

文章编号:1673-5005(2009)05-0006-06

塔河油田奥陶系多期岩溶作用的识别标志

万云¹, 刘存革², 刘洪¹, 刘建军², 袁福锋³

(1. 重庆科技学院 科技处, 重庆 401331; 2. 中国石化 西北分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 西南石油大学 研究生院, 四川 成都 610500)

摘要:通过岩心观察、薄片鉴定及古生物、地球化学等分析手段,结合区域地质资料和钻井测井资料对同生期大气水溶蚀作用、加里东期表生岩溶作用、海西早期表生岩溶作用及埋藏期溶蚀作用的识别标志进行详细研究。结果表明,各期岩溶作用在区域上的分布特征、岩溶产物的岩石学特征、成岩作用特征、地球化学特征、古生物特征等方面都有明显的差别,以此为基础可建立各期岩溶作用的识别标志,指导油气勘探。

关键词:塔河油田;奥陶系;岩溶作用;识别标志;加里东期;海西早期;同生期;埋藏期
中图分类号:P 588.2 **文献标识码:**A

Identification signs of multiphase karstification of Ordovician reservoir in Tahe Oilfield

WAN Yun¹, LIU Cun-ge², LIU Hong¹, LIU Jian-jun², YUAN Fu-feng³

(1. Scientific Research Department, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;
2. Northwest Branch Company, SINOPEC, Urumchi 830011, China;
3. Graduate School of Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The identification signs of karstification in syndiagenetic stage, Caledonian Epi-diagenetic stage, Early Hercynian Epi-diagenetic stage and Epi-Hercynian burial stage were studied in detail by the means of core observation, thin section analysis, paleontology and geochemistry on the basis of the information of regional geology, well drilling and well logging. The results show that the characteristics of the periodic karstifications are significantly different in the regional distribution, and the petrology, diagenesis, geochemistry and paleontology features of the karstic products are different. Therefore the identification marks of the periodic karstifications can be established to guide petroleum exploration.

Key words: Tahe Oilfield; Ordovician formation; karstification; identification sign; Caledonian; Early Hercynian; Syndiagenetic stage; burial stage

塔河油田奥陶系油藏位于塔里木盆地沙雅隆起南坡阿克库勒凸起上,奥陶系经历了加里东期、海西早期、海西晚期及燕山期等多期构造运动。地层遭受了多期岩溶作用,即沉积期受海平面变化控制的大气水溶蚀作用,加里东期受平行不整合面控制的大气水岩溶作用,海西早期受角度不整合面控制的大气水岩溶作用以及海西期后与热液活动有关的埋藏溶蚀作用,最终形成以岩溶缝洞型储层为主的潜山油气藏。

由于不同时期古地质背景和构造作用特征具有较大的差异,导致了各个时期流体活动、岩溶机制、岩溶作用强度、分布规律及对储层发育的影响差别很大。因而,正确建立各期岩溶作用的识别标志是研究各期流体活动特征、岩溶储层分布规律及有效划分岩溶期次的重要基础,对指导油气勘探也具有重要意义。塔河油田奥陶系油藏是多期岩溶作用相互叠加、相互改造的最终产物,由于岩溶作用的持续改造,很难准确识

收稿日期:2009-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50604022);重庆市教委科技项目(KJ081412)

作者简介:万云(1959-),女(汉族),重庆人,高级工程师,学士,主要从事石油与天然气地质研究。

别和区分各期岩溶作用^[1-2]。笔者通过岩心观察、薄片鉴定及古生物、地球化学等分析手段,结合区域地质资料、钻井测井资料等详细研究各期岩溶作用的识别标志,为准确划分岩溶期次打下基础。

1 同生期大气水溶蚀作用识别标志

同生期大气水溶蚀作用是碳酸盐沉积物形成后,由于海平面的周期性变动,导致礁滩体等高部位周期性暴露地表,接受大气淡水的淋滤,文石、高镁方解石以及不稳定的盐类矿物,在淡水作用下会发生溶解,通常产生粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔^[3-4]。此类溶蚀作用标志如下:

(1)该期溶蚀作用在区域、层位和岩性上都具有一定的选择性。对塔河油田多口井岩心及薄片的统计分析表明,该期溶蚀作用形成的孔隙型储层主

要发育于塔河油田南部奥陶系一间房组上部的颗粒灰岩中,颗粒灰岩类型有生屑灰岩、砂屑灰岩及鲕粒灰岩等,颗粒灰岩在平面上的分布主要受礁滩沉积相展布的控制,主要是由于频繁海平面升降变化导致礁滩体等高部位频繁暴露于水体之上,并接受大气水的淋滤溶解,形成大量的溶蚀孔隙。

(2)该期溶蚀作用及化学充填作用显示出强烈的组构选择性。溶蚀作用主要在颗粒内部或一代纤维柱状方解石胶结物中进行,主要针对石膏、文石和高镁方解石等不稳定的结构组分进行溶解,形成粒内溶孔、铸模孔及粒间溶孔。化学充填作用主要针对同生期大气水溶蚀作用形成的粒内、粒间溶孔进行充填,并在颗粒内部形成单晶或多晶方解石充填物(图1(a))。

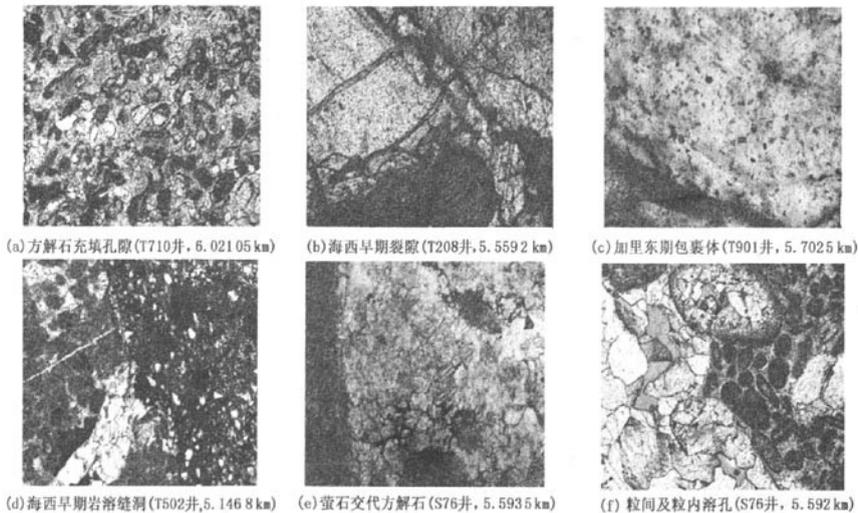


图1 多期岩溶作用微观结构特征

Fig. 1 Micro-structure characteristics of multiphase karstification

(3)溶蚀孔隙壁上黑色沥青赋存。该期溶蚀作用形成的溶蚀孔隙大多赋存沥青物质,表明该期形成的溶蚀孔隙存在着早期石油充注,并受到过水洗氧化改造。前人的大量研究也表明,本区溶蚀孔隙内的石油充注可能发生于加里东中晚期^[5]。综上所述,这些溶蚀孔隙形成时间较早,油气的早期充注是其得以保存下来的重要原因。

(4)溶蚀孔隙内方解石充填物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与中晚奥陶世海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 背景值一致,分布范围窄; $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负,分布范围也较窄(图2)。碳氧

同位素特征表明,该期的岩溶作用发生在大气水环境,但由于滩体暴露时间较短,大气水改造作用相对较弱,因此碳氧同位素值仍可继承海相沉积物的特征。

(5)该期溶蚀作用主要形成孔隙-裂缝型储层。岩心上表现为针孔发育,微裂缝发育;测井曲线上表现为自然伽马值增大,双侧向电阻率降低,声波时差增加,密度值略有降低的特征;成像测井图上表现为针孔状溶蚀孔洞发育。这与加里东期及海西早期溶蚀的测井响应特征有明显区别。

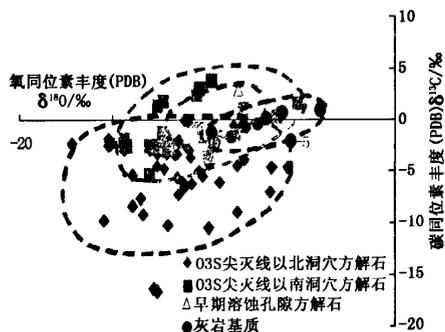


图2 塔河油田奥陶系不同岩溶时期的
碳氧同位素特征

Fig.2 Character of C/O isotope in Ordovician
formation in Tahe Oilfield during different karst periods

2 加里东期表生岩溶作用识别标志

早奥陶世末—晚奥陶世末,塔里木地区发生了区域性挤压构造运动,沙雅隆起也在这时形成雏形,研究区在这次构造运动中受影响相对较弱,主要表现为整体小幅度抬升,形成向北抬起的缓坡形态,导致一间房组与上伏恰尔巴克组之间、良里塔格组与上伏桑塔木组之间为平行不整合接触^[6]。地震剖面上可见上伏地层上超于平行不整合面上,上下地层之间存在生物化石带的缺失,如一间房组顶部与恰尔巴克组之间可缺失2~4个牙形石化石带^[7]。由此可见,本区存在加里东期岩溶作用。

2.1 分布区域标志

加里东期岩溶产物主要分布于塔河油田南部的上奥陶统覆盖区(桑塔木组尖灭线以南),纵向上分布于中下奥陶统一间房组、鹰山组及上奥陶统良里塔格组。该区域上奥陶统桑塔木组岩性以泥岩为主,可视为不透水层,该不透水层的存在阻止了海西早期岩溶在本区的发育,因此加里东期岩溶产物得以保存,该区域多口钻井在中下奥陶统及上奥陶统良里塔格组灰岩钻遇加里东期岩溶洞穴。而在塔河主体区(桑塔木组尖灭线以北),加里东期形成的岩溶产物经海西早期岩溶改造后难以保存,仅少数井在深层洞穴发现加里东期岩溶产物。

2.2 岩石学标志

加里东期溶洞充填物较为单调,岩溶孔洞内充填物的组分以方解石和碳酸盐泥为主(图1(b)),两种组分共占溶洞充填物的80%以上(图3),局部可见自生石英和少量的陆源泥质,未见陆源石英砂。反映了加里东期发生岩溶时,塔里木广大地区地表均为台地相纯净碳酸盐岩“被子”覆盖,缺少陆源碎

屑物质供应。

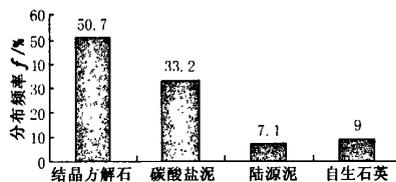


图3 加里东期岩溶孔洞充填物矿物
组分的分布频率特征

Fig.3 Frequency distribution character of
mineralogical composition of fillings in karst
caves during Caledon stage

2.3 成岩序列标志

塔河油田经历的多期构造运动导致了其成岩环境演化比较复杂,先后经历了同生期的海底成岩环境、大气淡水成岩环境、浅埋藏成岩环境、加里东期表生成岩环境、浅埋藏成岩环境、海西早期表生成岩环境、浅、深埋藏成岩环境。多期不同环境的成岩序列及溶洞、裂缝和充填物在成岩作用过程中的切割关系可划分各岩溶期次。加里东期岩溶缝洞可切割同生期溶蚀孔隙内充填的单晶或多晶方解石,该期形成的溶洞多被方解石晶体、碳酸盐泥等充填,其充填物又受到后期压溶作用形成的缝合线及海西早期风化裂隙的切割改造(图1(b))。

2.4 地球化学标志

(1)碳氧稳定同位素标志。选取灰岩基质、早期溶孔内方解石、桑塔木组尖灭线以南洞穴方解石以及桑塔木组尖灭线以北洞穴方解石的碳氧稳定同位素样品进行分析(图2)。4类方解石样品可大致代表海水环境、同生期大气水溶蚀环境、加里东期岩溶环境和海西早期岩溶环境。结果表明:加里东期岩溶产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海西早期相比明显偏正,并与中晚奥陶世海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 背景值接近; $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负,分布范围较宽,与海西早期相似。碳同位素特征表明,此期溶蚀孔洞充填的方解石主要来源于台地内部,同时也表明暴露剥蚀时间较短,没有受到有机质氧化产生的轻 CO_2 的影响。氧同位素特征表明,该期的岩溶作用发生在大气水环境,其范围值较宽,反映岩溶作用的纵向分带特征,越靠近不整合面, $\delta^{18}\text{O}$ 值越偏负,而在离不整合面较深处, $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏正。

(2)锶同位素标志。前人大量研究证实塔河地区奥陶系碳酸盐岩中锶同位素比值受陆源锶与碳酸盐岩重溶锶比例的控制,碳酸盐岩重溶锶的同位素

比值相对较低,陆源铈的加入会使铈同位素比值明显增加^[8-9]。选取桑塔木组尖灭线以南洞穴方解石以及桑塔木组尖灭线以北洞穴方解石两类样品(大致代表加里东期岩溶环境和海西早期岩溶环境)进行分析(图4)。从图4可以看出:桑塔木组尖灭线以南(加里东期)洞穴方解石的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 值为0.70871~0.71012,平均为0.70932,这与早奥陶世海洋的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 值(0.7077~0.7094)^[8]范围接近;桑塔木组尖灭线以北洞穴方解石 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 值较高,为0.70894~0.71295,平均为0.710。这表明在加里东期岩溶时期,地表直接出露的是一套岩性非常纯净的正常海相碳酸盐岩,岩溶产物的铈同位素组成将主要受下奥陶统海相碳酸盐岩重溶铈来源的控制,与下奥陶统海相碳酸盐岩的铈同位素组成相近,呈相对低值特征。

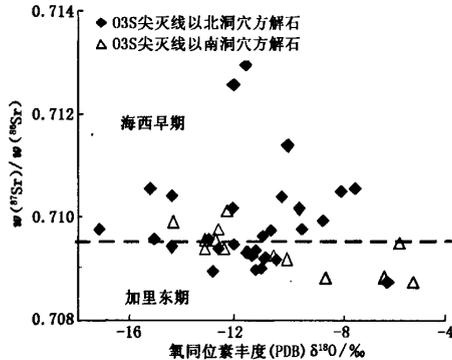


图4 塔河油田奥陶系岩溶产物 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 的分布特征

Fig. 4 Distribution character of $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ of karst product in Ordovician formation of Tahe Oilfield

(3)包裹体标志。包裹体类型、均一温度、盐度成熟度等特征反映充填作用发生的环境^[10]。加里东期方解石晶体中包裹体类型有两相、单相水溶液包裹体,两相、单相烃包裹体和沥青包裹体。其中液态烃包裹体多呈灰黑-黑色(图1(c)),这种烃类包裹体成熟度低,对应的铈同位素值也较低,应为加里东期的产物。

3 海西早期表生岩溶作用的识别标志

海西早期构造运动是阿克库勒凸起最为重要、影响最为强烈的构造运动,表现为强烈的构造抬升、褶皱和断裂活动,造成志留-泥盆系、上奥陶统地层普遍遭到剥蚀,中下奥陶统顶部也受到部分剥蚀,形成区域性不整合面。该期岩溶作用也异常强烈,是

本区最主要的岩溶发育期。

3.1 分布区域标志

海西早期岩溶产物主要分布于塔河油田主体区中下奥陶系一间房组和鹰山组(桑塔木组尖灭线以北),其分布范围受上奥陶统桑塔木组不透水层分布的控制,该套不渗透层在阿克库勒凸起周边呈裙边式分布。在泥盆纪末海平面下降时期,阿克库勒凸起高部位受到强烈岩溶作用,岩溶地貌的出水区应在上奥陶统桑塔木组尖灭线附近,不可能穿透上奥陶统桑塔木组在其尖灭线以下深部泄出。当石炭纪海平面逐渐上升,超过上奥陶统桑塔木组尖灭线时,出水区应在海平面附近。由此可见,阿克库勒凸起奥陶系碳酸盐岩海西早期岩溶发育的范围限制在上奥陶统桑塔木组尖灭线以北,尖灭线以南海西早期岩溶不发育但加里东期岩溶发育。

3.2 岩石学标志

海西早期岩溶作用与加里东期相比,其表现形式更为复杂,如构造-风化裂隙发育、大型洞穴发育、洞穴充填物类型复杂等。但是,该期岩溶作用最突出的特征是洞穴内充填物富含陆源碎屑组分(图1(d)),这是区别加里东期岩溶的最主要标志。陆源碎屑组分的增加可能反映了上奥陶系、志留系、泥盆系碎屑岩地层对岩溶缝洞充填物类型起着控制作用。

3.3 成岩序列标志

海西早期岩溶缝洞往往是在缝合线、构造裂隙的基础上进一步溶蚀扩大形成的,这种岩溶缝洞可明显地切割同生期溶蚀孔隙内充填的单晶或多晶方解石、加里东期形成的构造裂隙方解石及岩溶孔洞充填物(图1(d)),同时还可切割平行层面缝合线以及沿平行层面缝合线发育的白云石化斑块,岩溶缝洞充填物可被后期形成的构造裂隙以及晚期缝合线切割改造。

3.4 地球化学标志

(1)碳氧稳定同位素标志。海西早期岩溶缝洞方解石的碳氧稳定同位素组成特征表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均偏负,且变化范围较宽(图2)。 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏负反映了岩溶作用发生于大气水环境,其值变化范围较宽反映岩溶作用的纵向分带特征; $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负表明当时有机质氧化产生的轻 CO_2 加入到大气水流体中,间接指示出当时地表已有成熟的土壤、湿润的气候和普遍的植物生长。

(2)铈同位素标志。海西早期不整合面上既有下奥陶统碳酸盐岩分布,又有中上奥陶统、志留-泥

盆系碎屑岩分布,因此该期岩溶产物含有大量陆源碎屑物质,使岩溶产物中陆源锶来源大量增加,导致了岩溶产物的锶同位素比值明显增大。桑塔木尖灭线以北洞穴方解石 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 值较高(图4),由此可见,海西早期岩溶产物的 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 值由于陆源锶的加入而表现为高值特征。

(3)包裹体标志。海西早期岩溶缝洞方解石中烃类包裹体成熟度中等一较高,颜色为浅黄色、黄色,荧光也显示浅黄色、黄色,对应的锶同位素值也较高。

3.5 孢粉标志

S81,TK427,S70,S75,T314,S86等6口井检测出泥盆纪孢子^[11]。由于加里东期岩溶缝洞充填物中不可能含有泥盆纪孢子,因此孢粉存在是海西早期岩溶的重要标志。

4 埋藏期溶蚀作用的识别标志

本区埋藏溶蚀作用发生于海西期后浅—深埋藏期,按溶蚀作用机理可分为热液溶蚀作用及酸性溶液溶蚀作用。

4.1 热液溶蚀作用的识别标志

热液溶蚀作用机理主要是携带大量化学活性物质(如 CO_2 , H_2S , SO_2 等)的热液流体与地层水混合后沿裂隙或断裂循环,并释放出大量的热能,促使流体与所经围岩发生各种物理化学反应,对碳酸盐岩的溶蚀作用^[12-13],研究区在早二叠世发生过大规模火山活动,岩浆热液流体与地层水混合后沿构造裂隙渗滤,溶蚀碳酸盐岩。热液作用主要表现为萤石化、绿泥石化和褪色作用^[13]。研究发现萤石交代方解石现象,萤石内部还有大量溶孔发育(图1(e)),萤石周围岩石有明显的褪色作用,这是埋藏期热液溶蚀的直接证据。

4.2 酸性溶液溶蚀作用识别标志

酸性溶液溶蚀作用主要是烃类在热催化裂解或硫酸盐还原作用下,生成有机酸、 CO_2 或 H_2S ,这些酸性溶液可溶解碳酸盐岩,形成大量溶蚀孔隙^[14-16]。此类溶蚀作用主要形成针孔状次生孔隙,溶蚀作用无组构选择性,溶蚀孔隙有粒内溶孔、粒间溶孔(图1(f))。此外,本区储层中普遍发育黄铁矿,这可能是 H_2S 与 Fe^{2+} 作用的产物。

5 结论

(1) 同生期溶蚀作用主要发育于塔河油田南部一间房组上部的颗粒灰岩中,该期溶蚀作用及化学

充填作用显示出很强的组构选择性,溶蚀孔隙壁有沥青赋存,碳同位素值偏正,氧同位素值偏负,该期溶蚀作用主要形成孔隙型储层。

(2) 加里东期岩溶产物主要分布于塔河油田南部的上奥陶统覆盖区中下奥陶统及上奥陶统良里塔格组,溶洞内充填物的组分以方解石和碳酸盐泥为主, $\delta^{13}\text{C}$ 值与中晚奥陶世海相碳酸盐岩的背景值接近, $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负,锶同位素值显相对低值特征,液态烃包裹体成熟度低。

(3) 海西早期岩溶产物主要分布于桑塔木组尖灭线以北下奥陶统一间房组和鹰山组,岩溶溶洞充填物比较复杂,且富含陆源碎屑组分,碳氧稳定同位素组成特征表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值均偏负,洞穴方解石 $w(^{87}\text{Sr})/w(^{86}\text{Sr})$ 值较高,液态烃类包裹体成熟度中等一较高,岩溶产物中有泥盆纪孢子存在。

(4) 埋藏溶蚀作用可分为热液溶蚀作用及酸性溶液溶蚀作用。热液溶蚀作用表现为萤石交代方解石,萤石内部发育溶孔,萤石周围岩石有明显的褪色作用。酸性溶液的溶蚀作用表现为针孔状次生孔隙发育,溶蚀作用无组构选择性。

参考文献:

- [1] 徐国强,李国蓉,刘树根,等. 塔里木盆地早海西期多次风化壳岩溶洞穴层[J]. 地质学报, 2005, 79(4): 557-568.
XU Guo-qiang, LI Guo-rong, LIU Shu-gen, et al. Multiple karst cave horizons in the early hercynian weathering crust in the Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(4): 557-568.
- [2] GU J. Characteristics and evolutionary models of karst reservoirs of lower Ordovician carbonate rocks in Lunnan area of Tarim Basin, China [J]. AAPG Bull, 2000, 84(9): 14-31.
- [3] 张涛,闫相宾,王恕一,等. 塔河油田奥陶系一间房组礁滩相溶蚀孔隙型储层特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4): 462-471.
ZHANG Tao, YAN Xiang-bin, WANG Shu-yi, et al. Characteristics and genesis of reef-bank facies reservoirs with dissolution pores in Ordovician Yijianfang formation in Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 462-471.
- [4] 徐国强,邵大力,刘树根,等. 塔北隆起区一间房组礁滩沉积体特征[J]. 天然气工业, 2006, 26(4): 16-19.
XU Guo-qiang, SHAO Da-li, LIU Shu-gen, et al. Characteristics of reef flat deposits in Yijianfang formation at Tahe uplifted zone [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26

- (4):16-19.
- [5] 邓小江,梁波,莫耀汉,等. 塔河油田奥陶系一间房组礁滩相储层特征及成因机制新认识[J]. 地质科技情报,2007,26(4):63-69.
DENG Xiao-jiang, LIANG Bo, MO Yao-han, et al. A new know of characteristics and genesis of reef and bank facies reservoirs in Ordovician Yijianfang formation in Tahe Oilfield [J]. Geological Science and Technology Information, 2007,26(4):63-69.
- [6] 俞仁连. 塔里木盆地塔河油田加里东期古岩溶特征及其意义[J]. 石油实验地质,2005,2(5):468-472.
YU Ren-lian. Characteristics and significance of the Caledonian karst in the Tahe Oilfield in the Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005,2(5):468-472.
- [7] 刘春燕,吴茂炳,巩固. 塔里木盆地北部塔河油田奥陶系加里东期岩溶作用及其油气地质意义[J]. 地质通报,2006,25(9/10):1128-1134.
LIU Chun-yan, WU Mao-bing, GONG Gu. Caledonian karstification of Ordovician carbonates in the Tahe Oilfield, Northern Tarim Basin, Northwest China, and its petroleum geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2006,25(9/10):1128-1134.
- [8] 张涛,云露,邹兴威,等. 锶同位素在塔河古岩溶期次划分中的应用[J]. 石油实验地质,2005,27(3):299-303.
ZHANG Tao, YUN Lu, WU Xing-wei, et al. The application of strontium isotopes in division of paleokarst stages in Tahe oilfield [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005,27(3):299-303.
- [9] GEORGE A D, CHOW N. Palaeokarst development in a lower frasnian (devonian) platform succession, Canning Basin, Northwestern Australia [J]. Australian Earth J Sci, 1999,46(6):905-913.
- [10] 李纯泉,陈红汉,陈汉林,等. 塔河油田奥陶系有机包裹体的油气指示意义[J]. 天然气工业,2004,24(10):24-26.
LI Chun-quan, CHEN Hong-han, CHEN Han-lin, et al. Organic inclusions in the ordovician reservoir in Tahe Oilfield [J]. Natural Gas Industry, 2004,24(10):24-26.
- [11] 肖玉茹,何峰煜. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究——以塔河油田为例[J]. 石油与天然气地质,2003,24(1):75-80.
XIAO Yu-ru, HE Feng-yu. Reservoir characteristics of paleocave carbonates—a case study of ordovician paleo-reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003,24(1):75-80.
- [12] HEDENQUIST J W, HENLEY R W. The importance of CO₂ on freezing point measurements of fluid inclusions: evidence from active geothermal systems and implications for epithermal ore deposition [J]. Economic Geology, 1985,80(5):1379-1405.
- [13] 吴茂炳,王毅,郑孟林,等. 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩热液岩溶及其对储层的影响[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2007,37(增刊I):83-92.
WU Mao-bing, WANG Yi, ZHENG Meng-lin, et al. The hydrothermal karstification and the influence for the reservoir in Ordovician formation in the middle part of Tarim Basin [J]. China Science, (Ser D): Geoscience, 2007,37(sup I):83-92.
- [14] 王恕一,陈强路,马红强. 塔里木盆地塔河油田下奥陶统碳酸盐岩的深埋溶蚀作用及其对储集体的影响[J]. 石油实验地质,2003,25(1):557-561.
WANG Shu-yi, CHEN Lu-qiang, MA Hong-qiang. Burial corrosion of lower ordovician carbonate rocks and its influence on reservoirs in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003,25(1):557-561.
- [15] 曾伟,黄先平,杨雨,等. 川东北地区飞仙关组储层中的埋藏溶蚀作用[J]. 天然气工业,2006,26(11):4-6.
ZENG Wei, HUANG Xian-ping, YANG Yu, et al. Burial dissolution of Feixianguan formation reservoir in Northwest Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2006,26(11):4-6.
- [16] 徐世琦,洪海涛,张光荣,等. 四川盆地三叠统飞仙关组鲕粒储层发育的主要控制因素分析[J]. 天然气勘探与开发,2004,27(1):1-3.
XU Shi-qi, HONG Hai-tao, ZHANG Guang-rong, et al. Main controlling factors analysis on oolitic reservoir development of lower Triassic Feixianguan formation in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2004,27(1):1-3.

(编辑 徐会永)