

doi:10.3799/dqkx.2017.031

塔中隆起碳酸盐岩叠合复合岩溶模式与油气勘探

韩剑发¹, 孙崇浩¹, 王振宇², 吉云刚^{1,3}, 李浩³, 陈军¹

1. 中国石油塔里木油田公司, 新疆库尔勒 841000

2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要:塔里木盆地大型碳酸盐岩台地形成与构造演化过程中,发育了台缘礁、台内滩与深层白云岩等巨厚的碳酸盐岩建造,经过多期构造运动形成了种类繁多、规模巨大的岩溶缝洞系统,是台盆地海相碳酸盐岩油气勘探开发的重要领域。基于野外露头与井下地质、岩样分析、地球物理预测及岩溶地质刻画,静态特征与生产动态等多学科动静态一体化研究,阐明了洞穴、溶蚀孔洞、裂缝等储集空间发育特征及大型岩溶缝洞系统的形成机理;创建了与不整合暴露、断裂破碎相关的岩溶叠合复合发育模式;揭示了不整合面相关岩溶横向广泛分布、断层相关岩溶纵向局部拓展及其三维展布规律;提出叠合复合岩溶缝洞系统是油气复式成藏的关键,亦是复式油气聚集区立体勘探开发的基础,叠合复合岩溶模式的建立有效指导了塔中隆起碳酸盐岩凝析气田的重大发现与高效开发。

关键词:塔中隆起;碳酸盐岩;不整合暴露面;断裂破碎带;叠合复式岩溶;复式油气成藏;石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)03-0410-11

收稿日期: 2016-06-23

Superimposed Compound Karst Model and Oil and Gas Exploration of Carbonate in Tazhong Uplift

Han Jianfa¹, Sun Chonghao¹, Wang Zhenyu², Ji Yungang^{1,3}, Li Hao³, Chen Jun¹

1. *Tarim Oilfield Company, Petrochina, Korla 841000, China*

2. *College of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China*

3. *College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

Abstract: In the process of large carbonate platform formation and tectonic evolution of Tarim basin, the thick platform margin reef, intra-platform beach and deep dolomite carbonate sediments were developed, which formed the various types and large scale of karst fracture-cave systems by the reconstruction of multi period tectonic movement, and the system is an important field of oil and gas exploration and development inside the platform-basin transitional area marine carbonate. Based on the multidisciplinary static and dynamic comprehensive analysis of the field outcrop, underground geology, geophysical prediction, karst geological description, static characteristics and production dynamic data, this paper described the characteristics of reservoir space development, such as caves, dissolved pores and fractures as well as the formation mechanism of the large-scale karst fracture-cave system, and established the superimposed development model of unconformity exposed and fracture karst, and revealed the horizontal distribution of unconformity related karst and the longitudinal distribution and three-dimensional distribution of the fault karst. The comprehensive study shows that the composite karst fracture-cave system is the key to oil and gas accumulation, and is also the basis for the exploration and development of the complex oil and gas accumulation area. The establishment of the superimposed compound karst model is an effective way to guide the significant discovery and efficient development of the carbonate condensate gas field in Tazhong uplift area.

基金项目: 国家科技重大专项(Nos.2011ZX05049,2016ZX05053).

作者简介: 韩剑发(1965-),男,博士,高级工程师,主要从事碳酸盐岩油气地质研究与勘探开发部署. ORCID:0000-0002-9792-7755.

E-mail: hanjf-tlm@petrochina.com.cn

引用格式: 韩剑发,孙崇浩,王振宇,等,2017.塔中隆起碳酸盐岩叠合复合岩溶模式与油气勘探.地球科学,42(3):410-420.

Key words: Tazhong uplift; carbonate; exposed unconformity surface; fracture zones; superimposed compound karst; Compound hydrocarbon accumulation; petroleum geology.

0 引言

全球勘探开发实践证实碳酸盐岩是油气勘探开发的重点领域(马永生等,2007;康玉柱等,2011;王招明等,2012)。迄今为止,国外碳酸盐岩勘探人员已发现了一系列大型油气田,诸如滨里海盆地 Kashagan 油田,石炭系礁灰岩岩性地层圈闭,可采储量 25.55×10^8 t;阿拉伯盆地 Azadegan 油田,白垩系灰岩构造圈闭,可采储量 8.826×10^8 t;扎格罗斯盆地 Tabnak,二叠系鲕粒灰岩构造圈闭,可采储量 5.515×10^8 t;近期我国也发现了塔中、塔河、哈拉哈塘、靖边、普光、磨溪—高石梯等多个大中型碳酸盐岩油气田,研究表明这些油气田与岩溶作用和岩溶缝洞系统密切相关(金之钧和蔡立国,2006;朱光有等,2012)。

岩溶作用,也称喀斯特作用,是指相关流体对可溶性岩石进行以化学溶蚀为主,机械侵蚀和重力崩塌作用为辅,导致岩石破坏、物质堆积的地貌形成过

程。国内外岩溶分类方案、岩溶成因机理、岩溶发育模式众多且自成体系,涉及多个学科,诸如油气地质(韩剑发等,2007,2008,2010;马永生,2007;杨海军等,2007;康玉柱,2011;鲁新便等,2015;蔡忠贤等,2010)、水文地质、现代岩溶(loucks)、古岩溶学科等多学科的交叉和渗透,很好地指导了岩溶学的研究与油气勘探。

塔里木盆地在台地演化过程中发育了巨厚的碳酸盐岩沉积,其中,台缘礁、台内滩及白云岩这 3 大碳酸盐岩建造埋藏深、时代老(图 1),岩溶缝洞系统发育主控因素不明、空间展布规律不清、地质模型不完善等是勘探开发面临的科学问题与技术挑战。随着碳酸盐岩油气勘探开发向纵深拓展,亟需深化岩溶作用主控因素岩溶缝洞系统叠合复合形成机理与发育模式研究。因此,注重台地演化过程剖析,强化野外露头与井下地质、地球物理与岩溶地质结合,突出静态特征与生产动态一体化攻关,科学建立碳酸盐岩多期次多

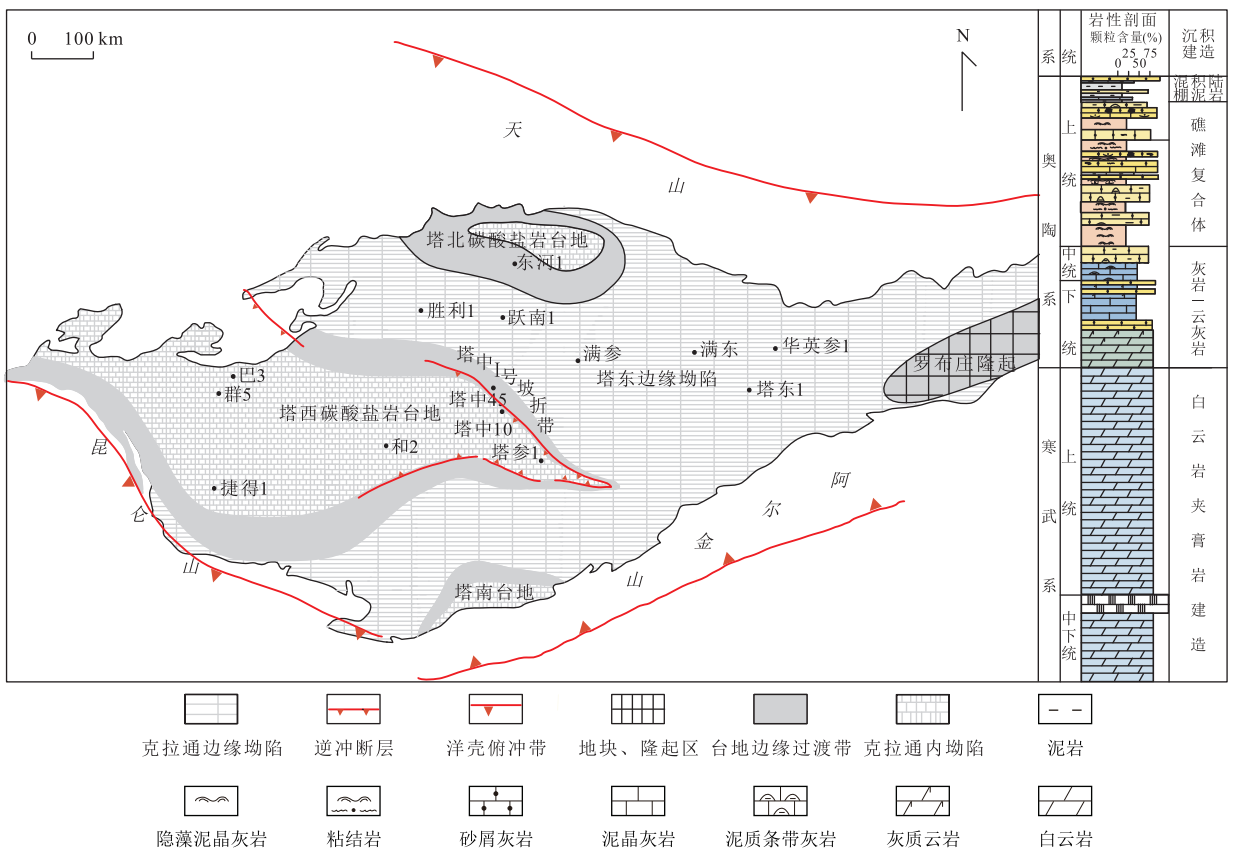


图 1 塔中地区碳酸盐岩建造纲要图

Fig.1 Sketch of carbonatite in Tazhong area

成因叠合复合岩溶模式,是碳酸盐岩缝洞体建模、油气藏建模、油气发现与高效开发的迫切需求。

1 塔中隆起碳酸盐岩建造

塔中隆起是在寒武系—奥陶系巨型褶皱背斜基础上长期发育的继承性古隆起,形成于早奥陶世末,泥盆系沉积前基本定型。高频海平面变化与层序地层学研究表明,早海西期后塔中隆起构造迁移及改造为岩溶缝洞型储集体的发育奠定了坚实的基础(韩剑发等,2015;韩剑发等,2016)。

塔中地区寒武纪—奥陶纪是大型碳酸盐岩台地沉积建造期,发育了礁滩复合体、内幕不整合灰岩、深层白云岩等巨厚碳酸盐岩沉积(王振宇等,2010;郑剑等,2015;邹亚锐等,2014)。

塔中隆起台地建造过程中经历了多期海平面升降、大地构造运动与多期次断裂活动,发育了多个大型不整合、遭受了数次抬升剥蚀,长期的暴露溶蚀及构造应力作用,使其形成了多期次、多成因叠加改造的大型碳酸盐岩缝洞系统,且受深度控制不明显,有效储集孔洞的发育深度下限可能达到 9 000 m,这些缝洞系统是油气富集的有利场所(韩剑发等,2011)。

1.1 上奥陶统礁滩复合体

塔中上奥陶统良里塔格组发育大型镶边台地礁滩相沉积,有我国最早的珊瑚—层孔虫造礁群落,生物礁与台缘粒屑滩构成礁滩复合体。礁滩复合体沿台地边缘成群成带分布。

礁滩复合体主要岩石类型为礁灰岩类和颗粒灰岩类,占有有效储集体的 80% 以上,其中颗粒含量通常大于 50%。次生孔洞是主要的储集空间,储集空间以大型溶洞、溶蚀孔洞、粒内及粒间孔为主,次生溶孔 > 85%,裂缝是主要的渗滤通道。礁滩复合体中的棘屑灰岩、生物砂砾屑灰岩以发育均匀溶蚀的蜂窝状孔洞为特征,孔洞呈圆形、椭圆形,孔径一般为 1~10 mm,面孔率最高达 10%,孔隙度平均为 2.27%,渗透率平均为 $5.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

储集体主要分布在良里塔格组上部 50~300 m 范围内礁滩相中,单层厚度为 3~6 m,单井储集体有效厚度为 30~160 m,储集体纵向叠置,横向连片,形成整体连片的、横向上具有非均质性的礁滩储集体(韩剑发等,2010)。

1.2 下奥陶统内幕不整合

下奥陶统鹰山组沉积时期,塔中隆起整体为开阔台地相沉积,根据地形差异,可将其细分为台内滩

和滩间海亚相,沉积物以较高能量的砂屑灰岩为主。储集体岩石类型主要为颗粒灰岩类和白云岩过渡类型,灰岩储集体占 69.45%,以砂屑灰岩为主,白云岩等占 30.55%;颗粒灰岩为主的储集体有利于选择性溶蚀改造,具备良好的储集性能。

早奥陶世末期,塔中 I 号断裂使得塔中隆起整体抬升并遭受强烈剥蚀,广泛缺失中奥陶统一间房组和吐木休克组,笔者根据地层古生物分析缺失时间为 12 Ma,在碳酸盐岩内幕存在不整合,储集体大面积呈准层状分布在不整合面之下 150 m 范围内(杨海军等,2011)。

内幕不整合岩溶储集体以大缝大洞为主,储集空间主要为孔、洞、缝,根据其空间组合特征笔者将储集体类型划分为 4 大类:孔洞型储集体、裂缝型储集体、裂缝—孔洞型储集体和洞穴型储集体。其中,洞穴型储集体是区块内重要的储集体类型,钻井过程中常出现大量泥浆漏失、溢流、钻具放空等工程异常,甚至 3 000~4 000 m 钻具失落无踪,表明钻遇了大型缝洞体。而岩心和测井仅能反映井筒附近的储集性,并不能真实反映缝洞型碳酸盐岩储层的储集性能;岩心常规分析和测井解释表明,基质孔隙度最大达 11.13%,最小孔隙度仅 0.17%,平均孔隙度 0.91%,渗透率分布范围 $1 \times 10^{-3} \sim 153 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $3.77 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于低孔、低渗储集体。

2 叠合复合岩溶发育模式

塔中碳酸盐岩台地形成演化过程中发育的台缘礁滩复合体、内幕不整合颗粒滩以及深层白云岩等建造是岩溶作用的物质基础;岩溶作用是塔里木盆地时代古老、埋藏超深海相碳酸盐岩具备储集性能的关键。高频海平面变化、多期次构造运动使得多个不整合面、多期断层破碎带历经多种流体的溶蚀与叠加改造、复合发展,形成规模巨大的岩溶缝洞系统(表 1)。

良里塔格组台缘礁滩复合体经过同生期暴露风化淋滤形成相对均匀溶蚀孔洞,一间房组、鹰山组颗粒滩经历相对较长时间的暴露风化淋滤形成大型洞穴、孔洞—裂缝等储集空间。

塔中构造演化过程中发育三期主要断裂系统。其中,走滑断裂破碎带,特别是其帚状撒开端,接受源自深部的热流体及浅表的淡水等流体溶蚀改造,沿断层破碎带强烈的扩溶形成了较大的洞穴、裂缝—孔洞等储集空间,同时,这些流体侧向运移能够

表 1 塔里木盆地构造运动与岩溶发育关系

Table 1 The relationship between karst development and Tarim basin tectonic movement

名称	三期不整合 地层接触关系	缺失的地层	断代时间
早海西期	石炭系(C) 上奥陶统良里塔格组(O _{3l}) 下奥陶统鹰山组(O _{1y})	泥盆系—志留系和上奥陶统桑塔木组(O _{3s});甚至泥盆系—志留系和整个上奥陶统(O ₃)	仅按泥盆系计算就达 38 Ma
晚加里东期	柯坪塔格组上段(S _{1k³}) 上奥陶统良里塔格组(O _{3l}) 下奥陶统鹰山组(O _{1y})	下志留统柯坪塔格组中段(S _{1k²})、上奥陶统柯坪塔格组下段(O _{3k¹})和桑塔木组(O _{3s});甚至下志留统柯坪塔格组中段(S _{1k²})至整个上奥陶统(O ₃)	约 10 Ma 左右;若考虑 O _{1y} 上部的缺失,则达 18 Ma
中加里东期	上奥陶统良里塔格组(O _{3l}) 下奥陶统鹰山组(O _{1y})	上奥陶统底部的吐木克组(O _{3t}) 中奥陶统一间房组(O _{2y})	约 15 Ma;若考虑 O _{1y} 上部的缺失,则达 23 Ma

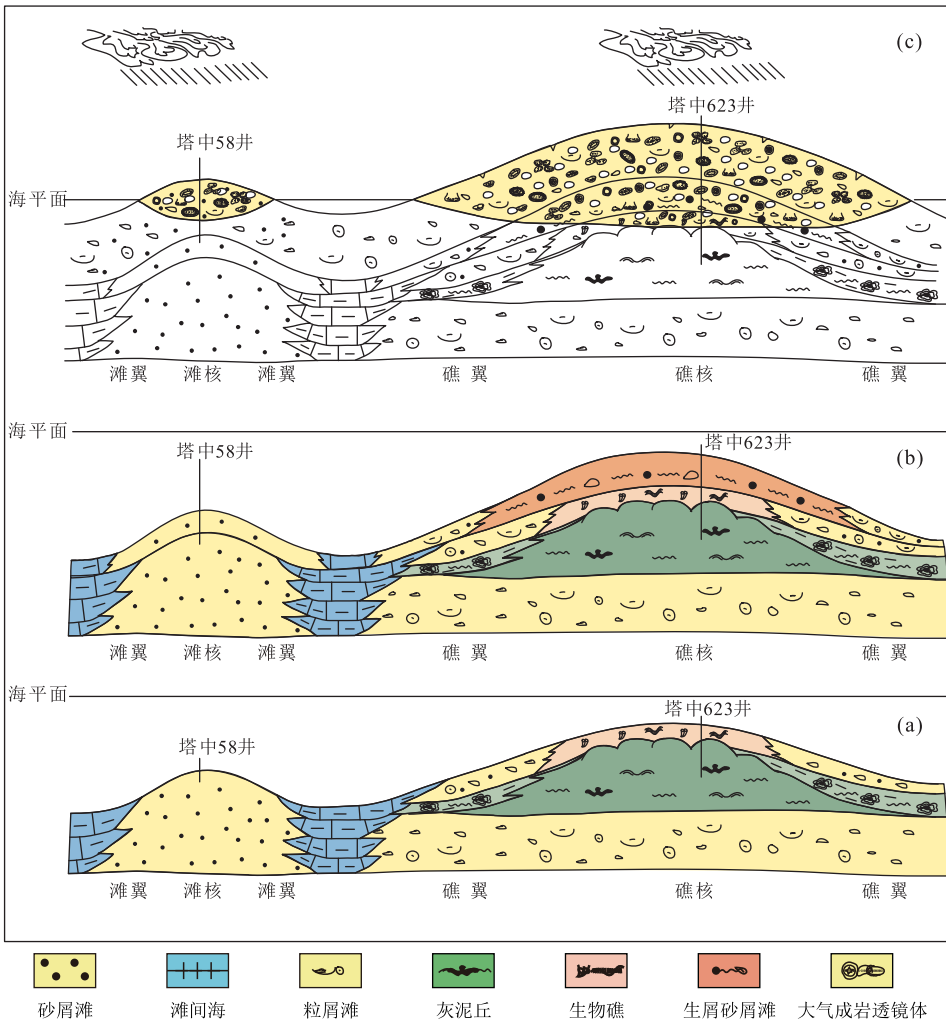


图 2 台地边缘礁滩复合体同生期岩溶发育模式

Fig.2 Model of syn-sedimentary karst development of platform edge reef flat composite

a.礁滩体生长;b.海平面相对下降,生物破碎在礁体边缘形成生屑砂屑滩;c.礁滩体暴露,接受大气淡水淋滤,形成大气成岩透镜体

大规模扩溶早期不整合相关岩溶,塔中隆起多个区域不整合相关岩溶与多期断层相关岩溶横向叠置、纵向交融形成三维空间规模巨大的缝洞系统,是塔中油气复式聚集形成大型碳酸盐岩凝析气藏的关键(张涛和蔡希源,2007;韩剑发等,2011).

2.1 不整合暴露相关岩溶

塔里木盆地上奥陶统礁滩复合体、中下奥陶统台内滩以及深层白云岩等碳酸盐岩在台地形成演化过程中,经历多期构造运动抬升暴露形成了大型碳酸盐岩潜山以及巨厚碳酸盐岩内幕不整合;同时,遭

受大气淡水的长期淋滤溶蚀,发生了多期次多类型的岩溶作用,形成了横向广泛展布的岩溶缝洞系统,成为油气富集的有利场所(钱一雄等,2007;张涛和蔡希源,2007;韩剑发等,2008)。

2.1.1 同生期短暂暴露礁滩岩溶 良里塔格组礁型地貌隆起和海平面相对变化以及准同生期大气淡水溶蚀、淋滤作用和岩溶作用是控制台缘礁滩体优质储集体发育的根本原因(图 2)。

受米级沉积旋回和海平面变化的控制,处于台地边缘的礁滩复合体形成的古地貌高地,伴随海平面暂时性相对下降,呈孤立岛状暴露于大气淡水成岩环境中,受到富含 CO_2 的大气淡水的淋滤,发生选择性和非选择性的淋滤、溶蚀作用,从而形成粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔以及溶缝和溶洞。

笔者根据微量元素测井钍钾比等同生期岩溶作用的识别标志,在塔中 I 号坡折带多数井的上奥陶统灰岩中发现有不同期次和不同程度的岩溶作用及大气成岩透镜体的发育。常出现于礁滩旋回顶部的颗粒灰岩中,并相应发育 4~5 期大气成岩透镜体(图 3),多期岩溶缝洞体纵向叠置、侧向加积,呈准层状分布。

2.1.2 表生期内幕不整合相关岩溶 中加里东运动使塔中地区整体抬升,中一下奥陶统鹰山组大面积暴露并长期遭受剥蚀,沉积间断超过 12 Ma,形成广泛分布的鹰山组不整合岩溶发育区。鹰山组顶部不整合面之下 150 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。

笔者根据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等因素的差异将不整合面向下划分为 4 个岩溶带,分别为表层岩溶带、垂向渗滤岩溶带、水平潜流岩溶带和深部缓流岩溶带。塔中地区鹰山组优质储集体主要发育在径流岩溶带,其次为垂向渗滤岩溶带,有效储集体呈准层状分布在不整合面之下 150 m 范围内(蔡忠贤等,2010)(图 4)。

古地貌不仅对沉积古地理的发育具有重要影响,对碳酸盐岩储集体的发育也具有明显的控制作用。古地貌决定了古降水流平衡面、地下水的深度与活动范围及水动力场大小,从而影响层间岩溶的深度、范围及强度。根据岩溶地貌的形态与特征,可将其划分为岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶洼地 3 个大单元。岩溶洼地岩溶作用相对较弱,储集体较为不发育。塔中隆起岩溶斜坡主要以水平层状岩溶为主,发育暗河管道系统,部分溶蚀垮塌和洞穴充填为主,储集体发育一般。岩溶次高地的剥蚀和溶蚀强度最大,主要以垂向溶蚀为主,发育大型落水洞等,岩溶储集体较为发育。

塔中地区早奥陶世鹰二段中晚期,海平面下降和多次暴露溶蚀造成鹰山组上部发育了多套高能滩体孔洞层,具有明显的相控性和层控性,且残存有较好的孔渗性能,为后期层间岩溶的发育奠定了基础。

晚奥陶世吐木休克组末期至良里塔格组沉积早期,构造隆升作用和海平面下降造成了上覆地层的剥蚀,并使得鹰山组再次暴露溶蚀,形成了典型的岩溶地貌和区域性不整合面,在不整合面附近顺层发育了大规模的层间岩溶储集体。

有效储集体主要分布在岩溶斜坡带,沿着断裂

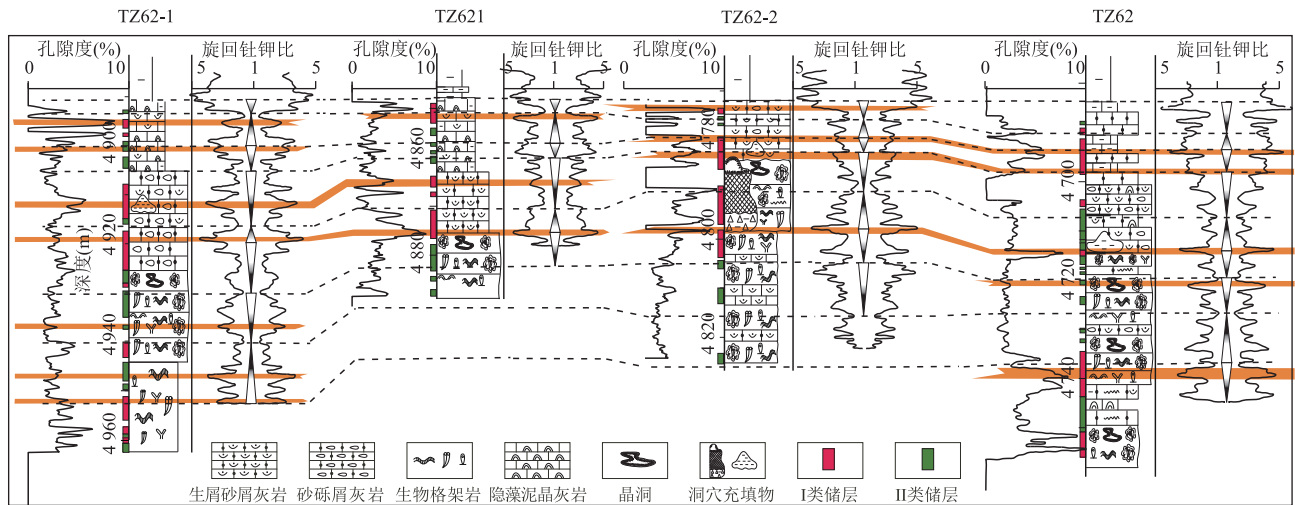


图 3 塔中礁滩复合体高频旋回建造与储集体对比

Fig.3 Comparison chart of Tazhong reef flat composite high-frequency cycle construction and reservoir body

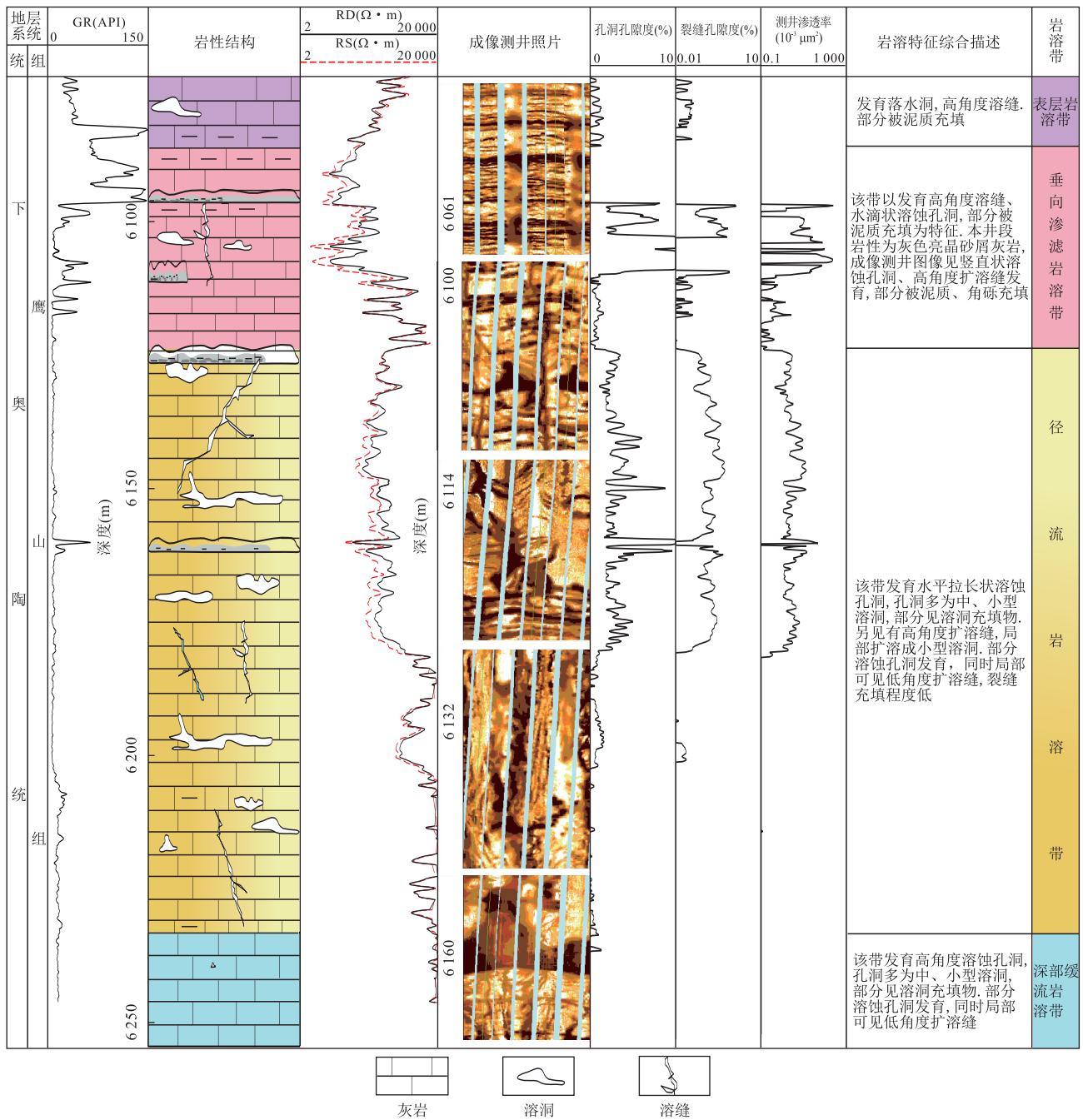


图 4 塔中鹰山组不整合相关岩溶及储集体发育剖面

Fig.4 Profile of karst related with unconformity of Yingshan Formation in Tazhong area and reservoir body development

走向的条带状区域层间岩溶作用的范围和深度可以得到进一步加强,随着良五段沉积时期的海侵,造成了海平面的上升和稳定潜水面的多次向上迁移,在纵向上旋回叠置了多套层间岩溶型储集体,先期的高能滩体孔洞层是其发育的重点层位,持续的海侵最终淹没了鹰山组顶部的缝洞系统,海侵沉积的低能泥质灰岩渗透率较低,为一套较好的盖层,与鹰山组层间岩溶缝洞型储集体构成了有利的储盖组合(韩剑发等,2008;鲁新便等,2015)。

2.2 断裂破碎带相关岩溶

将野外露头、成像测井、高精度三维地震与钻井资料结合(周文等,2011),并充分利用油气动态生产数据,实现了断层相关岩溶缝洞系统多学科动态一体化精细刻画及预测评价,其中,塔中隆起加里东期—海西期构造运动强烈,发育三期断裂体系,这些断裂及其破碎带,是断层相关岩溶缝洞系统形成与演化的关键。

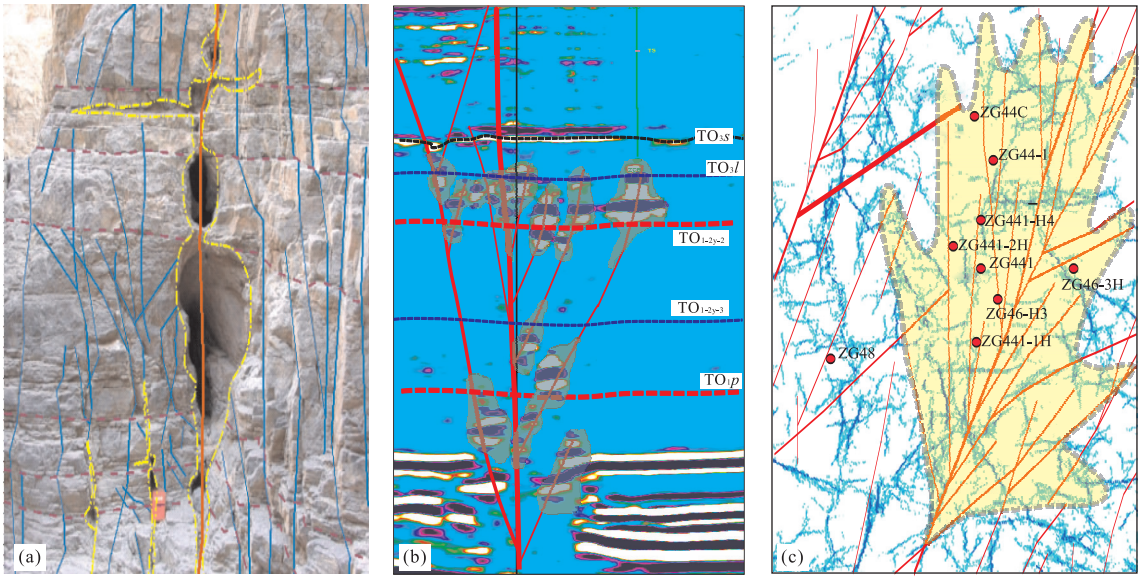


图 5 断层相关岩溶发育模式

Fig.5 Model of karst development related with fault

a.野外露头;b.地震剖面;c.缝洞系统发育

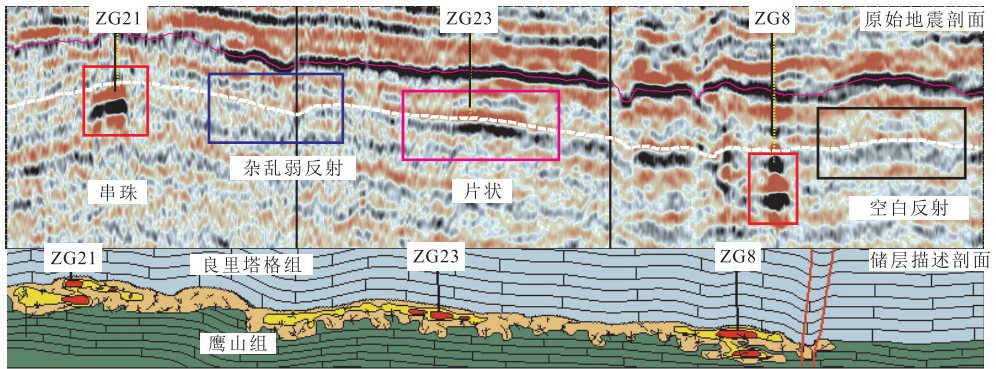


图 6 塔中地区储层地震反射类型特征剖面

Fig.6 Profile of reservoir seismic reflection characteristic in Tazhong area

表 2 塔中地区大气淡水胶结物的电子探针分析结果

Table 2 Electron probe analysis result of atmospheric fresh water cement in Tazhong area

井号	深度(m)	孔隙及胶结物	发光特征	常(微)量元素(10^{-6})						
				MgO	SrO	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	MnO	FeO
TZ24	4 690.8	砾间溶孔,刃状	不发光	1 170	0	0	0	0	0	0
TZ24	4 690.8	砾间溶孔,叶片状	不发光	1 720	0	770	60	0	0	280
TZ26	4 281.6	超大溶孔,叶片状	不发光	680	470	0	0	0	0	10
TZ44	5 017.1	窗格孔,细粒状,二期	不发光	770	0	10	0	0	660	0
TZ451	6 112.7	粒间孔,叶片状	不发光	560	450	610	0	0	0	220

根据塔里木盆地边缘野外露头奥陶系一间房组碳酸盐岩精细解剖,沿大型走滑断裂破碎带受多向流体作用发生大规模选择性溶蚀,纵向溶蚀带可达到 170 m 左右,同时,沿横向输导层对早期的溶蚀层段进行扩容,形成大规模的断层相关岩溶缝洞系统(图 5a)。

断层相关岩溶发育的关键是断裂破碎带纵向上具有接受浅地表淡水和深层热流体的优势,且断裂破碎带具有大面积与流体接触发生溶蚀的概率,泄流畅通便于深度溶蚀(韩剑发等,2008,2010);同时,沿断裂破碎带输导的流体可侧向运移对早期不整合相关

表 3 塔中地区奥陶系储层包裹体温度及成藏时期

Table 3 Reservoir enclosure temperature of Ordovician in Tazhong area and petroleum entrapment stage

地区	层位	晚加里东期	晚海西期	喜山期
TZ45 井区	O ₃	70~100 °C	90~125 °C	120~155 °C
TZ82 井区	O ₃	70~90 °C	110~130 °C	140~150 °C
TZ62 井区	O ₃	70~90 °C	90~120 °C	115~140 °C
TZ83 井区	O ₁	86~90 °C	100~120 °C	125~150 °C

缝洞系统进行扩溶,三维空间上形成以断裂为核心的岩溶储集体,即断裂相关岩溶缝洞系统(图 5b,5c)。

塔中地区奥陶系主要发育两组三期断裂:即早中加里东期塔中 I 号大型逆冲断裂,晚加里东期平行于 I 号断裂的伴生断裂,加里东期末期—海西早期走滑断裂。走滑断裂形成于挤压应力环境,切割早期主断裂及伴生断裂,北东走向为主,典型的构造样式有负花状构造、海豚效应、平行高陡断裂系。

构造破裂作用及其所形成的裂缝对碳酸盐岩储渗性能具有重要影响。裂缝对沟通孔隙提高储集体渗透率有明显作用;同时,也有利于孔隙水和地下水的活动,形成大型的孔洞缝系统,从而改善储集性能。埋藏期流体运移主要由深部高压区向浅部低压区的泄流,同时因构造挤压作用形成的高压区向低压区的泄流;垂向上主要沿断裂运移,侧向上沿主断裂周围的次级断裂、孔洞层发生侧向运移,以单向流为主,也有可能对流或环流(韩剑发等,2007)。

在中生代埋藏期,塔中 I 号断层附近构造活动较为强烈,发育大量的高角度缝、斜交缝或网状缝。伴随酸性水的进入,发生了多期的埋藏溶蚀作用,形成溶缝、串珠状溶孔、溶蚀孔洞,孔隙度增加约 2%,与先期残余孔洞一起构成新的储渗组合。多期构造破裂作用所形成的裂缝改善了储集体的渗流条

件,增加了储集体和微观孔隙结构的连通性,裂缝发育区的形成对高产油气井具有明显的控制作用。

2.3 叠合复合岩溶模式

2.3.1 叠合复合岩溶响应特征 岩心和成像资料上既有泥、砾充填的大型溶洞,又有均匀状的中小型溶蚀孔洞。地震剖面上既有代表好储层的串珠状强反射、片状强反射,也有代表小缝洞体的杂乱反射和弱反射(图 6)。

另外,在钻井过程中钻具放空、泥浆漏失、溢流、井喷,以及测井、测试等多学科动静态资料一体化研究揭示了塔中碳酸盐岩岩溶缝洞系统规模巨大、分布广泛,具有十分明显多成因多期次叠合复合特征。

2.3.2 叠合复合岩溶地质依据 依据碳酸盐岩台地演化历史和分析化验数据,笔者发现塔中隆起碳酸盐岩岩溶缝洞系统具有明显的多期次叠合复合特征。

同生期岩溶作用发生于同生期大气淡水成岩环境中,受次级沉积旋回和海平面变化的控制,伴随海平面暂时性相对下降,时而出露海面或出于淡水透镜体内,受到富含 CO₂ 大气淡水淋滤,发生选择性和非选择性的淋滤、溶蚀作用,形成大小不一,形态各异的各种孔隙。这些大气淡水胶结物在常(微)量元素的总体特征上,通常表现为 Mg、Sr 和 Na 低值,不含 Fe、Mn 或仅含少量的 Fe、Mn(表 2),反映了近地表氧化—弱氧化环境中的大气淡水作用。

表生期岩溶作用的发育与重大的海平面下降或构造运动造成的沉积区大面积暴露有关,常常对应的是不整合面,塔中地区奥陶系碳酸盐岩层系内部和顶面主要发育三期不整合,分别是中加里东期、晚加里东期、早海西期。

埋藏期岩溶作用主要发生于中—深埋藏阶段,主要表现为与有机质热演化成岩作用相联系的溶蚀作

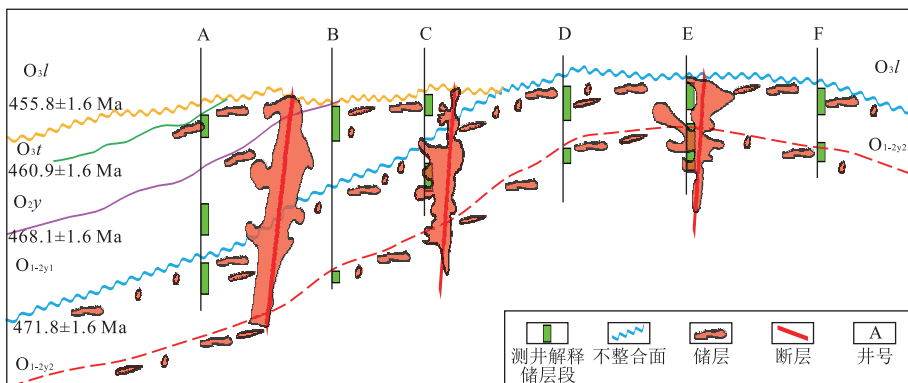


图 7 碳酸盐岩叠合复合岩溶缝洞系统发育模式

Fig.7 Carbonatite multiphase karst fracture and cave system superposition development mode

用现象及过程,塔中地区埋藏岩溶作用主要有三期,分别为加里东—海西早期、晚海西期和喜山期,储层盐包裹体均一化温度主要分布在 3 个区间(表 3),分别为 70~100 °C、90~125 °C、120~155 °C,与盐包裹体共生的烃类包裹体在加里东期主要为液相包裹体,发黄色荧光,数量少;晚海西期主要为气液两相包裹体,发黄色和黄绿色荧光,数量较多;喜山期主要为气态包裹体,这与油气成藏过程期次是一致的。

2.3.3 叠合复合岩溶发育模式 塔中地区规模巨大岩溶缝洞系统的形成主要受碳酸盐岩岩相特征、区域不整合、大型断裂系统、区域性碳酸盐岩不整合长期暴露并遭受大气淡水的淋滤,发生强烈的岩溶作用形成横向广泛展布的岩溶缝洞系统;同时,塔中隆起受区域应力作用经历多期断裂活动,断裂破碎带受大气淡水及深层烃类演化中产生的酸性流体等热液改造,发生强烈的岩溶作用形成纵向深度拓展的岩溶缝洞系统;地质演化过程中,与不整合暴露相关的岩溶和与断裂破碎相关的岩溶叠合复合,形成三维空间规模展布的大型岩溶缝洞系统(图 7),是油气复式成藏的关键。

风化壳岩溶型储集体首先是在同生风化岩溶的基础上,中奥陶—晚奥陶统吐木休克组时期,沿不整合面形成准层状分布的大规模缝洞储集体;良里塔格组沉积时期,礁滩体经多期暴露,形成多套孔洞层叠置,大气淡水作用对鹰山组储集体产生影响。后经加里东期至喜山期多期构造破裂和埋藏溶蚀作用进一步对储集体进行改造,最终形成了优质的风化壳岩溶型储集体。

在沉积相带控制的基础上,风化壳层间岩溶、热液岩溶以及构造作用等多种因素的作用使储集体的连通性变好。其中,古地貌控制的风化壳层间岩溶是储集体形成的最主要因素,构造变形作用产生断裂与裂缝提供了沟通通道,促进了溶蚀即岩溶作用的进行,有效地改善了储集体的储集性能,白云岩化则是本区鹰山组白云岩内幕型储集体发育的重要控制因素。因此,只有多种作用多期叠加改造才能形成纵向叠置、横向连片的优质碳酸盐岩储集体。

3 塔中隆起复式油气勘探

塔里木克拉通区经历了早—中寒武世缓坡型碳酸盐岩台地、晚寒武世—早中奥陶世弱镶边斜坡型碳酸盐岩台地、晚奥陶世早期孤立型碳酸盐岩台地和晚奥陶世中晚期淹没型碳酸盐岩台地的形成演变。塔

北、塔中、巴楚等古隆起发育了台缘礁滩复合体、巨厚碳酸盐岩内幕层间岩溶体以及深层白云岩等大型碳酸盐岩建造;伴随塔里木盆地叠合复合演化过程,这些碳酸盐岩建造遭受多期次多成因改造,广泛发育洞穴、裂缝和孔洞等缝洞型碳酸盐岩储集空间,储集性能十分优越。寒武系欠补偿盆地相和斜坡相泥岩及泥灰岩可作为主力烃源岩,经历了“早期成油、晚期气侵”的成藏演化,成为油气勘探的重要领域。

3.1 叠合复合岩溶分布规律

塔中隆起奥陶系碳酸盐岩经历了多期岩溶作用的叠加改造,形成了纵向叠置、横向连片、三维空间规模展布的大型岩溶缝洞系统,主要集中在良里塔格组、一间房组、鹰山组、蓬莱坝组。其中,良里塔格组礁滩复合体储层主要分布在塔中 I 号坡折带台缘,一间房组岩溶储层主要分布在塔中西部,鹰山组岩溶储层主要分布在塔中 10 号带,蓬莱坝组在塔中地区大面积分布。

3.2 叠合复合岩溶勘探领域

3.2.1 礁滩复合体勘探领域 通过对塔中地区奥陶系礁滩型储集体的储集体特征、储集体成岩主控因素以及纵横向分布特征的综合分析可评价预测该区有利储集区带。

塔中 I 号坡折带礁滩体位于台地边缘外带,针对礁滩复合体岩溶储集体(杨海军等,2007;韩剑发等,2012),形成了“沿台缘、钻礁滩”的勘探思路,揭示了塔里木盆地奥陶系礁滩体沿坡折带叠置连片的规模分布规律,已探明油气储量 1.38×10^8 t,是我国目前发现的最大的奥陶系生物礁油气藏。

研究表明塔里木盆地礁滩体有利面积为 1.58×10^4 km²,油气资源 $> 15 \times 10^8$ t,塔中隆起台缘礁滩体及台内丘滩体是有利的勘探领域。特别是,最新研究表明,寒武系深层发育玉尔吐斯组优质烃源岩,中深 1 井发现的油气可能为寒武系来源,因此,塔中地区油气源十分充沛,勘探潜力巨大(韩剑发等,2011; Zhu *et al.*, 2015)。

3.2.2 层间岩溶体勘探领域 下奥陶统鹰山组经过中加里东期构造抬升,地层遭受剥蚀溶蚀,在鹰山组顶部形成了典型的风化壳层间储集体,再加上后期构造改造和埋藏溶蚀作用,形成了优质的储集体。

通过对制约下奥陶风化壳层间储集体发育因素的综合分析,结合单井测井解释和试油成果,笔者对鹰山组风化壳层间储集体有利储集区带进行了预测,内幕不整合层间岩溶的创新丰富了古岩溶地质理论,形成了“锁定内幕不整合,优选层间岩溶区,钻探规模

缝洞体”的勘探思路,指导了中古8、中古43井区两个千亿方级凝析气田的探明,新增探明油气储量 3.46×10^8 t.同时,揭示了塔里木盆地层间岩溶勘探潜力巨大,埋深 <7500 m范围内有利面积 $>5 \times 10^4$ km²,油气资源 $>30 \times 10^8$ t,塔中西部一间房组与鹰山组勘探潜力巨大(韩剑发等,2012;Zhu *et al.*,2014).

4 结论

(1)塔里木大型叠合复合盆地与塔中隆起礁滩复合体、层间不整合、深层白云岩等碳酸盐岩建造,是形成碳酸盐岩优质岩溶储集体的地质基础;

(2)高频海平面变化、多期暴露遭受溶蚀与构造运动,是多期次多成因岩溶缝洞体叠合复合,横向广泛展布、纵向局部拓展的关键;

(3)塔中隆起碳酸盐岩储集类型主要为洞穴型、裂缝—孔洞型与孔隙型,叠合复合岩溶缝洞系统平面上集中分布于岩溶斜坡和断裂带附近,纵向上集中于不整合面200 m范围内;

(4)塔中隆起碳酸盐岩缝洞系统发育,成藏地质条件优越,资源潜力巨大,发现了我国奥陶系最大的碳酸盐岩凝析气田,新增探明油气储量 5.09×10^8 t;

(5)注重地质过程,突出多构造期次、多地质成因创建的碳酸盐岩岩溶缝洞系统叠合复合模式,对类似碳酸盐岩油气勘探开发具有重要指导意义。

References

- Cai, Z. X., Liu, Y. L., Liu, Q., 2010. The Appearance and Significance of Palaeo Drainage Systems Connection in the Top of Lower Middle Ordovician in Tahe Oilfield. *Geoscience*, 24 (2): 273—278 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. F., Mei, L. F., Yang, H. J., et al., 2007. Study on Oil and Gas Source and Migration Accumulation of Ordovician Carbonate Reef-Bank Complex in Central Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 18 (3): 426—435 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. F., Yu, H. F., Zhang, H. Z., et al., 2008. Characteristics of Hydrocarbon Enrichment in the Lower Ordovician Carbonate Rock Weathering Crust on the Northern Slope Zone of Tazhong Area. *Oil & Gas Geology*, 29 (2): 167—188 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. F., Xu, G. Q., Ju, Y., et al., 2010. Quantitative Prediction on Fractures and Its Development Law in Lianglitage Formation in Tazhong 54-Tazhong 16 Well Area, Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 45 (4): 1027—1037 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. F., Sun, C. H., Yu, H. F., et al., 2011. Kinetics of Reef-Shoal Complexes and Its Restriction to Reservoir in Ordovician from Tazhong I Fault Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (3): 845—856 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. F., Zhang, H. Z., Yu, H. F., et al., 2012. Hydrocarbon Accumulation Characteristic and Exploration on Large Marine Carbonate Condensate Field in Tazhong Uplift. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (3): 769—782 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. F., Wang, Q. L., Chen, J., et al., 2015. Carbonate Sequence Structure and Microfacies Distribution of the Middle and Lower Ordovician in Northwestern Tarim Basin. *Geoscience*, 29 (3): 599—608 (in Chinese with English abstract).
- Han, J. F., Ren, P., Chen, J., et al., 2016. Sedimentary Microfacies and Favorable Reservoir Distribution of Yingshan Formation in North Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 37 (1): 18—23 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. B., Hu, W. G., Wang, Y., et al., 2015. Characteristics and Development Practice of Fault-Karst Carbonate Reservoirs in Tahe Area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 36 (3): 347—355 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., Cai, L. G., 2006. Prospect, Main Problems and Countermeasures of Marine Oil and Gas Exploration in China. *Oil & Gas Geology*, 27 (6): 722—730 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Y. Z., 2011. Paleozoic Marine Petroleum Geology in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., 2007. Marine Oil and Gas Exploration in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Qian, Y. X., Conxita, T., 2007. Diagenesis Comparison between Epigenic Karstification and 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).
- Wang, Z. Y., Sun, C. H., Yang, H. J., et al., 2010. Formation Pattern of Upper Ordovician Reef-Bank Complex along the Tazhong Slopebreak I, Tarim Block, NW, China. *Acta Geologica Sinica*, 84 (4): 546—552 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. M., Yang, H. J., Wang, Q. H., et al., 2012. Geological Theory and Exploration Technology for Marine Carbonate Giant Condensate Field of Tazhong Uplift in Tarim Basin. Science Press, Beijing (in Chinese with Eng-

lish abstract).

Yang, H. J., Han, J. F., Chen, L. X., et al., 2007. Characteristics and Patterns of Complex Hydrocarbon Accumulation in the Lower Paleozoic Carbonate Rocks of the Tazhong Palaeoplift. *Oil & Gas Geology*, 28(6): 784—790 (in Chinese with English abstract).

Yang, H. J., Han, J. F., Sun, C. H., et al., 2011. A Development Model and Petroleum Exploration of karst Reservoirs of Ordovician Yingshan Formation in the Northern Slope of Tazhong Palaeoplift. *Acta Petrolei Sinica*, 32(2): 199—205 (in Chinese with English abstract).

Zhang, T., Cai, X. Y., 2007. Caledonian Paleo-Karstification and Its Characteristics in Tahe Area, Arim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(8): 1125—1134 (in Chinese with English abstract).

Zhou, W., Li, X. H., Jin, W. H., et al., 2011. The Control Action of Fault to Paleokarst in View of Ordovician Reservoir in Tahe Area. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2339—2348 (in Chinese with English abstract).

Zhu, G. Y., Yang, H. J., Su, J., et al., 2012. New Progress of Marine Hydrocarbon Geological Theory in China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 722—738 (in Chinese with English abstract).

Zhu, G. Y., Zhang, B. T., Yang, H. J., et al., 2014. Origin of Deep Strata Gas of Tazhong in Tarim Basin, China. *Organic Geochemistry*, 74: 85—97. doi: 10.1016/j.orggeochem.2014.03.003

Zhu, G. Y., Huang, H. P., Wang, H. T., 2015. Geochemical Significance of Discovery in Cambrian Reservoirs at Well ZS1 of the Tarim Basin, Northwest China. *Energy & Fuels*, 29: 1332—1344.

Zheng, J., Wang Z. Y., Yang, H. Y., et al., 2015. The Control Mechanism of Microtopography in the High Frequency Sequence Framework to Reef-Bank Complex Reservoir. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 942—956 (in Chinese with English abstract).

Zou, Y. R., Ta, J. G. L., Xing, Z. Y., et al., 2014. Evolution of Sedimentary Basins in Tarim during Neoproterozoic-Paleozoic. *Earth Science*, 39(8): 1200—1216 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡忠贤, 刘永立, 刘群, 2010. 塔河油田中下奥陶统顶面岩溶古水系对接现象及其意义. *现代地质*, 24(2): 273—278.

韩剑发, 梅廉夫, 杨海军, 等, 2007. 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. *天然气地球科学*, 18(3): 426—435.

韩剑发, 于红枫, 张海祖, 等, 2008. 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. *石油与天然气地质*, 29(2): 167—188.

韩剑发, 徐国强, 琚岩, 等, 2010. 塔中 54—塔中 16 井区良里塔格组裂缝定量预测及发育规律. *地质科学*, 45(4): 1027—1037.

韩剑发, 孙崇浩, 等, 2011. 塔中 I 号坡折带奥陶系礁滩复合体发育动力学及其控储机制. *岩石学报*, 27(3): 845—856.

韩剑发, 张海祖, 于红枫, 等, 2012. 塔中隆起海相碳酸盐岩大型凝析气田成藏特征与勘探. *岩石学报*, 28(3): 769—782.

韩剑发, 王清龙, 陈军, 等, 2015. 塔里木盆地西北缘中一下奥陶统碳酸盐岩层序结构和沉积微相分布. *现代地质*, 29(3): 599—608.

韩剑发, 任凭, 陈军, 等, 2016. 塔中隆起北斜坡鹰山组沉积微相及有利储集层展布. *新疆石油地质*, 37(1): 18—23.

鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等, 2015. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践. *石油与天然气地质*, 36(3): 347—355.

金之钧, 蔡立国, 2006. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策. *石油与天然气地质*, 27(6): 722—730.

康玉柱, 2011. 中国古生代海相油气地质学. 北京: 地质出版社.

马永生, 2007. 中国海相油气勘探. 北京: 地质出版社.

钱一雄, Conxita Taberner, 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.

王振宇, 孙崇浩, 杨海军, 等, 2010. 塔中 I 号坡折带上奥陶统台缘礁滩复合体建造模式. *地质学报*, 84(4): 546—552.

王招明, 杨海军, 王清华, 等编著, 2012. 塔中海相碳酸盐岩特大型凝析气田地质理论与勘探技术. 北京: 科学出版社.

杨海军, 韩剑发, 陈利新, 等, 2007. 塔中古隆起下古生界碳酸盐岩油气复式成藏特征及模式. *石油与天然气地质*, 28(6): 784—790.

杨海军, 韩剑发, 孙崇浩, 等, 2011. 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. *石油学报*, 32(2): 199—205.

张涛, 蔡希源, 2007. 塔河地区加里东中期古岩溶作用及分布模式. *地质学报*, 81(8): 1125—1134.

周文, 李秀华, 金文辉, 等, 2011. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用. *岩石学报*, 27(8): 2339—2348.

朱光有, 杨海军, 苏劲, 等, 2012. 中国海相油气地质理论新进展. *岩石学报*, 28(3): 722—738.

郑剑, 王振宇, 杨海军, 等, 2015. 高频层序格架内礁型微地貌特征及其控储机理——以塔中东部地区上奥陶统为例. *地质学报*, 89(5): 942—956.

邹亚锐, 塔吉古丽, 邢作云, 等, 2014. 塔里木新元古代—古生代沉积盆地演化. *地球科学*, 39(8): 1200—1216.