

中-加科技合作交流资料

关于冷湖地区 Clearwater  
储集层的 x-射线衍射和  
稳定同位素分析结果的  
报 告

中国石油天然气总公司  
石油勘探开发科学研究院

一九九一年四月一日

# 目 录

## 一.前言

## 二.样品描述

## 三.方法和结果

1. 沥青抽提
2. X-射线衍射参数
3. 全岩 X-射线衍射分析
4.  $>38\mu\text{m}$  和  $<38\mu\text{m}$  粒级的 X-射线衍射分析
5.  $<2\mu\text{m}$  粒级的 X-射线衍射分析
6. 碳酸盐矿物的氧和碳同位素年龄

## 四.初步看法

1. 亚氯酸钠和冷抽提处理的影响
2. 方解石胶结物的纵向分布
3. 碎屑白云石的纵向分布
4. 粘土矿物的变化( $<2\mu\text{m}$  粒级)
  - a. BVI-CH1
  - b. BVI-X7
  - c. Esso
  - d. Suncor
  - e. Dome
  - f. BP
5. 白云石和方解石中的稳定同位素变化
  - a. 白云石
  - b. 方解石

## 编者提要

热采过程中,有些矿物受热分解、蚀变,并产生  $\text{CO}_2$ ; 增加储层中液体的酸度,沉淀堵塞孔隙,也会造成工艺装备的结垢和腐蚀。对热采工艺的选择和采油效率影响极大。所以,对热采油藏进行矿物学研究是非常必要的。

本文主要研究了白云石和方解石胶结物在储层中的分布和成因。研究的目的是为地化和工艺方案模拟研究提供基础数据。岩样制备和实验方法及数据都未经筛选和修改,真实可靠,可供我们研究同类问题时参考。

# 目 录

## 一.前言

## 二.样品描述

## 三.方法和结果

1. 沥青抽提
2. X-射线衍射参数
3. 全岩 X-射线衍射分析
4.  $>38\mu\text{m}$  和  $<38\mu\text{m}$  粒级的 X-射线衍射分析
5.  $<2\mu\text{m}$  粒级的 X-射线衍射分析
6. 碳酸盐矿物的氧和碳同位素年龄

## 四.初步看法

1. 亚氯酸钠和冷抽提处理的影响
2. 方解石胶结物的纵向分布
3. 碎屑白云石的纵向分布
4. 粘土矿物的变化( $<2\mu\text{m}$  粒级)
  - a. BVI-CH1
  - b. BVI-X7
  - c. Esso
  - d. Suncor
  - e. Dome
  - f. BP
5. 白云石和方解石中的稳定同位素变化
  - a. 白云石
  - b. 方解石

## 表

- 表 1 沉积相描述
- 表 2 样品描述
- 表 3 全岩样品归一化后的峰高
- 表 4  $< 38\mu\text{m}$  粒级归一化后的峰高
- 表 5  $< 38\mu\text{m}$  粒级归一化后的峰高
- 表 6  $< 2\mu\text{m}$  粒级归一化后的峰高
- 表 7 白云石和方解石的氧和碳同位素分析结果

# 图

图 1a BVI-CH1 方解石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 1b BVI-X7 方解石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 1c Esso 方解石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 1d Suncor 方解石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 1e Dome 方解石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 1f BP 方解石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 2a BVI-CH1 白云石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 2b BVI-X7 白云石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 2c Esso 白云石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 2d Suncor 白云石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 2e Dome 白云石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 2f BP 白云石( $>38\mu\text{m} \pm$  全岩)

图 3a BVI-CH1( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 3b BVI-CH1( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 3c BVI-CH1( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 4a BVI-X7( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 4b BVI-X7( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 4c BVI-X7( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 5a Esso( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 5b Esso( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 5c Esso( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 6a Suncor( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 6b Suncor( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 6c Suncor( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 7a Dome( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 7b Dome( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 7c Dome( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 8a BP( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 8b BP( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 8c BP( $<2\mu\text{m}$  粒级)

图 9 碳酸盐中的稳定同位素变化情况

图 10 稳定同位素变化情况: BVI-CH1

图 11 稳定同位素变化情况: BVI-X7

图 12 稳定同位素变化情况: BVI-X7

图 13 稳定同位素变化情况: BVI-X7

图 15 稳定同位素变化情况: Esso

图 14 稳定同位素变化情况: Esso

图 16 稳定同位素变化情况: Esso

# 关于冷湖地区 Clearwater 储集层的 X-射线衍射和稳定同位素分析结果的报告

## 摘 要

本报告列出了冷湖地区 Clearwater 层大约 150 块样品的 X-射线矿物学和碳、氧全位素分析结果。所有的样品都取自岩心, 它们代表着该地区北部以下五个主要的实验/工业开采点: (I) 8-14-85-W4 (BVI-CHI) -ABC 实验项目; (II) 8-14-65-2W4 (BVI-X7) -ABC 实验项目; (III) 3-22-65-4W4 (84-J3-13) -ESso; (IV) 10-14-67-3W4- Suncor; (V) 10-7-67-4W4- dome; 和 (VI) 12-8-65-5W4EX-9-BP (英国石油公司)。报告中列举的资料包括: 样品描述 (表 2), 全岩 X 射线矿物学 (表 3),  $>38\mu\text{m}$  粒级的 X 射线矿物学 (表 4),  $<38\mu\text{m}$  粒级的 X 射线矿物学 (表 5),  $<2\mu\text{m}$  粒级的 X 射线矿物 (表 6) 以及碎屑白云石和方解石胶结物的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  年龄, (表 7)。

根据这些数据得出的初步结论包括以下几个方面。

1. 在进行 X 射线分析之前, 为了去除样品中的沥青所进行的亚氯酸钠和冷抽提处理对矿物不产生明显的影响。

2. 每口井的方解石胶结物的丰度和纵向分布是不同的 (图 1a-f)。

3. 每口井的碎屑白云石 (粒状) 的丰度和纵向分布也是不同的, 它们与方解石胶结物的产状之间没有什么关系 (图 2a-f)。

4. 在粘土矿物方面 ( $<2\mu\text{m}$  粒级), 最主要的特点是 7A 矿物 (几乎都是富铁的 1:1 的层状硅酸盐, 铁铝蛇纹石) 与 17A 矿物 (蒙皂石族) 之间的反相关关系 (图 3a-8a)。在某些井段, 7A 与 10A (伊利石) 粘土之间也存在着一点不很明显的反相关关系 (图 3c-8c)。14A 矿物 (绿泥石族) 的丰度则没有什么明显的变化 (图 3b-8b)。

5. 骨架粒状白云石的  $\delta^{13}\text{C}$  ( $-1\text{‰}$  到  $+0.05\text{‰}$ , PDB) 和  $\delta^{18}\text{O}$  ( $+22\text{‰}$  到  $+24\text{‰}$ , SMOW) 值没有什么变化。这些是西加拿大沉积盆地白垩系沉积岩中的白云石的典型成分。只有无机成因的  $\text{CO}_2$  才对上述白云石的形成作出明显的贡献。

6. 对于成岩的方解石胶结物,  $\delta^{13}\text{C}$  值呈现出很大的变化范围 ( $-5\text{‰}$  到  $+17\text{‰}$ , PDB); 而  $\delta^{18}\text{O}$  值的变化则小得多 ( $+17\text{‰}$  到  $+23\text{‰}$ , SMOW; 图 9)。图 10-16 表明了每个胶结区域同位素变化的详细情况。一般来说,  $\delta^{14}\text{C}$  的值几乎接近于  $0\text{‰}$  (PDB) 的样品可能是无机  $\text{CO}_2$  成因的; 而较高的  $\delta^{13}\text{C}$  值可能反映了有机物中的细菌发酵而产生的  $\text{CO}_2$  的存在。随着方解石中  $\delta^{13}\text{C}$  值的增加,  $\delta^{18}\text{O}$  值一般是减少的。这也许反映了在方解石形成过程中, 含有低的  $\delta^{18}\text{O}$  的大气水影响的增大。

AOSTRA-ARC<sup>#</sup> 岩心计划 (1986.7.1-1987.6.30) 和加拿大的 NSERC (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) 对本工作提供了经济支持。现在正在进行的工作包括对这些数据的详细分析和讨论, 这将是若干附加报告和手稿的主题 (与 ARC 人员合作)。这项工作将通过 AOSTRA-University 研究计划 (同 Longstaffe 的 680 号协议, 1988.7.1-1980.6.30) 和 NSERC 工作基金 A7387 继续进行下去, 并通过 AOSTRA-University 研究计划加以报道。

## 一、 前 言

编写本报告的目的列于列举出冷湖地区 clearwater 地层六口井的岩心样的 X-射线和稳定同位素的数据。这些数据为目前正在进行的一个地区的矿物学，地球化学和成岩作用的研究提供了基础资料 (AOSTRA-University680 号协议)。当这些数据有效时，说明这些数据在各个方面的意义的原稿和报告将要提供出来。

## 二、 样品描述

Clearwater 地层是下白垩系 Mannville 组的硅质碎屑沉积物的一个组成部分，在冷湖地区与泥盆系碳酸岩呈不整合接触。在 Mannville 组内部，clearwater 位于 McMurray 地层之上，Grand Rapids 地层之下。Clearwater 地层是一个若干个由下到上逐渐变粒的小层 (Packages) 组成的，其厚度从 35m 到 70m。

本研究中所分析的样品来自中艾伯塔的东部，从 township65 到 67，Ranges1 到 5W4。测试了六口井的岩心样，它们代表了冷湖地区北部五个主要的试验 / 工业开采区。这些岩心是：

1. 8-14-65-2W4(BVI-CH1)-ABC 试验项目
2. 8-14-65-2W4(BVI-X7)-ABC 试验项目
3. 3-22-65-4W4(84-J3-13)-Esso
4. 10-14-67-3W4-Suncor
5. 10-7-67-4W4-Dome
6. 12-8-66-5W4(Ex-9)-BP(英国石油公司)

根据砂 / 页岩比，生物扰动作用的情况，层理或纹理性质，含油饱和度以及方解石胶结程度，wrightman 先生将本研究区域的 clearwater 地层分成若干个沉积相。表 1 给出了他对这些沉积相的描述。表 2 列出了采集于六个岩心的 150 多块样品的井深，沉积相和岩性特征。

## 三、 方法和结果

### 1. 沥青抽提

应用为 ARC 所采用的冷抽提 / 离心标准方法对所有含有碳氢化物的样品进行了沥青抽提。然后在湿态下过筛，将样品分成  $<38\mu\text{m}$  与  $>38\mu\text{m}$  粒级两部分，并分别记下它们的重量。

### 2. X-射线衍射(XRD)参数

在下列条件下，应用 X-射线衍射仪对所有的样品进行了分析：

1. Co-K $\alpha$  辐射, 石墨单色器滤波;
2. 发散狭缝为  $1^\circ$ , 时间常数为 2;
3. 扫描速度为  $1^\circ (2\theta) / \text{min}$ , 纸速为  $10\text{mm} / \text{min}$ ;
4. 管压 50KV, 管流 20mA.

### 3. 全岩 X 射线分析

全岩 X-射线分析结果见表 3. 对那些不需要进行冷抽提处理以去除沥青的样品(如, 碳酸盐胶结的砂岩, 含水砂岩, 含沥青很少的砂岩以及页岩)差不多都进行了全岩 X-射线分析. 不含沥青的岩样先破碎(手工)成  $< 20\mu\text{m}$  粒级, 接着用 3% 浓度的亚氯酸钠溶液在  $65^\circ\text{C}$  条件下处理 48 小时以去除有机质, 最后再洗涤干净以去掉亚氯酸钠溶液. 将样品装进 A1 样品架, 用背压法制样, 然后进行 X-射线分析, 扫描范围从  $2^\circ (2\theta)$  到  $65^\circ (2\theta)$ .

表 3 给出的只是归一化后的各种矿物的峰高百分数, 而不是实际的重量百分数; 骨架矿的形式分析 (Modal Analysis) 工作正在进行之中. 除了 7A 和 10A 粘土之外, 所有矿物的形式因子(即用于峰高的校正因子, 它是用来说明各相之间结晶性变化情况的)都采用 1, 而 7A 矿物和 10A 矿物的形式因子分别采用 2 和 4. 所有各相的最强峰的峰高被测量, 接着扣除背景值. 那些丰度少于 5% 的相是不可能被 X-射线检测到的.

### 4. $> 38\mu\text{m}$ 和 $< 38\mu\text{m}$ 粘级的 X-射线分析

表 4 与表 5 分别列出了  $> 38\mu\text{m}$  与  $< 38\mu\text{m}$  样品的 X-射线衍射分析结果. 为了得到这些数据, 原岩经过了沥青的冷抽提处理, 用湿态过筛的方法将样品分成  $> 38\mu\text{m}$  与  $< 38\mu\text{m}$  两部分. 它们又都破碎成  $< 20\mu\text{m}$  粒级, 凉干, 最后用背压法装进 A1 样品架在衍射仪上进行分析. 扫描范围从  $2^\circ (2\theta)$  到  $65^\circ (2\theta)$ .

表 4 与表 5 给出的仅仅是归一化后的峰高值, 而不是重量百分数. 除了 10A 和 7A 粘土分别采用 4 与 2 的形式因子外, 其余各相均采用 1. 测量各相最强峰的峰高, 并扣除背景值. 在这两个表的最后一栏也给出了每种粒级对经沥青抽提后的原岩的重量百分数. 于是, 这些样品的全岩 X-射线分析结果是可以计算出来的, 这些数据是非常需要的. 同样, 那些含量低于 5% 的相是不可能被 X-射线检测到的.

### 5. $< 2\mu\text{m}$ 粒级的 X-射线衍射分析

$< 2\mu\text{m}$  粒级样品的 X-射线衍射结果见表 6. 这时仅仅报道了几种主要的粘土矿物, 它们是根据 (001) 底面间距加以鉴定的. 关于样品中存在着的混合层矿物和 1: 1 的 Fe 粘土的详细分析工作正在进行之中. 表 6 中 7A 粘土几乎都是铁铝蛇纹石和铁铝蛇纹石类矿物, 也有少量高岭石. 具有一定膨胀层成分的混合层矿物是包括在 17A (蒙脱石类) 矿物族中的.

在分离  $< 2\mu\text{m}$  粒级粘土之前, 用冷抽提法从原岩中除掉沥青. 对于那些未作这样处

理的样品, 表 6 已作了说明。为了获得  $<2\mu\text{m}$  的粘土, 对样品要进行以下的处理。

1. 轻轻地把  $<38\mu\text{m}$  的样品破碎, 然后用 3% 浓度的亚氯酸钠在  $65^\circ$  条件下处理 48 小时以去除残留的有机物 (未作这种处理者表 6 已加注明)。接着用蒸馏水彻底洗涤以去除亚氯酸钠, 最后放在蒸馏水中用超声波加以分散。为了获得  $<2\mu\text{m}$  的粘土, 样品被放置在一个高脚的容器 (column) 中并经历了一定时间的沉降。分散和沉降过程被重复三次以保证有效的分离。

2. 用 3% 浓度的亚氯酸钠溶液对上这  $<2\mu\text{m}$  样品在  $65^\circ\text{C}$  条件下处理 48 小时以去除有机质 (例外情况, 表 6 已注明), 接着洗涤干净以去除亚氯酸钠溶液。

3. 把  $<2\mu\text{m}$  粒级的样品分成两部分: 一部分用 2Mol. 浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  饱和; 另一部分用 2Mol 浓度的  $\text{K}^+$  饱和。饱和后的样品也要彻底洗涤干净, 然后进行冷冻干燥。

4. 用吸管将 50mg 的上述经  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  饱和的样品分别沉降在陶瓷片上。用这个方法可制得板状晶形材料的很好的定向片。

得到以下各种的 X-射线谱图:

1.  $\text{Ca}^{2+}$  饱和,  $R \cdot H = 54\%$ ,  $2^\circ - > 35^\circ (2\theta)$ ;
2.  $\text{Ca}^{2+}$  饱和, 又经乙醇溶解,  $2^\circ - > 85^\circ (2\theta)$ ;
3.  $\text{K}^+$  饱和,  $R \cdot H = 0\%$ ,  $2^\circ - > 25^\circ (2\theta)$ ;
4.  $\text{K}^+$  饱和,  $R \cdot H = 54\%$ ,  $2^\circ - > 25^\circ (2\theta)$ ;
5.  $\text{K}^+$  饱和, 加热到  $300^\circ\text{C}$ ,  $2^\circ - > 15^\circ (2\theta)$ ;
6.  $\text{K}^+$  饱和, 加热到  $550^\circ\text{C}$ ,  $2^\circ - > 15^\circ (2\theta)$ 。

在上机进行 X-射线分析之前以及分析过程中, 室内的湿度要得到控制。综合阳离子, 有机物和水饱和的样品的 X-射线谱图, 可以鉴定出绝大部分的粘土矿物, 也包括混合层矿物的定量测定 (对于后者, 即混合层矿物的鉴定工作, 目前正在进行之中)。

应用为 Biscage (1963) 采用的简化方法, 根据定向片的 X-射线谱图, 可以计算出各种粘土矿物之间的相对百分含量。Biscage 方法可得出半定量的结果, 其要点如下:

1. 在  $\text{Ca}^{2+}$  饱和又经乙醇溶解的谱图上, 在 17A 峰 (大部分是蒙皂石, 也有一些混合层矿物), 10A 峰 (大部分是伊利石与伊利石/蒙皂石混层) 和 7A 峰 (1: 1 铁粘土, 如铁铝蛇纹石; 1: 1 铝粘土, 如高岭石) 下面画一条平滑的基线。测量并记录下上述三个峰的峰高。对经  $\text{K}^+$  饱和又进行  $550^\circ$  加热处理的谱图, 也有同样的方法进行测量。

2. 形式因子是用来校正各种主要粘土矿物的可变的结晶性的: 对于 17A, 14A, 7A 和 10A 四种矿物, 其值分别为 1, 1, 2 和 4, 它们之间相对百分含量是应用校正后的峰高进行计算的。如果有 14A 矿物, 那么它的 (002) 的反射将对 7A 的峰高产生影响。于是 7A 矿物最后的计算结果应作以下修正: 从原 7A 含量中减去 14A 矿物的含量。最后, 全部数值再被归一化到 100%。

## 6. 碳酸盐矿物的氧和碳同位素年龄

碎屑白云石颗粒和成岩方解石胶结物的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  分析结果见表 7。此表采用通用的  $\delta$  标记。氧同位素是相对于标准平均海水 (SMOW) 的; 而碳同位素则相对于 Pee Dee

地层的拟箭石属的 (PDB)。在计算中采用了在 25℃ 条件下的  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  中的氧同位素的分馏因子-1.0412。

在作同位素分析之前,所有含碳酸盐的样品(除了表 7 中加了注解的样品外)都用 3% 的亚氯酸钠溶液处理以去除残留的有机质。用去尽有机质的方法制备碳酸盐矿物来进行同位素分析,研磨至  $<44\mu\text{m}$  的粉末岩样在无水的  $\text{H}_3\text{PO}_4$  中在 25℃ 条件处理 1 小时(方解石)和 10 天(白云石)。对既含方解石又含白云石的样品进行了三个小时的抽真空,接着进行方解石的冷抽提以便使  $\text{CO}_2$  的交叉污染减少到最小程度。这些  $\text{CO}_2$  气体是由方解石和白云石一齐产生的。但是交叉污染还是可能存在的。因此,只有当一个样品中的方解石/白云石比值  $>0.5$  时,方解石的分析结果才被记录下来;而对于白云石,只有这个比值  $<0.7$  时,其结果才被记录。在实验过程中, NBS-20 标样给出了下面准确和精确的平均值:  $\delta^{18}\text{O}(\text{SMOW}) = +26.50 \pm 0.02\%$ ;  $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB}) = -1.17 \pm 0.01\%$ 。

#### 四、初步看法

关于对每个项目的更仔细的分析 and 讨论的报告,正在编写之中。下面仅仅是一些一般性的观察结果。

##### 1. 亚氯酸钠和冷抽提处理的影响

为了估计冷抽提和亚氯酸钠处理(漂白)对粘土矿物的影响,选取了 BVI-CH1 井的几块样品并进行了分析。这些样品只用一种方法处理,有的则哪一种方法都不用(表 6)。FL1-19 是一块不含沥青的页岩,它的亚样品的粘土矿物没发生什么明显的变化。这些亚样品及其处理情况如下: FL1-19, 冷抽提和漂白; FL1-10nbl, 不进行漂白但做了冷抽提; FL1-19NCE, 漂白; FL1-19nblNCE, 既未漂白又未经冷抽提。对于一块不含沥青的砂岩的三个亚样品 FL1-1, FL1-1nbl 和 FL1-1nblNCE, 也可以见到类似情况。

与上面情况相比较, FL1-18, 一块与油砂紧邻的灰色页岩,虽然没有因经冷抽提而引起的矿物学的变化,但是经漂白的亚样品(FL1-18, FL1-18nblNCE)比起未作这种处理的亚样品(FL1-18nbl, FL1-18nblNCE)则含有明显高的 17A 与明显低的 10A 成份。在样品 FL1-10, FL1-10nblNCE-1 和 FL1-10nblNCE-ii 当中,也可以看到未漂白的比起漂白的具有较低的 17A 与较高的 14A 衍射强度。这些数据说明,对于含有沥青的样品来说,如果不进行亚氯酸钠的漂白处理,残余的有机物有时可能保留在矿物的层间,这样就导致了膨胀性矿物(如 17A 矿物)晶面间距的部分收缩,从而给出了错误的小的  $d(001)$  值。根据这些实验结果,对于所有含沥青的样品,在进行了漂白处理之后还要接着进行冷抽提。只有经过这样处理的样品才被进一步的考虑。

##### 2. 方解石胶结物的纵向分布

六口井的方解石胶结物纵向分布情况见图 1a-f。数据来自表 3 (全岩)或表 4 ( $>38\mu\text{m}$  粒级)。如果二者均有数据,则数值大者被采用。

根据表 4 的数据，可以看到方解石胶结的明显井深位置是：

表一

| 井 号     | 深度(m)    | 方解石最大丰度    |
|---------|----------|------------|
| BVI-CHI | ≈440     | ≈40%       |
| BVI-XT  | ≈448-449 | ≈70%       |
|         | ≈459     | ≈45%       |
| ESSO    | ≈448     | ≈50%       |
|         | ≈452-458 | ≈5%(沥青浸渍)  |
|         | ≈472-475 | ≈90%       |
|         | ≈481-483 | ≈60%       |
|         | ≈485-486 | ≈45%       |
|         | ≈491     | ≈40%       |
| SUNCOK  | ≈515-516 | ≈50%       |
|         | ≈519-521 | ≈55%       |
| DOME    | ≈548     | ≈30%       |
|         | ≈482     | ≈35%       |
|         | ≈483-484 | ≈45%       |
|         | ≈488     | ≈10%(沥青浸渍) |
| BP      | ≈460     | ≈25%       |
|         | ≈469     | ≈35%(沥青浸渍) |

### 3. 碎屑白云石的纵向分布

图 2a-f 给出了六口井的白云石纵向分布情况。数据来自表 3 (全岩) 或表 4 ( $>38\mu\text{m}$  粒级)。如果二表均有数据, 则采用大的。

表二

| 井 号     | 深度(m)   | 白云石的最大丰度 |
|---------|---------|----------|
| BVI-CH1 | 426-437 | 25%(油砂)  |
| BVI-XT  | 430-431 | 40%(油砂)  |
|         | 438     | 10%(页岩)  |
|         | 441-443 | 30%(油砂)  |
|         | 445     | 30%(油砂)  |
| ESSO    |         | 均小于 5%   |
| SUKCOK  | 521     | 5%(砂岩)   |
|         | 548     | 5%(页岩)   |
| DOME    | 489-493 | 25%(油砂)  |
| BP      | 454-458 | 25%(油砂)  |

根据这些数据可以看到, 富含白云石 ( $>5\%$ ) 的井段如下:

### 4. 粘土矿物( $<2\mu\text{m}$ 粒级的变化)

每口井的主要粘土矿物的相对百分数 (归一到 100%) 与井深之间的关系见图 3-8。对于每块样品的粘土矿物更仔细的解释工作正在进行之中。下面只是给出初步的观察结果。

#### a. BVI-CH1

对这口井粘土矿物分布特点的主要印象是: 7A 矿物与 17A 矿物之间所存在的强烈的反相关关系 (图 3a); 7A 与 10A 粘土之间也存在类似的关系, 虽然不那么明显 (图 3b)。7A 与 14A 粘土之间则不存在明显的关系 (图 3c)。在这个剖面较下部 (449.35-455.10m; FL1-3 到 FL1-8, 表 6)。饱含沥青的样品一般含有较多 7A 矿物和较少的 17A 粘土成分; 而少含或者不含沥青的样品则有少的 7A 与多的 17A 粘土矿物。在这个剖面较上部, 那些饱含沥青的样品, 如 FL1-11 到 FL1-17 (422.40-437.80), 以高的 7A 和低的 17A 粘土成分为特征; 而且 7A 矿物的含量从本井段的底部迅速地增加到 90%。这个富含沥青的井段夹在上部的页岩 (FL1-18, 421.30m) 与下部的方解石胶结

带 (FL1-10, 440.15m) 之间的。而这个页岩与方解石胶结带本身则均富含 17A 而少含 7A 矿物。还有一块被沥青浸渍的样品 (FL1-9, 441.15m), 它产出另一个次要的方解石胶结带, 但紧靠着上述的方解石主胶带的下面, 也是 17A 多 7A 矿物少, 这种情况与处在主胶结带和页岩之间的油砂是不同的。

#### b. BVI-X7

在这口井也观察到与 BVI-CH1 井类似的分布规律: (I) 7A 与 17A 粘土之间有强烈的反相关关系 (图 4a); (II) 7A 与 10A 粘土之间也存在类似关系, 但是不那么强烈 (图 4b); (III) 7A 与 14A 矿物之间则无什么关系 (图 4c)。一般说来, 富含沥青的样品都是富含 7A 而少含 17A 矿物成分的。比如, 在本剖面的较下部分, 在较靠下的方解石胶结带 (459.15-459.38m, FL2-41) 和较靠上的 (448.15-448.60m, FL2-34; 449.00-440.15m, FL2-35) 方解石胶结带之间的那块位于最下部, 仅含斑点状沥青的含水砂样 (FL2-40), 含有高的 17A 和低的 7A 矿物成分。而组成上述井段的其它样品 (FL2-36 到 FL2-39), 它们都富含沥青, 其粘土矿物的相对丰度情况是 7A 多, 17A 矿物少。与这种情况相似, 处在下部 (445.28m, FL2-32) 与上部页岩 (437.57m, FL2-26) 之间的富含沥青的样品, 也是 7A 矿物多而 17A 少。

在这个剖面的靠上部分, 在那块页岩 (437.57m, FL2-26, 表 6) 上面的第一块油砂, 是富含 17A 矿物的, 而其余样品则富含 7A 而少含 17A 粘土成分的。紧紧夹在一块页岩 (在上) 与一个方解石胶结带 (在下) 之间的油砂样品 (FL2-33, 446.96m) 的粘土矿物相对丰度高的也是 17A 而不是 7A 成分。

#### c. ESSO

这口井的主要粘土矿物在相对丰度上的变化情况如图 5a-c 所示。它与其它作过分析的所有的井不同之处在于: 所有样品, 包括方解石胶结的不含沥青的井段 (如 FL3-49, 表 6), 都含有相对多的 7A 矿物 ( $\geq 60\sim 95\%$ ), 一块紧靠方解石胶结带底部的样品 (FL3-53, 表 6) 的 7A 矿物最少, 而 17A 成分则最多。

#### d. SUNCOR

SUNCOR10-14-67-3W4 井的粘土矿物相对丰度存在着与 BVI-CH1 与 BVI-X7 类似的规律, 见图 6a-c。所有含沥青样品的 7A 矿物的含量一般都是很高的 (30-90%, 表 6, 图 6a)。这里有四块样品, 其 7A 粘土含量最低, 17A 粘土含量最高。其中两块紧靠在一个方解石胶结带的下面 (FL4-90, FL4-94; 表 2, 6); 还有一块含 7A 矿物相对少的样品是采集于一个被方解石部分胶结的区域 (FL4-97, 表 2, 5)。

#### e. DOME

在粘土矿物方面, DOME10-7-67-4W4 井的主要特点是 7A 与 10A 矿物之间; 17A 与 14A 矿物之间都存在着反相关关系 (表 6, 图 7a-c)。总的说来, 这口井 7A 粘土的相对丰度是高的 ( $\geq 40\sim 90\%$ )。但是, 当接近方解石胶结带时, 7A 粘土的含量则相对地变低。例如, 紧靠一个胶结带的上部与下部的样品 FL5-110 与 FL5-113 就是这种情况。从

上部接近一个主胶结带的样品 (FL5-113, FL5-114, FL5-115) 和从下部接近这个主胶结带的样品 (FL5-119), 情况也是这样。这口井还出现了 10A 粘土发育的井段 (FL5-119, FL5-115, 表 6; 图 7c)。

#### f. BP

BP12-8-66-5W4 井的 7A, 10A 和 17A 粘土变化十分明显; 但 14A 粘土的变化则很有限 (图 8a-c)。7A 是主矿物, 含量都比较高 (30-90%; 表 6; 图 8a)。但当接近方解石胶结带时, 它的丰度则相对地下降 (如 FL6-133, FL6-134, FL6-138, FL6-139, FL6-142)。这里有以下两个例外: 一块不特别靠近一个方解石胶结带的样品 (466.98m; FL6-137; 表 2, 6; 图 8a), 17A 矿物含量增加了, 这可能反映了该样品存在有富含蒙皂石的页岩碎屑。另一块样品 (FL6-131, 457.57m; 表 6) 则是 10A 矿物的相对丰度明显的增加 ( $\geq 35\%$ , 图 8b)。

### 5. 在白云石和方解石中的稳定同位素的变化情况

#### a. 白云石

表 7 和图 9 中的  $\delta^{18}\text{O}$  (+22‰-+24‰, SMOW) 和  $\delta^{13}\text{C}$  (-1‰-+0.5‰, PDB) 数值反映了西加拿大盆地的沉积碳酸盐中的骨架粒状白云石特点。碳同位素数值表明只有无机成因的  $\text{CO}_2$  对白云石结晶才起明显的作用。而氧同位素数据则说明了在白云石形成 (也许是重结晶过程) 中大气水的影响。

#### b. 方解石

图 9 表明,  $\delta^{13}\text{C}$  (-5‰-+17‰, PDB) 有个很大的变动范围, 而  $\delta^{18}\text{O}$  (+17‰-+23‰, SMOW) 的变化则很小。同时也可看出, 当  $\delta^{13}\text{C}$  值增加时,  $\delta^{18}\text{O}$  值则倾向于减少。含有较低的氧同位素倾向也许反映了在成岩方解石形成与变化过程中具有低的  $\delta^{18}\text{O}$  的大气水所起的重要作用。碳同位素成分几乎接近于 0‰的方解石中的  $\text{CO}_2$  也许是无机成因的 (如白云石溶解而释放出的  $\text{CO}_2$ , 等等)。其它样品含有较高的碳同位素值, 这说明细菌对有机质的发酵作用所产生的  $\text{CO}_2$  对方解石的胶结作用起了很重要的影响。

第二个次要倾向是  $\delta^{18}\text{O}$  (到 19‰, SMOW) 和  $\delta^{13}\text{C}$  (到 -5‰, PDB) 值的减少, 这在图 9 中也可以观察到。这个现象可能反映了含  $^{13}\text{C}$  低的大气水的影响, 这里的  $^{13}\text{C}$  是无机成因的, 可能是土壤过程释放出来的  $\text{CO}_2$ 。

这里有一个异常的数据 ( $\delta^{18}\text{O} \leq +10\%$ ;  $\delta^{13}\text{C} \leq -8\%$ ; 表 7, FL2-34dnbl); 它与上述描述的趋势不一致。这个数据是来自那块不进行亚硝酸钠处理的样品的。因此, 这样的同位素是代表着由方解石与残留有机质共同产生的  $\text{CO}_2$ 。在其它所有样品中, 这样的交叉污染都被避免了。

BVI-CHI, BVI-X7 和 ESSO (3-22-65-4W4) 三口井的样品可以用来详细地说明成岩方解石在碳和氧同位素方面的变化情况。BVI-CHI 井的同位素变化概况见图 10, 它的方解石胶结物的相对丰度见图 1a。饱含沥青样品 (434.65-437.25m; FL1-12,

FL1-13) 中的方解石胶结物的  $\delta^{13}\text{C}$  值几乎为 0‰ (PDB), 是典型的无机碳。不含沥青的胶结区中 (440.15m, FL1-10) 的方解石的  $\delta^{13}\text{C}$  值比较高 ( $\geq +5\%$ , PDB)。那块紧靠着这个胶结区下面的饱含油的样品 (441.15m; FL1-9) 则含有最高的  $\delta^{13}\text{C}$  值。

图 11 给出了 BVI-X7 井成岩方解石同位素变化的概况。这口井的方解石胶结物的相对丰度如图 1b 所示。图 12 则相当详细地提供了该井两个方解石胶结带的同位素变化特点。在上胶结带 (448.18–448.56m; FL2-34), 氧和碳同位素没有明显的变化。而前面讨论过的样品 FL2-34dnbl, 因为存在交叉污染, 其数据被废弃掉。这里的  $\delta^{13}\text{C}$  数值 ( $-3\%$ – $-2\%$ , PDB) 意味着方解石主要是无机成因的。

就在主胶结带下面有一个胶结带 (449.03–449.10m; FL3-35), 它的  $\delta^{13}\text{C}$  的值比起主胶结带要高得多 ( $+6\%$ – $17\%$ , PDB; 表 7, 图 12)。这反映了有机成因的  $\text{CO}_2$  对方解石胶结作用所起的重要作用。但是, 它的  $\delta^{18}\text{O}$  的值比起主胶结带要稍为低一些。

图 13 表明了位于 BVI-X7 井最下面的方解石胶结带的同位素变化情况 (459.16–459.38m; FL2-41)。靠下部的五块样品饱含沥青, 而靠上部的三块则不含沥青 (表 2, 7)。在中部和下部,  $\delta^{13}\text{C}$  值是非常高的 ( $+14\%$ – $+16\%$ , PDB), 往上则系统地减少, 到顶部此值为  $+6\%$  (PDB)。在这个胶结带, 尤其是靠下部的饱含沥青的位置, 在方解石形成过程中存在着含  $^{13}\text{C}$  的二氧化碳的富集问题。当碳同位素值有强烈的变化时, 氧同位素却没有明显的变化。

图 14 表明: ESSO3-22-65-4W4 井的方解石胶结物的碳同位素成分 ( $-5\%$ – $+16\%$ , PDB) 有很大的变化。图 1c 给出了这口井方解石胶结物的相对丰度。有意思的是这里有一个很低的  $\delta^{13}\text{C}$  数值, 它是来自一块完全被页岩 (472.02m; FL3-60, 表 2, 7) 包围着的无沥青砂岩的方解石胶结物的。如此低的碳同位素成分意味着在方解石形成过程中的  $\text{CO}_2$  是来自一个与富  $^{13}\text{C}$  的  $\text{CO}_2$  完全不同的过程 (比如土壤中的  $\text{CO}_2$ ), 尽管这里还有一点有机成因的因素。富  $^{13}\text{C}$  的  $\text{CO}_2$  被认为是反映了与沥青降解过程有关的细菌发酵作用。被页岩包转着这块方解石可能保存了无沥青的有机与无机相互作用的同位素特征。

这口井其它方解石胶结区的同位素成分与上述其它井的情况是相似的, 其详情见图 15 与 16。除了无沥青的胶结带的底部外, 靠近这口井顶部的所有胶结带 (447.67–448.10m; 图 15) 的  $\delta^{13}\text{C}$  数值 ( $-2\%$ – $+2\%$ , PDB) 反映了无机成因的  $\text{CO}_2$  的特征。该区最底部样品的较高的  $^{13}\text{C}$  值反映了有机成因的  $\text{CO}_2$  的某些影响。相比之下, 位于 474.70–474.78m 的无沥青的胶结区 (FL3-61A, B; 图 14) 则具有相当高的  $\delta^{13}\text{C}$  值 ( $+6\%$ , PDB), 其情况与那块方解石脉是相似的 ( $+8\%$ , PDB)。还有一个更薄一点的不含沥青的胶结带 (481.71–481.75; FL3-64, FL3-65; 图 16) 具有更高的  $\delta^{13}\text{C}$  值, 从顶部的  $+9\%$  (PDB) 增加到底部的  $+13\%$  (PDB)。在 482.15–482.62m (FL3-70, FL3-71, FL3-72; 图 16) 范围的方解石胶结物与含沥青样品中,  $\delta^{13}\text{C}$  达到本口井的最大值 ( $+15\%$ – $+16\%$ , PDB, 表 7)。

从这个最大值点开始, 随着深度的增加, 方解石胶结物的  $\delta^{13}\text{C}$  值一般是减少的。在 482.74–482.89m 的一个无沥青带具有相当均匀的  $\delta^{13}\text{C}$  值:  $+13\%$ – $+14\%$  (PDB) (表 7)。处在 484.81–484.88m 范围和 485.67m 深度的两个胶结带的  $\delta^{13}\text{C}$  值要低一些 ( $+9\%$ – $+11\%$ , PDB), 而在 491.26m 井深处 (表 2, 7; 图 14, 16),  $\delta^{13}\text{C}$  值还要低

(+5‰, PDB).

上述在  $\delta^{13}\text{C}$  值方面的系统的大的变化反映了在方解石胶结中下列若干因素的变化与综合影响: (I) 无机成因的  $\text{CO}_2$ ; (II) 与沥青有关的有机成因的  $\text{CO}_2$  和 (III) 与沥青无关的但也是有机成因的  $\text{CO}_2$ . 关于上述变化在评价冷湖重油沉积物方面的地质与地球化学意义的详细讨论工作正在进行之中。