

准噶尔盆地陆东地区石炭系地震波组及构造-地层层序特征

张磊¹,何登发¹,李滌¹,郑孟林²,吴松涛¹,梁宇生¹,杨思迪²

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083; 2. 中国石油 新疆油田分公司 勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000]

摘要:利用最新钻井与地震资料,对准噶尔盆地陆东地区石炭系的地震波组特征展开研究,在此基础上划分了研究区构造-地层层序。通过分析对比30口井的合成地震记录,识别出4个主要反射界面: T_0 , T_1 , T_2 和 T_3 。 T_0 和 T_2 界面反射波振幅强、连续性好、波形稳定,为本区主要的区域性不整合,也是关键的对比标志层。在此基础上,总结了4个反射界面间各地震地层的波组特征,其中 T_1 与 T_2 之间的反射波组整体振幅弱、中-低频和中-差连续,反射外形呈楔状,可作为陆东地区对比的标志层。在不整合面追踪的基础上,结合露头、古生物资料和年代学资料等,将研究区石炭系划分为4套构造层,从下至上分别为:下沉积岩段 C_1-s (滴水泉组)、下火山岩段 C_1-v (松客尔苏组下亚组)、上沉积岩段 C_2-s (松客尔苏组上亚组)和上火山岩段 C_2-v (巴山组)。研究认为,石炭系各构造层的分布受基底、构造背景、发育位置及后期改造作用的控制,在弧内断陷和弧前盆地等部位发育的厚度相对较大,在岛弧凸起部位厚度较小;早、晚石炭世未发育的两期构造挤压运动,导致 C_1-v 与 C_2-s 之间的地层及 C_2-v 构造层顶部遭受剥蚀,并使石炭纪断陷发生反转。

关键词:地震波组特征;构造-地层层序;石炭系;陆东地区;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Characteristics of seismic wave groups and tectono-stratigraphic sequences of the Carboniferous, eastern Luliang uplift, Junggar Basin

Zhang Lei¹, He Dengfa¹, Li Di¹, Zheng Menglin², Wu Songtao¹, Liang Yusheng¹, Yang Sidi²

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Exploration and Development of Xinjiang Oilfield Branch Company Ltd., PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: We explored the characters of seismic wave groups of the Carboniferous in the eastern Luliang uplift of Junggar Basin under the guidance of the latest drilling and seismic data. Accordingly, the tectono-stratigraphic sequences were identified in the study area. Four main reflection interfaces, namely T_0 , T_1 , T_2 and T_3 , were identified based on analysis and correlation of synthetic seismograms of 30 wells. Among them, the interface T_0 and T_2 are characterized by high amplitude, good continuity, and stable waveform of reflective waves, thus are the main regional unconformities and the critical key beds of comparison in the area. Based on that, the seismic wave group characters of each seismic stratum among the four interfaces were summarized. We thus knew that the seismic wave groups between T_1 and T_2 have low amplitude, medium-low frequency and moderate-poor continuity, and wedge-shaped reflection, thus can be used as the key beds of comparison in the eastern Luliang uplift. Then we traced the unconformities, analyzed the outcrop, paleontological and chronological data, and subsequently subdivided the Carboniferous herein into four tectonic layers. From the bottom to the top, they are the lower sedimentary tectonic layer C_1-s (Dishuiquan Formation), lower volcanic tectonic layer C_1-v (Songkaersu lower group), upper sedimentary tectonic layer C_2-s (Songkaersu upper group) and upper volcanic tectonic layer C_2-v (Bashan Formation). The results can be summarized as follows: (1) the distribution of tectonic layers in the Carboniferous is controlled by the basement, tectonic setting, location of development and later modification. Their thickness is relatively large in the intra-arc fault

收稿日期:2018-05-15; 修订日期:2018-07-11。

第一作者简介:张磊(1988—),男,博士研究生,矿产普查与勘探。E-mail:geozhanglei@163.com。

通讯作者简介:何登发(1967—),男,博士,教授,构造地质学。E-mail:hedengfa282@263.net。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05001-001)。

depression and fore-arc basin, while is relatively small on the island arc convex; (2) two tectonic compression activities developed at the end of the Early and Late Carboniferous respectively lead to the denudation of the strata between C_1-v and C_2-s and that on top of the C_2-v , and the inversion of the fault depression in the Carboniferous.

Key words: character of seismic wave group, tectono-stratigraphic sequence, Carboniferous, eastern Luliang uplift, Junggar Basin

准噶尔盆地石炭系火山机构发育,火山岩相变化剧烈,导致深部地震资料品质普遍较差,地震波组特征普遍很不清楚,很难识别地震反射波的振幅、频率、连续性与内部结构等信息,因此一直以来石炭系地震波组特征研究较为欠缺。地震反射波组特征是地层内部结构的客观反映,与岩层的成分、粒度、密度、岩层面结构与产状等因素密切相关,通过对地震波组特征的研究,能够从地球物理的角度反映出石炭系地质结构的信息^[1]。目前准噶尔盆地石炭系地层划分方案存在诸多争议^[2-3],如何利用波组特征来开展构造-地层层序的划分,也是准噶尔盆地石炭系研究的重点和难点之一。勘探研究表明,石炭系自身发育大量烃源岩^[4-6],石炭系气藏可能为自生自储型,加强对石炭系地质结构的研究,特别是烃源岩展布的刻画,对于石炭系油气勘探具有重要意义。石炭纪是准噶尔盆地海陆过渡的关键构造变革期,而陆梁隆起发育和保存了盆地内相对完整的石炭纪地层^[7-9],是揭示石炭纪地质结构的窗口。加强对研究区构造-地层层序特征的研究不仅对准噶尔盆地石炭纪原型盆地的恢复意义重大,而且对于探索中亚造山带^[10-12]俯冲-增生-造山过程也具有重要启示意义^[13-14]。

随着近年来对深部勘探的投入逐步增大,准噶尔盆地石炭系的研究迎来了新机遇:①新部署了多批高

精度2D地震测线,能较清晰地显示石炭系波组特征及其内幕结构;②大量钻遇石炭系的新钻井和大量取心,为搭建石炭系地层格架和年代学约束打下了基础。本文利用最新地震与钻井等资料,从关键井的合成地震记录制作入手,标定过关键井的高精度2D地震测线,精细追踪石炭系内部主要不整合面,总结、对比石炭系的地震波组特征。在此基础上,结合年代学数据、古生物资料和野外露头,综合划分了陆东地区构造-地层层序,并分析了影响其发育的主要因素。

1 地质概况

1.1 区域构造特征

准噶尔盆地处于西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块的交汇部位,是中亚造山带(CAOB)的重要组成部分。在地理位置上,盆地处于亚洲大陆的中心地带,四周被褶皱山系环绕,西侧为北东-北北东走向的扎伊尔山、谢米斯台山,东北侧为北西走向的阿尔泰山和克拉美丽山,南侧为近东西走向的天山和博格达山,整体呈周缘高中心低、北高南低的近似三角形形态展布^[15-17](图1)。

准噶尔盆地为晚古生代以来的大型叠合前陆盆地^[18-22],自形成以来主要经历了海西、印支、燕山及喜

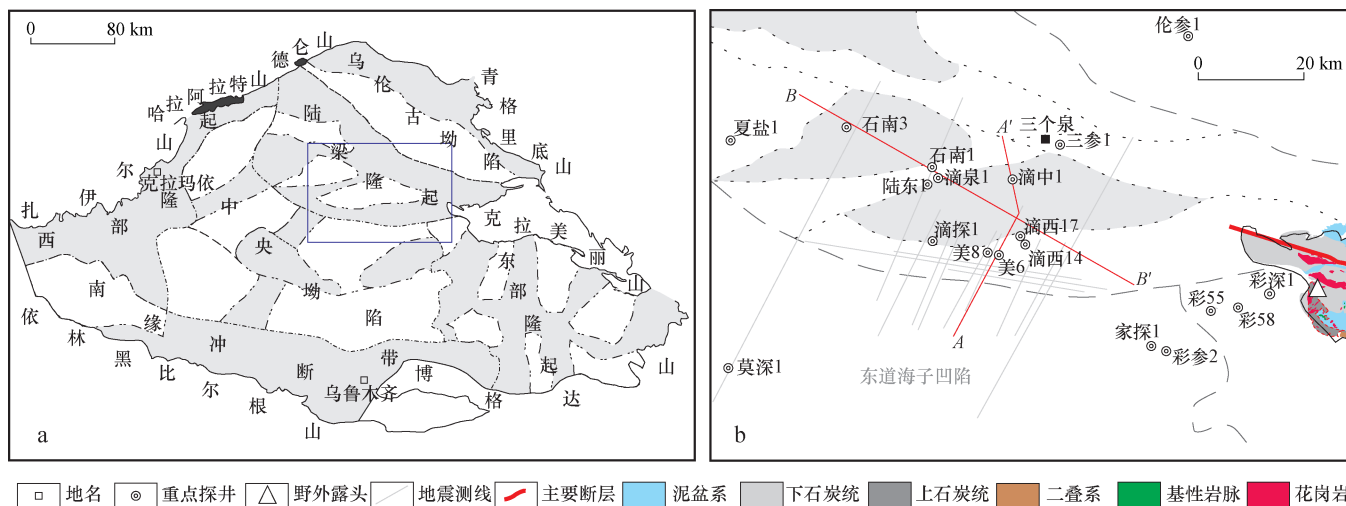


图1 准噶尔盆地腹部地区构造纲要图^[16](修改)

Fig. 1 Tectonic outline of the central Junggar Basin^[16](modified)

马拉雅构造运动^[23-25]。多期构造运动的叠加导致研究区内构造特征复杂,特别是海西期与燕山期的构造运动对陆梁隆起的构造变形起到了决定性作用^[26-28]。前人研究表明,石炭纪不同方向板块的俯冲导致准噶尔地区的洋盆收缩,形成了多个与俯冲背景相关的岛弧地体^[16,29]。准噶尔盆地在早、晚石炭世都经历了拉张-挤压的演化阶段^[2],形成了多个石炭纪断陷。晚二叠世的海西构造运动使盆地发育的石炭纪断陷发生构造反转,海西期是形成盆地现今隆-坳格局的关键时期^[2]。盆地在三叠纪进入统一的坳陷发育阶段,陆梁隆起由南向北发育一系列超覆。侏罗纪末期,受盆地边界断层压扭作用的影响,陆梁隆起再次隆升,造成东段在滴南凸起、滴北凸起和石东凸起缺失上侏罗统^[23]。喜马拉雅期受北天山隆升与向北逆掩冲断的影响,深部断裂再次活动,但陆梁隆起形态仍得到保持。

1.2 地层系统

石炭系广泛分布在准噶尔地区,约占整个上古生界出露总面积的50%以上,主要发育一套火山-沉积岩建造,具有岩相复杂、厚度变化大的特点^[30]。不同地区石炭系岩相差异很大,且后期遭受了强烈的改造和破坏,使准噶尔地区石炭系的划分与对比较为困难,存在较大的争议。

自20世纪50年代以来,已有多个研究机构在准噶尔盆地周缘露头开展了区域地质调查,为盆缘露头区地层的研究提供了重要依据。在全国地层划分对比研究《新疆维吾尔自治区岩石地层》划分方案中,准噶尔地区属于北疆地层区,与研究区相邻的是卡拉麦里地层小区。新疆地矿局在该区露头的1:200 000地质填图中,将石炭系由下至上分为下石炭统松喀尔苏组下亚组(C_1s^a)、松喀尔苏组上亚组(C_1s^b)、上石炭统巴塔玛依内山组(C_2b) (以下简称巴山组)和石钱滩组(C_2s) (图2)。松喀尔苏组下亚组不整合覆盖于中泥盆统卡拉麦里组之上,为一套火山碎屑岩建造,厚达2 345 m,岩性以中酸性熔岩火山角砾岩、流纹岩、流纹质英安斑岩为主;松喀尔苏组上亚组岩性主要为凝灰质砾岩和凝灰质砂岩,厚743 m,其中化石植物较多,属蕨类、种子蕨类植物叶子,如 *Spirifer attenuates* Sowerby. 等,大多为石炭纪产物。巴山组主要为中-酸性熔岩夹碳质页岩、煤线和凝灰质砂岩,自西向东,总体趋势由中酸性过渡为中-基性,炭质页岩尖灭极快;石钱滩组主要为砂砾岩、炭质页岩及泥灰岩,厚度为69 m,上覆与三叠系上仓房沟组不整合接触。

对于盆地内石炭系的层位划分,前人提出多种方案。Yang^[3] (2012)将准东地区石炭系划分为4套构造层,分别是VSS Ca(杜内阶)、VSS Cb(维宪阶)、VSS Cc(巴什基尔阶)和VSS Cd(莫斯科阶-格舍尔阶);Li^[2] (2015)将准东地区石炭系划分为下火山岩段(下石炭统)、沉积岩段(上石炭统)和上火山岩段(上石炭统)3套构造层;新疆油田分公司的划分方案为 C_1d (滴水泉组)、 C_1s^a (松喀尔苏组下亚组)、 C_1s^b (松喀尔苏组上亚组)和 C_2b (巴塔玛依内山组)4套构造层(图2)。由于地震品质不高,在地震剖面上较难清晰识别出各构造层之间的不整合面,且深部构造层缺乏年代学约束,因此在诸多构造地层划分方案中均存在证据不够充分的问题。从目前的钻探成果来看,盆地内石炭系的岩性与露头区有一定的相似性,主要以一套火山-沉积建造为主。下石炭统主要发育中酸性火山岩、火山角砾岩和凝灰岩;上石炭统下部发育一套火山岩、火山碎屑岩和碎屑沉积岩,上部主要发育中基性火山岩。

由于火山岩相横向变化迅速,如何合理地开展盆地内石炭系与相邻露头对比,是北疆地区石炭系研究的重点,而充分利用地震波组特征和现有可靠的年代学资料是建立研究区石炭系等时年代-地层格架的关键。

2 合成地震记录与波组特征

2.1 合成地震记录

应用合成地震记录标定地层是连接地质、测井和地震资料的有效方法^[1],合成记录的质量直接影响到后续地震层序的建立。为了精细刻画石炭系的波组特征,本次研究共选取了30口井进行标定,其中约有20口井的井震匹配度较高(表1),本文选取了其中两口典型井进行展示(图3,图4)。

滴中1井为滴水泉凹陷代表井,完钻深度为4 800 m,彩58井为五彩湾凹陷的代表井,完钻深度为4 000 m,两口井均完整钻遇了沉积岩段。滴中1井石炭系顶部为一套灰色玄武岩,夹红褐色安山岩,波速 $V_p \approx 4\ 141 \sim 4\ 495$ m/s,其上覆地层为三叠系克拉玛依组,岩性为褐色泥岩夹灰色细砂岩,波速 $V_p \approx 3\ 351 \sim 3\ 631$ m/s,二者界面(T_0)上、下存在明显的波阻抗差异(图3);彩58井石炭系顶部为厚套火山角砾岩夹安山岩,上覆二叠系将军庙组底部为灰白色钙质细砂岩与褐色泥岩,二者界面(T_0)上下的岩性差异明显(图4)。整体上,石炭系与上覆二叠系之间的界面(T_0)反射特征清晰,

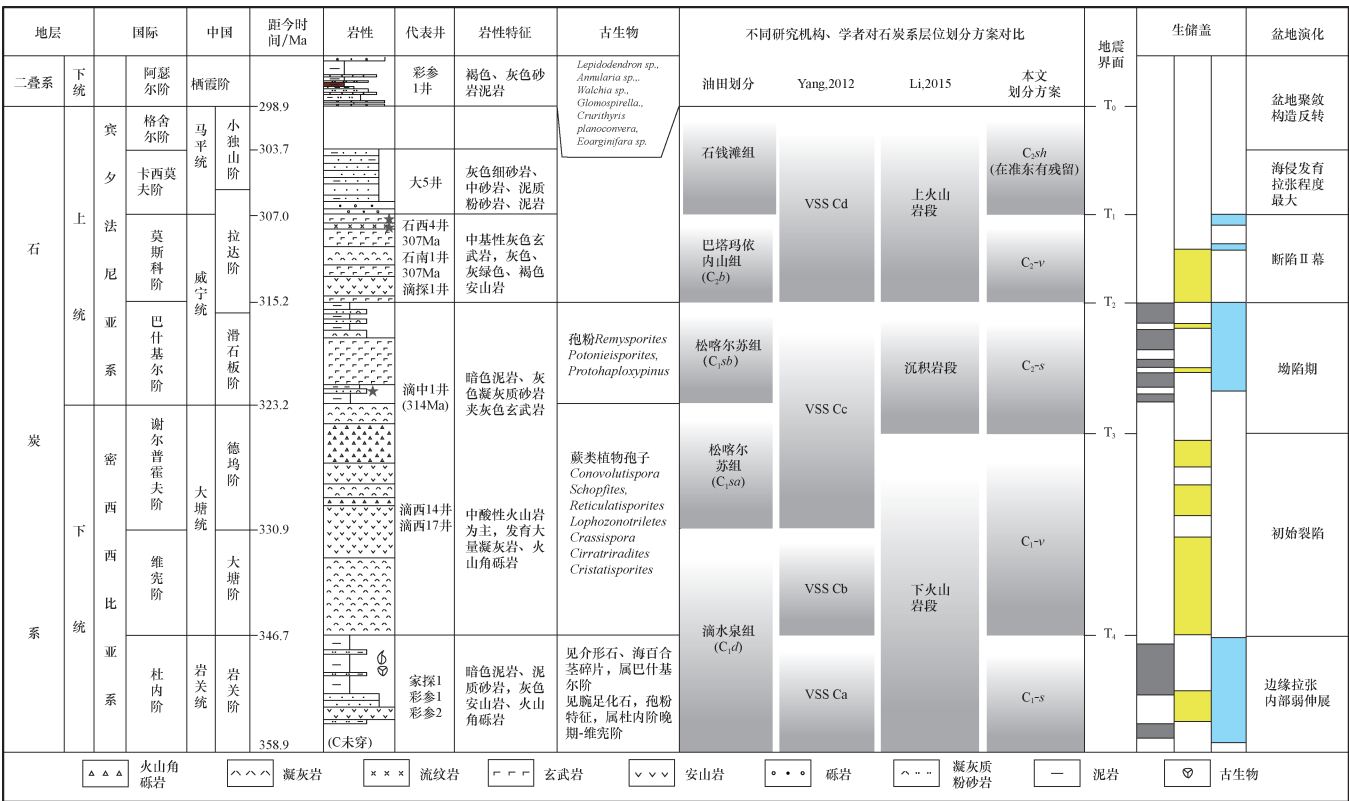


图2 准噶尔盆地陆东地区地层系统与盆地演化阶段

Fig. 2 Stratigraphic system and basin evolutionary stages of the eastern Luliang uplift, Junggar Basin.

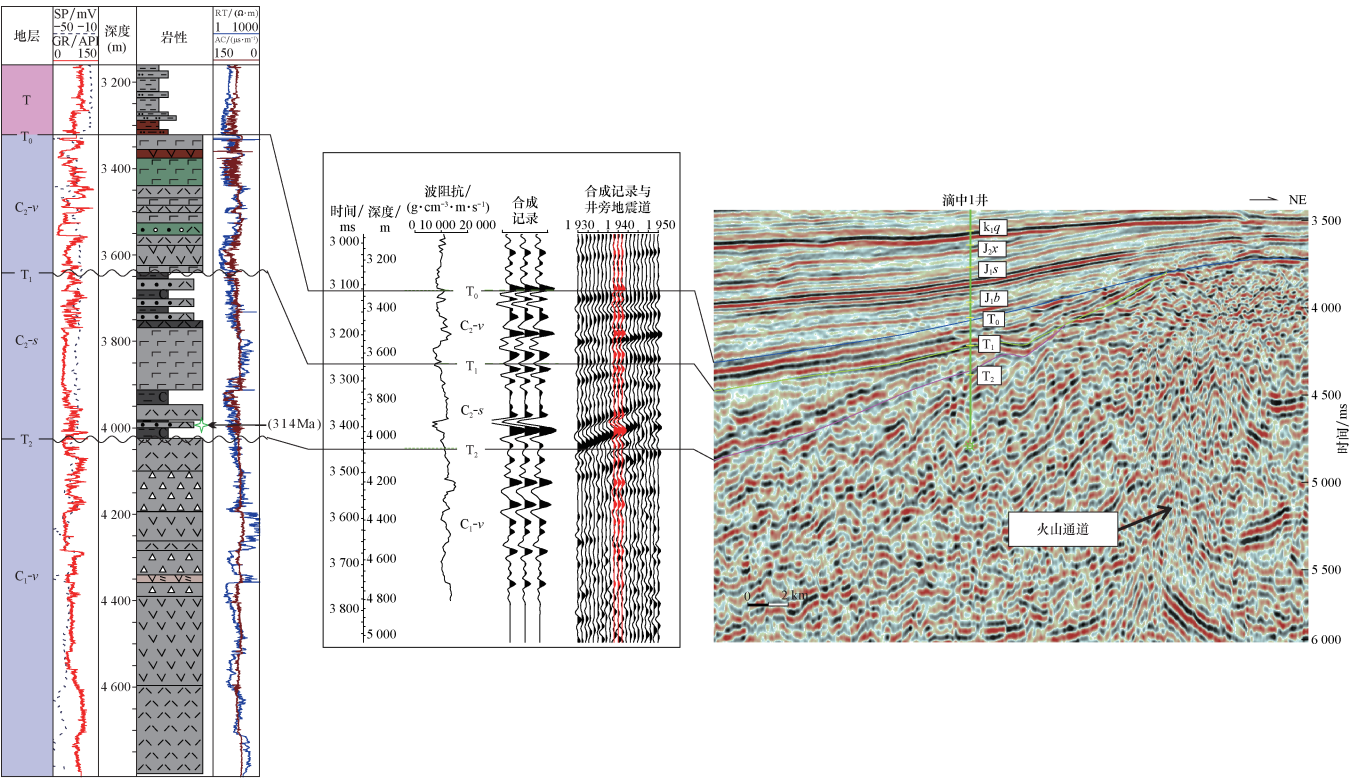


图3 准噶尔盆地滴水泉凹陷滴中1井石炭系合成记录(井位见图1)

Fig. 3 Synthetic seismograms of the Carboniferous sequences in Well Dizhong-1, Dishuiquan Sag, Junggar Basin.

(see Fig. 1 for well location)

表 1 准噶尔盆地腹部石炭系地震波组特征对比

Table 1 Comparison of seismic wave groups of the Carboniferous in the central Junggar Basin

系	统	国际地层	距今时间/Ma	地震界面/构造层	石东凸起	三个泉凸起	滴北凸起	滴水泉凹陷	滴南凸起	白家海凸起	五彩湾凹陷
二叠系	下统	阿瑟尔阶	298.9	T_0							P2j
石炭系	上统	宾夕法尼亚阶	303.7	C_{2-v}							中-弱振幅 中-低频 差连续(顶) 火山角砾岩
		莫斯科阶	307.0								强振幅 中-高频 中-高连续
		杜内阶	315.2	T_1	中-强振幅 中-低频 中等连续 √	强振幅 中-低频 高连续 √	中等振幅 中等频率 中-差连续 √	中-强振幅 高频 中等连续	强振幅 低频 高连续		弱振幅 中-低频 中-差连续(顶)
		巴什基尔阶	323.2	C_{2-s}							强振幅 中-高频 中-高连续(底)
	下统	密西西比阶	330.9	C_{1-v}							中等振幅 中等频率 中等连续 √
		维宪阶	346.7								中-强振幅 中-低频 中等连续 √
		杜内阶	358.9	T_3							中-弱振幅 中-频率 中-差连续 √
		杜内阶	358.9	C_{1-s}							
	泥盆系			未钻穿 代表井	滴泉1、石南1 陆东1	陆6	三参1	滴中1	滴探1、美8、美6、 滴西14、滴西17、 滴西18	彩参2、家探1	彩深1、彩参1 彩55、彩58 彩25、彩27

逐渐减薄至尖灭,滴南凸起上沉积层厚度变小,火山岩比例增加,反射波组呈中-强振幅、低频、中等连续。五彩湾凹陷的波组特征为中-强振幅、中等频率、中等连续,虽然此处层厚度大(彩深1井),但火山岩(主要为安山岩与凝灰岩)的比例高,所以也能产生较好的地震反射波。

T_2/T_3 之间波组特征:整体上反射波振幅强、中等频率、中等连续。在滴水泉凹陷内,波组为中等振幅、中-低频和中等连续,而在两侧的滴南凸起、滴北凸起及斜坡带上,波组特征为中-弱振幅、中-低频、中-差连续。这是因为该构造层发育时期,滴南凸起和滴北凸起上发育火山机构,火山爆发时火山碎屑物质快速堆积,形成厚套的火山角砾岩和凝灰岩,反射特征不清楚;凹陷内远离物源,火山溢流相与碎屑岩沉积增多,反射特征增强。五彩湾地区该层上段主要发育大套安山岩,波组表现为中等振幅、中等频率和中等连续;下段主要发育火山角砾岩,波组表现为弱振幅、中-低频率和差连续。

T_3 之下波组特征:只在五彩湾凹陷有钻遇,波组特征为强振幅、中等频率、中-高连续。该套波组顶部 T_3 界面由泥岩与上覆安山岩产生,波阻抗差异大,反射特征清晰,其底界暂未钻穿。

通过对 T_0, T_1, T_2, T_3 反射界面的波组特征分析,及对这 4 个界面之间的地震波组特征进行总结与对

比,可以将研究区石炭系初步划分为 4 套地震地层,即: T_0/T_1 之间地震地层、 T_1/T_2 之间地震地层、 T_2/T_3 之间地震地层和 T_3 之下地震地层。

3 构造-地层特征

3.1 构造-地层划分的方法

本文构造层划分以关键井的井震标定为基础,在地震剖面上识别出主要不整合面,结合地震波组特征划分出地震地层。通过时-深关系将地震剖面上的不整合面标定在井上,并依据不整合面的追踪结果,开展相应的连井对比。对于不同构造带上的不整合面,用古生物和年代学数据进行约束,限定其时限,开展对比,最后用相同的方法开展盆内与相邻露头之间的对比,最终确定出研究区石炭系的划分方案。

3.2 不整合特征

在地震地层研究中,不整合面上、下地层的接触关系通常可以分为 4 种类型:削蚀-超覆型、削蚀-整一型、整一-超覆型和整一-整一型^[31]。盆地内,不整合类型通常由凹陷内的整一-整一型向隆起斜坡的削蚀-超覆型向隆起顶部的削蚀-整一型逐渐变化^[32]。

准噶尔盆地石炭纪经历了多期构造运动,形成了与之相应的多个不整合。在 30 口钻井标定的基础上,研究区石炭系可识别出 4 套区域性不整合面。

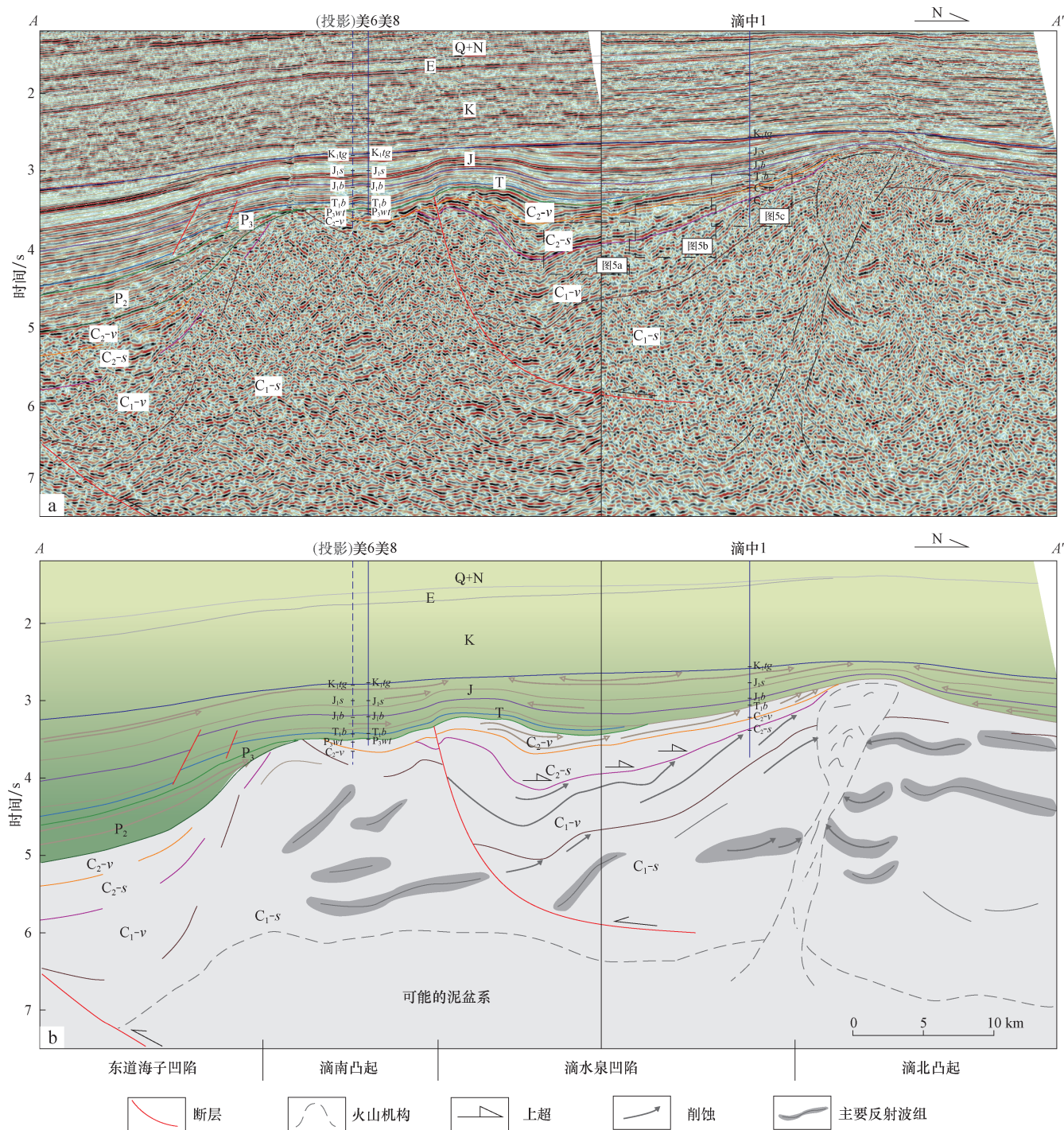


图5 准噶尔盆地滴水泉凹陷A—A'地震剖面及解释方案(剖面位置见图1b)

Fig. 5 Seismic profile A—A' of Dishuiquan Sag in Junggar Basin, and its geological interpretation(see Fig. 1b for profile location)

a. 地震剖面; b. 地质结构剖面

T_3 不整合:界面之上构造层与下伏构造层呈高角度不整合接触,如图8、图9中 T_3 之下构造层顶部遭受一定削蚀。

T_2 不整合:为上、下石炭统之间的区域不整合界面,这也是石炭系内部最主要的不整合面;界面之上构造层超覆于下伏构造层之上,超覆特征明显,不整合面之下构造层被削蚀(图5、图7a、7b)。

T_1 不整合:界面之上构造层与下伏构造层之间呈削蚀不整合接触,削蚀特征明显;不整合面之下波组特征为弱振幅、低频、差连续,之上为中—强振幅、中高频、中—高连续,波组特征差异显著(图7c)。

石炭系顶部不整合(T_0):上石炭统、中—下二叠统遭受剥蚀,石炭系与上覆二叠统梧桐沟组甚至三叠系呈不整合接触,该不整合面可全区对比(图5、图6)。

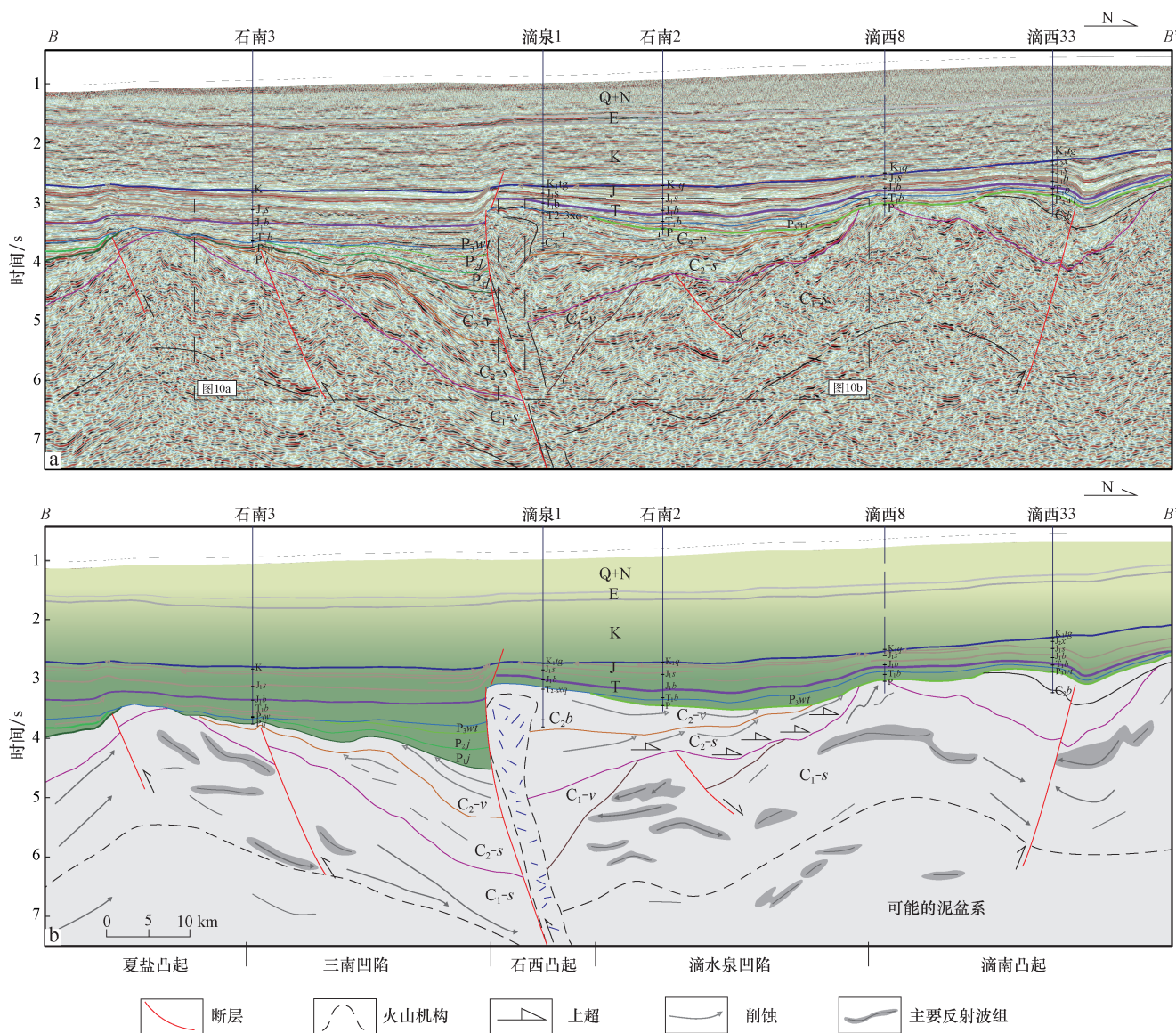


图6 准噶尔盆地滴水泉凹陷B-B'地震剖面及解释方案(剖面位置见图1b)

Fig. 6 Seismic profile B-B' of Dishuiquan Sag in Junggar Basin, and its geological interpretation (see Fig. 1b for profile location)

a. 地震剖面; b. 地质结构剖面

需要说明的是,石炭系与下伏泥盆系在野外露头上呈明显角度不整合接触关系,但由于研究区内泥盆系地震反射杂乱、品质较差,石炭系底界不整合面的识别追踪尚存在一定困难。

3.3 构造层特征

本文以不整合面追踪为基础,总结了不同构造带上石炭系的波组特征,结合露头、古生物资料与年代学资料等,综合分析后将研究区石炭系划分为4套构造层。分别是:下沉积岩段 C_1-s (滴水泉组)、下火山岩段 C_1-v (松喀尔苏组下亚组) 和上沉积岩段 C_2-s (松喀尔苏组上亚组) 和上火山岩段 C_2-v (巴塔玛依内山组)。

1) C_1-s 构造层(杜内阶): 由于 C_1-s 构造层目前尚未被钻穿,其底界尚不确定,本次研究暂选定了一套不整合面作为其底界。从地震剖面上可看出,基底多为杂乱反射特征, C_1-s 构造层的厚度变化相对较小,表明构造环境整体较稳定(图5,图6)。研究区内钻遇该构造层的井较少,主要分布在五彩湾凹陷内。彩深1井钻遇了471 m,岩性主要为深灰色泥岩、灰色凝灰岩、火山角砾岩等;彩55井揭示140 m,岩性主要为黑灰色炭质泥岩,夹薄层灰色火山角砾岩、凝灰质细砂岩等。从岩石组合特征来看, C_1-s 构造层为一套火山活动相关的海相沉积岩序列。彩深1井,4 700 ~ 4 850 m 井段中多产蕨类植物孢子,其中 *Cristatisporites saarensi* 见于准东露头区的滴水泉组,表明此段属于早

石炭世。

2) C_1-v 构造层(维宪阶-谢尔普霍夫阶):该构造层在剖面上表现出明显的断陷特征,在滴水泉凹陷靠近断层的一侧厚度大,在滴南凸起、滴北凸起等远离断层处的厚度迅速减小,并且在南北向剖面中呈现明显的反转特征(图8)。研究区完整钻遇 C_1-v 构造层的井有彩深1井(774 m),彩55井(373 m),部分钻遇的井有滴中1井(772 m),滴西17井(75 m),滴西14井(240 m)美8井(346 m)与莫深1井(694 m)等(图6-7)。 C_1-v 构造层的岩石组合主要包括灰色火山角砾岩、凝灰质角砾岩、凝灰岩、灰色玄武岩、安山岩和凝灰质砂岩等,岩石组合表现出海相火山岩夹少量火山碎屑岩建造的特征。莫深1井,7 114~7 500 m 所见孢粉化石全为黑色,化石结构已被破坏,但在所钻石炭系顶部6 903~7 106 m 井段中发现 *Schopfites*, *Crassispota*, *Cristatisporites*, *Cymbosporites*, *Spelaeotritetes*, *Spinozonotritetes* 和 *Vallatisporites*

等蕨类植物孢子,其时代为石炭纪。莫深1井,6 997.7 m 的凝灰岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(331.7 \pm 3.8) \text{ Ma}^{[33]}$,对应早石炭世维宪期;滴西14井,3 839.5 m 处采集的石炭系凝灰岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(337.2 \pm 4.1) \text{ Ma}^{[2]}$,属于早石炭世维宪期;彩58井,3 803.8 m 采集的凝灰岩样品年龄为 $(325 \pm 4.7) \text{ Ma}$,属于谢尔普霍夫期;在白碱沟露头区, C_1-v 火山岩的年龄为 $(336.6 \pm 3.7 \sim 338.3 \pm 5.2) \text{ Ma}^{[34]}$,表明上述盆内火山岩的年代学结果与白碱沟露头的测试结果一致,均属于维宪期-谢尔普霍夫期。

3) C_2-s 构造层(巴什基尔阶):从连井对比剖面上看, C_2-s 构造层主要发育在滴中凹陷和五彩湾凹陷内(图8,图9),由凹陷中心向两侧凸起带迅速减薄至尖灭,在五彩湾凹陷与滴南凸起之间呈断层接触关系(图5,图6)。相比于 C_1-v 构造层, C_2-s 构造层分布范围更大,在一定区域内可进行横向对比。研究区

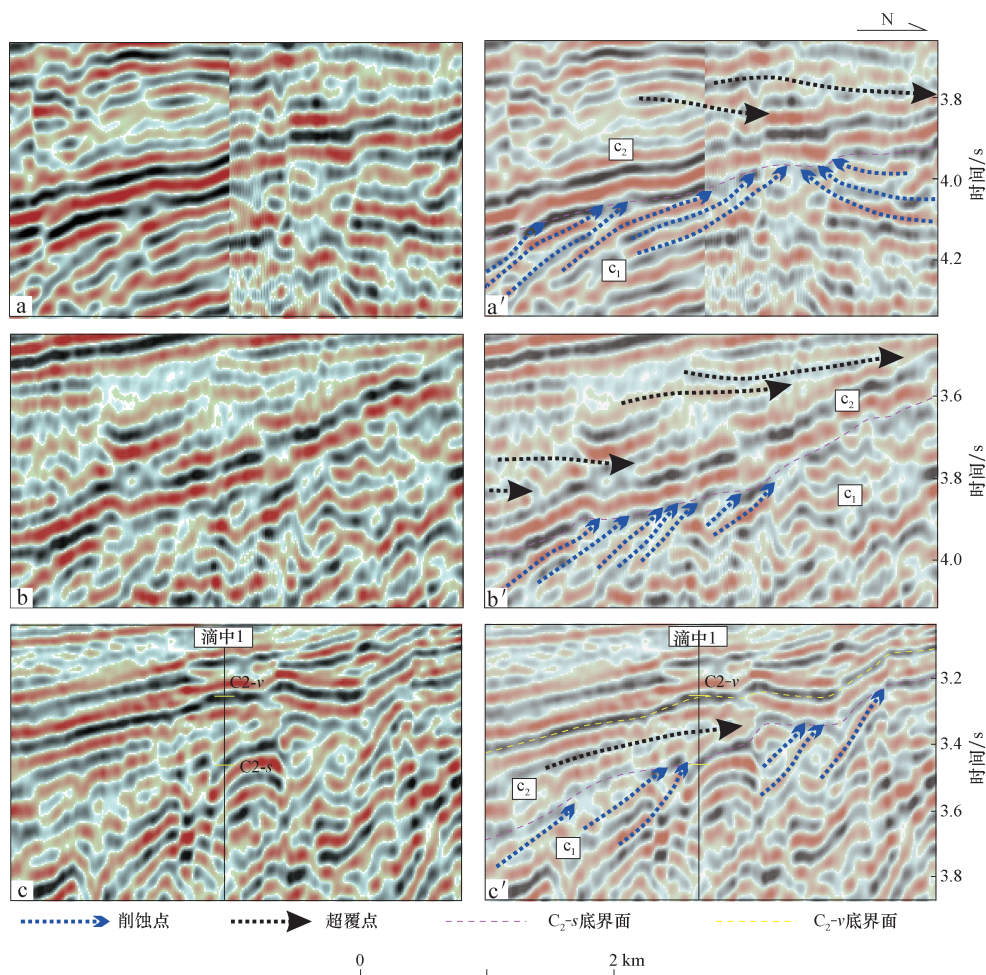


图7 准噶尔盆地上、下石炭统之间的不整合特征(剖面位置见图1b)

Fig. 7 Unconformity features between the Upper and Lower Carboniferous of Junggar Basin (see Fig. 1b for profile location)

a-c. 原始地震剖面; a'-c'. 地震解释剖面

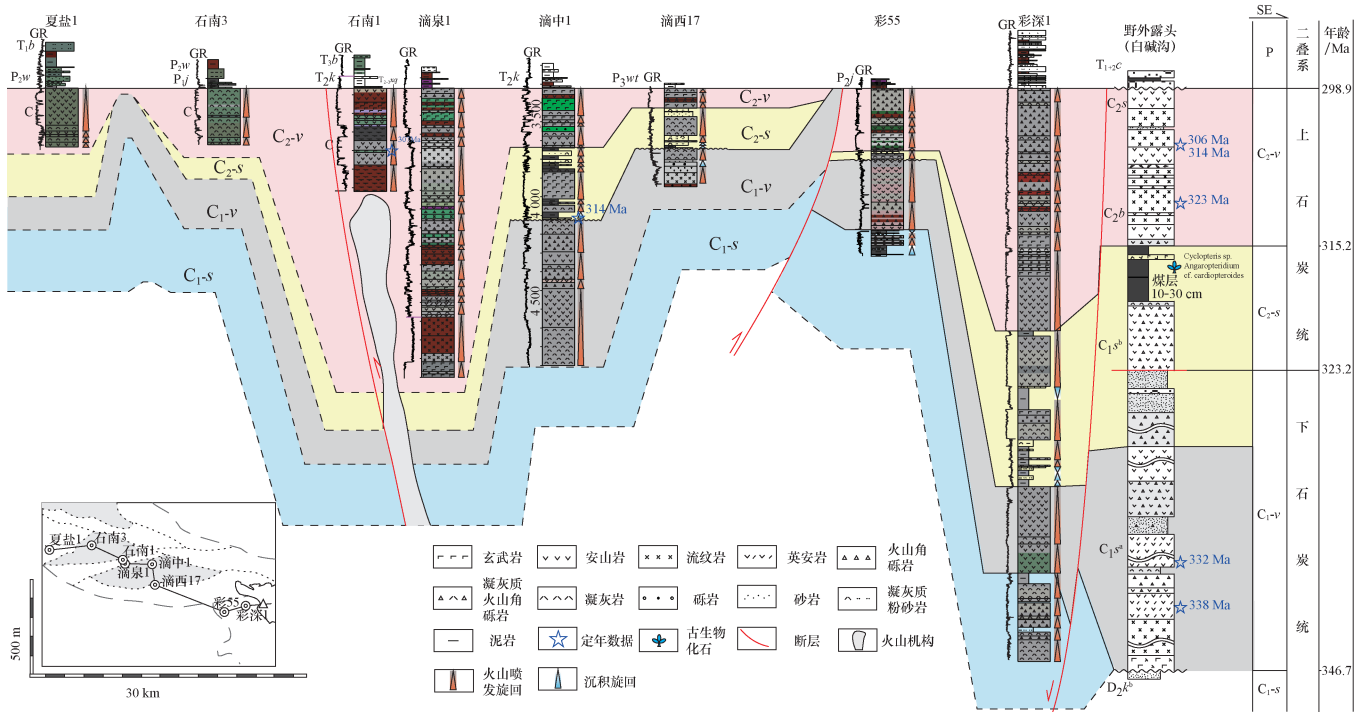


图8 准噶尔盆地夏盐1—石南3—石南1—滴泉1井—滴中1井—滴西17井—彩55井—白碱沟露头连井地层对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 8 Well-tie profile crossing Well Xiayan-1,Shinan-3,Shinan-1,Diquan-1,Well Dizhong-1,Well Dixi-17,Well Cai-55, and Baijiangou outcrop in Junggar Basin(see Fig. 1b for profile location)

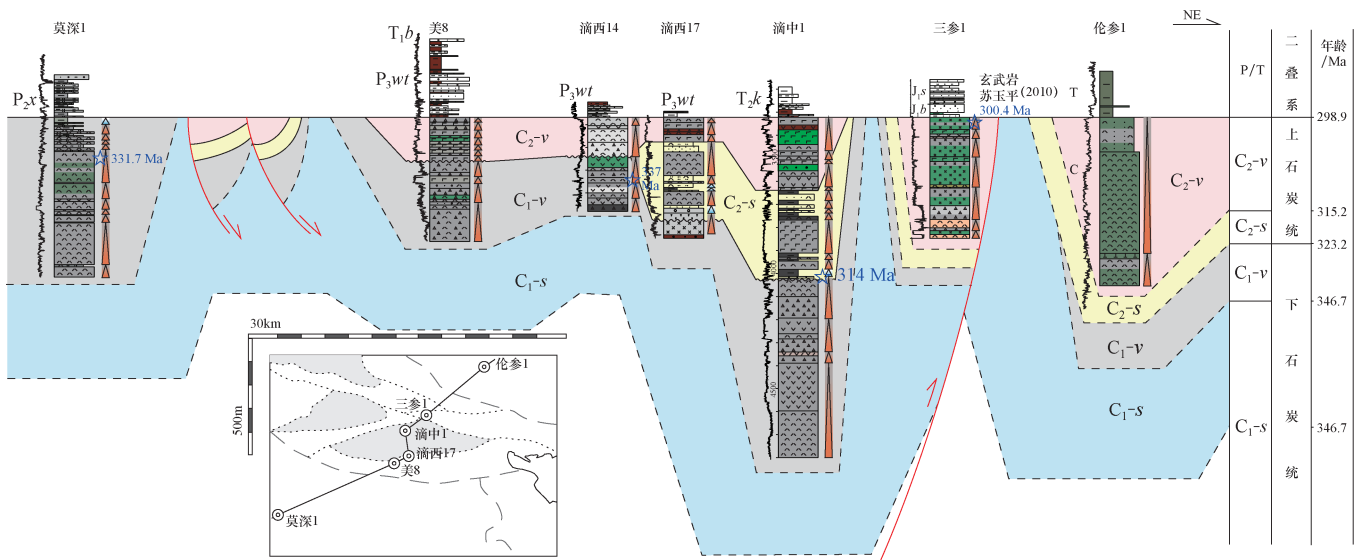


图9 准噶尔盆地莫深1井—美8井—滴西14井—滴西17井—滴中1井—三参1井—伦参1井连井地层对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 9 Well-tie profile crossing Well Moshen-1,Mei-8,Dixi-14,Dixi-17,Dizhong-1,Sancan-1, and Luncan-1(see Fig. 1b for profile location)

内滴中1井、滴西17井和彩深1井完整钻遇该构造层,厚度分别为387,345和830 m,岩性主要为碎屑岩沉积段(黑色碳质泥岩、凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩)与火山岩段(深灰色凝灰岩、灰色玄武岩、安山岩)互

层,岩性组合整体上为一套火山岩、火山碎屑岩建造。滴西17井沉积段在3 870~4 000 m产大量单囊花粉*Remysporites*,表明其可能为晚石炭世。在白碱沟露头的巴山组碳质页岩中发育大量石炭纪植物化石,主要

为 *Cyclopteris* sp., *Angaropteridium* cf. *cardiopteroids* 等, 其时代一部分为晚石炭世; 滴中1井, 3 998.2 m 处采集的凝灰质砂岩样品, 测定其同位素 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (314.6 ± 1.2) Ma, 表明这套火山碎屑岩的沉积时代为晚石炭世^[2]。

4) C_2-v 构造层(莫斯科阶): 该构造层在研究区都有发育, 整体呈现出断陷特征, 在滴中凹陷的厚度最大, 并在石南1井附近可识别出火山机构特征。 C_2-v 构造层在滴南凸起和滴北凸起的厚度明显减薄, 并且存在明显的削蚀特征。研究区内大部分井均有钻遇 C_2-v 构造层, 如滴中1井(317.4 m)、美8井(191 m)和滴泉1井(1 546 m)等, 岩性主要为褐色火山角砾岩、灰色凝灰岩、绿灰色、深灰色玄武岩和安山岩等中基性火山岩。 C_2-v 构造层的火山岩多呈墨绿色或褐色, 表明晚石炭世的火山喷发可能包括水下和水上两种环境, 但整体表现出偏氧化环境喷发的特征。已有年代学数据显示, 石南1井3 502.5 m 玄武岩样品同位素 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均年龄值为 (308.6 ± 4.7) Ma^[35]; 石西4井4 592.8 m 和4 608.0 m 处的英安岩和流纹岩样品同位素 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均年龄值为 (297.3 ± 4.4) Ma 和 (307.2 ± 7.9) Ma^[3]; 三参1井2 406.5 m 处的玄武岩样品同位素年龄为 (300.4 ± 1.3) Ma^[36], 以上数据表明 C_2-v 构造层属于晚石炭世莫斯科期。白碱沟露头上部的火山岩年龄为 (306.5 ± 1.5) Ma 和 (314.3 ± 1.9) Ma^[37], 可以与盆内进行对比, 同属于 C_2-v 构造层(图8, 图9)。

4 石炭系构造-地层层序发育的影响因素

4.1 基底

盆地基底的特征对石炭系构造层的分布具有重要控制作用, 特别是对于 C_1-s 构造层。准噶尔盆地是否存在前寒武基底一直存在争议, 近年来越来越多证据显示准噶尔盆地基底属于新生地壳^[2, 37]。Long^[38]根据石炭系火山岩同位素地球化学研究, 认为石炭系火山岩可能形成于洋内岛弧相关环境; Xu^[39]认为盆地周缘造山带中的大量蛇绿岩可作为洋壳基底的证据; 李涤等^[2-3, 8]将巴山组下火山岩厘定为早石炭世岛弧岩浆产物, 并且未发现大量古老的继承性锆石, 表明可能不存在前寒武基底。前人最新的研究成果和关键证据, 均表明准噶尔盆地在早石炭世可能为多岛弧格局, 岛弧的相互拼贴增生构成盆地基底主体。由于早石炭世早期的构造活动相对较弱^[2], C_1-s 构造层发育时,

在岛弧的部位厚度会相对较薄, 在岛弧之间的位置发育厚度会较大。

4.2 构造环境

C_1-v 构造层、 C_2-s 构造层和 C_2-v 构造层发育的厚度, 与所在的构造演化背景和构造位置关系密切。石炭纪准噶尔洋向北部的陆梁岛弧俯冲, 在俯冲带前缘部位可能形成弧前盆地; 早石炭世中-晚期(维宪期)俯冲板片后撤, 导致陆梁岛弧开始伸展, 并在岛弧轴部形成弧内断陷盆地^[2]。 C_1-v 构造层主要对应弧内断陷发育期(图5), 因此在滴水泉凹陷内靠近断层的位置发育的厚度最大。由于这一期发育的断层角度陡倾, 断陷发育的范围相对较小, C_1-v 构造层的范围也相对较小(图10)。在滴南凸起南侧可能发育弧前盆地(图5), C_1-v 构造层在此处的厚度也较大。而对于岛弧高部位如滴南凸起和滴北凸起, C_1-v 构造层基本不发育或厚度非常薄。 C_2-s 构造发育时期盆地进入坳陷沉积阶段, 因此 C_2-s 构造层发育的范围要远大于 C_1-v 断陷, 但分布的范围主要还是在弧内断陷和弧前盆地的位置。晚石炭世中期, 俯冲板片又一次后撤, 断层再次活动, 在弧内断陷发育厚套 C_2-v 构造层, 在岛弧凸起部位厚度较小(图5)。

4.3 后期改造作用

上、下石炭统之间和石炭系顶部均发育大规模区域性不整合(图7, 图10), 分别代表了两期构造挤压运动。 C_2-s 构造层底部普遍发育“下削上超”特征, 与下伏 C_1-v 构造层呈高角度不整合接触, 表明 C_2-s 构造层发育前存在一次构造挤压活动, 地层被抬升, 并导致部分 C_1-v 顶部被削蚀。在盆山连井大剖面上可看出, 白碱沟露头松喀尔苏组上亚组顶部发育一套碎屑岩沉积, 与上石炭统底部的火山角砾岩不整合接触(图8), 但在研究区内并未观察到这部分碎屑岩, 盆内的 C_1-v 构造层直接与上覆 C_2-s 构造层削蚀不整合接触, 且二者之间的不整合规模较大, 因此推测在 C_1-v 与 C_2-s 构造层之间可能还存在一期剥蚀作用。准噶尔洋盆在晚石炭世末闭合, 盆地进入前陆盆地演化阶段^[18], 先期断陷边界断层在晚石炭世末—早中二叠世期间发生反转, 靠近断的位置上拱特征明显(图5, 图6, 图10)。这两期构造挤压活动造成隆起区的构造层遭受剥蚀、改造, 特别是陆梁隆起东段, 隆起区普遍缺失中下二叠统, 甚至部分上石炭统遭受剥蚀, 隆起高部位还缺失中、下三叠统^[40]。

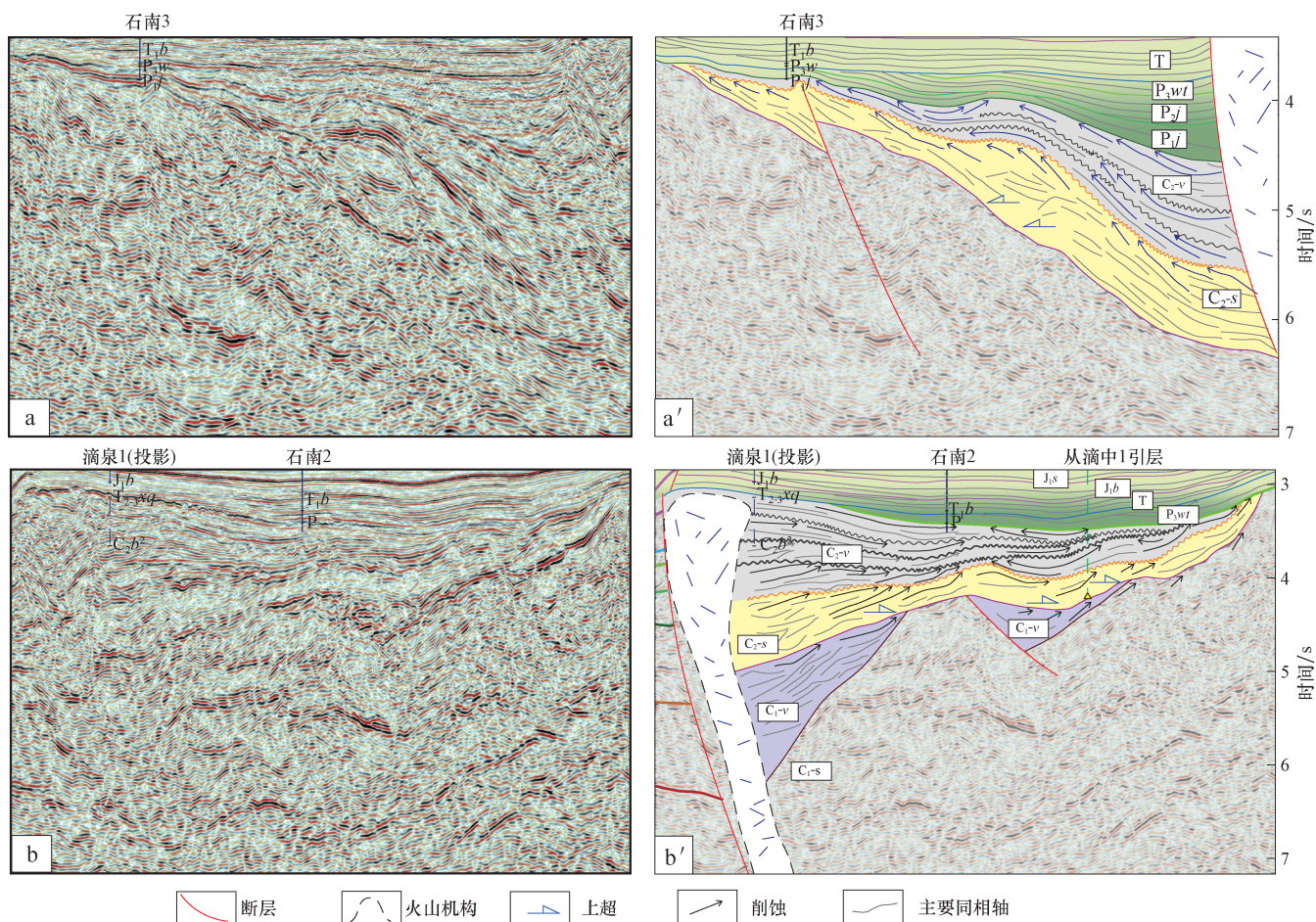


图10 准噶尔盆地滴水泉凹陷石炭纪多幕断陷特征

Fig. 10 Characteristics of the Carboniferous multistage fault depression of Dishuiquan Sag, Junggar Basin

a-b. 地震剖面; a'-b'. 地质结构剖面

5 结论

1) 在30口井合成地震记录的基础上,在石炭系顶部及内部识别出4个主要反射界面, T_0 , T_1 , T_2 和 T_3 , 分别对应4套不整合,其中 T_0 和 T_2 界面反射波振幅强、连续性好,波形稳定,为本区主要的区域性不整合界面,也是关键的可对标志层。该4套不整合,将石炭系划分为 T_0/T_1 , T_1/T_2 , T_2/T_3 之间和 T_3 之下4套地震地层。

2) 总结了本区石炭系4套地震地层的波组特征: T_0/T_1 之间整体反射波振幅强,中低频、高能、连续性好,波形稳定,内部反射结构呈平行-亚平行结构; T_1/T_2 之间整体反射波振幅弱,中-低频和中-差连续,反射外形呈楔状; T_2/T_3 之间整体上反射波振幅强、中等频率、中等连续; T_3 之下地层只在五彩湾凹陷有钻遇,波组特征为强振幅、中等频率、中-高连续。

3) 以不整合面追踪为基础,结合露头、古生物资

料与年代学资料等,综合将研究区石炭系划分为4套构造层,分别是:下沉积岩段 C_1-s (滴水泉组)、下火山岩段 C_1-v (松喀尔苏组下亚组)、上沉积岩段 C_2-s (松喀尔苏组上亚组)和上火山岩段 C_2-v (巴山组)。

4) 石炭系构造层的分布受多种因素控制:①盆地基底对 C_1-s 构造层的影响最显著,在岛弧基底部位的厚度会相对较小,岛弧之间厚度较大;②构造背景和位置对 C_1-v 、 C_2-s 和 C_2-v 构造层的发育关系密切,在弧内断陷、弧前盆地的厚度相对较大,岛弧凸起部位厚度较小;③早、晚石炭世末发育了两期构造挤压运动,分别导致 C_1-v 与 C_2-s 之间的构造层和 C_2-v 构造层顶部遭受剥蚀,并使石炭纪断陷发生反转。

致谢:本文地震、钻井与测井等资料均由新疆油田分公司勘探开发研究院提供,在此表示感谢!

参考文献

- [1] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 东营:石油大学出版社,2009:5-8.

- Lu Mengji. The principle of seismic exploration [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2009: 5–8.
- [2] 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 East Junggar terrane [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(3): 1089–1109.
- [3] Yang X F, He D F, Wang Q C, et al. Tectono-stratigraphic 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.
- [4] 廖健德, 王绪龙, 向宝力, 等. 准噶尔盆地莫索湾地区油气成藏分析 [J]. *天然气工业*, 2004, 24(09): 15–18.
- Liao Jiande, Wang Xulong, Xiang Baoli, et al. Analysis of hydrocarbon accumulation in Mosuowan area in Junggar basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(09): 15–18.
- [5] 向宝力, 王绪龙, 赵孟军, 等. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系源岩演化及成藏时序 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(03): 347–352.
- Xiang Baoli, Wang Xulong, Zhao Mengjun, et al. Evolution of the Carboniferous source rocks and hydrocarbon accumulation sequence in Ludong-Wucuiwan area, the Junggar basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(03): 347–352.
- [6] 余腾孝, 曹自成, 徐勤琪, 等. 准噶尔盆地北部古生代构造演化与石炭系烃源岩 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(01): 91–97.
- Yu Tengxiao, Cao Zicheng, Xu Qinqi, et al. The Paleozoic tectonic evolution and the Carboniferous source rocks in the northern Junggar basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(01): 91–97.
- [7] 李涤, 何登发, 樊春, 等. 准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系玄武岩的地球化学特征及构造意义 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(03): 981–992.
- Li Di, He Dengfa, Fan Chun, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Carboniferous basalt in the Karamaili gas field of Junggar basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(03): 981–992.
- [8] 李涤, 何登发, 唐勇, 等. 准噶尔盆地滴南凸起早石炭世火山岩的成因及其对克拉美丽洋闭合时限的约束 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(08): 2340–2354.
- Li Di, He Dengfa, Tang Yong, et al. Genesis of Early Carboniferous volcanic rocks of the Di'nan uplift in Junggar basin: Constraints to the closure time of Kalamaili ocean [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(08): 2340–2354.
- [9] 赵霞, 贾承造, 张光亚, 等. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系中、基性火山岩地球化学及其形成环境 [J]. *地学前缘*, 2008, 15(02): 272–279.
- Zhao Xia, Jia Chengzao, Zhang Guangya, et al. Geochemistry and tectonic settings of Carboniferous intermediate-basic volcanic rocks in Ludong-Wucuiwan, Junggar basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(02): 272–279.
- [10] Scedilengör A M C, Natal'In B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*. 1993, 364(6435): 299–307.
- [11] Xiao W J, Han C, Chao Y, 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): 102–117.
- [12] 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(4): 584–605.
- Li Jinyi, Zhang Jin, Yang Tiannan, et al. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the north Asian orogenic region and its adjacent areas [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(4): 584–605.
- [13] 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻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. A preliminary study on the crustal tectonic framework and its forming processes in northern Xinjiang and its adjacent areas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(1): 148–168.
- [14] 李锦轶, 王克卓, 孙桂华, 等. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1087–1102.
- Li Jinyi, Wang Kezhao, Sun Guihua, et al. Paleozoic active margin slices in the southern Turfan-Hami basin: geological records of subduction of the paleo-Asian Ocean plate in central Asian regions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1087–1102.
- [15] 赵白. 准噶尔盆地的构造特征与构造划分 [J]. *新疆石油地质*, 1993, 14(03): 209–216.
- Zhao Bai. Tectonic features and tectonic division of Junggar basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1993, 14(03): 209–216.
- [16] Bian W, Hornung J, Liu Z, et al. Sedimentary and palaeoenvironmental evolution of the Junggar basin, Xinjiang, Northwest China [J]. *Palaeobiodiversity & Palaeoenvironments*, 2010, 90(3): 175–186.
- [17] 毛治国, 邹才能, 朱如凯, 等. 准噶尔盆地石炭纪火山岩岩石地球化学特征及其构造环境意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(01): 207–216.
- Mao Zhiguo, Zhou Caineng, Zhu Rukai, et al. Geochemical characteristics and tectonic settings of Carboniferous volcanic rocks in Junggar basin. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(01): 207–216.
- [18] 张功成, 陈新发, 刘楼军, 等. 准噶尔盆地结构构造与油气田分布 [J]. *石油学报*, 1999, 20(01): 21–26.
- Zhang Gongcheng, Chen Xinfu, Liu Loujun, et al. Junggar basin structure and distribution of oil and gas fields [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 20(01): 21–26.
- [19] 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(04): 431–440.
- Cai Zhongxian, Chen Fajing, Jia Zhenyuan. Types and structural evolution of the Junggar basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(04): 431–440.
- [20] 况军. 地体拼贴与准噶尔盆地的形成演化 [J]. *新疆石油地质*, 1993, 14(02): 126–132.
- Kuang Jun. Geotectonic collage and formation and evolution of Junggar basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1993, 14(02): 126–132.
- [21] 吴孔友, 查明, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地构造演化与动力学背景再

- 认识[J]. 地球学报, 2005, 26(03): 217-222.
- Wu Kongyou, Zha Ming, Wang Xulong, et al. Further researches on the tectonic evolution and dynamic setting of the Junggar basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(03): 217-222.
- [22] 马宗晋, 曲国胜, 陈新发. 准噶尔盆地构造格架及分区[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(01): 1-6.
- Ma Zongjin, Qu Guosheng, Chen Xinfu. Tectonic framework and zoning of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(01): 1-6.
- [23] 何登发, 翟光明, 况军, 等. 准噶尔盆地古隆起的分布与基本特征[J]. 地质科学, 2005, 40(02): 248-261.
- He Dengfa, Zhai Guangming, Kuang Jun, et al. Distribution and characteristics of paleo-uplift of Junggar basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(02): 248-261.
- [24] 纪友亮, 周勇, 况军, 等. 准噶尔盆地车-莫古隆起形成演化及对沉积相的控制作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(10): 1342-1355.
- Ji Youliang, Zhou Yong, Kuang Jun, et al. The formation and evolution of Chepaizi-Mosuowan paleo-uplift and its control on the distributions of sedimentary facies in the Junggar basin[J]. Science China: Earth Science, 2010, 40(10): 1342-1355.
- [25] 漆家福, 陈书平, 杨桥, 等. 准噶尔-北天山盆地过渡带构造基本特征[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(02): 252-260.
- Qi Jiafu, Chen Shuping, Yang Qiao, et al. Characteristics of tectonic deformation within transitional belt between the Junggar basin and the northern Tianshan Mountain[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(02): 252-260.
- [26] 隋风贵, 林会喜, 赵乐强, 等. 准噶尔盆地周缘隆起带油气成藏模式[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(01): 1-7.
- Sui Fenggui, Lin Huixi, Zhao Leqiang, et al. Hydrocarbon accumulation patterns in peripheral uplift belts of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(01): 1-7.
- [27] 隋风贵. 准噶尔盆地西北缘构造演化及其与油气成藏的关系[J]. 地质学报, 2015, 89(04): 779-793.
- Sui Fenggui. Relationship between tectonic evolution and hydrocarbon accumulation of the Northwestern margin of Junggar basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(04): 779-793.
- [28] 胡秋媛, 董大伟, 赵利, 等. 准噶尔盆地车排子凸起构造演化特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(04): 556-564.
- Hu Qiuyuan, Dong Dawei, Zhao Li, et al. Tectonic evolutionary characteristics and their causes of Chepaizi uplift in Junggar basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(04): 556-564.
- [29] Xiao W J, Qin K Z, Sun S, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Chinese Tianshan: implications for crustal growth of central Asia[C]. EGS-AGU-EUG Joint Assembly, 2003.
- [30] 唐勇, 王刚, 郑孟林, 等. 新疆北部石炭纪盆地构造演化与油气成藏[J]. 地学前缘, 2015, 22(03): 241-253.
- Tang Yong, Wang Gang, Zheng Menglin, et al. Carboniferous basin evolution and its hydrocarbon accumulation in the north of Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(03): 241-253.
- [31] 牟中海, 何琰, 唐勇, 等. 准噶尔盆地陆西地区不整合与油气成藏的关系[J]. 石油学报, 2005, 26(03): 16-20.
- Mou Zhonghai, He Yan, Tang Yong, et al. Relation of unconformity with hydrocarbon accumulation in Luxi area of Junggar basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(03): 16-20.
- [32] 何登发. 不整合面的结构与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(02): 142-149.
- He Dengfa. Structure of unconformity and its control on hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(02): 142-149.
- [33] He D F, Li D. 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: 560-577.
- [34] 王富明, 廖群安, 樊光明, 等. 新疆东准噶尔滴水泉一带早石炭世火山岩年龄及地球化学特征[J]. 地质通报, 2013, 32(10): 1584-1595.
- Wang Fuming, Liao Qun'an, Fan Guangming, et al. Age and geochemical characteristics of the Early Carboniferous volcanic rocks in Dishuiquan area of East Junggar basin, Xinjiang[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(10): 1584-1595.
- [35] 李涤. 准噶尔盆地及邻区石炭纪构造格架与沉积充填演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- Li Di. Carboniferous tectonic framework and sedimentary filling evolution in the Junggar basin and adjacent area, NW China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [36] 苏玉平, 郑建平, Griffin William L, 等. 东准噶尔盆地巴塔玛依内山组火山岩锆石 U-Pb 年代及 Hf 同位素研究[J]. 科学通报, 2010, 55(30): 2931-2943.
- Su Yuping, Zheng Jianping, L Griffin William, et al. Zircon U-Pb and Hf isotopes of volcanic rocks from the Batamayineishan Formation in the eastern Junggar basin[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(30): 2931-2943.
- [37] Su Y P, Zheng J Z, Griffin W L, et al. Geochemistry and geochronology of Carboniferous volcanic rocks in the eastern Junggar terrane, NW China: Implication for a tectonic transition[J]. Gondwana Research, 2012, 22(3-4): 1009-1029.
- [38] Long X P, Yuan C, Sun M, et al. Geochemistry and U-Pb detrital zircon dating of Paleozoic graywackes in East Junggar, NW China: Insights into subduction-accretion processes in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 2012, 21(2-3): 637-653.
- [39] Xu Q Q, Ji J Q, Zhao L, et al. Tectonic evolution and continental crust growth of Northern Xinjiang in northwestern China: Remnant ocean model[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126(11): 178-205.
- [40] 吴晓智, 丁靖, 夏兰, 等. 准噶尔盆地陆梁隆起带构造演化特征与油气聚集[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(03): 277-279.
- Wu Xiaozhi, Ding Jing, Xia Lan, et al. Characteristics of tectonic-evolution and hydrocarbon accumulation of the Luliang uplift, Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(03): 277-279.