

碳酸盐岩孔隙度影响因素研究进展

浅水台地碳酸盐岩孔隙演化过程研究被视为油藏研究中最大的难题之一，而深入了解控制碳酸盐岩储层孔隙度变化的因素对油气勘探风险评估和油气藏建模又极其重要。尽管碳酸盐岩的研究已经持续了数十年时间，但关于其孔隙度变化的影响因素仍莫衷一是。

1、孔隙度与埋深

孔隙度通常是指总孔隙体积相对于岩石总体积的百分比。孔隙度与埋深的关系最先受到关注且研究也最为深入。现有的油气勘探开发实践表明，大多数具有经济性的碳酸盐岩储层其埋深都介于500~4500 m，但不同的储层之间、甚至同一储层内的平均孔隙度都存在较大的变化。碳酸盐岩储层的这一孔隙度变化特征较砂岩更为明显，似乎表明前者在沉积和成岩上具有更强的非均质性，但实际情况并非总是如此。岩相分析表明，即使看似非常均匀的砂岩储层其非均质性实际上也可能高于碳酸盐岩储层。另外，碳酸盐岩储层孔隙度的离散性分布并不影响其与埋深的关系：在典型的含油气（逐渐沉降型）盆地中，碳酸盐岩的孔隙度总体上随埋深的增加逐渐下降。

这种孔隙度-埋深相关性并非放之四海而皆准，例如在横向上构造抬升幅度变化较大的地区（如扎格罗斯褶皱带），这种关系便不复存在；加拿大艾伯塔盆地泥盆系碳酸盐岩储层也是如此，这可能因部分源自近地表高盐环境的水循环进入深层后引发了广泛的白云岩化。最经典的碳酸盐岩储层孔隙度-埋深关系曲线是由Schmoker和Halley于1982年建立，因其代表的储层完全不含油气、地温梯度低、埋深范围广（0~5.5 km）且主要为在非构造性的缓慢沉降过程中发育的具有颗粒支撑结构的碳酸盐岩，因此相对实用进而长期被业界用作对比标准。碳酸盐岩孔隙度除随埋深增加而下降外，还与地层应力、温度及时间等有关，但因四者相互关联而无法确定哪种因素在其中起主要作用。碳酸盐岩储层总孔隙度通常随埋深和温度的增加而降低，可能主要源于升温对沉积黏土的激活效应，这有助于化学压实和胶结。

2、最新研究认识

前人关于碳酸盐岩储层的研究至少提出了11种影响碳酸盐岩孔隙度的因素，根据其出现的先后顺序分别为：沉积结构、早期成岩作用、硬石膏胶结、白云岩化、超压、石油侵位、黏土与缝合线、埋藏溶蚀、喀斯特、裂缝和层序地层。近年来的研究不断证明这些因素并非适用于所有情况。

一般认为，控制碳酸盐岩孔隙度的两种主要矿物是白云石和硬石膏。在深埋的碳酸盐岩中，白云岩化作用通常与孔隙度呈正相关（少数情况下也可能相反）。硬石膏胶结作用会降低孔隙度，且这种胶结作用最常见于白云岩层段，在某些情况下会抵消白云化作用对提高孔隙度的积极作用。

沉积结构也被视为控制碳酸盐岩孔隙度演化的重要因素，如泥晶支撑的碳酸盐岩宏孔隙数量较少，且成岩过程中孔隙度减少的幅度往往最大，但如果其受到早期白云岩化作用的影响或者灰泥因受到早期微孔胶结作用的保护而未遭受机械压实，则沉积结构对其孔隙度的影响将大大减小。对于颗粒支撑的碳酸盐岩，强烈的早期成岩方解石胶结作用会导致大孔隙被胶结物全部充填。

层序地层是影响孔隙度变化的最重要因素，控制了除埋深和温度外所有因素发生作用的位置和强度。早期的石油侵位对方解石胶结作用的抑制（已知主要发生在微孔灰岩中）和早期出现的超压对压实作用的抑制（仅见于北海白垩油田）都是具有高度特异性的孔隙度保持因素。后期溶蚀作用产生孔隙是目前较流行的模型，但其理论逻辑基础薄弱，又欠缺经验证据的支持，极易被简单的观察结果证伪。

（供稿 卢雪梅）

《石油与天然气地质》来稿须知

1 《石油与天然气地质》主要以记录石油地质领域的重大科研成果、反映石油地质学科最新科技动态、促进国内外学术交流、提高石油地质研究和实践水平为办刊宗旨，是一份面向国内外公开发行的综合性学术期刊，为大 16 开、双月刊，主要栏目有“专家论坛”“油气地质”“勘探开发”“技术方法”等。

2 来稿要求

1) 欢迎作者登陆《石油与天然气地质》门户网站 (<http://ogg.pepris.com>) 进行网上投稿。文稿一律以 word 统一进行排版，页面设为 A4 幅面。

2) 来稿力求主题突出、观点明确、短小精练、简明扼要，以 10 000 字为限（包括图表所占的位置）。文稿应包含题名（限 25 字以内）、作者姓名（以 8 个为限）、作者单位（含通信地址）、中文摘要（以 300 ~ 500 字为宜）、关键词（按《汉语主题词表》和《石油化工汉语叙词表》等专业词表标引 3 ~ 8 个）、中国图书资料分类法分类号、英文摘要（含题名、作者汉语拼音名、作者单位、摘要及关键词）、第一作者简介（包括姓名、出生年份、性别、职称或学历、所从事专业或研究方向）、正文及参考文献（中、英对照）。

来稿若属省部级以上的基金资助项目，请在首页底脚处注明，并注明项目编号。

3) 文中图、表随文出现，图以 6 幅为限、彩图，要有中、英文对照的图、表名称。图中若涉及到国界，请附相应正规出版的地理底图。各图形要求符合规范（图幅尺寸为：分栏图宽度不超过 8 cm，通栏图不超过 16 cm），需提供 cdr, eps 或 ai 等格式的可编辑的图件；照片要求反差好、层次分明、彩色。文中表格一律使用三线表。

4) 文稿正文（含图表）中的物理量和计量单位应符合国家标准或国际标准。对外文字母、单位、符号的大小写、正斜体、上下角标及易混淆的字母应书写清楚。文中首次使用的符号应标明其中文含义。

5) 文稿章节编号采用三级标题。一级标题形如 1, 2, 3, ……；二级标题形如 1.1, 1.2, 1.3, ……，2.1, 2.2, 2.3, ……；三级标题形如 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3, ……，2.1.1, 2.1.2, 2.1.3, ……。引言或前言不排序。

6) 文中引用的参考文献应一一按序标注。未公开发表的资料可用脚注标注。参考文献序号应与其在文中出现的先后顺序一致。参考文献著录的内容应符合国家标准。

参考文献著录主要格式如下。

专 著：[序号] 著者.书名[M].版本（初版不写）.出版地：出版者，出版年：起止页码。

期 刊：[序号] 著者.篇名[J].刊名，出版年，卷次（期次）：起止页码。

论 文 集：[序号] 著者.篇名[C]//编者.论文集名.出版地：出版者，出版年：起止页码。

科技报告：[序号] 著者.题名[R].出版地：出版者，出版年：起止页码。

学位论文：[序号] 著者.题名[D].保存地点：保存单位，年份。

专利文献：[序号] 专利申请者.题名：国别，专利号[P].公告日期。

电子文献：[序号] 著者.题名[DB/OL].出版地：出版者，出版年[引用日期].获取或访问路径。

著者姓名采用姓在前、名在后的写法。姓名用汉字的著者，用全姓名，不缩写。姓名用西文的著者，姓全部大写，姓与名之间空一字符；名用缩写（首字母大写），不加缩写点。如著者不多于 3 人，则全部著录；如为 3 人以上者，只著录 3 人，后面中文加“等”、英文加“et al”。著者间加“，”，最后两者之间一律不加“和”、“and”等连词。起始页码与终止页码之间用半字线“-”连接。

3 编辑部对来稿文字、形式有修改权，若不同意，可事先声明。

4 来稿一经刊用，编辑部即自动默认论文作者自愿将其拥有的对该论文的汇编权（论文的部分或全部）、翻译权、印刷版和电子版的复制权、网络传播权和发行权转让给编辑部。编辑部将按规定付酬（稿酬含电子版与网络版），并赠送样刊 2 册。

通信地址：北京市昌平区百沙路 197 号院中国石化科学技术研究中心 7 号楼 201 室《石油与天然气地质》编辑部

邮政编码：102206

电 话：010-56607717 010-56608309

网 址：<http://ogg.pepris.com>

电子信箱：ogg.syky@sinopec.com

联 系 人：张亚雄 张玉银

《石油与天然气地质》编辑部