

# 南堡凹陷周边寒武-奥陶系碳酸盐岩 储层特征及成岩作用

成永生<sup>1</sup>, 陈松岭<sup>1,2</sup>, 王 海<sup>2,3</sup>, 藏 锋<sup>3</sup>, 易龙生<sup>2</sup>

(1. 中南大学 信息物理工程学院, 长沙 410083;  
2. 中南大学 地学与环境工程学院, 长沙 410083;  
3. 中国石油 冀东油田公司, 河北 唐山 063004)

**摘 要:** 基于大量的薄片及岩心观察, 运用电镜扫描、X 射线衍射、物性分析、铸体压汞等手段, 对寒武-奥陶系碳酸盐岩储层进行了研究, 探讨了成岩作用特征及孔隙演化模式。表明灰岩和白云岩为碳酸盐岩储层的主要岩石类型, 以孔、缝、洞为主要储集空间, 由于受连通性以及充填作用的影响, 构造裂缝的储集性能更为优越。储层基质孔隙差, 白云石化作用、溶蚀作用、压实和压溶作用、胶结及充填作用以及构造作用为区内主要的成岩作用类型。碳酸盐岩孔隙演化主要经历了两个阶段: 早期原生孔隙形成与收缩阶段、中晚期的次生缝、孔、洞发育与充填阶段; 早期碳酸盐岩沉积时孔隙大, 经初期成岩和埋藏后, 失去了主要孔渗性能; 中晚期的次生缝、孔、洞十分发育, 但充填严重, 晚期的构造缝及溶蚀孔、洞被部分保存。

**关键词:** 成岩作用; 储层; 孔隙演化; 碳酸盐岩; 南堡凹陷

中图分类号: P618.13; P588.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-1412(2008)03-0230-06

## 0 引言

南堡凹陷为中生代开始发育的含油气凹陷, 位于华北板块北部, 系黄骅拗陷内的次一级负向构造单元, 是黄骅拗陷东北部的的主要生油凹陷<sup>[1]</sup>。南堡凹陷周边主要发育有西河凸起、涧河凹陷、老王庄一落潮湾凸起、西南庄一柏各庄凸起、马头营凸起、石臼坨凹陷、乐亭凹陷及姜各庄凸起(图 1), 分布有西河潜山、老王庄潜山、西南庄一柏各庄潜山、马头营潜山和姜各庄潜山等 5 个潜山带。

根据对岩心资料和岩石薄片的观察, 结合大量电镜扫描、X 射线衍射、物性分析、铸体压汞等实验分析资料, 探讨了南堡凹陷周边地区寒武-奥陶系碳酸盐岩储层的特性, 揭示了成岩作用与孔隙演化之间的关系。



图 1 南堡凹陷周边地区构造区块划分  
Fig. 1 Tectonic block division in the peripheral of Nanpu sag

## 1 储层特征分析

### 1.1 储层岩石类型

收稿日期: 2007-04-30

基金项目: 中国石油冀东油田公司科技项目(研 2005-3)资助。

作者简介: 成永生(1979), 男, 江西九江人, 博士, 地质资源与地质工程专业。通信地址: 湖南省长沙市中南大学校本部信息物理工程学院邮政, 编码: 410083, E-mail: cys968@163.com

寒武-奥陶系碳酸盐岩主要发育有灰岩和白云岩两种岩石类型。

(1) 灰岩主要为泥晶结构、细晶结构、鲕状结构以及内碎屑结构, 层状构造、缝合线构造及条带状构造, 主要由方解石、白云石、泥质、黄铁矿、海绿石、绢云母等组成。方解石常呈泥晶、亮晶、方解石脉或溶蚀方解石脉, 含量 55%~97%, 颗粒小于 0.005 mm; 白云石为自形-半自形粒状, 呈浸染状分布或呈不规则条带状沿缝合线构造交代泥晶方解石, 或呈团包状集中分布, 颗粒大小 0.08~0.12 mm; 黄铁矿主要呈细粒状集合体浸染状分布或与泥质一起构成微脉沿裂隙断续分布; 泥质主要呈显微细脉不规则断续分布, 或呈细微条纹分布于泥晶方解石裂隙中, 或呈浸染状分布于泥晶方解石粒间。

(2) 白云岩主要为泥晶结构、层状构造, 由白云石、方解石、泥质、黄铁矿等组成。白云石主要呈泥晶产出, 少量细晶, 为自形-半自形粒状, 含量 74%~99%, 常被方解石胶结, 局部可出现白云石在方解石泥晶中呈浸染状分布; 方解石主要为泥晶状产出, 含量 0.5%~19%; 泥质主要呈显微细脉状与黄铁矿一起沿缝合线裂隙发育, 或呈细微脉分布和浸染状分布。

## 1.2 储集空间类型

(1) 孔隙。主要有晶内溶孔、粒内溶孔及晶间孔 3 种类型。晶内溶孔约 1~3  $\mu\text{m}$ , 府君山组岩石中较为发育; 粒内溶孔一般为 1~2  $\mu\text{m}$  或 1~3  $\mu\text{m}$ , 个别达 1~6  $\mu\text{m}$ , 扫描电镜显示冶里组、崮山组以及下马家沟组中发育有该类孔隙; 晶间孔极不发育, 说明碳酸盐岩基质孔隙度低。

(2) 裂缝。岩心观察发现, 碳酸盐岩储层中裂缝较发育, 其中以倾角 > 70° 的高角度裂缝为主, 其次为低角度裂缝, 水平或近水平的裂缝较少, 少数岩心中发育有网状的密集细小裂缝。裂缝充填相当严重, 通过对 10 口井的碳酸盐岩岩心段裂缝进行统计表明, 全充填缝占 81.9%, 半充填裂缝仅占 6.3%, 而未充填裂缝占 11.8%。

铸体薄片鉴定结果显示, 裂缝的微观形态主要表现为构造缝、溶蚀缝、缝合线 3 种类型。对 11 口钻井岩心的 35 个样品进行铸体薄片鉴定显示, 共发育构造裂缝近 300 余条, 但绝大多数都被全充填, 少数被半充填, 充填物主要为方解石、泥质, 以及少量的黄铁矿、白云石以及硅质等; 而发育溶蚀缝 70 余条, 其中绝大多数为构造溶蚀缝, 且大部分被充填, 少量被半充填, 充填物以方解石为主, 其次为泥质、

黄铁矿、白云石; 发育缝合线 70 余条, 大多被全充填, 少数被半充填, 充填物主要为泥质, 另见有机质充填现象。

(3) 洞穴。洞穴常常是岩溶发育的标志, 野外调研发现有较大的溶洞存在, 如府君山组中就见有较大的溶洞构造发育, 多个岩溶洞穴近似等间距分布, 溶洞大小相近, 其直径约为 0.5~2 m, 最大者直径可达 2.5 m, 多被泥质半充填-全充填, 溶洞发育于厚层灰岩中。

## 1.3 储层孔隙结构

压汞分析结果表明, 88% 的岩样进汞、退汞曲线均在高压值区才开始显现, 总体显示排驱压力大 (均值为 8.7 MPa)、汞饱和度低 (平均值 11.5%)、退汞效率高、孔喉小, 大部分孔喉直径 < 0.05  $\mu\text{m}$ , 最高汞饱和度 36.1%, 平均孔隙度为 2.17%, 93% 的样品渗透率 <  $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 最大渗透率为  $6.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 反映基质孔喉微小, 属微细喉型孔隙结构。另有约 12% 的岩样进汞曲线在较高压力值 (> 3 MPa) 才开始显现, 进汞速度较快, 无较大孔喉, 对渗透率的贡献主要为较小的孔喉。孔喉大多 < 0.25  $\mu\text{m}$ , 分选性相对较好, 存在有可供流体渗流的孔隙。

## 1.4 储层储集物性

经物性分析显示, 岩石孔隙度为 0.42%~4.4%, 77% 的岩样孔隙度低于 1.5%, 平均孔隙度为 1.247%, 渗透率为  $0.004 \times 10^{-3} \sim 0.658 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 30 个样品中有 20 个样品的渗透率低于  $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 平均渗透率为  $0.037 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩心样分析表明, 崮山组平均孔隙度最高 (1.62%), 其次为府君山组 (1.0375%), 其余各组地层的有效孔隙度均低于 1%, 因此, 多数地层被定为低孔特低渗或特低孔特低渗型储层。

## 2 主要成岩作用类型

南堡凹陷周边地区寒武-奥陶系碳酸盐岩经历了多种成岩作用, 其中白云石化作用、溶蚀作用、压溶作用、构造作用为建设性成岩作用<sup>[2-7]</sup>。

### 2.1 白云石化作用

白云岩化是碳酸盐岩较常见的成岩作用, 区内白云岩或灰质(含灰)白云岩不甚发育, 主要分布于寒武系的府君山组、馒头组, 奥陶系的亮甲山组、下马家沟组、上马家沟组等, 镜下观察发现白云岩化主

要发生在准同生白云岩化阶段,其典型特征为泥-微晶白云岩,晶体大小一般为泥晶或粉晶级,局部含有少量的自形-半自形粒状浸染分布的细晶白云岩,自形程度差,晶间微孔较发育,并含有针状或板条状石膏假晶,常有泥质和黄铁矿充填。白云岩成层性较好,区域分布较稳定。白云岩未经过晚期深埋藏白云石化,白云石晶形较差,晶粒细,晶间孔欠发育。

## 2.2 溶蚀作用

溶蚀作用常导致孔、洞的大量发育<sup>[8-12]</sup>,区内该类成岩作用也相当发育(图2,图3,图4),由于印支期地壳整体抬升,表生成岩作用占据主导地位,如N8孔于2 133.75~2 136.00 m段角砾状混杂堆积的灰白云质灰岩表面溶蚀孔洞较发育。岩心观察发现,方解石充填物中常可见有溶蚀孔、洞发育,如N33孔于1 826.27 m奥陶系下马家沟组岩心表面见有方解石充填物的溶蚀孔洞,洞径约3 mm × 6 mm,肉红色灰岩边缘还见溶蚀形成的港湾状。

扫描电镜显示,碳酸盐岩粒内溶孔普遍发育,11个样品中发现有7个样品发育有粒内溶孔,其大小约1~3 μm,最大者约1~6 μm。除了粒内溶孔普遍发育以外,还发育有较多的晶间溶孔,其大小约1~2 μm。这些经溶蚀形成的粒内溶孔以及晶间溶孔常可作为油气的有利储集空间,但孔隙之间的连通性制约着其对油气的储集能力。

铸体研究发现,35个岩石样品共发育溶蚀缝80余条,基本被方解石、泥质、白云石以及黄铁矿等全充填,缝宽大小不等,其中有75%的缝宽约5~1 000 μm,25%的缝宽为30~3 500 μm。

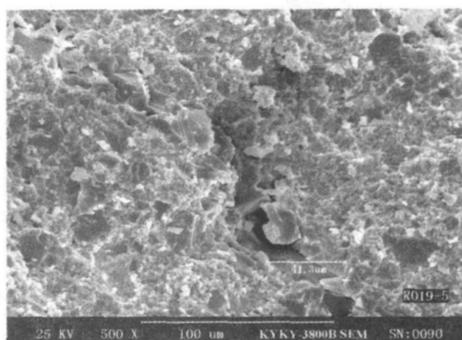


图3 泥晶灰岩中发育的溶蚀缝  
Fig. 3 The corroded fissures in micritic limestone  
缝宽0.04mm左右,缝内充填有方解石

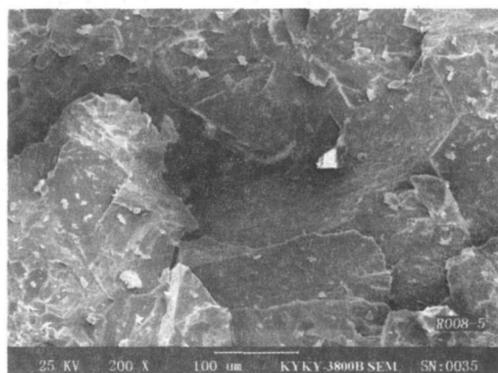


图4 灰岩中发育的晶间溶蚀孔  
Fig. 4 Intercrystal corrosion pores in limestone

加里东期和海西晚期的,地壳沉降导致上覆压力增大,岩石不断被压实(图5,图6),当压力增大到一定程度时,岩石中水被挤压、流动,并对其周边岩石进行溶蚀。

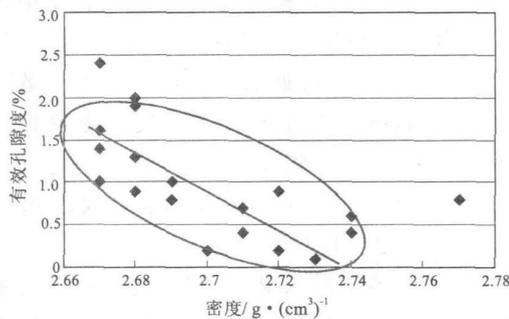


图5 灰岩有效孔隙度与密度关系

Fig. 5 Relation of valid porosity to density of limestone

岩心观察常见有缝合线呈不规则港湾状产出,大多被泥质全充填,少数被有机质充填。铸体分析发现,35个样品共发育有缝合线63条,平均每个样

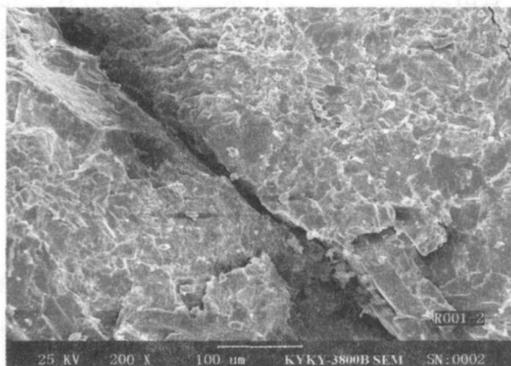


图2 细晶白云岩中的溶蚀缝

Fig. 2 The corroded fissures in aplitic dolomite  
缝宽0.03mm左右,缝内基本未被充填

## 2.3 压实和压溶作用

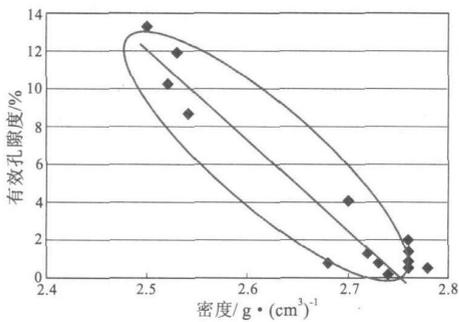


图 6 白云岩有效孔隙度与密度关系

Fig. 6 Relation of valid porosity to density of dolomite

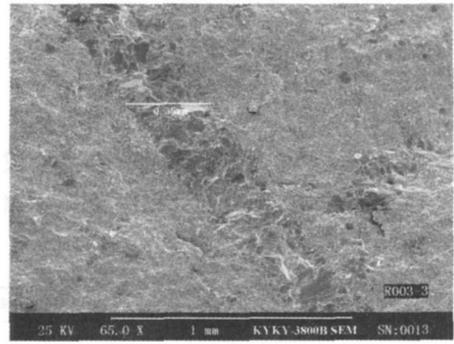


图 8 泥晶灰岩中的构造缝

Fig. 8 Structural suture in micritic limestone  
缝宽 0.35mm 左右, 被方解石充填完全

品发育近有 2 条, 其中 95% 以上的缝合线被泥质全充填, 极少数为半充填, 缝合线宽约 5~110  $\mu\text{m}$ , 个别可达 5~200  $\mu\text{m}$ 。

#### 2.4 胶结及充填作用

胶结与充填常常相伴生, 薄片鉴定发现, 方解石是一种常见的胶结物(图 7), 常常对半自形-自形白云石进行胶结, 少量的粘土矿物充填胶结于晶间及微裂隙中。充填物质以方解石、泥质、黄铁矿、硅质以及有机质等为主(图 8)。野外所见到的溶洞构造以及钻遇到的洞穴层都有被充填现象。岩心中裂缝绝大部分被充填, 特别是早期缝的充填物以方解石和泥质为主, 部分为硅质及有机质, 其中高角度裂缝充填现象尤为显著。经岩心薄片镜下鉴定, 约有 78% 的裂缝被全充填, 19% 的裂缝被半充填, 仅有 3% 左右的裂缝未被充填; 充填物以方解石和泥质为主, 少量充填有黄铁矿和有机质。

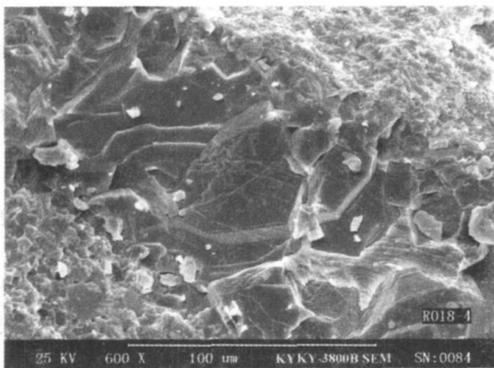


图 7 泥晶颗粒灰岩中的亮晶方解石胶结物, 亮晶方解石具晶粒结构

Fig. 7 Sparitic granular calcite cementing in micritic limestone

#### 2.5 构造作用

构造裂缝具有控制和促进岩溶作用发育的特

点, 可与溶蚀孔洞复合, 构成各类缝洞型储层, 成为油气储集的主要空间。区内构造裂缝发育以海西早期、海西晚期为主, 其次为加里东期, 再次为印支-燕山期等。在对 35 个岩石样品的铸体研究发现, 共发育有构造缝 152 条, 构造溶蚀缝 78 条, 在 152 条构造缝中有 26% 被半充填, 充填物为方解石、泥质以及白云石等, 极少数裂缝未被充填, 裂缝宽度一般 < 500  $\mu\text{m}$ , 但个别可达 1 000~3 500  $\mu\text{m}$ 。从裂缝的充填程度来看, 构造裂缝有相当部分为未充填-半充填, 连通性较好, 常常形成错综复杂的网脉状裂缝系统, 比较于溶蚀孔、洞而言, 构造裂缝对油气的储集条件更为有利, 应为区内碳酸盐岩储层的主要储集空间。

由于印支期地层暴露地表, 裂缝在此期间充填严重, 因此, 将印支期之前包括加里东期、海西期以及印支期称为早期裂缝形成期, 印支期之后称为晚期裂缝形成期。

早期构造裂缝基本被完全充填, 充填物以方解石为主, 另有泥质、有机质等, 裂缝以高角度的宽缝为主, 最宽者可达 1 cm 以上, 受印支期充填作用显著。该期另有少量的微细裂缝, 一般未充填-半充填, 对油气的聚集有贡献意义, 岩心观察发现, 在这些裂缝周边偶有油斑或油迹。

晚期构造裂缝形成以后地层处于埋藏状态, 裂缝充填性不强, 较早期裂缝而言, 裂缝一般较细小, 常发育有网状的密集微细裂缝, 半充填, 充填物质仍以方解石为主。与断裂伴生明显, 具组成带展布特点。

除上述主要成岩作用以外, 寒武-奥陶系碳酸盐岩还发生了重结晶作用、交代作用等成岩变化, 对碳酸盐岩储层的改造同样具有意义。

### 3 孔隙形成与演化模式

依据本区碳酸盐岩所经历的成岩阶段、成岩环境及相应的成岩作用(图9),可将碳酸盐岩储层孔隙演化分为两个阶段<sup>[13-15]</sup>。

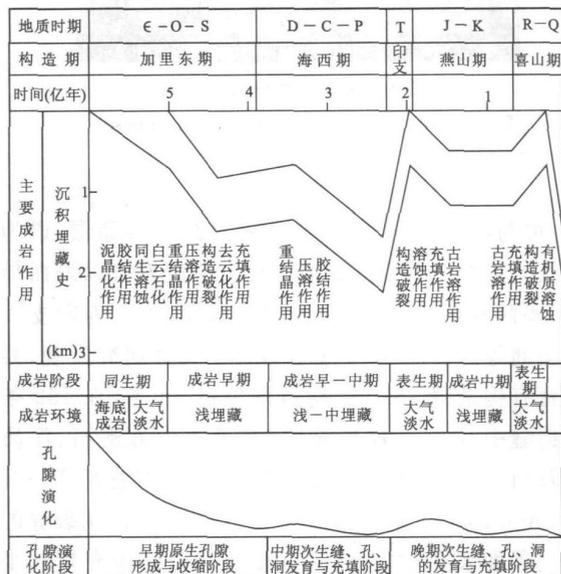


图9 南堡凹陷周边寒武系碳酸盐岩储层孔隙形成与演化模式

Fig.9 The formation and evolution model of pores in the carbonate reservoirs in peripheral of Nanpu sing

#### 3.1 早期原生孔隙形成与收缩阶段

同生期成岩阶段,碳酸盐岩边沉积边成岩,成岩作用类型有泥晶化作用、胶结作用、同生溶蚀、白云岩化作用、重结晶作用等,一方面原始沉积物中的孔隙大量收缩,同时又形成许多新生孔隙,使岩石仍保持有较大的孔隙空间,孔隙类型主要为粒间孔、晶间孔、早期溶孔等。进入成岩早期,埋深逐渐加大,受上覆载荷作用,碳酸盐岩又经历了强烈的压实压溶作用、早期胶结充填作用以及白云岩化作用等,使岩石中的原生孔隙基本丧失,孔隙度急剧降低,仅保留有粒间溶孔、晶间溶孔、缝合线及少量晶间孔。

#### 3.2 中晚期次生缝、孔、洞的发育与充填阶段

海西、印支、燕山及喜马拉雅运动造成地壳的升降变化,总体以抬升为主,使寒武-奥陶系碳酸盐岩长期遭受强烈剥蚀,处于表生大气淡水环境,发生了多期古岩溶作用,在不整合面之下的一定深度范围内,形成大小不一的各种溶蚀缝、孔、洞系统。同时,

与挤压、抬升相伴随的破裂作用在碳酸盐岩内形成了规模不等的裂缝系统。由于卸载原因,早期形成的缝合线开启,对增加储集空间有所贡献。受上述因素的共同影响,形成了一系列次生缝、孔、洞系统,极大地改善了碳酸盐岩的储集条件。

### 4 结论

(1) 灰岩、白云岩为碳酸盐岩储层的主要岩石类型,以孔、缝、洞为储集空间,其中裂缝以及洞穴对油气的贡献更大。

(2) 白云石化作用、溶蚀作用、压实和压溶作用、胶结及充填作用以及构造作用为主要的成岩作用类型。

(3) 碳酸盐岩孔隙演化经历了早期原生孔隙形成与收缩、中晚期的次生缝、孔、洞发育与充填等两个阶段。

(4) 碳酸盐岩溶蚀孔洞相对比较孤立、连通性差且充填较严重,而晚期的次生缝、孔、洞系统极大地改善了碳酸盐岩的储集性能。

致谢: 论文编写参阅了中国石油冀东油田相关资料,特此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 曹守连. 南堡凹陷断裂带构造演化及成藏条件分析[J]. 断块油气田, 1997, 4(2): 13-16.
- [2] 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.
- [3] 王一刚, 文应初, 刘志坚. 川东石炭系碳酸盐岩储层孔隙演化中的古岩溶和埋藏溶解作用[J]. 天然气工业, 1996, 16(6): 18-22.
- [4] 陈学时, 易万霞, 卢文忠. 中国油气田古岩溶与油气储层[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 244-253.
- [5] 姚合法, 张绪教, 王生朗, 等. 东濮凹陷及其邻区下古生界碳酸盐岩储集层特征及其控制因素分析[J]. 现代地质, 2000, 14(2): 191-196.
- [6] 韩宝平, 陈锁忠, 冯启言. 任丘油田古潜山储集孔隙特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 1997, 26(2): 46-51.
- [7] 苏立萍, 罗平, 胡社荣, 等. 苏桥潜山带奥陶系碳酸盐岩储集层研究[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 54-57.
- [8] 陈恭洋, 何鲜, 陶自强, 等. 千米桥潜山碳酸盐岩古岩溶特征及储层评价[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 375-379.
- [9] 姜平, 王建华. 大港地区千米桥潜山奥陶系古岩溶研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 50-53.

- [10] 夏日元,唐健生. 黄骅拗陷奥陶系古岩溶发育演化模式[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 51-53.
- [11] 韩宝平,刘仁达,罗承建,等. 岩溶作用对任丘古潜山碳酸盐岩油藏赋存的控制作用[J]. 中国岩溶, 1998, 17(1): 75-80.
- [12] 李振宏,郑聪斌. 古岩溶演化过程及对油气储集空间的影响——以鄂尔多斯盆地奥陶系为例[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3): 247-252.
- [13] 杨池银,武站国. 千米桥潜山奥陶系碳酸盐岩储层成岩作用与孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 319-323.
- [14] 翟永红,郭建华,刘生国. 塔中地区石炭系碳酸盐岩成岩作用与储层评价[J]. 江汉石油学院学报, 1995, 17(3): 13-18.
- [15] 游国庆,潘家华,刘淑琴,等. 东营凹陷古近系砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(3): 237-242.

## FEATURES AND DIAGENESIS OF CAMBRIAN-ORDOVICIAN CARBONATE IN PERIPHERAL OF NANPU SAG

CHENG Yong-sheng<sup>1</sup>, CHEN Song-ling<sup>1,2</sup>, WANG Hai<sup>2,3</sup>, ZANG Feng<sup>3</sup>, YI Long-sheng<sup>2</sup>

(1. School of Infraphysics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Jidong Oilfield Company of China Petroleum, Tangshan 063004, Hebei, China)

**Abstract:** Based on thin section and core, scanning electron microscope, X-ray diffraction, physical property analysis, casting section, Cambrian-Ordovician carbonate reservoir was studied, and the diagenesis and the porosity evolution pattern were discussed. It suggests that the main rock types of carbonate include limestone and dolomite. The primary reservoir space consists of hole, fissure and cave. As for the connectivity and filling, structural fracture is favorable for hydrocarbon accumulation. In this zone it is characterized by the lower matrix porosity for carbonate, which experienced many diagenesis stages, such as dolomitization, dissolution, compaction and pressure solution, cementation, filling, fracturing. Porosity evolution of Cambrian-Ordovician carbonate involves two stages, including porosity formation and shrinkage in the early stage, secondary fissure-hole-cave developing and filling in middle period and late stage. In early stage carbonate is characterized by big hole, but after the initial diagenesis and burial it loses most of the permeability. Yet in middle period and in late stage the secondary fissure-hole-cave of carbonate develops well but is filled heavily, the late tectonic fracture and dissolved pores and holes are preserved partly.

**Key Words:** diagenesis; reservoir; porosity evolution; carbonate; Nanpu sag