

塔里木盆地库车坳陷克拉苏和东秋断层上盘勘探突破方向

易士威¹,李明鹏¹,范土芝²,杨帆²,方辉²,黄福喜¹,金武弟²

(1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 2. 中国石油勘探与生产分公司,北京 100007)

摘要:塔里木盆地库车坳陷前陆冲断带成藏条件优越,特别是克拉苏构造带和东秋构造带,发现了克深大气藏群、克拉2大气藏和中秋1气藏,形成了超万亿立方米大气区。但目前发现的气藏平面上主要分布在克拉苏断层和东秋断层下盘,断层上盘仅仅发现了克拉2大气藏,纵向上主要赋存于白垩系巴什基奇克组。基于上述油气分布现状分析,认为克拉苏断层下盘之所以形成连片分布的大气藏群,主要是一系列近东西走向的逆冲断层形成了成排、成带的大型背斜和断背斜构造圈闭,控圈断层下通烃源岩,上达膏岩盐盖层而未断穿,既是油气运聚通道而又没有破坏圈闭的封闭性,这种成藏要素的绝佳匹配造就了克拉苏断层下盘连片大气藏群的形成;而由于克拉苏断层和东秋断层断穿膏盐岩甚至断达地表,造成断层上盘圈闭封闭性变差,致使具有相同储盖组合的白垩系巴什基奇克组圈闭未能成藏,但在断层上盘由于顶冲构造形成了独特的克拉2“盐包圈”圈闭,发育了独一无二的克拉2大气藏。其次,通过分析克拉苏逆冲断层和东秋逆冲断层对成藏的控制,认为断层对纵向上不同层系及不同类型储盖组合的成藏影响是不同的。从油气复式聚集理论出发,考虑克拉苏构造带和东秋构造带丰富的剩余油气资源,以及断层上盘、下盘勘探不均衡的现状,通过解剖吐格朗明逆冲断层上盘侏罗系成藏模式,以及克拉苏断层上盘和东秋断层上盘古近系成藏模式,提出克拉苏断层和东秋断层上盘尚有巨大的勘探潜力,侏罗系和古近系是断层上盘下步重大的突破方向。

关键词:断层上盘;成藏模式;突破方向;前陆冲断带;克拉苏断层;东秋断层;库车坳陷;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Exploration directions on the Kelaasu and East-Qiulitag fault hanging walls, Kuqa Depression, Tarim Basin

Yi Shiwei¹, Li Mingpeng¹, Fan Tuzhi², Yang Fan², Fang Hui², Huang Fuxi¹, Jin Wudi²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. PetroChina Exploration & Production Branch Company, Beijing 100007, China)

Abstract: The foreland thrust belts come in favorable accumulation conditions in the Kuqa Depression, Tarim Basin. Of the belts, the Kelaasu and East Qiulitag belts, in particular, contain a giant gas field of over trillion-cubic-meter reserve consisting of Keshen, Kela 2 and Zhongqiu 1 gas reservoirs. Horizontally, most of the reservoirs concentrate on the footwalls of Kelaasu and East-Qiulitag Faults, only Kela 2 is on the hanging wall. Vertically, the reservoirs mainly occur in the Cretaceous Bashijiqike Formation. Analyses show that the somehow continuous gas reservoir on the footwall of Kelaasu Fault were trapped by rows or belts of large-scale anticlines and faulted anticlines formed by a series of nearly EW-trending thrust faults. The faults that get connected to hydrocarbon source rocks downward and to gypsum-salt cap rocks upward without cutting them through, serve as effective migration channels while keeping the integrity of the trap untouched, thus making a perfect pooling combination. While on the hanging walls, gas traps with similar condition were mostly destroyed by the Kelaasu and East-Qiulitag Faults cutting through the gypsum-salt cap rocks, leaving only the Kela 2 reservoir preserved by salt on the top-up structure. Meanwhile, analysis of the Kelaasu and East-Qiulitag Faults' control on the reservoirs shows various impact upon different reservoir-cap assemblages and strata in a vertical direction. In all, the study dissected the accumulation model on the hanging walls of the Kelaasu and East-Qiulitag Faults through composite hydrocarbon accumulation theory while considering the abundant surplus resources and the exploration imbalance of the hanging walls and the foot walls, and suggested that the hanging walls of the Kelaasu and East-Qiulitag Faults have great

收稿日期:2019-11-19;修订日期:2021-02-02。

第一作者简介:易士威(1964—),男,博士、教授级高级工程师,油气地质综合研究与勘探。E-mail:ktb_ysw@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05007-003)。

exploration potential and the Jurassic and Paleogene strata are targets of future exploration on the foot walls of the faults.

Key words: hanging wall of fault, accumulation model, target for exploration breakthrough, foreland thrust belt, Kelasu Fault, East-Qiulitag Fault, Kuqa Depression, Tarim Basin

塔里木盆地库车坳陷油气资源丰富,成藏条件优越。在前陆冲断带已经发现克深大气藏群、克拉2大气藏和中秋1气藏,形成了超万亿立方米大气区,是中国西气东输重要的气源供给区^[1-4],是塔里木盆地天然气勘探开发主战场。截至2018年底,探明天然气储量和产量分别占塔里木盆地的61%和70%。但随着勘探程度的提高,库车坳陷前陆冲断带目标发现的难度越来越大,勘探目标构造更加复杂,圈闭面积变小,单体储量规模减小,埋藏深度增加,可供钻探的优质圈闭越来越少。实现库车天然气勘探的持续突破和稳定发展需求变得愈来愈紧迫,但勘探新突破、大突破的领域、区带、层系及目标仍不明确。虽然库车坳陷在多区带、多层系均已取得重大发现,但优越的成藏条件和丰富的剩余资源,决定了库车坳陷仍是塔里木盆地天然气增储上产的主体,无论从复式油气聚集理论出发,还是从不同区带、不同层系成藏条件差异以及勘探的不均衡性出发,库车坳陷前陆冲断带仍然具有巨大的勘探潜力。特别是克拉苏构造带和东秋构造带,在断层下盘都取得了大发现,但断层上盘仅仅发现了克拉2大气藏,纵向上主要含油气层系为白垩系巴什基奇克组,平面上油气藏主要位于克拉苏断层和东秋断层下盘。相似的构造背景和相同的储盖组合,勘探结果出现如此大差异。本研究试图从克拉苏构造带和东秋构造带不同区、不同段和不同层系构造特征、勘探的不均衡性以及储盖组合类型等角度,分析勘探现状和成藏条件的异同,梳理关键问题,明确勘探潜力和勘探方向,锁定有利勘探层系和目标。

1 地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部,是新生代晚期形成的陆内前陆盆地^[5],面积约 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1a),经历了中-新生代印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期构造运动^[3,5-6],具有“南北分带、东西分段、垂向分层、时间分序”的特点(图1b—f),平面上自北向南可分为北部单斜带、前渊带、前缘斜坡带和隆起带4带,自西向东可分为乌什段、拜城段和阳霞段3段^[1],垂向上自下而上分为基底构造层、膏泥岩下构造层、膏泥岩构造层和膏泥岩上构造层4层^[7-8],时间上在三叠

纪一早白垩世、古近纪—中新世表现为拉张环境,晚白垩世、上新世—第四纪表现为挤压环境^[7-9]。

库车坳陷中-新生界以陆相碎屑岩沉积为主(图2),三叠系、侏罗系沼泽相、湖相泥岩和煤系地层作为主力烃源岩,三叠系—新近系冲积扇、扇三角洲、辫状河三角洲及河流相砂岩作为储层,古近系库姆格列木群和新近系吉迪克组湖相盐岩、膏盐岩及泥岩作为区域性优质盖层,垂向上形成多套、多类型储盖组合,在挤压构造背景下形成一系列成排、成带展布的背斜和断背斜圈闭,为油气的聚集成藏提供了良好条件^[1,3,6]。

库车坳陷油气资源丰富,据中国石油第四次油气资源评价,天然气资源量为 $6.99 \times 10^{12} \text{ m}^3$,石油资源量为 $7.64 \times 10^8 \text{ t}$ 。目前已经在乌什凹陷神木构造带白垩系舒善河组,克拉苏构造带白垩系巴西改组、巴什基奇克组及古近系库姆格列木群底砂岩,秋里塔格构造带中秋段巴什基奇克组、古近系底砂岩及迪那段苏维依组—吉迪克组,迪北—吐格尔明构造带侏罗系阿合组—克孜勒努尔组取得重大发现^[1,4-6,10],具有多区带、多层系成藏特点。勘探结果表明,库车地区平面上油气分布和压力系统受生烃中心控制,油气相态呈环带状分布,内气外油。克深地区以干气为主,压力系数为1.7~2.0;博孜、大北、迪那和依南等地区以凝析气为主,压力系数为1.5~1.8;神木地区和库车南斜坡等地区以油为主,压力系数为1.1~1.2^[11-12]。

2 克拉苏构造带成藏特征

克拉苏构造带位于库车坳陷北缘,是南天山山前的第二排构造带,面积超 $5\,000 \text{ km}^2$,中国石油第四次油气资源评价天然气资源量超过 $3.06 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是名副其实的富气区带^[5-6]。克拉苏构造带受南天山隆升与盆山挤压的叠加,南北向发育多排近东西向构造,自西向东可分为阿瓦特、博孜、大北和克深等段,不同带、不同段和不同层勘探存在巨大差异,尤其是克拉苏逆冲断层上、下盘,差异更加明显。

2.1 克拉苏构造带成藏要素

库车坳陷发育上三叠统湖相泥岩和中、下侏罗统煤系两套优质烃源岩(图3a,b),厚度大(480~1\,040 m)、

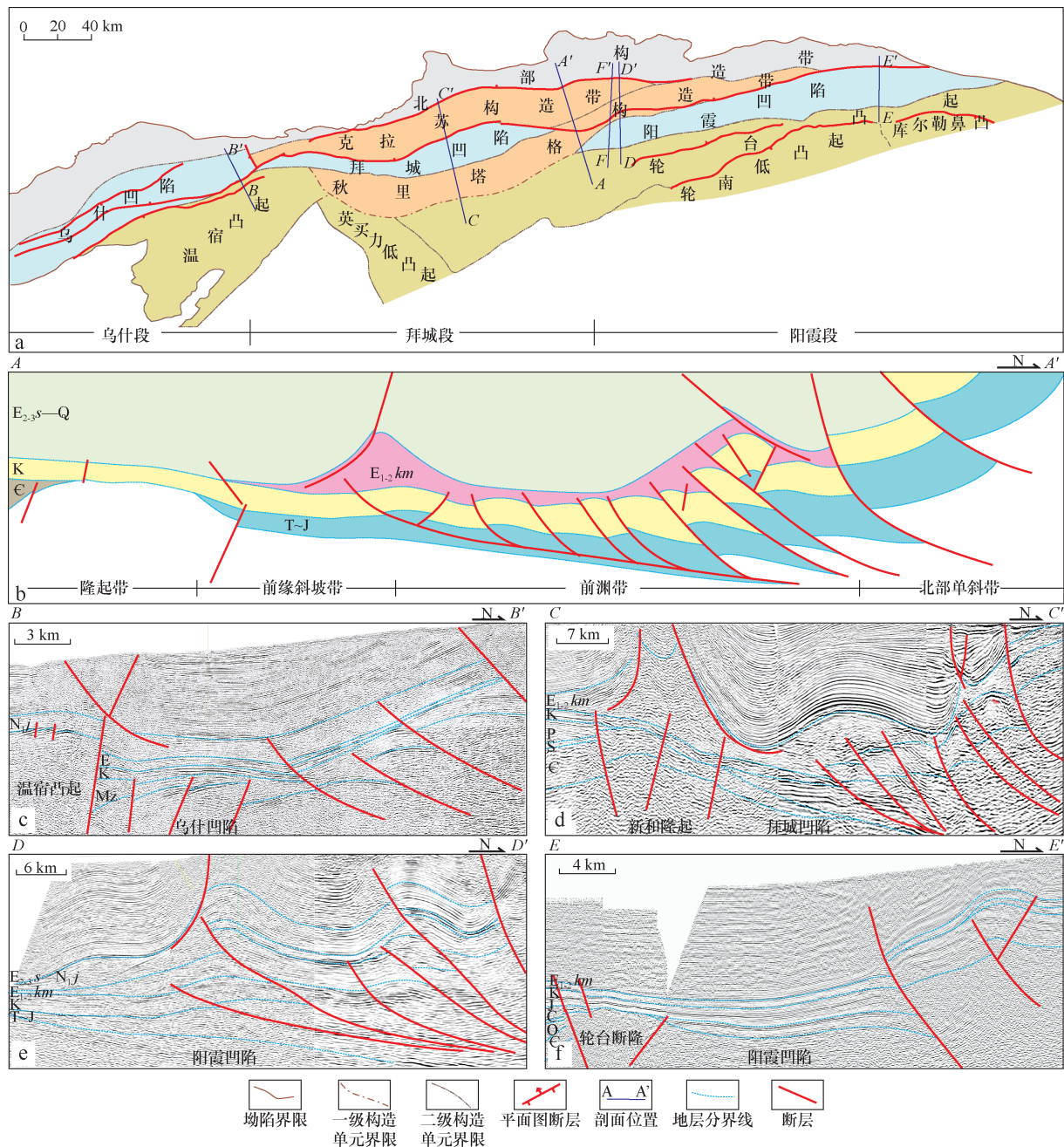


图1 塔里木盆地库车坳陷构造单元划分及典型地震剖面

Fig. 1 Tectonic unit division and typical seismic sections of the Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 库车坳陷构造单元划分; b. 库车坳陷前陆冲断带南北分段特征; c. 乌什凹陷构造特征; d. 克拉苏构造带-西秋构造带构造特征;
e. 克拉苏构造带-东秋构造带构造特征; f. 吐格来明构造带-阳霞凹陷构造特征

Є. 寒武系; O. 奥陶系; C. 石炭系; Q. 第四系; Mz. 中生界; T. 三叠系; J. 侏罗系; K. 白垩系; $E_{1-2} km$. 古近系库姆格列木群;

$E_{2-3} s$. 古近系苏维依组; E. 古近系; N_{1j} . 新近系吉迪克组

分布广($14\,000\text{ km}^2$)、有机质丰度高(平均 $1.63\% \sim 3.78\%$)、成熟度高($R_o > 1.6\%$)、生烃强度大[最大生气强度($350 \sim 400$) $\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$, 最大生油强度($160 \sim 200$) $\times 10^4\text{ t}/\text{km}^2$]、资源量大(累计生油 $234 \times 10^8\text{ t}$, 生气量 $102.6 \times 10^{12}\text{ m}^3$, 总生烃当量 $1\,051 \times 10^8\text{ t}$)^[1,13-14], 克拉苏构造带位于三叠系、侏罗系生烃中心之上; 白垩系巴什基奇克组主要为辫状河三角洲前缘沉积(图3c),

砂体横向连续, 厚度大($200 \sim 300\text{ m}$), 砂地比高($80\% \sim 90\%$), 储层物性好, 裂缝和孔隙发育, 埋深大于 $7\,500\text{ m}$ 孔隙度依然保持在 $4\% \sim 7\%$ ^[15-21]; 古近系库姆格列木群、新近系吉迪克组膏盐岩、膏泥岩区域分布面积超 $2 \times 10^4\text{ km}^2$ (图3d), 受挤压应力及断裂影响, 部分地区厚度剧增, 最厚可达 $4\,000\text{ m}$, 突破压力大、封盖能力强, 形成良好的保存条件^[1]; 库车组沉积

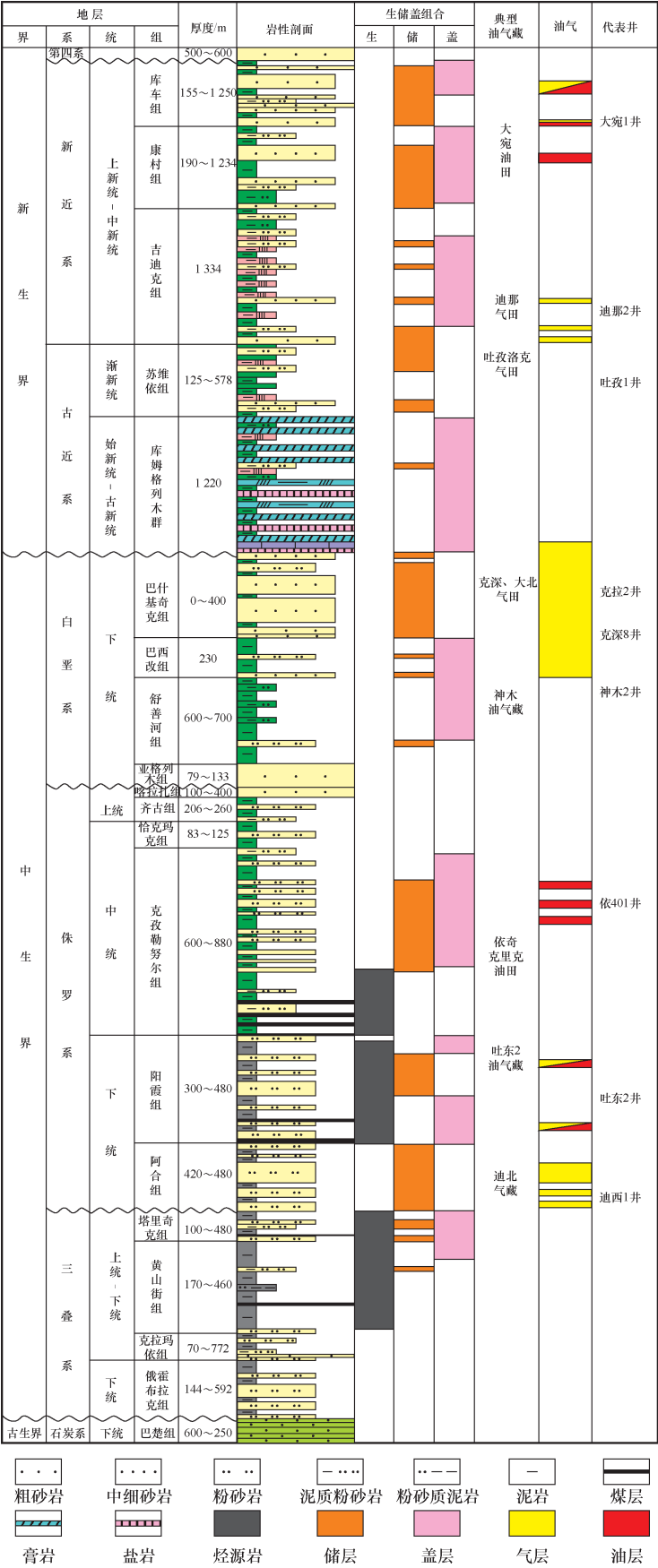


图 2 塔里木盆地库车坳陷中 - 新生界地层综合柱状图 (据文献[1] 修编)

Fig. 2 Stratigraphic column from the Mesozoic to Cenozoic in Kuqa Depression, Tarim Basin (modified from reference[1])

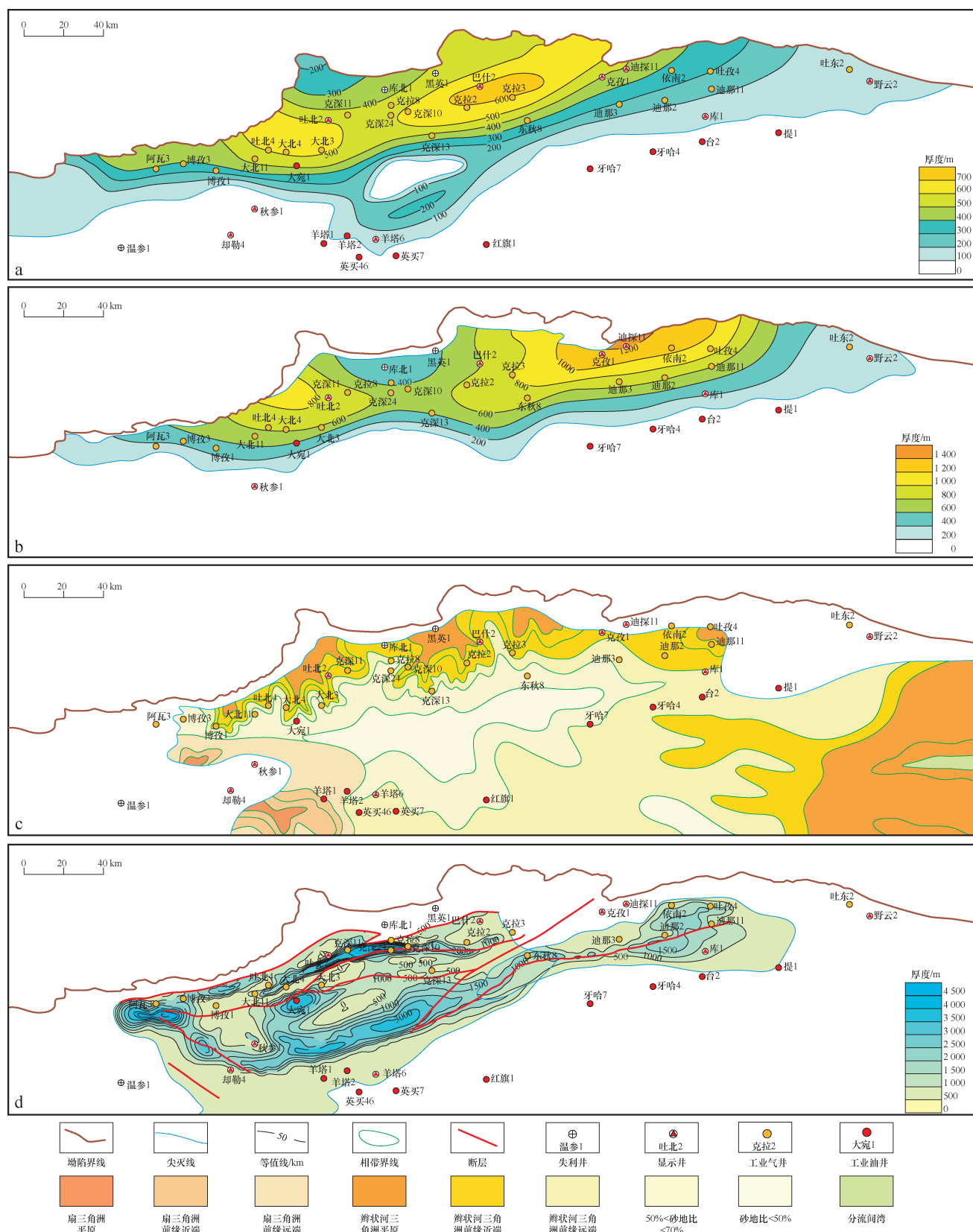


图3 塔里木盆地库车坳陷克拉苏和东秋构造带成藏要素(据文献[1,7,8和11]等修编)

Fig.3 Accumulation elements of Kelaasu and East-Qiulitag structural belts in Kuqa Depression, Tarim Basin
(modified from references[1],[7],[8],[11], etc.)

a. 三叠系烃源岩厚度等值线; b. 侏罗系烃源岩厚度等值线; c. 白垩系巴什基克组沉积相;
d. 古近系库姆格列木群及新近系吉迪克组膏盐岩厚度等值线

期以来形成多排逆冲断层,向下断至三叠系沟通源岩,形成良好运移通道,逆冲构造成排、成带分布,背斜圈闭规模发育^[3,6]。

从上述分析可见,克拉苏构造带发育优质的烃源岩和生储盖组合,良好油气运移通道及成排、成带大面积连片分布的圈闭,具足了成藏所需的所有要素,成藏条件十分优越。但克拉苏断层下盘发现了克深连片分布气藏群,而断层上盘却仅发现了克拉2大气藏的原因需要深入分析。

2.2 克拉苏断层下盘成藏特征

克拉苏构造带深层由于地震资料品质较差,准确的构造解释和圈闭落实难度大,在持续开展地震资料

采集处理攻关,提高成像质量的同时,深化地质研究,在断层相关褶皱理论、盐相关构造理论以及前陆冲断理论等指导下,克拉苏断层下盘构造特征逐渐明确,勘探不断取得新发现,形成了连片分布的万亿立方米级大气区^[3,6]。总结克拉苏断层下盘形成连片分布的大气区主要得益的4个有利条件。

一是成排、成带构造形成连片分布的大型背斜圈闭群。克拉苏构造带受南天山隆升挤压及前缘隆起遮挡影响,在三叠系-侏罗系泥岩和煤层、古近系膏盐层两套滑脱层间,形成多排近东西向冲断构造,各冲断构造有序叠置,每排构造内发育多个背斜、断背斜圈闭,平面上形成连片分布的圈闭群(图4a),为油气大规模聚集提供了有利场所。

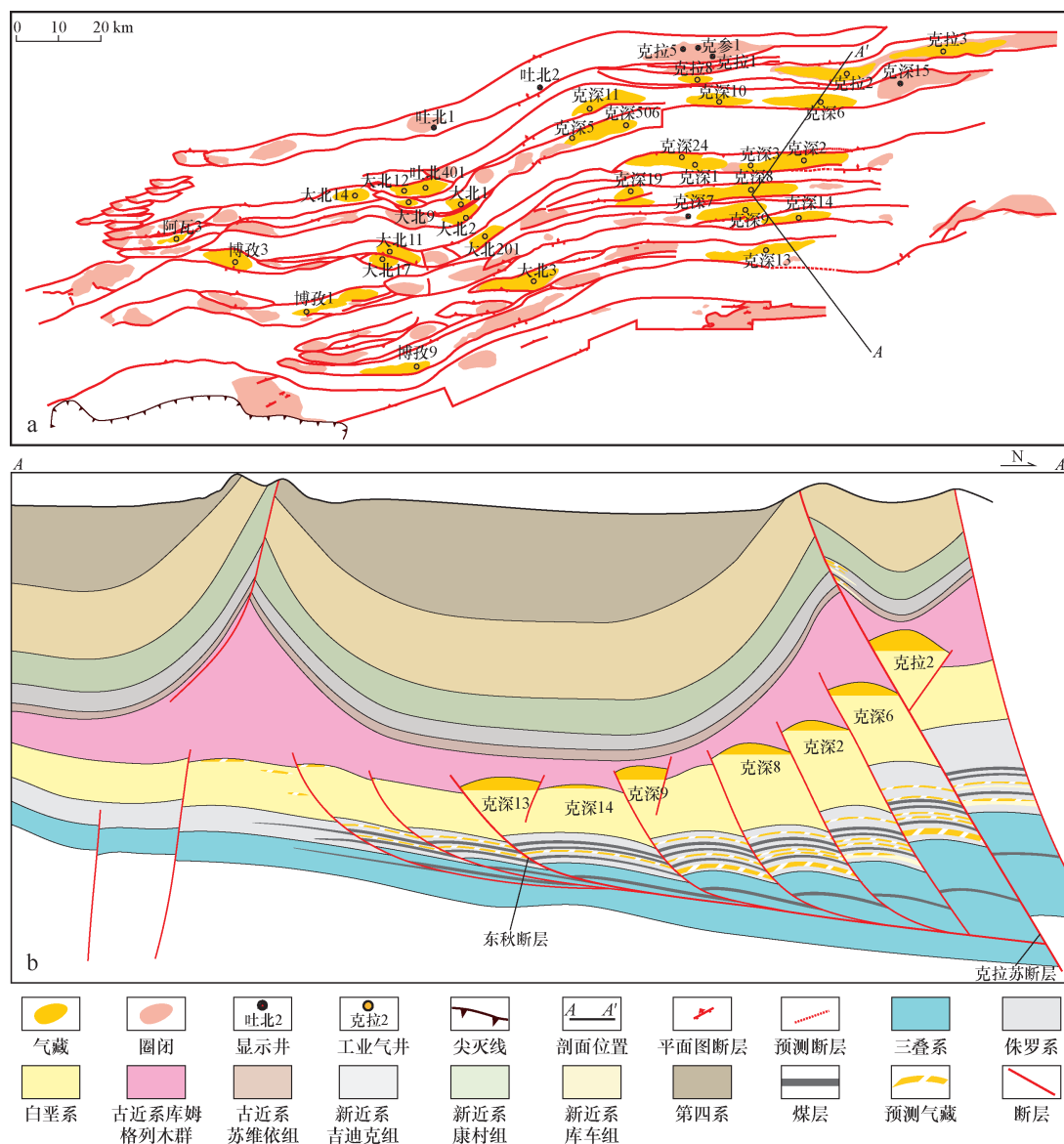


图4 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带圈闭发育情况(a)及成藏模式(b)(平面图据塔里木油田修改)

Fig.4 Trap development(a) and accumulation model(b) of Kelaasu structural belt in Kuqa Depression, Tarim Basin (with the plane map modified from that of Tarim oilfield)

二是控圈断层未断穿膏盐岩盖层,区域盖层完整、封闭性好。克拉苏断层下盘库姆格列木群厚度大、埋深大,膏盐岩呈塑性流变状态,有利于构造应力在膏盐岩内释放^[8,22-24],控圈断层向下沟通三叠系、侏罗系烃源岩,向上未断穿膏盐岩盖层(图4b),既起到油气运移输导的作用又没有破坏圈闭的有效性。

三是高效立体成藏模式(图5)。具体包括烃源岩缝网高效初次运移、逆冲断裂高效垂向输导以及储集层缝网高效聚集。在强挤压应力作用下,三叠系和侏罗系烃源岩内滑脱断层及其周缘的次级断裂、裂缝形成复杂的断裂-缝网系统,沟通大范围烃源岩,有利于烃源岩生成油气通过该断裂-缝网系统高效初次运移。克拉苏构造带成排分布的逆冲断层向下沟通三叠系和侏罗系烃源岩,向上沟通白垩系储层,为油气运移提供高效垂向输导通道。脆性系数较高的储集层在挤压应力下发生强烈形变,在储层中形成天然缝网,对油气高效运移和聚集起重要作用。

四是动静态成藏要素时空匹配好。克拉苏构造带除具有良好的生储盖组合、规模连片圈闭、良好运移通道和优质盖层等静态条件外,成藏要素的动态匹配性也是优越的。克拉苏构造带背斜和断背斜圈闭群在库车期最终定型,在强烈挤压隆升作用下,物源供给充足,沉积速率快。库车组沉积期以来,拜城凹陷库车组沉积速率为376 m/Ma,第四系沉积速度更是高达1 997 m/Ma^[13]。挤压变形和沉积物快速

堆积,使得烃源岩埋深快速增加、快速成熟和大规模生气^[25]。同时形成的通源断裂及裂缝形成油气运移通道,对圈闭进行高效充注。良好的静态成藏条件,叠加圈闭形成、主力烃源岩晚期规模生烃,以及通源断裂形成等要素动态匹配,最终形成连片分布的气藏群。

2.3 克拉苏断层上盘成藏特征

克拉苏构造带断层上盘与断层下盘成藏基础地质条件相似,自1993年克参1井到2016年克拉9井,断层上盘部署探井十余口,白垩系巴什基奇克组发现了克拉2大气藏及克拉8气藏,古近系库姆格列木群克拉3井获工业气流,其余井均未获工业气流,下面对造成这种勘探现状的原因进行分析。

2.3.1 顶冲构造形成独特的“盐包圈”使克拉2得以成藏

克拉2构造是克拉苏构造带勘探突破的第一个构造,也是目前发现的单体储量规模最大的气藏,位于克拉苏断层上盘东带,圈闭面积49 km²,幅度510 m,气藏面积48 km²,幅度448 m,探明天然气地质储量 $2\ 840 \times 10^8$ m³,圈闭充满度高^[2]。克拉2构造的成藏与顶冲构造样式及其保存条件关系密切。在前陆冲断带,当挤压应力达到一定程度以及逆冲构造演化到一定阶段时,由于应力补偿作用,在逆冲断层相关背斜顶

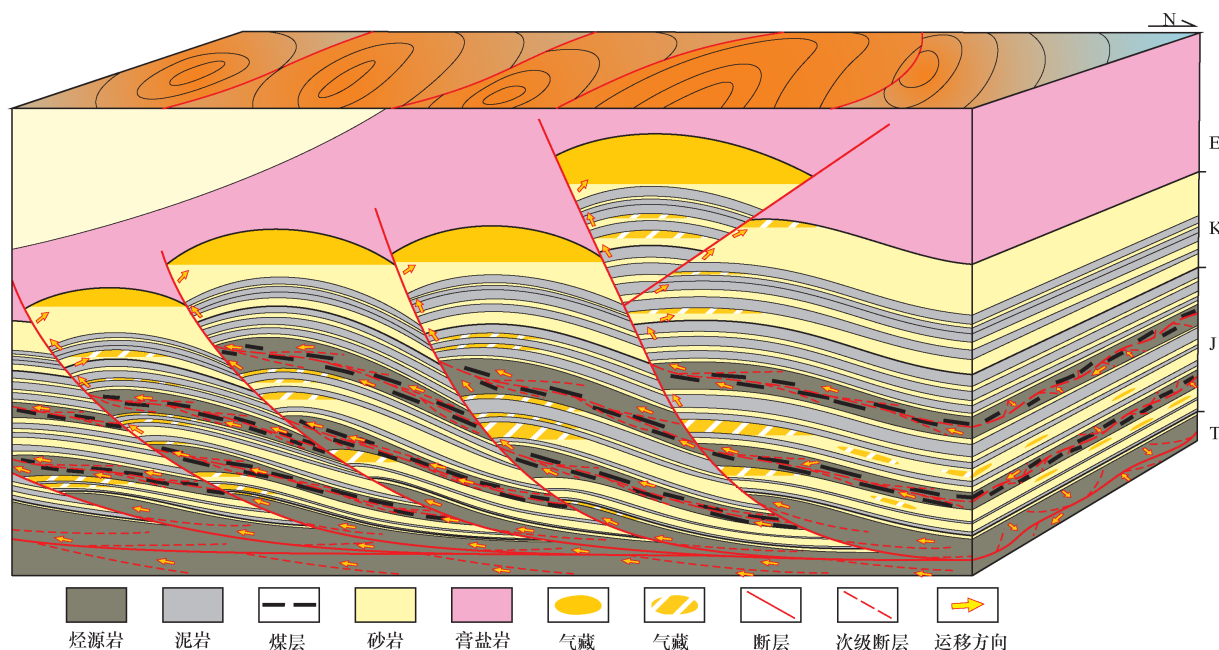


图5 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带高效立体成藏模式

Fig. 5 3D model showing effective accumulation in Kelasu structural belt in Kuqa Depression, Tarim Basin

T. 三叠系; J. 侏罗系; K. 白垩系; E. 古近系

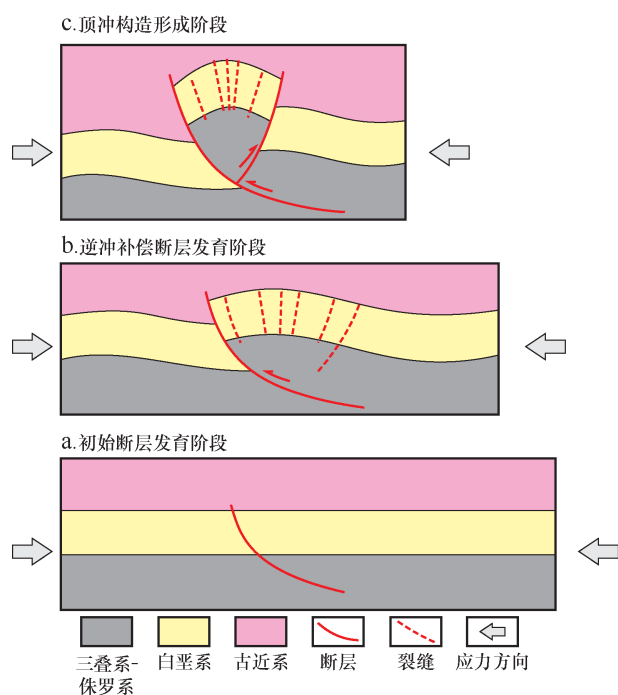


图6 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带顶冲构造发育模式

Fig. 6 Development model of top-up structure in Kelasu structural belt, Kuqa Depression, Tarim Basin

部形成与逆冲断层倾向相反的逆冲补偿断层,由两组断层夹持而形成的构造为顶冲构造。如图6,早期在挤压应力作用下,形成初始断裂,随着应力的加大,形成下部以三叠系-侏罗系泥岩和煤层为滑脱面,顶部终止于古近系库姆格列木群膏盐岩的逆冲滑脱断层,并且地层产生形变,形成的背斜和断背斜产生复杂的裂缝及劈理等,由于地层挤压缩短,在应力补偿作用下,形成与主逆冲断层倾向相反的逆冲补偿断层,在挤压应力下两组断层夹持地层沿断层面垂向运动,形成四周被具有优质封盖能力的膏盐岩包围的“盐包圈”构造,从而具有了完美的封闭保存条件而得以成藏。

2.3.2 克拉苏断层的发育特点决定了断层上盘巴什基奇克组未能成藏

克拉苏断层上盘以巴什基奇克组为储层,库姆格列木群为盖层的已钻探圈闭,除克拉2井外,克拉1井和克拉3井均未成藏,但克拉1井和克拉3井在库姆格列木群及之上的苏维依组、吉迪克组和康村组等大都见到油气显示。克拉3井在库姆格列木群底砂岩和上泥岩段薄砂岩测试获 $35.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,说明三叠系-侏罗系生成油气已经运移到库姆格列木群及其之上地层,克拉苏断层断穿了膏盐岩盖层,破坏了白垩系圈闭的有效性。分析认为造成白垩系巴什基奇克组未成藏的具体原因主要是2个方面。

一是目的层侧向对接岩性影响圈封闭性。当断层向下断达烃源岩而向上又断穿膏盐岩时,断层相关背斜各层系能否成藏则取决于上、下盘地层岩性的侧向对接关系(图7)。具体分为3种情况:①断层上盘顶冲构造形成“盐包圈”而成藏(图6);②薄层砂泥岩互层形成上、下盘随机侧向封堵而成藏;③厚储层只能在形成自圈时才能成藏。通过解剖克拉3圈闭(图7a),上盘巴什基奇克组连续厚层砂岩对接下盘苏维依组砂泥岩(图7b),造成侧向封闭性失效而未成藏。

二是克拉苏断层断穿膏盐岩盖层甚至断达地表影响圈封闭性。克拉苏断层上盘形成的一系列背斜圈闭在巴什基奇克组厚层储层与库姆格列木群膏盐岩盖层组合大都未成藏,说明当逆冲断层断穿膏盐层甚至断达地表,即便仅在断层的某一段断达地表,都会造成圈闭的封闭性变差甚至失效,在断层断达地表的部位会形成泄露窗口以及压力的低势区,导致油气主要向该窗口区优势运移而散失(图8)。因此,对于控带大型逆冲断层,即便仅在部分区域断穿膏盐岩盖层,那么受这条断层控制的背斜和断背斜圈闭中,以厚层储层为目的层的圈闭,特别是临近泄露窗口部位的圈闭成藏难度大。

3 克拉苏构造带勘探突破方向

克拉苏构造带具备成藏所需的所有地质要素,成藏条件优越,虽然已经发现了克深连片分布的大气区及克拉2大气藏,但剩余资源依然十分丰富,待发现天然气资源量超过 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,仍有巨大的勘探潜力,是持续深化勘探的重点区带。除继续对克拉苏断层下盘巴什基奇克组开展精细构造解释,寻找新的可供钻探的目标外,亟需开展大突破的方向、领域、层系和区带研究。

3.1 从复式油气聚集理论和勘探的不均衡看克拉苏构造带下步突破方向

20世纪70—80年代,中国石油地质学家在东部断陷盆地油气勘探实践中,总结提出了复式油气聚集带理论,有效指导了油气勘探^[26]。随着西部叠合盆地勘探开发实践的深入,赋予了复式油气聚集理论新的内涵,形成了具有叠合盆地特点的复式油气聚集理论,即具有多套烃源岩、多套储盖组合、经历多期构造演化、多期油气充注,形成在时间上和空间上多种油气藏类型复合、叠加和连片的油气聚集区^[26-30]。克拉苏构造带垂向上发育多套烃源岩,多套储盖组合,经历了印

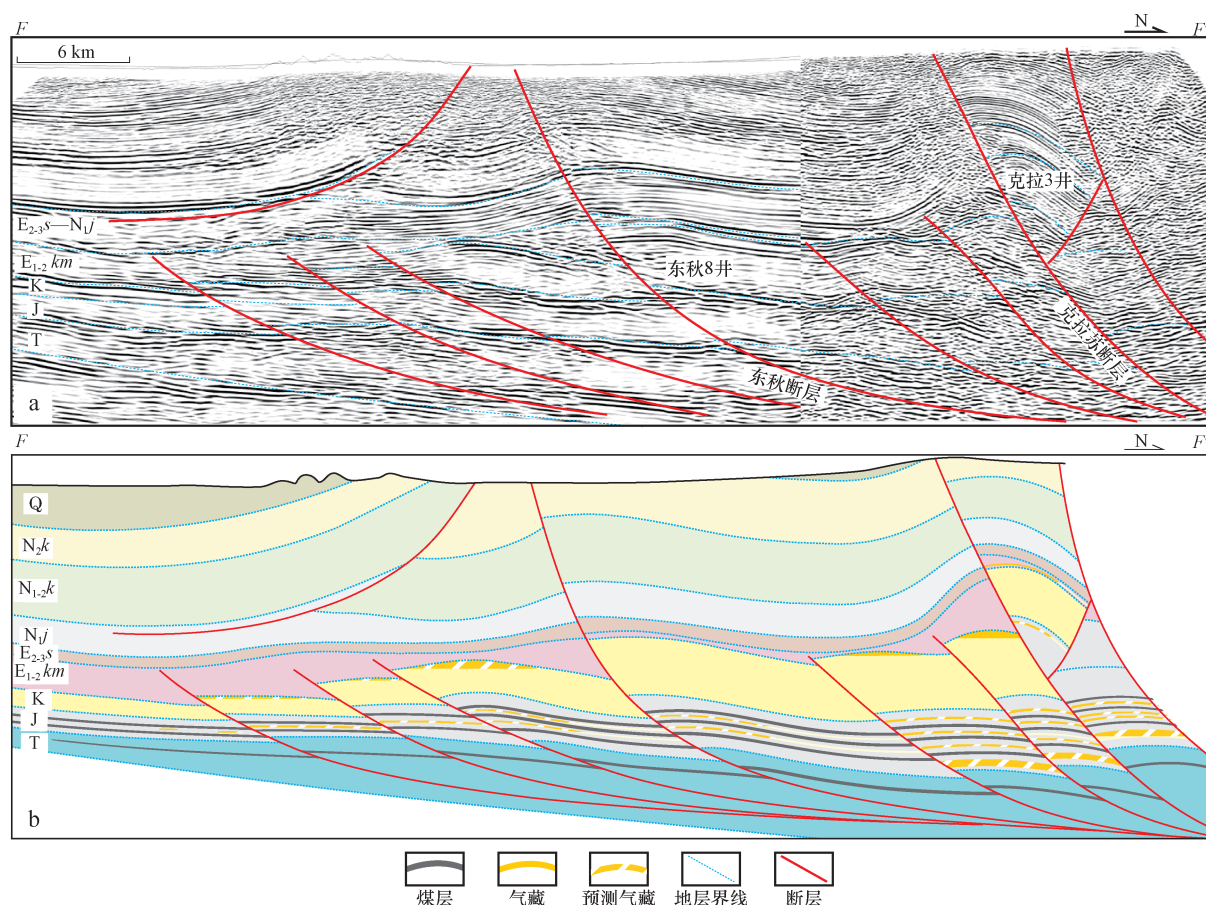


图7 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带-中秋构造带成藏模式($F-F'$ 剖面位置见图1a)

Fig.7 Accumulation model of Kelasu and East-Qiulitag structural belts in Kuqa Depression, Tarim Basin
(see Fig. 1a for the location of section $F-F'$)

a. 过克拉3、东秋8构造地震剖面;b. 克拉苏构造带-中秋构造带成藏模式

T. 三叠系;J. 侏罗系;K. 白垩系; $E_{1-2}km$. 古近系库姆格列木群; E_{2-3s} . 古近系苏维依组; N_{1j} . 新近系吉迪克组;
 N_{1-2k} . 新近系康村组; N_{2k} . 新近系库车组;Q. 第四系

支期、燕山期和喜马拉雅期等多期构造活动,油气多期充注,完全具备形成大型复式油气聚集区的成藏条件。但目前克拉苏构造带天然气勘探目的层主要为巴什基奇克组,领域主要为克拉苏断层下盘冲断带背斜和断背斜,油气藏类型主要为构造油气藏,虽取得一系列发现,但尚未形成多层系、多油气藏类型纵向叠置、横向连片的立体含油气格局。

从目前克拉苏构造带天然气勘探结果看,在层位上和构造上都存在严重的不均衡性。截至2018年底,克拉苏构造带累计发现天然气地质储量 $1.35 \times 10^{12} m^3$ 。在层位上看,三叠系-侏罗系未获发现,白垩系发现三级储量 $1.33 \times 10^{12} m^3$,占已发现储量的98.4%,其中巴西改组探明 $17.78 \times 10^8 m^3$,巴什基奇克组发现三级储量 $13321.78 \times 10^8 m^3$,古近系库姆格列木群探明储量 $192.5 \times 10^8 m^3$;从构造位置看,位于克拉苏断层上盘的储量为 $2964.13 \times 10^8 m^3$,主要为

克拉2气藏,位于断层下盘的储量为 $10585.91 \times 10^8 m^3$,占78.23%,从已发现气藏个数看,断层上盘仅发现克拉2和克拉8气藏,断层下盘发现气藏13个,而且数量在不断增加,不断取得新发现。克拉苏构造带在层位上,三叠系、侏罗系、白垩系舒善河和巴西改组、古近系以及新近系均处于较低勘探程度,在构造位置上,断层上盘勘探程度也远低于断层下盘。低勘探程度层系孕育着未来的勘探潜力。根据复式油气聚集理论和油气有序分布原则,克拉苏构造带断层上盘低勘探程度层系和区域即为未来勘探突破的领域和方向。

3.2 从不同层系储盖组合及油气藏类型看克拉苏构造带下步突破方向

库车前陆冲断带不仅不同区带成藏模式不同,即便是在同一构造带,甚至是受同一条断层控制的不同层的相同类型的圈闭,能否成藏也存在很大的差异。

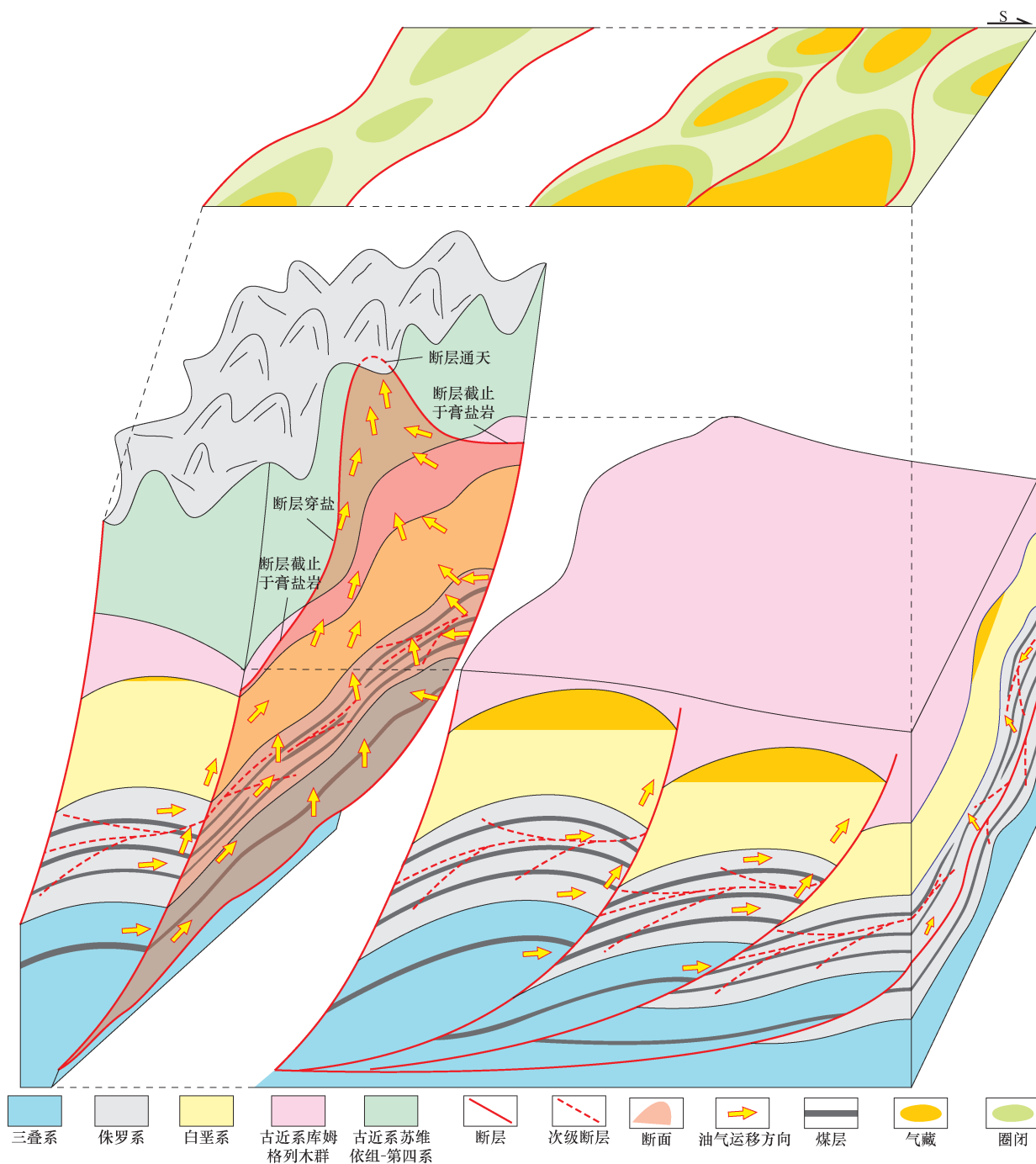


图8 塔里木盆地库车坳陷克拉苏断层上下盘差异成藏模式

Fig. 8 Differential accumulation model between the hanging wall and the foot wall of Kelaasu Fault in Kuqa Depression, Tarim Basin

同样受逆冲断层控制形成的背斜圈闭在成藏上产生巨大差异,主要与断层发育特征、断层两侧不同层系储盖组合特点以及二者之间的匹配有关。因此,通过解剖侏罗系和新生界已知气藏也能说明不同类型储盖组合与断层的匹配在纵向上可以造成不同层系成藏的差异。

库车坳陷中-新生界发育多个沉积旋回,自下而上形成多套储盖组合。储层根据厚度可分为厚砂层和薄砂层。盖层根据岩性可分为膏盐岩和泥岩。综合已

知油气藏,库车地区储盖组合可分为4类8套,其对应的油气藏类型也不尽相同(图9)。

1) 厚砂岩与膏盐岩储盖组合:主要为白垩系巴什基奇克组厚砂岩储层与古近系库姆格列木群膏盐岩和膏泥岩盖层,目前在克拉苏构造带克深、大北、博孜段及秋里塔格构造带中秋段等均获发现,是目前勘探开发的重点,展现连片大气区前景,以背斜型块状底水油气藏为主。

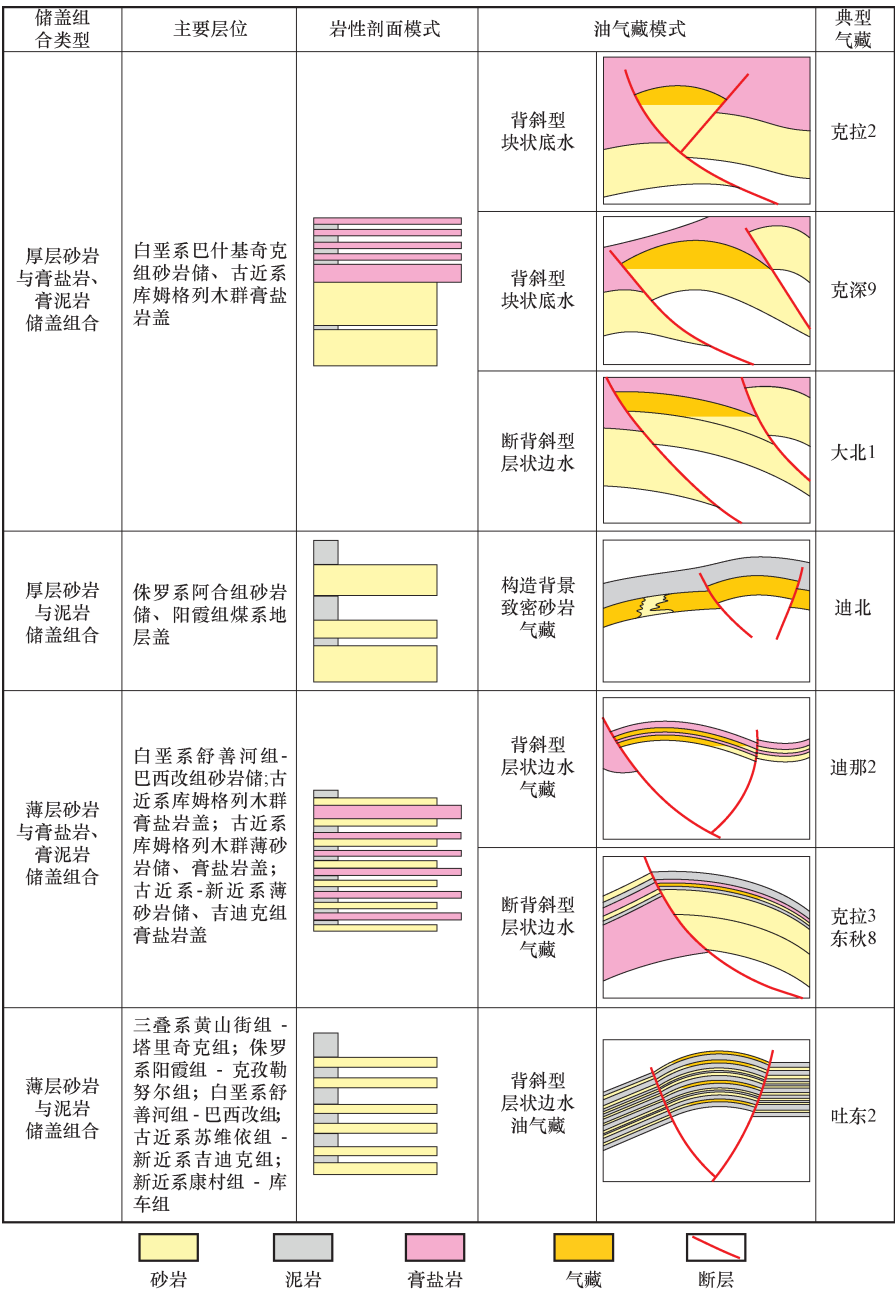


图 9 塔里木盆地库车坳陷主要储盖组合及油气藏类型

Fig. 9 Types of reservoir-caprock combinations and hydrocarbon reservoirs in Kuqa Depression, Tarim Basin

2) 厚层砂岩与泥岩储盖组合:主要为侏罗系阿合组厚砂岩储层与阳霞组下泥岩煤层盖层,目前除北部构造带以外侏罗系普遍埋藏相对较深,大多数并未钻达,但北部构造带东部阿合组已经发现迪北、依南 2 和吐孜 4 等气藏^[31],主要为构造背景上的致密砂岩气藏。

3) 薄砂岩与膏盐岩储盖组合:主要为古近系-新近系薄砂岩储层与吉迪克组膏盐岩盖层、古近系库姆格列木群内薄砂岩储层与膏盐岩、膏泥岩盖层,发现了迪那气藏和吐孜洛克、克拉 3 和东秋 8 等含气构造,主要为背斜型层状边水气藏。

4) 薄砂岩与泥岩储盖组合:三叠系黄山街组-塔里奇克组、侏罗系阳霞组-克孜勒努尔组、白垩系舒善河组、古近系苏维依组-新近系吉迪克组及新近系康村组-库车组均为这种类型。该储盖组合在库车地区广泛发育,由于砂地比较低,形成侧向封堵机率大,在神木构造带舒善河组、吐格尔明构造带阳霞组-克孜勒努尔组及大宛齐油田康村组-库车组等多个地区和多个层系取得发现,主要为构造和构造-岩性油气藏。

以下选取克拉苏构造带断层上盘克拉 3 古近系气藏和吐格尔明构造带断层上盘吐东 2 侏罗系气藏进行解剖,对比不同储盖组合类型成藏特征差异。

克拉苏断层上盘除了克拉2构造白垩系巴什基奇克组成藏外,克拉3构造在古近系库姆格列木群也成藏。克拉3构造白垩系巴什基奇克组未成藏,而古近系库姆格列木群成藏,与两套目的层储层厚度、储盖组合以及断层两侧岩性对接有关,厚储层块状底水油气藏,薄储层层状边水气藏,对侧向封堵的要求是不一样的。克拉3构造位于克拉苏断层上盘,克拉3井钻揭巴什基奇克组320 m,砂地比为74.3%,测试产水,钻揭库姆格列木群586 m,以泥岩和膏盐岩为主,砂地比仅为16.4%,且以粉细砂岩为主,在3472~3479 m内3 m细砂岩获 $35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流。图10反映克拉3井克拉苏断层上盘和下盘岩性对接关系,解剖克拉3油气成藏模式可见,克拉3井巴什基奇克组、库姆格列木群与下盘苏维依组侧向对接。统计表明:苏维依组以砂岩为主,具备侧向封堵能力的泥岩厚度仅占26%,厚层的巴什基奇克组砂岩侧向对接苏维依组砂泥岩,特别是顶部对接的是下盘古近系苏维依组砂岩,造成侧向封堵失效而未成藏。而古近系薄层砂泥岩频繁互层储盖组合则不同,断层上盘和下盘砂岩和泥岩的随机对接,克拉3构造库姆格列木群3472~3479 m薄砂岩侧向对接的就是苏维依组泥岩,垂向封盖膏盐岩,从而得以成藏。

吐格尔明构造位于库车坳陷北部构造带东段,为顶部受剥蚀,元古界变质岩出露的大型背斜构造,吐格

尔明构造带发育两期区域不整合,中生代三叠系-侏罗系不整合于元古界变质岩上,古近系不整合于侏罗系-白垩系之上^[32](图11a,b)。吐格尔明构造带及其周缘地表油苗丰富,多口井因保存条件差而未获工业油气流。2017年吐格尔明构造带东部平缓区的吐东2井在侏罗系阳霞组测试日产油 33.7 m^3 、气 $12.75 \times 10^4 \text{ m}^3$,吐东201井克孜勒努尔组测试日产油 15.1 m^3 、气 $3.75 \times 10^4 \text{ m}^3$,阳霞组日产油 3.6 m^3 、气 $1.13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。吐东2构造阳霞组断背斜圈闭幅度160 m,砂岩储层集中段厚115 m,为一层状边水油气藏。从钻探结果看,吐东2构造侏罗系存在两种类型储盖组合,阳霞组和克孜勒努尔组薄层砂泥岩互层储盖组合,吐东2井和吐东201井均发现高产油气层,阿合组厚层砂岩与薄层泥岩储盖组合测试为含气水层,两种储盖组合勘探成效差异大。分析认为,吐东2构造位于构造斜坡稳定区,阿合组砂地比在70%以上,砂岩单层厚度大且连续,中间夹有薄层泥岩,对侧向封堵条件要求更加苛刻,需要对接厚层泥岩才能成藏,对比表明,吐东2构造阿合组与断层下盘阳霞组内部砂砾岩段侧向对接,侧向封堵失效,而砂地比在50%左右的阳霞组和克孜勒努尔组,为薄砂泥岩频繁互层式组合,在断距合适的情况下,容易形成侧向随机封堵。吐东2井在阳霞组和克孜勒努尔组得以成藏,就是得益于某些砂岩层侧向对接泥岩形成良好侧向封堵(图11c,d)。

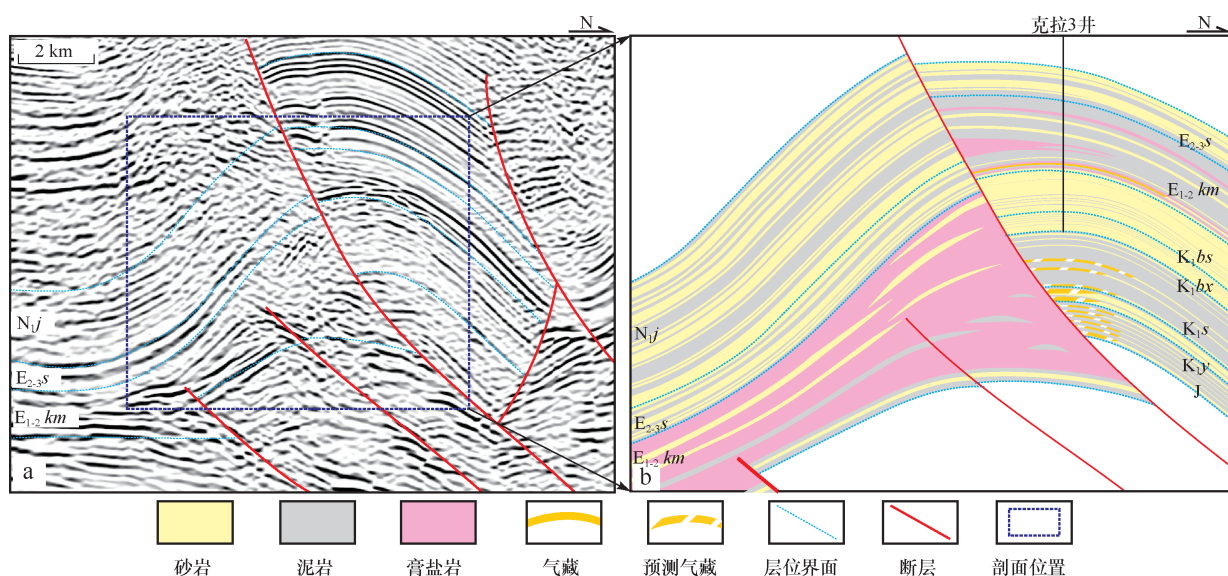


图10 塔里木盆地库车坳陷克拉3构造成藏模式解剖

Fig. 10 Accumulation model analysis of Kela 3 structure in Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 过克拉3构造地震剖面; b. 克拉3气藏解剖

J. 侏罗系; K_{1y}. 下白垩统亚格列木组; K_{1s}. 下白垩统舒善河组; K_{1bx}. 下白垩统巴西改组; K_{1bs}. 下白垩统巴什基奇克组;

E₁₋₂ km. 古近系库姆格列木群; E₂₋₃s. 古近系苏维依组; N_{ij}. 新近系吉迪克组

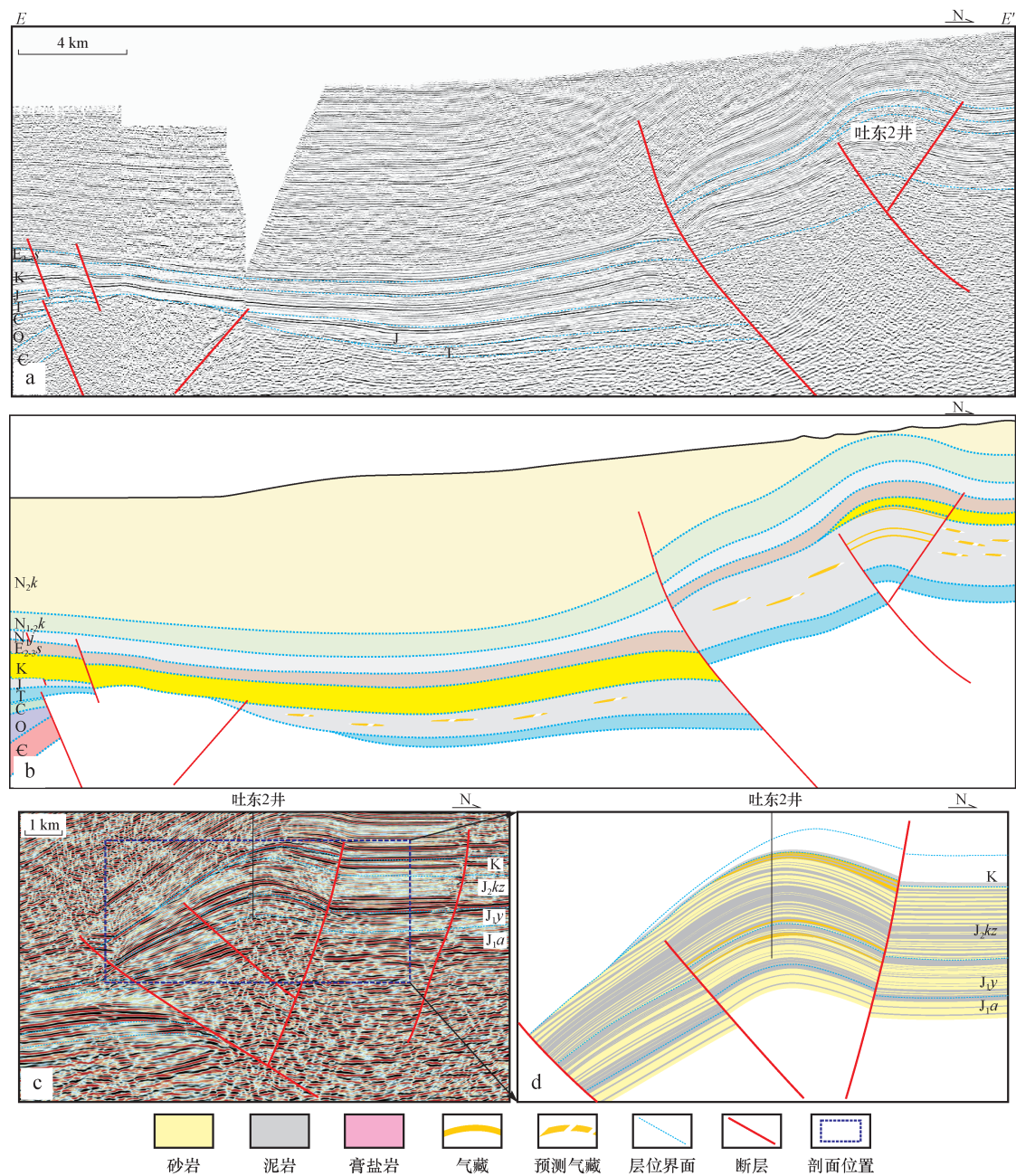


图 11 塔里木盆地库车坳陷吐格爾明构造带 - 阳霞凹陷成藏模式及吐东 2 油气藏解剖

Fig. 11 Accumulation model from Tugerming Tectonic Zone to Yangxia Sag and analysis of Tudong 2 structure in Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 吐格爾明构造带 - 阳霞凹陷地震剖面; b. 吐格爾明构造带 - 阳霞凹陷油气成藏模式; c. 过吐东 2 构造地震剖面; d. 吐东 2 油气藏解剖
C. 寒武系; O. 奥陶系; C. 石炭系; T. 三叠系; J. 侏罗系; K. 白垩系; J_{1a}. 下侏罗统阿合组; J_{1y}. 下侏罗统阳霞组; J_{2kz}. 中侏罗统克孜勒努尔组;
E_{1-2km}. 古近系库姆格列木群; E_{2-3s}. 古近系苏维依组; N_{1j}. 新近系吉迪克组; N_{1-2k}. 新近系康村组; N_{2k}. 新近系库车组

4 东秋里塔格构造带勘探突破方向

如果将克拉苏构造带和东秋构造带类比,会发现二者在构造、沉积、储层、烃源岩、储盖组合、圈闭类型和输导体系等诸多方面具有相似性^[33-35],这些成藏条件的相似性决定了二者也具有相似的成藏模式

(图 7),勘探结果也颇具有相似性,东秋断层上盘东秋 5,6 和 8 等井主要目的层巴什基奇克组均未成藏,仅东秋 8 井在库姆格列木群获工业气流,而断层下盘勘探效果好,发现了中秋 1 白垩系巴什基奇克组气藏。因此,解剖东秋构造带成藏特征,类比克拉苏构造带成藏模式,即可明确东秋断层上盘下步勘探突破方向。

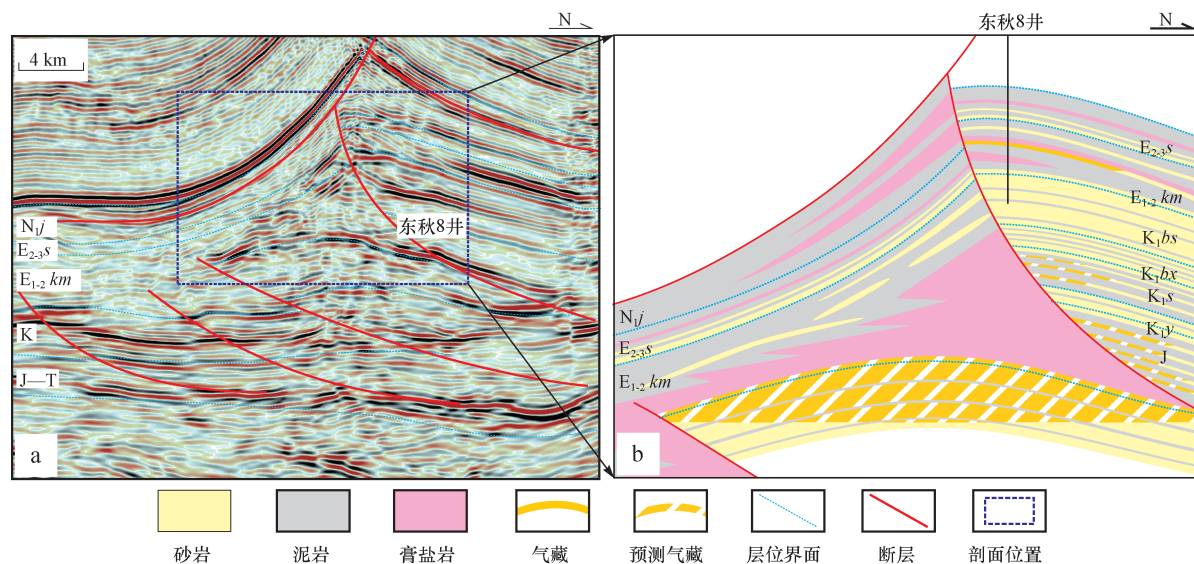


图12 塔里木盆地库车坳陷东秋8构造成藏模式解剖

Fig. 12 Accumulation model analysis of Dongqiu 8 structure in Kuqa Depression, Tarim Basin

a. 过东秋8构造地震剖面; b. 东秋8气藏解剖

T. 三叠系; J. 侏罗系; K. 白垩系; $E_{1-2} km$. 古近系库姆格列木群; $E_{2-3} s$. 古近系苏维依组; N_{1j} . 新近系吉迪克组; K_{1bs} . 下白垩统巴什基奇克组; K_{1bx} . 下白垩统巴西改组; K_{1s} . 下白垩统舒善河组; K_{1y} . 下白垩统亚格列木组

克里塔格构造带东秋断层下盘与克拉苏构造带类似,发育一系列逆冲叠瓦背斜构造(图12a),断层向下断达三叠系-侏罗系烃源岩,向上未断穿膏盐岩盖层,其下伏三叠系和侏罗系优质烃源岩,发育与克拉苏构造带相似沉积体系和储盖组合,成藏要素的相似性决定了两个构造带成藏模式的类似性(图7)。

同样,东秋断层上盘巴什基奇克组未成藏的原因,也与克拉苏构造带具有相似性。除了东秋断层在某些地方断达地表致使断层上盘圈闭封闭性变差外,侧向封堵因素也是造成圈闭失利的重要原因(图12b)。东秋8井钻揭巴什基奇克组242 m,砂地比84.9%,测试日产水超百吨。断层上盘巴什基奇克组厚层砂岩侧向对接的是断层下盘苏维依组砂泥岩,造成侧向封闭性变差而未成藏。东秋8井钻揭库姆格列木群厚560 m,砂地比为19.7%,以粉砂岩为主,细砂岩以上近18 m,在4 666~4 669 m粉砂岩段测试获 $28.7 \times 10^4 m^3/d$,薄储层得以成藏。东秋8井古近系库姆格列木群薄层砂泥岩频繁互层对接下盘吉迪克组泥岩,某些薄层储盖组合侧向随机封堵从而成藏。

东秋断层上盘侏罗系和古近系受逆冲断层控制,与白垩系地层同时形成断层相关背斜圈闭,但由于储盖组合类型不同,不同层系不同类型储盖组合侧向对接不同,薄层储层砂泥岩频繁互层可以随机封堵成藏。因此对于东秋构造带,与克拉苏构造带一样,侏罗系和古近系也是下步勘探突破的方向。

5 结论

1) 克拉苏构造带和东秋构造带具足了天然气成藏的所有动静态要素。大面积优质烃源岩、规模有效储层、多套储盖组合、区域性厚层膏盐岩盖层和成排、成带的大型构造圈闭,晚期快速深埋、高效生烃及复杂断裂缝网形成高效立体输导体系,为克拉苏构造带和东秋构造带天然气成藏提供了所有的动静态成藏条件。

2) 克拉苏构造带和东秋构造带构造特征决定了断层下盘、断层上盘成藏的差异性。克拉苏断层下盘发育的一系列断层下通源岩,上未穿盐,与之相关的断背斜圈闭保存条件好,形成了超万亿方连片分布大气区;而克拉苏断层虽然下通源岩,但向上穿盐甚至断达地表,断距大,侧向封堵条件差,破坏了圈闭的有效性,仅发现一个因顶冲构造形成的“盐包圈”型大气藏——克拉2气藏。

3) 克拉苏断层和东秋断层发育特点与断层上下盘储盖组合类型控制断层上盘成藏层系。克拉苏和东秋逆冲断层相关背斜各层圈闭能否成藏,纵向上不同储盖组合类型与断层的匹配形成的上下盘岩性对接起着关键性作用。侏罗系和古近系中的薄层砂岩与泥岩频繁互层式储盖组合类型更容易形成随机侧向封堵而成藏。

4) 克拉苏构造带和东秋构造带断层上盘侏罗系

和古近系是未来库车天然气勘探重要接替领域和突破方向。从勘探的不均衡性、复式油气聚集理论、储盖组合特征及典型油气藏解剖、已钻井成败经验启示及埋藏深度等看,克拉苏断层和东秋断层上盘的侏罗系和古近系是下步天然气勘探的重大突破方向和最为现实的接替领域。

参 考 文 献

- [1] 王招明,李勇,谢会文,等.库车前陆盆地超深油气地质理论与勘探实践[M].北京:石油工业出版社,2017.
Wang Zhaoming, Li Yong, Xie Huiwen, et al. Ultra deep oil and gas geological theory and exploration practice in Kuqa foreland basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [2] 贾承造,周新源,王招明,等.克拉2气田石油地质特征[J].科学通报,2002,11(S):91-96.
Jia Chengzao, Zhou Xinyuan, Wang Zhaoming, et al. Petroleum and geology characteristics of Kela 2 gas field [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 11(S): 91-96.
- [3] 王招明,李勇,谢会文,等.库车前陆盆地超深层大油气田形成的地质认识[J].中国石油勘探,2016,21(1):37-43.
Wang Zhaoming, Li Yong, Xie Huiwen, et al. Geological understanding on the formation of large-scale ultra-deep oil-gas field in Kuqa foreland basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 37-43.
- [4] 蔚远江,杨涛,郭彬程,等.中国前陆冲断带油气勘探、理论与技术主要进展和展望[J].地质学报,2019,93(3):545-564.
Yu Yuanjiang, Yang Tao, Guo Bincheng, et al. Major advances and outlook for oil and gas exploration, theory and technology of foreland thrust belts in China [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 545-564.
- [5] 谢会文,李勇,漆家福,等.库车坳陷中部构造分层差异变形特征和构造演化[J].现代地质,2012,26(4):682-690.
Xie Huiwen, Li Yong, Qi Jiafu, et al. Differential structural deformation and tectonic evolution in the middle part of Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Geoscience, 2012, 26(4): 682-690.
- [6] 杜金虎,王招明,胡素云,等.库车前陆冲断带深层大气区形成条件与地质特征[J].石油勘探与开发,2012,39(4):385-393.
Du Jinhu, Wang Zhaoming, Hu Suyun, et al. Formation and geological characteristics of deep giant gas provinces in the Kuqa foreland thrust belt, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(4): 385-393.
- [7] 杨克基,漆家福,马宝军,等.库车坳陷克拉苏构造带盐上和盐下构造变形差异及其控制因素分析[J].大地构造与成矿学,2018,42(2):211-224.
Yang Keji, Qi Jiafu, Ma Baojun, et al. Differential tectonic deformation of subsalt and suprasalt strata in Kuqa Depression and their controlling factors [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(2): 211-224.
- [8] 余海波,漆家福,杨宪章,等.塔里木盆地库车坳陷中生界构造古地理分析[J].高校地质学报,2016,22(4):657-669.
Yu Haibo, Qi Jiafu, Yang Xianzhang, et al. The mesozoic tectonic palaeogeographic analysis in Kuqa Depression of Tarim Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2016, 22(4): 657-669.
- [9] 郑孟林,王毅,金之钧,等.塔里木盆地叠合演化与油气聚集[J].石油与天然气地质,2014,35(6):925-934.
Zheng Menglin, Wang Yi, Jin Zhijun, et al. Superimposition, evolution and petroleum accumulation of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 925-934.
- [10] 杜金虎,田军,李国欣,等.库车坳陷秋里塔格构造带的战略突破与前景展望[J].中国石油勘探,2019,24(1):16-23.
Du Jinhu, Tian Jun, Li Guoxin, et al. Strategic breakthrough and prospect of Qiulitag structural belt in Kuqa Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 16-23.
- [11] 赵孟军,鲁雪松,卓勤功,等.库车前陆盆地油气成藏特征与分布规律[J].石油学报,2015,36(4):395-404.
Zhao Mengjun, Lu Xuesong, Zhuo Qingong, et al. Characteristics and distribution law of hydrocarbon accumulation in Kuqa foreland basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 395-404.
- [12] 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. Origin and controlling factors of Mesozoic-Cenozoic gas condensates with high wax content and high gravity oil in Kuqa Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1255-1269.
- [13] 鲁雪松,宋岩,赵孟军,等.库车前陆盆地复杂挤压剖面热演化历史模拟及烃源岩成熟度演化特征[J].天然气地球科学,2014,25(10):1547-1557.
Lu Xuesong, Song Yan, Zhao Mengjun, et al. Thermal history modeling of complicated extrusional section and source rock maturation characteristics in Kuqa foreland basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1547-1557.
- [14] 卓勤功,赵孟军,李勇,等.库车前陆盆地古近系岩盐对烃源岩生气高峰期的迟缓作用及其意义[J].天然气地球科学,2014,25(12):1903-1912.
Zhuo Qingong, Zhao Mengjun, Li Yong, et al. The delay of paleogene evaporate on the gas generation peak of source rocks and its significance in Kuqa foreland basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(12): 1903-1912.
- [15] 马玉杰,张荣虎,唐雁刚,等.塔里木盆地库车坳陷白垩系巴什基奇克组岩相古地理[J].新疆石油地质,2016,37(3):249-256.
Ma Yujie, Zhang Ronghu, Tang Yangang, et al. Lithofacies paleogeography of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2016, 37(3): 249-256.
- [16] 孙海涛,钟大康,李勇,等.超深低孔特低渗砂岩储层的孔隙成因及控制因素——以库车坳陷克深地区巴什基奇克组为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(3):693-704.
Sun Haitao, Zhong Dakang, Li Yong, et al. Porosity origin and controlling factors of ultra-deep porosity and ultra-low permeability sandstone reservoirs: A case study of Bashijiqike Formation in Keshen area of Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(3): 693-704.
- [17] 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 reservoir: A case study of Keshen-8 gas pool in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 719-729.

- [18] 罗威,李忠,徐文秀,等.塔里木盆地库车坳陷巴什基奇克组砂岩储层形成演化过程[J].世界地质,2017,36(4):1144-1151.
Luo Wei, Li Zhong, Xu Wenxiu, et al. Formation and evolution of sandstone reservoirs of Bashijiqike Formation in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Global Geology, 2017, 36(4): 1144-1151.
- [19] 高文杰,李贤庆,张光武,等.塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带深层致密砂岩气藏储层致密化与成藏关系[J].天然气地球科学,2018,29(2):226-235.
Gao Wenjie, Li Xianqing, Zhang Guangwu, et al. The relationship research between densification of reservoir and accumulation of the deep tight sandstone gas reservoirs of the Kelasu tectonic zone in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(2): 226-235.
- [20] 周鹏,尹宏伟,周露,等.断背斜应变中和面张性段储层主控因素及预测方法——以克拉苏冲断带为例[J].大地构造与成矿学,2018,42(1):50-59.
Zhou Peng, Yin Hongwei, Zhou Lou, et al. Reservoircontrolling factor and forecast of tensional zone in geostain neutral plane of faulted anticline: Example from Kelasu fold-thrust belt[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(1): 50-59.
- [21] 王俊鹏,张惠良,张荣武,等.裂缝发育对超深层致密砂岩储层的改造作用——以塔里木盆地库车坳陷克深气田为例[J].石油与天然气地质,2018,39(1):77-88.
Wang Junpeng, Zhang Huiliang, Zhang Rongwu, et al. Enhancement of ultra-deep tight sandstone reservoir quality by fractures: A case study of Keshen gas field in Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(1): 77-88.
- [22] 唐鹏程,饶刚,李世琴,等.盐层厚度对褶皱拼接样式的影响——以库车褶皱-冲断带西段前缘背斜带为例[J].地质学报,2018,92(3):437-448.
Tang Pengcheng, Rao Gang, Li Shiqin, et al. The effect of salt thickness on fold lateral linkage: A case study of the anticlines in the leading edge of the western Kuqa fold and thrust belt, South Tianshan[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(3): 437-448.
- [23] 谢会文,李勇,郭卫星,等.塔里木盆地库车坳陷中段盐上层构造特征[J].石油与天然气地质,2011,32(54):768-776.
Xie Huiwen, Li Yong, Guo Weixing, et al. Structural features of post-salt layers in the middle sedimentary cover of Kuqa Depression, the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(54): 768-776.
- [24] 雷刚林,谢会文,张敬洲,等.库车坳陷克拉苏构造带构造特征及天然气勘探[J].石油与天然气地质,2007,28(6):816-820.
Lei Ganglin, Xie Huiwen, Zhang Jingzhou, et al. Structural features and natural gas exploration in the Kelasu structural belt, Kuqa Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 816-820.
- [25] 吴海,赵孟军,卓勤功,等.膏盐岩对地层温度及烃源岩热演化的影响定量分析——以塔里木库车前陆盆地为例[J].石油勘探与开发,2016,43(4):550-558.
Wu Hai, Zhao Mengjun, Zhuo Qingong, et al. Quantitative analysis of the effect of salt on geothermal temperature and source rock evolution: A case study of Kuqa foreland basin, Western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 550-558.
- [26] 胡见义,徐树宝,童晓光.渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布[J].石油勘探与开发,1986,1:1-8.
Hu Jianyi, Xu Shubao, Tong Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 1: 1-8.
- [27] 贾承造,邹才能,杨智,等.陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J].石油勘探与开发,2018,45(4):546-560.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Yang Zhi, et al. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of Central and Western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 546-560.
- [28] 贾承造.论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J].石油勘探与开发,2017,44(1):1-11.
Jia Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.
- [29] 罗佳强,沈忠民.主运移通道控烃论[J].成都理工大学学报(自然科学版),2005,32(3):221-230.
Luo Jiajiang, Shen Zhongmin. Main migration path controlling hydrocarbon theory[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 32(3): 221-230.
- [30] 杜金虎,易士威,卢学军,等.试论富油凹陷油气分布的“互补性”特征[J].中国石油勘探,2004,9(1):15-22.
Du Jinhu, Yi Shiwei, Lu Xuejun, et al. “Complementarity” feature of hydrocarbon distribution in oil-rich sag[J]. China Petroleum Exploration, 2004, 9(1): 15-22.
- [31] 王朋,孙灵辉,王核,等.库车坳陷下侏罗统阿合组致密砂岩储层孔隙微观结构特征及其对致密气富集的控制作用[J].石油与天然气地质,2020,41(2):295-304.
Wang Peng, Sun Linghui, Wang He, et al. Microscopic pore structure of the tight sand gas reservoirs of the Low Jurassic in Kuqa Depression and its controls on tight gas enrichment[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 295-304.
- [32] 滕学清,李勇,杨沛,等.库车坳陷东段差异构造变形特征及控制因素[J].油气地质与采收率,2017,24(2):15-21.
Teng Xueqing, Li Yong, Yang Pei, et al. Differential structural deformation and its control factors in the eastern segment of Kuqa Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 15-21.
- [33] 李德江,易士威,冉启贵,等.塔里木盆地库车坳陷东秋里塔格构造样式及勘探前景[J].天然气地球科学,2016,27(4):584-590.
Li Dejiang, Yi Shiwei, Ran Qigui, et al. Structural characters and potentiality of the east Qiulitage anticline belt in Kuqa Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(4): 584-590.
- [34] 徐振平,赵博,汪新,等.库车坳陷东秋里塔格构造带隐伏构造定量计算[J].石油学报,2016,37(3):311-317.
Xu Zhenping, Zhao Bo, Wang Xin, et al. Quantitative calculation on buried structure of Eastern Qiulitage structural belt, Kuqa Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 311-317.
- [35] 杨敏,赵一民,闫磊,等.塔里木盆地东秋里塔格构造带构造特征及其油气地质意义[J].天然气地球科学,2018,29(6):826-833.
Yang Min, Zhao Yimin, Yan Lei, et al. Structural features of the eastern Qiulitage tectonic belt and petroleum geological significance[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(6): 826-833.