



波现象与智能反演成像研究组

# 白氢勘探及近地表空间探测的基本观点

报告人：王华忠

波现象与智能反演成像研究组 (WPI)

同济大学海洋与地球科学学院，上海

2024年6月27日

# 目录

- ◆ **一、概述**
- ◆ **二、白氢勘探的基本逻辑**
- ◆ **三、近地表空间探测的基本逻辑**
- ◆ **四、结论与讨论**

# 一、概述

## ◆ 氢（能源）的重要意义：

- ◆ 氢是自然界最多的元素，是宇宙中含量最高的物质，约占75%。地球上，氢的来源也非常广泛。水，化石燃料和所有生物体中都含有氢。
- ◆ 氢能是一种清洁能源，氢气燃烧后只会产生水，没有氮氧化物等有害物质的排放。氢能源的使用有助于减少环境污染，实现“双碳”目标。
- ◆ 与化石能源的局部分布不同，氢的生产可以不受时间与地点的限制，可以通过多种途径生产，如电解水、天然气重整、生物质转化等，不依赖于单一的能源来源。
- ◆ 氢能是多用途能源，氢气不仅可以用作发电燃料，还可以用于交通、工业、家庭供能等多个领域。例如，氢燃料电池汽车已经逐渐进入市场，氢能还可以用于钢铁、化工等高耗能产业以及家庭供热供电，应用范围广泛。

# 一、概述

## ◆ 氢（能源）的重要作用：

- ◆ 氢能源作为一种清洁能源，在减少温室气体排放和改善空气质量，缓解气候变化和环境污染问题方面具有重要作用。
- ◆ 氢气首先作为重要的工业气体，传统工业领域中有广泛应用，如在石油炼制、化工生产、钢铁制造等领域，使用氢气替代传统的碳基能源，可以显著减少二氧化碳。
- ◆ 氢能还可以用于家庭和商业建筑的供能，通过燃料电池为建筑物提供电力和热能。燃料电池具有高效、环保、可靠的特点，是未来家庭和商业供能的重要方向。
- ◆ 未来，氢作为能源载体的作用将日益凸显。氢燃料电池、氢基燃料航空航天，以及天然气掺氢、煤电掺氢、大规模储能等等领域，氢都大有用武之地。

# 一、概述

## ◆ 氢气（氢能）的特点：

- ◆ 能量高。除核燃料外，氢的发热值是目前所有燃料中最高的，1公斤氢气的能量约为142兆焦耳（MJ），是汽油的三倍。
- ◆ 氢本身无毒，燃烧产物是水，无污染，能循环利用。
- ◆ 氢气可以通过多种方式制取，如水电解、天然气重整、生物质转化等。因此，氢气的来源广泛，可以利用多种资源进行生产，不受单一能源的限制。
- ◆ 可利用形式多，可以是气态、液态或固态金属氢化物，能适应贮运及各种应用环境的不同要求。
- ◆ 因此，理论上，氢能是最理想、完美的能源，被誉为21世纪的能源。发展氢经济是人类摆脱对化石能源的依赖、保障能源安全的永久性战略选择。

# 一、概述

## ◆ 氢气生产（或制作）与储存的困境：

- ◆ 目前，电解水制氢是一种非常清洁的制氢方式，但由于电解设备昂贵和电力成本高，导致生产成本较高。降低电解水制氢的成本是当前面临的主要挑战之一。
- ◆ 电解水制氢，其效率通常只有60-70%。
- ◆ 氢气的密度很低，储存和运输都需要高压（通常为350-700 bar）或低温（ $-253^{\circ}\text{C}$ ）的条件，这会带来很高的技术和经济成本。此外，氢气分子非常小，容易渗透和扩散，对储罐和管道材料的要求也非常高。
- ◆ 氢能基础设施（如制氢厂、加氢站、储氢设施等）还不完善，建设和维护这些基础设施需要大量投资。尤其是加氢站的建设成本高昂且需要布局合理，以满足氢燃料电池车等应用的需求。

# 一、概述

## ◆ 白氢（金氢、地质氢）勘探的重要意义：

- ◆ 所谓的“白氢”是地下天然存在的一种氢气，也称作“天然氢”，随着工业和交通运输领域的去碳化，它作为能源的开采意义越来越大。
- ◆ 白氢勘探可以规避氢气生产面临的生产成本高、能源效率低、碳排放等问题。
- ◆ 工业和交通运输要“去碳化”，逐渐弃用煤炭、石油和天然气，因此氢气变得越来越重要。到目前为止，人类使用的氢主要由工业生产制成，不是天然氢（地质氢）。工业生产氢会排放很多温室气体，造成污染。为了使氢变成真正的“绿色能源”，工业上也用电解的方式从水分子中分解氢，但要确保使用的电是产生于太阳能、风能或水能的清洁电，目前水电解生氢成本相当高。
- ◆ 因此，白氢勘探在环境保护、降低制氢成本、增强能源安全、减少对化石燃料的依赖、支持可再生能源的发展等多个方面有不可估量的意义。白氢资源的开发和利用将为未来能源体系的转型和可持续发展提供重要支撑。

# 一、概述

## ◆ 白氢（金氢、地质氢）勘探的先驱：

- ◆ 法国能源转型部和工业部**2023年11月23日**联合签署了一份勘探许可，12月3日的《宪报》予以公布。勘探地区面积约225平方公里，位于西南部大西洋比利牛斯省（Pyénées-Atlantiques）。获得勘探许可的是TBH2Aquitaine公司，许可有效期为5年。
- ◆ 能源转型部表示，全法总共有6个勘探天然氢矿床的申请，上述勘探计划是第一个获批的申请，另外5个申请还在审查中。TBH2Aquitaine公司也骄傲地宣布，该公司是“法国第一个获得独立勘探天然氢的企业”。获得这一勘探许可，意味着**勘探工作马上可以开始**。公司第一步将进行**地震勘探**，然后需要再次审批，审批通过后，也就是**预计在两三年后才能进行进行钻探**。
- ◆ 在大西洋比利牛斯省还有一个勘探天然氢的申请，是由45-8ENERGY和Storengy两个公司联合提出的，勘探面积为266平方公里，和上述批准的勘探计划所涉地区紧邻。



白氢勘探还没有开始，或刚刚起步。

# 一、概述

## ◆ 目前国内氢能源发展的基本现状：

### ◆ 国内制氢来源分布：

- ◆ 国内制氢来源包括三大类：**化石能源制氢、电解水制氢、工业副产氢**。1) 化石能源制氢占比最大，包括煤制氢、天然气制氢、石油制氢；2) 工业副产氢占比其次，包括焦炭和兰炭副产氢、氯碱和其他副产氢、轻烃裂解副产氢；3) **电解水制氢占比最小**，包括电网、风电、光伏、水电、核电电解水。

### ◆ 国内可再生制氢项目分布：

- ◆ **截至2023年3月15日，国内规划可再生氢项目合计429.4万吨/年；已运行项目5.6万吨/年；建成尚未运营2.5万吨/年；在建项目19.7万吨/年；规划待建401.6万吨/年；地区分布：产能规划前五的省份是内蒙古、吉林、上海、河北、宁夏。**

### ◆ 国内已运营项目分类：

- ◆ **截至2023年2月，国内已运营的可再生氢项目中，1) 按照制氢来源分类：光伏13个，占比48%；风电5个，占比18%；水电1个，占比4%；多种来源8个，占比30%；2) 按照应用方向分类：交通16个，占比37%；科研12个，占比28%；发电6个，占比14%；合成甲醇2个，占比9%；储能1个，占比2%；其他5个，占比12%。**

### ◆ 国内可再生氢产能建设快速推进：

- ◆ **据中国氢能联盟研究院统计，2022年国内新增可再生制氢项目产能3.3万吨/年，同比增长65%；截至2022年底在建项目 17.7万吨，均有望在2年内投产运营；据高工锂电统计，2022年国内电解水制氢设备出货量722MW，同比提升106%。**

# 一、概述

## ◆近地表空间探测的意义：

- ◆深空探测、近地空间探测、深层超深层油气探测、大地球结构探测，都是很受重视且发展很深入的领域。
- ◆近地表空间探测，尽管有工程地球物理和城市地球物理的需求，但发展并不很快。
  - ◆事实上，近地表空间探测与上述相关领域的探测相比，难度可能更大。受关注的程度远远不够。
- ◆目前，军事领域的迫切需求，叠加上工程地球物理、防灾地球物理和城市地球物理的需求等、近地表空间探测明显地越来越需要投入人力物力加以解决。

# 一、概述

## ◆近地表空间探测的目的：

- ◆对近地表空间中的**动的异常体**和**静的异常体**进行空间定位、几何形态描述、和物性参数的估计，并据此对这些异常体进行描述和辨识。

# 一、概述

## ◆近地表空间探测的困境：

- ◆近地表介质变化异常复杂，尺度小，距离激发源近，缺乏有效的物理场激发与观测手段，难以得到完整的、可靠的、能用于异常体描述的有效数据体。
- ◆主动源激发的数据应该是主要的形式。被动源数据为辅。但主动源的性质、源与周围介质的耦合是大问题。源与异常体太近，低频震源激发情形下，异常体识别变成近源场情形下的问题。
- ◆基于都不完整的声/震、电、重、磁、光，包括钻孔数据，如何进行多元/多源数据的联合反演成像。
- ◆问题困难，投资不足，难以聚集研究力量，实现技术突破。

# 一、概述



国家新组建全国重点实验室，说明对近地表探测的需求在增强。尤其是当前军事需求的极速增加。

# 目录

- ◆ 一、概述
- ◆ 二、白氢勘探的基本逻辑
- ◆ 三、近地表空间探测的基本逻辑
- ◆ 四、结论与讨论

## 二、白氢勘探的基本逻辑

### ◆ 2024 EAGE 涉及氢能源勘探的 Section:

- ◆ Short Course: **Exploration of Subsurface Natural Geologic Hydrogen and Simulation for its Enhanced Production**
- ◆ Natural Hydrogen Potential Assessment & Modeling;
  - ◆ 8 篇文章
- ◆ Hydrogen Exploration, Storage & Usage;
  - ◆ 6 篇文章
- ◆ Understanding the 'Micro' Scale for Hydrogen Storage.
  - ◆ 4 篇文章

## 二、白氢勘探的基本逻辑

### ◆ 氢能源勘探的根本性问题：

- ◆ 氢气生成的地质、物理与化学机制；
- ◆ 氢气的运移；
- ◆ 氢气的封闭与赋存。

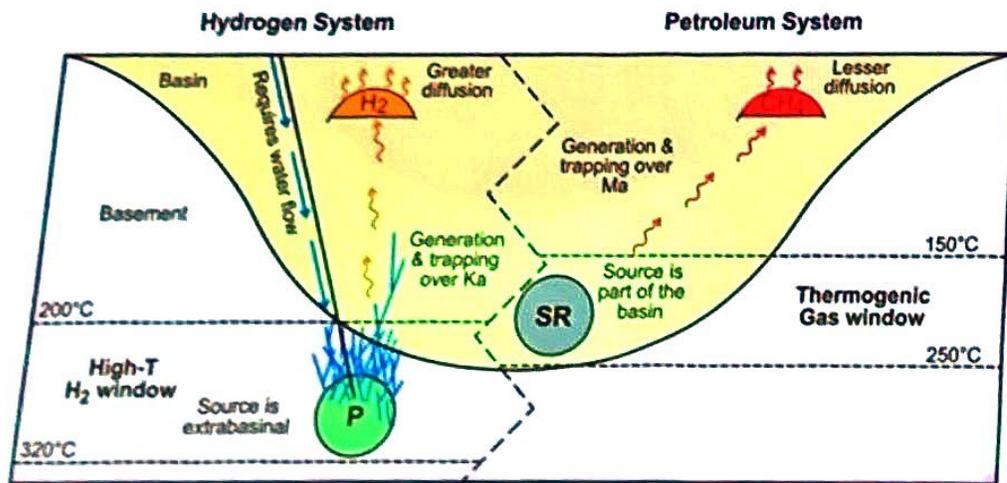
### ◆ 氢能源勘探的工程问题：

- ◆ 氢气的勘探；
- ◆ 钻井与脱气。

# 二、白氢勘探的基本逻辑



## Analogues and differences between natural H<sub>2</sub> and petroleum systems



Jackson et al. 2024, Geoenergy

Fig. 1. Hydrogen system v. petroleum system. A comparison of fluid systems highlighting differences in the nature and location of the source with respect to the host sediments. SR, petroleum source rock; P, protolith.

Main differences of H<sub>2</sub> system:

- Requires water inflow to react with rocks
- Needs less time to be generated
- But needs better traps/leaks faster
- More readily consumed by subsurface biosphere, especially methanogens



对比了自然氢气和石油系统之间的相似性和差异性（左：氢系统；右：油气系统）。

主要是自然氢气和石油系统在生成机制、地质条件、利用难易程度等方面的显著差异。

氢系统的特点：

需要水流流入与岩石反应；

需要更少的时间来生成；

需要更好的圈闭（因为泄露更快）

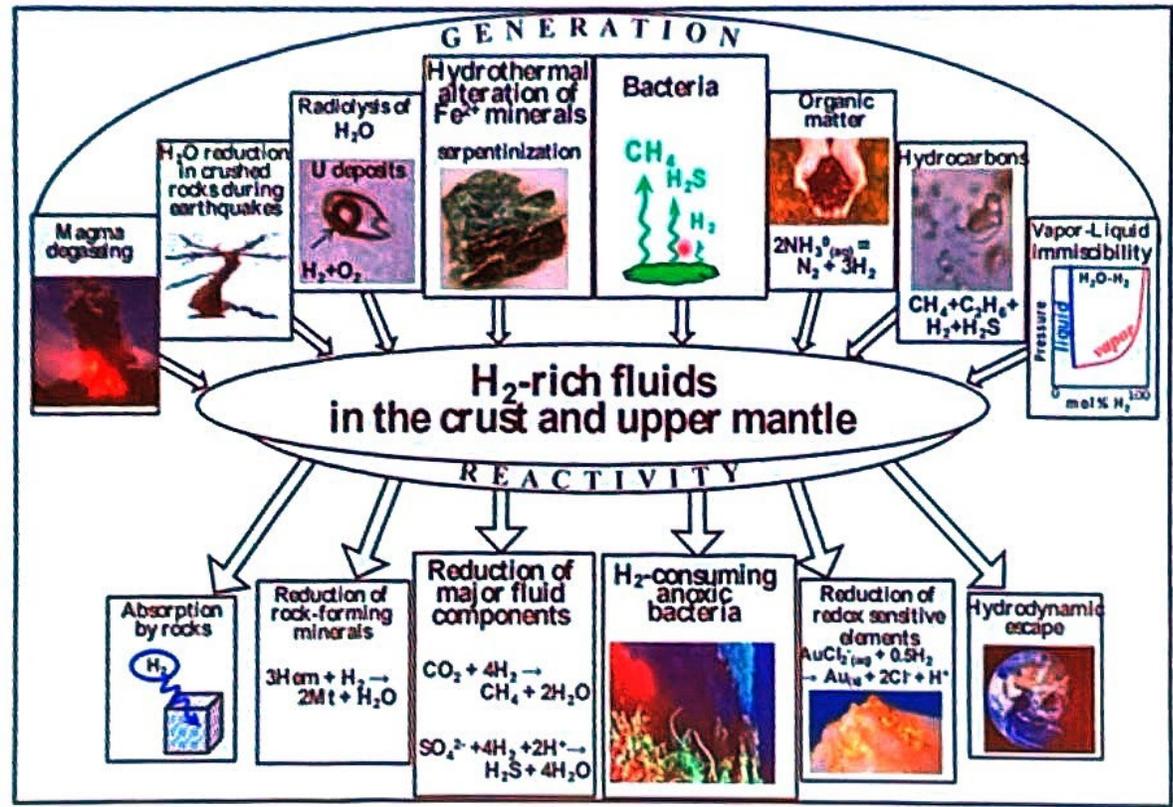
更容易被地下生物圈（尤其是产甲烷菌）消耗。

氢气系统通常与高温岩石区域相关，而石油系统则更多地与盆地内的沉积物相关。

21

# 二、白氢勘探的基本逻辑

H<sub>2</sub> generation and consumption in nature



Truche and Bazarkina 2019, E3S Web Conf. 21

自然环境中，氢的生产与消耗机制：  
生成机制：

岩浆脱气；地震过程中岩石破裂；  
辐射分解；细菌分解；有机物分解；水合物分解等

消耗机制：

岩石吸收；岩石形成矿物的还原；  
耗氢厌氧细菌；氢的耗散，等等



# 二、白氢勘探的基本逻辑

Focus on the main geologic H<sub>2</sub> formation mechanisms

**a Serpentinization & oxidation of iron ores**

$$2\text{FeO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2$$

**b Radiolysis**

$$\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\alpha, \beta, \gamma} \text{H} + \text{HO} \cdot$$

$$\text{H}_2, (\text{H}_2\text{O}, \text{H}_2\text{O}_2, \text{O}_2)$$

**c Rock Fracturing**

$$2(\equiv \text{Si} \cdot) + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2(\equiv \text{SiOH}) + \text{H}_2$$

**d Magma Degassing**

$$\text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SO}_2 + 3\text{H}_2$$

$$\text{SO}_4^{2-}(\text{melt}) + 2\text{FeO}(\text{melt}) = \text{SO}_2(\text{gas}) + \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{melt}) + \text{O}^{2-}$$

Wang et al. 2023, Energies

Also magnetite oxidation splits water:

$$2(\alpha - \text{Fe}_3\text{O}_4) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 3(\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3) + \text{H}_2$$

10-13  
EAGE 2024

25

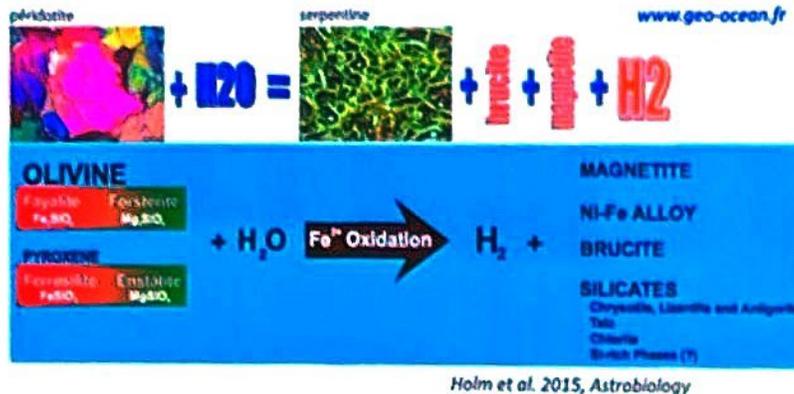
地质氢的四种生产机制：

- 1、铁矿石的蛇纹岩化和氧化；
- 2、岩石的辐射分解；
- 3、岩石破裂；
- 4、岩浆脱气。

# 二、白氢勘探的基本逻辑

## H<sub>2</sub> from serpentinization: water-mineral reactions

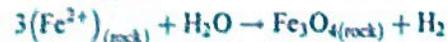
Peridotites, Ophiolites – average 10% Fe-olivine, but all ferrous (Fe<sup>2+</sup>), unless serpentinized



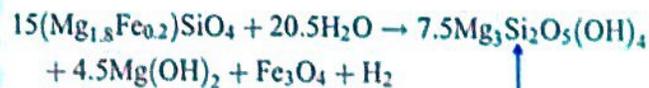
蛇纹岩化过程生成地质氢。

橄榄石、辉石与水反应生成蛇纹石

Generalized reactions of water with ferrous iron in subsurface:



Example serpentinization of olivine (0.2 fayalite – Fe)



Brucite

Magnetite

Serpentine

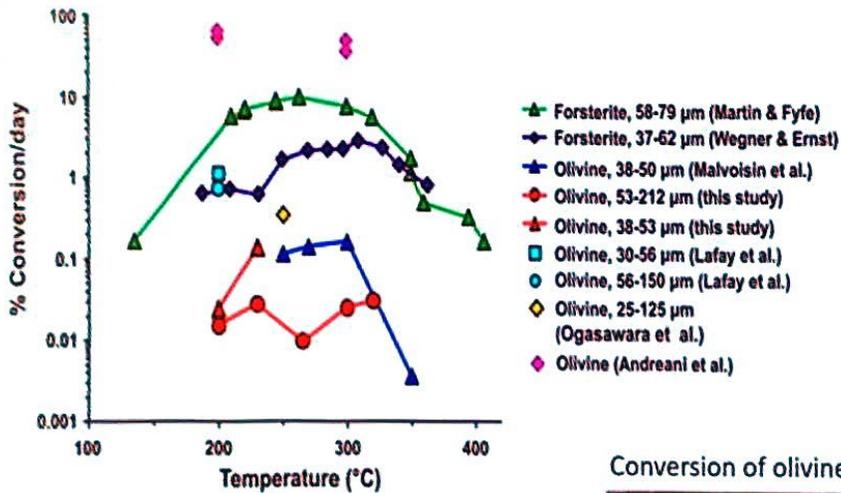
Boreham et al. 2021, AAPEA

76

# 二、白氢勘探的基本逻辑



## H<sub>2</sub> from serpentinization – impact of temperature



McCullum et al. 2016, GCA

Table 4  
Estimated time required for 50% ( $t_{50\%}$ ) and 99% ( $t_{99\%}$ ) serpentinization of olivine in the presence of excess H<sub>2</sub>O (data from Wegner and Ernst, 1983).<sup>a</sup>

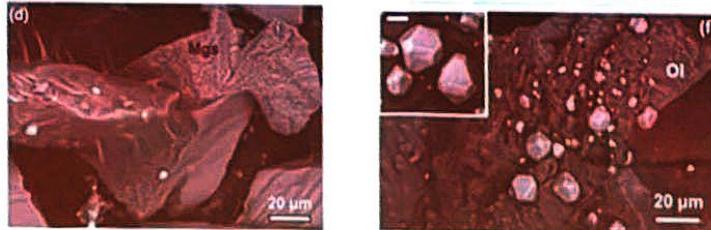
Temperature (°C)	$t_{50\%}$ (years)	$t_{99\%}$ (years)
20	40,000	270,000
50	13,000	86,000
100	2,900	19,000
150	930	6,200
230	240	1,600
310	90	600

<sup>a</sup> Data shown are for pure forsterite olivine with 50 mm grain diameters and a pressure of 50 MPa.

蛇纹岩化过程生成地质氢-温度对蛇纹石化产生氢的影响:

从右上角的表格可以看到在一定范围内，随着温度升高，蛇纹石化所需的时间减少。

Conversion of olivine to fibrous serpentine and magnetite



21

# 二、白氢勘探的基本逻辑

## H<sub>2</sub> from oxidation of iron ores

- BIFs have high iron content up to 30-40 wt. % but are partially already oxidized during sedimentation.
- Magnetite reacts with water from 50 °C to form H<sub>2</sub>

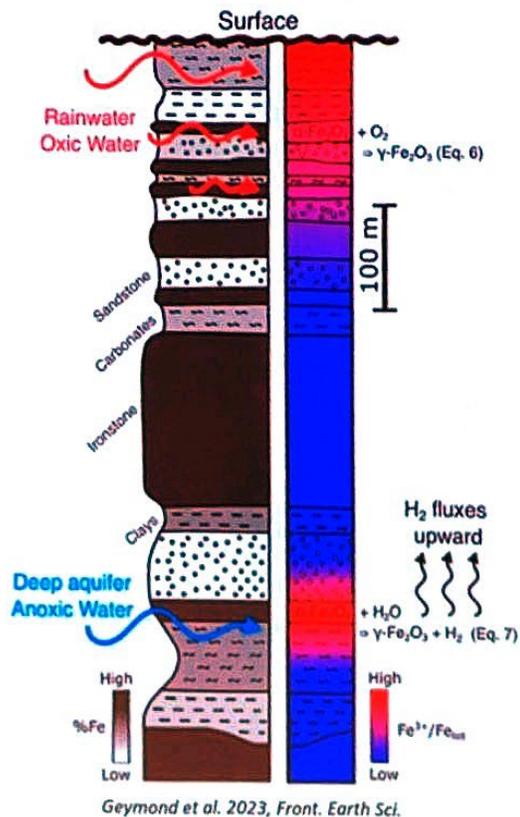


Magnetite  
(also by-product of Serpentinization)

maghemite



Banded Iron Formation (BIF), Australia



含铁矿石氧化产生H<sub>2</sub>:

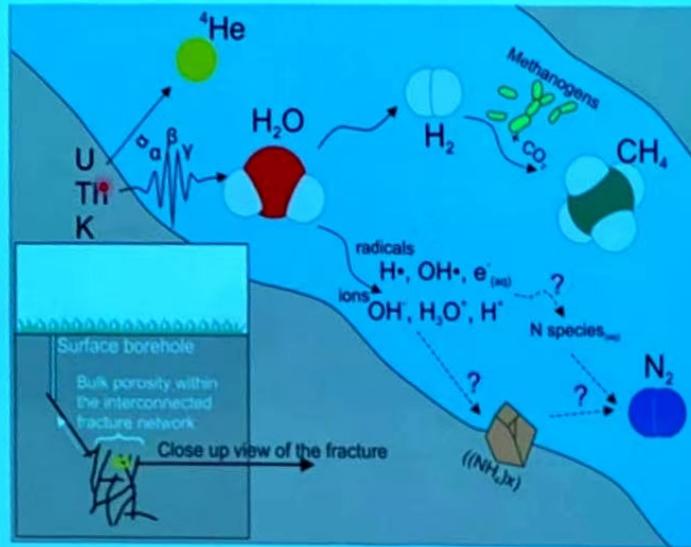
磁铁矿在50摄氏度时与水反应产生H<sub>2</sub>。

右图展示了澳大利亚的带状铁地层（BIF）内H<sub>2</sub>的产生。



# 二、白氢勘探的基本逻辑

Geologic H<sub>2</sub> via water radiolysis and its complexity



Karolyte et al. 2022, Chemical Geology

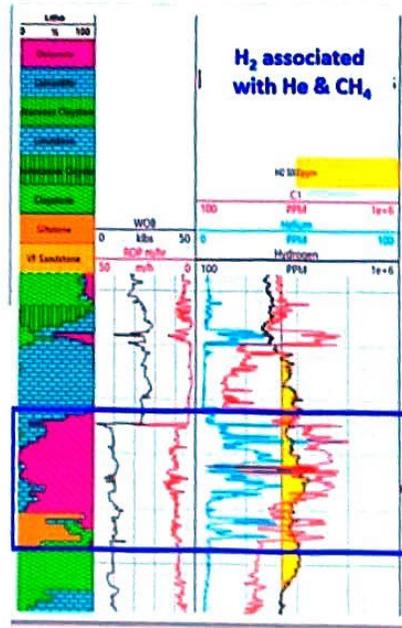
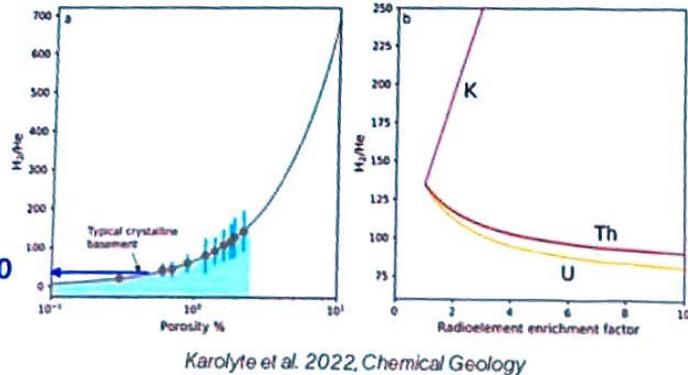
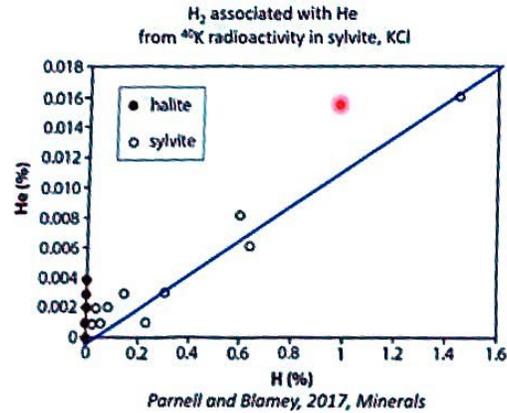
氦气, 氢气, 甲烷, 氮气  
一定程度上存在伴生性

# 二、白氢勘探的基本逻辑

## H<sub>2</sub> and Helium

- H<sub>2</sub> and Helium can be in some scenarios co-genetic
- Water radiolysis origin of H<sub>2</sub> where the radiation's alpha particle is He<sup>2+</sup>
- In rock rich in U, Th, K, e.g., granites, U-ores, etc.

Ratio H<sub>2</sub>/He depends on porosity and K, Th, U ratio, typical for radiolysis ~ 20-30. More K => ratio up



氢和氦在某些情况下是共生的

氢与甲烷也总存在联系

# 二、白氢勘探的基本逻辑

## Exploration steps for natural H<sub>2</sub> system



- **Natural H<sub>2</sub> system recognition**
  - **Source rocks**
    - Fe<sup>2+</sup>-rich rocks (peridotites, ophiolites, BIFs) - **magnetometry, gravimetry**
    - Radioactive rocks (granites, U-ores) – **radiometry**
    - High geothermal gradients plus water circulations (hydrothermal zones)
  - **Conduits delivering water to the “kitchen”**
    - Faults, formation dips aligned with hydraulic head - **seismic**
  - **Migration pathways from kitchen to reservoirs**
    - Faults, water beds, vertically permeable rocks - **seismic**
  - **Reservoir traps and their timing (critical time) - seismic**
    - Structural with conventional seals (shales)
    - Crystalline seals, igneous or evaporitic, salt layers (sills, dikes, diapirs)
    - Compromised seals (faults, fractures)
  - **Natural seeps** – expressions of active system leakage – **land surveys**
- **Drilling wells**
  - **Drilling**
    - Drill bits to handle sedimentary and crystalline rocks - **geothermal bits**
    - Mud choice – H<sub>2</sub> low-density, low-Pressure gas, or water-dissolved - **pressure tests**
  - **Well logging methods and data certainty - petrophysics, cuttings, mud gas**
  - **Sampling and testing promising intervals – H<sub>2</sub> phase studies**
- **Commercial H<sub>2</sub>?**
  - **Flow rate, total volume, purity (often mixed with CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He, ...)**
  - **Distance to market**

# 二、白氢勘探的基本逻辑

## ◆ 自然氢系统思维探测步骤:

### ◆ 自然H<sub>2</sub>系统的识别

#### ◆ 源岩

- ◆ 富铁岩石 (橄榄岩、蛇绿岩、带状铁地层) -----磁力计、重力计
- ◆ 放射性岩石 (花岗岩, 铀矿石) -----辐射测定法
- ◆ 高地温梯度加上水循环 (热液带)

#### ◆ 向“厨房”输送水的管道

- ◆ 断层、地层倾角与水力头方向一致-----地震方法探测

#### ◆ 从“厨房”到储层的迁移路径

- ◆ 断层、水层、垂直渗透性岩石-----地震方法探测

#### ◆ 储层圈闭及其时序----地震方法

- ◆ 带常规密封 (页岩) 的结构
- ◆ 结晶密封、火成岩或蒸发岩、盐层 (岩壁、岩脉、底喷岩)
- ◆ 受损密封 (断层、裂缝)

#### ◆ 自然渗透—主动系统渗漏的表达 ---- -土地调查

### ◆ 钻井

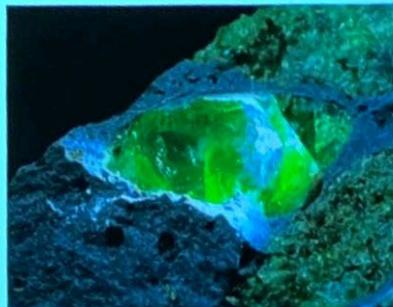
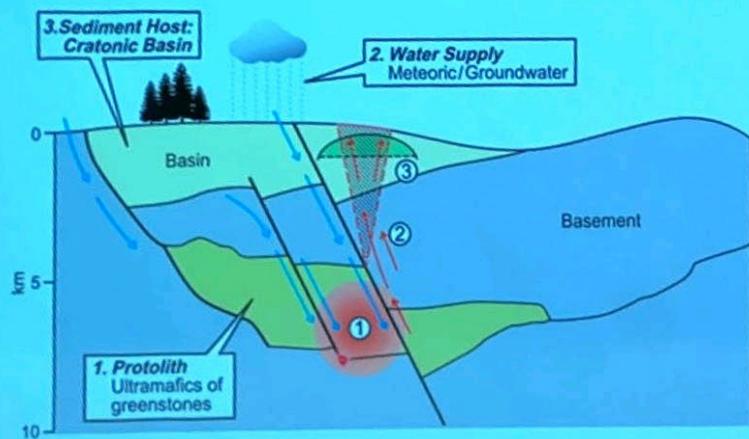
- ◆ 来处理沉积岩和结晶岩的钻头 ----- 地热钻头
- ◆ 泥浆选择---低密度, 低压气体或水溶解H<sub>2</sub> ----- 压力测试
- ◆ 测井方法和数据确定性 ---- 岩石物理、岩屑、泥浆气
- ◆ 采样和测试 ----H<sub>2</sub>相位测试

### ◆ 商业化H<sub>2</sub>?

- ◆ 流量、总体积、纯度 (常与甲烷、二氧化碳、氮气、氦气等混合)
- ◆ 市场化的距离

# 二、白氢勘探的基本逻辑

## Natural H<sub>2</sub> systems – general concepts



Olivine, Smithsonian NMNH

Fig. 4. Cratonic greenstone exploration model. Depicts serpentinization in greenstone protolith triggered by meteoric water supply and overlying host sediments of cratonic basin. (1) Zone of serpentinization reaction and hydrogen generation; (2) Advection and solution flow of hydrogen; (3) Sealing and trapping of gas-phase hydrogen (modified from Hutchinson *et al.* 2024). Blue arrows: groundwater; gold arrows: hydrogen.

## 天然H<sub>2</sub>系统的一般概念

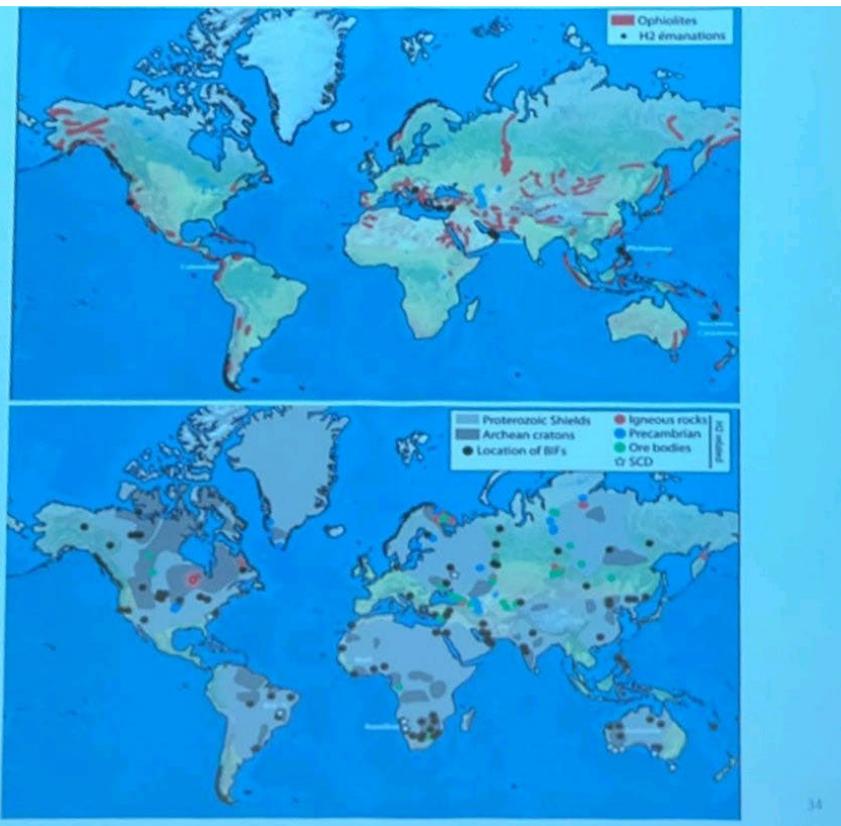
图4克拉通绿砂岩勘探模型显示了大气供水和上覆火山岩寄主沉积物共同作用下的克拉通绿砂岩演化过程。

- (1) 蛇纹石化作用区和氢气生成区;
- (2) 氢气的平流和溶解流量;
- (3) 气相氢气的密封和捕集

水通道->厨房->上行通道->储层

# 二、白氢勘探的基本逻辑

Global H<sub>2</sub> source rock distribution – iron-rich rocks and iron ores



全球H<sub>2</sub>源岩分布—富铁岩和铁矿石

# 二、白氢勘探的基本逻辑

## Seismic surveys to identify potential H<sub>2</sub> traps

Challenge 1: bright spots of H<sub>2</sub> look the same as any other gas

Salt could be a perfect seal (crystalline, geologically plastic-not fractures)

**Challenge 2: Leaky seals – still can trap hydrogen if its influx from “kitchen” is higher (funnel effect)**

*Mali, source: Crains Petrophysical Handbook*

*Patiño (Ecopetrol), Strapoc, et al., 2024, Frontiers in Geochemistry, in press*

10-13 June 2024 EAGE

地震调查识别潜在的H2圈闭：

挑战一：H2的亮点看起来和其他气体一样

找亮点？

挑战二：泄露密封。

找好的圈闭？

找好的圈闭岩性？

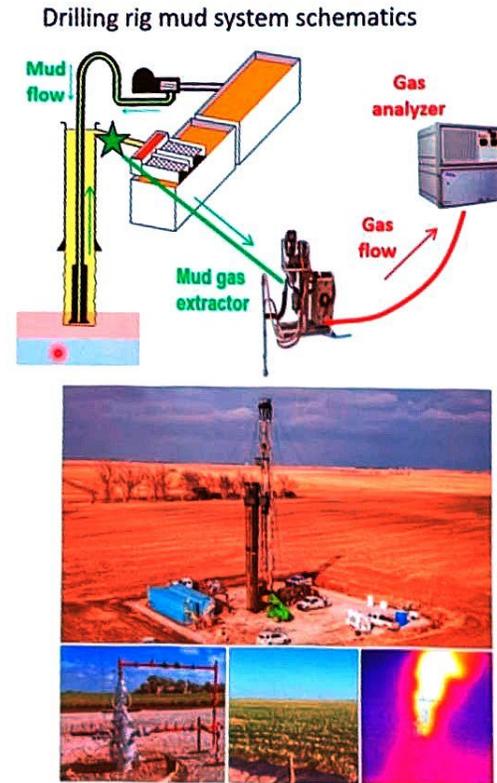
# 二、白氢勘探的基本逻辑

## Drilling wells for H<sub>2</sub>

### Challenges:

- Large **variability of rock hardness** (sedimentary and crystalline) – drilling performance, drill bits
- **Lack of specific response to petrophysics to H<sub>2</sub>** versus CH<sub>4</sub> accumulations
- Likely **mud thief zones** (risk of total losses – no mud gas data) – fractures zones, faults, karst
- **Low pressure regimes**, even sub-hydrostatic (risk of total losses – no mud gas data)
- Risk of H<sub>2</sub> **flow pathways blockage by drilling fluid invasion**
- **H<sub>2</sub> as water-dissolved phase** – low H<sub>2</sub> concentration
- Detection of H<sub>2</sub> while drilling (mud gas) **doesn't guarantee sustained flow**
- If H<sub>2</sub> is in **adsorbed phase**, wells might require dewatering first (like CBM wells)

10-13  
June 2024  
EAGE



## H<sub>2</sub>钻井

### 挑战:

- 岩石硬度（沉积和结晶）的大变异性-钻井性能，钻头
- 相比于甲烷（CH<sub>4</sub>），H<sub>2</sub>缺乏特定的岩石物理响应
- 可能的偷泥带（完全损失的风险-没有泥气数据）-裂缝带，断层，喀斯特
- 低压状态，甚至是压静水状态（全损风险-无泥浆气数据）
- H<sub>2</sub>流动通道被钻井液侵入堵塞的风险
- H<sub>2</sub>作为水溶解相-低H<sub>2</sub>浓度
- 钻孔时检测H<sub>2</sub>（泥浆气）不能保证持续流动
- 如果H<sub>2</sub>处于吸附相，并可能需要先脱水（如煤层气井）

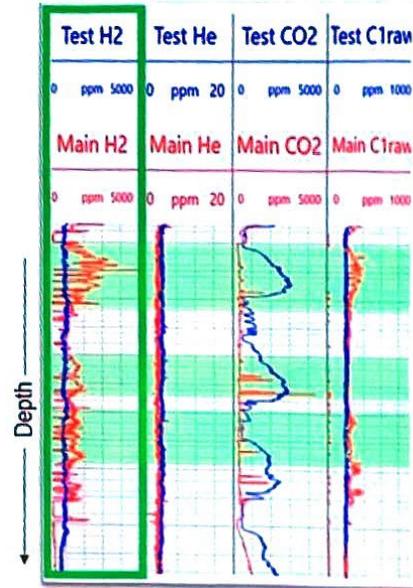
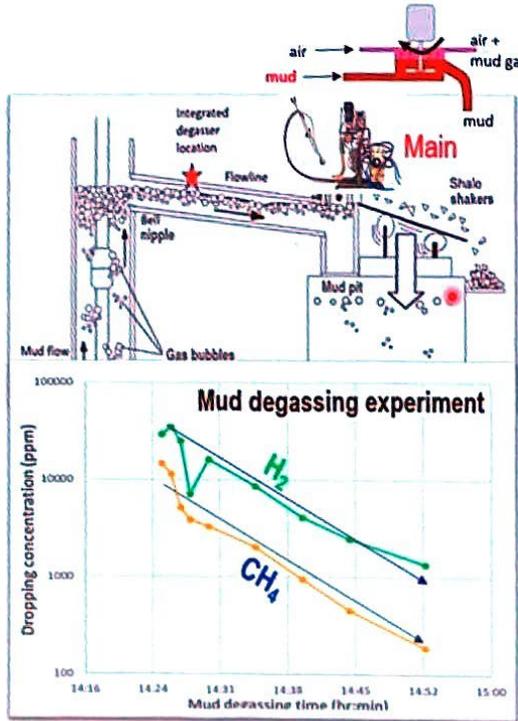
44

# 二、白氢勘探的基本逻辑



## Degassing strategy as key to H<sub>2</sub> quantification

- Mud degasser techniques compared (**conventional** vs **test**)
- H<sub>2</sub> retained in mud (!) despite low solubility (**Main**)
- H<sub>2</sub> degassing rate ~ CH<sub>4</sub>, allows quantification of reservoir-representative H<sub>2</sub> concentration



脱气策略是H<sub>2</sub>量化的关键：

- 泥浆除气器技术比较（常规与测试）；
- 尽管溶解度很低，H<sub>2</sub>仍主要保留在泥浆中；
- H<sub>2</sub>脱气率。

中图：泥浆脱气实验



## 二、白氢勘探的基本逻辑

### ◆短课程的思想总结：

- ◆1、讨论了氢气产生的地质和地球化学机制；
- ◆2、给出了氢气勘探的技术途径；
- ◆3、讨论了钻井存在的挑战；
- ◆4、讨论了脱气存在的方法及存在的问题。
- ◆5、商业应用前景还不能确定。

## 二、白氢勘探的基本逻辑

### ◆白氢勘探的观点：

- ◆天然氢的勘探，显然应该是首先找生氢源岩；找水运移通道；找氢气运移通道；找氢气藏。
- ◆当然，找生氢源岩是第一位的。可以顺藤摸瓜！
- ◆勘探地震在白氢勘探中应该能起到主要作用。找生氢源岩应该要借助大地电磁方法。
- ◆地质知识的指导还是要先行！

# 目录

- ◆ 一、概述
- ◆ 二、白氢勘探的基本逻辑
- ◆ 三、近地表空间探测的基本逻辑
- ◆ 四、结论与讨论

# 三、近地表空间探测的基本逻辑

## ◆近地表空间探测的需求：

- ◆近地表空间（0-200米；0-300米；再更深一点点？）探测，由于地下工程、地质防灾、环境和军事需求的促进，正逐渐变成一个需求热点。
- ◆以前的近地表空间探测主要服务于城市和建筑工程需求，探测深度不大，GPR等还可以发挥作用，但是扩展到200多米和300多米的深度，主要技术手段还是要靠地震（高精度近地表地震）。
- ◆军事需求的介入让问题更加复杂化。军事环境下，地震数据采集不再能随心所欲地布设观测系统，军事需求更多样，动的异常体和静的异常体的定位、识别和辨识都需要。这引入了十分复杂的问题。此时，近地表空间异常体的探测必须是**多物理场+多信息的**。

# 三、近地表空间探测的基本逻辑

## ◆近地表空间探测的基本逻辑：

- ◆首先，我认为：收集三维空间中的数据 $d$ 是第一位的。地下空间任意点  $(x,y,z)$  处，数据 $d$ 是一个向量。  $d$ 中每一个元素代表一种物理场数据类型。事实上，每个类型的物理场数据还可以沿时间变的。就是说每个类型的数据又可能是一个向量，甚至是高维数据体。在复杂的战场环境下，充分完整地采集数据 $d$ 是近地表空间探测问题研究的基础。没有这个基础，后面的探测就没有意义了！对声/震、电、重、磁、光物理场的数据观测的物理实质要多加关注了！

# 三、近地表空间探测的基本逻辑

## ◆近地表空间探测的基本逻辑：

- ◆ 另外，收集描述动的异常体和静的异常体的先验信息 $m_{\text{priori}}$ 也是非常重要的。
- ◆ 目前，声/震、电、重、磁、光大概是形成数据 $d$ 的物理场来源。假定有了充分的物理场数据，单独反演或联合反演动的异常体和静的异常体的描述参数是第二个要做的重点工作。
- ◆ 基于联合反演生成动的异常体和静的异常体的描述参数；或是基于单独的反演结果，然后融合成动的异常体和静的异常体的描述参数，这是两个不同的方案。这应该是近地表空间探测要解决的第二个核心问题。
  - ◆ Bayes参数估计理论框架
  - ◆ 空间数据统计分析（建模）理论框架
- ◆ 第三个问题就是根据单独反演或联合反演得到的动的异常体和静的异常体的描述参数，对动的异常体和静的异常体进行定位、识别和辨识。

# 三、近地表空间探测的基本逻辑

## ◆近地表空间探测的基本逻辑：

◆数据观测、数据分析（反演）、分析（反演）结果的解译，三个环节紧紧相扣。今后地球物理学家要想立足，必须同时关注这三个问题。仅仅成为数据处理专家（更甚的是算法专家）是远远不够的，只能依附于真正的地球物理学家（他们拿项目，分给搞数据处理和搞算法研究的）。

◆目前，激光激振、激光测振、光纤测振、旋转分量测振、高精度热感知、微重力感知、高精度磁感知、激光雷达等新的感知技术，需要在近地表空间探测中综合应用，得到更多的多物理场。

◆被动源数据的观测和处理在近地表空间探测中可能会发挥重要的作用。Aki和Rechard“定量地震学”书中的表示定理是被动源数据处理的理论基础。

# 三、近地表空间探测的基本逻辑

## ◆近地表空间探测的基本逻辑：

- ◆空间（也包括时间）散乱的多信息下，如何构建出一个统一的模型是很多领域的核心问题。在近地表空间探测中，这个表现得很明显。另外，随机模拟生成期望模型是值得关注的方法。总之，Bayes统计判决理论框架下的多信息融合生成期望模型，需要找到有效的具体实现方法与技术。

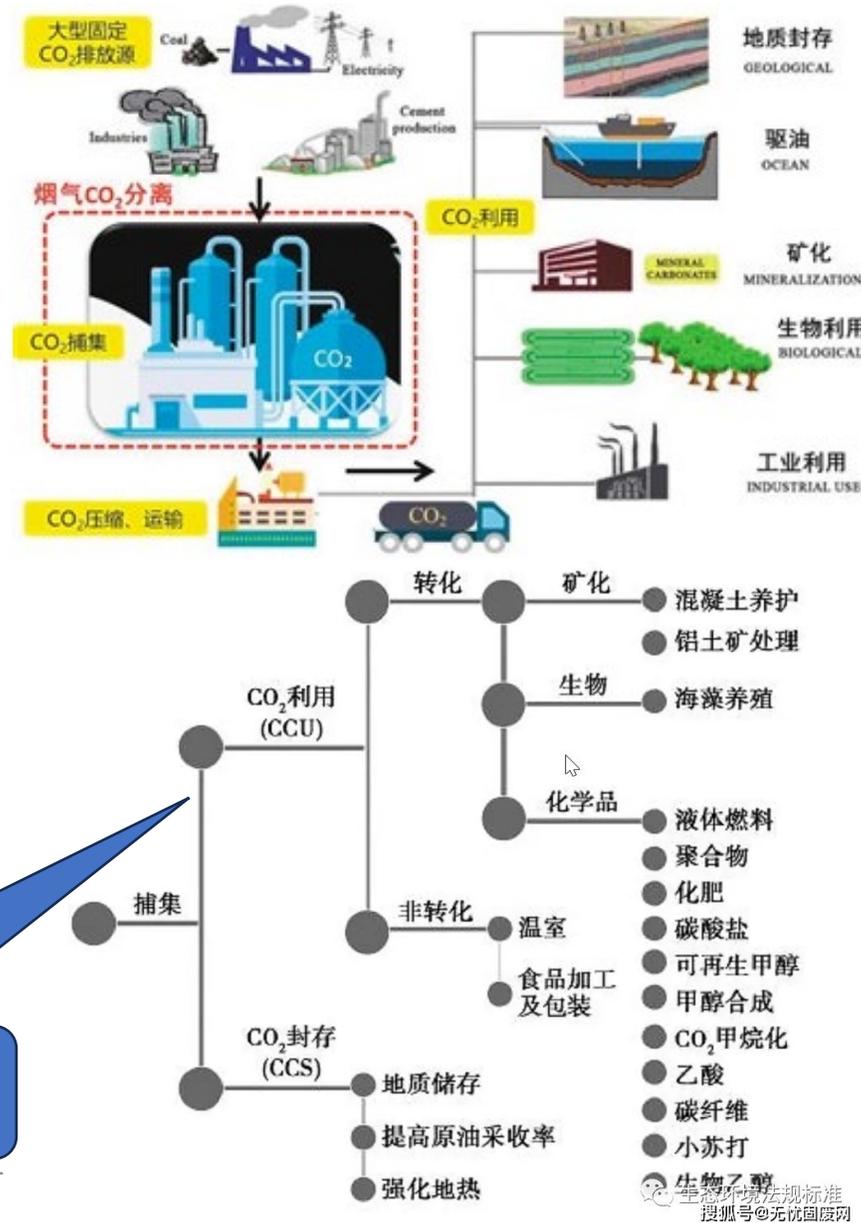
# 三、近地表空间探测的基本逻辑

## ◆近地表空间探测的基本逻辑：

- ◆ 油气勘探，尽管还要维持较长一段时间，但余下的主要是石油工业界的事情。大学里面的研究逐渐接近尾声。年轻的研究人员要注意专业技术的发展趋势。地球内部空间探测，从应用的角度看，今后的重点应该是深层超深层油气勘探和近地表空间探测。服务于CCS和CCUS的地震勘探，似乎没有引入过多的研究内容。作为纯粹的研究人员，直接转移到大地球构造的探测也不是不可。总之，要未雨绸缪！

CCS和CCUS应该是很不错的就业领域。

WPI-Seminar



CCS与CCUS会成为双碳时代的很重要的应用领域。值得大学里深入研究的勘探地震问题可能不太多。更多是个应用问题。

# 目录

- ◆一、概述
- ◆二、白氢勘探的基本逻辑
- ◆三、近地表空间探测的基本逻辑
- ◆四、结论与讨论

# 四、结论与讨论

- ◆由于绿氢工业生产尚存在很多技术瓶颈，白氢的地质勘探在“双碳”政策的落实，在人类社会可持续发展中，具有重要的价值与意义。
- ◆勘探地质家：白氢的生产、运移与存储。浅层水向下运移的通道-->合适的温度+化学反应岩石-->氢气大量产生-->合适的运移通道-->合适的封存条件-->白氢储层
- ◆地球化学家：白氢的大量生成条件。合适的温度条件+合适的岩石+化学反应（放射作用）+大量氢气生产
- ◆勘探地球物理学家：白氢储层的成像与刻画。“两宽一高”地震数据采集--> FWI类地震波成像-->白氢储层刻画与描述。
- ◆我认为：我们提出的CWI+WBIM应该是满足白氢储层成像需求的方法技术。

# 四、结论与讨论

## ◆近地表空间探测：

- ◆目前主要是多波场、多信息的采集和收集问题，即数据端存在太多问题，目前远远满足不了对小尺度快速变化的异常体进行高精度成像的需求。
  - ◆作为数据分析/成像人员，不能忽视（甚至无视）数据采集技术。认为数据采集无关我事，必须给我提供完整完美的数据体。
- ◆Bayes统计判决理论框架下，基于多波场、多信息生成期望模型是基本问题。目前，尚缺乏有效的具体实现方法与技术。
- ◆近地表空间探测问题比较多，还存在很大技术发展空间。



**谢谢**  
**欢迎批评指正**