第 49 卷 第 1 期：94-106 高电压技术 Vol.49, No.1: 94-106
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211557

风煤富集区域的风−氢−煤化工多能耦合系统碳排放核算与低碳效益评估

王进君，郭建华
（大连理工大学电气工程学院，大连 116024）

摘　要：针对风煤富集区域的风−氢−煤化工多能耦合系统(wind power-hydrogen energy storage-coal chemical multi-funtiaonal coupling system, WP-HES&CCMFCS)的低碳问题，基于排放因子法提出一种自上而下和自下而上相结合多能耦合系统的碳排放核算和低碳效益评估方法。首先，阐述多能耦合系统结构及其碳排放核算和低碳效益评估流程；利用广义 Bass 模型的不同冲击函数设定 3 种情景，并预测多能耦合系统关键环节风电在各情景下到 2025 年的技术扩散趋势；其次，综合考虑系统的能量流动约束和稳定运行约束，构建多能耦合系统的碳排放核算和低碳效益评估模型；最后，以新疆地区风电场和煤化工企业为背景进行验证。结果表明，2 种低碳情景较既定情景净收益提升分别为 7.88%和 3.54%，碳配额交易收益提升分别为 31.73%和 15.39%，并通过灵敏度分析得出 2 种耦合参数在特定区域时系统规划结果性价比将更低，为后续多能系统规划提供了新思路，并为工程决策者提供了规避低性价比的投资方案。

关键词：氢能；煤化工；Bass 模型；碳排放；低碳效益

Carbon Emission Accounting and Carbon Benefit Evaluation of Wind-hydrogen-coal Chemical Multi-functional Coupling System in Wind Coal Enriched Areas

WANG Jinjun, GUO Jianhua
(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The low-carbon assessment of wind power-hydrogen energy storage-coal chemical multi-funtiaonal coupling system (WP-HES&CCMFCS) in wind-coal enriched areas is focused on, and a carbon emission accounting and low-carbon benefit assessment method with a combined top-down and bottom-up process for a multi-energy coupling system is proposed based on the emission factor method. Firstly, the structure of the multi-energy coupling system and its carbon emission accounting and low-carbon benefit evaluation process are expounded; the different impact functions of the generalized Bass model are adopted to set three scenarios, and the technology diffusion trend in key links of multi-functional coupling system wind power in each scenario to 2025 is predicted. Secondly, the energy flow constraints and stable operation constraints of multi-functional coupling system are comprehensively considered. And an evaluation model for multi-energy coupling system carbon emission accounting and low-carbon benefit is built. Finally, wind farms and coal chemical companies in Xinjiang are taken as the background. The results show that the net income of the two low-carbon scenarios is increased by 7.88% and 3.54%, respectively, compared with the established scenario, and the income of carbon quota trading is increased by 31.73% and 15.39%, respectively. Through sensitivity analysis, it is concluded that the cost performance of the system planning results will be lower when the two coupling parameters are in a specific area, which provides a new idea for subsequent multi-functional system planning and provides a low cost investment scheme for engineering decision-makers.

Key words: hydrogen energy; coal chemical; Bass diffusion mode; carbon emission; carbon benefits

0　引言

传统能源系统规划局限于电、气、热(冷)等单一能源形式系统的内部，无法充分发挥它们之间的互补优势和协同效益[1]，特别是对于风煤富集区域，可再生能源消纳与煤炭清洁利用的问题迫在眉睫，这都是实现碳达峰、碳中和目标的阻碍。要兼顾风能的就地消纳和风煤富集区域资源的优化配置，就必须走煤化工和电力融合发展的路径，以电解水制氢为桥梁，将煤炭和风能资源相连接[2]。为保证区域碳达峰、碳中和目标如期实现，区域风电技术未来的扩散程度、不同风电渗透率下各个系统能量流

动及生产规模、以及区域碳排放核算和低碳效益评估方案，都是亟待解决的问题。

在区域风电技术扩散及预测方面,文献[3-4]利用 Bass 模型和 Davies 模型分析了印度和欧洲地区的风能技术扩散情况；文献[5-6]利用广义 Bass 模型对欧洲地区风能发展状况进行激励分析。上述研究多集中于利用技术扩散模型对历史数据进行分析，而通过技术扩散模型对未来技术发展趋势进行约束的研究较少。

在包含大规模储氢的多能耦合系统规划方面：文献[7]构建的综合风力发电系统，在提高新能源渗透率的同时，还通过生产氢气和甲烷，提高了系统的生产效率。文献[8-10]提出风−氢储能−煤化工多能耦合系统模型，并对耦合系统的经济性进行了分析。上述文献更多关注的是多能耦合系统的生产架构，鲜有探究多能耦合系统的低碳效益及系统能量流动和生产规模对低碳效益的影响。

在地区排放核算评估方面，国内外研究主要以政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC)提出的排放因子法为主体[11]，在排放系数基础上衍生出来其他指标对区域碳排放进行分析[12-14]，部分研究提出发电侧、电网侧、用户侧之间的碳排放责任分摊机制[15-16]。在碳达峰背景下，更需要控制系统的碳排放总量，故本文将碳配额和碳排放核算结合来详细表征系统减排成效。

综上所述，本文基于排放因子法提出一种风−氢−煤化工多能耦合系统(wind power-hydrogen energy storage-coal chemical multi-funtiaonal coupling system，WP-HES&CCMFCS)的碳排放核算和低碳效益评估方法，对多能耦合系统的碳排放总量做出量化计算，并探究其内部能量流动和子系统生产规模对低碳效益的影响，深入挖掘了 WP-HES&CCMFCS 的潜在社会价值和低碳效益。最后以新疆地区风电场和煤化工企业为背景，对模型的正确性和有效性进行了验证。

1　WP-HES&CCMFCS 碳排放核算和低碳效益计算思路

1.1　系统架构

本文提出的计及风能扩散的多能耦合系统碳排放核算和低碳效益评估方法是在文献[2，17]提出的大规模风/光−氢储能−煤多能耦合系统的基础上，充分考虑如山西、新疆等地的煤炭和新能源资源禀赋和产业现状而提出的一种实现碳达峰的路径。

WP-HES&CCMFCS 规划结构图如图 1 所示，主要包括风力发电系统、火力发电系统、电解水系统、压缩存储系统、富氢燃气轮机和煤化工制甲醇系统。规划前，系统一次能源主要由煤炭、石油等化石燃料和少部分风能构成，化石能源用作供电燃料和化工原料，导致能源系统的含碳量居高不下，为碳达峰目标带来极大挑战。规划后，在风煤富集地区，以电解水制氢系统为桥梁，风力发电系统所发电量部分并网消纳，部分用于电解水制氢气；电解产生的氢气和氧气部分直接用于气负荷，多余气体进行压缩存储；当电网负荷过重或新能源波动过大时，利用部分存储的氢气带动富氢燃气轮机发电并网，来保证供电可靠性和电网安全稳定运行，其余部分氢气和氧气，用于煤化工生产中，可以从空分和转换 2 个方面降低碳排放[15-16]，有效解决煤化工高能耗、高污染的问题。

本文提出的 WP-HES&CCMFCS 系统在实际应用中各个子系统耦合关系较为复杂，系统运营模式设置如下：风电场输出电量分为并网消纳和电解水制氢 2 个部分，设置电解水制氢的比例为 f_{wf}，风电并网的比例为 $1-f_{wf}$；电解水制得氢气总量的 f_{fc} 用于煤化工生产，剩余部分用作富氢燃气轮机的燃料，电解水制氢产生的氧气全部用于煤化工中煤气化过程[15,18]。

1.2　系统碳排放核算和低碳效益计算思路

在上述多能耦合系统架构的基础上，提出自上而下和自下而上相结合的系统碳排放核算和低碳效益评估方法，其计算思路如图 2 所示。

自上而下方法是从宏观层面出发，旨在通过具体模型表征区域经济、政策和技术因素与

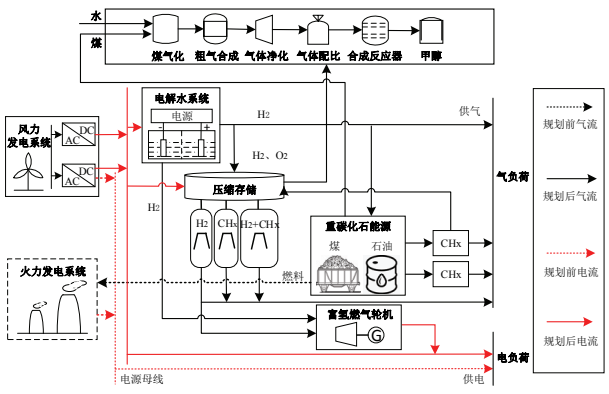


图 1　WP-HES&CCMFCS 规划结构图

Fig.1　WP-HES&CCMFCS planning structure diagram

WP-HES&CCMFCS 中各子系统生产规模之间的关系，进而间接反映上层因素与系统碳排放之间的关系。首先，基于风煤富集区域风电历史装机数据，对 Bass 模型进行参数估计；其次，以区域经济发展水平、低碳政策和低碳技术突破等作为变量，通过对广义 Bass 模型添加冲击函数的方式，来设置既定、弱低碳和强低碳 3 种风电扩散情景；最后，根据各情景相应风电技术扩散模型，预测规划水平年的风电装机规模。

自下而上方法是从系统下层运行细节出发，考虑 WP-HES&CCMFCS 子系统耦合关系、设备运行特点、化石燃料参数、排放因子等因素，模拟区域或省域尺度下的系统的能源消耗，进而推算碳排放量并完成系统低碳效益评估。首先，利用上文求解得到的规划水平年风电装机规模，在充分考虑系统稳定运行约束、技术指标约束以及子系统能量转换约束的基础上，模拟得到 WP-HES&CCMFCS 的生产规模；其次，识别相应生产规模下系统的排放源，计算化石燃料的活动数据，收集对应化石燃料的相关参数和排放因子数据，核算系统 CO_2 排放量；最后，构建包含并网收益、出售甲醇收益和碳排放配额交易收益在内的多能耦合系统低碳效益评估模型，并计算 3 种情景下 WP-HES&CCMFCS 净收益和低碳效益。

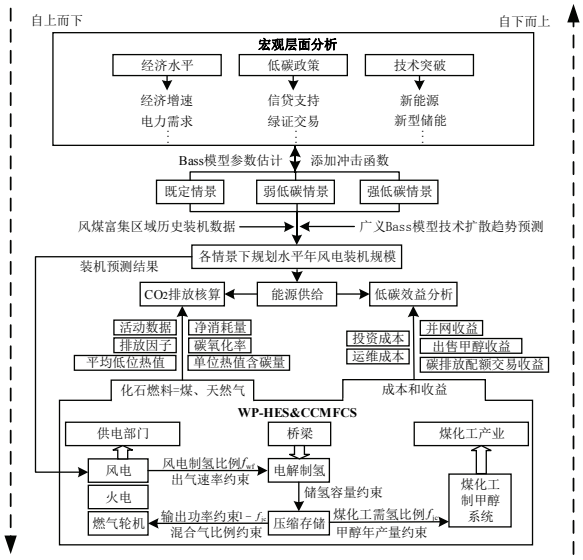


图 2 碳排放核算与低碳效益评估方法

Fig.2 Carbon emission accounting and low-carbon benefit assessment method

表 1 3 种情景中政策、经济和技术方面的主要差异

Table 1 Major differences in policy, economy, and technology in the three scenarios

场景设定	既定场景	弱低碳场景	强低碳场景
低碳政策	现有政策的延续	实行绿色电力证书交易制度	在绿色证书交易基础上，政府加大信贷支持力度
经济发展水平	按照现阶段经济增速核算	经济发展处于上行通道	经济增速加快，电力需求持续扩大
低碳技术突破	电力低碳技术无重大突破	储能技术处于示范阶段，对弃风影响有限	各类储能技术规模化应用，可有效解决弃风弃光问题

2 情景设计与扩散模型

2.1 情景设计

为了深入分析 2030 年碳达峰前风能的发展趋势，进而探究 WP-HES&CCMFCS 在相应风电装机容量下的碳配额交易收益及规划年净经济收益。本文为 2020—2025 年间的风能发展设置 3 种不同情景，分别是既定情景、弱低碳情景和强低碳情景。3 种情景的差异包括：低碳政策力度、区域经济发展水平以及电力行业低碳技术突破等，具体差异见表 1。

2.2 特定情景下的风能扩散模型

低碳政策、经济发展水平以及电力行业低碳技术对风能技术市场竞争力、扩散速度有直接或间接影响，本文利用广义巴斯模型量化分析外部变量对 2020—2025 年风能发展的影响，其表达式为

$$P_{\mathrm{W},t}=m\frac{1-\mathrm{e}^{-(p+q)\int_0^t x(\tau)\mathrm{d}\tau}}{1+\frac{q}{p}\mathrm{e}^{-(p+q)\int_0^t x(\tau)\mathrm{d}\tau}}\quad 0\le t\le+\infty \tag{1}$$

式中：$P_{\mathrm{W},t}$ 为第 t 年风电的装机容量；p 和 q 分别为风电技术的创新系数和模仿系数；m 为区域风电装机潜力；$x(t)$为可积函数，用来表征外部因素对风电装机容量的影响，当 $x(t)>1$ 时，外部因素为积极影响，当 $x(t)<1$ 时，为消极影响，当 $x(t)=1$ 时，模型为标准巴斯模型，不计及外部扰动对风电扩散的影响。

其中，$x(t)$通常包括指数冲击和矩形冲击 2 个部分，指数冲击是指在某一时间产生冲击，影响随时间推移减弱，矩形冲击是指在某一时间段产生冲击，其影响强度不随时间推移而改变。$x(t)$表达式为

$$x(t)=1+c_1\mathrm{e}^{b_1(t-a_1)}I_{(a_1\le t)}+c_2I_{(a_2\le t\le b_2)} \tag{2}$$

式中：a_1、b_1 和 c_1 分别为指数冲击起始时间、衰减

速度和冲击强度；a_2、b_2 和 c_2 分别为矩形冲击起止时间和冲击强度；I 为区间函数，$I_{(a_1\le t)}$ 在 $t\ge a_1$ 时函数为 1，$I_{(a_2\le t\le b_2)}$ 在 $a_2\le t\le b_2$ 时函数为 1。

通过细化 3 种情景中政策力度强弱、区域经济发展水平快慢和电力行业低碳技术发展快慢，以及各类因素对风电发展影响时间长度和影响强度的分析，来定义 3 种情景下不同影响因素所对应的冲击类型，并对广义 Bass 模型冲击函数中冲击起止时间、冲击强度进行参数赋值，从而量化 3 种情景的差异。

既定情景下，利用区域历史风电装机容量数据对模型内部参数进行估计，并对未来风电扩散路径不加干预，即不添加任何冲击函数令 $x(t)=1$，在此基础上风电扩散趋势。

弱低碳情景下，在政策方面，考虑实行绿色电力证书交易制度，且绿证交易对风电技术扩散的影响是持续的，故用矩阵冲击表征其影响过程，参考意大利绿色证书(green certificate, GC)交易政策作用效果[5]，考虑目前风煤富集区域可再生能源消纳责任富裕的状态，及绿色证书供不应求的态势，绿证为可再生能源带来的资金支持将不低于 79.06 元/MWh[19]；在区域经济方面，经济发展处于上行通道，电力需求不断增加，利用指数冲击表征经济恢复的影响；此情境下，不考虑电力行业低碳技术突破。

强低碳情景下，在碳达峰碳中和目标的驱动下，政策向可再生能源倾斜，政府加大信贷支持力度，金融支持这一外生变量作为矩形冲击影响风电扩散；在电力低碳技术方面，各类型储能规模化应用，大幅提高风电利用率，对风电技术扩散有积极作用，但作用强度会随时间推移减弱，故用指数冲击表征其影响[20] 。

2 种低碳情景下具体的冲击函数参数设置见表 2。

表 2　不同低碳情景下冲击函数参数设置

Table 2　Impact function parameter settings under different low-carbon scenarios

参量	弱低碳情境	强低碳情景
a_1	2	1
b_1	–0.05	–0.03
c_1	0.3	2.5
a_2	0	2
b_2	6	5
c_2	1.5	2.5

3　WP-HES&CCMFCS 效益评估模型

系统效益通过净经济效益表征，净经济效益由系统收益和成本之差表示。

3.1　WP-HES&CCMFCS 净经济效益模型

WP-HES&CCMFCS 规划年净经济效益 F 表达式为

$$F = I^{\text{grid}} + I^{\text{M}} + I^{\text{CT}} - C^{\text{total}} \tag{3}$$

式中：I^{grid} 为系统并网总收益；I^{M} 为系统出售甲醇收益；I^{CT} 为系统碳配额交易收益；C^{total} 为系统总成本。

WP-HES&CCMFCS 的各个子系统成本模型具体计算方法见文献[21]，此处不再赘述。系统收益主要包括以下几个方面：并网收益、出售甲醇收益及系统碳排放配额交易收益。

3.2　并网售电收益

并网总收益 I^{grid} 包括风电、富氢燃气轮机和燃煤机组并网收益，其表达式为

$$I^{\text{grid}} = P_{\text{W}}T_{\text{W}}\left(1-f_{\text{wf}}\right)\rho_{\text{W}} + P_{\text{G}}T_{\text{G}}\rho_{\text{G}} + P_{\text{CF}}T_{\text{CF}}\rho_{\text{CF}} \tag{4}$$

式中：P_{W} 为风力发电系统规划容量；P_{G} 为富氢燃气轮机规划容量；P_{CF} 为燃煤机组规划容量；此处，将各类机组/设备容量作为其单位时间实际出力；T_{W}、T_{G} 和 T_{CF} 分别为风力发电系统、富氢燃气轮机和燃煤机组的年运行小时数；ρ_{W}、ρ_{G} 和 ρ_{CF} 分别为风电、燃气机组和燃煤机组并网电价；f_{wf} 为风电制氢比例。

3.3　煤化工制甲醇系统出售甲醇收益

系统出售甲醇收益表达式为

$$I^{\text{M}} = P_{\text{M}}\rho_{\text{M}} \tag{5}$$

式中：P_{M} 为制甲醇系统年产量；ρ_{M} 为甲醇出售价格。

3.4　碳排放配额交易收益

WP-HES&CCMFCS 中碳排放环节主要包含用于并网支撑负荷的燃煤机组和富氢燃气轮机，其余部分直接碳排放较少或为零排放，故此处不予考虑。

3.4.1　碳排放配额

本文采用 2019—2020 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案（发电行业）基准法的方法进行燃煤机组和燃气机组碳排放配额计算，其模型为：

$$A^{\text{coal}} = P_{\text{CF}}T_{\text{CF}}B_{\text{e}}^{\text{coal}}F_{\text{l}}^{\text{coal}}F_{\text{r}}^{\text{coal}}F_{\text{f}}^{\text{coal}} \tag{6}$$

$$A^{\text{gas}} = P_{\text{G}}T_{\text{G}}B_{\text{e}}^{\text{gas}}F_{\text{l}}^{\text{gas}}F_{\text{r}}^{\text{gas}}F_{\text{f}}^{\text{gas}} \tag{7}$$

式中：A^{coal} 和 A^{gas} 分别为燃煤机组和燃气机组规划年供电 CO_2 配额量；$B_{\text{e}}^{\text{coal}}$ 为燃煤机组供电基准值；$F_{\text{l}}^{\text{coal}}$ 为燃煤机组冷却方式修正系数；$F_{\text{r}}^{\text{coal}}$ 为燃煤机

组供热量修正系数；$F_{\mathrm{f}}^{\mathrm{coal}}$ 为燃煤机组出力系数修正系数；$B_{\mathrm{e}}^{\mathrm{gas}}$ 为燃煤机组供电基准值；$F_{\mathrm{l}}^{\mathrm{gas}}$ 为燃煤机组冷却方式修正系数；$F_{\mathrm{r}}^{\mathrm{gas}}$ 为燃煤机组供热量修正系数；$F_{\mathrm{f}}^{\mathrm{gas}}$ 为燃煤机组出力系数修正系数。

风电机组碳配额 A^{wind} 表达式为

$$A^{\mathrm{wind}} = \lambda P_{\mathrm{W}} T_{\mathrm{W}} (1 - f_{\mathrm{wf}}) \tag{8}$$

式中λ为机组单位有功出力的碳排放配额分配率。

根据国家煤炭深加工升级示范项目资源消耗指标设定，测算出在煤制甲醇项目中，每吨甲醇产出需排放 CO_2 约 3.1 吨[22]，故煤化工碳排放总配额量 A^{M} 表达式为

$$A^{\mathrm{M}} = 3.1 P_{\mathrm{M}} \tag{9}$$

3.4.2 碳排放核算模型

根据国家温室气体排放核算与报告要求，本文发电部分的碳排放主要考虑化石燃料燃烧排放，其计算表达式如下：

$$E = \sum_{j=1}^{J} \left(D_j \times f_j \right) \tag{10}$$

$$D_j = V_j \times S_j \tag{11}$$

$$f_j = Q_j \times O_j \times \frac{44}{12} \tag{12}$$

$$S_1 = \left(a P_{\mathrm{CF}}^2 + b P_{\mathrm{CF}} + c \right) T_{\mathrm{CF}} \tag{13}$$

$$S_2 = P_{\mathrm{G}} g T_{\mathrm{G}} \tag{14}$$

式中：E 为机组规划年 CO_2 排放量；J 为化石燃料的种类（j=1 为煤、j=2 为天然气）；D 为化石燃料的活动数据；f 为化石燃料的 CO_2 排放因子；V 为化石燃料平均低位发热量；S 为化石燃料的净消耗量；Q 为化石燃料的单位热值含碳量；O 为化石燃料的碳氧化率；a，b，c 为燃煤机组的耗量系数；g 为燃气轮机单位电量消耗的天然气量。

理论上 WP-HES&CCMFCS 用电解水制氢替代传统煤化工中水气变换制氢过程，且生产过程购入电力为零排放的风电，所以在煤化工制甲醇环节中的碳排放为 0[23]。

3.4.3 碳配额交易收益模型

根据上述碳排放配额和碳排放核算模型，可以得到 WP-HES&CCMFCS 的碳配额交易收益 I^{CT} 表达式为

$$I^{\mathrm{CT}} = \pi \left(A^{\mathrm{coal}} + A^{\mathrm{gas}} + A^{\mathrm{wind}} + A^{\mathrm{M}} - E \right) \tag{15}$$

式中π为碳交易价格。

4 系统各子系统耦合关系约束

WP-HES&CCMFCS 要在特定模式下运行，需要满足常规的稳定运行约束，如机组出力上下限约束、机组爬坡约束、电解槽输出功率上下限约束及压缩存储设备容量约束等，此处不再赘述。在此基础上还需要满足各个子系统的技术指标约束以及子系统之间的能量转换关系约束，主要包括：电解水制氢气系统与风力发电系统的耦合约束、电解水制氢气系统与煤化工制甲醇系统的以及电解水制氢气系统与富氢燃气轮机之间的氢气供需约束。

4.1 电解水制氢速率约束

根据法拉第定律，经过化简换算，电解槽产氢速率与输入功率可表示为[24-25]：

$$v_{\mathrm{H_2}} = \frac{1.8 \eta_{\mathrm{F}} \sum_{\Omega_{\mathrm{el}}} U_{\mathrm{el}} P_{\mathrm{EL}} V_{\mathrm{m}}}{F} \tag{16}$$

$$P_{\mathrm{EL}} = P_{\mathrm{W}} f_{\mathrm{wf}} \tag{17}$$

式中：$v_{\mathrm{H_2}}$ 为电解水制氢系统的制氢速率；η_{F} 为法拉第效率；η_{el} 为电解槽效率，0<η_{el}<1；I_{el} 为电解槽电流；P_{EL} 为电解水制氢功率；F 为法拉第常数；V_{m} 表示气体摩尔体积，此处为 24.5 L/mol；Ω_{el} 为串联电解小室个数；U_{el} 为单个电解小室电压。

4.2 富氢燃气轮机稳定运行约束

制氢系统将制得的氢气按一定比例分配给富氢燃气轮机作为燃料，其输出功率 P_{G} 表达式为

$$P_{\mathrm{G}} = \frac{v_{\mathrm{H_2}} (1 - f_{\mathrm{jc}}) T_{\mathrm{EL}}}{\mu T_{\mathrm{G}}} \tag{18}$$

式中：μ为单位电量消耗的氢气量；T_{EL} 为电解槽年运行小时数；f_{jc} 为煤化工需氢比例。

$$f_{\mathrm{syn}} = \frac{g}{\mu} \tag{19}$$

式中 f_{syn} 为用作富氢燃气轮机燃料的合成气中天然气和氢气的比例，此处按天然气热值为氢气热值的 3.3 倍计算。

4.3 煤化工制甲醇系统稳定运行约束

在 WP-HES&CCMFCS 中，为了使煤化工制甲醇系统实现理论条件下 CO_2 零排放，需要利用电解水制氢系统为其提供大量氢气，以弥补煤制合成气(H_2 和 CO)过程中的物料不平衡的情况。而要保障制甲醇过程中 H_2 与 CO 的比例为 2:1，需在制取每吨甲醇过程中配入 777 Nm^3 的 H_2，整个子系统的稳定运行约束表达式为[21-22]

$$P_{\mathrm{M}} = \frac{0.032 v_{\mathrm{H_2}} f_{\mathrm{jc}} \eta_{\mathrm{M}} T_{\mathrm{M}}}{V_{\mathrm{m}}} \tag{20}$$

式中：η_{M} 为煤化工制甲醇系统效率；T_{M} 为煤化工制甲醇系统的年运行小时数。

5 算例分析

5.1 基础数据

以新疆地区风电场和煤化工企业为背景，使用使用 MATLAB R2016a 仿真平台，取风电制氢比例 f_{wf} 为 0.5，煤化工需氢比例 f_{fc} 为 0.7，对地区多能耦合系统进行碳排放核算和低碳效益评估。其中：算例计算涉及的参数见附录表 A1；新疆风能累计装机容量数据可用时间段为 2000 年至 2020 年[26]，数据见附录表 A2；系统中涉及的化石燃料的相关参数见附录表 A3。

5.2 匹配结果

由上文可知，Bass 模型主要通过创新行为和模仿行为求解风能在某一区域的扩散路径，故需要利用区域历史风电累计装机数据对 p 和 q 进行参数估计。本研究首先利用最小二乘法(nonlinear least square，NLS)对新疆地区的风能创新系数 p、模仿系数 q 以及风能潜力 m 进行估计，结果见表 3。

由表可看出，新疆风能市场的创新指数仅为 9.59×10^{-6}，模仿指数高达 0.6265，说明新疆风能技术市场的自主创新能力较低，风能技术的扩张主要依靠技术模仿实现。

以新疆实际风能累计装机容量数据预测准确度，选取平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)和中值百分比误差(median percentage error, MdAPE) 3 个预测精度指标[27]对 BASS 模型的预测精度进行分析，计算结果见表 4。

从表 4 的结果可以看出，BASS 模型的各项预测精度都较低，说明 BASS 模型对新疆风能技术扩散的预测方面具备一定的准确性。

根据模型参数估计值，利用广义 Bass 模型进行风能扩散趋势预测，预测结果见图 3，可以看出，新疆地区的风能发展在 2011 年至 2016 年为快速扩散阶段，在 2016 年以后扩散速度显著放缓，2019 年达到风能装机增长的阶段性峰值点，故 2021 年至 2025 年预测的风能装机结果如图 3 所示，新疆地区的风电发展进入成熟期，增长乏力，仅达到 22 000 MW 左右的装机规模。

根据 2.2 节的情景设置方法，在保证创新系数和模仿系数不变的基础上，设置不同冲击函数，对 2 种低碳情景下新疆地区的风电技术扩散路径进行短期预测，预测结果见图 3。

表 3 新疆地区风能技术扩散外部参数估计结果

Table 3 Related parameters of the two fossil fuels

	p	q	m
估值	9.59×10^{-6}	0.626 5	21 270

表 4 BASS 模型对新疆风能技术的预测精度计算

Table 4 Prediction accuracy calculation of Bass model for wind energy technology in Xinjiang

	平均绝对误差/MW	平均绝对百分比误差/%	中值百分比误差/%
数值	1 237.33	5.78	1.53

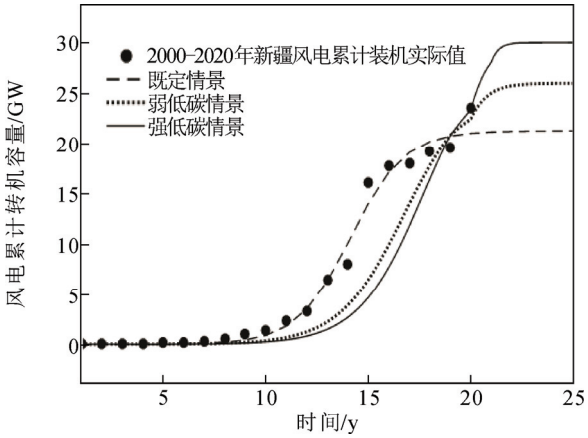


图 3 3 种不同情景下的风能技术扩散路径和趋势预测

Fig.3 Wind energy technology diffusion path and trend prediction under three different scenarios

从图 3 的趋势预测结果可知，不同的外部环境激励，对新疆地区风电年新增装机容量和累计装机容量的影响程度都不同。弱低碳情景下，风电发展受低碳政策和经济发展的影响，在 2020 年前后小幅增长，但之后增长趋于平稳，2025 年达到 26 000 MW 左右的装机规模。强低碳情景下，风电受到金融信贷支持和低碳技术突破的影响，在 2020 年至 2023 年间得到快速发展，但受地区风电最大市场潜量限制，2025 年达到 30 000 MW 左右的装机规模。

通过 3 种不同情景下风电装机规模短期预测分析，以新疆地区在 2025 年风电装机规模作为输入，得到不同情景下各个子系统的技术参数匹配结果，见表 5。

在 3 种情景下，2025 年的新疆地区的累计风电装机容量分别达到 21 270、25 980 和 30 000 MW。从参数匹配结果来看，风电装机容量越大，其对应的各子系统匹配的容量、容积和年产量也越大，但燃煤机组的污染性较大，受低碳因素限制，将不断

被清洁友好的可再生能源所替代，但即便在强低碳情景下燃煤机组装机容量所占比重仍然超过 35%。各子系统的经济性指标与技术参数匹配相对应，其计算结果见表 6。

由上表可知，虽然风力发电技术的不断成熟，其运行成本逐渐下降，但投资成本依然较高，而富氢燃气轮机由于技术尚未成熟和推广，其建设和运营需要付出极大的成本，虽未新建燃煤机组，但由于其现存的装机占比依然较大，故造成系统总运行成本也居高不下；系统并网收益增加的原因有 2 个，一是新疆地区风电和燃气发电并网电价略高于煤电并网电价，二是由于清洁能源装机容量增长较快，这也是造成不同情景下系统碳配额交易收益差异的主要原因。总之，3 种情景的系统碳配额交易收益和净收益都呈递增趋势，2 种低碳情景较既定情景净收益提高约 7.88%和 3.54%，碳配额交易收益提高约 31.73%和 15.39%，随着未来清洁能源发电技术成熟度提升，其发电成本必然降低，市场竞争也会逐渐增强，故 WP-HES&CCMFCS 未来的收益优势会越来越显著。

由上述分析可知，3 种情景的系统发电量结构有显著差异，故 3 种情景下系统碳排放也呈现出不同结果，其中碳排放主要来源于富氢燃气轮机和燃煤机组，具体核算结果见表 7。

由表 7 可知，系统总碳排放主要来自于燃煤机组排放，约占 WP-HES&CCMFCS 总排放的 97%，3 种情景下燃煤机组排放和总排放逐级递减，2025 年 2 种低碳情景相较于既定情景系统分别减排 5.92×10^6 t CO_2 和 12.69×10^6 t CO_2。3 种情景下富氢燃气轮机的碳排放呈递增趋势，此处富氢燃气轮机的混合燃气中氢气比例约占 70%，因此可以大幅减少碳排放，在同等装机容量下，富氢燃气轮机的碳排放只占燃煤机组碳排放的 15.6%左右，可见氢燃料是很好的清洁能源。

5.3 系统低碳效益影响因素分析

5.3.1 f_{wf}对 WP-HES&CCMFCS 低碳效益的影响

图 4 和图 5 为保证其他参数不变、f_{jc}为 0.7 时，f_{wf}在 0~1 间变化对 3 种不同情景下系统净效益和低碳收益的影响规律变化曲线，附表 A4 为 f_{wf} 在 0.1~0.5 间变化时系统净收益和碳配额交易收益的具体计算数值。

分析可知，当f_{wf}增大时，3 种情景下系统年净收益均有所下降，既定情景下降较为显著，强低碳情景下降较少；反之，3 种情景下系统的碳排放配额交易收益均伴随f_{wf}的增大而增加，此时强低碳情景的增幅更为明显，但各情景差异较小。

表 5 不同减排情景下各子系统参数匹配结果

Table 5 Matching results of various subsystem parameters under different emission reduction scenarios

情景设定	风电容量/MW	电解槽功率/MW	储氢罐容积/10^6 m^3	甲醇产量/10^6 t	燃气轮机容量/MW	燃煤机组容量/MW
既定	21 270	10 635	2.25	4.63	2 718	24 017
弱低碳	25 980	12 990	2.75	5.66	3 320	21 060
强低碳	30 000	15 000	3.18	6.53	3 834	18 536

表 6 不同减排情景下系统经济性计算结果

Table 6 Calculation results of system economy under different emission reduction scenarios

情景设定	年投资成本/亿元	年运维成本/亿元	并网收益/亿元	出售甲醇收益/亿元	碳交易/亿元	净收益/亿元
既定	–100.71	–439.40	519.51	138.95	80.85	199.20
弱低碳	–133.43	–458.66	535.34	169.72	93.29	206.26
强低碳	–161.36	–475.09	548.85	195.99	106.5	214.89

表 7 不同减排情景下系统碳排放核算结果

Table 7 System carbon emission accounting results under different emission reduction scenarios

情景设定	富氢燃气轮机/10^6 t	燃煤机组/10^6 t	总碳排放/10^6 t
既定	1.88	95.30	97.18
弱低碳	2.29	88.97	91.26
强低碳	2.65	81.84	84.49

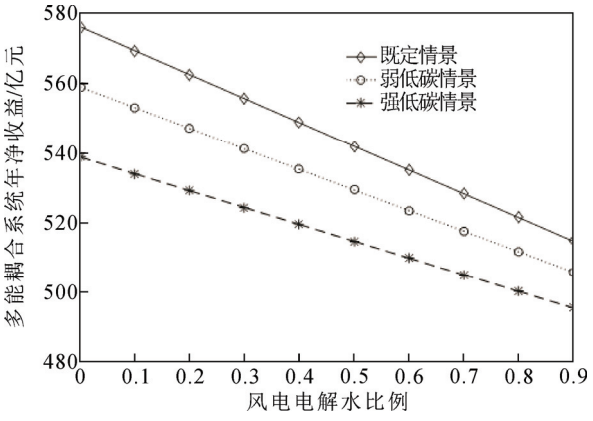


图 4 f_{wf}对系统净效益的影响

Fig.4 The impact of f_{wf} on the net benefit of the system

5.3.2 f_{jc}对 WP-HES&CCMFCS 低碳效益影响

保证其他参数不变，风电电解水制氢比例 f_{wf}

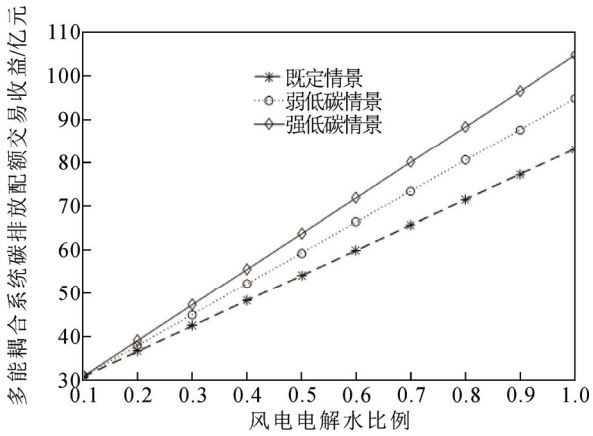


图 5 f_{wf}对系统低碳效益的影响

Fig.5 The impact of f_{wf} on the low-carbon benefits of the system

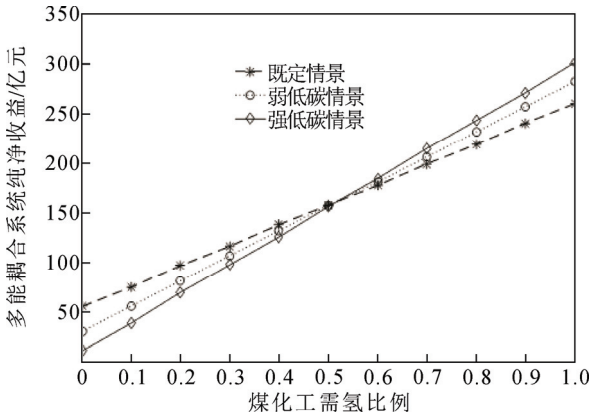


图 6 f_{jc}对系统净收益的影响

Fig.6 The impact of f_{jc} on the net benefit of the system

为 0.5 时，讨论煤化工需氢比例 f_{jc}在 0.1~1 间变化对 3 种不同情景下 WP-HES&CCMFCS 净效益和低碳收益的影响，结果如图 6 和图 7 所示。

由前文系统耦合约束模型可知，煤化工需氢比例的高低直接影响煤化工制甲醇设备的规划产量，由图 7 可知，当 f_{jc}增大时，3 种情景下系统年净收益和碳排放配额交易收益均呈上升趋势；2 种低碳情景下的系统净收益相较于既定情景净收益，对 f_{jc}变化更为敏感，当 f_{jc}在 0~1 之间变化时，强弱 2 种低碳情景下系统净收益提升速率分别约为既定情景下的 1.43 倍和 1.29 倍；可见煤化工制甲醇系统具有高回报的特点，而且由于制甲醇环节的碳排放为 0，故其可以为多能耦合系统带来充裕的可供交易创收的碳配额，因此新能源系统煤化工产业相联合，可以有效实现高水平消纳和低碳生产双赢的局面。

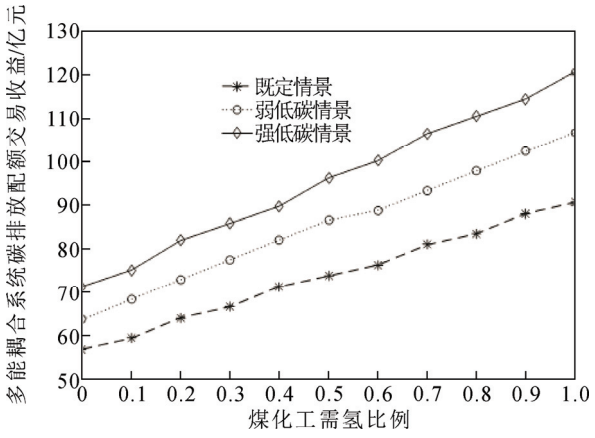


图 7 f_{jc}对系统低碳效益的影响

Fig.7 The impact of f_{jc} on the low-carbon benefits of the system

5.3.3 2 种低碳情景中不同f_{wf}和f_{jc}下的系统减排贡献分析

图 8 和图 9 为 2 种低碳情景下 2 个耦合参数比例同时变化时，系统减排贡献的变化规律图。

分析可知，当电制氢比例和煤化工需氢比例都较高时，用户侧电负荷全部由燃煤机组支持，所以 2 种减排情景中碳排放贡献都很小；当风电制氢比例较高，而煤化工需氢比例较低时，会有富氢燃气轮机承担部分电负荷，故系统减排贡献较大；当风电制氢比例更低时，风电替代化石能源供电比例就越高，所以系统减排贡献处于较高水平，且煤化工需氢比例越低，减排总量越高。总体上看，强低碳情景下系统减排贡献约为弱低碳情景的 1.6 倍。

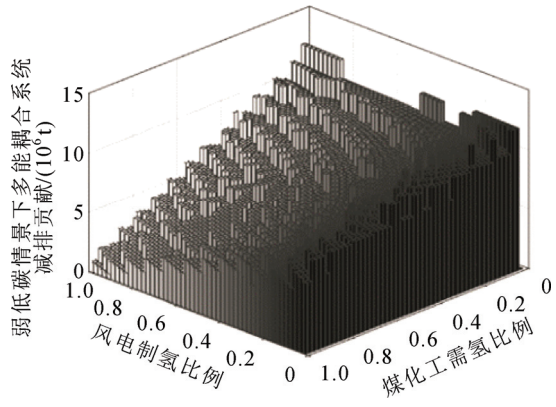


图 8 弱低碳情景在不同f_{wf}和f_{jc}下的系统减排贡献

Fig.8 Changes in the emission reduction of the system under different f_{wf} and f_{jc} in the weak carbon scenario

图 10 和图 11 为在 2 种低碳情景下的 2 个耦合参数比例同时变化时，系统净收益的变化规律图。

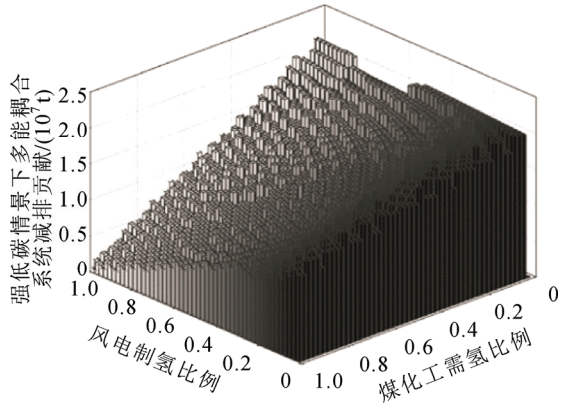


图 9 强低碳情景在不同 f_{wf} 和 f_{jc} 下的系统减排贡献

Fig.9 Changes in the emission reduction of the system under different f_{wf} and f_{jc} in the strong carbon scenario

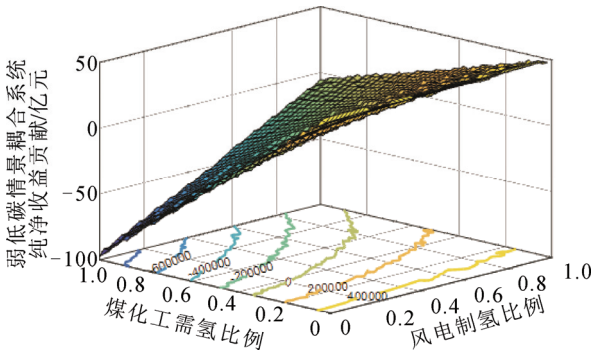


图 10 弱低碳情景在不同 f_{wf} 和 f_{jc} 下的系统净收益变化

Fig.10 Changes in the net income of the system under different f_{wf} and f_{jc} in the weak carbon scenario

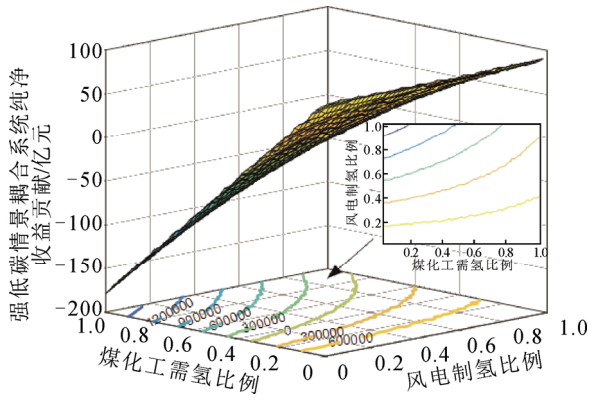


图 11 强低碳情景在不同 f_{wf} 和 f_{jc} 下的系统净收益变化

Fig.11 Changes in the net income of the system under differentt f_{wf} and f_{jc} in the strong carbon scenario

总体上看，强低碳情景下系统净收益要远高于弱低碳情景。具体分析：在 2 种低碳情景下，同样的煤化工需氢比例下，风电制氢比例越大，系统的净收益贡献也将越大，与 5.3.1 节得出的结论一致；在进行耦合参数选择时，要选择大于零等值线的区域，避免风能快速发展而导致系统净收益缩减；以强低碳场景为例，根据图 11 中系统净收益等值线的疏密程度变化，可以判断当风电制氢比例位于 0.5~1 区域，煤化工需氢比例位于 0~0.6 区域时，2 种耦合参数比例变化对系统净收益贡献的影响效果最小，特别是当风电制氢比例位于 0.8~1 区域时，系统净收益曲面存在较为明显的平缓区域，所以若 2 种耦合参数位于该区域时，则系统规划结果性价比将更低，在此区域提升单位净效益需要更高的成本投入。

6 结论

1）本文提出的 WP-HES&CCMFCS 碳排放核算和低碳效益评估方案充分考虑了经济、政策和技术等上层宏观因素，同时兼顾系统内部耦合关系、设备运行特点、化石燃料参数、排放因子、设备运行约束等下层细节问题，对解决区域能源系统的碳排放核算问题以及低碳效益评估问题有积极作用。

2）本文通过分析子系统间的 2 种关键耦合参数 f_{wf} 和 f_{jc} 对 WP-HES&CCMFCS 低碳效益的影响，可以有效量化分析各个环节的生产规模对系统总体减排效果的贡献度，并得出：风电制氢比例位于 0.8~1 区域且煤化工需氢比例位于 0~0.6 区域时，2 种耦合参数比例变化对系统净收益贡献的影响效果最小，系统规划结果性价比将更低，即净收益等值线更加稀疏，此时提升单位净效益需要更高的成本投入，因为 2 种耦合参数与电解制氢系统和煤化工制甲醇系统的投资成本紧密相连，而在此区域，高额的成本投入只能得到更低的收益回报，因此实际规划中应该尽量避开此区域，此结论可为后续多能耦合系统规划提供新思路，并为工程决策者规避低性价比的投资方案。

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

参考文献 References

[1] 邵成成，王锡凡，王秀丽，等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报，2016，36(14)：3817-3828.
SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828.

[2] 袁铁江，彭生江，胡克林，等. 面向煤基低碳能源战略的大规模风/光−氢储能−煤多能耦合系统[J]. 电气应用，2019，38(1)：10-15.
YUAN Tiejiang, PENG Shengjiang, HU Kelin, et al. Large-scale

wind/light-hydrogen storage-coal multi-energy coupling system for coal-based low-carbon energy strategy[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(1): 10-15.

[3] RAO K U, KISHORE V V N. Wind power technology diffusion analysis in selected states of India[J]. Renewable Energy, 2009, 34(4): 983-988.

[4] DAVIES S W, DIAZ-RAINEY I. The patterns of induced diffusion: evidence from the international diffusion of wind energy[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2011, 78(7): 1227-1241.

[5] VALLE A D, FURLAN C. Forecasting accuracy of wind power technology diffusion models across countries[J]. International Journal of Forecasting, 2011, 27(2): 592-601.

[6] HARIJAN K, UQAILI M A, MEMON M, et al. Forecasting the diffusion of wind power in Pakistan[J]. Energy, 2011, 36(10): 6068-6073.

[7] SAFARI F, DINCER I. Assessment and optimization of an integrated wind power system for hydrogen and methane production[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 177: 693-703.

[8] FAN X C, WANG W Q, SHI R J, et al. Hybrid pluripotent coupling system with wind and photovoltaic-hydrogen energy storage and the coal chemical industry in Hami, Xinjiang[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 950-960.

[9] 袁铁江，李国军，张增强，等. 风电–氢储能与煤化工多能耦合系统设备投资规划优化建模[J]. 电工技术学报，2016，31(14)：21-30.
YUAN Tiejiang, LI Guojun, ZHANG Zengqiang, et al. Optimal modeling on equipment investment planning of wind power-hydrogen energy storage and coal chemical pluripotent coupling system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 21-30.

[10] 段青熙，袁铁江，梅生伟，等. 风电–氢储能与煤化工多能耦合系统能量协调控制策略[J]. 高电压技术，2018，44(1)：176-186.
DUAN Qingxi, YUAN Tiejiang, MEI Shengwei, et al. Energy coordination control of wind power-hydrogen energy storage and coal chemical multi-functional coupling system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 176-186.

[11] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Kanagawa, Japan: IPCC, 2006.

[12] 宋　怡，林晨韵，梁高琪，等. 基于电力现货市场仿真的海上风电接入对广东省电力行业碳减排影响评估[J]. 全球能源互联网，2020，3(4)：363-373.
SONG Yi, LIN Chenyun, LIANG Gaoqi, et al. Assessing the impacts of large-scale offshore wind power integration on carbon emission reduction in Guangdong province based on electricity spot market simulation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 363-373.

[13] 刘晓燕，孙　慧. 资源型产业碳排放驱动因素演化与低碳发展路径选择[J]. 统计与决策，2019，35(2)：53-57.
LIU Xiaoyan, SUN Hui. The evolution of carbon emission driving factors of resource-based industries and the choice of low-carbon development path[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(2): 53-57.

[14] 张晓辉，刘小琰，钟嘉庆. 考虑奖惩阶梯型碳交易和电–热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报，2020，40(19)：6132-6141.
ZHANG Xiaohui, LIU Xiaoyan, ZHONG Jiaqing. Integrated energy system planning considering a reward and punishment ladder-type carbon trading and electric-thermal transfer load uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6132-6141.

[15] 陈艺璇，张孝顺，郭乐欣，等. 基于多智能体迁移强化学习算法的电力系统最优碳–能复合流求解[J]. 高电压技术，2019，45(3)：863-872.
CHEN Yixuan, ZHANG Xiaoshun, GUO Lexin, et al. Optimal carbon-energy combined flow in power system based on multi-agent transfer reinforcement learning[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 863-872.

[16] 王泽森，石　岩，唐艳梅，等. 考虑 LCA 能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(6)：1614-1626.
WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1614-1626.

[17] 彭生江，杨淑霞，袁铁江，等. 广义风–氢–煤能源系统的挑战与展望[J]. 电力系统自动化，2019，43(24)：6-12.
PENG Shengjiang, YANG Shuxia, YUAN Tiejiang, et al. Challenges and prospects of generalized wind-hydrogen-coal energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 6-12.

[18] 邵　迪，胡　敏，代正华，等. 风电/煤制天然气集成系统的研究[J]. 化学世界，2012，53(增刊 1)：70-71，74，69.
SHAO Di, HU Min, DAI Zhenghua, et al. Research on integrated wind power/coal-to-natural gas system[J]. Chemical World, 2012, 53(Supplement1): 70-71, 74, 69.

[19] 王　睿. 新能源“平价上网+绿证”时代的绿证价格预判[J]. 中国电力企业管理，2020(7)：58-59.
WANG Rui. Pre-judgment of the green certificate price in the era of new energy "affordable online+green certificate"[J]. China Power Enterprise Management, 2020(7): 58-59.

[20] SHE Z Y, CAO R, XIE B C, et al. An analysis of the wind power development factors by generalized bass model: a case study of China's eight bases[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 231: 1503-1514.

[21] 李国军，袁铁江，孙谊媚，等. 风电–氢储能与煤化工多能耦合系统全寿命周期经济性评估[J]. 电工技术学报，2017，32(21)：132-142.
LI Guojun, YUAN Tiejiang, SUN Yiqian, et al. Full life cycle economic evaluation of wind power-hydrogen energy storage and coal chemical multi-functional coupling system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 132-142.

[22] 姬加良. 煤与不同原料重整气化制甲醇对 CO_2 排放的影响[J]. 能源科技，2020，18(2)：62-66.
JI Jialiang. Effect of reforming gasification to methanol by coal and different raw materials on carbon dioxide emission[J]. Energy Science and Technology, 2020, 18(2): 62-66.

[23] 袁铁江，胡克林，关宇航，等. 风电–氢储能与煤化工多能耦合系统及其氢储能子系统的 EMR 建模[J]. 高电压技术，2015，41(7)：2156-2164.
YUAN Tiejiang, HU Kelin, GUAN Yuhang, et al. Modeling on hydrogen producing progress in EMR based wind power-hydrogen energy storage and coal chemical pluripotent coupling system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2156-2164.

[24] 邓　浩，陈　洁，焦东东，等. 风氢耦合并网系统能量管理控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(1)：99-106.
DENG Hao, CHEN Jie, JIAO Dongdong, et al. Control strategy for energy management of hybrid grid-connected system of wind and hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 99-106.

[25] SPYKER R L, NELMS R M. Analysis of double-layer capacitors

supplying constant power loads[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4): 1439-1443.

[26] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2020.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing, China: China Statistics Press, 2020.

[27] 段宏波，朱 磊，范 英. 中国风能技术扩散的规律及政策影响分析[J]. 管理科学，2013，26(4)：113-120.
DUAN Hongbo, ZHU Lei, FAN Ying. China's wind technology development: the diffusion patterns and policy analysis[J]. Journal of Management Science, 2013, 26(4): 113-120.

[28] 缑新科，崔乐乐，巨圆圆，等. 火电厂机组煤耗特性曲线拟合算法研究[J]. 电力系统保护与控制，2014，42(10)：84-89.
GOU Xinke, CUI Lele, JU Yuanyuan, et al. Study on curve fitting algorithm for thermal power plant units coal consumption[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 84-89.

[29] 郭 森，崔永军，贾 浩，等. 新疆电力供需预测及电能消纳有效途径研究[J]. 中国电力，2018，51(5)：147-153.
GUO Sen, CUI Yongjun, JIA Hao, et al. Research on electricity supply and demand forecasting and efficient path of electricity consumption in Xinjiang[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 147-153.



王进君
1981—，男，博士(后)，副教授
从事储能技术、高电压与绝缘方面的研究工作
E-mail: wangjinjun@dlut.edu.cn

WANG Jinjun
Post-doctorate
Associate professor



郭建华(通信作者)
1996—，男，硕士生
研究方向为风氢煤耦合系统低碳效益评估
E-mail: gjh877466544@163.com

GUO Jianhua
Corresponding author

收稿日期 2021-09-16 修回日期 2022-02-22 编辑 冉沐晨

附录 A

表 A1　基础参数

Table A1　Basic parameters

参数	数值	参数	数值
风电机组单位容量单价[21]/(万元·MW^{-1})	350	机组出力系数	1
电解槽单位容量单价[21]/(万元·MW^{-1})	100	富氢燃气机组耗天然气量/(Nm^3·MWh^{-1})	248.5
氢氧压力存储设备成本[21]/(万元·m^{-3})	3.5	法拉第效率	96.5%
煤化工制甲醇设备[21]/(万元·t^{-1})	0.4	风电碳排放配额分配率/(t·MWh^{-1})	0.798
风电并网电价/(元·kWh^{-1})	0.43	富氢燃气轮机混合气氢气比例	0.7
燃气轮机并网电价/(元·kWh^{-1})	0.57	碳交易价格/(元·t^{-1})	150
火电并网电价/(元·kWh^{-1})	0.27	燃煤机组耗量参数 a[28]	0.580 2×10^{-3}
甲醇售价/(元·t^{-1})	2500	燃煤机组耗量参数 b[28]	0.489 0×10^{-2}
贴现率	0.05	燃煤机组耗量参数 c[28]	67.811 9
系统寿命周期/年	20	电解槽效率	97%
燃煤机组供电基准值/(t·MWh^{-1})	0.877	单个电解小室电压/V	2
燃气机组供电基准值/(t·MWh^{-1})	0.392	煤化工制甲醇系统效率	90%
机组冷却修正系数	1	2025 年新疆年最大负荷预测[29]/MW	37 370
机组供热修正系数	1	2025 年新疆用电量预测值[29]/(亿 kWh)	2 500

表 A2　新疆地区历年风电装机数据

Table A2　Wind power installed capacity data in Xinjiang over the years

年份	装机规模/MW	年份	装机规模/MW
2001	73	2011	2316
2002	89	2012	3306
2003	90	2013	6452
2004	103	2014	8039
2005	181	2015	16 110
2006	207	2016	17 760
2007	299	2017	18 060
2008	577	2018	19 210
2009	1003	2019	19 560
2010	1364	2020	23 552

表 A3　化石燃料的相关参数

Table A3　Related parameters of fossil fuels

相关参数	煤	天然气
平均低位发热量/(GJ·t^{-1},GJ·10^{-4}Nm^{-3})	20.908	389.31
单位热值含碳量/(10^{-3}t·GJ^{-1})	26.18	15.3
碳氧化率/%	98	99

表 A4　f_{wf}对低碳效益影响计算结果

Table A4　Calculation results of the impact of f_{wf} on low carbon benefits

收益指标	f_{wf}	既定情景	弱低碳情景	强低碳情景
净收益/亿元	0.1	569.31	553.11	534.10
	0.2	562.58	547.29	529.22
	0.3	555.71	541.32	524.33
	0.4	548.92	535.37	519.24
	0.5	542.00	529.45	514.79
碳配额交易收益/亿元	0.1	365.32	378.61	389.91
	0.2	423.64	449.75	472.16
	0.3	481.82	520.93	554.32
	0.4	540.16	592.16	636.52
	0.5	598.46	663.34	718.64