文章编号:1000-0550(2014)03-0510-08

# **陕北盐盆马家沟组五段六亚段沉积期的古气候信息**<sup>①</sup> ——来自石盐包裹体的证据

胡 彬<sup>1,2</sup> 孔凡晶<sup>1,2</sup> 张永生<sup>1,2</sup> 郑绵平<sup>1,2</sup> 陈 靖<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所 北京 100037; 2. 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室 北京 100037)

**摘 要** 石盐包裹体的均一温度能够代表卤水结晶的温度,因而是揭示古气候的有效手段。陕北盐盆位于鄂尔多斯 盆地中东部,区内奥陶纪马家沟组发育厚层含盐沉积。对采自该盐盆的镇钾 1 井中的石盐包裹体进行详细的岩相学 研究以及均一温度测定。岩相学研究结果表明,包裹体的形态主要为方形、圆形及不规则形,包裹体的类型主要为纯 液相、气液两相和含子矿物包裹体三种。包裹体均一温度的测定采用低温冷冻测温法,其中,深度 2 738 m 的样品 zjy-1,均一温度为 18.5℃~27℃;深度 2 740 m 的样品 zjy-2,均一温度为 14.9℃~29.9℃;深度 2 744 m 的样品 zjy-3,均一温 度为 24℃~36.9℃;深度 2 812.8 m 的样品 zjy-4,均一温度为 14.7℃~31℃;该温度与前人所研究的奥陶纪古温度基本 吻合。样品均一温度反映陕北盐盆马家沟组五段六亚段沉积期的古气温在 27℃~36.9℃之间,其古气候为地处南半 球低纬度干旱气候带,炎热干旱的气候特征。

关键词 石盐流体包裹体 均一温度 冷冻法测温 陕北奥陶纪岩盐 古气候 第一作者简介 胡 彬 女 1988年出生 硕士研究生 地球化学 E-mail: hb.angel\_1228@163.com 通讯作者 孔凡晶 男 研究员 E-mail: kfjbj2002@aliyun.com 中图分类号 P532 文献标识码 A

蒸发盐类矿物是地表水体在强烈的蒸发作用下 结晶形成的,在此过程中被捕获于晶体晶格缺陷中的 流体(气体)称为蒸发盐中的原生包裹体。这些包裹 体能够保存形成时期大气圈、水圈、生物圈的重要信 息,可以为研究古温度、古水体成分、古大气成分以及 生物的演化提供可靠的定量数据<sup>[1]</sup>。对于蒸发盐包 裹体的研究近些年来引起了国内外学者极大的兴 趣<sup>[2]</sup>。在蒸发盐矿物中,石盐分布较为普遍且包裹 体数目多、体积较大,因而成为蒸发盐包裹体研究的 主要对象<sup>[1]</sup>。

石盐包裹体的研究内容主要包括:岩相学研究、 包裹体均一温度测定、包裹体成分测定以及包裹体所 捕获的微生物研究三个方面。前人对于石盐包裹体 的岩相学研究主要用来判别包裹体的原生和次生性。 原生石盐包裹体群的分布形态主要有两种:漏斗形和 人字形,这两种形态分别对应了两种不同的结晶过 程,即形成于水面的漏斗形结晶和形成于水底的人字 形结晶<sup>[3]</sup>。包裹体均一温度的测定方法主要采用低 温冷冻测温法<sup>[4,5]</sup>。采用该方法测得均一温度的最 大值可以作为形成时的环境温度<sup>[2,5,6]</sup>。包裹体成分 的测定方法主要有两种:一种是激光剥蚀电感耦合等 离子质谱法(LA-ICP-MS)<sup>[7,8]</sup>,另一种是扫描电镜能 谱法<sup>[9,10]</sup>。关于包裹体中所捕获的微生物研究,目前 已有学者从 2.5 亿年前二叠纪地层中的石盐包裹体 中提取出了被捕获的嗜盐菌的 DNA<sup>[11]</sup>。

本研究对来自陕北盐盆镇钾1井的样品进行了 详细的岩相学观察,并在此基础上,采用低温冷冻测 温法测定其中石盐包裹体的均一温度。根据测定结 果,对均一温度所记录的有关陕北盐盆马家沟组沉积 期的古气候信息做了进一步探讨。

### 1 研究区概况

陕北盐盆位于鄂尔多斯盆地的中东部,其分布范 围大致为36°10′~39°10′N,108°30′~111°E,面积约 5.6×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>(图1)。行政区划包括陕北地区柳林、临 县、神木、靖边、志丹、延安、大宁等市县辖区。鄂尔多 斯盆地位于贺兰山以东、吕梁山以西、阴山以南、秦岭 以北的地区,包括甘肃东部、宁夏大部、陕西中部和北 部、内蒙古西部和山西西部,面积约32×10<sup>4</sup>km<sup>2[12]</sup>。

陕北盐盆的蒸发盐所在层位主要发育马家沟组

①973项目(编号:2011CB403001)、地调项目(编号:1212011120178)与公益性行业科研专项(编号:201011001-4)联合资助 收稿日期:2013-07-31;收修改稿日期:2013-10-31



地层,其中马家沟组一、三、五段为含盐段,二、四、六 段为碳酸盐岩段。从岩性上看,陕北盐盆在该时期主 要经历了三次完整的海进—海退事件,形成了三个蒸 发盐与碳酸盐岩互层的沉积旋回<sup>[14]</sup>。 镇钾1井位于米脂县杜家石沟镇杜兴庄村,构造 位置上处于陕北盐盆西部盐坳处,是中国地质科学院 部署的一口用于调查评价陕北奥陶纪盐盆地钾盐资 源的钾盐基准井<sup>[15]</sup>。米脂县属中温带半干旱性气候 区,全年降雨不足,气候干燥。该地区 1993 年至 2012 年月均温依次为(1月~12月):-8.60°、 -2.91°、3.64°、11.55°、17.67°、22.26°、23.86°、 21.81°、16.35°、9.32°、1.29°、-5.83°(据中国气 象局米脂台站)。可以看出,该地区全年月均气温在 -5.83°~23.86°、年平均气温 9.20°。

## 2 样品采集及实验方法

#### 2.1 包裹体样品采集及岩相学观察

本次研究的样品采自镇钾 1 井马家沟组第五段 六亚段地层,样品深度为: 2 738 m(zjy-1), 2 740 m (zjy-2), 2 744 m(zjy-3), 2 812.8 m(zjy-4)。样品 zjy-1、zjy-2、zjy-3 的岩性为浅灰褐色、中粗晶岩盐;样品 zjy-4 岩性为浅灰褐色—烟灰色、中粗晶岩盐,局部含 泥砂(图 2)。

由于蒸发盐矿物具有易潮解、易重结晶等特殊性质,为防止磨片过程对包裹体均一温度的测定产生干扰,本研究未进行磨片,而直接将样品切成厚度小于0.5 mm 薄片在显微镜下观察。样品切好后加以编号,并用自封袋将样品密封好,放置于干燥器内保存,以避免矿物发生潮解。包裹体岩相学研究采用 Zeiss 公司的 AXIO Scope.A1 显微镜进行,包裹体拍照和测量分析使用 ProgRes CapturePro2.8.8 软件。石盐包裹



图 2 样品手标本照片 A.样品 zjy-1, B.样品 zjy-4 Fig.2 Photos of the samples A.Sample zjy-1, B.Sample zjy-4



图 3 原生纯液相石盐包裹体(左)在冷冻后(右)出现气泡 Fig.3 Primary fluid inclusions before(left) and after (right) chilling to nucleate vapor bubbles

体岩相学特征是判断包裹体原生和次生性的重要依据,原生石盐包裹体群的分布有其特征形态,即人字形和漏斗形。这两种形态分别对应着两种原生石盐 矿物晶型,即生长在水体底部的人字晶和生长在水面上的漏斗晶<sup>[3]</sup>。

#### 2.2 石盐包裹体均一温度的测定

石盐包裹体均一温度的测定采用低温冷冻测温 法<sup>[4,5]</sup>。将含原生纯液相石盐包裹体切片放入自封 袋中密封,在-18℃冰箱中冷冻处理,直至观察到纯 液相的包裹体出现气泡为止(图3)。将冷冻处理后 出现气泡的切片放在冷热台上,找到目标包裹体。先 以30℃/min的速率迅速降温至-15℃,然后再以 0.5℃/min的速率缓慢升温至15℃,最后以0.1℃/ min的速率升温至包裹体中的气泡完全消失,此时的 温度即为该包裹体的均一温度。本研究所测得每一 个样品的包裹体均一温度均来自于同一样品切片的 同一包裹体群。测温使用英国 Linkam THMS G600 显微冷热台,该仪器采用液氮制冷,温度范围为 -196℃~600℃,仪器精度为±0.1℃。

## 3 结果与分析

包裹体岩相学研究中观察到的石盐包裹体主要 有方形、圆形及不规则形等三种形态(图4A, B, C)。 方形是原生石盐包裹体最常见的形态,圆形主要多见 于富气相的包裹体,不规则形态则可能与包裹体经历 了后期改造变化有关。石盐包裹体有纯液相、气液两 相和含子矿物三相等不同相态(图4D, E, F)。

本次研究对 zjy-1、zjy-2、zjy-3、zjy-4 这 4 件样品

中的原生纯液相石盐包裹体进行了均一温度测定并 测量了包裹体大小,所测包裹体共计118个(图5)。 其中,样品 ziy-1 测得包裹体均一温度 34 个,最大值 为 27℃,最小值为 18.5℃,多数集中在 21℃~27℃之 间,并在22℃~23℃的区间有一个明显的峰值,该样 品均一温度的均值为 23.5℃,包裹体大小在 7.8~ 21.1 μm;样品 ziy-2 测得均一温度 31 个,最大值为 29.9℃,最小值为 23.8℃,数据集中出现在 23℃~ 26℃之间,并在 23℃~24℃、25℃~26℃区间内有两 个明显的峰值,均值为23.9℃,包裹体大小在2.6~ 36.52 µm;样品 ziy-3 测得均一温度 24 个,最大值为 36.9℃,最小值为24℃,数据多集中在27℃~34℃,并 在 27℃~28℃、33℃~34℃区间有两处峰值,均值为 30.5℃,包裹体大小在 12.4~34.6 µm;样品 zjy-4 测得 均一温度 29 个,最大值 31℃,最小值 14.7℃,数据多 集中在 21℃~26℃之间,并在 23℃~24℃之间有一处 峰值,均值为 23.1℃, 包裹体大小在 7.1~36.3 µm (表1)。

## 4 结论与讨论

#### 4.1 石盐包裹体均一温度的地质意义

原生石盐包裹体的均一温度能够代表其形成时 的水体温度,但与其形成时的气温又有怎样的对应关 系呢?对于这个问题,Roberts等(1995)做了深入研 究,并给出相应结论。在收集了加拿大死谷盐湖 1911~1993年的气温数据之后,总结出了该盐湖月平 均气温变化范围。同时,采用冷冻测温法得到相应时 期沉积的石盐包裹体均一温度。根据气温变化范围



图 4 镇钾 1 并石盐包裹体类型

A.方形石盐包裹体;B.圆形石盐包裹体;C.不规则形态的石盐包裹体;D.纯液相原生石盐包裹体;E.气液两相石盐包裹体;F.含子矿物三相次 生石盐包裹体。

Fig.4 Fluid inclusions in the study samples from Well Zhenjia-1

A.square fluid inclusions; B.round fluid inclusions; C.irregular fluid inclusions; D.primary one-phase liquid fluid inclusions; E.two-phase liquid-gas fluid inclusion; F.three-phase liquid-gas and crystal fluid inclusions.



514



图 5 石盐包裹体均一温度分布

A. zjy-1 原生包裹体均一温度测试结果;B. zjy-2 原生包裹体均一温 度测试结果;C. zjy-3 原生包裹体均一温度测试结果;D.zjy-4 原生包 裹体均一温度测试结果。

# Fig.5 Histograms of homogenization temperatures(Th) of fluid inclusions

A. histograms of homogenization temperatures(Th) of primary fluid inclusions in zjy-1; B. histograms of homogenization temperatures(Th) of primary fluid inclusions in zjy-2; C. histograms of homogenization temperatures(Th) of primary fluid inclusions in zjy-3; D. histograms of homogenization temperatures(Th) of primary fluid inclusions in zjy-4.

表1 石盐包裹体均一温度测试结果

 Table 1
 Homogenization temperature (Th) data of primary fluid inclusions in halite

样品编号一	均一温度(℃)				
	最大值	最小值	范围	均值	中值
ziy-1	27.0	18.5	8.5	23.5	23.2
ziy-2	29.9	14.9	15.0	23.9	23.9
ziy-3	36.9	24.0	12.9	30.5	30.0
ziy-4	31.0	14.7	16.3	23.1	23.3

温低 5℃~10℃左右<sup>[4]</sup>。Lowenstein 等(1998)测量了 实验室蒸发形成的石盐包裹体和野外(死谷)形成的 石盐包裹体的均一温度后,认为:石盐包裹体均一温 度的最大值能够反映其形成时的环境温度是。例如:实 验室蒸发形成的石盐包裹体的环境温度是 31.5℃,测 量所得的包裹体最大均一温度为 33℃;而死谷 4 月~ 5 月的卤水最大温度是 34.4℃,平均最高气温 31.3℃ ~37.6℃,测量所得的包裹体最大均一温度为 34℃<sup>[5]</sup>。本研究所测包裹体来自陕北盐盆奥陶纪马 家沟组五段六亚段地层,希望通过包裹体均一温度的 测定分析,得到陕北盐盆该时期的古气温。

#### 4.2 石盐包裹体的原生与次生性

由于石盐易于溶解及重结晶,寻找和判断原生包 裹体是开展石盐包裹体研究的前提。尽管由于后期 的改造和破坏,形成年代较早的石盐矿物大多发生了 一定的重结晶作用,但其中仍有可能找到未发生改变 的原生石盐包裹体<sup>[3]</sup>。在寻找原生石盐包裹体的研 究中,除了将石盐包裹体群的分布形态作为原生包裹 体的判断依据以外,还可以依据包裹体均一温度范围 大小,以及均一温度与包裹体大小之间的关系加以 判断<sup>[3]</sup>。

Coldstein 和 Reynolds(1994)认为,同一包裹体带 中所测量的均一温度,如果 90% 的数据都在 10℃~ 15℃范围之间,则可判定为原生包裹体<sup>[16]</sup>。本次测 试的四个样品,zjy-1 的均一温度最大值 27℃,最小值 18.5℃,范围在 8.5℃之间;样品 zjy-2 最大值29.9℃, 最小值 14.9℃,范围 15℃;样品 zjy-3 最大值为 36.9℃,最小值为 24℃,范围 12.9℃;样品 zjy-4 最大 值 31℃,最小值 14.7℃,范围 16.3℃(表1)。所以,本 次测定的均一温度是符合原生包裹体均一温度范围 的。

分析包裹体均一温度与包裹体大小之间的关系 是判定原生包裹体的又一项重要的标准<sup>[17]</sup>。前人在 这方面的实验结果表明,受到后期改造发生形变的包 裹体均一温度相对较高,而且越大的包裹体越容易受 到改造变形<sup>[3,18,19]</sup>。所以,如果原生包裹体受到了后 期作用,那么越大的包裹体,其均一温度也就越 高<sup>[17]</sup>。将本次测得的包裹体均一温度与该包裹体的 大小进行了分析比较,发现二者之间没有明显的数值 关系(图 6)。



### 4.3 石盐包裹体均一温度所指示的陕北奥陶纪盐盆 马家沟组沉积期的古气候信息探讨

奥陶纪发生了显生宙以来海洋动物群演变的大 爆发,并且在奥陶纪末出现了自寒武纪以来第二次生 物大灭绝事件,该时期的古温度、古环境信息一直为 人们所关注。前人研究认为,奥陶纪早期气温很高, 其后逐渐降低至相当于现在地球赤道附近的温度,该 温度从中奥陶世一直持续到晚奥陶世<sup>[20]</sup>(Trotter et al., 2008)。在奥陶纪末到志留纪初,温度又开始大 幅下降至2℃以下[21],并且引发了一次生物大灭绝 事件。前人对于奥陶纪古温度的测定主要采用氧同 位素方法,如 Shiels et al. (2005) 通过对腕足动物形 成碳酸盐中氧同位素测定认为奥陶纪热带赤道海水 表面温度的最低值为 16℃~32℃<sup>[22]</sup>;Giles(2012)采 用同样的方法得出奥陶纪低纬度地区古温度为8℃~ 26℃<sup>[21]</sup>;Trotter et al.(2008)对牙形石的氧同位素测 温结果表明整个奥陶纪古温度从最初的42℃降低到 奥陶纪末 23℃<sup>[20]</sup>。氧同位素测温首先需要测定样 品中氧同位素含量,进而得到δO<sup>18</sup>的数值,再通过一 系列计算得出古温度数据。由于样品本身的限制,及 假设古海水 δ018的准确性,使得氧同位素测温的精 确计算较难保证。而本研究采用测定石盐包裹体均 一温度的方法,得到的古温度直接、准确,这对于研究 奥陶纪的古温度、古气候信息具有不可取代的优势。

本研究测得陕北奥陶纪盐盆马家沟组的古温度 为:样品 zjy-1,18.5℃~27℃;样品 zjy-2,14.9℃~ 29.9℃;样品 zjy-3,24℃~36.9℃;样品 zjy-4,14.7℃~ 31℃(图7)。陕北盐盆中奥陶统马家沟组碳酸盐含 盐系主要由碳酸盐岩和蒸发盐交替沉积形成,为典型 的稳定克拉通古陆表海盆沉积[23]。从取样段岩芯的 岩性来看,底部岩盐段反映了当时炎热干燥的形成环 境,古温度为14.7℃~31℃;其后该地区经历了一次 淡化事件,形成了20m厚的石膏岩和10m左右的灰 岩沉积:接着该区再一次经历炎热干旱的气候,又形 成了岩盐层,气温较底部岩盐层的形成温度有所升 高,为24℃~36.9℃,在岩盐层形成的过程中温度逐 渐降低,从开始的 24℃~36.9℃,降低到 14.9℃~ 29.9℃,并最终降低到 18.5℃~27℃。如果按照 Lowenstein et al.(1998)的研究结果<sup>[5]</sup>,使用石盐包裹体 均一温度的最大值表示古气温,那么陕北盐盆地奥陶 纪在本研究段的古气温在最初为31℃;其后水体盐 度降低,形成约30m厚的膏岩、灰岩层;接着气候又 变干燥,逐渐形成岩盐,气温升高到 36.9℃;该层岩盐 厚约 20 m,所测古温度在该层位呈逐渐降低的趋势, 由36.9℃降低至29.9℃,又降至27℃。总的来说,本 研究所测的两个岩盐层的古温度大致接近,底层岩盐 层古温度为 31℃,上层岩盐层古温度为 36.9℃、 29.9℃、27℃。这组古温度与前人的氧同位素测温结 果基本是一致的。所以,我们认为,原生的石盐包裹 体均一温度能够反映其形成环境的古温度。



plotted next to location of samples in the cores

除了均一温度、岩性特征指示了陕北盐盆地奥陶 纪马家沟组沉积期为炎热干燥的气候特征以外,前人 的古地磁的研究结果也表明,奥陶纪的华北板块位于 南纬10°~24°之间<sup>[24,25]</sup>,地处南半球低纬度干旱带。 这种炎热、干旱的气候特征对于蒸发盐的形成十分有 利<sup>[26,27]</sup>,所以陕北盆地奥陶系马家沟组形成巨量的 石盐沉积,并于马家沟组五段六亚段陆续发现含钾显 示和局部薄钾盐层,成为全球少有的奥陶纪含钾盆 地<sup>[23]</sup>。结合以上对华北板块奥陶纪古气候的认识, 我们认为陕北奥陶纪盐盆处于炎热、干旱的低纬度干 旱带,其在马家沟组五段6亚段沉积期的古气温为 27℃~36.9℃。

这一古温度高于研究区近二十年的现代气温,作 者推测其原因可能有两点:首先,陕北盐盆地奥陶纪 所在的板块纬度位置较现今发生的很大的改变,从那 时的南纬10°~24°之间<sup>[24,25]</sup>,变为现在的北纬10°~ 24°,其所处气候带也从低纬度热带变为中纬度温带, 所以古气温高于现代气温;其次,前人的研究成果表 面,奥陶纪中期以前气温高于现代,从中奥陶晚期开 始,气温开始下降到奥陶纪末期达到最低<sup>[20]</sup>,本次研 究样品来自中奥陶纪,可能正处于奥陶纪温度较高的 时间段。

致谢 本论文的实验和撰写工作得到了中国科 学院南京地质古生物研究所孟凡巍博士的悉心指导, 中国地质科学院刘成林研究员、魏家秀老师、孙小红 博士、赵艳军博士等对论文提出了宝贵的修改意见, 在此一并感谢。

#### 参考文献(References)

- 刘兴起,倪培. 表生环境条件形成的石盐流体包裹体研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(8):856-862 [Liu Xingqi, Ni Pei. Advances in studies of fluid inclusions in halite formed in earth's surface environments[J]. Advances in Earth Science, 2001, 20(8): 856-862]
- 2 葛晨东,王天刚,刘兴起,等. 青海茶卡盐湖中流体包裹体记录的古 气候信息[J]. 岩石学报,2007,23(9):2063-2068 [Ge Chendong, Wang Tiangang, Liu Xingqi, *et al.* Paleoclimatic information recorded in fluid inclusions in halite from Chaka salt lake,Qinghai province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(9):2063-2068]
- 3 Roedder E. The fluid in salt[J]. American Mineralogist, 1984, 69(5/6): 413-439
- 4 Roberts S M, Spencer R J. Paleotemperatures preserved in fluid inclusions in halite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(19): 3929-3942
- 5 Lowenstein T K, Li J, Bronw C B. Paleotemperatures from fluid inclusions in halite: method verification and a 100,000 year paleotemperature record, Death Valley, CA [J]. Chemical Geology, 1998, 150: 223-245
- 6 孟凡巍,倪培,葛晨东,等. 实验室合成石盐包裹体的均一温度以及 古气候意义[J]. 岩石学报,2011,27(5):1543-1547[Meng Fanwei, Ni Pei, Ge Chendong, *et al.* Homogenization temperature of fluid in-

clusions in laboratory grown halite and its implication for paleotemperature reconstruction [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (5): 1543-1547]

- 7 Shepherd T J, Ayora C, Cendon D I. Quantitative solute analysis of single fluid inclusions in halite by LA-ICP-MS and cryo-SEM-EDS. Complementary microbeam techniques[J]. European Journal of Mineralogy, 1998, 10(6): 1097-1108
- 8 孙小红,胡明月,刘成林,等. 激光剥蚀 ICP-MS 法测定盐类矿物单 个流体包裹体的成分[J]. 分析化学,2013,41(2):235-241 [Sun Xiaohong, Hu Mingyue, Liu Chenglin, *et al.* Composition determination of single fluid inclusions in salt minerals by laser ablation ICP-MS [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2013, 41(2): 235-241]
- 9 Ayora C, Garcia, Veigas J, Pueyo J J. X-ray microanalysis of fluid inclusions and its application to the geochemical modeling of evaporite basins[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(1): 43-55
- 10 Timofeeff M N, Lowenstein T K, Blackburn W H. ESEM-EDS: An improved technique for major element chemical analysis of fluid inclusions[J]. Chemical Geology, 2000, 164(3/4): 171-182
- 11 Vreeland R H, Rosenzweig W D, Powers D W. Isolation of a 250 million-year- halotolerant bacterium from a primary salt crystal [J]. Nature, 2000, 407: 897-900
- 12 冯增昭,鲍志东,康祺发,等.鄂尔多斯奥陶纪古构造[J].古地理 学报,1999,1(3):83-94 [Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Kang Qifa, et al. Palaeotectonics of Ordovician in Ordos[J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1(3):83-94]
- 13 刘群,杜之岳,陈郁华. 陕北奥陶系和塔里木石炭系钾盐找矿远景[M]. 北京:原子能出版社,1997:1-113 [Liu Qun, Du Zhiyue, Chen Yuhua. Potash Salt-searching Prospects in Northern Shaanxi Ordovician and Tarim Carboniferous [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997: 1-113]
- 14 侯方浩,方少仙,董兆雄,等.鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. 沉积学报,2003,21(1):107-112 [Hou Fanghao, Fang Shaoxian, Dong Zhaoxing, et al. The development characters sedimentary environments and lithofacies of middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 107-112]
- 15 石崇东,高龙,宁金生,等. 镇钾 1 并长井段连续取心钻井工艺 [J]. 石油钻采工艺,2012,23(5):111-114 [Shi Chongdong, Gao Long, Ning Jinsheng, et al. Long core interval drilling technology in the Zhenjia 1 Well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 23(5): 111-114]
- 16 Goldstein R H, Reynolds T J. Systematic of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals [M]. Tulsa: SEPM Short Course 31, 1994
- Benison K C, Goldstein R H. Permian paleoclimate data from fluid inclusion in halite[J]. Chemical Geology, 1999, 154(1/2/3/4): 113-132
- 18 Petrichenko I O. Methods of study of inclusions in minerals in saline deposits[J]. Fluid Inclusion Research, 1979, 12: 114-274
- 19 Roedder E, Belkin H E. Thermal gradient migration of fluid inclusions in single crystals of salt from the Waste Isolation Pilot Plant site

(WIPP)[M] // Scientific Basis for Nuclear Waste Management. New York: Springer US, 1980: 453-464

- 20 Trotter J A, Williams Ian S, Barnes C R, et al. Did cooling oceans trigger Ordovician biodiversification? Evidence from conodont thermometry[J]. Science, 2008, 321(5888): 550-554
- 21 Giles P S. Low-latitude Ordovician to Triassic brachiopod habitat temperature(BHTs) determined from δ<sup>18</sup> O<sub>[brachiopod calcite]</sub>: A cold hard look at ice-house tropical oceans[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 317(318): 134-152
- 22 Sheields G A, Cardwn G A F, Veizer J, et al. Sr, C, and O isotope geochemistry of Ordovician brachiopods: A major isotopic event around the Middle-Late Ordovician transition [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(11): 2005-2025
- 23 张永生,郑绵平,包洪平,等. 陕北盐盆马家沟组五段六亚段沉积 期构造分异对成钾凹陷的控制[J]. 地质学报,2013,87(1):101-109 [Zang Yongsheng, Zheng Mianping, Bao Hongping, et al. Tectonic differentiation of O<sub>2</sub>m<sub>5-6</sub> deposition stage in salt basin, northern Shaanxi, and its control over the formation of potassium sags[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(1): 101-109]

- 24 Zhao Xixi, Robert S C, Liu Chun, et al. New Cambrian and Ordovician paleomagnetic poles for the North China Block and their paleogeographic implications[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(B2) : 1767-1788
- 25 杨振宇, Otofuji Y, 孙知明, 等. 河北唐山寒武系与奥陶系界线磁极性序列[J]. 科学通报, 1998, 43(17):1881-1885 [Yang Zhenyu, Y. Otofuji, Sun Zhiming, et al. Magnetic polarity sequence of the boundary of Cambrian and Ordovician Formation in Tangshan, Hebei [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(17): 1881-1885]
- 26 郑绵平,袁鹤然,张永生,等.中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报,2010,84(11):1523-1553 [Zheng Mianping, Yuan Heran, Zhang Yongsheng, et al. Regional distribution and prospects of potash in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1523-1553]
- 27 陈文西,袁鹤然. 陕北奥陶纪盐盆的区域成矿地质条件分析[J]. 地质学报,2010,84(11):1566-1575 [Chen Wenxi, Yuan Heran. Regional ore-forming geological conditions of the Ordovician northerm Shaanxi salt basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1566-1575]

## Paleoclimatic Information of $O_2 m_5^6$ Deposition Stage in Northern Shaanxi Salt Basin: Evidence from fluid inclusion in halite

HU Bin<sup>1,2</sup> KONG Fan-jing<sup>1,2</sup> ZHANG Yong-sheng<sup>1,2</sup> ZHENG Mian-ping<sup>1,2</sup> CHEN Jing<sup>1</sup>

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2. Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037)

Abstract: The homogenization temperature of fluid inclusions reflects the temperatures of the brines from which halite crystals grew. Therefore, it is a powerful tool to reveal the paleoclimate. Northern Shaanxi Salt Basin is located in the central and eastern of Ordos Basin. There is thick-bedded salt in Ordovician Majiagou Formation. Petrographical research and the homogenization temperature measurement of the samples which come from Zhenjia-1 core have been studied in detail. The results of petrographic research show that there are three types of fluid inclusions which are square, round and irregular. They contain liquid inclusion, liquid-gas inclusion and liquid-gas -crystal inclusion. The homogenization temperatures of fluid inclusions have been measured by cooling nucleation method. It shows that the homogenization temperatures of fluid inclusions of sample zjy-1(2 738 m deep) range 18.5°C to 27°C, sample zjy-2(2 740 m deep) range 14.9°C to 29.9°C, sample zjy-3(2 744 m deep) range 24°C to 39.6°C, and sample zjy-4(2 812. 8 m deep) range 14.7°C to 31°C. Comparing with previous paleotemperature, the records are basically coincident. The homogenization temperatures reflect the paleotemperature of Northern Shaanxi Salt Basin in the  $O_2 m_5^6$  stage of Ordovician period is about 27°C ~ 36.9°C, the paleoclimate is arid and hot in low-latitude arid zone of the southern hemisphere.

Key words: fluid inclusions in halite; homogenization temperature; cooling nucleation method; halite of northern Shaanxi Basin in Ordovician; paleoclimate