

# 内蒙古东胜铀矿床成矿主岩中球状磁铁矿的成因

李宏涛<sup>1,2)</sup>, 蔡春芳<sup>1,2)</sup>, 罗晓容<sup>1,2)</sup>, 李开开<sup>1,2)</sup>

1) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029; 2) 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京, 100029

**内容提要:**在东胜砂岩型铀矿床中,发现了球状磁铁矿、黄铁矿和方解石胶结物紧密共生的现象。为分析球状磁铁矿成因,进行了主岩岩石学观察、同位素测试及包裹体烃色谱—质谱分析。结果显示,包裹体石油烃具有“鼓包”,并检测到25-降藿烷系列,说明油气已被生物降解了。黄铁矿硫同位素低达 $-19.8\%$ ,形成于细菌硫酸盐还原作用;方解石胶结物碳同位素低至 $-19.7\%$ ,表明部分 $\text{CO}_2$ 来自油气的氧化作用。于是,硫酸盐还原细菌有可能厌氧降解了油气,并用厌氧呼吸还原 $\text{Fe}^{3+}$ 为 $\text{Fe}^{2+}$ ,形成球状磁铁矿、黄铁矿。这一成因联系,对本区铀矿和油气的勘探可能具有启发意义。

**关键词:**东胜铀矿床;球状自生磁铁矿;碳同位素;硫同位素;烃类包裹体;硫酸盐还原菌(SRB)

近几年,在鄂尔多斯盆地东胜地区中侏罗统直罗组中,发现了砂岩型铀矿床。研究表明,铀矿床的形成与油气作用有关(Cai et al., 2007a)。最近,笔者等利用扫描电镜,在含矿砂岩中发现了球状磁铁矿,形貌与McCabe等(1987)、Elmore等(1987)和刘庆生等(1991)在含沥青和含有烃类包裹体岩石样品中发现的球状自生磁铁矿相似。砂岩型铀矿床被认为形成于氧化还原过渡带,高价 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{U}^{6+}$ 易被还原,且均可能与油气介入有关,然而,迄今很少报道有球状磁铁矿的分布。研究磁铁矿与油气之间的成因联系,有可能提供理论依据,以利用磁性异常来寻找新的油气藏;且该磁铁矿分布于砂岩型铀矿床之中,弄清球状磁铁矿的成因,为理解该区的铀成矿机理可能具有重要的启发意义。

## 1 地质背景

内蒙古东胜地区位于鄂尔多斯盆地伊盟隆起的东北部(图1a)。鄂尔多斯盆地是在古生代海相及海陆过渡相前陆沉积盆地之上,叠加了中—新生代陆相拗陷沉积的叠合克拉通台向斜盆地。早三叠世—中侏罗世盆地内形成内陆凹陷,沉积了数千米厚的河、湖相碎屑岩。其中,上三叠统延长组是盆地最重要的石油烃源岩。中侏罗统直罗组辫状河砂岩

沉积,是东胜铀矿床的成矿主岩,岩性以灰色、灰白色中粗砂岩为主。据胜1井热演化史研究结果,本区直罗组所经历的最高古地温不超过 $70^\circ\text{C}$ (任战利等, 2006)。

## 2 样品来源及实验方法

样品采自东胜铀矿床中侏罗统直罗组赋矿砂岩,分别来自于新庙壕、皂火壕和沙沙台三个地段,取样地点见图1b,并采集了深层的三叠系烃源岩。

为观察磁铁矿,将砂岩样品轻轻敲碎至60~150目( $250\mu\text{m}\sim 104\mu\text{m}$ ),通过磁选选出具有磁性的矿物,然后在德国LEO 1450VP扫描电子显微镜(SEM)下观察矿物形态。能谱分析在英国牛津仪器公司INCA ENERGY 300 X射线能谱仪(EDS)上进行。砂岩中胶结物的同位素分析步骤如下:将含矿砂岩研磨至200目( $74\mu\text{m}$ )以下,用正磷酸法溶解砂岩中方解石胶结物,收集 $\text{CO}_2$ ;挑选砂岩中的黄铁矿颗粒、研磨,利用氧化铜采取高温直接氧化法,收集 $\text{SO}_2$ 。碳同位素采用 $\text{PDB}$ 标准在MAT252仪器上进行测量,精度为 $(0.15\%)$ ;而硫同位素采用CDT标准在Delta-S仪器上进行测量,精度为 $(0.2\%)$ 。砂岩中的铀含量利用电感耦合等离子质谱仪(ICP-

注:本文为国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律”(编号2003CB214605)的成果。

收稿日期:2006-03-10;改回日期:2006-08-16;责任编辑:章雨旭。

作者简介:李宏涛,男,1977年生。现为中国科学院地质与地球物理研究所博士生。主要从事石油地质、盆地流体—岩石相互作用研究。电话:010-62007375;Email: dhlht523@sina.com。通讯作者:蔡春芳,男,1966年生。研究员,博士生导师。主要从事盆地流体—岩石相互作用研究。Email: Cai\_cf@mail.iggcas.ac.cn。

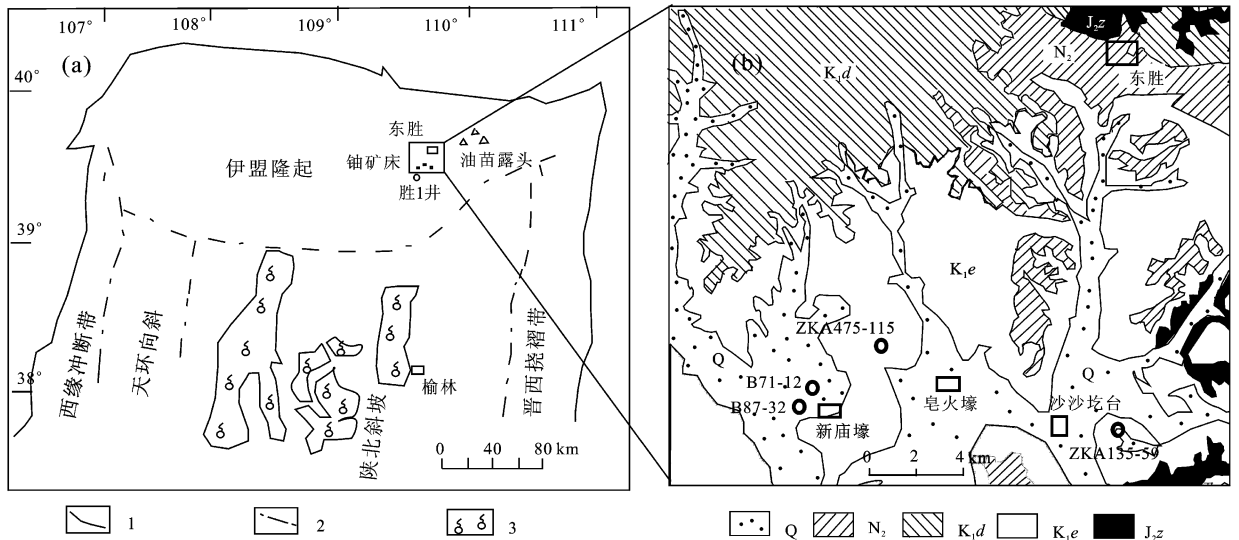


图1 鄂尔多斯盆地东胜铀矿床位置与矿区地质图及采样点地点(引自 Cai et al., 2007a, 略有修改)

Fig. 1 A geological map showing locations of the Dongsheng uranium deposit and sample collection, North Ordos (modified from Cai et al., 2007a)

1—盆地边界; 2—构造边界; 3—气田; Q—第四系; N<sub>2</sub>—上新统; 下白垩统; K<sub>1d</sub>—东胜组, K<sub>1e</sub>—伊金霍洛组; J<sub>2z</sub>—中侏罗统直罗组  
1—basin border; 2—structure border; 3—gas field; Q—Quaternary; N<sub>2</sub>—Pliocene; K<sub>1d</sub>—Lower Cretaceous Dongsheng Formation; K<sub>1e</sub>—Lower Cretaceous Yijinhuoluo Formation; J<sub>2z</sub>—Middle Jurassic Zhiluo Formation

MS)测定,精度为(8%。

包裹体中的有机质利用压碎抽提法抽提(George et al., 2004),即,首先把每个大约 50g 样品轻轻敲碎至 40~60 目(420 $\mu$ m~250 $\mu$ m),用蒸馏水清洗除去粒径比较小的填隙物及一些粘土矿物,低温烘干。然后用二氯甲烷和甲醇的混和液(93:7),浸泡 48~72h,倒掉溶液风干后,用双氧水氧化矿物颗粒表面残留的不溶有机物。最后将样品磨碎至 200 目(74 $\mu$ m)以下,用二氯甲烷浸泡抽提 48~72h。同时,对三叠系烃源岩也进行了有机质抽提。GC-MS 分析在 HP6890/5973MSD 上进行,色谱柱为 HP-5MS(30m $\times$ 0.25mm $\times$ 0.25 $\mu$ m),载气为氦气,升温程序为:40 $^{\circ}$ C 恒温 2min,然后以 4 $^{\circ}$ C/min 的升温速率升至 300 $^{\circ}$ C,恒温 15min。采用多离子检测方法进行检测。

### 3 实验结果

#### 3.1 镜下观察

显微镜薄片观察、鉴定显示,方解石是主要的胶结物,含量变化较大,占岩石总量的 0.3%~15%,平均为 6.9%(表 1)。黄铁矿含量较高,平均达 1.7%(表 1),在地层中以浸染状、结核状等广泛发育。黄铁矿常与方解石紧密共存,偶尔可见磁铁矿

周围部分被黄铁矿交代,暗示三者之间可能具有成因联系。显微镜荧光观察发现,油气包裹体主要赋存在石英颗粒愈合的次生裂缝中,为成岩次生包裹体。包裹体较小,通常<5 $\mu$ m,呈条带状沿次生裂缝分布,烃类包裹体发浅蓝—亮白色荧光,显示具有油气聚集或运移过(图 2)。

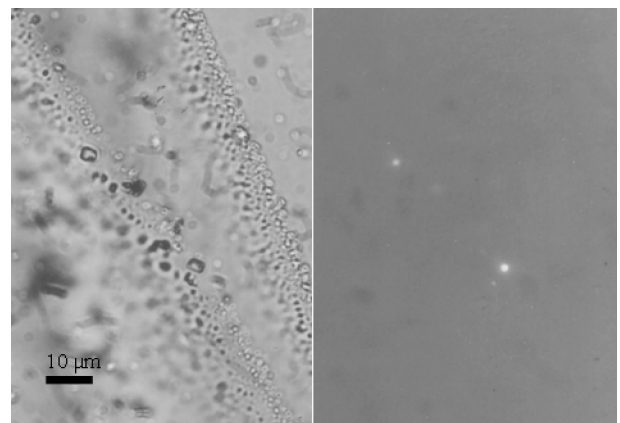


图2 东胜地区中侏罗统直罗组含矿砂岩样品(2-62号)石英颗粒中包裹体及荧光图片(左:单偏光;右:荧光)

Fig. 2 Photographs showing distribution of fluid inclusions and their fluorescence in quartz grains of the host sandstone (No. 2-62) of the Middle Jurassic Zhiluo Formation in Dongsheng area (left: transmitted light; right: fluorescent)

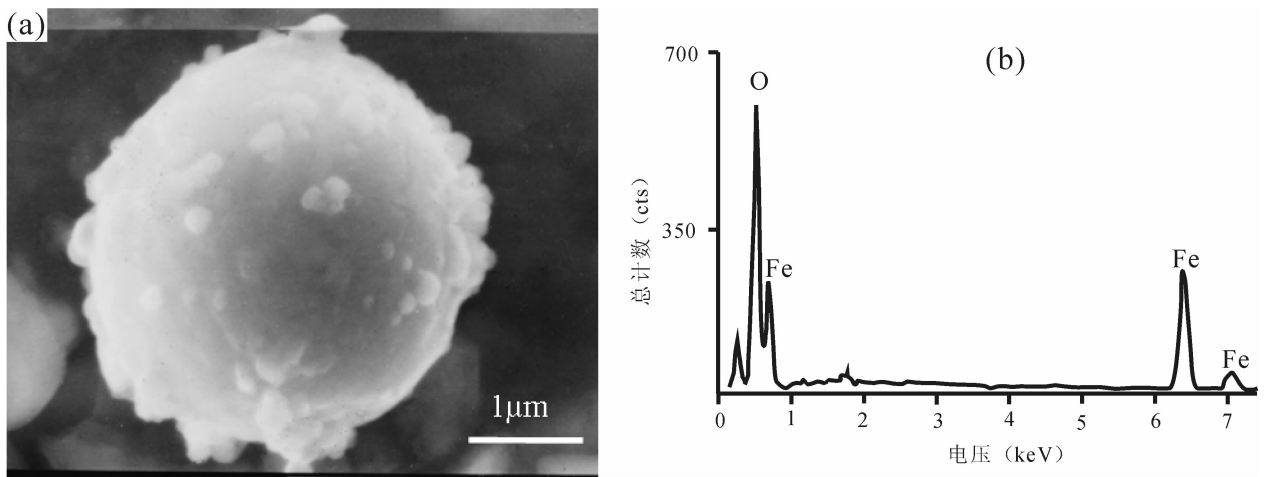


图 3 直罗组砂岩样品(2-62号)中磁铁矿扫描电镜图像(a)及能谱图(b)

Fig. 3 SEM photograph (a) and X-ray EDS spectrum (b) of magnetite from the host sandstone (No. 2-62)

对挑选出的磁性矿物颗粒进行扫描电镜观察,在新庙壕地段 2-62 号样品中,发现了球状磁铁矿颗粒(图 3a)。颗粒形状不规则、呈球形,直径在  $3\mu\text{m}$  左右,表面部分因晶体生长而有些小突起。这与过去一些研究者(McCabe et al., 1987; Elmore et al., 1987; 刘庆生等, 1991)在扫描电镜下所观察的球状自生磁铁矿颗粒形态基本一致。能谱分析显示,这种磁性矿物 Fe 是唯一的金属元素(图 3b),证明是磁铁矿。

### 3.2 黄铁矿、方解石胶结物同位素

镜下观察及前人研究结果均显示,磁铁矿可能与黄铁矿和方解石具有成因联系(McCabe et al., 1987; Saunders et al., 1999)。因此,对东胜铀矿床三个地段的含矿砂岩主要胶结物方解石以及黄铁矿进行同位素分析测试。结果如表 1 所示,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值范围为  $-12.3\text{‰} \sim -19.7\text{‰}$ , 样品  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值均低于  $-10\text{‰}$ , 暗示其碳源来自有机质(可能含有油气)的贡献。黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$  值最轻至  $-19.8\text{‰}$ , 低于已知

有机硫同位素的下限  $-17\text{‰}$  (Cai et al., 2002)。砂岩中铀含量在成矿带(氧化还原带)较高, 范围为  $14.4 \times 10^{-6} \sim 1836 \times 10^{-6}$ , 表明具有明显的铀富集作用发生, 而在氧化带铀含量较低, 仅为  $2.9 \times 10^{-6}$ 。已有的研究表明, 本区的铀矿化作用主要与油气参与下的硫酸盐还原菌(SRB)对  $\text{U}^{6+}$  直接的还原有关(Cai et al., 2007a)。

### 3.3 包裹体石油烃色谱分析结果

对抽提出的烃类进行色谱—质谱分析(图 4), 结果显示, 2-47 和 2-62 两个样品的烃类包裹体  $\text{Pr}/n\text{-C}17$  比值均为 0.53、 $\text{Ph}/n\text{-C}18$  分别为 0.57 和 0.85, 而三叠系源岩  $\text{Pr}/n\text{-C}17$  和  $\text{Ph}/n\text{-C}18$  比值均为 0.25。烃包裹体、三叠系源岩奇偶优势指数(OEP)均接近于 1, 无明显的奇偶优势, 表明烃类均达到成熟的演化阶段。潜在的油源来自三叠系和石炭系—二叠系烃源岩。已有的资料显示, 这两套源岩没有检测出 25-降藿烷(如图 5c、d)。

样品烃类包裹体  $m/z = 85$  谱图(图 4)基线之

表 1 东胜地区中侏罗统直罗组含矿砂岩方解石、黄铁矿含量及碳、硫同位素数据表

Table 1 Stable isotopic composition and percent content of calcite and pyrite aggregates from Zhiluo Formation host sandstones in Dongsheng area

样号	钻孔号	深度(m)	岩性(样品来源)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ (‰)	U( $\times 10^{-6}$ )	方解石(%)	黄铁矿(%)
2-47	B71-12	293.9	灰色粗砂岩(氧化还原带)	-16.4	—	193.1	1.1	1.5
2-62	B87-32	287.6	灰色砂岩(氧化还原带)	-17.2	-11.2	290.1	15	1.8
42-2	ZKA475-115	292	灰色砂岩(氧化还原带)	-19.7	-13.3	14.4	13	3
43	ZKA475-115	281	棕黄色细砂岩(氧化带)	-18.8	—	2.9	0.3	0.1
2-79	ZKA135-39	177.1	灰色砂岩(氧化还原带)	-12.3	-19.8	1836	5	2

注:—表示未测量。

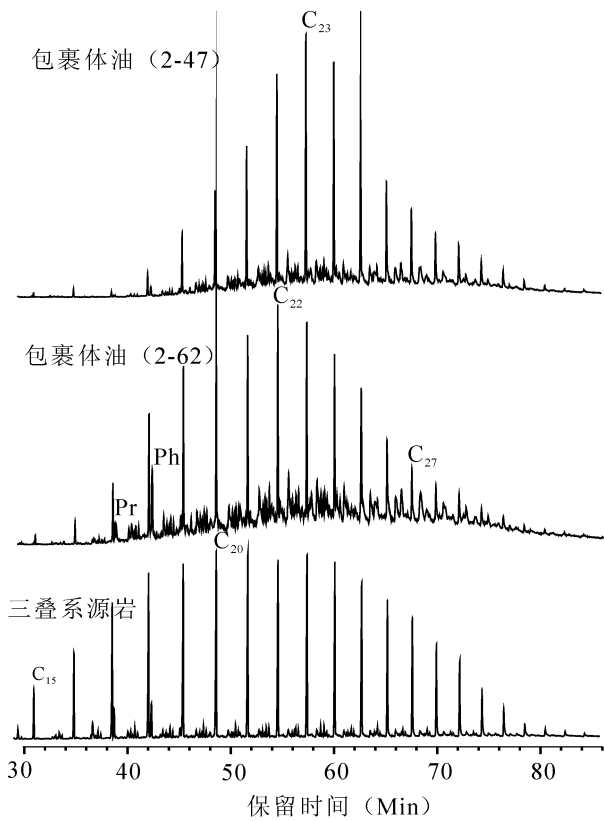


图4 东胜地区直罗组含矿主岩样品烃类包裹体与三叠系源岩抽提物  $m/z=85$  谱图

Fig. 4 Mass chromatograms ( $m/z=85$ ) of oils extracted from inclusions in the host sandstone of the Zhiluo Formation and Triassic source rock

上,碳数范围在  $C_{16} \sim C_{34}$  内出现“鼓包”现象,即不可识别的分辨物(UCM)。暗示包裹体油发生了生物降解(Peters et al., 1993)。同样,包裹体油  $m/z=177$ 、 $m/z=191$  谱图显示,在包裹体油中,也发现可能由于生物降解而形成的  $C_{28} \sim C_{32}$  17(21(-25-降藿烷系列,以及去甲基  $C_{28}$ 、 $C_{29}$  三环萜烷和降 Ts、Tm (图 5a、b) (Volkman et al., 1983; Peters et al., 1993)。2-47 号样品的 29DH/30H、29DH/29H 比值分别为 0.18、0.26, 2-62 号样品分别为 0.17、0.26。相反,三叠系源岩中,没有检测到有意义含量的 25-降藿烷系列(图 5c、d)。

## 4 讨论

本次在砂岩中发现的球状磁铁矿颗粒,与固体沥青中所发现的次生磁铁矿(McCabe et al., 1987; Elmore et al., 1987)相比,虽然大小不同,但形态相近,因此,它们可能具有相同的成因,即烃类和微生物共同作用的结果。磁铁矿、黄铁矿与方解石紧密

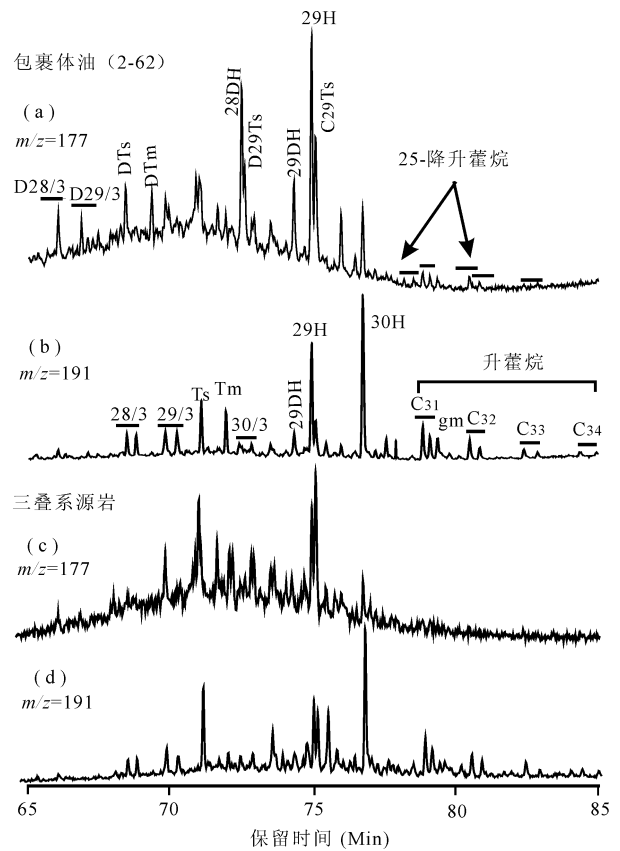


图5 直罗组砂岩(2-62号样品)包裹体油与三叠系源岩  $m/z=177$ 、191 谱图

Fig. 5 Partial  $m/z=177$  and  $m/z=191$  mass chromatograms of oils extracted from inclusions in the host sandstone of the Zhiluo Formation (No. 2-62) and Triassic source rock

H—17 $\alpha$ 21 $\beta$  藿烷; D—25-降藿烷; gm—伽马蜡烷; 28/3—C28 三环萜烷; 29/3—C29 三环萜烷; 30/3—C30 三环萜烷; D28/3—C27 去甲基三环萜烷; D29/3—C28 去甲基三环萜烷; Ts—C27 18 $\alpha$ 21 $\beta$ -22, 29, 30 三降藿烷; Tm—C27 17 $\alpha$ 21 $\beta$ -22, 29, 30 三降藿烷; DTs—C26 18 $\alpha$ 21 $\beta$ -22, 25, 29, 30 四降藿烷或 25-降 Ts; DTm—C26 17 $\alpha$ 21 $\beta$ -22, 25, 29, 30 四降藿烷或 25-降 Tm; C29Ts—C29 18 $\alpha$ 21 $\beta$ -30 降新藿烷; D29Ts—C28 18 $\alpha$ 21 $\beta$ -25, 30 二降新藿烷; 28DH—C27 17 $\alpha$ 21 $\beta$ -25, 30 二降藿烷; 29DH—C28 17 $\alpha$ 21 $\beta$ -25, 30 二降藿烷

H— 17, 21 hopanes; D— 25-norhopanes; gm— gammacerane; 28/3— C28 tricyclic terpane; 29/3— C29 tricyclic terpane; 30/3— C30 tricyclic terpane; D28/3— C27 demethylated tricyclic terpane; D29/3— C28 demethylated tricyclic terpane; Ts— 18, 21- 22, 29, 30-trisnorhopane; Tm— 17, 21- 22, 29, 30-trisnorhopane; DTs— C26 18, 21- 22, 25, 29, 30-tetrakisnorhopane (or 25-nor Ts); DTm— 25-nor Tm; 29Ts— C28 18 $\alpha$ 21 $\beta$ -30 norneohopane; D29Ts— C28 18 $\alpha$ 21 $\beta$ -25, 30 binorneohopane; 28DH— C27 17 $\alpha$ 21 $\beta$ -25, 30 binorhopane; 29DH— C28 17 $\alpha$ 21 $\beta$ -25, 30 binorhopane

共存,说明,磁铁矿—黄铁矿—方解石之间可能具有某种成因联系。如 Cai 等(2007b)研究认为,硫酸盐

还原菌消耗烃类产生  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ ，与周围的矿物(如含钙、含铁矿物)反应，可以产生碳酸盐化蚀变以及磁铁矿等磁性矿物，而黄铁矿则是  $\text{H}_2\text{S}$  对含铁矿物进一步还原的产物(Saunders et al., 1999)。

#### 4.1 黄铁矿成因与方解石中 $\text{CO}_2$ 来源

所测黄铁矿样品，最轻  $\delta^{34}\text{SCDT}$  值( $-19.8\%$ )低于已知有机硫同位素的下限 $-17\%$ (Cai et al., 2002)。表明这个黄铁矿中的硫不可能来自有机质，相反，应该来自细菌硫酸盐还原作用(BSR)，系在相对开放体系中，即硫酸根离子的供给速率高于被还原的速率，形成的。同时，另外两个黄铁矿  $\delta^{34}\text{SCDT}$  值分别为 $-11.2\%$ 和 $-13.3\%$ ，小于岩浆成因硫化物的  $\delta^{34}\text{SCDT}$  (约 $-5\% \sim +5\%$ )(Clark et al., 1997)，而研究区没有发现富硫的有机质，有机硫的贡献应该非常有限。这意味着，负  $\delta^{34}\text{SCDT}$  值的黄铁矿，主要为 BSR 成因，即在相对封闭的体系中，硫酸根离子的供给速率低于被还原的速率，细菌的硫酸盐还原作用将产生硫化氢和黄铁矿具有相对重的 ( $34\text{SCDT}$  值)(Aharon et al., 2000)。

而方解石  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为 $-12\% \sim -20\%$ (表 1)，表明方解石中部分碳来自有机质。已研究表明本区方解石  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  最低为 $-27.6\%$ ，来自油气的氧化作用(Cai et al., 2007a)。于是，与磁铁矿共生的方解石，其碳源很可能是油气的氧化所产生的  $\text{CO}_2$  与无机来源的  $\text{CO}_2$  混合的产物；尽管还不能排除地层中煤线或植物碎屑的贡献。

包裹体中石油烃具有生物降解的证据，部分支持了本区油气氧化作用提供了富  $^{12}\text{C}$  的方解石。该方解石与 SRB 成因的黄铁矿紧密共生，暗示细菌硫酸盐还原作用与油气的氧化具有密切联系。

#### 4.2 石油烃微生物降解

色谱—质谱图显示，包裹体油含有丰富的正构烷烃和一定数量的 25-降藿烷、去甲基三环萜烷。一般认为，存在 25-降藿烷，指示石油遭受严重生物降解(Peters et al., 1993)。然而，Blanc 等(1992)认为原油中 25-降藿烷也有可能直接来自源岩。在三叠系源岩抽提物及来源于石炭系—二叠系的原油中，并没有检测到 25-降藿烷和去甲基三环萜烷系列。这表明包裹体石油烃中所检测到的 25-降藿烷并非来自源岩，结合  $m/z = 85$  谱图上的“鼓包”，最可能是生物降解的产物。而包裹体油中较完整的正构烷烃则应为后期油气的二次充注的结果(Volkman et al., 1983)。包裹体油  $\text{Pr}/n\text{-C}17$ 、 $\text{Ph}/n\text{-C}18$  比值高于三叠系源岩抽提物，暗示后期充注的油气

也受到轻微的生物作用影响。这些说明，油气在被石英颗粒捕获之前，遭受长期的生物降解作用。

通常认为，油气生物降解主要是喜氧细菌作用的结果(Peters et al., 1993)。然而，近年来，研究显示，尽管厌氧微生物比喜氧微生物降解烃类的速率低，地下储层中石油烃是以厌氧微生物降解作用为主(Larter et al., 2003)。直罗组硫酸盐还原菌(SRB)成因黄铁矿大量存在，显示 SRB 异常活跃。这样，石油被 SRB 在厌氧条件下降解氧化是可能的，而降解产生的有机  $\text{CO}_2$  为方解石中碳的重要来源。

#### 4.3 磁铁矿成因解释

含矿主岩石英矿物含有烃类包裹体、方解石胶结物具有油气来源  $\text{CO}_2$  贡献、包裹体油具有生物降解的特征，暗示直罗组曾经发生过油气的运移或聚集，而油气在被石英矿物捕获之前遭受过微生物作用。这些一致说明，本次发现的球状磁铁矿，与前人发现的球状自生磁铁矿具有相同的成因，即，微生物与油气共同作用的产物。扫描电镜下，磁铁矿是具有粗糙的表面圆状颗粒，而这种不规则的结晶形态，反映了生物还原的快速、不受控制的生长的结果(Sparks et al., 1990)。

通常认为，铁还原菌在降解、氧化有机质同时，将  $\text{Fe}^{3+}$  作为电子接受者而直接还原到  $\text{Fe}^{2+}$ ，从而形成磁铁矿(Lovely et al., 1987; Lovely, 1990)。然而，本区含有较多的黄铁矿，暗示 SRB 大量繁殖。而这种条件并不适合铁还原菌的生存(Lovely et al., 1993)。研究已发现，SRB 在贫硫酸盐的条件下，也可以将  $\text{Fe}^{3+}$  还原，形成磁铁矿(Lovely et al., 1993)。后来，又发现某一特殊 SRB 菌种——RS-1，利用新陈代谢作用，可以同时形成磁铁矿和铁硫化物(Sakaguchi et al., 1993, 2002)。有意义的是，McCabe 等(1987)和 Sakaguchi 等(1993)均暗示，油气藏周围的磁铁矿存在可能与 SRB 有关。这样，SRB 可能与铁还原菌作用类似(Lovely et al., 1987, 1993; Lovely, 1990)，即利用烃类作为新陈代谢的碳源，伴随着油气的厌氧氧化，直接或间接将地层中的  $\text{Fe}^{3+}$  还原成  $\text{Fe}^{2+}$ ，并与原来地层中含有的  $\text{Fe}^{3+}$  共同作用，形成球状自生磁铁矿。但由于 SRB 还原  $\text{SO}_4^{2-}$  产生  $\text{H}_2\text{S}$ ，多数被还原的  $\text{Fe}^{2+}$  形成  $\text{FeS}_2$ ，因此，仅少数球状自生磁铁矿能得以保存。

球状磁铁矿( $1\text{Fe}^{2+} + 2\text{Fe}^{3+}$ )和黄铁矿( $\text{Fe}^{2+}$ )稳定地共存于同一高铀含量的砂岩中，暗示铀成矿环境为弱还原的铁还原与更强还原的硫酸盐还原环

境之间变化,或者,为硫酸盐还原环境但硫酸盐供给量有限, $\text{Fe}^{3+}$ 直接被硫酸盐还原菌还原。

## 5 结论

(1) 烃类包裹体存在证明,本区曾经有烃类运移或聚集过;包裹体油含有 25-降藿烷系列,及  $m/z=85$  谱图存在“鼓包”, $\text{Pr}/n\text{-C}_{17}$ 、 $\text{Ph}/n\text{-C}_{18}$  比值相对升高,指示油气被石英矿物捕获之前遭受生物降解。

(2) 硫酸盐还原菌(SRB)利用烃类作为新陈代谢的碳源,将油气氧化,直接或间接导致球状自生磁铁矿形成、方解石沉淀。

## 参 考 文 献 / References

刘庆生,张昌达,曲赞,蔡振京. 1991. 自生磁铁矿与烃的富集及运移之间相互关系的研究. *地球科学*, 16: 565~571.

任战利,张盛,高胜利,崔军平,刘新社. 2006. 伊盟隆起东胜地区热演化史与多种能源矿产的关系. *石油与天然气地质*, 27(2): 189~193.

Aharon P, Fu B. 2000. Microbial sulfate reduction rates and sulfur and oxygen isotope fractionations at oil and gas seeps in deepwater Gulf of Mexico. *Geochemical et Cosmochimica Acta* 64(2): 233~246.

Blanc P H, Connan J. 1992. Origin and occurrence of 25-norhopanes; a statistical study. *Organic Geochemistry*, 18: 813~828.

Cai C F, Worden R H, Wang Q H, Xiang T S, Zhu J Q, Chu X L. 2002. Chemical and isotopic evidence for secondary alteration of natural gases in the Hetianhe Field, Bachu Uplift of the Tarim Basin. *Organic Geochemistry*, 33: 1415~1427.

Cai C F, Li H T, Qin M K, Luo X R, Wang F Y, Ou G X. 2007a. Biogenic and petroleum-related ore-forming processes in Dongsheng uranium deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, (in press, see website).

Cai C F, Dong H L, Li H T, Xiao X J, Ou G X, Zhang C M. 2007b. Mineralogical and geochemical evidence for bacterial uranium mineralization coupled with hydrocarbon oxidation in the Shashagetai deposit, NW China. *Chemical Geology*, 236: 167~79.

Clark I D, Fritz P. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. New York: Lewis Publishers, 328.

Elmore R D, Enqel M H, Crwaford L, Nick K, Imbus S, Sofer Z. 1987. Evidence for a relationship between hydrocarbon and authigenic magnetite. *Nature*, 325: 428~430.

George S C, Ahmed M, Liu K, Volk H. 2004. The analysis of oil trapped during secondary migration. *Organic Geochemistry*, 35: 1489~1511.

Larter S, Wilhelms A, Head I, Koopmans M, Aplin A, DiPrimo R, Zwach C, Erdmann M, Telnaes N. 2003. The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface—part 1: Biodegradation rates in petroleum reservoirs. *Organic Geochemistry*, 34: 601~613.

Lovely D R, Stolz J F, Nord G L, Phillips E J P. 1987. Anaerobic production magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature*, 330(19): 252~254.

Lovely D R. 1990. Magnetite Formation During Microbial Dissimilatory Iron Reduction. *Iron Biominerals*. In: Frankel R B and Blakemore R P ed., New York Plenum Press, 151~166.

Lovely D R, Roden E E, Phillips E J P, Woodward J C. 1993. Enzymatic iron and uranium reduction by sulfate-reducing bacteria. *Marine Geology*, 113: 41~53.

McCabe C, Sassen R, Saffer B. 1987. Occurrence of secondary magnetite within biodegrade oil. *Geology*, 15: 7~10.

Peters K E, Moldowan J M. 1993. The Biomaker Guide—Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments. Prentice Hall, Inc.

Sakaguchi T, Grant B J, Matsunaga T. 1993. magnetite formation by a sulphate-reducing bacterium. *Nature*, 365: 47~49.

Sakaguchi T, Arakaki A, Matsunaga T. 2002. Desulfovibrio magneticus sp. nov., a novel sulfate-reducing bacterium that produces intracellular single-domain-sized magnetite particles. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 52: 215~221.

Saunders D F, Burson K R, Thompson C K. 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alteration. *AAPG Bulletin*, 83: 170~185.

Sparks N H C, Mann S, Bazylnski D A, Lovely D R, Jannasch H W, Franke R B. 1990. Structure and morphology of magnetite anaerobically-produced by a marine magnetotactic bacterium and a dissimilatory iron-reducing bacterium. *Earth Planet Sci. Lett.*, 98: 14~22.

Volkman J K, Alexander R, Kagi R I, Woodhouse G W. 1983. Demethylated hopanes in crude oils and their applications in petroleum geochemistry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 785~794.

# Origin of Spherical Magnetite from Host Sandstone of the Dongsheng Uranium Deposit, Inner Mongolia

LI Hongtao<sup>1,2)</sup>, CAI Chunfang<sup>1,2)</sup>, LI Kaikai<sup>1,2)</sup>, LUO Xiaorong<sup>1,2)</sup>

1) Institute of Geology and Geophysics, Chinese academy of sciences, Beijing, 100029

2) Key Laboratory of Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029

## Abstract

Spherical magnetite has been found in the Middle Jurassic Zhiluo Formation sandstone in Dongsheng area, Inner Mongolia in the northern of the Ordos basin. In order to assess its origin, the host sandstone

has been analyzed for fluid inclusion oil biomarkers, pyrite  $\delta^{34}\text{S}$ , calcite  $\delta^{13}\text{C}$  and observed under scanning electron microscope (SEM) and X-ray energy dispersive spectroscopy analyzer (EDS). Fluid inclusion oils in the host sandstone are characterized by significant amounts of demethylated hopanes and tricyclic terpanes and existence of unresolved complex mixtures. The features indicate the result of biodegradation. Pyrite has  $\delta^{34}\text{S}$  values as low as  $-19.8\text{‰}$ , indicating that the sulfur was originated from bacterial sulfate reduction. Calcite cement exhibits  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  values from  $-12.3$  to  $-19.7\text{‰}$ , suggesting that partial  $\text{CO}_2$  was derived from petroleum oxidation. Biogenic pyrite was found to intimately intergrow with calcite cements with petroleum-derived carbon, suggesting that petroleum was likely oxidized by sulfate reducing bacteria (SRB) and thus supplied a source of the carbon in the calcite. Furthermore, SRB may reduce  $\text{Fe}^{3+}$  to  $\text{Fe}^{2+}$  by anaerobic respiration, resulting in magnetite precipitation. These lines of evidence lead to proposal that SRB may have degraded hydrocarbons coupled with  $\text{Fe}^{3+}$  reduction and thus spherical magnetite formation. The association has important significance likely to uranium ore and petroleum exploration.

**Key words:** Dongsheng uranium deposit; spherical magnetite;  $\delta^{34}\text{S}$ ;  $\delta^{13}\text{C}$ ; hydrocarbon inclusions; sulfate reducing bacteria (SRB)

