第 52 卷 第 7 期：3150-3161 高电压技术 Vol.52, No.7: 3150-3161
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20260098

阶梯碳-绿证联合交易机制下新能源系统自适应优化策略

朱显辉[1]，周广鹏[1]，桑　林[2]，周皓岩[1]，蒋雨含[1]
（1. 黑龙江科技大学电气与控制工程学院，哈尔滨 150022;
2. 黑龙江科技大学创新创业学院，哈尔滨 150022）

摘　要：针对风光新能源出力不确定性导致系统减排效果下降问题，提出了一种碳-绿证联合交易机制下新能源系统低碳自适应优化策略。首先，采用概率潮流计算新能源出力随机不确定性，结合电力系统碳排放流理论，通过节点碳势求解和碳流追踪，明确了碳排放责任向负荷侧主体的分摊结果；其次，构建了以碳流密度与碳排放量为综合碳指标的碳-绿证交易机制，引入无需对碳指标数据假设参数化分布的信息熵理论与条件风险价值理论进行协同建模，给出了新能源出力不确定性风险等级的量化结果，并依据量化的风险等级，建立了针对不同风险动态收缩与放宽的自适应阶梯碳价分区，规范了不同用户的碳排放责任，实现了碳交易与绿证交易在定价规则、责任核算的深度协同。最后，在 IEEE 14 节点系统中对不同方案进行对比分析，结果表明所提方法能够有效衡量新能源不确定性风险影响，实现系统的低碳经济运行。

关键词：新能源系统；碳流计算；碳-绿证联合机制；信息熵；条件风险价值理论；阶梯碳价动态区间

Adaptive Optimization Strategy of New Energy System Under Ladder Carbon-Green Certificate Joint Trading Mechanism

ZHU Xianhui[1], ZHOU Guangpeng[1], SANG Lin[2], ZHOU Haoyan[1], JIANG Yuhan[1]
(1. School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;
2. School of Innovation and Entrepreneurship, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

Abstract: Aiming at the problem that the uncertainty of wind and solar new energy output leads to the decrease of system emission reduction effect, a low-carbon adaptive optimization strategy of new energy system under carbon-green certificate joint trading mechanism is proposed. Firstly, the probabilistic power flow is used to calculate the random uncertainty of new energy output. Combined with the carbon emission flow theory of power system, the allocation result of carbon emission responsibility to the load-side subject is clarified by solving the node carbon potential and tracking the carbon flow. Secondly, a carbon-green certificate trading mechanism with carbon flow density and carbon emissions as comprehensive carbon indicators is constructed. The information entropy theory and conditional value-at-risk theory, which do not need to assume parametric distribution of carbon index data, are introduced for collaborative modeling. The quantitative results of the uncertainty risk level of new energy output are given. According to the quantified risk level, an adaptive ladder carbon price partition for different risk dynamic contraction and relaxation is established, which standardizes the carbon emission responsibilities of different users and realizes the deep coordination of carbon trading and green certificate trading in pricing rules and responsibility accounting. Finally, different schemes are compared and analyzed in the IEEE 14 node system. The results show that the proposed method can be adopted to effectively measure the impact of new energy uncertainty risk and realize the low-carbon economic operation of the system.

Key words: new energy system; carbon flow calculation; carbon-green certificate joint mechanism; information entropy; conditional value-at-risk theory; ladder carbon price dynamic interval

基金资助项目：国家自然科学基金(51677057)；黑龙江省省属高等学校基本科研业务费科研项目(2024-KYYWF-1044)；大学生创新创业计划项目(202410219062S)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China(51677057), Heilongjiang Provincial Colleges and Universities Basic Scientific Research Business Fee Scientific Research Project(2024-KYYWF-1044), Students' Innovation and Entrepreneurship Training Program(202410219062S).

0　引言

电力行业作为节能减排背景下的碳排放大户，其低碳转型广受社会关注。为推动传统化石能源向绿色清洁能源转型，中国提出了碳达峰碳中和的“双碳”战略目标[1-2]。在“双碳”目标的引领下，以光伏、风电为代表的新能源发电产业迅速发展[3]，为节能减排奠定了重要基础。

为保障系统节能减排目标的实现，中国依托市场相继建立碳交易机制(carbon emission trading，CET)与绿色证书交易机制(green certificate trading，GCT)，分别针对“控制碳排放总量”与“促进可再生能源生产及消纳”2 大核心，在约束与激励 2 个层面助力“双碳”战略目标的早日达成[4-5]。

随着风光等新能源在电力系统中占比的提高，碳交易机制因设立较早，其如何在适配新能源特性的前提下结合碳交易机制实现系统节能减排，受到了科研人员的广泛关注。

文献[6]通过引入碳交易成本，构建了基于固定碳价的低碳经济调度模型，给出了系统出力分配的低碳化运行策略，但其采用的固定碳价过于僵化，无法真实反映碳价随市场供需关系的动态变化。文献[7]基于碳交易市场讨论了阶梯式碳交易的经济性和降碳有效性，但没有明确负荷作为用能源头所应承担的碳排放责任。文献[8]在负荷侧考虑电热综合需求响应的同时引入阶梯式碳交易机制，论证了负荷侧阶梯式碳价交易机制对系统低碳运行的激励效果。文献[9]则建立了一种自适应负荷阶梯碳势-碳价供需响应模型，通过提升用户侧碳势减排感知能力来降低碳排放。但文献[8-9]都未充分考虑新能源不确定性给系统节能减排带来的风险。文献[10]采用置信间隙决策理论处理新能源不确定性问题，构建了基于负荷节点碳势的动态碳价优化模型，给出了一些有益结论；但所提模型对历史数据的需求量较大，若实际场景中数据支撑不足或呈现非参数化分布特征，则其优化减排可能难以达到预期效果。

绿证交易市场机制的宗旨是促进可再生能源发电的规模化供给与高效性消纳[11]，该机制设立时间相对较晚并且与碳交易市场机制处于相对独立的运行状态。因此，如何强化二者的市场关联与机制衔接，以加快推进我国能源体系的协调降碳进程，成为当前研究的热点问题[12-13]。

文献[14]讨论了电力市场、碳市场和绿证市场等多种市场之间的互动交易机理。文献[15]将绿证与碳交易机制相结合，验证了二者联合机制在系统节能减排中的有效性。类似地，文献[16]则从可再生能源消纳、降低成本的角度出发，论证了绿证-碳联合交易机制的积极作用。上述成果为碳-绿证联合交易的协调运行奠定了理论基础。

值得注意的是，新能源不确定性对碳-绿证联合交易机制下的系统节能减排效果同样具有显著影响。为此，文献[17]在阶梯式碳-绿证联合交易机制下，对新能源不确定性给系统节能减排带来的风险进行了评估，并给出了量化分析结果。但该模型仅通过优化手段削弱了此类风险的影响，未将量化后的风险有效嵌入新能源电力系统的碳-绿证联合交易机制设计中，导致交易机制无法根据新能源不确定性带来的风险程度进行动态调整，使得绿证难以在联合交易中精准发挥降碳效能，制约了所提模型降碳潜力的充分释放。

针对以上问题，本文提出一种碳-绿证联合交易机制下新能源系统低碳自适应优化策略。首先基于风光新能源随机变量的概率模型，结合电力系统碳排放流理论，通过节点碳势求解与碳流追踪，将碳排放责任公平分摊至负荷侧各市场主体；进而构建碳流密度和碳排放量相结合的综合碳指标体系的阶梯式碳交易机制，尝试利用信息熵理论与条件风险价值(condition value at risk，CVaR)理论进行协同建模，以消除模型对碳指标参数化概率分布和海量历史数据的依赖，并获取新能源出力不确定性风险等级的量化结果；最后给出按照不同风险等级对碳价进行动态收缩和放宽的自适应区间，建立碳交易与绿证交易的协同交互机制，实现二者的深度衔接。以期提升阶梯碳交易分区公平性与科学性，强化绿证的经济价值属性与市场流通活性，达到降低系统碳排放和成本的优化目标。

1　系统优化思路

传统观念中将碳排放主要责任归于发电侧，没有过多考虑负荷侧。随着新能源的快速发展，为进一步促进系统的节能降碳，用户侧作为电能消费的主体也应当承担相应的碳排放责任。本文的研究对象为含风光新能源的电力系统碳排放，具体聚焦于新能源出力不确定性影响下系统碳排放责任的精准核算与减排激励机制的优化设计。为达到上述目的，考虑到风光等新能源波动性，本文引入能明确源荷

两侧碳责任分摊的碳流计算理论，结合节点碳流密度和节点碳排放量得到综合碳指标，建立阶梯碳交易分区机制，引入信息熵理论来实时衡量电力系统因新能源接入引起的碳指标不均衡度，并构建出有针对性的动态保护策略，在获取新能源的波动性影响量化结果的同时，能够根据不均衡程度自主调整边界，在保证碳价分区公平性的同时，避免使用清洁能源的中碳排用户被分入高碳价区域，进一步促进用户的自主减排意愿。同时，针对高碳排用户引入条件风险价值理论实施风险溢价惩罚，提高其主动减排的意愿。最后，发挥绿证的减排属性和经济价值，以系统碳指标差异最小为目标函数，建立阶梯碳交易和绿证交易机制协同模型，给出最优降碳结果。具体优化流程如图 1 所示。

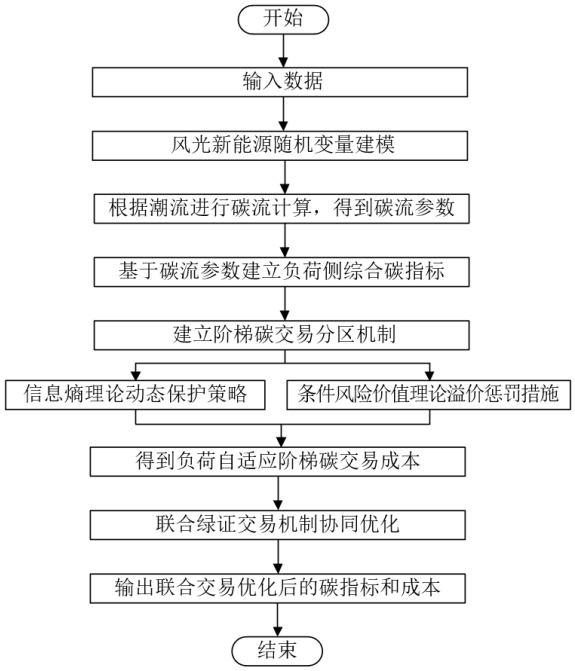


图 1 优化流程图

Fig.1 Optimization flowchart

2 概率建模与碳排放流计算

2.1 随机变量概率建模

风光等新能源出力具有间歇性和不确定性，不仅会对电力系统安全运行构成潜在威胁，还会间接导致电力系统碳流计算结果产生波动，无法得到真实的系统碳排放强度和碳排放责任。为量化这种不确定性风险，拟针对风光等新能源出力建立随机变量的概率模型。

2.1.1 风电输出概率模型

Weibull 分布是最接近风速服从分布的概率密度函数，风电输出功率与风速具有直接关系，所以完全可由 Weibull 分布得到，风电输出功率 P_{pw} 与风速 v 满足的函数关系如下：

$$P_{\mathrm{pw}}=\begin{cases}0, & v\le v_{\mathrm{i}}\\ k_1+k_2, & v_{\mathrm{i}}<v\le v_{\mathrm{r}}\\ P_{\mathrm{r}}, & v_{\mathrm{r}}<v\le v_{\mathrm{o}}\\ 0, & v>v_{\mathrm{o}}\end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases}k_1=\dfrac{P_{\mathrm{r}}}{v_{\mathrm{r}}-v_{\mathrm{i}}}\\ k_2=-k_1v_{\mathrm{i}}\end{cases} \tag{2}$$

式中：v_{i} 和 v_{o} 分别为风速的切入和切出风速；k_1 和 k_2 均为系数参数；v_{r} 为风电额定风速；P_{r} 为风电出力额定功率。

风电出力额定功率与风速之间可以视作一次函数关系，所以风电出力有功功率的概率密度函数 $f(P_{\mathrm{pw}})$可表示为：

$$f(P_{\mathrm{pw}})=\frac{r}{k_1c}\left(\frac{P_{\mathrm{pw}}-k_2}{k_1c}\right)^{r-1}\exp\left(-\left(\frac{P_{\mathrm{pw}}-k_2}{k_1c}\right)^{r}\right) \tag{3}$$

式中：r 为 Weibull 分布形状参数；c 为 Weibull 分布尺度参数。

2.1.2 光伏输出概率模型

光伏发电有功功率输出与光照强度大小、光伏电池板面积以及转换效率等因素密切相关[18]，在天气因素等多种随机因素影响下，光照强度大致服从 Beta 分布，其输出功率的概率密度函数 $f(P_{\mathrm{pv,out}})$可表示为：

$$f(P_{\mathrm{pv,out}})=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\left(\frac{P_{\mathrm{pv,out}}}{P_{\mathrm{pv,max}}}\right)^{\alpha-1}\left(1-\frac{P_{\mathrm{pv,out}}}{P_{\mathrm{pv,max}}}\right)^{\beta-1} \tag{4}$$

式中：$P_{\mathrm{pv,out}}$ 为光伏出力有功功率；$\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数；α 和 β 均为 Beta 分布的形状参数；$P_{\mathrm{pv,max}}$ 为光伏最大输出功率。

2.1.3 概率潮流计算模型

概率潮流计算方法包括模拟法、解析法和近似法 3 大类[19]。模拟法因其计算量和收敛速度不会随着系统规模和复杂程度的提升而增大的优势，在界内应用较为广泛，其中，蒙特卡洛模拟法的计算精度较高。因此，本文采用蒙特卡洛模拟法进行概率潮流相关计算。

蒙特卡洛模拟法是一种基于随机数、以概率统计理论为基础的数值计算方法，通过在随机变量可能的分布中进行概率抽样，得到电力系统电压和功率等变量运行结果。蒙特卡洛模拟法的具体步骤包

括确定计算参数、进行模拟、进行潮流计算以及统计概率分布等环节，通过在随机变量的可能分布中进行概率抽样，得到电力系统电压和功率等变量的运行结果。

2.2　碳流计算

采用燃煤、燃气等传统机组进行能源发电时，其燃烧会生成大量二氧化碳，形成污染环境的碳排放。但传统碳排放计量方法具有一定的局限性，无法准确反映系统碳排放真实情况。碳流计算认为碳排放并非从发电厂直接排入大气，而是随着电力系统潮流传递至用户侧[20-21]。利用碳硫计算能够描述每一条支路潮流中的碳排放情况[22]，明确了碳排放责任不仅由发电侧承担，负荷侧用户同样也应主动承担一部分碳排放的责任，电力系统碳排放流原理如图 2 所示。

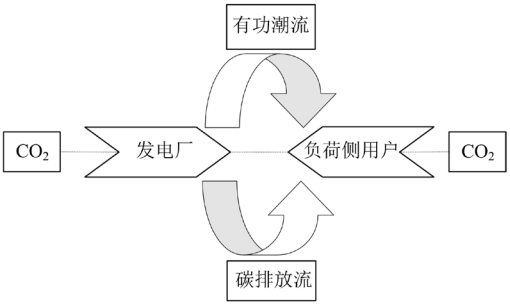


图 2　电力系统碳排放流示意图

Fig.2　Chart of carbon emission flow in power system

碳流依附于电力系统潮流，同样遵循比例共享原则，可采用基于比例共享原则的碳排放流追踪模型和潮流分布矩阵进行碳流计算，实现碳排放责任的合理公平分摊[23-24]。电力系统功率流具体如图 3 所示。

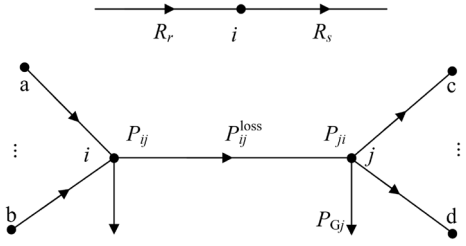


图 3　功率流示意图

Fig.3　Power flow diagram

图 3 中，P_{ij} 为节点 i 流出的有功功率；P_{ij}^{loss} 为支路 ij 上的功率损耗；R_r 为第 r 条向节点 i 注入碳流的支路碳流率；R_s 为第 s 条从节点 i 流出的支路碳流率；$P_{\mathrm{G}j}$ 为节点 j 的发电注入功率。满足：

$$\frac{R_{r,s}}{R_s}=\frac{R_r}{R_i} \tag{5}$$

式中：R_i 为节点 i 的总注入碳流率；$R_{r,s}$ 为节点 i 注入碳流中贡献给流出支路的碳流率分量。

以图 3 中线路 ij 为例，其功率守恒满足：

$$P_j=\sum_{i\in S_j}\left|P_{ji}\right|+P_{\mathrm{G}j} \tag{6}$$

式中：P_j 为流过节点 j 的有功功率；P_{ji} 为节点 j 的各上游节点注入的有功功率；S_j 为节点 j 的上游节点集合。

通过变换得到：

$$P_j-\sum_{i\in S_j}\frac{\left|P_{ji}\right|}{P_i}P_i=P_{\mathrm{G}j},\ j=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

式中：P_i 为上游节点 i 的有功功率。

使用矩阵形式表示为：

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{u}}\boldsymbol{P}=\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}$ 为发电机有功功率构成的 n 阶矢量；$\boldsymbol{P}$ 为各节点流过的有功功率构成的矢量；$\boldsymbol{A}_{\mathrm{u}}$ 为潮流分布矩阵，计算式为：

$$\left[\boldsymbol{A}_{\mathrm{u}}\right]_{ji}=\begin{cases}1, & i=j\\ \dfrac{-\left|P_{ji}\right|}{P_i}, & i\in S_j,\ j=1,2,\cdots,n\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{9}$$

通过式(9)建立的发电机功率和节点功率之间的联系，可以得到各碳流率结果。负荷碳流率计算式为：

$$R_{\mathrm{L}k}=\frac{P_{\mathrm{L}k}}{P_k}\boldsymbol{e}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{u}}^{-1}\mathrm{diag}(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}})\boldsymbol{E}_{\mathrm{G}} \tag{10}$$

式中：$R_{\mathrm{L}k}$ 为节点 k 的负荷碳流率；P_k 为流过节点 k 的有功功率；$P_{\mathrm{L}k}$ 为节点 k 的负荷功率；$\boldsymbol{e}_k$ 为 n 阶第 k 个分量为 1、其余分量为 0 的列矢量；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{G}}$ 为发电机碳排放强度列矢量；$\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}$ 为发电机功率矢量。

支路碳流率满足：

$$R_{kj}=\frac{P_{kj}}{P_k}\boldsymbol{e}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{u}}^{-1}\mathrm{diag}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}\right)\boldsymbol{E}_{\mathrm{G}} \tag{11}$$

式中：R_{kj} 为支路 kj 的碳流率；P_{kj} 为支路 kj 的有功功率。

网损碳流率计算式为：

$$R_{kj,\mathrm{loss}}=\frac{P_{kj,\mathrm{loss}}}{P_k}\boldsymbol{e}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_{\mathrm{u}}^{-1}\mathrm{diag}\left(\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}\right)\boldsymbol{E}_{\mathrm{G}} \tag{12}$$

式中：$R_{kj,\mathrm{loss}}$ 为支路 kj 的网损碳流率；$P_{kj,\mathrm{loss}}$ 为支路

kj 的有功功率损耗。

节点碳势又称节点碳流密度，其计算式为：

$$E_{\mathrm{N}j}=\sum_{i\in S_j}\frac{R_{ij}-R_{ij,\mathrm{loss}}}{P_j} \tag{13}$$

式中：$E_{\mathrm{N}j}$ 为节点 j 的节点碳势，也称节点碳流密度；R_{ij} 为支路 ij 的支路碳流率；$R_{ij,\mathrm{loss}}$ 为支路 ij 的网损碳流率。

以任意节点 k 为例，其节点碳流密度 ρ_k 和节点碳排放量 C_k 的计算式为：

$$\rho_k=\sum_{i\in I}\rho_i P_i/\sum_{i\in I}P_i \tag{14}$$

$$C_k=\rho_k P_k \tag{15}$$

$$\rho_k=\rho_j,\forall j\in O \tag{16}$$

式中：ρ_i 和 ρ_j 分别为节点 i 和 j 的节点碳流密度；I 和 O 分别为节点流入和流出支路集合。

3 阶梯碳-绿证联合交易优化模型

3.1 排放强度和总量的双交互参数

当前常见的碳指标多采用碳排放量[9]，能较好地体现碳排放规模，但忽视了碳排放强度差异和节点的差异性。容易导致减排责任分配不公、管控精准性不足的问题。为此，本文拟结合碳流密度和碳排放量形成综合碳指标，以准确区分碳排放强度和碳排放总量等不同类型用户的碳排放特征，实现兼顾节点碳流密度和排放总量管控的双重需求，从而全面、科学地界定用户的碳排放程度，为碳-绿证联合交易机制下的减排责任分摊、碳价动态调整提供精准的量化依据。综合碳指标和界定参数的计算式分别为：

$$f_l=\beta_1\frac{C_l}{C_{\mathrm{av}}}+\beta_2\frac{\rho_l}{\rho_{\mathrm{av}}} \tag{17}$$

$$q=(1-\zeta)(\beta_1\frac{C_{\mathrm{av}}}{C_{\mathrm{av}}}+\beta_2\frac{\rho_{\mathrm{av}}}{\rho_{\mathrm{av}}})=1-\zeta \tag{18}$$

式中：l 为负荷区域；f_l 为区域 l 综合碳指标；β_1 和 β_2 为权重系数，$\beta_1+\beta_2=1$；C_{av} 和 ρ_{av} 分别为平均碳排放量和碳流密度；q 为界定参数；ζ 为碳排系数。

现有文献主要关注用户的碳排放量，由于碳排放量反映用户的绝对碳排放责任，对系统碳总量管控具有重要意义，因此赋予其占比大于 60%的更高权重，但考虑到不同负荷节点的用电规模存在一定差异，占比 60%固定权重可能导致大负荷节点的碳强度被稀释，因此本文将碳排放量权重 β_1 设置为固定基础比例与随节点负荷占比调整量之和，使得负荷占比较大的节点的碳排放量项权重更高，碳流密度权重 β_2 取值等于 $1-\beta_1$。

3.2 自适应动态阶梯碳交易机制

3.2.1 阶梯碳交易模型

碳交易机制以碳配额的形式控制系统的碳排放量[25]。当系统碳排放量小于其配额量时，可以向市场出售多余的碳配额获得利益；当系统碳排放量大于其配额量时，超出部分需要向碳市场购买碳配额以避免惩罚罚款[26]。为进一步提高碳交易机制的约束能力，源侧采用基准线法对碳配额进行分配及购买，经过碳责任分摊的荷侧则采用阶梯式碳交易模型。

为避免偏态分布影响，首先采用对数变换给出碳价在对数空间的分区，然后再将该分区映射回原空间，阶梯碳交易分区如表 1 所示，其中 m 和 s 分别为系统碳指标均值和标准差；λ_1—λ_5 分别为分区 A—E 的碳价价格。

表 1 阶梯碳交易分区

Table 1 Ladder carbon trading partition

分区	碳指标界定	碳价
A	$f_l<(m-2s)q$	λ_1
B	$(m-2s)q\le f_l\le(m-s)q$	λ_2
C	$(m-s)q<f_l\le(m+s)q$	λ_3
D	$(m+s)q<f_l\le(m+2s)q$	λ_4
E	$f_l>(m+2s)q$	λ_5

3.2.2 信息熵保护策略

美国数学家香农在研究信息论中的不确定性问题时，受到统计力学领域相关公式的启发，引入熵作为度量信息、机会与不确定性的核心概念，后将其称为“信息熵”[27]。

光伏风电等新能源机组接入系统后，其出力的不确定会导致系统潮流与碳流计算结果产生偏差。考虑到影响风光出力的因素众多且普遍具有很强的随机性，而信息熵可以通过量化不确定性的“混乱程度”进行建模，不需要对碳指标数据假设特定的参数化分布形式。因此，本文拟引入信息熵理论衡量风光等新能源出力对系统碳指标不均衡度的影响。

新能源出力不确定性与系统碳指标不均衡度之间存在内在的物理关联。风光出力的随机波动通过电力潮流传导至系统各节点，由于碳流依附于系统潮流，潮流分布的随机性必然引起各节点碳流密度和碳排放量的随机波动。在新能源电力系统中，不同节点用户受新能源出力波动的影响程度不同，

靠近新能源接入点的节点用户碳指标波动幅度较大，远离接入点的节点用户受影响相对较小，这种波动差异性导致各节点碳指标在数值层面产生结构性分化。当新能源出力不确定性较强时，系统潮流分布偏差较大，各节点用户碳指标数值分化更为显著，对应的不均衡度更大，表征系统面临较高的不确定性风险；反之当新能源出力波动性较弱时，系统碳指标分布趋于均匀，不均衡度较小，表征系统不确定性风险较低。因此，系统不均衡度可以作为衡量新能源不确定性的量化表征。

通过信息熵理论量化数据不均衡度，基于该量化结果精准界定与风光新能源不确定性对应的风险等级，并依据风险等级配置动态调整系数。最后，通过对碳价分区边界的动态收缩与放宽调整，不仅能进一步提升分区的准确性与公平性，还能对清洁能源使用占比较高的中碳排用户形成精准保护，避免其因分区偏差被误划入高碳排区间，承担不合理的碳排放成本；反之，也可防止高碳排用户被错配至中碳排分区，确保碳交易机制的激励导向与约束能够公平、有效地实施。

首先将系统碳指标进行归一化处理：

$$p_{_i} = f_{_i} / \sum_{i=1}^{N} f_{_i} \tag{19}$$

式中：$p_{_i}$为归一化碳指标；$f_{_i}$为参与节点碳指标；N为参与节点数量。

再将经过归一化处理的系统综合碳指标代入香农信息熵H的计算式(式(20))，进而定义不确定性评估指标。

$$H = -\sum_{i=1}^{N} p_{_i} \cdot \ln p_{_i} \tag{20}$$

归一化信息熵指标H_{norm}的计算式为：

$$H_{\text{norm}} = H / H_{_\max} = H / \ln N \tag{21}$$

式中：$H_{_\max}$为完全均匀分布时的最大熵值。

根据归一化熵值得到系统不均衡度系数H_{im}的计算式为：

$$H_{\text{im}} = 1 - H_{\text{norm}} \tag{22}$$

由式(22)可知，不均衡度系数与风光新能源出力不确定性存在显著的相关性。据此，可依托式(22)实现对系统不确定性风险的量化评估，完成不同风险等级区间的划分，并最终构建以综合碳指标为核心导向、可实现分区边界动态收缩与放宽自动调整的阶梯式碳交易机制框架。基于式(22)中系统不均衡度量化结果，将系统风险划分为3个等级，并建立实施动态收缩和放宽作用的动态调整系数完整映射取值规则，如表2所示。

表2　动态调整系数取值规则

Table 2　Dynamic adjustment coefficient value rules

风险等级	判定条件	动态调整系数取值
低风险	$H_{\text{im}}<0.2$	0.55
中风险	$0.2\leq H_{\text{im}}<0.5$	0.45
高风险	$H_{\text{im}}\geq 0.5$	0.35

3.2.3　条件风险价值惩罚措施

对系统中的高碳排用户而言，可能需要在碳交易市场中购买多余碳排放额，承担相应的溢价。引入条件风险价值CVaR理论去量化惩罚高碳排用户承担的溢价风险[28]。CVaR理论是基于VaR提出的一种改进风险分析方法[29]，CVaR定义为：在一定投资周期内、给定的置信水平下，当风险损失超过VaR时的平均损失期望值，也被称为期望短缺或平均超额损失。CVaR弥补了VaR忽略尾部风险、不满足次可加性等缺陷，具备平移不变性等数学性质。上述性质为CVaR完整捕捉碳交易机制高碳排区域的尾部溢价风险提供了理论基础，此处借鉴CVaR理论的尾部风险思想构建风险溢价指标，旨在衡量价格在尾部超出均值的程度，用来描述用户在高价格区间购买碳排放权所需承担的溢价成本，推动其自主减排意愿。

基于风险价值数值得到风险溢价指标R_η为：

$$R_\eta = E\left(X / X \geq V_\eta\right) - \mu \tag{23}$$

式中：V_η为置信水平η下的风险价值；X为碳价随机变量；μ为区间平均价格；$E(\cdot)$为数学期望算子。

进行风险溢价调整后的碳价λ_i'为：

$$\lambda_i' = \lambda_i + \varepsilon_{\text{k}} R_\eta(i) \tag{24}$$

式中：λ_i为第i区间的原始碳价；ε_{k}为风险惩罚系数；$R_\eta(i)$为第i区间在置信水平η下的条件风险价值。

置信水平通常在90%~95%之间选取，置信水平等于90%意味着CVaR衡量碳价分布中最极端10%高价情景下的平均超额损失，能够有效捕捉高碳排区间的尾部溢价风险，该取值在电力系统CVaR优化领域中被广泛采用，所以本文取置信水平为90%。风险惩罚系数的选取需满足2个基本约束：(1)风险惩罚后的碳价应处于全国碳市场实际价格的合理范围内，避免因惩罚幅度过大导致碳价失去实际参考意义；(2)风险溢价需对高碳排用户形成实质性的减

排激励，避免因惩罚幅度过小而使 CVaR 溢价惩罚机制激励效果较差。基于上述 2 个理论层面，本文取风险惩罚系数为 0.15，对应的风险溢价为 CVaR 值的 15%，确保了有效惩罚与系统经济性之间的审慎平衡。参照同领域 CVaR 参数研究中风险偏好系数大于 0.1 时属于风险规避型的划分标准，本文取值属于风险规避区间的较低端取值，与上述双重约束相互印证[30-31]。

采用条件风险价值惩罚措施能够引导用户更好地自主减排。综合信息熵理论和条件风险价值理论联合优化策略，可以确定各区域阶梯碳交易成本 C_{c} 如下：

$$C_{\mathrm{c}}=\begin{cases}f_l\lambda_1, & f_l\in A\\ (m-2\delta s)q\lambda_1+\left(f_l-(m-2\delta s)q\right)\lambda_2, & f_l\in B\\ (m-2\delta s)q\lambda_1+\delta sq\lambda_2+\left(f_l-(m-\delta s)q\right)\lambda_3, & f_l\in C\\ (m-2\delta s)q\lambda_1+\delta sq\lambda_2+2\delta sq\lambda_3+\left(f_l-(m+\delta s)q\right)\lambda_4', & f_l\in D\\ (m-2\delta s)q\lambda_1+\delta sq\lambda_2+2\delta sq\lambda_3+\delta sq\lambda_4+\left(f_l-(m+2\delta s)q\right)\lambda_5', & f_l\in E\end{cases} \tag{25}$$

式中：δ 为动态调整系数；A、B、C、D 和 E 为阶梯碳交易分区；λ_1、λ_2、λ_3、λ_4' 和 λ_5' 分别为不同阶梯区域常规碳价和惩罚碳价。

3.3 联合绿证交易模型

绿色电力证书，简称“绿证”，是指国家依据可再生能源上网电量，向符合条件的可再生能源发电企业颁发的、具有唯一代码标识的电子凭证。它是绿色电力环境属性的唯一证明，也是消费绿色电力的权威依据，每个绿证对应 1 MWh(即 1 000 kWh)的可再生能源电量。

绿色证书交易机制作为一种促进新能源发电与消纳的认证手段，与可再生能源配额制度深度结合，能够进一步促进绿色电力消费。绿色证书交易成本 C_{g} 的计算式为：

$$C_{\mathrm{g}}=\lambda_{\mathrm{g}}\left(\rho_{\mathrm{g}}\sum_{t=1}^{24}P_{\mathrm{L}}(t)-\phi\sum_{t=1}^{24}\left(P_{\mathrm{PV}}(t)+P_{\mathrm{WT}}(t)\right)\right) \tag{26}$$

式中：λ_{g} 为一个绿证的交易单价；ρ_{g} 为系统需要持有的绿证配额系数；$P_{\mathrm{L}}(t)$ 为系统在 t 时刻的电负荷功率；ϕ 为可再生能源发电量可转化为绿证的量化系数；$P_{\mathrm{PV}}(t)$ 和 $P_{\mathrm{WT}}(t)$ 分别为 t 时刻光伏和风电的输出功率。

绿证将电力的物理发电属性与环境减排效益绑定，天然具备碳减排属性[32]。与碳交易市场的强制性约束不同，绿证交易市场允许用户自主自愿认购，所购绿证可与碳排放量等核心碳指标建立抵扣关联，从“碳约束”与“绿激励”2 个层面强化用户降碳动力，提升减排成效。本文将绿证交易机制与阶梯式碳交易机制深度融合，构建协同联动的联合交易框架，将碳交易成本与绿证交易成本纳入统一核算体系，在兼顾系统经济运行效益最大化的基础上，以区域碳指标差异性最小化为核心目标，实现系统节能减排效能的优化提升。

区域的绿证数量约束为：

$$\sum_{l=1}^{N}G_l\le\sum_{t=1}^{24}\left(P_{\mathrm{PV}}(t)+P_{\mathrm{WT}}(t)\right) \tag{27}$$

式中：G_l 为负荷区域 l 获得的绿证数量。

为了提高用户购买绿证的积极性，充分发挥绿证所蕴含的节能降碳效能[33]，本文构建的碳-绿证联合交易优化以各负荷区域绿证购买量为决策变量，以系统各区域碳指标差异最小作为绿色证书交易优化机制的目标函数，如下：

$$\min\left(\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{l=1}^{N}\left|f_{\mathrm{av}}'-f_l'\right|}\right) \tag{28}$$

式中：f_{av}' 和 f_l' 分别为系统负荷用户平均和区域 l 购买绿证之后的优化碳指标。

实行联合绿证交易机制后的优化系统平均碳指标和负荷区域碳指标分别为：

$$f_{\mathrm{av}}'=\beta_1\frac{\sum_{l=1}^{N}(C_k-G_l\rho_{\mathrm{av}})}{NC_{\mathrm{av}}}+\beta_2\frac{\sum_{l=1}^{N}(C_k-\sum_{l=1}^{N}G_l\rho_{\mathrm{av}})}{\sum_{l=1}^{N}(P_k\rho_{\mathrm{av}}\Delta t)} \tag{29}$$

$$f_l'=\beta_1\frac{C_k-G_l\rho_{\mathrm{av}}}{C_{\mathrm{av}}}+\beta_2\frac{C_k-G_l\rho_{\mathrm{av}}}{P_k\rho_{\mathrm{av}}\Delta t} \tag{30}$$

式中：Δt 为单位时间。

能源系统碳交易与绿证交易总成本 C_{t} 为：

$$C_{\mathrm{t}}=C_{\mathrm{c}}+C_{\mathrm{g}} \tag{31}$$

用户购买绿证后，依据式(29)、(30)计算得到优化碳指标，并以优化碳指标替代原始碳指标、重新判定其阶梯碳价分区归属。当更新后的优化碳指标跨越分区边界时，用户承担更低阶梯碳价，实现碳交易成本的实质性降低。这一再判定机制将绿证的环境减排属性与阶梯碳交易的价格约束机制紧密连结，使二者在定价规则与责任核算层面形成深度协同，而非简单的成本叠加。

4　算例分析

4.1　基础数据

本文算例采用取自南方某地区的实际数据，采用标准 IEEE 14 节点系统求解。单时段步长为 1 h，新能源光伏出力随机变量服从 Beta 分布，形状参数分别为 0.679 9 和 1.778 7，风机出力随机变量服从 Weibull 分布，其形状参数分别为 1.637 和 5.218，切入风速、额定风速和切出风速分别为 3、14、25 m/s。

需要说明的是，本文采用的信息熵理论针对的是无需对碳指标数据假设特定参数化分布形式的情况，与风光新能源随机变量服从何种概率分布属于 2 个独立的计算层级，二者并不矛盾。

风光出力不确定性融入到概率潮流模型中，并依据潮流计算结果对碳流进行计算，所得节点碳流密度和碳排放量等参数为期望值。为确保阶梯碳交易数据真实有效性，给出相关参数的选取依据如下：阶梯碳交易各分区的原始碳价源自 2024 年全国统计的碳价数据。碳排系数为 0.01，动态调整系数随风险等级变动，风险惩罚系数为 0.15，置信水平为 90%。同时国家 2024 年对绿证价格进行了下调，绿证交易单价定为 30 元，系统需要持有的绿证配额系数为 0.25，可再生能源发电量可转化为绿证的量化系数为 0.8。

4.2　不同方案下的仿真结果分析

为验证本文所提优化策略的有效性，构建 4 个不同的方案进行对比。方案 1 仅建立基础的阶梯碳交易机制而无任何优化；方案 2 在阶梯碳交易机制的基础上考虑信息熵和条件风险价值双重优化策略进行改进，但没有引入绿证进行联合交易；方案 3 为本文所提方案结合双重优化策略的碳-绿证联合交易机制。方案 4 为双重优化策略与典型场景法进行对比。各项方案的信息如表 3 所示，其中相比于方案 1，方案 2 在负荷侧阶梯碳交易机制中嵌入了阶梯分区的双重优化策略，引入信息熵理论计算得到系统的不均衡度，实现了对电力系统风险等级的有效划分，并基于风险等级调节动态调整系数实现自主收缩和放宽阶梯碳价分区，可以避免阶梯碳价分区无法自主适应系统变化的问题。方案 1 和方案 2 的具体分区结果如图 4 所示。

表 3　不同方案对比

Table 3　Comparison of different schemes

方案	阶梯碳交易	典型场景法	双重优化策略	碳-绿证联合交易
1	√	×	×	×
2	√	×	√	×
3	√	×	√	√
4	√	√	×	√

注：“√”代表考虑该因素，“×”代表不考虑该因素。

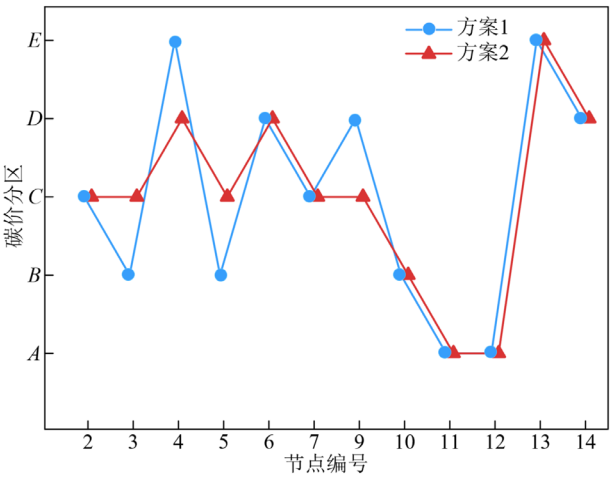


图 4　不同方案阶梯分区动态调整结果

Fig.4　Dynamic adjustment results of different schemes step partition

由图 4 可知，方案 2 基于风险评估的结果实现了阶梯碳价分区的动态调整，将方案 1 中位于 *E* 分区的节点 4 动态调整到 *D* 分区。相似地，节点 9 由 *D* 分区调整为 *C* 分区，节点 3 和节点 5 由 *B* 分区调整为 *C* 分区，证明了所提方案在考虑新能源接入的情况下，能够根据风险程度自主调整。避免了使用较多清洁能源的中碳排放用户被误分入高碳排分区，承担本不应该承担的高额碳排放成本的可能，提高了阶梯碳价分区的公平性，能够促进用户的减排意愿。

对比方案 1 和方案 2，引入条件风险价值理论对阶梯碳价分区实施风险溢价惩罚结果见图 5。

由图 5 可知，在方案 1 和方案 2 中，*A*、*B*、*C* 等分区的阶梯碳价保持不变。考虑尾部溢价风险的情况下，方案 2 中 *D* 和 *E* 分区用户所承担的阶梯碳价出现了一定的惩罚费用。具体原因为：*D* 和 *E* 分区节点碳排放超额产生的溢价惩罚，使得碳交易成本有所增加，通过引入条件风险价值理论，实现了对高碳排用户的精准惩罚，能够在一定程度上促进高碳排用户节能减排的积极性。

绿证本身即代表着清洁无污染的新能源电力凭证，具有一定碳减排属性，并可与用户自身的碳排放量相互抵消。方案 3 以系统碳指标差异性最小

作为目标函数，依托绿证交易机制优化用户交易行为，新能源电力转化为绿证后，系统各用户减排效果如图 6 所示。

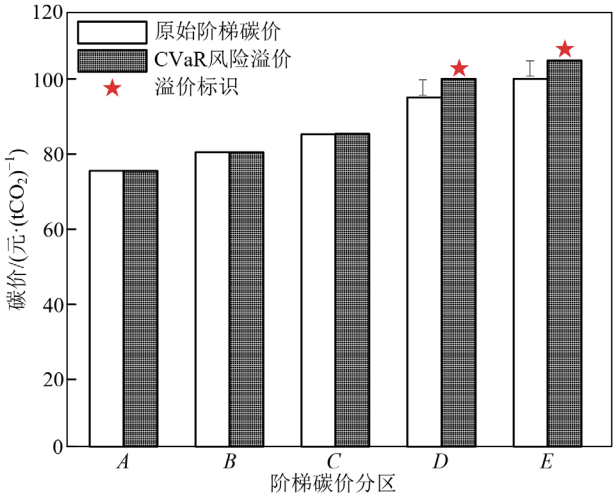


图 5 不同方案高碳排用户溢价惩罚结果

Fig.5 High carbon emission user premium penalty results of different schemes

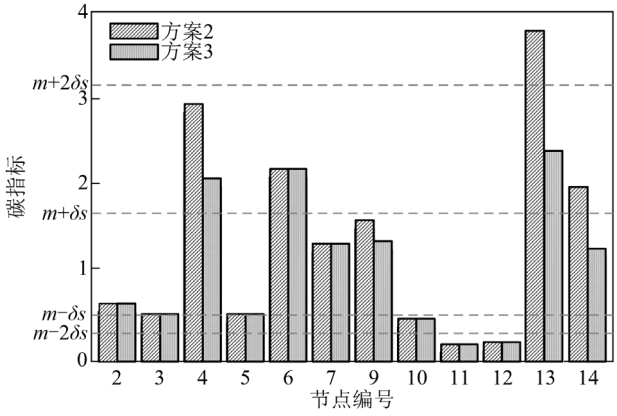


图 6 不同方案碳指标对比

Fig.6 Comparison of carbon index of different schemes

由图 6 可知，相比于没有引入绿证交易的方案 2，方案 3 的中高碳排放节点 4、9、13 和 14 因购买了绿证，其碳指标产生了明显下降，降幅分别为 29.9%、15.8%、37.2%和 37.0%。可见基于绿证与碳交易机制的联合交易机制中，高碳排用户通过购买绿证的方式抵冲碳排放指标是可行的。同时，节点 13 和节点 14 的碳指标均在引入绿证交易后由较高碳价区间降至较低碳价区间，节点用户实现了阶梯碳价分区的跨越降级，直观验证了引入绿证交易后二者协同交易优化机制的有效性。

方案 1 和方案 3 得到的碳-绿证联合交易下的成本优化结果如图 7 所示。

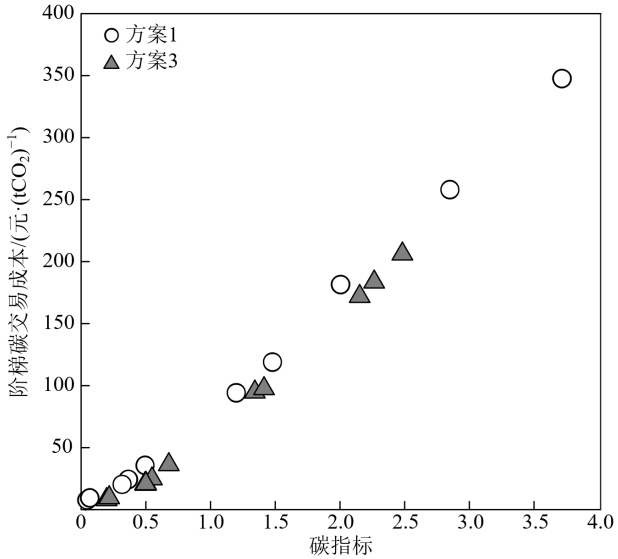


图 7 阶梯碳-绿证联合交易下的成本优化结果

Fig.7 Cost optimization results under ladder carbon-green certificate joint transaction

由图 7 可知，相比于仅采用基础阶梯碳交易的方案 1，方案 3 不仅考虑了阶梯碳价分区和惩罚的双重减排优化策略，同时在碳交易机制中引入了绿证交易机制进行联合优化。因此，本文所提方案 3 的碳交易成本低于方案 1，得到了更优的碳排放和成本，实现了新能源系统减排效果和经济性的协同优化。

进一步分析可知，采用方案 3 的最优结果中，节点 13 最高碳排负荷用户的碳排放成本由 347.47 元降为 210.57 元，降幅为 39.40%，同时方案 3 中其他用户的成本也有所降低。对所有用户的统计结果表明，采用方案 1 策略时，系统的平均碳指标为 1.220 4；而采用方案 3 的联合交易优化策略时，其平均碳指标为 0.968 8，降低了 20.62%。碳指标的标准差也由方案 1 中的 1.204 1 下降为方案 3 的 0.834 0，系统碳指标整体差异性降低了 30.74%，代表着碳-绿证联合交易机制下，系统各节点的碳排放指标的分布也较为均匀，说明在绿证机制的激励下，相比于中低碳排放用户，高碳排放用户购买绿证的意愿更强烈，证明了引入绿证对促进系统减排的有效性和重要性。

对方案 1—4 的各项成本和经济效益进行统计，所得结果如表 4 所示。由表 4 可知，方案 1 和方案 2 未引入绿证交易，其绿证交易成本为 0。方案 3 虽然因引入绿证交易产生了绿证交易成本，但绿证

带来的降碳效果也较为显著。与方案 1、2 相比，方案 3 的碳指标差异性降低，且总成本也分别降低了 3.20%和 4.33%。实现了系统低碳经济运行目标。方案 4 为采用典型场景法对碳交易机制进行优化，碳指标差异性较低，且与方案 3 相比总成本降幅较低，优化效果有限，体现了本文所用模型的优越性。

表 4　不同方案成本及效益

Table 4　Cost and benefit of different schemes

元

方案	碳交易成本	绿证交易成本	总成本	经济效益
1	1 362.01	0	1 362.01	0
2	1 378.16	0	1 378.16	16.15
3	1 058.41	260.07	1 318.48	−43.53
4	1 051.23	279.94	1 331.17	−30.84

5　结论

本文提出了一种碳-绿证联合交易机制下新能源系统低碳自适应优化策略，所得主要结论如下：

1）建立了绿证交易机制与阶梯式碳交易机制的协同交易框架，提出了兼顾节点碳流密度和排放总量的双参数交互机制，给出了一种能综合考量节点碳排放强度和排放总量的多角度融合策略。

2）构建了基于信息熵理论的动态自适应优化模型，量化了新能源出力不确定性对碳交易系统风险的影响程度，给出了不同风险程度下的阶梯碳价区间动态收缩和放宽的调整方案，并引入 CVaR 理论对高碳排用户进行了约束，保证了碳价分区的公平性和管控的精准性。

3）对比了碳-绿证交易的不同方案，结果表明所提方案可使系统碳指标差异性降低 30.74%、综合成本降低 3.20%，论证了所提双参数交互和信息熵-CVaR 理论的协同优化交易机制在成本控制与主体公平性方面的优越性。本文基于 IEEE 14 节点系统对所提方法进行了验证，未来将进一步在 IEEE 30 节点、IEEE 118 节点等更大规模系统中开展验证及其他研究工作，以检验所提机制的普适性与可扩展性。

参考文献　References

[1] 刘鑫蕊，罗雨晴，侯敏，等. 阶梯式碳交易的城市多能系统能量互补优化调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2275-2285.
LIU Xinrui, LUO Yuqing, HOU Min, et al. Energy complementation optimal scheduling strategy of urban multi-energy system with stepped carbon trading[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2275-2285.

[2] 朱显辉，胡旭，师楠，等. 考虑氢储动态效率的电氢耦合微网长期容量优化[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1128-1139.
ZHU Xianhui, HU Xu, SHI Nan, et al. Long-term capacity optimization of electrohydrogen coupled microgrid considering dynamic efficiency of hydrogen storage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1128-1139.

[3] 刘星磊，刘俊，杨崟，等. 考虑多功能区低碳改造与氢能多模式利用低碳特性的综合能源系统不确定性协同规划方法[J]. 电网技术，2025，49(1)：1-11.
LIU Xinglei, LIU Jun, YANG Yin, et al. Uncertainty planning method of integrated energy system with multi-functional areas considering low-carbon retrofit and multi-mode utilization of hydrogen[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 1-11.

[4] 汤军，高洪超，余涛，等. 电力市场环境下超大城市虚拟电厂的建设理念与创新实践[J]. 电网技术，2025，49(1)：103-112.
TANG Jun, GAO Hongchao, YU Tao, et al. Construction concept and innovative practices of virtual power plants in megacities under electricity market environment[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 103-112.

[5] 李灏恩，姜雨萌，戚宇辰，等. 碳中和目标下电力需求预测体系构建及华东区域电力需求发展趋势研究[J]. 电网与清洁能源，2024，40(2)：30-36.
LI Haoen, JIANG Yumeng, QI Yuchen, et al. A study on the construction of the power demand forecasting system under carbon neutrality goal and the development trend of power demand in East China[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2024, 40(2): 30-36.

[6] 张景淳，陈胜，彭琰，等. 计及灵活爬坡的气-电耦合综合能源系统低碳经济调度研究[J]. 电网技术，2022，46(9)：3315-3323.
ZHANG Jingchun, CHEN Sheng, PENG Yan, et al. Low carbon economic scheduling of gas-electric coupling integrated energy system considering flexible ramping products[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3315-3323.

[7] 崔杨，曾鹏，仲悟之，等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备，2021，41(3)：10-17.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10-17.

[8] 付波，杨勇康，方文俊，等. 考虑综合需求响应的含碳捕集与光热电站综合能源系统低碳经济调度[J]. 科学技术与工程，2024，24(33)：14260-14269.
FU Bo, YANG Yongkang, FANG Wenjun, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system with carbon capture and solar power station considering integrated demand response[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(33): 14260-14269.

[9] 余洋，吴千，霍宇航，等. 计及自适应阶梯碳势-碳价与供需双响应基于主从博弈的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术，2024，48(7)：2702-2714.
YU Yang, WU Qian, HUO Yuhang, et al. Low-carbon economic dispatch for integrated energy system based on Stackelberg game considering adaptive stepped carbon potential-carbon price and dual response of supply and demand[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2702-2714.

[10] 彭春华，娄钰杰，范国柱，等. 基于节点碳势响应的新型电力系统鲁棒优化调度[J]. 电网技术，2025，49(9)：3677-3687.
PENG Chunhua, LOU Yujie, FAN Guozhu, et al. Robust optimal dispatch of new power systems based on node carbon intensity response[J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3677-3687.

[11] 王守相，郑婉婷，赵倩宇，等. 基于碳-绿证互认和电热柔性负荷的含氢多能系统源荷低碳经济调度方法[J]. 高电压技术，2025，51(4)：1834-1845.

WANG Shouxiang, ZHENG Wanting, ZHAO Qianyu, et al. Source-load low-carbon economic dispatch method for hydrogen multi-energy system based on mutual recognition of carbon-green certificates and electric and thermal flexible loads[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1834-1845.

[12] 孙晓荣，尤咏，潘学萍，等. 计及碳市场和绿证市场的配电网投资效益动态评估[J]. 电力自动化设备，2024，44(5)：103-111.
SUN Xiaorong, YOU Yong, PAN Xueping, et al. Dynamic evaluation of investment benefit for distribution network considering carbon market and green certificate market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 103-111.

[13] 中共中央办公厅. 国务院办公厅关于推进绿色低碳转型加强全国碳市场建设的意见[EB/OL]. (2025-08-25)[2026-01-06]https://www.gov. cn/zhengce/202508/content_7037718. htm.
General Office of the Communist Party of China. Opinions of the General Office of the State Council on promoting green and low-carbon transformation and strengthening the construction of the national carbon market[EB/OL]. (2025-08-25)[2026-01-06]. https://www.gov. cn/zhengce/202508/content_7037718. htm.

[14] 尚楠，陈政，卢治霖，等. 电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制[J]. 电网技术，2023(1)：142-154.
SHANG Nan, CHEN Zheng, LU Zhilin, et al. Interaction principle and cohesive mechanism between electricity market, carbon market and green power certificate market[J]. Power System Technology, 2023(1): 142-154.

[15] 陈巍，江岳文. 碳-绿证-电量市场耦合交易优化研究[J]. 电网技术，2023，47(6)：2273-2284.
CHEN Wei, JIANG Yuewen. Trading optimization of carbon-green certificate-electricity market coupling[J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2273-2284.

[16] 葛淑娜，张彩玲，王爽，等. 计及氢能多元利用和绿证-碳联合交易的综合能源系统优化运行[J]. 电力自动化设备，2023，43(12)：231-237.
GE Shuna, ZHANG Cailing, WANG Shuang, et al. Optimal operation of integrated energy system considering multi-utilization of hydrogen energy and green certification-carbon joint trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 231-237.

[17] 巴金宇，何川，南璐，等. 基于绿证-阶梯碳交易联动与分布鲁棒机会约束的含氢园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备，2025，45(10)：169-176.
BA Jinyu, HE Chuan, NAN Lu, et al. Low-carbon economic scheduling of park-integrated energy system containing hydrogen based on green certificate-tiered carbon trading and distributionally robust chance constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(10): 169-176.

[18] 朱显辉，张尧，师楠，等. 计及渗透率约束的风光火储系统容量优化及规律研究[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(1)：74-83.
ZHU Xianhui, ZHANG Yao, SHI Nan, et al. Study on capacity optimization and law of wind-solar-thermal-storage system with permeability constraint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 74-83.

[19] 刘宇，高山，杨胜春，等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化，2014，38(23)：127-135.
LIU Yu, GAO Shan, YANG Shengchun, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 127-135.

[20] 周天睿，康重庆，徐乾耀，等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化，2012，36(11)：44-49.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.

[21] 周天睿，康重庆，徐乾耀，等. 碳排放流在电力网络中分布的特性与机理分析[J]. 电力系统自动化，2012，36(15)：39-44.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Analysis on distribution characteristics and mechanisms of carbon emission flow in electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 39-44.

[22] 马超，秦晓辉，刘晓瑞，等. 新型电力系统电碳协同研究综述：量化方法、关键技术与应用展望[J]. 高电压技术，2026，52(1)：193-214.
MA Chao, QIN Xiaohui, LIU Xiaorui, et al. Review of research on electricity carbon collaboration in new type power systems: quantitative methods, customs construction technologies and application prospects[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(1): 193-214.

[23] 汪超群，陈懿，迟长云，等. 基于潮流分布矩阵的电力系统碳排放流计算方法[J]. 科学技术与工程，2022，22(12)：4835-4842.
WANG Chaoqun, CHEN Yi, CHI Changyun, et al. Calculation method of power system carbon emission flow based on power flow distribution matrix[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4835-4842.

[24] 刘昱良，李姚旺，周春雷，等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报，2024，44(6)：2220-2235.
LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220-2235.

[25] 袁越，苗安康，吴涵，等. 低碳综合能源系统研究框架与关键问题研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(9)：4019-4036.
YUAN Yue, MIAO Ankang, WU Han, et al. Review of the research framework and key issues for low-carbon integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4019-4036.

[26] 陈雾，王冰，陈玉全，等. 基于绿证-阶梯碳交易联合机制的综合能源系统多主体协同优化方法[J]. 智慧电力，2025(9)：10-18.
CHEN Ji, WANG Bing, CHEN Yuquan, et al. A multi-agent collaborative optimization method for integrated energy systems based on green certificate-stepped carbon trading joint mechanism[J]. Smart Power, 2025(9): 10-18.

[27] 张广伦，钟海旺. 信息熵在电力系统中的应用综述及展望[J]. 中国电机工程学报，2023，43(16)：6155-6180.
ZHANG Guanglun, ZHONG Haiwang. Review and prospect of information entropy and its applications in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6155-6180.

[28] 曾子龙，李培强，李勇，等. 考虑条件风险价值的交直流系统两阶段分布鲁棒低碳经济优化调度[J]. 高电压技术，2024，50(1)：157-168.
ZENG Zilong, LI Peiqiang, LI Yong, et al. Low-carbon distributionally two-stage robust optimization considering conditional value-at-risk for hybrid AC/DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 157-168.

[29] 卫志农，陈妤，黄文进，等. 考虑条件风险价值的虚拟电厂多电源容量优化配置模型[J]. 电力系统自动化，2018，42(4)：39-46.
WEI Zhinong, CHEN Yu, HUANG Wenjin, et al. Optimal allocation model for multi-energy capacity of virtual power plant considering conditional value-at-risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 39-46.

[30] 吴静，刘轩宇，李响，等. 碳市场价格不确定性对电网调度影响机理分析[J]. 上海交通大学学报，2025，59(3)：354-364.
WU Jing, LIU Xuanyu, LI Xiang, et al. Impact mechanism analysis of carbon price uncertainty on power system dispatch[J]. Journal of

Shanghai Jiao Tong University, 2025, 59(3): 354-364.

[31] 肖白，魏正一，张大驰，等. 考虑源荷不确定性和绿证–碳交易的含氢储能微电网容量优化配置[J/OL]. 现代电力，1-14 [2026-03-10]. https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2024.0234.
XIAO Bai, WEI Zhengyi, ZHANG Dachi, et al. Optimal capacity configuration of hydrogen energy storage microgrid considering source-load uncertainty and green certificate-carbon trading[J/OL]. Modern Electric Power, 1-14[2026-03-10]. https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2024.0234.

[32] 陈荃，张丹宏，胡宇凡，等. 随机环境下计及绿证与碳配额约束的电力市场均衡分析[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5505-5515.
CHEN Quan, ZHANG Danhong, HU Yufan, et al. Equilibrium analysis of electricity market considering green certificate and carbon quota con-straints in stochastic environment[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5505-5515.

[33] 杨芃，杨晓辉，杨莉，等. 基于碳市场与绿证分配制度的源荷低碳经济调度[J]. 南方电网技术，2025，19(3)：87-95.
YANG Peng, YANG Xiaohui, YANG Li, et al. Low-carbon economic dispatching of source and load based on carbon market and green certificate allocation system[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(3): 87-95.



朱显辉
1975—，男，博士，副教授
主要从事光伏技术新能源调度方面的研究工作
E-mail: zhu_xianhui@sina.com

ZHU Xianhui
Ph.D.
Associate professor



周皓岩
2002—，男，硕士生
主要从事新能源调度方面的研究工作
E-mail: 1752684531@qq.com

ZHOU Haoyan



周广鹏(通信作者)
2001—，男，硕士生
主要从事新能源系统碳流方面的研究工作
E-mail: 2695837693@qq.com

ZHOU Guangpeng
Corresponding author



蒋雨含
2004—，女，本科生
主要从事新能源调度方面的研究工作
E-mail: 1296364824@qq.com

JIANG Yuhan



桑　林
1982—，女，硕士，副教授
主要从事多源感知、智能诊断、高光谱遥感方面的研究工作
E-mail: sanglin@usth.edu.cn

SANG Lin
Associate professor

收稿日期　2026-01-23　修回日期　2026-05-08　　编辑　程子丰