doi:10.3799/dqkx.2012.084

塔中地区中一下奥陶统碳酸盐岩 孔洞一裂缝储集系统划分及其特征

潘建国1,卫平生1,蔡忠贤2,杨海军3,王宏斌1,张虎权1

1. 中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃兰州 730020

2. 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

3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院,新疆库尔勒 841000

摘要:塔里木盆地塔中地区下奥陶统鹰山组是一套由喀斯特改造的碳酸盐岩储层,其储集空间主要为裂缝或与裂缝相关的溶蚀 孔洞,岩石基质孔隙很低.这些储集空间主要是由多期表生溶蚀作用与后期上升型溶蚀作用叠加改造的结果,因此储层结构复 杂、非均质性强.针对这类储层的发育特点,从储层地质静态描述的角度,按系统论思想,明确了"孔洞一裂缝储集系统"的科学内 涵,提出了以缝洞储集单元为核心的解剖思路和方法,并以多种地球物理方法包括叠前裂缝预测技术、碳酸盐岩古地貌分析技 术、地震一测井联合波阻抗反演技术以及三维地震属性提取及雕刻等所揭示的信息为基础,综合考虑储层发育的构造及其水文 地质边界条件,对缝洞储集单元进行了划分.在此基础上,结合钻井岩心及测井分析获得储集空间类型、结构及其成因信息,将该 区缝洞储集单元划分为表生岩溶型、热液岩溶型和裂缝型3种成因类型,明确了部分储集单元的成因属性. 关键字:塔中地区;岩溶孔洞一裂缝储集系统;缝洞储集单元;地球物理;石油.

中图分类号: P624 **文章编号:** 1000-2383(2012)04-0751-12 **收稿日期:** 2012-01-17

Reservoir Architectural System in the Middle-Lower Ordovician Carbonate Rock of Tazhong Areas in Tarim

PAN Jian-guo¹, WEI Ping-sheng¹, CAI Zhong-xian², YANG Hai-jun³, WANG Hong-bin¹, ZHANG Hu-quan¹

1. Northwest Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020, China

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

3. Petroleum Exploration and Development Research Institute, Tarim Oil field Company, PetroChina, Korla 841000, China

Abstract: The Yingshan Formation of Middle-Lower Ordovician in Tazhong uplift in Tarim is an important fracture and karstmodified carbonate reservoir. Main pore types in this reservoir include fractures ,vug and caves, which mainly resulted from multi-stage epigenetic dissolution and post-stage hypogenetic excavation. The reservoir architectural systems are of extreme heterogeneity and significant compartmentalization. This study presents an architectural hierarchy for the reservoirs not controlled by facices according to the system theory. On the basis of integrated information revealed by a variety of methods, such as geophysical methods including prestack fracture prediction technology, paleo-geomorphological analysis technology, seismiclogging wave impedance inversion technology, three-dimensional seismic attribute extraction technology, and well-logging explanation, core observation etc, the four types of reservoir units including fracture-dominated, vug-dominated, cave-dominated and complex can be identified and mapped in this area, these reservoir architectural units genetically formed in epigenetic and hydrothermal karst modification, fracturing. Moreover, the genesis of some reservoir units are studied in detail.

Key words: Tazhong area; karstic fracture-vug reservoir system; fractured-vug reservoir unit; geophysical; petroleum.

碳酸盐岩"缝洞系统"一词是 20 世纪 50-20 世 纪 60 年代由四川石油管理局为描述阳新统天然气 灰岩储层而提出的,用于刻画大小不同的溶蚀孔洞 (最大洞穴高度为5m左右)和裂缝相互串通而形成 的储集体. 近十年来,随着塔里木盆地奥陶系大规模 碳酸盐岩油藏的发现并投入开发,缝洞系统的概念 和内涵获得了进一步发展,并在此基础上提出了油 元(孙龙德,2007)及缝洞单元(张希明等,2007)的概 念,加深了对碳酸盐岩油藏内部非均质性的认识. 众 多学者认识到碳酸盐岩岩溶缝洞储层是一个由不同 时间、不同成因类型地质作用叠加复合形成的不同 尺度的储集空间所组成的复杂结构体系,储集空间 的大小尺度及其构成的网络结构样式约束着流体的 存储能力及其流动习性,从而影响着油气的产能大 小. 按照地质系统的复杂性论述,以岩溶作用和构造 破裂作用为主导地质作用的系统时空结构解剖应是 该类储层研究的核心. 因此,碳酸盐岩岩溶孔洞一裂 缝储集系统就是对不同类型、不同级别储集体相互 联系、组合分类、表征及评价的系统研究.

1 岩溶孔洞一裂缝储集系统概念及其 特性

根据"系统是由相互联系、相互作用的诸要素组 成的有机体,它具有为达到一定目的的整体功能"的 定义(Bertalanffy, 1973),本文将"岩溶孔洞一裂缝 储集系统"定义为一个在相同地质背景下,由不同成 因地质作用形成的溶蚀孔、洞、缝按多种结构样式组 成,并被相对致密岩体所包围和遮挡,具有流体存储 和输导功能的天然系统,该天然系统中,孔、洞、缝是 基本构成要素,且这些要素是地质历史时期多种地 质作用(包括表生、同生及埋藏等溶蚀作用以及构造 破裂作用)叠加复合的结果.受这些地质作用控制, 孔、洞、缝在空间结构样式上常表现为2个重要特 点:一是在区带规模或油田规模上常表现为非均质 性的集合体分布,其非均质性主要由控制孔、洞、缝 发育的岩溶作用及其构造破裂作用在区域规模上的 差异性造成;二是在区块规模或油藏规模上,这些集 合体中的孔、洞、缝可以组合成裂缝为主的、孔洞为 主的、洞穴为主的、或复合型等多种网络构型样式, 其非均质性则由控制因素的局部差异所致.结构样 式决定了流体的存储能力和渗流能力,因而是该类 油气田油气产能差异极大的主要控制因素.四川盆 地阳新统天然气的产能,塔河一轮古奥陶系的原油 产能,美国二叠盆地中下奥陶统 Ellenburger 群(或 堪萨斯州的 Arbuckle 群)、密西西比系的 Spergen 组和二叠系 San Andres 群的产能(Nissen et al.,

2009),以及中东 44 个巨型喀斯特改造油气田的产 能均表现出了这种特点(Trice,2005).

对应于油田规模的孔、洞、缝组成的结构体系, 本文定义为"岩溶孔洞-裂缝系统".而与油藏规模 和尺度相对应的孔、洞、缝结构体系则称为"缝洞储 集单元".因此,按照储集系统划分,"缝洞储集单元" 是"岩溶孔洞-裂缝系统"内部的次一级单元(子系 统),是储集系统层次性的表现.在尺度上,与前述的 "缝洞系统"相当.这种层次性划分也可以粗略或简 单的从岩溶水文地质角度来理解.一个喀斯特系统 可以划分成若干个水文地质单元,因此从缝洞系统 的初始成因角度,对应于"喀斯特系统"的产物应该 是"岩溶孔洞-裂缝系统",而对应于"水文地质单 元"的产物则是"缝洞储集单元".

根据系统边界或划分原则,将区域不整合面以 及区域性分布的非渗透性或弱渗透性地层作为系统 的边界,而将系统内部局部性分布的非渗透性或弱 渗透性地层作为缝洞储集单元的边界.

由上可以看出,"缝洞储集单元"是该类储层解 剖的核心,研究的重点包括单元边界的确定,单元内 孔、洞、缝空间网络结构样式的建立,流体存储能力、 流体流动规律的分析,以及单元主导成因机制的分 析等.

值得指出的是,"缝洞储集单元"不同于"油元", 也不同于"缝洞单元".前者是储集系统尺度上的概 念,也是从储层地质学的角度对碳酸盐岩储层静态 描述的概念,而后两者则是油气藏流体流动尺度上 的概念,也是油气藏动态描述的概念.

2 岩溶孔洞一裂缝储集系统研究方法 及关键技术

2.1 研究方法

以整体论为主导,还原论作辅助,宏观与微观处 理相结合和互补才是研究复杂性的较全面和完整的 方法论(於崇文,2002,2003).因此,"岩溶孔洞一裂 缝储集系统"作为一种复杂的地质系统,也应该采用 "从整体上研究系统的集体性质与行为"的方法论为 主,并辅助用"通过对最基本组成单元分别研究而认 识系统整体特征"的还原论,以达到对系统全面、客 观的认识.

首先是认知过程,即综合各种信息资料,不断开 展"岩溶孔洞一裂缝储集系统"由表及里,由现象到 本质的反映客观事物特征与内在联系的思想探索, 抓住关键地质要素. 然后开展地质学理论及地球物 理学模拟实验与技术2个方面的研究,前者主要从 微观和宏观2个层次,着重开展构造地质、岩相古地 理、储层地质、地震储层学等研究,一是建立不同类 型储集体结构样式、厘定相应的成因机理,二是不断 揭示构造破裂作用及岩溶作用对储集体的时空展 布、形成及演化等规律性认识:后者则通过一系列岩 石及储集体的地球物理学模拟和方法实验,明确储 集体的地球物理响应特征,并形成储集体的有效识 别、预测和表征技术.在此基础上,确定储集系统的 边界和形态,识别、预测和表征储集体,按照储集体 网络结构样式模型进行划分与评价,并对储集性能、 流体输导进行分析.尤其要将缝洞储集单元的解剖 作为重点,包括对单元边界的确定,单元内孔、洞、缝 空间网络结构样式的建立,流体存储能力、流体流动 规律的分析,以及单元主导成因机制的分析等,尽可 能地实现缝洞储集单元的定量化表征与评价,包括 定量化雕刻与建模,以达到明确勘探方向、优选勘探 开发目标、合理编制开发方案的目的(图1).本文侧 重的是塔中地区中一下奥陶统碳酸盐岩孔洞一裂缝 储集系统划分研究.

2.2 关键技术

根据岩溶孔洞一裂缝储集系统的研究方法与内

容,其关键技术主要包括:地球物理测井储层识别与 评价技术;全三维地震解释技术;碳酸盐岩古地貌恢 复技术;以地球物理岩石物理分析、储集体地震正演 模拟和地球物理实体模型实验等为核心的碳酸盐岩 地球物理模拟试验技术;以地震一测井联合波阻抗 反演、地震属性及叠前反演为主的碳酸盐岩岩溶孔 洞预测技术;叠前叠后裂缝型储层预测技术;碳酸盐 岩流体预测技术;缝洞储集体定量化雕刻及连通性 分析技术;缝洞储集体三维建模技术等.由于本文侧 重系统划分,因此,对于这些关键技术,暂不作详细 介绍.

3 塔中岩溶孔洞一裂缝储集系统划分

塔中地区奥陶系的岩性地层自下而上可划分为 下奥陶统蓬莱坝组、下一中奥陶统鹰山组、中奥陶统 一间房组,上奥陶统恰尔巴克组、良里塔格组和桑塔 木组共6套地层,但这些地层在全区的发育和分布 并不完整.构造演化史分析表明,整个奥陶纪时期, 塔中隆起发生了3次明显的构造隆升或海平面下降 事件.中奥陶世末的加里东中期 [幕运动,隆升或海 平面下降比较强烈,古生物、微量元素等资料证明其 风化淋滤时间长达15 Ma,因此整个隆起的大部分





Fig. 1 Flow chart of research for karstic fracture-vug reservoir system

区域缺失下一中奥陶统一间房组及随后代表海侵早 期沉积的上奥陶统下部吐木休克组地层;第2次隆 升发生于良里塔格组沉积末期,代表了加里东中期 Ⅲ幕运动,但暴露时间相对较短;桑塔木组沉积末期 的隆升运动代表了奥陶纪末的构造运动,属于加里 东中期Ⅲ幕运动.

塔中地区目前的油气产层主要为下一中奥陶统 鹰山组和上奥陶统良里塔格组中部的颗粒灰岩段 (图 2).但这两套储层的特征、分布及其形成机制存 在明显的差异,并非都是上述 3 期隆升造成地表暴 露产生的溶蚀改造的结果.加里东中期 I 幕运动是 整个塔里木盆地典型的区域性构造运动,暴露时间 较长,暴露范围大,对下伏鹰山组地层产生了明显的 溶蚀改造,具有典型的表生岩溶特征.而良里塔格组 沉积末期的加里东中期 Ⅱ 幕运动由于暴露时间较 短,对下伏地层的溶蚀改造相对比较弱.虽然奥陶纪 末期的加里东中期 Ⅲ 幕运动暴露时间比较长,但由 于桑塔木组主要为一套泥质粉砂岩一粉砂质泥岩, 良里塔格组上段岩性也为一套泥质条带灰岩,均属 于非可溶性岩层,因此地表大气淡水并未直接对良



图 2 塔中(Zg6 井)奥陶系发育的上奥陶统良里塔格组和中一下奥陶统二套产层 Fig. 2 The Lianglitage and Yingshan oil producers of Ordovician in Tazhong uplift



图 3 塔中地区奥陶系岩溶孔洞一裂缝储集系统剖面 Fig. 3 Karstic fracture-vug reservoir system division of Ordovician in Tazhong uplift

里塔格组中段的颗粒灰岩产生大面积的溶蚀改造, 储层的形成主要与三级海平面下降造成的同生岩溶 有关.

鹰山组和良里塔格组在分别经历了表生和同生 岩溶作用后的埋藏过程中,后期还不同程度地遭受 了上升型岩溶作用和多期构造破裂作用的改造,其 叠加在早期岩溶基础上,复杂化了储层的构型.

由上可看出,良里塔格组和鹰山组二套储层不 仅在储层的孔、洞、缝发育特征、分布规律及其成因 机制上均存在明显差异,而且两套地层间还存在一 个区域性的构造不整合面,特别是在良里塔格组下 部还发育了一套厚度较大的泥质灰岩段,属于区域 性分布的非一弱渗透性地层,其对于两套储层之间 的孔隙介质内的物质和流体交换起着重要的阻隔作 用,因此本文将塔中地区整个奥陶系储集体系划分 为2个岩溶孔洞一裂缝储集系统:上奥陶统良里塔 格组孔洞一裂缝储集系统和中一下奥陶统鹰山组孔 洞一裂缝储集系统(图 3).

4 中一下奥陶统缝洞储集单元的划分 及其特征

4.1 缝洞储集单元的划分

关于缝洞储集单元的划分目前存在较大的争议, 概括起来,主要有以下几种不同的划分思路和方案: (1)2006年,西北油田分公司勘探开发研究院针对塔 河油田最早提出了基于波形、分频和振幅变化率结合 岩溶古地貌及流体分析的划分方案;(2)2009年,塔里 木油田分公司基于轮古油田总体上表现出的"残丘控 油"、"沟谷控水"油气分布特征,提出了以较大岩溶沟 谷作为边界的划分方案;(3)斯伦贝谢中国公司 (2010)基于初始成因缝洞的连通性和相关性,提出了 形成于"统一水动力条件"下的缝洞储集体作为缝洞 系统(即本文的缝洞储集单元)的划分方案.

国外近几年也在开展类似的工作,具代表性的 是 Nissen *et al*. (2009)通过对西德克萨斯 Crane 县 Waddell 油田二叠系 San Andres 组以及科罗拉多 州 Cheyenne 县的 Cheyenne 和 Smoky Creek 两个 油田密西西比系 Spergen 组喀斯特改造储层的研究 表明,储层分隔仓的地质边界与喀斯特层的曲率有 一定关系,因此可以采用三维地震体曲率属性来刻 画其边界.

显然,上述岩溶孔洞一裂缝系统内次一级单元 划分方案存在巨大分歧,反映出目前人们对该单元 地质规律的认识并不十分清楚.这是因为缝洞型碳 酸盐岩储层的后期改造要远远大于碎屑岩储层,因 此原始水文地质条件控制下形成的缝洞体与后期叠 加改造后的缝洞体之间可以存在明显的差异.

针对缝洞型储层具有强烈改造性的特点,本文 强调以地震刻画的相对聚群状分布的孔、洞、缝网络 结构体作为系统内次一级单元划分的主要依据,边 界确定时又进一步考虑构造分区以及岩溶古地貌、

古水文相似性的约束.提出这一原则是为了能够在 划分过程中充分运用钻井约束下的三维地震资料来 对储集单元的空间连续性变化进行描述和刻画.基 于上述原则,对塔中下奥陶统鹰山组缝洞储集单元 进行了划分(图 4),并根据不同类型储层分别采用 了不同的地球物理方案.对洞穴及其孔洞型储层,主 要采用的是地震反射特征描述、正演模拟、井震校 验、单属性敏感性分析、多属性融合、多属性约束 井一震联合反演以及广义S变换的分频技术等相结 合的方案. 对裂缝型储层,则采用将叠前方位各向异 性分析与叠后构造应力场分析、本征值相干加强及 相关分量 P1 属性分析相结合的方法. 通过上述多 方法的综合运用和效果分析,同时总结出了塔中地 区中一下奥陶统岩溶孔洞一裂缝储集系统中储集性 能较好的缝洞储集单元的地震响应特征:强分频振 幅、低频、强相干、低阻抗、低速度、强衰减等.

4.2 缝洞储集单元的类型和特征

4.2.1 储集介质类型 宏观岩心和微观薄片观察 表明,塔中地区下奥陶统鹰山组的基质孔隙度和渗 透率非常低,基本不具备储渗条件.依据钻井岩心观 察、井史(放空、泥浆漏失等)、测井储层分析(基于双 侧向、孔隙度测井、成像测井),结合地震反射特征来 进行综合分析,确定其储层类型主要由溶蚀孔洞型、 裂缝型、洞穴型以及复合型储层构成.

尽管塔中地区下奥陶统鹰山组没有像塔河一轮 古油田那样发育比较完善的径流带岩溶管道系统, 但也有相当部分的钻井钻遇到了洞穴.截至 2011 年 上半年,在中石化和中石油的钻井中共有 17 口井在 下奥陶统的 25 个井段钻遇了洞穴,其中 13 个井段 洞穴的高度 超过 10 m, Tg1 井自 3 657.0~ 3 761.41 m钻遇到了该区最大的洞穴井段,达 104.41 m,泥浆漏失 20 456.5 m³,其余洞穴井段洞 穴高度一般在 10~20 m 范围.

正演模拟表明,洞穴的地震反射特征主要表现 为串珠状.塔中地区三维地震剖面上的串珠状反射 比较常见,如Zg5、Zg9、Zg6、Zg10及Zg21等井点处 均发育串珠状反射,其中Zg6、Zg10井为典型的长 串珠,而Zg7、Zg21井处为羊排状反射特征(图5). 平面上,塔中西部的发育程度总体要高于东部,在 Zg24-Zg26井区、Zg17-Tz452井区、Zg26井南、 Zg15井区、Zg12-Zg11井区以及Zg44-Tz10-Tz201-Tz23井区发育相对比较集中,且串珠分布与北西向 和北东向断裂关系非常密切(图4).反映出洞穴发 育与加里东和海西期断裂之间存在内在联系.

孔洞型储层是指测井裂缝孔隙度小于 0.04%, 孔洞孔隙度大于1.8%的储集层段,岩心上一般可



图 4 塔中下奥陶统鹰山组缝洞储集单元分布

Fig. 4 Fractured-vug reservoir unit distribution of Yingshan Fromation in Tazhong uplift



图 5 Zg10 井和 Zg21 井鹰山组中的串珠状和羊排状反射特征 Fig. 5 'Pinch-and-swell' and 'muttonchop' form seismic reflector in Yingshan Formation at well Zg10 and well Zg21

以明显观察到毫米~厘米级规模的溶蚀孔洞 (图 6),如Tz4 井在鹰山组 3 840.45~3 841.28 m、 3 932.76~3 933.27 m 和 3 935.36~3 937.70 m 这 3 个井段就属于此类型的储层,溶蚀孔洞大小一般 为 1 mm×2 mm,最大 5 mm×15 mm.具组构呈现 非选择性的分散状分布特征.

通过对主频峰值达到最大主频的斜率、相关长度、均方根振幅、能量半衰时、弧长、平均反射能量等 多属性参数的优化融合(图 7),可以看出,塔中鹰山 组孔洞型及孔洞一裂缝型储层在东段 Zg5-Zg6 井区 和 Tz721 井区处最发育,向南至 Tz16 潜山减薄;在 中段 Zg22-Zg11-Zg8 井方向,储层呈较连续的条带 状分布,储层厚度总体上也沿上述井点位置最厚,向 垂直于上述方向的两边减薄;在西段 Tz45 及 Zg28 井区孔洞型储层整体发育.

裂缝型储层是指测井裂缝孔隙度一般大于

0.04%,孔洞孔隙度小于 1.80%,主体由裂缝网络 系统所构成的储层段,如 Tz4 井 3 842.83~ 3 843.67 m、3 860.73~3 869.80 m、3 920.16~ 3 938.92 m这 3 个井段,及 Tz4-7-38 井 3 958.50~ 3 961.00 m井段就属于纯裂缝发育段.

根据岩心和成像测井研究,塔中鹰山组中发育 的裂缝主要为构造缝.裂缝期次大致可划分为3期: 第1期形成于加里东中晚期,缝细而平直,宽0.2~ 2.0 mm,为细粉晶方解石充填,其中还常见沥青;该 期缝往往角度较大,呈段密集出现,可见其切割层间 岩溶孔洞中充填的渗流粉屑;第2期形成于海西期, 以近直立的张裂缝为特征,缝宽且延伸长,岩心可见 其宽达1~3 cm,延伸长达1m,其缝壁不平整,具溶 蚀现象,有的可扩溶成溶缝和溶洞,其中为中粗晶方 解石、萤石、石膏、沥青或原油充填,该期缝常切割第 1期缝;第3期形成于印支一喜山期,呈斜交状、低 角度一水平状以及网状,宽0.2~5.0 mm,扩溶现象 较明显,常见沿缝分布有小型溶洞,缝内充填物少, 仅少量马牙状方解石和原油.

通过将该区叠后第三代本征相干、负值曲率以 及叠前裂缝预测分析(图 8),可以看出塔中地区的 北西向断裂与北东向或近南北向断裂的交汇处一般 是裂缝系统最为发育的部位,如 Tz14-Tz22 井区, 其余地区则呈相对较稀疏且不连续的片状分布 特征.

复合型缝洞储集单元的测井裂缝孔隙度一般大 于 0.04%,孔洞孔隙度大于 1.80%.储集层段中既 有裂缝也有小型孔洞的发育,孔洞和裂缝相互交融



图 6 Tz721、Tz84 井鹰山组中岩心、FMI 图像反映的孔洞型储层

Fig. 6 Dissolution vug of Yingshan Formation display form core and borehole image log of well Tz84 and well Tz721



图 7 塔中下奧陶统鹰山组风化壳多属性融合储层综合预测 Fig. 7 Reservoir distribution predicted by multi-attributes amalgamation in Yingshan Formation







图 8 采用不同方法预测的裂缝分布

Fig. 8 Fracture distribution predicted from different methods

a. 叠后本征值相干算法预测的 Zg162-Zg10 井区裂缝图;b. 叠后负值曲率预测的 Zg162-Zg10 井区裂缝图;c. 叠前频率衰减属性预测的 Tz49 井区的裂缝图;d. 为应变量分析预测的塔中中西部裂缝图

连接构成网络空间.在分布上,裂缝与孔洞可以不相关,也可以是溶蚀孔洞沿裂缝发育,裂缝与孔洞形成 串珠状分布.Tz83 井区下奥陶统大多为该类储层.

在地震上,复合型储层与孔洞型储层一般均表 现为中一弱振幅的反射特征,二者之间很难区分,因 此图 7 实际上反映的是 2 种类型储层的分布情况.

总之,塔中地区缝洞储集单元的储集类型尽管 可以划分出4种类型,但绝大部分储集单元主要表 现为复合型,单纯的洞穴型、裂缝型及孔洞型单元相 对比较少.通过大量测井解释可以看出,复合形式也 有差异,并不都是单纯的由孔洞和裂缝或洞穴构成 的交叉叠合式复合,也有很多是各种类型呈交互式 的复合,因此有时在测井上尽管可以看到发育纯类 型的井段,但实际上是单元内部储集空间进一步的 非均质性造成的,说明在储集单元内部仍然存在次 一级的非均质体.这种尺度的非均质性对于动态开 发显得尤为重要,因此是开发阶段需要重点描述的 对象.

4.2.2 缝洞储集单元成因类型 成因上,加里东中 期 [幕的表生期岩溶是塔中地区下奥陶统岩溶孔 洞一裂缝储集系统形成的主要机制,奠定了该套喀 斯特储层的重要基础,但后期上升型热液岩溶作用 以及多期构造破裂在不同地区对该表生岩溶造成了 不同程度的叠加,导致不同地区的缝洞储集单元在 主导成因上存在一定的差别,因此可以根据主导成 因的不同将缝洞储集单元划分为表生岩溶型、热液 岩溶型和裂缝型3种端元类型.

(1)表生岩溶型缝洞储集单元. 塔中大部分地区 下奥陶统鹰山组之上直接覆盖了上奥陶统良里塔格 组,仅在 Ⅱ号断裂带 Tz4-Tz46 井一线以及东南部 的塔中 1~8号断裂带-Tz38-Tz48 井一线分别覆 盖了上奥陶统桑塔木组和石炭系地层,因此大部分 地区只经历了加里东中期 Ⅱ幕表生岩溶作用. 而上 述 2个长条状分布的地区分别叠加了加里东中期Ⅲ 幕及海西早期表生岩溶作用.

通过多种地震储层预测技术的综合分析,结合 钻井漏失和测井储层解释结果对比,塔中地区下奥 陶统鹰山组风化壳储层在纵向上一般发育于下奥陶 统顶面以下 270 m 以内(图 9),主要集中在下奥陶 统顶面以下 60 ms(170 m 左右)时窗范围内,向下储 层变差.

(2) 热液岩溶型缝洞储集单元. 热液岩溶是指地 下深部的热液流体在内动力驱动下沿断裂和裂缝上 升过程中,由于与围岩之间未达到化学平衡而导致 的对碳酸盐岩围岩矿物的一种溶蚀作用. 热液岩溶 可以产生各种不同规模的溶蚀孔洞,形成良好储集 空间.

地震和钻井地质资料证明,塔中地区热液活动 非常强烈,其对储层的改造引起了许多学者的关注. 如李宇平等(2002)将 Tz45 井上奥陶统的岩溶储层



图 9 鹰山组表生岩溶纵向发育范围 Fig. 9 Depth range of epigenetic dissolution in Yingshan Formation



图 10 TZ45-Zg15 井区火成岩分布 Fig. 10 Distribution of igneous in well Tz45-Zg15 area

归结为代表受同沉积期和不整合岩溶缝洞及后期热 水溶蚀改造的缝洞储集体;王嗣敏等(2004)进一步 提出 Tz45 井良里塔格组中以发育萤石为特征的缝 孔洞是与中晚二叠世岩浆一热液作用有关的深部流 体改造型碳酸盐岩储集体;钱一雄等(2005,2006, 2007)分析了 Z1 井和 S2 井奧陶系的热液作用;金 之钧等(2006)和吴炳茂等(2006)等对塔中热液矿物 组合进行识别并总结热液活动的地球化学特征和判 识标志;吕修祥等(2005,2011)、朱东亚等(2008, 2009)及潘文庆等(2009)则分别对热液溶蚀特征进 行了较深入的研究.

综合上述研究者的研究成果,该区热液岩溶不 仅广泛发育于上奥陶统良里塔格组颗粒灰岩段,而 且在下奥陶统鹰山组也普遍可见,如 Tz2、Tz18、 Tz1、Z4、Z1、Zg9、Zg13、Tz3(14~16次取心)等井均 在下奥陶统中发现了明显的热液型岩溶孔洞.这些 热液岩溶储层垂向上的分布主要与非渗透性隔层有 关,当良4-良5隔层发育时,热液储层发育于鹰山 组;当该隔层尖灭或相变为灰岩时,热液岩溶储层发 育上移至良 2-良 3 段. 平面上则主要分布于热液 通道旁侧与流体汇集处. 因此根据塔中地区目前火 成岩的分布(图 10)结合钻井结果可以判断,总体上 塔中地区下奥陶统鹰山组中热液储层西部的发育程 度要强于东部.

(3)裂缝型缝洞储集单元. 与上述 2 种储集单元 不同的是,裂缝型储集单元属于构造成因而不是溶 蚀成因. 前已述及,塔中地区裂缝型储层中的裂缝系 统主要是由加里东中晚期、海西期以及印支一喜山 期的构造应力作用形成. 其中加里东中晚期的裂缝 系统主要与中一晚奥陶世末的挤压一压扭作用有 关,该时期不仅形成了北北西和北西向主要断裂构 造带,而且相继形成了 Tz16、Tz4、Tz1 和 Tz5 潜山 构造以及北西、近东西的断裂系统,主要分布在沿 Tz12-Tz15-Tz16 井一线、Tz4 井区和 Tz5 井区. 海 西期的裂缝系统主要与该时期一系列北东向分布的 走滑断裂有关. 因此沿这 2 个时期形成的褶皱及其 断裂特别是断裂交叉部位是裂缝系统发育的有利部 位(图 8),易形成裂缝型缝洞储集单元. 总之,塔中地区除了加里东中期由于表生岩溶 水的浅循环作用形成了区域范围内具有顺层分布特 点的孔洞型储层外,加里东中期一海西期形成的多 期、多组断裂/裂缝系统对鹰山组风化壳岩溶储集系 统中各种不同成因类型储集单元的发育起着决定性 作用.它们所构成的渗透性网络对地表水的集中补 给下渗,以及深部不同性质热液的上升及由此导致 的对围岩的改造均具有重要影响.因而尽管从成因 上可以划分为3种端元类型,但实际上许多储集单 元的成因可能具有复合叠加性.

5 结论

(1)由孔、洞、缝基本要素组成的非相控型碳酸 盐岩岩溶储层可以依据系统层次性和结构性原则, 从与油田和油藏规模相对应的尺度上分别划分为岩 溶孔洞-裂缝储集系统和缝洞储集单元,后者可按 主导成因作进一步划分.区域不整合面以及区域性 分布的非渗透性或弱渗透性地层可作为系统的边 界,而系统内部局部性分布的非渗透性或弱渗透性 地层则作为缝洞储集单元的边界.缝洞储集单元边 界及其内部结构特征的表征是认知该类储层的 核心.

(2)塔中地区奥陶系储层可以划分为上奥陶统 良里塔格组和中一下奥陶统鹰山组2个岩溶孔洞一 裂缝储集系统.上、下2个系统在孔、洞、缝类型,规 模、结构特征及其形成的主导机制等方面均表现出 较大的差异.塔里木盆地区域性的加里东中期I幕 构造运动面可作为2个系统的分隔边界.

(3)尽管采用地质及多种地球物理相结合的方 法对塔中中一下奥陶统鹰山组岩溶孔洞一裂缝储集 系统的缝洞储集单元进行了刻画,并按照主导成因 进一步划分为表生岩溶型、热液岩溶型、裂缝主导型 3种主要端元类型,但是在单元边界以及内部结构 特征刻画上仍存在不足,这也将是后续工作的重点 和要点.

References

- Bertalanffy, L. V., 1973. General system theory: foundations, development, applications. Geogy Braziller, USA.
- Jin, Z. J., Zhu, D. Y., Hu, W. X., et al., 2006. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim basin. Acta Geologica Sinica, 80(2): 245-253 (in Chi-

nese with English abstract).

- Li, Y. P., Wang, Z. Y., Li, W. H., et al., 2002. Trap types of Ordovician carbonate rocks in the central Tarim I fault zone and their petroleum exploration significance. *Chinese Journal of Geology*, 37 (Suppl.): 141-151 (in Chinese with English abstract).
- Lv, X. X., Yang, N., Xie, Q. L., et al., 2005. Carbonate reservoirs transformed by deep fluid in Tazhong area. Oil & Gas Geology, 26(3): 217 222 (in Chinese with English abstract).
- Lv, X. X., Zhang, Y. P., Jiao, W. W., et al., 2011. Effect of fault activity on carbonate reservoir of Yingshan Formation in Tazhong area, Tarim basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 32(3):244-249 (in Chinese with English abstract).
- Nissen, S., Bhattacharya, S., Watney, W. L., et al., 2009. Improving geologic and engineering models of midcontinent fracture and karst-modified reservoirs using new 3-D seismic attributes. final technical report. In: Byrnes, P., Marfurt, K., Sullivan, E. C., eds., Kansas geological survey open—file reports 2009. The University of Kansas Center for Research, Inc., 1 — 185. doi: 10. 2172/967045
- Pan, W. Q., Liu, Y. F., Dickson, J. A. D., et al., 2009. The geological model of hydrothermal activity in outcrop and the characteristics of carbonate hydrothermal karst of Lower Paleozoic in Tarim basin. Acta Sedimentologica Sinica, 27(5): 983-994 (in Chinese with English abstract).
- Qian, Y. X., Chen, Y., Chen, Q. L., et al., 2006. General characteristics of burial dissolution for Ordovician carbonate reservoirs in the northwest of Tazhong area. Acta Petrolei Sinica, 27(3):47-52 (in Chinese with English abstract).
- Qian, Y. X., Taberner, C. Zou, S. L., et al., 2007. Diagenesis comparison between epigenic karstification and burial dissolution in carbonate reservoirs: an instance of Ordovician carbonate reservoirs in Tabei and Tazhong regions, Tarim basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 12(2): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Qian, Y. X., Zou, Y. R., Chen, Q. L., et al., 2005. Geological and geochemical implications for multi-period and origin of carbonate karstification in the northwestern Tazhong: taking well Zhong 1 as an example. Acta Sedmentologica Sinica, 23(4): 596-603 (in Chinese with English abstract).
- Sun, L. D. , 2007. The hydrocarbon accumulation theory, exploration and development technology of carbonate res-

ervoirs. Petroleum Industry Press, Beijing, 315 (in Chinese).

- Trice, R., 2005. Challenges and insights in optimizing oil production from Middle East Mega karst reservoirs. In: Society of Petroleum Engineers, ed., The 14th SPE middle east oil & gas show and conference 2005. Bahrain International Exhibition Centre, Bahrain, 1-26.
- Wang, S. M., Jin, Z. J., Xie, Q. L., 2004. Transforming effect of deep fluids on carbonate reservoirs in the well Tz45 region. *Geological Review*, 50(5): 543-547 (in Chinese with English abstract).
- Wu, B. M., Wang, Y., Zhang, Y. G., et al., 2006. Thermal karstification of Ordovician carbonate and its petroleum geological significance in central Tarim basin. *Journal* of Central South University (Science and Technology), 37(Suppl. 1): 131-137 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. W., 2002. Complexity of geosystem: basic issues of geological science (I). Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 27(5): 509-519 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C. W., 2003. Complexity of geosystem: basic issues of geological science (II). Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 28(1): 31-40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. M., Zhu, J. G., Li, Z. Y., et al., 2007. Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe oilfield, Tarim basin: characteristics and subdivision of fracturevug units. *Marine Origin Petroleum Geology*, 12(1): 21-24 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. Y., Jin, Z. J., Hu, W. X., 2009. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area. *Acta Petrolei Sinica*, 30(5): 698-704 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. Y., Jin, Z. J., Hu, W. X., et al., 2008. Effects of deep fluid on carbonates reservoir in Tarim basin. *Geological Review*, 54(3): 348-357 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

金之钧,朱东亚,胡文瑄,等,2006.塔里木盆地热液活动地质 地球化学特征及其对储层影响.地质学报,80(2): 245-253.

- 李宇平,王振宇,李文华,等,2002. 塔中 I 号断裂构造带奥陶 系碳酸盐岩圈闭类型及其勘探意义. 地质科学,37(增 刊):141-151.
- 吕修祥,杨宁,解启来,等,2005.塔中地区深部流体对碳酸盐 岩储层的改造作用.石油与天然气地质,26(3): 217-222.
- 吕修祥,张艳萍,焦伟伟,等,2011.断裂活动对塔中地区鹰山 组碳酸盐岩储集层的影响.新疆石油地质,32(3): 244-249.
- 潘文庆,刘永福,Dickson,J.A.D.,等,2009. 塔里木盆地下古 生界碳酸盐岩热液岩溶的特征及地质模型. 沉积学报, 27(5):983-994.
- 钱一雄,陈跃,陈强路,等,2006.塔中西北部奥陶系碳酸盐岩 埋藏溶蚀作用.石油学报,27(3):47-52.
- 钱一雄, Taberner, C., 邹森林, 等, 2007. 碳酸盐岩表生岩溶 与埋藏溶蚀比较——以塔北和塔中地区为例. 海相油 气地质, 12(2):1-7.
- 钱一雄,邹远荣,陈强路,等,2005.塔里木盆地塔中西北部多 期、多成因岩溶作用地质一地球化学表征——以中1 井为例.沉积学报,23(4):596-603.
- 孙龙德,2007.碳酸盐岩油气成藏理论及勘探开发技术.北 京:石油工业出版社.
- 王嗣敏,金之钧,解启来,2004. 塔里木盆地塔中 45 井区碳酸 盐岩储层的深部流体改造作用. 地质论评,50(5): 543-547.
- 吴炳茂,王毅,张永贵,等,2006.塔中地区奥陶系碳酸盐岩热 液溶蚀作用及其油气地质意义.中南大学学报(自然科 学版),37(增刊1):131-137.
- 於崇文,2002. 地质系统的复杂性——地质科学的基本问题 (I). 地球科学——中国地质大学学报,27(5): 509-519.
- 於崇文,2003. 地质系统的复杂性──地质科学的基本问题 (Ⅱ). 地球科学──中国地质大学学报,28(1): 31-40.
- 张希明,朱建国,李宗宇,等,2007.塔河油田碳酸盐岩缝洞型 油气藏的特征及缝洞单元划分.海相油气地质,12(1): 21-24.
- 朱东亚,金之钧,胡文瑄,等,2008.塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响.地质论评,54(3):348-357.
- 朱东亚,金之钧,胡文瑄,2009. 塔中地区热液改造型白云岩 储层. 石油学报,30(5):698-704.