

文章编号:1006-2467(2022)12-1561-11

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.150

面向新型电力系统的可再生能源 绿色电力证书差异化配置模型

张 硕^{1,3}, 李 薇¹, 李英姿², 刘 强¹, 曾 鸣¹

(1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206; 2. 北京科技大学 经济管理学院, 北京 100083;
3. 华北电力大学 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室, 北京 102206)

摘 要: 实现我国“30·60”双碳目标, 能源绿色低碳转型是基础支撑, 构建以新能源为主体的新型电力系统是关键举措, 绿色电力证书(简称绿证)则是体现可再生能源绿色价值的重要凭证. 当前我国绿证分配机制单一, 无法有效衡量不同可再生能源发电类型可获得绿色价值的差异性, 并发挥其平衡可再生能源协调发展的杠杆作用. 为此, 从可再生能源发电类型电量兑换绿证的差异化入手, 建立考虑可再生能源综合价值的绿证差异化评价指标体系, 应用 CRITIC 法、熵权法和 TOPSIS 法构建可再生能源电力绿证差异化评价模型. 以 2030 年碳达峰目标为发展场景, 分析模型对集中式光伏发电、分布式光伏发电、陆上风力发电和海上风力发电绿色收益的影响, 进而修正其发展规划, 并提出绿证相关政策建议. 所构建的绿证差异化分配模型可为我国绿证市场机制的建设和完善提供相应的辅助决策支持.

关键词: 新型电力系统; 可再生能源; 绿证差异化; CRITIC-熵权法; TOPSIS 法

中图分类号: TM 715; TM 732 **文献标志码:** A

Differentiated Allocation Model of Renewable Energy Green Certificates for New-Type Power System

ZHANG Shuo^{1,3}, LI Wei¹, LI Yingzi², LIU Qiang¹, ZENG Ming¹

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Beijing Key Laboratory of New Energy and Low-Carbon Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to achieve China's "30·60" decarbonization goal, the green and low-carbon transformation of the energy system is the fundamental support; the construction of new-type power system is the key step, and the green certificate is the important voucher to reflect the green value of renewable energy. Currently, the distribution mechanism of green certificates in China is oversimplified, which neither effectively measures the variability of green values generated by different types of renewable energy, nor balances the coordinated development of renewable energy. Therefore, to differentiate the exchange mechanism of green certificates by different types of renewable energy power in this paper, an

收稿日期: 2022-05-07

基金项目: 国家重点研发计划资助(2021YFB2400700), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2022FR001), 国家社会科学基金重大项目(19ZDA081)

作者简介: 张 硕(1985-), 男, 河北省保定市人, 副教授, 从事综合能源系统、电力市场及电碳协同研究.

通信作者: 李英姿, 女, 博士, 副教授, 电话(Tel.): 010-61773167; E-mail: liyz@ustb.edu.cn.

evaluation index system is established, which describes the difference between green certificates, considering the comprehensive value of renewable energy, and an evaluation model is built with the criteria importance by using the intercriteria correlation (CRITIC) method, the entropy weight method, and the technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method. Under the development scenario of peaking carbon emissions before 2030, the impact of the differentiated distribution model on the green incomes of centralized photovoltaic distributed photovoltaic power, onshore wind power, and offshore wind power is analyzed. Moreover, the development plan of renewable energy is modified in consideration of the effect of the differentiated distribution model, and policy suggestions on green certificates are proposed accordingly. The results show that the differentiated distribution model of green certificates is practical to provide corresponding decision-making support to the construction and improvement of green certificates trading mechanism in China.

Key words: new-type power system; renewable energy; difference between green certificates; criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC)-entropy weight method; technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method

构建以新能源为主体的新型电力系统是我国实现碳达峰碳中和目标(“30·60”双碳目标)的基础支撑。碳达峰目标明确到 2030 年我国风力发电(简称风电)、光伏发电总装机容量将超过 1.2×10^{10} kW。如何实现大规模风电、光伏发电类型并网后的持续稳定发展,是新型电力系统建设的关键问题。为此,我国实施可再生能源电力消纳保障机制^[1](配额制)及配套可再生能源绿色电力证书(简称绿证)交易制度^[2],以确保风电、光伏发电类型的稳步可持续发展^[3]。

一些国家在可再生能源配额制方面积累了较丰富的经验^[4]。美国可再生能源装机容量在实施配额制期间实现快速增长。澳大利亚的可再生能源配额机制激发市场投资意向和发电项目建设,取得显著成果。英国实施配额制期间可再生能源发电比率由 2% 提升到 17%。当前针对配额制与绿证市场的研究主要集中在配额消纳、绿证政策和绿证差异化。在配额消纳方面,文献[5]采用发电商演化博弈模型建模仿真,结果表明应考虑可再生能源产业规划;文献[6]建立了配额制绿证中长期二次交易模型,结果表明放开二次交易利于配额制和绿证实施。在绿证政策方面,文献[7]构建了互补多区域综合绿证与电力市场模型,证明绿证将促进可再生能源企业市场竞争力;文献[8]构建了双碳目标下新型电力系统发展推演模型,结果表明政策投资力度是电力系统转型的基础。在绿证差异化研究方面,文献[9]针对发电侧差异性,建立基于熵权法的可再生能源电厂绿证核发评价体系;文献[10]建立可再生能源投资博弈模型,结果表明在无差别配额下高成本发电类

型将被挤出市场;文献[11]综述可再生能源电力系统研究现状,分析构建该系统将面临的主要挑战;文献[12]为分布式能源系统建立评价体系,可为能源系统多指标评价提供参考。

上述研究为我国绿证发展提供了重要借鉴和理论支持。当前我国绿证分配机制单一,无法充分体现不同可再生能源发电类型在绿色价值方面的差异;但进行绿色价值差异核算需要考虑的因素众多,简单建模方式不适用于不同发电类型绿色价值差异全面评价^[13],亟需建立一套科学合理的评价指标体系,准确评价其绿色价值及发展状态,加快推进新型电力系统建设。

本文以风电、光伏发电类型为研究对象构建考虑可再生能源综合价值的绿证差异化评价指标体系,创新地考虑了风电、光伏发电量兑换绿证的数量差异,结合 CRITIC 法(一种评价指标客观赋权的方法)、熵权法和 TOPSIS 法(一种相对优劣评价方法)构建绿证差异化配置模型,以碳达峰下风电、光伏发电发展目标为发展场景,分析并修正其发展路径。

1 考虑可再生能源综合价值的绿证差异化评价指标体系

1.1 评价指标构建

受可再生能源的资源特点所限,目前我国在能源绿色低碳转型体系的开发、并网、消纳等方面仍需加大力度,亟需建成推进可再生能源发展的综合评估体系。评价指标体系不仅应反映其发展现状和趋势,还应综合绿色、经济等方面加以引导,便于与可再生能源市场化交易、政策、消纳方面相衔接。基于

此,遵循指标选取全面性、可比性等统计原则构建评价指标体系,如表 1 所示。

表 1 可再生能源电力绿证差异化评价指标体系
Tab. 1 Differentiated evaluation index system for green power certificates of renewable power generation

一级指标	二级指标	指标特性
技术	能源开发成熟度/%	能源开发,正向
	合理建设周期/d	能源开发,负向
	能源转换效率/%	设施条件,正向
	能源利用效率/%	设施条件,正向
	装机容量平均增长量/%	设施条件,正向
经济	单位容量造价/(元·kW ⁻¹)	运行成本,负向
	平准化度电成本/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	运行成本,负向
	平均年投资额/元	运行成本,正向
	年带动就业人数/(人·MW ⁻¹)	运行收益,正向
	上网电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	运行收益,负向
资源	资源开发潜力/MW	能源潜力,正向
	电力季节性波动率/%	能源潜力,负向
	弃风、光率/%	能源潜力,负向
	可再生能源发电量占比/%	利用水平,正向
	可再生能源装机量占比/%	利用水平,正向
环境	供电降污排放量/t	降污成效,正向
	供电降碳排放量/t	降污成效,正向
	供电降废排放量/t	降污成效,正向
	供电节水量/t	保护成效,正向
	单位土地装机量/(kW·m ⁻³)	保护成效,正向

1.2 评价指标说明

1.2.1 技术指标

(1) 能源开发成熟度指当前可再生能源发展利用中相应技术水平、工艺流程等方面具有的产业化实用程度,表示为

$$M_{ed} = \frac{H_a}{H_{a,max}} \tag{1}$$

式中: H_a 为可利用时间; $H_{a,max}$ 为最大可利用时间。

(2) 合理建设周期(P_{rc})指所有在建项目均按合理工期组织施工,并按合理工期完工所需要的时间周期。

(3) 能源转换效率指能源经过加工、转换后,产生的各种能源产品的数量与同期投入加工转换的各种能源数量的比率^[14],表示为

$$\eta_i = 100 \frac{o_i}{I_i} \tag{2}$$

式中: o_i 为能源加工、转换产出量; I_i 为能源加工、转换投入量。

(4) 能源利用效率指各类能源在既定情况下如何获得尽可能多的产出品种和数量^[15],表示为

$$E_{eu} = \frac{\eta_i}{\eta_{i,max}} \tag{3}$$

式中: $\eta_{i,max}$ 为能源转换效率理论最大值。

(5) 装机容量平均增长量($C_{a,i}$)指一定年限内各发电类型装机容量平均年增长量。

1.2.2 经济指标

(1) 单位容量造价为发电工程总投资成本与电厂容量之比^[16],表示为

$$C_{cap} = \frac{C_{cost}}{W} \tag{4}$$

式中: C_{cost} 为发电厂总投资成本; W 为单位面积可安装的电站容量。

(2) 平准化度电成本指对项目生命周期内的成本和发电量进行平准化计算得到的发电成本。

(3) 平均年投资额指平均每年投资的资金总量,表示为

$$C_{ave} = C_{cap} \frac{1}{n_y} \sum_{t=1}^n C_{i,t}^a \tag{5}$$

式中: $C_{i,t}^a$ 为第 t 年的装机容量总量; n_y 为年数。

(4) 年带动就业人数分为显性和隐性就业两类。显性就业指电厂直接提供的工作岗位,可根据电厂人员定额得出;隐性就业指电厂建设、运营等环节提供的就业岗位^[17],表示为

$$P_e = P_e^d + P_e^r \tag{6}$$

$$P_e^d = \frac{1}{S_f} \sum_{t=1}^n \frac{C_{i,t}^n}{C_{i,t}^a} \tag{7}$$

式中: P_e 为年带动就业人数; P_e^d 为年带动显性就业人数; P_e^r 为年带动隐性就业人数; $C_{i,t}^n$ 为第 t 年的新增装机容量; S_f 为电厂人员定额。

(5) 上网电价(N_p)指计划内电量的上网电价。

1.2.3 资源指标

(1) 资源开发潜力指考虑地理环境要素等影响可开发利用的电站基地规模,表示为

$$E_{tec} = (S_{the} - N - F)W \tag{8}$$

式中: S_{the} 为理论可安装面积; N 、 F 分别为不可开发和限制开发的面积。

(2) 可再生能源发电量占比(P_{re})指年发电量占所有能源年发电量的比例。

(3) 可再生能源装机量占比(C_{re})指装机容量占光伏、风电装机容量的比例。

(4) 电力季节性波动率指发电类型发电功率波动程度^[18],表示为

$$P_R = \frac{P_{h+\Delta h}^t - P_N}{P_N} \tag{9}$$

式中: P 为某时刻的风电功率值; $P'_{h+\Delta h}$ 为 $h + \Delta h$ 时刻风电功率值; P_N 为风电额定装机容量.

(5) 弃风、光率(P_a^w)指由于电网接纳能力不足等导致设备暂停的现象.

1.2.4 环境指标

(1) 供电降污排放量指相对于火力发电(简称火电)而言,各发电类型降低的烟气等污染物排放总量,表示为

$$F_i = C_{i,t}^a H_a \theta \quad (10)$$

式中: θ 为火电烟气污染物排放系数.

(2) 供电降碳排放量指相对于火电而言,各发电类型降低的二氧化碳排放总量,表示为

$$C_i^{\text{er}} = C_{i,t}^a H_a \vartheta \quad (11)$$

式中: ϑ 为火电碳排放系数.

(3) 供电降废排放量指相对于火电而言,各发电类型降低的废水污染物排放总量,表示为

$$W_i = C_{i,t}^a H_a \varphi \quad (12)$$

式中: φ 为火电废水污染物排放系数.

(4) 供电节水量指相对于火电而言,各发电类型节约的用水总量,表示为

$$E_i = C_{i,t}^a H_a \nu \quad (13)$$

式中: ν 为火电耗水系数.

(5) 单位土地装机量($C_{i,l}$)指每平方米土地可容纳装机容量.

2 基于 CRITIC-熵权-TOPSIS 法的差异化评价模型

2.1 CRITIC-熵权法组合确定指标权重

采用 CRITIC 法和熵权法组合确定各评价指标权重.熵权法可根据各指标所传递信息量的大小,即指标间的离散程度来确定指标权重,而 CRITIC 法考虑指标变异性大小的同时兼顾指标之间的相关性.综合使用 CRITIC 法和熵权法能够更加客观反映指标的权重^[19],在实际应用中精度较高,客观性更强,能够更好地解释所得结果,具体步骤如下.

设有 m 个评价对象, n 个评价指标,原始数据为 x_{ij} , $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$.

2.1.1 处理原始数据 采用极值化法将评价指标数据转化为 $0 \sim 1$ 区间的标准化可比数值,根据指标属性分为正向指标和负向指标,表示为

$$d_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{\max}} \quad (14)$$

$$d'_{ij} = \frac{x_{\min}}{x_{ij}} \quad (15)$$

式中: d_{ij} 、 d'_{ij} 为处理后数据; x_{\max} 和 x_{\min} 分别为指标

的最大值和最小值.

2.1.2 计算指标权重 在 CRITIC 法中,指标信息量以指标间的对比强度和冲突性体现,表示为

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(d_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij} \right)^2} \quad (16)$$

$$r_{ij} = \frac{\sum_{i,j=1}^n (d_{ij} - \bar{d}_i)(d_{ij} - \bar{d}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (d_{ij} - \bar{d}_i)^2 \sum_{j=1}^n (d_{ij} - \bar{d}_j)^2}} \quad (17)$$

$$c_j = s_i \sum_{j=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (18)$$

$$\omega_1 = c_j / \sum_{j=1}^n c_j \quad (19)$$

式中: s_i 、 r_{ij} 、 c_j 分别为指标间的标准差、相关系数、信息量; ω_1 为 CRITIC 法权重结果.

熵权法根据评价指标变化程度所反映的信息来确定其权重,表示为

$$p_{ij} = d_{ij} / \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (20)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (21)$$

$$t_j = 1 - e_j \quad (22)$$

$$\omega_2 = t_j / \sum_{j=1}^n t_j \quad (23)$$

式中: p_{ij} 、 e_j 、 t_j 分别为指标的比率、熵值、信息熵冗余度; ω_2 为熵权法权重结果.

组合权重表示为

$$\omega_j = \gamma \omega_1 + (1 - \gamma) \omega_2 \quad (24)$$

式中: γ 为组合权重的系数,取值为 $[0, 1]$,依据文献[20-21],组合系数取值 0.5,该组合系数可在实际应用中数据积累的情况下调整.

2.2 TOPSIS 法评分排序

利用 CRITIC-熵权法得到各指标权重后,采用 TOPSIS 法进行评分排序. TOPSIS 法根据评价对象与理想化目标的接近程度进行优劣评价,可最大程度避免原始数据信息的损失,便于后续的标准化处理及评级,可更好地匹配可再生能源综合价值的绿证差异化评价指标体系,体现差异化结果,评价步骤如下.

构建加权矩阵表示为

$$z_{ij} = d_{ij} \omega_j \quad (25)$$

$$Z^* = (z_{ij})_{m \times n} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} z^+ &= (v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+) = \\ &\{ \max v_{ij} \mid j \in J_1, \min v_{ij} \mid j \in J_2 \} \\ z^- &= (v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-) = \\ &\{ \min v_{ij} \mid j \in J_1, \max v_{ij} \mid j \in J_2 \} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z^+)^2}$$
$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z^-)^2}$$
$$S_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$$

(28)

式中： z_{ij} 为加权后数据； Z^* 为加权矩阵； z^+ 、 z^- 分别为正、负理想解； J_1 、 J_2 分别为每个指标对应数据里的最大数、最小数的集合； D_i^+ 和 D_i^- 分别为评价对象与正、负理想解的距离。对 S_i 进行归一化处理，用相对贴近度 C 表示。

2.3 差异化划分区间模型

2.3.1 标准化贴近度值 基于 CRITIC-熵权法和 TOPSIS 法计算评价对象的最终贴近度值 (G_l)。采用线性比例标准化法将其转化至 0~100 区间并向上取整得到：

$$G_l = \left\lceil 100C \right\rceil, \quad l = 1, 2, \dots, m$$

(30)

2.3.2 构建百分整数制评分区间 根据评分数值，划定 s 个等值评分区间 $t_s, s = \{1, 2, \dots, o\}, o \in \mathbf{N}$ ，如表 2 所示。

表 2 百分整数制评分区间
Tab. 2 Percentile scoring range

评分区间	评分区间数值	发展程度
t_s	$\frac{100(o-1)}{s} \leq t_s < \frac{100o}{s}$	s 级
...
t_2	$100/s \leq t_s < 200/s$	二级
t_1	$0 \leq t_s < 100/s$	一级

2.3.3 对应百分整数制评分区间与绿证设定量 结合当前政策相关要求，根据各评价对象的发展状态和趋势，简化设定各评分区间的发展程度、发展状态及绿证设定量，如表 3 所示。

表 3 绿色电力证书设定量
Tab. 3 Setting quantity of green certificates

评分区间	发展程度	发展状态	绿证设定量/ (张·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)
81~100	五级	成熟	1
61~80	四级	较成熟	2
41~60	三级	一般成熟	3
21~40	二级	较不成熟	4
0~20	一级	不成熟	5

3 可再生能源电力绿证差异化影响分析

3.1 数据输入

我国风电、光伏发电主要有 4 类发电类型：集中式光伏发电、分布式光伏发电、陆上风电及海上风电。本文采用国家能源局、国际能源署^[22]等官方渠道发布的相关数据作为算例。其中，年带动就业人数、装机容量增长率采用 2016—2020 年数据，平均年投资额采用 2018—2020 年数据，其余指标均采用 2020 年数据。

3.2 可再生能源电力绿证差异化结果分析

采用 CRITIC-熵权组合权重法进行客观赋权，得到一级指标权重，如图 1 所示。发现环境类及资源类指标占比较高，分别为 33.22%、28.08%；技术类及经济类指标占比较低，分别为 22.40%、16.32%。发电类型对环境的友好程度及其可利用资源的丰富程度将是影响其发展速度的重点参考因素，而技术及经济方面参考价值相对较低，指标变动所造成的影响较小。

如图 2 所示为各二级指标权重，可再生能源发电量占比、供电降污排放量等指标权重均超过 6%，对可再生能源发电类型发展具有重要影响。单位容量造价、平准化度电成本等指标权重均低于 4%，对其发展影响作用较低。值得注意的是，虽然在其经济性方面进行优化对其作用较小，但年带动就业人数仍较为重要，应引起重视。

基于 CRITIC-熵权法和 TOPSIS 法计算 4 种发电类型评分与正负理想解的相对接近程度，结合绿证设定量，得到各发电类型的发展程度及兑换绿证量，如表 4 所示。

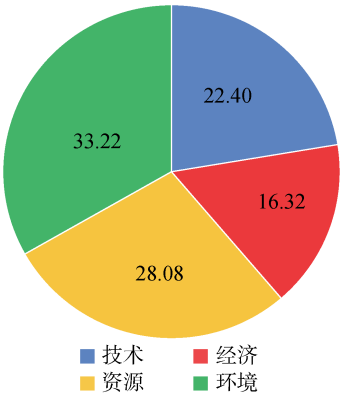


图 1 一级指标权重(%)

Fig. 1 Weights of first-level indexes (%)

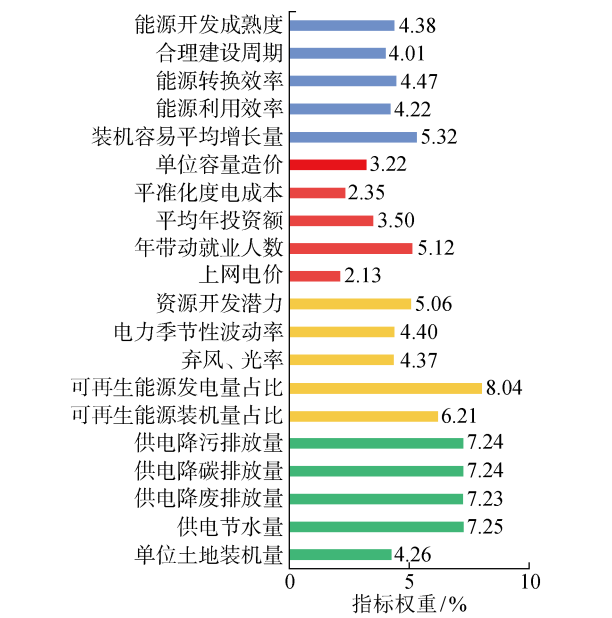


图 2 二级指标权重

Fig. 2 Weights of second-level indexes

表 4 发展程度及兑换绿证量

Tab. 4 Degree of development and number of green certificates exchanged

发电类型	TOPSIS 评分	百分整数 制转化/分	发展 程度	兑换绿证量/ (张·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)
集中式光伏	0.469 2	47	三级	3
分布式光伏	0.320 1	32	四级	4
陆上风电	0.679 8	68	二级	2
海上风电	0.298 5	30	四级	4

表 5 指导电价
Tab. 5 Guiding price

发电类型	p_{ge}	\bar{p}_{ge}
集中式光伏	I类资源区为 0.35,II类资源区为 0.40,III类资源区为 0.49	0.41
分布式光伏	0.46	0.46
陆上风电	I类资源区为 0.29,II类资源区为 0.34,III类资源区为 0.38,IV类资源区为 0.47	0.37
海上风电	近海为 0.75,潮间带竞价确定	0.75

表 6 煤电交易基准价平均值

Tab. 6 Average benchmark price of coal-fired power transactions

电网区域	p_{coal}
南方电网	0.400 2
国家电网	0.372 8
蒙西电网	0.282 9
煤电交易基准价平均值	0.352 0

表 7 修正后综合收益结果

Tab. 7 Comprehensive income results after revision

发电类型	p_g	p_{ge}	p_c	p_{coal}	p_r
集中式光伏	0.529 5	0.41	0.939 5	0.352	0.587 5
分布式光伏	0.706	0.46	1.166	0.352	0.814
陆上风电	0.353	0.37	0.723	0.352	0.371
海上风电	0.706	0.75	1.456	0.352	1.104

3.3 可再生能源电力绿色收益测算分析

目前绿证交易活跃度较低. 截至 2020 年 10 月, 光伏绿证实际交易量为 166 张, 平均交易价格为 668.1 元/张; 风电绿证实际交易量为 38 595 张, 平均交易价格为 174.4 元/张. 结合实际交易量和平均交易价格, 设定各发电类型指导电价为其 2020 年指导电价均值, 煤电交易基准价为 2020 年南方电网、国家电网及蒙西电网煤电交易基准价均值, 计算得出各发电类型综合收益与增长收益结果, 分别如表 5~7 所示, 计算公式表示为

$$p_r = p_c - p_{coal} \tag{31}$$

$$p_c = p_g + p_{ge} \tag{32}$$

$$p_g = m_n + p_e \tag{33}$$

$$p_e = \frac{s_1^c p_1^c + s_2^c p_2^c + \cdots + s_k^c p_k^c}{s_1^c + s_2^c + \cdots + s_k^c} \tag{34}$$

式中: p_r 为增长收益; p_c 为综合收益; p_{coal} 为煤电交易基准价平均值; p_g 为绿证收益; p_{ge} 为指导电价; m_n 为绿证数量; p_e 为绿证统一价; s_k^c 为实际交易量; p_k^c 为平均交易价格. 求解结果为 $p_e=176.5$ 元.

如图 3 所示, 相较于当前各发电类型指导电价, 在绿证差异修正后, 4 类发电类型的综合收益、增长收益均有不同幅度增长, 其结果更满足实际发展过程. 修正后, 集中式光伏与分布式光伏增长收益较高, 将获得良好发展; 陆上风电增长收益仍维持在中等水平, 将保持稳定发展; 海上风电综合收益最高, 将促进其更快、更稳发展.

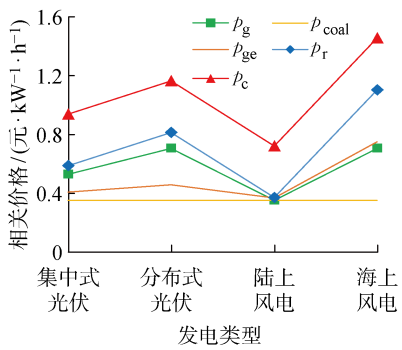


图 3 修正后综合收益及增长收益

Fig. 3 Revised comprehensive income and growth income

3.4 碳达峰下可再生能源电力发展路径分析

可再生能源电力绿证交易是释放可再生能源电力绿色价值的重要途径,进行绿证差异化直接影响企业的绿色收益,进而影响可再生能源电力发展规划.通过可再生能源电力绿证差异化模型分析并修正碳达峰目标情境下风电、光伏发电类型的发展路径,期望推动 4 类发电类型的平衡协调发展.

3.4.1 修正前的可再生能源电力发展路径测算

可再生能源发展路径传统算法一般采用近几年的平均增长或降低量来估计能源装机容量的发展趋势.2020 年总装机容量为 5.33×10^9 kW,为完成我国提出的到 2030 年风电、光伏发电量达到 1.2×10^{10} kW·h 的目标,需计算各发电类型近 5 年新增装机容量,根据发电类型对比,传统算法计算公式表示为

$$\rho_i = \frac{1}{5} \sum_{t=1}^5 (P_{i,v}^t - P_{i,v}^{t-1}) \tag{35}$$

式中: ρ_i 为装机容量平均增量; $P_{i,v}^t$ 为修正前各发电类型第 t 年的总装机容量.

求解结果为集中式光伏、分布式光伏、陆上风电和海上风电的新增装机容量平均增量分别为 2.528×10^7 、 1.327×10^7 、 2.651×10^7 、 1.46×10^6 kW,测算结果如表 8 所示.

3.4.2 修正后的可再生能源电力发展路径规划

进行绿证差异化的政策扶持后,发展较缓的发电类型发展速度会有一定程度提升,发展较成熟的技术发展速度将会放缓.根据发电类型对比,设定 4 种发电类型的增长速率将在平均增量基础上叠加修正得到绿色收益,设定陆上风电平均增量为 a 且绿色收益不变,则其他发电类型平均增量及绿色收益增长倍率计算公式如下:

$$\rho_i^{\text{new}} = \frac{a\rho_i}{\rho_{\text{on}}} \tag{36}$$

$$\mu_i = \frac{R_i^g}{R_{\text{on}}^g} \tag{37}$$

式中: ρ_i^{new} 为修正后的新增装机容量平均增量; ρ_{on} 为陆上风电的新增装机容量平均增量; μ_i 为第 i 类发电类型绿色收益增长速率; R_i^g 为第 i 类发电类型的增长收益; R_{on}^g 为陆上风电的增长收益.

求解得到集中式光伏、分布式光伏、陆上风电、海上风电绿色收益增长倍率分别为 1.584、2.194、1、2.976.为方便计算,取求解结果近似值,即增长倍率分别为 1.5、2、1、3.测算各发电类型的装机总量及 4 种发电类型总装机总量:

$$P_{i,v}^{\text{n},t} = P_{i,v}^t (1 + \mu_i \rho_i^{\text{new}} n_y) \tag{38}$$

$$Q_n = \sum_{t=1}^4 P_{i,v}^{\text{n},t} \tag{39}$$

式中: $P_{i,v}^{\text{n},t}$ 为修正后各发电类型第 t 年的总装机容量

表 8 修正前装机容量发展路径测算结果

Tab. 8 Calculation results of development paths for installed capacity before revision 10⁴ kW

年份	$C_{i,t}^a$				$P_{i,v}^t$
	集中式光伏	分布式光伏	陆上风电	海上风电	
2020	17 400	7 900	27 100	900	53 300
2021	19 928	9 227	29 751	1 046	59 952
2022	22 456	10 554	32 402	1 192	66 604
2023	24 984	11 881	35 053	1 338	73 256
2024	27 512	13 208	37 704	1 484	79 908
2025	30 040	14 535	40 355	1 630	86 560
2026	32 568	15 862	43 006	1 776	93 212
2027	35 096	17 189	45 657	1 922	99 864
2028	37 624	18 516	48 308	2 068	106 516
2029	40 152	19 843	50 959	2 214	113 168
2030	42 680	21 170	53 610	2 360	119 820

量; Q_n 为 4 种发电类型第 t 年的装机总量之和.

为与修正前进行比较,将 Q_n 设置为 1.2×10^{10} kW,解得 $a=307$. 集中式光伏、分布式光伏、陆上风电、海上风电新增装机容量平均增量分别为 2.654×10^7 , 1.858×10^7 , 1.856×10^7 , 307×10^6 kW, 规划结果如表 9 所示.

3.4.3 修正前后可再生能源电力发展路径对比
分析图 4~6 可知,在绿证差异修正后,集中式光伏、分布式光伏、海上风电装机容量较修正前呈加速增长状态,占据市场份额增加;陆上风电装机容量较修正前呈减速增长状态,占据市场份额降低. 集中式光伏、分布式光伏和海上风电增幅分别为 1.251×10^7 , 5.298×10^7 , 1.606×10^7 kW, 市场份额分别从

35.62% 上升至 36.60%, 17.67% 上升至 22.05%, 1.97% 上升至 3.30%; 陆上风电降幅 7.961×10^7 kW, 市场份额从 44.74% 降低至 38.04%. 较修正前,分布式光伏装机容量市场份额增加较为明显,将有利于电力系统控制,提高居民收入,降低电网输电成本. 海上风电装机容量市场份额有一定提升,将有效提升风电发电效率和电网消纳,减少投资成本和电网损耗. 对比结果显示:相较于可再生能源发展路径传统算法,修正模型的结果更满足实际发展路径过程,且有效促进其均衡发展,兼具绿色性和经济性,各发电类型的优势得以更加高效体现,有利于加快构建新型电力系统,助力“30·60”双碳目标的顺利实现,模型具有可用性和优越性.

表 9 修正后装机容量发展路径规划结果

Tab. 9 Planning results of development paths for installed capacity after revision

10⁴ kW

年份	装机容量				Q_n
	集中式光伏	分布式光伏	陆上风电	海上风电	
2020	17 400	7 900	27 100	900	53 300
2021	20 054	9 758	28 956	1 207	59 975
2022	22 707	11 614	30 811	1 514	66 646
2023	25 360	13 471	32 665	1 820	73 317
2024	28 013	15 328	34 520	2 127	79 988
2025	30 666	17 184	36 375	2 433	86 659
2026	33 319	19 041	38 230	2 740	93 329
2027	35 972	20 898	40 084	3 046	100 000
2028	38 625	22 755	41 939	3 353	106 671
2029	41 278	24 611	43 794	3 659	113 342
2030	43 931	26 468	45 649	3 966	120 013

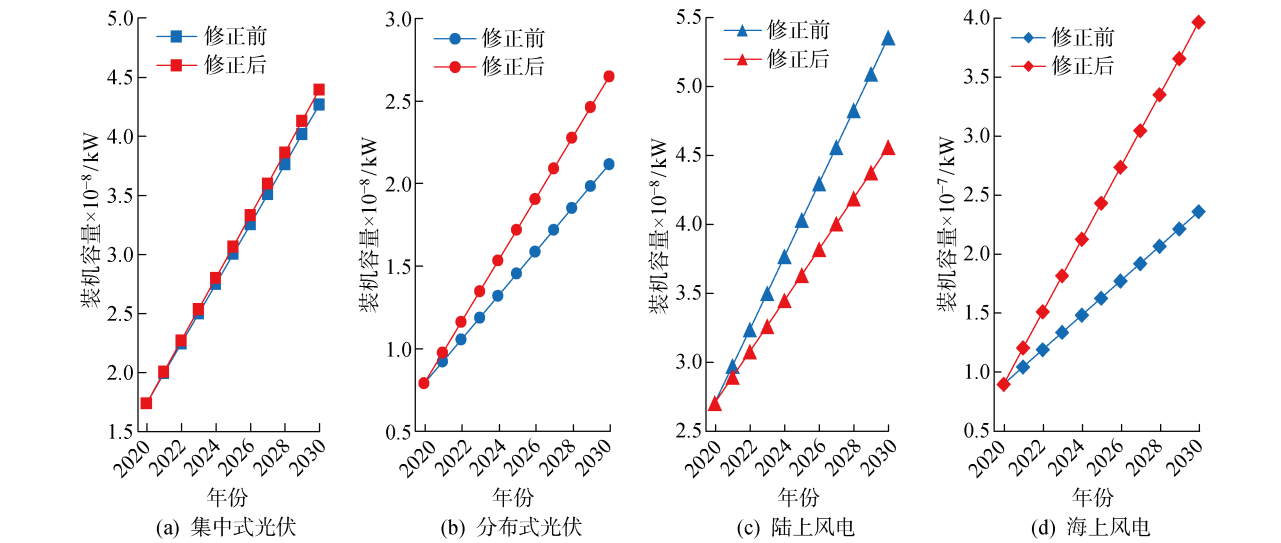


图 4 修正前后装机容量发展路径对比图

Fig. 4 Comparison of development paths for installed capacity before and after revision

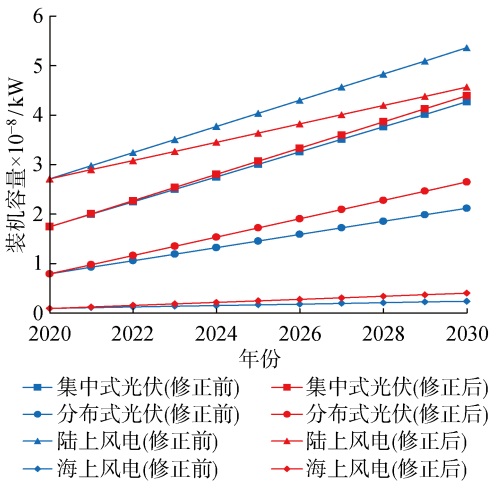


图 5 修正前后装机容量发展路径对比
Fig. 5 Comparison of development paths for in-
stalled capacity before and after revision

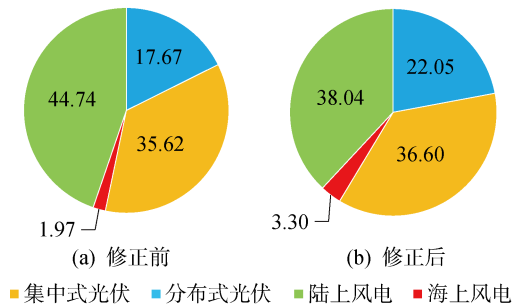


图 6 修正前后装机容量市场份额对比(%)
Fig. 6 Comparison of installed capacity market
shares before and after revision (%)

3.5 相关政策建议

3.5.1 制定电力绿证差异化制度 实施绿证差异化机制,可从绿色收益角度平衡不同发电类型收益,引导可再生能源多元同步发展,推进新型电力系统建设.结合本文绿证差异化结果,可从技术、经济、资源和环境多维度综合分析可再生能源发电类型的绿证差异化特性,并提出针对各发电类型电量的绿证差异化发放标准,释放其绿色价值,推动可再生能源发电市场化发展.

3.5.2 制定考虑均衡互补的可再生能源发展路径 加快实施能源结构调整,构建以新能源为主体的新型电力系统是实现“30·60”双碳目标的重要手段.为保证 2030 年碳达峰目标的顺利达成,应重点发展光伏、风电等可再生能源.在集中式光伏发电、陆上风电为主要构成的基础上,大力推进分布式光伏、海上风电的建设力度.确定考虑多类型可再生能源发电均衡互补发展的发展路径,适时调整各省可再生能源新增装机方案及消纳责任权重.此外,可侧

重带动就业人数、资源开发潜力等方面要素,规划发展各类型可再生能源电站.

3.5.3 统一可再生能源绿证定价基准 我国实施绿证制度的目的主要是减轻新能源补贴压力和引导绿色电力消费观,促进清洁能源利用.光伏和风电的绿证成交价格和数量差距较大,绿证市场不均衡在一定程度上影响了光伏和风电的发展趋势.参考可再生能源电力绿色收益测算结果,尽快完善绿证定价制度,即统一可再生能源绿证定价基准,确保绿证交易市场统一规范,根据绿证差异化标准核发绿证数量,促进可再生能源绿色交易有序发展.积极探索开展全国绿色电力交易,丰富绿电交易方式,形成电量交易价格和绿证价格分开交易结算,即电量与绿证分离的交易机制,完善绿电交易与绿证交易相匹配的协同机制,加强绿电交易与绿证交易的有效衔接.

3.5.4 将更多类型可再生能源纳入绿证体系 绿证作为可再生能源配额制度的核查、清算工具,进一步扩大可核发绿证项目的范围有助于完善可再生能源配额制度.随着光伏、风电行业平价上网政策的实施,应考虑将分布式光伏、生物质能等可再生能源发电类型纳入绿证体系,以便进行可再生能源的统一协调发展及管理,为其提供获得绿色收益的市场渠道,完善绿证交易市场.

4 结语

在“30·60”双碳目标大背景下,面向新型电力系统建设,通过构建考虑可再生能源综合价值的绿证差异化评价指标体系,提出绿证差异化分配方式,对集中式光伏、分布式光伏、陆上风电、海上风电 4 类发电类型进行实例研究,以解决可再生能源发展不均衡问题.主要贡献如下:结合当前可再生能源发展现状,构建考虑可再生能源综合价值的绿证差异化评价指标体系,形成绿证差异化评价依据;结合 CRITIC-熵权法及 TOPSIS 法构建可再生能源电力绿证差异化模型,形成绿证差异化核算方法;基于绿证差异化分配方法,实证分析集中式光伏、分布式光伏、陆上风电和海上风电 4 种典型可再生发电类型的绿色收益变化,结合 2030 年碳达峰可再生能源发展目标,分析绿证差异化促进可再生能源发电均衡发展的作用.在后续研究中,将进一步考虑更多可再生能源发电类型,提取更多时间序列数据,提升绿证差异化的覆盖面,为绿证交易制度提供更符合实际的辅助决策支持.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知[EB/OL]. (2019-05-10)[2022-04-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/xwfb/201905/t20190515_954419.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on establishing and improving the consumption guarantee mechanism of renewable energy electricity [EB/OL]. (2019-05-10)[2022-04-07]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/xwfb/201905/t20190515_954419.html.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国财政部, 国家能源局. 关于试行可再生能源绿色电力证书核发及自愿认购交易制度的通知[EB/OL]. (2017-02-06)[2022-04-07]. http://www.nea.gov.cn/2017-02/06/c_136035626.htm.
National Development and Reform Commission, Ministry of Finance of the People's Republic of China, National Energy Administration. Notice on the trial implementation of renewable energy green power certificate issuance and voluntary subscription and trading system [EB/OL]. (2017-02-06)[2022-04-07]. http://www.nea.gov.cn/2017-02/06/c_136035626.htm.
- [3] 游广增, 汤翔鹰, 胡炎, 等. 基于典型运行场景聚类的电力系统灵活性评估方法[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(7): 802-813.
YOU Guangzeng, TANG Xiangying, HU Yan, *et al.* Flexibility evaluation method for power system based on clustering of typical operating scenarios[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(7): 802-813.
- [4] 黄龙. 考虑可再生能源配额制的电力市场研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
HUANG Long. Research on electricity market considering renewable portfolio standards[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [5] ZHAO X G, REN L Z, ZHANG Y Z, *et al.* Evolutionary game analysis on the behavior strategies of power producers in renewable portfolio standard[J]. *Energy*, 2018, 162: 505-516.
- [6] 曲明, 丁涛, 白佳文, 等. 非水可再生能源电力消纳责任权重划分下的全国绿证中长期跨省交易测算分析[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3885-3894.
QU Ming, DING Tao, BAI Jiawen, *et al.* Green certificate transaction analysis in China under responsibility for non-water renewable energy integration ratio [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(10): 3885-3894.
- [7] HELGESEN P I, TOMASGARD A. An equilibrium market power model for power markets and tradable green certificates, including Kirchhoff's Laws and Nash-Cournot competition[J]. *Energy Economics*, 2018, 70: 270-288.
- [8] 陈文淑乐, 向月, 彭光博, 等. “双碳”目标下电力系统供给侧形态发展系统动力学建模与分析[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1567-1576.
CHEN Wenxue, XIANG Yue, PENG Guangbo, *et al.* System dynamic modeling and analysis of power system supply side morphological development with dual carbon targets[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(12): 1567-1576.
- [9] 彭谦, 周晓洁, 杨睿. 国家绿色电力证书交易市场与省级日前电力市场协调均衡机制设计[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2565-2571.
PENG Qian, ZHOU Xiaojie, YANG Rui. Design of coordination and balance mechanism between national green power certificate trading market and provincial day-ahead power market[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2565-2571.
- [10] 俞萍萍. 绿色证书交易机制下可再生能源发电定价研究: 期权博弈模型及数值模拟[J]. 价格理论与实践, 2018(11): 38-41.
YU Pingping. Pricing model of renewable energy under tradable green certificate system: Option games model and numerical simulation [J]. *Price: Theory & Practice*, 2018(11): 38-41.
- [11] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843-1856.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, *et al.* Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [12] WEN Q M, LIU G, WU W, *et al.* Multicriteria comprehensive evaluation framework for industrial park-level distributed energy system considering weights uncertainties[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 282: 124530.
- [13] 董福贵, 时磊. 可再生能源配额制及绿色证书交易机制设计及仿真[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 113-121.
DONG Fugui, SHI Lei. Design and simulation of renewable portfolio standard and tradable green certificate mechanism [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 113-121.

[14] CHEN Y J, YANG X L, LUO D, *et al.* Remaining available energy prediction for lithium-ion batteries considering electrothermal effect and energy conversion efficiency[J]. **Journal of Energy Storage**, 2021, 40: 102728.

[15] POURGHADERI N, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M, *et al.* Commercial demand response programs in bidding of a technical virtual power plant[J]. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2018, 14(11): 5100-5111.

[16] KARAMOV D N, MINARCHENKO I M, KOLOSITSYN A V, *et al.* Installed capacity optimization of autonomous photovoltaic systems under energy service contracting [J]. **Energy Conversion and Management**, 2021, 240: 114256.

[17] 段翔颖. 甘肃某风电场建设项目综合评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

DUAN Xiangying. Study on synthetic evaluation of a wind farm project in Gansu[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[18] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫, 等. 基于重尾分布的风电功率波动特性概率分布[J]. **电力自动化设备**, 2021, 41(7): 52-57.

DU Gang, ZHAO Dongmei, LIU Xin, *et al.* Probability distribution of wind power fluctuation characteristics based on heavy-tailed distribution[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2021, 41(7): 52-57.

[19] 傅为忠, 储刘平. 长三角一体化视角下制造业高质量发展评价研究: 基于改进的 CRITIC-熵权法组合权重的 TOPSIS 评价模型[J]. **工业技术经济**, 2020, 39(9): 145-152.

FU Weizhong, CHU Liuping. Research on the evaluation of high quality development of manufacturing industry from the perspective of integration of the Yangtze River Delta: TOPSIS evaluation model based on improved CRITICAL-Entropy weight method[J]. **Journal of Industrial Technological Economics**, 2020, 39(9): 145-152.

[20] 代洲, 王钢, 严英杰, 等. 基于组合赋权和模糊综合评判的电网企业物资品控体系综合能效评价[J]. **华南理工大学学报(自然科学版)**, 2020, 48(7): 47-54.

DAI Zhou, WANG Gang, YAN Yingjie, *et al.* Evaluation on the comprehensive energy efficiency of power grid enterprise material quality control system based on combination weighting and fuzzy comprehensive evaluation method [J]. **Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)**, 2020, 48(7): 47-54.

[21] 安进, 徐廷学, 曾翔, 等. 组合赋权下的装备质量状态信息融合评估方法[J]. **控制与决策**, 2018, 33(9): 1693-1698.

AN Jin, XU Tingxue, ZENG Xiang, *et al.* Equipment quality condition assessment under fusion information based on combination weighting [J]. **Control and Decision**, 2018, 33(9): 1693-1698.

[22] 国家能源局. 国家能源局发布 2020 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2021-01-20) [2022-04-07]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.

National Energy Administration. National Energy Administration releases national electricity industry statistics for 2020[EB/OL]. (2021-01-20) [2022-04-07]. http://www.nea.gov.cn/2021-01/20/c_139683739.htm.

(本文编辑:王历历)