

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

塔里木盆地库车坳陷盐构造运动学特征

邬光辉^{1,2)} 王招明²⁾ 刘玉魁²⁾ 张宝收²⁾

1) 中国科学院地质与地球物理研究所,北京,100029

2) 塔里木油田分公司勘探开发研究院,新疆库尔勒,841000

内容提要 本文根据大量地震与地质资料的综合分析,对表征库车坳陷盐构造流动变形特征的净生长量、生长率及应变速率进行了定量分析。厘定库车坳陷盐构造初始形成时间在中新世早期,盐构造早期生长缓慢而稳定;上新世中晚期—第四纪进入快速生长期,晚期盐构造生长速率高且差别大。库车坳陷盐构造演化可分为盐膏层沉积期、低幅度盐枕缓慢发育期、盐背斜构造发育期、盐底辟发展期、盐底辟刺穿破坏期五个连续演化阶段。

关键词 库车坳陷 盐构造 净生长量 生长率 应变速率 演化

盐构造是因盐膏岩等塑性岩层流动形成的各种样式构造(Trusheim, 1960; Jackson et al., 1986),由于盐构造在含油气盆地广泛发育,而且盐构造对油气成藏与圈闭的落实具有重要的作用,尤其是20世纪80年代以来在墨西哥湾、北海等盆地找到了大量的盐相关油气藏后,在盐构造的几何学与运动学特征、成因机制等方面的研究取得重大进展(Talbot et al., 1984; Jackson et al., 1986; Jackson, 1995; Ge et al., 1997; Velaj et al., 1999; Davison et al., 2000; Schultz-Ela, 2003),并在盐相关油气勘探中得到广泛应用(Montgomery et al., 1997; Volozh et al., 2003; 贾承造等, 2003)。

塔里木盆地库车坳陷近年来已发现克拉2特大型整装气田等一系列盐相关油气田,成为“西气东输”工程的主力气区,盐构造不仅为油气的聚集成藏提供了优质的盖层,而且在喜马拉雅运动中晚期的强烈挤压作用下,形成大量的盐相关构造,为油气的聚集提供了多种类型的大型圈闭,盐构造研究受到普遍关注(赵文智等, 1998; 张明山等, 2002; 王子煜, 2002a; 汤良杰等, 2003a, 2003b; 邬光辉等, 2003)。库车坳陷盐下圈闭发育、油气成藏条件优越(吕修祥等, 2000; 贾承造等, 2002; 秦胜飞等, 2002; 汤良杰等, 2003),但由于巨厚盐膏层造成盐下构造成像困难,而且盐膏层速度横向变化很大,造成圈闭落实困难,因此库车山地勘探的深入发展需要加强地震攻关与构造建模研究。盐膏层的塑性流动特点使得断层相

关褶皱理论在库车坳陷构造建模中的应用具有局限性(Jackson, 1995; Hossack, 1995),因此库车坳陷的构造建模需要深入分析盐构造的特征,以盐构造研究方法结合断层相关褶皱理论进行构造建模,有利于油气勘探取得更大的突破。本文在大量地震剖面分析的基础上,通过定量解析库车坳陷盐构造的运动学特征,探讨盐构造的构造演化规律。

1 区域地质背景

库车坳陷位于塔里木盆地北部(图1),东西长约500km,南北宽约20~100km,面积约 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。库车坳陷沉积了广泛的陆相中、新生界,最大厚度达12000m,到新近纪由于天山强烈的隆升形成陆内前陆盆地(田作基等, 1999)或再生前陆盆地(卢华复等, 2000)。库车坳陷在垂向上表现为3个不同结构特征的构造层次叠置而成:前中生界形成的盆地基底岩系构造层;由古近系—新近系盐膏层分割的盐下中生界和古近系—新近系组成的下部沉积盖层以及盐上新近系组成的盆地上部沉积层。库车油气系统以挤压构造为主,同时发育伸展构造、扭动构造、盐构造等,构成了一个相互作用、相互影响的复杂的有机系统,平面上具南北分带、东西分块的特点,由于晚喜马拉雅期强烈的构造冲断作用,形成一系列向盆地方向逆掩的冲断构造,其展布方向多呈北东东向,南北方向上构造成排成带发育。

在干旱的蒸发咸湖、盐湖环境下,库车坳陷西部

收稿日期:2004-02-18;改回日期:2004-07-13;责任编辑:周健。

作者简介:邬光辉,男,1971年生,中科院地质与地球物理研究所在读博士,主要从事油区构造地质与油气勘探的研究工作。通讯地址:841000,新疆库尔勒塔指123信箱勘探所;电话:0996-2175449;Email: korlaxj@sina.com。

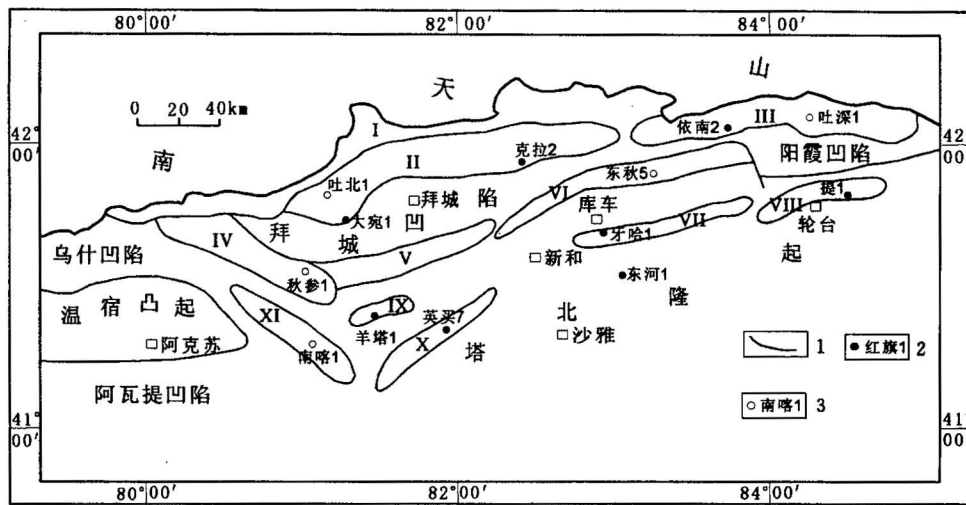


图 1 库车坳陷构造区划简图

Fig. 1 The schetch of structure of the Kuqa depression

I—北部单斜带；II—克拉苏构造带；III—依奇克里克构造带；IV—西秋里塔格构造带；V—中秋里塔格构造带；VI—东秋里塔格构造带；VII—牙哈构造带；VIII—阳南—提尔根构造带；IX—羊塔克构造带；X—英买力构造带；XI—喀拉玉尔衮构造带；1—构造带；2—出油井；3—干井

I—North single-dip belt; II—Kelasu structural belt; III—Yiqikelik structural belt; IV—Xiqiu structural belt; V—Zhongqiu structural belt; VI—Dongqiu structural belt; VII—Yaha structural belt; VIII—Yangnan—Tiergen structural belt; IX—Yangtake structural belt; X—Yingmaili structural belt; XI—Kalayurgun structural belt; 1—structural belt; 2—oil well; 3—dry well

古近系库姆格列木群与东部的新近系吉迪克组发育盐膏层，古近系塑性层岩性为盐岩、泥膏岩、泥岩，中新世吉迪克组以膏岩、盐膏岩、泥岩为主，盐膏层纵向上叠置、横向上连片，形成广泛分布的巨厚优质盖层。库车坳陷发育盐枕、盐背斜、盐墙、盐株、盐脊、盐席、盐楔、盐川、盐蘑菇等多种构造样式的盐构造(邬光辉等, 2003)，盐构造主要分布在秋里塔格、克拉苏构造带上。

2 库车坳陷盐构造的形成时间

通常情况下，盐构造的形成与迁移都会造成其顶部与翼部生长地层厚度的变化，也可能影响到沉积相或岩性的变化，因此结合地震和钻井资料，利用盐构造周缘沉降及其轴面在时间、空间上的变化可以确定盐构造形成与演化的时间(Trusheim, 1960; Senni et al., 1983)。在盐构造开始发育的时候，其两翼的生长地层会逐渐向顶部减薄，甚至出现沉积间断及地层不整合，而当底辟突出沉积面后，由于溶蚀流失与盐源补充的枯竭，沿盐体两翼可能出现箕状周缘沉降，这些特征是判断盐构造形成与演化的主要方法。

库车坳陷盐构造周缘沉降欠发育，主要通过盐构造周缘生长地层减薄的特征判断其发育时间，但

地层的减薄也可能是由于差异沉降或构造作用造成，因此先要排除差异沉降与构造运动的影响。由于克拉苏构造带只能观察到一翼的变化，兼有差异沉降与构造运动的影响，所以主要选取构造活动晚、生长地层减薄特征明显的秋里塔格构造带进行剖析。

通过典型地震剖面解释，发现拜城凹陷向秋里塔格构造带盐构造方向盐上地层减薄明显，从盐层以上到第四系都有减薄，盐上盖层厚度横向变化比率较大(图2a)，达50%~80%。上新统库车组上部至第四系的厚度差别最大，可达1000多米，厚度横向变化比率高达90%~160%(图2b)，其他层段变化平缓，约有5%~30%的减薄，由此分析盐构造主要生长期是在库车组沉积晚期至第四纪。由于差异沉降中、新生界从拜城凹陷向南部秋里塔格构造带存在减薄的趋势，不能因此判断盐构造上新世以前是否有盐构造的生长。

通过大量地震剖面的仔细对比分析，发现秋里塔格构造带有的地震剖面上南翼向北部盐构造方向存在中新统吉迪克组、康村组地层略微减薄的现象，而差异沉降应该是造成加厚的反映，而且秋里塔格构造带的构造运动不可能发生这么早(陈楚铭等, 1999; 汪新等, 2002; 管树巍等, 2003)，因此推断该区在中新世早期(中新统吉迪克组沉积期)盐构造就开

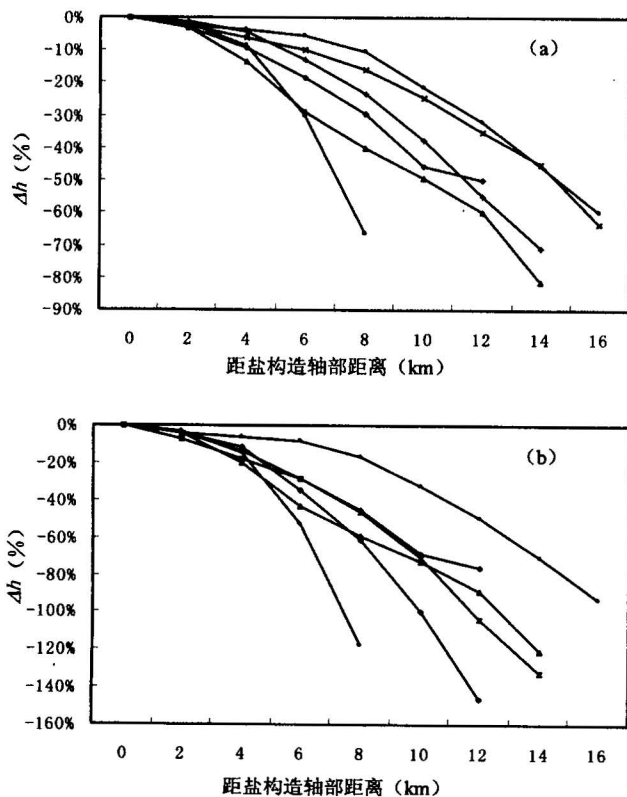


图2 秋里塔格构造带盐构造盖层(a)和主要生长盖层(b)厚度比率横向变化图

Fig. 2 Change percentage of thickness of stratigraphic units(a) and the main stratigraphic units(b) versus lateral distance from axes above the salt structures in the Qiluitag structural belt

始发育,但仅有数十米的低幅度。

大多地震剖面分析表明,秋里塔格构造带盐构造南翼盐上新世以前的生长地层厚度变化不明显,地层厚度基本没有减薄。其原因既有差异沉降的影响,同时盐构造幅度较小,更主要的原因有盐构造向南迁移的作用。由于差异负载作用,造成库车坳陷盐膏岩具有从盆地沉降中心向南北两端流动的特点,而库车坳陷新生代构造挤压作用来自北部,构造作用的推进是从北向南发展,因此在秋里塔格构造带的发育是向南扩展的。塑性盐源自北向南运移,形成盐顶的不断南迁,早期盐构造南翼的生长地层迁移至晚期盐构造的顶部或北翼,又由于地震剖面上盐构造顶面模糊不清,造成现今大多盐构造南翼盐上新世地层的厚度无变化。同时正是由于盐体的隆升抵消了部分南翼差异沉降造成的厚度差,表明在上新世前盐构造一直没有形成很大的规模。在秋里塔格构造带北翼的地震剖面上可见库车组至第四

系向盐构造加厚的现象,不同层段自下而上有向北迁移的特点。有的剖面上可见盐构造的北部吉迪克组与康村组地层的加厚,将其上地层拉平,则盐构造的高点不在现今的位置,表明早期盐层存在有减薄的趋势,盐体的流动造成上覆层的假龟状背斜,存在盐体迁移的现象,但直至上新世末期(库车组沉积末期)到第四纪才开始急速生长,盐构造周缘沉降与生长地层才表现明显。

克拉苏构造带南翼可见吉迪克组以上地层都有减薄趋势,被视为构造侵位形成的生长地层(刘志宏等,2000;雷刚林等,2001),但是新生界沉降中心位于克拉苏构造带南部拜城凹陷,差异沉降很可能造成地层厚度的向北减薄;而且克拉苏构造带与其南部的秋里塔格构造带分布在拜城凹陷两侧,盐膏层沉积中心位于克拉苏构造带南侧拜城凹陷,厚度超过1000m,在吉迪克组沉积期盐上地层厚达数百米时,由于差异负载的原因盐膏层发生向南北两侧的塑性流动,克拉苏构造带盐构造活动应该与秋里塔格构造带有一定的相似性,在吉迪克组沉积期存在早期的盐流活动,克拉苏构造带南翼吉迪克组地层的减薄很可能是由于差异沉降与盐构造活动造成的,而并非是构造侵位的作用。尽管克拉苏构造带受差异沉降、构造运动影响很大,但其早期的形成演化与南部大致相当,在中新世早期(吉迪克组沉积期)就开始发育,而本区库车组中上部生长地层表现明显(陈楚铭等,1999;卢华复等,2000;汪新等,2002),由于剧烈挤压构造活动带动盐构造都进入快速活动期,本区在上新世中期(库车组沉积中期)就开始快速生长。

综合大量地震剖面、盐构造运动学特征的定量分析以及差异沉降的定量分析等,认为库车坳陷盐构造在中新世早期(吉迪克组沉积期)就开始发育,但直至库车组沉积早期其规模都不大,仍停留在盐枕阶段,直至上新世中晚期(库车组沉积中晚期)——第四纪才开始快速生长。

3 库车坳陷盐构造流动变形特征

盐构造周缘同生长地层的厚度变化不仅是判断盐构造形成时间的重要标志,而且可以用来定量计算盐构造流动与变形特征,如果资料充分可靠,在盐构造周缘发生同沉积地层减薄并且是由于盐构造顶部抬升造成的条件下,盐构造生长量、生长速率与应变速率是盐构造变形定量分析简洁而有效的指标(Senni et al., 1983)。由于库车坳陷北部克拉苏构造

带受晚期构造作用大,根据该方法应用的条件及本区的实际情况,本文重点针对秋里塔格构造带的一系列典型剖面进行计算分析。

3.1 盐构造的净生长量

通过盐构造周缘正常沉积地层厚度同盐构造顶部生长地层的最小厚度差值可以计算盐构造的净生长量(Senni et al., 1983)。由于秋里塔格构造带构造抬升与构造剥蚀难以精确估计,因此盐构造净生长量是相对周缘上覆地层的相对高度。计算结果表明盐构造总的净生长量 G_n (图3)较大,一般为2000~5000m,平均3700m,在本构造带上盐构造具有西高东低的整体趋势,表明盐构造的发育程度大致是西高东低,而且其间存在多个盐构造高点。而在库车组沉积晚期与第四纪的主要生长期的净生长量 G_n' (图3)一般在1500~3000m,平均2100m,约占总量的50%~70%,考虑到剥蚀的影响,其数值可能还要高得多,由于其历经的时间极短,因此是相当可观的(其中BC99-112测线只能取南翼的资料,由于盐构造南迁的影响,以致数值偏小)。

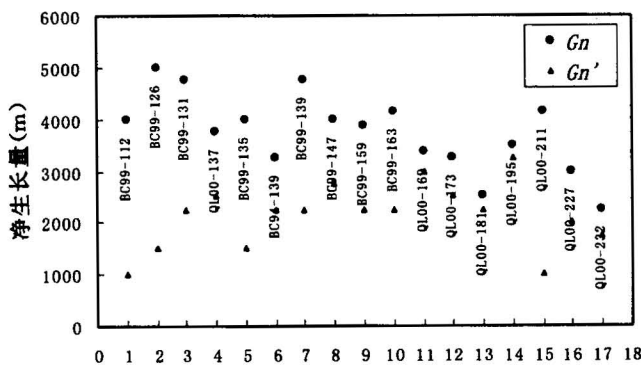


图 3 库车坳陷盐构造净生长量图

Fig. 3 Net growth of salt structures in the Kuqa depression

G_n —盐构造净生长量; G_n' —盐构造在主要生长期的净生长量;
BC99-112—过盐构造的地震剖面号
 G_n —Net growth of salt structure; G_n' —net growth of salt structure in the main growth stage;BC99-112—seismic line cross salt structure

3.2 盐构造的生长率

盐构造的生长速率可用净生长量与生长地层的沉积时间比值表达。计算结果表明(图4),秋里塔格构造带上盐构造的总生长率 e 为64~171m/Ma,平均124m/Ma,其变化不大,与世界上其他地区对比属于中等略偏高的水平(Senni et al., 1983)。主要生长期的净生长率 e' 一般为800~1400m/Ma,平均

1062 m/Ma。与相关资料对比其生长速率极高,东德克萨斯盆地盐丘生长速率的峰值范围也只在150~530m/Ma 之间,而中国拜城凹陷盐背斜生长率高达2125m/Ma(如图4中 BC94-139线),主要原因是由于库车组沉积晚期以后该区经受强烈的构造挤压与差异沉降的作用,造成盐构造急速生长,同时盐层顶部地层遭受强烈剥蚀,其盐上地层的变化集中在库车组上部(考虑盐体迁移的影响)。盐构造主要生长期的净生长率 e' 的变化较总生长率 e 变化范围大(图4),其差距可达4~5倍,表明晚期在不同位置盐构造活动的差别较大,而早期盐构造的生长比较缓慢而且稳定。

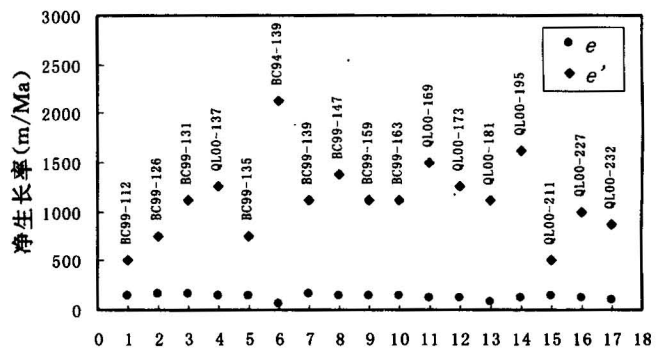


图 4 库车坳陷盐构造生长率图

Fig. 4 Net rate of growth of salt structures in the Kuqa depression

e —盐构造生长率; e' —盐构造在主要生长期的净生长率;
BC99-112—过盐构造的地震剖面号
 e —Net rate growth of salt structure; e' —net rate growth of salt structure in the main growth stage;BC99-112—seismic line cross salt structure

3.3 盐构造的应变速率

以形成盐构造为主的后期盐运移可以通过初次周缘沉降随时间的推移而不断变化反映出来,或根据地层指标,通过相当的最大地层厚度的变化来反映(Jackson et al., 1986),因此周缘沉降被用来测量盐运动的大小顺序。在许多地方,这种运移持续发生了好几个时代,因为这些时代持续的绝对时间是一个范围,所以盐的应变速率必定是个近似数。

本文盐构造的应变速率是利用盐构造的净生长率、盐构造的生长时间及估测的原始盐层沉积厚度,按每秒时间内盐构造高度的变化量计算的垂向上的应变速率(图5)。计算结果表明各剖面的应变速率 E 变化不大,在 $3 \times 10^{-16} \sim 7 \times 10^{-16}/s$ 之间,平均 $5.3 \times 10^{-16}/s$ 。而主要时期应变速率 E' 更为稳定,数值在

1. $18 \times 10^{-14} \sim 1.46 \times 10^{-14}/s$ 之间, 平均 $1.28 \times 10^{-14}/s$ 。由于目前为止库车坳陷没有准确的年代地层划分, 影响计算结果的主要参数是时间, 尽管计算中存在各种误差, 但以上的两项应变速率计算的数量级基本上是可靠的, 即库车坳陷盐构造的应变速率一般在 $10^{-16}/s$ 这个数量级, 其范围在 $10^{-15} \sim 10^{-17}/s$; 而快速生长期的应变速率范围大概是 $10^{-12} \sim 10^{-15}/s$, 一般在 $10^{-14}/s$ 这个数量级。

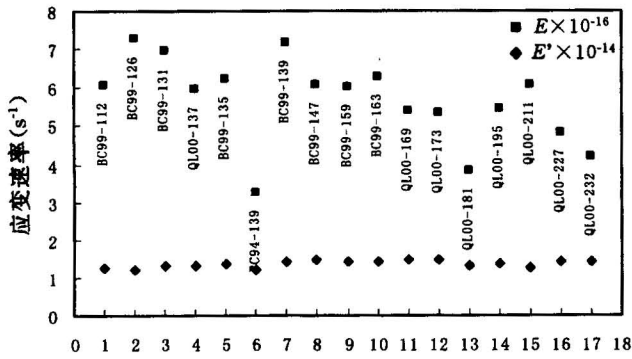


图5 库车坳陷盐构造应变速率图
Fig. 5 Strain rates of salt structures in the Kuqa depression

E—盐构造应变速率; E'—盐构造在主要生长期的应变速率;
BC99-112—过盐构造的地震剖面号
E—Strain rate of salt structure; E'—strain rate of salt structure in the main growth stage; BC99-112—seismic line cross salt structure

对比研究表明(Jackson et al., 1986), 盐岩原地变形的应变速率在8个大小级别上有很大的不同, 通过地层厚度变化计算底辟的应变速率一般在 $10^{-15} \sim 10^{-16}/s$, 平均为 $6.7 \times 10^{-16}/s$, 最大的应变速率在 $3.7 \times 10^{-15} \sim 6.2 \times 10^{-16}/s$, 平均为 $2.3 \times 10^{-15}/s$ 。库车坳陷盐岩的应变速率的范围和均值与从底辟围岩厚度变化的估计值接近, 但最大值和均值较以上数值高。软流圈(Jackson et al., 1986)流动的平均应变速率和地壳造山平均应变速率两者估计均为 $10^{-14}/s$, 库车坳陷盐构造晚期的应变速率与之相当, 很可能与晚期的造山运动有关, 并且与造山运动同步发展。

4 库车坳陷盐构造的演化特征

尽管库车坳陷盐构造特征复杂多变, 不同地区与不同样式的盐构造的形成演化不尽相同, 但也有一定的规律。根据库车坳陷盐构造形成时间、流动变形特征以及区域构造(陈楚铭等, 1999; 卢华复等,

2000; 汪新等, 2002; 陈书平等, 2003; 汤良杰等, 2004)的综合分析, 可以将其盐构造划分为五个连续发育的演化阶段(图6)。

盐膏层沉积期: 库车坳陷古近系—新近系盐膏岩沉积时沉降中心主要分布在接近克拉苏—依奇克里克构造带的拜城凹陷—阳霞凹陷一带, 发育宽广的盐湖、咸湖, 形成巨厚的塑性盐岩、膏岩与泥岩组合, 在坳陷中部厚度逾500m, 拜城凹陷西部最大厚度达2000m以上, 向南部塔北隆起以及北部山前逐渐减薄以致尖灭, 初始沉积的层状塑性膏盐岩具有中间厚、南北两边薄的特点(图6a)。

低幅度盐枕缓慢发育期: 盐膏岩在持续埋藏过程中, 由于盐膏层容易流动(Jackson, 1995; Mazariegos et al., 1996; 刘晓峰等, 2001; 王子煜, 2002b), 在盐膏岩密度小于上覆岩层密度的情况下, 上覆盖层差异沉降造成的不均匀的压力(差异压力)促使膏盐岩层发生横向流动, 造成压力相对较大的沉积中心部位的膏盐岩向压力相对较小的盆地边缘部位流动, 形成波状的低幅度褶皱, 使局部盐膏岩总

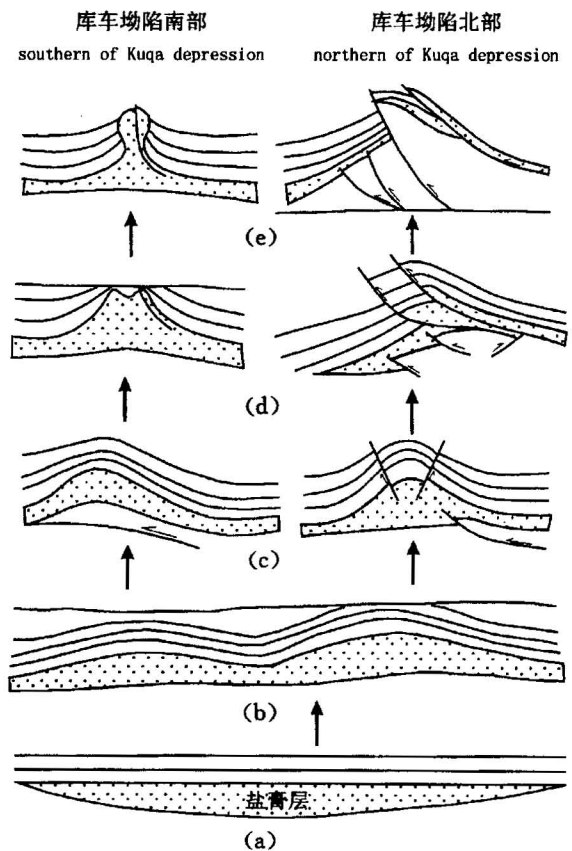


图6 库车坳陷盐构造的演化模式图
Fig. 6 Evolution model of salt structures in the Kuqa depression

体厚度增大,形成盐枕构造(图6b),主要发育在坳陷的南北斜坡上。由于库车地区盐膏层夹泥岩,而且与上覆盖层的粘度差别较小,造成盐膏层流动性能降低,又由于快速的沉降造成压实程度较低,以及上覆盖层巨厚的沉降将盐构造埋藏更深,阻碍了盐体的向上突破,因此盐枕幅度较低,并且一直持续至上新世。

盐背斜构造发育期:上新世中晚期,随着造山作用的发展,在库车坳陷北部构造挤压作用逐渐占据主导地位(卢华复等,2000;汪新等,2002),克拉苏构造带盐下断裂发育、地层发生缩短,并且逐步抬升。盐上地层由于盐膏层的塑性调节作用,发生较强的褶皱作用,盐膏层在地层整体缩短、差异负载作用加强的情况下,横向流动加速,早期盐枕构造塑性岩层进一步上拱汇聚形成类似大宛齐龟背式盐背斜构造(图6c),盐构造开始快速生长。随着盐构造的进一步发育,在其顶部产生局部次级引张正断层,由于盐构造上下地层都处于挤压收缩状态,因此盐上地层也可能产生逆断层,而不是类似墨西哥湾或东部油田伸展构造下的正断层,这已被模拟实验和挤压构造区的实例所证实(Jackson, 1995; Ge et al., 1997; Velaj et al., 1999)。在南部秋里塔格构造带由于构造作用自北向南发展的迟滞,挤压作用较弱,对盐构造生长的影响较小,上覆盖层连续的快速沉降阻碍了盐体的向上突破,处于盐枕—盐背斜渐进发育阶段。

盐底辟发展期:随着库车坳陷冲断构造作用的增强,盐构造上覆岩层进一步褶皱以致产生破裂带,断层活动进一步引起了盐膏层上覆负荷的不均匀分布,同时部分盐构造发育区产生高压异常,在超压状态下盐构造区域也是负荷压力相对集中的部位,造成盐膏岩快速向盐构造发育区流动,诱发膏盐层底辟作用的进行,塑性膏盐岩沿断裂或盐顶薄弱区向上突破刺穿上覆地层(图6d),形成各类底辟构造。库车坳陷北部在一侧强烈的构造挤压与顶板冲断层发育的情况下,断裂活动与抬升剥蚀促进了盐体侵位与底辟的生长,盐体的塑性流动受顶底板断裂的控制,盐构造形态也取决于盐层上下断裂组合的空间形态,从而形成克拉2井区倒“V”字型或喇叭形盐脊(邬光辉等,2003)。秋里塔格构造带受到构造挤压作用加强,同时由于北部盐上地层抬升很高产生重力传播作用,盐构造上覆褶皱进一步加大,盐层上下构造不协调产生更大的虚脱空间,凹陷中盐膏岩快速向南流动补充,形成盐墙、盐株等底辟构造。

盐底辟刺穿破坏期:在构造作用持续加强的情况下,盐构造上覆地层断裂发育,盐构造中盐膏层在其自身浮力作用、差异负载作用下沿断层运移或底辟突破至地表,底辟构造开始遭受破坏(图6e)。库车坳陷盐下强烈的断裂活动可能破坏盐构造的形态,同时盐膏层沿上覆地层断裂流出地面,因此现今可以看到库车坳陷北部形成的盐席、盐楔等,南部盐墙、盐株突出地表形成的盐蘑菇或盐川等地表盐构造。

5 结论

(1)库车坳陷盐构造初始形成时间在中新世早期(吉迪克组沉积期间),但只至上新世中期其规模都不大,处于盐枕阶段。克拉苏构造带直至库车组沉积中期,秋里塔格构造带直至库车组沉积末期到第四纪才开始急速生长。

(2)对表征库车坳陷盐构造流动变形特征的净生长量、生长率及应变速率的定量分析表明,盐构造早期生长缓慢而稳定,上新世中晚期(库车组沉积中晚期)以来是库车坳陷盐构造的快速生长期,晚期盐构造生长速率高、不同地区差异大,而且普遍高于国外其他地区盐构造的生长速率。

(3)库车坳陷盐构造演化可分为盐膏层沉积期、低幅度盐枕缓慢发育期、盐背斜构造发育期、盐底辟发展期、盐底辟刺穿破坏期五个连续演化阶段。

参 考 文 献

- 陈楚铭,卢华复,贾东,等. 1999. 塔里木盆地北缘库车再生前陆褶皱逆冲带中丘里塔格前锋带的构造与油气. 地质论评, 45(4): 423~433.
- 陈书平,汤良杰,贾承造. 2003. 前陆区盐层对盐上盐下层构造高点的控制及石油地质意义. 地球科学—中国地质大学学报, 28(3): 290~297.
- 管树巍,汪新,杨树锋,等. 2003. 南天山库车秋里塔格褶皱带三维构造分析. 地质论评, 49(5): 464~473.
- 贾承造,顾家裕,张光亚,等. 2002. 库车坳陷大中型气田形成的地质条件. 科学通报, 47(增刊): 49~55.
- 贾承造,赵文智,魏国齐,等. 2003. 盐构造与油气勘探. 石油勘探与开发, 30(2): 17~19.
- 雷刚林,张国伟,刘志宏. 2001. 库车前陆逆冲带生长地层及其在油气勘探中的意义. 新疆石油地质, 22(2): 107~110.
- 刘晓峰,解习农. 2001. 与盐构造相关的流体流动和油气运聚. 地学前缘, 8(4): 343~349.
- 刘志宏,卢华复,贾承造,等. 2000. 库车再生前陆逆冲带造山运动时间、断层滑移速率的厘定及其意义. 石油勘探与开发, 27(1): 12~15.
- 卢华复,陈楚铭,刘志宏,等. 2000. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因. 石油学报, 21(3): 18~24.
- 吕修祥,金之钧,周新源,等. 2000. 塔里木盆地库车坳陷与膏盐岩相

- 关的油气聚集. 石油勘探与开发, 27(4):20~22.
- 秦胜飞, 贾承造, 陶士振. 2002. 塔里木盆地库车坳陷油气成藏的若干特征. 中国地质, 29(1):103~108.
- 汤良杰, 贾承造, 皮学军, 等. 2003a. 库车前陆褶皱带盐相关构造样式. 中国科学(D辑), 33(1):38~46.
- 汤良杰, 贾承造, 金之钧, 等. 2003b. 塔里木盆地库车前陆褶皱带中段盐相关构造特征与油气聚集. 地质论评, 49(5):501~506.
- 汤良杰, 金之钧, 贾承造, 等. 2004. 库车前陆褶皱—冲断带前缘大型盐推覆构造. 地质学报, 76(1):17~25.
- 田作基, 宋建国. 1999. 塔里木库车新生代前陆盆地构造特征及形成演化. 石油学报, 20(4):7~13.
- 汪新, 贾承造, 杨树锋等. 2002. 南天山库车冲断褶皱带构造变形时间. 地质学报, 76(1):55~63.
- 王子煜. 2002a. 库车坳陷西部中生代地层岩石物理和力学性质. 地球物理学进展, 17(3):391~399.
- 王子煜. 2002b. 库车坳陷断层控制下的盐岩塑性流动及对上覆地层构造影响的沙箱模拟. 石油实验地质, 24(5):441~445.
- 邬光辉, 刘玉魁, 罗俊成, 等. 2003. 库车坳陷盐构造特征及其对油气成藏的作用. 地球学报, 24(3):249~254.
- 张明山, 姚宗惠, 陈发景. 2002. 塑性岩体与逆冲构造变形关系讨论——库车坳陷西部实例分析. 地学前缘, 9(4):371~376.
- 赵文智, 许大丰, 张朝军, 等. 1998. 库车坳陷构造变形层序划分及在油气勘探中的意义. 石油学报, 19(3):1~5.
- and exploration of oil and gas. Petroleum Exploration and Development, 30(2):17~19 (in Chinese with English abstract).
- Lei Ganglin, Zhang Guowei, Liu Zhihong. 2001. The growth formation of Kuqa foreland overthrust belt and its application in oil gas exploration. Xinjiang Petroleum Geology, 22(2):107~110 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaofeng, Xie Xinong. 2001. Fluid flow, hydrocarbon migration and accumulation associated with salt tectonics. Earth Science Frontiers, 8(4):343~349 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhihong, Lu Huaifu, Jia Chengzao et al. 2000. Orogeny timing and fault-slip rate and their significance to the rejuvenated foreland thrusts belt of Kucha. Petroleum Exploration and Development, 27(1):12~15 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huaifu, Chen Chuming, Liu Zhihong, et al. 2000. The structural features and origin of the kuqa rejuvenation foreland thrust belt. Acta Petroli Sinica, 21(3):18~24 (in Chinese with English abstract).
- Lü Xiuxiang, Jin Zhijun, Zhou Xinyuan, et al. 2000. Oil and gas accumulation related to evaporite rocks in Kuqa depression of Tarim basin. Petroleum. Exploration and Development, 27(4):20~22 (in Chinese with English abstract).
- Mazariegos R A, Andrews M J, Russell J E. 1996. Modeling the evolution of salt structures using nonlinear rock flow laws. Tectonophysics, 256:129~143.
- Montgomery S L, Moore D C. 1997. Subsalt play, Gulf of Mexico: A review. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 81(5):876~896.
- Qin Shengfei, Jia Chengzao, Tao Shizhen. 2002. Some characteristics of oil and gas accumulation in the Kuqa depression, Tarim basin. Geology in China, 29(1):103~108 (in Chinese with English abstract).
- Schultz-Ela D D. 2003. Origin of drag folds bordering salt diapirs. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 87(5):757~780.
- Senni S J, Jackson M P A. 1983. Evolution of salt structures, east Texas diapir province, part 2: patterns and rates of halokinesis. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 67(8):1245~1274.
- Talbot C J, Jarvis R J. 1984. Age, budget and dynamics of an active salt extrusion in Iran. Journal of Structural Geology, 6(5):521~533.
- Tang Liangjie, Jia Chengzao, Pi Xuejun, et al. 2003. Salt related structural styles in Kucha foreland folded belts. Science in China (Series D), 33(1):38~46 (in Chinese).
- Tang Liangjie, Jia Chengzao, Jin Zhijun, et al. 2004. Salt-related structural characteristics and hydrocarbon accumulation in the middle segment of the Kuqa foreland belt in the northern Tarim basin. Geological Review, 49(5):501~506 (in Chinese with English abstract).
- Tang Liangjie, Jin Zhijun, Jia Chengzao, et al. 2004. A large-scale salt nappe complex in the leading edge of the Kuqa foreland fold-thrust belt, Tarim basin, northern China. Acta Geologica Sinica, 78(1):17~25 (in Chinese with English abstract).
- Tian Zuoji, Song Jianguo. 1999. Tertiary structure characteristics and evolution of Kuche foreland basin, 20(4):7~13 (in Chinese with English abstract).
- Trusheim F. 1960. Mechanism of salt migration in northern Germany. AAPG Bulletin, 44(9):1519~1540.

References

- Velaj T, Davison I, Serjani A, et al. 1999. Thrust tectonics and the role of evaporates in the Ionian zone of the Albanides. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 83(9): 1408~1425.
- Volozh Y, Talbot C, Ismail-Zadeh A. 2003. Salt structures and hydrocarbons in the Pricaspian basin. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 87(2): 313~334.
- Wang Xin, Jia Chengzao, Yang Shufeng, et al. 1999. The time of deformation on the Kuqa fold-and-thrust belt in the southern Tianshan—based on the Kuqa river area. *Acta Geologica Sinica*, 76(1): 55~63 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ziyu. 2002a. Physical and mechanical properties of Mesozoic and Cenozoic rocks in the west of Kucha depression in Tarim basin. *Progress in Geophysics*, 17(3): 391~399 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ziyu. 2002b. Sandbox simulation of saltrock plastic flow controlled by faults in the Kucha depression of Tarim basin and its influence on overlying stratigraphic structures. *Petroleum Geology & Experiment*, 24(5): 441~445 (in Chinese with English abstract).
- Wu Guanghui, Liu Yukui, Luo Juncheng, et al. 2003. The salt structure characteristics and its effect to reservoir-forming in Kucha depression. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(3): 249~254 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Mingshan, Yao Zonghui, Chen Fajing. 2002. A discussion on the relationship between plastic body and deformation of thrust structure — in western Kucha depression of China as an example. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 371~376 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wenzhi, Xu Dafeng, Zhang Chaojun, et al. 1998. Division of structural deformed sequence in kuche depression and significance for oil- gas exploration. *Acta Petrolei Sinica*, 19(3): 1~5 (in Chinese with English abstract).

Kinematics Characteristics of the Kuqa Depression in the Tarim Basin

WU Guanghui^{1,2)}, WANG Zhaoming²⁾, LIU Yukui²⁾, ZHANG Baoshou²⁾

1) *Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing, 100029*

2) *Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, Korla, Xingjiang, 841000*

Abstract

This paper quantitatively describes the net growth, net growth rate and strain rate of the salt structures in the Kuqa depression and illustrates the salt movement characteristics of Kuqa depression based on analysis of abundant seismic and geological data. The first movement of the salt began in the early Miocene, when the salt structure grew slowly and stably. The fast growth of the salt structure took place from the middle-late Pliocene to Quaternary, featuring quick and differentiated growth. The salt structure in the Kuqa depression has five continuous growth stages: sedimentation of salt and gypsum, slow growth of low-relief salt pillows, development of salt anticlines, salt diapir expansion and breakage of salt diapir piercement.

Key words: Kuqa depression; salt structure; net growth; net growth rate; strain rate; evolution