

# 碳酸盐岩缝合线与基质有机质特征对比

高 岗, 柳广弟, 王成云, 师生宝

(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:**缝合线作为碳酸盐岩重要的地质现象,是碳酸盐岩有机质富集和流体排出的重要场所,对碳酸盐岩缝合线与基质有机质丰度的对比,有助于了解碳酸盐岩缝合线的有机质富集与排烃特征。通过碳酸盐岩基质与缝合线物质酸不溶物、有机碳(TOC)含量及热解(Rock-Eval)分析,对基质与缝合线的有机质富集特征及其继承性关系、排烃特征差异进行了详细分析。酸不溶物含量是碳酸盐岩有机质含量的重要指示,具有较低酸不溶物含量的基质对应的有机质丰度较低,而较高酸不溶物含量的缝合线对应的有机质丰度较高。缝合线的有机碳含量、已生烃量和排烃量均高于基质,生烃潜力高于基质。缝合线作为烃源岩要优于基质。缝合线与基质的母质成熟度一致,它们的有机质丰度具有良好的继承性。缝合线的排烃条件好于基质,对碳酸盐岩烃类的生成、运移和聚集都具有一定意义。

**关键词:**碳酸盐岩;缝合线;基质;有机质丰度;酸不溶物

**中图分类号:**TE122.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-1926(2014)08-1025-05

**引用格式:**Gao Gang, Liu Guangdi, Wang Chengyun, *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. [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.]

## 0 引言

缝合线是自然界岩石中广泛发育的一种矿物压溶作用产生的地质现象<sup>[1-3]</sup>,可以出现于碳酸盐岩、石英岩、石膏、砾岩甚至火成岩等不同岩性中,但99%的缝合线分布于碳酸盐岩中<sup>[4]</sup>。所以,缝合线是碳酸盐岩重要的地质特征。缝合线的形成是多种因素彼此间共同作用的结果,包括岩石岩性特征、外部应力、温度、流体参与、构造运动及物化条件等<sup>[5-7]</sup>,但最为重要的因素是应力与溶解作用共同控制下的压溶作用<sup>[8-11]</sup>。在应力点上的矿物质优先溶解的碳酸盐矿物被流体搬运至其他部位或周围基质中结晶胶结岩石、不溶矿物和有机质残留富集形成缝合线<sup>[12-14]</sup>。缝合线主要由围岩基质、缝合面和缝合膜3个要素组成<sup>[15-16]</sup>,其中的缝合膜是缝合线的主要物质组成部分,由于可溶矿物部分丢失,有机质与不溶矿物组分富集,从而表现出与围岩基质的差

异。有关缝合线与基质有机质丰度特征的研究成果还很有限<sup>[17-19]</sup>。本文将主要对比分析缝合线与基质的有机质丰度相关性及其与生排烃特征间的关系。

## 1 实验方法

研究所用的碳酸盐岩样品采自塔里木盆地的奥陶系。纯基质样品的采集比较简单,只需将岩心破碎,取缝合线附近较纯的碎屑,然后将其磨碎即可。由于缝合线以三维不规则的立体状态存在于碳酸盐岩基质中,其样品的获取比较复杂。对含缝合线较薄的岩心,用细钻沿缝合线取样,但因缝合线太细,样品量少且可能混入纯碳酸盐岩基质样品,但仍接近缝合线物质的组成特征;对所含缝合线较粗的岩心样品,可沿缝合线将其碎解,用特制手钳将缝合线中充填物取出,再用研钵磨碎。将不同样品过100目筛,然后分别放入编号的纸袋中,以备下一步实验分析所用。

收稿日期:2013-10-14;修回日期:2014-01-30.

基金项目: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”(编号:41372142)资助.

作者简介:高岗(1966-),男,陕西高陵人,副教授,博士,主要从事油气地质与油气勘探研究. E-mail: gaogang2819@sina.com.

取得了分析样品后,即可进行分析测试。首先分别称取碳酸盐岩基质、缝合线缝隙物 100 目粉碎样品 0.5~2.0g,分别放入烧杯中,加入过量 5% 的盐酸溶液,在 70℃ 条件下煮 2h,除去岩样中的碳酸盐。然后准确称取除去有机质后的坩锅,把除去碳酸盐的岩样移入坩锅中,滤去酸液,洗至中性,在 180℃ 下烘 6h。冷却后称量,计算酸不溶物含量。最后对烘干的样品进行有机碳和热解(Rock-Eval)分析。

## 2 实验结果分析

根据实验分析结果,酸不溶物含量与 TOC 含量有一定关系(图 1)。总体上基质的酸不溶物含量相对较低,主要在 0.20%~14.18% 之间,均值为 6.04%;缝合线酸不溶物含量相对较高,介于 2.10%~76.54% 之间,均值为 34.00%。可见,缝合线相对富含酸不溶物,这与压溶作用产生的结果一致。其中个别缝合线的酸不溶物含量也较低,主要与取样方法有关,可能有较多基质混入(图 1)。

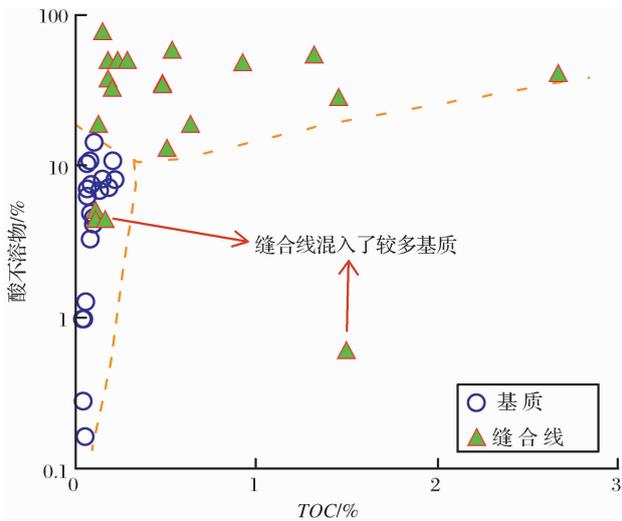


图 1 碳酸盐岩基质和缝合线酸不溶物含量与 TOC 含量关系  
Fig. 1 Relationship of insoluble matter content in acid and TOC content of matrix and stylolite in carbonate rock

缝合线的有机质丰度总体较高(图 2), TOC 含量介于 0.11%~2.67% 之间,均值为 0.61%;基质有机质丰度总体偏低, TOC 含量介于 0.04%~0.21% 之间,均值为 0.10%。缝合线与之临近基质的 TOC 含量比值主要介于 2.6~3.6 之间,个别可达到 7.5 以上。可见,如果按照一般烃源岩评价标准<sup>[20-22]</sup>,基质主要为非烃源岩,而缝合线则有部分可以作为烃源岩。应该说明的是由于本文选取的缝合线的缝合膜厚度普遍较薄,实际较纯的缝合线样品获取难度大,不同的缝合线样品都或多或少混入了

基质样品,所以,实测的缝合线 TOC 含量比实际的 TOC 含量要低一些。综合考虑,缝合线作为烃源岩要明显好于基质。

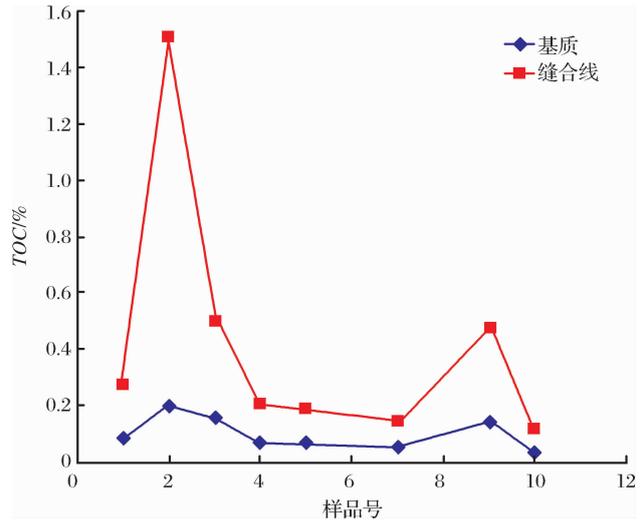


图 2 碳酸盐岩缝合线与基质 TOC 含量对比  
Fig. 2 Contrast of TOC contents of matrix and stylolite in carbonate rock

从缝合线与基质 TOC 含量、热解  $S_1+S_2$  关系(图 3,图 4)来看,基本呈正相关关系,但 TOC 含量的正相关关系好于  $S_1+S_2$ (图 3,图 4)。以 Y 代表缝合线的 TOC 含量, X 代表基质的 TOC 含量,则:  $Y=0.0678e^{14.59X}$ (图 3)。从本质上来说,缝合线中的有机质是从基质继承而来的,基质有机质含量高,因压溶作用富集于缝合线中的有机质就多,反之就少。缝合线的热解  $S_1+S_2$  值总体高于基质,缝合线的  $S_1+S_2$  值介于 0.17~1.15mg/g 之间,均值为 0.51mg/g;基质  $S_1+S_2$  值介于 0.11~0.69mg/g 之间,均值为 0.34mg/g,二者的相关性较差,主要是由于该参数包含了已生成的易运移的烃  $S_1$  和未生成的烃  $S_2$  2 个部分,由于已生成烃的运移程度的随机性,就造成了缝合线与基质的热解  $S_1+S_2$  参数很难一致变化。总体表明了单位质量缝合线的生烃潜力高于基质(图 4)。缝合线热解  $S_1$  值总体高于基质,前者的  $S_1$  值介于 0.09~0.88mg/g 之间,均值为 0.27mg/g;后者的  $S_1$  值介于 0.05~0.56mg/g 之间,均值为 0.15mg/g,二者具有一定的正相关关系(图 5)。表明单位质量缝合线的已生烃量高于基质。缝合线的  $S_1/(S_1+S_2)$  值总体低于基质,其中缝合线的  $S_1/(S_1+S_2)$  值介于 0.33~0.77 之间,均值为 0.50;基质的  $S_1/(S_1+S_2)$  值介于 0.45~0.85 之间,均值为 0.63,二者具有较好的正相关关系(图 6)。上述特征说明,缝合线的泥质含量高,吸附的已

生成的烃较多,而基质的泥质含量较低,吸附的烃较少。

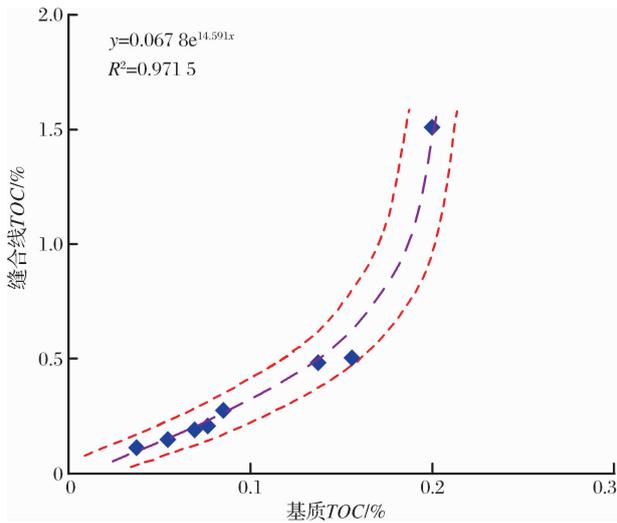


图 3 基质与缝合线 TOC 含量关系

Fig. 3 Relationship of TOC contents of matrix and stylolite

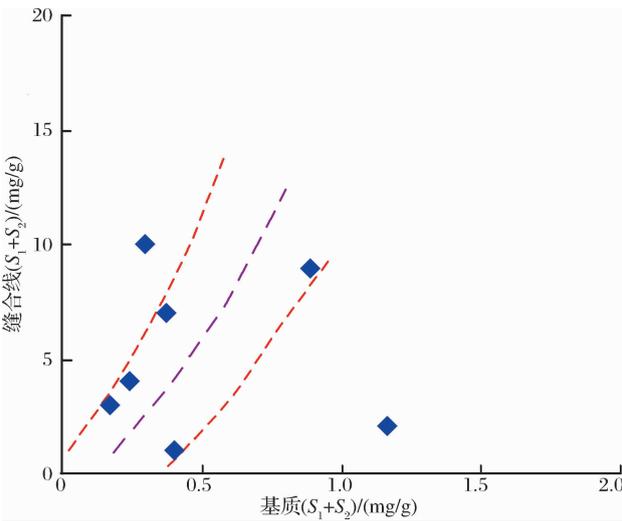


图 4 基质与缝合线热解 S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub> 关系

Fig. 4 Relationship of pyrolysis S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub> of matrix and stylolite

如果以单位质量 TOC 对应的已生烃量 S<sub>1</sub>/TOC 来看,基质的 S<sub>1</sub>/TOC 值一般都低于缝合线,二者呈反比关系(图 7),缝合线的 S<sub>1</sub>/TOC 值介于 0.22~1.12 之间,均值为 0.69;基质的 S<sub>1</sub>/TOC 值介于 0.6~3.59 之间,均值为 1.38。相对于 TOC 来说,已生成的烃 S<sub>1</sub> 值越低,即 S<sub>1</sub>/TOC 值越低,说明排烃就越多,基质的 S<sub>1</sub>/TOC 值总体较低,说明基质的排烃效率偏低,缝合线的排烃效率高。随着缝合线 S<sub>1</sub>/TOC 值降低而基质的 S<sub>1</sub>/TOC 值升高,一方面说明缝合线的排烃作用增强,另一方面也说明基质的 S<sub>1</sub>/TOC 值越高,其向缝合线排烃的作用

就降低了。缝合线与基质的残余有机质生烃潜力 S<sub>2</sub>/TOC 值具有一定的正相关关系,缝合线的 S<sub>2</sub>/TOC 值介于 0.12~1.68 之间,均值为 0.94,基质的 S<sub>2</sub>/TOC 值介于 0.35~2.16 之间,均值为 0.80,二者比较接近,其中几个较高的缝合线 S<sub>2</sub>/TOC 高值对应的缝合线 TOC 值较低,这种关系与缝合线和附近基质的母质成熟度接近有关(图 8)。

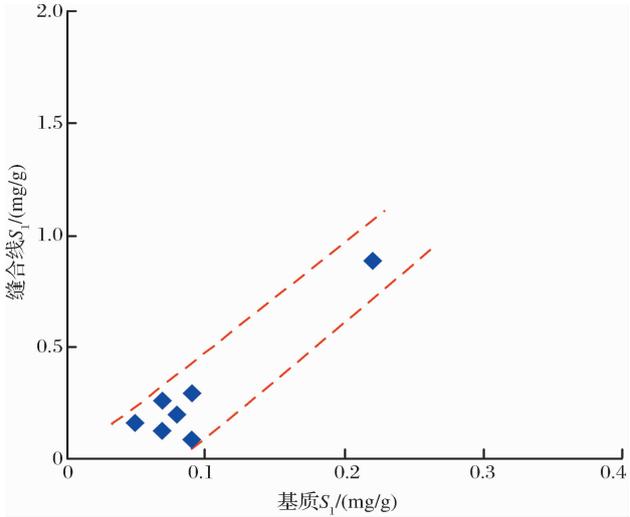


图 5 缝合线与基质的 S<sub>1</sub> 关系

Fig. 5 Relationship of pyrolysis S<sub>1</sub> of matrix and stylolite

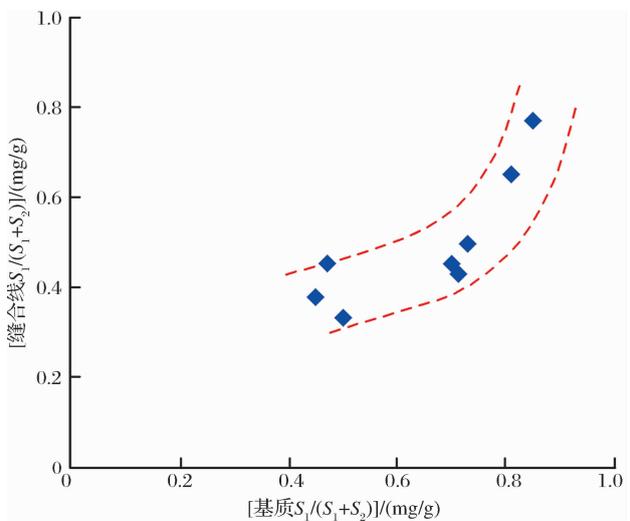


图 6 缝合线与基质的 S<sub>1</sub>/(S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>) 关系

Fig. 6 Relationship of pyrolysis S<sub>1</sub>/(S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>) of matrix and stylolite

### 3 油气地质意义

与泥岩相比,我国碳酸盐岩的有机质丰度总体偏低,尤其是大面积分布的中上元古界—古生界的海相碳酸盐岩。但在有机质丰度总体偏低的背景上,压溶作用导致的缝合线有机质相对富集,同时,缝合线的

孔渗性相对好于周围基质,是致密碳酸盐岩流体排出的重要通道,其中有机质生成的烃类更易发生初次排烃和运移。在缝合线形成后,由于上覆负荷作用、胶结作用等,缝合线也可以变得致密,起到遮挡油气的作用。致密的缝合线受构造应力、溶蚀作用改造,也可以形成裂缝或溶蚀缝隙,成为油气运移的通道,在储集层中也可以作为储集空间。在某些碳酸盐岩油气藏中,缝合线可以作为储集空间和储集改造的有利条件<sup>[23-24]</sup>。可见,碳酸盐岩缝合线对烃类生成、排出、二次运移以及聚集都具有一定意义。

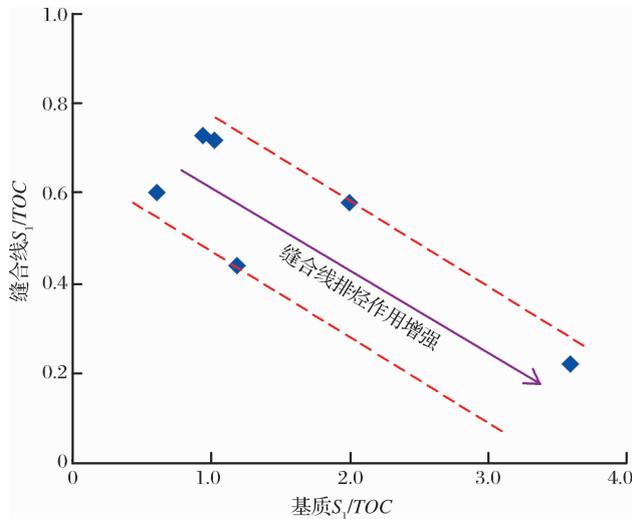


图7 缝合线与基质的  $S_1/TOC$  关系

Fig. 7 Relationship of  $S_1/TOC$  of matrix and stylolite

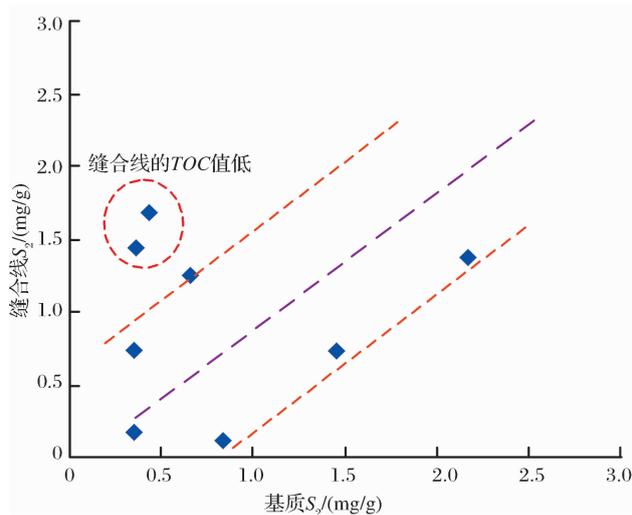


图8 缝合线与基质的  $S_2/TOC$  关系

Fig. 8 Relationship of pyrolysis  $S_2/TOC$  of matrix and stylolite

## 4 结论

对于碳酸盐岩来说,缝合线的形成是有机质富集和流体排泄的重要过程,其中的酸不溶物含量可

以作为有机质含量的重要指示,酸不溶物含量高的碳酸盐岩对应的有机质丰度也高,基质酸不溶物含量低,对应的有机质丰度也低,所以,单从有机质丰度来看,缝合线作为烃源岩要优于基质。缝合线作为碳酸盐岩压溶作用的结果,与基质有机质丰度之间有良好的继承性。缝合线与基质的母质成熟度一致,单位质量  $TOC$  对应的已生烃量的差异表明缝合线的排烃条件好于基质,对烃类生成、排出、二次运移以及聚集都具有一定作用。

## 参考文献 (References):

- [1] Li Fangzheng, Zhang Junhua. Stylolite genetic type[J]. Journal of Changchun University: Earth Science Edition, 1990, 20(1): 21-28. [李方正, 张俊华. 缝合线构造的成因类型[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 1990, 20(1): 21-28.]
- [2] Ma Yongsheng, Tian Haiqin, Chen Hongde, et al. Carbonate Microfacies: Analysis, Interpretation and Application[M]. Beijing: Geology Press, 2006: 296-302. [马永生, 田海芹, 陈洪德, 等. 碳酸盐岩微相: 分析、解译及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 296-302.]
- [3] Fan Hangyu, Xiao Zhiyong, Zeng Zuoxun. Forming and simulation of three-dimensional morphology of stylolites in Tieshan, Hubei Province, South China[J]. Geoscience, 2009, 23(3): 447-455. [樊航宇, 肖智勇, 曾佐勋. 湖北大冶铁山地区缝合线三维形态模拟及其成因分析[J]. 现代地质, 2009, 23(3): 447-455.]
- [4] Jose R, Andrade Ramos, Stylolites measurement of rock loss[J]. Revista Brasileira de Geociências, 2000, 30(3): 432-435.
- [5] Mossop. Origin of the peripheral rim, Redwater Reef, Alberta[J]. Bulletin Canada Petroleum Geology, 1972, 20: 238-280.
- [6] Cai Jiexing. Formation conditions of stylolite[J]. Journal of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1989, 8(2): 138-145. [蔡杰兴. 缝合线形成的条件[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1989, 8(2): 138-145.]
- [7] Zhao Jian, Luo Gengming, Zeng Zuoxun, 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. [赵健, 罗根明, 曾佐勋, 等. 缝合线研究的新进展——以湖北大冶铁山地区为例[J]. 现代地质, 2005, 19(4): 501-507.]
- [8] Abudu Rehemana, Zhong Jianhua, Li Yang, et al. Ordovician characteristics and petroleum geological significance of stylolite of Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2010, 34(1): 7-11. [阿布都·热和曼, 钟建华, 李阳, 等. 塔河油田奥陶系缝合线特征及石油地质意义[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2010, 34(1): 7-11.]
- [9] Wang Qi, Chen Guojun. Diagenetic evolution of carbonate rocks in western Tarim Basin and its relationship with reservoir formation[J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(1): 23-27. [王琪, 陈国俊. 塔里木盆地西部碳酸盐岩成岩演化与储层形成关系[J]. 新疆地质, 2002, 20(1): 23-27.]
- [10] Li Guorong. Discussion on the genetic mechanism of stylolites in carbonate rocks and their significance for storage[J]. Mineral Petrol, 1997, 17(2): 49-54. [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.]

- [11] Elizabeth A Finkel, Bruce H Wilkinson. Stylolitization as source of cement in Mississippian Salem limestone, west-central Indiana[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(2): 174-186.
- [12] Zhang Boquan, Guan Zhenliang, Pan Lin. Compaction of carbonate rocks in the Ordos Basin[J]. Earth Science: Journal of China University Of Geosciences, 1995, 20(3): 299-305. [张博全, 关振良, 潘琳, 鄂尔多斯盆地碳酸盐岩的压实作用[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20(3): 299-305.]
- [13] 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.
- [14] Moore C H. Carbonate Diagenesis and Porosity[M]. Developments in Sedimentology 48. New York: Elsevier, 1989.
- [15] Cai Jiexing. Characteristics and genetic mechanism of the stylolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 1990, 5(2): 51-60. [蔡杰兴. 缝合线特征及成因机理[J]. 岩石学报, 1990, 5(2): 51-60.]
- [16] Einat Aharonov, Regina Katsman. Interaction between pressure solution and clays in stylolite development: Insight from modeling[J]. American Journal of Science, 2009, 309(7): 607-632.
- [17] Liu Guangdi, Gao Gang, Wang Hui. Characteristics of organic matter distribution and hydrocarbon expulsion in carbonate source rock[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(3): 482-485. [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.]
- [18] Leythaeuser D, Borromeo O, Mosca F, et al. Pressure solution in carbonate source rocks and its control on petroleum generation and migration[J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(7): 711-733.
- [19] Hofmann P, Leythaeuser D. Migration of hydrocarbons in carbonate source rocks of the Stafffurt member of the Permian Zechstein, borehole Aue 1, Germany: The role of solution seams[J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(6): 597-606.
- [20] Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Dajiang, et al. Evaluation criteria for Paleozoic effective hydrocarbon source rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 8-12. [张水昌, 梁狄刚, 张大江, 等. 关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 8-12.]
- [21] Cheng Keming, Wang Tieguan, Zhong Ningning, et al. Geochemistry of Source Rock[M]. Beijing: Science Press, 1995. [程克明, 王铁冠, 钟宇宁, 等. 烃源岩地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [22] Lu Jincai, Wei Xiayang, Chen Gaochao, et al. Characteristics of hydrocarbon source rocks in Lower Permian Maibanhada Formation in Hangwula Region of Alashan Right Banner[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2): 335-342. [卢进才, 魏仙祥, 陈高潮, 等. 阿拉善右旗杭乌拉地区下二叠统埋汗哈达组烃源岩特征[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 335-342.]
- [23] Zhang Xianjun, Zhu Changjian, Shi Jun, et al. Discussion on the Ordovician carbonate reservoir characteristics in Hetianhe Gasfield and its periphery area of Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 120-126. [张现军, 朱长见, 师骏, 等. 塔里木盆地和田河气田及其周缘地区奥陶系碳酸盐岩储集层特征探讨[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 120-126.]
- [24] Yang Wei, Wei Guoqi, Wang Qinghua, et al. The Ordovician carbonate reservoir characteristics and constructive diagenesis in Hetianhe Gasfield[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(3): 191-195. [杨威, 魏国齐, 王清华, 等. 和田河气田奥陶系碳酸盐岩储层特征及建设性成岩作用[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 191-195.]

## A Comparative Study of the Organic Matter Characteristics of Stylolite and Matrix in Carbonate Rock

GAO Gang, LIU Guang-di, WANG Cheng-yun, SHI Sheng-bao

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

**Abstract:** As an important geological phenomenon in carbonate rocks, stylolites are the places where organic matter is enriched and fluid is discharged. The comparative study of organic matter abundance between stylolite and carbonate rock matrix is advantageous to understand organic matter enrichment and hydrocarbon expulsion of stylolite. By analysis of the content of insoluble matter in acid, total organic carbon (TOC) and pyrolytical (Rock-Eval) products of carbonate rock and stylolite, detailed study has been carried out on the enrichment characteristics, inheritance, hydrocarbon expulsion differentials of organic matter in matrix and stylolite. The content of insoluble matter in acid is an important index of organic matter abundance of carbonate rocks. Matrix with low level of insoluble matter normally corresponds to low amount of organic matter, while the stylolites with high level of insoluble matter will correspond to high level of organic matter. As a source rock, stylolite is much better than matrix. The stylolite has better TOC, generated and expelled hydrocarbon, and its hydrocarbon generation potential is similar to that of matrix. Their organic matter abundance had good succession. The difference of generated hydrocarbon amount per unit mass TOC between stylolite and matrix indicated that hydrocarbon expulsion conditions in stylolite were superior to that in matrix. Stylolite is significant to generation, expulsion and accumulation of hydrocarbon.

**Key words:** Carbonate rock; Stylolite; Matrix; Organic matter abundance; Insoluble matter content in acid