

塔里木盆地巴楚地区大型膝褶带的发现及油气勘探意义

王毅¹,张仲培¹,张波²,云金表¹,刘士林¹,宋海明¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京100083;2. 北京大学地球与空间科学学院,北京100871)

摘要:利用野外地表露头、重新处理的地震反射剖面及钻井资料,详细解析并重新认识了巴楚隆起的构造变形特征,提出巴楚地区以往解释的主导构造样式“两断夹一隆”中的具高角度特征的“断层”大多数并不是断裂,而是大型膝褶带,“两断夹一隆”中的“两断”实际是一对共轭膝褶带。同时提出,这种具高角度特征的膝褶带及其褶皱构造是克拉通盆地内在挤压背景下的一种重要变形样式,膏盐层与不连续地层界面的广泛发育以及区域顺层挤压缩短变形是该区形成大型膝褶带的重要地质因素。结合膝褶带的形成机制,分析了它与大型断裂带的区别,并建立了识别地下大型膝褶带的几何形态、地震反射和应力指示等标志。在巴楚隆起形成演化历史研究基础上,探讨了巴楚地区古生界膝褶变形在改善储层和形成圈闭方面的油气地质意义,分析了其油气勘探前景,并指出了寻找大型膝褶型背斜油气藏的有利区带。

关键词:膝褶带;构造样式;圈闭;巴楚地区;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Discovery of large kink-band structures and petroleum exploration implications in Bachu area, Tarim Basin

Wang Yi¹, Zhang Zhongpei¹, Zhang Bo², Yun Jinbiao¹, Liu Shilin¹, Song Haiming¹,

(1. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Outcrop observation, reprocessed seismic reflection profiles and drilling data were integrated to describe the characteristics of structural deformation of Bachu uplift. The previously interpreted structural style was “one uplift between two fault zones”. However, the previously interpreted fault zones with deep angle were not faults but a pair of conjugate kink-band structural zones. It is believed that the large kink-band structural zones and the fold structures in the area are the dominant styles of structural deformations in the abdomen of the cratonic basin under compression. The widely developed gypsum-salt bed and discontinuous bed boundary and regional along-bedding compressional deformation are the vital geological factors controlling the formation of the large kink-band structural zones. Marks like geometry, seismic reflection and stress were presented for identification of large underground kink-band structural zones based on their formation mechanism and differences with large fault zones. On the basis of research on history of Bachu uplift, we discussed the implications of the Paleozoic kink deformation to reservoir improving and traps forming, analyzed their exploration prospect and outlined the favorable zones for discovering large anticlinal reservoirs of kind fold type.

Key words: kink-band zone, structural pattern, trap, Bachu area, Tarim Basin

巴楚地区位于塔里木盆地西部,区域构造位置上属于巴楚隆起,是塔里木盆地的重要次级构造单元。巴楚隆起西北邻柯坪断隆,东接卡塔克隆起,向北东过渡为阿瓦提凹陷,东南与塘古孜巴斯凹陷相连,向西南逐渐过渡为麦盖提斜坡。是晚古生代以来长期发育、新生代强烈变形的活动古隆起^[1-4](图1)。

巴楚地区发育一系列条带状展布的构造带。地震

剖面上过去把这些条带状的构造带解释为两个高角度逆断层夹一个背斜(即“两断夹一隆”)、两个同向高角度逆断层夹一个断块和高角度逆断层等构造,并认为其形成机制都与基底卷入式逆冲作用和走滑-压扭作用相关。因此,高角度断裂带和走滑-压扭构造一直被认为是巴楚隆起的主要构造类型^[5-7]。近年来,通过野外露头详细测量和盆地地震资料重新精细解释,

收稿日期:2014-10-9;修订日期:2014-11-03。

第一作者简介:王毅(1967—),男,博士、教授,构造地质学、含油气盆地分析和油气勘探。E-mail: wangyi_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-004)。



图1 塔里木盆地巴楚地区构造带展布

Fig. 1 Structural distribution of Bachu area, Tarim Basin

①柯坪逆冲断裂;②色力布亚构造带;③康塔库木构造带;④海米罗斯构造带;⑤玛扎塔格构造带;⑥古董山断裂带;
⑦卡拉沙依构造带;⑧吐木休克构造带;⑨阿恰构造带;⑩巴楚构造带

发现巴楚隆起上以往认为的主导样式“两断夹一隆”中的具高角度特征的“断层”大多数并不是断裂,而是大型膝褶带,“两断”实际是一对共轭膝褶带。

大量研究表明,各种规模的膝褶带在自然界是常见的一种构造样式,是层状介质在顺层外力挤压过程中调节岩石变形的重要构造类型。但在盆地内发育膝褶带及其相关变形构造在国内外的报道并不多见^[8-11]。因此,针对这种大型膝褶带及其伴生的膝褶型褶皱,探讨其圈闭特征与含油气性具有重要的油气地质意义。本文试图从巴楚地区膝褶带的变形特征、形成机理和发育规律出发,分析巴楚地区大型膝褶带作为油气聚集带的有利条件,进而建立膝褶带相关圈闭的模式,并指出该区大型膝褶带的油气前景。

1 地质背景

巴楚地区膏盐层与不连续地层界面的广泛发育形

成该区特征明显的层状岩石地层,上下地层岩性变化较大,表现出显著的岩层分层特征,使该区地层在区域水平挤压缩短变形过程中非常有利于层间滑动和大型膝褶的形成。

塔里木盆地地层齐全,厚度巨大,从震旦系到第四系均有分布,残留最大厚度达16 000 m。其中,震旦系一下二叠统为海相和海-陆交互相沉积,下古生界则主要以碳酸盐岩为主,上二叠统一第四系为陆相沉积。而巴楚地区中生界地层基本缺失,震旦系、古生界及新生界地层均有发育,总厚度可达4 000~8 000 m。古近系分布于麦盖提斜坡及巴楚隆起西缘和南缘,巴楚隆起大部分缺失古近系,新近系直接覆盖在古生界之上。钻井资料显示,研究区内存在3套含石膏地层:古近系、石炭系和中寒武统。这3套石膏层是构造变形的3个重要的滑脱层。

根据露头、钻井和地震资料,巴楚隆起区内可以识别出9个主要的不整合界面。其中4个为角度不整合面,3个局部角度不整合面,2个为平行不整合面。4

个主要的不整合面为加里东期志留系与奥陶系之间的不整合面,海西期石炭系与下伏地层之间的不整合面、喜马拉雅期古近系与古生界之间的不整合面以及喜马拉雅晚期中新统与上新统之间的不整合面。

2 大型膝褶带构造特征

对最新的地震资料重新精细解释并结合地面地质研究,我们发现过去对巴楚隆起地震剖面上最为常见的“高角度断层”解释方案中很多表现为一条高角度的“逆冲断层”往往与一个低反射带或反射空白带相邻,“断裂”两侧几乎看不出断距,同相轴甚至可以连续追踪,无明显错断。据此提出巴楚地区大部分具有“两断夹一隆”构造特征中的“两断”并非断层,实际是一对共轭膝褶带。如阿恰膝褶型斜坡带、吐木休克构造带、色力布亚构造带、康塔库木膝褶型背斜带、乔肖尔盖共轭膝褶带、和田1井区构造带、古董山构造带、海米罗斯构造带和玛扎塔格构造带等均属于此类型。

2.1 地表构造观测与解析

巴楚隆起西北部小海子水库-柯坪地区与南部玛扎塔格-古董山的露头为研究本区地下构造提供了一个很好的窗口。西北部自东向西分别出露良里塔格山、别里塔格、瓦吉里塔格、小海子水库旁的玛扎山、大坂塔格以及位于沙漠腹地的玛扎塔格-乌山-古董山(图2)。这些出露在沙漠中的古生代和新生代地层是进行构造观测的主要对象。下面以别里塔格膝褶型褶皱为例进行野外露头构造观测与解析。

2.1.1 别里塔格膝褶型褶皱

别里塔格山以NW-SE向延伸近25 km,主要出露奥陶系中-薄层灰岩、白云岩和泥灰岩地层。野外观测点主要集中在西北端(图2)。观测点地层产状平面投影图显示出地层产状显著的分带性,观测区被分为A、B、C三个区,A和C区域内的地层倾角明显高角度,B区域内的地层近于水平。地层平面几何形态显示出膝褶型褶皱特征,没有观测到脆性断裂。构造剖面则表明褶皱两翼地层明显的高角度倾斜,褶皱顶部地层水平或近于水平,膝褶带内陡立地层投影显示褶皱平均走向NNW-SSE。

在褶皱枢纽处的观测点(GPS292),可以观测到大量的脆性破裂或劈理面,劈理面产状为NW倾 50° ,与观测的褶皱枢纽基本一致。这些破裂大都充填方解石和石英,两侧的灰岩地层连续变形,没有发生截然的断裂或位移。综合别里塔格地区的所有观测点并结合过该区的地震主测线进行分析计算,恢复的构造样式呈

现大型共轭膝褶带特征,膝褶带内地层倾角为高角度,自浅部向深部两条膝褶带边界汇聚,交于一点,地表褶皱的顶部向上突起,深部则呈现V形褶皱(图3)。

2.1.2 构造应力-应变体系分析

基于对巴楚地区出露地层的野外构造观测和解析,可以得出巴楚地区主要构造样式以膝褶型褶皱为主,同时也有弯滑褶皱。除玛扎塔格山以外,出露地表的断裂构造主要为小规模逆冲(良里塔格山),发育于褶皱翼部或翼部外侧,为调节断裂或柯坪断裂体系的产物,而褶皱核部未观测到断层。据此推测褶皱变形与断裂构造没有必然联系。褶皱变形与逆冲断裂构造的切割关系也表明巴楚地区褶皱变形应早于柯坪逆冲构造带。

根据最大有效力矩准则的理论计算^[12-13],膝褶带边界与最大主挤压应力轴 σ_1 之间的理论夹角为 54.7° (图4)。自然界的统计结果也表明这个角度范围为 $45^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ^[14-17]。依据实测的野外观测数据计算,在良里塔格背斜区的古应力方向为最大挤压应力,应力方向为NE-SW,与膝褶带边界夹角分别为 $53^{\circ} \sim 64^{\circ}$;别里塔格和大阪塔格褶皱区,最大主应力方向亦为NE-SW向,与膝褶带边界夹角分别为 48° 和 54° 。这些结果与利用古地磁数据估算的主挤压应力方向为NE-SW(来源于玛扎塔格山中新世乌恰组的砂岩和泥岩)^[18]基本吻合。

2.2 地下典型构造带地震剖面解释与构造解析

在地震剖面上,膝褶带变形样式不同于断层构造样式^[19]。膝褶带在地震剖面上常是一个具有一定宽度的带,带内地震信息表现出低振幅、信息模糊或空白带等特征。换言之,地震剖面上出现的具有一定宽度的信息模糊或空白带,为膝褶带内陡立或高角度倾斜(当带内地层倾斜角度大于 40°)地层的地震反映,而非断裂构造。

2.2.1 典型构造带地震剖面解释与构造解析

对研究区大量的地震剖面进行了精细的解释与分析表明:巴楚地区的基本构造样式主要以膝褶型单斜、膝褶型背斜、逆冲断裂及相关的褶皱变形为主。从构造变形的组合关系而言,主要为典型的双构造变形层格架,即基底卷入膝褶变形+浅层逆冲滑脱变形。基底卷入型构造变形样式大部分不是“压扭构造”或逆冲断层,而是以连续变形的膝褶带形成的褶皱变形为主(图5)。同时,发现在该区早期的基底膝褶变形控制后期盖层的滑脱构造发育,表明基底卷入型构造变形明显早于盖层滑脱构造,表现出浅层次构造对深层次构造的继承性关系。在巴楚隆起区发生基底卷入型的膝褶构造有色力布亚深部膝褶带、康塔库木共轭膝

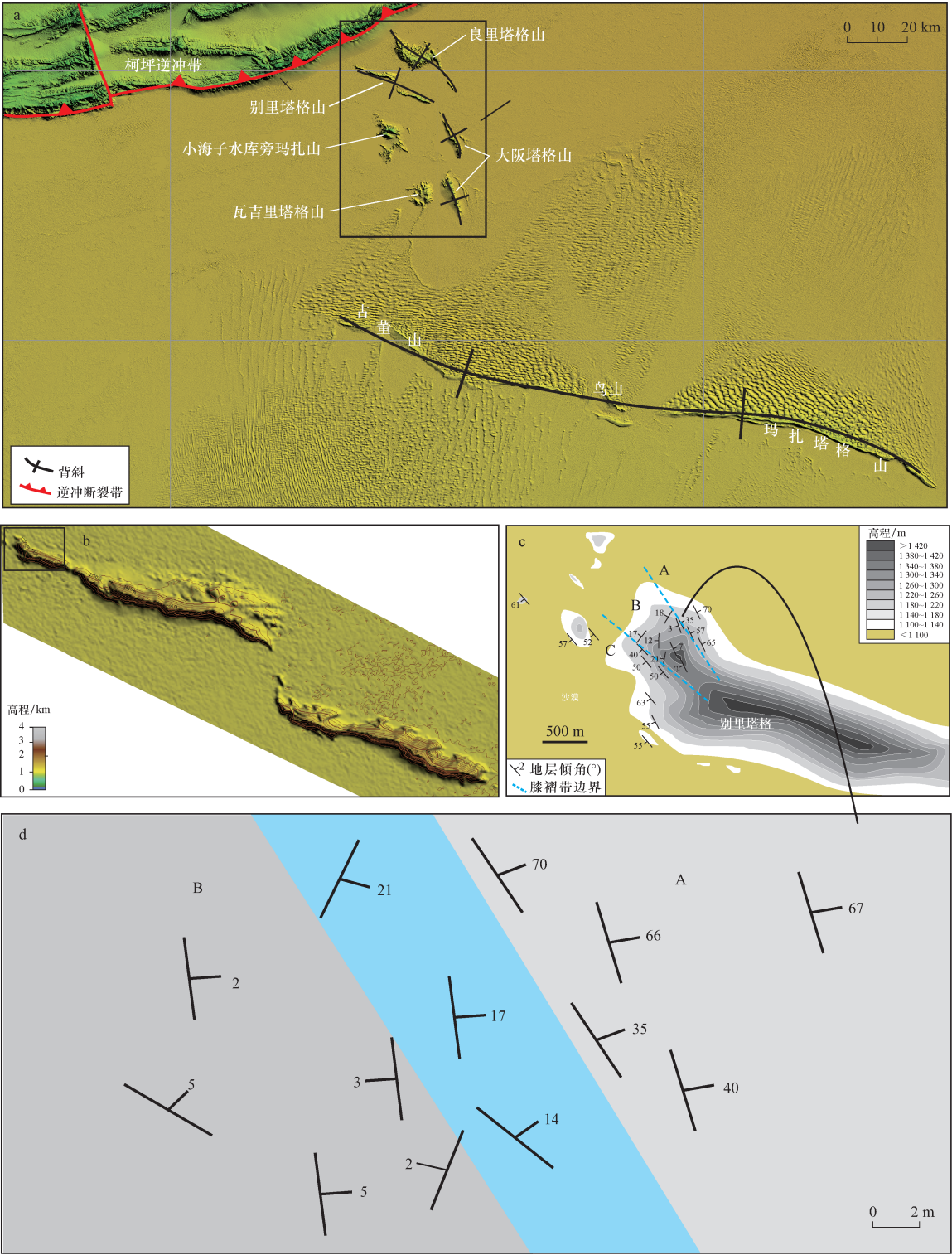


图2 塔里木盆地别里塔格山露头构造位置与地层产状变化

Fig. 2 Structural location and changes of occurrence of Bielitage hill outcrop in Bachu area, Tarim Basin

a. 剖面位置; b. 数字高程图; c. 观测点地层倾角与分带特征;
d. 小范围内精细的产状变化和分区特征

褶带、玛扎塔格深部共轭膝褶带、古董山东南段的共轭膝褶带以及阿恰和吐木休克膝褶带。发生盖层滑脱型构造的有色力布亚浅层逆冲滑脱构造、卡拉沙依被动顶板逆冲构造、玛扎塔格浅部逆冲滑脱构造以及海米罗斯浅部的逆冲滑脱构造等,这些构造在横穿巴楚隆

起的地震剖面上均有很好的显示。

2.2.2 巴楚地区构造变形特征

纵向上,可以将巴楚隆起区内卷入不同构造样式的沉积-构造组合分为如下3类:前膝褶变形层、同膝

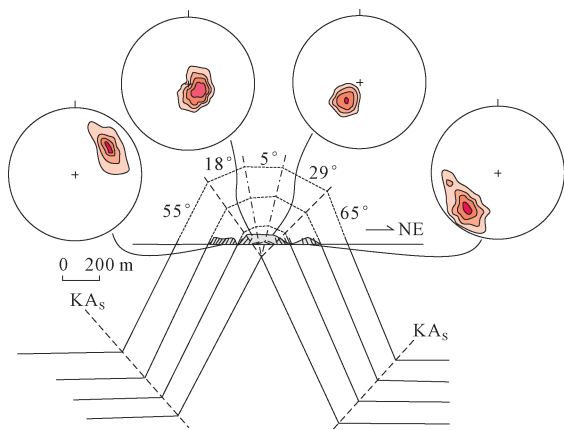


图3 塔里木盆地别里塔格膝褶型褶皱样式
Fig. 3 Kink fold pattern in Bielitage, Tarim Basin
KA_s 为利用地震信息识别的膝褶带边界

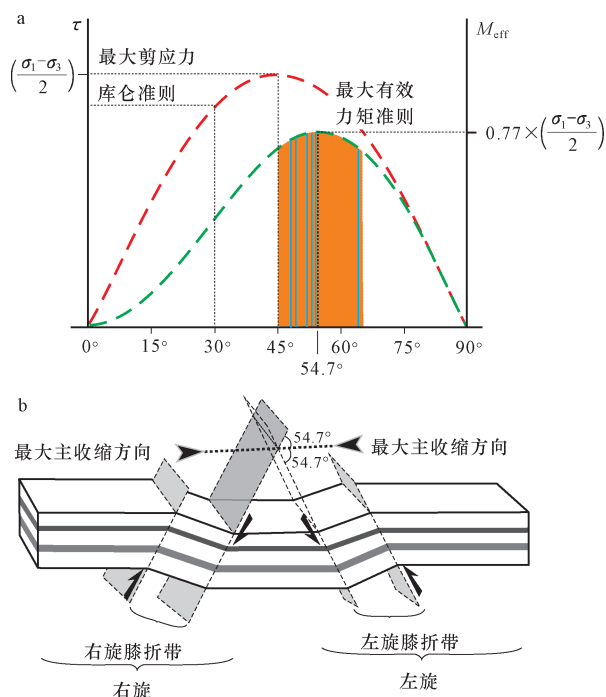


图4 最大有效力矩准则及其推测出的最大主收缩方向
Fig. 4 The maximum effective moment criterion (MEMC) and maximum contraction direction inferred by MEMC

a. 棕色区域为试验和自然界界定的最大收缩方向与膝褶带边界夹角范围(45°~65°),区域内绿色线为本次计算值;其中, σ_1 为最大主应力,MPa; σ_3 为最小主应力,MPa; τ 为剪切力,MPa; M_{eff} 为最大有效力矩,MPa; b. 基于最大有效力矩准则的理想的共轭膝褶带与最大主挤压方向的关系图解

褶变形层和后膝褶变形层。前膝褶变形层的构造主要分布于色力布亚构造带北段、古董山构造带北段和卡拉沙依构造带。前膝褶构造以低角度逆冲断裂为主,如被动顶板逆冲及其相伴的褶皱。主要卷入变形的地层为志留系沉积之前的地层,这类构造规模有限,且埋深大,后期活动不明显。对巴楚隆起现今的构造格局不具有控制效应。同膝褶变形层指卷入膝褶变形的地层,是形成巴楚地区基本构造格架和样式的主要沉积-构造

组合样式,该层主要的构造样式为大型膝褶带和巨型共轭膝褶带以及与其相伴发育的背斜构造。卷入膝褶变形的地层涉及基底和整个古生代地层,部分新生代地层也发生膝褶变形(图6)。后膝褶变形层主要发生在新生代地层中,部分地区石炭系-二叠系也有发生。主要的构造样式为逆冲断层及其相伴产生的背斜构造,如色力布亚带的东南段、海米罗斯带、玛扎塔格带及卡拉沙依带等新生代地层均发生了逆冲滑脱构造。这类表层的逆冲滑脱断裂明显改造了早期的膝褶带。

横向上,主要的构造和边界均依附于膝褶带产出。如阿恰-吐木休克构造带为巴楚隆起的东北边界,主要以大型单膝褶和非对称性膝褶为基本构造格架。西南侧边界的色力布亚-海米罗斯-玛扎塔格带也是如此。在巴楚隆起的腹地,膝褶带构造也是形成大-中型背斜构造的重要要素,如古董山东南段的背斜构造和乔肖尔盖的背斜构造等。

综上所述,巴楚隆起总体表现为大型膝褶型褶皱变形的产物,而非过去认为的高角度逆冲断裂形成的断隆构造,其重要的边界带均为基底卷入变形的巨型膝褶带构造,隆起带内则发育不同规模的共轭或单斜膝褶带。

2.3 膝褶带的形成机制

膝褶带是层状地质体中较为常见的构造现象,尤其是各向异性的片岩和部分沉积岩。至于膝褶带的形成机制,却一直是构造地质学家探讨和争论的焦点。自1897年Clough提出膝褶构造样式概念以来,膝褶和膝褶带的几何学、运动学以及形成机理的研究,倍受物理材料学和构造地质学家关注。许多学者尝试着通过试验再造膝褶带,从早期的简单力学模型,到复杂的连续介质模型和物理材料模拟^[20-22]。在地质学领域,膝褶带是中、上地壳流变机制的重要地质现象,是岩石脆韧性变形的典型产物。从大尺度露头到晶体显微变形,膝褶和膝褶带构造样式都是岩石连续变形的重要方式^[23-24]。对沉积地层中膝褶带研究,从对膝褶带几何学定性描述和试验模拟到对其形成机制的理论探讨方面,大部分学者主要集中于几何学特征和力学性质的探讨。Kirschner等认为褶皱作用是影响沉积岩变形的最后一次事件,但膝褶带的分布在变形过程中是不均一的,且膝褶带、断裂及剪切带之间没有明显的关联性^[25]。

郑亚东(2004)在对共轭膝褶带的夹角进行定量分析之后,获得110°的夹角,并提出岩石变形的最大有效力矩准则,解决了Mohr-Coulomb准则对自然界广泛存在的大变形不能给予合理解释的难题,该准则控制膝褶带的取向,因而可解释沉积地层中膝褶带的形成^[12-13](图4)。

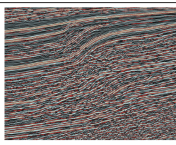
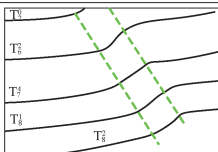
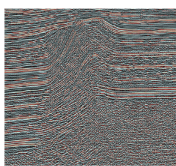
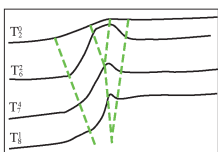
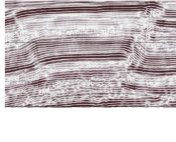
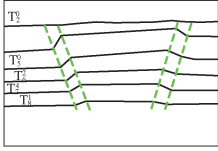
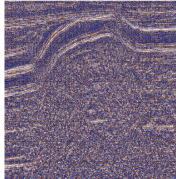
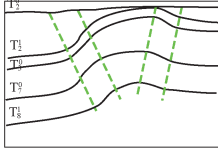
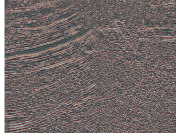
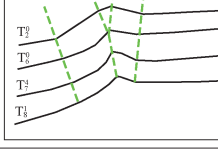
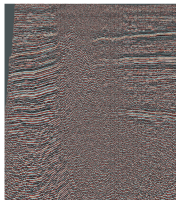
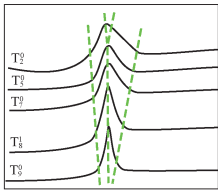
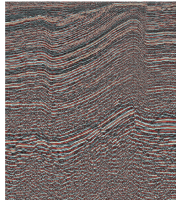
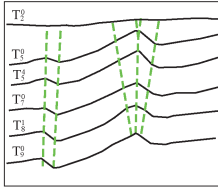
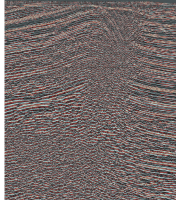
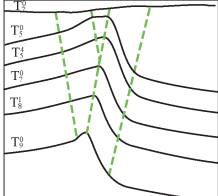
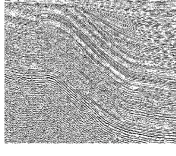
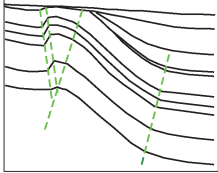
构造带		典型地震剖面	剖面构造样式解释	膝褶类型	主要特征	构造时限分析	构造样式
色力布亚	西北段			单斜型膝褶带	T ₃ 至T ₅ 之下的地层均发生膝褶变形；膝褶面倾向东北方向，T ₃ 不整合于膝折之上	形成于早二叠世，中新世强烈活动	基底卷入型构造
	南段			共轭-非对称型膝褶带	北翼膝折带窄，南翼宽，共轭形态，形成巨大的膝褶型斜坡		
乔肖尔盖				共轭-对称型膝褶带	共轭膝褶样式非常对称，形成膝褶型褶皱	形成于中新世	盖层拆离型构造
康塔库木				共轭型膝褶带	基本对称型共轭膝折，形成膝褶型背斜构造，基底卷入膝褶变形	二叠纪形成雏形，中新世基本定型	基底卷入型构造
古董山东南段				共轭-非对称型膝褶带	西南翼膝折宽，北东翼较窄，北东翼高于西南翼，形成膝褶型背斜构造	形成于中新世，更新世强烈活动	基底卷入型构造
玛扎塔格				共轭-非对称型膝褶带	北翼膝折宽，南翼较窄，在深部形成膝褶型背斜	形成于新生代前	基底卷入型构造
卡拉沙依				单斜或共轭型膝褶带	膝褶带形成的背斜较宽缓		基底卷入型构造
吐木休克				共轭型膝褶带	大型膝褶型斜坡带，非对称性，基底发生抬升和隆起	形成于二叠纪，中新世强烈活动	基底卷入型构造
阿恰				共轭-非对称型膝褶带	形成大型膝褶型斜坡，基底发生强烈抬升和隆起		基底卷入型构造

图 5 塔里木盆地巴楚隆起区典型膝褶构造与特征

Fig. 5 Characteristics of the typical kink-band structures developed in Bachu uplift, Tarim Basin
(绿色虚线示意膝褶带边界)

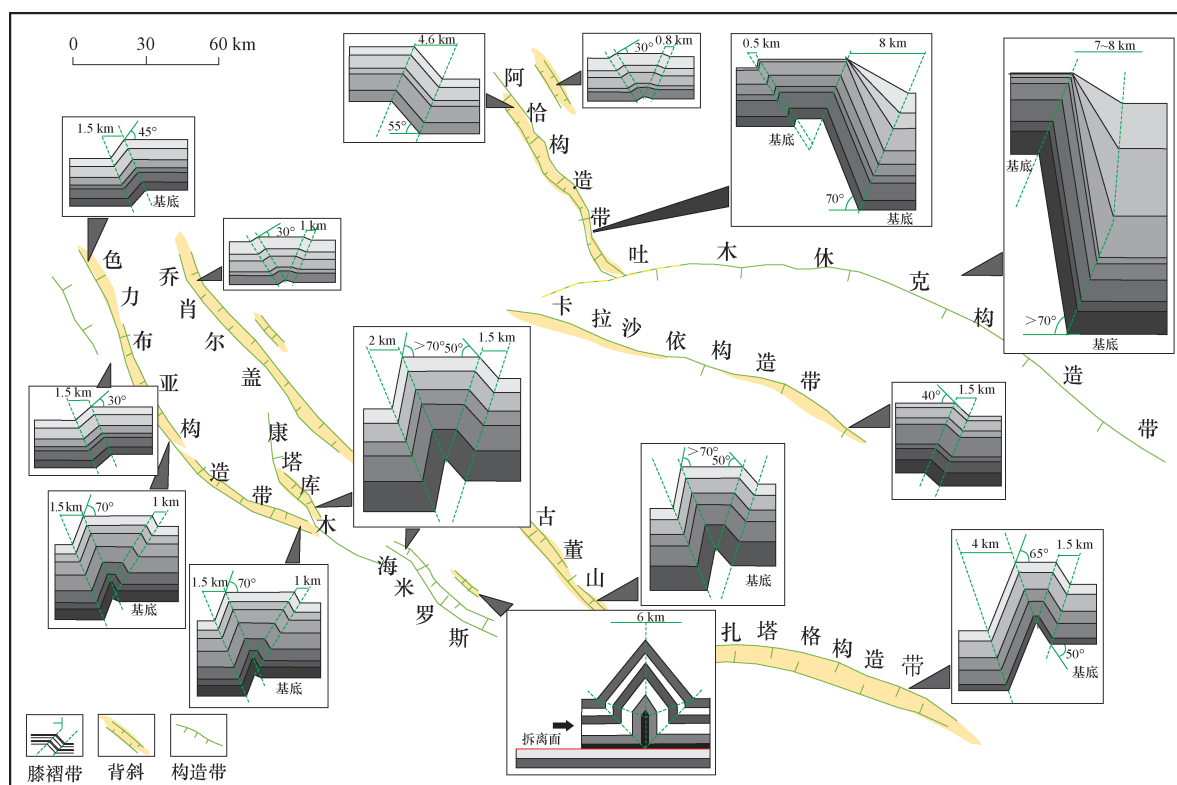


图6 塔里木盆地巴楚隆起主要膝褶带构造样式

Fig. 6 Structural patterns of the main kink-bands in Bachu uplift, Tarim Basin

3 膝褶带构造鉴别

各种规模的膝褶带往往在油气勘探实践中不被重视的原因,是人们对该构造样式的认知程度不够,特别是目前地震资料处理技术和手段及其在地震剖面中的识别仍有相当的难度。

3.1 膝褶带构造的地球物理识别标志

膝褶带与断裂带地震正演模拟结果与对比研究表明,膝褶带表现为具有一定宽度的变形带,带内地层发生统一的倾斜,由于发生膝褶变形的地层在膝褶带内的倾斜,导致地震反射难以真实准确成像。因此在二维和三维地震剖面上一般很难辨别膝褶带构造和断裂构造。而这两类构造样式是截然不同的构造类型,在地震剖面上有效区分和厘定这两类构造对准确分析构造演化和圈闭至关重要。

3.1.1 地震反射结构特征

通常膝褶带表现为具有一定宽度的高角度(一般 $>50^\circ$)地震反射带,具有两个较为清晰、大致平行的边界。带内、外同向轴倾角一般发生统一变化。

当膝褶带内地层倾角超过 45° 时,地震反射界面从膝褶外向膝褶内追踪困难,时常发生反射界面在向斜部位被“高估”,甚至在深部追踪出小型背斜构造等

假象^[19]。

3.1.2 地震反射振幅特征

地震剖面上,膝褶带往往呈一定宽度的特征信息带,带内地震信息表现出低振幅、模糊或空白反射带特征,这个地震信息模糊带存在两个非常明显的平行边界,且边界呈高角度延伸。

膝褶带内、外角之间的变化,即膝褶型褶皱的紧闭程度(或带内地层倾角变化),对地震反射信息的影响巨大。对内角大于外角的宽缓膝褶型褶皱而言,膝褶带内反射界面基本可以识别和追踪。而对于内角和外角角度接近或内角小于外角的情况,即紧闭褶皱样式,膝褶带内反射界面自浅部向深部几乎均为低振幅带,带内地震信息响应地质信息的能力显著降低,甚至出现地震信息假象。这些假象和低振幅带是膝褶带内地层高角倾斜的必然响应。

3.2 膝褶带与断裂带的区别

膝褶带构造和断裂构造是两类完全不同的构造样式,在地震剖面上所显示出的信息也大相径庭,但这两类构造也存在伴生现象,因此在地震剖面上有效判别这两类构造至关重要。判别方法主要包括以下4点:① 在地震剖面上,断层呈线状延伸,很少的断层带能达几千米宽,而膝褶带呈较宽的带状延伸;② 低角度逆冲性质的断裂面往往产生反射信号,形成断面波,而

膝褶带构造不形成断面波;③逆冲断裂两盘地层的反射界面形成显著的上下叠置现象,而膝褶带构造不产生这种叠置效应;④断裂构造往往造成断层两盘地层反射波相位显著的错位,且沿断裂方向,这种错位现象应该是连续的,而膝褶带构造内部和两侧的地层反射界面是连续可以追踪对比的。

4 巴楚隆起大型膝褶带形成与改造

4.1 巴楚隆起边缘构造带形成与演化

巴楚隆起作为塔西南前陆盆地的前缘隆起,其南、北两侧均发育有大型的膝褶带及其相关褶皱,其构造特征在巴楚隆起区具有广泛的代表性。尤其是隆起南缘的大型膝褶带(色力布亚-海米罗斯-玛扎塔格中深层膝褶带)最为明显。

巴楚隆起南缘带的地表露头仅在隆起东段的玛扎塔格构造处有出露。在玛扎塔格山东段的露头剖面上,中新统紫红色岩系形成多套背斜和向斜褶皱,其背斜几何特征均为南翼缓、北翼陡,表现出由南向北逆冲的运动学特征,在剖面最底部显著变形的石膏变形层内,也可以看到类似的特征。地震资料揭示玛扎塔格中深层存在不对称膝褶型褶皱,南翼缓、北翼陡,表明该膝褶带也是受由南向北方向的挤压应力所致,与地表变形特征的主挤压应力方向相似。因此,玛扎塔格构造带的形成过程与西昆仑造山带的区域构造演化背景密切相关,该构造带浅层的薄皮构造体系应为上新世—第四纪西昆仑山前冲断带的前缘部位,而深层基底卷入型的大型膝褶型褶皱变形则是中新世末塔西南山前逆冲体系向盆地腹地挤压变形的产物,二者的形成时期存在差异。玛扎塔格构造带与西昆仑山前逆冲褶皱带大致平行,表明了该构造带与塔西南山前构造带处于一致的构造应力场中。巴楚隆起的北缘构造带(阿恰-吐木休克膝褶带),仅表现为单斜型膝褶及其相关褶皱,但是其走向和南缘带的走向大致平行,活动时限也基本一致,二者都与塔西南山前构造带近似平行。

综上所述,巴楚隆起的形成和演化主要是受控于西昆仑造山带古生代—新生代构造演化过程的产物。巴楚隆起应当属于西昆仑造山带挤压变形的先锋部位,巴楚隆起前新生代的大型膝褶和膝褶型褶皱变形为西昆仑造山带基底构造变形的产物,而浅层次的薄皮构造为上新世—第四纪西昆仑冲断带的前锋构造,活动时间晚。

4.2 巴楚隆起形成对早期构造格局的影响

巴楚隆起是一个继承性古隆起,自海西中—晚期开始雏形发育,直至中新世末强烈隆升,第四纪最终定

型。海西中—晚期巴楚隆起西段雏形的形成首先打破了巴麦地区西部东南高西北低的构造格局。印支期—燕山期巴楚隆起在继承前期西北高东南低的基础上进一步抬升,隆起范围扩大。喜马拉雅晚期南、北两条边界大型膝褶带的形成彻底颠覆了早期西南高、北东低的构造格局,建立了现今南北低、中间高的格局。

自中新世晚期开始,在强大的区域挤压应力作用下,吐木休克、色力布亚和玛扎塔格等大型膝褶带强烈活动,并控制了现今巴楚隆起的边界,从而形成一个由大型膝褶带控制的背冲式隆起。多期次的构造活动逐步改造和改变着早期的构造格局。因此,巴楚隆起的崛起对巴楚地区早期构造格局的改造体现在巴楚隆起主体区的褶皱变形、南北缘大型膝褶带的形成以及麦盖提斜坡区的倾向反转等3个方面。

5 油气勘探意义

巴楚地区经历了多期构造演化过程,构造变形具有叠加特征,这些构造对油气聚集成藏具有重要控制作用。古隆起的差异演化、膝褶带与膝褶型背斜的形成成为构造圈闭和地层—岩性圈闭的发育提供了地质条件,同时对储层的发育以及油气运移和输导产生重要影响。

5.1 膝褶带相关圈闭

5.1.1 膝褶带内的扩容空间

岩层膝褶化的过程中,膝褶内和膝褶外岩层的弯曲与层间滑动是主要的变形方式,这种变形方式将导致膝褶带内或膝褶带外岩层形成丰富的张性破裂或微裂缝。在低孔隙度、低渗透率岩层中,陡倾膝褶带或共轭膝褶带的发育将大大增强储集体的渗透能力。然而,膝褶带是否扩容、扩容程度如何,取决于膝褶带内膝褶带边界线与膝褶带内、外岩层之间的夹角 β , α 的大小(图7)。从几何上膝褶带的形成过程中要求前后体积守恒:当 $\beta > 90^\circ$ 时,岩层长度缩短,厚度增大; $\beta < 90^\circ$ 时,岩层长度拉长,厚度减薄。然而,许多天膝褶带的带内常出现矿脉充填的各种张裂空间^[15-17],包括层间剥离脉、雁行张性脉、鞍状脉和三角形矿脉^[26],表明带内岩层缺乏足够的可塑性,岩层长度和厚度不能满足变形所要求的变化。如果岩层长度保持不变,带内的体积变化(扩容)与 α 和 β 之间关系为: $\Delta = \sin\beta / \sin\alpha - 1$ 。因此,膝褶带形成早期为: $\beta > \alpha$,膝褶带表现为扩容作用,带内面理或层理间厚度(L')大于带外面理或层理间厚度(L),膝褶带内岩层趋于增厚(图7b); $\beta = 90^\circ$ 时,膝褶带厚度达到最大;如果岩层的厚度不变,带内体积便增大,变形后带内空间体积的增大所导致的

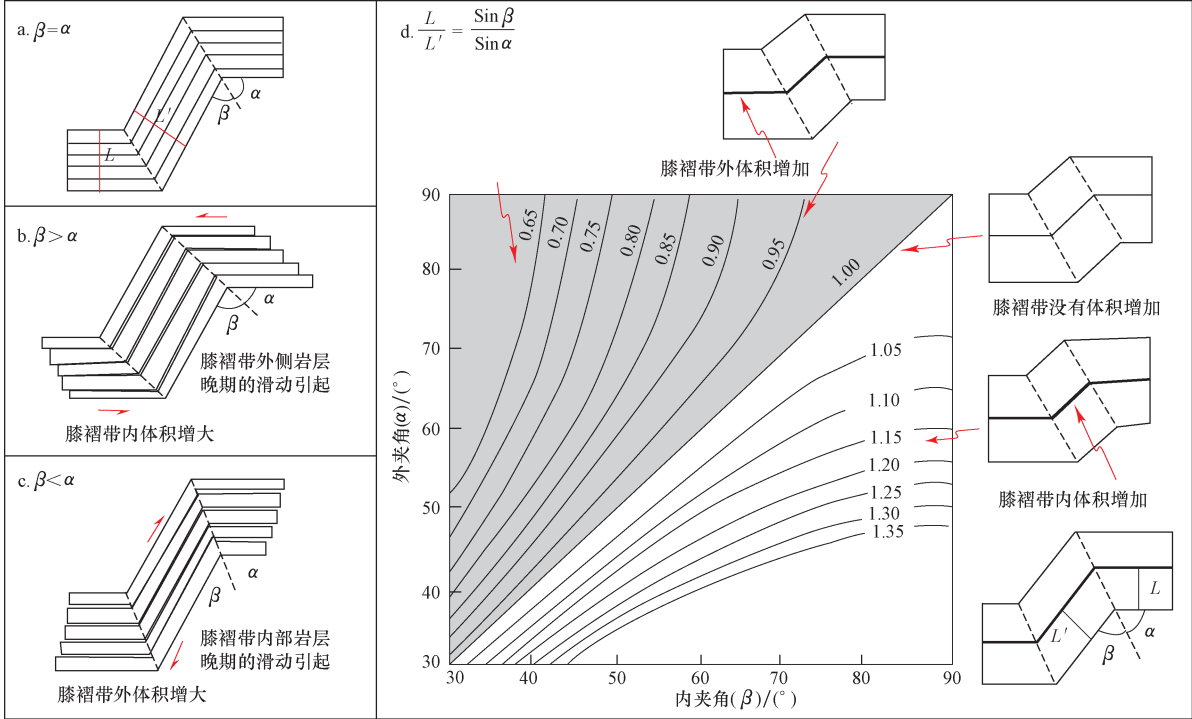


图7 膝褶带内地层扩容/封堵效应判别关系

Fig. 7 Chart for distinguishing stratum dilation or sealing in kink-band structure

β . 边界线与带内岩层的夹角, (°); α . 边界线与带外岩层的夹角, (°); L . 原始岩层厚度, m;

L' . 变形后的岩层厚度, m (虚线为膝褶带边界线, 灰色阴影部分为内夹角大于外夹角导致膝褶带体积增加的各种情形。)

真空或低压趋于将周边的高压流体(热液或油气流体)吸入,形成膝褶带内顺层剥离而充填矿脉或岩脉^[26]。当内夹角 β 不断变化至小到外夹角 α 时(图7c),带内流体压力增大,岩层长度趋于加长、厚度趋于减薄,形成与层理近垂直的张裂隙;流体趋于流入这些低压空间和挤入膝褶带旁侧形成鞍状矿脉或油气聚集。因此,对于膝褶带内夹角 β 大于外夹角 α 的情况,陡倾膝褶带或共轭膝褶带的发育大大增强低孔隙度、低渗透率岩层的储集渗透能力,是油气运聚的有利部位。其扩容程度以通过计算膝褶带内、外角的大小关系(表1),利用扩容/封堵效应判别图版来定量表征和判断其扩容程度(图7d)。据此得出巴楚隆起区喜马拉雅山期膝褶带的发育,其保存条件并不是完全不好,反而是扩容作用促使裂缝发育的有利部位(表1)。

5.1.2 膝褶带相关圈闭

单一膝褶及其伴生的背斜构造是巴楚地区最为常

见的构造组合样式。这些挤压背斜构造与单一膝褶带活动有关,由古生界和新生界组成,以上下层构造高点一致为特征,广泛分布于色力布亚构造带和吐木休克带。这类构造中,背斜高位和膝褶带均为有利勘探区域。

根据巴楚隆起膝褶带的结构特征,与膝褶带相关的圈闭存在三种模式:①膝褶带内层间圈闭。它是带内低孔渗岩石裂缝型储集体与其直接上覆的非渗透层封闭形成的圈闭;②膝褶型背斜圈闭。这种圈闭与通常的背斜圈闭相似,常规的储集层、上覆的常规盖层与背斜形态就构成了封闭空间,形成圈闭;③膝褶带地层圈闭模式。这种圈闭是指在膝褶化地层遭受剥蚀之后,形成隆起和斜坡,不整合界面之上地层再次超覆的情况下,带内低孔渗岩石裂缝型储集层被不整合面上的盖层封闭,形成与膝褶带相关的地层圈闭。

5.2 膝褶带可作为油气运移通道

通常,断层、不整合面与储集层被认为是构成地下

表1 塔里木盆地巴楚地区典型膝褶带内、外夹角及扩容/封堵效应判别

Table 1 Inner and outer included angles of typical kink-band structural zones and discrimination of stratum dilation or sealing of kink-band structure in Bachu area, Tarim Basin

膝褶带	色力布亚	康塔库木	玛扎塔格	卡拉沙依	乔肖尔盖	吐木休克
内表角(β)/(°)	88	64	82	80	100	56
外表角(α)/(°)	72	58	65	74	78	70
是否扩容	扩容	扩容	扩容	扩容	扩容	封堵

油气运移三维网络体系的三大要素。膝褶带本身内部既可以存在不整合面,同时又可发育层间小断层和裂缝,因此,如果裂缝上下左右互相勾通的话,其本身就是一个很好的油气运移通道。同时,膝褶带与带外其它的大型低角度逆冲断层、不整合面或储集层也可以相互连通,构成复杂运移网络体系的一部分,成为油气运移的垂向通道。输导能力取决于带内的塑性层的厚度比例与裂缝体系的相互勾通情况。塑性层厚度比例越小,越容易相互勾通^[27]。

5.3 大型膝褶带相关圈闭的勘探前景分析

如上所述,巴楚隆起发育多个膝褶带,其中以隆起南、北两缘大型构造最为典型。北缘为阿恰-吐木休克膝褶带,南缘为色力布亚-康塔库木-海米罗斯-玛扎塔格构造带。统计结果表明,巴麦地区油气显示主要集中在麦盖提斜坡及巴楚隆起的南缘构造带,巴什托地区油气主要显示集中在上古生界,泥盆系、石炭系和二叠系油气显示活跃。玛扎塔格及其玉北地区油气显示以奥陶系较活跃。而志留系显示主要集中在巴楚隆起东北部与阿瓦提结合部。可见,南缘膝褶带周边的钻井油气显示良好,是一个有利的油气汇聚区。

根据前面对膝褶带内部结构的分析,裂缝系统的发育对大型膝褶带内致密岩层孔渗性的改造意义最为突出。巴楚隆起南缘的大型膝褶带使奥陶系致密碳酸盐岩、志留系-泥盆系致密砂岩以及石炭系的灰岩可能被裂缝改造,形成好的裂缝型储层。平面上,南缘膝褶带位于隆起与斜坡的过渡部位,是喜马拉雅晚期麦

盖提斜坡油气源自南西向北东运移的有利指向区。油气从斜坡向隆起区运移,首先到达该部位。即使是油气来自本地的深层,膝褶带本身也可作为垂向输导体系,油气优先充注到这一部位。同时,南缘膝褶带在形成之前,本身位于加里东期-海西早期塔西南-和田古隆起的北坡部位,是早期巴楚地区寒武系源岩生成油气向古隆起运移的必经之地。这一构造格局一直保持到中生代。喜马拉雅晚期,尽管受昆仑山向盆地推挤作用的影响,浅层沿古近系含膏泥岩自塔西南拗陷向巴楚隆起方向逆冲,形成目前巴楚隆起南缘的高山地形。但是,阿尔塔什组膏盐几乎覆盖了整个南缘构造带,这对于寒武系-二叠系的中、深层背斜构造的油气起到很好的保护作用(图8)。此外,如果从抬升剥

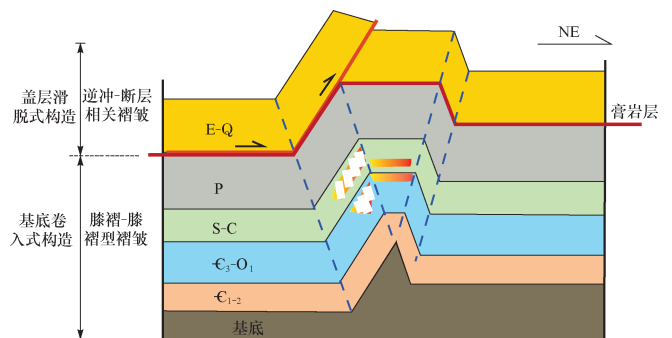


图8 塔里木盆地巴楚隆起南缘构造带叠加构造模式
Fig. 8 Superimposed structural mode in the southern belt of Bachu uplift, Tarim Basin

C₁₋₂. 中-下寒武统; C₃-O₁. 上寒武统-下奥陶统;
S-C. 志留系-石炭系; P. 二叠系; E-Q. 古近系-新近系

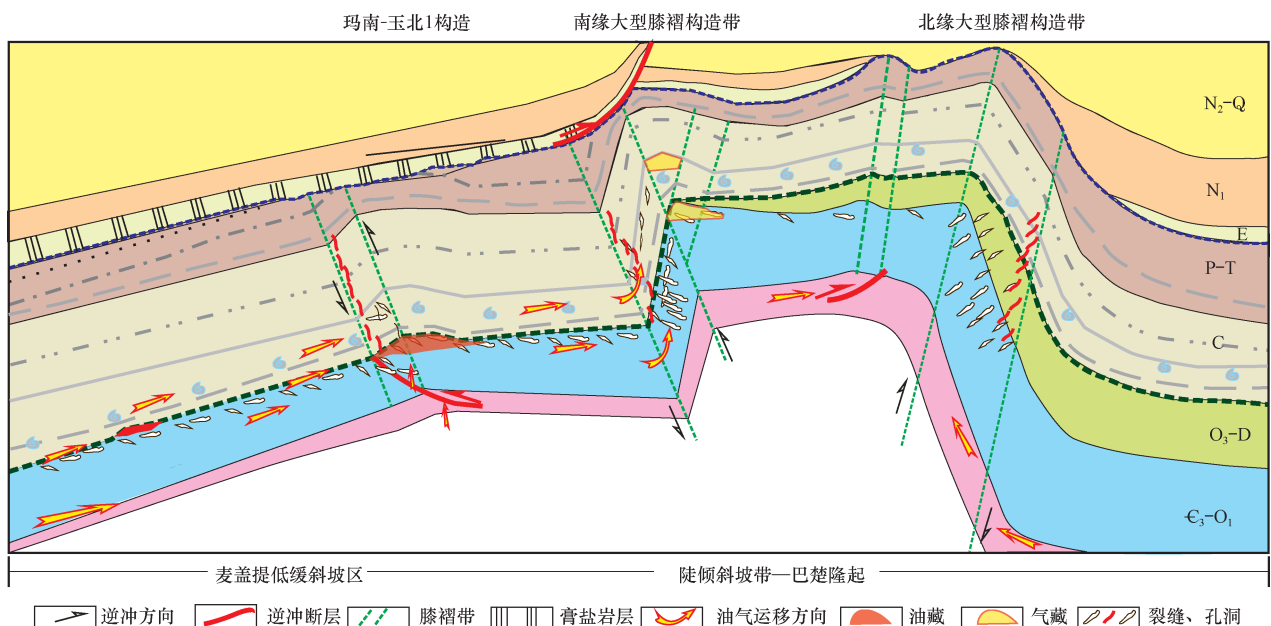


图9 塔里木盆地巴楚隆起膝折带油气成藏模式

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation patterns of the kink-band structures in Bachu uplift, Tarim Basin

C₁₊₂. 中-下寒武统; C₃-O₁. 上寒武统-下奥陶统; O₃-D. 上奥陶统-泥盆系; C. 石炭系; P-T. 二叠系-三叠系;
E. 古近系; N₁. 新近系下部; N₂-Q. 新近系上部-第四系

蚀角度来评价保存条件好坏,膝褶带处于背斜高部位的两翼,保存条件应更优于背斜高部位。所以,南缘膝褶带有利于早期运移、晚期聚集。

南缘膝褶带从色力布亚西端到玛扎塔格东端,其长度达200多千米。这样狭长的构造带虽然在平面上并不是一直连续延伸,但其长度规模和裂缝型储集体的体积是非常可观的。一旦发现油气,其资源潜力巨大。因此,巴楚隆起南缘的大型膝褶带具有良好的勘探前景,是探索新型油气藏——膝褶型油气藏的有利区(图9),值得进一步评价和风险勘探。

6 结论

1) 巴楚隆起主体不是受断裂控制,以往解释的主导样式“两断夹一隆”及其“高角度断层”实际上为大型共轭膝褶带和单个膝褶带。大型膝褶带控制巴楚隆起南、北边缘。

2) 具高角度特征的膝褶带及其褶皱构造是克拉通盆地内部在挤压背景下的一种重要变形样式,一系列喜马拉雅期大型膝褶带与低角度断裂带构成巴楚隆起复杂多样的构造样式,是长期挤压背景下不同变形阶段构造共存的结果。

3) 膝褶带有利于形成新型构造圈闭——膝褶带相关圈闭,巴楚隆起南缘的色力布亚-玛扎塔格构造带是探索膝褶型油气藏的有利地区。

参 考 文 献

- [1] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-425.
Jia Chengzao. The structural character and petroleum of the Tarim Basin, NW China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1-425.
- [2] 吕修祥, 周新源, 皮学军. 塔里木盆地巴楚凸起油气聚集及分布规律[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(6): 489-493.
Lv Xiuxiang, Zhou Xinyuan, Pi Xuejun, et al. Accumulation and distribution patterns of hydrocarbon in Bachu arch of Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(6): 489-493.
- [3] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 207-221.
He Dengfa, Zhou Xinyuan, Yang Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleouplifts in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 207-221.
- [4] 吕海涛, 张仲培, 邵志兵, 等. 塔里木盆地巴楚-麦盖提地区早古生代古隆起的演化及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 76-83.
Lv Haitao, Zhang Zhongpei, Shao Zhibing, et al. Structural evolution and exploration significance of the Early Paleozoic palaeouplifts in Bachu-Maigaiti area, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 76-83.
- [5] 杨明慧, 金之钧, 吕修祥, 等. 塔里木盆地基底卷入扭压构造与巴楚隆起的形成[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 158-164.
Yang Minghui, Jin Zhijun, Lv Xiuxiang, et al. Basement-involved transpressional structure and the formation of the Bachu Uplift, Tarim Basin, Northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 158-164.
- [6] 肖安成, 杨树锋, 李曰俊, 等. 塔里木盆地巴楚-柯坪地区新生代断裂系统[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 78-85.
Xiao Ancheng, Yang Shufeng, Li Yuejun, et al. A studying of Cenozoic fracture systems in Bachu-Kalpin area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 78-85.
- [7] 丁文龙, 林畅松, 漆立新, 等. 塔里木盆地巴楚隆起构造格架及形成演化[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 242-251.
Ding Wenlong, Lin Changsong, Qi Lixin, et al. Structural framework and evolution of Bachu uplift in Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 242-252.
- [8] 郑亚东, 莫午零, 张文涛, 等. 柴达木盆地油气勘探新思路[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(1): 13-18.
Zheng Yadong, Mo Wuling, Zhang Wentao, et al. A new idea for petroleum exploration in Qaidam Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(1): 13-18.
- [9] Camerillo R H, Benson E F. Geometric and seismic interpretation of the Perdido fold belt; northwestern deep-water Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(3): 363-386.
- [10] 丁道桂, 郭彤楼, 翟常博, 等. 鄂西-渝东地区膝褶带构造[J]. 石油实验地质, 2005, 279(3): 205-210.
Ding Daogui, Guo Tonglou, Zhai Changbo, et al. Kin kstructure in the west Hubei and East Chongqing[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 279(3): 205-210.
- [11] 申银民, 李越, 李猛, 等. 巨型膝褶带: 塔中油田奥陶系沉积的构造控制[J]. 地层学杂志, 2013, 37(3): 297-302.
Shen Yinmin, Li Yue, Li Meng, et al. A large kink-band; tectonic controlling factor for the ordovician sediments in the Tazhong Oilfield[J]. Journal of Stratigraphy, 2013, 37(3): 297-302.
- [12] Zheng Yadong, Wang Tao, Ma Minbo, et al. Maximum effective moment criterion and the Origin of low-angle normal faults[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(2): 271-285.
- [13] Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, Wang Xinshe. The maximum-effective moment criterion developing in practice[J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(3): 209-218.
- [14] Paterson M S, Weiss L E. Experimental deformation and folding in phyllite[J]. AAPG Bulletin, 1966, 77: 343-374.
- [15] 郑亚东, 王涛, 王新社. 新世纪构造地质学与力学的新理论——最大有效力矩准则[J]. 自然科学进展, 2005, 15(2): 142-148.
Zheng Yadong, Wang Tao, Wang Xinshe. The new theory in structural geology and geomechanics in new century: maximum effective moment criterion[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(2): 142-148.
郑亚东, 王涛, 王新社. 最大有效力矩准则及相关地质构造[J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 49-60.
- [16] Zheng Yadong, Wang Tao, Wang Xinshe. The maximum effective moment criterion (MEMC) and related geological structures[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 49-60.
- [17] 郑亚东, 张进江, 王涛. 实践中发展的最大有效力矩准则[J]. 地质力学学报, 2009, 15(3): 209-217.
Zheng Yadong, Zhang Jinjiang, Wang Tao. The Maximum-effective-moment criterion developing in practice[J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(3): 209-217.

- [9] Kang Z J, Wu Y S. Modeling multiphase flow in naturally fractured vuggy petroleum reservoirs [C]//The 2006 SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Texas, U. S. A; SPE 102356, 2006; 1-10.
- [10] Wu Y S, Di Y, Kang Z J, et al. A multiple-continuum model for simulating single-phase and multiphase flow in naturally fractured vuggy reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(1): 13-22.
- [11] 刘学利, 彭小龙, 杜志敏, 等. 油水两相流 Darcy-Stokes 模型 [J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(6): 89-92.
Liu Xueli, Peng Xiaolong, Du Zhimin, et al. Oil water two phase flow darcy-stokes mode [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(6): 89-92.
- [12] 杨坚, 程倩, 李江龙, 等. 塔里木盆地塔河 4 区缝洞型油藏井间连通程度 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 484-489.
Yang Jian, Cheng Qian, Li Jiang tong, et al. Interwell-connectivity analysis for fracture-vug reservoirs in the block-4 of Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 484-489.
- [13] 康志江, 李江龙, 张冬丽, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流特征 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 634-640.
Kang Zhijiang, Li Jianglong, Zhang Dongli, et al. Percolation characteristics of fractured-vuggy carbonate reservoir in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 634-640.
- [14] 康志江, 赵艳艳, 张冬丽, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏数值模拟基础理论与应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 2011, 30(5): 68-71.
Kang Zhijiang, Zhao Yanyan, Zhang Dongli, et al. Basic theory and application of numerical simulation in fractured-vuggy carbonate reservoir [J]. Petroleum Geology and exploitation in Daqing, 2011, 30(5): 68-71.
- [15] 李宗宇. 塔河奥陶系缝洞型碳酸盐岩油藏开发对策探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 856-862.
Li Zongyu. A discussion on development strategies for the Ordovician fractured-vuggy carbonate rock reservoirs in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 856-862.
- [16] 韩大匡, 陈钦雷, 闫存章. 油藏数值模拟基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 1-120.
Han Dakuang, Chen Qinlei, Yan Cunzhang. The basis for reservoir numerical simulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 1-120.
- [17] 康志江, 崔书岳. 塔河油田缝洞型油藏剩余油分布特征 [J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(6): 54-58.
Kang Zhijiang, Cui Shuyue. Distribution characteristics of the remained oil in tahe fractured-cave carbonate oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and exploitation in Daqing, 2012, 31(6): 54-58.
- [18] 胡向阳, 李阳, 权莲顺, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏三维地质建模方法——以塔河油田四区奥陶系油藏为例 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 383-387.
Hu Xiangyang, Li Yang, Quan Lianshun, et al. Three-dimensional geological modeling of fractured-vuggy carbonate reservoirs: a case from the ordovician reservoirs in Tahe-IV block, Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 383-387.

(编辑 张亚雄)

(上接第 924 页)

- [18] Dupont Nivet. Discordant paleomagnetic direction in Miocene rocks from the central Tarim Basin; evidence for local deformation and inclination shallowing [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 199(3-4): 473-482.
- [19] 张波, 张仲培, 郑亚东, 等. 膝褶皱带构造及其地球物理正演 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 105-115.
Zhang Bo, Zhang Zhongpei, Zheng Yadong, et al. Kink-band structure and its geophysical forward modeling [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(1): 105-115.
- [20] Argon A S. Treatise on materials science and technology [M]. New York: Academic Press, 1972: 79-114.
- [21] Budiansky B. Micromechanics [J]. Compute Structures, 1983, 16(1): 3-12.
- [22] Ardell A J, Christie J M, Tullis J. Dislocation substructures in deformed quartz rocks [J]. Crystal Lattice Defects, 1973, 4: 275-285.
- [23] Anderson T B. Kink-bands and related geological structures [J]. Nature, 1966, 210: 1249-1251.
- [24] Nishikawa O, Takeshita T. Dynamic analysis and two types of kink bands in quartz veins deformed under subgreenschist conditions [J]. Tectonophysics, 1999, 301(1-2): 21-34.
- [25] Kirschner D L, Teixell A. Three-dimensional geometry of kink bands in slates and its relationship with finite strain [J]. Tectonophysics, 1996, 262(1-4): 195-211.
- [26] Ramsay J G, Huber M I. The techniques of modern structural geology (Volume 1: Strain Analysis) [M]. New York: Academic Press, 1983.
- [27] 张波, 李生福, 张进江, 等. 膝褶、膝褶带、共轭膝褶带: 一种可能的新型油气构造样式 [J]. 天然气工业, 2010, 30(2): 32-40.
Zhang Bo, Li Shengfu, Zhang Jinjiang, et al. Kink, kink-band and conjugate kink-band: a probably potential new type of structural trap [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(2): 32-40.

(编辑 张玉银)