

文章编号: 0253- 9985(2005) 02- 0220- 04

长石砂岩次生溶孔的形成机理

李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅

(中国石化西南石油分公司勘探开发研究院, 四川成都 610081)

摘要: 在酸性水介质条件下, 长石类矿物都能发生程度不同的溶蚀反应并形成次生孔隙。根据原始矿物和次生矿物的组成和物理化学性质可以定量计算次生孔隙度。钾长石被溶蚀时形成的次生孔隙度最高, 达 11.91%, 钙长石形成的次生孔隙度最低, 为 0.72%, 钠长石和中长石形成的次生孔隙度介于两者之间。长石溶蚀过程中所需的 CO_2 , 一部分来自大气降水或水与大气接触过程中所溶解的空气中的 CO_2 , 另一部分则来源于有机质在生烃过程中的分解产物。

关键词: 长石砂岩; 溶蚀作用; 次生孔隙度

中图分类号: TE112.221

文献标识码: A

Formation mechanism of secondary dissolved pores in arcose

Li Wenguo, Zhang Xiaopeng, Zhong Yumei

(Exploration and Production Research Institute of Southwest Branch Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan)

Abstract: In acidic aqueous media, feldspar minerals can be dissolved to some extents, leading to the formation of secondary pores. Secondary porosity can be quantitatively estimated based on the composition and physicochemical properties of the original and secondary minerals. Secondary porosity formed by dissolution of K-feldspar can be as high as 11.91%, while that of calcium feldspar is the lowest, being only 0.27%, and that of sodium feldspar and andesine range between the former two. Some of the CO_2 needed for dissolving feldspar might have been sourced from meteoric water and/or dissolved from the air when water got in touch with atmospheric air, while the others might have been the products of decomposition of organic matter during generation of hydrocarbons.

Key words: arcose; dissolution; secondary porosity

构成碎屑岩储层砂岩的主要组成有石英、长石和各种各样的岩屑。其中, 砂岩中含量最多的石英(含硅质碎屑)的物理化学性质最稳定。各种岩屑(除硅质外)的物理化学性质最不稳定, 在风化或搬运过程中很容易遭到破坏或发生蚀变, 因而在距物源较远的区域内所形成的砂岩中一般含量都不高。长石类碎屑组分的物理化学性质的稳定性, 介于上述两者之间, 因而在砂岩中分布比较广泛。但长石类矿物毕竟是岩浆分异过程(在高温条件下)中形成的, 它们的组成和分子结构都比较复杂。当温度降低, 尤其是当其转移到沉积岩的赋存环境时, 就容易发生分解或溶蚀等反应。

从各种长石的组成来看, 无论是正长石还是斜长石类, 在其成分中都含有碱金属钾或钠离子, 或含碱土金属钙离子, 它们在有水存在的酸性介质条件下, 都容易发生溶蚀反应并形成次生孔隙^[1, 2]。在含油气层系中, 这些次生溶孔的形成对储层储渗条件的改善具有重要意义。

1 溶蚀作用

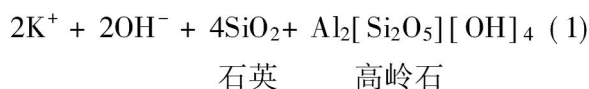
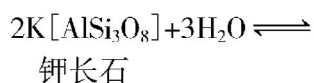
矿物与水接触时发生的溶解反应, 据其反应产物的不同分为两类, 即全等溶解(dissolve congruently)和非全等溶解(dissolve incongruently)^[3]。所谓全等溶解是指矿物与水接触发生溶解反应时, 其反

应产物都是溶解组分。例如方解石(CaCO_3)、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)或硬石膏(CaSO_4)等矿物的溶解,其溶解反应的产物为 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 和 SO_4^{2-} 。而长石类的溶解则属于非全等溶解。非全等溶解是指矿物与水接触产生溶解反应时,其反应产物除溶解组分外,还有新生成的一种或多种矿物或非晶质固体物质。长石在其溶解过程中,部分离子被溶解进入溶液中,而另一部分组分则将转变成新的矿物。由于这些新生的矿物或称次生矿物与原始矿物组成的不同,它们的分子量、密度等物理化学性质也不同,其所占据的体积空间将发生变化,从而导致次生孔隙空间的产生。

在酸性介质条件下,长石与水接触时,都将发生非全等溶解反应,在成岩变化中称溶蚀作用(corrosion)。由于不同长石组成的不同,它们在溶蚀过程中形成的次生孔隙也有差异。

1.1 钾长石

钾长石比钠长石和钙长石更容易被溶蚀,沈照理、张以明等^[3,4]认为,钾长石在有水参与的条件就可以发生溶蚀反应,其反应式为



据反应式(1)可知,2摩尔的钾长石溶蚀后,将形成1摩尔的高岭石。2摩尔钾长石的重量为556 g,密度^[5]为 2.57 g/cm^3 ,体积为 216.342 cm^3 。

高岭石的分子量为258,即反应(1)中所形成的1摩尔高岭石的重量为258 g。高岭石的密度^[5~7]为 $2.58 \sim 2.67 \text{ g/cm}^3$,反应中所形成的1摩尔高岭石的最大体积和最小体积分别为100和 96.629 cm^3 ,两者相差3.37%,显然在摩尔体积最小时形成的次生空间会更大。

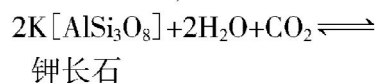
在反应(1)中还形成4摩尔石英,石英的分子量为60,4摩尔石英的重量为240 g。石英的密度^[5~7]为 2.65 g/cm^3 ,因此石英体积为 90.566 cm^3 。

即上述溶蚀过程中,固体矿物溶蚀前后总体积差的最小值和最大值分别为 25.776 cm^3 和 29.147 cm^3 。

为了保险起见,我们按最保守的数值计算上述反应过程中可能形成的次生孔隙度(下同)。若以原始矿物钾长石所占体积为准,则它们被溶蚀

后可能形成的孔隙度最小值为 $25.776 \div 216.342 = 11.91\%$ 。

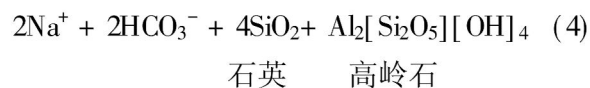
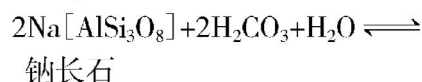
据汪正然等^[5],钾长石在有水和 CO_2 的酸性介质条件下更容易进行,其反应式为



对比反应(1)和反应(2)表明,当2摩尔的钾长石被溶蚀后,将形成1摩尔的高岭石和4摩尔的石英,反应前后固体矿物总体积的变化和次生孔隙度与前述反应是相同的,所不同的是留在水溶液中的离子,前者为 2K^+ 和 $2(\text{OH})^-$,后者是 $2\text{K}^+ + 2\text{HCO}_3^-$ 。

1.2 钠长石

在有水和碳酸的条件下,钠长石中的钠离子将被溶出而进入水溶液中,其余的部分将变为次生的高岭石等,其反应式为

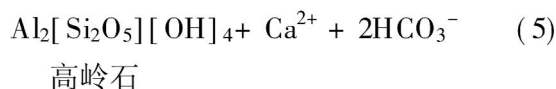
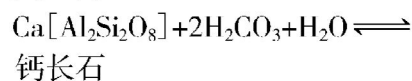


钠长石的分子量为262,高岭石的分子量为258。由(4)式可以看出,当2摩尔的钠长石被溶蚀后,将有1摩尔的次生高岭石形成,同时形成4摩尔的石英,它们的体积分别为100和 90.566 cm^3 。钠长石的密度为 2.61 g/cm^3 ,则参与反应的2摩尔的钠长石的原始体积为 200.766 cm^3 。

在反应过程中,固体矿物反应前后总的体积变化为 10.20 cm^3 ,以原始矿物钠长石所占体积为准,则反应前后固体矿物所占体积空间的变化为 $10.20 \div 200.766 = 5.08\%$ 。因此,在2摩尔钠长石的溶蚀过程中,可能形成5.08%的次生孔隙。

1.3 钙长石

在有水和 CO_2 存在的条件下,钙长石溶蚀的化学反应式^[3]为



1摩尔的钙长石为278 g。钙长石的密度^[5~7]

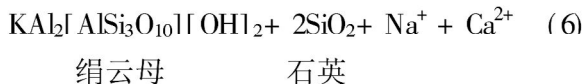
为 2.76 g/cm^3 , 故 1 摩尔的钙长石的体积为 100.725 cm^3 。如前所述, 溶蚀后所形成的 1 摩尔高岭石的体积为 100 cm^3 。

在这个溶蚀过程中, 固体矿物总体积变化为 $100.725 - 100.00 = 0.725 \text{ cm}^3$ 。

按原始钙长石所占据体积计算, 在溶蚀过程中所形成的次生孔隙度为 $0.725 \div 100.725 = 0.72\%$ 。因此, 钙长石在溶蚀过程中可能形成的次生孔隙度最低。

1.4 中长石

过渡型组分中长石在溶蚀过程中形成过渡型次生矿物绢云母时, 也可能形成次生孔隙。据赵伦山等^[8], 中长石 $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ 在发生水解反应时, 可以蚀变为绢云母, 同时析出 SiO_2 。该反应方程式为



在上述反应中需要有 H^+ 和 K^+ 参与, 同时析出 Na^+ 和 Ca^{2+} 。

中长石分子量为 540, 绢云母分子量为 398, 按中长石的平均密度为 2.66 g/cm^3 计算, 1 摩尔的中长石的体积为 203.008 cm^3 。所形成的 1 摩尔绢云母, 按其平均密度为 2.88 g/cm^3 计算, 其体积为 138.194 cm^3 。与绢云母同时形成的 2 摩尔石英的重量为 120 g, 按其密度为 2.65 g/cm^3 计算, 其体积为 45.283 cm^3 。

在上述溶蚀作用过程中, 固体矿物的总体积变化为 19.531 cm^3 。可能形成的次生孔隙度为 $19.531 \div 203.008 = 9.62\%$ 。这就是说, 在富钾条件下, 当中长石在溶蚀过程中有绢云母和次生石英形成时, 也可以形成相当多的次生孔隙。

过渡型的中长石是由钠长石和钙长石组成的, 当它们处于酸性介质条件下发生水解反应时, 最终的产物将是高岭石和石英, 该反应实质上是反应(4)和(5)的叠加, 所形成的次生孔隙度也与之对应, 在此不再赘述。

2 问题探讨

2.1 水与碳酸的来源

在不同类型长石的各种溶蚀反应中, 首要的前提就是必须有水参与, 绝大多数情况下都需要

有 CO_2 参与, 所以人们最为关注的是水中的 CO_2 来源问题。在有沉积岩分布的地区, 在潜水面以下所有岩层的岩石孔隙中都含水。岩层所含的水, 据其与地表大气降水联通性的好坏及水动力条件的差异, 通常分为渗滤水(或称为重力水或潜水)和承压水两大类。渗滤水是指第一个隔水层以上岩层中所含的水。这种水的来源与大气密切相关, 所含的 CO_2 主要由空气中的 CO_2 和在气水界面上通过长期持续进行的气体溶解反应而进入水体中的 CO_2 。尽管 CO_2 在大气中的平均含量仅为 0.03% , 但 CO_2 在水中的溶解度很高, 当大气与水接触时, 大气中的降水将偏酸性。从另一个角度来看, 大气降水中的氧含量也相对增加, 当沉积岩层中含有有机质时, 它可以加速有机质的氧化反应而形成 CO_2 , 使地层中又有次生的 CO_2 形成, 从而增强水对长石的溶蚀能力。

在第一个隔水层以下, 第二、第三隔水层之间的水称为承压水。这些水中所含的 CO_2 , 除由上述岩层中继承下来的以外, 还有由有机质分解而产生的 CO_2 , 尤其是在含油气盆地中, 在干酪根生烃过程中所生成的 CO_2 数量是相当可观的。

不同沉积岩中的各类干酪根热演化生烃实验^[9]表明, 在热解产物中, 水和 CO_2 的量(按重量计算)基本相等。Espitalie^[10]的实验资料也表明, 在烃类大量生成阶段, 以水和 CO_2 形式脱出氧的机率也大体相等, 即每脱出 4 摩尔 H_2O , 同时将有 1 摩尔 CO_2 脱出。因此, 地层中的水和 CO_2 , 除在沉积岩形成过程中继承下来的以外, 还有生烃过程中由有机质分解而来的。下面重点讨论一下生烃过程中所形成的 CO_2 的数量问题。以前我们曾对干酪根的生油气率^[11, 12]和生油气过程中不同阶段的 CO_2 生成量进行过理论计算^[13](表 1, 2)。

由表 1 和表 2 可以看出, 各种类型的原始油气母质, 即干酪根, 随着生油气过程的发展, 其生烃量和相应的 CO_2 的累积生成量都是持续增加的。由于生烃量和 CO_2 的生成量都与地层中原始成烃母质的含量成正比, 所以在含油气盆地中, 生油气条件越好, 在生油气过程中所生成的 CO_2 量越多, 越有利于上述溶蚀反应的进行。在有机质含量和生烃阶段相同的条件下, 含Ⅳ型干酪根的烃源岩在生油气过程中生成的 CO_2 量比含Ⅲ型干酪根的源岩生成的 CO_2 要多些, 因而更有利

表 1 各类干酪根在不同演化阶段的生油气率

Table 1 Oil/gas incidence factor (%) of various kerogens in different evolution stages

演化阶段	生油气率/ %		
	iv型(腐泥型)	㊟型(混合型)	㊿腐殖型)
生化气阶段	0	0	0
	7.40	3.43	3.06
生油阶段早、中期	36.45	21.78	3.65
生油阶段末期	30.75	20.88	3.97
湿气阶段	31.12	22.06	8.57
干气阶段早期	32.74	23.20	9.18
干气阶段末期	39.11	29.89	15.73

表 2 各类干酪根演变到不同阶段 CO₂ 的生成率

Table 2 CO₂ incidence factor (%) of various kerogens in different evolution stages

演化阶段	CO ₂ 生成率/ %		
	iv型(腐泥型)	㊟型(混合型)	㊿腐殖型)
生化气阶段	0	0	0
	6.810	8.012	8.464
生油阶段早、中期	7.684	9.843	10.619
生油阶段末期	7.709	10.834	13.537
湿气阶段	7.709	10.839	14.887
干气阶段早期	7.766	10.867	15.964
干气阶段末期	9.079	12.697	18.539

于长石类矿物发生溶蚀作用。在陆相碎屑沉积为主的含油气盆地中,其烃源岩多富含 ㊟和 ㊿型原始生烃母质,在生烃过程中将比 iv 型原始母质生成更多的 CO₂,这就为长石类的溶蚀和次生溶孔的形成创造了较好的条件。

2.2 溶蚀在成岩变化中的作用

各类长石的溶蚀作用和次生孔隙的形成将会改善储层的孔渗条件。在上述溶蚀作用过程中,还有次生的石英和粘土矿物——高岭石等沉淀形成,人们往往把后者看作破坏性成岩作用。我们认为,这种看法有待商榷,至少在长石溶蚀过程中形成的石英次生加大和次生粘土矿物的产生,可看作是长石砂岩溶蚀作用的组成部分,而不是把它简单的定性为破坏性成岩变化。如果这样看待这些问题,就比较容易理解,为什么在孔隙条件好的长石砂岩储层中反而更容易见到次生粘土矿物和石英次生加大等现象。我们认为,对这类储层而言,通过认真仔细的研究,可以根据次生石英和粘土矿物的多少,反过来计算在长石溶蚀过程中已经形成的次生孔隙度。如以钾长石为例,若以被溶蚀的长石原始体积为准,它在溶蚀过程中可

能形成的次生孔隙度为 11.91%;若我们以次生的石英和粘土矿物为准,则溶蚀作用后所形成的次生孔隙度为 $11.91\% \div (1 - 11.91\%) = 13.52\%$ 。同理也可以计算出其他长石类矿物在溶蚀过程中所形成的次生孔隙度。

参 考 文 献

1 姚光庆,孙尚如. 煤系粗粒低渗储层自生粘土矿物特征及其对储层特征的影响——以焉耆盆地侏罗系三工河组油层为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 65~ 69
Yao Guangqing, Sun Shangru. Characteristics of authigenic clay minerals in coarse grained and low permeability reservoirs in coal measures and its effect on reservoir property: an example of oil reservoir in Jurassic Sangonghe formation in Yanqi basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 65~ 69

2 蔡进功,谢忠怀,田芳,等. 济阳拗陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 84~ 88
Cai Jingong, Xie Zhonghuai, Tian Fang, et al. Diagenesis and pore evolution of deep sandstones in Jiyang depression[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 84~ 89

3 沈照理,朱宛华,钟佐桑. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社, 1993. 10~ 11
Shen Zhaoli, Zhu Wanhua, Zhong Zuoshen. The foundation of hydrogeochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 10~ 11

4 张以明,侯方浩,方少仙,等. 冀中饶阳凹陷下第三系沙河街组第三段砂岩次生孔隙形成机制[J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(3): 208~ 215
Zhang Yiming, Hou Fanghao, Fang Shaoxian, et al. Secondary pore formation mechanism of third member of Shahejie Formation, Raoyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(3): 208~ 215

5 汪正然,陈武. 矿物学[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1965. 249~ 253
Wang Zhengran, Chen Wu. Mineralogy [M]. Shanghai: Shanghai Publishing House of Science and Technology, 1965. 249~ 253

6 王德滋. 光性矿物学[M]. 上海:上海人民出版社, 1975. 80
Wang Dezi. Optical mineralogy [M]. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1975. 80

7 北京大学地质系岩矿教研室编. 光性矿物学[M]. 北京:地质出版社, 1979. 63~ 242
Teaching and Research Section under Geological Department, Beijing University. Textbook of optical mineralogy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979. 63~ 242

8 赵伦山,张本仁. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 1988. 92
Zhao Lunshan, Zhang Benren. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. 92

9 Ishiwatari R, Rohrback B G, Kaplan I R. Hydrocarbon generation by thermal alteration of kerogen from different sediments [J]. AAPG Bull, 1978, 62(4): 678~ 692

(下转第 229 页)

3.3 晚期喜马拉雅运动改造

早白垩世以后, 由于须二段储层已普遍致密化, 早期聚集的气藏在三维空间上多为致密岩带所包围。尽管喜马拉雅运动是川西地区最强烈的一次构造运动, 构造形变较强, 断裂也相当发育, 但原先聚集的油气难以发生大规模的再次运移、聚集。喜马拉雅运动对油气藏的改造集中表现于: 原背斜高点变成了低点或翼部、或气水界面被掀斜、或统一气藏被成岩作用肢解成若干储渗体, 许多气藏范围超越了今构造圈闭, 气藏形态变得很不规则等。天然气藏由早期的常规圈闭经历了强烈的改造后变得更为隐蔽, 增加了天然气勘探和预测的难度。

参 考 文 献

- 杨克明. 川西坳陷油气资源现状及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 322~ 326, 331
Yang Keming. Status of oil & gas resources and prospecting potential in western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 322~ 326, 331
- 朱昭岐. 研究古构造的方法[J]. 国外油气勘探, 1989, 1(4): 39~ 55
Zhu Zhaoqi. Researching ways of palaeostructure[J]. Abroad Oil & Gas Exploration, 1989, 1(4): 39~ 55
- 安凤山, 王信, 叶军. 对中坝须二气藏圈闭分析的思考[J]. 天然气工业, 2003, 23(4): 8~ 12
An Fengshan, Wang Xin, Ye Jun. An idea about the trap analysis of T_{3x}² gas reservoir in Zhongba field[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(4): 8~ 12
- 杨克明, 徐进. 川西坳陷致密碎屑岩领域天然气成藏理论与勘探开发方法技术[M]. 北京: 地质出版社, 2004. 53~ 62
Yang Keming, Xu Jin. Reservoiring theory and methods and technologies of natural gas exploration and development in tight elastic rocks in western Sichuan depression[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. 53~ 62
- 张贵生, 张世华, 王信. 合兴场气田须二段气藏成藏机理研究[J]. 天然气工业, 1999, 19(增刊): 71~ 76
Zhang Guisheng, Zhang Shihua, Wang Xin. Forming mechanism of gas reservoir in the second member of Xujiahe Formation of Hexingchang gas field in west Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(Sup): 71~ 76
- 尹长河, 王廷栋, 郑丽辉. 平落坝气田成藏时期的确定[J]. 天然气地球科学, 1999, 10(3~ 4): 70~ 75
Yin Changhe, Wang Tingdong, Zheng Lihui. Reservoir formation time in Pingluoba gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 1999, 10(3~ 4): 70~ 75
- 兰大樵, 邱宗恬. 川西坳陷平落坝气田须二段气藏成藏研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(3): 8~ 10
Lan Daqiao, Qiu Zongtian. The research on the formation of Upper Triassic Xuer gas reservoir of Pingluoba gas field in Chuanxi depression[J]. Petroleum Exploration & Development, 2002, 29(3): 8~ 10
- 王德新, 郑祖燕, 王祖全, 等. 川西燕山期构造形变演化与油气聚集成藏[J]. 天然气工业, 1999, 19(增刊): 77~ 81
Wang Dexin, Zheng Zhuyan, Wang Zhuquan, et al. Yanshanian tectonic deformation evolution and reservoir formation in west Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 1999, 19(Sup): 77~ 81
- 李晓清, 汪泽成, 张兴为, 等. 四川盆地古隆起特征及对天然气的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 347~ 351
Li Xiaoqing, Wang Zecheng, Zhang Xingwei, et al. Characteristics of palaeo-uplifts in Sichuan basin and their control action on natural gases[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(4): 347~ 351
- 曹烈, 周兴毅, 邓永富, 等. 川西坳陷天然气运移模拟研究[J]. 矿物岩石, 2000, 20(3): 75~ 80
Cao Lie, Zhou Xingyi, Deng Yongfu, et al. The migration and accumulation modelling of natural gas in west Sichuan depression[J]. Journal of Mineralogy and Petrology 2000, 20(3): 75~ 80
- 吴世祥, 汪泽成, 张林, 等. 川西前陆盆地勘探思路分析[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 210~ 216
Wu Shixiang, Wang Zecheng, Zhang Lin, et al. Exploration strategy for the foreland basin in western Sichuan[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(3): 210~ 216
- Espitalie J, Laporte J L, Madec M, et al. Methode rapide de caracterisation des roches meres de leur potentiel petrolier et de leur degre d' evolution[J]. Rev Inst Frandais Petrol, 1977, XXX(1): 23~ 42
- 李汶国. 各类干酪根不同成熟阶段生油量的探讨[J]. 石油与天然气地质, 1981, 2(3): 199~ 211
Li Wenguo. A preliminary study of hydrocarbon production from various types of kerogen at different mature stages[J]. Oil & Gas Geology, 1981, 2(3): 199~ 211
- 李汶国. 物质平衡法计算生气率及其地质应用[J]. 石油实验地质, 1988, 10(1): 1~ 11
Li Wenguo. The oil/gas potential calculated by material balance and the application in geology[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1988, 10(1): 1~ 11
- 张晓鹏, 李汶国, 彭大经. 有机二氧化碳在碳酸盐溶蚀孔隙形成中的作用及其定量探讨[J]. 海相沉积区油气地质, 1988, 2(2): 63~ 71
Zhang Xiaopeng, Li Wenguo, Peng Dajing. The action of organic carbon dioxide on the formation of carbonate solution pores and its quantitative approach[J]. Oil & Gas Geology of Marine Deposit Region, 1988, 2(2): 63~ 71

(上接第 223 页)