中和具有重要的指导意义。



图 A2 风电历年发电量及增速

Fig.A2 Annual wind power generation and growth rate

在过去的 10 年内，由于相关产业设备的普及、相关技术的进步等原因，风电发电成本逐渐大幅下降。风电历年投资及增速如图 A3 所示，随着发电成本逐年下降，风电投资也在稳步增长。2019 年 5 月，国家发展改革委印发《完善风电上网电价政策的通知》（发改价格〔2019〕882 号），要求“自 2021 年 1 月 1 日起，新核准的陆上风电项目全面实现平价上网、国家不再补贴”。2021 年 6 月 7 日，国家发展改革委正式发布《关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》，通知明确，2021 年 8 月 1 日起新建陆上风电、光伏发电项目国家将不再补贴，上网电价按各地燃煤发电基准价执行。此次通知有利于进一步稳定投资预期，促进新能源产业加快发展。此外，如再进一步考虑技术进步导致的全生命周期电量增加潜力及绿色证书交易收入，新能源项目投资收益率有望进一步提高，从而更加有利于吸引投资，助力新能源发展目标实现。



图 A3 风电历年投资额及增速

Fig.A3 Annual investment and growth rate of wind power



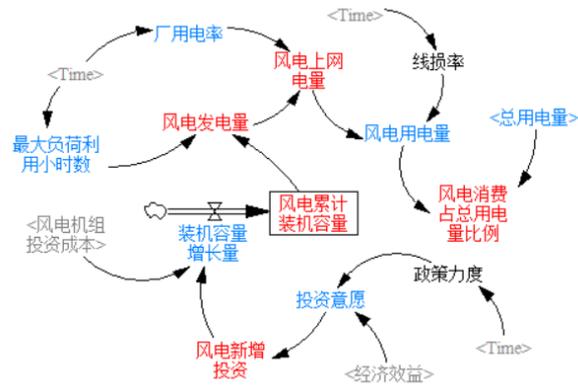


图 B4 风电发展子模块  
Fig.B4 Wind power development sub-module

表 B1 真实性检验结果  
Table B1 Authenticity test results

年份	装机容量 仿真值/GW	装机容量 真实值/GW	误差/%	发电量仿真值/ (亿 kW · h)	发电量真实值/ (亿 kW · h)	误差/%
2006	2.81	2.60	8.07	33.10	30.2	9.60
2007	4.59	4.20	9.29	62.42	57.1	9.32
2008	7.73	8.39	-7.87	124.56	130.8	-4.77
2009	16.54	17.60	-6.02	262.49	276.2	-4.96
2010	28.42	29.59	-3.95	459.71	494.3	-6.94
2011	48.19	46.23	4.23	754.52	741.1	1.81
2012	63.50	61.42	3.39	1098.54	1030.7	6.58
2013	78.77	76.52	2.94	1462.14	1383.6	5.68
2014	97.88	96.57	1.37	1634.28	1598.5	2.24
2015	126.57	130.75	-3.20	1811.49	1856.4	-2.42
2016	148.62	147.47	0.78	2547.62	2409.7	5.72
2017	170.30	163.25	4.32	3130.77	3034.8	3.16
2018	191.39	184.27	3.86	3720.40	3658.0	1.71
2019	220.35	209.15	5.36	4266.55	4053.6	5.25
2020	290.19	281.00	3.27	4809.13	4643.0	3.58

表 B2 不同政策力度场景参数  
Table B2 Scenario parameters of various policy strength

场景	上网电价/ [元 · (kW · h) <sup>-1</sup> ]	辅助服务 占比/%	GDP 增长率/%	政策 力度
低政策力度	0.29	3	6.1	1.2
高政策力度	0.42	6	8.38	1.7

表 B3 不同技术进步率场景参数

Table B3 Scenario parameters of various technical progress rate

场景	CCUS 技术	线损	供电标准煤耗/	风电最大负荷	厂用电率/%
	普及率/%	率/%	[g · (kW · h) <sup>-1</sup> ]	利用小时数/h	
低技术进步率	70	3.00	305	2300	3.39
高技术进步率	90	2.58	300	2800	2.87

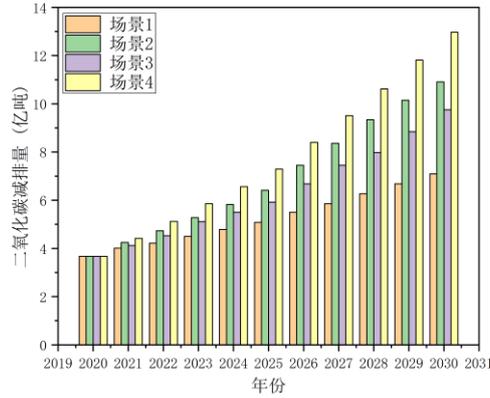


图 B5 不同场景下受风电发展影响的碳减排量

Fig.B5 Carbon emission reduction affected by wind power development under various scenarios

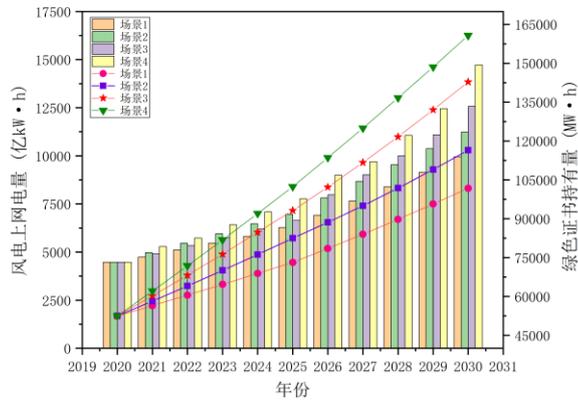


图 B6 不同场景下风电上网电量及绿色证书持有量

Fig.B6 On-grid electricity of wind power and tradable green certificate holdings under various scenarios