

塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带 古近系膏盐岩盖层演化与圈闭有效性

卓勤功¹, 李勇², 宋岩¹, 杨宪彰², 赵孟军¹, 方世虎¹, 柳少波¹, 鲁雪松¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库车 841000)

摘要:膏盐岩层是含油气盆地良好的区域盖层,但不是完美的盖层。研究表明,膏盐岩具有“低温脆变、高温塑变”特征,构造挤压背景下膏盐岩盖层的封闭性随埋深而演化,大于3 000~3 200 m的埋藏深度是克拉苏构造带膏盐岩盖层封闭的关键。克拉苏构造带盐下圈闭成藏有效性因盖层封闭性演化不同而异,克拉苏区带盖层封闭的关键时间为库车中晚期,以勘探盖层埋深超过3 200 m的完整背斜圈闭为主;克深区带盖层封闭的关键时间为库车早中期,在断层侧向封堵时盐下断块、断背斜等圈闭均可聚集油气。研究成果与勘探现状吻合,并有利于提高勘探成功率。

关键词:膏盐岩盖层;封闭能力;脆塑性;圈闭有效性;克拉苏构造带;库车坳陷;塔里木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Evolution of Paleogene saline deposits and effectiveness of traps in Kelasu tectonic zone, Kuqa Depression, Tarim Basin

Zhuo Qingong¹, Li Yong², Song Yan¹, Yang Xianzhang²,
Zhao Mengjun¹, Fang Shihu¹, Liu Shaobo¹, Lu Xuesong¹

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

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korle, Xinjiang 841000, China)

Abstract: Saline deposits are good regional cap rocks in petroliferous basins, yet not perfect. Research shows that saline deposits are characterized by “embitterment at low temperature and plastic deformation at high temperature”. The sealing capacity of saline deposits changes with burial depth, and the depth from 3 000 to 3 200 m is critical to the capping effectiveness of saline deposits in the Kelasu tectonic zone. The effectiveness of subsalt trap accumulations is influenced by the evolution of saline deposits. The key time for the closing of cap rocks in the anticline zone of Kesalu is the middle and late Kuqa periods, and the main exploration targets are the complete anticline traps buried over 3 200 m deep. In the deep zone of Kelasu, the key time for the closing of cap rocks is the early and middle Kuqa periods, and petroleum may be trapped in subsalt blocks and broken anticlines when faults are laterally sealed. Research fits the status of exploration, and helps to improve exploration success rate.

Key words: saline deposit cap rock; sealing capacity; brittle-plastic; effectiveness of trap; Kelasu tectonic zone; Kuqa Depression; Tarim Basin

世界上许多含油气盆地中油气藏的形成与膏盐岩层有关,其中334个大油气田中盖层为盐岩、石膏的占33%^[1],66个有膏盐岩分布的含油气盆地拥有全世界一半以上的探明储量^[2]。因此,探讨膏盐岩层对油气成藏的影响具有重要意义,国内外学者对此进行了深入研究^[3-16]。

库车前陆盆地克拉苏构造带古近系底部发育

一套膏盐岩盖层,厚度一般为200~900 m,局部可超过3 000 m。在其下伏白垩系砂岩储层中形成了大量油气聚集,如克拉2大气田,但随着油气勘探的深入,盐上浅层圈闭也发现了油气聚集成藏,如大宛齐油田;浅部储层更是广泛发育油气显示,地表发现塔拉克、巴拉库艾肯、康村、基里什等大量油苗。盐下圈闭在相继发现大北气田、克深气田的同

时,也出现了一批失利探井,如克拉 5、克拉 1、克拉 3 等。盐上、盐下圈闭成藏和非成藏情况均存在,膏盐岩盖层的封闭能力受到质疑,其何处封闭、何处不封闭以及复杂的油气成藏现状困扰着油田勘探工作者,制约着油气的深入勘探。本文通过典型油气藏解剖和膏盐岩盖层等石油地质特征分析,结合国内外膏盐岩应力应变实验结果,提出挤压构造背景下膏盐岩盖层的封闭性在地质历史时期是变化的,其演化规律控制着盐下圈闭的成藏有效性,由此明确了克拉苏构造带不同构造区带和不同构造段盐下圈闭油气成藏特征及油气勘探风险。

1 区域石油地质特征

1.1 构造单元

库车坳陷位于塔里木盆地北部、南天山山前,由“五带三凹”组成。“五带”自北向南依次为北部单斜带、克拉苏构造带、依奇克里克构造带、秋里塔格构造带、南部斜坡带;“三凹”自西向东分别为乌什凹陷、拜城凹陷和阳霞凹陷(图 1)。

克拉苏构造带为库车坳陷北部冲断带的第二排构造带,总体呈北东东—东西向展布。受南天山差异挤压构造作用控制,区域上构造带发育多条大致平行的、分段生长而成的、北倾的北东东、北东走向的逆断层以及由断层相关褶皱构成的成排成带的构造圈闭。其中,自北向南以延伸长、规模大的克拉苏断裂为界,将克拉苏构造带南北划分为克拉苏区带和克深区带,前者发育断块、断背斜、背斜圈闭,典型油气藏如克拉 2 气田,后者发育断块、断背斜圈闭,典型油气藏如大北气田、克深 1 气田等;自西向东以侧断坡构造转换带为界,将克拉苏构造带分为 5 段:阿瓦特段、博孜段、大北 1—克深 5 段、

克深 1—克深 2 段、克拉 3 南段。

1.2 生储盖组合

库车前陆盆地发育 5 套主力烃源岩,即:上三叠统黄山街组和中侏罗统恰克马克组湖相烃源岩,上三叠统塔里奇克组和中下侏罗统克孜勒努尔组、阳霞组煤系烃源岩。从有机质类型、成烃母质和热演化程度看,库车前陆盆地为新近纪晚期持续强充注,以成气为主、成油为辅^[17],特别是克拉苏构造带,油气来源充足。

克拉苏构造带古近系膏盐岩、膏泥岩、泥岩间互沉积,全区分布。由于膏盐岩沉积和塑性流动的差异,其分布差别很大,钻井揭示厚度几十米至几千米,最厚区位于克深 2 井—吐北 4 井—大宛 1 井—线,厚度均在 3 000 m 以上。与膏盐岩有关的储盖组合有 2 类:(1)膏盐岩层之下挤压型的(断)背斜圈闭、断块,储集层包括三叠系、侏罗系、白垩系以及古近系底砂岩,盖层为古近系库姆格列木群膏盐岩、膏泥岩,平面分布稳定;(2)膏盐岩底辟拱张型(断)背斜圈闭,储集层为大套膏盐岩层之上的康村组和库车组,盖层为与砂岩互层的泥岩段。

2 膏盐岩盖层封闭性评价

2.1 膏盐岩盖层岩石力学特征

盖层发育特征往往决定着该区油气富集层系、富集程度,特别是区域优质盖层,包括盖层的分布、岩性、岩石力学特征、厚度等等。盖层岩石力学特征不是直接决定盖层自身封闭能力的因素,但决定盖层可塑性程度,因此影响构造变形过程中断裂、裂缝的形成及演化。

膏岩和盐岩同为蒸发岩,在含油气盆地中往往与泥岩呈沉积序列发育,两类岩石结构均致密、孔

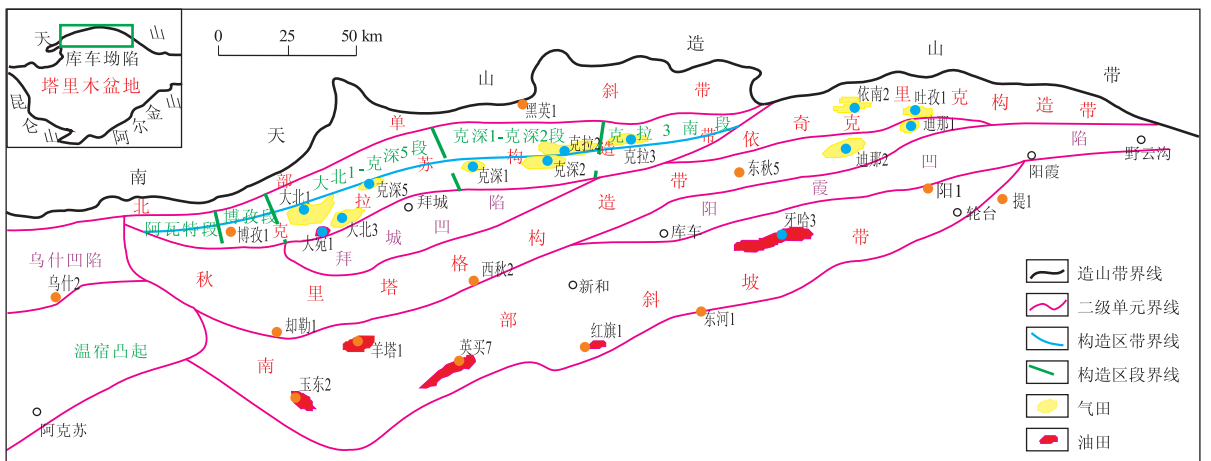


图 1 塔里木盆地库车坳陷构造单元及油气藏分布

Fig. 1 Tectonic units and reservoir distribution in Kuqa Depression, Tarim Basin

隙率低,热导率高。在一定的温度和压力作用下,可分别呈现脆性破裂和塑性流动特征。因此,膏盐岩的应力应变特征明显与碎屑岩不同,特别是盐岩层,其内在原因是膏盐岩本身在不同温度下具有明显不同的脆性、塑性,一般随埋深或温度增加,流变塑性增强,受力流动而不易破裂,甚至使已产生的断裂、裂缝消失^[18-22]。

Ian Davison^[23]研究认为,膏盐岩层在强、快速挤压应力作用下,产生断裂和裂缝的主控因素为岩石内在有效应力和外部差应力,有效应力越小、差应力越大时,膏盐岩层越易破裂。因此,膏盐岩层处于浅埋藏低围压或大量转化脱水增压时最易产生断裂和裂缝,前者与浅层膏盐岩以脆性为主的岩石力学特征相符,后者与膏盐岩层脱出层间水产生异常高压机制有关,流体压力增大将使膏盐岩层所承受的有效应力减小。

盐岩不同温度下三轴应力—应变实验(图2)表明,一般情况下,盐岩应力—应变过程可分为4个阶段:压密阶段、弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段。

由于盐岩孔隙度较小,压密阶段很短,即在很小的应力状态下盐岩即达到其压密强度;弹性变形阶段应力与应变呈线性关系,应力取消时变形可恢复原状;当受力超过屈服强度时,盐岩变形进入塑性阶段,应力取消时岩石应变无法恢复,应力与应变关系为非线性;当受力超过岩石抗压强度时,碎屑岩一般会发生破裂,轴向应力大幅降低,而盐岩只是在原塑性的基础上发生流变,轴向应力发生不规律的低幅降低。盐岩受热温度越高,抗压强度越低,发生塑性变形所需的应力越低,一定温度下破坏阶段与塑性阶段合二为一,盐岩可呈夏天的奶油状流动。

盐水浸泡作用下膏岩岩石力学特性实验表明,膏岩在盐水溶液长期浸泡作用下,有少量溶液由表

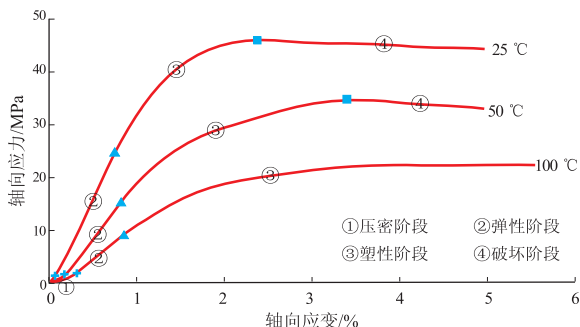


图2 不同温度下盐岩三轴应力—应变曲线
据高小平等^[22]修改。

Fig. 2 Triaxial stress-strain curves of salt rocks at different temperatures

及里地浸入,从而使石膏变形呈软化趋势,变形能力增强,增幅高达73%~147%,相应弹性模量也有所下降^[24]。

2.2 膏盐岩盖层脆塑转变定量评价

由膏盐岩岩石力学特征及前人的实验可知,膏盐岩在不同温度条件下三轴应力—应变曲线存在明显差异,且膏盐岩的压密强度、屈服强度和抗压强度界限值随温度升高而降低,尤其是抗压强度。由此采用内差法,建立了膏盐岩压密强度、屈服强度和抗压强度随温度变化的定量关系。然后,按库车坳陷克拉苏构造带库车期—西域期平均古地温梯度28℃/km、年地表温度15℃、岩石平均密度2.3g/cm³计算,绘制了克拉苏构造带古近系库姆格列木群膏盐岩3个参数随埋深的变化曲线,并以3条曲线和岩石应力—应变强度界线值为标准,建立了克拉苏构造带古近系库姆格列木群膏盐岩脆、塑性变形模式(图3)。

由图3可见,膏盐岩具有低温脆变、高温塑变特征,随埋深增加膏盐岩岩性特征可划分为3个阶段:脆性阶段、过渡阶段和塑性阶段。纵向上,埋深在2600m以内膏盐岩层以脆性为主,快速挤压受力易破裂,发育断裂和裂缝,油气易散失;3200m

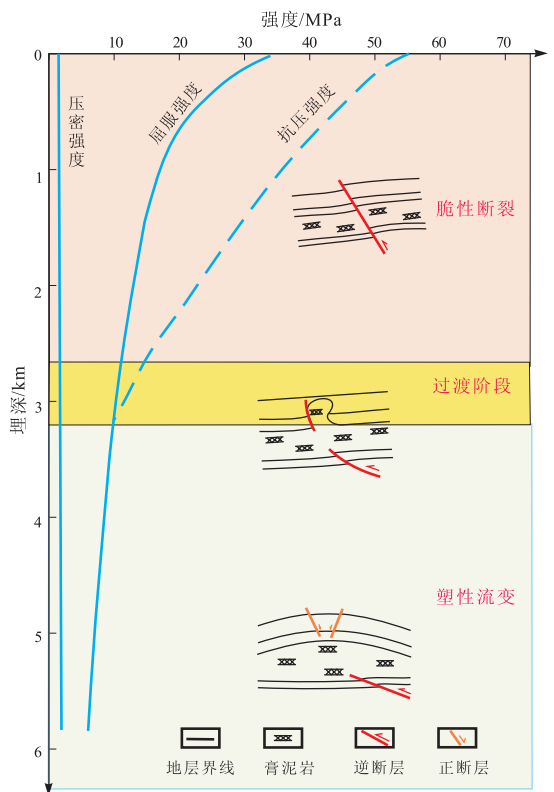
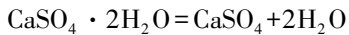


图3 塔里木盆地库车坳陷
克拉苏构造带膏盐岩脆塑转变模式

Fig. 3 Brittle-plastic transition of saline deposits in Kelasu tectonic zone, kuqa Depression, Tarim Basin

以下膏盐岩层完全呈塑性,在挤压变形过程中膏盐岩层塑性流动释放构造应力,盖层不易破裂,已有断层也因膏盐岩层的流动变形而消失,是良好的盖层;2 600~3 200 m为脆塑过渡段,3 000~3 200 m为克拉苏构造带膏盐岩盖层开启与关闭的关键深度段。

膏盐岩层中石膏硬石膏化等脱水反应与膏盐岩矿物组成、粒度大小、孔隙流体盐度和地温梯度有关,一般发生在地温70~105℃之间。膏盐岩层常见矿物转化脱水反应如下:



按照前文古地温梯度及地表温度取值计算,克拉苏构造带膏盐岩矿物转化脱水对应的埋深大致为2~3 km,恰与膏盐岩脆塑过渡段吻合。层间水的脱出增加了孔隙流体压力,一般来说流体压力增加有利于盖层封闭,但同时降低了岩层有效应力,在构造挤压状态下易产生裂缝,甚至断裂,使膏盐岩盖层封闭能力大大降低,盐下油气易散失;随着膏盐岩埋深增加、层间水的脱出以及沿断裂、裂缝的排出,裂缝愈合,岩层塑性增大,盖层封闭能力亦增强。

2.3 膏盐岩盖层封闭关键时期

膏盐岩在区域构造挤压应力、上覆沉积物载荷作用以及其他外力作用下,广泛发育不同程度的脆塑变形,形成大量盐构造及其相关圈闭^[25]。

克拉苏构造带西段大北地区沿吐孜玛扎断裂发育了一系列盐岩刺穿或隐刺穿等盐构造,主要有吐孜玛扎盐墙,以及零星出露的盐丘。盐刺穿的层位自东向西逐渐变新,从东侧刺穿吉迪克组逐渐变为刺穿库车组,形成吐孜玛扎盐墙,其走向近东—西,长度50~60 km,宽几十至几百米,膏盐岩层和周围地层之间呈复杂的锯齿状侵入接触关系。依据古地磁资料确定,该区生长地层的年代下限为上统库车组沉积时期(5 Ma),最新的生长地层为现代沉积。在吐孜玛扎盐墙之南,还发育有与之基本平行的大宛齐盐枕,走向延伸40~50 km,宽10~20 km。盐枕最厚部位的盐岩厚度3 000~4 000 m。上覆地层只有库车组上段和第四系,为扇状生长地层,地层向盐枕顶部上超减薄,在盐枕两翼变厚,地层的倾角由老至新变缓。依据这套生长地层的时代和发育部位,确定大宛齐盐枕于上新世库车中期开始发育。由此可见,大北地区古近系膏盐岩层塑性流动的开始时间为库车早中期。

根据地层厚度对比,大北地区盐上地层现今厚

度超过3 700 m,完全具备塑性流动的条件;之后挤压、上侵、焊接,形成断层焊接,同时膏盐岩层间的断裂部分消失,该断裂被分为上下两段,此时断层不再对油气起散失或输导作用。

东秋箱状背斜位于秋里塔格构造带克孜勒努尔沟,主体为吉迪克组灰褐色泥岩与灰白色膏岩、泥质膏岩互层,南北宽1 300 m,高307 m,南北两翼地层近直立,且多发育褶曲和逆冲断裂,特别是灰白色膏岩层,在逆冲断面上,膏岩层被拖曳拉长,发生塑性变形,形成剪切型涂抹,上盘地层向下涂抹,下盘地层向上涂抹;南翼逆冲断裂发育比北翼多,断裂带内充填宽约1~2 cm的次生石膏脉。显然是早期深埋时构造挤压发生了脆性和塑性变形。依据地层对比,东秋箱状背斜吉迪克组之上缺失康村组和库车组地层,最近的东秋6井二者累积厚度2 811 m。从而表明膏泥岩在最小为2 811 m埋深时已具有明显的塑性变形。

地下膏盐岩层的流动除现今地表特征外,盐岩微观流体包裹体研究也提供了佐证。吐北1井库姆格列木群白色盐岩样品,4 080.5 m,盐岩捕获的暗色天然气包裹体呈线型排列,可能是先期盐岩的裂缝捕获的产物,值得注意的是,这些包裹体均为长条状,且定向排列,显然是盐岩流动拉长的结果。

综上所述,克拉苏构造带膏盐岩的封闭性受其埋深和区域构造背景的控制,具有“低温脆变、高温塑变”特征,一定埋深脱水和强烈构造挤压状态下膏盐岩盖层破裂,深埋挤压背景下塑性流动而封闭。依据膏盐岩脆塑演化模式、盐层中部埋深和生长地层年代,大北地区膏盐岩盖层封闭的关键时间为库车早中期,克拉区带膏盐岩盖层封闭的关键时间为库车中晚期。

3 圈闭成藏有效性

根据膏盐岩盖层封闭性演化模式和具体圈闭盖层,新近纪特别是现今的埋藏深度,可以大致判断圈闭能否成藏,结合圈闭埋藏演化史,也可分析该圈闭地质历史时期是否有油气聚集以及圈闭成藏史。

3.1 盐下圈闭成藏分析

结合大北地区烃源岩演化^[26-27]、油气源对比^[28]、构造发育史^[29-31]以及油气运移通道^[32-33]等研究成果,确定克拉苏构造带油气充注为早油晚气,成藏期分为3期,即康村期、库车期和第四纪西域期;强烈构造挤压发生在库车期—第四纪。因此,克拉苏构造带在康村组沉积期处于构造相对平

静时期,盐下发育的少数圈闭基本处于2 000 m以下,其膏盐岩盖层具有物性和压力封闭双重机制,可聚集早期上三叠统黄山街组湖相烃源岩生成的原油。库车期以来强烈的构造挤压运动使埋深在3 000 m以内的圈闭盖层遭到破坏,已聚集的原油散失。利用砂岩储层颗粒荧光分析技术,在目前成藏与非成藏盐下圈闭的白垩系巴什基奇克组储层中均表明有古油藏的存在,包括克拉2气田、大北1气田、克拉3失利圈闭,证实圈闭早期曾聚集了原油。

以克拉2气田为例。克拉2气田主要以产气为主,含极少量凝析油,为分析气藏成藏过程、恢复古油藏的规模,在气藏系统取心井克拉201井3 600~4 030 m的取心井段内系统采集了16块岩石样品,其中,气水界面(3 935 m)之上样品9块,气水过渡带(3 935~3 940 m)样品2块,水层(3 940 m)之下样品5块。

对上述岩石样品进行定量颗粒荧光分析,无论是储层岩石QGF-E荧光光谱强度,还是QGF指数,均表明在埋深3 980 m以内具有古油藏特征,QGF-E大于50,QGF指数几乎都大于4,即使是现今的气水过渡带和水层;3 980 m以下两参数值迅速下降。因此,3 980 m是克拉2古油藏的古油水界面,埋深在现今气水界面之下。

经过构造强烈挤压作用,若膏盐岩目前仍处于3 000 m以内,那么非完整背斜圈闭,如断块、断背斜等圈闭很难再聚集油气,如圈闭形态类似于克拉2气藏的克拉5号构造圈闭,膏盐岩层埋深为2 289~2 693 m,没有油气聚集成藏。若膏盐岩在后期的挤压过程中埋深超过3 200 m,则盐下老圈闭和新

生成的新圈闭均有效,可聚集晚期的煤成气,形成气田,如大北1、克拉2、克深1-2气田。

3.2 克拉苏构造带成藏差异对比

受膏盐岩盖层封闭性演化的影响,克拉苏构造带盐下圈闭成藏有效性形成时期不同,造成了油气成藏的差异性。

对比克拉苏构造带盖层埋深与圈闭成藏情况,发现不但不同区带膏盐岩盖层的封闭能力和形成时期有差异,不同构造段也有差异(图4)。

需要说明的是,大北和克深字号的探井均位于克深区带,为成功井;克拉字号的探井均位于克拉区带,克拉5井、克拉1井和克参1井为失利井,克拉204井、克拉203井和克拉2井为克拉2气田上的探井和评价井,克拉3井盐下白垩系储层失利,盐间薄砂层成藏。

由此可见,以克拉苏断裂带为界,北部克拉苏区带,膏盐岩埋藏相对较浅,一般以脆性变形为主,所以膏盐岩盖层的封闭性多受到断裂的破坏,特别是埋深小于3 000 m的克拉5、克拉1等失利圈闭,油气成藏为完整性背斜圈闭成藏,如克拉2气田;南部的克深区带在天然气大规模成藏期——库车—西峡期,埋藏深度较大,呈塑性,新产生的断层难以对其形成实质性的破坏,封闭能力强,即使是断块圈闭,在断裂侧向封闭的基础上也能成藏,如大北103断块;而紧临克拉苏断裂带上、下盘的圈闭,处于上述两种情况之间,如前所述,膏盐岩盖层在地质历史时期是变化的,早期埋藏浅,后期埋藏增加,因此,其封闭性也是早弱晚强,受此影响,这类圈闭多数早期形成的油藏被破坏,晚期形成含油的气藏。上述圈闭成藏与膏盐岩层的厚度关系不大。

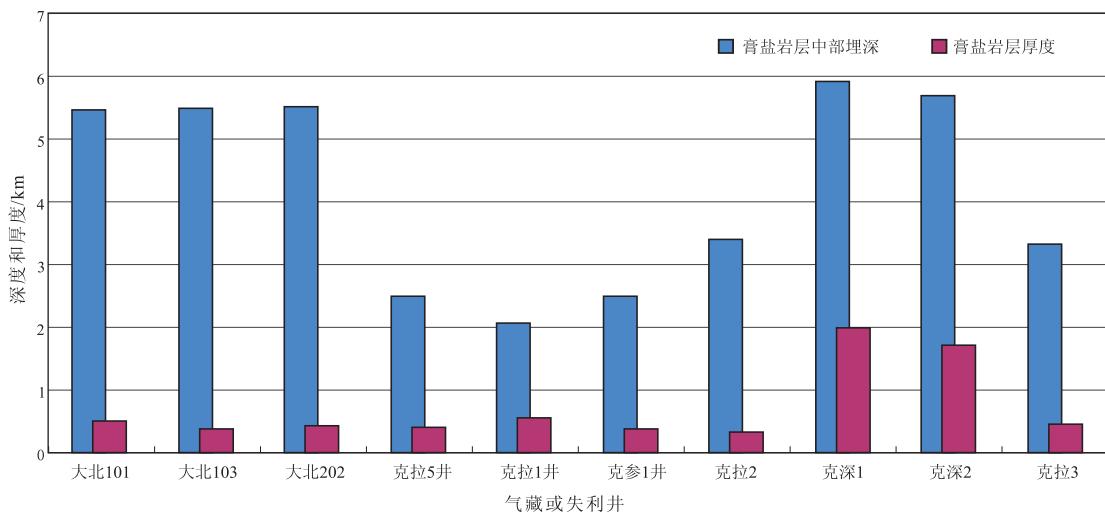


图4 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带膏盐岩层中部埋深与盐层厚度对比

对比克拉苏构造带同样成藏的大北1气田和克拉2气田,前者处于克拉苏构造带西部的克深区带,膏盐岩盖层埋深远远超过3 200 m,盖层封闭形成时间为库车早中期,捕获并聚集了早期少量原油和后期大多数的天然气;后者位于克拉苏构造带东部的克拉苏区带,尽管地质历史时期盖层埋深大大超过3 200 m,但目前的埋深略大于3 200 m,因此其盖层封闭最终形成时间较晚,为库车中晚期,圈闭聚集了晚期高成熟—过成熟的天然气,仅含极少量凝析油,气藏中聚集着克拉苏构造带、乃至库车前陆盆地成熟度最高的天然气,如大北、克拉、迪那等气藏天然气甲烷碳同位素值一般介于 $-27.3‰ \sim -35.0‰$,而克拉2气藏天然气甲烷碳同位素值为 $-27.3‰ \sim -27.8‰$,个别为 $-31.1‰$ 。

4 结论

1) 膏盐岩具有低温脆变、高温塑变特征,构造挤压背景膏盐岩盖层的封闭性随埋深而演化,大于3 000~3 200 m的埋藏深度是克拉苏构造带膏盐岩盖层封闭的关键。

2) 依据膏盐岩脆塑演化模式、盐层中部埋深和生长地层年代,克深区带膏盐岩盖层封闭的关键时间为库车早中期,克拉区带膏盐岩盖层封闭的关键时间为库车中晚期。

3) 克拉苏构造带盐下圈闭成藏有效性因膏盐岩盖层封闭性演化不同而异,克拉区带盖层埋藏较浅,以勘探完整背斜圈闭为主,圈闭中汇聚的古原油多被破坏,晚期聚集了高一过成熟的煤成气;克深区带在断层侧向封堵时盐下断块、断背斜等圈闭均可聚集中晚期充注的油气成藏。

参考文献:

- [1] Ulisses T M, Carry D K. Development of sediment overpressure and its effective thermal maturation: application to the Gulf of Mexico Basin[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(9): 1367-1396.
- [2] 张朝军,田在艺. 塔里木盆地库车坳陷第三系盐构造与油气[J]. 石油学报, 1998, 19(1): 6-10.
- [3] North F K. Petroleum geology[M]. London: Allen and Unwin Press, 1985.
- [4] Schreiber B C. Evaporites and hydrocarbons[M]. New York: Columbia University Press, 1988.
- [5] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation occurrence[M]. New York: Springer-Verlag Press, 1984.
- [6] 吕延防. 油气藏封盖研究[M]. 北京:石油工业出版社, 1996.
- [7] 杜棚,郑洪印,焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 137-148.
- [8] 董忠良,张金功,王永诗,等. 油气藏封盖机制研究现状[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2008, 44: 49-53.
- [9] 高震,谢庆宾. 浅析膏盐岩发育与油气成藏的关系[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(1): 9-11.
- [10] 王东旭,曾溅辉,宫秀梅. 膏盐岩层对油气成藏的影响[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 329-332.
- [11] 赵振宇,周瑶琪,马晓鸣,等. 含油气盆地中膏盐岩层对油气成藏的重要影响[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(2): 299-308.
- [12] 孙海龙. 渤南洼陷膏盐层发育与深层储层次生孔隙发育的关系[J]. 河南石油, 2005, 19(2): 14-18.
- [13] 吕修祥,金之钧,周新源,等. 塔里木盆地库车坳陷与膏盐岩相关的油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 20-21.
- [14] 杨宪彰,雷刚林,张国伟,等. 库车坳陷克拉苏构造带膏盐岩对油气成藏的影响[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2): 201-204.
- [15] 周兴熙. 库车坳陷第三系盐膏质盖层特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 古地学报, 2000, 2(4): 51-57.
- [16] 徐士林,吕修祥,杨明慧,等. 库车坳陷膏盐岩对异常高压保存的控制作用[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2004, 19(4): 5-8.
- [17] 赵孟军,宋岩,秦胜飞,等. 中国中西部前陆盆地多期成藏、晚期聚气的成藏特征[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 525-533.
- [18] 王子煜. 库车坳陷西部中生代地层岩石物理和力学性质[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(3): 399-405.
- [19] 梁卫国,赵阳升,徐素国. 240 °C内盐岩物理力学特性的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2365-2369.
- [20] 陈剑文,杨春和,高小平,等. 盐岩温度与应力耦合损伤研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(11): 1986-1991.
- [21] 陈剑文,杨春和,冒海军. 升温过程中盐岩动力特性实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 231-236.
- [22] 高小平,杨春和,吴文,等. 温度效应对盐岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1775-1778.
- [23] Davison I. Faulting and fluid flow through salt[J]. Journal of Geological Society, 2009, 166, 1-12.
- [24] 梁卫国,张传达,高红波,等. 盐水浸泡作用下石膏岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1156-1163.
- [25] 汪新,唐鹏程,谢会文,等. 库车坳陷西段新生代盐构造特征及演化[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 57-65.
- [26] 何光玉,卢华夏,王良书,等. 库车盆地烃源岩特征及生烃史特征[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 570-574.
- [27] 李谦,王飞宇,孔凡志,等. 库车坳陷恰克马克组烃源岩特征[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2007, 29(6): 38-42.
- [28] 卓勤功,赵孟军,谢会文,等. 克拉苏构造带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.
- [29] 汪新,贾承造,杨树锋,等. 南天山库车冲断褶皱带构造变形时间:以库车河地区为例[J]. 地质学报, 2002, 76(1): 55-63.
- [30] 郭光辉,罗春树,胡太平,等. 褶皱相关断层:以库车坳陷新生界盐上构造层为例[J]. 地质科学, 2007, 42(3): 496-505.
- [31] 贾承造,宋岩,魏国齐,等. 中国中西部前陆盆地的地质特征及油气聚集[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 3-13.
- [32] 赵林,秦胜飞. 库车坳陷天然气成藏条件分析[J]. 石油实验地质, 1999, 21(4): 307-310.
- [33] 李振生,刘德良. 塔里木北部库车地区的断层系统及其对油气的控制作用[J]. 地质科学, 2009, 44(1): 26-34.