

文章编号: 0253-9985(2004)03-0319-05

千米桥潜山奥陶系碳酸盐岩 储层成岩作用与孔隙演化

杨池银¹, 武站国²

(1. 石油大学, 北京 102200; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 渤海湾盆地千米桥潜山奥陶系储层经历了两次裸露岩溶及古近纪后的深埋藏成岩作用。其中, 印支-早燕山期裸露岩溶属溶丘(梁)-洼地型岩溶发育模式, 是储集空间形成的重要时期。6期胶结事件的详细解剖表明, 喜马拉雅期深埋藏岩溶主要与腐蚀性热流体的作用有关, 是形成现今储层孔隙系统的最关键时期。局限的热液岩溶和裸露的背斜轴部之下地表岩溶的混合带, 对千米桥潜山奥陶系孔隙分布具有重要控制作用。印支期挤压逆冲形成的背斜轴部, 特别是潜山内幕背斜形态与潜山顶面形态相互协调的区域, 是储层发育最好的部位。

关键词: 裸露岩溶; 埋藏期; 成岩序列; 腐蚀性流体; 孔隙演化

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

Diagenesis and pore evolution of Ordovician carbonate reservoirs in Qianmiqiao buried hill

Yang Chiyin¹ Wu Zhanguo²

(1. University of Petroleum, Beijing; 2. China University of Geosciences, Beijing)

Abstract: Ordovician carbonate reservoirs in Qianmiqiao buried hill have experienced two periods of bare karst and post-Paleogene deep buried diagenesis. The bare karst during Indosinian-early Yanshan epoch, an important period for the formation of reservoir spaces, belongs to karst development mode of haystack hill-hollow type. Detailed study of 6 cementation events shows that deep-buried karst in Himalayan period, a critical period for the development of current reservoir pore system, is related to corrosive thermal fluids. The zones characterized by both local thermal fluid karst and surface karst under the outcropped anticlinal axes control the distribution of pores in Ordovician reservoirs in Qianmiqiao buried hill. Reservoirs are best developed in the anticlinal axes formed by compressional thrusting during the Indosinian epoch, especially in the areas where the shapes of anticlines within the buried hill harmonize with that of top of buried hill.

Key words: bare karst; burial period; diagenetic sequence; corrosive fluid; pore evolution

千米桥潜山位于黄骅坳陷中部, 被大张坨断层、港8井断层及港西断层所围限, 总体形态为北倾的半背斜, 奥陶系顶面埋深-3700m至-5000m。1999~2000年, 通过第一轮探井和评价井钻探, 发现了面积达44.2 km²的中-高凝析油含量的饱和型凝析气藏^[1]。然而, 随后钻探的3口开发井中却只有一口井获得成功, 表明奥陶系碳

酸盐岩储层具有很强的非均质性。

该区中、下奥陶统沉积时经历了4次海侵-海退旋回^[2], 早马家沟期早期、晚马家沟期早期、峰峰期早期的沉积环境以潮坪为主, 是有利的沉积相带。晚加里东-早海西期经历了第一次裸露岩溶; 印支运动期间, 千米桥地区位于小站-沙垒田古隆起南翼, 上古生界及三叠系被剥蚀殆尽; 印

支运动晚期,黄骅拗陷普遍发育挤压逆冲构造^[3,4],使千米桥潜山下古生界内形成多种冲断褶皱^[5];上侏罗统一下白垩统沉积前,千米桥地区奥陶系为梁、洼相间的残丘地形,且地貌形态与内幕构造形态具有一定的协调性;晚燕山期后,该区成为中生代裂陷盆地的一部分,随周边正断层的发育,断垒型潜山形成并不断深埋。

本文在解剖奥陶系碳酸盐岩岩溶动力学机制的基础上,讨论印支-早燕山期裸露岩溶的组合形态特征,建立相关的岩溶发育模式。通过胶结期次的鉴别,探讨深埋藏期成岩共生序列与孔隙形成演化的关系。

1 储层特征

千米桥潜山奥陶系碳酸盐岩储集岩类主要有泥、粉晶白云岩,泥晶灰岩及过渡岩类等。泥、粉晶白云岩中晶间孔及裂缝发育;泥晶灰岩中见有张裂缝及不同级别的溶洞。奥陶系风化壳内的灰岩也可形成较好的储层;角砾岩中的干化角砾状白云岩、岩溶角砾(灰质)白云岩或(白云质)灰岩、溶塌角砾白云岩等均可作为有效储层。

潜山探井钻探过程中,钻井液漏失、井涌、井径异常扩大、试油产油产气等现象,均在潜山顶部发育,向下有逐渐减少的趋势。板深7井4 251 m进入奥陶系,4 267.62 m发生井漏,4 268~4 269.4 m和4 270~4 271.6 m见异常扩径,反映可能有较大的溶蚀缝洞存在。测井解释的储集层也有上多下少的现象。物性分析表明,在4 400 m处有一明显界限,推测应为风化溶蚀的底界(图1)。

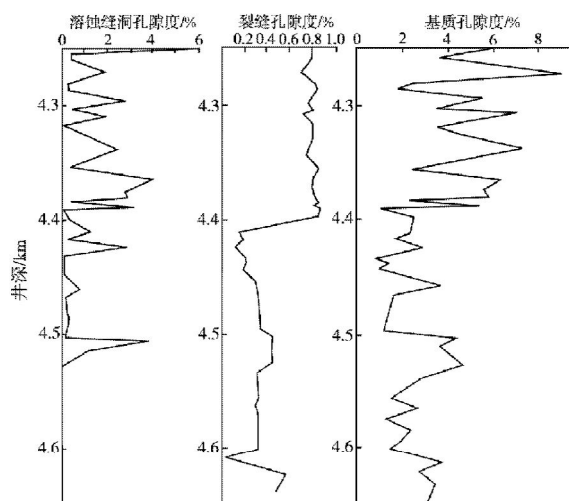


图1 板深7井潜山顶部风化段底界划分图

Fig.1 Bottom boundary of weathered interval on top of buried hill in Banshen 7 well

平面上,从板深703井经过千12-18井至板深7井处,即位于潜山地形高部位,存在一有效厚度高值带,厚约80~100 m,走向大致北东向,向北西及南东两侧变薄。测井解释总孔隙度高值带与有效厚度变化趋势基本一致^[6]。

2 岩溶机理

根据碳酸盐岩岩溶理论^[7],结合黄骅拗陷周围露头区奥陶系碳酸盐岩岩溶现象的观察,认为影响该层系岩溶作用强度及岩溶组合形态的因素主要有以下几个方面。

(1) 岩性及其叠置关系影响岩溶的形态组合特征。裸露环境下,灰岩岩溶化强度高于白云岩,因此灰岩有利于形成较大规模的洞穴,而白云岩的溶蚀一般沿晶间隙扩展,常形成“整体”溶蚀。石膏夹层的存在及其膏溶作用对岩溶发育有很大促进作用,并产生丰富的岩溶现象。

(2) 大排量或短距离流动的大气水是岩溶发育的必要条件。裂缝是大气水进入可溶岩层的重要通道,裂缝发育级别和密度直接影响水流交替作用的强度^[8]。

(3) 不同化学组分的水相混合,以及水中含有各种酸的成分,均可显著提高碳酸盐岩的溶蚀速率。低含盐度水具有小的离子强度,水中化学组分活性较大,当与处于水岩平衡状态的地层水(一般含盐度较高)混合时,化学组分的活性增强,导致溶蚀能力提高。随着水中CO₂分压的升高,方解石溶解度的增高比白云石大得多,从而加剧了二者的差异溶蚀。

(4) 溶蚀周期对岩溶作用的充分发展至关重要。构造抬升过快或剥蚀作用十分强烈的地区,岩溶作用一般不太发育。观察发现,在奥陶系出露但未遭受剥蚀的地区(石炭-二叠系还未剥蚀干净),奥陶系的溶洞非常发育。

(5) 成岩作用中的白云岩化作用、重结晶作用及去白云岩化作用均有利于岩溶发育。

(6) 水动力转换带,如裸露区和浅埋藏带之间的过渡带,有利于岩溶作用的发展。岩溶水流从较大水力梯度向较小水力梯度转化,在埋藏区一侧产生回流,形成较强的水流交换,使岩溶化增强。

3 岩溶发育模式

尽管千米桥地区在晚加里东-早海西期也经

历了一次时间长达120 Ma的裸露岩溶,但当时的构造运动以升降为主,断裂不发育,古侵蚀地形相对高差较小,碳酸盐岩大片连续裸露分布,因此在相当大的范围内岩溶形态组合变化不大。

千米桥地区在印支-早燕山运动期间,由于挤压逆冲作用的影响,断裂构造发育,使地表淡水更易于向深部渗漏,而且由于地形总体高差较大,水流冲刷作用显著,加之褶皱作用进一步增加了局部地形的变化幅度,形成了溶蚀作用强烈的溶丘-洼地型岩溶地貌。其溶丘与洼地的相对高差最大可达300~400 m(图2),具有西北高、东南低和洼地深度较大、丘峰平缓的特点,类似于现代贵州岩溶高原区至湘西岩溶丘陵区过渡带的岩溶地貌景观^[9]。板深7井溶丘和东部溶梁构成一局部小分水岭,南侧形成一个地表水和地下水向南运动的浅部岩溶水系统,北侧地下水则由西向东运动。由于千米桥地区以北还有地形更高的裸露区域,来自北部的地表、地下水向南径流,进入该区以南的浅-中深埋藏区,形成了具有统一流场的开放-半开放岩溶系统。

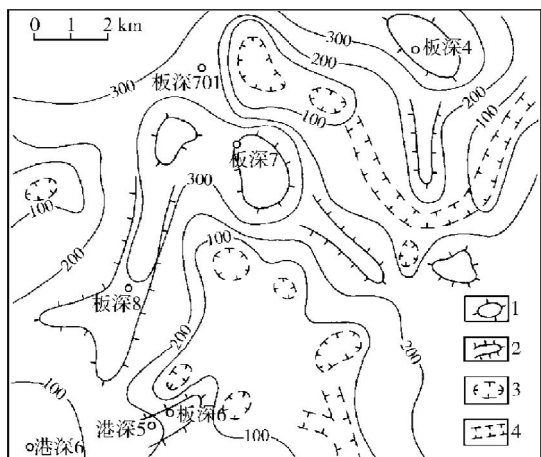


图2 千米桥地区 J₃-K₁ 沉积前古岩溶地貌及相对高度等值线图(单位:m)

Fig. 2 Paleokarst feature and contour of relative height prior to deposition of J₃-K₁ in Qianmiqiao area
1—溶丘; 2—溶梁; 3—洼地; 4—沟谷

参照相似岩溶地貌区的研究成果*, 溶丘、溶梁地区岩溶地下水位变化幅度较大, 一般为30~50 m, 水力梯度约2.2%~6.8%, 舒缓背斜分馏区垂直淋滤岩溶带发育深度一般可达50~100 m。在

岩性变化段,可形成厚度几米至几十米的似层状水平溶蚀段,发育顺层溶缝、溶孔,局部形成小规模岩溶管道、溶洞。地下水位以下,在灰岩段形成层间溶缝和顺层斜交溶缝,向洼地方向形成细小的分枝岩溶管道,在白云岩段发育溶孔;另一方面在构造破碎带和大型节理裂隙带,顺其延伸方向形成向深部发育的不规则网状溶缝带,局部形成较大溶洞。在洼地或洼地边缘形成落水洞、竖井和管道系统。

受构造、地层岩性组合和水动力条件的影响与控制,千米桥地区形成的表层岩溶带和垂直淋滤岩溶带厚度较大^[10]。水平岩溶带可进一步划分为径流岩溶亚带、渗流岩溶亚带、缓流岩溶带和滞留沉淀带(图3)。存在浅部循环和深部循环两种方式,形成了较为复杂的、非均一性较强的岩溶空间格局。溶丘、溶梁部位岩溶化较强,发育深度较大。受地下水位和水力梯度的控制,垂直渗流岩溶带厚度变化较大,一般50~150 m;水平径流岩溶亚带在地下水面附近,岩溶管道发育,厚度一般40~60 m,下游区局部形成微承压管道水流;水平渗流岩溶亚带以层间溶隙、溶缝为主;缓流带岩溶发育较弱,以微溶蚀裂隙为主,少量孔缝。水流缓慢向南部洼地运动,局部存在碳酸盐矿物的沉淀充填;滞留带保持较高的静水压力,溶蚀作用基本停止,水对矿物的饱和程度较高,普遍产生沉淀充填。

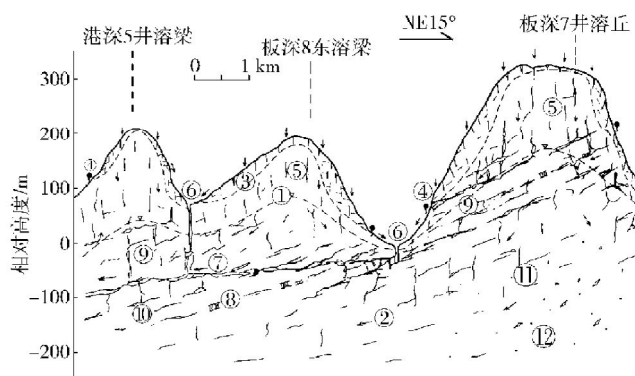


图3 千米桥地区溶丘(梁)洼地型岩溶发育模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram showing karst development mode of haystack hill-hollow type in Qianmiqiao area

①—地下水位; ②—地下水流向; ③—表层岩溶带; ④—季节性泉水; ⑤—垂直淋滤带; ⑥—落水洞; ⑦—地下水河; ⑧—膏溶; ⑨—水平径流带溶洞(管道); ⑩—水平渗流带溶蚀孔缝; ⑪—缓流带溶孔、微溶缝; ⑫—滞留沉淀带

* 高道德, 张世从. 贵州省黔南地区岩溶发育规律研究. 1986

4 成岩序列与孔隙演化

为了深入剖析深埋藏岩溶的成因机制及其对孔隙形成演化的控制作用, 采用了阴极发光显微镜、流体包裹体分析及微区取样技术。阴极发光用于区分碳酸盐岩缝洞内胶结物的形成期次, 微区取样用于对阴极发光区分开的各期胶结物进行纯方解石或白云石的碳、氧同位素等项分析^[11]。

研究表明, 在奥陶系沉积并经历了晚加里东-早海西期的裸露以后, 千米桥地区共鉴别出 6 期控制储层孔隙演化的胶结事件(图 4)。

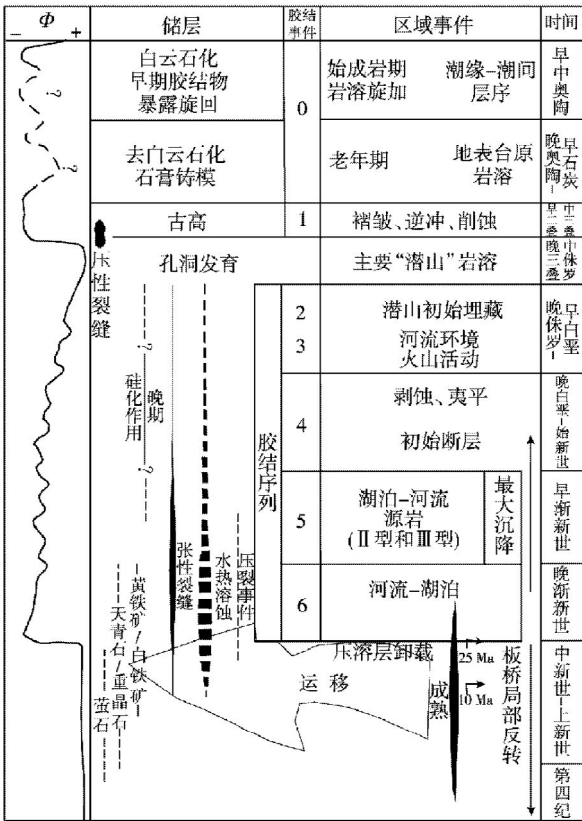


图 4 千米桥潜山奥陶系储层孔隙演化模式图

Fig. 4 Pattern showing pore evolution in Ordovician reservoirs in Qianmiqiao buried hill

第一期方解石把裂缝充填成直的壁面, 通常受到剪切应力和重结晶的影响, 说明此期方解石沉淀期间或之后有构造应力场的变化。该期胶结物代表中生代的挤压事件。但该期方解石以裂隙充填为特征, 任何残留的孔隙都可能因机械压实、剪切和重结晶作用而被破坏。胶结事件后发生了印支-早燕山期裸露岩溶, 奥陶系碳酸盐岩孔隙明显增大。

第二期胶结事件以岩溶洞穴和通道的发育为特征, 对先期裂缝或截切或增强, 但仅有少量胶结物以洞穴沉积物的形式保存下来, 结合前述千米桥构造演化史, 推测其形成时限应在奥陶系被上侏罗-下白垩统再次埋藏之后。

第三期胶结事件以独特流体介入为特征, 具体反映在第三期胶结物质上形成一层薄膜, 局部表现为岩溶孔洞的扩大(包括对第二期胶结物的截切), 据此推测该期胶结物形成于温度逐渐升高的局限岩溶含水层中(热液岩溶混合-岩浆活动), 其形成时限很可能是岩浆活动比较活跃的上侏罗-下白垩统沉积时期。

第四期胶结物代表了进一步埋藏条件下的热液岩溶, 或在较高温度下大气淡水与岩溶水混合作用的增强。储层性质在此期发生了重大变化, 主要是岩溶洞穴扩大, 局部发生了对前期胶结物的截切(张性断裂)。随后发生的胶结作用削减了大量新生成和继承孔隙, 很可能反映了千米桥地区构造反转和沉降。

第五期胶结事件同样反映了进一步埋藏条件下的热液岩溶, 或在较高温度下大气淡水与岩溶水混合作用的增强。其主要特征是强烈的压裂和水力压裂作用, 并影响了所有前期胶结物。该期事件可能与早渐新世的主要张性断裂和沉降有关, 从数量上看, 此期胶结物没有第四期重要, 因而在储层中保存了大量的前期岩溶孔隙。

第六期胶结事件反映了在温度不断升高、张性断裂发育、孔洞扩大和方解石胶结作用(第六期)情况下, 储层进一步深埋。有证据表明, 所有前期胶结物均被截切、碳酸盐岩遭受溶解。该期胶结物包含了多个溶蚀-微角砾化-内沉积作用和重复胶结作用亚阶段, 也可能存在有机成因 CO₂ 的参与, 据此可间接地将此期事件限定在渐新世末-中新世早期。

萤石是研究样品中孔洞充填的最后一期胶结物, 与其伴生的还有黄铁矿/白铁矿、重晶石/天青石。在萤石形成之前有一次发生在深部的重要溶蚀事件, 特别是沿压溶作用发生的层位, 产生了一些次生孔隙, 并对残留孔隙(原生或次生)的连通产生重要作用。其溶蚀作用可能与有机酸分解形成的腐蚀性流体有关, 也可能与油气运移前细菌硫酸盐还原作用形成的 H₂S 有关。尽管萤石形成于此次溶蚀事件之后, 但并未使孔隙完全闭合。

萤石中烃包体的存在说明其形成于烃运移时期。

影响千米桥潜山奥陶系储层成岩序列的主要因素和特点是: ①奥陶系早期成岩和裸露; ②印支-早燕山期构造变形和裸露岩溶; ③持续深埋使大气淡水含水层逐渐被热液流体所取代, 产生热液岩溶; ④第三纪拉张过程中, 构造的脉动是多次水力压裂和胶结物溶蚀的主要原因, 由酸性流体引起的主要深埋藏岩溶事件发生在烃类运移之前。千米桥奥陶系储层演化的关键点是第六期胶结事件末期所发生的变化, 腐蚀性、温度稍低且具不同化学性质的流体, 在烃类到达之前或运移期间, 压溶面或任何前期组构都发生了较强的溶蚀, 并可利用或增强在中生代和古近纪发育的岩溶系统中的继承孔隙。由于前期各阶段所形成的孔隙, 在随后的胶结事件中大多被充填, 因而该期的溶蚀是形成现今储层孔隙系统的最关键时期, 但是早期成岩阶段残存的孔隙和裂缝(或组构), 有可能影响后期溶蚀流体的分布样式。

5 控制溶蚀孔洞分布的关键因素

5.1 古岩溶地貌

局部性的溶丘、溶梁部位岩溶化较强, 发育深度较大。从区域性的尺度分析, 由地形高低导致的地层剥蚀强度的差异, 同样对岩溶孔隙分布具有控制作用。在千米桥潜山范围内, 以板深4、板深701井为代表的北部区块, 由于古地形处于较高的部位, 奥陶系剥蚀最为强烈, 其溶蚀孔隙发育的层段仅局限于奥陶系内部沉积间断面或层序界面, 只有受这些沉积层序界面控制的后期成岩作用的痕迹, 没有发育明显的溶洞, 却含有丰富的萤石。以板深7、板深8、板深703等井为代表的中部区块, 奥陶系的剥蚀程度没有北部强烈, 其溶蚀孔隙发育的层段遍及整个奥陶系, 没有受到沉积层序界面的控制, 溶洞、角砾和晶洞都很丰富, 萤石比北部地区少。以板深6井为代表的南部区块, 奥陶系剥蚀程度最弱, 局部保留有石炭系盖层, 其溶蚀作用与中部非常相似, 也有丰富的角砾和溶洞。

5.2 内幕逆冲褶皱构造

印支-早燕山期, 千米桥潜山中中部区块形成裸露的背斜, 而北部和南部区块已被中生代盖层掩埋。此时奥陶系内部岩溶面(含晚加里东-早海西期台原岩溶系统)是一个局限(承压)岩溶系

统, 裸露的背斜成为局部大气淡水补给区(作为一个自生岩溶系统), 并和承压含水层发生广泛的混合, 从而有利于岩溶洞穴的发育。

在 J_3-K_1 沉积时期, 背斜被深埋在红层之下, 局限岩溶系统演变为热液岩溶系统, 补给-排泄区之间的水流循环及重新开启的裂缝, 对该岩溶系统有增强作用。

借助千米桥地区以外的补给区和异常高压, 始新世的构造反转进一步增强了热液岩溶系统, 这种模式一直持续到古近纪晚期-新近纪早期。来自邻接地区生油岩的压实释放水、来自深部并溶有大量 CO_2 的热流体, 均可被优先引入背斜部位, 这些流体具有高度腐蚀性并产生了大量孔隙, 同时对前期岩溶系统的残留孔隙也有扩容作用。尽管腐蚀性流体将影响整个地区的岩石(压溶的层位、胶结的裂缝、白云石嵌晶等), 但其作用主要集中在原有的构造圈闭(或新圈闭)内^{*}。

参 考 文 献

- 1 吴永平, 杨池银, 王喜双. 渤海湾盆地北部奥陶系潜山油气藏成藏组合及勘探技术[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(5): 1~4
- 2 冯增昭, 王英华, 张吉森, 等. 华北地台早古生代岩相古地理[M]. 北京: 地质出版社, 1990
- 3 漆家福, 杨池银, 王子煜, 等. 黄骅盆地孔西潜山前第三系基底内幕构造解释[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 30~34
- 4 陈清华, 刘池洋, 李琴, 等. 黄骅坳陷徐杨桥-黑龙村潜山带逆冲构造的发现及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 353~356
- 5 吴永平, 杨池银, 廖前进, 等. 黄骅坳陷深层油气藏形成条件与勘探潜力[A]. 见: 谯汉生. 中国东部深层石油勘探论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 110~152
- 6 李建英, 卢刚臣, 孔凡东, 等. 千米桥潜山奥陶系储层特征及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 367~371
- 7 Palmer A N. Geochemical models for the origin of macroscopic solution porosity in carbonate rocks[A]. In: Budd D A, Saller A H, Harris P M. Unconformities and porosity in carbonate strata[C]. AAPG Memoir, 1995, 63: 77~102
- 8 肖玉茹, 何峰煜, 孙义梅. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究——以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 75~80
- 9 袁道先. 中国西南部的岩溶及其与华北岩溶的对比[J]. 第四纪研究, 1992, 12(4): 352~361
- 10 徐国盛, 李国蓉, 王志雄. 济阳坳陷下古生界潜山储集体特征[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 248~251
- 11 顾乔元, 杨威, 王清华, 等. 和田河气田奥陶系碳酸盐岩成岩作用及孔隙演化[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(4): 390~395

* Esteban M, Qing Sun S. Carbonate reservoir: how important is the late diagenesis? AAPG Annual Meeting March 10~13, 2002, Houston, Texas