

塔里木盆地顺北地区克拉通内走滑断裂带中-下奥陶统 储集体方解石脉形成及其与油气充注耦合关系

刘建章^{1,2}, 蔡忠贤^{1,2}, 滕长宇^{1,2}, 张恒^{1,2}, 陈诚^{1,2}

[1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074]

摘要:塔里木盆地顺北油气田为克拉通内走滑断裂多期活动控制下形成的碳酸盐岩超深层油气田,不同断裂带及同一走滑断裂带不同分段的油气性质和油气丰度等均存在显著差异。基于岩心和岩石薄片观察以及阴极发光、微区原位微量元素-稀土元素、流体包裹体的系统分析,对塔里木盆地顺北1号和顺北5号走滑断裂带中-下奥陶统储集体中的裂缝脉体序次、成脉流体来源及其与油气充注耦合关系进行研究,并结合走滑断裂演化过程和油气分布特征,探讨了顺北地区油气差异聚集的控制因素。结果表明:顺北1号和顺北5号走滑断裂带中-下奥陶统至少发育4期方解石脉体(Cal-1, Cal-2, Cal-3, Cal-4)。Cal-1成脉流体主要为海源性流体, Cal-2, Cal-3和Cal-4成脉流体来源于同地层成岩流体。Cal-2, Cal-3和Cal-4脉体的形成分别与加里东晚期—海西早期、海西晚期—印支期、燕山期—喜马拉雅期构造活动和油气充注相伴生。不同断裂带油气充注过程存在差异,顺北5号断裂带主充注期为海西晚期—印支期,顺北1号断裂带主充注期为海西晚期—印支期及燕山期—喜马拉雅期。走滑断裂构造样式及演化历史控制下的油气差异充注过程是顺北地区油气差异聚集的关键。

关键词:方解石脉;走滑断裂带;油气差异聚集;油气充注;超深层;碳酸盐岩油气田;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Coupling relationship between formation of calcite veins and hydrocarbon charging in Middle-Lower Ordovician reservoirs in strike-slip fault zones within craton in Shunbei area, Tarim Basin

LIU Jianzhang^{1,2}, CAI Zhongxian^{1,2}, TENG Changyu^{1,2}, ZHANG Heng^{1,2}, CHEN Chen^{1,2}

[1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. School of Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China]

Abstract: Shunbei oil/gas field is of the ultra-deep carbonate type controlled by multi-stage strike-slip faulting within the craton. The significant differences on the oil/gas property and abundance are shown in different fault zones even different segments in a fault zone. An integration of the core and thin section observation, cathodoluminescence, in-situ trace and rare earth element (REE) analysis, systematic analysis of fluid inclusions, is applied to study the sequence of fracture vein formation, sources of vein-forming fluids and their coupling relationships with hydrocarbon charging in the Middle-Lower Ordovician reservoir of the No. 1 and 5 strike-slip fault zones in Shunbei area. We also investigate the factors controlling differential hydrocarbon accumulation in Shunbei area while understanding the evolution of strike-slip faults and the hydrocarbon accumulation pattern. The results show that there are at least four phases of calcite vein development, that is, Cal-1, Cal-2, Cal-3, and Cal-4, respectively, in the Middle-Lower Ordovician reservoir of the No. 1 and 5 strike-slip fault zones in Shunbei area. The vein-forming fluids of Cal-1 are mainly sea-sourced fluids, while that of Cal-2, Cal-3 and Cal-4 are derived from diagenetic fluids in the reservoir where the veins occur. The formation of Cal-2, Cal-3 and Cal-4 calcite veins is associated with tectonic activities and hydrocarbon charging in the

收稿日期:2022-06-06;修订日期:2022-10-18。

第一作者简介:刘建章(1976—),男,博士、副教授,石油地质综合研究。E-mail:liujzh@126.com。

通讯作者简介:蔡忠贤(1963—),男,博士、教授,碳酸盐岩储层研究。E-mail:zxcai@cug.edu.cn。

基金项目:中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA14010302);国家自然科学基金项目(42072179)。

Late Caledonian to Early Hercynian, the Late Hercynian to Indosinian, and the Yanshan-Himalayan, respectively. The strike-slip fault zones are different in hydrocarbon charging, as shown by that the main charging phase of the No. 5 fault zone was during the Late Hercynian to Indosinian, while the main charging period of No. 1 fault zone was during the Late Hercynian to Indosinian, and Yanshan-Himalayan. The differential hydrocarbon charging controlled by strike-slip fault structural style and evolution history is the key to differential hydrocarbon accumulation in Shunbei area.

Key words: calcite vein, strike-slip fault zone, differential hydrocarbon accumulation, hydrocarbon charging, ultra-deep stratum, carbonate oil/gas field, Shunbei area, Tarim Basin

引用格式:刘建章,蔡忠贤,滕长宇,等. 塔里木盆地顺北地区克拉通内走滑断裂带中-下奥陶统储集体方解石脉形成及其与油气充注耦合关系[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 125-137. DOI: 10. 11743/ogg20230110.

LIU Jianzhang, CAI Zhongxian, TENG Changyu, et al. Coupling relationship between formation of calcite veins and hydrocarbon charging in Middle-Lower Ordovician reservoirs in strike-slip fault zones within craton in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 125-137. DOI: 10. 11743/ogg20230110.

塔里木盆地、四川盆地等含油气盆地的深层(埋深 4 500 ~ 6 000 m)–超深层(埋深 > 6 000 m)海相碳酸盐岩蕴藏着丰富的油气资源,是实现中国油气资源战略接替的现实领域^[1-3]。然而,与中–浅层相比,深层–超深层海相碳酸盐岩层系地质时代老、埋藏深,油气成藏要素经历了长期复杂演化和多期构造活动叠加下的调整与改造过程,油气藏类型多样,油气聚集机理、分布规律及主控因素十分复杂,对传统油气成藏机理的经典理论和勘探认识提出了新的挑战^[4]。

近年来,塔里木盆地台盆区顺托果勒低隆起超深层海相碳酸盐岩层系发现了以轻质油–凝析油气藏为主的超十亿吨级的顺北油气田^[3, 5-6],不同于以塔河、塔中等为代表的整合岩溶缝洞型碳酸盐岩油气田^[7-8]和以普光、安岳等为代表的礁/滩型碳酸盐岩油气田^[9-11],顺北油气田主要为克拉通内走滑断裂控制下形成的超深层断控缝洞型油气田,走滑断裂具有明显的“控储、控藏、控富”特征^[6, 12-13]。尽管对顺北地区走滑断裂构造特征、形成演化、成因机制及其控储、控藏、控富机制进行了大量研究并取得了丰硕的成果^[5, 13-19],但因顺北地区超深层碳酸盐岩油气藏受克拉通板内中、小尺度走滑断裂体系控制并经历了多期复杂的构造运动,油气成藏过程与分布规律极其复杂,对走滑断裂演化控制下油气差异聚集过程的研究仍较为薄弱,油气主成藏期次的认识存在以下争议:①加里东晚期–海西早期^[20-21];②海西晚期–印支期^[17];③加里东晚期–海西早期、海西晚期–印支期、燕山期–喜馬拉雅期 3 期成藏^[3, 14, 16, 22]。

含油气盆地沉积岩石中断裂与裂缝是流体活动的重要通道,断裂与裂缝中充填的不同期次和不同类型的矿物脉体是地质历史时期构造活动下流体和岩石相互作用的直接产物^[23-25],记录了断裂带中流体活动的

丰富地质和地球化学信息^[26-27],是研究沉积盆地构造活动和流体演化历史的重要媒介。通过对裂缝脉体开展岩石薄片观察、阴极发光、微区原位微量元素–稀土元素及流体包裹体测温、测盐等方面的分析测试,可以厘定裂缝脉体类型、期次及形成序次关系,判识成脉古流体性质、来源、形成环境及其演化过程^[28]。本文拟在对塔里木盆地顺北地区勘探开发程度较高的顺北 1 号、顺北 5 号走滑断裂带奥陶系鹰山组–一间房组碳酸盐岩储集体岩心观察的基础上,通过对裂缝脉体类型与形成序次、成脉流体性质及油气充注过程的分析,探讨顺北地区走滑断裂带古流体演化过程与油气充注历史的耦合关系,为顺托果勒低隆起走滑断裂油气差异聚集机理的研究提供参考。

1 区域地质概况

顺北油气田主体位于塔里木盆地腹部顺托果勒低隆起,北邻沙雅隆起,南接卡塔克隆起,东西向位于阿瓦提坳陷与满加尔坳陷之间^[3](图 1)。顺托果勒低隆起经历了加里东早期弱伸展背景下的稳定构造沉降、加里东中晚期–海西早期区域挤压背景下的低隆起形成、海西晚期–印支期的调整改造^[29-32]和燕山期–喜馬拉雅期的断裂活化及定型阶段^[19],形成现今构造样式。与各期构造活动相对应,顺托果勒低隆起发育多期走滑断裂,不同走滑断裂甚至同一断裂不同分段的发育特征均存在巨大差异^[13, 18]。

与沙雅隆起和卡塔克隆起相比,顺托果勒低隆起地层发育较齐全,各年代地层仅部分组、段不同程度缺失(图 1b)。下寒武统玉尔吐斯组斜坡相泥页岩为优质烃源岩层,中–下奥陶统鹰山组–一间房组碳酸盐岩与上覆桑塔木组厚层泥岩盖层形成了良好的储–盖组

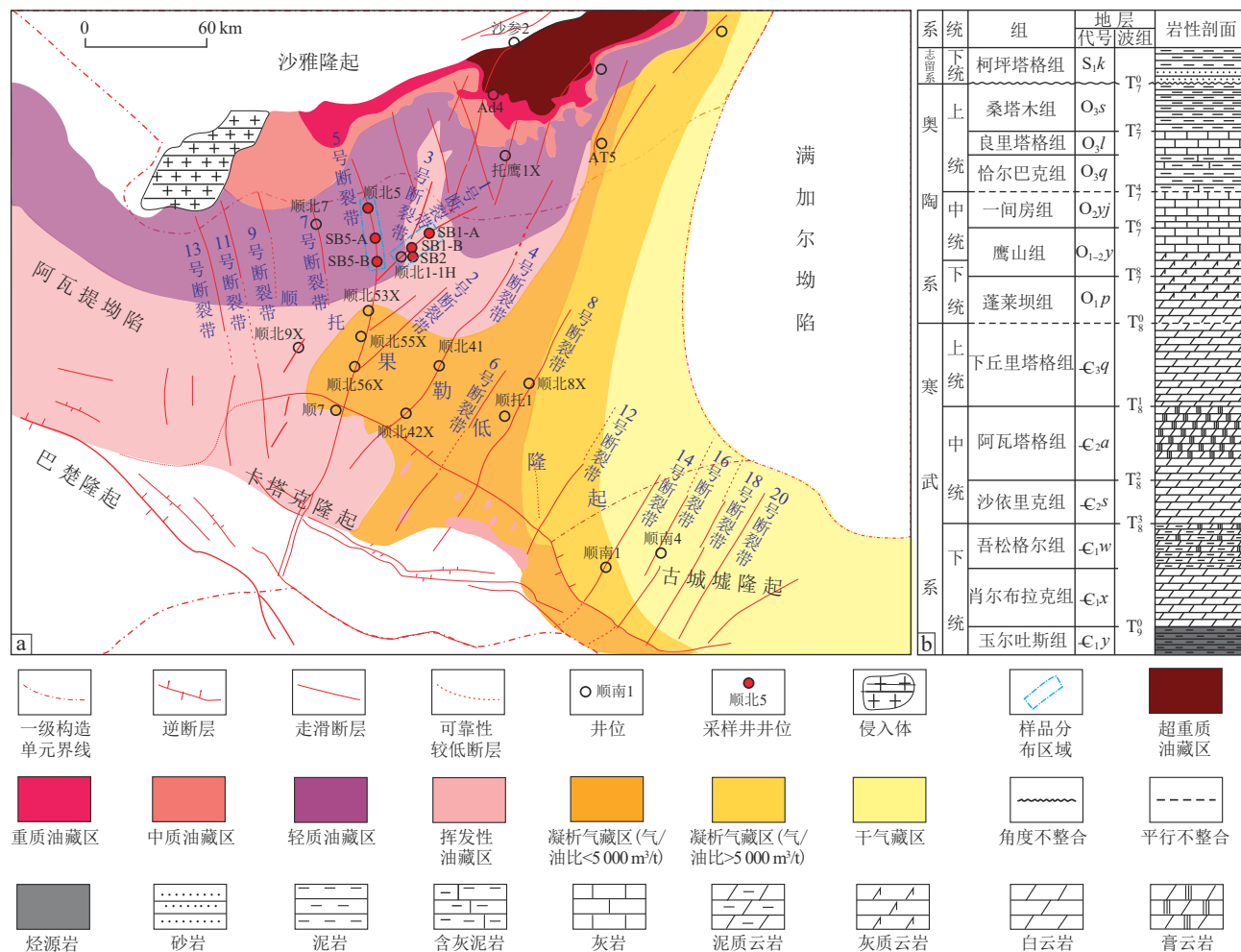


图 1 塔里木盆地顺北地区断裂、油气类型平面分布(a)和地层综合柱状图(b)(据文献[3, 13]修改)
Fig. 1 Map of fault zones and hydrocarbon types (a), and composite stratigraphic column (b) of Shunbei area, Tarim Basin
(modified from references [3] and [13])

合,是目前顺北地区油气勘探评价的主要目标^[12-14,16]。中-下奥陶统鹰山组—一间房组碳酸盐岩储集体岩石类型主要为致密泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、砂屑泥晶灰岩等,储集空间主要为走滑断裂多期活动形成的断控洞穴、构造裂缝带及破碎带^[6,33]。横穿断裂带的侧钻井和水平井多遇放空、钻井液漏失现象^[16],而距离断裂带较远的钻井鲜有放空、漏失现象^[5,34]。顺北油气田不同断裂带甚至同一断裂的不同分段,油气相态、油气柱高度、油气藏规模和钻井产能也具有显著差异^[3,13]。断裂带总体具有“西油东气、北油南气”的特征^[5,13-14](图1a)。

2 裂缝脉体期次及成脉流体来源

顺北地区可大致以顺北5号断裂带为界,划分为两个延伸方向的走滑断裂体系,在平面上分区明显。顺

北5号及其以西的断裂体系主要沿NNW向展布,顺北1号及其以东的断裂体系主要走向为NE-NNE(图1)。顺北5号以东的顺北1号、顺北2号断裂收敛于顺北5号断裂带,走向大致为NE45°,被认为是顺北5号断裂的分支断裂体系^[3,18]。

2.1 不同期次脉体岩石学及阴极发光特征

对顺北5号断裂带中-北段、顺北1号断裂带多口井岩心观察表明,顺北地区中-下奥陶统鹰山组—一间房组储集体以构造破裂成因的高角度裂缝为主,见伴生的网状水平裂缝,被多期方解石半充填或者全充填,并可见少量沥青充填。对顺北1号断裂带、顺北5号断裂带中-北段奥陶系碳酸盐岩储集体中的裂缝脉体进行岩石薄片观察与阴极发光测试,结果表明,顺北5号断裂带中-北段碳酸盐岩储集体中至少发育4期方解石脉体(图2),而顺北1号断裂带碳酸盐岩储集体中除

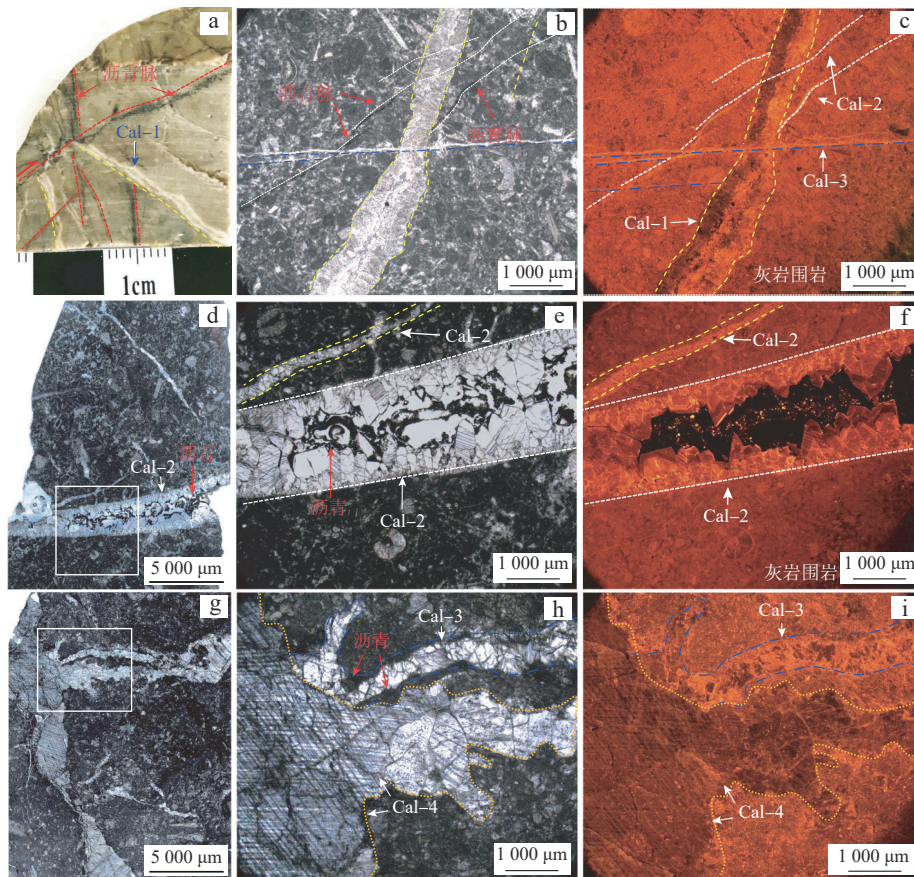


图2 顺北地区顺北5号断裂带中-下奥陶统储集体中脉体岩石学及阴极发光特征照片

Fig. 2 Micrographs of petrography and cathodoluminescence (CL) of calcite veins in the Middle-Lower Ordovician reservoirs of the No. 5 fault zone in Shunbei area

a. B5-A井,埋深7 373.09 m,一间房组,岩心照片,网络状沥青脉切穿Cal-1方解石脉;b. 为图2a岩石透射光薄片照片,Cal-1,Cal-2和Cal-3为穿插接触关系,Cal-2伴生沥青细脉并切穿Cal-1,Cal-3切穿Cal-1和Cal-2;c. 为图2b对应的阴极发光照片,Cal-1不发光,Cal-2和Cal-3发橘红色光;d. SB5-A井,埋深7 475.00 m,一间房组,岩石薄片全扫描照片,Cal-2与沥青伴生;e. 为图2d中白色方框区域岩石薄片透射光照片,Cal-2与沥青伴生;f. 为图2e对应的阴极发光照片,Cal-2发橘红色光,中晶方解石边缘呈暗红色环带状阴极光;g. SB5-B井,埋深7 679.00 m,一间房组,岩石薄片全扫描照片,Cal-4切穿Cal-3;h. 为图2g中白色方框区域岩石薄片透射光照片,Cal-4为粗晶方解石、切穿Cal-3,Cal-3为中-细晶方解石,边缘沥青发育;i. 为图2h对应的阴极发光照片,Cal-3总体发橘红色光,Cal-4不发光、且比围岩更暗

至少发育4期方解石脉体外,局部成岩早期硅质岩化严重,而晚期可见部分方解石脉被粉-细晶石英交代(图3)。

顺北5号断裂带碳酸盐岩储集体中,第1期方解石脉体(Cal-1)主要充填于裂缝边缘,方解石晶体呈栉壳状或者纤维状,脉体中心可见部分粉-细晶方解石,阴极光下不发光或发橘红色光(图2a—c);第2期亮晶方解石脉体(Cal-2)切穿第1期方解石脉体,方解石呈等轴状细-中晶结构,并与沥青脉伴生,阴极光下发橘红色,较宽裂缝内充填的中-粗晶方解石环带状边缘发暗红色光(图2d—f);第3期方解石脉体(Cal-3)切穿了第1期、第2期方解石脉体(图2b,c),晶体特征及阴极发光特征与第2期近似,呈等轴状细-中晶结构,阴极光下发橘红色光(图2b,c,g—i),脉体边缘可见沥

青;第4期方解石脉体(Cal-4)明显截切了第3期方解石脉体,主要由近等轴中-粗晶方解石构成,解理纹发育,阴极光下不发光或者发暗红色光,比围岩阴极光颜色更暗(图2g—i)。

顺北1号断裂带方解石脉体主要取自拉分段一间房组灰岩储集体,局部可见明显的早期硅质岩化,硅质多为隐晶-微晶结构,阴极光下呈紫-棕色(图3a—d)。第1期方解石脉体多位于硅质的边缘,粒径较细且宽度较窄,阴极光下呈暗红色或不发光,仅局部发育;第2期方解石脉体较发育,主要为粉-细晶方解石,自形程度较好,部分与硅质直接接触,阴极光下发较强的橘红色光,局部可见第2期方解石脉体被石英交代(图3b—d),应为第3期方解石脉体形成前产生;第3期方解石脉体阴极发光呈暗红色,特征与围岩接近,明显见切割

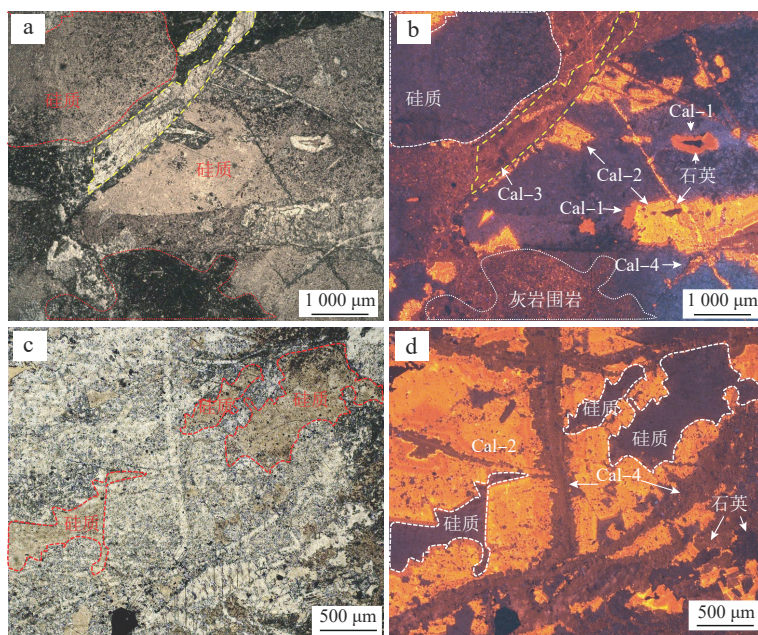


图3 顺北地区顺北1号断裂带SB1-A井中-下奥陶统储集体(埋深7 278.1 m)中脉体岩石学及阴极发光特征

Fig. 3 Micrographs of petrography and cathodoluminescence (CL) of calcite veins in the Middle-Lower Ordovician reservoirs (at a burial depth of 7 278.1 m) in well SB1-A of the No. 1 fault zone in Shunbei area

a. 岩石薄片透射光照片;b. 为图3a对应的阴极发光照片,灰岩围岩、硅质与Cal-1,Cal-2和Cal-3呈接触关系,并可见Cal-2部分被石英交代现象,Cal-4阴极光下不发光、切穿Cal-2和Cal-3;c. 岩石薄片透射光照片;d. 为图3c对应的阴极发光照片,硅质发棕色光,Cal-2发橘红色光,Cal-4不发光,Cal-4切穿Cal-2

第2期方解石脉体的特征(图3a,b);前期形成的方解石脉体多被第4期方解石脉体切割,该期方解石脉体典型特征是阴极光下不发光或发暗棕红色光。

总的来看,顺北地区顺北1号断裂带、顺北5号断裂带中-北段中-下奥陶统碳酸盐岩储集体中方解石脉体发育,顺北5号断裂带中-北段至少可见4期方解石脉体,顺北1号断裂带拉分段也至少发育4期方解石脉体,且局部见灰岩被硅质岩化现象,产生于第1期方解石脉体形成之前,而第2期方解石脉体部分被石英交代,可能表明顺北1号断裂带流体输导性能更强、成脉流体类型及古流体活动历史更复杂多样,可能存在晚期的硅质流体活动。

2.2 不同期次脉体微量元素-稀土元素特征

稀土元素(REE)是指位于化学元素周期表ⅢB族La-Lu(镧系)和钪(Sc)、钇(Y)共17种元素,化学性质稳定,具有相似的地球化学行为,是重要的地球化学指示剂。自然界中不同来源的流体具有不同的REE含量和配分特点^[35-37],从流体中生长或沉淀的矿物继承了流体的特征,可以通过矿物配分特征来推断流体来源^[26]。

采用激光微区原位法(LA-ICP-MS)对各期次典

型方解石脉进行元素分析,得到不同期次方解石脉的微量元素和稀土元素含量。顺北1号断裂带只获得了Cal-2,Cal-3和Cal-4共3期方解石脉体的稀土元素数据,顺北5号断裂带碳酸盐岩储集体中4期方解石脉稀土元素数据均可检测到。顺北1号断裂带和顺北5号断裂带中-下奥陶统灰岩围岩及裂缝充填方解石脉的稀土元素含量(ΣREE)总体较低(0.02~28.90 $\mu\text{g/g}$),不同期次方解石脉体的Fe和Mn含量、Fe/Mn含量比值、 ΣREE 及 ΣLREE (轻稀土元素含量)/ ΣHREE (重稀土元素含量)(表1)及配分模式均存在一定的差异(图4)。

顺北5号断裂带Cal-1方解石脉Fe和Mn含量低,但Fe/Mn值相对较高,平均为20.5;Cal-2方解石脉Fe/Mn平均值为6.0;Cal-3方解石脉Fe/Mn平均值为1.8,与Cal-2方解石脉相比Mn含量变化不大,但Fe含量明显增加;Cal-4方解石脉Fe和Mn含量均显著增加,Fe/Mn平均值为8.4。顺北5号断裂带Cal-1方解石脉Mn含量极低,Fe/Mn值高因而阴极发光弱或不发光;Cal-2和Cal-3方解石脉Mn含量略有增加而Fe含量减少,因而阴极发光略有增强;Cal-4方解石脉阴极发光较弱。与顺北5号断裂带相比,顺北1号断裂带Cal-2方解石脉Fe含量较大,Mn含量明显更高,Fe/Mn值相对较小,

表1 顺北地区顺北1号和顺北5号断裂带方解石脉与围岩的稀土元素和部分微量元素含量及其比值

Table 1 Contents and ratios of REEs and some trace elements in calcite veins and host-rocks of the No. 1 and 5 fault zones in Shunbei area

断裂带	方解石脉/围岩 (样品数量)	Mn 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Fe 含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Fe/Mn	U/Th	$\Sigma\text{REE}/$ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$
顺北1号	Cal-2(N=4)	130.7~136.4 133.2	441.0~1024.5 625.1	3.4~7.5 4.7	1.1~1.4 1.2	2.2~4.8 3.7	1.8~3.8 3.1
	Cal-3(N=4)	25.1~30.3 28.0	90.8~272.6 174.5	3.0~9.2 6.2	1.4~100.0 28.2	10.1~18.3 14.7	6.7~13.7 9.4
	Cal-4(N=2)	31.9~47.4 39.6	1498.4~2264.6 1881.5	31.6~71.1 51.3	4.1~7.2 5.7	6.6~9.7 8.2	8.9~76.4 42.6
	灰岩(N=3)	18.3~27.0 22.2	158.3~199.4 183.7	5.9~10.9 8.6	1.5~3.1 2.2	18.5~28.9 23.7	6.1~11.9 9.0
顺北5号	Cal-1(N=3)	3.3~8.9 5.4	92.4~97.0 94.0	10.9~27.9 20.5	1.0~48.3 24.7	0.02~0.3 0.2	0.9~4.2 2.7
	Cal-2(N=5)	38.9~92.0 65.2	161.3~698.8 407.9	4.1~7.6 6.0	2.4~3.2 2.8	1.8~7.3 4.4	3.9~4.6 4.4
	Cal-3(N=5)	36.6~110.5 70.9	77.8~236.8 130.9	1.2~2.1 1.8	0.9~149.1 50.3	15.8~21.3 17.7	6.1~19.7 11.4
	Cal-4(N=2)	156.6~212.2 184.4	1248.9~1845.9 1547.4	8.0~8.7 8.4	2.2 2.2	1.8~4.2 3.0	4.5~6.8 5.7
	灰岩(N=3)	27.1~139.1 65.5	331.7~745.1 604.8	5.4~27.3 14.5	0.5~0.9 0.8	8.3~20.3 12.6	5.1~6.1 5.5

注: ΣREE 为稀土元素总含量; $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为轻稀土元素与重稀土元素含量比值。

表中数值为: $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

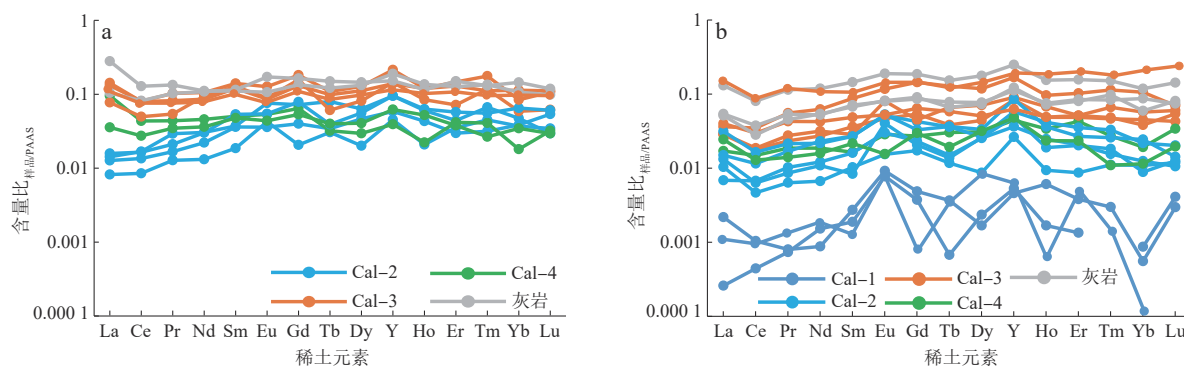


图4 顺北地区顺北1号断裂带(a)和顺北5号断裂带(b)中-下奥陶统储集体方解石脉与围岩稀土元素配分模式

Fig. 4 REE distribution pattern of calcite veins and wall rocks in the Middle-Lower Ordovician reservoirs of the No. 1 fault zone (a) and No. 5 fault zone (b) in Shunbei area

阴极发光较强; Cal-3方解石脉 Mn 和 Fe 含量均明显减小, 但 Mn 含量减小更为显著, 导致 Fe/Mn 值有所增大, 因而阴极发光强度有所减弱; Cal-4方解石脉中 Fe 含量显著增大, 而 Mn 含量变化不大, Fe/Mn 值高, 阴极光不发光或极弱。

不同期次典型裂缝方解石脉体和灰岩围岩稀土元素含量经太古宙页岩(PAAS)标准化^[38]处理后的配分模式如图4所示, 顺北1号及顺北5号断裂带方解石脉稀土元素含量(ΣREE)普遍较围岩偏低(表1)。顺北5号断裂带 Cal-1方解石脉稀土元素总量(ΣREE)较围岩显著偏低(平均为 $0.20 \mu\text{g/g}$), 且具有明显的轻稀土

(ΣLREE)亏损、重稀土波动较大, 显著的 Eu 和 Y 正异常特征; 顺北1号及顺北5号断裂带 Cal-2方解石脉稀土元素总含量也较围岩偏低, 较明显的轻稀土相对亏损, 较弱的 Eu 和 Y 正异常, 顺北1号断裂带 Cal-2方解石脉同时具有弱的 La 正异常特征。其他两个期次 Cal-3 和 Cal-4方解石脉稀土元素配分样模式与围岩类似, 总体表现为曲线较平坦, 稀土元素含量较灰岩围岩偏轻, 具有较弱的 Ce 负异常和较低的 La, Eu 及 Y 正异常特征。顺北1号断裂带和顺北5号断裂带的 Cal-3方解石脉与其他期次脉体相比, 稀土元素总量相对较高, 与围岩相近或略高。

2.3 成脉流体来源及形成环境

海相自生碳酸盐岩REE的PAAS标准化配分模式具有与现代海水类似的特征:重稀土元素富集、La正异常、轻微的Gd异常以及高Y/Ho比值(44~74)^[39-40],研究区稀土元素含量及配分模式(表1;图4)表明灰岩围岩继承了中-下奥陶统海水的信息。顺北5号断裂带Cal-1方解石脉稀土元素含量(Σ REE)比围岩显著偏轻,PAAS标准化配分模式具有配分曲线波动大,轻稀土亏损、Eu显著正异常等复杂特征,基本与文献^[26]报道的经热液改造作用岩石的REE配分模式吻合,但Cal-1方解石脉Fe和Mn元素含量极低,阴极光下不发光-发暗红色光。岩心及岩石薄片观察发现,方解石多呈栉壳状或者纤维状,具有明显的海水沉积方解石特征,推测认为Cal-1成脉流体主要为海源性流体,形成后经历了热液改造作用,导致Cal-1方解石脉失去了海水来源的原始REE的典型特征,表现出稀土元素含量较低、配分曲线起伏不定的复杂变化。其他期次方解石脉体稀土元素配分模式与灰岩围岩类似,总体表现为配分曲线较平坦,稀土元素含量较灰岩围岩略偏轻,普遍具有La正异常,较高Y/Ho比值(28.3~76.9),部分脉体具有轻微的Eu正异常特征(图4),可能表明各期次成脉流体主要来源于同地层演化后的地层流体。

Ce异常^[41-42]是沉积氧化-还原环境的常用判别指标。一般 $\delta Ce_N > 1$ 为正异常,代表还原环境, $\delta Ce_N < 1$ 为负异常,代表氧化环境。本研究采用PAAS标准化后计算结果 $[\delta Ce_N = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)]$,N表示PASS标准化后的结果]表明,顺北1号断裂带Cal-2、Cal-3和Cal-4各期次方解石脉的 δCe_N 平均值分别为0.74,0.70和0.70,与灰岩围岩 δCe_N 平均值0.71接近;顺北5号断裂带4期次方解石脉 δCe_N 平均值依次为0.62,0.67,0.70和0.60,与顺北5号断裂带灰岩围岩 δCe_N 平均值0.65也非常接近。这说明各期次方解石脉 δCe_N 主要继承了灰岩围岩的特征,因而可能不适用于脉体成岩环境的判别。

U/Th比值也是氧化-还原环境的可靠判别指标^[43],通常 $U/Th > 1.25$ 代表还原环境, $U/Th < 0.75$ 代表氧化环境, $0.75 < U/Th < 1.25$ 代表贫氧环境。顺北1号断裂带Cal-2方解石脉U/Th值介于1.11~1.44,平均值为1.25,指示Cal-2方解石脉成岩环境为贫氧-还原环境;Cal-3和Cal-4方解石脉U/Th值均大于1.25(表1),指示形成于还原环境。顺北5号断裂带Cal-1方解石脉U/Th值变化大,介于1.0~48.3,表明形成于贫氧-还原环境,U/Th较大变化范围可能是形成于海

源性流体的脉体经历了较强还原性热液叠加改造作用的结果;Cal-3方解石脉U/Th值也变化大,介于0.9~149.1,指示形成于贫氧-还原环境;Cal-2和Cal-4方解石脉U/Th值均大于1.25,主要形成于还原环境。

3 油气充注期次与脉体形成耦合关系

3.1 流体包裹体岩相学特征

流体包裹体是有力的流体示踪工具,现广泛应用于油气成藏期次的研究^[44-45]。岩相学特征是流体包裹体分析的基础。流体包裹体薄片透射光及烃类包裹体荧光观察表明,顺北1号断裂带、顺北5号断裂带中-下奥陶统碳酸盐岩储集体中烃类包裹类型丰富,主要为气-液两相油包裹体、富气相天然气包裹体,可见少量单一液相油包裹体、固相沥青包裹体、纯气相天然气包裹体;烃类包裹体总体个体较小,直径一般为2~8 μm ,少数可达10~15 μm ;形态大多数为近圆形或椭圆形,部分为不规则状。单偏光下油包裹体颜色多为无色,少量为棕褐色,天然气包裹体多为无色,少数纯气态烃包裹体为黑色或黑灰色。紫外光下,油包裹体主要发蓝白色荧光,其次为黄绿色荧光,少量发浅黄色荧光。荧光显微镜下统计表明,顺北5号断裂带中-北段一间房组储集体中蓝白色、黄绿色、浅黄色荧光油包裹体百分比率大致为50%,45%和5%,而顺北1号断裂带三者比率大致为55%,40%和5%。从烃类包裹体赋存矿物及产状看,顺北1号断裂带、顺北5号断裂带油包裹体均主要呈串珠状分布于穿灰岩、生物骨架孔充填方解石晶体及裂缝充填方解石脉体的构造愈合微裂纹中,并以构造愈合微裂纹及裂缝充填方解石脉体为主。因此,顺北1号断裂带与顺5号断裂带烃类包裹体荧光颜色、丰度及赋存产状特征差异并不明显。

顺北1号断裂带、顺北5号断裂带烃类包裹体均可大致分为3期:第1期烃类包裹体(P1)主要为发黄绿色、蓝白色荧光油包裹体,少量为浅黄色荧光油包裹体,多呈串珠状、团簇状、零星状分布于沥青前形成的Cal-2脉体及溶孔充填方解石中(图5a,b,e,f)。第2期烃类包裹体(P2)主要为发蓝白色、黄绿色荧光油包裹体,多呈串珠状、团簇状分布于沥青后形成的Cal-3脉体内(图5c,d,g,h),部分沿愈合微裂纹呈串珠状分布,与第3期次油包裹体难以区分。第3期烃类包裹体(P3)主要为发蓝白色、黄绿色荧光油包裹体,部分伴生天然气包裹体,多呈串珠状分布于穿泥晶灰岩围岩、生物骨架孔充填方解石、方解石脉体的构造愈合微裂

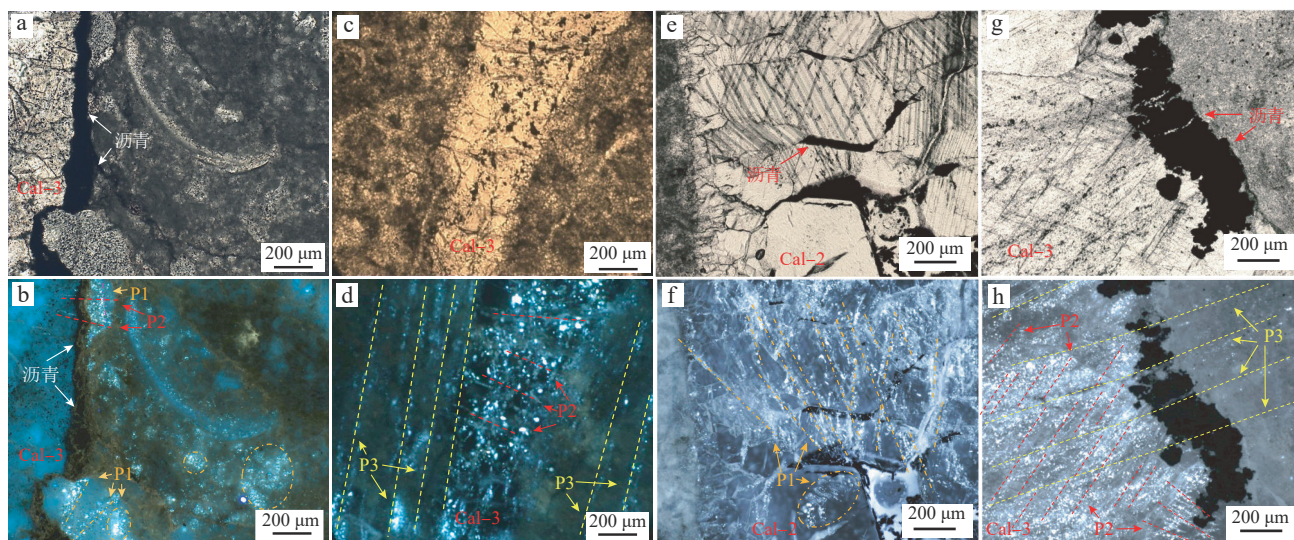


图5 顺北地区顺北1号断裂带(a—d)和顺北5号断裂带(e—h)中下奥陶统储集体中烃类包裹体岩石学特征及期次划分

Fig. 5 Micrographs showing the petrographical features and charging stage division of hydrocarbon inclusions in the Middle-Lower Ordovician reservoirs of the No. 1 fault zone (a—d) and No. 5 fault zone (e—h) in Shunbei area

a. SB1-A井,埋深7 279.76 m,一间房组,透射光照片,Cal-3边缘见沥青条带;b. 为图5a对应的紫外光照片,沥青条带发棕褐色荧光,早期溶孔及生物骨架孔充填方解石中见大量发黄绿色、蓝白色荧光油包裹体,主要为第1期油气充注形成;c. SB2井,埋深7 363.00 m,一间房组,透射光照片,Cal-3发育;d. 为图5c对应的紫外光照片,Cal-3内见大量零星状、串珠状发蓝白色荧光油包裹体,为第2期油气充注形成,穿Cal-3脉体及生屑泥晶灰岩围岩的愈合微裂纹中发育第3期发蓝白色荧光油包裹体;e. SB5-A井,埋深7 475.00 m,一间房组,透射光照片,Cal-2晶间孔中见大量沥青;f. 为图5e对应的紫外光照片,Cal-2内见大量串珠状、零星状发蓝白色、黄绿色荧光油包裹体,为第1期油气充注形成;g. SB5-A井,埋深7 373.09 m,一间房组,透射光照片,Cal-3边缘见沥青条带;h. 为图5g对应的紫外光照片,Cal-3内见大量串珠状、零星状发蓝白色荧光油包裹体,为第2期油气充注形成,穿Cal-3脉体及泥晶灰岩围岩、沥青条带的愈合微裂纹中见大量发蓝白色荧光油包裹体,为第3期油气充注形成

纹中(图5c—f)。总体上,油包裹体呈串珠状分布于穿泥晶灰岩、生物骨架孔充填方解石、不同期次方解石脉的构造愈合微裂纹是该区烃类包裹体主要的赋存产状,表明研究区油气主要沿断裂及其伴生裂缝构成的复杂网络系统运移。

3.2 油气充注期次

在流体包裹体岩相学分析的基础上,根据流体包裹体组合(FIA)^[46]严格筛选原生成岩盐水包裹体及与油包裹体共生的盐水包裹体进行均一温度、盐度等测试,并剔除气液比差异大、不规则形、“卡脖子”等可能发生了流体泄露或再平衡等过程的流体包裹体数据。顺北1号断裂带及顺北5号断裂带各期次方解石脉体中盐水包裹体均较丰富,大多为气-液两相,呈近椭圆或纺锤形,大小在1~15 μm ,但多以3~8 μm 为主,大多呈串珠状、团簇状产出,尤以Cal-2和Cal-3流体包裹体含量最丰富。顺北1号断裂带Cal-1检测到的少量原生盐水包裹体均一温度大致为65~80 $^{\circ}\text{C}$;Cal-2原生盐水包裹体及与油包裹体共生盐水包裹体均一温度为75~100 $^{\circ}\text{C}$;Cal-3原生盐水包裹体及与油包裹体共生盐水包裹体均一温度为100~120 $^{\circ}\text{C}$;在Cal-2和

Cal-3构造愈合微裂纹中检测到了大量与油包裹体、天然气包裹体共生盐水包裹体,其均一温度范围为130~180 $^{\circ}\text{C}$ (图6a)。在顺北5号断裂带Cal-1检测到的少量原生盐水包裹体均一温度约为65~80 $^{\circ}\text{C}$;Cal-2原生盐水包裹体及与油包裹体共生盐水包裹体均一温度为80~100 $^{\circ}\text{C}$;Cal-3原生盐水包裹体及与油包裹体共生盐水包裹体均一温度约为100~125 $^{\circ}\text{C}$;在Cal-2和Cal-3构造愈合微裂纹中检测到少量与油包裹体共生盐水包裹体,其均一温度范围大致为125~140 $^{\circ}\text{C}$ (图6b)。顺北1号断裂带较高温范围(>120 $^{\circ}\text{C}$)油气包裹体丰度、频次明显高于顺北5号断裂带(图6)。顺北1号、顺北5号断裂带Cal-4方解石脉表面较污浊,均未能检测到可测温的气-液两相盐水包裹体。

结合流体包裹体岩相学特征分析认为,顺北地区顺北1号断裂带、顺北5号断裂带中下奥陶统碳酸盐岩储集体中至少发生了3期烃类充注过程。第1期油气充注(P1)主要对应于Cal-2脉体形成时期;该期油气充注后经历氧化降解等生物、化学作用而形成固体沥青。第2期油气充注(P2)对应于Cal-3脉体形成时期,烃类包裹体主要呈串珠状、团簇状分布于Cal-3脉体内,部分分布于穿早期脉体的构造愈合微裂纹中。

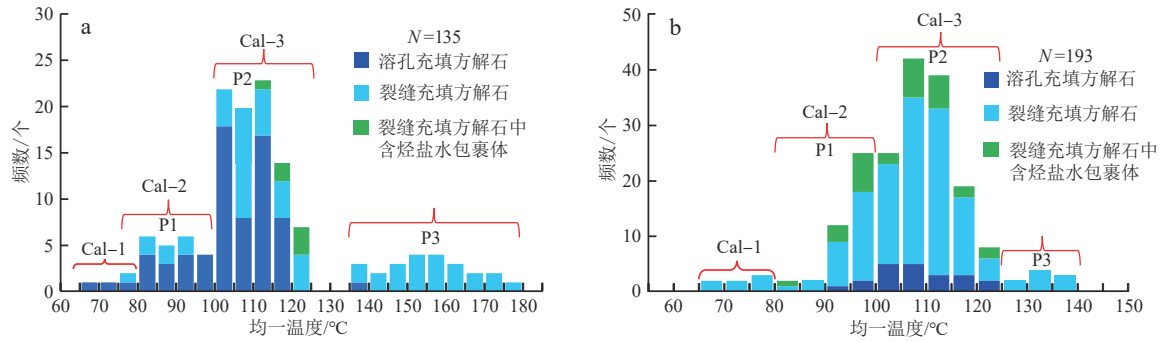


图6 顺北地区顺北1号断裂带(a)和顺北5号断裂带(b)中-下奥陶统与烃类包裹体共生盐水包裹体均一温度频数直方图

Fig. 6 Histograms of homogenization temperatures for the paragenetic aqueous inclusions of hydrocarbon inclusions in the calcite veins of the Middle-Lower Ordovician in the No. 1 fault zone (a) and No. 5 fault zone (b), Shunbei area

第3期油气充注(P3)主要呈串珠状分布于穿泥晶灰岩围岩、生物骨架孔充填方解石、多期方解石脉的构造愈合微裂纹中。

3.3 油气充注期次与方解石脉形成的耦合关系

将各期方解石脉原生盐水包裹体以及与烃类裹体同期的盐水包裹体的均一温度与构造-埋藏史图结合可以大致间接确定各期方解石脉形成时间和油气成藏时期^[44-45, 47-48],结果表明:顺北1号断裂带3期油气充注时间分别为425~388, 280~215和125~0 Ma,并可能以22~0 Ma为主,对应的构造活动阶段分别为加里东晚期—海西早期、海西晚期—印支期和燕山中—晚期—现今,并可能以喜马拉雅晚期为主(图7a)。顺北5号断裂带3期油气充注时间分别为428~385, 280~200和200~118 Ma(图7b),对应的构造活动阶段分别为加里东晚期—海西早期、海西晚期—印支期和燕山早—中期。Cal-1脉体可能主要形成于奥陶纪晚期,加里东运动Ⅲ幕强烈的构造活动形成的断裂构成了深层

热液上升的通道,叠加了热液改造;Cal-2和Cal-3脉体与加里东晚期—海西早期、海西晚期—印支期的油气充注过程伴生;Cal-4推测性认为主要形成于燕山期的构造活动(图7a,b)。

结合前述裂缝脉体岩石学、阴极光特征及依据微量元素-稀土元素确定的成脉流体来源与环境,可大致厘定油气充注期次与方解石脉形成的耦合关系:①加里东运动Ⅲ幕中—浅埋藏阶段形成第1期构造破裂,Cal-1方解石脉形成,局部叠加硅质交代作用或热液改造作用;②加里东晚期—海西早期中—深埋藏阶段形成第2期构造破裂,Cal-2方解石脉形成,早期油气充注(P1)后,油气经历氧化、降解作用形成沥青;③海西晚期—印支期中—深埋藏阶段形成第3期构造破裂,Cal-3方解石脉形成、第2期油气充注(P2),燕山期深埋藏阶段形成第4期构造破裂,Cal-3方解石脉形成;④燕山期—喜马拉雅期,第3期油气充注(P3)。顺北1号断裂带和顺北5号断裂带第1期和第2期油气充注时间基本相同,分别对应于加里东晚期—海西

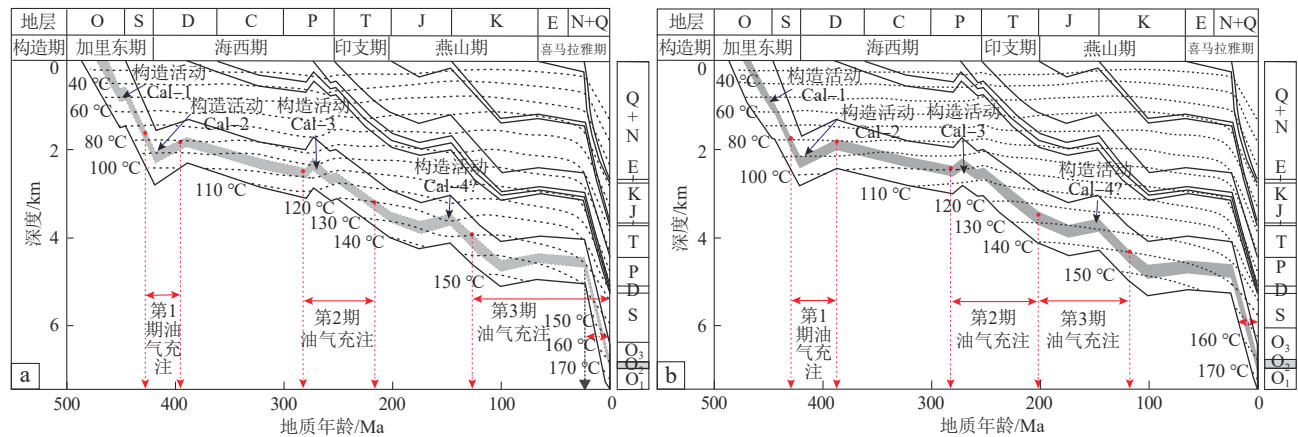


图7 顺北地区顺北1号断裂带(a)和顺北5号断裂带(b)中-下奥陶统油气藏油气充注期次和时间

Fig. 7 Burial history diagram showing the determination of hydrocarbon charging stages and timing in the Middle-Lower Ordovician reservoirs of the No. 1 fault zone (a) and No. 5 fault zone (b) in Shunbei area

早期和海西晚期—印支期的构造运动。第3期油气充注时间存在差异,顺北5号断裂带中—北段油气充注可能主要发生于燕山早—中期,而顺北1号断裂带可能主要为燕山中—晚期—现今并以喜马拉雅晚期油气充注为主。

4 油气充注差异性主控因素探讨

近年的研究表明,下寒武统玉尔吐斯组中—外缓坡相泥岩是顺北地区的主力烃源岩^[14, 18],而顺北地区中西部长期处于较为稳定的沉降埋深区域,且具有持续低地温特征^[3],液态生油窗长,海西晚期处于高成熟油生成阶段,燕山期—喜马拉雅期仍处于生凝析油气和湿气阶段^[49],为超深层晚期油气成藏提供良好的物质基础。切穿寒武统玉尔吐斯组,沟通主力烃源岩与奥陶系储集体的走滑断裂体系成为顺北地区油气运移的主要输导通道^[3, 12-13]。因此,走滑断裂分段样式、活动期次及活动强度控制下油气充注过程的差异性可能是揭示顺北地区油气差异聚集的关键。

勘探实践表明,顺北地区奥陶系油气藏沿走滑断裂带走向呈条带状分布,走滑断裂带不同构造样式部位,油气丰度存在较大差异:以拉张为主的顺北1号主干断裂带相对于以压隆为主的顺北5号主干断裂带,单井产油量更高,且同一断裂带的拉分段优于平移段和压隆段,主干断裂带优于次级断裂和分支断裂,北东向断裂带优于北西向断裂带^[13, 18]。顺北1号断裂带与顺北5号断裂带油气来源差异不大,但顺北1号断裂带和顺北5号断裂带中段为未饱和和挥发性油藏,顺北5号断裂带北段为未饱和和轻质油藏,顺北5号断裂带南段为凝析油藏,顺北1号断裂带原油、天然气成熟度均明显高于顺北5号断裂带中—北段^[14]。

地震资料构造解析结合盆地区域构造演化分析表明,顺北5号断裂带及顺北3号断裂带至少经历了3期构造活动^[29-31, 50]:①加里东中期Ⅲ幕,顺北5号断裂带北段于加里东中期Ⅲ幕在压扭应力环境下发生右行走滑, T_4^+ 界面发育呈左阶展布的高陡走滑分段;②加里东晚期,顺北5号断裂带北西向走滑断裂继承性活动、形成断穿 T_5^+ 界面雁列正断层,顺北1号断裂在斜拉应力环境下发生左阶左行活动、 T_5^+ 界面发育的雁列正断层错断至 T_6^+ 界面;③海西中—晚期,顺北5号断裂带深层走滑断裂左行反转活动、在上覆地层中形成断穿 T_6^+ 界面的右阶展布雁列正断层,顺北1号断裂带再次发生左行走滑活动、 T_6^+ 界面以上的地层中发育雁列正断

层并断穿 T_6^+ 界面。有研究认为,印支期或更晚(喜马拉雅期),顺北1号等北东向断裂带仍发生微弱的继承性活动^[18]。邻区托普台地区托普39共轭断裂体系活动历史也表明,喜马拉雅期NNW向断裂没有明显活动,但却是NNE向断裂的主活动期,也是托普39断裂轻质油气的主充注期^[29]。由此可见,顺北1号NNE向断裂喜马拉雅期仍继承性活动,但因克拉通内走滑断裂位移小、断距小且地层埋深大,受地震资料品质以及分辨率局限性的影响而难以清晰识别。

由前述顺北1号和顺北5号断裂带油气充注历史可知,这两个断裂带裂缝脉体期次及油气充注过程与走滑断裂发育演化有较好的耦合关系,但不同断裂带甚至同一断裂带的不同分段由于走滑断裂构造样式及活动历史的差异性,油气充注过程均存在较大差异。顺北1号和顺北5号断裂带油气藏主要经历了加里东晚期—海西早期和海西晚期—印支期的油气充注,但加里东晚期—海西早期形成的油气藏遭受氧化降解,现今裂缝中可见沥青残留。顺北5号断裂带油气藏以海西晚期—印支期的油气充注为主,部分段可能存在燕山期高成熟度油气的充注。顺北1号断裂带油气藏主要为海西晚期—印支期和燕山期—喜马拉雅期油气充注的混合,并可能以燕山期—喜马拉雅期为主要成藏期,因而油气成熟度和油气富集程度明显高于顺北5号断裂带中—北段;晚期穿生物骨架孔充填方解石、多期方解石脉的构造愈合微裂纹中可观察到大量高成熟油气包裹体,并检测到与其共生的较高温度范围(130~180℃)的盐水包裹体,证明存在燕山期—喜马拉雅期断裂活动与油气充注。这也同时说明,地震资料的宏观构造解析与储集体裂缝充填方解石脉类型、形成序次,流体包裹体分析等地质、地球化学资料的微观分析相结合,是探索深层—超深层碳酸盐岩领域油气差异聚集机理的关键途径。

总体而言,顺北1号断裂带整体处于一个弱拉张背景;顺北5号断裂带中—北段整体处于较强挤压背景。顺北1号断裂带油气输导能力总体强于顺北5号断裂带,油气在通源走滑断裂控制下垂向运移并在有利部位聚集成油气藏,且顺北1号断裂带长期继承性活动,更有利于油气多期次尤其是晚期充注。走滑断裂构造样式及演化历史控制下的油气差异充注过程是顺北地区油气差异聚集的关键。

5 结论

1) 顺北5号和顺北1号走滑断裂带中—下奥陶统碳

酸盐岩储集体中均至少发育4期方解石脉体。Cal-1方解石脉形成于浅-中埋藏阶段的贫氧-还原环境,成脉流体主要为海源性流体,并叠加了稍晚期的热液改造。Cal-2方解石脉形成于贫氧-还原环境,Cal-3和Cal-4方解石脉主要形成于还原环境,流体主要来源于同地层演化后的地层流体。

2) 顺北5号和顺北1号断裂带4期方解石脉主要形成于加里东中期Ⅲ幕、加里东晚期—海西早期、海西晚期—印支期及燕山期的构造活动时期。油气藏总体经历了加里东晚期—海西早期、海西晚期—印支期和燕山期—喜马拉雅期3期油气充注过程。

3) 顺北5号和顺北1号断裂带中-下奥陶统油气主成藏期次存在一定的差异。顺北1号断裂带油气藏为海西晚期—印支期和燕山—喜马拉雅晚期油气充注形成,并以喜马拉雅晚期为主;顺北5号断裂带油气藏主要为海西晚期—印支期油气充注形成,局部存在燕山期充注油气的混合。走滑断裂构造样式及演化历史控制下的油气充注过程的差异性顺北地区走滑断裂带油气差异聚集的关键。

参 考 文 献

- [1] 赵文智, 胡素云, 刘伟, 等. 再论中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特征与勘探前景[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 1-9.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, LIU Wei, et al. Petroleum geological features and exploration prospect in deep marine carbonate strata onshore China: A further discussion[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 1-9.
- [2] 何治亮, 张军涛, 丁茜, 等. 深层-超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 633-644, 763.
HE Zhiliang, ZHANG Juntao, DING Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 633-644, 763.
- [3] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 1-17.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17.
- [4] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655-672, 683.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672, 683.
- [5] 漆立新, 云露, 曹自成, 等. 顺北油气田地质储量评估与油气勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 127-135.
QI Lixin, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Geological reserves assessment and petroleum exploration targets in Shunbei Oil & Gas Field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 127-135.
- [6] 云露, 朱秀香. 一种新型圈闭: 断控缝洞型圈闭[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 34-42.
YUN Lu, ZHU Xiuxiang. A new trap type: Fault-controlled fracture-vuggy trap[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 34-42.
- [7] 翟晓先, 云露. 塔里木盆地塔河大型油田地质特征及勘探思路回顾[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 565-573.
ZHAI Xiaoxian, YUN Lu. Geology of giant Tahe Oilfield and a review of exploration thinking in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 565-573.
- [8] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 323-331.
ZHAI Xiaoxian. Exploration practice and experience of Tahe giant oil-and-gas field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(4): 323-331.
- [9] MA Yongsheng, GUO Xusheng, GUO Tonglou, et al. The Puguang Gas Field: New giant discovery in the mature Sichuan Basin, southwest China[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(5): 627-643.
- [10] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293.
ZOU Caineng, DU Jinhui, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.
- [11] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 1-13.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Petroleum geological conditions and exploration importance of Proterozoic to Cambrian in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 1-13.
- [12] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 38-51.
QI Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 38-51.
- [13] 刘宝增. 塔里木盆地顺北地区油气差异聚集主控因素分析——以顺北1号、顺北5号走滑断裂带为例[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 83-95.
LIU Baozeng. Analysis of main controlling factors of oil and gas

- differential accumulation in Shunbei area, Tarim Basin—taking Shunbei No. 1 and No. 5 strike slip fault zones as examples [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 83–95.
- [14] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 975–984.
- CAO Zicheng, LU Qinghua, GU Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 975–984.
- [15] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1415–1425.
- MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(12): 1415–1425.
- [16] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(1): 102–111.
- QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(1): 102–111.
- [17] 王斌, 赵永强, 何生, 等. 塔里木盆地顺北5号断裂带北段奥陶系油气成藏期次及其控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 965–974.
- WANG Bin, ZHAO Yongqiang, He Sheng, et al. Hydrocarbon accumulation stages and their controlling factors in the northern Ordovician Shunbei 5 fault zone, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 965–974.
- [18] 云露. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(3): 41–52.
- YUN Lu. Controlling effect of NE strike-slip fault system on reservoir development and hydrocarbon accumulation in the eastern Shunbei area and its geological significance, Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3): 41–52.
- [19] 云露. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(2): 136–142.
- YUN Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2): 136–142.
- [20] LU Ziyue, LI Yingtao, YE Ning, et al. Fluid inclusions record hydrocarbon charge history in the Shunbei area, Tarim Basin, NW China [J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 8847247.
- [21] 杨率, 郭光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地北部地区超深断控油藏关键成藏期[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 249–261.
- YANG Lv, WU Guanghui, ZHU Yongfeng, et al. Key oil accumulation periods of ultra-deep fault-controlled oil reservoir in northern Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 249–261.
- [22] 韩强, 云露, 蒋华山, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系油气充注过程分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 645–658.
- HAN Qiang, YUN Lu, JIANG Huashan, et al. Marine oil and gas filling and accumulation process in the north of Shuntuoguole area in northern Tarim Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2021, 51(3): 645–658.
- [23] SCHULTZ R A, FOSSEN H. Terminology for structural discontinuities [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(7): 853–867.
- [24] BONS P D, ELBURG M A, Gomez-Rivas E. A review of the formation of tectonic veins and their microstructures [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 43: 33–62.
- [25] WORDEN R H, BENSHATWAN M S, POTTS G J, et al. Basin-scale fluid movement patterns revealed by veins: Wessex Basin, UK [J]. *Geofluids*, 2016, 16(1): 149–174.
- [26] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 810–818.
- HU Wenxuan, CHEN Qi, WANG Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 810–818.
- [27] BEINLICH A, JOHN T, Vrijmoed J C, et al. Instantaneous rock transformations in the deep crust driven by reactive fluid flow [J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(4): 307–311.
- [28] 陈少伟, 刘建章. 含油气盆地微观裂缝脉体期次、成因与流体演化研究进展及展望[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(4): 81–92.
- CHEN Shaowei, LIU Jianzhang. Research progress and prospects of the stages, genesis and fluid evolution of micro-fracture veins in petroliferous basins [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(4): 81–92.
- [29] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 878–888.
- DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 878–888.
- [30] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂中段活动特征及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 990–998, 1073.
- DENG Shang, LI Huili, HAN Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 990–998, 1073.
- [31] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(6): 1111–1126.
- DENG Shang, LIU Yuqing, LIU Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: A case study of the Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(6): 1111–1126.
- [32] WANG Ziyi, GAO Zhiqian, FAN Tailiang, et al. Structural

- characterization and hydrocarbon prediction for the SB5M strike-slip fault zone in the Shuntuo low uplift, Tarim Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 117: 104418.
- [33] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(5): 831-839.
- JIAO Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(5): 831-839.
- [34] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(1): 14-22.
- LYU Haitao, HAN Jun, ZHANG Jibiao, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(1): 14-22.
- [35] SCHIEBER J. Redistribution of rare-earth elements during diagenesis of carbonate rocks from the Mid-Proterozoic Newland Formation, Montana, U. S. A. [J]. *Chemical Geology*, 1988, 69(1/2): 111-126.
- [36] LOTTERMOSER B G. Rare earth elements and hydrothermal ore formation processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 1992, 7(1): 25-41.
- [37] BAU M, MÖLLER P. Rare earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 45(3): 231-246.
- [38] MCARTHUR J M. Recent trends in Strontium isotope stratigraphy [J]. *Terra Nova*, 1994, 6(4): 331-358.
- [39] BAU M, KOSCHINSKY A, DULSKI P, et al. Comparison of the partitioning behaviours of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(10): 1709-1725.
- [40] SHIELDS G A, WEBB G E. Has the REE composition of seawater changed over geological time?[J]. *Chemical Geology*, 2004, 204(1/2): 103-107.
- [41] BODIN S, GODET A, WESTERMANN S, et al. Secular change in northwestern Tethyan water-mass oxygenation during the late Hauterivian-early Aptian [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 374: 121-131.
- [42] 林治家, 陈多福, 刘芊. 海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(1): 72-80.
- LIN Zhijia, CHEN Duofu, LIU Qian. Geochemical indices for redox conditions of marine sediments[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(1): 72-80.
- [43] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [44] 陈红汉. 油气成藏年代学研究进展[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(2): 143-150.
- CHEN Honghan. Advances in geochronology of hydrocarbon accumulation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(2): 143-150.
- [45] 陈红汉, 吴悠, 丰勇, 等. 塔河油田奥陶系油气成藏期次及年代学[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 806-819.
- CHEN Honghan, WU You, FENG Yong, et al. Timing and chronology of hydrocarbon charging in the Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 806-819.
- [46] GOLDSTEIN R H. Petrographic analysis of fluid inclusions[M]// Samson I, Anderson A, Marshall D. *Fluid inclusions: Analysis and Interpretation*. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, 2003: 9-53.
- [47] MIDDLETON D, PARNELL J, CAREY P, et al. Reconstruction of fluid migration history in Northwest Ireland using fluid inclusion studies [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70: 673-677.
- [48] KELLY J, PARNELL J, CHEN H H. Application of fluid inclusions to studies of fractured sandstone reservoirs[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70: 705-709.
- [49] 顾忆, 万旸璐, 黄继文, 等. “大埋深、高压力”条件下塔里木盆地超深层油气勘探前景[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 157-164.
- GU YI, WAN Yanglu, HUANG Jiwen, et al. Prospects for ultra-deep oil and gas in the “deep burial and high pressure” Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2019, 41(2): 157-164.
- [50] TENG Changyu, CAI Zhongxian, HAO Fang, et al. Structural geometry and evolution of an intracratonic strike-slip fault zone: A case study from the North SB5 fault zone in the Tarim Basin, China [J]. *Journal of Structural Geology*, 2020, 140: 104159.

(编辑 张玉银)