

准噶尔盆地构造演化阶段及其特征

何登发,张磊,吴松涛,李涤,甄宇

[中国地质大学(北京)能源学院,北京100083]

摘要:盆地构造演化阶段是讨论盆地形成与演化过程的基础,也是确定油气成藏时-空格架的重要依据,对于建立大陆的构造运动年表也具有重要意义。基于准噶尔盆地内部的深井与高精度反射地震资料,在盆地构造沉降与构造-地层层序分析的基础上,结合周缘构造事件,厘定了盆地的构造演化阶段,剖析了不同阶段的演化特征。研究认为,准噶尔盆地经历了石炭纪断陷-拗陷、早二叠世断陷、中二叠世-三叠纪前陆盆地、侏罗纪伸展断陷-压扭盆地、白垩纪-古近纪陆内拗陷与新近纪-第四纪陆内前陆盆地等6个演化阶段,可归并为石炭纪、早二叠世-三叠纪、侏罗纪和白垩纪-第四纪4个不等时的伸展-聚敛旋回。随时间演化伸展活动趋弱、挤压活动(南北向上)增强,盆地整体表现为“四周冲断挤压、范围缩小”的特点,东西向上缩短率为35.8%,南北向上缩短率为12.2%,东西向上的缩短为南北向上缩短的3倍。西缘挤压主要在中二叠世-早三叠世,而东缘挤压除此之外,晚三叠世、中侏罗世早期、晚侏罗世-早白垩世仍较强烈,南缘挤压在中-晚二叠世、中-晚侏罗世、上新世-第四纪强烈发生,北缘则在晚白垩世冲断活动强烈。上述伸展、挤压过程在时间和空间上的强烈差异性形成了准噶尔盆地复杂的叠加、复合地质结构,不同构造单元差异演化明显,油气聚集独具特色。

关键词:地质结构;构造沉降;构造-地层层序;构造演化;叠合盆地;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin

He Dengfa, Zhang Lei, Wu Songtao, Li Di, Zhen Yu

[School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The analysis of tectonic evolutionary stages serves as the basis for addressing the basin formation and evolution, also as the important foundation for delineation of the spatial-temporal framework for oil and gas accumulation, and as a key reference for establishing the tectonic movement chronology for continents. Based on the information from deep boreholes and the high resolution reflection seismic data within the Junggar Basin, we delineated the tectonic evolution stages of the basin and explored the characteristics of every stage, through analyzing the tectonic subsidence and the tectono-stratigraphic sequence, and the tectonic events in the periphery of the basin. The results show that the basin has undergone six evolutionary stages, including the Carboniferous fault depression-depression, the Permian fault depression, the Middle Permian and Triassic foreland basin, the Jurassic extensional fault depression-compression-shear basin, the Cretaceous-Paleogene intra-continental depression, and the Neogene-Quaternary intra-continental foreland basin, which can be grouped into four non-isochronous extension-compression cycles, namely the Carboniferous, Early Permian-Triassic, Jurassic, and Cretaceous-Quaternary cycles. The extension tends to be weaker, but the compression gets stronger north-southwardly, with time passing by. On the whole, the basin exhibits the character of “thrusting on its periphery and shrinking in scope”, with the west-eastward shortening rate being 35.8%, almost three times of the 12.2% on the north-south direction. The compression from the west took place mainly during the Middle Permian-Early Triassic, while besides that, the compression from the east was still strong in the Late Triassic, early Middle Jurassic, and Late Jurassic-Early Cretaceous. The compression from the south took place strongly in the Middle and Late Permian, the Middle and Late Jurassic, and the Pliocene-Quaternary; while the extensive thrusting on the northern margin occurred in the Late Cretaceous. The pronounced spatial-temporal differences of the above extension and compression have given rise to the complex superimposed

收稿日期:2018-05-15;修订日期:2018-07-20。

第一作者简介:何登发(1967—),男,教授、博士生导师,盆地构造与油气地质。E-mail:hedengfa282@263.net。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41430316,40739906);国家自然科学基金面上项目(41272237)。

composite basin architecture, thus different tectonic units show strong differential evolution and unique features of oil and gas accumulation.

Key words: geological structure, tectonic subsidence, tectono-stratigraphic sequence, tectonic evolution, superimposed basin, Junggar Basin

盆地阶段(basin phase)是盆地发展历史中某一具主导沉降机制的时期,不同盆地阶段之间主导的构造沉降机制不同。它们之间可能为不整合面或相应的整一界面所分隔。由于不整合面常表现为沉积间断或剥蚀间断,因此沉积盆地的演化表现为沉降过程不断被这种间断所打破的阶段式发展历史。在时间序列上,较长的沉降过程间夹幕式的无沉积作用(hiatus)、隆升剥蚀或褶皱等事件;在地质结构上,沉积盆地表现为被区域性不整合面所限定的构造-地层层序在垂向上的叠加组合,这种叠加组合可以被晚期的构造事件(如断裂、褶皱和岩浆活动等)所调整改造。

因此,厘定沉积盆地的演化阶段即是确定盆地发展的时间序列及不同阶段的空间结构,主要有两种基本方法:①构造沉降分析,确定构造沉降过程及其变化特点,剖析每一阶段的构造沉降机制,不同阶段之间沉降的转换特点;②构造-地层层序与年代地层格架分析,基于钻井、地震和露头等综合建立区域地质大剖面,分析构造-地层层序构成及其年代-地层格架,确定地层不整合面的时间、地理与几何变量。

准噶尔盆地因受其基底组成的非均一性及周缘构造带的长期活动影响,内部变形复杂,结构横向变化快,兼之受地震分辨率影响长期对其深层反射属性难以界定等问题,对准噶尔盆地构造演化阶段的认识迄今仍分歧较大^[1-8]。而盆地构造演化阶段的厘定及其性质的剖析是了解盆地油气地质条件的基础,也是制定油气勘探战略的重要依据。本文依据近年来盆地的深探井、高分辨率地震反射剖面及周缘露头的研究进展,基于上述学术思路,重新认识准噶尔盆地的构造演化阶段,为建立盆地构造运动年表与深层油气勘探提供新的思路与参考依据。

1 地质背景

准噶尔盆地地处古亚洲洋构造域的南部,是中亚造山带(CAOB)的重要组成部分^[9-13](图1a),其三面被古生代的缝合线和褶皱带围限。盆地的西面为北东-北东东向的西准噶尔褶皱造山带,是准噶尔地块与塔城、巴尔喀什等地块相互碰撞拼接的缝合带,盆地北东面及东面是西伯利亚古板块南缘的阿尔

泰褶皱造山带及东准噶尔褶皱造山带,盆地南缘为北天山褶皱造山带,为准噶尔地块与塔里木板块之间的缝合带(图1b)。

依据盆地内部二叠系构造特征及后期构造改造特点,将准噶尔盆地划分为西部隆起、东部隆起、陆梁隆起、北天山山前冲断带、中央坳陷和乌伦古坳陷等6个一级构造单元和44个二级构造单元(图1b)。根据盆地深钻井及地震反射资料,准噶尔盆地是一个石炭纪—第四纪发展起来的大陆板内沉积盆地(图2)^[14-18]。石炭系—二叠系下统发育多套火山岩系;中二叠统发育大型湖泊沉积体系,为盆地主要烃源岩发育期;上二叠统粗碎屑沉积体系发育;中—下三叠统发育扇三角洲—湖泊沉积体系,扇体构成油气主要储集体;上三叠统(白碱滩组)发育大型湖泊沉积,表现为克拉通内坳陷盆地沉积;下侏罗统—中侏罗统下部(八道湾组—西山窑组)为湖泊—沼泽相沉积;中侏罗统上部(头屯河组)—上侏罗统为河湖相砂砾岩沉积,盆缘冲积扇体系发育;下白垩统为河湖相沉积,上白垩统分布局限,为炎热气候环境下红层;古近系为河湖相沉积;新近系—第四系山前巨厚,为一套砂砾岩沉积。

准噶尔盆地经历了石炭纪之前的基底形成,石炭纪一二叠纪过渡发展,中生代—古近纪内陆湖盆及新近纪—第四纪强烈挤压等演化过程^[14-15]。

2 盆地构造演化阶段

2.1 构造沉降与盆地阶段

近年来盆地腹部有一系列深探井,如莫深1井和达探1井,都已钻揭下石炭统。根据莫深1井和达探1井的钻井资料做出了基底沉降曲线和构造沉降曲线。可以看出:盆地腹部在连续的沉降过程中为3次抬升剥蚀(早二叠世末期、晚侏罗世和古近纪末期)所打断(图3)。

1) 石炭纪—早二叠世快速沉降期

又可分为早石炭世、晚石炭世、早二叠世3个沉降阶段,主要为正断层活动控制的快速沉降。其间在早石炭世末和晚石炭世末在盆地大部分地区(如帐北断褶带、陆东凸起、车—拐凸起等)可以见到挤压隆升及剥蚀现象,反映了局部或区域构造事件。

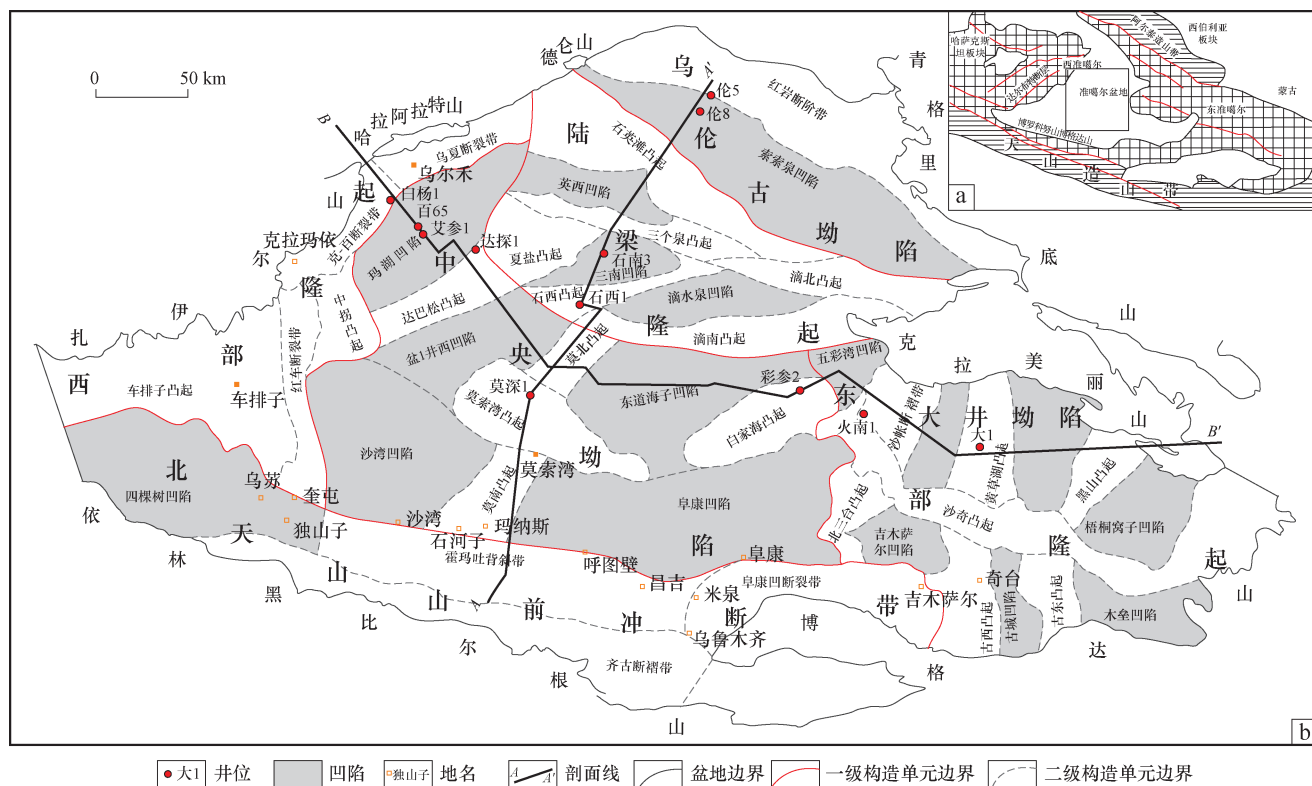


图1 准噶尔盆地大地构造位置(a)与构造地质单元分布(b)

Fig. 1 Geo-tectonic location (a) and distribution of tectonic geological units (b) in the Junggar Basin

2) 早二叠世末隆升期

表现为风城组顶部的不整合面。在沙湾、盆1井西、玛湖等凹陷反映出早二叠世末期的构造反转。盆地性质由伸展转为挤压。

3) 中二叠世—三叠纪沉降期

表现为中二叠世快速沉降、晚二叠世—中三叠世沉降减速、晚三叠世缓慢沉降的特点,构成“S”型沉降形态,其类型类似前陆盆地的沉降曲线。

4) 早—中侏罗世沉降期

基底沉降表现为快速沉降,但在构造沉降曲线上为慢速沉降,仅在早侏罗世初期(八道湾组沉积期)构造沉降速率略大。

5) 晚侏罗世隆升期

主要是齐古组、喀拉扎组沉积期,盆地腹部缺失。

6) 白垩纪—古近纪沉降期

在基底沉降曲线上,莫深1井为快速沉降,达探1井在早白垩世晚期沉降放缓,但其后仍然下沉。两口井在构造沉降曲线上幅度变化不大,类似于热沉降拗陷特征。

7) 古近纪末期轻微隆升

古近纪与新近纪之间发生了沉降机制的转换,在构造沉降曲线上有轻度隆升。

8) 新近纪—第四纪沉降期

莫深1井与达探1井区沉降较缓。山前带则急剧挠曲沉降。

2.2 构造—地层层序

2.2.1 构造地质剖面

根据探井声波测井资料制作合成地震记录,进行地震剖面地质层位标定。通过层位追踪、闭合解释了南北向、东西向地震大剖面(图4,图5)。

南北向剖面(图4)经过北天山山前冲断带、阜康凹陷、莫索湾凸起、莫北凸起、滴南凸起、三南凸起、三个泉凸起、英西凹陷、石英滩凸起、索索泉凹陷和红岩断阶带。在该剖面上,可见第四系底界、新近系底界、白垩系底界、三叠系底界、二叠系底界等角度不整合现象(图4b,c)。白垩系及其以上地层,统一南倾。石英滩凸起以南二叠系及其以上地层整体南倾,石英滩凸起以北白垩系之下泥盆系、三叠系和石炭系北倾,在红岩断阶带,下盘地层被牵引。在阜康凹陷与石英滩凸起之间,二叠系之下的石炭系发育一系列地堑、半地堑构造,早石炭世的断陷主要发育在 C_{1v} 构造层内,断陷范围较小、断层倾角较陡,部分断层向上终止于 C_{2s} 底界;晚石炭世断陷范围扩大,大部分断层终止于上覆

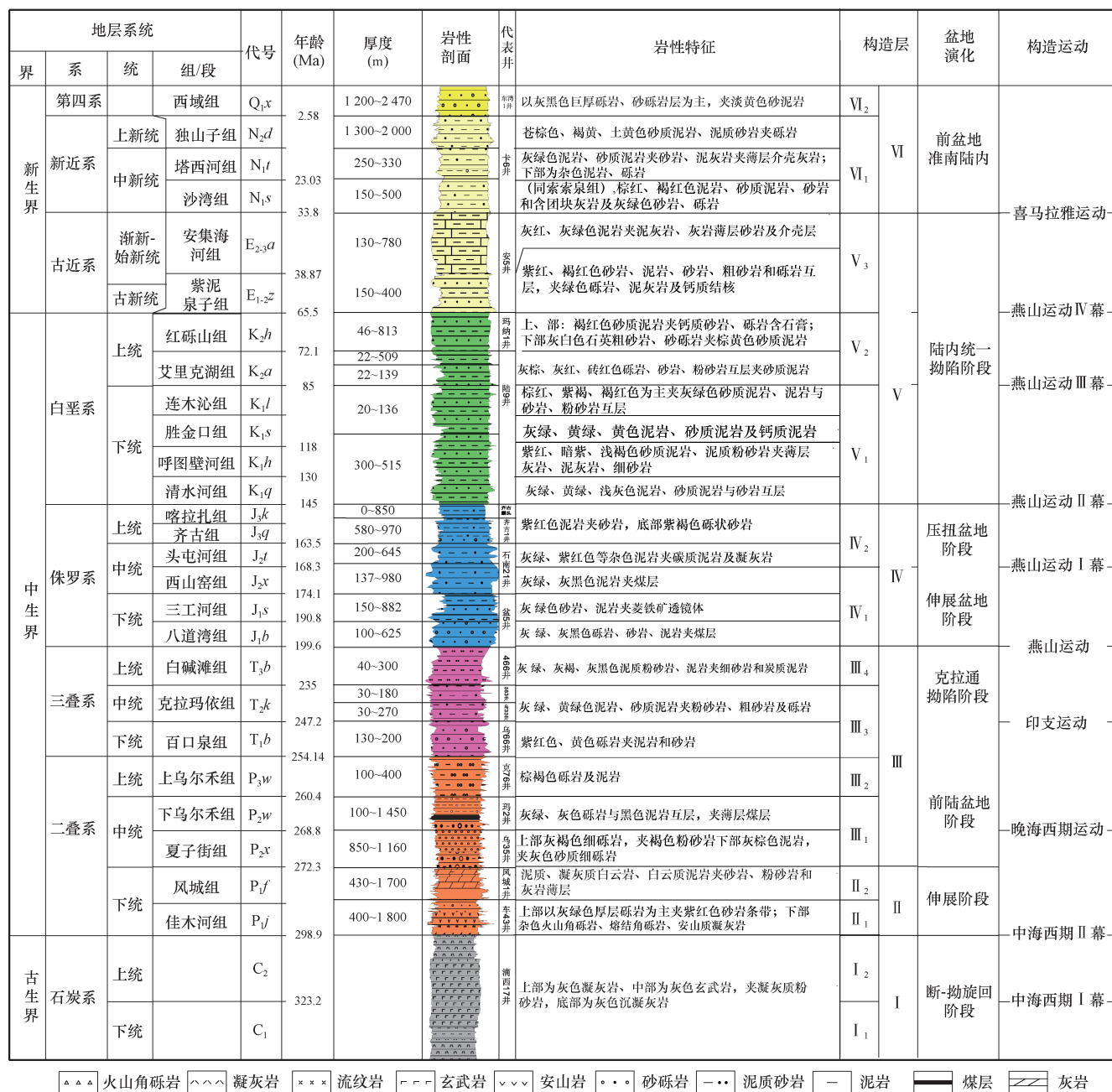


图2 准噶尔盆地地层综合柱状图与盆地演化

Fig. 2 Composite stratigraphic column and evolution of the Junggar Basin

二叠系底; 他们为二叠系角度不整合覆盖, 在滴南凸起和三个泉凸起等高部位可被三叠系或侏罗系角度不整合覆盖。北天山山前冲断带白垩系底部滑脱层之上形成滑脱冲断系统, 其下在石炭系-侏罗系之间形成多个冲断席组成的双重构造; 靠近山前, 发育石炭系-中生界构成的构造楔, 导致新生界形成北倾单斜。红岩断阶带形成基底卷入型断层传播褶皱, 在其上盘上石炭统之上, 侏罗系和白垩系急剧减薄, 其上为第四系所不整合覆盖。整条剖面揭示出南、北对冲形态。

东西向剖面(图5)经过克-百断裂带、玛湖凹陷、达巴松凸起、盆1井西凹陷、莫北凸起、东道海子凹陷、白家海凸起、五彩湾凹陷、沙帐断褶带、石树沟凹陷、黄草湖凸起、石钱滩凹陷、黑山凸起、老君庙褶皱带和克拉美丽山东段。在该剖面上, 可见新近系底界、古近系底界和白垩系底界等区域性角度不整合(图5b, c)。在克-百断裂带, 可见侏罗系不整合于冲断席之上; 在玛湖西斜坡, 见三叠系底部的削截不整合; 在东部海子凹陷内部, 可见下二叠统风城组的超覆现象。自克-百断裂带至黑山凸起, 白垩系及以上地层形成大的拗

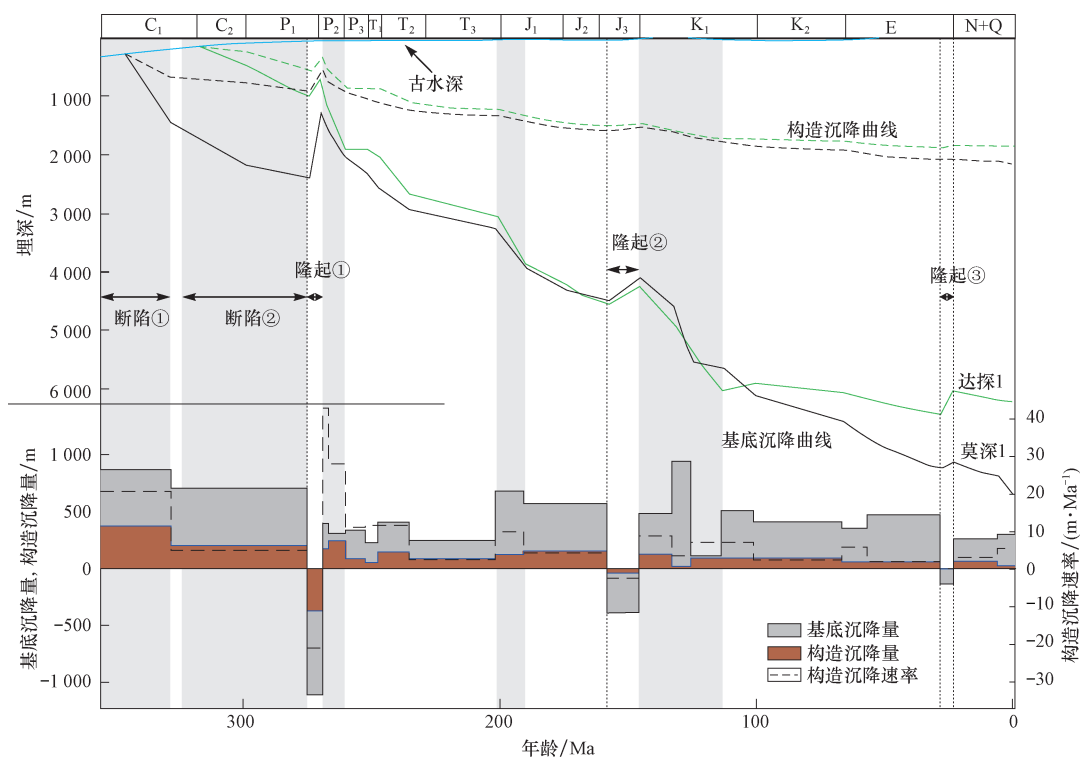


图3 准噶尔盆地腹部莫深1井与达探1井的基底沉降与构造沉降曲线

Fig. 3 Curves showing the basement subsidence and tectonic subsidence of Well Moshen-1 and Well Datan-1 in the central Junggar Basin

陷带,呈向斜形态;三叠系-侏罗系也具此形态,但在白家海凸起与黑山凸起之间,受下伏冲断活动影响,“向斜”东翼被褶皱及断层切割复杂化。二叠系自克-百断裂带向莫北凸起一带呈楔状减薄,玛湖凹陷西斜坡二叠系较厚,且东南倾,指示出前二叠系的构造楔入活动^[19];莫北凸起东界之下有大型西倾断裂,与上覆断层构成“楼梯式”转接^[20]。自白家海凸起、沙帐断褶皱带、黄草湖凸起到黑山凸起,二叠系、石炭系形成隔档式断层传播褶皱背斜带,大型断层发育在次级构造单元之间;其上为侏罗系、白垩系不整合覆盖。黑山凸起以东为强烈的褶皱变形带,老君庙褶皱带石炭系-侏罗系形成大型向斜,克拉美丽山东段发育大型构造楔。东西向剖面上也具对冲结构(为不同构造世代作用的结果)。

2.2.2 构造-地层层序

图4和图5所示的结构剖面清楚地指示了准噶尔盆地构造-地层层序的发育特点。为更加直观地反映出盆地构成特点,制作了图6和图7所示的年代地层层架剖面。

在南北向剖面上,可见6套构造-地层层序,即:①石炭系:包括下石炭统和上石炭统两套构造-地层

层序,下石炭统 C_{1v} 断陷构造层分布较广,主要分布在阜康凹陷北部、莫索湾凸起、陆梁隆起和红岩断阶带,在乌伦古坳陷内被剥蚀;上石炭统主要残留在陆梁隆起上,红岩断阶带上有部分残留,乌伦古坳陷和盆地南侧的中央坳陷带内均遭受剥蚀。石炭系与二叠系之间发育区域性不整合面(剥蚀时限 52 ~ 101 Ma),致使上石炭统和部分下石炭统遭受强烈剥蚀,陆梁隆起及以北地区剥蚀较大。②下二叠统:包括佳木河组、和风城组。在阜康凹陷-莫北凸起一带较为发育,在三南凹陷及以南有残余,以北剥蚀殆尽。③中二叠统-三叠系:包括夏子街组-下乌尔禾组、上乌尔禾组、中下三叠统、上三叠统等4个次级构造-地层层序。中二叠统残余范围扩大,下乌尔禾组在三南凹陷、三个泉凸起、英西凹陷均有少量残留。在莫索湾凸起、莫北凸起及陆梁隆起上,二叠系与三叠系之间发育不整合(不整合面时限为 9 ~ 14 Ma),上二叠统在莫北凸起以北遭受强烈剥蚀,只在英西凹陷有部分残留。下三叠统仅发育在莫北凸起以南,底部发育一套砂砾岩,超覆于下伏二叠系之上。中-晚三叠世,盆地沉积范围扩大到整个盆地,盆地进入克拉通内坳陷阶段。④侏罗系:包括八道湾-西山窑组、头屯河组、局部发育齐古-喀拉扎组。八道湾组沉积时期,盆地进入伸展断陷或拗陷

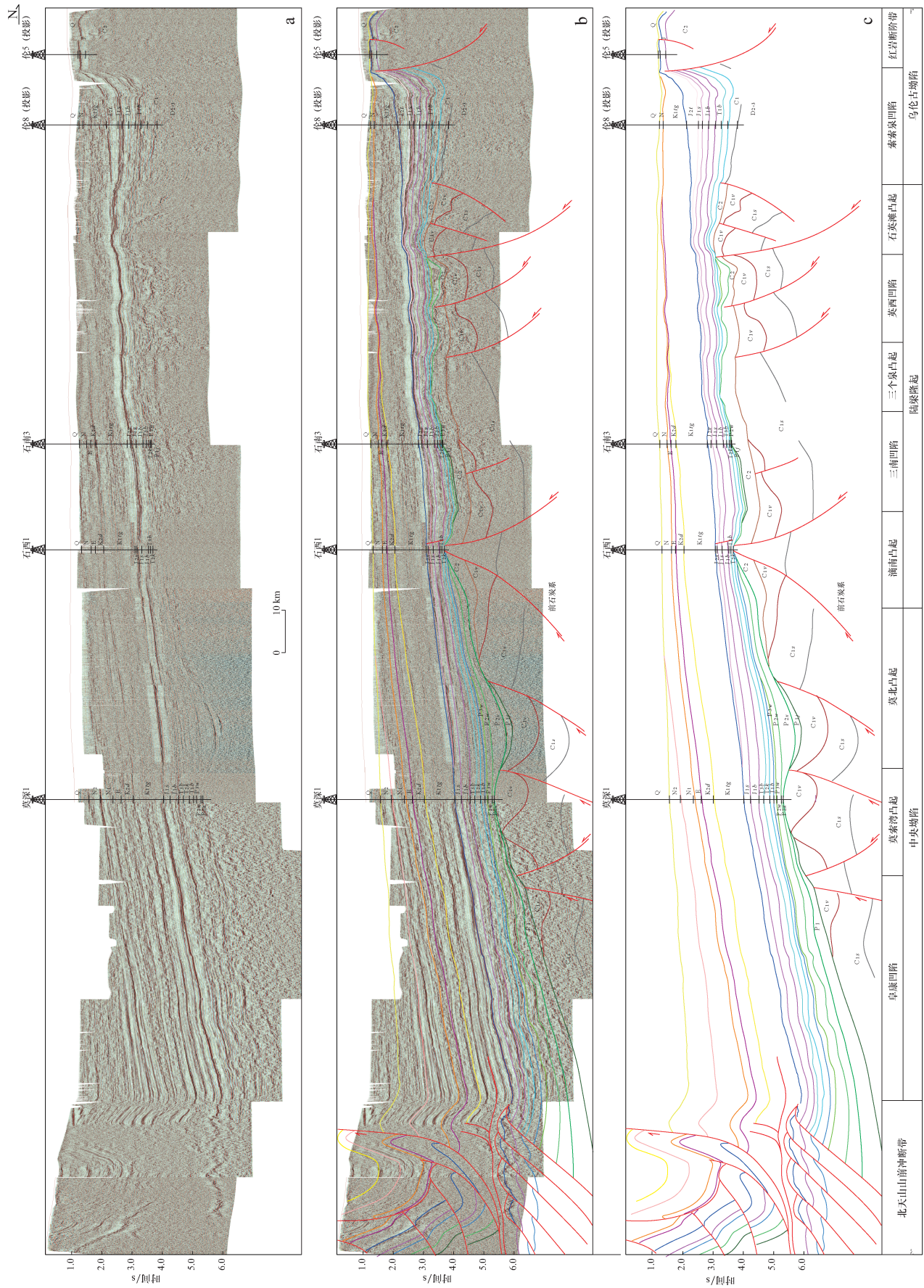


图4 准噶尔盆地南北向地震剖面 (44') (a)、地震地质解释剖面 (b) 及地质结构剖面 (c)

Fig. 4 NS-trending seismic profile (44') (a), seismic geological interpretation profile (b), and geological architecture cross-section (c) of the Junggar Basin

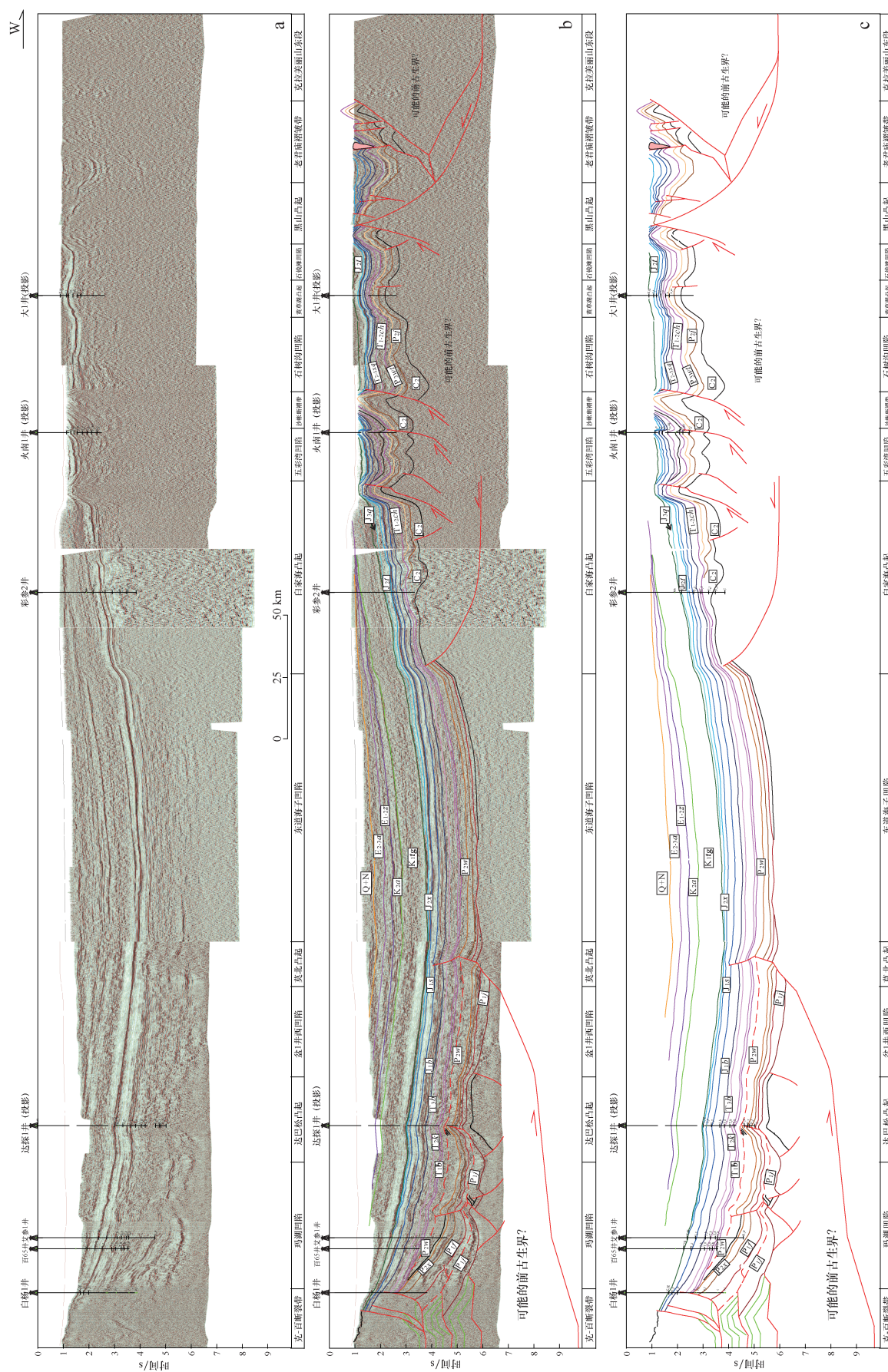


图5 准噶尔盆地东西向地震剖面 (a)、地震地质解释剖面 (b) 及地质结构剖面 (c)

Fig. 5 EW-trending seismic profile (BB') (a), seismic geological interpretation profile (b), and geological architecture cross-section (c) of the Junggar Basin

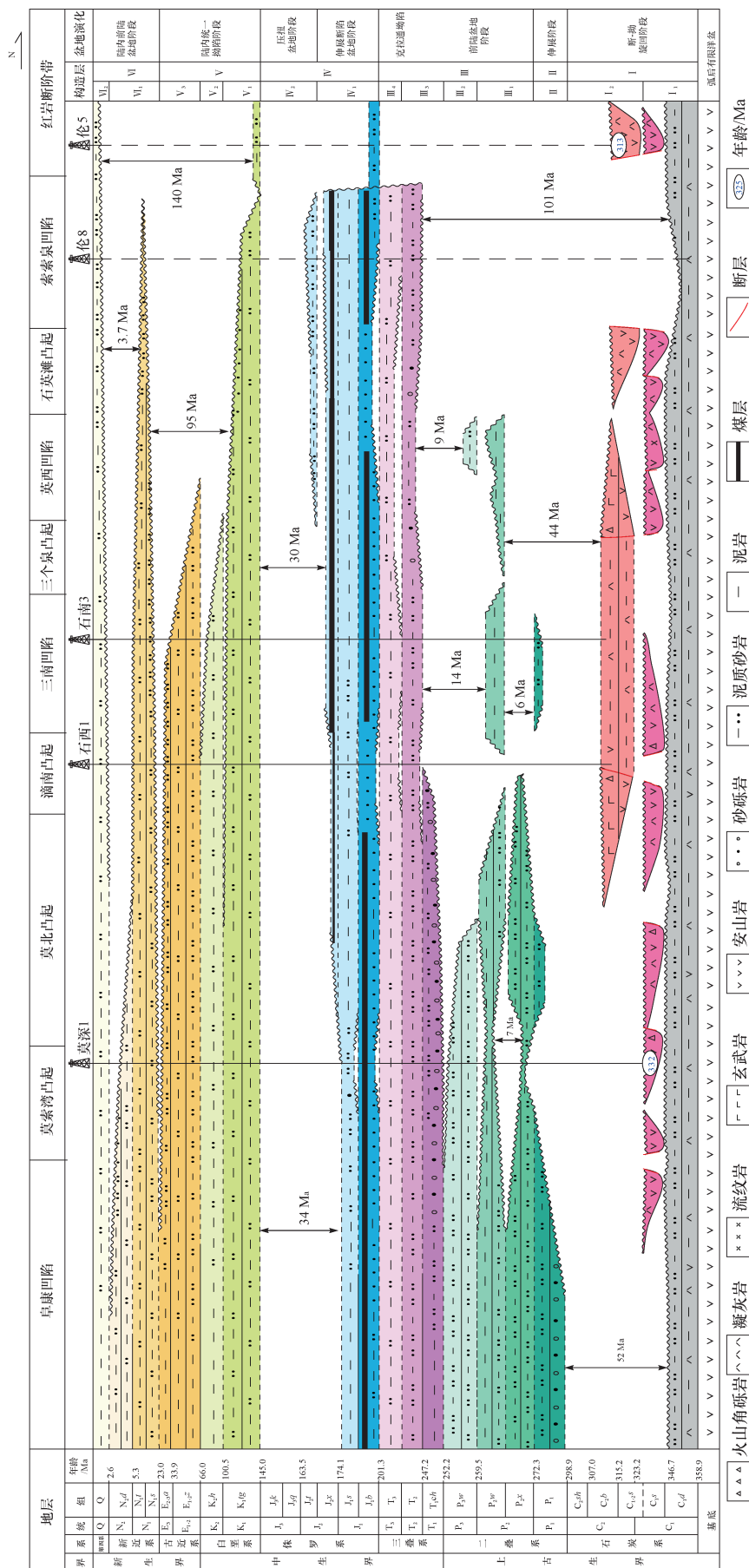


图6 准噶尔盆地南北向剖面 (A4') 年代地层格架

Fig. 6 Chronologic stratigraphic framework on the NS-trending cross-section (A4') of the Junggar Basin

C_{1s}. 滴水泉组; C_{1s}.s. 松喀尔苏组; C_{2b}. 巴塔玛依内山组; C_{3sh}. 石钱滩组; P₁. 下二叠统; P_{2x}. 夏子街组; P_{3w}. 下乌尔禾组; P_{3w}. 上乌尔禾组; T_{1ch}. 下仓房沟群; T₂. 中三叠统; T₃. 上三叠统; J_{1b}. 八道湾组; J_{1s}. 三道湾组; J₂. 头屯河组; J_{3q}. 齐古组; J_{3k}. 喀拉扎组; K_{1g}. 吐谷鲁群; K_{2h}. 上白垩统; E₂.s. 古-始新统紫泥泉子组; E₂.s. 始-渐新统安集海河组; N_{1s}. 沙湾组; N₂. 塔西河组; N₃. 独山子组; Q. 第四系

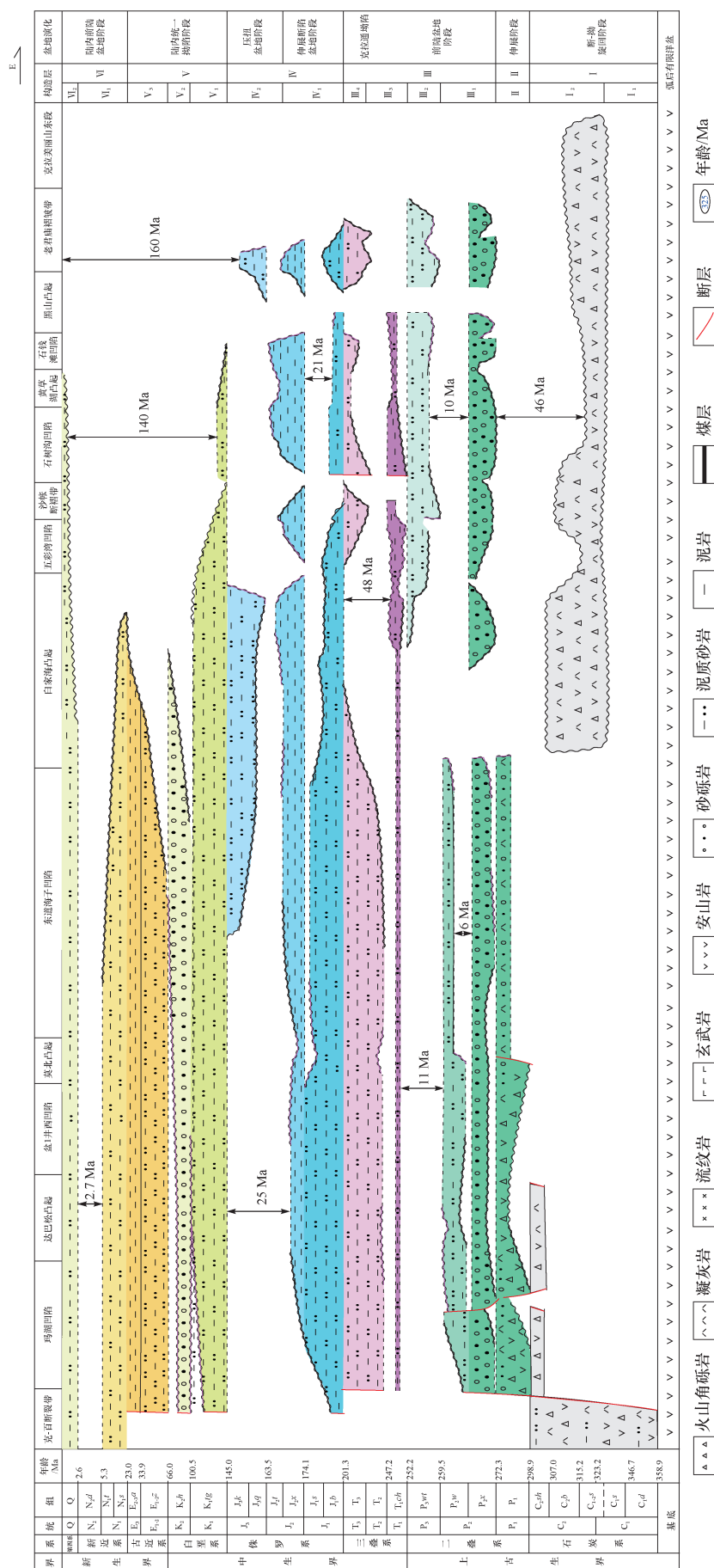
图7 准噶尔盆地东西向地震剖面 (BB') 年代地层格架

Fig. 7 Chronologic stratigraphic framework on the EW-trending cross-section (BB') of the Junggar Basin

C_{1d}. 滴水泉组; C_{1s}. 松喀尔苏组; C₂. 上下七英统过渡泥岩段; C_{2b}. 巴格玛依内山组; C_{2sh}. 火地组; P₁. 下二叠统; P₂. 夏子街组; P_{3w}. 下乌尔禾组; T₁. ch. 下乌尔禾组; T₂. 中三叠统; T₃. 上三叠统; J_{1b}. 八道湾组; J_{1s}. 三河组; J_{2x}. 西山窑组; J_{2t}. 头屯河组; J_{3q}. 齐古组; J_{3k}. 喀拉扎组; K/G. 吐鲁番群; k_{2h}. 上白垩统; E_{1sz}. 古-始新统紫泥泉组; E_{23a}. 始-渐新统安集海河组; N_{1s}. 沙湾组; N_{1t}. 塔西河组; N_{2d}. 独山子组; Q. 第四系

阶段,分布范围广,发育煤层。西山窑组沉积末期,盆地处于压扭构造背景,在莫北凸起和滴南凸起、石英滩凸起等发育角度不整合^[18,21-22]。晚侏罗世,盆地遭受大规模隆升剥蚀,上侏罗统大多缺失,西山窑组在盆地南部的阜康凹陷、莫索湾凸起等地区被剥蚀;⑤白垩系-古近系:盆地进入陆内统一拗陷阶段,发育下白垩统、上白垩统与古近系3个次级构造层。古近纪末期盆地北部的三个泉凸起至红岩断阶带遭受剥蚀;⑥新近系-第四系:包括新近系、第四系次级构造层,新近纪末期盆地北部再次遭受抬升剥蚀,第四系不整合于下伏地层之上。

在东西向剖面上(图7),可见构造-地层层序。①石炭系:大井拗陷以下石炭统为主,阜康-吉木萨尔-古城等凹陷,以上石炭统为主;②下二叠统:在东道海子凹陷、玛湖凹陷等较为发育;③中二叠统一三叠系:包括夏子街组-下乌尔禾组、上乌尔禾组、中下三叠统、上三叠统等4个次级构造-地层层序,其间均为不整合面分隔。夏子街组分布甚广,而下乌尔禾组在玛湖凹陷、东道海子凹陷等较为发育;上乌尔禾组(东部称为梧桐沟组)在五彩湾凹陷以东较为发育,在玛湖凹陷南部、中拐凸起及沙湾凹陷一带上乌尔禾组发育。下三叠统与中上三叠统之间也存在不整合面,下三叠统在盆地东部发育较广,盆地西部受西北缘向盆内推覆作用影响,地层较薄,以粗粒物质为主^[23-24];中三叠统主要发育在盆地西部;上三叠统沉积期,湖盆范围扩大,发育完整的上三叠统,但白家海凸起有所缺失;④侏罗系:下侏罗统下部全盆发育,上部主要沉积在玛湖凹陷、达巴松凸起、盆1井西凹陷、莫北凸起、东道海子凹陷,向盆地东部逐渐消失;中侏罗统在盆地内大范围发育,从克-百断裂带到玛湖凹陷超覆不整合发育,盆地东部受逆冲活动影响,形成一系列断层相关褶皱带,顶部被削蚀;上侏罗统大范围缺失,但在东道海子凹陷和白家海凸起分布较广;黑山凸起和老君庙褶皱带一些地区也残存上侏罗统^[18];⑤白垩系-古近系:白垩系普遍发育,但盆地东部普遍缺失上白垩统,下白垩统呈现盆缘较薄、盆内较厚的特征;盆地东部部分缺失古近系;⑥新近系-第四系:包括沙湾组、塔西河组、第四系等次级构造层,新近纪末期盆地北部大范围遭受剥蚀,缺失独山子组,第四系不整合于下伏地层之上。克-百断裂带新近系超覆于石炭系之上,缺失间断时限约275 Ma。

2.3 盆地演化阶段

从盆地构造沉降曲线、构造-地层层序及不整合

面间断时间综合分析(图3—图7),准噶尔盆地经历了以下6个演化阶段(图2):①石炭纪:分别经历早石炭世和晚石炭世两个断陷/拗陷旋回;②早二叠世:主要为佳木河期、风城期断陷发育期,在风城组沉积末期构造反转,由伸展转为挤压^[21];③中二叠世—三叠纪:分别经历夏子街组-下乌尔禾组、上乌尔禾组、中下三叠统、上三叠统等沉积期,为盆地的主要挤压变形期,晚三叠世形成大型的克拉通内拗陷;④侏罗纪:早-中侏罗世早期伸展变形明显,但中侏罗世晚期一晚侏罗世,压扭活动^[16,18,22,25];⑤白垩纪—古近纪:大型内陆湖泊盆地发育期,受炎热气候影响,发育红层;⑥新近纪—第四纪:处于前陆环境,发生大规模缩短变形。

3 盆地构造演化特征

3.1 剖面构造演化及其对盆地构造变形的约束

3.1.1 南北向剖面构造演化

对南北向构造地质剖面(44')进行平衡剖面恢复,共划分为石炭纪、早二叠世、中-晚二叠世、三叠纪、侏罗纪、白垩纪—古近纪和新近纪以来7个变形阶段。其中,石炭纪处于伸展断陷-拗陷阶段,早、晚石炭世均经历一期断-拗过程。早石炭世中晚期断陷的伸展量较大,约为9 km,形成了一系列半地堑、地堑(图8b);石炭纪末期断陷经历了正反转过程。下二叠统佳木河组沉积时期盆地依然处于伸展环境,在玛湖凹陷西斜坡、中拐凸起和沙湾凹陷一带发育大量火山岩;风城组继承了这种特点,火山活动在玛湖凹陷较为强烈。整体而言,下二叠统分布不均匀,是对石炭纪末盆地地貌的一次调整,高处削截,低洼处填平补齐,而中-上二叠统分布范围明显扩大,向隆起高部位逐渐超覆(图8d,e)。中-晚二叠世盆地南、北两侧均发生挤压活动,造成早期石炭纪的断陷被改造,上石炭统和中-下二叠统遭受剥蚀。中二叠世以盆地南部逆冲推覆为主,缩短量达11 km。三叠系是在二叠系的基础上继承性发育,整体仍处于挤压环境,在下三叠统底部发育一套冲积扇沉积体系,中-上三叠统发育时湖盆范围进一步扩大,形成统一的大型拗陷湖盆(图8f)。早侏罗世早期盆地进入断陷阶段,于盆-山结合部位断陷发育,沉积厚度增大;中-晚侏罗世受盆缘大断裂压扭作用影响,在盆内形成多个NE, NEE向凸起带^[22]。在凸起带上,特别是对应基底断裂带部位,发育中浅层次级断裂。进入白垩纪,北部的红岩断阶

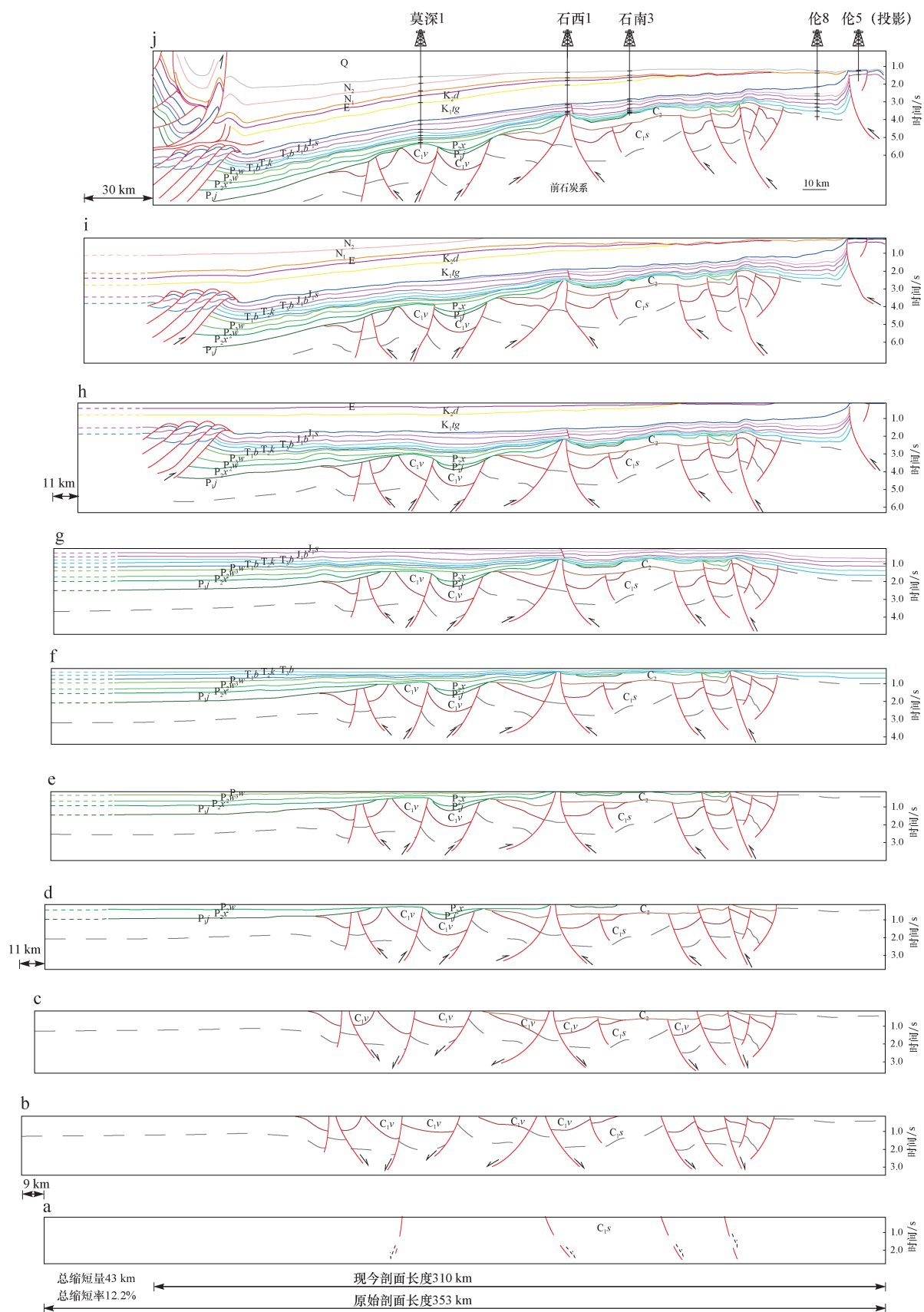


图8 准噶尔盆地南北向构造演化剖面(AA')

Fig. 8 NS-trending tectonic evolution profile (AA') of the Junggar Basin

a. C_{1v} 沉积前; b. C₂ 沉积前; c. P₁ 沉积前; d. P₂ 沉积前; e. T 沉积前; f. J 沉积前; g. K 沉积前; h. N_{1s} 沉积前; i. Q 沉积前; j. 现今

带开始活动,致使红岩断阶带的侏罗系遭受剥蚀(图8h)^[26]。南侧淮南缘冲断带也开始活动,形成多个逆冲断片,这一时期的缩短量达11 km。新近纪,受北天山冲断活动的影响,盆地挠曲沉降,整体向南掀斜,在山前沉积巨厚的新近系。新近纪晚期—第四纪,南缘冲断带活动进一步增强,在前期冲断片之上形成逆冲推覆体,构成上、下叠置的多重滑脱构造变形系统,山前部位发育巨厚的第四系,缩短量达30 km。

AA'剖面总缩短量为43 km,表明准噶尔盆地南北向上整体发生了缩短,缩短率为12.2%,在中—晚二叠世缩短了11 km,古近纪末期缩短了11 km,上新世—第四纪缩短为30 km,晚期挤压很强。在这些挤压缩短事件之间,则是伸展或热沉降期。即自石炭纪以来,准噶尔盆地在南北方向上经历了二叠纪—三叠纪、侏罗纪、白垩纪—第四纪3个伸展—聚敛旋回。

3.1.2 东西向剖面构造演化

对东西向构造地质剖面(BB')进行平衡恢复,表明准噶尔盆地在东西方向上经历了以下演化过程:①晚石炭世—早二叠世伸展断陷阶段(图9a—c),在玛湖凹陷、大井坳陷一带发育半地堑组合^[27];②中—晚二叠世,盆地东、西两侧均发生挤压活动,以盆地西部的逆冲推覆为主,缩短量达73 km,盆地东部缩短量为39 km;西侧发育大规模同构造沉积活动的扇体,形成扇三角洲体系群^[28];③早三叠世,盆地两侧仍在同时挤压,盆地西侧缩短量为68 km,盆地东侧缩短量为22 km,扇三角洲体系群仍然发育^[23-24],这一时间整体以盆地西部构造活动为主;④中—晚三叠世,盆地西缘以稳定湖盆沉积为主,中三叠世早期仍有逆冲推覆作用影响,形成一系列冲积扇;盆地东部变形则开始向盆内快速传播,形成白家海凸起和黑山凸起,盆地东部缩短量为11 km,表现出西弱东强的活动特点;⑤早侏罗世—中侏罗世西山窑组沉积期,盆地西部以稳定沉积为主,发育湖沼相沉积,盆地东部则继续向盆内推覆,缩短量约为52 km(图9g),表现出强烈的缩短活动;⑥中—晚侏罗世,盆地受压扭作用影响,在盆地内部形成车—莫古隆起^[16,18,20],盆地西缘和东缘都有相应的逆冲响应,盆地东缘缩短量约为15 km(图9h),表明在燕山期盆地东部的构造活动尤为强烈;⑦白垩纪,在稳定沉积了一定厚度的下白垩统之后,盆地东部再次抬升,但缩短量较小,反映在构造几何学特征上即盆地东部断层更为高陡、褶皱抬升剥蚀较强;⑧新近纪以来盆地东西向整体稳定沉降,之后,

受天山向北推覆影响,盆地西缘、东缘有所抬升,但构造变形较小。

从东西向剖面的复原来看(图9),准噶尔盆地在东西向上的缩短率达35.8%,盆地西缘的缩短率为18.5%,盆地东缘的缩短率17.2%,西侧的挤压缩短强于东侧。盆地西侧的挤压限于玛湖凹陷一带,前锋可能达到莫北凸起;挤压缩短主要发生在中—晚二叠世和早三叠世。但盆地东侧的挤压则达到黑山凸起,甚至达白家海凸起一带,前锋扩展范围较西侧的大得多;挤压缩短除中—晚二叠世、早三叠世之外,晚三叠世、中侏罗世早期、晚侏罗世—早白垩世仍有强烈的挤压变形,即燕山早中期的构造变形东强西弱。晚白垩世以来,东、西方向上的挤压较为微弱。

比较图8和图9不难看出,盆地变形具有以下特点:①准噶尔盆地在东西向上的缩短率(35.8%)远远大于南北向上的缩短率(12.2%)。②南北向上与东西向上的挤压缩短时期存在差异,首先是中—晚二叠世东西向上的缩短远远强于南北向的缩短;其次,早三叠世东西向上发生较大规模缩短,而南北向上挤压很弱;第三是东西向上燕山早、中期较强,南北向上较弱;第四是南北向上喜马拉雅晚期非常强烈,但东西向上这一时期趋于平静。③中—晚二叠世是盆地南北、东西向上都发生缩短的时期,但东西向上的挤压(始于风城组沉积末期)略早于南北向的挤压(梧桐沟组沉积期)。④石炭纪均经历早石炭世、晚石炭世两个伸展—拗陷旋回,早石炭世末期正反转,晚石炭世末期断褶活动强烈,地层剥蚀严重。

3.2 准噶尔盆地构造演化模式

随着古亚洲洋盆的开启、消减和闭合的演化,准噶尔地区自早古生代以来长期表现为多岛洋的构造格局^[14-15,29],该构造体制持续发育至晚古生代,直至形成准噶尔盆地的基底^[18,30]。根据盆地地质结构(图3,图4)和构造演化(图8,图9)特点,准噶尔盆地的构造演化可以概括为6个演化阶段(图2,图10):

1) 石炭纪洋盆开启—消减阶段

石炭纪期间,乌伦古、陆梁、莫索湾等线性岛弧离散在准噶尔洋中构成了准噶尔地区的多岛洋格局^[30-33]。洋盆俯冲消减过程中在岛弧地体之上形成了一系列弧相关盆地^[34](图10a)。整个准噶尔地区在石炭纪末期完成了洋—陆构造转换,导致上述弧—盆系统相继碰撞拼贴^[31-32],完成了二叠纪准噶尔盆地的拼合基底^[30]。二叠系与石炭系之间为区域不整合,标志了这一构造事件。

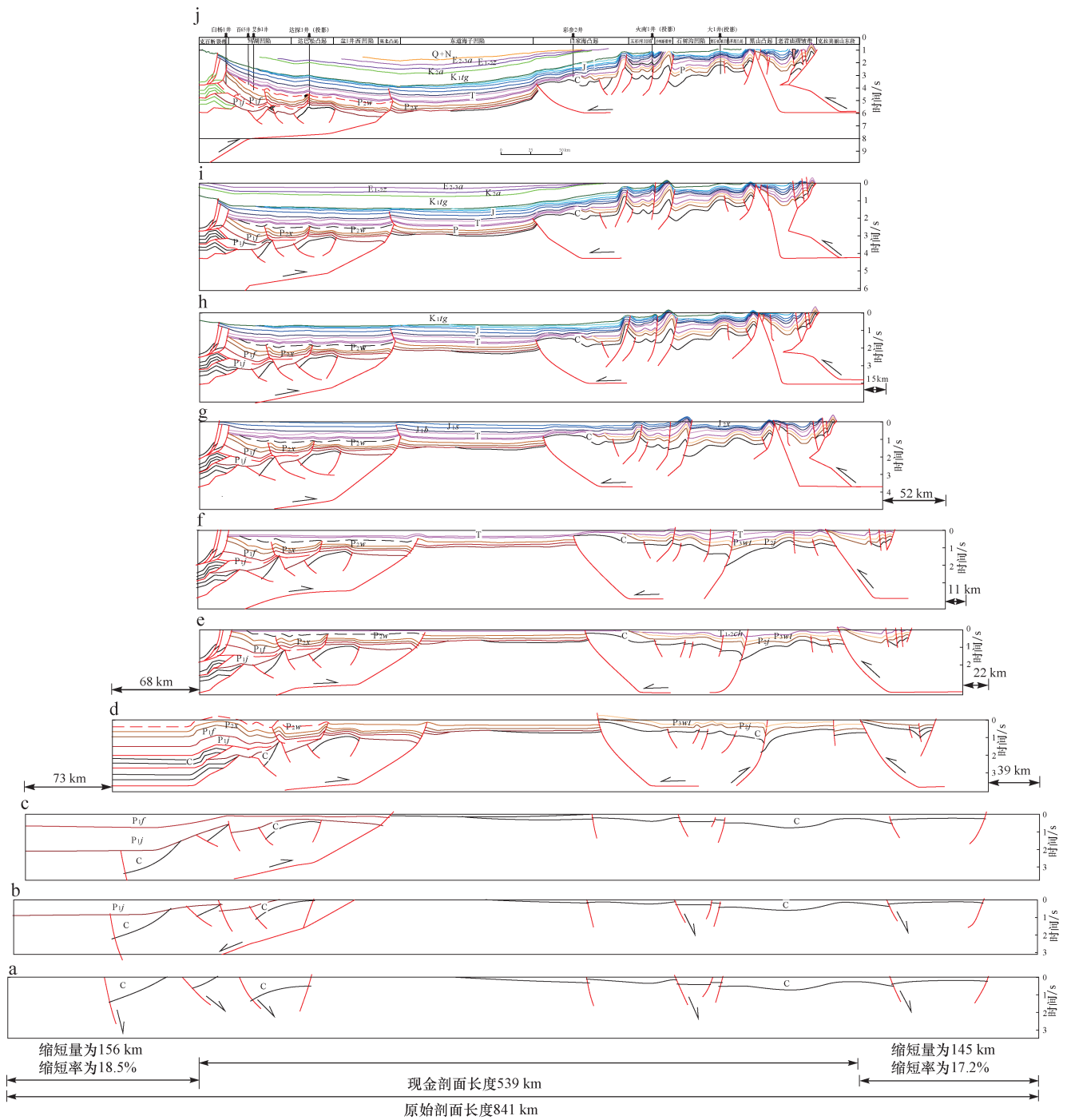


图9 准噶尔盆地东西向构造演化剖面(BB')

Fig. 9 EW-trending tectonic evolution profile (BB') of the Junggar Basin

a. 二叠系沉积前; b. 下二叠统佳木河组沉积早期; c. 中二叠统沉积前; d. 三叠系沉积前; e. 中三叠统沉积前; f. 侏罗系沉积前; g. 中侏罗统头屯河组沉积前; h. 上白垩统沉积前; i. 新近系沉积前; j. 现今

2) 石炭纪末—早二叠世伸展阶段

石炭纪末—早二叠世处于后碰撞调整时期^[35-36], 后碰撞伸展作用导致准噶尔盆地广泛发育石炭纪末—早二叠世的断陷和裂谷岩浆事件(图10b), 在盆地西部的佳木河组与风城组可见多期中—基性火山岩, 在地质结构剖面上可见该期的地堑与半地堑组合(图3, 图4)。

3) 中二叠世—三叠纪前陆盆地阶段

准噶尔盆地进入断陷后的坳陷演化阶段, 具体表现为在盆地玛湖、沙湾—盆1井西、东道海子—五彩湾—大井、阜康—吉木萨尔等凹陷内发育中二叠世厚层泥岩(图10c)。盆地在晚二叠世—三叠纪发生强烈挠曲沉降, 如前所述, 该期是准噶尔强烈挤压缩短时期

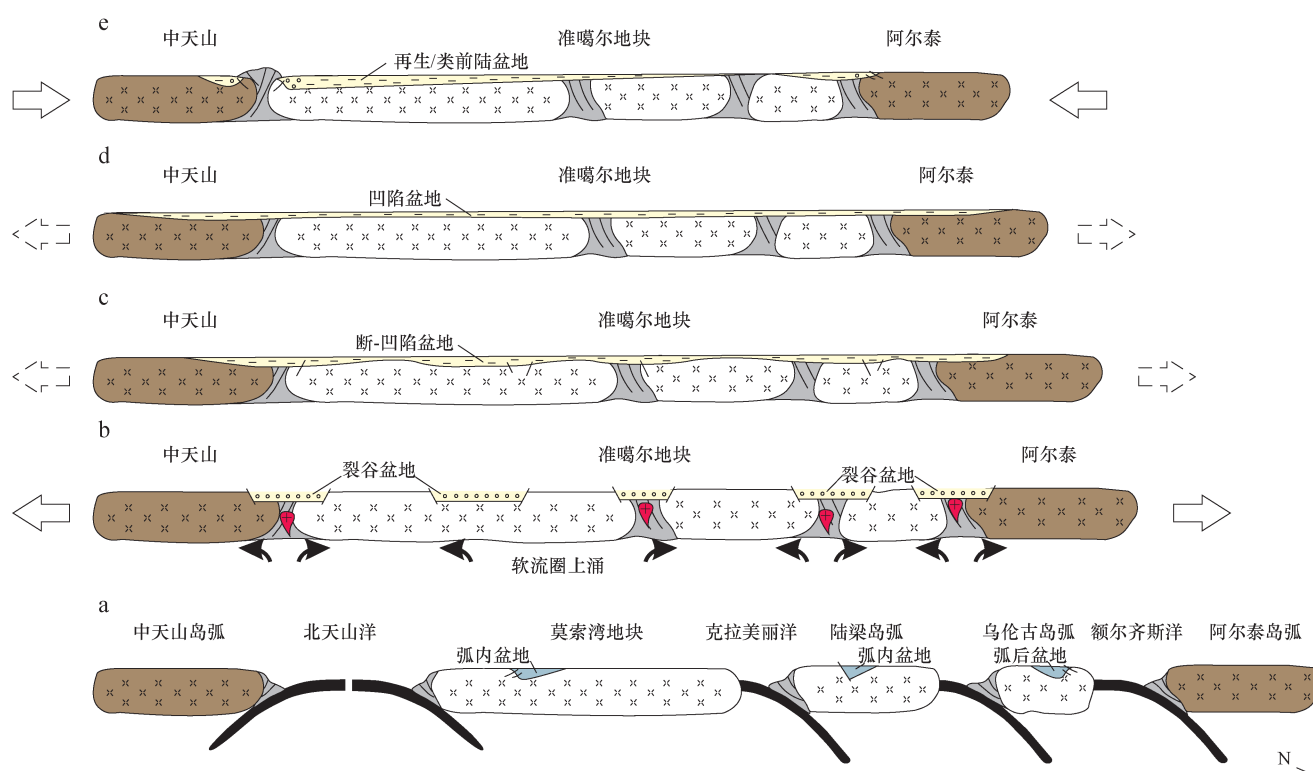


图10 准噶尔盆地构造演化模式

Fig. 10 Tectonic evolution pattern of the Junggar Basin

- a. 石炭纪(弧相关盆地); b. 石炭末纪—早二叠世(后碰撞裂谷盆地); c. 中二叠世—早三叠世(陆内断—凹陷盆地);
d. 侏罗纪—古近纪(热沉降成因的凹陷盆地); e. 新近纪—第四纪(后方前陆盆地)

(图8,图9),形成了准噶尔西北缘、南缘及东缘的前陆盆地带;至晚三叠世该期的差异构造作用导致红岩断阶带形成低凸起^[18]。

4) 侏罗纪伸展—压扭阶段

早侏罗世—中侏罗世早期,准噶尔盆地处于弱伸展环境,发育在赵重远称之为“后海西地台”之上^[37],主要为一套含煤建造,该期的盆地范围广阔,水体浅而宽,可称为“泛准噶尔盆地”(图10d);自中侏罗世晚期头屯河组沉积期—晚侏罗世,受周缘块体调整影响,盆地处于压扭活动期^[22],且盆地东缘挤压强烈活动(图9)。使得侏罗纪经历了一个伸展—挤压的完整旋回。

5) 白垩纪—古近纪克拉通内拗陷阶段

准噶尔盆地及邻区统一沉降,以拗陷湖盆沉积为主(图10d),早白垩世湖盆范围广,早白垩世末期盆地东缘有挤压发生,可能与蒙古—鄂霍茨克洋的关闭事件有关;晚白垩世受古气候影响,红层发育;古近纪仍为大型拗陷,盆地南侧发育安集海组沉积期大型湖盆;古近纪末期盆地南侧已有挤压事件的发生。

6) 新近纪—第四纪前陆盆地阶段

受印度和欧亚板块碰撞的远程效应影响,准噶尔

盆地南缘冲断活动强烈,这主要是塔里木地块在这一时期向天山之下发生陆内俯冲^[38],塔里木地块俯冲前锋到达准噶尔盆地南缘一带,准噶尔盆地处于后方前陆环境(retro-foreland),发生急剧挠曲沉降,充填了巨厚的新近系—第四系,靠近山前,沉积厚度大,向前陆方向减薄,盆地几何形态呈不对称楔状(图3,图10e)。准噶尔盆地再次演化为大型前陆拗陷。

4 讨论与结论

4.1 讨论

前人对于准噶尔盆地构造演化阶段的划分并不一致,主要是所依据的资料基础与学术观点差异较大。其一是对石炭纪的认识,早期将石炭系作为盆地的“基底”看待,但随着五彩湾气田、石西油田、克拉美丽气田、中拐石炭系气藏和滴南石炭系气藏等的发现,钻探资料揭示出石炭系是火山岩系与沉积岩系的组合,王京彬等^[35]认为这是后碰撞阶段伸展期的产物,从我们对石炭纪及其之前地质时期的构造—沉积格局复原来看^[30-34],石炭纪是古亚洲洋中这一地域一系列岛弧带的拼贴期,发育一系列弧前、弧内、弧后或弧间等“弧相

关盆地”(图 10a),这是准噶尔盆地的早期演化阶段,经历了早、晚石炭世两个伸展-凹陷旋回。

其二是关于早二叠世盆地的性质,多数学者认为这是前陆盆地发育期^[4-5,8,39]。吴庆福^[1]、尤绮妹^[2]、赵白^[3]、蔡忠贤等^[6]、陈发景等^[7]、何登发等^[9]确定早二叠世为裂谷,主要依据是佳木河组、风城组中基性火山岩发育的伸展构造环境及靠近扎伊尔山前地层加厚、沉降中心的迁移发育等所体现的断陷结构。所不同的是,吴庆福^[1]认为二叠纪始终为裂陷,陈发景等^[7]认为中二叠世为裂谷期后弱伸展拗陷,晚期为弱缩短挠曲拗陷。本文则依据玛湖、沙湾等凹陷地震剖面的解析,认为风城组末期已发生构造反转,中二叠世已经处于挤压作用期,并认为这一时期延续至晚三叠世,当然期间存在多个挤压高峰期,即存在幕式运动。

其三是关于早-中三叠世的盆地性质,陈发景等^[7]认为早-中三叠世及晚三叠世早期为弱伸展拗陷,晚三叠世晚期可能为弱缩短挠曲拗陷。从玛湖凹陷周缘、沙湾凹陷周缘克拉玛依、黄羊泉、夏子街、夏盐、中拐等扇三角洲体系广泛发育来看^[23-24],早-中三叠世应是周缘强烈冲断活动期,这从克-百断裂带、乌-夏断裂带和哈山断裂带等冲断活动及生长地层的特征上也可得到证明^[40]。晚三叠世白碱滩组沉积期,乌伦古拗陷已与中央拗陷等连城一体(图 4,图 8,图 10c),表现为克拉通内拗陷特点,但在乌-夏断裂带晚三叠世的逆冲活动仍很强烈,侏罗系角度不整合于这些冲断背斜带之上。

对侏罗纪经历伸展-挤压旋回的认识逐渐趋于一致。如陈发景等^[7]认为早-中侏罗世为弱伸展拗陷,中-晚侏罗世为小型陆内前陆拗陷。本文基于地震剖面解析,认为早侏罗世、中侏罗世早期(西山窑期)处于伸展背景,在准噶尔南缘一带有断陷带发育,而中侏罗世晚期(头屯河期)-晚侏罗世盆地整体处于压扭构造背景,形成了横亘盆地中央的 NE-NEE 向的车-莫古隆起^[22],在陆梁隆起部位形成了夏盐、石东、滴水泉等 8 个压扭性鼻状凸起带^[25]。况军等^[41]认为在淮南缘形成了前陆冲断带,齐古组和喀拉扎组等的砾岩代表该期冲断活动产物。

早白垩世为稳定大陆内拗陷,具有热冷却沉降性质。而晚白垩世由于地层厘定仍有含混,对其属性仍存争议,如陈发景等^[7]认为晚白垩世为弱缩短挠曲拗陷;Tang 等^[26]在盆地北缘红岩断阶带的构造解析表明这一时期发生强烈冲断,但盆地南缘、西北缘这一时期构造活动并不强烈。

古近纪为稳定大陆内拗陷,在安集海河组沉积期

发育大型湖泊,盆地中、南部沉积了厚达 400~600 m 的泥岩。北天山向北的冲断活动自 20 Ma 以来已经开始,塔西河组、独山子组和西域组的粗碎屑沉积为冲断前缘的近端沉积,该期盆地陈发景称为大型内陆前陆拗陷^[7],本文称为后方(或后侧)前陆盆地。

4.2 结论

1) 准噶尔盆地是在前石炭纪复合基底之上,历经石炭纪—第四纪长期演化而形成的大型叠合复合盆地。

2) 从盆地构造沉降特征与盆地构造-地层层序等出发,将准噶尔盆地划分为石炭纪断陷-拗陷、早二叠世断陷、中二叠世—三叠纪前陆盆地、侏罗纪伸展断陷—压扭盆地(早-中侏罗世早期断陷,中侏罗世晚期—晚侏罗世压扭)、白垩纪—古近纪陆内拗陷、新近纪—第四纪陆内前陆盆地等 6 个演化阶段。

3) 准噶尔盆地自石炭纪以来,经历了 4 期伸展-聚敛旋回,即石炭纪(包括早-晚石炭世两个次级伸展-挤压旋回)、早二叠世—三叠纪、侏罗纪和白垩纪—第四纪,伸展期、挤压期并不等时,但伸展活动趋弱,挤压活动(南北向上)趋强。

4) 准噶尔盆地整体表现为“四周挤压、范围缩小”特点,南北、东西方向上的挤压具有非等时性、非对称性。南北向上缩短为 12.2%,东西向上缩短为 35.8%,东西向上的缩短远大于南北向上的缩短。西缘挤压主要在中二叠世—早三叠世;而东缘挤压除此之外,晚三叠世、中侏罗世早期、晚侏罗世—早白垩世仍挤压强烈。南缘挤压在中-晚二叠世、中-晚侏罗世、上新世—第四纪挤压强烈;北缘则在晚白垩世冲断活动强烈。

5) 上述伸展、挤压过程在时、空上的强烈差异性导致准噶尔盆地复杂的叠加、复合地质结构。石炭纪的伸展形成近东西向上的裂谷带,末期正反转沿裂谷边界断裂发生;中-晚二叠世西北缘的强烈缩短伴随旋转调整形成了 NNE-NE 向的玛湖-沙湾等大型前陆盆地,而淮南缘、克拉美丽山前该期近 EW 向的前陆拗陷盆地沉降量要小得多;晚侏罗世的缩短变形及其相关盆地主要在淮南缘;新近纪—第四纪的前陆盆地覆盖盆地大部分范围,淮南缘 EW 向前陆拗陷沉降量最大,盆地向南掀斜。

致谢:本文在酝酿、成文过程中,得到李德生、张国伟、贾承造和马永生等院士的启发与鼓励。在与张义杰、何治亮、唐勇、高山林及郑孟林等的交流中,受益匪浅,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] 吴庆福. 准噶尔盆地构造演化与找油领域[J]. 新疆地质, 1986, 4(3): 1-9.
Wu Qingfu. Tectonic evolution and exploration realms[J]. Xinjiang Geology, 1986, 4(3): 1-9.
- [2] 尤绮妹. 准噶尔盆地各构造阶段的大地构造单元划分及含油气性[M]. 兰州: 甘肃科技出版社, 1992: 14-22.
You Qimei. Division of tectonic units and its hydrocarbon exploration prospect in Junggar basin[A]. Wang Yuming. Comprehensive study on petroleum geology in Junggar Basin[M]. Lan Zhou: Gan Su Scientific Publications, 1992: 14-22.
- [3] 赵白. 准噶尔盆地的形成与演化[J]. 新疆石油地质, 1992, 13(3): 191-196.
Zhao Bai. Formation and evolution of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1992, 13(3): 191-196.
- [4] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 新疆北部及邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1-169.
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, et al. Tectonic evolution of northern Xinjiang and its adjacent regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-169.
- [5] 孙肇才. 中国中西部中—新生代前陆盆地及其含油气性—兼论准噶尔盆地内部结构单元划分[J]. 海相油气地质, 1998, 4(3): 16-30.
Sun Zhaocai. Mesozoic-Cenozoic foreland basin of the western China and its hydrocarbon exploration prospect with a comment on the division of tectonic units in Junggar basin[J]. Marine Petroleum prospect, 1998, 4(3): 16-30.
- [6] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 431-440.
Cai Zhongxian, Chen Fajing, Jia Zhenyuan. Types and tectonic evolution of Junggar basin[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(4): 431-440.
- [7] 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 77-89.
Chen Fajing, Wang Xinwen, Wang Xinwei. Prototype and tectonic evolution of the Junggar basin, northwestern China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 77-89.
- [8] 陈新, 卢华复, 舒良树, 等. 准噶尔盆地构造演化分析新进展[J]. 高校地质学报, 2002, 8(3): 257-266.
Chen Xin, Lu Huaifu, Shu Liangshu, et al. Study on tectonic evolution of Junggar basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2002, 8(3): 257-266.
- [9] Sengor A M C, Natal' in B A, Burtman V S. Evolution of the Altai tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364(6435): 299-307.
- [10] Sengor A M C, Natal' in B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis[M]. In: Yin A, Harrison M eds: Cambridge University Press, 1996, 486-640.
- [11] Jahn B M, Windley B, Natal' in B, et al. Phanerozoic continental growth in Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(5): 599-603.
- [12] Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(2-4): 102-117.
- [13] Xiao W J, Windley B F, Huang B C, et al. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altai: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth and metallogeny of Central Asia[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1189-1217.
- [14] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994: 1-437.
He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, et al. Paleozoic crustal evolution and metallogeny of Xinjiang, China[M]. Urumqi: Xinjiang People Press, 1994: 1-437.
- [15] 成守德, 徐新. 新疆及邻区大地构造编图研究[J]. 新疆地质, 2001, 19(1): 33-37.
Cheng Shoude, Xu Xin. On compiling of map of tectonics of Xinjiang and neighbouring areas[J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(1): 33-37.
- [16] 何登发, 翟光明, 况军. 准噶尔盆地古隆起动力学演化特征[J]. 地质科学, 2005, 40(2): 248-261.
He Dengfa, Zhai Guangming, Kuang Jun. Distribution and tectonic features of paleo-uplifts in the Junggar basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(2): 248-261 (in Chinese).
- [17] 张朝军, 何登发, 吴晓智, 等. 准噶尔多旋回叠合盆地的形成和演化[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(1): 47-58.
Zhang Chaojun, He Dengfa, Wu Xiaozhi, et al. Formation and evolution of multicycle superimposed basins in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(1): 47-58.
- [18] 何登发, 周路, 吴晓智. 准噶尔盆地古隆起形成演化与油气聚集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 1-413.
He Dengfa, Zhou Lu, Wu Xiaozhi. Formation and evolution and hydrocarbon accumulation in paleo-uplifts in Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 1-413.
- [19] 何登发, 吴松涛, 赵龙, 等. 环玛湖凹陷二叠—三叠系沉积构造背景及其演化[J]. 新疆石油地质, 2018, 39(1): 35-47.
He Dengfa, Wu Songtao, Zhao Long, et al. Tectono-depositional setting and its evolution during Permian to Triassic around Mahu sag, Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018, 39(1): 35-47.
- [20] 何登发, 陈新发, 张义杰, 等. 准噶尔盆地油气富集规律[J]. 石油学报, 2006, 25(3): 1-10.
He Dengfa, Chen Xinfu, Zhang Yijie, et al. Enrichment characteristics of oil and gas in Jungar basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 25(3): 1-10.
- [21] 何登发, 周路, 唐勇. 准噶尔盆地侏罗系西山窑组与头屯河组间不整合特征与油气聚集[J]. 古地理学报, 2007, 9(3): 227-236.
He Dengfa, Zhou Lu, Tang Yong. Characteristics of unconformity between the Xishanyao Formation and Toutunhe Formation of Middle Jurassic in Junggar basin and its significance in petroleum exploration

- [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 227–236.
- [22] 何登发,陈新发,况军,等.准噶尔盆地车排子-莫索湾古隆起的形成演化与成因机制[J]. *地学前缘*, 2008, 15(1): 42–55.
- He Dengfa, Chen Xinfu, Kuang Jun, et al. Development and genetic mechanism of Chepaizi-Mosuowan uplift in Junggar basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 42–55.
- [23] 唐勇,徐洋,瞿建华,等.玛湖凹陷百口泉组扇三角洲群特征及分布[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(6): 628–635.
- Tang Yong, Xu Yang, Qu Jianhua, et al. Fan-delta group characteristics and its distribution of the Triassic Baikouquan reservoirs in Mahu sag of Junggar basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(6): 628–635.
- [24] 何苗,张利伟,刘勇,等.准噶尔盆地西北缘三叠纪沉积体系与环境[J]. *地质通报*, 2017, 36(6): 1032–1042.
- He Miao, Zhang Liwei, Liu Yong, et al. Sedimentary system and environment research on the Triassic strata in northwest Junggar basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(6): 1032–1042.
- [25] 胡素云,蔚远江,董大忠,等.准噶尔盆地腹部断裂活动对油气聚集的控制作用[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 1–7.
- Hu Suyun, Yu Yuanjiang, Dong Dazhong, et al. Control of fault activity on hydrocarbon accumulation in central Junggar basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2006, 27(1): 1–7.
- [26] Tang J Y, He D F, Li D, et al. Large-scale thrusting at the northern margin of Junggar basin since Cretaceous and its implications for the rejuvenation of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6(2): 227–246.
- [27] 沈扬,李晓剑,贾凡建,等.准噶尔西北缘风城期构造沉积格局及源岩分布[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(4): 16–20.
- Shen Yang, Li Xiaojian, Jia Fanjian, et al. Structural sedimentary pattern and source rock distribution of Fengcheng Formation at northwestern margin of the Junggar basin [J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2015, 22(4): 16–20.
- [28] 蔚远江,何登发,雷振宇,等.准噶尔盆地西北缘前陆冲断带二叠纪逆冲断裂活动的沉积响应[J]. *地质学报*, 2004, 78(5): 612–625.
- Yu Yuanjiang, He Dengfa, Lei Zhenyu, et al. Sedimentary response to the activity of the Permian thrusting fault in the foreland thrust belt of the northwestern Junggar basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(5): 612–625.
- [29] 李锦轶,何国琦,徐新,等.新疆北部及临区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. *地质学报*, 2006, 80(1): 148–168.
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, et al. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(1): 148–168.
- [30] He D F, Li D, Fan C, et al. Geochronology, geochemistry and tectonostratigraphy of Carboniferous strata of the deepest well Moshen-1 in the Junggar basin, northwest China: Insights into the continental growth of Central Asia [J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(2): 560–577.
- [31] Li D, He D F, Santosh M, et al. Tectonic framework of the northern Junggar Basin Part I: The eastern Luliang uplift and its link with the eastern Junggar terrane [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(3): 1089–1109.
- [32] Li D, He D F, Santosh M, et al. Tectonic framework of the northern Junggar basin part II: The island arc-basin system of the western Luliang uplift and its link with the west Junggar terrane [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(3): 1110–1130.
- [33] Li D, He D F, Yang Y H, et al. Petrogenesis of mid-Carboniferous volcanics and granitic intrusions from western Junggar basin boreholes: geodynamic implications for the Central Asian Orogenic Belt in northwest China [J]. *International Geology Review*, 2014, 56(13): 1668–1690.
- [34] Yang X F, He D F, Wang Q C, et al. Tectonostratigraphic evolution of the Carboniferous arc-related basin in the east Junggar basin, northwest China: Insights into its link with the subduction process [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(3–4): 1030–1046.
- [35] 王京彬,徐新.新疆北部后碰撞构造演化与成矿[J]. *地质学报*, 2006, 80(1): 23–430.
- Wang Jingbin, Xu Xin. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(1): 23–30.
- [36] 徐学义,李荣社,陈隽璐,等.新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1521–1534.
- Xu Xueyi, Li Rongshe, Chen Junlu, et al. New constraints on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1521–1534.
- [37] 赵重远.试说中国后海西地台的存在和其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 26(1): 16–21.
- Zhao Zhongyuan. Post-Hercynian platforms in China and its geological significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 26(1): 16–21.
- [38] Zhao J M, Liu G D, Lu Z X, et al. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin [J]. *Tectonophysics*, 2003, 376(3): 199–239.
- [39] 杨文孝,况军,徐长胜.准噶尔盆地大油田形成条件和预测[J]. *新疆石油地质*, 1995, 16(3): 201–211.
- Yang Wenxiao, Kuang Jun, Xu Changsheng. Formation condition and prediction of giant oilfields in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1995, 16(3): 201–211.
- [40] 何登发,管树巍,张年富,等.准噶尔盆地哈拉阿拉特山冲断带构造及找油意义[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(1): 267–270.
- He Dengfa, Guan Shuwei, Zhang Nianfu, et al. Thrust belt structure and significance for petroleum exploration in Hala' alat mountain in northwestern margin of Junggar basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(1): 267–270.
- [41] 况军,齐雪峰.准噶尔前陆盆地构造特征与油气勘探方向[J]. *新疆石油地质*, 2006, 27(1): 5–9.
- Kuang Jun, Qi Xuefeng. The structural characteristics and oil-gas explorative direction in Junggar foreland basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2006, 27(1): 5–9.