

“岩相、古地理”资料选编—1

# 沉积成岩作用研究

参考资料

地质矿产部岩相古地理工作协作组

# 前 言

沉积成岩作用是沉积学研究的重要内容之一，对认识沉积岩的形成、演化和油气资源、沉积、层控矿产等地质工作均具有重要的意义。就我国当前的研究状况看，近几年来虽有较快的进展，但仍属薄弱环节。为配合这一工作的深入开展，并有助于我国沉积学工作者了解国内外成岩作用研究的现状、动向和存在问题，本刊特邀请地质矿产部情报研究所奚瑾秋、王绍全、夏祖葆等同志，编、译了这一材料供同志们参考。

奚瑾秋等同志在百忙中不辞辛劳，抽出宝贵时间完成了这一工作，使之能及时交付出版；为赶印这份材料，地质矿产部成都地质矿产研究所部分同志也给予了大力协助。谨此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促，编辑、校印中的错漏之处，敬希读者指正。

《岩相古地理研究与编图通讯》

编辑部 1984年7月

# 目 录

我国沉积岩成岩作用研究新动向.....	( 1 )
国外沉积岩成岩作用研究动向一瞥.....	( 25 )
国外压实作用研究得到加强.....	( 30 )
内源沉积的成岩作用.....	( 36 )
加拿大学者对白云岩成岩作用研究的新认识.....	( 38 )
碎屑岩成岩作用的稳定同位素研究.....	( 53 )
粗粒硅质碎屑岩成岩作用的概况.....	( 60 )
沉积岩形成作用的各个阶段.....	( 69 )
苏联在研究成岩作用分析中重视后成作用的研究.....	( 79 )

# 我国沉积岩成岩作用研究新动向

奚瑾秋\*

(地质矿产部情报研究所)

## 一、砂岩的成岩作用

随着石油勘探开发研究的深入发展,不少地质工作者愈益重视成岩作用对储层物性的巨大影响。我国将成岩作用理论用于解决油气藏和某些矿床方面有很好的成就,象长庆油田勘探开发研究院朱国华对陕甘宁盆地西南部上三叠系延长统低渗含油砂体和次生孔隙砂体形成的研究就达到国际水平。

### 一、次生孔隙

七十年代中期,对砂岩孔隙性质的认识产生了根本的变化。次生孔隙中储集着大量油气。世界上许多沉积盆地砂岩,如美国墨西哥湾沿岸地区,北海侏罗系油田,阿拉斯加普罗德霍湾油田等,都被认为是次生孔隙型储集砂岩。我国内蒙二连盆地地下白垩统白彦花群中部油层也是次生溶孔油层,其最高孔隙度达33.5%,渗透率458md。所以研究次生孔隙具有重要的现实意义。

#### (一)次生孔隙的成因分类

华北石油勘探开发设计研究院的学者成功地运用偏光显微镜观察中地区岩心铸体薄片,根据结构成因,将次生孔隙划分为以下十类:

1、**晶内溶孔**:长石晶体、云母晶体部分或全部交代、溶解而成,其分布不受埋藏深度的限制。

2、**粒内溶孔**:在颗粒内部同心圈之间,见有溶解的次生孔隙。

3、**晶间孔隙**:在成岩作用中,新生的白云石、高岭土等矿物,晶体虽小但晶形极为发育,互相堆积而成各种晶间孔隙。

---

\*1983年11月,在成都召开《全国沉积岩成岩作用学术讨论会》。会上发表的论文达40余篇,讨论的问题比较广泛,有关砂岩成岩作用及碳酸盐岩成岩作用的论文较多,现择砂岩成岩作用、碳酸盐岩成岩作用、生物礁成岩作用、白云岩成岩作用、颗粒在成岩作用中的次生变化及其研究意义、粘土矿物的成岩后生作用研究方面的新动向作了编写。其他方面的内容请查阅会议资料。由于时间仓促,编写能力有限,恳请批评指正——编写者

4、**火山喷发岩溶解气孔**：在火山喷发岩屑的气孔中，充填玻璃质或绿泥石，后经交代溶解而成。

5、**泥质胶结物残余溶孔**：原来的胶结物为云母泥质或为绿泥石，后来由于碳酸盐交代或选择性的溶解而形成。

6、**碳酸盐胶结物残余溶孔**：粒间孔隙被方解石充填或交代，后因方解石被选择性溶解而形成。分布在次生孔隙发育带。

7、**粒间溶孔**：胶结物为泥质或方解石，后因交代或选择性的全部溶解而成。它与原生粒间孔的区别在于碎屑颗粒常见有溶蚀的锯齿边缘，并有残余的泥质或方解石胶结物，同时次生粒间溶孔分布不均匀等。

8、**淋滤溶孔**：粒间溶孔的直径比相邻颗粒大得多的孔隙，这些被溶解的颗粒，大多为易风化的长石或碳酸盐颗粒、表颗粒。

9、**粒间溶孔缝**：许许多多粒间溶孔互相沟通组成微细的缝网，这种砂岩的孔隙度一般，而渗透性可达几百 $md$ 。

10、**构造微裂缝**：由于构造挤压作用，沿着颗粒边缘或泥质胶结物中裂开而成。分布在比较致密的地层之中。

在冀中地区砂岩次生孔隙发育带，主要以粒间溶孔、淋滤溶孔和粒间溶孔缝为代表，产生中等孔隙度和高渗透率，为理想的出油层。

辽河石油勘探局姚文江对沈阳油田下第三系沙河街组三段砂岩组进行了鉴定和扫描电镜分析，表明该区广泛发育次生孔隙，同时个别砂层还保存了原生孔隙。他认为尽管原生孔隙与次生孔隙的区别相当困难，然而砂岩中碎屑颗粒的普遍溶蚀，悬浮的填集状态，特大孔隙空间（等于或大于格架颗粒）的存在，残余状方解石胶结物以及钙质交代物部分溶解形成的粒内孔等现象均证明孔隙的次生成因。

## （二）次生孔隙的识别标志及结构类型

胜利油田地质研究院吕正谋认为，长期以来，砂岩的次生孔隙所以被忽视，主要原因是缺乏识别次生孔隙的标志。他通过对山东东营凹陷下第三系砂岩次生孔隙的反复观察，认为以下十二种现象是鉴别该区砂岩次生孔隙的有用标志。

1、**部分溶解**是常见的现象，它是可溶组份部分溶解的结果。孔隙边缘的溶解特征十分明显：砂屑的溶解多呈不规则状，结晶的碳酸盐矿物和斜长石常被溶成圆弧形或港湾状。

2、**受溶蚀颗粒和过量孔隙**是碎屑边缘被明显溶蚀而使粒间孔隙达到或超过40%的一种现象。它可能是碳酸盐矿物先沿颗粒周围进行交代，后因水化学性质改变，把碳酸盐矿物溶去了，留下被溶蚀的外貌。

3、**溶蚀残骸**是陆源碎屑、盆屑和交代矿物被溶去大部分，原颗粒仅留残体的一种现象，见有斜长石残骸、砂屑残骸、交代斜长石的白云石残骸等，它们无疑为地下深处溶解的产物。这个标志比较常见，在薄片很容易辨认，是个很重要的标志。

4、**铸模孔隙**是一种比较多见的次生孔隙标志，它是陆源碎屑、盆屑和交代矿物被完全溶解后而保留了原颗粒形貌的一种孔隙结构。最常见的是软体动物碎片的铸模。

铸模孔隙在薄片特征突出，辨认容易，有时在岩芯上肉眼就可清楚地识别出螺、蚌



及其碎片的铸模。

5、**贴粒孔隙**是在碳酸盐矿物胶结的砂岩中紧靠陆源碎屑出现的一种孔隙，常呈叶片状、透镜状或串珠状分布于颗粒周围，它不可能是碳酸盐沉淀时留下的空间，而是地下深处酸性水溶液沿砂粒与胶结物之间的薄弱环节，把紧靠砂粒的碳酸盐溶去后形成的次生孔隙。此标志虽分布不广，但却十分可靠。

6、**残余胶结物**（或基质）存在于孔隙比较发育的砂岩中，是胶结砂粒的碳酸盐矿物被大部溶去而幸存下来的残余物。

7、**伸长型孔隙**也存在于碳酸盐矿物胶结的砂岩中，它是跨越多个颗粒的粒间孔隙，常呈长条、折线、树枝、蠕肠等奇形怪状，在薄片容易识别，常与局部溶解、溶蚀残骸、残余胶结物共生。

8、**不均匀性填集**是在同一薄片中的颗粒排列得极不均匀，有的部位的颗粒排列比较紧密，与其相邻的部位比较稀疏，甚至出现漂浮状颗粒。这是原生碳酸盐或成岩早期形成的碳酸盐胶结物分布得不均匀，未胶结的部位随着埋深的增加而被压实，被胶结的部位因有碳酸盐矿物的支撑，基本上未被压实，后来由于酸性水将粒间碳酸盐溶去，使其恢复了原来的较大粒间孔隙。用沥青堵孔制片有利于该标志的辨认。

9、**超粒大孔隙**：此处是指那些明显地大于孔隙周围最大颗粒，但在某些砂岩中，有的孔隙两三倍或更多倍于它周围最大颗粒，这样的大孔隙只能是成岩过程中产生的。

10、**油浸基质**（或胶结物）是粒间孔隙内的碳酸盐基质在成岩过程中，主要受温度和压力的影响发生重结晶（有的又遭溶蚀），晶间孔隙随之变大，具备了储渗能力引起的，通过电镜可看到发育的微孔隙。油浸胶结物完全是地下深处淋滤碳酸盐胶结物，使其产生晶内微孔隙，后被原油充填，在薄片表现为油浸，借助电镜可见到大量互相连通的微孔隙。

11、**破碎颗粒**：一个颗粒碎成两块或几块的现象只能是成岩期产生的，在多孔的薄片常常看到它，有零星存在的，也有成群出现的。前者多成两半，可能由上覆压力引起，后者多数颗粒都碎成数块，其成因可能与构造活动有关。破碎颗粒在薄片中是很好认的，但应排除制片过程中可能产生的人为现象。

12、**岩石裂缝**一般是在沉积物固结后受力产生的缝隙，在断层比较发育的地方容易出现。在碳酸盐矿物胶结的砂岩中比较清楚，胶结物稀少的较疏松油砂中，裂缝往往比较模糊，然而，在沥青堵孔的薄片显示得很清楚。

上述各标志，尤其是溶解形成的那些标志，它们很少单独出现，当在某个薄片中发现一种标志时（破碎颗粒除外），只要仔细观察，往往会找到一系列标志。

### （三）研究次生孔隙方法

与原生孔隙比较起来，次生孔隙的大小范围较复杂，均匀程度更差，有的在岩芯上就可直接看到，有的需通过扫描电子显微镜观察才够真切，然而，大多数在薄片中就显示得很清楚。在工作中，应从观察岩芯入手，系统采样和重点采样相结合，室内用实体显微镜、偏光显微镜、扫描电镜等仪器设备对手标本、岩石薄片、铸体薄片、样品自然断面和磨光面，砂粒表面等进行仔细观察，以找出研究区砂岩次生孔隙的识别标志，进而确定次生孔隙的结构类型、成因、丰度、分布及控制因素，成岩变化顺序，探讨在油气勘探开发

中的意义。在砂岩比较疏松及含油等特殊地区可试用沥青堵孔制片和松解岩石观察砂粒表面等方法。

传统的成岩作用以压实、固结、胶结、致密化等孔隙性丧失为基础。自70年代以来，苏联、北美等学者相继开展砂岩孔隙性研究，发现孔隙度随深度增加而降低，但埋深1300~2500米以下时往往又出现高孔隙段，这便是淋滤成因的次生孔隙带，它与烃类生成有关。对次生孔隙带形成，发展过程及分布规律的研究，实际上也是对岩石成分，孔隙流体性质，有机质热演化，地温、压力等多种成岩因素的研究，这些工作无疑给成岩作用增加了新内容。

## 二、成岩演变对储集层特征的影响\*

松辽盆地各层砂岩的岩性差异较小，而物性差异较大。特别是随着埋藏深度的增加，储油物性逐渐变差的规律性明显。

影响砂岩储油物性的因素比较复杂，主要是沉积条件与成岩条件两方面。对不同成岩阶段的砂岩这两方面的影响有较大的差异。在早成岩阶段由于成岩作用中以机械压实为主，而机械压实程度主要决定于埋藏深度（一般在1000米以内）和砂岩本身的沉积条件。即是说当原始沉积物颗粒较粗、分选较好、粘土基质等填隙物较少时，在相同的压实条件下其物性较好。在中成岩阶段由于机械压实和化学固结都起重要作用，加上沉积条件所形成的颗粒较小、分选较差、填隙物较多时，则物性将显著变差。

由于不同油层所处成岩阶段不同，砂岩中自生矿物的种类、数量、组合和产状不同，它们对物性的影响也不同。沉积条件决定砂岩的原始孔隙度和渗透率，而成岩作用决定砂岩的最终孔隙度和渗透率。砂岩中的自生矿物是成岩过程中化学固结作用的产物。在中成岩和晚成岩阶段\*\*往往出现较多的自生矿物，因此它们的存在对砂岩的物性起着重要的或决定性的影响。

### 1、自生石英和长石（硅质胶结）的影响

石英和长石的次生加大和再生胶结程度（见表1），从1级—5级标志着自生石英和长石逐渐增多，也就是逐渐堵塞原生粒间孔隙、降低原生孔隙度的过程。因早成岩阶段石英次生加大为1~2级，硅质胶结引起孔隙度降低数量少，对储集性影响较小。而在中成岩阶段及晚成岩阶段，硅质胶结达3—5级，显然将成为使原生孔隙度降低的主要因素。

### 2、自生粘土矿物的影响

砂岩中除一部分他生粘土矿物胶结外，存在大量的自生粘土矿物。由于粘土矿物本身的物理和化学性质对流体有明显的敏感性，在注水、三次采油中有很大的影响。粘土矿物具有很高的表面负电荷和阳离子交换能力，加上粘粒微小有很大的表面积，因此具有很强的吸附

---

\*以大庆石油学院勘探系杜博民等撰写的松辽盆地北部储集层特征及成岩演变为例。

\*\*根据松辽盆地北部砂岩储集层的成岩演变特征，大庆石油学院、大庆油田科学研究所设计院杜博民、邢顺全、周书欣将该区成岩阶段分为三个阶段五期：即早成岩阶段早期、早成岩阶段晚期、中成岩阶段早期、中成岩阶段晚期和晚成岩阶段——编者

石英次生加大与再生胶结简表

表1

石英次生加大 与再生胶结程度 (级别)	薄片岩性特征	扫描电镜岩性 特征	成岩后生作 用强度
1	偶见石英具次生加大边或自形晶	二氧化硅溶蚀及沉淀, 开始见到少量石英再生长晶面	弱
2	少部分石英具次生加大(边窄)或自形晶面。孔隙发育	同上	弱
3	石英多具(大部分具)次生加大(边较窄), 自形晶面较多; 部分具再生胶结。孔隙发育	石英自形晶面发育	中
4	石英和较多长石普遍具次生加大(边变宽), 自形晶面多。再生胶结较普遍(颗粒局部镶嵌)。孔隙发育中等。孔隙中见次生石英及长石小晶体	石英、长石自形晶面发育	中
5	石英、长石普遍具次生加大(边宽)颗粒外形多不规则, 自形晶面少。再生胶结普遍, 颗粒间镶嵌多。孔隙发育差。泥质重结晶较好, 泥团常呈千枚状集合偏光	石英、长石自形晶面变少, 颗粒间不规则镶嵌。大孔隙很少见, 可见微孔	强
6	石英和长石外形不规则, 紧密镶嵌, 呈石英岩状结构。孔隙发育差。泥质已绢云母化或绿泥石化	很少见石英、长石自形晶面, 颗粒之间紧密镶嵌。孔隙很少见	极强



能力，即具有很强的表面活性。不同种类的粘土矿物对油层的影响不同：

1) 蒙脱石：晶层间联结松弛，最易吸水膨胀及进行离子交换，其体积膨胀可达数百倍，从而极大地破坏水的渗透率，对注水开发极为不利。蒙脱石常呈薄膜状贴附颗粒表面或呈套膜状，它的存在具较大危害，需采用适当措施，如用氯化钾钻井及稀的盐酸和氢氟酸处理解除蒙脱石膨胀等。

2) 高岭石：在砂岩中常呈假六方片状自形晶体，晶片厚约0.1—0.2微米，直径数微米，集合体呈书状或杂乱堆积在粒间孔隙内，晶体间具大量微孔隙可达数微米大小，一部分小于1微米，其中一些亦可构成束缚孔隙（不流动孔隙）的一部分。少部分高岭石晶片分散在颗粒表面。高岭石的存在与其它粘土矿物相比对于孔隙度和渗透率的影响要小一些，因此，物性好的储集层中往往有较多的高岭石存在。但是，当采油注入高压流体时，高岭石晶体很容易被分散或打碎而堵塞直径小于晶体大小孔隙喉道。高岭石的危害可用氢氟酸解除。

3) 伊利石：通常呈鳞片状（他生的为主）近于平行地贴附颗粒表面或呈套膜状，自生伊利石常呈纤维状、毛发状或薄条片状由颗粒表面伸入孔隙内，有时成为搭桥或网状。由于它的晶体个体小（厚度和宽度小于0.1微米，长度数微米），其集合体造成大量束缚孔隙，产生高束缚水饱和度，使渗透率大为减少。伊利石亦具有强吸附性，能吸附注入油层流体，因此，在注入其它流体前最好用盐酸和氢氟酸混合物溶解处理。

4) 绿泥石：叶片状晶体多近于垂直贴附颗粒表面或呈套膜状，或充填孔隙内，也会造成大量微孔隙并严重使渗透率减少。此外，由于绿泥石中含铁较高，有能溶于稀盐酸的特征，在油层开发采取改造措施时，如用盐酸酸化地层，要考虑到绿泥石遇稀盐酸会溶解而产生氢氧化铁沉淀堵塞孔隙的副作用，在盐酸中可加入去氧剂和离子螯合剂作预防。

5) 其它混合层粘土矿物如蒙脱石—伊利石、蒙脱石—绿泥石的性质，与这些成分的单矿物性质类似，对油层的影响也类似。

### 3、碳酸盐胶结的影响

各油层砂岩中碳酸盐胶结物的含量很少，一般为1~2%或更少。以方解石为主，少量可见菱铁矿。

1) 方解石：在砂岩中多呈嵌晶状局部不均匀分布，对石英、长石颗粒以及粘土矿物常有溶蚀交代现象。几乎在各油层砂岩中方解石都是最晚形成的自生矿物。多数方解石早于石油进入砂岩，则起了降低孔隙度和堵塞大孔道降低渗透率的作用，而方解石晚于石油进入时，在采油时则起封堵排油通道的作用。

2) 菱铁矿：偶然在油层砂岩中出现，以半自形菱铁矿集合体团块充填少数孔隙的方式，或呈分散状自形菱铁矿微晶散布颗粒周围一丛生状，一般含量甚微，不足1%的较多。当含量高时亦使孔隙度和渗透率降低。

由此可见，必须十分重视不同成岩阶段砂岩中的自生矿物组合特征及产状的研究，用以判断它们对储集层特征的影响。尤其应重视自生粘土矿物对油层物性的影响，预测其在采油措施中可能造成的损害，以便采取相应的处理措施。

加强对储集层的岩性、物性与含油性的综合分析，较全面地研究储集层的沉积条件与成岩条件，有利于深入认识影响储集物性的因素，为评价储集层性质提供更多的依据，并

可对有利的储集层勘探深度和层位进行预测。因此，杜博民等的研究工作具有一定的理论意义和实际价值。

### 三、研究成岩作用的意义

#### （一）成岩作用在勘探开发中的应用

胜利油田地质科学研究院杜韞华同志研究了一个二氧化碳气顶油藏成岩作用后认为该项工作对油气勘探的意义在于：成分大体相同的砂岩，由于成岩环境不同，储集性可以相差很大，因此他认为不能笼统的加以评价。找出有利地区的形成条件和分布规律是岩矿工作在石油勘探上不断探索的方向。而且她还认为成岩作用研究与油田开发改造油层的工作相结合也是岩矿工作努力探索的方向。

#### （二）滇中含铜砂岩的成岩作用与成矿环境

铜铅锌铁锰等固体矿产的沉积期后矿床，是在特定的地质条件下，以液相或气相的形式自矿源体中溶出（逸出）迁移到现在的容矿层中沉淀聚集成矿的。这与石油天然气矿藏的形成极为相似，但成矿过程和作用比油气藏复杂。因为成矿元素由固相、液相、气相等形式转化迁移形成富集体，除一般地质条件外，还要有一系列适于成矿的物理、化学因素，这些因素主要与含矿岩系本身的性质和变化相联系，因此成岩作用与层控矿床等的关系是很密切的。

滇中铜矿化赋存于砂岩的红色与灰色交互带的灰色砂岩中。铜矿物以沿层散点浸染状产出为主。铜铁硫化物具明显的分带特征，自接近红色层处起到灰色层内部，依次出现辉铜矿→斑铜矿→黄铜矿→黄铁矿等不同的矿物组合带，个别矿床在接近辉铜矿带的红色砂岩中含有自然铜。黄铁矿被铜矿物交代的现象极普遍，如黄铜矿沿着黄铁矿结核的裂隙中呈显微网状交代；有的黄铜矿颗粒中包容有黄铁矿的残留体；有的辉铜矿和斑铜矿还保留有黄铁矿假象；在辉铜矿边缘则分布有晕圈状的赤铁矿微晶，这是黄铁矿被交代后折出铁的氧化产物。铜矿物之间的交代次序是黄铜矿被斑铜矿交代，斑铜矿又被辉铜矿交代，这已由铜矿物之间的包裹穿插情况所证实。这些资料说明硫化铜矿物的形成于后生晚期。

根据上述地质特点，可以看出由于构造活动强化了某些地段岩石的成岩后生作用，先是还原性气液导入，造成红色退色作用产生了黄铁矿化，其后以碳酸盐的溶解和碎屑被熔蚀，在高盐度孔隙水的作用下，岩石孔隙进一步发育，矿源层中的铜质被溶出，渗透到成岩后生改造较强的含黄铁矿灰色砂岩内，经过较长期的交代沉淀充填，最后富集成具有工业意义的含铜砂岩。因此，砂岩成岩后生作用的类型和程度对于铜矿的形成是重要条件之一。

## 二、碳酸盐岩的成岩作用

成岩作用与岩相、古地理和地层学的研究以及沉积、层控矿床成矿规律的研究均有十分密切的关系。在开发和勘探各类油、气田的过程中,由于成岩作用直接影响和决定了有机物质的转化和岩石孔隙、裂隙的性质、类型和规模、与含油、气区的远景评价及油、气的运移、储集等条件直接有关。所以在研究油、气分布规律时,成岩作用始终是最重要的研究课题之一。

多种成岩环境的客观存在决定了成岩作用的复杂性。在不同的成岩环境中,具实际意义的岩石孔隙可以形成、变化、保存或消失。换言之,成岩环境的研究可预测岩石中各类矿产的储集性能。对碳酸盐岩来说,容矿空间的形成和分布,在一定程度上取决于成岩作用的性质和强度。

近年来,碳酸盐岩成岩作用的研究不断取得新的进展,研究成岩作用的方法日渐增多,成岩阶段的划分亦随成岩作用标志的确定而日趋详细。由于碳酸盐沉积物具有化学性质活泼、沉积速度较快、生物沉积作用明显、胶结物易于形成并被溶解和交代,以及成岩作用的多样性等特点,因而决定了碳酸盐成岩作用对岩石性质的影响远较其它岩类显著。但同类沉积物在相似的成岩物理化学条件下,所遭受的成岩变化或其所处的成岩阶段仍大体近似。然而,当相同的沉积物处于不同成岩环境或不同的沉积物处于相同的成岩环境时,其所产生的成岩变化、所处的成岩阶段必将有所不同,因此,通过成岩作用的研究可恢复其成岩环境。

碳酸盐岩的成岩环境多不同于沉积环境,故成岩作用经常能明显地改变沉积作用的特点而赋予其一系列新的岩石特征。这些特征难以作为沉积相的标志而应视为成岩作用的标志加以研究。

碳酸盐岩的成岩作用不仅直接改变岩石的结构和构造,而且还在相当大的程度上决定了岩石的成分或主要造岩矿物的结晶形态。例如在潮间的近地面的潮下带,镁及钠离子都较高,胶结物多为纤维晶到泥晶的文石和高镁方解石。在大气水带,钠、镁及相伴生的阴离子都较低,且有微生物的新陈代谢作用和快速地物理化学沉淀作用,故泥晶方解石可大量形成于地表。在渗流带的下部,由于重结晶作用缓慢,方解石多以等轴状亮晶出现;在地下深处,同生水、盐水和大气水互相混合,钠离子浓度多大于正常海水浓度,镁离子则因粘土的吸附作用和白云石化作用而降低了浓度,在 $Mg/Ca$ 离子比下降的情况下,镁离子的减少消除了这一离子对方解石形态的抑制效应,故在混合水带除可能形成少量白云石外,文石和高镁方解石都将转化为方解石,并以具原始矿物假象的亮晶方解石为特征。在不同环境中,碳酸盐的结晶速度也影响着矿物的形态。

我国碳酸盐岩在时间和空间上分布之广,与之相关的矿产之多,在世界上亦属罕见。南方十二省范围内分布的泥盆纪碳酸盐地层的含矿性更具特点,在这套地层中富集了为数众多的沉积、沉积变质、层控型和与岩浆——热液作用有明显成因关系的许多大型和特大型矿床。随着沉积学和层控及热卤水成矿理论的发展,已逐步认识到碳酸盐岩沉积相、沉积结构、组分等基本特征,对矿床的展布规律、矿化机理和成矿物质运移及富集作用的重大影响。

随着中东和北美一些大型碳酸盐岩油气田的发现,成岩作用的研究蓬勃发展起来。当前研究的重点放在成岩作用机理、成岩环境、成岩作用发生的相对时间次序,亦即成岩发

展史等方面。

成都地质学院刘效曾以川东卧龙河构造上二叠统长兴组为例，研究了碳酸盐岩的成岩环境和成岩后生变化发展史，并与北美和中欧的两个实例进行对比。探讨了成岩作用对油气储层的影响，很有启示。

川东地区上二叠统长兴组是一个有利的含油气层系。但是储集层特征变化极大，同一构造范围内不同的井产能悬殊。而且在一些构造上钻得的工业性气井常常出现超高压的情况。如卧龙河构造二十号井测得地层压力为静水柱压力的1.8倍。这些现象与上二叠统长兴组碳酸盐岩所经历的复杂成岩历史有关。

刘效曾将卧龙河四十九号井长兴组岩心剖面划分出十一个成岩带。其中海水潜流带三个，混合带两个，淡水潜流带五个，渗流带一个。

他将川东卧49井地区成岩后生变化史归纳为：

#### **准同生期：**

- (1)、泥晶化：由藻类和真菌向心钻孔所形成。泥晶边一般厚0.05毫米。
- (2)、生物扰动潜穴，以及在潜穴附近的粪粒。

#### **成岩期：**

(3)、等厚环边胶结物。方解石晶体围绕颗粒的外表面或孔隙的内表面呈环状分布。环边的厚度较均匀。一般做为第一世代胶结物出现。

(4)、微晶环边，由微晶方解石晶体组成的薄而不规则的包壳，可能是藻类的间接产物。藻类在夜间放出二氧化碳造成溶解，在白天二氧化碳用来营光合作用，导致碱性环境而使碳酸钙沉淀。

(5)、溶蚀作用，包括渗流和潜流溶蚀，形成众多的生物铸模孔，生物粒内、粒间孔和少量的溶洞、溶缝。这些孔、洞、缝除少数得以保存外，都被碳酸盐晶体充填，向孔隙中心晶体变粗。

(6)、悬挂形胶结物。

(7)、再生胶结物，见于棘屑的共轴生长。

(8)、等轴粒状胶结物。晶体的长宽比小于1.5比1，它形的等轴方解石晶体充填孔隙并向中心变粗。等轴粒状胶结物常和等厚环边胶结物成世代关系。

(9)、调整白云化作用。高镁方解石构成的生物棘皮动物、红藻等在转变成方解石的过程中，释放出过量的镁离子而发生的白云化作用。这种白云化程度较低，一般不超过10%。形成的白云石多为它形。

(10)、混合白云化。白云化程度高，可达80%。晶间孔发育。

(11)、黄铁矿化，黄铁矿晶体为自形或半自形，和调整白云化有关。

#### **后生期：**

(12)、压溶作用，产生缝合线。

(13)、后生白云化，多发生在缝合线附近，或充填于孔隙之中。碳酸盐沉积物中高岭石转变为钙一蒙脱石和镁一蒙脱石，以及埋藏温度的增加，使孔隙流体的镁钙比增加，对白云石沉淀有利。

(14)、去白云化作用。

(15)、硅化，自生石英晶体呈棱柱状，含有白云石包裹体。属后生，但交代时间不清。

(16)、烃类的运移和成熟。

(17)、裂隙的产生。

#### **北美和中欧的一些情况：**

1、加拿大彩虹油田中泥盆统碳酸盐岩成岩变化史为：

##### **早期成岩作用**

(1)、钻孔藻类的泥晶化。

(2)、早期方解石胶结。同时有海水内部沉积物和藻类泥晶。

(3)、在海水条件下少量的淋滤作用，生物钻孔和中等程度的破裂。

(4)、无沉积作用时的早期破裂和侵蚀，超咸化条件下海面下降的少量侵蚀作用。

(5)、裂缝中的蒸发碳酸盐沉积物（灰泥），从蒸发岩至少下降了60英尺。

(6)、交代作用（硬石膏结核）和孔隙胶结物（细晶硬石膏胶结物），在蒸发灰泥沉积后不久，并伴随有（5）和（6）的塑性变形和压实。

(7)、白云化。在蒸发沉积物中发育，并向下扩展到礁体，有大量碳酸钙淋滤作用。

**晚期成岩作用：**（相当于我国的后生作用）当埋藏到玛斯凯格蒸发岩系以后，发生下列晚期成岩作用。

(8)、高镁方解石和文石变为方解石。

(9)、中等程度的破裂作用。

(10)、由于压溶（缝合线）而形成的晚期成岩方解石和白云石，以及文石转变为方解石。

2、中欧泥盆系碳酸盐岩成岩变化史为：

##### **早期成岩作用（早成期）**

(1)、泥晶化。

(2)窗孔、遮蔽孔、虫孔、粒内和粒间孔、溶沟和裂隙中的内部沉积物。

(3)、等厚放射纤维状方解石，有时为微钟乳状，并有交互的不规则微晶纹层。

(4)、溶蚀作用。被溶蚀的部分包括放射纤维状胶结物，微钟乳环边，生物（层孔虫）和组分（瓣粒）。

(5)、偏三角面体方解石亮晶（犬牙状亮晶），有时在沉积后可见一个富铁帽和少量溶蚀现象。

(6)、晶簇镶嵌方解石（直径数百个微米），经常发生交代，主要在礁后相。

(7)、海百合茎的共轴生长。

(8)、放射纤维方解石，在大的粒间孔，遮蔽孔以及洞穴中。主要是带状纤维壳，单个环边厚度可达6毫米。

(9)、破裂作用。

##### **晚期成岩作用（中成期和晚成期）**

(10)、菱面体壳晶。剩余孔隙中沉淀的低铁和高铁方解石或白云石。

(11)、自生石英，有方解石和沥青包裹体。



(12)、烃类运移,在菱面体亮晶结胶物以后的剩余孔隙空间。

(13)、白云石。

(14)、形变、华力西运动。

(15)、后造山运动的矿化和交代。

刘效曾认为卧龙河地区长兴组碳酸盐岩的储集性能是比较差的(川东卧龙河地区的灰岩夹白云化灰岩孔隙度范围为0.23—2.19%,平均孔隙度为0.77%),虽然在沉积阶段和成岩阶段形成了不少原生和次生孔隙,但多数都被胶结物所充填。为了进行对比,把北美和中欧的物性资料分别列表于后。

加拿大几个碳酸盐岩油气的储集性 表2

油田	碳酸盐岩类型	平均孔隙度%	渗透率md
红水油田	礁相白云岩、灰岩	6.53	高
天鹅山油田	礁相灰岩	7.8	20(平均值)
雨虹油田			
A油藏	礁相白云岩	11.8	159.2(最大值)
B油藏	礁相白云岩	7.8	460.0(最大值)

中欧地区泥盆系碳酸盐的储集性 表3

碳酸盐岩类型	孔隙度(%)		渗透率(md)
	范围	平均值	最大值
台地灰岩	0.2—0.8	0.5	0.08
台地白云岩(局部)	3.7—5.2	4	0.05
礁前	0.2—0.7	0.5	0.1
礁	0.1—0.3	0.2	0.03
礁后	0.1—1.5	0.25	0.07

注:此表根据德国的飞马和德士古公司未发表的资料

加拿大中—上泥盆统碳酸盐礁组合都是世界上有名的大油气田。从表1中可以看到储层的物性参数都是很高的。这主要是由于白云化作用和大气水的广泛溶蚀作用。但是到了中欧虽然在岩相上也同样出现造礁环境,而物性参数很低(见表2),按照Krebs的意见,泥盆系碳酸盐岩组合在中欧地区所以没有找到油气的原因,是由于复杂的地槽区历史和以后的华力西造山运动的影响。因此说明储集性并不受岩相的控制,成岩作用才是问题的关键。

总的看来,川东长兴组介于北美和中欧两种情况之间,即有一定的油气储集条件,但储集性能是比较差的。造成这种情况的主要原因有二。一是受构造运动的影响,沉积物中的原生和次生孔隙形成以后如能迅速沉降,摆脱近地表成岩作用影响,常能幸免不被充填。但长兴世时没有剧烈的沉降运动,使这些沉积物遭受长期而复杂的近地表成岩作用的

影响。于是许多世代的胶结作用把各种孔隙破坏殆尽。二是古地理原因，长兴世广阔的陆表海水流畅通，通过沉积物或岩石孔隙的碳酸盐矿物源源不断地沉淀下来。这也给胶结作用创造了良好的条件。因此，只有那些以溶解作用占优势的古代淡水透体使其附近发生混合白云化的地方，才能形成较好储集条件。

众所周知，油气的聚集通常与岩石的一定孔隙、孔洞和裂缝有关。而岩石中的孔隙等又明显地受到各种因素的控制。诸如沉积相带的控制、构造的控制、成岩作用的控制等等。

西南石油学院碳酸盐岩研究室对滇黔挂南盘江地区浪平台地二叠系碳酸盐岩后生变化进行了研究。

他们研究了成岩作用与成岩环境及其对孔隙发展的控制，很有实际意义：

#### (1)、海底成岩环境下发生的成岩作用以及对孔隙发展的影响。

浪平台地二叠系碳酸盐岩在海底成岩环境中发生的成岩作用主要有颗粒的泥晶化作用、海底纤维状胶结作用、棘屑的海底共轴胶结作用以及压实作用。

其中泥晶化作用对孔隙的演化没有直接影响，但它却为后来的粒内溶孔以及铸模孔隙的形成创造了良好的先决条件。

关于海底胶结作用，过去人们都认为胶结作用是破坏孔隙、降低岩石孔隙度的极重要因素。但是，现在看来不完全是这样。特别是对岩石中早期胶结物的评价尤其如此。因为它形成时期早，如果考虑到压实作用的话，那么它的存在显然具有双重意义，一方面是降低岩石原始孔隙度，另一方面则是提高了岩石的抗压强度。因此，对孔隙来说，它即起到了破坏作用，又起到了一定的保护作用。仅破坏而言，据镜下估计，大致可使岩石的孔隙度在原有基础上降低5%左右。

至于压实作用，在浪平台地二叠系碳酸盐岩中，由压实作用留下的痕迹在薄片中是十分清楚的。诸如颗粒的嵌入，颗粒间的缝合接触，颗粒的各种塑性变形、颗粒的破裂以及其它现象等等，几乎应有尽有，只是它们多发生在第一期胶结作用之后。由于在主要压实期前沉积物就已被早期胶结呈半固结状态。因此，比起松散的沉积物来说，它具有较强的抗压能力。据此，再一次证明浪平台地二叠系碳酸盐岩第一世代胶结物的存在，确实具有降低和保护孔隙的双重作用。仅压实而言，大致可使岩石的原始孔隙度减少22%左右。

#### (2)、大气淡水及混合水成岩环境下发生的成岩作用及其对孔隙发展的影响。

在大气淡水及混合水成岩环境中，浪平台地二叠系碳酸盐岩主要经历了两次溶解作用、一次胶结作用、矿物的转化作用、部分白云化作用、部分硅化作用，以及压实作用和棘屑的共轴生长。

其中，溶解作用使孔隙度有所增加，并产生了若干新的孔隙类型。但随后的胶结作用又使岩石孔隙下降很多。而新生变形和云化、硅化作用，对孔隙的变化没有多大的影响。

#### (3)、区域地下水成岩环境下发生的成岩作用及其对孔隙发展的影响。

在该环境中，浪平台地二叠系碳酸盐岩主要发生了第三期胶结作用，形成第三世代亮晶白云石和粗亮晶方解石胶结物。经它胶结之后，本来就剩下不多的孔隙此时几乎全部填满。

#### (4)、深埋藏成岩环境下发生的成岩作用及其对孔隙发展的影响。

在该成岩环境中发生的成岩作用主要有重结晶作用、压溶作用、部分硅化作用和应变重结晶作用。

其中，重结晶作用和矿物转化一样，总的趋势是破坏孔隙。但从另一方面来讲，重结晶也导致了晶间孔隙的产生，亦包括在晶粒相对较粗的部位往往可见溶蚀成孔洞。

压溶作用，主要表现为缝合线的发育。由于缝合线一般来说是压性缝，对于后期油气的储集和运移意义不大。但是，在构造作用的配合下，它有可能对油气的储集和运移起到促进作用。

至于这个时期的硅化和应变重结晶作用，由于很不发育，对孔隙的发展几乎没有影响。

#### (5)、表生成岩环境下发生的成岩作用及其对孔隙发展的影响。

在表生成岩环境中，浪平台地二叠系碳酸盐岩所经历的成岩作用主要有第三期溶解作用，方解石充填作用、去白云化作用等。

虽然，表生成岩环境对于岩石的孔隙发展影响也很大，但它毕竟发生在现今，而且又多被充填，与油气的聚集已经没有多大关系了。

综上所述，可见碳酸盐岩的成岩作用是碳酸盐沉积物和碳酸盐岩演化历史中极其重要过程。对它的研究，不仅与油气直接有关，而且亦将有助于了解碳酸盐岩的成岩历史、孔隙演化和油气储集条件的初步分析。因此，具有重要的理论意义和实际价值。

胶结作用和溶解作用在碳酸盐岩的诸成岩事件中，常常具有主导作用，它们组成了事物矛盾的两个方面。研究这种矛盾的对立统一，不仅对了解油气运移、储集和分布至关重要，而且，通过对成岩结构的了解，有助于在一定程度上认识碳酸盐岩的成岩作用过程，从而为恢复成岩环境提供可信的依据。

在碳酸盐岩的成岩过程中，压实作用仍然是一种常见而又重要的成岩作用现象，绝不容容易忽视。它无疑是原始沉积物转变为固结石灰岩过程中体积缩小的重要原因之一。

### 三、生物礁成岩作用

世界上发现的许多生物礁油气藏，其产量之高是众人皆知的。著名的有墨西哥黄金港油田，加拿大的红水油田等。对于这类油气藏的勘探也越来越引起人们的重视。

在我国川东鄂西一带上二叠统地层中，目前已发现许多生物礁体。其中建南气藏是这些礁体中已获工业性气流的一个地下潜伏礁体，但是与世界其它高产礁型油气藏相比，产量是比较低的。那么是什么因素限制了它的产量呢？对这一地区生物礁的储集条件又如何评价呢？要回答这些期题，就必须研究这一地区生物礁的成岩后生变化以及它们对油气聚集空间的控制作用。

由于湖北利川见天坝海绵礁是目前该地区出露、发育都比较完好的一个典型礁体，层位与建南气藏相当，生物组合完全一致，对它的成岩历史及孔隙演变的研究在此地区是具有一定代表性的，并且有助于认识这一地区生物礁的储集性能，为此西南石油学院方少仙和沈昭国对见天坝上二叠统海绵礁中的硅化作用、成岩历史及孔隙演变等问题进行了研究。

见天坝海绵礁产于上二叠统长兴组第二段，主要造礁生物为串管海绵亚目中的多孔与

无孔超科以及纤维海绵的一些属种，次要生物为层孔虫、苔鲜虫、群体珊瑚、水媳、管壳石、非骨骼蓝藻形成粘壳或包壳，其丰度影响造礁方式。喜藻生物主要是腕足类、海百合茎、腹足类、隐口目苔鲜虫及有孔虫等。该地区海绵礁的生长、发育及分布受到古断裂活动的控制。沈昭国将见天坝海绵礁的发展划为五个阶段：第一阶段为礁生长基底形成阶段。此阶段由于断裂活动，形成水下凸起地形，为海绵礁的生长发育奠定了基础；第二阶段为礁生长阶段。造礁生物丰度低，一般在15~25%左右，形成障积岩；第三阶段，兴旺阶段。造礁生物繁盛，特别是串管海绵，丰度为40~50%，形成一套骨架岩；第四阶段为衰退阶段。由于礁体生长速度与区域性海侵速度失去平衡，造礁生物生长受到限制，但蓝绿藻特别发育，形成一套粘结岩；第五阶段即暴露消亡阶段。礁体出露海平面，受到侵蚀。

见天坝海绵礁的成岩历史及孔隙演变简介如下：

由上述生物组成的见天坝海绵礁，是最重要的原生孔隙。其次是生物死亡之后，有机体腐烂分解形成的许多生物体腔孔隙，这两类孔隙主要发育在礁上部骨架岩中。孔隙大约可占原始沉积物体积的30—40%。另外，在礁碎屑和其它颗粒间还有粒间孔隙和粒内孔隙，它们多分布于礁下部。总的来说，见天坝海绵礁原生孔隙度可达40~50%。

这样高的原生孔隙度是如何演化发育直至几乎完全消失的呢？其根本原因是由于礁体生成之后，经历了漫长的成岩历史。在成岩过程中，各种成岩作用对它的孔隙空间进行了不同性质和不同程度的改造。

见天坝海绵礁中，**泥晶化作用**很普遍，不论是造礁生物还是附礁生物，其边缘常有一泥晶套环绕，并且都出现在所有粘结物以及生物屑共轴生长之前。它的厚度可从0.5微米到几微米左右。少数有孔虫已全部被泥晶化。在某些情况下，整个生物被溶蚀，但泥晶套却保留下来，形成溶模孔隙（或称铸模孔隙）。这种孔隙又被后来的胶结物充填。

泥晶化作用，就当时来说对孔隙的影响不大，但由它产生的泥晶套却为后来溶模孔隙的形成创造了必要条件。

海绵礁中第一代胶结作用的产物为纤维状方解石。这种作用明显地降低了礁灰岩的原生孔隙度，特别是骨架孔隙，至少使原生孔隙度降低了10~15%。

**溶蚀作用**在礁体下部障积岩中表现十分强烈，形成许多溶孔、溶洞和溶沟。

这种规模较大的溶蚀现象，表明是淡水作用的结果。

由于溶蚀作用，就当时来说，大大改善了礁体岩石的孔隙度和渗透率，并使孔隙类型有了新的增加。如果这些增加的孔隙能保存下来，无疑它将是良好的油气储集空间。

第二代胶结作用形成叶片状方解石胶结物，分布于整个礁体。它使礁体岩石原生孔隙度进一步降低，同样也使溶蚀作用产生的次生孔隙开始缩小，对礁体岩石孔隙发展起到了又一次破坏作用。

在海绵礁上部，在第一世代和第二世代胶结物中以及部分生物化石（如海绵、层孔虫、珊瑚等）和蓝绿藻的包壳层中，常常出现泥晶~细粉晶大小的白云石交代物，并且伴随有石膏假晶出现，向下逐渐消失。

这期白云石和石膏晶体（现已为假晶）的成因看来是与礁体暴露后，局部、短暂的干