

文章编号:0253-9985(2007)06-0809-07

库车坳陷古流体动力与天然气成藏特征分析

王震亮^{1,2}

(1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要:根据库车坳陷超压的成因分析结果,将其分为沉积型超压和构造挤压型超压。利用实测压力、包裹体形成压力和最大埋深时期的古压力等直接证据作为约束条件,根据所建立的流体压力演化数学模型,恢复出不同地质时期的沉积型超压;基于构造压实作用机理,评价了喜马拉雅期构造型超压的形成幅度。将二者加以叠合,获得了目的层的压力演化历史,并恢复出气势的演化历史,分析了流体动力对天然气运移、成藏的影响。研究认为,目的层在库车组沉积前处于沉积型超压阶段,而库车组以来则属沉积型超压的萎缩和构造挤压型超压的发育阶段;侏罗系烃源岩与下白垩统储层之间过剩压力的大小对比关系,形成了天然气的持续充注、早期充注晚期停滞、早期充注早期停滞等3种运移类型;不同时期的气势梯度分布表明,库车组沉积以后的侧向运移、成藏作用最为活跃;第四纪以来的构造运动促成天然气的运移、聚集强度增大,是造成天然气晚期成藏的主要原因。

关键词:超压;过剩压力;气势梯度;流体动力;油气运移;成藏特征;库车坳陷

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Analysis on paleohydrodynamic force and gas accumulation characteristics in the Kuqa Depression, the Tarim Basin

Wang Zhenliang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: Analysis of the causes of overpressure in the Kuqa depression reveals that there are two types of overpressure: the depositional overpressure and the tectonic compressive overpressure. Constrained by such direct evidences as measured pressure, forming pressure of fluid inclusions, and palaeo-pressure during the epoch with the maximal burial depth, the depositional overpressure in different geologic periods are reconstructed in accordance with the mathematical model of fluid pressure evolution. On the basis of mechanism of structural compaction, the amplitude of tectonic overpressure in the Himalaya period is evaluated. The evolution history of fluid pressure in target strata is obtained and the development of gas pressure potential is restored by combining these two kinds of overpressures. The impact of hydrodynamic force upon gas migration and pooling is also studied. The results show that the target was under depositional overpressure before the deposition of Kuche Formation, and since then went through the decline of depositional overpressure and rising of tectonic overpressure. Three modes of gas migration including continuous charging, early charging with later standstill and early charging with early standstill are recognized based on analyses of the pressure relationship between the Jurassic source rock and the lower Cretaceous reservoir rock. Gas pressure potential gradients in different geologic periods show that the lateral migration and accumulation was most active after the deposition of Kuche Formation. The major cause of the late accumulation of gas was the intensifications of gas migration and accumulation by tectonic movement since the Quaternary period.

收稿日期:2007-10-19。

作者简介:王震亮(1966—),男,教授、博士生导师,油气运移与成藏、盆地流体动力学、油气地质资源评价。

基金项目:教育部“能源盆地油气地质”创新团队资助项目(IRTO559);国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB214603)。

Key words: overpressure; excess pressure; gas potential gradient; hydrodynamic force; hydrocarbon migration; hydrocarbon accumulation characteristic; Kuqa Depression

油气的运移、成藏作用发生于特定的地质历史时期,现今的油赋特征特征是这一作用的最终结果。一般说来,在影响油气运移、成藏的诸要素中,流体动力是其中最主要的因素之一,因为运移的发生须在一定的动力框架和动力梯度下可实现,而成藏作用实际上是促使运移的各种动力在特定条件下达到暂时平衡的结果^[1-4]。同样,现今实测到的流体动力分布也是漫长地质历史时期演化的结果,除非在非常新的一次沉降盆地(如新近纪盆地)才可作为历史的近似代表,通常情况下,流体压力的纵向分布曲线,是不能代表压力演化历史的,对于后期改造强烈的中西部叠合盆地更是如此。因此,有必要着眼于流体压力在历史时期的分布、演化特点,才可能真实描述天然气在地质历史时期的运移、成藏特点^[5-7]。

库车坳陷自北而南可划分为7个二级构造单元^[8],即北单斜带、克拉苏-依奇克里克山前冲断背斜带、秋立塔格前缘冲断背斜带、南部斜坡带以及乌什、拜城、阳霞3个凹陷。主要的大气田发现于山前冲断背斜带和前缘冲断背斜带。克拉2气田位于塔里木盆地库车坳陷北部克拉苏构造带,在古近系白云岩底面构造图上,克拉2背斜是一个近东西向的不对称长轴背斜。克拉2气田的气主要来自侏罗系烃源岩,沿断层垂向运移,在喜马拉雅中晚期形成的白垩系-古近系背斜中聚集并形成大气田。克拉2气田异常高压明显,每百米压力梯度为1.8~2.1 MPa,过剩压力30~35 MPa。有关克拉2气田超压的成因,前人认为构造挤压是形成本地区超压的第一位的因素,来自下伏烃源岩高压天然气的注入存在疑问,欠压实作用是否存在还有争论。王震亮等(2005)定量评价了气柱浮力、欠压实作用和构造挤压作用等因素对砂岩内异常高压的贡献^[9],并提出了克拉2气田超压形成的概念模式。气柱浮力对超压的贡献不超过10%;欠压实作用对砂岩中超压的形成起着重要作用,其贡献一般为20%~30%;从构造挤压作用对本区超压的贡献最大可达40%~50%。

根据超压的成因,将其划分为沉积型超压和构造型超压。前者系在沉积、成岩过程中因欠压实作用、生烃作用等所形成的过剩压力,后者则是

当构造应力超过上覆负荷时,在封闭的流体体系内,由一部分构造压应力转化而成的流体压力。将不同时期的古压力与现今压力进行对比,利用数值模拟技术、应力分析法等恢复出压力演化历史。

1 沉积型超压的恢复

1.1 最大埋深时期的泥岩古压力

工作中共编制了库车坳陷及邻区40多口井的砂、泥岩压实曲线,并对其分布特征、成因进行了分析。由于压实作用具有不可逆性,故从压实曲线换算出的过剩压力应当反映最大埋深时期的压力分布状态^[10,11]。根据作者编制的库车坳陷不同地区的埋藏史曲线,认为自三叠纪以来以库车组(N_2k)沉积末埋深最大,从而反映本地区的超压为库车期末。

从库车坳陷北部克参1井—克拉3井剖面的泥岩过剩压力分布(图1)看,超压顶开始出现于康村组底或古迪克组(N_1j),超压体穿层性不明显,过剩压力的幅度明显大于塔北地区,其中在库姆格列木组超压幅度最大,形成一个过剩压力为20~30 MPa的稳定超压层,其中在克拉201井处形成了一个30 MPa以上的超压体,构成本区压力最高的地层,自此向上、向下过剩压力都将降低。

平面上,古近系库姆格列木群异常压力在全区广泛分布,整体具有北高南低、西高东低的特点。其中以克拉201井过剩压力最大,超过20 MPa,而塔北的轮台地区仅为3~5 MPa,异常压力的形成与分布主要受膏泥岩地层分布特征控制,一方面巨厚的膏泥岩使得压实过程中流体排出不畅,另一方面可以形成良好的封隔体,异常压力得以保存。下白垩统泥岩内的异常压力分布同样具有北高南低、西高东低的分布格局,但过剩压力的幅度较库姆格列木群已明显降低,主要由于砂岩含量的增大,压实排水相对顺畅。

将砂岩实测压力与泥岩最大埋深时期古压力进行对比,可以确定欠压实作用可能对砂岩压力的贡献。库车坳陷下白垩统砂、泥岩压力的对比表明,坳陷北部泥岩在最大埋深时期形成的过剩压力仅相当于现今实测过剩压力的30%~50%左

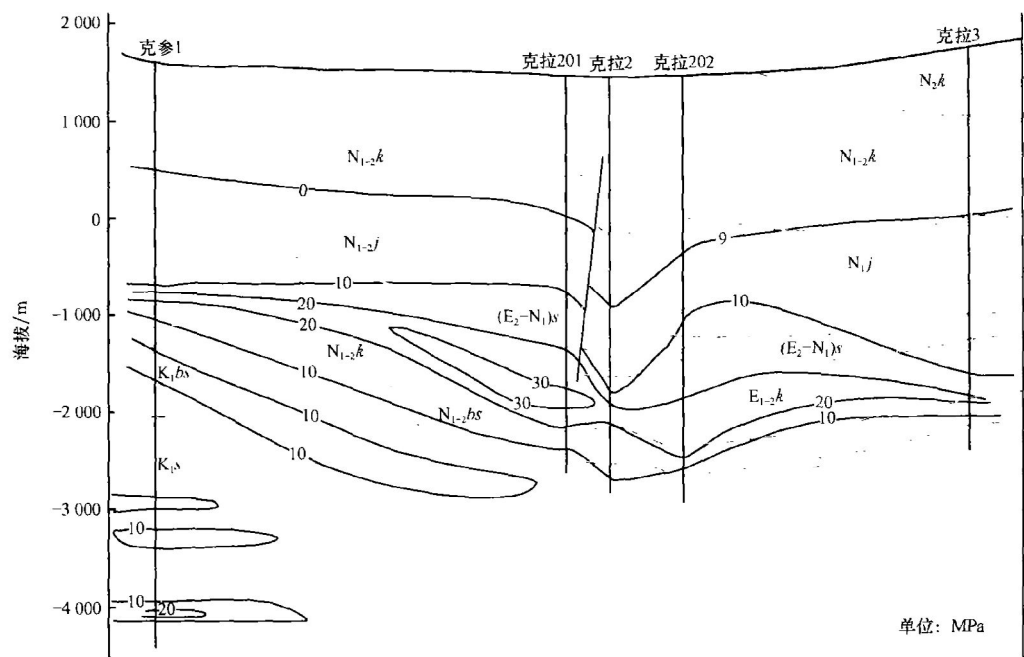


图1 根据压实曲线计算的克拉苏构造带克参1井—克拉3井剖面在最大埋深时期的泥岩过剩压力
Fig. 1 Excess pressure of mudstone during the maximum burial depth on the profile crossing Kechan 1 well to Kela 3 well in the Kelaasu structural belt calculated from compaction curves

右,这与我们先前对克拉2气田范围内进行的评价结果是一致的,说明欠压实作用仍然是形成库车坳陷异常高压的重要因素,是不容忽视的。

1.2 包裹体形成压力的恢复

通过对岩石自生包裹体进行显微镜下鉴定和冷热台下测温,测定其均一温度和流体组分,应用矿物(石英)平衡热力学算法,可以计算出流体包裹体形成时期地层所经历的温度、压力,为确定古压力、古温度状态提供了充分的直接证据^[12,13]。镜下观察,砂岩中次生形成的包裹体,分布于石英碎屑的晚期微裂隙。实验中共测试了38个

包裹体,包裹体的粒度为2~4.5 μm,呈灰黑色半透明状,主要次生分布于石英碎屑的微裂隙和石英加大边中(79%),其余原生分布于石英条带、方解石。在包裹体的类别中,含烃类水溶液包体占50%,盐水包体42%,其余为CO₂水溶包体。其形成温度分为110~145℃(15.7%),150~175℃(84.3%)两期。

根据库车坳陷在喜马拉雅晚期剥蚀前、后两个状态下的地层埋深,分别得到了两组压力梯度结果。由表1可见,克拉2井库姆格列木组(E₁₋₂ km)、巴什基奇克(K₁ bs)砂岩储层在N₂k沉积末—N₂k剥蚀末之间的古压力梯度比较接近,每

表1 根据砂岩样品的包裹体形成温度和压力计算的古地层压力结果
Table 1 Paleo-formation pressure calculated from the temperature and pressure data of inclusions in sandstone samples

井号	层位	样品深度/m	N ₂ k 末剥蚀厚度/m	形成压力/MPa	每百米压力梯度*/MPa	每百米压力梯度**/MPa
克拉2	E ₁₋₂ km	3 564.0	2 857	62.0	0.966	1.740
	K ₁ bs	3 831.3	2 857	65.0	0.972	1.697
	K ₁ bs	3 900.0	2 857	66.0	0.977	1.692
	K ₁ bs	3 924.5	2 857	66.0	0.973	1.682
东秋5	E ₁₋₂ km	4 773.9	2 364	76.5	1.072	1.603
	K ₁ bs	5 094.0	2 364	76.0	1.019	1.492

注: * 和 ** 分别指按 N₂k 沉积末(最大埋深状态)和 N₂k 末剥蚀后的埋深计算出的压力梯度。

百米大致为0.97~1.69 MPa,而东秋5井库姆格列木群($E_{1-2} km$)、巴什基奇克组($K_1 bs$)在此阶段内的古压力梯度略有差别,分别为1.07~1.60 MPa和1.02~1.49 MPa。因此可以认为,在库车地区天然气运移、成藏最为活跃的新近纪晚期,存在一定幅度的流体压力、地层温度异常。但压力的幅度已明显低于最大埋深时期(库车组沉积末)。

以上两个方面的证据表明,在本地区天然气运移、成藏最为活跃的新近纪晚期,是存在一定幅度异常压力的。

1.3 沉积型超压演化历史的恢复

以现今实测压力为基础,以压实研究获得的最大埋深时期压力和包裹体研究获得的形成压力作为历史时期的约束,以盆地数值模拟技术为主线,正确建立模型,仔细选取参数,并辅以适当的实现方法,有助于实现对某些石油地质过程的定量描述和恢复^[14]。

2 构造型超压的评价

构造挤压作用对超压形成的影响,可以根据“构造压实作用”机理加以描述,即从先前的上覆负荷对目的层的压实,转变为侧向挤压对目的层的压实,前、后两个时期经历了最大主应力方向的转变^[10]。在完全开放的流体体系内,无论侧向上的构造挤压强度如何,都很难将其应力传递给孔隙流体;在完全封闭的流体体系内,则从垂向总

负荷到侧向挤压应力间的新增应力部分,将全部加给孔隙流体;半封闭流体体系内,流体增压的幅度与地层的岩性、年代、泊松比等因素有关。

构造挤压能否引起流体压力的增高有一个基本前提,那就是后一时期的侧向上的构造主应力必须明显大于前一时期的负荷应力,才能在岩石孔隙流体内产生增压效应。因此,在评价构造型超压的大小时,有必要考虑构造增压的可能性和有效性。

实践证明,应用声发射实验可以测定岩石所经历的最大主应力。将实测的最大主应力数据与相应深度点计算出的上覆总负荷应力进行对比(图2)^[15],发现库车坳陷内(如克拉2气田)实测的现今最大主压应力大于沉积负荷应力,说明此处构造挤压作用较强烈,构造应力对异常流体压力的形成有可能起到十分重要的作用。而在塔北隆起内,现今最大主应力值低于上覆沉积负荷应力,反映构造挤压作用相对微弱,侧向的构造挤压作用很难对该地区流体压力的增高起到明显作用,因此,在计算喜马拉雅晚期剥蚀末和现今两个时期的流体压力时,库车坳陷范围内必须构造挤压作用对流体压力的增高效应,而塔北隆起的流体则一直来源沉积型超压。

根据前人分析,库车坳陷的强烈冲断变形作用发生于喜马拉雅晚期(上新世库车期—第四纪)。喜马拉雅晚期运动是库车坳陷最强烈的一次构造运动,库车再生前陆盆地目前的构造面貌和局部构造均形成和定型于这一时期。因此,主要针对库车组抬升之后与现今两个时期,分析构

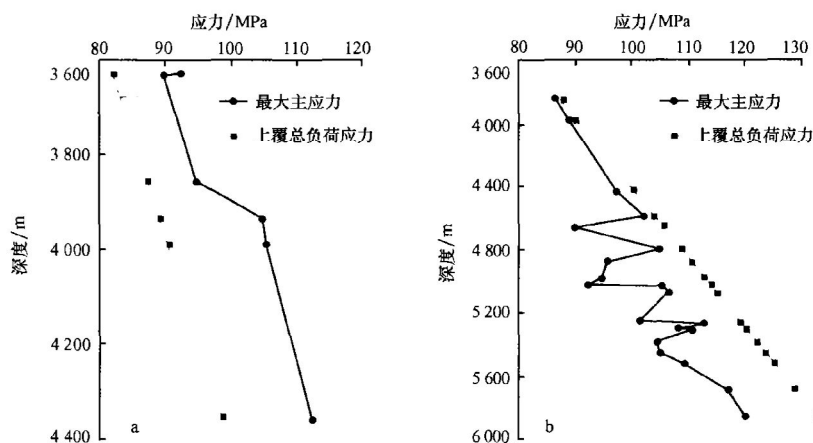


图2 库车坳陷a)与塔北隆起北缘b)最大主应力与上覆负荷应力的分布和大小对比^[15]

Fig. 2 Comparison of the distribution and values of maximum principle stress and overburden stress in the Kuqa Depression a) with those on the northern edge of the Tabei Uplift b)

造挤压对流体的增压作用。

在计算构造增压幅度时,先根据现今实测孔隙度和压实系数,计算地下岩层的有效应力,利用现今埋深计算上覆总负荷应力和最大主应力,求出平均应力后,即可得到在上覆负荷和构造挤压的双重作用下流体压力的大小。至于库车组末的孔隙度,则根据孔隙度-深度关系求出,然后根据盆地模拟出的埋深计算负荷和最大主应力,评价构造挤压对流体压力的增压效应。

3 压力演化的阶段性

现以巴什基奇克组(K_1bs)内的压力演化特点为例加以说明。

3.1 沉积型超压阶段(N_1j — N_2k 沉积末)

在吉迪克组沉积以前,库车坳陷整体表现为一个北倾单斜,沉积厚度小,下白垩统成岩作用强度较弱,且经历了多次抬升、剥蚀,全区下白垩统内一直无超压出现。

过剩压力开始出现于迪克组沉积末,但超压幅度较小,仅沉积中心地区有3~4 MPa的低幅度超压,其他地区仍为静水压力。

康村组沉积末,全区普遍发育异常高压,除塔北隆起和阳霞以东外均有超压产生,过剩压力整体具有西高东低的趋势。受沉积中心北移的控制,超压中心也向北迁移,过剩压力最大可达22 MPa,整体上北高南低。

库车组沉积末,沉积型超压的演化达到了顶峰,无论是超压的分布范围还是幅度都超过以往各时期。在拜城凹陷和阳霞凹陷形成两个过剩压力中心区(图3),中间夹相对低压区。自超压中心区向南过剩压力逐渐降低。

3.2 沉积型超压的萎缩和挤压型超压发育阶段(N_2k 末—现今)

库车组沉积后,库车坳陷经历了地质历史时期中最为强烈的构造运动——喜马拉雅晚期构造运动。流动动力的演化变得异常复杂,一方面区域性的抬升剥蚀,使得沉积型超压不断的萎缩;另一方面,强烈的构造挤压作用,导致挤压型流体动力的孕育产生。

喜马拉雅晚期剥蚀末,全区过剩压力的分布格局与库车组沉积末相似,只是过剩压力的幅度明显降低。库车坳陷内由于构造挤压型超压的补充,降低幅度较小,约为10~15 MPa。过剩压力中心区仍位于拜城凹陷和阳霞凹陷。

现今,过剩压力的分布格局基本未变,挤压型超压已占主导地位,并使坳陷内的过剩压力幅度略有回升。

4 流体动力对天然气运移、成藏的影响

4.1 地质时期生、储层间过剩压力差的对比及引起的排烃差别

侏罗系烃源岩与主要储层下白垩统之间,过

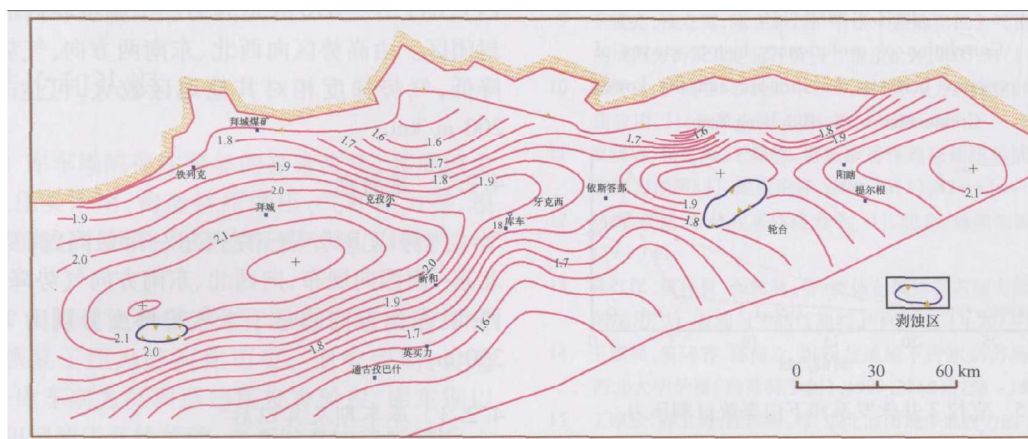


图3 库车坳陷巴什基奇克组在库车组沉积末的地层压力系数分布

Fig. 3 Distribution of formation pressure coefficients of the Bashijiqi Formation in the Kuqa Depression at the end of the Kuqa period

剩压力差在不同地质时期的大小对比关系,引起了烃源岩排烃、运移的差别,在地质历史上形成了不同的充注类型。

4.1.1 持续充注型

此种类型的特点是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下白垩统目的层的过剩压力,使得侏罗系地层中排出的天然气可以持续向上覆储层中充注。研究发现库车坳陷内大部分地区属于此种类型(图4)。

4.1.2 早期充注晚期停滞型

以克拉2气田为例(图5),从吉迪克组沉积开始至喜马拉雅晚期剥蚀末,侏罗系过剩压力大于下白垩统的过剩压力,此时,天然气可以发生垂向的充注和运移。此后,侏罗系沉积型超压因得不到后续的压力补给而不断降低,与此同时,下白垩统内尽管沉积型超压不断削弱,但因构造挤压的增压作用,流体压力得到补偿反而增加,晚期(距今0.4 Ma左右)上、下地层的过剩压力达到平衡,天然气的垂向注入停止。

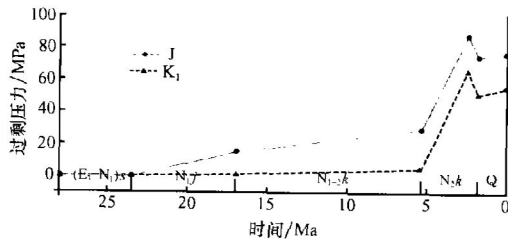


图4 拜城凹陷侏罗系和下白垩统过剩压力演化史曲线对比

Fig. 4 Correlation of evolutionary history curves of excess pressure between the Jurassic and the Lower Cretaceous in the Baicheng Sag

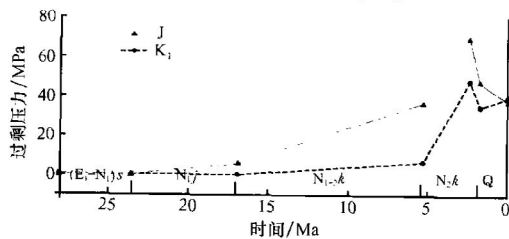


图5 克拉2井侏罗系和下白垩统过剩压力演化史曲线对比

Fig. 5 Correlation of evolutionary history curves of excess pressure between the Jurassic and the Lower Cretaceous at Well Kela 2

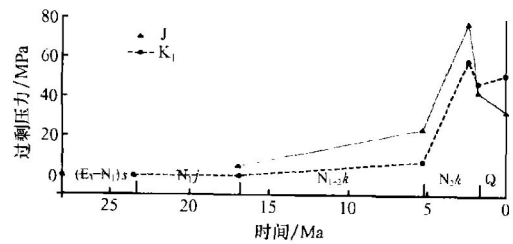


图6 克拉3井侏罗系和下白垩统过剩压力演化史曲线对比

Fig. 6 Correlation of evolutionary history curves of excess pressure between the Jurassic and the Lower Cretaceous at Well Kela 3

4.1.3 早期充注早期停滞型

以克拉3井为例(图6),从吉迪克组沉积至库车组沉积末,侏罗系内的过剩压力大于下白垩统,天然气得以向上运移。在喜马拉雅晚期构造运动期间(距今1.9 Ma左右),下白垩统内流体压力受到构造增压的影响,过剩压力降低的速率低于侏罗系,导致侏罗系过剩压力低于下白垩统,天然气的充注停止。

4.2 不同时期的气势梯度及其运移动力

这里仍以巴什基奇克组为例,说明不同地质时期的气势梯度大小分布的差异,并用于反映运移动力的强弱。

4.2.1 吉迪克期

高势中心位于东秋8—东秋6井之间(牙克西),R11井—R10井是其另一个幅度较高的气势封闭区。由高势区向西北、东南两方向,气势快速降低,气势梯度相对其他地区较大,可达140~200 m/km。

4.2.2 康村期

气势以R10井—克孜尔一带最高,高势区呈北东—南西向展布,向西北、东南方向气势降低,向西北、东南方向的每千米气势梯度分别为200和330 m。

4.2.3 库车期及其以后

高势区基本分布于拜城凹陷范围内,呈近东西向展布,并一直延续到牙克西等地。库车组沉积末,南、北两个方向的每千米气势梯度分别为

700 和 730 m。现今,由高势区向西北、东南方向的每千米气势梯度分别为 1 000 和 900 m。

综上所述,吉迪克期以后,巴什基奇克组内天然气的运移动力以库车期以后最为强大,其气势梯度约为吉迪克期、康村期的 2~3 倍以上。可以认为,天然气在库车期及其以后的运移成藏作用最为活跃。

4.3 运移方向

天然气自下伏地层进入特点圈闭,其二次运移既包括沿断裂等垂向运移通道的垂向运移,也包括沿输导层在侧向上的运移。天然气沿断裂的垂向运移主要是在断裂活动时期呈“幕式”进行的。而侧向运移,因在不同气势演化阶段内气势分布的格局基本相似,其运移特征具有一定稳定性和缓慢调整的特点。以下主要根据巴什基奇克组气势分布和运聚系统划分^[16],讨论其侧向运移特点。康村期以前,天然气在该组地层内的侧向运移主要是由拜城高势中心区的两侧运移,运移方向主要指向其西北和东南方向。库车期及其以后,高势中心略向西移至 R9 井—R11 井附近,由此向东北、东南、西南等方向的运移比较引人注目。

而在中侏罗统内,库车坳陷北部的气势分布在康村期前、后发生了“跷跷板式”变化。康村期以前气势在北部边缘高,向南呈斜坡状分布,天然气整体向南运移,仅在康村期可能向西南方向的运移(指向拜城);库车期以后,天然气主要从拜城高势中心区向东北、东南等方向运移,同时在库车坳陷东部的阳霞相对高势区内,向西北方向的运移也不容忽视。

5 结论和认识

1) 库车坳陷存在明显的异常高压,其成因主要有欠压实作用、构造挤压增压、气柱浮力等,根据超压的成因,可将其分为沉积型超压与构造型超压。

2) 根据建立的沉积型、构造型超压的评价机制,恢复了压力的演化历史。研究表明,吉迪克期—库车期为沉积型超压发育阶段,库车期以后,沉积型超压开始萎缩,逐渐发育构造型超压。

3) 侏罗系烃源岩与下白垩统储层之间过刺压力的大小对比关系,形成了天然气的不同运移类型,即坳陷内大部分地区的持续充注型,以克拉

2 为代表的早期充注晚期停滞和以克拉 3 为代表的早期充注早期停滞型。

4) 巴什基奇克组内不同时期的气势梯度分布表明,库车期以后的气势梯度约为吉迪克期、康村期的 2~3 倍以上,因此天然气在库车期及其以后的侧向运移、成藏作用最为活跃。

致谢:本课题研究过程中得到国家“973”天然气项目办公室、中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院的大力支持,西北大学硕士研究生施立志、孙明亮、张立宽等参与了部分基础工作,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- 1 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京:石油工业出版社:2004. 2~4
- 2 王庭斌. 中国气田的成藏特征分析[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 103~110
- 3 王震亮, 张立宽, 孙明亮, 等. 鄂尔多斯盆地神木—榆林地区上石盒子组—石千峰组天然气成藏机理[J]. 石油学报, 2004, 25(3): 37~43
- 4 赵孟军, 宋岩, 秦胜飞, 等. 中国中西部前陆盆地成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 402~410
- 5 王震亮. 改造型盆地流体动力学的发育特点[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 24~27
- 6 Song Yan, Xia Xinyu, Wang Zhenliang, et al. Interaction of fluid dynamic factors in the migration and accumulation of natural gas[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(14): 1 207~1 211
- 7 王震亮, 陈荷立. 试论古水动力演化的旋回性与油气的多期次运聚[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 339~344
- 8 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
- 9 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
- 10 陈荷立, 罗晓容. 砂泥岩中异常高流体压力的定量计算及其地质应用[J]. 地质论评, 1988, 34(1): 54~63
- 11 罗晓容, 杨计海, 王振峰. 盆地渗透性地层超压形成机制及钻前压力预测[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 22~31
- 12 刘斌, 沈昆. 流体包裹体热力学[M]. 北京:地质出版社, 1999. 119~140
- 13 陈红汉, 董伟良, 张树林, 等. 流体包裹体在古压力模拟研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 207~211
- 14 王震亮, 罗晓容, 陈荷立. 沉积盆地地下古水动力场恢复[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1997, 27(2): 155~159
- 15 丁原辰, 孙宝珊, 汪西海, 等. 塔北油田现今地应力的 AE 法测量[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(2): 215~218
- 16 王震亮, 陈荷立. 有效运聚通道的提出与确定初探[J]. 石油实验地质, 1999, 21(1): 71~75

(编辑 高 岩)