

doi:10.3799/dqkx.2012.S1.016

塔里木盆地哈拉哈塘凹陷奥陶系成藏流体演化

肖 晖^{1,2}, 赵靖舟^{1,2}, 杨海军³, 蔡振忠³, 朱永峰³, 高莲花³, 张 妮^{1,2}

1. 西安石油大学油气资源学院, 陕西西安 710065

2. 西安石油大学油气资源学院油气成藏地质学重点实验室, 陕西西安 710065

3. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000

摘要: 应用烃类包裹体偏光—荧光镜下特征、盐水包裹体均一温度及油包裹体红外光谱特征, 研究塔里木盆地哈拉哈塘凹陷奥陶系油藏成藏流体特征及演化历史。实验结果表明: 油藏主要经历2期成藏, 早、晚两期包裹体均一温度峰值分别在为72.5~78.5℃和92.1~99.7℃; 油包裹体红外光谱实验再次表明, 油包裹体内普遍含有水; 还发现原生包裹体水/油相比值较大(4.6~2.1), 烃类成熟度参数较低(CH_2/CH_3 比值为7.3~4.5); 次生包裹体水/油比值较小(1.1~0.4), 烃类成熟度较高(CH_2/CH_3 比值为2.9~1.9); 原生包裹体普遍含有硫醇类化合物, 而次生包裹体几乎不含有。对比奥陶系原油地球化学特征发现, 含硫醇类化合物为油藏早海西期生物降解作用形成, 海西晚期较高成熟度原油的大量充注, 使硫醇类化合物含量不断降低, 同时部分硫醇类化合物开始发生裂解生成少量 H_2S 。

关键词: 包裹体; 红外光谱; 成藏流体; 哈拉哈塘凹陷; 地球化学; 油气。

中图分类号: TE122

文章编号: 1000—2383(2012)S1—0163—11

收稿日期: 2011—11—08

Fluid Inclusion and Micro-FTIR Evidence for Hydrocarbon Charging Fluid Evolution of the Ordovician Reservoir of Halahatang Depression, the Tarim Basin

XIAO Hui^{1,2}, ZHAO Jing-zhou^{1,2}, YANG Hai-jun³, CAI Zhen-zhong³, ZHU Yong-feng³, GAO Lian-hua³, ZHANG Ni^{1,2}

1. School of Petroleum Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

2. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation, School of Petroleum Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

3. Petrochina Tarim Oilfield Company, Kuerle 841000, China

Abstract: The evolution of the hydrocarbon charging fluids of the Ordovician reservoir, Halahatang depression and the Tarim basin, was studied by the evidence of inclusion petrography, transmitted light-incident fluorescence, homogenization temperature and Micro-FTIR of the petroleum inclusions. The experiments data show that: firstly, two hydrocarbon charging stages were determined, the peak homogenization temperature of associated saline inclusions were 72.5—78.5℃ and 92.1—99.7℃ respectively; secondly, the Micro-FTIR data confirm that there generally exist H_2O in the petroleum inclusion; furthermore, the ratio of $\text{H}_2\text{O}/(\text{CH}_2 + \text{CH}_3)$ in the primary hydrocarbon inclusions is larger (4.6—2.1) than the ratio (1.1—0.4) in the secondary hydrocarbon inclusions, and the maturity of the primary hydrocarbon inclusions (CH_2/CH_3 ratio is 7.3—4.5) is lower than the maturity of the secondary hydrocarbon inclusions (CH_2/CH_3 ratio is 2.9—1.9); lastly, sulf-alcohols compounds generally exist in the primary hydrocarbon inclusions, but do not exist in the secondary hydrocarbon inclusions. Compared with geochemistry data of the Ordovician hydrocarbon, sulf-alcohols compounds were the product of the early reservoir biodegradation having occurred in early-Hercynian, and in the late-Hercynian, the higher maturity hydrocarbon largely generated charges and mixes with the early hydrocarbon, which causes the content of the sulf-alcohols decreased. At the same time, part of the sulf-alcohols cracks to generate H_2S .

Key words: inclusion; Micro-FTIR; charging fluid; Halahatang depression; geochemistry; hydrocarbon.

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41102082, 41002052); 国家科技重大专项项目(No. 2008ZX05005-004-08HZ); 陕西省科技厅研究发展计划项目(No. 2012JQ5011).

作者简介: 肖晖(1980—), 讲师, 主要从事盆地构造热演化史及油气成藏地质学研究. E-mail: xiaohui_4787@163.com

0 引言

油气藏充注期次和成藏流体演化是油气勘探以及油气藏形成及分布研究中的一个重大石油地质学问题. 不同的成藏期认识往往产生不同的勘探思路, (赵靖舟和李启明, 2002; 李明诚, 2008), 而不同期次成藏流体性质差异, 对搞清原生与次生油藏特征及其关系尤为重要. 油包裹体广泛存在于含油气盆地各类岩石中, 是烃类流体作为地层水中不混溶物被成岩矿物保留下来的原始样品, 能够提供油气生成、运移与聚集事件的演化信息和参数(Munz, 2001; 陈红汉等, 2003; 丰勇等, 2009), 在油气勘探与开发中得到越来越多的应用. 近年来, 油包裹体类型判别和单个油包裹体成分分析是研究的热点内容之一(Eadington *et al.*, 1991; 卢焕章等, 2004, 刘德汉等, 2007), 国内外文献中主要方法包括荧光光谱(Stasiuk and Snowdon, 1997; 陈银节等, 2005; Chang and Huang, 2008; 赵艳军和陈红汉, 2008; 李纯泉等, 2010)、低温激光拉曼光谱(Burke, 2001; 张鼎等, 2007; 张敏等, 2007; 陈勇和 Ernst, 2009)、傅里叶红外光谱(Pironon *et al.*, 1991; 余孝颖和施继锡, 1996; 孙青等, 1998; 李荣西等, 1998; 邹育良等, 2005)、古压力热力学模拟(Montel, 1993; Ap-
lin *et al.*, 1999; Thierry *et al.*, 2000)等. 只有对不同类型、不同期次油包裹体进行准确的期次划分, 才

能获取不同时代油气生成、运移和成藏等地质过程与演化信息, 为油气勘探和开发提供依据.

塔里木盆地哈拉哈塘凹陷位于塔北隆起中部, 东、西两侧分别为轮南低凸起和英买力低凸起正向二级构造单元, 北接轮台低凸起, 南邻满西斜坡带(图 1). 以往研究认为哈拉哈塘凹陷为塔北隆起有利生油凹陷(贾承造, 1999), 长期向继承性发育的邻近古隆起供烃. 目前已发现东侧的塔河油田、东南侧的哈德逊油田、北侧的牙哈油田、西北侧的东河塘油田以及西侧的英买力油田(崔海峰等, 2010). 2006 年中石油针对奥陶系“丘状”礁滩体上钻探 H6 风险探井, 在奥陶系见油气显示 2 层(16 m), 同时中石化在邻区钻探的 AD4 井在奥陶系一间房组获得高产油流, 展示了哈拉哈塘地区良好的勘探前景(张朝军等, 2010). 截止 2009 年底, 中石油后续钻探的 10 口探井, 其中 9 口井在奥陶系一间房组至鹰山组一段获得高产工业油气流. 因此, 塔里木盆地哈拉哈塘凹陷将是现在及今后海相碳酸盐岩油气勘探的重点地区, 与油气相关的各项研究亟待进一步深化. 本文从微观成藏流体入手, 借助流体包裹体荧光特征观察与鉴定、均一温度测试、烃类包裹体显微傅里叶红外光谱(Micro-FTIR)分析等手段, 研究油藏成藏期次和成藏流体演化, 并与现今宏观油地球化学特征相结合, 探讨奥陶系油藏成藏过程.

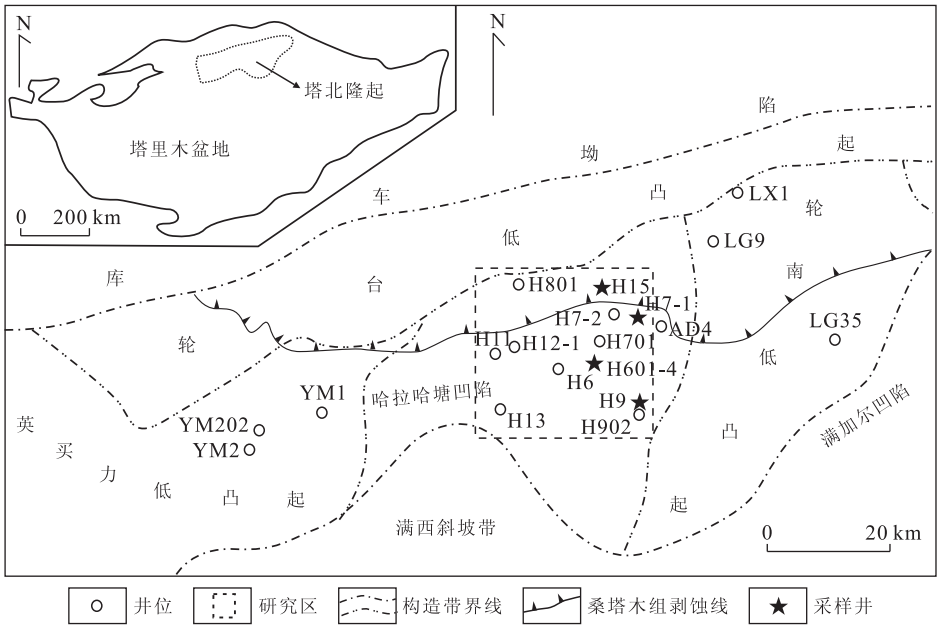


图 1 哈拉哈塘凹陷区域构造位置及采样井位分布
Fig. 1 Structural location of Halahatang depression and the distribution of sample tested wells

1 研究区地质背景

1.1 构造发育历史

哈拉哈塘凹陷沉积地层保存完整,古生界仅缺失上志留统和下泥盆统,中生界地层均有分布。上奥陶统桑塔木组(O_3s)及其以上地层整体表现为凹陷沉积,下古生界构造形态的形成主要经历了以下阶段:(1)加里东中期古斜坡形成阶段。塔里木盆地在近南北挤压环境下,塔北隆起开始掀斜抬升,哈拉哈塘地区位于塔北隆起区南部斜坡。(2)加里东晚期—海西早期鼻状构造发育阶段。早志留世沉积末,轮台古隆起相对抬升,整个塔北地区表现为以轮台古隆起为区域高背景的斜坡区(何登发等,2007;张光亚等,2007),哈拉哈塘地区中奥陶统一间房组(O_2yj)顶面构造继承加里东中期北高、南低构造特征,但开始呈现略向西南倾的鼻状构造。(3)海西晚期—印支期鼻状构造定型阶段。塔北隆起由于北西—南东向挤压运动,在斜坡背景上形成北东—南西走向的轮南大型背斜(安海亭等,2009)。哈拉哈塘地区位于该背斜的西斜坡,局部构造活动使研究区 O_2yj 顶面形成近东西向展布的鼻状隆起构造,该鼻状构造为轮南大型背斜构造的向西延伸,同为轮南低凸起的组成部分(赵孟军等,2007),至此哈拉哈塘古生界构造格局形成。

1.2 奥陶系储层发育特征

哈拉哈塘凹陷奥陶系储层主要分布在 O_2yj 和鹰山组(O_{1y})上部。 O_2yj 岩性主要以灰色、褐灰色亮晶砂屑灰岩、鲕粒灰岩为主,夹泥晶灰岩,沉积环境以开阔海台地台内浅滩为主; O_{1y} 岩性以褐灰色砂屑灰岩、褐灰色泥晶灰岩为主,沉积环境以开阔台地台内洼地为主,局部发育台内滩砂屑灰岩。本区储层段岩心资料和地震资料表明,奥陶系碳酸盐岩储层段溶蚀孔洞发育,并为后期断层所连通,属于内幕岩溶型裂缝—孔洞体系(刘玉魁等,2005;倪新锋等,2010)。岩溶作用受加里东期构造抬升和层间不整合面控制(顾家裕,1999;何发歧,2002),在加里东晚期—印支期断层改造作用下(刘春燕等,2006),最终形成复杂的溶蚀缝洞体系。

2 样品特征及实验方法

流体包裹体样品取自井 H15、H7-1、H601-4 和 H9 共 4 口钻井的奥陶系油藏一间房组含油岩心,

岩性主要为含方解石脉的泥晶灰岩。受油藏厚度和取心段位置的控制,采样点集中在一间房组储层内,样品间隔厚度小于 70 m。每 1 个样品均磨制了 2 套双面抛光薄片,薄片厚度为 0.1~0.5 mm,用无荧光的 502 胶粘贴,一套用于包裹体岩相学分析与烃类包裹体荧光观察和显微红外光谱测定,另一套用于显微成分测试与均一温度、盐度测定。包裹体均一温度测试在 Leica DM2500P 搭配 LINKAM THMS600 型冷热台上进行,均一法测温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。包裹体显微红外成分测试在北京核工业地质分析测试研究中心完成,使用 Nicolet 公司 670 型 NEXUS Micro-FTIR 光谱仪进行分析。扫描范围 $650\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,扫描次数 128 次,分辨率 8 cm^{-1} 。为了消除测试过程中矿物基质对油包裹体的干扰,本次测试过程中采用了“差谱法”扣除宿主矿物的影响(孙青等,1998)。方解石矿物的红外吸收峰主要在 $3\,000\sim 2\,800\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,600\sim 2\,500\text{ cm}^{-1}$ 之间,每次测试之间,先在无吸收的 $4\,000\sim 2\,500\text{ cm}^{-1}$ 进行分析,然后对所测试的包裹体红外光谱进行差值校准,确保测出成分的可靠性。

3 实验结果

3.1 油包裹体荧光特征及均一温度测定

哈拉哈塘凹陷及邻区奥陶系储层成岩序列主要为早期重结晶方解石→碳酸盐溶蚀作用→硅胶结作用→方解石充填构造裂缝(倪新锋等,2010)。按照流体包裹体类型鉴定和划分方法(刘德汉,1995;刘德汉等,2008),研究区含油储层主要发育 4 类烃类包裹体:液烃包裹体、气液烃包裹体、气烃包裹体和沥青包裹体(图 2)。根据烃类包裹体赋存宿主矿物、产状、荧光特征及均一温度,进一步将其划分为早、晚 2 期(表 1)。

第 1 期烃类包裹体主要发育在孔洞充填方解石胶结物内,成带状分布,以褐色、浅褐色油包裹体为主(图 2a, 2i)。个体较大,一般 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$,紫外荧光激发下呈现浅黄、黄绿及黄白色(图 2b, 2e, 2j)。晶间微裂隙中发育大量油质沥青和沥青包裹体,荧光下沥青显示深褐色(图 2b, 2j),为早期烃类流体运移、聚集过程中发生了色层效应与生物降解作用的产物。第 2 期烃类包裹体主要见于裂缝充填方解石脉中,成线状大规模分布,仍以油包裹体为主,其次为气液烃包裹体(图 2f),个别井中见到气烃包裹体(图 2h)。个体大小一般在 $6\sim 15\text{ }\mu\text{m}$,荧光下主要显

实验结果表明,出现明显谱峰共有 3 处,分别是 $3\ 500 \sim 3\ 200\ \text{cm}^{-1}$ 、 $3\ 000 \sim 2\ 800\ \text{cm}^{-1}$ 和 $2\ 532\ \text{cm}^{-1}$, 代表性谱图见图 4。根据理论上不同官能在红外谱图中的位置,它们分别对应于 H_2O 的吸收峰,甲基($-\text{CH}_3$)和亚甲基($-\text{CH}_2$)的伸缩振动吸收峰和含硫醇化合物中 S-H 基团(Vry *et al.* ,

表1 哈拉哈塘凹陷奥陶系储层烃类包裹体类型划分及特征

Table 1 Classification and characteristics of hydrocarbon inclusions in the Ordovician reservoir in the Halahatang depression

井号	井段(m)	宿主矿物	烃类包裹体		同期盐水包裹体			期次
			类型	荧光颜色	冰点温度 (℃)	均一温度 (℃)	气/液	
H601-4	6 649~6 652.5	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	浅黄、黄绿色	-3.4	73.5	10	第1期
H601-4	6 649~6 652.5	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	浅黄、黄绿色	-2.8	67.3	15	第1期
H601-4	6 649~6 652.5	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	浅黄、黄绿色	-3.8	76.6	10	第1期
H601-4	6 649~6 652.5	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	浅黄、黄绿色	-4.2	75.5	10	第1期
H601-4	6 649~6 652.5	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	浅黄、黄绿色	-3.7	78.7	10	第1期
H601-4	6 649~6 652.5	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	浅黄、黄绿色	-5.1	80.3	5	第1期
H601-4	6 649~6 652.5	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	浅黄、黄绿色	-4.8	82.5	5	第1期
H601-4	6 649~6 652.5	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	蓝绿色	-2.0	88.5	10	第2期
H601-4	6 649~6 652.5	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	蓝绿色	-3.1	88.5	15	第2期
H601-4	6 649~6 652.5	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	蓝绿色	-3.5	97.3	15	第2期
H601-4	6 649~6 652.5	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	蓝绿色	-2.8	98.5	15	第2期
H601-4	6 649~6 652.5	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	蓝绿色	-4.5	102.6	10	第2期
H601-4	6 649~6 652.5	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	蓝绿色	-5.6	112.3	10	第2期
H601-4	6 649~6 652.5	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	蓝绿色	-5.2	118.6	10	第2期
H9	6 615~6 619.0	孔洞充填方解石	原生,OL	浅黄色	-3.5	66.2	5	第1期
H9	6 615~6 619.0	孔洞充填方解石	原生,OL	浅黄色	-3.8	64.5	5	第1期
H9	6 615~6 619.0	孔洞充填方解石	原生,OL	浅黄色	-3.0	78.8	10	第1期
H9	6 615~6 619.0	孔洞充填方解石	原生,OL	浅黄色	-4.6	79.5	10	第1期
H9	6 615~6 619.0	孔洞充填方解石	原生,OL	浅黄色	-2.8	78.5	10	第1期
H9	6 615~6 619.0	孔洞充填方解石	原生,OL	浅黄色	-5.2	92.1	10	第1期
H9	6 615~6 619.0	方解石脉	次生,LGL 为主,GL 其次	蓝绿色	-2.8	82.5	15	第2期
H9	6 615~6 619.0	方解石脉	次生,LGL 为主,GL 其次	蓝绿色	-3.6	86.7	15	第2期
H9	6 615~6 619.0	方解石脉	次生,LGL 为主,GL 其次	蓝绿色	-3.1	95.8	10	第2期
H9	6 615~6 619.0	方解石脉	次生,LGL 为主,GL 其次	蓝绿色	-4.5	98.5	15	第2期
H9	6 615~6 619.0	方解石脉	次生,LGL 为主,GL 其次	蓝绿色	-3.5	99.5	15	第2期
H9	6 615~6 619.0	方解石脉	次生,LGL 为主,GL 其次	蓝绿色	-5.2	106.8	15	第2期
H15	6 585~6 592.0	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	黄色	-3.6	65.6	10	第1期
H15	6 585~6 592.0	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	黄色	-3.6	65.6	10	第1期
H15	6 585~6 592.0	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	黄色	-2.1	72.5	10	第1期
H15	6 585~6 592.0	孔洞充填方解石	原生,OL,BL 为主	黄色	-2.7	75.8	10	第1期
H7-2	6 587~6 595.0	孔洞充填方解石	原生,OL	黄白色	-2.8	76.2	15	第1期
H7-2	6 587~6 595.0	孔洞充填方解石	原生,OL	黄白色	-3.6	78.4	15	第1期
H7-2	6 587~6 595.0	孔洞充填方解石	原生,OL	黄白色	-1.9	81.5	10	第1期
H7-2	6 587~6 595.0	孔洞充填方解石	原生,OL	黄白色	-4.0	81.5	10	第1期
H7-2	6 587~6 595.0	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	浅蓝白色	-4.3	82.4	10	第2期
H7-2	6 587~6 595.0	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	浅蓝白色	-4.5	88.6	10	第2期
H7-2	6 587~6 595.0	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	浅蓝白色	-4.0	92.4	15	第2期
H7-2	6 587~6 595.0	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	浅蓝白色	-4.0	92.4	15	第2期
H7-2	6 587~6 595.0	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	浅蓝白色	-5.3	99.7	15	第2期
H7-2	6 587~6 595.0	方解石脉	次生,OL 为主,LGL 其次	浅蓝白色	-5.6	99.7	15	第2期

1987; Pironon, 1990; 孙青等, 1998; 李荣西等, 1998; 邹育良等, 2005; 欧光习等, 2006).

红外光谱 H₂O 和有机官能团羟基(—OH)谱图特征不同,前者表现为 3 700~3 200 cm⁻¹之间的宽谱带(孙青等, 1998),后者仅在 3 700 cm⁻¹附件出现狭窄峰型(Bellamy, 1968). 而且—OH 基团只在有机质成熟度为未成熟—成熟阶段才较为明显,即到成熟—高成熟阶段,—OH 峰基本低于红外光谱检测限,无法识别出来(Durand and Espitalie, 1976). 塔北哈拉哈塘地区奥陶系原油成熟度在中等成熟阶段(卢玉红等, 2007),因此认为本次实验在 3 700~3 200 cm⁻¹出现的宽谱带是水分子吸收峰,几乎没有来自有机质官能团—OH 的贡献.

进一步对油包裹体中 H₂O 与有机质官能团 CH₂、CH₃ 以及 S-H 特征进行 4 个方面分析:(1)包裹体中是否存在水;(2)水/油相对含量(H₂O/(CH₂/CH₃))变化情况;(3)油中 CH₂/CH₃ 变化情况(该参数是反映油包裹体成熟度的良好指标(Kister *et al.*, 1990));(4)油包裹体中是否存在硫醇化合物中的 S-H. 此外,还对与油包裹体共生的盐水包

表 2 石油包裹体红外光谱参数及计算值

Table 2 Micor-infrared spectra of the petroleum inclusions and its parameters calculating

井号	样品号	层位	包裹体类型	石油包裹体特征			
				$H_2O/(CH_2+CH_3)$	CH_2/CH_3	X_{inc}, X_{std}	$Th(^{\circ}C)$
H601-4	H601-4-1	O_2y_j	原生	4.6	7.251	71.235, 25.374	63.7
H601-4	H601-4-2	O_2y_j	原生	2.6	6.209	61.587, 22.219	76.6
H601-4	H601-4-1	O_2y_j	次生	1.1	2.051	13.9, 7.967	95.8
H601-4	H601-4-2	O_2y_j	次生	0.6	2.316	16.844, 8.948	99.5
H601-4	H601-4-4	O_2y_j	次生	0.4	2.872	23.024, 11.359	106.8
H15	H15-1	O_2y_j	原生	2.8	4.532	41.236, 18.389	65.6
H15	H15-2	O_2y_j	原生	3.6	4.732	43.527, 20.105	75.8
H7-2	H7-2-1	O_2y_j	原生	2.1	6.186	62.278, 21.493	76.2
H7-2	H7-2-1	O_2y_j	次生	0.9	1.882	12.022, 7.341	92.4

注: X_{inc} 为烷烃链碳原子数; X_{std} 为烷烃直链碳原子数.

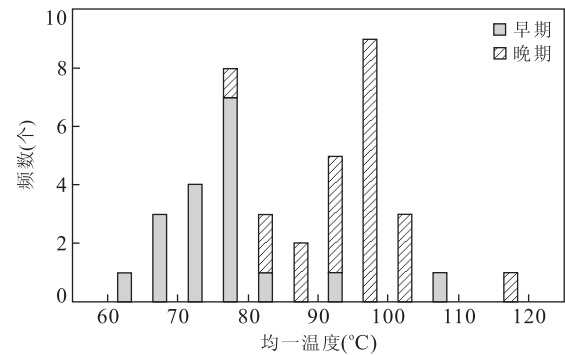


图 3 哈拉哈塘凹陷奥陶系储层盐水包裹体均一温度

Fig. 3 Homogenization temperature of fluid saline inclusions in the Ordovician reservoir, Halahatang depression, the Tarim basin

裹体进行了均一温度 (Th) 测定. 分析结果见表 2, 图 4.

第一, 油包裹体普遍检测出水峰, 而且 $H_2O/(CH_2+CH_3)$ 比值存在明显差异, 根据数据的分布, 可以划分为 2 个区间. 方解石胶结物中的原生包裹体比值在 4.6~2.1 之间, 反映水相对于油占优势; 方解石脉中次生包裹体比值在 1.1~0.4 之间, 代表包裹体中水占劣势, 或含微量水. 原生和次生包裹体之间的水/油相对含量变化较大, 反映油水分布不均一, 组成上差异显著, 油气运移、充注过程中成分流体差异较大.

第二, CH_2/CH_3 相对比值分布在 7.251~1.882 之间, 反映油气成熟度差异较大. 其中, 原生包裹体 CH_2/CH_3 相对比值为 7.251~4.532, 应用 X 系数法 (Pironon *et al.*, 2001; Pironon, 2004) 计算的烷烃链碳原子数 (X_{inc}) 和烷烃直链碳原子数 (X_{std}) 分别约为 71~41 和 25~18; 次生包裹体相对比值在 2.872~1.882 之间, X_{inc} 和 X_{std} 碳原子数分别约为 23~12 和 11~7. 总体上, 随着 CH_2/CH_3 相

对比值的增高, 有机质烃类基团碳原子数降低, 反映原生包裹体成熟度较低, 次生包裹体成熟度较高.

第三, 3 口井 9 块样品的测试结果显示, 原生包裹体内烃类物质全部检测出了硫醇化化合物的 S-H 基团, 而次生包裹体除在 H7-2 井 (位置见图 1) 中的 1 个样品中发现有 S-H 基团外, 几乎都不含有硫醇化化合物的 S-H 基团. 结合流体包裹体 Th 数据, 说明原生、次生包裹体烃类流体的成分发生了明显的改变.

对比分析发现, CH_2/CH_3 和 Th 之间表现出了一定的相关性, 即均一温度较低 (63.7~76.2 $^{\circ}C$) 成藏期的包裹体, 对应油包裹体的 CH_2/CH_3 值大于 4.5, 而均一温度较高的包裹体较前者的 CH_2/CH_3 值均小于 2.9. 但是 Th 、 CH_2/CH_3 参数和 $H_2O/(CH_2/CH_3)$ 之间并未表现出明显的相关性. 综合 CH_2/CH_3 参数、 Th 和 $H_2O/(CH_2/CH_3)$ 之间关系可以看出, CH_2/CH_3 参数小于 2.9 和大于 4.5 代表了不同成藏期的油气充注, 但不同成藏期内红外吸收峰中水/油相对含量与 Th 之间无明显的正相关关系.

以表 2 和图 4 为代表, 原生和次生包裹体分别赋存在方解石胶结物和方解石脉中. 它们的 $H_2O/(CH_2/CH_3)$ 、 CH_2/CH_3 和 Th 数据总体上反映, 在原生包裹体同一成藏温度区间 (63.7~76.6 $^{\circ}C$) 油气成熟度指标 CH_2/CH_3 值 (4.5~7.3) 变化较大, 水/油比值 (2.1~4.6) 变化也较大; 次生包裹体对应同一成藏温度 (92.4~106.8 $^{\circ}C$), CH_2/CH_3 值 (1.9~2.8) 变化较小, 水/油比值 (0.4~1.1) 变化也较小.

综合以上分析, 塔北哈拉哈塘地区奥陶系储层油包裹体红外光谱测试结果表明, 原生包裹体普遍含水, 水/油比较高、烃类成熟度较低, 但水/油比、成熟度参数相对含量变化较大, 烃类物质中普遍含有 S-H 基团; 次生包裹体含水相对较少, 成熟度相对较高, 水/油比、成熟度参数相对含量变化较小, 很少或

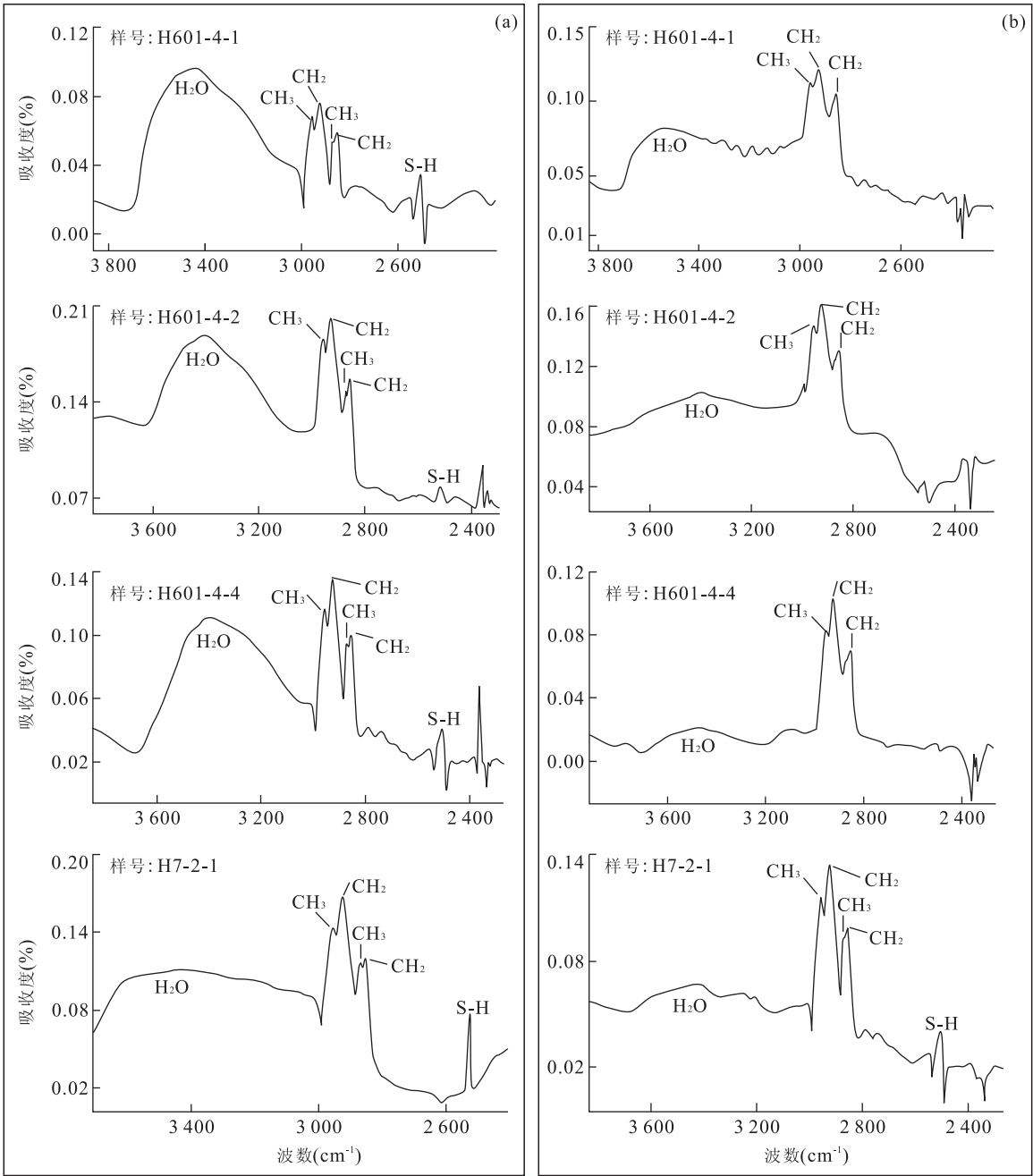


图4 油包裹体显微一红外光谱特征

Fig. 4 Micro-infrared spectrum characteristics of hydrocarbon inclusions

a. 原生油包裹体红外光谱;b. 次生油包裹体红外光谱

基本不含 S-H 基团。

4 讨论

4.1 油包裹体含水的意义

由于在显微镜下较容易观察到与油包裹体共生的水溶液包裹体(图 2),加之在人工合成矿物中,油相包裹体中含有水,所以一般认为油气包裹体的形

成离不开水。曹剑等(2006)也通过红外光谱方法鉴定出了油气包裹体内含有不同比例的水。通过本次实验,不但证实了油包裹体中普遍含水,而且发现原生包裹体水/油相对比值普遍大于次生包裹体。

在早期油气充注阶段,矿物表面由于亲水性而优先与水结合;此外,由于烃类物质中的极性基团与水混溶使其有限溶于水中,因而在地层温度、压力条件下油气包裹体形成时常常有水伴生。此时水会以

“水膜”的形式存在与油和矿物表面之间(Pironon, 1990),被油相掩盖,故在显微镜下通常不易被观察发现(少数情况下可以见到大量油水两相包裹体,一般与非均匀捕获有关).并且由于成藏早期,生烃量小,油藏含水饱和度高,烃类极性物质与水接触面积大,混溶充分,因而水/油相对比值较大.

晚期随着较高成熟度油气的充注,油藏含油饱和度不断增加,矿物表面极性也逐渐向亲油性转变,残余在孔隙末端的地层水与晚期烃类中的极性物质混合,形成次生石油包裹体.此时由于油、水接触面减少,烃类物质浓度远高于地层水,因而水/油相比值降低.

4.2 成藏流体演化

哈拉哈塘凹陷奥陶系原油地球化学特征为:(1)原油密度在 $0.81 \sim 0.94 \text{ g/cm}^3$,略高于正常原油,油气地球化学证据表明原油主要是在海相烃源岩生油窗演化阶段生成的烃类,后期没有受到明显的高成熟度油气注入的影响和次生改造(卢玉红等, 2007);(2)原油饱和烃气相色谱特征表现为色谱基线鼓包明显,表明奥陶系原油普遍遭受生物降解(廖泽文等, 2010);(3)本次研究收集的原油 PVT 资料表明, H601-4、H7-2、H15 井油藏天然气 H_2S 含量在 0.014% 左右,组分含量小于 1% .

结合前述成藏流体地球化学特征表明,原生包裹体所含烃类代表了早期较低成熟度原油充注,成藏温度主要为 $63.5 \sim 76.6^\circ\text{C}$.根据塔北地区海相烃源岩生烃热演化历史研究表明(Zhang and Huang, 2005),加里东晚期—早海西期寒武系烃源岩首次生烃,海西早期发生的区域构造运动致使轮南、塔河地区构造抬升(何登发等, 2007;张光亚等, 2007),位于塔河西侧的哈拉哈塘地区志留系遭受部分剥蚀,奥陶系油藏普遍发生生物降解作用,在喜氧菌作用下碳酸盐岩储层石膏与烃类作用形成含硫醇类化合物.海西晚期,轮南、塔河地区持续抬升作用,形成轮南大型背斜,塔北地区寒武系烃源岩生成高成熟度油气,中上奥陶统烃源岩也开始生烃.此时哈拉哈塘地区持续沉降,在 $92.4 \sim 106.8^\circ\text{C}$ 成藏温度下,高成熟度烃类不断充注、混合,致使饱和烃气相色谱正构烷烃分布较为完整,轻质组分丰度大于重组分(卢玉红等, 2007).同时,在此温度条件下,含硫醇类化合物开始裂解生成 H_2S (朱光有等, 2004),但随着含硫醇类丰度的不断减少,低于红外光谱检测下限,致使次生包裹体中的含硫醇类红外光谱峰不明显.

5 结论

(1)塔北哈拉哈塘地区奥陶系油藏主要发生两期成藏过程:包裹体均一温度记录早期均一温度峰值在 $72.5 \sim 78.5^\circ\text{C}$,晚期均一温度峰值在 $92.1 \sim 99.7^\circ\text{C}$.

(2)本次油包裹体红外光谱实验再次表明,油包裹体的形成普遍离不开水的参与.另外,本次实验还发现:原生包裹体所记录的早期成藏阶段,烃类极性物质与水接触面积大,混溶充分,油藏含水饱和度高,水/油相比值较大;次生包裹体反映晚期成藏阶段,油藏含油饱和度不断增加,烃类物质浓度远高于地层水,因而水/油相比值降低.

(3)原生包裹体红外光谱所记录的含硫醇类化合物为油藏早海西期生物降解作用形成,海西晚期较高成熟度原油的大量充注、与早期低成熟度原油混合,致使硫醇类化合物含量不断降低,低于红外光谱检测下限.同时,部分硫醇类化合物开始发生裂解生成少量 H_2S .

致谢:承蒙审稿专家对文本提出的诸多有益建议,谨致谢忱.塔里木油田公司勘探开发研究院杨海军院长、蔡振忠总地质师以及碳酸盐研究中心张丽娟主任、朱永峰、郑多明、卢玉红等在研究过程中给予了指导和建议,在此深表感谢.同时感谢北京核工业地质分析测试研究中心欧光习研究员、张剑锋博士在样品测试过程中给予的帮助.

References

- An, H. T., Li, H. Y., Wang, J. Z., et al., 2009. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 142—147 (in Chinese with English abstract).
- Aplin, A. C., Macleod, G., Larter, S. R., et al., 1999. Combined use of confocal laser microscopy and PVT simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions. *Marine and Petroleum Geology*, 16(2): 97—110. doi: 10.1016/S0264-8172(98)00079-8
- Bellamy, L. J., 1968. Advances in infrared group frequencies. Chapman and Hall, London.
- Burke, E. A. J., 2001. Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*, 55(1—4): 139—158. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00043-8
- Cao, J., Yao, S. P., Hu, W. X., et al., 2006. Detection of water in petroleum inclusions and its implications. *Chinese*

- Science Bulletin*, 51(12):1583—1588 (in Chinese with English abstract).
- Chang, Y. J., Huang, W. L., 2008. Simulation of the fluorescence evolution of “live” oils from kerogens in a diamond anvil cell; application to inclusion oils in terms of maturity and source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(15):3771—3787. doi:10.1016/j.gca.2008.05.041
- Chen, H. H., Li, C. Q., Zhang, X. M., et al., 2003. Using fluid inclusion to determine hydrocarbon migration and accumulation events and times in Tahe oilfield. *Earth Science Frontiers*, 10(1):190 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Miao, J. J., Zhang, Z. Y., 2005. Three-dimensional fluorescence spectrum and its implication for hydrocarbon. *Natural Gas Geoscience*, 16(1):69—72 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y., Burke, E. A. J., 2009. Laser raman microspectroscopy of fluid inclusions: theory, method, problems and future trends. *Geological Review*, 55(6):851—861 (in Chinese with English abstract).
- Cui, H. F., Zheng, D. M., Li, D. Z., 2010. Reservoir characteristics and exploration trend for carbonate inner reservoir in Yingmali area. *Oil Geophysical Prospecting*, 45(Suppl. 1):196—201 (in Chinese with English abstract).
- Durand, B., Espitalie, J., 1976. Geochemical studies on the organic matter from the Douala basin (Cameroon)—II. evolution of kerogen. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40:801—808. doi:10.1016/0016-7037(76)90032-6
- Eadington, P. J., Hamilton, P. J., Bai, G. P., 1991. Fluid history analysis—a new concept for prospect evaluation. *Australian Petroleum Exploration Association Journal*, 31(1):282—294.
- Feng, Y., Chen, H. H., Ye, J. R., et al., 2009. Reservoir forming periods and accumulation process of Chaluhe fault depression of Yitong basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3):502—510 (in Chinese with English abstract).
- Gu, J. Y., 1999. Characteristics and evolutionary model of karst reservoirs of Lower Ordovician carbonate rocks in Lunnan area of Tarim basin. *Journal of Palaeogeography*, 1(1):54—60 (in Chinese with English abstract).
- He, D. F., Zhou, X. Y., Zhao, C. J., 2007. The Ordovician prototype basin types and its evolution of the Tarim basin. *Chinese Science Bulletin*, 52(Suppl.):126—135 (in Chinese).
- He, F. Q., 2002. Karst weathering crust oil-gas field on carbonate unconformity: an example from the Tahe oilfield in the Ordovician reservoir in the Tarim basin. *Geological Review*, 48(4):391—397 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., 1999. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(3):177—183 (in Chinese with English abstract).
- Kister, J., Guiliano, M., Largeau, C., et al., 1990. Characterization of chemical structure, degree of maturation and oil potential of Torbanites (type I kerogens) by quantitative FT-ir spectroscopy. *Fuel*, 69(11):1356—1361. doi:10.1016/0016-2361(90)90115-7
- Li, C. Q., Chen, H. H., Liu, H. M., 2010. Identification of hydrocarbon charging events by using micro-beam fluorescence spectra of petroleum inclusions. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4):657—662 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., 2008. Re-understanding of some problems about petroleum migration and accumulation. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(2):133—137 (in Chinese with English abstract).
- Li, R. X., Jin, K. L., Liao, Y. S., 1998. Analysis of organic inclusions using Micro-FT, IR and fluorescence microscopy and its significance. *Geochimica*, 27(3):244—250 (in Chinese with English abstract).
- Liao, Z. W., Zhang, L. H., Yang, C. P., 2010. Geochemical characteristics of heavy oils from the east and west sides of Halahatang depression, Tarim basin, China: exemplified by oils of LG7 and DH1-6-9. *Geochemica*, 39(2):149—153 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Y., Wu, M. B., Gong, G., 2006. Caledonian karstification of Ordovician carbonates in the Tahe oilfield, northern Tarim basin, Northwest China, and its petroleum geological significance. *Geological Bulletin of China*, 25(9):1128—1134 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. H., 1995. Fluid inclusion studies—an effective means for basin fluid investigation. *Earth Science Frontiers*, 2(3—4):149—154 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. H., Lu, H. Z., Xiao X. M., 2007. Hydrocarbon inclusions and its application on the petroleum exploration and development. Guangdong Technology Press, Guangzhou:147—149 (in Chinese).
- Liu, D. H., Xiao, X. M., Tian, H., et al., 2008. Fluid inclusion types and their geological significance in petroliferous basins. *Oil & Gas Geology*, 29(4):491—501 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. K., Zheng, D. M., Wang, J. N., et al., 2005. The Ordovician carbonic reservoir characteristics and mineralization in Yingmaili low heave of Tarim basin. *Natural Gas Geoscience*, 16(5):587—591 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., Fan, H. R., Ni, P., et al., 2004. Fluid inclusion. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Lu, Y. H., Xiao, Z. Y., Gu, Q. Y., et al., 2007. Geochemical characteristics and accumulation of marine oil and gas

- around Halahatang depression, Tarim basin, China. *Science in China (Ser. D)*, 51 (Suppl. 1): 195—206 (in Chinese with English abstract).
- Montel, F., 1993. Phase equilibria needs for petroleum exploration and production industry. *Fluid Phase Equilibria*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 84: 343—367.
- Munz, I. A., 2001. Petroleum inclusion in sedimentary basins: systematics, analytical methods and applications. *Lithos*, 55(1—4): 195—212. doi: 10. 1016/S0024—4937(00)00045—1
- Ni, X. F., Zhang, L. J., Shen, A. J., et al., 2010. Diagenesis and pore evolution of the Ordovician karst reservoir in Yingmaili-Hanilcatam region of Tarim basin. *Journal of Palaeogeography*, 4(8): 467—479 (in Chinese with English abstract).
- Ou, G. X., Li, L. Q., Sun, Y. M., 2006. Theory and application of the fluid inclusion research on the sedimentary basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 25 (1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Pironon, J., 1990. Synthesis of hydrocarbon fluid inclusions at low temperature. *Am. Miner.*, 75(1—2): 226—229.
- Pironon, J., 2004. Fluid inclusions in petroleum environments; analytical procedure for PTX reconstruction. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1333—1342.
- Pironon, J., Sawatzki, J., Dubessy, J., 1991. Nir FT-Raman microspectroscopy of fluid inclusion: comparisons with VIS Raman and FT-IR microspectroscopies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 3885—3891. doi. org/10. 1016/0016—7037(91)90083—H
- Pironon, J., Thiery, R., Ayt Ougoudal, M., et al., 2001. FT-IR measurements of petroleum fluid inclusions; methane, *n*-alkanes and carbon dioxide quantitative analysis. *Geofluids*, 1(1): 2—10. doi: 10. 1046/j. 1468—8123. 2001. 11002. x
- Stasiuk, L. D., Snowdon, L. R., 1997. Fluorescence microspectrometry of synthetic and natural hydrocarbon fluid inclusions; crude oil chemistry, density and application to petroleum migration. *Applied Geochemistry*, 12(3): 229—241. doi: 10. 1016/S0883—2927(96)00047—9
- Sun, Q., Weng, S. F., Zhang, X., 1998. μ FTIR microanalysis limits of hydrocarbon fluid inclusions; matrix minerals absorption. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(3): 248—252 (in Chinese with English abstract).
- Thiery, R., Pironon, J., Walgenwitz, F., et al., 2000. PIT (petroleum inclusion thermodynamic): a new modeling tool for the characterization of hydrocarbon fluid inclusions from volumetric and microthermometric measurements. *Journal of Geochemical Exploration*, 69—70: 701—704. doi: 10. 1016/S0375—6742(00)00085—6
- Van den Kerkhof, A. M., Hein, U. F., 2001. Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55(1—4): 27—47. doi: 10. 1016/S0024—4937(00)00037—2
- Vry, J., Brown, P. E., Beauchaine, J., 1987. Application of micro-FTIR spectroscopy to the study of fluid inclusions. *EOS*, 44: 1538.
- Yu, X. Y., Shi, J. X., 1996. Infrared, ultraviolet and fluorescence analyses and their application in the study of organic inclusions. *Acta Mineralogica Sinica*, 16(2): 212—217 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. J., Jia, C. Z., Li, B. L., et al., 2010. Ancient karsts and hydrocarbon accumulation in the middle and western parts of the North Tarim uplift, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(3): 263—269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D., Tian, Z. J., Leng, Y. Y., 2007. Hydrocarbon and laser Raman microspectroscopy characteristics of hydrocarbon inclusion. *Science in China (Ser. D)*, 37(7): 900—907 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. Y., Zhao, W. Z., Wang, H. J., 2007. Multicycle tectonic evolution and composite petroleum systems in the Tarim basin. *Oil & Gas Geology*, 28(5): 653—662 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M., Zhang, J. F., Li, L. Q., et al., 2007. The application of laser Raman microprobe to the study of fluid inclusion. *World Nuclear Geoscience*, 24(4): 238—244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Huang, H. P., 2005. Geochemistry of Palaeozoic marine petroleum from the Tarim basin, NW China: part 1. oil family classification. *Org. Geochem.*, 36(8): 1204—1214. doi: 10. 1016/j. orggeochem. 2005. 01. 013
- Zhao, J. Z., Li, Q. M., 2002. Accumulation stages and accumulation process of marine hydrocarbon pools in the cratonic areas of Tarim basin. *Chinese Science Bulletin*, 47(Suppl.): 116—121 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. J., Pan, W. Q., Han, J. F., et al., 2007. Accumulation process and model of the Ordovician buried hill oil reservoir in the western Lunnan area, the Tarim basin. *Chinese Science Bulletin*, 52(Suppl. 1): 174—184 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., J., Chen, H. H., 2008. The relationship between fluorescence colors of oil inclusions and their maturities. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(1): 33—35 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Dai, J. X., Zhang, S. C., et al., 2004. Generation mechanism and distribution characteristics of hydrogen

sulfide bearing gas in China. *Natural Gas Geoscience*, 15 (2): 166—170 (in Chinese with English abstract).

Zou, Y. L., Yu, X., Li, S. H., et al., 2005. Study on hydrocarbon reservoir formation period using microscope-infrared spectroscopy method. *Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing*, 24(3): 33—35 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

安海亭, 李海银, 王建忠, 等, 2009. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制. *大地构造与成矿学*, 33(1): 142—147.

曹剑, 姚素平, 胡文瑄, 等, 2006. 油气包裹体中水的检出及其意义. *科学通报*, 51(12): 1583—1588.

陈红汉, 李纯泉, 张希明, 等, 2003. 运用流体包裹体确定塔河油田油气成藏期次及主成藏期. *地质前缘*, 10(1): 190.

陈银节, 缪九军, 张宗元, 2005. 三维荧光光谱的油气指示意义. *天然气地球科学*, 16(1): 69—72.

陈勇, Burke, E. A. J., 2009. 流体包裹体激光拉曼光谱分析原理、方法、存在的问题及未来研究方向. *地质评论*, 55(6): 851—861.

崔海峰, 郑多明, 李得滋, 2010. 英买力地区碳酸盐岩内幕油气藏特征及勘探方向. *石油地球物理勘探*, 45(增刊1): 196—201.

丰勇, 陈红汉, 叶加仁, 等, 2009. 伊通盆地岔路河断陷油气成藏过程. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 502—510.

顾家裕, 1999. 塔里木盆地轮南地区下奥陶统碳酸盐岩岩溶储层特征及形成模式. *古地理学报*, 1(1): 54—60.

何登发, 周新源, 张朝军, 2007. 塔里木地区奥陶纪原型盆地类型及其演化. *科学通报*, 52(增刊): 126—135.

何发歧, 2002. 碳酸盐岩地层中不整合—岩溶风化壳油气田——以塔里木盆地塔河油田为例. *地质论评*, 48(4): 391—397.

贾承造, 1999. 塔里木盆地构造特征及油气聚集规律. *新疆石油地质*, 20(3): 177—183.

李纯泉, 陈红汉, 刘惠民, 2010. 利用流体包裹体微束荧光光谱辨识油气充注期次. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(4): 657—662.

李明诚, 2008. 对油气运聚若干问题的再认识. *新疆石油地质*, 29(2): 133—137.

李荣西, 金奎励, 廖永胜, 1998. 有机包裹体显微傅里叶红外光谱和荧光光谱测定及其意义. *地球化学*, 27(3): 244—250.

廖泽文, 张绿惠, 杨楚鹏, 2010. 塔里木盆地哈拉哈塘凹陷东西两侧海相稠油地球化学特征: 以 LG7 井和 DH1-6-9 井稠油为例. *地球化学*, 39(2): 149—153.

刘春燕, 吴茂炳, 巩固, 2006. 塔里木盆地北部塔河油田奥陶

系加里东期岩溶作用及其油气地质意义. *地质通报*, 25(9): 1128—1134.

刘德汉, 1995. 包裹体研究——盆地流体追踪的有力工具. *地质前缘*, 2(3—4): 149—154.

刘德汉, 卢焕章, 肖贤明, 2007. 油气包裹体及其在石油勘探开发中的应用. 广州: 广东科技出版社, 147—149.

刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等, 2008. 含油气盆地中流体包裹体类型及其地质意义. *石油与天然气地质*, 29(4): 491—501.

刘玉魁, 郑多明, 王建宁, 等, 2005. 塔里木盆地英买力低凸起奥陶系碳酸盐岩储层特征及其成岩作用. *天然气地球科学*, 16(5): 587—591.

卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等, 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社.

卢玉红, 肖中尧, 顾乔元, 等, 2007. 塔里木盆地环哈拉哈塘海相油气地球化学特征与成藏. *中国科学(D辑)*, 37(增刊II): 167—176.

倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等, 2010. 塔里木盆地英买力—哈拉哈塘地区奥陶系岩溶储集层成岩作用及孔隙演化. *古地理学报*, 4(8): 467—479.

欧光习, 李林强, 孙玉梅, 2006. 沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践. *矿物岩石地球化学通报*, 25(1): 1—11.

孙青, 翁诗甫, 张煦, 1998. 傅立叶变换红外光谱分析矿物有机包裹体的限制. *地球科学——中国地质大学学报*, 23(3): 248—252.

余孝颖, 施继锡, 1996. 红外、紫外及荧光分析在有机包裹体研究中的应用. *矿物学报*, 16(2): 212—217.

张朝军, 贾承造, 李本亮, 等, 2010. 塔北隆起中西部地区古岩溶与油气聚集. *石油勘探与开发*, 37(3): 263—269.

张光亚, 赵文智, 王红军, 2007. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统. *石油与天然气地质*, 28(5): 653—662.

张敏, 张建锋, 李林强, 等, 2007. 激光拉曼探针在流体包裹体研究中的应用. *世界核地质科学*, 24(4): 238—244.

张鼎, 田作基, 冷莹莹, 2007. 烃和烃类包裹体的拉曼特征. *中国科学(D辑)*, 37(7): 900—907.

赵靖舟, 李启明, 2002. 塔里木盆地克拉通区海相油气成藏期与成藏史. *科学通报*, 47(增刊): 116—121.

赵孟军, 潘文庆, 韩剑发, 等, 2007. 塔里木盆地轮西地区奥陶系潜山油藏成藏过程及聚集模式. *科学通报*, 52(增I): 174—184.

赵艳军, 陈红汉, 2008. 油包裹体荧光颜色及其成熟度关系. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(1): 91—96.

朱光有, 戴金星, 张水昌, 等, 2004. 含硫化氢天然气的形成机制及分布规律研究. *天然气地球科学*, 15(2): 166—170.

邹育良, 俞萱, 李松花, 等, 2005. 利用显微—红外光谱法研究油气成藏期次. *大庆石油地质与开发*, 24(3): 33—35.