

# 二氧化碳的分离回收及应用的进展研究

勾叶, 杨影, 欧阳丽沙, 尘新宇, 张正国\*

北方民族大学化学与化学工程学院, 宁夏 银川

收稿日期: 2024年11月14日; 录用日期: 2025年2月19日; 发布日期: 2025年2月28日

## 摘要

为了减缓温室效应, 减少二氧化碳的排放量, 二氧化碳的资源化利用无疑是有效加快实现“碳达峰”和“碳中和”目标的关键。通过综述目前二氧化碳的分离利用方法和封存技术, 分析了二氧化碳在各个领域中的主要应用, 并对二氧化碳的资源化研究发展方向进行了展望。

## 关键词

二氧化碳, 分离回收, 封存技术, 应用

# Research Progress on Separation, Recovery and Application of Carbon Dioxide

Ye Gou, Ying Yang, Lisha Ouyang, Xinyu Chen, Zhengguo Zhang\*

College of Chemistry and Chemical Engineering, Northern University for Nationalities, Yinchuan Ningxia

Received: Nov. 14<sup>th</sup>, 2024; accepted: Feb. 19<sup>th</sup>, 2025; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

In order to reduce the greenhouse effect and carbon dioxide emissions, the resource utilization of carbon dioxide is undoubtedly the key to effectively accelerating the realization of the goal of “carbon peak” and “carbon neutrality”. In this paper, the separation and utilization methods and storage technologies of carbon dioxide are reviewed, the main applications of carbon dioxide in various fields are analyzed, and the research and development direction of carbon dioxide resource utilization has prospected.

\*通讯作者。

## Keywords

**Carbon Dioxide, Separation and Recovery, Storage Technology, Application**

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

由于大量温室气体(尤其是二氧化碳)被排放到人类生活的环境中,这使得全球气候的改变,同时带来了全球性的温室效应。这迫使人类的生存环境变得恶劣,如土地干旱化,海平面升高等一系列问题。在人类生活和经济发展的推动下,人类生存呼吸和工业生产所产生的二氧化碳见图 1,已经远远地超过了将二氧化碳转化为有机物的速度。

大量的二氧化碳能够形成一层厚厚的保温层,起到吸热和保温的作用。首先太阳辐射使地面初步增温;然后进行地面辐射,辐射过程中热量被二氧化碳大量吸收;随后形成大气逆辐射,热量被二氧化碳阻挡又回到地表,致使地表温度升高,也就是形成了温室效应。这也推动了碳达峰与碳中和两个重大目标的提出[1]。

近年来,二氧化碳在各产业都起到了至关重要的作用。二氧化碳的资源化利用方式也逐渐多样化起来了。例如长沙理工大学的同学们为此首次成功制备出活性氧化镁泡沫混凝土,并将固碳率从 20%大幅提升至 60%。石河子大学的团队尝试采用太阳能光伏板代替传统屋顶,将光热资源用于农产品干燥降低了屋顶维护成本,还增加了发电效率。

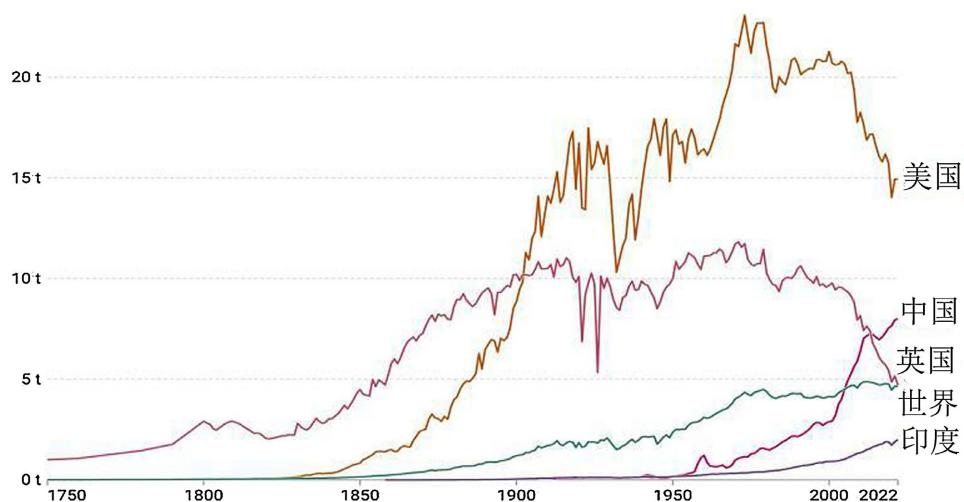


Figure 1. Per capita carbon dioxide emissions

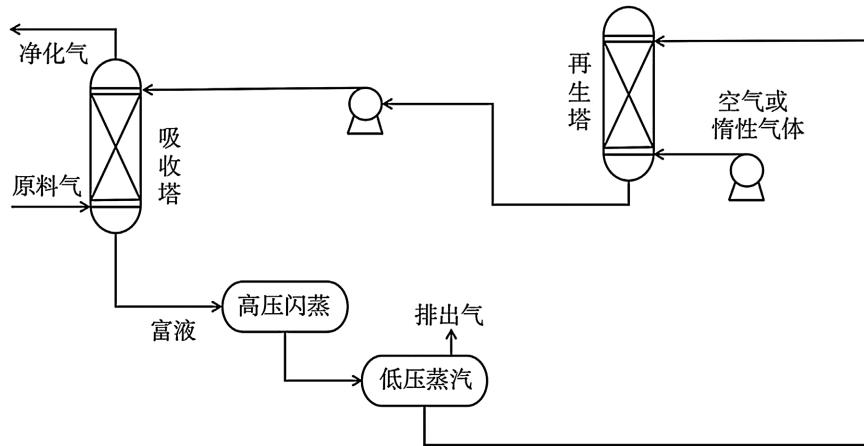
图 1. 人均二氧化碳排放量

## 2. 二氧化碳的分离回收技术

### 2.1. 吸收法

二氧化碳的吸收法是指用吸收剂分离获得二氧化碳的方法。按照吸收剂的不同,可分为以下两类。

(1) 物理吸收法: 是指二氧化碳气体与溶剂不发生化学变化的吸收过程, 图 2 为物理吸收法的基本流程[2]。其吸收原理是通过交替改变工艺操作工程的压力与温度来实现吸收剂对气体的吸收和解吸, 从而达到分离处理的目的。



**Figure 2.** The basic process of physical absorption method  
**图 2.** 物理吸收法的基本流程

对于二氧化碳而言主要用丙烯酸酯、聚乙二醇、聚酯类等沸点高、溶解度大的吸收剂。一般情况下, 压强变大(或温度变低)二氧化碳被吸收的程度就越深, 其原理就是亨利定律[3]。由于该过程不发生化学反应, 故能耗较化学吸收法小。根据  $\text{CO}_2$  在  $31^\circ\text{C}$  和  $7139\text{ MPa}$  下, 或在  $23^\circ\text{C} \sim 12^\circ\text{C}$  和  $1159 \sim 2139\text{ MPa}$  下液化的特点, 可对气体进行多层压缩和冷却, 让  $\text{CO}_2$  液化分离。常用的物理吸收法有氨基乙基乙醇胺-环丁砜-水溶液吸收法、加压水洗法、低温甲醇法(Rectisol 法)、聚乙二醇二甲醚法(Selexol 法[4])、N-甲基吡咯烷酮法、碳酸丙烯酯法(Flour 法)等。其中低温甲醇法是  $\text{CO}_2$  通过附着在甲醇中的-OH 基团上的氧原子的未共享电子对上而被物理吸收[5][6], 因此为维持低温, 所以消耗的电能多。

物理吸收法吸收能力强, 吸收剂用量少, 吸收剂的再生可通过降压即可实现, 该法使用对  $\text{CO}_2$  所处环境有要求, 应在高压低温状态下。

(2) 化学吸收法: 是利用气体混合物中各组分与吸收剂进行化学反应, 从而将其中溶解度最大的组分分离出来。化学吸收法的优点包括高效率和快速吸收, 适用于处理大量气体和低浓度污染物。混合气和吸收剂进行化学反应,  $\text{CO}_2$  被富集在吸收剂中, 再经过高温分解得到  $\text{CO}_2$ , 过程见图 3。此法工艺设备的内部的压力与温度有极高要求。该方法所用的化学溶剂应与  $\text{CO}_2$  反应具有高度选择性的特点, 同时还要保证其不易挥发, 否则不利于二氧化碳的富集。常用的吸收剂一般是强碱、碳酸盐溶液和有机胺类。吸收剂浓度通常不超过 50%, 若浓度过高, 会引起腐蚀。

(3) 热钾碱法。利用碳酸盐与碳酸氢盐之间的转换关系来对二氧化碳进行提纯。碳酸氢盐溶液再次进行加热即可得到更纯净的  $\text{CO}_2$ 。

(4) 有机胺作为吸收溶剂。如: 含有烷基哌嗪的甲基二乙醇胺、含水碳酸钾的三丁基磷酸酯、乙醇胺(MEA) [7]、二乙醇胺(DEA)、正丙醇胺等烷醇胺。胺基类吸收剂的蒸气压通常较低, 故可在较高浓度下操作。在工业吸收  $\text{CO}_2$  中, 利用无水混合胺相变吸收剂进行碳捕集, 其中沈紫薇[8]等就水对该吸收剂的影响进行研究, 在水分含量分别为 0%, 19%, 25% 的 P-T-EG 体系下进行探究, LI [9] 等得出结论, 吸收剂体系中水分含量增加将影响类活度系数, 使其相变能力减弱[10][11]。伯胺和仲胺吸收剂的反应速率比叔胺快, 前两种吸收剂中基团上氢原子的活性较后者高, 且位阻更小, 反应更易进行(见图 4)。

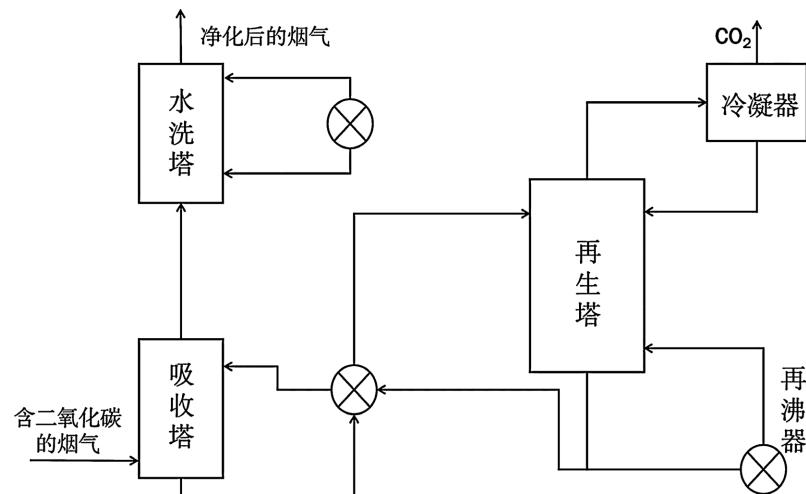
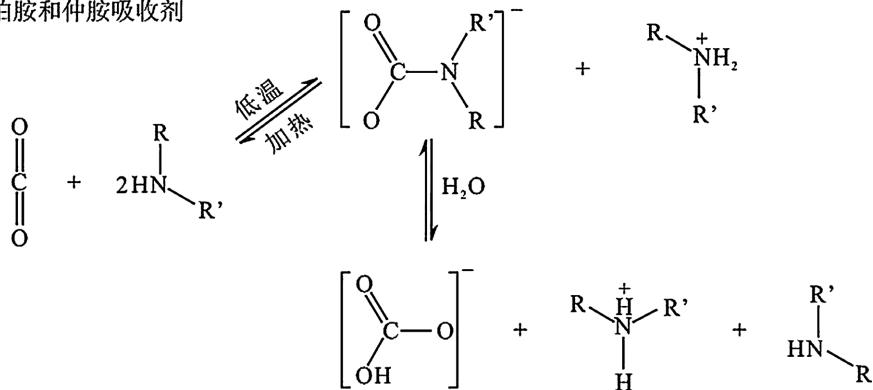


Figure 3. Process flow of chemical absorption capture of carbon dioxide  
图 3. 化学吸收捕集 CO<sub>2</sub> 的工艺流[12]

(a) 伯胺和仲胺吸收剂



(b) 叔胺吸收剂

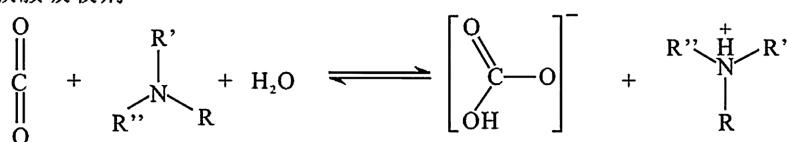


Figure 4. Absorption principle diagram of different types of absorbents  
图 4. 不同类型吸收剂的吸收原理图[13]

纪国庆[14]采用 DEA-MDEA-AEP 的复合吸收剂在不同条件下对 CO<sub>2</sub> 进行实验, 实验结果表明混合物的脱碳率与温度呈正相关, 当温度在 40℃ 左右, 其吸收效率达最佳。无论是单组分有机胺吸收剂还是复合有机胺吸收剂, 其外界条件和自身物性对 CO<sub>2</sub> 的吸收效率都会产生影响。

化学吸收法吸收过程耗时长, 且吸收剂难再生; 吸收剂的成本高, 部分吸收剂不能大规模的投入使用。

## 2.2. 吸附分离法

吸附分离法是指利用吸附剂对混合气体的各气体组分的吸附强度和选择差异性来提取回收 CO<sub>2</sub> 的方法。此法所用设备数量多, 主要使用吸附塔。在吸附分离过程中要保证投料与出料的连通性。影响吸附剂的饱和最大吸附量的因素主要是被吸附物的温度或压力。一般被吸附物的分压越低和对应温度越高时, 吸附剂对其的吸附量就少。温度对于活性炭吸附二氧化碳的影响为高温不利于吸附, 较低温度更加有利,

张琳[15]等人指出了这一结果,他们通过实验测得273、288、298和311 K时活性炭吸附CO<sub>2</sub>,达到饱和吸附量的时间分别为8、7、6和5 min。且273 K温度下饱和吸附量最大为96.0 mg/g。由此可知CO<sub>2</sub>的饱和吸附量随着温度的升高而明显降低,高温不利于吸附[16]。

不同压力、不同组分的混合气体可采用不同的吸附方法,其中变压吸附法(改变压力)应用范围广,生产工艺过程原料能耗少,工艺过程周期短,工艺成本较低且产品品质较高。而变温吸附法(改变温度)则与之相反。故变压吸附法更经济,二氧化碳的回收质量好。

### 2.3. 膜分离法

膜分离法是利用压力差使混合气体中透过率高的气体顺利通过薄膜,同时用膜拦截渗透率低的气体,以达到分离各组分的目的,此过程薄膜的作用类似于分离不同粒径分子的渗透膜。膜的材料主要有两种:聚合物膜和陶瓷膜。在工业上用于二氧化碳分离的膜的制作原料主要有:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>(制多孔玻璃膜)、醋酸纤维素、聚丙烯酸酯等,随着科技水平的提升越来越多高性能的膜材料被研究出来,如聚二甲基硅氧烷膜、碳纳米管等,均可高效的提取二氧化碳。聚合物膜和陶瓷膜的优缺点比较见表1。

**Table 1.** Comparison of different types of materials

**表 1.** 不同种类的材料比较

膜材料	优点	缺点
聚合物膜	吸收性能好,传质速率快,低成本	膜润湿问题严重
陶瓷膜	优异的稳定性,耐高温	普通陶瓷膜具有亲水性

在烟气中吸收CO<sub>2</sub>时,烟气中的颗粒物对膜吸收CO<sub>2</sub>性能的负面影响,刘瑞[17]等人指出了这种影响是不可逆的。颗粒物沉积在膜表面及膜孔内,减小有效面积、阻塞传质通道,导致膜吸收性能恶化。同时他们将CO<sub>2</sub>与N<sub>2</sub>混合,模拟烟气并让烟气透过膜,在燃煤飞灰、CaSO<sub>4</sub>和(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>三种颗粒环境中,CO<sub>2</sub>的脱除效率都随着时间的进行而降低,所以颗粒物存在会对CO<sub>2</sub>脱除产生影响进而对膜吸附CO<sub>2</sub>产生影响(见表2)。在采用膜分离时要考虑所分离的混合其中的各组分性质,不同性质会影响到分离效能。

**Table 2.** The removal efficiency of three types of particulate matter on membrane absorption of carbon dioxide

**表 2.** 三种颗粒物对膜吸收CO<sub>2</sub>的脱除效率

分组	CaSO <sub>4</sub>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	燃煤飞灰
最初	80.9%	79.8%	79.7%
一段时间后	67%	54%	43%

### 2.4. 比较

两大类溶剂吸收法对二氧化碳的吸收与分离回收效果都极高,分离出的二氧化碳杂质(H<sub>2</sub>S)少,但是投资所需成本较高。而吸附分离法中变压吸附法的生产力高,并且质量高可靠。生产主要依赖于机械,故生产设备的成本大。膜分离法的生产工艺较简单,生产成本较低,一般分离回收的二氧化碳纯度低,适用于初步的分离回收过程。

## 3. 二氧化碳的处置封存技术

### 3.1. 利用微藻固碳

微藻多为光合自养生物,多数的微藻细胞中都含有叶绿体,可高效地利用二氧化碳和光能生成生物

质，然后将生物质加工成燃料和高价值化学品，我国是世界上第一大微藻生产国，为微藻固碳[18]提供了有利条件。

### 3.2. 混凝土建筑材料

二氧化碳可与新拌混凝土或再生混凝土骨料等水泥基材料反应生成热稳定性的碳酸钙，由此可固碳和“固化”水泥[19]，或用于制造骨料。这样做会长期储存一些 CO<sub>2</sub>，并可能取代排放密集的传统水泥。

### 3.3. 地下封存二氧化碳

利用枯竭油气田封存二氧化碳技术和向油井注入 CO<sub>2</sub> [20]增加石油产量的二氧化碳驱油提高采收率 (CO<sub>2</sub>-EOR) 技术都能有效提高二氧化碳的封存率。也可以利用其他天然储存进行封存。

### 3.4. 生物质能源碳捕集和封存(BECCS)

在生物能源碳捕集中，运营商通过种植树木捕集 CO<sub>2</sub>，通过生物能源发电，并封存由此产生的 CO<sub>2</sub> 排放。

### 3.5. 增强风化

破碎岩石，如玄武岩，并将其散布在陆地上，会导致大气中的 CO<sub>2</sub> 加速形成稳定的碳酸盐。在农田中可能会提高产量。

### 3.6. 森林

通过加强森林保护和重新植树造林，可以增加森林吸收和储存二氧化碳的能力。

### 3.7. 土壤固碳

精细化农业管理通过科学施肥、合理灌溉等措施，以提高农作物的生产效率，减少碳排放，该技术不仅可以将 CO<sub>2</sub> 储存在土壤中，还可以提高农业产量。

### 3.8. 生物炭

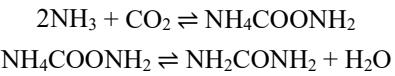
生物炭是“热解”的生物质：在低氧环境下高温燃烧的植物材料。生物炭是一种碳负载材料，可以通过高温热解得到，它可以帮助固定二氧化碳，从而提高土壤固碳能力。

## 4. 二氧化碳的各种应用

### 4.1. 二氧化碳在化工合成上的应用

随着科学技术水平提升，CO<sub>2</sub> 在化工领域应用也逐渐广泛。可将氢气与 CO<sub>2</sub> 结合起来生产碳氢燃料，包括甲醇、合成燃料和合成气。

(1) 合成尿素[21]。主要有水溶液全循环法、二氧化碳汽提法和氨汽提法。



(2) 合成甲酸[22]。可使用水热还原二氧化碳制甲酸。

(3) 合成天然气、乙烯、丙烯等低级烃类。主要利用二氧化碳和氢气在催化剂和一定温度压强的作用下进行合成。

(4) 合成甲醇[23]。二氧化碳制甲醇是一种新型的合成化学反应，它的原理是利用二氧化碳与氢气在

催化剂的作用下发生化学反应，生成甲醇和水。在反应过程中可通过不断蒸出  $H_2O$  以促进分离处理，从而提高甲醇的纯度。

(5) 制成聚合物。二氧化碳聚合的原理是利用催化剂催化  $CO_2$  与其他化合物发生反应，将  $CO_2$  转化为有机化合物。常用的催化剂包括金属催化剂、有机催化剂和生物催化剂。一种常见的  $CO_2$  聚合反应是通过催化剂将  $CO_2$  与环氧化合物发生环氧化反应，生成环氧化物。然后将环氧化物与其他化合物再反应，生成所需材料。 $CO_2$  聚合可以用于生产聚合物材料，如聚碳酸酯。聚碳酸酯具有良好的力学性能和热稳定性，可以用于制备塑料制品、纤维和涂料等。

## 4.2. 二氧化碳在农业上的应用

二氧化碳是植物进行光合作用的主要原料，植物利用其将太阳能转化为化学能，以支持植物的生长。近年来，许多农业类生产企业开始用二氧化碳来提高生产效益。例如，在温室中增加  $CO_2$  浓度，可以提升蔬菜、花卉等作物的生长速度和品质； $CO_2$  可以作为天然杀菌剂，杀死某些对作物有害的病菌和虫害，减少对化学农药的依赖，提高农产品的质量和安全性；在农业温室中，通过调节  $CO_2$  的浓度，可以改善作物的生长环境，尤其是在寒冷地区或冬季，通过添加  $CO_2$ ，可以为农作物提供更高的温度和光照条件，延长生长周期，缩短生长周期； $CO_2$  可以促进植物的生长和养分吸收，增加植物的整体生长速度，提高产量和质量，如日光温室增施  $CO_2$  对薄皮甜瓜果实产量和品质的影响见表 3。

**Table 3.** Effects of increased  $CO_2$  application on yield and quality of oriental melon fruit in the solar greenhouse [24]  
**表 3.** 日光温室增施  $CO_2$  对薄皮甜瓜果实产量和品质的影响[24]

处理天数 Days of treatment	单株产量 Single plant yield (g)	单果重 Single fruit weight (g)	可溶性固形物 Soluble Solid (%)	可溶性蛋白 Soluble protein (mg/g)	可溶性糖 Soluble sugar (%)
0	993 ± 7.98 <sup>c</sup>	489 ± 7.96 <sup>c</sup>	10.8 ± 0.33 <sup>c</sup>	2.87 ± 0.14 <sup>b</sup>	10.65 ± 0.21 <sup>c</sup>
5	1007.6 ± 6.03 <sup>c</sup>	497 ± 6.35 <sup>c</sup>	11.21 ± 0.10 <sup>c</sup>	2.95 ± 0.09 <sup>b</sup>	10.89 ± 0.24 <sup>c</sup>
10	1165 ± 8.72 <sup>b</sup>	523 ± 4.36 <sup>b</sup>	11.21 ± 0.21 <sup>c</sup>	3.08 ± 0.1 <sup>ab</sup>	11.72 ± 0.31 <sup>b</sup>
15	1231 ± 7.23 <sup>a</sup>	579 ± 5.31 <sup>a</sup>	12.39 ± 0.16 <sup>a</sup>	3.29 ± 0.15 <sup>a</sup>	12.85 ± 0.16 <sup>a</sup>
20	1179 ± 6.32 <sup>b</sup>	534 ± 7.54 <sup>b</sup>	11.85 ± 0.22 <sup>b</sup>	3.11 ± 0.12 <sup>ab</sup>	11.97 ± 0.35 <sup>b</sup>

此外还有实验证明，当二氧化碳浓度上升到 500 ppm 时，小麦、水稻等作物的产量可以增加 10% 左右； $CO_2$  在育种方面也得到了应用，例如，在水中培养苗木时，增加  $CO_2$  浓度可以提高幼苗率和成活率。

## 4.3. 二氧化碳在一般工业上的应用

二氧化碳可以用于消防灭火，因为二氧化碳不支持燃烧，可以破坏氧气供给，密度又比空气大，能够覆盖可燃物，使其与空气隔绝，以达到灭火的目的。

二氧化碳可作制冷剂，二氧化碳的冷却效率高，不易使产品浸湿，原料丰富，并且不会造成二次污染。二氧化碳在常温常压下是气态，在一定压力下可以凝结成液体乃至固体，当压力减小后会迅速蒸发，吸收热量，以达到降低温度的效果。

二氧化碳可用于制糖，2021 年 9 月，中国科学院天津工业生物技术研究所首次在实验室实现了从二氧化碳到淀粉的人工全合成[25]。人工淀粉合成过程见图 5。

不到两年时间，2023 年 8 月 16 日，天津工业生物所实验室实现了从二氧化碳到糖的精准全合成[26]。整套实验的反应时长约 17 小时，相较于种植取糖的方式，在时间尺度上实现了从“年”到“小时”的跨

越；此外，糖合成的效率比已知成果提高了 10 倍以上，达 0.67 克每升每小时，葡萄糖的碳固定合成效率达到每毫克催化剂每分钟 59.8 纳摩尔碳。

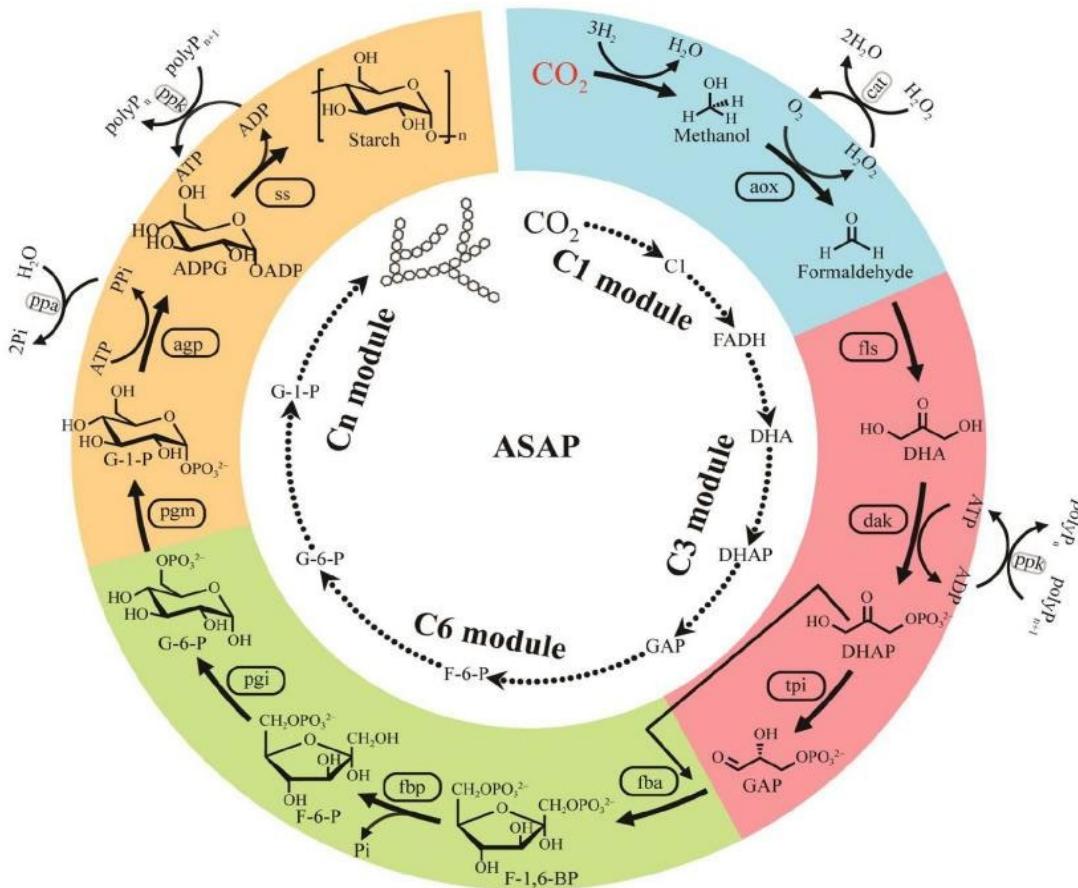


Figure 5. Artificial starch synthesis process  
图 5. 人工淀粉合成过程

二氧化碳制取纯碱，其主要方法是侯氏制碱法，二氧化碳在常温常压下先在饱和  $\text{NaCl}$  溶液中通入  $\text{NH}_3$ ，再加压通入  $\text{CO}_2$ ，由于  $\text{NaHCO}_3$  的溶解度较小，所以有  $\text{NaHCO}_3$  结晶析出。再将滤出的  $\text{NaHCO}_3$  焙烧可得纯碱。

二氧化碳是食品和饮料行业的重要气体，它用于饮料的碳酸化，如汽水、啤酒、苏打水等，还用于食品冷冻、保鲜和增加货架寿命，例如冷冻食品和肉类包装。

工业二氧化碳在金属加工中用于焊接和切割。二氧化碳气体保护焊[27] (MIG/MAG 焊接)是常见的焊接过程之一，它适用于钢铁等材料的焊接。气体保护焊是一种常见的焊接方法，它利用惰性气体或活性气体来保护焊接区域，防止氧气和其他杂质进入焊缝。二氧化碳在气体保护焊中可用于不同类型的金属，如钢铁、不锈钢和铝合金等。它可以通过混合其他惰性气体(如氩气)来调整焊接区域的化学环境，以实现最佳的焊接效果。气体金属弧焊中的二氧化碳气体金属弧焊(GMAW)是另一种常见的焊接方法，它使用电弧将金属电极和工件熔化并连接在一起。

#### 4.4. 超临界二氧化碳的应用

超临界二氧化碳流体，超临界二氧化碳的溶解度远高于常规有机溶剂，因此在分离提取热敏性、易

氧化分解的成分方面具有潜在的应用价值。与其他有机溶剂相比，超临界二氧化碳的表面张力更低，这使得它在分离、提纯、萃取等工业化学过程中表现出独特的优势。超临界二氧化碳是无毒、无味的，其化学惰性强，不会污染环境和产品。作为一种具有可逆性的溶剂，超临界二氧化碳可以通过调整溶解度和温度等参数来实现对反应产物的回收，从而避免了传统有机溶剂可能带来的有毒有害废液处理问题。

超临界二氧化碳可用于发电，超临界二氧化碳发电系统主要是由压缩机、透平、回热器、冷却装置、吸热装置等组成。由于处于超临界状态下的二氧化碳具有传热性、粘度低等优点，可以大大降低涡轮机械和换热器等机械的维护成本。且二氧化碳的超临界易到达、安全性高、纯度高、价格便宜，使得其较为适合作为热力循环的工质。超临界二氧化碳循环发电机的优势就在于它的体积小，不再需要水和蒸汽，在同等装机容量下，二氧化碳发电机组的体积只有蒸汽机组的 1/25。其次就是效率高，在 600℃ 温度下，发电效率比蒸汽机组高 3~5 个百分点。最后就是污染小，采用二氧化碳机组的燃煤电厂，单位发电量碳排放强度可减少 10% [28]。

超临界二氧化碳还可以用来萃取植物油、中药中的有效成分等比如利用超临界二氧化碳从元宝枫籽油中萃取植物甾醇和生育酚，用三种萃取方法的萃取含量进行比较见表 4，由表可分析得知超临界二氧化碳萃取有效成分的含量显著优于正己烷萃取和低温压榨的方式。

**Table 4.** Extraction of plant sterols and tocopherols from Acer truncatum seed oil using three different methods  
**表 4.**三种不同方法提取的元宝枫籽油中萃取植物甾醇和生育酚含量[29]

含量 $\mu\text{g/g}$	超临界二氧化碳萃取	正己烷萃取	低温压榨
菜油甾醇	56.1 <sup>a</sup> $\pm$ 0.8	54.7 <sup>a</sup> $\pm$ 0.8	47.6 <sup>b</sup> $\pm$ 0.4
豆甾醇	201.2 <sup>a</sup> $\pm$ 4.0	196.5 <sup>a</sup> $\pm$ 3.9	161.7 <sup>b</sup> $\pm$ 0.0
谷甾醇	730.8 <sup>a</sup> $\pm$ 3.7	714.3 <sup>b</sup> $\pm$ 6.9	629.2 <sup>c</sup> $\pm$ 5.3
总甾醇	988.1 <sup>a</sup> $\pm$ 8.5	965.5 <sup>a</sup> $\pm$ 9.3	858.5 <sup>b</sup> $\pm$ 5.6
$\alpha$ -生育酚	152.3 <sup>a</sup> $\pm$ 2.3	143.9 <sup>b</sup> $\pm$ 3.6	142.5 <sup>b</sup> $\pm$ 2.6
$\beta$ -生育酚	62.2 <sup>a</sup> $\pm$ 0.9	59.0 <sup>a</sup> $\pm$ 1.2	53.4 <sup>b</sup> $\pm$ 0.3
$\gamma$ -生育酚	489.5 <sup>a</sup> $\pm$ 7.3	472.1 <sup>a</sup> $\pm$ 4.7	402.3 <sup>b</sup> $\pm$ 0.0
$\delta$ -生育酚	287.4 <sup>a</sup> $\pm$ 5.7	266.2 <sup>b</sup> $\pm$ 4.0	249.1 <sup>c</sup> $\pm$ 0.9
总生育酚	991.4 <sup>a</sup> $\pm$ 5.0	941.2 <sup>b</sup> $\pm$ 8.1	847.3 <sup>c</sup> $\pm$ 3.0

注：同一行不同字母代表结果具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

由此可知用植物原料能与指定压力下的二氧化碳进行萃取作用以提取有效成分。

## 5. 结论与展望

随着人类的教育水平逐步提高，人类对低碳发展的重视程度也会升高。二氧化碳的分离回收技术和封存技术将随着新的研究进一步革新，碳资源化利用其前景十分广阔。目前碳利用市场依旧存在着一定的问题，比如利用率低，回收成本高。二氧化碳的捕集、封存和利用的项目数量会逐渐增加，同时二氧化碳的利用场景会更加多样化。

未来的二氧化碳利用技术发展将会面临以下挑战：

- (1) 需要提高技术创新能力，寻找更高效的吸收剂和分离膜材质，降低技术成本，最大化获取经济效益。
- (2) 加强二氧化碳封存技术的安全性，提高环境安全评估水平，以实现二氧化碳的长期封存。
- (3) 建立规模化利用碳资源体系，优化碳分离回收流程，降低过程能耗。

- (4) 延长碳利用产业链, 实现碳增值。
- (5) 高效推行低碳生活, 增加地表植被覆盖率。需要提高技术创新能力, 寻找更高效的吸收剂和分离膜材质, 降低技术成本, 最大化获取经济效益。

## 基金项目

国家级大学生创新训练计划项目(2024-XJ-HG-051)。

## 参考文献

- [1] 什么是碳达峰与碳中和? [J]. 新长征(党建版), 2021(1): 48-49.
- [2] 杨同. 二氧化碳的分离回收技术与综合利用[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(5): 42-44.
- [3] 高宁博, 王明晨, 杨天华, 等. 有机燃料燃烧烟气的二氧化碳捕集技术研究[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S2): 562-572.
- [4] 梁正. Selexol 净化法及其应用[J]. 煤炭化工设计, 1981(4): 55-74.
- [5] Koytsoumpa, E., Atsonios, K., Panopoulos, K.D., Karella, S., Kakaras, E. and Karl, J. (2015) Modelling and Assessment of Acid Gas Removal Processes in Coal-Derived SNG Production. *Applied Thermal Engineering*, **74**, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.026>
- [6] Park, S.H., Lee, S.J., Lee, J.W., Chun, S.N. and Lee, J.B. (2015) The Quantitative Evaluation of Two-Stage Pre-Combustion CO<sub>2</sub> Capture Processes Using the Physical Solvents with Various Design Parameters. *Energy*, **81**, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.055>
- [7] 武存喜. K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>反应器填料塔二乙醇胺促进 CO<sub>2</sub>吸收工艺研究[J]. 化学工程师, 2020, 34(4): 72-74, 43.
- [8] 沈紫薇, 常栎渊, 郭本帅, 鲁厚芳, 季燕, 唐思扬, 毛松柏, 梁斌. 水对无水相变吸收剂捕集 CO<sub>2</sub>性能的影响[J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(4): 107-113.
- [9] Li, X., Wang, Y., Lu, H., Zhong, S., Liu, C., Song, L., et al. (2022) Phase Splitting Rules of the Primary/Secondary Amine-Tertiary Amine Systems: Experimental Rapid Screening and Corrected Quasi-Activity Coefficient Model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **61**, 7709-7717. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00533>
- [10] Papadopoulos, A.I., Tzirakis, F., Tsivintzelis, I. and Seferlis, P. (2019) Phase-Change Solvents and Processes for Post-combustion CO<sub>2</sub> Capture: A Detailed Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **58**, 5088-5111. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b06279>
- [11] Kim, S., Shi, H. and Lee, J.Y. (2016) CO<sub>2</sub> Absorption Mechanism in Amine Solvents and Enhancement of CO<sub>2</sub> Capture Capability in Blended Amine Solvent. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **45**, 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.12.024>
- [12] 刘飞, 关键, 祁志福, 等. 燃煤电厂碳捕集、利用与封存技术路线选择[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 57(7): 1-13.
- [13] 刘大李, 王聪, 刘新伟, 于一夫. 用于二氧化碳捕集的化学吸收剂研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(1): 94-104, 112.
- [14] 纪国庆. 三元复合吸收剂捕集二氧化碳中试优化[J]. 油气田地面工程, 2015, 34(2): 9-10.
- [15] 张琳, 孙莹, 杨林军. 湿法脱硫烟气中两种模拟颗粒物在 CO<sub>2</sub>吸收膜上的粘附特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3859-3866.
- [16] 简相坤, 刘石彩. 活性炭对 CO<sub>2</sub>的吸附及动力学研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(12): 161-165.
- [17] 刘瑞, 张琳, 王霞, 瞿如敏, 杨林军. 湿法脱硫净烟气中的细颗粒物对膜吸收 CO<sub>2</sub>的影响[J]. 化工进展, 2015, 34(10): 3804-3808.
- [18] 魏延丽, 王金虎, 李静, 等. 碳中和背景下微藻生物固碳技术的研究进展[J]. 环境生态学, 2023, 5(5): 4-2-48.
- [19] 蒲云辉, 尹杰, 李薇薇, 等. 水泥基材料封存二氧化碳评价方法研究进展[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2019, 38(2): 206-209, 217.
- [20] 姜睿. 二氧化碳封存技术在油气行业应用进展[J]. 当代石油石化, 2022, 30(2): 34-38.
- [21] 史建公, 刘志坚, 刘春生. 二氧化碳为原料制备尿素技术进展[J]. 中外能源, 2019, 24(1): 68-79.
- [22] 曾旭, 殷国栋, 周仰原等. 水热反应产氢及其高效还原二氧化碳产甲酸的研究进展[J]. 天津化工, 2023, 37(1):

24-27.

- [23] 陈浩, 陈桂, 宋丹丹等. 高活性 Cu-ZnO@SiO<sub>2</sub> 纳米催化剂催化 CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇[J]. 高等学校化学学报, 2023, 44(11): 122-130.
- [24] 韩欣彤. 日光温室增施 CO<sub>2</sub> 对薄皮甜瓜氮代谢的影响机制[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [25] 黄耀辉, 焦悦, 吴小智, 等. 生物育种对种业科技创新的影响[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(3): 413-421.
- [26] 段大卫. 二氧化碳“变身”糖迈出关键一步[J]. 新农村, 2023(10): 56.
- [27] 许成凯, 姜明宇, 甘彪. 复杂节点 CO<sub>2</sub> 气体保护焊焊接施工技术[J]. 四川建材, 2023, 49(12): 131-133.
- [28] 陈玥. 热点[J]. 环境经济, 2021(22): 4-5.
- [29] 蒋雨桥, 赵仲恺, 张文斌. 超临界二氧化碳萃取元宝枫籽油工艺研究[J/OL]. 中国油脂: 1-12.  
<https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230670>, 2024-03-19.