

塔里木盆地顺南地区走滑断裂发育特征及演化

孔永吉, 吴孔友, 刘 寅

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

摘 要: 顺南地区位于塔里木盆地塔中隆起北部, 受多期构造应力影响, 该地区以走滑断裂大量发育为典型特征。对三维地震资料的精细解释和深入分析结果表明, 研究区走滑断裂具有垂向分层、平面分段、多期次构造叠加的特征。顺南地区主要发育北东、北东东和北西向 3 组走滑断裂。北东向断裂活动性强, 平面上发育雁列式断层及马尾状构造, 剖面上主要发育对称花状、正花状与负花状上下分层叠置的复合花状构造。北东东和北西向断裂活动性较弱, 剖面上以单条直立走滑断裂为主, 平面上呈线性延伸或由多段同向走滑断层连接而成。根据断层构造样式和受力性质, 将顺南 1 断裂沿走向划分为 4 段: 2 个复合花状-拉张段和 2 个简单花状-挤压段, 拉张段和挤压段沿走向交替出现。顺南走滑断裂的形成主要经历了 5 期构造运动: 加里东早期、加里东中期 I 幕、加里东中期 III 幕、加里东晚期-海西早期和海西晚期。其中, 加里东中期 I 幕和加里东中期 III 幕为该区主要断层活动期。

关键词: 走滑断裂; 构造演化; 花状构造; 三维地震解释; 塔里木盆地

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyz.2020.05.006

DEVELOPMENT AND EVOLUTION OF THE STRIKE-SLIP FAULTS IN SHUNNAN AREA, TARIM BASIN

KONG Yong-ji, WU Kong-you, LIU Yin

School of Geosciences and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong Province, China

Abstract: Shunnan area, located in the northern Tazhong uplift of Tarim Basin, is affected by multi-stage tectonic stress with a large number of developed strike-slip faults. Detailed interpretation and deep analysis of 3D seismic data show the faults are varied in vertical and plane views with multi-stage structural superposition. There are mainly 3 groups, i.e. NE, NEE, and NW, of strike-slip faults developed in the study area. The NE-trending faults are highly active, with en echelon and horsetail structures developed on the plane, and composite flower structures of symmetric flower, positive and negative flowers superimposed on the profile; while the NEE and NW faults are less active, with single vertical strike-slip fault dominated on the profile, and linear extension or multi-section synthetic strike-slip faults connected on the plane. According to the structural style and stress property, the F_{SN1} can be divided into 4 segments along the strike, including 2 composite flower-tensional segments and 2 simple flower-compressional segments, which occur alternately along the strike. The strike-slip faults mainly went through 5 stages of tectonic movements: the Early Caledonian, Episode I of Middle Caledonian, Episode III of Middle Caledonian, Late Caledonian-Early Hercynian and Late Hercynian, among which, the second and third are the main stages for fault activity.

Key words: strike-slip fault; tectonic evolution; flower structure; 3D seismic interpretation; Tarim Basin

收稿日期:2020-03-11;修回日期:2020-05-06. 编辑:张哲.

基金项目:中科院先导科技 A 类专项“深层油气形成与分布预测”(XDA14010301);国家科技重大专项(2017ZX05001003-004).

作者简介:孔永吉(1995—),男,硕士研究生,地质学专业,构造地质学研究方向,通信地址 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, E-mail//963357518@qq.com

通信作者:吴孔友(1971—),男,博士,教授,主要从事地质构造与油气成藏研究,通信地址 山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号, E-mail//wukongyou@163.com

0 引言

随着石油勘探由浅层、常规油气藏逐步向深层-超深层、非常规油气藏发展^[1-3]。近年来,在塔里木盆地顺托果勒低隆起区中奥陶统超深层(深度大于7000 m)陆续发现了受走滑断裂控制的海相碳酸盐岩油气藏,从而引起学者的广泛关注^[4-9],引发了一系列对走滑断层发育特征与油气成藏之间关系的研究。走滑断裂是一种重要的构造类型,国内外学者对走滑断裂的构造特征及形成机理进行过详细的探讨。走滑断裂可划分为3部分:端部破碎带、连接破碎带和面破碎带。在单条走滑断层弯曲段以及多条斜列走滑断层重叠部位常发育花状构造,是圈闭的有利形成区^[10-11]。通过大量的物理模拟实验^[12-15],学者们认为走滑断裂的形成可分为3个阶段:R断裂发育阶段、Y断裂和P断裂发育阶段、断裂贯穿阶段。在顺南地区,随着高精度三维地震资料的获得,不同学者针对该区走滑断层的识别、构造特征、断层活动期次、形成机理以及控储控藏作用等方面进行了大量的研究^[16-21]。虽然学者们对顺南地区构造样式取得了一些新的认识,但关于走滑断裂的特征及形成演化机制仍有较大的争议。本文在精细三维地震解释的基础上,结合区域构造背景,分析顺南地区走滑断裂的构造特征及其形成演化,以期为深入分析区域走滑断裂发育及油气勘探提供参考。

1 区域地质概况

顺南地区位于塔中隆起北坡,塔中I号断裂下盘,

西部以塔中I号断裂为界与塔中隆起相邻,东临满加尔拗陷,南北方向分别为古城墟隆起和顺托果勒低隆起(图1)。现今整体表现为由南东方向逐渐向北西倾伏的单斜,在长期构造演化过程中,发生三期次构造抬升和剥蚀。该区地层古生界除奥陶系部分缺失之外,受古城墟隆起演化影响,志留系、泥盆系均有不同程度的缺失,从北西向南东剥蚀程度逐渐增强,厚度逐渐减薄,但其他地层发育相对完整^[18]。

寒武纪一早奥陶世,塔里木盆地构造活动稳定,塔中北坡沉积环境为局限台地-半局限台地-开阔台地,沉积了巨厚的碳酸盐岩地层^[22],主要为白云岩、灰岩和含膏云岩。

中奥陶世末期,塔中地区受加里东中期I幕构造隆升影响,形成区域角度不整合界面。塔中北坡位于构造斜坡区,抬升幅度相对较低。大部分地区暴露时间短,剥蚀程度弱,形成区域平行不整合界面,仅一间房组顶部被剥蚀^[23]。受塔中I号断裂带的控制,顺南地区由台地边缘相逐渐向陆棚相演化^[20],岩性以泥岩、灰泥岩为主。

晚奥陶世一中泥盆世,在南天山洋和古昆仑洋闭合以及阿尔金山强烈的构造挤压作用下,古城墟地区强烈抬升^[7],地层遭受剥蚀。顺南地区东南部上奥陶统、志留系和泥盆系均遭受了不同程度的剥蚀。

晚泥盆世-石炭纪,塔中北坡整体处于应力松弛背景。二叠纪时期,顺南地区发生了岩浆刺穿作用^[24],碎屑岩中夹杂了火成岩,断裂活动微弱。

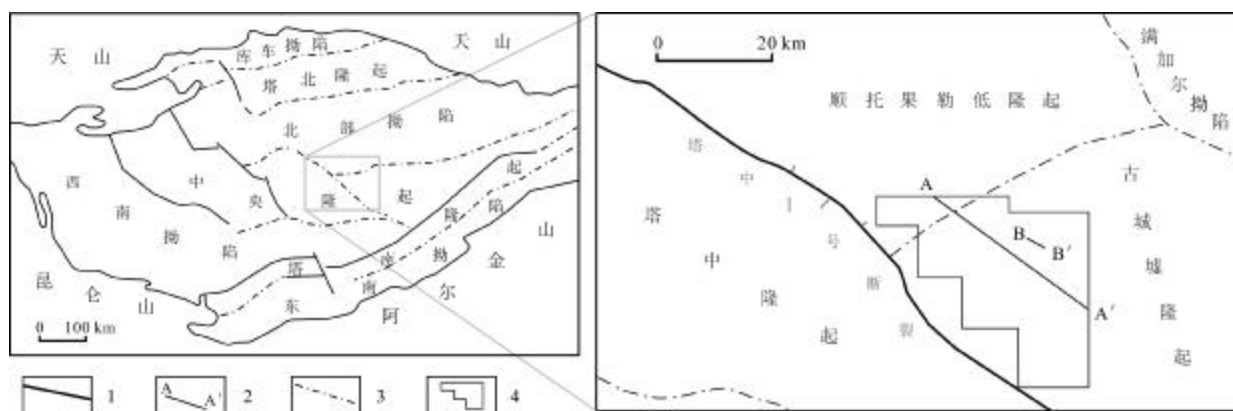


图1 塔里木盆地构造单元及顺南地区构造位置图

(据文献[16]修改)

Fig. 1 Tectonic units of Tarim Basin and tectonic location map of Shunnan area

(Modified from Reference [16])

1—断层(fault); 2—地震剖面(seismic profile); 3—构造单元边界(tectonic boundary); 4—三维研究区(3D study area)

三叠纪至今,塔里木盆地受周缘造山带影响发生多期构造运动,但顺南地区构造活动微弱,仅在局部发生轻微调整^[25]。

2 走滑断裂特征

基于三维地震资料的解释,在顺南地区识别出多条北东、北东东向走滑断裂和少量北西向走滑断裂,北东向断裂为该区主要的走滑断裂,自西向东依次为顺南3、顺南1、顺南4和顺南2断裂(图2)。顺南地区的走滑断裂具有纵向分层、沿走向分段、多期次构造叠加的特征。

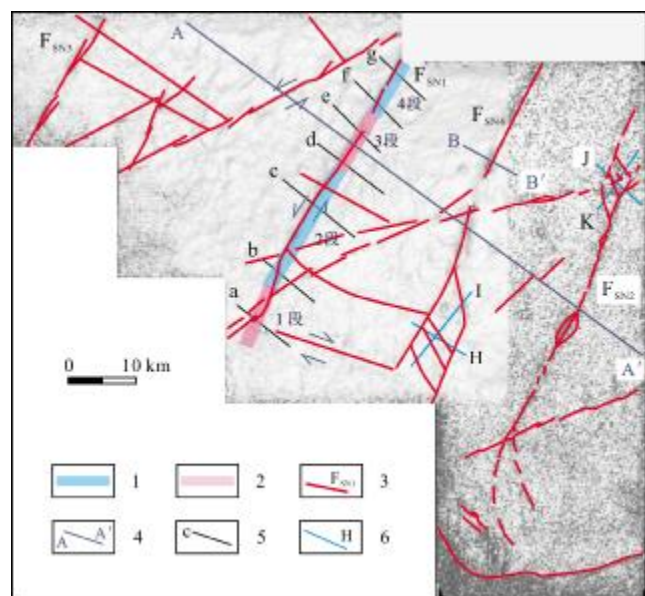


图2 顺南1断裂分段变形图

Fig. 2 Deformation of F_{SN1} by segments

底图为顺南地区一间房组顶面 T_7^4 地层倾角属性图 (Base map from the dip angle attribute map of T_7^4 in Shunnan area); F_{SN1} —顺南1断裂; F_{SN2} —顺南2断裂; F_{SN3} —顺南3断裂; F_{SN4} —顺南4断裂; 1—拉张段 (tensional segment); 2—挤压段 (compressional segment); 3—断层 (fault); 4—三维地震剖面 (3D seismic profile); 5—顺南1断裂横切剖面 (crossing profile of F_{SN1}); 6—拉分地堑剖面 (profile of pull-apart graben)

2.1 纵向分层特征

在地震剖面中可以看出,顺南地区不同层位构造变形具有明显的差异性。根据构造样式和受力性质,可以将该区分分为5层:底部、深部、中部、浅部和顶部(图3)。

底部构造样式表现为正断层,断层倾角较大,位于 T_8^2 之下,断裂向下切穿基底,向上断穿沙依里克组。

从中奥陶系一间房组顶面(T_7^4)到中寒武统阿瓦

塔格组上层之间为深部构造,发育正花状构造(F_{SN1} 、 F_{SN4})和直立走滑断裂(F_{SN2})。正花状构造具有背形、隆起的特征,地层变形明显。直立走滑断裂层两盘位移较小,地层变形较弱。

上奥陶统为中部构造层,同时发育正花状构造(F_{SN1})、负花状构造(F_{SN4})和直立走滑断层(F_{SN2}),且花状构造地层变形明显,有明显的拱起或下掉现象,形成地堑或地垒。该层位断裂与下伏断层上下叠置,形成上部负花状与下部正花状叠置的复合花状构造(F_{SN4}),或形成上部正花状与下部正花状叠置的简单花状构造(F_{SN1})。

在上奥陶统和下石炭统之间为浅部构造层,地层剥蚀现象明显,发育高倾角断层,以张性断裂为主。该层位断裂向下断入桑塔木组的泥岩中,向上未切至下石炭统巴楚组中。其独立存在或与早期形成的断裂相连,上下地层变形差异明显。

该区域的顶部构造层地层变形不明显,主要发育小规模雁列断层,局部发育中等—偏高角度的逆断层。剖面上,断裂向上未切穿二叠系顶面,纵向断距很小。

2.2 沿走向分段特征

通过对三维地震数据的解释,顺南1断裂具有明显的分段性,即在同一层位沿断裂走向可出现压扭隆升段、张扭沉降段等。根据剖面构造样式和受力性质的不同,可将顺南1断裂划分为四大段(图2)。

第一段为简单花状—挤压段, T_7^4 界面及上覆上奥陶统沿断裂向上拱起,表现为正花状构造,断裂向下断穿寒武系,在中下寒武统表现为高角度正断层(图4a)。第二段为复合花状—拉张段, T_7^4 界面自南向北隆起幅度变大,上覆地层沿断裂表现为向形,断裂表现为复合花状构造,断裂倾角约 85° 。在中下寒武统中发育直立走滑断裂或小型花状构造,并以 T_8^2 界面为界断裂出现分层特征, T_8^2 之下发育负花状构造, T_8^2 之上发育正花状构造(图4b、c)。第三段为简单花状—挤压段,与第一段相似表现为正花状构造,但该段 T_7^4 界面及上覆地层的隆起幅度比第一段较大,地层变形更加明显,在中下寒武统中发育直立走滑断层(图4d、e)。第四段为复合花状—拉张段, T_7^4 界面拱起幅度小于第三段,大于第一段。上覆地层沿断裂下掉幅度明显大于第二段,上下叠置的复合花状最为显著。底部发育单

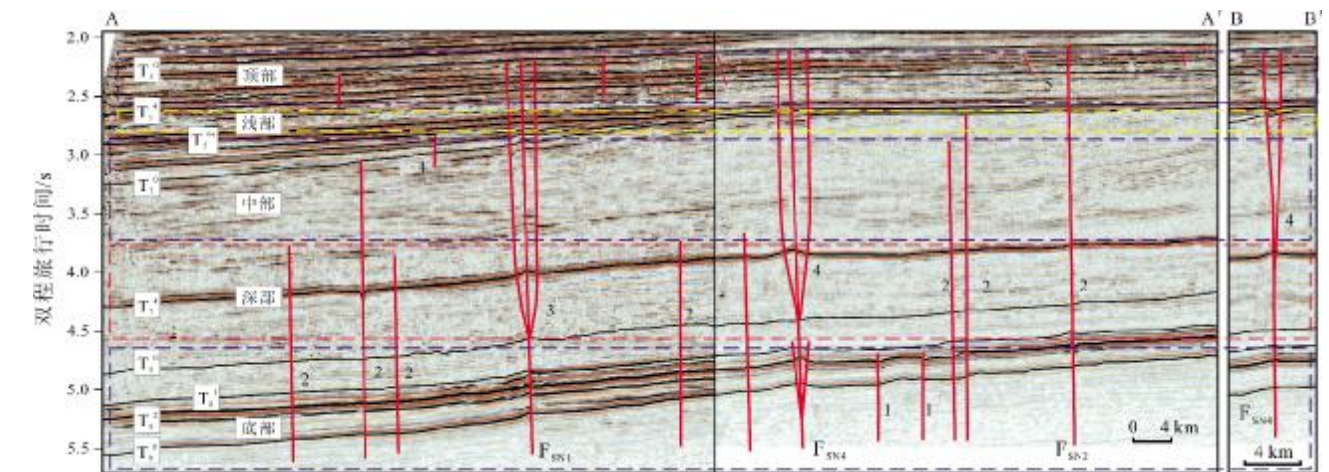


图 3 顺南地区三维地震剖面 AA'和 BB'

Fig. 3 3D seismic profiles AA' and BB' in Shunnan area

剖面位置见图 1、2 (Section position shown in Figs. 1 & 2); 1—高角度正断层(high-angle normal fault); 2—直立走滑断层(vertical strike-slip fault); 3—正花状构造(positive flower structure); 4—复合花状构造(composite flower structure); 5—逆断层(reverse fault)

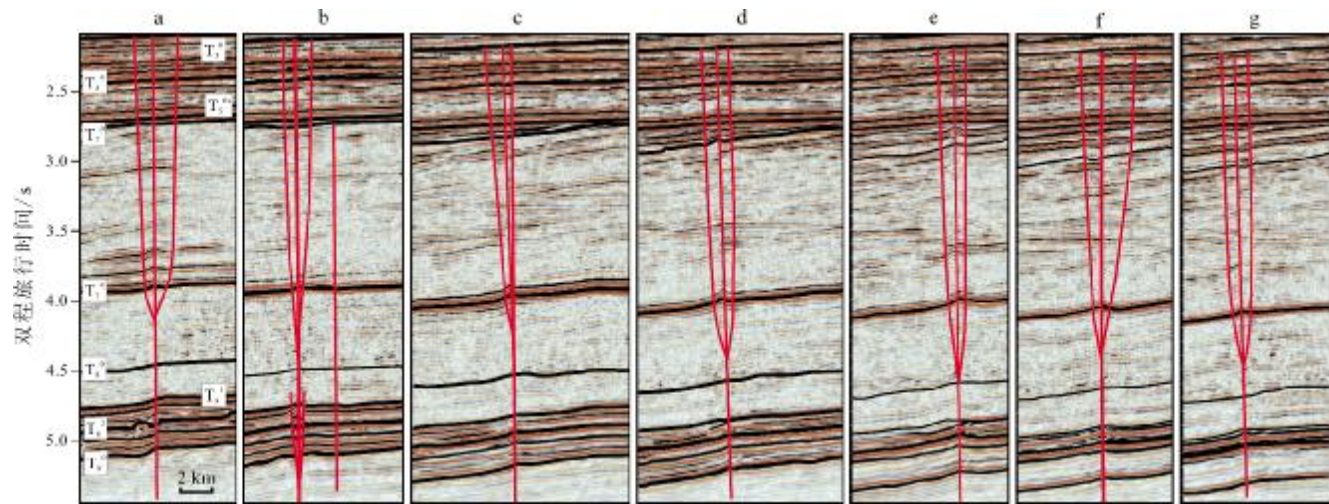


图 4 顺南 1 走滑断裂不同段地震剖面解释

Fig. 4 Seismic interpretation of F_{SN1} strike-slip fault by segments

剖面位置见图 2 (Section position shown in Fig. 2)

一直立走滑断裂,地层变形不明显(图 4f、g). 该区断层分段性特征是后期构造叠加在早期构造上形成的.

2.3 多期次构造叠加特征

顺南地区断裂经历多期次的构造运动, 早期断裂对后期断裂的形成具有控制作用. 从多层位界面可以看出, 该区主干断裂为北东向, 后期形成的断裂走向未发生明显改变(图 5). 但是, 断裂特征具有继承性的同时又具有差异性, 不同时期的受力性质使断裂在不同层位各具特征. 在中寒武统沙依里克组顶界面(T₈²)的相干切片上显示, 该层位发育北东、北东东向和两组呈

一定角度相交的北西向断裂, 断裂为线性延伸, 相互切割(图 5a). 从中奥陶统一间房组顶面(T₇⁴)上可以看出断裂活动显著, 北东东向断裂由多段同向走滑断层连接而成, 顺南 4 断裂南部发育拉分地堑(图 5b). T₇⁰界面为桑塔木组的顶面, 该界面断裂特征显著. 顺南 3 断裂发育一系列北西走向的雁列断层, 呈北东向延伸. 顺南 1 断裂北部与顺南 3 断裂相似, 南部发育两段呈中心对称的马尾状构造, 之间线性延伸. 顺南 4 断裂北部发育左行右阶雁列断层, 南部发育马尾状构造(图 5c).

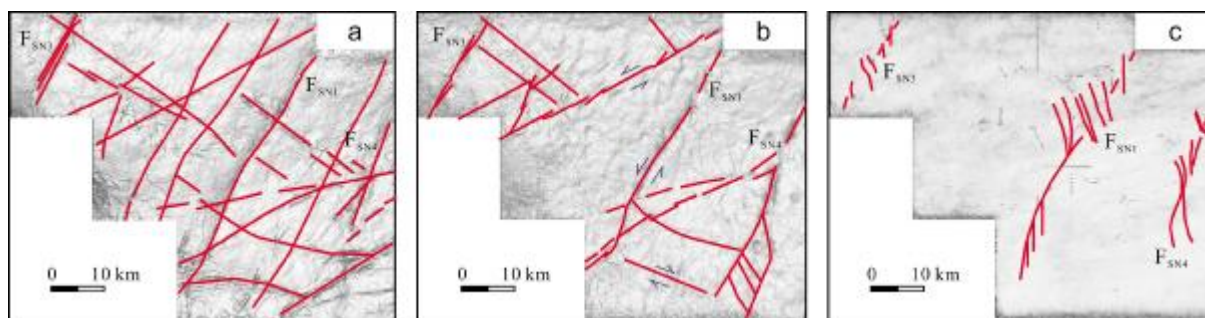


图5 顺南地区不同界面相干属性和断裂解释图

Fig. 5 Coherent properties and fault interpretation of different interfaces in Shunnan area

a—沙依里克组顶界面(T_8^2)相干切片(coherent slice of T_8^2 in F_{SN1} area); b—一间房组顶界面(T_7^4)相干切片(coherent slice of T_7^4 in F_{SN1} area); c—桑塔木组顶界面(T_7^0)相干切片(coherent slice of T_7^0 in F_{SN1} area)

加里东早期,顺南地区受到北西向张应力作用,在中下寒武统形成了北西向高角度正断层和少量沿北东向延伸的右阶雁列断层。加里东中晚期,随着塔中隆起的形成,顺南地区地层强烈变形,产生规模较大的花状构造,沟通早期断裂,剖面上组成了各种性质的构造样式。在部分地区可见 T_7^4 界面及临近的上覆地层向上隆起,而远离 T_7^4 界面的地层发生了拉张下掉。笔者认为这是走滑断层特殊的形成机制所导致:走滑断层初期形成雁列断层,随着走滑作用进行,雁列断层发生连接,在不同段叠置部位,地层出现构造变形,形成隆起或拉分地堑。随着走滑断裂停止活动,区域整体沉降继续接受沉积。加里东中期Ⅲ幕的构造运动使加里东中期Ⅰ幕形成的走滑断裂重新活化,走滑断裂挤压隆起部位继续上升,将上覆临近地层顶起,而远离 T_7^4 界面的地层由于受力性质不同,发生拉张、下掉,继而出现上述现象。该区断裂多期次构造叠加的特征和其特殊的形成机制使其在剖面上的构造特征并不具有完全一致性,这也导致了断层沿走向的分段性。

2.4 拉分地堑特征

中奥陶统一间房组顶面倾角属性图(图2)显示,顺南4断裂的南部和顺南2断裂的北部发育拉分地堑。其主干断裂整体为北东走向,内部发育一系列右阶展布的北西向张性断裂。分别截取北西和北东方向共4条剖面(图6)对内部特征进行精细刻画,探究其变形差异。

在顺南4断裂的北西向地震剖面H(图6)中,断裂发育构造样式简单,为单条直立走滑断层。包络地堑的两条主干断裂向上切穿至二叠纪地层,向下断穿

寒武纪地层,引起了 T_8^1 界面和 T_9^0 界面的变形和错断。地堑内部的次级断裂活动性较弱,其与右侧主干断裂所夹持的桑塔木组地层表现为向形,中间低,两侧高。在北东向剖面I(图6)中,构造样式复杂,发育直立走滑断层和负花状构造。 T_7^4 界面呈波幅小、频率高的波动状,分支断层较多但断距普遍较小。相比于顺南4断裂剖面的杂乱,顺南2断裂的拉分地堑特征十分明显。北西向剖面J(图6)穿过2条北东向主干断裂、1条北西向分支断裂和1条北东东向断裂。北西向分支断裂活动性弱,未切穿 T_7^0 界面,其与左侧主干断裂之间的 T_7^4 界面表现为幅度较大的向形,与右侧主干断裂之间 T_7^4 界面略微向下弯曲,受北东东向断裂控制。北东东向断裂倾向北西,活动性较主干断裂小,断入石炭系中,与左侧分支断裂之间所夹持的地层向下弯曲明显。右侧北东向断裂活动性最强,断层两盘 T_7^4 界面出现明显断距。在北东向剖面K(图6)中,发育负花状构造,地层自两侧向中心沿断层依次下掉,断距明显。

对比顺南4断裂和顺南2断裂两处的拉分地堑发现,前者断裂发育复杂,断距较小,地层变形多样(图6H、I);后者断裂特征清晰,断距较大,地层变形简单(图6J、K)。结合区域背景分析认为,其差异性是由塔中隆起的边界所导致。顺南4断裂南部靠近塔中隆起,其位置对应于塔中隆起边界的转折部位(图1),受力复杂;顺南2断裂北部距塔中隆起较远,受隆起边界影响小,受力简单。

3 走滑断裂形成演化

中寒武世(加里东早期),塔里木盆地北部和西南

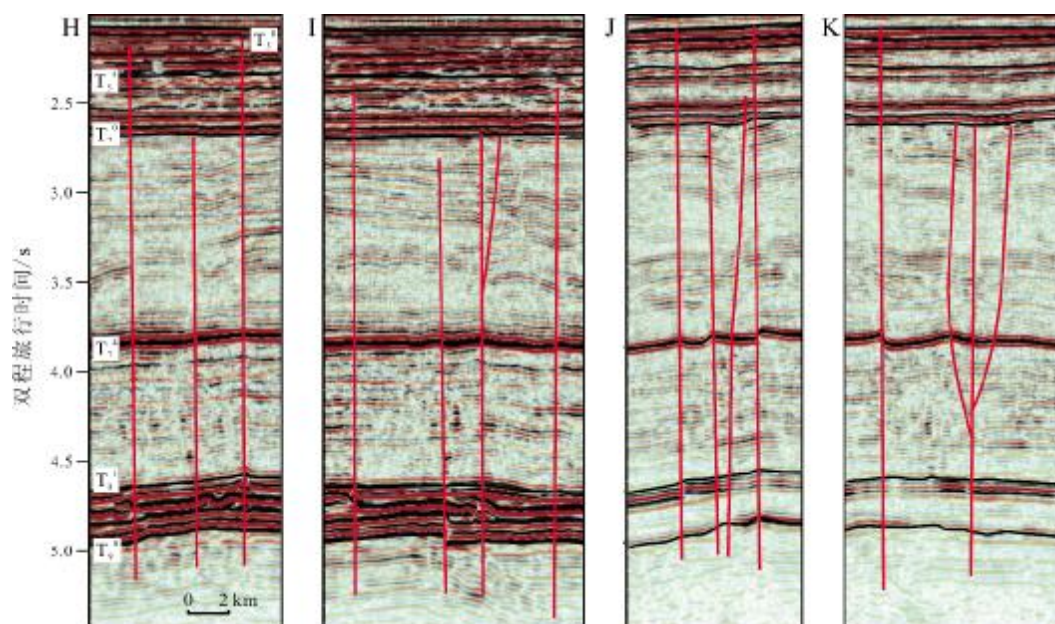


图6 顺南地区拉分地堑地震剖面解释

Fig. 6 Seismic interpretation of pull-apart graben in Shunnan area

剖面位置见图2 (Section position shown in Fig. 2)

部分别发育南天山洋和北昆仑洋^[26-27],顺南地区处于克拉通内弱伸展环境,中下寒武统主要发育北西向平行排列的正断层和少量北东向雁列断层(图7a)。

中奥陶世末(加里东中期I幕),随着西南侧古昆仑洋俯冲消减^[28],塔中隆起形成,发育具有右旋性质的北西向逆冲断层——塔中I号断裂。塔中I号断裂的右旋活动在顺南地区形成北东向的R'断裂,即北东向左旋走滑断裂,并且受控于塔中隆起的边界差异,同期发育北东东向左旋走滑断裂。在差异性挤压应力下,位于顺南1断裂和顺南4断裂间的北东东向断裂自南向北走向向东发生偏移,形成弧形断裂。该期发育直立走滑断层和正花状构造,向下断穿寒武系,与早期北东向断层相连。早期断层活化,北东向断裂向上断穿 T_8^1 界面,北西向断层具有右旋性质(图7b)。

奥陶纪末(加里东中期III幕),古昆仑洋闭合及古阿尔金洋俯冲消减^[29],塔中隆起东部抬升剥蚀。顺南地区位于塔中前缘隆起的隆后拗陷^[22],沉积了巨厚的桑塔木组泥岩,自北西向南东方向逐渐变厚。该时期顺南地区发育直立走滑断层和正负花状构造,以后者为主,叠加在中下奥陶统的正花状构造上形成复合花状构造(图7c)。加里东中期I幕形成的直立走滑断层向上发育,消失在桑塔木组泥岩中。

志留纪—中泥盆世(加里东晚期—海西早期),受塔里木盆地周缘板块碰撞影响,顺南地区强烈抬升,地形呈北西低南东高,志留系向南东方向逐层超覆(图7d)。在顺南地区东南部,志留系和泥盆系缺失明显,断裂继承性发育。

二叠纪末(海西晚期),受南缘羌塘板块与塔里木陆地碰撞和北缘天山造山带影响^[30],顺南地区局部发育北东向雁列断层。这些断裂规模小,延伸短,部分断裂在早期断裂基础上继承性发育,对早期断裂进行调整(图7e)。之后该区断裂特征未有较大改变(图7f)。

4 讨论

走滑断层对于油气的运移具有控制作用。垂向上,断层向下切穿寒武系,沟通了玉尔吐斯组烃源岩,使油气能够运移到中奥陶统鹰山组、一间房组储层。该区断裂由多期形成,深部断裂经历多次的开启与闭合,使得晚期生成的油气也能向上运移至储集层,形成多期成藏。平面上,走滑断层的分段性使断层的叠合区地层受力集中,断块内裂缝发育,有利于储层的发育。在油气运移方面,位于同一段的储层连通性优于不同段储层。

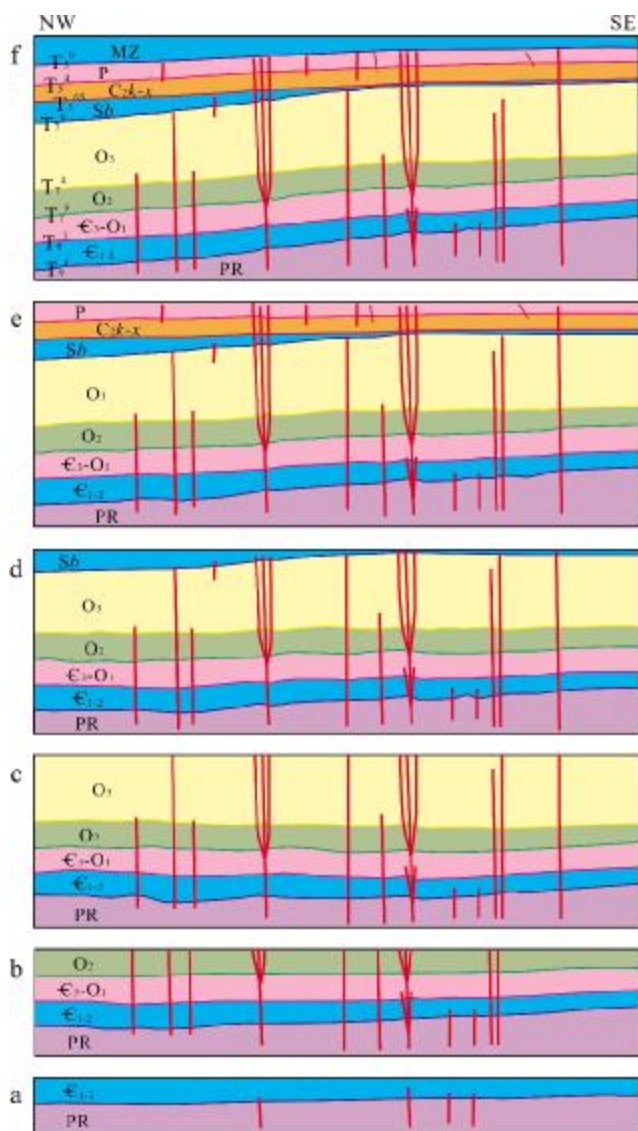


图7 顺南地区构造演化模式图

Fig. 7 Tectonic evolution model of Shunnan area

a—上寒武统沉积前 (before Upper Cambrian deposition); b—上奥陶统沉积前 (before Upper Ordovician deposition); c—志留系沉积前 (before Silurian deposition); d—卡拉沙依组沉积前 (before Karratha Formation deposition); e—中生代沉积前 (before Mesozoic deposition); f—现今 (present)

现关于顺南地区断裂的几何学特征已比较明确,但是在走滑断裂的形成期次上仍有一定争议。对于正断层和逆断层,其两盘地层的厚度差异以及断裂断穿的层位可以较好地指示断层的形成时期。而走滑断层主要为水平移动,断层两盘地层厚度无明显变化,断穿的层位也无法明确指示断层形成时期。以直立走滑断层为例(图3),断层向上断入上奥陶统,向下切穿寒武系,但是这并不能指明该断层是在加里东早期形成,加

里东中期活化并与该时期形成的断裂相连,还是在加里东中期形成,直接向下断穿寒武系。部分学者通过地层界面变形程度确定断层最初形成时期,认为地层变形最大的时期为断层的形成时期,这可能忽视了直立走滑断层并不一定能使两盘地层在垂向上发生明显变形这一特点。通过研究断裂在纵向上的差异性,结合区域构造背景,确定该区走滑断层的形成期次,这种方式对发育花状构造的走滑断层较为适用,但应用于直立走滑断层还是具有局限性。

5 结论

顺南地区发育北东、北东东和北西向3组走滑断裂,在纵向上具有分层特征,自下向上可分为5层:底部、深部、中部、浅部和顶部。北东向断裂活动性强,主要发育正花状和复合花状构造,北东东和北西向断裂活动性较弱,以直立走滑断层为主。顺南1断裂自南向北可分为4段,挤压段和拉张段沿走向交替出现。该区断裂多期形成,早期断裂对后期断裂具有控制作用,后期断裂改造早期断裂。顺南4和顺南2断裂拉分地堑的差异是由塔中隆起边界所致。

顺南地区主要经历5期构造运动:加里东早期、加里东中期I幕、加里东中期III幕、加里东晚期—海西早期和海西晚期。加里东早期发育北西向张性正断层;加里东中期I幕和加里东中期III幕为该区主要断层活动期,发育北东向花状构造;加里东晚期—海西早期和海西晚期,断层继承性活动。

走滑断层对于油气的运移具有控制作用,陡倾的产状和多期开启的性质,为油气的垂向运移提供了良好条件。同时,走滑断层的分段性也决定了油气的横向运移。

参考文献:

- [1]何治亮,金晓辉,沃玉进,等.中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J].中国石油勘探,2016,21(1):3-14.
- [2]顾忆,万畅璐,黄继文,等.“大理深、高压”条件下塔里木盆地超深层油气勘探前景[J].石油实验地质,2019,41(2):157-164.
- [3]朱光有,曹颖辉,闫磊,等.塔里木盆地8000 m以深超深层海相油气勘探潜力与方向[J].天然气地球科学,2018,29(6):755-772.
- [4]朱光有,杨海军,朱永峰,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J].岩石学报,2011,27(3):827-844.
- [5]焦方正.塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意

- 义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
- [6] Deng S, Li H L, Zhang Z P, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin [J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1): 109-137, doi: 10.1306/06071817354.
- [7] 邬光辉, 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.
- [8] 马德波, 邬光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地深层走滑断层分段特征及对油气富集的控制: 以塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系走滑断层为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 225-237.
- [9] 邬光辉, 杨海军, 屈泰来, 等. 塔里木盆地塔中隆起断裂系统特征及其对海相碳酸盐岩油气的控制作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 793-805.
- [10] Kim Y S, Peacock D C P, Sanderson D J. Fault damage zones [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(3): 503-517.
- [11] 李明刚, 吴克强, 康洪全, 等. 走滑构造变形特征及其形成圈闭分布[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 44-47.
- [12] Dooley T P, Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results [J]. Tectonophysics, 2012, 574-575: 1-71.
- [13] Xiao Y, Wu G H, Lei Y L, et al. Analogue modeling of through-going process and development pattern of strike-slip fault zone [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 368-376.
- [14] 赵亚男, 吴孔友, 郝良柱, 等. 油气盆地内小断层识别及发育机理研究——以惠民凹陷江家店地区为例[J]. 地质与资源, 2019, 28(2): 184-192.
- [15] 肖凡, 苏朝光, 吴孔友, 等. 惠民凹陷临北地区小断层识别及形成机理物理模拟[J]. 地质与资源, 2019, 28(6): 570-575.
- [16] 刘军, 任丽丹, 李宗杰, 等. 塔里木盆地顺南地区深层碳酸盐岩断裂和裂缝地震识别与评价[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 703-710.
- [17] 张继标, 张仲培, 汪必峰, 等. 塔里木盆地顺南地区走滑断裂派生裂缝发育规律及预测[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 955-963, 1055.
- [18] 甄素静. 塔里木盆地塔中北坡走滑断裂样式特征及其形成机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- [19] 甄素静, 汤良杰, 李宗杰, 等. 塔中北坡顺南地区走滑断裂样式、变形机理及石油地质意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(12): 2315-2324.
- [20] 李培军, 陈红汉, 唐大卿, 等. 塔里木盆地顺南地区中-下奥陶统 NE 向走滑断裂及其与深成岩溶作用的耦合关系[J]. 地球科学, 2017, 42(1): 93-104.
- [21] 付晨阳, 汤良杰, 曹自成, 等. 塔中北坡走滑断裂横向变形差异及其油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2017, 39(6): 783-789.
- [22] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 257-267.
- [23] 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.
- [24] 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 等. 塔里木盆地二叠纪大火成岩省发育的时空特点[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2): 179-182.
- [25] 汤良杰, 漆立新, 邱海峻, 等. 塔里木盆地断裂构造分期差异活动及其变形机理[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2569-2583.
- [26] 何登发, 贾承造, 德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64-77.
- [27] 汤良杰. 塔里木盆地构造演化与构造样式[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1994, 19(6): 742-754.
- [28] 李本亮, 管树巍, 李传新, 等. 塔里木盆地塔中低凸起古构造演化与变形特征[J]. 地质论评, 2009, 55(4): 521-530.
- [29] 任建业, 张俊霞, 阳怀忠, 等. 塔里木盆地中央隆起带断裂系统分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 219-230.
- [30] 张仲培, 王毅, 云金表, 等. 塔中地区断裂不同演化阶段对油气聚集的控制[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 316-323, 315.

(上接第 496 页/Continued from Page 496)

- [13] 刘粤惠, 刘平安. X 射线衍射分析原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 72-77.
- [14] 马礼敦. X 射线粉晶衍射仪[J]. 上海计量测试, 2003, 30(5): 41-46.
- [15] 马礼敦. X 射线粉末衍射的新起点-Rietveld 全谱拟合[J]. 物理学进展, 1996, 16(2): 251-271.
- [16] 迟广成, 宋丽华, 王娜, 等. X 射线粉晶衍射仪在山东蒙阴金伯利岩蚀变矿物鉴定中的应用[J]. 岩矿测试, 2010, 29(4): 475-477.
- [17] 迟广成, 肖刚, 伍月, 等. X 射线粉晶衍射仪在大理岩鉴定与分类中的应用[J]. 岩矿测试, 2014, 33(5): 698-705.
- [18] Kretz C. Symbols for rock-forming minerals [J]. American Mineralogist, 1983, 68(1/2): 277-279.
- [19] 中国科学院贵阳地球化学研究所. 矿物 X 射线粉晶鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 117-122.
- [20] 姚心侃. 多晶 X 射线衍射仪的技术进展[J]. 现代仪器, 2001(3): 1-3, 10.