



中国CO₂地质封存技术：潜力与 早期实施机会

CO₂ Geologic Storage in China: Potential and Early Opportunities

李小春 研究员
中国科学院武汉岩土力学研究所

Xiaochun Li

Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS





CO₂ Geological Storage Group



- **Since 2005**
- **6 staffs + 10 students**
- **ECBM-related modeling, safety assessment and monitoring**



Outline

1. Potential

1.1 Point Sources

1.2 Capacities

2. Early opportunities: Cost, Market scale and Options

3. CO₂/N₂-ECBM

1. 地质封存潜力

1.1 集中排放源

1.2 封存容量

2. 早期机会: 成本、规模 和方式

3. 混合气体驱替煤层气





1. Potential: Point Sources

集中排放源





Methodology

$$(ECO_2)_{ji} = (EF)_{ji} \times (P_1)_{ji}$$

$$(ECO_2)_{ji} = (EF)_{ji} \times (P_2)_{ji} \times (A)_{ji} \times (T)_{ji}$$

$$(ECO_2)_t = \sum_j \sum_i (ECO_2)_{ji}$$

ECO_2 -The emission of CO_2 ;

EF -Emission factor;

P_1 -Yield;

P_2 -Productive capacity;

A -Productive rate;

T -Full load hours .





Results

CO₂ sources statistics in 2004

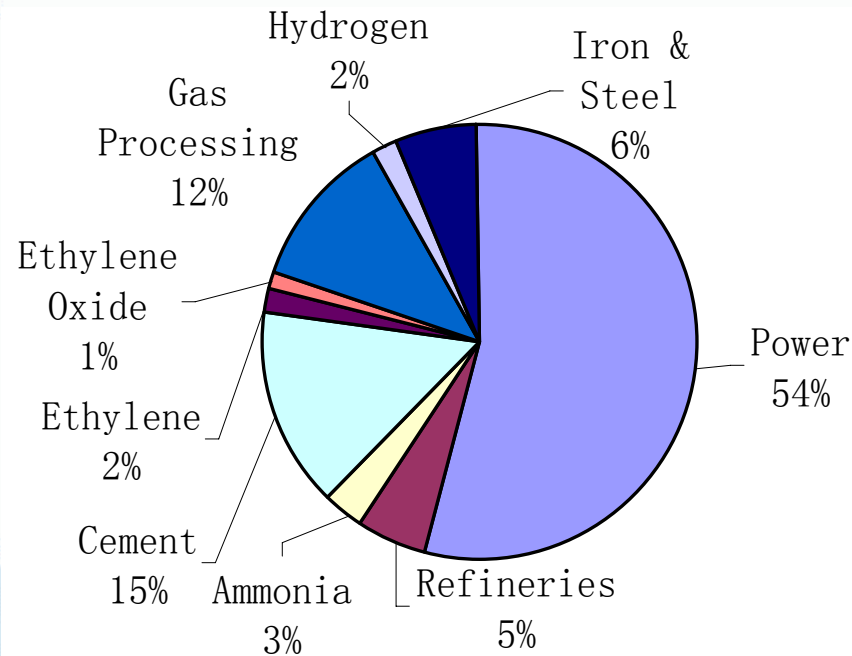
| Sectors | Total | | >10 ⁵ t/yr | | Conc. /% |
|----------------|-------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------|
| | Num. | Emis./10 ⁸ t | Num. | Emis./10 ⁸ t | |
| Power | 622 | 18.6092 | 591 | 18.5895 | 3~15 |
| Refineries | 92 | 0.7858 | 84 | 0.7813 | 3~13 |
| Ammonia | 162 | 1.2724 | 160 | 1.2709 | 100 |
| Cement | 584 | 5.7036 | 530 | 5.6663 | 20 |
| Ethylene | 46 | 0.4378 | 43 | 0.4363 | 12 |
| Ethylene Oxide | 49 | 0.0114 | 1 | 0.0011 | 100 |
| Hydrogen | 109 | 0.0724 | 25 | 0.0474 | 8~100 |
| Iron & Steel | 146 | 2.8286 | 127 | 2.8225 | 15 |
| TOTAL | 1810 | 29.7212 | 1561 | 29.6153 | |

Exact pure CO₂ emission need be reconfirmed

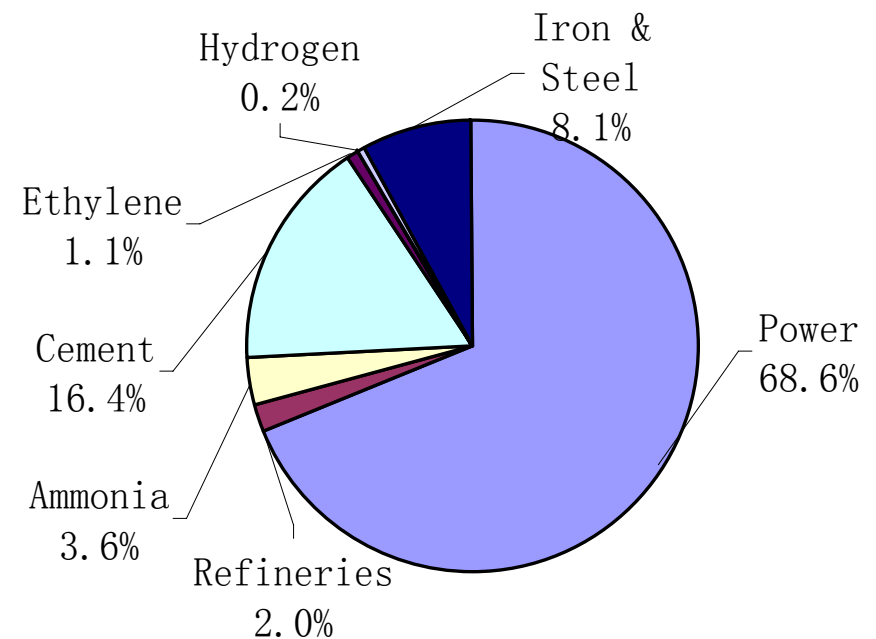




1.3. CO₂ Emissions in Sectors



World(after IEA)

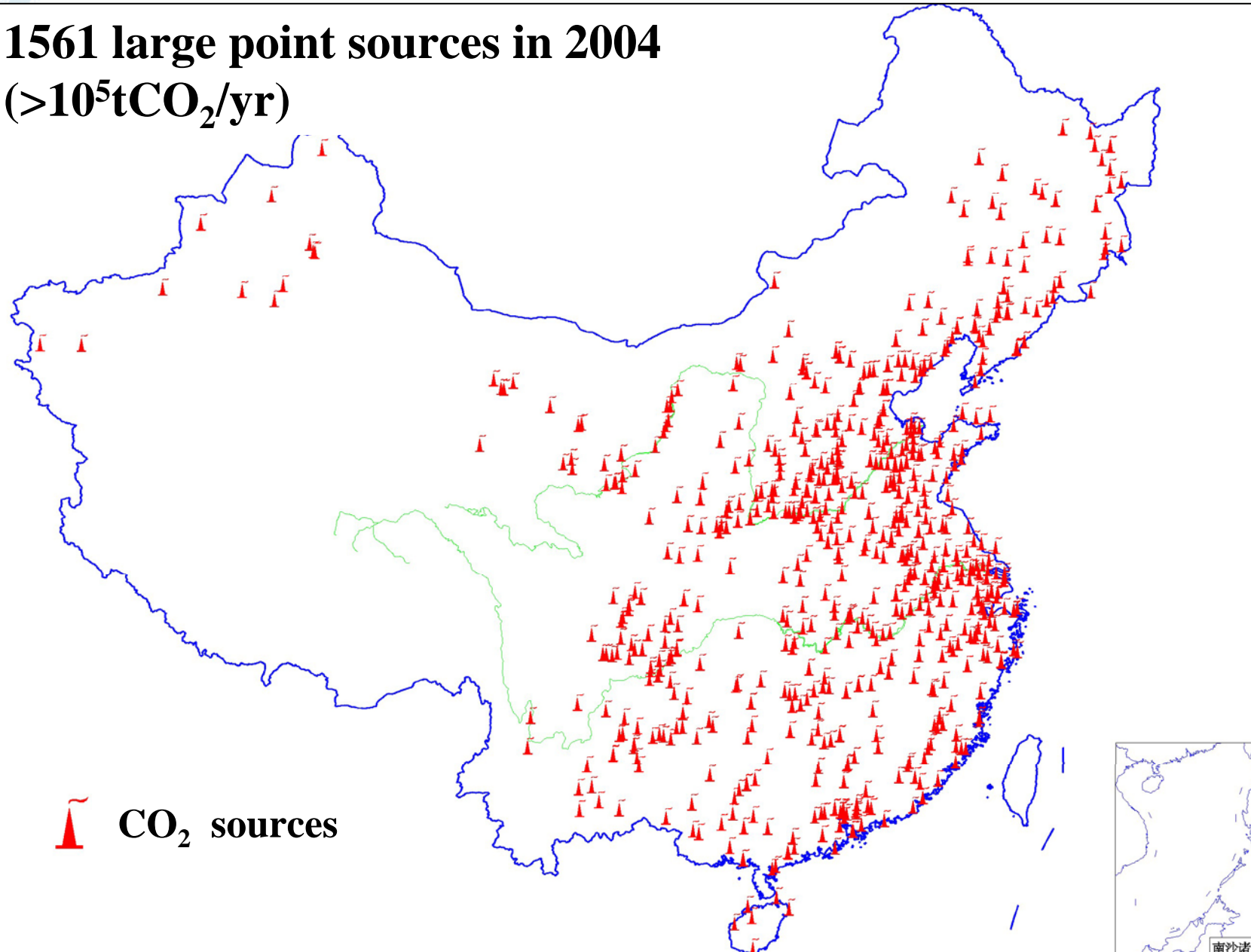



China





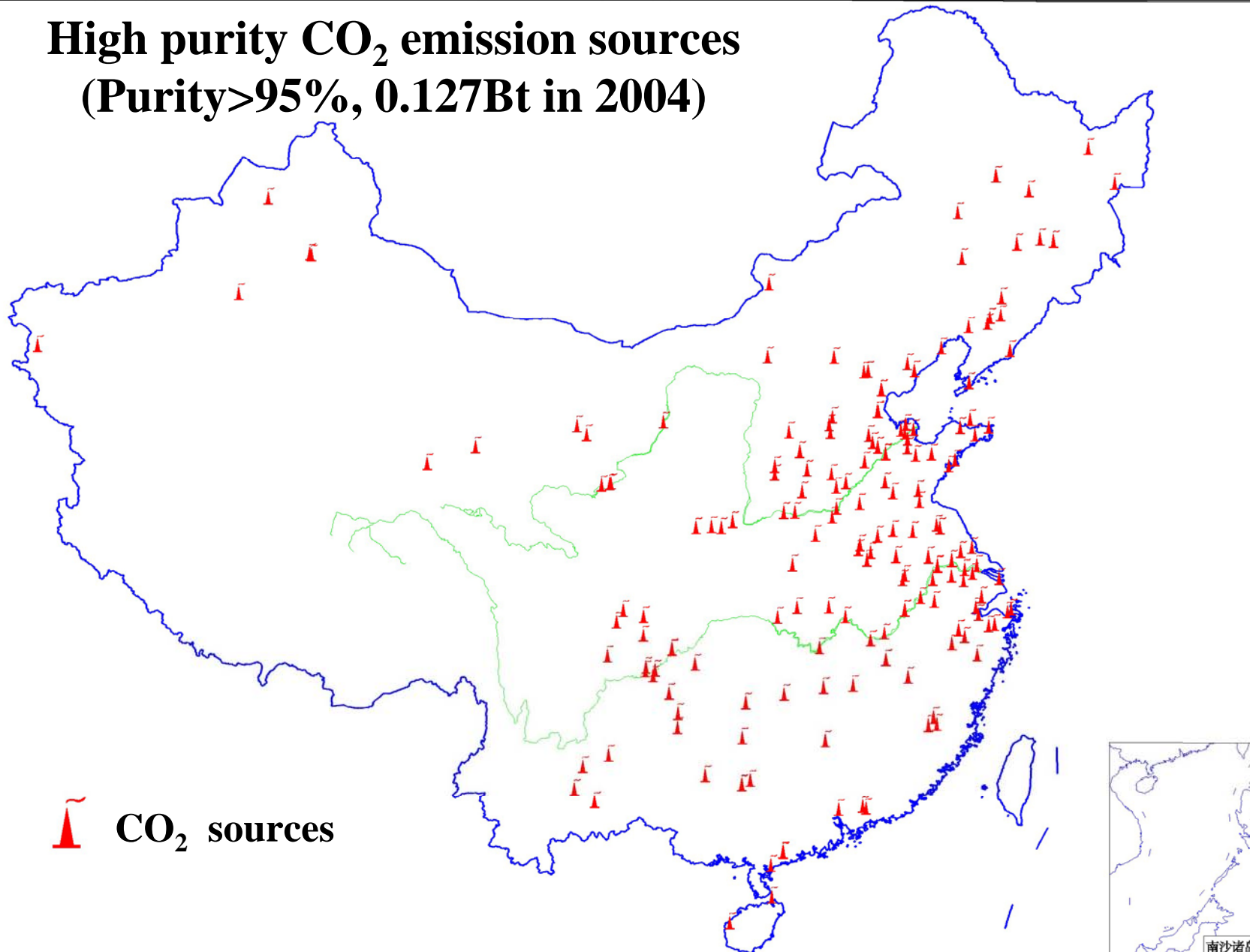
1561 large point sources in 2004 ($>10^5 \text{tCO}_2/\text{yr}$)



 **CO₂ sources**



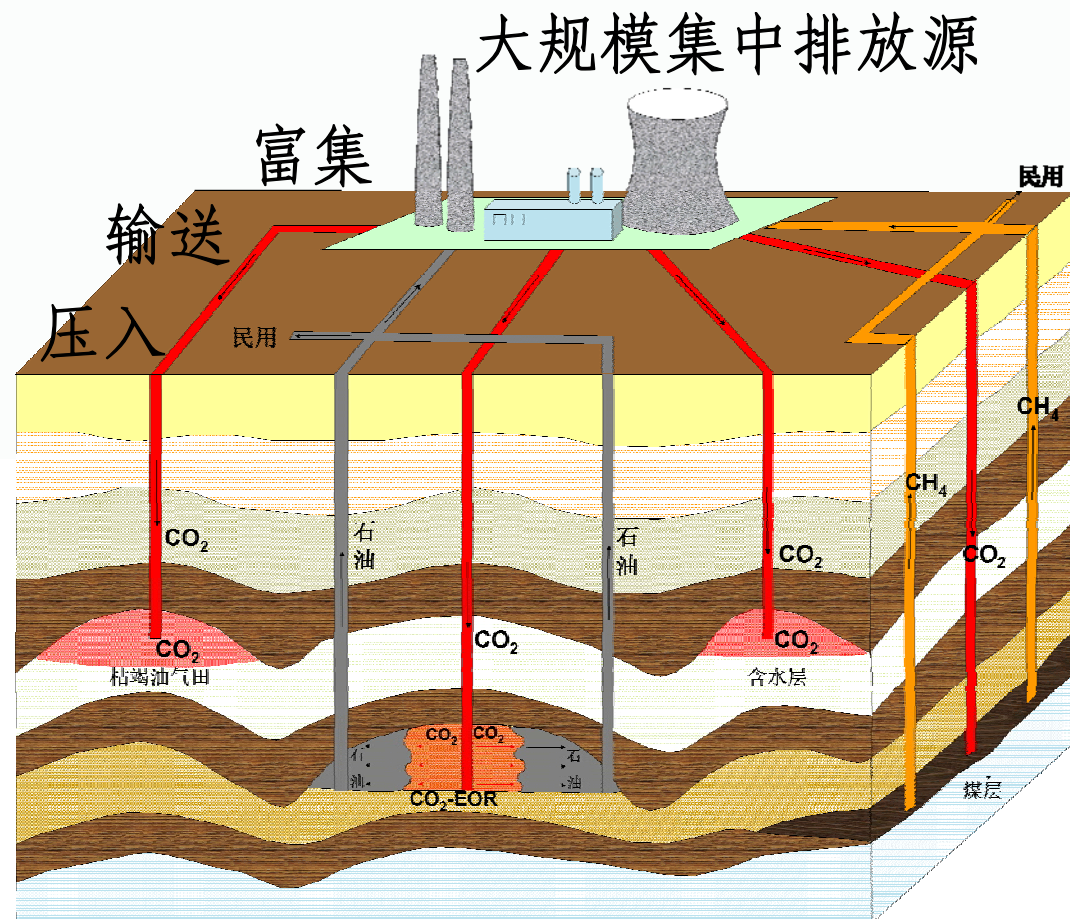
High purity CO₂ emission sources (Purity>95%, 0.127Bt in 2004)





1. Potential: CO₂ storage capacities

- ❖ CO₂驱替煤层气 (CO₂-ECBM)
- ❖ CO₂驱油 (CO₂-EOR)
- ❖ 枯竭气田 (Depleted gas fields)
- ❖ 深部含水层 (Aquifers)





CO₂-ECBM





Methodology

$$SCO_2 = 0.1 \times A \times TH \times \rho_{coal} \times GC \times RF \times ER \times \rho_{co_2}$$

SCO_2 : capacity ;

0.1: 10% of the total reserve available;

A : surface area of coal basins [m^2];

TH : cumulative thickness of the coal [m];

ρ_{Coal} : coal density [Mg/m^3];

GC : gas content [m^3 STP gas/ Mg coal];

RF : recovery factor [-] ;

ER : CO_2 -to- CH_4 replacement ratio [-];

ρ_{co2} : standard density of CO_2 [= 1.977 kg/m^3]

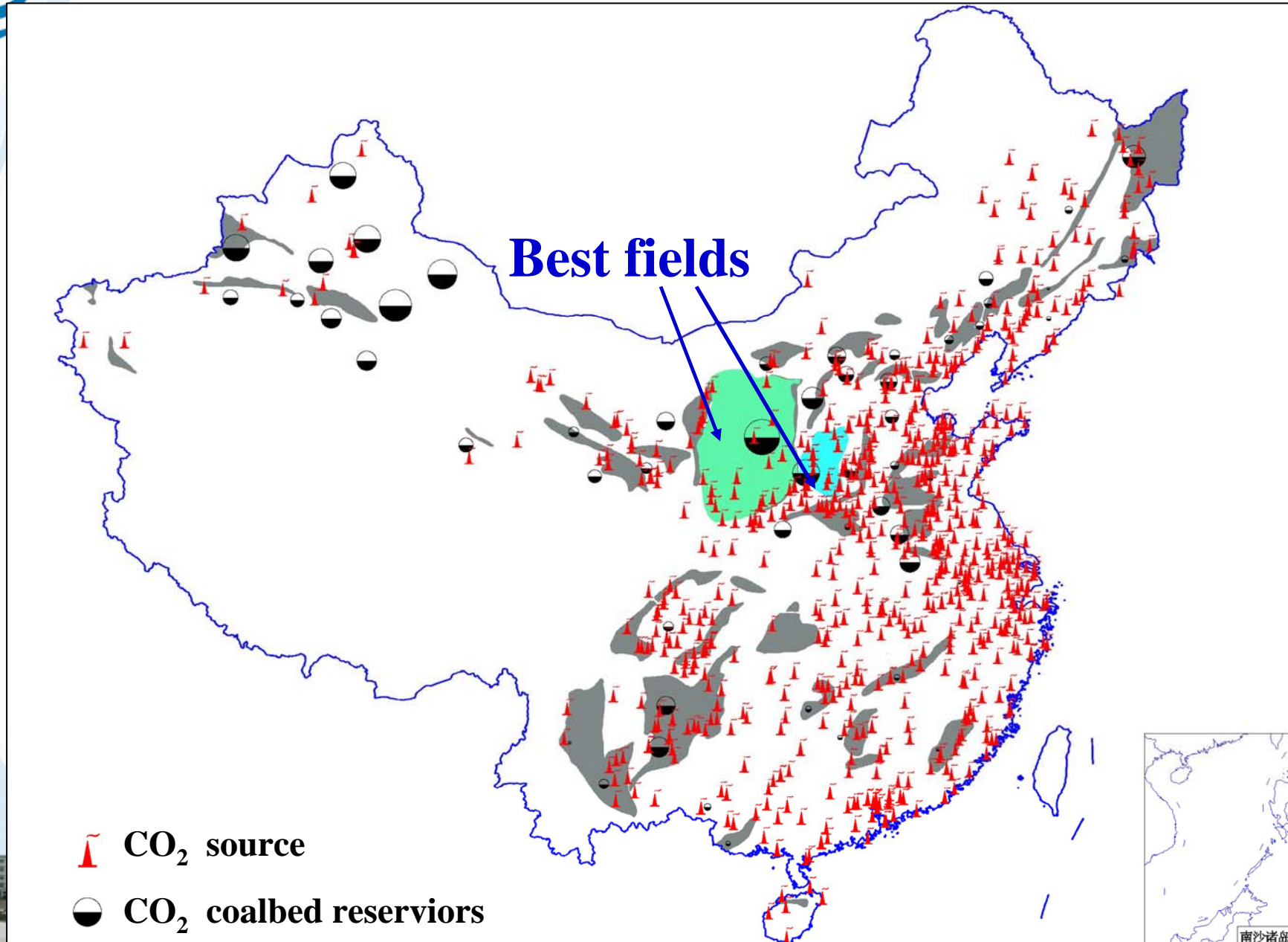




CO₂-ECBM Capacity

CO₂ capacity: $120.78 \times 10^8 \text{t}$





▲ CO₂ source

● CO₂ coalbed reservoirs





Methodology

$$SCO_2 = Eoil \times R_{CO_2}$$

$$Eoil = EXTRA \times OOIP \times C$$

***Eoil*:** Extra oil due to by CO₂-EOR (BO);

***R_{CO2}*:** Ratio for net CO₂ injection versus oil production (Mg/BO), from 0.15 to 0.8;

***EXTRA*:** Percentage of extra oil recovery due to CO₂ injection[-];

***OOIP*:** Original oil in place, in barrels of oil(BO);

***C*:** Contact factor[-], equal to 0.75(Stevens,1999).

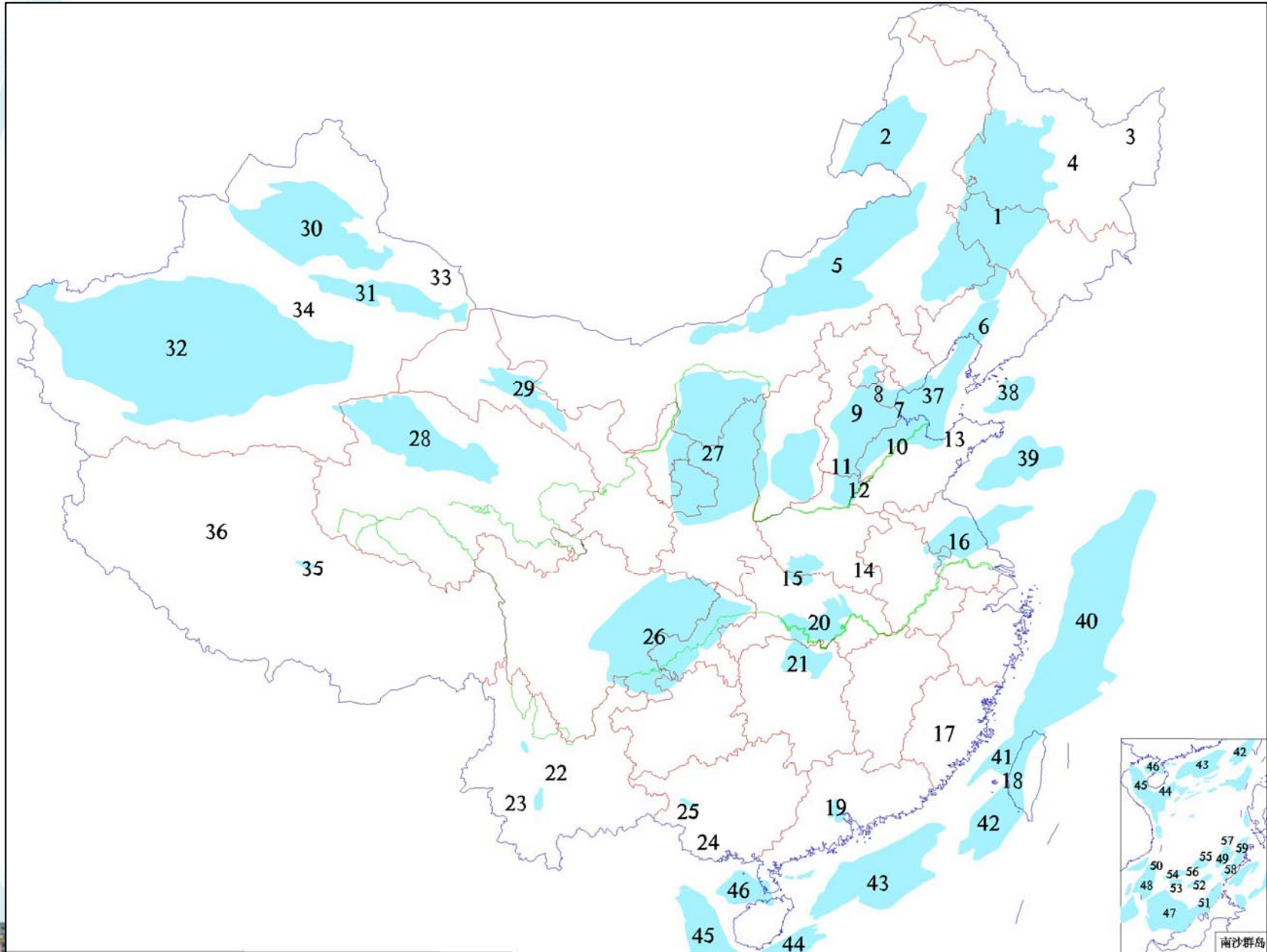




EOR Capacity

| | OOIP | $SCO_2/10^8t$ | $E_{oil}/10^8t$ |
|--------|---------|---------------|-----------------|
| Total | 1106.56 | 101.66 | 31.46 |
| Proved | 215.74 | 48.30 | 14.67 |





Main oil fields and oil & gas basins in China

中国科学院武汉岩土力学研究所
INSTITUTE OF ROCK AND SOIL MECHANICS
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES





Gas Fields To Be Depleted





2.4.1 Methodology

$$SCO_2 = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M 0.75 \times R_{OGIPij} \times R_{CO_2/CH_4ij} \times \rho_{CO_2}$$

With:

$$R_{OGIPij} = a \times OIGP \times R_s$$

SCO_2 : Capacity [kg];

0.75 : 75% of void space created by exploiting natural gas may be replaced with CO_2 (Stevens, 1999).

R_{OGIPij} : Ultimately recovered CH_4 [m³];

R_s : recovery factor[-];

R_{CO_2/CH_4} : Molar ratio of CO_2/CH_4 [-] , function of depth





Capacity

| | GIP/10⁸m³ | SCO₂/10⁸t |
|------------------|--|--|
| Predicted | 483816.63 | 304.83 |
| Proved | 32041.43 | 41.03 |





Aquifer





Methodology: Volume method (in SC phase)

$$SCO_2 = A \times 0.01 \times 0.02 \times m \times \phi \times \rho_{CO_2}$$

SCO_2 : capacities [M];

m : the thickness of aquifers; **A -area**[L²];

ϕ : the porosity of brine aquifers[-]

ρ_{CO_2} : CO₂ density





Methodology:

Solubility method (dissolved in water)

$$SCO_2 = a \times A \times h \times \eta \times \phi \times R \times \rho_w \times M_{CO_2}$$

SCO_2 : Capacity[M];

a : the ratio of basin area available for storage, 0.01;

A : basin area [L²];

h : depth [L];

η : Aquifer-sediments ratio [-];

ϕ : porosity of aquifers [-]

R : CO₂ solubility [L³/L³]

M_{CO_2} : mole density, 44g/mol





Capacity

| Location | Volume method/ 10^8t | | | Solubility method / 10^8t |
|----------|-------------------------------|--------|--------|---------------------------------------|
| | low | best | high | |
| Onshore | 7.68 | 122.97 | 276.65 | 773.80 |
| Offshore | 2.43 | 38.84 | 87.37 | 661.25 |
| Total | 10.11 | 161.81 | 364.02 | 1435.05 |





Capacity summary (in 10^8t)

| | |
|---------------|---------------------|
| ECBM: | 120.8 |
| EOR: | 26.1 ~ 139.2 |
| 枯竭气田: | 41.0 ~ 304.8 |
| 含水层: | |
| SC: | 10.1 ~ 364.0 |
| Diss.: | 1439.0 |
| 合计: | 1636 ~ 2368 |





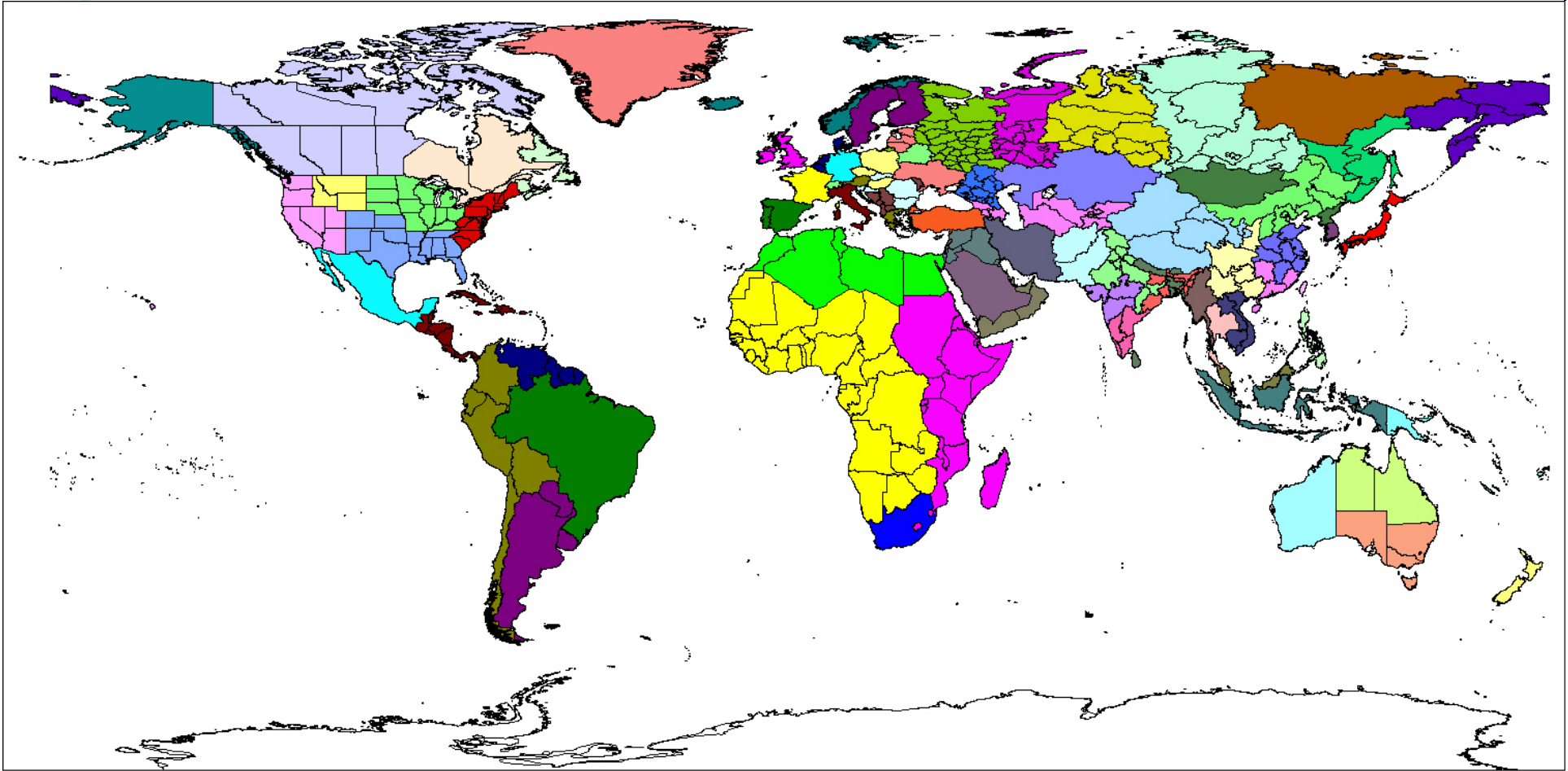
2. Early opportunities: Scenario analyses

- ❖ **The DNE21+ model**
- ❖ **Energy saving, renewables (solar, wind, hydro), energy switching, nuclear, CCS**
- ❖ **2000-2050**
- ❖ **77 regions, 5 regions in China**
- ❖ **Constrains:**
 - * **550ppm path**
 - * **satisfying energy demand**
 - * **2000-2050 global energy system with lowest cost**
 - * **without CO2 trading**



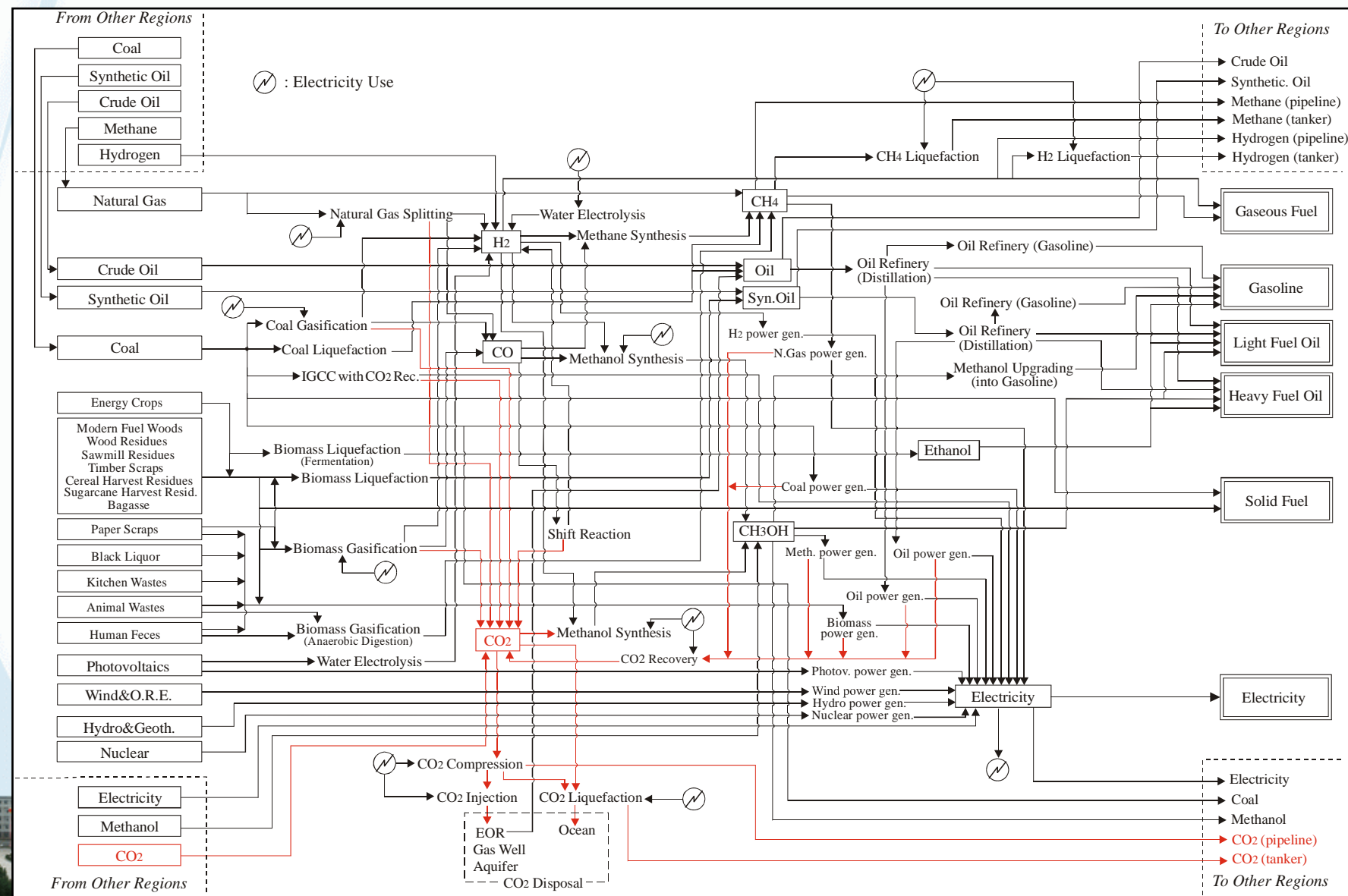
Regions

分区





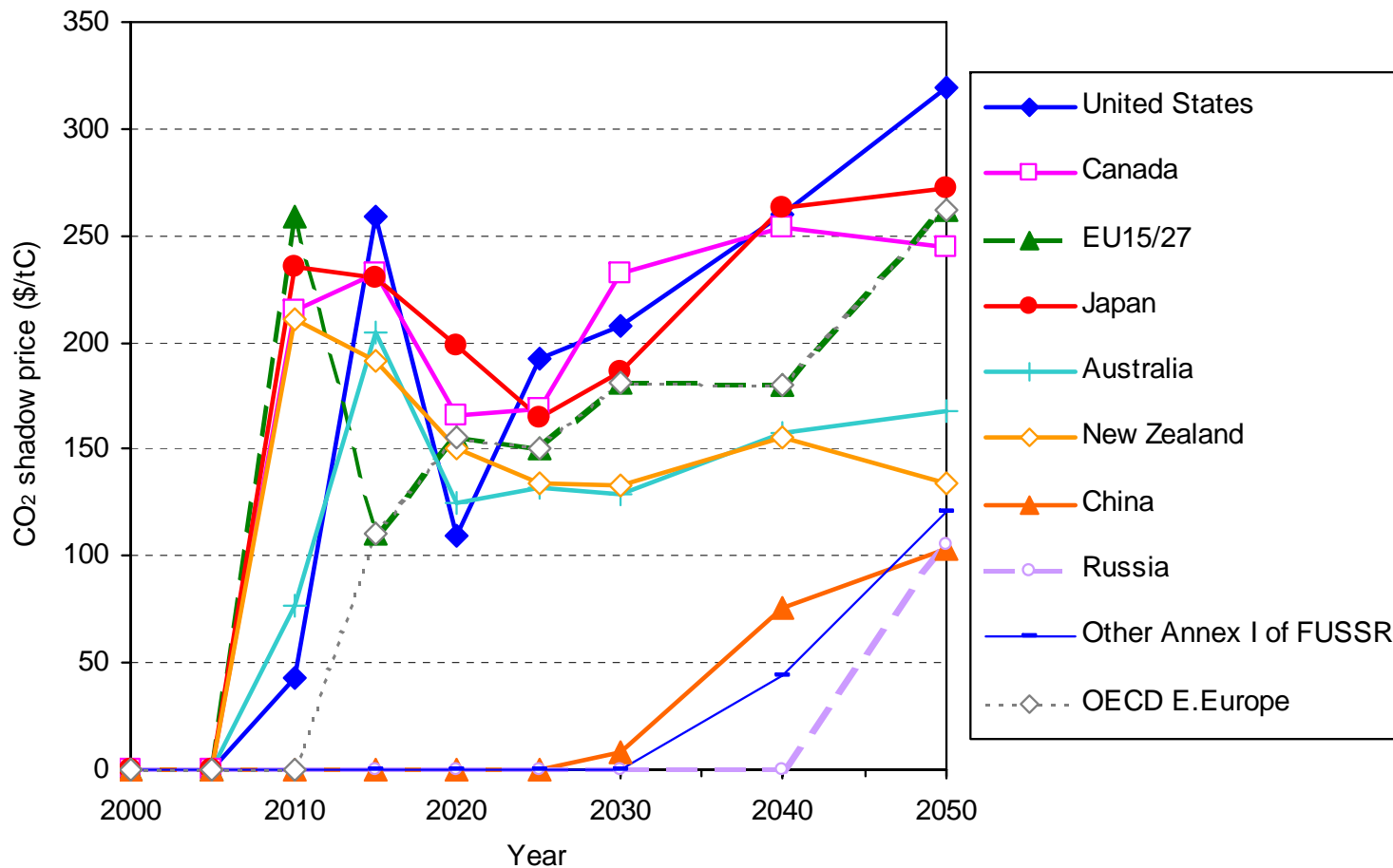
Energy system





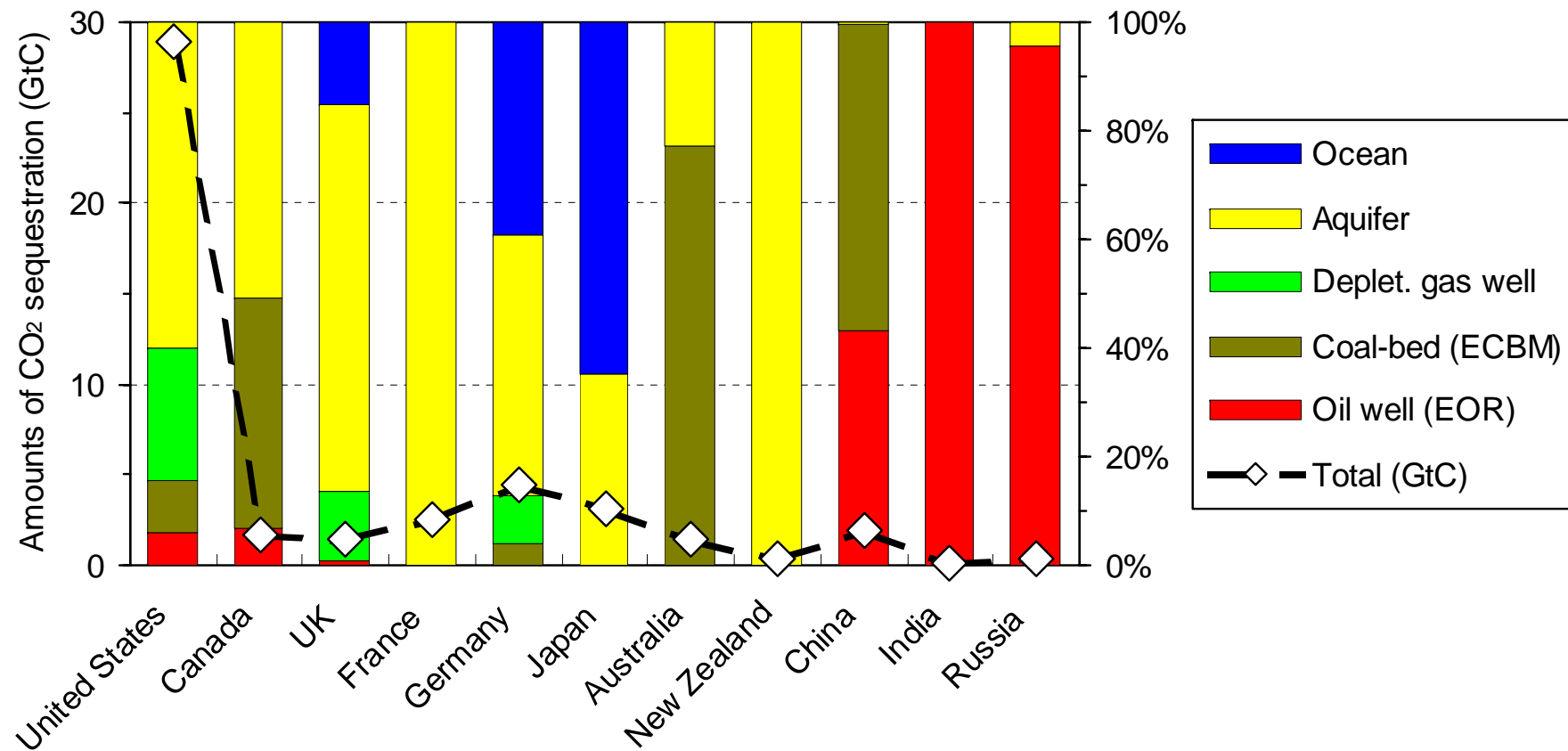
Result: cost

- Regulation Case w.o. Emission Trading -





Result: Options and deploy scale





2. Early opportunities summary

- ❖ **Major options: ECBM and EOR**
- ❖ **Deployment: 7Bt**
- ❖ **Cost: half of USA, Japan and EU**
- ❖ **Best sites: in Huabei Plain**
- ❖ **The above depends on the emission reduction target of China**





3. CO₂/N₂-ECBM





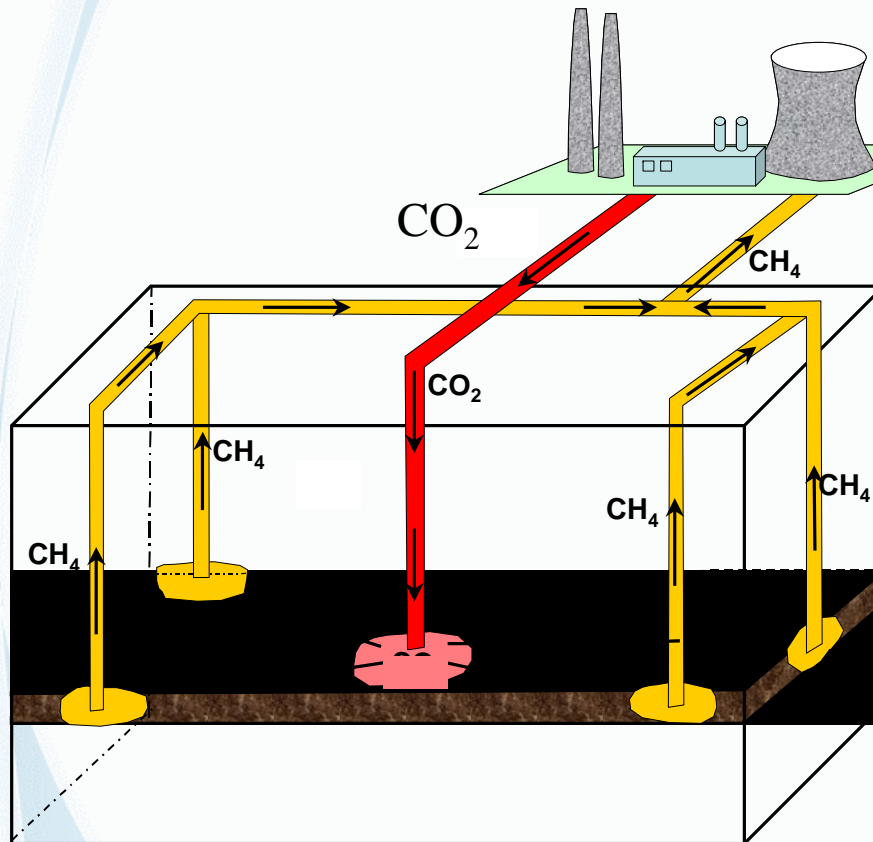
CO₂/N₂-ECBM: motivations

- **CO₂ decreases permeability, increases the risk of outburst=> high-permeability unmineable coals.**
- **pure CO₂ is costly.**
- **In China, the permeability of 72% of coals < 1mD, and defining “unminable” is difficult**
- **ECBM method suitable for low-permeability mineable coals is required.**

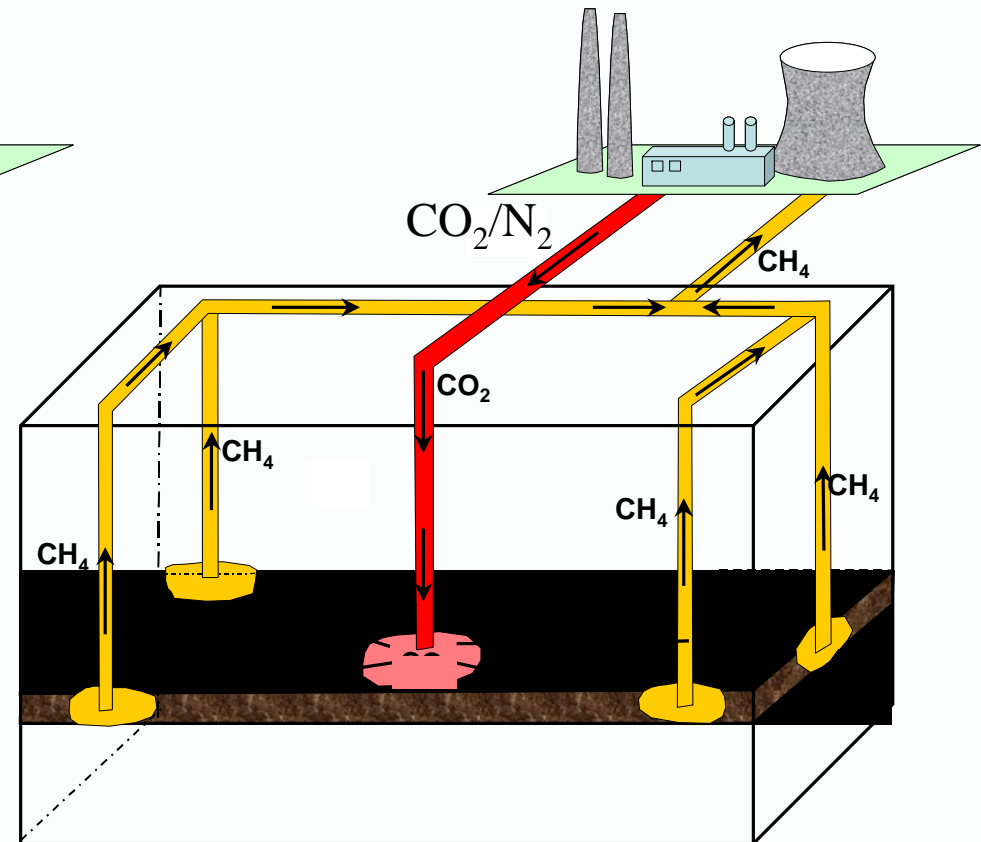




CO₂/N₂-ECBM: Concept



CO₂-ECBM



CO₂/N₂-ECBM





CO₂/N₂-ECBM: features

The roles of N₂

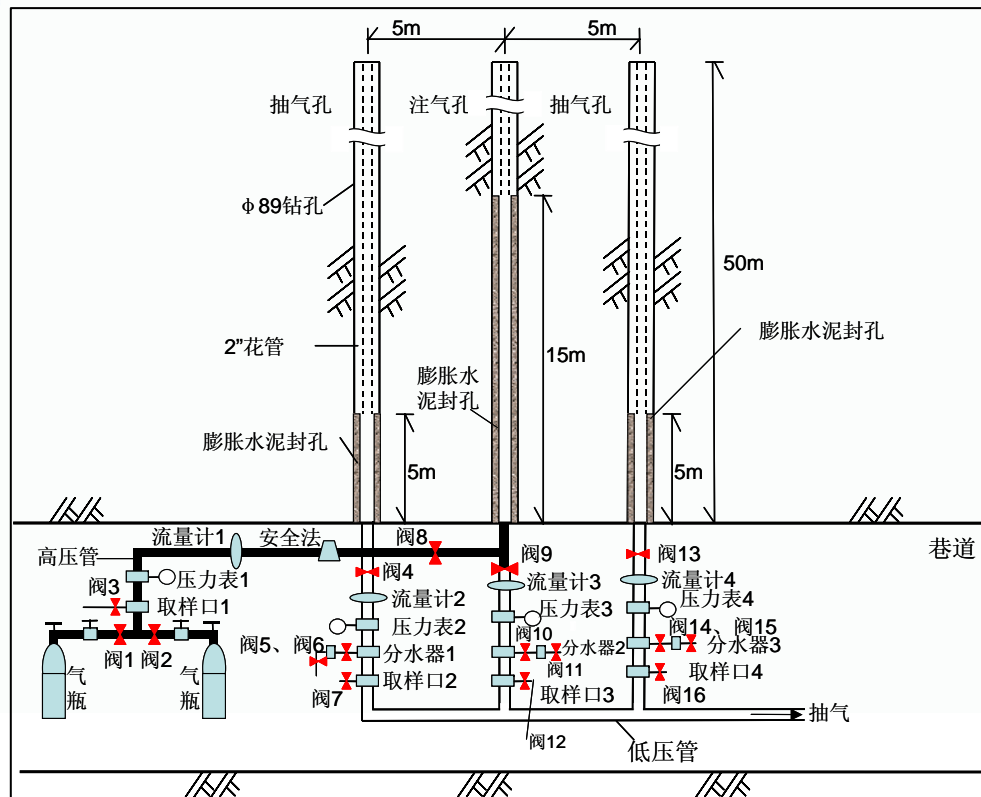
- ❖ **Increasing permeability due to coal shrinkage.**
- ❖ **Less risky than CO₂ and CH₄.**

Features

- ❖ **Balancing the displacement role of CO₂ and permeability-enhancing role of N₂.**
- ❖ **Mitigating the gas burst risk of coal: urgent needs**
- ❖ **Suitable for low-permeability minable coals.**
- ❖ **Lower transport and capture cost**
- ❖ **CO₂ and/or CH₄ emission reduction, depending on mining or not**



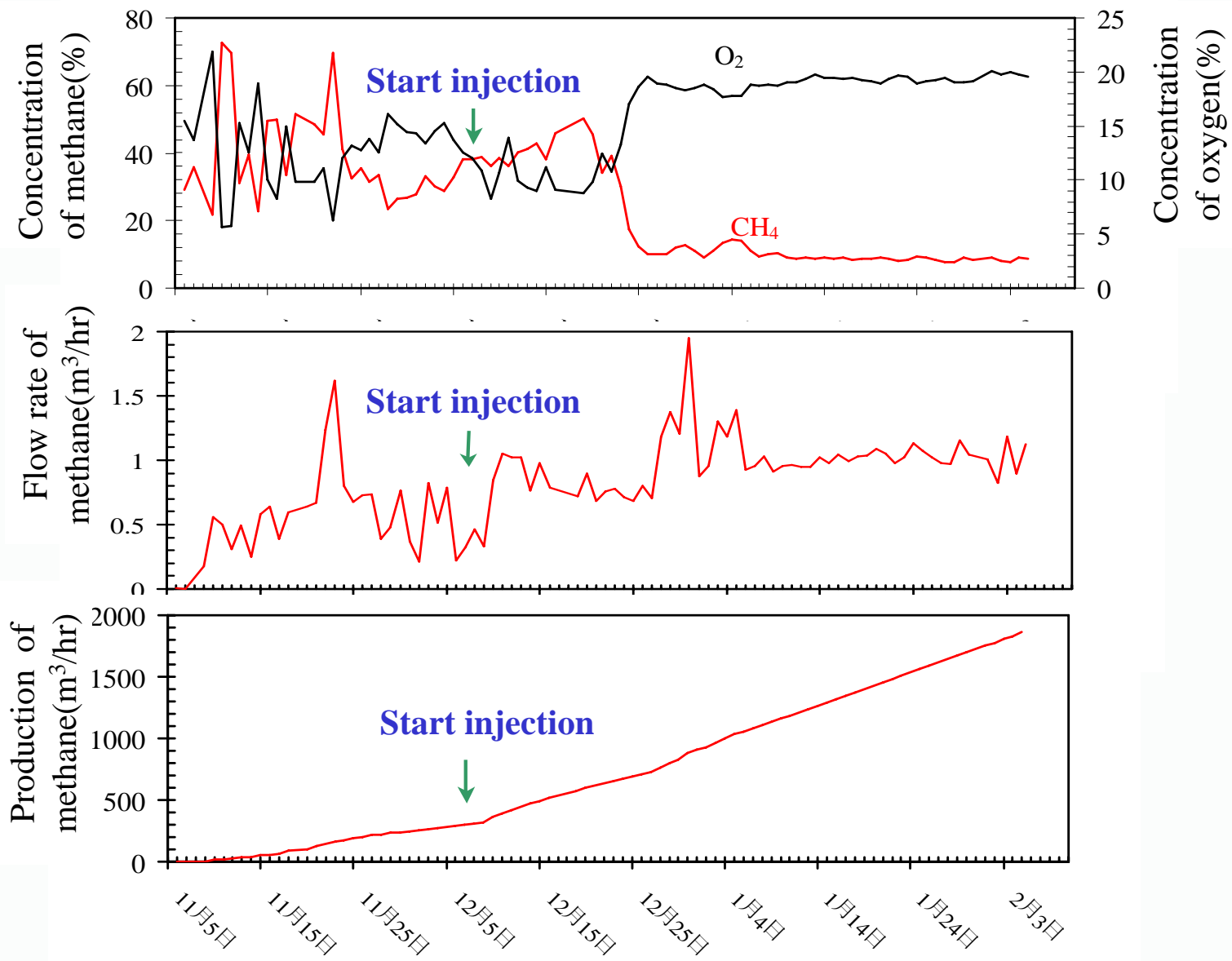
Pilot Test in Pingdingshan Coal Mine



- ❖ 620m deep tunnel
- ❖ Initial permeability of $4\mu\text{D}$
- ❖ 3 test wells + 220 existing production wells

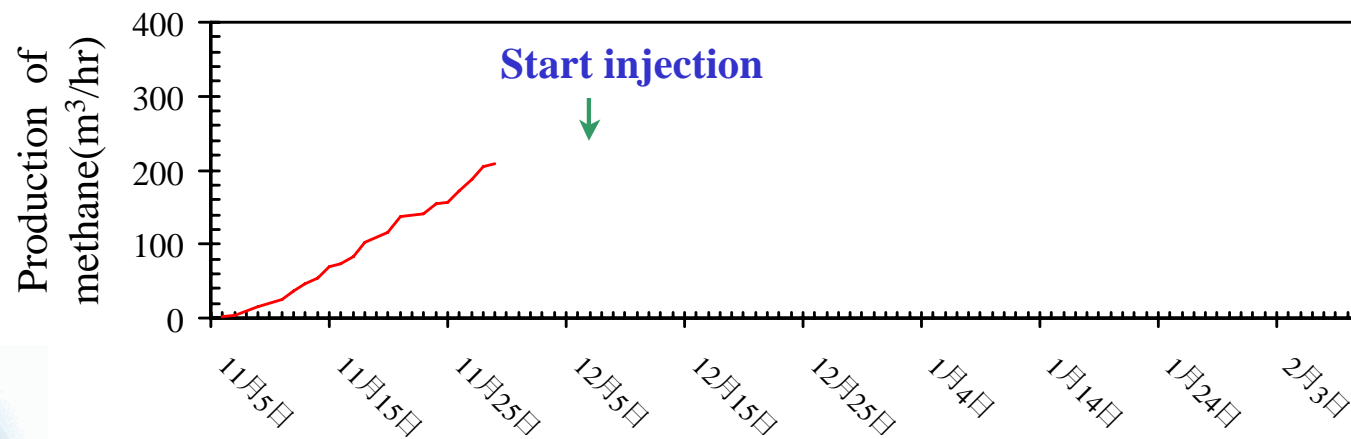
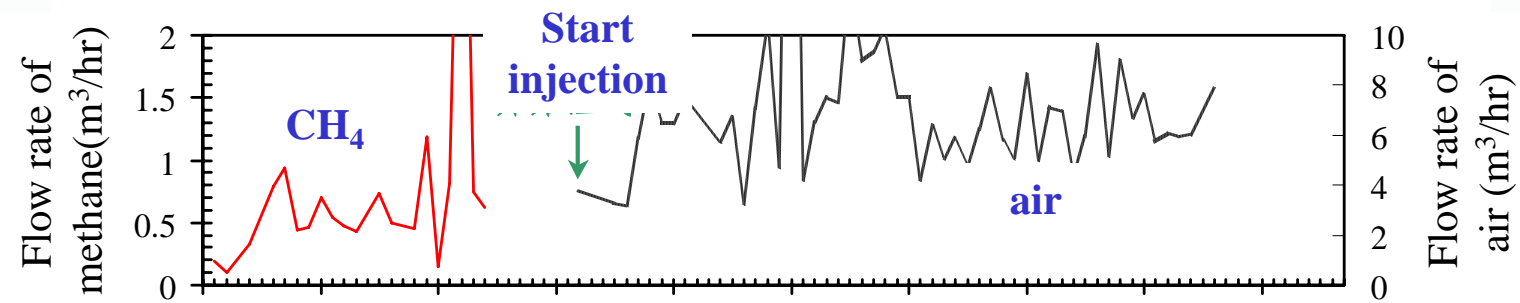
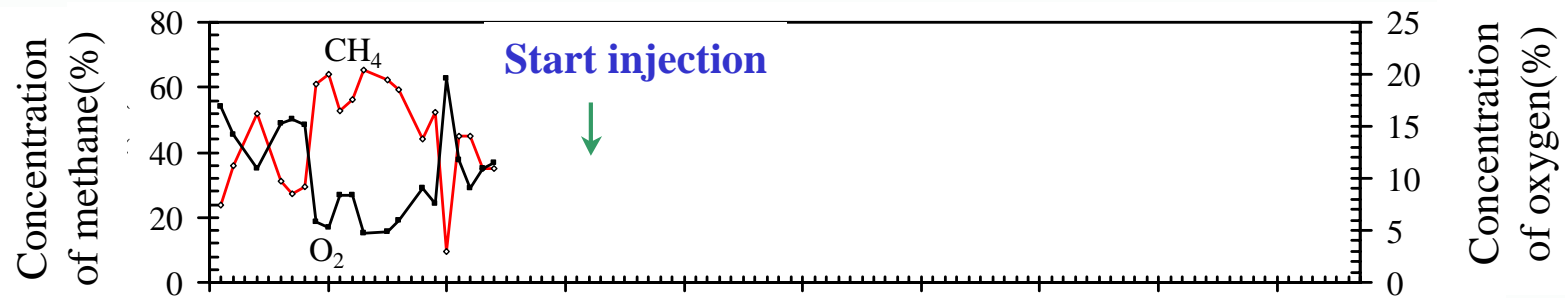
To verify the role of N_2 and feasibility of Chinese technologies





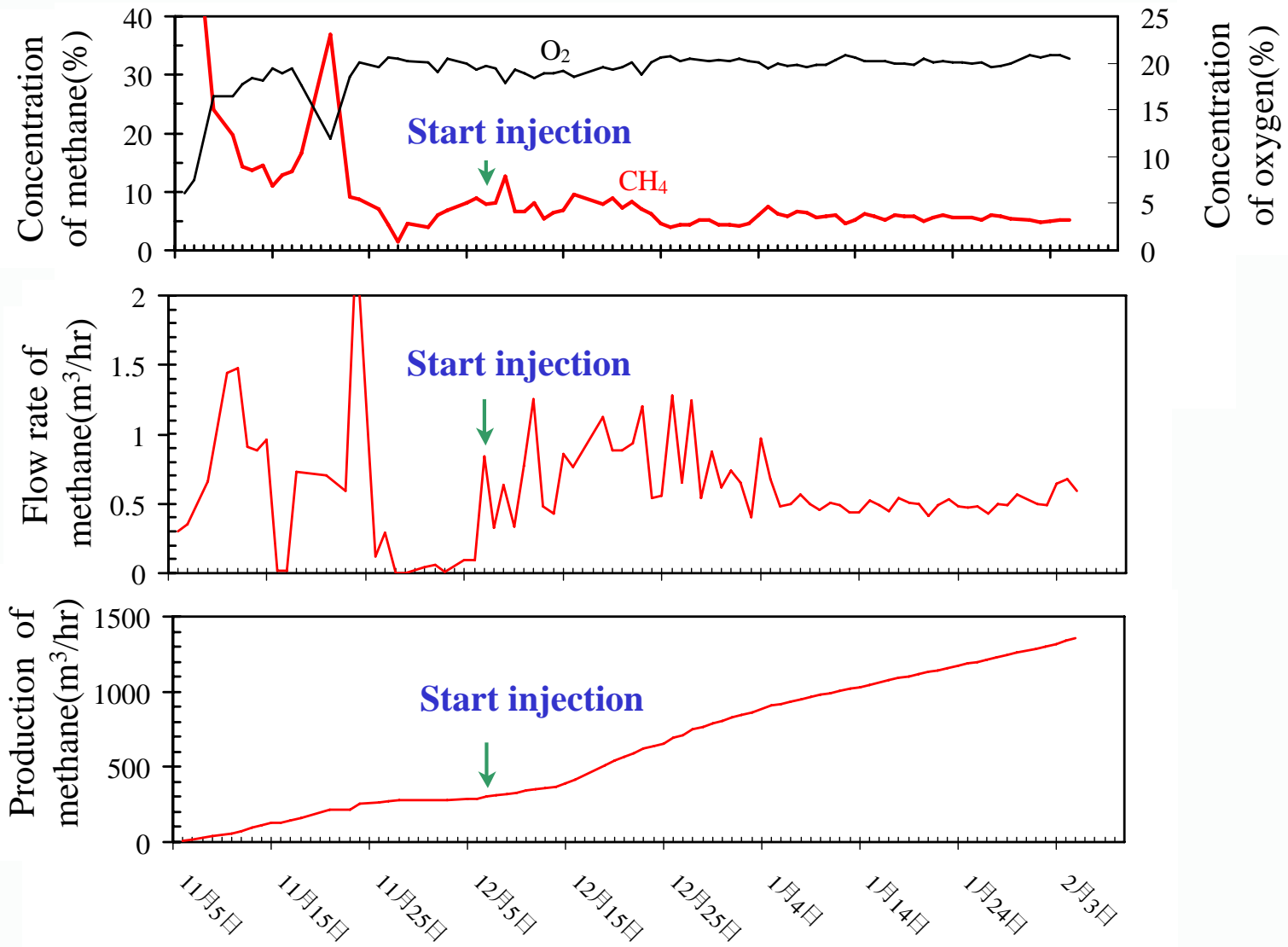
1# borehole





2# borehole





3# borehole





Results of pilot test

| The number of boring hole | Flow rate of CH ₄ (m ³ /hr) | | | Cumulative production of CH ₄ (m ³) | | | Average concentration of CH ₄ (%) | | |
|---|---|------|---------|--|--------|---------|--|------|---------|
| | Pump solely | ECBM | average | Pump solely | ECBM | average | Pump solely | ECBM | average |
| 1# hole | 0.41 | 1.10 | 0.86 | 303.6 | 1556.4 | 1860.0 | 38.1 | 15.9 | 23.5 |
| 2# hole | 0.422 | | | 208.1 | | | 43.4 | | |
| 3# hole | 0.40 | 0.75 | 0.63 | 299.3 | 1036.1 | 1336.1 | 13.5 | 6.0 | 8.6 |
| Boring holes nearby(220 by traditional method) | 0.13 | | | | | | 6 | | |
| Comparison ECBM with traditional method | 3.2 | 7.1 | 5.7 | | | | 5.3 | 1.8 | 2.7 |

Comparing with 220 extraction wells, the average CH₄ concentration was 170% up, and average CH₄ flow rate was 470% up.



Summary

- 1. We have lots of early opportunities of implementing ECBM and EOR.**
- 2. Both options need be adapted to our practical situations.**
- 3. Scenario analyses have given us a preliminary image, more work must be done.**
- 4. The pilot test has shown the effectiveness of CO₂/N₂-ECBM. Larger tests in more mines are required.**





Thank you for your attentions!

Gratitude to:

CAS for financial support

PCC for providing the test site and technical support

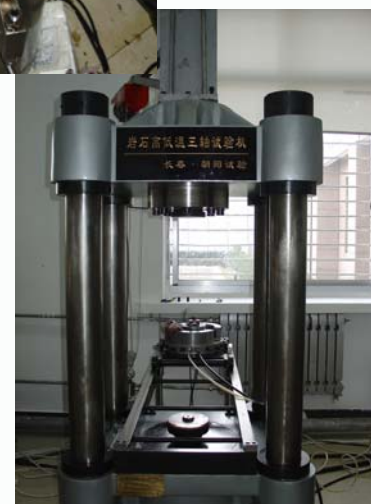
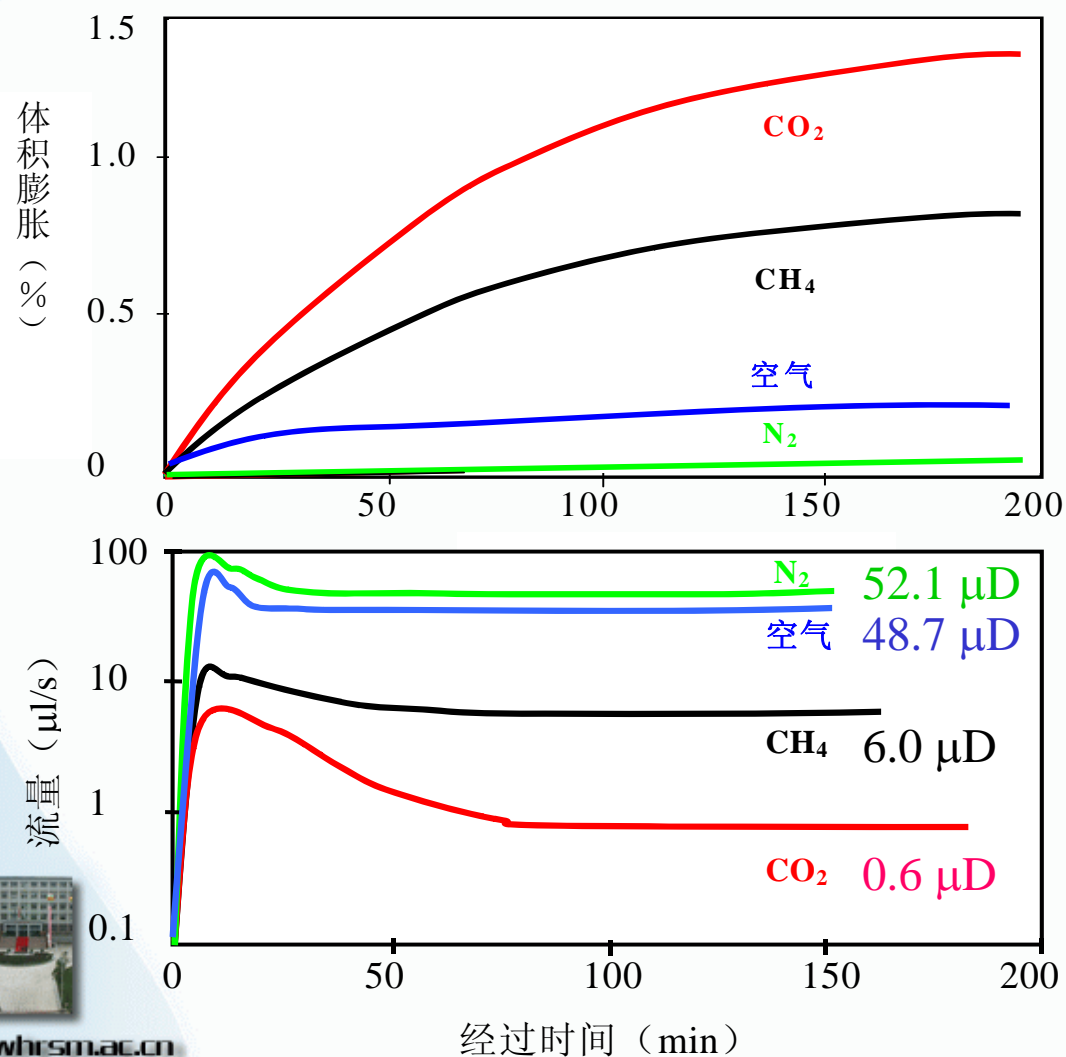
RITE for providing DNE21 simulator

Many companies for providing information





3、早期机会 混合气体驱替煤层气 (G-ECBM)





Background

Recovery 15%

CH₄ emission from coal mines

0.2-0.3Bt-CO₂e in 2004.

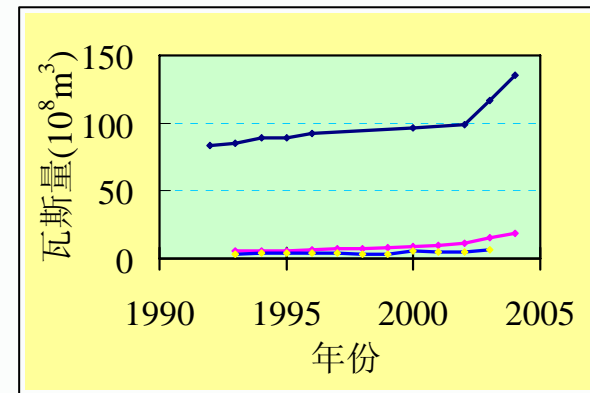
Gas outbursts

*** Death toll of 2400 in 2005.**

Low rate of CBM utilization

*** 7 % of CH₄ from coal mines was utilized.**

72% of coals have permeability lower than 1mD





1、地质封存研究组介绍

- 成立于2005年
- 组员6人+学生7人
- 研究方向：封存工程的安全性评价与监控
- 近期面向有附带效益的工程；远期面向大规模封存工程





2、现状与问题：我国的经验 提纯（富集、回收）

| 回收工艺 | 产 能（万吨） |
|---|---------|
| 英国BOC公司技术 | 9 |
| 美国Praxair公司技术 | 12.2 |
| 低温分馏精制 | 6 |
| 变压吸附(pressure swing adsorption, PSA)工艺 | 2 |
| 林德公司技术 提浓,压缩,液化净化 | 8 |

总提纯能力：约200万吨/年

出厂价 ： 50-70USD/t





2、现状与问题：我国的经验 管道输送

1990年，大庆油田建设过 6.5 km的CO₂ 管道





2、现状与趋势： 我国的经验： 压入

| Project | Scale of project | Start date | Storage type |
|---------|------------------|------------|-----------------------|
| 大庆油田 | Pilot | 1990 | CO ₂ -EOR |
| 江苏油田 | Pilot | 1998 | CO ₂ -EOR |
| 辽河油田 | Pilot | 2001 | CO ₂ -EOR |
| 中原油田 | Pilot | | CO ₂ -EOR |
| 吉林油田 | Pilot | 1994 | CO ₂ -EOR |
| 胜利油田 | Pilot | | CO ₂ -EOR |
| 沁水煤田 | Pilot | 2003 | CO ₂ -ECBM |
| 平顶山煤田 | Pilot | 2006 | G-ECBM |



www.whrsm.ac.cn



院武汉岩土力学研究所
OF ROCK AND SOIL MECHANICS
SE ACADEMY OF SCIENCES



2、现状与趋势：我国的水平

| | | 研究阶段 | 实证阶段 | 一定条件下经济可行 | 成熟化 |
|----|-------|------|------|-----------|-----|
| 富集 | 燃烧前 | X | | X | |
| | 燃烧后 | X | | X | |
| | 富氧燃烧 | X | X | | |
| | 工业分离 | | | | XX |
| 运输 | 管道 | | | ? | X |
| | 轮船 | ? | | X | |
| 埋存 | ECBM | X | X | | |
| | EOR | | | X | X |
| | 枯竭油气田 | X | | X | |
| | 含水层 | X | | X | |





2、现状与趋势： 关键问题

1) 科学问题

多成分多相系统的长期反应流动过程的理论与模拟。

2) 经济性

富集技术、增渗技术开发；适用条件明确化；设计优化。

3) 安全性（力学稳定性、泄漏）

调查与评价方法、长期监测技术





3、早期机会

- 封存工程的场地依存度高
- 研发工作和能力建设要依托工程
- 早期机会：低成本甚至有盈利、障碍较少
- 逐步解决困难、认识机理、提高技术

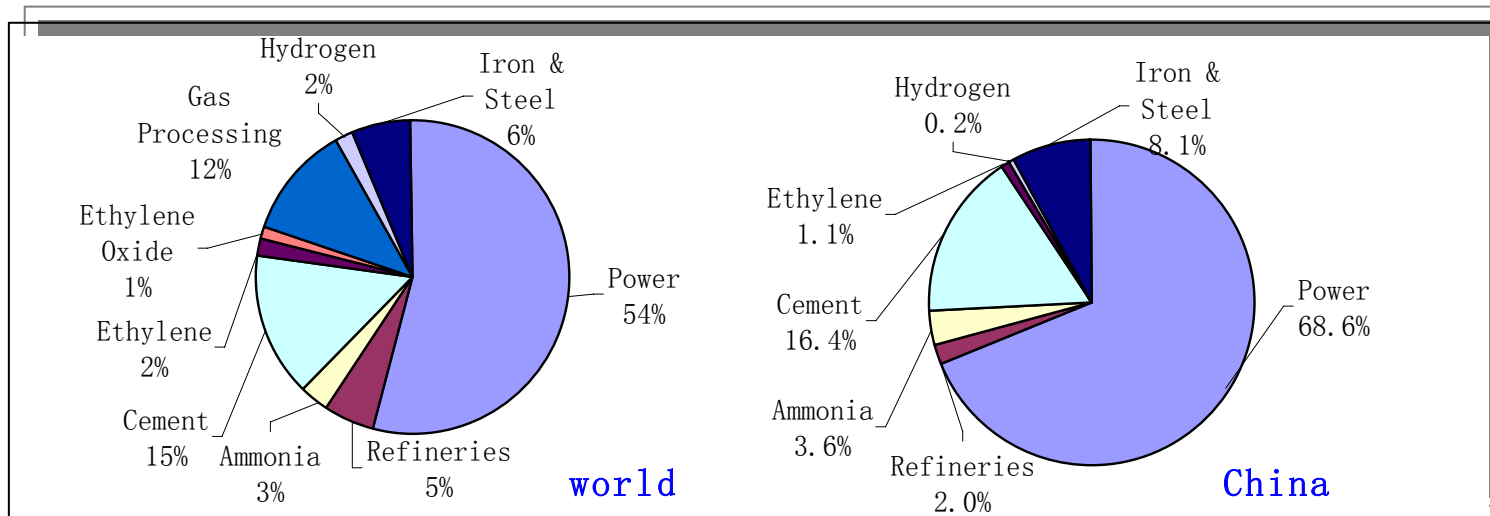
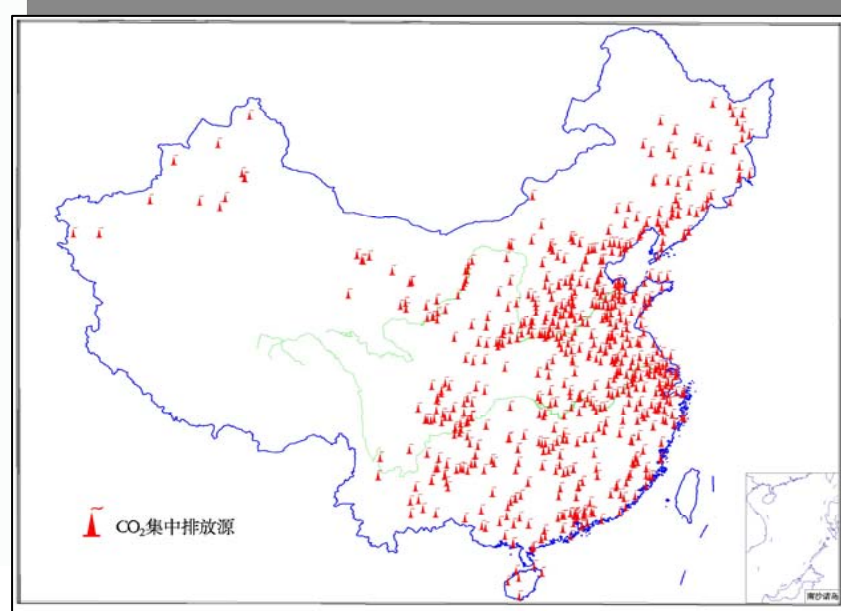
潜力调查、场地筛选、基础研究、现场试验





3、早期机会：集中排放源

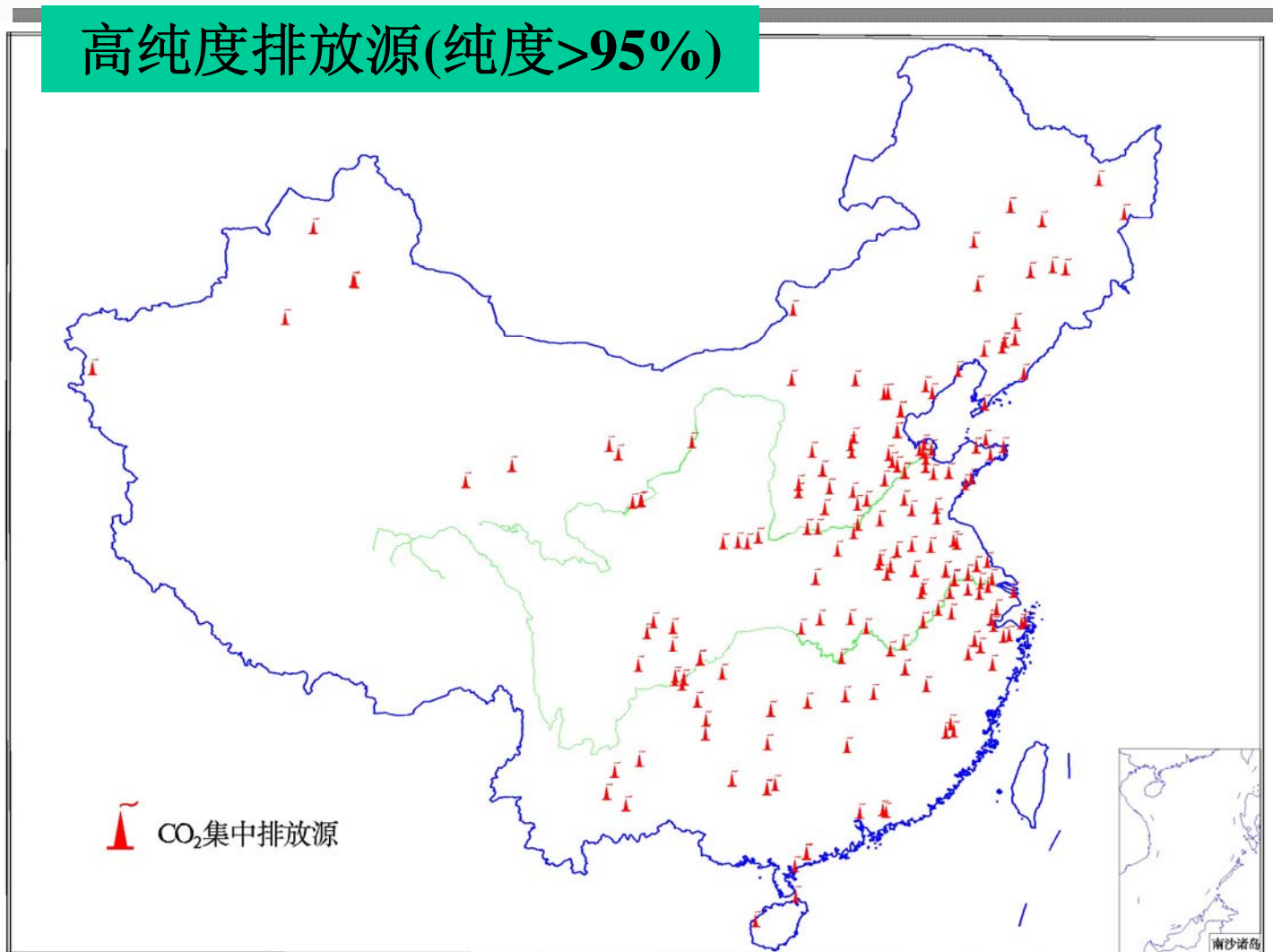
| 排放源 | 总计 | | >10 ⁵ t/yr | | 浓度 (%) |
|-------|------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|--------|
| | 数目 | 排放量 (10 ⁸ t) | 数目 | 排放量 (10 ⁸ t) | |
| 火力电站 | 622 | 18.6092 | 591 | 18.5895 | 3~15 |
| 炼油厂 | 92 | 0.7858 | 84 | 0.7813 | 3~13 |
| 制氨厂 | 162 | 1.2724 | 160 | 1.2709 | 100 |
| 水泥厂 | 584 | 5.7036 | 530 | 5.6663 | 20 |
| 乙烯厂 | 46 | 0.4378 | 43 | 0.4363 | 12 |
| 环氧乙烷厂 | 49 | 0.0114 | 1 | 0.0011 | 100 |
| 制氢厂 | 109 | 0.0724 | 25 | 0.0474 | 8~100 |
| 钢铁厂 | 146 | 2.8286 | 127 | 2.8225 | 15 |
| 总计 | 1810 | 29.7212 | 1561 | 29.6153 | |





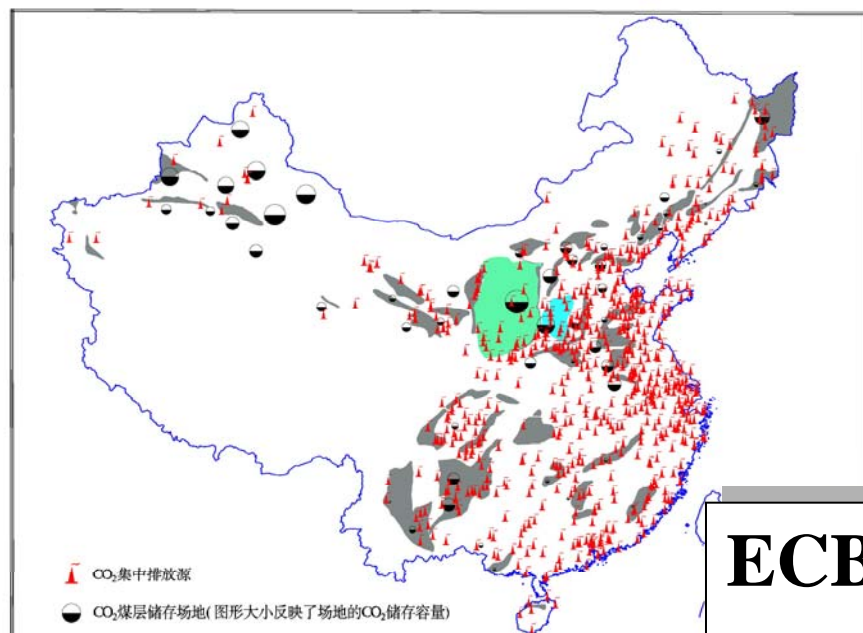
3、早期机会：排放源

高纯度排放源(纯度>95%)





3、早期机会：封存容量



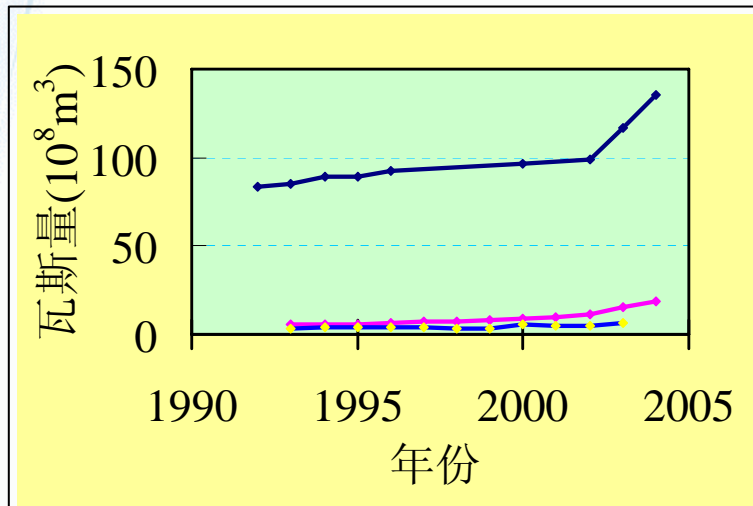
从源—地匹配来看华北平原、中原平原最好

ECBM: 120.8 亿吨
EOR: 26.1~139.2 亿吨
枯竭气田: 41.0 ~ 304.8 亿吨
含水层: 371 ~ 1439.0 亿吨
合计: 560 ~ 2000亿吨

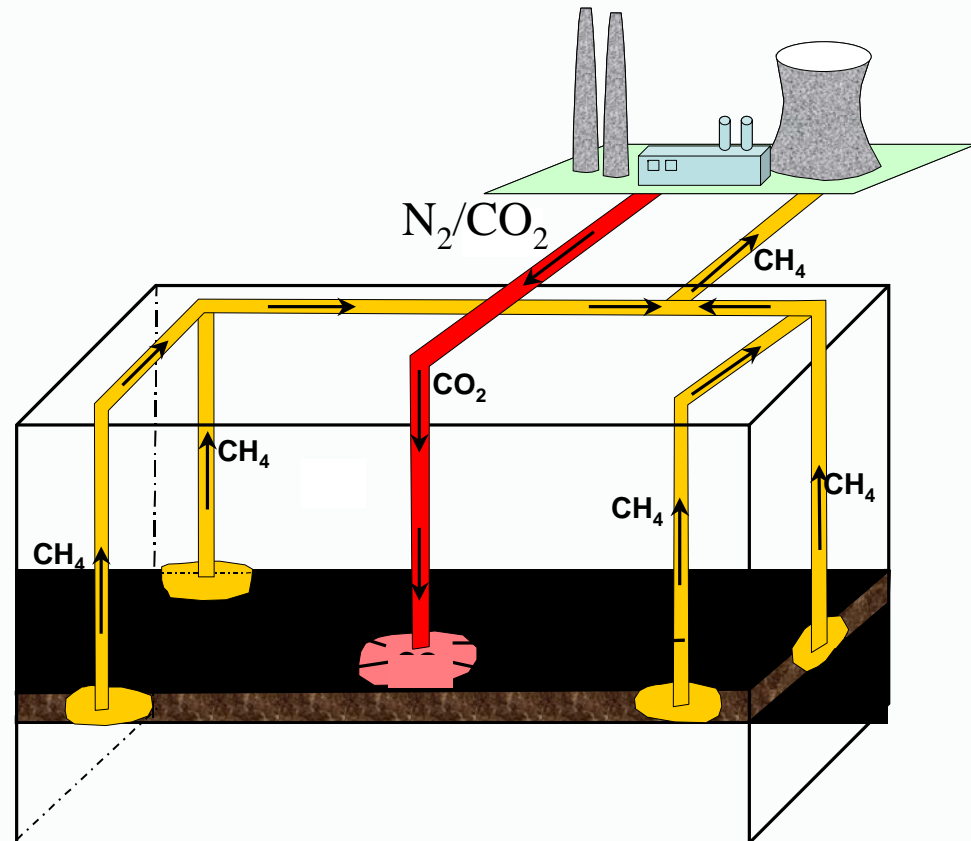




3、早期机会 混合气体驱替煤层气 (G-ECBM)



低采收率：事故多、利用率低、甲烷排放



提高渗透系数是关键





3、早期机会

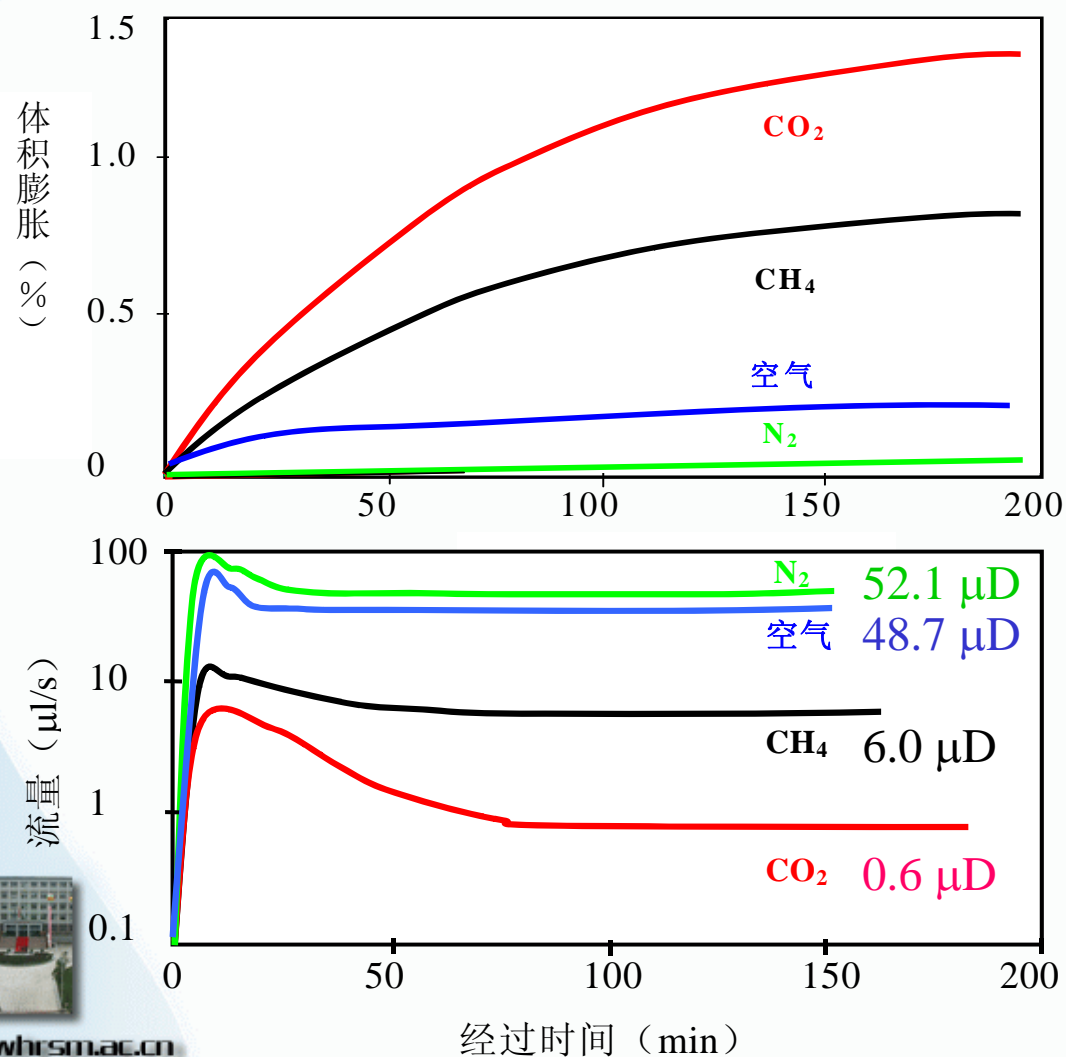
混合气体驱替煤层气 (G-ECBM)

- ❖ 非纯CO₂、含N₂的气体（烟道气）
- ❖ N₂驱替后，煤层收缩，有增渗作用，对于低渗透煤层具有重要意义。
- ❖ N₂的突出危险性远小于煤层气和CO₂。
$$\text{CO}_2:\text{CH}_4:\text{N}_2=6:3:1$$
- ❖ 气源近、无需提纯、大幅度减少成本。
国外试验成本，CO₂占50~70%



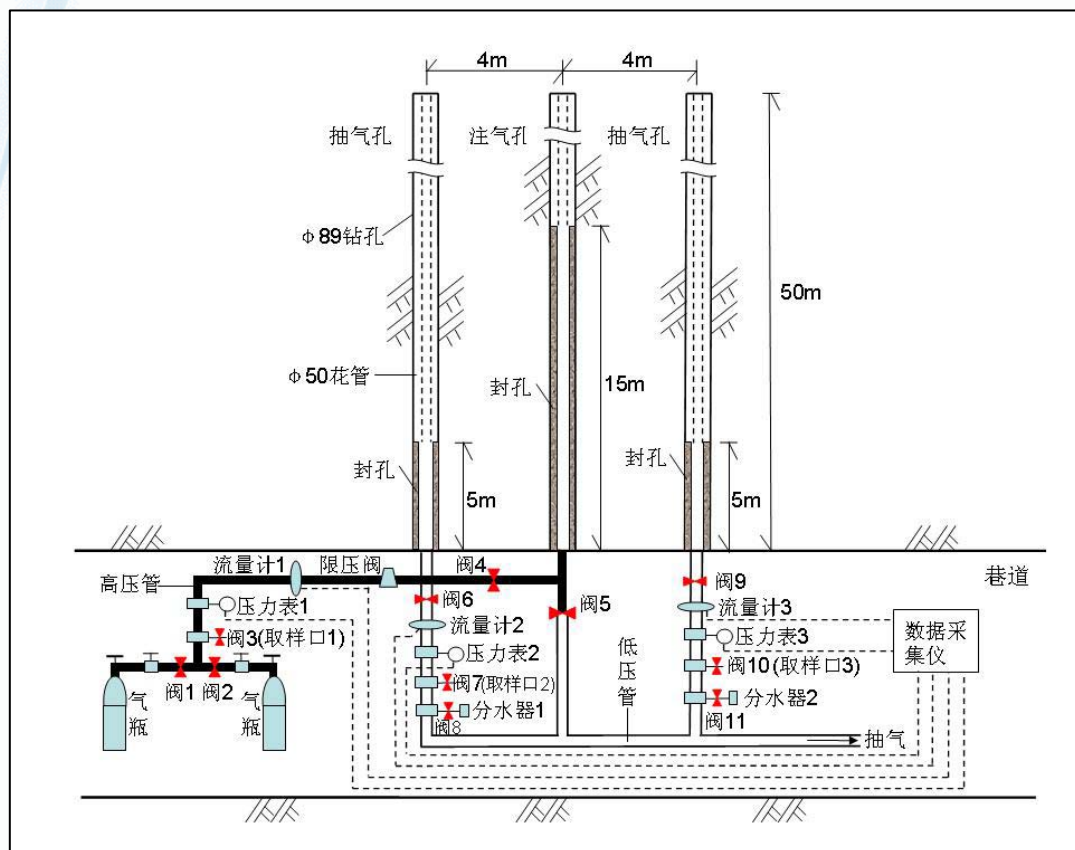


3、早期机会 混合气体驱替煤层气 (G-ECBM)





3、早期机会：G-ECBM现场试验



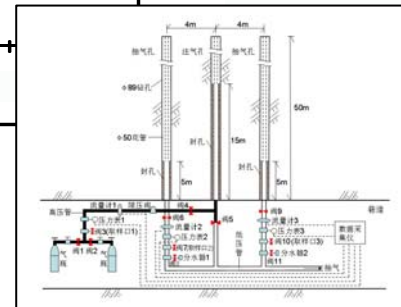
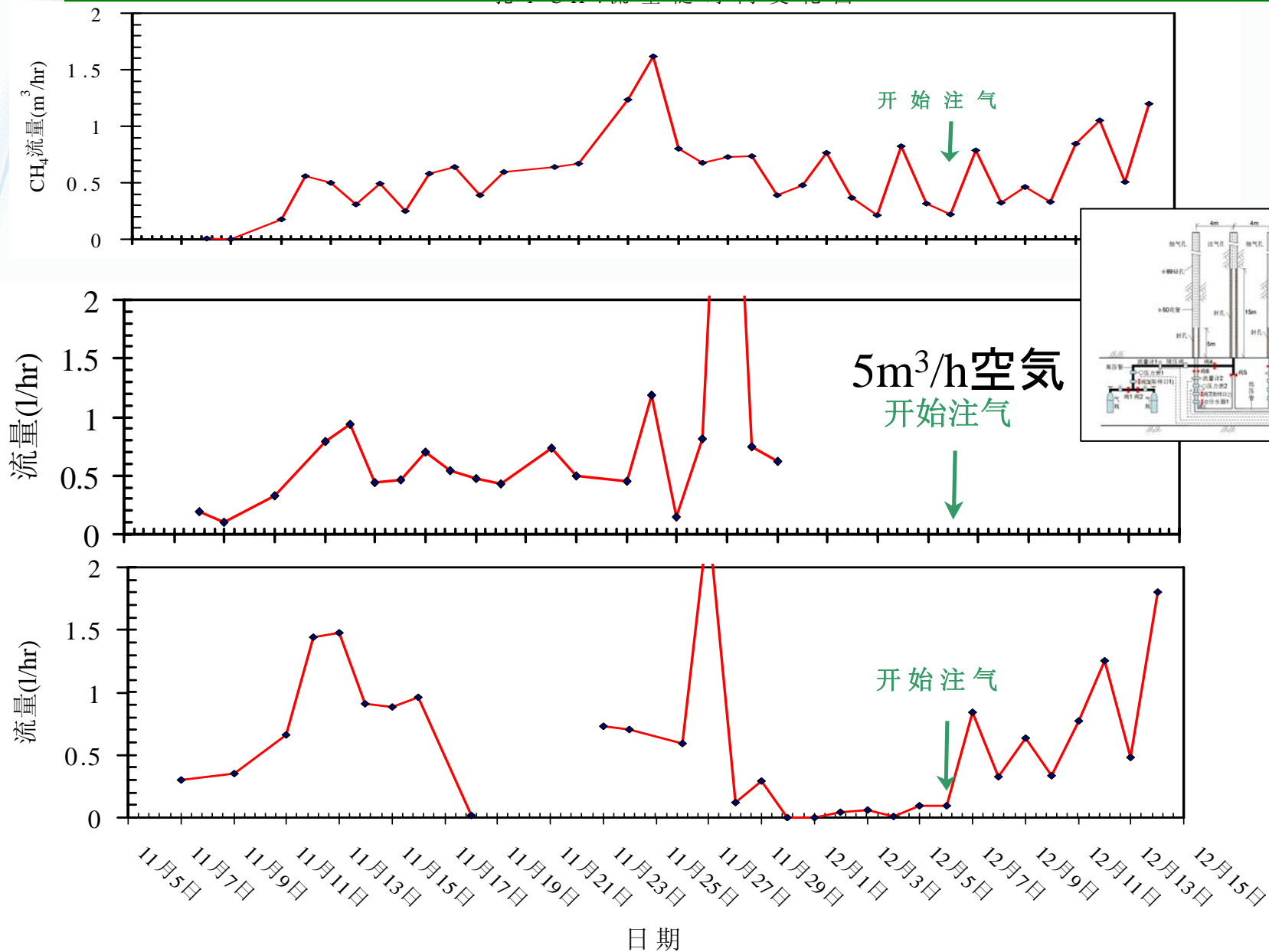
平顶山八矿（地下620m巷道中、渗透系数 $4\mu\text{D}$ 、注入空气等）

试验孔3个+矿山生产孔220个





3、早期机会：G-ECBM现场试验





3、早期机会：G-ECBM现场试验

| 孔号 | 平均 CH ₄ 流量 | 累计 CH ₄ 产量 | 平均 CH ₄ 浓度 | 截止时间 |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|
| | (m ³ /hr) | m ³ | % | |
| 孔 1 | 0.433 | 316.727 | 37.865 | 12 月 9 日 |
| 孔 2 | 0.422 | 208.1 | 43.4 | 11 月 29 日 |
| 孔 3 | 0.562 | 319.137 | 13.503 | 12 月 9 日 |
| 八矿其他抽放孔 (220 个孔) | 0.13 | | 6 | |

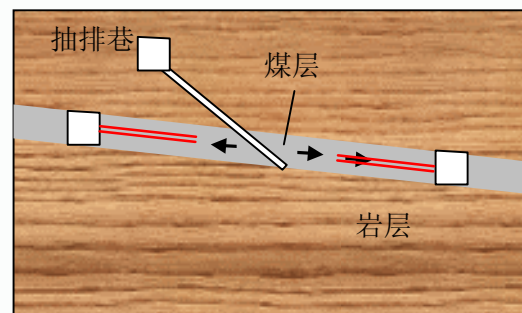
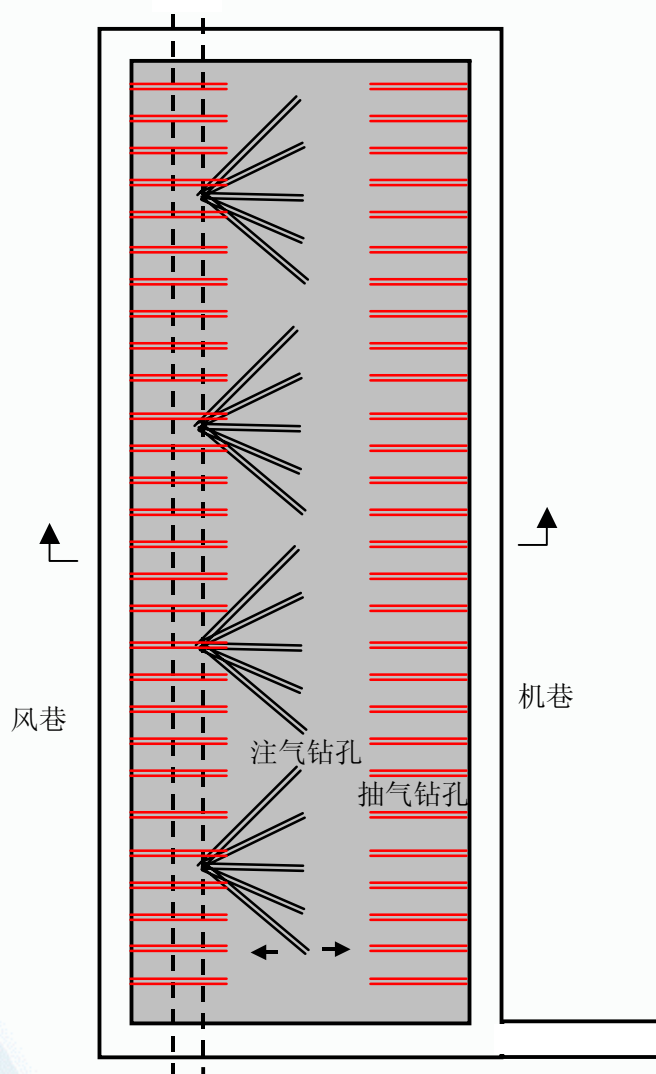
平均CH₄流量增加2.6倍

平均CH₄浓度增加4.0倍





3、早期机会：G-ECBM现场试验



比较不同气体的效果

观察驱替过程及机理

验证理论结果

开发压入、封孔和监测技术





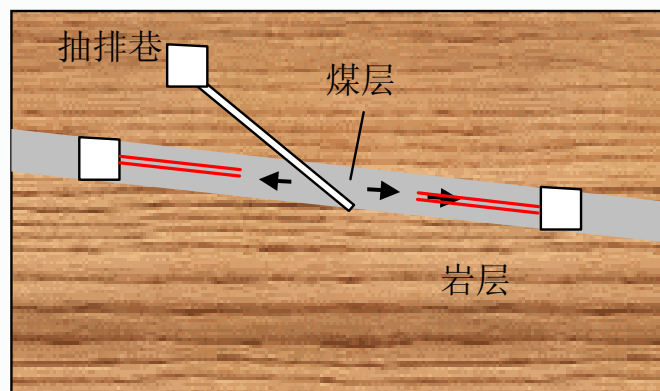
4、开发路线图： 美国至2012年的路线图

| | 2002年 | | 2012年 |
|----|-------|---|---|
| 富集 | 电站 | 发电成本增加 | 发电成本增加 |
| | | 20-40% | 10% |
| 埋存 | ECBM | $<2\text{m}^3\text{-CO}_2/\text{m}^3\text{-CH}_4$ | $>3\text{m}^3\text{-CO}_2/\text{m}^3\text{-CH}_4$ |
| | EOR | $<1\text{t-CO}_2/\text{t-Oil}$ | $4\text{t-CO}_2/\text{t-Oil}$ |
| | 含水层 | | 水平井注入示范试验 渗漏低于0.01%/year |



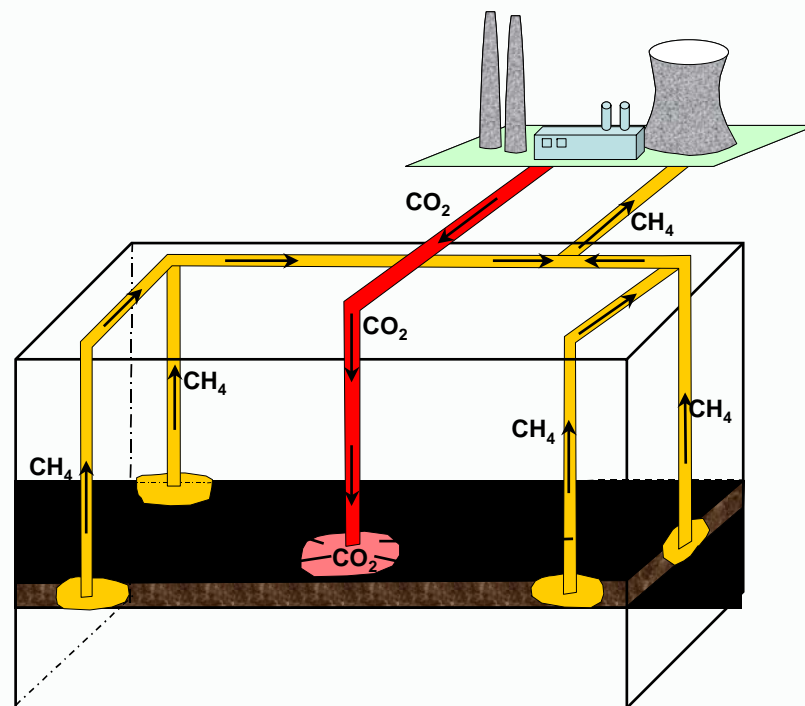


4、开发路线图：思路



G-ECBM

瓦斯发电、地下混合
气体驱替



CO₂-ECBM

燃煤发电、地上CO₂
气体驱替





4、开发路线图

G-ECBM

2009年：完成中试（减排量15万吨/a，零成本）

2012年：实用化（系统成熟，5个以上工程应用）

CO₂-ECBM

2009年：增渗、完井和监测技术开发

2011年：完成中试（减排量15万吨/a，成本低于交易价）

2014年：工业试验（减排量30万吨/a，成本低于交易价）

2020年：实用化（5个以上工程应用）





谢 谢 大 家！



www.whrsm.ac.cn

中国科学院武汉岩土力学研究所
INSTITUTE OF ROCK AND SOIL MECHANICS
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



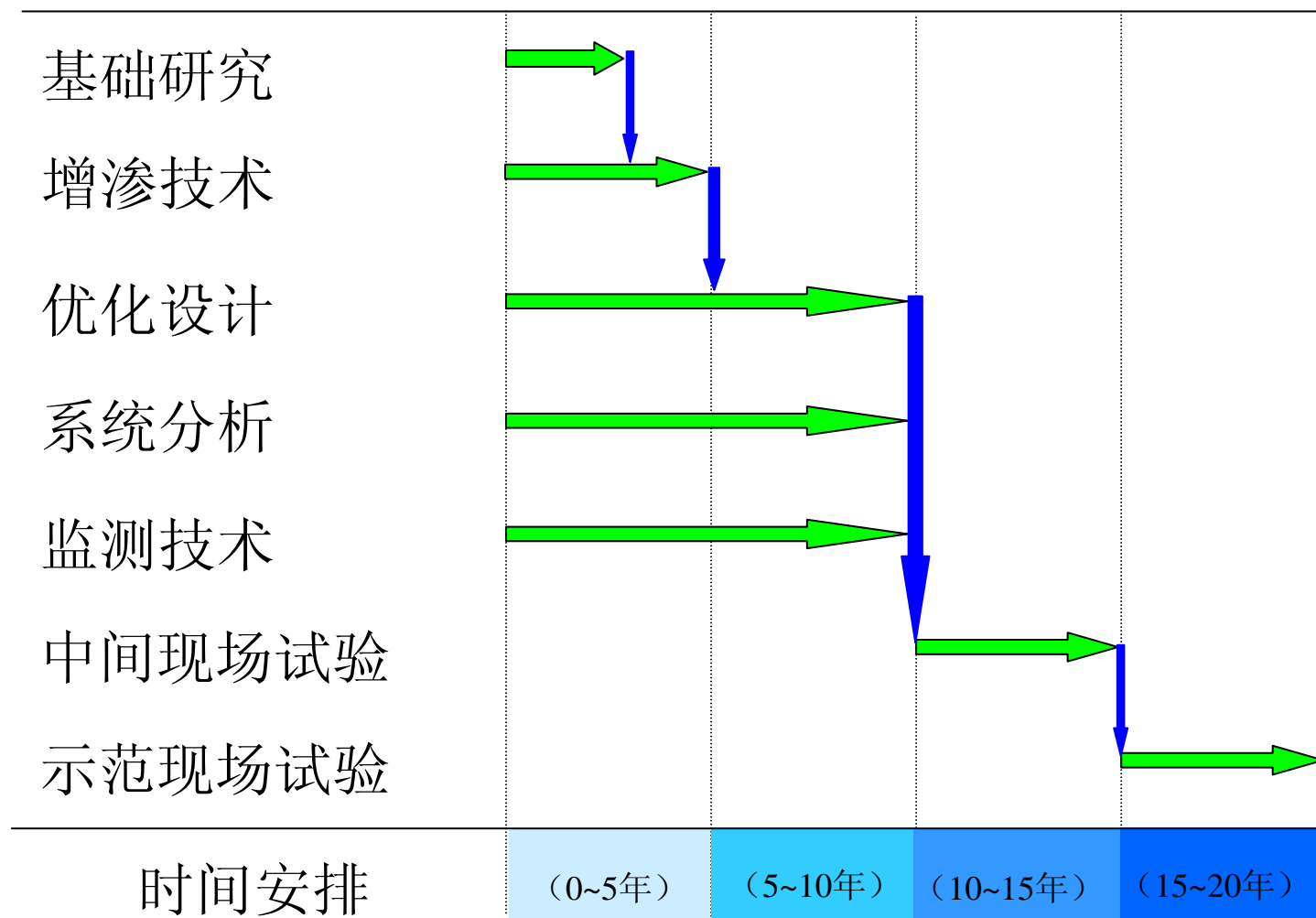
2、现状与问题：小节

- 要素技术在煤炭、石油、化工工业中已经存在
- 与国际水平和实用化要求的差距较大
 - * 提纯成本高、产能小，缺少面向提纯新型发电技术
 - * 缺乏长期远距离输送经验
 - * 压入规模小、时间短
 - * 未对地下 CO_2 的复杂运移及反应过程、工程安全性（泄漏和稳定性）与经济性进行系统的观察和研究





4、开发路线图：G-ECBM开发路线图





6. G-ECBM: P2計画

目標:

- 1) 1年間の抽出率 $>20\%$ OGIP $\Rightarrow 0.5\text{m}^3/\text{h}$ (以前 $0.1\text{ m}^3/\text{h}$)
- 2) 効果・過程へのガス成分の影響、最適工法を明確

内容

- 1) 初期条件調査(ガス成分・圧力・含量、応力、浸透性など)
- 2) Lab試験(吸着、置換、力学、浸透)
- 3) モデリングと設計(Injection-ready generator含み)
- 4) 現場試験(内部気圧・成分・温度・応力、外部変形・成分・AEなどのモニタリング、生産ガス発電)
- 5) 効果検証(浸透性測量、トンネルのガス成分)



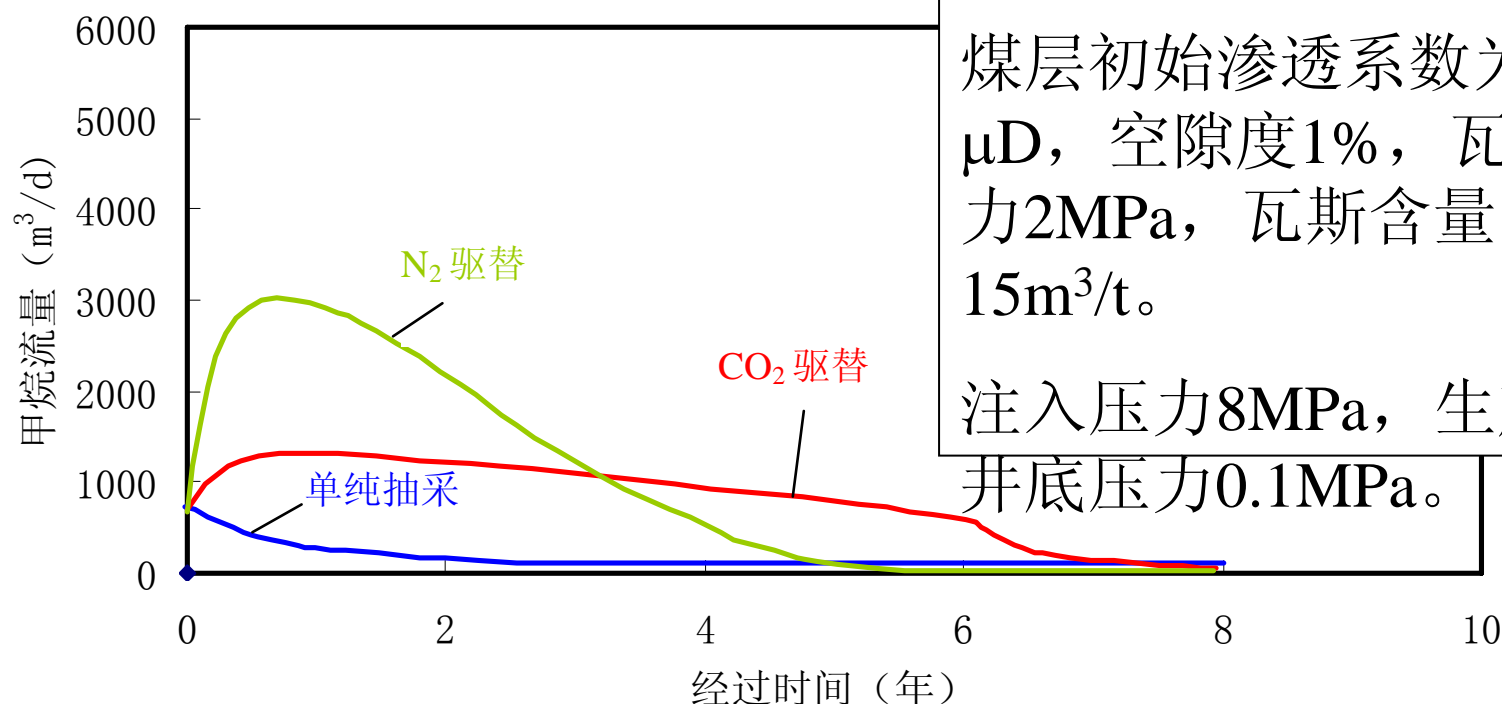
模拟结果

5点布置，边长200m。

煤层深600m，厚度4m。

煤层初始渗透系数为4.2 μD ，空隙度1%，瓦斯压力2MPa，瓦斯含量15m³/t。

注入压力8MPa，生产井井底压力0.1MPa。



单纯抽采：采收率仅为14%，平均日产量为200m³/d。

CO₂驱替：采收率达到54%，平均日产量为1000m³/d。

N₂驱替：采收率达到72%，平均日产量为1600m³/d。。





影响

CCS 技术在中国

本刊记者 崔月婷

通过《埋葬二氧化碳》，大家已经了解到二氧化碳捕集封存（CCS）技术是一种实现温室气体减排的有力举措。那么 CCS 技术在我国的发展如何？我们采访了中科院组建二氧化碳地质封存与利用研究小组的李小春教授。

《环球科学》专访

中科院网站首页



新闻

网站搜索
Search

关键词:

搜索类别: 标题搜索

搜索 高级搜索

中国科学院-当日要闻

科学时报:美物理界精英聚会哥伦比亚大学 庆祝李政道80寿辰暨字 ...

新闻首页 领导活动 院内新闻 国内新闻 国际新闻 视频新闻 一线报道 传媒扫描 图片新闻

当前位置: 首页 > 新闻 > 一线报道 >> 正文

《环球科学》杂志专访武汉岩土所李小春研究员

武汉岩土力学研究所

在最新一期《环球科学》杂志(2006年第10期)上,刊登了一篇题为“CCS 技术在中国”的专访,受访者就是中国科学院武汉岩土力学研究所的李小春研究员。



www.whrsm.ac.cn

中国科学院武汉岩土力学研究所
INSTITUTE OF ROCK AND SOIL MECHANICS
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



影响力

grams.jsp?prog=Carbon+Sequestration

The screenshot shows the U.S. Department of Energy website. At the top, there is a navigation bar with links: ABOUT DOE | ORGANIZATION | NEWS | CONTACT US. Below this is the U.S. Department of Energy logo and a large banner with the text "U.S. DEPARTMENT OF ENERGY". Under the banner, there are several categories: SCIENCE & TECHNOLOGY, ENERGY SOURCES, ENERGY EFFICIENCY, THE ENVIRONMENT, PRICES & TRENDS, and NAT SEC. On the left side, there is a sidebar with a list of topics: Fossil Energy, Clean Coal & Natural Gas Power Systems, Carbon Sequestration, Hydrogen & Other Clean Fuels, and Oil & Natural Gas Supply & Demand. The main content area shows the breadcrumb "You are here: Fossil Energy > R&D Project Data Base" and a description of the database. At the bottom, there are search options: "By Keyword" and "By St" (likely Short Name), with a search button labeled "提交查询内容" (Submit Search Content).

《美国能源部
先端研究项目
数据库》

NEDO碳减排项目数据库

壳牌石油、EU第7框架科学计划



www.whrsm.ac.cn

中国科学院武汉岩土力学研究所
INSTITUTE OF ROCK AND SOIL MECHANICS
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



无人机低空摄影测量系统



计算机处理软件



谢 词

- ❖ 岩土所在资金、人力在的支持
- ❖ 平顶山煤业集团的资金支持和协作
- ❖ 冯夏庭研究员、刘泉声研究员的宝贵建议
- ❖ 本组各位同事和学生的努力工作
- ❖ RITE、AIST、ARC的协助
- ❖ 出席各位的耐心





2. 对策：京都议定书概要

- ❖ 6种气体(CO_2 、 CH_4)
- ❖ 第一次以法律强制减排
- ❖ 义务国家39(不含中国)
- ❖ 2008-2012期间在1990的水平上削减5.2%。
- ❖ 义务国间排放权交易。
- ❖ 义务国与非义务国间的清洁开发机制 (CDM)



地球环境产业技术研究机构





3. 地质封存：国内的技术现状

| | | 研究阶段 | 实证阶段 | 一定条件下经济可行 | 成熟化 |
|----|-------|------|------|-----------|-----|
| 富集 | 燃烧前 | X | | X | |
| | 燃烧后 | X | | X | |
| | 富氧燃烧 | X | X | | |
| | 工业分离 | | | | XX |
| 运输 | 管道 | | | ? | X |
| | 轮船 | ? | | X | |
| 埋存 | ECBM | X | X | | |
| | EOR | | | X | X |
| | 枯竭油气田 | X | | X | |
| | 含水层 | X | | X | |





3. 地质封存：国外研究历史

欧洲 (1991)

加拿大 (1992)

美国 (1999)

日本 (2000)

澳大利亚 (2000)





3. 地质封存：全球封存容量 (IEA)

- ❖ 煤 层: 1485 亿吨
- ❖ 油 气 田: 1780-4910 亿吨
- ❖ 咸水含水层: 870-27270 亿吨
- 总量 : 4135-33665 亿吨

- 相当于全球年排放量的14-112倍。
- 容量巨大，但不确定性也大





3. 地质封存：国外的技术现状

有三个商业规模的工程正在进行：

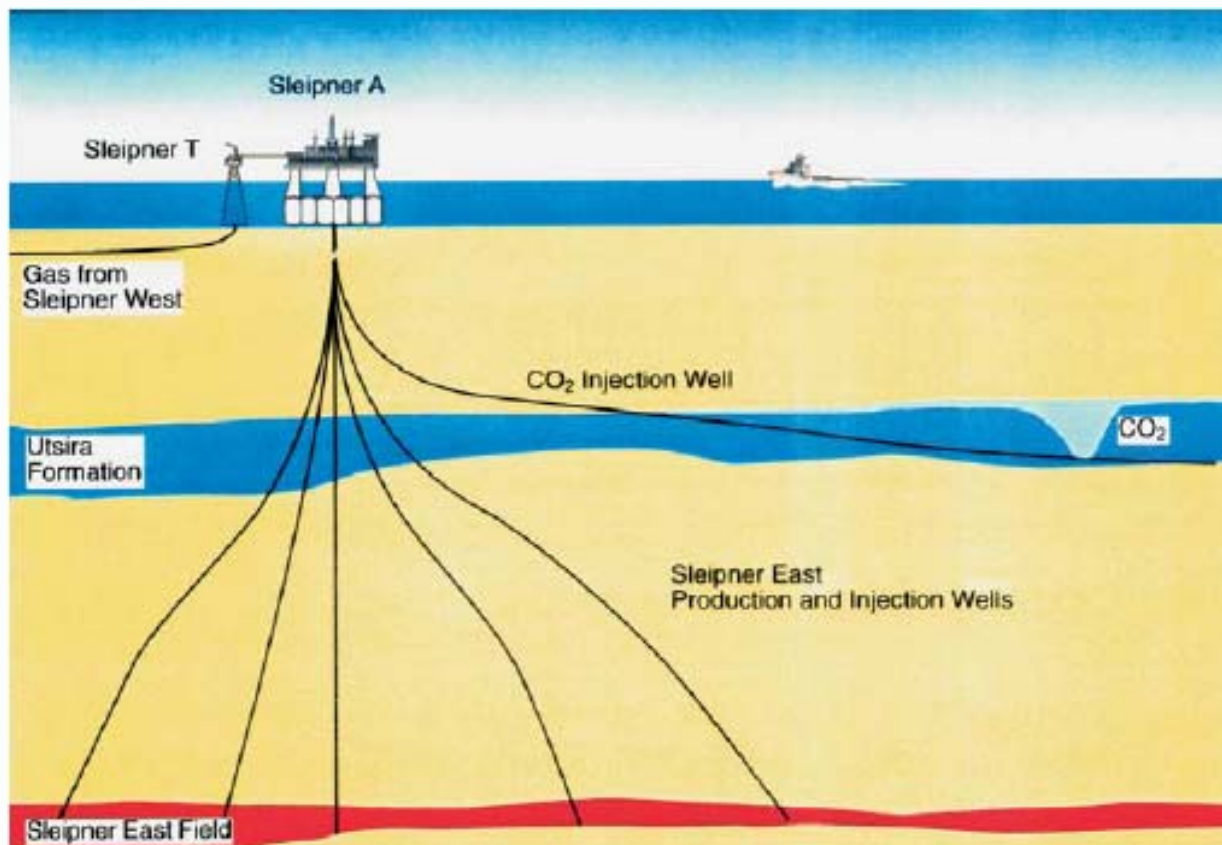
- ❖ 挪威的Sleipner含水层埋存
- ❖ 加拿大的Weyburn CO₂-EOR
- ❖ 阿尔及利亚的In Salah气田储存

全球有70多个油田正采用CO₂驱油,每年向地下注入约3000万吨CO₂, 并提高采收率5-20个百分点。





3. 地质封存: Sleipner工程



自1996年，每年注入100万吨的CO₂





3. 地质封存: Weyburn CO₂-EOR



总注入量约1900万吨CO₂





3. 地质封存：国外技术水平

| | | 研究阶段 | 实证阶段 | 一定条件下经济可行 | 成熟化 |
|----|-------|------|------|-----------|-----|
| 富集 | 燃烧前 | | | X | |
| | 燃烧后 | | | X | |
| | 富氧燃烧 | | X | | |
| | 工业分离 | | | | X |
| 运输 | 管道 | | | | X |
| | 轮船 | | | X | |
| 埋存 | ECBM | | X | | |
| | EOR | | | | X |
| | 枯竭油气田 | | | X | |
| | 含水层 | | | X | |





3. 地质封存：经济性与安全性问题

经济性问题

- ❖ 排放源-隔离场地的匹配 =》减少输送成本
- ❖ 场地的准确评价与有效利用 =》减少压入成本
- ❖ 新的分离工艺和发电系统 =》降低富集成本

安全性问题

- ❖ 安全性概念的确立(定量化、时间尺度)
- ❖ CO₂-地层流体-岩石系统的THMC过程的科学认识
- ❖ 监测精度、成本、规范

泄漏（地层、井孔）、
力学稳定性（诱发地震）





5. N-ECBM: 06年工作内容

I 驱替过程理论研究（室内）

- 1) 煤质分析及吸附性能测试
- 2) 吸附 CO_2 、 N_2 、 CH_4 及空气后煤的胀缩及渗透系数测定
- 3) 吸附量—胀缩变形—渗透性理论关系
- 4) 驱替过程理论模型

II 中间试验（现场）

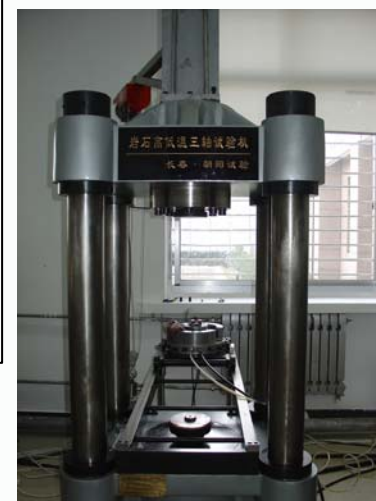
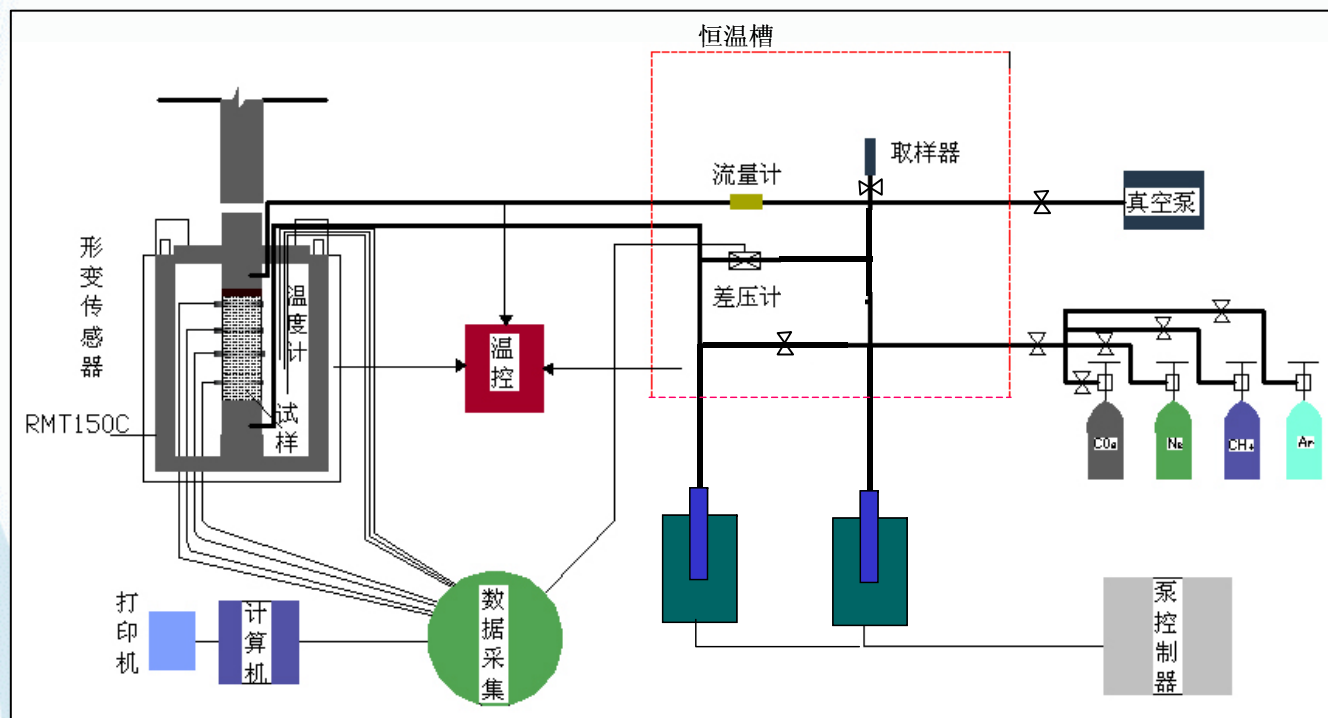
III 可行性评价

计算机模拟、经济性、技术成熟度、工业试验方案





5. N-ECBM: 室内试验装置

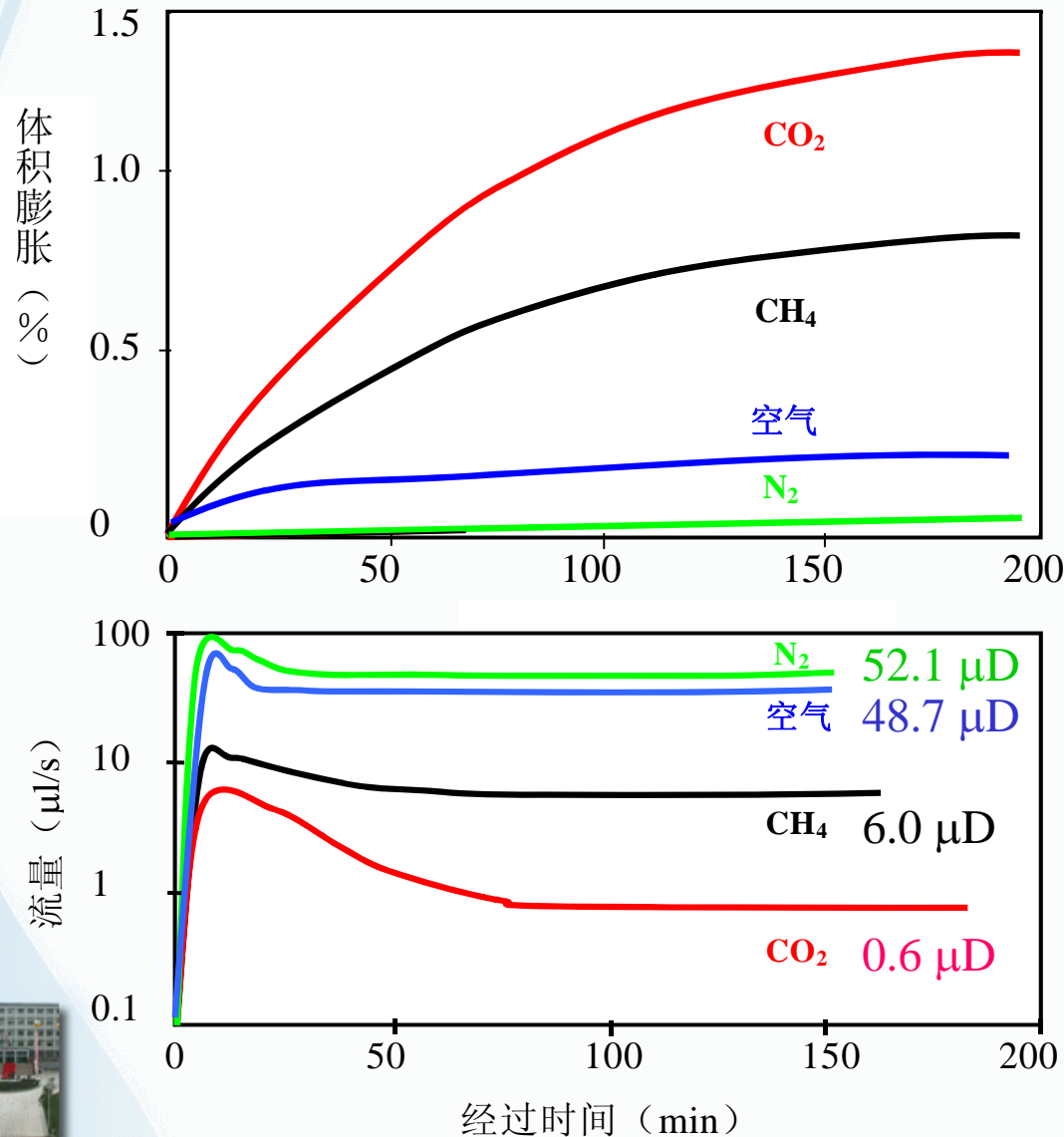


中国科学院武汉岩土力学研究所
INSTITUTE OF ROCK AND SOIL MECHANICS
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES





5. N-ECBM: 吸附后膨胀及渗透系数



围压12MPa, 气压
2MPa, 温度30℃



空气或N₂置换CH₄后,
煤收缩, 渗透系数增加;
CO₂置换CH₄后, 煤
膨胀, 渗透系数减少。





5. N-ECBM: 理论关系

对流—扩散—吸附

$$\phi \frac{M_i}{RT} \frac{dp_i}{dt} + \gamma_i \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \left[\gamma_i \phi \nabla \cdot \left(-\frac{K}{\phi \mu} \cdot \nabla p \right) + (\phi \nabla \gamma_i) \cdot \left(-\frac{K}{\phi \mu} \cdot \nabla p \right) \right] - \nabla \cdot (\rho_i D_{ij} \nabla c_i) + A_{gi} = q_{gei}$$

吸附量—膨胀

$$\alpha = \frac{KRT}{V_0} \frac{\ln(1 + bp_{\max})}{p_{\max}} \frac{1 + bp_{\max}}{b}$$

膨胀—应力

$$\begin{aligned} 3\Delta\sigma &= \Delta\sigma_{xx} + \Delta\sigma_{yy} + \Delta\sigma_{zz} \\ &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \nu \Delta\varepsilon_{yy} + \sum \beta_i \Delta\varepsilon_{vmi} + \Delta p + \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \nu \Delta\varepsilon_{yy} + \sum \beta_i \Delta\varepsilon_{vmi} + \Delta p \end{aligned}$$

应力—渗透系数

$$K = K_0 \exp[-3C_f (\sigma_h - \sigma_{h0})]$$



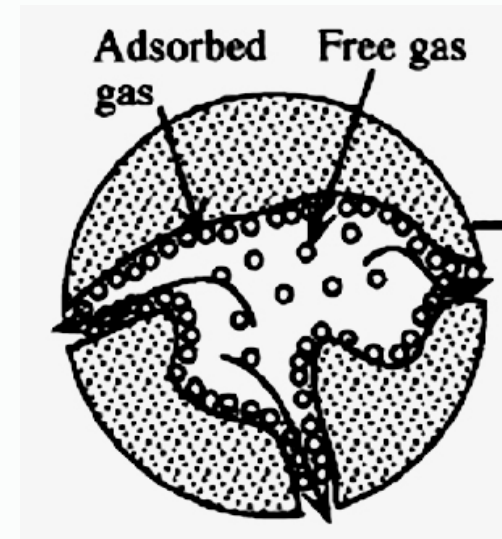
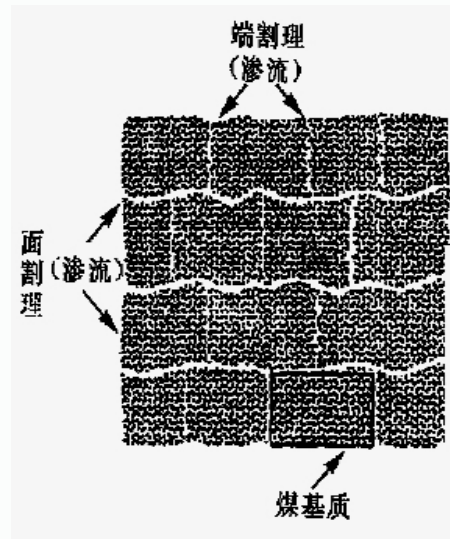


5. ECBM: メカニズム

“置換”： CH_4 の分圧を減少、解吸を促進。

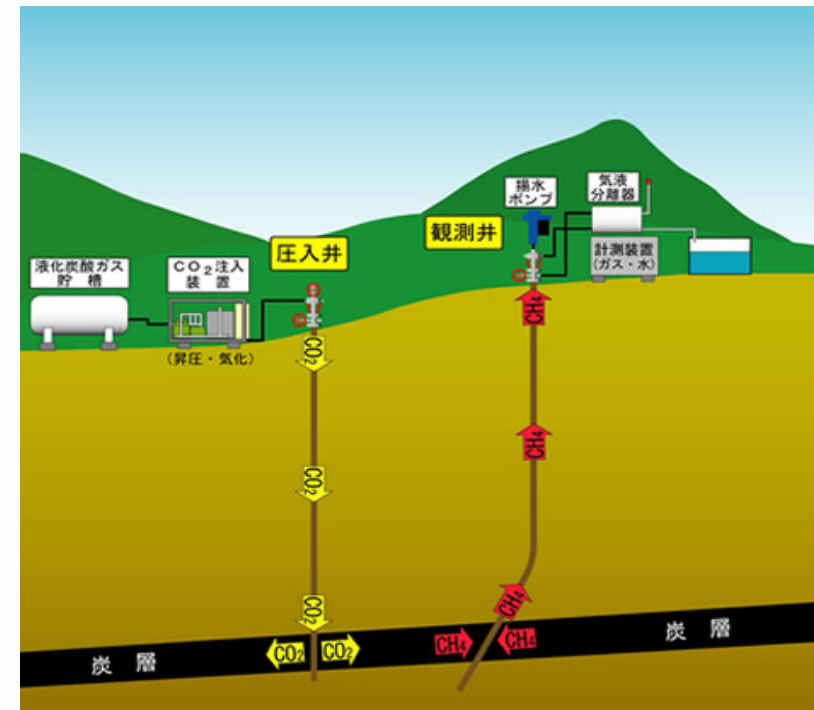
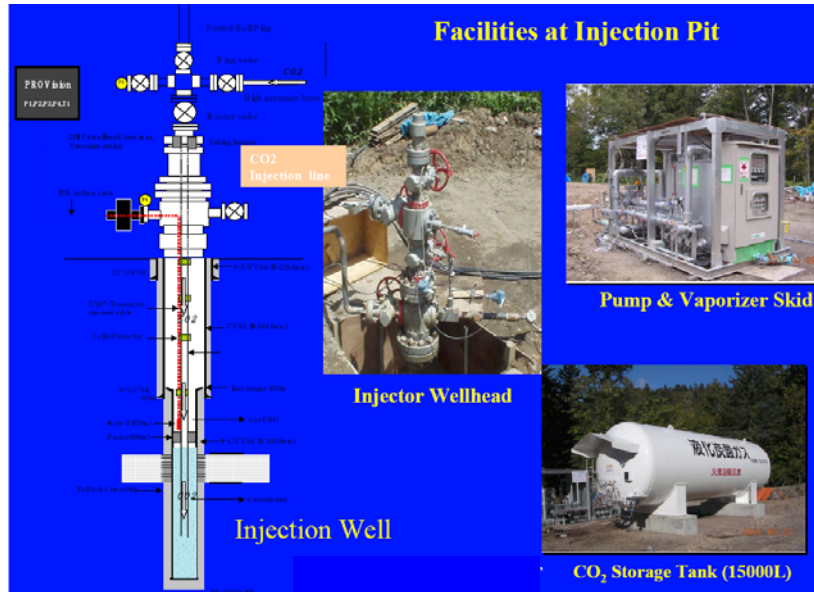
“促流”： 高い圧力勾配を保持、流速を増大

“変滲”： 高い間隙圧による浸透率を保ち；また、膨張・収縮による浸透率を変化



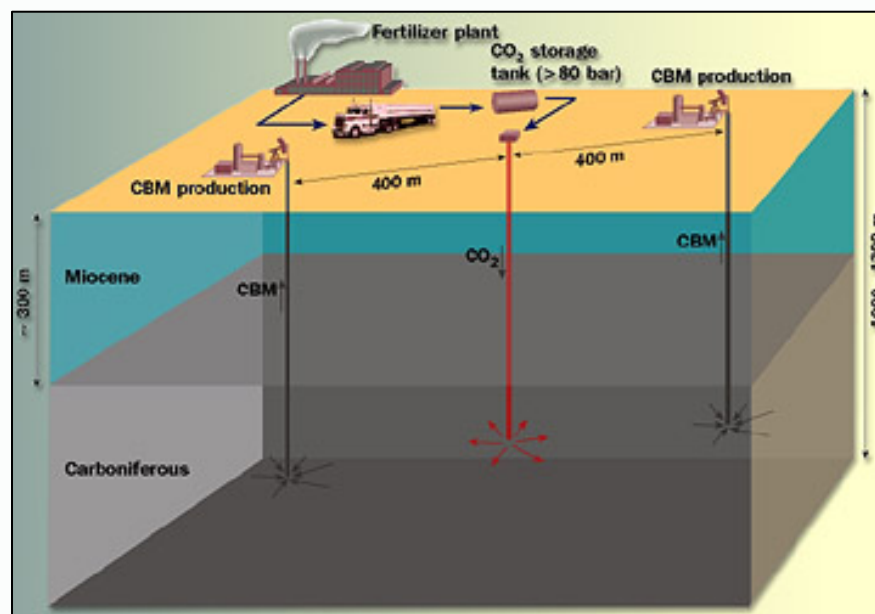


日本北海道试验场（02—06）





RECOPOL现场 (01—06)



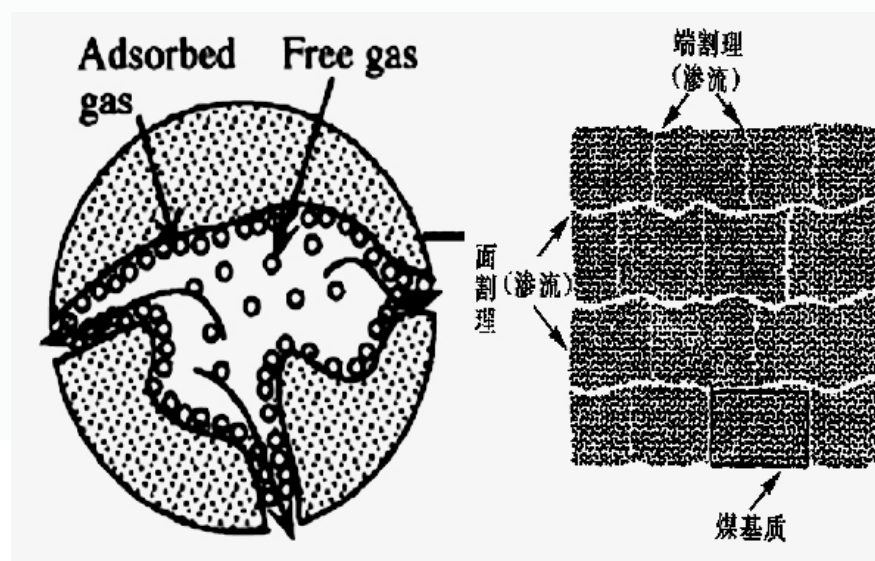


加拿大沁水试验场（02—06）





5 混合ガスによる炭層ガス増進回収技術 (G-ECBM)



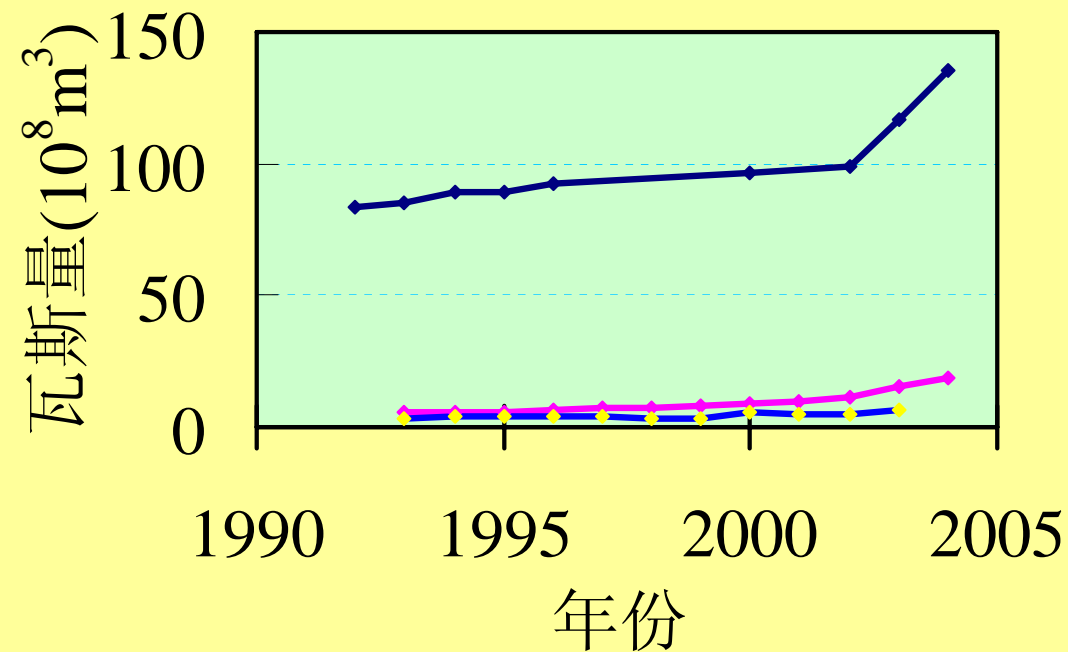
炭層ガス(CH_4)

Flammable, explosible greenhouse gas, also clean fuel.





5. G-ECBM: Background



2004年全国平均

❖ 抽出率: 15%

❖ 利用率: 6%

❖ 放出率: 94%



5. G-ECBM: 背景

炭層ガス事故:

- * 安全措置複雑、コスト5元/t石炭;
- * 採掘不順、効率低い;
- * 事故頻繁(2004年に4000人死亡)

大規模炭層ガス利用困難

- * 地質埋蔵量30万億 m^3 ;
- * 2004年: 利用6%。

温暖化ガス放出

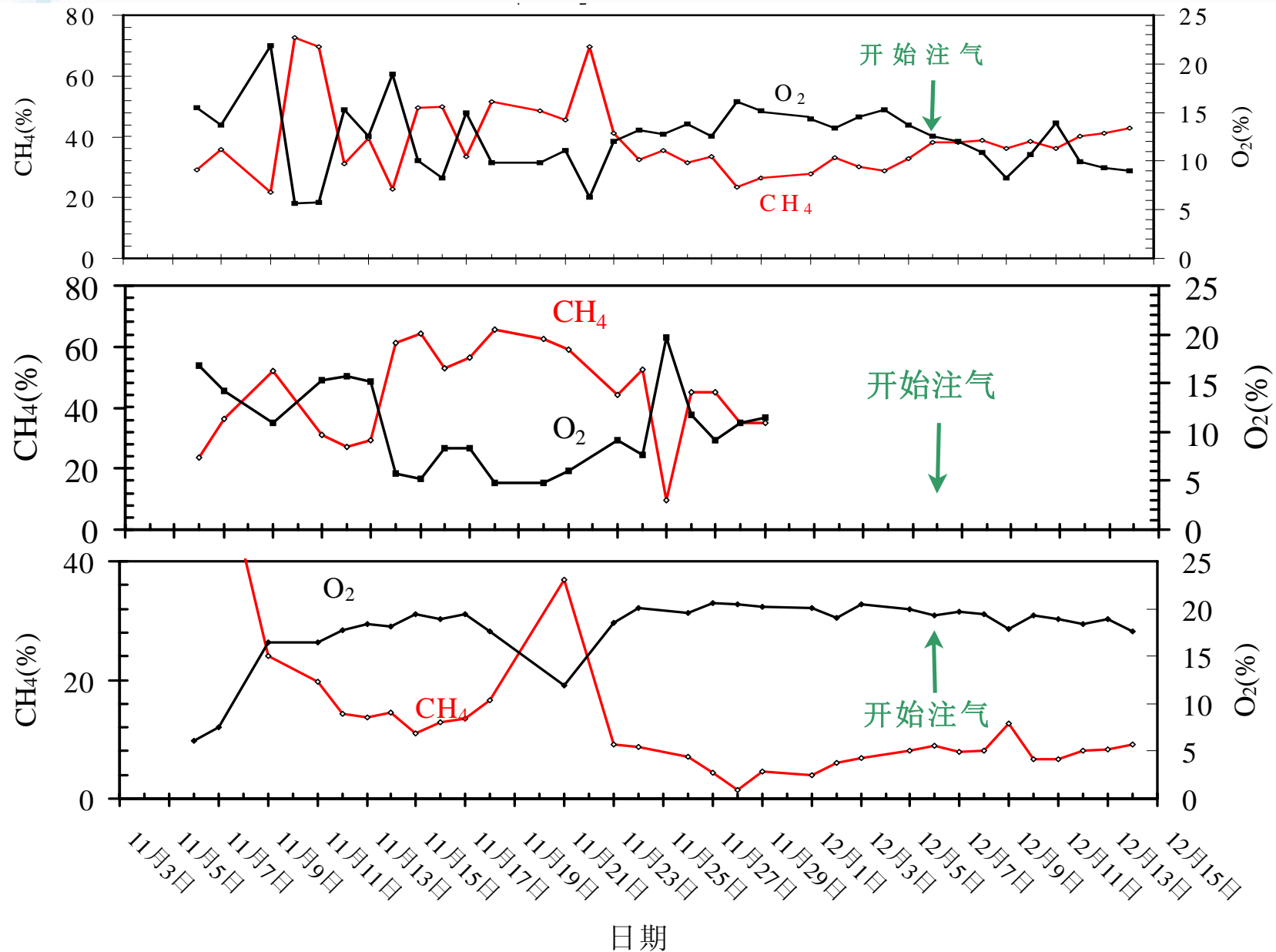
- * CH_4 放出量130億 m^3 , 2亿吨 CO_2 = 相当。



抽出率の増加は鍵となる。



5. G-ECBM: 试验结果





5. G-ECBM: 试验结果

