

文章编号: 0253-2697(2011)02-0199-07

塔中北斜坡奥陶系鹰山组岩溶型储层发育模式与油气勘探

杨海军 韩剑发 孙崇浩 王福焕 正 岩 吉云刚

(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: 塔中北斜坡奥陶系鹰山组顶部的不整合面发育大规模岩溶缝洞型优质储层,目前已探明油气储量约 2×10^8 t。岩溶型储层以大型缝洞储集空间为主,贯穿于不整合面以下 200 m 范围内,具有非均质变化的缝洞叠置连片且呈带状展布。这套储层既与岩溶古地貌相关,又受多成因、多期次成岩溶蚀、断裂裂缝、埋藏溶蚀叠加的综合控制,其中断裂和裂缝网络是岩溶水的主要渗滤通道,不整合岩溶控制了储层的横向展布规模,埋藏溶蚀是优化储集性能的关键。通过储层主控因素的深入分析,建立了储层叠合发育演化模式,综合预测了储层发育的有利区带,指出在勘探中要注重不同井区之间的储层类型和主控因素之差异性,优选主控因素以对勘探进行指导。

关键词: 塔中北斜坡; 鹰山组; 碳酸盐岩; 岩溶型储层; 断裂; 不整合岩溶; 埋藏溶蚀

中图分类号: TE112

文献标识码: A

A development model and petroleum exploration of karst reservoirs of Ordovician Yingshan Formation in the northern slope of Tazhong palaeouplift

YANG Haijun HAN Jianfa SUN Chonghao WANG Fuhuan ZHENG Yan JI Yungang

(Research Institute of Exploration & Development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China)

Abstract: In the northern slope of the Tazhong palaeouplift, large-scale high-quality reservoirs with karst fractures and cavities are well developed along the unconformity of the top part of the Ordovician Yingshan Formation, where the cumulatively proved oil in place is nearly 200 million tons. The reservoir space of these karst reservoirs is dominated by large fractures and vugs, penetrating through a depth of 200 m below the unconformity. These fractures and vugs are characterized by the superimposition of fractures and vugs with heterogeneous change and by a banded distribution. These reservoirs are not only related to ancient karst topography, but also controlled by many other integrated factors, such as multi-origins, multi-phase diagenetic dissolution, fracture cracks, superimposition of burial dissolution. The fracture and fracture network is a major percolation channel of karst water. And the unconformity karst controls the horizontal distribution scale of reservoirs, and burial dissolution is a key for the optimization of reservoirs. By detailed investigations on these main controlling factors, a model for the superimposed development and evolution of reservoirs was established and a comprehensive forecast for favorable zones of reservoir development was made as well. It was pointed out that it was necessary to pay attention to differences in reservoir types and main factors between different well blocks, and finally an optimal selection of main controlling factors was made for exploration guidance.

Key words: northern slope of Tazhong palaeouplift; Yingshan Formation; carbonate; karst reservoir; fault; unconformity karst; burial dissolution

中国岩溶储层型油气田分布广泛,近年来随着石油勘探新技术、新方法的不断应用,在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地相继又发现了一批岩溶缝洞型碳酸盐岩油气藏,使岩溶缝洞型碳酸盐岩储层的研究成为近年来的焦点之一,预示着中国岩溶型碳酸盐岩储层具有良好的勘探前景和巨大的勘探潜力^[1]。众多学者一致研究认为,碳酸盐岩岩溶型储层形成的根本原因就是岩溶和裂缝的综合作用,断裂和裂缝在碳酸盐岩勘探开发中的重要性已逐渐成为共识,碳酸盐

岩地层因岩溶和裂缝的发育和叠加改造作用,可成为优质储层^[2-3]。

塔中地区奥陶系是塔里木盆地油气勘探的重点领域之一,在上奥陶统良里塔格组陆表海礁滩型油气藏探明储量达亿吨级后^[4],近两年在下奥陶统鹰山组又实现了较大的勘探突破^[5],目前已探明油气储量近 2×10^8 t,预示着该区具备形成大型优质碳酸盐岩储层的良好地质条件,拥有巨大的油气资源潜力。对于该区鹰山组储层成因的研究,国内外学者取得了一定的

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05049)“塔里木盆地大型碳酸盐岩油气田勘探开发示范工程”和(2008ZX05004-004)“塔里木盆地海相碳酸盐岩油气资源潜力、有利勘探区带评价与目标优选研究”联合资助。

第一作者及通讯作者: 杨海军,男,1970年12月生,2008年获中国地质大学(武汉)博士学位,现为中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院高级工程师,主要从事油气综合勘探与石油地质研究。E-mail: yhj701205@163.com

进展,但也存在着很大的争议。一种观点认为鹰山组风化壳岩溶储层为加里东中期构造运动的产物,纵向上叠置、横向上连片呈准层状展布^[5-7];另一种观点认为受断裂控制的热液岩溶储层是该区最重要的储层类型^[8];还有就是针对断裂裂缝^[3]、热液白云岩化^[9]等单一因素对储层改造作用的论述,并针对风化壳储层形成了储层地震综合预测技术^[10]。众多学者的不同观点对于不同时期某一具体区块的勘探突破起到指导作用。但近十几年的勘探历程表明:塔中北斜坡鹰山组储层受控因素多样、油水关系复杂、不同井区间储层特征差异较大,这些问题已经严重制约着勘探方向的选择和开发方案的制定。在勘探形势乐观的大背景下,深入探讨该区复杂油气储集体的形成机制和发育模式,对于指导该区精细勘探开发和相似地区油气勘探具有重要意义。

1 地质背景

塔中北斜坡位于塔里木盆地中央隆起带塔中低凸

起北部,是塔中低凸起的一个二级构造单元(图1)。塔中低凸起西与巴楚断隆相接,东与塔东低隆相连,呈北西向条带状展布,是一个在寒武系—奥陶系巨型褶皱背斜基础上长期发育的继承性隆起,形成于早奥陶世末,泥盆系沉积前基本定型,早海西期以后以构造迁移及改造为特征。区域地层对比和生物地层学分析表明,该区奥陶系大部分缺失中奥陶统,鹰山组与上覆良里塔格组之间呈角度不整合关系,鹰山组顶部遭受了长达10 Ma的强烈剥蚀、淋滤和风化,形成了广布塔中地区的碳酸盐岩风化壳岩溶储集体。塔中低凸起为北部满加尔凹陷与南部塘古孜巴斯凹陷所夹持,特别是满加尔凹陷已被证实为大型的生烃凹陷,环满加尔凹陷已发现了哈得4、东河塘、英买力等一系列大中型油气田。塔中低凸起是周边凹陷烃源岩生成油气的长期运移指向区。塔中I号断裂、后期的走滑断裂以及横向的输导层形成时间早,构成油气运移的有效输导体系,为大量油气的运聚成藏提供了桥梁。

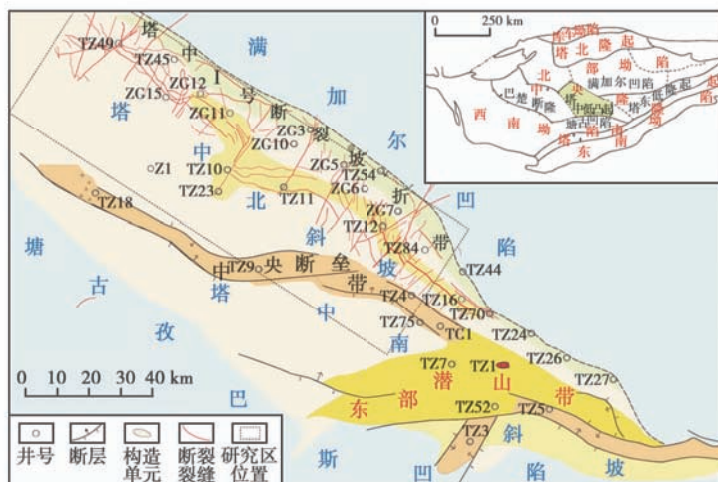


图1 塔中北斜坡构造位置

Fig. 1 The structural position of the northern slope of Tazhong palaeocuplift

2 储层物性与储集空间类型

通过对24口井273块岩心常规物性数据统计,实测孔隙度分布范围为0.17%~11.13%,平均为0.91%;实测渗透率分布范围为 $(0.004 \sim 153) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $3.776 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,说明基质孔隙并非有效的储渗空间。关键是溶蚀孔洞和裂缝可组成大型缝洞系统,具体包括地震串珠状反射所对应的缝洞单元,成像测井检测到的裂缝和孔洞,钻井放空、漏失段对应的储集空间等。根据鹰山组孔、洞、缝的综合识别和组合特征,将其划分为洞穴型储层、

裂缝—孔洞型储层、孔洞型储层和裂缝型储层4种类型。

2.1 洞穴型储层

洞穴型储层是该区最主要的储集类型之一,其储渗空间主要以大型洞穴(直径大于100 mm)为主。最明显的特征就是在钻井过程中出现放空或漏失(表1),成像测井图像为暗色条带夹局部亮色团块或所有极板全是黑色[图2(a)],地震上可见典型的串珠状反射。洞穴型储层纵向上主要分布在鹰山组顶部风化壳附近,平面上主要分布于断裂活动发育区,是油气产出的主要的储集类型。

表 1 塔中北斜坡奥陶系鹰山组储层钻进过程中放空及钻井液漏失情况

Table 1 The situation of depletion and drill fluid leakage in reservoir drilling in Yingshan Formation, Ordovician, northern slope of Tazhong palaeocouplift

井号	井深/m	放空/m	钻井液漏失量/m ³
TZ84	5 631.16~5 666.29		148.3
	5 463.14		278
TZ721	5 484		204.9
	5 505		4 488.83
ZG3	6 529		4.6
ZG17	6 665~6 700		95.84
ZG1	6 375.46~6 389.37		122.4
ZG8	6 127~6 145.58	2.8	3 776.3
ZG10	6 299.8~6 309.7		11.2
ZG11	6 459.65~6 475.61	4.69	1 196.53
TZ726	5 531.04~5 534.09		235.9
ZG6	6 172.73		118.46
ZG10	6 309.73		11.2

2.2 裂缝—孔洞型储层

裂缝—孔洞型储层也是该区最主要的储集类型之一,孔洞是其主要的储集空间,裂缝可提供部分储集空间,但更为重要的是起连通渗流渠道的作用。相比单一孔洞型或单一裂缝型储层,孔洞和裂缝共存更能提高储集、渗流能力,其在 FMI 成像测井动态图像上显

示为黑斑点与垂直黑色条带联合[图 2(b)]。裂缝—孔洞型储层在研究区广泛分布,纵向上主要分布在距鹰山组顶部 200 m 范围之内。

2.3 孔洞型储层

孔洞型储层发育相对较少,主要是原生孔隙经过溶蚀改造形成溶蚀孔、洞(直径小于 100 mm),裂缝欠发育,大多由同生期大气淡水淋滤作用形成。此类储层经过中-深埋藏多数已被胶结充填,基质孔隙度多在 2% 以下,但部分溶蚀孔洞发育段孔隙度可达 4%~6%,局部超过 10%。在 FMI 成像图上观察到的溶蚀孔洞,一般呈不规则暗色斑点状分布[图 2(c)]。孔洞型储层主要分布在塔中 I 号坡折带附近(如 ZG203 井),纵向上分布于高能滩等沉积地貌高处。

2.4 裂缝型储层

裂缝型储层相对不发育。该类储层缺乏孔洞,基质孔隙一般不发育,孔洞孔隙度一般小于 1.8%,裂缝孔隙度一般大于 0.04%,裂缝既是渗滤通道,又是主要的储集空间,具低孔隙度(主要是岩石基质孔隙度)和较高的渗透率,储渗能力主要受裂缝分布和发育程度的控制[图 2(d)]。裂缝型储层主要分布在塔中北斜坡鹰山组中下部裂缝相对较发育的区域。

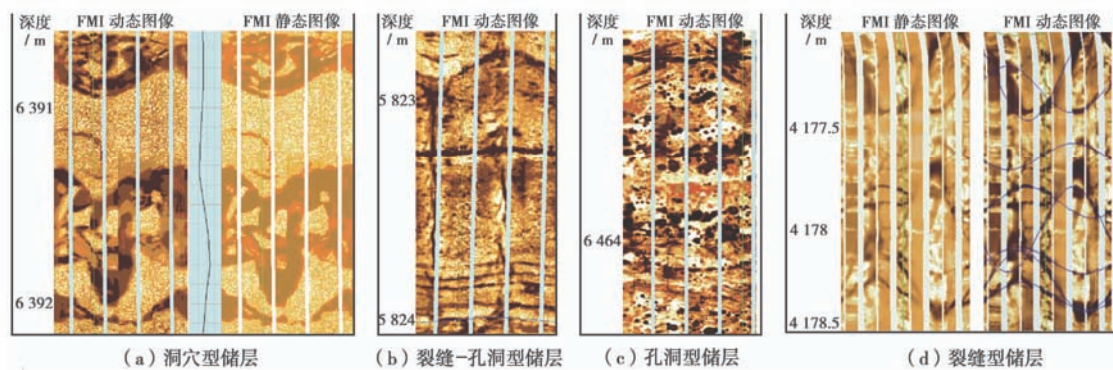


图 2 塔中北斜坡奥陶系鹰山组岩溶型储层储集类型响应特征

Fig. 2 The response characteristics of karst reservoir storage types in Yingshan Formation, Ordovician, northern slope of Tazhong palaeocouplift

3 储层发育主控因素分析

早奥陶世末—晚奥陶世初的中加里东运动使塔中地区整体抬升,中奥陶统上部的一间房组和上奥陶统下部的吐木休克组多有缺失,鹰山组部分层段被剥蚀。鹰山组在表生成岩环境中,经多幕次加里东运动和海西早期运动形成叠加古隆起的暴露、埋藏和再抬升,造成了碳酸盐岩多期次、多成因的溶解,形成了叠加复合储集体。

3.1 断裂和裂缝网络

构造背景是古岩溶发育的基础,断裂展布型式控制了岩溶地貌分区,断裂和裂缝是岩溶水的主要渗滤

通道^[11]。工区断裂非常发育,主要有 2 期:第 1 期为加里东期形成的塔中 I 号断裂和塔中 10 号断裂,呈北西—南东走向,断距大,延伸远,控制了塔中北斜坡构造的总体格局;第 2 期主要形成于海西期,为北东—南西走向的走滑断裂,加深改造了塔中北斜坡的构造面貌。走滑断裂均伴随一些羽状排列的次级走滑断层,其与主走滑断裂斜交,组成网状断裂系统(图 1)。中加里东至海西期形成的多期、多组断裂及伴生的裂缝网络形成良好的流体优势运移通道,成为各种液体(地表水、热液水、烃源岩排烃之前的酸性水)溶蚀改造储层的有利通道,使得横向上分布相对稳定的储层在垂

向上通过网络系统的沟通而成为有利的碳酸盐岩孔洞缝发育的集合体。

3.2 不整合岩溶

中加里东运动使塔中地区整体抬升,中-下奥陶统鹰山组广泛暴露并长期遭受剥蚀,形成广泛的鹰山组不整合岩溶发育区^[6]。鹰山组顶部不整合面之下200 m厚的地层内出现了发育程度不等、规模不同、形态各异的岩溶缝洞系统和不同特征的内部充填物。岩溶的发育程度和深度随古地貌位置、古水文条件以及暴露时

间长短等因素的差异而有较大的变化^[12-13]。理论上一个发育完整的不整合岩溶序列从不整合面向下一般由表层岩溶带、垂向渗滤岩溶带、径流岩溶带和深部缓流岩溶带4部分构成。塔中北斜坡鹰山组除表层岩溶带相对不发育外,垂向渗滤岩溶带、径流岩溶带和深部缓流岩溶带均有不同程度的发育。优质储层段主要分布在径流岩溶带内,其次为垂向渗滤岩溶带,深部缓流岩溶带储层基本不发育(图3)。有效储集体呈准层状分布在垂向渗滤岩溶带和径流岩溶带内。

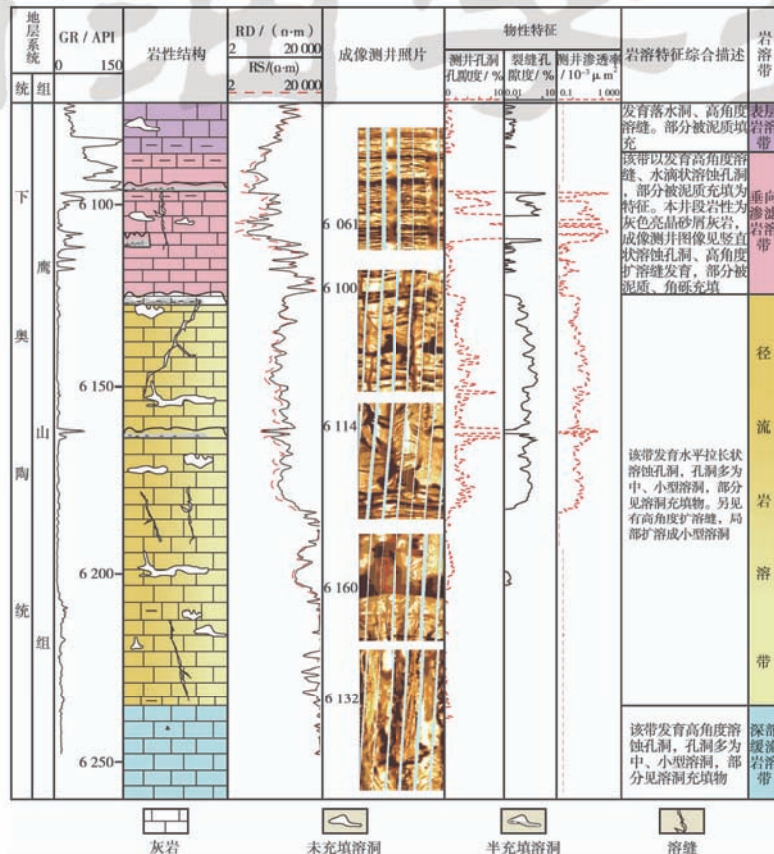


图3 塔中北斜坡奥陶系鹰山组岩溶带及储层发育剖面

Fig. 3 The karst belt and reservoir development in Yingshan Formation, Ordovician, northern slope of Tazhong palaeoclimat

不同井区地层的岩性分布特征、古地貌以及岩溶期次的不同,导致了风化壳岩溶在不同井区的发育和分布存在着明显的差异。古地貌不仅对沉积古地理的发育具有重要影响作用,对碳酸盐岩储层发育分布也具有明显的控制作用^[14],利用残厚法(鹰山组和蓬莱坝组厚度)可较好地反映鹰山组风化壳的古地貌。塔中北斜坡岩溶古地貌形态由于中加里东运动起伏较大,平行塔中I号坡折带方向从外带向内带逐渐升高,依次发育岩溶洼地、岩溶斜坡及岩溶次高地,东西两侧分别是潜山区和平台区(图4)。岩溶洼地岩溶作用相对较弱,储层相对不发育(如TZ722井)。岩溶斜坡除大气降水垂直渗流补给外,还接受岩溶高地地下水的侧向补给,水动力作用强,主要以水平层状岩溶为主;岩

溶形态以暗河管道和宽溶缝为主,部分溶蚀垮塌物可具有一定距离的搬运和分选;储层保存情况较好(如ZG5井、ZG7井)。岩溶次高地上的侵蚀、溶蚀力度大,为地下水的补给区,流体以垂向渗滤为主,形成垂向溶蚀带、落水洞等,分布具有非均一性(如ZG432井)。西部平台区岩溶作用也相对较弱,储层相对不发育(如ZG15井)。东部潜山区岩溶作用最强,常形成大型的缝洞系统。

塔中北斜坡鹰山组岩溶古地貌高度差异明显,如岩溶次高地与岩溶洼地最大高差可达581 m。由于鹰山组不整合岩溶作用发育的不完善性,结合多口井岩溶具体发育情况,推测岩溶有效厚度为100~200 m,即不整合岩溶储层集中分布在下奥陶统顶面以下200 m地层厚度范围内,这与目前钻井油气产出情况非常符合。

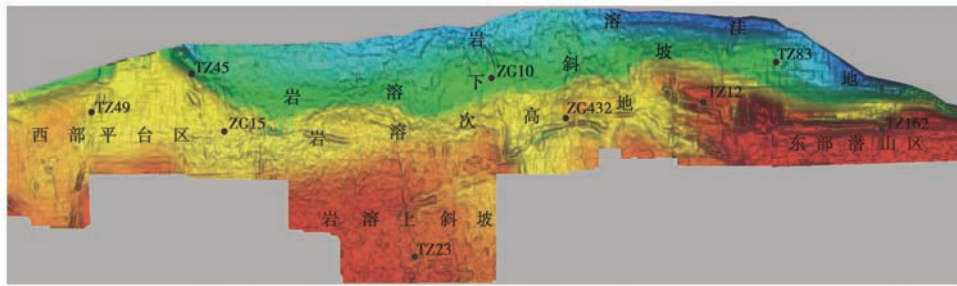


图 4 塔中北斜坡奥陶系鹰山组不整合岩溶古地貌特征

Fig. 4 The ancient unconformity karst topography in Yingshan Formation, Ordovician, northern slope of Tazhong palaeo uplift

3.3 埋藏溶蚀

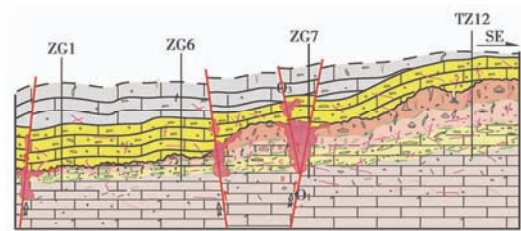
埋藏期深部流体的溶蚀作用可改善储层的储集性能,不但使储层的孔隙度升高、渗透性增强,而且能在构造裂缝发育带形成相当规模的储渗体^[15-16]。埋藏溶蚀所形成的储层主要分布在构造裂缝和断层发育带、油气排泄有利区和运移线上,以及其他因素形成的孔隙发育带。本区碳酸盐岩历经多次构造—成岩旋回的改造,同时存在多套源岩和多次烃类的运聚事件^[17-20],相应地发育了多期埋藏溶蚀作用。特别是 TSR 作用形成的酸性流体对储层的溶蚀改造,可以明显改善储层的性能,这已在四川盆地飞仙关组和长兴组得到证实^[21]。塔中地区奥陶系油气藏中富含因 TSR 作用形成的酸性流体^[7],如硫化氢、二氧化碳等,这些流体对成岩蚀变、扩溶缝洞具有重要作用,是本区一种重要的建设性成岩作用。埋藏溶蚀作用所形成的各种串珠状溶蚀孔洞、扩溶缝进一步改善了不整合岩溶所形成的缝洞系统,成为本区油气有效的储集空间[图 2(b)、图 2(c)],控制着优质储层的发育和油气富集。

该区另一种优质的储层是白云岩储层,埋藏期地下水沿断层或裂缝向上运移使灰岩地层发生热液白云岩化,这对灰岩储集性能具有重要的建设性作用。热液成因白云岩具有以下特征:白云岩晶体粗大,常为中—粗晶,部分为块状斑晶;异形白云石结晶粗大,呈粗晶块状,晶形和解理弯曲,波状消光,常分布于溶蚀孔洞中或大裂缝中,具有较高的铁和锰含量。埋藏成因白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围较宽,平均值高于近地表海水蒸发成因,Fe 含量可达 $(1\ 804\sim 4\ 652)\times 10^{-6}$,Mn 含量最高可达 132×10^{-6} ,具有较轻的 $\delta^{18}\text{O}$;流体包裹体均一化温度高;常见石英等残余晶体。热液成因的白云岩分布较广,如 TZ162 井、TZ12 井、TZ43 井等均可见及,呈不规则透镜状或块状分布,井间对比性较差。碳酸盐岩围岩、岩浆热液、断裂和不整合等共同组成了热液溶蚀作用的要素,同时热液矿物的发育也可较大地改善储层的物性。

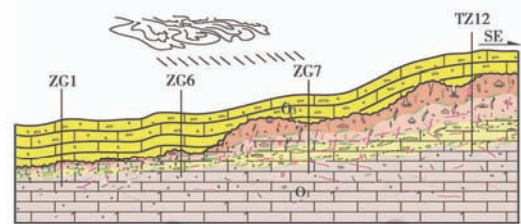
4 储层发育模式及有利区带预测

塔中北斜坡奥陶系鹰山组为大型不整合准层状缝

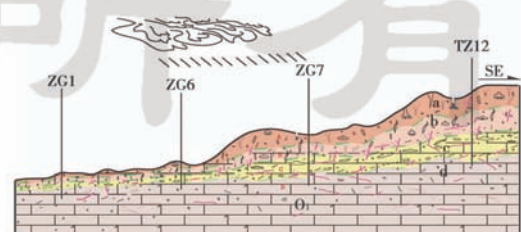
洞型凝析气藏^[22],是多种作用、多期叠加改造形成的纵向叠置、横向连片的优质碳酸盐岩储集体。其储层成因演化模式见图 5:良里塔格组沉积之前,下奥陶统鹰山组地层经过中加里东期构造抬升而受剥蚀溶蚀,发育不整合岩溶,在不整合面附近形成准层状的大规模不整合岩溶型缝洞储集体;到上奥陶统良里塔格组下部的良四段、良五段沉积时期,海平面之上的岩溶水对鹰山组储层进一步溶蚀,空间上与良四—良五段的礁滩体形成统一的储集体系;晚加里东期至喜山期经过多期构造破裂作用和埋藏溶蚀作用改造及油气聚集,



晚加里东期至喜山期,经过多期构造破裂作用和埋藏溶蚀作用改造及油气聚集,下奥陶统顶部的风化壳储层和良里塔格组下部的孔洞层被断裂/裂缝体系连通为一个统一的储集单元



良四、五段沉积时期,海平面之上的岩溶水对鹰山组储层进一步溶蚀,空间上与良四、五段礁滩体形成统一的储集体系



a:表层岩溶带 b:垂向渗滤岩溶带 c:层流岩溶带 d:深部缓流岩溶带
晚奥陶世良里塔格组沉积之前,鹰山组上部发育不整合岩溶,在不整合面附近形成准层状的大规模缝洞储集体

图 5 塔中北斜坡奥陶系岩溶型储层叠加改造模式

Fig. 5 The model of superimposition and reconstruction courses in the karst reservoir in Yingshan Formation, Ordovician, northern slope of Tazhong palaeo uplift

鹰山组顶部的风化壳储层和良里塔格组下部的孔洞层被断裂/裂缝体系连通为一个统一的储集单元,最终形成了优质的岩溶型储层。

通过对制约不整合岩溶型储层发育因素分析及发育演化模式建立可预测有利的储集区带。这套储层既与岩溶古地貌相关,又受多成因、多期次成岩溶蚀、断裂裂缝、埋藏溶蚀叠加的综合控制。优质储层主要沿断裂

和裂缝呈斑团状和短条带状,最有利储层发育区主要分布在不整合岩溶和断裂同时发育的区域,总体上沿塔中1号坡折带呈断续分布,部分受走滑断裂控制而呈北东—南西向分布。次有利储层发育区主要分布在不整合岩溶和断裂次有利发育的区域,但范围较最有利储层分布范围广,连片性好。断裂和不整合岩溶都不发育或者只有一种类型发育的区域储层相对不发育(图6)。

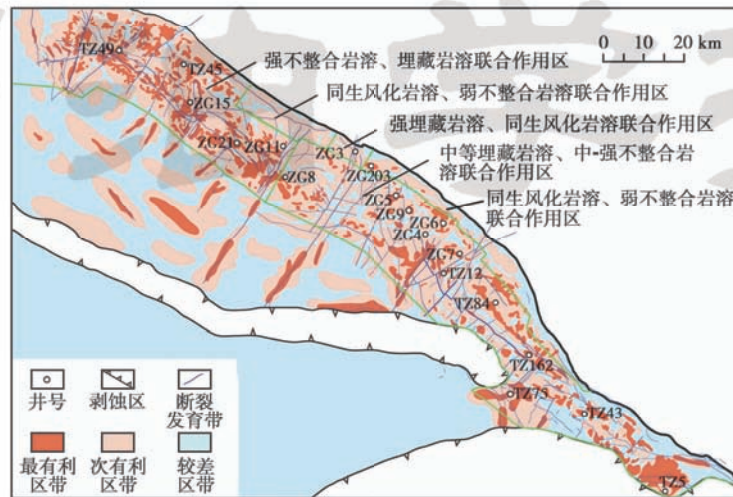


图6 塔中北斜坡奥陶系鹰山组岩溶型储层有利发育区带预测

Fig. 6 The prediction of favorable belt in karst reservoir in Yingshan Formation, Ordovician, northern slope of Tazhong palaeo-plateau

5 结论

塔中北斜坡鹰山组储层以大型缝洞储集空间为主,洞穴型、裂缝—孔洞型、孔洞型、裂缝型储层均有不同程度的发育,油气产出条件好。与断裂相关的岩溶型储层的发育受不整合岩溶、断裂裂缝、埋藏溶蚀作用叠加的综合控制,优质储层发育在不整合面之下 200 m 厚的范围内。多种作用、多期叠加改造形成了纵向叠置、横向连片的优质碳酸盐岩储集体,古地貌和断裂控制岩溶储集体分布,大型缝洞系统集中于岩溶斜坡和断裂附近。

塔中北斜坡鹰山组岩溶储集体勘探中要注重不同井区之间的储层类型和主控因素之差异性,优选主控因素对勘探进行指导。西部地区是强不整合岩溶、埋藏溶蚀联合作用区,高渗透带的缝洞发育区明显受断裂和裂缝发育控制,在勘探上应以寻找断裂和裂缝发育区为主;中部地区为不整合岩溶和埋藏白云岩化强烈改造的地区,白云岩均质孔洞型储层发育,在注重寻找不整合岩溶发育区的同时,还应注重白云岩储层的分布区;东部地区是不整合岩溶改造区,在勘探上应注重结合岩溶地貌,寻找岩溶储层发育区,把良五段和鹰山组储层作为一个储集体系进行综合考虑。针对塔中北斜坡鹰山组储层控制因素复杂的情况,一方面要加

强不同地区储层差异性的成因机理研究,另一方面要在地震勘探上突出对岩溶微地貌精细刻画和断裂裂缝精细雕刻技术的攻关。

参考文献

- [1] 金之钧,蔡立国. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 722-730.
Jin Zhijun, Cai Ligu. Exploration prospects, problems and strategies of marine oil and gas in China[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 722-730.
- [2] 邹才能,陶士振. 海相碳酸盐岩大中型岩性地层油气田形成的主要控制因素[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 I): 32-39.
Zou Caineng, Tao Shizhen. Major factors controlling the formation of middle and large marine carbonate stratigraphic fields[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Supplement I): 44-53.
- [3] 吕修祥,杨宁,周新源,等. 塔里木盆地断裂活动对奥陶系碳酸盐岩储层的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(增刊 I): 48-54.
Lü Xiuxiang, Yang Ning, Zhou Xinyuan, et al. Influence of Ordovician carbonate reservoir beds in Tarim Basin by faulting[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(Supplement I): 53-60.
- [4] 周新源,王招明,杨海军,等. 中国海相油气田勘探实例之五——塔中奥陶系大型凝析气田的勘探和发现[J]. 海相油气地质, 2006, 11(1): 45-51.
Zhou Xinyuan, Wang Zhaoming, Yang Haijun, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China(Part5): Tazhong

- Ordovician condensate field in Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2006, 11(1): 45-51.
- [5] 苗继军, 贾承造, 邹才能, 等. 塔中地区下奥陶统岩溶风化壳储层特征与勘探领域[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 497-500.
- Miao Jijun, Jia Chengzao, Zou Caineng, et al. Characteristics and exploration fields of paleo-karst reservoirs at the top of Early Ordovician in central Tarim uplift[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 497-500.
- [6] 赵宗举, 周新源, 陈学时, 等. 塔中地区中晚奥陶世古潜山岩溶储集层特征[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(6): 660-663.
- Zhao Zongju, Zhou Xinyuan, Chen Xueshi, et al. Characteristics of paleokarst reservoirs of Middle-Late Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(6): 660-663.
- [7] 韩剑发, 于红枫, 张海祖, 等. 塔中地区北部斜坡带下奥陶统碳酸盐岩风化壳油气富集特征[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(2): 167-173.
- Han Jianfa, Yu Hongfeng, Zhang Haizu, et al. Characteristics of hydrocarbon enrichment in the Lower Ordovician carbonate rock weathering crust on the northern slope zone of Tazhong area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(2): 167-173.
- [8] 潘文庆, 刘永福, Dickson J A D, 等. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩热液岩溶的特征及地质模型[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 983-994.
- Pan Wenqing, Liu Yongfu, Dickson J A D, et al. The geological model of hydrothermal activity in outcrop and the characteristics of carbonate hydrothermal karst of Lower Paleozoic in Tarim basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 983-994.
- [9] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. *石油学报*, 2009, 30(5): 698-704.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2009, 30(5): 698-704.
- [10] 王宏斌, 张虎权, 孙东, 等. 风化壳岩溶储层地质—地震综合预测技术与应用[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(1): 131-137.
- Wang Hongbin, Zhang Huquan, Sun Dong, et al. Application of integrated seismic-geology prediction techniques to weathering crust karst reservoir[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(1): 131-137.
- [11] 刘忠宝, 孙华, 于炳松, 等. 裂缝对塔中奥陶系碳酸盐岩储集层岩溶发育的控制[J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(3): 289-291.
- Liu Zhongbao, Sun Hua, Yu Bingsong, et al. The control of fractures on karst in Ordovician carbonate reservoirs in Tazhong area, Tarim basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(3): 289-291.
- [12] 邹元荣, 郭书元. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩表生岩溶分布特征及主控因素[J]. *新疆地质*, 2005, 23(2): 209-212.
- Zou Yuanrong, Guo Shuyuan. The distribution of the surface carbonate karst reservoir and its controlling factors in Ordovician in Tazhong area[J]. *Xinjiang Geology*, 2005, 23(2): 209-212.
- [13] 陈景山, 李忠, 王振宇, 等. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 858-868.
- Chen Jingshan, Li Zhong, Wang Zhenyu, et al. Paleokarstification and reservoir distribution of Ordovician carbonates in Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 858-868.
- [14] 林畅松, 杨海军, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代中央隆起带古构造地貌及其对沉积相发育分布的制约[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(3): 306-316.
- Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Paleogeomorphology of the Paleozoic central uplift belt and its constraint on the development of depositional facies in the Tarim Basin[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6): 823-834.
- [15] Heward A P, Chuenbunchom S, Makel G, et al. Nang Nuan oil field, B6/27, Gulf of Thailand; Karst reservoir of meteoric or deep-burial origin[J]. *Petroleum Geoscience*, 2000, 6: 15-27.
- [16] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响[J]. *地质论评*, 2008, 54(3): 348-354.
- Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Effects of deep fluid on carbonates reservoir in Tarim Basin[J]. *Geological Reviews*, 2008, 54(3): 348-354.
- [17] 韩剑发, 梅廉夫, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系碳酸盐岩礁滩复合体油气来源与运聚成藏研究[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(3): 426-435.
- Han Jianfa, Mei Lianfu, Yang Haijun, et al. The study of hydrocarbon origin, transport and accumulation in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(3): 426-435.
- [18] 韩剑发, 梅廉夫, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中奥陶系天然气的非烃成因及其成藏意义[J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 314-325.
- Han Jianfa, Mei Lianfu, Yang Haijun, et al. Non-hydrocarbon origin of Ordovician natural gas in Tazhong of Tarim Basin and its implications for non-hydrocarbon accumulation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 314-325.
- [19] 韩剑发, 梅廉夫, 杨海军, 等. 塔中 I 号坡折带礁滩复合体大型凝析气田成藏机制[J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(3): 323-326.
- Han Jianfa, Mei Lianfu, Yang Haijun, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of large-sized reef-shoal complex condensate gas field in Tazhong No. 1 slope-break zone, Tarim basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(3): 323-326.
- [20] 杨海军, 韩剑发, 陈立新, 等. 塔中古隆起下古生界碳酸盐岩油气复式成藏特征及模式[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(6): 784-790.
- Yang Haijun, Han Jianfa, Chen Lixin, et al. Characteristics and patterns of complex hydrocarbon accumulation in the Lower Paleozoic carbonate rocks of the Tazhong Palaeouplift[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(6): 784-790.
- [21] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地高含 H₂S 天然气的分布与 TSR 成因证据[J]. *地质学报*, 2006, 80(8): 1208-1218.
- Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Distribution of high H₂S-bearing natural gas and evidence of TSR origin in Sichuan Basin[J]. *Acta Geological Sinica*, 2006, 80(8): 1208-1218.
- [22] 杨海军, 邬光辉, 韩剑发, 等. 塔里木盆地中央隆起带奥陶系碳酸盐岩台缘带油气富集特征[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 26-30.
- Yang Haijun, Wu Guanghui, Han Jianfa, et al. Characteristics of hydrocarbon enrichment along the Ordovician carbonate platform margin in the central uplift of Tarim Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2007, 28(4): 26-30.