

塔北南缘中奥陶统顺层岩溶储层特征及成因

乔占峰^{1,2}, 沈安江^{1,2}, 张丽娟³, 倪新锋^{1,2}, 郑兴平^{1,2}, 熊冉^{1,2}

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)

(3 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院)

摘要 塔北南缘中奥陶统地层序列完整,其上无长期暴露的不整合面,但是钻井揭示其中岩溶储层发育。以上奥陶统桑塔木组剥蚀线为界,塔北隆起可划分为潜山区和内幕区两部分,潜山区以洞穴型、裂缝+孔洞型储层为主;内幕区以裂缝+孔隙+孔洞型储层为主,孔隙+孔洞型储层和洞穴型储层也有发育。岩溶储层总体上呈层状分布,集中发育于中奥陶统顶面以下100m范围内;平面上自潜山区向内幕区储层发育程度逐渐减弱,局部沿断裂集中分布。通过岩心、薄片、成像测井、水化学等资料和地质背景的分析认为,内幕区上奥陶统富泥质地层隔挡了潜流带地下水外泄地表,致使潜水面处于非完全稳定状态,其下“缓流带”具较高水势,为内幕区地下水运移提供了动力,从而在中奥陶统发生顺层岩溶作用。古隆起及斜坡背景为顺层岩溶储层的发育提供了地质背景,渗透性好的颗粒灰岩和裂缝系统为顺层岩溶作用提供了有效的流体通道,顺层岩溶作用则是各类储集空间形成的关键。

关键词 中奥陶统; 碳酸盐岩储层; 岩溶作用; 储层特征; 储层成因; 塔里木盆地; 塔北隆起

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

塔北南缘奥陶系碳酸盐岩地层具有巨大油气潜力,近些年有多口井获得油气突破,是塔里木盆地非常重要的勘探领域^[1-3]。该地区中奥陶统钻井过程中,漏失、放空较为频繁,岩溶缝孔洞型储层特征明显。然而该地区中奥陶统沉积序列完整,目的层之上并无长时期暴露的不整合面^[4-7],常规的潜山岩溶模式和层间岩溶模式都无法合理解释该地区的岩溶储层成因。

本文在充分认识地质背景和岩溶储层特征的基础上,以水文学理论为指导,通过对岩溶储层特征和发育规律的总结,对这一现象的成因进行了探讨,以期为后续研究提供参考。

1 地质背景

以上奥陶统桑塔木组剥蚀线为界,塔北隆起可划分为潜山区和内幕区两部分(图1)。潜山区以轮台地区、轮南地区和哈拉哈塘地区北部构成;内幕区则以哈拉哈塘地区、哈得地区及轮古东地区为主。内

幕区为塔北隆起向满加尔凹陷和草湖凹陷的过渡斜坡带,也称为塔北南缘,向东进入草湖凹陷,向南进入满加尔凹陷,处于大型的构造斜坡背景。

塔北南缘奥陶系中断裂非常发育,以NNE、NNW和SN向走滑断裂为主,平面呈“X”型组合(图1)。断裂于加里东期开始发育,其后经多期构造活动叠加。

潜山区的中—下奥陶统鹰山组直接被志留系、石炭系或三叠系覆盖,大部分地区缺失中奥陶统,只在哈拉哈塘地区北部尚残留有中奥陶统鹰山组上段。塔北南缘(内幕区)的中奥陶统一间房组—鹰山组一段地层发育完整,上覆地层依次为上奥陶统吐木休克组、良里塔格组、桑塔木组以及志留系等(图2)。其间发育多期规模不等的整合面,其中一间房组顶面发育平行整合面,良里塔格组、桑塔木组、志留系和泥盆系顶均发育角度不整合面,这些不整合面对应于中加里东期到早海西期的多幕构造运动。各期不整合面伴随轮南低凸起的隆起而发育,一间房组上覆地层具有靠近潜山区剥蚀程度强烈、厚

收稿日期: 2012-02-14; 改回日期: 2012-04-23

本文为国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号 2011ZX05004-002)资助成果

乔占峰: 1983年生,工程师。2008年在成都理工大学获硕士学位。主要从事碳酸盐岩沉积和储层研究。通讯地址: 310023 杭州市西溪路920号; 电话: (0571)86718476

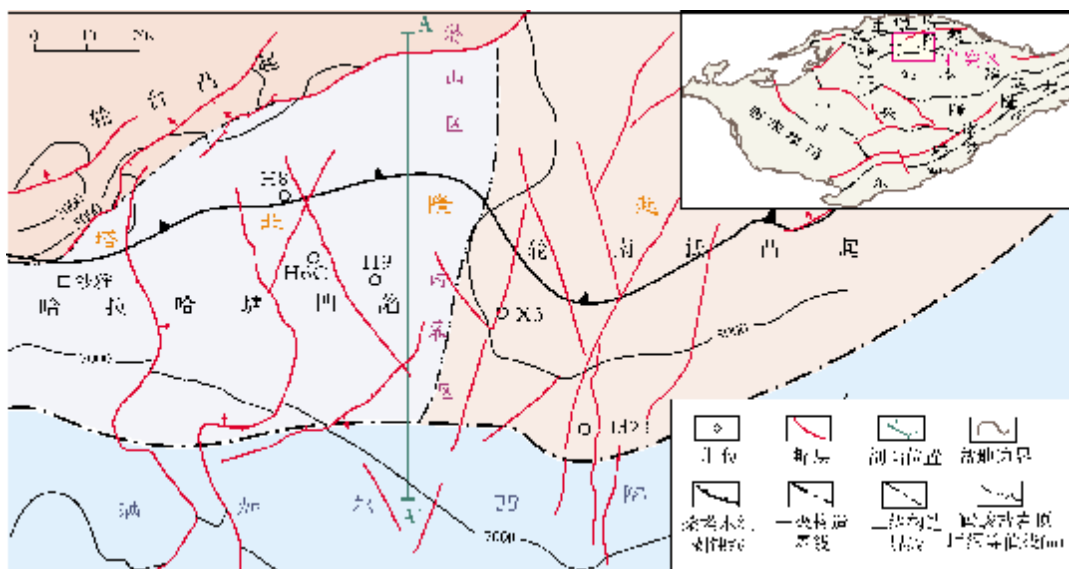


图 1 塔北南缘奥陶系潜山区与内幕区分布图

度向潜山区减薄并最终尖灭的趋势。总体上以桑塔木组顶不整合面对应的中加里东Ⅲ幕构造运动对该区影响最为强烈,构造形态变化最大,致使中—上奥陶统大规模削截,与志留系夹角较大。

中—下奥陶统与上奥陶统构成了两种截然不同的岩石类型面貌(如图 2)。中—下奥陶统岩性较为单一,以纯碳酸盐岩为主,其中,中奥陶统一间房组

以礁灰岩、亮晶棘屑灰岩为主,为典型的高能礁滩相沉积;鹰山组上段以亮晶颗粒灰岩和泥晶灰岩互层为主,为开阔台地相沉积。总体上,中奥陶统颗粒灰岩占有非常大的比例,可达 70%以上,下奥陶统以灰岩和白云岩互层为主,而上奥陶统则以斜坡—盆地相富泥地层(泥质灰岩、泥灰岩和灰质泥岩)为主,仅良里塔格组局部发育少量颗粒灰岩。

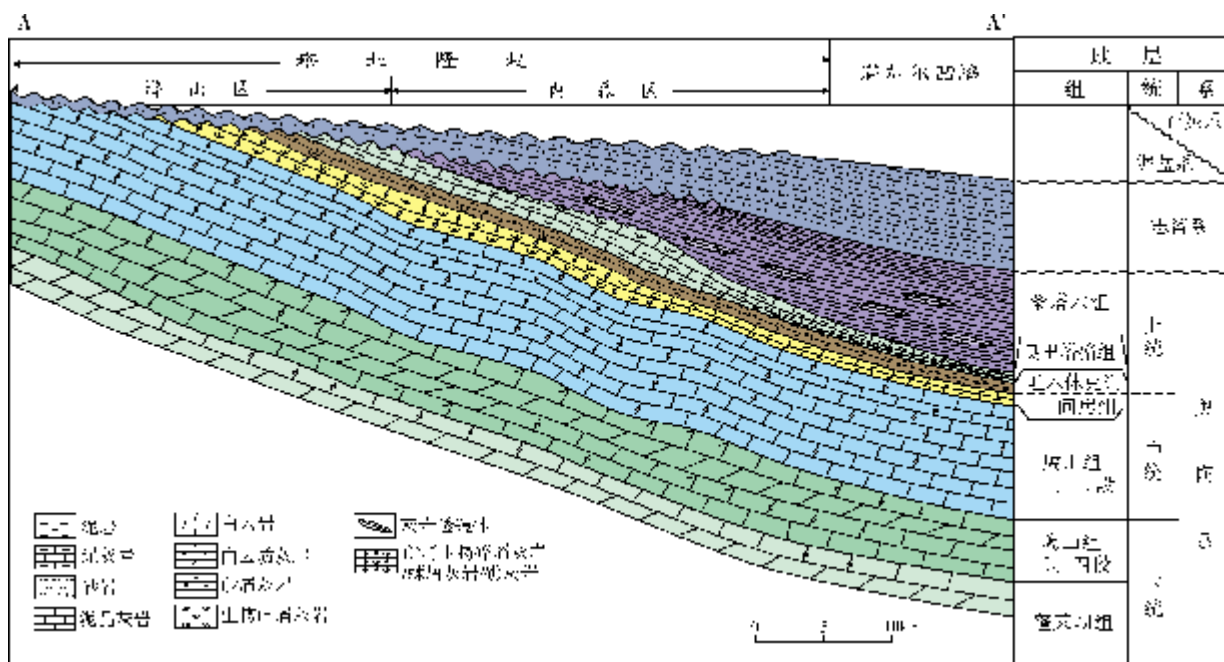


图 2 塔北南缘中—上奥陶统沉积结构剖面图





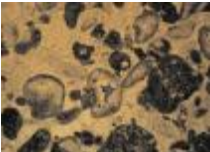

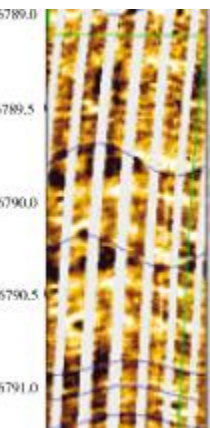
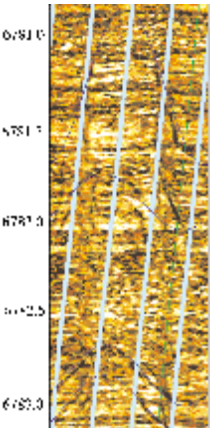
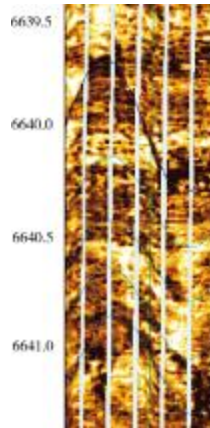
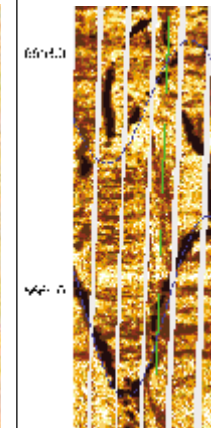
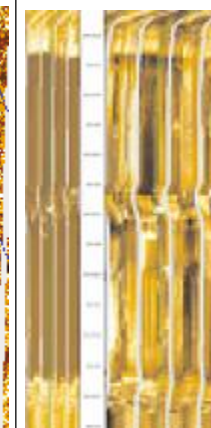
2 储层特征

2.1 储集空间类型及特征

通过对研究区近20口井的岩心、薄片、钻井和录井资料的分析,认识到塔北南缘奥陶系岩溶储层储集空间大小差异明显、类型多样,包括孔隙、孔洞、大

型溶洞及裂缝等(表1)。
孔隙 包括粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔及其他溶孔,以粒内溶孔和铸模孔相对较常见。岩心多油浸,既有组构选择性也有非组构选择性的,反映其形成既有同生期的淡水溶蚀作用,也有埋藏期的埋藏溶蚀作用。基质孔隙总体不发育,主要分布在一间房组和鹰山组颗粒灰岩与藻屑灰岩中。

表 1 塔北南缘中奥陶统岩溶储层空间类型及特征

	储集空间类型				
	孔隙+孔洞	裂 缝	裂缝+孔隙+孔洞	裂缝+孔洞	洞 穴
岩心	 <p>亮晶生物碎屑砂屑灰岩。微孔发育,岩心含油。一间房组</p>	 <p>砂屑灰岩。裂缝不完全充填。鹰山组</p>	—	 <p>亮晶砂屑灰岩。沿裂缝发育溶蚀孔洞,岩心斑状油浸。一间房组</p>	 <p>巨晶方解石,洞穴充填物,放空 7.6m,收获 0.57m。鹰山组</p>
薄片	 <p>亮晶砂屑棘屑灰岩。粒内溶孔发育。一间房组。 ×40,(-)</p>	—	—	 <p>亮晶砂屑灰岩。沿裂缝溶蚀孔洞。鹰山组。 ×40,(-)</p>	—
成像测井	 <p>暗色斑点(代表孔洞)呈准层状分布。一间房组</p>	 <p>暗色正弦曲线线条(代表裂缝)发育。一间房组</p>	 <p>暗色斑点(孔洞)准层状分布,被暗色正弦曲线线条(代表裂缝)切割。一间房组</p>	 <p>暗色斑点呈线状排列,为沿裂缝溶蚀扩大形成的孔洞。一间房组</p>	 <p>暗色段代表洞穴,高 4m。鹰山组</p>
储层特征与组构切割关系	孔隙和孔洞为主要储集空间,主要发育在颗粒灰岩和礁灰岩中。宏观上受礁滩体控制,成层性较好。微观特征揭示至少存在两期溶蚀;准同生期和后期的溶蚀扩大	裂缝构成主要储集空间。以受构造运动影响的构造缝为主,各种岩性均可发育,分布上主要沿断裂密集发育	裂缝、孔隙和孔洞共同构成储集空间,主要发育在颗粒灰岩中。表现为孔隙+孔洞型储层叠加裂缝改造,晚期裂缝可见溶蚀扩大现象。两期溶蚀;准同生期溶蚀和裂缝的溶蚀扩大	裂缝和孔洞为主要储集空间。孔洞为沿裂缝局部溶蚀扩大形成,颗粒灰岩和泥晶灰岩均可发育。该类储层为裂缝型储层经后期溶蚀改造而成	以洞穴为主要储集空间,在有构造缝及垮塌缝发育的情况下,储集性能更佳。为裂缝体被局部强烈溶蚀而形成

裂缝 成因上主要有构造缝、溶蚀缝和成岩缝三种类型。其中以高角度构造缝为主,约占裂缝总量的 60%以上。不同时期构造缝相互切割,局部网状微裂缝发育。溶蚀缝也较为常见,一般沿早期裂缝或重新开启的缝合线溶蚀扩大而形成孔洞。成岩缝多被方解石完全充填。

溶蚀孔洞 孔径大于 2mm,为塔北南缘中—下奥陶统一间房组—鹰山组一段重要的储集空间类型。孔洞大多顺层状发育或沿裂缝发育,常见方解石充填或半充填,偶见泥质充填,部分未充填,成像测井表现清楚。

大型溶洞 因取心困难,只能通过常规测井和成像测井、洞穴角砾岩、地下暗河沉积物、巨晶方解石充填、钻井放空、泥浆漏失、钻时明显降低等标志进行识别。如某井在鹰山组发生放空 1m,成像测井表现为大段暗色低阻层,显示为大型洞穴。

2.2 储层类型及特征

综合岩心、薄片、成像测井、地震资料及生产测

试资料的分析,根据储集空间组合特征和相互切割关系,将塔北南缘中奥陶统顺层岩溶储层划分为孔隙+孔洞型、裂缝型、裂缝+孔隙+孔洞型、裂缝+孔洞型、洞穴型等五种类型(表 1)。

2.3 储层发育分布特征

基于岩心、测井、地震剖面和生产测试资料,通过单井解剖和连井对比分析,建立了塔北南缘奥陶系岩溶储层发育分布模式图(图 3)。纵向上,岩溶储层集中发育在一间房组顶面以下 100 m 范围内,自上而下发育程度减弱,断裂带附近可发育至更深。平面上,储层自潜山区向内幕区发育程度总体逐渐减弱,局部沿断裂发育带延伸至更远,总体上,内幕区岩溶储层发育受断裂控制更为明显。经统计表明,潜山区以洞穴型、裂缝+孔洞型储层为主,内幕区以裂缝+孔隙+孔洞型储层为主,孔隙+孔洞型储层和洞穴型储层也有发育,这一规律已被生产实践所证实。

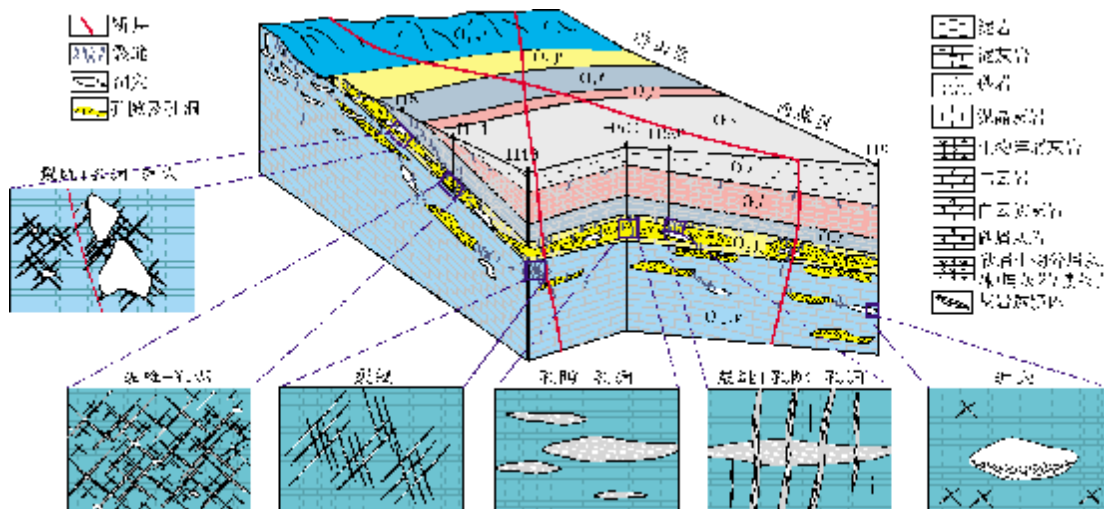


图 3 塔北南缘奥陶系岩溶储层发育模式图

O_{1p} 蓬莱坝组; O_{1-2y} 鹰山组; O_{2y} 一间房组; O_{3t} 吐木休克组; O_{3l} 良里塔格组; O_{3s} 桑塔木组

3 岩溶储层成因

塔北隆起奥陶系经历了多期岩溶作用的改造,包括准同生溶蚀作用、层间岩溶作用、顺层岩溶作用、潜山岩溶作用以及埋藏岩溶作用等^[8-10],但是在地质背景认识的基础上,通过岩心、薄片、成像测井、地球化学、水化学等资料的分析,结合储集空间特征、组构切割关系及储层发育特征,笔者认为塔北南缘

内幕区中奥陶统以顺层岩溶作用为岩溶储层最为重要的形成机制(图 4),可总结为以下四个方面。

(1) 古隆起及斜坡为顺层岩溶储层的发育提供了地质背景

中加里东晚期—早海西期,塔北隆起大幅度抬升,轮南古潜山长时间暴露于大气淡水中,潜山区遭受了强烈的潜山岩溶作用改造,发育大型的缝洞系统。同时,围斜区哈拉哈塘和轮古东等地区中—下奥

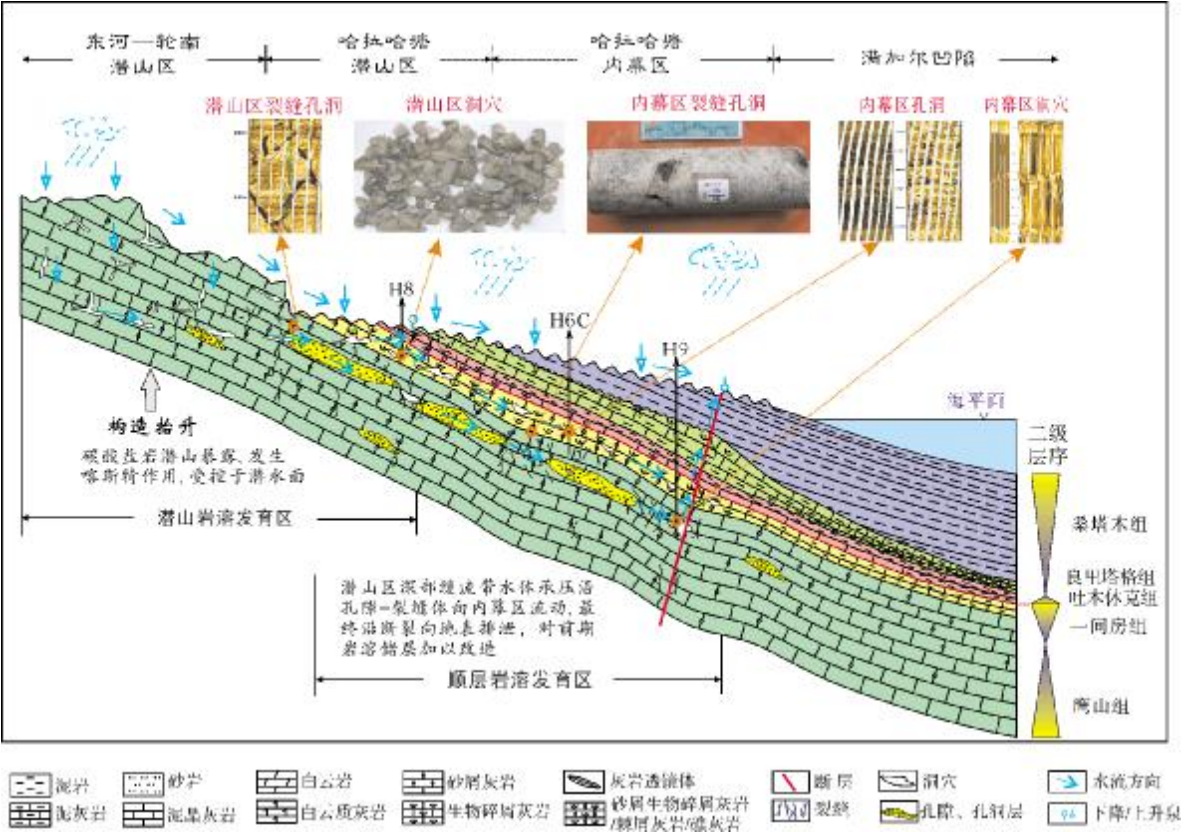


图4 塔北南缘奥陶系顺层岩溶作用模式及储层形成机理示意图

陶统一间房组及鹰山组一段之上覆盖了吐木休克组泥岩地层,隔挡了潜山区潜流带地下水的排泄。地表泄水点将集中在泥岩地层的尖灭线附近,远高于正常裸露碳酸盐岩潜山的水压平衡点,导致潜水面处于非完全稳定状态,其下“缓流带”仍具一定水势,并具有向内幕围斜区运移的动力,为顺层岩溶作用的发育提供了很好的地质背景(图4)。岩溶储层在平面上分为两个区,一是潜山高部位的潜山岩溶储层发育区,二是围斜部位的顺层岩溶储层发育区。

地层水中 Na/Cl 与 Ca/Mg 特征可反映地层受大气水影响的程度和地层的封闭性。通过对塔北南缘中奥陶统地层水水化学特征的分析,揭示了潜山区和内幕区中部分地区的地层水受大气水影响的特征明显,并且其影响程度具有自潜山区向内幕区逐渐减弱的趋势(图5),这一趋势与地质背景完全吻合,符合水文地质学原理。

(2)渗透性好的颗粒灰岩为顺层岩溶作用提供了成岩介质通道

沉积相研究揭示,塔北南缘各井奥陶系一间房

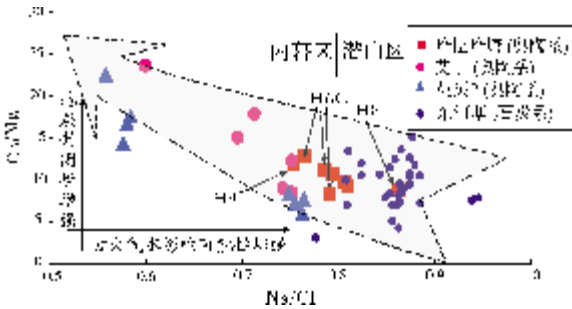


图5 塔北南缘中奥陶统地层水 Na/Cl 与 Ca/Mg 分布图

组及鹰山组上段高能滩相沉积发育,层状大面积分布,属三级层序高水位体系域沉积。高水位晚期发育的高能滩相沉积在地貌上为相对隆起,水体浅,相对海平面的微弱下降即可导致其暴露于大气淡水中。文石及高镁方解石矿物相的不稳定,导致粒内溶孔、粒间溶孔等组构选择性溶孔发育。

岩心及成像测井资料揭示,溶蚀孔隙段主要发育于三级层序高水位体系域中上部和四级准层序组的上部,以某井为例,岩心段可识别出三个向上变浅

的旋回, 基质孔隙主要发育在旋回上部的颗粒灰岩中(图 6)。这类孔隙虽然有限($\phi < 1\%$), 但却构成了后期流体重要的初始渗滤通道, 可进一步被溶蚀扩大。故此, 研究区一间房组在成像测井上多见成层状发育的溶蚀孔洞。

(3) 发育的裂缝系统为顺层岩溶作用提供了成岩介质通道

由于塔北南缘中奥陶统纯碳酸盐岩地层之上覆

盖的是富泥质地层, 在构造应力作用下, 在碳酸盐岩地层的上部(即中奥陶统)会发生应力集中, 有利于发育大量的断裂和裂缝。断裂及其伴生裂缝的发育, 将改善碳酸盐岩地层的渗流条件, 增加流体与母岩的接触面积和溶蚀范围, 为塔北南缘围斜区中一下奥陶统岩溶作用大面积发育提供必要的条件。地震储层预测成果显示, 90%以上的溶蚀孔洞及洞穴均与断裂及裂缝有关。

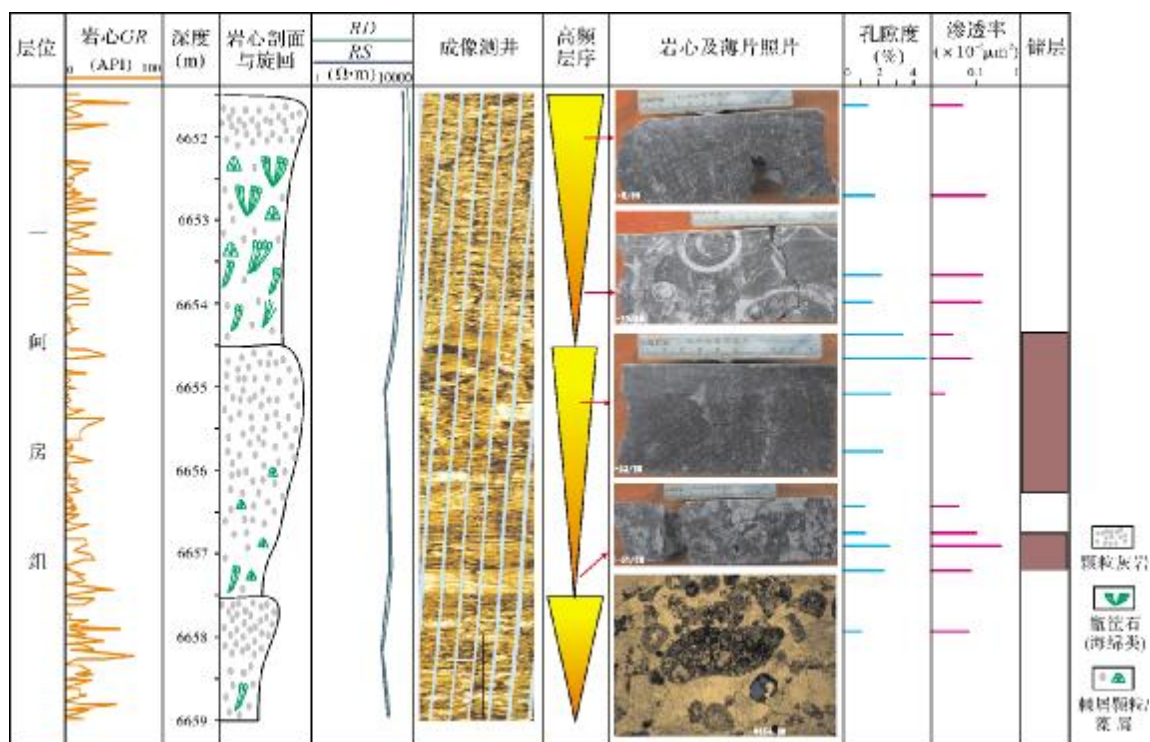


图 6 塔北南缘某井一间房组取心段岩性与储层发育关系图

另外, 勘探实践证实, 地震剖面上的“串珠”为岩溶缝洞储层的响应, 其平面分布具有明显的规律性, 集中发育于断裂附近, 且多见数个串珠相互靠近呈线状排列。笔者在对哈拉哈塘地区研究过程中, 首次将多于 2 个的相邻“串珠”用短线相连, 发现短线走向与断裂走向非常吻合^[1], 证明串珠的发育与断裂关系非常密切, 这更反映了断裂和裂缝对岩溶缝洞发育的控制作用。

(4) 顺层岩溶作用是各类储集空间形成的关键

顺层岩溶作用通常是沿孔隙、断裂及裂缝发育的渗透性层进行(图 4), 形成孔洞、溶缝及大洞穴, 构成顺层岩溶储层的主要储集空间。前已述及, 围岩基质孔并不发育, 热液作用也不明显, 岩溶缝洞主要

是由顺层岩溶作用形成的, 受断裂控制, 顺层分布。顺层岩溶作用发生的时间应该在中加里东晚期—早海西期, 与轮南古潜山大幅度抬升同步, 是潜山岩溶作用向斜坡区的延伸。顺层岩溶作用的强度由北向南逐级减弱, 此已为勘探实践所证实。

综上所述, 中加里东晚期—早海西期, 随着轮南古潜山大幅度抬升, 长时间暴露于表生环境, 潜山区遭受了强烈的喀斯特岩溶作用改造, 发育大型的缝洞系统。同时, 由于围斜部位处于大型构造斜坡背景中, 中奥陶统碳酸盐岩地层被上奥陶统等富泥质地层覆盖, 泥岩地层的隔挡作用影响了潜山区潜流带地下水的流向, 地表泄水点的位置远高于正常裸露碳酸盐岩潜山的水压平衡点位置, 这种情况下潜水面并非处于完

全稳定状态,其下“缓流带”仍具有一定的水力梯度,具有向内幕区运移的趋势,为内幕区地下流体的流动提供了动力。一间房组和鹰山组经历同生溶蚀作用、层间岩溶作用和构造作用的改造后,形成了由“孔隙层—裂缝体—断裂带”构成的“潜山—内幕—地表(上升泉)”的水循环通道,使得潜山区仍具水力梯度的深部缓流带流体,经过孔隙层、裂缝带顺层向盆地区运移,最后经过断裂沟通向地表泄水,导致顺层岩溶作用持续发生,形成顺层岩溶储层。由于孔隙、裂缝及断裂的组合方式多样,导致溶蚀扩大的结果也比较复杂,故形成了上述五种储集空间类型。

4 结 论

塔北南缘奥陶系岩溶储层主要的储集岩为一间房组—鹰山组上段的颗粒灰岩,发育孔隙、裂缝、溶蚀孔洞和洞穴四种储集空间类型,不同种类储集空间相互组合构成孔隙+孔洞型、裂缝型、裂缝+孔隙+孔洞型、裂缝+孔洞型、洞穴型等五种组合类型。岩溶储层集中发育在一间房组以下 100m 范围内,平面上自北向南发育程度逐渐减弱,并沿断裂富集。

地质背景、储层特征及结构切割关系和水文地质特征揭示顺层岩溶作用是塔北南缘奥陶系岩溶储层最为重要的成因机制。

参 考 文 献

- [1] 王伟力,刘洛夫,陈利新,等. 塔里木盆地轮古东地区奥陶系碳酸盐岩储集层发育控制因素及有利区带预测[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 107-115.
- [2] 卢玉红,肖中尧,顾乔元,等. 塔里木盆地环哈拉哈塘海相油气地球化学特征与成藏[J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 2007, 37(增 2): 167-176.
- [3] 张朝军,贾承造,李本亮,等. 塔北隆起中西部地区古岩溶与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 263-269.
- [4] 鲍志东,齐跃春,金之钧,等. 海平面波动中的岩溶响应——以塔里木盆地牙哈—英买力地区下古生界为例[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 205-211.
- [5] 徐国强,刘树根,李国蓉,等. 塔中、塔北古隆起形成演化及油气地质条件对比[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 114-129.
- [6] 俞仁莲. 塔里木盆地塔河油田加里东期古岩溶特征及其意义[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 468-478.
- [7] 乔占峰,沈安江,邹伟宏,等. 断裂控制的非暴露型大气水岩溶作用模式——以塔北英买 2 构造奥陶系碳酸盐岩储层为例[J]. 地质学报, 2011, 85(12): 2070-2083.
- [8] 沈安江,潘文庆,郑兴平,等. 塔里木盆地地下古生界岩溶型储层类型及特征[J]. 海相油气地质, 2010, 15(2): 20-29.
- [9] 倪新锋,王招明,杨海军,等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩储层岩溶作用[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(5): 11-16.
- [10] 倪新锋,张丽娟,沈安江,等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型、期次及叠合关系[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1312-1321.
- [11] 倪新锋,杨海军,沈安江,等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制[J]. 石油学报, 2010, 31(6): 933-940.

编辑:赵国宪

Characteristics and Origin of Middle Ordovician Karst Reservoirs in South Margin of Northern Tarim Basin

Qiao Zhanfeng, Shen Anjiang, Zhang Lijuan,
Ni Xinfeng, Zheng Xinping, Xiong Ran

Abstract: The Middle Ordovician strata are well deposited in the south margin of northern Tarim Basin. Drill data reveal that no long-term exposed unconformity surface exists on the Middle Ordovician strata and the karst reservoirs develop in the strata. Bordered by the pinchout line of upper Ordovician Shangtamu Fm., a burial hill area in the north and an inner area in the south can be divided. Cavernous and fractured+vuggy reservoirs are predominant in the burial hill area. Fractured+porous+vuggy reservoirs are dominant while porous+vuggy and cavernous reservoirs are also common in the inner area. Generally, the development of karst reservoirs exhibits bed-liked in lateral and focuses vertically within the interval of 100 meters below the top surface of Yijianfang Fm., whereas the reservoirs get weak in developing extent from north to south and distribute locally along faults. By means of the analysis of cores, thinsections, FMI, hydrologic data and geologic setting, it is shown that the Middle Ordovician karst reservoirs originate considerably from karstification taking place along rock layers. The fact that the overlying upper Ordovician mud-rich strata in the inner area prevented phreatic underground water from flowing back to the surface brings in an unstable phreatic water table under which the slow flow zone provides high potential energy for underground water to flow. It is suggested that the geological setting including paleouplift and slope is the prerequisite of developing karstification, and permeable grainstone and fracture system may form available pathways for diagenetic fluids. The karstification along layers advances a variety of reservoir spaces.

Key words: Middle Ordovician; Carbonate reservoir; Karstification; Reservoir characteristics; Reservoir origin; Northern Tarim Basin

Qiao Zhanfeng: male, M.S., Geology Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, 920 Xixi Road, Hangzhou, Zhejiang, 310023, China