

文章编号:0253-9985(2010)01-0022-06

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

鲁新便¹, 蔡忠贤²

(1. 中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司 石油勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 中国地质大学, 湖北 武汉 430074)

摘要:以塔河奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏为原型,厘定了古溶洞系统的概念与特征,探讨了其形成、演化、改造以及对油藏的分隔作用,提出了古溶洞系统的垮塌充填-断裂体系是造成油藏分隔化作用的主要因素。针对该类油藏由于喀斯特作用与构造作用所造成的缝洞储集体非均质性特征,认为其油藏描述应按照系统性、层次性思路,分岩溶体系(古溶洞系统)与油藏体系(缝洞单元)两个级次来进行。与此同时,按照对喀斯特油藏描述调整后的思路与技术方法对研究区古溶洞系统与开发井位部署之间关系进行了描述,取得了良好效果。

关键词:缝洞型碳酸盐岩;溶洞型油藏;古溶洞系统;油气开发;塔河油田

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

A study of the paleo-cavern system in fractured-vuggy carbonate reservoirs and oil/gas development

—taking the reservoirs in Tahe oilfield as an example

Lu Xinbian¹ and Cai Zhongxian²

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute of SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A study of the Ordovician fractured-vuggy carbonate reservoirs in the Tahe oilfield is carried out to determine the concept and features of paleo-cavern systems in these reservoirs. Also included in the study are the formation, evolution, and deformation of these systems as well as their role in compartmentalization of reservoirs. The study points out that the compartmentalization of these reservoirs is mainly caused by collapse, filling, and fracturing processes of the paleo-cavern systems. It is therefore suggested that these heterogeneous reservoirs formed by karstification and tectonic movements shall be described systematically and hierarchically from a karst system level (paleo-cavern system) and reservoir level (fracture-vug unit). The idea is applied to the study area and gains positive results.

Keywords: fractured-vuggy carbonate, cavernous reservoir, paleo-cavern system, oil/gas field development, Tahe oilfield

塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏与孔隙型、裂缝-孔隙型油气藏有着本质区别,油藏储集体具有洞、缝、孔共存,储集空间尺度变化大,储集空间分布不连续的特征,油气水分布受缝洞体控制^[1~5]。由于油藏埋藏超深(5 300~6 700 m),地

震反射信噪比低,缝洞体准确预测难度大;岩心点资料、钻测录井资料难以类推油气藏空间特征;缝洞体规模、形态、内部结构、能量特征千差万别,开发井和科学的能量补充难度大,对此类油藏的开发缺乏成功的经验和理论技术。

收稿日期:2009-12-13。

第一作者简介:鲁新便(1963—),男,博士、教授级高级工程师,油气田开发及管理。

文章将以塔河油田为例,分岩溶体系(古溶洞系统)和油藏体系(缝洞单元)两个级次来揭示油藏整体呈现的分隔性、差异性,进一步研究和厘定喀斯特油藏描述的理论概念、术语的内涵及开发意义,从三维空间上描述和刻画古溶洞系统现今的构型样式,并建立相关的描述方法技术,为此类油藏的开发和开发方案的制定和提高采收率等方面提供依据。

1 古溶洞系统的概念与特征

大量资料表明,溶洞的发育一般不以孤立的形式存在,与岩溶发育有关的古暗河系统或溶洞系统在长期暴露的岩溶区具有继承性发育的特点,即古暗河系统的发育具有一定的普遍性和继承性,可能发育一代以上的古溶洞系统,且新溶洞系统对老洞穴系统的叠加普遍存在,多期古溶洞系统的相互叠加,从而形成复合洞穴系统^[6]。与岩溶有关的洞穴状孔隙网络是一个溶洞系统或多个洞穴系统众多坍塌洞穴联系而成的洞隙网络,该洞隙网络是由管道、洞穴、裂隙、裂缝和溶洞孔隙等5种岩溶空隙介质体(通常以管道和洞穴等为主)组成的复合体系,其结构类型呈多样性,在二维平面上,有单管型、树枝型、网络型和复合型;在剖面上,有单层型、阶梯型和多层型等。

2 古溶洞系统描述方法与展布特征

前人研究结果显示岩溶体系形成演化的时空地质模型(树枝状、梳状和单管状洞穴)与古断裂体系、褶皱体系和古地貌、古水系关系最为密切^[7~13]。通过对塔河150口钻遇洞穴的钻井,地下河系统分布区域以及延伸方向研究结果显示,断裂及其伴生裂缝、岩溶地貌是控制岩溶发育的重要因素,其中,岩溶地貌是控制海西早期岩溶发育的重要因素,而断裂及其伴生裂缝是控制加里东中期及海西早期岩溶发育的重要因素。

2.1 古溶洞系统描述方法

塔河油田奥陶系缝洞型油藏是多期表生条件下形成的岩溶体系经埋藏演化而形成的复杂古岩溶油藏,空间结构复杂。因此描述和刻画不同尺

度的古岩溶体系的非均质性特征是揭示缝洞型油藏内部复杂地质结构的基础。利用地震正演分析,通过截取过井剖面的钻、录、测井数据对采集地震相数据的标定,建立不同岩相逢洞体的识别模式。

在塔河油田主体区,综合利用钻井、古地貌、古水系、地震反射特征以及地震反演的波组抗数据,推断4区西部发育两个正交方向的古暗河系统,深部古溶洞系统分布以区域主要断裂带为导向,沿北东向呈折尺状水平展布,古暗河系统总体呈南高北低的分布趋势(图1);古暗河的流动方向与地震测线上的构造倾角(红色)一致,古溶洞系统深度分布在5 550~5 800 m,主要深度分布在5 600 m。

在塔河南部盐下地区,基于古溶洞系统的认识,初步形成了利用波形分析、振幅变化率等储层预测技术寻找潜在的古溶洞分布。尤其是利用分频技术和波形技术,对已钻遇的溶洞进行标定和追踪,利用地震属性的切片技术和不同深度溶洞的标定,顺着古暗河系统的高部位及规模较大的溶洞体进行井位部署。需要指出的是受古

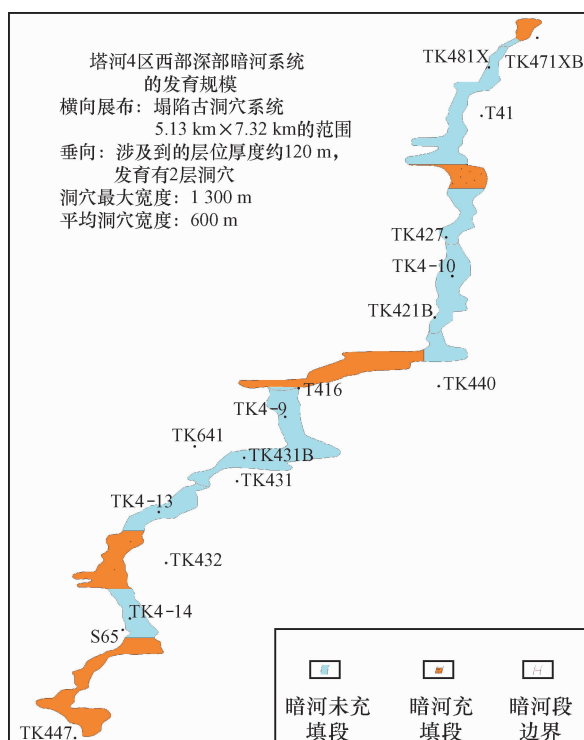


图1 塔河油田古溶洞系统平面分布

Fig. 1 Planar distribution of the paleo-cavern system in Tahe oilfield

地形、断裂控制,平面上潜流水道相互交叉、相互叠置、相互切割的影响,古洞穴系统的储层具有很强的空间复杂性和非均质性,会形成溶洞-裂缝-垮塌角砾岩-洞穴沉积充填物交替的复杂储集空间。

2.2 古溶洞系统空间分布差异

塔河油田主体区海西早期古残丘与 T_4^1 的构造叠合部位,尤其是继承性发育的古残丘高部位,古岩溶残丘的翼部,受褶皱体系控制,古溶洞系统发育呈现为蜂窝状和网状分布,多位于风化壳的浅层部位,古溶洞系统的展布范围广,不同深度层的溶洞之间连通性较好,连通规模大,油井产能高,底水能量强,如 S48 井区, S65 井区, S74 井区。

主体区岩溶斜坡及沟谷区,岩溶缝洞不发育,浅层多以不规则的孤立单体形式存在,平面呈椭圆形、不规则形态,储集体横向连通较差,开发动态多表现为定容特征,主要分布在 4 区和 3 区、以及 7 区和 2 区的交界地带。这种类型储层之间基本不连通或连通较差,多以孤立的落水洞发育为主,深、浅层的溶洞系统连通性较差,推断为不同时期岩溶期的产物。

塔河油田外围区的南部、西北部受岩溶断裂和古地貌发育影响,先存线状构造体系与岩溶洞穴类型、岩溶体系之间具有较好的对应关系,储层主要受控于断裂、构造,多呈条带状,呈近南北向和北西向分布。规模较大的缝洞带有 S1102—S113, S117—S106-3, S1181—S7201 井区等,沿这些带钻井放空、漏失较多,单井产能高,溶洞段主要分布于——间房组,鹰山组水洞逐渐发育(图 2)。

3 古溶洞系统的油藏分隔化作用

目前油藏分隔化作用研究集中于断裂、地层的连通性和封闭性,油藏焦油席的封闭性和水动力封闭性;除此之外,油田的产能资料也可用来分析油藏流体的分隔性和连通性;岩溶体系由于后期的充填作用、垮塌作用期和构造作用,从而使早期的古溶洞系统内部连通性和分隔化作用进一步复杂化,形成大量的分隔间(残余洞穴和溶道)。

塔河地区的岩溶缝洞埋藏深度普遍在 5 500 m 以上,根据对 59 口井岩心的详细观察和测录井资料,结合三维地震资料分析,将其洞穴充填相划分

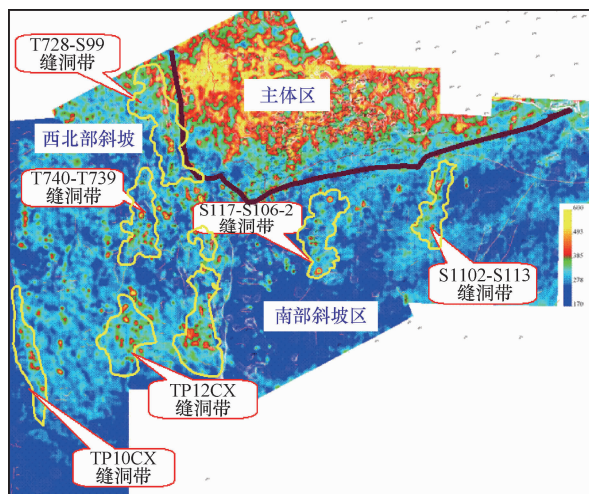


图 2 塔河油田南部外围区串珠状反射平面分布(0~20 ms)

Fig. 2 Planar distribution of string-bead-shaped seismic reflections in the periphery area to the south of Tahe oilfield

为化学沉(淀)积岩相、搬运型岩相、垮塌型岩相、渗流充填相、围岩相、洞穴外流水沉积相 6 类。充填垮塌作用形成的分隔带由巴楚组的砂泥质充填柱或带、致密灰岩、地下溶洞坍塌的角砾岩、断层分隔性构成。

本区的岩溶垮塌作用非常普遍,可以分成早期近地表阶段的垮塌和晚期埋藏阶段的垮塌两种类型。近地表阶段的垮塌,在岩溶地貌上,可形成岩溶洼地、漏斗、落水洞、暗河天窗、竖井、岩溶障谷等,垮塌形成的堆积物主要为角砾岩。在地震剖面上,早期垮塌作用所造成的反射同相轴的变形仅出现于岩溶地层中,而不影响到上覆非可溶性地层。

可以利用地震资料,通过在平面上刻画沉陷的幅度和分布范围来反映洞穴群或单个洞道的垮塌分布。埋藏阶段洞穴的垮塌作用主要是聚群状分布的洞穴群的联合垮塌。国外这种古洞穴体系的埋藏垮塌作用已在西德克萨斯的许多油田、北-中德克萨斯的 Forth Worth 盆地、印度洋的 Maldives 等地区发现^[6]。塔河油田岩溶洞穴大规模的埋藏后垮塌作用主要发生于海西晚期运动之前,平面上表现为 T_4^1 顶面大量非定向性断续延伸的弧形断裂体系,剖面上以垮塌性断裂为边界的垮塌岩柱体为特征,柱形断裂(实际是正断层)带多沿着古水系以及上覆地层的凹陷变形带分布。在塔河地区这些岩柱体、断裂裂缝自下奥陶统鹰山组——间房组向上绝大多数消失于上覆

石炭系地层中。塔河油田柱状塌陷结构的识别标志是从 T_5^0 — T_7^4 均表现为继承性的柱状塌陷,垮塌的古洞穴体系的区域性样式通常呈线状。

塔河地区发育有若干规模较大的垮塌洞穴体系,典型的垮塌体系是 T740—TK1012—TK1052 井区(图3),呈北西—南北向延伸,长度约 5.3 km,东西向宽度可达 1.0 ~ 2.3 km,塌陷带的面积约 8.2 km²。洞穴体系垮塌作用形成的断裂向上断至 T_5^0 ,向下延伸较深,其上部发育大的沉陷带和断裂,沉陷构造在地震剖面 and 振幅变化率图中反映明显(图3,图4),相对弱的振幅变化率特征可能与垮塌形成的混杂角砾化岩石构成的相对均值的孔隙结构有关。

在塔河喀斯特油藏勘探开发布井的进程中, T_5^0 — T_7^4 继承性的柱状塌陷面以及长条状的构造凹陷区(塌陷带上方凹陷),可能是下一个潜在的开发目标和领域,这些垮塌溶洞系统形成的角砾岩带分布比目前存在的溶洞系统的孔隙更均衡和连片,此类开发目标具有连片、呈带特征,因此在地震反射特征和振幅变化率上构成特殊反射模式和特征。

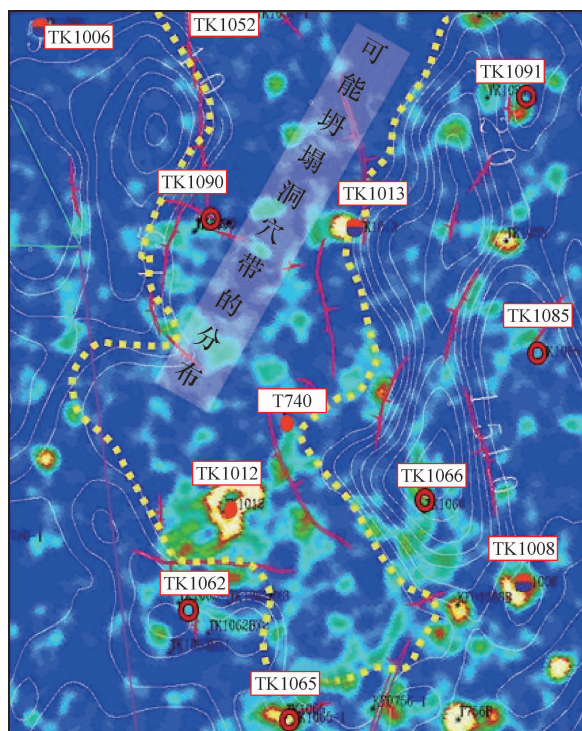


图3 T740—TK1012—TK1052 井区可能的垮塌洞穴体系分布示意图

Fig. 3 Distribution of possible collapsed cavern systems in T740 - TK1012 - TK1052 wellblock

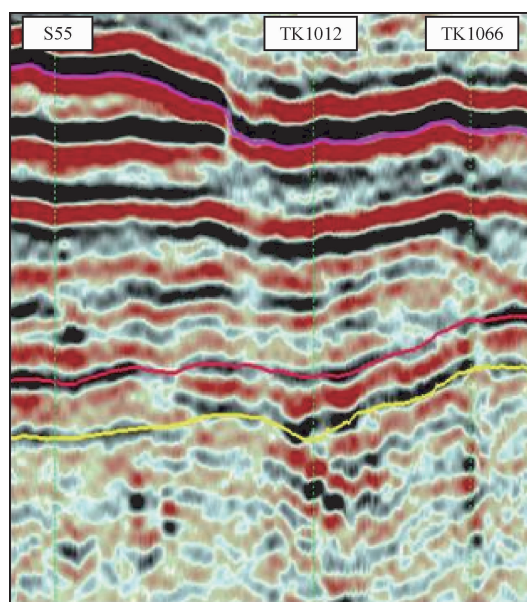


图4 过TK1012—TK1066井横切垮塌洞穴体系的地震剖面

Fig. 4 Seismic profile crosscutting collapsed cavern systems in TK1012 - TK1066 wells

垮塌裂缝—断裂体系所造成的油藏内部连通性和分隔化作用是非常重要的。缝洞型复杂油藏分隔性是由岩溶形成和演化两个不同阶段造成的,它们分别对应于两个不同级次、不同尺度的地质体——古溶洞系统和缝洞单元。塔河油藏开发实践证明,奥陶系油藏呈现出多压力系统、多个渗流单元的开发地质特征,油藏的严重分隔性造成了油藏性质的复杂性。奥陶系油藏并非是一个整体连片油藏,而是由不同规模缝洞单元组成的空间叠合连片的复杂油气藏。依据油藏描述结果,2005—2006年将奥陶系油藏已投入开发的2,3,4,6,7,8区块,划分成42个多井单元,110个孤立或相对定容的单元。2006—2007年利用波形、分频分析、三维地震反射能量体技术进行了缝洞单元边界的刻画和空间雕刻;同时利用注水和示踪剂分析技术,深化了井间储集体的连通性认识,进一步精细了缝洞单元的划分,把前期152个的缝洞单元重新划分为137个缝洞单元。

4 古溶洞系统与开发布井

溶洞作为塔河油田主要的储集空间,在地震剖面上表现为“串珠状地震反射结构”(图5),在

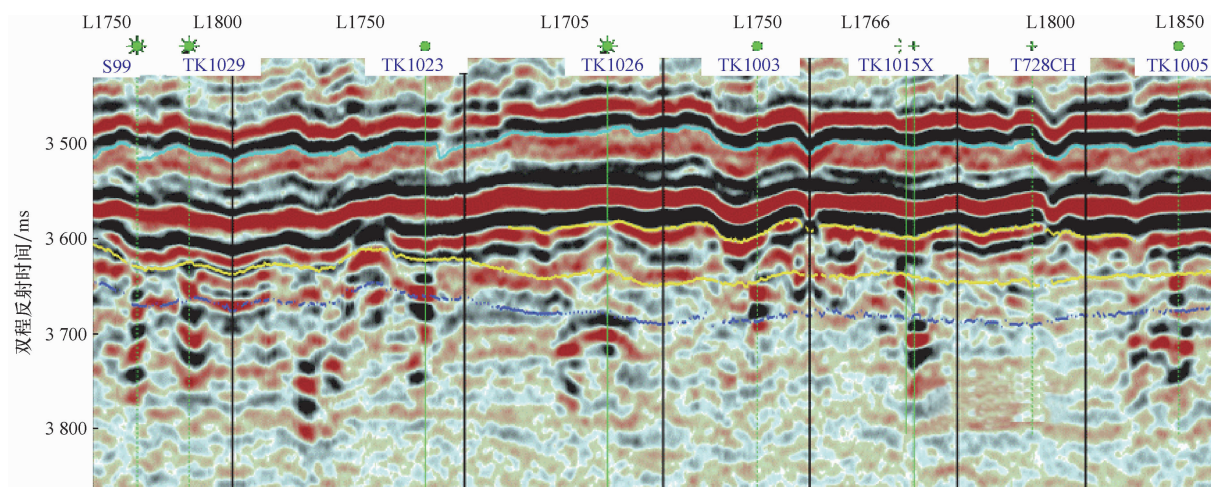


图 5 S99—TK1005 井的具有典型串珠结构的地震反射剖面

Fig. 5 Seismic profile with the typical string-bead-shaped reflection in well S99 – TK1005

沿层振幅变化率图上表现为“椭圆形、串珠状、条带状振幅变化率异常”。塔河油田 62% 以上钻井都直接钻遇溶洞,并且 20% 高产油井累产都大于 10×10^4 t 以上,表明溶洞不是孤立发育,且有一定的方向性和展布规模。通过对主体和外围区缝洞的岩溶缝洞的成生关系研究,表明主体区与外围(北部和南部)的缝洞体、流体之间的成因与油藏规模存在关联性。基于油藏暗河系统的缝洞发育规律认识,初步形成了利用波形分析技术、振幅变化率、波形技术,用已知钻井揭示的规模较大的溶洞进行标定和追踪,通过地震属性的切片技术和不同深度发育溶洞的标定关系研究,提出顺着古暗河系统发育展布的方向,进行井位追踪部署和加深井部署思路。

1) 在上奥陶剥蚀区(主体区),通过追踪 TK427 井 T_4^1 面以下 140 m 左右的古溶洞系统的分布,在 7 区东部针对滚动部署了 TK748, TK762, TK763 井,进一步证明塔河油田奥陶系中深部的开发潜力,开拓并发现了 TK748—TK762, TK210—T436CH 等单元。在主体区有利的储集体预测技术组合为地震反射结构 + 振幅变化率预测技术,有利的地震反射识别模式为岩溶残丘高部位或斜坡的表层弱 + 内幕弱反射、杂乱强反射、串珠状反射为主。

2) 在上奥陶覆盖区,将深部断裂与振幅变化率叠合分析。古溶洞系统的发育受古地貌和岩溶断裂带控制明显,暗河或古溶洞系统发育,与近南

北、北东向和北西向断裂带的分布具有较好的一致性,为典型的“条带状油藏”特征。沿有利缝洞带展布方向布井,先后开发评价了整体开发塔河南部 S117—S106 - 2 缝洞带, S99—T728 缝洞带以及南部 S1181 缝洞带,建立了最佳的储集体预测技术组合为精细相干分析技术 + 地震反射结构 + 振幅变化率预测技术 + 曲率分析技术,有利的地震反射识别模式为背冲断块 + 构造高 + 串珠状反射,逆冲断块 + 构造高 + 弱反射,构造高 + 弱反射(S72 - 1)等。

3) 基于 TK476—T403 联井剖面上岩溶洞穴垂向发育结构认识,提出不同岩溶地貌单元深层次的溶洞系统具有不同的储集性能的观点,深、浅层的溶洞系统之间的致密灰岩段分割了上部、下部储集带的连通性,产层均位于表层洞穴,下部洞穴充填严重,推断该类溶洞系统为同一水动力条件的产物;对 S48—T401 缝洞单元和 TK427 暗河系统为代表的侧向叠加型溶洞系统研究显示,深、浅溶洞系统之间互不连通,上下层洞穴的发育深度和洞穴形态相差较大,表层溶洞表现为片状或网状的发育特征,深层溶洞则为孤立的暗河系统,推断为不同水动力条件的产物;基于不同时期古溶洞系统的相互叠加模式及纵向结构、开发潜力研究,提出了以开发井的纵向加深,探索不同深度储集带的井位部署的思路。

4) 在岩溶地区,沿主河道会出现较多的塌陷现象,以至部分地下河道裸露地表,形成天窗

天坑或竖井。但在岩溶谷地仍发育大量的伏流,部分地下水系和暗河通常都是沿着洼地底部发育的,每个洼地底部通常都有落水洞,河谷中鞍形谷区必定有伏流河穿过,依据河谷中鞍形谷和洼地等地貌形态,推断地下暗河发育。塔河勘探开发实践表明,目前 T_4^4 顶面的岩溶洼地或沟谷地区仍具有开发潜力,如塔河3、4区之间,6区、7区结合部位以及7区东南部地区的岩溶谷地,从前期的S64井,TK422以及TK429井区附近河谷的横剖面上,可以看出此段河谷底部塌陷比较严重,上覆的石炭系地层明显随之塌陷,表明塌陷是在石炭系上覆地层沉积之后发生的,因此从成藏分析的角度,该领域仍具有进一步开发的潜力。

参 考 文 献

- 1 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): 120 ~ 124
- 2 鲁新便. 岩溶缝洞型碳酸盐岩储集层的非均质性研究[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(4): 360 ~ 362
- 3 鲁新便. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开发地质研究中的若干问题[J]. 石油实验地质, 2003, 25(5): 508 ~ 512
- 4 宋美虹. 塔河油田4区奥陶系碳酸盐岩潜山油藏储层预测[J]. 油气与地质采收率, 2005, 12(4): 23 ~ 25
- 5 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): 201 ~ 207
- 6 Ebanks W J. Flow unit concept—integrated approach to reservoir description for engineering projects[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(5): 551 ~ 552
- 7 黄绪宝, 顾汉明. 塔河油田南部缝洞储层的正演模拟及地震波场特征[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 836 ~ 840
- 8 陈志海, 马旭杰, 黄广涛. 缝洞型碳酸盐岩油藏缝洞单元划分方法研究——以塔河油田奥陶系主力开发区为例[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 847 ~ 855
- 9 李宗宇. 塔河奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏开发对策探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 856 ~ 860
- 10 饶丹, 马绪杰. 塔河油田主体区奥陶系缝洞系统与油气分布[J]. 石油实验地质, 2007, 29(6): 589 ~ 592
- 11 窦之林. 储层流动单元研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000
- 12 贾振远. 论碳酸盐岩储集层(体)[J]. 海相油气地质, 2001, 6(4): 1 ~ 7
- 13 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993
- (编辑 董立)

(上接第21页)

- 2 汤朝阳. 白云石化作用及白云岩问题研究述评[J]. 东华理工学院学报, 2006, 9(1): 205 ~ 211
- 3 郭建华, 沈昭国, 李建明. 塔北东段下奥陶统白云石化作用[J]. 石油与天然气地质, 1994, 15(1): 51 ~ 59
- 4 刘斌. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1999. 158 ~ 165
- 5 李心清, 万国江. 碳酸盐岩氧、碳稳定同位素地球化学研究目前面临的几个问题[J]. 地球科学进展, 1999, 15(3): 262 ~ 267
- 6 Hird K. The composition of carbonate and oxygen isotope in the ancient dolomite[J]. AAPG Bulletin, 1987, 34(4): 156 ~ 232
- 7 陈代钊. 构造-热液白云岩化作用与白云岩储层[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 614 ~ 622
- 8 Malone M J, Baker P A, Burns S J. Hydrothermal dolomitization and recrystallization of dolomite breccias from the Miocene Monterey Formation, Tepusquet area, California[J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66: 976 ~ 990
- 9 Lee Y I, Friedman G M. Deep-burial dolomitization in the Ordovician Ellenberger Group carbonates, West Texas and Southeastern New Mexico—reply[J]. J Sediment Petrol, 1988, 58(3): 910 ~ 913
- 10 Land L S. The origin of massive dolomite[J]. J Geol Educ, 1985, 33: 112 ~ 125
- 11 Luczaj J A, Harrison W B III, Williams N S. Fractured hydrothermal dolomite reservoirs in the Devonian Dundee Formation of the central Michigan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(5): 1 787 ~ 1 801
- 12 Machel H G, Lonnee J. Hydrothermal dolomite: a product of poor definition and imagination[J]. Sedimentary Geology, 2002, 152(4): 163 ~ 171
- 13 张涛, 闫相宾. 塔里木盆地深层碳酸盐岩储层主控因素探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 745 ~ 754
- 14 金之钧, 朱东亚. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. 地质学报, 2006, 80(2): 245 ~ 252
- 15 刘昊年, 黄思静. 锶同位素在沉积学中的研究与进展[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 59 ~ 63
- (编辑 李军)