

塔里木盆地库车坳陷北部典型露头剖面白垩系巴什基奇克组三段高分辨率层序地层特征

王胜军¹,唐永亮¹,朱松柏¹,谢伟¹,单长安²,聂延波¹,王勇¹,王益民¹,蒋国军¹,邵剑波¹,叶聰琛²

(1. 中国石油塔里木油田公司 克拉油气开发部,新疆 库尔勒 841000; 2. 西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065)

摘要:基于丰富的野外露头实测资料,并结合地表自然伽马测量、元素(Fe, Ca, Mg, B)分析及井下数据,对塔里木盆地库车坳陷北部露头剖面白垩系巴什基奇克组三段层序地层特征进行了系统研究。结果表明,巴什基奇克组三段发育3个特征明显的岩性段,其下部为两期厚层褐灰色中、细砂岩-棕褐色厚层泥岩旋回;中部为大套厚层褐色、褐灰色粉砂岩、细砂岩夹薄层红褐色泥岩;上部为褐灰色粉砂岩、细砂岩与红褐色泥岩互层。地表自然伽马值范围为5~40 API,以齿化钟形和箱形夹齿化平直段为主,这些曲线形态可以较好地与井下进行对比。Fe³⁺和Fe²⁺含量、Ca/Mg含量比及B元素含量在剖面上的变化趋势表明地层旋回特征十分明显,巴什基奇克组古水体经历了浅—深—浅—深—浅—深—浅的变化过程。巴什基奇克组三段长周期旋回界面在野外露头区易于识别对比,根据露头岩性、颜色和层理构造等特征可识别出“向上变深的非对称”和“向上变深再变浅的近对称”两种短期基准面旋回叠加样式,结合自然伽马曲线特征和元素分析可以明确中期旋回。基于此方法,露头剖面巴什基奇克组三段可划分为3个中期旋回(四级层序),6个短期旋回(五级层序),部分剖面缺少1个短期旋回。与更加靠近湖盆中心的钻井相比,露头区往往少发育1个中期旋回和4个短期旋回。露头区MSC1, MSC2与MSC3中期旋回分别对应于井下MSC2, MSC3和MSC4中期旋回,其砂体与泥岩隔夹层具有较为相似的规律。研究成果有利于库车坳陷北部气区优质储层的追踪对比和预测,可以高效指导深层天然气的勘探开发。

关键词:沉积旋回;高分辨率层序地层;巴什基奇克组;露头剖面;深层天然气;白垩系;大北气田;库车坳陷;塔里木盆地
中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

High-resolution sequence stratigraphy of the third member of Cretaceous Bashijiike Formation in a typical outcrop section, northern Kuqa Depression, Tarim Basin

Wang Shengjun¹, Tang Yongliang¹, Zhu Songbai¹, Xie Wei¹, Shan Changan², Nie Yanbo¹,

Wang Yong¹, Wang Yimin¹, Jiang Guojun¹, Shao Jianbo¹, Ye Congchen²

(1. Kela Oil and Gas Development Department, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China; 2. School of Earth Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: A systematic analysis was carried out on a combination of field outcrop data with surface natural gamma ray measurement and element contents (Fe, Ca, Mg and B) as well as well data to characterize the sequence stratigraphy of the third member of Bashijiike Formation in an outcrop section from the northern Kuqa Depression. The results show that the member has three distinct lithologic intervals, with the lower interval characterized by two sedimentary cycles (periods) of thick brownish-gray medium to fine sandstone and thick brown mudstone, the middle interval by a large set of thick brown and brown-gray siltstone, fine sandstone with thin reddish brown mudstone interbeds and the upper interval by alternating brown-gray siltstone, fine sandstone and reddish-brown mudstone. The surface natural gamma curves values range between 5 and 40 API and occur mostly as dented bell curves or flattened boxes with dents in between, which can be readily compared with well logs. The variation trends of Fe³⁺ and Fe²⁺, Ca/Mg ratio and B in the section show striking stratigraphic cycles, corresponding to the paleo-water variation in an order of shallow - deep - shallow - deep - shallow for the Bashijiike Formation. These long-period cycle interfaces in the third member of Bashijiike Formation are contrastive and can be easily identified in outcrops. Observation of the lithology,

收稿日期:2021-12-27;修订日期:2022-05-16。

第一作者简介:王胜军(1985-),男,高级工程师,超深油气藏地质。E-mail: wangsj-tlm@petrochina.com.cn。

通讯作者简介:单长安(1985-),男,博士,副教授,石油与天然气地质。E-mail: shanca@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05051);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2018E-1803)。

color, bedding and other characteristics of the outcrop section reveals two types of short-term base-level cycle superposition patterns, i. e., the “upward-deepening asymmetric” pattern and the “upward-deepening followed by upward-shallowing near-symmetric” pattern; and if combined with the characteristics of natural gamma curves and elemental analysis, medium-term cycles can also be identified. Based on this method, the third member of Bashijiqike Formation in the outcrop can be divided into three medium-term cycles (fourth-order sequences) and six short-term cycles (fifth-order sequences), with one short-term cycle missing from parts of the outcrop. However, compared with data gathered from wells drilled closer to lake basin center, absence of one medium-term cycle and four short-term cycles are often observed in the outcrop. The medium-term cycles of MSC1, MSC2 and MSC3 in the outcrop correspond respectively to the medium-term cycles of MSC2, MSC3 and MSC4 in subsurface, and they share the similar alternating patterns of sand body with mudstone interlayers/barriers. The study may be used to guide gas exploration in the deep of northern Kuqa Depression.

Key words: sedimentary cycle, high-resolution stratigraphy, Bashijiqike Formation, outcrop profile, deep gas, Cretaceous, Dabai Gasfield, Kuqa Depression, Tarim Basin

引用格式:王胜军,唐永亮,朱松柏,等. 塔里木盆地库车坳陷北部典型露头剖面白垩系巴什基奇克组三段高分辨率层序地层特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 804-822. DOI: 10. 11743/ogg20220406.

Wang Shengjun, Tang Yongliang, Zhu Songbai, et al. High-resolution sequence stratigraphy of the third member of Cretaceous Bashijiqike Formation in a typical outcrop section, northern Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43 (4): 804-822. DOI: 10. 11743/ogg20220406.

塔里木盆地库车坳陷北部大北气田是中国“西气东输”的主力气源,主力产气层为白垩系巴什基奇克组,是构造复杂、埋藏超深的微含凝析油大气田^[1-2]。它与克深、克拉、迪那和吐孜区带连片组成了库车坳陷的天然气富集区带,天然气资源潜力超过万亿方,是塔里木油田天然气勘探开发的主力区带^[3]。早白垩世,库车坳陷进入前陆盆地演化阶段,处于构造活动区,其层序地层与构造沉降、湖平面变化、沉积物补给、古地理与古气候等存在密切关系,其中构造因素的影响尤为重要^[4-8]。基于这一特征,前人针对塔里木盆地库车坳陷白垩系开展了大级别的层序地层划分对比研究,基本明确了白垩系三级层序地层格架^[9-16]。然而,针对巴什基奇克组层位的小层层系划分及其特征研究相对较少。夏文新等(2004)将库车坳陷克拉苏构造带白垩系巴西改组和巴什基奇克组各自划分为1个三级层序^[17];林畅松等(2003)将塔里木盆地库车坳陷西部白垩系巴西改组划分为1个三级层序,3~4个四级层序,将巴什基奇克组划分为2~3个三级层序,9个四级层序和15个五级层序^[18]。

大北气田主力产气层白垩系巴什基奇克组埋深普遍超过5 000 m,目前井深普遍超过了7 000 m^[19-21]。超深层天然气井钻井取心成本较高,所以新钻井取心工作目前开展较少,针对大套地层的长井段系统取心也没有。然而,随着大北气田的持续勘探开发,遇到了天然气勘探突破困难、储层非均质性增强的问题,有必

要进一步开展系统基础地质特征研究。为此,笔者与团队重新对大北气田的野外露头进行系统调查和研究,以期指导库车坳陷超深层天然气勘探开发。精细的等时地层层序划分与对比是开展库车坳陷沉积体系和储层特征等后续勘探开发研究的基础^[22-23],因此文章基于典型的野外露头剖面开展了精细层序地层特征研究。根据陆相地层的自身特点,进行了详细野外测量工作,并结合微量元素旋回分析与地表自然伽马值实测等方法,基于Cross高分辨率层序地层学理论,重点对库车坳陷北部大北区段巴什基奇克组三段进行了层序地层等时划分与对比。研究成果将有利于大北气区有利储层的追踪对比和预测,高效指导深层天然气的勘探开发。

1 地质背景与露头剖面

1.1 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部,是盆地的二级负向构造单元,走向总体上与南天山一致,其南侧为塔里木盆地内部的塔北隆起,北侧为南天山隆起,呈NEE向展布^[6]。大北气田位于库车坳陷克拉苏构造带西端(图1a)。对于库车坳陷中生代盆地原型性质还存在一些分歧,部分学者认为库车坳陷是中-新生代发育起来的前陆盆地,盆地形成和发展与天山造山带

形成和活动密切相关,天山造山楔不断向盆地推进的构造负荷是盆地形成演化的根本动力^[24-30]。另有学者认为库车坳陷在晚二叠世—早三叠世,进入了碰撞造山-周缘前陆盆地演化阶段,侏罗纪—古近纪(特别是侏罗纪)属于弱伸展环境发育的山前坳陷,新近纪属于再生前陆盆地^[31-34]。李勇等认为,库车坳陷中生代盆地原型是覆盖在南天山晚古生代增生楔和塔里木克拉通过渡带上的坳陷盆地,沉降-沉积轴线位于造山楔前缘甚至在增生楔之上^[6]。库车坳陷充填的沉积地层为中生界-新生界,内部存在多个不整合界面^[6,9]。其中,白垩系与下伏侏罗系呈平行不整合,局部为角度不整合接触^[35-36]。晚白垩世末,燕山末期运动致使

天山南缘阶段性隆升,导致库车坳陷内部上白垩统基本被剥蚀,下白垩统发育较全,自下而上分为亚格列木组、舒善河组、巴西改组和巴什基奇克组,古近系库姆格列木组直接覆盖于早白垩统之上^[37],呈区域性不整合接触^[38]。白垩系常发育一种特殊的沉积旋回,在不整合面之上首先沉积的是洪积扇砾岩和间歇性河流砂砾岩所构成的冲积沉积物,向上逐渐演变为沙漠湖红色泥岩,在成湖初期或湖退期发育了滨湖相风成砂岩,构成了一大套较为典型的沙漠湖沉积体系。从冲积沉积到湖泊沉积构成总体向上变细的沉积相序组合^[39-40]。

大北气田主要勘探目的层下白垩统巴什基奇克组

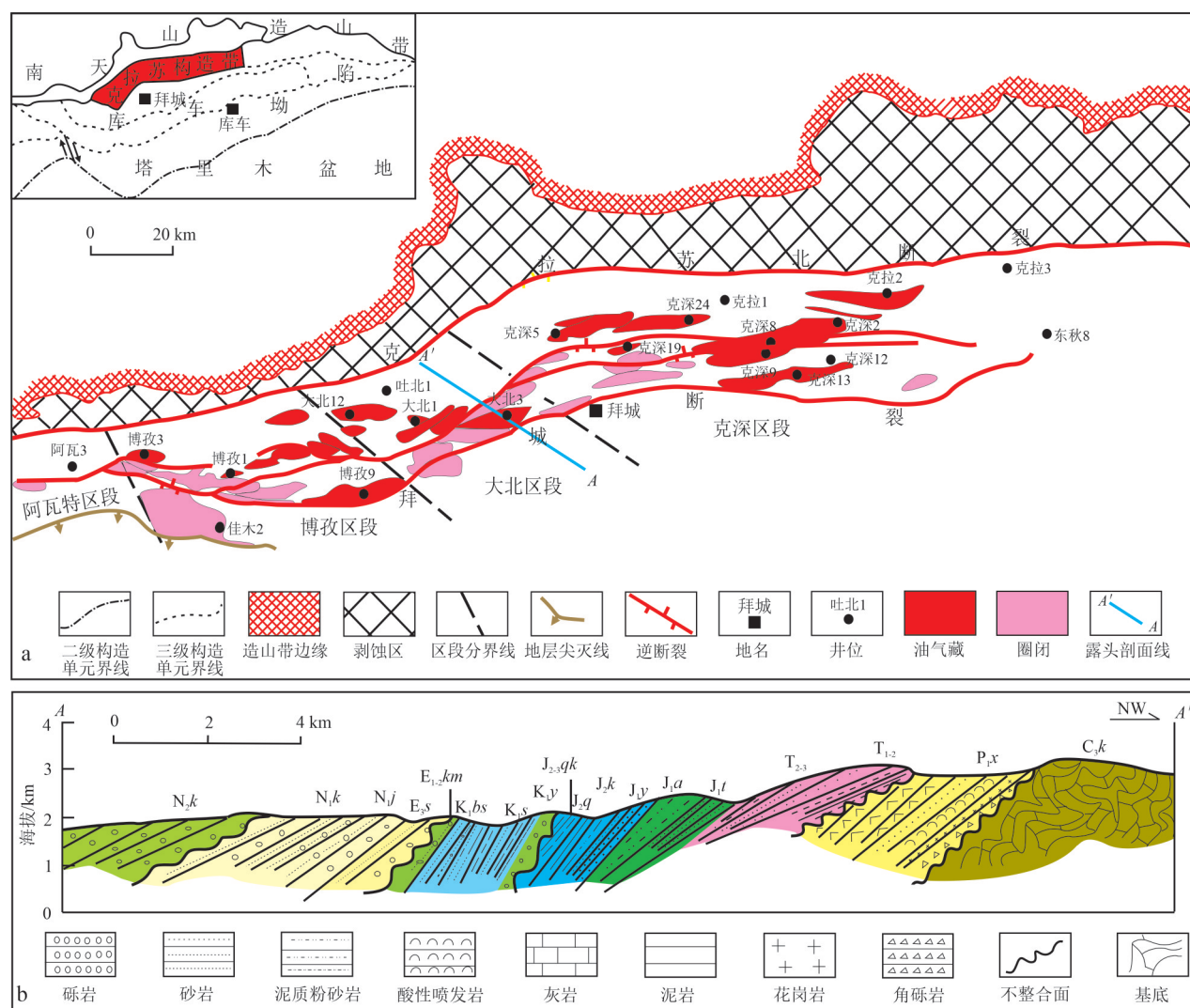


图1 库车坳陷克拉苏构造带油气藏与地层出露分布

Fig. 1 Sketch maps showing the distribution of oil and gas reservoirs and outcropped sequences in Kelasu tectonic belt, Kuqa Depression

a. 库车坳陷克拉苏构造带油气藏分布(据文献[20]修改); b. 大北地区北西-南东向地面露头剖面

N₂k. 库车组; N₁k. 康村组; N₁j. 吉迪克组; E₃s. 苏维依组; E₁₋₂km. 库姆格列木群; K₁bs. 巴什基奇克组; K₁s. 舒善河组; K₁y. 亚格列木组; J₂₋₃qk. 七克台组; J₂q. 克孜勒努尔组; J₂k. 喀拉扎组; J₁y. 阳霞组; J₁a. 阿合组; J₁t. 塔里奇克组; T₂₋₃. 中-上三叠统; T₁₋₂. 中-下三叠统; P₁x, C₃k. 二叠系及石炭系基岩

为辫状河三角洲前缘亚相,总体上为一套红色碎屑岩,厚度一般在100~400 m,自上而下可划分为3个岩性段。第一个岩性段基本全被剥蚀;第二个岩性段以褐色中-细砂岩夹薄层泥岩为主,泥岩质较纯;第三个岩性段碎屑颗粒相对较粗,为含砾砂岩和砂砾岩,泥岩夹层变厚。在大北气田内,巴什基奇克组由南向北剥蚀程度逐渐增加,北部井区仅存部分下段,往南厚度不断增加^[41]。巴什基奇克组出露剖面处于库车坳陷北部前陆冲断带的基底卷入型叠瓦状冲断-单斜构造带,习惯上称之为北部单斜带,地面构造整体上表现为向南倾的高角度单斜区(图1b)。北部单斜带是库车坳陷构造变形的初始状态或缩影,代表南天山后缘逆冲断层楔向前推进构造形态。由于前缘突破后通常引发后缘伸展,所以露头区整体构造应力状态是以强大挤压构造背景并伴随伸展拉张构造环境。研究区出露地层的序列与库车坳陷腹部一致,由北向南依次为上侏罗统喀拉扎组(J_3k)、下白垩统卡普沙良群(K_1k)、下白

垩统巴什基奇克组(K_1bs)和古近系库姆格列木群($E_{1-2}km$),其中卡普沙良群(K_1k)由下至上为亚格列木组(K_{1y})、舒善河组(K_{1sh})和巴西改组(K_{1b}),地表地层出露条件好,地层序列完整、齐全(图1b)。

1.2 露头剖面特征

本次共实测了7条野外露头剖面,其中1条位于拜城县铁热克镇索罕村西部,地层出露的最为完整、齐全,命名为索罕西剖面;另外6条实测剖面较为集中,均位于索罕村东部,出露地层主要为白垩系巴西改组和巴什基奇克组第三段,进一步将东区划分成Ⅰ区块、Ⅱ区块和Ⅲ区块,自东向西共实测了6条剖面,分别命名为Ⅰ-1、Ⅰ-2、Ⅱ-1、Ⅱ-2、Ⅱ-3和Ⅲ-2剖面。本次露头实测工作累计共测量导线24条,总长度1 867.6 m,地层分层共计697层,产状测量37次。野外剖面实测区内主要河流为卡普沙良河与台勒维丘克河,河流流向总体上呈南北向切割白垩系(图2)。

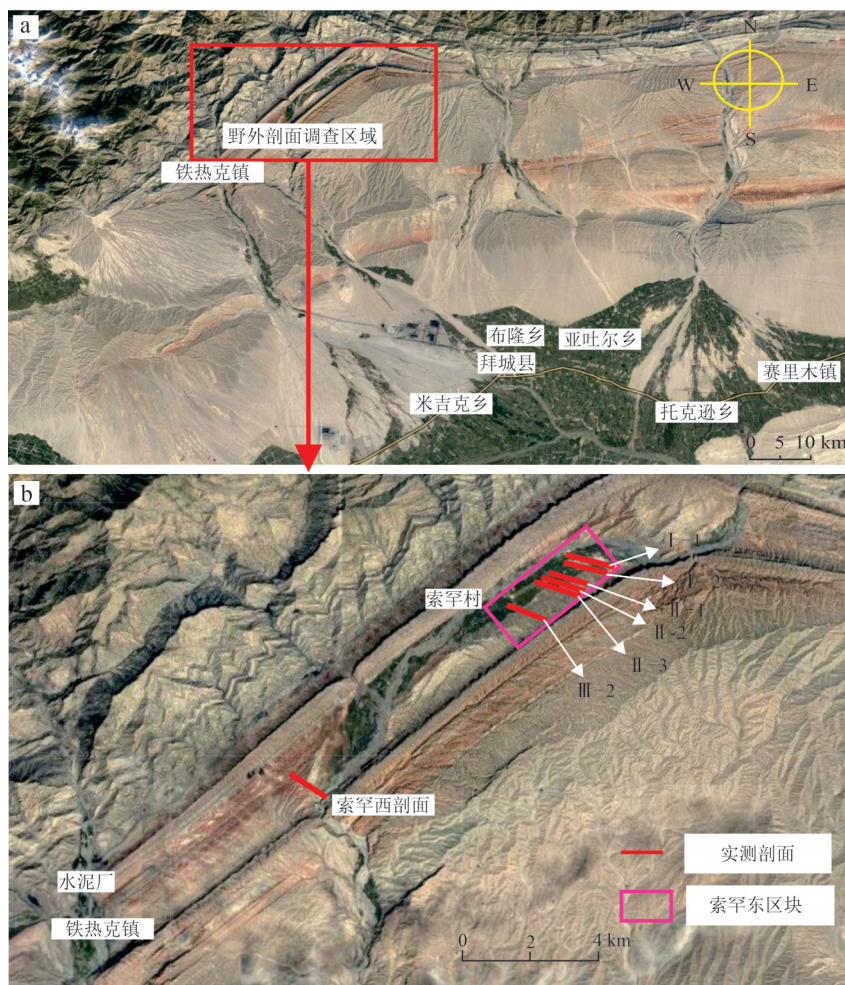


图2 库车坳陷北部索罕露头剖面位置

Fig. 2 Satellite images showing the location of Suhan outcrop, Kuqa Depression

a. 索罕露头剖面卫星图片; b. 索罕露头剖面位置

以索罕西实测剖面为代表,该剖面白垩系舒善河组(K_1sh)、巴西改组(K_1b)和巴什基奇克组(K_1bs)均有出露。剖面整体呈向南倾斜的单斜层系,岩相分异特征明显,界面清晰。其中舒善河组中部岩性主要为大套厚层绛紫色泥岩夹薄层青灰色砂岩,中上部为绛紫色泥岩与灰绿色泥岩及棕黄色泥岩交互沉积,呈五彩色,通常将这套稳定的“五彩带”作为舒善河组的典型标志,也是确定全区地层划分对比的标志层。巴西改组底部为大套灰色厚层砂岩偶夹薄层泥岩沉积,中部为棕褐色泥岩夹灰色砂岩沉积,上部为褐灰色,灰色含砾砂岩,砂岩夹薄层泥岩沉积,与下伏舒善河组的界面为一大型的冲刷面。巴什基奇克组三段底部为大套厚层砾岩沉积;中部为灰色砾岩,含砾砂岩夹棕褐色泥岩沉积;上部为灰色砾岩、褐灰色砂岩,含砾砂岩与棕黄色泥岩互层沉积,与下伏巴西改组呈大型冲刷-充填

接触。巴什基奇克组二段下部为灰色砾岩与棕黄色泥岩互层沉积,与下伏地层界面为一大型河道冲刷面;中部岩性主要为灰色砾岩夹棕褐色泥岩;上部岩性主要为灰色、褐灰色砾岩和含砾砂岩。巴什基奇克组一段地层岩性主要为大套巨厚层棕褐色和棕红色砾岩,与下伏地层界面为冲刷面接触,与上覆古近系库姆格列木群的大套砾岩呈微角度不整合接触(图3)。

巴什基奇克组三段在Ⅰ-2,Ⅱ-1,Ⅱ-2和Ⅱ-3剖面均完整出露,Ⅰ-1剖面不发育,Ⅲ-2剖面仅掩盖上部少部分地层。地层厚度分布在50~69 m,砂岩百分含量在38%~53%(表1)。以索罕西剖面为例,巴什基奇克组三段层厚为55 m,砂岩厚度为23 m,砂/地比为43%,中砂岩及其以上级别砂岩占总地层的25%,细砂岩占13%,粉砂岩占5%(表1),粗碎屑沉积物比重大,以陆上平原沉积环境占优势。索罕东区5条实

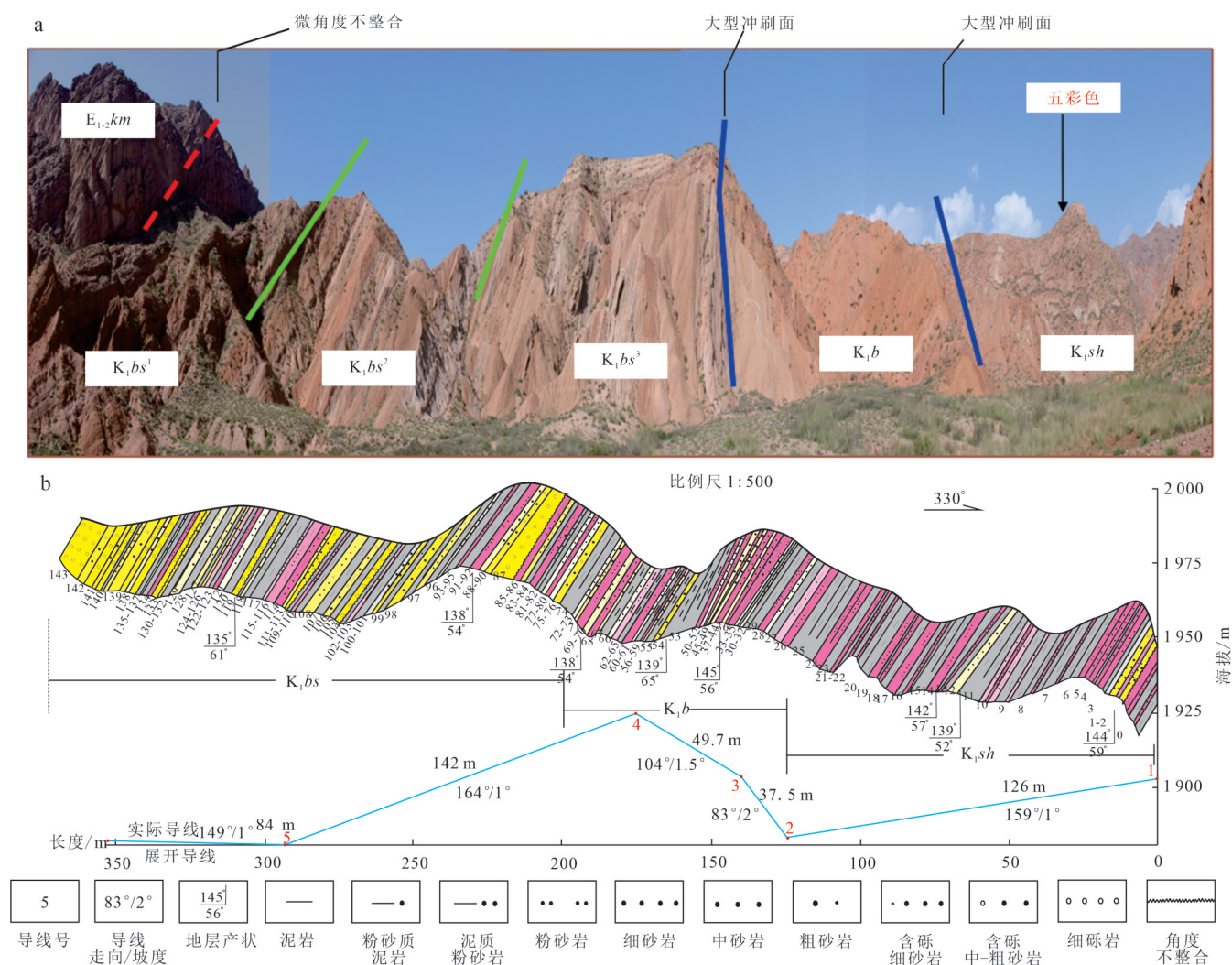


图3 库车坳陷北部索罕西实测剖面全景与地层剖面

Fig. 3 Panorama of the measured outcrop sections in the western Suohan of the Kuqa Depression with stratigraphic illustration

a. 索罕西实测剖面全景; b. 索罕西实测地层剖面

测剖面巴什基奇克组三段层厚平均为60.8 m,砂岩平均厚度为27.8 m,砂/地比平均为45.8%,中砂岩及其以上级别占总层的1.2%~8.2%,细砂岩占5.5%~14.2%,粉砂岩、泥质粉砂岩占29.2%~34.3%(表1),细粒的粉砂岩和细砂岩所占比重大,反映扇三角洲前缘亚相为优势的沉积环境。其中Ⅱ-1剖面下部岩性特征为两期厚层褐灰色中、细砂岩-棕褐色厚层泥岩旋回,中部为大套厚层褐色、褐灰色粉砂岩以及细砂岩夹薄层红褐色泥岩,上部为褐灰色粉砂岩、细砂岩与红褐色泥岩互层,3个岩性段地层特征差异明显。

2 地表实测自然伽马曲线特征

2.1 典型剖面不同岩石类型自然伽马曲线

为了更好地与大北气田井下地层层序与旋回特征进行对比,本次野外工作对索罕西,Ⅰ-1,Ⅰ-2,Ⅱ-1和Ⅱ-2共5条地层剖面进行了地面自然伽马测量,共实测了3 006个点,平均测量密度为4.06个/m。露头区地表自然伽马值范围为5~37 API;在岩石类型上响应特征表现为中砂岩与细砂岩自然伽马值最低,范围是5~17 API,平均值为13~14 API;粗砂岩及细砾岩次之,范围是14~19 API,平均值为16~17 API;其次为粉砂岩和泥质粉砂岩,范围在15~23 API,平均值为17~19 API;粉砂质泥岩与泥岩的自然伽马值最高,范围为23~37 API,平均25~28 API(图4)。

2.2 地表自然伽马曲线在岩相序列上的变化特征

野外实测自然伽马的结果表明,地表自然伽马曲线规律性较强,在不同沉积岩相序列以及岩石类型存在较为明显的差异。将实测露头剖面的地表自然伽马经加密处理生成曲线,并对实测的5条地层剖面进行对比。在不同的岩相序列上,自然伽马曲线形态差异明显,表现为三角洲平原曲线形态多为箱形和钟形,曲线叠加样式加积特征明显;三角洲前缘伽马值变化频

繁,波动幅度大,曲线形态可见齿化钟形、箱形、指状及漏斗形,曲线叠加样式进积、退积特征明显;湖相或分流间湾沉积的厚层泥岩段曲线形态多为齿化平直段(图5)。

2.3 露头区与井下自然伽马曲线对比

选取露头区具代表性的地层剖面Ⅱ-1剖面与大北气田DB202井进行自然伽马曲线对比,结果表明露头区与井下形态规律十分相似,其曲线形态可以较好的与井下进行对比。纵向上,Ⅱ-1剖面与井下巴西改组到巴什基奇克组二段,不同层位其自然伽马曲线泥岩基值差异明显,均呈向上变小的3个基值段。巴西改组自然伽马曲线形态在露头区以指状和齿化平直段互层为特征,而在井下曲线形态表现为齿化平直段夹指状;从剖面曲线组合形态来看,露头区靠近源区,砂体更加发育一些。巴什基奇克组三段露头区和井下曲线形态均以齿化钟形与箱形夹齿化平直段为主,形态较为一致,曲线剖面组合形态来看Ⅱ-1剖面 and 井下处于相同的相带,均为三角洲前缘沉积序列特征。巴什基奇克组二段露头区和井下曲线形态均为齿化箱形夹齿化平直段,不同的是露头区齿化平直段更发育;从剖面相序组合特征来看露头区与井下沉积相带类似(图6)。

3 巴什基奇克组三段高分辨率层序地层特征

3.1 野外露头元素

元素地球化学方法在层序地层与古生态环境分析中的应用越来越受到重视。采集了Ⅱ-1剖面巴什基奇克组三段12个野外露头样品,采用X射线荧光光谱(XRF)方法进行了元素测试(表2),Fe、Ca、Mg及B元素分析结果显示巴什基奇克组三段具有较好的地层旋回特征。不管何种类型的岩石,均含有一定丰度的Fe元素,且不同价次的Fe元素能够很好的反映古氧化-

表1 库车坳陷北部索罕露头区巴什基奇克组三段岩性特征

Table 1 Lithological statistics of the Bashijiqike Formation in the Suhan outcrop, Kuqa Depression

实测剖面	地层厚度/m	砂层厚/m	砂/地比/%	中砂岩及以上占比/%	细砂岩占比/%	粉砂岩占比/%
索罕西	55	23	43	25.0	13.0	5.0
Ⅰ-2	67	32	47	7.5	10.3	29.2
Ⅱ-1	60	31	53	8.2	10.5	34.3
Ⅱ-2	50	19	38	2.0	5.5	30.3
Ⅱ-3	69	33	49	1.2	14.2	33.6
Ⅲ-2	58	24	42	2.0	10.4	29.6

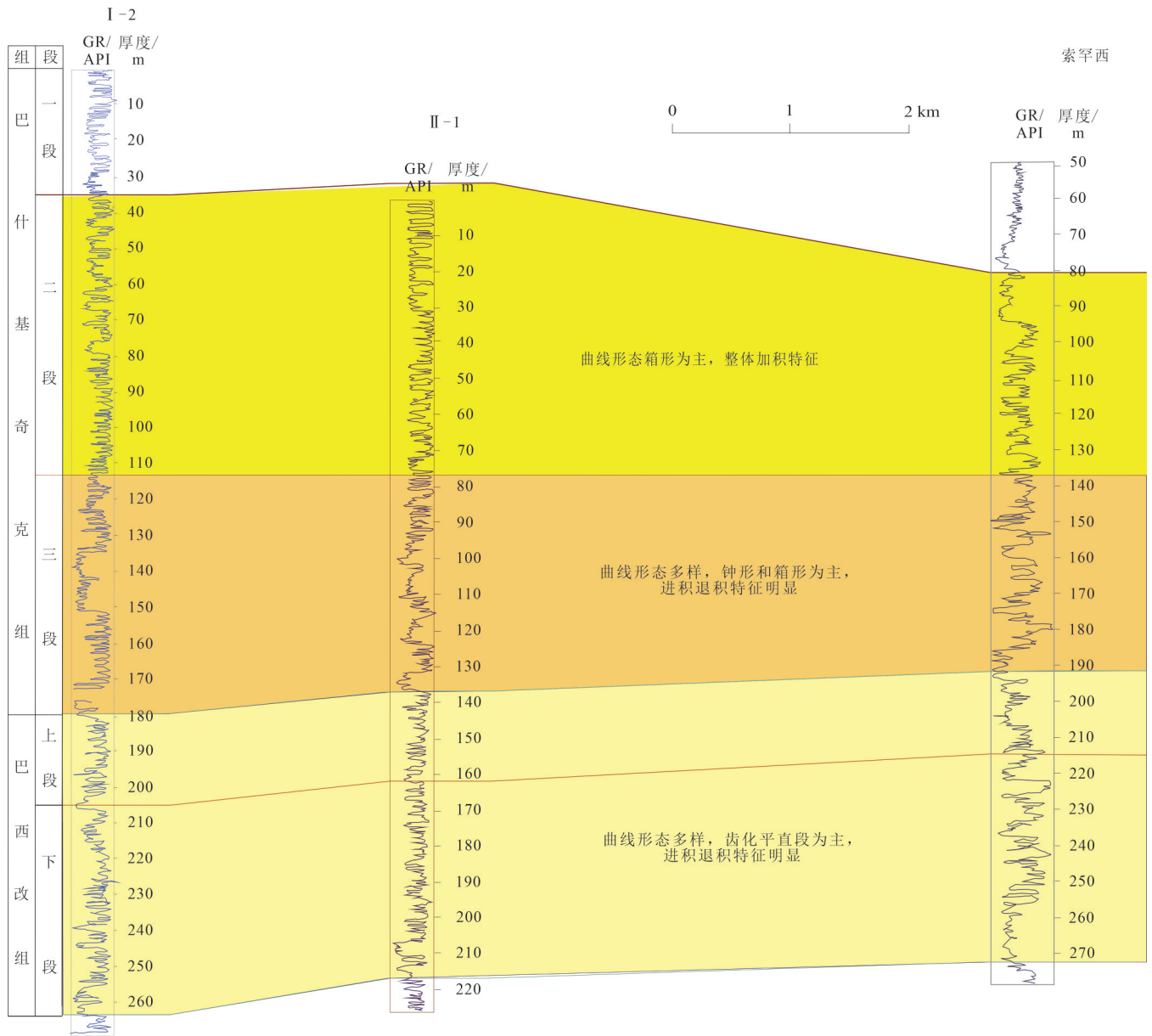


图5 库车坳陷北部露头区不同剖面实测地表自然伽马形态对比

Fig. 5 Shape comparison of surface natural gamma curves for the outcrop, Kuqa Depression

1) 长期基准面旋回界面

长期基准面旋回在大北气区范围内均可以追踪对比,对应于地层组或段的分界线。以 I-2 地层剖面为例,其实测地层层第 37—38 层为巴什基奇克组与巴西改组地层界面,第 37 层为巴西改组顶界,岩性为棕褐色泥岩偶夹砂质条带;第 38 层为巴什基奇克组三段底界,岩性为中-厚层褐灰色槽状交错层理细砾岩和含砾粗砂岩,为大型河道冲刷面,之上发育厚层砂岩,可见具明显冲刷-充填结构的大型下切水道。之上第 41—42 层发育大套厚层的棕褐色泥岩,横向分布稳定,可全区追踪对比,为最大湖泛面(图 8a)。II-2 地层剖面实测第 84—85 层为巴西改组二段与巴什基奇

克组三段的地层界面,界面之上为大套厚层的大型槽状交错层理褐灰色细砾岩,界面之下为棕褐色泥岩,界面性质为大型河道冲刷面(图 8b)。

2) 短期基准面旋回基本叠加样式

野外露头的岩性变化特征是短期旋回识别的基础,短期基准面旋回准层序叠加样式识别是高分辨率层序地层划分对比的基础,露头剖面显示巴什基奇克组三段主要发育两种短期基准面旋回叠加样式。

① 向上“变深”的非对称旋回叠加样式(A类)。该旋回叠加样式表现为上升半旋回极其发育,下降半旋回不发育或者欠发育,顶底界面均为一期次的河道冲刷面。II-1 剖面第 59—63 层段为该类型的典型代

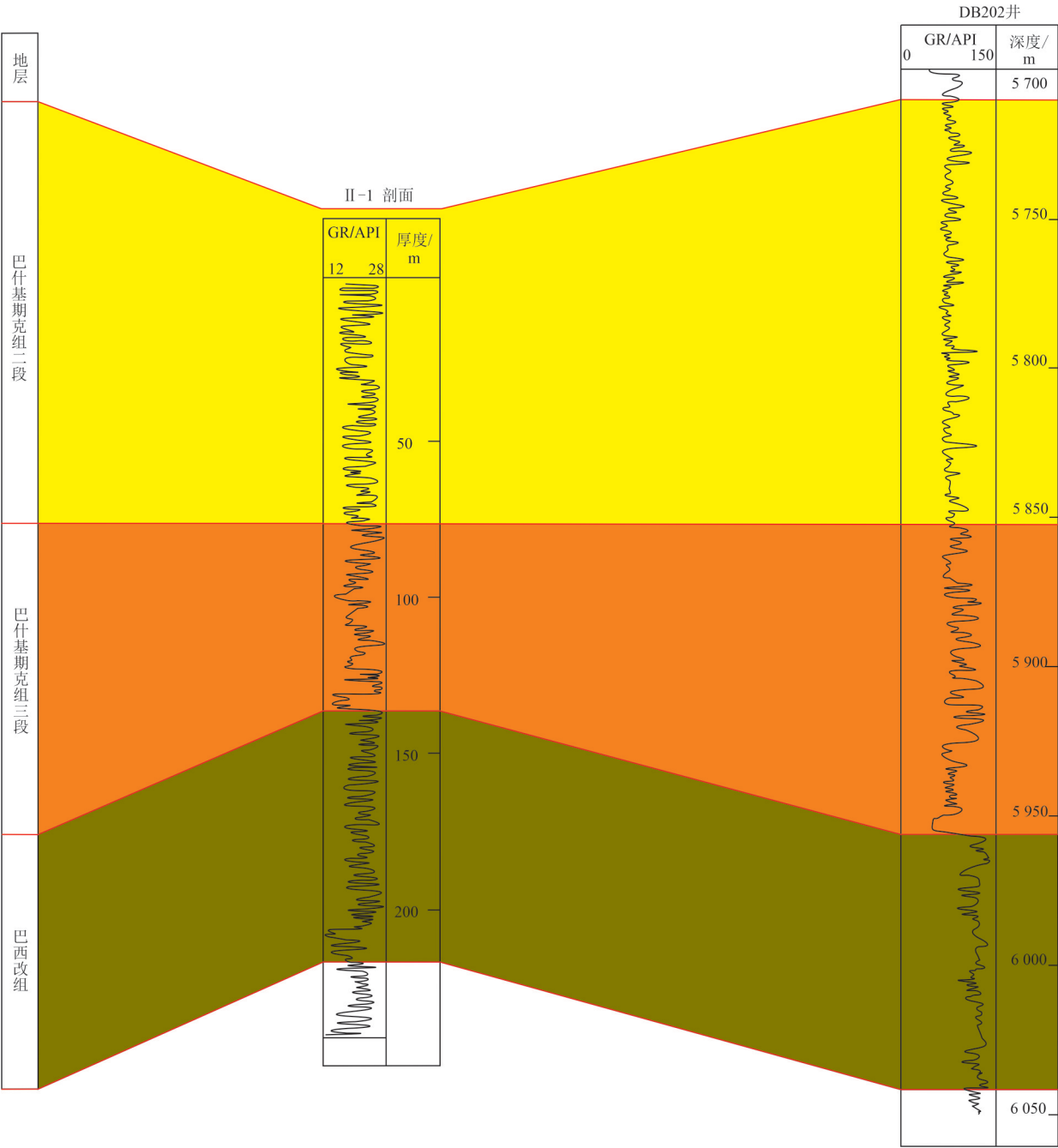


图6 库车坳陷北部Ⅱ-1实测剖面与井下自然伽马曲线形态对比
Fig. 6 Shape comparison of surface and downhole natural gamma curves, Kuqa Depression

表,剖面岩相序列为大套向上粒度逐渐变细的砂岩,泥岩或者砂质泥岩不发育。该类型代表了在低的可容纳空间与沉积物供给充分的条件下,沉积物供给速率远大于可容空间增长速率所引起的加积-退积作用形成的短期基准面旋回(图9a)。

② 向上“变深再变浅”的近对称旋回叠加样式(B类)。该旋回叠加样式表现为层序对基准面旋回的上升和下降半旋回都有完整的记录,其顶底界面一般以冲刷面较为常见,层序内部通常发育退积-进积作用

形成的由粗变细再变粗的沉积序列。露头区Ⅱ-3剖面第46—53层段为该类型的典型代表,剖面岩性序列为板状交错层理细砂岩—砂质泥岩—板状交错层理细砂岩—泥岩—板状层理细砂岩,呈近对称的半旋回,上升半旋回稍占优势,湖泛面对应中上部的泥岩段(图9b)。

两类主要的短期旋回叠加样式构成了巴什基奇克组三段中-长期旋回,其中以A类在露头区最为常见,这主要和短期内持续的湖平面快速上升有关。短期旋

表2 库车坳陷北部露头区Ⅱ-1剖面巴什基奇克组三段微量元素特征

Table 2 Trace element contents in the third member of Bashijiqike Formation in section Ⅱ-1 of the outcrop, Kuqa Depression

样品编号	岩性	微量元素含量						
		Fe ³⁺ /%	Fe ²⁺ /%	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	CaO/%	MgO/%	Ca/Mg	B/10 ⁻⁶
Ⅱ-1-YS1	灰色含砾细砂岩	1.31	0.61	0.47	5.10	0.91	5.6	36.6
Ⅱ-1-YS2	青灰色板状层理细砂岩	1.26	1.03	0.82	8.09	1.40	5.8	43.9
Ⅱ-1-YS3	青灰色板状层理中砂岩	0.92	0.92	1.00	15.81	1.14	13.9	27.2
Ⅱ-1-YS4	红褐色波纹层理泥质粉砂岩	0.91	0.68	0.75	19.58	1.08	18.1	25.7
Ⅱ-1-YS5	青灰色槽状层理细砂岩	0.60	0.56	0.93	25.46	0.88	29.0	22.9
Ⅱ-1-YS6	褐灰色平行层理粉砂岩	1.52	0.89	0.59	5.57	1.69	3.3	39.8
Ⅱ-1-YS7	褐灰色平行层理粉砂岩	1.40	0.57	0.41	12.07	1.46	8.3	31.6
Ⅱ-1-YS8	青灰色板状层理细砂岩	1.16	0.63	0.54	12.42	1.43	8.7	25.2
Ⅱ-1-YS9	褐灰色平行层理粉砂岩	1.89	0.96	0.51	3.09	2.06	1.5	42.5
Ⅱ-1-YS10	青灰色平行层理细砂岩	1.46	1.73	1.18	9.53	1.90	5.0	41.2
Ⅱ-1-YS11	褐灰色平行层理粉砂岩	1.40	0.99	0.71	4.16	1.52	2.7	34.3
Ⅱ-1-YS12	青灰色含砾中砂岩	1.09	0.86	0.79	10.49	1.06	9.9	29.4

回基本叠加样式特征反映了巴什基奇克组三段沉积时期具有低的可容纳空间,充沛的沉积物源供给,持续快速湖进的沉积特征。

3.2.2 高分辨率层序划分对比方案

对于陆相盆地湖平面升降频繁、相变快的特点,沉积的短期基准面旋回是其重要特征,短期基准面旋回叠加样式的识别是高分辨率层序地层划分对比的基础。根据高分辨率层序地层划分的基本原则,参照前人对本区层序划分方案,结合露头区岩石元素旋回分析及层序地层特征^[16-17],本文将露头剖面巴什基奇克组三段划分为1个长期旋回(三级层序,LSC)、3个中期旋回(四级层序,MSC)和6个短期旋回(五级层序,SSC)(图10)。

长期基准面旋回界面均为大型的水道冲刷面,易于识别对比,其短期基准面旋回基本叠加样式在野外根据露头岩性变化及其组合特征可以进行划分识别,而中期旋回特征就具有明显的差异性。以Ⅱ-1剖面为例,3个中期旋回地层岩性组合特征各不相同,第1个中期旋回底部为砂岩,之上依次厚层泥岩、厚层砂岩及厚层泥岩加砂岩,中-厚层泥岩段代表最大湖泛面,自然伽马曲线呈现箱形和齿化钟形,元素变化也具有较好的变化趋势可循,其Fe³⁺含量值呈现高一底一高的变化趋势(Fe²⁺含量与之相反),Ca/Mg含量比值呈现小一大一小的变化趋势,B元素含量呈现大一小一大的变化趋势;第2个中期旋回岩性组合类似于第1个中期旋回,自然伽马曲线以齿化钟形为主,其各类元素变化趋势和第1个中期旋回具有较好的一致性特征;第3个中期旋回岩性组合特征总体为下部位厚层砂夹薄层

泥,上部以厚层泥为主,局部夹砂层,自然伽马曲线以齿化钟形和箱形夹齿化平直段为主,Fe³⁺与B元素含量呈现逐渐减小的趋势,Ca/Mg含量比值呈现小一大一小一大的变化趋势。

在识别出长期旋回界面,中期旋回岩性组合特征和短期旋回叠加样式的基础上,参照部分剖面地表实测伽马曲线形态,与其他4条地层剖面进行了高分辨率层序地层划分与对比。建立了露头区巴什基奇克组三段高分辨率层序地层格架和划分方案,将其划分为1个长期旋回、3个中期旋回和6个短期旋回,其中Ⅱ-2剖面顶部缺失了1个短期旋回(图11)。

3.3 大北气区井下基准面旋回划分

运用高分辨率层序地层学理论对大北气田DB-101,DB102,DB2,DB201和DB202井巴什基奇克组三段进行了层序地层划分。以DB201井为例,根据测井的自然伽马和电阻率曲线,录井的岩性变化及其组合特征,将该井巴什基奇克组三段划分为1个长期旋回、4个中期旋回和8个短期旋回。对称的“向上变深再变浅”和缺失下降半旋回的“向上变深”这两种基本的短期旋回叠加样式构成了井下中-长期旋回。井下中期基准面旋回界面响应特征一般为电测曲线的突变面和岩性变化界面,自然伽马曲线叠加样式能较好地反映地层的旋回性。MSC1旋回自然伽马曲线主要为加积叠加样式,下部为砂岩夹泥岩,上部为泥岩夹砂岩;MSC2旋回自然伽马曲线叠加样式为退积-加积,岩性组合为下部为砂岩夹泥岩,上部为泥岩偶夹砂岩,泥岩段代表最大湖泛面;MSC3旋回自然伽马曲线叠加样式为加积,岩性组合特征为砂岩夹泥岩沉积;MSC4旋回

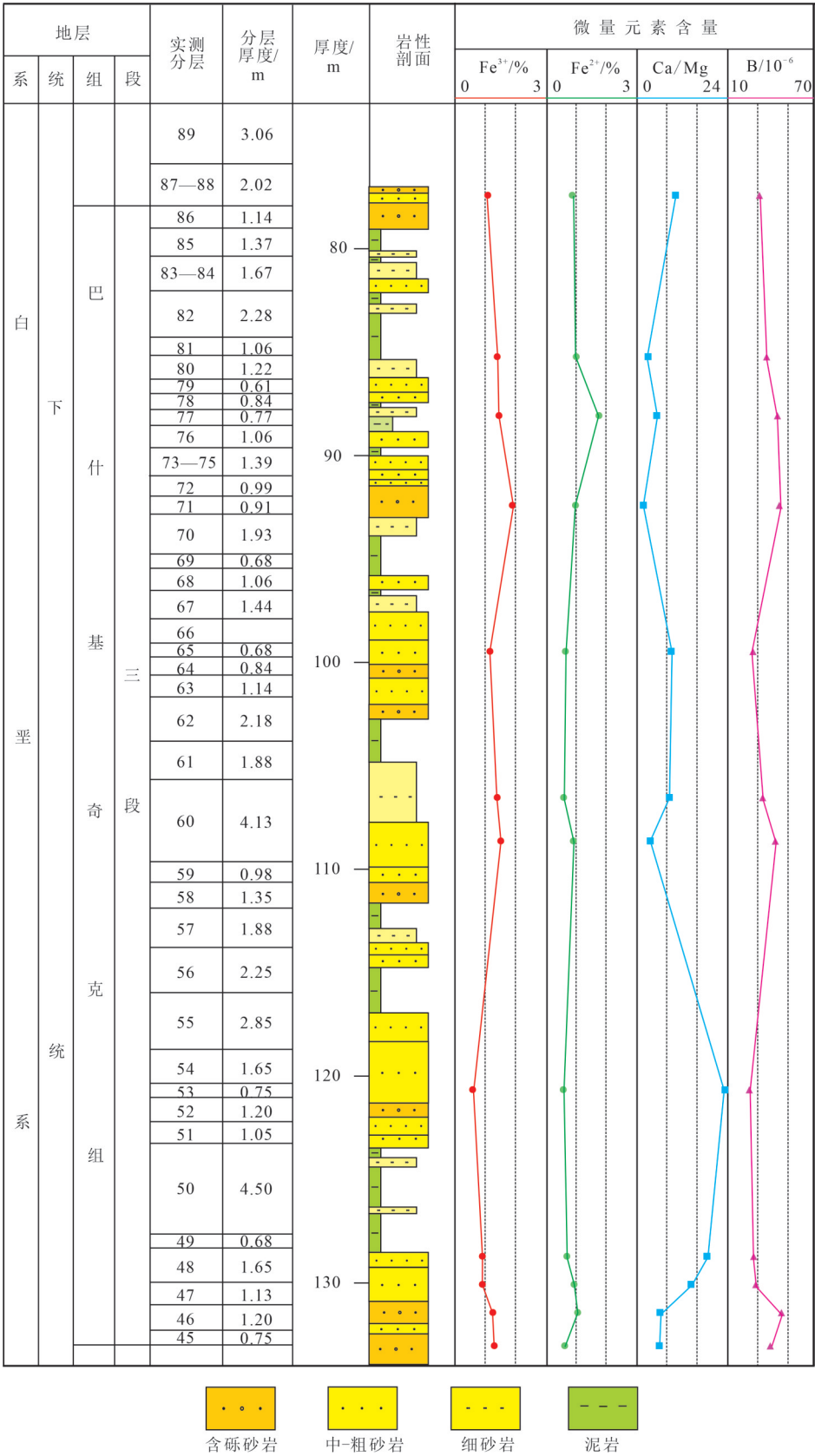


图7 库车坳陷北部露头区Ⅱ-1实测剖面巴什基奇克组三段微量元素垂向分布
Fig. 7 Vertical distribution of trace element contents in the third member of Bashijiqike Formation in section Ⅱ-1 of the outcrop, Kuqa Depression

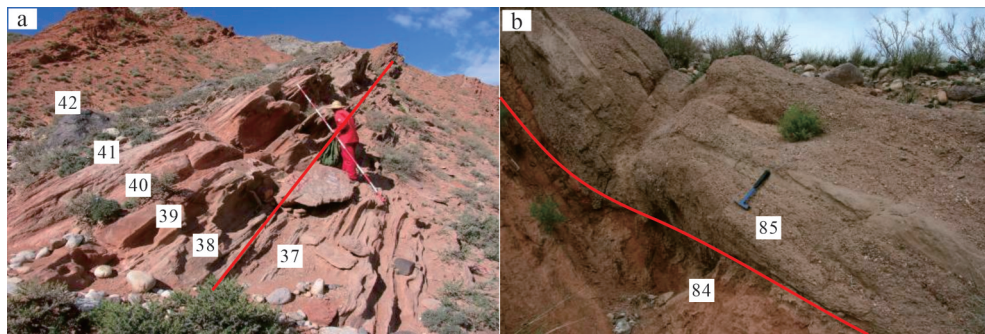


图8 库车坳陷北部野外露头剖面巴什基奇克组长期基准面旋回界面

Fig. 8 Photos showing the long-period cycle interfaces in the Bashijiqike Formation in the outcrop, Kuqa Depression

a. I-2剖面第37—38层段巴什基奇克组三段与巴西改组界面; b. II-2剖面第84—85层段巴什基奇克组三段与巴西改组二段界面

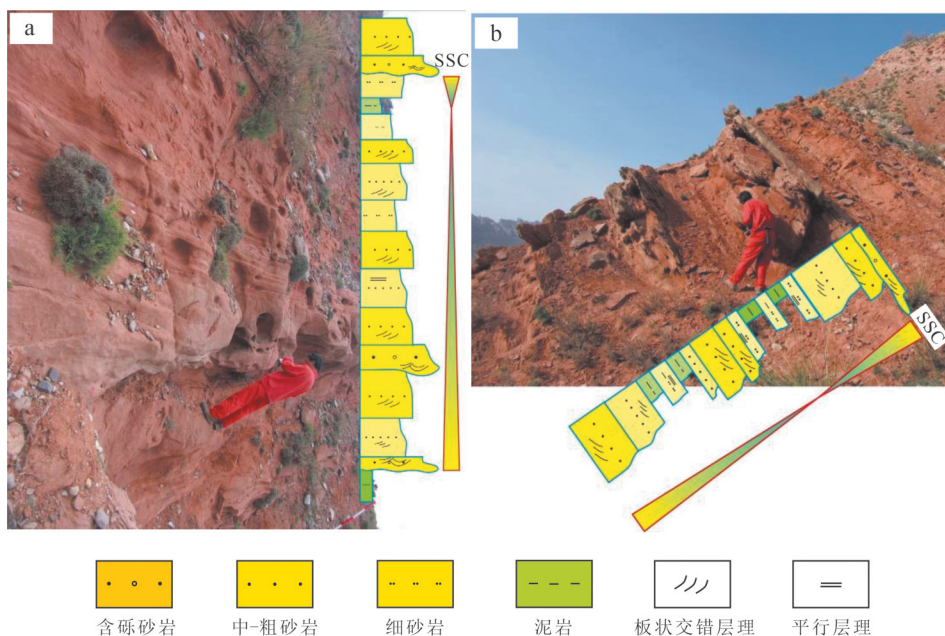


图9 库车坳陷北部野外露头剖面巴什基奇克组三段短期基准面旋回基本叠加样式

Fig. 9 Photos and diagrams showing the basic superimposition pattern of the short-period base level cycles in the third member of Bashijiqike Formation in the outcrop, Kuqa Depression

a. II-1剖面第59—63层段; b. II-3剖面第46—53层段

自然伽马曲线叠加样式为加积-进积,下部为厚层砂岩,上部为砂岩与泥岩互层(图12)。

在单井层序地层划分基础上,进一步建立了大北井下巴什基奇克组三段高分辨率层序地层对比格架,以过DB101,DB102,DB2,DB201和DB202井的巴什基奇克组三段高分辨率层序地层连井对比剖面为骨架剖面,将井下巴什基奇克组三段划分为1个长期旋回、4个中期旋回和10个短期旋回,MSC1, MSC2和MSC3旋回在部分井中缺失了1个短期旋回(图13)。

3.4 露头区与井下高分辨率层序地层对比

露头区剖面与井下层序地层对比工作是研究深埋地层特征的基础。相对于露头区,大北气区钻井位置

更加靠近湖盆中心,因此井下层序比露头更发育。通过上述露头剖面与井下层序地层特征研究(图11,图13),表明井下中期旋回的地层发育厚度平均大于露头区,并且多发育了1个中期旋回和4个短期旋回。根据最大湖泛面位置和各个中期旋回地层岩性组合特征等,露头区MSC1, MSC2和MSC3中期旋回分别对应于井下MSC2, MSC3和MSC4中期旋回,SSC1-2对应井下SSC4-5,井下多出SSC3旋回,SSC3-4对应井下SSC6-7,井下多出SSC8旋回,SSC5-6对应井下SSC9-10。

露头区隔夹层分布规律受中期旋回控制影响明显,总的来说,集中发育于中期旋回上升半旋回的上部和下降半旋回,其中以下降半旋回隔夹层最为发育。自下而上, MSC1旋回为三角洲快速后退期,也是最大

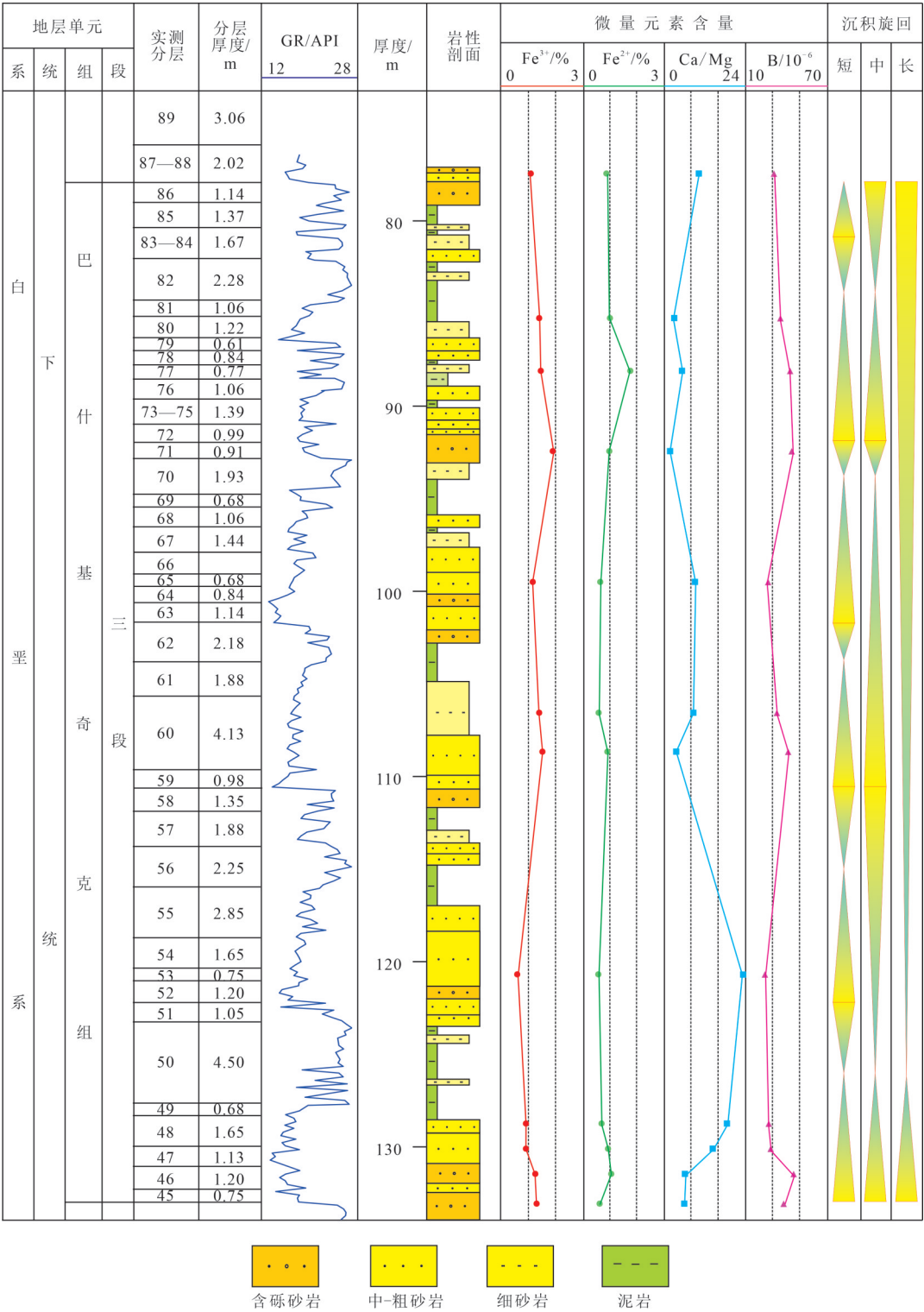


图10 库车坳陷北部露头区Ⅱ-1剖面巴什基奇克组三段高分辨率层序地层划分方案
Fig. 10 High-resolution sequence stratigraphic division proposal for the third member of
Bashijiqike Formation in section Ⅱ-1 of the outcrop, Kuqa Depression

湖泛面时期,受此影响,隔夹层横向分布稳定,单层平均厚度大,层数相对少;MSC2旋回为三角洲快速推进期,砂岩较发育,横向隔夹层分布相对不稳定,单层平均厚度相对较薄,层数相对多于MSC1;MSC3旋回为

三角洲稳定推进期,隔夹层横向分布相对稳定,单层平均厚度比MSC1旋回小,大于MSC2旋回,隔夹层层数相对较多。井下隔夹层分布规律表现为MSC1隔夹层相对不发育,发育规模也较小,横向连续性相对差;

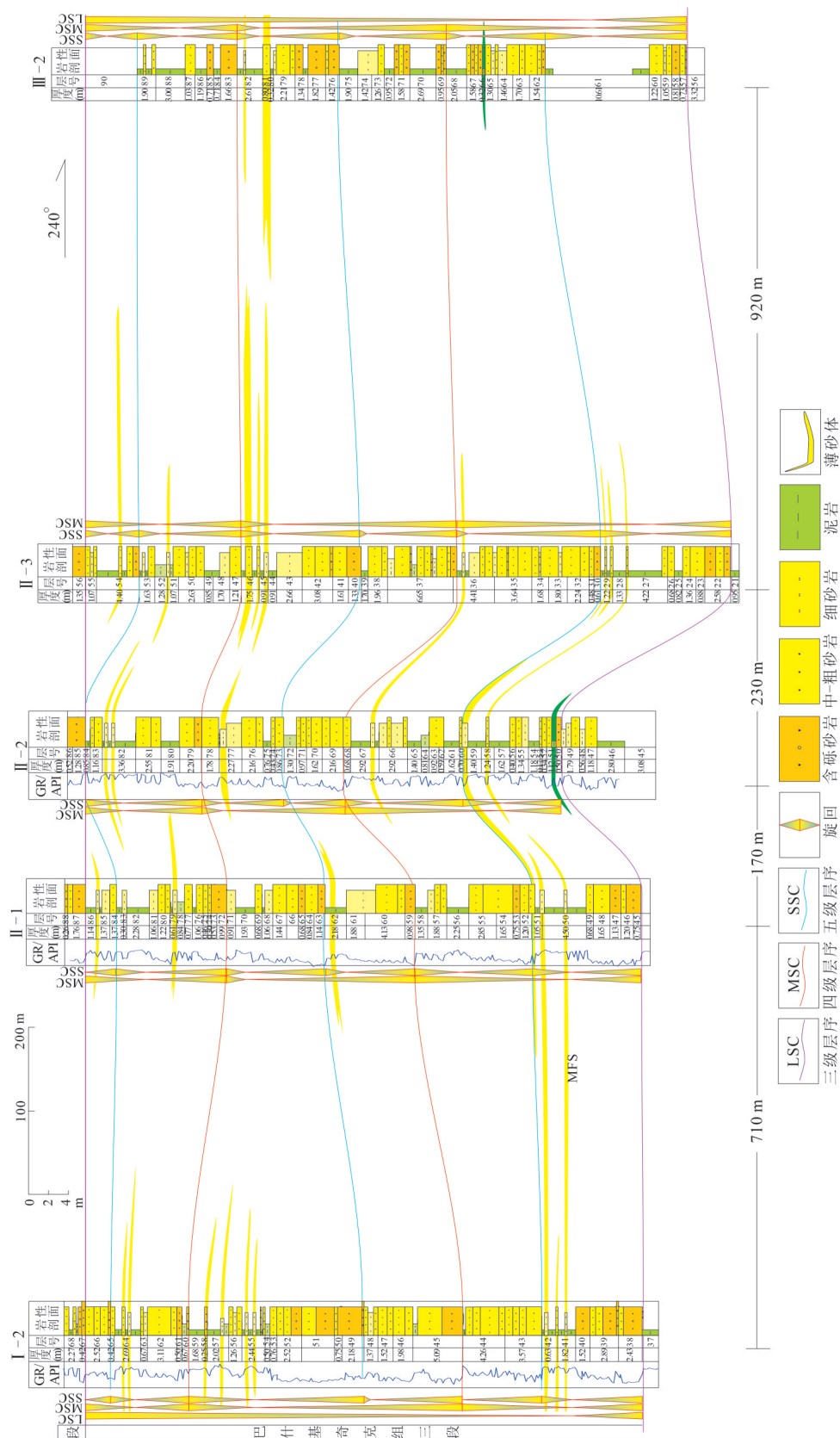


图 11 库车坳陷北部露头区 5 条露头剖面巴什基奇克组三段高分辨率层序地层对比格架

Fig. 11 Correlation of high-resolution sequence stratigraphy of the third member of Bashijiqike Formation in five sections of the outcrop, Kuqa Depression

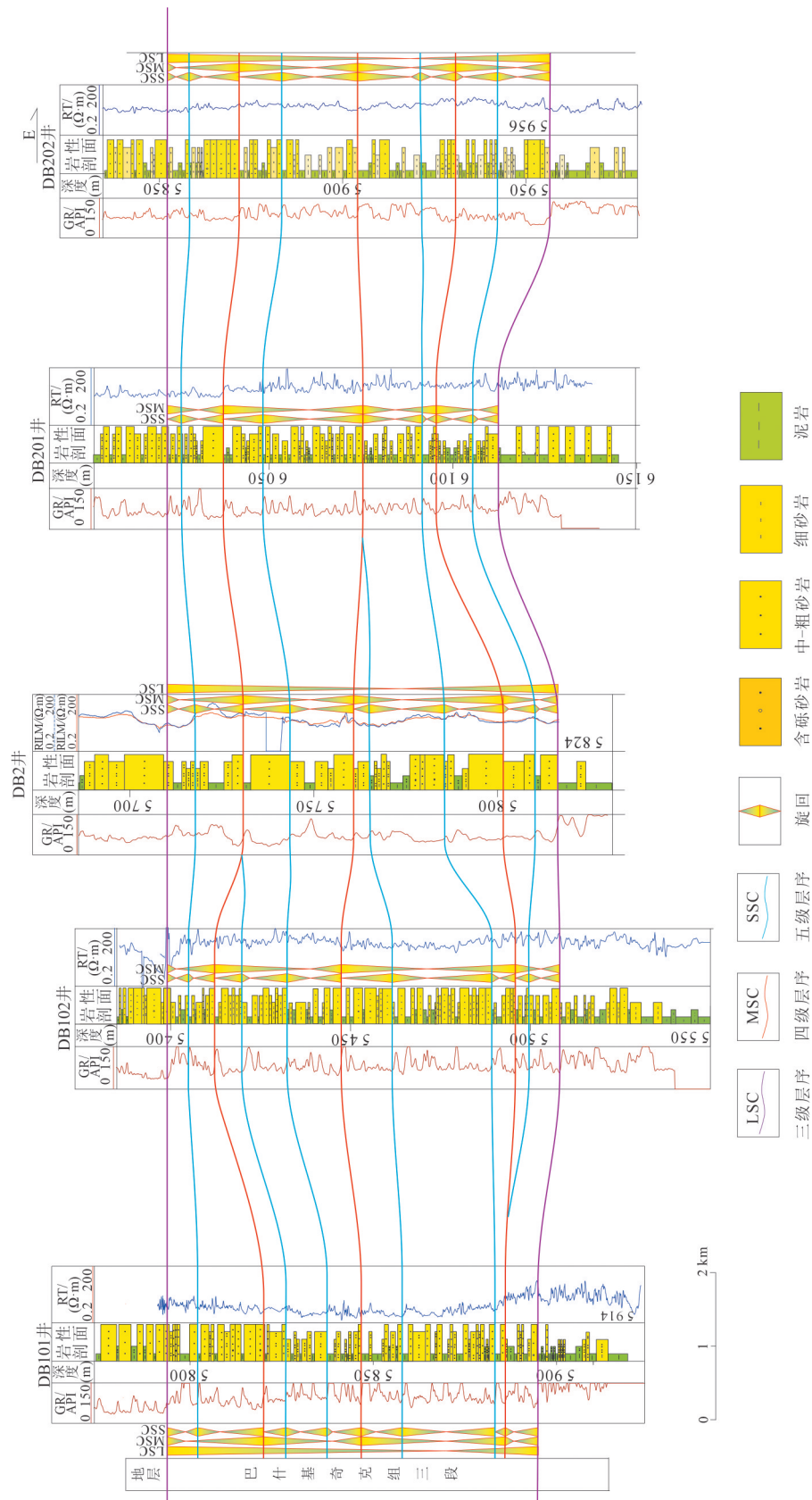


图 13 库车坳陷北部大北气区井下巴什基奇克组三段高分辨率层序地层对比格架
Fig. 13 Correlation of high-resolution sequence stratigraphy of the third member of Bashijiqike Formation in wells, Dabai gasfield, Kuqa Depression

参 考 文 献

- [1] 朱光有, 池林贤, 张志遥, 等. 塔里木盆地大北气田凝析油中分子化合物组成与成因[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 482-495.
Zhu Youguang, Chi Linxian, Zhang Zhiyao, et al. Composition and genesis of molecular compounds in condensate from Dabei Gas Field, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 482-495.
- [2] 苏洲, 张慧芳, 韩剑发, 等. 塔里木盆地库车坳陷中、新生界高蜡凝析油和轻质油形成及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1255-1269.
Su Zhou, Zhang Huifang, Han Jianfa, et al. Formation and controlling factors of high wax condensate and light oil of Middle and Cenozoic in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1255-1269.
- [3] 李鹭光. 中国天然气工业发展回顾与前景展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 1-11.
Li Luguang. Review and prospect of natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 1-11.
- [4] 张博, 李江海, 吴世萍, 等. 大北气田储层裂缝定量描述[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(1): 42-46.
Zhang Bo, Li Jianghai, Wu Shiping, et al. Quantitative characterization of reservoir fractures in Dabei Gas field [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 42-46.
- [5] 马涛, 马青, 王振宇, 等. 库车坳陷古近系原型沉积盆地地层序地层格架及沉积演化[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 369-381.
Ma Tao, Ma Qing, Wang Zhenyu, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary evolution of paleogene prototype sedimentary basin in Kuqa Depression[J]. Geological Science, 2020, 55(2): 369-381.
- [6] 李勇, 漆家福, 师俊, 等. 塔里木盆地库车坳陷中生代盆地性状及成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(5): 829-842.
Li Yong, Qi Jiafu, Shi Jun, et al. Characteristics and genesis of Mesozoic basin in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Tectonics and Metallogeny, 2017, 41(5): 829-842.
- [7] 何治亮, 高山林, 郑孟林. 中国西北地区沉积盆地发育的区域构造格局与演化[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 227-240.
He Zhiliang, Gao Shanlin, Zhen Menglin. Regional tectonic pattern and evolution of sedimentary basins in northwest China [J]. Geoscience Frontiers, 2015, 22(3): 227-240.
- [8] Ning Fei, Yun Jinbiao, Zhang Zhongpei, et al. Deformation patterns and hydrocarbon potential related to intracratonic strike-slip fault systems in the east of Central Uplift Belt in the Tarim Basin [J]. Energy Geoscience, 2022(1): 63-72.
- [9] 赖锦, 王贵文, 柴毓, 等. 库车坳陷白垩系巴什基奇克组成岩层序地层特征[J]. 沉积学报, 2015, 33(2): 394-407.
Lai Jin, Wang Guiwen, Cai Yu, et al. Characteristics of sequence stratigraphy of Cretaceous Bashijiqike formation in Kuqa Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(2): 394-407.
- [10] 毕征峰, 薛明喜, 潘广山, 等. 塔里木盆地白垩系三级层序划分、展布特征及充填模式[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(22): 51-56.
Bi Zhengfeng, Xue Mingxi, Pan Guangshan, et al. Division, distribution and filling model of tertiary Cretaceous sequence in Tarim Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(22): 51-56.
- [11] 杨兴业, 王家豪. 库车坳陷北部白垩系露头层序地层分析[J]. 新疆石油天然气, 2008, 4(4): 15-21+5.
Yang Xingye, Wang Jiahao. Sequence stratigraphy analysis of Cretaceous outcrop in northern Kuqa Depression[J]. Xinjiang Oil and Natural Gas, 2008, 4(4): 15-21+5.
- [12] 梅冥相, 于炳松, 靳卫广. 塔里木盆地库车坳陷白垩纪层序地层格架及古地理演化[J]. 古地学报, 2004, 6(3): 261-278.
Mei Mingxiang, Yu Bingsong, Jin Weiguang. Cretaceous sequence stratigraphic framework and paleogeographic evolution in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(3): 261-278.
- [13] 林畅松, 王清华, 肖建新, 等. 库车坳陷白垩纪沉积层序构成及充填响应模式[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(S1): 74-82.
Lin Changsong, Wang Qinghua, Xiao Jianxin, et al. Sedimentary sequence composition and filling response model of cretaceous in Kuqa Depression [J]. Science in China Series (D: Earth Sciences), 2004, 34(S1): 74-82.
- [14] 胡涛, 张柏桥, 舒志国. 库车坳陷白垩系一个扇三角洲准层序的结构特征[J]. 矿物岩石, 2003, 23(2): 87-89.
Hu Tao, Zhang Baiqiao, Shu Zhiguo. Structural characteristics of a fan delta parasequence in the Cretaceous of Kuqa Depression [J]. Mineral Rocks, 2003, 23(2): 87-89.
- [15] 贾进华, 薛良清. 库车坳陷中生界陆相层序地层格架与盆地演化[J]. 地质科学, 2002, 37(S1): 121-128+140.
Jia Jinhua, Xue Liangqing. Mesozoic continental sequence stratigraphic framework and basin evolution in Kuqa Depression [J]. Scientia Geologica Sinica, 2002, 37(S1): 121-128+140.
- [16] 肖建新, 林畅松, 刘景颜. 塔里木盆地北部库车坳陷白垩系层序地层与体系域特征[J]. 地球学报, 2002, 23(5): 453-458.
Xiao Jianxin, Lin Changsong, Liu Jingyan. Sequence stratigraphy and system tract characteristics of Cretaceous in Kuqa Depression,

- northern Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 23(5): 453-458.
- [17] 夏文军, 张柏桥, 舒志国, 等. 库车坳陷巴什基奇克组露头储层层次分析[J]. *江汉石油学院学报*, 2004, 26(3): 8-10.
- Xia Wenjun, Zhang Baiqiao, Shu Zhiguo, et al. Reservoir hierarchy analysis of bashijiike Formation outcrop in Kuqa Depression[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 2004, 26(3): 8-10.
- [18] 林畅松, 郑和荣, 任建业, 等. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三纪同沉积断裂作用对沉积充填的控制[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2003, 33(11): 1025-1036.
- Lin Changsong, Zheng Herong, Ren Jianye, et al. Control of sedimentary filling by eogene synsedimentary faulting in Dongying and Zhanhua depressions, Bohai Bay Basin[J]. *Science in China Series (D: Earth Sciences)*, 2003, 33(11): 1025-1036.
- [19] 王珂, 杨海军, 张惠良, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征与有效性——以塔里木盆地库车坳陷克深8气藏为例[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 719-729.
- Wang Ke, Yang Haijun, Zhang Huiliang, et al. Characteristics and effectiveness of structural fractures in ultra-deep tight sandstone reservoirs: A case study of Keshen 8 gas reservoir in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 719-729.
- [20] 曾庆鲁, 莫涛, 赵继龙, 等. 7000 m以深优质砂岩储层的特征、成因机制及油气勘探意义——以库车坳陷下白垩统巴什基奇克组为例[J]. *天然气工业*, 2020, 40(1): 38-47.
- Zeng Qinglu, Mo Tao, Zhao Jilong, et al. Characteristics, genetic mechanism and petroleum exploration significance of deep high-quality sandstone reservoir at 7 000 m: A case study of Lower Cretaceous Bashijiike Formation in Kuqa Depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(1): 38-47.
- [21] 田军, 杨海军, 吴超, 等. 博孜9井的发现与塔里木盆地超深层天然气勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2020, 40(1): 11-19.
- Tian Jun, Yang Haijun, Wu Cao, et al. Discovery of Well Bozi 9 and exploration potential of ultra-deep natural gas in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(1): 11-19.
- [22] Adeniyi Amodu, Oluwaseye Peter Oyetade, Suyi Lawrence Fadiya, et al. Sequence stratigraphic analysis and hydrocarbon prospectivity of AMO Field, deep offshore Niger Delta, Nigeria[J]. *Energy Geoscience*, 2022, 3(1): 80-93.
- [23] 杜威, 纪友亮, 季梦瑶, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷早渐新世高精度年代地层格架建立及意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(4): 142-151.
- Du Wei, Ji Youliang, Ji Mengyao, et al. Establishment and significance of high-resolution Early Oligocene chronostratigraphic framework in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2021, 44(4): 142-151.
- [24] 陈发景, 汪新文. 中国西北地区早-中侏罗世盆地原型分析[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 459-469.
- Chen Fajing, Wang Xinwen. Prototype analysis of early-middle Jurassic Basin in northwest China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 459-469.
- [25] 曹守连, 陈发景. 塔里木板块北缘前陆盆地的构造演化及其与油气的关系[J]. *地球科学*, 1994, 19(4): 482-492.
- Cao Shoulian, Chen Fajing. Tectonic evolution of foreland basin in the northern margin of Tarim Plate and its relation to oil and gas[J]. *Earth Science*, 1994, 19(4): 482-492.
- [26] 丁道桂, 刘伟新, 崔可锐, 等. 塔里木中新生代前陆盆地构造分析与油气领域[J]. *石油实验地质*, 1997, 19(2): 97-105+107.
- Ding Daogui, Liu Weixin, Cui Kerui, et al. Structural analysis and hydrocarbon domain of Meso-Cenozoic Tarim foreland basin[J]. *Petroleum Geology Experiment*, 1997, 19(2): 97-105+107.
- [27] 何文渊, 李江海, 钱祥麟, 等. 塔里木盆地北部隆起负反转构造成因机制探讨[J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 234-240.
- He Wenyuan, Li Jianghai, Qian Xianglin, et al. Discussion on genesis mechanism of negative inversion structure in northern Tarim Basin uplift[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(2): 234-240.
- [28] 贾进华, 薛良清. 库车坳陷中生界陆相层序地层格架与盆地演化[J]. *地质科学*, 2002, 37(S1): 121-128+140.
- Jia Jinhua, Xue Liangqing. Mesozoic continental sequence stratigraphic framework and basin evolution in Kuqa Depression[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2002, 37(S1): 121-128+140.
- [29] 崔泽宏, 王志欣, 汤良杰. 塔北隆起北部叠加断裂构造特征与成因背景分析[J]. *中国地质*, 2005, 32(3): 378-385.
- Cui Zehong, Wang Zhixin, Tang Liangjie. Tectonic characteristics and genetic background analysis of superimposed faults in northern Tabei Uplift[J]. *Geology in China*, 2005, 32(3): 378-385.
- [30] 王家豪, 王华, 陈红汉, 等. 前陆盆地的构造演化及其沉积、地层响应——以库车坳陷下白垩统为例[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 114-122.
- Wang Jiahao, Wang Hua, Chen Honghan, et al. Tectonic evolution and sedimentary and stratigraphic responses of foreland basins: A case study of the Lower Cretaceous in Kuqa Depression[J]. *Geoscience frontiers*, 2007, 14(4): 114-122.
- [31] 刘志宏, 卢华复, 李西建, 等. 库车再生前陆盆地的构造演化[J]. *地质科学*, 2000, 35(4): 482-492.
- Liu Zhihong, Lu Huafu, Li Xijian, et al. Tectonic evolution of kuqa foreland basin[J]. *Geological Sciences*, 2000, 35(4): 482-

- 492.
- [32] 贾承造, 陈汉林, 杨树锋, 等. 库车坳陷晚白垩世隆升过程及其地质响应[J]. 石油学报, 2003, 24(3): 1-5+15.
- Jia Chengzao, Chen Hanlin, Yang Shufeng, et al. Study on the uplift process and geological response of the Late Cretaceous in Kuqa Depression[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 24(3): 1-5+15.
- [33] 阎福礼, 卢华复, 贾东, 等. 塔里木盆地库车坳陷中、新生代沉降特征探讨[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2003, 39(1): 31-39.
- Yan Fuli, Lu Huaifu, Jia Dong, et al. Characteristics of Mesozoic and Cenozoic subsidence in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2003, 39(1): 31-39.
- [34] 李本亮, 魏国齐, 贾承造. 中国前陆盆地构造地质特征综述与油气勘探[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 190-202.
- Li Benliang, Wei Guoqi, Jia Chengzao. Tectonic geological characteristics and petroleum exploration of Foreland basins in China [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 190-202.
- [35] 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等. 构造裂缝发育型砂岩储层定量评价方法及应用——以库车前陆盆地白垩系为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 827-835.
- Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, Yang Haijun, et al. Quantitative evaluation method and application of tectonically fractured sandstone reservoir: A case study of Cretaceous in Kuqa foreland Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 827-835.
- [36] 张荣虎, 贾承造, 张惠良, 等. 塔里木盆地白垩系巴什基奇克组陆相砂岩中碳酸盐岩碎屑特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 410-418.
- Zhang Ronghu, Jia Chengzao, Zhang Huiliang, et al. Detrital characteristics and geological significance of carbonate rocks in cretaceous Bashijiqike Formation continental sandstone, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 27(3): 410-418.
- [37] 韩登林, 李忠, 韩银学, 等. 库车坳陷克拉苏构造带白垩系砂岩埋藏成岩环境的封闭性及其胶结作用分异特征[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2351-2362.
- Han Denglin, Li Zhong, Han Yinxue, et al. Sealing and cementation differentiation of Cretaceous sandstone burial diagenetic environment in Kelasu tectonic belt, Kuqa Depression [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2351-2362.
- [38] 贾进华. 库车前陆盆地白垩系巴什基奇克组沉积层序与储层研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 133-143.
- Jia Jinhua. Sedimentary sequence and reservoir characteristics of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa foreland Basin [J]. Geoscience Frontiers, 2000, 7(3): 133-143.
- [39] 顾家裕. 塔里木盆地库车坳陷白垩纪层序地层格架. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 274-276.
- Gu Jiayu. Depositional Sequence Characteristics and Evolution in Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 274-276.
- [40] 朱玉新, 郭庆银, 邵新军, 等. 新疆塔里木盆地库车坳陷北缘白垩系储层沉积相研究[J]. 古地理学报, 2000, 2(4): 58-65.
- Zhu Yuxin, Guo Qingyin, Shao Xinjun, et al. Study on reservoir sedimentary facies of the Cretaceous in the north of Kuqa Depression, Tarim basin, Xinjiang [J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(4): 58-65.
- [41] 易艳, 张泽楷, 崔小虎, 等. 大北气田白垩系致密裂缝性储集层压力敏感特征[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(3): 340-343.
- Yi Yan, Zhang Zekai, Cui Xiaohu, et al. Pressure sensitive characteristics of cretaceous tight fractured reservoirs in Dabai Gas Field [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(3): 340-343.
- [42] 田景春, 陈高武, 张翔, 等. 沉积地球化学在层序地层分析中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006(1): 30-35.
- Tian Jingchun, Chen Gaowu, Zhang Xiang, et al. Application of sedimentary geochemistry in sequence stratigraphy analysis [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science), 2006(1): 30-35.
- [43] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 4-28.
- Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary geochemistry and environmental analysis [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 4-28.
- [44] 张祥玉, 李守军, 赵秀丽, 等. Ca/Mg 比值对古环境的指示意义及其影响因素[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 9-16.
- Zhang Xiangyu, Li Shoujun, Zhao Xiuli, et al. The significance of Ca/Mg ratio to paleo-environment and its influencing factors [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 36(3): 9-16.
- [45] 明承栋, 侯读杰, 赵省民, 等. 内蒙古东部索伦地区中二叠世哲斯组古环境与海平面相对升降的地球化学记录[J]. 地质学报, 2015, 89(8): 1484-1494.
- Ming Chengdong, Hou Dujie, Zhao Xingmin, et al. The geochemistry records of paleoenvironment and sea-level relative movement of Middle Permian Zhesi Formation in Eastern Inner Mongolia [J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(8): 1484-1494.

(编辑 董立)