

超深层灰岩孔隙-微孔隙特征与成因 ——以塔里木盆地顺南7井和顺托1井一间房组灰岩为例

尤东华^{1,2}, 韩俊³, 胡文瑄¹, 钱一雄², 曹自成³, 陈强路², 李慧莉⁴

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:超深层条件下灰岩是否具有有效储集空间, 储层成因与储集性能如何等问题是深层-超深层油气勘探领域关注的课题之一。以塔里木盆地顺南7井、顺托1井一间房组灰岩为例, 通过岩心观察、计算机断层扫描、薄片与阴极发光分析、扫描电镜等分析手段描述超深层灰岩的孔隙、微孔隙发育特征并探讨其成因。一间房组下段藻灰岩(以顺南7井为代表)孔隙以窗格孔、遮蔽孔为主要类型, 其为沉积-成岩早期孔隙海水的胶结残余; 微孔隙为分布于藻粒屑内部的方解石晶间微孔, 其形成可能受重结晶作用与原始有机质演化的共同控制。一间房组上段生物粘结岩(以顺托1井为代表)孔隙以生物壳铸模孔、硅球与自形方解石集合体内部晶间孔隙为主要类型, 微孔隙主要为生物体腔微孔、方解石重结晶形成的晶间微孔、灰岩基质中自形石英晶面微孔。成岩早期的热液流体改造可能是顺托1井生物粘结岩孔隙、微孔隙的主要成因, 早期液态烃类充注对孔隙、微孔隙保存具有重要意义。由此表明, 不同钻井不同结构特征灰岩的孔隙-微孔隙发育特征与成因不同, 并进一步导致了灰岩储层发育与分布的控制因素存在差异。

关键词:孔隙; 微孔隙; 藻灰岩; 生物粘结岩; 超深层; 一间房组; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Characteristics and genesis of pores and micro-pores in ultra-deep limestones: A case study of Yijianfang Formation limestones from Shunnan-7 and Shuntuo-1 wells in Tarim Basin

You Donghua^{1,2}, Han Jun³, Hu Wenxuan¹, Qian Yixiong², Cao Zicheng³, Chen Qianglu², Li Huili⁴

(1. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 2. Wuxi Research Institute of

Petroleum Geology, Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

3. Exploration and Development Research Institute, Northwest Oilfield Company of SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

4. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Development of effective reservoir space, genetic mechanism and reservoir quality of deep to ultra-deep limestone are key concerns of deep to ultra-deep oil and gas exploration. Detailed core observations, computerized tomography, microscopy, cathodoluminescence and scanning electron microscopy analyses were carried out to characterize the petrology and pore spaces of limestone samples from the Yijianfang Formation in Shunnan-7 and Shuntuo-1 wells in Tarim Basin. Pores in the Lower Yijianfang Formation limestones (Well Shunnan-7) are dominated by fenestrae and shelter pores, which survived the cementation in the deposition to early diagenetic stages. Micro-pores are calcite inter-crystalline pores in algae particles, and their formation might be jointly controlled by recrystallization and maturation of original organic matters. The pores of boundstones in the Upper Yijianfang Formation (Well Shuntuo-1) are dominated by moldic pores in biological shells and inter-crystalline pores within aggregates of silica spheres and euhedral calcites; their micro-pores are mainly biomembrane micro-pores, inter-crystalline micro-pores resulted from recrystallization of calcites and micro-pores in euhedral quartz in limestone matrix. Hydrothermal alteration in the early diagenetic stage may be the major genetic mechanism of pores and micro-pores in Well Shuntuo-1. The early hydrocarbon charging may play an

收稿日期: 2017-02-11; 修订日期: 2017-07-01。

第一作者简介: 尤东华(1980—), 男, 博士研究生、副研究员, 碳酸盐岩储层地质学。E-mail: youdh.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214802); 中国石化科技开发部项目(P13069, P16112)。

important role in the preservation of pores and micro-pores during burial. Our results show that the characteristics and genesis of pores and micro-pores of limestones with different structural features in different wells are different. Thus, the controlling factors for the development and distribution of ultra-deep limestone reservoirs are complicated.

Key words: pore, micro-pore, algal limestone, microbial boundstone, ultra-deep strata, Yijianfang Formation, Tarim Basin

碳酸盐岩随埋深增加压实、压溶作用的增强其基质孔隙度逐渐减小,一定埋深(约2~5 km)条件下白云岩相对灰岩具有更高的孔隙度^[1-3]。超深层条件下(本文指大于6 km埋深范围),白云岩以其特有的储集空间与优质储集性能^[4-5]受到地质学家与石油勘探家的重视,并相继取得了超深层领域的油气突破,如美国 Mills 气田^[6-7]、普光气田^[8-9]、元坝气田、磨溪-龙王庙气田^[5,10]、古城地区天然气气藏^[11]、中深1井油气藏等^[12]。

灰岩孔隙主要受早期成岩事件的影响,包括压实-压溶作用、胶结-交代作用、新生变形作用及重结晶作用,通常形成组构选择性孔隙(如粒间-粒内孔隙)。依据灰岩埋藏深度与孔隙度的压实曲线研究^[1,3],通常情况下灰岩埋深超过3 500 m、孔隙度小于3%基本不具有勘探价值。成岩中晚期的岩溶作用、构造-热液事件可进一步改造原始灰岩,且通常形成非组构选择性储集空间,如塔河缝洞型岩溶储层^[13]。超深层条件下灰岩是否具有有效基质孔隙,能否形成有效储层则鲜有报道,其孔隙特征与成因缺乏相关研究。塔里木盆地塔中I号断折带以北顺南7井与顺托1井揭示了孔隙-微孔隙型灰岩储层,为探讨超深层条件下灰岩孔隙特征、储层成因提供了基本素

材。本文着重阐述顺南7井与顺托1井孔隙-微孔隙的发育特征并探讨其成因,为进一步开展相关优质储集体的分布预测提供了条件。

1 地质背景

顺南7井与顺托1井位于塔里木盆地塔中I号断折带以北自满加尔坳陷向卡塔克隆起过渡的区域,二级构造单元划分上其分别属于古城墟低隆起与顺托果勒低隆起(图1)。钻井所在地区早中奥陶世发育巨厚的台地相碳酸盐岩沉积建造,晚奥陶世早期以深水斜坡相恰尔巴克组泥灰岩为主,晚奥陶世中晚期沉积了巨厚的混积陆棚相却尔却克群泥岩^[14]。中、下奥陶统碳酸盐岩与上覆却尔却克群泥岩构成了良好的储盖组合。

中、晚奥陶世沉积建造的差异代表了盆地区域构造背景发生较大变化。以塔中I号断折带为界,加里东中晚期构造运动控制了塔中I号断折带南北沉积建造的分异,并进一步控制了相关层序界面性质、储集岩类型、油气藏分布等。依据古城墟隆起古隆1井详细的古生物、同位素地层学的研究^[15-17],目前认为

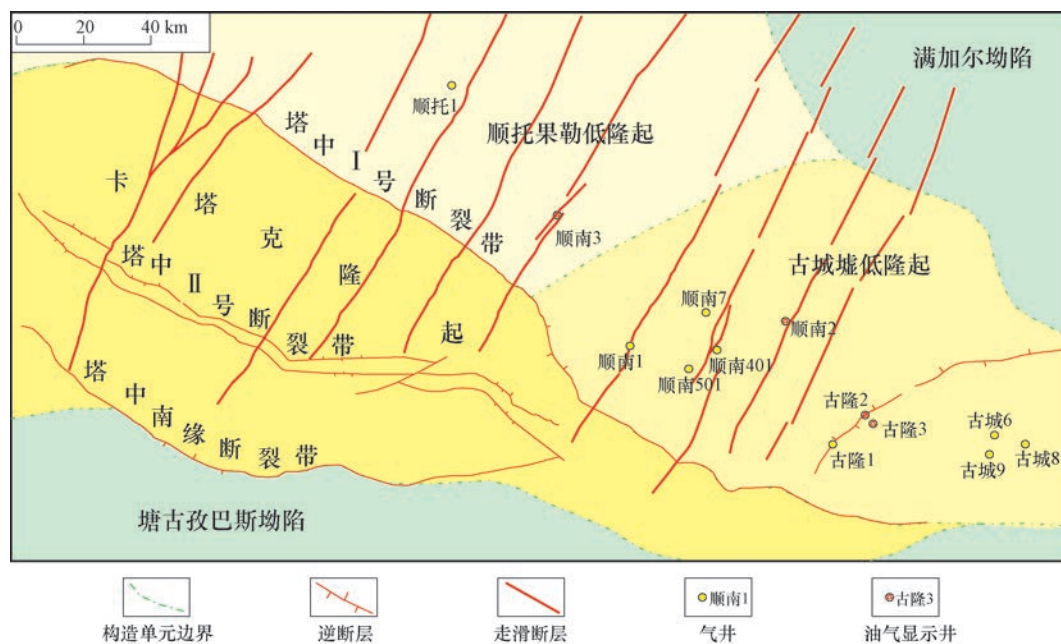


图1 塔中地区构造单元及钻井位置

Fig. 1 Structure units in Tazhong area and drilling well locations

塔中 I 号断折带以北的大部分区域中晚奥陶世为连续沉积,即碳酸盐岩建造一间房组的顶面未发生大规模的岩溶作用。

依据区域地层岩性、古生物群落特征、碳同位素地层学的对比,结合测井曲线的电性特征将该区一间房组划分为下段与上段(图2)。一间房组下段岩性上以藻灰岩、亮晶藻砂屑灰岩、亮晶藻砾屑灰岩为主,发育典型的窗格构造;生物群落表现为以藻类占主导地位,少量腹足、介形、角石等;电性上表现为低 GR 值,5~10API 左右。一间房组上段岩性上以藻粘结灰岩为主,生物多样及其丰度明显增加,常见海百合、苔藓虫、腹足、介形虫、葛万藻;电性上表现为相对高 GR 值,10~20API 左右。区内一间房组的地层厚度大约在 200 m 左右。

2 孔隙-微孔隙发育特征

按孔径大小进行孔隙、微孔隙的界定缺乏统一标

准,甚至不同类型孔隙对孔隙、微孔隙大小的界定存在差异^[18]。本文微孔隙主要指基质孔隙直径大致为 10~20 μm 至亚微米尺度的孔隙,而孔隙主要指孔隙直径大致为 2~5 mm 至几十微米左右的孔隙。

2.1 一间房组下段——以顺南 7 井为例

1) 孔隙特征

岩心尺度可见斑点状分散孤立、孔径大小不一的孔隙。铸体薄片显微观察显示主要有两种孔隙类型(图3):遮蔽孔(少量)和窗格孔(大部分)。大部分孔隙被方解石和白云石充填,可以分为双层结构(遮蔽孔、大部分窗格孔)与多层结构(少量窗格孔)。双层结构为纤柱状方解石-直面自形白云石(图3b),直面自形白云石之后可半充填或全充填干净透明自形方解石。多层结构为纤柱状方解石-非自形白云石环带-纤柱状方解石与较透明粒状方解石-直面自形白云石-干净透明自形方解石(图3c),最晚期的方解石如

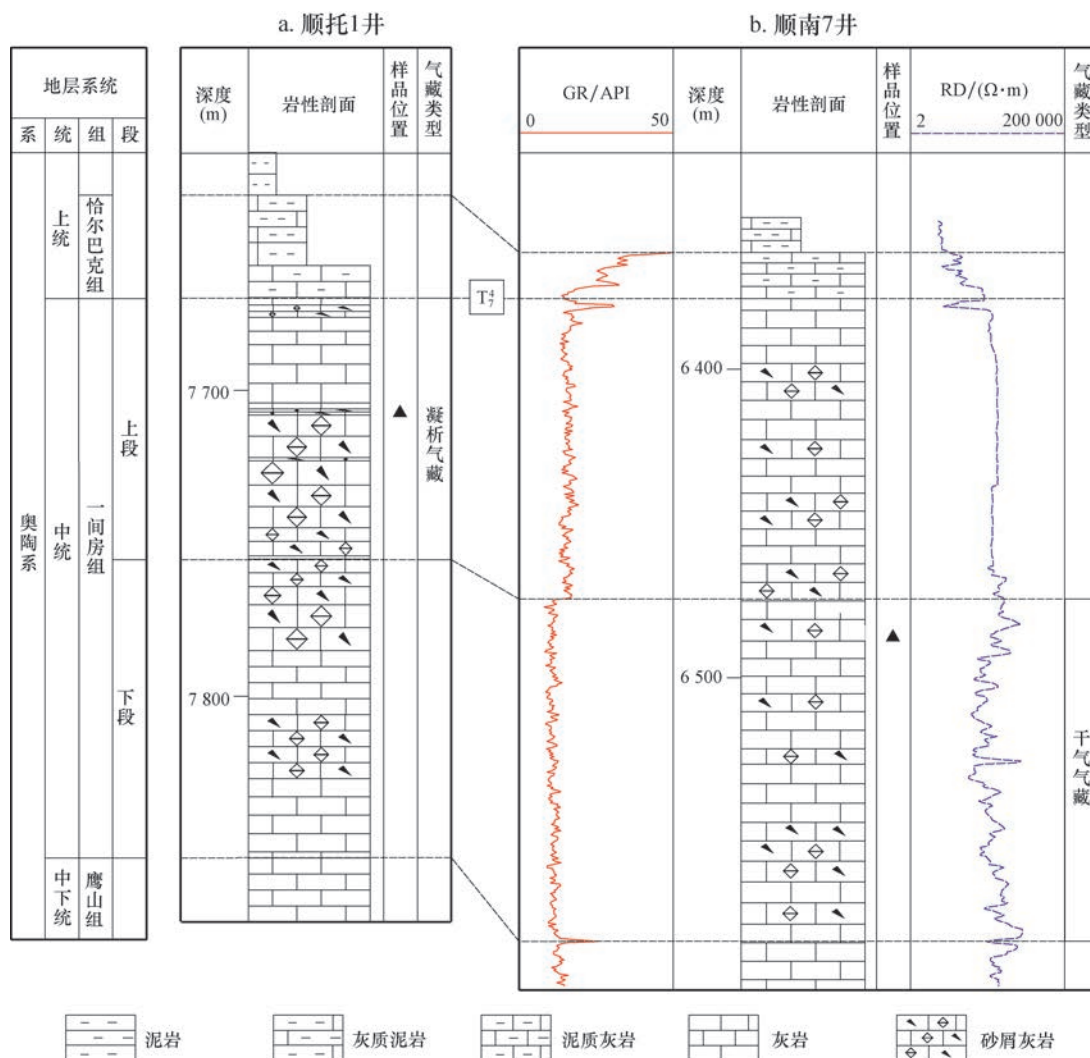


图2 塔中地区顺托1井与顺南7井一间房组地层柱状图及样品采集位置

Fig. 2 Stratigraphic column of the Yijianfang Formation and sampling sites in Shuntuo-1 and Shunnan-7 wells in Tazhong area

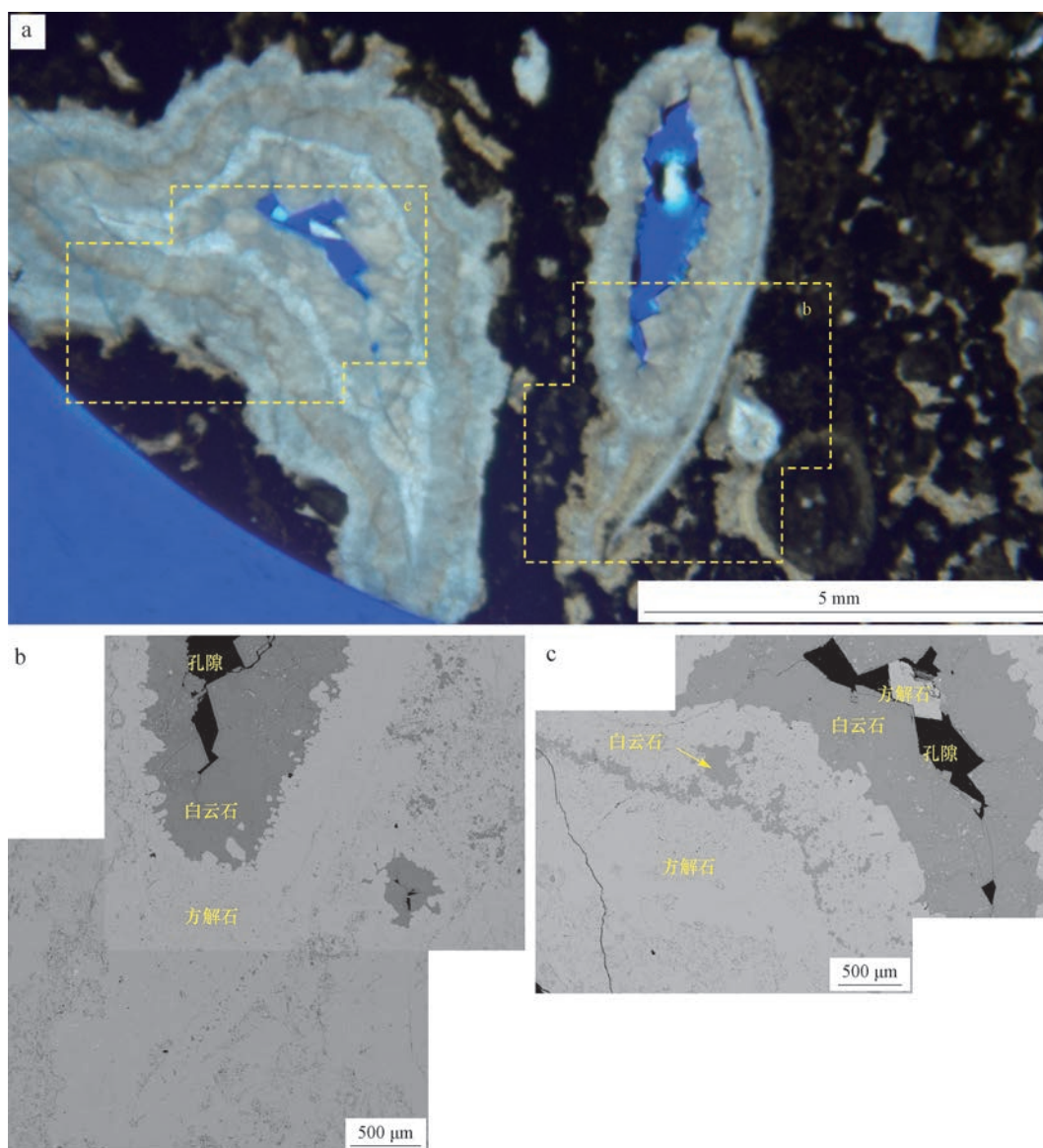


图3 塔中地区顺南7井一间房组下段典型孔隙结构特征

Fig. 3 Pore structure in the Lower Yijianfang Formation of Well Shunnan 7 in Tazhong area

a. 铸体薄片, 双层结构的遮蔽孔与多层结构的窗格孔, 埋深6 486.30 m; b. 电子探针背散射图像, 浅灰色为方解石, 深灰色为白云石, 黑色为残余孔隙, 方解石-白云石组成的双层结构; c. 电子探针背散射图像, 多层结构

全充填则无残余孔隙。

2) 微孔隙特征

通过铸体薄片、常规扫描电镜、氩离子抛光-聚焦离子束扫描电镜分析, 还发现微孔隙的存在。这些微孔隙主要分布于藻屑内部, 藻屑与藻屑之间的亮晶胶结物不发育微孔隙(图4a, c)。微孔隙为自形方解石晶间棱角状孔(图4b, d), 孔隙大小主要介于几百纳米-几个微米(图4b, f), 其内部常见有机质(图4e)。

2.2 一间房组上段——以顺托1井为例

岩心整体致密, 岩性为灰黑色-黄灰色生物粘结灰岩, 具有较高的沥青质含量且油味较重。发育少量

蜂窝状孔隙(图5a), 凝析气的储集空间以基质微孔隙主。

1) 孔隙特征

根据孔隙发育的特点, 可以区分两类孔隙: ①硅球与自形方解石组成的网状集合体中的孔隙(图5b)。硅球为石英晶核集合体, 网状集合体内部发育大量几十微米至百微米左右晶间孔隙(图5c), 孔隙空间局部可见单个自形石英, 孔隙连通性极好。铸体薄片下可见局部粒状石英晶体, 生物壳体部分或完全硅化, 少量直面自形白云石分散于硅质或方解石之中(图5d)。②生物壳铸模孔(图5e, f), 生物种类多样, 主要有海百合、苔藓虫、介形虫等, 部分生物壳体发生局部硅化。

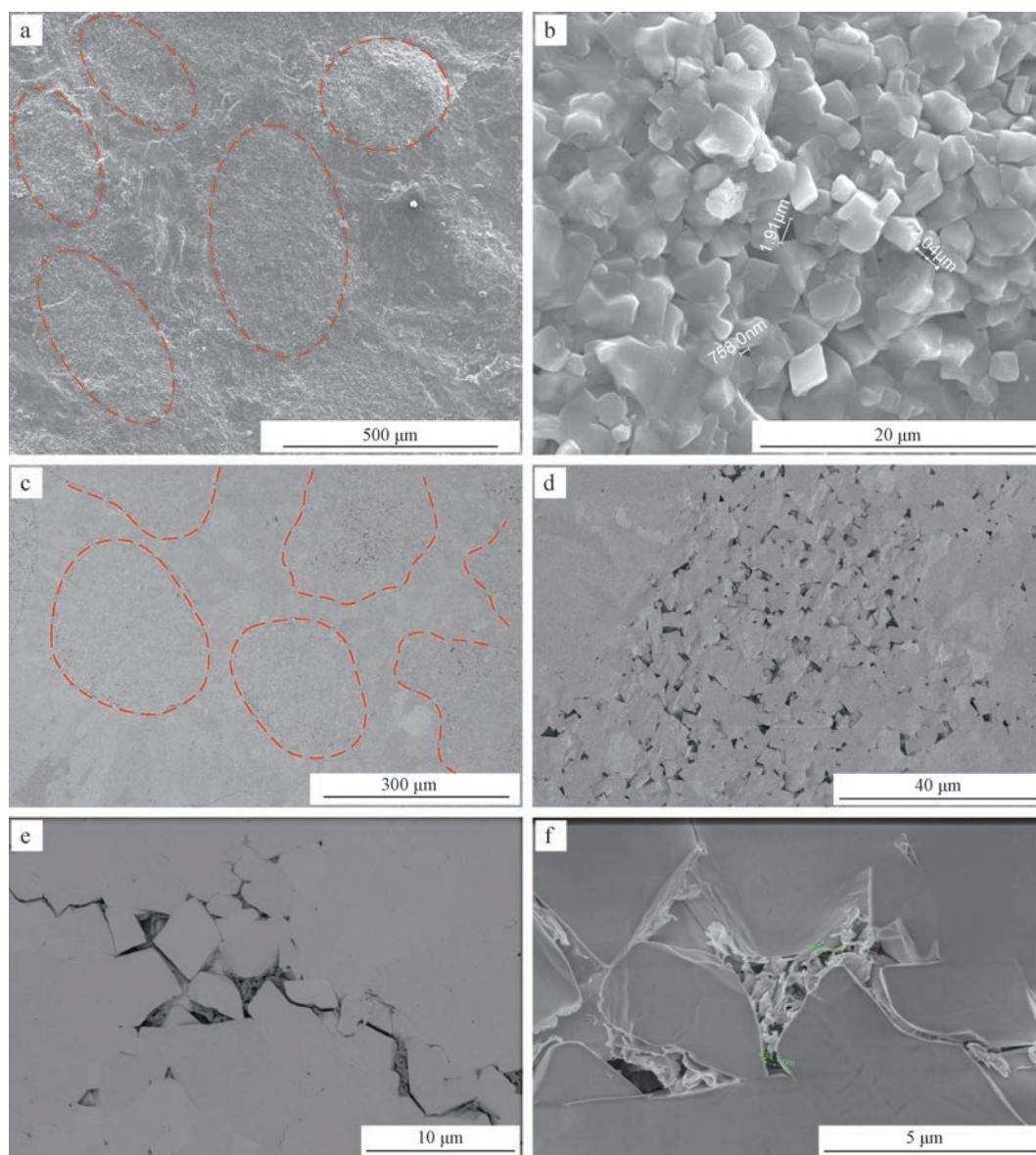


图4 塔中地区顺南7井一间房组下段典型微孔隙结构特征

Fig. 4 Micro-pore structure in the Lower Yijianfang Formation of Well Shunnan-7 in Tazhong area

a, b. 常规扫描电镜图像, 埋深 6 486.30 m; c, d, e, f. 氩离子抛光-扫描电镜分析图像, 埋深 6 486.30 m

2) 微孔隙特征

微孔隙主要有3类:①生物体腔微孔隙(图6a—c),包括葛万藻、窗格苔藓虫、红藻等;②方解石重结晶形成的晶间微孔隙(图6d,e),包括颗粒内部晶间微孔或方解石集合体晶间微孔隙;颗粒内部常见自形石英(图6d);③灰岩基质中自形石英晶面发育蜂窝状微孔隙(图6f)。

生物体腔微孔隙以葛万藻为例,在计算机断层(CT)扫描二维切片上微孔隙直径以小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 为主,且直径 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以内的微孔隙占大部分比例(图7a—d)。常规扫描电镜下方解石重结晶形成的微孔隙在 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以内(图6e),微孔隙连通性较好。自形石英晶

面蜂窝状微孔隙直径一般小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ (图6f)。

3 讨论

3.1 孔隙-微孔隙的成因

基于碳酸盐矿物沉积-成岩过程中矿物稳定性、成岩改造等作用与孔隙类型的关系,可将孔隙分为组构选择性、非组构选择性^[19]。基于孔隙特征研究以及成岩演化序列的理解,可对超深层灰岩的孔隙、微孔隙成因进行初步分析。

顺南7井一间房组下段藻灰岩孔隙以窗格孔、遮蔽孔为典型特征,属于组构选择性孔隙。孔隙的双层

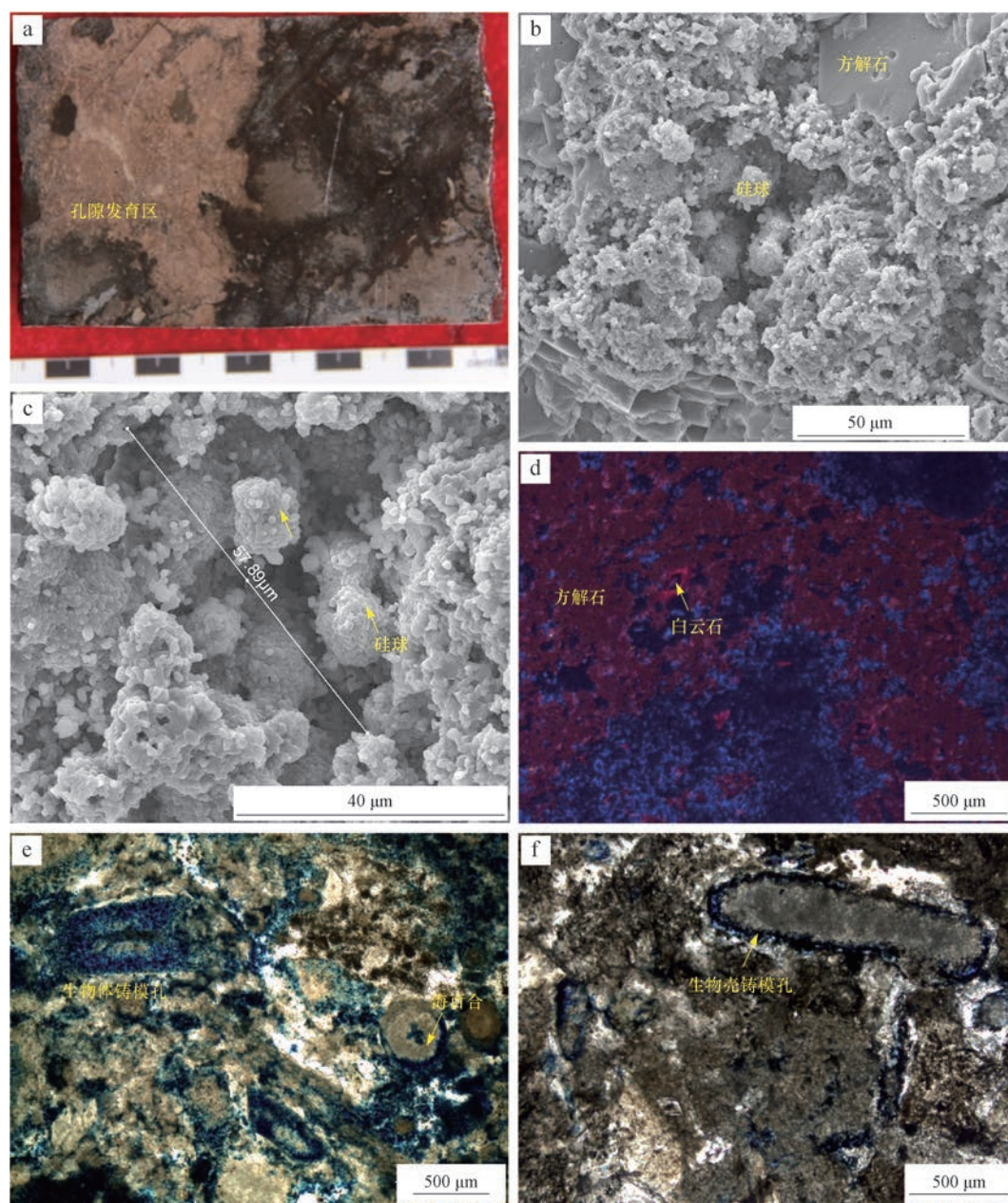


图5 塔中地区顺托1井一间房组上段典型孔隙特征

Fig. 5 Characteristics of typical pores in the Upper Yijianfang Formation of Well Shuntuo-1 in Tazhong area

a. 岩心照片, 孔隙发育区呈浅灰-灰白色, 形态不规则, 埋深 7 705.60 m; b. 孔隙发育区的扫描电镜二次电子图像, 自形方解石与硅球之间发育大量孔隙, 埋深 7 705.60 m; c. 图 b 中局部放大, 晶间孔隙达几十微米, 埋深 7 705.60 m; d. 孔隙发育区阴极发光图像, 亮红色白云石部分残留于硅球与方解石之中, 埋深 7 705.60 m; e, f. 孔隙发育区铸体薄片, 部分残留的生物体腔孔, 埋深 7 705.60 m

结构表明孔隙流体早期为富镁海水条件, 而晚期为变质海水(原始孔隙海水经历浅埋-深埋过程进一步发生浓缩)。孔隙的多层结构中纤柱状方解石夹非自形白云石环带代表了早期富镁海水或浅埋藏条件下与海水性质相似的孔隙流体; 透明粒状方解石、直面自形白云石与晚期自形方解石可能代表了埋藏条件下孔隙流体沉淀的结果。由此可见, 目前可见的孔隙应该是胶结残余的窗格孔、遮蔽孔, 孔隙无论是双层结构还是多层结构均揭示了从沉积至埋藏的过程。孔隙的保存可

能与白云石化(抗压实压溶作用)、有限的孔隙流体有关。

分布于藻屑内部的方解石晶间微孔隙可能受藻屑内部有机质演化与重结晶作用的共同控制。薄片分析显示藻屑内部普遍具有有机质(图8), 且有机质分布于方解石晶间微孔之中(图4f)。已有研究表明^[20], 碳酸盐岩中有机质可能来源于生物钙化过程、微生物或生物活动过程, 相对封闭环境下低程度氧化有利于原始有机质的保存, 并且进一步发生硫酸盐还原作用、反

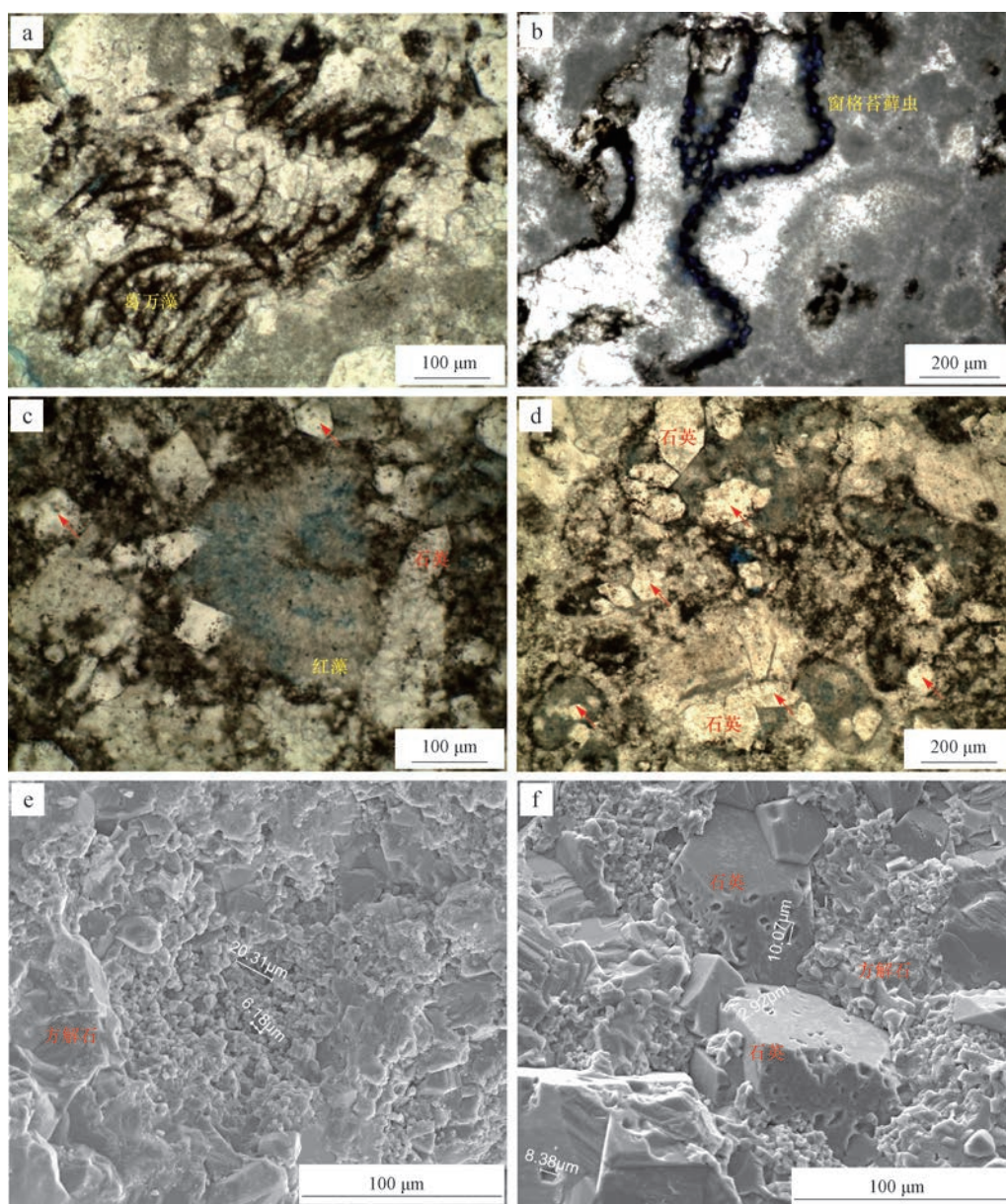


图6 塔中地区顺托1井一间房组上段典型微孔隙特征

Fig. 6 Characteristics of typical micro-pores in the Upper Yijianfang Formation of Well Shuntuo-1 in Tazhong area

- a. 铸体薄片, 葛万藻体腔微孔, 7 705.65 m; b. 铸体薄片, 窗格苔藓虫体腔微孔, 7 672.24 m; c. 铸体薄片, 红藻体腔微孔, 7 707.39 m; d. 铸体薄片, 粒间与粒内重结晶方解石晶间微孔, 7 707.39 m; e. 扫描电镜图像, 方解石晶间微孔, 7 706.15 m; f. 扫描电镜图像, 自形石英晶面微孔隙, 7 705.65 m

硝化作用。随着埋深增加, 有机质演化与方解石的重结晶作用将共同作用, 从而促进自形方解石及其晶间微孔的形成。

顺托1井一间房组上段生物粘结岩基质中具有大量的自形石英, 其孔隙-微孔隙的发育可能与热液流体的改造、早期烃类充注及其演化抑制了进一步成岩作用有关。蜂窝状孔隙与基质之间存在明显的蚀变边界(图9a), 蜂窝状孔隙中以具孔隙的隐晶质硅为主要特点(图5d,e), 而基质中发育大量自形石英为典型特

点(图6d,f)。在隐晶质硅之中残留分散的直面自形白云石表明热液流体的改造应该晚于自形白云石的形成, 而一般认为分散直面自形白云石形成于浅埋藏条件。选择性生物壳铸模孔隙的形成同样表明热液流体的改造应该属于成岩早期。早期形成的孔隙有利于生烃高峰期液态烃的充注, 并且烃类充注及其演化可进一步抑制成岩作用。孔隙-微孔隙中可见大量沥青质(图9b,c), 表明早期烃类充注对孔隙-微孔隙的保存具有建设性作用。

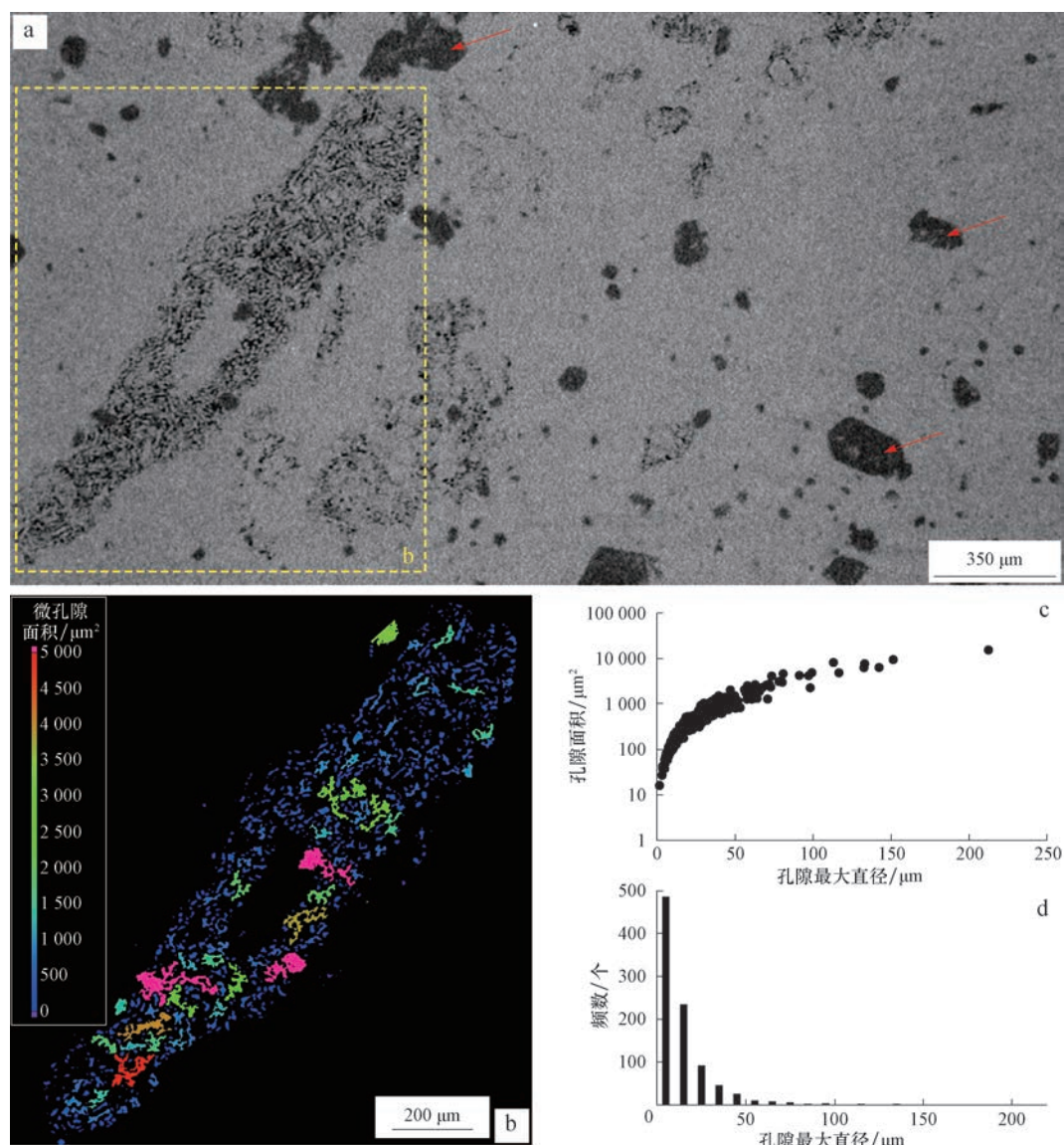


图7 塔中地区顺托1井葛万藻内部微孔隙特征

Fig. 7 Characteristics of micro-pores in Girvanella of Well Shuntuo 1 in Tazhong area

a. 计算机断层扫描二维切片,分辨率1.6 μm ,红色箭头所指为微孔隙发育的方解石集合体,其微孔特征见图6e;b. 对a中黄框线内葛万藻内部微孔隙进行二维面积刻画;c,d. 基于b中微孔隙最大直径与面积及频数的统计关系分析

3.2 储层发育的控制作用

上述分析表明顺南7井一间房组下段藻灰岩储层与顺托1井一间房组上段生物粘结岩储层属于不同成因具体不同特点的超深层孔隙-微孔隙型灰岩储层,其储层发育的控制因素存在差异。

1) 相控型藻灰岩储层

一间房组下段藻灰岩以低伽马、纯碳酸盐矿物、藻类占绝对主导地位为主要特征,代表了一间房组沉积早期相对干净的水体特征,藻纹层、窗格孔为代表的沉积组构特征表明其主要形成于潮间-潮上带。藻类等微生物种群的发育促进原始有机质的富

集,其在埋藏成岩过程随着热演化作用的进行与重结晶作用相互制约导致了粒内微孔隙的保存。由此可见,以顺南7井为代表的一间房组下段储层主要发育于潮间-潮上带藻灰岩中。顺南三维工区储层预测表明相关有利储层的发育呈条带状-片状,分布于其中的顺南5井、顺南501井在一间房组下段均获得良好的天然气效果。

2) 断控-热液改造型生物粘结岩储层

顺托1井位于顺1西三维区,邻近顺1井北东向走滑断裂带(图1)。地震-地质剖面显示顺托1井附近发育晚奥陶世火成岩侵入体^[21],并已被顺1井、顺托1井证实。顺托1井一间房组岩心^[21]与岩石CT切

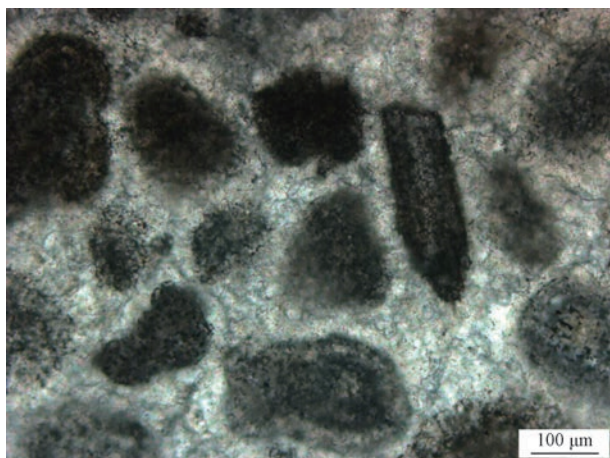


图8 塔中地区一间房组下段藻屑内部分散有机质分布特征
Fig. 8 Distribution characteristics of dispersed organic matter in algae particles in the Lower Yijianfang Formation in Tazhong area

片均揭示了热液流体改造的特征(图9),薄片分析表明生物粘结灰岩基质中具有异常高的石英含量,由此表明其储层主要受构造-热液控制。塔中I号断裂带以北受北东向走滑断层的控制,在顺南4、古隆1、古城6等多口钻井已证实普遍存在热液活动并普遍具有以石英为代表的热液矿物^[14,21-22]。

4 结论

超深层条件下灰岩可以发育孔隙、微孔隙且具有一定的勘探潜力。顺南7井一间房组下段藻灰岩以窗格孔、遮蔽孔与藻屑内部方解石晶间微孔隙为主要储集空间;顺托1井一间房组上段生物粘结岩以生物壳铸模孔、硅球与自形方解石集合体内部晶间孔隙、生物

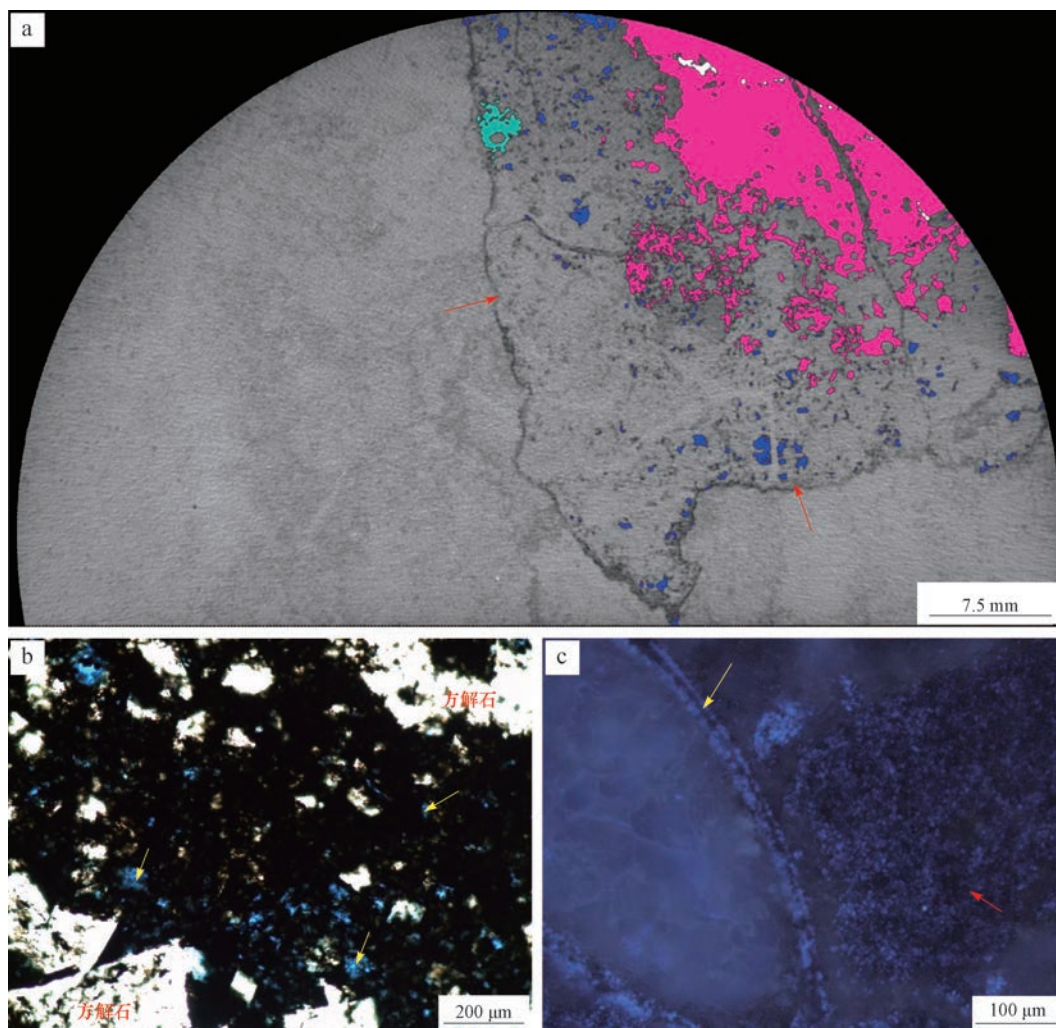


图9 塔中地区顺托1井一间房组上段蚀变特征及孔隙-微孔隙有机质特征
Fig. 9 Characteristics of alteration and organic matters in pores and micro-pores in the Upper Yijianfang Formation of Well Shuntuo-1 in Tazhong area

a. 计算机断层扫描二维切片显示的硅质热液侵蚀边界(红色箭头所指),彩色区域为孔隙,扫描分辨率为41 μm;b. 孔隙中充填的沥青质且沥青质中间发育孔隙(黄色箭头所指),铸体薄片;c. 灰岩基质中的沥青质呈不发光-蓝白色荧光,黄色箭头所指为介形虫壳,红色箭头所指为葛万藻

体腔微孔、方解石晶间微孔、自形石英晶面微孔为主要储集空间。藻灰岩的孔隙为沉积-成岩早期的胶结残余,而微孔隙的形成可能与重结晶作用、原始有机质及其演化相关。生物粘结岩孔隙-微孔隙可能与成岩早期的热液流体改造相关,早期液态烃类充注对孔隙、微孔隙保存具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Schmoker J W, Halley R B. Carbonate porosity versus depth: a predictable relation for South Florida [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66 (12): 2561-2570.
- [2] Halley R B, Schmoker J W. High-porosity Cenozoic carbonate rocks of south Florida: progressive loss of porosity with depth [J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(2): 191-200.
- [3] Ehrenberg S N, Eberli G P, Keramati M, et al. Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolostone reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(1): 91-114.
- [4] Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Jin Zhijun, et al. Formation mechanism of deep Cambrian dolomite reservoirs in the Tarim basin, northwestern China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 59: 232-244.
- [5] Zou Caineng, Hou Lianhua, Hu Suyun, et al. Prospect of ultra-deep petroleum onshore China [J]. Energy, Exploration & Exploitation, 2014, 32(1): 19-40.
- [6] Jemison R M. Geology and development of mills ranch complex—World's Deepest Field [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63 (5): 804-809.
- [7] Sternbach C A, Friedman G M. Dolomites formed under conditions of deep burial: Hunton Group carbonate rocks (Upper Ordovician to Lower Devonian) in the deep Anadarko Basin of Oklahoma and Texas [J]. Carbonates and Evaporites, 1986, 1(1): 61-73.
- [8] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式——以四川普光气田为例 [J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1087-1094.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: a case study from the Puguang oilfield in Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8): 1087-1094.
- [9] 马永生, 郭彤楼, 赵雪凤, 等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2007, 37(S2): 43-52.
Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, et al. Generation mechanism of deep high-quality dolomite reservoirs in Puguang Gas Field [J]. Science in China (Series D), 2007, 37(S2): 43-52.
- [10] Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 687-695.
- [11] 王铁冠, 宋到福, 李美俊, 等. 塔里木盆地顺南-古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 753-762.
Wang Tieguan, Song Daofu, Li Meijun, et al. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(6): 753-762.
- [12] Li Sumei, Amrani Alon, Pang Xiongqi, et al. Origin and quantitative source assessment of deep oils in the Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Organic Geochemistry, 2015, 78: 1-22.
- [13] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合-联合成因机制 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743-752.
He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhangtao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(6): 743-752.
- [14] 云露, 曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 788-797.
Yun Lu, Cao Zicheng. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(6): 788-797.
- [15] 蔡习尧, 钱一雄, 陈强路, 等. 塔里木盆地古隆 1 井奥陶系哈尔巴克组与一间房组的发现及意义 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 348-358.
Cai Xiyao, Qian Yixiong, Chen Qianglu, et al. Discovery and significance of Qrebake and Yijianfang Formations of Ordovician in Well GL1, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 348-358.
- [16] 蔡习尧, 马宇驰, 陈跃, 等. 塔里木盆地中央隆起区哈尔巴克组与一间房组分布及意义 [J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 591-598.
Cai Xiyao, Ma Yuchi, Chen Yue, et al. Distribution and significance of the Ordovician Qrebake and Yijianfang formations in the Central Uplift of the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(5): 591-598.
- [17] 张智礼, 李慧莉, 谭广辉, 等. 塔里木中央隆起区奥陶纪碳同位素特征及其地层意义 [J]. 地层学杂志, 2014, 38(2): 181-189.
Zhang Zhili, Li Huili, Tan Guanghui, et al. Carbon isotope chemostratigraphy of the Ordovician system in Central Uplift of the Tarim Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(2): 181-189.
- [18] Løngø A. Making sense of carbonate pore systems [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(9): 1381-1405.
- [19] Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(2): 207-250.
- [20] Swart P K. The geochemistry of carbonate diagenesis: The past, present and future [J]. Sedimentology, 2015, 62: 1233-1304.
- [21] 韩俊, 曹自成, 邱华标, 等. 塔中北斜坡奥陶系走滑断裂带与岩溶储集体发育模式 [J]. 新疆石油地质, 2016, 37(2): 145-151.
Han Jun, Cao Zicheng, Qiu Huabiao, et al. Model for strike-slip fault zones and karst reservoirs development of Ordovician in Northern Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(2): 145-151.
- [22] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向 [J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 257-267.
Huang Taizhu. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(3): 257-267.