

◆减污降碳协同与资源全元素高效利用◆

## 典型企业尿素碳足迹核算及降碳潜力分析

李素玉<sup>1,2</sup>, 李航<sup>3,4</sup>, 王婷<sup>1,2</sup>, 刘绿怡<sup>1,2</sup>, 李艳丽<sup>1,2</sup>, 王莉<sup>3,4</sup>

(1. 河南省生态环境技术中心, 河南 郑州 450004; 2. 河南省生态环境损害鉴定评估与修复工程技术研究中心, 河南 郑州 450004; 3. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 4. 河南省减污降碳协同工程技术研究中心, 河南 郑州 450001)

[摘要] 在“双碳”目标的背景下, 尿素工业的碳减排工作具有重大意义。以典型尿素企业生产数据为基础, 采用生命周期法进行碳足迹核算, 并对减排措施降碳潜力进行分析, 结果表明煤制尿素的碳足迹为 $\text{CO}_2$  3 426 kg/t, 低温甲醇洗过程排放量最大, 占总排放的79%。应用绿氢和CCS(二氧化碳捕获与封存)技术后碳足迹可以分别降低48.99%和44.64%, 绿氢技术的降碳潜力略高于CCS技术。

[关键词] 尿素; 生命周期评价; 碳足迹; 碳减排

[中图分类号] TQ441; X322 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566(2025)08-0081-07

### Carbon footprint accounting and carbon reduction potential analysis of typical urea enterprise

LI Suyu<sup>1,2</sup>, LI Hang<sup>3,4</sup>, WANG Ting<sup>1,2</sup>, LIU Lyuyi<sup>1,2</sup>, LI Yanli<sup>1,2</sup>, WANG Li<sup>3,4</sup>

(1. Henan Provincial Ecological Environment Technology Center, Zhengzhou 450004, China; 2. Henan Engineering Technology Research Center of Eco-Environmental Damage Identification and Restoration, Zhengzhou 450004, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 4. Henan Provincial Collaborative Engineering Technology Research Center for Pollution Reduction and Carbon Reduction, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In the context of the “dual carbon” goal, carbon emission reduction of the urea industry is of great significance. Based on production data from a typical urea enterprise, this study employs the life cycle assessment method to account for the carbon footprint and analyze the carbon reduction potential of measures. The results show that the carbon footprint of coal-to-urea is  $\text{CO}_2$  3 426 kg/t, and the emission of low-temperature methanol washing process is the largest, accounting for 79% of the total emissions. The application of green hydrogen and CCS (carbon capture and storage) technology can be reduce carbon footprint by 48.99% and 44.64%, respectively, and the carbon reduction potential of green hydrogen technology is slightly higher than that of CCS technology.

**Key words:** urea; life cycle assessment; carbon footprint; carbon reduction

### 0 引言

2020年9月, 我国在联合国大会上宣布, 争取在2030年前实现碳达峰, 努力争取在2060年前实现碳中和。2022年7月, 工业和信息化部、国家发展和改革委员会、生态环境部联合印发《工业领域碳达峰实施方案》, 明确到2025年, 规模以上工业企业增加值能耗较2020年下降13.5%, 单位工业增加值二氧化碳排放下降幅度大于全社会下降幅度, 重点行业二氧化碳排放强度明显下降。“十五五”期间, 基本建立以高效、绿色、循环、低碳为重要特征的现代工业体系。尿素是氮含量最高且使用量最大的氮肥, 属于典型的高能耗产业。2023

年我国尿素产量高达7 500万t, 约占全球总产量的30%<sup>[1]</sup>。鉴于我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋, 尿素生产主要以煤炭为原料, 约70%的尿素生产依赖煤炭, 仅有30%以天然气为原料<sup>[2]</sup>。然而,

[收稿日期] 2025-03-31

[作者简介] 李素玉(1978-), 女, 河南南阳人, 高级工程师, 从事生态环境保护工作。

[通信作者] 王莉(1973-), 女, 河南长垣人, 教授, 从事环境规划与管理、减污降碳政策工作。

[基金项目] 中国工程院(院地合作)重大战略咨询研究项目“河南省经济社会高质量发展的生态环境保护战略研究项目”(2021HENZDA01); 河南科技智库调研课题项目“双碳”背景下河南农业碳汇发展路径研究”(HNKJZK-2024-04A)

全球大多数国家主要以天然气生产尿素<sup>[3]</sup>。与天然气相比，以煤炭为原料生产尿素时，消耗每单位能量，CO<sub>2</sub>排放量高出约70%<sup>[4]</sup>，这意味着我国尿素生产会释放更多的温室气体。在“双碳”目标的背景下，尿素工业的碳减排工作具有重大意义。

当前对尿素产品碳足迹核算的研究较少，大多数研究集中在氢、合成氨等关键中间产物。张贤等<sup>[5]</sup>对我国煤制氢工艺的碳足迹进行了量化，结果表明，传统煤制氢工艺生产每千克氢气排放CO<sub>2</sub>为17.47~29.78 kg，而经CCUS（二氧化碳的捕集、利用与封存）技术改造后，其碳足迹CO<sub>2</sub>排放量可降低至2.17~8.91 kg，减排贡献率达80.6%。在合成氨领域，刘婷婷<sup>[6]</sup>基于LCA（生命周期评价）对页岩气和传统能源制氨的环境影响进行比较研究，结果表明页岩气制氨的二氧化碳排放量为304 kg/t，煤制合成氨的二氧化碳排放量为6 180 kg/t。李淳等<sup>[7]</sup>基于SimaPro软件对煤制合成氨产品从“摇篮到大门”的碳足迹进行计算，结果表明1 t液态合成氨产品的二氧化碳排放量为6 204 kg，并提出了化学链制氢和碳捕集两种低碳技术，情景分析表明采用这两种工艺较传统煤制合成氨工艺可使碳排放降低27.99%和46.36%。

本研究采用Open-LCA模型对典型企业煤制尿素产品的碳足迹进行核算，依据核算结果提出绿氢

和CCS（二氧化碳捕集与封存）两种改进措施，并对改进后的尿素产品的碳足迹进行重新核算，旨在为尿素企业的低碳转型提供一定的理论支持。

### 1 材料与方法

#### 1.1 计算方法

Open-LCA软件由德国柏林的GreenDelta（一家独立的可持续发展咨询和软件公司）于2006年开发，是一款开源的生命周期评价（LCA）软件，其核心优势在于数据的开放性和共享性。凭借其开源特性和丰富的数据接口，Open-LCA能够自由导入Ecoinvent、CLCD等多个权威数据库，为碳足迹核算提供了广泛的数据支持。因此，本研究选用Open-LCA作为尿素产品碳足迹核算的工具，以确保数据的可靠性。

产品碳足迹核算方法见式（1）。

$$E = \sum_{i=1}^n (M_i \times CF_i) \tag{1}$$

式中， $M_i$ 为第*i*种资源的消耗量； $CF_i$ 为第*i*种物质的碳排放因子。

#### 1.2 系统边界和功能单位

本研究利用Open-LCA 2.0.4建立工艺生产模型，以1 t尿素产品为功能单位，核算尿素产品从“门到门”过程中的碳足迹。尿素生产过程系统边界如图1所示，主要包括3个单元，分别为制氢单元、合成氨单元、尿素单元。制氢单元是利用煤炭

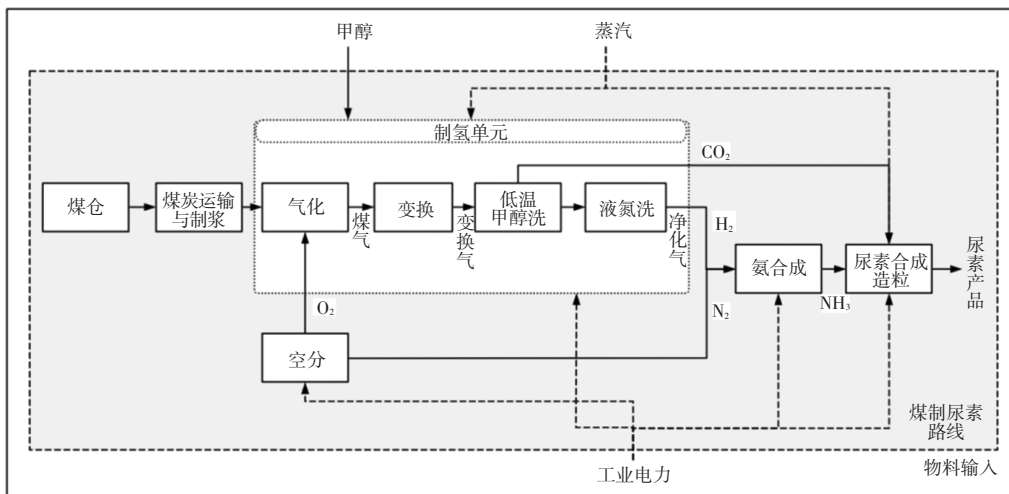


图1 煤制尿素生产工艺流程

Fig. 1 Flow chart of coal-to-urea production process

与水发生反应生产氢气的过程，其中包括皮带输送与制浆、气化、变换、低温甲醇洗及液氮洗；合成氨单元是氢气与氮气在高温高压下发生反应的过程，包括氮气、氢气压缩，氨合成；尿素单元是氨与二氧化碳反应生成尿素的过程。除此之外，还包

括锅炉、空分等辅助单元。

对系统边界作如下假设：（1）模型的系统边界都不考虑污染物排放的后续处理；（2）生产系统建设阶段的材料、能源消耗不考虑在生命周期数据清单中。

### 1.3 清单分析

本研究基础数据主要来源于河南省某尿素企业的现场调研,该企业年产尿素80万t,采用先进的水煤浆气化工工艺。尿素生产各阶段输入、输出数据见表1。原料煤经过破碎后进入棒磨机,然后与一定量的工艺水混合,磨成一定粒度分布的水煤浆。电力和水生产的背景生产数据来源于Ecoinvent数据库,下同。气化过程是水煤浆与空分来的氧气在高温高压下发生部分氧化反应,生产的煤气成分复杂,主要包括CO<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>。目标企业气化过程的蒸汽来源于余热回收,因此这里不考虑蒸汽使用量。由于数据库中并没有代表中国地区空分过程的数据,欧洲地区的空分装置同样也是电力驱动,因此空分过程使用欧洲地区的数据替代。变换过程是通过化学反应将转化气中的CO与水蒸气反应生成H<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>,进一步提高氢气的浓度。该过程主要消耗的能源为电力。低温甲醇洗和液氮洗是以低温甲醇和液氮为选择性溶剂的一种物理洗涤系统。它在一台洗涤塔中除去进料变换气中的CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S和COS(羰基硫),使洗涤后的气体能达到氨合成的要求。该过程消耗的能源也仅为电力,CO<sub>2</sub>作为副

表1 尿素生产各阶段输入输出

Table 1 Input and output of each stage of urea production

阶段	项目	参数	数量	单位		
皮带输送与制浆	输入	煤炭	909.17	kg		
		电力	22.84	kW·h		
		水	1	m <sup>3</sup>		
	输出	煤浆	1	m <sup>3</sup>		
		气化				
气化	输入	煤浆	2.9×10 <sup>-4</sup>	m <sup>3</sup>		
		O <sub>2</sub>	0.23	kg		
		电力	1.28×10 <sup>-3</sup>	kW·h		
	输出	煤气	1	m <sup>3</sup>		
变换	输入	气化气	1.51	m <sup>3</sup>		
		电力	1.21×10 <sup>-3</sup>	kW·h		
		变换气	1	m <sup>3</sup>		
低温甲醇洗及液氮洗	输入	变换气	1.76	m <sup>3</sup>		
		电力	0.31	kW·h		
		输出	净化气	1	m <sup>3</sup>	
	输出	CO <sub>2</sub>	2	kg		
		氮氢压缩	输入	净化气	0.75	m <sup>3</sup>
				N <sub>2</sub>	0.32	kg
电力	0.043			kW·h		
	输出	氮氢合成气	1	m <sup>3</sup>		
		合成氨	输入	氮氢合成气	3 118	m <sup>3</sup>
电力	34.12			kW·h		
输出	合成氨			1 000	kg	
尿素合成及造粒	输入	合成氨	576.1	kg		
		CO <sub>2</sub>	760	kg		
		电力	107	kW·h		
		蒸汽	2.62	GJ		
		输出	尿素	1 000	kg	

产物从该过程直接排出。净化气(氢气)和来自空分单元的N<sub>2</sub>以3:1的摩尔比混合经压缩机压缩,其中压缩机为电力驱动。氮氢混合气进入氨合成塔,在高温高压条件下生成合成氨。从低温甲醇洗装置送来的CO<sub>2</sub>气体加压冷却后,进入尿素合成系统的汽提塔。NH<sub>3</sub>和CO<sub>2</sub>发生冷凝及生成氨基甲酸铵的放热反应。然后氨基甲酸铵经过闪蒸、加热分解,生成尿素溶液。再用CO<sub>2</sub>汽提法对合成的尿液在135℃下进行提纯,然后造粒生产尿素颗粒。蒸汽生产数据来源于CLCD数据库。

## 2 尿素产品碳足迹核算结果

### 2.1 碳素流分析

煤炭既是尿素生产的原料,又是热能供应的燃料,对煤制尿素生产系统进行碳素流分析至关重要。以目标企业为例,全年尿素产量80万t,碳元素流动情况如图2所示,原料煤种类为烟煤,燃料煤种类为无烟煤,经检测,其对应w(C)分别为78%、83%,两者碳含量之和为全年碳元素的输入量,为67.42万t。原料煤在制氢单元发生煤气化反应,根据实际生产数据,少部分的碳元素以飞灰和煤渣的形态排出系统,分别为1 622.7 t和2 003.64 t,部分碳元素以CO<sub>2</sub>的形式作为原料输送到尿素合成单元,折合碳20.82万t。根据系统物料守恒理论,剩余碳元素直接排放到大气中,折合碳38.69万t。企业燃煤锅炉的碳氧化率为94%,因此燃料煤中70 953.89 t碳以CO<sub>2</sub>的形式直接排放,4 528.97 t碳随炉渣排出系统外。整个过程,直接排放的碳元素占总碳输入量的67.91%,炉渣和飞灰中的碳元素仅占总碳输入量的1.21%,输入到尿素单元的碳元素占总碳输入量的30.88%。值得注意的是,尿素在

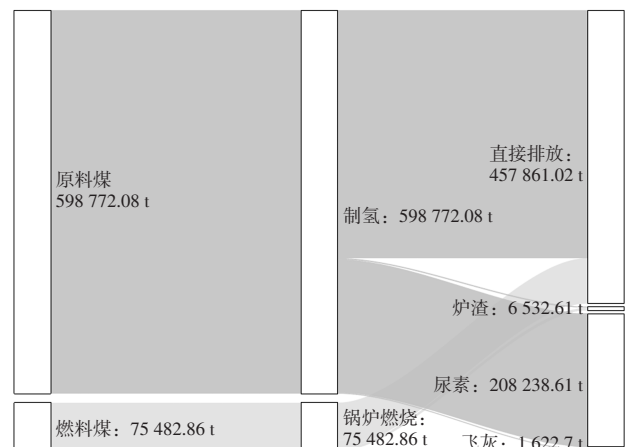


图2 煤制尿素生产系统碳素流动图

Fig. 2 Carbon flow diagram of coal-to-urea production system

施用过程会发生分解，用于尿素合成的原料CO<sub>2</sub>又将排入到大气中，整个过程中CO<sub>2</sub>的排放量并未减少。因此，本研究不考虑尿素合成过程中CO<sub>2</sub>的消耗，而是将其归于制氢单元排放进行计算。总的来看，整个系统98.79%的碳元素最终以CO<sub>2</sub>的形式排放。

### 2.2 碳足迹核算

尿素生产各工段的碳排放如图3所示，煤炭输送与制浆、变换、氨合成的碳排放主要是电力间接排放；气化过程的碳排放主要来源于氧气的生产；低温甲醇洗工段的碳排放主要由过程排放贡献。氨氮压缩工段的碳排放主要来源于氨气的生产，这是因为在该过程需要将氮气和氢气混合压缩。由于尿

素造粒工段需要将尿素溶液中的水分充分蒸发，这个过程需要大量的蒸汽，因此尿素合成及造粒工段的碳排放主要来源于蒸汽的生产过程。

尿素生产过程各工段的碳排放占比如图4所示，碳排放主要来源于低温甲醇洗工段，约占总排放量的79%，主要的原因是原料煤炭经过气化和变换副产的CO<sub>2</sub>都集中在这里排放。其次是尿素合成工段，碳排放约占总碳排放的10%。氨氮压缩和气化工段的碳排放占比均约为5%。煤炭输送与制浆工段、氨合成、变换工段的碳排放均未超过1%，可以忽略不计。

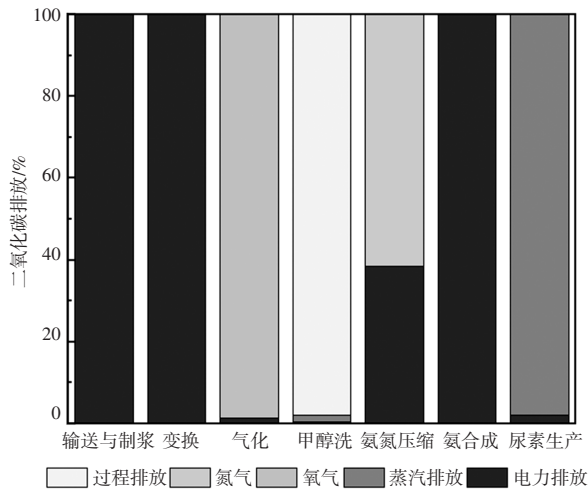


图3 尿素生产过程各工段二氧化碳排放贡献组成

Fig. 3 Composition of carbon dioxide emission contribution of each stage of urea production process

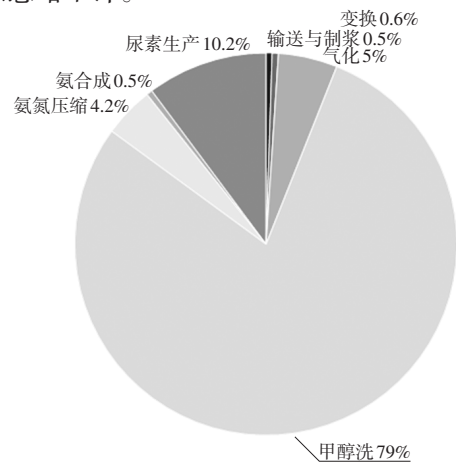


图4 尿素生产各工段二氧化碳排放占比

Fig. 4 Proportion of carbon dioxide emissions in each stage of urea production

图5为尿素生产的碳足迹网络图，能够更直观地了解尿素生产过程二氧化碳的流动。电力生产产生

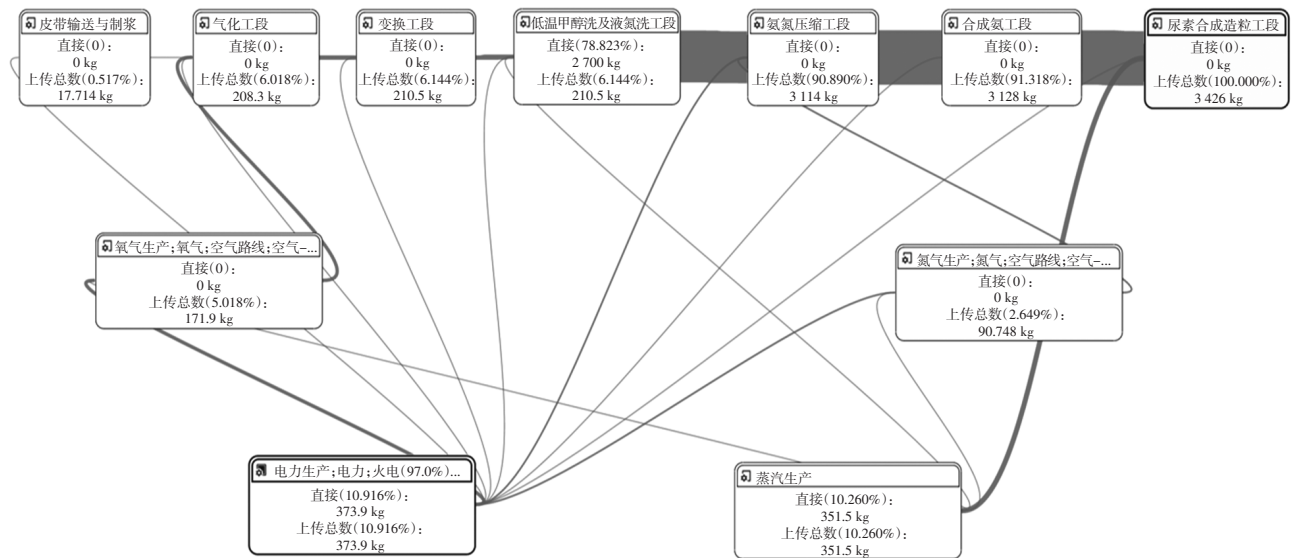


图5 尿素生产碳足迹网络图

Fig. 5 Carbon footprint network diagram of urea production

注：上传总数指从开始到目标单元过程贡献的二氧化碳量；直接指目标单元的直接排放量。

的碳足迹传输给皮带输送与制浆，然后再传输给气化工段，一级传送一级构成尿素生产的碳足迹，蒸汽、氮气、氧气生产过程也在图5中表现出来。总的来说，1 t尿素在整个生产过程的二氧化碳总排放量为3 426 kg，电力生产间接排放约占11%，蒸汽生产间接排放约占10%，过程直接排放约占79%。

### 3 尿素产品降碳潜力

在“双碳”目标的背景下，降低碳排放已成为企业必须面对的重要任务。作为国家碳中和目标的主要执行者，企业在碳中和技术研发与推广以及实际减排行动方面的表现，将直接关系到国家碳中和目标的实现进程。对于尿素企业而言，采取有效措施降低产品的碳排放尤为关键。根据上述研究结果，煤制尿素的碳排放主要来自制氢单元低温甲醇洗工段。基于此对制氢工段进行工艺路线改进（如图6所示），设置了两种情景，分别为绿氢和CCS，

从而降低尿素产品碳足迹。

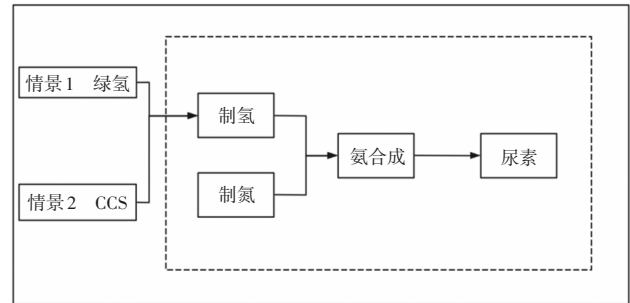


图6 尿素生产工艺路线改进

Fig. 6 Improvement of urea production process route

#### 3.1 绿氢情景

利用电解水制氢替代原料煤炭是当前研究热点<sup>[8-9]</sup>。《合成氨行业节能降碳专项行动计划》中提到“推动以可再生能源替代煤制氢，提高绿氢利用的比例”。绿氢-尿素碳足迹核算系统边界如图7所示。

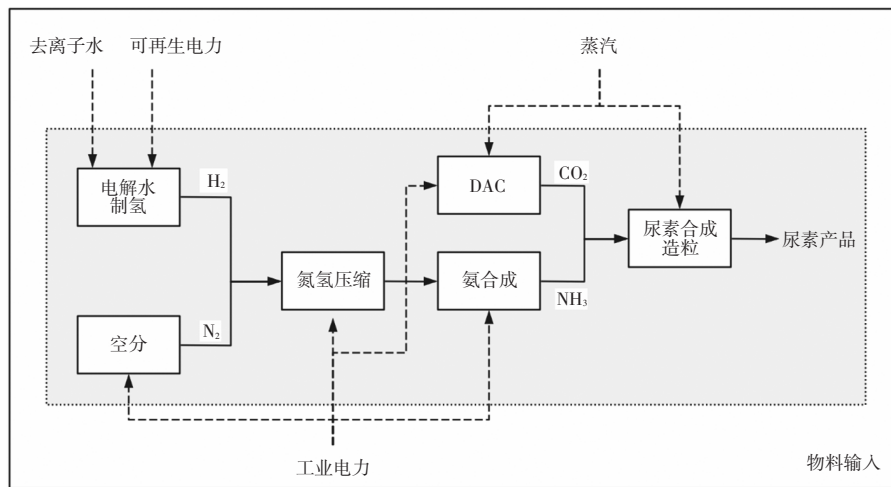


图7 绿氢-尿素碳足迹核算系统边界

Fig. 7 Boundaries of green hydrogen-urea carbon footprint accounting system

绿氢-尿素生产工艺可由电解水制氢、氨合成以及尿素合成3部分组成。碱性电解水制氢技术成本相对较低，产生的氢气纯度高，且技术相对成熟，是目前商业化程度最高的电解水制氢技术<sup>[10]</sup>。由于电解水制氢无法跟煤制氢一样，副产CO<sub>2</sub>作为尿素的原料，因此该情境中需要加入直接从大气中捕集二氧化碳技术（DAC）。固体吸附法具有低温（80~100℃）再生的优点，使其能够利用低品位热能，降低运行成本，因此本研究采用固体吸收法生产CO<sub>2</sub><sup>[11]</sup>。为保证压缩机、高压泵等设施的稳定运行，电力来源均为工业电力。碱性电解槽装置参数来源于新疆某制氢制绿氨一体化项目，见表2。DAC单元的参数来源于廖昌建等<sup>[12]</sup>的研究，见

表3。

表2 碱性电解槽装置参数清单

Table 2 Parameters of alkaline electrolyzer device

绿电/ (kW·h)	去离子水 体积/L	m(KOH)/ kg	m(N <sub>2</sub> )/ kg	m(水蒸气)/ kg
54.70	12.93	2.50	0.29	110

表3 DAC装置参数清单<sup>[12]</sup>

Table 3 DAC device parameters

捕集每吨CO <sub>2</sub> 消耗电力/GJ	捕集每吨CO <sub>2</sub> 消耗蒸汽/GJ
1.90	7.60

#### 3.2 CCS情景

基于我国的资源禀赋特征，尿素企业以煤炭为

原料的能源结构在短期内难以改变<sup>[13]</sup>。CCS技术是煤制尿素实现低碳发展的唯一方式。CCS-尿素碳足迹核算系统边界如图8所示，CCS技术由CO<sub>2</sub>捕集、运输、封存3部分组成。一般来说，CO<sub>2</sub>浓度越高其捕集能耗越低。普通燃煤电厂烟气中CO<sub>2</sub>体积分数为8%~15%，而煤制氢尾气中CO<sub>2</sub>体积分率则高达80%~90%，因此CCS技术非常适用于该

生产流程<sup>[14]</sup>。由于煤制氢CO<sub>2</sub>捕集所需的能耗可由煤制氢厂自身提供，因此可不考虑CO<sub>2</sub>捕集能耗所产生的碳足迹，以避免重复计算。低温甲醇洗排放的高浓度CO<sub>2</sub>有一部分需要作为尿素的生产原料，因此CCS技术针对剩余排入大气中的CO<sub>2</sub>。假设CO<sub>2</sub>采用管道运输，运输和封存消耗的能源以电力为主，相关的情景参数如表4所示。

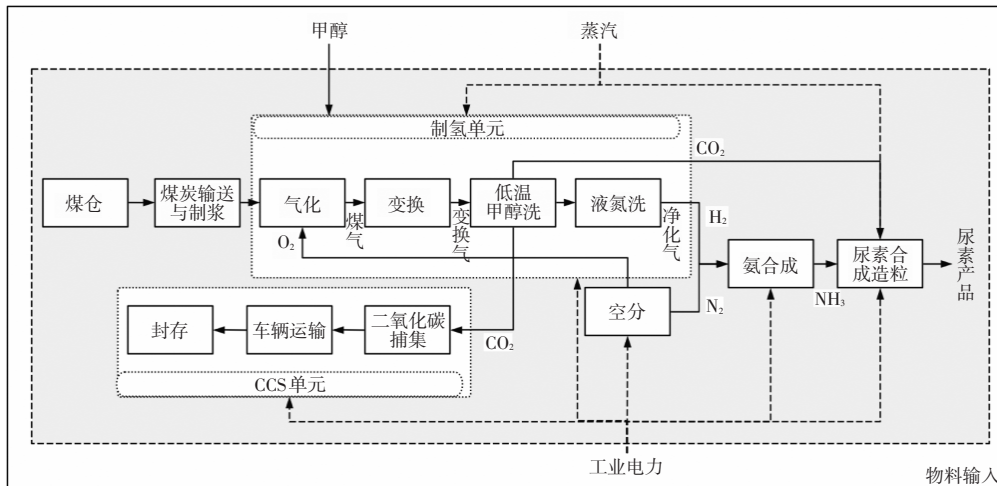


图8 CCS-尿素碳足迹核算系统边界

Fig. 8 Boundary of CCS-urea carbon footprint accounting system

表4 CCS过程参数清单

Table 4 CCS process parameters

CO <sub>2</sub> 捕集率/%	吨CO <sub>2</sub> 千米运输能耗/(kW·h)	CO <sub>2</sub> 运输距离/km	CO <sub>2</sub> 封存能耗/(kW·h·t <sup>-1</sup> )
90 <sup>[15]</sup>	1.3 <sup>[5]</sup>	250 <sup>[16]</sup>	10 <sup>[17]</sup>

### 3.3 减排效果

使用Open-LCA软件对应用两种降碳技术后的尿素碳足迹进行评估，结果如图9所示。在绿氢情

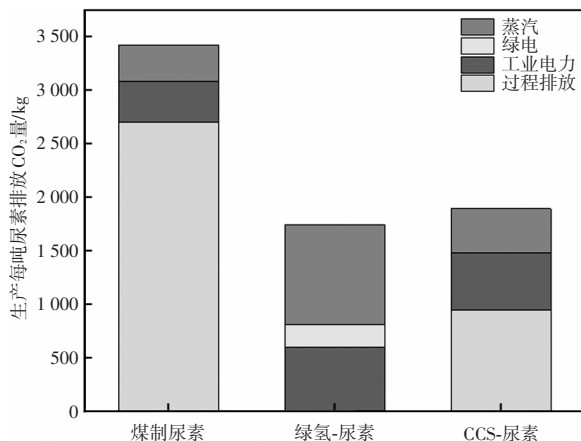


图9 减排技术下尿素产品碳足迹贡献分布

Fig. 9 Distribution of carbon footprint contribution of urea products under emission reduction technology

景下，每吨尿素产品的碳足迹为CO<sub>2</sub> 1 747.52 kg，相较于传统的煤制尿素，碳排放降低了48.99%。然而，碳排放的主要来源仍然是二氧化碳空气捕集装置，该装置的运行需要大量的蒸汽和电力，其中蒸汽生产过程的碳足迹占整个过程的53.56%。在CCS情景下，每吨尿素产品的碳足迹为CO<sub>2</sub> 1 896.51 kg，略高于绿氢情景，但相较于煤制尿素减少44.64%的碳排放。此时，碳排放的主要来源是过程排放，占产品碳足迹的49.86%。

### 4 结论

(1) 本研究对典型尿素企业进行了现场调研，基于Open-LCA模型对尿素产品的碳足迹进行核算，结果表明，煤制尿素的碳足迹为CO<sub>2</sub> 3 426 kg/t，低温甲醇洗过程排放量最大，占总排放的79%。应用绿氢和CCS技术后碳足迹可以分别降低48.99%和44.64%，绿氢技术的降碳潜力略高于CCS技术。

(2) 根据碳足迹及降碳潜力结果，对尿素企业的低碳转型提出以下建议：加大绿电和绿氢技术的研发投入，降低技术成本，通过示范项目展示绿电和绿氢技术的应用效果，积累经验并推动技术成熟；建立完善的绿氢、绿电交易市场，加快碳交易市场的建设，将尿素行业纳入碳交易体系，通过市

场机制激励企业使用绿电和绿氢；围绕CCS各个环节开展核心技术攻关，如降低成本和能耗的碳捕集技术研发、CO<sub>2</sub>压缩等，深化与美国、欧洲、日本等国家和地区的合作，借鉴国外先进经验。

#### 【参考文献】

- [1] 倪杨,商宽祥,刘长伟,等.关于添加剂对尿素产品多样性及应用的研究[J].化肥设计,2024,62(5):6-10.  
NI Y, SHANG K X, LIU C W, et al. Study on the additives for Diversity of Urea Products and Application [J]. Chemical Fertilizer Design, 2024, 62(5): 6-10.
- [2] HABGOOD D C C, Hoadley A F A, Zhang L. Techno-economic analysis of gasification routes for ammonia production from Victorian brown coal [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2015, 102(1): 57-68.
- [3] EGERER J, Grimm V, Niazmand K, et al. The economics of global green ammonia trade-“Shipping Australian wind and sunshine to Germany” [J]. Applied Energy, 2023, 334(3): 120662.
- [4] FLORES-GRANOBLES M, Saeys M. Minimizing CO<sub>2</sub> emissions with renewable energy: a comparative study of emerging technologies in the steel industry [J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(7): 1923-1932.
- [5] 张贤,许毛,徐冬,等.中国煤制氢CCUS技术改造的碳足迹评估[J].中国人口·资源与环境,2021,31(12):1-11.  
ZHANG X, XU M, XU D, et al. Carbon footprint assessment of coal-to-hydrogen technology combined with CCUS in China [J]. Chinese Population, Resources and Environment, 2021, 31(12): 1-11.
- [6] 刘婷婷.基于LCA的页岩气和传统能源制氨的环境影响比较研究[D].大连:大连理工大学,2021.  
LIU T T. Life cycle assessment of ammonia production from shale gas compared with traditional energy routes [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [7] 李淳,孙志辉,黄湘琦,等.煤制合成氨碳足迹核算与减排分析[J].化工环保,2024,44(4):559-564.  
LI C, SUN Z H, HUANG X Q, et al. Carbon footprint accounting and emission reduction analysis of coal-based synthetic ammonia [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2024, 44(4): 559-564.
- [8] 刘康祥,周家辉,徐钢,等.面向高比例可再生能源消纳的光储氢醇一体化系统规划与调度[J].动力工程学报,2023,43(11): 1477-1486.  
LIU K X, ZHOU J H, XU G, et al. Planning and Scheduling of Integrated System of Light Hydrogen Storage and Methanol for High Proportion of Renewable Energy Consumption [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(11): 1477-1486.
- [9] ZHANG Z, ZHANG H, JIANG H, et al. Green ammonia: revolutionizing sustainable energy for a carbon-free future [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12(48): 33334-33361.
- [10] 张正,宋凌璐.电解水制氢技术:进展、挑战与未来展望[J].工程科学学报,2025,47(2):282-295.  
ZHANG Z, SONG L J. Hydrogen production by water electrolysis: Advances, challenges and future prospects [J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(2): 282-295.
- [11] 周爱国,郑家乐,杨川箬,等.直接空气二氧化碳捕集技术工业化进展[J].化工进展,2024,43(6):2928-2939.  
ZHOU A G, ZHENG J L, YANG C Z, et al. Industrial progress in direct air CO<sub>2</sub> capture technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(6): 2928-2939.
- [12] 廖昌建,张可伟,王晶,等.直接空气捕集二氧化碳技术研究进展[J].化工进展,2024,43(4):2031-2048.  
LIAO C J, ZHANG K W, WANG J, et al. Progress on direct air capture of carbon dioxide [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(4): 2031-2048.
- [13] 张一楠,熊小鹤,周寅聪,魏鹏,谭厚章.CO<sub>2</sub>捕集、利用及封存技术研究进展[J/OL].煤炭学报.https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1282.  
ZHANG Y N, XIONG X H, ZHOU Y C, et al. Research progress of CO<sub>2</sub> capture, utilization and storage technology [J]. Journal of China Coal Society. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2024.1282.
- [14] 熊波,陈健,李克兵,等.工业排放气二氧化碳捕集与利用技术进展[J].低碳化学与化工,2023,48(1):9-18.  
XIONG B, Chen J, LI K B, et al. Technical progress in carbon dioxide capture and utilization of industrial vent gas [J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2023, 48(1): 9-18.
- [15] LISZKA M, MALIK T, MANFRIDA G. Energy and exergy analysis of hydrogen-oriented coal gasification with CO<sub>2</sub> capture [J]. Energy, 2012, 45(1): 142-150.
- [16] DAHOWSKI R T, DAVIDSON C L, LI X C, et al. Examining CCS Deployment Potential in China Via Application of an Integrated CCS Cost Curve [J]. Energy Procedia, 2013, 37(1): 2487-2494.
- [17] 陶怡,王强,田华,等.现代煤化工项目CCUS减排路径问题分析[J].中国煤炭,2023,49(2):103-108.  
TAO Y, WANG Q, TIAN H, et al. Analysis on key issues of CCUS emission reduction path for modern coal chemical project [J]. China Coal, 2023, 49(2): 103-108.