第 39 卷 第 6 期	中国岩溶	Vol. 39 No. 6
2020年12月	CARSOLOGICA SINICA	Dec. 2020

张 三,金 强,程付启,等.古岩溶流域内地表河与地下河成因联系与储层特征:以塔河油田奥陶系岩溶为例[J].中国岩溶,2020, 39(6):900-910.

DOI:10.11932/karst2020y37

古岩溶流域内地表河与地下河成因联系与储层特征 ——以塔河油田奥陶系岩溶为例

张 三1,金 强1,程付启1,孙建芳2,魏荷花2,张旭栋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. 中国石油化工集团公司勘探开发研究院,北京 100083)

摘 要:在岩溶缝洞储层精细描述过程中,利用钻井校正地震的方法恢复岩溶末期的岩溶地貌,发现 塔河油田奧陶系岩溶区内东西两侧发育由走滑断裂形成的地貌高带(分水岭),其间为一向南开口的 喇叭口状洼地,南接岩溶盆地;利用钻井、测井与地震综合解释方法,发现洼地北部较陡(坡度为2.9° 左右)、南部较缓(坡度为1.5°),发育由众多支流汇聚的2条岩溶水系,西侧一条在北部以地表河为 主,在南部转入地下河,东面一条地表河与地下河交替发育,由3段地表河和2段地下河组成。由于 强烈的侵蚀与溶蚀作用,形成了不同规模及充填物的5种地表河,但多数地表河内没有发现河流砂岩 充填,只有岩溶湖泥灰岩沉积;而地下河溶洞内充填了大量的砂岩和泥岩,成为重要的油气储层。地 表河原本是有砂泥沉积的,当下游发育地下河时,洪水把原有的砂泥岩冲入地下河,形成了溶洞砂泥 岩沉积,除少数下游地表河残留砂泥岩外,塔河地区奥陶系岩溶地表河基本不存在砂质储层。 关键词:岩溶水系;地表河泥灰岩沉积;地下河砂泥岩沉积;成因联系;奥陶系;塔河油田

中图分类号:P618.13 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)06-0900-11 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

塔河油田位于塔里木盆地北部沙雅隆起之上, 在奧陶系碳酸盐岩缝洞储层中发现超过10×10⁸t的 石油地质储量^[1-2]。由于岩溶缝洞储层的复杂性,储 集空间分布规律一直难以确定^[3-4]。21世纪初,随着 现代水文学、水文地质学与岩溶地质学的引入,逐渐 认识到水沿断裂通道向下渗流溶蚀,在风化壳以下 200m范围内均可形成溶蚀缝洞^[5-6],溶蚀孔、洞、缝或 孤立分布,或以复杂的形式相互连通形成空间结构 极其复杂的缝洞网络系统^[7-8]。在岩溶缝洞型储层精 细描述过程中,用地表河(地表径流、地表水系)、地 下河(地下径流、暗河)的概念来表征岩溶区水系分 布及其与岩溶储层的关系。蔡忠贤等^[9-10]结合现代 岩溶理论在古地貌恢复的基础上,进一步明确了塔 河油田岩溶水系分布,认为地表水系与地下暗河共 同构成了岩溶区地表一地下双重水系网络系统,控 制着岩溶储层的空间分布。鲁新便等^[11]以井震结 合,建立了一套地下河溶洞三维雕刻技术。金强 等^[12]通过现代岩溶与古岩溶地质考察,根据塔河油 田岩溶地质条件,构建了表层、渗流、径流及潜流岩 溶作用带划分方案,总结出各岩溶带的缝洞成因类 型及发育特征,并通过岩芯观察与测井解释,提出了 不同类型缝洞及其充填物的识别方法^[13],查明了地

基金项目:国家自然基金-中国石化联合基金项目(U1663204);国家油气重大专项(2016ZX05014-002-007)

第一作者简介:张三(1990-),男,博士研究生,从事石油地质方面研究。E-mail:zspetro@sina.com。

通信作者:金强(1956-),男,教授,主要从事油气地质和地球化学方面的教学与科研工作。E-mail: jinqiang@upc.edu.cn。 收稿日期:2020-01-16 表河与地下河沉积韵律特征与沉积环境氧化还原 性^[14]。随着钻井资料的增多、地震精度的提高,塔河 油田岩溶缝洞储层研究成果及方法日趋成熟^[15-17],成 为石油行业古岩溶研究的典范^[2,18]。

然而多年勘探开发实践表明,地下河溶洞砂岩 发育大量的油气储集空间(孔隙度达20%)^[14],而地表 河中并未找到砂岩储层,地表河沉积物是什么,与地 下河沉积物有何差异,二者之间有何成因联系,尚需 深入研究。本文以塔河油田奧陶系岩溶为研究对 象,通过钻井校正地震的方法,精细刻画出岩溶末期 地貌,结合岩芯、薄片与测井解释成果,查明了地表 河与地下河沉积特征及成因类型,明确其空间分布; 并结合地化分析测试,利用平面与剖面叠合分析的 方法,深入探讨了地表河与地下河的成因联系及储 层差异,以期为油田勘探开发实践提供指导。

1 塔河奥陶系岩溶地貌精细表征

中泥盆世初期,塔北强烈隆升,使塔河油田奥陶 系台地相巨厚碳酸盐岩暴露地表遭受强烈岩溶作 用,形成海西早期岩溶地貌。晚泥盆世末期,湖相灰 泥岩直接超覆于岩溶地貌之上,隔绝了地表水与碳 酸盐岩的接触,结束了该期大气淡水岩溶作用^[19]。 本次所要刻画的岩溶地貌即为该期岩溶结束时的地 表形态。

塔河油田奧陶系岩溶地貌恢复已有大量成 果^[20-21],主要基于地震资料而钻井数据应用少,很难 达到开发阶段精细描述的需求。本课题组连续十多 年进行塔河油田岩溶储层描述工作,积累了大量的 地质一地球物理资料,能为精细描述工作提供保障。 本次充分利用研究区21口井的岩芯资料、216口井的 测井数据及200 km²高精度最新处理叠前偏移地震数 据体,在前人已恢复岩溶地貌的基础上,采用骨架剖 面控制、枢纽井点标定、向外辐射校正的方法,构建 了覆盖研究区27×24的骨架测线。依据枢纽井点钻 井分层数据标定地震解释层面,实现骨架测线闭合, 再以枢纽井点为准,依次向外辐射校正,使所有井震 解释层面一致,逐次完成所有测线井震校正,精细刻 画出研究区奥陶系岩溶地貌(图1)。

研究区岩溶地貌北高南低、西倾东翘,南北构造 高差可达300m,局部丘峰林立、沟壑纵横,相对高差 达80m。其岩溶地貌主要由东西侧S48和S74两个 分水岭与其间的S75岩溶洼地以及南部的岩溶湖组 成。分水岭形成于挤压背景下的花状构造,其中S74 分水岭呈北北东向展布,延伸长度为8.6 km、宽 2.2 km、高度大于80 m; S48 分水岭呈近南北向展布, 长度6.5 km,在T402 井附近宽度为3.5 km 左右、高 度达100m;S75岩溶洼地为相对负向地形,北高南 低、西陡东缓,呈向南张开的喇叭口状,形成于强烈 岩溶作用时期(奥陶系残余厚度小于两侧分水岭)。 岩溶洼地北部地形落差大,坡度约2.9°,主要以孤立 残丘与众多蛇曲形侵蚀沟谷组成,相对高差在 30~50 m,其为岩溶洼地上游;岩溶洼地南部地形渐 趋平缓,坡度约1.5°,主要以宽缓残丘及少量沟谷组 成,相对高差<20m,其为岩溶洼地下游;上下游分界 为S67-S75-TK419一线。TK734-TK231-TK219一线 以南地形平坦,不发育溶蚀残丘与侵蚀沟谷,称其为 岩溶湖。受研究区东西侧两分水岭的限制,地表河 自北向南穿过分水岭,流经岩溶洼地,最终汇入岩溶 湖,形成一个独立的岩溶流域(图1)。

2 地表河与地下河成因类型

2.1 地表河沉积特征与类型

本次综合古地貌和古构造,依据地表河平面延伸长度(L)和配位数(与一条河流交汇的河流数量N) 划分地表河类型。统计研究区大小河流126条,河流 长度L与配位数N统计结果显示,L值变化较大,在 0.1~18.6km之间,其中0.1~5km占56.8%,主要分 布在研究区北部地形落差大的区域,5~10km占 37.6%,全区广泛分布,10km以上仅占5.6%,分布在 研究区中部和东部及南部。N值在0~12之间,0~1的 占60.5%,主要分布在研究区北部,2~5的占29.8%, 大于5的占9.7%。因此,定义出干流河(L>15km、 N>5),支流河(L>5km、N>1),末梢河(L>0.1km、N< 1)(图1)。

由岩芯观察表明,研究区地表河充填物主要由 泥灰岩、砾屑泥灰岩及砂泥岩组成,存在砂泥岩充填 干流河、泥灰岩一砂泥岩充填干流河、泥灰岩充填干 流河(发育落水洞)、泥灰岩充填支流河、砾屑灰岩充 填末梢河5种组合类型(图2)。

T624井位于岩溶洼地西南部,5557.6~5606.0m 形成了48.4m溶蚀—侵蚀河谷,其中充填了多个正 旋回砂泥岩(图2a),砂泥岩呈棕色、浅灰色,砂岩具 块状层理,颗粒分选磨圆较好,局部含油,碎屑成份 中石英颗粒约占75%、粒径为0.15~0.30mm(图3a, 图3i);旋回底部发育底砾岩,砾石成分为奥陶系灰岩



Fig. 1 Planar and profile characteristics of Ordovician karst landform in Tahe oilfield

以及少量燧石,砾屑直径可达3~6 cm、磨圆较好(随地表河长途搬运),属岩溶期河流沉积(图 3b)。此种 类型地表河在研究区分布局限,仅分布于岩溶洼地 下游T624—T615—T444一线附近的地表干流河谷 之中。

岩溶湖附近地表河多发育砂泥一泥灰岩两套沉 积组合。例如,TK231井处的干流河,该干流河谷深 35 m,下部被28 m河流砂泥岩沉积充填,电阻率介于 20~60 Ω·M,上部充填7 m的岩溶湖相泥灰岩,电阻 率高达152 Ω·M(图2b)。

除了在下游局部河道中存在砂质沉积外,局部

发育的落水洞中也存在砂泥质,其往往与岩溶碎屑 混杂伴生。S64并位于河谷交汇处,于5490m钻穿 80 cm奥陶系灰岩砾石层后即钻遇2.3m混杂堆积的 落水洞充填砾石层,砾石为奥陶系灰岩,呈椭圆状及 长条状,分选较差,砾间空隙被含石英矿物的砂泥质 充填(图3d,图3j);地表河谷中并无砂质沉积,而被 21 m灰泥质完全充填,深灰色泥岩与褐灰色泥质灰 岩呈互层结构,具波状和水平层理(图3c),电性特征 与TK231一致,属于岩溶末期岩溶湖沉积。

泥灰质沉积充填广泛分布于岩溶洼地上游区地 表河谷之中。例如,T601井钻遇17m的支流河,河谷



图2 塔河油田奥陶系古岩溶地表河成因类型

Fig. 2 Genesis types of surface rivers of Ordovician paleokarst in Tahe oilfield

a.砂泥岩充填干流河(T624井) b.泥灰岩-砂泥岩充填干流河(TK231井) c.泥灰岩充填干流河(发育落水洞)(S64井) d.泥灰岩充填支流 河(T601井) e.砾屑灰岩充填末梢河(T416井)



图3 塔河油田地表河沉积充填物岩矿特征

Fig. 3 Mineral features of sediment fillings in surface rivers in Tahe oilfield

a.T624 井,5 570.8 m,灰褐色含油中砂岩 b.T624 井,5 572.6 m,灰质砾岩,砾石以奥陶系灰岩,呈椭圆状,砾径可达2~5 cm c.S64 井,5 475.1 m,深灰泥岩与褐灰色泥灰岩互层 d.S64 井,5 490.9~5 491.2 m,落水洞,上部奥陶系灰岩,下部为岩溶碎屑混杂砾石层 e.T601 井,5 534.1 m,深灰色含砾灰质泥岩,灰质砾屑漂浮泥岩基质之中 f.T601 井,5 540.1~5 540.3 m,砾屑灰岩,上部色深、粒度细,下部色浅、粒度粗,底部含燧石砾屑 g.T416 井,5 429.4 m,砾屑灰岩,砾石为灰质岩块呈棱角状 h.T415 井,5 421.5~5 421.6 m,砾屑灰岩,砾石由灰质岩块及燧石组 成,呈棱角状 i.石英中砂岩,石英颗粒分选磨圆较好、呈线接触(a样品薄片,正交) j.灰砾岩,砾石为奥陶系泥晶灰岩,呈长条状,砾间填隙物含石英矿物(d样品薄片,正交) k.砂质砾屑灰岩,颗粒为灰质岩屑,粒级在10~800 µm 不等(f样品薄片,正交)

完全被深灰色泥灰岩充填,棱角状灰质砾屑成层漂 浮在泥灰岩中,为典型岩溶湖沉积(图3e);下部为 灰色砂质灰岩、具块状层理、灰质岩屑粒级在0.1~ 0.5 mm不等,滴5%稀盐酸反应剧烈(图3f,图3k)。

T416井钻遇12m的支流河一末梢河,被砾屑灰 岩充填,砾屑为奥陶系灰岩,呈棱角状,砾间均被深 灰色灰泥质胶结(图3g),属岩溶后期湖相山前坡积 物二次沉积的产物,多分布于分水岭与岩溶洼地间 陡坡带的支流河或末梢河内,如TK411、T415、TK456 等井均有分布。

2.2 地下河沉积特征与类型

本次结合地下河地震雕刻结果^[10-11],依据地下河 空间展布,可划分出干流、支流、末梢洞(河)的空间 位置。在断裂交叉处或河流交汇、转弯处溶洞规模 明显扩大呈厅堂状,可称其为厅堂洞。井震标定结 果表明,塔河地区溶洞高度与其体积(地震雕刻体 积)具很好的正相关性,即溶洞高度(h)可代表地下 河溶洞的规模^[12-13,18]。因此,本次用钻井可以精确度 量的地下河溶洞高度作为地下河类型划分依据,将 其划分为厅堂洞(h>15 m),干流洞(h=5~10 m),支流 洞(h=1~5 m),末梢洞(h<1 m)4种类型,并分析其沉 积充填特征(图4)。

厅堂洞多分布于断层交汇处,也是地下河交汇、 分叉的地方,是地下河溶蚀与围岩垮塌共同作用的 结果。溶蚀、垮塌使溶洞扩大,充填使溶洞空间缩小, 这样一边扩大、一边充填,构成了多个垮塌角砾岩与 沉积砂泥岩组合的溶洞充填序列。例如,TK730并位 于北北东与北北西断裂交叉处,5563.4~5581.0m 钻遇18.9m的厅堂洞,溶洞充填率为100%,其中 垮塌角砾充填(锯齿状中低伽玛、高中子、低电阻) 8.9m、砂泥沉积充填(箱型高伽马、高中子、特低电 阻)10.0m,呈4个垮塌—沉积充填序列。

干流洞多沿断裂带分布,溶蚀与侵蚀作用强烈, 多呈管道状展布,河道中水流动力强,偶遇狭窄喉道 处,流速骤减,大量岩溶碎屑随即卸载沉积,其中砂 泥质充填为其主要充填类型。TK451 井 5 566.8~ 5 576.0m钻遇9.2m的干流洞,溶洞充填率为100%, 其中6.2m的沉积充填(高伽玛、高时差、低电阻),不 足1m的化学充填(低伽马、低中子、中高电阻),还发 育一层2.0m厚的垮塌角砾岩。

支流洞和末梢洞多与断裂诱导裂缝有关,延伸 方向多变,分布较广,充填程度低,以沉积细粒物质 充填为主。S65 井 5 724.8~5 726.9 m 钻遇2.1 m 的 支流洞,溶洞顶部0.86 m 钻遇放空(中高伽马、指状 高中子、特低电阻),漏失钻井液528 方;下部充填 1.24 m 灰绿色粉砂岩与泥岩,溶洞充填率为56%。 S67 井 5 518.2~5 518.8 m 钻遇0.6 m 的末梢洞,溶洞 充填率为100%,全为灰绿色粉砂质泥岩充填(中高伽 马、中子、齿状低电阻),其周围50 m 范围内发育众多 因裂缝溶蚀扩大而形成的缝洞复合体,储集性能 良好^[22]。



图4 塔河油田奥陶系岩溶地下河成因类型

Fig. 4 Genesis types of Ordovician karst underground rivers in Tahe oilfield

a.TK730井,厅堂洞,垮塌角砾与沉积砂泥岩充填 b.TK451井,干流洞,化学一垮塌角砾一沉积砂泥充填 c.S65井,支流洞,砂泥充填,发育 0.86m未充填段 d.S67井,末梢洞,泥岩充填

研究区12口井的地下河岩芯资料显示,地下河 沉积充填物主要有两种类型:一种是细粒砂泥质沉 积,或为细砂岩、或为泥岩,其中砂岩以石英砂岩为 主,石英颗粒分选磨圆较好,饱含油(图5a,图5b),如 T615、S70、T639等井;另一种是粗砾岩,砾石为垮塌 角砾或岩溶砾屑,其随地下河近距离搬运沉积,分选 较差、磨圆中等,砾间充填细粒砂泥质(图5c,图5d), 如T403、S75、T414等井。



图5 塔河油田地下河沉积充填物岩矿特征

Fig. 5 Mineral features of sediment fillings in underground rivers in Tahe oilfield a.T615井,5547.4m,灰褐色油浸细砂岩,岩性疏松 b.石英细砂岩,石英含量>60%,分选较好、磨圆中等,颗粒呈点接触(a样品,正交) c.T403井,5541.1m,浅灰色砂砾岩,岩性疏松,砾石为奥陶系灰岩,磨圆较好 d.砾屑砂岩,岩屑除灰岩砾石外主要为钙华,含少量石英矿 物(c样品染色薄片,正交)

3 地表河与地下河分布及成因联系

3.1 地表河与地下河分布

结合前人研究成果^[10-11],依据地表河与地下河电 性特征,并震结合,对研究区地表河与地下河分布进 行精细刻画(图6)。结果显示:研究区内发育两大岩 溶水系,主要分布于岩溶洼地区,一是西侧始于 TK472 井附近的末梢河、经 T601、S67 井附近、到 TK231、TK734 井附近汇入岩溶湖,二是东侧始于 TK492 井附近的末梢河、经 T416 支流河与 T403 地下 河、于 TK257 井附近入湖。两大水系周围汇集40多 条支流河和末梢河,西侧地表河主要分布于岩溶洼 地上游,下游主要表现为地下河,全程达25.8 km;东 侧地貌落差大,地表河常被溶蚀残丘阻挡而转入地 下河,穿越溶蚀残丘后再次出露地表成为地表河,大 约历经了 3 个地表河段和 2 个地下河段最终汇入岩 溶湖,全程达14.6 km(图7)。

3.2 地下河是地表河的地下延伸

由图6可知,无论是西侧还是东侧,地表河与地

下河首尾相连、此消彼长,地表河消失的地方即为地 下河起源之处,几经转折地下河再出露地表,成为地 表河。因此,地下河即为地表河的地下延伸。

岩溶洼地下游地形平缓,水量充足,包气带厚度 小,受潜水面波动的影响,地下河呈多层式"立交桥" 式发育。例如,S67井区发育的网状地下河,地表河 即通过多处落水洞和溶蚀裂隙渗滤进入地下转变为 地下河,顺平缓斜坡流经TK602—TK632—TK730井, 于TK734井处直接汇入岩溶湖。由于地形坡度小,地 下河道平缓,水流稳定,地下河溶洞以细粒沉积物充 填为主。同时,受多期潜水面升降的影响形成了3个 细砂—泥质沉积旋回,各旋回井间可明显追踪对比。 越靠近岩溶湖方向,受湖面升降影响越大,形成的旋 回越多(图7a)。依此理论可预测井间沉积充填物的 分布。

岩溶洼地上游地下河溶洞多与断裂伴生,溶洞 规模大,厅堂洞发育,溶洞垮塌严重。因其地形落差 大,包气带厚,受小幅度潜水面升降影响小,地下河 埋藏深且呈单层树枝状发育。例如,T403井区树枝 状地下河,地表河通过TK476井溶丘底部脚洞直接灌





人地下发育地下河,流经T403井厅堂洞后分为两支, 而后又于TK446井南部沿断层上涌出露地面,继而流 入TK458—TK257地表河汇入岩溶湖。由于地形坡 度大,水流迅猛,溶洞垮塌严重,部分垮塌角砾被再 次搬运沉积,充填物主要以粗碎屑和垮塌角砾为主, 形成了3~4个充填旋回,井间亦可对比(图7b)。

3.3 地表河与地下河砂泥岩"同源异境"

研究区地下河沉积充填物中均发育他形石英矿物,岩溶洼地下游地表河砂泥质沉积物中也含有石

英矿物,因此对研究区地表河与地下河砂泥岩样品 进行微量元素与锶同位素分析,由表1可知,奥陶系 灰岩Sr/Ba>20,属于典型的海相沉积^[12,23];地表河砂 泥岩Sr/Ba比值为0.085~0.175(平均为0.124),属于 陆相氧化环境产物;S64井落水洞充填物样品Sr/Ba 比值高于0.16,为弱氧化环境的产物;地下河砂泥岩 样品Sr/Ba比值介于0.422~0.921(平均为0.632),属 于弱还原沉积产物,S65井的灰绿色泥岩也反映了弱 还原沉积环境。S64井地表河和落水洞砂砾岩沉积



Fig. 7 Profile of genesis relation and composition of fillings between surface and underground rivers in the east and west side of Tahe oilfield (profile location shown in Fig.6)

物 U/Th<0.75、V/Cr<2,属于弱氧化环境;地下河砂泥 岩0.75<U/Th<1.25,2<V/Cr<5,属于弱还原一还原环 境。同时,地表河、地下河砂泥岩总稀土含量远高于 奥陶系灰岩(图8),地下河溶洞热液充填的巨晶方解 石总稀土含量也高于奥陶系灰岩,说明岩溶河流充 填物与奥陶系灰岩无关,可能是陆源或热液来源物。 地表河、地下河砂泥岩稀土元素配分模式非常相似, 表现为轻稀土富集的右倾型、Eu含量略微偏低,说明 它们是同一水系的产物。同时,地表河与地下河沉 积物中的锶同位素组成相近,在0.7124~0.7312之 间,高于幔源锶与周围碳酸盐岩重溶锶,也表明地下 河与地表河砂泥岩具有同源性质。

因此,地表河砂泥岩沉积物形成于弱氧化环境, 地下河砂泥岩形成于弱还原环境,二者具有相同的 陆源碎屑供给、不同的沉积环境。地表河通过落水 洞或断裂带进入地下发生溶蚀作用,形成地下河各 类溶洞,原本沉积的地表河砂泥岩被洪水不断冲刷 搬运进入地下河而逐渐卸载沉积,从而导致地形落 差大、水流湍急的岩溶洼地北部地表河没有了砂泥



Fig. 8 REE distribution pattern of sedimentary fillings of surface and underground rivers in Tahe oilfield

岩,仅在地形平坦、水流缓慢的岩溶洼地下游河谷中 残留砂泥岩沉积物。

表1 地表河、地下河砂泥岩沉积物锶同位素和微量元素组成特征

Table 1 Compositions of microelements and strontium isotope of sandstone and mudstone in surface and underground rivers in Tahe

			oilfield					
样品号	样品性质		⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Sr/Ba	V/Cr	U/Th	REE/ppm	L/H
T615-5435.32	褐灰色砂屑灰岩	原岩	0.708733	29.680	4.040	2.520	4.261	9.273
T403-5 535.26	褐灰色砂屑灰岩		0.708910	30.003	5.741	2.372	3.711	10.821
S64-5516.21	褐灰色砂屑灰岩		0.709 004	5.094	4.110	5.083	3.923	6.568
T624-5567.5	棕褐色粉砂质泥岩	地表河	0.720977	0.085	1.069	0.115	59.882	10.284
T624-5 568.8	浅灰色石英砂岩		0.716755	0.109	0.952	0.392	33.131	9.190
T624-5572.6	灰色砂砾岩		0.712423	0.124	1.658	0.224	59.540	10.179
S64-5493.1	深灰色砾岩		0.731 203	0.178	2.054	0.895	86.491	10.826
T615-5 538.8	灰色粉砂质泥岩	地下河	0.724 927	0.564	3.264	0.965	118.392	8.637
T615-5547.4	灰褐色细砂岩		0.714 372	0.422	2.035	0.885	96.551	9.010
T615-5557.6	褐灰色粉砂岩		0.721 025	0.508	3.220	0.790	137.391	9.155
S65-5 538.78	灰绿色泥岩		0.731 203	0.921	5.021	1.352	333.796	10.101
T403-5 573.6	绿灰色泥岩		0.724 678	0.745	4.625	1.021	154.792	8.038
S75-5727.8	白色巨晶方解石		0.716 664	8.468	0.652	1.744	13.254	3.584

4 地表河与地下河沉积物储集性能

研究区大部分地表河被岩溶湖泥灰质充填,其 灰质成分高(>60%),裂缝欠发育,无溶蚀作用,加之 压实作用导致其岩性非常致密,225块岩芯样品物性 分析测试孔隙度也都小于1%,几乎无油气显示,为非 储层(图9a)。



图9 塔河油田地表河与地下河沉积充填物物性及含油性特征对比

Fig. 9 Comparison of characteristics of physical and oil-bearing properties of sediment fillings between surface rivers and underground rivers in Tahe oilfield

a.泥灰质充填地表河(T601井) b.砂泥质充填地表河(T444井) c.沉积充填干流洞(T615井)

岩溶洼地下游T624—T615—T444井一线附近的 地表河砂泥岩沉积物,受后期压实与胶结作用影响, 颗粒呈线接触,原生粒间孔隙不发育(图3i)。4口井 52个地表河砂岩样品物性测试数据显示,其孔隙度 分布于0.2%~3.8%之间(平均为1.6%);钻录井与 试采资料显示,地表河砂岩油气显示较差,大部分无 油气显示,仅局部岩芯见油迹显示,压裂试采结果均 为干层(图9b)。落水洞沉积物砂泥混杂,后期压实 强烈,灰岩砾石呈线性接触(图3j),物性较差,亦为非 有效储层。因此,塔河油田地表河不存在有效储层。

地下河砂岩受洞壁支撑保护,后期压实程度弱 (碎屑颗粒呈点接触),岩性疏松,除部分钙质胶结 外,仍然保存了大量原生粒间孔(图5b,图5d)。118 块地下河砂岩样品物性分析数据显示,其孔隙度主 峰区间为16.8%~20.4%。钻录井与试采资料也证 实地下河砂岩油气显示级别高、含油性好,为塔河油 田重要油气储层(图9c)。

5 结 论

(1)塔河地区地表河充填物主要由泥灰岩、砾屑 灰岩及砂泥岩组成。其中泥灰岩与砾屑灰岩均属于 岩溶后湖相沉积,在研究区广范分布;而砂泥岩属于 岩溶期河流相沉积,与落水洞和地下河砂泥岩沉积 物具有相同的矿物成分,仅分布于地形平坦的岩溶 洼地下游的T624—T615—T444—线附近;

(2)地下河是地表河的地下延伸,二者具有相同 的物源供给、不同的沉积环境。地形落差大的洼地 北部,水流急速,不断将原本地表河砂泥岩冲刷搬 运,通过落水洞进入地下形成地下河砂泥岩沉积,而 地表河谷中没有了砂泥岩;地形平坦的洼地下游区, 水流平缓,河谷中仍残留着地表河砂泥岩沉积物;

(3)塔河油田不发育有效的地表河砂岩储层,地 表河中广泛充填泥灰质,岩性致密,几乎无储集空间;局部河谷中残留的砂岩经受后期强烈压实与钙 质胶结作用,平均孔隙度只有1.6%,含油性差,亦属 非有效储层。地下河砂岩受溶洞保护,压实程度弱, 孔隙度可达20%,含油性好,为重要的油气储层。

参考文献

- [1] 康玉柱.中国古生代海相油气资源潜力巨大[J].石油与天然 气地质,2010,31(6):699-706.
- [2] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. 石油学报,2013,34(1):115-121.
- [3] 康玉柱.塔里木盆地北部石油地质几个问题的讨论[J].现代 地质,1989,3(1):111-123.
- [4] 张抗.塔河油田的发现及其地质意义[J].石油与天然气地质,

1999,20(2):24-28,36.

- [5] 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):76-78.
- [6] 何发岐.碳酸盐岩地层中不整合一岩溶风化壳油气田:以塔 里木盆地塔河油田为例[J].地质论评,2002,48(4):391-397.
- [7] 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,2008,29(5):565-573.
- [8] 夏日元,唐建生,邹胜章,等.碳酸盐岩油气田古岩溶研究及 其在油气勘探开发中的应用[J].地球学报,2006,27(5): 503-509.
- [9] 蔡忠贤,刘永立,段金宝.岩溶流域的水系变迁:以塔河油田6
 区西北部奥陶系古岩溶为例[J].中国岩溶,2009,28(1): 30-34.
- [10] 李源,鲁新便,蔡忠贤,等.塔河油田海西早期古水文地貌特 征及其对洞穴发育的控制[J].石油学报,2016,37(8):1011-1020.
- [11] 鲁新便,何成江,邓光校,等.塔河油田奧陶系油藏喀斯特古 河道发育特征描述[J].石油实验地质,2014,36(3):268-274.
- [12] 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.
- [13] 金强,田飞,鲁新便,等.塔河油田奧陶系古径流岩溶带垮塌 充填特征[J].石油与天然气地质,2015,36(5):729-735.
- [14] 金强,康迅,荣元帅,等.塔河油田奧陶系古岩溶地表河和地 下河沉积和地球化学特征[J].中国石油大学学报:自然科学 版,2015,39(6):1-10.
- [15] 邹胜章,夏日元,刘莉,等.塔河油田奥陶系岩溶储层垂向带 发育特征及其识别标准[J].地质学报,2016,90(9):2490-2501.
- [16] 王晓畅,张军,李军,等.基于交会图决策树的缝洞体类型常规测井识别方法:以塔河油田奥陶系为例[J].石油与天然气地质,2017,38(4):805-812.
- [17] 马丽娟,孔庆莹,刘坤岩,等.塔河油田奧陶系油藏弱振幅反射特征及形成机理[J].石油地球物理勘探,2014,49(2): 338-343.
- Fei Tian, Qingyun Di, Qiang Jin, et al. Multiscale geologicalgeophysical characterization of the epigenic origin and deeply buried paleokarst system in Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102:16-32.
- [19] 新疆油气区石油地质志编写组.中国石油地质志:第十五卷 [M].北京:石油工业出版社,1992:57-120.
- [20] 曹建文,夏日元,张庆玉.应用古地貌成因组合识别法恢复塔 河油田主体区古岩溶地貌[J].新疆石油地质,2015,36(3): 283-287.
- [21] 康志宏.塔河碳酸盐岩油藏岩溶古地貌研究[J].新疆石油地 质,2006,27(5):522-525.
- [22] 金强,程付启,田飞. 岩溶型碳酸盐岩储层中缝洞复合体及其 油气地质意义[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2017,41 (3):49-55.
- [23] 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.

Genesis relation of surface and underground rivers and reservoir characteristics in paleokarst drainage systems: A case study of Ordovician karst in the Tahe oilfield

ZHANG San¹, JIN Qiang¹, CHENG Fuqi¹, SUN Jianfang², WEI Hehua², ZHANG Xudong¹

(1.School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;2. SINOPEC Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract The Tahe oilfield lies on a slope of Ordovician karst, where the northern Tarim basin strongly uplifted in early Hercynian time, exposed Ordovician carbonate rock suffered from karstification for 56 Ma, producing complex fracture-cave reservoirs and karst landforms with numerous stone forests and canyons, as well as several karst drainage systems(surface rivers and underground rivers). The objective of this study was to reveal the genesis relationship between these surface and underground rivers and define reservoir characteristics in this area. Based on analyses to a large number of data of drilling, clogging, seismic surveys and measurement, the karst landform at the end period of karst development was restored by the method of drilling and seismic correction. And the genesis types and reservoir characteristics of surface rivers and underground rivers were analyzed by rock-minerals analysis and three-dimensional seismic carving technology. The results show that the geomorphologic high zone (watershed) formed by strike-slip faults developed in the east and west sides of the study area, the dustpan karst depression with southward opening lies between them, and a karst basin is present in the south. The northern depression is a steep slope (gradient 2.9 °) and the southern is relatively gentle (1.5 °). There are two main karst drainage formed by many tributaries developed in the depression, one is in the west that is dominated by surface rivers in the north and turns into underground rivers in the south; the other is on the east side with alternating surface (3 sections) and underground (2 sections) rivers. There are five kinds of surface rivers with different scales and fillings formed by strong erosion and dissolution, and there are no sedimentary sandstone in most surface rivers that are completely filled by the karst lacustrine marl with breccia, but no karstification, and compacted and cemented in the later period, and has almost no reservoir space. However, the underground river caves and sinkholes were filled a large amount of sandstone and mudstone, which were protected by the cave supporting, and the compaction effect was weak, among them, the porosity of sandstone reach 20%. Research suggests that the underground rivers are actually the extension of surface rivers below the ground. Originally there were sandstone deposits in surface rivers. Later on when underground rivers developed in the downstream areas, the flood washed the original sand-mudstone into the underground rivers from sinkholes, thus forming sandstone filling in karst caves of underground rivers, resulting in the high-quality oil and gas reservoirs, while almost no sandstone reservoir is present in surface rivers of Ordovician karst in the Tahe oilfield.

Key words karst drainage system, surface river marlstone deposits, underground river sand-mudstone deposits, formation and evolution, Ordovician, Tahe oilfield

(编辑 黄晨晖)