

中国CO₂咸水层封存的关键技术、设备与材料现状

Current Status and Gaps in Essential Technology, Equipment and Material for Implementing CO₂ Saline Aquifer Storage Projects in China

Ning Wei 魏宁

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy
of Sciences



China Australia Geological Storage of CO₂

中澳二氧化碳地质封存



报告目的

总体目标：调研中国CO₂咸水层封存所需的关键技术、装备与材料的现状水平，识别其与工程实施要求之间的差距。

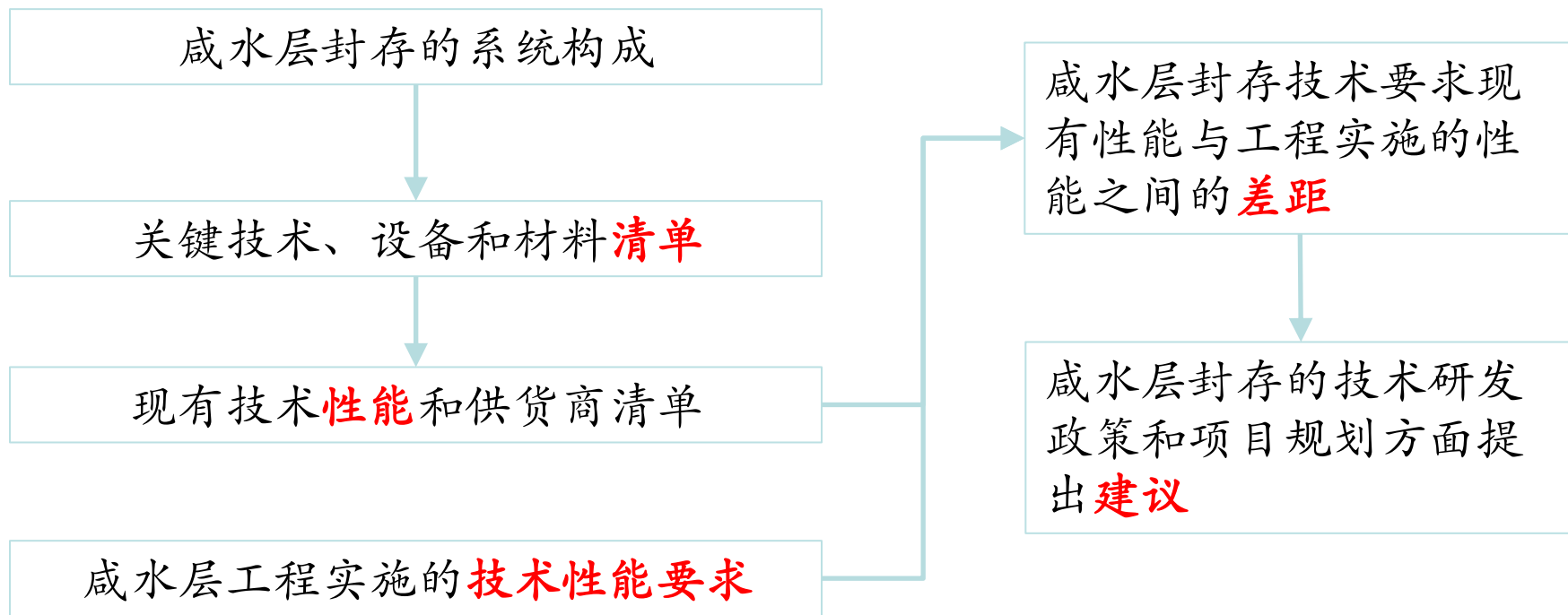
Objective: identify the status and gaps of China's key technologies and equipment supplies for implementing CO₂ saline formation storage project (the portion of capture and transportation is excluded from the list).



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



技术路线



涉及方面：**关键技术、设备与材料**等类别；

实施手段：专家咨询，网页和电话咨询；规范和工程调研。



主要内容

- CO₂咸水层封存技术与装备清单
- CO₂咸水层封存项目性能要求
- CO₂咸水层封存技术国内外差距
- CO₂咸水层封存技术研发的建议



CO₂咸水层封存技术与装备清单

CO₂咸水层封存技术装备层次划分

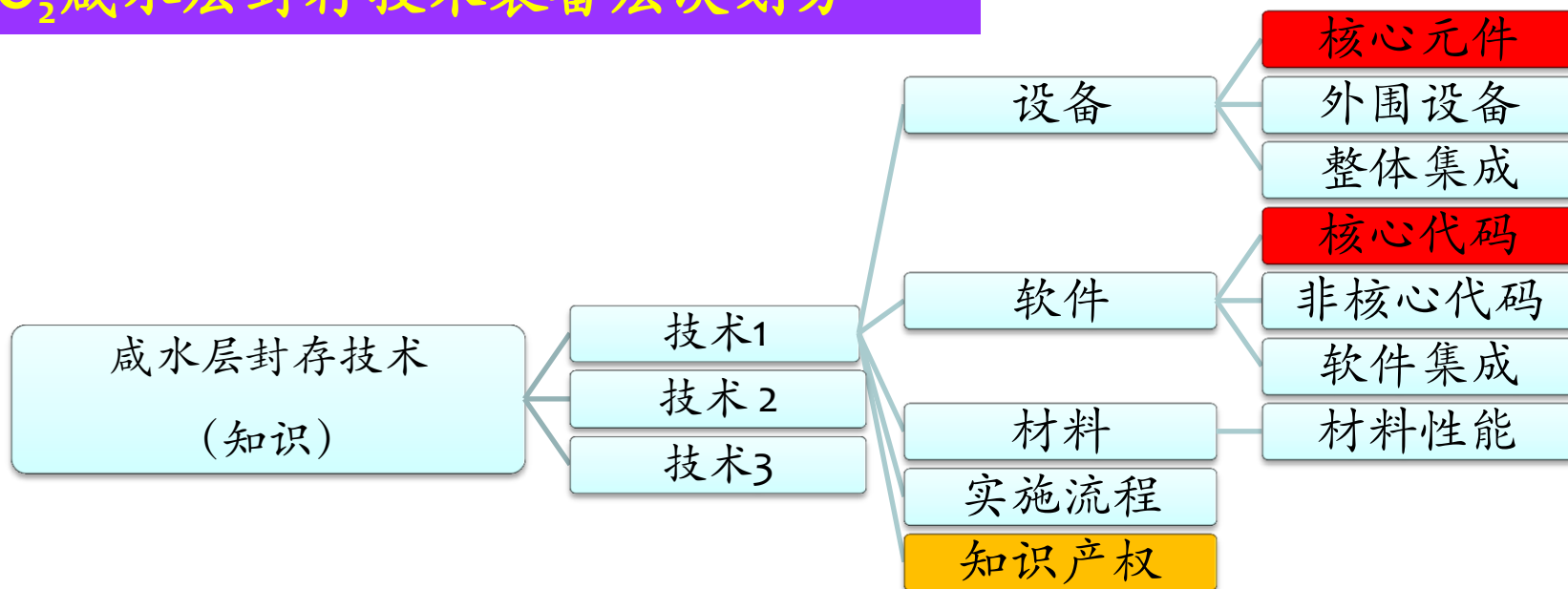


Fig. 技术与装备的层次定义

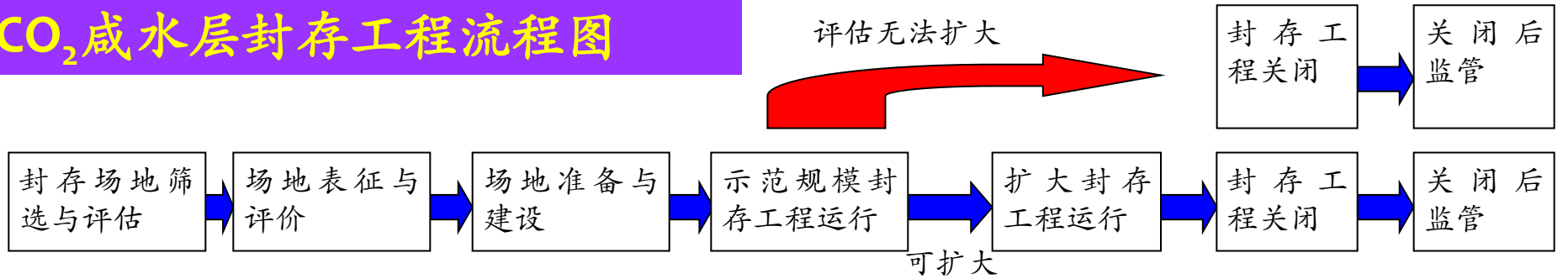
装备、软件和材料是技术内容的实体化。

按照技术类别划分：共性技术（传统油气等行业）与特需技术（CO₂封存特殊）



CO₂咸水层封存技术与装备清单

CO₂咸水层封存工程流程图



- ★ 场地筛选、表征与设计阶段 (2~5a)
 - 场地筛选;
 - 开发许可;
 - 场地表征;
 - 场地筛选;
 - 项目发展设计;

- ★ 示范规模运行 (2~10a)
 - 封存许可;
 - 场地设计;
 - 场地建设(钻井、地下、地表设备和注入等);
 - 注入运行
 - 监测与安全评价(服务);
 - 环境评价(监测);

- ★ 扩大运行 (20~50a)
 - 放大可行性判断;
 - 放大设计阶段与施工;
 - 放大工程运行;
 - 监测与安全评价;
 - 环境评价;

- ★ 场地关闭/关闭后阶段 (500~1000a)
 - 场地关闭许可;
 - 场地关闭验证(封井);
 - 长期责任转移;
 - 关闭后长期监管(长期风险预测与管理);

每个阶段涉及到相对应的技术、设备和材料部分。



China Australia Geological Storage of CO₂

中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术与装备清单

关键技术清单

- 场地表征与储盖层评价技术（场地筛选）
- 井场布置与封存过程控制技术
- 钻井、固井与完井技术（垂直井、水平井等的长期密封性）
- 注入控制技术（多地层内CO₂压力与晕控制）
- 监测、验证与评价技术（监测与评价方法）
- 井下设备的长寿命耐腐蚀等技术（材料方面）
- 风险评估与风险管理技术（包含场地长期风险预测与风险管理技术）
- 等等 70+技术与20+关键技术



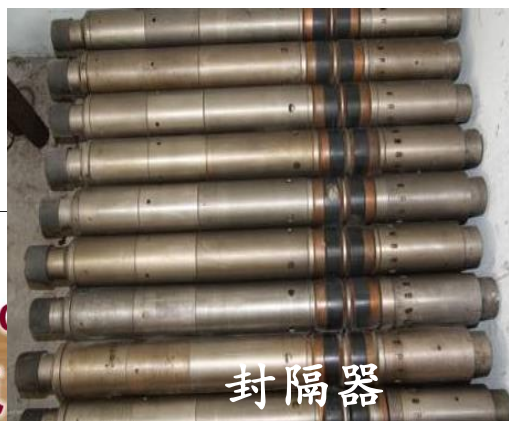
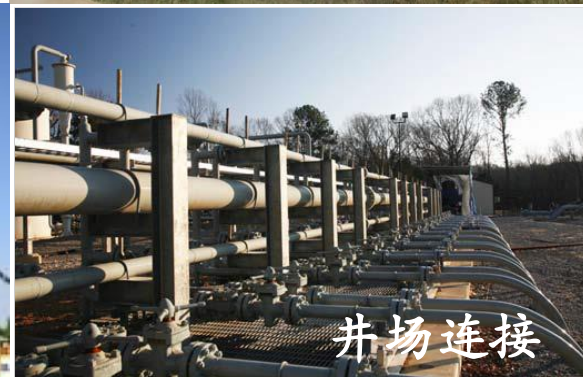
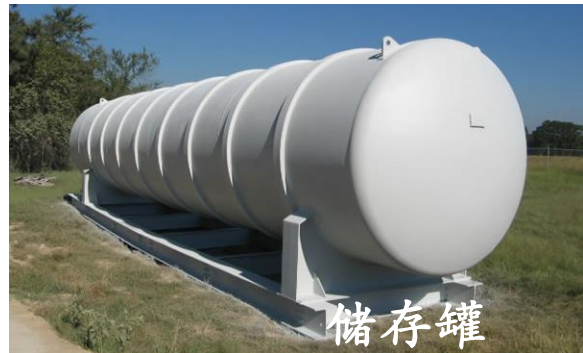
China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术与装备清单

CO₂咸水层封存的关键设备-共性设备

- 钻井、固井与完井设备;
- 井下设备 (抽采、桥塞、封隔器等)
- CO₂储存设备
- 注入设备 (温压控制)
- 井场连接 (管阀等)
- 压缩设备
- 水处理设备
- 钻井平台
- 等等



cags
钻机

China Australia C
中澳二氧

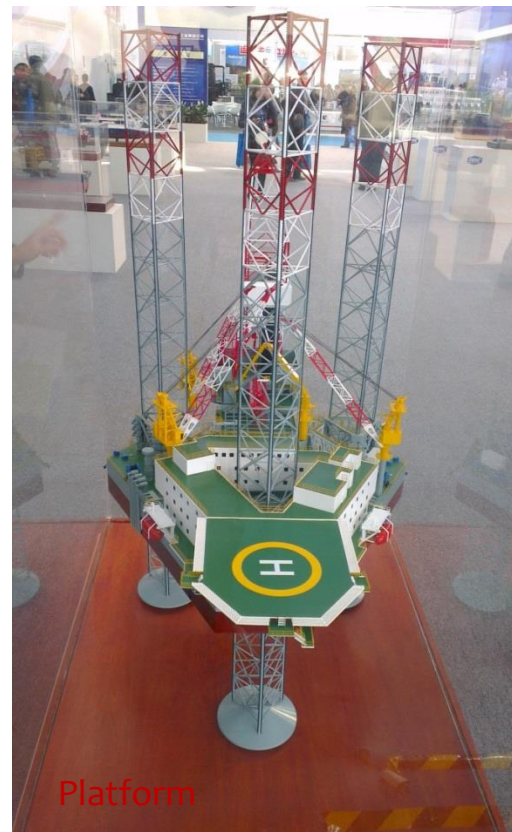
封隔器

压缩泵

www.ChinaCags.com

CO₂咸水层封存技术与装备清单

CO₂咸水层封存的关键设备-共性设备



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术与装备清单

CO₂咸水层封存设备清单-特需设备

□ 大气监测

□ 地表监测

□ 地下监测

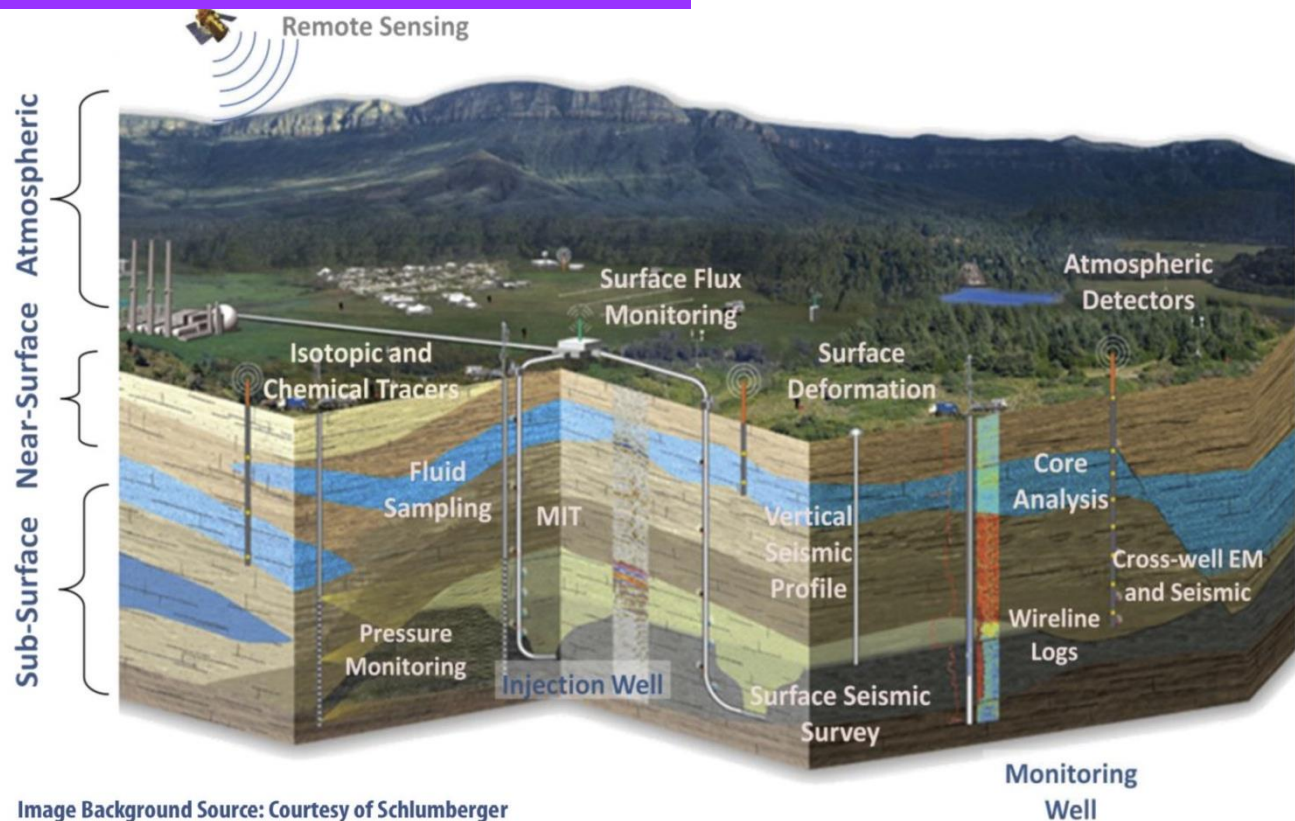


Image Background Source: Courtesy of Schlumberger

特需技术包含：场地表征与筛选、预测、监测与评估等。同样也是基于传统技术发展起来的，也是有研发和产业基础的。



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术与装备清单

CO₂监测技术（计量与认证）

1	多组分表面地震	20	卫星干涉
2	地球物理测井	21	航空光谱成像
3	井底流体化学	22	多波束回声探测
4	井底压力/温度	23	侧扫声纳
5	二维地震	24	表面重力测量
6	长期井底PH监测	25	涡度协方差
7	示踪剂	26	跨孔电阻层析成像
8	微震监测	27	陆上电阻层析成像
9	气泡流检测	28	高分辨率声学成像
10	土壤气体浓度	29	气泡流化学
11	表面气流	30	航空电磁
12	垂直地震剖面（VPS）	31	生态系统研究
13	红外二极管激光器	32	地质雷达
14	非色散红外气体分析仪	33	流体地球化学
15	单井电磁	34	布默/斯帕克剖面Boomer/Sparker profiling
16	钻井重力测量	18	跨孔电磁
17	陆地电磁	19	倾斜仪

- 目前重要的的监测技术，其中3D地震、多组分表面地震、地球物理测井、地球化学测井、井底压力/温度监测、微震监测、气泡流检测和土壤气体浓度等技术成熟，是初步表征阶段主要的监测方法。
- 大部分技术国内外均处于研发阶段；没有列出具体的参数，同时各技术均为研发项目，没有具体的价格。



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术与装备清单

CO₂咸水层封存的关键材料

- 防腐橡胶（耐CO₂密封元件）
- 防腐剂（井下设备）
- 低损伤性的泥浆；
- 完井水泥（耐CO₂腐蚀）
- 冶金管材（气密封套管、油管、钻杆、井场连接、采油树、钢丝绳等设备材质）
- 等等



CO₂咸水层封存技术与装备清单

CCUS试验现场调研



多个中国CCS现场调研: 胜利油田、延长油田、吉林油田、苏北油田、鄂尔多斯CCS项目等CCS项目, 另外其他相关企业的情况。



cags

China Australia Geological Storage of CO₂

中澳二氧化碳地质封存



主要内容

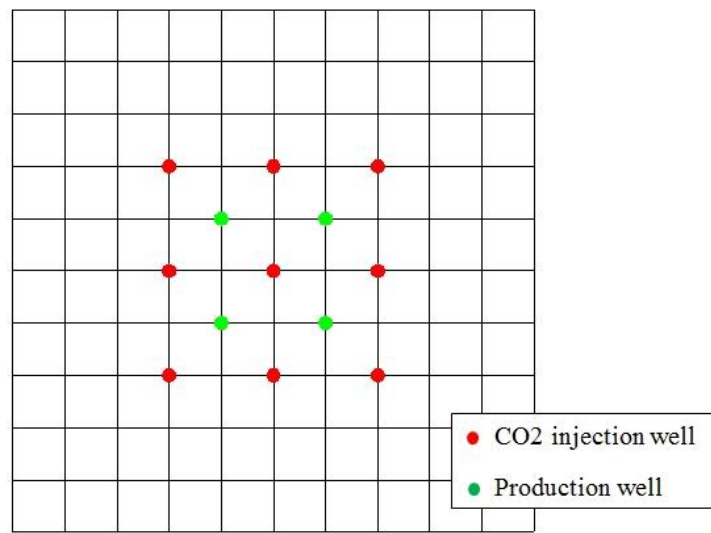
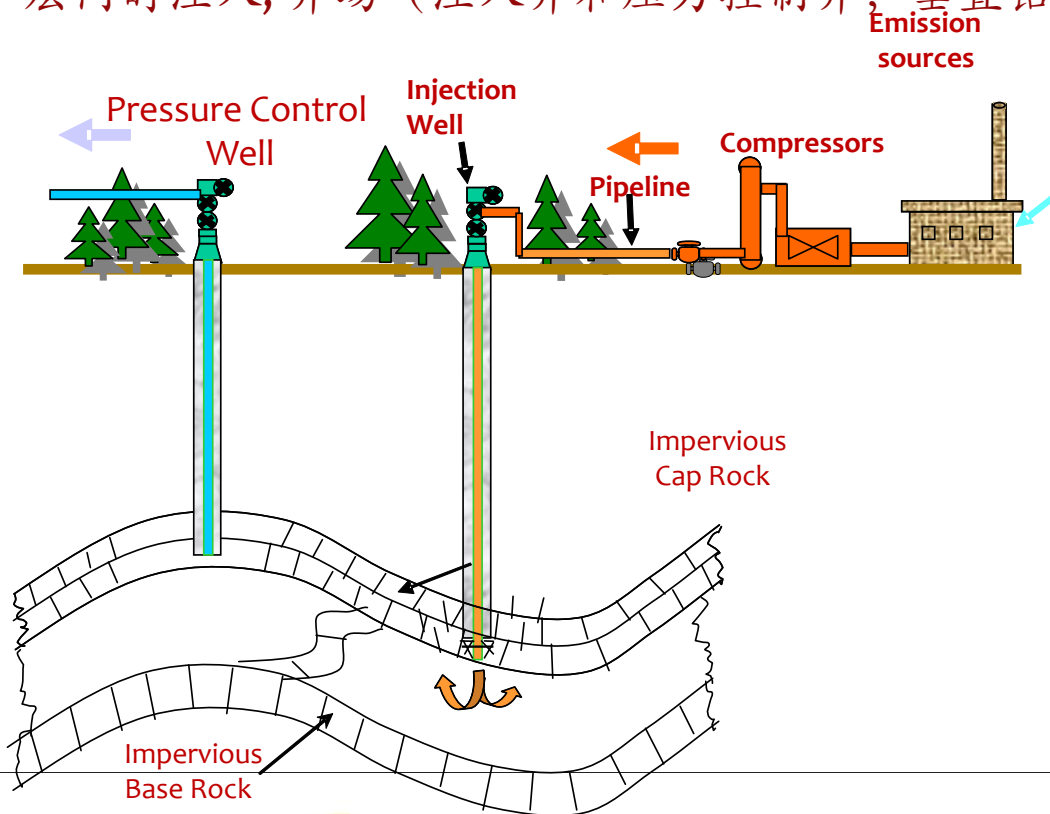
- CO₂咸水层封存技术与装备清单
- CO₂咸水层封存项目性能要求
- CO₂咸水层封存技术国内外差距
- CO₂咸水层封存技术研发的建议



CO₂咸水层封存项目性能要求

CO₂咸水层封存示范工程设备与性能要求

陆上CO₂咸水层封存工程设定的主要参数：规模1Mt/a；鄂尔多斯低孔低渗地层；多层同时注入；井场（注入井和压力控制井，垂直钻孔深度3000m）；超临界CO₂注入。



Injection Strategy

Modified from Schematic map of acid injection in Alberta Basin

China Australia Geological Storage of CO₂

中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存项目性能要求

CO₂咸水层封存示范工程设备与性能要求

- 本设备清单以设定示范项目为依据而制定，清单详细的列举了各设备的主要参数、特性以及用途。国内技术与装备基本满足工程需求（参数符合），但是科研方面需要提升，特需设备块需要单独研发。

部分关键设备清单

设备分类	设备二级分类	具体技术	具体设备	主要参数	生产单位
地质勘探与监测设备	场地勘探与表征技术	地震勘探技术	检波器：供应地面三分量地震检波器	可调整检波器的方位0~360°，允许误差小于2°，倾角0~15°，允许误差小于1.5°。技术参数检波器外径：Φ107mm 检波器高度：59mm（不含尾锥），尾锥长度：75mm，电缆隔离度：≥20dB，七芯电缆长2m，相位一致性：≤±1ms 质量：1600g，环境温度：-40℃~+70℃。	济南亿科仪器仪表制造有限公司
			GPS：eTrex10手持机	尺寸：10.3×5.4×3.3 cm；显示屏尺寸：2.2英寸；屏幕分辨率：176×220；防水指标：IPX7；电池使用时间：25小时；接口：USB；可漂浮：否；高灵敏接收器：是。	南京久测仪器技术有限公司
		地表变形监测技术	测斜仪：光纤陀螺测斜仪（FOG-101）	可测参数：井斜、方位、高边工具面、北向工具面和井底温度； 测量精度：方位角：0°~360°，误差：≤±2°；井斜角：0°~70°，误差：≤±0.15°；重力工具面角：0°~360°，误差：≤±1.5°；北向工具面角：0°~360°，误差：≤±3°； 适应环境条件：耐温：-20℃~80℃，加保温筒150℃ 耐压：100Mpa，抗冲击：700g, 0.5ms, 1sine； 外形尺寸：井下仪器抗压外壳直径：48mm 井下仪器长度：3100mm；标准R型单点引鞋或标准型引鞋； 测量软件：V2.0.0.0 陀螺专用视窗操作系统； 测量方式、时间：轨迹测量：连续，2分钟每点；定向测量：单点或多点； 地面主机：陀螺通用主机。	北京三孚莱石油科技有限公司
	其他监测设备	声波测井	补偿声波测井仪（BCA5601）	最高耐温：155℃；最大耐压：100MPa；仪器最大外径：Φ90mm；最小井眼尺寸：120mm；连接长度：4710mm；最大井眼尺寸：450mm；仪器质量：90kg；仪器总长度：5213mm；电子仪连接长度：1400mm；声学连接长度：3300mm；测量范围：130~650m/s/m；测量精度：2μs/m；测量误差：±3ms/m（在130ms/m~200ms/m时）、±1.5%（在200ms/m~650ms/m时）；径向探测深度：100mm（3.941in）；垂直分辨率：0.4m（1.31ft）；稳定性：±5%。	中国石油测井公司
		井下压力传感器	井下压力传感器（CP-50）	量程：-0.1MPa~0MPa~200MPa可选；环境温度-20℃~85℃；供电：5~12VDC；输出信号：1.5~2.0mV/V；温度漂移：0.01%/℃；零点漂移：0.01%/℃；综合误差：±0.1%；线性误差：0.05%；重复性误差：0.05%；迟滞误差：0.05%；工作温度：-45℃~+85℃；输入阻抗：Rin≥3kΩ；输出阻抗：Rout≤3kΩ。	北京力诺天晟科技有限公司
		土壤气体勘测	土壤野外组合测试仪XX-TFY	土壤电阻率的测定：精度 0.1 Ω/m；土壤中金属腐蚀电位的测定：精度 ± 1 mV；土壤电位梯度的测定：精度 ± 0.1 mV/m；土壤氧化还原电位的测定：精度 ± 2 mV；土壤pH的测定：精度0.02pH；土壤含水量的测定：精度 0.1%；土壤容量的测定：精度 0.02 g/m ³ ；土壤总孔隙率的测定：精度 0.6%；土壤含气率的测定：精度 0.6%；土壤硫化物的测定：精度0.1 ppm。	北京顺祥凯鑫科技有限公司
钻井及配套设备	钻机	ZJ20年载钻机	最大钩载：450(kN(t))；名义钻井深度：2500m	四川昆仑石油设备制造有限公司	
		压井管汇	压井管汇	工作压力：2000PSI~20000PSI；公称口径：2.1/16"~4.1/16"（46mm~103mm）；工作介质：石油、天然气、泥浆；工作温度：-46° C~121° C（LU级）	江苏美高钻采设备有限公司
	井控装备	防喷器	液动双闸板防喷器（2FZ）	型号：2FZ 118-70；通径：180mm；额定工作压力：70MPa；重量：790kg；	山东省东营市东达机械制造有限公司



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



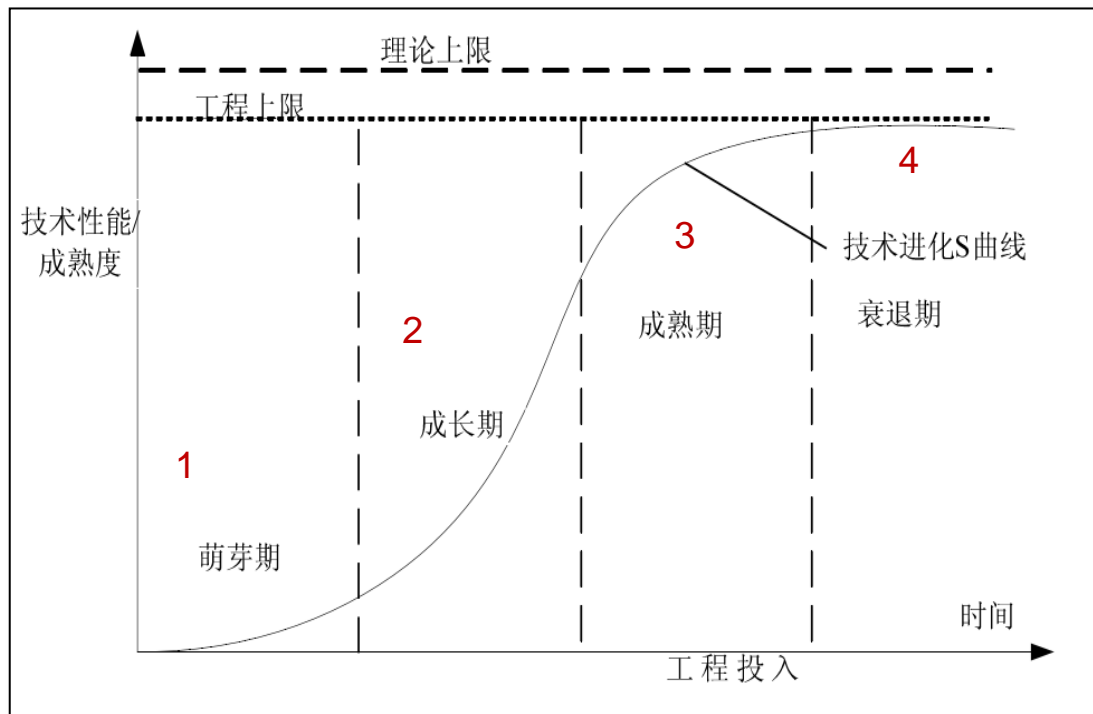
主要内容

- CO₂咸水层封存技术与装备清单
- CO₂咸水层封存项目性能要求
- CO₂咸水层封存技术国内外差距
- CO₂咸水层封存技术研发的建议



CO₂咸水层封存技术国内外差距

技术成熟度划分



Evaluation of technology Maturity

•4 代表满足本技术的商业规模长期封存要求或者适用于普通技术人群（衰退期）

Commercial scale;

•3 工业示范应用（成熟期）

Demo ;

•2 中试（含实验室应用，成长期）； Bench scale

•1 基础研究（萌芽期） Basic Research;

•0 概念阶段； Conception



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术国内外差距

国内外CO₂咸水层封存差距较小的技术

总体上我国CO₂咸水层封存技术比国外落后5-10年，但部分关键技术与国际水平差距不大。有两种情况：

1、国内外都比较成熟，但水平相差不大的：

- 高分辨率地震波法勘察与解释
- 岩石-流体体系运移、化学、力学特性测试技术

2、国内外均开始起步的：

- 储层增渗设备与工艺
- 废弃钻井勘察、检测、评价与修复
- 高效大流量高压注气机组
- 近地表土壤气分布式远程监测
- 深层流体状态监测
- 动态反分析与预警
- 地层与断层的泄漏补救设备与工艺



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术国内外差距

国内外CO₂咸水层封存差距较大的技术

CO₂咸水层封存技术的发展必须突破国内外都不成熟且难度很大的技术，这些技术有：

- ▶ 场地表征与评价技术（多尺度多方法集成的场地评价技术）
- ▶ 长期安全性与环境风险分析评价技术
- ▶ 多地层统注技术（包含各地层反馈、流量控制等技术）
- ▶ 大规模场地特征监测技术，如：星载多光谱合成成像监测与解释技术；
- ▶ 近地表/浅层土壤气/水质分布式监测技术
- ▶ 流体运移与地层破裂监测与解释（地震与微震耦合分析）
- ▶ 泄漏风险管理技术（泄漏检测与修复技术）

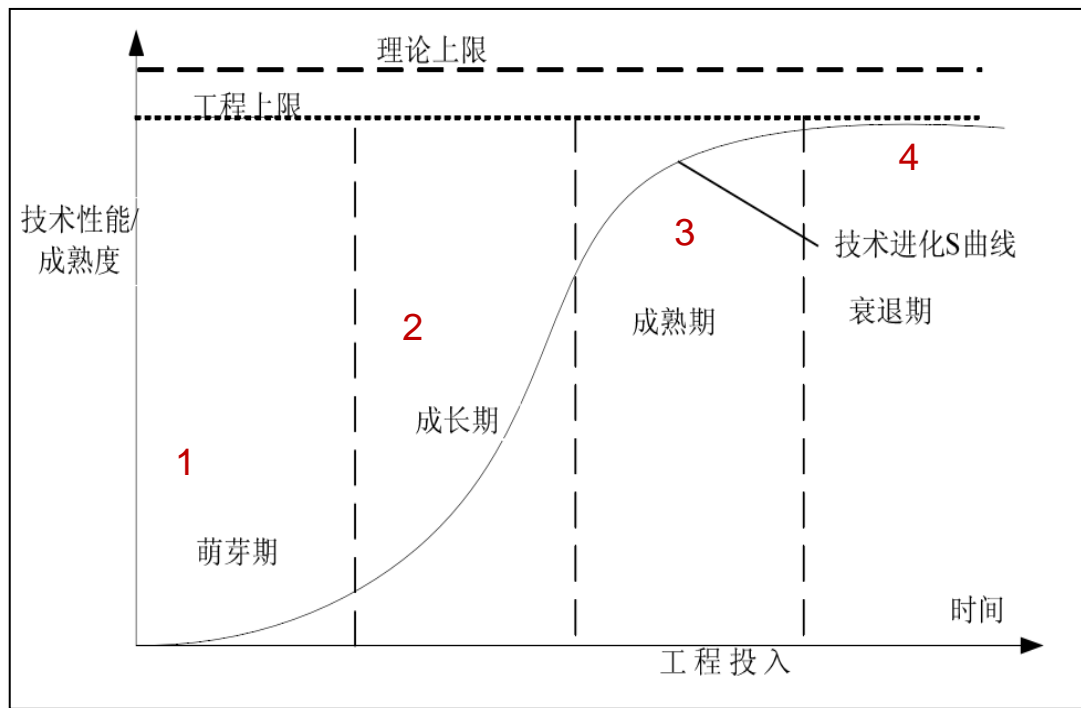


China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术国内外差距

技术成熟度划分

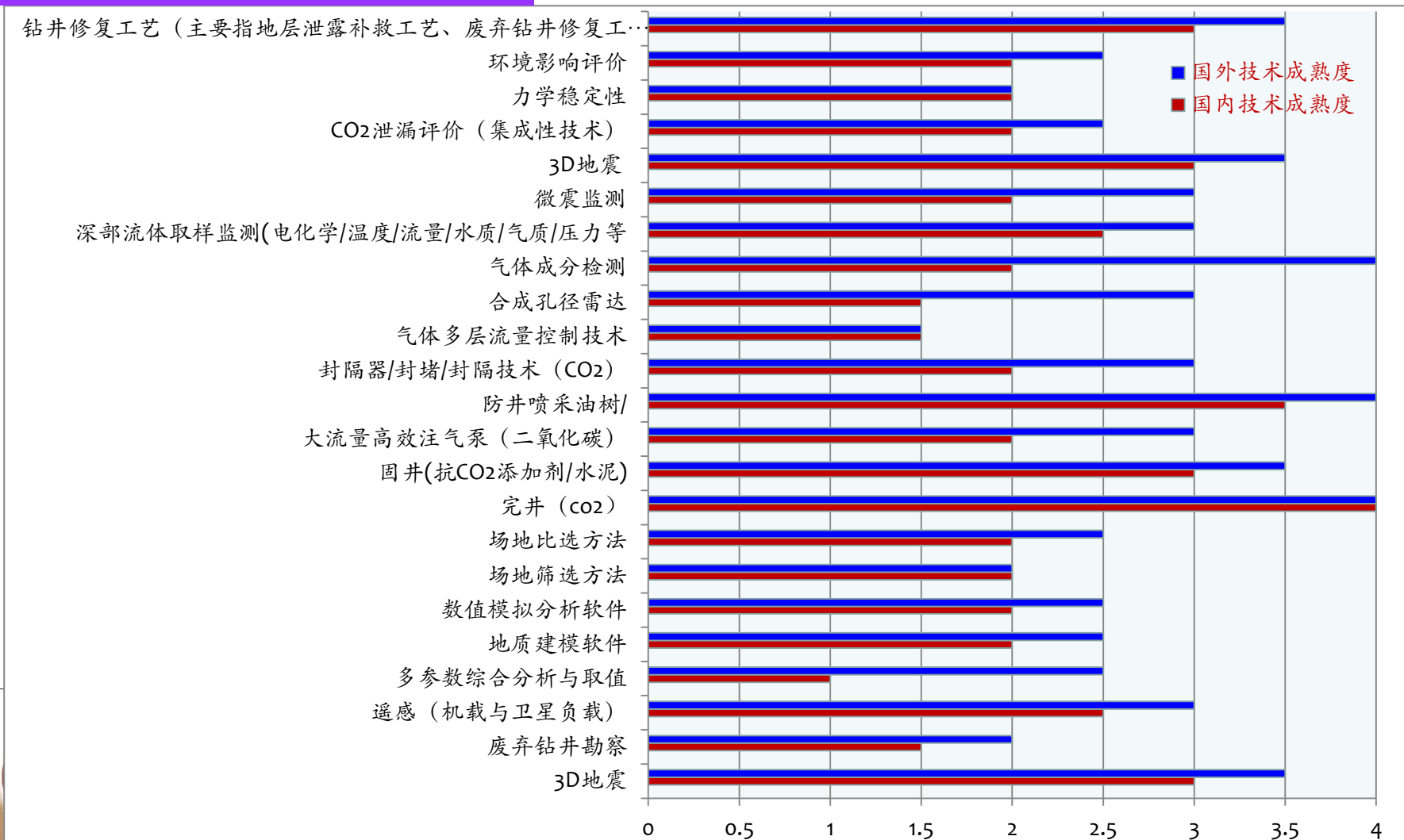


- 4 代表满足本技术的商业规模长期封存要求或者适用于普通技术人群（衰退期）；
- 3 工业示范应用（成熟期）；
- 2 中试（含实验室应用，成长期）；
- 1 基础研究（萌芽期）；
- 0 概念阶段；



CO₂咸水层封存技术国内外差距

关键技术的国内外对比



主要内容

- CO₂咸水层封存技术与装备清单
- CO₂咸水层封存项目性能要求
- CO₂咸水层封存技术国内外差距
- CO₂咸水层封存技术研发的建议



CO₂咸水层封存技术研发的建议

技术与设备的基本情况

中国企业具有大部分CO₂咸水层封存的技术与装备，特别是传统共性技术与装备，基本可以满足示范工程的需求；但其与先进的国际企业相比，还有较大差距。主要表现在：

- ① 部分关键技术和装备的核心零部件受制于人，关键材料依赖进口。
- ② 核心软件商业化程度低，包含地质建模、模拟与分析软件。
- ③ 产业结构不合理，低端产能过剩、高端产能不足和发展滞后，处于低附加值领域；

这个也与国内大部分设备制造企业的特点相近。



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术研发的建议

初步建议-仅考虑国内研发条件下

一、共性技术与装备

对于传统的勘探、钻井与完井、测井技术，国内企业处于追赶状况与调整适应CO₂地质封存的状态，建议设定该类技术研发与示范的引导政策，提高其可靠性与精度，这类装备具体如下：

1. 高精度地层层序勘探、模拟与地层评价技术与装备；
2. 小型化、信息化、集成化、自动化与智能化的钻井技术与相应装备；
3. 高效率、高精度、高可靠性地震勘探技术装备。地层数据采集环节将以开发高采集效率、高质量、低采集成本方法获得多分量地震数据为发展方向。
4. 高精度、高可靠、高分辨率、深探测的测井设备及数据解释技术；
5. CO₂条件下的抗腐蚀、高可靠性和大规模的井下设备与地表设备；
6. CO₂地质封存风险管理相应的装备。



China Australia Geological Storage of CO₂

中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术研发的建议

初步建议- 仅考虑国内研发与自由市场条件下

二、特需技术与设备

特需装备主要集中于CO₂地质封存的监测与验证技术，建议依据不同的阶段对其展开不同的策略，例如：对正处于“开发和示范阶段”的技术与装备进行较大幅度的资助。不过，新型设备的创新也是在材料和工艺基础上的创新，其取决于国家整体的工业水平和创新能力，目前国内企业掌握的核心材料与核心元件的专利，所以对国内企业的务实要求为：

1. 吸引更多的国内企业参与到技术和装备研发（改革研发体制、提高研发投入、专利申请、技术整合），充分利用国内国外两种资源。
2. 对中国特点引起的特殊特需技术，具有一定基础，如：中国地质特需的设备与解释技术，中国废弃钻井监测。
3. 进一步提高设备整合创新，提高其整体可靠性与产品的市场竞争力（性价比），争取核心材料与元件的创新，提高耐久性与精度，实现装备的突破性进展。
4. 通过工程示范与早期实施整合所有的技术、装备、软件与人才，整合产业链，形成CO₂咸水层封存的优势力量。
5. 通过产业链整合，从而实现关键设备与关键技术的创新。



CO₂咸水层封存技术研发的建议

CO₂咸水层封存的重点发展方向-无国际合作条件下

- 小差距的技术：在技术层面上与国际水平相差不大；但在关键元件、材料与软件上与国际水平差距较大，争取突破核心技术。
- 较大差距的技术：国内外同处于研发起步的基础不同，有一定差距，需要特别重视，缩小差距，提升整个技术核心程度。

对于我国CO₂咸水层封存项目来说，当前需要着力突破那些在即将启动的示范工程中很可能用到，或者短期可以突破精度和可靠性的技术与装备，例如：

岩石-流体体系运移、化学、力学特性测试技术；

场地表征与场地评价筛选技术(信息不足条件下的选址技术)；

高效大流量高压注气技术；

耐腐蚀井下与地表设备；

深层流体状态监测；

等等技术领域



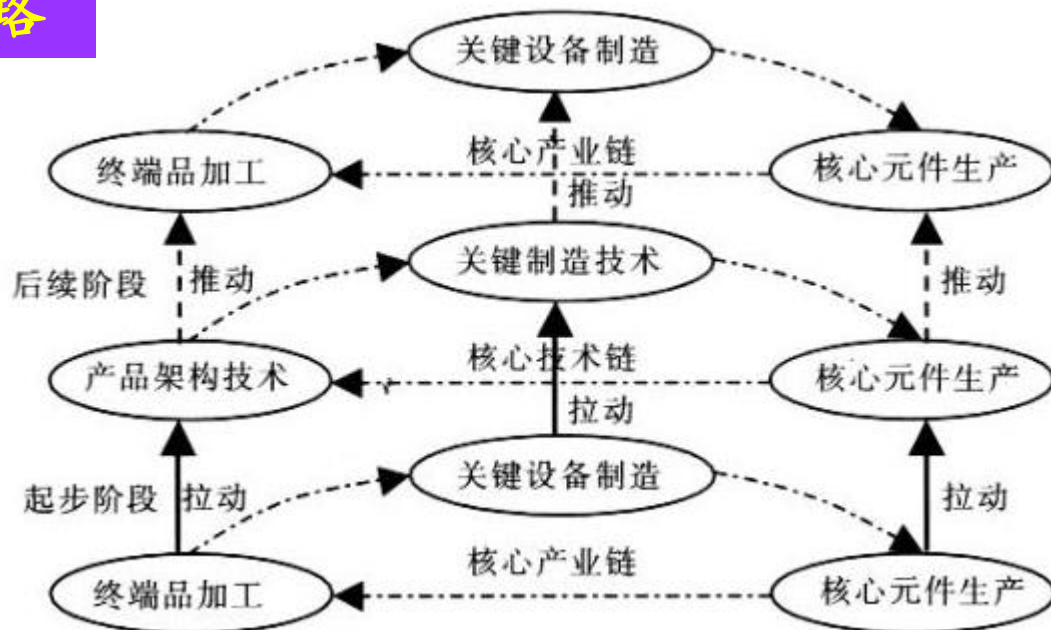
China Australia Geological Storage of CO₂

中澳二氧化碳地质封存



CO₂咸水层封存技术研发的建议

CCS技术发展之路



发展中国家核心产业链与核心技术链协同发展机制

发展中国家的产业发展拉动技术进步，而非技术进步推动产业发展类型。国家整个技术提升更需要国家的产业政策；策略上通过示范工程和早期工程实施推动中国国内技术的升级与集成，从而实现关键设备与关键技术的创新。



敬请各位专家批评指正!

Email: Nwei@whrsm.ac.cn



China Australia Geological Storage of CO₂
中澳二氧化碳地质封存

