

塔里木盆地顺南地区中-下奥陶统深成岩溶特征

朱 秀¹,朱红涛¹,陈红汉¹,祁 磊¹,李培军¹,云 露²

[1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,湖北 武汉 430074;

2. 中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院,新疆 乌鲁木齐 830011]

摘要:基于热液运移通道低连续弱振幅和热液作用区高连续强振幅“串珠体”两种截然相反的地震反射特征,建立振幅地震属性分级-断裂体系解释-拾取-三维刻画-融合技术,有效刻画热液运移通道和热液作用区二者空间耦合关系,进而建立深成岩溶的发育模式。通过对塔里木盆地塔中 SN4 井鹰山组上段深成岩溶系统的刻画,认识到热液作用区(深成岩溶系统发育区)的形成与分布和热液运移通道系统具有密切关系。①热液运移通道系统一般由主干断裂、次生断裂以及横向输导层(近地表岩溶系统、孔隙层以及孔洞层)组成,其中主、次断裂合成树枝状形态构成垂向运移通道。深部热液先沿垂向运移通道运移,接着沿横向输导层运移,形成“纵横结合”的热液运移通道系统。②深部热液在次生断裂的顶部汇聚后加剧,沟通了先存的“单串珠”状的近地表岩溶系统,使得原先“单串珠”点状分布的近地表岩溶系统沟通演变成连片分布的“串珠体”深成岩溶系统,呈现“枝状疏导、层状分布、指状交互”特征。

关键词:单串珠;串珠体;发育模式;深成岩溶系统;奥陶系;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characterization of hypogenic karst systems in the Middle-Lower Ordovician of Shunnan area, Tarim Basin

Zhu Xiu¹, Zhu Hongtao¹, Chen Honghan¹, Qi Lei¹, Li Peijun¹, Yun Lu²

[1. Key Lab of Tectonic & Hydrocarbon Resource of Educational Ministry, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Institute of Exploration & Development, SINOPEC Northwest Petroleum Company, Urumqi, Xinjiang 830011]

Abstract: By contrasting two opposite seismic reflection features of hydrothermal conducting pathways (low continuity and weak seismic amplitudes) and hydrothermal zones (high continuity and strong seismic amplitudes) of data gathered from hypogenic karst systems in the Middle-Lower Ordovician of Shunnan area in Tarim Basin, we developed a new seismic characterization workflow consisting of seismic amplitude thresholding, fracture system interpretation, pick up, and merge display, to effectively describe the coupling relationship between spatial distribution of hydrothermal zones (hypogenic karst system' zones) and hydrothermal conducting pathways (fracture systems), and then to establish development modal of the hypogenic karsts. Characterization of the hypogenic karsts from the Yingshan Formation of Well SN4 in central Tarim Basin shows a close relationship between the formation and distribution of the areas affected by hydrothermal fluids and the migration pathways of the fluids. The migration pathway system is usually composed of primary and secondary faults, and lateral carriers (epigenic karst systems, porous layers and vuggy layers), among which, the primary and secondary faults together form vertical migration pathways. Fluids from the deep usually move upwards along the vertical pathways first and then flow along the lateral carriers—a criss-cross migration system. The accumulation of fluids from the deep at the top of the secondary faults makes it possible for the scattered epigenic karst systems of individual bead string type to communicate with one another and form a massive hypogenic karst system of “bead string complex” type with such features as branched carriers, layered distribution and interfingering bead strings.

Key words: individual bead string, bead string complex, development model, hypogenic karst system, Ordovician, Tarim Basin

碳酸盐岩从沉积、固结到深埋藏的过程中会经历 各种各样的成岩作用,从而形成不同性质的碳酸盐岩,

收稿日期:2016-04-06;修订日期:2016-08-20。

第一作者简介:朱秀(1992—),女,硕士研究生,层序地层学与沉积学。E-mail:1773610481@qq.com。

通讯作者简介:朱红涛(1976—),男,教授、博士生导师,层序地层学、沉积学与地震沉积学。E-mail:htzhu@cug.edu.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214804)。

具有不同的地震反射特征。对于岩溶系统的刻画,主要是基于地震相、地震属性和模型约束等技术^[1-4],分别在平面上和剖面上对岩溶储层进行识别、预测和含油气检测分析。张宏等^[1]通过地震相、地震属性和测井约束反演等主要技术手段对古岩溶缝洞型储层发育区带进行评价,评价出4个有利钻探目标。张进铎^[2]通过测井、地震属性体刻画及岩溶古地貌特征等手段实现了储层有利区带的划分与钻井位置的标定。李凡异等^[3]通过三维地震物理模拟技术,对岩溶地震响应的瞬时振幅、均方根振幅、分频振幅和纵波阻抗体等四种属性进行了三维雕刻,讨论了岩溶的“串珠状地震反射特征”的形成机理。王者顺等^[4]提出频率差异分析预测技术进行速度反演,分析塔河碳酸盐岩溶洞的地震响应。

根据岩溶系统的发育环境,可以将岩溶系统分为近地表岩溶系统和深成岩溶系统两大类。众多研究^[5-14]表明,深成岩溶系统的发育与深部热液流体的作用具有密切关系,热液运移通道系统作为沟通深部热液流体与上部地层的桥梁,研究其与热液作用区(深成岩溶发育区)的关系则显得尤为重要。然而,综合国内外的研究及进展,对于深成岩溶系统的刻画,更多体现在二维剖面和平面上的刻画,尤其是将热液作用区和热液运移通道分开刻画与描述,很少对二者同时进行三维时空展布的刻画,不能系统地展现深成岩溶系统的分布。研究区内塔中 SN4 井鹰山组上段泥晶灰岩与砂屑灰岩层段发育一系列的典型热液矿物(板条状石膏、热液石英和冰洲石),以及深成岩溶作用形成的蜂窝状残余孔隙,且过井地震剖面指示的“串珠体”反射特征与近地表岩溶系统“单串珠”反射特征也存在一定的差异,表明该地区地层岩溶系统受到了深成岩溶作用的改造,是开展深成岩溶系统刻画的有效试验场。同时,研究区也发育典型的近地表岩溶系统,通过开展近地表岩溶系统和深成岩溶系统对比工作,有助于建立深成岩溶系统的发育特征及模式。

因此,本文以塔里木盆地 SN4 井鹰山组上段深成岩溶系统为目标,提出一种基于振幅地震属性分级-断裂体系解释-拾取-三维刻画-融合技术刻画深成岩溶系统的新方法,直观、高效地展示了深成岩溶系统的热液运移通道系统和热液作用区的空间耦合关系,体现深成岩溶系统的系统性,对后期深成岩溶系统研究提供支持。在此基础上,进一步总结深成岩溶系统的发育模式,最后探讨深成岩溶系统的控制因素。

1 区域地质概况

顺南地区位于塔里木盆地中央隆起北斜坡南段,

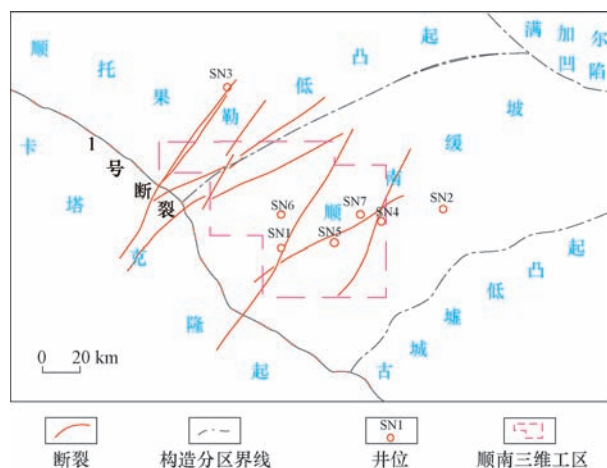


图1 塔里木盆地塔中顺南地区构造位置

(据参考文献[35],修改)

Fig. 1 Location of Shunnan area in the central Tarim Basin

西部以 I 号断裂带为界与卡塔克隆起相邻,北邻顺托果勒低凸起,南接古城墟低凸起,东部连通满加尔凹陷(图1)。该地区是塔里木盆地构造活动相对稳定和地层保存相对较全的地区之一,除部分缺失志留系与泥盆系外,其他古生界、中生界和新生界保存均较完整且分布广泛,其中奥陶系表现为一个东南高、逐渐向西北方倾没的单斜。

2 典型深成岩溶作用

深成岩溶(hypogenic karst)是指深部地层由于矿物脱水作用、有机质生烃作用、岩石变质和液化作用以及岩浆活动等释放的流体向上运移,与上部地层发生化学反应,改造原始岩石物性的一种成岩作用^[15-18]。深部流体往往具有高于原岩的温度和压力,在向上运移过程中,除了改造流经地层的岩石物性之外,还因温压条件的改变以及与围岩的相互作用,常常沉淀出一些特殊的矿物,这些矿物是指示深成岩溶作用的重要线索^[19]。

通过对该地区多口单井进行岩心观察、薄片鉴定和扫描电镜分析,在 SN4 井鹰山组上段泥晶灰岩层段(深度为 6 669.47 m)和砂屑灰岩层段(深度为 6 670.44~6 672.98 m)发现多种典型热液矿物沉淀,有板条状石膏、热液石英、冰洲石,以及深成岩溶作用形成的蜂窝状残余孔隙(图2)。板条状石膏的形成,表明流体的来源很有可能来自于中下寒武统含膏碳酸盐岩地层,或者流体在向上运移的过程中混合了该层段的地层水。热液石英和大量硅质条带的形成表明热流体中富含硅质。冰洲石是低温热液流体在温度降低和 pH 值增加的情况下析出的一种透明方解石,具有一定的热液指示意义^[20]。上述一系列的证据表明

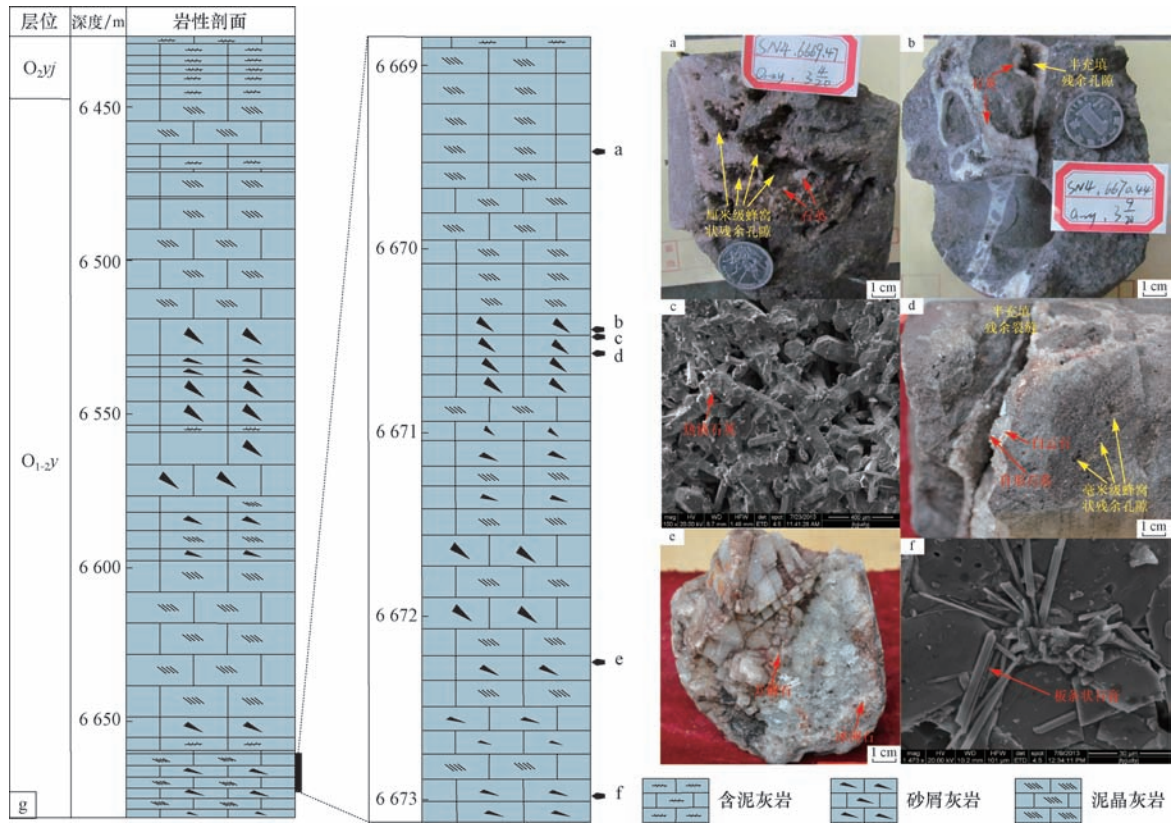


图2 顺南地区SN4井中-下奥陶统岩心及扫描电镜照片

Fig. 2 SEM photos of core samples from the Middle – Lower Ordovician in Well SN4 in Shunnan area

- a. SN4井, $O_{1-2}y$, 埋深6 669.47 m, 岩心照片, 深成岩溶作用形成的厘米级蜂窝状残余孔隙; b. SN4井, $O_{1-2}y$, 埋深6 670.44 m, 岩心照片, 沿裂缝发育的硅质胶结物以及半充填的残余孔隙; c. SN4井, $O_{1-2}y$, 埋深6 670.48 m, 扫描电镜照片, 热液石英; d. SN4井, $O_{1-2}y$, 埋深6 670.57 m, 岩心照片, 半充填残余裂缝以及毫米级蜂窝状残余孔隙; e. SN4井, $O_{1-2}y$, 埋深6 672.25 m, 岩心照片, 冰洲石; f. SN4井, $O_{1-2}y$, 埋深6 672.98 m, 扫描电镜照片, 板条状石膏; g. 中-下奥陶统岩心岩性剖面

SN4井鹰山组上段地层岩溶系统受到过深部热液的改造。

3 近地表岩溶系统和深成岩溶系统地震反射模式

“串珠状”地震反射特征在碳酸盐岩地层中常常被作为溶洞型储集体的特殊响应,可能对应单个溶洞,也可能对应多个溶洞组成的联合洞穴^[3,21-22]。在塔中顺南三维地震工区内,通过不同方向过井地震剖面,发现研究区内发育有大量异常地震反射特征,呈现“单串珠”或“串珠体”的形态。研究表明“单串珠”地震反射特征反映近地表岩溶系统,主要发育在顺南地区中-下奥陶统鹰山组下段,“串珠体”地震反射特征与深成岩溶系统有关,广泛分布在鹰山组上段。

3.1 近地表岩溶系统地震反射模式

顺南地区中-下奥陶统鹰山组下段发育典型的近地表岩溶系统。在过SN6井与SN5井地震剖面上呈现典型的“单串珠”地震反射特征(图3a)。“单串珠”

反射往往由多个纵向叠置的蠕虫状短轴强振幅组成,形似“串珠”,其纵向比例大于横向比例,与围岩平行-亚平行反射形态有明显差异,为潜在岩溶洞穴、高孔隙度储层或富集油气储层。

碳酸盐岩地层中裂缝与孔洞发育时,流体的充填会导致地震波的散射,表现为较强的均方根振幅异常^[23]。在平面上,顺南地区鹰山组下段近地表岩溶系统对应的RMS振幅异常呈现出孤立的斑点状分布且发育广泛,表明该段近地表岩溶系统最为发育(图3b)。

3.2 深成岩溶系统地震反射模式

SN4井鹰山组上段发育典型的深成岩溶系统。在过SN4井鹰山组上段地层的地震剖面上主要表现为“串珠体”强反射地震特征,相比于近地表岩溶系统的“单串珠”地震反射特征,深成岩溶系统“串珠体”强反射的规模要更大、特征更明显。连片分布的“串珠体”强反射由两个及两个以上的“单串珠”反射横向平行展布而成,呈准层状分布(图4a)。其次,深成岩溶系统的分布范围与断裂体系密切相关,主要表现为两个

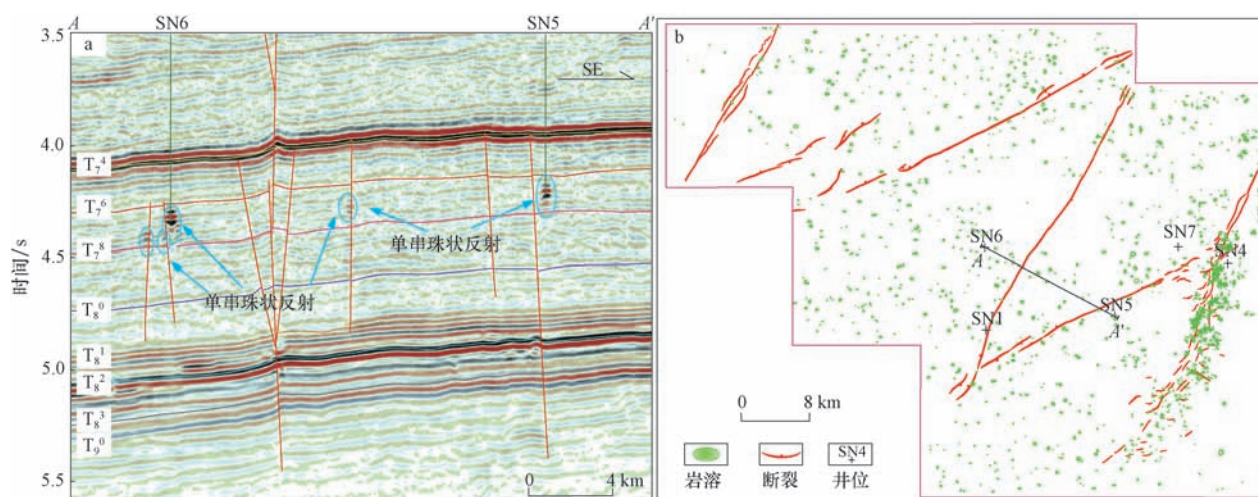


图3 顺南地区鹰山组下段过 SN6 与 SN5 井呈“单串珠”反射特征的近地表岩溶系统(a)
以及 RMS 图指示的呈孤立的斑点状分布的近地表岩溶系统(b)

Fig. 3 “Individual bead string” seismic reflections of epigenic karst systems across Well SN6 and SN5 (a) and isolated epigenic karst systems (b) in the Lower Yingshan Formation, Shunnan area

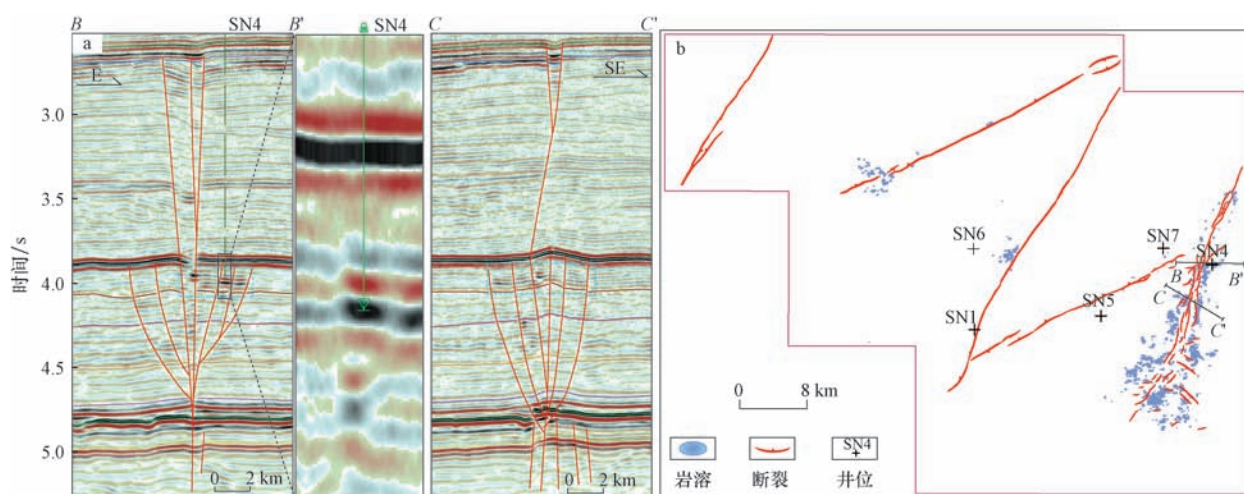


图4 顺南地区鹰山组上段过 SN4 井呈“串珠体”反射特征的深成岩溶系统(a)
以及 RMS 图指示的沿断层走向带状分布的深成岩溶系统(b)

Fig. 4 “Bead string complex” seismic reflections of hypogenic karst systems across Well SN4 (a) and the hypogenic karst systems in banded distribution along fault strike (b) in the Upper Yingshan Formation, Shunnan area

方面:①剖面上,连片分布的“串珠体”强反射断开的位置,往往对应于断层的发育位置,且“串珠体”强反射一般发育在次生断裂的顶部(图4a);②平面上,深成岩溶系统呈现带状分布,横向上具有一定的连续性,且主要沿 NE 向断裂体系分布,表明深成岩溶系统和深部断裂活动存在密切关系(图4b)。

4 顺南地区深成岩溶系统地震刻画

地下任何地质体及其性质的变化都将引起其地震响应信息发生相应的变化,因此,利用常规地震剖面反射特征来识别岩溶系统具有可行性^[24-30]。深成岩溶系统热液作用区和热液运移通道系统对应不同的内部

地震反射特征。热液作用区成层性好,表现为“串珠体”强反射,热液运移通道系统往往对应断裂系统和横向输导层,连续性较差,振幅强度也相对较弱。

4.1 深成岩溶系统地震刻画方法

针对上述状况,基于热液作用区(串珠体强振幅、高连续地震反射)和热液运移通道(低连续地震反射)具有不同的地震反射特征这一特点,本次研究采用新的思路,将热液作用区和热液输导通道系统分开刻画与描述,然后进行二者刻画结果的融合显示,形成一套热液作用区振幅地震属性分级显示-热液运移通道断裂体系解释-拾取-三维刻画-融合显示的方法与流程(图5),直观展现热液作用区和热液运移通道系统

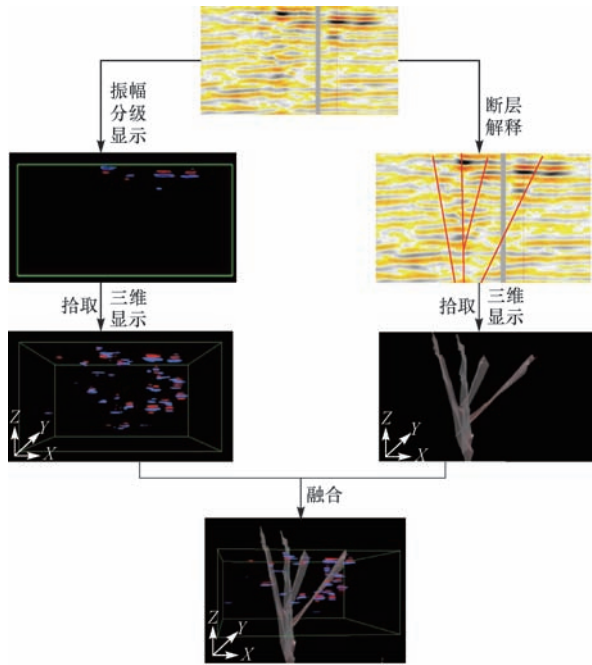


图 5 深成岩溶系统地震刻画方法流程

Fig. 5 Workflow of seismic characterization of hypogenic karst systems

的形态、空间展布及二者空间耦合关系。

1) 基于三维地震数据与钻井资料约束下,开展

测井 - 地震联合对比,综合开展深成岩溶系统的测井相和地震相分析;通过不同地震测线的地震相分析,分析深成岩溶系统发育区及其伴生的断裂体系的特征。

2) 深成岩溶作用区三维刻画。基于深成岩溶系统作用区强振幅特征,具体开展:①通过 RMS 属性提取技术,确定振幅分级标准,定义深成岩溶系统相对应的振幅值范围,关键是确定其最小值;②对原始三维地震数据进行三维振幅分级显示,仅显示大于深成岩溶系统最小振幅值的振幅部分;③对分级显示结果进行体素拾取,自动追踪得到深成岩溶系统的时空展布。

3) 热液运移通道断裂体系的解释、拾取及三维显示。

4) 将拾取的深成岩溶系统作用区和热液运移通道断裂体系融合显示,实现深成岩溶系统的三维时空展布刻画。

4.2 深成岩溶系统地震刻画结果

通过上述刻画方法,可以获取一系列热液运移通道系统和热液作用区的空间配置关系,从不同角度分析二者之间的耦合关系(图 6)。

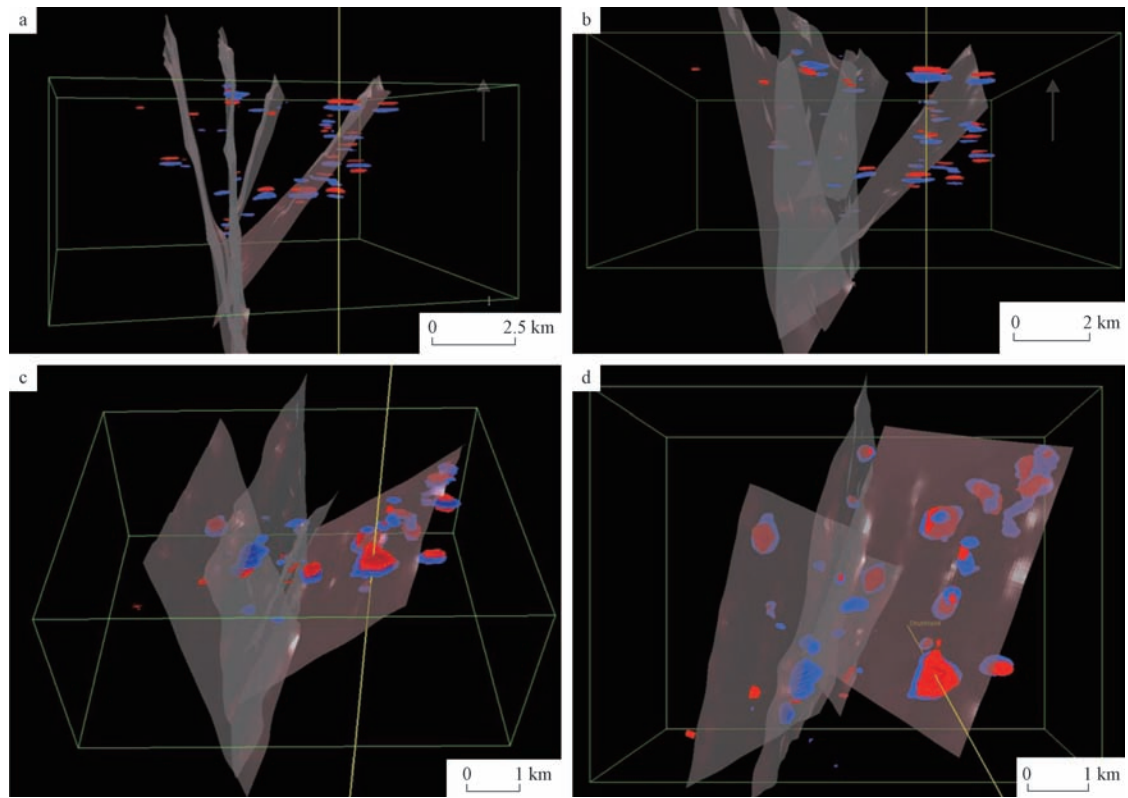


图 6 顺南地区鹰山组深成岩溶地震刻画结果

Fig. 6 Characterization of hypogenic karst systems in Shunnan area

a. 鹰山组上段与下段深成岩溶分布叠合图;b. 深成岩溶分布侧视图;
c. 深成岩溶分布斜视图;d. 深成岩溶分布俯视图

热液运移通道系统一般由主干断裂、次生断裂以及横向输导层组成,主干断裂与次生断裂合成树枝状形态构成垂向运移通道。横向输导层主要由不整合面、风化壳岩溶系统、孔隙层以及孔洞层等先存渗透层构成(图6a)。主干断裂以垂向断裂体系为主,粗大集中,截面呈圆形或椭圆形。次生断裂具有垂直、水平以及弯曲不定的向多个方向发散的构造形态,截面形态大小不一(图6b)。

热液作用区一般发育在热液运移通道系统次生断裂的顶部,热液在此汇聚后形成的深成岩溶系统加剧和沟通了先存的“单串珠”近地表岩溶系统,使得近地表岩溶系统由原来“单串珠”点状分布沟通与连片,演变成“串珠体”深成岩溶系统。因此,深成岩溶系统总体呈现水平和层状分布,且横向上具有一定连续性,同时形成于不同次生断裂顶部的深成岩溶系统相互融合与贯通,使得层状分布特点更加明显(图6a—c)。另一方面,形成于相同次生断裂顶部不同位置的深成岩溶系统表现出明显的振幅异常特征,由上往下振幅逐渐减小,由中心向两边振幅逐渐减小,表明在热液汇集区,侧向蚀变范围最大,向下蚀变范围逐渐减小(图6c,d)。在地震相上,表现为断层两侧的强振幅属于相同同相轴。

5 顺南地区深成岩溶系统发育模式

热液流体蚀变的3个要素:岩浆提供热源及部分矿物离子,围岩提供流体中绝大部分成矿物质;断裂是重要运移通道,尤其是张性断层和走滑断层;大气淡水及地层水提供大部分流体来源。

通常情况下,走滑断裂或者张性断层及其伴生的

断裂体系将是热液垂向运移的重要通道。在横向上,先存的不整合面及近地表岩溶系统是热液横向运移的重要通道。同时,先存的孔隙层、孔洞层和、层理等导流层也将是热液横向运移的重要通道。顺南地区鹰山组下段碳酸盐岩地层沉积后,并未发生强烈构造抬升剥蚀,因此并未发育大型地层不整合。但是随着海平面的下降,该区长期处于一个暴露的地表环境,为近地表岩溶系统在该区的发育提供了良好的地质条件,测井资料显示近地表岩溶系统对砂屑灰岩物性改造非常明显。此外,早期表生岩溶作用产生的溶洞体系将被后期埋藏压实作用部分破坏,而其残余空间往往是埋藏热液溶蚀流体进入储层的优势通道,继而发生溶蚀改造扩大溶洞空间。因此,断裂体系、近地表岩溶系统、孔隙层、孔洞层、层理和残留的溶洞体系都是热液优先选择的运移通道。

通过对深成岩溶系统进行3D刻画及分析,认为“主次断裂”构成垂向断裂体系,对深成岩溶作用的发育均具有积极的意义:深部热液先沿多级断裂向上“枝状疏导”,然后沿先存渗透层横向运移,表现为沿“层状分布”,在横向运移时发生选择性溶蚀,形成典型的“指状交互”特征。即在“纵横结合”的热液运移通道上发育的深成岩溶系统总体呈现“枝状疏导、层状分布、指状交互”特征(图7)。

1) “枝状疏导”特征:裂缝和断层是热液垂向运移的重要通道,主干断裂与次生断裂组合成树枝状形态,形成多个枝状疏导的泄压系统。主干断裂是渗流通道的“树干”,次生断裂是热液扩散通道的“树枝”,在次生断裂的顶部砂屑灰岩层段热液汇集区形成的溶蚀孔洞、白云岩化储层则为“树叶”。

2) “层状分布”特征:沿次生断裂运移的热液,在

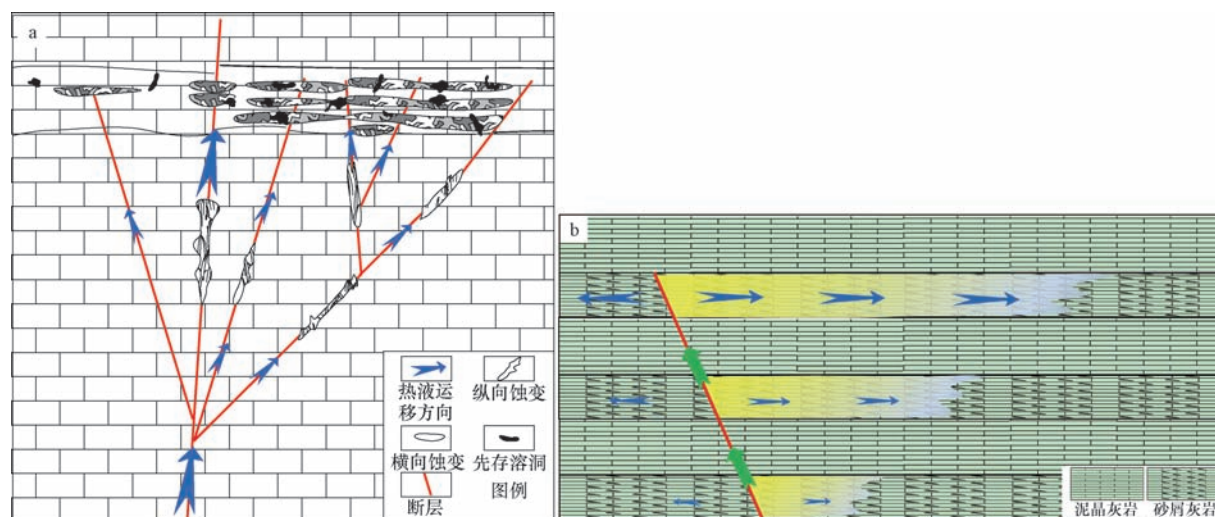


图7 顺南地区鹰山组深成岩溶系统发育模式

Fig. 7 Development pattern of hypogenic karst systems in the Yingshan Formation, Shunnan area

a. 深成岩溶系统发育模式;b. “指状交互”式深成岩溶系统

次生断裂顶部汇集,形成封闭区,这些热液开始优势选择横向运移通道,沿近地表岩溶系统、孔隙层、孔洞层、层理和残留的溶洞系统侧向运移,在热液横向运移通道上形成的层状分布的溶蚀孔洞系统。此外,不同的次生断裂所形成的层状分布溶蚀孔洞系统融合与贯通,加剧了溶蚀孔洞系统的层状分布特点。

3) “指状交互”特征:热液蚀变具有明显的岩性及组构选择性,主要表现为热液在次生断裂体系顶部汇集后,在横向上会发生选择性的溶蚀,优先蚀变亮晶砂屑灰岩,泥晶灰岩则不发生明显的蚀变。蚀变的亮晶砂屑灰岩与未蚀变的泥晶灰岩表现为互层、交替出现,随着横向热液流动范围的增大,以及温度的降低,压力与浓度等条件的变化,蚀变强度越来越弱。同时,在热液汇集区,侧向蚀变范围最大,向下蚀变范围逐渐减小。蚀变层与围岩形成典型的指状交互特点。

在深成岩溶系统“主次断裂、枝状疏导、纵横结合、层状分布、指状交互”发育模式控制下,溶蚀孔洞系统自下而上一般可分为下部带、过渡带和上部带。下部带以沿主干断裂通道分布的垂向管道洞穴为主,粗大集中,截面呈圆形或椭圆形。过渡带具有垂直、水平、弯曲不定的向多个构造方向发散的管道洞穴形态。上部带,次生断裂顶部的热液汇集区,受先存横向分布的导流层控制,出现水平形态的溶蚀孔洞层。这3个带总体上呈现出下直、干粗、上部弯曲发散和顶部近水平的树状洞穴系统。

因此,在塔里木深部碳酸盐岩储层的勘探过程中,应充分重视挤压背景下张性断裂的发育及其热流体疏导效应,如走滑断裂强烈活动地带。同时应着重注意多期不同性质流体的叠加改造效应,这些区域可作为优选勘探目标。

6 深成岩溶系统控制因素

6.1 深成岩溶系统与断裂体系耦合关系

顺南地区主要经历4期构造运动,即加里东早期、加里东中期、加里东晚期—海西早期和海西晚期。加里东早期构造应力作用强度相对适中,加里东中期和加里东晚期—海西早期这两期构造运动相对最强烈,海西晚期构造活动相对最弱。在多期构造作用叠加作用下,顺南地区断裂垂向上具有明显的阶段性,多期断裂在不同的层位表现出不同的构造样式特征。

顺南地区鹰山组下段碳酸盐岩地层沉积后,随着海平面的下降,该区长期处于一个暴露的地表环境,尽管没有遭受构造抬升剥蚀,但为近地表岩溶系统在该区的发育提供了良好的地质条件(图3b)。受加里东中期I幕强烈的构造应力作用,塔中北坡位于I号断

裂下降盘,在中奥陶世末鹰山组 and 一间房组沉积结束后并没有暴露地表,因此近地表岩溶系统在鹰山组上段基本不发育,主要发育的深成岩溶系统集中在SN4走滑断裂带(图4b)。

鹰山组深成岩溶系统沿SN4走滑断裂带分布,这可能与构造活动和先存近地表岩溶系统两部分有关。

走滑断裂的性质和碳酸盐岩的岩石物性特征决定了在碳酸盐岩地层中,压扭性走滑断裂比张扭性走滑断裂控制的构造裂缝带宽且更发育^[31]。顺南地区加里东中期I幕压扭性走滑断裂活动形成了NEE向和NE向两组走滑断裂带。其中NEE向走滑断裂带活动较弱,断裂规模较小,且在后期基本未发生继承性。NE向走滑断裂切穿层位多,向下多切穿至基底震旦系,基底之下的热液流体可沿走滑断裂进入上覆地层,并与奥陶系碳酸盐岩发生交代作用,有利于埋藏溶蚀作用的进行。

SN4断裂带局部地区在加里东晚期—海西早期的强烈张扭断裂的下切作用影响下,中-下奥陶统中早期的正花状断裂发生构造反转,形成张性正断层,重新开启后,形成极易流体运移的垂向断裂输导体系。其他走滑断裂带由于构造带较窄且断裂发育不丰富,在后期张扭性应力作用下,中-下奥陶统中仅局部主干断裂发生构造反转,次生断裂基本不发育。相应地,走滑断裂带中-下奥陶统中深成岩溶系统基本不发育。

除此之外,其他走滑断裂带由于近地表岩溶系统不发育,并未形成大规模沿断裂带发育的深成岩溶系统,由此推断,先存的近地表岩溶系统是发育深成岩溶系统的优势区。

由此可知,深成岩溶系统发育与SN4断裂带内部构型具有非常好的耦合关系。平面上主要沿SN4断裂带发育,垂向剖面上受走滑断层分层性控制,发育多个层段,且以鹰山组上段为主;侧向上主要受先存渗流带,即近地表岩溶系统的影响。

6.2 深成岩溶系统与古地貌耦合关系

古地貌形态(高程和地形起伏状况)对岩溶系统的形成与展布起着决定作用。根据鹰山组古地貌特征,可以划分为:台内低洼、低洼边缘缓坡和低洼边缘局部高地。

鹰山组下段古地貌形态整体较为平缓,台内低洼范围较小,主要为低洼边缘缓坡与低洼边缘局部高地。由于地貌平缓,近地表岩溶系统分布广泛,从洼陷边缘局部高地、边缘缓坡到台内低洼,近地表岩溶系统规模、数量逐渐减小、减少;深成岩溶系统受断裂体系和先成的近地表岩溶系统控制,主要发育在岩溶斜坡和岩溶高地(图8)。相对于示鹰山组下段古地貌形态,

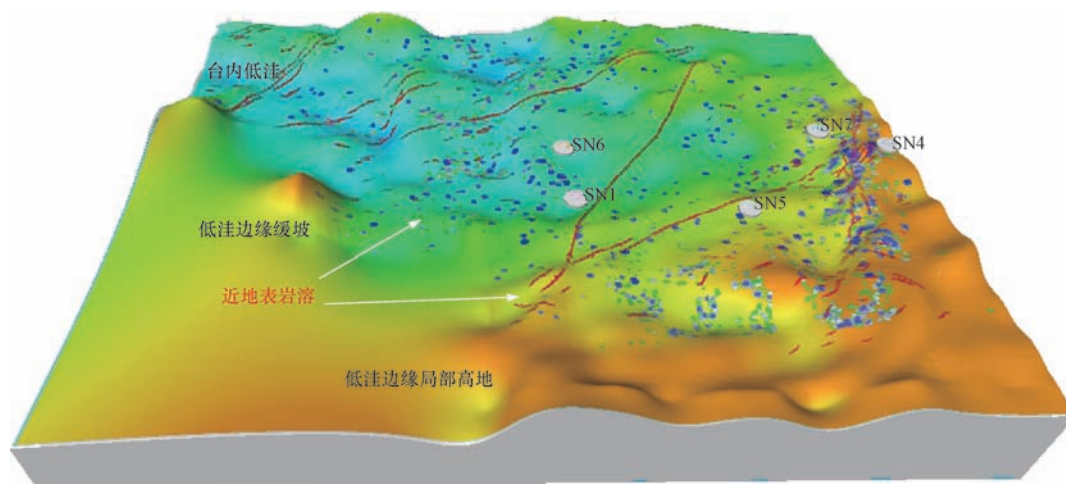


图8 顺南地区鹰山组下段近地表岩溶系统与古地貌叠合图

Fig. 8 Overlay of the paleo geomorphology and epigenic karst systems in the Lower Yingshan Formation in Shunnan area

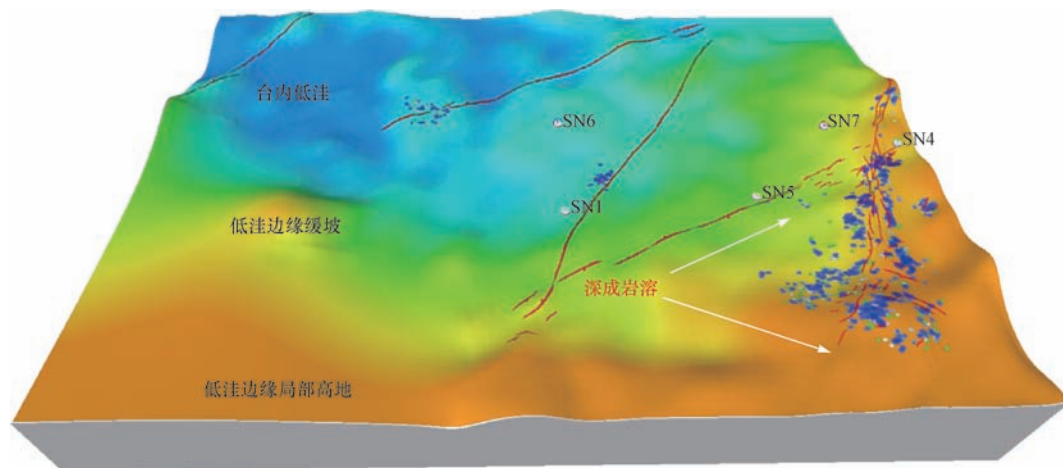


图9 顺南地区鹰山组上段深成岩溶系统与古地貌叠合图

Fig. 9 Overlay of the paleo geomorphology and hypogenic karst systems in the Upper Yingshan Formation in Shunnan area

鹰山组上段古地貌形态进一步变陡(图9),地貌单元更加清晰,表现为台内低洼范围扩大,岩溶缓坡带相对不发育,岩溶高地带较为发育。鹰山组上段近地表岩溶系统相对不发育,零星分布在台内低洼和岩溶边缘缓坡带。受断裂作用控制,深成岩溶系统较为发育,主要发育在低洼边缘局部高地。

综上所述,研究区近地表溶系统主要分布于低洼边缘局部高地和低洼边缘缓坡,少量分布于台内低洼。这些古地貌单元中容易发育大量的连通性较好的溶蚀孔洞,因此,它不仅为原来较为致密的碳酸盐岩提供了大量的有效储集空间,并且为后期的深成岩溶系统热液作用提供了溶蚀空间与通道。

6.3 岩溶系统与沉积相耦合关系

据前人研究成果^[32-35],顺南地区中-下奥陶统主要是一套海相碳酸盐台地沉积,整体上是一个水体逐渐加深、水动力由强变弱的沉积过程。蓬莱坝组至鹰山组是一个典型的海进式台地相的沉积序列,由蓬莱

坝组的局限台地相纯白云岩段沉积向上逐渐为灰质云岩与云质灰岩,最后变成鹰山组上段的开阔台地相的颗粒灰岩与泥晶灰岩沉积。说明当海水受到海底地势的阻隔作用与外海不畅通时,海水的含盐度有所增高,由于当时水体较浅,水体局部流通不畅,因此形成局限台地的沉积环境,并发育微晶泥质白云岩与白云质泥岩。随着海平面的逐渐上升,局限台地内部的水体较为流畅,此时沉积少量灰岩,呈层状夹于白云岩中,出现灰质白云岩与灰岩的交互沉积。当海平面进一步上升,水体逐渐加深,台地内海水的盐度与水体能量等趋于正常,因而产生大量灰岩沉积,出现白云质灰岩。当海平面再进一步上升,逐渐沉积灰岩。这使原来的局限台地环境逐渐变为开阔台地环境,其沉积序列为较明显的海进式沉积序列。

顺南地区鹰山组沉积时期,早期均为台内喀斯特平原相(LST),中-晚期为台坪相(TST-HST),每个层序不同的体系域内都存在一定数量的台内滩。台内滩一般发育在局部极浅水的微地貌高地上^[36-38]。从

岩溶系统与这些台内滩的耦合关系来看,台内滩发育区域,深成岩溶系统和近地表岩溶系统也相对较发育。

7 结论

1) 明确近地表岩溶系统和深成岩溶系统的地震反射特征及差异,建立近地表岩溶系统“单串珠”和深成岩溶系统“串珠体”地震反射模式。深成岩溶系统“串珠体”强反射,由两个及两个以上“单串珠”反射横向平行展布而成,呈准层状分布,平面上则沿断裂体系带状分布的特点。

2) 在“纵横结合”的热液运移通道上发育的深成岩溶系统总体呈现“枝状疏导、纵横结合、层状分布、指状交互”的发育模式。深部热液先沿垂向断裂体系(主次断裂)运移,然后开始沿横向输导层(近地表岩溶系统、孔隙层以及孔洞层)运移,形成“纵横结合”的热液运移通道系统,深部热液在次生断裂的顶部汇聚后加剧、沟通了先存的“单串珠”状的近地表岩溶系统,使得原先“单串珠”点状分布的近地表岩溶系统沟通、连片演变成“串珠体”深成岩溶系统,总体呈现“枝状疏导、层状分布、指状交互”特征。

3) 探讨深成岩溶系统与断裂体系、古地貌以及沉积相等控制因素的耦合关系,建立多成因控制下的深成岩溶发育模式。断裂体系和裂缝是热液垂向运移的重要通道,也是首要控制因素,先存的近地表岩溶系统残余空间是热液溶蚀流体优势汇聚区,不整合面、风化壳、孔隙层、孔洞层、层理和砂屑灰岩层等导流层是热液横向运移的重要通道和溶蚀空间。

参 考 文 献

- [1] 张宏,郑茂茂,杨道庆,等.塔中卡塔克区块古岩溶储层地震预测技术[J].石油学报,2008,29(1):69-74.
Zhang Hong, Zheng Junmao, Yang Daoqing, et al. Prediction of paleo-karst reservoir in the southeastern slope of Tazhong area in Tarim Basin using seismic techniques[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 69-74.
- [2] 张进铎.碳酸盐岩储集体积量化估算技术[J].石油勘探与开发,2004,31(4):87-88.
Zhang Jinyi. A method to quantitatively calculate the volume of carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(4): 87-88.
- [3] 李凡异,魏建新,狄帮让,等.碳酸盐岩溶洞的“串珠”状地震反射特征形成机理研究[J].石油地球物理勘探,2012,47(3):386-391.
Li Fanyu, Wei Jianxin, Di Bangrang, et al. Formation mechanism research for bead-like seismic reflection of carbonate caves[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(3): 386-391.
- [4] 王者顺,王尚旭,唐文榜.塔河碳酸盐岩溶洞油藏的地震响应及频率差异分析[J].石油与天然气地质,2004,25(1):94-98.
Wang ZheShun, Wang Shangxu, Tang Wenbang. Seismic response and frequency difference analysis of cavern-type reservoirs in carbonate in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 94-98.
- [5] Eichhubl P, Davatzes N C, Becker S P. Structural and diagenetic control of fluid migration and cementation along the Moab fault, Utah[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(5): 653-681.
- [6] Davison I. Faulting and fluid flow through salt[J]. Journal of the Geological Society, 2009, 166(2): 205-216.
- [7] Frankowicz E, McClay K R. Extensional fault segmentation and linkages, Bonaparte Basin, outer North West Shelf, Australia[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(7): 977-1010.
- [8] 汤良杰.塔里木盆地走滑断裂带与油气聚集关系的探讨[J].地球科学,1992,17(4):403-410.
Tang Liangjie. The relation of the belt of the strike-slip fault and oil/gas accumulation[J]. Earth Sciences, 1992, 17(4): 403-410.
- [9] 魏国齐,贾承造,姚慧君.塔北地区海西晚期逆冲-走滑构造与含油气关系[J].新疆石油地质,1995,16(2):96-101.
Wei Guoqi, Jia Chengzao, Yao Huijun. The relation of thrust-strike slip structure and hydrocarbon potential in late of Hercynian in north area of Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1995, 16(2): 96-101.
- [10] 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(S1):48-54.
Lv Xiuxiang, Yang Ning, Zhou Xinyuan, et al. The controlling effect of carbonate fault system on reservoirs in Tarim Basin[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 38(S1): 48-54.
- [11] 吴晓智,李佰华,吕修祥,等.库车前陆盆地走滑断裂形成机理及其对油气的控制[J].新疆石油地质,2010,31(2):118-121.
Wu Xiaozhi, Li Baihua, Lv Xiuxiang, et al. Strike-slip fault system in Kuqa foreland basin and its control on hydrocarbon[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(2): 118-121.
- [12] 郭光辉,成丽芳,刘玉魁,等.塔里木盆地寒武-奥陶系走滑断裂系统特征及其控油作用[J].新疆石油地质,2011,32(3):239-243.
Wu Guanghui, Cheng Lifang, Liu Yukui, et al. Strike-slip fault system of the Cambrian-Ordovician and its oil-controlling effect in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(3): 239-243.
- [13] 杨圣彬,刘军,李慧莉,等.塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用[J].石油与天然气地质,2013,34(6):797-802.
Yang Shengbin, Liu Jun, Li Huili, et al. Characteristics of the NE-trending strike-slip fault system and its control on oil accumulation in north peri-cline area of the Tazhong paleo-uplift[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 797-802.
- [14] 罗小龙,汤良杰,谢大庆,等.塔里木盆地雅克拉断凸走滑作用及其形成机理[J].石油与天然气地质,2013,34(2):257-263.
Luo Xiaolong, Tang Liangjie, Xie Daqing, et al. Strike-slip movement and its genetic mechanism in Yakela faulted salient, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 257-263.
- [15] Palmer A N. Distinction between epigenic and hypogenic maze caves[J]. Geomorphology, 2011, 134(1): 9-22.
- [16] Klimchouk A. Speleogenesis, hypogenic[J]. Studies, 2012, 69: 114-134.
- [17] Klimchouk A. Morphogenesis of hypogenic caves[J]. Geomorphology, 2009, 106(1): 100-117.
- [18] Stafford K W, Land L, Klimchouk A. Hypogenic speleogenesis within seven rivers evaporites: Coffee cave, eddy county, New Mexico[J].

- Journal of Cave and Karst Studies, 2008, 70(1): 47–61.
- [19] 吴茂炳, 王毅, 郑孟林, 等. 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩热液岩溶及其对储层的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(S1): 83–92.
- Wu Maobing, Wang Yi, Zheng Menglin, et al. Characteristics of the hydrothermal karst in the Ordovician of the Tazhong area and its control on the reservoirs [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37(S1): 83–92.
- [20] 罗跃平. 冰洲石的矿物学特征及其褪色实验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2002.
- Luo Yueping. Experimental study on the fading of Iceland spar and its mineralogical characteristics [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002.
- [21] 王保才, 刘军, 马灵伟, 等. 塔中顺南地区奥陶系缝洞型储层地震响应特征正演模拟分析[J]. 石油物探, 2014, 53(03): 344–350.
- Wang Baocai, Liu Jun, Ma Lingwei, et al. Formation modeling for seismic response characteristics of the fracture-cavity Ordovician reservoir in Shunnan area of central Tarim Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(03): 344–350.
- [22] 吴俊峰, 姚姚, 撒利明. 碳酸盐岩特殊孔洞型构造地震响应特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(02): 180–185.
- Wu Junfeng, Yaoyao, Sa Liming. Analysis on seismic response of special cavernous structure of carbonate [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(02): 180–185.
- [23] 万方, 崔文彬, 李士超, 等. RMS提取技术在溶洞型碳酸盐岩储层地质建模中的应用[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 279–286.
- Wan Fang, Cui Wenbin, Li Shichao, et al. The application of RMS extracting technology in Geologic modeling on carbonate reservoir with cavern [J]. Geoscience, 2010, 24(2): 279–286.
- [24] 龚洪林, 王振卿, 李录明, 等. 应用地震分频技术预测碳酸盐岩储层[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 129–135.
- Gong Honglin, Wang Zhenqing, Li Luming, et al. Predicting carbonate reservoir by applying seismic spectral decomposition technique [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 129–135.
- [25] 赵迎月, 顾汉明, 李宗杰, 等. 塔中地区奥陶系典型地质体地震识别模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(6): 1262–1270.
- Zhao Yingyue, Gu Hanming, Li Zongjie, et al. The seismic wave field recognition mode of typical geological bodies in the Ordovician in Tazhong Area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(6): 1262–1270.
- [26] 曹俊兴, 刘树根, 田仁飞, 等. 龙门山前陆盆地深层海相碳酸盐岩储层地震预测研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2423–2434.
- Cao Junxing, Liu Shugen, Tian Renfei, et al. Seismic prediction of carbonate reservoirs in the deep of Longmenshan Foreland Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2423–2434.
- [27] 杜金虎, 周新源, 李启明, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩大油气区特征与主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 652–662.
- Du Jinhu, Zhou Xinyuan, Li Qiming, et al. Characteristics and controlling factors of the large carbonate petroleum province in the Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 652–662.
- [28] 徐敬领, 王亚静, 曹光伟, 等. 碳酸盐岩储层测井评价方法[J]. 现代地质, 2012, 26(6): 1265–1275.
- Xu Jingling, Wang Yajing, Cao Guangwei, et al. Well-logging evaluation methods on carbonate reservoirs [J]. Geoscience, 2012, 26(6): 1265–1275.
- [29] 马伯林. 地震属性分析在碳酸盐岩储层研究中的应用[J]. 安徽地质, 2007, 17(1): 40–46.
- Ma Bolin. Seismic attribute analysis in the study of carbonate rock reservoir block [J]. Geology of Anhui, 2007, 17(1): 40–46.
- [30] 王利田, 王志章, 秦志军, 等. 应用地震属性分析预测其仓储集层[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(3): 369–371.
- Wang Litian, Wang Zhizhang, Qin Zhijun, et al. Application of seismic attributes analysis to gas reservoir prediction [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(3): 369–371.
- [31] 苗青, 潘懋, 高洪亮, 等. 用三维可视化解释技术解释潜山复杂断裂构造[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(3): 364–366.
- Miao Qing, Pan Mao, Gao Hongliang, et al. Using 3D visualization technology to interpret complicated fault structures in buried hill [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(3): 364–366.
- [32] 赵治信, 谭泽金, 唐鹏, 等. 塔里木盆地覆盖区奥陶纪生物地层[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(6): 494–500.
- Zhao Zhixin, Tan Zejin, Tang Peng, et al. Biostratigraphy of Ordovician in cover area of Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(6): 494–500.
- [33] 陈景山, 王振宇, 代宗仰, 等. 塔中地区中上奥陶统台地镶边体系分析[J]. 古地理学报, 1999, 1(2): 8–17.
- Chen Jingshan, Wang Zhenyu, Dai Zongyang, et al. Study of the middle and upper Ordovician rimmed carbonate platform system in the Tazhong area, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1(2): 8–17.
- [34] 李洪革, 韩宇春. 塔中地区中上奥陶统有利油气富集的地震相特征及分布[J]. 石油地球物理勘探, 2003, 38(2): 194–198.
- Li Hongge, Han Yuchun. Character and distribution of seismic facies favorable for oil/gas accumulation in Middle-Upper Ordovician, Tazhong area [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(2): 194–198.
- [35] 云露, 曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 788–797.
- Yun Lu, Cao Zicheng. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 788–797.
- [36] 谢世文. 塔里木盆地中央隆起区鹰山组层序地层及储集体地质特征[D]. 四川: 成都理工大学, 2011.
- Xie Shiwen. A study on sequence stratigraphy and geological characteristics for Yingshan Formation in the central uplift area of Tarim Basin, China [D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2011.
- [37] 王黎栋. 塔中地区 T_1^4 界面碳酸盐岩古岩溶储层形成机理与分布预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2007.
- Wang Lidong. Formation mechanics and distribution forecast of Carbonates Paleokarst reservoir in T_1^4 Interface from Central Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007.
- [38] 翟振飞. 塔里木盆地塔中地区奥陶系层序地层及沉积特征研究[D]. 四川: 成都理工大学, 2010.
- Zhai Zhenfei. A study on the sequence stratigraphy and sedimentary characteristic of Ordovician in Tazhong area of Tarim Basin [D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2010.