

文章编号:0253-9985(2012)02-0208-09

库车坳陷构造挤压对流体动力的影响

张凤奇^{1,2},王震亮²,范昌育²,赵雪娇²

(1. 西安石油大学 油气资源学院,陕西 西安 710065; 2. 西北大学 地质学系,陕西 西安 710069)

摘要:库车坳陷喜马拉雅晚期构造挤压强烈,流体动力分布复杂。为分析库车坳陷构造挤压对流体动力的影响,模拟了库车坳陷喜马拉雅晚期最大主压应力的分布;利用建立的构造挤压增压模型,评价了库车坳陷主要构造带喜马拉雅期构造挤压增压;将沉积型超压和构造挤压增压加以叠合,获得了库车坳陷目的层的压力演化历史,并恢复出气势的演化历史;在构造应力场和流体动力恢复的基础上,分析了库车坳陷构造挤压对流体动力的影响及天然气运聚特征。结果表明,库车坳陷在构造强烈活动期,构造挤压改变了流体动力的大小,流体动力的增大增强了天然气的运移动力,有利于天然气运移,流体动力的减小减弱了天然气的运移动力,有利于天然气聚集;构造挤压也改变了流体动力的方向,构造挤压作用下,使局部圈闭成为相对低势区,成为天然气运移的指向区;较强流体动力指向上的弱流体动力区,可成为天然气的有利聚集区。

关键词:构造挤压;流体动力;构造应力场;库车坳陷;塔里木盆地

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Effects of tectonic compression on hydrodynamic force in Kuqa Depression

Zhang Fengqi^{1,2}, Wang Zhenliang², Fan Changyu² and Zhao Xuejiao²

(1. School of Petroleum Resources, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

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

Abstract: Late Himalayan tectonic compression was strong in Kuqa Depression, Tarim Basin, resulting in complex hydrodynamic force distribution. In order to understand the effects of tectonic compression on hydrodynamic force in Kuqa Depression, we simulated the distribution of the maximum principal compressive stress of Kuqa Depression in the Late Himalayan period. The tectonic compression model was used to evaluate the amplitude of tectonic overpressure in the main tectonic zones of Kuqa Depression in the Late Himalayan period. The evolution history of fluid pressure in the major target formations of Kuqa Depression was defined and that of gas pressure potential was restored by integrating the depositional overpressure with the tectonic compressive overpressure. Based on restoration of tectonic stress field and paleohydrodynamic force, we analyzed the effects of tectonic compression on hydrodynamic force and the characteristics of gas migration and accumulation in Kuqa Depression. Tectonic compression can change the hydrodynamic force in Kuqa Depression during strong tectonic activity. The enhancement of hydrodynamic force can increase gas migration force, being favorable for gas migration. The lowering of hydrodynamic force can reduce gas migration force, being favorable for gas accumulation. Tectonic compression also can change the direction of hydrodynamic force, turning the local traps into relatively low potential areas, to which gas migrate. Areas with weak hydrodynamic force in the direction of stronger hydrodynamic force are favorable for hydrocarbon accumulation.

Key words: tectonic compression, hydrodynamic force, tectonic stress field, Kuqa Depression, Tarim Basin

收稿日期:2011-05-15;修订日期:2012-02-28。

第一作者简介:张凤奇(1981—),男,博士、讲师,成藏动力学和成藏地质学。

基金项目:国家油气重大专项(2008ZX05003-02)

库车坳陷位于塔里木盆地北部,北缘是南天山造山带,南邻塔北隆起,坳陷呈北东东向展布,面积约 42 700 km²。中生代以来受天山造山带的强烈挤压,山前褶皱强烈。喜马拉雅运动晚期,在山前褶皱-冲断作用下形成中、新生界逆冲带,在坳陷内沉积了数千米厚的新生代地层^[1-2]。在强烈的构造挤压作用下,使处于封闭程度较强的流体体系产生增压^[3-10],打破已有流体动力分布格局,使油气发生运移、调整,此时虽然构造应力起主导作用^[11-12],但油气不完全沿着高应力区向低应力区运移,最终控制油气运移的是流体势,油气是从高流体势向低流体势发生运移的,流动的最大可能方向是流体势梯度最大的方向。构造应力场与油气运移关系前人已做过较多探讨,通过在渗流方程中引入表征构造应力的梯度项来研究构造应力场对油气的驱移作用^[13];从流体动力学的基本规律出发,应用渗流力学、岩土力学和弹性力学的理论及方法,推导出了考虑应力状态的多孔介质中流体运动的动力学方程,分析构造应力对流体运移的影响^[14-15];应用孔隙压力和有效应力的概念提出将固体构造应力场中的平均应力转化为孔隙介质中等效的流体压力或流体势场,再用渗流方程和达西定律解出由构造应力场所引起的流体运移速率,来研究构造应力场驱动油气运移^[16-18]。而强烈构造挤压作用后,流体动力如何变化?规律又是如何?前人尚未进行过系统讨论。本文旨在通过对构造应力场及构造挤压作用下的流体动力的

恢复,分析构造挤压对流体动力的影响,总结其规律,以认识构造挤压对油气成藏的影响和作用。

1 构造应力场的恢复

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,本文主要分析该时期构造挤压对流体动力的影响。本次构造应力场恢复平面上选定目的层为巴什基奇克组,剖面上选定过 DB1 井和 TB1 井北西-南东向剖面,运用 ANSYS 10.0 软件完成,采用二维模拟。研究时根据古近系库姆格列木组底(T₈)目前构造纲要图建立平面地质模型(图 1)。根据研究区高温高压三轴岩石力学参数的实验结果^[19-22]和钻井岩性组合资料,通过加权平均法得到地质体单元内的实际岩石力学参数。在同一单元内,岩石当作均质体处理,而各单元之间岩石力学参数可以不同。断层当作断裂带处理,建模时把断裂带定义为三角形六节点单元类型,其他部分定义为四边形八节点单元类型(表 1)。

在喜马拉雅晚期最大主应力方向变成水平,南天山和盆山边界处的构造变形以近北-南向挤压变形为主,而库车坳陷内部则以近北-南向和北西-南东向挤压变形为主^[23]。据此,本次将东西向设定为 X 方向,南北向设定为 Y 方向,边界条件的设置为:将西边界在 X 方向约束,东南角在 X, Y

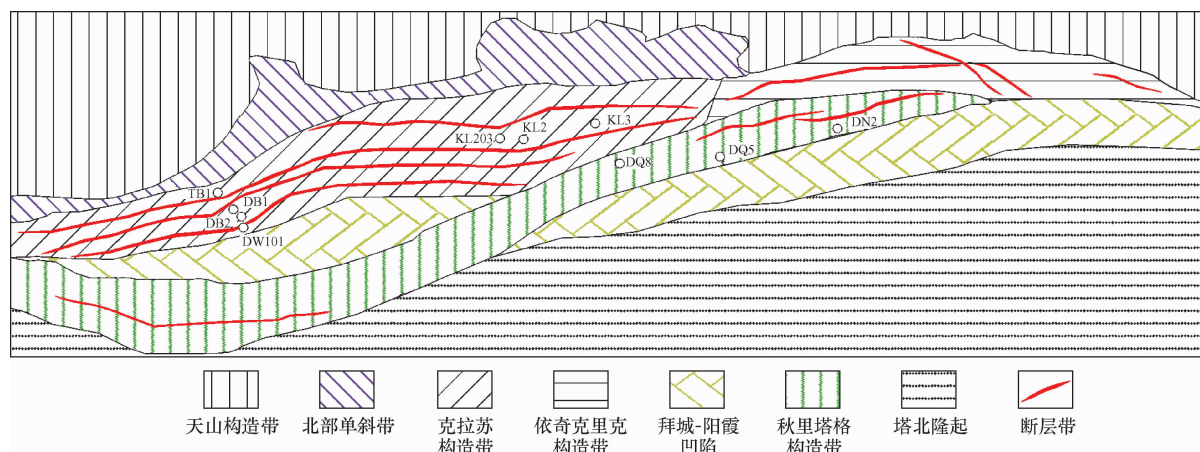


图 1 库车坳陷巴什基奇克组顶面地质模型示意图

Fig. 1 Geological model of top surface of the Bashijiqi Formation in Kuqa Depression

表 1 库车坳陷喜马拉雅晚期巴什基奇克组岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters of the Bashijiqike Formation in Kuqa Depression in the Late Himalayan period

材料序号	模拟对象	单元类型	杨氏模量/GPa	泊松比
1	天山构造带	四边形八节点	21	0.245
2	北部单斜带	四边形八节点	19	0.249
3	克拉苏构造带	四边形八节点	14 ~ 38	0.210 ~ 0.270
4	依奇克里克构造带	四边形八节点	18	0.254
5	拜城-阳霞凹陷	四边形八节点	51 ~ 56	0.300 ~ 0.320
6	秋里塔格构造带	四边形八节点	21 ~ 46	0.210 ~ 0.256
7	塔北构造带	四边形八节点	13	0.190
8	断层带	三角形六节点	8	0.320

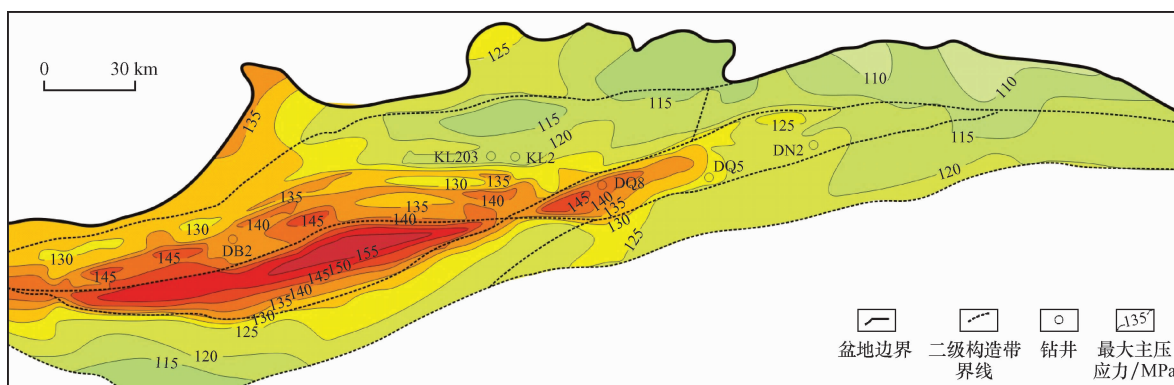


图 2 库车坳陷巴什基奇克组喜马拉雅晚期最大主压应力平面分布

Fig. 2 Plane distribution of the maximum principal stress of the Bashijiqike Formation in Kuqa Depression in the Late Himalayan period

方向均约束,东北角在 X 方向约束。在此条件约束下,不断改变模拟过程中的北部、南部边界的挤压应力,直至模型中 TB1 井、KL3 井、DW101 井的受力状况与实际声发射测量^[24]的数值相吻合。最终确定北部边界的挤压应力为 110 MPa,南部边界的挤压应力为 100 MPa。

模拟结果表明,巴什基奇克组顶面喜马拉雅晚期最大主压应力分布自南天山山前向塔北隆起大致呈带状展布(图 2)。各构造带及其内部最大主压应力大小不等,克拉苏构造带大北地区最大主压应力一般为 130 ~ 150 MPa, DB2 井附近出现相对低值区 135 ~ 140 MPa;克拉苏地区最大主压应力一般为 115 ~ 150 MPa, KL203 井—KL2 井处出现相对低值区为 115 ~ 120 MPa, KL2 井和 KL1 井南部的克深地区相对较大,为 130 ~ 150 MPa。依奇克里克构造带大多在 105 ~ 120 MPa。秋里塔格构造带中最大主压应力东秋里塔格大于西秋里塔格,东秋里塔格构造带中西

部的 DQ8、DQ5 一带最大主压应力在 125 ~ 145 MPa,大于东部的 DN2 一带的最大主压应力 115 ~ 125 MPa,西秋里塔格构造带在 110 ~ 130 MPa,具有北大南小的特点。

根据同样的方法,对过 DB1 井—TB1 井(BC06-163)剖面西域期沉积前和现今两个时期不同层位的最大主压应力进行了数值模拟(图 3)。模拟时选用的岩石力学参数(表 2),剖面上所施加应力视为重力派生的应力场中一个水平主应力与构造应力之和。将近北西—南东向设定为 X 方向,垂直向设定为 Y 方向,将模型底部 Y 约束,左上角 X 约束,顶面自由,南北边界力的加载考虑到西域组沉积前较现今构造挤压更为强烈,参考前人对 DB1 井和 DW101 井实测声发射数据^[24],确定西域组沉积前剖面在南北边界加合应力为 $\sigma_H = 0.01h + 60$;现今剖面在南北边界加合应力为 $\sigma_H = 0.01h + 55$ 。这里的 h 为埋藏深度, m; σ_H 为加合应力, MPa。

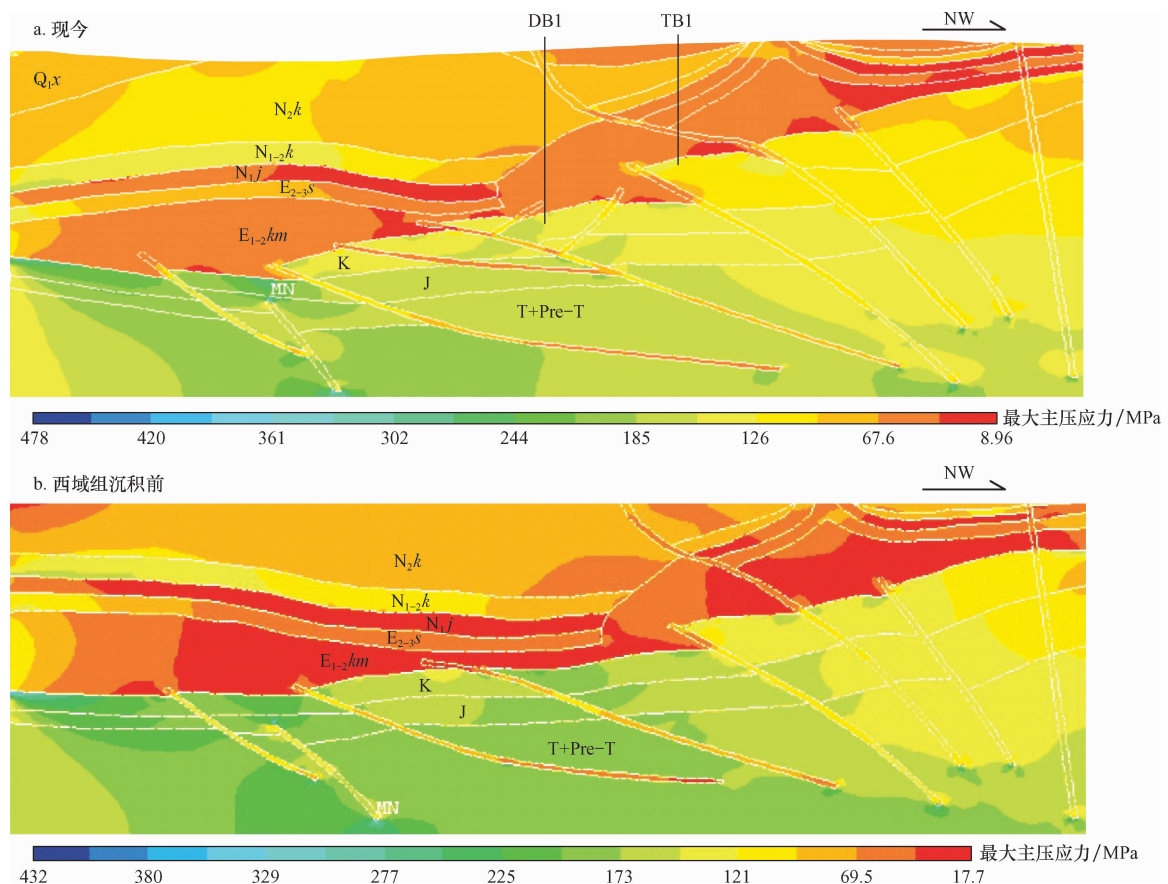


图3 过 DB1 井–TB1 井的演化剖面最大主压应力分布

Fig. 3 Distribution of maximum principal compressive stress on evolution profile crossing the well Dabe1 1 – well Tube1 1
(剖面模型据塔里木油田分公司,2009)

表2 库车坳陷岩石力学参数(据张明利等,2004,有修改)^[24]Table 2 Rock mechanics parameters of Kuqa Depression
(Modified from Zhang Mingli, et al., 2004)^[24]

岩性时代	单元类型	杨氏模量/GPa	泊松比
西域组(Q _{1x})	四边形八节点	12	0.280
库车组(N _{2k})	四边形八节点	15	0.260
康村组(N _{1k})	四边形八节点	20	0.250
吉迪克组(N _{1j})	四边形八节点	5	0.420
苏维依组(E _{2-3s})	四边形八节点	10	0.300
库姆格列木组(E _{1-2km})	四边形八节点	6	0.350
白垩系(K)	四边形八节点	35	0.230
侏罗系(J)	四边形八节点	37	0.250
前侏罗系(Pre-J)	四边形八节点	39	0.250
断层带	三角形六节点	8	0.320

模拟结果表明,两个时期古近系库姆格列木组膏盐岩层及其以上岩层相对白垩系及以下地层最大主压应力普遍较小,同一地区埋深较大的三叠系、侏罗系源岩层最大主压应力较上覆储集层白垩系普遍要大(图3)。西域组沉积前古近系库

姆格列木组盐下三叠系、侏罗系、白垩系,最大主压应力普遍在120~200 MPa,普遍大于现今时期对应层位的最大主压应力(图3)。

2 流体动力的恢复

库车坳陷异常高流体压力的形成主要受控于欠压实、天然气的充注或下部高流体压力的充注、构造挤压等作用^[1,7]。王震亮(2007)根据超压的成因将库车坳陷超压划分为沉积型超压和构造挤压型超压。沉积型超压为与沉积、成岩过程中因欠压实、生烃作用等所形成的过剩压力。构造挤压型超压为构造应力超过上覆负荷时,在封闭程度好的流体体系内,由一部分构造压应力转化而成的流体压力^[25]。构造挤压后流体压力的计算为该时期沉积型流体压力与构造挤压增压之和,故将二者加以叠合,即可获得目的层的压力演化历史,并可进一步恢复出气势的演化历史。

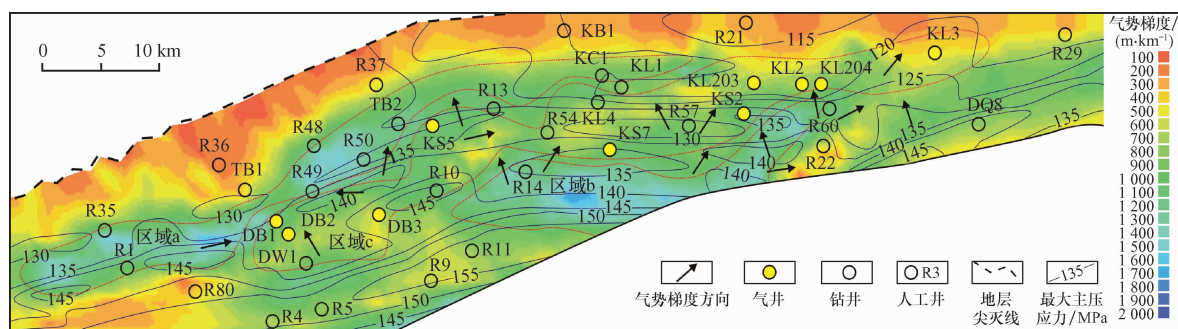


图5 克拉苏构造带巴什基奇克组喜马拉雅晚期气势梯度分布

Fig. 5 Gas potential gradient of the Bashijiqi Formation in Kelaasu structural belt in the Late Himalayan period

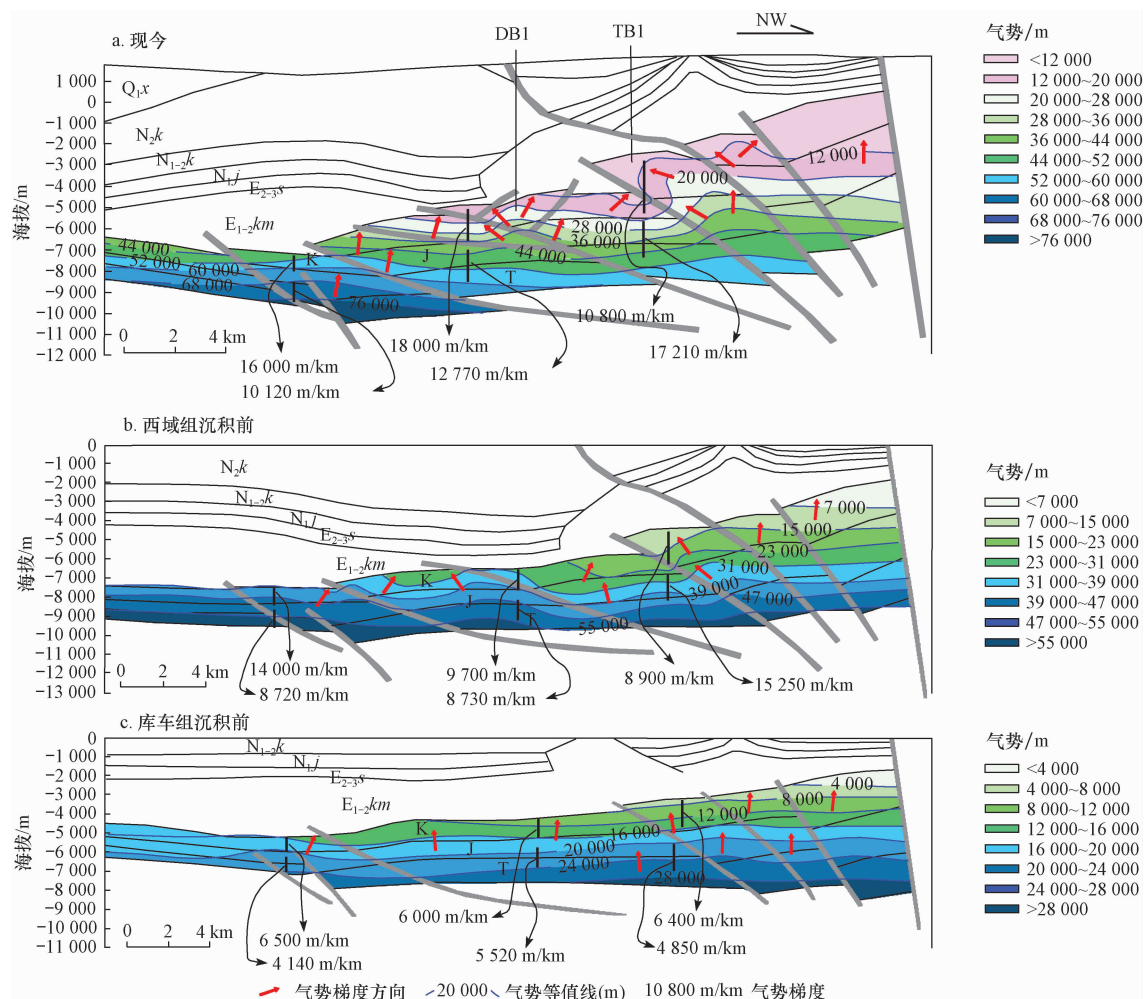


图6 过大北1井—吐北1井的演化剖面气势分布与天然气运移特征

Fig. 6 Distribution of gas potential and gas migration characteristics on the evolution profile crossing the well Dabe1 - well Tube1
(演化剖面根据塔里木油田分公司, 2009)

3 构造挤压引起的流体动力变化及特点

单位距离的气势差——气势梯度是天然气运移

动力大小的直接反映,气势梯度方向为流体运移的潜在指向。构造挤压对流体动力的影响可通过分析构造挤压前后气势梯度大小和方向的变化来实现。以喜马拉雅晚期构造挤压较为强烈的克拉苏构造带为例,比较构造挤压增压前、后流体动力的改变。

3.1 构造挤压对流体动力大小的影响

库车坳陷在库车组沉积期间以垂向压实为主,相对较弱的侧向挤压作用不足以引起流体增压。该时期主要发育沉积型增压类型。喜马拉雅晚期构造挤压逐渐增强,库车组遭受抬升剥蚀,巴什基奇克组的侧向挤压应力大于其上覆载荷,使得侧向挤压作用引起流体增压。由于该时期侧向挤压应力大小分布不均,使得侧向挤压作用在不同位置引起的流体增压幅度不同,从而使得构造挤压前后不同位置气势梯度变化不同(图5)。喜马拉雅晚期强烈构造挤压后,克拉苏构造带巴什基奇克组气势梯度的改变较大(图4,图5)。其中,巴什基奇克组在R1井—R49井—R50井—TB2井—KC1井一带(图5区域a)和KL4—KS7—KS2以南地区气势梯度明显增大(图5区域b),中部DB2井—DB3井—R54井—KS2井—KL2井—KL3井地区气势梯度明显减小(图5区域c)。

康村组沉积期构造挤压较弱,主要以垂向压实为主,气势变化较有规律,同一层位侧向上气势变化由深到浅有逐渐变小的趋势,垂向上区域性盖层之下由深部三叠系向上部白垩系气势逐渐变小(图6)。库车末期构造挤压开始变强,把该时期假定为构造挤压变强的开始且地层还没来得及发生变形,较强的构造挤压作用使局部产生流体增压。这种增压作用在深部三叠系、侏罗系和浅部白垩系都有发生,同等深度条件下挤压应力大于上覆载荷且越大时,构造挤压引起的流体增压越大,这种增压作用在不同位置的差异使得气势分布格局发生了改变。在DB1井和TB1井附近,垂向上浅部巴什基奇克组气势梯度分别由6 000和6 400 m/km变为9 700和8 900 m/km,深部三叠系、侏罗系气势梯度有较大幅度的增大,分别由5 520和4 850 m/km变为8 730和15 250 m/km;剖面中、南部拜城凹陷,垂向上浅部巴什基奇克组气势梯度有大幅度增大,由6 500 m/km变为14 000 m/km,深部三叠系、侏罗系气势梯度有较大幅度的增大,由4 140 m/km变为8 720 m/km。西域期构造挤压下地层发生了明显的变形,局部构造挤压仍然较大,挤压增压仍在持续,局部气势变化差异性变大,使得垂向上巴什基奇克组局部气势梯度有较大幅度提高,在DB1井和TB1井附近,垂向上气势梯度分别由9 700和8 900 m/km变

为18 000和10 800 m/km,深部三叠系、侏罗系气势梯度有小幅幅度增大,分别由8 730和15 250 m/km变为12 770和17 210 m/km;剖面中南部拜城凹陷浅部巴什基奇克组和深部三叠系、侏罗系气势梯度有小幅幅度增大,分别由14 000和8 720 m/km变为16 000和10 120 m/km。

3.2 构造挤压对流体动力方向的影响

从库车组沉积末期和喜马拉雅晚期巴什基奇克组平面上气势梯度方向的对比来看(图4,图5),构造挤压后流体动力方向变化明显。库车组沉积末期高气势区位于南部,气势梯度方向由南东指向北西或近南指向北。喜马拉雅晚期构造挤压强烈期DB2井区气势梯度方向变化最为明显,DB2井附近为低气势区,成为了来自西、南、东3个方向的气势梯度指向区。KS2井处由库车组沉积末期的北西方向变成了北东方向,R22人工井附近由库车组沉积末期的近北方向变成了近东向。

康村期气势变化均较为平缓,气势梯度方向近垂直向上,库车末期构造挤压作用下,局部应力增大,引起了流体增压,同时地层发生变形,改变了流动动力分部格局,气势变化由原来的平缓变为似波浪状,气势梯度方向在似“波峰”、“波谷”处发生改变(图6)。现今时期气势剖面中DB1井附近、TB1井北侧等处气势等值线呈现似“波峰”状,气势梯度方向由该处向剖面两侧发散(图6)。

4 构造挤压引起的天然气运聚特征

喜马拉雅晚期特别是库车期以来为库车坳陷天然气的主要成藏期^[28],该时期的流体动力分布格局直接影响着天然气的分布规律。喜马拉雅晚期强烈构造挤压后深部超压体系三叠系、侏罗系源岩层垂向上气势梯度在拜城凹陷和克拉苏构造带北部有大幅度增大,在克拉苏构造带中部增大幅度稍小。气势梯度的增大极大地增强了天然气的垂向运移动力,加之强烈的构造运动使已存断裂开启或产生新生断裂。开启的油源断裂可作为天然气垂向运移的重要通道,天然气运移动力的增强促使了天然气沿开启断裂向上部运移。由于区域性膏盐岩盖层较强的封盖,使得垂向运移来的天然气侧向充注上部白垩系储层。克拉苏构造

带中由于圈闭较为发育,垂向上通过油源断裂运移来的天然气可直接充注进入邻近圈闭之中。拜城凹陷内深部生成的天然气沿油源断裂首先充注到上部盐下白垩系储层之中,平面上白垩系储层在拜城凹陷为高势区(图6)。深部运移来的天然气便由拜城凹陷的高势区顺层侧向向低势区克拉苏构造带运移。

同一层位平面上流体动力的大小和方向决定了天然气的侧向运移和聚集。喜马拉雅晚期强烈构造挤压后克拉苏构造带上部巴什基奇克组气势发生了明显改变,形成了局部高、低势区,局部低势区可成为天然气的有利指向区,垂向和侧向运移来的油气可在天然气的局部低势区聚集成藏。喜马拉雅晚期强烈构造挤压后反映天然气运移强度的气势梯度也发生了明显改变,气势梯度的增大,可增强天然气的侧向运移动力,气势梯度的减小可减弱天然气的侧向运移动力。克拉苏构造带KL4井—KS7井—KS2井以南地区气势梯度的明显增大(图5区域b),增强了天然气向运移指向区的运移动力。DB2井—DB3井—R54井—KS2井—KL2井—KL3井地区一带(图5区域a)为相对低势区,成为区域b强运移动力的指向区,且为气势梯度减小的区域,气势梯度的减弱又有利于天然气在该区域聚集成藏。目前已发现的KL2、DB2等气藏均分布在该区域。因此,认为DB2井—DB3井—R54井—KS2井—KL2井—KL3井地区(图5区域a)一带为克拉苏构造带喜马拉雅晚期构造挤压作用下流体动力变化的有利聚集区。

5 结论和认识

1) 构造强烈活动期,库车坳陷巴什基奇克组喜马拉雅晚期各构造带及其内构造挤压强度不同,从北部单斜带到塔北隆起带大致呈条带状展布,油气较为富集的克拉苏构造带在DB1井—DB2井附近、KL203井—KL2井—KL204井等处平面上均为相对低应力区。

2) 构造挤压强烈活动期,构造挤压改变了流体动力的大小,流体动力的增大增强了天然气的运移动力,流体动力的减小减弱了天然气的运移动力,处于强流体动力指向上的弱流体动力区为天然气的有利聚集区。

3) 构造挤压不仅改变流体动力的大小,也改变其方向,构造挤压作用下,可使局部圈闭成为相对低势区,成为天然气运移的指向区,DB2井—DB3井—R54井—KS2井—KL2井—KL3井地区为克拉苏构造带流体动力大小和方向变化下的有利聚集区。

致谢:在研究过程中得到中国石油集团科学技术研究院宋岩教授、赵孟军副所长、柳少波主任、方世虎副主任、卓勤功博士、孟庆洋博士、姜林博士、鲁雪松博士和中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院的大力支持,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 宋岩,洪峰,夏新宇,等.异常压力与油气藏的同生关系——以库车坳陷为例[J].石油勘探与开发,2006,33(3):303-308.
Song Yan, Hong Feng, Xia Xinyu, et al. Syngensis relationship between abnormal overpressure and gas pool formation——with Kuqa depression as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 303-308.
- [2] 万桂梅,汤良杰,金文正.库车坳陷西里塔格构造带新生代沉降史分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(增刊1):19-23.
Wan Guimei, Tang Liangjie, Jin Wenzheng. The analysis of Cenozoic subsidence history of the western Qilitage tectonic belt in Kuqa Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(S1): 19-23.
- [3] 徐国盛,匡建超,李建林,等.天山北侧前陆盆地异常高压成因研究[J].成都理工大学学报,2000,27(3):255-262.
Xu Guosheng, Kuang Jianchao, Li Jianlin, et al. Research on the genesis of abnormal high pressure in the foreland basin to the north of Tianshan[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(3): 255-262.
- [4] 赵靖舟.前陆盆地天然气成藏理论与应用[M].北京:石油工业出版社,2003:128-258.
Zhao Jingzhou. Theory of gas pool-forming in foreland basin and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 121-153.
- [5] 曾联波,周天伟,吕修祥.构造挤压对库车坳陷异常地层压力的影响[J].地质论评,2004,50(5):471-475.
Zeng Lianbo, Zhou Tianwei, Lü Xiuxiang. Influence of tectonic compression on the abnormal formation pressure in the Kuqa depression[J]. Geological Review, 2004, 50(5): 471-475.
- [6] 王震亮,孙明亮,张立宽,等.川西地区须家河组异常压力演化与天然气成藏模式[J].地球科学——中国地质大学学报,2004,29(4):433-439.

- Wang Zhenliang, Sun Mingliang, Zhang Likuan, et al. Evolution of abnormal pressure and model of gas accumulation in Xujiahe Formation, western Sichuan basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(4): 433–439.
- [7] 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): 55–62.
- 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): 55–62.
- [8] Luo Xiaorong, Wang Zhaoming, Zhang Liqiang, et al. Overpressure generation and evolution in a compressional tectonic setting, the southern margin of Junggar Basin, northwestern China [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(8): 1123–1139.
- [9] 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): 59–64.
- 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): 59–64.
- [10] 宋岩, 柳少波, 赵孟军, 等. 中国中西部前陆盆地油气分布规律及主控因素 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 7–74.
- Song Yan, Liu Shaobo, Zhao Mengjun, et al. Oil-gas distribution and its main factors in the foreland Basin of central western China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 7–74.
- [11] 宋岩, 夏新宇, 王震亮, 等. 天然气运移和聚集动力的耦合作用 [J]. *科学通报*, 2001, 46(22): 1906–1910.
- Song Yan, Xia Xinyu, Wang Zhenliang, et al. The interaction between migration and accumulation dynamics of natural gas [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(22): 1906–1910.
- [12] 王毅, 宋岩, 单家增. 构造应力在油气运移成藏过程中的作用 [J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(5): 563–570.
- Wang Yi, Song Yan, Shan Jiazeng. Action of tectonic stress on hydrocarbon migration and accumulation [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 563–571.
- [13] 沈淑敏, 冯向阳, 刘文英. 塔里木盆地北部地区主要断裂带构造应力场与油气运移 [J]. *地质力学学报*, 1995, 1(2): 11–20.
- Shen Shumin, Feng Xiangyang, Liu Wenying. Tectonic stress driving and migration of gas and oil in northern Tarim basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 1995, 1(2): 11–20.
- [14] 孙雄, 洪汉净, 马宗晋. 构造应力作用下流体运动的动力学分析——构造流体动力学 [J]. *地球学报*, 1998, 19(2): 150–157.
- Sun Xiong, Hong Hanjing, Ma Zongjin. The influence of structure stress on fluid movement—structure fluid dynamics [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1998, 19(2): 150–157.
- [15] 孙雄, 洪汉净. 构造应力场对油气运移的影响 [J]. *石油勘探与开发*, 1998, 25(1): 1–4.
- Sun Xiong, Hong Hanjing. Influence of tectonic stress on hydrocarbon migration [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(1): 1–4.
- [16] 武红岭, 王小凤, 马寅生, 等. 油田构造应力场驱动油气运移的理论和研究方法研究 [J]. *石油学报*, 1999, 20(5): 7–12.
- Wu Hongling, Wang Xiaofeng, Ma Yansheng, et al. Theory and method of studying hydrocarbon migration driven by tectonic stress field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1999, 20(5): 7–12.
- [17] 武红岭, 王小凤, 马寅生, 等. 多孔介质构造应力驱油的固流耦合分析 [J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(1): 76–89.
- Wu Hongling, Wang Xiaofeng, Ma Yansheng, et al. Solid-fluid coupling analysis of tectonic stress driven oil-gas movement in porous media [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(1): 76–89.
- [18] 王小凤, 武红岭, 马寅生, 等. 构造应力场、流体势场对柴达木盆地西部油气运聚的控制作用 [J]. *地质通报*, 2006, 25(9/10): 1036–1043.
- Wang Xiaofeng, Wu Hongling, Ma Yansheng, et al. Controls of the tectonic stress field and fluid potential field on hydrocarbon migration and accumulation in the western Qaidam basin, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(9/10): 1036–1044.
- [19] 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.
- Wang Ziyu. Physical and mechanical properties of Mesozoic and Cenozoic rocks in the west of Kuqa Depression in Tarim Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(3): 399–405.
- [20] 周新桂, 陈永桥, 孙宝珊, 等. 塔里木盆地北部地层岩石力学特征及地质学意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(5): 8–12.
- Zhou Xingui, Chen Yongqiao, Sun Baoshan, et al. Rock mechanics characteristics in northern Tarim Basin and its geologic significance [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(5): 8–12.
- [21] 王延欣, 侯贵廷, 李江海, 等. 塔北隆起中西部新近纪末构造应力场数值模拟 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(6): 52–57.
- Wang Yanxin, Hou Guiting, Li Jianghai, et al. Numerical simulation of tectonic stress field at the end of Neocene in the Midwest of Tabei Uplift [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(6): 52–57.
- [22] 张明利, 谭成轩, 汤良杰, 等. 库车坳陷克拉2气藏异常高地层压力成因力学分析 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2004, 29(1): 93–102.
- Zhang Mingli, Tan Chengxuan, Tang Liangjie, et al. An analysis on mechanical genesis of overpressure at Kela 2 gas pool in Kuqa Depression [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(1): 93–102.
- [23] 王清晨, 张仲培, 林伟. 库车盆地—天山边界的晚第三纪断层活动性质与应力状态 [J]. *科学通报*, 2003, 48(24): 2553–2559.

- 特征及成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 542-550.
- Wu Shixiang, Li Hongtao, Long Shengxiang, et al. A study on characteristics and diagenesis of carbonate reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 542-550.
- [8] 刘洛夫, 朱毅秀, 胡爱梅, 等. 滨里海盆地盐下层系的油气地质特征[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(3): 11-15.
- Liu Luofu, Zhu Yixiu, Hu Aimei, et al. Petroleum geology of pre-salt sediments in the Pre-Caspian basin[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2002, 24(3): 11-15.
- [9] 刘洛夫, 朱毅秀, 熊正祥, 等. 滨里海盆地的岩相古地理特征及其演化[J]. 古地纪学报, 2003, 5(3): 279-289.
- Liu Luofu, Zhu Yixiu, Xiong Zhengxiang, et al. Characteristics and evolution of lithofacies palaeogeography in Pre-Caspian basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(3): 279-289.
- [10] 方甲中, 吴林刚, 高岗, 等. 滨里海盆地碳酸盐岩储集层沉积相与类型—以让纳尔油田石炭系 KT-II 含油层系为例[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(4): 498-508.
- Fang Jiazhong, Wu Lingang, Gao Gang, et al. Sedimentary facies and types of carbonate rock reservoir in Caspian Seashore Basin: a case from Carboniferous KT-II Member in Zahnanor Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Production, 2008, 35(4): 498-508.
- [11] 蒋晓光, 彭大钧, 陈季高, 等. 滨里海盆地东缘生物礁预测研究[J]. 成都理工大学学报, 2005, 32(5): 492-497.
- Jiang Xiaoguang, Peng Dajun, Chen Jigao, et al. Prediction of organic reefs on the east edge in the Near Caspian Sea basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2005, 32(5): 492-497.
- [12] Moore C H. Carbonate diagenesis and porosity[M]. New York: Elsevier, 1989.
- [13] 王琪, 史基安, 陈国俊, 等. 塔里木盆地西部碳酸盐成岩环境特征及其储层物性的控制作用[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 548-554.
- Wang Qi, Shi Ji'an, Chen Guojun, et al. Characteristics of diagenetic environments of carbonate rocks in Western Tarim Basin and their controls on the reservoir property[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 548-554.
- [14] Stoessell R K, Moore C H. Chemical constraints and origins of four groups of Gulf Coast reservoir fluids[J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(6): 896-906.

(编辑 张亚雄)

(上接第216页)

- Wang Qingchen, Zhang Zhongpei, Li Wei. Tertiary fault active feature and stress state in the boundary of Kuqa basin and Tianshan[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(24): 2553-2559.
- [24] 张明利, 谭成轩, 汤良杰, 等. 塔里木盆地库车坳陷中新生代构造应力场分析[J]. 地球学报, 2004, 25(6): 615-619.
- Zhang Mingli, Tan Chengxuan, Tang Liangjie, et al. An analysis of the Mesozoic-Cenozoic tectonic stress field in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(6): 615-619.
- [25] 王震亮. 库车坳陷古流体动力与天然气成藏特征分析[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 809-815.
- Wang Zhenliang. Analysis on paleohydrodynamic force and gas accumulation characteristics in the Kuqa depression, the Tarim basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 809-815.
- [26] 王震亮, 罗晓容, 陈荷立. 沉积盆地地下水动力场恢复——原理与方法[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1997, 27(2): 155-159.
- Wang Zhenliang, Luo Xiaorong, Chen Heli. Rebuilding of palaeohydrodynamic field in sedimentary basin: principle and means[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 1997, 27(2): 155-159.
- [27] 张凤奇, 王震亮, 宋岩, 等. 库车坳陷构造挤压增压定量评价的新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 1-7.
- Zhang Fengqi, Wang Zhenliang, Song Yan, et al. The new method of quantitative evaluation on pressurization according to tectonic compression in Kuqa depression[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(4): 1-7.
- [28] 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(中国地质大学), 2005, 12(4): 525-531.
- Zhao Mengjun, Song Yan, Qin Shengfei, et al. The multi-stage formation of oil-gas pools and late-stage accumulation of gas in the foreland basins in central and western China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 525-531.

(编辑 高 岩)