

引文格式:吴兴旺,谢一鸣,吴杰,等. 中国省域可再生能源电力配额分配研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(2): 229-242.

WU Xingwang, XIE Yiming, WU Jie, et al. Renewable energy power quota allocation among China's provincial regions[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(2): 229-242.

中国省域可再生能源电力配额分配研究

吴兴旺^{1,2a}, 谢一鸣^{1,2a}, 吴杰^{1,2a}, 常圣卿^{2b}, 冯晨鹏^{2b}

(1. 国网安徽省电力有限公司 电力科学研究院, 安徽 合肥; 2. 合肥工业大学 a. 管理学院, b. 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 安徽 合肥)

摘要:【目的】面对“双碳”目标的迫切要求,作为中国最大的碳排放来源的电力行业,其能源低碳转型刻不容缓。为此,中国在2018年开始推行可再生能源电力配额制,然而,由于各省经济发展、产业结构、资源禀赋的差异,科学合理的配额分配至关重要。【方法】基于此,设计了一套可再生能源电力配额分配机制。首先,采用差分自回归移动平均模型对未来各省份的发电数据进行预测;其次,运用数据包络分析方法,以最大化中国整体可再生能源发电比例为目标,探讨合理的配额分配方案。【结果】实证研究显示,优化后的配额分配,在2025年,中国可再生能源发电比例可由30.2%提升至32%,同时保持总发电量不减少。【结论】总体而言,提出的配额分配方法有助于指导中国可再生能源电力配额制度的实施,并为实现“双碳”目标提供决策支持。

关键词: 可再生能源; 电力配额; 数据包络分析; 差分自回归移动平均模型; 资源配置

中图分类号: TM6; N945.15 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240467

文章编号: 1007-9432(2026)02-0229-14

Renewable Energy Power Quota Allocation among China's Provincial Regions

WU Xingwang^{1,2a}, XIE Yiming^{1,2a}, WU Jie^{1,2a}, CHANG Shengqing^{2b}, FENG Chenpeng^{2b}

(1. Electric Power Scientific Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd, Hefei, Anhui, China;
2a. School of Management, b. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-making,
Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui, China)

Abstract:【Purposes】Faced with the urgent demands of the “dual carbon” goals, the electricity industry, as the largest source of carbon emissions in China, is under significant pressure to undergo a low-carbon energy transition. To address this issue, China initiated the implementation of renewable energy electricity quotas in 2018. However, owing to disparities in economic development, industrial structure, and resource endowment among provinces, scientific and reasonable quota allocation is crucial. 【Methods】Accordingly, in this paper, a renewable energy power quota allocation mechanism was proposed. First, an autoregressive integrated moving average model was employed to forecast the future electricity generation data of each province. Subsequently, the data envelopment analysis method was applied to maximize the overall proportion of renewable energy electricity generation in China, thereby exploring feasible quota allocation strategies. 【Results】The results of the empirical

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-08-21

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助(5500-202220136A-1-1-ZN)

第一作者: 吴兴旺, 高级工程师, 主要从事电力变压器状态评估与智能诊断技术研究, (E-mail) 408224175@qq.com

通信作者: 冯晨鹏, 博士, 副教授, 主要从事组织绩效评价与资源分配研究, (E-mail) cpfeng@hfut.edu.cn

study show that with optimal quota allocation, the proportion of renewable energy electricity generation in China could increase from 30.2% to 32% in 2025, while maintaining the total electricity generation level. **【Conclusions】** In conclusion, the proposed quota allocation method in this study contributes to guiding the implementation of China's renewable energy electricity quota system, thereby supporting the achievement of the "dual carbon" goals.

Keywords: renewable energy; electricity quotas; data envelopment analysis (DEA); autoregressive integrated moving average (ARIMA); resource allocation

电力行业的能源低碳转型迫在眉睫,构建可再生能源发电方式刻不容缓。许多国家已经开始实施可再生电力配额制,即国家或地区强制性地要求在该地区的生产、配输或消费的电力中,必须包含最低比例的可再生能源电力。由于燃煤发电是我国最主要的发电方式,其二氧化碳排放直接导致电力行业成为我国最大的碳排放来源行业。2022年,电力行业的碳排放量达到47.2亿t,占全国碳排放总量的40%左右。为了解决上述问题,2018年11月中国国家能源局发布了《关于实行可再生能源电力配额制的通知》,按省级行政区域确定配额指标,实行可再生能源电力配额制。而在此之前,中国国家能源局两次发布《可再生能源电力配额及考核办法(征求意见稿)》,对配额分配办法和政策展开了激烈讨论。可再生能源电力配额的初步分配极大地影响了各区域的电力生产和消费,各省域之间的异质性增大了配额分配的复杂性。因此,可再生能源电力配额的科学合理配置,是实行可再生能源电力配额制至关重要的问题,也是政策可以持续顺利施行的基础与保障。

在可再生能源电力配额制度的研究方面,有多篇文献对相关内容进行了深入探讨。谢旭轩等(2012)^[1]概述了美国可再生能源配额制的进展,并比较了各州的设计和运行特点,以期为中国实施配额制提供借鉴。赵新刚等(2018)^[2]运用微观经济学和制度经济学的相关理论提供了可再生能源配额制的经济学解释,并论证了配额制的有效性。WANG等(2018)^[3]采用熵权法分配中国各区域的可再生能源配额,提出了一个透明和可接受的机制。赵新刚等(2019)^[4]通过演化博弈研究了配额制的不同设定对发电厂商策略的影响,结果表明科学的配额有益于制度环境建设的长期稳定。FAN等(2021)^[5]建立多元回归模型,预测了中国的可再生能源电力配额制对中国各省份的可再生能源电力需求的影响,实证结果表明可再生能源配额制将促进可再生能源的利用,但尚有较大进步空间。

在资源配置领域,现有方法包括线性规划^[6]、多目标优化^[7]、数据包络分析方法(Data Envelopment Analysis, DEA)等。其中DEA作为一种有效的评价和分析工具,能够同时处理多个输入和输出变量,且无需假设函数形式,可以根据不同的分析目的灵活地变换模型,因此被广泛运用于各种复杂的资源配置问题中。DEA最初由Charnes等(1978)^[8]提出,随着时间的推移,该方法在学术界和实践中得到了广泛的认可和应用。它不仅可以用于单一层次资源配置问题,还可以应用于多层次、多维度的复杂资源配置和决策中。Athanassopoulos(1995)^[9]基于DEA在多级规划问题中整合目标设定和资源分配。丁晶晶等(2013)^[10]同时考虑效率和公平,并基于网络DEA解决并联系统的内部资源和目标配置问题。王怡(2019)^[11]讨论了一种基于DEA方法的额外资源按需分配方法。冯晨鹏等(2020)^[12]提出基于“集中分配—局部补偿”的两阶段DEA模型,优化浙江省的碳排放权配额分配及补偿方案。

在可再生能源配额制的DEA相关研究方面,Zurano-Cervelló等(2019)^[13]采用DEA方法对28个欧盟成员国的发电组合效率水平进行了评估,并考虑发电技术问题重新优化了各国的发电组合。WANG等(2022)^[14]基于BCC-DEA模型测算了中国2018年公布的可再生能源电力配额分配方案的效率,结果表明大部分省份分配效率低下;进一步,基于零和收益DEA模型(ZSG-DEA)重新规划了可再生能源电力配额分配方案,实现了低效省份的效率提升。朱庆缘等(2022)^[15]基于效率和公平原则,构建了中国可再生能源电力配额的动态分配机制。SUN等(2022)^[16]通过DEA评估了官方发布的可再生能源分配方案的效率,然后应用ZSG-DEA模型对方案进行了优化,并通过基尼系数验证了优化方案的公平性。ZHOU等(2022)^[17]基于公平和效率原则,结合ZSG-DEA模型和熵权法,实现了中国的可再生能源配额分配,并通过环境基尼系数验

证了分配结果的合理性。朱庆缘等(2024)^[18]基于DEA方法,提出了一种可再生能源电力配额分配方法,在确保最大化总发电量的情况下,尽可能地最小化碳排放量。

此外,为了完成未来的可再生能源配额分配,需要根据历史数据进行预测。现有的预测方法包括差分自回归移动平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average, ARIMA)、指数平滑法^[19]、支持向量机^[20]、神经网络^[21]等。其中,ARIMA模型是一种广泛应用于时间序列分析和预测的统计模型,相比于复杂的机器学习模型,ARIMA模型所需的参数较少,减少了过拟合的风险,且更加直观,容易理解和解释,便于实际应用。韩超等(2004)^[22]基于ARIMA模型对短时交通流进行了预测,并通过仿真实验验证了预测结果的有效性。姜春海等(2012)^[23]通过ARIMA模型对中国的火电需求量进行了预测分析。YUAN等(2016)^[24]采用ARIMA模型和GM模型对中国的一次能源消耗进行了预测。Aasim等(2019)^[25]基于ARIMA模型和小波变换预测短期风速。赵滨滨等(2019)^[26]建立了基于ARIMA模型的光伏系统输出功率预测模型。FAN等(2021)^[27]建立了ARIMA模型和长短期记忆模型的新型混合模型,有效地预测了油井产量。

区别于过往可再生能源电力配额分配的研究,本文的创新之处在于:1)本文没有简单地仅针对历史数据进行配额分配,而是运用ARIMA模型对影响可再生能源电力发展的关键指标(如人口、GDP以及各种能源发电机装机容量、能源发电量)进行预测,并将预测结果融入配额分配模型,提升了配额分配的科学性和前瞻性;2)以DEA模型为基础,构建了以整体可再生能源电力发电比例最大化的分配模型。本文综合考虑公平性和效率性指标,以各省域的经济水平、发电能源资源禀赋等多维指标为投入,以各种能源发电量为产出,所提模型在确保总发电量不减少的情况下,以全国整体可再生能源发电比例最大化为目标,探索各省域的可再生能源发电比例潜力,进而对各省域可再生能源电力配额(即可再生能源发电量占总发电量的比例)进行分配,实现其合理配置。

本文的主要贡献概括为:1)在可再生能源电力配额分配的研究中,率先考虑基于历史数据进行预测,进而基于预测结果进行未来的配额分配,实现了配额分配的前瞻性;2)提出了新的基于DEA的可再生能源电力配额分配体系。本文综合了多维度

指标,能够更全面反映各省域的特征差异,从而实现更加合理的配额分配,为区域间合理分配可再生能源电力配额提供了新的视角和方法,丰富了可再生能源电力配额分配的优化模型方法,为政府制定可再生能源配额提供了新的参考。

1 理论模型

1.1 ARIMA模型

ARIMA模型是一种广泛应用于时间序列分析和预测的统计模型。它被设计用来捕捉数据中的变化趋势,并且可以通过对历史数据的分析来预测未来的趋势。ARIMA模型由三部分组成:(1)自回归模型(AR),描述变量与过去值之间的关系,用于处理时间序列的自回归部分;(2)差分过程(I),对原始数据进行处理,使其变为平稳时间序列;(3)移动平均模型(MA),描述观测值与随机误差之间的关系,用于处理时间序列的移动平均部分。ARIMA模型的表达式如下。

$$\Delta^d y_t = \phi_0 + \phi_1(\Delta^d y_{t-1}) + \cdots + \phi_p(\Delta^d y_{t-p}) + \epsilon_t - \theta_1 \epsilon_{t-1} - \cdots - \theta_q \epsilon_{t-q} \quad (1)$$

ARIMA模型中参数 p 表示自回归项的阶数, d 表示差分阶数, q 表示移动平均项的阶数。 t 为时间索引, $\Delta^d y_t$ 表示对原始时间序列 y_t 进行 d 阶差分, ϕ_0 为常数项, $\phi_1, \dots, \phi_p$ 为自回归项的系数, $\theta_1, \dots, \theta_q$ 为移动平均项的系数, ϵ_t 为零均值白噪声。预测发电量及发电机装载量的ARIMA模型构建步骤如下。

步骤1:时间序列的平稳性检验,采用ADF检验(Augmented Dickey-Fuller Test)或PP检验(Phillips-Perron Test)判断时间序列的平稳性,对非平稳序列进行差分转化为平稳序列。

步骤2:确定参数,通过观察自相关函数(ACF)和偏自相关函数(PACF),以及根据AIC准则(Akaike information criterion)或者BIC准则(Bayesian information criterion),来确定ARIMA模型的参数。

步骤3:模型检验,对拟合的模型进行残差分析,检查模型的残差是否符合白噪声假设,如不符合则重复上述步骤。

1.2 DEA模型

考虑有 n 个决策单元(Decision-Making Unit, DMU),每个DMU包括公平性投入指标 X_a^{equity} ($a=1, \dots, A$)和效率性投入指标 $x_b^{\text{efficiency}}$ ($b=1, \dots, B$),以及可再生能源电力产出指标 Y_r^{renew} ($r=1, \dots, R$)和不可再生能源电力产出指标 Y_s^{nonrenew} ($s=1, \dots, S$),DMU $_p$ 的投入产出可表示为

($X_{ap}^{\text{equity}}, X_{bp}^{\text{efficiency}}, Y_{rp}^{\text{renew}}, Y_{sp}^{\text{nonrenew}}$)。本文全面综合考虑各省域的特征差异,涵盖了公平性和效率性投入指标,以及可再生和不可再生能源发电量产出指标,在确保全国总发电量不减少的前提下,以最大化全国的可再生能源发电比例为目标,提出了新的各省域可再生能源配额分配模型,如模型(2)所示。

在模型(2)中, $\text{DMU}_p(p=1, \dots, n)$ 为被考虑单元, λ_j^p 为当 DMU_p 被考虑时 DMU_j 的乘数变量, θ_{lr}^p 、 θ_{2s}^p 为可再生能源发电量和不可再生能源发电量变化的比例, α 为整体的可再生能源发电量占全部发电量的比例。约束(2.2)、(2.3)分别为公平性和效率性投入约束。约束(2.4)、(2.5)分别为可再生能源发电量和不可再生能源发电量产出约束。约束(2.6)表示模型(2)基于规模报酬可变(Variable Re-

turns to Scale, VRS)假设。约束(2.7)确保了总发电量不减少。约束(2.8)为 α 的计算表达式。约束(2.9)表示可再生能源发电量不可减少。约束(2.10)中, β 为一个可设定的参数,在 $\beta=1$ 时表示不可再生能源发电量也不可减少;当 $\beta<1$ 时,可理解为在保持总发电量不减少的同时,不可再生能源发电量的 $1-\beta$ 部分可以转化为可再生能源发电量,不可再生能源发电量的变化下界为 $\beta Y_{sp}^{\text{nonrenew}}$ 。当一个区域努力提升自身区域的可再生能源发电量时,其不可再生能源应达到的发电量可以适当的减少,即鼓励可再生能源发电。值得说明的是,参数 β 是一个可变的边界,表示不可再生能源发电量转换为可再生能源发电量的最大程度,或许并不会完全进行转化。

$$\text{Max } \alpha \quad (2.1)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j^p X_{aj}^{\text{equity}} \leq X_{ap}^{\text{equity}} \quad \forall a, p \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^p X_{bj}^{\text{efficiency}} \leq X_{bp}^{\text{efficiency}} \quad \forall b, p \quad (2.3)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^p Y_{rj}^{\text{renew}} \geq \theta_{lr}^p Y_{rp}^{\text{renew}} \quad \forall r, p \quad (2.4)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^p Y_{sj}^{\text{nonrenew}} \geq \theta_{2s}^p Y_{sp}^{\text{nonrenew}} \quad \forall s, p \quad (2.5)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^p = 1 \quad \forall p \quad (2.6) \quad (2)$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \theta_{lr}^p Y_{rp}^{\text{renew}} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \theta_{2s}^p Y_{sp}^{\text{nonrenew}} \geq \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R Y_{rp}^{\text{renew}} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S Y_{sp}^{\text{nonrenew}} \quad (2.7)$$

$$\frac{\sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \theta_{lr}^p Y_{rp}^{\text{renew}}}{\sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \theta_{lr}^p Y_{rp}^{\text{renew}} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \theta_{2s}^p Y_{sp}^{\text{nonrenew}}} = \alpha \quad (2.8)$$

$$\theta_{lr}^p \geq 1, \quad \forall r, p \quad (2.9)$$

$$\theta_{2s}^p \geq \beta \geq 0, \quad \forall s, p \quad (2.10)$$

$$\lambda_j^p \geq 0, \quad \forall j, p \quad (2.11)$$

当模型(2)得到最优解时,在当前生产可能集和生产技术的条件下,整体最大能达到的可再生能源发电量占全部发电量的比例为 α^* ,区域 p 最优的可再生能源发电量为 $\sum_{r=1}^R \theta_{lr}^{p*} Y_{rp}^{\text{renew}}$,最优的不可再生能源发电量为 $\sum_{s=1}^S \theta_{2s}^{p*} Y_{sp}^{\text{nonrenew}}$,最优的可再生能源发电配额如式(3)所示。

$$\alpha^* = \frac{\sum_{r=1}^R \theta_{lr}^{p*} Y_{rp}^{\text{renew}}}{\sum_{r=1}^R \theta_{lr}^{p*} Y_{rp}^{\text{renew}} + \sum_{s=1}^S \theta_{2s}^{p*} Y_{sp}^{\text{nonrenew}}} \quad (3)$$

2 实证研究

2.1 数据与样本

本节将用模型(2)探讨中国31个省域的可再生能源电力配额分配方案。本文实证研究部分选取的指标如表1所示。投入指标分为公平性指标和效

率性指标。其中,选取 GDP 和人口作为公平性指标。GDP 是衡量一个地区经济规模和发展水平的重要指标之一,较高的 GDP 可能代表着更强大的经济实力和资源投入能力;而人口影响能源的需求和使用,较多的人口意味着更高的能源需求,因此选取 GDP 和人口作为一种公平性考量。效率性指标则选取水电发电装机容量、风电发电装机容量、太阳能发电装机容量和火电发电装机容量,通过考虑发电装机容量,可以测量一个地区在可再生能源和不可再生能源方面的能源生产潜力和效率。产出指标分为可再生能源指标和不可再生能源指标。其中,可再生能源指标包括水电发电量、风电发电量和太阳能发电量,不可再生能源指标则选取了火电发电量。仅少数地区存在核电发电,故本文未选取核电发电相关指标。

表 2 为 2007—2022 年中国各区域相应指标的描述性统计数据,其中 GDP 和人口数据来源于《中

表 1 投入和产出指标 Table 1 Input and output indicators			
指标	指标类型	指标名称	单位
投入指标	公平性指标	GDP	亿元
		人口	万人
	效率性指标	水电发电装机容量	万 kW
		风电发电装机容量	万 kW
		太阳能发电装机容量	万 kW
		火电发电装机容量	万 kW
产出指标	可再生能源指标	水电发电量	亿 kWh
		风电发电量	亿 kWh
		太阳能发电量	亿 kWh
	不可再生能源指标	火电发电量	亿 kWh

国统计年鉴》,2021—2022 年发电量数据来源于《中国能源统计年鉴》,2021—2022 年发电装机容量来源于《中国电力统计年鉴》,其余数据来源于《中国电力年鉴》。太阳能发电的数据统计自 2012 年开始。

表2 中国31个省域的投入产出指标描述性统计数据(2007—2022年)											
Table 2 Descriptive statistics of input-output indicators for China's 31 provincial regions (2007—2022)											
变量		投入						产出			
		人口 /万人	GDP /亿元	火电发电机 装机容量/ 万kW	风电发电机 装机容量/ 万kW	水电发电机 装机容量/ 万kW	太阳能发电 装机容量/ 万kW	火电 发电量/ 亿kWh	风电 发电量/ 亿kWh	水电 发电量/ 亿kWh	太阳能 发电量/ 亿kWh
2007年	Mean	4 206.23	8 891.12	1 664.68	13.55	478.10		877.71	1.84	152.04	
	Std	2 706.20	7 604.15	1 465.94	22.84	588.93		745.53	3.14	223.52	
	Max	9 660.00	31 084.40	5 414.00	108.00	2 402.00		2 709.00	14.40	933.00	
	Min	289.00	342.19	1.00	0.00	0.00		0.01	0.00	0.00	
2008年	Mean	4 239.81	10 555.48	1 944.74	27.06	556.68		904.13	4.22	182.40	
	Std	2 725.71	8 855.17	1 579.63	46.68	698.08		765.76	7.58	278.10	
	Max	9 893.00	35 696.46	5 593.00	230.00	2 905.00		2 735.00	37.40	1 199.00	
	Min	292.00	395.91	8.00	0.00	0.00		0.13	0.00	0.00	
2009年	Mean	4 272.35	11 783.99	2 100.29	56.78	633.23		971.49	8.91	184.45	
	Std	2 748.27	9 730.40	1 646.79	120.21	781.98		799.20	18.32	281.37	
	Max	10 130.00	39 482.56	5 886.00	642.00	3 001.00		2 858.00	97.40	1 167.00	
	Min	296.00	441.36	10.00	0.00	0.00		1.31	0.00	0.00	
2010年	Mean	4 302.74	14 098.13	2 289.23	95.35	696.97		1 102.22	15.94	221.55	
	Std	2 764.98	11 401.35	1 765.44	189.09	871.35		897.80	32.94	321.79	
	Max	10 441.00	46 013.06	6 002.00	973.00	3 085.00		3 305.00	173.60	1 246.00	
	Min	300.00	507.46	31.00	0.00	0.00		3.82	0.00	0.00	
2011年	Mean	4 323.94	16 820.68	2 478.68	149.08	751.58		1 258.18	23.84	215.57	
	Std	2 769.45	13 216.29	1 886.60	283.57	958.80		997.71	44.47	335.84	
	Max	10 505.00	53 210.28	6 480.00	1 457.00	3 386.00		3 731.00	227.00	1 261.00	
	Min	303.00	605.83	37.00	0.00	0.00		4.64	0.00	0.00	
2012年	Mean	4 348.03	18 598.45	2 644.16	198.19	804.68	11.00	1 266.42	33.16	275.95	1.15
	Std	2 778.80	14 325.99	1 965.13	333.10	1 062.42	26.93	1 028.28	56.14	411.16	2.89
	Max	10 594.00	57 067.92	6 982.00	1 693.00	3 964.00	136.00	3 943.00	284.00	1 545.00	14.00
	Min	308.00	701.03	37.00	0.00	0.00	0.00	5.00	0.00	0.00	0.00
2013年	Mean	4 403.10	20 322.88	2 806.81	246.80	904.65	51.25	1 361.81	44.60	287.76	2.70
	Std	2 857.06	15 597.43	2 107.75	375.36	1 301.08	109.03	1 084.84	72.23	478.50	6.15

续表 2

变量		投入						产出			
		人口 /万人	GDP /亿元	火电发电机 装机容量/ 万 kW	风电发电机 装机容量/ 万 kW	水电发电机 装机容量/ 万 kW	太阳能发电 装机容量/ 万 kW	火电 发电量/ 亿 kWh	风电 发电量/ 亿 kWh	水电 发电量/ 亿 kWh	太阳能 发电量/ 亿 kWh
2007年	Max	11 270.00	62 163.97	7 555.00	1 854.00	5 266.00	429.80	4 174.00	368.20	2 023.00	28.00
	Min	317.00	807.67	39.00	0.00	0.00	0.00	6.00	0.00	0.00	0.00
	Mean	4 432.81	22 075.79	2 979.48	311.55	983.48	80.20	1 363.68	51.54	342.05	7.58
	Std	2 886.94	16 987.71	2 191.25	439.24	1 509.21	135.10	1 097.63	76.69	609.85	14.87
2008年	Max	11 489.00	67 809.85	7 727.00	2 100.00	6 293.00	517.30	4 098.00	386.20	2 578.00	58.00
	Min	325.00	920.83	40.00	1.00	0.00	0.00	3.00	0.10	0.00	0.00
	Mean	4 454.74	23 315.09	3 243.71	421.72	1 030.77	136.06	1 364.71	59.87	358.92	12.75
	Std	2 914.72	18 218.96	2 437.07	553.57	1 629.17	186.46	1 165.41	80.93	641.97	21.24
2009年	Max	11 678.00	72 812.55	8 754.00	2 425.00	6 939.00	609.60	4 484.00	408.00	2 767.00	75.50
	Min	330.00	1 026.39	40.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
	Mean	4 483.97	25 163.55	3 422.42	475.83	1 071.29	246.16	1 395.94	77.65	379.00	21.44
	Std	2 951.66	20 103.05	2 560.36	582.10	1 695.21	249.85	1 217.49	95.57	678.38	25.72
2010年	Max	11 908.00	80 854.91	9 540.00	2 557.00	7 246.00	893.00	4 671.00	464.00	2 989.00	90.00
	Min	340.00	1 151.41	41.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00
	Mean	4 509.00	27 327.10	3 564.29	526.65	1 108.29	417.39	1 533.74	99.08	399.29	34.30
	Std	2 984.41	22 186.91	2 708.60	596.73	1 768.51	343.41	1 371.03	114.09	718.13	35.02
2011年	Max	12 141.00	89 705.23	10 335.00	2 670.00	7 714.00	1 052.00	5 546.69	544.97	3 023.56	116.85
	Min	349.00	1 310.92	40.00	1.00	0.00	12.00	1.62	3.47	0.07	0.56
	Mean	4 526.13	29 506.69	3 690.68	594.39	1 137.42	562.35	1 643.97	118.06	410.60	57.26
	Std	3 013.21	23 905.15	2 775.18	631.20	1 819.70	434.38	1 400.00	132.64	754.40	47.49
2012年	Max	12 348.00	97 277.77	10 367.00	2 868.00	7 824.00	1 361.00	5 524.79	630.99	3 162.67	136.83
	Min	354.00	1 477.63	42.00	1.00	0.00	40.00	2.93	0.14	0.15	2.09
	Mean	4 542.10	31 784.94	3 837.32	674.74	1 155.00	658.71	1 683.92	130.98	434.81	72.40
	Std	3 034.21	25 949.28	2 893.68	654.71	1 843.08	496.44	1 393.95	140.84	782.75	58.17
2013年	Max	12 489.00	107 671.07	10 713.00	2 920.00	7 846.00	1 619.00	5 292.91	665.80	3 316.01	176.31
	Min	361.00	1 697.82	42.00	1.00	0.00	51.00	3.88	0.16	0.12	3.33
	Mean	4 548.81	32 658.55	4 020.13	908.61	1 194.48	818.06	1 719.43	150.48	451.74	84.15
	Std	3 053.97	26 661.81	3 034.15	852.85	1 915.44	641.16	1 410.30	151.59	837.81	66.39
2014年	Max	12 624.00	110 760.94	11 135.00	3 786.00	7 892.00	2 272.00	5 141.56	726.29	3 541.38	210.56
	Min	366.00	1 902.74	43.00	1.00	0.00	62.00	4.12	0.14	0.10	4.16
	Mean	4 550.32	36 701.40	4 185.13	1 060.26	1 261.06	988.94	1 872.86	211.65	446.33	105.08
	Std	3 060.91	29 972.16	3 174.72	916.56	2 067.33	829.47	1 513.61	207.81	863.17	85.26
2015年	Max	12 684.00	124 369.70	11 599.00	3 996.00	8 887.00	3 343.00	5 281.04	967.21	3 724.46	310.45
	Min	366.00	2 080.20	43.00	3.00	0.00	63.00	3.48	0.14	0.21	4.83
	Mean	4 547.58	38 821.36	4 301.06	1 179.48	1 335.71	1 266.68	1 899.61	246.02	450.73	137.83
	Std	3 059.50	31 350.73	3 259.21	1 019.90	2 203.47	1 066.68	1 530.16	226.06	895.65	118.67
2016年	Max	12 657.00	129 118.60	11 753.00	4 568.00	9 746.00	4 270.00	5 254.82	1 077.09	3 886.56	462.13
	Min	364.00	2 132.60	43.00	3.00	0.00	69.00	3.19	0.90	0.14	5.56
	Mean	4 547.58	38 821.36	4 301.06	1 179.48	1 335.71	1 266.68	1 899.61	246.02	450.73	137.83
	Std	3 059.50	31 350.73	3 259.21	1 019.90	2 203.47	1 066.68	1 530.16	226.06	895.65	118.67
2017年	Max	12 657.00	129 118.60	11 753.00	4 568.00	9 746.00	4 270.00	5 254.82	1 077.09	3 886.56	462.13
	Min	364.00	2 132.60	43.00	3.00	0.00	69.00	3.19	0.90	0.14	5.56
	Mean	4 547.58	38 821.36	4 301.06	1 179.48	1 335.71	1 266.68	1 899.61	246.02	450.73	137.83
	Std	3 059.50	31 350.73	3 259.21	1 019.90	2 203.47	1 066.68	1 530.16	226.06	895.65	118.67
2018年	Max	12 657.00	129 118.60	11 753.00	4 568.00	9 746.00	4 270.00	5 254.82	1 077.09	3 886.56	462.13
	Min	364.00	2 132.60	43.00	3.00	0.00	69.00	3.19	0.90	0.14	5.56
	Mean	4 547.58	38 821.36	4 301.06	1 179.48	1 335.71	1 266.68	1 899.61	246.02	450.73	137.83
	Std	3 059.50	31 350.73	3 259.21	1 019.90	2 203.47	1 066.68	1 530.16	226.06	895.65	118.67
2019年	Max	12 657.00	129 118.60	11 753.00	4 568.00	9 746.00	4 270.00	5 254.82	1 077.09	3 886.56	462.13
	Min	364.00	2 132.60	43.00	3.00	0.00	69.00	3.19	0.90	0.14	5.56
	Mean	4 547.58	38 821.36	4 301.06	1 179.48	1 335.71	1 266.68	1 899.61	246.02	450.73	137.83
	Std	3 059.50	31 350.73	3 259.21	1 019.90	2 203.47	1 066.68	1 530.16	226.06	895.65	118.67
2020年	Max	12 657.00	129 118.60	11 753.00	4 568.00	9 746.00	4 270.00	5 254.82	1 077.09	3 886.56	462.13
	Min	364.00	2 132.60	43.00	3.00	0.00	69.00	3.19	0.90	0.14	5.56
	Mean	4 547.58	38 821.36	4 301.06	1 179.48	1 335.71	1 266.68	1 899.61	246.02	450.73	137.83
	Std	3 059.50	31 350.73	3 259.21	1 019.90	2 203.47	1 066.68	1 530.16	226.06	895.65	118.67
2021年	Max	12 657.00	129 118.60	11 753.00	4 568.00	9 746.00	4 270.00	5 254.82	1 077.09	3 886.56	462.13
	Min	364.00	2 132.60	43.00	3.00	0.00	69.00	3.19	0.90	0.14	5.56
	Mean	4 547.58	38 821.36	4 301.06	1 179.48	1 335.71	1 266.68	1 899.61	246.02	450.73	137.83
	Std	3 059.50	31 350.73	3 259.21	1 019.90	2 203.47	1 066.68	1 530.16	226.06	895.65	118.67
2022年	Max	12 657.00	129 118.60	11 753.00	4 568.00	9 746.00	4 270.00	5 254.82	1 077.09	3 886.56	462.13
	Min	364.00	2 132.60	43.00	3.00	0.00	69.00	3.19	0.90	0.14	5.56
	Mean	4 547.58	38 821.36	4 301.06	1 179.48	1 335.71	1 266.68	1 899.61	246.02	450.73	137.83
	Std	3 059.50	31 350.73	3 259.21	1 019.90	2 203.47	1 066.68	1 530.16	226.06	895.65	118.67

表 2 中,“Mean”为均值,“Std”为标准差,“Max”为最大值,“Min”为最小值。根据表 2,可知:

1)从 2007 年到 2022 年,中国的发电装机容量和发电量总体呈现上升趋势,各地区火电装机容量均值从 2007 年的 1 664.68 万 kW 增长到 2022 年的 4 301.06 万 kW,火电发电量均值从 877.71 亿 kWh 增长到 1 899.61 亿 kWh。风电、水电装机容量均值分别从 2007 年的 13.55 万 kW、478.10 万 kW 增长

到 2022 年的 1 179.48 万 kW、1 335.71 万 kW,风电、水电发电量均值分别从 1.84 亿 kWh、152.04 亿 kWh 增长到 246.02 亿 kWh、450.73 亿 kWh。太阳能装机容量均值从 2012 年的 11.00 万 kW 增长到 2022 年的 1 266.68 万 kW,发电量均值从 1.15 亿 kWh 增长到 137.83 亿 kWh。

2)可再生能源装机容量和发电量占比显著提高。2007 年,可再生能源发电(水电、风电、太阳能)

装机容量占总装机容量的不到 23%,2022 年提高到超过 46%。2007 年,可再生发电量占总发电量不到 15%,2022 年增幅超过 30%。

3)标准差数据显示,各类发电方式的装机容量和发电量存在较大的地区差异,随着总量的增加差距也越来越大。发电装机容量方面,火电、水电、风电和太阳能装机容量的标准差在研究期内都有不同程度的增加,说明装机分布的省际差异在扩大。其中,太阳能装机容量标准差从 2012 年的 26.93 万 kW 增加到 2022 年的 1 066.68 万 kW,增幅最大。发电量方面,火电、水电和太阳能发电量的标准差都在增加,而风电发电量标准差增幅最大,从 2007 年的 3.14 亿 kWh 增至 2022 年的 226.06 亿 kWh。

综合来看,2007—2022 年中国电力结构不断优化,可再生能源占比显著上升,但化石燃料电力仍占主导地位,未来脱碳转型任重道远。

2.2 数据预测

基于 2007 年到 2022 年的历史数据,通过 ARIMA 模型,本文预测了 2022 年后未来五年即 2023 年到 2027 年的各指标数据。各地区相关指标的历史数据及预测结果分别如图 1~图 10 所示。通过图 1~图 10 可以观察到,各地区的发电量呈上涨趋势。预测数据显示,从 2023 年开始,各省火电装机容量和发电量预计呈现稳步增长的趋势。到 2027 年,中国火电装机容量将达到 159 059 万 kW,发电量将达到 67 498 亿 kWh,增长速度从 2023 年到 2027 年逐年呈现放缓的趋势,表明未来火电的增长可能会趋于平稳。而风电装机容量和发电量将保持较快的增长速度,到 2027 年分别达到 52 145 万 kW

和 12 040 亿 kWh,未来风电在电力结构中的比重将进一步提高。水电装机容量和发电量相对增长较为平稳,在电力结构中的比重将保持相对稳定。太阳能装机容量和发电量增长最为迅速,到 2027 年分别达到 59 925 万 kW 和 7 110 亿 kWh。增长速度非常快,表明太阳能发电将在未来电力结构中发挥更重要的作用。

此外,值得注意的是,可再生能源发电装机容量的提升并不必然导致发电量的相应增加。这是因为可再生能源发电量受到多种自然条件因素的影响。在本研究中,由于受外部因素的制约,预测的装机容量增加,相应发电量的增长存在相对有限的情况。

总体而言,预测结果显示,2023—2027 年我国电力结构呈现出以下特点:不可再生能源(火电)仍将占据主导地位,但增速放缓;可再生能源(水电、风电、太阳能)快速发展,占比不断提高,且水电保持相对稳定的地位,而风电和太阳能的发展将大力提速。

2.3 配额分配分析

本文以 2027 年的预测数据为例,展开关于各省域可再生能源发电配额的分配研究。基于 ARIMA 方法预测的各指标数据,通过模型(2)进行可再生能源发电比例的调配,使得全国整体可再生能源发电占比最大。结果如表 3 和 4 所示。其中表 3 为 $\beta=1$ 时,各区域的发电额度变化以及可再生能源发电量占总发电量的比例变化情况。设定 β 值小于 1 时,意味着努力提升可再生能源发电量的同时,不可再生能源发电量会相应地减少,即鼓励可再生能

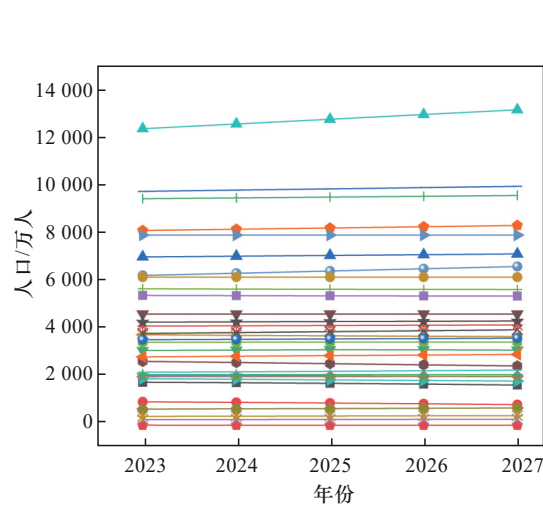


图 1 人口预测数据(2023—2027 年)
Fig.1 Forecast data for population (2023—2027)

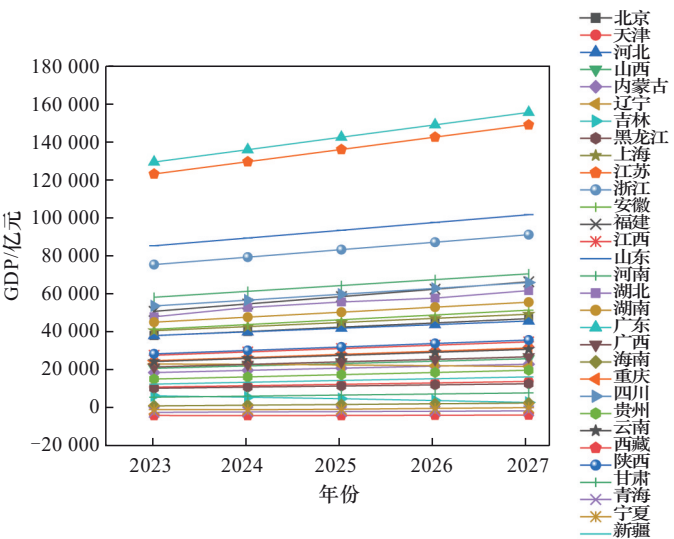


图 2 GDP 预测数据(2023—2027 年)
Fig.2 Forecast data for GDP (2023—2027)

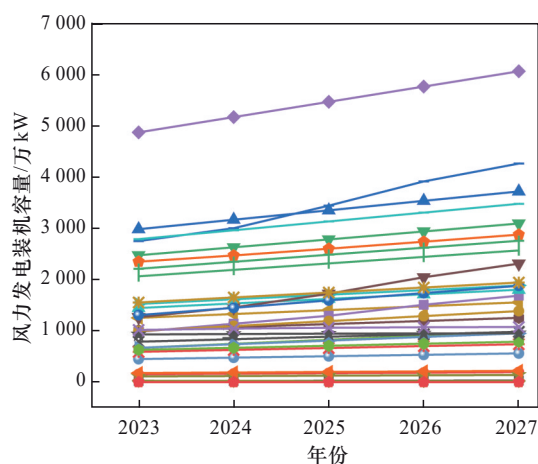


图3 风电发电装机容量预测数据(2023—2027年)

Fig.3 Forecast data for installed wind power capacity(2023—2027)

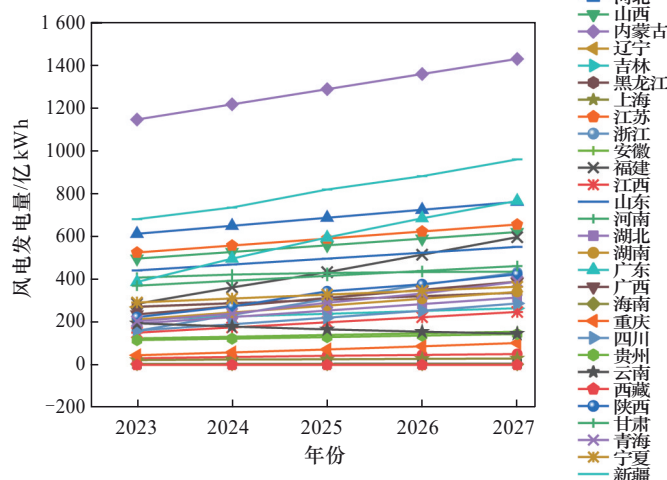


图4 风电发电量预测数据(2023—2027年)

Fig.4 Forecast data for wind power generation (2023—2027)

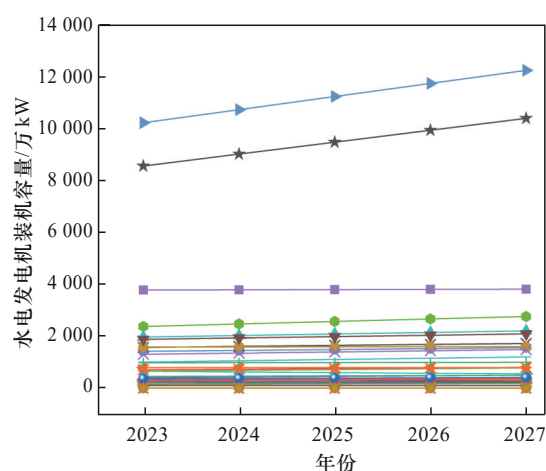


图5 水电发电装机容量预测数据(2023—2027年)

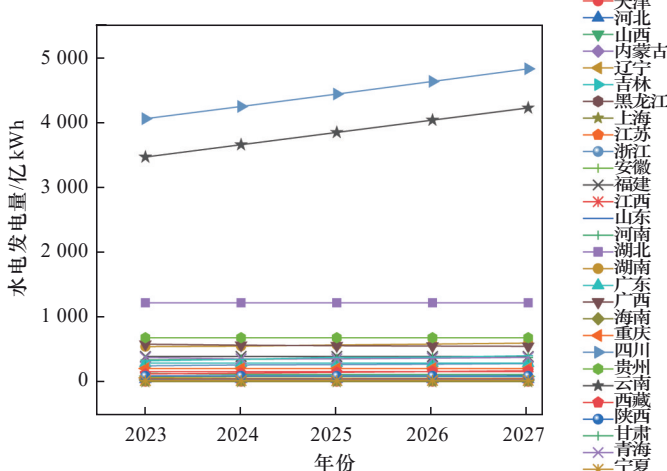
Fig.5 Forecast data for installed hydropower capacity
(2023—2027)

图6 水电发电量预测数据(2023—2027年)

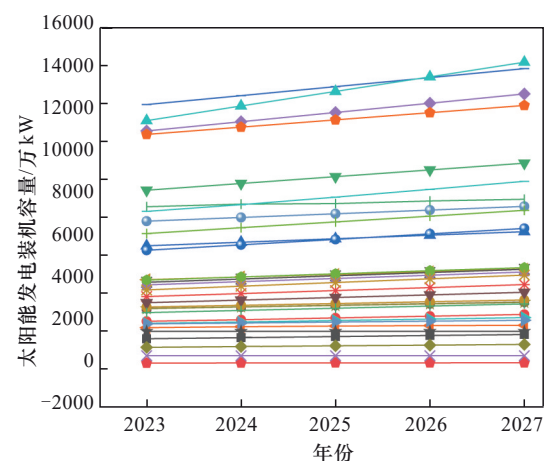
Fig.6 Forecast data for hydropower generation
(2023—2027)

图7 太阳能发电装机容量预测数据(2023—2027年)

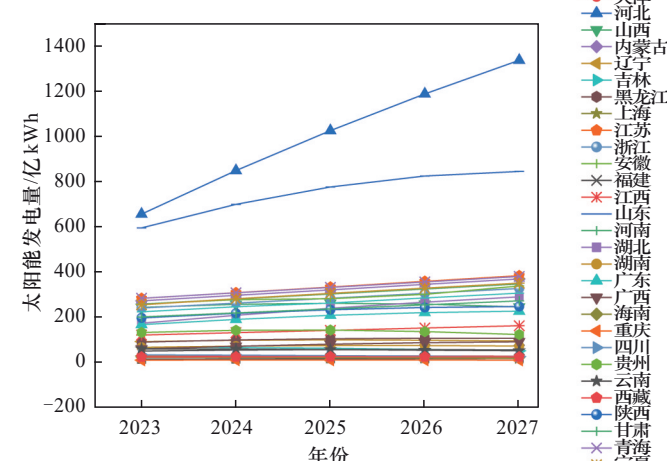
Fig.7 Forecast data for installed solar power capacity
(2023—2027)

图8 太阳能发电量预测数据(2023—2027年)

Fig.8 Forecast data for solar power generation (2023—2027)

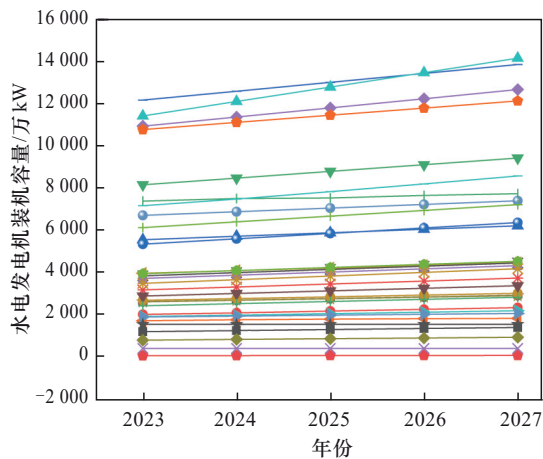


图9 火电发电装机容量预测数据(2023—2027年)

Fig.9 Forecast data for installed thermal power capacity (2023—2027)

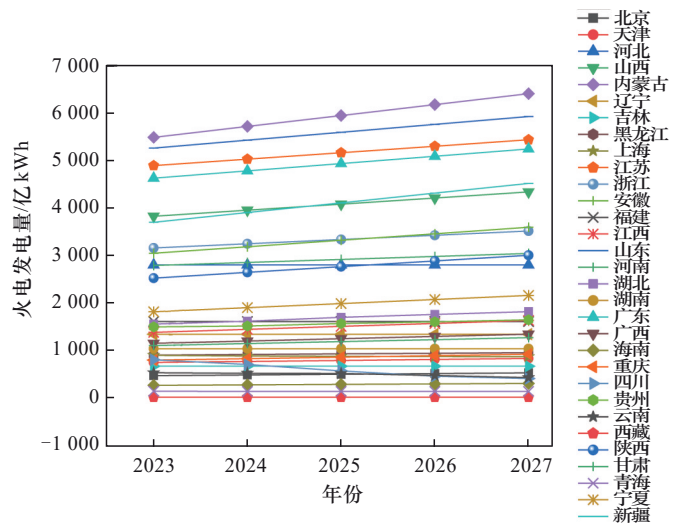


图10 火电发电量预测数据(2023—2027年)

Fig.10 Forecast data for thermal power generation (2023—2027)

源发电。本文以 $\beta=0.8$ 和 $\beta=0.9$ 为例,表4和表5为 $\beta=0.9$ 和 $\beta=0.8$ 时的配额分配情况。

表3中, $\beta=1$ 意味着可再生能源发电量和不可再生能源发电量均不可减少,这种情况下,可再生能源发电量占总发电量的比例 α 由分配前的33.88%提高至优化分配后的34.60%,可再生能源发电量由34 588.490亿kWh提升至35 716.528亿kWh,而不可再生能源发电量则保持不变。其中,大部分区域(25个)的可再生能源发电比例保持不变,表明这些区域在当前生产可能集中已处于生产前沿,其当前的可再生能源发电配额是适当的。有6个区域(辽宁、江西、河南、湖北、湖南、广西)的可再生能源发电配额有所提升,幅度在0.9%~5.7%,表明这些省份的可再生能源发电在当前生产水平下还存在进步空间,其可再生能源发电量需进一步增加。河南的配额变化量最大,改进空间最大,需大力发展可再生能源发电,提升可再生能源发电量。西藏和青海的可再生能源配额达到90%以上,处于领先水平。四川、云南紧随其后,而四川更是可以进一步增加可再生能源发电量,其配额在优化后应达到90.2%。湖北和湖南的可再生能源配额为50%左右,已经处于较高水平,但两省仍存在提升空间,其可再生能源发电量还可进一步增加至54.9%和50.4%。

表4和表5中,分别取 $\beta=0.9$ 和 $\beta=0.8$,意味着可再生能源发电量不可减少,而各区域不可再生能源发电额度的10%和20%可用于“贴补”可再生能源发电。 $\beta=0.9$ 的情况下, α 由分配前的

33.88%提高至优化分配后的35.30%;而 $\beta=0.8$ 的情况下, α 更是进一步提高至35.51%。

取 $\beta=0.9$ 时,有16个区域的可再生能源发电配额没有变化,15个区域的配额得到了优化调整,包括湖南、辽宁、西藏、北京、云南、青海、江苏、安徽、陕西、山西、贵州、江西、广西、河南和湖北。其中湖北的配额变化最大,达到7.5%,其配额从50.2%改进到了57.6%,可再生能源发电量应从1 822.520亿kWh增加到2 215.503亿kWh,而不可再生能源发电量应从1 808.404亿kWh下降到1 627.563亿kWh。值得注意的是西藏、湖南和辽宁的配额变化,西藏的配额虽然已经达到了98.6%,但其不可再生能源发电量应该进一步减少。而湖南和辽宁的配额变化分别为-7.7%和-2.4%,且其不可再生能源发电量还需增加,造成这两个区域配额变化的主要原因是“全国一盘棋”的额度分配策略。本文所提出的方法主要目标为我国整体的可再生能源发电比例最大化,并且要保证我国总发电量不减少,在此目标下,部分省份的不可再生能源发电量被调高,从而保证足够的发电量,而不是追求于局部区域的配额最优化。

取 $\beta=0.8$ 时,可再生能源发电配额没有变化的区域数变为了21个,10个区域的配额发生了变化,包括湖南、辽宁、安徽、山西、陕西、广西、湖北、河南、江西和贵州,变化幅度为-8%~10.2%。湖南和辽宁的配额变化依旧为负,而贵州的配额调整最大,达到了10.2%,其可再生能源发电量从943.398亿kWh提升至1 152.318亿kWh,且不

表 3 2027 年各省域可再生能源发电配额的分配情况($\beta=1$)
Table 3 Allocation of renewable energy generation quotas for each province by 2027($\beta=1$)

省域	预测可再生能源 发电量/亿 kWh	分配后可再生能 源发电量/ 亿 kWh	预测不可再生能 源发电量/ 亿 kWh	分配后不可再生 能源发电量/ 亿 kWh	预测可再生能 源发电配额	分配后可再生 能源发电配额	配额变化
北京	29.740	29.740	517.093	517.093	0.054	0.054	0.000
天津	75.472	75.472	821.293	821.293	0.084	0.084	0.000
河北	2 135.839	2 135.839	2 794.448	2 794.448	0.433	0.433	0.000
山西	899.435	899.435	4 334.321	4 334.321	0.172	0.172	0.000
内蒙古	1 840.065	1 840.065	6 406.093	6 406.093	0.223	0.223	0.000
辽宁	481.639	598.000	1 332.231	1 332.231	0.266	0.310	0.044
吉林	391.591	391.591	657.682	657.682	0.373	0.373	0.000
黑龙江	488.538	488.538	943.907	943.907	0.341	0.341	0.000
上海	45.041	45.041	860.134	860.134	0.050	0.050	0.000
江苏	1 078.247	1 078.247	5 433.920	5 433.920	0.166	0.166	0.000
浙江	1 033.531	1 033.531	3 508.920	3 508.920	0.228	0.228	0.000
安徽	580.465	580.465	3 588.387	3 588.387	0.139	0.139	0.000
福建	1 038.488	1 038.488	1 601.130	1 601.130	0.393	0.393	0.000
江西	560.133	628.807	1 622.240	1 622.240	0.257	0.279	0.023
山东	1 423.422	1 423.422	5 925.093	5 925.093	0.194	0.194	0.000
河南	890.544	1 204.044	3 035.560	3 035.560	0.227	0.284	0.057
湖北	1 822.520	2 197.430	1 808.404	1 808.404	0.502	0.549	0.047
湖南	1 006.344	1 044.509	1 027.430	1 027.430	0.495	0.504	0.009
广东	1 278.094	1 278.094	5 239.893	5 239.893	0.196	0.196	0.000
广西	1 024.581	1 241.010	1 334.053	1 334.053	0.434	0.482	0.048
海南	43.800	43.800	293.373	293.373	0.130	0.130	0.000
重庆	312.394	312.394	910.867	910.867	0.255	0.255	0.000
四川	5 147.780	5 147.780	396.923	396.923	0.928	0.928	0.000
贵州	943.398	943.398	1 636.712	1 636.712	0.366	0.366	0.000
云南	4 428.171	4 428.171	418.513	418.513	0.914	0.914	0.000
西藏	189.934	189.934	2.792	2.792	0.986	0.986	0.000
陕西	756.597	756.597	2 997.507	2 997.507	0.202	0.202	0.000
甘肃	1 105.827	1 105.827	1 260.373	1 260.373	0.467	0.467	0.000
青海	1 140.991	1 140.991	124.953	124.953	0.901	0.901	0.000
宁夏	732.089	732.089	2 149.880	2 149.880	0.254	0.254	0.000
新疆	1 663.777	1 663.777	4 513.454	4 513.454	0.269	0.269	0.000

可再生能源发电量应从 1 636. 712 亿 kWh 减少至 1 309. 370 亿 kWh。

对比 $\beta=0.8$ 、 $\beta=0.9$ 和 $\beta=1$ 三种不同配置情况,如图 11 所示,由于当 $\beta=0.8$ 和 $\beta=0.9$ 时,可以将各省域内的不可再生能源发电量额度转化为可再生能源发电量, α 也由 $\beta=1$ 时的 34. 60% 提升到 $\beta=0.9$ 时的 35. 30%,而在 $\beta=0.8$ 时更是进一步提升至 35. 51%。与 $\beta=1$ 的情况相比, $\beta=0.9$ 时各个区域的配额也发生了相应的变化,其中江西、湖北、广西、河南的配额相对进一步提高,而湖南和辽宁则有所降低。这种“举全国之力”的配置方式,使得总体可再生能源发电占比达到更高

水平。

3 结束语

可再生能源发电是实现碳中和目标的关键途径。通过引入可再生能源电力配额制度,有利于推动我国能源结构的绿色低碳转型,然而,科学合理地配置各地区的可再生能源电力配额,是制度有效实施的重中之重。针对我国电力行业现状及“双碳”目标的约束需求,本文设计了一种用以优化可再生能源电力配额的分配机制。首先,引入时间序列预测,通过 ARIMA 模型对影响可再生能源发展的关键指标进行预测,为未来配额分配奠定了基

表 4 2027 年各省域可再生能源发电配额的分配情况($\beta=0.9$)
Table 4 Allocation of renewable energy generation quotas for each province by 2027($\beta=0.9$)

省域	预测可再生能源 发电量/亿 kWh	分配后可再生能 源发电量/ 亿 kWh	预测不可再生能 源发电量/亿 kWh	分配后不可再生 能源发电量/ 亿 kWh	预测可再生能 源发电配额	分配后可再生 能源发电配额	配额变化
北京	29.740	29.740	517.093	465.384	0.054	0.060	0.006
天津	75.472	75.472	821.293	821.293	0.084	0.084	0.000
河北	2 135.839	2 135.839	2 794.448	2 794.448	0.433	0.433	0.000
山西	899.435	1 007.075	4 334.321	3 900.889	0.172	0.205	0.033
内蒙古	1 840.065	1 840.065	6 406.093	6 406.093	0.223	0.223	0.000
辽宁	481.639	598.000	1 332.231	1 879.890	0.266	0.241	-0.024
吉林	391.591	391.591	657.682	657.682	0.373	0.373	0.000
黑龙江	488.538	488.538	943.907	943.907	0.341	0.341	0.000
上海	45.041	45.041	860.134	860.134	0.050	0.050	0.000
江苏	1 078.247	1 095.245	5 433.920	4 890.528	0.166	0.183	0.017
浙江	1 033.531	1 033.531	3 508.920	3 508.920	0.228	0.228	0.000
安徽	580.465	604.106	3 588.387	3 229.548	0.139	0.158	0.018
福建	1 038.488	1 038.488	1 601.130	1 601.130	0.393	0.393	0.000
江西	560.133	659.293	1 622.240	1 460.016	0.257	0.311	0.054
山东	1 423.422	1 423.422	5 925.093	5 925.093	0.194	0.194	0.000
河南	890.544	1 217.184	3 035.560	2 879.797	0.227	0.297	0.070
湖北	1 822.520	2 215.503	1 808.404	1 627.563	0.502	0.576	0.075
湖南	1 006.344	1 045.017	1 027.430	1 457.357	0.495	0.418	-0.077
广东	1 278.094	1 278.094	5 239.893	5 239.893	0.196	0.196	0.000
广西	1 024.581	1 251.265	1 334.053	1 278.351	0.434	0.495	0.060
海南	43.800	43.800	293.373	293.373	0.130	0.130	0.000
重庆	312.394	312.394	910.867	910.867	0.255	0.255	0.000
四川	5 147.780	5 147.780	396.923	396.923	0.928	0.928	0.000
贵州	943.398	1 047.858	1 636.712	1 473.041	0.366	0.416	0.050
云南	4 428.171	4 428.171	418.513	376.662	0.914	0.922	0.008
西藏	189.934	189.934	2.792	2.513	0.986	0.987	0.001
陕西	756.597	785.722	2 997.507	2 697.756	0.202	0.226	0.024
甘肃	1 105.827	1 105.827	1 260.373	1 260.373	0.467	0.467	0.000
青海	1 140.991	1 140.991	124.953	112.458	0.901	0.910	0.009
宁夏	732.089	732.089	2 149.880	2 149.880	0.254	0.254	0.000
新疆	1 663.777	1 663.777	4 513.454	4 513.454	0.269	0.269	0.000

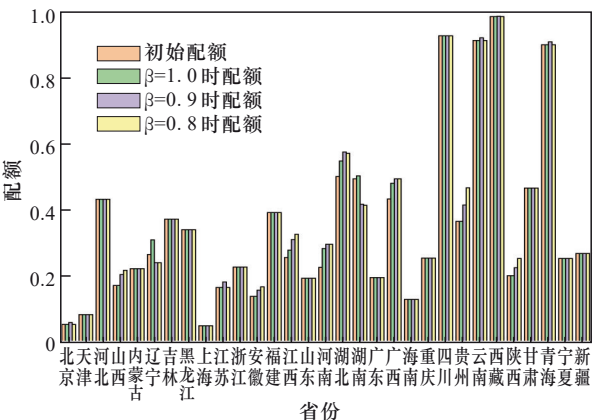


图 11 2027 年各省域可再生能源发电配额分配变化情况
Fig.11 Changes in renewable energy generation quotas allocation for each provincial region by 2027

础,提高了配额分配的前瞻性。其次,基于DEA方法构建了以最大化整体可再生能源发电比例为目标 的优化模型。本文综合考虑多维度投入产出指标,全面反映地区间差异,包括经济发展水平、能源禀赋等,在确保总发电量不减的前提下,探索各省域可再生能源发电的潜力,提升更高的可再生能源发电比例。

研究结果显示,在保证总发电量不减少的前提下,优化配额分配可将我国 2025 年的可再生能源发电占比从 30.2% 提升至 32%,部分区域如江西、贵州等存在较大改进空间,需要大力发展可再生能源发电。此外,通过允许将更多不可再生能源发电转

表 5 2027 年各省域可再生能源发电配额的分配情况($\beta=0.8$)
Table 5 Allocation of renewable energy generation quotas for each province by 2027 ($\beta=0.8$)

省域	预测可再生能源 发电量/亿 kWh	分配后可再生能 源发电量/ 亿 kWh	预测不可再生能 源发电量/ 亿 kWh	分配后不可再生 能源发电量/ 亿 kWh	预测可再生能 源发电配额	分配后可再生 能源发电配额	配额变化
北京	29.740	29.740	517.093	517.093	0.054	0.054	0.000
天津	75.472	75.472	821.293	821.293	0.084	0.084	0.000
河北	2 135.839	2 135.839	2 794.448	2 794.448	0.433	0.433	0.000
山西	899.435	1 045.780	4 334.321	3 745.037	0.172	0.218	0.046
内蒙古	1 840.065	1 840.065	6 406.093	6 406.093	0.223	0.223	0.000
辽宁	481.639	597.998	1 332.231	1 879.914	0.266	0.241	-0.024
吉林	391.591	391.591	657.682	657.682	0.373	0.373	0.000
黑龙江	488.538	488.538	943.907	943.907	0.341	0.341	0.000
上海	45.041	45.041	860.134	860.134	0.050	0.050	0.000
江苏	1 078.247	1 078.247	5 433.920	5 433.920	0.166	0.166	0.000
浙江	1 033.531	1 033.531	3 508.920	3 508.920	0.228	0.228	0.000
安徽	580.465	615.965	3 588.387	3 049.545	0.139	0.168	0.029
福建	1 038.488	1 038.488	1 601.130	1 601.130	0.393	0.393	0.000
江西	560.133	673.514	1 622.240	1 384.453	0.257	0.327	0.071
山东	1 423.422	1 423.422	5 925.093	5 925.093	0.194	0.194	0.000
河南	890.544	1 217.184	3 035.560	2 879.797	0.227	0.297	0.070
湖北	1 822.520	2 212.729	1 808.404	1 656.486	0.502	0.572	0.070
湖南	1 006.344	1 045.017	1 027.430	1 474.927	0.495	0.415	-0.080
广东	1 278.094	1 278.094	5 239.893	5 239.893	0.196	0.196	0.000
广西	1 024.581	1 251.265	1 334.053	1 278.351	0.434	0.495	0.060
海南	43.800	43.800	293.373	293.373	0.130	0.130	0.000
重庆	312.394	312.394	910.867	910.867	0.255	0.255	0.000
四川	5 147.780	5 147.780	396.923	396.923	0.928	0.928	0.000
贵州	943.398	1 152.318	1 636.712	1 309.370	0.366	0.468	0.102
云南	4 428.171	4 428.171	418.513	418.513	0.914	0.914	0.000
西藏	189.934	189.934	2.792	2.792	0.986	0.986	0.000
陕西	756.597	814.847	2 997.507	2 398.005	0.202	0.254	0.052
甘肃	1 105.827	1 105.827	1 260.373	1 260.373	0.467	0.467	0.000
青海	1 140.991	1 140.991	124.953	124.953	0.901	0.901	0.000
宁夏	732.089	732.089	2 149.880	2 149.880	0.254	0.254	0.000
新疆	1 663.777	1 663.777	4 513.454	4 513.454	0.269	0.269	0.000

化为可再生能源发电,整体配额占比可进一步提高,这种“举全国之力”的配置方式更有利于实现“双碳”目标。

本文提出的配额分配方法可为政府制定可再生能源发电配额政策提供了新的理论依据和分析工具,同时也为各省域可再生能源配额优化提供了

有益借鉴。未来的研究中,可以在模型中引入多目标优化,不仅考虑配额最大化,同时也考虑其他目标,如减排代价最小化等,使配额分配方案满足多重需求;另外,也可以探索将不确定性因素纳入模型,提高分配方案的稳健性。

参考文献:

[1] 谢旭轩,王田,任东明.美国可再生能源配额制最新进展及对我国的启示[J].中国能源,2012,34(3):33-37,46.
XIE X X, WANG T, REN D M. The latest progress of renewable portfolio standard in the United States and lessons for China [J]. Energy of China, 2012, 34(3): 33-37, 46.

[2] 赵新刚,梁吉,任领志,等.能源低碳转型的顶层制度设计:可再生能源配额制[J].电网技术,2018,42(4):1164-1169.
ZHAO X G, LIANG J, REN L Z, et al. Top-level institutional design for energy low-carbon transition: Renewable portfolio

- standards [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(4): 1164–1169.
- [3] WANG B, WEI Y-M, YUAN X-C. Possible design with equity and responsibility in China's renewable portfolio standards [J]. *Applied Energy*, 2018, 232: 685–694.
- [4] 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 X G, REN L Z, WAN G. Renewable portfolio standards, the strategic behavior of power producers and evolution [J]. *China Journal of Management Science*, 2019, 27(3): 168–179.
- [5] FAN J-L, WANG J-X, HU J-W, et al. Will China achieve its renewable portfolio standard targets? An analysis from the perspective of supply and demand [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110510.
- [6] 荆海晓, 李小宝, 房怀阳, 等. 基于线性规划模型的河流水环境容量分配研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 34–38, 44.
JING H X, LI X B, FANG H, et al. Investigation of the river water environment capacity allocation by using linear programming model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3): 34–38, 44.
- [7] 吕一兵, 万仲平, 胡铁松. 初始排污权分配及定价的双层多目标规划模型 [J]. *运筹与管理*, 2014, 23(6): 17–22.
LV Y B, FANG Z P, HU T S. A bilevel multi-objective model of initial emission permits allocating and pricing [J]. *Operations Research and Management*, 2014, 23(6): 17–22.
- [8] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units [J]. *European Journal of Operational Research*, 1978, 2(6): 429–444.
- [9] ATHANASSOPOULOS A D. Goal programming & data envelopment analysis (GoDEA) for target-based multi-level planning: allocating central grants to the Greek local authorities [J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 87(3): 535–550.
- [10] 丁晶晶, 毕功兵, 梁樑. 并联系系统资源和目标配置双准则 DEA 模型 [J]. *管理科学学报*, 2013, 16(1): 10–21.
DING J J, BI G B, LIANG L. Bi-criteria DEA model for resource allocation and target setting in parallel production system [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2013, 16(1): 10–21.
- [11] 王恰. 额外资源按需分配方法研究 [J]. *中国管理科学*, 2019, 27(6): 206–216.
WANG Q. On-demand extra resource allocation [J]. *China Journal of Management Science*, 2019, 27(6): 206–216.
- [12] 冯晨鹏, 尹绍婧, 肖相泽, 等. 浙江省区域碳排放权配额分配与补偿研究 [J]. *系统工程学报*, 2020, 35(5): 577–587.
FENG C P, YIN S J, XIAO X Z, et al. Study of allocation and compensation of regional carbon emission right in Zhejiang Province [J]. *Journal of Systems Engineering*, 2020, 35(5): 577–587.
- [13] ZURANO-CERVELLO P, POZO C, MARIA MATEO-SANZ J, et al. Sustainability efficiency assessment of the electricity mix of the 28 EU member countries combining data envelopment analysis and optimized projections [J]. *Energy Policy*, 2019, 134: 110921.
- [14] WANG S, ZHAO W, FAN S, et al. Is the Renewable Portfolio Standard in China Effective? Research on RPS Allocation Efficiency in Chinese Provinces Based on the Zero-Sum DEA Model [J]. *Energies*, 2022, 15(11): 3949.
- [15] 朱庆缘, 董学平, 张珂铜, 等. 可再生能源电力配额指标动态分配机制研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(4): 967–980.
ZHU Q Y, DONG X P, ZHANG K T, et al. Research on dynamic allocation mechanism of renewables quota in renewable portfolio standard [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2022, 42(4): 967–980.
- [16] SUN J, WEN W, WANG M, et al. Optimizing the provincial target allocation scheme of renewable portfolio standards in China [J]. *Energy*, 2022, 250: 123699.
- [17] ZHOU D, HU F, ZHU Q, et al. Regional allocation of renewable energy quota in China under the policy of renewable portfolio standards [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2022, 176: 105904.
- [18] 朱庆缘, 陈希凡, 陈杰, 等. 中国区域电力企业可再生能源电力配额分配机制研究 [J]. *中国管理科学*, 2024(9): 292–302.
ZHU Q Y, CHEN X F, CHEN J, et al. Renewables quota allocation among regional power industries under the policy of renewable electricity standard [J]. *China Journal of Management Science*, 2024(9): 292–302.
- [19] 贡文伟, 黄晶. 基于灰色理论与指数平滑法的需求预测综合模型 [J]. *统计与决策*, 2017(1): 72–76.
GONG W W, HUANG J. A demand forecast model based on the gray theory and exponential smoothing method [J]. *Statistics & Decision*, 2017(1): 72–76.
- [20] 栗然, 李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测 [J]. *中国电力*, 2008(2): 74–78.
LI R, LI G. Photovoltaic power generation output forecasting based on support vector machine regression technique [J]. *Electric Power*, 2008(2): 74–78.
- [21] 杨胡萍, 白慧, 刘家学, 等. 基于改进 RBF 神经网络的电力系统短期负荷预测 [J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2008(2): 204–207.
YANG H P, BAI H, LIU J X, et al. Electric power system's short-term load forecasting based on radial basis function neural

- network [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2008(2): 204-207.
- [22] 韩超, 宋苏, 王成红. 基于 ARIMA 模型的短时交通流实时自适应预测[J]. 系统仿真学报, 2004(7): 1530-1532, 1535.
HAN C, SONG S, WANG C. A real-time short-term traffic flow adaptive forecasting method based on ARIMA model [J]. Journal of System Simulation, 2004(7): 1530-1532, 1535.
- [23] 姜春海, 李姝, 田露露. “十二五”期间中国火电需求量预测分析: 基于 ARIMA 模型[J]. 财经论丛, 2012(5): 103-108.
JIANG C H, LI S, TIAN L L. China's thermal power demand forecast in “Twelfth Five-Year” Period: Based on ARIMA model [J]. Collected Essays on Finance and Economics, 2012(5): 103-108.
- [24] YUAN C, LIU S, FANG Z. Comparison of China's primary energy consumption forecasting by using ARIMA (the autoregressive integrated moving average) model and GM (1, 1) model [J]. Energy, 2016, 100: 384-390.
- [25] AASIM, SINGH S N, MOHAPATRA A. Repeated wavelet transform based ARIMA model for very short-term wind speed forecasting [J]. Renewable Energy, 2019, 136: 758-768.
- [26] 赵滨滨, 王莹, 王彬, 等. 基于 ARIMA 时间序列的分布式光伏系统输出功率预测方法研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(6): 820-823.
ZHAO B B, WANG Y, WANG B, et al. Photovoltaic power prediction in distribution network based on ARIMA model time series [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(6): 820-823.
- [27] FAN D, SUN H, YAO J, et al. Well production forecasting based on ARIMA-LSTM model considering manual operations [J]. Energy, 2021, 220: 119708.

(编辑: 赵树庆)