

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.600



# 塔中北坡“复合花状”构造发育特征及成因机制

韩晓影<sup>1,2</sup>, 汤良杰<sup>1,2\*</sup>, 曹自成<sup>3</sup>, 魏华动<sup>3</sup>, 付晨阳<sup>1,2</sup>

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学地球科学学院, 北京 102249

3. 中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:** 学者们对塔中北坡走滑断层的活动期次和发育时间以及形成机制展开过一些研究, 但尚未达成共识. 近期高品质三维地震资料的获得, 有助于对该区走滑断层展开更详细的研究. 基于三维地震数据的解释, 发现塔中北坡发育一系列下断穿寒武系基底、上断至中泥盆统的 NNE 向走滑断裂. 地震剖面上显示多数走滑断裂几何学形态复杂, 以上奥陶统为界, 断裂呈现下部“正花状”与上部“负花状”相互叠置的“复合花状”构造样式. 三维地震相干切片显示, 下部断裂呈 NNE 向线性延伸且只分布于主位移带附近; 上部断裂为 NW 走向, 整体上呈现为右阶雁列排布. 根据界面沿断层局部“隆升”高度的分析以及断层生长指数的计算可知, 下部断裂形成时间不早于晚奥陶世, 上部雁列正断层的发育时间为中志留—中泥盆世. 结合塔里木盆地周缘构造背景分析, 认为下部基底断层可能发育于晚奥陶世, 与古昆仑洋强烈俯冲碰撞作用相关; 上部雁列断层的形成可能受控于下部基底走滑断层的活化, 与阿尔金域强烈的褶皱造山作用相关.

**关键词:** 走滑断层; “复合花状”构造; 线性构造; 雁列断层; 塔中北坡; 石油地质.

**中图分类号:** P542

**文章编号:** 1000-2383(2018)02-0525-13

**收稿日期:** 2017-09-30

## Characteristics and Formation Mechanism of Composite Flower Structures in Northern Slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin

Han Xiaoying<sup>1,2</sup>, Tang Liangjie<sup>1,2\*</sup>, Cao Zicheng<sup>3</sup>, Wei Huadong<sup>3</sup>, Fu Chenyang<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Exploration and Production Research Institute of Northwest Oilfield Branch Company, SINOPEC, Urumqi 830000, China

**Abstract:** Developmental stages and mechanisms of the strike-slip faults on the northern slope of the Tarim basin remains controversial despite many studies. However, a more detailed study of the strike-slip faults in the area is possible due to the availability of high-quality 3D seismic data now. It is found that a series of strike-slip faults, which cut through the basement strata and straight up to the Middle Devonian strata, developed in the study area based on detailed 3D seismic interpretations. On the 3D seismic profiles, the strike-slip fault shows complex geometric feature that consists of a lower positive flower structure and an upper negative flower structure that is bounded by the Late Ordovician strata. On the seismic coherency slices, the lower strike-slip faults show NE linear extension and the upper strike-slip faults are NW trending and present right-order en-echelon arrangements. According to changes of the rising height of the interface and fault throw changes, the development history of the strike-slip faults may be divided into two stages including the Late Ordovician and the Middle Silurian-Middle Devonian. Combined with tectonic background analyses on the structures surrounding Tarim basin, the lower strike-slip faults and the upper en-echelon normal faults may be genetically linked. In the Late Ordovician, the

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos.41572105, 41172125); 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 项目 (No.2012CB214804); 国家科技重大专项 (No.2011ZX05002-003-001); 中国石油化工股份有限公司项目 (Nos.P14131, P11086).

**作者简介:** 韩晓影 (1989—), 女, 博士研究生, 主要从事含油气盆地构造分析方面的研究. ORCID: 0000-0001-7495-3902. E-mail: hanxiaoying\_cup@126.com

\* **通讯作者:** 汤良杰, ORCID: 0000-0002-6426-7287. E-mail: 1140071859@qq.com

**引用格式:** 韩晓影, 汤良杰, 曹自成, 等, 2018. 塔中北坡“复合花状”构造发育特征及成因机制. 地球科学, 43(2): 525-537.

Tazhong uplift experienced a strong compression from ancient Kunlun ocean subducting in NE direction, which resulted in the formation of NNE-trending strike-slip faults. During the Middle Silurian-Middle Devonian, intense folding orogeny of the Arkin tectonic domain caused the reactivation of the lower strike-slip faults and made the formation of the en-echelon normal faults was controlled by the early-stage basement weak zones.

**Key words:** strike-slip fault; composite flower structure; linear structure; en-echelon normal fault; northern slope of Tazhong uplift; petroleum geology.

作为沉积盆地中特殊且复杂的断裂系统,走滑断裂对储层改造、岩浆活动、圈闭形成以及油气运聚成藏均具有重要的控制作用.勘探实践证明,塔中北坡发育一定规模与油气分布相关的走滑断层(邬光辉等,2011,2012;马庆佑等,2012;杨圣彬等,2013;周新源等,2013;黄太柱,2014;Lan *et al.*,2015;韩剑发等,2017;李培军等,2017).走滑断层的详细刻画,对分析该区走滑活动与油气成藏的关系至关重要.随着石油勘探的发展,大量地质、地球物理资料的获得极大地促进了走滑断层的调查研究.然而,由于这些断裂固有的三维特性,很难充分表征塔中北坡走滑断层的发育特征及其形成机制.前人大量的研究主要集中于走滑断层结构特征及其控油作用分析(张承泽等,2008;邬光辉等,2011,2012;马庆佑等,2012;杨圣彬等,2013;周新源等,2013;黄太柱,2014;Lan *et al.*,2015),包括走滑断层结构样式、分布特征及其与油气运聚的关系.多数作者认为走滑断层活动于志留纪至泥盆纪,剖面上表现为“正花状”或“负花状”构造(张承泽等,2008;邬光辉等,2011,2012;马庆佑等,2012).许多学者对塔中北坡走滑断层的活动期次和发育时间以及形成机制展开过研究,然而他们的认识并不统一(张承泽等,2008;杨圣彬等,2013;黄太柱,2014).

近期高品质三维地震资料的获得,有助于对该区走滑断层展开详细研究,更好地约束和了解走滑断层的发育特征及其成因机制.本文基于三维地震资料解释,详细解剖和落实了塔中北坡走滑断层的几何形态,并厘清了断层活动期次及发育时间.此外,结合塔里木盆地周缘构造背景和基底构造分析,本文对塔中北坡走滑断层的形成机制也进行了简单探讨,以期对塔中地区进一步的油气勘探提供地质依据.

## 1 区域地质概况

塔中北坡位于塔中隆起的北部,以塔中 I 号断裂带为界,上盘为塔中隆起区,下盘为塔中北坡,在构造位置上跨于顺托果勒低凸起东南段与古城墟隆

起西段之上(黄太柱,2014).塔中北坡 NE 向延伸约 100 km,北西向延伸约 350 km,覆盖面积约为 35 000 km<sup>2</sup>.本文主要运用 3 个三维地震工区,顺 1 三维工区位于塔中北坡北部,覆盖面积约为 1 200 km<sup>2</sup>;顺南 1 和顺南 2 三维工区位于南部,面积约为 4 600 km<sup>2</sup>(图 1).

塔里木盆地古生代经历了多期强烈的构造活动(Nakajima *et al.*,1990).前寒武纪—早奥陶世,塔里木板块 SE 方向的阿尔金洋处于海底扩张阶段,北部的南天山洋处于裂谷时期,西南的古昆仑洋在早寒武世已开始俯冲消减,但是规模很小,整个塔里木盆地处于统一的伸展背景之下,伸展断层发育(Li *et al.*,2013)(图 2 中红色断层).中—晚奥陶世,古昆仑洋发生强烈的俯冲碰撞作用(李本亮等,2009),塔里木盆地由伸展转换为挤压构造背景,来自 SW 方向强烈的挤压力导致塔中 I 号逆冲断裂和塔中南缘逆冲断裂活动强烈,塔中隆起初步形成(Li *et al.*,1996;Wang,2004;任建业等,2011,2012;Li *et al.*,2012).志留纪—泥盆纪,随着昆仑加里东碰撞造山活动的结束,古特提洋开始扩张(杨树峰等,2005).同时,南天山洋俯冲消减逐渐闭合,阿尔金构造域发生强烈的褶皱造山作用(Liu *et al.*,2007).来自 SE 方向强烈的挤压力,导致塔中隆起呈现 SE(高)向 NW(低)倾没的单斜构造形态(丁长辉等,2009).在区域构造背景下,塔中北坡南部上志留统和泥盆系被强烈地挤压(图 2).晚泥盆世之后,塔里木盆地周缘的古大洋均逐渐闭合,在塔中地区,与古特提斯洋演化相关的二叠纪火成岩及与其通道相关的断裂广泛发育(Li *et al.*,2013).

地质和地球物理资料揭示,塔中北坡古生界除了奥陶系、志留系、泥盆系等有不同程度的缺失(黄太柱,2014),其他地层发育相对完整(图 3).寒武系—中奥陶统发育厚达 3 000 m 的海相碳酸盐岩,上奥陶统发育厚度超过 2 000 m 的泥岩,志留—石炭系塔中地区广泛发育碎屑岩.塔中地区主要地震反射界面和岩石地层单位见图 3.



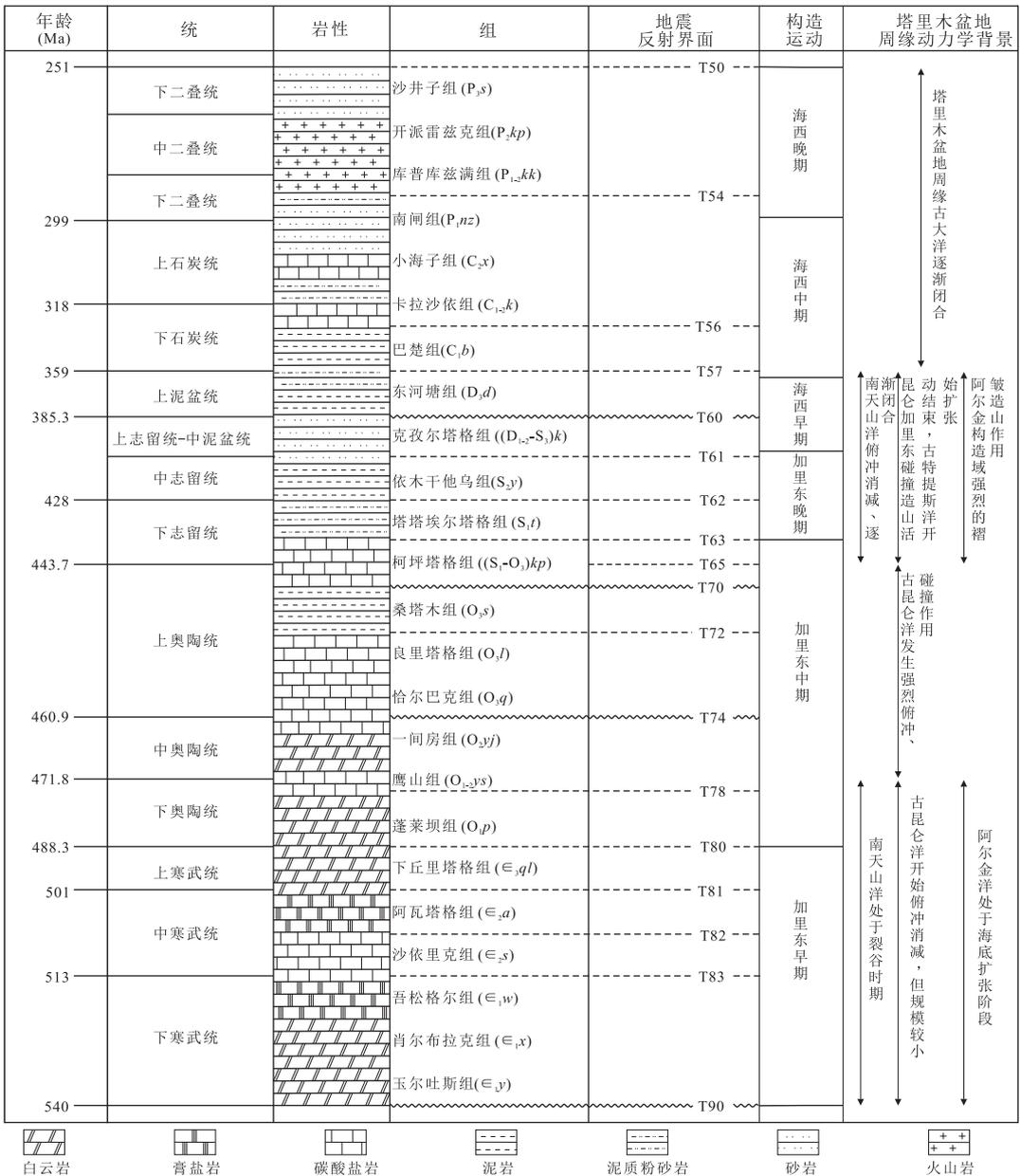


图 3 塔中地区古生界地层

Fig.3 The Paleozoic strata of Tazhong uplift

断层两侧同一岩性地层单元的厚度、沉积相或者地层产状的突然变化也作为走滑断层识别的标志之一 (Ghalayini *et al.*, 2014). 在平面上, 走滑断裂系统通常以发育线性延伸构造、雁列断层和马尾断裂为特征 (Moody and Hill, 1956; McClay and Bonora, 2001). 空间上, 走滑断层通常呈现出海豚和丝带效应 (Graham *et al.*, 1984). 此外, 夹于走滑断裂带中发育的各种透镜或杏仁状构造也作为走滑断层的空间识别标志之一.

由于塔中北坡走滑断层规模较小, 空间识别标志并不明显. 然而, 笔者在顺 1、顺南 1 和顺南 2 工区

的三维地震剖面观察到垂直断层和“花状”构造的发育 (图 2). 同时, 顺南 1 工区上奥陶统桑塔木组顶界面的相干切片显示, 顺南 1 断层的南部分化出马尾断裂并走向衰亡 (图 4a). 顺南 2 工区上奥陶统哈尔巴克组底界面相干切片显示, 顺南 2 断层北部呈现拉分地堑特征、南部则呈现线性延伸特征 (图 4b). 顺 1 工区泥盆系东河塘组底界面相干切片显示, 顺 1 断裂带由一系列整体上呈右阶雁列展布的延伸规模不大的 NW 向断裂组成 (图 4c). 基于以上断裂几何学特征, 塔中北坡古生代发育的断裂被确定为走滑断裂.

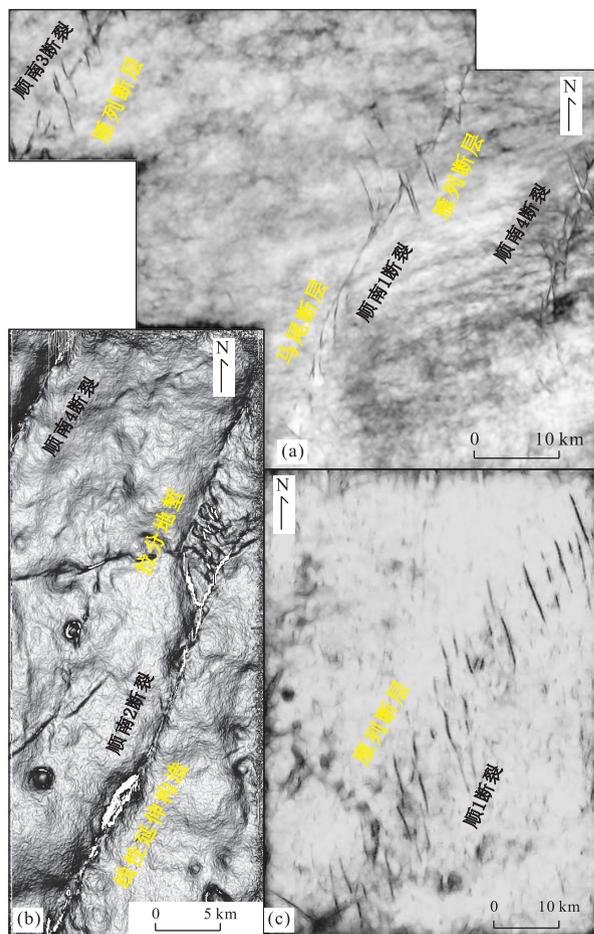


图4 塔中北坡走滑断层识别标志

Fig.4 Identification characteristics of strike-slip faults in northern slope of Tazhong uplift

a. 顺南1三维工区桑塔木组顶界面(T70)相干切片; b. 顺南2三维工区恰尔巴克组底界面(T74)相干切片; c. 顺南1三维工区东河塘组底界面(T60)相干切片; 三维工区的位置见图1

## 2.2 断裂几何学样式

基于三维地震精细解释数据,笔者在研究区的3个三维工区中共识别出顺1、顺南1、顺南2、顺南3和顺南4五组主要的走滑断裂带(图5~7)。除了该五条断裂带,图6显示在顺南1和顺南2工区还发育一系列NEE向走滑断裂,然而,由于这些断裂在剖面上断距太小难以识别(图2),因此本文将不对该方向走滑断裂展开详细研究。图5代表研究区五条走滑断裂带构造样式典型剖面,剖面上显示这些断裂断穿寒武系至中泥盆统所有地层,且断面陡倾几乎垂直。志留系—中泥盆统沿这些断层形成“下掉”的小型地堑,最大垂直位移不超过150 m(塔中地区时深转换公式约为:深度(m)=双程反射时间(ms)×3)。寒武系—上奥陶统沿断层不存在明显的错断,但断层两侧地层多呈向上低幅“隆起”的特征。

顺1断层发育于顺1三维工区中部,向北端延伸断层几何形态复杂,呈现为下部“正花状”与上部“负花状”相互叠置的“复合花状”构造样式;断层中、南部呈现为简单几何学形态,由下部的垂直断层和上部的“负花状”构造组成(图5)。在顺南1和顺南2三维工区,从NW到SE,平面上依次发育顺南3、顺南1、顺南4和顺南2四条NNE向断裂,顺南3、顺南2断裂的中部以及顺南3、顺南4断裂的南部,断裂下部断面陡直,上部则发育“负花状”构造。顺南4断裂的北部和顺南2断裂的南部走滑断层表现为简单的直立断层。顺南1和顺南2断裂的北部则呈现为“复合花状”构造(图5)。综上所述,剖面上大多数走滑断裂表现为陡倾、直立断层或者“复合花状”构造。

奥陶系恰尔巴克组底界面三维地震属性图显示五条断裂带走向近平行(图6,7),每条断裂带均由一系列延伸规模不大的NNE向断层组成,且沿着主位移带呈带状分布。此外,图6还显示顺南4断裂北部发育拉分地堑,顺南1和顺南4断裂的南部分化出马尼断裂。志留系依木干他乌组顶界面的相干切片显示,五条主断裂带的每条断裂带均由一系列近于等间距排列的NW向正断层组成;这些正断层倾向NE或SW,倾角为 $83^{\circ}\sim 87^{\circ}$ ,且整体呈右阶雁列展布,沿NNE向线性延伸与下部基底走滑断层的主位移带基本平行(图6,7)。每条雁列正断层与基底走滑断层交角的范围为 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ,大多数交角约为 $50^{\circ}$ 。空间上,雁列正断层与基底走滑断层上下叠置,呈现出一个复杂的几何学形态,以上奥陶统为界,由下部的凸起地层变形和上部的凹陷地层变形组成。

## 2.3 断裂活动期次和发育时间

基于地震剖面判断断层形成时间的方法有多种,如:分析断层切割地层时代、断距变化分析和断层生长指数计算等。一种最常用的方法就是分析断层与邻近地层的接触关系,断层发育时间比其所切割地层时代晚、比其所终止地层时代早,因此通过确定断层切割的最新地层和终止的最老地层,可以判定断层的活动时间。塔中北坡断裂向下断穿基底,向上消失于中泥盆统顶界面,表明其最晚活动时间早于中泥盆世。下部断裂的垂向断距不明显,很难确定断层发育的精确时间。但是,寒武纪—晚奥陶世的层位沿下部断裂两侧呈现出明显向上局部“隆升”的特征。本文将界面沿断层的局部“隆升”高度作为断距分析指标,界面局部“隆升”高度越大指示断距越大。本文运用两种计算界面局部“隆升”高度的方法

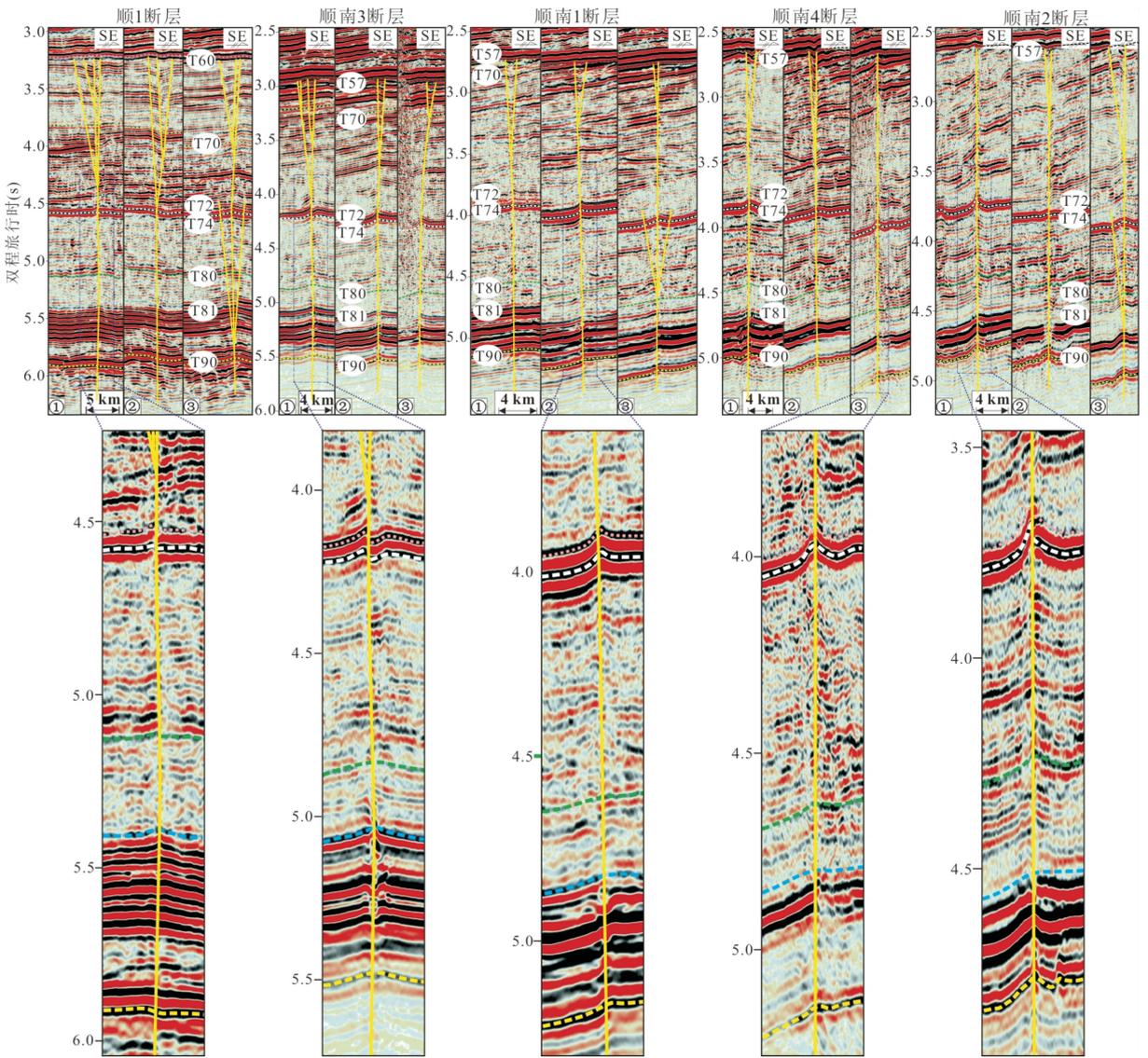


图 5 顺 1、顺南 1 和顺南 2 三维工区地震剖面走滑断裂解释

Fig.5 Interpreted 3D seismic sections across the strike-slip faults from the 3D seismic volumes of S1, SN1 and SN2

走滑断裂典型构造样式剖面位置见图 6

(图 8).第一种计算方法适用整个界面起伏变化不大、地层产状水平的情况(图 8a).加里东晚期和海西早期的构造运动使塔中北坡南部发生区域构造隆升,导致地层发生倾斜,界面沿断层总的隆升高度是区域隆升高度和局部“隆升”之和;因此,第二种方法适用于在界面倾斜的情况下计算界面沿断层的局部“隆升”高度(图 8b).基于这两种方法,本文选取了五条主断裂带典型剖面(图 5),计算寒武纪一晚奥陶世不同层位沿断层的“隆升”高度.结果显示最大“隆升”高度位于 T74 和 T72 界面(图 9),这表明下部基底断裂的变形时间不早于 T72 界面发育时间,据此笔者认为下部基底走滑断裂发育时间可能不早于晚奥陶世.

综上所述,上部断裂系统由一系列雁列正断层组成,这些断层向下断穿志留系,向上消失于中泥盆统,表明其最晚活动时间早于晚泥盆世.此外,利用断层生长指数法,即根据断层两盘沉积物厚度比值,可以判定雁列正断层精确活动时间(汤良杰和金之钧,2000;Li *et al.*,2015).如果断层生长指数大于 1,意味着断层上盘沉积厚度大于下盘,代表该单位沉积时受断层活动影响;断层生长指数越大代表断裂活动越强烈.在顺南 1 和顺南 2 工区,由于部分泥盆系和上志留统被剥蚀,所以不能确定断裂的确切活动时间.为了更准确地判断上部雁列正断层的发育时间,本文选取了顺 1 三维工区 F1、F2 和 F3 三条代表性的断层进行生长指数计算(图 10),这些断层

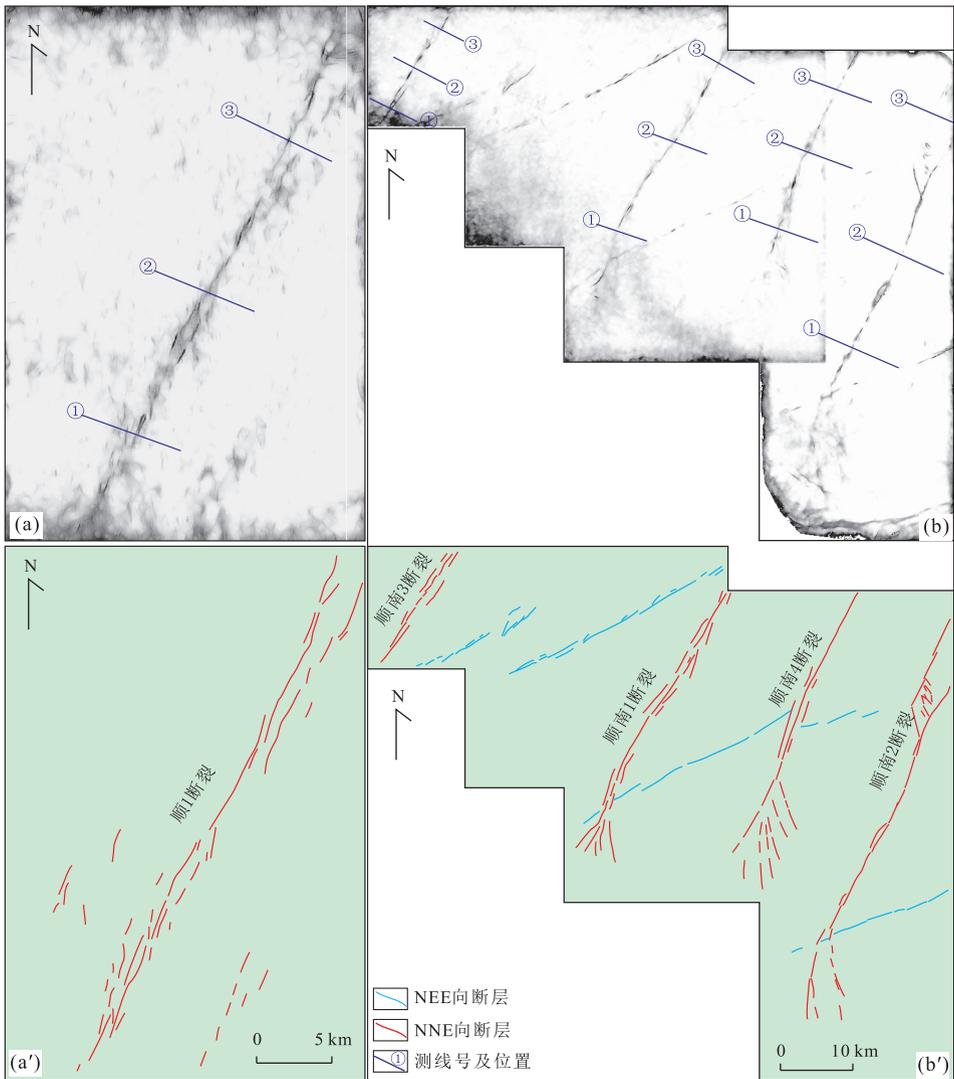


图 6 顺 1(a, a')、顺南 1 和顺南 2(b, b')三维工区上奥陶统恰尔巴克组底界面(T74)地震相干属性切片

Fig.6 Coherence attribute slices of the Ordovician Qiaerbake Formation bottom (T74) from the 3D seismic volumes of S1 (a, a'), SN1 and SN2 (b, b')

三维工区的位置见图 1

两侧下志留统断距相当,生长指数约为 1,表明这些断裂的形成时间晚于早志留世.中志留世一中泥盆世,断层两盘沉积物厚度(依木干他乌组和克孜尔塔格组)比值显示断层生长指数在 1.24~2.02 之间.同时,依木干他乌组沉积时期断层生长指数最大,克孜尔塔格组沉积时期断层生长指数减小,表明这些断裂开始发育于中志留世一直活动至中泥盆世,且活动高峰期为中志留世.

根据断层切割层位、界面“隆升”高度变化以及断层生长指数计算结果,笔者认为塔中北坡古生代分别发育基底走滑断层和上部雁列正断层两期断裂活动,基底走滑断层发育时间不早于晚奥陶世,上部雁列正断层活动于中志留世一中泥盆世.

### 3 走滑断层的演化过程及成因机制

关于塔中北坡走滑断层前人已展开过大量研究,在断裂的结构样式、分布特征以及断裂控油机理等方面取得了很多重要认识(张承泽等,2008;邬光辉等,2011,2012;马庆佑等,2012;杨圣彬等,2013;周新源等,2013;黄太柱,2014;Lan *et al.*, 2015).然而,由于过去研究中缺乏三维地震数据,走滑断层垂向断距较小,利用二维地震资料识别与落实比较困难,严重制约了对走滑断层的精细刻画,尤其对走滑断层形成演化及成因机制的研究仍存在一些争议.一些学者认为走滑断裂体系是晚加里东期挤压应力环境下形成的塔中地区 NW 向构造的调节断层(张

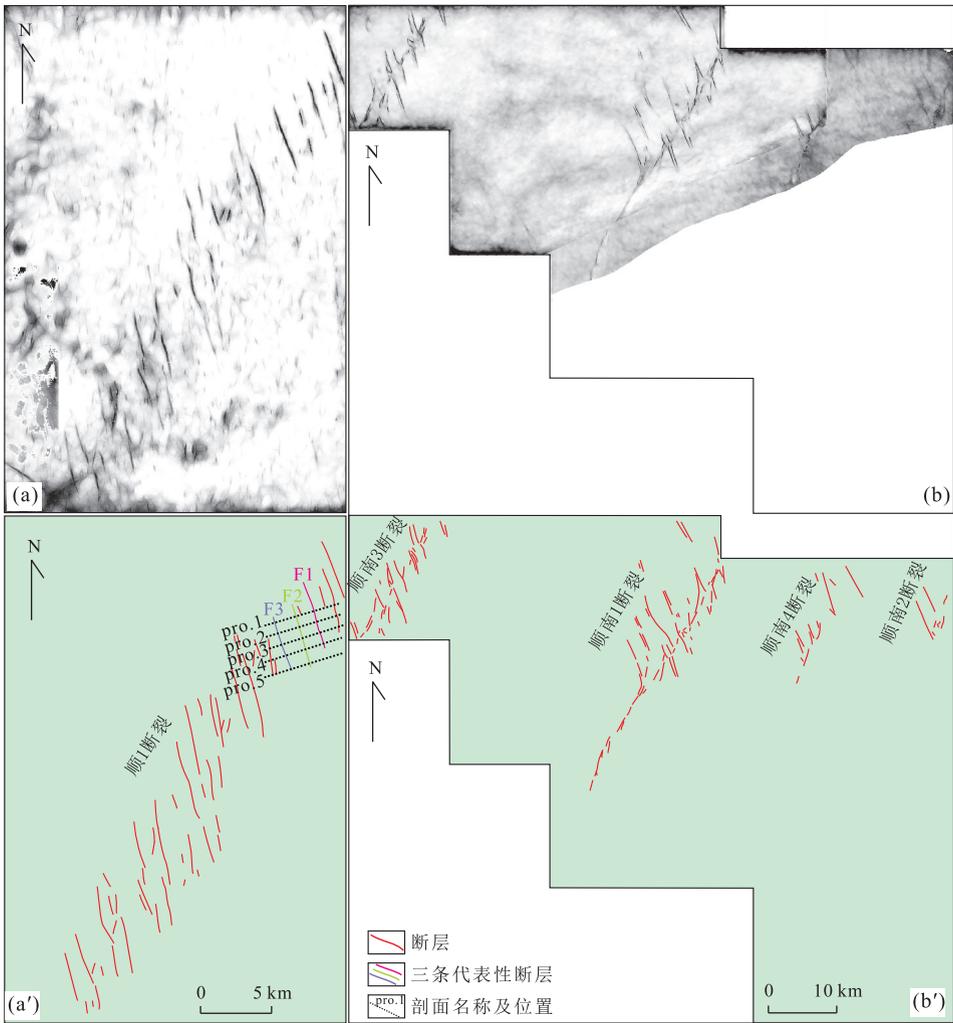


图 7 顺 1 三维工区中泥盆统克孜儿塔格组顶界面(T60)地震相干属性切片(a,a'),顺南 1 和顺南 2 三维工区下志留统柯坪塔格组顶界面(T63)地震相干属性切片(b,b')

Fig.7 Coherence attribute slice of Devonian Keziertage Formation top (T60) from the S1 3D seismic volumes (a, a') and Coherence attribute slice of Silurian Kepingtage Formation top (T63) from the 3D seismic volume of SN1 and SN2 (b, b')

三维工区的位置见图 1

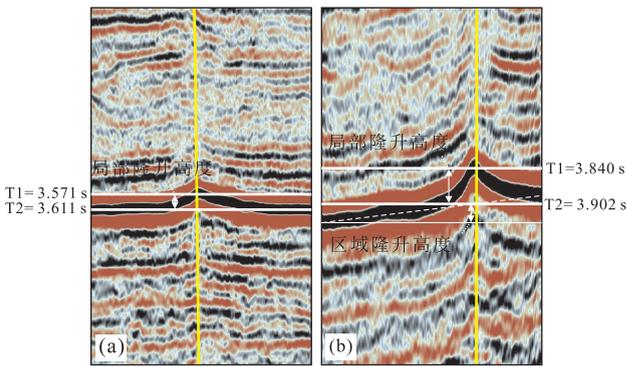


图 8 界面“隆升”高度计算示意图

Fig.8 Schematic sketch diagram of the rising height of the interface

局部隆升高度(km)=(T2-T1)×3

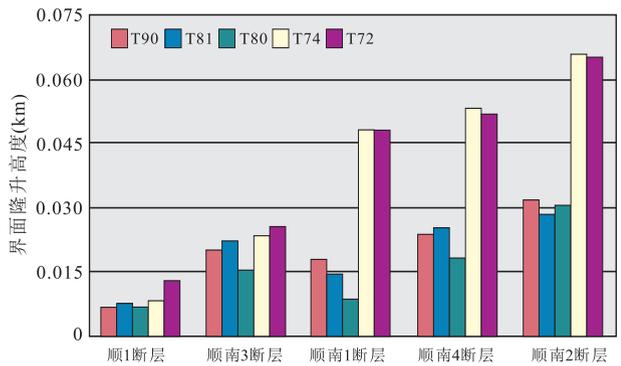


图 9 不同断裂不同界面“隆升”高度柱状图

Fig.9 The histogram of the rising height of different interface of the six major faults

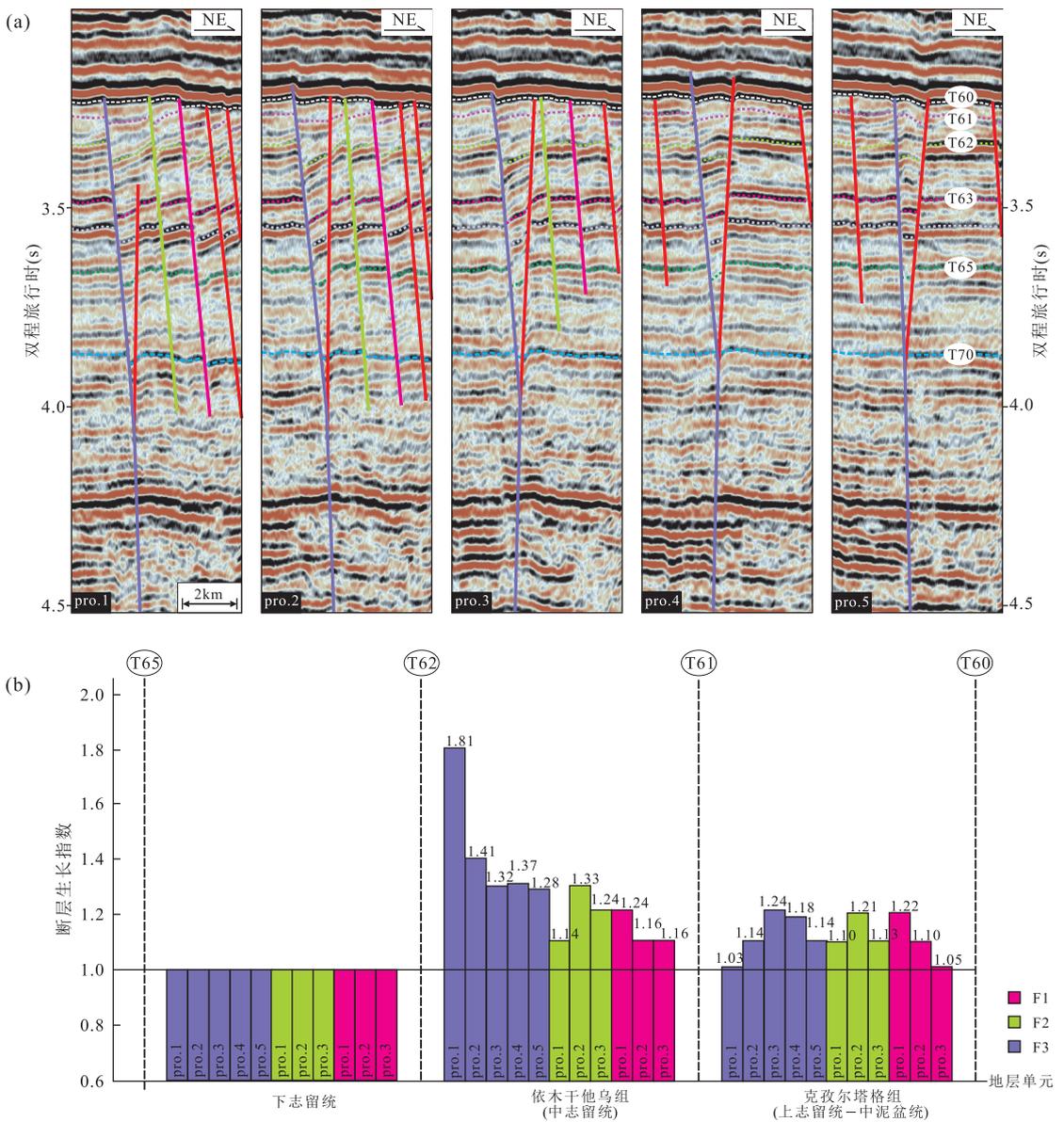


图 10 雁列正断层地震解释剖面(a)和断层生长指数分析(b)

Fig.10 Seismic interpretation sections (a) and fault growth index analysis (b) for en-echelon normal faults  
断层 F1、F2、F3 和剖面 pro.1、pro.2、pro.3、pro.4、pro.5 的位置见图 5

艳萍等,2011;杨圣彬等,2013);大多数学者认为早海西期在来自 SE 方向的构造挤压作用下,对基底 NE 向构造产生走滑分量导致左旋走滑断裂系统形成(张承泽等,2008;邬光辉等,2011,2012;马庆佑等,2012;Li *et al.*,2013).然而,笔者发现大部分走滑断层在三维地震剖面上呈现为“复合花状”构造,且下部的“正花状”构造与上部的“负花状”构造具有不同的性质,其形成于不同时期、受不同因素控制.

### 3.1 走滑断层演化过程

基于上文分析可知,下部走滑断层发育时间不早于晚奥陶世,上部雁列正断层活动于中志留世一

中泥盆世.值得注意的是,很难确定下部基底断层的确切发育时间.然而,可以对下部走滑断层活动时间提出两种假设:(1)其形成时间不迟于晚奥陶世不晚于中志留世;(2)基底走滑断层与上部雁列断层同时发育.结合塔中地区周缘构造背景分析,本文支持第一种假设(理由详见 3.3 节).此外,上部雁列正断层活动于中志留世一中泥盆世,考虑到该时期在塔中北坡地区并不存在 NE-SW 向伸展应力的相关记录,所以笔者推测这些雁列正断层很可能受控于基底走滑断层的重新活化.同时,通过测量上部雁列断层与主位移带夹角,笔者发现多数雁列断层与主位

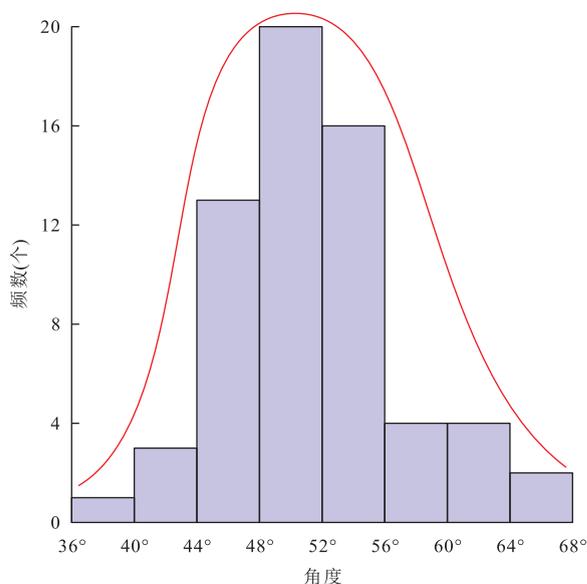


图 11 雁列正断层与主位移带交角分布频数柱状图

Fig.11 The frequency distribution histogram of the angle between the strike of each en-echelon normal fault and the principal displacement zone (PDZ)

移带的交角在  $50^\circ$  左右 (图 11), 意味着这些雁列正断层为 NE 向基底走滑断层在左旋走滑位移变形过程中形成的伸展破裂构造 (Wilcox *et al.*, 1973; Stefanov and Bakeev, 2015). 因此, 塔中北坡走滑断层的演化过程被划分为 2 个演化阶段: 第一阶段断层活动开始于晚奥陶世, 形成直立、高倾走滑断层; 第二阶段断层活动于中志留世—中泥盆世, 上部雁列正断层发育受控于下部基底断层的重新活化。

### 3.2 先存基底构造特征

尽管受深度分辨率的限制, 先存基底构造在地震资料上很难被清楚地观察到。但是, 基于盆地基底航磁资料解译, 前人研究发现在塔里木盆地中部有一条极为醒目、横亘盆地东西的高值正磁异常条带, 以此为界, 塔北地块以相对较弱的 NNW 向弱磁异常为特征, 塔南地块则以 NE 向正负相间的磁异常条带为特征 (乔日新和张用夏, 2002; 许大丰等, 2004; 何碧竹等, 2011)。基于对塔南地块的 NE 向正负相间的磁异常条带特征的解译, 学者们认为在塔中地区发育 NE 向先存基底构造 (乔日新和张用夏, 2002; 何碧竹等, 2011; 邬光辉等, 2012)。大多数学者认为, 塔中北坡走滑断层的发育受控于这种先存基底软弱结构 (邬光辉等, 2011, 2012; 马庆佑等, 2012; 杨圣彬等, 2013; 周新源等, 2013; 黄太柱, 2014; Lan *et al.*, 2015)。

### 3.3 周缘构造背景分析

晚奥陶世, 由于古昆仑洋的俯冲作用强烈加剧,

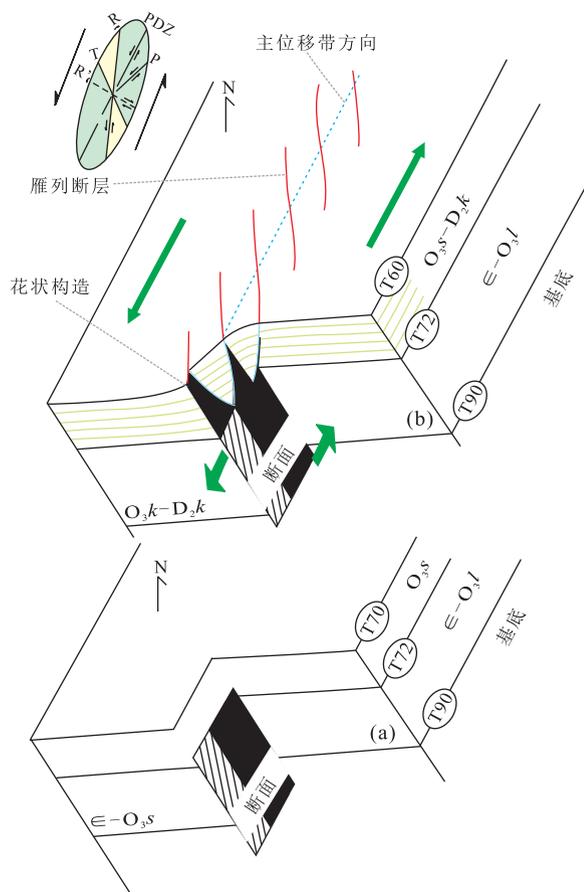


图 12 塔中北坡走滑断层演化模型

Fig.12 Evolution model of the strike-slip faults in the northern slope of Tazhong uplift

塔里木盆地经历了强烈的挤压作用 (张振生等, 2002)。在塔中地区, 作为构造薄弱带的 NE 向先存基底构造受 NE 向挤压力影响, 可能成为 NE 向走滑断裂发育的基础。在塔中地区受到挤压作用之前, 平行于挤压力的基底断层已经先存, 那么受古昆仑洋俯冲作用强烈加剧的影响, 这些隐伏基底断裂重新活化为 NNE 基底走滑断层不足为奇。这些走滑断层剖面上表现为具有逆离距直立断层 (或正花状构造) (图 12a)。受桑塔木组厚层泥岩解耦作用的影响, 在柯坪塔格组和塔塔埃尔塔格组沉积时期, 剖面上显示走滑断层活动微弱。中志留世—中泥盆世, 随着昆仑加里东碰撞造山作用的结束, 塔中地区的主要动力学背景发生转换, 阿尔金构造域强烈的褶皱造山活动使得塔中北坡南部地区不断抬升, 志留系顶部发生强烈侵蚀甚至整个泥盆系均被剥蚀殆尽。在 SE 方向上的区域性挤压应力场产生剪切分量, 使得早期的 NE 走向的基底走滑断层复活, 发生左旋走滑位移, 导致中志留世—中泥盆世地层形成了一系

列 NW 走向雁列正断层.剖面上,雁列正断层呈现出负花状构造,随着走滑位移增加,雁列正断层与深部基底断层断穿上奥陶统厚层泥岩相贯通构成下部具有逆离距的直立断层或者“正花”和上部“负花”叠置的“复合花状”构造(图 12b).

## 4 结论

(1)地震剖面上,塔中北坡走滑断层断面陡直,向下断穿寒武系基底,向上断至中泥盆统.大多数走滑断层显示出复杂的几何组合样式,以上奥陶统为界,由一个下部具有逆离距的直立断层或者“正花”状构造和上部“负花”状构造复合而成.平面上,下部基底断层由一系列延伸规模不大的 NNE 向断层组成,且沿着主位移带呈带状分布;上部断层由一系列 NW 向正断层组成,这些正断层整体呈右阶雁列展布,形成 NNE 向线性延伸带,该带与下部基底走滑断层的主位移带平行.

(2)下部基底断层变形不早于晚奥陶世;上部雁列正断层形成于中志留世,一直活动至中泥盆世,且活动高峰期为中志留世.

(3)下部走滑断层可能受晚奥陶世期间古昆仑洋俯冲作用强烈加剧的影响.上部雁列断层与下部基底走滑断层具有成因联系,志留—泥盆纪阿尔金构造域的强烈褶皱造山运动导致基底走滑断层强烈活化,并发生左旋走滑位移,从而导致一系列的雁列式正断层形成.

致谢:中石化西北油田分公司在地震资料方面给予了大力支持,匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并致以深切谢意.

## References

Asaoka, A., Sawada, Y., Yamada, S., 2016. Riedel Shear Band Formation with Flower Structures That Develop at the Surface Ground on a Strike Slip Fault. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(20): 751—754. <https://doi.org/10.3208/jgssp.jp-121>

Christie-Blick, N., Biddle, K. T., 1985. Deformation and Basin Formation along Strike-Slip Faults. In: Biddle, K. T., Christie-Blick, N., eds., *Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation*. *Special Publications of SEPM*, 37: 1—34. <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0001>

Ding, C. H., Zhou, H. B., Lu, P. C., et al., 2009. The Paleozoic Structural Features and Its Evolution of the Tazhong Low Uplift, Xinjiang. *Geotectonica et Metallogenia*, 33

(1): 148—153 (in Chinese with English abstract).

Ghalayini, R., Daniel, J. M., Homberg, C., et al., 2014. Impact of Cenozoic Strike-Slip Tectonics on the Evolution of the Northern Levant Basin (Offshore Lebanon). *Tectonics*, 33(11): 2121—2142. <https://doi.org/10.1002/2014tc003574>

Graham, S. A., McCloy, C., Hitzman, M., 1984. Basin Evolution during Change from Convergent to Transform Continental Margin in Central California. *AAPG Bulletin*, 68(3): 223—249. <https://doi.org/10.1306/ad460a03-16f7-11d7-8645000102c1865d>

Han, J. F., Sun, C. H., Wang, Z. Y., et al., 2017. Superimposed Compound Karst Model and Oil and Gas Exploration of Carbonate in Tazhong Uplift. *Earth Science*, 42(3): 410—420 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.031>

Harding, T. P., 1974. Petroleum Traps Associated with Wrench Faults. *AAPG Bulletin*, 58(7): 1290—1304.

Harding, T. P., 1985. Seismic Characteristics and Identification of Negative Flower Structures, Positive Flower Structures, and Positive Structural Inversion. *AAPG Bulletin*, 69(4): 582—600. <https://doi.org/10.1306/ad462538-16f7-11d7-8645000102c1865d>

He, B. Z., Jiao, C. L., Cai, Z. H., et al., 2011. A New Interpretation of the High Aeromagnetic Anomaly Zone in Central Tarim Basin. *Geology in China*, 38(4): 961—969 (in Chinese with English abstract).

Huang, T. Z., 2014. Structural Interpretation and Petroleum Exploration Targets in Northern Slope of Middle Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(3): 257—267 (in Chinese with English abstract).

Lan, X. D., Lü, X. X., Zhu, Y. M., et al., 2015. The Geometry and Origin of Strike-Slip Faults Cutting the Tazhong Low Rise Megaanticline (Central Uplift, Tarim Basin, China) and Their Control on Hydrocarbon Distribution in Carbonate Reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 22: 633—645. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2014.12.030>

Li, B. L., Guan, S. W., Li, C. X., et al., 2009. Paleo-Tectonic Evolution and Deformation Features of the Lower Uplift in the Central Tarim Basin. *Geological Review*, 55(4): 521—530 (in Chinese with English abstract).

Li, C. X., Wang, X. F., Li, B. L., et al., 2013. Paleozoic Fault Systems of the Tazhong Uplift, Tarim Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 39(1): 48—58. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.09.010>

Li, D. S., Liang, D. G., Jia, C. Z., et al., 1996. Hydrocarbon Accumulation in the Tarim Basin, China. *AAPG Bulletin*,

- 80(10):1587—1603.
- Li, P. J., Chen, H. H., Tang, D. Q., et al., 2017. Coupling Relationship between NE Strike-Slip Faults and Hypogenic Karstification in Middle-Lower Ordovician of Shunnan Area, Tarim Basin, Northwest China. *Earth Science*, 42(1): 93—104 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.007>
- Li, S. T., Ren, J. Y., Xing, F. C., et al., 2012. Dynamic Processes of the Paleozoic Tarim Basin and Its Significance for Hydrocarbon Accumulation—A Review and Discussion. *Journal of Earth Science*, 23(4): 381—394. <https://doi.org/10.1007/s12583-012-0262-5>
- Li, Y. J., Wen, L., Yang, H. J., et al., 2015. New Discovery and Geological Significance of Late Silurian-Carboniferous Extensional Structures in Tarim Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 304—319. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.11.020>
- Liu, Y. J., Neubauer, F., Genser, J., et al., 2007. Geochronology of the Initiation and Displacement of the Altyn Strike-Slip Fault, Western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(2—3): 243—252. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2006.03.002>
- Ma, Q. Y., Sha, X. G., Li, Y. L., et al., 2012. Characteristics of Strike-Slip Fault and Its Controlling on Oil in Shuntuoguole Region, Middle Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(2): 120—124 (in Chinese with English abstract).
- McClay, K., Bonora, M., 2001. Analog Models of Restraining Stepovers in Strike-Slip Fault Systems. *AAPG Bulletin*, 85(2): 233—260. <https://doi.org/10.1306/8626c7ad-173b-11d7-8645000102c1865d>
- Moody, J. D., Hill, M. J., 1956. Wrench-Fault Tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 67(9): 1207—1246. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[1207:wt\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[1207:wt]2.0.co;2)
- Nakajima, T., Maruyama, S., Uchiumi, S., et al., 1990. Evidence for Late Proterozoic Subduction from 700-Myr-Old Blueschists in China. *Nature*, 346: 263—265. <https://doi.org/10.1038/346263a0>
- Qiao, R. X., Zhang, Y. X., 2002. New Knowledge Obtained from the Application of High-Precision Aeromagnetic Survey to Oil and Gas Exploration in Tarim Basin. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 26(5): 334—339 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Yang, H. Z., Hu, D. S., et al., 2012. Fault Activity and Its Controlling to Marine Cratonic Breakup in Tarim Basin. *Earth Science*, 37(4): 645—653 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.074>
- Ren, J. Y., Zhang, J. X., Yang, H. Z., et al., 2011. Analysis of Fault Systems in the Central Uplift, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 219—230 (in Chinese with English abstract).
- Stefanov, Y. P., Bakeev, R. A., 2015. Formation of Flower Structures in a Geological Layer at a Strike-Slip Displacement in the Basement. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 51(4): 535—547. <https://doi.org/10.1134/s1069351315040114>
- Swanson, M. T., 2005. Geometry and Kinematics of Adhesive Wear in Brittle Strike-Slip Fault Zones. *Journal of Structural Geology*, 27(5): 871—887. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.11.009>
- Tang, L. J., Jin, Z. J., 2000. Negative Inversion Process and Hydrocarbon Accumulation of Yaha Fault Belt in Northern Uplift, Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(2): 302—309 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., 2004. Tectonic Evolution of the Western Kunlun Orogenic Belt, Western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(2): 153—161. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.10.007>
- Wilcox, R. E., Harding, T. P., Seely, D. R., 1973. Basic Wrench Tectonics. *AAPG Bulletin*, 57(1): 74—96.
- Woodcock, N. H., Rickards, B., 2003. Transpressive Duplex and Flower Structure: Dent Fault System, NW England. *Journal of Structural Geology*, 25(12): 1981—1992. [https://doi.org/10.1016/s0191-8141\(03\)00057-9](https://doi.org/10.1016/s0191-8141(03)00057-9)
- Wu, G. H., Chen, Z. Y., Qu, T. L., et al., 2012. Characteristics of the Strike-Slip Fault Facies in Ordovician Carbonate in the Tarim Basin, and Its Relations to Hydrocarbon. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 219—227 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. H., Cheng, L. F., Liu, Y. K., et al., 2011. Strike-Slip Fault System of the Cambrian-Ordovician and Its Oil-Controlling Effect in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 32(3): 239—243 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. F., Zhao, M. J., Meng, Q. R., et al., 2004. Tectonic Evolution and Paleo-Structure Restoration of Tazhong Low Uplift. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing (in Chinese).
- Yang, S. B., Liu, J., Li, H. L., et al., 2013. Characteristics of the NE-Trending Strike-Slip Fault System and Its Control on Oil Accumulation in North Peri-Cline Area of the Tazhong Paleouplift. *Oil & Gas Geology*, 34(6): 797—802 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. F., Chen, H. L., Ji, D. W., et al., 2005. Geological Process of Early to Middle Permian Magmatism in Tar-

- im Basin and Its Geodynamic Significance. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 504—511 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.Z., Yu, H.F., Zhang, H.Z., et al., 2008. Characteristic, Genesis and Geologic Meaning of Strike-Slip Fault System in Tazhong Area. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 30(5): 22—26 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.P., Yang, H.J., Lv, X.X., et al., 2011. Strike-Slip Faults and Their Controls on Hydrocarbon Reservoir in Middle Part of Northern Slope of Tazhong Area, Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 32(4): 342—344 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.S., Li, M.J., Liu, S.P., 2002. Generation and Evolution of Tazhong Low Uplift. *Petroleum Exploration and Development*, 29(1): 28—31 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.Y., Lü, X.X., Yang, H.J., et al., 2013. Effects of Strike-Slip Faults on the Differential Enrichment of Hydrocarbons in the Northern Slope of Tazhong Area. *Acta Petrolei Sinica*, 34(4): 628—637 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 丁长辉, 周红波, 路鹏程, 等, 2009. 塔中低凸起古生界构造特征及演化. *大地构造与成矿学*, 33(1): 148—153.
- 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. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.031>
- 何碧竹, 焦存礼, 蔡志慧, 等, 2011. 塔里木盆地中部航磁异常带新解译. *中国地质*, 38(4): 961—969.
- 黄太柱, 2014. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向. *石油实验地质*, 36(3): 257—267.
- 李本亮, 管树巍, 李传新, 等, 2009. 塔里木盆地塔中低凸起古构造演化与变形特征. *地质评论*, 55(4): 521—530.
- 李培军, 陈红汉, 唐大卿, 等, 2017. 塔里木盆地顺南地区中一下奥陶统 NE 向走滑断裂及其与深成岩溶作用的耦合关系. *地球科学*, 42(1): 93—104. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.007>
- 马庆佑, 沙旭光, 李玉兰, 等, 2012. 塔中顺托果勒区块走滑断裂特征及控油作用. *石油实验地质*, 34(2): 120—124.
- 乔日新, 张用夏, 2002. 高精度航空磁测在塔里木盆地油气勘查中的几点新认识. *物探与化探*, 26(5): 334—339.
- 任建业, 阳怀忠, 胡德胜, 等, 2012. 塔里木盆地中央隆起带断裂活动及其对海相克拉通解体的作用. *地球科学*, 37(4): 645—653. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.074>
- 任建业, 张俊霞, 阳怀忠, 等, 2011. 塔里木盆地中央隆起带断裂系统分析. *岩石学报*, 27(1): 219—230.
- 汤良杰, 金之钧, 2000. 塔里木盆地北部隆起牙哈断裂带负反转过程与油气聚集. *沉积学报*, 18(2): 302—309.
- 邬光辉, 陈志勇, 曲泰来, 等, 2012. 塔里木盆地走滑带碳酸盐岩断裂相特征及其与油气关系. *地质学报*, 86(2): 219—227.
- 邬光辉, 成丽芳, 刘玉魁, 等, 2011. 塔里木盆地寒武—奥陶系走滑断裂系统特征及其控油作用. *新疆石油地质*, 32(3): 239—243.
- 许大丰, 赵孟军, 孟庆任, 等, 2004. 塔中低凸起构造演化与古构造恢复. 北京: 中国石油勘探开发研究院.
- 杨圣彬, 刘军, 李慧莉, 等, 2013. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用. *石油与天然气地质*, 34(6): 797—802.
- 杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 等, 2005. 塔里木盆地早—中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义. *高校地质学报*, 11(4): 504—511.
- 张承泽, 于红枫, 张海祖, 等, 2008. 塔中地区走滑断裂特征、成因及地质意义. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 30(5): 22—26.
- 张艳萍, 杨海军, 吕修祥, 等, 2011. 塔中北斜坡中部走滑断裂对油气成藏的控制. *新疆石油地质*, 32(4): 342—344.
- 张振生, 李明杰, 刘社平, 2002. 塔中低凸起的形成和演化. *石油勘探与开发*, 29(1): 28—31.
- 周新源, 吕修祥, 杨海军, 等, 2013. 塔中北斜坡走滑断裂对碳酸盐岩油气差异富集的影响. *石油学报*, 34(4): 628—637.