

# 咸水层二氧化碳封存：渤海湾盆地 天津试验场地描述 **Bohai Bay Project**

庞忠和  
中国科学院地质与地球物理研究所

**Prof. PANG Zhonghe**  
Institute of Geology & Geophysics, Chinese  
Academy of Sciences, Beijing, 100029  
[z.pang@mail.igcas.ac.cn](mailto:z.pang@mail.igcas.ac.cn)



# 提 纲 Outline

- 场地描述的重要性 Why site characterization
- 课题介绍 Background of the project
- 场地地质背景 Geology of the test site
- 场地描述 Site characterization
  - 沉积学特征
  - 储、盖层物性特征
  - 储层流体特征
- 储层地球化学响应研究 Reservoir geochemical responses
- 结论 Conclusions



# 什么是场地描述？

场地描述就是通过资料的收集、分析和解译，以一定的准确度来判断某个选定的场地是否能在特定的时间内，在满足健康、安全性和环境需求时，封存特定量的CO<sub>2</sub>.

“*The collection, analysis and interpretation of data and the application of knowledge to judge, with a degree of confidence, if an identified site will store a specific quantity of CO<sub>2</sub> for a defined period of time and meet all health, safety, environmental requirements.*”

From Peter Cook, CO2SC 2006

cags

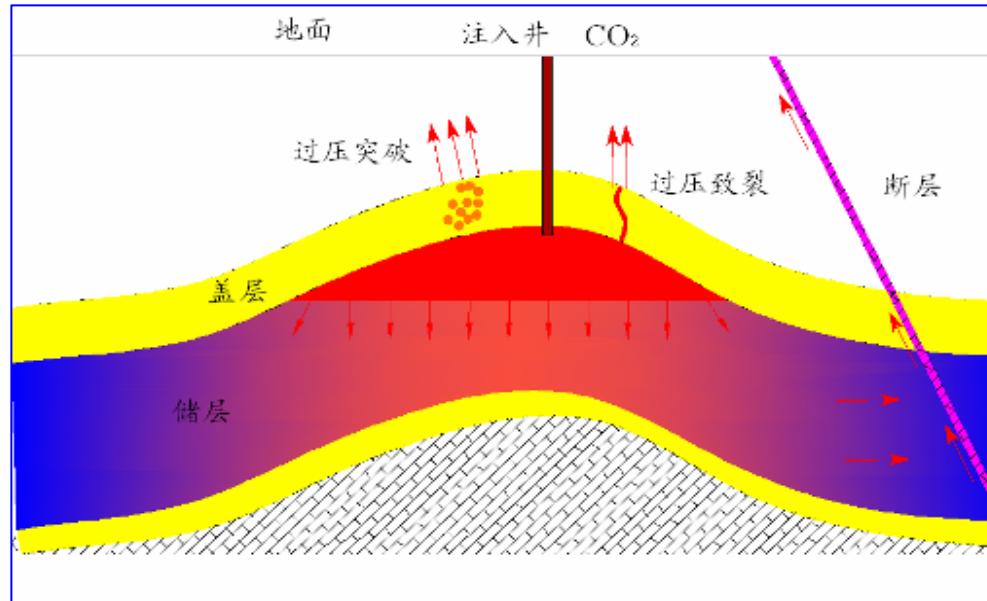
China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>

中澳二氧化碳地质封存



# 场地描述的重要性

试验场地的地质条件，包括地层岩性、构造特征、储物性（孔隙度、渗透率、流体组分以及矿物组分等），会影响CO<sub>2</sub>在储层中的物理、化学过程，进而影响其封存机制、运移特征、安全性、及封存潜力等。



CO<sub>2</sub>地质封存示意图

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

中澳二氧化碳地质封存

cags



# 课题介绍

本是国家863计划十一五CO<sub>2</sub>地质封存重点项目课题，由中国科学院地质与地球物理研究所，中国科学院武汉岩土力学研究所，大连理工大学和天津地热勘查设计研究院共同承担。

以渤海湾盆地北塘凹陷馆陶组咸水层为试验点，综合室内实验、现场试验和数值模拟多种手段，研究CO<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-咸水混合流体的物理化学特性，认识CO<sub>2</sub>注入地下咸水层后的运移规律以及环境响应，通过突破关键技术，形成适合我国陆相沉积盆地地质条件的低成本、实用性CO<sub>2</sub>封存量评价技术、安全性评价技术和环境效应监测技术。

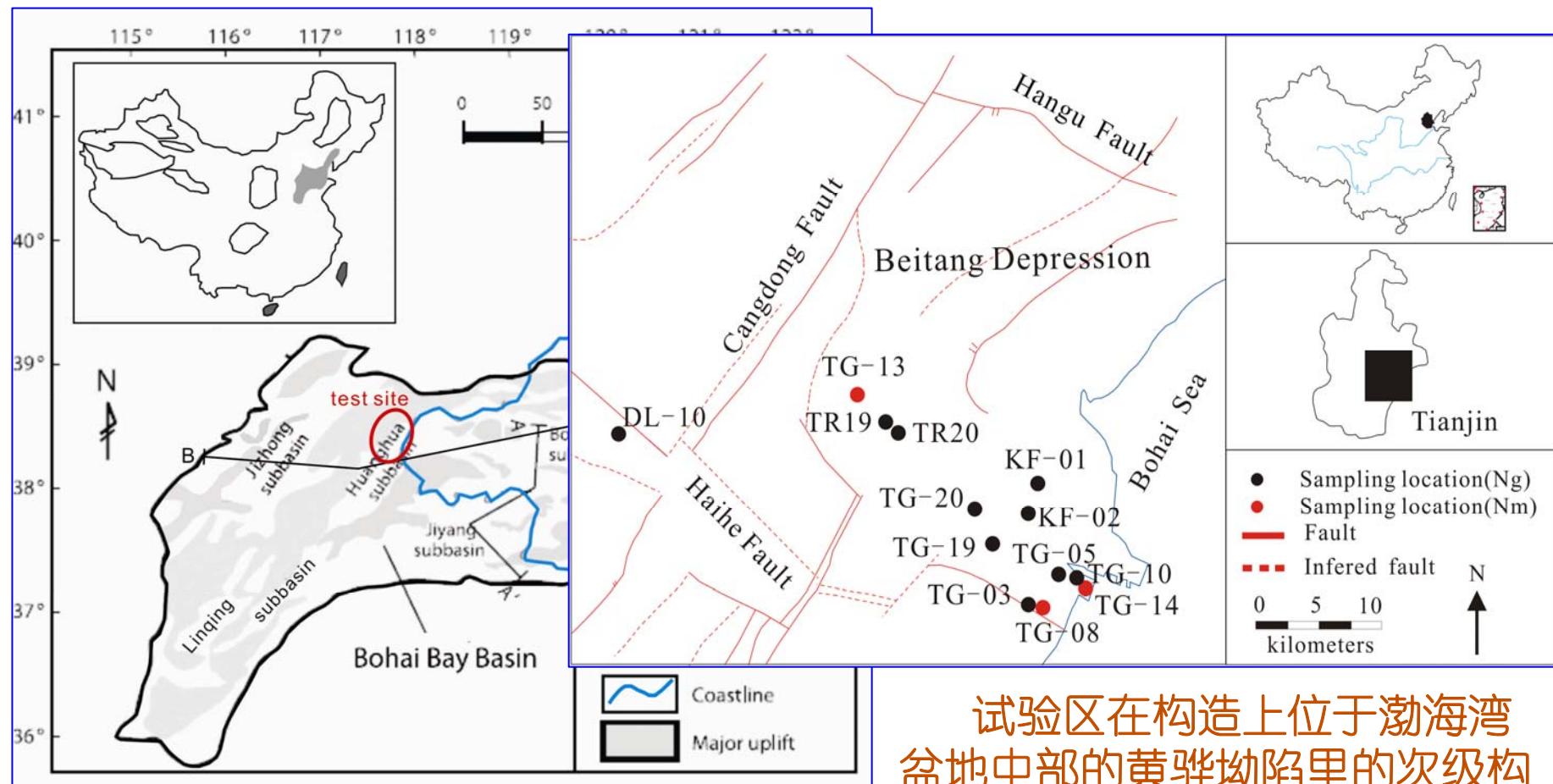


cags

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



# 场地地质背景



Location of Bohai Bay test site

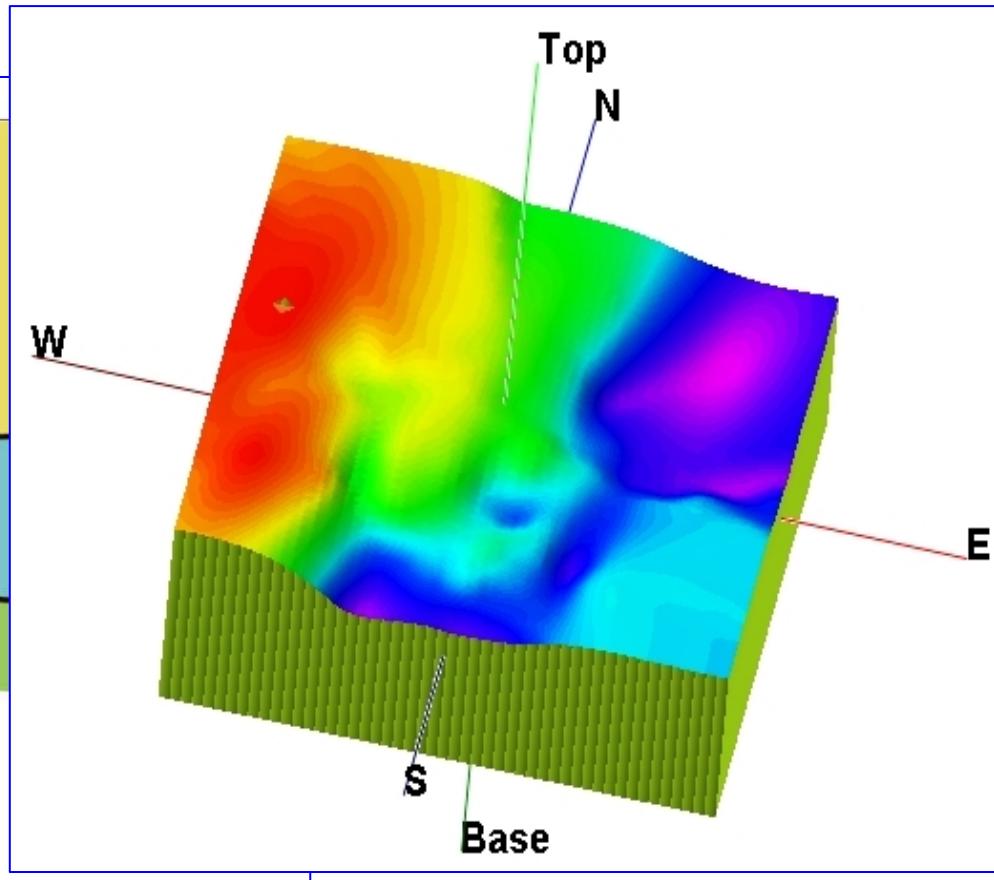
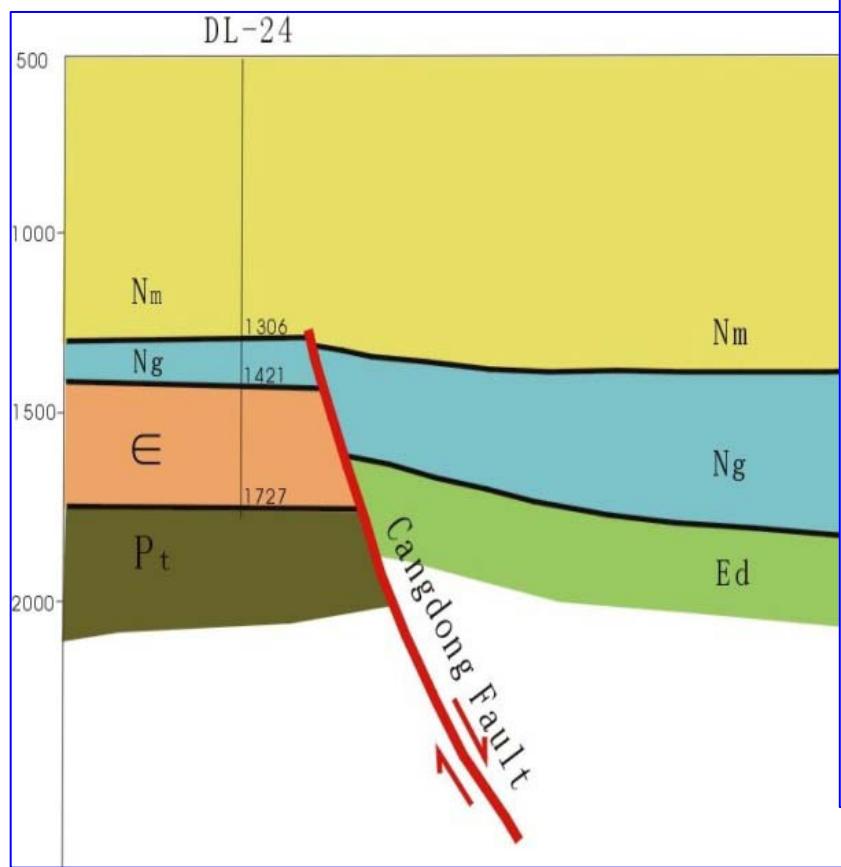
cags

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

中澳二氧化碳地质封存

试验区在构造上位于渤海湾盆地中部的黄骅坳陷里的次级构造单元北塘凹陷中，在地理上位于中国天津市的塘沽区。





## 研究区地层剖面示意图

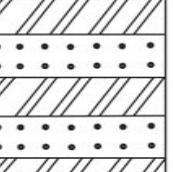
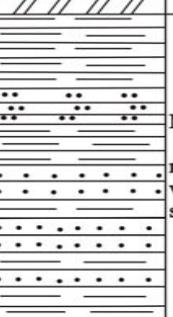
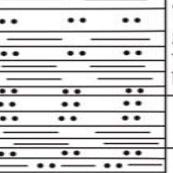
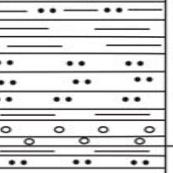
cags

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

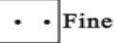
中澳二氧化碳地质封存

试验区目标储层是新近系的馆陶组，盖层是其上覆的上新近系明化镇组和第四系。



Geological Periods					Depth (m)	Formation Thickness (m)	Geological column	Rock properties descriptions	
Eon	System	Series	Formation	Section					
Cenozoic	Quaternary		Pingyuan formation		520	520		Yellow-light yellow clay, sandy clay and interbedded silt sandstone	
	Neogene	Pliocene	Minghua zheng formation		1290	770		Mainly brownish red and dark red mudstone, with thin green sandstone interlayered.	
		Miocene	Guantao formation	Ng I	1390	100		Thick, dark green sandstone with interlayered brown mudstone	
				Ng II	1420	40		sandstone and mudstone	
			Ng III	1720	290		Mainly dark green sandy mudstone and fine-sandstone, with less gravel		
Paleogene	Oligocene	Dongying formation	E	1750	30			mudstone and sandstone	

Legends

 Clay
 Mudstone
 Fine sandstone
 Sandstone
 Gravel

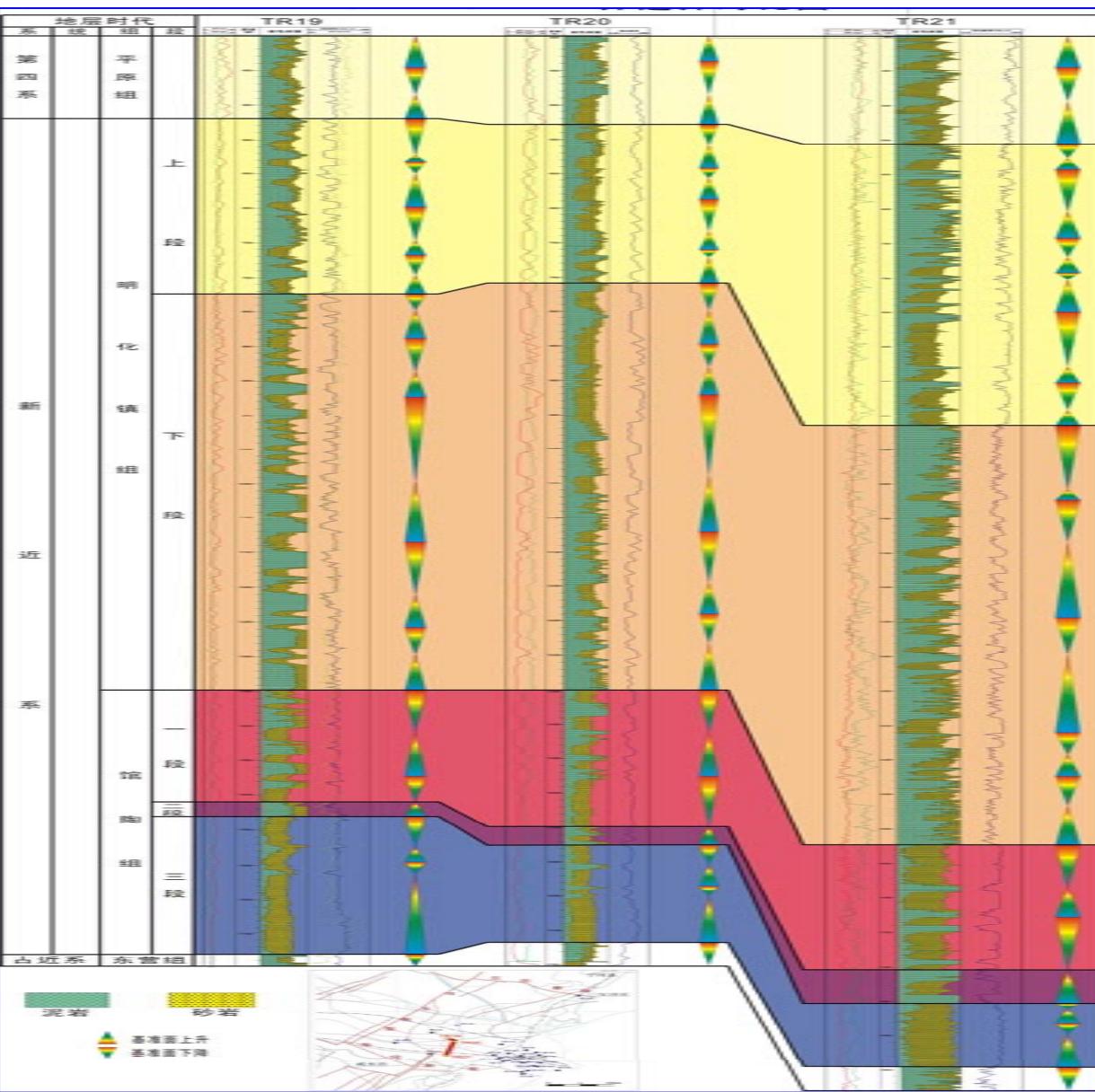
渤海湾盆地北塘凹陷地层柱状剖面图

# cags

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



# 场地描述—沉积学特征



明化镇组：主要为曲流河—滨浅湖泊沉积体系沉积。其中细砂岩、含砾砂岩为曲流河沉积，砂岩间泥岩为河道间沉积，粉砂岩及部分泥岩为河湖沼泽—滨浅湖泊沉积。

馆陶组：底部含水段底砾岩为辨状河道沉积。上下部含水段粉细砂岩为曲流河沉积。砂层之间的泥岩为河道间泛滥平原沉积环境

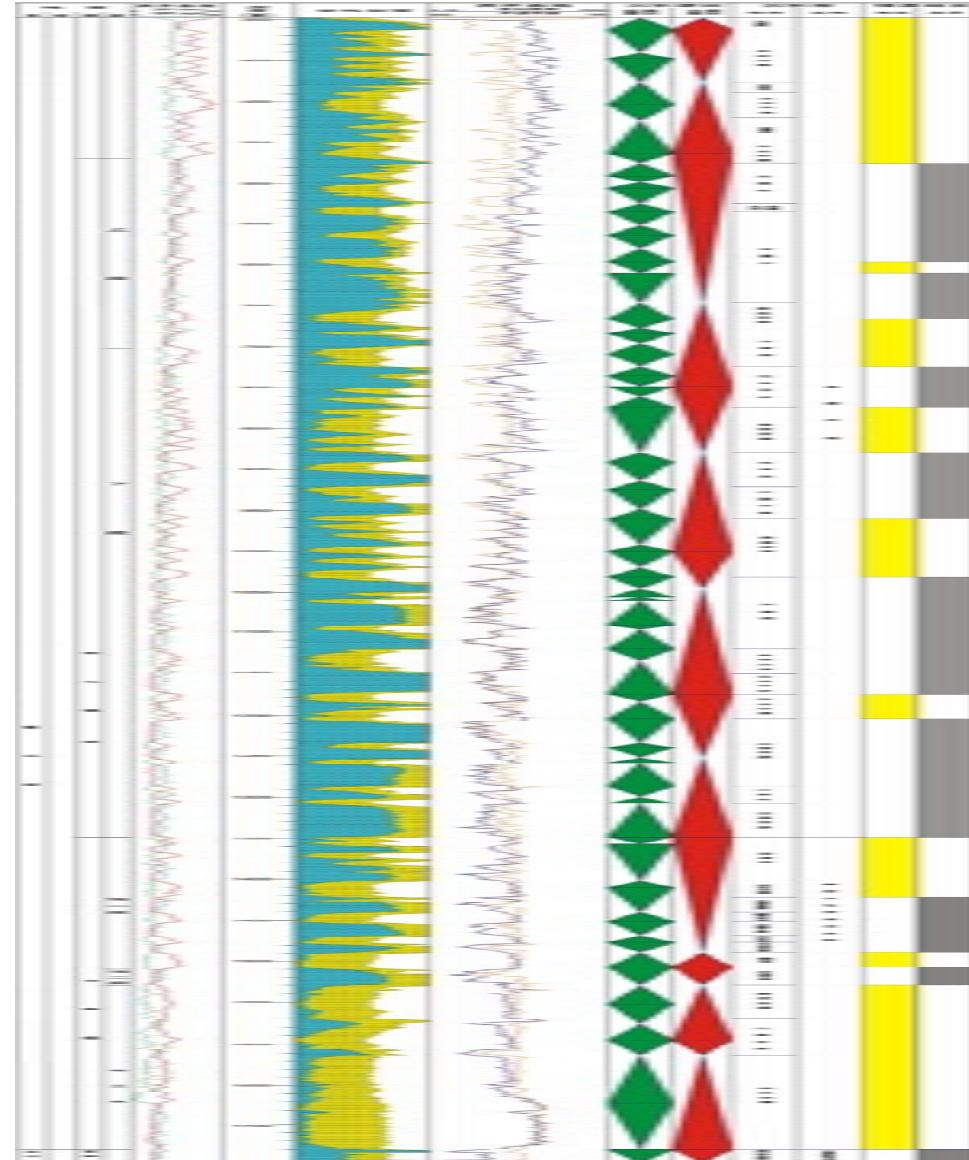


## Minghuazheng formation

明化镇组：可以划分2个3级层序，分别对应明化镇组1，2段。14个准层序组和31个准层序。

## Guantao formation

馆陶组：可以划分为1个3级层序，4个准层序组和10个准层序。



# 储盖组合分析

明化镇组下段是曲流河泛滥平原—河湖沼泽相泥岩，泥岩单层最大厚度一般在15—80米，与上覆第四系层可形成良好的区域性盖层。

馆陶组发育辫状河和曲流河两类砂岩储层，下段以辫状河沉积为特征，而上部多为曲流河沉积，孔隙度为25%以上，渗透率最大可达到 $4000 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$ ，平均( $15\text{--}1400) \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$ ，属高孔高渗储层。



# 储、盖层物性特征



目标储层馆陶组岩芯图

馆陶组砂岩储层：

区域上西薄东厚，自西向东厚度由350米变化到550米。沉积旋回明显，分为馆Ⅰ粉细砂岩、粉砂岩段，馆Ⅱ泥岩段和馆Ⅲ砂砾岩段。

孔隙度：33.6%–38.7%

渗透率： $1.165\text{--}2.003 \mu \text{m}^2$   
or 1150–1980mD



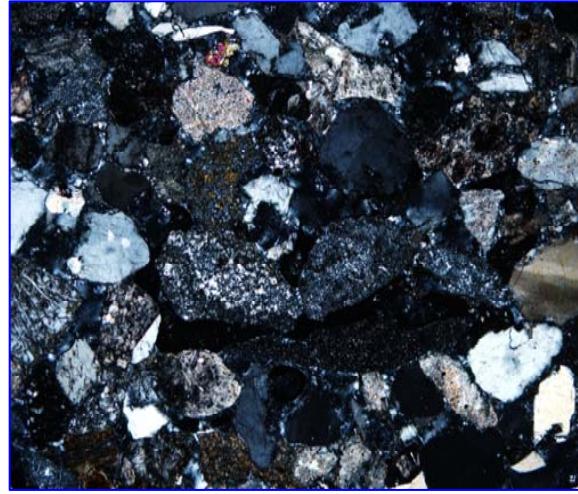
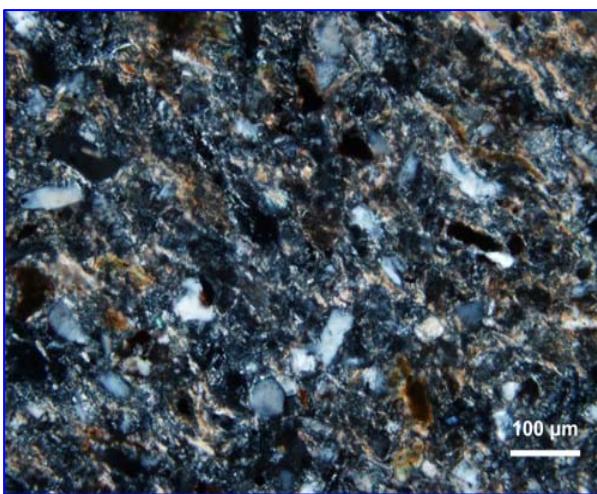
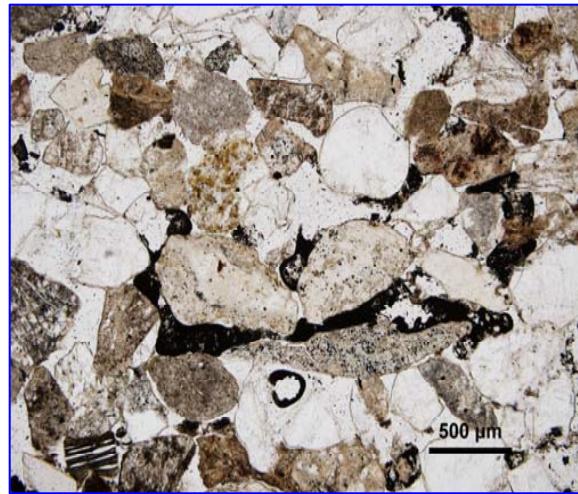
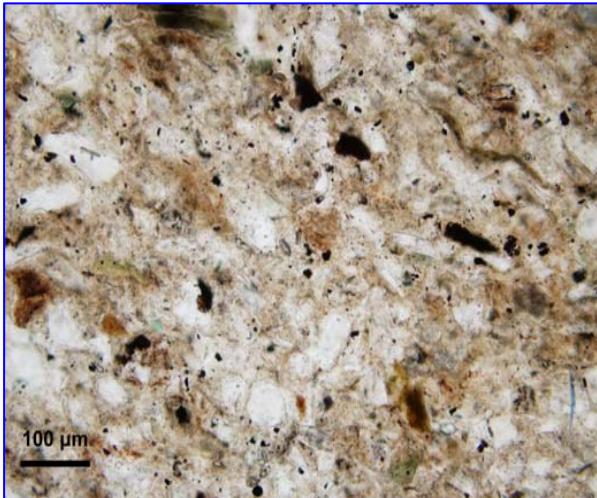


## 明化镇组盖层岩性图

cags

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





盖层岩石薄片分析

储层岩石薄片分析

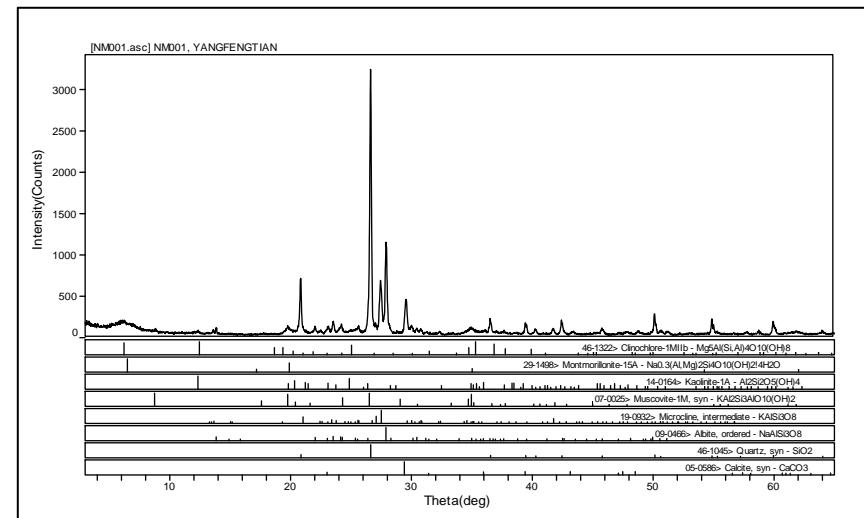
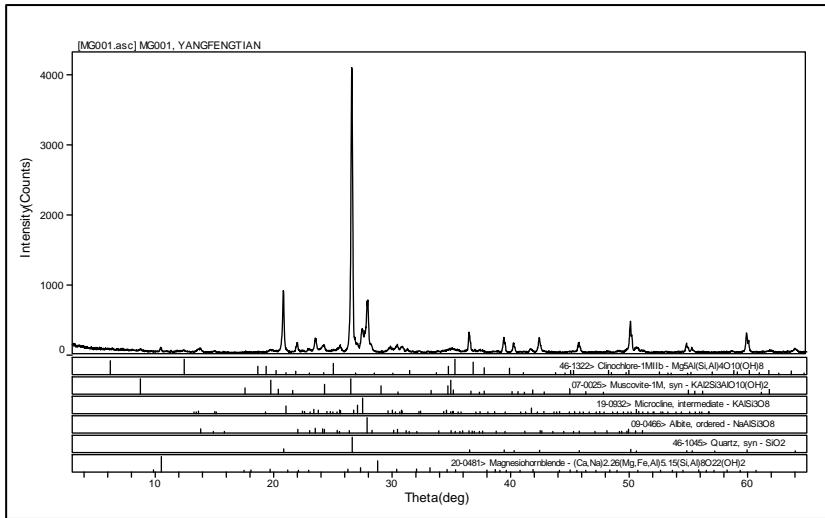
cags

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

中澳二氧化碳地质封存



# 储层及盖层矿物组分分析(XRD)



Samples	Mineral composition %						
	Quartz	Albite	Microcline	Biotite	Chlorite	Smectite	Others
Ng-1814m	55	12	6	3	2	—	Hornblende 3
Ng-1813.78m	60	13	10	3	2 + kaolinite	trace	—
Nm-1225m	30	13	8	4	4+kaolinite 1	trace	Dolomite 16
Nm-888m	45	20	10	3	2+ kaolinite	trace	Calcite 15
Nm-965m	40	19	8	3	3+ kaolinite	trace	Dolomite 10+Calcite 13

# 储层及盖层矿物组分分析(XRF)

composition	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn O	Mg O	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	TOTAL	FeO
samples	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Ng-1814m	76.3 4	0.27	11.13	2.26	0.03	1.09	1.23	2.48	2.73	0.09	1.94	99.59	1.02
Ng-1813.78m	76.8 2	0.24	10.93	2.09	0.03	1.34	1.32	2.23	2.32	0.06	2.40	99.78	0.95
Nm-1225m	55.0 8	0.67	13.55	5.21	0.08	5.48	4.99	1.58	2.68	0.12	10.52	99.96	2.42
Nm-888m	65.4 3	0.60	13.85	3.83	0.31	1.12	4.04	2.06	3.05	0.13	5.62	100.04	0.31
Nm-965m	65.0 3	0.57	13.21	4.42	0.06	2.07	4.06	2.14	3.04	0.17	5.23	100.00	0.64

cags

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

中澳二氧化碳地质封存



# 储层流体特征

# Properties of reservoir fluid

cags

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



# 水样采集



现场测定: pH, EC, TDS, Eh, DO,  
 $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$

实验室测试:  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  
 $^{14}\text{C}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , 主要离子组分,  
微量元素,  $\text{SiO}_2$

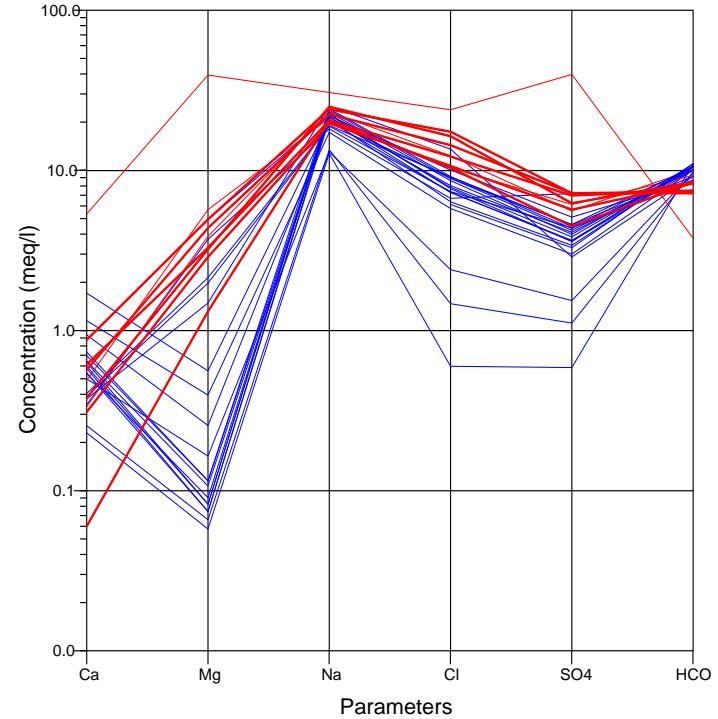
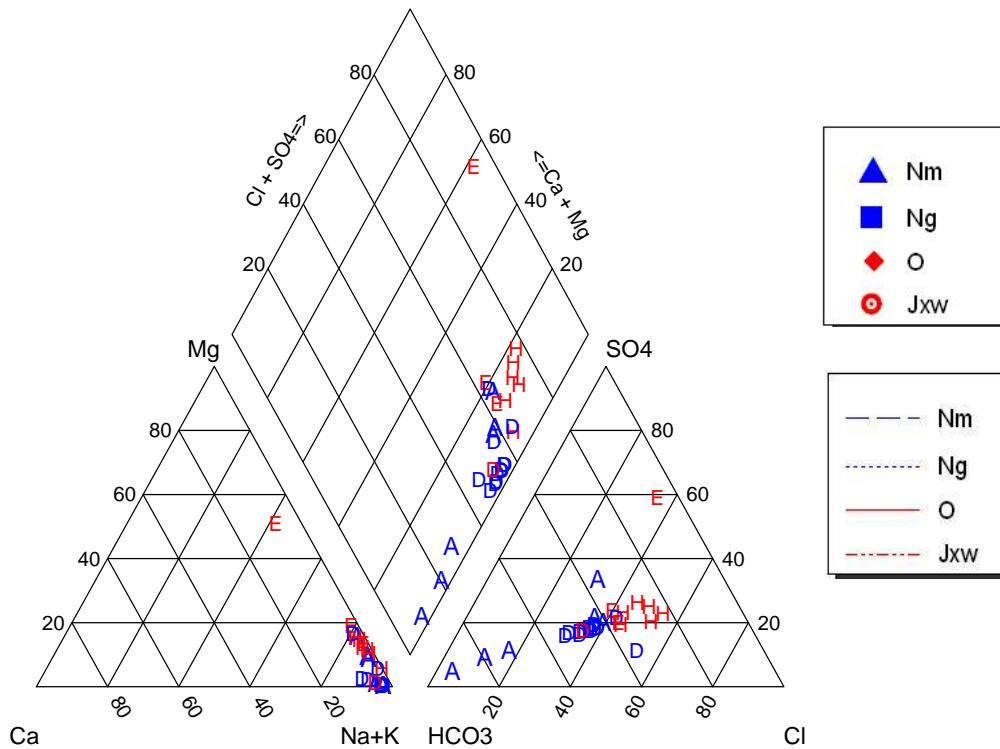
cags

China Australia Geological Storage of  $\text{CO}_2$

中澳二氧化碳地质封存

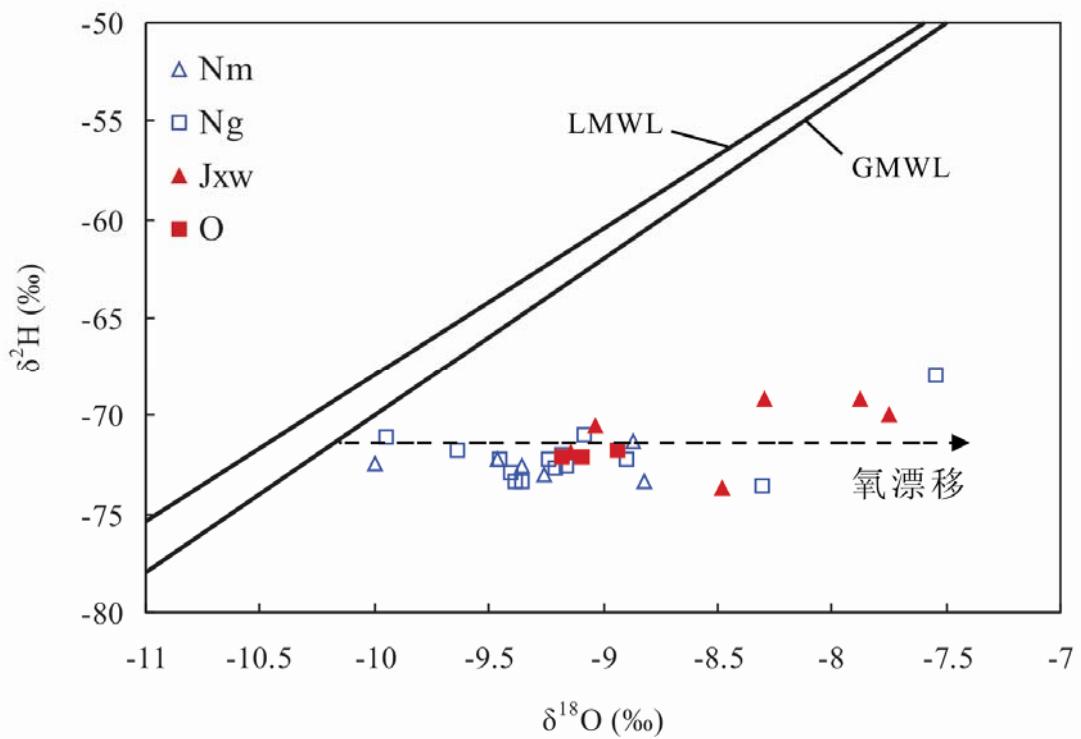


# 储层流体水化学特征



水化学类型：主要为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 型，局部地区出现 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水。 pH：7.4–8.6 TDS：0.7–1.5 g/1 储层流体温度：40–80℃

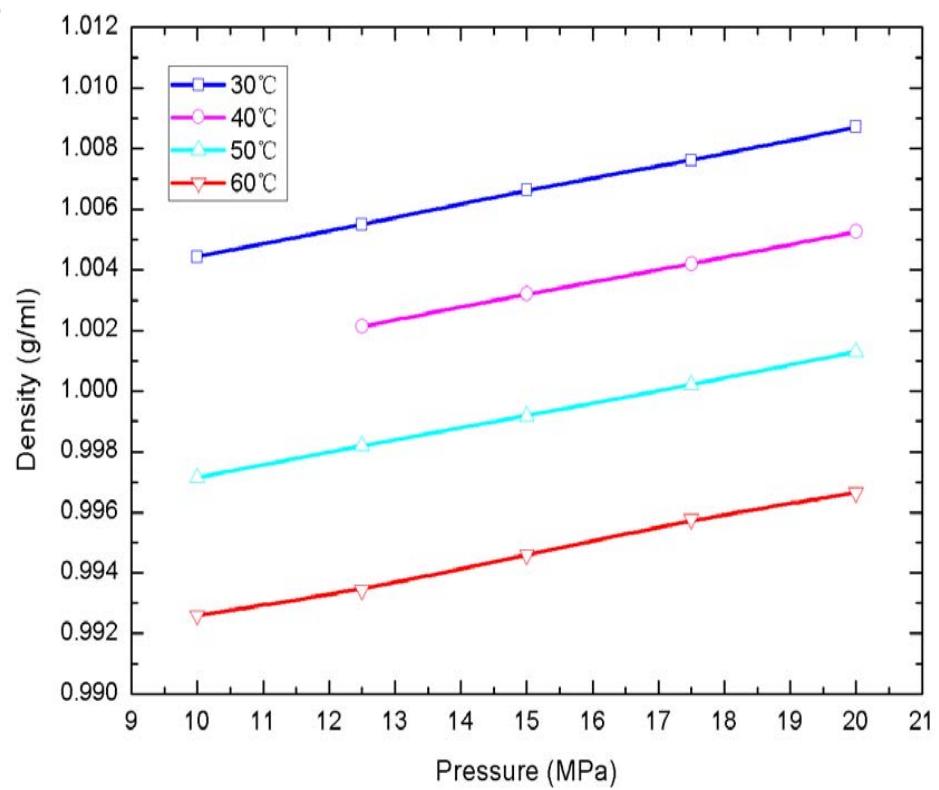
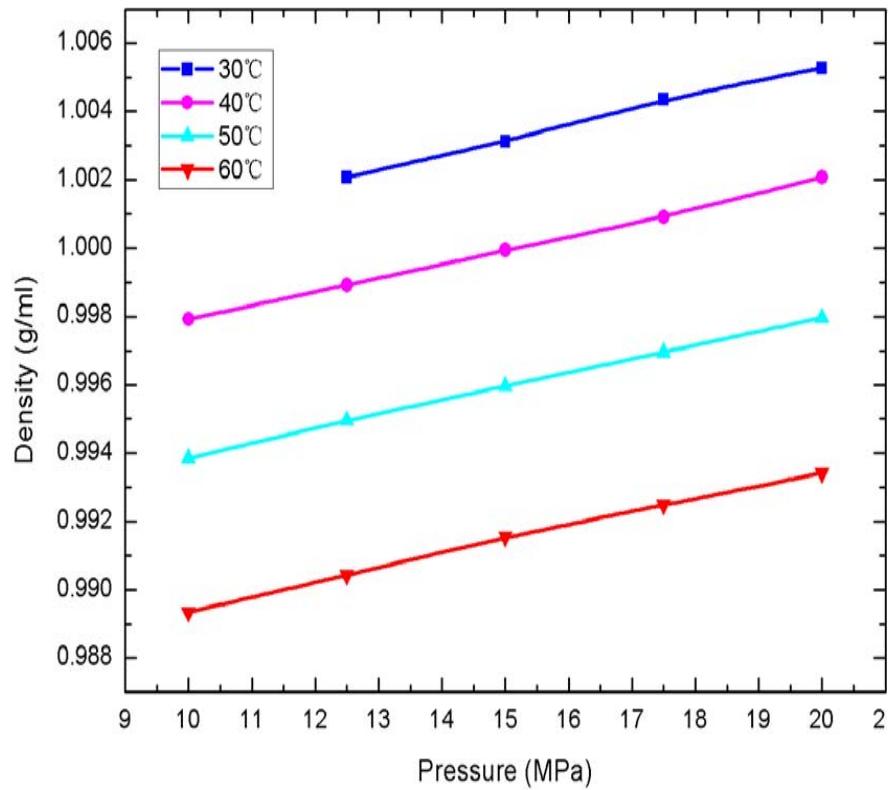




cags

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

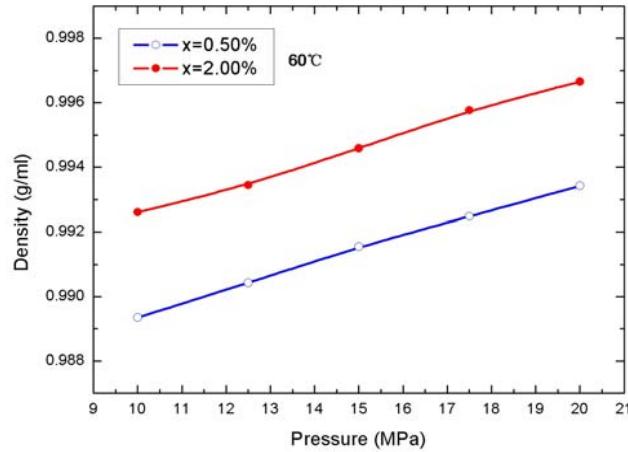
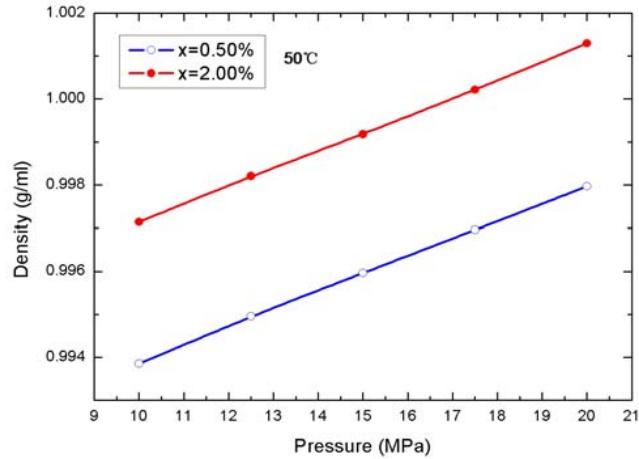
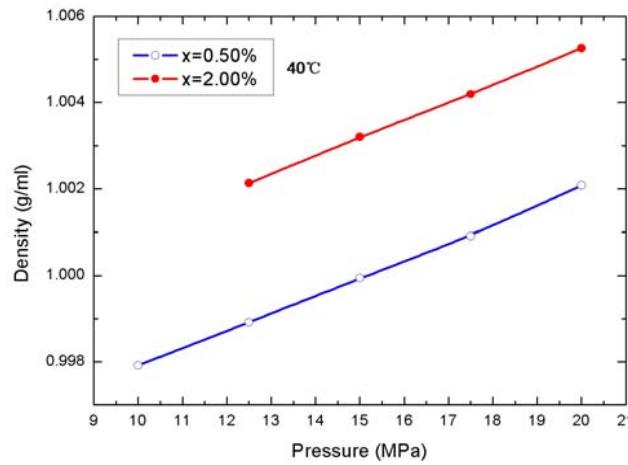
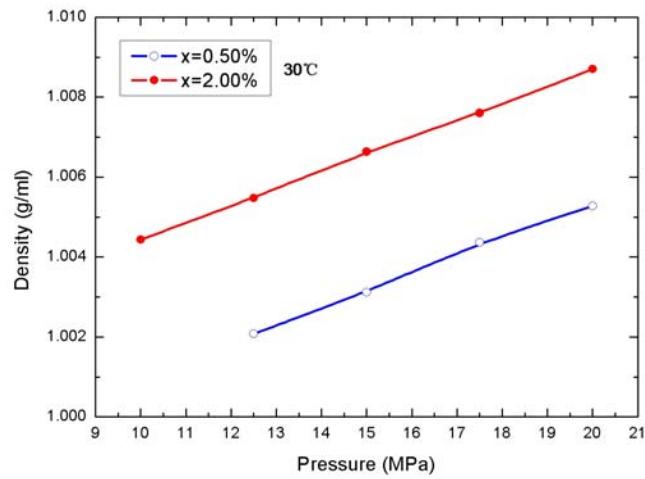




## CO<sub>2</sub>溶液密度随压力变化

(CO<sub>2</sub>质量分数为0.5% (左图) 和2% (右图))





cags

$\text{CO}_2$ 溶液密度随压力和质量分数的变化

China Australia Geological Storage of  $\text{CO}_2$   
中澳二氧化碳地质封存



储层对于注入的地球化学响应

# **Geochemical response to CO<sub>2</sub> injection**

**cags**

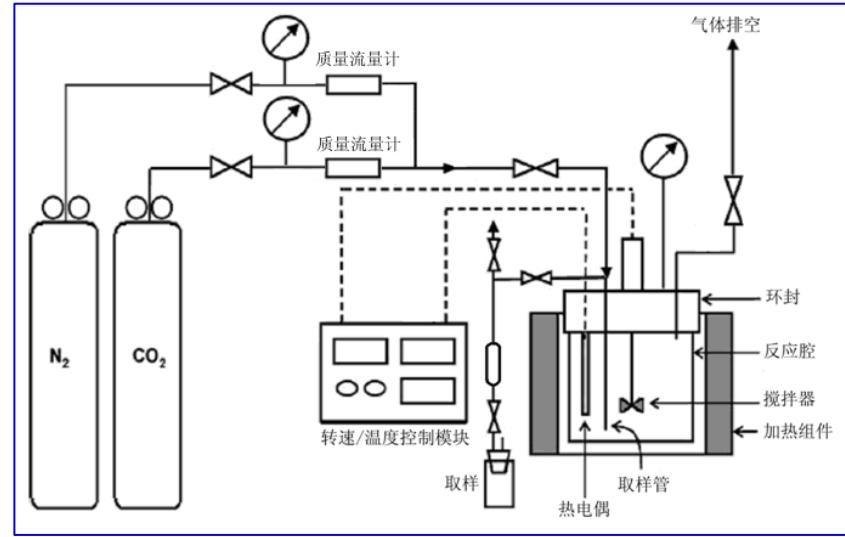
China Australia Geological Storage of CO<sub>2</sub>  
中澳二氧化碳地质封存



# 水-岩-CO<sub>2</sub>相互作用实验研究



Batch type autoclave (Parr 4575A )



Schematic diagram of the autoclave

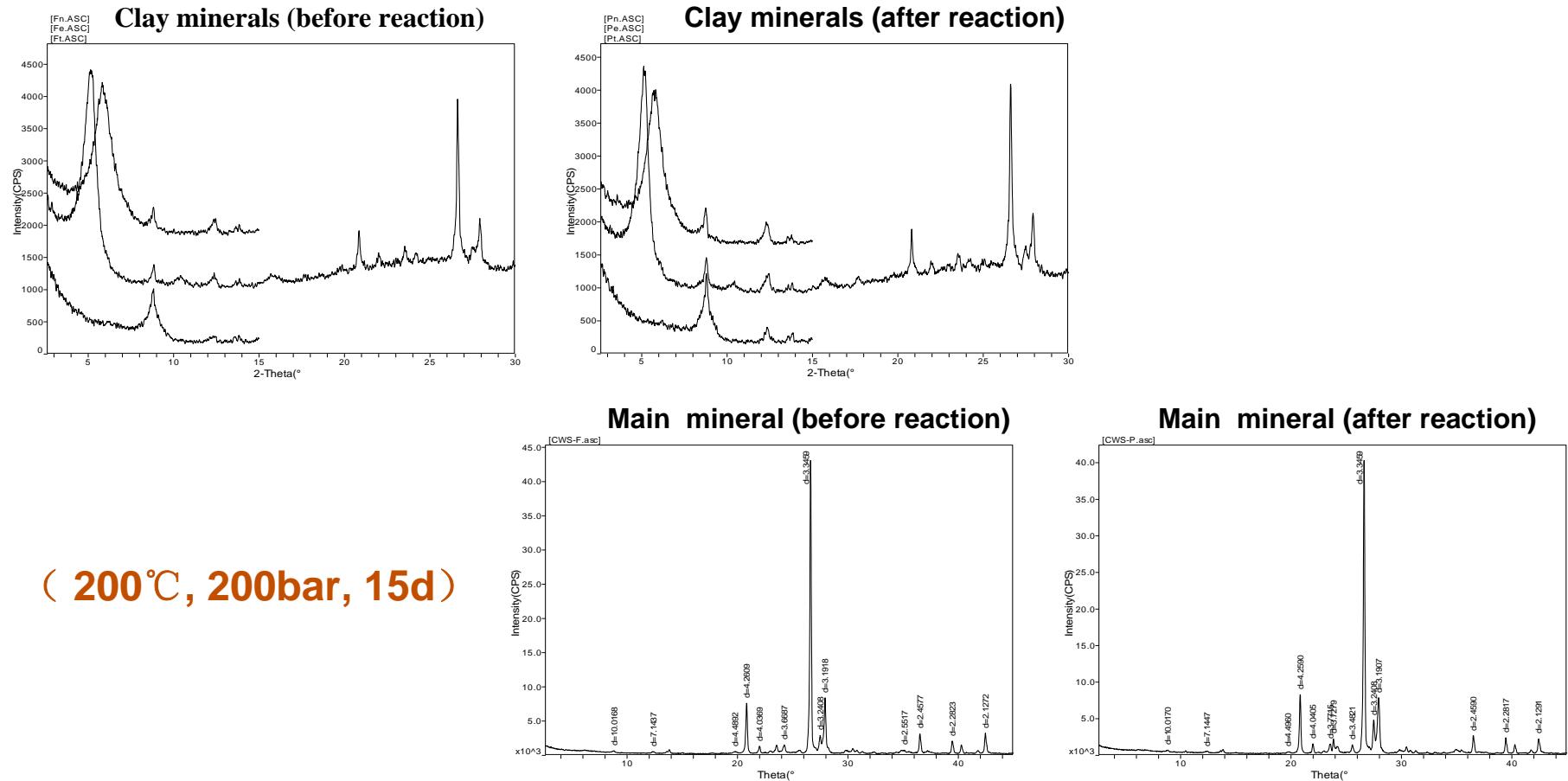
Max. pressure : 345bar  
Max. temperature: 500°C  
Volume: 500ml

cags

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

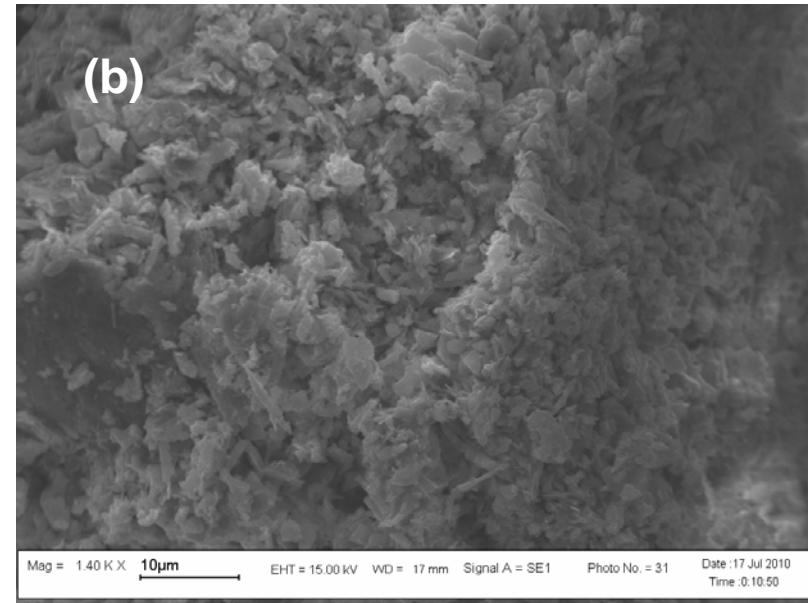
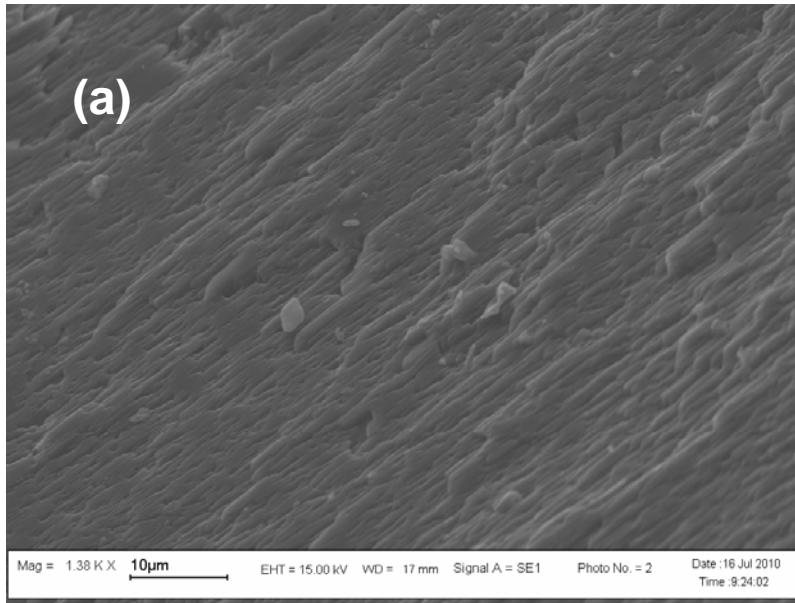


# 反应前后粘土矿物等的变化

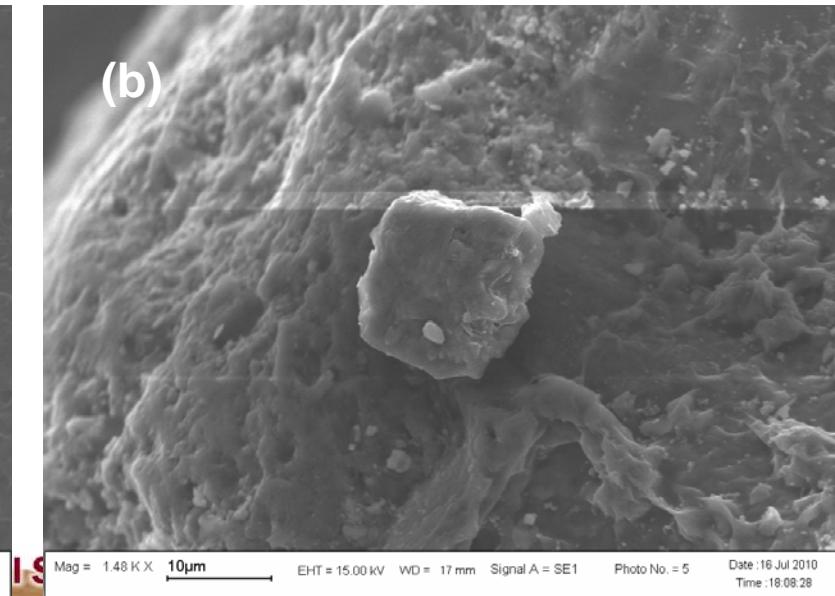
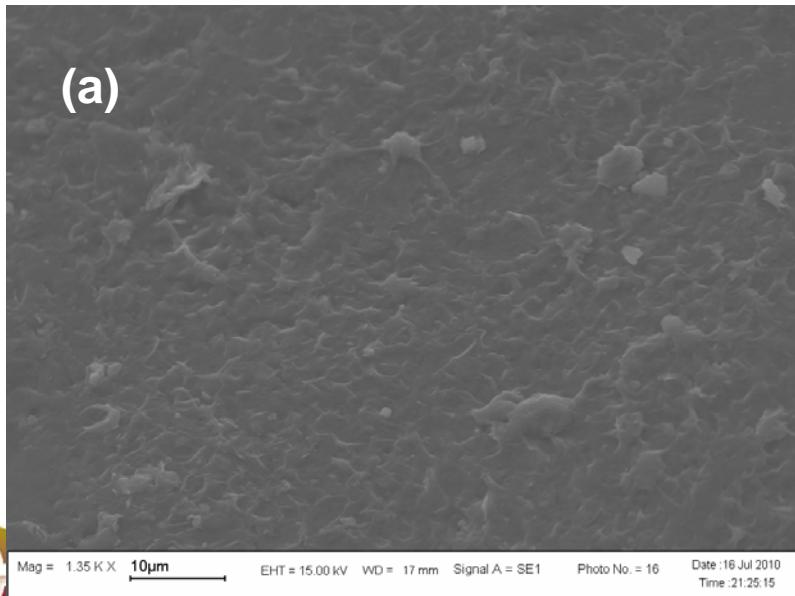


( $200^{\circ}\text{C}$ ,  $200\text{bar}$ ,  $15\text{d}$ )

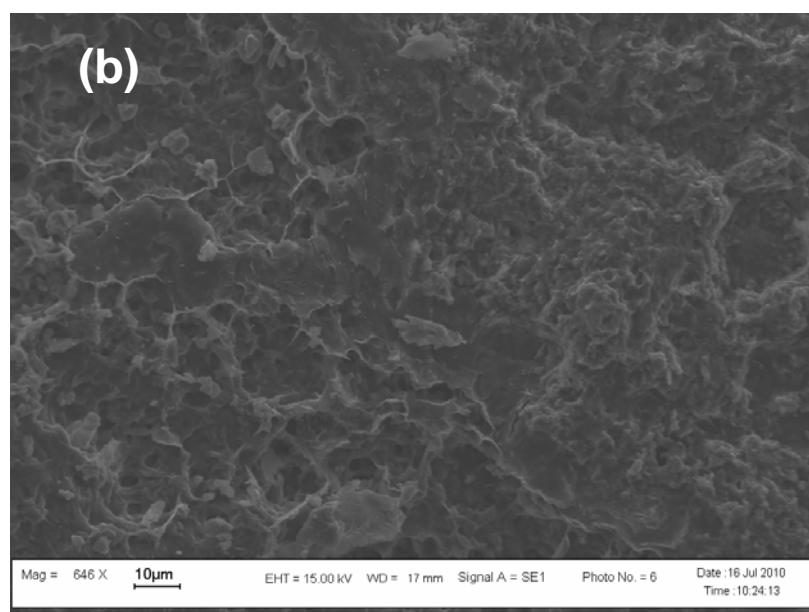
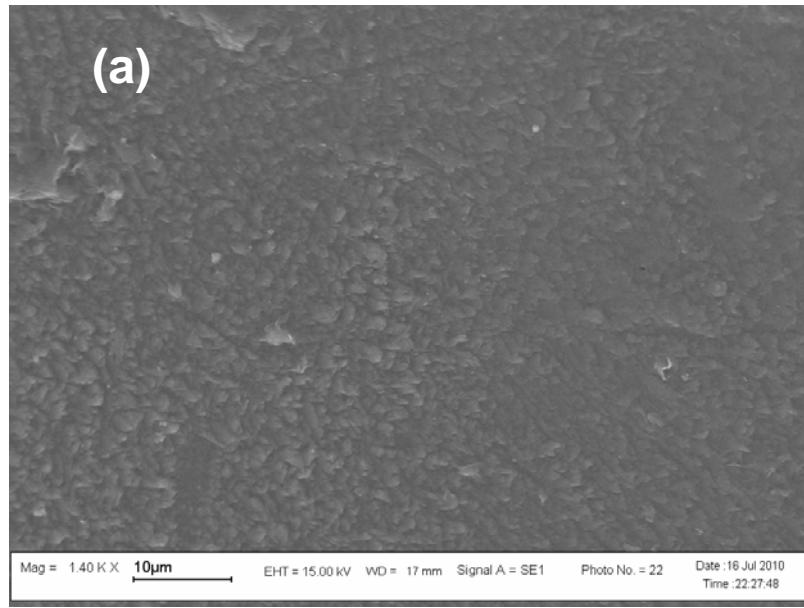
Mineral composition (%)	Quartz	Microcline	Plagioclase	Smectite	Illite	Kaolinite	Chlorite	Clay minerals
Before reaction	61.6	11.2	20.5	4.8	1.3	0.4	0.3	6.7
After reaction	63.3	8.8	20	6.1	1.2	0.4	0.2	7.9



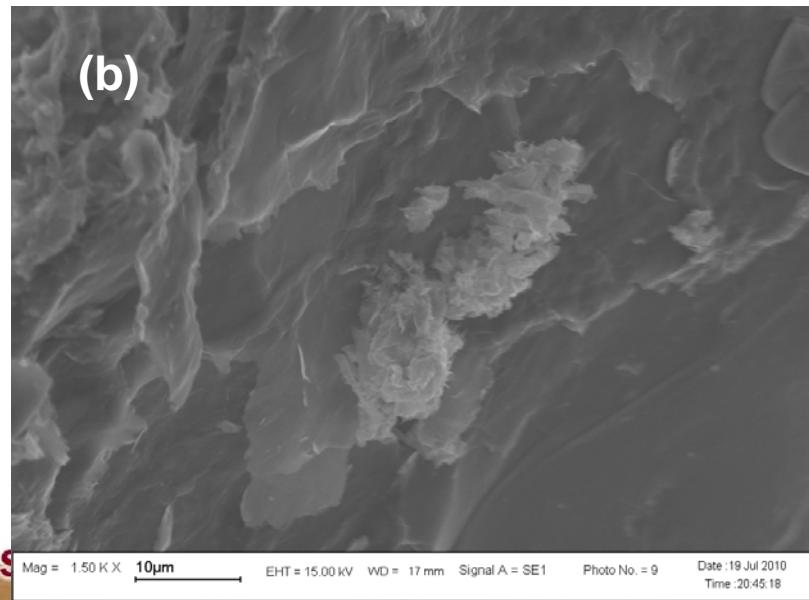
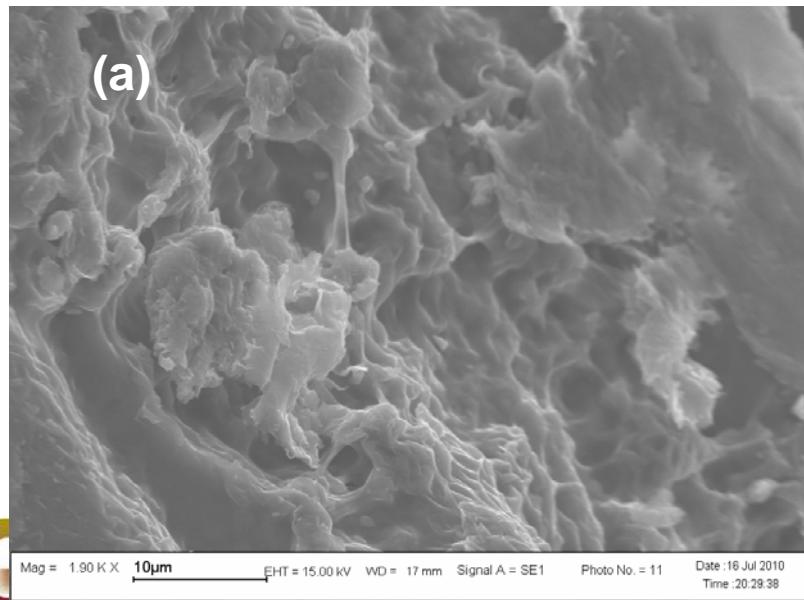
SEM micrographs of microcline: (a) before reaction; (b) after reaction



SEM micrographs of albite: (a) before reaction; (b) after reaction



SEM micrographs of quartz: (a) **before reaction**; (b) **after reaction**

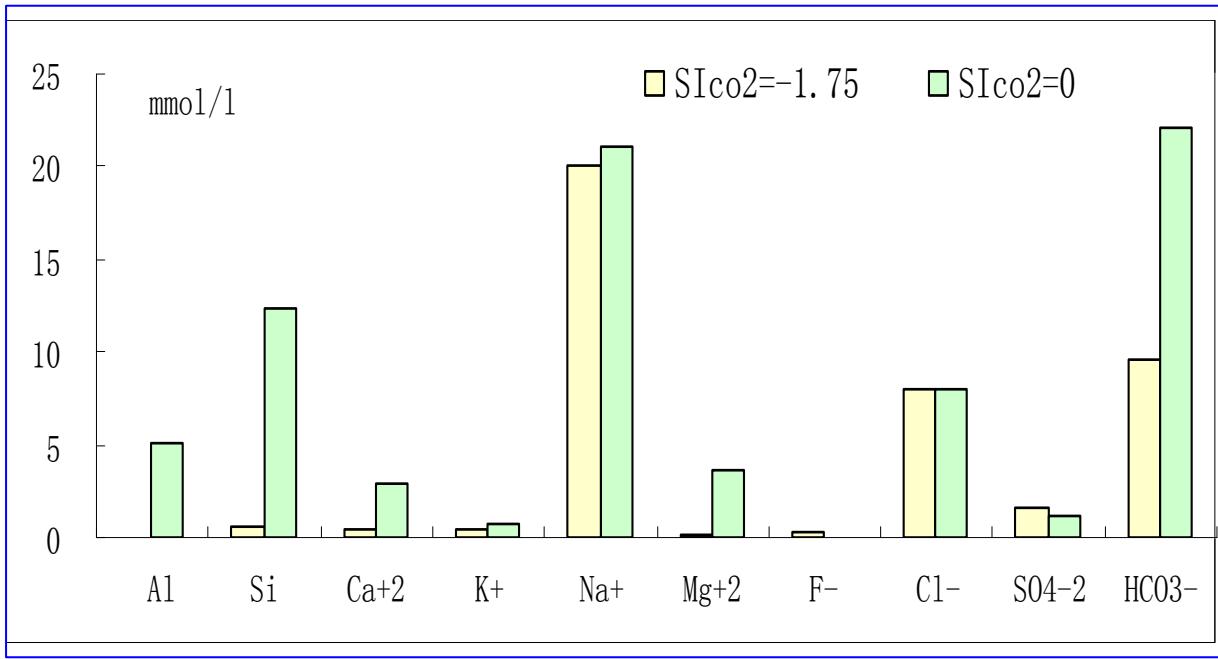


SEM micrographs of biotite: (a) **before reaction**; (b) **after reaction**

# CO<sub>2</sub>-水-岩反应的热力学模拟

- 应用PHREEQC软件，以生产井TR19水样水化学数据和馆陶组岩芯矿物组分测试结果，模拟不同CO<sub>2</sub>含量(0mmol, 9. 68mmol, 14. 24mmol, 27. 82mmol, 69. 92mmol, 196. 8mmol, 分别对应SI<sub>CO2</sub>=-1. 75, -1, -0. 5, 0, 0. 5, 1)注入到储层后的地球化学响应。
- 矿物组分：石英（40%），钠长石（10%），钙长石（9%），方解石（13%），白云石（10%），绿泥石（8%），云母（3%）以及其他矿物如高岭石，蒙脱石（7%）。

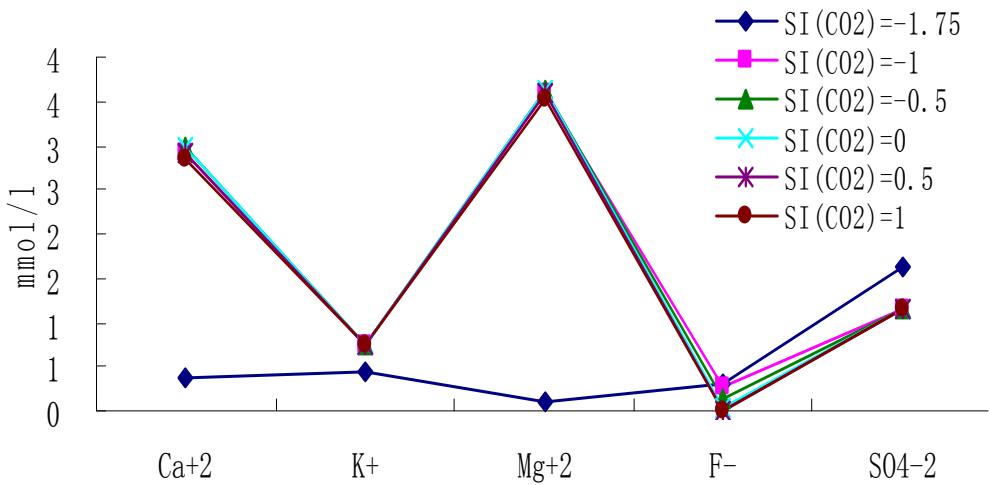




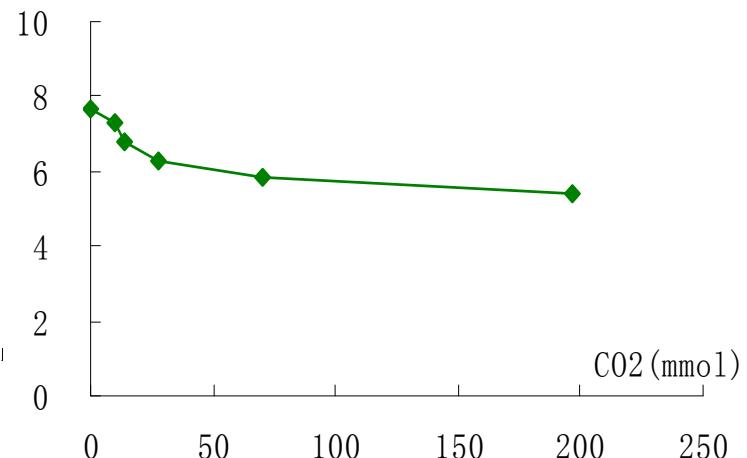
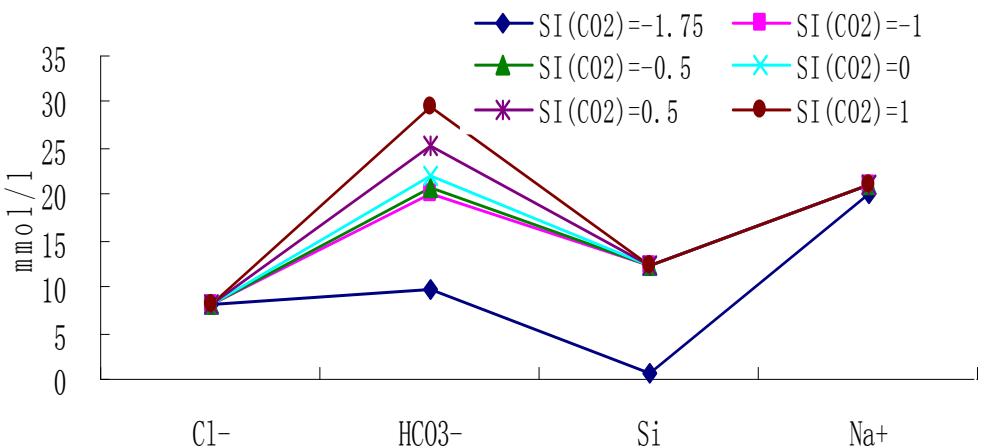
与初始条件相比， $27.82\text{mmol CO}_2$ 注入后，储层流体中Al, Si,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ 等的含量显著增加，性质保守的元素如 $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 等的变化不明显，流体的pH值从初始的7.7降为6.3。

模拟条件：1kg水溶液，0.01mol岩石样， $n_{\text{CO}_2}=0$  ( $\text{SI}_{\text{CO}_2}=-1.75$ ) 和 $n_{\text{CO}_2}=27.82\text{mmol}$  ( $\text{SI}_{\text{CO}_2}=0$ ) 条件下储层水化学变化特征图





通过做敏感性分析，讨论不同CO<sub>2</sub>注入量条件下储层流体水化学组分的变化，发现pH值，HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>对CO<sub>2</sub>含量变化的响应最明显。



不同CO<sub>2</sub>加入量条件下储层水化学特征变化图

pH值随CO<sub>2</sub>加入量不同变化图



# 结 论

- 试验区目标储层馆陶组为砂岩储层，孔隙度在25%以上，最大达38.7%，渗透率最大可达到 $4000 \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$ ，平均 $(1165-2003) \times 10^{-3} \mu \text{m}^2$ ，属高孔高渗储层；盖层为其上覆的明化镇组下段泥岩层及第四系，泥岩单层厚度为15-80m，区域上广泛分布。
- 储层流体主要为 $\text{Cl}\cdot\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 型水，属于偏碱性流体，pH平均值为7.7，TDS为0.7-1.5g/l，水温为40-80℃，氢氧同位素结果表明储层水来自大气降水，由于存在古水或水-岩相互作用导致地层水有1-1.5‰的氧漂移。



- 水-岩相互作用实验表明CO<sub>2</sub>注入后，石英和粘土矿物含量增加，长石含量有所降低，模拟结果表明CO<sub>2</sub>注入后，储层流体中Al, Si, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等的含量显著增加，性质保守的元素如Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等的变化不明显，流体的pH值从初始的7. 7降为6. 3。
- 通过试验场地的详细地质描述，充分理解其地质特征（包括储层和盖层），为下一步的现场注入试验做好准备工作。



# 致谢！ Acknowledgements

- 国家科技部863计划
- CAGS 中澳二氧化碳地质封存项目

cags

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



Thank you for your attention !

cags

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

