

碳酸盐岩缝合线与基质的排烃效应

——以川东地区石炭系和奥陶系碳酸盐岩为例

王 轩,高 岗,李佳烨,葛黛薇,张维维

[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]

摘要:为了探究碳酸盐岩缝合线与基质的排烃效应及其物质组成的差异,采集了四川盆地东部大池干构造带座3、池53、五科1等取心井含缝合线的石炭系和奥陶系碳酸盐岩岩心样品,进行了缝合线与基质的岩心与铸体薄片观察以及全岩X-射线衍射矿物成分含量、有机碳含量、热解(Rock-Eval)、可溶有机质抽提、族组分离与定量等实验测试。实验分析表明,缝合线比基质的物质组成有较大差异,这主要与压溶作用有极为密切的关系。由于碳酸盐矿物的压溶作用,缝合线比基质含有更多的白云石、黄铁矿、有机质等不溶物质,矿物颗粒主要呈基底胶结、杂基支撑,基质中的矿物颗粒之间主要呈线状、凹凸状紧密接触。这种矿物组成和结构特征使得缝合线比基质有相对更好的孔渗性,可以成为地质历史时期中碳酸盐岩内部流体排出的重要通道,所以,缝合线的排烃效应比基质明显。对于含有缝合线的低有机质丰度碳酸盐岩来说,缝合线有机质可以作为碳酸盐岩生烃的重要补充。此外,缝合线中较多的可溶有机质对热解参数有一定影响。

关键词:缝合线;基质;有机地球化学;排烃效应;碳酸盐岩;四川盆地

中图分类号:TET22.1

文献标识码:A

Hydrocarbon expulsion of stylolite and matrix in carbonate rocks: A case study from the Ordovician and Carboniferous carbonate rocks in Eastern Sichuan Basin

Wang Xuan, Gao Gang, Li Jiaye, Ge Daiwei, Zhang Weiwei

[State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: This paper discusses the differences of hydrocarbon expulsion and compositions between stylolite and matrix in carbonate rocks. Samples were taken from the Ordovician and Carboniferous carbonate rock cores containing stylolites of Wells Zuo 3, Chi 53 and Wuke 1 in the Dachigan Structure Belt of the Eastern Sichuan Basin. The stylolite and matrix were studied through observation of core and cast thin sections and various tests such as whole rock X-Ray diffraction for mineral components and TOC content, Rock-Eval pyrolysis, solvent extraction and fractionation of extract and so on. The results indicate that there is a relatively large compositional difference between stylolite and matrix in carbonate rocks, and this is intimately related to pressure solution of carbonate mineral. Because of pressure solution, the stylolite contains more indissoluble materials such as dolomite, pyrite, and organic matter than the matrix. The mineral grains in stylolites mainly display basal cementation and matrix-supported fabric. While the mineral grains in the matrix mainly represent li near contact and close contact in concave and convex shapes. This makes stylolite to have better physical properties compared with the matrix, thus acting as important passages for expulsion of fluids in carbonate rocks in geological history. Therefore, the hydrocarbon expulsion effect of stylolite is more evident than that of the matrix. For the stylolite-bearing carbonate rocks with low organic abundance, the organic matter in the stylolite can be a prominent supplement of hydrocarbon generation in carbonate source rocks. In addition, the soluble organic matters relatively abundant in the stylolite have certain effects on Rock-Eval pyrolysis parameters.

Key words: stylolite, matrix, organic geochemistry, hydrocarbon expulsion effect, carbonate rock, Sichuan Basin

收稿日期:2016-04-12;修订日期:2017-04-20。

第一作者简介:王轩(1992—),男,硕士研究生,石油地质研究。E-mail:1528159409@qq.com。

通讯作者简介:高岗(1966—),男,博士、副教授,油气勘探与开发。E-mail:gaogang2819@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41372142)。

缝合线是碳酸盐岩中矿物在应力作用下发生溶解作用从而形成的一种重要的地质现象^[1]。碳酸盐岩有机质分布具有较强的非均质性,其中缝合线是有机质富集和流体转移的重要部位^[2-5]。有关碳酸盐岩中缝合线的分布、形态类型、物质组成、成因已进行了较多的研究^[1-5],缝合线对储集层孔渗、流体输导的意义也进行了多方面的探讨^[6],而对于碳酸盐岩缝合线岩石学特征、排烃作用及有机质富集作用的研究并不多。一般情况下,缝合线本身由于致密的不溶残余物的存在成为流体转移的遮挡物而不能构成储渗空间^[7-8]。但缝合线形成之后的漫长地质历史时期由于后期溶蚀作用可以向储渗空间演化,形成大量沿缝合线分布的溶蚀孔隙^[9]。一旦发生溶蚀作用,则缝合线就会有较高的孔隙度,可作为油气和其他流体转移的通道,所以,碳酸盐岩的缝合线对石油的运移、聚集有一定作用^[10-12]。烃源岩的排烃是指油气从低渗透源岩中排驱到相对较高渗透率的运载层或储层的过程^[13-15]。碳酸盐岩中的有机质主要由于成岩作用而呈非均质分布特征,压溶作用导致了有机质在缝合线中的富集^[16],而有机质在缝合线部位富集则提高了石油的排出效率^[17]。

海相碳酸盐岩层系一直是全球油气勘探的重要领域^[18],由于海相碳酸盐岩中有机碳含量普遍较低^[19],缝合线富含有机质可以作为海相碳酸盐岩生烃的补充,所以研究海相碳酸盐岩中广泛发育的缝合线具有重要意义。目前国内外学者较少将缝合线与基质的岩石学特征、地球化学结合起来对比分析缝合线对碳酸盐岩的排烃作用。本文将选择四川盆地石炭系与奥陶系海相碳酸盐岩进行岩石薄片观察,结合X-射线衍射测试的矿物成分含量、有机碳、热解与可溶有机质含量对比等方面分析碳酸盐岩基质与缝合线的排烃效应。

1 地质概况

四川盆地在地理范围上包括了四川省中东部和重庆的大部分区域,是一个呈菱形样式的构造盆地。盆地被周围的断裂带所围绕,东部与龙门山台缘拗陷带相邻,西部与大巴山和大娄山台缘拗褶带分界,南部紧邻大凉山断裂带,北部通过断裂与米仓山台褶带相接,总体面积大概 26 万多平方千米(图 1)^[20]。四川盆地是一个大型的内陆盆地,盆地发育的特点是盆地周边山地的海拔都较高,而盆地中间的地势较平坦并且海拔较低,所以可以非常明显地将盆地区分成周缘山地和盆地中部两个部分^[21]。

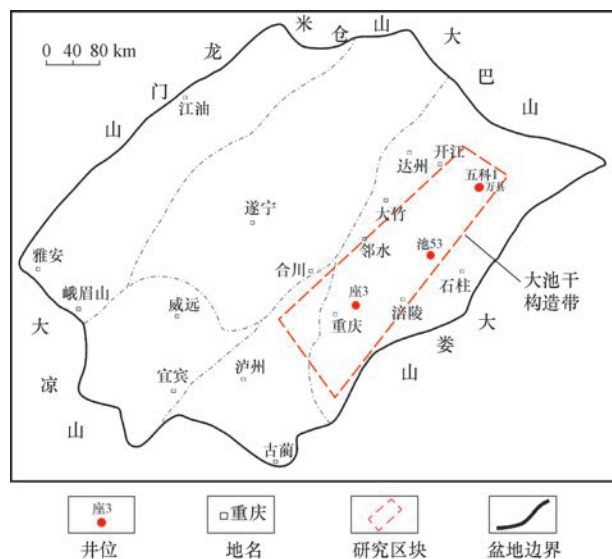


图 1 四川盆地构造位置与取心井分布

Fig. 1 Structure and cored well location in the Sichuan Basin

四川盆地构造上属于扬子地台西部重要的一级单元,是上扬子克拉通基础上发育起来经历了多期构造旋回运动、多类型盆地叠合形成的大型含油气盆地^[22]。作为大型古老叠合沉积盆地,四川盆地的形成和发展经历了多期构造运动,总体以沉降、沉积为主,可分为两大沉积构造演化阶段:① 震旦纪到中三叠世为海相克拉通盆地碳酸盐岩沉积构造演化阶段,盆地以垂直升降运动为主;② 晚三叠世以来进入前陆盆地的陆相碎屑岩为主的沉积构造演化阶段,形成“前陆-克拉通”类型的叠合盆地^[23]。

四川盆地地层主要由震旦纪到中三叠世沉积的海相碳酸盐岩构成,地层的总厚度达数千米,也有部分地层岩性表现为陆相的砂岩和碳酸盐岩,但是储集层主要为海相的碳酸盐岩层段^[23]。盆地主要发育开阔台地相、局限台地相、台内滩相等蒸发岩沉积,存在局部高能滩相发育区,并且这些滩相异常体有利于早期岩溶发育,从而有利于在碳酸盐岩中发生压溶作用形成缝合线^[24]。本次论文研究区选取四川盆地东部地区大池干构造带,该地区地层碳酸盐岩富含较粗的缝合线,在该研究区域采集的奥陶系和石炭系目的层中的碳酸盐岩岩心样品中富含较多的缝合线,并且缝合线均发育较粗,碳酸盐岩样品富含缝合线物质,符合本次研究的需要。

2 实验方法

本次研究样品主要采自四川盆地大池干构造带的座 3、池 53 和五科 1 等钻井的石炭系和奥陶系岩心。

样品富含黑色缝合线充填物(图2)。本次研究要对比分析缝合线及其周围基质,因此对样品中的缝合线与基质分别进行剥离,纯基质样品的采集相对简单,由于基质在样品中占绝大部分,因此只需将岩心破碎,取缝合线附近较纯基质碎屑将其研磨即可。缝合线由于不规则存于样品中,并且不同部位粗细程度不同,其采集难度较大。在采集的过程中尽量选取缝合线较粗的部位,先沿缝合线用细钻将其碎解,然后用特制的手钳将缝合线中充填物分离取出,用锉刀去除明显的基质部分,再用研钵将质纯的缝合线充填物磨碎。将缝合线和基质粉末进行称重过 100mg 目筛,然后分别放入编号的样品袋中,以备下一步实验分析用。

在取得实验样品后即可开始进行分析测试。首先对分析的岩心样品制备岩石铸体薄片进行岩石学特征及孔隙发育情况显微镜下观察。然后分别称取碳酸盐岩基质和缝合线物质 100 mg,先后进行总有机碳、热解(Rock-Eval)与全岩 X-射线衍射矿物成分分析测试。接下来挑选含缝合线的物质(20~30 g)和足够多的基质(150 g 左右)样品,进行氯仿沥青“A”抽提、族组分的分离与定量分析等。

3 实验结果与讨论

3.1 基质与缝合线岩石学特征

大量的缝合线铸体薄片观察发现研究区海相碳酸盐岩缝合线发育特征有所不同,缝合线的粗细程度有所不同,这与发生压溶作用形成缝合线时的应力大小

有关。普通岩石薄片,方解石会被茜素红硫溶液染成红色,而白云石则不会被染色(图3),借此区分两种主要的碳酸盐岩矿物成分。铸体薄片,未被充填的孔隙会被蓝色液态胶充注变成蓝色加以区分(图4)。铸体薄片观察发现缝合线中矿物成分主要是白云石,充填物主要是黑色的固体沥青、有机质以及土黄色的泥质等(图3)。缝合线内矿物颗粒之间一般呈基底胶结、杂基支撑的特点(图3)。缝合线周围基质的主要矿物成分为方解石,矿物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(图3,图4)。这是缝合线压溶成因的重要证据,由于碳酸盐岩中矿物胶结物的大量发育可以成为岩性致密化的主要因素^[25],这也为缝合线形成过程中流体携溶解的碳酸盐向基质运移,当条件变化时溶解的矿物离子重新结晶而起胶结作用,使缝合线周围基质变得更加致密提供了依据。但基质中排烃特征不明显,排烃后残余物很少,说明其排烃效应并不如缝合线好。

缝合线充填物和基质物质的全岩 X-射线衍射测试结果与显微镜下观察结果基本一致(表1)。缝合线充填物中粘土矿物含量介于 17.5%~26.3%,均值为 20.7%;白云石含量介于 41.3%~48.6%,均值为 45.6%;黄铁矿含量介于 8.7%~14.1%,均值为 11.4%;而在基质物质中,粘土矿物含量介于 2.8%~8.2%,均值为 5.4%;白云石含量介于 15.2%~27.9%,均值为 21.3%;黄铁矿含量介于 1.8%~5.7%,均值为 3.1%;缝合线充填物中的粘土、白云石和黄铁矿含量均高于基质物质,尤其是黄铁矿差异最大。

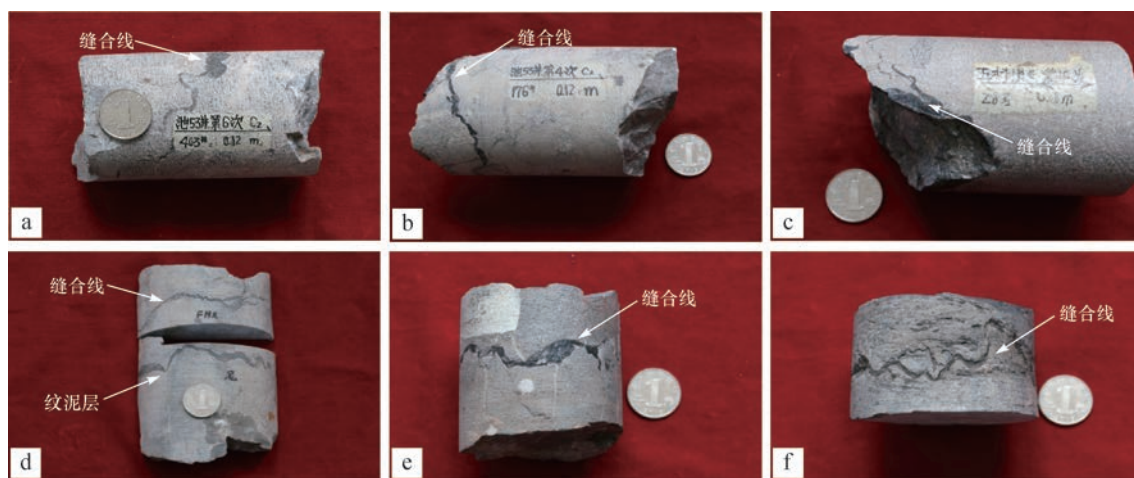


图2 川东地区含缝合线的碳酸盐岩岩心样品照片

Fig. 2 Photos of carbonate rock core samples containing stylolite in the Eastern Sichuan Basin

a. 池53井,石炭系,埋深3 056.21~3 056.32 m; b. 池53井,石炭系,埋深3 053.82~3 053.94 m; c. 五科1井,石炭系,埋深4 254.24~4 254.32 m; d. 座3井,奥陶系,埋深4 316.19~4 324.69 m; e. 座3井,奥陶系,埋深4 316.19~4 324.69 m; f. 座3井,奥陶系,埋深4 324.6~4 336.19 m

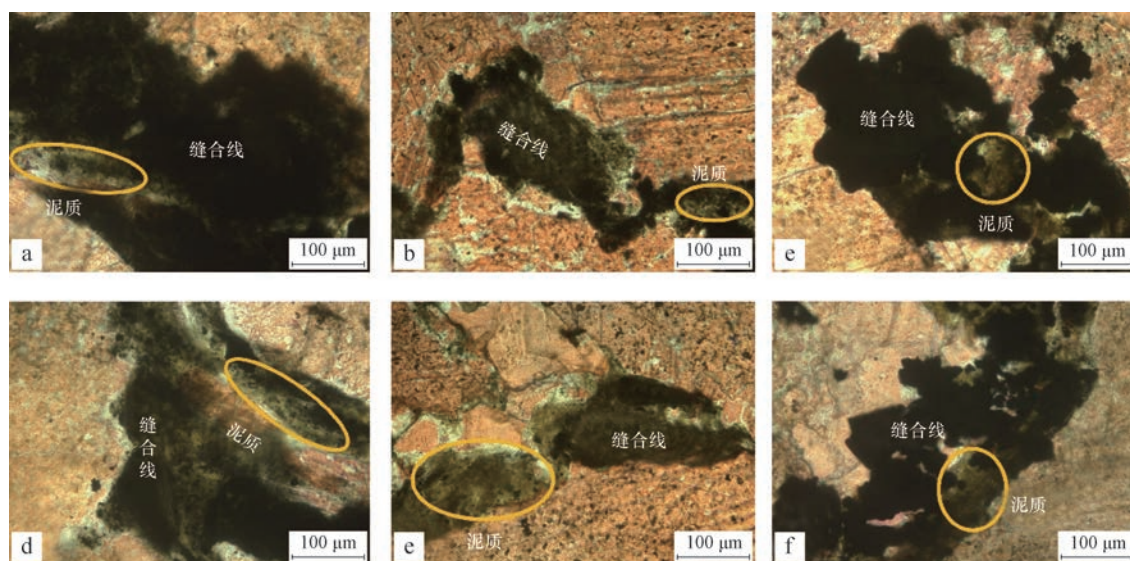


图3 川东地区石炭系和奥陶系碳酸盐岩缝合线显微镜下铸体薄片特征(单偏光20倍)

Fig. 3 Cast thin sections of the stylolite in the Carboniferous and Ordovician carbonate rocks in the Eastern Sichuan Basin

a. 座3井,奥陶系,埋深4 316.19~4 316.43 m,含大量沥青和少量泥质;b. 池53井,石炭系,埋深3 056.21~3 056.32 m,含大量沥青和少量泥质;c. 五科1井,石炭系,埋深4 254.24~4 254.32 m,含大量沥青和少量泥质;d. 座3井,奥陶系,埋深4 317.52~4 317.71 m,含中量沥青和中量泥质;e. 池53井,石炭系,埋深3 053.82~3 053.94 m,含少量沥青和大量泥质,有机质分散;f. 五科1井,石炭系,埋深4 251.62~4 251.73 m,含大量沥青和大量泥质

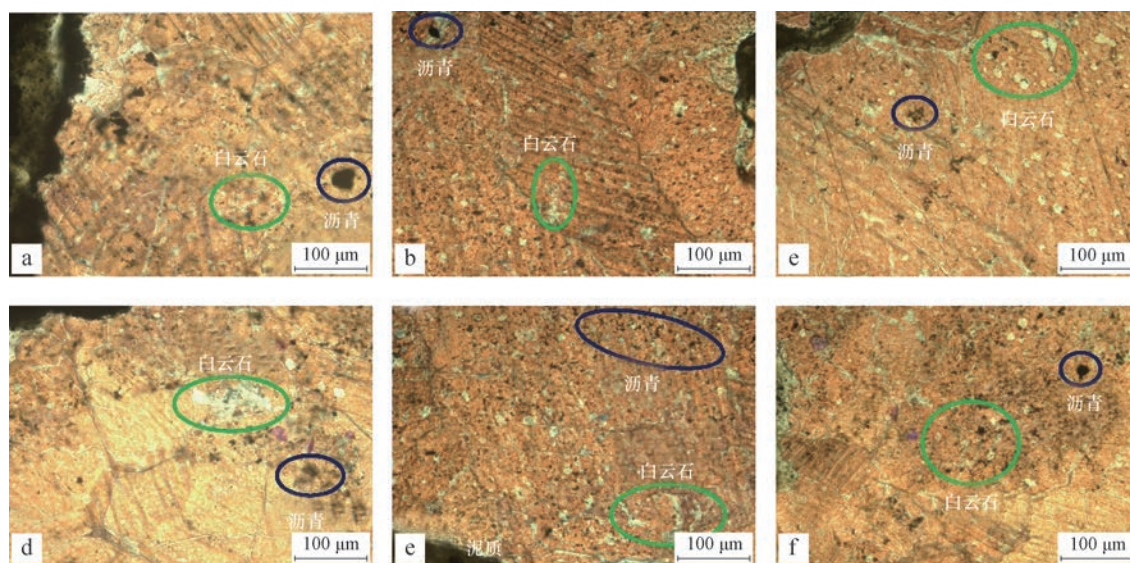


图4 川东地区石炭系和奥陶系碳酸盐岩基质显微镜下铸体薄片特征(单偏光20倍)

Fig. 4 Cast thin sections of the matrix in the Carboniferous and Ordovician carbonate rocks in the Eastern Sichuan Basin

a. 座3井,奥陶系,埋深4 316.19~4 316.43 m,含少量白云石和少量沥青;b. 池53井,石炭系,埋深3 056.21~3 056.32 m,含少量白云石和极少量沥青;c. 五科1井,石炭系,埋深4 254.24~4 254.32 m,中量白云石和极少量沥青;d. 座3井,奥陶系,埋深4 317.52~4 317.71 m,少量白云石和少量沥青;e. 池53井,石炭系,埋深3 053.82~3 053.94 m,中量白云石和极少量沥青;f. 五科1井,石炭系,埋深4 251.62~4 251.73 m,中量白云石和少量沥青

缝合线中白云石和黄铁矿比基质中含量更高的现象可能与缝合线的压溶成因有关。在沉积后期碳酸盐岩颗粒间发生压溶作用,碳酸盐岩在酸性地质流体的作用下溶解,溶解的碳酸盐岩流体主要沿着缝合线的压溶面运移排泄,这样不溶的白云石、黄铁矿、有机质等逐渐富集形成缝合线,易溶于酸性地质流体的方解

石溶解后随碳酸盐岩流体运移排泄出去^[26]。最终导致缝合线中不溶的白云石和黄铁矿相比基质更加富集,测定含量更高,而方解石含量相比基质更少的现象。

在缝合线形成过程中,压溶作用形成的碳酸盐岩流体中溶解的矿物离子会重新结晶而起到胶结作用,

表1 川东地区碳酸盐岩缝合线与基质矿物成分含量数据

Table 1 Minerology of stylolite and matrix in carbonate rocks in the Eastern Sichuan Basin

序号	编号	粘土/ %	白云石/ %	黄铁矿/ %	石英/ %	斜长石/ %	方解石/ %
1	1-FHX	17.5	47.6	14.1	5.1	2.6	11.8
2	1-JZ	7.1	17.3	2.6	2.4	2.5	66.1
3	5-FHX	22.5	45.5	10.6	5.3	2.1	12.4
4	5-JZ	4.1	16.8	3.2	3.4	2.4	68.4
5	4-FHX	26.3	41.3	9.3	6.6	2.7	11.5
6	4-JZ	8.2	15.2	1.8	1.6	2.1	66.7
7	9-FHX	18.1	44.8	13.1	6.8	2.8	9.7
8	9-JZ	5.3	27.2	3.4	2.4	2.6	56.1
9	15-FHX	19.2	48.1	12.5	5.7	1.8	8.3
10	15-JZ	3.1	26.4	5.7	2.6	1.5	58.7
11	11-FHX	22.7	43.4	11.5	6.9	1.9	11.8
12	11-JZ	2.8	27.9	2.2	2.4	1.4	59.3
13	10-FHX	18.5	48.6	8.7	6.2	2.9	12.2
14	10-JZ	6.9	18.1	2.7	2.2	2.7	63.4

从而使得缝合线周围基质孔隙度降低,从而基质岩石变得更加致密^[27]。而在缝合线形成之后,碳酸盐岩中储集层储集物性的影响因素主要为成岩后生作用和裂缝的发育情况,碳酸盐岩内的断裂和孔洞类岩溶通道往往是油气运移的高速通道^[28]。

首先从成岩后生作用角度来看,随着缝合线形成之后压溶作用使得基质愈加致密,地质流体理应沿着缝合线流动并向致密的基质层中运移,后续如果发生溶蚀作用理应使得缝合线中溶蚀孔洞比基质要更加发育^[26-27];此外,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。

然后从碳酸盐岩裂缝发育的岩性因素来看,裂缝发育的内因主要取决于岩石的脆性,岩性不同,脆性不一样,裂缝发育的程度也不一样,脆性大的岩层裂缝更加发育;硅质含量增加会增加岩石的脆性,利于裂缝的发生;白云石含量增加,晶粒比方解石更粗,会增加岩石脆性,也有利于裂缝的发生^[29]。此外,泥质含量增加,将降低岩石的脆性,减弱裂缝的发育;但是考虑到粘土矿物可以促进有机质生烃反应的进行^[30],并且粘土矿物层本身可以产生大量的微孔隙和微裂缝,增加岩石的孔隙度。所以,单纯从缝合线与基质的矿物成分对比来看,结合缝合线的压溶成因和碳酸盐岩后生成岩作用的分析,判断碳酸盐岩缝合线次生孔洞和裂缝更加发育,孔渗性理应更好,其本身有机质除了可以生部分油气外,也可作为油气运移通道;这也与镜下薄片观察的结果一致;所以理论上缝合线的排烃效应应

该比基质要好。另外,在压溶作用的影响下,地下地质环境中溶解了围岩物质的碳酸盐溶液更倾向于沿着缝合线的压溶面运移排泄,而不是主要进入难渗透的缝合线两侧岩石中^[26-27],综合说明了缝合线的排烃效应理应比基质要好。

3.2 基质与缝合线排烃效应对比

碳酸盐岩缝合线的形成主要是碳酸盐岩基质压溶作用下流体及可溶离子排出的结果,所以其中的烃类含量与烃类排出之间存在一定的关系。同一部位的缝合线与基质成熟度接近、有机质类型相似,差异在于缝合线的有机质丰度和生烃潜力比基质大,因此可以根据两者的地化特征和族组分含量对比分析排烃效应好坏。

3.2.1 排烃效应分析方法

生油岩热解(Rock-Eval)数据的变化可以反映出生油岩的生排烃特征^[31-32]。一般地,热解 S_1 代表的是单位岩石的残留烃量,若未发生过排烃,则可代表岩石的已生烃总量,其大小取决于有机质丰度、类型和成熟度。在有机质丰度相同时,它可以反映有机质的生烃特征,但事实上各岩石的有机质丰度不尽相同,所以不能直接用 S_1 来说明有机质的生烃特征,而应该采用消除了有机质丰度影响之后的参数烃指数 I_{HC} ($I_{HC} = S_1/TOC, \text{mg/g}$) 来表征有机质的生排烃效应。以单位质量 TOC 对应的残余烃量 I_{HC} 作为缝合线与基质排烃强度的衡量标准,是因为相对 TOC 来说,残余烃量 S_1 值越小说明在地质历史时期排烃量越大,排烃强度也越大。通过计算缝合线充填物与基质物质的 I_{HC} 数值,再拟合其与两者有机质丰度、残余有机质生烃潜力、 T_{max} 数值之间的曲线关系,以及分离定量实验中氯仿沥青“A”的含量以及各族组分的相对含量,可以分析出排烃效应与这些影响因素之间的关系,判断出缝合线与基质的排烃效应强弱。

3.2.2 排烃效应与有机质丰度的关系

根据有机碳含量(TOC)及热解生烃潜力 P_g ($P_g = S_1 + S_2$) 分析结果,缝合线 TOC 值介于 0.18% ~ 0.81%,均值为 0.67%;基质 TOC 值介于 0.03% ~ 0.23%,均值为 0.12%。缝合线的 P_g 值介于 2.3 ~ 6.6 mg/g,均值为 4.6 mg/g;基质 P_g 值介于 0.2 ~ 1.2 mg/g,均值为 0.57 mg/g。

对于碳酸盐岩,许多研究将其烃源岩 TOC 含量下限设定在 0.3% 左右^[33],如果单从有机质丰度来看,缝合线充填物作为烃源岩要好于基质物质。根据实验计

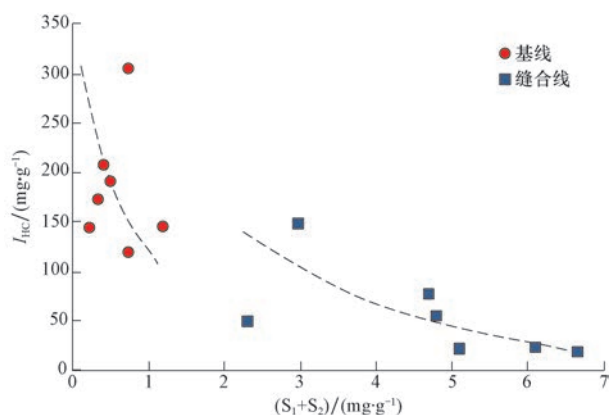


图5 川东地区碳酸盐岩样品中基质和缝合线的热解烃指数与生烃潜力关系

Fig. 5 Relationship between I_{HC} and P_g of matrix and tytolite in carbonate rock samples in the Eastern Sichuan Basin

算结果,基质的 I_{HC} 值明显较高,主要介于 121 ~ 307 mg/g,均值为 185 mg/g;缝合线的 I_{HC} 值明显较低,主要介于 19 ~ 148 mg/g,均值为 57 mg/g。这说明缝合线相对于基质有更多的烃类排出,预示了缝合线的排烃效应比基质要强。

根据排烃效应与有机质丰度关系来看(图5),由于缝合线的排烃效应比基质明显,有机质丰度整体比基质要高,并且 I_{HC} 值与热解生烃潜力 P_g 值呈反比关系。再次说明有机质丰度越高,排烃效应越明显,缝合线比基质的排烃效应更好。

3.2.3 排烃效应与残余有机质生烃潜力的关系

热解方法得到的烃指数(I_{HC})和氢指数(I_H)($I_H = S_2/TOC, \text{mg/g}$)均可以表示岩石有机质的生烃潜力^[34]。其中 I_{HC} 可表示岩石中已生成的相对于 TOC 的烃量, I_H 表示岩石中相对于 TOC 可以在更高的演化阶段生成的烃量,则 $(I_{HC} + I_H)$ 表示的是岩石中相对于 TOC 的总的残余烃潜力,包括已生成和残余可生成的烃潜力。根据分析计算结果,缝合线的 $(I_{HC} + I_H)$ 值介于 420 ~ 1 271.5 mg/g,均值为 762.1 mg/g;基质 $(S_1 + S_2)/TOC$ 数值介于 398.4 ~ 616.6 mg/g,均值为 509.7 mg/g。说明缝合线的总残余有机质生烃潜力普遍高于基质。通过拟合曲线(图6)可以看出, I_H 与 $(I_{HC} + I_H)$ 之间呈反比关系,并且两条曲线具有较好的正相关性,说明残余有机质生烃潜力越大,排烃效应越强。

TOC 与热解计算结果显示,缝合线的 I_H 值介于 271 ~ 1 221 mg/g,均值为 705 mg/g;基质 I_H 值介于 104 ~ 462 mg/g,均值为 325 mg/g。通过拟合曲线(图6)可以很明显地看出,缝合线的 I_H 值高于基质,

表明其有更强的残余生烃潜力。拟合曲线也表现出 I_{HC} 值与 I_H 值呈反比关系,并且两条曲线具有较好的正相关性,说明缝合线比基质的排烃效应更好。

3.2.4 排烃效应与族组分的关系

缝合线的形成主要是碳酸盐岩基质压溶的结果,也是基质烃类排出的通道,其可溶有机质与基质内的可溶有机质之间存在排烃效应关系^[11]。氯仿沥青能比较准确的代表岩样中溶于氯仿的沥青物质含量。与酒精-苯沥青相比,氯仿沥青的烃类含量较高,在成分上更接近石油。因此,在有机质含量相同的情况下,氯仿沥青的含量愈高,说明有机物质向石油转化的程度愈高,常用氯仿沥青含量“ A ”(A)与有机碳含量(TOC)的比值(即 A/TOC 值)表示有机物质向油气的转化程度。氯仿沥青“ A ”含量实验数据结果显示,缝合线中氯仿沥青“ A ”含量介于 0.007% ~ 0.044%,均值为 0.028%,基质中氯仿沥青“ A ”含量介于 0.001% ~ 0.007%,均值为 0.004%。据图7柱状图显示,缝合线充填物中氯仿沥青“ A ”/ TOC 数值均高于基质样品,其比值分别介于 0.03 ~ 0.06 和 0.02 ~ 0.04,均值分别为 0.04 和 0.03,整体上缝合线中数值要更大。这说明碳酸盐岩缝合线中有机质向油气转化的程度相比基质中更高,可能与缝合线中大量富集可溶有机质有关,但两者由于地质历史时期中埋深一致,所以差别并不大。

表2为氯仿沥青“ A ”族组分相对含量,显示族组分回收率介于 86% ~ 94%,均值为 91%,分离定量实验结果合理。从表2中各族组分相对含量的差异来看,整体趋势是缝合线充填物中饱和烃和芳香烃含量低于基质,沥青质和非烃含量高于基质物质。在烃源岩初次排烃过程中,排烃程度越强,残余的烃类含量就相应越少,非烃类物质相应越多。整体来看,缝合线充填物的排烃效应应该比基质物质要好,排烃强度更大,利于碳酸盐岩烃源岩的初次排烃。

此外,氯仿沥青“ A ”的各族组分在初次运移的排烃程度上也有明显差异。饱和烃含量整体低于芳香烃含量,芳香烃含量整体低于非烃,似乎可以说明饱和烃相对于芳香烃,芳香烃相对于非烃更易排出烃源岩。同时,缝合线的饱和烃和芳香烃含量普遍低于基质,又一次表明缝合线更利于烃类的排出和运移。

3.2.5 排烃效应对热解 T_{max} 的影响

根据热解实验数据分析结果,缝合线的 T_{max} 值介于 373 ~ 500 °C,均值为 420 °C;基质 T_{max} 值介于 420 ~ 600 °C,均值为 481 °C。同一碳酸盐岩缝合线与基质

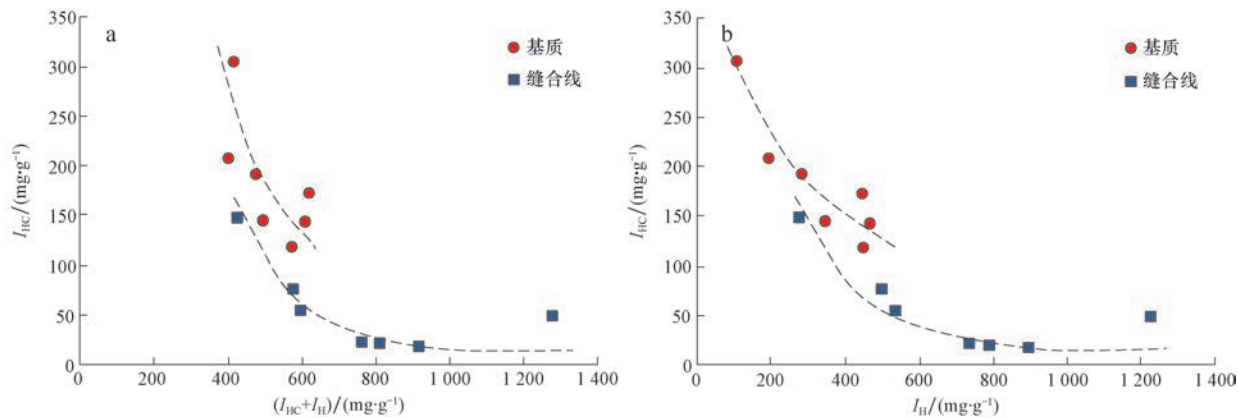


图 6 川东地区碳酸盐岩缝合线和基质的 I_H 值和 $(I_{HC} + I_H)$ (a) 与 I_{HC} 值(b) 关系

Fig. 6 Relationship between I_{HC} and $(I_{HC} + I_H)$ (a) and I_H (b) of stylolite and matrix in carbonate rock samples in the Eastern Sichuan Basin

表 2 川东地区碳酸盐岩缝合线与基质各族组分相对含量数据
Table 2 Relative contents of various group components of stylolite and matrix in carbonate rocks in the Eastern Sichuan Basin

序号	编号	族组分相对含量/%			
		饱和烃	芳香烃	非烃	沥青质
1	1 - FHX	17	23	32	28
2	1 - JZ	21	35	24	20
3	5 - FHX	21	24	37	18
4	5 - JZ	25	36	23	16
5	4 - FHX	18	26	41	12
6	4 - JZ	22	31	34	13
7	9 - FHX	23	27	37	13
8	9 - JZ	28	36	29	7
9	15 - FHX	14	31	35	20
10	15 - JZ	21	29	33	17
11	11 - FHX	29	33	27	11
12	11 - JZ	32	41	18	9
13	10 - FHX	17	35	33	15
14	10 - JZ	24	34	29	13

的有机质成熟度应该相近,但 T_{max} 呈现出来的规律是基质均高于缝合线,且无论是基质还是缝合线,它们的 I_{HC} 与 T_{max} 两者关系曲线均具有较好的正相关性(图 8)。这显示了残余可溶沥青对最高热解峰温 T_{max} 的影响。从烃源岩热解过程来说,在低于 90 °C 时热解得到的主要是轻烃(S_0),在 90 ~ 300 °C 范围热解得到的主要较重的已经生成的烃类(S_1),在 300 ~ 600 °C 范围热解得到的主要是干酪根热解烃(S_2)。如果样品中有较多的比较重的烃类和非烃,则在 90 ~ 300 °C,这些已生成的可溶有机质就不能完全解析,只有在 300 ~ 600 °C 的较低温度范围才能释放,这就引起了热解烃峰温的下降,从而得到较低的 T_{max} 值。由于缝合线比基质有更多的可溶有机质含量,所以,其热解 T_{max} 值总体低于

基质。可见,排烃效应对热解 T_{max} 数值可以造成影响。这指示当利用热解 T_{max} 分析烃源岩热成熟度时应考虑可溶有机质的影响。

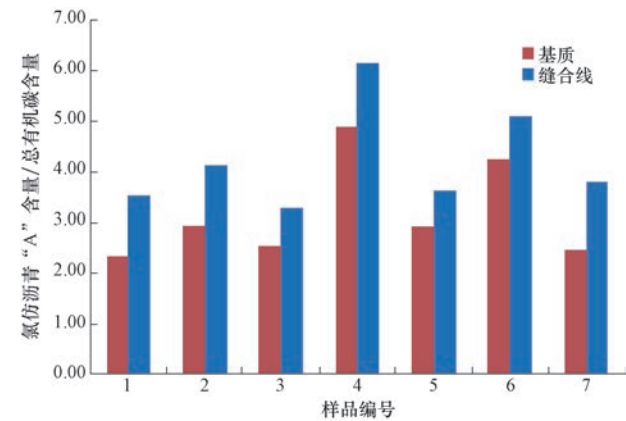


图 7 川东地区碳酸盐岩样品缝合线与基质氯仿沥青“A”含量/总有机碳含量数值对比

Fig. 7 Chloroform bitumen “A” vs. total organic carbon content of the stylolite and matrix in carbonate rock samples in the Eastern Sichuan Basin

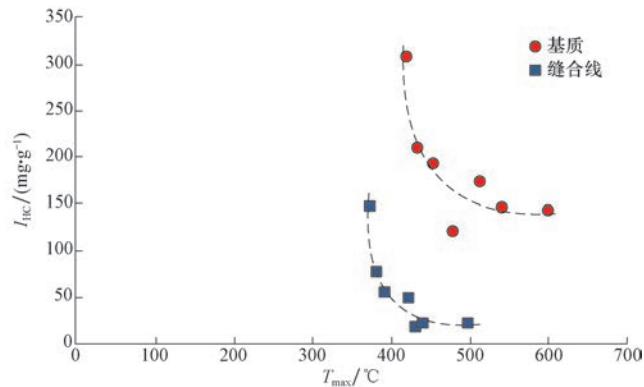


图 8 川东地区碳酸盐岩缝合线和基质的 I_{HC} 值与 T_{max} 值关系

Fig. 8 Relationship between I_{HC} and T_{max} of stylolite and matrix in carbonate rock samples in the Eastern Sichuan Basin

4 结论

1) 岩石铸体薄片与全岩 X -射线衍射实验表明碳酸盐岩缝合线比基质有更多的白云石、黄铁矿、黑色沥青、固体有机质以及泥质等,矿物颗粒之间一般呈基底胶结、杂基支撑,基质中矿物颗粒之间一般呈线状、凹凸紧密接触。所以缝合线比基质有相对更好的孔渗性,地质历史时期可以作为碳酸盐岩内部流体排出的重要通道。

2) 有机质丰度分析显示由于压溶过程的富集作用,碳酸盐岩缝合线比基质有更多的有机质,说明了缝合线相对于基质有更高的生烃潜力。这对于含有缝合线的低有机质丰度碳酸盐岩的生烃有一定贡献。

3) 碳酸盐岩缝合线与基质的热解、可溶有机质及其族组分含量的对比表明可溶有机质含量对热解参数有影响,缝合线的排烃效应比基质更好。

参 考 文 献

- [1] Jrda R. Stylolites; measurement of rock loss[J]. *Revista Brasileira De Geociências*, 2001, 30(3): 432-435.
- [2] Ramsdom R M. Stylolite and oil migration[J]. *AAPG Bulletin*, 1952, 36(11): 2185-2186.
- [3] Finkel E A, Wilkinson B H. Stylolitization as source of cement in Mississippian Salem limestone, west-central Indiana[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(2): 174-186.
- [4] Wanless H R. Limestone response to stress; Pressure solution and dolomitization[J]. *Journal of Sediment Research*, 1979, 49(1): 328-332.
- [5] Tucker, Maurice E. Carbonate sedimentology[J]. Oxford London: Blackwell Scientific, 1990, 18(4): 401-402.
- [6] 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 Gang. Research status and oil & gas geology significance of carbonate rock stylolite[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(2): 218-226.
- [7] Logan B W, Semeniuk V. Dynamic metamorphism, processes and products in Devonian carbonate rocks, Canning basin, western Australia[J]. *Journal of Geological Society of Australia*, 1976: 138-145.
- [8] Dürrast H, Siegesmund S. Correlation between rock fabrics and physical properties of carbonate reservoir rocks[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 1999, 88(3): 392-408.
- [9] Park W C, Schot E H. Stylolite; their nature and origin[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1968, 38(1): 175-191.
- [10] 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 Dazhi, Li Guorong, Luo Peng, et al. Diagenesis research of Shi niulan Group of the Silurian in the southeastern Sichuan [J]. *Natural Gas Technology*, 2009, 3(6): 6-11.
- [11] 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 Gang. Role of stylolite to generation, expulsion, migration and accumulation of hydrocarbon in carbonate rock [J]. *Xian Petroleum Institute Journal: Natural Sciences*, 2000, 15(4): 32-36.
- [12] 钟建华, 孔凡亮, 李阳, 等. 塔河油田四区奥陶系碳酸盐岩油藏中的缝合线研究[J]. *地质论评*, 2010, 5(6): 841-850.
Zhong Jianhua, Kong Fanliang, Li Yang, et al. Stylolite research of the Ordovician carbonate reservoir in the forth area of Tahe oil field [J]. *Geology Review*, 2010, 5(6): 841-850.
- [13] 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 Guangdi, Gao Gang, Wang Hui. Organic matter distribution and hydrocarbon-expelling characteristics of carbonate source rocks [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(3): 482-485.
- [14] 高岗, 郝石生, 王晖. 碳酸盐基质与缝合线的生烃和排烃特征[J]. *中国科学: D 辑*, 2000, 30(2): 175-179.
Gao Gang, Hao Shisheng, Wang Hui. Characteristics of hydrocarbon generation and expulsion in matrix and stylolite of carbonate rocks [J]. *Science in China: series D*, 2000, 30(2): 175-179.
- [15] 蔡希源. 湖相烃源岩生排烃机制及生排烃效率差异性——以渤海湾盆地东营凹陷为例, 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 329-334.
Cai Xiyuan. Hydrocarbon generation-expulsion mechanisms and efficiencies of lacustrine source rocks; a case study from the Dongying sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology* [J]. 2012, 33(3): 329-334.
- [16] 王行信, 蔡进功, 包于进, 等. 粘土矿物对有机质生烃的催化作用[J]. *海相油气地质*, 2006, 11(3): 27-38.
Wang Xingxin, Cai Jingong, Bao Yujing, et al. Catalysis of clay mineral to organic matter in hydrocarbon genesis [J]. *Marine Petroleum Geology*, 2006, 11(3): 27-38.
- [17] 唐健程, 陈红汉, 王家豪等. 湘东南拗陷上古生界碳酸盐岩储层成岩作用[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(6): 43-47.
Tang Jiancheng, Chen Honghan, Wang Jiahao, et al. The diagenesis of the upper Paleozoic carbonate rocks in the southeast Xiang depression [J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(6): 43-47.
- [18] 王大鹏, 陆红梅, 陈小亮, 等. 海相碳酸盐岩大中型油气田成藏体系及分布特征[J]. *石油与天然气地质*, 2016, (3): 363-371.
Wang Dapeng, Lu Hongmei, Chen Xiaoliang, et al. Petroleum accumulation systems and distribution of medium to large marine carbonate fields [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, (3): 363-371.
- [19] 田春桃, 马素萍, 杨燕, 等. 湖相与海相碳酸盐岩烃源岩生烃条件对比[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 336-341.
Tian Chuntao, Ma Suping, Yang Yan, et al. Comparison of hydrocarbon generation conditions between lacustrine and marine carbonate source rocks [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 336-341.
- [20] 荣毅, 胡明, 谭勇, 等. 四川盆地东部开江地区石炭系构造演化与油气成藏关系分析[J]. *重庆科技学院学报(自然科学版)*, 2010, 12(3): 24-29.
Rong Yi, Hu Ming, Tan Yong, et al. Carboniferous tectonic evolution

- and hydrocarbon accumulation relationship analysis of Kaijiang Area in eastern Sichuan basin [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 12 (3) : 24 - 29.
- [21] 刘满仓,杨威,李其荣,等. 四川盆地蜀南地区奥陶系地层划分对比及特征[J]. 石油天然气学报, 2008, 5(30): 192 - 197.
- Liu Mancang, Yang Wei, Li Qirong, et al. Study on characteristics and its stratigraphic classification and correlation of Ordovician in Shunan area of Sichuan Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 5(30): 192 - 197.
- [22] 郭铁,谢淑云,张殿伟,等. 川南地区灯影组白云岩地球化学特征及流体来源[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 721 - 730.
- Wu Tie, Xie Shuyun, Zhang Dianwei, et al. Geochemical characteristics and fluid origin of the Dengying Formation dolomites in southern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 721 - 730.
- [23] 刘建华,朱西养,王四利,等. 四川盆地地质构造演化特征与可地浸砂岩型铀矿找矿前景[J]. 铀矿地质, 2005, 21(6): 321 - 330.
- Liu Jianhua, Zhu Xiyang, Wang Sili, et al. Geologic tectonic evolutionary characteristics and prospecting potential. for ISL-amenable sandstone type uranium deposits in Sichuan basin [J]. Uranium Geology, 2005, 21(6): 321 - 330.
- [24] 郭彤楼. 四川盆地奥陶系储层发育特征与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 372 - 378.
- Guo Tonglou. Characteristics and exploration potential of Ordovician reservoirs in Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 372 - 378.
- [25] 林小兵,刘莉萍,田景春,等. 川西坳陷中部须家河组五段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 224 - 230.
- Lin Xiaobing, Liu Liping, Tian Jingchun, et al. Characteristics and controlling factors of tight sandstone reservoirs in the 5th member of Xujiahe Formation in the central of western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 224 - 230.
- [26] 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 Qinyin, Wang Ruihua, Mu Chuanlong, et al. New cognition about stylolite [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 241 - 249.
- [27] 李国蓉. 碳酸盐岩中缝合线的形成机制及其储集意义讨论[J]. 矿物岩石, 1997, 17(2): 49 - 54.
- Li Guorong. Discussion on the genetic mechanism of stylolites in carbonate rocks and their significance for storage [J]. Journal of Mineral Petroleum, 1997, 17(2): 49 - 54.
- [28] 周波,金之钧,云金表,等. 碳酸盐岩油气二次运移距离与成藏[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 457 - 463.
- Zhou Bo, Jin Zhijun, Yun Jinbiao, et al. Secondary oil migration distance and hydrocarbon accumulation in carbonate rocks [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 457 - 463.
- [29] 何胡军,曾大乾,毕建霞,等. 普光气田碳酸盐岩储层裂缝的成因及其控制因素[J]. 海相油气地质, 2014, 19(4): 65 - 72.
- He Hujun, Zeng Daqian, Bi Jianxia, et al. Genesis and control factors of fractures in Carbonate Reservoirs in Puguang Gas Field [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(4): 65 - 72.
- [30] 唐海,汪全林,彭鑫岭,等. 川东宣汉地区飞仙关组裂缝特征及成因研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(4): 78 - 84.
- Tang Hai, Wang Quanlin, Peng Xinling, et al. The study of fracture characteristics and causes at Feixianguan Formation in Xuanhan area of eastern Sichuan [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(4): 78 - 84.
- [31] Espitalié J, Deroo G, Marquis F. La pyrolysis Rock-Eval et ses applications. Revue de L'Institut Français du Pétrole, 1985, 40, 755 - 784.
- [32] Tissot B P Welte D H. , Petroleum formation and occurrence [M]. New York: Springer Verlag, 1984.
- [33] 林会喜,彭苏萍,杜文凤,等. 渤南洼陷沙四上亚段碳酸盐岩成藏条件与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 161 - 166.
- Lin Huixi, Peng Suping, Du Wenfeng, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and prospecting potentials of carbonate rocks in the Upper Es4 of Bonan Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 161 - 166.
- [34] 陈建平,梁狄刚,张水昌,等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. 地质学报, 2012, (7): 1132 - 1142.
- Chen Jianping, Liang Digang, Zhang Shuichang, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, (7): 1132 - 1142.

(编辑 张亚雄)