

文章编号: 0253-2697(2015)04-0395-10 DOI:10.7623/syxb201504001

库车前陆盆地油气成藏特征与分布规律

赵孟军¹ 鲁雪松¹ 卓勤功¹ 李勇² 宋岩¹ 雷刚林² 王媛²

(1. 中国石油勘探开发研究院 中国石油天然气集团公司盆地构造与油气成藏重点实验室 北京 100083;

2. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000)

摘要:库车前陆盆地是中国目前油气勘探程度和研究程度最高的前陆盆地。在深入认识库车前陆盆地油气成藏条件和油气聚集过程的基础上,总结了库车前陆盆地的油气分布规律:①平面上,油气相态在克拉苏构造带中部以干气为主,以此为中心向南、北两侧及东、西两端渐变为凝析气、油藏;②垂向上,以第三系含盐地层和侏罗系煤系泥岩 2 套区域盖层划分为盐上、盐下和深层 3 套成藏组合,盐下白垩系成藏组合是天然气勘探主体;③从南向北,不同构造带的油气藏类型、油气相态、油气成藏期次表现为时空上的有序聚集;④从东向西,不同构造段构造特征、油气藏类型、成藏特征和资源潜力具有差异性,具有中段油气富集的特征。通过对油气成藏规律和油气分布特征的认识,整体建立了库车前陆盆地从非常规致密油气到常规油气的有序聚集模式,深入认识了油气分布规律和有利勘探领域。

关键词:成藏条件;成藏过程;分布规律;成藏组合;有序聚集;库车前陆盆地

中图分类号:TE122.14

文献标识码:A

Characteristics and distribution law of hydrocarbon accumulation in Kuqa foreland basin

Zhao Mengjun¹ Lu Xuesong¹ Zhuo Qingong¹ Li Yong² Song Yan¹ Lei Ganglin² Wang Yuan²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC Key Laboratory of Basin Structure and Hydrocarbon Accumulation, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development,

PetroChina Tarim Oilfield Company, Xinjiang Korla 841000, China)

Abstract: At present, Kuqa foreland basin has the highest degree of prospecting and attracts the most attention from researchers in China. Based on the deep understanding of accumulation condition and process, the oil and gas distribution law was systematically analyzed and summarized; (1) Horizontally, dry gas mainly exists in the central segment of Kelasu tectonic belt, while condensate gas and oil reservoirs gradually appear from this center to the north and south sides, and to the east and west ends; (2) Vertically, taking the tertiary salt-bearing strata and mudstone in Jurassic coal measures as two sets of regional cap rocks, it can be divided into three sets of reservoir-forming combinations, i. e., the supra-salt, sub-salt, and deep layer combination. Among them, Cretaceous combination under the salt-bearing strata is the main exploration domain for natural gas; (3) From south to north, the reservoir type, hydrocarbon phase state, accumulation time in different tectonic belts are shown as ordered time-space aggregation; (4) From east to west, there are certain differences in tectonic characteristics, reservoir types, hydrocarbon accumulation characteristics and resource potential between various segments, and rich hydrocarbon is found in the middle segment. Based on the analysis of hydrocarbon accumulation law and distribution characteristics, an integrated orderly accumulation model is established for both conventional petroleum and unconventional tight oil and gas in Kuqa foreland basin, which is useful to further recognize the hydrocarbon distribution law and favorable exploration domains.

Key words: accumulation condition; accumulation process; distribution law; reservoir-forming combination; orderly accumulation; Kuqa foreland basin

引用:赵孟军,鲁雪松,卓勤功,李勇,宋岩,雷刚林,王媛.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.

Cite: Zhao Mengjun, Lu Xuesong, Zhuo Qingong, Li Yong, Song Yan, Lei Ganglin, Wang Yuan. Characteristics and distribution law of hydrocarbon accumulation in Kuqa foreland basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(4): 395-404.

库车前陆盆地是中国重要的天然气勘探开发基地之一,在中国中西部诸多前陆盆地中,库车前陆盆地是目前天然气储量发现最多、单体气藏规模最大的前陆盆地,油气勘探和研究程度最高。自从克拉 2、迪那 2

和牙哈等大气田发现以来,随着勘探的不断深入,近几年来在克拉苏构造带 6 000~8 000 m 的深层又相继发现了大北、克深 2、克深 5、克深 8 等一批大气田(藏)。但库车前陆盆地目前的勘探及地质认识程度仍存在较

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05003)和中国石油天然气集团公司科技开发项目(2011-B0403)资助。

第一作者及通信作者:赵孟军,男,1965年4月生,1988年获长春地质学院学士学位,1994年获中国石油勘探开发研究院博士学位,现任中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心副主任、教授级高级工程师,主要从事油气成藏综合研究。Email:zmj@petrochina.com.cn

大的不均匀性,油气分布规律及勘探方向不十分清楚。前人及作者前期针对库车前陆盆地油气成藏开展了大量的研究工作,主要侧重于对库车前陆盆地典型油气藏特征、成藏过程^[1-11]、油气成藏条件^[12-16]与成藏主控因素^[17-19]进行分析,但对库车前陆盆地整体成藏规律的认识仍不够。因此,笔者在现有的勘探发现及深入认识油气成藏条件和油气聚集过程的基础上,重点对库车前陆盆地的油气分布规律进行系统分析总结,对于认识该盆地油气分布规律、指出下一步有利勘探方向具有重要意义,对中国中西部其他前陆盆地的勘探也具有借鉴意义。

1 油气成藏规律

1.1 油气成藏条件

库车前陆盆地天然气成藏地质条件十分优越^[12-19]。古近系膏盐岩盖层与下伏白垩系巨厚砂岩储层组成了优质储盖组合,目前已发现的大型油气田都分布在这套储盖组合中。三叠系、侏罗系煤系烃源岩具有厚度大、生烃强度大、持续生排烃、晚期快速大量生气的特点,奠定了形成大气田的烃源基础,目前库车前陆盆地已发现的天然气都为煤成气。由于古近系膏盐岩层的存在,冲断变形表现出明显的分层特征^[20-22],盐上以盐岩层内滑脱形成的逆冲断层及相关褶皱构造为主,盐下则形成大量逆冲叠瓦断层及其相关褶皱,构造圈闭平面上成排成带分布,垂向上相互叠置,为构造型大气区的形成提供了良好的聚集条件。

1.2 油气成藏特征

研究认为,库车前陆盆地油气成藏具有“晚期成藏、超压充注、高效聚集”的总体特征。但不同区带仍具有一定的差异性,这种差异性将在分布规律部分进行详细探讨。

1.2.1 晚期成藏

喜马拉雅期是库车前陆盆地构造的主要变形时期,也是油气大规模成藏的主要时期。库车前陆盆地的构造变形主要从喜马拉雅早期开始发育,在喜马拉雅晚期定格^[21,22]。喜马拉雅期强烈的构造运动使各种成藏要素在短时间内有效匹配^[23]。在时间上,圈闭形成期与生、排烃期良好匹配,为油气高效充注和聚集提供条件。

多期次的构造活动期与烃源岩生排烃期的匹配决定了该区具有多期成藏、早油晚气、晚期成藏为主的特征^[1-12],天然气成藏主要是在库车组沉积期以来,这也有利于大气田的形成和保存。综合运用多种成熟度参数以及岩石显微观察、储层沥青测试、颗粒荧光分析、包裹体分析等技术,剖析了克拉苏构造带油气动态成

藏过程^[4-6],研究认为克拉苏构造带的原油由成熟和高成熟油组成,油气充注过程为“早期成熟油、晚期高成熟油和高-过成熟气”,早期形成的盐下古油藏受新近纪晚期断裂的破坏,部分原油向上进入盐上浅层背斜圈闭汇聚成藏,随着埋深增大膏盐岩盖层塑性增强,穿盐断裂消失,盐下圈闭再次聚集高-过成熟的天然气。对比克拉2、大北、克深2等典型油气藏的成藏过程,发现不同构造带的油气成藏过程和成藏时间差异较大^[4-6]。

1.2.2 高效聚集

断裂沟通高效输导、源-储压差控制下的高压强充注是库车盐下油气运聚成藏的动力学机制。盐下白垩系储层远离下部的侏罗系—三叠系烃源岩,盐下密集发育的逆冲断裂成为沟通烃源岩和储层的有效输导通道,油气从烃源岩中排出后沿着断裂发生快速垂向运移,输导效率高。烃源岩生气史研究表明,受库车组沉积以来的快速挤压深埋控制,侏罗系—三叠系烃源岩在5 Ma以来生气量快速增加,每百万年生气速率最高达到15~20 mg/gTOC,为高效气源灶^[24-26]。由于气体体积膨胀,烃源岩晚期快速大量生气过程中必然产生超压。根据流体压力数值模拟结果,在吉迪克组沉积以来的不同时期,侏罗系过剩压力始终大于目的层下白垩统的过剩压力,源-储压差可达10~20 MPa^[27],使得侏罗系地层中排出的天然气在巨大源-储压差的驱动下可以持续向上覆储层中强充注,从而形成气藏规模大、含气饱和度高的大气田。

1.2.3 超压充注

库车前陆盆地天然气自库车组沉积以来的超晚期成藏、超压强充注、大量断裂沟通高效输导、构造圈闭形成晚以及膏盐岩优质盖层的良好封盖决定了天然气的高效聚集和保存,天然气散失量少。气藏形成后,在喜马拉雅晚期强烈的构造挤压作用下,岩石孔隙体积变小,由于上覆古近系巨厚的膏盐岩或膏泥岩盖层起到了良好的封堵作用,流体排泄不出去,水平挤压应力部分由孔隙中的流体承受,使得流体压力升高,从而形成了库车前陆盆地普遍的异常高压^[28-33]。高压气藏有利于储层裂缝的发育以及气藏内高含气饱和度的保持,也有利于天然气的高效开采,单井日产能可达 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上。

2 油气分布规律

在平面上,烃源岩的成烃演化、构造圈闭形成演化、构造活动强度等在时间和空间上的时序性和差异性,决定了库车前陆盆地在不同构造带和不同构造段具有差异的成藏过程、油气相态及富集程度;在垂向上,区域性的储盖组合则控制了油气富集层位、成藏组合特征及资源潜力。

2.1 油气相态平面分布特征

研究表明,库车前陆盆地油气相态差异主要受烃源岩成熟度和成藏过程控制^[34,35]。三叠系—侏罗系烃源岩成熟生烃中心控制了该区具有“内环干气、中环凝析气、外环油”的油气分布规律(图1),在这一宏观规律基础上,个别油气藏的成藏过程会对油气藏的相态、气/油比产生较大影响。

2.1.1 盆内以干气和湿气为主

在盆地中心内部—最大成熟生气中心克深2—克深5井区一线,烃源岩成熟度 R_o 大于 2%,最大达到 3.5%以上,主要形成高一过成熟的干气藏,如克拉2气田、克深1、克深2和克深5气藏等,相态类型主要为纯的干气藏,天然气干燥系数大于 0.99,甲烷碳同位素最重,一般介于 -29‰~-26‰,换算天然气成熟度 R_o 介于 1.9%~2.5%,为高一过成熟的煤成气。克拉2气田含少量凝析油是由于早期成藏原油的少量残留^[4]。

2.1.2 东、西两端以凝析气为主

在盆地的西端博孜、大北地区以及东端的迪那、依南地区,烃源岩成熟度 R_o 主要介于 1.2%~2.0%,主要形成凝析油含量低的凝析气藏,如大北1、大北3气田、博孜1、迪那2、迪那1等凝析气藏等,气/油比较高,一般大于 $8500\text{ m}^3/\text{m}^3$,天然气干燥系数介于 0.85~0.98,为湿气藏,甲烷碳同位素较盆内要轻,一般介于

35%~30%,换算天然气成熟度 R_o 介于 1.2%~1.8%,为高成熟的煤成气。同样位于盆地西端但是保存在盐上浅部构造层的大宛齐油田,其现今为油藏,这是由于它的特殊成藏过程造成的。油气源对比表明大宛齐油田原油与大北盐下气藏残留原油的油源一致,大宛齐油田是盐下大北油气藏遭受破坏逸散到浅层构造中形成的残留油藏^[5-7]。

2.1.3 南、北两侧以凝析油气和原油为主

在盆地外围南、北两侧远离烃源岩成熟中心的南部斜坡带以及北部单斜带,烃源岩成熟度较低, R_o 介于 0.6%~1.2%,主要形成油藏、油气藏及凝析油含量高的凝析油气藏,如却勒1油藏、羊塔5油藏、英买力油田、牙哈油气田和提尔根气田等,油气相态为油藏、挥发性油藏和凝析气藏(凝析油含量高),气/油比较低,一般小于 $2000\text{ m}^3/\text{m}^3$ 。天然气干燥系数一般低于 0.85,为湿气或油藏伴生气,甲烷碳同位素较轻,一般介于 -39‰~-35‰,换算天然气成熟度 R_o 介于 0.7%~1.1%,主要为成熟阶段生成的煤成气。在南部斜坡带的个别气藏如羊塔1凝析气藏(气/油比为 $8184\text{ m}^3/\text{m}^3$)、玉东2凝析气藏(气/油比为 $6293\text{ m}^3/\text{m}^3$)的气/油比较高,这是由于这两个气藏的成因为下部的原生油气藏受断裂破坏发生调整在浅层形成的次生气藏^[34,35],油气组分的垂向分异作用造成气/油比较高。

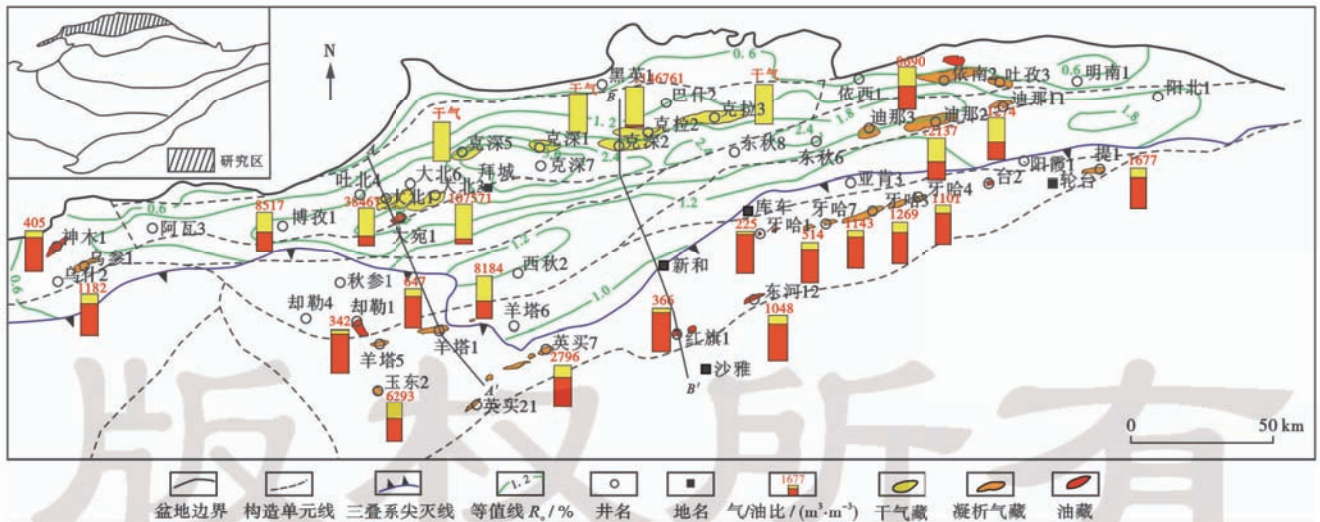


图1 库车前陆盆地油气相态与烃源岩 R_o 分布叠合

Fig. 1 Congruency map of the distribution of oil & gas phase state and source rock R_o in Kuqa foreland basin

2.2 油气成藏组合垂向分布特征

根据油气藏赋存层位、生储盖组合特征、成藏条件、油气藏类型和油气成藏特征,库车前陆盆地在纵向上自下而上可划分为盐上、盐下和深层3套成藏组合(图2)。

2.2.1 盐上成藏组合

在膏盐岩盖层之上的第三系为盐上成藏组合,为他源-常压系统,主要是下部成藏组合和中部成藏组合

中的油气藏被穿盐断裂破坏调整至浅层所形成的次生气藏(如大宛齐油田)及大量的油气显示,主要发育在构造挤压强烈的北部山前带和克拉苏构造带北侧,以及膏盐岩厚度变薄尖灭的南部斜坡带地区。

2.2.2 盐下成藏组合

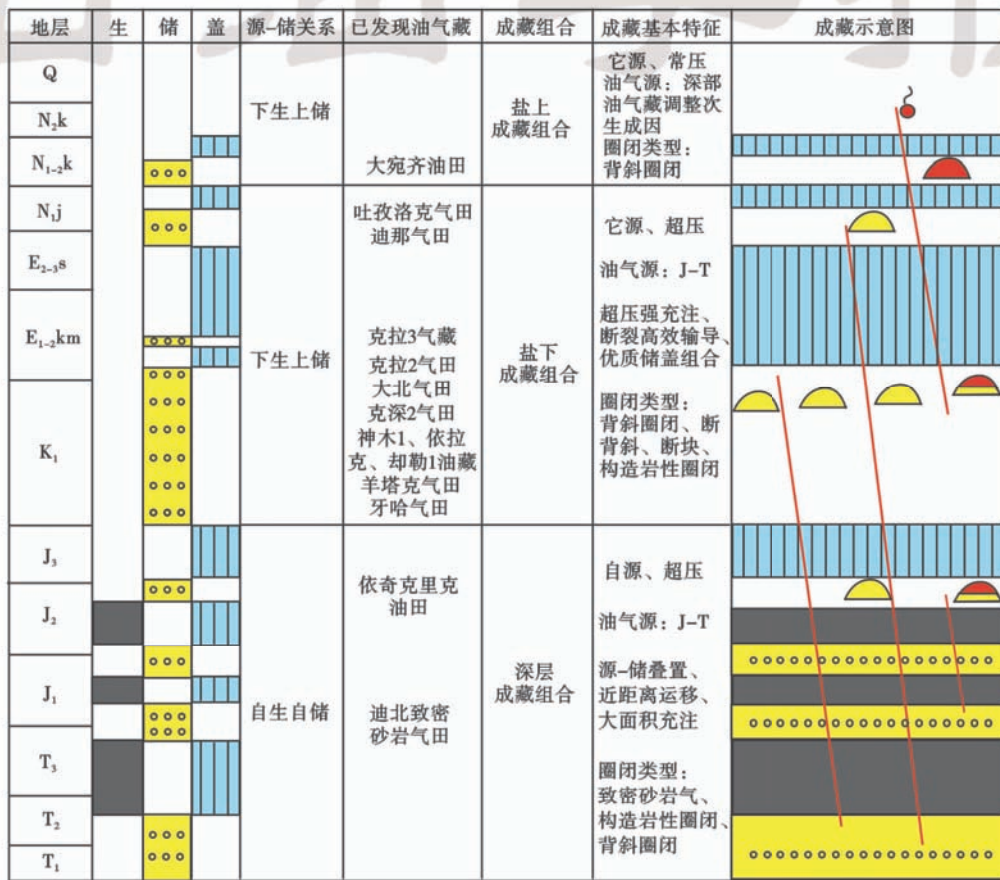
在膏盐岩滑脱层之下为盐下成藏组合,在西部发育古近系膏盐岩-古近系底砾岩和白垩系砂岩优质储

盖组合,在东部由于岩性发生变化发育吉迪克组膏盐岩-吉迪克组底砾岩和古近系砂岩储盖组合,在基底断裂的沟通下,深部侏罗系—三叠系生成的油气和深层成藏组合中储存的致密气层在较大源-储压差作用下沿着断裂快速高效输导到盐下的构造圈闭和储层中形成大量油气聚集,为他源-超压系统。目前库车前陆盆地主要的油气发现都集中在盐下白垩系,盐下白垩系成藏组合也是下一步天然气勘探的主体。

2.2.3 深层成藏组合

深层成藏组合发育在深部的侏罗系—三叠系地层

中,源-储共生、紧密相连,煤系烃源岩与致密砂岩呈互层状或横向相变相接,具有优先聚集油气的条件,烃源岩生成的油气在源-储压差驱动下,不断向邻近的砂岩夹层中运移,形成致密砂岩气藏,如库车东部的迪北致密气藏^[36],为自源-超压系统。推测在克拉苏冲断带的侏罗系—三叠系深层同样也发育这套致密砂岩气层,成为深部有利的“储气层”,在基底断裂的沟通下,深部的致密气层会向中浅层不断调整,成为另一个重要气源。随着勘探深度的不断增加和钻井技术的进步,深层成藏组合可作为天然气勘探的重要接替领域。



注: N_{2k}—库车组; N_{1-2k}—康村组; N_{1j}—吉迪克组; E_{2-3s}—苏维依组; E_{1-2km}—库姆格列木群。

图2 库车前陆盆地成藏组合划分及成藏特征

Fig. 2 Reservoir types and hydrocarbon distribution patterns of Kuqa foreland basin

2.3 油气成藏分带特征

受构造形成时间、变形程度、调节构造和构造应力等因素的影响,前陆冲断带往往呈现出构造分带、分段特征,不同构造带、构造段在构造样式、构造变形机制及油气成藏特征上均表现出明显的差异性^[37,38],造成油气分布十分复杂。通过对典型油气藏成藏期次、成藏过程的详细解剖和对比,明确库车前陆盆地不同构造带的油气成藏过程及油气相态特征具有明显的差异性和规律性(图3)。

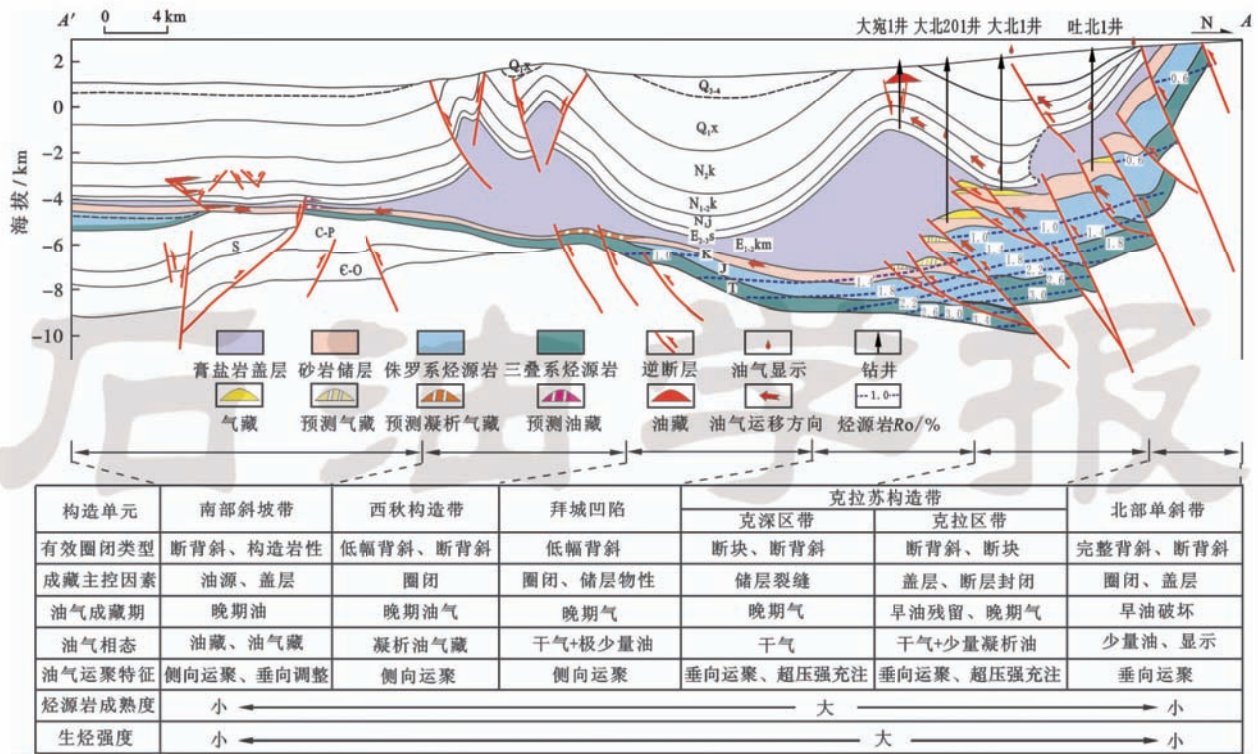
2.3.1 北部单斜带

北部单斜带烃源岩在吉迪克组—康村组沉积期已

进入成熟阶段,原油大量生排烃并在早期构造圈闭中成藏,但后期强烈抬升剥蚀使生烃停止,并使古油藏发生破坏,山前带以形成早期残余油藏及大量的油气苗显示为主。

2.3.2 克拉苏构造带

克拉苏构造带北侧的克拉区带,烃源岩在康村组沉积期已进入成熟阶段,原油大量生排烃并在早期构造圈闭中成藏,但库车组沉积期以来的强烈构造运动使早期古油藏发生破坏,其快速冲断挠曲沉降使得烃源岩晚期快速生气,晚期干气得以在保存条件好的圈



注:Q₃₋₄—第四系上更新统一全新统;Q_{1-x}—第四系西域组。

图 3 库车前陆盆地不同构造带油气成藏特征及其差异(剖面位置见图 1)

Fig. 3 Hydrocarbon accumulation characteristics of different tectonic belts in Kuqa foreland basin(position is shown in Fig. 1)

闭中再次聚集,形成以晚期干气为主、含少量早期残留原油的油气藏,如克拉 2 气田^[4]、大北气田^[5-7]。克拉苏构造带南侧的克深区带至拜城北地区,烃源岩在康村组沉积期尚未进入成熟阶段,库车组沉积期以来的快速沉降使得烃源岩晚期快速生气,晚期干气在盐下库车组沉积期以来从北向南逐渐延展形成的“叠瓦状”构造圈闭中形成聚集,形成以晚期干气为主的干气藏,如克深 2、克深 8、克深 9 气藏。

在空间上,烃源岩生气中心,平面成排成带、垂向叠置分布的大量构造圈闭、优质储层相带以及巨厚膏盐岩盖层在克拉苏构造带有效叠合,这使得克拉苏构造带具有天然气富集的得天独厚的地质条件^[13,14],这也是为什么迄今在克拉苏构造带发现克拉 2、大北、克深 2、克深 5 等千亿立方米级别储量的大气田进而形成超万亿立方米天然气规模储量区的主要原因。在前陆冲断带,生、储、盖、圈条件的有效叠合决定了库车前陆盆地油气主要富集在前陆冲断带,属于前陆冲断带油气富集型的前陆盆地,与扎格斯前陆盆地较为相似,勘探发现也证实了这一点。

2.3.3 隆起斜坡带

在南部前缘隆起一斜坡带的广泛地区,烃源岩向南逐渐尖灭,邻近的烃源岩成熟度一直很低,直到库车组沉积期以来的快速沉降才使得烃源岩进入成熟阶

段,油气经过长距离的侧向运移之后在一些有利的构造、岩性、地层圈闭中形成以晚期成藏为主的油气藏,油气成熟度也相对北部冲断带要低。

此外,不同构造带构造活动强度不同,断层发育、延伸程度也不相同,使得油气在纵向上的富集层位也不相同^[37,38]。在构造活动较弱的构造段,油气往往在与烃源岩相邻的储集层中聚集成藏,易形成原生油气藏,如盐下白垩系克深 2、克深 8 气藏以及库车东部侏罗系迪北气藏;在构造相对强烈的构造段,油气聚集的层位往往受断裂延伸程度控制,特别是当构造活动发生在早期油气藏形成之后时,早期成藏遭受破坏、改造,部分油气向浅部储盖组合调整。克拉区带储集层沥青、砂岩颗粒荧光、流体包裹体相关研究表明:克拉 2、大北气藏曾发育古油藏^[4],在库车组沉积后期和西域组沉积期强烈的构造挤压背景下,古油藏受穿盐断裂的破坏,绝大多数原油沿断裂向上运移、散失(图 3),部分油气调整后可在盐层上部储盖组合汇聚成藏,如大宛齐油田的主力产油层为康村组,油源地球化学对比证实了大宛齐油田原油与大北盐下气藏残留原油油源一致^[5-7]。

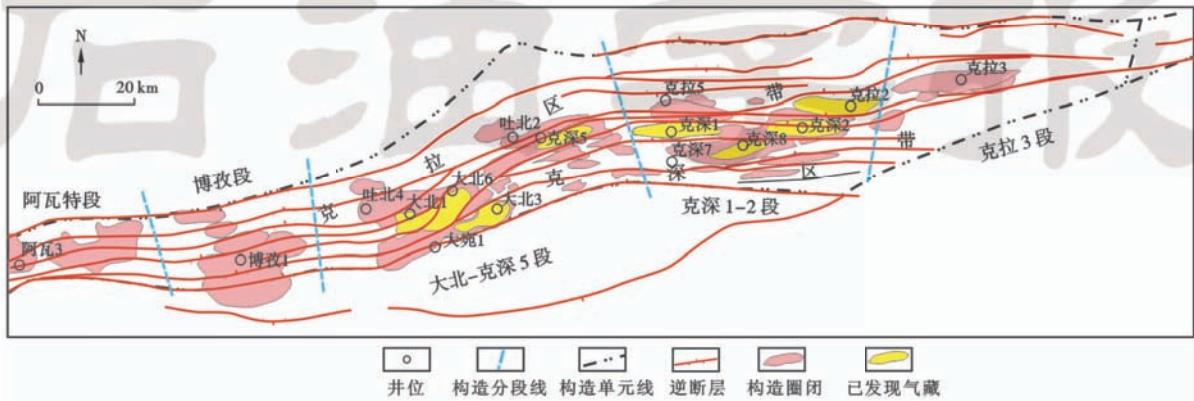
2.4 油气成藏分段特征

冲断带发育的一级调节构造控制了冲断带的构造分段特征,中段油气往往相对富集^[37,38]。按照冲断构造样式及动力学机制,天山南缘冲断带自西向东可以

分为4个部分:喀什—阿克苏叠瓦冲断带、拜城—库车褶皱冲断带、库尔勒右滑转换带和罗布泊冲断带^[39],以位于中段的拜城—库车冲断带油气最为富集。目前发现的油气田(如克拉2、大北1、依南2、牙哈、雅克拉、英买7气田等)均是位于拜城—库车褶皱冲断带。而在拜城—库车褶皱冲断带中,又以中段的克拉苏构造带油气最为富集。在同一构造带,次级调节构造控制着每个构造带内部的分段性,主要表现为断裂的走

向、倾角、构造样式等发生较大改变,从而控制了不同段内油气性质、油气分布的差异。

根据地面露头观察、地震构造解释、钻遇地层特征等分析,大北—克拉苏构造带自西向东又可进一步划分为阿瓦特、博孜、大北—克深5、克深1-2、克拉3等5个段^[40]。虽然各构造段均发育逆冲叠瓦构造,但受盆地边界条件、盐湖及古隆起等因素影响,各段盐下叠瓦构造发育的数量、走向、幅度均有明显差异(图4)。



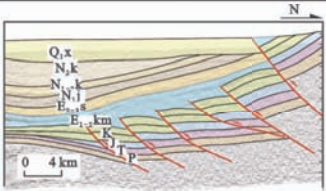
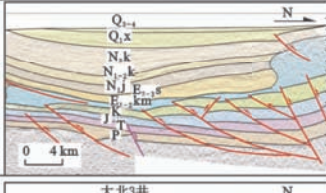
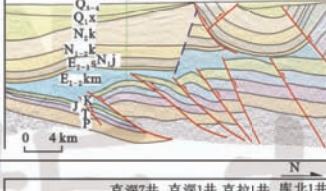
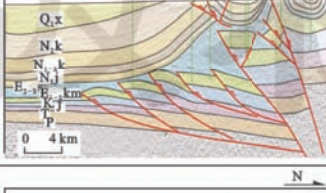
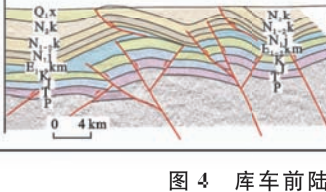
构造段	地质剖面特征	构造变形特征	膏盐岩层	烃源岩成熟度	油气相态	分级
阿瓦特段		高角度逆冲断裂, 前展式楔形断块, 未穿型断盖组合	厚, 2500m 中深: 2500~4500m (北部浅)	T 顶界 Ro=1.0%~1.3%	凝析气藏 (阿瓦3, 气/油比 51390m ³ /m ³ , 干燥系数0.93)	4
博孜段		低角度逆冲断裂, 前展式楔形断块, 未穿型断盖组合	薄, 400m 中深: 5000~7000m	T 顶界 Ro=1.2%~1.6%	凝析气藏 (博孜1, 气/油比 8517m ³ /m ³ , 干燥系数0.86)	3
大北—克深5段		高角度逆冲断裂, 后展式楔形断块, 未穿型、隔断型断盖组合	北薄(300m) 南厚(2500m) 中深: 5000~7000m	T 顶界 Ro=1.6%~2.6%	干气藏、凝析气藏 (大北1, 气/油比 38467m ³ /m ³ , 干燥系数0.94; 克深5, 干燥系数0.997)	2
克深1—2段		低角度逆冲断裂, 前展式楔形断块, 未穿型、隔断型断盖组合	北厚(3000m) 南薄(500m) 中深: 5000~7500m	T 顶界 Ro=2.2%~3.0%	干气藏 (克深1, 干燥系数0.996; 克深2, 干燥系数0.993)	1
克拉3段		高角度走滑断裂, 花状构造, 构造破碎, 断穿型断盖组合	薄, 300~500m 中深: <3500m	T 顶界 Ro=1.6%~2.0%	干气藏 (克拉3, 干燥系数0.992)	5

图4 库车前陆盆地克拉苏构造带不同段成藏条件差异及油气分布

Fig. 4 Differences of hydrocarbon accumulation condition and hydrocarbon distribution in various segments of the Kelasu tectonic belt in Kuqa foreland basin

克拉苏构造带中段的大北—克深 1-2 段逆冲叠瓦构造最为发育,自北向南发育 5~6 排构造,膏盐岩埋深大、封闭性好,且与生烃中心有效叠合,是目前勘探最为有利的区带。大北—克深 5 段盐层厚度变化剧烈,克拉苏断裂下盘发育盐底辟构造,南部则发育盐丘构造,中部盐层明显减薄。从构造发育来看,盐下楔形构造具有“后展式”的构造特征,具有垂直断距大、圈闭密集分布的特点。克深 1-2 段盐层仅在克拉苏断裂下盘增厚,向南部盐岩层逐渐减薄。盐下构造为受基底滑脱面及高角度逆冲断裂控制的楔形断块构造,具有“前展式”构造特征。平面上断层走向则表现为近东西向,与大北—克深 5 段相比,该段盐下构造变形向南部扩展更远,发育 6 排构造。克深 1-2 段紧临冲断带最大的生气中心,圈闭规模大,断裂未切穿膏盐层盖层,天然气成藏条件最好,以干气藏为主,目前已发现克拉 2 气田、克深 1-2 气田、克深 8 气田;大北—克深 5 段烃源岩成熟度较克深 1-2 段略低,但构造圈闭形成较早且后期被破碎,以断块圈闭为主,油气藏以干气为主,早期圈闭含较多的凝析油,已探明大北气田、克深 5 气田。

博孜段除浅层发育巨厚的砾岩层外,其他成藏条件与大北—克深 5 段基本类似,但烃源岩成熟度 R_o 介于 1.2%~1.6%,以形成凝析气藏为主,目前博孜 1 井加深钻探获工业油气流,显示出较大的勘探潜力。

阿瓦特段烃源岩成熟度 R_o 介于 1.0%~1.3%,局部达到 1.6%,以凝析油气为主,北部膏盐埋深浅、保存条件差,而南部膏盐埋深大、保存条件好,2013 年钻探的阿瓦 3 井获工业油气流,显示该段也具有较大的勘探潜力。

克拉 3 南段处于古近纪膏盐岩和新近纪膏盐岩相变交汇处,盖层厚度相对减薄。最不利的因素是盐层厚度小、高角度的走滑断裂发育,且以膏岩、膏泥岩为

主,断层切穿膏泥岩盖层,气藏保存较差,目前已发现克拉 3 气藏,巴什基奇克组(K_1bs)气层已被破坏为含水气水层,仅在 $E_{1-2}km$ 盐间的白云岩夹层中见工业气流。

3 油气有序聚集模式及勘探领域

通过以上对库车前陆盆地的地质构造特征、油气成藏过程及分布规律系统的分析,可以发现库车前陆盆地油气聚集呈现出一种“有序”的方式。由于前陆冲断带冲断叠置构造和构造挠曲的发育,造成在冲断带前缘和前渊凹陷地层埋深大,深部烃源岩成熟度高、储层普遍致密化,因此在深部主要形成连续型致密砂岩油气藏和构造型致密砂岩油气藏。特别是在深部成藏组合的侏罗系—三叠系地层中,源-储共生、紧密相连,倾向于形成大面积分布的致密砂岩气藏,如库车地区东部发现的迪北致密气藏;冲断带深层的白垩系储层由于埋深大,储层物性较差,已属于致密砂岩储层,有效储层埋深下限为 8 000~8 300 m^[41],但由于断裂-褶皱的作用,在断背斜圈闭的主体部位裂缝发育,从而形成与常规油气藏聚集规律相似的构造型裂缝性致密砂岩气藏,如克深气田^[42]。往构造浅部或山前带和斜坡带两侧,由于埋深减小,储层物性变好,主要形成以常规构造油气藏、地层岩性油气藏为主,如克拉 2 气藏、大宛齐油田、牙哈气田等。并且由于穿构造层断裂的沟通,垂向上将深部致密砂岩油气藏与中浅层的常规油气藏联接在一起,从而形成常规油气和非常规油气在垂向上和侧向上的有序聚集^[43](图 5、图 6)。在纵向上,从深到浅,依次为三叠系—侏罗系的连续型致密砂岩气、白垩系的构造型致密砂岩气藏、浅部的常规储层构造油气藏;在横向上,从拗陷带往南、北两侧,埋深逐渐减小,储层孔渗性逐渐变好,油气藏类型也从致密砂岩气藏逐渐过渡为构造型致密砂岩气藏和常规构

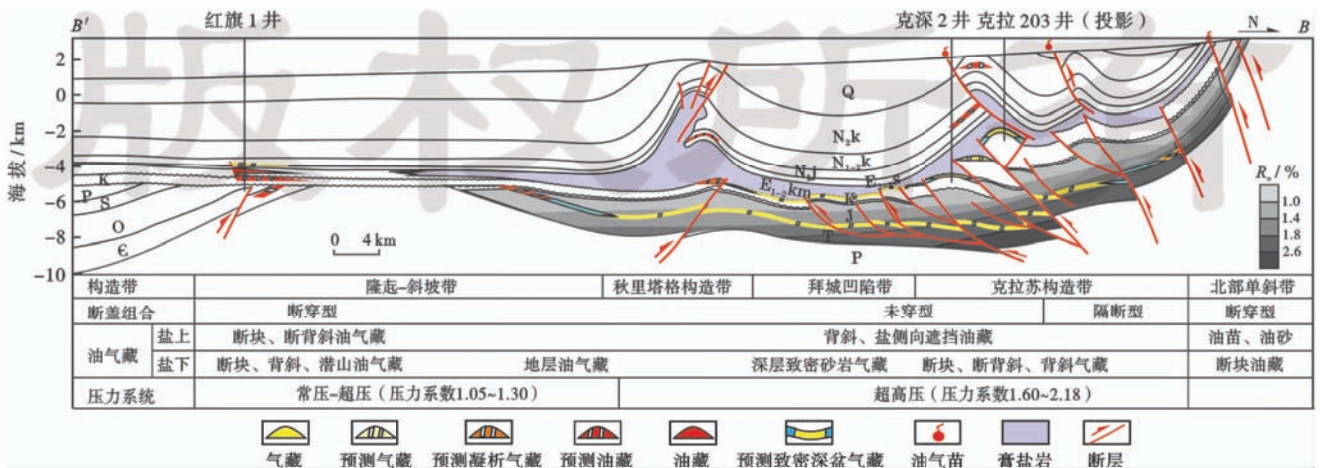


图 5 库车前陆盆地油气有序聚集剖面模式(剖面位置见图 1)

Fig. 5 Profile model of hydrocarbon orderly accumulation in Kuqa foreland basin(position is shown in Fig. 1)

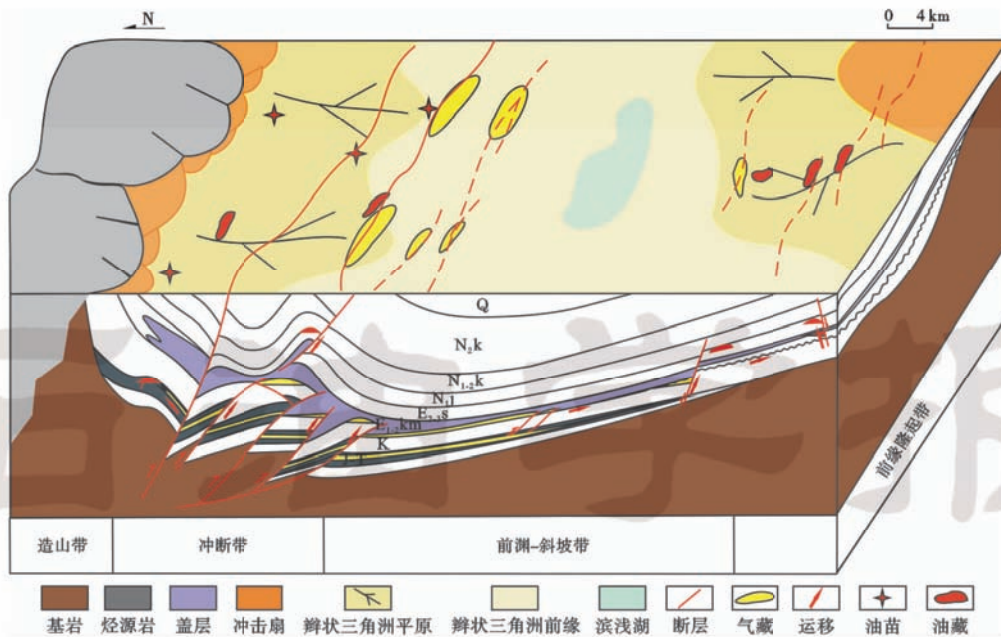


图6 库车前陆盆地油气有序聚集立体模式

Fig. 6 Three-dimensional model of hydrocarbon orderly accumulation in Kuqa foreland basin

造、岩性地层油气藏；在平面上，盆地中部的坳陷中心—冲断带深层以天然气藏为主，往北部的山前带、南部的斜坡带以及盆地的东、西两端逐渐过渡为凝析气藏、油气藏或油藏。

以上所建立的库车前陆盆地油气有序聚集的模式，系统总结和描述了库车前陆盆地的复杂油气分布规律，对下一步勘探方向和勘探领域有一定的指导意义。目前，膏盐岩盖层之下的白垩系构造致密砂岩气藏是库车前陆盆地的主力勘探层系和现实勘探领域，应继续在克拉苏冲断带的整体勘探^[13,14,44]，并积极向冲断带的西段和东段延伸，扩大勘探成果和含油气范围，如西段的博孜、阿瓦特段已获得突破，与克拉苏冲断带相邻的东秋构造带的西段是下一步风险勘探的重点领域；西秋构造带是拜城凹陷油气向南部斜坡带运移的必经之路，该区带发育古隆起，有利于形成地层岩性油气藏，是风险勘探的另一个重要领域。

随着钻井深度的增加和钻井工艺的提高，深部的三叠系—侏罗系致密砂岩气可能是下一步的重要接替领域，目前已在盆地东部迪北地区获得突破，在克拉苏构造带西端的阿瓦特地区侏罗系埋深相对较浅，是下一步积极探索的有利地区。此外，在北部单斜带，由于三叠系—侏罗系地层上倾角度大，储层历史最大埋深大，储层物性差，很可能在上倾方向上受断层或沥青带封堵形成致密油藏，由于目前埋藏较浅，也是下一步勘探研究的重要探索领域。

4 结论及认识

(1) 库车前陆盆地油气成藏具有“晚期成藏、超压

充注、高效聚集”的总体特征，整体具有“南北分带、东西分段、纵向分层、内气外油”的油气分布规律以及“山前带早期油、冲断带早油晚气、冲断带前缘晚期气、斜坡带晚期油气”的有序成藏规律。

(2) 通过油气聚集过程和油气分布特征的认识，构建了库车前陆盆地从非常规致密油气到常规油气的有序聚集模式，对深入认识库车前陆盆地油气分布规律和勘探领域有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 赵孟军, 卢双舫, 王庭栋, 等. 克拉2气田天然气地球化学特征与成藏过程[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊1): 109-115.
Zhao Mengjun, Lu Shuangfang, Wang Tingdong, et al. Geochemical characteristics and formation process of natural gas in Kela 2 gas field[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(Supplement 1): 113-119.
- [2] 王招明, 王廷栋, 肖中尧, 等. 克拉2气田天然气的运移和聚集[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊1): 103-108.
Wang Zhaoming, Wang Tingdong, Xiao Zhongyao, et al. Migration and accumulation of natural gas in Kela-2 gas field[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(Supplement 1): 107-112.
- [3] 赵孟军, 王招明, 张水昌, 等. 库车前陆盆地天然气成藏过程及聚集特征[J]. 地质学报, 2005, 79(3): 414-422.
Zhao Mengjun, Wang Zhaoming, Zhang Shuichang, et al. Accumulation and features of natural gas in the Kuqa foreland basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(3): 414-422.
- [4] 鲁雪松, 刘可禹, 卓勤功, 等. 库车克拉2气田多期油气充注的古流体证据[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 537-544.
Lu Xuesong, Liu Keyu, Zhuo Qingong, et al. Palaeo-fluid evidence for the multi-stage hydrocarbon charges in Kela-2 gas field, Kuqa foreland basin, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration & Development, 2012, 39(5): 537-544.

- [5] 卓勤功,赵孟军,谢会文,等.库车前陆盆地大北地区储层沥青与油气运聚关系[J].石油实验地质,2011,33(2):193-196.
Zhuo Qingong, Zhao Mengjun, Xie Huiwen, et al. Relationship between reservoir bitumen and hydrocarbon migration in Dabei region, Kuqa foreland basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(2):193-196.
- [6] 马玉杰,卓勤功,杨宪彰,等.库车坳陷克拉苏构造带油气动态成藏过程及其勘探启示[J].石油实验地质,2013,35(3):249-254.
Ma Yujie, Zhuo Qingong, Yang Xianzhang, et al. Petroleum dynamic accumulation process and its implications in Kelasu structural belt, Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3):249-254.
- [7] Zhang Shuichang, Zhang Bin, Zhu Guangyou, et al. Geochemical evidence for coal-derived hydrocarbons and their charge history in the Dabei Gas Field, Kuqa thrust belt, Tarim basin, NW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(7):1364-1375.
- [8] 赵孟军,卢双舫.库车坳陷两期成藏及其对油气分布的影响[J].石油学报,2003,24(5):16-20.
Zhao Mengjun, Lu Shuangfang. Two periods of reservoir forming and their significance for hydrocarbon distribution in Kuqa Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(5):16-20.
- [9] 赵靖舟,戴金星.库车前陆逆冲带天然气成藏期与成藏史[J].石油学报,2002,23(2):6-10.
Zhao Jingzhou, Dai Jinxing. Timing and filling history of natural gas reservoirs in Kuqa foreland thrust belts, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 23(2):6-10.
- [10] 王飞宇,杜治利,张水昌,等.塔里木盆地库车坳陷烃源灶特征和天然气成藏过程[J].新疆石油地质,2009,30(4):431-439.
Wang Feiyu, Du Zhili, Zhang Shuichang, et al. Source kitchen and natural gas accumulation in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(4):431-439.
- [11] 李贤庆,肖贤明,唐永春,等.天然气甲烷碳同位素动力学研究及其应用:以塔里木盆地库车坳陷克拉2气田为例[J].高校地质学报,2005,11(1):137-144.
Li Xianqing, Xiao Xianming, Tang Yongchun, et al. A Kinetic study on methane carbon isotopes of natural gas and its application; a case study of Kela-2 gas field in the Kuqa depression, Tarim basin[J]. Geological Journal of China Universities, 11(1):137-144.
- [12] 梁狄刚,陈建平,张宝民,等.塔里木盆地库车坳陷陆相油气的生成[M].北京:石油工业出版社,2004:106-140.
Liang Digang, Chen Jianping, Zhang Baomin, et al. Continental hydrocarbon generation in Kuqa depression, Tarim basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004:106-140.
- [13] 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 Jinhua, 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 & Development, 2012, 39(4):385-393.
- [14] 王招明.塔里木盆地库车坳陷克拉苏盐下深层大气田形成机制与富集规律[J].天然气地球科学,2014,25(2):153-166.
Wang Zhaoming. Formation mechanism and enrichment regularities of Kelasu subsalt deep large gas field in Kuqa Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2):153-166.
- [15] 何登发,李德生,何金有,等.塔里木盆地库车坳陷和西南坳陷油气地质特征类比及勘探启示[J].石油学报,2013,34(2):201-218.
He Dengfa, Li Desheng, He Jinyou, et al. Comparison in petroleum geology between Kuqa depression and Southwest depression in Tarim basin and its exploration significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2):201-218.
- [16] 李本亮,陈竹新,雷永良,等.天山南缘与北缘前陆冲断带构造地质特征对比及油气勘探建议[J].石油学报,2011,32(3):395-403.
Li Benliang, Chen Zhuxin, Lei Yongliang, et al. Structural geology correlation of foreland thrust-folded belts between the southern and northern edges of the Tianshan Mountain and some suggestions for hydrocarbon exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3):395-403.
- [17] 田作基,张光亚,邹华耀,等.塔里木库车含油气系统油气成藏的主控因素及成藏模式[J].石油勘探与开发,2001,28(5):12-16.
Tian Zuoji, Zhang Guangya, Zou Huayao, et al. The major controlling factors and pool-forming pattern of oil and gas reservoirs in Kuqa petroleum system, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration & Development, 2001, 28(5):12-16.
- [18] 卢双舫,赵孟军,付广,等.塔里木盆地库车油气系统富气的主控因素分析[J].大庆石油学院学报,2001,25(3):10-13.
Lu Shuangfang, Zhao Mengjun, Fu Guang, et al. Key factor analysis of enriching in natural gas in Kuche petroleum system, Tarim Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2001, 25(3):10-13.
- [19] 吕锡敏,皮学军,任战利,等.库车前陆盆地含油气系统的地质特征[J].天然气地球科学,2004,15(3):214-217.
Lü Ximin, Pi Xuejun, Ren Zhanli, et al. The Geological characteristics of the petroleum system in Kucha foreland basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(3):214-217.
- [20] 赵文智,许大丰,张朝军,等.库车坳陷构造变形层序划分及在油气勘探中的意义[J].石油学报,1998,19(3):1-5.
Zhao Wenzhi, Xu Dafeng, Zhang Zhaojun, et al. Division of structural deformed sequence in Kuche depression and significance for oil gas exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3):1-5.
- [21] 汪新,王招明,谢会文,等.塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟[J].中国科学:地球科学,2010,40(12):1655-1668.
Wang Xin, Wang Zhaoming, Xie Huiwen, et al. Cenozoic salt tectonics and physical models in the Kuqa depression of Tarim Basin[J]. Scientia Sinica Terrae, 2010, 40(12):1655-1668.
- [22] 漆家福,雷刚林,李明刚,等.库车坳陷克拉苏构造带的结构模型及其形成机制[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):49-56.
Qi Jiafu, Lei Ganglin, Li Minggang, et al. Analysis of structure model and formation mechanism of Kelasu structure zone, Kuqa depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1):49-56.
- [23] Jiang Zhenxue, Li Lianxia, Song Yan, et al. Control of neotectonic movement on hydrocarbon accumulation in the Kuqa foreland basin, West China[J]. Petroleum Science, 2010, 7(1):49-58.
- [24] 秦胜飞,贾承造,陶士振.塔里木盆地库车坳陷油气成藏的若干特征[J].中国地质,2002,29(1):103-107.
Qin Shengfei, Jia Chengzao, Tao Shizhen. Some characteristics of oil and gas accumulation in the Kuqa depression, Tarim basin[J]. Geology in China, 2002, 29(1):103-107.
- [25] 赵文智,王红军,单家增,等.库车坳陷天然气高效成藏过程分析[J].石油与天然气地质,2005,26(6):703-710.
Zhao Wenzhi, Wang Hongjun, Shan Jiazeng, et al. Analysis of highly efficient gas reservoir forming process in Kuqa depression

- [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(6): 703-710.
- [26] 邹华耀, 王红军, 郝芳, 等. 库车坳陷克拉苏逆冲带晚期快速成藏机理[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(8): 1032-1040.
Zou Huayao, Wang Hongjun, Hao Fang, et al. The late and fast hydrocarbon accumulation mechanism in the Kelasu thrust belt in Kuqa depression[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(8): 1032-1040.
- [27] 张凤奇, 王震亮, 武富礼, 等. 低渗透致密砂岩储层成藏期油气运移的动力分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(4): 32-38.
Zhang Fengqi, Wang Zhenliang, Wu Fuli, et al. Dynamic analysis on hydrocarbon migration of accumulation periods in low permeability tight sandstone reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(4): 32-38.
- [28] 皮学军, 谢会文, 张存, 等. 库车前陆逆冲带异常高压成因机制及其对油气藏形成的作用[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊 1): 84-90.
Pi Xuejun, Xie Huiwen, Zhang Cun, et al. Overpressure mechanism and its control on reservoir formation in Kuqa foreland thrust belt[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(S1): 84-90.
- [29] 朱玉新, 邵新军, 杨思玉, 等. 克拉 2 气田异常高压特征及成因[J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(4): 9-13.
Zhu Yuxin, Shao Xinjun, Yang Siyu, et al. Character and origin overpressure in Kela-2 gas field[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(4): 9-13.
- [30] 王红军, 胡见义. 库车坳陷白垩系含油气系统与高压气藏的形成[J]. 天然气工业, 2002, 22(1): 5-8.
Wang Hongjun, Hu Jianyi. Formation of the Cretaceous petroleum system and high pressure gas reservoirs in Kuqa petroleum system[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(1): 5-8.
- [31] 王震亮, 张立宽, 施立志, 等. 塔里木盆地克拉 2 气田异常高压的成因分析及其定量评价[J]. 地质论评, 2005, 51(1): 55-63.
Wang Zhenliang, Zhang Likuan, Shi Lizhi, et al. Genesis analysis and quantitative evaluation on abnormal high fluid pressure in the Kela-2 gas field, Kuqa depression, Tarim basin[J]. Geological Review, 2005, 51(1): 55-63.
- [32] 石万忠, 陈红汉, 何生. 库车坳陷构造挤压增压的定量评价及超压成因分析[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 59-65.
Shi Wanzhong, Chen Honghan, He Sheng. Quantitative evaluation on contribution of structural compression to overpressure and analysis on origin of overpressure in Kuqa depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 59-65.
- [33] 张凤奇, 王震亮, 赵雪娇, 等. 库车坳陷迪那 2 气田异常高压成因机制及其与油气成藏的关系[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 739-747.
Zhang Fengqi, Wang Zhenliang, Zhao Xuejiao, et al. Genetic mechanism of overpressure and its relationship with hydrocarbon accumulation in Dina-2 gas field, Kuqa depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 739-747.
- [34] 周兴熙. 库车油气系统烃类的流体相态特征研究[J]. 天然气工业, 2001, 21(2): 82-85.
Zhou Xingxi. Phase state of oil & gas pools in Kuqa petroleum system[J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(2): 82-85.
- [35] Chen Ling, Zhu Guangyou, Zhang Bin, et al. Control factors and diversities of phase state of oil and gas pools in the Kuqa petroleum system[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 484-496.
- [36] 鲁雪松, 柳少波, 李伟, 等. 低勘探程度致密砂岩气区地质和资源潜力评价——以库车东部侏罗系致密砂岩气为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 178-184.
Lu Xuesong, Liu Shaobo, Li Wei, et al. Geological and resource evaluation in tight sandstone gas plays of low exploration degree: a case of Jurassic tight sandstone gas in east Kuqa Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(2): 178-184.
- [37] 宋岩, 方世虎, 赵孟军, 等. 前陆盆地冲断带构造分段特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 31-38.
Song Yan, Fang Shihu, Zhao Mengjun, et al. The Structural segmentation of foreland thrust belts and its implications for hydrocarbon accumulation in foreland basins in central and western China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 31-38.
- [38] 宋岩, 赵孟军, 方世虎, 等. 中国中西部前陆盆地油气分布控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 265-274.
Song Yan, Zhao Mengjun, Fang Shihu, et al. Dominant factors of hydrocarbon distribution in the foreland basins, central and western China. Petroleum Exploration & Development, 2012, 39(3): 265-274.
- [39] Yin A, Nie S, Craig P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. Tectonics, 1998, 17(1): 1-27.
- [40] 徐振平, 谢会文, 李勇, 等. 库车坳陷克拉苏构造带盐下差异构造变形特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6): 1034-1038.
Xu Zhenping, Xie Huiwen, Li Yong, et al. Characteristics and controlling factors of the subsalt differential structure in the Kelasu structural belt, Kuqa depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(6): 1034-1038.
- [41] 王波, 张荣虎, 任康绪, 等. 库车坳陷大北-克拉苏深层构造带有效储层埋深下限预测[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 212-218.
Wang Bo, Zhang Ronghu, Ren Kangxu, et al. Prediction of the lower limit of burial depth for effective reservoirs in the Dabei Kelasu deep structural belt of Kuqa depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 212-218.
- [42] 王珂, 戴俊生, 张宏国, 等. 裂缝性储层应力敏感性数值模拟——以库车坳陷克深气田为例[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 123-133.
Wang Ke, Dai Junsheng, Zhang Hongguo, et al. Numerical simulation of fractured reservoir stress sensitivity: a case from Kuqa depression Keshen gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 123-133.
- [43] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-25.
Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: concept and practical significance [J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(1): 14-25.
- [44] 徐振平, 李勇, 马玉杰, 等. 塔里木盆地库车坳陷中部构造单元划分新方案与天然气勘探方向[J]. 天然气工业, 2011, 31(3): 31-36.
Xu Zhenping, Li Yong, Ma Yujie, et al. Future gas exploration orientation based on a new scheme for the division of structure units in the central Kuqa depression, Tarim basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(3): 31-36.

(收稿日期 2014-10-28 改回日期 2015-01-26 责任编辑 张怡)