

准噶尔盆地腹部超压顶面附近深层砂岩碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙形成机理

何生¹, 杨智^{1,2,5}, 何治亮^{3,5}, 武恒志^{4,5}, 王芙蓉^{1,5}, 孟闲龙^{3,5}

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国石化西南油气分公司, 四川成都 610051

5. 中国石化石油勘探开发研究院西部分院, 新疆乌鲁木齐 830011

摘要: 准噶尔盆地腹部深层超压顶面附近(现今埋深 4 400~6 200 m, 温度 105~145 °C)砂岩中广泛出现的碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙与超压流体活动关系密切。由于超压封闭和释放引起其顶面附近砂岩中的孔隙压力和水化学环境的周期性变化可导致碳酸盐沉淀和易溶矿物溶解过程交替出现。根据腹部地区超压顶面附近深埋砂岩成岩作用、碳酸盐胶结物含量、储集物性、碳酸盐胶结物碳、氧同位素和烃源岩热演化模拟等资料的综合研究表明:含铁碳酸盐胶结物是主要的胶结成分,长石类成分的次生溶蚀孔隙是主要的储集空间类型,纵向上深层砂岩碳酸盐胶结物出现 15%~30% 含量的地层厚度范围约在邻近超压顶面之下 100 m 至之上大于 450 m,碳酸盐胶结物出现大于 25% 含量高值带分布在靠近超压顶面向上的 250~300 m 的地层厚度范围,超压顶面附近砂岩中碳酸盐胶结物含量高值的深度范围也是次生溶蚀孔隙(孔隙度 10%~20%)发育带的范围;因晚白垩世以来深部侏罗纪煤系有机质生烃增压作用,导致在超压顶面附近砂岩晚成岩作用阶段深部富含碳酸盐的超压流体频繁活动,所形成的碳酸盐胶结物受到了明显的与深部生烃增压有关的超压热流体和有机脱羧作用的影响;超压流体多次通过超压顶面排放,使得超压顶面附近砂岩遭受了多期酸性流体溶蚀作用过程,形成了次生溶蚀孔隙发育带。

关键词: 碳酸盐胶结作用; 次生溶蚀孔隙; 超压顶面; 流体-岩石相互作用; 准噶尔盆地腹部。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2009)05-0759-10

收稿日期: 2008-12-11

Mechanism of Carbonate Cementation and Secondary Dissolution Porosity Formation in Deep-Burial Sandstones near the Top Overpressured Surface in Central Part of Junggar Basin

HE Sheng¹, YANG Zhi^{1,2,5}, HE Zhi-liang^{3,5}, WU Heng-zhi^{4,5}, WANG Fu-rong^{1,5}, MENG Xian-long^{3,5}

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences, Ministry of Education, Wuhan 430074, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China

4. Southwest Branch Company, SINOPEC, Chengdu 610051, China

5. West Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Urumqi 830011, China

Abstract: The carbonate cementation and secondary dissolution porosity in the deep-burial sandstones near the top overpressured surface (present-day depths: 4 400–6 200 m and temperatures: 105–145 °C) in the central part of Junggar Basin are intimately related to the overpressured fluid activities. Periodic decreases of pore pressures and changes of formation hydrochemical conditions as sealing and releasing of overpressures along the top overpressured surface can result the processes of carbonate precipitation and aluminosilicate dissolving in the sandstones. Based on the data of diagenesis, carbonate cement content, sand-

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20060491505); 国家自然科学基金重点资助项目(40739904); 国家科技重大专项项目(2008ZX05001); 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2008B-0100); 美国石油地质学家学会(AAPG)2007年优秀科研基金。

作者简介: 何生(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 从事油气地质方面的教学和科研工作。E-mail: shenghe@cug.edu.cn

stone property, carbon and oxygen isotope of carbonate cement, thermal maturity modeling of source rocks and so on, integrated studies indicate as follows: The ferroan carbonate cements are the dominated cements formed in the late diagenesis stage, and the feldspar-related secondary dissolved pores are the most important pore types in the deep-burial sandstone reservoirs. The thickness scopes are more than 550 m, occurring 100 m below the top overpressured surface and over 450 m above the surface, while the carbonate cement contents reach or exceed the values of 15% to 30%. The thickness intervals are 250–300 m above the top overpressured surface while the carbonate cement contents reach or exceed the values of 25%. The depth intervals of up to 10%–20% secondary dissolving porosity are concomitant with the depth ranges of relative high carbonate cement contents. Since the late Cretaceous, the carbonate-riched fluid flows have been produced frequently as the development of hydrocarbon generation pressures from the deep Jurassic coal-bearing strata, and the carbonate cements have been influenced evidently by the overpressured and thermal fluids, implying that the late-stage ferroan calcite carbon is partly originated from the organic-matter thermal degradation. The secondary porosity zones in the deep-burial sandstones near the top overpressured surface have been formed during the processes of acid-fluid expulsion and migration due to upward releases of overpressures along the diagenetic barrier associated with the top carbonate mineralization zones.

Key words: carbonate cementation; secondary dissolution porosity; top overpressured surface; fluid-rock interaction; central part of Jungar basin.

0 引言

砂岩中碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙的形成是决定深部储层物性的一个十分重要的因素, 在过去的 30 多年里针对这一问题, 许多学者从碳酸盐胶结和溶蚀反应机理、流体流动与物质迁移的时空关系、超压与成岩作用的关系、水—岩、有机—无机和砂岩—泥岩相互作用等方面开展了大量而较为深入的研究(Curtis, 1978; Surdam *et al.*, 1984; Surdam *et al.*, 1989; Hunt, 1990; Bjørlykke *et al.*, 1994; 李明诚, 1995; Lynch, 1996; 张枝焕等, 1998; Jonk *et al.*, 2005; 郝芳, 2005; 聂逢君等, 2005; 解习农等, 2006; Wilkinson *et al.*, 2006; 王芙蓉等, 2009). Hunt(1990)提出碎屑岩超压盆地中超压顶封层的形成与碳酸盐岩矿化作用有直接关系; Jansa *et al.* (1990)认为孔隙压力释放和降低有利于碳酸盐的胶结, 邻近常压系统的超压系统以及泻压带, 周期性的压力释放将导致 CO₂ 分压突然降低以及孔隙流体地球化学性质发生改变, 从而引起溶解在地层水中的碳酸盐沉淀; 在许多碎屑岩超压系统中, 次生溶蚀孔隙发育带可以出现在超压带之上的静水压力带, 超压顶封层中和超压仓内(Weedman *et al.*, 1996; 王勇等, 2006), 次生溶蚀孔隙常常是有利的储集带中最重要的储集空间类型(Jansa *et al.*, 1990; Weedman *et al.*, 1996; 钟大康等, 2003; 王勇等, 2006; 于炳松和赖兴运, 2006a). 前期的有关研究表明, 在准噶尔盆地腹部地区深层(深度大于 4 400 m)超压顶面附近高碳酸盐胶结物含量的侏罗—白垩系砂岩内存在次生溶蚀孔隙发育带(王芙蓉等, 2006),

有关该深层侏罗—白垩系砂岩储层的岩石学、成岩作用和储集特征、地层水化学、超压发育特征和形成机制等方面已开展了较多的研究工作(刘得光, 1998; 王震亮等, 2000; 张义杰, 2002; 王芙蓉等, 2006; 曹剑等, 2007; 谢小敏等, 2007; 焦养泉等, 2008; 杨智等, 2008; 何生等, 2009), 是进一步研究和探讨超压、碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙之间成因联系及地质作用过程的理想地区. 本文提出了超压顶面附近砂岩成岩作用、储集物性、碳酸盐胶结物含量和碳、氧同位素以及烃源岩埋藏热演化等方面新的观测证据, 集中探讨了准噶尔盆地腹部晚期超压(生烃增压)背景下超压顶面附近碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙的形成及分布, 进一步深化了准噶尔盆地腹部深层超压流体活动与砂岩成岩作用和有利次生溶蚀孔隙发育带的关系研究, 为认识碎屑岩超压盆地超压顶面附近碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙的形成机理提供了研究实例和进一步的研究依据.

1 地质和超压背景

准噶尔盆地位于新疆北部, 是我国大型含油气盆地之一. 盆地周围被褶皱山系环绕, 平面形状呈南宽北窄的近三角形, 面积为 $13.6 \times 10^4 \text{ km}^2$. 盆地基底具有前寒武结晶基底和中上元古界深变质岩相的双层结构, 是晚古生代—中新生的裂谷—前陆叠合盆地, 经历了海西、印支、燕山和喜山多期构造演化, 沉积岩最大厚度达 14 000 m. 研究区位于准噶尔盆地腹部主要包括中央拗陷的盆 1 井西凹陷和昌吉凹陷西段, 在矿权上属于中国石化的中部 1 区块和

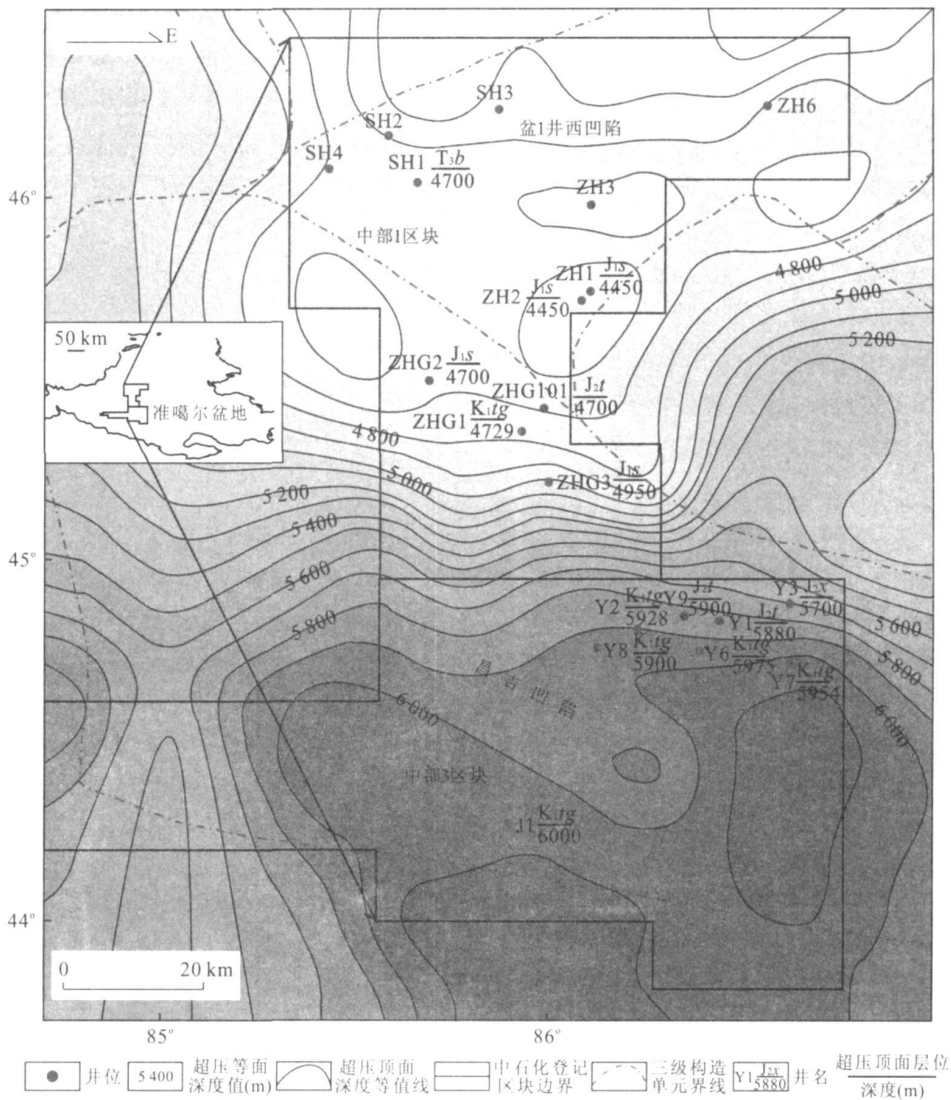


图 1 准噶尔盆地腹部超压顶面深度等值线以及典型钻井井位图

Fig. 1 A contour map of top overpressured surface and typical well locations in the central part of Junggar basin

3 区块 (图 1)。中晚侏罗世由于燕山 I、II 幕构造抬升, 盆地腹部曾形成一横贯中央拗陷东西的大型车莫古隆起, 晚侏罗世古隆起再次抬升剥蚀, 既而隐伏埋藏, 直至喜山运动消亡, 而盆地也成为一南倾的斜坡(李平平等, 2006; 武恒志等, 2006; 杨智等, 2008)。本区储集层为中下侏罗统和下白垩统河流—三角洲相砂岩, 目的层段埋藏深度大于 4 000 m, 经历了强烈的压实; 区内主要发育有二叠系和侏罗系两套烃源岩。侏罗纪煤系地层为八道湾组(J_{1b})、三工河组(J_{1s})和西山窑组(J_{2x}), 煤系烃源岩处于正常压实, 热演化程度中等, R_o 为 0.7%~1.3%, 其热演化生烃作用和超压顶部的成岩封闭导致了晚白垩世以来腹部侏罗系大范围的压力系数为 1.24~2.07 的超压状态(何生等, 2009)。

准噶尔盆地腹部普遍发育深层超压系统(深度大于 4 400 m), 许多钻井揭示了侏罗系的超压层, 并结合地震速度资料计算和绘制了超压顶面深度等值线图(图 1)(杨智等, 2008; 何生等, 2009), 超压顶面压力系数为 1.1~1.2。由图 1 可知, 腹部不同地区超压顶面的深度不同, 盆 1 井西凹陷为 4 400~4 700 m, 昌吉凹陷北部为 4 700~5 700 m, 昌吉凹陷南部为 5 700~6 200 m。超压顶面的深度随着侏罗系埋深的增加由北向南逐渐变深, 其顶面所在层位逐渐从侏罗系内部过渡到侏罗系顶部或白垩系底部, 超压带大多顺层分布, 只是在凹陷边缘和局部地区有穿层分布现象。

2 砂岩中碳酸盐胶结物特征

准噶尔盆地腹部深层侏罗—白垩系砂岩目的层储层埋深范围一般为 4 000 ~ 6 200 m, 砂岩类型主要为岩屑砂岩和长石岩屑砂岩, 岩屑成分以火成岩岩屑成分为主, 有少量变质岩岩屑。砂岩具有较低的成分成熟度和较高的结构成熟度。泥质杂基含量较低, 泥质总量多在 4% ~ 6% 之间。

砂岩成岩作用类型主要有压实溶蚀作用、胶结作用和溶解作用, 呈现出较强的非均质性。砂岩储层孔隙度一般在 10% 左右, 渗透率在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右, 本区高孔隙度砂岩含有原生和次生孔隙, 其中以次生溶蚀孔隙为主(图 2a), 溶蚀的物质包括长石(图 2b)

和碳酸盐胶结物以及石英、中酸性火山岩屑等, 较大的孔隙度和渗透率区间出现在次生溶蚀孔隙发育带内, 超压顶面附近砂岩的渗透率最大值可达约 $24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。超压顶面附近厚度数百米的地层范围为碳酸盐胶结物含量高值带, 可以占据整个孔隙和喉道(图 2c), 碳酸盐胶结物溶孔也有发育(图 2d)。

研究区深层砂岩碳酸盐胶结物是最主要的胶结成分, 其中以含铁质碳酸盐胶结物为主, 其对砂岩储集性能的影响也最大。阴极发光照片显示碳酸盐胶结是多期的(图 2e), 发桔红色光, 在孔隙的边缘与颗粒接触的地方, 主要是相对早期胶结形成的含铁方解石(Fe/Mn 值较高), 发亮黄色光, 其含量较少, 位于孔隙的中间, 也为含铁方解石(Mn/Fe 值较

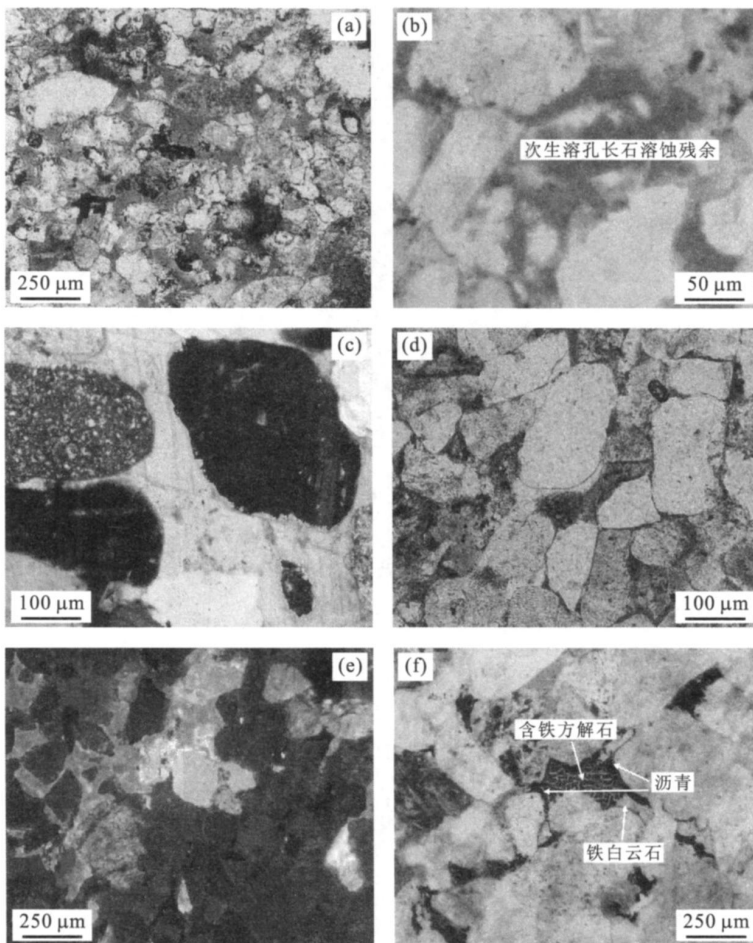


图 2 准噶尔盆地腹部砂岩碳酸盐胶结成岩作用显微照片

Fig. 2 Diagenesis micrograph of carbonate cements in sandstone in central part of Junggar basin
a. Y1 井, 5 877.34 m, J_{2t} 孔隙全貌, 主要发育粒间溶蚀孔隙, 铸体片, 10×4(-); b. Y1 井, 5 882 m, J_{2t} 长石溶蚀残余, 铸体片, 10×20(-); c. Y1 井, 5 876 m, J_{2t}, 连晶方解石占据孔隙和喉道, 10×10(+); d. Y1 井, 5 877.8 m, J_{2t} 方解石溶孔, 10×10(-); e. ZHG3 井, 5 109.56 m, J_{1s}, 多期含铁方解石胶结物, 阴极发光片, ×40; f. Y2 井, 5 966 m, J_{2t} 溶蚀孔隙为含铁方解石充填, 铁白云石交代含铁方解石, 孔隙边缘为沥青, 铸体片, 10×4(-)

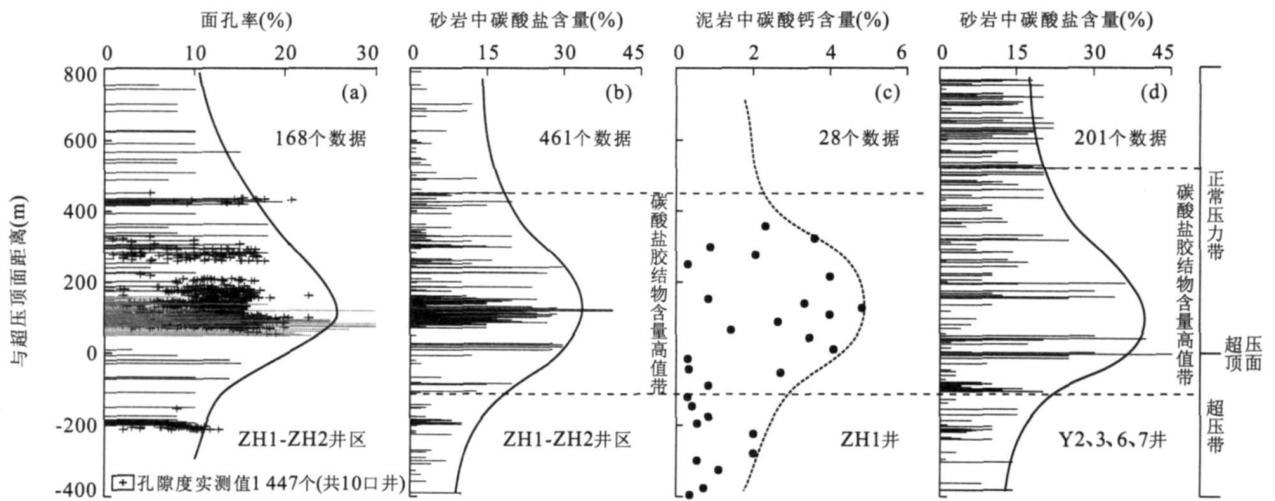


图 3 准噶尔盆地腹部不同井区超压顶面附近砂岩面孔率和碳酸盐胶结物含量以及泥岩碳酸钙含量图

Fig. 3 Graphs of mean porosities and carbonate cement contents in sandstones for the different well areas and calcium carbonate contents in mudstones for the well ZH1, near the top overpressured surface in the central part of Junggar basin

高), 主要是相对晚期的含铁方解石. 在薄片观察中, 含铁方解石有时呈连晶式发育(图 2c), 孔隙式胶结, 铸体薄片中环氧树脂经染色之后多为深红色(图 2f); 铁白云石单晶多呈菱形, 染色后多为天蓝色, 铁白云石多是交代铁方解石形成的(图 2f). 由此可以判断, 方解石、含铁方解石和铁白云石形成的先后顺序: 方解石→含铁方解石→铁白云石.

腹部 ZH1 和 ZH2 井区超压顶面深度约 4 450 m, 对埋深在 3 600 ~ 4 750 m 的钻井砂岩岩芯薄片观察、碳酸盐胶结物含量和孔隙度数据统计分析发现, 超压顶面附近砂岩碳酸盐胶结物高含量带大体与面孔率高值带范围相对应(图 3a 和图 3b), 进一步观察发现次生孔隙发育的范围碳酸盐胶结物含量低, 面孔率增加, 如腹部 ZH1—ZH2 井区, 超压顶面深度约为 4 450 m, 其上下几百米主要为侏罗系三工河组河流相砂泥岩互层沉积, 薄片统计资料显示, 垂向上这一地区发育有多个次生孔隙带. 超压顶面附近几百米地层厚度范围内出现砂岩中碳酸盐胶结物高值带, 碳酸盐胶结物含量可高达 30%, 而孔隙度在该带内也可高达 20%(图 3a 和图 3b). 图 3c 为 ZH1 井超压顶面附近泥岩样品原子吸收光谱测定结果, 相比较超压顶面之下超压带内泥岩中的碳酸钙含量(绝大多数在 2% 以内), 超压顶面之上泥岩中的碳酸钙含量相对偏高(大多为 2% ~ 5%). 图 3a 和图 3b 进一步可知, 腹部 ZH1—ZH2 井区超压顶面附近砂岩出现大于 15% 的碳酸盐胶结物含量带的地层厚度约为 550 m, 高值区间与超压顶面不对称, 范围从超压顶面之下 100 m

至之上 450 m, 砂岩中碳酸盐胶结物含量出现大于 25% 的高值区间位于靠近超压顶面向上约 250 m 的地层厚度范围, 统计砂岩大于 10% 的面孔率的地层厚度范围和分布特征具有相似性, 该范围出现多个面孔率高值带即次生溶蚀孔隙发育带. 说明该层段内碳酸盐胶结作用和溶蚀作用强烈, 胶结层和溶蚀带可能交互出现, 胶结和溶蚀作用过程具有内在联系.

图 3d 为腹部 Y2、3、6、7 井埋深在 4 900 ~ 6 350 m 砂岩岩芯薄片观察和在超压顶面(深度 5 700 ~ 6 000 m)上下碳酸盐胶结物含量统计分布情况, 超压顶面附近碳酸盐胶结物分布特征与 ZH1 和 ZH2 井区非常类似, 砂岩中碳酸盐胶结物含量出现大于 25% 的高值区间位于靠近超压顶面向上约 250 ~ 300 m 的地层厚度范围; 但在超压顶面以上砂岩出现大于 15% 的碳酸盐胶结物含量带的地层厚度超过 600 m, 出现大于 20% 的碳酸盐胶结物含量的地层厚度约为 600 m, 范围从超压顶面之下 100 m 至之上约 550 m, 砂岩中碳酸盐岩胶结物含量相对于 ZH1 和 ZH2 井区明显偏高, 这可能由于在超压系统埋深和地温不断增加、侏罗系烃源岩成熟度和生烃量也不断增加的过程中, 影响范围更大的富含碳酸盐的强超压流体向超压顶面附近和超压顶面之上常压系统排放、转移、物质迁移和胶结的结果.

3 超压顶面附近碳酸盐胶结作用机理探讨

(1) 薄片观察. 铸体薄片显示(图 2), 超压顶面

附近碳酸盐胶结作用和易溶矿物溶蚀作用明显, 流体活动和胶结与溶蚀反应多期出现. 如图 2f, 含铁成分的方解石或是铁白云石多是充填在粒间溶孔中, 说明其形成晚于前一次溶解作用; 而且可见含铁方解石和铁白云石充填孔隙的边缘为沥青, 说明相对早期的液态烃充注经历了破坏过程形成沥青, 含铁方解石和铁白云石的形成要更晚, 属于晚成岩阶段的产物.

(2)碳酸盐胶结物中的流体包裹体. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近砂岩碳酸盐胶结物中含有很多微小($\leq 5 \mu\text{m}$)的包裹体. 基于其荧光颜色、气液比、地层温度、盐度等的分析, 发现至少有两个时期热流体活动与碳酸盐胶结作用和次生溶蚀孔隙形成相关, 温度分别介于 $96 \sim 102 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $125 \sim 145 \text{ }^\circ\text{C}$. 由这两期热流体活动产生的碳酸盐胶结物均是晚成岩阶段的产物.

(3)地层水化学. 超压顶面附近地层水资料显示, 超压顶面处地层水矿化度增加, 从超压顶面处向上向下 $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$ 浓度有减小的趋势, 水化学环境偏碱性, pH 值介于 $7 \sim 9$ 之间, 主要为 NaHCO_3 水型, 这可能说明了研究区成岩晚期的水化学环境的特点. 是典型的方解石过饱和溶液, 有利于方解石的沉淀(于炳松和赖兴运, 2006b). 又因为在超压顶面附近 $4450 \sim 6200 \text{ m}$ 的深度范围内, 地层温度较高($105 \sim 145 \text{ }^\circ\text{C}$), 粘土矿物处于伊蒙混层向伊利石

转化的阶段, 释放出 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} , 因此生成的碳酸盐胶结物主要为含铁方解石或含铁白云石.

(4)碳、氧稳定同位素. 根据对现代沉积剖面的研究, 在埋藏较浅、温度较低部位, 由细菌代谢作用产生的二氧化碳富集轻碳同位素, 并由此而产生具轻碳同位素的成岩碳酸盐(图 4a 中 I 区), 图 4a 中 II 区为与甲烷细菌活动生成生物气有关的碳酸盐, 图 4a 中 III 区的碳酸盐与有机酸脱羧作用有关. 当发酵细菌的活动随着埋藏加深而逐渐失去活动性时, 有机酸在热催化作用下脱羧开始成为主要反应, 并产生烃类和 CO_2 , 这种 CO_2 往往具有高负值特征, 由于这些部位的温度较高, 所以氧同位素组成则因为 ^{18}O 的消耗而呈高负值, 故可与 I 区的“成岩碳酸盐”相区别. 而且, 这类 CO_2 可以先于或同时于油气运移期进入储集层内, 并以碳酸盐的形式沉淀下来(Jansa *et al.*, 1990; 王大锐, 2000; Wilkinson *et al.*, 2006).

用 McCrea (1950) 正磷酸法(转引自王大锐, 2000)和 Finnigan-MAT253 C033 气体质谱仪分析了准噶尔盆地腹部超压顶面附近(深度范围为 $4785 \sim 6120 \text{ m}$)的 53 块砂岩储集层岩芯样品的碳酸盐胶结物的碳、氧同位素, 将所得 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 值标绘在图 4a 和图 4b 中, 可以看出, 超压顶面附近的碳、氧同位素均分布在 III 区, 说明超压顶面附近砂岩中碳酸盐胶结物与有机酸脱羧作用有关.

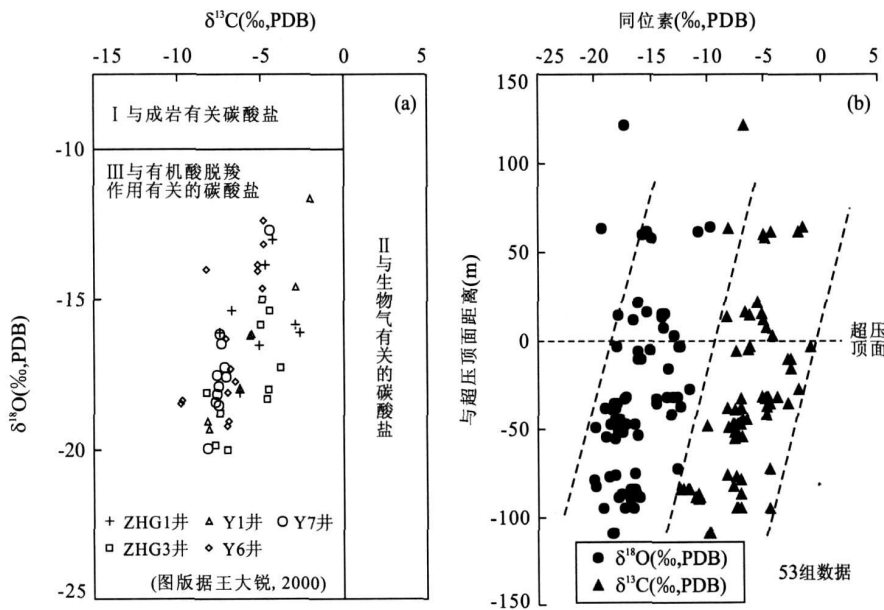


图 4 准噶尔盆地腹部超压顶面附近砂岩碳酸盐胶结物碳氧同位素特征图

Fig. 4 Characteristics of carbon-oxygen isotopic composition for carbonate cements in sandstones near the top overpressured surface in the central part of Junggar basin

超压顶面附近砂岩中碳酸盐胶结物中的碳、氧同位素测试结果表明(图 4a), 碳酸盐胶结物多具有低负值的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 的范围为 $-1.98\% \sim -19.07\%$, 集中分布范围为 $-12.58\% \sim -4.28\%$, 平均为 -7.03% , $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 的范围为 $-11.62\% \sim -21.28\%$, 平均值为 -16.57% . 超压顶面附近储层碳酸盐胶结物的碳同位素发生了负漂移, 说明在成岩过程中有轻碳同位素的加入; $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负的程度较大, 说明是处于深埋高温状态下成岩晚期形成的产物, 这与前文薄片观察和碳酸盐胶结物的含量综合分析的超压顶面附近以成岩晚期含铁碳酸盐胶结为主的结果是一致的. 前人研究表明 (Jansa *et al.*, 1990; 王大锐, 2000; Wilkinson *et al.*, 2006), 海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 常在 $0\% \sim 3\%$ 范围内变化, 与大气水有关的碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-1\% \sim -5\%$ 范围内变化, 有机碳的一般在 -25% , 而且作为灵敏地质温度计的 $\delta^{18}\text{O}$ 也同时呈现出低负值, 说明这些砂岩中碳酸盐胶结物形成过程中受到了较为强烈的深部有机流体影响, 碳酸盐胶结物的沉淀多与相对更深部位含有有机酸的热流体侵入和参与有关.

从图 4b 还可以得出, 超压顶面附近的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值由向下明显减少, 也就是较轻的 ^{12}C 和 ^{16}O 同位素相对于较重的 ^{13}C 和 ^{18}O 同位素在超压顶面附近约 200 m 的深度范围内随埋深总体明显增加即 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的负值增大, 另外, 在相同的与超压顶面距离上的不同测点 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值最大可相差 -10% ; 这些现象很难用在超压顶面附近 200 m 范围内的埋深和地温增加效应来解释. 可能的解释: (1) 超压顶面上下约 100 m 的有限深度范围内, 碳酸盐胶结物受含有机质超压热流体活动的影响显著, 流体—流体和流体—岩石相互作用相对充分, 从超压顶面之下向超压顶面之上, 砂岩中碳酸盐沉淀过程中较轻的 ^{12}C 和 ^{16}O 同位素相对于较重的 ^{13}C 和 ^{18}O 同位素参与反应和交换越充分以及被迁移的越多, 而较重的 ^{13}C 和 ^{18}O 相对较多的留在了原地, 因而造成了超压顶面附近 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值总体的这种分布趋势; (2) 大致相同深度样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布区间较大, 可能说明与多期次深部流体活动和参与的碳酸盐沉淀胶结作用过程有关.

4 次生溶蚀孔隙形成机理分析

实验证明, 煤样中的有机酸浓度为 $11 \sim 95 \text{ mg/g}$

, 而淡水一半咸水中所提取的干酪根中有机酸浓度为 $30 \sim 60 \text{ mg/g}$, 个别深暗色泥岩可达 $90 \sim 120 \text{ mg/g}$, 而提取 1 g 干酪根需泥岩 $500 \sim 1000 \text{ g}$, 可见煤系地层所产生的有机酸要比其他地层高数百倍, 这对于煤系地层及相邻地层中次生溶蚀孔隙的形成具有更为有利的条件, 特别是在深埋过程中, 是造成长石等铝硅酸盐类矿物颗粒和碳酸盐胶结物溶解的主要因素(程克明等, 1994; 郑浚茂等, 1997). 在煤系地层沼泽—泥炭化过程中, 可以分为 3 个阶段, 起始阶段 pH 值较小, 介质酸性较强; 而在气体大量产出期, 其 pH 值近于 7, 介质呈中性; 其后介质逐渐偏碱性.

准噶尔盆地腹部侏罗纪煤系地层埋藏热演化过程中, 成熟门限深度以下大量产生富钙镁超压酸性热流体, 并在门限深度附近砂岩中或大套煤系烃源岩顶部砂岩中形成以碳酸盐胶结为主导作用的过程, 从而形成碳酸盐矿化带的封隔层, 该封隔层对超压的形成、流体运移和次生溶蚀孔隙形成有直接影响. 煤系地层热演化过程中(图 5), 分别由基质镜质体、角质体、木栓质体、沥青质体和树脂体造成前期的大量有机酸生成和由藻类体、角质体和孢子体造成后期的大量有机酸生成; 有机质的热成熟过程除了产生有机酸外, 还会产生 CO_2 , CO_2 在两期有机酸产生之后稳定增加(程克明等, 1994; 郑浚茂等, 1997; 寿建峰等, 2005). 腹部超压顶面附近深层砂岩储层大致经历了 3 期的次生溶蚀孔隙形成. 早期泥晶方解石的溶蚀使孔隙有所增加, 随后在中晚侏罗世燕山 I、II 幕构造抬升可能使砂岩遭受了大气淡水的风化淋滤, 产生了一些次生溶孔, 但很有可能对现存孔隙贡献不大, 基于两点原因: 该期次生溶蚀孔隙产生于近地表, 随着后期地层埋藏, 尤其是在现今储层埋深均大于 4000 m , 其形成的孔隙可能很难有效保存下来; 另外根据古生物以及粘土矿物微量元素的分析, 中晚侏罗世以来, 气候逐渐转为干旱, 风化作用可能以物理风化作用为主, 而因为降雨较少, 大气淡水的淋滤作用非常局限(徐同台等, 2003; 钟筱春等, 2003; 李平等, 2006; 武恒志等, 2006; 谢寅符等, 2006). 后期产生的有机酸及 CO_2 可造成较大规模的溶蚀而形成较多的次生溶孔, 这其中超压流体的作用不可或缺. 因为晚白垩世侏罗纪煤系烃源岩开始成熟生烃并导致侏罗系及邻近地层广泛发育超压, 与晚期次生孔隙形成的时期是一致的, 最初酸性物质可能就近溶蚀, 由于低幅度超压不足以使溶蚀物质大量被迁移而导致次生溶孔的明显增加, 相反碳酸盐胶结作用可能较为重要, 但随着地层的埋

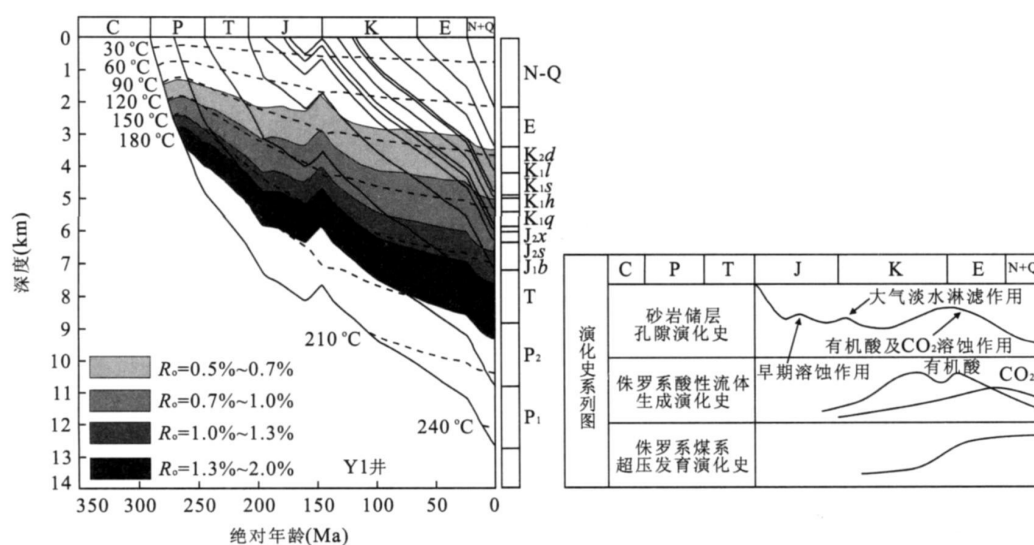


图 5 准噶尔盆地腹部煤系地层埋藏热演化、孔隙演化、酸性流体演化以及超压发育史图

Fig. 5 Diagrams for the histories of source rock burial and thermal maturity, evolutions of sandstone porosity, organic acid and CO_2 generation and overpressure in the coal-bearing strata of the central part of Junggar basin

深和地温增加, 煤系烃源岩中的有机质进入大量生烃阶段(温度约为 $100 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$, R_o 约为 $0.7\% \sim 1.3\%$), 系统内超压进一步发育和积累, 造成酸性物质及溶蚀物质向上部地层排放和运移, 或岩层破裂导致系统内外流体发生能量和物质交换, 在孔隙流体地球化学性质和温压条件发生明显变化的超压顶面附近, 碳酸盐胶结物大量沉淀胶结形成超压顶部封隔层, 随着顶封层的多次破裂和超压流体的排泄释放, 酸性流体多次对超压顶面附近砂岩进行溶蚀产生次生溶孔, 溶解在流体中的碳酸盐也会在超压顶面附近砂岩中多期沉淀胶结, 超压顶面附近砂岩中由于易溶矿物质的溶解和饱和矿物质的流体移出而产生较多的储集空间. 另外, 深部超压可能对次生溶孔的支撑和保存作用具有某种意义.

5 结论

(1) 准噶尔盆地腹部埋深在 $4\ 400 \sim 6\ 200 \text{ m}$ (温度 $105 \sim 145 \text{ }^\circ\text{C}$) 超压顶面附近砂岩中广泛发育的碳酸盐胶结物和长石类溶蚀次生孔隙与超压流体活动密切相关. 准噶尔盆地腹部侏罗纪煤系地层热演化生烃过程中, 由于成熟门限深度以下产生的富钙镁酸性超压热流体在超压顶面附近的频繁活动, 导致了超压顶面附近砂岩中多期碳酸盐胶结作用和长石类等易溶矿物溶蚀作用过程, 致使在成熟的大套侏罗纪煤系烃源岩顶面深度附近至白垩系底部即超压

顶面附近砂岩中形成了碳酸盐胶结矿化带和多期溶蚀次生孔隙发育带.

(2) 准噶尔盆地腹部超压顶面附近砂岩薄片观察、流体包裹体、碳酸盐胶结物碳氧同位素等方面的证据表明, 碳酸盐胶结物主要为晚成岩作用阶段与多期深部流体活动有关的含铁碳酸盐胶结物, 碳酸盐胶结物的形成明显地受到了深部超压热流体和有机脱羧反应的影响, 是超压流体多期由深部向上排放的结果. 纵向上砂岩碳酸盐胶结物出现 $15\% \sim 30\%$ 含量的地层厚度范围约在超压顶面附近之下 100 m 至之上大于 450 m , 碳酸盐胶结物含量高值区间与超压顶面不对称, 出现大于 25% 的含量高值带分布在靠近超压顶面以上的 $250 \sim 300 \text{ m}$ 的范围内.

(3) 准噶尔盆地腹部超压顶面附近深层砂岩中, 长石等铝硅酸盐类矿物次生溶蚀孔隙是主要的储集空间类型, 超压顶面附近碳酸盐胶结物含量高值带深度也是次生溶蚀孔隙(孔隙度 $10\% \sim 20\%$) 发育带的深度范围, 超压顶面附近砂岩中次生溶蚀孔隙带的形成与超压流体向上多期排放过程中的酸性流体溶蚀作用有关.

References

- Björlykke, K., 1994. Fluid-flow processes and diagenesis in sedimentary basins. In: Parnell, L., ed., *Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins*. Geological Society Special Publication, 78: 127–140.

- Cao, J., Hu W. X., Yao, S. P., et al., 2007. Mn content of reservoir calcite cement; A novel inorganic geotracer of secondary petroleum migration in the tectonically complex Junggar basin (NW China). *Science in China (Ser. D)*, 37(10): 1358—1365 (in Chinese).
- Cheng K. M., Zhang, C. F., 1994. Research of coal-derived hydrocarbon from the Turpan-Hami basin. *Science in China (Ser. B)*, 24(11): 1216—1222 (in Chinese).
- Curtis, C. D., 1978. Possible links between sandstone diagenesis and depth-related geochemical reactions occurring in enclosing mudstones. *Journal of the Geological Society*, 135(1): 107—117.
- Hao, F., 2005. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanism of petroleum accumulation in overpressured basins. Science Press, Beijing, 3—36, 136—268 (in Chinese).
- He, S., He, Z. L., Yang, Z., et al., 2009. Studies of characteristics well-log responses and mechanisms of abnormally high pressures within the Jurassic Formation in the central part of Junggar Basin. *Earth science—Journal of Chinese University of Geosciences*, 34(3): 457—470 (in Chinese with English abstract).
- Hunt, J. M., 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1): 1—12.
- Jansa L. F., Noguera U. V. H., 1990. Geology and diagenetic history of overpressured sandstone reservoirs, venture gas field offshore Nova Scotia, Canada. *AAPG Bulletin*, 74(10): 1640—1658.
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Lu, Y. C., et al., 2008. Evolution of the Chepaizi-Mosuwan Paleo-Uplift, Junggar Basin, China; Evidence from diagenesis of late Jurassic red beds. *Earth science—Journal of Chinese University of Geosciences*, 33(2): 219—226 (in Chinese with English abstract).
- Jonk, R., Hurst, A., Duranti, D., et al., 2005. Origin and timing of sand injection, petroleum migration, and diagenesis in Tertiary reservoirs, South Viking Graben North Sea. *AAPG Bulletin*, 89(3): 329—357.
- Li, M. C., 1995. Hot fluid activity in crust and hydrocarbon migration. *Earth Science Frontiers*, 2(3—4): 155—162 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. P., Zou, H. Y., Hao, F., 2006. Formation mechanism and effect on petroleum accumulation of the weathering crust, top of Jurassic, in the hinterland of Junggar basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(6): 889—896 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. G., 1998. Overpressure origin and hydrocarbon pool forming mode of Maqiao uplift in Junggar basin. *Petroleum Exploration and Development*, 25(1): 21—24 (in Chinese with English abstract).
- Lynch, F. L., 1996. Mineral/water interaction, fluid flow, and Frio sandstone diagenesis; Evidence from the rocks. *AAPG Bulletin*, 80(4): 486—504.
- Nie, F. J., Jiang, M. Z., Li, S. T., et al., 2005. The responses of sandstone to hot fluid flow and their identified markers—A case study from the western part of the Pearl River Mouth basin. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 581—591 (in Chinese with English abstract).
- Shou, J. F., Zhang, H. L., Si, C. S., et al., 2005. Sandstone diagenesis dynamics. Petroleum Industry Press, Beijing, 73—75 (in Chinese).
- Surdam, R. C., Boese, S. W., Crossey, L. J., et al., 1984. The chemistry of secondary porosity (in clastic diagenesis). *AAPG Memoir*, 37: 127—149.
- Surdam, R. C., Crossey, L. J., Hagen, E. S., et al., 1989. Organic-inorganic and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73(1): 1—23.
- Wang, D. R., 2000. Oil-gas stable isotopic geochemistry. Petroleum Industry Press, Beijing, 4—20 (in Chinese).
- Wang, F. R., He, S., Hong, T. Y., et al., 2006. Dominant factors affecting the reservoir properties of deeply buried bed in the center of Junggar basin. *Xinjiang Geology*, 24(4): 423—428 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. R., He, S., He, Z. L., et al., 2009. Characteristics and genetic mechanism of carbonate cement in sandstone reservoirs of Yongjin Area in Central Junggar Basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(2): 169—178 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Zhong, J. H., Chen, H., et al., 2006. Vertical distribution and genesis of the secondary pore in deep formation of Paleogene at Dongpu Sag. *Petroleum Exploration and Development*, 33(5): 576—580 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. L., Zhu, Y. S., Chen, H. L., et al., 2000. Physical and chemical properties of Jurassic fluid in the hinterland of Junggar basin and its hydrodynamic significance. *Geochimica*, 29(6): 542—548 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. Z., Wu, S. H., Xiong, Q. H., et al., 2003. Characteristics of percolation fields in oilgas fields. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Weedman, S. D., Brantley, S. L., Shiraki, R., et al., 1996. Diagenesis compaction, and fluid chemistry modeling of a sandstone near a pressure seal: Lower Tuscaloosa For-

- mation, Gulf Coast. *AAPG Bulletin*, 80 (7): 1045—1064.
- Wilkinson, M., Haszeldine, R. S., Fallick, A. E., et al., 2006. Hydrocarbon filling and leakage history of a deep geopressed sandstone, Fulmar Formation, United Kingdom North Sea. *AAPG Bulletin*, 90 (12): 1945—1961.
- Wu, H. Z., Meng, X. L., Yang, J. F., et al., 2006. Formation conditions and prospecting technologies for subtle reservoirs in the Che-Mo palaeohigh of central Junggar basin. *Oil & Gas Geology*, 27(6): 779—803 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. M., Cao, J., Hu, W. X., et al., 2007. Origin and application of GOI data of oil inclusions in structurally complex basins: A case study in the Mosuowan area of the Junggar basin (NW China). *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 834—842 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Li, S. T., Liu, X. F., et al., 2006. Basin fluid dynamics in abnormally pressured environments. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—178 (in Chinese).
- Xie, Y. F., Li, H. Q., Sun, Z. C., et al., 2006. Discovery of a weathering crust between Jurassic and Cretaceous and its stratigraphic significance in the Shinan area of the Junggar basin. *Geological Review*, 52(1): 137—144 (in Chinese with English abstract).
- Xu, T. T., Wang, X. X., Zhang, Y. Y., et al., 2003. Clay minerals in petroliferous basin in China. Petroleum Industry Press Beijing 422—456 (in Chinese).
- Yang Z., He, S., He, Z. L., et al., 2008. Distribution of overpressure stratum and its relationship with hydrocarbon accumulation in the central part of Junggar basin. *Acta Petrolei Sinica*, 29(2): 199—205 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B. S., Lai, X. Y., 2006a. Dissolution of calcite cement and its contribution to the secondary pores of reservoir in the Kela 2 gas field in the Tarim basin. *Journal of Mineral and Petrology*, 26(2): 74—79 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B. S., Lai, X. Y., 2006b. Carbonic acid system of groundwater and the solubility of calcite during diagenesis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(5): 627—635 (in Chinese with English abstract).
- Zha, M., Zhang, W. H., Qu, J. X., et al., 2000. The character and origin of overpressure and its explorational significance in Junggar basin. *Petroleum Exploration and Development*, 27(2): 31—35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. J., 2002. The geochemical characteristics of water rock interaction products in Junggar basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 23(6): 482—484 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. H., Chang, X. C., Zeng, J. H., et al., 1998. Research on waterrock interaction and its application on petroleum geology. *Geological Science and Technology Information*, 17(3): 69—74 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. M., Ying, F. X., 1997. Reservoir characteristics and diagenetic model of sandstone intercalated in coal-bearing strata (acid water medium). *Acta Petrolei Sinica*, 18(4): 19—24 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, D. K., Zhu, X. M., Zhang, Z. H., et al., 2003. Origin of secondary porosity of Paleogene sandstone in the Dongying Sag. *Petroleum Exploration and Development*, 30(6): 51—53 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, X. C., Zhao, C. B., Yang, S. Z., et al., 2003. Jurassic system in the north of China Palaeoenvironment and oil-gas source. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹剑, 胡文瑄, 姚素平, 等, 2007. 准噶尔盆地示踪石油运移的无机地球化学新指标研究. 中国科学(D 辑), 37(10): 1358—1369.
- 程克明, 张朝富, 1994. 吐鲁番—哈密盆地煤成油研究. 中国科学(B 辑), 24(11): 1216—1222.
- 郝芳, 2005. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理. 北京: 科学出版社, 3—36, 136—268.
- 何生, 何治亮, 杨智, 等, 2009. 准噶尔盆地腹部地区侏罗系异常高压特征及测井响应与成因研究. 地球科学——中国地质大学学报, 34(3): 457—470.
- 焦养泉, 吴立群, 陆永潮, 等, 2008. 准噶尔盆地腹部侏罗系顶部红层成岩作用过程中蕴藏的车莫古隆起演化信息. 地球科学——中国地质大学学报, 33(2): 219—226.
- 李明诚, 1995. 地壳中的热流体活动与油气运移. 地学前缘, 2(3—4): 155—162.
- 李平平, 邹华耀, 郝芳, 2006. 准噶尔盆地腹部侏罗系顶部风化壳的发育机制及其油气成藏效应. 沉积学报, 24(6): 889—896.
- 刘得光, 1998. 准噶尔盆地马桥凸起异常高压成因及油气成藏模式. 石油勘探与开发, 25(1): 21—24.
- 聂逢君, 姜美珠, 李思田, 等, 2005. 砂岩对热流通作用的响应及识别标记—珠江口盆地西部为例. 地学前缘, 12(4): 581—591.

(下转 798 页)

(in Chinese).

Yang C., Luo, X., Li J., et al., 2008. Geochemical characteristics of pyrolysis gas from epimetamorphic rocks in the northern basement of Songliao basin, NE China. *Science in China (Ser. D)*, 51(Suppl. I): 140–147.

Zhou, Q., Feng Z., Men, G., 2008. Present geotemperature and its suggestion to natural gas generation in Xujiawei-zi fault-depression of the northern Songliao basin. *Science in China (Ser. D)*, 51(Suppl. I): 207–220.

附中文参考文献

戴金星, 杨春, 胡国艺, 等, 2008. 煤成气是中国天然气工业的

主角. 天然气地球科学, 19(6): 733–740.

付广, 吕延防, 于丹, 2007. 我国不同类型盆地高效大中型气田形成的主控因素. 地球科学——中国地质大学学报, 32(1): 82–88.

付广, 王有功, 2008. 火山岩天然气成藏要素时空匹配及对成藏的控制作用: 以徐家围子地区深层为例. 地球科学——中国地质大学学报, 33(3): 342–348.

冯子辉, 迟元林, 杜洪文, 等, 2002. 原油在储层介质中的加水裂解生气模拟实验. 沉积学报, 20(3): 505–509.

徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等, 1998. 天然气中稀有气体地球化学. 北京: 科学出版社, 231.

(上接 768 页)

寿建峰, 张惠良, 斯春松, 等, 2005. 砂岩动力成岩作用. 北京: 石油工业出版社, 73–75.

王大锐, 2000. 油气稳定同位素地球化学. 北京: 石油工业出版社, 4–20.

王芙蓉, 何生, 洪太元, 等, 2006. 准噶尔盆地腹部地区深埋储层物性特征及影响因素. 新疆地质, 24(4): 423–428.

王勇, 钟建华, 陈昊, 等, 2006. 东濮凹陷古近系深层次生孔隙垂向分布特征及成因. 石油勘探与开发, 33(5): 576–580.

王震亮, 朱玉双, 陈荷立, 等, 2000. 准噶尔盆地腹部侏罗系流体物理化学特征及其水动力学意义. 地球化学, 29(6): 542–548.

王志章, 吴胜和, 熊琦华, 等, 2003. 油气田渗流场特征. 北京: 石油工业出版社.

武恒志, 孟闲龙, 杨江峰, 等, 2006. 准噶尔盆地腹部车—莫古隆起区隐蔽油气藏形成条件与勘探技术. 石油与天然气地质, 27(6): 779–803.

谢小敏, 曹剑, 胡文瑄, 等, 2007. 叠合盆地储层油气包裹体 GOI 成因与应用探讨—以准噶尔盆地莫索湾地区为例. 地质学报, 81(6): 834–842.

解习农, 李思田, 刘晓峰, 等, 2006. 异常压力盆地流体动力学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–178.

谢寅符, 李洪奇, 孙中春, 等, 2006. 准噶尔盆地石南地区侏罗

系—白垩系间风化壳的发现及其地层学意义. 地质论评, 52(1): 137–144.

徐同台, 王行信, 张有瑜, 等, 2003. 中国含油气盆地粘土矿物. 北京: 石油工业出版社, 422–456.

杨智, 何生, 何治亮, 等, 2008. 准噶尔盆地腹部超压层分布与油气成藏. 石油学报, 29(2): 199–205.

于炳松, 赖兴运, 2006a. 克拉 2 气田储集岩中方解石胶结物的溶解及其对次生孔隙的贡献. 矿物岩石, 26(2): 74–79.

于炳松, 赖兴运, 2006b. 成岩作用中的地下水碳酸体系与方解石溶解度. 沉积学报, 24(5): 627–635.

查明, 张卫海, 曲江秀, 等, 2000. 准噶尔盆地异常高压特征、成因及勘探意义. 石油勘探与开发, 27(2): 31–35.

张义杰, 2002. 准噶尔盆地水岩反应产物的地球化学特征. 新疆石油地质, 23(6): 482–484.

张枝焕, 常象春, 曾溅辉, 等, 1998. 水—岩相互作用研究及其在石油地质中的应用. 地质科技情报, 17(3): 69–74.

郑浚茂, 应凤祥, 1997. 煤系地层(酸性水介质)的砂岩储层特征及成岩模式. 石油学报, 18(4): 19–24.

钟大康, 朱筱敏, 张枝焕, 等, 2003. 东营凹陷古近系砂岩次生孔隙成因与纵向分布规律. 石油勘探与开发, 30(6): 51–53.

钟筱春, 赵传本, 杨时中, 等, 2003. 中国北方侏罗系(II)古环境与油气. 北京: 石油工业出版社.