

# 多重不确定性条件下长三角地区多行业 CCUS 源汇匹配模型研究与应用

李吉喆<sup>1,2</sup>, 樊静丽<sup>3</sup>, 李凯<sup>3</sup>, 王雅先<sup>3</sup>, 王智<sup>3</sup>, 张贤<sup>2</sup>

(1.清华大学地球系统科学系,北京 100084; 2.中国 21 世纪议程管理中心,北京 100038;

3.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083)

**摘要:**随着“双碳”目标的提出,长三角地区面临一定的减排压力。合理布局规划碳捕集利用与封存(CCUS)项目对保障长三角地区能源安全,平稳实现区域“双碳”目标具有重要意义。CCUS 技术的发展面临诸多不确定性因素,对 CCUS 未来时空部署形成巨大挑战。然而,现有 CCUS 源汇匹配研究多采用混合整数线性规划等方法,未充分考虑排放源、技术和政策等因素变化对 CCUS 减排潜力、宏观布局及成本效益的影响,导致规划结果与实际情况相比可能存在一定的偏差,给 CCUS 大规模部署带来较大挑战。为解决复杂不确定条件下 CCUS 源汇匹配问题,通过模糊可能性、随机机会约束和区间线性规划等方法,构建基于区间模糊机会约束规划方法的 CCUS 源汇匹配模型,应用在中国长三角地区 CCUS 源汇匹配的实际问题中,探究风险管理和决策支持方案。研究发现:若考虑不确定性,长三角地区 CCUS 项目总成本将高于确定性模型的评估结果;在违约风险为 40% 的情况下,长三角 CCUS 项目源汇匹配总成本最低,平准化减排成本低于 30 美元/t 的排放源占筛选出排放源总数的 38.5%,累计厂级碳捕集潜力 56.9 亿 t。因此,将多重不确定性纳入模型综合考虑,探究不确定性条件下的 CCUS 源汇匹配部署方案,在提高项目经济性、可行性等方面具有重要的实际意义。

**关键词:**碳捕集利用与封存(CCUS);长三角地区;模糊机会约束;源汇匹配;时空布局;风险管理

**中图分类号:**X701 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-4772(2024)10-0129-10

## Development of CCUS source-sink matching model for Yangtze River Delta under multiple uncertainties

LI Jizhe<sup>1,2</sup>, FAN Jingli<sup>3</sup>, LI Kai<sup>3</sup>, WANG Yaxian<sup>3</sup>, WANG Zhi<sup>3</sup>, ZHANG Xian<sup>2</sup>

(1. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038;

3. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083)

**Abstract:** Under carbon peak and carbon neutrality goals, the Yangtze River Delta region faces emission reduction pressures. Deployment of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) projects are crucial for ensuring energy security in the Yangtze River Delta region and achieving the net-zero ambition. CCUS projects faces multiple uncertainties. However, most of the previous research were focused on CCUS source-sink matching with mixed-integer linear programming method. Changes of emission sources, development of technologies and policies were ignored. This may lead to the deviations between the planning results and real-world case. Therefore, a CCUS source-sink matching model was developed based on interval fuzzy chance-constrained programming methods under uncertainties. A Yangtze River Delta case study will be applied to explore risk management and policy-making decisions. Results show that, for Yangtze River Delta region, the total cost of CCUS projects will be higher than that of deterministic models; when the constraint-violation probability for reduction demands is 40%, the total cost of CCUS projects is the lowest, 38.5% of plants have a levelized cost of emission reduction below 30 \$/t CO<sub>2</sub>, and the total mitigation potential will be 5.69 Gt CO<sub>2</sub>. Hence, exploring CCUS source-sink matching deployment plans under

收稿日期:2024-06-27;责任编辑:宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS24062701

基金项目:国家资助博士后研究人员计划资助项目(GZC20231327)

作者简介:李吉喆(1992—),女,山东临沂人,助理研究员。E-mail: kxljizhe@126.com

通讯作者:张贤(1981—),男,山东青岛人,研究员,博士。E-mail: zhangxian@acca21.org.cn

引用格式:李吉喆,樊静丽,李凯,等.多重不确定性条件下长三角地区多行业 CCUS 源汇匹配模型研究与应用[J].洁净煤技术,2024,30(10):129-138.

LI Jizhe, FAN Jingli, LI Kai, et al. Development of CCUS source-sink matching model for Yangtze River Delta under multiple uncertainties[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 129-138.



multiple uncertainties is critical for exploring the tradeoff of risks and benefits.

**Key words:** carbon capture utilization and storage(CCUS); Yangtze River Delta region; fuzzy chance constraint; source-sink matching; layout; risk management

## 0 引言

全球变暖是人类面临的共同挑战,碳捕集利用与封存(CCUS)逐渐成为实现1.5℃和2℃温控目标的关键技术手段。《联合国气候变化框架公约》第28次缔约方大会(COP28)重申了《巴黎协定》“将全球平均温度升高幅度控制在工业革命前2℃之内,并为把升温控制在1.5℃内而努力”的目标,习近平总书记在第75届联合国大会一般性辩论上宣布,中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值、努力争取2060年前实现碳中和。此后,实现“双碳”目标已经成为我国应对气候变化和促进产业绿色低碳转型的重大战略。CCUS作为碳中和技术体系的重要构成部分<sup>[1]</sup>,是指将CO<sub>2</sub>从工业过程、能源利用或大气当中分离出来,直接加以利用或注入地层以实现CO<sub>2</sub>永久减排的过程<sup>[2]</sup>,CCUS是实现《巴黎协定》温控目标的关键技术手段和托底技术保障。绝大多数温升预测模型结果都表明,若没有CCUS技术将无法实现《巴黎协定》温控目标<sup>[3-4]</sup>。碳中和目标下,2060年中国CCUS减排需求约为21亿~25亿t/a<sup>[5]</sup>(“a”为“年”)。

长江三角洲(以下简称“长三角”)地区是中国经济发展最活跃的区域之一<sup>[6]</sup>,约占全国GDP的24.2%(2023年)。由于经济发展和人口密集,长三角地区能源消费量较大,化石能源仍占主导地位,碳排放量持续增加,长三角地区碳排放量占全国碳排放量的占比超过15.9%(2021年)。随着碳中和目标的提出,长三角地区面临一定的减排压力。合理布局规划CCUS项目对保障长三角地区能源安全,平稳实现区域碳中和目标具有重要意义。长三角CCUS技术的发展面临诸多不确定性因素,对CCUS未来时空部署形成巨大挑战<sup>[7-9]</sup>。碳中和的实现不仅意味着能源结构的重大变革,同时对减排技术,尤其是CCUS等零碳负碳技术的需求更加迫切<sup>[10]</sup>。

源汇匹配是保障CCUS技术合理规划和有序发展的关键。通过数学建模及空间优化的方式,将CO<sub>2</sub>排放源与封存地进行有效链接,进而更好探究CCUS未来减排潜力、宏观布局及成本效益等问题。为分析市场、政策等不确定性因素对CCUS部署的影响,部分学者开始尝试将源汇匹配与实物期权<sup>[11-13]</sup>、蒙特卡罗模拟等方法深度融合,处理具有

随机特征的不确定性因素,提高了决策的科学性和准确性<sup>[14-15]</sup>。CCUS项目规划布局在很大程度上取决于投资者对碳价格<sup>[16]</sup>、技术进步<sup>[17]</sup>、激励政策<sup>[18]</sup>和公众接受度<sup>[19-20]</sup>等因素不确定性的判断<sup>[21]</sup>。实物期权理论通过几何布朗运动(资产随机游走的标准扩散过程)和均值回归来描述资产价格的随机过程<sup>[22]</sup>,可用于表征数据的随机特征,被广泛应用于企业投资<sup>[23]</sup>、政府补贴<sup>[24]</sup>、储能技术<sup>[25-26]</sup>和CCUS技术等各个领域。例如,ITEAM\_CHN模型<sup>[27]</sup>深度融合源汇匹配与投资决策,将碳价格波动模拟为随机过程,探究其对燃煤电厂CCUS技术改造成本收益的影响<sup>[18]</sup>,进而提出投资决策建议。

为进一步定量表征多重不确定性及其影响,国内外学者开发了大量的不确定性规划方法,如模糊可能性规划(FPP)<sup>[28-29]</sup>、机会约束规划(CCP)<sup>[30]</sup>和区间线性规划方法(ILP)<sup>[31]</sup>等,并将其应用在能源<sup>[32-34]</sup>、固废<sup>[35]</sup>、核反应堆<sup>[36]</sup>等系统的规划管理与决策过程中。随机规划方法可处理符合随机分布特征的不确定性,其中机会约束规划方法最为常见。对于无明显分布特征且上下界已知的数据,可用区间线性规划方法处理其区间不确定性。即使在无法准确判断某因素“属于”或者“不属于”某个集合,而且集合的外延是模糊的,也可以通过模糊集定量描述模糊不确定性信息,通过模糊可能性规划方法处理模糊不确定性。

然而,现有源汇匹配研究多采用混合整数线性规划等方法,未充分考虑排放源、技术和政策等因素变化对CCUS减排潜力、宏观布局及成本效益的影响,导致规划结果与实际情况存在一定偏差<sup>[37]</sup>,给CCUS技术集群的大规模部署带来较大挑战。因此,为解决复杂不确定条件下CCUS源汇匹配问题,研究通过模糊可能性、随机机会约束和区间线性规划等方法,构建基于区间模糊机会约束规划方法的CCUS源汇匹配模型,应用在中国长三角地区CCUS源汇匹配的实际问题中,探究风险管理和决策支持方案。具体研究目标为:①建立区间模糊机会约束规划方法,量化CCUS项目存在的复杂不确定性,形成更贴近实际情况的数据集合,揭示不确定性对时空部署的关键影响因素。②构建基于区间模糊机会约束规划方法(IFC)的源汇匹配规划模型,将不确定性纳入模型综合考虑,实现源汇匹配模型的优化。③引入交互式求解算法,探究包含风

险管理和决策支持在内的综合集成方案。将模型应用在中国长三角地区全行业（包括燃煤电厂、钢铁、水泥和煤化工）CCUS 源汇匹配方案构建优化中，从理论和实证两方面验证模型的科学性和实用性。

## 1 CCUS源汇匹配模型构建

### 1.1 区间模糊机会约束规划方法

耦合模糊可能性、随机机会约束和区间线性规划方法，建立区间模糊机会约束规划方法。模糊可能性规划方法能够处理参数具有模糊特征的不确定性信息，目标函数可表示为：

$$\underset{\sim}{\text{Min}} f = \underset{\sim}{C}X \quad (1)$$

$$AX \geq B \quad (2)$$

$$X \geq 0 \quad (3)$$

式中， $f$ 为具有模糊可能性分布的模糊目标， $A$ 、 $B$ 为约束方程组的系数矩阵， $X$ 为决策变量， $C$ 为具有模糊可能性分布的模糊参数，对于上下界已知，但分布函数未知的参数，可以通过区间表征其不确定性信息，区间线性规划方法可以处理区间形式的不确定性信息，将其与模糊可能性规划方法耦合得到式(4)：

$$\underset{\sim}{\text{Min}} f^{\pm} = \sum_{j=1}^k \underset{\sim}{C}_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=k+1}^n \underset{\sim}{C}_j^{\pm} x_j^{\pm} \quad (4)$$

式(4)满足式(5)和式(6)：

$$\sum_{j=1}^k a_{ij}^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=k+1}^n a_{ij}^{\pm} x_j^{\pm} \leq b_j^{\pm}, i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$x_j^{\pm} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中， $a_{ij}^{\pm}$ ， $b_j^{\pm}$ ， $C^{\pm}$ 和 $x_j^{\pm}$ 分别为区间参数， $x_j^{\pm}$ 为决策变量，当 $j=1, 2, \dots, k$ 时， $C^{\pm}$ 和 $a_{ij}^{\pm}$ 为正系数，当 $j=k+1, \dots, n$ 时， $C^{\pm}$ 和 $a_{ij}^{\pm}$ 为负系数。 $C^{\pm}$ 为边界模糊的区间参数。三角模糊隶属度函数可以通过中心 $c$ 和点到中心的距离 $\gamma$ 表示 $C = (c, \gamma)$ ，线性条件下该隶属度函数 $\mu_c(x)$ 可以表示为：

$$\mu_c(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x < c - \gamma \text{ or } x > c + \gamma \\ 1 - \frac{|c - x|}{\gamma}, & \text{if } c - \gamma \leq x \leq c + \gamma \end{cases} \quad (7)$$

式(4)可以转换为：

$$\underset{\sim}{\text{Min}} f^{\pm} = \sum_{j=1}^k \underset{\sim}{c}_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=k+1}^n \underset{\sim}{c}_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=1}^k \gamma_j |x_j^{\pm}| + \sum_{j=k+1}^n \gamma_j |x_j^{\pm}| \quad (8)$$

通过可信度水平 $\lambda$ 反映决策者对成本和风险的考虑， $\lambda \in [0, 1]$ 一般决策者更倾向于选择高可信度

水平的情况，式(8)可以转换为：

$$\underset{\sim}{\text{Min}} f^{\pm} = \sum_{j=1}^k \underset{\sim}{c}_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=1}^k \lambda \gamma_j |x_j^{\pm}| + \sum_{j=k+1}^n \underset{\sim}{c}_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=k+1}^n \lambda \gamma_j |x_j^{\pm}| \quad (9)$$

该方法可以处理目标函数或约束条件中的区间参数、模糊可能性分布的不确定性问题，但是无法处理参数的随机不确定性。机会约束规划方法能够处理参数符合概率分布的问题。将 CCP 与 FPP、ILP 耦合，构建区间模糊机会约束规划方法，处理变量或参数的区间、模糊可能性分布、概率分布的不确定。该方法可以表示为：

$$\underset{\sim}{\text{Min}} f^{\pm} = \sum_{j=1}^k \underset{\sim}{c}_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=1}^k \lambda \gamma_j |x_j^{\pm}| + \sum_{j=k+1}^n \underset{\sim}{c}_j^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=k+1}^n \lambda \gamma_j |x_j^{\pm}| \quad (10)$$

满足：

$$\sum_{j=1}^k a_{ij}^{\pm} x_j^{\pm} + \sum_{j=k+1}^n a_{ij}^{\pm} x_j^{\pm} \leq b_j^{(q_i)\pm}, i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$x_j^{\pm} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$q_i$ 为违反此约束所允许的概率。根据交互式求解算法<sup>[31]</sup>，可以将具有不确定变量或参数的模型拆分为下界和上界 2 个子模型。以包含式(10)、式(11)和式(12)的模型为例，下界子模型可以表示为：

$$\underset{\sim}{\text{Min}} f^{-} = \sum_{j=1}^k \underset{\sim}{c}_j^{-} x_j^{-} + \sum_{j=1}^k \lambda \gamma_j |x_j^{-}| + \sum_{j=k+1}^n \underset{\sim}{c}_j^{-} x_j^{-} + \sum_{j=k+1}^n \lambda \gamma_j |x_j^{-}| \quad (13)$$

满足：

$$\sum_{j=1}^k |a_{ij}|^{+} \text{Sign}(a_{ij}) x_j^{-} + \sum_{j=k+1}^n |a_{ij}|^{-} \text{Sign}(a_{ij}) x_j^{-} < b_j^{(q_i)-},$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

$$x_j^{-} \geq 0, j = 1, 2, \dots, k \quad (15)$$

$$x_j^{-} \geq 0, j = k+1, k+2, \dots, n \quad (16)$$

上界子模型可以表示为：

$$\underset{\sim}{\text{Min}} f^{+} = \sum_{j=1}^k \underset{\sim}{c}_j^{+} x_j^{+} + \sum_{j=1}^k \lambda \gamma_j |x_j^{+}| + \sum_{j=k+1}^n \underset{\sim}{c}_j^{+} x_j^{+} + \sum_{j=k+1}^n \lambda \gamma_j |x_j^{+}| \quad (17)$$

满足：

$$\sum_{j=1}^k |a_{ij}|^{-} \text{Sign}(a_{ij}) x_j^{+} + \sum_{j=k+1}^n |a_{ij}|^{+} \text{Sign}(a_{ij}) x_j^{+} \leq b_j^{(q_i)+},$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$



$$x_j^+ \geq x_{j,opt}^-, j = 1, 2, \dots, k \quad (19)$$

$$x_{j,opt}^+ \geq x_j^-, j = k+1, k+2, \dots, n \quad (20)$$

式中, opt 为子模型的解。

因此, 基于不确定性方法的模型求解步骤为:

- ①根据区间模糊机会约束规划方法将目标函数和约束条件转换为区间规划问题;
- ②对区间线性规划问题求解, 将模型拆分为下界子模型, 求解模型得到  $f_{opt}^-$ ;
- ③构建上界子模型, 求解模型得到  $f_{opt}^+$ ;
- ④综合上下界子模型的求解结果, 得到模型最优解: 总成本表示为  $[f_{opt}^-, f_{opt}^+]$ , 决策变量表示为  $x_{opt}^\pm = [x_{opt}^-, x_{opt}^+]$ 。

### 1.2 基于区间模糊机会约束规划方法的 CCUS 源汇匹配模型

与以往模型不同, 构建该模型时考虑所有变量或参数的不确定性特征 (图 1)。

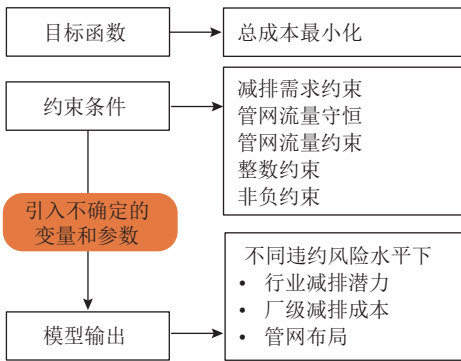


图 1 模型框架

Fig. 1 Framework of model

对模型涉及变量与参数进行分类, 引入适当函数对其进行数学描述, 以总成本最小化为目标函数, 通过区间变量或参数表示规划期内项目总成本  $f^\pm$ , 排放源  $i$  和封存地  $j$  累计捕集量  $CE_i^\pm$  与封存量  $SE_j^\pm$ , 驱油的收益系数 (油价、桶吨比、驱替比)  $r^\pm$ , 节点之间管网的长度  $DS_{n,m}^\pm$ 。用可用模糊变量或参数表示行业单位捕集成本  $cC_i^\pm$ , 单位封存成本  $cS_j^\pm$ , 管道单位长度资本投资成本  $cp_i^\pm$ , 管道单位长度运行和维护成本  $cpo_d^\pm$ 。可用二进制变量表示管网能否匹配到封存地  $Yc_i$ , 封存地能否链接到排放源  $Ys_j$ , 封存地是否为油田  $Yo_j$ 。用不等式表示约束条件, 如减排需求、管网流量、封存潜力约束等, 则不确定条件下源汇匹配模型可表示为:

$$\begin{aligned} \text{Min } f^\pm = & \sum_i CE_i^\pm \times cC_i^\pm \times Yc_i + \\ & \sum_j SE_j^\pm \times cS_j^\pm \times Ys_j - r^\pm \times SE_j^\pm \times Yo_j + \\ & \sum_{(n,m)} \sum_d (cp_i^\pm + cpo_d^\pm) \times DS_{n,m}^\pm \times Yp_{(n,m),d} \end{aligned} \quad (21)$$

约束条件为:

- 1) 减排需求约束: 排放源的捕集量大于累计减排需求  $T$ , 以确保实现各行业累计减排需求。

$$\Pr \left\{ \sum_i CE_i^\pm \times Yc_i \geq T^\pm \right\} \geq 1 - P_k, \quad \forall k = 1, 2, \dots, \eta \quad (22)$$

$P_k$  为事件的违约风险。在系统可承受范围内允许项目存在一定的违约风险, 在较低风险水平下能够确保 CCUS 项目较高的稳定性, 但是项目成本较高; 适当放宽约束条件, 允许其存在一定水平的违约风险时, 有利于降低项目成本。对于以下 2 个事件: 一是所有排放源的减排潜力大于行业的累计减排潜力, 二是封存地的累计封存量不能超过其累计封存潜力, 本文将设置不同违约概率, 如 0.1, 0.2 和 0.3。约束条件成立的概率, 不小于约束成立的置信区间  $(1 - P_k)$ 。

- 2) 管网流量守恒

$$\begin{aligned} SE_n^\pm \times Yr_n^\pm = & CE_n^\pm \times Yc_n + \sum_{(m,n)} XP_{(m,n)}^\pm \times p - \\ & \sum_{(n,m)} XP_{(n,m)}^\pm \times p, \forall n \in N \end{aligned} \quad (23)$$

若节点  $n$  为排放源, 则排放源的捕集量等于流出量; 若节点  $n$  为封存地, 封存地的总封存量等于流入量; 若节点  $n$  为中间节点, 其总流入量  $XP_{(m,n)}^\pm$  等于其总流出量  $XP_{(n,m)}^\pm$ ,  $p$  为所有年份。

- 3) 管网流量约束: 管网流量受管道的流量上限约束。

$$\begin{aligned} \sum_{(n,m)} am_{(n,m)}^\pm \leq & \sum_d \sum_t Yp_{(n,m),d} \times upp_d, \\ \forall (n,m) \in & \text{弧 } \widehat{nm} \end{aligned} \quad (24)$$

式中, 弧  $\widehat{nm}$  之间的管网流量  $am_{(n,m)}^\pm$  不能超过直径为  $d$  的管道的流量上限阈值  $upp_d$ 。

- 4) 封存潜力约束: 封存地  $j$  的累计封存量不能超过其累计封存潜力。

$$\Pr \{ SE_j^\pm \leq csp_j^\pm \} \geq 1 - P_k, \forall j \in J, k = 1, 2, \dots, \eta \quad (25)$$

式中,  $csp_j^\pm$  为封存地  $j$  的累计封存潜力。

- 5) 注入能力约束: 封存地  $j$  的实际年封存量不超过其最大注入速率与打井数的积。

$$SE_j^\pm / p \leq r_j^\pm w \quad (26)$$

式中,  $w$  为封存地  $j$  的打井数, 如果  $\text{CO}_2$  注入速率过大, 将会导致地层破坏, 诱发碳泄漏或地震等灾害, 因此假设封存地打井数小于 50 口。

- 6) 整数约束: 可用二进制变量表示管网能否匹配到封存地, 封存地能否链接到排放源, 封存地是否为油田, 两节点间是否使用直径为  $d$  的管道。

$$Y_{C_i} = \begin{cases} 1, & \text{排放源 } i \text{ 能通过管网匹配到封存地} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, \forall i \quad (27)$$

$$Y_{S_j} = \begin{cases} 1, & \text{封存地 } j \text{ 能链接到排放源} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, \forall j \quad (28)$$

$$Y_{O_j} = \begin{cases} 1, & \text{封存地 } j \text{ 是油田} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, \forall j \quad (29)$$

$$Y_{P_{(n,m),d}} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } n \text{ 到 } m \text{ 之间使用直径为 } d \text{ 的管道} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}, \forall n, m, d \quad (30)$$

通过交互式求解算法对模型进行求解。

### 1.3 数据来源

在减排需求方面, 根据《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告(2023)》等与文献[38], 综合已有排放源信息, 确定未来 CCUS 技术在我国各行业中主要年份的减排贡献。在关键技术参数方面, 研究涉及的地理信息数据包括点源数据(煤电 82 个、钢铁 20 个、水泥 64 个和煤化工 6 个), 点源的信息包括设备的装机容量、服务年限、生产效率、能耗和运行时间等, 数据来源有 *Global Power Plant Database*, *The Global Coal Plant Tracker*, 《中国电力年鉴》和 *Carbon Emission Accounts and Datasets*[39] 等; 封存地为 40 km×40 km 的网格数据, 包括苏北、南华北和东海盆地, 封存地类型有陆上咸水、陆上油田、海上咸水和海上油田。在关键经济参数方面, 本项目涉及到的成本主要包括煤电、钢铁和水泥行业捕集环节的资本投资成本、运

行和维护成本, 煤化工的捕集成本包括单位工艺捕集成本和单位常规捕集成本; 管道、封存运输成本包括资本投资和运行维护成本; 驱油收益主要受油价和驱替比的影响。经济相关数据来源于 GCCSI[40] 和文献[41-42] 等。在管网路径部署方面, 假设候选管网路径沿着现有陆上国道和陆海天然气管道建设, 允许源与源、源与汇、汇与汇之间连通, 源与汇需要在一定的距离范围内接入管网。

## 2 不确定性条件下长三角地区 CCUS 源汇匹配分析

### 2.1 长三角地区多行业 CCUS 减排潜力分析

考虑到技术、经济和政策的发展, 假设在 2030 年对长三角地区排放源进行大规模 CCUS 技术改造。由于燃煤电厂、钢铁厂、水泥厂和煤化工厂的设备运行年限为 45、30、40 和 40 a 左右, CCUS 技术投资回收期为 15 a, 因此, 选择“至 2030 年剩余寿命超过 15 a”作为排放源筛选标准, 符合 CCUS 改造条件的燃煤电厂、钢铁厂、水泥厂和煤化工厂分别有 82、20、64 和 6 个。图 2 描述了长三角地区排放源、封存地和真实陆海管网分布。其中, 燃煤电厂主要分布在江苏(34 个)南部, 安徽(29 个)中南部和浙江沿海地区, 超过 50% 的钢铁厂和煤化工厂分布在江苏省, 近 50% 的水泥厂分布在安徽省。上海市排放源为燃煤电厂(3 个)和钢铁厂(2 个)。浙江主要排放源为燃煤电厂(16 个)、钢铁厂(16 个)和水泥厂(14 个)。煤电厂和钢铁厂是主要排放源, 碳排放量分别为 5.06 亿、2.05 亿 t/a, 水泥厂碳排放量为 1.15 亿 t/a,

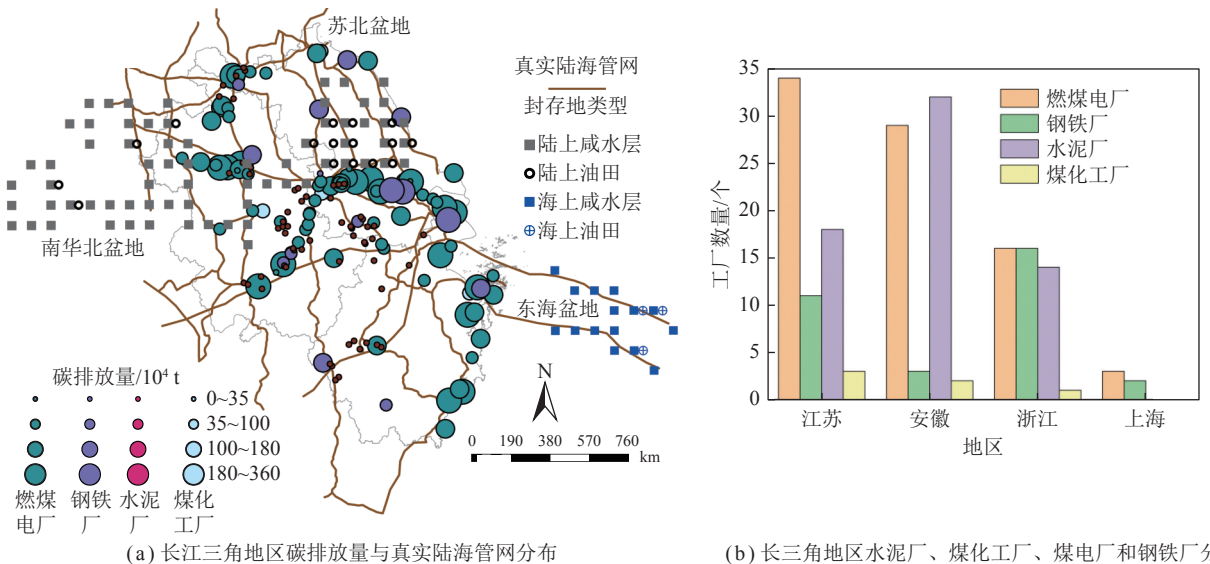


图 2 长江三角地区排放源数量、碳排放量及真实陆海管网分布

Fig. 2 Distribution of emission sources, carbon emission and real land-sea pipe network in the Yangtze River Delta region

化工厂碳排放量最低为 0.24 亿 t/a。

考虑到真实地理位置及 CCUS 项目经济性,长三角地区适宜进行 CO<sub>2</sub> 封存的盆地包括陆上苏北和南华北盆地、海上东海盆地,由于封存地自身地质条件及机构统计方法均有不同,盆地封存潜力评估具有较大不确定性,长三角地区陆上咸水层和油田的封存潜力分别为 [1 907, 2 281] 亿 t 和 [0.68, 0.82] 亿 t,海上咸水层和油田的封存潜力分别为 [3 560, 4 257] 亿 t 和 [0.25, 0.28] 亿 t,长三角地区真实陆海管网长度共计 11 073 km。

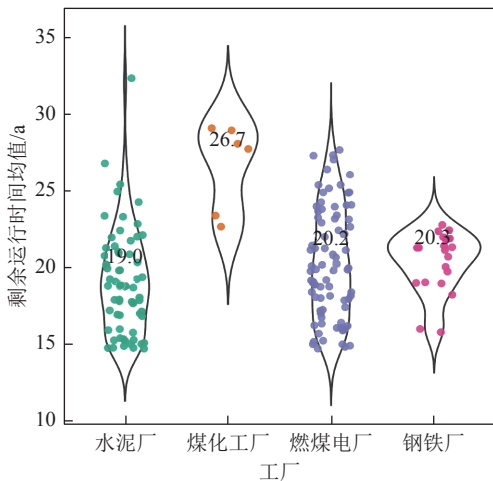
如图 3 (a) 所示,煤电厂、钢铁厂、水泥厂和煤化工厂剩余运行时间均值分别为 20.2、20.3、19.0、26.7 a。为实现碳减排目标,避免资产搁浅,降低经济损失,有必要对其进行 CCUS 技术改造。随着技术进步,捕集效率不断提高,逐渐从 90% 提高到 95% (图 3 (b)),导致各厂捕集潜力评估存在不确定性,各煤电厂、钢铁厂、水泥厂和煤化工厂捕集潜力的均值为 [87, 92]、[141, 149]、[21, 44] 和 [106, 112] Mt/a。

根据《中国二氧化碳捕集利用与封存年度报告(2023)》,到 2060 年中国 CCUS 减排需求约为 21.1 亿~25.3 亿 t/a。本研究根据碳中和目标下全国 CCUS 减排需求及长三角地区实际碳排放量占比,分析该地区多行业 CCUS 减排需求(表 1)。根据实际情况,存在总捕集量无法满足减排需求的可能性,因此将该事件的违约风险水平设为 10%、20%、30%、40% 和 50%,分析不同违约风险水平下,长三角地区多行业 CCUS 源汇匹配部署方案及厂级平准化成本。减排潜力在一定的区间内符合随

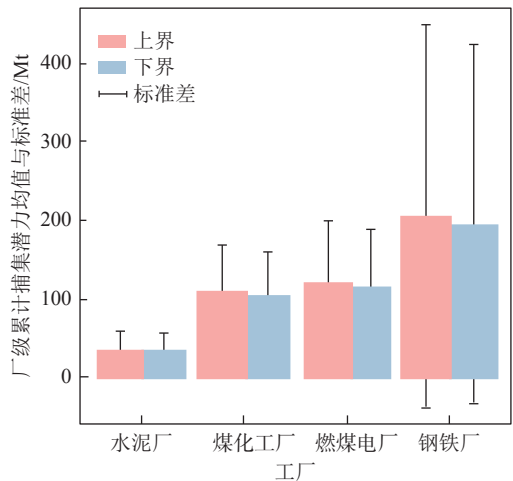
机分布特征,其均值和标准差见表 1。根据概率密度函数,确定不同违约风险水平下各行业减排需求,并将随机特征的不确定性参数引入模型中。在违约可能性较低(10% 违约概率)情况下,2030—2060 年,可进行 CCUS 改造的煤电、钢铁、水泥和煤化工数量分别为 [30, 53]、[4, 9]、[5, 11] 和 [1, 3];减排需求分别为 [38.79, 59.51]、[6.61, 10.11]、[2.75, 4.54]、[1.34, 2.04] Mt。在违约可能性较高,即 50% 违约概率下,2030—2060 年,可进行 CCUS 技术改造的煤电、钢铁、水泥和煤化工数量分别为 [37, 42]、[3, 7]、[7, 11] 和 [2, 3];减排需求分别为 [45.88, 52.42]、[7.64, 9.08]、[3.28, 4.01]、[1.55, 1.84] Mt。总体而言,煤电行业减排需求最高,其次为钢铁、煤化工和水泥行业。

## 2.2 多重不确定性条件下 CCUS 源汇匹配布局规划方案

受技术、经济和政策等多重不确定性因素影响,长三角地区 CCUS 部署方案呈现显著异质性。图 4 明确了满足约束(不违约)和 10%~50% 违约风险水平下长三角地区 CCUS 源汇匹配部署方案。结果表明,在满足约束(不违约)情况下,匹配到 47 个排放源,其累计捕集 CO<sub>2</sub> 潜力为 4 728 Mt。煤电行业匹配到 30 个,累计捕集 CO<sub>2</sub> 潜力为 3 713 Mt。当违约概率为 10% 时,匹配到 40~76 个排放源,累计捕集潜力为 [4 782, 7 763] Mt。煤电、钢铁、水泥和煤化工累计捕集潜力分别为 [3 856, 5 963]、[602, 1 091]、[221, 409] 和 [104, 301] Mt。当违约概率为 50% 时,共匹配到 49~63 个排放源,累计捕集潜力 [5 961, 6 884] Mt。煤电、钢铁、水泥和煤化



(a) 长三角地区水泥厂、煤化工厂、燃煤电厂和钢铁厂剩余寿命分布



(b) 厂级累计碳捕集潜力均值与标准差

图 3 长三角地区排放源剩余寿命分布及厂级累计碳捕集潜力

Fig. 3 Residual lifespan distribution of emission sources and cumulative carbon capture potential at plant level in the Yangtze River Delta region

表 1 长三角地区多行业 CCUS 减排需求

Table 1 CCUS emission reduction demands of multi-industry in the Yangtze River Delta region

排放源	减排需求/(亿t·a <sup>-1</sup> )							
	均值	标准差	基础情景 (BAU)	违约水平				
				p=0.1	p=0.2	p=0.3	p=0.4	p=0.5
燃煤电厂	49.15	6.30	49.15	[38.79, 59.51]	[41.05, 57.24]	[42.57, 55.72]	[43.83, 54.46]	[45.88, 52.42]
钢铁厂	8.36	1.06	8.36	[6.61, 10.11]	[7.05, 9.67]	[7.24, 9.48]	[7.46, 9.26]	[7.64, 9.08]
水泥厂	3.64	0.54	3.64	[2.75, 4.54]	[2.95, 4.34]	[3.08, 4.21]	[3.19, 4.10]	[3.28, 4.01]
煤化工	1.69	0.21	1.69	[1.34, 2.04]	[1.42, 1.97]	[1.47, 1.91]	[1.51, 1.87]	[1.55, 1.84]

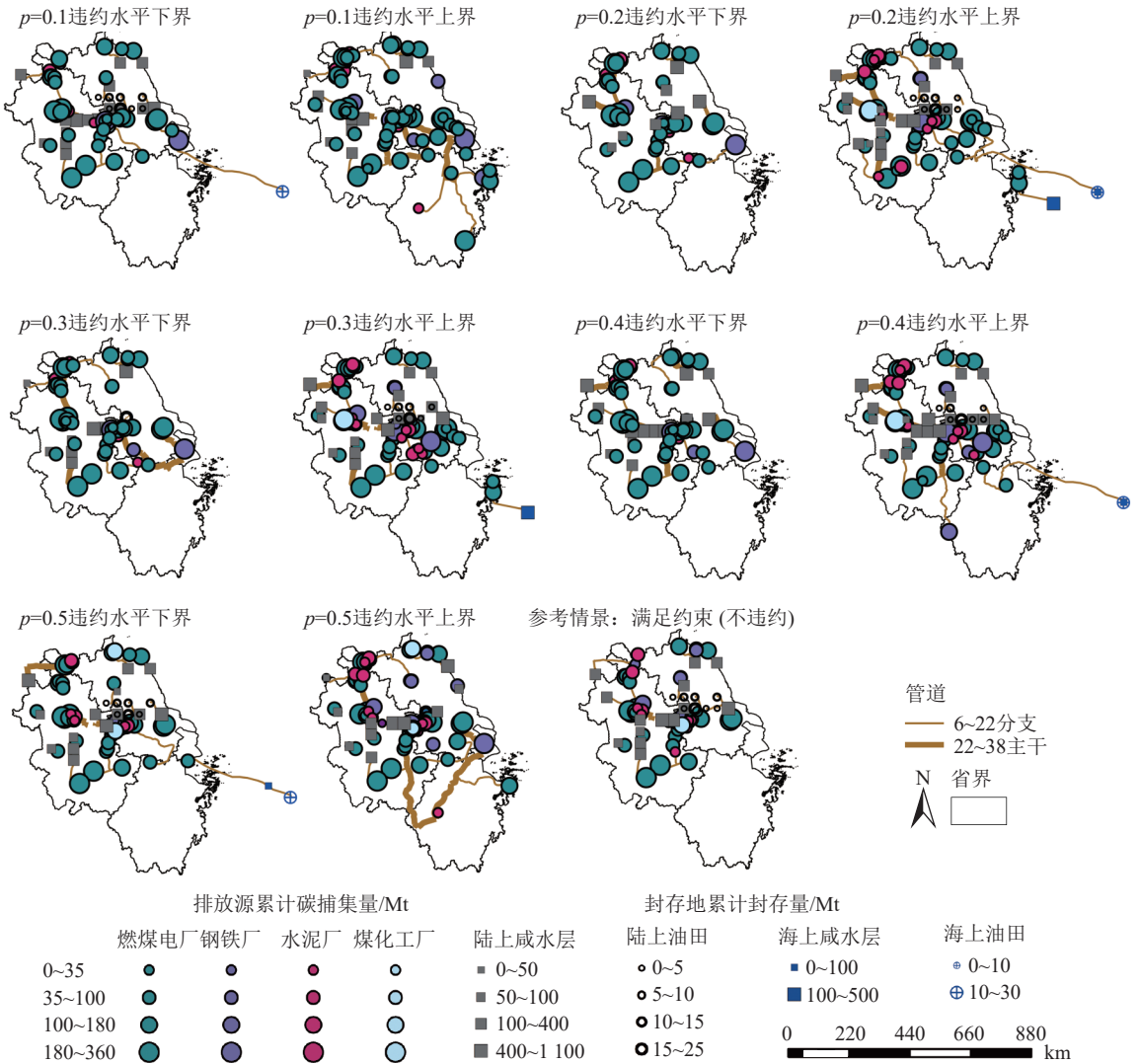


图 4 违约概率为 10% ~ 50% 情况下长三角地区 CCUS 源汇匹配布局方案

Fig. 4 CCUS source-sink matching layout in Yangtze River Delta with constrain-violation probability of 10% - 50%

工累计捕集潜力分别为 [4 607, 5 212]、[810, 963]、[301, 409] 和 [244, 301] Mt。当违约概率越高时，减排需求量更加集中在概率密度函数的均值附近，其减排需求将越高，因此在较高的减排需求约束下，匹配到的排放源数量及捕集潜力均呈增加态势。

在同一违约概率水平下，由于捕集需求、潜力及成本等仍具有多重不确定性，导致 CCUS 源汇匹配布局存在显著异质性。例如，在 50% 违约概率水平下，为同时满足上界模型中的减排需求和项目经济性，需要增加水泥厂的改造数量，因此可对浙江



省中部的的水泥厂进行CCUS技术改造,同时通过两条主干管道将捕集的CO<sub>2</sub>封存至苏北和南华北盆地。此外,对江苏南部3个钢铁厂进行CCUS技术改造,可增加636.8 Mt CO<sub>2</sub>捕集量。

在违约概率为20%和40%的上界模型中,为了满足成本最小化的目标,源汇匹配遵循就近封存的原则。同时,为了满足给定的减排需求,选择浙江东部电厂进行CCUS技术改造,考虑到项目整体经济性,将利用现有的陆海管网将CO<sub>2</sub>运输至东海盆地进行封存,包括海上和陆上封存地,海上油田封存将产生驱油收益,因此在这2种情况下,均匹配到东海盆地的海上油田和海上咸水层。但是,在违约概率为20%和40%的下界模型中,并未匹配到海上封存地。结果表明,在多重不确定性条件下,技术和经济等差异将导致不同的源汇匹配布局方案。

### 2.3 CCUS项目经济性分析

在不考虑CCUS项目不确定性情况下,CCUS项目总成本为986.7亿美元,累计碳捕集量为47.28亿t(图5)。当违约概率水平从10%增加到50%时,项目总成本呈现先降低后增加的趋势。当违约概率分别为20%、30%和50%时,项目总成本高于BAU项目总成本。

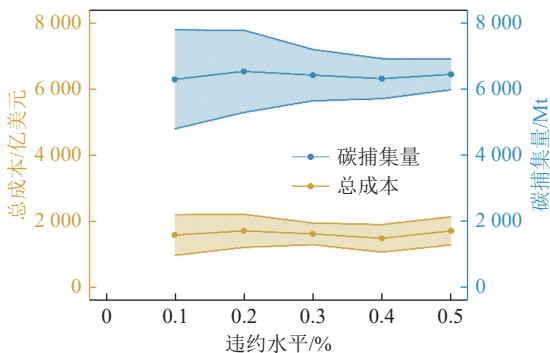


图5 不同违约水平下CCUS项目总成本和累计碳捕集量

Fig. 5 Total cost and cumulative carbon capture of CCUS project under constrain-violation probabilities

研究发现,现有的确定性研究对项目总成本的评估往往低于实际值。当违约概率为40%时,项目总成本最低,为[1 074, 1 903]亿美元。从累计碳捕集量的角度来看,上界子模型碳捕集量随违约概率的增加呈现先降低后增加的趋势,下界子模型碳捕集量随违约概率的增加呈现逐渐增加的趋势。同样,该违约概率下,2030—2060年累计碳捕集量为[56.9, 69.0]亿t,碳捕集量的均值最低,为63亿t。总体而言,在违约风险较高(40%)时,项目总成本最低,同时碳捕集潜力也最低。在违约风险较低

(10%)时,项目总成本最高,但碳捕集潜力并不高。因此,决策者在制定政策时应综合考虑风险、成本及减排效益的权衡。

厂级平准化减排成本受捕集成本、运输成本和封存成本等多种因素影响。如图6所示,在10%、40%和50%违约概率下,上界子模型的平准化减排成本高于下界子模型。在10%~50%违约概率下,所有的排放源中,江苏省煤制烯烃化工厂平准化减排成本最低(12美元/t),其次为江苏扬州燃煤电厂(22.9美元/t)。在10%、30%和40%违约水平下,上界子模型中平准化减排成本低于30美元/t的排放源数量分别为4、1和1个,分别占筛选出排放源总数的5.26%、1.49%和1.56%;该水平下,项目减排潜力较大,分别为77.6亿、71.3亿和69.0亿t,尽管项目整体减排潜力较大,但是厂级平准化减排成本偏高,对排放源造成较大的经济压力。在40%违约概率下,平准化减排成本低于30美元/t的排放源数量最多(20个),占筛选出排放源总数的38.5%,累计厂级碳捕集潜力56.9亿t。总体而言,在违约概率为40%,减排需求处于较低水平时,厂级平准化减排成本最低,排放源碳减排经济压力较小,进行CCUS技术改造具有较高经济可行性。

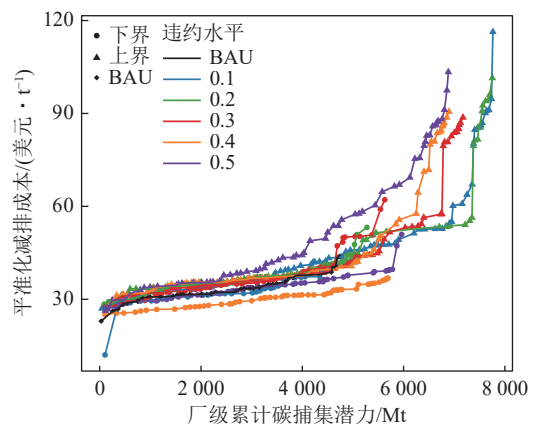


图6 不同违约概率下平准化减排成本及厂级累计捕集潜力

Fig. 6 Levelized cost of emission reduction and cumulative carbon capture potential at plant level under constrain-violation probabilities

## 3 结 语

围绕CCUS项目面临复杂不确定性的问题,研究通过模糊可能性、随机机会约束和区间线性规划等方法,构建基于区间机会约束规划方法的CCUS源汇匹配模型,应用在中国长三角地区CCUS源汇匹配的实际问题中,探究风险管理和决策支持方案。研究发现,在多重不确定性条件下,技术成熟度、经济成本和减排需求等差异将导致源



汇匹配布局方案产生显著变化,例如,在不同违约概率下,排放源和封存地的数量、分布差异显著导致不同部署方案下减排潜力差异显著。从项目总成本的角度分析,不确定性对成本评估影响较大,与确定性的模型相比,考虑多重不确定性提高了项目总成本评估的科学性、准确性,更符合工程实际。从厂级平准化减排成本的角度分析,多重不确定性条件下厂级平准化减排成本差异显著,探究不确定性条件下的厂级平准化减排成本,能够帮助降低排放源碳减排经济压力,提高 CCUS 技术改造的经济可行性,加快 CCUS 大规模部署。因此,将多重不确定性纳入模型综合考虑,探究不确定性条件下的 CCUS 源汇匹配部署方案,在提高项目经济性、可行性等方面具有重要的实际意义。

## 参考文献 (References):

- [1] 张贤,李阳,马乔,等.我国碳捕集利用与封存技术发展研究[J].中国工程科学,2021,23(6):70-80.  
ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Proceedings of CSEE, 2021, 23(6): 70-80.
- [2] 科技部社会发展科技司,中国 21 世纪议程管理中心.中国碳捕集利用与封存技术发展路线图[M].北京:科学出版社,2019.
- [3] 彭雪婷,吕昊东,张贤. IPCC AR6 报告解读:全球碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展评估[J].气候变化研究进展,2022,18(5):580-590.  
PENG Xueting, LYU Haodong, ZHANG Xian. Interpretation of IPCC AR6 report on carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology development[J]. Climate Change Research, 2022, 18(5): 580-590.
- [4] 《第四次气候变化国家评估报告》编写委员会.第四次气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2022.
- [5] 张贤,杨晓亮,鲁玺,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[R/OL].2023[2024-06-27]. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2023/03/CCS-Progress-in-China-CN.pdf>.
- [6] 国家统计局.中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL].(2024-02-29)[2024-06-27]. [http://www.gov.cn/lianbo/burnen/202402/content\\_6934935.htm](http://www.gov.cn/lianbo/burnen/202402/content_6934935.htm).
- [7] 张九天,张璐.面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J].热力发电,2021,50(1):1-6.  
ZHANG Jiutian, ZHANG Lu. Preliminary discussion on development of carbon capture, utilization and storage for carbon neutralization.[J]. Thermal power generation, 2021, 50(1): 1-6.
- [8] 王灿,张雅欣.碳中和愿景的实现路径与政策体系[J].中国环境管理,2020,12(6):58-64.  
WNAG Can, ZHANG Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.
- [9] WEI N, LI X, LIU S, et al. A strategic framework for commercialization of carbon capture, geological utilization, and storage technology in China[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 110: 103420.
- [10] 中共中央 国务院.关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL].2021[2024-06-27]. [https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm).
- [11] BLACK F, SCHOLLES M. The pricing of options and corporate liabilities[J]. Journal of Political Economy, 1973, 81(3): 637-654.
- [12] MERTON R C. An analytic derivation of the cost of deposit insurance and loan guarantees an application of modern option pricing theory[J]. Journal of Banking & Finance, 1977, 1(1): 3-11.
- [13] KOZLOVA M. Real option valuation in renewable energy literature: Research focus, trends and design[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 180-196.
- [14] NARITA D, KLEPPER G. Economic incentives for carbon dioxide storage under uncertainty: a real options analysis[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2016, 53: 18-27.
- [15] DIXIT A K, PINDYCK R S. Investment under uncertainty[M]. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- [16] FAN J L, LI Z, DING Z, et al. Investment decisions on carbon capture utilization and storage retrofit of Chinese coal-fired power plants based on real option and source-sink matching models[J]. Energy Economics, 2023, 126: 106972.
- [17] YANG L, WEI N, LYU H, et al. Optimal deployment for carbon capture enables more than half of China's coal-fired power plant to achieve low-carbon transformation[J]. iScience, 2022, 25(12): 105664.
- [18] FAN J, SHEN S, XU M, et al. Cost-benefit comparison of carbon capture, utilization, and storage retrofitted to different thermal power plants in China based on real options approach[J]. Advances in Climate Change Research, 2020, 11(4): 415-428.
- [19] KOUKOZAS N, CHRISTOPOULOU M, GIANNAKOPOULOU P P, et al. Current CO<sub>2</sub> capture and storage trends in Europe in a view of social knowledge and acceptance. a short review[J]. Energies, 2022, 15(15): 5716.
- [20] NIELSEN J A E, STAVRIANAKIS K, MORRISON Z. Community acceptance and social impacts of carbon capture, utilization and storage projects: A systematic meta-narrative literature review[J]. Plos One, 2022, 17(8): e0272409.
- [21] AGATON C B. Areal options approach to renewable and nuclear energy investments in the philippine[M]. Berlin: Logos Verlag Berlin GmbH, 2019.
- [22] MYERS S C. Determinants of corporate borrowing[J]. Journal of Financial Economics, 1977, 5(2): 147-175.
- [23] HAN N, HUNG M, WU I S. The effect of cutting interest rates on corporate investments: a real options model[J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2024, 40(2): 512-526.
- [24] GAN L, LI Q. Research on R&D project investment decision and optimal government subsidies[J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(2): 63-72.
- [25] SUN B, FAN B, ZHANG Y, et al. Investment decisions and strategies of China's energy storage technology under policy uncertainty: a real options approach[J]. Energy, 2023, 278: 127905.

- [26] LI L, ZHU L, FAN Y. Competitive investment strategy for renewable power generation under uncertainty[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(7): 11–17.
- [27] WEI N, JIAO Z, ELLETT K, et al. Decarbonizing the coal-fired power sector in china via carbon capture, geological utilization, and storage technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(19): 13164–13173.
- [28] DIDIER D, HENRI P. *Fuzzy Sets and systems: theory and applications*[M]. New York: Academic Press, 1985.
- [29] HUANG G, BAETZ B, PATRY G. A gray fuzzy linear-programming approach for municipal solid-waste management planning under uncertainty[J]. *Civil Engineering Systems*, 1993, 10(2): 123–146.
- [30] BIRGE J, LOUVEAUX F. *Introduction to Stochastic Programming, Second Edition*[M]. New York: Springer New York, 2011.
- [31] HUANG G, BAETZ B, PATRY G. A gray linear-programming approach for municipal solid-waste management planning under uncertainty[J]. *Civil Engineering Systems*, 1992, 9(4): 319–335.
- [32] LIN X, HUANG G, ZHOU X, et al. An inexact fractional multi-stage programming (IFMSP) method for planning renewable electric power system[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2023, 187: 113611.
- [33] CHEN L, HUANG G, CHEN J, et al. Development of a multi-regional factorial optimization model for supporting electric power system's low-carbon transition-a case study of Canada[J]. *Resources Conservation And Recycling*, 2023, 194: 106995.
- [34] LI J Z, HUANG G H, LI Y P, et al. Development of a multi-region power system risk management model for supporting China's carbon neutrality ambition in 2060s[J]. *Earths Future*, 2022, 10(9): e2021EF002230.
- [35] WANG Z, CHEN Z, AN C. Improving solid waste management in remote First Nations communities through inventory-theory-based optimization[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2023, 51(1): 27–46.
- [36] HAN D, HUANG G, ZHANG X, et al. A multi-stochastic SMR siting model applied to the Province of Saskatchewan, Canada: Emphasis on technological competition and policy impacts[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2022, 178: 106059.
- [37] ZHANG X, LI K, WEI N, et al. Advances, challenges, and perspectives for CCUS source-sink matching models under carbon neutrality target[J]. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 12.
- [38] 魏一鸣, 余碧莹, 唐葆君, 等. 中国碳达峰碳中和时间表与路线图研究 [J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2022, 24(4): 13–26.
- WEI Yiming, YU Biying, TANG Baojun, et al. Roadmap for achieving China's carbon peak and carbon neutrality pathway[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2022, 24(4): 13–26.
- [39] LEI T, WANG D, YU, et al. Global iron and steel plant CO<sub>2</sub> emissions and carbon-neutrality pathways[J]. *Nature*, 2023, 622(7983): 514–520.
- [40] GCCSI. Global status of CCS report 2023[R/OL].(2023–11–09)[2024–06–27]. <https://status23.globalccsinstitute.com/>.
- [41] 中国水泥协会. 2022年中国水泥行业经济运行报告[R/OL].[2024–06–27]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/bztt/202306/W020230605413586179091.pdf>
- [42] 中国钢铁工业协会. 2022年钢铁行业经济运行报告[R].[2024–06–27]. <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/bztt/202306/W020230605413586261007.pdf>.