

文章编号: 0253-2697(2024)04-0642-17 DOI:10. 7623/syxb202404003

四川盆地中部走滑断裂活动时间与控藏作用

——来自断裂带胶结物 U-Pb 定年和流体包裹体的证据

鲁雪松^{1,2} 桂丽黎^{1,2} 汪泽成¹ 柳少波^{1,2} 刘 强³ 范俊佳^{1,2} 陈玮岩^{1,2} 马行陟^{1,2}
姜 华¹ 付小东⁴ 李文正⁴ 钟 源⁵ 李堃宇⁵ 谢武仁¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 提高油气采收率全国重点实验室 北京 100083;
3. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712; 4. 中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023;
5. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院 四川成都 610041)

摘要:四川盆地中部(川中地区)深层海相地层发育多组走滑断裂,其垂向位移小且存在多期活动,断裂的形成时期难以判识。通过对断裂带附近发育的多期碳酸盐胶结物进行 U-Pb 定年,结合矿物的成岩序次分析、流体包裹体分析及其他矿物的定年结果,综合厘定了川中地区走滑断裂多期流体活动的时限,剖析了走滑断裂对油气成藏的控制作用。研究结果表明:川中地区的走滑断裂经历了多期活动,主要活动时间为早加里东期—燕山期,与峨眉地裂运动有关的晚海西期走滑拉张断裂在垂向上沟通了多个层系,有利于在断裂带附近形成优质储层,并为印支期大规模古油藏的形成提供输导条件;印支期,裂陷槽内烃源岩大量生油,原油沿着 NWW 向走滑断裂在纵向和横向上进行长距离输导,在川中地区形成了多层系、立体、差异化富集的古油藏;燕山期,古油藏发生准原位裂解而形成古气藏;晚燕山期—喜马拉雅期,古气藏发生调整改造和再运移,此时,NWW 向走滑断裂主要起到封闭和横向遮挡的作用,控制了天然气的局部富集和保存。NWW 向走滑断裂对川中地区油气的运移成藏与富集起到了重要的控制作用。

关键词:深层储层;碳酸盐 U-Pb 定年;流体包裹体;走滑断裂;断裂活动时间;四川盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Activity time of strike-slip faults and their controlling effects on hydrocarbon accumulation in central Sichuan Basin:evidence from U-Pb dating and fluid inclusions of cements in fault zone

Lu Xuesong^{1,2} Gui Lili^{1,2} Wang Zecheng¹ Liu Shaobo^{1,2} Liu Qiang³ Fan Junjia^{1,2} Chen Weiyan^{1,2}
Ma Xingzhi^{1,2} Jiang Hua¹ Fu Xiaodong⁴ Li Wenzheng⁴ Zhong Yuan⁵ Li Kunyu⁵ Xie Wuren¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Beijing 100083, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Limited Company, Heilongjiang Daqing 163712, China; 4. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Zhejiang Hangzhou 310023, China; 5. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Sichuan Chengdu 610041, China)

Abstract: Several groups of strike-slip faults are developed in the central Sichuan Basin. Due to the small vertical displacement of strike-slip faults and the superposition of multi-period activities, it is difficult to identify the fault formation time. Comprehensively based on the U-Pb dating of multi-stage carbonate cements near the fault zone, in combination with the analyses of mineral diagenetic sequence and fluid inclusions as well as dating results of other minerals, the paper confirms the multi-stage activity time of strike-slip faults in the central Sichuan Basin, and also analyzes the controlling effect of strike-slip faults on hydrocarbon accumulation. The research results indicate that the strike-slip faults underwent multiple stages of activities, and mainly occurred from the Early Caledonian period to Yanshan period. The tensional strike-slip faults, which formed during the Late Hercynian period and were affected by the Emei taphrogenic movement, vertically connected with multiple layers and facilitated the formation of high-quality reservoirs near the fault zone, thus providing transportation conditions for the formation of large-scale paleo-oil reservoirs during the Indosinian peri-

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 42172164, No. 42002177)和中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2023ZZ0206, 2021DJ0105)资助。

第一作者:鲁雪松,男,1982年11月生,2009年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事油气成藏年代学分析与成藏综合研究。Email:luxs@petrochina.com.cn

通信作者:桂丽黎,女,1987年10月生,2016年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事油气成藏年代学分析与成藏综合研究。Email:gll@petrochina.com.cn

od. Moreover, a significant amount of oil was generated in the source rocks of the rifting trough during the Indosinian period. The oil was then transported vertically and horizontally along the NWW-trending strike-slip fault over long distances, resulting in the three-dimensional differential enrichment of paleo-oil reservoirs. The paleo-oil reservoir underwent quasi-in-situ cracking in the Yanshanian period, leading to the formation of paleo-gas reservoirs. Subsequently, these paleo-gas reservoirs underwent adjustment, reconstruction and re-migration during the period from the Late Yanshanian to the Himalayan epoch. At that time, the NWW-trending strike-slip faults primarily played a role in sealing and transverse shielding, thus controlling the local gas enrichment and preservation. In conclusion, the NWW-trending strike-slip faults played a significant role in controlling the formation, migration, and accumulation of hydrocarbons in the study area.

Key words: deeply buried reservoir; U-Pb dating of carbonate; fluid inclusion; strike-slip fault; fault activity time; Sichuan Basin

引用:鲁雪松,桂丽黎,汪泽成,柳少波,刘强,范俊佳,陈玮岩,马行陟,姜华,付小东,李文正,钟源,李堃宇,谢武仁. 四川盆地川中地区走滑断裂活动时间与控藏作用——来自断裂带胶结物 U-Pb 定年和流体包裹体的证据[J]. 石油学报, 2024, 45(4): 642-658.

Cite: LU Xuesong, GUI Lili, WANG Zecheng, LIU Shaobo, LIU Qiang, FAN Junjia, CHEN Weiyan, MA Xingzhi, JIANG Hua, FU Xiaodong, LI Wenzheng, ZHONG Yuan, LI Kunyu, XIE Wuren. Activity time of strike-slip faults and their controlling effects on hydrocarbon accumulation in central Sichuan Basin: evidence from U-Pb dating and fluid inclusions of cements in fault zone [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(4): 642-658.

近年来,随着三维地震资料的应用,油气勘探中的断层识别精度得到提高,发育于克拉通盆地内部稳定区的较为隐蔽的一类走滑断裂也被发现并引起关注^[1-4]。塔里木盆地中部在奥陶系内发现了受走滑断裂系统控制的超大规模油气田^[5-7],证实走滑断裂对储集层改造、油气运聚成藏与富集有显著的控制作用;四川盆地中部(川中地区)在震旦系一下古生界海相层系中也发现多组走滑断裂。由此,关于走滑断裂对油气的控储、控藏作用研究得到了重视。

目前,经过多轮地震探测与处理解释技术攻关,在川中地区以及四川盆地北斜坡地区,三维地震工区内走滑断裂的分布特征已基本厘清^[5, 8-10],但由于走滑断裂的垂向断距和水平滑移距均较小,走滑断裂的地震响应特征不显著,同时受多期构造叠加改造影响,走滑断裂的形成与活动时期仍难以判识。Li 等^[11]以川中地区 2778 km² 范围内的三维地震资料为基础,指出该地区在兴凯旋回期间发育右行张扭走滑断层,在加里东旋回期间发育弱挤压左行走滑断层。马德波等^[8]基于 6600 km² 三维地震资料的解析认为,高石梯—磨溪地区的古生界发育早加里东期右行和晚海西期左行 2 期张扭走滑断层;但苏楠等^[12]认为,该地区的高陡走滑断裂形成于喜马拉雅期,与四川盆地新生代发生的逆时针旋转造成的扭张应力环境有关。焦方正等^[5]认为,川中地区的走滑断裂形成于震旦纪,并存在加里东期—海西期多期继承性活动,仅个别断裂带在中生代—新生代再次复活。管树巍等^[10]通过分析磨溪地区与高石梯地区之间凹陷的构造沉降量,结合深层走滑断裂与浅层伴生构造的关系认为,走滑断裂经历了晚奥陶世—志留纪右行走滑阶段、晚古生代—三叠纪断层沉寂阶段和中侏罗世至今左行走滑阶段。马兵山等^[13]采用地震-地质解析方法和断层充填碳酸盐胶结

物 U-Pb 定年方法厘定了走滑断裂的活动时期,认为川中地区的走滑断裂经历了南华纪走滑断层萌芽阶段、晚震旦世一早寒武世右行张扭走滑阶段、奥陶纪—二叠纪前弱压扭走滑阶段和晚二叠世左行弱张扭走滑阶段,仅有极少数断裂在印支期及后期被选择性激活。以上研究表明,川中地区走滑断裂系统的成因复杂且经历多期活动,但目前基于年代学证据揭示的断层形成与活动时期的研究和数据较少且存在争议。对走滑断裂形成演化过程及其对油气的控储、控藏作用的认知将直接影响川中地区油气多层系立体勘探的选区、选带和选层。

断裂带内的脉体是断裂带流体活动的主要产物,脉体中多期沉淀的矿物及其中的流体包裹体作为直接证据,记录了断裂带的多期活动和流体作用;分析脉体中矿物的生长特征、开展碳酸盐 U-Pb 定年以及流体包裹体分析,可以很好地恢复断裂或裂缝的形成/开启时间以及流体活动历史^[14-19]。笔者在川中地区采集了走滑断裂附近震旦系灯影组、寒武系龙王庙组和二叠系栖霞组—茅口组等多层系内发育的与断裂活动有关的含多期脉体的岩心样品,通过分析充填碳酸盐胶结物的 U-Pb 定年结果以及闪锌矿、石英和萤石等热液矿物的同位素定年结果,结合岩相学和流体包裹体特征,综合厘定了川中地区走滑断裂的多期次活动时间,并在此基础上分析了走滑断裂对川中地区多层系油气成藏与油气差异聚集的控制作用。

1 地质背景

四川盆地经历了多期构造-沉积旋回,形成了震旦系—志留系海相克拉通断陷盆地、石炭系—中三叠统海相克拉通坳陷盆地、上三叠统一新生界前陆盆地等

原型盆地的有序叠合^[20],断裂系统和油气系统发育(图1)。川中地区位于四川盆地中部盐亭—南充—合川一带,构造上属于川中平缓构造带[图1(a)]。震旦纪—寒武纪,受兴凯地裂运动控制,研究区形成了德阳—安岳克拉通内裂陷^[21-22];晚加里东期,研究区在强烈挤压作用下形成乐山—龙女寺古隆起;海西期—燕山期,古隆起整体呈继承性发育,其轴线稍有迁移;喜马拉雅期,古隆起最终定型^[23]。三维地震精细刻画揭示川中地区的震旦系—下古生界海相地层发育多组走

滑断裂[图1(a)],其在平面上以发育小位移斜列、雁列断层为主,发育近EW向、NW向和NE向3组断裂体系[图1(a)],在剖面上表现为高陡直立的花状构造样式、“Y”字形与反“Y”字形构造样式[图1(c)],断裂系统具有分层、分级、分类与分段的特点^[5,8-9,13]。根据断裂向上发育终止的层位以及分层的差异可确定走滑断裂的活动期次^[1,24]。川中地区走滑断裂发生的垂向位移小并且没有断至地表,同时又叠加了多期构造改造,导致其形成时期难以判识。

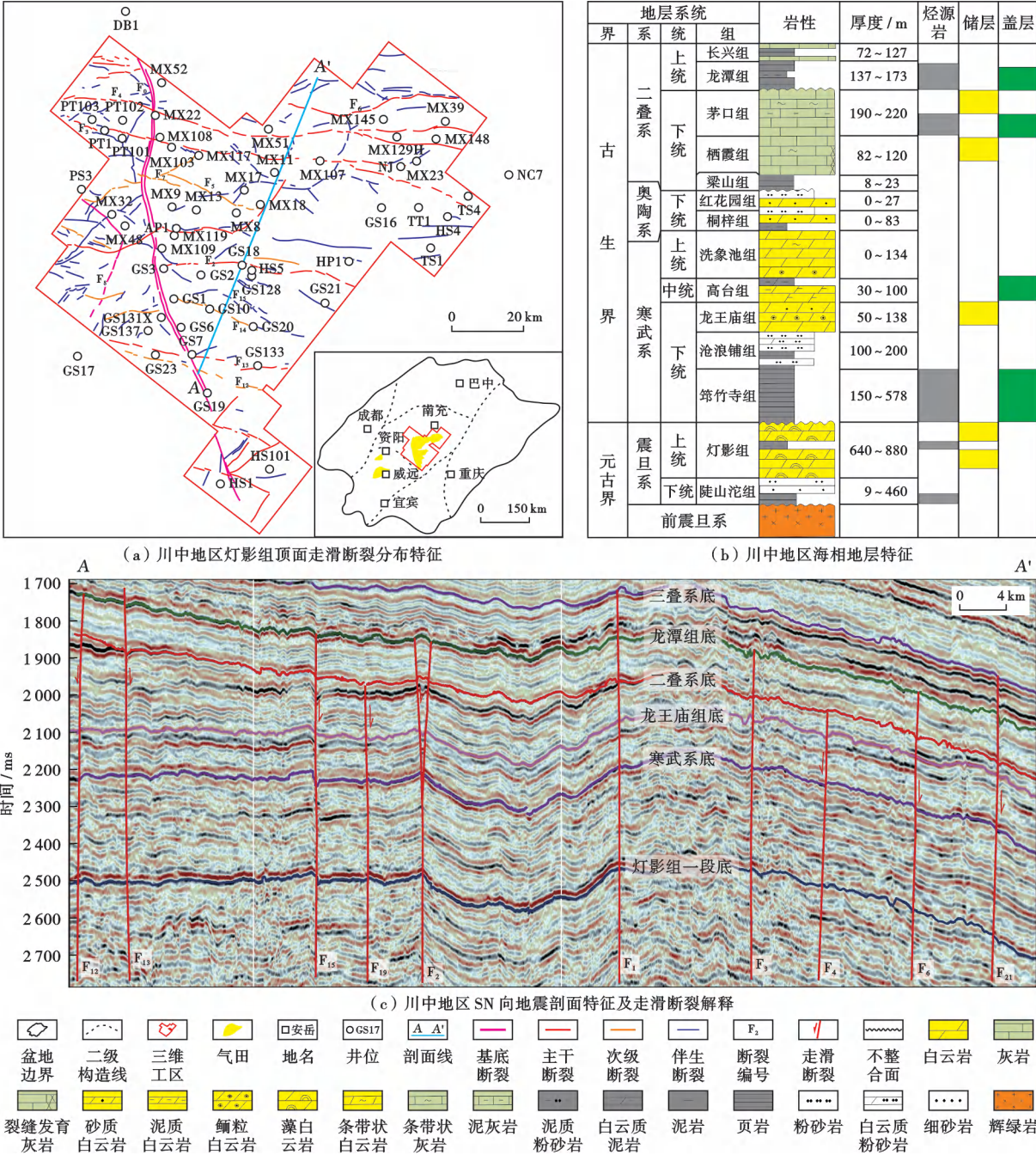


图1 川中地区走滑断裂分布、地层特征及典型地震剖面(据文献[8]修改)

Fig. 1 Strike-slip fault distribution, stratigraphic characteristics and typical seismic profiles in central Sichuan Basin

目前,川中隆起带在灯影组二段(灯二段)、灯影组四段(灯四段)和龙王庙组已探明天然气储量超过万亿立方米,并在洗象池组、栖霞组、茅口组、玄武岩地层和长兴组等多个层系获得工业气流,呈现出多层系立体成藏的特点^[25]。基于天然气组分、碳/氢同位素等数据开展的气源对比的分析表明,川中地区震旦系灯影组、寒武系和二叠系中的天然气均为原油裂解气,主要来源于下寒武统筇竹寺组烃源岩,仅少量气藏可能有来自震旦系、志留系烃源岩的贡献^[26-28]。因此,通源走滑断裂是控制川中地区震旦系一下二叠统多层系油气立体成藏与差异富集的关键要素。

2 样品与实验方法

2.1 实验样品

样品来自川中地区 PT1 井、PS4 井、MX103 井、MX148 井、MX39 井和 MX42 井等 15 口取心井,共计 96 块,层位涵盖震旦系灯二段与灯四段、寒武系龙王庙组和中二叠统栖霞组—茅口组,岩性主要为细晶—粗晶白云岩、砾屑白云岩、藻白云岩和生屑灰岩。选取靠近断裂带发育的脉体和构造角砾岩样品制备岩石薄片和流体包裹体薄片,对其开展了岩相学观察、流体包裹体测温和碳酸盐 U-Pb 定年等分析,同时对岩石孔洞中挑选出的萤石矿物颗粒开展了 Sm-Nd 同位素定年分析。

2.2 实验方法

岩相学观察、流体包裹体测温、阴极发光鉴定和碳酸盐 U-Pb 定年分析均在中国石油天然气集团有限公司盆地构造与油气成藏重点实验室完成。其中,岩石薄片观察所用仪器为 ZEISS Axio Imager M2 pol 型偏光显微镜;阴极发光观察所用仪器为 CLF-2 型冷阴极发光仪,测试电压为 13 kV,电流为 300 mA;流体包裹体测温仪器为 Linkam MDSG600 型冷热台,测温误差为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。激光原位碳酸盐 U-Pb 定年采用 Thermo Scientific Element XR 型高分辨率电感耦合等离子体质谱仪和 NWR HE 193 nm 型准分子激光剥蚀系统,接口使用 Jet 采样锥 + H 截取锥组合,在载气氦气中引入少量氮气以进一步提高仪器灵敏度。为确保激光微区碳酸盐 U-Pb 定年结果的可靠性,在测年之前必须开展详细的岩相学和矿物阴极发光鉴定,明确矿物成岩的序次关系、矿物类型和后期流体改造影响;激光布点时要避开被后期流体活动改造部位,保证所有测点位于单一期次形成的矿物内,然后针对定年矿物采用网格法筛选、边筛边布点的方法快速筛选出高 U 含量和低普通 Pb 含量的点位,有效提高靶点筛选和布点的效率^[29]。萤石 Sm-Nd 同位素定年测试在中

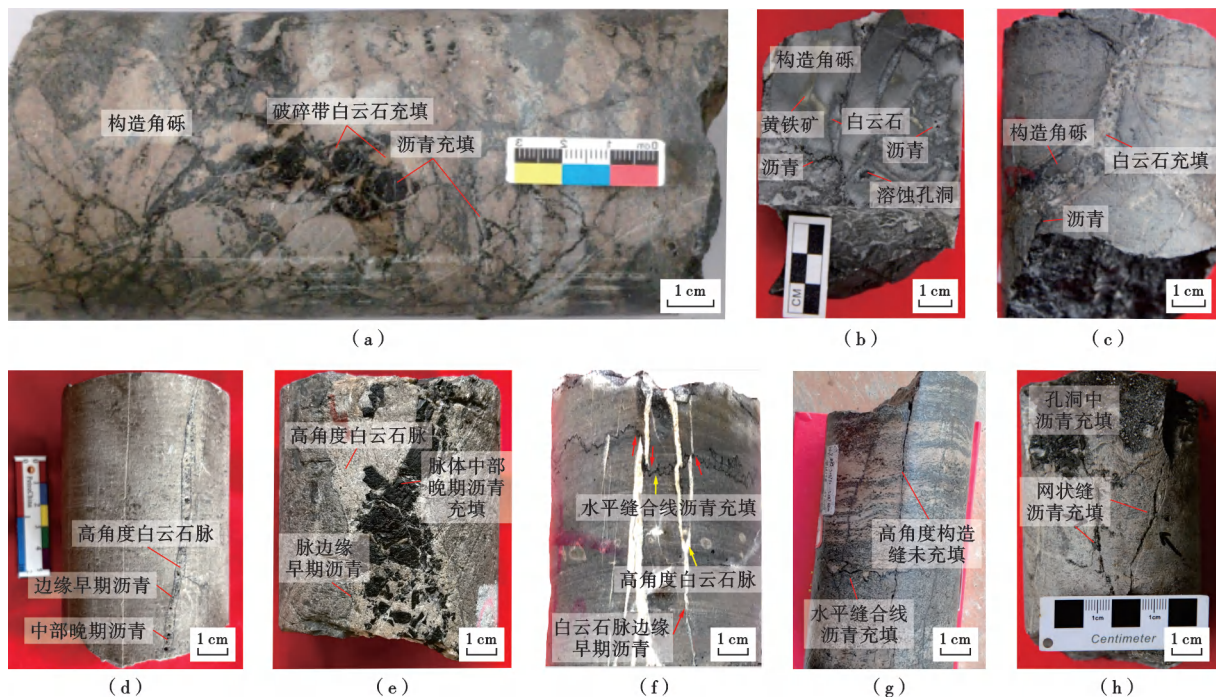
国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室完成,实验采用 Thermo Scientific Triton 型热电离质谱仪(TIMS),利用溶液法分别测定萤石中的 Sm、Nd 同位素比值。

3 实验结果

3.1 岩相学特征

在川中地区走滑断裂附近的灯影组储层中,脉体及孔洞中的多期次胶结物记录了断裂的多期运动和流体活动历史。断层带核部主要发育构造角砾岩,破碎的角砾之间被鞍状白云石和沥青充填[图 2(a)—图 2(c)];断裂破碎带中裂缝发育,这些裂缝多为高角度近垂直的张性裂缝,多期次的胶结物从裂缝面向内对称生长,依次充填栉壳状白云石、早期沥青、鞍状白云石和晚期沥青[图 2(d)、图 2(e)],同时可见近水平的压溶缝合线切割高角度白云石脉^[30][图 2(f)],局部可见构造缝切割水平缝合线[图 2(g)],晚期发育的构造缝未见胶结物充填或仅充填少量沥青[图 2(h)]。

岩相学和岩石阴极发光特征表明:细脉中多充填 1 期或 2 期胶结物,粗脉因受长期继承性拉张作用影响而发育多期胶结物充填。粗脉中的多期胶结物从裂缝面向中间对称生长,依次发育具有亮色环边的栉壳状白云石、暗色细晶白云石、暗色粗晶白云石、亮红色鞍状白云石、沥青和石英[图 3(a)],反映了裂缝的多期拉张作用和流体活动;而细脉中只充填了具有亮色环边的栉壳状白云石和暗色细晶白云石,反映细脉在晚期为闭合状态。多期脉体与溶蚀孔洞相连,由于脉体沿构造裂缝切割溶蚀孔洞,裂缝和溶蚀孔洞中充填的胶结物相同[图 3(b)—图 3(d)]。微生物白云岩中发育 2 期细脉,且与孔洞充填物相连,其中,早期发育的“X”形细脉在阴极发光条件下呈暗色,切割孔洞边缘的栉壳状白云石和细晶白云石,与孔洞内的中—粗晶白云石为同期流体产物,而晚期细脉为亮红色,切割早期细脉和孔洞边缘的栉壳状白云石、细晶/粗晶白云石,最终与孔洞中亮红色鞍状白云石相连,反映晚期细脉与孔洞中的鞍状白云石为同期流体产物[图 3(c)];此外,脉体可沿葡萄花边状白云石与母岩之间的接触面发育,脉体中依次充填亮红色鞍状白云石、方铅矿和石英,其中,鞍状白云石沿细脉切割早期胶结物,最终与孔洞中的鞍状白云石相连[图 3(d)]。粗脉中可见亮红色鞍状白云石充填裂缝,后期出现方解石交代白云石、萤石交代方解石和白云石,反映了流体的多期次活动[图 3(e)]。溶蚀孔洞中形成的多期次胶结物也间接反映断裂带的多期流体活动特征。



(a)断裂破碎带中发育构造角砾岩,砾石间被鞍状白云石和沥青充填,灯四段,MX39 井 5 271. 13~5 271. 30 m;(b)断裂破碎带中发育构造角砾岩,砾石间被鞍状白云石和沥青充填,鞍状白云石中见溶蚀孔洞,砾石中母岩被黄铁矿交代,灯二段,PT1 井 5 771. 72m;(c)断裂破碎带中发育构造角砾岩,砾石间被鞍状白云石和沥青充填,灯四段,ZT1 井 4 944. 52m;(d)高角度白云石细脉,脉体边缘发育早期沥青薄膜,中间由晚期沥青充填,灯四段,MX39 井 5 277. 54~5 277. 57 m;(e)高角度白云石宽脉,脉体边缘发育早期沥青薄膜,白云石脉中夹大量晚期沥青,灯二段,PT4 井 6 184. 43 m;(f)近层理方向的压溶缝合线切割高角度的白云石脉体^[30],白云石脉体尾端呈撕裂状,反映张性特征,灯四段,GS102 井 5 181. 92 m;(g)高角度构造缝切割水平压溶缝合线,高角度缝未充填,灯四段,MX39 井 5 287. 30~5 287. 48 m;(h)高角度“X”形网状缝中沥青部分充填,灯四段,ZT1 井 4 975. 26 m。

图 2 川中地区走滑断裂附近灯影组储层的岩心特征

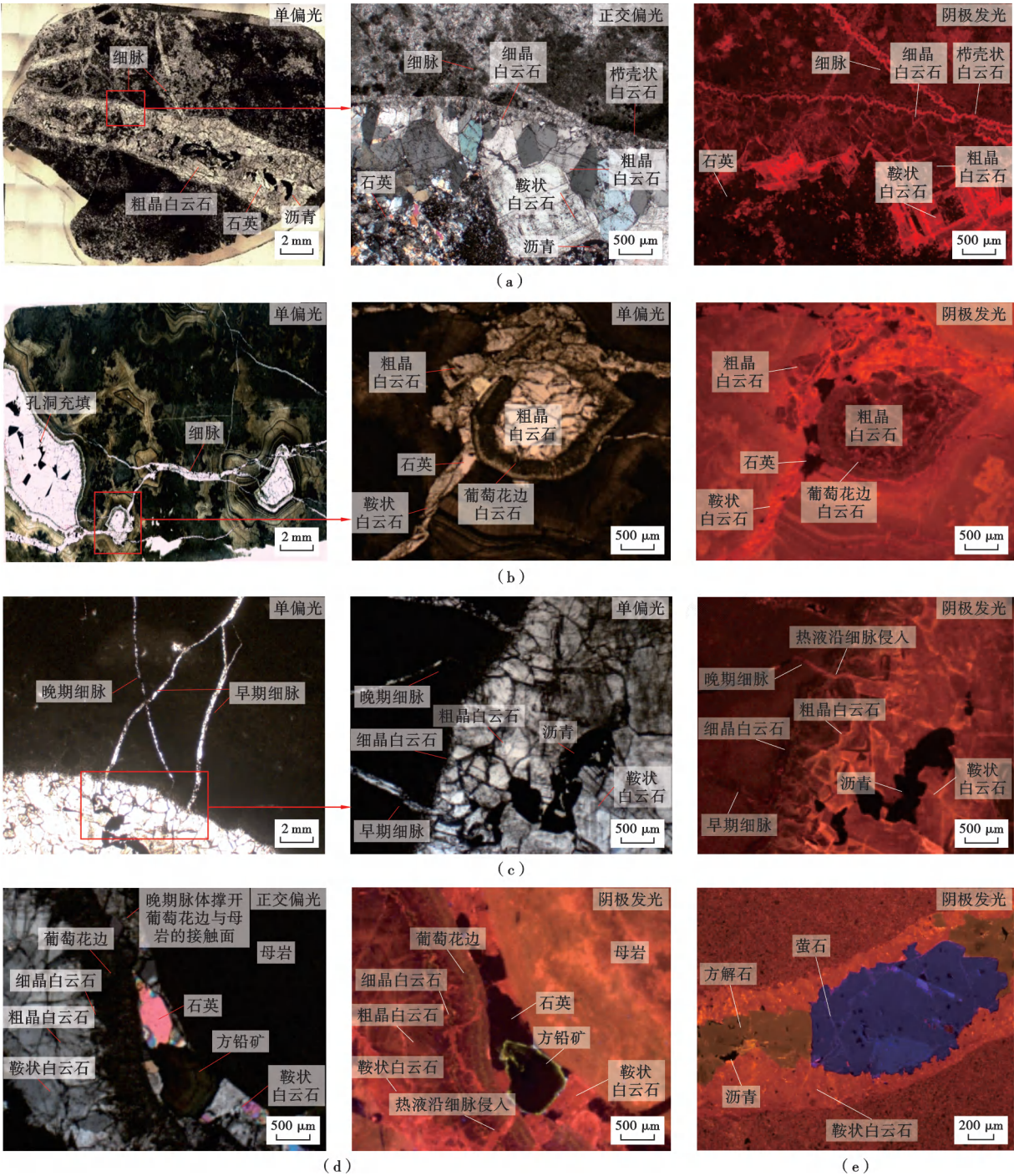
Fig. 2 Core characteristics of reservoir of Dengying Formation near strike-slip fault in central Sichuan Basin

范俊佳等^[31]对川中地区灯影组储层内溶蚀孔洞和裂缝中的多期次胶结物进行了厘定,确定了自生胶结物的成岩序次为:葡萄花边状白云石(阴极发光下呈暗色)—栉壳状白云石(阴极发光下具亮色环边)—细晶白云石(阴极发光下呈暗色)—早期沥青—中晶/粗晶白云石(阴极发光下呈暗色)—鞍状白云石(阴极发光下呈亮红色)—晚期沥青—黄铁矿、铅锌矿与方解石[与热化学硫酸盐还原(TSR)作用有关]—石英(阴极发光下不发光)—萤石(阴极发光下呈亮蓝色)。其中,除早期葡萄花边状白云石为发育在准同生期溶蚀孔洞中的海水成因胶结物外,其他期次胶结物均与断裂或裂缝中的流体活动有关,记录了多期次的断裂与流体活动。

3.2 同位素定年结果

图 4 和表 1 为川中地区震旦系一二叠系储层中裂缝和孔洞内充填的多期次白云石和方解石的 U-Pb 定年结果以及灯影组储层中萤石的 Sm-Nd 同位素定年结果。笔者结合已有的矿物定年结果^[30,32-38](表 2)、

成岩特征与成岩作用先后序次,进一步明确了川中地区断裂带经历的多期次流体活动和相应胶结物中矿物发育的顺序:①裂缝边部的栉壳状白云石—细晶白云石,该期白云石为第 I 期胶结物,其 U-Pb 年龄为 513. 4~501. 0 Ma;②中晶—粗晶白云石,其 U-Pb 年龄为 479. 6~474. 0 Ma;③粗晶白云石,其 U-Pb 年龄为 430. 0~400. 0 Ma;④鞍状白云石与少量伴生的方解石,其 U-Pb 年龄为 262. 7~246. 0 Ma,其中,灯影组、龙王庙组和栖霞组都发育热液成因的鞍状白云石,且不同层系中鞍状白云石的 U-Pb 年龄都分布在晚二叠纪末期—早三叠世早期^[32-34],说明其为同一期断裂流体活动的产物;⑤方铅矿与闪锌矿,其为断控型 TSR 作用的产物^[39],铅锌矿的 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素定年结果为 225. 0~191. 9 Ma^[35];⑥石英,其包裹体的 ³⁹Ar-⁴⁰Ar 同位素定年结果为 (125. 8±8. 2) Ma^[36];⑦萤石,其 Sm-Nd 同位素定年结果结合川滇黔地区以往的资料^[37-38]分析为 129. 7~100. 0 Ma。



(a)微生物白云岩中发育细脉和粗脉,二者相互连接,粗脉中的胶结物为具有亮红色环边的栉壳状白云石、暗色细晶白云石、暗色粗晶白云石、亮红色鞍状白云石、沥青和石英,灯二段,PT1井5771.71~5771.86m;(b)微生物白云岩中见多期细脉切割孔洞或与孔洞胶结物相连,细脉切割孔洞充填物,孔洞中依次充填葡萄花边状白云石和粗晶白云石,脉体中充填亮红色鞍状白云石和石英,鞍状白云石细脉使孔洞边缘呈破碎状,灯二段,PS4井6185.60m;(c)微生物白云岩中发育2期细脉,与孔洞充填物相连,早期的“X”形细脉在阴极发光条件下呈暗色,切割孔洞边缘的栉壳状白云石和细晶白云石,与孔洞中的暗色中一粗晶白云石为同期流体产物,晚期细脉为亮色,切割孔洞边缘的栉壳状白云石、细晶/粗晶白云石,与孔洞中亮红色鞍状白云石相连,灯二段,PS4井6206.26m;(d)微生物白云岩中沿葡萄花边状白云石与母岩之间的接触面发育细脉,脉体中依次充填亮红色鞍状白云石、方铅矿和石英,鞍状白云石沿细脉切割葡萄花边状白云石、细晶白云石和粗晶白云石,与孔洞中鞍状白云石相连,灯二段,PS4井6209.29m;(e)裂缝中充填鞍状白云石,后期方解石交代白云石、萤石交代方解石与白云石,灯四段,MX51井5334.14m,阴极发光。

图 3 川中地区断裂带附近灯影组储层裂缝脉体和孔洞充填物的岩相学特征

Fig. 3 Petrographic characteristics of fractured veins and cavity filling minerals of Dengying Formation near fault zones in central Sichuan Basin

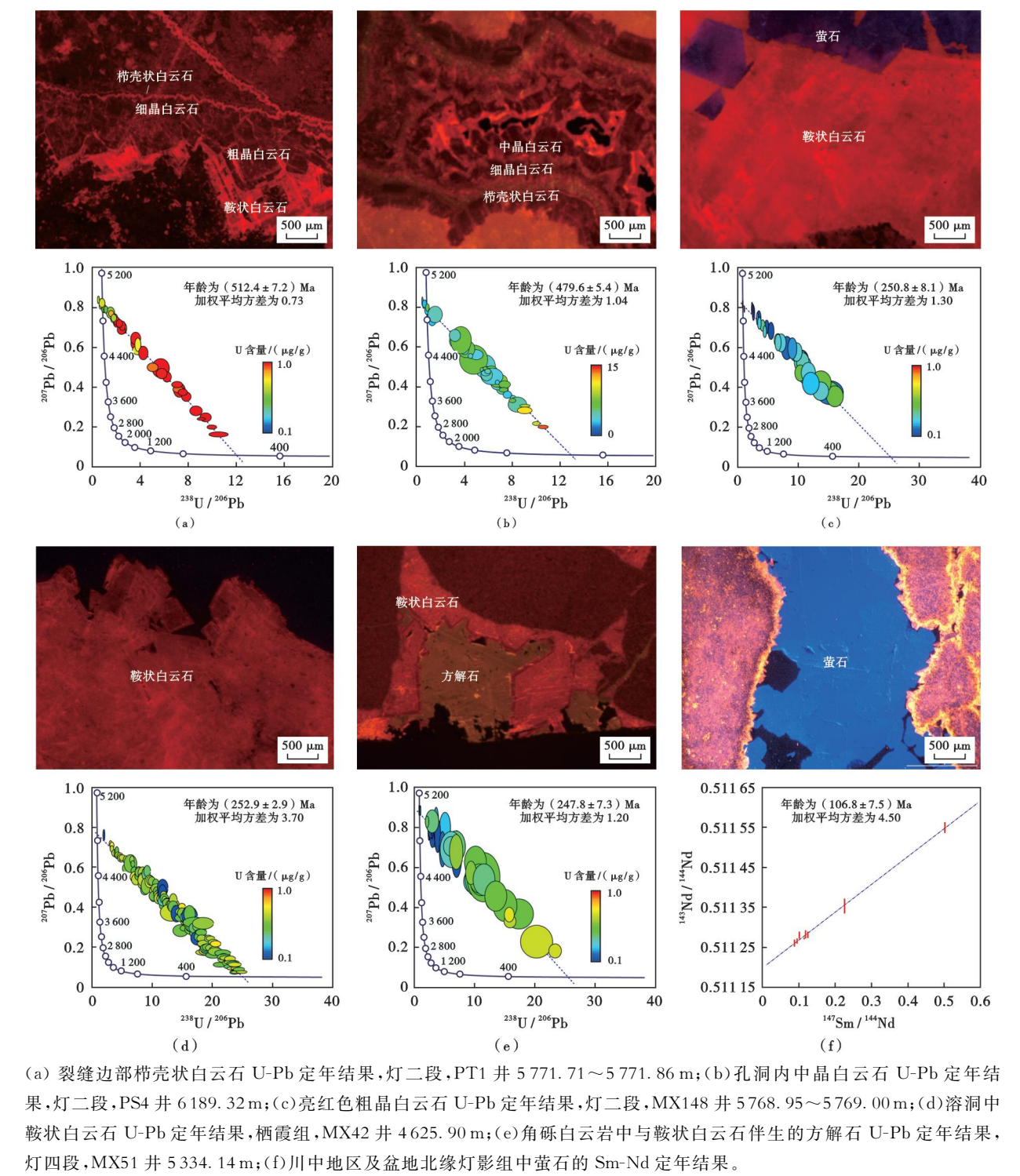


图 4 川中地区与断裂活动有关的矿物定年结果

Fig. 4 Results of mineral dating related to fault activity in central Sichuan

3.3 流体包裹体温度与盐度特征

在过灯影组的断裂带中，早期胶结物为栉壳状白云石和细晶白云石，这种白云石由于晶体小，很少有包裹体。中晶—粗晶白云石、鞍状白云石、石英与萤石中发育多期流体包裹体组合且包裹体类型多样。范俊佳等^[31]对灯影组储层中矿物的成岩演化序列及不同成

岩矿物发育的包裹体类型、组合和期次进行的研究认为：鞍状白云石和石英中既发育原生盐水包裹体组合，也发育与沥青、纯气相甲烷包裹体伴生的次生气-液两相盐水包裹体组合；萤石中发育 3 期包裹体组合，第 1 期为呈群体分布的、气液比为 5%~10% 的气-液两相与纯气相甲烷包裹体组合，第 2 期为在萤石颗粒内呈

表 1 川中地区碳酸盐矿物激光微区 U-Pb 定年结果

Table 1 Results of laser microprobe U-Pb dating of carbonate minerals in central Sichuan Basin

矿物类型	样品位置	U 含量/ 10^{-6}	Pb 含量/ 10^{-6}	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$	U-Pb 年龄/Ma	加权平均方差	点数
栉壳状白云石	灯二段,PT1 井 5 771.76 m	0.780~10.560	0.210~0.820	0.780~10.560	512.4 ± 7.2	0.86	40
中晶白云石	灯二段,ZS101 井 6 240.09 m	0.001~1.100	0.063~19.940	0.085~4.150	477.0 ± 19.0	1.40	49
中晶白云石	灯二段,PS4 井 6 193.34 m	0.028~14.000	0.360~36.700	0.317~10.750	479.6 ± 5.4	1.04	47
中晶白云石	灯四段,MX51 井 5 334.10 m	0.314~3.330	0.170~11.700	0.420~10.360	474.0 ± 12.0	5.90	60
鞍状白云石	灯二段,MX148 井 5 769.00 m	0.080~0.290	0.018~0.590	0.730~17.200	250.8 ± 8.1	1.30	37
鞍状白云石	栖霞组,MX42 井 4 625.90 m	0.040~0.670	0.009~0.730	1.830~25.190	252.9 ± 2.9	3.70	145
方解石	灯四段,MX51 井 5 334.10 m	0.540~20.980	0.180~0.910	0.590~23.300	247.8 ± 7.3	1.20	40
方解石	灯四段,MX103 井 5 198.20 m	0.043~1.129	0.001~11.640	0.005~29.310	213.3 ± 2.8	2.80	58

表 2 四川盆地及周缘与断裂活动有关的矿物定年结果

Table 2 Dating results of minerals related to fault activity in Sichuan Basin and its periphery

位置	取样点	层位	矿物	岩相学特征	测试方法	定年结果/Ma	文献来源
磨溪—高石梯地区及邻区	PT1 井	灯二段	栉壳状白云石	分布在裂缝边缘,为白云石砾屑周围的最早一期胶结物;在阴极发光下核部较暗,边部为亮红色	U-Pb	512.4 ± 7.2	文献[30]
	GS102 井	灯四段	细晶白云石	充填于垂直裂缝中	U-Pb	513.5 ± 9.8 507.8 ± 6.9 501.0 ± 12.0	
	PS4 井、ZS101 井	灯二段	中晶白云石	分布于裂缝和晶洞中,在阴极发光下呈暗色	U-Pb	479.6 ± 5.4 477.0 ± 19.0	
	MX51 井	灯四段	中晶白云石	分布于裂缝和晶洞中,在阴极发光下呈暗色	U-Pb	474.0 ± 12.0	
	MX21 井、MX51 井	灯四段	粗晶白云石	分布于裂缝、晶洞中部,在阴极光下核部呈亮红色、边部较暗	U-Pb	415.0 ± 16.0 405.0 ± 16.0 400.0 ± 35.0	文献[30]
	鼓城剖面、MX148 井	灯二段	鞍状白云石	中晶—粗晶,充填于孔洞中,表面较脏,在阴极发光下呈亮红色	U-Pb	250.8 ± 8.1 248.0 ± 27.0 246.3 ± 1.5	部分据文献[32]
	MX119 井、MX51 井	灯四段	方解石	去白云石化作用的产物,交代鞍状白云石后充填于孔洞,后期被萤石、石英交代	U-Pb	259.4 ± 3.0 247.4 ± 7.3	部分据文献[30]
	MX42 井、MX108 井	栖霞组二段	鞍状白云石	充填于溶蚀孔洞,具有典型的鞍状晶体形态	U-Pb	262.7 ± 7.5 256.0 ± 12.0 252.9 ± 2.9	部分据文献[33-34]
磨溪地区	MX103 井	灯四段	方解石	其形成晚于鞍状白云石,与沥青伴生,可能为 TSR 作用的产物	U-Pb	213.3 ± 2.8	
盆地西南缘	川滇黔铅锌矿	灯影组	闪锌矿	发育于溶蚀孔洞和脉体中,与沥青伴生,其形成晚于鞍状白云石	Sm-Nd、Rb-Sr	225.0~191.9	文献[35]
磨溪—高石梯地区	MX21 井	龙王庙组	石英	发育于溶蚀孔洞中,其形成晚于鞍状白云石,呈自形—半自形	³⁹ Ar- ⁴⁰ Ar	125.8 ± 8.2	文献[36]
四川盆地周缘及川中地区	新立、朗溪、河坝地区	灯影组、奥陶系	萤石	发育于溶蚀孔洞和脉体中,交代白云石、方解石,内部见有交代残余	Sm-Nd	129.74 ± 0.61 128.3 ± 6.8 104.0 ± 14.0 100.0	文献[37-38]
	川中地区	灯影组	萤石	发育于溶蚀孔洞和脉体中,交代白云石、方解石,内部见有交代残余	Sm-Nd	106.8 ± 7.5	

定向分布的气-液两相与纯气相甲烷包裹体组合,第 3 期为呈定向分布且穿过 2 个以上萤石颗粒的、具有不同气液比特征的气-液两相与纯气相甲烷包裹体组合,为晚期构造流体事件在早期矿物中形成的次生流体包裹体组合。笔者重点研究这些流体包裹体组合中的盐水包裹体的均一温度和盐度特征,剔除受流体包裹体再平衡作用^[40]影响的温度和盐度数据后,走滑断裂中的流体活动可以划分为 5 期(图 5):①第 1 期流体为细晶—中晶白云石中的原生盐水包裹体组合,其均一温度为 76.90~82.90℃,盐度为 2.38%~6.12%;②第 2 期流体为粗

晶白云石中的原生盐水包裹体组合,其均一温度为 116.60~130.50℃,盐度为 6.92%~11.35%;③第 3 期流体为鞍状白云石和石英加大边中的原生盐水包裹体组合,其均一温度为 121.43~151.93℃,盐度为 15.70%~26.05%;④第 4 期流体为石英、萤石以及鞍状白云石中与含沥青包裹体伴生的盐水包裹体组合,反映了原油裂解早期阶段的流体特征,其均一温度为 174.50~270.00℃,盐度为 7.85%~15.76%;⑤第 5 期流体为石英、萤石和鞍状白云石中与气体包裹体伴生的次生盐水包裹体组合,反映了原油裂解晚期阶段及之后构造抬升阶段的流体特

征,其均一温度为 132.40~238.40℃,盐度为 1.74%~7.31%。流体包裹体的均一温度和盐度特征(图 5)分析表明:与第 1 期流体相比,第 2 期流体的温度和盐度逐渐增高,反映白云石在从细晶一中晶到粗晶的形成过程中,地层流体的演化表现为原生海水在深埋过程中逐渐浓缩,盐度也随之增加;第 3 期流体的盐度突然增加到 15% 以上,表明鞍状白云石和早期石英应该形成于深部异常高盐度的热液流体;第 4 期流体的温度继续增加但盐度降低,表明晚期的石英和萤石形成于高温深埋过程中,而流体盐度的降低是由于大量热液矿物沉淀造成;

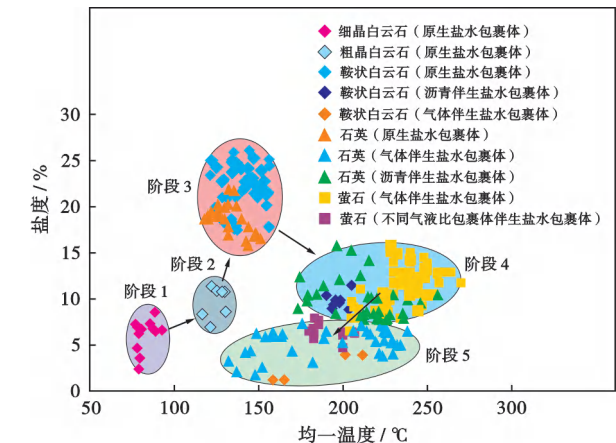
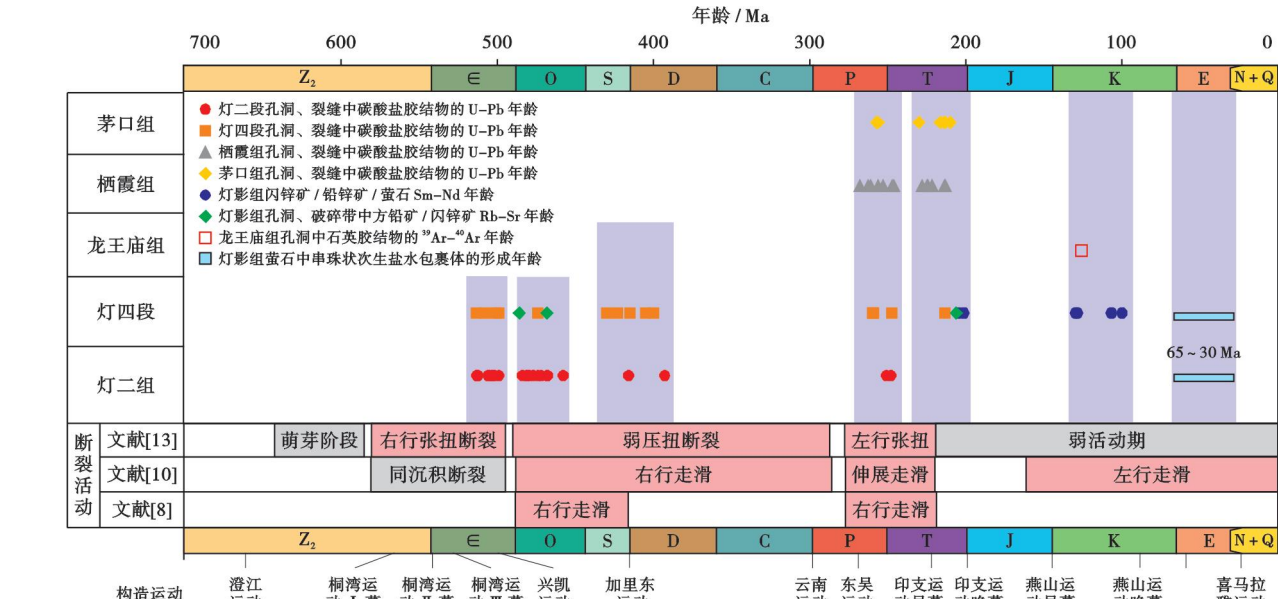


图 5 川中地区灯影组储层中多期次流体包裹体的温度和盐度特征

Fig. 5 Temperature and salinity characteristics of multi-stage fluid inclusions in reservoir of Dengying Formation in central Sichuan Basin



注:Z₂—晚震旦世;E—寒武纪;O—奥陶纪;S—志留纪;D—泥盆纪;C—石炭纪;P—二叠纪;T—三叠纪;J—侏罗纪;K—白垩纪;E—古近纪;N+Q—新近纪与第四纪。

图 6 川中地区震旦系—二叠系沿走滑断裂多期次胶结物的年龄分布与断裂活动阶段

Fig. 6 Age distribution of multi-stage cements from Sinian to Permian along strike-slip faults and fault activity stages in central Sichuan Basin

第 5 期流体的温度和盐度又逐渐减小,反映了晚期处于构造抬升逐渐降温的过程。

4 讨 论

4.1 走滑断裂经历了多期阶段性活动

结合矿物定年结果与流体包裹体特征以及前人对四川盆地构造活动事件与阶段的认识^[21-23]可以确定,川中地区的走滑断裂在寒武纪、志留纪—泥盆纪、晚二叠纪、中—晚三叠纪、白垩纪和新生代都有持续性、阶段性的断裂与流体活动(图 6)。

4.1.1 加里东期走滑断裂活动的地质记录

在 PT1 井灯二段白云岩储层中,裂缝边部最早一期的栉壳状白云石的 U-Pb 定年结果为 $(512.4 \pm 7.2)\text{Ma}$ [图 4(a)];Su 等^[30]对 GS102 井、MX21 井和 MX51 井灯四段裂缝中白云石胶结物的 U-Pb 定年结果为 513~501 Ma。在 PS4 井和 ZS101 井灯二段以及 MX54 井灯四段,裂缝中部中晶—粗晶白云石的 U-Pb 定年结果为 $479.6 \sim 474.0\text{Ma}$ 。在 MX103 井灯四段,裂缝边部中晶白云石的 U-Pb 定年结果为 $(430 \pm 24)\text{Ma}$,而来自 MX21 井和 MX51 井的粗晶白云石样品的 U-Pb 定年结果为 415~400 Ma。因此,加里东期的走滑断裂活动大致可以分为 3 期:513~501 Ma、480~474 Ma 和 430~400 Ma,分别对应兴凯地裂运动晚期、早加里东期和晚加里东期。

4.1.2 晚海西期走滑断裂活动的地质记录

二叠纪末期,峨眉大火山岩省玄武岩喷发,在 NE—

SW 向拉张应力作用下, NWW 向断裂发生张扭, 形成大量脉体充填的破裂带^[8]。在该期热液流体上涌过程中, 脉体切割围岩和角砾以及部分早期裂缝边缘的白云石, 形成广泛分布的鞍状白云石(阴极发光下呈亮红色, 图 3), 鞍状白云石形成之后又充注了大量原油(后期裂解为沥青)。

在川中地区, 震旦系灯影组、寒武系龙王庙组和二叠系栖霞组一茅口组均发现鞍状白云石^[41-43]。大量定年结果证明鞍状白云石为晚二叠世峨眉地裂运动的产物。例如: MX148 井灯二段鞍状白云石的 U-Pb 定年结果为 $(250.8 \pm 8.1) \text{ Ma}$ [图 4(c)]; 在 MX42 井栖霞组白云岩溶蚀孔洞中, 鞍状白云石的 U-Pb 定年结果为 $(252.9 \pm 2.9) \text{ Ma}$ [图 4(d)]; MX51 井灯四段中与鞍状白云石伴生的方解石的 U-Pb 年龄为 $(247.4 \pm 7.3) \text{ Ma}$ [图 4(e)]; MX119 井灯四段鞍状白云石的 U-Pb 年龄为 $(259.4 \pm 3.0) \text{ Ma}$ ^[30]; MX42 井和 MX108 井栖霞组鞍状白云石的 U-Pb 年龄分别为 $(262.7 \pm 7.5) \text{ Ma}$ 和 $(256.0 \pm 12.0) \text{ Ma}$ ^[33-34]。

4.1.3 印支期走滑断裂活动的地质记录

中一晚三叠世, 震旦系—寒武系烃源岩处于成熟阶段, 油气大规模生成^[44]。受印支期构造运动影响, 早期形成的走滑断裂再度活化、开启, 油气发生大规模充注。在含鞍状白云石的脉体中可见大量沥青充填(图 2); 同时, 白云石中可见大量沥青包裹体, 为原油包裹体在后期经历高温裂解后的产物。伴随着油气的大规模充注, 印支期的断裂活动导致深部富金属离子的热液流体与还原性的富有机质流体相混合, 发生 TSR 作用, 形成多种硫化物沉淀, 黄铁矿、闪锌矿和方铅矿沿缝合线和高角度裂缝分布^[39]。除四川盆地内部外, 在盆地北缘和川滇黔地区可发现有不同规模的铅锌矿床及矿化点, 前人对闪锌矿的定年分析认为, 川滇黔地区及马元地区的铅锌矿形成时间为 $225.0 \sim 191.9 \text{ Ma}$ ^[35]; 笔者对 MX103 井灯四段裂缝中与沥青伴生的方解石进行了 U-Pb 定年, 其结果为 $(213.3 \pm 2.8) \text{ Ma}$, 进一步说明原油发生 TSR 作用的时间为晚印支期。

4.1.4 燕山期走滑断裂活动的地质记录

燕山期, 四川盆地 NWW 向断裂改为左行张扭运动^[8], 深部高温热液沿着早期裂缝的剩余空间或新生裂缝运移, 形成石英和萤石等热液矿物。显微镜下可见石英交代鞍状白云石[图 3(d)], 其中发育大量气体包裹体、气-液两相包裹体、气-液-沥青包裹体和沥青包裹体; 萤石交代白云石、方解石和石英[图 3(e)], 其中发育大量气体包裹体和气-液两相包裹体。石英和萤石等热液矿物的形成与古油藏大量裂解生气过程在时

间上一致。

在川中地区与四川盆地北缘, 灯影组中萤石的 Sm-Nd 同位素测年结果为 $(106.8 \pm 8.5) \text{ Ma}$ [图 4(f)]。此外, 在 MX21 井龙王庙组, 石英中流体包裹体的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年结果为 $(125.8 \pm 8.2) \text{ Ma}$ ^[36]; 在四川盆地东南部河坝地区, 铅锌矿床中萤石的 Sm-Nd 定年结果约为 130 Ma ^[37]; 在彭水朗溪地区, 奥陶系重晶石-萤石矿床成矿期萤石的 Sm-Nd 定年结果为 $(104 \pm 14) \text{ Ma}$ ^[38]。这些定年结果均与燕山期构造活动的认识相吻合。

4.1.5 喜马拉雅期走滑断裂活动的地质记录

喜马拉雅期, 川中古隆起因受构造挤压而发生抬升, 原油裂解气藏受到调整改造, 但在断裂带中并未见到与喜马拉雅期断裂活动有关的胶结物, 推测喜马拉雅期的断裂活动以压扭封闭为主。样品分析中, 岩心观察可见未被充填的高角度劈裂缝[图 2(g)—图 2(h)]; 萤石和石英中可见大量呈串珠状分布、切割矿物颗粒的非均一捕获的次生包裹体, 这些包裹体常为共生的纯气相甲烷包裹体、不同气液比的盐水包裹体和纯盐水包裹体, 包裹体中的气相成分主要为 CH_4 , 含有少量的 CO_2 和 H_2S ^[31]。伴生的盐水包裹体的均一温度为 $178.5 \sim 218.0^\circ\text{C}$, 结合埋藏史、热演化史推算其对应的形成时间为 $65 \sim 30 \text{ Ma}$ 。这些包裹体为古气藏形成后受构造抬升影响、气藏压力突然释放的产物, 记录了喜马拉雅期构造抬升阶段古气藏调整改造的信息(图 6)。

将矿物定年结果揭示的断裂流体活动与前人利用传统地震方法得到的地质认识^[9-13]进行对比(图 6), 分析表明: ①矿物定年结果与前人根据地质和地震资料划分的走滑断裂形成演化阶段基本一致, 但定年结果更加具体, 能够明确给出断裂流体活动的时间范围; ②由于矿物定年结果反映的是断裂带中流体活动的历史, 对于借助地震资料无法识别的断裂活动, 或者揭示早期断裂在晚期流体活动中是否开启并控制流体运移方面, 矿物定年具有明显优势, 其结果可以作为判断断裂演化和流体活动的重要依据。

4.2 海西期走滑断裂活动控制了优质储层的发育

走滑断裂对经历过深埋成岩作用、以低孔低渗为特征的碳酸盐岩储层具有重要的改造作用^[24, 45]。在川中地区, 位于台缘带的震旦系碳酸盐岩的基质孔隙度为 $2\% \sim 10\%$ 、渗透率为 $1 \sim 5 \text{ mD}$, 而台内碳酸盐岩的基质渗透率一般小于 1 mD , 与全球超深层致密碳酸盐岩储层的渗透率接近^[5]。但在断裂破碎带附近, 由于裂缝与溶蚀孔洞发育[图 7(a)], 可以有效改善储层物性, 断裂带附近碳酸盐岩储层的渗透率可以增加 $1 \sim 2$ 个数量级, 有利于油气富集和高产; 在断裂带核部,

由于脉体内矿物胶结严重,储层物性变差[图 7(a)]。研究表明:走滑断裂活动对灯影组储层具有改善作用,且由于走滑断裂存在分区、分带的特征,断裂带对台内储层的改善程度要强于台缘储层^[46];在距离走滑断裂 0~2 km 范围内,储层渗透率可大幅度提高,局部可增加 2~3 个数量级,尤其是在距断裂带 500 m 的范围内,储层渗透率的改善更为显著^[5,46]。天然气井的

产量测试结果表明,钻揭灯影组的天然气产量大于 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的钻井几乎全位于断裂带附近距离断层 1.5 km 的范围以内,而且,随着井位与断层的距离增大,所获得的天然气产量具有先升高后降低的趋势^[5][图 7(b)]。这与断裂带结构以及其储层物性变化的规律一致,说明天然气的高产明显受断裂带控制。

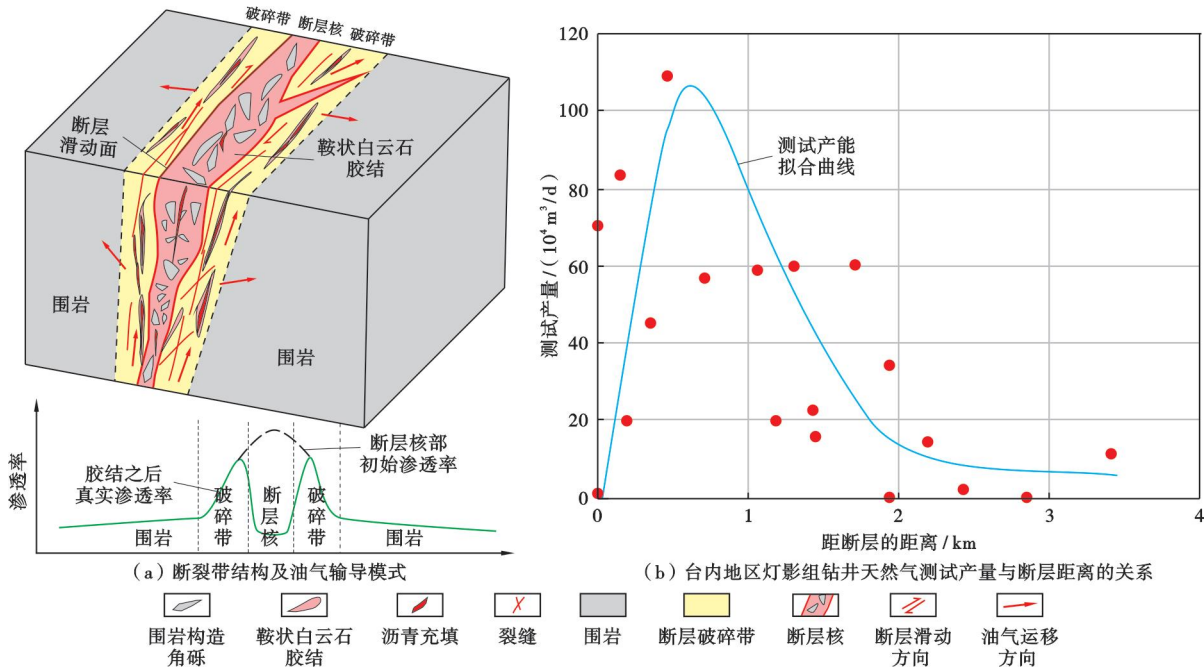


图 7 走滑断裂带结构及其对油气运移与产量的控制作用

Fig. 7 Strike-slip fault belt structure and its controlling effect on oil-gas migration and production

对灯二段、灯四段、龙王庙组和栖霞组一茅口组储层中脉体的矿物特征进行分析,结果表明:早/晚加里东期的断裂活动仅限于灯影组中,而形成于晚二叠世的热液成因鞍状白云石普遍在纵向上多层系中发育,说明二叠纪末期的拉张走滑活动强烈,这与峨眉地裂运动的特征一致。晚海西期的拉张走滑断裂活动切穿至二叠系,并伴随着热液流体活动,在多层系中形成了受断裂控制的热液成因鞍状白云石^[41-43]。该期热液白云石化作用对震旦系—寒武系基质白云岩储层和二叠系灰岩储层具有重要的改造作用,尤其直接控制了茅口组优质白云岩储层的发育^[42]。研究表明,在川中地区,中二叠统栖霞组—茅口组中发育受断裂活动控制的、中—浅埋藏程度的构造-热液成因白云岩储层^[42],储层的面孔率可达 8%,比基质白云岩储层的渗透率高 1~2 个数量级。川中地区的老井复查结果表明,该地区钻遇的二叠系优质白云岩储层主要沿着走滑断裂呈条带状分布,而远离走滑断裂的钻井钻遇的储层物性大多较差,优质白云岩储层的发育与走滑断裂密切相关。

4.3 印支期走滑断裂的继承性活动控制着古油藏的多层系立体成藏

川中地区在二叠纪末期—早三叠纪拉张走滑活动强烈,并随着中—晚三叠世大量油气持续充注,形成了多层系分布的古油藏。其中,走滑断裂有效沟通了烃源岩和储层,而断裂破碎带中的大量裂缝作为油气的优势运移通道,除具有垂向输导作用之外,还具有沿断裂走向的横向输导作用,从而控制着古油藏的多层系立体成藏。

4.3.1 NWW 向走滑断裂具有横向长距离输导油气的作用

川中地区发育多组 NWW 向走滑断裂,由于断裂走向与裂陷槽走向近于垂直且直接深入到裂陷槽内,可有效沟通源岩与储层。断裂走向与油气运移方向一致,这有利于裂陷槽生烃中心产生的原油通过 NWW 向走滑断裂发生长距离运移,其中,断裂带发挥了类似“直通车”的作用,将槽内和台缘带的原油远距离、高效输导至台内带,并在断裂带两侧聚集。例如,在位于台内带的 MX39 井中可发现储层内发育大量沥青,其与

台缘带生烃中心的距离达 80 km。此外,桐湾运动形成的不整合面和淡水淋滤形成的岩溶孔洞发育层段可能也对油气的横向输导起到关键作用。

关于走滑断裂对油气的横向输导作用,主要有以下 2 方面证据:①已发现的闪锌矿、方铅矿等金属硫化物主要沿着 NWW 向走滑断裂分布^[39],由于这些金属

硫化物的形成与原油充注和 TSR 作用直接相关,因此可反映原油充注也主要沿着 NWW 向断裂进行;②在川中地区灯影组和龙王庙组储层中,沥青内的含氮化合物(二苯并噻吩)含量变化^[47]指示原油的充注方向为 NWW 向,且沿着走滑断裂走向可深入到台内地区,这充分证明走滑断裂具有横向输导油气的作用(图 8)。

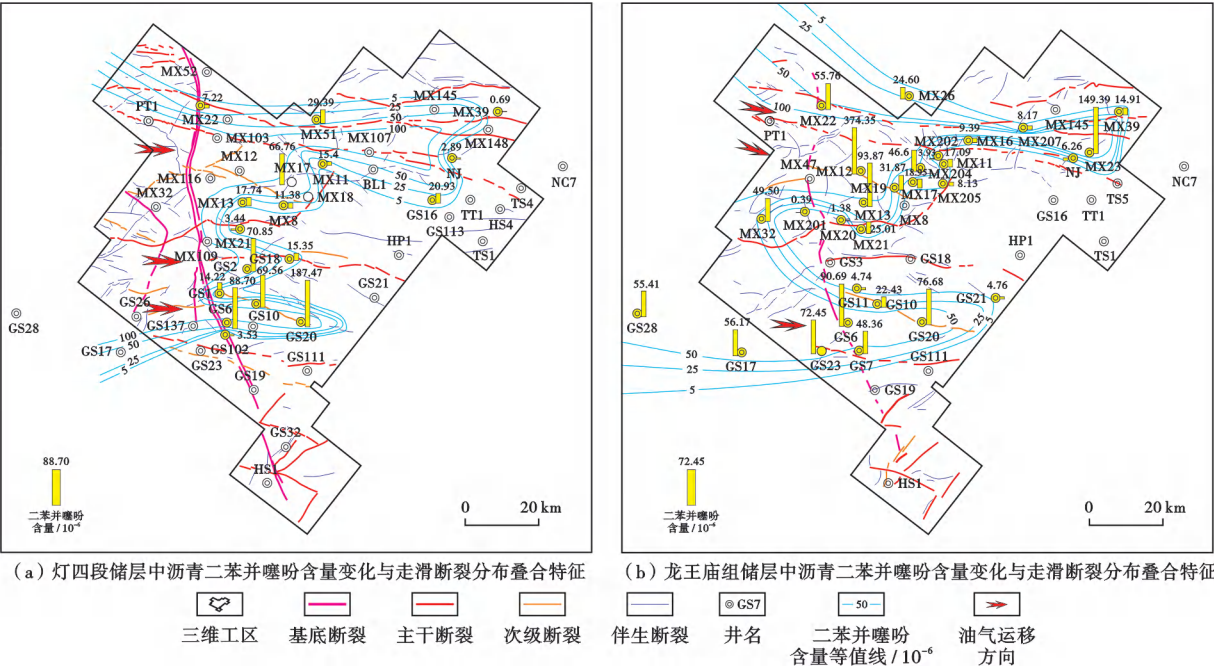


图 8 川中地区灯影组和龙王庙组储层沥青中二苯并噻吩含量与走滑断裂分布的叠合特征(据文献[47]修改)

Fig. 8 Superimposed characteristics of dibenzothiophene contents in bitumen from Dengying Formation and Longwangmia Formation and strike-slip fault distribution in central Sichuan basin

4.3.2 走滑断裂的垂向输导作用促使油气对纵向上的多套储层进行选择性的充注

断裂本身并不能作为好的油气圈闭,沿断裂带发生垂向运移的烃类流体会向断层两侧的岩层侧向分流,并在进入到合适的储集空间后最终聚集成藏。物理模拟实验表明:当断裂带与其两侧砂层的渗透率比值较大时,油气主要沿断裂带发生垂向运移;而当两者的渗透率比值较小时,一部分油气可通过断裂带向砂层发生侧向运移^[48];当油气沿断裂带发生垂向运移时会优先充注到物性更好的储层中^[49]。川中地区的走滑断裂在纵向上沟通了多套储层,这有利于将筇竹寺组烃源岩中生成的油气穿层输导到下伏的震旦系和上覆的沧浪铺组、龙王庙组、栖霞组和茅口组储层中。油气在沿断裂垂向运移的过程中将优先向物性最好的储层段进行侧向分流、运移成藏,即油气通过断裂对纵向上不同层系储层的充注具有选择性。古油藏在印支期形成之后,由于埋深和温度的增加,在燕山期会发生准原位的原油裂解生气并形成古气藏^[31,44],因此,印支期古油藏基本控制了现今气藏的规模和分布特征。

将川中地区灯影组、龙王庙组和栖霞组—茅口组高产气井与走滑断裂的分布相叠合(图 9),分析表明,走滑断裂对多个层系的高产井分布具有控制作用。灯影组、龙王庙组和栖霞组—茅口组各层系的天然气富集在空间上具有“此消彼长”的关系。例如:在磨溪地区,龙王庙组储层发育、天然气富集高产,而灯影组中的天然气产量普遍较低;灯影组中的天然气主要富集在高石梯地区和蓬莱—中江地区;栖霞组—茅口组中的天然气高产井则主要分布在台内带灯影组和龙王庙组储层较差的地区。这一现象说明,油气通过走滑断裂对纵向上不同层系的储层进行了选择性充注,从而造成纵向上多层系立体成藏、差异富集的特点(图 10)。

4.4 燕山期以来的走滑断裂以封闭作用为主,有利于天然气保存

燕山期,川中地区的古油藏开始大量裂解形成古气藏;晚白垩纪以来,四川盆地西北部受九龙山冲断挠曲沉降影响而形成大幅沉降,川中隆起区逐渐抬升剥蚀,形成北低南高的构造格局,古气藏进入调整改造阶

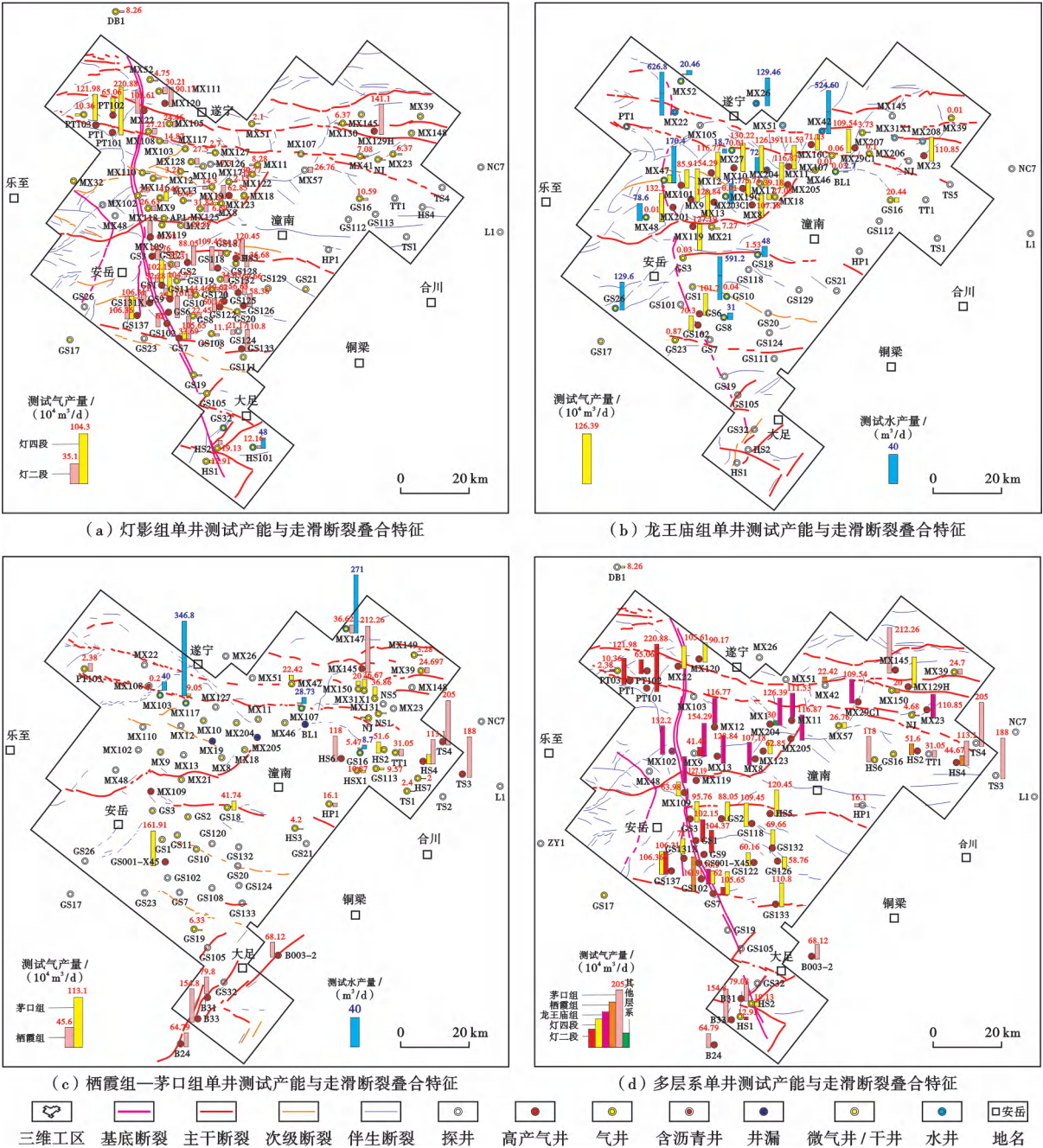


图 9 川中地区走滑断裂分布与多层系单井天然气产量的叠合特征

Fig. 9 Superimposed characteristics of strike-slip fault distribution and single well gas production from multiple strata in central Sichuan Basin

段,其天然气运移方向调整为 NW—SE 向;喜马拉雅期,川中地区受近 EW 向挤压应力作用控制,NWW 向和 NW 向断层转变为左行压扭断层^[50],加之储层中的裂缝带已被胶结物充填殆尽、天然气运移方向与断裂带走向近于垂直等因素,NWW 向走滑断裂主要起封闭作用,这有利于天然气在断裂带的下倾方向富集和保存。

燕山期后,川中地区走滑断裂活动减弱且以油气封闭作用为主的主要证据如下:①在燕山期走滑断裂

内胶结物较少,石英和萤石等热液矿物在灯二段和灯四段储层中较为常见,而在龙王庙组和栖霞组中胶结矿物仅见于少数钻井,这表明燕山期的断裂活动整体较弱,纵向上多层系基本不连通,对油气运移主要起封闭作用,有利于天然气在层系内部保存;②天然气中甲烷、乙烷的碳/氢同位素组成表明,灯影组与龙王庙组、栖霞组-茅口组的天然气特征明显不同,灯影组天然气的组分偏干,乙烷碳同位素偏重,氢同位素偏轻^[27-28],如果燕山期走滑断裂仍然处于开启状态并继续强烈活

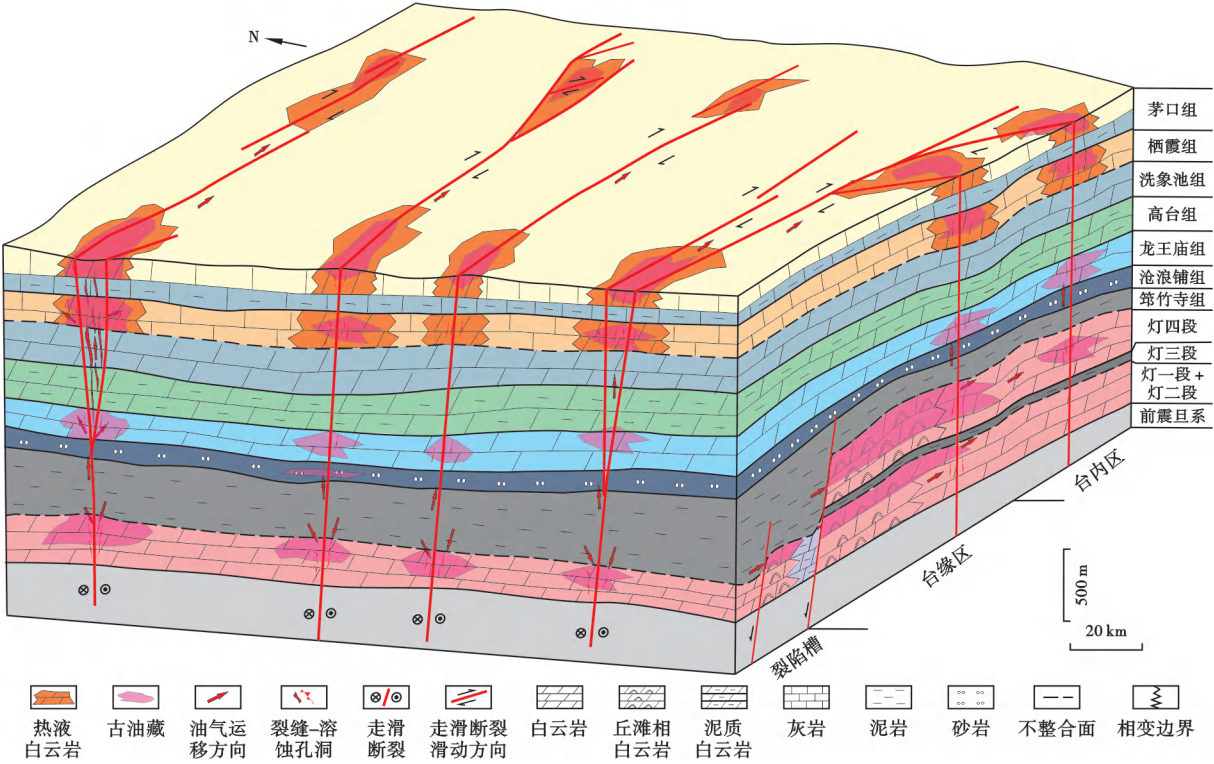


图 10 川中地区印支期走滑断裂控制下的多层系立体控藏模式

Fig. 10 Stereoscopic accumulation model of multiple strata and under the control of Indosinian strike-slip faults in central Sichuan Basin

动,灯影组的天然气会向上运移,在垂向上多层系内的天然气组成和碳/氢同位素特征势必会趋同,从而不存在现今的明显差异。

5 结论与启示

(1) 川中地区走滑断裂附近脉体中白云石、方解石、铅锌矿、石英和萤石等矿物的成岩序次、同位素定年以及流体包裹体分析表明,走滑断裂在寒武纪、志留纪—泥盆纪、晚二叠世、中—晚三叠世、白垩纪和新生代都有持续性、阶段性的活化并伴随流体活动。其中,与峨眉地裂运动有关、形成于晚海西期的 NWW 向走滑拉张断裂活动在垂向上沟通了多个层系,有利于在断裂带附近形成优质储集空间,为印支期大规模古油藏的形成提供纵、横向输导条件,对川中地区油气多层系立体运移成藏与差异富集起到重要的控制作用。

(2) 基于断裂带附近裂缝储层中多期次脉体胶结物的成岩序次划分、碳酸盐 U-Pb 定年和流体包裹体分析,能够有效地厘定走滑断裂的活动/开启时间,这种方法对于分析地震资料上无法识别的断裂活动,或者揭示早期断裂在晚期流体活动中是否保持开启并控制流体运移,具有明显的优势,可为分析克拉通盆地深层、超深层碳酸盐台内走滑断裂的形成演化及其控储、控藏作用提供了一种新的思路 and 有效手段。

参 考 文 献

[1] DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1): 109-137.

[2] 贾承造, 马德波, 袁敬一, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造特征、形成演化与成因机制[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 81-91. JIA Chengzao, MA Debo, YUAN Jingyi, et al. Structural characteristics, formation & evolution and genetic mechanisms of strike-slip faults in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 81-91.

[3] 刘永涛, 周义军, 刘池洋, 等. 鄂尔多斯盆地隐蔽型走滑断裂带构造特征及其油气地质意义[J]. 地质评论, 2020, 66(增刊 1): 90-92. LIU Yongtao, ZHOU Yijun, LIU Chiyang, et al. Structural characteristics and its oil and gas geological significance of hidden strike-slip fault zone in Ordos Basin[J]. Geological Review, 2020, 66(S1): 90-92.

[4] 黄雷, 刘池洋, 何发岐, 等. 克拉通盆地内断裂走滑变形特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(6): 930-942. HUANG Lei, LIU Chiyang, HE Faqi, et al. Strike-slip deformation characteristics of fault in craton basin[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2022, 52(6): 930-942.

[5] 焦方正, 杨雨, 冉崎, 等. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 92-101. JIAO Fangzheng, YANG Yu, RAN Qi, et al. Distribution and gas exploration of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 92-101.

[6] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4):

58-71.
WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 58-71.

[7] 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.

[8] 马德波, 汪泽成, 段书府, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断层构造特征与天然气成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 795-805.
MA Debo, WANG Zecheng, DUAN Shufu, et al. Strike-slip faults and their significance for hydrocarbon accumulation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 795-805.

[9] 邱泽华, 周路, 陈骁, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断层识别[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 57(3): 647-655.
QIU Zehua, ZHOU Lu, CHEN Xiao, et al. Identification of strike-slip faults in Gaoshiti-Moxi area of Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 57(3): 647-655.

[10] 管树巍, 梁瀚, 姜华, 等. 四川盆地中部主干走滑断裂带及伴生构造特征与演化[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 252-264.
GUAN Shuwei, LIANG Han, JIANG Hua, et al. Characteristics and evolution of the main strike-slip fault belts of the central Sichuan Basin, southwestern China, and associated structures[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 252-264.

[11] LI Wenke, WANG Jun, LI Jinsong, et al. Characteristics and origin of the Sinian-Permian fault system and its controls on the formation of paleo-carbonate reservoirs: a case study from central paleo-uplift, Sichuan Basin, China[J]. Interpretation, 2018, 6(1): T191-T208.

[12] 苏楠, 杨威, 苑保国, 等. 四川盆地喜马拉雅期张扭性断裂构造特征及形成机制[J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2362-2378.
SU Nan, YANG Wei, YUAN Baoguo, et al. Structural features and deformation mechanism of transtensional faults in Himalayan period, Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2021, 46(7): 2362-2378.

[13] 马兵山, 梁瀚, 邬光辉, 等. 四川盆地中部地区多期次走滑断层的形成及演化[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 333-345.
MA Bingshan, LIANG Han, WU Guanghui, et al. Formation and evolution of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 333-345.

[14] BECKER S P, EICHHUBL P, LAUBACH S E, et al. A 48 m. y. history of fracture opening, temperature, and fluid pressure: Cretaceous Travis Peak Formation, East Texas Basin[J]. GSA Bulletin, 2010, 122(7/8): 1081-1093.

[15] HOOKER J N, LARSON T E, EAKIN A, et al. Fracturing and fluid flow in a sub-décollement sandstone; or, a leak in the basement[J]. Journal of the Geological Society, 2015, 172(4): 428-442.

[16] FALL A, EICHHUBL P, BODNAR R J, et al. Natural hydraulic fracturing of tight-gas sandstone reservoirs, Piceance Basin, Colorado[J]. GSA Bulletin, 2015, 127(1/2): 61-75.

[17] MOTTRAM C M, KELLETT D A, BARRESI T, et al. Syncing fault rock clocks: direct comparison of U-Pb carbonate and K-Ar illite fault dating methods[J]. Geology, 2020, 48(12): 1179-1183.

[18] YANG Peng, WU Guanghui, NURIEL P, et al. In situ LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characterization of fault-zone calcite in the central Tarim Basin, northwest China: implications for fluid circulation and fault reactivation[J]. Chemical Geology, 2021, 568: 120125.

[19] 李慧莉, 高键, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺托果勒低隆起走滑断裂带流体时空分布及油气成藏意义[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 316-328.
LI Huili, GAO Jian, CAO Zicheng, et al. Spatial-temporal distribution of fluid activities and its significance for hydrocarbon accumulation in the strike-slip fault zones, Shuntuoguole low-uplift, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 316-328.

[20] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589-606.
HE Dengfa, LI Desheng, ZHANG Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(3): 589-606.

[21] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 24-35.
WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 24-35.

[22] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用[J]. 石油学报, 2016, 37(1): 1-16.
DU Jinhu, WANG Zecheng, ZOU Caineng, et al. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the formation of Anyue giant gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 1-16.

[23] 姜华, 汪泽成, 杜宏宇, 等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化与新元古界震旦系天然气成藏[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 192-200.
JIANG Hua, WANG Zecheng, DU Hongyu, et al. Tectonic evolution of the Leshan-Longnvsi paleo-uplift and reservoir formation of Neoproterozoic Sinian gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 192-200.

[24] 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.

[25] 魏国齐, 杨威, 谢武仁, 等. 克拉通内裂陷及周缘大型岩性气藏形成机制、潜力与勘探实践——以四川盆地震旦系—寒武系为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 465-477.
WEI Guoqi, YANG Wei, XIE Wuren, et al. Formation mechanisms, potentials and exploration practices of large lithologic gas reservoirs in and around an intracratonic rift: taking the Sinian-Cambrian of Sichuan Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(3): 465-477.

[26] 董才源, 谢增业, 朱华, 等. 川中地区中二叠统气源新认识及成藏模式[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(4): 18-23.
DONG Caiyuan, XIE Zengye, ZHU Hua, et al. New insight for gas source and gas accumulation modes of middle Permian in central Sichuan Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2017, 32(4): 18-23.

[27] 谢增业, 李剑, 杨春龙, 等. 川中古隆起震旦系—寒武系天然气地球

- 化学特征与太和气区的勘探潜力[J]. 天然气工业, 2021, 41(7): 1-14.
- XIE Zengye, LI Jian, YANG Chunlong, et al. Geochemical characteristics of Sinian-Cambrian natural gas in central Sichuan paleo-uplift and exploration potential of Taihe gas area[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(7): 1-14.
- [28] 谢增业, 魏国齐, 李剑, 等. 四川盆地川中隆起带震旦系一二叠系天然气地球化学特征及成藏模式[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 50-67.
- XIE Zengye, WEI Guoqi, LI Jian et al. Geochemical characteristics and accumulation pattern of gas reservoirs of the Sinian-Permian in central Sichuan uplift zone, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 50-67.
- [29] 鲁雪松, 桂丽黎, 陈玮岩, 等. 激光原位碳酸盐岩 U-Pb 定年实验方法改进与石油地质应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(12): 2953-2968.
- LU Xuesong, GUI Lili, CHEN Weiyan, et al. Improvement of in situ LA-ICP-MS U-Pb dating method for carbonate minerals and its application in petroleum geology[J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(12): 2914-2929.
- [30] SU Ao, CHEN Honghan, FENG Yueying, et al. Dating and characterizing primary gas accumulation in Precambrian dolomite reservoirs, central Sichuan Basin, China: insights from pyrobitumen Re-Os and dolomite U-Pb geochronology[J]. Precambrian Research, 2020, 350: 105897.
- [31] 范俊佳, 姜华, 鲁雪松, 等. 四川盆地蓬莱地区震旦系灯影组气藏压力演化与成藏过程[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 32-43.
- FAN Junjia, JIANG Hua, LU Xuesong, et al. Pressure evolution and hydrocarbon accumulation process of Sinian Dengying Formation gas reservoirs in the Penglai area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 32-43.
- [32] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 476-487.
- SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. The dating and temperature measurement technologies for carbonate minerals and their application in hydrocarbon accumulation research in the paleo-uplift in central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 476-487.
- [33] 段军茂, 郑剑锋, 沈安江, 等. 川中地区下二叠统栖霞组白云岩储层特征和成因[J]. 海相油气地质, 2021, 26(4): 345-356.
- DUAN Junmao, ZHENG Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Characteristics and genesis of dolomite reservoir of the Lower Permian Qixia Formation in central Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(4): 345-356.
- [34] 何文渊, 蒙启安, 印长海, 等. 四川盆地合川——潼南地区栖霞组白云岩天然气地质特征及有利勘探区带[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(4): 1-11.
- HE Wenyuan, MENG Qi'an, YIN Changhai, et al. Geological characteristics and favorable exploration plays of gas in Qixia Formation dolomite in Hechuan-Tongnan area of Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(4): 1-11.
- [35] 吴越. 川滇黔地区 MVT 铅锌矿床大规模成矿作用的时代与机制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- WU Yue. The age and ore-forming process of MVT deposits in the boundary area of Sichuan-Yunnan-Guizhou provinces, southwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [36] 徐昉昊, 袁海锋, 徐国盛, 等. 四川盆地磨溪构造寒武系龙王庙组流体充注和油气成藏[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 426-435.
- XU Fanghao, YUAN Haifeng, XU Guosheng, et al. Fluid charging and hydrocarbon accumulation in the Cambrian Longwangmiao Formation of Moxi structure, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 426-435.
- [37] 王国芝, 刘树根, 陈翠华, 等. 四川盆地东南缘河坝 MVT 铅锌矿与古油气藏的成生关系[J]. 地质前缘, 2013, 20(1): 107-116.
- WANG Guozhi, LIU Shugen, CHEN Cuihua, et al. The genetic relationship between MVT Pb-Zn deposits and paleo-oil/gas reservoirs at Heba, Southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(1): 107-116.
- [38] 邹颜. 川东南地区重晶石—萤石矿成矿规律与找矿方向[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- ZOU Hao. Metallogenic regularity and prospecting direction of barite-fluorite deposit in southeast Sichuan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [39] 刘强, 鲁雪松, 范俊佳, 等. 四川盆地震旦系气藏 TSR 证据及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(6): 929-943.
- LIU Qiang, LU Xuesong, FAN Junjia, et al. Evidence and controlling factors of thermochemical sulfate reduction in the Sinian gas reservoirs, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6): 929-943.
- [40] 陈勇, 韩雨航, 鲁雪松, 等. 深层碳酸盐储层再平衡流体包裹体特征及其原始捕获条件确定[J]. 地球科学, 2023, 48(2): 413-4283.
- CHEN Yong, HAN Yuhang, LU Xuesong, et al. The characteristics of re-equilibrated fluid inclusions in deep carbonate reservoirs and determination of their original trapping conditions[J]. Earth Science, 2023, 48(2): 413-428.
- [41] 蒋裕强, 陶艳忠, 谷一凡, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区灯影组热液白云石化作用[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 51-60.
- JIANG Yuqiang, TAO Yanzhong, GU Yifan, et al. Hydrothermal dolomitization in Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 51-60.
- [42] 刘宏, 马腾, 谭秀成, 等. 表生岩溶系统中浅埋藏构造-热液白云岩成因——以四川盆地中部中二叠统茅口组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 916-927.
- LIU Hong, MA Teng, TAN Xiucheng, et al. Origin of structurally controlled hydrothermal dolomite in epigenetic karst system during shallow burial: an example from Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 916-927.
- [43] LIU Dawei, CAI Chunfang, HU Yongjie, et al. Multistage dolomitization and formation of ultra-deep Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoir in central Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123: 104752.
- [44] 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 Jinhu, 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.
- [45] WU Guanghui, ZAO Kuanzhi, QU Haizhou, et al. Permeability

distribution and scaling in multi-stages carbonate damage zones: insight from strike-slip fault zones in the Tarim Basin, NW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 114: 104208.

[46] 张旋, 冉崎, 陈康, 等. 川中地区安岳气田走滑断裂对灯影组储层及含气富集的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(6): 917-928.

ZHANG Xuan, RAN Qi, CHEN Kang, et al. The controlling effect of strike-slip fault on Dengying Formation reservoir and gas enrichment in Anyue gas field in central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(6): 917-928.

[47] CHEN Zhonghong, SIMONEIT B R T, WANG T G, et al. Biomarker signatures of Sinian bitumens in the Moxi-Gaoshiti bulge of Sichuan Basin, China: geological significance for paleo-oil reservoirs[J]. Precambrian Research, 2017, 296: 1-19.

[48] 姜振学, 庞雄奇, 曾溅辉, 等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 507-516.

JIANG Zhenxue, PANG Xiongqi, ZENG Jianhui, et al. Research on types of the dominant migration pathways and their physical simulation experiments[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 507-516.

[49] 郭凯, 曾溅辉, 卢学军, 等. 断层纵向输导与储层非均质性耦合控运模拟实验研究[J]. 现代地质, 2010, 24(6): 1164-1170.

GUO Kai, ZENG Jianhua, LU Xuejun, et al. An experimental study of oil migration controlled by vertical conduction of faults and reservoir heterogeneity[J]. Geoscience, 2010, 24(6): 1164-1170.

[50] 孔志岗, 张斌臣, 吴越, 等. 四川大梁子富锆铅锌矿床的控矿构造样式及成矿机制研究[J]. 地学前缘, 2022, 29(1): 143-159.

KONG Zhigang, ZHANG Binchen, WU Yue, et al. Structural control and metallogenic mechanism of the Daliangzi Ge-rich Pb-Zn deposit in Sichuan Province, China[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(1): 143-159.

(收稿日期 2023-06-26 改回日期 2023-10-25 编辑 雷永良)

中国石油学会《石油学报》第九届编辑委员会第二次会议在京召开

2024 年 3 月 27 日, 中国石油学会《石油学报》第九届编辑委员会第二次会议在北京石油科技交流中心召开。中国石油学会理事长焦方正, 中国工程院院士邓运华、中国科学院院士郝芳、中国科学院院士邹才能、中国工程院院士刘合、中国工程院院士李宁, 以及来自中国石油、中国石化、中海油和各大石油院校、科研院所的 29 位编委、37 位青年编委、11 位审稿专家及论文作者代表共 80 余人参加会议, 共商学报发展大计, 共绘学报美好蓝图。会议由中国石油学会副理事长兼秘书长、《石油学报》第九届编委会副主任徐凤银教授主持。

焦方正指出,《石油学报》是中国石油学会主办的综合性高级别学术刊物, 创刊 45 年来, 始终肩负着代表中国石油工业勘探开发领域行业最高学术及技术水平、引领行业科技发展方向、宣传行业科技成果的重要责任, 在行业内具有较高权威性和较大影响力。近年来, 在以贾承造院士作为主任的第九届编委会的指导帮助和各位编委的鼎力支持下,《石油学报》学术影响力和行业影响力稳步提升。

焦方正强调,《石油学报》作为一本行业特色鲜明的学术期刊, 是促进油气理论创新的重要平台, 是讲好中国油气科研故事的重要窗口。《石油学报》第九届编委会与编辑部要牢记总书记关于学术期刊建设的重要指示批示, 坚守初心、引领创新, 重点开展学术质量提升、数字化建设、集群化建设、国际化市场化办刊等工作, 加强高影响力论文宣传推广, 积极构筑中国石油天然气领域学术交流高地, 夯实支撑油气行业高水平科技自立自强的基础。

《石油学报》编辑部作了《坚守初心 引领创新——为推动中国石油勘探开发事业作贡献》的工作汇报, 向与会院士、专家汇报了第九届编委会成立以来取得的成绩、开展的重点工作和下一步工作计划。会议公布了《石油学报》2021—2023 年有突出贡献编委、《石油学报》2023 年度十篇高影响力论文、《石油学报》2021—2023 年有突出贡献青年编委、《石油学报》2023 年度十篇青年高影响力论文和《石油学报》2021—2023 年有突出贡献审稿专家, 中国石油学会理事长焦方正、中国科学院院士郝芳和中国工程院院士邓运华为入选专家和作者颁发证书。会议宣读了《石油学报》第二届青年编委名单, 中国石油学会理事长焦方正为青年编委颁发聘书。

中国科学院院士邹才能、中国石油勘探开发研究院窦立荣教授、中国石油大学(华东)王民教授、中国石油杭州地质研究院张荣虎教授级高级工程师分别作题为《关于碳中和“超级能源系统”的思考》《30 年跨国油气勘探开发的成果及启示》《页岩含油率、孔隙度与含油饱和度实验方法研究》《塔里木盆地库车坳陷万米深层油气成藏关键条件与资源潜力》的主题报告。

中国石油学会副理事长兼秘书长徐凤银教授主持召开《石油学报》第九届编辑委员会第二次会议讨论环节。付金华教授、张昌民教授、张功成教授、张劲军教授、曾联波教授、郭召杰教授、魏国齐教授、朱光有教授、曹剑教授、张荣虎教授、李士祥教授等专家学者积极建言献策, 围绕如何进一步明确期刊定位、打造主题专辑、扩大期刊国际影响力、充分发挥编委参与组约稿潜力、组织学术活动与学术沙龙、畅通审稿反馈渠道、加强宣传推广、落实网络首发、改进封面设计等方面进行了热烈讨论, 提出了许多宝贵的意见和建议。徐凤银教授在总结讲话中充分肯定了第九届编委、青年编委对《石油学报》的关心与支持, 强调要坚定不移树牢《石油学报》作为行业顶级期刊的定位, 要正确认识学术论文的价值, 要加强顶层设计, 统筹资源优势, 加强宣传推广, 努力打造优势学术品牌和优质学术平台。徐凤银强调,《石油学报》第九届编委要认真履行编委职责, 积极参与学报审稿、撰稿、组稿和宣传工作; 编辑部要认真梳理编委的意见和建议, 积极采纳, 充分吸收, 切实提升《石油学报》学术影响力和国际影响力, 打造行业顶级期刊。