

石灰岩、白云岩储层孔隙度-渗透率关系研究

徐维胜¹, 赵培荣¹, 聂鹏飞², 王先德¹

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 吉林省公安厅七处, 吉林 长春 130051)

摘要:白云石化作用对储层特征的影响是碳酸盐岩储层研究中的一个重要主题。最重要也是最普遍地发现可能是在深埋藏条件下,白云岩的孔隙度和渗透率要比石灰岩高,然而,目前表明这种差异的定量信息却很少。虽然大多数研究实例表明白云岩的孔隙度更高,但是也有少量的不同观点。利用来自不同沉积背景、不同年代、不同埋藏深度的5个碳酸盐岩台地岩心样品的孔隙度和渗透率的关系,分析了石灰岩和白云岩互层储层特征的相似性和差异。在浅埋藏的台地中,石灰岩和白云岩的平均孔隙度很接近,而白云岩的渗透率要比石灰岩的高。3个深埋藏的台地岩心的主要特征是石灰岩的平均孔隙度比相邻的白云岩要低很多,但是它们的孔隙度-渗透率关系却十分相近。

关键词:孔隙度;渗透率;石灰岩储层;白云岩储层;白云石化作用

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Porosity-permeability interrelation of limestone and dolomite reservoirs

Xu Weisheng¹, Zhao Peirong¹, Nie Pengfei², Wang Xiande¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

Key words: porosity; permeability; limestone reservoir; dolomite reservoir; dolomitization

1 岩心样品的综合分析

通过比较5个浅水碳酸盐岩台地的岩心来评价石灰岩、白云岩储层的孔隙度-渗透率之间的关系^[1,2],岩心数据如图1。其中3个实例是深埋藏的(图1C,D,E),而其他两个则是浅埋藏的(图

1A,B),深度在0~700 m之间。

在图1A与B中,浅埋藏的两组数据表明石灰岩和白云岩的孔隙度没有明显的差异,二者的平均孔隙度相似。3个深埋藏的石灰岩和白云岩储层孔隙度频率分布特征基本相似(图1C,D,E),并与浅埋藏条件下的孔隙度分布形成鲜明的对比。深埋藏的石灰岩孔隙度分布倾向于高频率的低孔

收稿日期:2008-09-18。

第一作者简介:徐维胜(1974—),男,博士研究生,矿产普查与勘探。

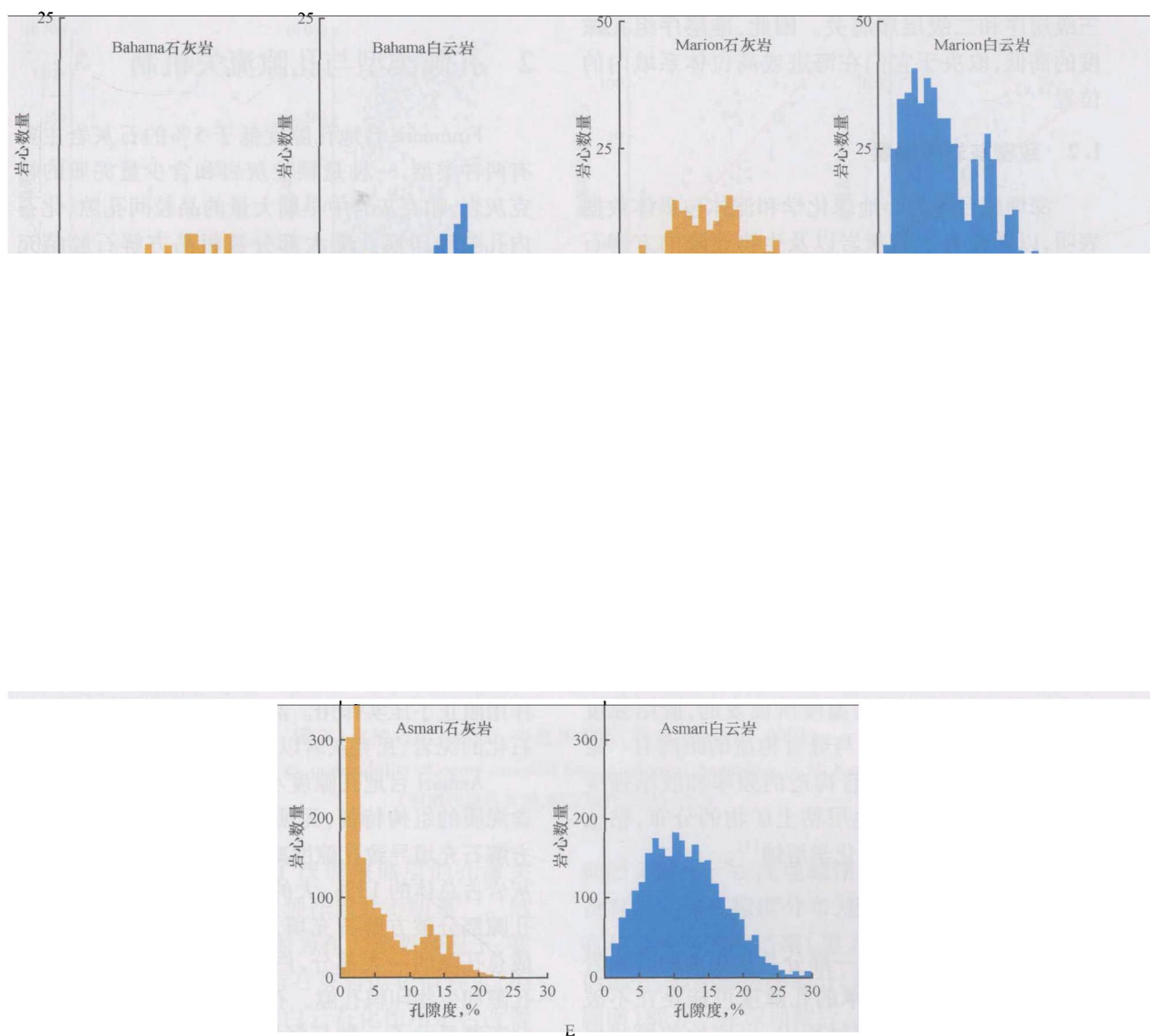


图1 5个台地石灰岩、白云岩孔隙度频率分布(据 S. N. Ehrenberg, G. P. Eberli, 2006)

Fig. 1 Porosity frequency distributions of limestone and dolomite cores sampled from 5 platforms

三级层序和二级层序有关。因此,准层序组孔隙度的高低,取决于它们在海进或高位体系域内的位置^[8,9]。

1.2 致密灰岩障碍层

深埋藏台地岩心地球化学和流体包裹体数据表明,以颗粒为主的灰岩以及生物建隆的方解石胶结作用是在埋藏过程中发生的^[10]。另外,低孔隙度间隔和岩石中高含量铝土矿以及频繁的缝合作用之间的对应关系显示,导致孔隙流失的埋藏胶结作用主要来自沿着缝合构造带的化学压实作用^[11,12]。粗晶方解石胶结是导致孔隙流失的主要机制,并与埋藏化学压实起因相对应^[13]。岩心照片的缝合构造统计表明,缝合构造的频率与低孔隙灰岩之间有着紧密的联系。在大多数样品中,导致孔隙流失的主要原因是灰泥骨架致密的方解石微胶结作用和粗晶方解石沉淀。在低孔隙度、泥质为主的地层中,除了粗晶石胶结外,化学压实的胶结作用也降低了孔隙度^[14,15]。石灰岩的化学压实作用是由不断升高的温度所促发的,胶结强度与缝合构造的数量以及与缝合构造的距离有一定的比例关系。此外,缝合构造的频率和胶结强度在很大程度上取决于地层粘土矿物的分布,粘土矿物有助于碳酸盐岩的化学溶蚀^[1]。

1.3 白云岩孔隙的成因

白云岩孔隙度很大一部分是从先前的石灰岩中继承而来的,这种继承的孔隙度可能是在不破坏组构的白云石化作用过程中,以原始的形状保存下来,或者在破坏组构的白云石化作用过程中重新分布^[16]。浅埋藏地层中,石灰岩和白云岩有相似的孔隙度,而在深埋藏地层中,白云岩比互层的石灰岩孔隙度更高。在埋藏成岩过程中,白云岩孔隙度可能增大或者更有利于保存。白云岩低孔隙度分布的情况很少,这是因为有大量的晶间孔隙和普遍的印模孔隙^[17]。这两种次生孔隙被认为是在近地表的埋藏条件下形成的,因为缺乏埋藏过程中的溶蚀证据。白云岩孔隙度优先保存的特性反应了它对化学压实和胶结作用具有更强的抵抗性,而致密灰岩比白云岩有更多的缝合构造^[1]。除了碳酸盐岩的矿物学特征外,沉积粘土矿物的分布,对机械压实的差异抵制性都可能导致深埋藏石灰岩低孔隙度。

2 孔隙类型与孔隙流失机制

Finnmark 台地孔隙度低于5%的石灰岩主要有两种类型,一种是颗粒灰岩和含少量泥质的帕克灰岩,帕克灰岩中早期大量的晶粒间孔隙、化石内孔隙和印模孔隙大部分被粗晶方解石胶结充填;另一种是泥质支撑的岩相,化石间孔隙的方解石充填和化学压实作用以及泥质骨架致密胶结而导致孔隙度的减小。孔隙度大于10%的石灰岩的原生晶间孔隙和化石内孔隙部分被方解石胶结物所充填。孔隙度大于10%的白云岩孔隙主要是晶间孔隙和生物印模孔隙^[7]。

Madison 台地孔隙度小于5%的石灰岩主要是颗粒灰岩到帕克灰岩,包括少量的泥岩以及瓦克灰岩,孔隙度流失的主要原因是粗晶方解石的胶结作用。孔隙度大于10%的石灰岩包括原生粒间孔隙、印模孔隙、晶间孔隙、以及裂缝。原生孔隙保存在白云石化的颗粒灰岩中,早期的白云石化作用阻止了压实作用。晶间孔隙普遍存在于白云石化的泥岩、瓦克灰岩以及球粒颗粒灰岩中^[18]。

Asmari 台地孔隙度小于5%的石灰岩具有富含泥质的组构特征,泥质骨架的致密胶结和粗晶方解石充填导致孔隙度减小。孔隙度大于10%的灰岩占总体的13%,大的原生晶间孔隙和化石内孔隙部分被方解石充填,大的泥质骨架孔隙是组成总孔隙的一大部分,白云岩的孔隙主要是晶间孔隙和生物印模孔隙。石灰岩和白云岩孔隙度的分布都显示了一种与沉积组构有关的特性,以颗粒为主的组构,往往对应高孔隙度,而以泥质为主的组构对应低孔隙度^[19,20]。

3 孔隙度-渗透率发育模式预测

如图2A所示,两组浅埋藏的碳酸盐岩台地的白云岩渗透率比石灰岩的渗透率高,这种现象反应了微孔隙灰泥被具有大晶间孔隙的白云石所交代。相反,3组深埋藏岩心的数据表明,石灰岩和白云岩总体的孔隙度-渗透率关系没有明显的差异(图2B,C,D)。孔渗关系趋势的计算,是在剔除了渗透率低于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品后来进行的,因为这些岩心对于计算总体的孔渗关系没有任何意义。从图2B,C,D的比较中很容易得出,

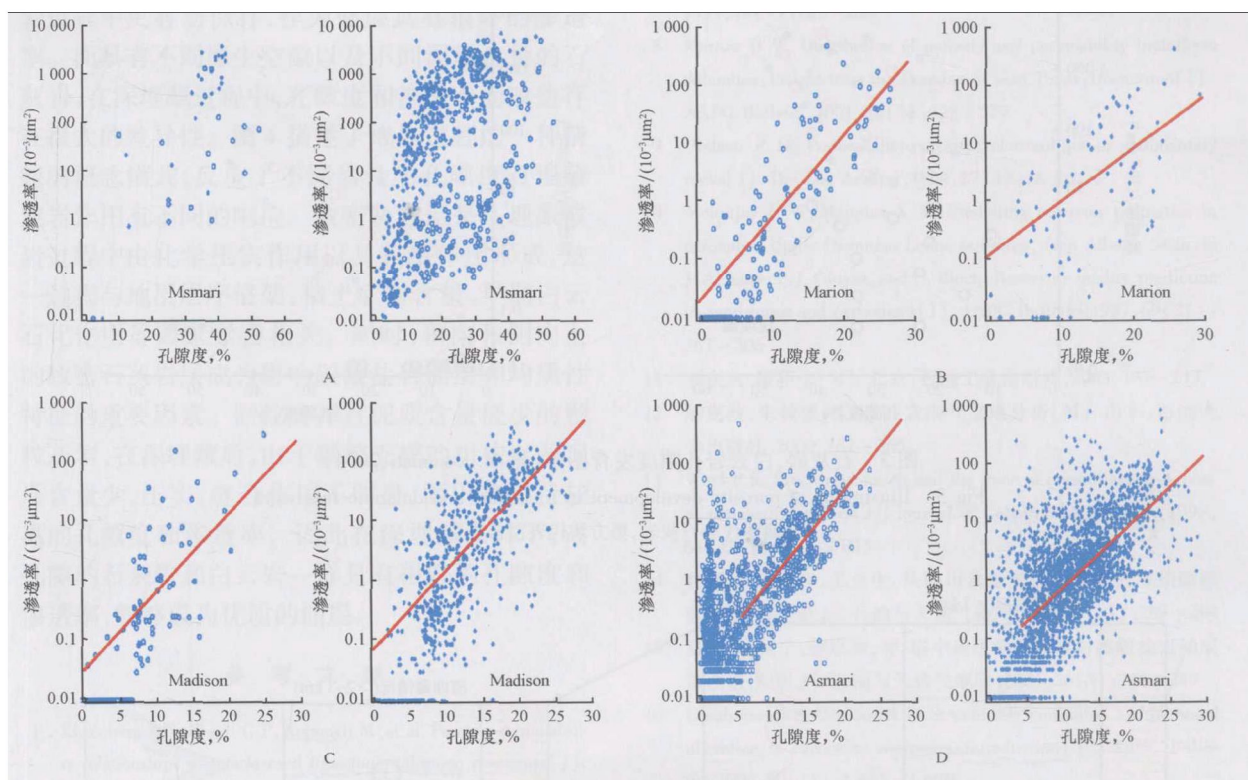


图2 台地岩心孔隙度-渗透率关系(据 M. Keramati,2004)

Fig. 2 Porosity vs. permeability of cores sampled from platforms(According to M. Keramati,2004)

(圆圈代表石灰岩,黑方块代表白云岩。)

白云石化作用大大改善了浅埋藏储层的孔渗关系,而在深埋藏情况下,这种作用并不明显^[7]。然而这种解释是不准确的,因为在大多数情况下,我们很难知道白云岩最初与石灰岩的相似程度,因此不能肯定图2B,C,D中白云石化作用是否改善了渗透率。如果深埋藏的白云岩最初是富含泥质的、低渗透率的沉积,说明这种解释是错误的。从图2A的比较来推断,在浅埋藏条件下,白云石化作用是提高渗透率的一种有效方式,但如果白云石化的地层最初是生物礁或者非常粗粒的颗粒灰岩演化而来,这种解释也就不对了。

浅埋藏与深埋藏孔渗关系的比较,可以推测出一种合理解释,在浅埋藏时就具有低渗透率的石灰岩,在埋藏过程中更倾向于孔隙度、渗透率的流失,最终接近于零,这些石灰岩样品在做图2C,D时已经被剔除。这样,最终深埋藏的孔隙度大于4%、渗透率大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的碳酸盐岩主要是那些最初孔隙度和渗透率较高的石灰岩,在埋藏过程中逐渐与白云岩的渗透率基本接近,

如图3所示。在浅埋藏情况下,石灰岩和白云岩没有明显的孔隙度分布差异,但是所有白云岩具有相对较高的渗透率(黑方块),而石灰岩则分为两部分,即高渗透率部分(黑圆圈)和低渗透率(兰圆圈)部分。在深埋藏后,具有低渗透率的石灰岩受到埋藏成岩作用的强烈影响,最终的渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,而具有最初高渗透率的石灰岩由于具有更多颗粒支撑的组构来抵制渗透率流失,因此受埋藏成岩作用的改造相对较小。结果,这些深埋藏的渗透率大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的石灰岩和白云岩总体的孔隙度-渗透率关系没有明显的差异。

根据以上的比较,总结出一种石灰岩、白云岩互层储层的孔隙度差异发育模式(图4),5种不同岩性的碳酸盐岩是:①富含粘土矿物的石灰岩;②粘土含量极少的颗粒灰岩;③原生高孔隙白云岩;④中到低孔隙度白云岩;⑤早期石膏胶结的白云岩。在埋藏深度小于1 km时,这些沉积非均质的浅水碳酸盐岩地层总体上具有较高的孔隙度。

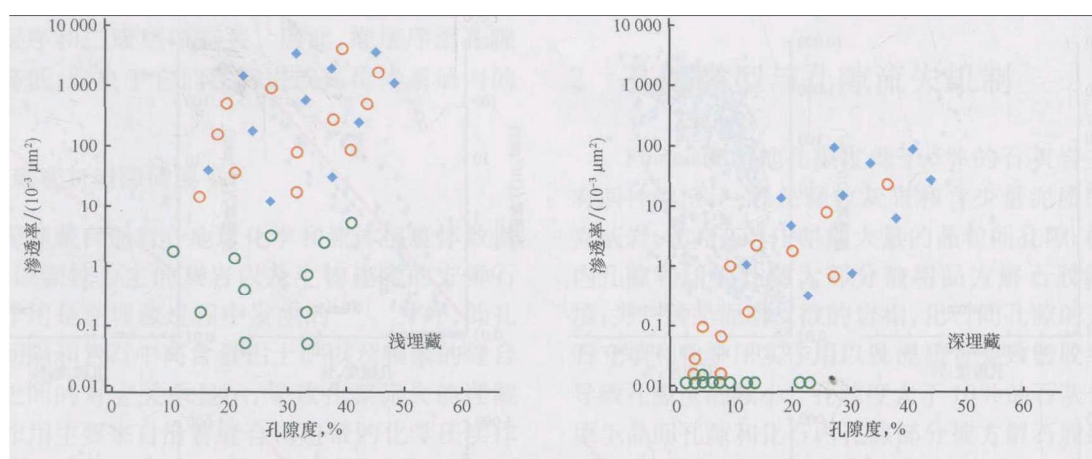


图3 石灰岩、白云岩孔隙度发育图解(据 M. Keramati, 2004)

Fig. 3 Illustration of porosity development in limestone and dolomite reservoirs

(圆圈代表石灰岩,黑方块代表白云岩。)

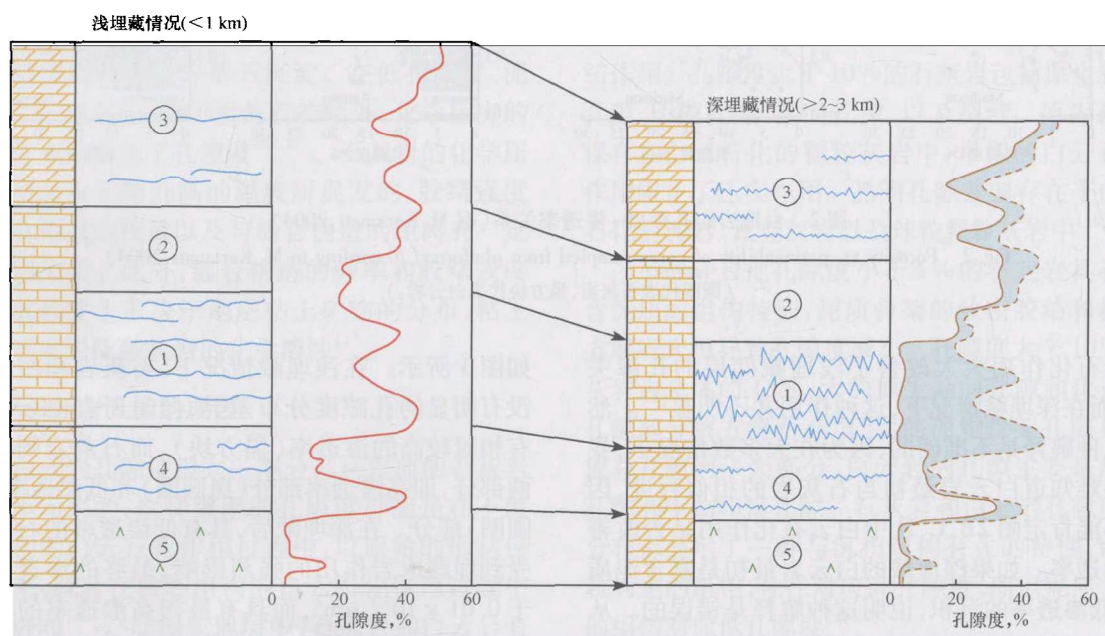


图4 碳酸盐岩深埋藏后的孔隙度发育模式(据 S. A. Moallemi, 2006)

Fig. 4 Porosity development patterns of deep burial carbonate rocks (according to S. A. Moallemi, 2006)

(虚线表示埋藏前的孔隙度,实线表示埋藏后孔隙度。)

在深埋藏后,不同岩性地层孔隙度流失的差异性由图4右侧的埋藏前后曲线之间的阴影来显示。易于发生化学压实和方解石胶结的石灰岩的孔隙度流失最大。颗粒灰岩由于粘土含量极少而不易发生化学压实和缝合构造,并且具有颗粒支撑的组构特征,因此孔隙度流失很少。白云岩中的缝合构造同样会导致孔隙度的流失,但是相对于石灰岩来说,流失量较小。具有较高最初孔隙和较

低最初孔隙的白云岩孔隙度流失相对较小,而具有很低最初孔隙度的白云岩以及被石膏胶结的地层则形成碳酸盐岩致密层。

4 结论

以上关于碳酸盐岩台地的石灰岩、白云岩的孔隙度-渗透率研究表明,白云岩孔隙度在埋藏成

岩过程中更容易保存,作为储层具有很好的渗透率。而具有不同原生空隙以及不同泥质含量的石灰岩,在深埋藏过程中,孔隙度和渗透率的改造存在很大的差异性。图4描述了成岩过程的一种猜想的概念模式,反应了不同岩性的孔隙度对埋藏成岩作用有不同的响应。致密灰岩层是在埋藏成岩过程中由化学压实作用以及胶结作用形成,这一过程与地层层序格架、粘土矿物含量、早期白云石化作用等因素紧密相关。同时,垂向和侧向上的致密石灰岩层成为影响碳酸盐岩储层非均质性特征的重要因素。颗粒支撑且泥质含量极少的颗粒灰岩,在深埋藏后,由于颗粒支撑的组构以及泥质含量少,压实、缝合作用不明显,而仍然保持较高的孔隙度和渗透率。因此在深埋藏条件下,高孔隙的石灰岩和白云岩一样具有很好的孔隙度和渗透率,能够成为优质的储层。

参 考 文 献

- Ehrenberg S N, Eberli G P, Keramati M, et al. Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolomite reservoirs[J]. AAPG Bull, 2006, 90(1): 91-114
- Ehrenberg S N, Nadeau P H. Sandstone versus carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity depth and porosity-permeability relationships[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(6): 435-436
- 马永生, 梅冥相, 陈小兵, 等. 碳酸盐岩储层沉积学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 161-170
- 马永生主译. 碳酸盐岩微相-分析、解释及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2006. 270-284
- 马永生. 中国海相油气勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2007. 202-208
- 邓宏文. 高分辨率层序地层学-原来及应用[M]. 北京: 地质出版社, 2002. 147-150
- Ehrenberg S N, Nielsen E B, Syana T A, et al. Depositional evolution of the Finnmark carbonate platform, Barents Sea: Results from wells 7128/6-1 and 7128/4-1[J]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 1998, 78(9): 185-224
- Morrow D W. Distribution of porosity and permeability in platform dolomites: Insight from the Permian of west Texas: Discussion[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(7): 525-529
- Nelson P H. Permeability-porosity relationships in sedimentary rocks[J]. The Log Analyst, 1994, 17(3): 38-62
- Mountjoy E W, Marquez X M. Predicting reservoir properties in dolomites: Upper Devonian Leduc buildups, deep Alberta basin, in J. A. Kupecz, J. Gluyas, and S. Bloch, Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates[J]. AAPG Bulletin, 1997, 69(21): 267-306
- 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. 197-217
- 陆克政, 朱筱敏, 漆家福. 含油气盆地分析[M]. 山东: 石油大学出版社, 2003. 362-366
- Weyl P K. Pressure solution and the force of crystallization-A phenomenological theory[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 64(32): 2 001-2 025
- 冉隆辉, 谢姚祥, 王兰生. 从四川盆地解读中国南方海相碳酸盐岩油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 289-294
- 吕修祥, 杨宁, 解启来, 等. 塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 284-289
- Langhorne B S, Graham R D. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: introduction[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1 641-1 690
- Morrow D W. Distribution of porosity and permeability in platform dolomites: Insight from the Permian of west Texas: Discussion[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(6): 525-529
- Sonnenfeld M D. Sequence evolution and hierarchy within the lower Mississippian Madison Limestone of Wyoming, in M. W. Longman and M. D. Sonnenfeld, eds., Paleozoic systems of the Rocky Mountain region: Rocky Mountain Section[J]. SEPM, 1996, 12(3): 165-167
- Hull C E, Warman H R. Asmari oil fields of Iran, in M. T. Halbouty, ed., Geology of giant petroleum fields[J]. AAPG Memoir, 1998, 14(5): 428-430
- 岳大力, 吴胜和, 林承焰, 等. 流花 11-1 油田礁灰岩油藏沉积-成岩演化模式[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 518-523, 529

(编辑 董 立)