

doi: 10.12029/gc20180306

王伟锋, 王乾, 单新建. 2018. 库车前陆冲断带横断层发育特征及其形成机制[J]. 中国地质, 45(3): 493–510.

Wang Weifeng, Wang Qian, Shan Xinjian. 2018. Development characteristics and formation mechanism of transverse faults along the Kuqa thrust belt[J]. Geology in China, 45(3): 493–510(in Chinese with English abstract).

库车前陆冲断带横断层发育特征及其形成机制

王伟锋¹ 王乾¹ 单新建²

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555;

2. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要:横断层是指走向与主构造走向线直交或大角度相交的伴生断层, 在冲断带中普遍存在且具有一定的研究意义。库车前陆逆冲带是中亚地区典型的逆冲褶皱带, 是经历多期构造形成的再生前陆盆地, 具备发育横断层的构造基础。结合前人资料, 通过对地貌遥感影像、深部物理资料以及地震勘探等资料的分析解译, 对库车前陆冲断带的横断层构造特征、形成机制以及地质意义进行了探讨。通过研究发现: (1) 库车前陆冲断带存在 16 条主要横断层(组), 其中 9 条横断层结构及性质确定, 总体来看主要分布在北部单斜带、克拉苏构造带以及秋里塔格构造带; (2) 依照形成机制, 研究区横断层可以分为基底断裂活化型走滑横断层、盖层撕裂型走滑横断层以及盐上张性横断层三大类; (3) 横断层在调节冲断带不同段逆冲差异、横向河流发育、丰富构造样式以及控制油气运移等方面具有一定的地质意义。

关键词:库车前陆冲断带; 横断层; 构造特征; 形成机制; 构造格局

中图分类号: P542.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2018)03-0493-18

Development characteristics and formation mechanism of transverse faults along the Kuqa thrust belt

WANG Weifeng¹, WANG Qian¹, SHAN Xinjian²

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, 266555, Shandong, China; 2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China)

Abstract: Transverse faults are widespread in the thrust belt, and the study of these faults is significant and valuable. Having experienced multi-episodic tectonic changes, the Kuqa thrust belt has had the structural foundation of developing transverse faults. In combination with the remote sensing image, deep geophysical data and seismic section analysis, the authors studied the tectonic characteristics and genetic types of transverse faults in the Kuqa thrust belt. Some conclusions have been reached: (1) There are 16 transverse faults in the Kuqa thrust belt, with structure and properties of nine faults being confirmed. These transverse faults are

收稿日期: 2016-06-17; 改回日期: 2016-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41340008)资助。

作者简介: 王伟锋, 男, 1958 年生, 博士, 教授、博士生导师, 长期从事地质构造、地震地质、地质工程、含油气盆地分析等领域的研究和教学工作; E-mail: wwf_upc@163.com。

通讯作者: 王乾, 男, 1991 年生, 硕士生, 地质资源与地质工程专业, 从事构造地质与含油气盆地分析研究; E-mail: 1379966385@qq.com。

mainly distributed in northern monocline tectonic zone, Kelasu tectonic zone and Qiulitag tectonic zone; (2) Transverse faults can be divided into three genetic types, i.e., basement activation transverse fault, cover-tear fault and tensional transverse fault; (3) Transverse faults have some geological significance in adjusting the thrust displacement difference between segments, developing transverse rivers, enriching structural styles and controlling oil and gas migration.

Key words: Kuqa thrust belt; transverse fault; tectonic characteristics; tectonic framework; formation mechanism

About the first author: WANG Weifeng, male, born in 1958, doctor, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of tectonic geology, seismic geology, geological engineering and analysis of petroliferous basins; E-mail: wwf_upc@163.com.

About the corresponding author: WANG Qian, male, born in 1991, master, engages in the study of tectonic geology and analysis of petroliferous basins. E-mail: 1379966385@qq.com.

Fund support: Supported by Chinese National Natural Science Foundation program (No. 41340008).

1 前 言

国外学者在20世纪80年代就已经关注到冲断带横断层并进行了相关研究。在研究认识方面, 主要认为横向断层形成原因在于内因和外因两个方面, 在内因上, 横断层发育部位本身可能就位于构造薄弱区, 这些构造薄弱区可能是由于基底断裂, 也可能是由于不同强度的岩层配置引起, 从而在剧烈的造山运动影响中充分体现了出来(Anderle et al., 1987; Yassaghi et al., 2011; Zanchi et al., 2012); 在外因上, 大型的逆冲造山运动必然伴随着沿走向逆冲量分布不均的情况, 在走向上的不稳定性形成了错段山脉的横断层构造(Price et al., 2001; Stone et al., 2003)。

就国内情况来看, 许多学者在其研究中都对横断层有一定的描述和记载, 少数有比较系统详细的研究。在形成机制上, 前人在对塔里木盆地北部断裂格架进行分析后指出, 在塔北分布的横断层有着不同的形成机制, 包括伴生形成的撕裂断层、后期变化应力场条件下滑脱形成的断层、后期变化应力场条件下形成的基底卷入断层(王燮培等, 1995); 周新源等(2004)在对塔里木盆地南缘冲断带阿其克横断层研究中认为, 阿其克横向转换构造是其两侧不同力学体制相互作用的产物; 胡文瑞等(2014)认为酒西盆地的横断层是由于脆性地层和刚性地层应对同一应力场的逆冲作用的变形程度不同, 导致两套地层之间出现调节变形差异的走滑性质的横向断层, 张家声等(2008)在研究鄂尔多斯西北缘横断层后也提出了类似的观点。在构造作用和地

质意义上, 大部分学者等认为横断层主要起到协调冲断席之间逆冲量差距的作用(何登发等, 2004; 李明杰等, 2005; 许多年等, 2007; 张家声等, 2008; 李世琴等, 2013); 在地震地质方面横断层的存在对于分割地壳运动强度不同的块体以及控制地震的传播和分布有着重要意义(马宗晋等, 2002; 王伟锋等, 2014); 另外横断层的存在可以控制沉积的分段性, 且在油气成藏过程中可以沟通含油气凹陷和圈闭, 引导侧向运移以及对油气资源进行垂向的调整和分配的作用(陶国亮等, 2006; 陈国民等, 2011; 蔡俊等, 2016)。综上可见, 横断层在建立冲断带的构造格局, 重新认识冲断带的逆冲运动, 以及评价资源分布等方面有着重要的研究价值。

2 区域地质概况

研究区库车前陆冲断带位于南天山造山带与塔里木盆地耦合处的中段, 其主断裂带走向呈近东西向。关于库车冲断带的构造基础, 可以追溯到晚二叠世。古生代末期, 南天山洋盆关闭并开始发生A型俯冲作用, 库车周缘前陆盆地形成, 在经历了侏罗—古近纪的伸展夷平演化阶段后, 始新世末的印度板块碰撞作用通过“远距离效应”于中新世将应力传递到塔里木盆地北缘, 并再次活化中生代时期的造山带, 形成了库车再生前陆逆冲带(郭令智等, 1992; 田作基等, 1999; 卢华复等, 2000)。从新近纪开始的陆内俯冲构造运动成为造成现今库车前陆逆冲带的主要运动, 由其挤压引起的构造调整和侧向逃逸作用, 使库车坳陷形成了“四带三凹”的构造格局, 同时构造变形的强度由北向南逐渐变弱, 在

接近造山带的北部变形最为强烈,衍生了大量的构造现象,向南部则因为沉积中心的迁移,地层厚度逐步递增,中生界和新生界总计厚达10000多米的地层沉积为库车前陆逆冲带提供了优质的成藏成矿条件(卢华复等,2000)。

3 横断层的识别

研究区发育的横断层及其相关构造走向异于主断裂带方向,包括南北向、北西向和北北东向。通过地貌遥感影像及高程数据、深部重磁资料的解译,能够找到横断层的存在性证据,在此基础上,来自地震勘探的剖面资料能够对横断层存在性进一步证明,同时能够明确横断层的地质结构,为横断层的形成机制提供相应的依据(图1)。

3.1 遥感地貌解译及地质识别

随着航天卫星遥感技术的快速发展,多波段的遥感影像技术在地质地貌的解译中凸显出越来越重要的地位(王志刚等,1996)。NASA于2013年发射的Landsat-8卫星提供了丰富的1~11号多波段陆地成像数据。其中的7、4、1号波段组合图像具有兼容中红外、近红外及可见光波段信息的优势,能够过滤多数干扰信息,各种构造形迹(褶皱及断裂)显示清楚,不同类型的岩石区边界清晰,地质可解译度高(袁小祥等,2011;徐涵秋等,2013)。笔者利用Landsat-8提供的研究区波段影像数据进行了741波段组合,获得了地质现象丰富的影像数据(图2)。

在结合区域地质资料的基础上,通过对地貌影响解译发现,研究区的横断层及相关构造现象明显,识别度极高。横断层的地貌识别特征主要包括这几个方面:

3.1.1 横向河流发育区域

地质学中的经典观点“逢沟必断”说明了河流沟谷往往发育在工区构造意义上较为脆弱的部位,而其构造脆弱与断层发育有着较大的联系。在水系并不发达的库车前陆逆冲地区,河流沟谷的发育与断层的发育的关系则更为密切。如木扎尔特河上游流域发育有典型的断层三角面(图3a)指示了其构造基础木扎尔特断裂的存在;库车河的南北向延伸,在康村段甚至发生了河道宽度由150 m到600 m的突增现象(图3b),是库车断裂(图1中1号横断层)存在的重要证据;在西秋里塔格构造带北

部的托克逊乡,木扎尔特河下游走向发生了将近90°的突变,由东西走向转为近南北走向,其西侧褶皱发育明显,而东部地势相对平坦(图3c),这种变化的构造基础应当是托克逊横断层(图1中5号横断层)发育的结果。

3.1.2 沿东西走向的构造地形和岩性变化

沿近东西方向的构造地形的错断或突变是研究区主构造带差异性运动的结果,同时也伴随着横向断层的产生。如库车河上游(图4),库车河的西侧的巴什基奇克背斜形态完整,核部为上侏罗统齐古组及喀拉扎组,两翼对称分布下白垩统亚格列木组、舒善河组、巴什基奇克组和古近-新近系库姆格列木群地层,而库车河的东侧背斜形态则有变化,北翼地层仅出露下白垩统亚格列木组和舒善河组,背斜出现向北倒转的形态,这种构造及岩性上的突然变化是横断层存在的重要证明。

3.1.3 构造的线性切割

在主断裂带的逆冲的大背景下,横断层的后期活动对先行形成地表构造形成截交切割,在地表上呈现线性影像。如处于库车冲断带西部的喀拉玉尔滚构造带(图5),北喀背斜西北部出现笔直的断面,沿该断面走向向上,东阿瓦特背斜的西侧依同一线性方向呈现向南拖曳,整体来看,线性影像的东侧地表构造发育丰富,而西侧则主要为冲积扇沉积地貌,暗示了喀拉玉尔滚断裂(图1中7号横断层)的存在。

3.2 重磁资料识别基底横断层

研究区的上下分层性决定了地表破裂变形不能完全代表地下的构造情况,因此对于库车冲断带及相邻地区的地下及深层横断层的研究,地球物理资料能够提供其存在的有力证据从而补充完善横断层的展布情况。

由于资料限制,在重力数据的采集上,笔者利用了美国国家地理空间情报局提供的全球重力场模型(球谐函数展开阶次为2190次),对中国大陆而言其提供的自由重力异常总体精度为 $10.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$,其提供的大地水准面总体精度为20 cm(章传银等,2009),在区域性构造的识别上达到标准。由于重力二阶导数对于地下浅层重力异常的有着较好的识别效果,能够突出地下被区域场所掩盖的构造以及地质体,因此我们结合高程数据,对研究工区进

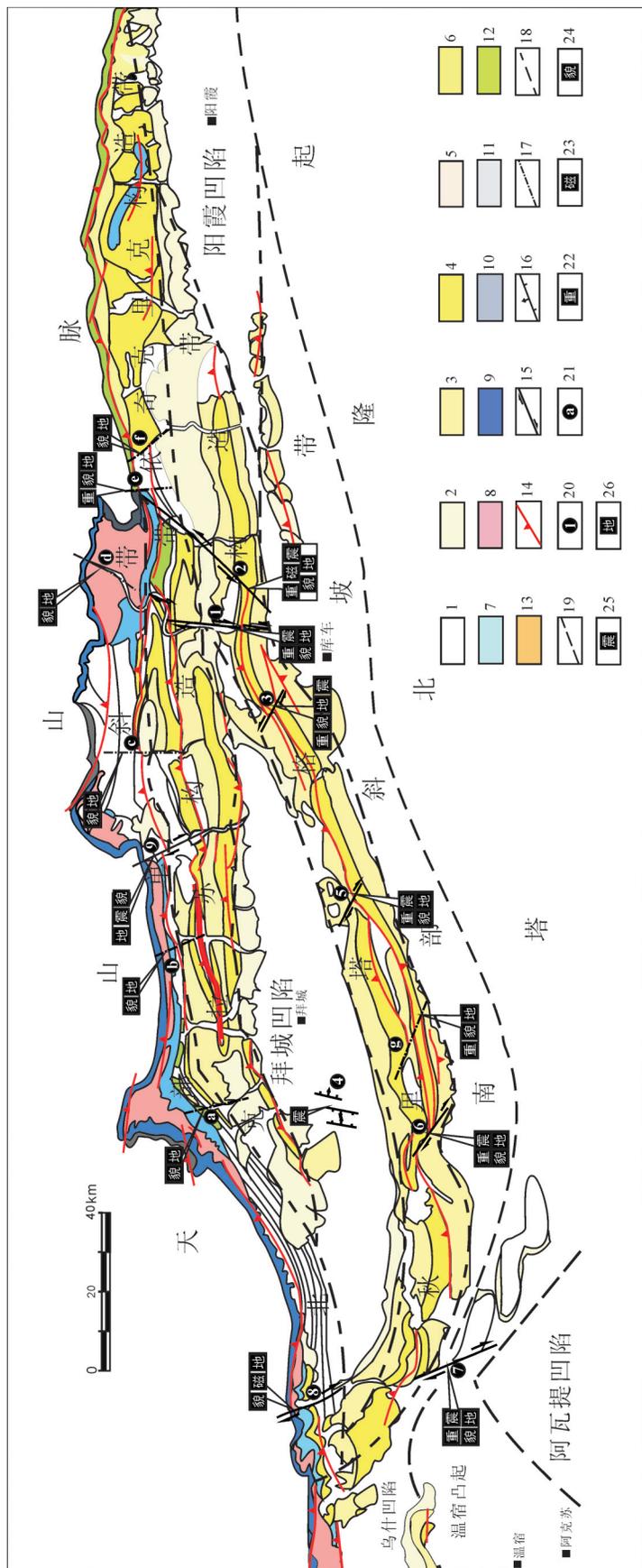


图1 库车前陆冲断带构造纲要图 (据漆家福等, 2013 修改)

1—第四系上、中部沉积层; 2—第四系下部、西域组; 3—上新统; 4—中新统; 5—古近系; 6—白垩系; 7—侏罗系; 8—三叠系; 9—二叠系; 10—石炭系; 11—上古生界; 12—下古生界; 13—震旦系; 14—主逆冲断层; 15—走滑断层; 16—张性横断层; 17—性质不明横断层; 18—二级构造单元界线; 19—一级构造单元界线; 20—性质明确的横断层编号, 其中①—库车横断层, ②—康村横断层, ③—盐水沟横断层, ④—大宛齐横断层, ⑤—托克逊横断层, ⑥—西秋横断层, ⑦—喀拉玉尔滚横断层, ⑧—木扎尔特横断层, ⑨—巴什横断层; 21—性质不明的横断层编号; 22—重力证据支持标注; 23—地磁异常证据支持标注; 24—地貌证据支持标注; 25—地震剖面支持标注; 26—地质证据支持标注

Fig. 1 Geological map of Kucha thrust belt (modified after Qi et al., 2013)

1—Upper and middle sedimentary layer of Quaternary; 2—Lower sedimentary layer of Quaternary; 3—Pliocene, mainly Kuche Formation; 4—Miocene, mainly Kangcun Formation; 5—Eocene; 6—Cretaceous; 7—Jurassic; 8—Triassic; 9—Permian; 10—Carboniferous; 11—Upper Paleozoic; 12—Lower Paleozoic; 13—Sinian; 14—Main thrust fault; 15—Strike-slip transverse fault; 16—Tensional transverse fault; 17—Transverse fault whose property is unknown; 18—Boundary of secondary tectonic unit; 19—Boundary of first-order tectonic unit; 20—Serial number of transverse fault whose property is clear, ①—Kuche transverse fault, ②—Kangcun transverse fault, ③—Yanshuigou transverse fault, ④—Dawanqi transverse fault, ⑤—Tuokexun transverse fault, ⑥—Xiqiu transverse fault, ⑦—Kalayuergun transverse fault, ⑧—Muzhaerte transverse fault, ⑨—Bashi transverse fault; 21—Serial number of transverse fault whose property is unknown; 22—Label of evidence from gravity anomaly; 23—Label of evidence from geomagnetic anomaly; 24— Label of evidence from seismic sections; 25— Label of evidence from remote sensing image; 26— Label of geological evidence

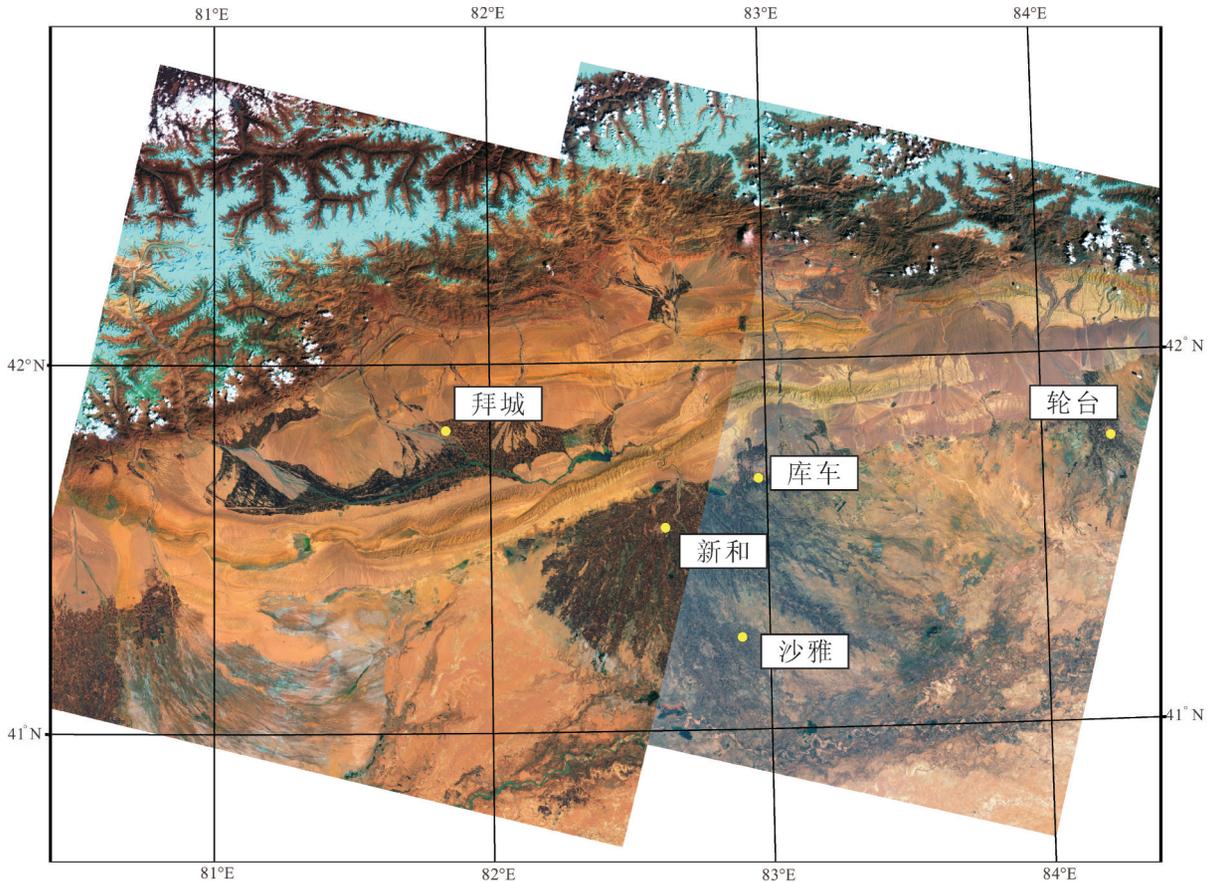


图2 库车冲断带遥感波段合成图
Fig.2 Layer stack of Kuqa thrust belt

行了布格校正,并对其进行了垂向二阶导数运算,得到了重力二阶导数等值线图(图6)。通过实际对比发现,重力二阶导数对于库车冲断带及其周边地区的构造情况较为吻合:在北部高值和低值呈东西展布且相互交错,二阶导数值梯度带不断重复出现,表现了冲断带近东西走向主断裂的展布特征;向南部,明显的二阶导数高值带对应了秋里塔格构造带以及塔北隆起等构造。在二阶导数南北分带性的宏观展布特征下,研究区局部上被数条横向梯度带所分割,如图中所示,以东经83度线为界,其西侧有5条北西走向的横向梯度带,大致呈等间距分布在西秋里塔格构造带区域;其东侧存在3条横向梯度带,一条近南北向分布于库车河地区,另两条呈北东向平行分布于库车冲断带东侧。总体来看,该区具有多条横向的重力异常带,指示了图1中多条横断层的存在,这在与其他横断层证据的对比校正中得到了证实。

库车坳陷中生代并无岩浆活动,其岩浆活动的发育期在石炭—二叠纪,因而基底是研究区磁性体的发育层,可以借助磁测资料来对库车基底的构造情况进行预测(曾庆全等,2003)。在地磁数据方面,美国地球物理数据中心的NGDC-720高精度地磁异常模型由卫星磁测、海洋磁测、航空磁测、海洋磁测以及地面磁测的资料编汇而成,其球谐函数阶次达到720次,能够适应航空导航需要,在地质构造识别完善中亦具有参考价值(徐文耀等,2008;黄晓颖等,2010)。通过对研究区的垂向磁分量 ΔZ 进行垂向二次导数运算以减少区域场的影响,得到研究区的 ΔZ 垂向二阶导数图(图7)。通过分析可以发现,研究工区的基底磁性异常带主要由东西向纵向异常带以及6条横向异常带组成,横向异常带以北东向为主,同时在拜城凹陷西南和西北方向各存在一条北西向横向梯度带(L5,L6)。磁分量异常带的分布与前人研究给出的库车前陆基底结构大致吻

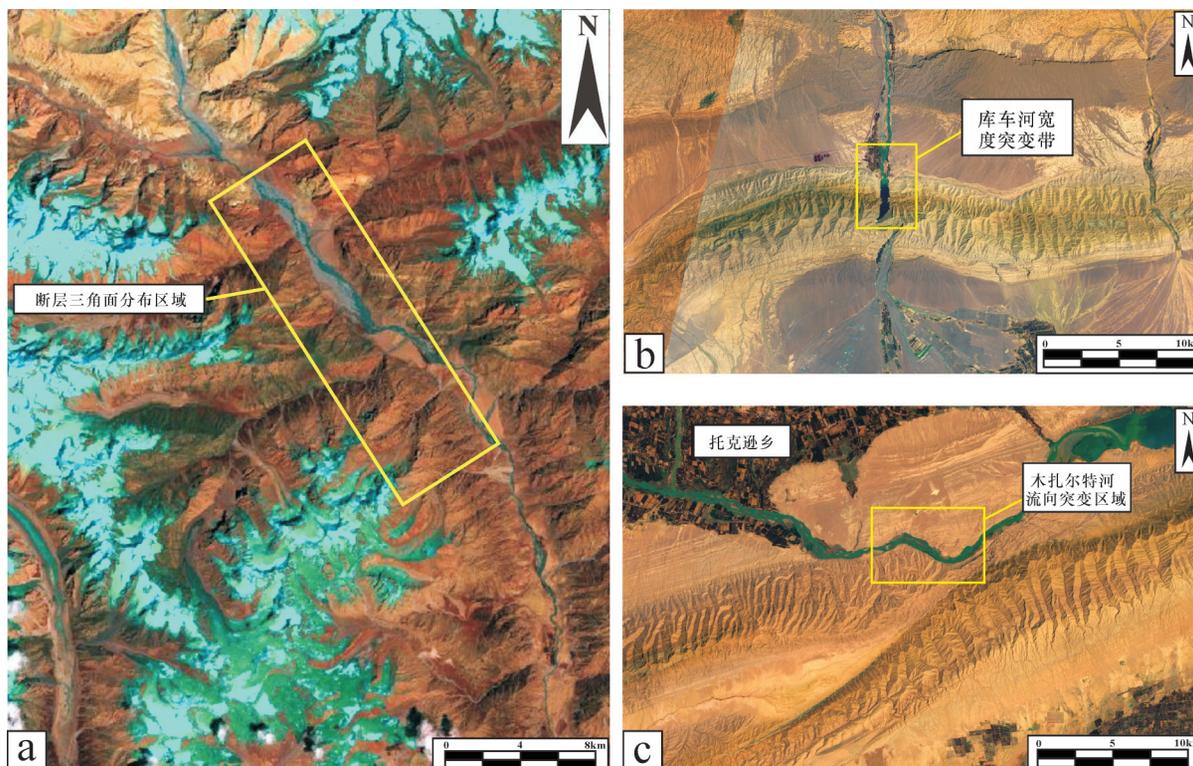


图3 横向河流遥感地貌影像

a—木扎尔特河流域的断层三角面;b—库车河宽度突变;c—木扎尔特河流向突变

Fig. 3 Remote sensing relief images of transverse rivers

a—Fault facet of Muzhaerte River; b—Width change of Kuqa River; c—Flow direction change of Muzhaerte River

合(图8)。可以认为,研究区存在大规模的基底断裂,其中近东西向的基底断裂对应主逆冲构造活动的影响,分布长度贯穿整个库车前陆冲断带,而近北东向与北西向基底断裂则可能是晚古生代导致南天山洋闭合的俯冲作用的遗迹。参考其他方面的证据和前人的研究(曾庆全等,2003),图6中的横向梯度带中,L2应是图8中库尔哈基底断裂的表现,在位置上与康村横断层(图1中的2号横断层)几乎重合,也就是说康村横断层极有可能是继承于库尔哈基底断裂发育而来;另外L5与地貌上识别出的木扎尔特横断层(图1中的8号横断层)有着良好的对应关系,结合木扎尔特横断层从造山带延伸而来的事实,L5梯度带是证实木扎尔特横断层具有深部背景的有力证据。

3.3 地震勘探资料解释

在区域地质资料、地貌遥感和重磁识别等存在性证据基础上,利用地震勘探资料可以对横向断裂的断裂性质和地质结构进行研究,从而为其形成机

制的探讨提供证明基础。通过对库车地区地震资料研究发现,按照性质主要可以将横断层分为走滑横断层和张性横断层。

3.3.1 走滑横断层

在大规模的碰撞造山运动中,不同部位岩石的力学性质、所受应力的方向和大小必然存在差异,因此常沿造山带产生一系列垂向(即横向)走滑断层来调节构造带的不同部位(吴晓智等,2010),对于在挤压条件下发育的此类走滑横断层,在沿造山带方向的地震剖面上常常以正花状构造为标志,在已知的库车前陆冲断带地震资料中,这种现象普遍而且明显(图9,图10)。然而在走滑的共性之中,亦有差异性,有的走滑断裂涉及基底,与先期基底断裂有着密切的联系如康村走滑断层(图1中的2号横断层);有的走滑横断层如喀拉玉尔滚断层(图1中的6号横断层)(唐鹏程等,2010),其变形并未切割基底构造,而是仅发育在上覆层中,属于薄皮构造。

另外,这种通过走滑横断层来进行的变形调

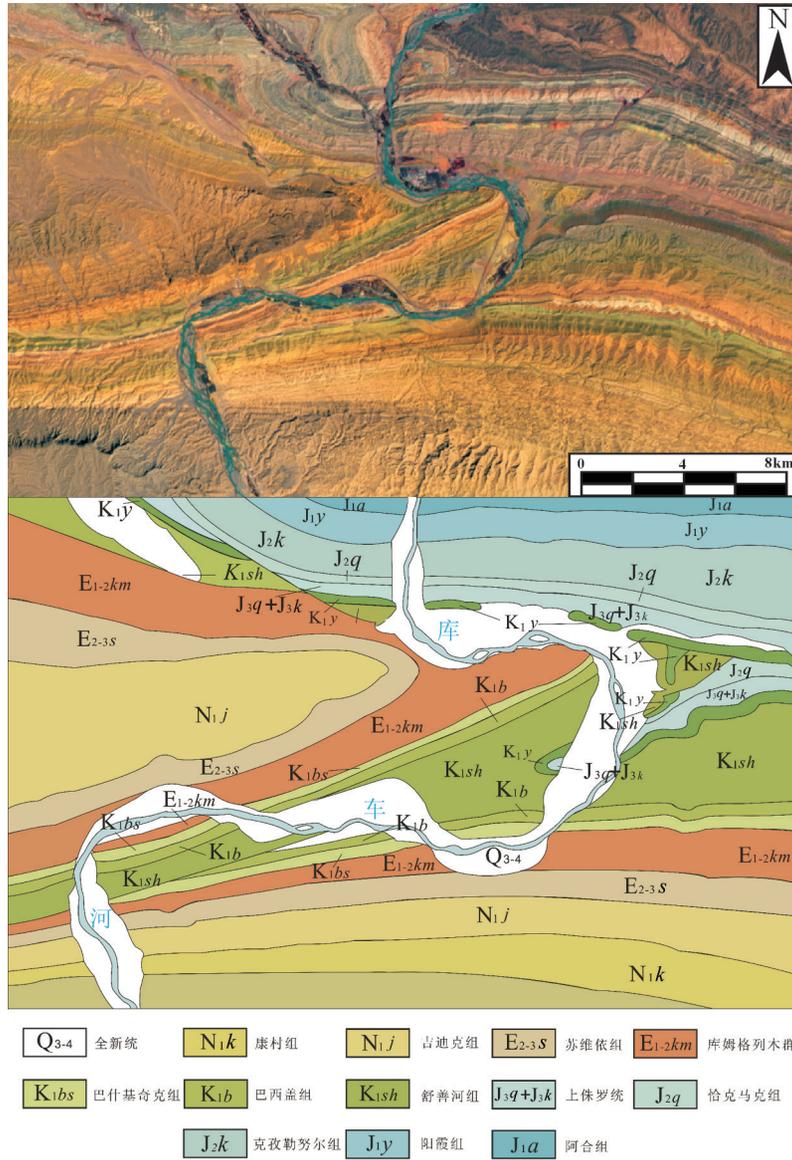


图4 巴什基奇克背斜遥感地貌及地质图
 Fig.4 Remote sensing relief image and geological map of Bashijiqike anticline

节,必然意味着该断层两侧的逆冲构造样式或者沉积地层有着突变式的显著差异,库车走滑横断层(图1中的1号横断层),其东侧的东秋5段剖面显示,其盐上段发育箱状褶皱,北倾冲断层向上突破,逆冲于南部地层之上;而其西侧的东秋8段盐上段,发育紧闭褶皱,南倾冲断层反冲与北部地层之上(图11),这与东秋5段的逆冲结构有着“突变”式的不同;沉积地层差异如喀拉玉尔滚断层,其西侧不发育盐层,而东部的盐层发育,反映了断层形成前的原始沉积差异(李世琴等,2013)。这种短距离内

的构造特征和沉积地层的大变化,是横向走滑断层形成的重要因素,同时也可以视作横向走滑断层存在的潜在标志。

3.3.2 张性横断层

库车冲断带沉积地层中,中、新生界的地层厚度最大可达12 km,其中古近系膏盐岩层库姆格列木群地层发育,构成了研究区的上滑脱层,在基底构造和主构造带逆冲作用下,膏盐层发生流动变形,形成了丰富的盐相关构造(余一欣等,2006;唐鹏程等,2012)。由于盐相关构造的存在,在已知的地震资料

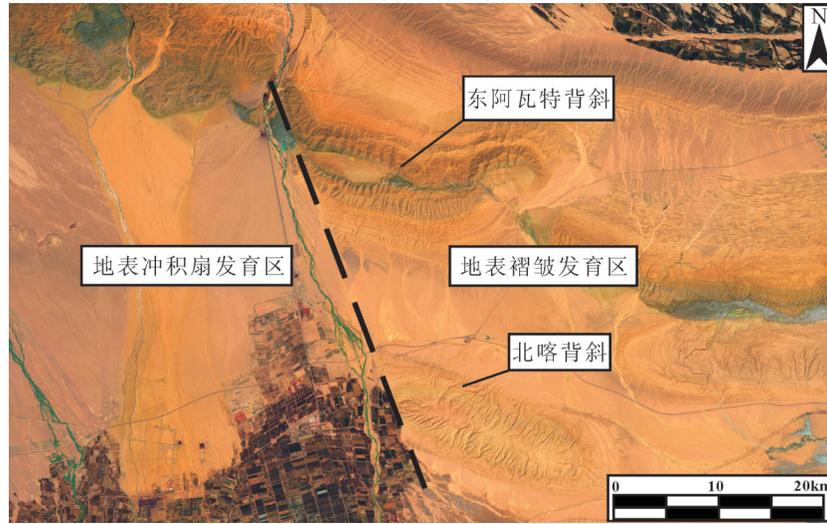


图5 喀拉玉尔滚遥感地貌
Fig.5 Remote sensing relief image of Kalayuergun fault

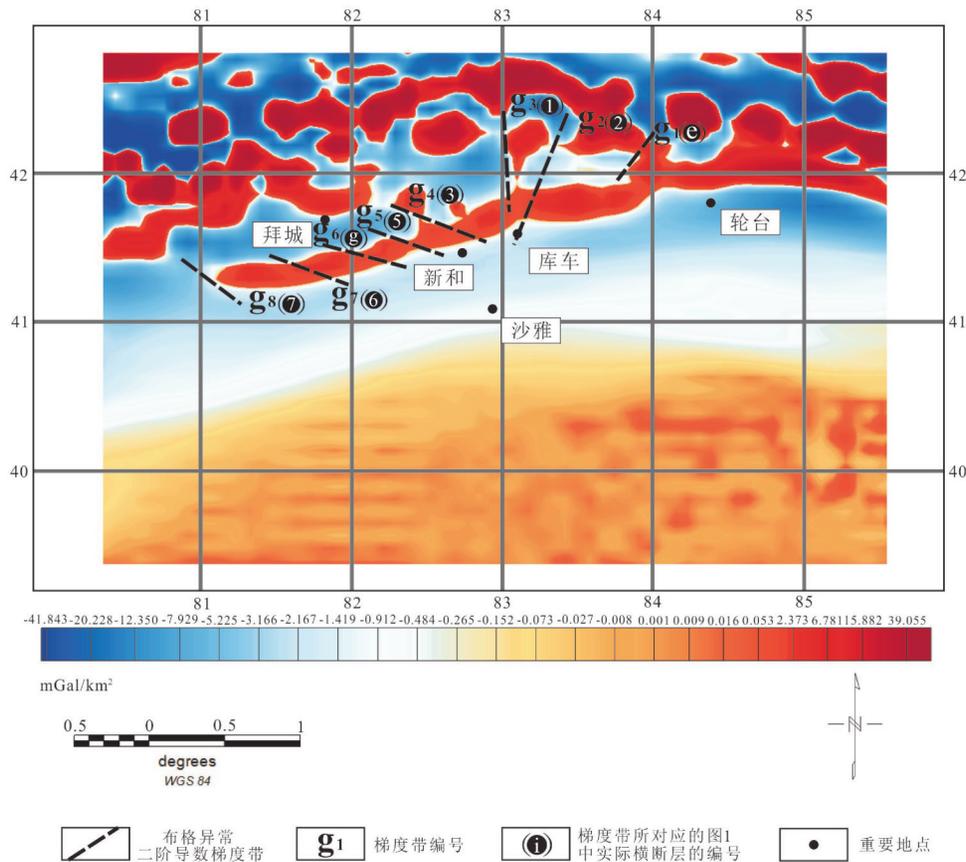


图6 库车坳陷及其周边地区布格重力异常二阶导数解译图
Fig.6 Interpretation map of second derivative of gravity anomaly of Kuqa depression and related area

中,出现了冲断带地区相对少见的张性横断层(图1中4号横断层组)。大宛齐张性横断层组(图12),在

盐下隆起的构造基础上,受到逆冲挤压影响,大宛齐盐枕核部聚集了大量的盐岩,并向上大幅度拱起,在

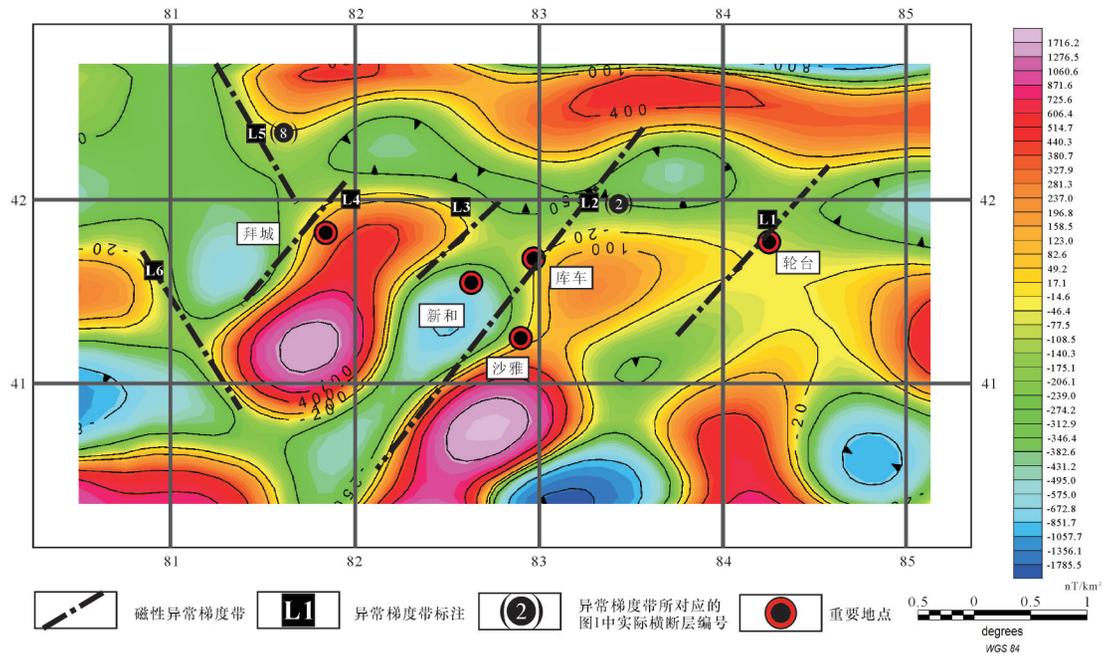


图7 库车地区地磁分量异常 ΔZ 垂向二阶导数图

Fig. 7 Interpretation map of second derivative of geomagnetic ΔZ component of Kuqa Depression and related area

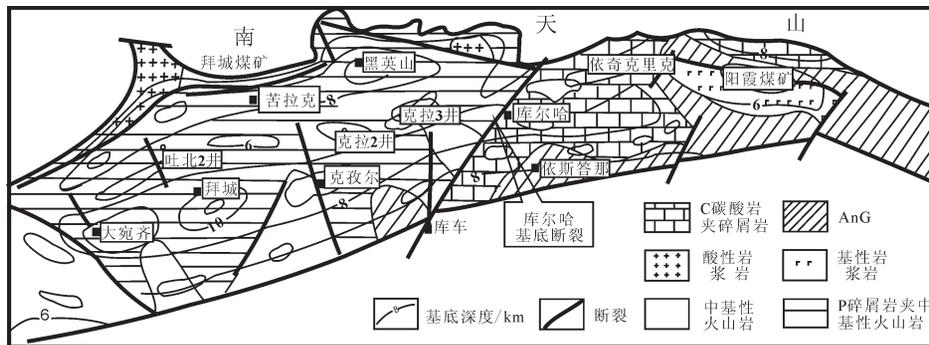


图8 库车前陆盆地基底结构(据曾庆全等,2003)

Fig. 8 Basement structure of Kuqa foreland basin(after Zeng Qingquan et al,2003)

形成盐拱背斜的同时,上部发育有数条横向的张性横断层,以高角度正断层模式切割了上覆地层。

3.3.3 研究区横断层分布

通过上述研究手段以及结合前人研究成果,库车前陆冲断带中能够被识别并确认地质结构的有9条(表1,图13),除了表中能够确认构造特征的横断层之外,地貌遥感以及重磁等部分资料支持存在但性质不明的同等规模横断层存在7条。总体来看,横断层在北部单斜带、克拉苏构造带以及秋里塔格构造带上分布密集。

4 横断层形成机制

通过上述分析和识别,在明确横断层的基础

上,依照横断层的性质将其分为走滑横断层与张性横断层两类,并探讨了其形成机制。

4.1 走滑横断层

4.1.1 基底活化型

基底活化型走滑横断层,除了走滑的断层性质外,与基底断裂活化的密切关系是其区别于其他走滑横断层的重要特征。在晚古生代到早中生代,东西向挤压应力场形成的基底断裂成为库车前陆盆地的分段性基础,在经过中生代的削平和沉积作用后,于新近纪的南北向挤压构造活动中产生活化,直接影响了上覆地层逆冲推覆的不均一性,形成了剖面上卷入基底地层的花状构造。同时由于基底断裂具有延伸长、切割深的特点,其上覆地层的逆

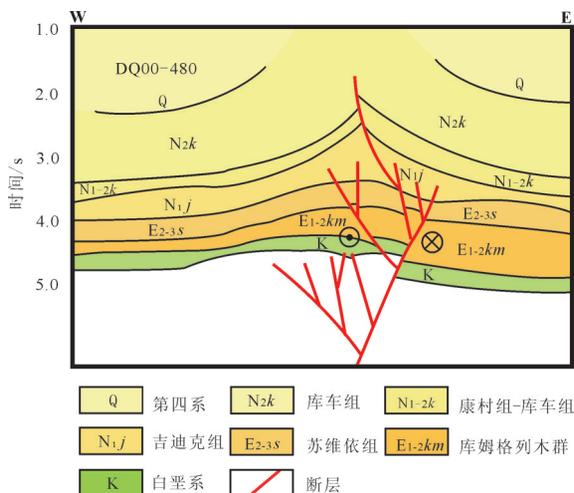


图9 康村断裂地震剖面图(据吴晓智等,2010)
Fig. 9 Seismic section of Kangcun fault

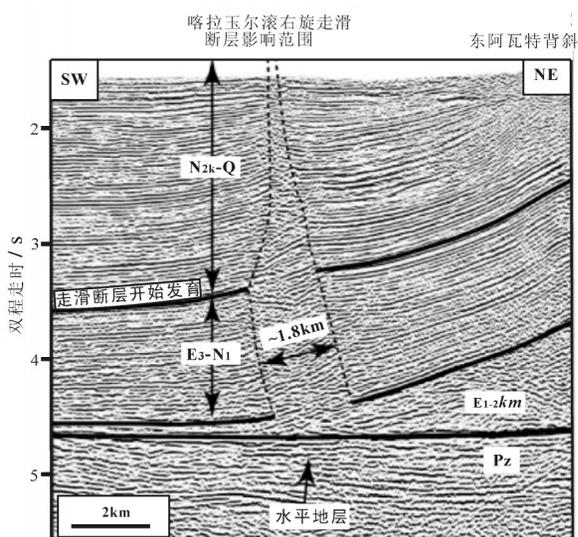


图10 喀拉玉尔滚断裂地震剖面图(据唐鹏程等,2010)
Fig.10 Seismic section of Kalayuergun fault

冲不均一性在大范围内始终存在,从而在地貌上可以清楚地看到多处山脉和隆起构造被其切割。如康村横断层(图7,图9)在地貌上沿克拉苏构造带与依奇克里克构造带分界线向西南方向延伸直至横向切割秋里塔格构造带,其地震剖面显示其花状构造向基底延伸,同时在平面位置上与深部磁性异常梯度带几乎重合,断裂在结构上有着继承性,地表断层的特征与活动来自于深部断裂的活化,属于基底活化性质的横断层(图14)。

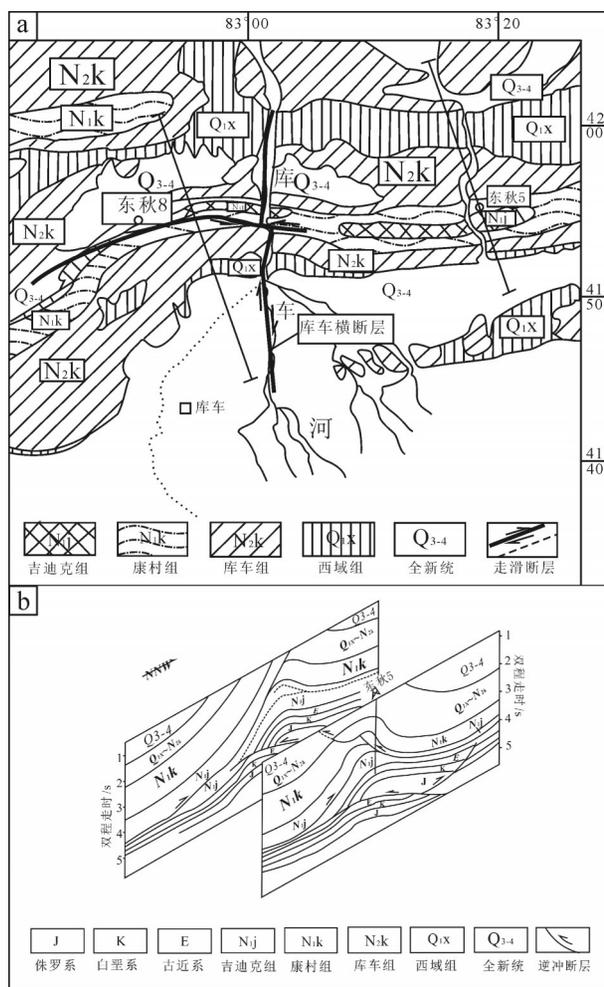


图11 库车河地区地质图以及东秋5段、东秋8段剖面特征
(据杨明慧等,2006)
a—库车河地区地质图;b—东秋5段、东秋8段剖面特征
Fig. 11 Geological map of Kuqa River area and geological section of Dongqiu 5 and Dongqiu 8
(after Yang Minghui et al.,2006)
a—Geological map of Kuqa River area; b—Geological section of Dongqiu 5 and Dongqiu 8

4.1.2 盖层撕裂型

从构造意义上来讲,盖层撕裂型横断层也是为了调节逆冲推覆的变形差异而产生的断层,但在构造样式则有区别。与基底活化型相比,盖层撕裂型横断层只切割滑脱层上部地层,滑脱层本身则未被切穿,下部基底构造样式亦未受影响,不具有卷入基底的特征,属于薄皮构造,从地貌上来看,盖层撕裂型横断层延伸长度较短,其两侧地层的逆冲方向和逆冲量常常有明显差别(图17)。如喀拉玉尔滚断层,在地震剖面上基底地层接近水平,并未变形,花状构造的影响范围也仅局限在上覆地层中(图

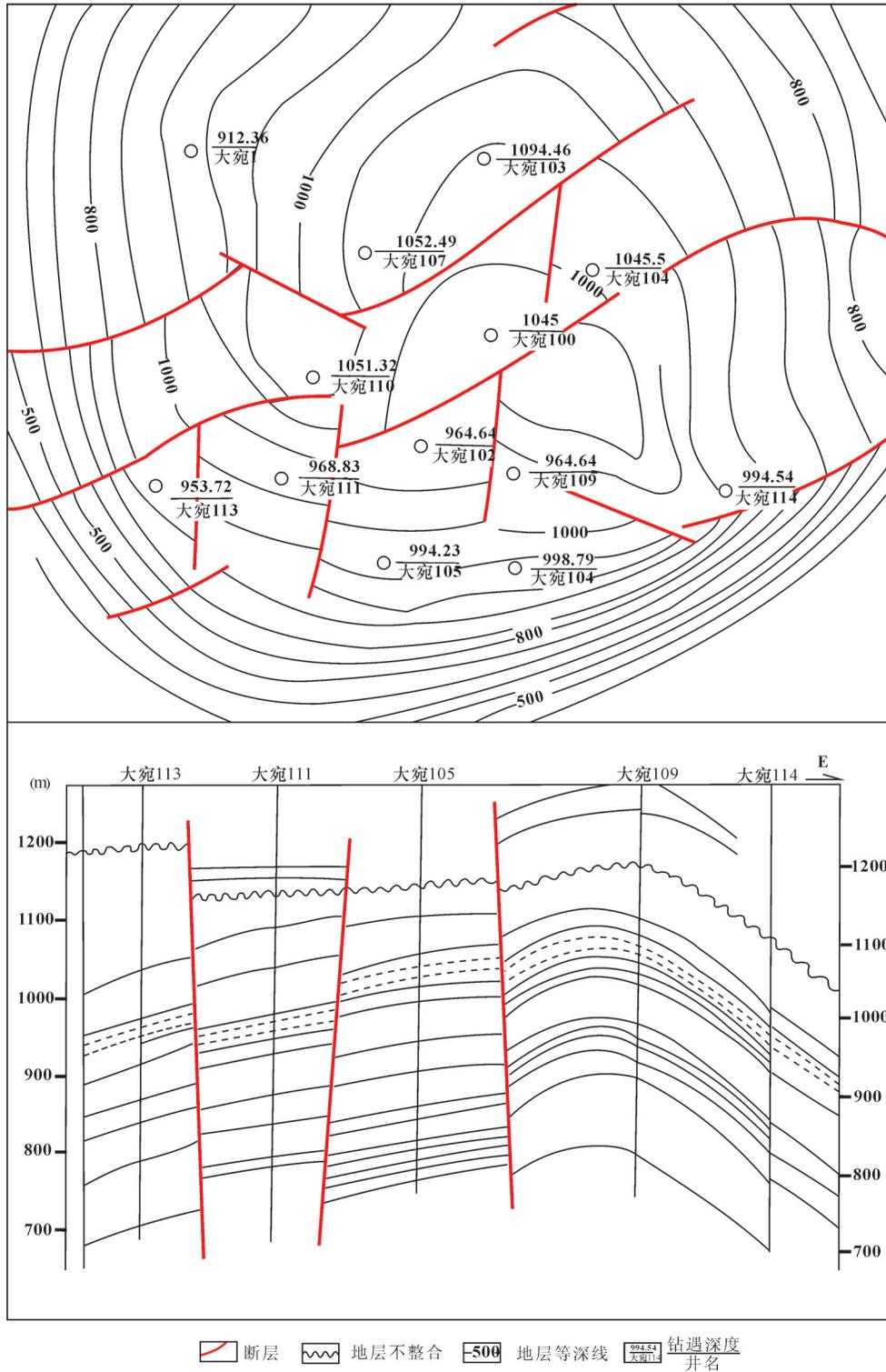


图12 大宛齐构造平面及剖面图(据余一欣等,2006)

Fig.12 Tectonic plan view and section of Dwanqi structure(after Yu Yixin et al.,2006)

10),在地貌上,其西侧发育冲积扇相,东侧由于发育盐岩层而变形剧烈,两侧逆冲程度呈现明显的不一致,是典型的盖层撕裂型横断层。在地貌上表现

为调节逆冲构造差异的西秋横断层,其地震剖面上亦表现为较为明显的花状构造特征。相类似的,在秋里塔格构造带西侧,发育的西秋横断层,在地震

表1 库车地区横断层存在证据及结构特征
Table 1 Evidence of existence and tectonic characteristics of transverse faults in Kuqa thrust belt

序号	横断层名称	断层存在性证据和结构特征			断层性质	横断层类型
		地貌特征	重磁特征	地质结构特征		
1	库车横断层	整体呈南北走向, 库车河发育, 河道宽度突变; 两侧岩性错置; 东侧巴什基奇克背斜对称, 西侧背斜倒转; 东侧秋里塔格构造带向北凸出, 西侧向南凸出	有南北向布格重力异常二阶导数线性梯度带 g_3 与其位置对应	断层东侧东秋5段剖面发育箱状褶皱, 北倾冲断层向上突破; 西侧东秋8段, 盐上层发育紧闭褶皱, 南倾冲断层发育	右旋走滑断层	基底活化型横断层
2	康村横断层	北东走向, 规模较大, 切割库车冲断带西段, 断层东西侧山体逆冲不一, 位移差量达 8.4 km	北东向磁异常二阶导数线性梯度带 L_2 与其位置对应。与基底断裂库尔哈断裂联系密切	断层东西向剖面为正花状构造, 断裂延伸至基底地层	左旋走滑断层	基底活化型横断层
3	盐水沟横断层	北西走向, 横切秋里塔格构造带, 东侧为库车塔吾背斜, 西侧为托克拉克背斜, 两背斜之间的位移量为 3 km	北西向重力异常二阶导数线性梯度带与其位置对应	其两侧的库车塔吾背斜与托克拉克背斜逆冲方向不一致, 且结构上差别悬殊	左旋走滑断层	盖层撕裂型横断层
4	大宛齐横断层组	整体南北走向, 由于上覆沉积和人工改造, 地貌无明显识别特征	对应布格重力异常为低值	三条高角度正断层切割盐拱背斜, 下伏大宛齐盐枕构造	正断层	张性横断层
5	托克逊横断层	整体北西走向, 木扎尔特河下游走向由东西向突变南北走向; 西侧褶皱发育明显, 东部地势相对平坦	北西向布格重力二阶导数线性梯度带 g_5 与其对应	断层东西向剖面为正花状构造; 断层西侧为古隆起构造段, 东侧为新生代晚期冲断构造带	右旋走滑断层	盖层撕裂型横断层
6	西秋横断层	整体北西走向, 以西秋横断层为界, 西侧为西秋里塔格构造段平面上向北凸出, 东侧为中秋里塔格构造段, 平面上向南凸出	北西向布格重力异常二阶导数线性梯度带 g_7 与其对应	断层东侧为古隆起构造段, 西侧为古构造复活段, 剖面特征为正花状构造	右旋走滑断层	盖层撕裂型横断层
7	喀拉玉尔滚横断层	整体北北西走向, 切割地表北喀背斜南翼、东阿瓦特背斜南翼, 东阿瓦特背斜沿断层向南拖曳	北西向布格重力异常二阶导数线性梯度带 g_8 与其对应	断层东侧盐岩发育, 西侧盐岩不发育; 剖面特征为正花状构造, 未切穿基底, 属薄皮构造	右旋走滑断层	盖层撕裂型横断层
8	木扎尔特横断层	近南北走向, 规模较大, 切断山脉, 河道平均宽度达 1 km, 两侧发育典型的断层三角面	北西向磁性异常梯度带 L_5 与其对应	由造山带延伸至北部单斜带, 切割盆山耦合部位, 无地震剖面资料	右旋走滑断层	基底活化型横断层
9	巴什横断层	位于北部单斜带与造山带交界处, 整体呈南北走向, 两侧山体逆冲规模差异较大	重磁资料显示不明显	地震剖面呈现高角度近直立断面形态	左旋走滑断层	盖层撕裂型横断层

剖面上表现为典型的花状构造特征(图 15, 图 16), 在局部调节了秋里塔格构造的逆冲差异。

4.2 张性横断层

在研究区还发现了冲断带少见的张性横断层——大宛齐横断层组, 其规模较小, 主要分布于盐上层, 且成组出现。大宛齐横断层组的形成主要取决于主逆冲断裂挤压下盐岩层的流动变形这一重要因素。在库车冲断带西部, 盐岩层由于挤压逆冲

聚集于大宛齐地区, 形成了大宛齐盐枕, 随着南北向逆冲挤压的继续, 其核部聚集了大量的盐岩, 盐枕开始上拱, 在盐枕之上的局部区域产生东西向的张性应力场, 从而形成了张性横断层组(图 18)。

5 横断层的地质意义

5.1 控制河道发育及扇体展布

研究区地处温带大陆性气候地区, 干旱少雨,

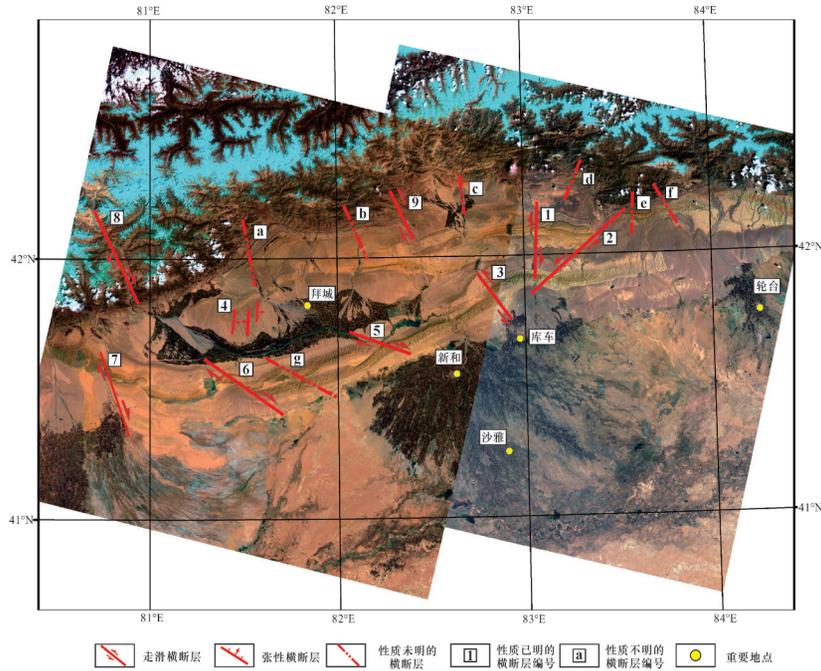


图 13 库车冲断带横断层分布图

1—库车横断层; 2—康村横断层; 3—盐水沟横断层; 4—大宛齐横断层(组); 5—托克逊横断层; 6—西秋横断层; 7—喀拉玉尔滚横断层; 8—木扎尔特横断层; 9—巴什横断层 a~g—性质未明的横断层

Fig.13 Distribution of transverse faults in Kuqa thrust belt

1—Kuqa transverse fault; 2—Kangcun transverse fault; 3—Yanshuigou transverse fault; 4—Dawanqi transverse fault; 5—Tuokexun transverse fault; 6—Xiqiu transverse fault; 7—Kalayuergun transverse fault; 8—Muzhaerte transverse fault; 9—Bashi transverse fault; a~g— Transverse fault whose structure is unknown

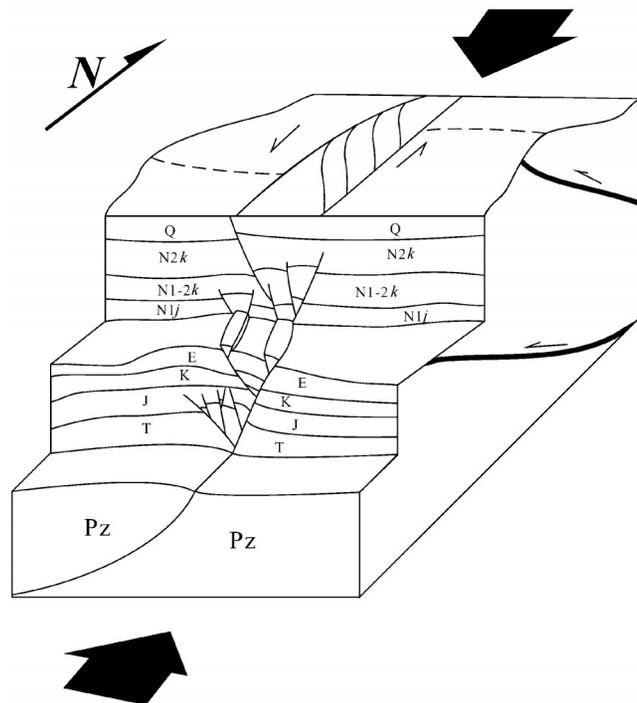


图 14 基底活化型横断层形成模式图

Fig. 14 Formation mechanism of basement activation transverse fault

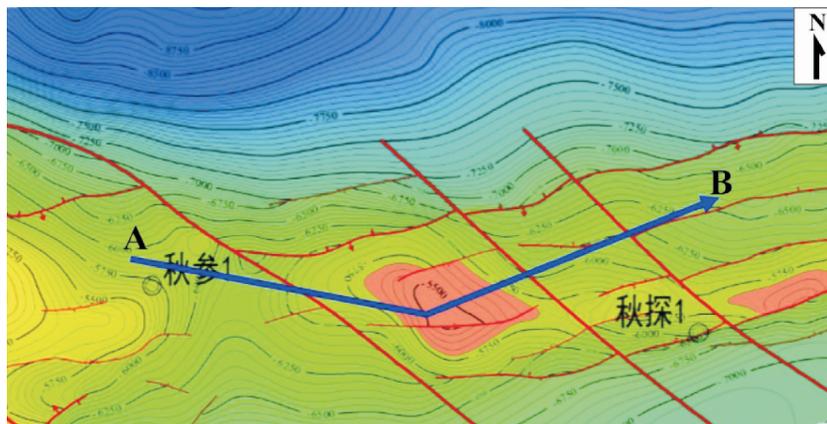


图 15 秋里塔格构造带古潜山构造顶面图

Fig. 15 Top structural map of buried hill of Qiulitag structural belt

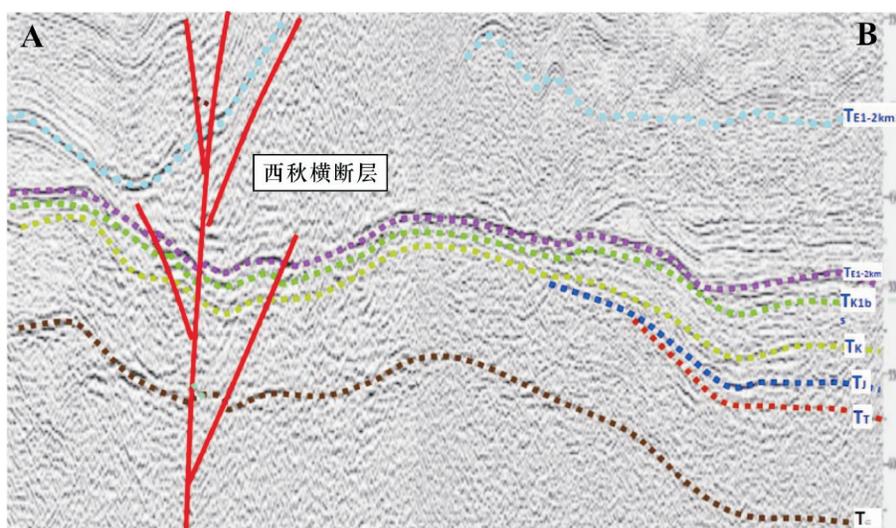


图 16 西秋横断层地震剖面解释图

Fig. 16 Seismic section of Xiqiu transverse fault

南天山的冰雪融化是其最为主要的水源之一。通过纵横断层的“拼接”，为向塔里木盆地汇聚的水资源提供了横向的构造通道，使原本并不充沛的水源能够避免分散从而进行南北向的长距离迁移，成为重要的河道。研究区发育的库车河、克孜勒河、喀拉苏河、台勒维丘克河、喀普斯浪河以及木扎尔特河等横向河流，河道较宽，方向常呈直角转弯变化，其形成几乎都有横断层作为其重要的构造基础。

另外，当横向河流流入盆地中的平缓地区时，水流就会发生分散，其携带而来的沉积物即发生沉积从而形成明显的冲积扇地貌。由于横向河道与横断层的密切联系，在研究区冲积扇与横断层在位

置上呈现一一对应的关系，如库车断裂所对应的库车河冲积扇就是一个典型的例子(图 19)。

5.2 调节作用和对构造格局的影响

由于沉积地层的差异以及挤压应力场分布不均的影响，沿主逆冲方向常会出现缩短量和构造变形的变化，研究区发育的大部分走滑性质横断层能够调节短距离内的缩短量和构造样式突变。如喀拉玉尔滚断层、西秋横断层、托克逊横断层、库车横断层等走滑横断层调节了各自两侧的构造变形差异。

同时横断层的存在暗示了在库车冲断带整体呈现南北分带的情况下，沿东西方向具有东西分段的构造现象。东西分段的成因可能是由于外力作

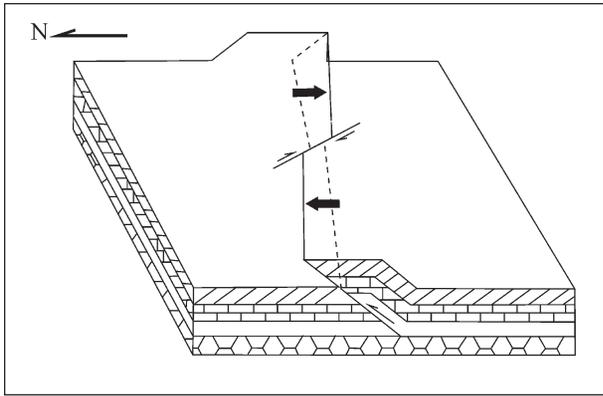


图 17 盖层撕裂型横断层形成机制图(据边海光等,2011 略改)
Fig. 17 Formation mechanism of cover-tear fault
(modified after Bian et al., 2011)

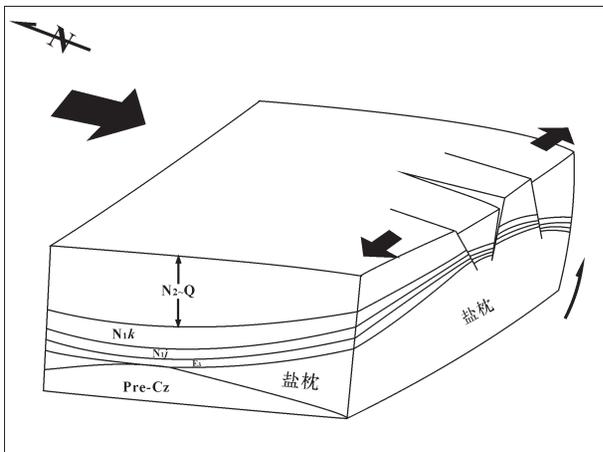


图 18 张性横断层形成机制图
Fig. 18 Formation mechanism of tensional transverse fault

用差异、沉积地层性质不同、基底起伏断裂亦或是多种因素共同影响,使库车冲断带在构造格局上更加复杂和多样化。

5.3 石油地质意义

库车前陆冲断带油气资源丰富,横断层在石油地质方面也有着较为重要的作用。在逆冲挤压的大背景下,横断层常常与逆冲主断裂联合发育,控制相应的构造圈闭形态,乃至油气藏的分布。

在走滑横断层十分发育的秋里塔格构造带西段,由横向断裂分割而成的构造圈闭十分常见。如图 15 所示,逆冲主断裂与两条走滑性质的横断层联合发育共同切割成断块构造。该断块西侧的横断层即为西秋横断层,从 AB 向剖面(图 16)可以看出,西秋横断层为典型的正花状构造,体现其所具备的

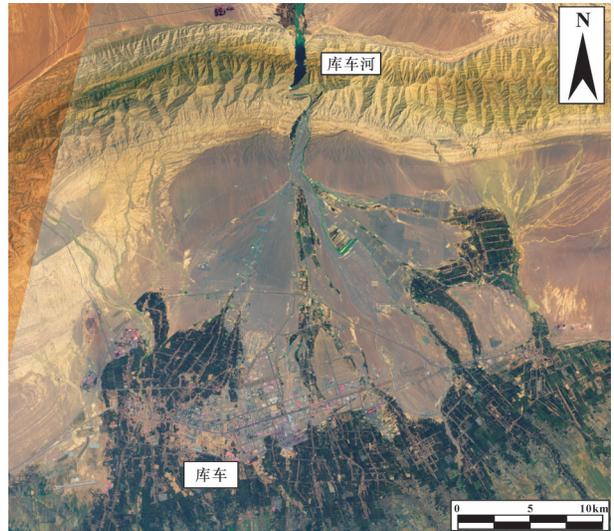


图 19 库车冲积扇地貌遥感图
Fig. 19 Remote sensing relief image of Kuqa alluvial fan

压扭性质。这种横断层在断层面两侧岩性配置理想的情况下有可能是良好的封闭断层,对于油气的封堵聚集有着较为重要的作用。

另外在大宛齐油田(图 20),拜城坳陷的三叠系—侏罗系烃源岩形成的油气在第四纪时被后期形成的干气所驱替,沿着已经发育的张性横断层向上运移并聚集于大宛齐背斜(余一欣等,2006)。可见,在油气运移方面,油源和构造圈闭之间发育的开启横断层能够成为油气运移的优势通道,在主断裂与横断层交错发育的地区则更有可能形成油气聚集。

6 结 论

(1)横断层能够通过地貌遥感、重磁解译以及地震勘探资料解释等方法进行识别,研究区之中,通过现有资料能够确认的有 9 条横断层(组),分别是库车横断层、康村横断层、盐水沟横断层、大宛齐横断层组、托克逊横断层、西秋横断层、喀拉玉尔滚横断层、木扎尔特横断层以及巴什横断层。可能存在的横断层有 10~16 条甚至更多,在研究区广泛分布,北部单斜带、克拉苏构造带、秋里塔格构造带中分布较为密集。

(2)通过对库车冲断带的构造演化以及横断层特征分析,将研究区的横断层从形成机制上分为三类,分别是具有基底卷入特征的基底活化型走滑横

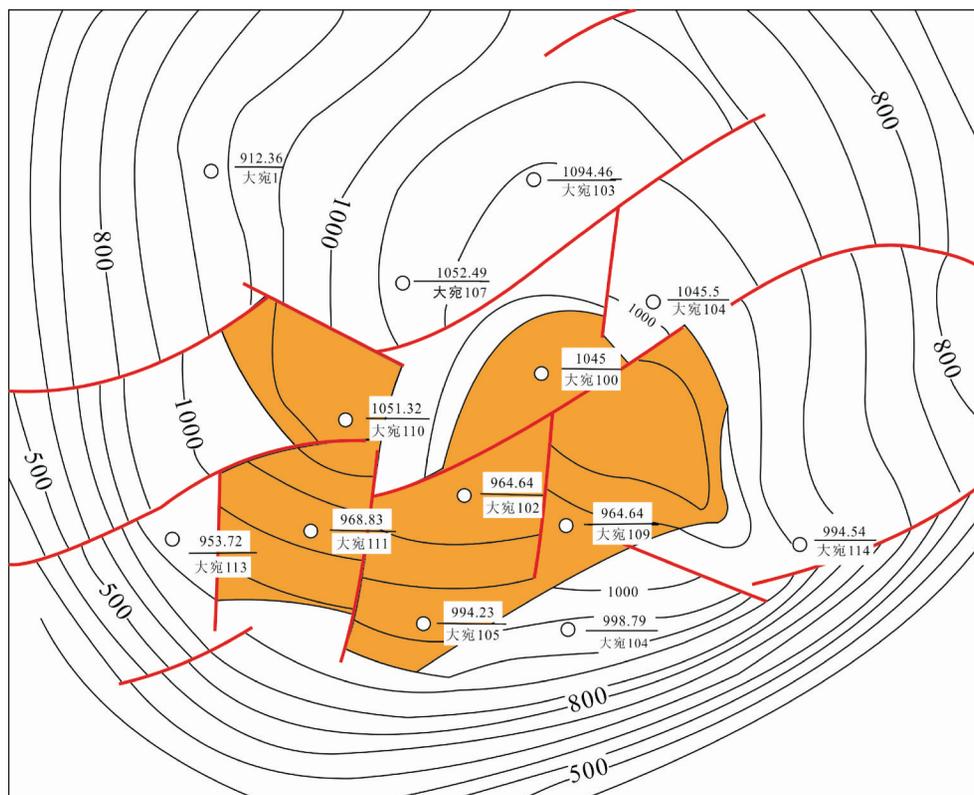


图20 大宛齐油藏构造平面图(据余一欣等,2006)

Fig. 20 Tectonic plan view of Dawanqi reservoir (after Yu Yixin et al.,2006)

断层;属于薄皮构造的盖层撕裂型横断层;由于盐构造垂向上拱而形成的张性横断层。

(3)横断层的存在能够在平面以及垂向上调节研究区挤压逆冲的不均一性,同时,主逆冲断层与横断层共同发育,使库车前陆冲断带在构造格局上形成了南北分带,东西分段的特点。

(4)横断层具有一定的石油地质意义。在构造圈闭方面,横断层能够切割背斜形成断块型圈闭,丰富了库车地区的圈闭类型;在油气运移方面,开启的横断层能够成为油气的优势运移通道,与开启的纵断裂一起形成网格式的油气运移网络,横纵断裂共同发育相交汇的地区,很有可能是油气交汇聚集的场所。

Reference

Anderle, H.J. 1987. The evolution of the South Hunsrück and Taunus Borderzone[J]. *Tectonophysics*, 137(1/4): 101-114.
 Bian Haiguang, Li Benliang, Jin Jiuqiang, Tian Jiqiang, Chen Zhuxin, Guan Shuwei. 2011. 3D structural characteristics in the Middle of Kelasu Structural Belt in Kuqa Depression [J]. *Xinjiang Petroleum*

Geology, 32(4): 360-363 (in Chinese with English abstract).
 Cai Jun, Lv Xiuxiang, Li Boyuan. 2016. Transverse Fault and Its Control on Hydrocarbon Accumulation [J]. *Geological Science and Technology Information*, 35(1): 107-113 (in Chinese with English abstract).
 Chen Guomin, Xia Minquan, Wan Yun, Zhang Peiping, Yuan Jianxin, Gong Qinglin. 2011. Structural characteristics and exploration prospects of North-Kunlun faults zone in Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 22(1): 89-96 (in Chinese with English abstract).
 Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Lu Huaifu, et.al. Two kinds of remote structural effects resulting from the India and Qingzang-Tibet collision[C]//Symposium of the Research on Modern Geology (Volume I). Nanjing: Nanjing University Press, 1992:1-8 (in Chinese).
 He Dengfa, Ying cheng, Du Shekuan, Shi Xi, Ma Shuhui. 2004. Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts — A case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, (3):91-101(in Chinese with English abstract).
 Hu Wenrui, He Xin, Mu Langfeng, Xiao Yvxiang, Hou Xiuling, Zhang Yang. 2014. Tectonic deformation characteristics of Jiuxi Basin and

- its formation mechanism of fault-related folds[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, (3): 253–258 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiaoying, Bian Shaofeng. 2010. The research evolution of international high-resolution geomagnetic models [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 30(3): 79–82 (in Chinese with English abstract).
- Li Mingjie, Xie Jielai, Pan Liangyun. 2005. Structural character of western part of northern Qilian Mountain front thrust belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(4): 438–444 (in Chinese with English abstract).
- Li Shiqin, Tang Pengcheng, Rao Gang. 2013. Cenozoic deformation characteristics and controlling factors of Kalayuergun Structural Belt, Kuqa Fold and Thrust Belt, Southern Tianshan [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 38(4): 859–869 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huaifu, Chen Chuming, Liu Zhihong, Jia Dong, Wang Guoqiang, Jia Chengzao. 2000. The structural features and origin of the Kuqa rejuvenation foreland thrust belt [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 21(3): 18–24 (in Chinese).
- Ma Z, Wang C Y, Xu J, Nie, F, Zhang, J. 2002. Study on the transverse structures across Taiwan Strait[J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 45(12): 1114–1126.
- Price R A. 2001. An evaluation of models for the kinematic evolution of thrust and fold belts: structural analysis of a transverse fault zone in the Front Ranges of the Canadian Rockies north of Banff, Alberta[J]. *Journal of Structural Geology*, 23(6): 1079–1088.
- Stone D S. 2003. New interpretations of the Piney Creek thrust and associated Granite Ridge tear fault, northeastern Bighorn Mountains, Wyoming[J]. *Rocky Mountain Geology*, 38(2): 205–235.
- Qi Jiafu, Li Yong, Wu Chao, Yang Shuijiang. 2013. The interpretation models and discussion on the contractive structure deformation of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 40(1): 106–120 (in Chinese with English abstract).
- Tang Pengcheng, Li Shiqin, Lei Ganglin, Huang Shaoying. 2012. Characteristics and formation of salt structures in Baicheng Sag, Kuqa Fold- and- Thrust Belt [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 37(1): 69–76+92 (in Chinese with English abstract).
- Tang Pengcheng, Wang Xin, Xie Huiwen, Lei Ganglin, Huang Shaoying. 2010. The quele aera of the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China: Cenozoic salt structures, evolution and controlling factors [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1736–1745 (in Chinese with English abstract).
- Tao Guoliang, Hu Wenxuan, Zhang Yijie, Cao Jian, Zhang Yueqian Gao, Xiaokang. 2006. NW-trending transverse faults and hydrocarbon accumulation in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, (4): 23–28 (in Chinese with English abstract).
- Tian Zuoji, Song Jianguo. 1999. Tertiary structure characteristics and evolution of Kuqa foreland basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 20(4): 7–13 (in Chinese).
- Wang Weifeng, Qing Yanbin, Zhu Chuanhua, Shan Xinjian. 2014. New view points of the seismogenic mechanism of Wenchuan and Lushan Earthquake under the action of transverse fault [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36(3): 102–112 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiepei, Yan Junjun. 1995. Structural framework of major fault faults in northern Tarim basin, Xinjiang[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, (3): 237–242 (in Chinese).
- Wang Zhigang, Li Lin. 1996. Geological remote sensing for the transverse structures in Tianshan Area [J]. *Remote Sensing of Environment China*, (4): 273–279 (in Chinese).
- Wu Xiaozhi, Li Baihua, Lv Xiuxiang, Xie Huiwen, Liu Zhigang. 2010. Strike-slip fault system in Kuqa Foreland Basin and its control on hydrocarbon [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 31(2): 118–121 (in Chinese with English abstract).
- Xu Hanqiu, Tang Fei. 2013. Analysis of new characteristics of the first Landsat 8 image and their ecoenvironmental significance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, (11): 3249–3257 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenyao, Bai Chunhua, Kang Guofa. 2008. Global models of the Earth's crust magnetic anomalies [J]. *Progress in Geophysics*, 23(3): 641–651 (in Chinese with English abstract).
- Xu Duonian, Wang Weifeng, Qiu Yibo, Xin Ye, Guo Jiangang. 2007. Characteristics and origin of structural accommodation zone in Wu-Xia Area, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(4): 410–412 (in Chinese with English abstract).
- Yang Minghui, Jin Zhijun, Lü Xiuxiang, Sun Dongsheng, Peng Gengxin, Lei Gangli. 2006. Eastern Qiulitag displacement transfer structure and its evolution the Kuqa Fold- Thrust Belt, Tarim Basin: Discuss concurrently the trap-forming of lateral ramp-related anticline [J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 321–329 (in Chinese with English abstract).
- Yassaghi A, Naeimi A. 2011. Structural analysis of the Gachsar sub-zone in central Alborz range; constrain for inversion tectonics followed by the range transverse faulting[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 100(6): 1237–1249.
- Yu Yixin. 2006. The Salt-Related Structures and Their Formation Mechanisms in the Qiulitag Structural Belt, Kuqa Depression [D]. Beijing: China University of Petroleum, (in Chinese).
- Yuan Xiaoxiang. 2011. Multi-source Remote Sensing Data Application in Information Extraction of Active Tectonics [D]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration (in Chinese with English abstract).
- Zanchi A, D'Adda P, Zanchetta S, Berra, F. 2012. Syn-thrust

- deformation across a transverse zone: the Grem-Vedra fault system (central Southern Alps, N Italy) [J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 105(1): 19–38.
- Zeng Qingquan, Kong Fanshu, Zheng Li, Ji Liansheng, Jiang Wenbo. 2003. Views on gravomagnetic and electric exploration in Kuqa foreland basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 24(3): 28–33 (in Chinese).
- Zhang Jiasheng, He Zixin, Fei Anq, Li Tianbin, Huang Xiongnan. 2008. Epicontinental mega thrust and nappe system at north segment of the western rim of the Ordos Block[J]. *Chinese Journal of Geology*, 43(2): 251–281(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chuanyin, Guo Chunxi, Chen Junyong, Zhang Liming, Wang Bin. 2009. EGM 2008 and its application analysis in Chinese Mainland [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 38(4): 283–289 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinyuan, Lou Jinhai, Wang Qinghua, 2004. Structural characteristics and petroleum geology of the thrust belts in southern Tarim Basin [J]. *Science in China (Series D)*, 34(S1): 56–62 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 边海光, 李本亮, 靳久强, 田继强, 陈竹新, 管树巍. 2011. 库车坳陷克拉苏构造带中段三维变换构造特征[J]. *新疆石油地质*, 32(4): 359–362.
- 蔡俊, 吕修祥, 李博媛. 2016. 横向断层及其控油气作用[J]. *地质科技情报*, 35(1): 107–113.
- 陈国民, 夏敏全, 万云, 张培平, 袁建新, 巩庆林. 2011. 柴达木盆地昆北断阶带构造特征及油气前景初步评价[J]. *天然气地球科学*, 22(1): 89–96.
- 郭令智, 施央申, 卢华复等. 印藏碰撞的两种远距离构造效应. *现代地质学研究文集(上)* [M]. 南京: 南京大学出版社, 1992: 1–8.
- 何登发, 尹成, 杜社宽, 石昕, 马辉树. 2004. 前陆冲断带构造分段特征——以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例[J]. *地学前缘*, (3): 91–101.
- 胡文瑞, 何欣, 穆朗枫, 肖毓祥, 侯秀林, 张洋. 2014. 酒西盆地构造变形特征及断层相关褶皱形成机理[J]. *新疆石油地质*, (3): 253–258.
- 黄晓颖, 边少锋. 2010. 国际高精度地磁模型研究进展[J]. *海洋测绘*, 30(3): 79–82.
- 李明杰, 谢结来, 潘良云. 2005. 祁连山北缘冲断带西段构造特征[J]. *地学前缘*, 12(4): 438–444.
- 李世琴, 唐鹏程, 饶刚. 2013. 南天山库车褶皱—冲断带喀拉玉尔滚构造带新生代变形特征及其控制因素[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(4): 859–869.
- 卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 贾东, 王国强, 贾承造. 2000. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因[J]. *石油学报*, 03: 18–24, 108.
- 漆家福, 李勇, 吴超, 杨书江. 2013. 塔里木盆地库车坳陷收缩构造变形模型若干问题的讨论[J]. *中国地质*, 40(1): 106–120.
- 唐鹏程, 李世琴, 雷刚林, 黄少英等. 2012. 库车褶皱—冲断带拜城凹陷盐构造特征与成因[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(1): 69–76+92.
- 唐鹏程, 汪新, 谢会文, 雷刚林, 黄少英. 2010. 库车坳陷却勒地区新生代盐构造特征、演化及变形控制因素[J]. *地质学报*, 84(12): 1735–1745.
- 陶国亮, 胡文瑄, 张义杰, 曹剑, 张越迁, 高小康. 2006. 准噶尔盆地西北缘北西向横断裂与油气成藏[J]. *石油学报*, (4): 23–28.
- 田作基, 宋建国. 1999. 塔里木库车新生代前陆盆地构造特征及形成演化[J]. *石油学报*, 20(4): 7–13.
- 王伟锋, 卿艳彬, 朱传华, 单新建. 2014. 横断层作用下汶川地震与芦山地震震害机制新探[J]. *地球科学与环境学报*, 36(3): 102–112.
- 王燮培, 严俊君. 1995. 塔里木盆地北部断裂格架分析[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, (3): 237–242.
- 王志刚, 李林. 1996. 中亚天山地区横向构造的航天遥感分析[J]. *环境遥感*, (4): 273–279.
- 吴晓智, 李佰华, 吕修祥, 谢会文, 刘志刚. 2010. 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*, 31(2): 118–121.
- 徐涵秋, 唐菲. 2013. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义[J]. *生态学报*, (11): 3249–3257.
- 徐文耀, 白春华, 康国发. 2008. 地壳磁异常的全球模型[J]. *地球物理学进展*, 23(3): 641–651.
- 许多年, 王伟锋, 邱怡博, 辛也, 郭建刚. 2007. 准噶尔盆地乌夏地区构造调节带特征及成因[J]. *新疆石油地质*, 28(4): 410–412.
- 杨明慧, 金之钧, 吕修祥, 孙冬胜, 彭更新, 雷刚林. 2006. 库车褶皱冲断带东秋里塔格位移转换构造及其演化——兼论侧断坡相关背斜构造圈闭的形成[J]. *地质学报*, 80(3): 321–329.
- 余一欣. 2006. 库车坳陷秋里塔格构造带盐相关构造及其形成机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京).
- 袁小祥. 2011. 多源遥感数据在活动构造信息提取中的应用研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.
- 曾庆全, 孔繁恕, 郑莉, 冀连胜, 江汶波. 2003. 库车前陆盆地重磁电勘探述评[J]. *石油学报*, 24(3): 28–33.
- 张家声, 何自新, 费安琪, 李天斌, 黄雄南. 2008. 鄂尔多斯西缘北段大型陆缘逆冲推覆体系[J]. *地质科学*, 43(2): 251–281.
- 章传银, 郭春喜, 陈俊勇, 张利明, 王斌. 2009. EGM 2008 地球重力场模型在中国大陆适用性分析[J]. *测绘学报*, 38(4): 283–289.
- 周新源, 罗金海, 王清华. 2004. 塔里木盆地南缘冲断带构造特征及其油气地质特征[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 34(S1): 56–62.