

文章编号: 1001-6112(2011)01-0096-04

川东南志留系泥岩盖层 水岩相互作用的实验模拟及其研究意义

张军涛¹, 吴世祥¹, 李宏涛¹, 柳智利²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 西南石油大学 研究生部, 成都 610500)

摘要: 通过水岩反应模拟实验, 可研究分析在不同的成岩环境下, 盖层岩石的水岩反应对储层形成以及油气保存方面的影响。选取川东南地区志留系龙马溪组盖层泥岩, 在 30 °C, 1 MPa; 80 °C, 20 MPa 和 160 °C, 40 MPa 的温压条件下, 与淡水和含乙酸流体进行水岩反应实验模拟。结果显示: 在常温常压下, 泥岩与淡水仅发生非常微弱的水岩反应, 说明在地表淡水弱的水动力条件下, 对泥岩盖层破坏是非常有限的; 而高温高压下, 含乙酸的流体对盖层泥岩的破坏力要高于常温常压下的淡水, 但是溶蚀率也很微弱, 并且相对于同种条件下的灰岩和云岩的溶蚀率还要低得多。研究区内, 当有具有溶蚀性的热流体活动时, 在志留系泥岩渗透率低和难溶蚀 2 个因素的叠加阻挡作用下, 大量的流体在碳酸盐岩层中滞留, 与围岩发生充分的水岩作用。

关键词: 水岩反应; 模拟实验; 盖层; 泥岩; 油气聚集; 储层形成

中图分类号: TE122.2+5

文献标识码: A

Simulation experiment of water—rock interaction in Silurian mudstone cap formation and its significance in Southeast Sichuan Basin

Zhang Juntao¹, Wu Shixiang¹, Li Hongtao¹, Liu Zhili²

(1. SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China;

2. Faculty of Graduate Studies, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: The influence of water—rock interaction of cap rock on reservoir formation and hydrocarbon preservation under different environments was analyzed with simulation experiment of water—rock interaction. The mudstone cap rock samples from the Silurian Longmaxi Formation in the Southeast Sichuan Basin were selected to react with freshwater and acetic fluid under different temperature and pressure conditions of 30 °C, 1 MPa; 80 °C, 20 MPa and 160 °C, 40 MPa, respectively. Under normal temperature and pressure, the interaction between mudstone and fresh water was very weak, suggesting that the interaction was not destructive to cap rock under weak hydrodynamic force; however, acetic fluid under high temperature and pressure was more destructive than fresh water under normal conditions. Yet the solubility of mudstone was much lower than that of carbonate under the same conditions. In the study area, when hydrothermal fluid moved, more fluid was occluded in carbonate and reacted with rock because of low permeability and solubility of the Silurian mudstone.

Key words: water—rock interaction; simulation experiment; cap rock; mudstone; hydrocarbon accumulation; reservoir formation

盖层及封盖条件是油气聚集成藏的重要因素, 优质区域盖层决定着大中型油气田的形成和聚集^[1]。我国大中型油气田盖层以泥岩为主^[2], 四川盆地的主力气层海相碳酸盐岩之上发育有泥岩、泥质灰岩、膏质白云岩、硬石膏层等封盖性好的区域

盖层^[3-6]。另外, 热液改造型碳酸盐岩储集层的形成也与致密的封堵层(盖层)关系密切^[7-8]。

盖层岩石的成岩演化过程中, 流体活动对盖层的封堵能力有较大影响^[9], 不同成岩环境、不同的成岩流体, 对盖层岩石封堵能力的影响也不尽相同^[10]。

收稿日期: 2010-09-07; 修订日期: 2010-12-29。

作者简介: 张军涛(1981-), 男, 在站博士后, 主要从事储层地质学研究。E-mail: tota.zhang@gmail.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB422107)和国家科技重大专项项目(2008ZX05005-002)资助。

因此,研究盖层水岩反应的方式、机理以及其对封堵能力的影响程度是十分必要的。水岩反应的实验模拟在国内外已进行了许多研究,其研究方法和实验仪器亦较为成熟。前人通过模拟实验,来研究地层流体对碳酸盐岩溶蚀作用的影响^[11-15]。但是由于盖层岩性的特殊性,目前对于盖层的水岩作用的实验模拟还相对较少。仅见如吴世祥、李剑等人利用实验模拟研究盖层的水岩相互作用^[9,16]。

本次研究借鉴较为成熟的储层水岩反应实验,通过模拟盖层泥岩的水岩反应,研究盖层在不同的成岩环境下,水岩反应对储层形成以及油气保存方面的影响。

1 地质背景

中国华南地区在志留系广泛分布着一套区域性的泥岩层系^[17]。在川东南地区,这套泥岩层上下分别为奥陶系和二叠系以及志留系本身的海相碳酸盐岩,其中可与下伏的上奥陶统五峰组碳酸盐岩匹配形成较好的储盖组合^[18]。

川东南地区的该套地层自沉积形成以后,经历了长时间的成岩演化,并存在有多期的风化暴露和断裂活动,地层水与淡水对其均有影响^[19-20]。因此,可能存在有多期多次类型的水岩相互作用过程。

2 实验样品及实验条件

2.1 实验样品与实验介质

样品来自于川东南地区的林1井,以下志留统的龙马溪组泥岩为主要的研究对象。首先对其进行X衍射矿物组分分析。然后将泥岩样品,分成质量相近的9份(表1),并使每份具有不同的反应时间或温压条件以及流体环境。实验模拟2种不同的成岩环境:地表岩溶和埋藏溶蚀,即常温常压和高温高压(30℃,1MPa;80℃,20MPa;160℃,40MPa),流体介质相对应地分别选用大气降水和热卤水(含

乙酸, $\omega(\text{乙酸})=0.5\%$)。

2.2 实验装置

实验在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所完成。实验装置水—岩反应模拟实验仪如图1,该装置用管式炉加温控制实验温度,内部用1个6孔板固定样品管,管底采用微孔及节制阀门,以控制每个样品出口端的流量。通过进口端流速控制实验压力^[14](图1)。

2.3 实验流程

本次实验采用动态压力平衡法,即让新鲜的流体不断地流过岩样,并保持釜内压力不变,所以水的流速和流出的总液体量将会直接影响到实验结果。为了保证流过所有样品的流速基本一致,实验采用定时间、定流量、定总量,在20h左右的时间,以10mL/min流速注入反应液,最终使得出口阀流出量分别为0.5,1,2L,虽然中间各个样品管的出口流速会有微小的差别,但可以用间隙关闭出口阀的方式,精确控制各样品的流出总液量。实验表明,浸泡方式下岩样的溶蚀量较小,所以短暂关闭出口阀门不会影响到结果^[13]。

在每组样品实验模拟之前和完成以后,都对其

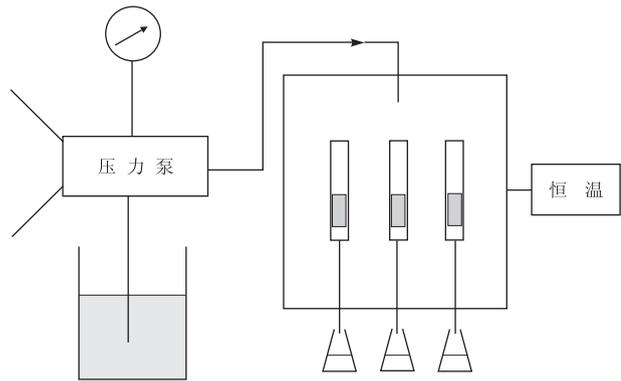


图1 水—岩反应模拟实验仪装置示意^[14]

Fig.1 Sketch map of simulation experiment of water—rock interaction

表1 不同条件下泥岩样品的溶蚀率

Table 1 Solubility of mudstone samples under different conditions

序号	反应前/g	反应后/g	溶蚀量/g	溶蚀率/%	流体量/L	反应条件
1	8.095 50	8.09 196	0.003 54	0.044	0.5	30℃,1MPa
2	7.311 09	7.308 50	0.002 59	0.035	1	30℃,1MPa
3	6.201 48	6.201 72	-0.000 24	(0.000)	2	30℃,1MPa
4	8.000 76	7.981 36	0.019 40	0.242	0.5	80℃,20MPa
5	5.119 51	5.092 58	0.026 93	0.526	1	80℃,20MPa
6	6.861 98	6.801 65	0.060 33	0.879	2	80℃,20MPa
7	7.840 98	7.790 54	0.050 44	0.643	0.5	160℃,40MPa
8	6.822 38	6.755 05	0.067 33	0.987	1	160℃,40MPa
9	6.827 24	6.705 98	0.121 26	1.776	2	160℃,40MPa

表面进行扫描电镜分析。

3 实验结果

3.1 样品不同环境下的溶蚀率

X 衍射分析显示泥岩样品中主要矿物组分为粘土矿物,并含有少量的石英、长石等碎屑矿物,以及微量的碳酸盐矿物。而粘土矿物中主要成分为伊利石,约占 96%,其次为绿泥石,约占 4%。

在常温常压、淡水介质条件下,泥岩样品仅发生了微弱的溶蚀(表 1)。在经历 0.5,1,2 L 的流体反应后,其溶蚀率分别仅为 0.044%,0.035%,0.000%,而且 3 个不同的时间段里的溶蚀率的变化并不明显。而在高温高压、有乙酸存在的条件下,岩石样品受溶蚀破坏的强度明显强于常温淡水条件下,并且随着温度和压力的增加,其溶蚀率也随之增加。在 80 °C,20 MPa 条件下,岩石样品经 0.5,1,2 L 含乙酸流体介质的溶蚀后,较常温常压有了显著地升高,其溶蚀率分别可至 0.242%,0.526%,0.879%;而在 160 °C,40 MPa 条件下,岩石样品经 0.5,1,2 L 含乙酸流体介质的反应后,其溶蚀率是 3 个测试条件下的最高值,分别为 0.643%,0.987%,1.776%。同时,也注意到除了在常温常压淡水介质条件下,岩石样品的溶蚀率都随着流体介质的增加而增加,且增加过程大致具有线性的特征(图 2)。

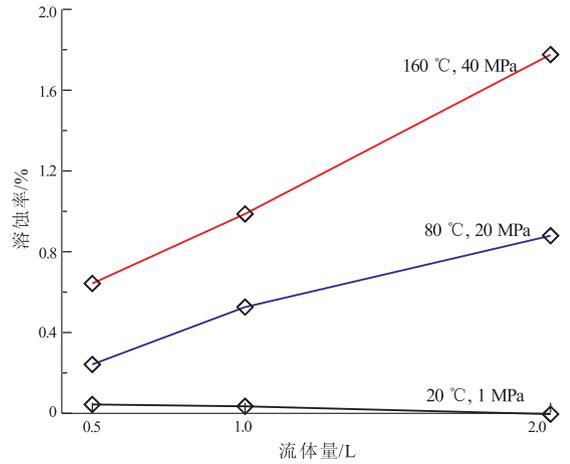


图 2 不同温压条件下泥岩的溶蚀率
Fig. 2 Solubility of mudstone samples under different temperature and pressure conditions

3.2 水岩反应前后样品的形态以及物质组分差异

通过对样品进行扫描电镜分析,可以显现岩石样品反应前后在形貌特征以及物质组成的差异。在常温常压下、经历了 3 个不同量流体过程的样品,其反应前后的物质组成和表面形态并无太大的差异(图 3A,B)。反应前,泥岩表面呈凹凸不平状,主要的矿物组分为粘土矿物和少量的石英、碳酸盐矿物以及黄铁矿等(图 3A);反应后,样品表面并未出现太大的差异(图 3B)。而在 80 °C,20 MPa,乙酸流体介质的条件下,泥岩样品反应前后有较大的差异(图 3C,D)。反应后表面区域圆滑,样品表面部分易溶

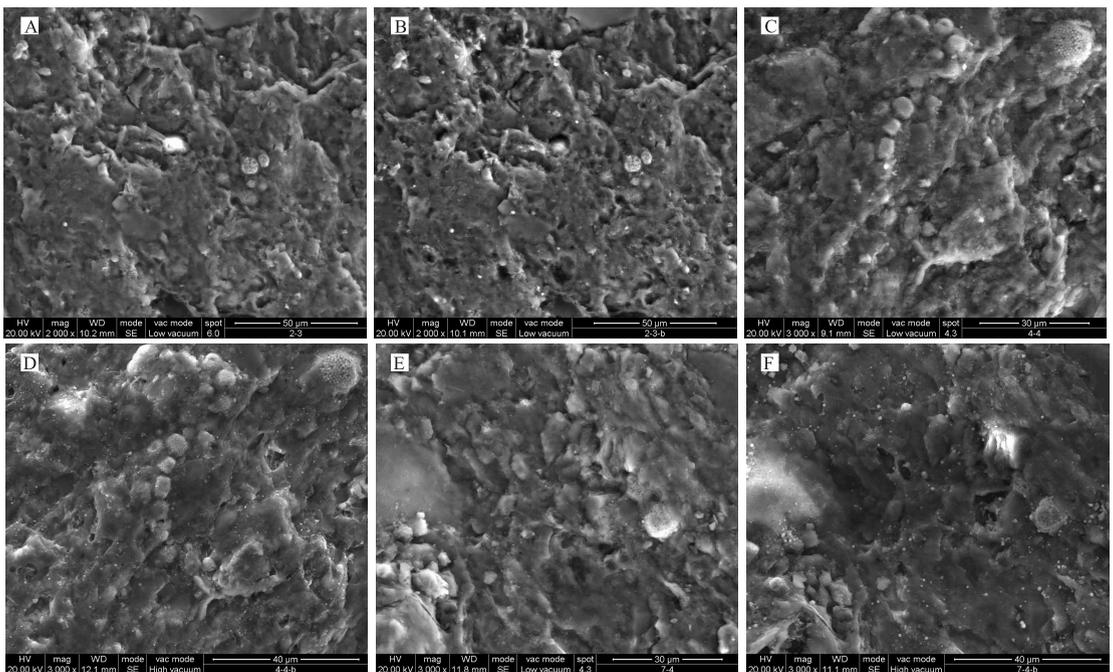


图 3 水岩反应前后样品的形貌和物质组分差异

Fig. 3 Differences of surface morphology and component between samples before and after water-rock interaction

矿物组分(主要为碳酸盐岩矿物)已经明显减少,并可见表面有少量的绿泥石沉淀(图 3D)。在 160 °C, 40 MPa, 乙酸流体介质的条件下, 样品反应前后的差异更为明显(图 3E, F)。反应后, 样品表面更加圆润, 易溶组分减少得更为显著, 表面有黄铁矿沉淀产生(图 3F)。

4 讨论

4.1 表生条件下水岩反应对盖层泥岩的影响

实验结果显示, 在常温常压下泥岩样品在淡水中的溶蚀率非常低, 溶蚀量微乎其微。即在常温常压下, 泥岩与淡水仅有非常微弱的水岩反应发生。这可能与泥岩本身的内部物质组成和成岩阶段相关, 首先本次研究泥岩样品主要矿物成分为粘土矿物以及少量的石英、长石和碳酸盐矿物, 这些矿物在常温常压淡水条件下都具有较低的溶解度, 很难被溶蚀; 并且泥岩样品处于高成岩阶段, 难以继续发生水岩反应, 这可以解释泥岩样品在常温常压下较低的溶蚀率。由此可以推断, 在地表淡水弱的水动力条件下, 对泥岩盖层破坏是非常有限的。但是值得注意的是, 由于本次实验的流体的流速非常低, 流体对岩石样品的冲刷作用对实验结果影响非常小。但在实际情况下, 物理的冲刷破碎是地表条件下对盖层岩石最主要的破坏作用。

4.2 埋藏条件下水岩反应对盖层泥岩的影响

埋藏条件下含乙酸流体的溶蚀率要明显高于在常温常压淡水条件的溶蚀率, 说明在埋藏条件下含乙酸流体的溶蚀能力要高于常温常压下的淡水。这也与岩石的物质组成以及成岩阶段有关, 在乙酸存在的条件下, 使得易于溶蚀的组分如碳酸盐矿物、粘土矿物等被溶蚀; 而在高温高压的条件下, 处于晚成岩阶段的泥岩也易于产生微小裂隙, 使得更易发生溶蚀。故而推断, 同等流体量的情况下, 在埋藏环境中含乙酸的流体对盖层的破坏力要高于地表条件的淡水。即使如此, 含乙酸流体在高温高压条件下对泥岩的溶蚀率也是非常低的, 最高仅为 1.776%。

在都是同一种流体(含乙酸)的情况下, 随着温度和压力的升高, 溶蚀率也逐渐升高。可能说明在较高的温度压力条件下, 即较大的深度下, 泥岩更容易发生溶蚀破坏。

4.3 盖层水岩反应对热水改造碳酸盐岩储层形成的影响

虽然高温高压的含乙酸流体对泥岩有一定的溶蚀能力, 但是对比同种条件下的灰岩和云岩的溶蚀

率, 可以发现两者的溶蚀率之间存在较大的差异。碳酸盐岩的溶蚀率远高于泥岩, 在 90 °C, 50 MPa 条件下, 经 1 L 含乙酸流体作用下碳酸盐岩的溶蚀率可高达 39%^[13]。参照经典的热热水溶蚀碳酸盐岩储层的形成模式^[7], 可以发现一个较好的热水改造碳酸盐岩储层的存在, 顶部必须具备有一个泥岩(或其他致密岩性)的封堵层。以往的研究只对比分析了两者之间渗透性的差异, 但均未考虑到在埋藏条件下, 泥岩盖层的溶蚀问题。本次研究显示, 泥岩虽然在埋藏条件具有较常温下更高的溶蚀率, 但相对于碳酸盐岩而言, 其溶蚀率还是非常微弱的。

因此, 可以预测在埋藏条件下, 当断裂或岩浆热液活动时, 具有溶蚀性的热流体在由下向上运移过程中, 首先对位于下部的下奥陶系碳酸盐岩发生溶蚀作用, 而当流体运移至顶部时, 由于志留系泥岩渗透率低和难溶蚀 2 个因素的叠加作用, 使得流体无法继续向上运移, 大量的热流体在碳酸盐岩中滞留, 与岩石的水岩反应更加充分, 造成强烈的溶蚀, 产生大量的溶蚀孔洞, 形成热改造碳酸盐岩储集层^[21]。

5 结论

1) 在常温常压下, 泥岩与淡水仅有非常微弱的水岩反应发生, 在地表淡水弱的水动力条件下, 对泥岩盖层破坏是非常有限的。

2) 同等流体量的情况下, 在埋藏环境中含乙酸的流体对泥岩的破坏力要高于常温常压下的淡水。在同一种流体(含乙酸)的情况下, 随着温度和压力的升高, 溶蚀率也逐渐升高。可能说明在较高的温度压力条件下, 即较大的深度下, 泥岩可能更容易发生溶蚀破坏。

3) 泥岩虽然在高温高压下也能被含乙酸流体溶蚀, 但相对于同种条件下的灰岩和云岩的溶蚀率要低得多。在研究区内, 当有具有溶蚀性的热流体活动时, 由于志留系龙马溪组泥岩渗透率低和难溶蚀 2 个因素的叠加, 使得大量的流体在碳酸盐岩中滞留, 与围岩发生充分的水岩作用, 有可能在奥陶系碳酸盐岩地层中形成热改造碳酸盐岩储集层。

致谢: 在实验过程和本文完成过程中, 得到了中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所范明高级工程师、刘伟新高级工程师、张庆珍高级工程师、俞凌杰等的帮助和指导, 在此一并表示感谢。

5 结论

根据盖层岩石地球物理响应特征,利用测井资料,采用多种测井方法可以有效地识别盖层的岩性、厚度等。以岩心分析数据为基础,应用测井资料,建立盖层参数测井解释模型,获得膏岩含量、孔隙度、渗透率等参数,最终实现对盖层的测井识别和综合评价。同时为盖层的预测研究提供有效的盖层参数。

参考文献:

[1] 赵振宇,周瑶琪,马晓鸣,等. 含油气盆地中膏盐岩对油气成藏的重要影响[J]. 石油与天然气地质,2007,28(2):300-308.

[2] 陈元华,史振勤. 对南海相碳酸盐岩区勘探的思考[J]. 断块油气田,1999,6(4):18-20.

[3] 沃玉进,汪新伟. 中、上扬子地区地质结构类型与海相层系油气保存意义[J]. 石油与天然气地质,2009,30(2):178-187.

[4] 刘昭茜,梅廉夫,郭彤楼,等. 川东北地区海相碳酸盐岩油气成藏作用及其差异性:以普光、毛坝气藏为例[J]. 石油勘探与开发,2009,36(5):552-561.

[5] 李国平. 天然气封盖层研究与评价[M]. 北京:石油工业出版社,1996:57-79.

[6] 邓模,吕俊祥,潘文蕾,等. 鄂西渝东区油气保存条件分析[J]. 石油实验地质,2009,31(2):202-206.

[7] 郭彤楼,楼章华,马永生. 南海相油气保存条件评价和勘探决策中应注意的几个问题[J]. 石油实验地质,2003,25(1):3-9.

[8] 赵庆波,杨金凤. 中国气藏盖层类型初探[J]. 石油勘探与开发,1994,21(3):16-23.

[9] 李国平,石强,王树寅,等. 储盖组合测井解释方法研究[J]. 测井技术,1997,20(2):98-104.

[10] 焦翠华,谷云飞. 测井资料在盖层评价中的应用[J]. 测井技术,2004,28(1):46-47.

[11] 吕延防. 中国大中型气田盖层封盖能力综合评价及其对成藏的贡献[J]. 石油与天然气地质,2005,26(6):742-745,753.

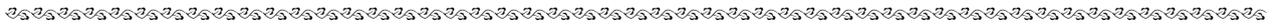
[12] 游秀玲. 天然气盖层评价方法探讨[J]. 石油与天然气地质,1991,12(3):261-275.

[13] 吕延防,付广,高大岭,等. 油气藏封盖研究[M]. 北京:石油工业出版社,1996:4-30.

[14] 付广,张发强,吕延防. 厚度在盖层封闭油气中的作用[J]. 天然气地球科学,1998,9(6):20-25.

[15] 宋子齐,李亚玲,潘玲黎,等. 测井资料在小洼油田盖层评价中的应用[J]. 油气地质与采收率,2005,12(4):4-6,28.

(编辑 徐文明)



(上接第 99 页)

参考文献:

[1] 戴金星,宋岩,张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素[J]. 中国科学 D 辑,1996,26(6):481-487.

[2] 胡国艺,汪晓波,王义凤,等. 中国大中型气田盖层特征[J]. 天然气地球科学,2009,20(2):162-166.

[3] 罗啸泉,李书兵,何秀彬,等. 川西龙门山油气保存条件探讨[J]. 石油实验地质,2010,32(1):10-14.

[4] Ma Y H, Guo X S, Guo T L, et al. The puguang gas field: new giant discovery in mature Sichuan Basin, southwest China [J]. AAPG Bulletin,2007,91(5):627-643.

[5] Wei G Q, Chen G S, Du S M, et al. Petroleum systems of the oldest gas field in China: Neoproterozoic gas pools in the Weiyuan gas field, Sichuan Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008,25:371-386.

[6] 邓模,吕俊祥,潘文蕾,等. 鄂西渝东区油气保存条件分析[J]. 石油实验地质,2009,31(2):202-206.

[7] Davies G R, Smith Jr. L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin,2006,90(11): 1641-1690.

[8] 陈莉琼,沈昭国,侯方浩,等. 四川盆地三叠纪蒸发岩盆地形成环境及白云岩储层[J]. 石油实验地质,2010,32(4):334-340.

[9] 吴世祥,金之钧,汤良杰. 盖层水岩相互作用研究及其油气地质意义:以黔中隆起及周缘为例[J]. 地质学报,2007,81(8):1110-1117.

[10] 张长江,潘文蕾,刘光祥,等. 中国南方志留系泥质岩盖层动

态评价研究[J]. 天然气地球科学,2008,19(3):301-310.

[11] 张文正,黄思静. 碳酸盐岩深埋藏溶蚀成岩过程的实验模拟研究[J]. 低渗透油气田,1997,2(1):34-37.

[12] 范明,蒋小琼,刘伟新,等. 不同温度条件下 CO₂ 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用[J]. 沉积学报,2007,25(6):825-829.

[13] 肖林萍. 埋藏条件下碳酸盐岩实验室溶蚀作用模拟的热力学模型与地质勘探方向:以陕甘宁盆地奥陶统马家沟组第五段为例[J]. 岩相古地理,1997,17(4):57-70.

[14] 范明,胡凯,蒋小琼,等. 酸性流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 地球化学,2009,38(1):20-26.

[15] Luquot L, Gouze P. Experimental determination of porosity and permeability changes induced by injection of CO₂ into carbonate rocks[J]. Chemical Geology, 2009,265(1-2): 148-159.

[16] 李剑,严启团,张英,等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气盖层封闭机理的特殊性[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(增刊 II): 36-42.

[17] 王清晨,严德天,李双建. 中国南方志留系底部优质烃源岩发育的构造-环境模式[J]. 地质学报,2008,82(3):289-295.

[18] 马永生,郭彤楼,付孝悦,等. 中国南海相石油地质特征及勘探潜力[J]. 海相油气地质,2002,7(3):19-27.

[19] 潘忠华,范德廉. 川东南脉状萤石-重晶石矿床同位素地球化学[J]. 岩石学报,1996,12(1):127-136.

[20] 张林,魏国齐,郭英海,等. 四川盆地志留系层序地层及有利储集层分布[J]. 天然气工业,2005,25(5):6-8.

[21] 刘树根,汪华,孙玮,等. 四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析[J]. 石油与天然气地质,2008,29(6):781-818.

(编辑 黄娟)