

缝合线有机质富集及流体运移意义

——以鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩为例

高岗^{1*}, 王轩¹, 张维维¹, 董岩², 王程程¹, 李佳烨¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 克拉玛依 834000

* 通信作者, gaogang2819@sina.com

收稿日期: 2016-08-16

国家自然科学基金项目《碳酸盐岩缝合线有机质富集与油气运移作用研究》(41372142) 资助

摘要 本文选取鄂尔多斯盆地中东部含缝合线的奥陶系海相碳酸盐岩样品, 分别对缝合线和基质进行了岩石铸体薄片、荧光薄片镜下观察、有机碳含量测试、热解分析、全岩X-射线衍射矿物成分以及扫描电镜等一系列实验分析测试, 以分析碳酸盐岩缝合线对有机质富集与油气运移的作用。研究表明, 缝合线有机质丰度比基质高, 含油性比其周围的基质要好, 但二者母质类型相近。缝合线中有含量相对较多的黏土、石英、白云石、黄铁矿、黑色沥青、有机质和含量相对较少的方解石。缝合线物质颗粒之间一般呈基底胶结、杂基支撑, 其孔隙发育程度、孔隙类型和孔隙密集程度要好于基质, 利于油气的运移。总体表明缝合线对于低有机质丰度碳酸盐岩有机质富集、油气生成和流体运移都具有积极作用。

关键词 碳酸盐岩; 缝合线; 基质; 有机质富集; 流体运移

0 引言

作为全球油气重要的烃源岩类型之一, 碳酸盐岩在海相、陆相沉积地层中均有分布, 但海相沉积中更为广泛。缝合线作为碳酸盐岩的地质特征之一^[1], 其有机质富集特征对于碳酸盐岩, 尤其是低有机质丰度的碳酸盐岩的有机质富集、成烃与流体输导特征的认识均具有重要的理论和现实意义^[2]。有关碳酸盐岩缝合线的分布特征、类型与成因、物质组成、流体输导和油气储层意义及其与沉积、构造的关系前人已做了大量工作^[3-5], 但对缝合线有机质的富集特征、地化特征与流体输导特征仅做过少量前期工作。鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩有机质丰度总体较低^[6-8], 常见

缝合线发育, 但对缝合线与基质的有机质丰度、矿物组成、孔隙结构、有机岩石学特征及其与油气生成和运移特征的对比还未进行过相应研究工作。关于缝合线对碳酸盐岩烃类的生成、运移和聚集意义, 前人已取得一定研究成果。高岗等发现缝合线已生烃量和排烃量均高于基质, 并且它们的有机质丰度具有良好的继承性^[9]; Koepnick发现在缝合线形成之后的漫长地质历史时期, 其本身可以向储渗空间演化, 形成大量沿缝合线分布的溶蚀孔隙^[10]; 次生改造作用使得缝合线对碳酸盐岩储集层油气聚集与输导具有重要作用^[2]; 周大志等认为缝合线的压溶成因机理对储层渗透率有改善作用^[11]; Dunnington认为在缝合线形成过程中被溶解的碳酸盐随流体运移, 同时碳酸盐岩中产生的烃

引用格式: 高岗, 王轩, 张维维, 董岩, 王程程, 李佳烨. 缝合线有机质富集及流体运移意义——以鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩为例. 石油科学通报, 2017, 01: 1-11

GAO Gang, WANG Xuan, ZHANG Weiwei, DONG Yan, WANG Chengcheng, LI Jiaye. Significance of stylolite on organic matter enrichment and fluid migration: A case study on stylolite in the Ordovician carbonate rocks of Ordos Basin. Petroleum Science Bulletin, 2017, 01: 1-11. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.001

类也可随流体运移^[12]；谭钦银等通过泥岩与碳酸盐岩对比研究认为致密碳酸盐岩主要是以缝合线作为通道向外排烃^[13]。可见，缝合线不单能富集有机质和生成一定量的烃类，而且可以为油气的储集和流体运移创造良好条件，有利于初次排烃作用的进行。本次选取鄂尔多斯盆地宜11、宜13、陕21、龙探1等钻井(见图1)中发育缝合线的奥陶系海相碳酸盐岩，主要从矿物岩石学、有机质岩石学、有机地球化学等方面系统分析碳酸盐岩缝合线与基质的有机质赋存关系、缝合线岩石学特征与有机质含量的关系以及缝合线流体输导特征，探究碳酸盐岩缝合线对于地下地质过程中有机质富集、储集和油气运移的作用。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部，是一个发育了早古生代海相、晚古生代海陆过渡相-陆相、中生代陆相沉积的多旋回叠合盆地^[6,14]。盆地内的奥陶系海相沉积平均厚度为500~1500 m，总体表现为台地碳酸盐岩沉积，发育开阔海、云坪、膏云坪、膏盐湖、滩

等^[14-15]。研究区位于盆地中东部的陕北斜坡地区(图1)，奥陶系从下到上依次发育冶里组、亮甲山组与马家沟组。冶里组和亮甲山组岩性主要为含燧石白云岩、泥质白云岩和竹叶状白云岩(图1)。主要勘探目的层位马家沟组可分六段，分别构成了三套海进-海退层序(图1)，其中马一段至马三段为第一套旋回，马四段和马五段为第二套旋回，马六段为第三套旋回^[16-17]。从马一期到马六期，海侵规模逐渐增强；马一、马三、马五段以蒸发岩类为主，多为准同生白云岩、膏岩和盐岩；马二、马四、马六段以灰岩沉积为主，主要为泥晶石灰岩。上述沉积旋回在横向上非常稳定，在整个盆地中东部地区都可以对比。总体上表现为盆地西部以开阔海为主，中部和东部以云坪为主，含膏沉积则主要位于陕北一带^[14]。

缝合线的形成是多种因素共同作用的结果，包括岩石岩性特征、上覆负荷应力、温度、流体参与、构造运动等^[18-20]。鄂尔多斯盆地马家沟组灰岩经历了漫长的地质演化，成岩现象复杂，白云石化作用、溶蚀作用和破裂作用等都有发生，因此该地区缝合线特别发育^[21]。缝合线与基质相比，明显颜色较深，主要为

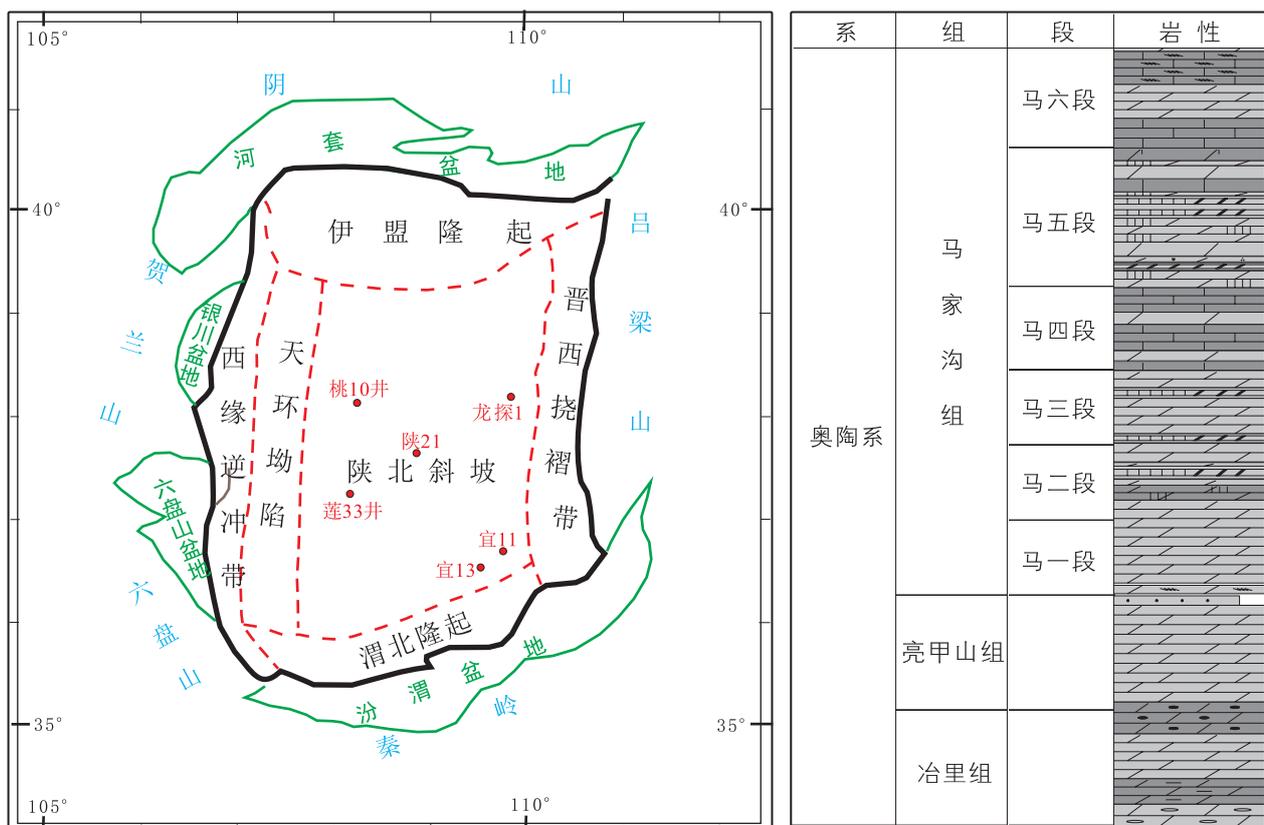


图1 研究区构造位置-构造单元划分与奥陶系岩性柱状简图(据谢锦龙等)^[14]

Fig. 1 The structure location, geological unit division and stratigraphic schematic column in the study area (according to XIE JinLong^[14])

灰色或灰黑色,肉眼观察较为均质,在岩心上有的连续性好,有的连续性较差,而基质的均质性总体较强。下奥陶统马家沟组马五段为本次研究采样的主要目的层段,岩性主要为海相碳酸盐岩。

2 样品与分析方法

本次研究主要采集鄂尔多斯盆地宜11、宜13、陕21、龙探1等钻井的奥陶系含有缝合线的碳酸盐岩岩心样品8块。首先制备岩石铸体薄片和荧光薄片进行显微镜观察。然后从岩心样品中利用特制的手工钳和镊子等工具从样品中剥离出缝合线样品。分别在研钵中研磨缝合线与岩石基质样品,用100目标准筛筛出缝合线与岩石基质样品。对获得的缝合线与基质样品分别进行总有机碳(TOC)、总碳(TC)、总硫(TS)含量测试和热解(Rock-Eval)等一系列分析测试。

从粉末样品中称取100 mg在950℃下用Leco CS-230碳硫测定仪上测定总碳(TC)。接下来称取100 mg左右缝合线或基质粉末样品置于瓷坩埚中,将坩埚放入50 ml烧杯中,加入25 ml 5%的盐酸溶液,浸泡3~4小时后,将烧杯放在水浴锅上加热(温度控制在100℃以下),使烧杯中的液体慢慢蒸发40分钟,取出冷却到室温,将坩埚放在抽滤器上,用蒸馏水洗至中性(用5%的AgNO₃试验),小心取出盛样坩埚放在烘箱内60~80℃烘干,时间为6~8小时,取出放入干燥器内准备分析测定。在Leco CS-230碳硫测定仪上测定有机碳(TOC)与硫(TS)含量。称取100 mg待测的缝合线或基质样品利用油气评价工作站(OGE-II热解仪)对缝合线与岩石基质进行热解分析,获取 S_1 [kg(烃)/t(岩石)]、 S_2 [kg(烃)/t(岩石)]和 T_{max} (℃)参数。仪器工作环境温度为10~30℃,湿度为RH≤80%;高纯氦气压力为0.20~0.30 MPa,空气压力为0.30~0.40 MPa;氢气压力为0.20~0.30 MPa;交流电为220±10 V,50±3 Hz。

利用全岩X-射线衍射实验分析样品中矿物含量及差异。实验主要在Bruker D2 PHASERX射线衍射仪上进行。将样品缝合线与基质分别碎样后再用小研钵研磨成粉末,装入特定的容器后送入仪器进行测试,仪器测定功率为3 kW,测量准确度为0.000 1°,测角仪扫描范围为1°~160°。检查温度为26℃,湿度为RH≤30%,测试条件为Cu靶,陶瓷X光管,K α 辐射;30 Kv管压,10 mA管流;发射狭缝为0.6 mm,接收狭缝为8 mm;采用LynxEye™一维阵列探测器。

3 结果与讨论

3.1 碳酸盐岩缝合线与有机质富集的关系研究

3.1.1 岩石荧光薄片特征对比

利用石油的荧光性可鉴定岩石中是否含油以及含油性的好坏^[21]。对研究区碳酸盐岩样品制备荧光薄片,在荧光显微镜下观察其荧光性,鉴定缝合线与其周围基质中微量石油和沥青质类物质的含量差异。图2为本次实验所选取的典型荧光薄片镜下照片,每组照片左边为正常透射光的岩石薄片照片,右边为反射光下的荧光照片,共选取4组典型的岩石样品薄片在镜下用不同倍数进行对比观察。

观察表明,不同地区不同岩石样品中虽然蓝色荧光部分的发光程度和范围有所不同,代表含油性有差异,但是总体呈现出的特征是一致的,即黑色的缝合线充填物均比其周围基质所呈现出来的荧光性更强(图2a,b,d,f,h中缝合线荧光性明显),基质中除了个别部位(如图2b,c中基质)外基本不含荧光,这与普通岩石薄片下观察到的缝合线中有机质富集而基质中黑色有机质只零散分布的特征具有一致性。有些地区岩石荧光薄片在低倍数显微镜下缝合线的荧光观测效果不佳,对其同一部位放大20倍后观察,均发现缝合线中蓝色荧光分布范围大,普遍荧光性较好,个别部位荧光强度很大,这说明碳酸盐岩缝合线中含油性比其周围基质要好,应该与缝合线在地质历史过程中运移的外来烃有关,其含油性也相应更好。

3.1.2 岩石总有机碳、总硫和热解参数特征

有机碳含量测试结果显示,缝合线TOC值除陕21井高达25.1%之外,其余样品介于0.067%~1.30%之间,均值为0.487%;基质TOC值介于0.003%~0.126%之间,均值为0.043%。同一样品的对比可见,缝合线的有机碳含量均高于基质(图3A),这表明了缝合线中的有机质比基质更丰富。同样,热解结果显示,除陕21井为147.67 kg(烃)/t(岩石)外,其余样品缝合线的生烃潜力(S_1+S_2)值介于0.09~9.31 kg(烃)/t(岩石)之间,均值为2.25 kg(烃)/t(岩石);基质的(S_1+S_2)值介于0.03~3.23 kg(烃)/t(岩石)之间,均值为0.838 kg(烃)/t(岩石)。同一样品的对比明显可以看出缝合线的 S_1+S_2 值要比基质高得多(图3B)。缝合线与基质的总硫含量分别在0.147%~4.73%和0.059%~0.401%,均值分别为2.774%和0.235%(图3C);缝合线与基质的热解 S_1 值分别分布在0.04~20.03 kg(烃)/t(岩

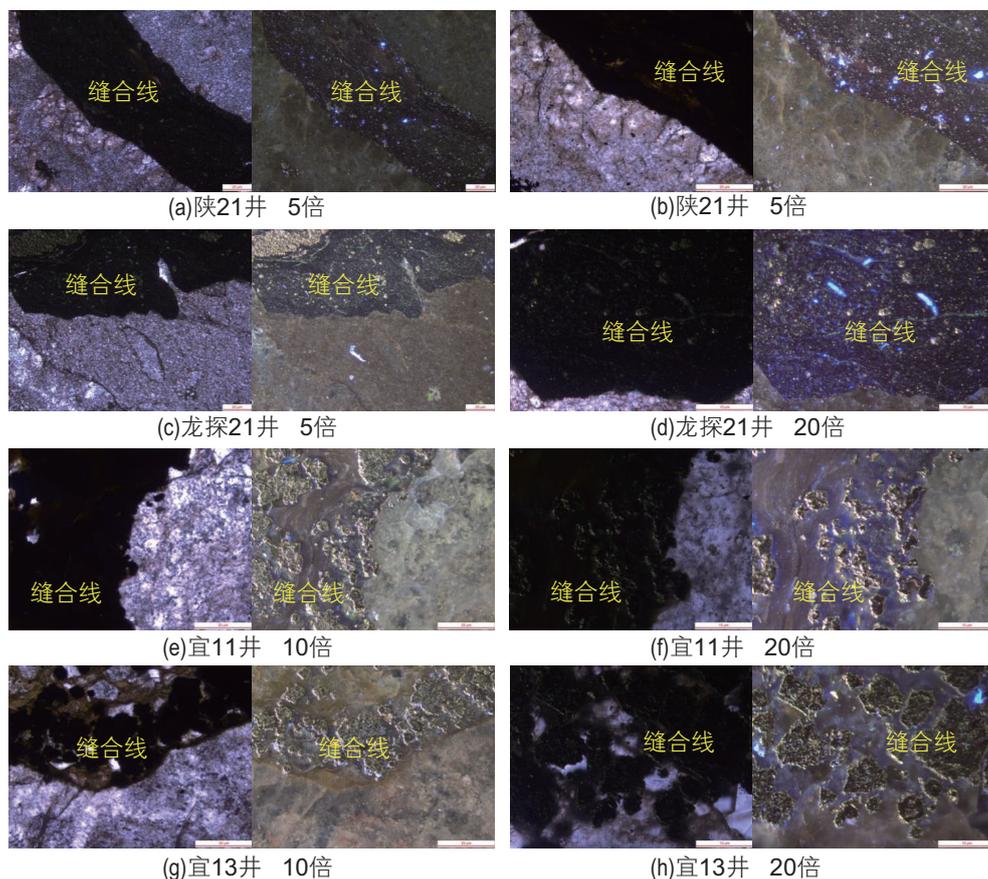


图2 研究区奥陶系碳酸盐岩缝合线与基质荧光显微镜下照片

(a) 陕21井样品缝合线与基质(5倍); (b) 陕21井样品缝合线与基质(5倍); (c) 龙探1井样品缝合线与基质(5倍); (d) 龙探1井样品缝合线局部(20倍); (e) 宜11井样品缝合线与基质(10倍); (f) 宜11井样品缝合线局部(20倍); (g) 宜13井样品缝合线与基质(10倍); (h) 宜13井样品缝合线局部(20倍)

Fig. 2 Photos of stylolite and matrix samples of the Ordovician carbonate rocks under fluorescence microscope in the study area
 (a) Stylolite and matrix of Well Shan21 samples (5X); (b) Stylolite and matrix of Well Shan21 samples (5X); (c) Stylolite and matrix of Well Longtan1 samples (5X); (d) Stylolite part of Well Longtan1 samples (20X); (e) Stylolite and matrix of Well Yi11 samples (10X); (f) Stylolite part of Well Yi11 samples (20X); (g) Stylolite and matrix of Well Yi13 samples (10X); (h) Stylolite part of Yi13 samples (20X)

石)和0.01~2.37 kg(烃)/t(岩石)之间, 均值分别为5.93 kg(烃)/t(岩石)和0.60 kg(烃)/t(岩石)。通过同一样品的对比可见(图3D), 缝合线中有比基质更多的总硫含量和可溶烃含量。

缝合线的氢指数(HI)值介于54~509 kg(烃)/t(TOC)之间, 均值为269 kg(烃)/t(TOC); 而基质HI值介于108~683 kg(烃)/t(TOC)之间, 均值为458 kg(烃)/t(TOC)。在 T_{\max} -氢指数关系图(图4B)中, 缝合线样品的HI和 T_{\max} 数据分布相对较为正常, 基质的HI数据分布基本正常, 但其 T_{\max} 数据要么过低, 要么过高, 显示出明显的差异。通过进一步的对比分析发现, 缝合线和基质的热解 S_1 数值分别主要介于0.04~20.03 kg(烃)/t(岩石)和0.01~2.37 kg(烃)/t(岩石)之间, 均值分别为5.93 kg(烃)/t(岩石)和

0.603 kg(烃)/t(岩石)。如果把基质与缝合线统一考虑, 则样品的 T_{\max} 值有随总硫含量和热解 S_1 数值增加而降低的趋势(图4A, B)。显然, 缝合线中总体有较多的已生成的烃和硫含量, 基质中有相对较低的硫含量和 S_1 值, 它们对 T_{\max} 产生了影响。

3.2 碳酸盐岩缝合线与油气储集条件的关系研究

3.2.1 岩石铸体薄片特征分析

选取3组典型的缝合线及基质岩石铸体薄片进行镜下对比观察(图5a-b; c-d; e-f), 判断矿物成分和有机质充填情况。观察发现, 缝合线的主要矿物成分是白云石, 并且含有大量黑色沥青、土黄色的泥质以及有机质等充填物, 颗粒之间一般呈基底胶结、杂基支撑的特点。偏光显微镜下发现缝合线内富含黄铁矿

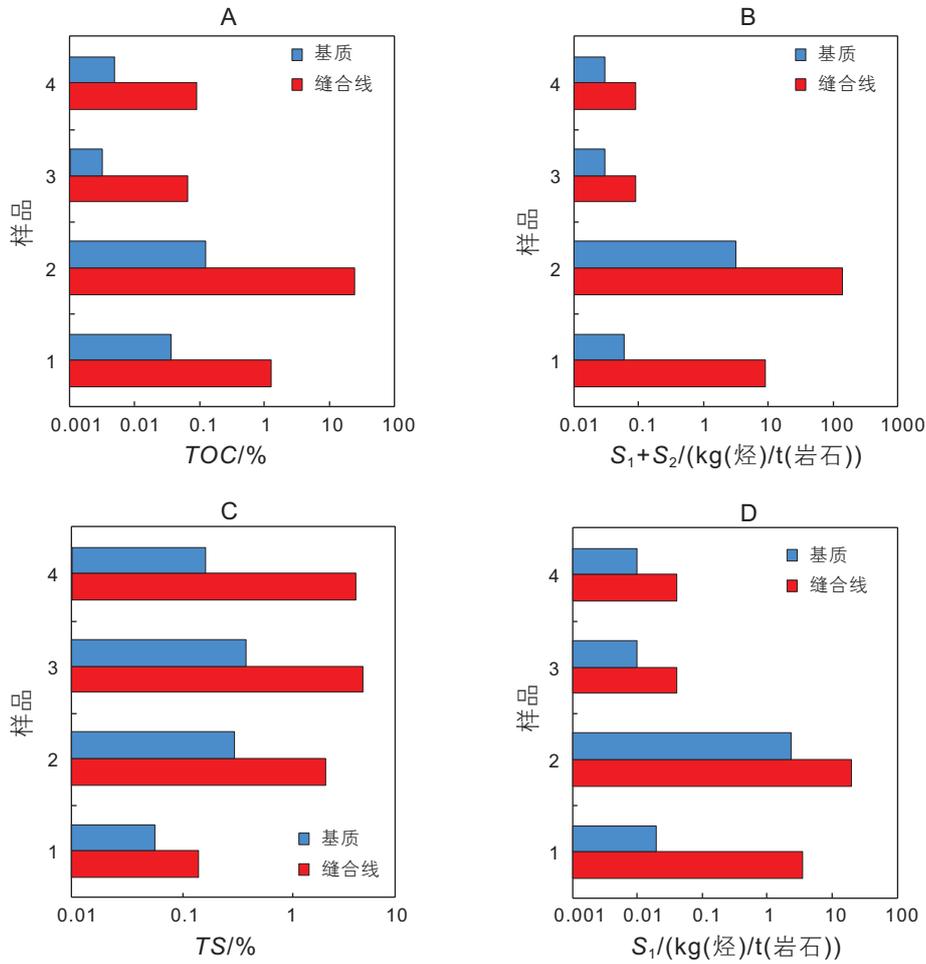


图3 研究区奥陶系碳酸盐岩基质与缝合线样品 TOC、TS、 S_1 与 S_1+S_2 值对比图

Fig. 3 Histogram of TOC, TS, S_1 and S_1+S_2 for stylolite and matrix samples in the Ordovician carbonate rocks of the study area

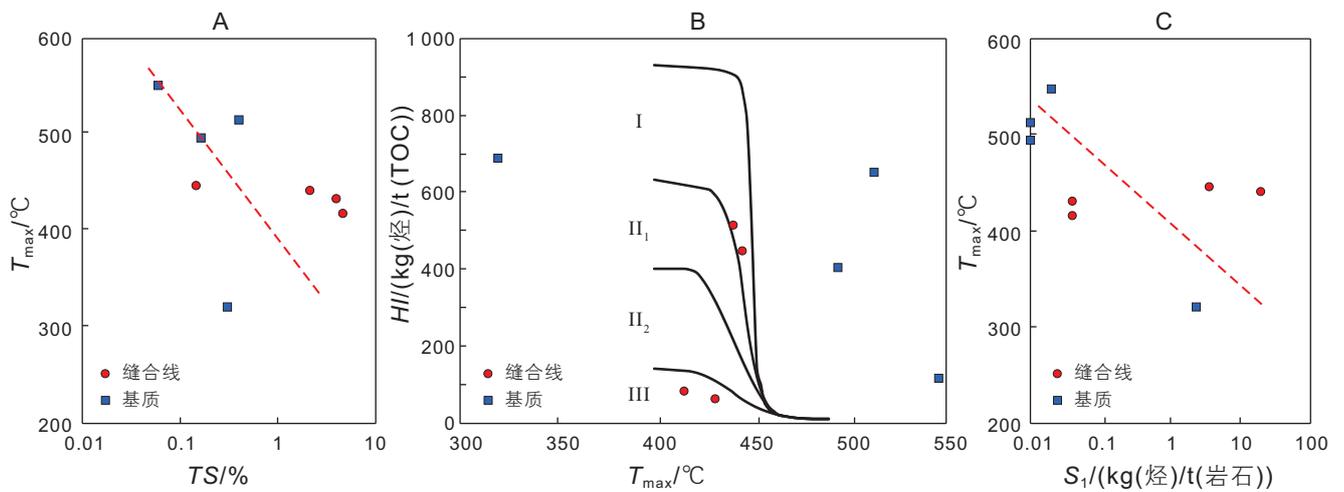


图4 研究区奥陶系碳酸盐岩缝合线与基质样品 TS、HI、 S_1 与 T_{max} 关系图

Fig. 4 Cross diagram of T_{max} versus TS, HI, S_1 for stylolite and matrix samples in the Ordovician carbonate rocks in the study area

颗粒。缝合线周围的基质主要矿物成分为方解石，白云石、黑色的有机质和沥青等则较少，颗粒之间一般呈接触胶结或镶嵌胶结，呈线接触、凹凸接触的特点，

此外基质中黄铁矿含量很少。

岩石铸体薄片中的不管缝合线还是基质，被蓝色染料填充的区域均较少，代表未被充填的孔隙总体较少

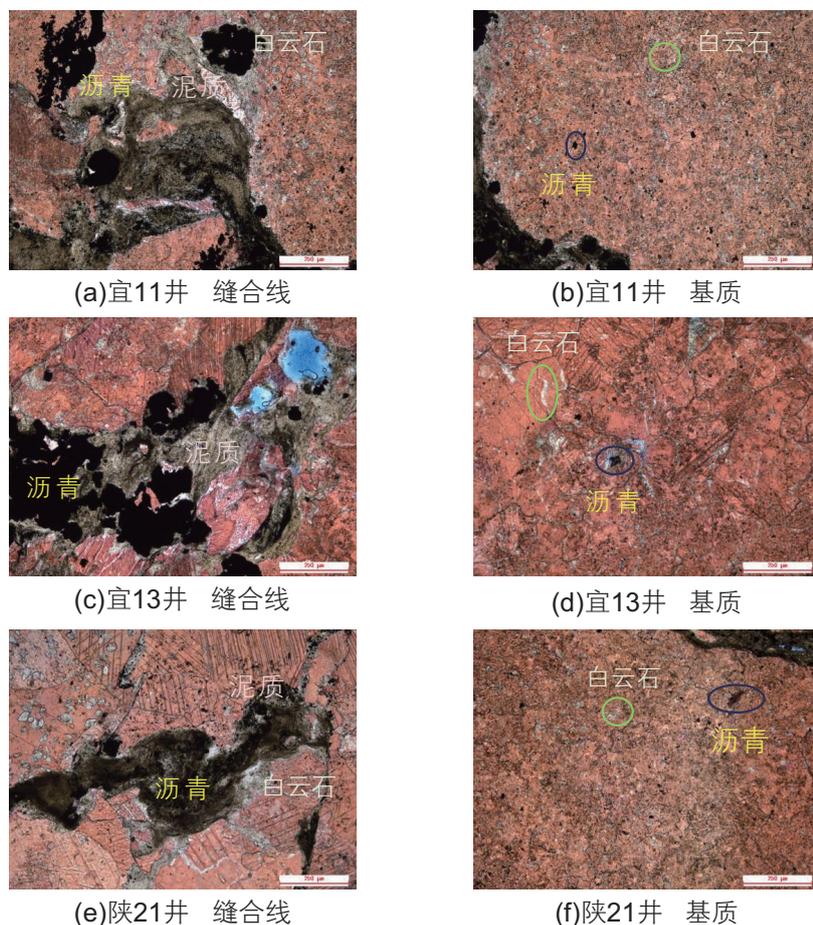


图5 研究区奥陶系碳酸盐岩岩石样品铸体薄片镜下照片

Fig. 5 Microscopic casting thin section of the Ordovician carbonate rock samples in the study area

(图5)。但从颗粒接触关系与压实程度来看,基质中的方解石结晶程度高,比缝合线的致密性更强,均质性较强,孔隙相互孤立分布,而缝合线展布有一定方向性和延续性,其充填物中的微孔隙发育(图5),应比基质有更优越的流体运移条件。

3.2.2 全岩X-射线衍射分析

为分析碳酸盐岩缝合线与基质矿物组成的差异,补充选取了碳酸盐岩中缝合线较宽的样品进行了缝合线与基质的剥离,然后将质纯的缝合线充填物与基质物质进行了全岩X-射线衍射分析。主要的矿物成分包括黏土、石英、斜长石、方解石、白云石和黄铁矿,其中缝合线和基质的黏土矿物含量分别分布在12.1%~28.7%和2.8%~16.9%,均值分别为18.4%和7.2%。缝合线和基质的石英和斜长石含量分别分布在10.3%~17.9%、4.4%~7.2%、1.8%~2.9%和1.4%~2.7%,均值依次为13.4%、5.6%、2.4%和2.2%。缝合线与基质的方解石和白云石含量分别为25.9%~38.4%、63.4%~78.1%、18.3%~29.1%和

3.2%~17.9%,均值依次为30.7%、71.1%、24.3%和10.8%。缝合线黄铁矿含量介于8.9%~13.1%之间,均值为10.7%,基质的黄铁矿含量介于1.8%~5.7%之间,均值为3.1%。可见,缝合线中的黏土、石英、白云石和黄铁矿明显高于基质,而方解石含量低于基质,二者的斜长石含量相近(图6)。这与岩石铸体薄片观察中得出缝合线中更富集黄色泥质条带和黄铁矿、白云石含量更高而方解石含量偏低的观察结果基本一致。

上述矿物组成差异主要与缝合线的压溶成因有关^[22-31],沉积期后碳酸盐岩中颗粒发生压溶作用,溶解的碳酸盐流体会沿着缝合线向缝合线周围基质或其它更远部位运移,不溶的黏土等矿物和有机质残留富集形成缝合线;而流体携带溶解的碳酸盐矿物离子在条件变化时会发生重结晶而起到胶结作用,从而使得缝合线周围基质孔隙度降低,岩性变得更加致密^[25, 29]。所以,缝合线形成之后的压溶作用使得基质愈加致密,地质流体理应沿着缝合线运移而非致密的

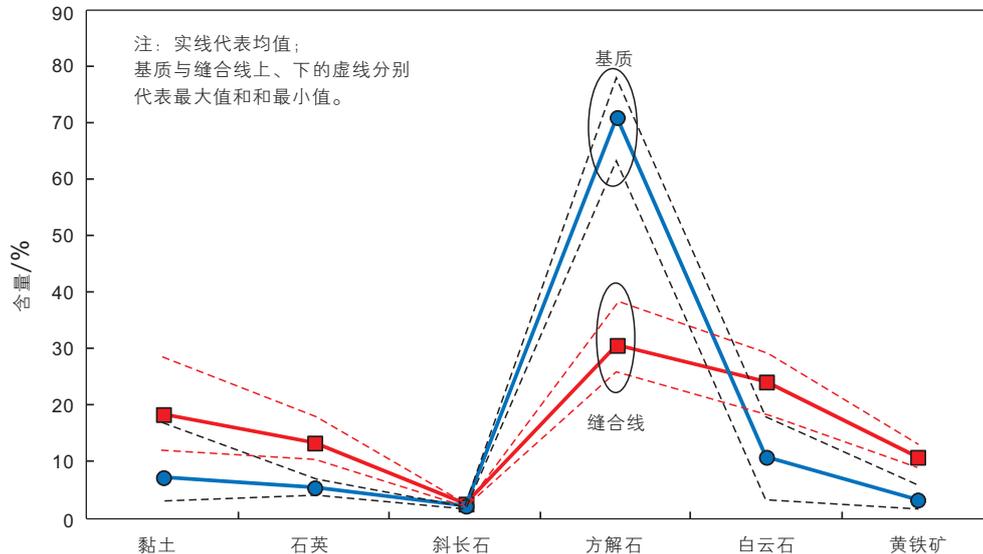


图 6 研究区碳酸盐岩缝合线与基质样品的矿物组成对比图

Fig. 6 Mineral composition comparison of stylolite and matrix samples in carbonate rocks in the study area

基质层, 后续如果发生溶蚀作用, 缝合线中溶蚀孔洞比基质要更容易发育^[28-30]。此外, 缝合线白云石相比方解石晶粒增大、晶间孔径变大, 会使碳酸盐岩中白云石含量更高的缝合线中孔隙度和渗透率增加, 对孔渗性可以起到改善作用。

3.2.3 缝合线与基质孔隙结构分析

选取富含缝合线的碳酸盐岩样品进行扫描电镜观察, 分别剥离出质纯、平整、大小合适的缝合线与基质岩块, 切出自然新鲜断面。由于自然断面表面粗糙, 还常伴有脱落的碎屑覆盖, 因此用氩离子抛光处理新鲜断面的表面, 这样去除样品表面的凹凸不平的部分及附着物。然后将氩离子抛光好的岩块用导电胶固定在样品台上, 喷金处理后即可得到适合实验观察的光滑平整的断面。将制备好的岩块通过SU8010冷场发射扫描电镜进行微米/纳米级孔隙及微裂缝的形状、大小和分布等特征观察, 考虑到样品挑选的随机性和宏观性, 从研究区内不同采样地区分别选取3组典型的缝合线与基质孔隙结构对比照片(图7)。

缝合线与基质中的孔隙结构主要是微米级的粒间溶蚀孔隙(图7a-f均有大量分布), 主要发育在矿物颗粒之间呈蜂窝状分布(图7a)或零星分布(图7c,e), 在镜下呈椭圆状(图7a)、溶蚀港湾状(图7e,d)及不规则形状等(图7b,c,e,f)。主要呈不规则状的粒内溶蚀孔隙(图7c,d,f)和棱角状的晶间孔隙(图7b), 微裂缝含量相对较少(图7e), 并呈零星分布。对莲33井样品的孔隙结构分析显示, 缝合线中密集发育大量蜂窝状粒

间溶蚀孔, 基质中也有大量粒间溶蚀孔呈零星分布, 以及少量棱角状的晶间孔发育(图7a,b)。对宜11井样品的孔隙结构分析显示, 缝合线与基质中均零星分布不规则状及溶蚀港湾状的粒间溶蚀孔, 以及少量粒内溶蚀孔, 缝合线孔隙的发育程度要比基质中更高(图7c,d)。对桃10井样品的孔隙结构分析表明, 缝合线中大量发育粒间溶蚀孔隙, 主要呈溶蚀港湾状和不规则状零星分布, 并且在右下角有一条狭长的微裂缝发育, 基质中孔隙发育程度明显要稀少一些(图7e,f)。

综合判断, 不同地区采集的碳酸盐岩样品中的缝合线孔隙虽然大小相比基质样品中的孔隙不存在明显优势, 但是其发育程度、发育种类和密集程度则均远比基质样品要更好, 孔径主要分布在1~5 μm, 微裂缝直径主要分布在0.1~1 μm, 均大于甲烷分子直径(0.414 nm)和石油流体分子平均直径(10 nm)。因此, 缝合线样品中微米级的溶蚀孔、粒内孔、粒间孔、晶间孔和微裂缝等均有利于流体的运移。

3.3 碳酸盐岩缝合线对油气运移的作用研究

本次研究采用烃指数 HCI [$HCI = S_1/TOC$, kg(烃)/t(有机碳)]来反映缝合线与基质的生烃特征。由于同一岩样的缝合线与基质有机质类型相近, 成熟度一致, HCI 大小则与岩石的排烃有关; HCI 越小代表排烃越多, 反之则排烃相对要少。依此原理, 利用烃指数 HCI 的大小来对比缝合线与基质的排烃效率差异。选用研究区内不同深度段岩样中缝合线充填物与基质

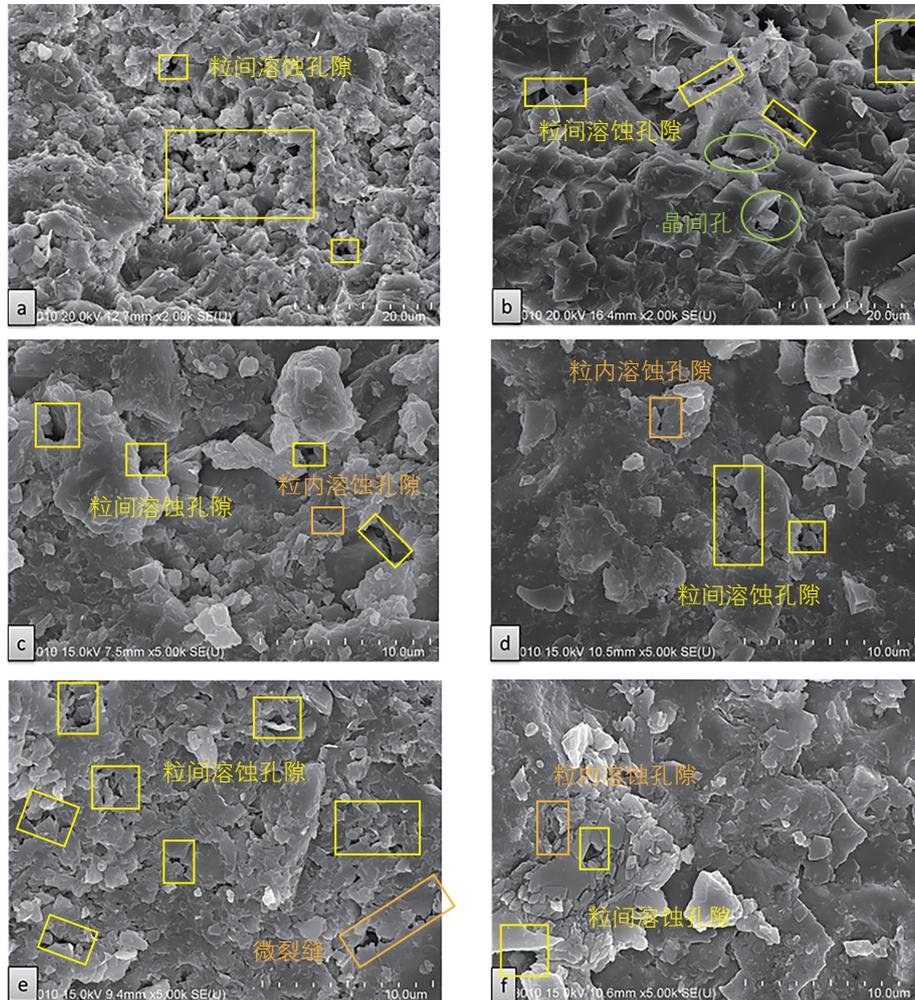


图7 研究区奥陶系碳酸盐岩样品缝合线与基质孔隙结构扫描电镜二次电子图像

(a) 莲33井样品缝合线(放大2 000倍); (b) 莲33井样品基质(放大2 000倍); (c) 宜11井样品缝合线(放大5 000倍); (d) 宜11井样品基质(放大5 000倍); (e) 桃10井样品缝合线(放大5 000倍); (f) 桃10井样品基质(放大5 000倍)

Fig. 7 Secondary electron images of SEM for stylolite and matrix of the Ordovician carbonate rocks in study area

(a) Stylolite of Well Lian33 samples (2 000X); (b) Matrix of Well Lian33 samples (2 000X); (c) Stylolite of Well Yi11 samples (5 000X); (d) Matrix of Well Yi11 samples (5 000X); (e) Stylolite of Well Tao10 samples (5 000X); (f) Matrix of Well Tao10 samples (5 000X)

物质的烃指数 HCI 数据进行对比(图8)。缝合线的 HCI 值分布在43~276 kg(烃)/t(有机碳)之间,除一个样品 HCI 值高达1 881 kg(烃)/t(有机碳)外,其余基质的 HCI 值在54~322 kg(烃)/t(有机碳)之间。可见主要样品的缝合线 HCI 值都低于基质(图8)。这实际表明了缝合线中相对于TOC已生成的烃类更少,更多的烃类已排出了缝合线,说明了缝合线有更好的油气运移条件^[32-33]。

4 结论

通过对研究区海相碳酸盐岩中缝合线与基质进行

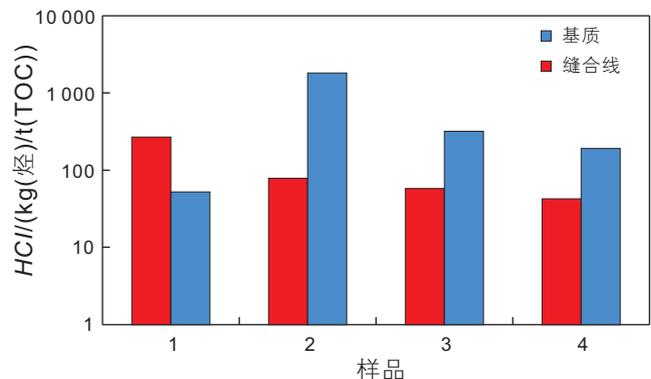


图8 研究区奥陶系碳酸盐岩缝合线与基质 HCI 值对比图

Fig. 8 Comparison diagram of HCI values for stylolite and matrix samples in the Ordovician carbonate rocks

一系列有机地化实验研究以及镜下观察分析, 最终得出结论如下:

1) 岩石荧光薄片、有机碳与热解分析实验结果表明碳酸盐岩有机质丰度总体不高, 但缝合线有机质丰度高于基质, 其母质类型与基质相近; 由于有相对较多的外来运移烃和溶解残余物的聚集, 缝合线的有机质丰度和含油性比其周围的基质要好, 说明缝合线有利于有机质的富集, 这些对于研究区高演化低有机质丰度的碳酸盐烃源岩的天然气生成是有利的。

2) 岩石铸体薄片与全岩 X-射线衍射分析表明缝合线比基质有更多的相对稳定的矿物如黏土、石英、白云石、黄铁矿与黑色沥青、有机质等, 而方解石含量低于基质。缝合线物质颗粒之间一般呈基底胶结、杂基支撑; 基质颗粒之间一般呈接触胶结或镶嵌胶结,

呈线接触、凹凸接触。从岩性角度和成岩角度分析, 均表明基质更加致密, 缝合线孔隙性更好, 更有利于油气的储集。

3) 扫描电镜观察显示了碳酸盐岩缝合线孔隙发育程度、孔隙类型和孔隙密集程度均远比基质样品要好, 而且缝合线本身生烃能力比基质更强, 油气运移动力更大; 综合表明缝合线比基质更利于碳酸盐岩流体的运移。

4) 通过对鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组的碳酸盐岩缝合线进行实验分析, 发现该地区缝合线对于岩石中有机质富集、油气的储集和运移都有促进作用, 可见, 缝合线对于油气的生成、排烃运移及油气开发等都具有积极意义。

参考文献

- [1] JOSE R, ANDRADE R. Stylolites measurement of rock loss[J]. *Revista Brasileira de Geociências*, 2000, 30(3): 432–435.
- [2] 高岗. 碳酸盐岩缝合线研究及油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(2): 218–226.[GAO G. Research status and oil & gas geology significance of carbonate rock stylolite[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 218–226.]
- [3] BATHURST R G C. Carbonate sediments and their diagenesis: Developments in sedimentology 12[M]. New York: Elsevier, 1971.
- [4] RICKEN W. Diagenetic bedding[M]. *Lecture Notes Earth Science* 6, Berlin: Springer Verlag, 1986.
- [5] MOORE C H. Carbonate diagenesis and porosity[M]. *Development in Sedimentology* 48, New York: Elsevier, 1989.
- [6] 夏新宇, 洪峰, 赵林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶统碳酸盐岩有机相类型及生烃潜力[J]. *沉积学报*, 1999, 17(4): 638–650.[XIA X Y, HONG F, ZHAO L, et al. Organic facies type and hydrocarbon potential of carbonates in Majiagou Fm. Lower Ordovician in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(4): 638–650.]
- [7] 陈安定. 陕甘宁盆地奥陶系源岩及碳酸盐岩生烃的有关问题讨论[J]. *沉积学报*, 1996, 14(增刊): 90–99. [CHEN A D. Carbonate source-rocks of the Ordovician in Shan-Gan-Ning Basin and discussion on the hydrocarbon generation of carbonates[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(supp.): 90–99.]
- [8] 程付启, 金强, 刘文汇, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳混源气成藏分析[J]. *石油学报*, 2007, 28(1): 38–42. [CHENG F Q, JIN Q, LIU W H, et al. Formation of source mixed gas reservoir in the central gas field in Ordovician weathering crust of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(1): 38–42.]
- [9] 高岗, 柳广弟, 王成云, 等. 碳酸盐岩缝合线与基质有机质特征对比[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(8): 1205–1209.[GAO G, LIU G D, WANG C Y, et al. A comparative study of the organic matter characteristics of stylolite and matrix in carbonate rock[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(8): 1205–1209.]
- [10] KOEPNICK R B. Distribution and vertical permeability of stylolites within a lower Cretaceous carbonate reservoir, Abu Dhabi, United Arab Emirates. Stylolites and Associated Phenomena: relevance to hydrocarbon reservoirs[M]. Abu Dhabi: Abu Dhabi National Reservoir Research Foundation, 1984: 261–278.
- [11] 周大志, 李国蓉, 罗鹏, 等. 川东南志留系石牛栏组成岩作用研究[J]. *天然气技术*, 2009, 3(6): 6–11.[ZHOU D Z, LI G R, LUO P, et al. Study on diagenesis of Silurian Shiniunan Formation, southeastern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Technology*, 2009, 3(6): 6–11.]
- [12] DUNNINGTON H V. Stylolite developments postdates rock induration[J]. *Journal of Sediment Petroleum*, 1954, 24(3): 27–49.
- [13] 谭钦银, 王瑞华, 牟传龙, 等. 缝合线成因新认识[J]. *地学前缘*, 2011, 18(2): 241–249. [TAN Q Y, WANG R H, MU C L, et al. New cognition about stylolite[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 241–249.]
- [14] 谢锦龙, 吴兴宁, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五段岩相古地理及有利区带预测[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(4): 23–32.[XIE J L, WU X N, SUN L Y, et al. Lithofacies palaeogeography and potential zone prediction of Ordovician Majiagou Member-5 in Ordos Basin[J]. *Marine Petroleum Geology*, 2013, 18(4): 23–32.]
- [15] 付金华, 白海峰, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储集体类型及特征[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 110–118. [FU J H, BAI H F, SUN L Y, et al. Types and characteristics of the Ordovician carbonate reservoirs in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012,

- 33(2): 110–118]
- [16] 杨华, 刘新社, 张道锋. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气成藏主控因素及勘探进展[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 1–12. [YANG H, LIU X S, ZHANG D F. Main controlling factors of gas pooling in Ordovician marine carbonate reservoirs the Ordos Basin and advances in gas exploration[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5):1–12.]
- [17] 郭彦如, 赵振宇, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 44–61. [GUO Y R, ZHAO Z Y, XU W L, et al. Sequence stratigraphy of the Ordovician system in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 44–61.]
- [18] 蔡杰兴. 缝合线特征及成因机理[J]. 岩石学报, 1990, 5(2): 51–60. [CAI J X. Characteristics of sutures and their forming mechanism [J]. Acta Petrologica Sinica, 1990, 5(2): 51–60.]
- [19] 赵健, 罗根明, 曾佐勋, 等. 缝合线研究的新进展—以湖北大冶铁山区为例[J]. 现代地质, 2005, 19(4):501–507. [ZHAO J, LUO G M, ZENG Z X, et al. New progress of the stylolite research: Taking stylolites in Tieshan area, Daye city, Hubei province as an example[J]. Geoscience, 2005, 19(4): 501–507.]
- [20] MOSSOP G D. Origin of the peripheral rim, Red water Reef, Alberta [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1972, 20: 238–280.
- [21] 柳广弟. 石油地质学(第四版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009, 23–24. [LIU G D. Petroleum Geoscience(The Fourth Edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009, 23–24.]
- [22] EATON A. Report on the district adjoining the Erie Canal [R]. New York: Geology of New York, 1824: 134–143.
- [23] HUNT T S. Geological survey of Canada. Report of progress from its commencement to 1865[R]. Canada: Geological Survey of Canada, 1863: 631–634.
- [24] STOCKDALE P B. The stratigraphic significance of solution in rocks [J]. Journal of Geology, 1926, 34: 399–414.
- [25] SHINN E A, HALLEY R B, HUDSON J H, et al. The enigma of limestone compaction [J]. Geology, 1977, (5):21–24.
- [26] MAXWELL J C. Influence of depth, temperature, and geologic age on porosity of quartz sandstone [J]. AAPG Bulletin, 1964, 48: 697–709.
- [27] MALIVA R G, SIEVER R. Diagenetic replacement controlled by force of crystallization [J]. Geology, 1988, 16: 688–691.
- [28] VON B D, CAROZZI A V. Experimentally-simulated stylolitic porosity in carbonate rocks [J]. Journal of Petroleum Geology, 1990, 13(2):179–192.
- [29] STOCKDALE P B. Stylolites: their nature and origin [M]. Indianapolis, Indiana: Indiana University Press, 1922:1–97.
- [30] MOORE C H. Carbonate Diagenesis and Porosity [M]. New York: Elsevier, 1989.
- [31] 高岗, 柳广弟, 黄志龙. 碳酸盐岩压实埋藏史和排烃数值模拟模型 [J]. 海相油气地质, 1998, 3(2): 55–59. [GAO G, LIU G D, HUANG Z L. Pressure solution buried history and hydrocarbon-expelling numerical simulation model [J]. Marine Petroleum Geology, 1998, 3(2):55–59.]
- [32] 柳广弟, 高岗, 王晖. 碳酸盐烃源岩有机质分布与排烃特征 [J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 482–485. [LIU G D, GAO G, WANG H. Organic matter distribution and hydrocarbon-expelling characteristics of carbonate source rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3):482–485.]
- [33] 高岗. 缝合线对碳酸盐岩油气生排运聚的作用 [J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2000, 15(4): 32–36. [GAO G. Role of stylolite to generation, expulsion, migration and accumulation of hydrocarbon in carbonate rock [J]. Journal of Xian Petroleum Institute (Natural Science Edition), 2000, 15(4):32–36.]

Significance of stylolite on organic matter enrichment and fluid migration: A case study on stylolite in the Ordovician carbonate rocks of Ordos Basin

GAO Gang¹, WANG Xuan¹, ZHANG Weiwei¹, DONG Yan², WANG Chengcheng¹, LI Jiaye¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Exploration & Development Institute, Xinjiang Oil Field Company, PetroChina, Karamay, 834000, China

Abstract In this paper, Ordovician stylolite-bearing marine carbonate rock samples in the eastern-middle part of the Ordos Basin were selected and analyzed. A series of analytical experiments such as observation of casting thin section and fluorescent thin section, TOC test, Rock-Eval pyrolysis, X-ray diffraction of whole rock, and scanning electron microscopy were conducted

to analyze the effect of stylolites in carbonate rocks on organic matter enrichment and hydrocarbon migration. It is indicated in the study that the stylolites represent higher TOC content and better oil-bearing properties than that of the neighboring matrix; however, the two contain similar kerogen type. The stylolite contains a relatively higher content of clay, quartz, dolomite, pyrite, and black bitumen; but relatively lower content of calcite. The grains in the stylolite generally represent basal cementation and matrix supported features. The pore developmental degree, pore types, and pore developmental density are better than that of the matrix, favoring the migration of hydrocarbon. In general, the stylolite demonstrates a positive effect on the organic matter enrichment, hydrocarbon generation, and fluid in carbonate rock with low organic matter abundance.

Keywords carbonate rocks; stylolite; matrix; organic matter enrichment; fluid migration

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2017.01.001

(编辑 付娟娟)