

塔河油田奥陶系古径流岩溶带垮塌充填特征

金强¹, 田飞², 鲁新便³, 康逊¹

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国科学院地质地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国石化西北分公司勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011]

摘要:岩溶缝洞是塔河油田主要储集空间,但是它们70%以上的空间被地下河沉积砂泥和洞穴垮塌角砾等物质所充填,其中垮塌角砾约占30%。研究这些垮塌角砾的形成和分布对于岩溶储层地质学具有重要意义。通过野外考察、岩心观察以及测井和地震资料分析,发现径流岩溶带垮塌角砾大小、形态不一,而且与地下河砂泥沉积呈互层出现,颗粒较小的垮塌角砾有被搬运迹象;洞穴规模越大(如厅堂洞和干流洞)、越靠近活动性断层的溶洞和表层岩溶带的溶洞,垮塌角砾岩堆积厚度越大;颗粒较小的(<2 cm)垮塌角砾岩孔渗性差,颗粒较大者可具有较好的储集性能和含油性,后者构成了塔河油田岩溶缝洞储层的一部分。

关键词:缝洞;垮塌角砾岩;径流岩溶带;奥陶系;塔河油田

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Characteristics of collapse breccias filling in caves of runoff zone in the Ordovician karst in Tahe oilfield, Tarim Basin

Jin Qiang¹, Tian Fei², Lu Xinbian³, Kang Xun¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;
2. Institute of Geology and Geophysics, Academia Sinica, Beijing 100029, China; 3. Exploration and Development Institute, Northwest Branch, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Fractures and vugs are the major reservoir spaces in Tahe oilfield, but more than 70% of their spaces were filled by underground river sediments and cavern-roof collapse breccias, of which the latter accounts for over 30% in the cavern fillings. It is of great significant for reservoir geology of karst carbonates to study the formation and distribution of the collapse breccias. Combined with investigations on the Ordovician karst outcrops, observations of core samples and interpretations on well logging and seismic data, it was found that the collapse breccias are various in sizes and shapes in which small size of the breccias are transported by underground river and interbedded with sedimentary debris layers in caverns. The larger the caverns were (such as chamber caverns and main channel caverns) and the closer to active faults and epi-karst zone, the larger the thickness of the collapse breccias are. Porosities and permeabilities of the collapse breccias are low when the grain size of the breccias is smaller than 2 cm. The breccias with bigger grain size would have better reservoir physical property and oil-bearing property, and thus should be one part of reservoir rocks in Tahe oilfield.

Key words: fracture-vug, collapse breccias, runoff zone, Ordovician, Tahe oilfield

塔河油田位于塔里木盆地沙雅隆起中段的高部位,是我国发现的石油储量最大、产量最高的碳酸盐岩油田,其原油主要产自奥陶系岩溶储层^[1-3]。该储层是塔北隆起发育期(晚加里东期—早海西期)奥陶系灰岩经历了长期的岩溶作用,形成的大面积岩溶缝洞等储集空间^[4-5],其中塔河油田主体区奥陶系灰岩内发育了完善的表层岩溶带、渗流岩溶带、径流岩溶带和潜流岩溶带^[6-8]。经过20多年的开发,发现径流岩溶

带缝洞储集空间大,是塔河油田原油储量和产量的主体^[9-10]。

径流带缝洞发育数目多、空间结构十分复杂,国内外学者进行了地质、地球物理和地球化学等多方面的研究^[11-13],提出了各种成因演化模式和成因结构^[14-16],还对缝洞充填特征提出了不同机制和充填模式^[17-19],尤其是巴楚—柯坪隆起奥陶系古岩溶露头的考察^[20-21],对认识塔河油田缝洞形成和储层特征具有

很好的指导意义。作者跟踪国内外研究趋势,通过野外考察、样品分析和综合研究,针对塔河油田奥陶系岩溶缝洞形成过程,提出了不同岩溶带的缝洞结构模式^[8]、缝洞充填物类型识别及其分布规律,并且论述了沉积充填物^[22]和化学充填物^[23]特征及形成过程。通过对塔河油田主体区径流岩溶带的研究,发现其中垮塌角砾在缝洞碎屑充填物中占30%以上,但是变化范围非常大(20%~100%),含油性也差别很大,所以研究它们的分布规律、形成控制因素以及它们的储集物性具有丰富岩溶储层地质理论的意义。

1 径流岩溶带缝洞垮塌充填物特征

位于塔北隆起带西部的巴楚隆起发育良好的奥陶系古岩溶露头。硫磺沟地区出露的一个古溶洞应该是径流岩溶带溶洞(图1a)^[21],因为该洞下部为地下河径流沉积充填砂泥(图1b),左上角为垮塌角砾充填物(图1c),该垮塌角砾为洞顶原地垮塌、具有原岩的成层性,但是碎裂作用明显。

塔河油田主体区(4区、6区和7区)钻井揭示了奥陶系比较完善的表层岩溶带、渗流岩溶带和径流岩溶带^[7-8]。径流岩溶带的溶洞主要是地下河溶蚀作用形成的,由厅堂洞、干流洞、支流洞和末梢洞组成^[8-22]。

厅堂洞规模大(钻井揭示的洞高一般大于15 m,最宽可达2 km以上),充填物类型多。例如T403井在埋深5 487.4~5 554.4 m钻遇洞高67 m的厅堂洞,由岩心和测井解释证实,该厅堂洞完全被垮塌角砾-沉积砂泥所充填,呈现出10个韵律(图2a,图1d—h)。

这是典型的周期性岩溶动力学事件:降雨量较大时,地表河携带大量泥砂通过落水洞等进入径流带地下河,形成地下河砂泥沉积^[22,24-25],同时溶洞周缘溶蚀作用强烈;在降雨量减小时,径流带地下河作用减弱或断流,潜水面下降造成溶洞顶板抗压强度降低,使得洞顶垮塌,形成垮塌角砾堆积。垮塌角砾具有磨圆现象(图1f,g)。这种磨圆有两种可能:一是垮塌角砾被地下河搬运而磨圆;另一种认为是垮塌之前被岩溶水淋滤的结果。

干流洞(洞高为5~15 m)也常见垮塌角砾与沉积砂泥间互充填的现象(图2b),该干流洞顶部还有1.5 m未被充填。

一些小型溶洞(包括洞高为0.5~5 m的支流洞和洞高小于0.5 m的末梢洞)垮塌角砾充填比沉积砂泥充填多,而且会有方解石等化学充填物。例如S64井在埋深5 499.3~5 500.4 m钻遇到一个支流洞,大部分被垮塌角砾充填,顶部充填巨晶方解石(图2c)。

野外露头 and 成像测井可以看到很大的垮塌角砾(图1a),岩心上观察到的垮塌角砾一般不超过5 cm(图1d—h),而且本身具有很多的溶蚀裂缝,角砾间或裂缝内常见砂泥充填物,还有一些化学胶结物,可能具有较好的储集性能。

2 径流岩溶带垮塌充填物形成的控制因素

通过塔河主体区的160余口探井及相关测井和地震资料综合解释,发现靠近断层和落水洞的部位垮塌

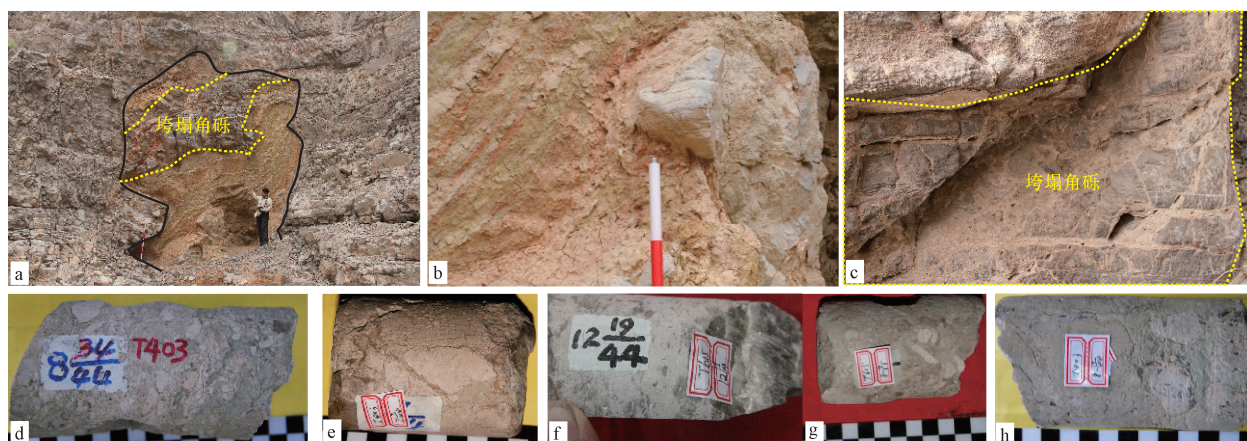


图1 巴楚隆起露头和塔河油田岩心观察到的奥陶系径流岩溶带垮塌充填物特征

Fig. 1 Characteristics of collapse breccias filling in the Ordovician caves of runoff zone observed from outcrops of Bachu uplift and cores in Tahe oilfield

a. 巴楚隆起硫磺沟奥陶系岩溶洞穴露头,洞穴左上角为垮塌角砾充填物,其他为沉积充填物;b. 同一洞穴中沉积充填物具有成层结构;c. 同一洞穴中垮塌角砾与围岩岩性一致,原地垮塌、具有成层性、碎裂明显(黄色点线范围内均为垮塌角砾);d. 垮塌角砾岩,角砾杂乱分布,T403井,埋深5 537.5 m;e. 垮塌角砾,角砾间充填沉积碎屑,T403井,埋深5 516.2 m;f. 垮塌角砾,有磨圆现象,有断层擦痕,T615井,埋深5 604.3 m;g. 垮塌角砾与沉积碎屑共生,T615井,埋深5 535.6 m;h. 磨圆的垮塌角砾,与沉积碎屑共生,T403井,埋深5 539.8 m

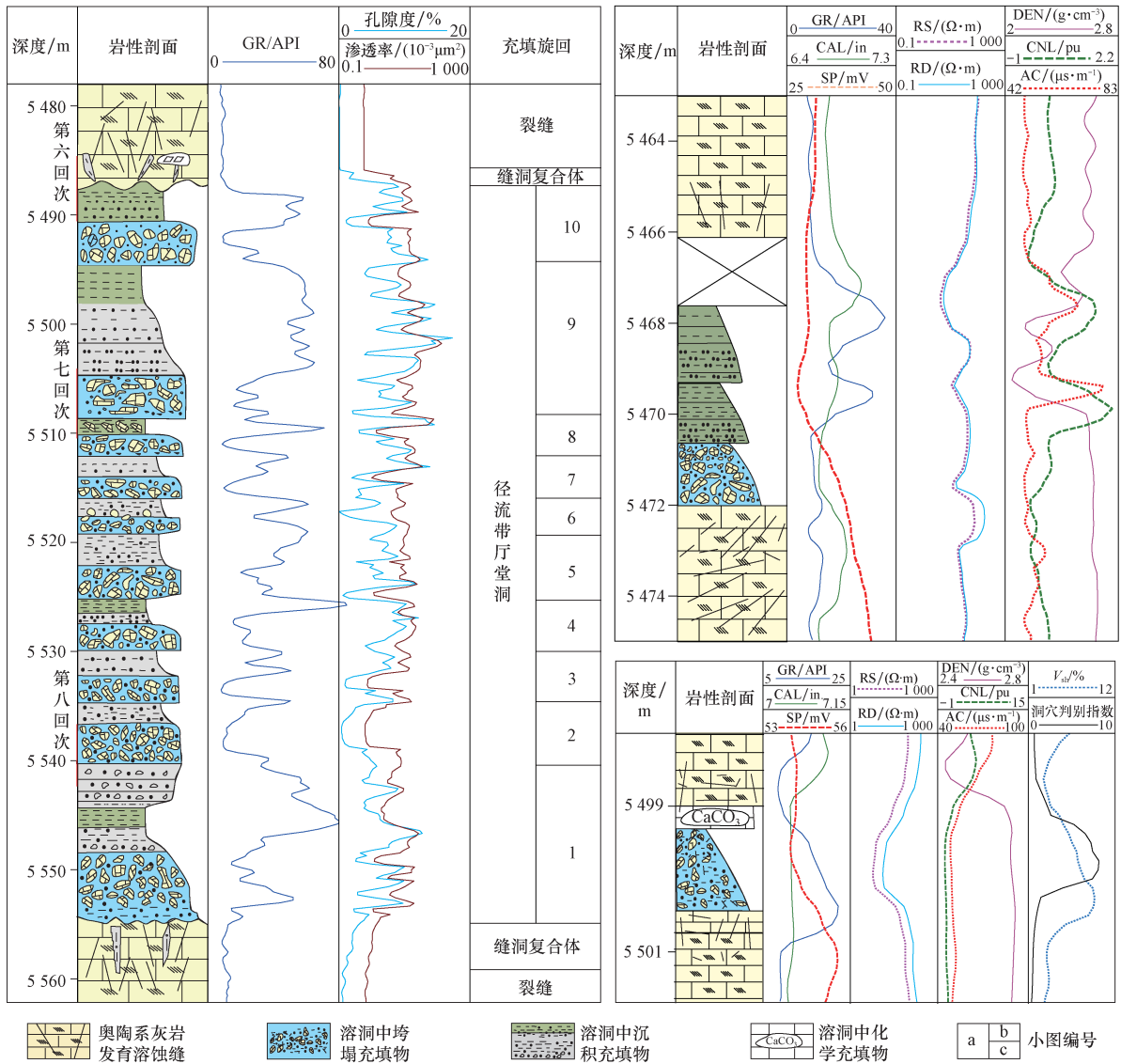


图 2 塔河油田钻遇的径流岩溶带溶洞沉积砂泥和垮塌角砾充填特征
Fig. 2 Characteristics of fillings of sedimentary sand/mud and collapse breccias in caverns of runoff zone in Tahe oilfield

a. T403 井钻遇的厅堂洞,由 10 个垮塌角砾-沉积砂泥旋回完全充填;b. TK411 井钻遇的干流洞(5 466.2~5 473.4 m),底部充填垮塌角砾,中部充填沉积砂泥,顶部未充填;c. S64 井钻遇的支流洞(5 499.3~5 500.4 m),垮塌角砾充填,顶部还有方解石充填

角砾比较发育^[8],此外,如果原岩为薄层灰岩,也容易形成垮塌角砾。

许多学者发现奥陶系岩溶期前有些断层开始发育,而更多断层是岩溶期发育的,还有少量断层是岩溶期后发育的^[26-27]。作者发现岩溶期的断层规模不是很大(断距<100 m)^[8,16],但是对岩溶作用具有明显控制作用:断层控制表层岩溶带的地表河和落水洞的发育、控制渗流带的渗流井和驻水洞发育,控制径流带地下河的走向和厅堂洞的发育,厅堂洞与落水洞往往发育在两条断层交叉处^[8]。TK423 井在埋深 5 573.0~5 575.6 m 处钻遇一个支流洞,被三期垮塌角砾完全充填(图 3a),地震资料解释表明,该支流洞紧靠一条断层(图 3b),该断层切割了岩溶上下地层,说明岩溶期有活动^[17],所以造成附近溶洞垮塌

充填。

岩溶型碳酸盐岩油田的开发,常把连通的缝洞称为缝洞单元^[28]。本文作出了 T615 井缝洞单元内部垮塌角砾充填物的等厚图(图 4a)^[29-30],可以看出,T615 井—TK730 井一带为一个厅堂洞,垮塌角砾岩厚度在 TK730 井附近厚度最大(达 9 m);TK632 井为支流洞,垮塌角砾厚度不足 3 m;TK632 井北东方向为干流洞,垮塌角砾厚度可达 5 m,其他地方垮塌角砾厚度基本在 4 m 以下(图 4a)。T615 井钻在该厅堂洞靠近边缘位置,垮塌角砾厚度不足 4 m,在成像测井上明显看出角砾形态(图 4b)。

实际上,T615—TK730 井一带厅堂洞附近的断层比较发育(图 4c),而且 TK730 井附近断层更多一些,所以该井附近的垮塌角砾厚度也大一些,尤其是

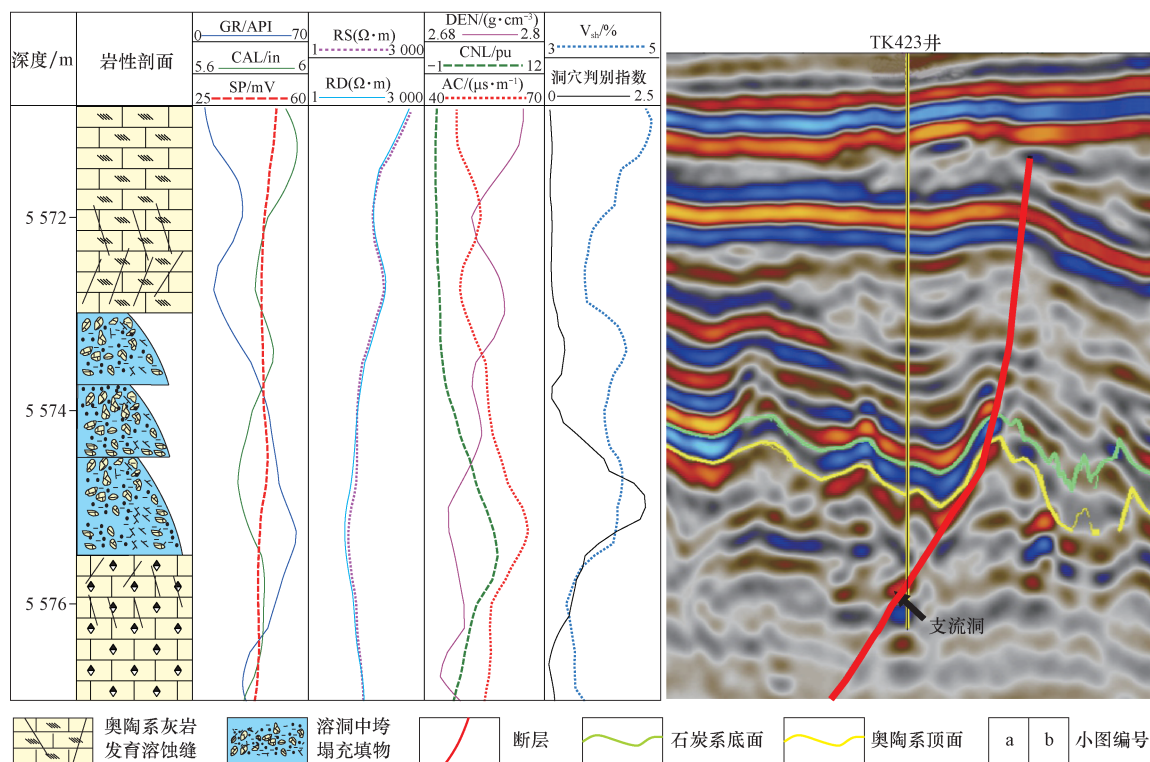


图3 塔河油田 T423 井地层综合柱状图(a)及过该井地震剖面(b)

Fig. 3 Composite columnar section of Well T423 (a) and well-tie seismic profile (b) in Tahe oilfield

[注:T423 井在埋深 5 573.0 ~ 5 576.4 m 钻遇的支流洞完全被垮塌角砾充填(a),该支流洞靠近断层(b).]

TK730 井东侧断层发育,垮塌作用还造成地震上的串珠反射。虽然这些断层的断距不大,但是都是在岩溶期活动,所以对于垮塌角砾的形成起到直接控制作用。

受岩溶作用的碳酸盐岩单层厚度与产状也对垮塌角砾形成起控制作用。例如,湖南张家界附近的黄龙洞是经受岩溶作用的石炭系—二叠系灰岩组成,供游人参观的区域主要是径流岩溶带的厅堂洞和部分干流洞。厅堂洞规模很大(洞高可达 140 m),垮塌角砾在厅堂洞内堆积如山,其原因是石炭系—二叠系主要薄层灰岩与泥岩互层,在断层和岩溶作用下非常容易垮塌。而塔河油田奥陶系灰岩均为厚层块状灰岩,泥岩夹层也很少,所以垮塌规模及厅堂洞规模不如黄龙洞的大。

然而,径流岩溶带距奥陶系剥蚀面的深度可能对垮塌角砾形成具有一定的相关性。塔河油田 4 区在岩溶期处于较高部位,径流岩溶带距表层岩溶带最浅的地方只有十几米,厅堂洞内的垮塌角砾厚度可超过 20 m;7 区的 T615 井缝洞单元径流岩溶带距表层岩溶带超过 150 m,厅堂洞垮塌角砾厚度最大 9 m。因此,径流岩溶带深度越小垮塌角砾形成的概率越大。

3 径流岩溶带垮塌角砾的储集性能

径流岩溶带充填的砂质沉积物具有较好的孔隙度和渗透率,成为塔河油田良好的含油层和产层^[22,25]。

尽管这些砂质沉积物埋藏深度大于 5 300 m,发生了胶结作用,但是受到的压实作用很弱,保持了较多的原生孔隙,所以储集性能较好。垮塌角砾与此类似,除了埋藏期的胶结作用以外,压实作用很弱,也应该具有较高孔渗性,但是孔渗性是有变化的(图 4b)。

实际上,塔河油田径流带充填的垮塌角砾是和沉积砂泥质混合堆积而成,由于不同的排列方式和角砾岩本身磨圆的差异性,造成仅用测井声波时差来拟合垮塌角砾岩的孔隙度会出现问题。根据岩心观察和描述,发现垮塌角砾岩具角砾支撑结构,细粒碳酸盐岩碎屑或沉积砂泥质充填角砾间,对其储集性和渗流性影响很大。研究表明,密度测井和声波时差与角砾岩间充填物含量关系密切,故建立孔隙度及渗透率评价方程如下^[29]:

$$\Phi = 191.2 - 54.362 \rho_b - 23.057(160.286/\Delta t)^{0.4872} \quad (1)$$

$$K = 0.0035e^{0.239\Phi - 0.045V_{sh} + 3.53} \quad (2)$$

式中: ρ_b 为密度测井值, g/cm^3 ; Δt 为声波时差值, $\mu s/ft$; V_{sh} 为泥质含量, %。

对比验证 T403 和 S67 等 8 口取心井垮塌角砾岩,计算孔隙度与实测孔隙度,相关系数为 0.91(图 5a);垮塌角砾岩渗透率与孔隙度正相关,但不是线性关系,例如 T615 井在取心段埋深 5 548 ~ 5 550 m 为典型的垮塌角砾岩,声波时差就存在明显的周波跳跃的特征,

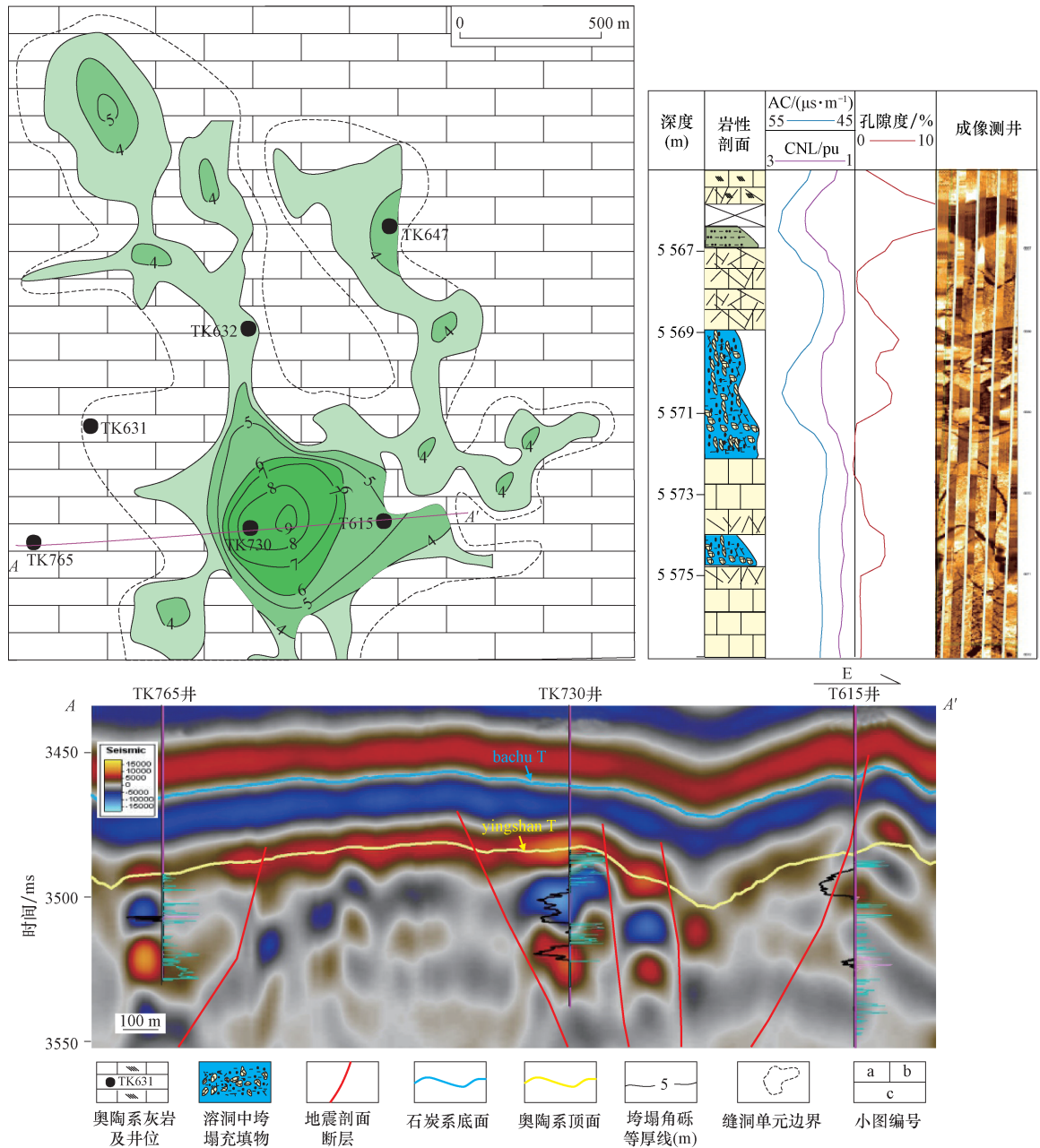


图 4 塔河油田 T615 缝洞单元垮塌角砾厚度分布和测井、地震剖面特征

Fig. 4 Thickness distribution of fracture-vug unit of collapse breccias and features of related well logging and seismic profile in Well T615 in Tahe oilfield

a. T615 缝洞单元平面分布及垮塌角砾等厚图; b. T615 井径流带溶洞垮塌角砾充填成像测井特征; c. 过 T615—TK730 井地震剖面及断层解释

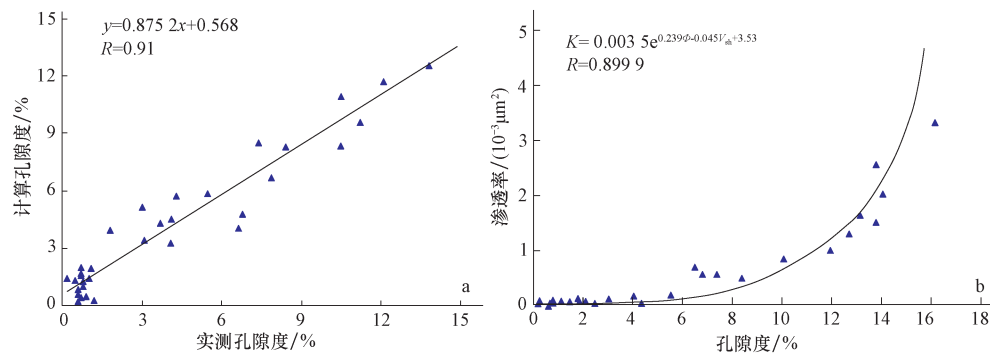


图 5 塔河油田缝洞垮塌角砾岩计算孔隙度与实测孔隙度关系(a)及渗透率与孔隙度关系(b)

Fig. 5 Measured porosity vs. calculated porosity (a) and porosity vs. permeability (b) of collapse breccias in caverns of runoff zone in Tahe oilfield

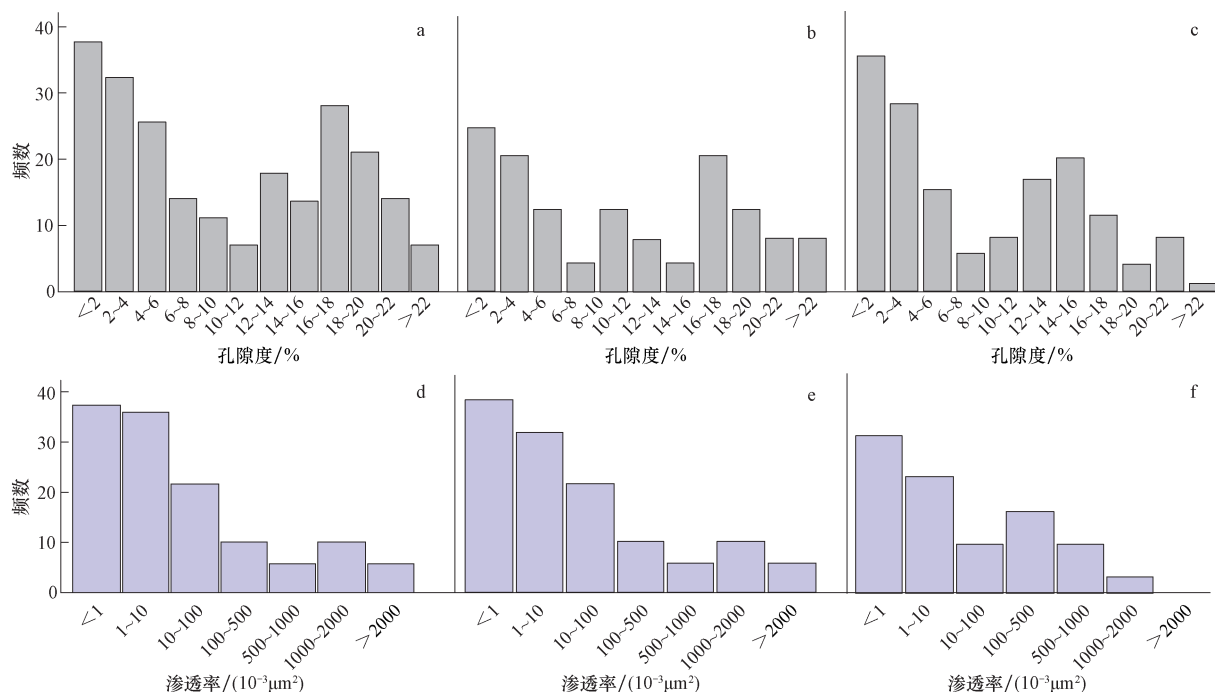


图6 塔河油田奥陶系径流岩溶带垮塌角砾充填物孔隙度和渗透率直方图

Fig. 6 Histograms of porosity and permeability of the collapse breccias fillings in the Ordovician caverns of runoff zone, Tahe oilfield

a, d. 厅堂洞角砾岩; b, e. 干流洞角砾岩; c, f. 支流洞角砾岩

而实测孔隙度并不高,为此我们引入了泥质含量(V_{sh}),再对垮塌角砾岩的渗透率进行拟合,取得了较好的效果(图5b)。

在径流岩溶带充填物识别的基础上^[29],利用公式(1)和(2)进行了塔河油田主体区的垮塌角砾储集物性评价,结果按照厅堂洞、干流洞和支流洞等成因类型分别统计(图6)。与一般砂岩储层相比,径流岩溶带垮塌角砾岩多数物性是比较差的,其孔隙度小于8%,渗透率小于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图6a—c);但是值得重视的是,约半数垮塌角砾岩物性好的,即孔隙度为12%~20%,渗透率为 $(100 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,本身具有溶蚀孔缝或者碎裂缝;孔隙度大于20%、渗透率大于 $1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的数量很少,可能是角砾本身溶蚀缝洞就很发育所致。总体看,厅堂洞物性较好的垮塌角砾岩数量多,其孔隙度中值为16%~18%、渗透率中值为 $(500 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;干流洞和支流洞物性较好的垮塌角砾岩孔隙度中值为14%~16%,支流洞垮塌角砾岩的物性相对干流洞也要差一些。通过岩心对比,发现孔渗性很差的垮塌角砾一般具有搬运磨圆现象(图1d),角砾直径小于2 cm(图1h),它们与沉积砂泥共生、呈杂基支撑结构^[31],所以物性差。而颗粒很大的垮塌角砾,在垮塌前遭受淋滤溶蚀,本身就发育大量溶蚀孔缝,径流岩溶带埋藏以后没有明显的压实作用,从成像测井看角砾间的胶结物也不多(图4b),因此孔渗性比较好。

识别出的末梢洞垮塌角砾岩数量少,没有进行统计。

4 结论

1) 垮塌角砾岩在径流岩溶带广泛分布,在厅堂洞和干流洞等比较大型的地下河通道内往往与沉积砂泥岩呈互层分布,在支流洞和末梢洞等规模小的溶洞内常常仅发育垮塌角砾岩。垮塌角砾有一定的磨圆现象,一是由地下河短距离搬运造成;二是垮塌前淋滤和溶蚀作用造成。

2) 从T403井等大型厅堂洞来看,降雨量大时径流带溶洞以沉积砂泥充填为主,降雨量减小时可能以垮塌角砾充填为主,从而造成垮塌角砾岩与沉积砂泥岩互层现象。溶洞规模越大、越靠近活动断层、径流带距表层岩溶带越近,垮塌角砾岩堆积越多。

3) 颗粒较小的角砾($<2\text{ cm}$)多数有一定的搬运作用,它们与沉积泥砂共生,物性差(孔隙度 $<10\%$ 、渗透率 $<100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);颗粒较大的角砾本身发育溶蚀孔缝,角砾间的胶结作用比较弱,而且径流带充填的碎屑物质所受压实作用弱,因此部分垮塌角砾岩具有较好储集物性,孔隙度可达16%~18%、渗透率可达 $(500 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是值得关注的岩溶储集体的一种类型。

致谢:本文受到中国石油化工集团公司李阳院士

和康玉柱院士的指导,受到中国石化勘探开发研究院和西北分公司勘探开发研究院开发地质所的支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 康玉柱. 塔里木盆地海相古生界油气勘探的进展[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(1): 77-79.
Kang Yuzhu. Advances of oil and gas exploration in Paleozoic marine depositions in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(1): 77-79.
- [2] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101-106.
Li Yang, Fan Zhihui. Formation model of fracture-cave systems in Ordovician carbonates in Tahe Oilfield and their distributions[J]. Acta Petroli Sinica, 2011, 32(1): 101-106.
- [3] 翟晓先, 云露. 塔里木盆地塔河大型油田地质特征及勘探思路回顾[J]. 石油与天然气地质, 2009, 29(5): 565-573.
Zhai Xiaoxian, Yun Lu. Geological features of the large-scale Tahe Oilfield in Tarim Basin and its exploration review[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 29(5): 565-573.
- [4] 闫相宾, 李铁军, 张涛, 等. 塔中与塔河地区奥陶系岩溶储层形成条件的差异[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 202-207.
Yan Xiangbin, Li Tiejun, Zhang Tao, et al. Different forming conditions of karst reservoirs in Tahe Oilfield and in Tazhong area[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 202-207.
- [5] 鲁新便, 蔡忠贤. 缝洞型碳酸盐岩油藏古溶洞系统与油气开发——以塔河碳酸盐岩溶洞型油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 22-27.
Lu Xinbian, Cai Zhongxian. Paleocave systems in karst carbonate reservoirs and their oil and gas productions: a case study of Tahe karst carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 22-27.
- [6] 肖玉茹, 王敦则, 沈杉平. 新疆塔里木盆地塔河油田奥陶系古洞穴型碳酸盐岩储层特征及其受控因素[J]. 现代地质, 2003, 17(1): 92-98.
Xiao Ruyu, Wang Dunze, Shen Shanping. Reservoir features of paleocave carbonates in Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin, Xinjiang[J]. Modern Geology, 2003, 17(1): 92-98.
- [7] 夏日元, 邹胜章, 梁彬. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
Xia Riyuan, Zou Shengzhang, Liang Bin. Fracture-cave system model and formation in Ordovician Tarim Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [8] 金强, 田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 15-21.
Jin Qiang, Tian Fei. A study on constructions of fracture-cave in karst carbonates in Tahe Oilfield[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2013, 37(5): 15-21.
- [9] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 323-331.
Zhai Xiaoxian. Exploration practice and recognition on super-huge Tahe Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 323-331.
- [10] 康玉柱. 塔里木盆地塔河油田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2005, 10(4): 31-38.
Kang Yuzhu. Discovery of Tahe Oilfield and its exploration Tarim Basin[J]. Marine Oil and Gas Geology, 2005, 10(4): 31-38.
- [11] Loucks, R. G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(11): 1795-1834.
- [12] Borghi, A, Renard, P, Jenni, S. A. Pseudo-genetic stochastic model to generate karstic networks[J]. Journal of Hydrology, 2012, 414: 516-529.
- [13] 韩庆之, 曾克峰, 梁杏. 特殊的地表岩溶形态及成因探讨[J]. 中国岩溶, 1998, 17(4): 392-397.
Han Qingzhi, Zeng Kefeng, Liang Xin. Investigation on special karst geography and its formation[J]. China Karst, 1998, 17(4): 392-397.
- [14] Palmer, A. N. Origin and morphology of limestone caves[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(1): 1-21.
- [15] 蔡春芳, 李开开, 李斌, 等. 塔河地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物的地球化学特征及其形成流体分析[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2399-2404.
Cai Chunfang, Li Kaikai, Li Bin, et al. Geochemistry of fillings in fracture-cave of Ordovician karst in Tahe area and their forming fluids[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2399-2404.
- [16] Loucks, R. G, P. K. Mescher, G. A. McMechan. Three-dimensional architecture of a coalesced, collapsed-paleocave system in the Lower Ordovician Ellenburger Group, central Texas[J]. AAPG Bulletin, 2004, (88): 545-564.
- [17] 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和复合-联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743-752.
He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controls on reservoir formation in Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin, and combinational genetic mechanism[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 743-752.
- [18] Sayago, J. D, Lucia, M, Mutti, M., et al. Characterization of a deeply buried paleokarst terrain in the Loppa High using core data and multiattribute seismic facies classification[J]. AAPG bulletin, 2012, 96(10): 1843-1866.
- [19] 徐微, 蔡忠贤, 贾振远, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏溶洞充填物特征[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 287-293.
Xu Wei, Cai Zhongxian, Xia Zhenyuan, et al. Filling materials in caves of Ordovician carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Modern Geology, 2010, 24(2): 287-293.
- [20] 张文博, 金强, 徐守余, 等. 塔北奥陶系露头古溶洞充填特征及其油气储层意义[J]. 特种油气藏, 2012(3): 50-54.
Zhang Wenbo, Jin Qiang, Xu Shouyu, et al. Features of fillings in paleo-caves of Ordovician outcrops, Tabei uplift[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2012(3): 50-54.
- [21] 钟建华, 毛毳, 李勇, 等. 塔北硫磺沟奥陶系含油古溶洞的发现及意义[J]. 中国科学(地球科学), 2015, 55: 1406-1426.
Zhong Jianhua, Mao Cui, Li Yong, et al. Discovery of the ancient Ordovician oil-bearing karst cave in Liuhuanguo, North Tarim Basin, and its significance[J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 55: 1406-1426.
- [22] 金强, 康迅, 荣元帅, 等. 塔河油田奥陶系古岩溶地表河和地下河沉积特征分析. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 待刊.

- [J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 17–29.
- Zhang Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4): 17–29.
- [17] 罗顺社, 张建坤, 汪凯明, 等. 燕山地区中元古界碳酸盐岩碳、氧同位素特征及其环境意义[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(6): 18–24.
- Luo Shunshe, Zhang Jiankun, Wang Kaiming, et al. The Mesoproterozoic carbonate carbon and oxygen isotopic characteristics and its environmental significance in Yanshan area [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(6): 18–24.
- [18] 旷红伟, 李家华, 罗顺社, 等. 燕山地区 1.6 ~ 1.0 Ga 时期碳酸盐岩碳、氧同位素组成、演化及其地质意义[J]. 地学前缘, 2009, 16(5): 118–133.
- Kuang Hongwei, Li Jiahua, Luo Shunshe, et al. The C and O isotopic compositions and their evolution recorded in the carbonate interval of the Yanshan area from 1.6 to 1.0 Ga, and their geological implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5): 118–133.
- [19] Korte C, Kozur H W, Veizer J. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature [J]. *Palaeogeography*, 2005, 226(2): 287–306.
- [20] Keith M H, Weber J N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestone and fossils [J]. *Geochem Cosmochim Acta*, 1964, 28(10): 1787–1816.
- [21] Mackenzie F T. Sedimentary cycling and the evolution of sea water [C]// Riley J P. *Chemical oceanography* (2nd ed). London: Academic Press, 1975: 309–364.
- [22] 邵龙义. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(1): 39–45.
- Shao Longyi. The relation of the oxygen and carbon isotope in the carbonate rocks to the paleotemperature etc [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1994, 23(1): 39–45.
- [23] Craig H. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural water [J]. *Science*, 1961, 133(23): 1833–1834.

(编辑 李 军)

(上接第 735 页)

- Jin Qiang, Kang Xun, Rong Yuanshuai, et al. Sedimentary characteristics of sandstones and mudstones deposited in the surface rivers and subsurface rivers in the Ordovician carbonate karst, Tahe Oilfield [J]. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 2015, in press.
- [23] 金强, 康迅, 田飞. 塔河油田奥陶系古岩溶径流带缝洞化学充填物成因分析[J]. 石油学报, 2015, 待刊.
- Jin Qiang, Kang Xun, Tian Fei. Investigations on chemical fillings in fracture-caves in Paleo-karst runoff zone in Ordovician in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, in press.
- [24] 徐国强, 李国蓉, 刘树根, 等. 塔里木盆地早海西期多期次风化壳岩溶洞穴层[J]. 地质学报, 2005, 79(4): 558–568.
- Xu Guoqiang, Li Guorong, Liu Shugen, et al. Cave layers formed multiple times of weathering crusts in Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(4): 558–568.
- [25] 鲁新便, 何成江, 邓光校, 等. 塔河油田奥陶系油藏喀斯特古河道发育特征描述[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 268–274.
- Lu Xinbian, He Chengjiang, Deng Guangxiao, et al. Description on paleo-river channels in Ordovician karst reservoirs, Tahe Oilfield [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(3): 268–274.
- [26] 李朋, 任建业, 阳怀忠, 等. 巴楚地区断裂带内热液流体活动及对碳酸盐岩改造的特征分析[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(3): 378–385.
- Li Peng, Ren Jianye, Yang Huaizhong, et al. Thermal fluid activity in fault system in Bachu area and its cation on carbonates [J]. *Geotectonica et Metallogeny*, 2011, 35(3): 378–385.
- [27] 李会军, 丁勇, 周新桂, 等. 塔河油田奥陶系海西早期、加里东中期岩溶对比研究[J]. 地质论评, 2010, 56(3): 71–75.
- Li Huijun, Ding Yong, Zhou Xingui, et al. Comparison on Ordovician karsts formed in early Hercynian and in middle Caledonian in Tahe Oilfield [J]. *Geological Review*, 2010, 56(3): 71–75.
- [28] 康志宏, 陈琳, 鲁新便, 等. 塔河岩溶型碳酸盐岩缝洞系统流体动态连通性研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 110–120.
- Kang Zhihong, Chen Lin, Lu Xinbian, et al. Dynamic connection study on karst carbonate fracture-cave systems in Tahe Oilfield [J]. *Geological Front*, 2012, 19(2): 110–120.
- [29] 田飞, 金强, 李阳, 等. 塔河油田奥陶系缝洞型储层小型缝洞及其充填物测井识别[J]. 石油与天然气地质, 2012, 36(6): 900–908.
- Tian Fei, Jin Qiang, Li Yang, et al. Identification of small fracture-vugs and their fillings through log interpretation in fracture-vuggy Ordovician reservoirs in Tahe Oilfield [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 36(6): 900–908.
- [30] 金强, 田飞, 张宏方. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞单元综合评价[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 272–279.
- Jin Qiang, Tian Fei, Zhang Hongfang. Comprehensive evaluation of fracture-cave units in karst carbonates in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(3): 272–279.
- [31] 林忠民. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及成藏条件[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 23–27.
- Lin Zhongmin. Reservoir features of Ordovician carbonates and oil accumulations in Tahe Oilfield [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2002, 23(3): 23–27.

(编辑 张玉银)