

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019023

引用格式: 王彦博, 张永庶, 肖安成, 汪立群, 沈亚, 吴磊. 2019. 柴达木盆地北缘南八仙背斜深、浅断裂系统耦合分析[J]. 高校地质学报, 25 (5): 741-747

柴达木盆地北缘南八仙背斜深、浅断裂系统耦合分析

王彦博^{1,2}, 张永庶³, 肖安成^{1,2}, 汪立群³, 沈亚⁴, 吴磊^{1,2*}

1. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310012;
2. 教育部含油气盆地构造研究中心, 杭州 310012;
3. 中国石油青海油田勘探开发研究院, 敦煌 736202;
4. 东方地球物理公司研究院地质研究中心, 涿州 072751

摘要: 柴达木盆地内部发育有丰富的基底和浅层断裂, 二者之间的成因机制目前还存在较大争议。文章基于高精度三维地震反射数据和钻井资料, 对柴达木盆地北缘南八仙背斜的深、浅断裂系统的几何形态和相互耦合关系进行了分析。南八仙地区主要发育两条近EW走向的高角度基底断裂, 分别为南倾的马仙断裂和北倾的仙南断裂, 都是中生代晚期就开始发育的老断裂, 并在新生代重新活化。在新生界内部还发育NW走向和近EW走向两组浅层正断层体系, 断距都很小。NW走向正断层主要位于马仙断裂南侧(上盘), 呈雁列式排列。近EW走向正断层范围较小, 仅局限在南八仙背斜核部、仙南断裂上部, 由一系列近平行的正断层组成, 在仙南断裂上部形成一个小型的地堑构造, 切割了NW走向的正断层体系。分析认为NW走向正断层与马仙断裂左旋走滑导致的尾端拉张有关, 而近EW走向正断层体系与高角度仙南断裂逆冲活动导致的浅层剪切拉张有关。综合前人研究成果认为柴达木盆地广泛存在的浅层断裂成因多变, 深、浅断裂耦合关系十分复杂, 先存断裂在新生代构造活动中起到了一定的控制作用。

关键字: 柴达木盆地; 南八仙背斜; 三维地震; 深、浅断裂耦合; 正演模拟

中图分类号: P542.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2019) 05-741-07

Structural Coupling of Deep and Shallow Fault Systems in the Nanbaxian Anticline, Northern Qaidam Basin

WANG Yanbo^{1,2}, ZHANG Yongshu³, XIAO Ancheng^{1,2}, WANG Liqun³, SHEN Ya⁴, WU Lei^{1,2*}

1. School of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China;
2. Research Center for Structures in Oil & Gas Bearing Basins, Hangzhou 310012, China;
3. Exploration & Development Research Institute of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736202, China;
4. GRI, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou 072751, China

Abstract: Abundant basement deep faults and shallow faults are widely developed in the Qaidam Basin, but the genetic mechanism between the coupling of the diverse faults is still controversial. In this paper, we analyze the geometry and coupling relationship of deep and shallow fault systems across the Nanbaxian anticline in the northern margin of the Qaidam Basin, by using high-resolution 3D seismic reflection data and drilling data. Results show that two EW-trending, high-angle basement faults are developed in the

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-04-25

基金项目: 国家科技重大专项 (2016ZX05003-001; 2017ZX05008-001); 中央高校基本科研业务费专项资金及中国石油青海油田公司勘探开发研究院项目 (K17-506120-009) 联合资助

作者简介: 王彦博, 男, 1993年生, 硕士研究生, 研究方向为盆地分析和构造解析; E-mail: 21638036@zju.edu.cn

*通讯作者: 吴磊, 男, 1983年生, 博士, 副教授, 主要从事盆地分析和构造解析; E-mail: leiwu@zju.edu.cn

Nanbaxian area, namely, the south-dipping Maxian fault and the north-dipping Xiannan fault. They were both initially formed in the late Mesozoic and rejuvenated in the Cenozoic. Two sets of shallow normal fault systems are well developed within the Cenozoic in Nanbaxian. One is NW-striking, and mainly en echelon distributed on the southern side (hanging wall) of the Maxian fault. The other is EW-striking, and confined in the core of the Nanbaxian anticline above the Xiannan fault. This EW-striking fault cuts the NW-striking normal fault system, and consists of a series of parallel sub-normal faults, forming a small graben structure within the Cenozoic above the basement-involved Xiannan fault. We interpret that the NW-striking normal faults are related to extension at the western tail of the Maxian fault caused by the sinistral strike slip, while the EW-striking normal faults result from local extension caused by thrust of the high-angle Xiannan fault. Combined with previous research, we conclude that the widely distributed shallow fault systems are of various origins with a complicated coupling with the deep fault systems in the Qaidam Basin, and that the pre-existing faults played an important role in the Cenozoic deformation.

Key words: Qaidam Basin; Nanbaxian anticline; 3D seismic; coupling of deep and shallow fractures; forward modeling

Corresponding author: WU Lei, Associate Professor; E-mail: leiwu@zju.edu.cn

柴达木盆地位于青藏高原北部,是区域内最大的中—新生代沉积盆地,具有完整而连续的中—新生界沉积序列,周缘被祁连山、东昆仑山、阿尔金山等巨型逆冲和走滑造山带围限,既是研究新生代印藏碰撞远程效应的理想场所,也蕴含着丰富的油气和金属矿产资源(Yin and Harrison, 2000; 戴俊生等, 2003; 姜波等, 2004; 刘志宏等, 2005; Zhou et al., 2006; 吴光大等, 2006; 袁四化等, 2008; 关平和简星, 2013; 肖安成等, 2013; Wu et al., 2014; Fu et al., 2015; 付锁堂等, 2015; Wei et al., 2016; Wang et al., 2017; Lu et al., 2018)。

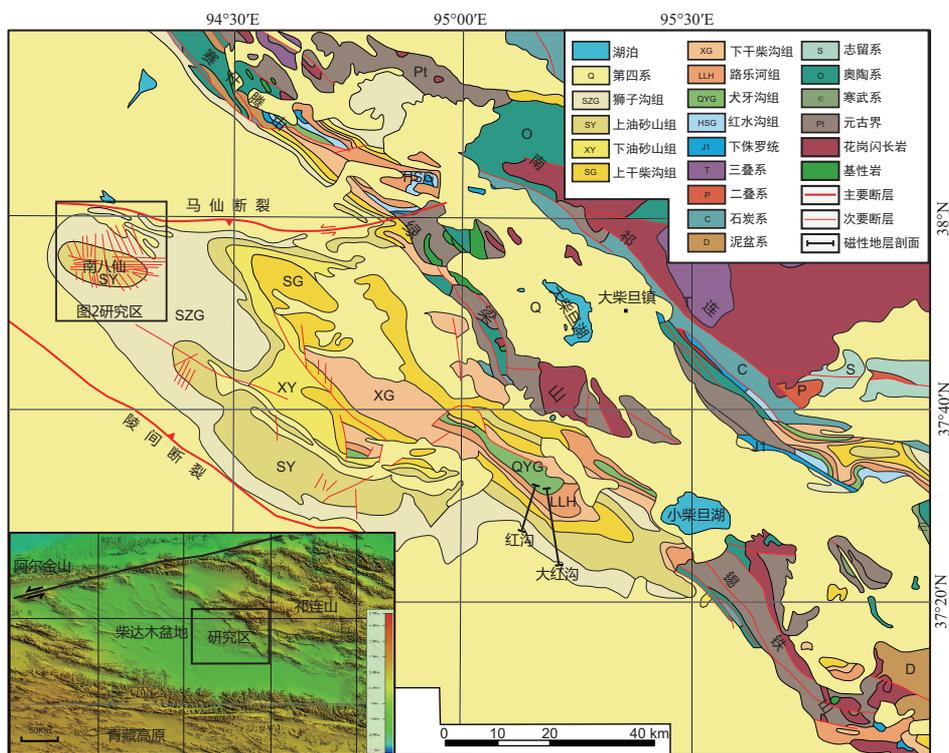
柴达木盆地内部晚新生代以来变形强烈,形成了一系列呈线性或者雁列式展布的基底断裂和褶皱(Mao et al., 2016; Wei et al., 2016)。最新的高精度遥感和三维地震数据揭示在柴达木盆地浅层还发育有数量众多的小型断裂,性质复杂多样,正断层、逆断层和走滑断层均很常见,多分布在背斜区,相互之间呈平行、雁列式或羽状排列(Mao et al., 2016),对盆地内构造圈闭的形成与破坏、油气的运移与保存都有重要影响。一般认为这些浅层断裂的形成是受深部基底断裂的控制,其性质和几何形态能在一定程度上反映基底断裂的运动学特征。Mao等(2016)对盆地西部NW向构造带深、浅断裂的相互关系进行了探讨,提出是深部基底断裂的右旋压扭活动形成了浅层的雁列式小断裂;在这种情况下,浅层与深部断裂走向之间往往会有一定的角度。然而,浅层断裂并不总是呈雁列式排列,也有很多相互之间呈平行展布,且与深部基底断裂之间也基本平行(Mao et al., 2016)。杜威等(2017)对柴西地区南翼山

构造浅层断裂成因进行分析,认为产状高陡的南翼山边界断裂是一个具有左旋走滑性质的压扭性断裂带,其活动导致了南翼山背斜以及三组次级断裂的形成。可见,柴达木盆地内深、浅断裂之间的构造耦合关系非常复杂,还需要进一步深入研究。本文以柴达木盆地北缘马海一大红沟凸起之上的南八仙背斜为研究对象,利用高精度的三维地震数据对其深、浅断裂的平、剖面结构和运动学特征进行了分析,同时利用简单的正演模拟探讨了二者之间的关系,为柴达木盆地深、浅断裂构造耦合提供一些新的认识和思路。

1 地质背景

南八仙背斜位于柴北缘马海一大红沟凸起北缘西端。马海一大红沟凸起是柴北缘中段的一个次级构造单元(汪立群等, 2005; 肖安成等, 2006),整体呈三角形,其北侧以EW走向的马仙断裂与赛什腾凹陷分开,北东为NW走向的绿梁山,南侧为陵间断裂,西北侧为NW走向的冷湖背斜带,南东角与锡铁山相连(图1)。马海一大红沟凸起内部发育多个不同方向的次级断裂和褶皱构造,中生界和新生界底部地层从凸起四周向核部有明显的地层削蚀和超覆现象,是在中生代古隆起基础上发育的继承性凸起(汪立群等, 2005; 王亮等, 2010)。

马海一大红沟凸起上地层出露齐全,新生界自下而上出露路乐河组(LLH)、下干柴沟组下段(LXG)、下干柴沟组上段(UXG)、上干柴沟组(SG)、下油砂山组(XY)、上油砂山组(SY)、狮子沟组(SZG)和七个泉组(QGQ)(青海省地质



据20万地质图大柴旦幅^①和马海幅^②编绘而成；左下角小图为青藏高原北缘地形图，指示研究区的位置

图1 柴达木盆地北缘马海—大红沟凸起地质图

Fig. 1 Geological map of the Mahai-Dahonggou Uplift, northern Qaidam Basin

矿产局, 1991); 在大红沟背斜地区白垩系甚至都出露至地表(图1)。前人对马海-大红沟凸起大红沟背斜出露的完整新生界做了系统的磁性地层定年(Lu and Xiong, 2009; Ji et al., 2017; Wang et al., 2017), 不同研究对新生界下部层序年代的认识存在很大差异, 但对上部层序(上油砂山组以上)时代的认识较为一致(表1)。

2 南八仙背斜断裂系统

南八仙背斜位于马海—大红沟凸起西北角, 整体呈近EW走向, 地表出露上油砂山组和狮子沟组。长期的石油地震勘探在该地区积累了丰富的高精度三维地震资料。结合钻井和地表分层结果以及钻井揭示的层速度模型(表2), 对这些地震数据进行时深转换和地质解释, 在此基础上识别出了研究区多套深、浅断裂系统(图2)。

2.1 深层基底断裂

南八仙背斜深部主要发育两条近东西走向的

表1 柴达木盆地北缘马海—大红沟凸起新生界及其时代

Table 1 Cenozoic stratigraphy and chronology in the Mahai-Dahonggou Uplift, Northern Qaidam Basin

地层	符号	年代/Ma		
		Lu and Xiong, 2009 ^a	Ji et al., 2017 ^a	Wang et al., 2017 ^b
七个泉组	QQQ			
狮子沟组	SZG		<8.1	<6.3
上油砂山组	SY	13~<8.5	12.9~8.1	9~6.3
下油砂山组	XY	(22~20)~13	19.5~12.9	11.1~9
上干柴沟组	SG	>34~(22~20)	34.2~19.5	16.5~11.1
下干柴沟组上段	UXG		44.2~34.2	23.5~16.5
下干柴沟组下段	LXG			
路乐河组	LLH		>52.0~44.2	25.5~23.5

^a研究对象为大红沟背斜大红沟剖面(图1); ^b研究对象为大红沟背斜大红沟剖面, 位于大红沟剖面西~10 km处(图1)

表2 南八仙背斜层速度模型

Table 2 Velocity model of the Nanbaxian Anticline

层位	Air	SZG	SY	XY	SG	XG	LLH	Mz	Basement
层速/(m/s)	3000	3600	3800	2500	3550	4010	3890	4460	5500

① 青海省地质局第一区域地质调查队. 1980. 中华人民共和国地质图—大柴旦幅(J-46-24).

② 青海省地质局第一区域地质调查队. 1980. 中华人民共和国地质图—马海幅(J-46-17).

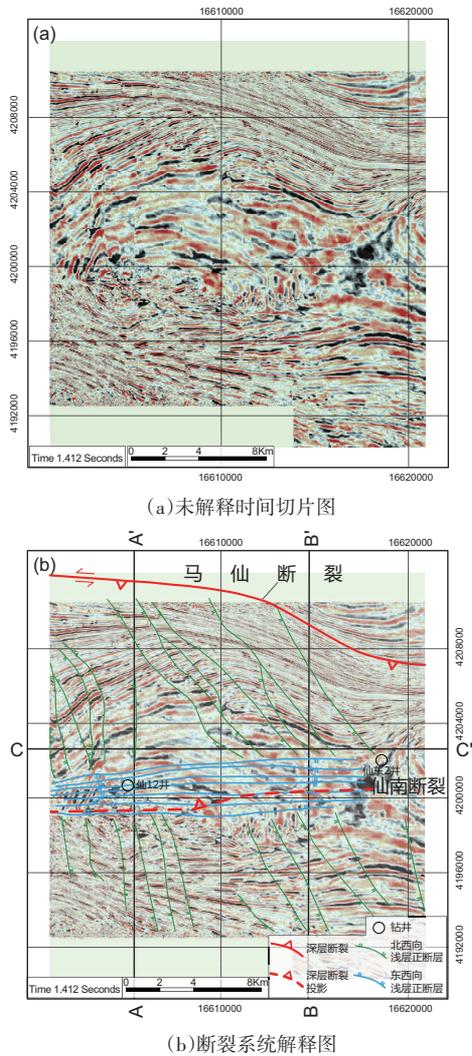


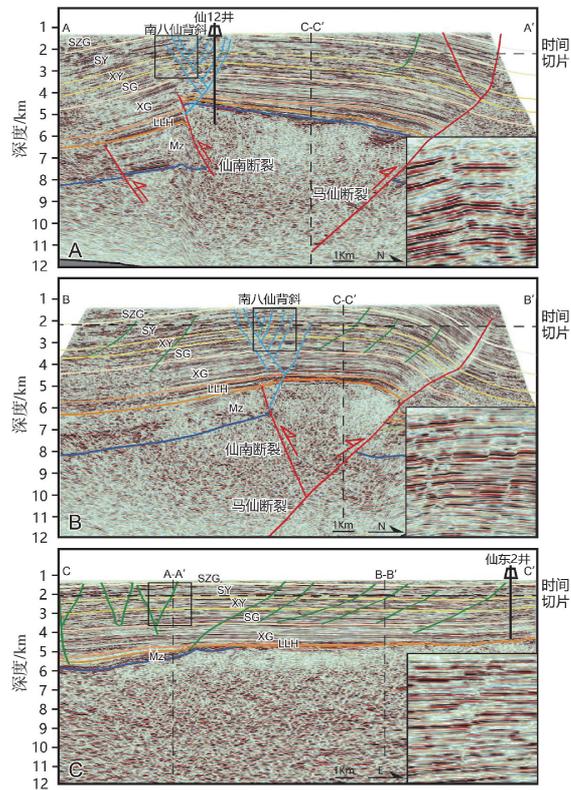
图2 南八仙地区三维地震时间切片(1.412 s)及断裂系统平面图

Fig. 2 Time slice (1.412 seconds) of 3D seismic data superposed by different fault systems in the Nanbaxian area

基底逆断裂：马仙断裂和仙南断裂。

2.1.1 马仙断裂

马仙断裂的东段连接绿梁山，是绿梁山与赛什腾山的构造分界线，向西一直延伸至冷湖背斜带，长度达90~100 km，构成了整个马海一大红沟凸起的北界（图1）。从过马仙断裂的地震剖面来看，该断裂南倾，倾角约50°~55°（图3）。结合钻井约束发现，马仙断裂上盘中生界地层在南八仙背斜西段有少量分布，而在东段及以东地区缺失，下盘中生界则普遍较厚（图3）。这些沉积特征反映了马仙断裂在中生代晚期就开始发生逆冲活动。该断裂控制了中生界地层分布，与前人认



剖面位置如图2所示；蓝色实线为东西向浅层正断层，绿色实线为北西向浅层正断层；黑框为正断层细节放大；Mz：中生代；新生界地层代号见表1

图3 南八仙地区地震反射剖面及其地质解释

Fig. 3 Seismic reflection profiles and their geological interpretation in the Nanbaxian area

识一致（王亮等，2010）。此外，新生界底部的路乐河组也明显从四周向靠近马仙断裂的上盘超覆（图3），可能代表了前新生代古地貌对新生代早期沉积的控制；再向上一直到上油砂山组厚度变化较小，且都卷入了构造变形，说明其现今的构造形态定型很晚，可能发生在晚中新世以后。

2.1.2 仙南断裂

仙南断裂位于马仙断裂上盘东端，呈东西走向，是控制南八仙背斜形成的主要基底断裂。从过仙南断裂的地震剖面可以看出，仙南断裂倾向北，断面非常陡倾，通过层速度模型（表2）对剖面进行时深转换，从深度剖面上可以看出其倾角达70°以上（图3），中生界底错断1500 m左右，新生界底错断700 m以上。与马仙断裂类似，仙南断裂上下两盘中生界厚度差异很大，上盘中生界仅在西部有少量分布，下盘中生界普遍较厚，反映其也是一条前新生代活动的基底断裂。新生界的地层分布特征与马仙断裂上盘一致，同样具有

路乐河组的超覆和后期变形的特点。

2.2 浅层断裂系统

三维地震数据还揭示了在南八仙背斜地区发育两组浅层正断层系统(图2),分别为北西走向和近东西走向。北西走向正断层分布范围较广,在时间切片上可清晰识别(图2),主要沿着马仙断裂南侧分布,向南穿过南八仙背斜,与马仙断裂斜交,角度约在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间,向南逐渐变为北北西向或正南北向。剖面上,该组正断层基本上仅在中生界中发育,以南西倾向为主,断距非常小(图3)。

东西向正断层分布有限,仅在南八仙背斜核部发育,由一组密集的正断层组成,平面上切割北西走向正断层(图2)。剖面上,该组正断层发育在仙南断裂上部的新生界中,每条断层的断面陡直、断距很小,不同倾向断裂之间相互切割现象明显,形成了一个地堑形状的构造谷地(图3a, b)。

3 讨论

3.1 北西向浅层正断层与马仙断裂

北西向正断层沿着马仙断裂西端发育并与之呈一定的交角,表明其与马仙断裂的活动有着密切联系;这些断裂平面上呈雁列式展布,表明其成因可能与走滑有一定的关系。而前人研究发现,马仙断裂具有一定的左旋走滑分量(王亮等, 2010),其南侧西端正好处于拉张的环境,与这些北西向正断层的发育非常匹配。因此,本文认为由于马仙断裂的左旋走滑,断裂上盘整体向东滑移,在马仙断裂南侧西端形成张性环境,进而导致这些北西向浅层正断层的发育。由于马仙断裂走滑量很小,因而这些正断层规模都不大,仅在中生界内部发育。

3.2 东西向浅层正断层与仙南断裂

由于这些近东西向的浅层正断裂多发育于南八仙背斜的核部,可能与南八仙背斜核部地层褶皱弯曲而导致的局部拉张环境有关。在这种情形下,局部拉张会在褶皱地层曲率最大的位置发育。然而,笔者注意到在邻近的马仙断裂上盘,具有同样褶皱形态和岩性的中生界中却没有类似张性正断层发育(图2, 3),说明这些东西向正断层可能有着其他的成因机制。

东西向正断层与仙南断裂在走向、发育位置、平面范围等方面都非常一致,暗示着它们可

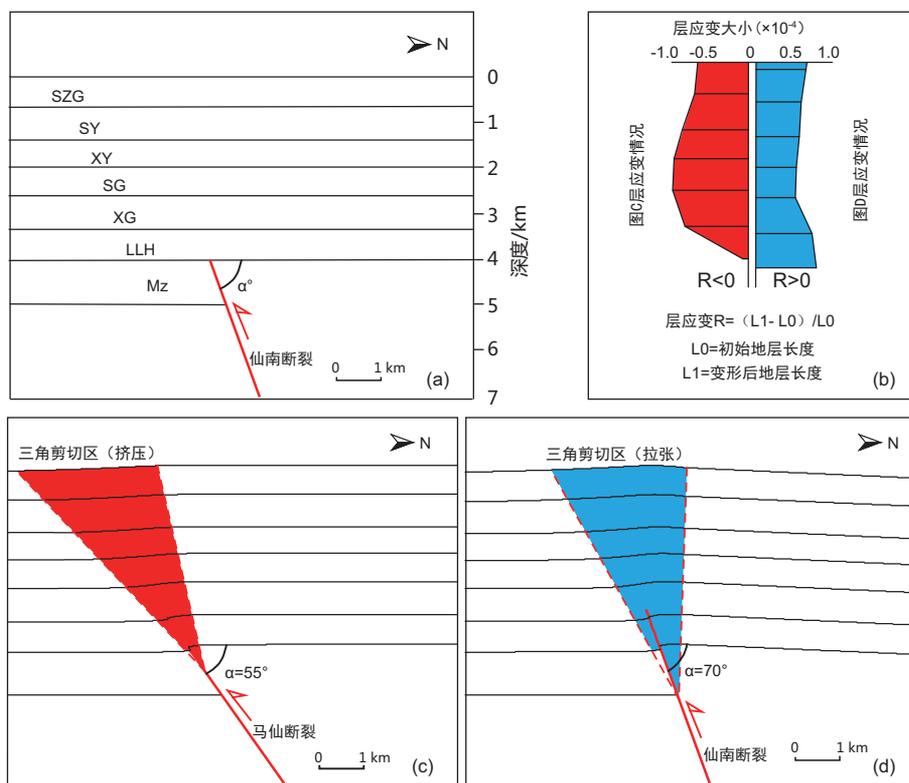
能有着密切的成因联系。然而因为这些东西向正断层的走向与仙南断裂平行而非斜交,很难用走滑来进行解释。笔者注意到,与一般的逆冲断裂不同,仙南断裂的倾角非常大($\sim 70^{\circ}$, 图3),远大于马仙断裂的倾角($\sim 55^{\circ}$)。如此高角度的逆断层活动可能在其浅部有不同的响应。笔者利用2D Move软件来对其运动学特征进行了简单的正演模拟,以分析不同倾角的基底逆断层活动对浅层构造的影响(图4)。

初始模型总长10 km, 新生界厚4 km, 无变形;中生界厚1 km, 且仅在下盘发育,代表中生代就活动的基底断裂(图4a)。断裂倾角设置为 55° 和 70° , 分别用于模拟马仙断裂和仙南断裂(图4c, d)。断裂运动学特征选择三角剪切模型(Allmendinger, 1998), 该模型已被广泛应用于柴达木盆地的基底变形中(pei et al., 2017)。基底断裂的新生代断距均为0.2 km, 与路乐河组断距基本一致。为充分展示不同模型的变形特征,我们计算了变形前后各地层的层应变 R , 其计算方法为: $R = (L_1 - L_0) / L_0$, 其中 L_0 和 L_1 分别为初始和变形后对应层的长度。当 $R > 0$ 时, 地层处于拉张状态; 当 $R < 0$ 时, 地层处于挤压状态。由于三角剪切模型的地层变形主要发生在断裂上部的三角剪切带中, R 的数值大小反映的其实是三角剪切带内的应力状态。

结果发现, 当基底断裂倾角相对较小时(55°), 其层应变都小于0, 反映其顶部的三角剪切区域为挤压环境(图4c), 也不会有平行基底断裂的正断层发育; 而当基底断裂倾角达到 70° 时, 其层应变都大于0, 反映其顶部的三角剪切区域变为拉张环境(图4d), 因而在该区域内会有一些与基底断裂平行的浅层正断层发育, 与仙南断裂上部的近东西向正断层的位置和形态都非常吻合。

3.3 南八仙背斜深、浅断裂的形成过程及意义

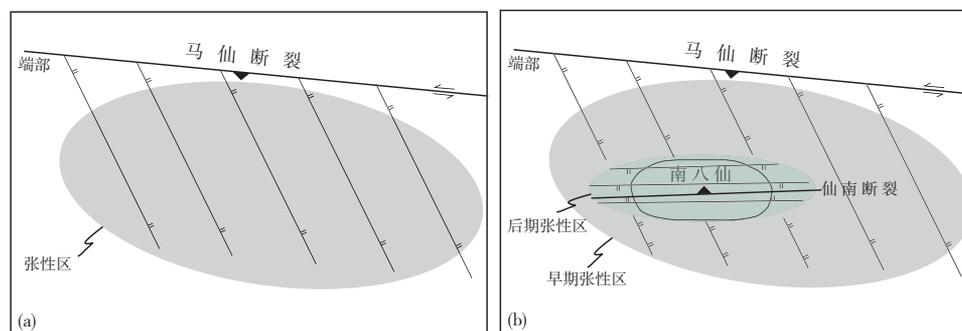
从上文分析可知, 南八仙背斜浅层发育的两套断裂系统分别与两条基底断裂的活动有关。北西向断层由马仙断裂的端部走滑而产生, 影响范围较广, 形成时间相对较早; 东西向断层受到仙南断裂的逆冲活动而形成, 分布较为局限, 活动相对较晚并切割了早期北西向断层(图5), 两组断层共同构成了南八仙浅层独特的结构。可见, 柴达木盆地内广泛发育的浅层正断层确实与深层基底断裂的活动有密切联系, 除了走滑活动外,



(a) 正演模拟初始模型设置; (c) 和 (d) 正演模拟结果; (b) 模拟结果中不同层应变大小, 红色 (代表挤压) 为 c 结果, 蓝色 (代表拉张) 为 d 结果; Mz: 中生代; 新生代地层代号见表 1

图 4 南八仙背斜断裂发育运动学机制模拟

Fig. 4 Simulation of fault kinematics of the Nanbaxian anticline



(a) 为早期受马仙断裂端部走滑作用影响, 形成北西向正断层; (b) 为后期仙南断裂发育, 导致南八仙内东西向正断层产生, 与早期断层叠加

图 5 南八仙背斜深、浅断裂构造耦合示意图

Fig. 5 Sketch map showing the structural coupling of deep and shallow fault systems in the Nanbaxian anticline

高角度基底断裂的逆冲活动也能形成浅层的正断层系统 (图 4)。由于南八仙背斜深部的两条主要基底断裂 (马仙断裂和仙南断裂) 都是前新生代活动的先存断裂, 本研究也进一步说明了先存断裂对柴达木盆地新生代变形的控制作用 (Wu et al., 2014)。此外, 南八仙背斜也是柴达木盆地内的重要油气田, 其主要圈闭就是这些浅层东西向正断层形成的断块和断鼻构造, 因此本文认识对

柴达木盆地后续的油气勘探也有一定的借鉴意义。

4 结论

本文在三维地震数据、钻井数据的基础上, 对柴北缘南八仙背斜的深、浅断裂耦合机制进行了详细分析。得出以下结论:

(1) 南八仙背斜深层结构简单, 主要发育两条基底断裂。马仙断裂具有左旋走滑的斜向逆冲

性质，仙南断裂具有高角度逆冲性质。它们都是中生代晚期就开始活动的老断裂，控制了断裂两盘中生界地层分布和新生界早期沉积；

(2) 南八仙背斜浅层结构复杂，存在两套独立的断裂系统。北东向断层呈雁列式分布，范围广泛，与马仙断裂呈约 45° 交角；东西向断层与仙南断裂平行，局限于南八仙背斜核部，对北东向断裂存在限制和切割；

(3) 南八仙背斜发育的深层断裂对浅层断裂有明显控制作用。北西向浅层正断层受控于马仙断裂的端部走滑；东西向正断层受控于仙南断裂的高角度逆冲。

参考文献 (References):

- 戴俊生, 叶兴树, 汤良杰, 等. 2003. 柴达木盆地构造分区及其油气远景[J]. 地质科学, 38(3): 291-296.
- 杜威, 刘润超, 程翔, 等. 2017. 柴达木盆地南翼山构造样式及其与油气成藏关系: 三维地震解释新证据[J]. 高校地质学报, 23(1): 117-124.
- 付锁堂, 马达德, 陈琰, 等. 2015. 柴达木盆地阿尔金山前东段天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 20(6): 1-13.
- 关平, 简星. 2013. 青藏高原北部新生代构造演化在柴达木盆地中的沉积记录[J]. 沉积学报, 31(5): 824-833.
- 姜波, 徐凤银, 彭德华, 等. 2004. 柴达木盆地北缘断裂构造变形特征[J]. 中国矿业大学学报, 33(6): 687-692.
- 刘志宏, 万传彪, 杨建国, 等. 2005. 柴达木盆地北缘地区新生代构造特征及变形规律[J]. 地质科学, 40(3): 404-414.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 汪立群, 徐凤银, 庞雄奇, 等. 2005. 马海——大红沟凸起油气勘探成果与柴达木盆地北缘的勘探方向[J]. 石油学报, 26(3): 21-25+32.
- 王亮, 肖安成, 杨树锋, 等. 2010. 柴北缘大型基底断裂——马仙断裂的构造特征研究[J]. 地质科学, 45(1): 157-166.
- 吴光大, 葛肖虹, 刘永江, 等. 2006. 柴达木盆地中、新生代构造演化及其对油气的控制[J]. 世界地质, 25(4): 411-417.
- 肖安成, 杨树锋, 程晓敢, 等. 2006. 柴达木盆地北缘的右行走滑冲断系统及其动力学[J]. 石油与天然气地质, 27(4): 482-487, 494.
- 肖安成, 吴磊, 李洪革, 等. 2013. 阿尔金断裂新生代活动方式及其与柴达木盆地的耦合分析[J]. 岩石学报, 29(8): 2826-2836.
- 袁四化, 刘永江, 葛肖虹, 等. 2008. 青藏高原北缘的隆升时期——来自阿尔金山和柴达木盆地的证据[J]. 岩石矿物学杂志, 27(5): 413-421.
- Allmendinger R W. 1998. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds [J]. *Tectonics*, 17(4): 640-656.
- Fu S, Ma D, Guo Z, et al. 2015. Strike-slip superimposed Qaidam Basin and its control on oil and gas accumulation, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42(6): 778-789.
- Ji J, Zhang K, Clift P D, et al. 2017. High-resolution magnetostratigraphic study of the Paleogene-Neogene strata in the Northern Qaidam Basin: Implications for the growth of the Northeastern Tibetan Plateau [J]. *Gondwana Research*, 46(Supplement C): 141-155.
- Lu H and Xiong S. 2009. Magnetostratigraphy of the Dahonggou section, northern Qaidam Basin and its bearing on Cenozoic tectonic evolution of the Qilian Shan and Altyn Tagh Fault [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(3-4): 539-550.
- Lu H, Ye J, Guo L, et al. 2018. Towards a clarification of the provenance of Cenozoic sediments in the northern Qaidam Basin [J]. *Lithosphere*, 2.1 (2010): 50-63.
- Mao L, Xiao A, Zhang H, et al. 2016. Structural deformation pattern within the NW Qaidam Basin in the Cenozoic era and its tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 687: 78-93.
- Pei Y, Paton D A, Wu K, et al. 2017. Subsurface structural interpretation by applying trishear algorithm: An example from the Lenghu5 fold-and-thrust belt, Qaidam Basin, Northern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 143: 343-353.
- Wang W, Zheng W, Zhang P, et al. 2017. Expansion of the Tibetan Plateau during the Neogene [J]. *Nature Communications*, 8: 15887.
- Wei Y, Xiao A, Wu L, et al. 2016. Temporal and spatial patterns of Cenozoic deformation across the Qaidam Basin, Northern Tibetan Plateau [J]. *Terra Nova*, 28(6): 409-418.
- Wu L, Xiao A, Ma D, et al. 2014. Cenozoic fault systems in southwest Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau: Geometry, temporal development, and significance for hydrocarbon accumulation [J]. *AAPG Bulletin*, 98(6): 1213-1234.
- Yin A and Harrison M T. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280.
- Zhou J, Xu Fe, Wang T, et al. 2006. Cenozoic deformation history of the Qaidam Basin, NW China: Results from cross-section restoration and implications for Qinghai-Tibet Plateau tectonics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(1-2): 195-210.