

# 中国CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub> Saline Aquifer Storage Projects in China

Ning Wei 魏宁

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences

中科院武汉岩土力学研究所

Nov 19, 2014



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# 报告目的

总体目标：调研中国CO<sub>2</sub>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 for implementing CO<sub>2</sub> deep saline aquifer storage project (the portion of capture and transportation is excluded from the list).

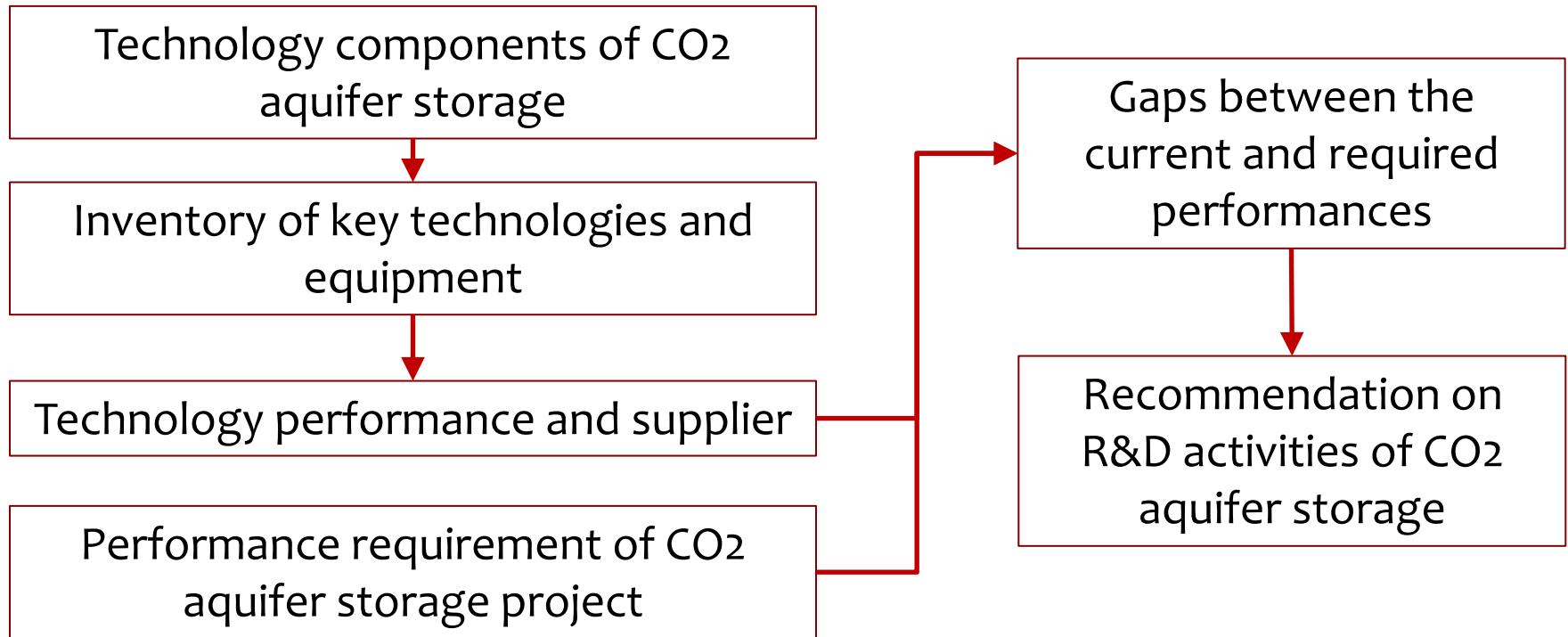


China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# Research Method



**Study range:** **Key technologies, equipment and material;**

**Method:** Expert consultant, website, telephone interview, annual report of enterprises, and others



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# 主要内容

- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单
- Inventory of technologies and equipment
- CO<sub>2</sub>咸水层封存项目性能要求
- Performance requirement for CO<sub>2</sub> aquifer storage
- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距
- Gaps between International and Chinese in CO<sub>2</sub> aquifer storage
- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术研发的建议
- Recommendation on R&D activities of CO<sub>2</sub> aquifer storage

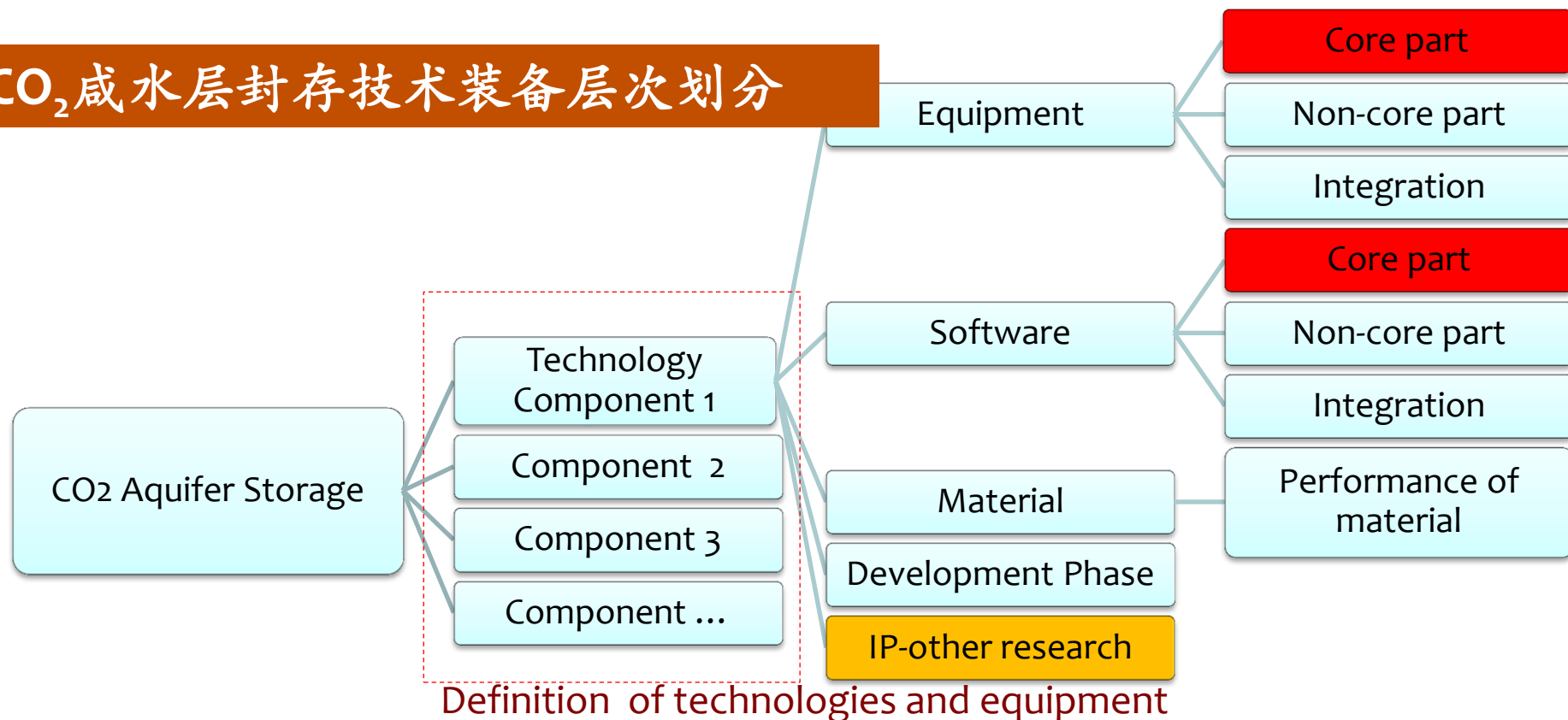


China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## CO<sub>2</sub>咸水层封存技术装备层次划分



装备、软件和材料是技术内容的实体化，由此主要针对技术开展相应的分析。  
按照技术类别划分：共性技术（油气等行业技术）与特需技术（CO<sub>2</sub>封存产生的新需求）



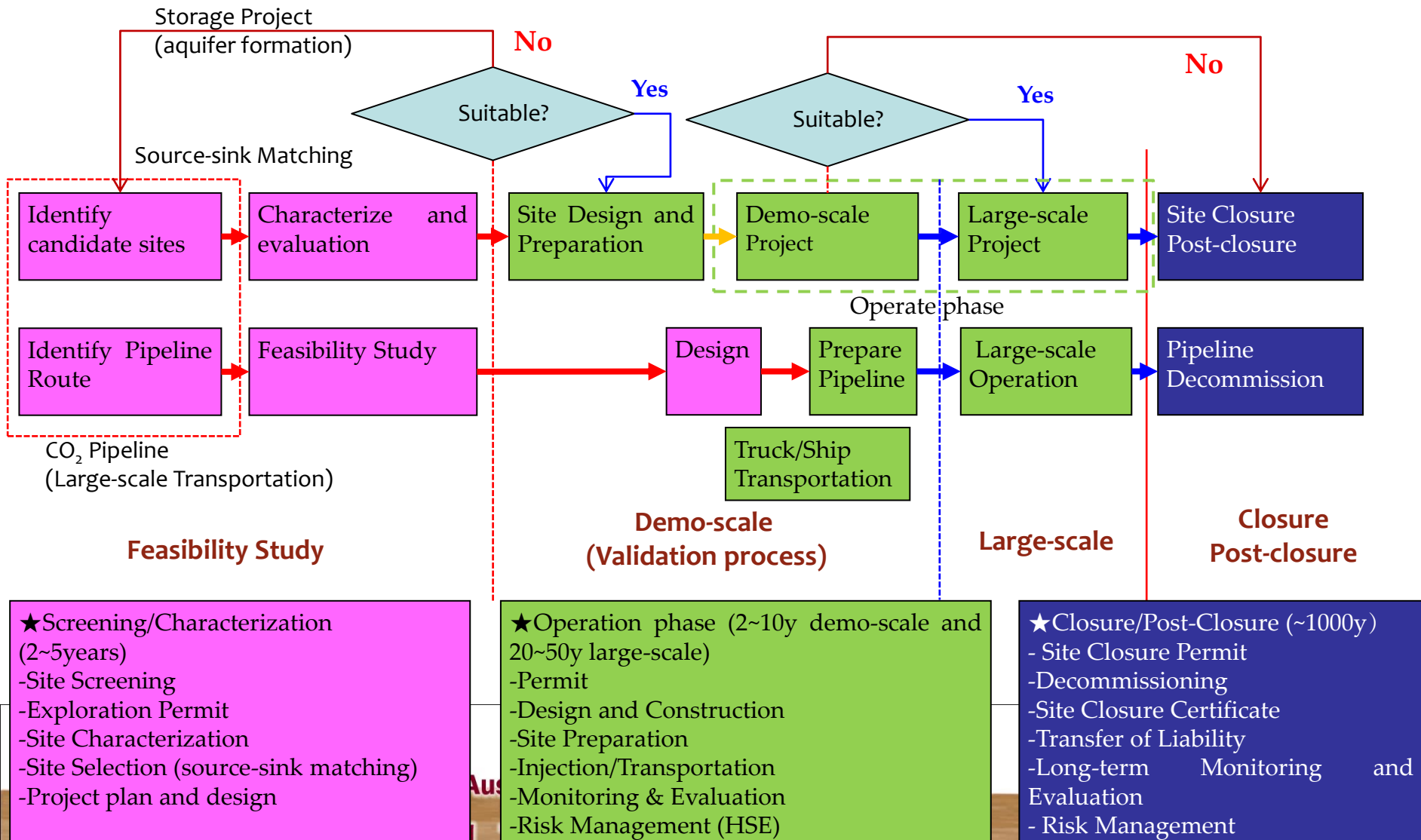
China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## CO<sub>2</sub>咸水层封存工程流程图





# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## 关键技术清单

清单包含总共70+技术与20+关键技术，关键技术如：

- ❑ 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）
- ❑ 注入调控技术（多地层内压力与CO<sub>2</sub>晕控制，优化封存量）
- ❑ 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（材料与元件方面）
- ❑ 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）



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



## CO<sub>2</sub>咸水层封存设备清单-共性设备清单

The logo for CAGS (California Association of Governmental Superintendents) is located in the bottom right corner. It features the word "cags" in a stylized, lowercase font. The letters are white with a thick, dark outline. The "c" and "a" are connected, and the "g" has a unique, rounded shape. The logo is set against a dark background.

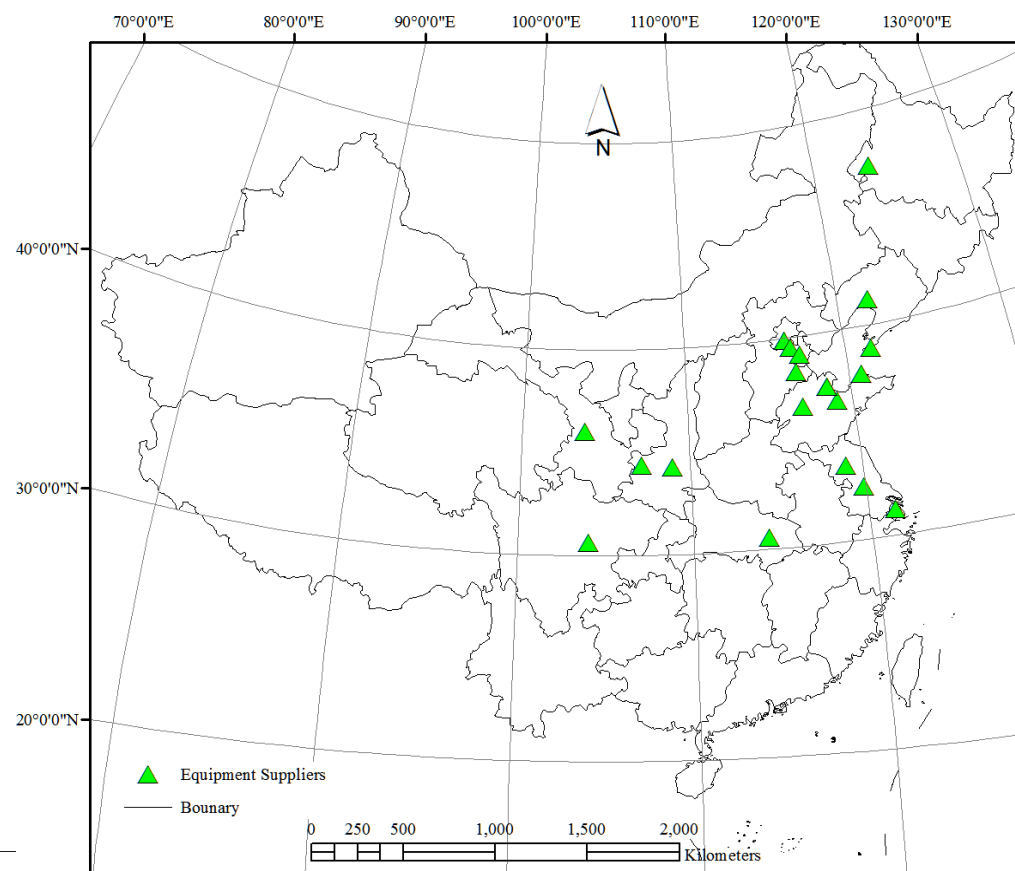
# China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub> 中澳二氧化碳地质封存

[illegible]



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## CO<sub>2</sub>咸水层封存设备清单-共性设备清单



该图统计了国内规模以上（规模千万以上的企业）石油企业的信息，其中包括生产规模、产品类型、在中国的分布趋势等。



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## CO<sub>2</sub>咸水层封存的关键设备-共性设备

- 勘探
- 钻完井技术
- 注入调控 (CO<sub>2</sub>压力控制与晕控制技术)
- 地层增渗
- 水存储与处理设备
- 等等装备



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存

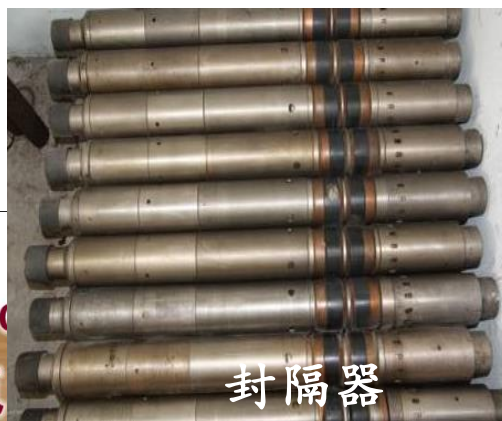
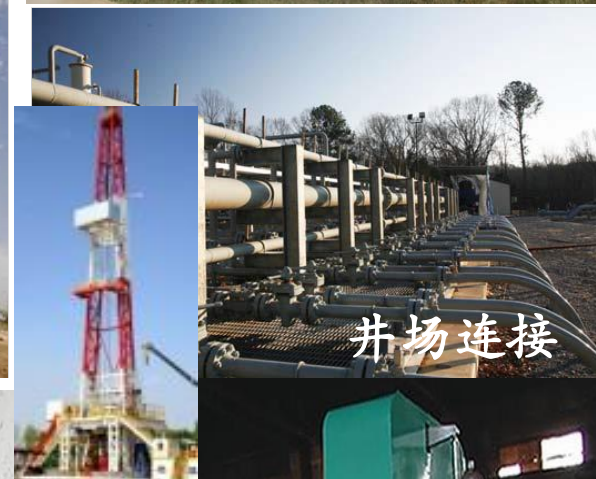
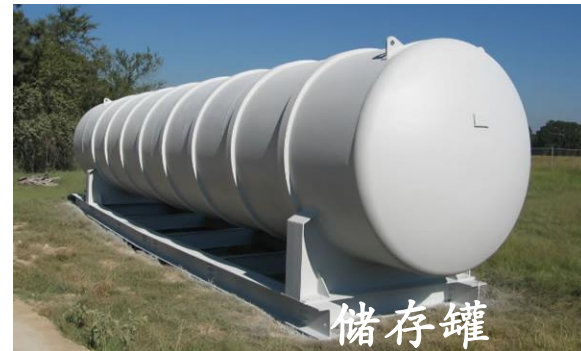




# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## CO<sub>2</sub>咸水层封存的关键设备-共性设备

- 井下设备（抽采、桥塞、封隔器、抽采设备等）
- CO<sub>2</sub>储存设备
- 注入设备（温压控制）
- 井场连接（管阀等）
- 压缩设备
- 等等



**cags**  
钻机

China Australia C  
中澳二氧

封隔器

压缩泵

# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## CO<sub>2</sub>咸水层封存的关键材料

- ❑ 防腐橡胶（耐CO<sub>2</sub>密封元件）
- ❑ 防腐剂（井下设备）
- ❑ 低损伤性的泥浆；
- ❑ 完井水泥（耐CO<sub>2</sub>腐蚀）
- ❑ 冶金管材（气密封套管、油管、钻杆、管网、采油树、钢丝绳等设备材质）
- ❑ 等等





# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## CO<sub>2</sub>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

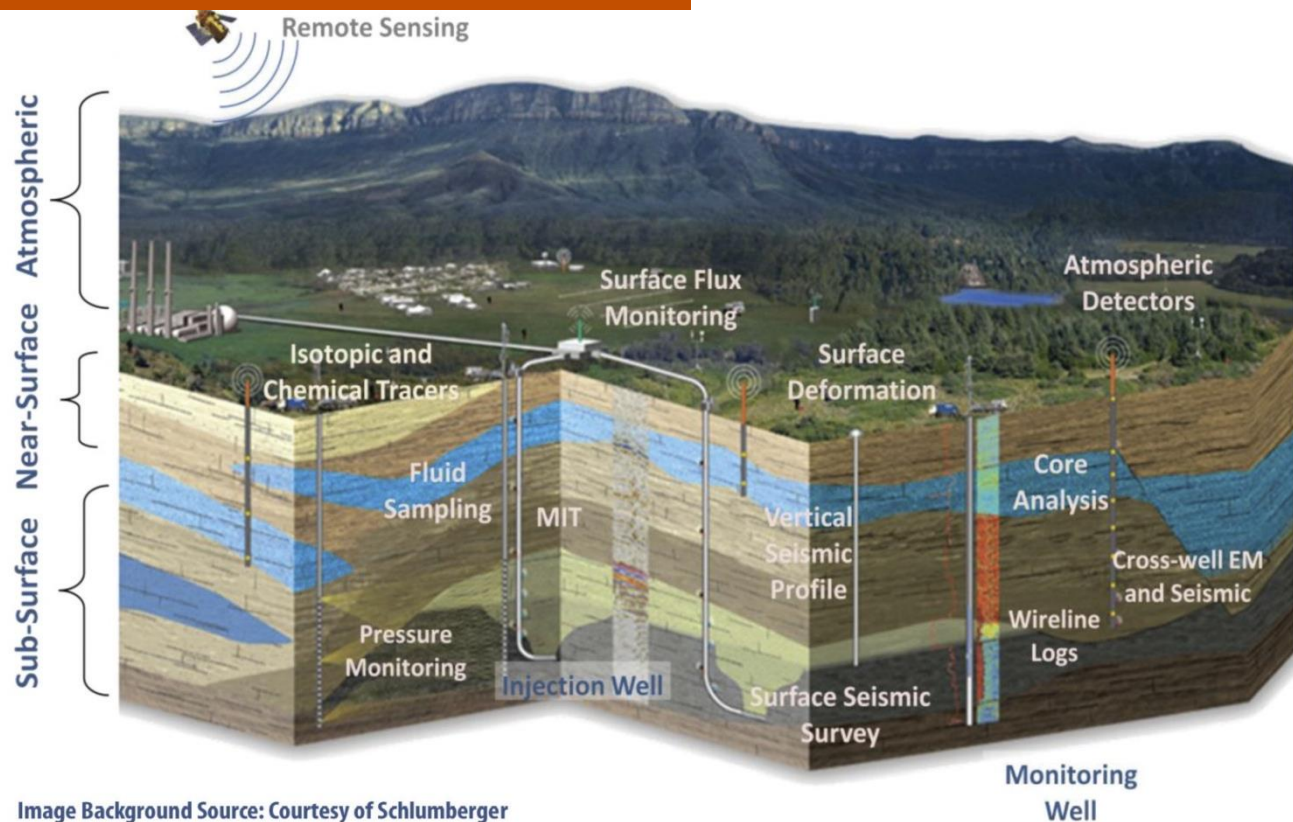


Image Background Source: Courtesy of Schlumberger

特需技术是因为CO<sub>2</sub>地质封存需要研发的，主要集中在场地表征、监测与评估等；它同样也是基于传统技术发展起来的，也是有其研发和产业基础的。

**cags**

China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存





# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单

## CO<sub>2</sub>监测与评价技术

1	3D seismic	21	Aerial spectral imaging
2	Multi-component seismic	22	Multiband echo sounders
3	Geophysical well logging	23	Side-scan sonar
4	Borehole fluid chemistry	24	Surface gravity measure
5	Down hole pressure/temperature	25	Seawater chemistry
6	two-dimensional seismic	26	Individual well electromagnetism
7	Long-term monitoring of downhole pH	27	Cross-borehole resistivity tomography
8	Ttracer agent	28	Fluid geochemistry
9	Cross-borehole seismic	29	Drilling gravity measurements
10	Micro-seismic monitoring	30	Bubble flow chemistry
11	Gas flow rate	31	Dipmeter survey
12	Soil gas concentration	32	Subsea electromagnetic
13	Surface flow	33	Land magnetic survey
14	Vertical seismic profile (VSP)	34	Ecological research system
15	Infrared diode lasers	35	Bummer / Spark sectional
16	Non-dispersive infrared gas analyzer	36	Airborne electromagnetic method
17	Subsea gas sampling	37	High-resolution acoustic imaging
18	Cross-borehole eletro-magnetic wave method	38	Electrical resistance tomography
19	Vorticity covariance	39	Geological radar
20	Satellite interference	40	Electrical spontaneous potential

目前重要的的监测技术，其中3D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、土壤气体浓度和通量检测等技术成熟，是表征阶段基础的监测方法。

额外部分的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 CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>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 CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# 主要内容

- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单
- Inventory of technologies and equipment
- CO<sub>2</sub>咸水层封存项目性能要求
- Performance requirement for CO<sub>2</sub> aquifer storage
- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距
- Gaps between International and Chinese in CO<sub>2</sub> aquifer storage
- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术研发的建议
- Recommendation on R&D activities of CO<sub>2</sub> aquifer storage



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存

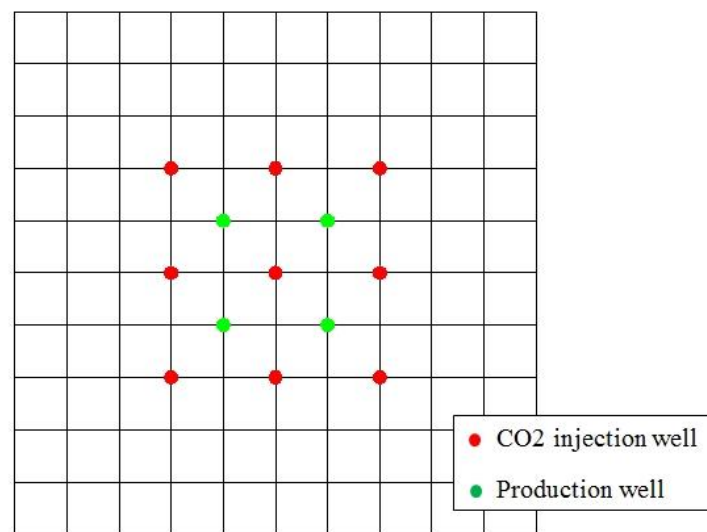
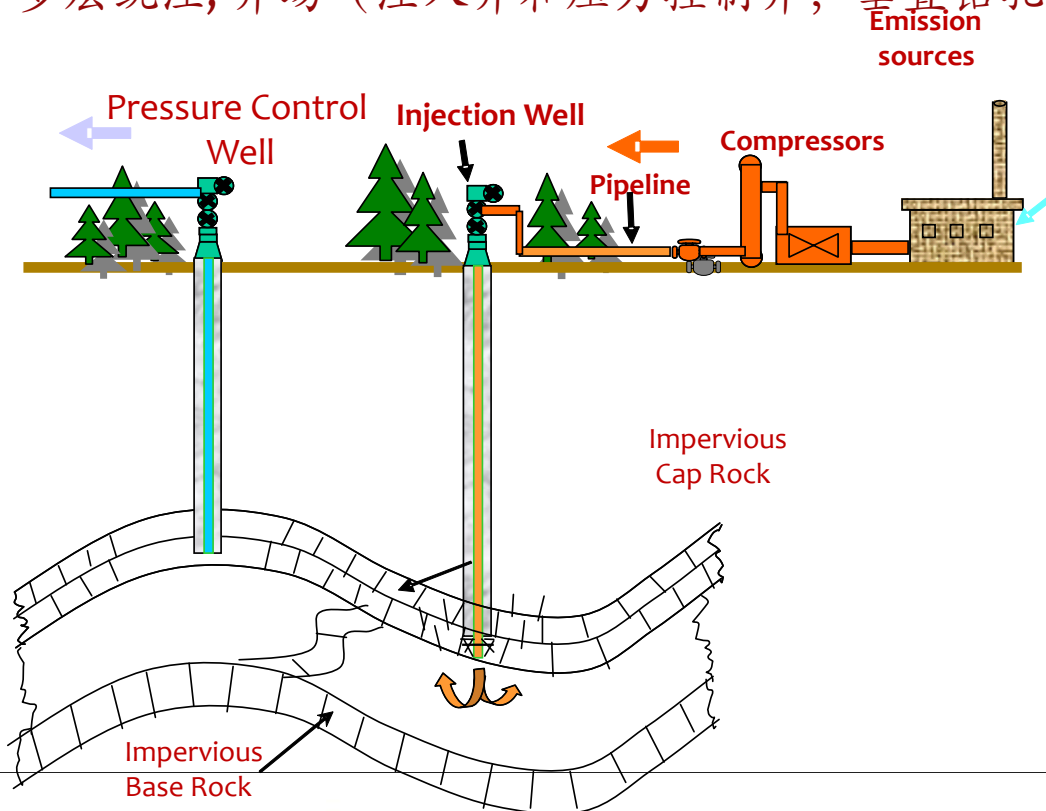




# CO<sub>2</sub>咸水层封存项目性能要求

## CO<sub>2</sub>咸水层封存示范工程设备与性能要求-陆上咸水层封存

陆上CO<sub>2</sub>咸水层封存工程设定的主要参数：规模 1Mt/a；鄂尔多斯典型低孔低渗地层；多层统注；井场（注入井和压力控制井，垂直钻孔深度 3000m）；超临界CO<sub>2</sub>注入。



Well fields (Injection Strategy)

Modified from Schematic map of acid injection in Alberta Basin

CAGS

China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>咸水层封存项目性能要求

## CO<sub>2</sub>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及用途。国内技术与装备基本满足基本的工程需求（参数符合），但是科研方面或工程高要求则需要提升，特需设备块需要特别的研发。

### 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, 1s1ms； 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E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；声系连接长度：3300mm；测量范围：130~650Hz/m；测量精度：2μs/m；测量误差：±3μs/m（在130μs/m~200μs/m时）、±1.5%（在200μs/m~650μs/m时）；径向探测深度：100mm（3.94in）；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（GP: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KX-TFV	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%；土壤容重的测定：精度 0.02 g/m <sup>3</sup> ；土壤总孔隙度的测定：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
井控装备	钻机及配套设备	钻机	ZJ20车载钻机	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;公称通径:2.1/16"~4.1/16"(46mm~103mm)；工作介质:石油、天然气、泥浆；工作温度：-46℃~121℃（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 CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存





# 主要内容

- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单
- Inventory of technologies and equipment
- CO<sub>2</sub>咸水层封存项目性能要求
- Performance requirement for CO<sub>2</sub> aquifer storage
- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距
- Gaps between International and Chinese level
- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术研发的建议
- Recommendation on R&D activities of CO<sub>2</sub> aquifer storage

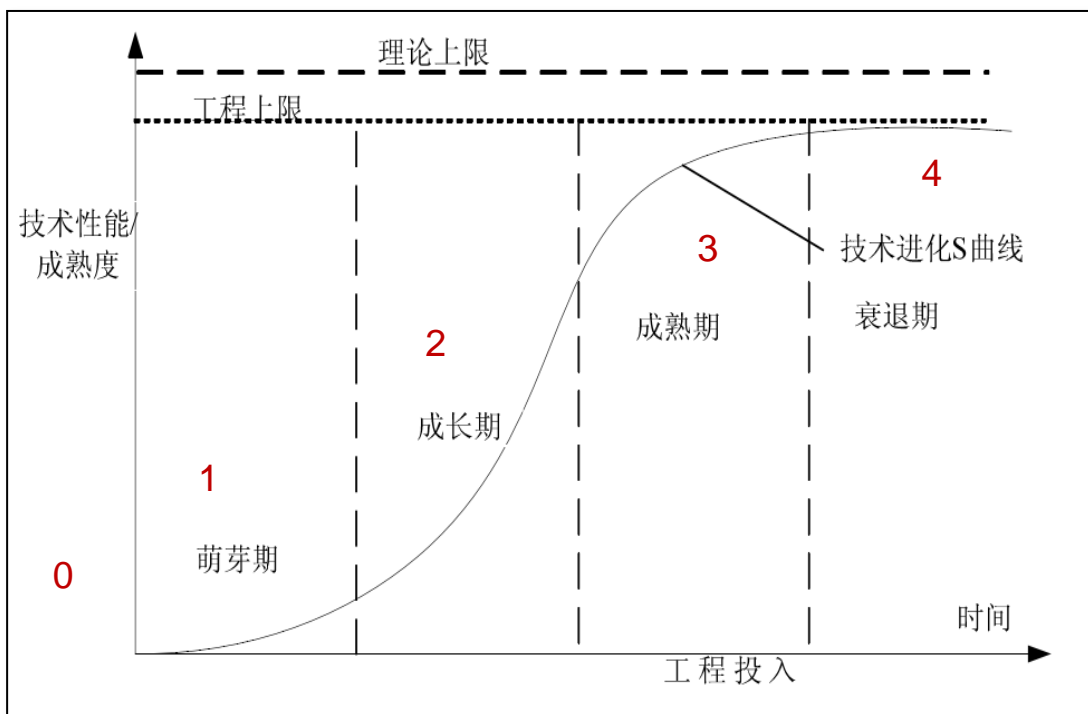


China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距

## 技术成熟度划分



Evaluation of technology readiness level

- 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）； Lab or Bench scale
- 1 基础研究（萌芽期） Basic Research;
- 0 概念阶段； Conceptual study



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距

## TRL-Modified US-DOE methodology

TRL	DOE-FE Definition	Different Stage
1	Basic principles observed and reported (Basic Research)	Conceptual study
2	Technology concept and/or application formulated (Feasibility Research)	Conceptual study
3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept (Feasibility Research)	Conceptual study
4	Component and/or system validation in a laboratory environment (Technology Development)	Laboratory Scale
5	Laboratory-scale similar-system validation in a relevant environment (Technology Development)	Laboratory Scale
6	Engineering/pilot-scale, prototypical system demonstrated in a relevant environment (System Development)	Pilot scale
7	System prototype demonstrated in a plant environment (System Development)	Demo scale
8	Actual system completed and qualified through test and demonstration in a plant environment (Operational Verification)	Full-scale demonstration plant
9	Actual system operated over the full range of expected conditions (Operational Verification)	Full-scale demonstration plant
10	Actual system operated at commercial scale (Commercial Deployment)	Commercial process



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

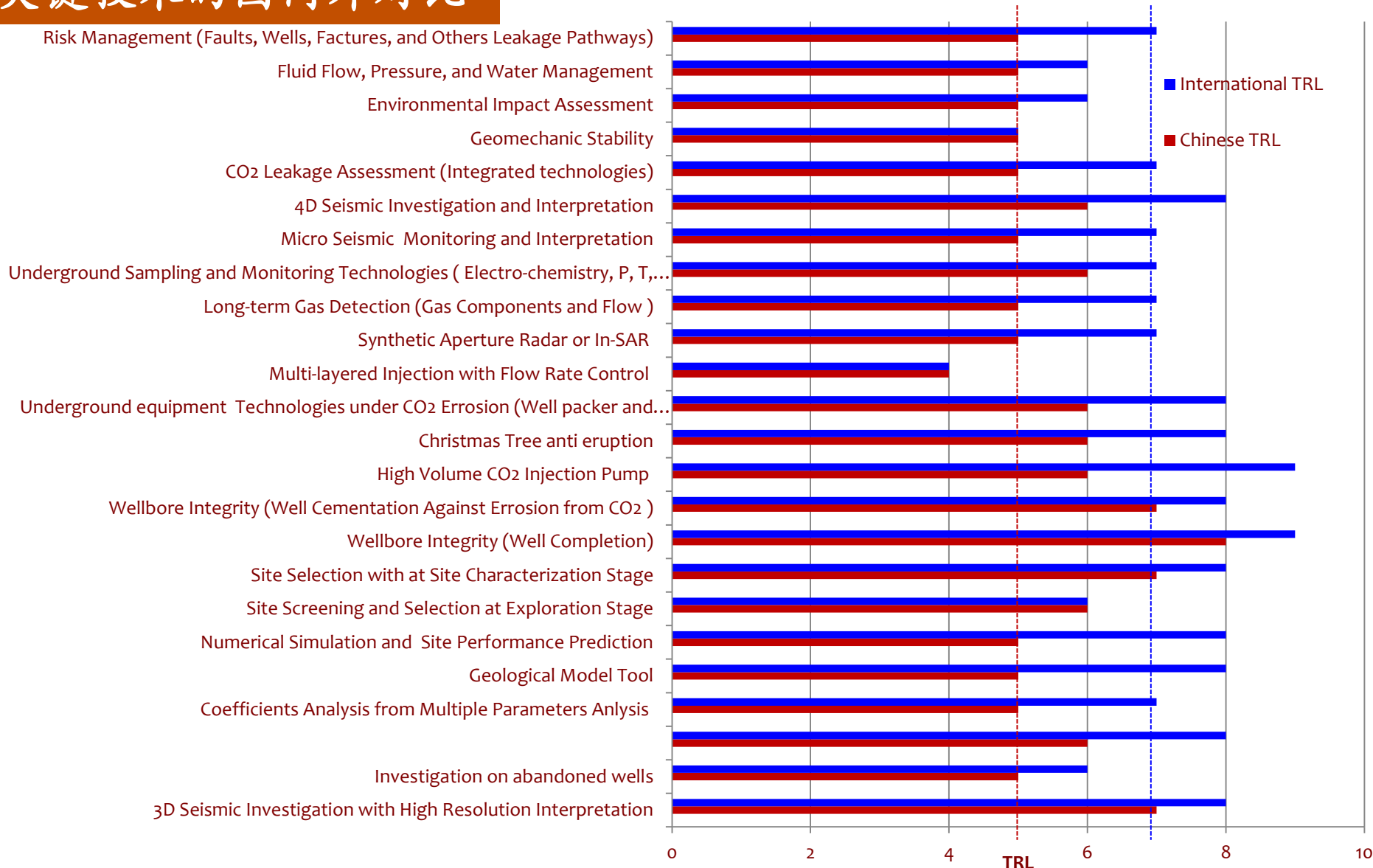
中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距

## 关键技术的国内外对比

国际采用NETL数据，国内基于CCS或者类似研发项目



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距

## 国内外CO<sub>2</sub>咸水层封存差距较小的技术

总体上我国CO<sub>2</sub>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、国内外均不成熟（基础研究、实验室研究、部分先导示范）：

- 储层CO<sub>2</sub>调控技术
- 增渗设备与工艺
- 废弃钻井检测与修复技术
- 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
- 储层动态反分析与预警
- 地层与断层的泄漏补救设备与工艺

等等技术



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存





# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距

## 国内外CO<sub>2</sub>咸水层封存差距较大的技术

CO<sub>2</sub>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
- 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）
- 等技术



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# 主要内容

- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备清单
- Inventory of technologies and equipment
- CO<sub>2</sub>咸水层封存项目性能要求
- Performance requirement for CO<sub>2</sub> aquifer storage
- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术国内外差距
- Gaps between International and Chinese in CO<sub>2</sub> aquifer storage
- CO<sub>2</sub>咸水层封存技术研发的建议
- Recommendation on R&D activities of CO<sub>2</sub> aquifer storage



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术研发的建议

## 技术与设备的基本情况

中国具有大部分CO<sub>2</sub>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；但其与国际顶级技术相比，还有较大差距。主要表现在：

- ① 中国CO<sub>2</sub>咸水层封存技术与装备整体停留在研发与先导阶段，与国际整体示范阶段差距较大。
- ② 细分到下一层次：部分关键技术和装备的核心零部件缺失，关键材料和元件依赖进口；
- ③ 核心软件商业化程度低，包含：地质建模、模拟与分析软件，地层解释软件等；
- ④ 产业结构不合理，低端产能过剩、高端发展滞后，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，改善产业结构与工业附加值是技术研发的核心部分。



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存



# CO<sub>2</sub>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、场地表征技术，国内企业处于追赶状况与调整适应CO<sub>2</sub>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，提高技术与装备的可靠性与精度**，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、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：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. CO<sub>2</sub>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. CO<sub>2</sub>地质封存风险管理相应的装备。



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存





# CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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。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。目前国内企业很少掌握的核心材料与核心元件的制造工艺与知识产权，所以对国内企业的务实要求为：

1. 建立国际联合研发机制，充分利用国内国外两种资源。成熟度较低的技术和装备，吸引更多的企业参与到技术和装备研发（研发体制、研发投入、技术整合、知识产权）。
2. 对中国特点引起的特殊特需技术，同时具有一定研发与产业基础，如：中国国情或地质条件特需的设备与软件技术，如：高精度场地表征与监测技术（3D地震、多层取样监测）、废弃钻井检测技术等。
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. 通过多个工程示范提升和整合所有的CCS技术、装备、软件与人才，整合产业链，形成CO<sub>2</sub>咸水层封存方面的优势力量。
5. 通过产业链整合，从而实现关键设备与关键技术的创新和整体创新。



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存





# CO<sub>2</sub>咸水层封存技术研发的建议

## CO<sub>2</sub>咸水层封存技术研发建议

- 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，需要重视，缩小差距，提升核心技术程度，特别是知识产权方面。

对于我国CO<sub>2</sub>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关键技术研发，或者短期可以突破精度和可靠性的技术与装备，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)；
- 耐腐蚀井下与地表设备；
- 深层流体取样与监测技术；
- 地表监测技术；

等等技术领域



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



敬请各位专家批评指正！

Ning Wei

Email: [Nwei@whrsm.ac.cn](mailto:Nwei@whrsm.ac.cn)



China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存

