



典型场地二氧化碳咸水层封存的适宜性与可行性研究

报告人：王万福

中国石油安全环保技术研究院

二零一三年七月二日



汇报提纲

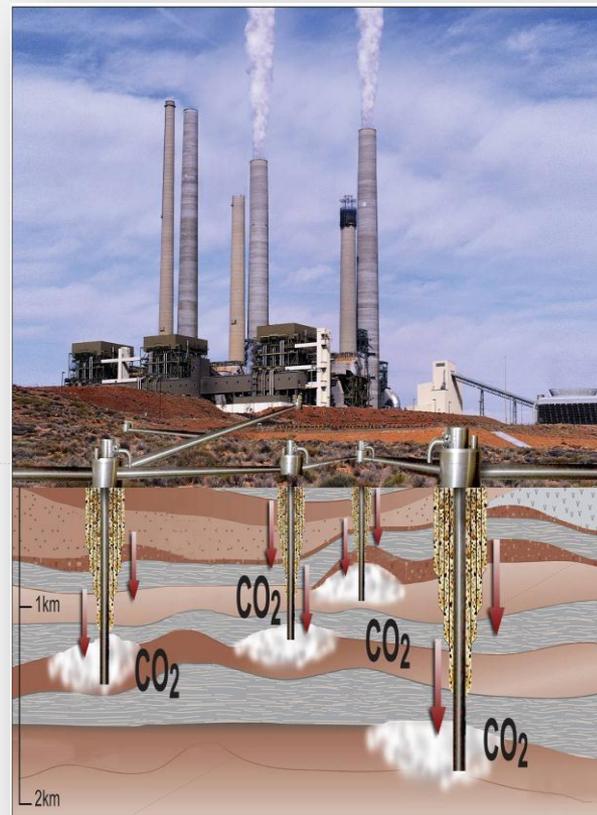
- 一、项目背景
- 二、封存机理认识
- 三、研究方案设想
- 四、封存潜力与选址方法研究
- 五、典型场地研究
- 六、结束语



一、项目背景

1、为二氧化碳减排寻求有效途径与技术是既必要又紧迫

- 作为世界上能源消耗和二氧化碳排放的大国之一，**我国节能减排任务艰巨**，节能减排已成为我国的一项基本国策；
- 为应对气候变化工作，2009年我国政府确定了**到2020年单位国内生产总值(GDP)二氧化碳排放比2005年下降40%-45%**的温室气体行动目标；
- 目前，我国富煤、少油、缺气的能源资源状况决定了**我国在未来很长一段时间内煤炭依然是主要能源**，其燃烧仍将排放大量的二氧化碳。



CCS技术示意图



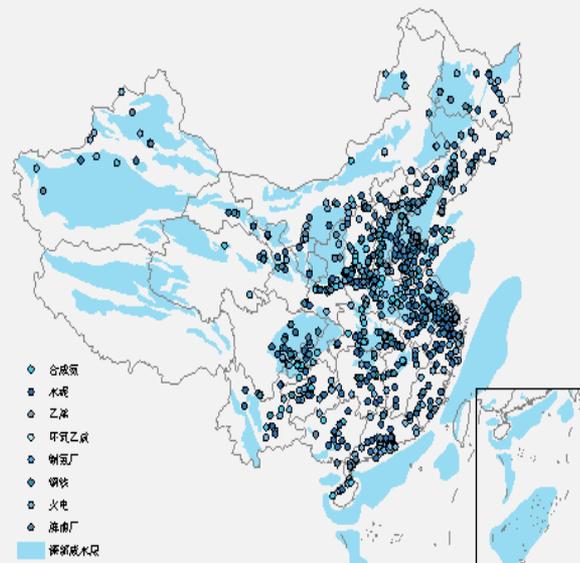
一、项目背景

2、二氧化碳咸水层封存是减少温室气体排放的有效措施

■ 根据国际能源组织预测，CCS对二氧化碳减排的贡献度为19%左右，**是各种减排技术中贡献度最大的单项技术**；

■ 全球研究数据表明，咸水层封存潜力比油气田、深部煤层气田封存潜力都要大，**我国咸水层封存潜力占地质封存潜力的90%以上**；

■ 咸水层圈闭结构分布普遍，**与高浓度CO₂排放源匹配性较好**，减少运输（以及综合）成本。



我国咸水层和CO₂集中排放源地理分布

◆ 然而，中国在这方面的研究才起步不久，**其可行性及封存能力与风险尚未系统研究**，存在许多科学与技术问题没有解决。



一、项目背景

3、中国石油非常重视二氧化碳咸水层封存的研究

■ 近年，中国石油在积极开展“二氧化碳提高石油采收率的资源化利用及地下埋存”取得重要进展和成果的基础上，又将“二氧化碳咸水层封存”列入“中国石油低碳关键技术研究”重大科技专项的重点攻关内容。

■ 以中国石油低碳专项为依托，中国石油安全环保院牵头，汇聚我国二氧化碳地质封存研究领域的研究力量和油田企业（吉林油田、新疆油田等）组成了“二氧化碳地质封存联合项目组”。

◆ 下面我要汇报的内容也是联合项目组在“二氧化碳咸水层封存研究”获得的一些初步认识与工作进展。



汇报提纲

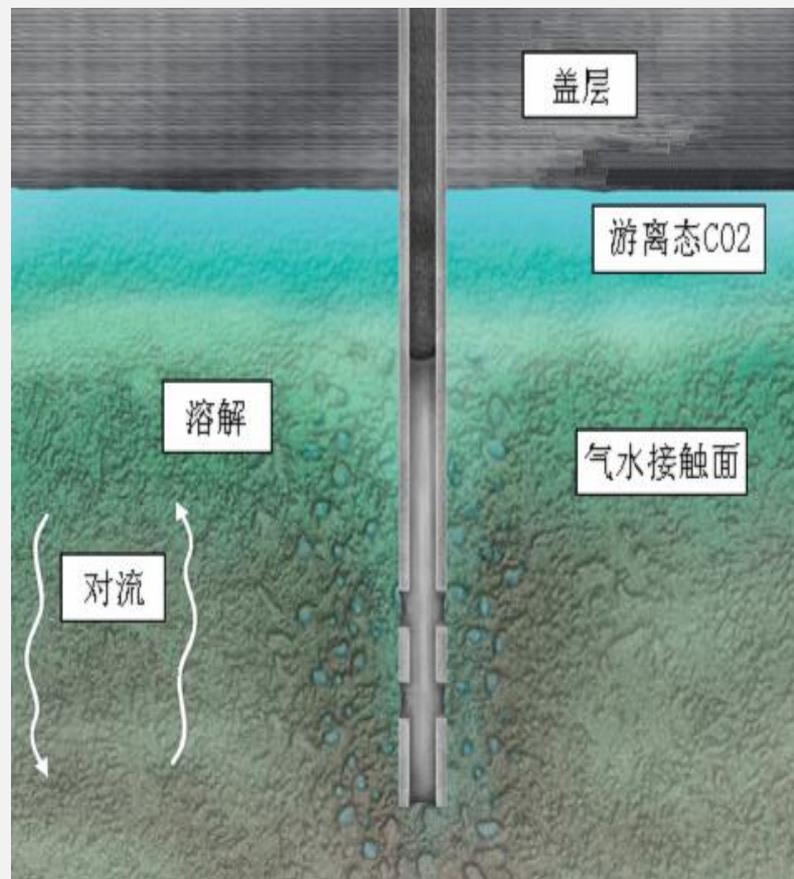
- 一、项目背景
- 二、封存机理认识
- 三、研究方案设想
- 四、封存潜力与选址方法研究
- 五、典型场地研究
- 六、结束语



二、封存机理认识

1、CO₂地质埋存机理

- **构造埋存**
圈闭地质体（背斜、阻隔断层等）
- **残余气埋存**
重力、粘滞力、毛细力
- **溶解埋存**
CO₂溶解于水，生成碳酸、重碳酸
- **矿物埋存**
长石 + 粘土 + CO₂ → 高岭石 + 方解石 + 白云石 + 菱铁矿 + 石英
(碎屑岩)



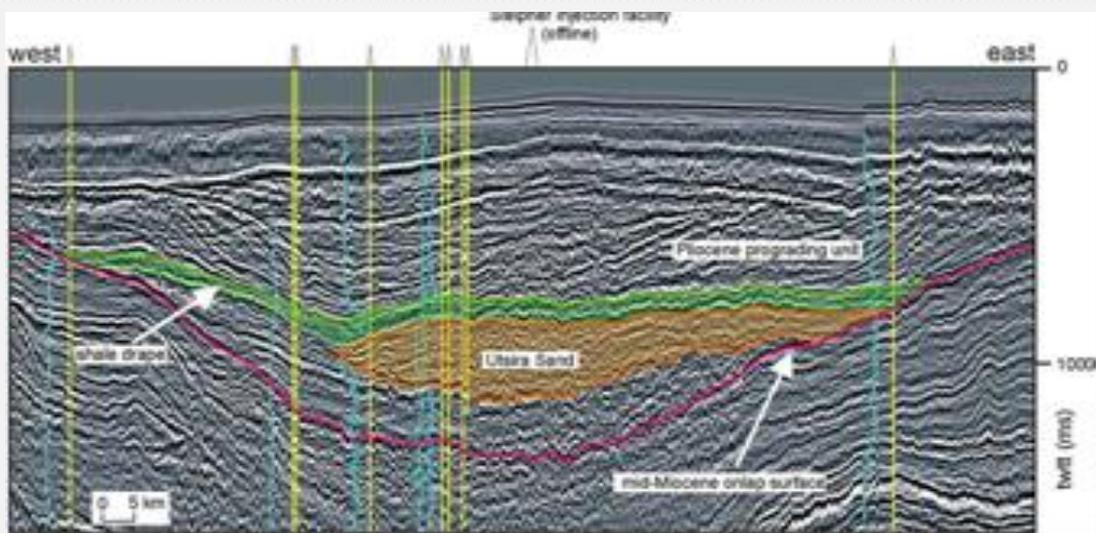
CO₂注入和运移示意图



二、封存机理认识

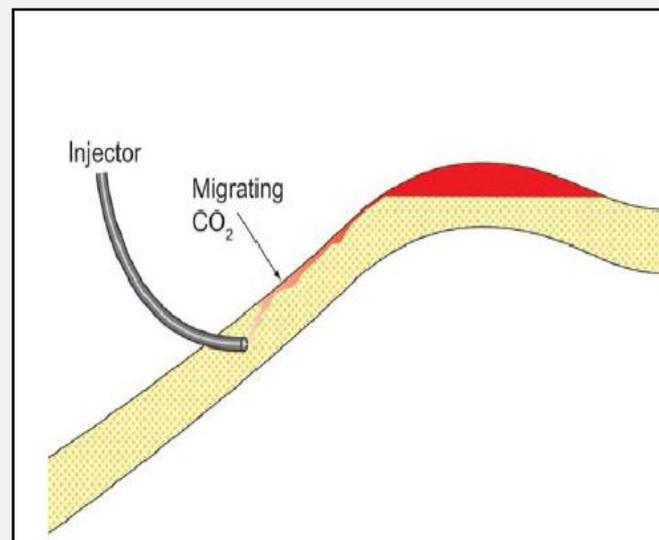
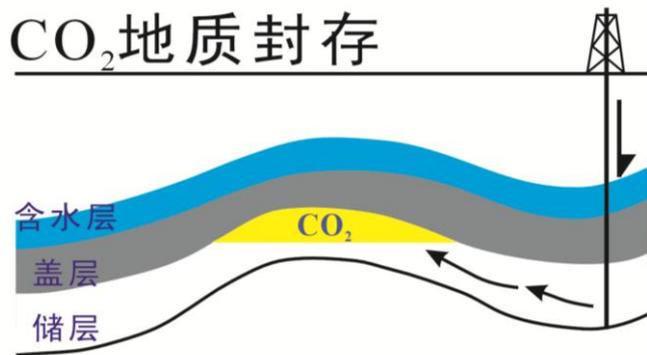
1) 构造圈闭埋存

➤ 构造圈闭是咸水层CO₂封存的基本地质体，CO₂注入咸水层后，受储层非均质性和浮力作用下聚集在构造圈闭顶部，形成构造圈闭埋存。



Sleipner 项目的一条地震剖面

CO₂地质封存

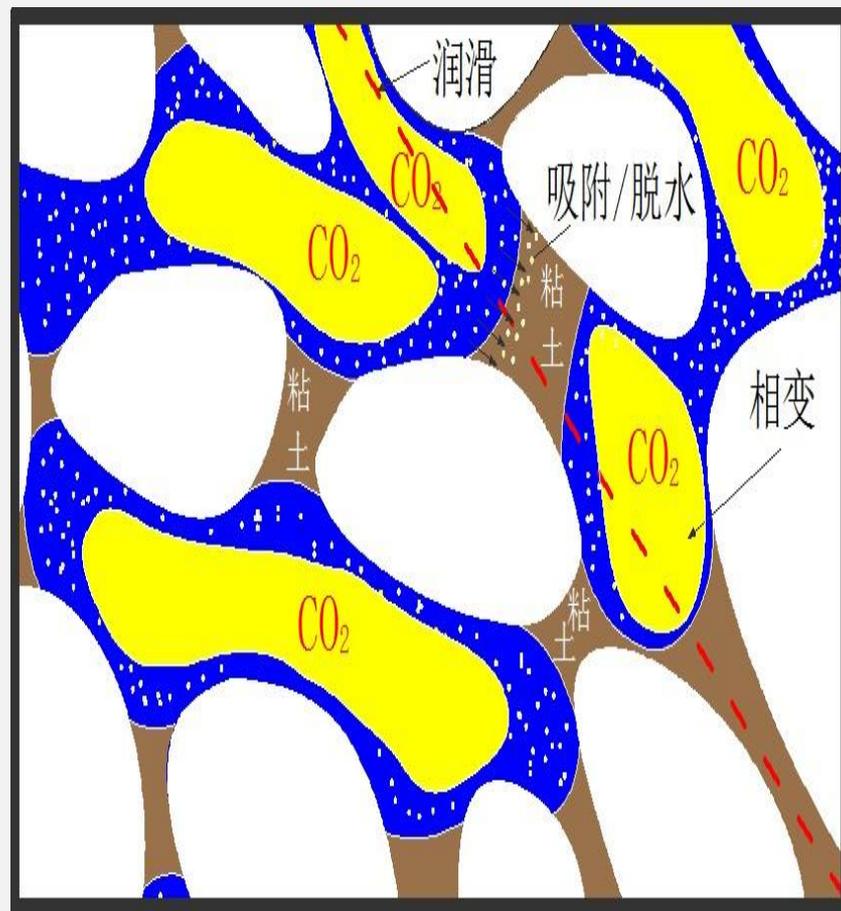




二、封存机理认识

2) 残余气(毛细管)埋存

➤ 因 CO_2 的**浮力**不足以克服孔隙喉道的**毛细管突破压力**，从而使其在注入的运移过程中从连续相中分离出来，并被**隔封**在毛细孔隙空间内，这种捕集机制被称为残余气（毛细管）捕集。



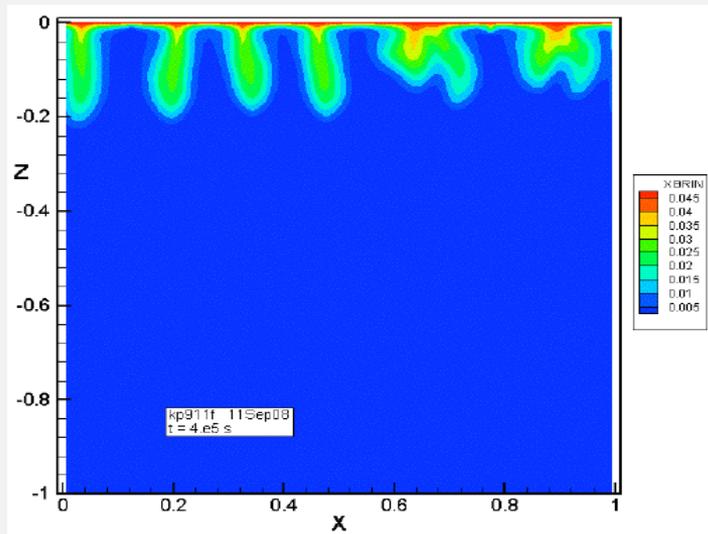
残余气埋存示意图



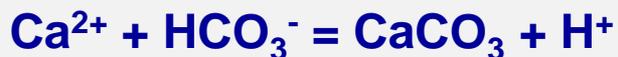
二、封存机理认识

3) 溶解埋存

➤ 注入咸水层中的 CO_2 ，部分会在咸水中溶解，溶解量的大小取决于存储介质的温度、压力和盐度的变化。



➤ 溶解在水中的 CO_2 ，会与水中的Ca、Mg、Fe等离子发生反应，生成碳酸盐矿物，有利于提高其溶解度：



溶解化学平衡

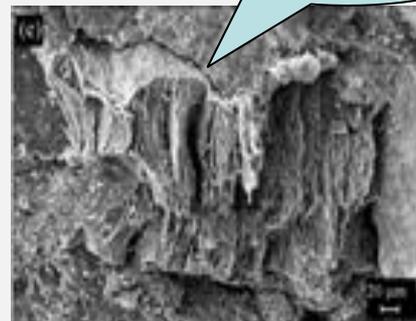
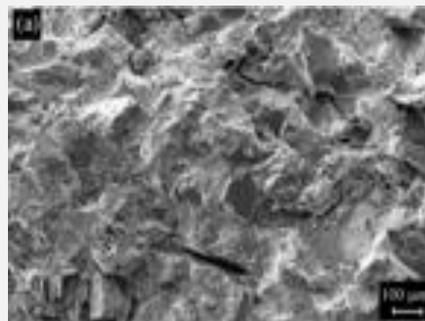
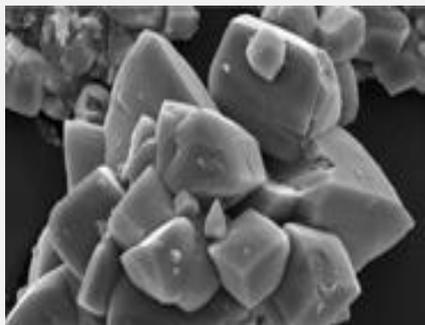
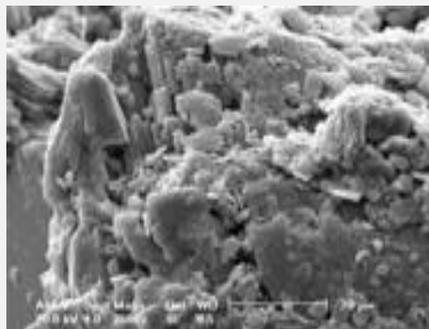


二、封存机理认识

4) 矿物埋存

- 随着 CO_2 溶解量和存储时间的增加，其将与难容离子和岩石发生化学反应形成新的矿物，即为矿物埋存，也被认为是最持久、最稳定的埋存方式。
- 溶解的 CO_2 与岩石中的矿物质发生化学反应形成离子类物质，经过数百万年， CO_2 将转化为坚固的碳酸盐矿物(碎屑岩储层)或 HCO_3^- 离子(碳酸盐岩储层)，从而将 CO_2 永久的封存。
- 硅质碎屑岩：长石+黏土+ $\text{CO}_2 \rightarrow$ 高岭石+方解石+白云石+菱铁矿+石英

SEM图像

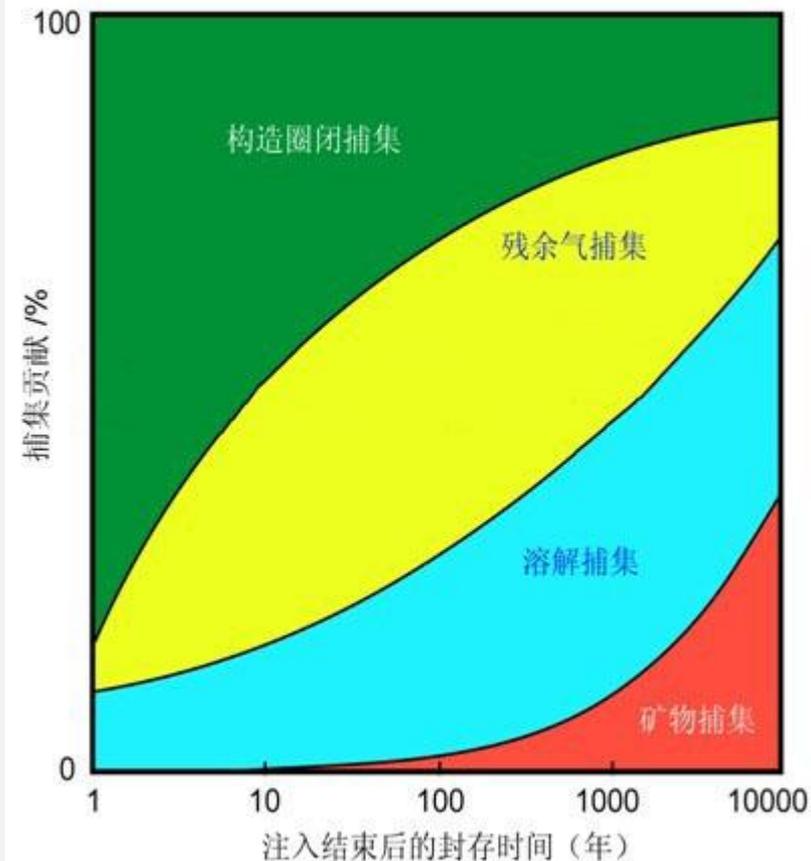




二、封存机理认识

■ **综合认为：** 以上4种封存机理并不孤立，它们在埋存时间内都在起作用，并随着时间的推移，各种机理作用的强弱也随之变化。各种机理的作用大小及其变化也受储层物性、构造圈闭等**六大主控因素**的影响所致。

主控因素	主要指标
储层物性特征	孔隙度、渗透率等
储层岩性特征	碎屑岩、碳酸盐岩等
构造圈闭	圈闭形态、等封闭性
水-气-岩作用	地球化学反应等
盖层条件	厚度、力学性质等
流体环境	温度、地层水矿化度等



各种埋存机理随时间变化的贡献比例 (CLSF, 2007)



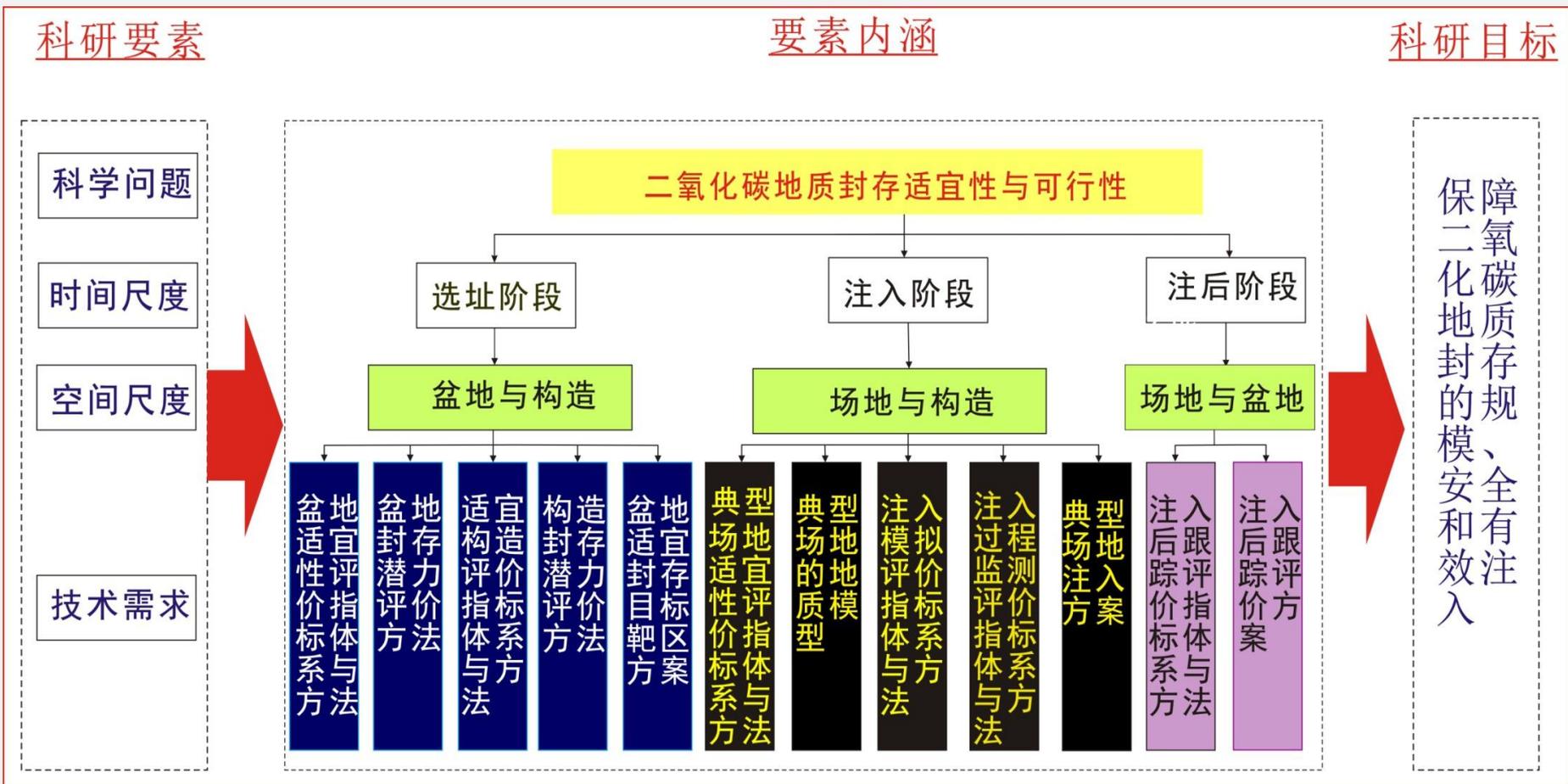
汇报提纲

- 一、项目背景
- 二、封存机理认识
- 三、**研究方案设想**
- 四、封存潜力与选址方法研究
- 五、典型场地研究
- 六、结束语



三、 研究方案设想

1、 研究架构



◆ 典型场地二氧化碳地质封存适宜性与可行性研究的总体架构图



三、研究方案设想

2、研究目标

针对我国将加强二氧化碳咸水层封存的**科学试验与工程验证**的急需，研究建立 CO₂咸水层封的**适宜性与可行性**评价体系与方法，通过对典型场地**封存潜力、安全性与注入性**的评价研究及工程示范，最终：

- 为咸水层二氧化碳地质封存的选址、注入方案设计、注入过程监测与注后跟踪的整体技术体系建设提供理论基础；
- 为相关法规和标准的建立提供科研依据；
- 为二氧化碳咸水层封存工程提供技术支持。



3、研究思路

总体思路：充分**借鉴和总结**国内外已有研究成果，围绕**科学评价、规模注入、安全封存、全程跟踪**四个关键环节，将**不同空间及时间尺度上的技术需求**作为研究对象，**重点做好3项工作，完成7项任务（25项具体研究内容）**。

■ 3项工作

- 研究开发出二氧化碳咸水层封存的适宜性评价指标体系与评价方法、注入模拟评价指标体系与评价方法，以及注入过程监测与注入后跟踪评价指标体系与评价方法；
- 依托油田已有丰富地质资料，研究评价出典型沉积盆地适宜咸水层封存的圈闭构造、封存潜力与典型封注试验场地；
- 研究提出典型场地的注入方案与跟踪评价方案，并开展封注试验。



■ 7项任务

- (1) 二氧化碳封存适宜性评价指标体系研究
- (2) 典型沉积盆地二氧化碳封存的适宜性研究
- (3) 适宜二氧化碳封存的典型场地选址研究
- (4) 典型场地储-盖层的适宜性评价研究
- (5) 典型场地二氧化碳封存的注入方案研究
- (6) 典型场地二氧化碳封存的跟踪评价方案研究
- (7) 典型场地二氧化碳封存的工程方案及示范研究



(1) 二氧化碳封存适宜性评价指标体系研究

- 1) 典型沉积盆地油气藏、二氧化碳气藏等储盖层的成藏地质条件类比研究；
- 2) 典型沉积盆地活动断层、场地稳定性、生态环境等适宜性评价关键指标研究；
- 3) 建立盆地级二氧化碳封存潜力与适宜性评价指标体系和评价方法；
- 4) 建立典型沉积盆地咸水层封存GIS评价系统。



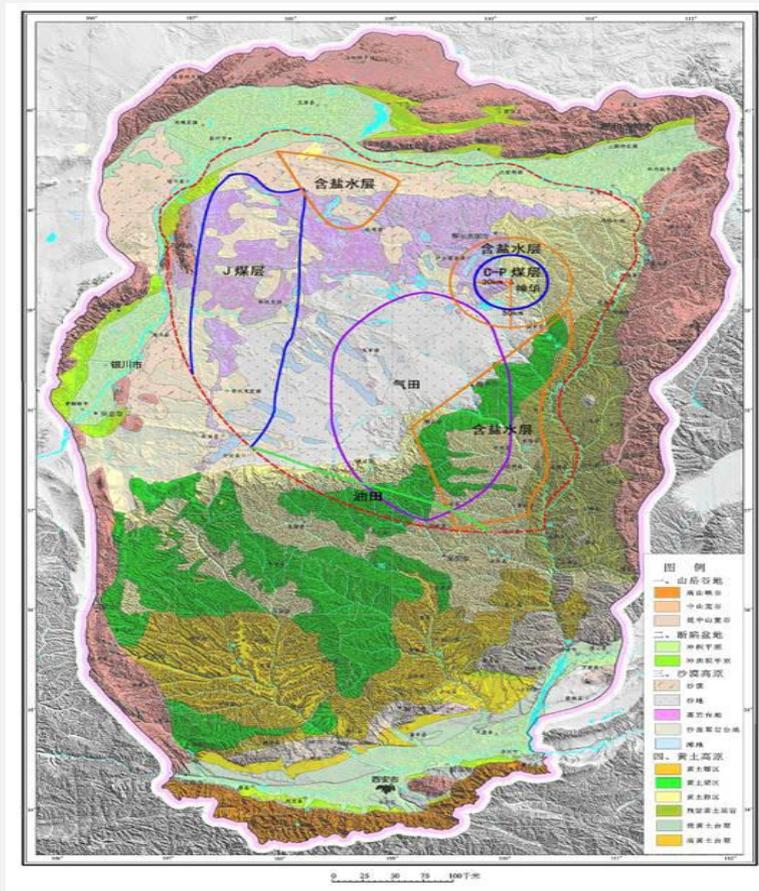
北海盆地Sleipner项目区域位置图

■ 提供CO₂埋存潜力与适宜性的评价方法



(2) 典型沉积盆地二氧化碳封存的适宜性研究

- 1) 盆地级储、盖层岩性及其厚度、孔隙度、渗透率等适宜性评价指标研究；
- 2) 活动断裂与地壳稳定性、土地利用及土地覆盖等适宜性评价指标研究；
- 3) 典型盆地二氧化碳地质封存适宜性与潜力评价研究；
- 4) 典型盆地中适宜二氧化碳地质封存的目标靶区研究。



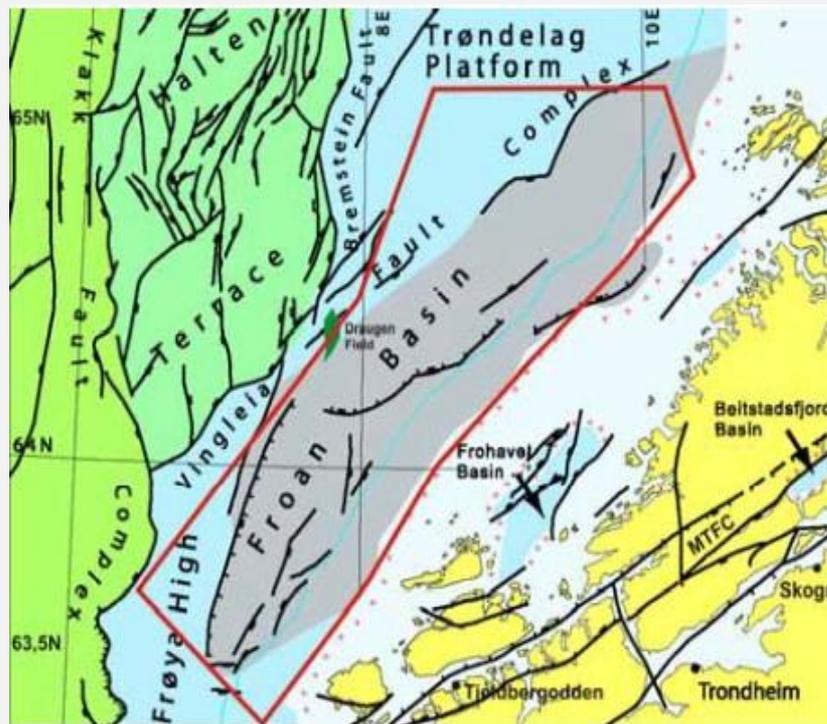
鄂尔多斯盆地封存目标靶区

■从盆地提供适宜CO₂埋存的目标靶区



(3) 适宜二氧化碳封存的典型场地选址研究

- 1) 适宜二氧化碳封存的选址指标体系与评价标准研究；
- 2) 适宜二氧化碳封存的典型场地优选研究；
- 3) 典型封存场地的封存潜力评价研究。



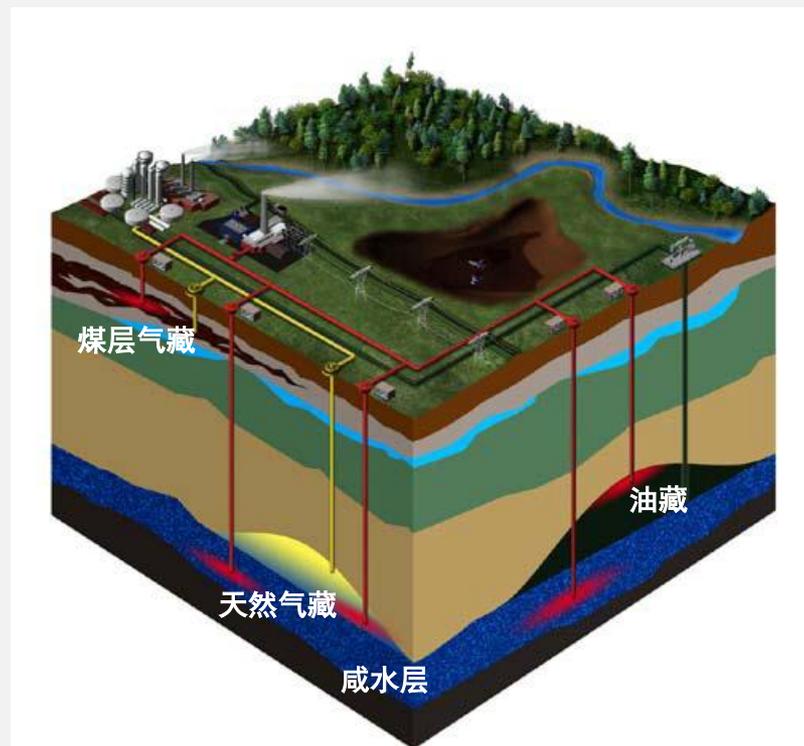
地质构造轮廓图显示挪威中部三个具埋存潜能的位置

■ 提供适宜CO₂安全埋存的目标地质体与潜力



(4) 典型场地储-盖层的适宜性评价研究

- 1) 典型场地储-盖层的地质特征研究;
- 2) 典型场地储-盖层物理化学稳定性研究, 目标圈闭构造的封存机理分析;
- 3) 典型场地封存的安全风险评估研究;
- 4) 典型场地的地质模型建立。



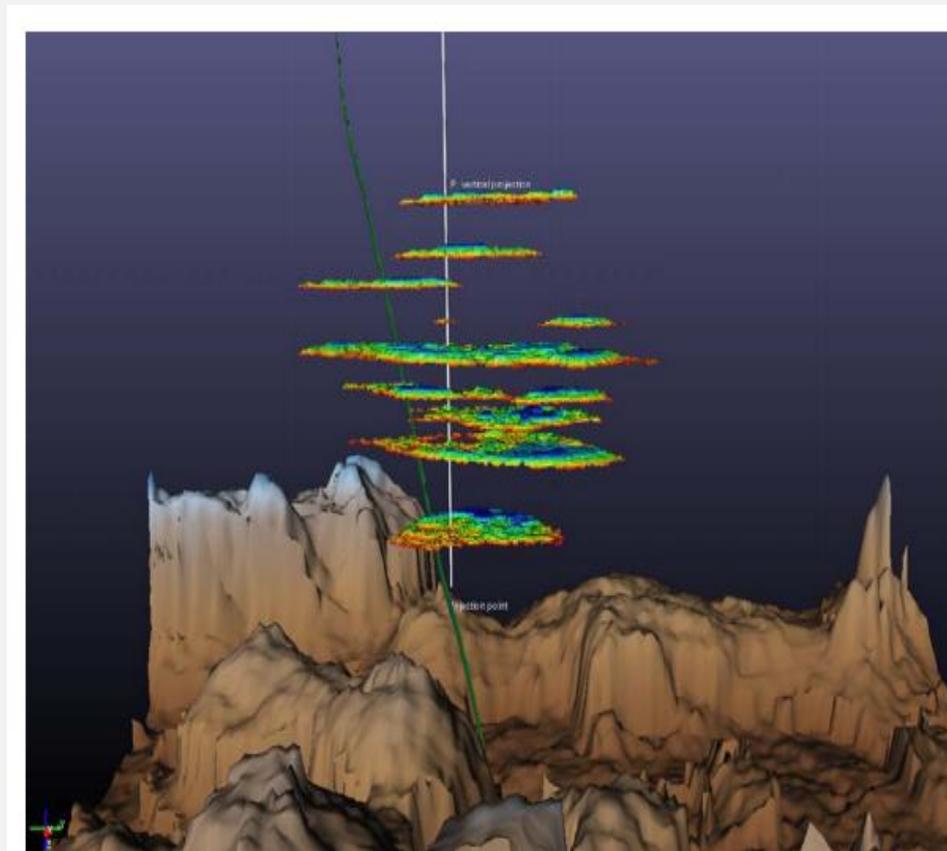
CO₂埋存地质体示意图(from ARC)

■ 提供CO₂安全埋存目标地质体的地质模型



(5) 典型场地二氧化碳封存的注入方案研究

- 1) 典型场地二氧化碳—咸水—岩石耦合流动特征实验研究；
- 2) 典型场地二氧化碳注入动态特征影响因素研究；
- 3) 典型场地二氧化碳地下封存工程注入方案的优化研究。

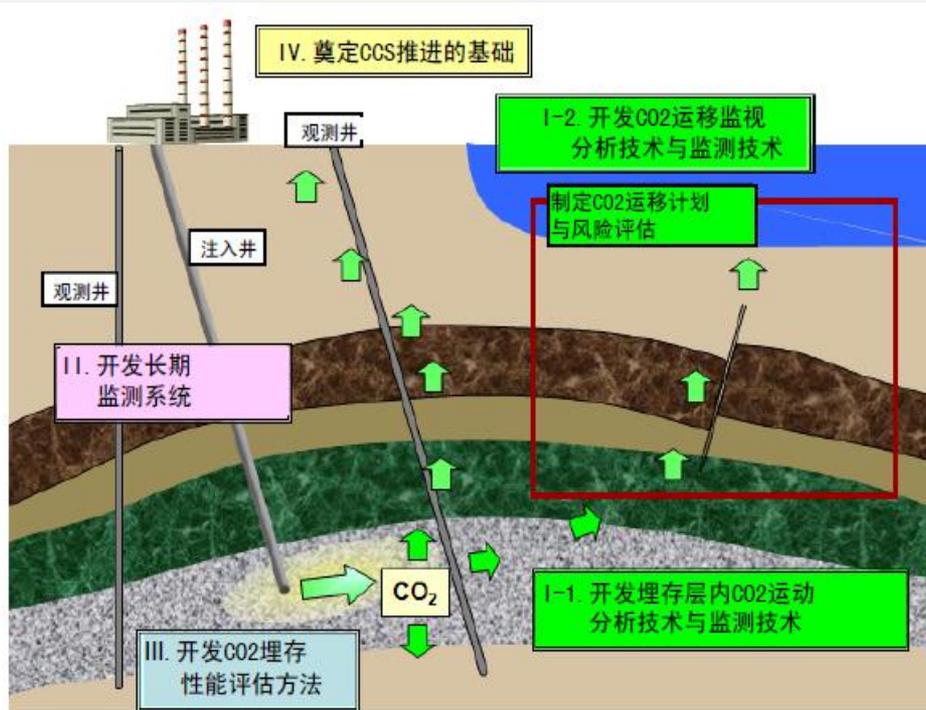


■ 提供CO₂安全埋存的注入方案



(6) 典型场地二氧化碳封存的跟踪评价方案研究

- 1) 跟踪评价指标体系与评价方法研究；
- 2) 工程测试与跟踪监测技术方法的优选研究；
- 3) 工程测试与跟踪监测方案的优化研究。



CO₂地质埋存安全性评价及监控体系

- 提供确保CO₂安全埋存的保障手段



(7) 典型场地二氧化碳封存的配套工程方案及示范研究

- 1) 配套工程方案的优化研究；
- 2) 示范工程建设研究；
- 3) 示范工程注入与监测研究；
- 4) 示范工程注后与跟踪评价研究。

■ 提供CO₂埋存的具体实施及工程技术方法，获取成套试验数据



黑59区块CO₂驱地面工程示意图



汇报提纲

- 一、项目背景
- 二、封存机理认识
- 三、研究方案设想
- 四、封存潜力与选址方法研究**
- 五、典型场地研究
- 六、结束语



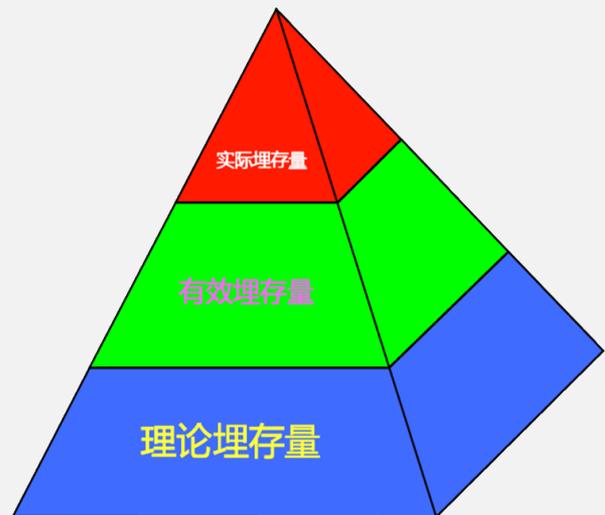
四、封存潜力与选址方法研究

1、封存潜力分类认识

■ **理论埋存量**：表示在储层孔隙空间中 CO_2 可以完全充填在其中，在地层流体中 CO_2 可以以最大的饱和度溶解其中，是一个最高上限的埋存潜力。

■ **有效埋存量**：从技术层面上考虑了储层性质、储层封闭性、埋存深度、储层压力系统及孔隙体积等因素影响的埋存量。

■ **实际埋存量**：考虑到技术、法律及政策、基础设施和经济条件等因素影响的埋存量，如能源与矿产资源评价中的探明储量，需针对实际情况进行计算。



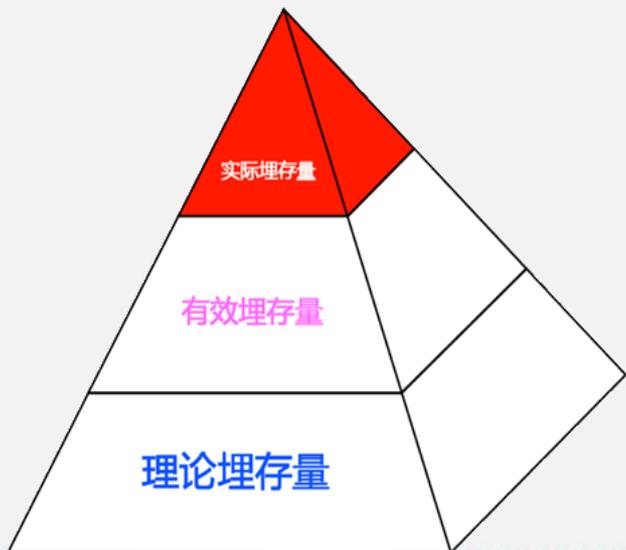


2、盆地规模金字塔3级埋存量计算的认识

(1) 理论埋存量计算: $M_t = C \cdot A \cdot h \cdot \phi \cdot \rho_{CO_2}(P, T)$

(2) 有效埋存量计算: $M_e = C \cdot A \cdot h \cdot \phi \cdot \rho_{CO_2}(P, T) \cdot S_{eff}$

(3) 实际埋存量计算: $M_p = C \cdot A \cdot h \cdot \phi \cdot \rho_{CO_2}(P, T) \cdot S_{eff} \cdot (1 - S_{wirr})$



式中:

M_t : CO_2 的理论埋存量, 10^5t ;

C : 含水层面积与评价区域面积的百分比, 小数;

A : 评价区域面积, km^2 ;

h : 咸水层平均厚度, m ;

Φ : 咸水层平均孔隙度, 小数;

$\rho_{CO_2}(P, T)$: CO_2 在咸水层平均温度压力条件下的密度, kg/m^3 ;

S_{eff} : 存储系数, 一般根据埋存方式估计, 小数, 一般1%-10%之间, 常取经验值2%;

S_{wirr} : 波及系数, 一般根据数值模拟或野外试验确定, 小数;

S_{wirr} : 孔隙最低含水率, 一般根据数值模拟或野外试验确定, 小数。



3、埋存量的优化算法

■ 基本思路

- 理论上，咸水层中CO₂的总埋存量应该是四种埋存形式的总和；
- 由于矿物埋存的发生需要很长的时间，况且其是在溶解埋存的基础上发生，其在潜力计算可忽略。
- 可通过分别估算三种埋存机理的埋存量来估算CO₂ 总埋存量。

优化算法基本思路

$$M_{\text{总}} = M_{\text{自由气}} + M_{\text{残余气}} + M_{\text{溶解}} + M_{\text{矿物}}$$

$$M_{\text{总}} = M_{\text{自由气}} + M_{\text{残余气}} + M_{\text{溶解}}$$

总埋存量



■ 埋存容量的计算

$$M_{CO_2} = Ah\phi\rho_{CO_2}(C_{eff} + m) \times 10^{-3}$$

其中：

$$C_{eff} = (a+b)(S_g^{struc} + S_w^{struc} X_w^{CO_2} \rho_w / \rho_{CO_2}) + cX_w^{CO_2} \rho_w / \rho_{CO_2}$$

■ 有效孔隙体积的利用率 (u) 和存储效率 (D) 的计算：

$$u = Q_{CO_2} / M_{CO_2}, \quad D = C_{eff} u$$

以上三个公式中：

C_{eff} ：整个咸水层的有效容量系数；

S_g^{struc} ：构造圈闭控制区内 CO_2 气体饱和度；

S_w^{struc} ：构造圈闭控制区内残余水饱和度，(1- S_g^{struc})；

a ：构造圈闭控制区体积比例系数；

b ：残余饱和度圈闭控制区折合成构造圈闭控制区后的体积比例系数；

c ：溶解圈闭控制区体积比例系数；

M_{CO_2} ：咸水层 CO_2 埋存容量 (10^6t)；

A ：咸水层覆盖面积 (km^2)；

h ：咸水层厚度 (m)；

ϕ ：孔隙度；

m ：矿物圈闭系数；

Q_{CO_2} ：工程期限内埋存的 CO_2 总量 (10^6t)。

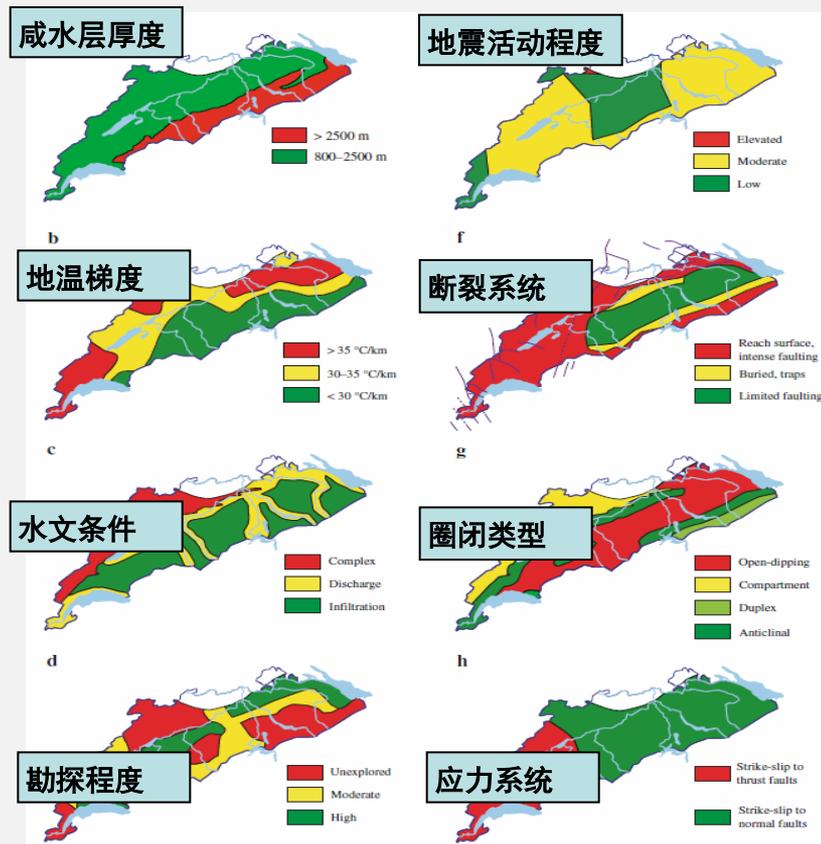


四、封存潜力与选址方法研究

4、适宜性评价指标体系与方法

■ 评价指标体系

借鉴国外工程实践的经验，结合我国陆相沉积的地质特征，从地质学角度，研究提出了盆地级选址的指标体系。其中，包括**咸水层埋深、地温梯度、水文条件、勘探程度、地震活动程度、断裂系统、圈闭类型和应力系统**等8个方面。



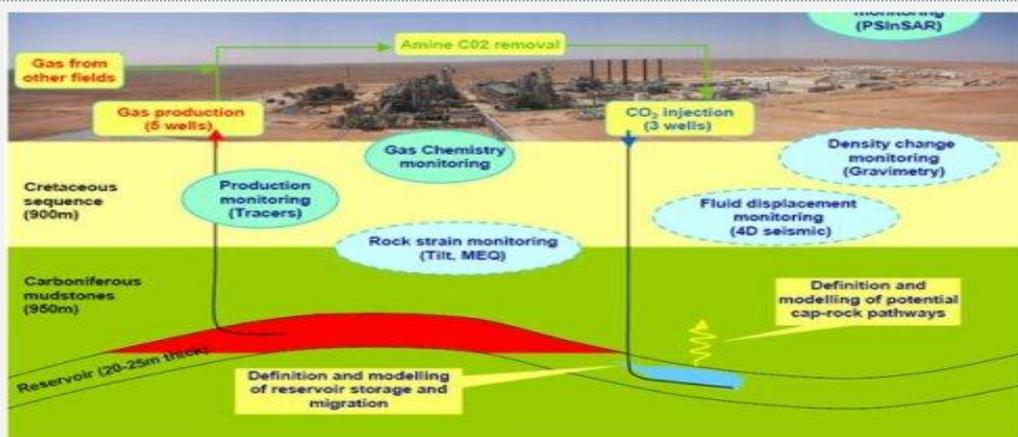
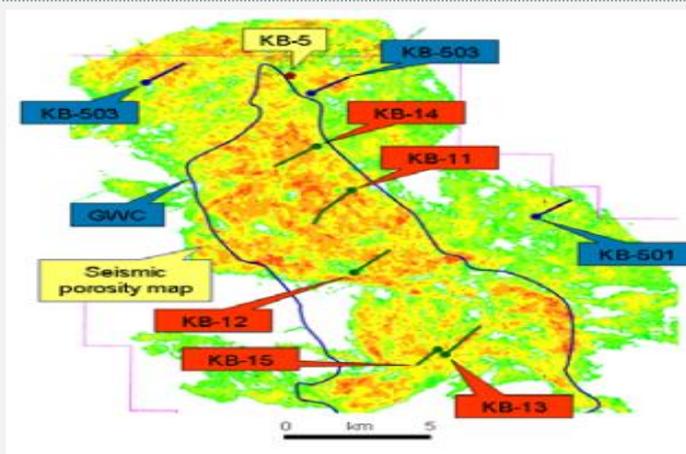
瑞士Molasse盆地区域参数级别分布图



■ 适宜地质特征

经对全球CO₂咸水层埋存项目地质条件统计分析，适宜碳封存的咸水层具备如下地质特征：

- **构造特征**：盆地构造稳定，地震活动少；
- **水动力条件**：盆地水动力系统埋藏深、区域规模，随地形地貌起伏；
- **地热特征**：冷盆比热盆更利于CO₂以高密度埋存，增加埋存量；
- **盆地的勘探程度**：盆地勘探程度高，井网密度等资料详细。



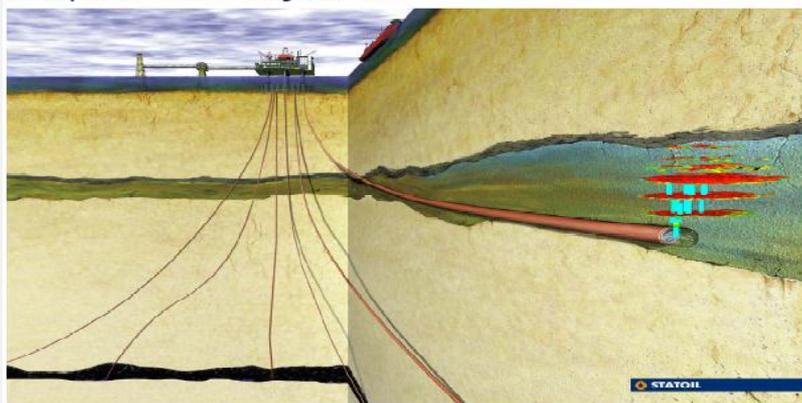
In Salah气田示范工程平面和剖面图



5、典型构造筛选评价标准

■充分调研全球CO₂咸水层封存项目的地质条件，从储层和盖层特征等要求，研究提出了适宜CO₂封存的典型构造筛选评价标准。

Sleipner CO₂ Injection



挪威Sleipner CO₂埋存项目

全球CO₂咸水层封存项目地质条件统计情况

参数	最小值	最大值	峰位
孔隙度	13	37	22
渗透率	5	5000	887
深度	650	2550	1487
厚度	15	343	110
盖层厚度	30	1500	340
温度	28	103	50
压力	7.3	40	15.5

适宜CO₂封存的构造筛选评价标准

分类指标	筛选项目	参数范围
储层特征	深度 (m)	>1000
	平均渗透率 (md)	10-5000
	孔隙度 (%)	>20
	厚度 (m)	>100
	咸水层压力 (MPa)	>8
盖层特征	盖层裂缝状况	盖层裂缝不发育
	盖层厚度 (m)	>200
	盖层突破压力 (MPa)	★
其它指标	特殊指标	不影响淡水层、地热水层, pH高



汇报提纲

- 一、项目背景
- 二、封存机理认识
- 三、研究方案构想
- 四、封存潜力与选址方法研究
- 五、典型场地研究**
- 六、结束语



吉林油田CO₂咸水层封存选址研究

1、资料收集

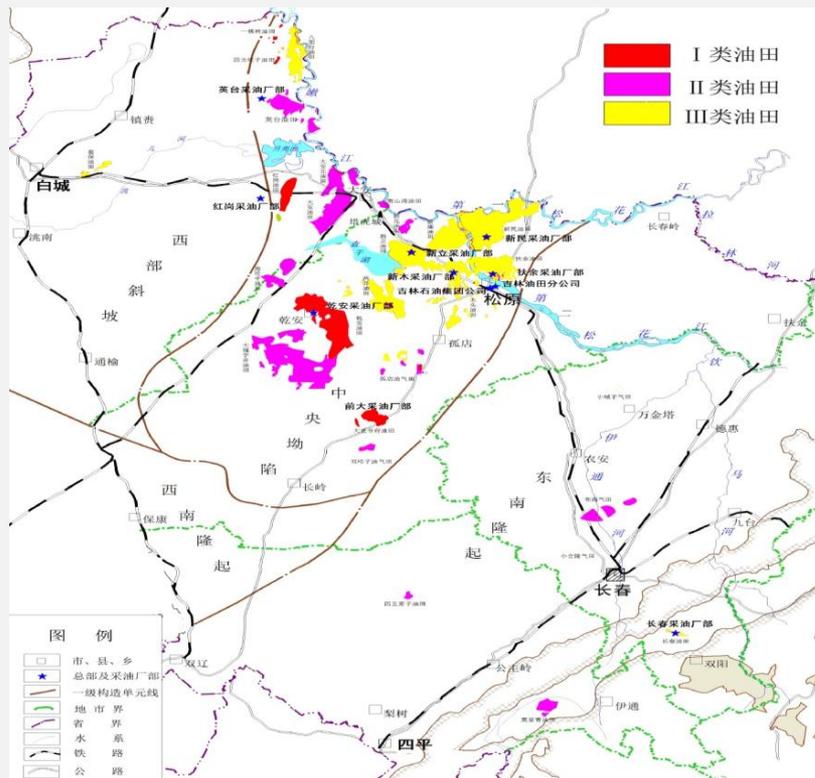
- (1) **地质静态资料**：包括区域地质概况和特征、岩性、测井数据等。
- (2) **盆地的地层层序**：包括各层位咸水层的储盖组合特征，地层综合柱状图等。
- (3) **咸水层水体构造特征**：包括断层、构造图等。
- (4) **咸水层储层特征**：包括岩石学特征、储层物性等。
- (5) **盖层特征**：包括盖层岩性、盖层物性等。
- (6) **流体性质**：包括地层水类型、总矿化度、酸碱度等。
- (7) **生产动态资料**：压裂施工数据、生产数据表、试井数据等。



吉林油田CO₂咸水层封存选址研究

2、目标把区适宜性评价

- 运用研究建立的选址指标体系与评价标准，综合评价了吉林油田的**26个**区块构造。
- 根据综合评价结果，将其分为三个等级，其中Ⅲ类构造**10个**，Ⅱ类构造**11个**，Ⅰ类构造**5个**。
- 初步建立了三级构造的分布图件



吉林油田二氧化碳咸水层封存三级构造分布图件



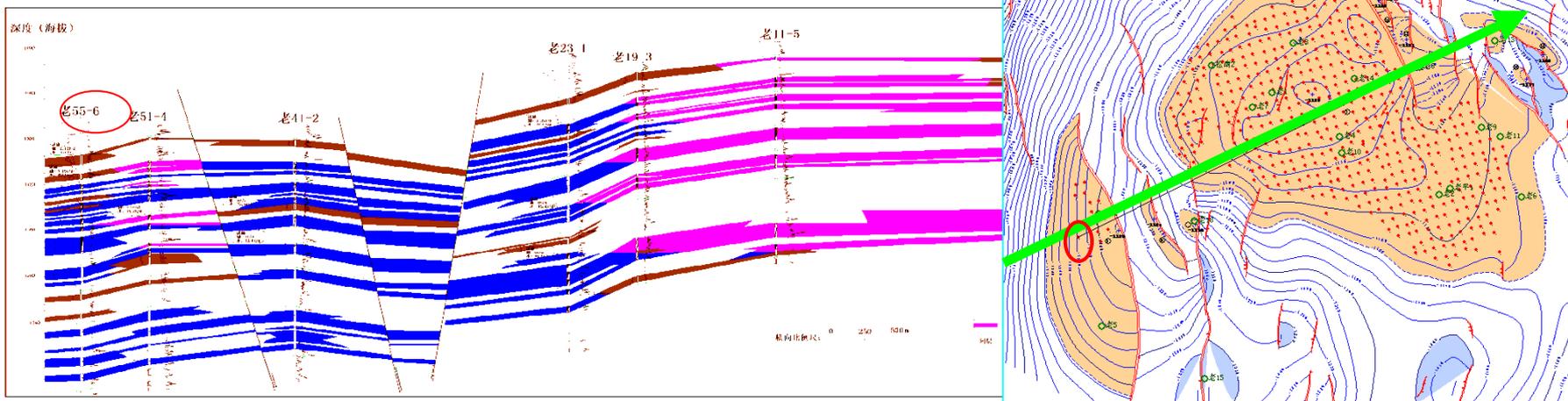
吉林油田CO₂咸水层封存选址研究

5、试注场址潜力评价

■ 优选大老爷府油田的隆斜构造作为试注场址，理论埋存量1.1亿吨，有效封存量550万吨（封存系数0.05）

油区	层位	面积(Km ²)	厚度(m)	孔隙度	圈闭理论埋存量(×10 ⁶ t)	溶解理论埋存量(×10 ⁶ t)	总理论埋存量(×10 ⁶ t)	有效埋存量 Scff=0.02 (×10 ⁶ t)	有效埋存量 Scff=0.05 (×10 ⁶ t)	有效埋存量 Scff=0.10 (×10 ⁶ t)
大老爷府-老12块	青山口组	9.7	50	0.220	67.75	43.02	110.78	2.22	5.54	11.08

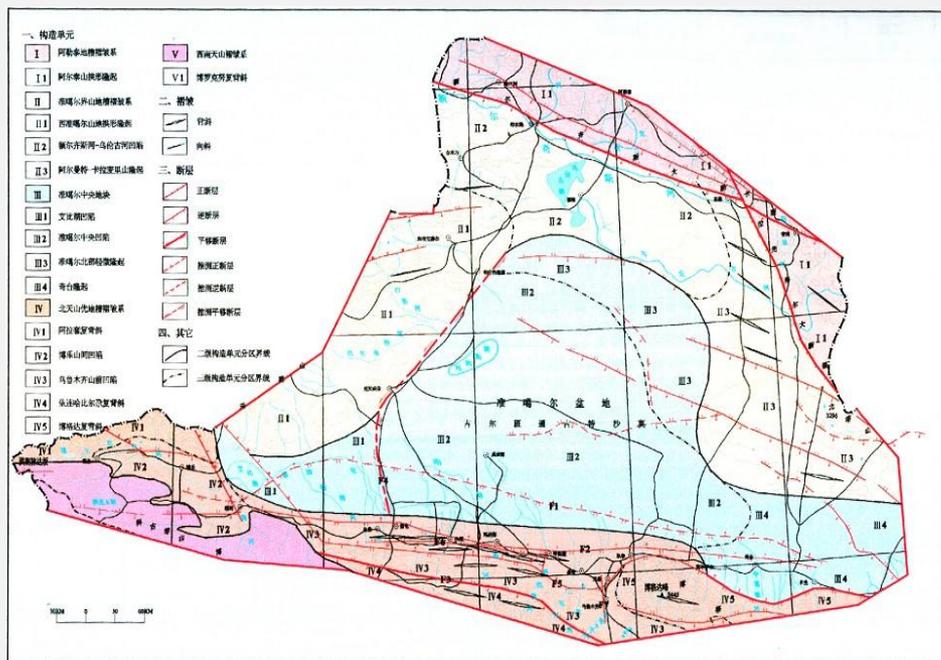
老 55-6 —老 8 井 油 藏 剖 面 图 (近 东 西 向)





新疆油田咸水层分布与封存潜力评价

新疆油田基本地质构造



准噶尔盆地构造纲要图

■ 新疆油田主要位于准噶尔盆地内部，它是一个周围被古生界地层褶皱形成的山脉所环绕的大型盆地，是一个经历过多次造山运动所形成的盆地。

■ 整个盆地也是一个较大的向斜，北翼宽度数倍于南翼；盆地中部绝大部分被第四纪所覆盖，仅在西北缘与北部的边远地区有幅度不大的背斜与断层存在，如克拉玛依的黑山背斜，轴向为西北——东南向；北部吐丝托依纳、东部的沙丘河构造等；在背斜一带同样形成大小不等的向斜：如索索泉向斜等。

◆ 目前，已收集了新疆油田咸水层的相关地质资料，正在进行资料整理和研究其咸水层分布与埋藏地质条件，然后开展其封存潜力评价。



汇报提纲

- 一、项目背景
- 二、封存机理认识
- 三、研究方案构想
- 四、封存潜力与选址方法研究
- 五、典型场地研究
- 六、结束语



结束语

- 根据我国节能减排的重大需求、国际科学前沿和国内外研究现状，规模化二氧化碳咸水层封存的基础与技术将是二氧化碳地质埋存研究的重点方向之一。
- 二氧化碳地质封存研究，涉及地质学、渗流力学、热力学、环境科学与工程等学科和专业，需要多领域、多学科和多专业的相互交叉和综合集成，研究面广、难度大。
- 我们下步将围绕CCS全流程的技术示范，重点开展：一是加强吉林油田场址筛选之后的注入实验与模拟、注入与监测方案、安全和环境评价、工程建设与注入跟踪等研究工作；二是加强新疆油田封存潜力评价与选址研究；三是加强国内外技术交流与合作。



谢谢!

