

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.10.001

祁连山东北缘武威盆地隐伏构造

施炜^{1,2,3}, 张波⁴, 杨勇^{1,2}, 赵子贤¹

SHI Wei^{1,2,3}, ZHANG Bo⁴, YANG Yong^{1,2}, ZHAO Zixian¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081;

3. 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 北京 100094;

4. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730020

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;

3. SinoProbe Laboratory, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100094, China;

4. The Second Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730020, Gansu, China

摘要:祁连山东北缘武威盆地是阿拉善地块南缘主要的含油气盆地,也是石炭系页岩气勘探的热点区域。长期以来,由于武威盆地为第四系覆盖,盆地的结构和构造存在很大争议。通过地震剖面探测和钻探地层分析,对武威盆地西部的结构和构造进行了厘定。地震剖面和钻探揭示,研究区前寒武纪基底之上主要发育下部寒武系、中部新近系和上部第四系3套构造层。下构造层构造复杂,发育下寒武统(大黄山组)断陷盆地、下寒武统冲断-褶皱带和下白垩统断陷盆地。下构造层的构造分析,结合区域地层和构造特征,提出武威盆地经历了早寒武世NE—SW向伸展变形、侏罗纪末—白垩纪初NE—SW向地壳缩短变形及早白垩世NE—SW向伸展变形3期构造演化过程。武威盆地东、西部的地层序列和构造差异表明,武威盆地以武威-蔡旗构造隆起带为界,可划分为东、西2个构造单元。

关键词:祁连山东北缘;武威盆地;地震剖面;下寒武统;新生界;隐伏构造

中图分类号:P54;P631.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)10-1711-09

Shi W, Zhang B, Yang Y, Zhao Z X. Buried structures in the Wuwei Basin, northeast margin of the Qilianshan structural belt. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(10): 1711-1719

Abstract: The Wuwei Basin in the northeast margin of Qilianshan structural belt is one of the oil/gas-bearing basins for Carboniferous shale gas exploration in the west China. However, much disagreement is going on the structures and tectonics in the Wuwei Basin due to the Quaternary covering of the basin. Here we conducted the 2D seismic surveying and drill exploration, and defined three sets of structural layers from the seismic profile, e.g., lower structural layer composed of Lower Cambrian strata (Dahuangshan Formation) and Early Cretaceous strata, middle structural layer consisting of Neogene strata, and upper structural layer formed of Quaternary strata. In the lower structural layer, some faulted basins developed, which were filled by the Lower Cambrian or Late Cretaceous; and the Lower Cambrian was also thrust and folded. Together with regional structure analysis, we suggest three stages of deformation process, including NE-SW extension in the Early Cambrian, NE-SW shortening in the Late Jurassic-Early Cretaceous, and NE-SW extension in the Early Cretaceous. In addition, it also shows the differences on the regional structure and sedimentary sequences in the west and east

收稿日期:2022-03-10;修订日期:2022-04-15

资助项目:中国地质调查局项目《武威-固原地貌边界带基础地质调查》(编号:DD20190018)和国家重点研发计划项目《燕山期陆内变形与传播》(编号:2017YFC0601402)

作者简介:施炜(1971-),男,博士,研究员,构造地质学专业。E-mail:shiweimg@163.com

parts of the Wuwei Basin, which indicates the Wuwei Basin, limited by the Wuwei-Caiqi structural belt, can be divided into west and east sub-basins.

Key words: northeast margin of the Qilianshan structural belt; Wuwei Basin; seismic profile; Lower Cambrian; Cenozoic; buried structures

武威盆地在区域上为北边的阿拉善地块、南边的祁连山构造带和东边的鄂尔多斯地块围限,向西通过大黄山隆起与民乐盆地相望,北接巴彦浩特盆地和潮水盆地,向东直至鄂尔多斯盆地西缘褶皱带(图1-A)。盆地近EW向展布,东西长约300 km,南北宽25~100 km,面积约 $2.75 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1]。武威盆地是阿拉善地区石炭系发育和保存较好的盆地之一,具有良好的油气地质条件^[2-6]。现有研究认

为,武威盆地构造格架表现为“三拗两隆”,即北部拗陷、哈拉敖包隆起、中部拗陷、翟家隆起、南部拗陷。北部拗陷由儿马湖凹陷、头道湖凹陷和乱石井凹陷组成,中部拗陷包括陈家圈凹陷和冰草湖凹陷,南部拗陷自西向东分别为大靖凹陷、营盘凹陷、土墩凹陷和中卫凹陷^[7-8](图1-B)。武威盆地总体上被第四系覆盖,制约了对武威盆地结构与构造的认识。目前,在武威盆地中东部开展了大量的地球

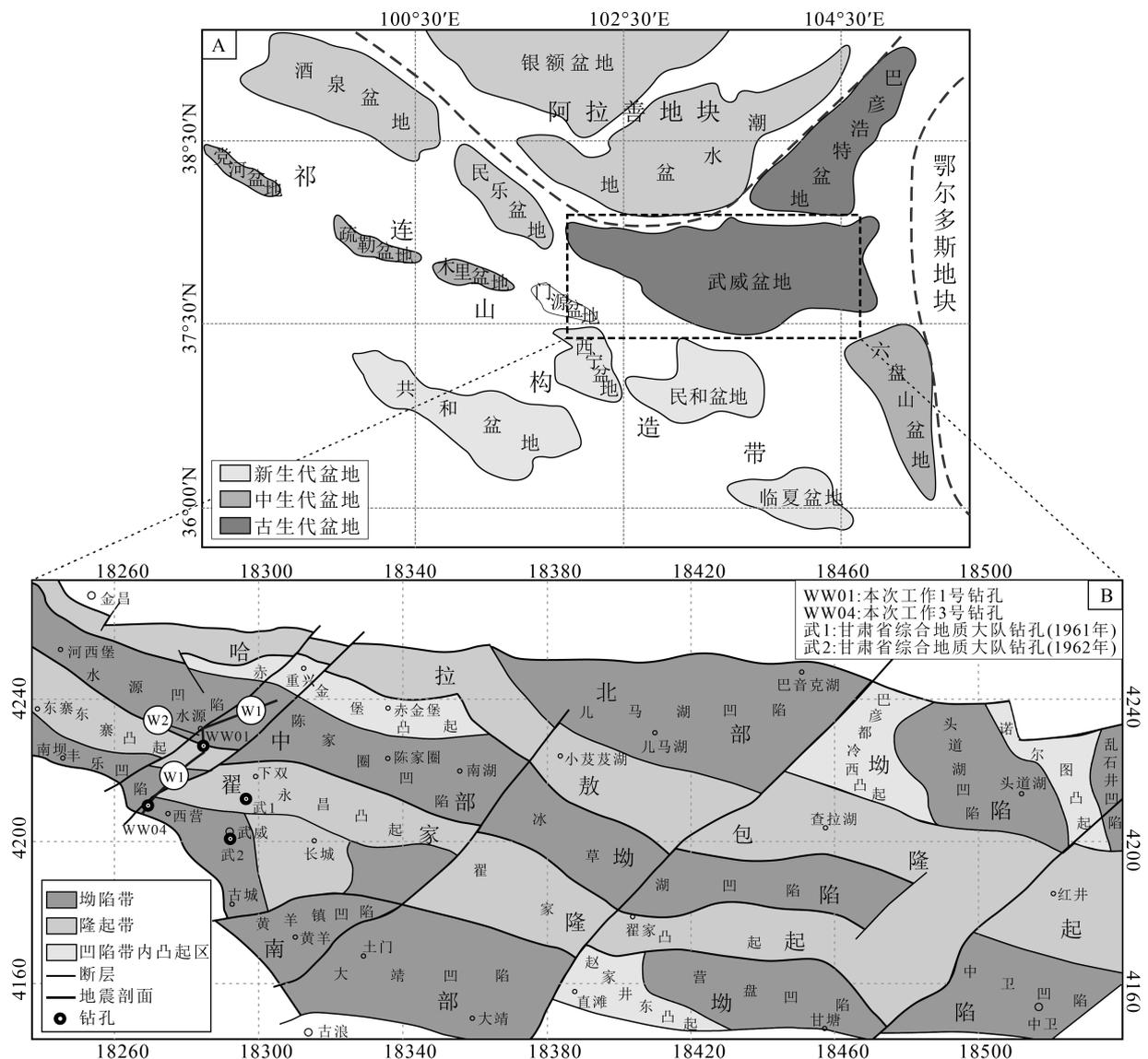


图1 祁连山构造带北部盆地分布(A,据参考文献[1]修改)与武威盆地构造格架(B,据参考文献[7])

Fig. 1 Paleozoic-Cenozoic basins in the north of the Qilianshan structural belt (A) and structural sketch of the Wuwei Basin (B)

物理工作,划分了武威盆地构造单元,提出了盆地的构造格架^[7]。但由于盆地西部缺乏精细的地球物理调查工作,导致对盆地的结构与构造认识不清。本次基于武威盆地西部二维地震剖面调查,对盆地的结构与构造提出了新的认识。

1 二维地震剖面数据采集与处理

1.1 数据采集试验

本次根据研究区浅层地震地质条件,选择合适的激发因素与接收因素,最终确定适合的最佳施工参数和工作方法,以便取得高信噪比的原始记录,从而获取高质量的地震剖面。

施工前对主要仪器性能、激发、接收因素等进行试验。试验点布设在研究区的北部地段(WW01 钻孔附近)。根据初步分析,该区域沉积物粒度较研究区南部小,人文干扰小。采用单线排列接收,300 道检波器接收信号,激发点位于中间位置。本次地震工作采用 1200 道节点地震仪采集数据,项目开始前对所有参加野外数据采集的地震仪进行一致性试验,各记录道起跳一致,振幅、相位差符合规范要求。

在环境噪音与干扰波分析方面,试验点地震记录中发育面波、折射波、多次波等干扰信号,并存在机械、谐波干扰等,而且施工测线附近高压电线较多,影响资料品质,为低信噪比地区(图 2)。

在可控震源扫描参数试验方面,本次试验采用中间放炮、两边接收,道距 20 m,300 道检波器接收,分别进行可控震源振动次数、扫描长度、扫描频率、震源出力的试验。每个试验点共试验 25 炮,合计 50 炮,优选激发参数(表 1)。

表 1 可控震源地震试验方案

Table 1 Experimental plan of vibrator seismic				
序号	项目	因素	备注	工作量统计
1	振动次数	1 次	固定因素	2 * 3 炮=6 炮
		2 次	1 台 20 s;6~84 Hz	
		3 次	70%	
		14 s		
2	扫描长度	16 s		2 * 8 炮=16 炮
		18 s		
		20 s	固定因素	
		22 s	1 台 1 次;6~84 Hz	
		24 s	70%	
		26 s		
		28 s		
		55%		
3	震源出力	60%	固定因素	2 * 5 炮=10 炮
		65%	1 台 1 次;6~84 Hz	
		70%	20 s	
		75%		
		6~76 Hz		
4	扫描频率	6~84 Hz		2 * 9 炮=18 炮
		6~96 Hz		
		8~76 Hz	固定因素	
		8~84 Hz	1 台 1 次 20 s	
		8~96 Hz	70%	
		10~76 Hz		
		10~84 Hz		
		10~96 Hz		

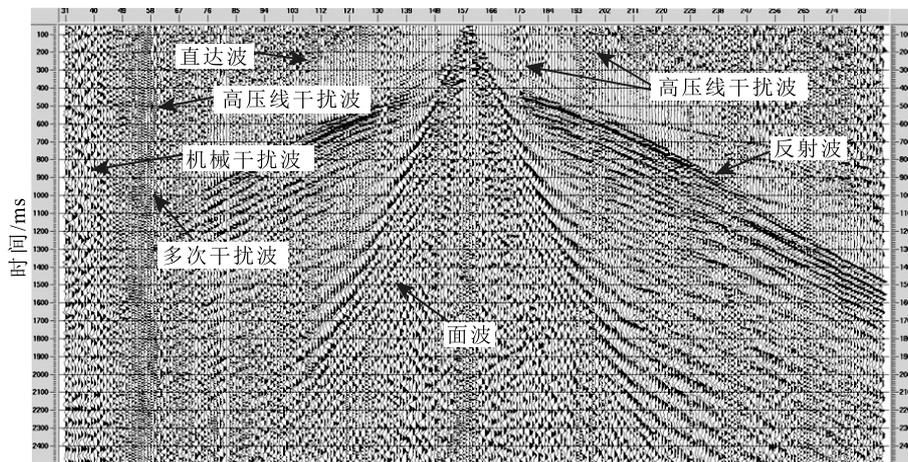


图 2 试验单炮记录

Fig. 2 Single shot record of seismic reflection

最终,本次地震试验获得了研究区数据采集最佳参数,数据采集采用宽线测量方式,按照三线一炮采集。施工时道距为 20 m,采用 900 道 N-Seis 节点地震仪固定排列接收,每次施工 900 道排列内所有炮点后,将排列整体向前移动,并重复部分接收排列(表 2)。

1.2 数据采集

二维地震数据采集采用宽线测量方式,按照三线一炮采集。施工时道距 20 m,采用 900 道 N-Seis 节点地震仪固定排列接收,每次施工 900 道排列内所有炮点后,将排列整体向前移动,并重复 100 道接收排列。震源采用可控震源,扫描长度为 24 s,扫描频率为 6~84 Hz。数据采集分段完成二维测线 3 条,共计 4459 炮,满次覆盖长度为 65.8 km。

1.3 数据处理

本次数据处理按照“高信噪比、高分辨率、高保真度”的原则开展工作,最大限度地改善各主要目的层的成像精度和成像质量,最终使剖面具有较高的信噪比,主要反射层次齐全,断层形态清晰,断点清楚可靠,波组反射特征明显。

本次地震资料处理的流程如图 3 所示。在原始地震资料读入系统后,进行置道头等预处理;然后开展叠前噪音压制,有效压制面波、线性相干噪声和工业电干扰等。在叠前噪音压制完成后,进行球面扩散振幅补偿及地表一致性振幅补偿,随后开展静校正处理,消除地表高程及低降速带厚度变化等因素对反射波旅行时的影响。

再经过地表一致性反褶积处理,提高地震资料分辨率,合理拓展有效频带。在抽取 CMP 道集(Common Middle Point 道集)后,首先进行第一轮速度分析获得速度谱,利用该速度场进行动校正并

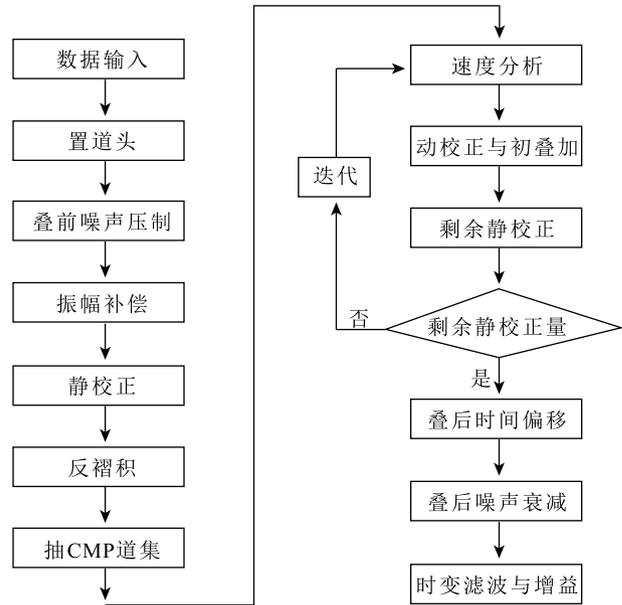


图 3 二维地震数据处理流程

Fig. 3 Processing of 2D seismic reflection data

做初次叠加,进行剩余静校正处理(图 4),如果剩余静校正未达到合理范围,则进行第二轮速度分析,以此迭代,直至剩余静校正量足够小后停止迭代。最后进行叠后时间偏移、叠后噪音压制,并进行时变滤波、增益等修饰性处理,获得最终的成果剖面(图 5-A)。

2 地震剖面特征

本次武威盆地地震测线由 W1 测线、W2 测线和 W3 测线 3 段构成(图 5-A)。各测线地震剖面特征如下:①W1 测线为剖面南段,测线 NE 走向,从祁连山前缘至新泉村。剖面上的反射波同相轴的数量变化大,同相轴的形态也有变化(图 5-A)。在祁连山前缘附近,浅部出现多层宽缓的反射波同相轴,1.0~1.1 s 之间与 1.2~1.3 s 之间均出现同相轴,该处强反射波同相轴随时间增加其角度逐渐变缓。路口庄—连霍高速段的同相轴主要表现为浅部 0.4 s 以浅的宽缓同相轴,以下为较杂乱的无序反射波同相轴。连霍高速—新泉村段的强反射波同相轴表现为典型的双层结构,1.0 s 以浅的同相轴连续,且向北低缓抬升。1.0 s 以下的同相轴则表现为连续波状结构,且同相轴不连续。②W2 测线为剖面中段,近 SN 走向,从新泉村至金武高速。该测线

表 2 二维地震测线观测系统参数

Table 2 Parameters of 2D seismic observation

项目	参数
观测系统	3L1S
排列方式	单排列 300 道固定接收
覆盖次数	200 次
接收道数	300 道×3=900 道
道距	20 m
炮点距	20 m
接收线距	20 m

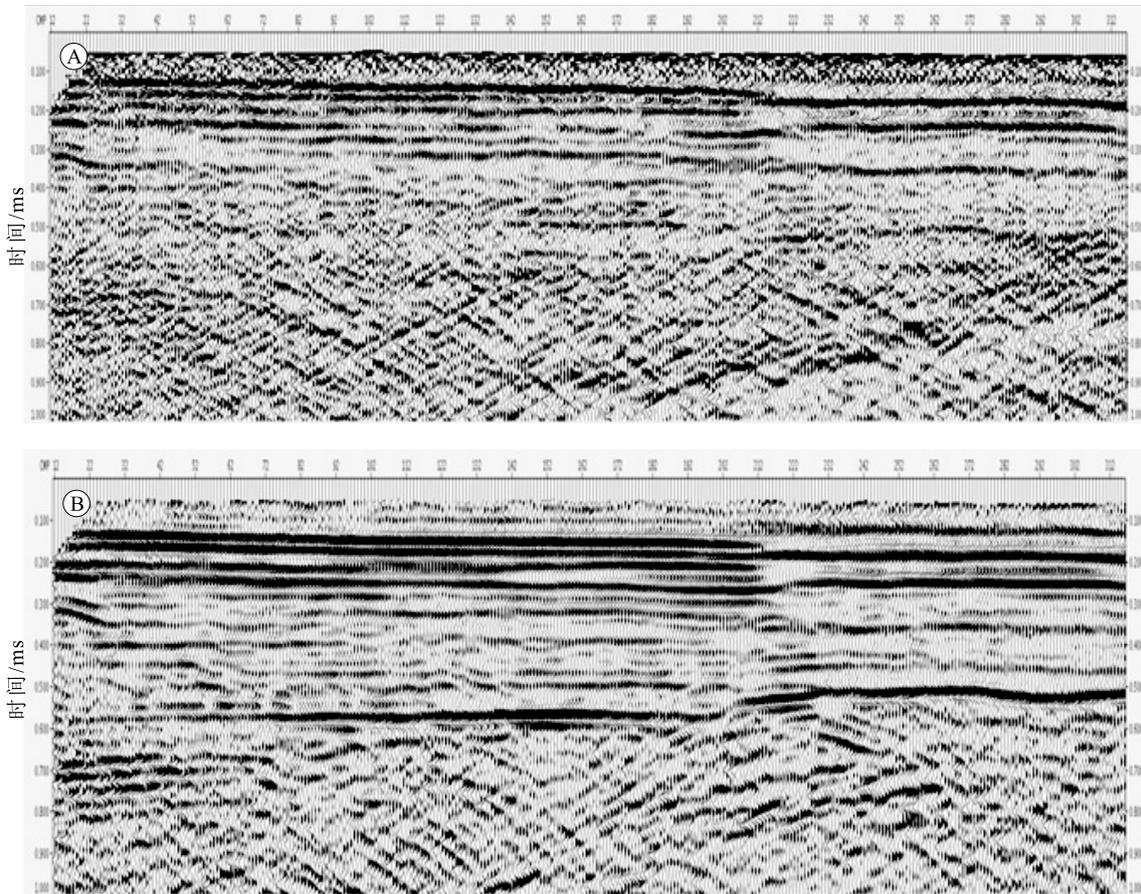


图 4 剩余静校正前(A)和剩余静校正后(B)的叠加剖面(局部)

Fig. 4 Stacking profile prior to residual static correction(A) and stacking profile posterior to residual static correction(B)

段的反射波同相轴主要表现为近水平的双层结构,即 0.15~0.3 s 之间与 0.5~0.65 s 之间均存在多个强反射波同相轴组合(图 5-A)。③W3 测线为剖面北段,北东走向,从金武高速到龙首山。该测线段波阻抗界面明显不同于 W1 测线。主体以 0.2~0.3 s 之间的强反射波同相轴、0.5~0.6 s 之间的强反射波同相轴的双层结构,且整体呈现向 NE 方向抬升为特征。只在马家庄附近的 0.9~1.1 s 存在不连续的、较模糊的强反射波同相轴(图 5-A)。

总体上,二维地震时间剖面显示 3 组强反射波组(图 5-A),具体特征如下:①在 0.42~0.45 s 之间,反射波组存在 2 个较强的反射波同相轴,同相轴振幅相对较强,波阻抗差异明显,说明该反射层上下层位的岩性差异大,岩性有明显变化,可能为地层界面。②在 0.92~1 s 之间,反射波组出现 2~3 个强反射波同相轴,同相轴振幅强,波阻抗差异明显,

表明该反射层上下层位的岩性差异显著。根据剖面特征分析,确定该反射界面为武威盆地区域性的波阻抗界面,上下层位的同相轴产状明显不同,表明该界面是武威盆地区域性不整合界面。③在 1.3~1.5 s 之间,反射波组显示 3 个强反射波同相轴,同相轴振幅强,波阻抗差异明显。但是以新泉村为分界,剖面南段该反射波组明显,剖面北段不明显,表明武威测线南段和北段的地层发育不同。

3 地震剖面构造解释

依据上述地震剖面发射波组特征,结合测线上的钻孔地层分析(图 6),可识别出下构造层、中构造层和上构造层 3 套构造层。本次在测线 W1 与 W2 上分别布置了钻孔。钻孔揭示,3 套构造层的地层系统分别为第四系松散砂砾石层(2.58~0 Ma),新近系砂岩、泥岩和砾岩(11.2~2.58 Ma),下寒武统变质砂

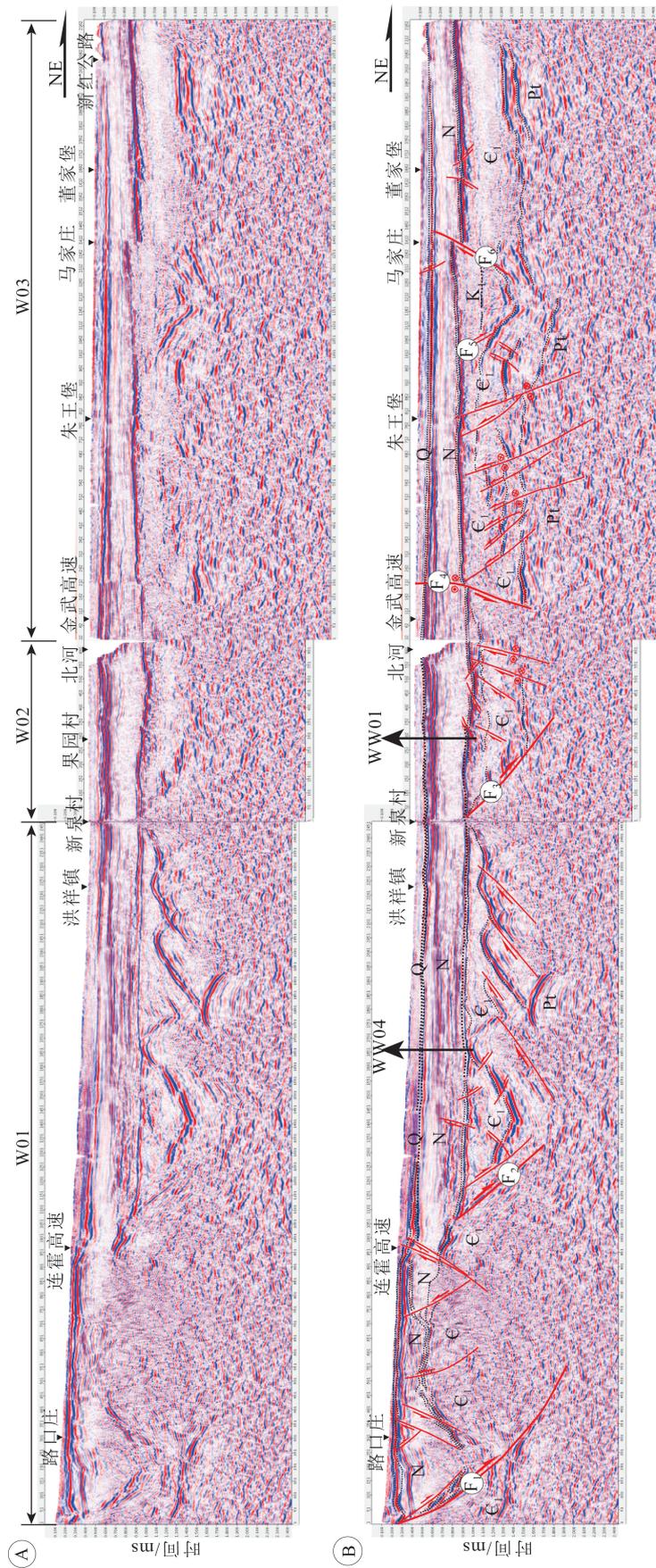


图5 二维地震剖面(A)和构造解释(B)
Fig. 5 2D seismic profile (A) and structural interpretation (B)

岩,含志留纪花岗岩,不发育三叠系、侏罗系、白垩系,新生界直接覆盖于上古生界或基底之上^[9-10](图6)。此外,从盆地东侧龙首山出露的地层看,推测下构造层下伏地层为龙首山群片麻岩基底^①。

在下构造层,可见 F_2 、 F_3 、 F_6 断层的正断活动控制了寒武统大黄山组沉积,分别形成3个断陷盆地。对下构造层构造样式的分析,表明该构造层从剖面南西向北东,出现由 F_2 、 F_3 、 F_6 断层分隔的复背斜构造、叠瓦构造、走滑构造和宽缓褶皱构造4个不同样式的构造,表明这期构造缩短变形以NE—SW向为主,从祁连山向盆地内部逐渐减弱,构造变形动力来源于盆地南侧。这期褶皱构造除广泛为近水平新近系覆盖外,在盆地中北部也被下白垩统角度不整合覆盖^①(图5)。武威盆地儿马湖凹陷地震勘探显示,下石炭统褶皱变形与侏罗系褶皱变形一致,且这套褶皱系统又被下白垩统角度不整合覆盖^[12]。据此,虽然盆地西部缺失石炭系、二叠系和侏罗系,但发育下白垩统与下伏下寒武系角度不整合构造,可以推断下寒武统的褶皱变形时间为晚侏罗世—早白垩世。

在盆地中部朱王堡北,除可见下寒武统断陷盆地外,其上叠加了 F_5 断层控制的断陷盆地。盆地西缘龙首山发育NW走向的早白垩世断陷盆地,盆地向东延伸隐伏在武威盆地第四系之下^①,对应本次地震剖面识别的断陷盆地。因此, F_5 断层控制的断陷盆地应与龙首山发育的早白垩世断陷盆地一致(图5)。早白垩世武威盆地受NE—SW向伸展变形作用控制。区域上,武威盆地隐伏的白垩系断陷盆地可能为早白垩世祁连山隆升的沉积响应^[13]。

总之,下构造层的构造分析表明,武威盆地在古生代以来至少经历3期构造变形,即早寒武世NE—SW向伸展变形、侏罗纪末—白垩纪初NE—SW地壳缩短变形及早白垩世NE—SW伸展变形(图5)。

中构造层主要表现为新近系断陷盆地,盆地南缘为 F_1 断层控制,盆地地层总体上向北延伸且逐渐抬升,显示盆地为南断北超沉积特征。盆地中部钻孔剖面与南缘钻孔剖面对比研究表明,其新近系沉积时代为11.2~2.58 Ma^[14],说明武威盆地在晚新近纪(11.2~2.58 Ma)经历伸展断陷过程。该构造层也发育逆断层,如 F_5 断层,断层切割新近系,又被第四系覆盖,表明武威盆地在新近纪末期—第四纪初

受NE—SW向构造挤压作用发生变形^[9]。上构造层由第四系组成,盆地南缘多发育逆断层,盆地内部发育少量走滑断层和逆断层,表明武威盆地第四纪变形主要集中在盆地南缘^[15-16]。

此外,最近的航磁资料分析显示,沿武威—蔡旗方向,总体上为一隆起带,且发育断裂带,这一构造带明显将武威盆地分割为东、西两部分。盆地西部完全不同于东部^[11],其盆地充填的地层序列可能不一致,西部前寒武纪基底之上发育下寒武统大黄山组,局部为下白垩统河口群,广泛发育新近系和第四系^[10]。而东部地层发育较完整,有寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系及新生界^[12]。因此,依据下构造层的构造分析和地层沉积序列的差异,武威盆地以武威—蔡旗为界可划分为东、西两部分。

4 结 论

(1)武威盆地西部前寒武纪基底之上发育3套构造层。下构造层发育下寒武统(大黄山组)断陷盆地、下寒武统冲断—褶皱带和下白垩统断陷盆地。

(2)根据下构造层的构造分析,结合区域地层和构造特征,提出武威盆地古生代以来的3期构造演化过程:早寒武世NE—SW向伸展变形、侏罗纪末—白垩纪初NE—SW地壳缩短变,以及早白垩世NE—SW伸展变形。

(3)鉴于盆地东、西部的地层序列和构造差异,武威盆地可以武威—蔡旗构造隆起带为界,划分为东、西2个构造单元。

致谢:二维地震数据采集由甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院完成,审稿专家提出了建设性意见,在此一并感谢。

参考文献

- [1] 玉门油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十三)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
- [2] 李儒峰, 柳广弟, 马国富, 等. 武威盆地石炭系层序地层学研究[J]. 现代地质, 2010, 24(6): 1048-1056.
- [3] 魏建设, 卢进才, 魏仙祥, 等. 河西走廊地区石炭系烃源岩的特征[J]. 地质通报, 2010, 29(2): 367-373.
- [4] 阎存凤, 袁剑英. 武威盆地石炭系沉积环境及含油气远景[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2): 267-274.
- [5] 魏仙祥, 卢进才, 魏建设, 等. 河西走廊地区石炭系—二叠系油气地质条件与含油气前景[J]. 地质通报, 2011, 30(6): 865-878.
- [6] 杜治利, 田亚, 陈夷. 甘肃武威盆地儿马湖凹陷探获油气[J]. 中国地

- 质,2017,4(1): 190-191.
- [7] 陈夷,杜治利,杜小弟,等.利用 CEMP 测线结合重磁震对武威盆地进行构造单元划分[J].中国矿业,2018,27(1): 112-118.
- [8] 刘洪军,杜治利,陈夷,等.武威盆地武地 1 井石炭系烃源岩地球化学特征及地质意义[J].天然气地球科学,2021,32(7): 1061-1072.
- [9] Zhao Z X, Shi W, Yang Y, et al. The Late Cenozoic crustal shortening in the north-east margin of the Qilian Shan: Evidence from the Fenge Basin, Gansu Province[J]. Geological Journal, 2020, 55: 7193-7205.
- [10] 施伟,赵子贤,杨勇,等.祁连山东北缘武威盆地新近系甘肃群地层划分[J].地质通报,2022,41(2/3): 1-13.
- [11] 孙栋华,江民忠,常树帅,等.河西走廊中东段基底岩相构造分析和大地构造单元划分[J].地球物理学进展,2017,32(1): 254-265.
- [12] 胡峰,龙思萍,王雪梅,等.武威盆地儿马湖凹陷右炭系页岩气资源潜力及沉积目分析[J].复杂油气藏,2019,12(4): 19-23.
- [13] 郭荣涛,赵习,刘红光,等.兰州盆地下白垩统碎屑岩层序地层序列: 祁连山早白垩世隆升的沉积学响应[J].吉林大学学报,2016,46(2): 321-335.
- [14] Zhao Z, Shi W, Yang Y, et al. Late Cenozoic magnetostratigraphy and paleoenvironmental change in the northeastern Tibetan Plateau: Evidence from a drill core in the Wuwei Basin, NW China[J/OL]. Journal of Asian Earth Sciences. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2021.105023>.
- [15] Gradstein F M, Ogg J G, Ogg G M. The Geologic Time Scale [J]. Newsletters on Stratigraphy, 2012, 45(2): 171-188.
- [16] 杨树锋,陈汉林,程晓敢,等.祁连山北缘冲断带的特征与空间变化规律[J].地学前缘,2007,14(5): 211-221.
- [17] 艾晟,张波,樊春,等.武威盆地南缘断裂晚第四纪活动地表形迹与活动速率[J].地震地质,2017,39(2): 408-422.
- ①甘肃省地质局第一区域地质测量队.1:20万河西堡幅地质图及区域地质测量报告.1968.