



# 四川轻化工大学课程实施大纲

课程名称：碳达峰与碳中和概论

授课班级：化学工程与工艺 1-5  
应用化学 1-6

任课教师：徐川岚 田海洋

工作部门：化学工程学院

联系方式：13308340372

四川轻化工大学 制

2025 年 02 月

# 《碳达峰与碳中和概论》课程实施大纲

## 基本信息

课程代码：16273023

课程名称：碳达峰与碳中和概论

学 分：2

总 学 时：32

学 期：2024-2025 第 2 学期

上课时间：按照教务处安排

上课地点：按照教务处安排

答疑时间和方式：课间、平时；QQ 和邮箱

答疑地点：上课教室或第二实验楼 5090

授课班级：化学工程与工艺专业复合培养选修

任课教师：徐川岚 田海洋

学 院：化学工程学院

QQ：3516919845；279827759

邮 箱：3516919845@qq.com

联系电话：13308340372

## 目录

<b>1. 教学理念 .....</b>	<b>8</b>
1.1 关注学生的发展 .....	8
1.2 关注教学的有效性 .....	9
1.3 关注教学的策略 .....	9
1.4 关注教学价值观 .....	9
<b>2 课程介绍 .....</b>	<b>10</b>
2.1 课程的性质 .....	10
2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用 .....	10
2.3 课程的前沿及发展趋势 .....	11
2.4 学习本课程的必要性 .....	12
2.5 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题 .....	12
<b>3 教师简介 .....</b>	<b>12</b>
3.1 教师的职称、学历 .....	12
3.2 教育背景 .....	12
3.3 研究兴趣（方向） .....	13
<b>4 先修课程 .....</b>	<b>13</b>
<b>5 课程目标 .....</b>	<b>13</b>
<b>6 课程内容 .....</b>	<b>13</b>
<b>7 课程实施 .....</b>	<b>15</b>
7.1 教学单元一 .....	16
7.1.1 教学目标 .....	16

7.1.2 教学内容（含重点、难点） .....	16
7.1.3 教学过程及方法 .....	16
7.1.4 作业安排 .....	23
7.1.5 参考资料 .....	23
7.2 教学单元二 .....	24
7.2.1 教学目标 .....	24
7.2.2 教学内容（含重点、难点） .....	24
7.2.3 教学过程及方法 .....	24
7.2.4 作业安排 .....	29
7.2.5 参考资料 .....	29
7.3 教学单元三 .....	29
7.3.1 教学目标 .....	29
7.3.2 教学内容（含重点、难点） .....	30
7.3.3 教学过程及方法 .....	30
7.3.4 作业安排 .....	39
7.3.5 参考资料 .....	39
7.4 教学单元四 .....	39
7.4.1 教学目标 .....	39
7.4.2 教学内容（含重点、难点） .....	40
7.4.3 教学过程及方法 .....	40
7.4.4 作业安排 .....	43
7.4.5 参考资料 .....	44
7.5 教学单元五 .....	44
7.5.1 教学目标 .....	44
7.5.2 教学内容（含重点、难点） .....	44
7.5.3 教学过程及方法 .....	44
7.5.4 作业安排 .....	47
7.5.5 参考资料 .....	47
7.6 教学单元六 .....	47
7.6.1 教学目标 .....	47



7.6.2 教学内容（含重点、难点） .....	47
7.6.3 教学过程及方法 .....	47
7.6.4 作业安排 .....	49
7.6.5 参考资料 .....	49
7.7 教学单元七 .....	50
7.7.1 教学目标 .....	50
7.7.2 教学内容（含重点、难点） .....	50
7.7.3 教学过程及方法 .....	50
7.7.4 作业安排 .....	54
7.7.5 参考资料 .....	54
7.8 教学单元八 .....	55
7.8.1 教学目标 .....	55
7.8.2 教学内容（含重点、难点） .....	55
7.8.3 教学过程及方法 .....	55
7.8.4 作业安排 .....	60
7.8.5 参考资料 .....	61
7.9 教学单元九 .....	61
7.9.1 教学目标 .....	61
7.9.2 教学内容（含重点、难点） .....	61
7.9.3 教学过程及方法 .....	61
7.9.4 作业安排 .....	66
7.9.5 参考资料 .....	66
7.10 教学单元十 .....	67
7.10.1 教学目标 .....	67
7.10.2 教学内容（含重点、难点） .....	67
7.10.3 教学过程及方法 .....	67
7.10.4 作业安排 .....	71
7.10.5 参考资料 .....	71
7.11 教学单元十一 .....	72
7.11.1 教学目标 .....	72

7.11.2 教学内容（含重点、难点） .....	72
7.11.3 教学过程及方法 .....	72
7.11.4 作业安排 .....	74
7.11.5 参考资料 .....	74
7.12 教学单元十二 .....	74
7.12.1 教学目标 .....	74
7.12.2 教学内容（含重点、难点） .....	74
7.12.3 教学过程及方法 .....	75
7.12.4 作业安排 .....	82
7.12.5 参考资料 .....	82
7.13 教学单元十三 .....	83
7.13.1 教学目标 .....	83
7.13.2 教学内容（含重点、难点） .....	83
7.13.3 教学过程及方法 .....	83
7.13.4 作业安排 .....	86
7.13.5 参考资料 .....	86
7.14 教学单元十四 .....	87
7.14.1 教学目标 .....	87
7.14.2 教学内容（含重点、难点） .....	87
7.14.3 教学过程及方法 .....	87
7.14.4 作业安排 .....	90
7.14.5 参考资料 .....	90
7.15 教学单元十五 .....	91
7.15.1 教学目标 .....	91
7.15.2 教学内容（含重点、难点） .....	91
7.15.3 教学过程及方法 .....	91
7.15.4 作业安排 .....	95
7.15.5 参考资料 .....	95
7.16 教学单元十六 .....	95
7.16.1 教学目标 .....	95

7.16.2 教学内容（含重点、难点） .....	96
7.16.3 教学过程及方法 .....	96
7.16.4 作业安排 .....	101
7.16.5 参考资料 .....	101
<b>8. 课程要求 .....</b>	<b>102</b>
<b>9. 课程考核方式及评分规程 .....</b>	<b>102</b>
<b>10. 课堂规范 .....</b>	<b>102</b>
<b>11. 课程资源 .....</b>	<b>103</b>
<b>12. 教学合约 .....</b>	<b>103</b>
<b>13. 其他说明 .....</b>	<b>103</b>

## 1. 教学理念

“学生中心，教师主体，引领社会。”

《碳达峰与碳中和概论》作为复合培养选修课，是一门包含多种碳中和技术简介的课程。因此，在向学生讲解与本专业有关的基础知识和应用，对学生强调结合生活中的碳中和技术进行自主学习也是必要的。

### 1.1 关注学生的发展

教师是“人类灵魂的工程师”，教师是最可亲可敬的人。作为一名教师，“教书育人”是我们最本质的工作，但是“教书”不只是教会学生们书本上的知识，还应更关注学生其它各方面的发展。

那么，如何切实做到关注学生的发展？应该从以下几点入手：

一、真正做到“学生中心”，教师应“以学生的发展为本”，因此，教师要牢固树立以学生为中心的教学观念，激发学生参与意识，把主动权归还学生，相信每一位学生都有发展，给学生提供更多的参与机会，给学生搭建一个自主学习的舞台，培养学生为了适应未来的生活而努力准备。

二、关注学生的“学习兴趣”，课堂上看学生的学习兴趣如何，可从这几点观察：教师是否有创设各种情境诱发学生的求知欲；教师是否能提出矛盾的问题，引起学生的疑惑；教师是否以生动的实例，描述枯燥的概念，使比较抽象的内容变得通俗形象；教师是否有利用思辨问题或实验结论作引导，这样既可激发学生的学习兴趣又可启发学生的思考。

三、关注学生情感、态度与价值观的体现与发展，作为老师，在强调学习基本知识的过程中，要潜移默化地培养学生积极的人生态度，正确的价值观、人生观和科学的世

界观，使学生在知识学习的过程中学会正确的价值选择，逐步具有社会责任感，努力为人民服务，树立远大理想。

四、关注每一个学生的发展，每个学生是不同的个体，有着不同的生活背景，他们在学习中有着不同的经验与体会，对同一个问题的解决，不同的学生也会表现出不同的思维习惯及见解。教师的教学要关注学生个性差异，学生不是一个机器制造出来的工业品，要承认和接受学生身心发展、认知规律的差异，不能强求一致。

## **1.2 关注教学的有效性**

有效教学的灵魂是要有既定的教学目标；营造氛围是根本；洞察学生心理是基础。这就好比木桶理论，课堂教学、课后复习，教师的教、学生的学，一个也不能少，哪块木板也不能短。通过师生的共同努力，使师生都在繁重的劳作中得到提升，还给学生们的思考的时间与空间，真正落实教学内容。本课程要达到教学高效，控制节奏是要务，语言表达是关键。

## **1.3 关注教学的策略**

教学的策略是指以一定的教育思想为指导，在特定的教学情境中，为实现教学目标而制定并在实施过程中不断调适、优化，以使教学效果趋于最佳的系统决策与设计。是在教学过程中，为完成特定的目标，依据教学的主客观条件，特别是学生的实际，对所选用的教学顺序、教学活动程序、教学组织形式、教学方法和教学媒体等的总体考虑。也就是说教学策略是在教学的过程中，各个环节中使用的指导思想和方法。

## **1.4 关注教学价值观**

教学的价值观是指人们对教学价值的认识、态度、评价等的总称，以及在此基础上所确定的行为取向标准，也就是教学这一现象所具有的价值在人的主观意识中的反映。教学的价值观的全部秘密就在于回答“教学的价值是什么？”这一问题。教学作为一种

存在具有一定的要素、结构、功能，它们构成了教学的属性，这种属性决定了教学对人有哪些用途和作用的大小如何，它是教学价值产生的源泉。但教学的属性本身还不是教学价值，只有人的教学需要介入后，属性是否对人有意义，且意义的性质、方向、程度等才能显示出价值来。价值观在教学思想领域的具体体现，既具有价值观的普遍属性，又带有教学领域的特点，最终通过多种多样的目的追求表现出来。

## **2 课程介绍**

### **2.1 课程的性质**

本课程融合了工业、交通运输、建筑、农业等多领域碳中和技术的知识，是化工学院的工艺、应化、制药、生药等专业的复合选修课程。

### **2.2 课程在学科专业结构中的地位、作用**

鉴于碳达峰与碳中和已从国际条约转变为国内政策的情况，中共中央国务院于2021年10月底发布了《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》、《中国碳达峰行动方案》两个指导文件，标志着碳达峰与碳中和政策在中国正式开始落地实施，巨变在即，我国各行业在未来的四十年中的发展都将受到深刻影响。

我院能源化学工程、化学工程与工艺、应用化学、制药工程、生物制药的五个化工类专业也将受到不同程度的影响。通过本课程的学习，可以使學生掌握化工学科所面临的最新要求和长期发展趋势，和其它专业课程形成一个有机的整体，专业发展方向更加明确。本课程包括三个板块：（1）从政策的层面学习碳达峰和碳中和的有关知识，包括全球气候变化的有关组织、国际会议、国际条约、国内政策等；（2）从技术的层面，包括能源、资源、信息三大减碳领域，以及重点产业的碳减排、碳零排、碳负排技术，分为能源篇、资源篇、信息篇、产业篇和决策篇；（3）从市场的层面，主要是碳中和决策支撑技术和正在逐步完善的碳排放交易市场的有关知识。

通过本课程的学习，可以掌握碳达峰与碳中和的有关政策知识、技术方案，和市场刺激机制，开阔学生视野、明确努力方向，增加就业、深造机会，为国家和社会发展助力。

## 2.3 课程的前沿及发展趋势

碳，曾经是人类进步和工业兴起的最初推动力。从最早人类对于火的使用，到十八世纪中叶的工业革命，再到后来的电气化时代，二战后石油工业的崛起，人类主要是以燃烧含碳物质，特别是化石能源来推动社会进步。煤炭、石油、天然气所释放的巨大能量让地球文明发生了天翻地覆的变化，形成了今天现代化社会的种种景观。然而，无节制的碳排放，造成温室效应。与工业化之前相比，全球平均温度已经上升  $1.168^{\circ}\text{C}$ 。已经显现出海平面升高、干旱、极端天气、农作物减产、疾病频发等后果。

假如再无节制继续排放，到 2030 年将再升高  $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，如不控制，到本世纪末气温要升高  $3\sim 6^{\circ}\text{C}$ ，这将突破临界温度，造成无法逆转的灾难性后果，人类的居住环境将变成一个“更不宜居的温室地球”。经过多年谈判，2015 年《巴黎协定》确立了一个长期的宏伟目标，就是将全球平均升温控制在工业革命前的  $2^{\circ}\text{C}$  以内，争取控制在  $1.5^{\circ}\text{C}$  以内。为了实现该目标，提出了要“尽快达到温室气体排放的全球峰值”（即碳达峰），并且“在本世纪下半叶实现温室气体源的人为排放与汇的清除之间的平衡”，也就是到 21 世纪下半叶实现温室气体净零排放，即碳中和（是指通过植树造林、节能减排等形式，抵消自身产生的二氧化碳排放量，实现净零二氧化碳排放）。

当代世界碳中和的巨大变革，力度相当于是十八世纪的工业革命，区别只是那时候是逐渐开始使用碳，现在是逐渐取消使用碳。这么重大的历史运动，需要各行的积极参与，共同努力。作为化工学科的专业人员，更应该必须参与进去，学习掌握必要的科学知识。

## 2.4 学习本课程的必要性

《碳达峰与碳中和概论》是化工类专业都要共同学习的复合选修课程，通过本课程的学习，掌握当代社会“碳达峰”与“碳中和”重大时代主题的有关知识，掌握该主题在政策、技术、碳交易市场三个领域的具体体现。与其它课程群形成一个完整有机体，该课程在其中起到提示方向的作用，为国家的碳中和战略做好人才知识储备。

## 2.5 课程内容可能涉及到的伦理与道德问题

课程没有涉及到伦理与道德问题。

## 3 教师简介

### 3.1 教师的职称、学历

徐川岚

2023/09–至今，四川轻化工大学，讲师

2019/09–2023/06，重庆大学，化学工程与技术，博士

2016/09 – 2019/06，重庆大学，化学，硕士

2011/09 – 2015/06，四川农业大学，化学生物学，学士

田海洋

2020/01–至今，四川轻化工大学，讲师

2014/09 – 2019/12，西南石油大学，化学工程与技术，博士

2010/09 – 2014/06，四川理工学院，化学工程与工艺，学士，

### 3.2 教育背景

徐川岚，博士，讲师。2023 年 6 月在重庆大学获化学工程与技术博士学位，先后参与两项国家自然科学基金的研究。

田海洋，博士，讲师。2019 年 12 月在西南石油大学获化学工程与技术博士学位，



主持和参与国家自然科学基金、国家重点实验室开发基金、四川省科技计划项目和企事业单位纵横向科研项目 10 余项。

### 3.3 研究兴趣（方向）

徐川岚主要从事电化学能源转换技术的研究工作，燃料电池阴极催化材料的研发。

田海洋主要从事油气增产功能材料和 CO<sub>2</sub> 捕集与利用技术的研究工作。

## 4 先修课程

本课程的先修课程为《新能源与可再生能源》。

## 5 课程目标

（1） 掌握碳元素、碳循环、温室效应、温室效应危害的基本知识、了解全球气候问题的紧迫性。

（2） 了解全球气候谈判的艰难历程，掌握巴黎协定、中国碳排放的历史与现状，重点掌握中国的碳达峰行动方案、中国的碳中和路径。形成碳达峰与碳中和在政策层面的知识体系。

（3） 掌握能源、资源、信息三大减碳领域的低碳技术分类；掌握零碳电力技术、氢能技术和二氧化碳捕集封存技术；掌握生物质燃料/原料替代、工业原料替代与循环利用、二氧化碳资源化和碳负排及生态碳汇强化技术。了解信息与通信技术在节能减碳中的应用。掌握工业、交通运输、建筑、农业领域碳中和技术。了解碳排放监测、核算、净零碳导向下的低碳转型情景分析。

（4） 了解碳中和决策支撑技术。

## 6 课程内容

### 第 1 章 气候变化与全球应对

教学重点：全球气候变化、全球碳排放与碳中和、国际碳中和公约与行动、我国碳

中和目标、挑战和机遇。

教学难点：我国碳中和目标、挑战和机遇。

## 第2章 能源篇

教学重点：2.1 零碳电力技术（传统发电节能提效技术、可再生能源发电技术、储能技术、核能技术、核能发电技术、输配电技术）；2.2 氢能技术（制氢技术、储氢技术、运氢技术、氢能应用）；2.3 二氧化碳捕集封存技术（液体吸收技术、固体吸附技术、膜分离技术、二氧化碳压缩、运输技术、二氧化碳封存技术）。

教学难点：二氧化碳捕集封存技术。

## 第3章 资源篇

教学重点：3.1 生物质燃料/原料替代（生物质制备液体燃料、生物质制备燃气、生物质制备化学品、生物质制备大宗材料）；3.2 工业原料替代与循环利用（钢铁冶金原料替代、水泥原料替代、绿色高分子原料替代、工业固体废物循环利用）；3.3 二氧化碳资源化技术（二氧化碳制备化学品、二氧化碳制备燃料、二氧化碳制备高性能材料、二氧化碳矿化利用）；3.4 碳负排及生态碳汇强化技术（直接空气碳捕获技术、生物能源和碳捕集与封存技术、生物炭土壤固碳技术、陆地碳汇强化技术、海洋碳汇强化技术）。

教学难点：二氧化碳资源化技术。

## 第4章 信息篇

教学重点：信息与通信技术在节能降碳中的应用（大数据、云计算与人工智能技术、物联网与数字孪生技术、卫星遥感技术、集成耦合与优化技术）。

教学难点：大数据、云计算与人工智能技术在节能降碳中的应用。

## 第5章 产业篇

教学重点：5.1 工业领域碳中和技术（钢铁、化工、石化、水泥和有色金属冶炼行业）；5.2 交通运输领域碳中和技术（能效提升技术、替代燃料技术、绿色能源替代技术）；5.3 建筑领域碳中和技术（建筑建造、构造与环境营造碳减排技术、建筑能源系统碳零排技术、建筑绿化系统碳负排技术）；5.4 农业领域碳中和技术（种植与养殖碳减排技术、农田土壤固碳增汇技术、农业有机废弃物资源化利用技术）。

教学难点：交通运输领域碳中和技术、建筑领域碳中和技术

## 第 6 章 碳中和决策支撑技术

教学重点：碳排放监测技术、碳排放核算技术、净零碳导向下的低碳转型情景分析、基于学习曲线的技术发展路径。

教学难点：碳排放监测技术。

学时安排：

章（或节）	主要内容	学时
第 1 章	气候变化与全球应对	4
第 2 章	能源篇	6
第 3 章	资源篇	8
第 4 章	信息篇	4
第 5 章	产业篇	8
第 6 章	碳中和决策支撑技术	2
合计		32

## 7 课程实施

本课程总共 32 学时，分为 16 个单元讲授，每单元 2 学时，每个单元的教学实施详

情如下：

## 7.1 教学单元一

### 7.1.1 教学目标

- (1) 了解全球气候变化可能带来的影响
- (2) 掌握气候变化的影响因素
- (3) 掌握温室气体排放与气候变化的关系
- (4) 了解全球的碳排放分布情况

### 7.1.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 全球气候变化
- (2) 全球碳排放与碳中和

### 7.1.3 教学过程及方法

- (1) 为什么要学？(讲授法)

## 碳达峰与碳中和概论



- 为什么要学？
- 这门课的主要内容？
- 如何学好这门课？
- 考核方式？

工业革命后，各国在迅猛发展的过程中产生了大量的二氧化碳。全球变暖、冰川融化、海平面上升、土地沙漠化、雨林消失等等都是受其影响而产生的非常严重的全球灾

害，全球气候治理是全人类要一起共同应对的重要问题。

2020 年 9 月，习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出：“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”。“碳达峰目标和碳中和愿景”已经成为我国“十四五”发展时期乃至今后长期低碳转型发展的战略方向。

## **(2) 如何学好这门课? (讲授法)**

- 了解碳达峰碳中和政策提出的背景；
- 了解碳达峰碳中和政策的具体内容；
- 掌握全球碳达峰碳中和的路径，重点掌握中国碳达峰碳中和路径；
- 掌握能源、资源、信息三大减碳领域的低碳技术分类。

## **(3) 考核方式(讲授法)**

- 课程成绩=平时作业成绩×60%+课程报告成绩×40%。
- 考勤：若缺席一次，扣 10 分；缺席三次，不及格
- 上课回答问题：总分+1 分，至多加 3 分
- 作业：3 次

## **(4) 教学目的与要求(讲授法)**

- 掌握碳元素、碳循环、温室效应、温室效应危害的基本知识、了解全球气候问题的紧迫性。
- 了解全球气候谈判的艰难历程，掌握巴黎协定、中国碳排放的历史与现状，重点掌握中国的碳达峰行动方案、中国的碳中和路径。形成碳达峰与碳中和在政策层面的知识体系。
- 掌握能源、资源、信息三大减碳领域的低碳技术分类；掌握零碳电力技术、氢能技术和二氧化碳捕集封存技术；掌握生物质燃料/原料替代、工业原料替代与

循环利用、二氧化碳资源化和碳负排及生态碳汇强化技术。了解信息与通信技术在节能减碳中的应用。掌握工业、交通运输、建筑、农业领域碳中和技术。

了解碳排放监测、核算、净零碳导向下的低碳转型情景分析。

- 了解碳中和决策支撑技术。

### （5）全球气候变化（讲授和举例法）

- 全球气候变化一般指全球范围内气候平均状态统计意义上的显著改变或者持续较长一段时间的变动。
- 根据《联合国气候变化框架公约》的定义，气候变化是指除在类似时期内所观测的气候的自然变异外，由于直接或间接地人类活动改变了地球大气地组成而造成地气候变化。
- 描述气候平均状态的变量主要包括气温、降水、风、日照和辐射等。

气候变化可能带来的影响：



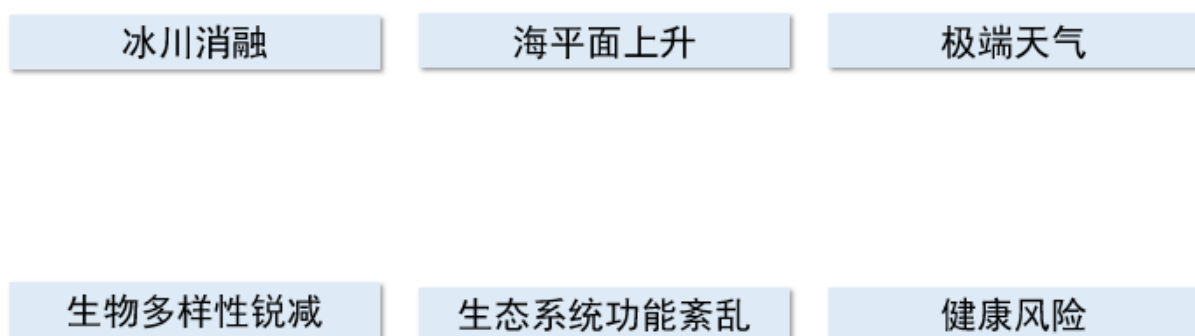
#### ① 正面影响

大气湿度增加：气候变化会导致全球大气湿度增加，带来更多的降水。例如非洲北部、亚洲中部以及我国中西部将变得更加湿润。

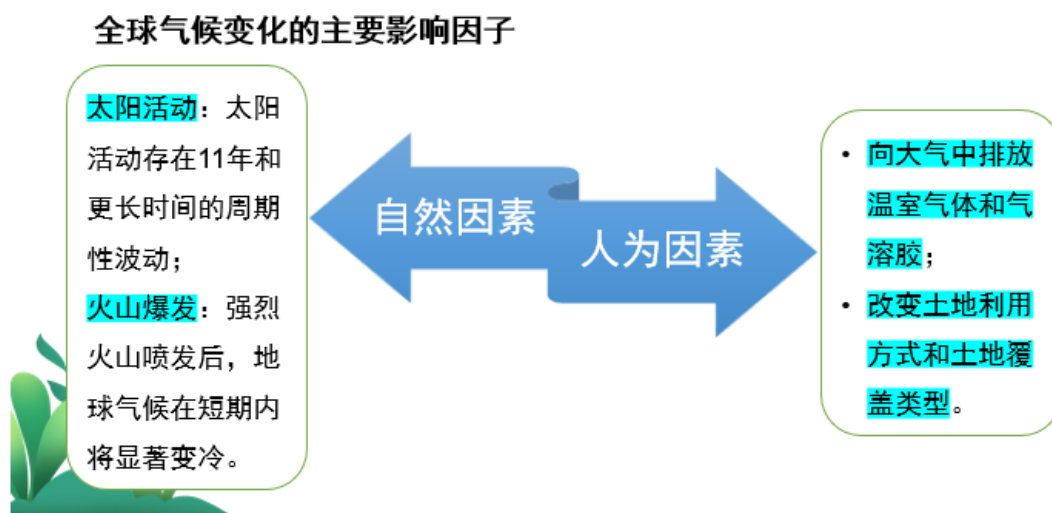
植被覆盖率增加：气候变化和大气 CO<sub>2</sub> 含量增加会促进植物生长，在一定程度上增加植被覆盖，扩大绿化面积。

农作物增产：气候变暖有助于农作物增产。更长的温暖季节导致局部地区作物分蘖良好，产量增加。

## ② 负面影响



## (6) 气候变化的影响因素（讲授和举例法）



### • 温室气体

温室气体：大气中能够吸收和释放太阳红外辐射的气体。

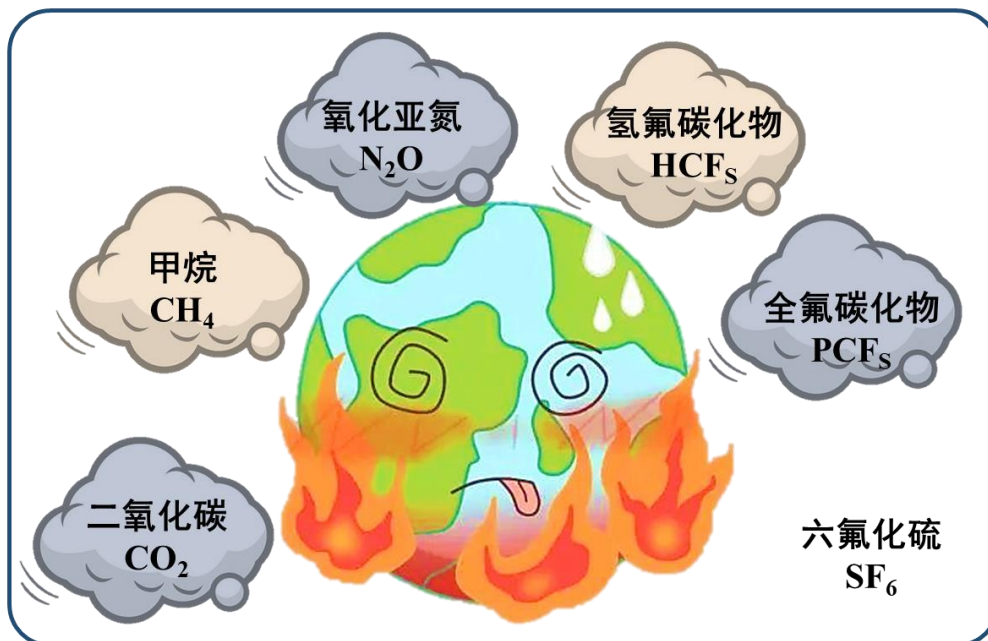
温室气体的来源：

CO<sub>2</sub>：化石燃料使用 and 水泥生产，以及土地利用变化（如热带毁林）；

CH<sub>4</sub>: 畜牧业水稻田、湿地等;

N<sub>2</sub>O: 施肥等农业生产活动;

CFCs: 冰箱、空调等制冷剂的使用



- 气溶胶、太阳活动

### 气溶胶

气溶胶通过影响大气化学、辐射和云物理过程的变化,进而影响近地表的辐射平衡和气温。绝大部分气溶胶因反射太阳辐射而对大气产生降温作用。

### 太阳活动

太阳是地球热量的主要来源,太阳活动与地球温度变化密切相关,但其影响程度存在较大不确定性。太阳黑子的变化与全球温度之间具有良好的相关性。

- 其他



板块运动

地球轨道

海洋运动

.....

火山活动

## (7) 气候变化应对（讲授和举例法）

适应

对实际或预期气候及其影响进行调整的过程，以减少或降低气候变化带来的风险。

减缓

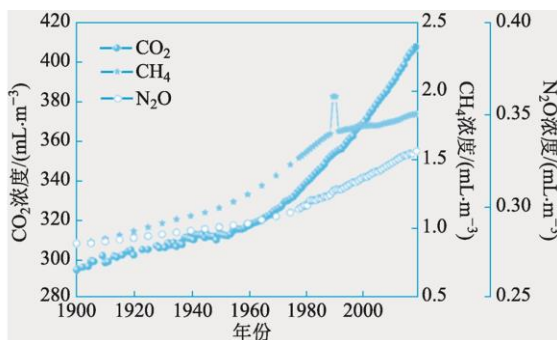
减少温室气体排放或增加汇的过程，以减缓未来的气候变化。

## (8) 温室气体排放与气候变化的关系（讲授和问题教学法）

2019 年，全球人为温室气体排放量约为 524 亿吨（CO<sub>2</sub> 当量），全球平均温度变化与温室气体排放量具有一定的相关性。



全球温室气体排放与温度变化的关系  
(Our World in Data, 2016)

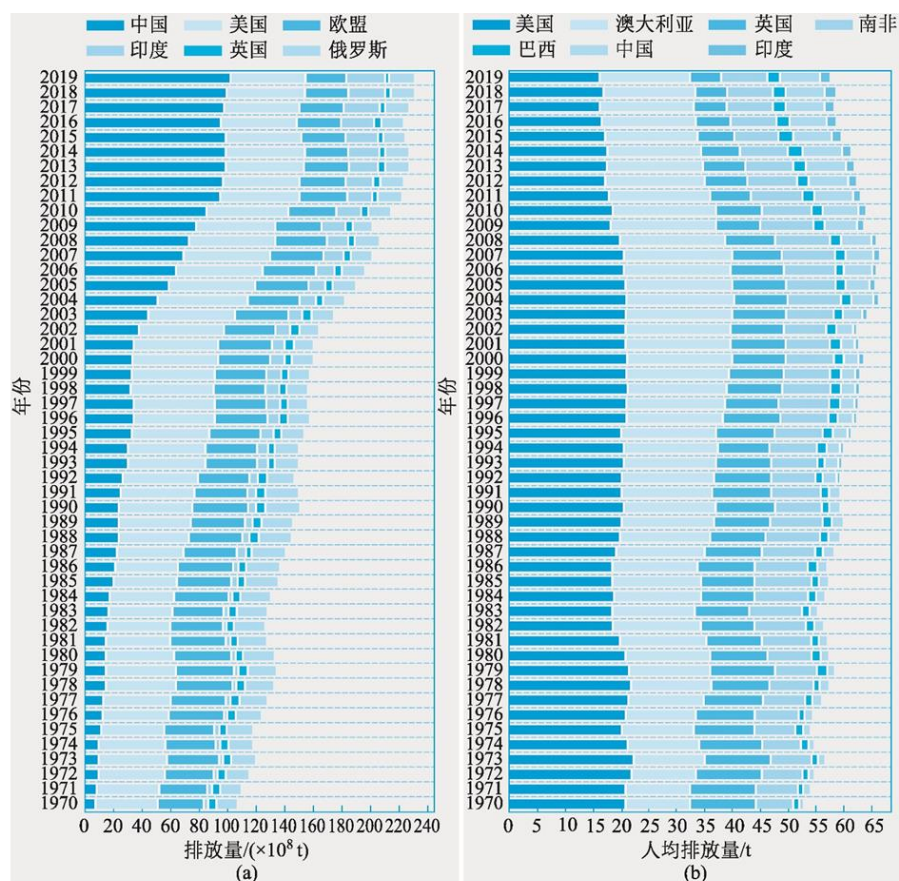


大气中温室气体浓度年际变化  
(Our World in Data, 2019)

### (9) 碳排放时空分布（讲授法）

亚洲、北美、欧洲的 CO<sub>2</sub> 排放量分别占全球的 53%、18%、17%。

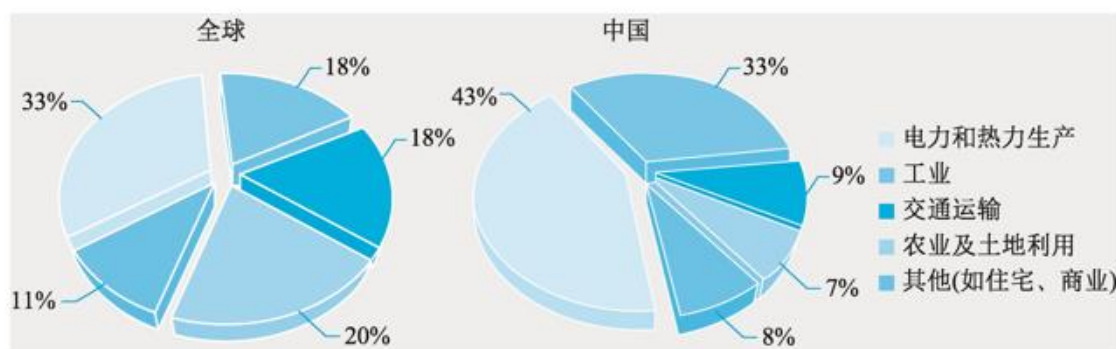
自 2006 年以来，中国一直是世界上最大的碳排放国，排放量已占全球排放量的四分之一以上，但人均排放量略低于世界平均水平。



全球主要国家CO<sub>2</sub>排放量变化 (a) 和人均CO<sub>2</sub>排放量 (b)

### (10) 碳排放情况（讲授法）

2019 年，全球 CO<sub>2</sub> 的排放约 70% 来源于电力和热力生产、工业生产及交通运输过程



2019年全球及中国行业CO<sub>2</sub>排放对比 (IEA, 2020)

## (11) 分组准备进行小组课程报告

小组作业 (40%) :

- ✓ 自由组队, 5 人一组;
- ✓ 自选“双碳”相关主题, 撰写一篇论文, 进行 10 分钟 PPT 口头汇报;
- ✓ 第十周周五提交小组名单+选题题目;
- ✓ 汇报前发送论文+PPT 至邮箱 3516919845@qq.com

### 7.1.4 作业安排

学习完本单元内容, 谈谈你对气候变化的认识与感想? (500 字左右)

### 7.1.5 参考资料

- (1) 汪霞, 汪华林, 碳中和技术概论, 北京: 高等教育出版社, 2022.
- (2) 丁仲礼, 张涛, 碳中和逻辑体系与技术需求, 北京: 科学出版社, 2022.
- (3) 金涌, 胡山鹰, 张强, 2060 中国碳中和, 北京: 化学工业出版社, 2022.9.
- (4) 王灿, 张九天, 碳达峰、碳中和的新发展路径, 北京: 中共中央党校出版社, 2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.

(6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

## 7.2 教学单元二

### 7.2.1 教学目标

- (1) 了解国际碳中和公约与行动
- (2) 掌握我国碳中和目标、挑战和机遇

### 7.2.2 教学内容(含重点、难点)

- (1) 国际碳中和公约与行动
- (2) 我国碳中和目标、挑战和机遇

### 7.2.3 教学过程及方法

#### (1) 国际公约(讲授法和举例法)

##### 《联合国气候变化框架公约》

(United Nations Framework Convention on Climate Change)

1992 年 5 月, 在联合国大会上通过, 并由 154 个国家共同签署, 是世界上首个关于全面控制 CO<sub>2</sub> 等温室气体排放的国际公约。

确立了 5 个基本原则:

- ✓ “共同但有区别”的原则, 要求发达国家带头应对气候变化;
- ✓ 应充分考虑发展中国家的具体国情;
- ✓ 缔约方应采取必要举措, 预测、预防和减少导致气候变化的要素;
- ✓ 重视各方可持续发展权;
- ✓ 加强各国之间的合作。

##### 《京都议定书》(Kyoto Protocol)

1997 年 12 月通过, 对《联合国气候变化框架公约》的重要补充。规定发达国家要在 1990 年的

基础上于 2050 年减排 80%~85%；发展中国家在得到发达国家一定援助的前提下，实行自愿减排。

采用四种减排方式：

- ✓ 两个发达国家之间可以进行排放额度买卖的“排放权交易”
- ✓ 以“净排放量”计算温室气体排放量
- ✓ 可以采用绿色开发机制
- ✓ 可以采用“集团方式”

### 《巴黎协定》(The Paris Agreement)

2015 年 12 月，《巴黎协定》设定了本世纪后半叶实现净零排放的目标。

我国以“五大发展理念”为核心，提出实现碳中和四大目标：

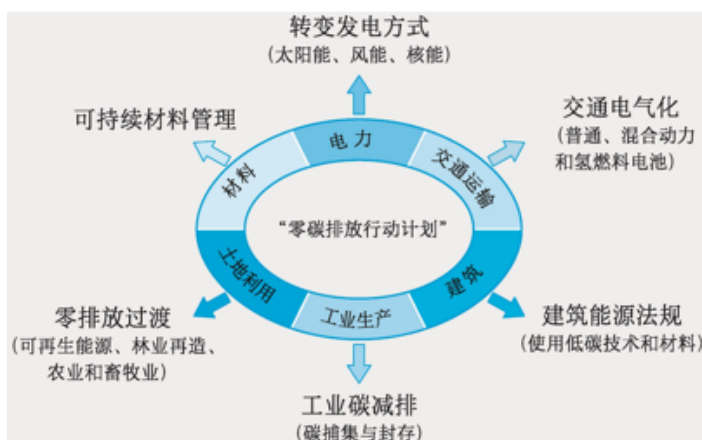
- ✓ 到 2030 年，中国单位 GDP 的 CO<sub>2</sub> 排放比 2005 下降 60%到 65%
- ✓ 非化石能源在总能源比重提升到 20%左右
- ✓ 中国的 CO<sub>2</sub> 排放要达到峰值，并且争取尽早达到峰值
- ✓ 中国的森林蓄积量要比 2005 年增加 45 亿 m<sup>3</sup>。

## (2) 国际行动（讲授法和举例法）

### (一) 欧盟



## （二）美国



美国零碳计划（SDSN, 2020）

美国宣布，到2030年将温室气体排放量较2005年减少50%~52%，并在2050年实现净零排放。

2020年10月27日，美国提出了《零碳排放行动计划》，重点关注六大碳排放相关的能源生产与消费部门，包括电力、交通运输、建筑、工业生产、土地利用和材料。

## （三）其他国家

全球GDP排名前十国家的气候承诺

国家	净零目标	承诺性质
美国	2050年	政策宣示
中国	2060年前	政策宣示
日本	2050年	政策宣示
德国	2045年	法律规定
印度	/	/
英国	2050年	法律规定
法国	2050年	法律规定
意大利	2050年	政策宣示
巴西	2050年	政策宣示
加拿大	2050年	政策宣示

截至2020年底，全球130多个国家提出了碳中和目标，这些国家二氧化碳排放量占全球的73%，GDP占全球的70%。

数据来源：全球能源转型及零碳发展白皮书，2021

### （3）我国碳中和目标、挑战和机遇（讲授法和合作教学法）

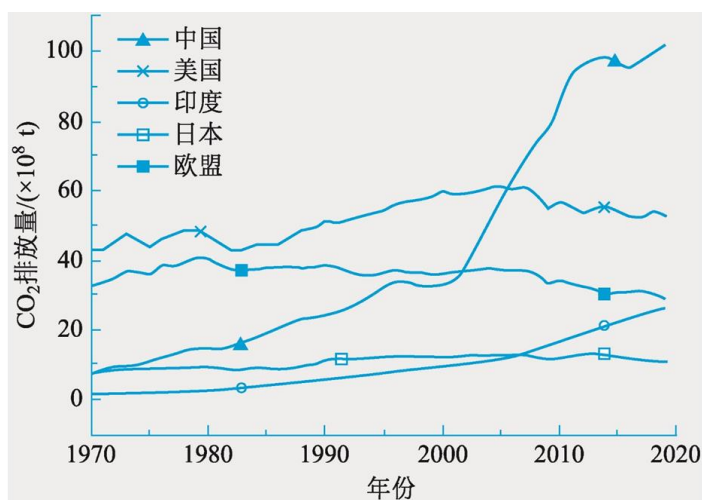
#### a) 我国碳中和的目标

到2030年，单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放比2005年下降65%以上；非化石能源消费比重达到25%左右，风电、太阳能发电总装机容量达到12亿kW以上；森林覆盖率达到25%左右，森林蓄积量达到190亿m<sup>3</sup>，CO<sub>2</sub>排放量达到峰值并实现稳中有降。

到 2060 年，绿色低碳循环发展的经济体系和清洁低碳安全高效的能源体系全面建立，能源利用效率达到国际先进水平，非化石能源消费比重达到 80% 以上，碳中和目标顺利实现。

#### b) 我国碳中和挑战

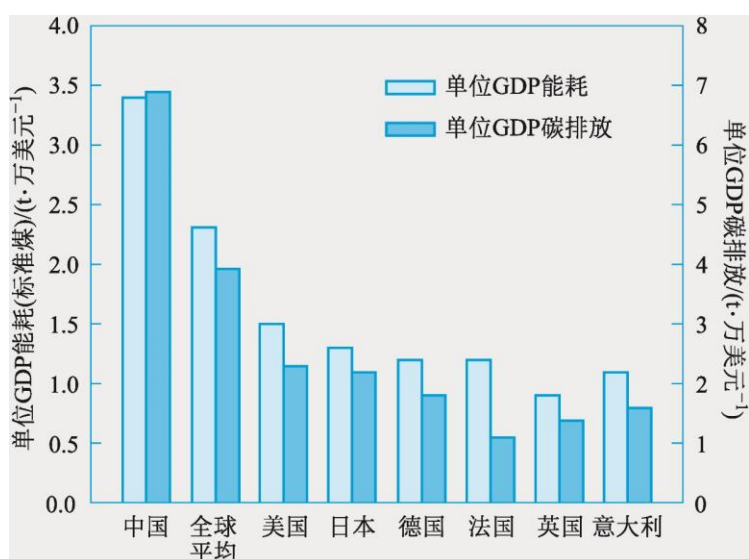
面临“三高”的巨大挑战：高碳的能源结构、高碳的产业结构、中高速的工业化阶段。



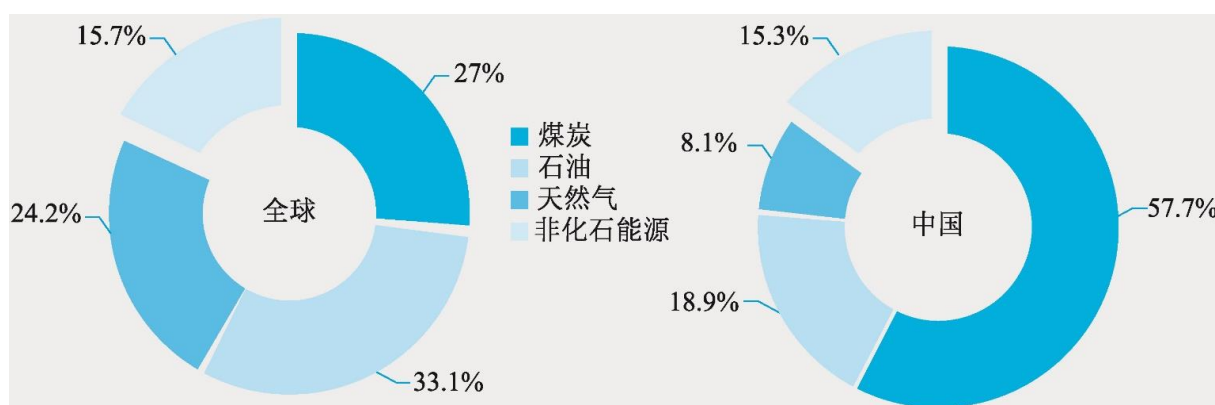
全球主要国家CO<sub>2</sub>排放量变化（Our World in Data, 2019）

- ❑ 我国与欧美国家处在不同的发展水平阶段和不同的经济增速阶段。
- ❑ 我国 CO<sub>2</sub> 排放总量明显超过欧美发达国家。





我国单位 GDP 能耗高、CO<sub>2</sub> 排放强度大，2019 年我国单位 GDP CO<sub>2</sub> 排放量为 6.9 t CO<sub>2</sub>/万美元，是全球平均的 1.8 倍、美国的 3 倍、德国的 3.8 倍。



■ 我国化石能源占比高达 85%，并且呈现“一煤独大”的格局，煤炭占比接近 60%

■ 我国能源消费 CO<sub>2</sub> 排放强度比世界平均水平高 30% 以上

#### c) 我国碳中和机遇

- 我国人均 CO<sub>2</sub> 排放量低
- 我国节能潜力巨大
- 我国可再生能源丰富
- 我国技术发展空间大



#### (4) 第一章小结

- ✓ 全球气候变化：气候变化带来的影响；影响因素；应对措施。
- ✓ 全球碳排放与碳中和：碳排放来源及排放量，中国碳排放所处水平。
- ✓ 国际碳中和公约与行动：应对气候变化的三大里程碑式国际公约。
- ✓ 我国碳中和目标、挑战和机遇：2060 年前实现碳中和；“三高”挑战；我国碳中和机遇。
- ✓ 碳中和技术：能源、资源、信息技术，支撑产业碳中和。

#### 7.2.4 作业安排

课后思考：如何看待我国人均碳排放比较低？

#### 7.2.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.
- (4) 王灿，张九天，碳达峰、碳中和的新发展路径，北京：中共中央党校出版社，2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室，碳达峰碳中和政策汇编，北京：中国计划出版社，2023.1.
- (6) 汪军，碳中和时代 未来 40 年财富大转移，北京：电子工业出版社，2021.10.

### 7.3 教学单元三

#### 7.3.1 教学目标

从本单元开始能源篇内容的讲解，首先是零碳电力技术的学习，本节学习目标如下：

- (1) 掌握传统发电节能提效技术

- (2) 掌握可再生能源发电技术

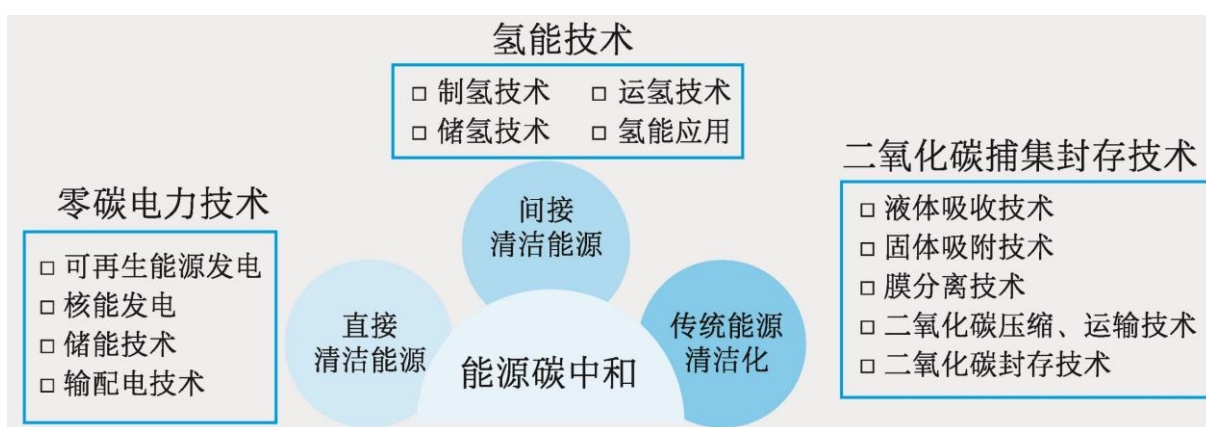
### 7.3.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 传统发电节能提效技术  
(2) 可再生能源发电技术

### 7.3.3 教学过程及方法

- (1) 能源篇内容简介，包括 3 个部分：零碳电力技术、氢能技术和二氧化碳捕集封存技术。（讲授法）

2020 年，我国能源消费总量为 49.8 亿 t 标准煤，位居世界第一其中，非化石能源消费量占能源消费总量的比重仅为 15.5%，能源领域减碳是我国实现碳中和的关键。能源利用的主要行业包括电力和热力生产、工业、交通运输、制造及建筑等，其中电力和热力生产是最大贡献源。中国能源基金会提出中国实现碳中和路径中多部门、多举措并举的一揽子解决方案，指出未来零碳电力减碳约 27%，非电燃料如氢能减碳约 14%，二氧化碳捕集与封存减碳约 7%。本篇第二节、第三节和第四节分别介绍零碳电力技术、氢能技术以及 CO<sub>2</sub>捕集封存技术。工业建筑、交通运输、农业领域的节能提效将在产业篇介绍。



- (2) 零碳电力技术简介（讲授法）

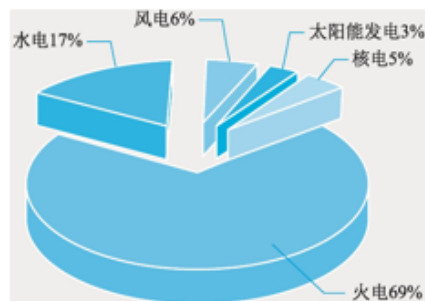
电力脱碳是碳中和的第一要务。具有“零碳”属性的可再生能源电力和核能电力将逐渐成为能源电力的供应主体，进而实现电力零碳化。可再生能源发电的波动性增加了电网的调度难度和运营成本，需加快发展储能，同时利用先进的输配电技术支撑新能源发电、多元化储能、新型负荷大规模友好接入，构建“新能源发电-规模化储能-先进输配电”的能源供应模式。本节主要介绍传统发电节能提效技术、可再生能源及核能发电技术、储能技术和输配电技术。



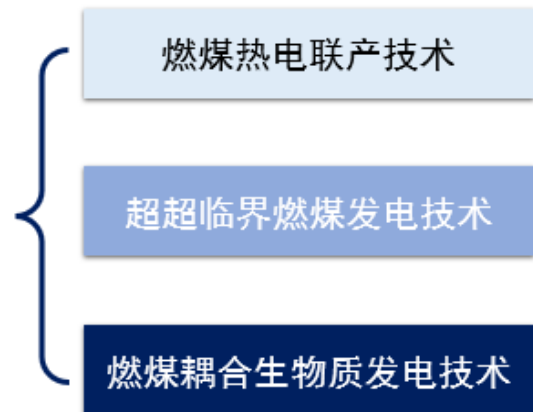
**电力脱碳是碳中和的第一要务！**

### (3) 传统发电节能提效技术（讲授法+举例法）

- 我国2020年的发电量仍以火电为主，高达69%。因此，**传统发电节能提效技术**尤其重要。

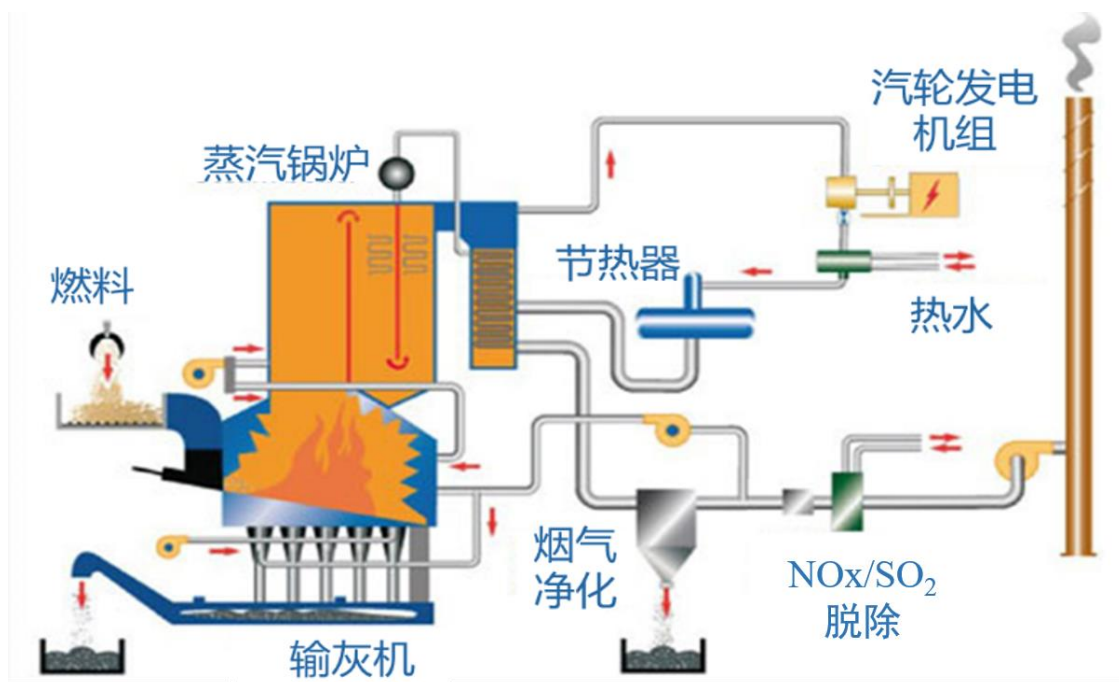


中国2020年发电量结构  
《中国能源大数据报告（2021）》



#### a) 燃煤热电联产技术

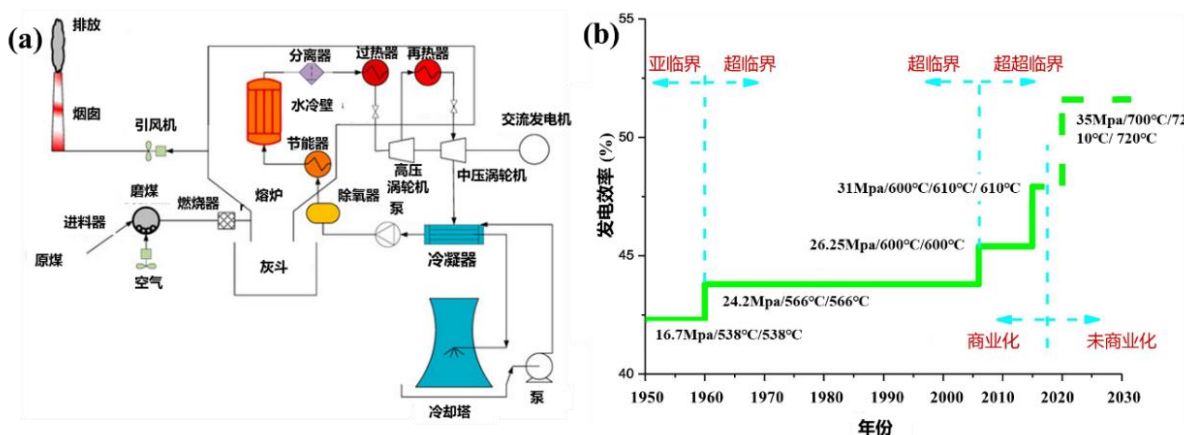
燃煤热电联产是一种以供热和发电同时进行的燃煤能源利用系统，是我国主要供热方式之一，且主要以燃煤机组为主。热电联产可提高能源利用率、节约能源，还具有便于综合利用、改善环境等优点。



基于汽轮机的热电联产示意图

## b) 超超临界燃煤发电技术

超超临界燃煤发电是燃煤电厂将水蒸气压力、温度提高到超临界参数以上，实现大幅提高机组热效率、降低煤耗和污染物排放的技术。

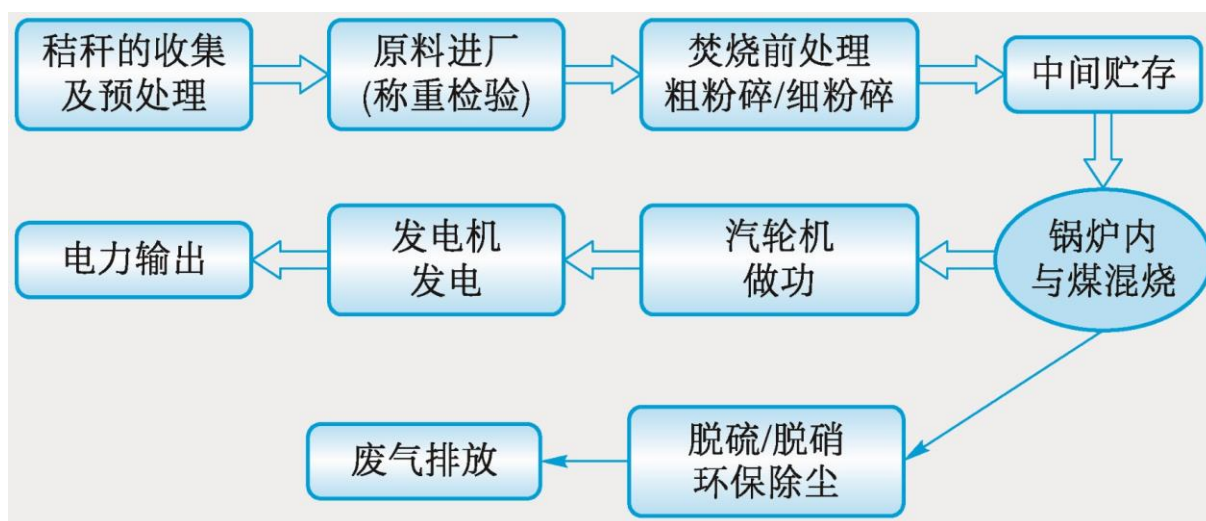


(a)典型超超临界燃煤发电流程图

(b)我国超超临界燃煤发电技术发展现状

## c) 燃煤耦合生物质发电技术

用生物质替代部分煤作为锅炉燃料，生物质与燃煤在炉外或炉内混合后进行燃烧，产生蒸汽后在汽轮机内做功，带动发电机进行发电。

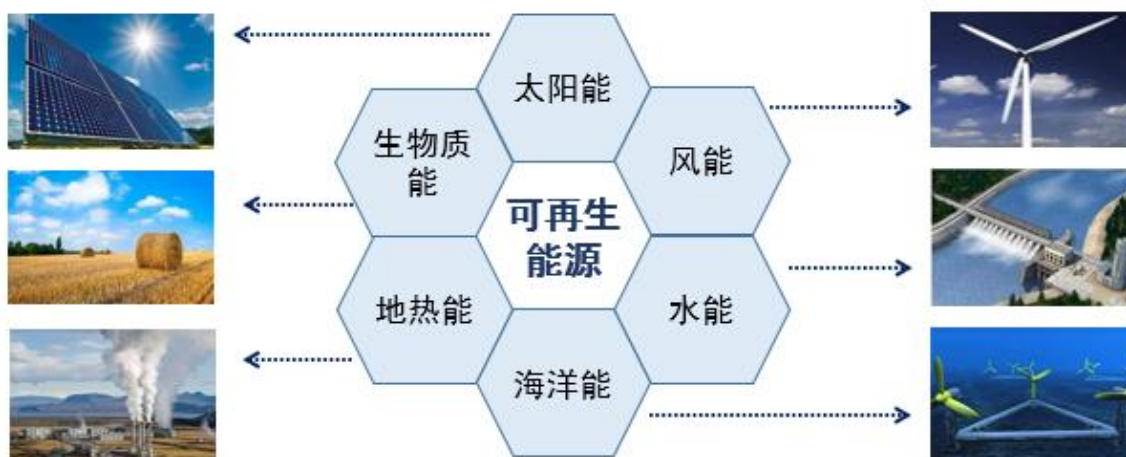


生物质与煤混合燃烧发电示意图

## (4) 可再生能源发电技术（讲授法+问题教学法）



可再生能源是自然界中可以不断得到补充或能在较短周期内再产生的能源，包括太阳能、风能、水能、生物质能、地热能、海洋能等。



#### a) 太阳能发电技术

我国太阳能总辐射资源丰富，呈“高原大于平原、西部干燥区大于东部湿润区”；2020 年，累计装机容量 2.53 亿千瓦，位居全球第一。

中国太阳能热能等级表

等级地区	年日照时数 (h/a)	年辐射总量 (MJ/m <sup>2</sup> ·a)	包括主要地区	备注
一类	3200-3300	6680-8400	新疆, 甘肃, 青海, 西藏	太阳能资源最丰富地区
二类	3000-3200	5852-6680	内蒙古, 宁夏, 山西, 河北	太阳能资源较丰富地区
三类	2200-3000	5016-5850	山东, 河南, 黑龙江, 吉林, 辽宁, 云南, 陕西, 广东	太阳能资源中等地区
四类	1400-2000	4180-5016	湖南, 广西, 江西, 浙江, 湖北, 福建, 安徽	太阳能资源较差地区
五类	1000-1400	3344-4180	四川, 贵州	太阳能资源最差地区

来源：李平，2016，《光伏太阳能产业发展调研》

太阳能发电技术分为两大类：

### (一) 太阳能光伏发电

“光生伏特效应”原理：太阳能→电能



### (二) 太阳能光热发电

同“火电机组”发电原理：热能→电能



## b) 风力发电技术

我国位于亚洲大陆东南，比邻太平洋西岸，属于季风强盛的区域。原理：风能-叶片动能-发电机转子动能-电能。

风力发电机的类型有以下几种：

#### 1. 水平轴风力发电机



#### 2. 垂直轴风力发电机



#### 3. 达里厄型风力发电机



风力发电的优缺点：

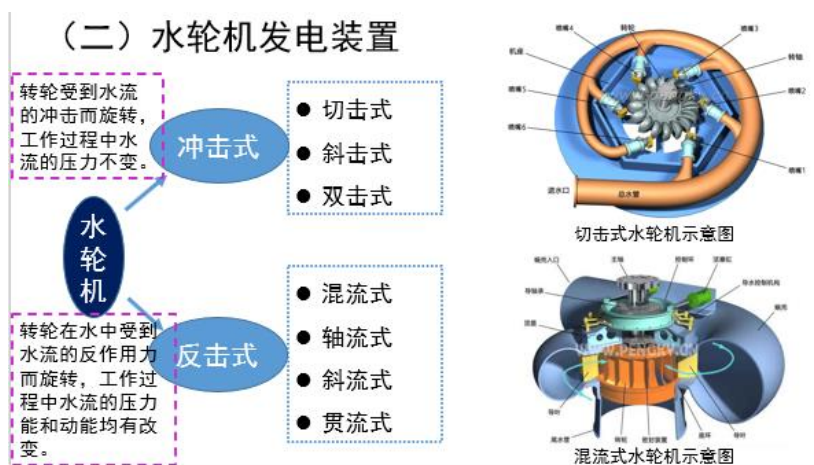
优势	挑战
风力发电的电价一直处于下降的趋势	弃风限电问题
风能资源的丰富性	风电并网问题
风电技术已经日臻成熟	电力储存技术薄弱
风力发电工程的建设工期短，见效快	产业结构不完善
风力发电可以减缓火力发电的压力	风力发电机安全性能不足
风电的应用范围更加广泛，可以实现对边远农村的独立供电	

### c) 水力发电技术

水力发电站分类：

- 水源性质：常规水电站、抽水蓄能电站；
- 开发水头的手段：坝式水电站、引水式水电站和混合式水电站；
- 利用水头的大小：高水头（ $>70\text{ m}$ ）、中水头（ $15\sim70\text{ m}$ ）和低水头（ $<15\text{ m}$ ）水电站；
- 发电规模：大型水电站（ $>25\text{ 万 kW}$ ）、中型水电站（ $2.5\text{ 万}\sim25\text{ 万 kW}$ ）和小型水电站（ $<2.5\text{ 万 kW}$ ）。

水轮机发电装置：





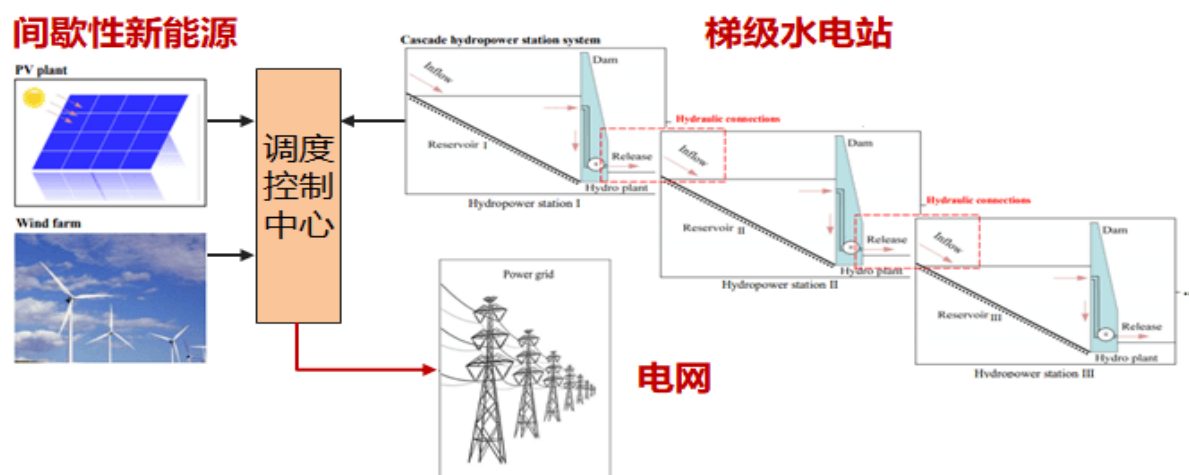
水力发电应用举例：三峡水电站；白鹤滩水电站

水力发电的优缺点：

优点	缺点
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 自然资源丰富</li> <li>• 无环境污染问题</li> <li>• 水力发电成本低</li> <li>• 高回报率</li> <li>• 主要动力设备效率较高</li> <li>• 设备启动、操作灵活</li> <li>• 社会综合效益大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 受地形、水力资源等影响</li> <li>• 单机容量受限制</li> <li>• 建厂初期投资费用高</li> <li>• 发电站一旦建成容量增加难</li> <li>• 影响生物多样性</li> <li>• 自然遗产等生态环境遭破坏的负面影响</li> </ul>

#### d) 水风光多能互补技术

“水风光互补”：以水电基地为基础，对周边风电、光伏等新能源发电的一体化建设运营，将水电和光伏就近打捆上网。充分发挥多能源间互补效益，保障系统安全稳定运行。



水风光多能互补系统示意图

#### e) 生物质能发电技术

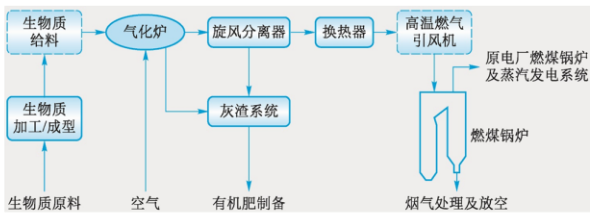
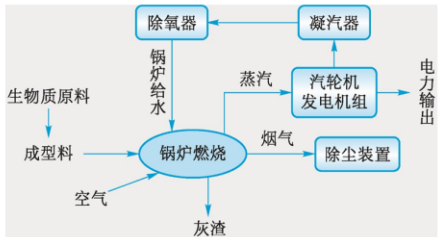
用生物质发电，替代或耦合煤炭，可显著减少  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的排放。2020 年，我国生

物质发电装机容量 2952 万千瓦，发电量 1326 亿 kWh。

生物质发电方式：

(一) 生物质直燃发电

(二) 生物质气化间接发电

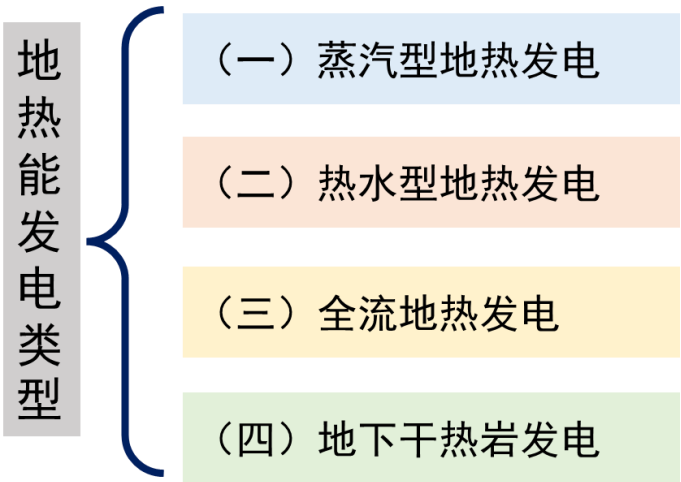


图修改自：郦林俊，电力科技与环保，2019,35,36

e) 地热能发电技术

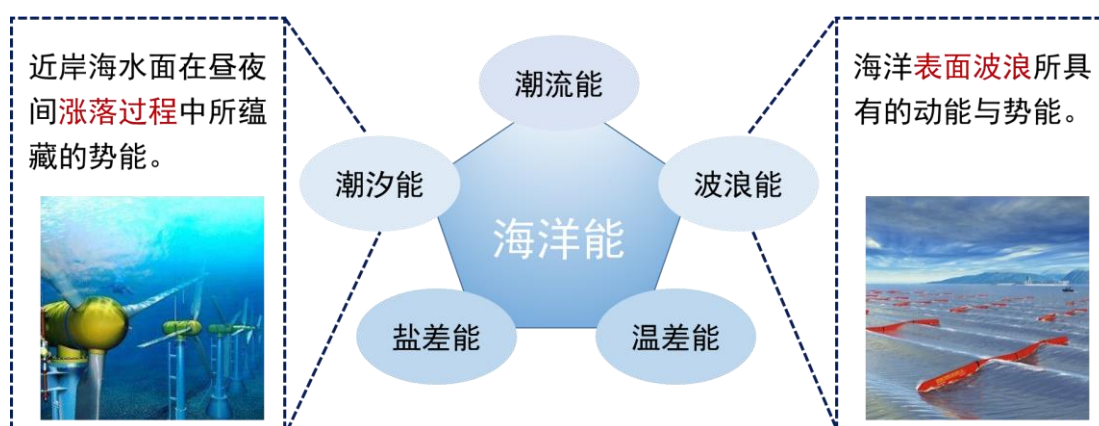
地热发电是以地下热水和蒸汽为动力源的一种新型发电技术，原理和火力发电的基本原理一样：地下热能——机械能——电能。

地热能发电类型：



f) 海洋能发电技术

海洋能指蕴藏于海洋中的可再生能源，包括潮汐能、波浪能、海流能、海水温差能、海水盐差能等。



### 7.3.4 作业安排

课后思考：可再生能源发电目前存在那些限制？

### 7.3.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.
- (4) 王灿，张九天，碳达峰、碳中和的新发展路径，北京：中共中央党校出版社，2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室，碳达峰碳中和政策汇编，北京：中国计划出版社，2023.1.
- (6) 汪军，碳中和时代 未来 40 年财富大转移，北京：电子工业出版社，2021.10.

## 7.4 教学单元四

### 7.4.1 教学目标

接着零碳电力技术的学习，本节学习目标如下：

- (1) 掌握储能技术

- (2) 了解核能发电技术
- (3) 了解输配电技术

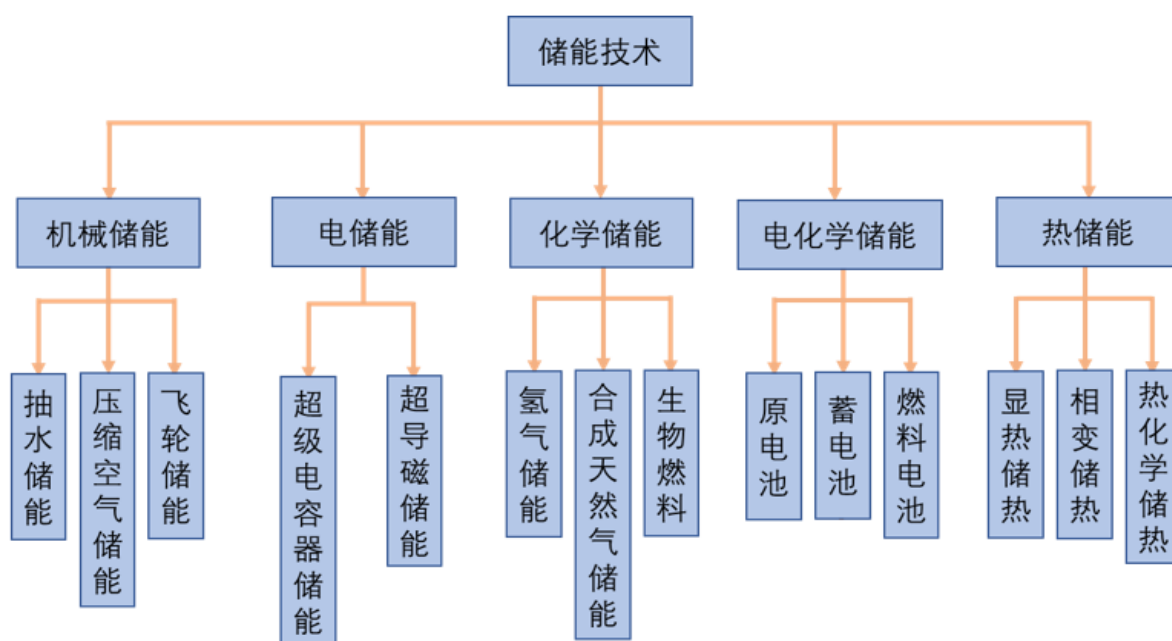
### 7.4.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 储能技术
- (2) 核能发电技术
- (3) 输配电技术

### 7.4.3 教学过程及方法

#### (1) 储能技术（讲授法和举例法）

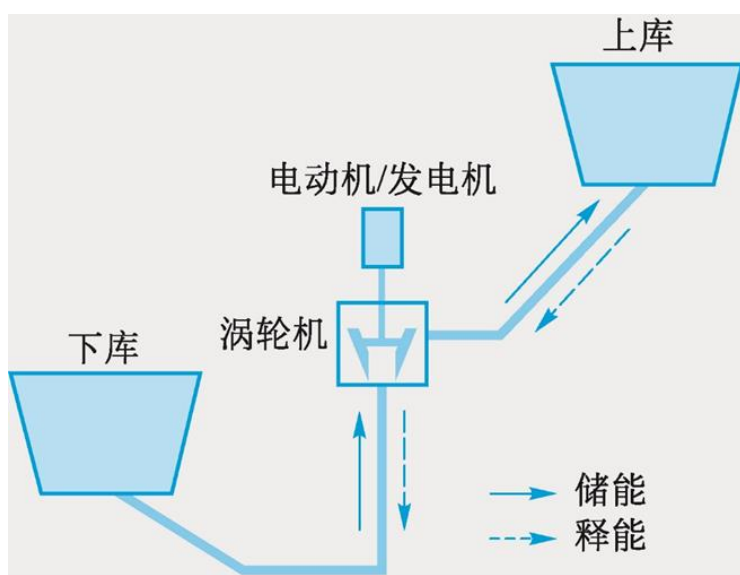
储能技术可在提高可再生能源消纳比例、保障电力系统安全稳定运行、提高发输配电设施利用率、促进多网融合等方面发挥重要作用。



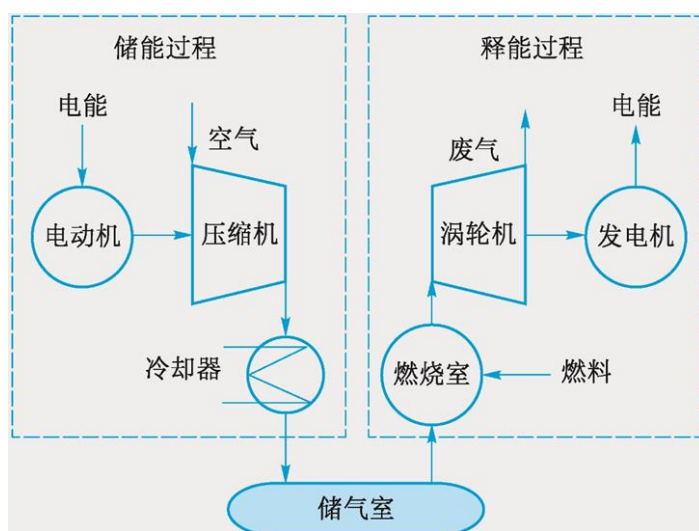
#### a) 机械储能

机械储能是将电能转换为机械能存储，在需要使用时再重新转换为电能。

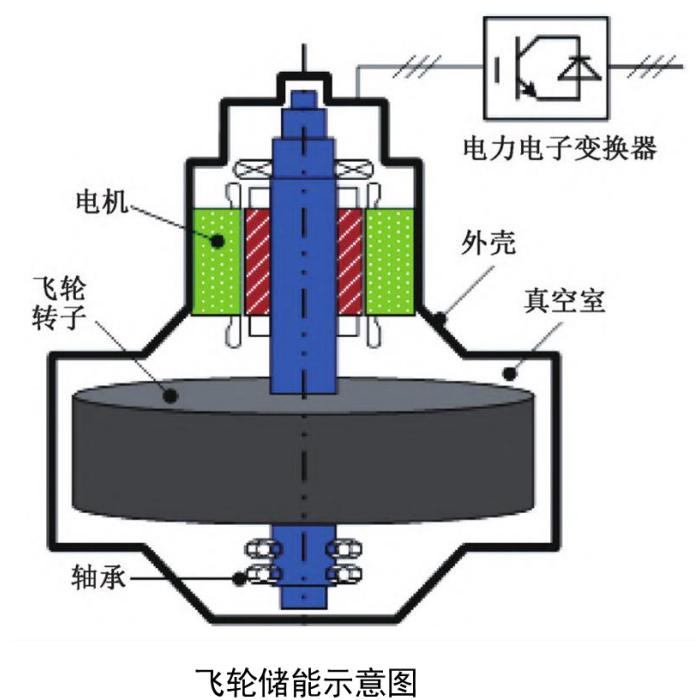
例如：抽水储能、压缩空气储能、飞轮储能



抽水蓄能示意图



压缩空气储能示意图



#### b) 电化学储能

电化学储能通过电池正负极的氧化还原反应充放电，实现电能和化学能的相互转化。

不同电池储能规模比较

电化学储能类型	寿命 周期/次	能量成本/ (美元·kW·h <sup>-1</sup> )	能量密度/ (W·h·kg <sup>-1</sup> )	储能 规模
锂离子电池	4500	500~1420	75~200	MW级
铅酸电池	≈1000	200~400	30~50	MW级
全钒液流电池	>10000	750~830	10~30	MW级
镍氢电池	2000		50~70	MW级
钠硫电池	4500	400~555	150~240	MW级
ZEBRA电池	3000	400~900	90~120	MW级
液态金属电池	>10000	<150	50~200	

#### c) 热储能

热储能以储热材料为介质将太阳能光热、地热、工业余热、低品位废热等热能储存

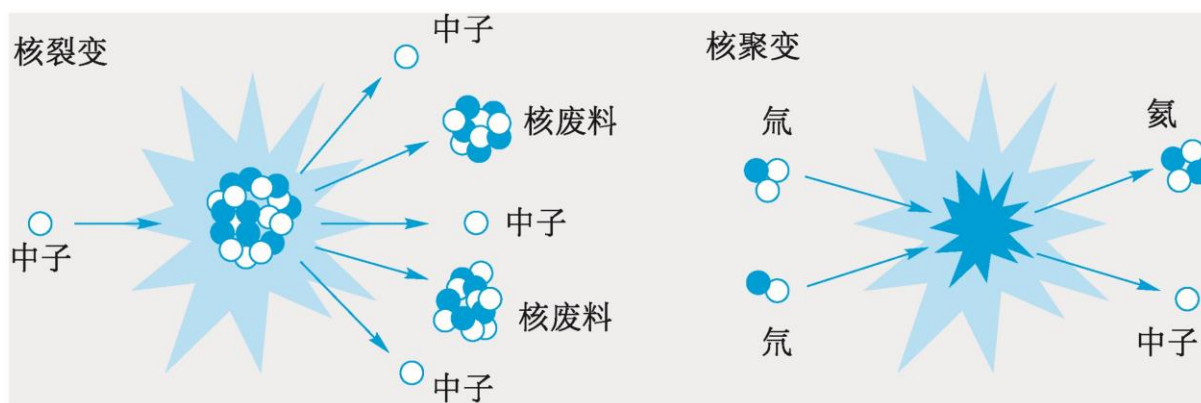
起来，在需要时释放。

d) 电气储能，如超级电容器储能、超导储能。

## (2) 核能发电技术（讲授法和举例法）

核能：原子核通过核反应，改变核结构变成另外一种新的原子核所释放出的能量。

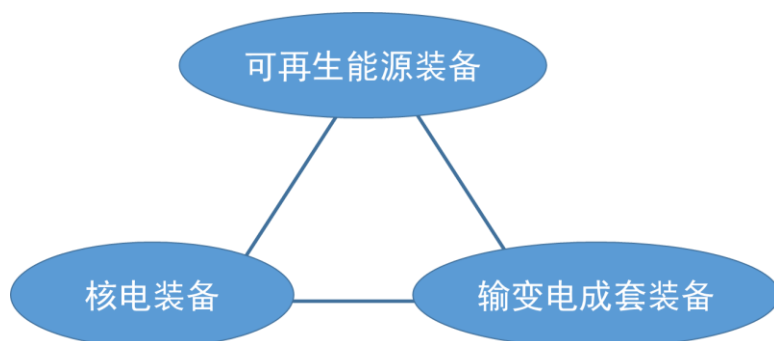
在核裂变和核聚变反应中，都有净的质量减少，减少的质量转化为核能。



## (3) 输配电技术（讲授法和举例法）

输配电技术指的是电力从产生到利用，一般经过发电、升压变电、超特高压传输、降压变电、配电、用电等环节。

先进电力装备：



## 7.4.4 作业安排

课后思考：储能技术的分类？各有哪些优缺点？

#### 7.4.5 参考资料

- (1) 汪霞, 汪华林, 碳中和技术概论, 北京: 高等教育出版社, 2022.
- (2) 丁仲礼, 张涛, 碳中和逻辑体系与技术需求, 北京: 科学出版社, 2022.
- (3) 金涌, 胡山鹰, 张强, 2060 中国碳中和, 北京: 化学工业出版社, 2022.9.
- (4) 王灿, 张九天, 碳达峰、碳中和的新发展路径, 北京: 中共中央党校出版社, 2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.
- (6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

### 7.5 教学单元五

#### 7.5.1 教学目标

开始学习氢能技术, 本节学习目标如下:

- (1) 掌握制氢技术
- (2) 掌握储氢技术

#### 7.5.2 教学内容 (含重点、难点)

- (1) 制氢技术
- (2) 储氢技术

#### 7.5.3 教学过程及方法

- (1) 制氢技术 (讲授法和举例法)

制氢技术包括:

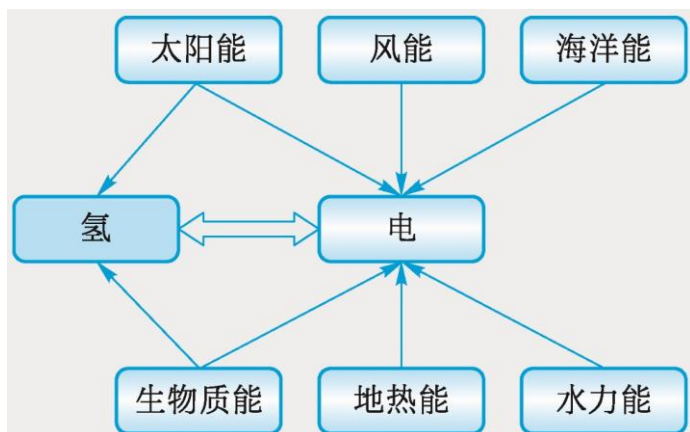




a) 化石能源制氢包括：煤制氢、天然气制氢、石油制氢，分别介绍这几种技术。

b) 电解水制氢包括：碱性电解水制氢、质子交换膜电解水制氢、固体氧化物电解水制氢，分别介绍这几种电解水制氢的技术。

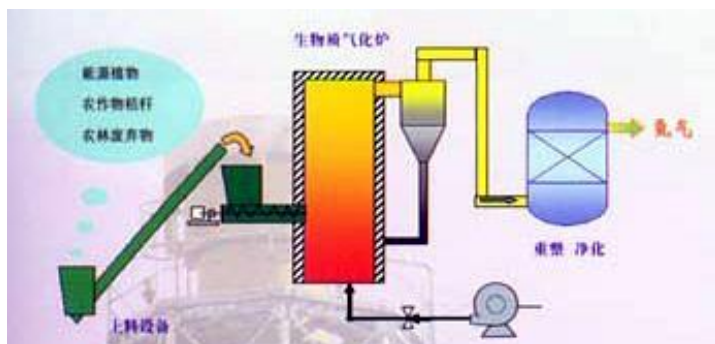
c) 可再生能源制氢



风能、海洋能、水力能、地热能：先发电，再电解水制氢

太阳能、生物质能：既可以发电制氢，也可以直接制氢

d) 生物质制氢：生物质气化制氢、生物质热解重整制氢、超临界水转化法制氢

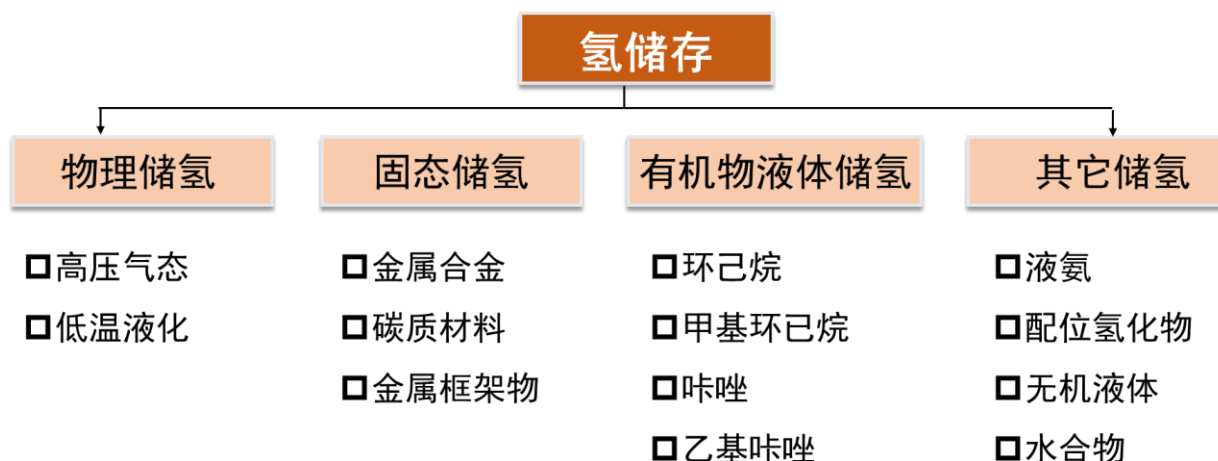


e) 其他制氢技术:

化工原料制氢:

制氢方法	反应式	优点	缺点
甲醇蒸汽重整	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$	$\text{H}_2$ 含量高 反应温度低	反应动态响应慢 床层存在“冷点”
甲醇分解	$\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}$	反应迅速	反应温度高 $\text{CO}$ 含量高
甲醇部分氧化	$\text{CH}_3\text{OH} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{CO}_2$	反应条件温和	$\text{H}_2$ 含量低 内部温度不易控制
甲醇自热重整	$\text{CH}_3\text{OH} + \beta\text{O}_2 + (1-2\beta)\text{H}_2\text{O} \rightarrow (3-2\beta)\text{H}_2 + \text{CO}_2 (0 \leq \beta \leq 0.5)$	反应温度适中 反应吸放热耦合, 可达到热平衡	$\text{H}_2$ 含量低, 催化剂易烧结或积炭

## (2) 储氢技术 (讲授法和举例法)



#### 7.5.4 作业安排

课后思考：制氢技术的分类？各有哪些优缺点？

#### 7.5.5 参考资料

- (1) 汪霞, 汪华林, 碳中和技术概论, 北京: 高等教育出版社, 2022.
- (2) 丁仲礼, 张涛, 碳中和逻辑体系与技术需求, 北京: 科学出版社, 2022.
- (3) 金涌, 胡山鹰, 张强, 2060 中国碳中和, 北京: 化学工业出版社, 2022.9.
- (4) 王灿, 张九天, 碳达峰、碳中和的新发展路径, 北京: 中共中央党校出版社, 2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.
- (6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

### 7.6 教学单元六

#### 7.6.1 教学目标

继续学习氢能技术，本节学习目标如下：

- (1) 掌握运氢技术
- (2) 了解氢能的应用

#### 7.6.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 运氢技术
- (2) 氢能的应用

#### 7.6.3 教学过程及方法

##### (1) 运氢技术（讲授法和举例法）

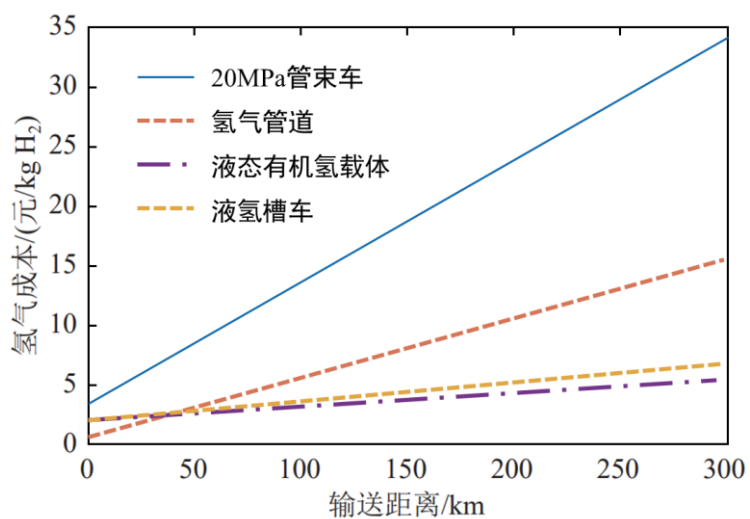
氢的直接输运方式主要有气氢输送、液氢输送和固氢输送 3 种方式以及间接利用液

氨或有机液体作为氢载体进行运输。

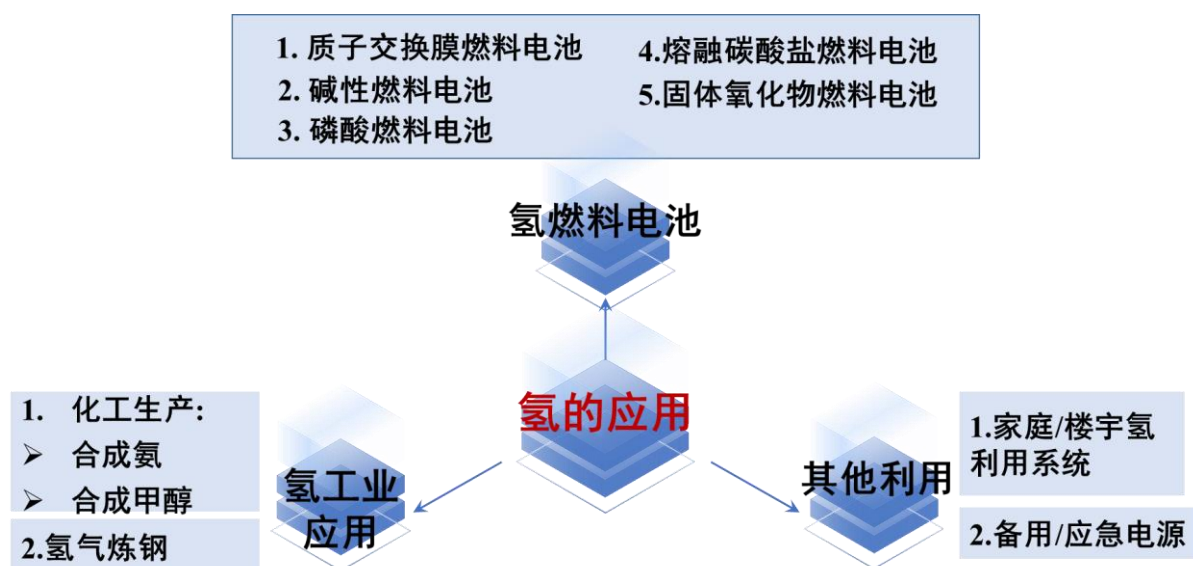


300 km 以上运输成本排序：液态有机氢载体<液氢槽车<氢气管道<管束车

50 km 以内：氢气管道运输成本较低，适合小规模运输



## (2) 氢能应用（讲授法和举例法）



对每部分内容进行详细讲解，并举实例。

#### 7.6.4 作业安排

课后作业：氢燃料电池与锂离子电池比较有何优缺点？

#### 7.6.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.
- (4) 王灿，张九天，碳达峰、碳中和的新发展路径，北京：中共中央党校出版社，2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室，碳达峰碳中和政策汇编，北京：中国计划出版社，2023.1.
- (6) 汪军，碳中和时代 未来 40 年财富大转移，北京：电子工业出版社，2021.10.

## 7.7 教学单元七

### 7.7.1 教学目标

开始学习二氧化碳捕集封存技术，本节学习目标如下：

- (1) 掌握二氧化碳液体吸收技术
- (2) 掌握二氧化碳固体吸收技术

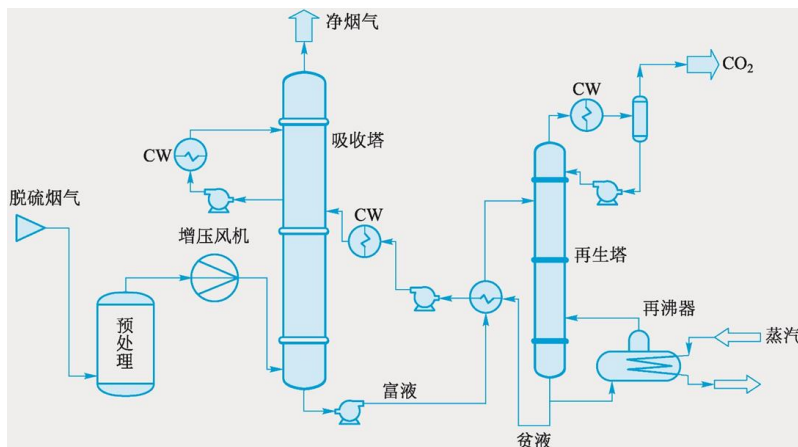
### 7.7.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 液体吸收技术
- (2) 固体吸收技术

### 7.7.3 教学过程及方法

#### (1) 二氧化碳液体吸收技术（讲授法和举例法）

液体吸收是目前应用最为广泛的 CO<sub>2</sub> 捕集方法，主要分为物理吸收法、化学吸收法和物理化学联合吸收法。



液体吸收CO<sub>2</sub>捕集工艺流程

#### (2) 物理吸收二氧化碳（讲授法和举例法）

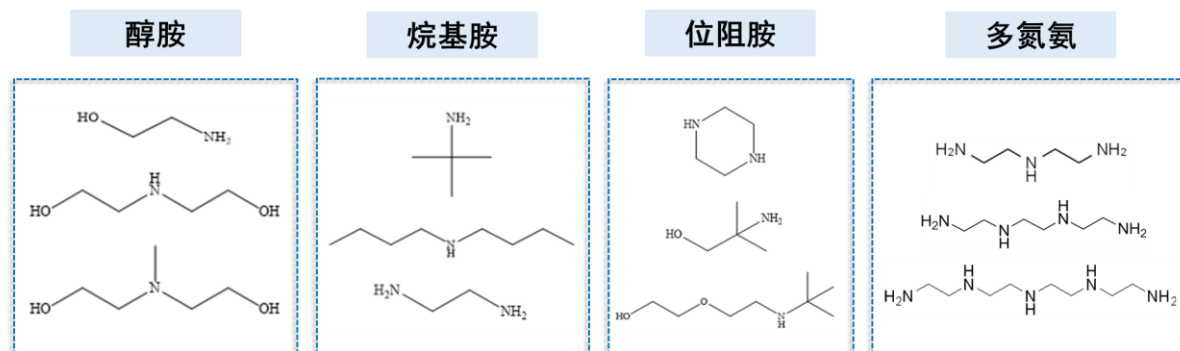
吸收剂不与 CO<sub>2</sub> 发生化学反应，仅通过 CO<sub>2</sub> 在吸收剂中的物理溶解实现 CO<sub>2</sub> 吸收的方法。分为以下几种方法：

### 几种物理吸收剂比较

	低温甲醇	聚乙二醇二甲醚	碳酸丙烯酯	N-甲基吡咯烷酮
操作温度 (°C)	-40	0	10	-15
溶剂循环量	适中	大	大	大
CO <sub>2</sub> 脱除效果	高	高	较高	较高
设备要求	高	一般	一般	一般
溶剂损失	严重	严重	一般	一般
热公用工程	中	高	高	高
冷公用工程	高	中	低	中

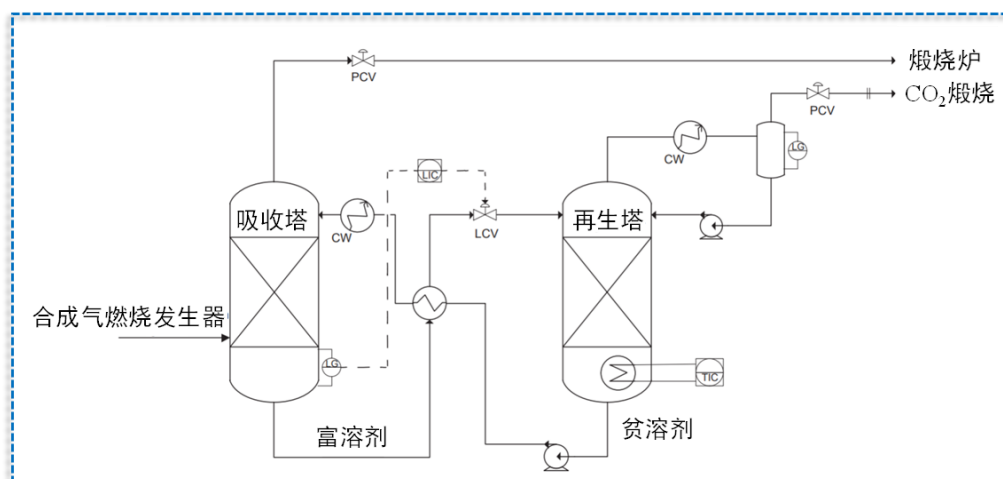
### (3) 化学吸收二氧化碳（讲授法和举例法）

a) 有机胺法: 有机胺中的氨基基团与 CO<sub>2</sub> 发生酸碱中和反应, 实现 CO<sub>2</sub> 的分离与吸收。



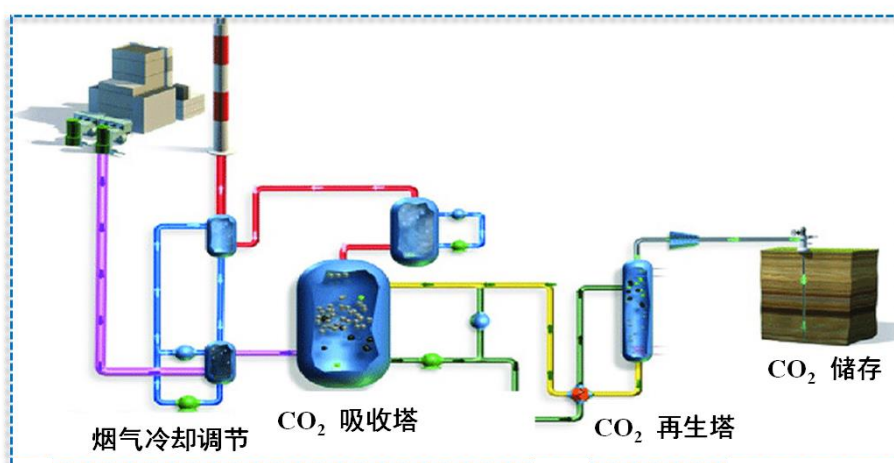
常用CO<sub>2</sub>捕集的有机胺吸收剂

b) 热钾碱法: 高浓度的碳酸钾溶液与 CO<sub>2</sub> 反应生成碳酸氢钾, 对生成的碳酸氢钾进行高温加热或减压处理, 解吸出 CO<sub>2</sub>。



热钾碱法吸收CO<sub>2</sub>流程示意图

c) 氨法：氨与 CO<sub>2</sub>、水在一定温度下反应生成碳酸铵，当有过量的 CO<sub>2</sub> 存在时，会继续发生反应生成碳酸氢铵。

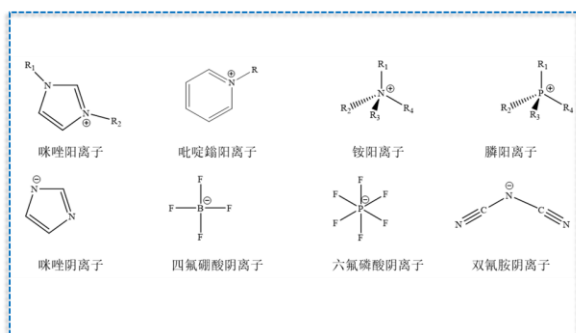


氨法CO<sub>2</sub>吸收工艺流程图

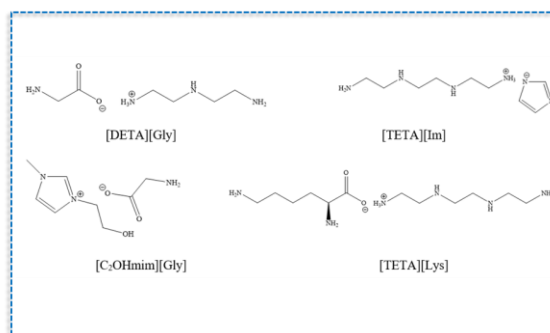
d) 离子液体法

- 离子液体是由特定阳、阴离子构成的，在室温下呈液态的盐类。
- 结构可调节、热稳定性高、蒸气压低，对 CO<sub>2</sub> 吸收有极高选择性。





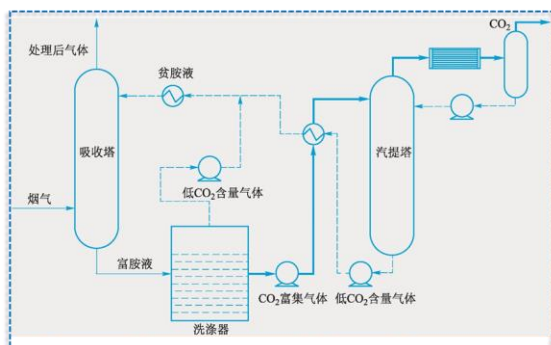
几种常规离子液体中的阴、阳离子



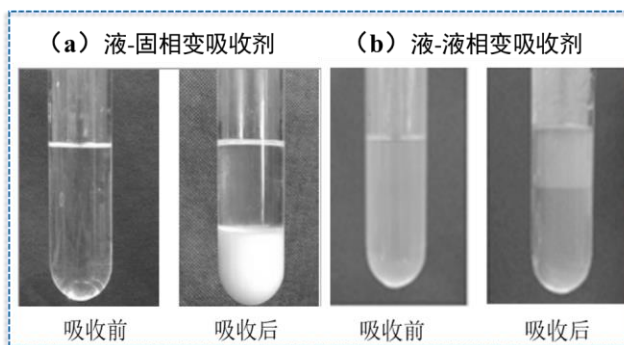
几种功能化离子液体

### e) 相变吸收剂法

- 相变吸收剂由主吸收剂、分相促进剂和溶剂组成；
- 相变吸收剂可分为液-固相变吸收剂和液-液相变吸收剂。



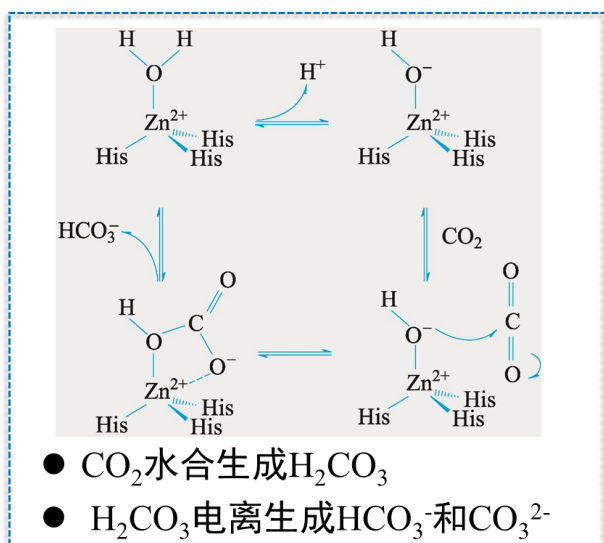
相变吸收剂CO<sub>2</sub>捕集过程



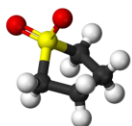
两种相变吸收剂示意图

### f) 酶促吸收法

碳酸酐酶催化 CO<sub>2</sub> 水合反应机理：



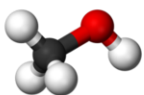
#### (4) 物理化学联合吸收二氧化碳（讲授法和举例法）



环丁砜法

- 采用**环丁砜**、**二异丙醇胺**和**水**的混合溶液作为吸收剂，同时脱除 $\text{H}_2\text{S}$ 和 $\text{CO}_2$ 。

- 环丁砜法对设备的**腐蚀性较大**，实际工业应用较少。



甲醇法

- 以**甲醇**、**烷醇胺**等及**少量缓蚀剂**组成的混合溶液为吸收剂。

- 适用于以油为原料制氢、甲醇合成气或制纯氢的气体净化，也适用于羰基合成原料气的净化。

#### 7.7.4 作业安排

课后作业：氢燃料电池与锂离子电池比较有何优缺点？

#### 7.7.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.
- (4) 王灿，张九天，碳达峰、碳中和的新发展路径，北京：中共中央党校出版社，

2021.7.

(5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.

(6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

## 7.8 教学单元八

### 7.8.1 教学目标

继续学习二氧化碳捕集封存技术, 本节学习目标如下:

- (1) 掌握膜分离技术
- (2) 了解二氧化碳压缩、运输技术
- (3) 了解二氧化碳封存技术

### 7.8.2 教学内容(含重点、难点)

- (1) 膜分离技术
- (2) 了解二氧化碳压缩、运输技术
- (3) 二氧化碳封存技术

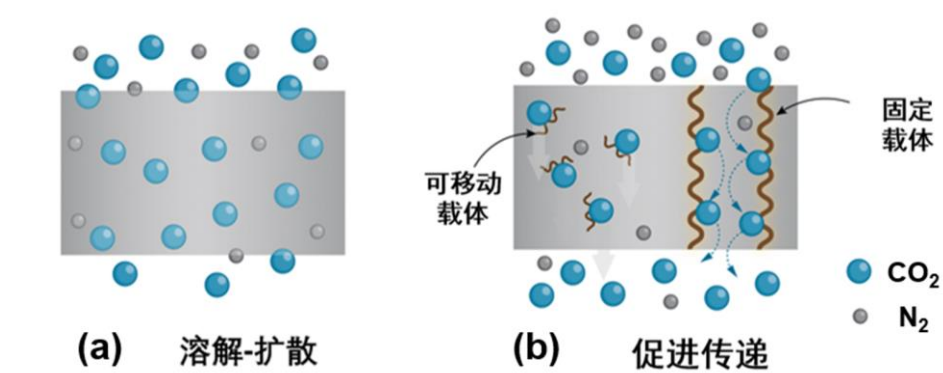
### 7.8.3 教学过程及方法

- (1) 膜分离技术(讲授法和举例法)

a) 膜分离过程:

气体膜分离:

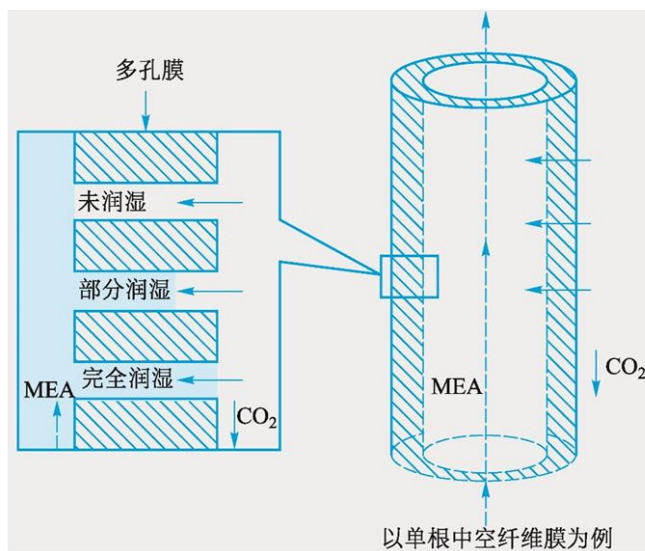
基于膜材料对不同气体渗透选择性的差异, 分离混合气体的过程。



两种CO<sub>2</sub>分离膜工作原理示意图

膜吸收：

膜吸收法是以微孔疏水膜为界面，将混合气体和吸收液隔开。

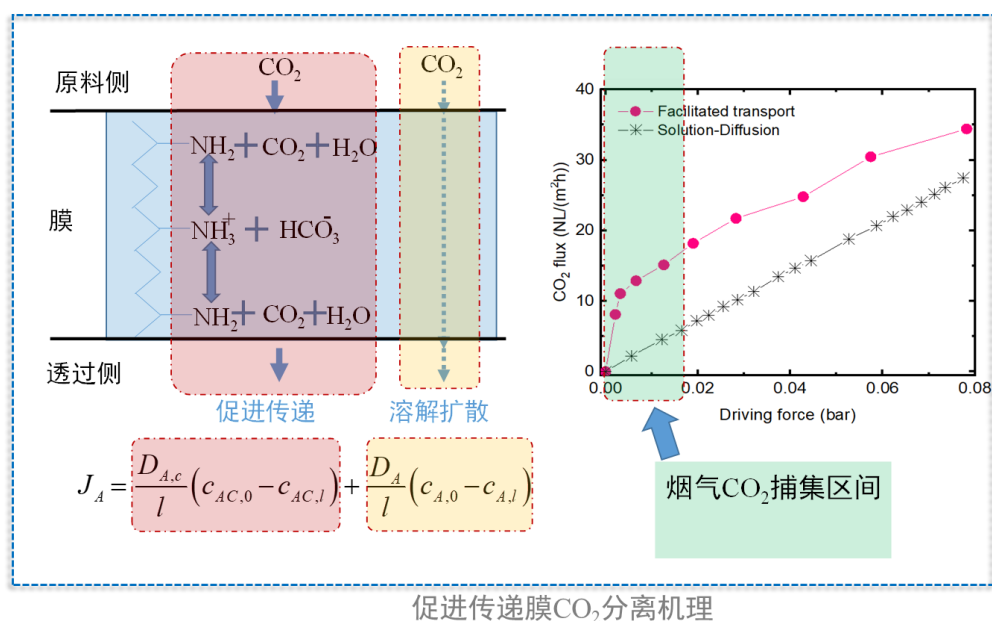


## 膜吸收原理—以单根中空纤维膜为例

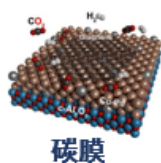
b) 膜分离材料：

高分子膜：高分子膜一般通过溶解-扩散机理传递气体分子，渗透率和选择性之间存在“trade-off”现象。

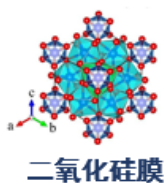
促进传递膜：在膜中引入载体，待分离组分与载体之间发生可逆化学反应，实现待分离组分传递过程的强化。



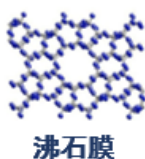
无机膜：



- 通常由热硬化性的聚合物高温分解制成，大部分碳膜的传递机理为**分子筛效应**。



- 二氧化硅具有优越的热、化学及结构稳定性。
- 二氧化硅膜制备技术包括溶胶法和化学气相沉积。



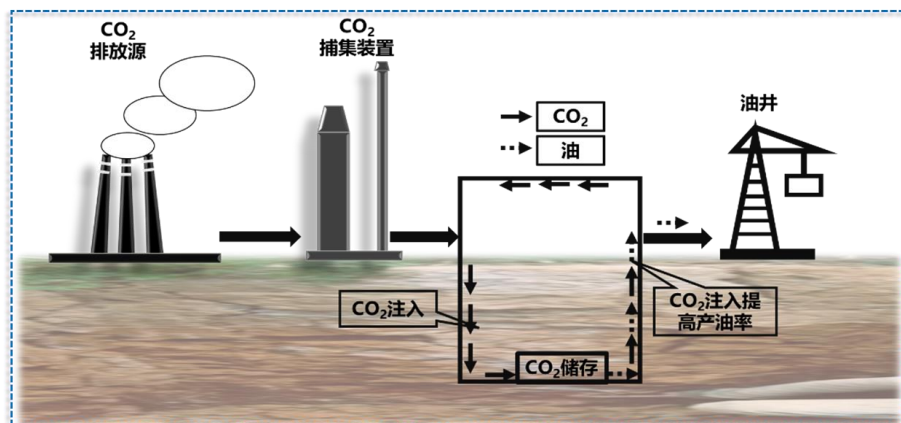
- 稳定性好、分离系数高、热稳定性好、化学稳定性强。
- 沸石膜的分离机理主要为**分子筛分**。

混合基质膜：在聚合物中填充无机材料，通过无机填料和聚合物之间的相互作用制得混合基质膜。



地质储存原理：

- CO<sub>2</sub> 减排途径：地质储存、海洋储存及矿物碳化化固定。
- 将 CO<sub>2</sub> 注入地下深部的油气层、煤层、盐水层、碳酸盐岩、玄武岩中。

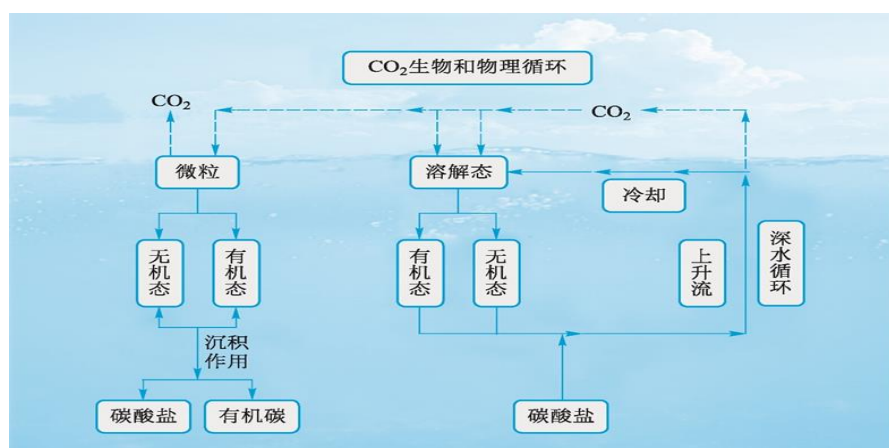


CO<sub>2</sub>提高石油采收率基本流程

#### b) 海洋储存

- 将富含 Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>的水溶液进行矿化，既可以解决 CO<sub>2</sub> 固定问题，也能解决来自海水淡化厂的海水预处理或卤水废弃物问题。

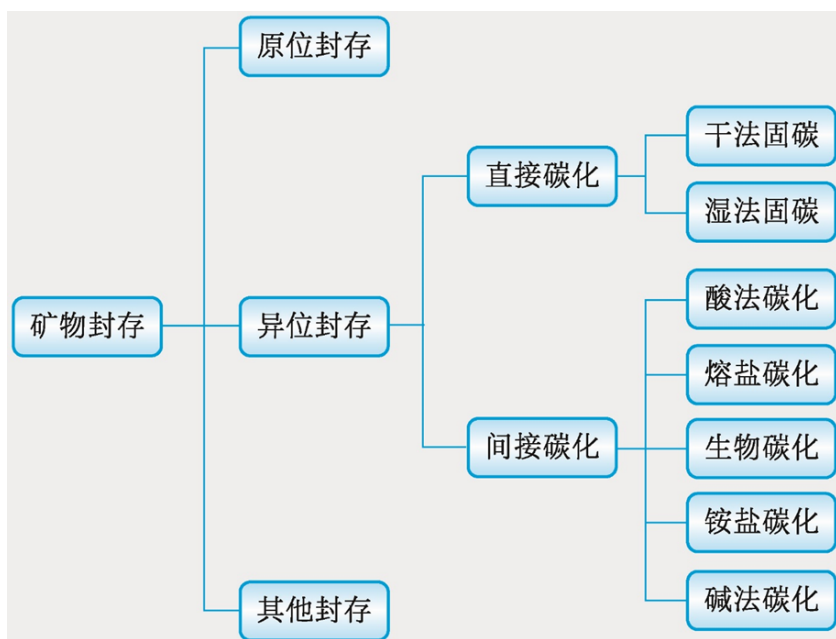
CO<sub>2</sub> 海洋储存机理：



#### c) 矿物封存

- 自然界中矿物封存用到的矿物储量丰富，如蛇纹石或滑石等。





矿物封存工艺路线总结

#### (4) 本部分内容小结（讲授法）

- ✓ 液体吸收  $\text{CO}_2$ —是目前应用最为广泛的  $\text{CO}_2$  捕集方法，分为物理吸收法、化学吸收法和物理化学联合吸收法，其中化学吸收法应用最为广泛。
- ✓ 固体吸附  $\text{CO}_2$ —固体吸附技术覆盖了较宽的温度和压力范围，同时避免产生有毒和腐蚀性物质。
- ✓ 膜分离法—膜选择透过性分离气体混合物，使气体分离或者富集。目前大多仍处于实验室阶段。
- ✓  $\text{CO}_2$  压缩—开发新型  $\text{CO}_2$  压缩机，提高压缩机性能、减小压缩需  $\text{CO}_2$  气体的能耗。
- ✓  $\text{CO}_2$  封存—把  $\text{CO}_2$  的埋存与 EOR、EGR 和 ECBM 相结合，可降低封存成本。

#### 7.8.4 作业安排

课后思考：什么情况下适合用膜分离技术捕集二氧化碳？



### 7.8.5 参考资料

- (1) 汪霞, 汪华林, 碳中和技术概论, 北京: 高等教育出版社, 2022.
- (2) 丁仲礼, 张涛, 碳中和逻辑体系与技术需求, 北京: 科学出版社, 2022.
- (3) 金涌, 胡山鹰, 张强, 2060 中国碳中和, 北京: 化学工业出版社, 2022.9.
- (4) 王灿, 张九天, 碳达峰、碳中和的新发展路径, 北京: 中共中央党校出版社, 2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.
- (6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

## 7.9 教学单元九

### 7.9.1 教学目标

开始学习资源篇的内容, 本节学习目标如下:

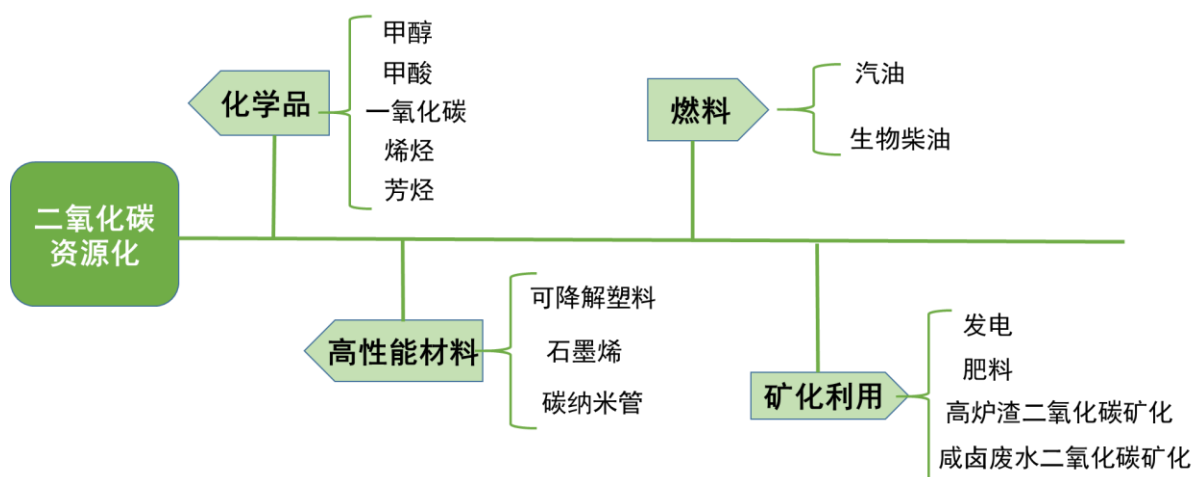
- (1) 掌握二氧化碳制备化学品
- (2) 了解二氧化碳制备燃料

### 7.9.2 教学内容(含重点、难点)

- (1) 二氧化碳制备化学品
- (2) 二氧化碳制备燃料

### 7.9.3 教学过程及方法

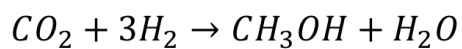
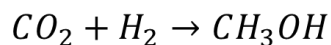
- (1) 二氧化碳资源化技术简介(讲授法和举例法)



## (2) 二氧化碳制备化学品（讲授法和举例法）

### a) 二氧化碳制备化学品

制备原理：

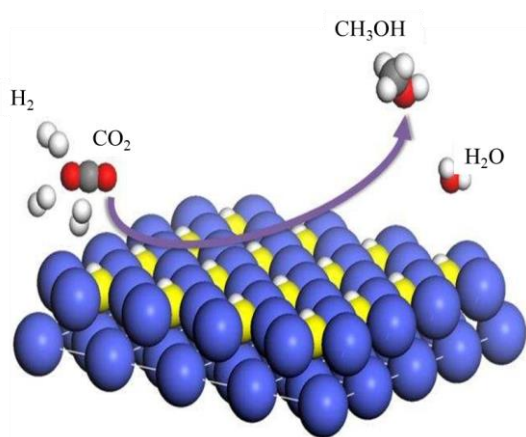


反应条件：

- 高压、低温
- 脱除 H<sub>2</sub>O
- 未反应的 H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 进行循环

催化剂：

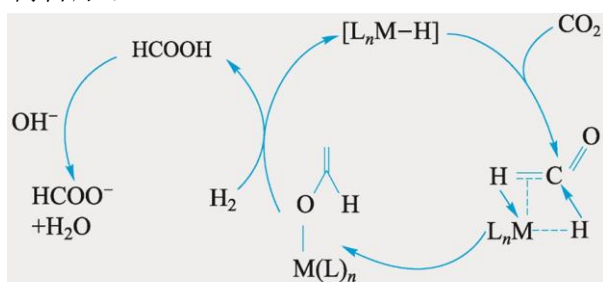
- 常用 Cu 基催化剂和助剂（如 Al、Zn 等），价格低廉、高比表面积和高分散度



CO<sub>2</sub>制备甲醇机理图

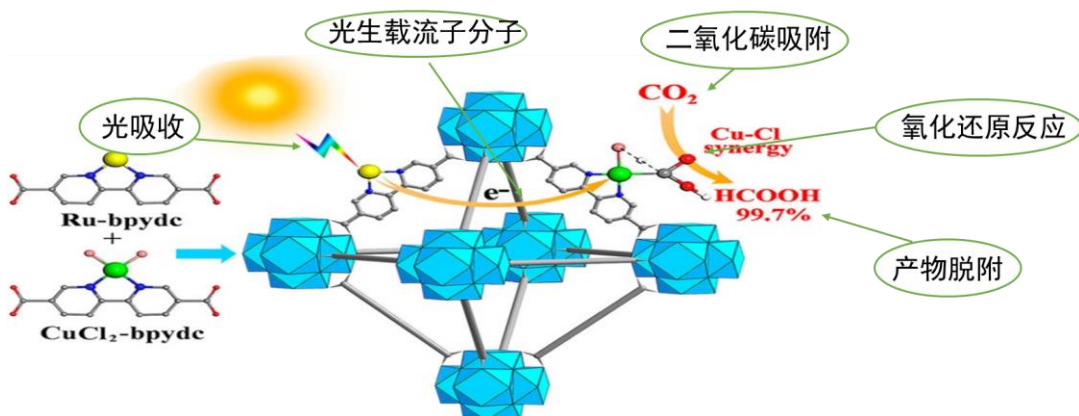
## b) 二氧化碳制备甲酸

制备原理： $CO_2 + H_2 \rightarrow HCOOH$



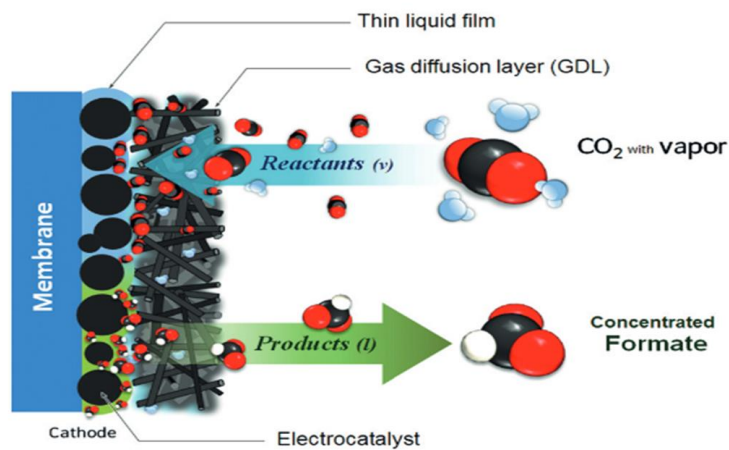
CO<sub>2</sub>制备甲酸均相催化机理图

光催化制甲酸：



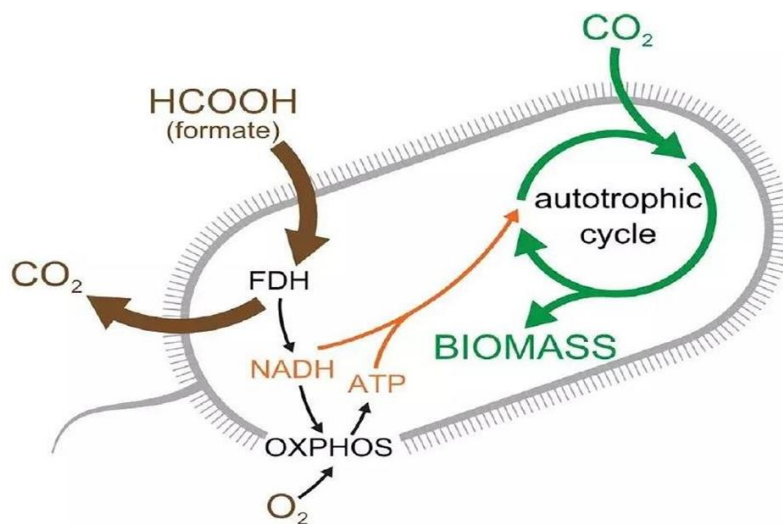
光催化CO<sub>2</sub>还原制甲酸机理图

电催化制甲酸：



电催化CO<sub>2</sub>还原合成甲酸示意图

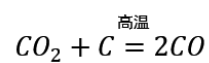
生物酶催化技术:



甲酸脱氢酶 (FDH)催化还原CO<sub>2</sub>示意图

### c) 二氧化碳制备一氧化碳

❖ 制备原理



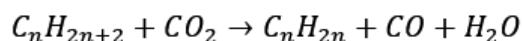
❖ 高温条件 (一般为1300~1600 °C)

❖ 氧化物载体 (多为金属氧化物, 如Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、CeO<sub>2</sub>等) 热分解, 释放O<sub>2</sub>

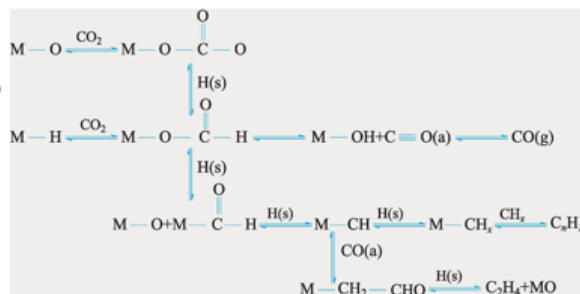
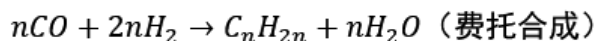
❖ 还原态载体在低温下与CO<sub>2</sub>反应生成CO

#### d) 二氧化碳制备烯烃

##### ❖ 二氧化碳氧化烷烃制烯烃技术



##### ❖ 二氧化碳加氢制烯烃技术



CO<sub>2</sub>加氢制备烯烃反应机理图

以合成气（一氧化碳和氢气的混合气体）为原料在催化剂和适当条件下合成以液态的烃或碳氢化合物（hydrocarbon）的工艺过程。

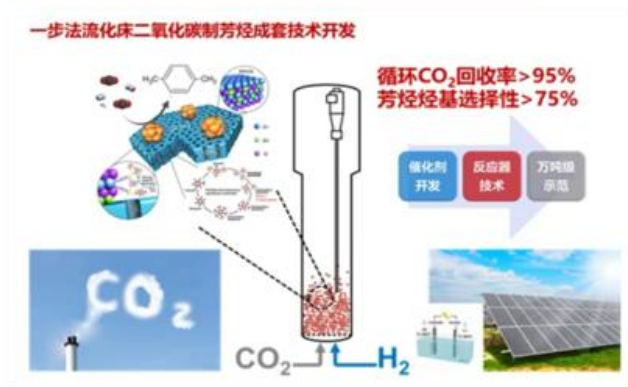
10

#### e) 二氧化碳制备芳烃

**芳烃：**不饱和度高、结构复杂

**难点**

开发高效、稳定催化剂



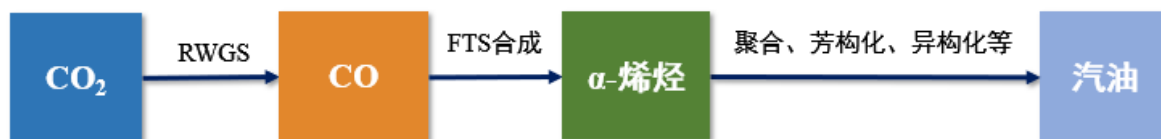
二氧化碳/合成气制芳烃工业试验项目

**流化合成气一步法制芳烃**（FSTA）技术采用低氢碳比合成气直接制备芳烃，打破原有ASF分布的限制，CO转化率大幅提高。

#### （3） 二氧化碳制备燃料（讲授法和举例法）

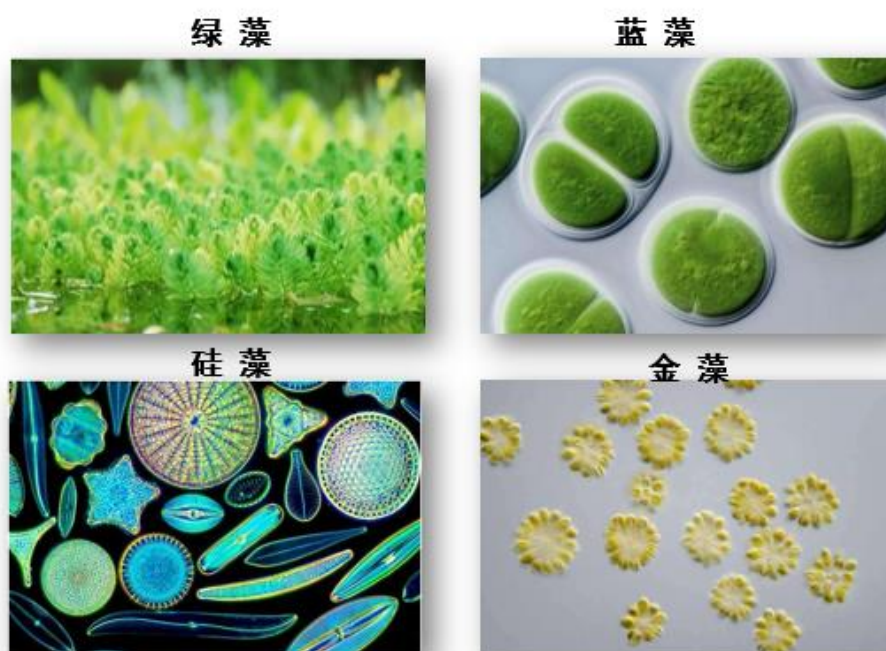
##### a) 二氧化碳制备汽油

通过逆水煤气变换反应（RWGS）将 CO<sub>2</sub> 还原为 CO，然后通过 FTS 合成转化为 α-烯烃，再经过聚合、芳构化、异构化等，最终生成汽油馏分。



#### b) 二氧化碳制备柴油

- 藻类光合作用效率高，生长速度快，生长周期短。
- 可利用 CO<sub>2</sub> 合成生物柴油。
- 从水中获取如 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等形态的碳源，固定 CO<sub>2</sub> 后可转化为生物柴油。



#### 7.9.4 作业安排

课后思考：二氧化碳资源化可以制备哪些化学品？

#### 7.9.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.

- (3) 金涌, 胡山鹰, 张强, 2060 中国碳中和, 北京: 化学工业出版社, 2022.9.
- (4) 王灿, 张九天, 碳达峰、碳中和的新发展路径, 北京: 中共中央党校出版社, 2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.
- (6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

## 7.10 教学单元十

### 7.10.1 教学目标

继续学习资源篇的内容, 本节学习目标如下:

- (1) 掌握二氧化碳制备高性能材料
- (2) 了解二氧化碳矿化利用

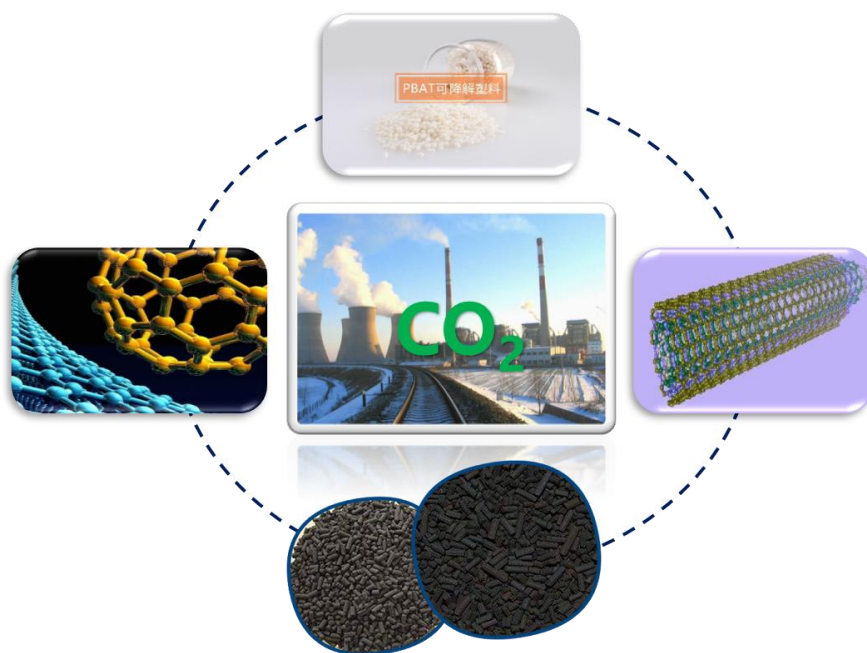
### 7.10.2 教学内容 (含重点、难点)

- (1) 二氧化碳制备高性能材料
- (2) 二氧化碳矿化利用

### 7.10.3 教学过程及方法

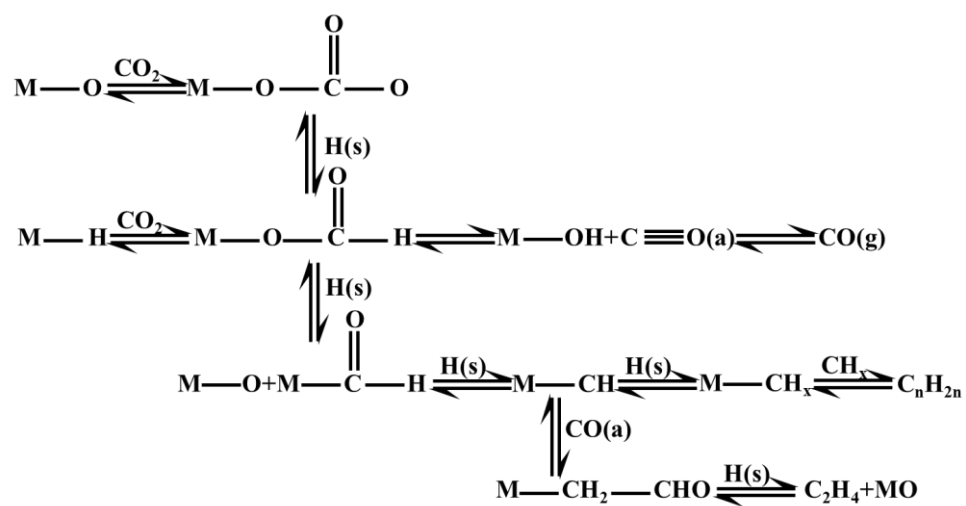
#### (1) 二氧化碳制备高性能材料 (讲授法和举例法)

- 利用  $\text{CO}_2$  制备高性能材料可减少化石能源消耗, 实现低能耗、低污染、低排放;
- $\text{CO}_2$  可制备多种高性能材料, 包括可降解塑料、碳纳米管、石墨烯等。



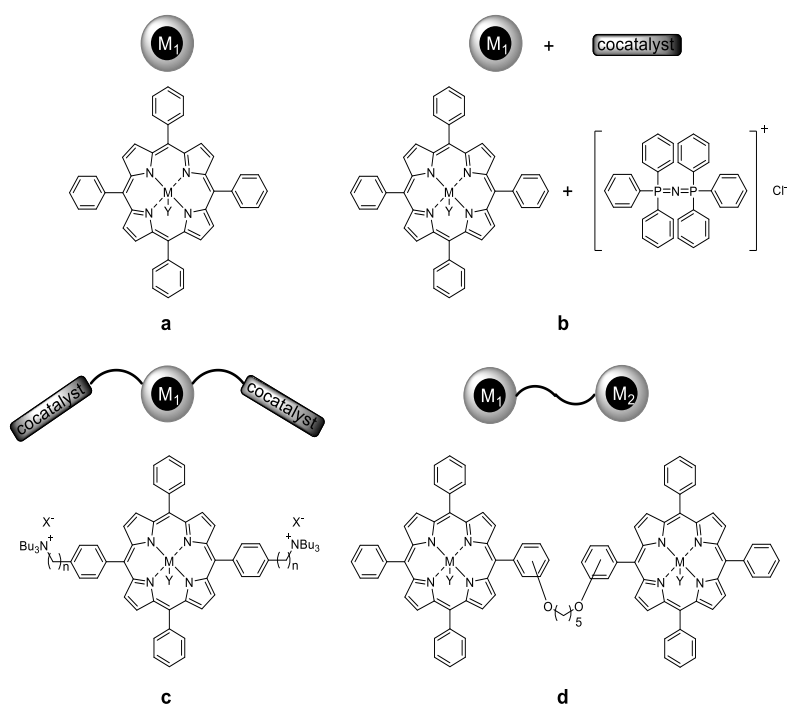
#### a) 二氧化碳制备可降解塑料

制备机理：CO<sub>2</sub> 与环氧化物共聚合生成聚碳酸酯（PPC）



#### b) 催化剂

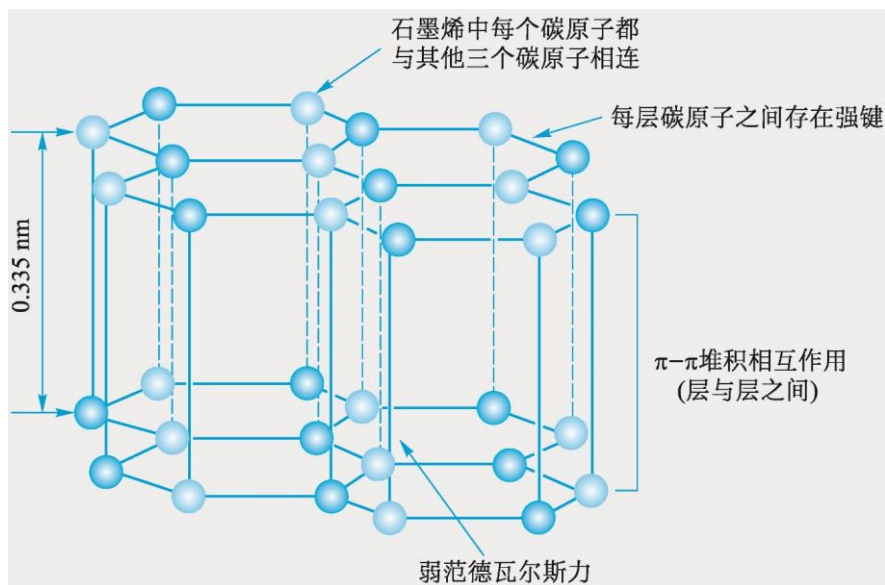




### c) 应用研究

年份	单位	原料	产物	应用
1990年代起	中科院广州化学公司	CO <sub>2</sub>	可降解塑料	制备了多种担载羧酸锌类催化剂，进行5000 t/a工业化试验
1990年代起	中科院广州化学所	CO <sub>2</sub>	脂肪链聚碳酸酯多元醇、聚氨酯材料	可应用于包装材料，成本低，可完全降解
1997年以来	中科院长春应用化学研究所	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 塑料	建成世界首条万t级PPC生产线
2009年	康奈尔大学	CO <sub>2</sub>	塑料瓶、塑料收缩包装膜	能耗减半，提供氧气阻隔性能，减少塑料用量
2011年	日本东京大学	CO <sub>2</sub> 、环氧化合物	共聚物	选择性地生成产物
2017年	巴斯大学	CO <sub>2</sub> 、天然糖（胸苷）	聚碳酸酯	产物用于制造饮料瓶、镜片、CD的防刮涂层

### (2) 二氧化碳制备石墨烯（讲授法和举例法）



石墨烯层间作用力示意图

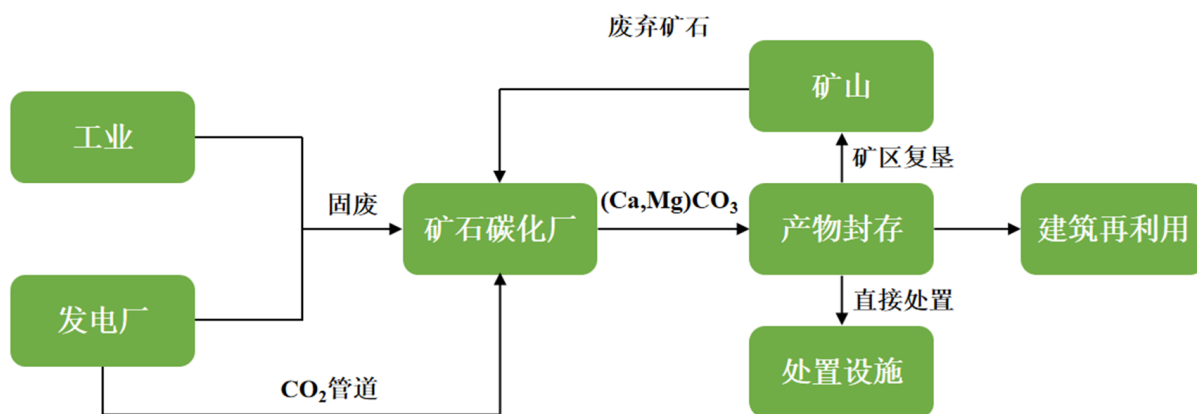
- 石墨烯同一层的碳原子通过共价键进行连接，但相邻层通过范德华力进行连接。
- 由于范德华力远小于共价键的作用力，可以通过外加作用力实现剥离。

### (3) 二氧化碳制备石墨烯（讲授法和举例法）

- 碳纳米管（carbon nanotubes, CNTs）因其出色的力学、电学和化学性能，而广泛应用于复合增强导电或抗静电、磁性等材料的加工。
- 目前，以  $\text{CO}_2$  为原料制备 CNTs 是前沿技术，主要包括激光蒸发技术、电化学还原技术、催化还原-气相沉积技术等。

### (4) 二氧化碳制备石墨烯（讲授法和举例法）

$\text{CO}_2$  与含  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的矿物质进行碳酸化反应，转化为稳定的碳酸盐矿物，能够稳定保存成千上万年，实现  $\text{CO}_2$  的永久封存。



CO<sub>2</sub> 矿化技术路径图

#### 7.10.4 作业安排

课后思考：二氧化碳资源化可以制备哪些高性能材料？

#### 7.10.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.
- (4) 王灿，张九天，碳达峰、碳中和的新发展路径，北京：中共中央党校出版社，2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室，碳达峰碳中和政策汇编，北京：中国计划出版社，2023.1.
- (6) 汪军，碳中和时代 未来 40 年财富大转移，北京：电子工业出版社，2021.10.

## 7.11 教学单元十一

### 7.11.1 教学目标

继续学习资源篇的内容，本节学习碳负排及生态碳汇强化技术，目标如下：

- (1) 掌握直接空气碳捕获技术
- (2) 掌握生物能源和碳捕集与封存技术

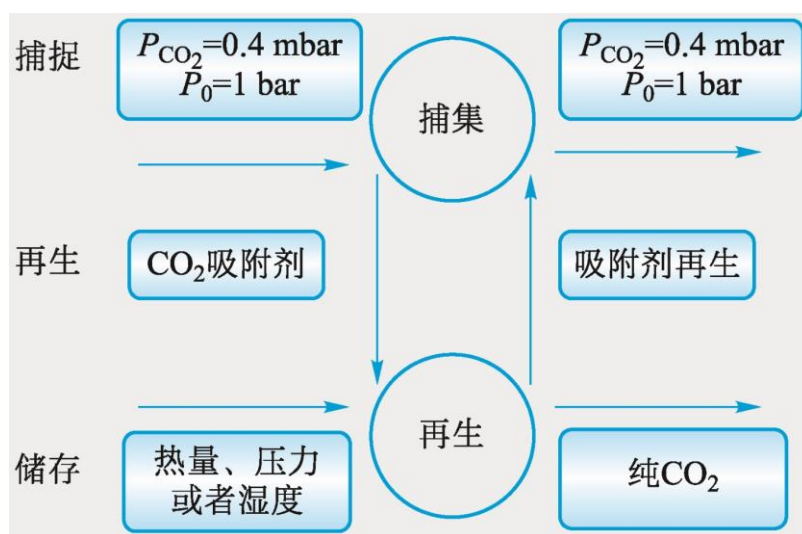
### 7.11.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 直接空气碳捕获技术
- (2) 生物能源和碳捕集与封存技术

### 7.11.3 教学过程及方法

#### (1) 直接空气碳捕获技术（讲授法）

a) 捕获工艺：空气捕捉、吸收剂或吸附剂再生、CO<sub>2</sub> 储存组成。



#### b) 常用的吸附剂

捕集的 CO<sub>2</sub> 经固体或液体吸收材料吸收、压缩并送入储存罐贮存。



常用的吸附剂：

公司名称	吸附剂	吸附剂再生	捕集能耗 (kWh t <sup>-1</sup> CO <sub>2</sub> )	优点	缺点
Carbon Engineering	碱性溶液	化学反应	1824	可大规模 稳定运行	能耗高 占地大
Climeworks	胺类吸附剂	100 °C脱附	1700~2300	吸附效果好	处置量小 能耗高
Global Thermostat	胺类吸附剂	低温蒸汽脱附 (85~100 °C)	1320~1670	占地小	吸附 效果差

## (2) 生物能源和碳捕集与封存技术（讲授法）

生物能源与碳捕集和储存（Bioenergy with carbon capture and storage, BECCS）是一种碳负排技术。

### ◆ 生物能源

生物质转化为热、电、液体和气体



### ◆ 碳捕集与储存

捕集并储存在地质构造中或嵌入到长效产品中



生物能源中的二氧化碳来源

来源	二氧化碳的来源	分类
火力发电厂	以生物质或生物燃料为原料使用蒸汽或燃气动力发电机在燃烧发电及供热过程中释放CO <sub>2</sub>	能源
纸浆和造纸厂	造纸废气进入回收锅炉所生产的CO <sub>2</sub>	工业
	石灰窑中产生的CO <sub>2</sub>	
	造纸黑液和树皮等木质生物质气化过程中生产的CO <sub>2</sub>	
	气化合成气燃烧过程中产生的CO <sub>2</sub>	
乙醇生产	发酵如甘蔗，小麦或玉米等生物质会释放CO <sub>2</sub>	工业
沼气生产	沼气提高甲烷的比例，从沼气中分离CO <sub>2</sub>	工业

#### 7.11.4 作业安排

课后思考：二氧化碳资源化可以制备哪些高性能材料？

#### 7.11.5 参考资料

- (1) 汪霞, 汪华林, 碳中和技术概论, 北京: 高等教育出版社, 2022.
- (2) 丁仲礼, 张涛, 碳中和逻辑体系与技术需求, 北京: 科学出版社, 2022.
- (3) 金涌, 胡山鹰, 张强, 2060 中国碳中和, 北京: 化学工业出版社, 2022.9.
- (4) 王灿, 张九天, 碳达峰、碳中和的新发展路径, 北京: 中共中央党校出版社, 2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.
- (6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

### 7.12 教学单元十二

#### 7.12.1 教学目标

继续学习资源篇的内容, 本节学习碳负排及生态碳汇强化技术, 目标如下:

- (1) 掌握生物炭土壤固碳技术
- (2) 了解陆地碳汇强化技术
- (3) 了解海洋碳汇强化技术

#### 7.12.2 教学内容(含重点、难点)

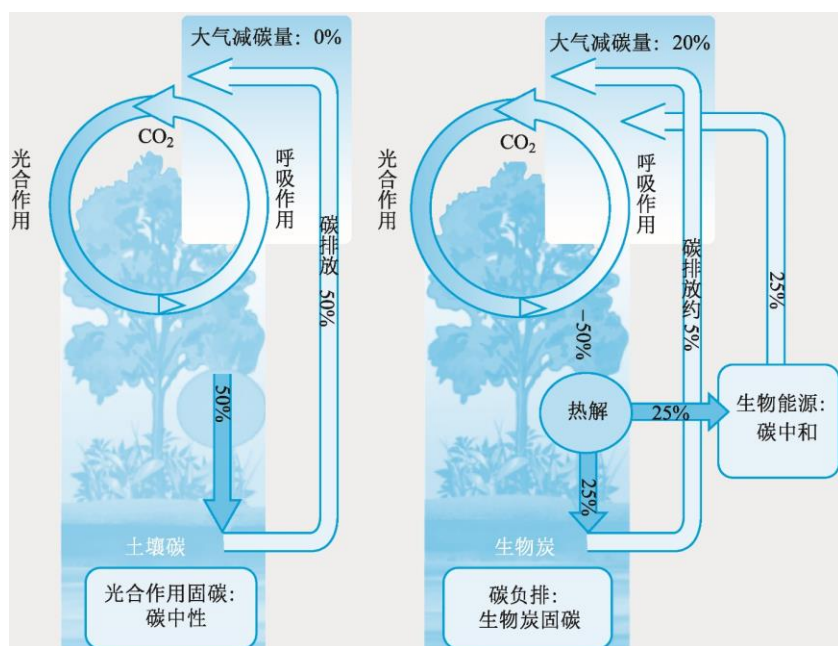
- (1) 生物炭土壤固碳技术
- (2) 陆地碳汇强化技术
- (3) 海洋碳汇强化技术

### 7.12.3 教学过程及方法

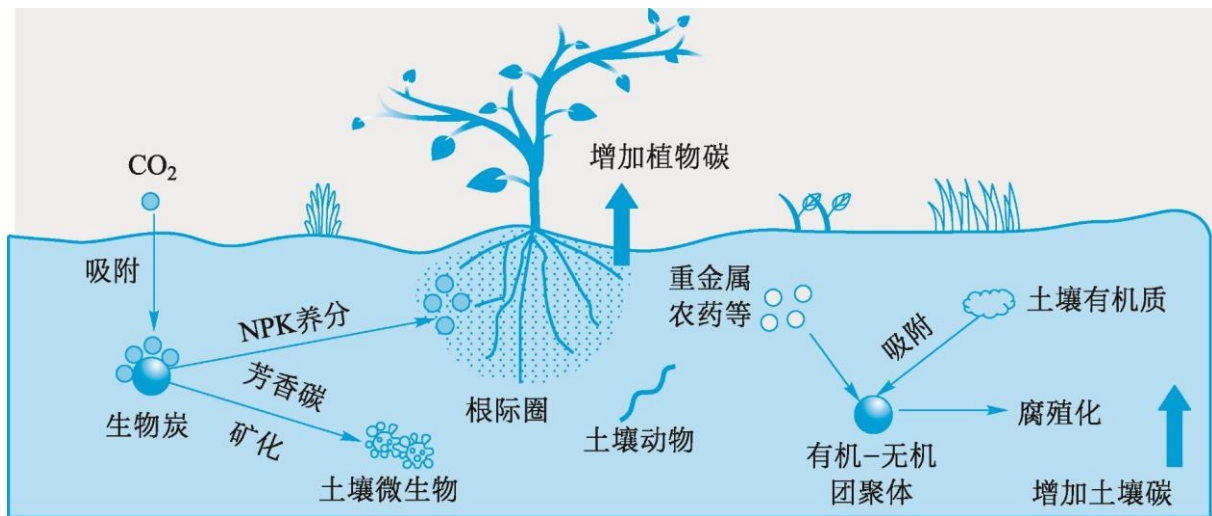
#### (1) 生物炭土壤固碳技术（讲授法）

生物炭（Biochar）是由生物质在完全或部分缺氧的情况下经低温热解炭化产生的一类高度芳香化难熔性固态物质。

##### a) 生物炭还田固碳原理



- ❑ 以生物炭还田，仅有约 5% 的碳分解成  $\text{CO}_2$
- ❑ 减碳量约为 20%，为碳负排
- ❑ 循环次数越多，减碳程度越大

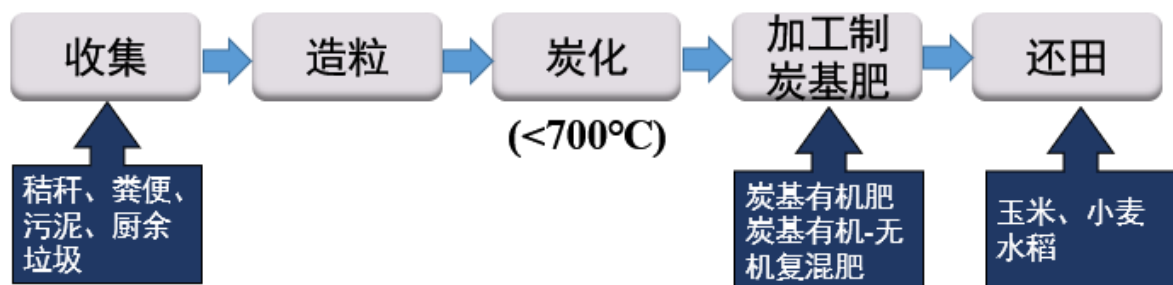


作用机制：

- 增加顽固性碳，减少碳矿化。
- 吸附易挥发碳，减少碳矿化。
- 促进土壤腐殖化，增加碳容量。
- 抑制土壤呼吸，降低碳矿化。
- 降低毒害，提升碳固存。

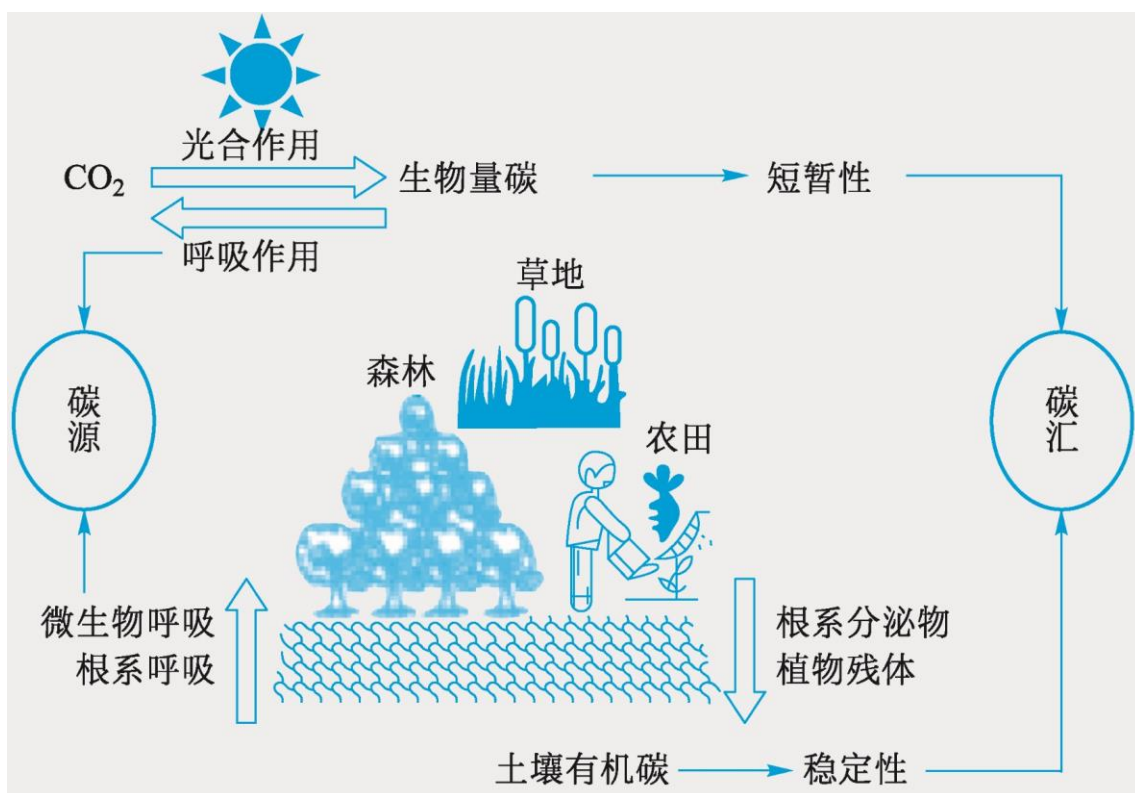
b) 生物炭农用固碳技术

流程：



(2) 陆地碳汇强化技术（讲授法和举例法）

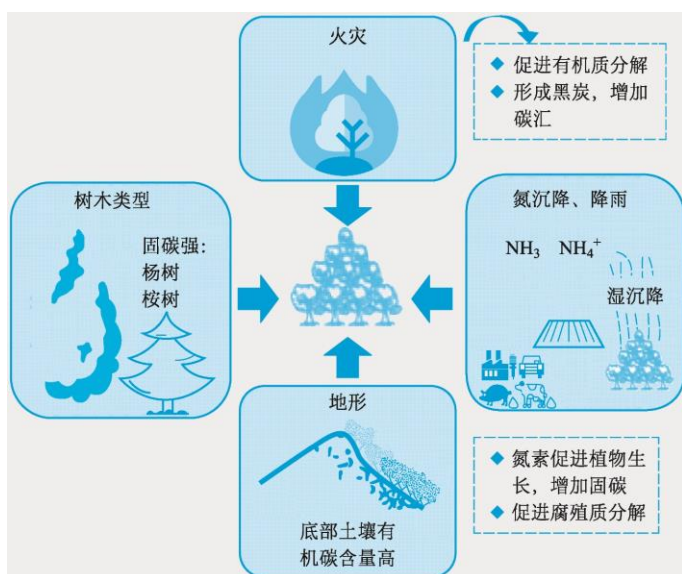




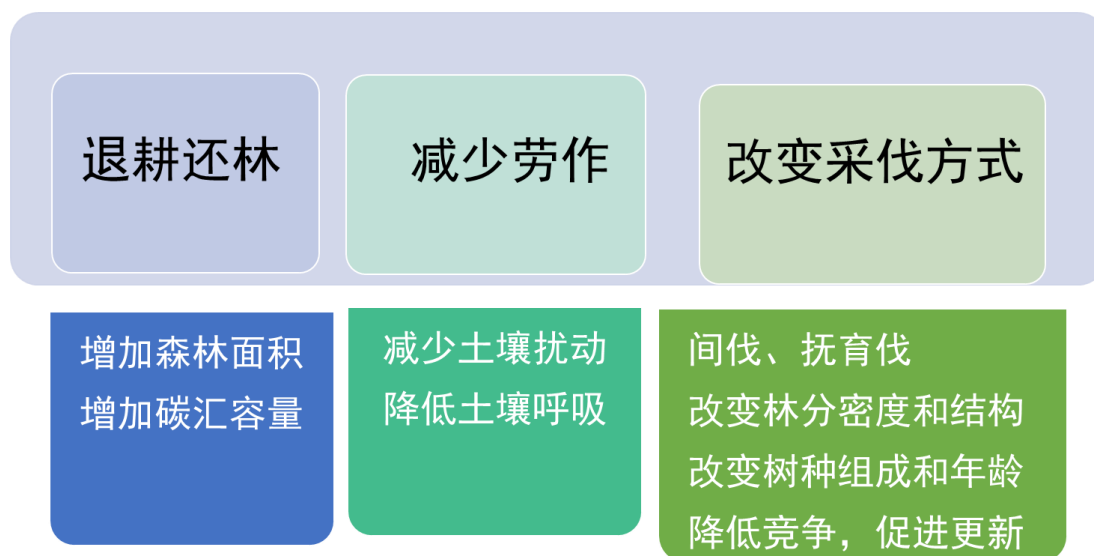
#### a) 森林碳汇

森林植被通过自身光合作用吸收大气中的  $\text{CO}_2$ ，并将其转化为有机物储存在植物或土壤中的能力。

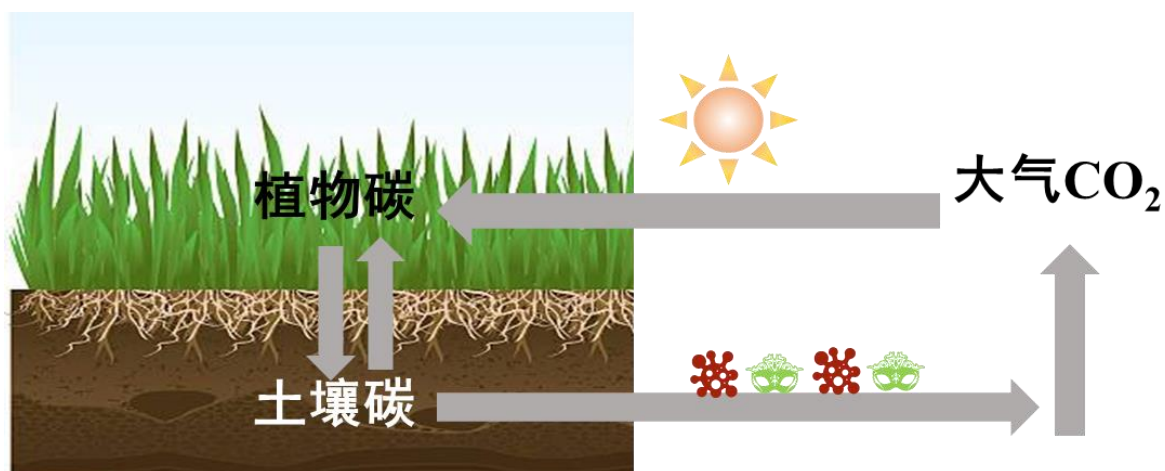
影响森林固碳的因素:



森林碳汇强化技术：

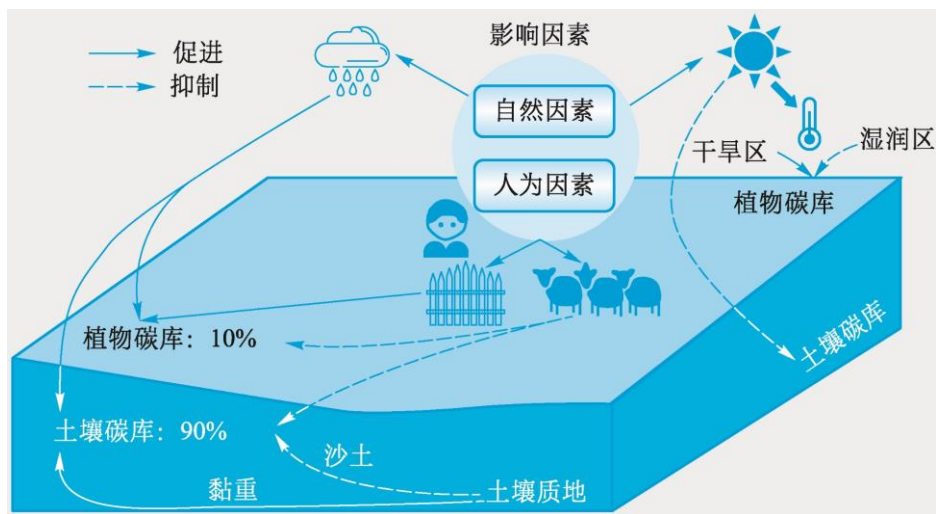


b) 草原碳汇



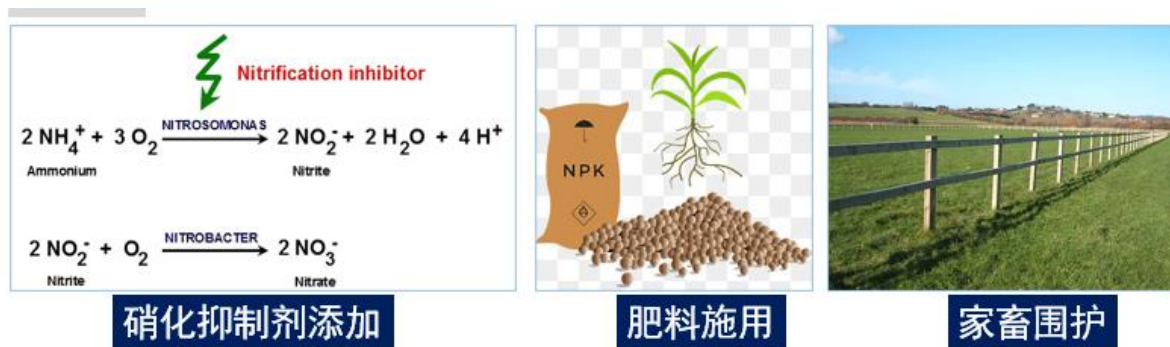
- 草地吸收 CO<sub>2</sub>，将其固定在土壤中
- 草地总碳储量约 25.4 ~ 29.1 Pg C，其 95~97%的碳为土壤有机碳

影响草地碳汇的因素：



草地碳汇强化技术:

减少草地碳排放; 增加草地碳容量



#### c) 湿地碳汇

湿地生态系统仅占全球陆地总面积的 4-6%，但其碳储量占全球陆地碳储量的 12-24%。

湿地碳汇原理:

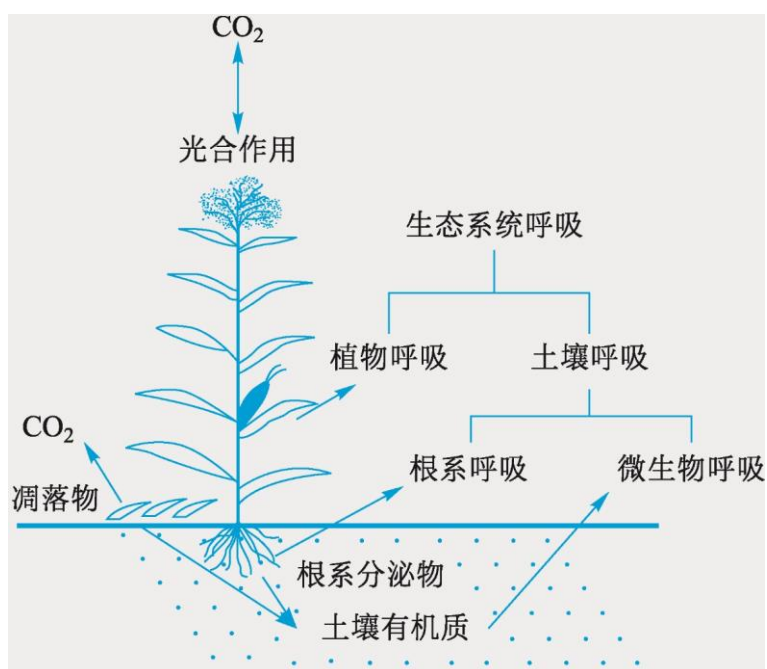
- ❑ 植物碳: 植物吸收  $\text{CO}_2$  合成有机物, 并储存;
- ❑ 土壤碳: 植物残体形成腐殖质和泥炭, 并贮存于土壤。

#### d) 农田碳汇

我国农田面积为  $1.30 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 是主要的碳汇。

- ❑ 植物碳汇: 作物通过光合作用将  $\text{CO}_2$  转化成有机物。

□ 土壤碳汇：植物残体在土壤中转变为土壤有机质。

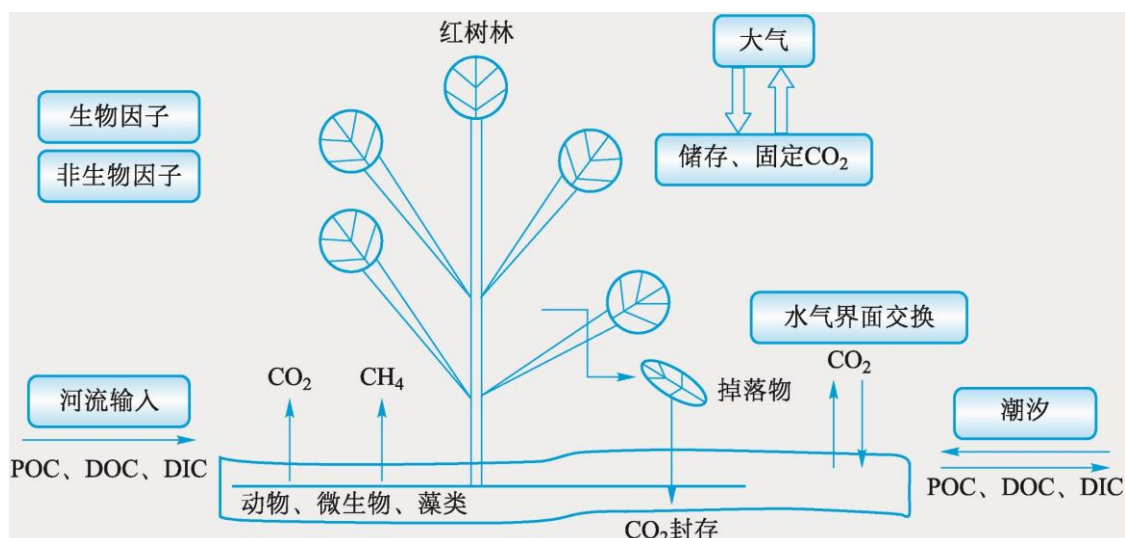


农田土壤碳平衡过程

### (3) 海洋碳汇强化技术（讲授法和举例法）

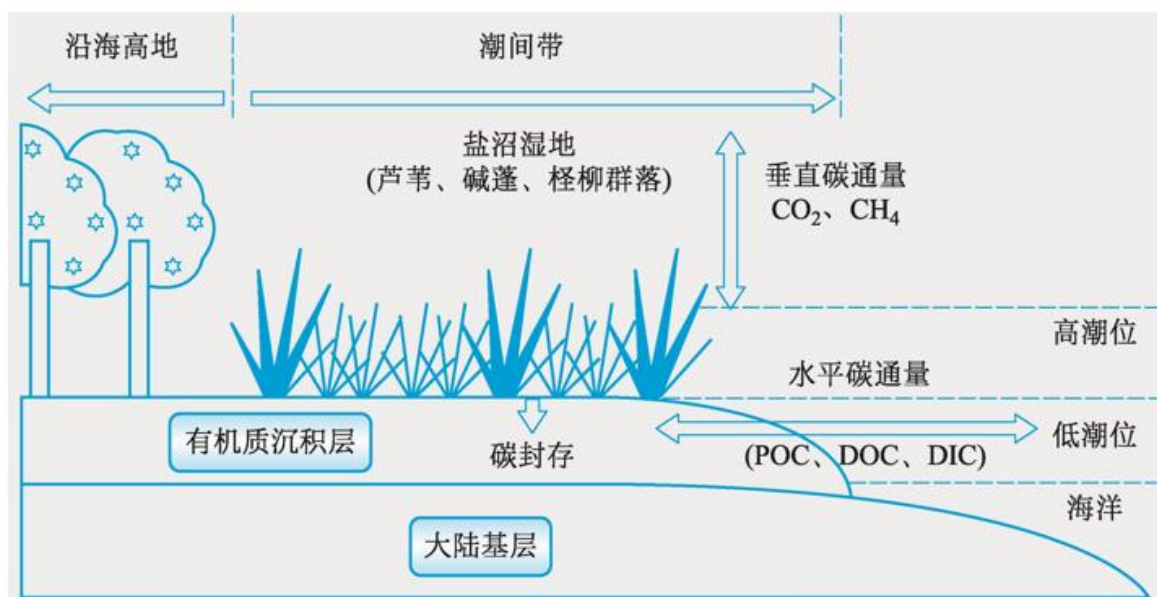
全球初级生产者生长面积不到海洋面积的 2%，但初级生产者固定碳量可达 54-59 Pg C/a，占全球碳捕捉和封存总量的 50%。

#### a) 红树林固碳过程



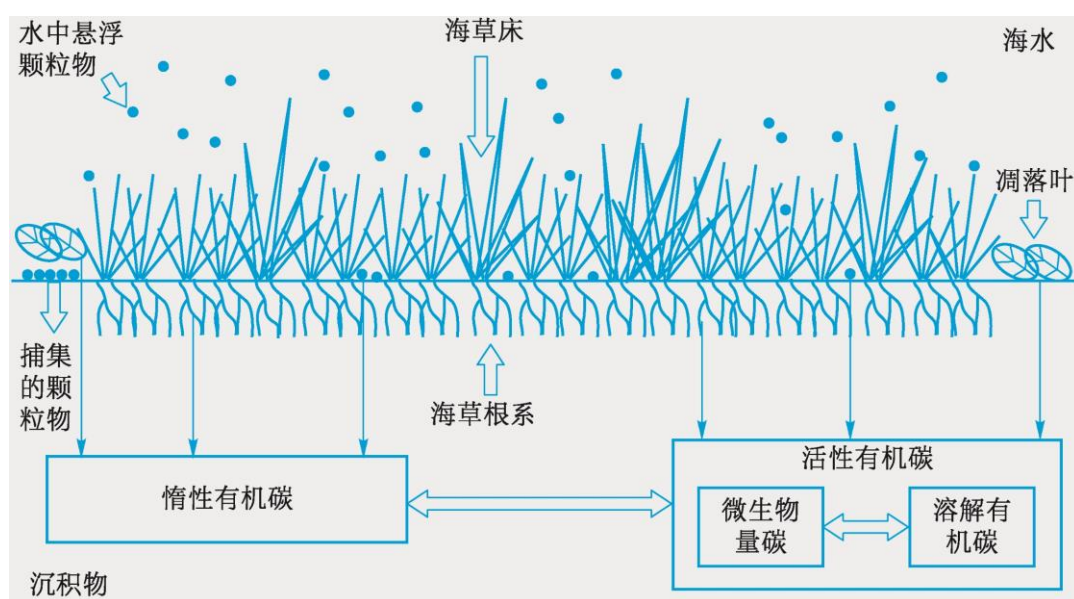
## b) 盐沼湿地固碳

盐沼湿地的碳储存量约占全球海洋生态系统碳储存量的 14-30%，是一个巨大的碳汇。



## c) 海草床固碳

- 大面积的连片海草被称为海草床，具有生产力高的特点。
- 全球总面积为  $1.7\text{-}6.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ，不足海洋总面积 0.2%，其固碳量约占海洋总固碳量的 18%。

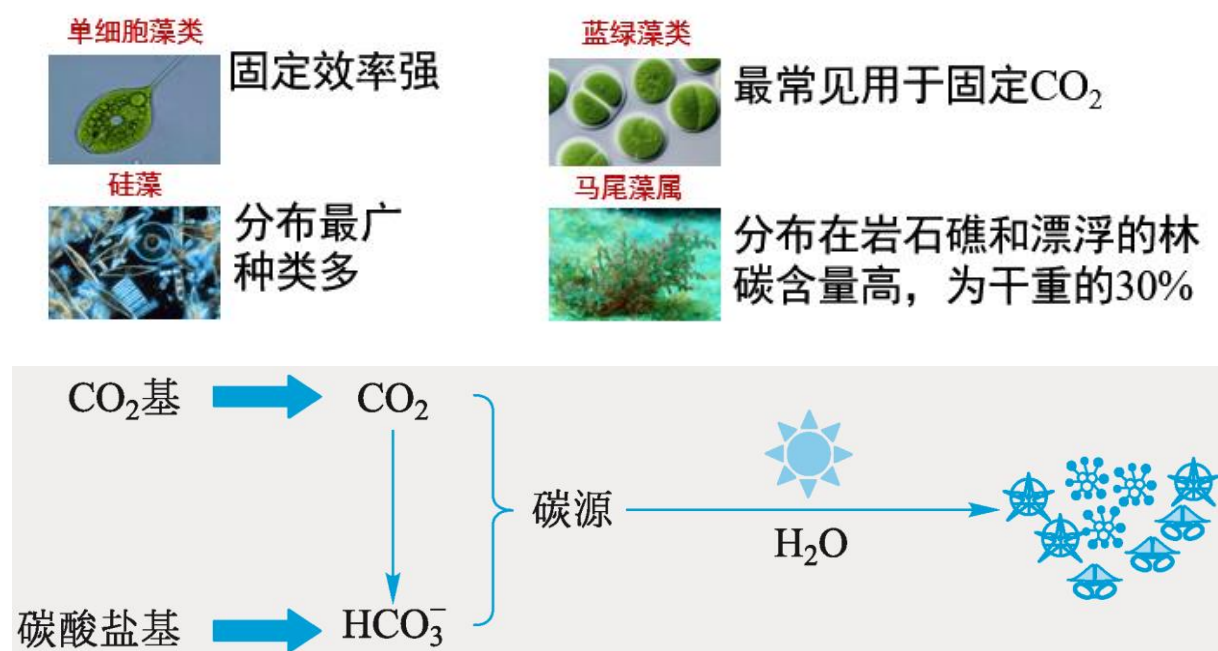




#### d) 海水微藻固碳

海藻固定的碳约为 1.5 Pg/a 的净初级生产力，相当于红树林、盐沼和海草床的总和。

常见的海藻种类：



微藻捕获  $\text{CO}_2$  过程：

- 直接吸收  $\text{CO}_2$
- 利用  $\text{CO}_2$  捕获产生的碳酸氢盐 ( $\text{HCO}_3^-$ ) 作为藻类生物质生产的碳源

#### 7.12.4 作业安排

课后作业：碳负排及生态碳汇强化技术分为哪几类？

#### 7.12.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.
- (4) 王灿，张九天，碳达峰、碳中和的新发展路径，北京：中共中央党校出版社，

2021.7.

(5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室，碳达峰碳中和政策汇编，北京：中国计划出版社，2023.1.

(6) 汪军，碳中和时代 未来 40 年财富大转移，北京：电子工业出版社，2021.10.

## 7.13 教学单元十三

### 7.13.1 教学目标

继续学习资源篇的内容，本节学习工业原料替代与循环利用，目标如下：

- (1) 掌握钢铁冶金原料替代
- (2) 掌握水泥原料替代

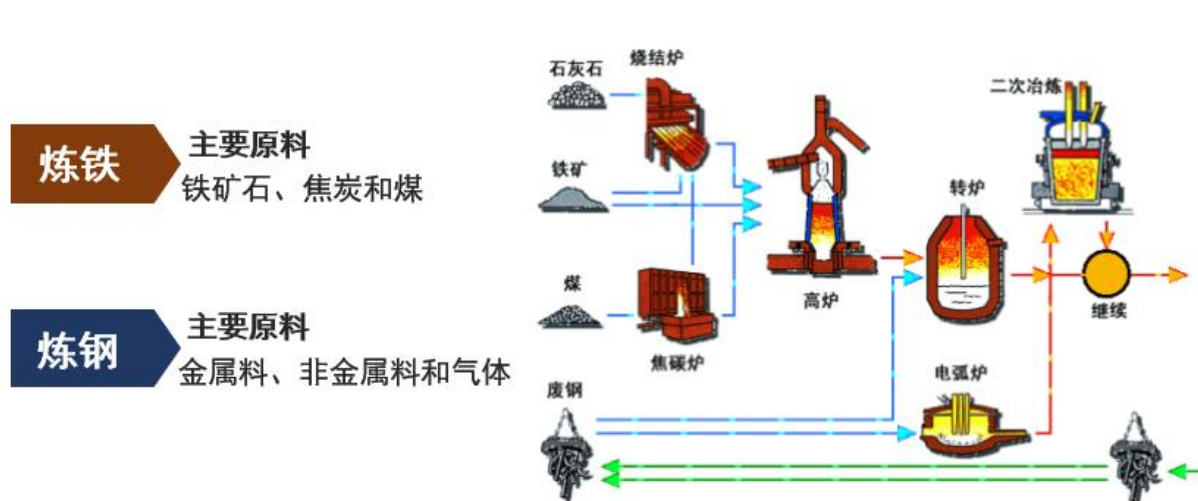
### 7.13.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 钢铁冶金原料替代
- (2) 水泥原料替代

### 7.13.3 教学过程及方法

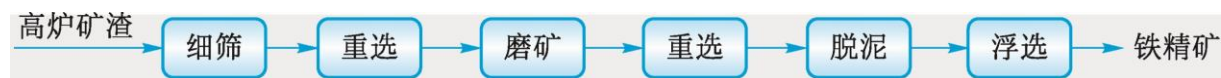
#### (1) 钢铁冶金原料替代（讲授法）

据国际钢铁协会估计，每生产 1 t 钢坯排放 CO<sub>2</sub> 的平均值为 1.7-1.9 t



#### a) 铁矿石替代

矿渣： 主要化学组成： $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$ ，占矿渣总量的 90% 以上



- ❑ 铁精矿回收率超过 70%，含铁量达 60% 以上
- ❑ 回收的铁精矿作炼铁行业替代原料，可减少铁矿石的开采量

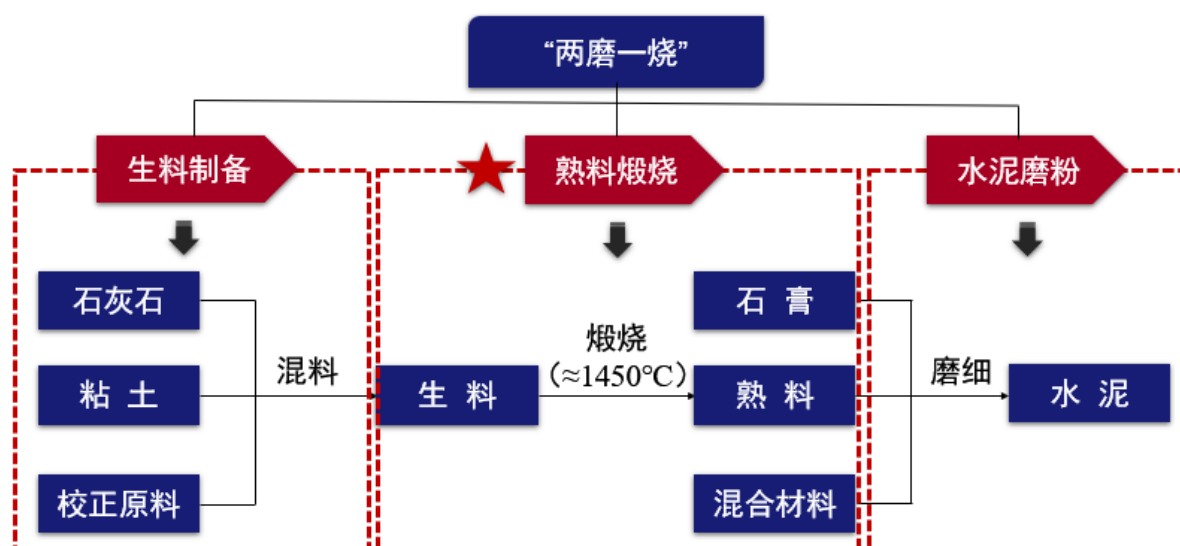
硫铁矿烧渣：

- ❑ 一般情况下，硫铁矿中硫含量越高产生的烧渣中铁组分含量越高。
- ❑ 主要矿物组成：赤铁矿、磁铁矿、黄铁矿和石英等

粉煤灰：

- ❑ 粉煤灰呈灰白色或灰黑色
- ❑ 化学成分受煤炭源、燃烧方式、锅炉炉型和收集方式的影响
- ❑ 化学组成主要有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，少量  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{SO}_3$  等

## (2) 钢铁冶金原料替代（讲授法和举例法）



采用可提供钙源且碳酸盐含量低或非碳酸盐的原料替代石灰石，可降低水泥生产的碳排放。



a) 钙质原料替代

电石渣:

电石渣  $\text{pH} \geq 14$ , 化学成分与湿度有关

- 湿排: 以  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  为主, 重量占比达 70%~80%
- 干排: 以  $\text{CaO}$  为主 (含量高达 64%~67%), 还含有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  等

$\text{Ca}(\text{OH})_2$  比  $\text{CaCO}_3$  分解温度低, 且电石渣组成成分稳定, 有害物质含量少, 用湿电石渣取代石灰石原料, 可降低水泥熟料的烧成过程能耗, 减少碳排放

硅钙渣:

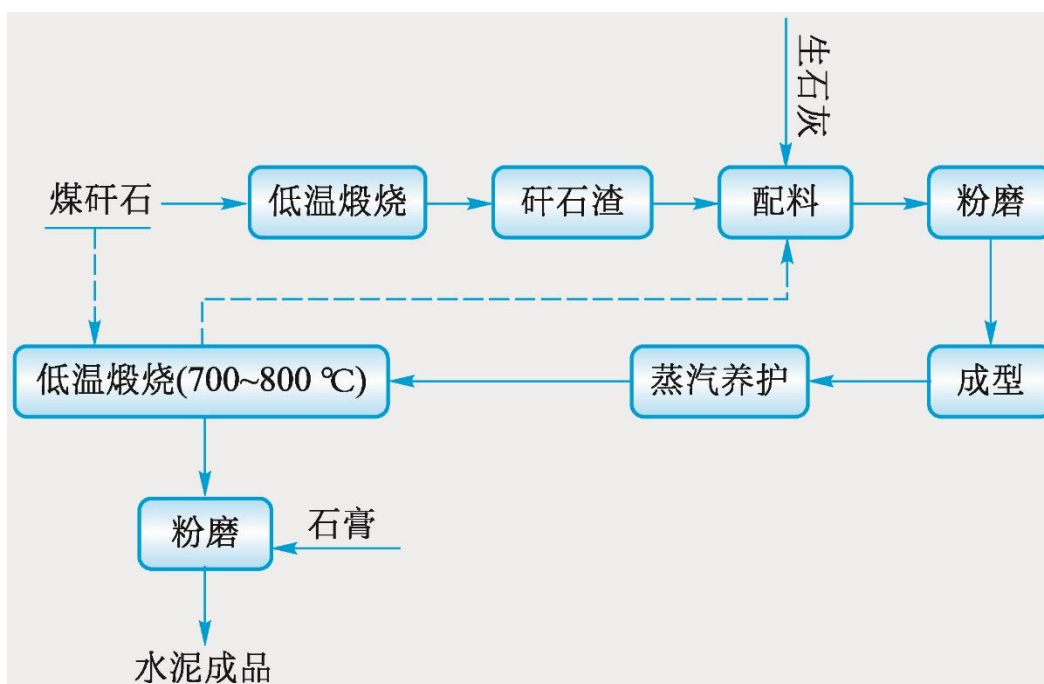
硅钙渣: 石灰石=9:1 的原料配比混合, 温度控制在  $1300 \sim 1400^\circ\text{C}$ , 制备出的硅酸盐水泥性能达标, 表现出更优的易磨性和易烧性, 硅钙渣掺入量越大水泥性能越好

b) 硅铝质原料替代

尾矿:

- 一是尾矿中铁含量较高, 可以取代普通水泥配方中的铁粉
- 二是利用尾矿替代部分生料, 不同的微量元素对水泥熟料的矿物组成有一定影响

b) 煤矸石



低温方法制备煤矸石水泥的生产工艺

#### 7.13.4 作业安排

课后没有作业。

#### 7.13.5 参考资料

- (1) 汪霞, 汪华林, 碳中和技术概论, 北京: 高等教育出版社, 2022.
- (2) 丁仲礼, 张涛, 碳中和逻辑体系与技术需求, 北京: 科学出版社, 2022.
- (3) 金涌, 胡山鹰, 张强, 2060 中国碳中和, 北京: 化学工业出版社, 2022.9.
- (4) 王灿, 张九天, 碳达峰、碳中和的新发展路径, 北京: 中共中央党校出版社, 2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.
- (6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

## 7.14 教学单元十四

### 7.14.1 教学目标

继续学习资源篇的内容，本节学习工业原料替代与循环利用，目标如下：

- (1) 了解绿色高分子原料替代
- (2) 了解工业固体废物循环利用

### 7.14.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 绿色高分子原料替代
- (2) 工业固体废物循环利用

### 7.14.3 教学过程及方法

#### (1) 绿色高分子原料替代（讲授法和举例法）

##### a) 天然高分子原料替代

改性纤维素：

纤维素含有大量羟基，存在较强的分子链间氢键网络，分子链段有序排列成结构致密的晶体纤维素，难溶解、不熔化、加工极其困难。

- ❑ 传统纤维素材料生产工艺复杂，需  $\text{NaOH}/\text{CS}_2$ 、 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ /氨水等苛刻溶剂，成本高、污染严重，极大限制其广泛使用
- ❑ 当前已开发  $\text{NaOH}$ 、尿素、水、离子液体等低温纤维素溶解清洁溶剂，通过化学改性合成纤维素衍生物，提高加工性能等

##### b) 淀粉

- ❑ 以淀粉为原材料，辅以加工助剂，使其既可加工成型，又能在自然环境中完全降解
- ❑ 生产的产品主要包括淀粉薄膜、淀粉基纤维等

## b) 合成高分子原料替代

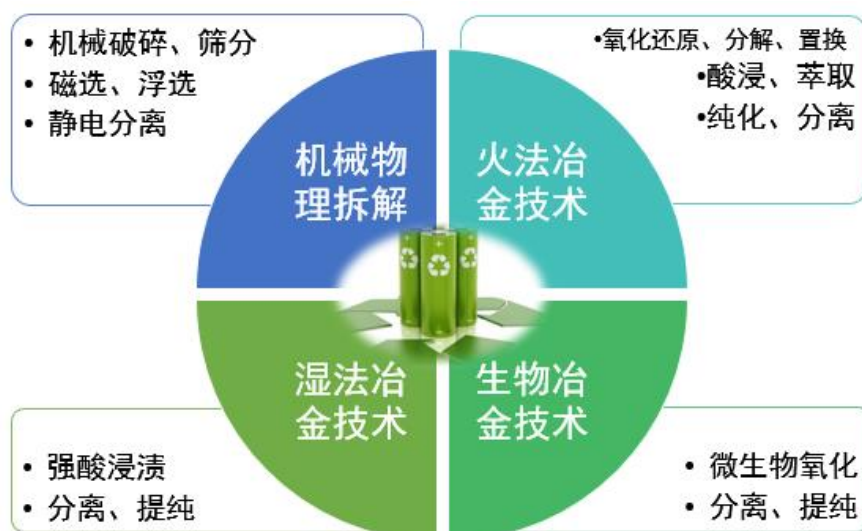
聚己内酯（PCL）：

- ❑ PCL 由  $\epsilon$ -己内酯开环聚合而成，熔点约 53-63°C
- ❑ 常温下为橡胶态，具较好粘弹性和流变性、延展性
- ❑ 生物相容性和降解性优异，具有形状记忆功能
- ❑ PCL 已应用于伤口缝合线、药物缓释剂及绷带
- ❑ PCL 可用作微生物碳源，可在土壤中缓慢降解

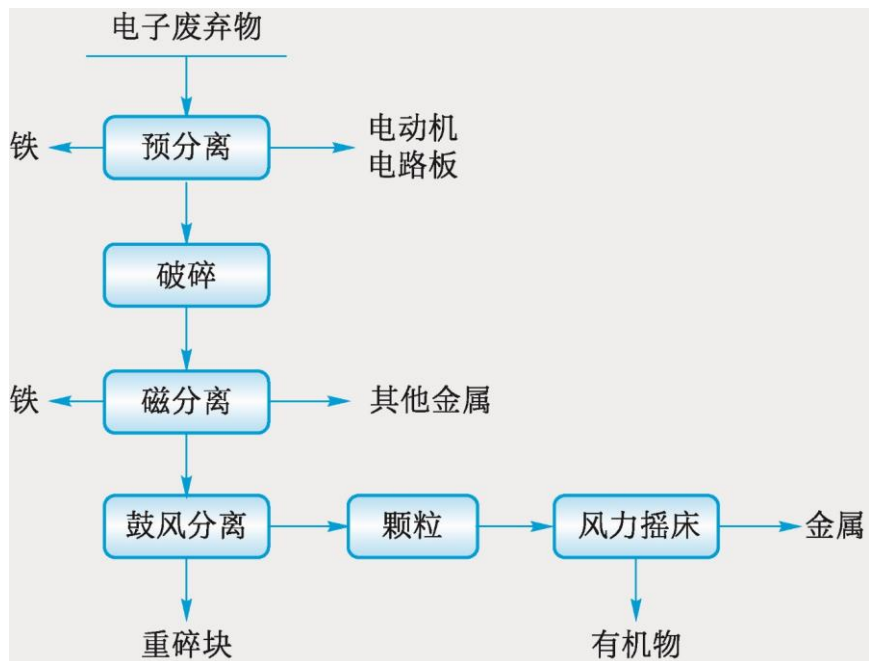
## （2） 工业固体废物循环利用（讲授法和举例法）

### a) 金属料循环利用

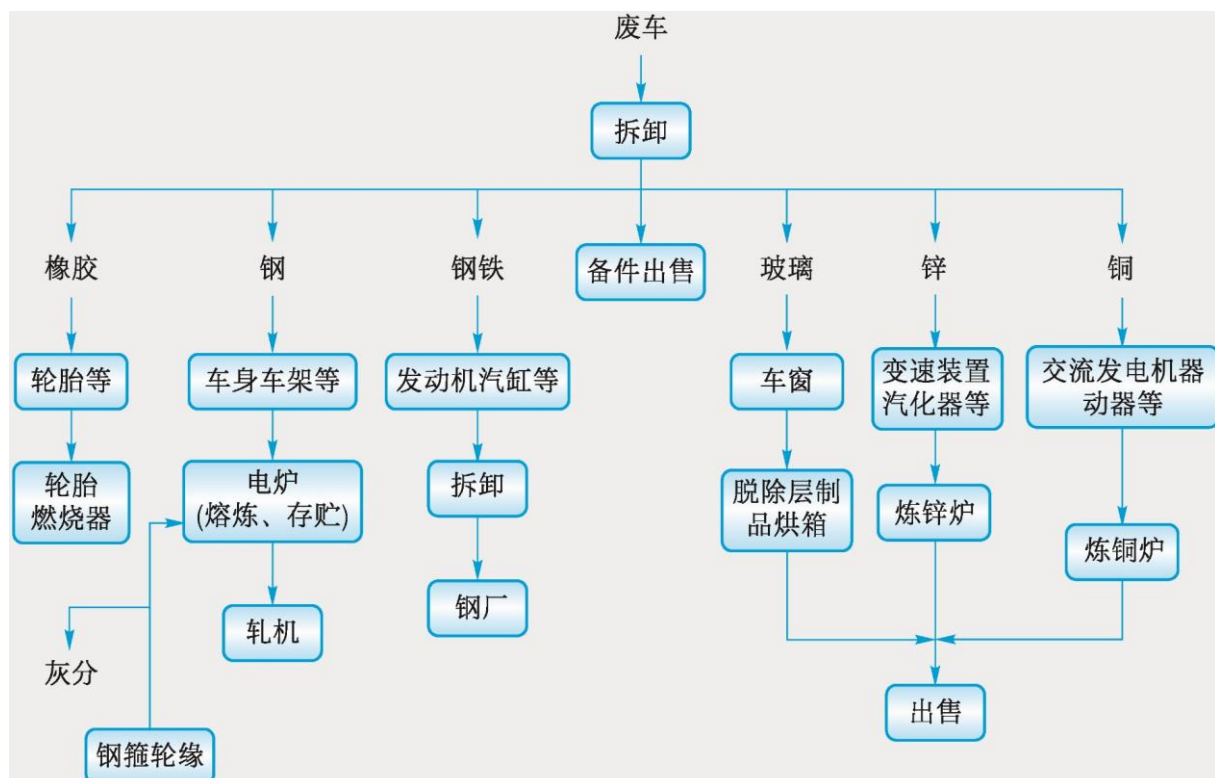
报废锂电池拆解与循环利用：



电子废弃物拆解与金属回收：

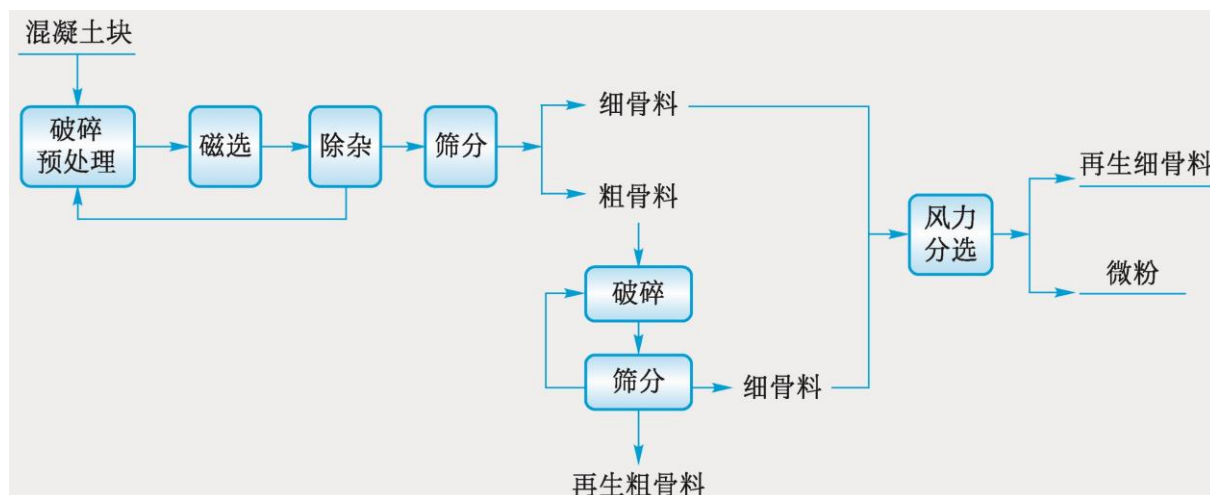


报废汽车拆解与回收金属：



b) 建筑材料循环利用

再生骨料：废弃混凝土块是主要的建筑废弃物，经破碎、加工处理制成再生粗骨料和再生细骨料



#### 7.14.4 作业安排

课后思考：学习完“工业原料替代与循环利用”，谈谈你的体会。

#### 7.14.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.
- (4) 王灿，张九天，碳达峰、碳中和的新发展路径，北京：中共中央党校出版社，2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室，碳达峰碳中和政策汇编，北京：中国计划出版社，2023.1.
- (6) 汪军，碳中和时代 未来 40 年财富大转移，北京：电子工业出版社，2021.10.

## 7.15 教学单元十五

### 7.15.1 教学目标

继续学习信息篇的内容，本节学习信息与通信技术在节能降碳中的应用，目标如下：

- (1) 掌握大数据、云计算与人工智能技术
- (2) 掌握物联网与数字孪生技术
- (3) 了解卫星遥感技术
- (4) 了解集成耦合与优化技术了解绿色高分子原料替代

### 7.15.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 大数据、云计算与人工智能技术
- (2) 物联网与数字孪生技术
- (3) 卫星遥感技术
- (4) 集成耦合与优化技术了解绿色高分子原料替代

### 7.15.3 教学过程及方法

#### (1) 大数据、云计算与人工智能技术（讲授法和举例法）

##### a) 大数据技术在节能降碳中的应用

通过预测分析、数据挖掘等方法，大数据能够帮助提高工业、建筑、交通以及农业领域的生产效率、能源使用效率等。

#### 大数据技术在节能降碳中的应用

领域	应用场景	技术
工业	电力生产、油田企业信息化、质量内容评估与判定、全过程质量数据管理、智慧化工园区有色金属生产、数控系统	大数据
建筑	建筑建造、建筑设计、建筑运维	数据聚类、数据融合、数据关联
交通	交通出行、海运、航空	大数据分析
农业	农业生产信息传输	大数据智能分析

b) 云计算支撑效率提升与能源管理技术

云计算强大的计算能力以及空间存储能力不仅可以提高工业、农业等领域的工作效率，还能减少各行业在运行中的能源浪费。

云计算与分布式计算技术在节能降碳中的应用

领域	应用场景	技术	解决路径
工业	油田油气生产、油田企业信息化、加工设备智能化	云平台、分布式计算技术、边缘计算、数据预处理	提高管理效率、追溯碳足迹、能源高效利用
农业	农业信息管理	云服务、传感器技术	提高农业工作效率

c) 人工智能支撑运行节能技术

人工智能是由计算机或机器模拟和拓展人类智慧，通过知识学习总结解决问题的办法和应用系统。

人工智能在节能降碳中的应用

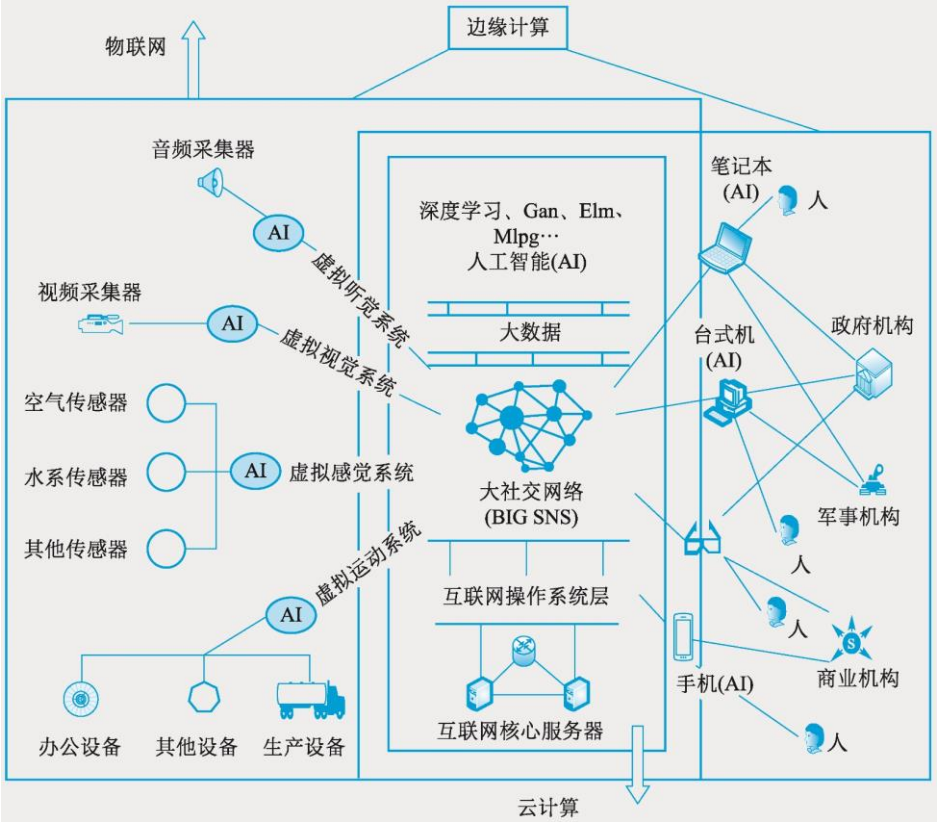
领域	应用场景	技术	解决路径
工业	风光发电功率预测、电力生产、电网安全、油田企业信息化、焦化配煤、高炉炼铁、化学生产、有色金属生产、数控系统、生产车间智能控制、数字化检测、加工设备智能化	孤立森林算法、长短期记忆神经网络、机器学习、深度学习、流计算模型、迭代计算模型、遗传算法、多元回归、向量机预测模型、人工神经网络	提高能源利用率、减少能源消耗、提高管理效率、追溯碳足迹
建筑	建筑建造、建筑运维、建筑能源管理	机器学习、深度学习	减少能源消耗
交通	交通出行管理、城市轨道交通、海运、航空	人工智能	减少交通拥堵、提高能源利用率
农业	农业生产信息采集、处理和决策实施	计算机视觉、人工智能	提高农业工作效率、提高能源利用率

(2) 物联网与数字孪生技术（讲授法和举例法）

a) 物联网应用框架



□ 物联网通过融合大数据、云计算和人工智能三大技术，能够提高物联网的工作效率。

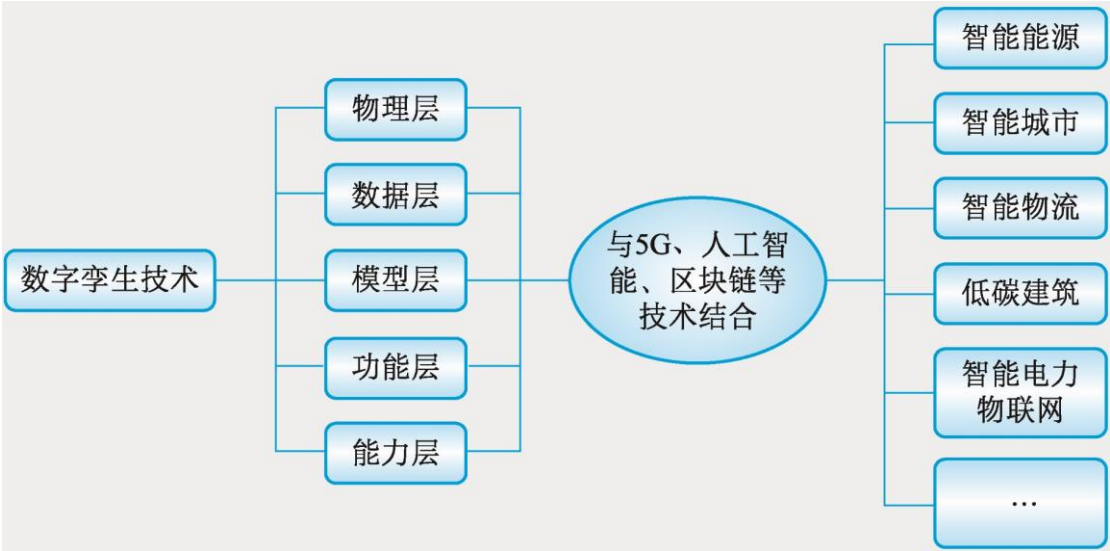


物联网技术典型应用场景

领域	应用场景	技术	解决路径
工业	电力生产、传输、油田油气生产、资源管理、建材物流、智慧化工园区、化工数字转型、数字化检测	物联网、无线传感技术、无线网桥、射频无线终端技术	感知电力系统运行状态、减少石化碳排放、降低钢铁管能源消耗、提升物流效率、提升设备运行效率、限制污染气体排放、优化资源使用
建筑	建筑建造、建筑运维、建筑能源管理	物联网	降低管理能源消耗、减少碳排放、降低建筑运行能源消耗
交通	交通出行、交通管理、城市轨道交通	物联网	减少汽车尾气排放、提高轨道交通运维效率
农业	农产品运输、农业碳监测	传感器、无人机、物联网	提高农业工作效率、土壤有机碳含量估算

b) 数字孪生支撑效率提升与运行节能技术

- 数字孪生能充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，建立虚拟仿真模型，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应实体装备的全生命周期过程。



数字孪生技术在节能降碳中的应用

领域	应用场景	解决路径
工业	电网运行、化工数字转型、碳排放预测、加工设备智能化	提高园区节能水平、减少化工园区的无效损耗、预测车间碳排放、降低制造能源损耗
建筑	建筑建造、建筑运维	降低施工能源消耗、提高建筑运维效率
交通	交通管理、城市轨道交通	减少交通拥堵、减少列车能源消耗
农业	农业生产信息处理、农产品运输	提高农业工作效率

(3) 卫星遥感技术（讲授法和举例法）

卫星遥感技术主要用于地面的定位导航和遥感数据的处理应用。卫星遥感技术可用于企业温室气体排放监测、智能导航、汽车尾气监测等。

#### **(4) 集成耦合与优化技术（讲授法和举例法）**

多技术融合支撑支撑系统协同技术：

##### **□ 智能发电系统数据应用框架**

针对火发电机组的智能运行控制，利用机器学习等建立专用智能控制算法库，通过 CO<sub>2</sub> 排放控制等实现燃烧过程的智能优化处理，减少温室气体排放。

#### **7.15.4 作业安排**

课后思考：举例说一说信息与通信技术在节能降碳中的应用

#### **7.15.5 参考资料**

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.
- (4) 王灿，张九天，碳达峰、碳中和的新发展路径，北京：中共中央党校出版社，2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室，碳达峰碳中和政策汇编，北京：中国计划出版社，2023.1.
- (6) 汪军，碳中和时代 未来 40 年财富大转移，北京：电子工业出版社，2021.10.

### **7.16 教学单元十六**

#### **7.16.1 教学目标**

第 5 章产业篇自学。开始学习最后一部分内容：决策篇，本节学习碳中和决策支撑技术，目标如下：

- (1) 掌握碳排放监测技术
- (2) 掌握碳排放核算技术

- (3) 了解净零碳导向下的低碳转型情景分析
- (4) 了解基于学习曲线的技术发展路径

### 7.16.2 教学内容（含重点、难点）

- (1) 碳排放监测技术
- (2) 碳排放核算技术
- (3) 净零碳导向下的低碳转型情景分析
- (4) 基于学习曲线的技术发展路径

### 7.16.3 教学过程及方法

#### (1) 碳排放监测技术（讲授法和举例法）

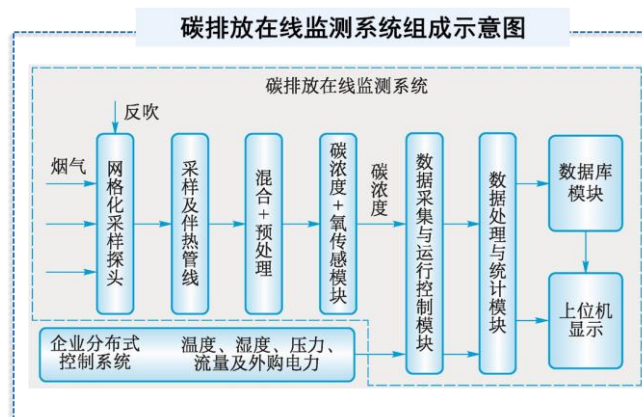
##### a) 在线监测技术

国家背景监测站：

- 建成 16 个国家背景监测站，
- 11 个站点实时监测
- 5 个站点监测系统升级改造

福建武夷山、四川海螺沟、青海门源、山东长岛、内蒙古呼伦贝尔等 5 个站点，CO<sub>2</sub> 监测精度达到世界气象组织全球大气监测计划要求。

固定源排放企业的 CO<sub>2</sub> 浓度监测



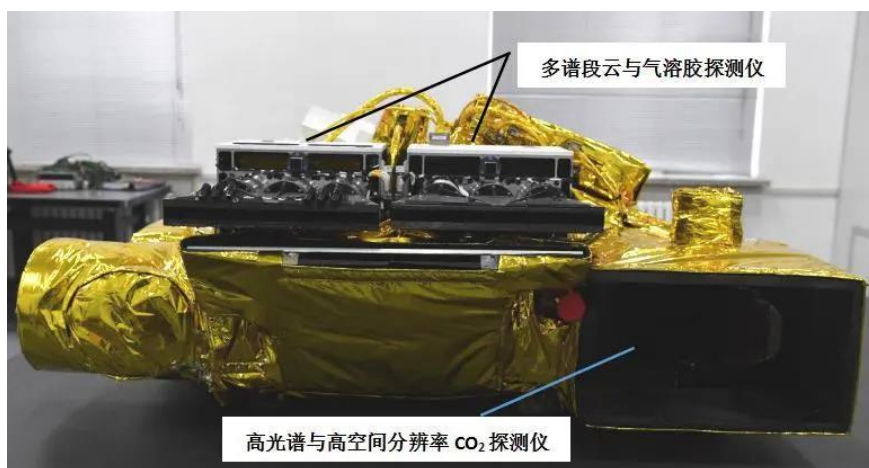
碳排放在线监测系统组成：

- 烟气取样模块
- 浓度检测模块
- 数据采集与运行控制模块
- 数据处理与统计模块

b) 遥感卫星反演技术

CO<sub>2</sub> 探测仪：

CO<sub>2</sub> 探测仪采用大面积衍射光栅对吸收光谱进行细分，能够探测 2.06 μm、1.6 μm、0.76 μm 三个大气吸收光谱通道。

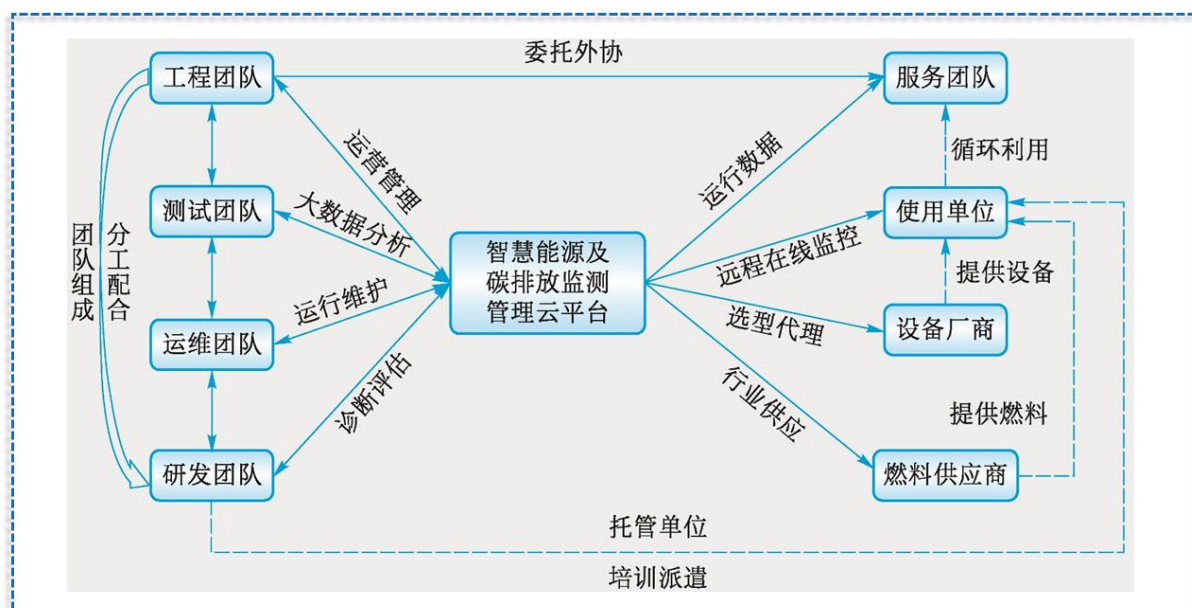


高光谱遥感技术：

利用植物光合作用波谱特征对红光、蓝紫光等波段光有不同表现来反映植被的参数和信息，从而对植被的碳汇功能进行反演。

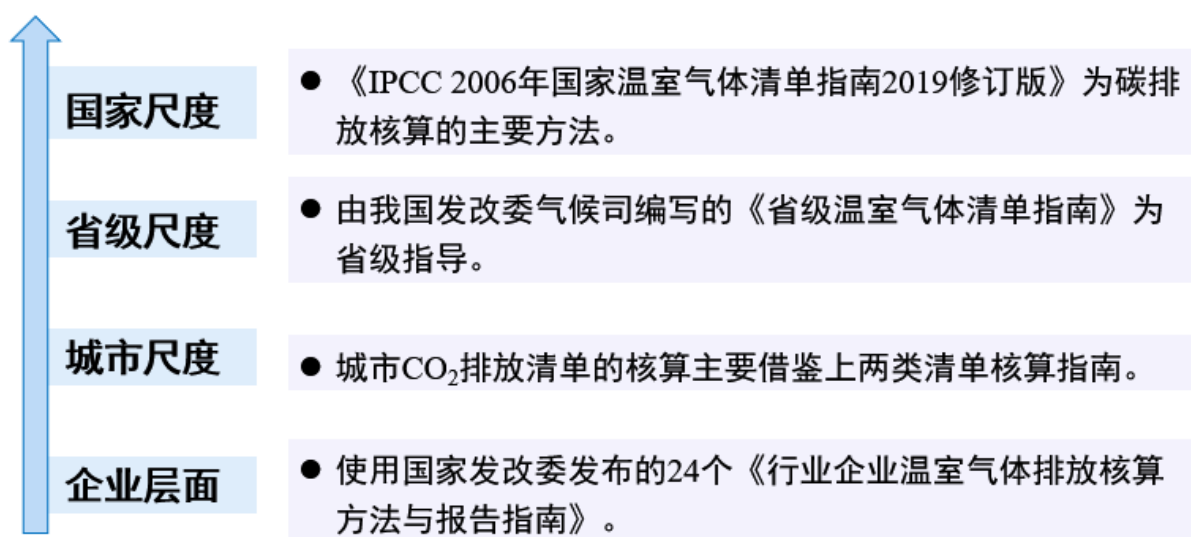
c) 大数据监测平台

大数据碳排放监测平台：



## (2) 碳排放核算技术（讲授法和举例法）

### a) 分尺度的直接二氧化碳排放核算技术：



### b) 基于全生命周期的碳足迹核算技术

生命周期评价用于评价某一产品、工艺或服务从原材料采集，到产品生产、运输、使用及最终处置的全生命周期阶段的能源消耗及环境影响。





### c) 碳汇核算技术

陆地碳汇包括森林碳汇、草原碳汇、湿地碳汇以及农田碳汇四部分。与第三章第二节的内容相对应。

## (3) 净零碳导向下的低碳转型情景分析（讲授法和举例法）

### a) 基于能源经济模型的碳中和情景

模型一般可以分为自上而下的能源经济模型、自下而上的能源技术模型和混合模型，能源经济模型有三类最典型的模型

<b>投入产出模型</b>	➤ 以总需求为已知条件，基于联立方程组来模拟经济部门的复杂关系。
<b>宏观计量经济模型</b>	➤ 基于经济变量的历史统计关系来预测经济行为，着重突出与政策相关的短期动态机制。
<b>可计算一般均衡模型</b>	➤ 以消费者和生产者分别寻求福利或利润最大化为假设基础，对市场均衡价格进行模拟。

### b) 基于能源技术模型的碳达峰情景

三种自下而上的能源技术模型：

- 综合能源系统仿真模型

该模型详细刻画了能源供应和需求技术。

- 部门预测模型

该模型利用海量相对初级的技术实现预测能源供应和需求。

- 动态能源优化模型

该模型又称为部分均衡模型，以能源供给与需求技术的详细信息为基础，来计算能源市场的局部均衡。

#### c) 基于混合模型的 2°C 和 1.5°C 情景

混合模型：

定义：利用自上而下模型和自下而上模型间互补的关系，将两类模型连接起来的模型称为混合模型。

我国低碳战略情景研究中比较常见的混合模型：

北京大学搭建的 IMED 模型

发改委能源研究所搭建的 IPAC 模型

清华大学根据马里兰大学开发的 GCAM 模型本地化后得到的 GCAM-China 模型

#### （4） 基于学习曲线的技术发展路径（讲授法和举例法）

##### a) 学习曲线效应

学习曲线效应基于两种因素的协同作用产生：

- 熟能生巧：

连续进行有固定规程的工作，复用经验，实现操作熟练，从而使得单位任务量的作用时缩短。

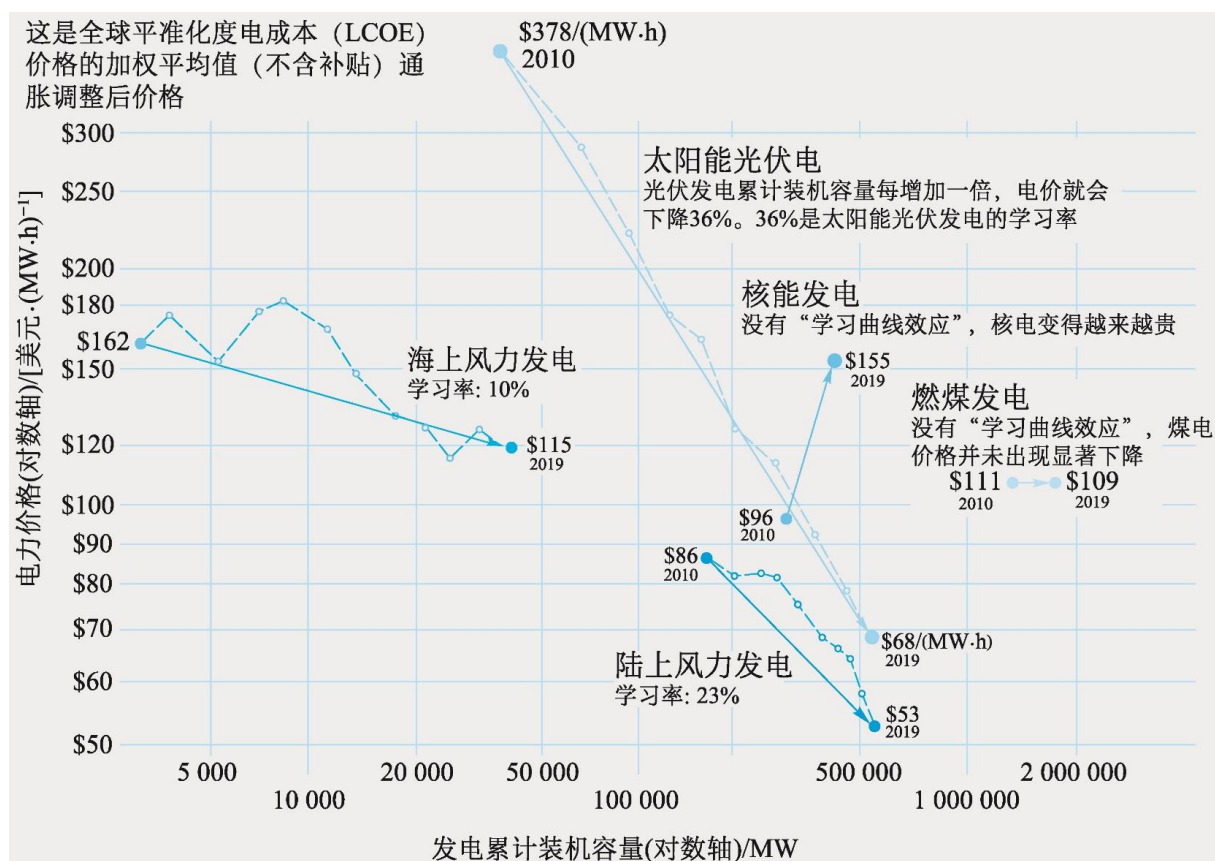
- 规模效应：



一次生产的产品越多，分摊到每件产品上的准备时间和转换时间越少，单位生产效率越高。

## b) 可再生能源发电的学习曲线

各类再生能源技术电力成本的"学习曲线效应":



## 7.16.4 作业安排

课后作业：简述碳中和决策支撑技术的分类。

## 7.16.5 参考资料

- (1) 汪霞，汪华林，碳中和技术概论，北京：高等教育出版社，2022.
- (2) 丁仲礼，张涛，碳中和逻辑体系与技术需求，北京：科学出版社，2022.
- (3) 金涌，胡山鹰，张强，2060 中国碳中和，北京：化学工业出版社，2022.9.

- (4) 王灿, 张九天, 碳达峰、碳中和的新发展路径, 北京: 中共中央党校出版社, 2021.7.
- (5) 碳达峰碳中和工作领导小组办公室, 碳达峰碳中和政策汇编, 北京: 中国计划出版社, 2023.1.
- (6) 汪军, 碳中和时代 未来 40 年财富大转移, 北京: 电子工业出版社, 2021.10.

## 8. 课程要求

学生根据教师提供的参考书、专业学术专著和刊物、网络课程资源等进行自学, 认真做好记录, 课堂练习。

## 9. 课程考核方式及评分规程

本课程实施综合考评, 采取课堂讨论、期末作业等方法, 注重学习的学习态度和最终成绩的平衡, 以全面综合地评定学生的能力。

(1) 考核类别          考查

(2) 考核形式          平时作业+课程报告

总评成绩=平时作业成绩×60%+课程报告成绩×40%。

## 10. 课堂规范

(1) 课堂纪律: 依据四川轻化工大学相关规定

(2) 课堂礼仪: 依据四川轻化工大学相关规定

## 11. 课程资源

- (1) 教材与参考书：以教师提供的参考书为准
- (2) 专业学术专著：教师提供相关资源，学生根据自己实际情况自由选择参阅
- (3) 专业刊物：教师提供相关资源，学生根据自己实际情况自由选择参阅
- (4) 网络课程资源：教师提供相关资源，学生根据自己实际情况自由选择参阅
- (5) 课外阅读资源：教师提供相关资源，学生根据自己实际情况自由选择参阅

## 12. 教学合约

- (1) 教师作师德师风承诺
- (2) 阅读课程实施大纲，理解其内容
- (3) 同意遵守课程实施大纲中阐述的标准和期望

## 13. 其他说明

无