

陇东地区延长组构造裂缝方解石脉特征及其与 烃类流体活动的关系

郭 凯^{1,2}, 曾 斌^{1,2}, 李元昊³, 刘涛涛^{1,2}

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249;
3. 中国石油长庆油田 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘要:通过微量元素与稳定同位素分析对鄂尔多斯盆地陇东地区延长组广泛发育的构造裂缝方解石充填物的成因及其与烃类流体活动的关系进行研究。结果表明:该区砂泥岩裂缝中充填的方解石为相对富集 Fe 和 Mn 而贫 Mg 的(含)铁方解石,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-6.6\% \sim 2.7\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 $-23.0\% \sim -14.9\%$;方解石脉中富集的 Mn 元素主要源于酸性烃类流体对长 7 段源岩内部凝灰岩的溶蚀,其成因主要与有机质演化过程中甲烷生成作用产生的相对富¹³C 二氧化碳和脱羧作用产生的贫¹³C 二氧化碳有关;方解石脉主要形成于早白垩世长 7 段烃源岩生排烃期间,稍早于或同步于烃类流体的大规模活动,侏罗纪末期形成的裂缝构成了延长组烃类流体活动的重要通道,有利于烃源岩排烃及低渗透砂岩储层的油气运移。

关键词:裂缝充填方解石;微量元素;稳定同位素;烃类流体;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE 122 **文献标志码:**A

Geochemical characteristics of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang formation of Longdong area and its relationship with hydrocarbon fluid flow

GUO Kai^{1,2}, ZENG Jian-hui^{1,2}, LI Yuan-hao³, LIU Tao-tao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield, PetroChina, Xi'an 710021, China)

Abstract: The origin of calcite veins and their relationship with hydrocarbon fluid flow were studied by analyzing trace element and stable isotope, which occurred extensively in the widely distributed tectonic fractures of Yanchang formation in Longdong area of Ordos Basin. The results show that calcite veins in sandstones and mudstones are all ferrocalcite with relatively high Fe and Mn content and low Mg content, and their $\delta^{13}\text{C}$ ranges from -6.6% to 2.7% (PDB) and $\delta^{18}\text{O}$ ranges from -23.0% to -14.9% (PDB). Combining these data with geological features, it is indicated that the enrichment of Mn in calcite veins is attributed to corrosion of volcanic tuff in Chang 7 member by hydrocarbon fluid, and the formation of these calcite veins is associated with carbon dioxide of rich ¹³C generated by microbial methanogenesis and that of poor ¹³C generated by thermal decarboxylation. The calcite veins mainly formed in the Early Cretaceous during oil generation and expulsion of source rocks in Chang 7 member, and their formation was prior to or coeval with extensive hydrocarbon fluid flow. The tectonic fractures formed in the Late Jurassic are significant fluid flow pathway and play an important role for oil expulsion from source rocks and migration through low permeability sandstones.

Key words: fracture-filling calcite; trace element; stable isotope; hydrocarbon fluid; Ordos Basin

对自生矿物进行元素或同位素组成等地球化学分析可以追溯古流体的活动及可能的油气充注与运移历史^[1-2]。自生方解石矿物由于对不同成岩环境的敏感性及其在含油气盆地中的广泛发育,被用来分析成岩环境及成岩流体的演化与活动过程^[1,3]。研究表明,地层裂缝或断裂中形成的方解石充填物可以有效记录烃类流体的活动^[4-6]。Caja等^[5]发现方解石脉的形成与裂缝中烃类流体的运移可同时进行。鄂尔多斯盆地是中国中西部地区的大型含油气盆地,盆地内三叠系延长组发育典型的低渗透岩性油藏,其中延长组长6—长8段储层尤其致密,渗透率一般小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。盆地内广泛发育的构造裂缝可作为延长组石油运移的通道,对延长组低渗透砂岩的成藏具有重要作用^[7-8]。由于低渗透砂岩储层的致密性特征导致油气在其中的运移阻力巨大,而裂缝的发育则可以有效沟通烃源岩与低渗透层并提高储层的渗流性能,大大改善低渗透砂岩石油的充注和运移能力。笔者通过陇东地区延长组构造裂缝方解石脉的微量元素、同位素地球化学分析对该区方解石脉的形成以及延长组广泛发育的构造裂缝

对于源岩排烃及低渗透砂岩石油运移作用进行研究。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地在晚古生代进入陆内拗陷盆地发育阶段^[9],在盆地持续沉降过程中发育的上三叠统延长组碎屑岩沉积是盆地内主要的石油勘探层系,由下至上共分为长10—长1十个油层组。其中,长7段为在湖盆鼎盛时期发育的一套含油页岩的湖相泥岩沉积,是盆地中生界的主力烃源岩^[10]。陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部,地跨伊陕斜坡和天环拗陷两个构造单元(图1),面积约为 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$,长6—长8段是该区主力油层,储集砂体主要为三角洲前缘水下分流河道、河口坝、前缘席状砂以及滑塌浊积砂体,岩石类型主要为长石砂岩、岩屑长石砂岩,受沉积与成岩作用控制表现为典型的低渗透砂岩储层^[3]。目前已在该区南部庆阳、镇北及合水地区的长8段及北部白豹—华池地区的长6段等见工业油流或形成规模储量,本次所取得的构造裂缝方解石脉样品主要位于该区延长组地层(图1)。

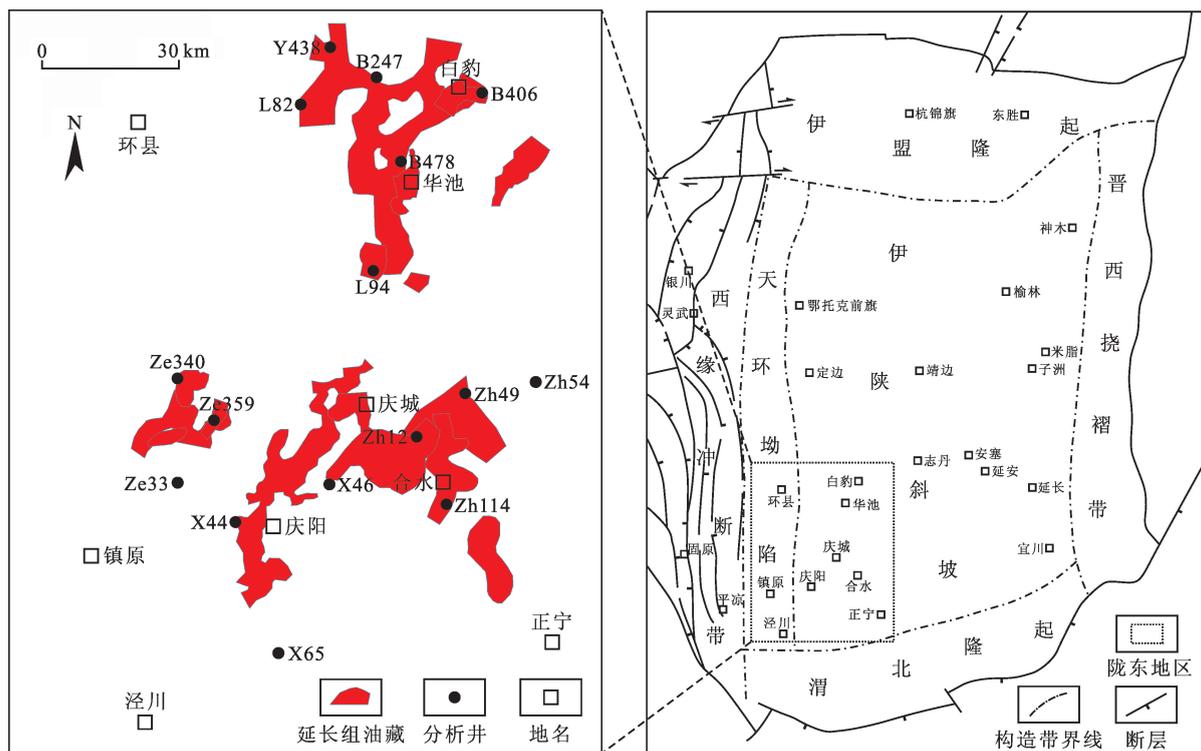


图1 陇东地区构造位置及分析井位置

Fig. 1 Structure location and location of analysis wells of Longdong area

2 延长组构造裂缝及其方解石脉特征

陇东地区构造裂缝主要为在燕山期和喜马拉雅

期古构造应力场控制下形成于晚侏罗世和晚白垩世—古近纪的两期剪切裂缝^[11-12]。受岩层非均质性影响,该区主要发育燕山期NW向和喜马拉雅期

NE向裂缝^[12]。岩心观察表明,该区构造裂缝主要为高角度或垂直裂缝,缝面平直,缝长一般为10~30 cm,部分可达30 cm甚至大于1 m,缝宽一般小于2 mm。在所统计的188条裂缝中,砂岩与粉砂岩中发育的裂缝分别约占70%和22%,而泥岩中仅占8%,且发育于砂岩的裂缝一般都终止于上下泥岩界面,表明裂缝的发育受岩性影响显著。裂缝可分为充填缝和未充填缝,由于喜马拉雅期形成的裂缝系

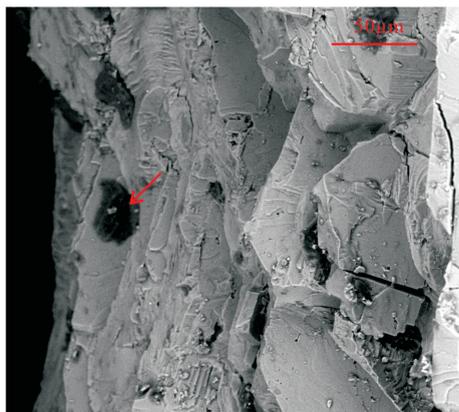
统大多未被充填^[8],因此被充填的裂缝可能主要是燕山期发育的。充填缝主要被方解石充填且有的方解石脉被原油浸染(图2(a),(b)),甚至在方解石脉体内可见到明显的含油现象(图2(c)),表明该区方解石脉的形成与油气运移关系密切。染色薄片观察表明,该区构造裂缝内充填的方解石主要为含铁或铁方解石(图2(d)),可能为成岩晚期的产物。



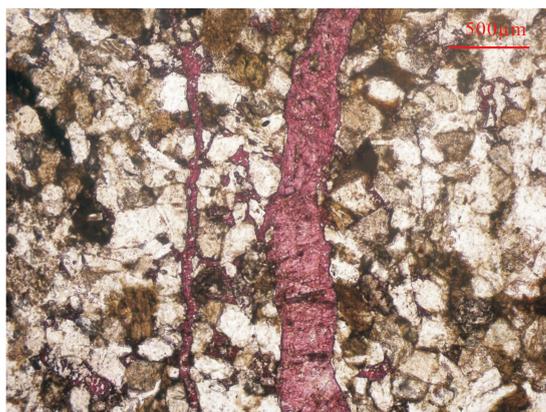
(a) 灰色细砂岩中方解石充填的垂直构造缝, X65井, 长7, 1.781 km



(b) 黑色泥岩中方解石充填(白色点状部分)的垂直构造缝,缝面被原油浸染, Ze33井, 长8, 2.257 km



(c) 灰色细砂岩中发育粗晶方解石脉,箭头指示脉体中含油(BSE,加速电压15 kV), B478井, 长6, 2.0158 km



(d) 深灰色细砂岩中垂直构造缝内充填铁方解石(铁方解石被铁氧化物与茜素红-S染色剂染成紫色), Ze340井, 长8, 2.379 km

图2 延长组构造裂缝方解石脉岩相学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of calcite veins in tectonic fractures of Yanchang formation

3 样品分析

在核工业北京地质研究院 JXA-8100 电子探针分析仪上对陇东地区延长组 7 件构造裂缝方解石脉样品进行元素组成定量分析,测试条件为加速电压 20 kV,束流 1×10^{-8} A。测试结果表明,陇东地区延长组构造裂缝内充填的方解石均为含铁或铁方解石,其 FeO 含量一般为 0.19% ~ 1.12%, MgO 含量一般为 0.10% ~ 0.35%, MnO 含量一般为 0.43% ~ 1.55%, Sr 含量最低, SrO 含量一般小于 0.14% (表 1)。

对陇东地区延长组 24 件构造裂缝方解石脉进行了碳、氧同位素组成分析,其中,砂岩方解石脉 20 件,暗色泥岩方解石脉 4 件。对收集的方解石脉先用二氯甲烷萃取掉原油,后用蒸馏水清洗,在 60 °C 的烘箱里烘干 4 h,并用玛瑙研钵研磨至小于 150 μm。将研磨后的样品用磷酸法制得二氧化碳气体,并在 MAT253EM 型稳定同位素质谱仪上测定方解石脉的碳、氧同位素组成。测试数据以 PDB(北美皮狄组美洲拟箭石的缩略语)标准的 δ 千分率偏差给出,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。结果表明,

陇东地区延长组砂、泥岩裂缝方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-6.6\text{‰} \sim 2.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 $-23.0\text{‰} \sim -14.9\text{‰}$ 。砂岩与泥岩中的方解石脉碳、氧同位素组成分布较一致,砂岩方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-6.6\text{‰} \sim$

1.1‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 $-23.0\text{‰} \sim -14.9\text{‰}$; 泥岩方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-2.4\text{‰} \sim 2.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 $-22.5\text{‰} \sim -16.3\text{‰}$ (表 2)。

表 1 延长组构造裂缝方解石脉的电子探针元素组成分析结果

Table 1 Analysis results of element components of tectonic fracture-filling calcite by EPMA in Yanchang formation

样号	层位	测点数/个	w (CaO)/%	w (FeO)/%	w (MgO)/%	w (MnO)/%	w (SrO)/%	w (Mn)/ 10^{-6}
B247-1	长 2	2	54.70	0.53	0.11	0.76	0.02	4803
B406-2	长 7	1	54.97	0.19	0.10	0.65	0.09	5035
B478-2	长 6	2	54.63	0.75	0.29	0.39	0.03	3060
L94-3	长 8	2	54.29	0.53	0.11	0.97	0.06	7552
X46-1	长 8	1	53.71	1.10	0.35	0.43	0.14	3331
Ze340-3	长 8	1	53.34	0.87	0.18	1.55	0.04	12006
Zh54-1	长 8	1	53.80	1.12	0.25	1.08	0.13	8366

表 2 延长组构造裂缝方解石脉的碳、氧同位素分析结果

Table 2 Analysis results of isotopic compositions of carbon and oxygen of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang formation

样号	层位	围岩岩性	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
B247-1	长 2	灰色细砂岩	-0.8	-15.0
B247-2	长 6	深灰色细砂岩	-0.7	-17.6
B406-1	长 3	灰色细砂岩	-2.0	-14.9
B478-1	长 6	灰色泥岩	-2.4	-17.4
B478-2	长 6	灰色细砂岩	0.7	-23.0
B478-3	长 7	灰色细砂岩	-2.0	-17.9
L82-1	长 7	灰黑色细砂岩	-3.5	-17.4
L94-1	长 6	黑灰色细砂岩	-0.5	-16.7
L94-2	长 7	灰色细砂岩	-0.5	-16.8
L94-3	长 8	灰色细砂岩	-3.6	-16.9
Y438-1	长 6	灰褐色粉砂岩	-1.7	-20.0
Y438-2	长 7	灰色泥岩	-2.0	-22.5
X44-1	长 7	灰色细砂岩	-0.7	-17.2
X44-2	长 8	灰色粉砂岩	-4.8	-18.0
X46-2	长 8	灰褐色细砂岩	-4.5	-17.8
X65-1	长 8	灰色细砂岩	-3.0	-17.0
Ze33-1	长 8	黑色泥岩	2.7	-16.3
Ze340-1	长 7	灰色细砂岩	-1.4	-16.6
Ze340-2	长 8	黑灰色粉砂岩	-2.4	-19.0
Ze359-1	长 7	灰色细砂岩	-0.6	-17.2
Zh114-1	长 7	深灰色泥岩	-0.8	-16.6
Zh114-2	长 8	浅灰色细砂岩	-3.8	-16.6
Zh12-1	长 8	灰色细砂岩	-6.6	-16.9
Zh49-1	长 7	灰褐色细砂岩	1.1	-16.1

4 方解石脉的成因与烃类流体活动

4.1 方解石脉的微量元素组成与成脉流体来源

陇东地区延长组方解石脉的 Sr 含量很低,因而主要对 Fe、Mg 和 Mn 的相对含量进行分析。该区方解石脉 Fe 元素相对含量在 20% ~ 60%, Mn 元素相对含量在 20% ~ 70%, 而 Mg 元素相对含量一般低

于 20%, 以相对富集 Fe 和 Mn 而贫 Mg 为特征(图 3)。研究表明,陇东地区延长组发育了大量晚期铁方解石胶结物,这些晚期铁方解石胶结物的形成与有机质脱羧作用有关,是指示研究区烃类流体在储层中发生显著运移的典型自生矿物^[3,13]。从延长组储层铁方解石胶结物与方解石脉微量元素的关系可知,该区裂缝方解石脉的 Fe、Mg 和 Mn 的含量与储层铁方解石胶结物的元素分布一致(图 3),表明两者很可能具有相近的成岩流体来源。因此,裂缝方解石脉相对富集 Fe、Mn 元素且其微量元素分布与晚期铁方解石胶结物相同表明,方解石脉的形成可能与烃类流体活动有关。

由于 Mn 在酸性、中性和基性火山岩中的含量分别为 $(600 \sim 800) \times 10^{-6}$ 、 $(1200 \sim 1500) \times 10^{-6}$ 和 $(1500 \sim 2500) \times 10^{-6}$ ^[14],而在大气水和海水中 Mn 的含量却极低,一般小于 0.1×10^{-6} ^[14-15],因此碳酸盐矿物中 Mn 的富集最有可能反映其与火山物质的关系,是典型的与火山物质相关的元素^[2]。本区裂缝方解石脉相对富集 Mn 元素,其含量一般为 $(3060 \sim 12006) \times 10^{-6}$,平均为 6181×10^{-6} (表 1),如此高的 Mn 含量表明成脉流体与火山物质可能存在一定关系。研究表明,鄂尔多斯盆地延长组长 7 段发育了多达数十层的薄层凝灰岩,且以西南部陇东地区最为发育^[16]。这些凝灰岩中含有大量的长石等易溶组分,且已不同程度地蚀变成伊蒙混层和伊利石等黏土矿物^[16]。因而可以推测,长 7 段主力烃源岩成熟演化过程中产生的酸性流体将首先与其内部凝灰岩等火山物质作用,造成凝灰岩溶蚀蚀变,并产生大量 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Mg^{2+} 等还原性金属离子,而富含金属离子的烃类流体进入砂岩或泥岩裂

缝后在合适的温压与酸碱度条件下沉淀形成铁方解石充填物,因此本区方解石脉中 Mn 的富集主要与长 7 段烃源岩生成的酸性烃类流体对其内部凝灰岩等火山物质的溶蚀有关。

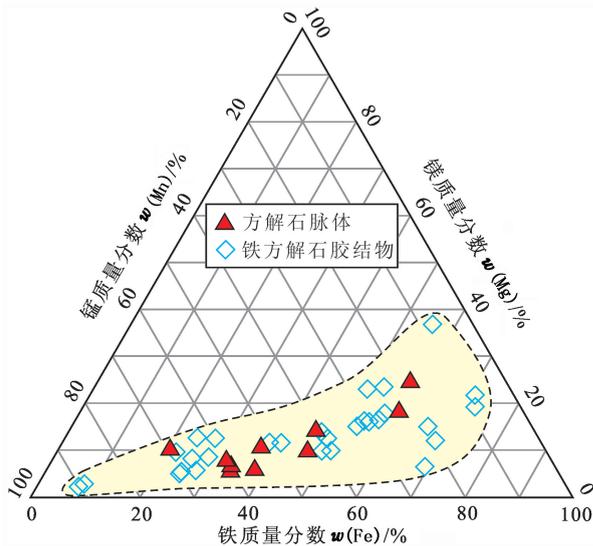


图 3 延长组铁方解石胶结物与构造裂缝方解石脉微量元素组成三角图

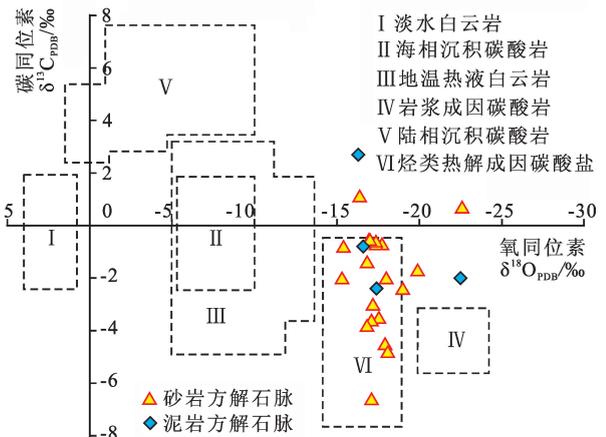
Fig. 3 Ternary plot illustrating the elemental composition of tectonic fracture-filling calcite and ferroan calcite cements in Yanchang formation

4.2 方解石脉的碳、氧同位素组成与成脉流体来源

从图 4 中可以看出,研究区方解石脉的碳、氧同位素组成明显不同于海相碳酸岩(图 4 中 II 区),也不同于与幔源 CO₂ 有关的岩浆成因碳酸岩(图 4 中 IV 区),表明方解石脉的形成与海水沉淀物以及与幔源 CO₂ 的关系不大。同时,与典型陆相沉积碳酸岩相比(图 4 中 V 区),两者无论是碳同位素组成还是氧同位素组成都具有很大的不同,说明其并非湖水沉积的产物。由于大气 CO₂ (δ¹³C 为 -7‰) 和土壤 CO₂ (δ¹³C 为 -25‰) 中十分富集¹²C,受大气水影响形成的方解石的碳同位素组成往往表现为高负值^[19],而这显然不符合本区方解石脉的碳同位素组成。因而,研究区方解石脉的形成与无机碳源关系不大,可能主要与有机碳源有关。王大锐等^[4]指出,高温变质水分解并携带的热解烃类物质进入裂缝中可形成与有机碳源有关的贫¹⁸O 的方解石沉淀(图 4 中 VI 区)。本区方解石脉的碳、氧同位素组成主要分布于这一区域,进一步说明其形成与烃源岩演化产生的有机碳源有关。

沉积岩中的有机质在演化过程中一般多会经历氧化作用(OX)、细菌硫酸盐还原作用(BSR)、甲烷生成作用(Me)和有机质脱羧作用(D)^[20-21]。在

BSR 带主要形成贫¹³C 和¹⁸O 较亏损的贫铁碳酸盐^[21](图 5 中 I 区,图版据王大锐^[22]);而 Me 带内形成的二氧化碳则相对富集¹³C,其碳同位素组成可



注:图中各区域的范围主要参考王大锐^[4]、Jrgen^[17]和董福湘^[18]的数据

图 4 延长组构造裂缝方解石脉的碳、氧同位素组成与相关数据比较

Fig. 4 Isotopic composition of carbon and oxygen of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang formation and its comparison with other datas

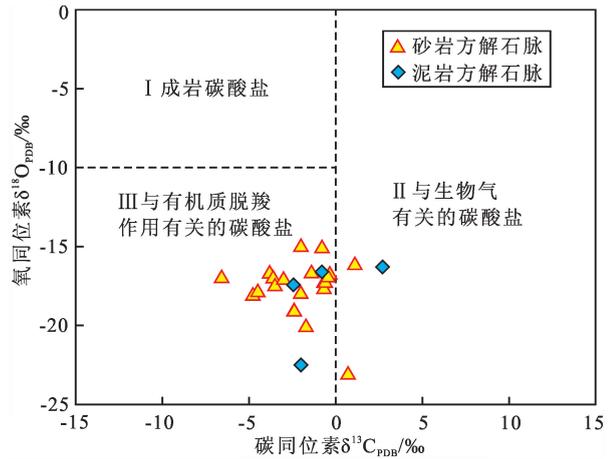


图 5 延长组构造裂缝方解石脉的碳、氧同位素组成分布

Fig. 5 Isotopic composition of tectonic fracture-filling calcite in Yanchang formation

高达 15‰^[21],该带内生成的碳酸盐相对富集¹³C 而氧同位素组成分布较宽(图 5 中 II 区);D 带在较高温度下有机质发生脱羧作用产生的二氧化碳碳同位素组成主要在 -10‰ ~ -20‰^[21-22],该带内生成的碳酸盐的碳同位素组成明显偏负而氧同位素组成也明显亏损(图 5 中 III 区)。本区砂岩和泥岩裂缝方解石脉的碳、氧同位素组成表明其形成主要与甲烷生成作用和有机质脱羧作用有关。因此,延长组构造

裂缝内方解石脉的形成与长7段主力烃源岩的成熟演化过程密切相关,其形成过程伴随着烃类流体的活动。

4.3 方解石脉的形成时间及其与烃类流体活动的关系

烃源岩在甲烷生成作用期间(温度低于75℃)可伴生相当数量的二氧化碳,而当温度处于80~120℃时,有机质脱羧作用可生成大量二氧化碳和有机酸,且在这一温度范围内有机质开始生油并在100~120℃时达到生油高峰^[23-24]。因此,有机质演化过程中二氧化碳的产生一般早于或同步于石油的生成,其提供的用于成岩胶结的碳源也早于或同步于石油的生成和运移^[24]。由于本区长7段烃源岩主要在早白垩世期间开始成熟并达到生油高峰^[25],因而大量的二氧化碳主要产生于早白垩世长7段烃源岩持续埋藏演化期间。前述方解石脉的微量元素和碳、氧同位素组成表明,本区方解石脉的形成主要与长7段烃源岩演化过程中的甲烷生成作用和有机质脱羧作用有关,即主要形成于早白垩世二氧化碳大量生成时期,因此被方解石充填的裂缝应主要为侏罗纪末期发育的构造裂缝。早白垩世末期以来发生的区域性构造抬升使得延长组烃源岩生烃终止,二氧化碳的产生也随之停止,因此导致喜山期发育的裂缝大多数未被充填^[8]。

综合分析认为,本区构造裂缝充填的方解石脉主要是在早白垩世期间烃类流体的活动参与下形成的,其形成稍早于或同步于烃类流体大规模活动。早白垩世期间长7段烃源岩成熟生烃,同时伴生大量二氧化碳和有机酸,所形成的酸性烃类流体首先对烃源岩层系内部火山物质溶蚀,有机酸在烃源岩内部被中和,使得油源流体富含大量以Mn为代表的金属离子。由于烃类流体的pH值受羧酸根阴离子缓冲并保持在约5.4,且持续较高的二氧化碳分压使得碳酸盐溶解度降低^[23],使进入泥岩或储层砂岩裂缝中的流体沉淀形成充填裂缝的方解石脉。因此,本区燕山晚期和喜马拉雅期发育的两期构造裂缝,尤其是侏罗纪末期发育的裂缝在早白垩世长7段主力烃源岩生排烃期间构成了烃类流体活动的重要通道,不仅能沟通烃源岩与致密砂岩储层,而且可提高低渗储层的渗流能力,对研究区烃源岩排烃及低渗透砂岩储层的油气运移具有重要的输导作用。

5 结论

(1) 陇东地区延长组构造裂缝内充填的方解石

为含铁或铁方解石,以相对富集Fe和Mn而贫Mg为特征,方解石脉中Mn元素的富集主要来自于酸性烃类流体对长7段烃源岩层系内部凝灰岩等火山物质的溶蚀。

(2) 陇东地区延长组构造裂缝充填方解石的形成受海相碳酸岩、幔源CO₂及大气CO₂的影响不大,而主要与长7段烃源岩演化过程中甲烷生成作用产生的相对富¹³C二氧化碳和有机质脱羧作用产生的贫¹³C二氧化碳有关。

(3) 陇东地区延长组构造裂缝方解石脉主要形成于早白垩世长7段烃源岩成熟演化期间,且稍早于或同步于烃类流体大规模活动,侏罗纪末期形成的裂缝构成了延长组烃类流体活动的重要通道,对研究区烃源岩排烃及低渗透砂岩储层的油气运移具有重要意义。

参考文献:

- [1] BOLES J R, EICHHUBL P, GARVEN G, et al. Evolution of a hydrocarbon migration pathway along basin-bounding faults: evidence from fault cement[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7): 947-970.
- [2] 曹剑, 胡文瑄, 姚素平, 等. 准噶尔盆地示踪石油运移的无机地球化学新指标研究[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(10): 1358-1369.
CAO Jian, HU Wen-xuan, YAO Su-ping, et al. Mn content of reservoir calcite cement: a novel inorganic geotracer of secondary petroleum migration in the tectonically complex Junggar Basin(NW China)[J]. Science in China (ser D: Earth Sciences), 2007, 50(12): 1796-1809.
- [3] 史基安, 王金鹏, 毛明陆, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长6—长8段储层砂岩成岩作用研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 373-380.
SHI Ji-an, WANG Jin-peng, MAO Ming-lu, et al. Reservoir sandstone diagenesis of member 6 to 8 in Yanchang formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 373-380.
- [4] 王大锐, 张映红. 渤海湾油气区火成岩外变质带储集层中碳酸盐胶结物成因研究及意义[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(2): 40-42.
WANG Da-rui, ZHANG Ying-hong. A study on the origin of the carbonate cements within reservoirs in the external metamorphic belt of the Bohai Bay oil-gas bearing region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(2): 40-42.
- [5] CAJA M A, PERMANYER A, MARFIL R, et al. Fluid flow record from fracture-fill calcite in the Eocene limestones from the South-Pyrenean Basin(NE Spain) and its

- relationship to oil shows[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, 89 (1/3): 27-32.
- [6] 徐田武, 曾溅辉, 张永旺, 等. 大巴山前陆构造带主断裂碳酸盐岩碳、氧同位素特征及其对流体的响应[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(2): 34-39. XU Tian-wu, ZENG Jian-hui, ZHANG Yong-wang, et al. Carbon and oxygen isotope features of carbonatite in the main fracture of Daba Mountains foreland structural belt and its fluid response[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33 (2): 34-39.
- [7] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(5): 1-5. ZHAO Wen-zhi, HU Su-yun, WANG Ze-cheng, et al. The role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(5): 1-5.
- [8] 邸领军, 张东阳, 王宏科. 鄂尔多斯盆地喜山期构造运动与油气成藏[J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 34-37. DI Ling-jun, ZHANG Dong-yang, WANG Hong-ke. Primary discussion on Himalayan tectonic movement and petroleum reservoir in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(2): 34-37.
- [9] 陈安清, 陈洪德, 徐胜林, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代物源体系及聚砂规律[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(6): 1-7. CHEN An-qing, CHEN Hong-de, XU Sheng-lin, et al. Provenance and sandy accumulation regularity of Neopalaeozoic in North Ordos Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35 (6): 1-7.
- [10] 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用: 强生排烃特征及机理分析[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(3): 289-293. ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, LI Jian-feng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation: hydrocarbon generation and expulsion mechanism [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(3): 289-293.
- [11] 张莉. 陕甘宁盆地储层裂缝特征及形成的构造应力场分析[J]. *地质科技情报*, 2003, 22(2): 21-24. ZHANG Li. Characteristics of reservoir fracture and the analysis of stress field in Shanxi-Gansu-Ningxia Basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2003, 22(2): 21-24.
- [12] 曾联波, 李忠兴, 史成恩, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组特低渗透砂岩储层裂缝特征及成因[J]. *地质学报*, 2007, 81(2): 174-180. ZENG Lian-bo, LI Zhong-xing, SHI Cheng-en, et al. Characteristics and origin of fractures in the extra low-permeability sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang formation in the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 174-180.
- [13] 王琪, 嵯喜准, 陈国俊, 等. 延长组砂岩中碳酸盐胶结物氧碳同位素组成特征[J]. *天然气工业*, 2007, 27(10): 28-32. WANG Qi, ZHUO Xi-zhun, CHEN Guo-jun, et al. Characteristics of carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate cements in Triassic Yanchang sandstone in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27 (10): 28-32.
- [14] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [15] TUCKER M E, WRIGHT V P, DICKSON J A D. Carbonate sedimentology [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [16] 邱欣卫. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层特征和形成环境[D]. 西安: 西北大学, 2008. QIU Xin-wei. Characteristics and forming environments of tuffs in Yanchang formation in Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [17] JØRGEN J. Carbon and oxygen isotopic studies of the chalk reservoir in the Skjold Oilfield, Danish North Sea: implications for diagenesis [J]. *Chemical Geology*, 1988, 73(2): 97-107.
- [18] 董福湘, 刘立, 马艳萍. 大港滩海地区沙一段下部砂岩储层中方解石胶结物碳、氧同位素研究[J]. *石油实验地质*, 2004, 26(6): 590-593. DONG Fu-xiang, LIU Li, MA Yan-ping. Carbon and oxygen isotopes of calcite cement in the lower part of the Sha-1 formation, the Dagang beach area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26(6): 590-593.
- [19] TRAVE A, CALVET F. Syn-rift geofluids in fractures related to the early-middle Miocene evolution of the Valles-Penedes half-graben (NE Spain) [J]. *Tectonophysics*, 2001, 336: 101-120.