

# 鄂尔多斯东南缘奥陶系碳酸盐岩成岩温度

叶 俭

(西安地质学院 710054)

云琼英 胡显穆

(华北石油地质局第三普查勘探大队, 陕西咸阳 712000)

鄂尔多斯东南缘奥陶系溶洞充填物的流体包裹体和稳定同位素研究, 得到了四个不连续温度系列, 其中 44—46℃、59—61℃、104—118℃为加里东期, 156—169℃为海西期。据此, 可以认为下奥陶统的有机质在加里东期已达成熟, 在海西期转化为气。根据下奥陶统马家沟组底部的流体包裹体均一温度资料和盆地周边中、上奥陶统较深水特征, 鄂尔多斯中部曾接受过中、上奥陶统沉积, 在加里东运动后方被剥蚀。

**关键词** 鄂尔多斯 奥陶系 流体包裹体 古地温 溶洞 油气演化

**第一作者** 叶 俭 女 58岁 副教授 沉积岩石学

鄂尔多斯地区奥陶系主要由潮坪-浅海相碳酸盐岩组成, 研究成岩作用, 必须查明其古温度。由于碳酸盐岩与碎屑岩不同, 很难利用镜煤反射率来确定; 而且, 常见的厚层碳酸盐岩中很少有粘土岩夹层, 所以也很难利用粘土矿物的混层比或结晶度来判断古温度。因此, 借助成岩矿物中的流体包裹体来判断成岩温度<sup>[1,2]</sup>是一种较好的方法。这一方法用于中、新生代盆地已获得较好的成果, 但是, 在古生代, 特别是早古生代地层中还未得到广泛应用。其中一个重要原因是早古生代地层经历的成岩历史比较复杂, 往往难以确定成岩矿物形成的时期。本文的目的不仅是研究成岩矿物中流体包裹体的温度, 而且试图解决这些成岩矿物形成的时期。从而解决早古生代沉积中油气的形成、转化及时期。

本文采用华北石油地质局第三普查勘探大队拟定的地层系统, 自下而上为: 寒武系上统( $\epsilon_3$ ); 奥陶系下统冶里组( $O_{1y}$ )、亮甲山组( $O_{1l}$ )、马家沟组( $O_{1m}$ )、峰峰组( $O_{1f}$ ); 奥陶系中统泾河组( $O_{2j}$ )(或同期异相平凉组 $O_{2p}$ ); 奥陶系上统, 背锅山组( $O_3b$ )。

## 一、样品的选择

研究成岩古温度, 所取样品必须是成岩过程中形成的矿物, 而且要尽可能选择成岩最晚阶段形成的矿物。在广泛研究了鄂尔多斯地区东南缘奥陶系的露头和大量岩石薄片之后, 发现在整个成岩作用过程中, 最晚形成的矿物是充填在溶洞、溶孔和裂隙中的矿物; 但是考虑到裂隙的形成时期不易确定, 因此, 我们只选择了溶洞、溶孔中的充填物作为研究对象。

收稿日期: 1991-12-06 改回日期: 1992-07-13

\* 本文系国家“七五”重点攻关项目 54-01-09-03 中的部分成果。

## 二、流体包裹体温度的测定

在鄂尔多斯东缘的山西柳林、兴县和南缘的陕西淳化奥陶系剖面中, 均有溶洞、溶孔发育。有的零星分布, 有的比较集中, 但主要分布在寒武系顶部和奥陶系下统各组(如冶里组、亮甲山组和马家沟组)顶部或各组接触界面附近。其中又以亮甲山组和马家沟组顶部最发育。这些溶孔、溶洞或沿层理分布, 或沿裂隙分布, 充填物或为白色方解石, 或为含铁方解石, 或为冰洲石、白云石、重晶石, 甚至为泥砂质充填。很多溶孔、溶洞中只有一期充填物, 但具有两期或三期充填物的也不少见。可见, 溶孔、溶洞的形成及充填的过程是相当复杂的。

我们对各组的溶洞充填物进行了电子探针分析, 测定了它的化学成分和矿物成分(表1)。从表中可以看出, 盆地东缘柳林地区寒武系顶部白云岩中溶洞很发育, 具有三期充填物, 形成似玛瑙纹构造(图版 I-1), 第一期为白云石, 第二期为含镁方解石, 第三期为含铁方解石(图版 I-2), 其中只有第三期方解石中有气液包裹体。冶里组上部溶洞中的充填物有两期, 第一期为黄色含铁方解石, 第二期为白色方解石, 后者具有气液包裹体。亮甲山组顶部的溶洞比较发育, 有两期充填物, 第一期有些为重晶石, 有些为渗滤沙, 第二期则均为方解石, 凡方解石中均有包裹体。马家沟组上部溶洞充填物一般只有一期, 或为方解石, 或为冰洲石, 均有气液包裹体(图版 I-3); 其底部溶洞中则有两期充填物, 其中第二期有包裹体(图版 I-4)。

表1 鄂尔多斯东南缘溶洞充填物的矿物成分和化学成分

| 样 号 | 矿物成分       | 化 学 成 分 |       |      |      |                 | 层 位             | 产 地  |
|-----|------------|---------|-------|------|------|-----------------|-----------------|------|
|     |            | CaO     | MgO   | FeO  | SrO  | CO <sub>2</sub> |                 |      |
| S-4 | 第二期方解石     | 57.00   | 0.21  | 0.05 | 0.13 | 42.61           | O <sub>1m</sub> | 山西柳林 |
| S-3 | 第二期白色方解石   | 56.17   | 0.07  | 0.13 | 0.03 | 43.61           | O <sub>1l</sub> |      |
| S-2 | 第一期黄色含铁方解石 | 56.32   | 0.31  | 0.60 | 0.12 | 42.67           | O <sub>1g</sub> |      |
|     | 第二期白色方解石   | 57.29   | 0.58  | 0.09 | 0.06 | 41.98           |                 |      |
| S-1 | 第一期白云石     | 31.03   | 23.43 | 0.00 | 0.07 | 45.47           | € <sub>3</sub>  |      |
|     | 第二期方解石     | 56.55   | 0.74  | 0.09 | 0.09 | 42.53           |                 |      |
|     | 第三期方解石     | 56.95   | 0.08  | 0.39 | 0.07 | 42.51           |                 |      |
| T-7 | 方解石        | 56.14   | 0.07  | 0.00 | 0.09 | 43.71           | O <sub>2j</sub> | 陕西淳化 |
| T-4 | 第一期方解石     | 56.39   | 0.40  | —    | 0.01 | 43.21           | O <sub>2m</sub> |      |
|     | 第二期方解石     | 57.16   | 0.33  | —    | 0.14 | 42.38           |                 |      |
| T-3 | 白云石        | 30.54   | 22.19 | 0.02 | 0.07 | 47.18           | O <sub>1l</sub> |      |
| T-2 | 白云石        | 30.50   | 23.33 | 0.18 | 0.13 | 45.86           |                 |      |
| T-1 | 第一期方解石     | 55.22   | 0.09  | 0.12 | 0.07 | 44.51           | € <sub>3</sub>  |      |
|     | 第二期方解石     | 55.82   | 0.09  | 0.00 | 0.22 | 43.87           |                 |      |

盆地南缘陕西淳化寒武系顶部白云岩的溶孔、溶洞不发育, 但溶蚀作用仍可见到, 有些溶孔中可见两期方解石充填, 第二期方解石中有气液包裹体。奥陶系冶里组白云岩的溶洞中只有一期白云石充填; 亮甲山组顶部白云岩中溶洞较发育, 但大部分都被白云石充填; 马家

沟组下部白云岩中,有些层段溶孔较发育,常见两期方解石充填,第二期方解石中可见气液包裹体(图版1-5,6)。泾河组下部红色石灰岩中有少量溶孔发育,其中为方解石充填,并具有包裹体。

上述所有样品中的气液包裹体,均为原生包裹体,一般为3—15 $\mu\text{m}$ ,形态不甚规则,其中气相一般约占10%—25%,少数样品中还有石盐子晶包裹体。对这些气液包裹体都测定了均一温度(表2)\*。

表2 鄂尔多斯东南缘奥陶系古地温分析结果

| 样号  | 包体均一温度*<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 据 $\delta^{18}\text{O}$ 计算**<br>的温度( $^{\circ}\text{C}$ ) | 层位                 | 产地   |
|-----|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------|------|
| S-5 | 162—169                           |                                                           | $\text{O}_{1m}$    | 山西柳林 |
| S-4 | 115.5                             |                                                           | $\text{O}_{1m}$ 底  |      |
| S-3 |                                   | 61.45                                                     | $\text{O}_{1f}$ 一期 |      |
|     | 120.9                             | 93.14                                                     | $\text{O}_{1f}$ 二期 |      |
| S-2 |                                   | 67.91                                                     | $\text{O}_{1g}$    |      |
| S-1 | 99—123                            | 114.51                                                    | $\text{E}_2$       |      |
| Z-3 | 104.8                             | 123.77                                                    | $\text{O}_{1m}$ 顶  | 山西兴县 |
| Z-2 |                                   | 44.11                                                     | $\text{O}_{1g}$    |      |
| Z-1 | 138.6—158                         |                                                           | $\text{E}_2$ 顶     |      |
| T-7 | 156.8                             |                                                           | $\text{O}_{2j}$ 下  | 陕西淳化 |
| T-6 | 154.3                             |                                                           | $\text{O}_{1f}$ 顶  |      |
| T-5 | 159.6                             |                                                           | $\text{O}_{1m}$ 中  |      |
| T-4 | 118.4                             | 111.46                                                    | $\text{O}_{1m}$ 底  |      |
| T-3 |                                   | 59.67                                                     | $\text{O}_{1f}$    |      |
| T-2 |                                   | 46.36                                                     | $\text{O}_{1g}$    |      |
| T-1 | 119.7—122.7                       | 94.30                                                     |                    |      |

\* 均一温度测定为西安地矿所在 CHAIXMECA 仪器上测定

\*\*  $\delta^{18}\text{O}$  为中国科学院西安黄土研究室所测

所测包体均一温度大部分都大于120 $^{\circ}\text{C}$ 。柳林剖面奥陶系下统马家沟组底部第二期、亮甲山组顶部第二期与寒武系上统凤山组第三期方解石中的包体均一温度,是一个由上向下渐增的温度系列:115.5 $^{\circ}\text{C}$ —120 $^{\circ}\text{C}$ —123 $^{\circ}\text{C}$ 。但马家沟组底部向上则均一温度呈逆向递增趋势,与正常的地热增温规律不符。

为了进一步验证包体均一温度的可靠性,我们同时分析了部分含包体方解石(主晶)的氧同位素,并按大场忠道<sup>[6]</sup>的公式计算出古温度(表2)。从计算结果看,气液包裹体均一温度与据 $\delta^{18}\text{O}$ 计算的古温度很相近。因此,据氧同位素计算的古温度与包体均一温度均可作为研究古温度的依据。

\* 这里的均一温度未做压力校正,可视为成矿温度下限<sup>[4,6]</sup>。

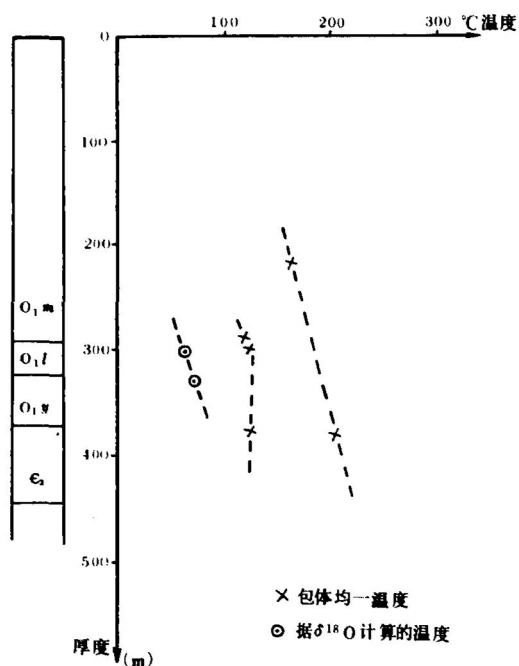


图1 山西柳林奥陶系古温度  
在剖面中的分布

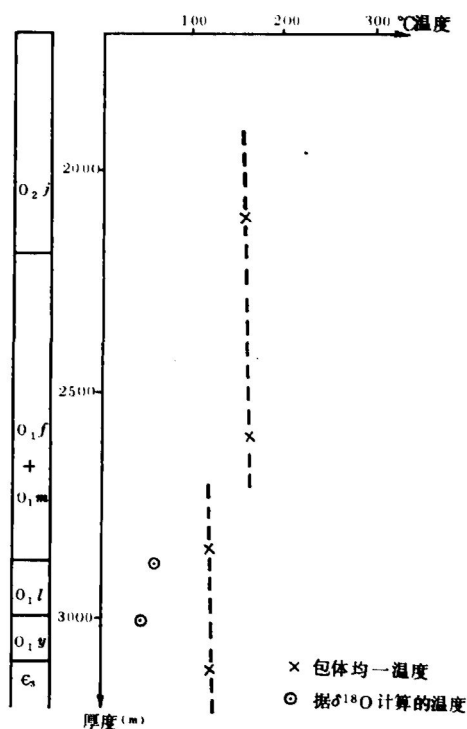


图2 陕西淳化奥陶系古温度  
在剖面中的分布

将奥陶系各组样品用两种方法所得的古温度标在柱状剖面的相应位置上(图1, 2), 得到以下几组温度系列:

- (1) 44.11℃—46.36℃ 是冶里组溶洞充填物的形成温度;
- (2) 59.67℃—61.45℃—67.91℃ 是亮甲山组第一期充填物和冶里组第二期充填物的形成温度;
- (3) 115.5℃—118.4℃—120.9℃—123℃ 是马家沟组底部第二期方解石、亮甲山组上部第二期方解石和寒武系顶部第三期方解石的形成温度;
- (4) 156.8℃—159.6℃—162℃—169℃—199.5℃ 是奥陶系中统泾河组下部、马家沟组中部和寒武系顶部方解石的形成温度。

### 三、温度系列与溶洞发育史的关系

为什么会在一个剖面中出现几组不连续的温度系列, 而且有些与常规的地热增温趋势不同? 为了探索这一问题, 我们研究了本区溶洞、溶孔发育的历史。

华北地台在早古生代有过两次较强烈的构造运动, 一次为怀远运动(实际应为加里东运动的一幕), 发生在亮甲山组沉积之后, 形成了马家沟组与亮甲山组之间的平行不整合; 另一次为加里东运动(应为加里东运动主幕), 在奥陶系沉积之后, 造成部分奥陶系、志留系、泥盆系和下石炭统的缺失, 形成了通常所说的加里东侵蚀面。在鄂尔多斯地区, 这两次构造运

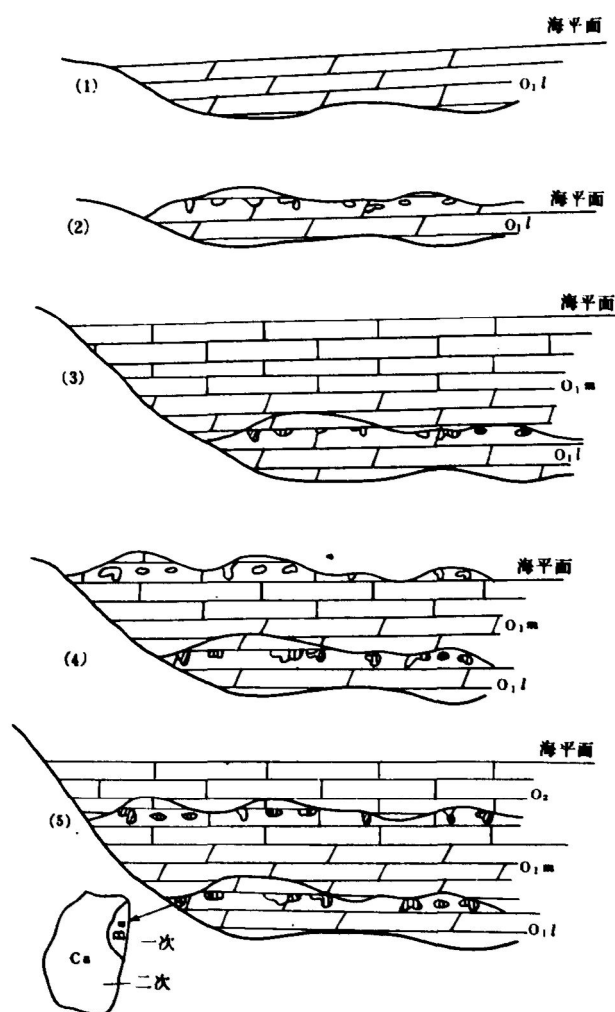


图3 奥陶系亮甲山组顶部溶洞的形成、演化与构造运动的关系

- (1) 亮甲山组沉积时;
- (2) 怀远运动, 亮甲山组露出水面, 遭受剥蚀、溶解, 形成溶孔、溶洞;
- (3) 盆地下降, 再接受沉积 (马家沟组),  $O_1l$  顶部溶洞第一次被充填, 充填时温度为  $61^{\circ}\text{C}$ ;
- (4) 第二次构造运动, 沉积物 ( $O_1m$ ) 露出水面, 形成溶孔、溶洞, 亮甲山组顶部的溶孔受到改造或形成新的溶孔;
- (5) 盆地再次下降,  $O_1m$  顶部溶孔第一次被充填,  $O_1l$  顶部溶孔第二次被充填, 充填时温度为  $120.9^{\circ}\text{C}$

如果不考虑亮甲山组溶洞中有第二期充填物, 只测定第一期充填物的温度, 则会造成由下向上, 温度由低到高  $61.45^{\circ}\text{C} \rightarrow 115^{\circ}\text{C}$  的与正常地热增温情况相反的逆向增温假象。由此可见, 同一剖面上溶孔的形成有多期历史, 其充填过程也是多期的, 必须掌握溶孔发育史的确

动所形成的间断面均很清晰, 在其附近, 溶蚀现象发育, 形成溶孔、溶洞发育层段。显然, 这些溶孔、溶洞都是在构造运动导致地壳抬升, 并使地层露出或接近地表时, 在大气水酸性介质条件下, 碳酸盐岩被溶蚀而成。至于这些溶孔、溶洞的充填, 应是再埋藏时进行的, 因为充填物大都是碱性介质条件下形成的方解石和白云石。

如果将鄂尔多斯东缘亮甲山组顶部白云岩的成岩序列: 白云石化  $\rightarrow$  硅化  $\rightarrow$  溶蚀  $\rightarrow$  充填  $\rightarrow$  溶蚀  $\rightarrow$  充填  $\rightarrow$  溶蚀, 与溶洞充填物的温度结合起来, 就可知道溶孔、溶洞的形成演化历史 (图3)。

怀远运动所形成的溶孔、溶洞, 在马家沟组沉积时, 也就是亮甲山组被埋藏时, 被第一次充填, 充填物为重晶石 (或渗滤沙), 古温度为  $61.45^{\circ}\text{C}$  (据  $\delta^{18}\text{O}$ )。早奥陶世末, 本区重新抬升, 在马家沟组顶部形成新的溶孔。此时, 亮甲山组中的溶孔则在合适的条件下 (一般在断裂带附近), 进一步改造扩大和形成新的溶孔。当盆地再次沉降, 下奥陶统处于埋藏环境时, 马家沟组的溶孔第一次充填, 而亮甲山组的溶孔则第二次被充填, 充填物为方解石, 古温度为  $120.9^{\circ}\text{C}$ 。与此同时, 马家沟组底部溶洞中的充填物 (亦为方解石) 古温度为  $115^{\circ}\text{C}$ 。这就说明溶洞虽处于不同层位, 但它们是同一构造期充填的, 构成了一个温度系列, 这一个温度系列由上至下古温度渐增, 符合地热增温的一般规律。

凿证据, 确定充填物形成的构造期, 方能判定各构造期达到的古温度。同一构造期充填的矿物的温度, 应是一个由上向下增温的系列。推而广之, 不同温度系列的矿物, 是不同构造期形成的。但由于孔洞本身分布不均匀, 因而古温度是不连续的。

可以认为鄂尔多斯东南缘各剖面中出现的四个温度系列, 代表了四个构造期间溶洞充填时的古温度。它们在鄂尔多斯地区内的分布是很有规律的, 而且可能普遍存在。

将这四个温度系列与本区构造运动的关系结合起来(图4), 不仅可以了解次生溶孔的发育历史, 而且可以判断本区奥陶系除经历怀远和加里东两大构造运动外, 在冶里组与亮甲山组之间、奥陶系下统与中统之间, 各有一沉积间断, 也就是有一次构造活动。其中冶里组与亮甲山组之间的沉积间断, 在华北其它地区已有报道, 在山西兴县和柳林剖面中均可见二者之间有一层砾岩, 其砾石成分除碳酸盐岩外, 还有砂岩和酸性介质条件下形成的硅质结核。下统与中统之间的沉积间断, 不仅表现在下统顶部的白云岩和灰岩中表生成岩作用的去白云石化和去石膏化现象, 而且在许多地方沉积相也不连续, 表现出突变的特征。

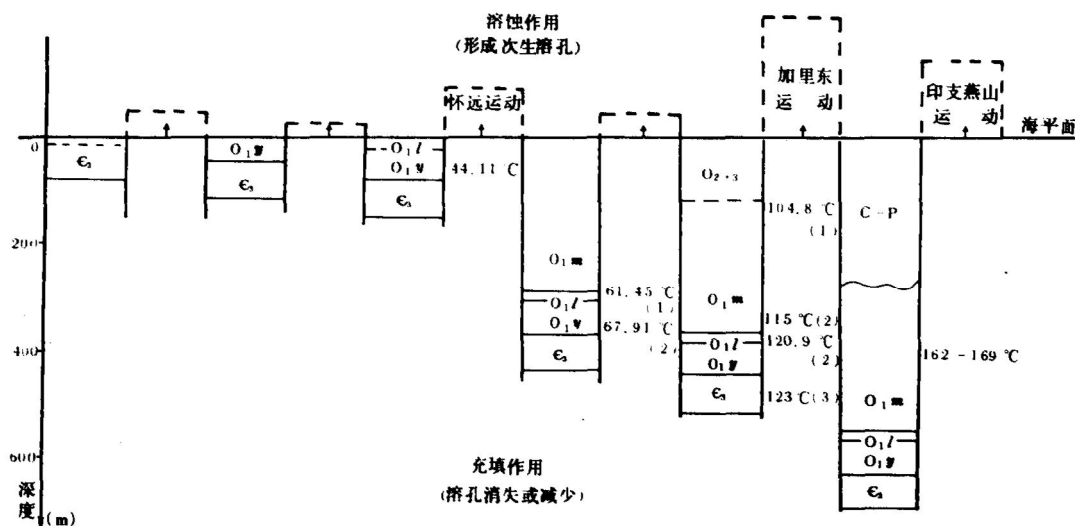


图4 鄂尔多斯东南缘溶洞的形成、演化与古温度、构造运动的关系

当然, 在加里东运动之后, 奥陶系还要经受海西、印支-燕山运动的影响, 特别是印支-燕山运动对鄂尔多斯地区的沉积影响更大。中生代时, 鄂尔多斯盆地周边发生了相当强烈的岩浆和构造活动, 区域热流比较活跃, 对区内有些地区溶孔、溶洞的形成与充填不可能没有影响。

长期以来, 人们认为下奥陶统沉积之后, 由于地壳抬升在盆地内部没有接受中、上统沉积。如果同意这个观点, 盆地周边的中、上统沉积应是海退序列。相反, 周边中、上统沉积却是具有较深水特征的海进序列。除非盆地周边有一环形大障壁, 阻止海水的侵进, 否则盆地内部何能缺失中—上统沉积。

将包体均一温度数据和沉积相资料结合起来考虑, 我们有理由认为盆地内部可能曾接受过中、上统沉积, 只是在加里东运动之后才抬升受到剥蚀, 成为现在的格局。在府谷附近和部分井下已见到残余的中统灰岩; 内蒙大余太和乌拉特前旗的山黑拉山的中、上统沉积也是

剥蚀残余的证据。

#### 四、古温度与油气演化

由上述不同构造期所达到的古温度来看,在中奥陶统沉积时,下统马家沟组底部的古温度已达 115℃—118℃,反映此时有机质已处于成熟期。也就是在加里东运动期内,下统有机质已转化为烃。石炭—二叠系沉积时,奥陶系古温度已达 156℃—166℃,有机质达过成熟,烃类已裂解为气。

再从该区碳酸盐岩中所夹少量粘土岩的粘土矿物分析结果看(表3),奥陶系下统粘土矿物成分主要由伊利石和绿泥石组成,均不含混层矿物,且伊利石结晶度为 4—6,据 Shaw<sup>[7]</sup>等的研究,其相应的古温度为 130℃—180℃。也说明有机质已达过成熟,与包体研究的结论是一致的。现在盆地内部勘探结果主要为气(CH<sub>4</sub>)也证明了这一结论的正确。

表3 鄂尔多斯东南缘粘土矿物 X-射线衍射分析结果及古温度

| 样 号   | 粘 土 矿 物 含 量 |               |      | 混层比<br>% | 伊利石<br>结晶度 | 古温度<br>(℃) | 层 位             | 产 地  |
|-------|-------------|---------------|------|----------|------------|------------|-----------------|------|
|       | I %         | 无序<br>I / m % | Ch % |          |            |            |                 |      |
| S-1-3 | 100         | —             | —    | 0        | 5          | 130—180    | O <sub>1f</sub> | 山西柳林 |
| S-1-2 | 45          | —             | 55   | 0        | 4          | 130—180    | O <sub>1m</sub> |      |
| S-1-1 | 95          | —             | 5    | 0        | 6          | 130—180    | O <sub>1m</sub> |      |
| T-1-3 | 77          | 10            | 13   | 50       | 9          | 80—110     | O <sub>2b</sub> | 陕西淳化 |
| T-1-2 | 81          | 9             | 10   | 59       | 3          | 80—110     | O <sub>2j</sub> |      |
| T-1-1 | 80          | —             | 20   | 0        | 6          | 130—180    | O <sub>1m</sub> |      |

值得注意的是南缘中、上统的页岩中,粘土矿物除伊利石和绿泥石外,还有少量伊利石—蒙脱石混层矿物,其中混层比为 50%—59%,伊利石结晶度可达 9,反映中、上统沉积古温度为:80℃—110℃,有机质可能处于成熟期,与下统有所差别,出现这种差别的原因还待今后注意研究。

本文是在华北石油地质局第三普查勘探大队领导的关怀下完成的。在工作过程中得到西安地矿所包体实验室、中国科学院黄土研究室的有关人员的大力支持,西安地质学院的莫少龙、郑葆英和张明还同志也给我们很大帮助。在此一并致谢。

#### 参 考 文 献

- 1 卢焕章等. 包裹体地球化学. 北京:地质出版社, 1990; 56—162, 200—210
- 2 何知礼. 包体矿物学. 北京:地质出版社, 1982; 1—48
- 3 施维姆等. 矿物包裹体在碳酸盐岩及油气评价中的意义. 沉积学报, 1987; 5 (1)
- 4 杨惠民. 贵州碳酸盐岩矿物流体包裹体温度与成岩作用. 海相沉积区油气地质, 1987; 1 (1); 27—30
- 5 Walderhaug O. A fluid inclusion of quartz cemented sandstones from offshore Mid-Norway possible evidence for continued quartz cementation during oil emplacement. J. Sed. Petrol, 1990; 60 (2); 203—209

- 6 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985: 23—26  
7 方郵森等. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社, 1987: 173—180

## DIAGENETIC TEMPERATURE OF ORDOVICIAN CARBONATE ROCK IN SOUTHEAST MARGIN OF ORDOS

Ye Jian

(*Xian Institute of Geology*)

Yun Qunying Hu Xianmu

(*3rd Brigade of Petroleum Exploration and Prospecting, North China Bureau of Petroleum Geology*)

### Abstract

Studied the fluid inclusions and stable isotopes in the fillings of Lower Paleozoic dissolve burrows on the southeast margin of Ordos, four discontinuous temperature sequences were recovered: 44—46°C, 59—61°C and 104—118°C were Caledonian orogenic stage, 156—169°C was Hercynian orogenic stage. Therefore, it might be considered that organic matter of Lower Ordovician was mature in Caledonian stage and turned into gas in Hercynian.

According to the paleotemperature of the bottom of Majiagou Formation in Lower Ordovician and the deep water characters of Middle-Upper Ordovician on the basin periphery, it is suggested that the internal basin had received Middle-Upper Ordovician sediments which were eroded after Caledonian orogeny.