

库车拗陷西部特殊塑性沉积体 对构造变形和圈闭形成的影响

张振生* 张明山

(石油地球物理勘探局研究院地质研究中心)

吴奇之

(石油地球物理勘探局)

摘要

张振生,张明山,吴奇之.库车拗陷西部特殊塑性沉积体对构造变形和圈闭的影响.石油地球物理勘探.2001,36(1):60~71

库车拗陷西部的下第三系盐、膏、泥等塑性体形成于与海水有短暂沟通的蒸发泻湖环境,受重力和构造应力联合作用发生了复杂的变形,对拗陷西部的构造样式、圈闭类型、油气成藏的形成产生了重要的影响。以往单纯用冲断层相关褶皱构造样式分析其成因机制,不能科学地反映圈闭的分布规律,也曾经滞缓了油气勘探进程和步伐。通过塑性体的综合分析能够为库车的构造样式研究提供帮助,为油气勘探提供指导和建议。

主题词 库车拗陷 塑性沉积体 构造变形 圈闭

ABSTRACT

Zhang Zhensheng, Zhang Mingshan and Wu Qizhi. Effect of special plastic deposition body on structural deformation and trap forming in western of Kuche Depression. OGP, 2001, 36(1):60~71

Formed in an evaporating lagoon environment having a short connection with sea water and produced a complex deformation by joint action of gravity and structural stress, the plastic body such as salt, gypsum and mud in Neogene in western of Kuche Depression plays a important role in structural pattern, trap type and oil-gas reservoir forming in western of the depression. Simply analyzing its producing mechanism using thrust-related folding structural pattern before did not scientifically reflect distribution rule of traps and postponed process and pace of oil-gas prospecting. Synthetic analyzing plastic body can provide help in structural pattern study of Kuche Depression and also provide guide and suggestion on oil-gas prospecting.

Subject terms: Kuche Depression, plastic deposition body, structural deformation, trap

引言

库车拗陷位于塔里木盆地北缘,属于新疆拜城县到轮台县境内(图1)。自50年代中期开展

* Zhang Zhensheng, Geological Research Center, GRI, BGP, P. O. Box 11-1, Zhuozhou City, Hebei Province, 072751, China
本文于1999年12月30日收到。

了地面地质调查和浅井钻探,到70年代追踪地面油苗对地面构造布设了多口探井,仅在浅层见到显示和井喷;除1958年发现依奇克里克油田之外,未能在全拗陷取得突破,得出的结论是出露地层时代老,倾角陡,受断裂剥蚀影响严重,油藏保存条件差。随着地震勘探技术的提高,资料品质有了明显的改善,地质认识也进了一步,确定了深层为勘探目标,终于在1998年的油气勘探中取得质的飞跃。1998年初克拉2井、克拉3井、依南2井相继在下第三系底部、白垩系、侏罗系得到了高产油气流,从而发现克拉2号、依南2号特大型气田。油气勘探的突破带来地质认识的更新,通过研究发现,原先认定的四排线形(地表的)构造并不能代表盆地内有利圈闭的分布规律;而塑性层在构造变形中所起的作用,已不能简单看作水平滑脱层,其构造变形综合了塑性体的重力底辟和构造挤压应力双重机制。同时,构造形成过程和机制又对油气聚集产生了重要影响。如何正确认识构造圈闭分布和油气成藏规律,关系到拗陷下一步的勘探方向和进程。本文尝试以拗陷西部下第三系塑性体的研究为基础,剖析构造运动的过程和机制,改变传统有关前陆褶冲带的构造应力变形占主导地位的认识,提出塑性体在重力差异作用下的底辟作用的重要性和对圈闭形成的决定意义,为今后油气勘探提供指导。

库车拗陷西部区域地质背景和构造样式分析

区域地质背景

库车拗陷位于塔里木盆地北部,南天山造山带前缘,北面为南天山中、高山,南面为塔里木沙漠腹地,现代地貌以低山及丘陵为主。南天山哈尔克山—黑英山一带早古生代末到晚古生代形成了古南天山洋,后于晚古生代晚期最终闭合,产生了塔里木板块与天山—哈萨克斯坦板块的碰撞对接。从古生代末期至中、新生代,天山及塔里木盆地进入了统一的陆壳板块内部的构造演化阶段。

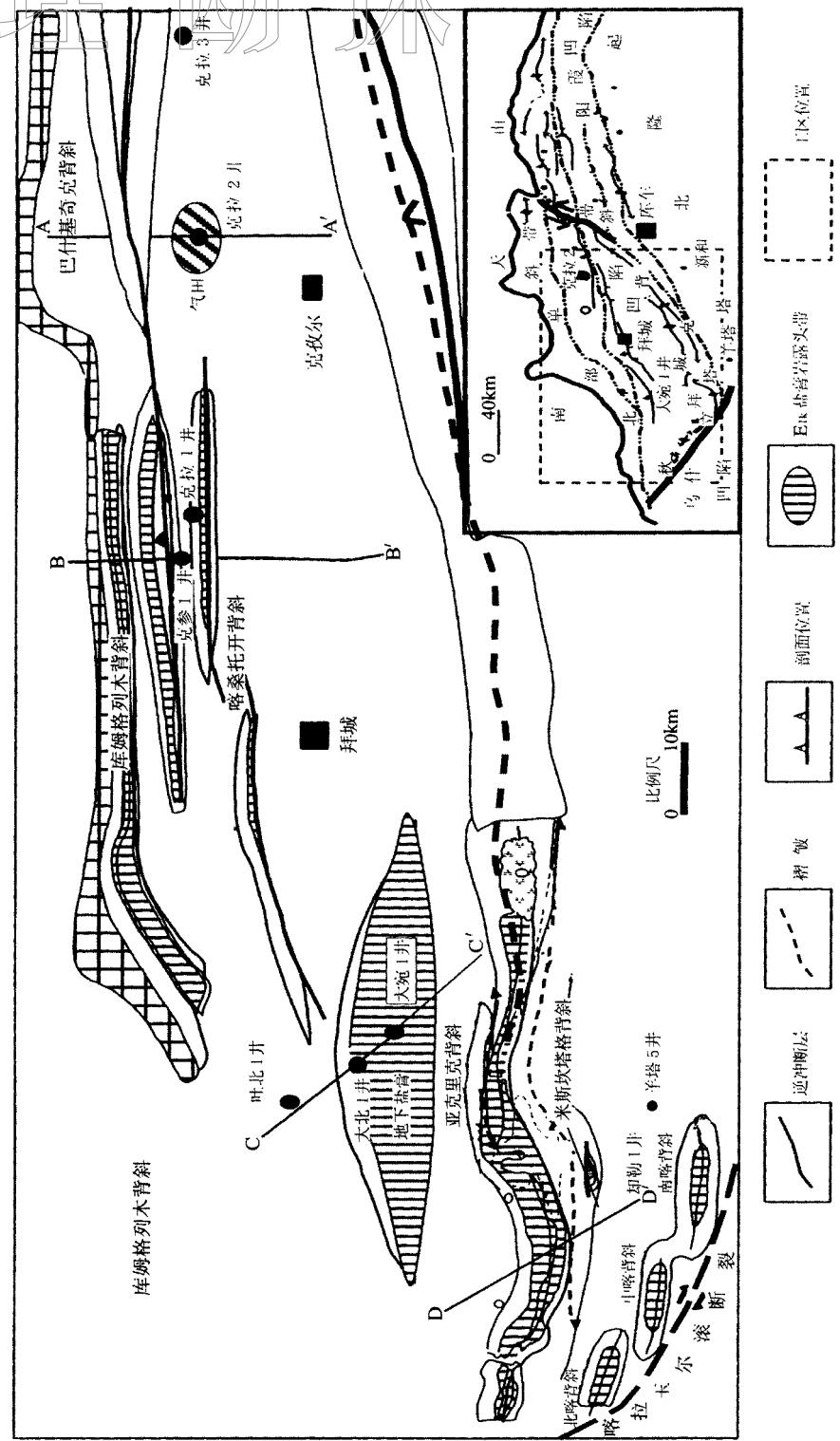
现代南天山逆冲造山楔整体以南天山南缘北布谷鲁断裂为主,呈不规则的弧形向塔里木克拉通逆冲推覆,柯坪、塔北等中、新生代继承性古隆起(前缘隆起)反向逆冲和阻挡,构成了库车拗陷的南北缘区域应力边界。拗陷中部的库车河附近的左行走滑即侧断坡调节了拗陷东、西两部分的位移,塑造了东、西部的构造差异。西缘的喀拉玉尔滚右行走滑断裂形成了与乌什盆地的分界,从而构成了库车拗陷前陆冲断褶皱带的现今应力背景(图1)。

库车拗陷的构造样式

在冲断褶皱构造研究中,发现由一种岩性地层进入到另一种岩性地层时断层面倾角常常发生变化的现象,定义为“断坪、断坡”等概念^[1]。近年来相继在世界各大碰撞造山带前缘发现了冲断构造,归纳起来可以概括为:冲断层和冲断层系统,也称为叠瓦扇和双重构造^[2];冲断层相关褶皱系统,称为断层弯曲褶皱、断层扩展褶皱;复合变形系统等^[3]。

库车拗陷地表和部分地下构造样式与典型前陆褶冲带相似,个别构造具有典型的冲断层系统或断层相关褶皱样式,但是总体上其断面缺少断坡和断坪结构,最大特点是以复合型构造为主,有自己的规律。根据现今构造样式和特点,总结为几种与盐、膏、泥岩塑性变形有关的实例。

(1)膏、泥、盐等塑性体上滑脱断展褶皱:以喀桑托开背斜、米斯坎塔克背斜等为主,由下第三系盐、膏、泥塑性层蠕变形成了新生代地层的地表断展褶皱,不同的是盲冲断层后期变为通



库车拗陷西部构造纲要

物

天断层。近年来通过大量地震资料的综合分析才发现深层(时间剖面近1.5s以下)构造与浅层构造之间存在着塑性层滑脱,构成了上、下构造不符合的现象(图2)。该带地表、地下背斜在东西方向上普遍存在着转换现象,表现为由南向北或由北向南的逆冲转换,以及背斜轴迹向东或

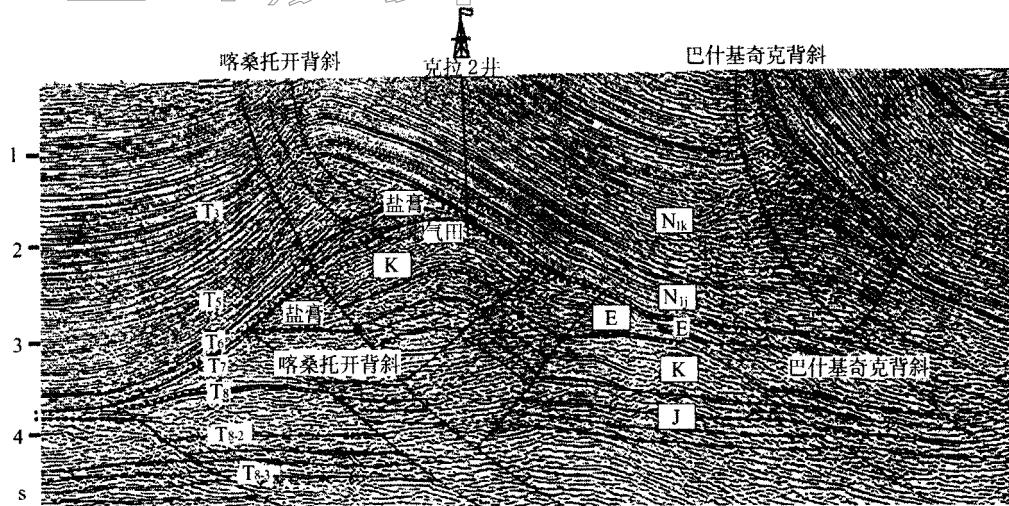


图2 库车拗陷西部克拉苏地区南北向地震剖面(AA')

向西倾伏转换的现象(图1)。

(2)膏、泥、盐塑性体下双重构造:克拉苏构造带较为典型,由中生代地层在第三系下部的盐、膏、泥等塑性体之下组成的双重构造,与塑性层一起构成被动顶板双重构造;最高一排冲断块为克拉苏圈闭带(图2)。塑性体上成滑脱背斜,表现为挤压加剧情况下深浅层的不同样式构造发展的机制。对于塑性体顶面曾有人认为是第三系底即T₈,塑性体之下为中生界完整大背斜。但是从相邻的大宛1井在塑性层中钻遇近千米下第三系盐层看,塑性体为下第三系。由克拉2井、克拉202井钻探结果表明:塑性体下中生界为多个断块(马石)构成的双重构造。综合各种信息,本文认为下第三系含盐塑性体柔性变形作用,形成了新生界和中生界之间的构造滑脱,后期继承性冲断作用使中生界形成许多断块,并且部分冲断层切入到浅层新生界地层中,既形成了浅层断层弯曲褶皱,又调节了垂向构造运动的幅度差。而冲断层未归到侏罗系某一滑脱面上,冲断层的发源可解释为在震旦系变质片岩中。

(3)盐隆隆起带:大宛齐隆起为下第三系盐上新生界的低幅度隆起。在拜城向斜西段北翼发育了大宛齐隆起,为库姆格列木群盐、膏、泥岩塑性流动产生的被动纵弯褶皱隆起(图3)。米斯坎塔克背斜也是盐隆背斜。

应用平衡剖面技术对拗陷西部采用塑性体(E_{lk})滑脱分层法分别处理滑脱体以上的断裂、褶皱和以下的被动双重构造,得出克拉苏构造带中生界与新生界间存在着近28km的缩短量差(图4)。究竟是构造解释方案不对,还是存在着中生代末期的大型冲断作用呢?通过1999年对西秋里塔格(即米斯坎塔克背斜带)的地震勘探发现,剖面上存在大型的造成新生界重叠的逆冲断层,其下的中生界仅有很小的缩短量,两者相差近30km,形成下第三系库姆格列木组塑性层上、下的线长不平衡(图5)。如果将克拉苏构造带与西秋里塔格构造带综合起来考虑,则中、新生界的变形就是协调的了。这既说明了中生代末期没有大的缩短变形,也说明了塑性体在构造变形中起了很大的分层滑脱的作用。

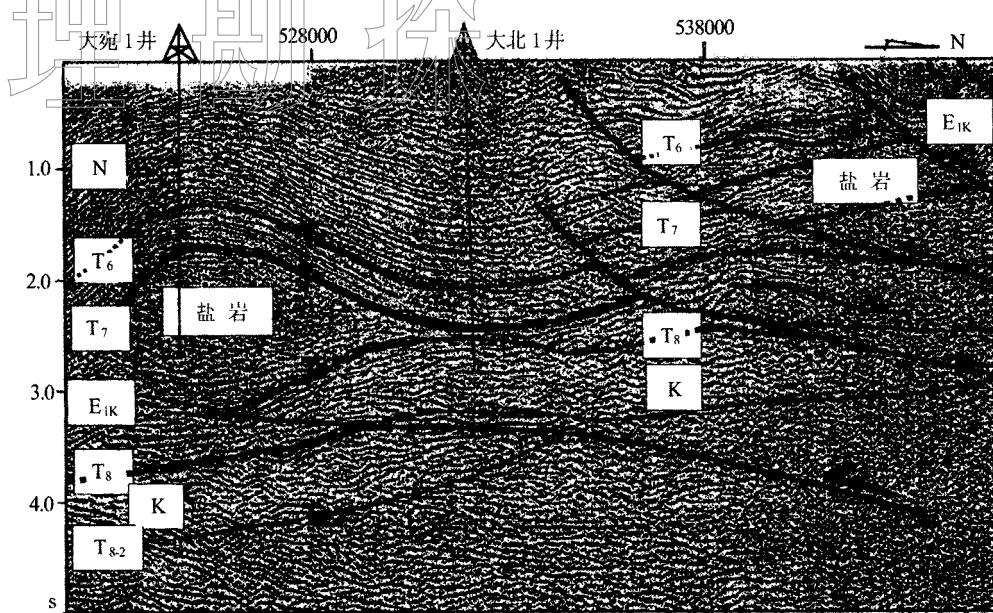


图3 库车西部大宛齐地区南北向地震剖面(CC', BC94(96)-139叠偏剖面)

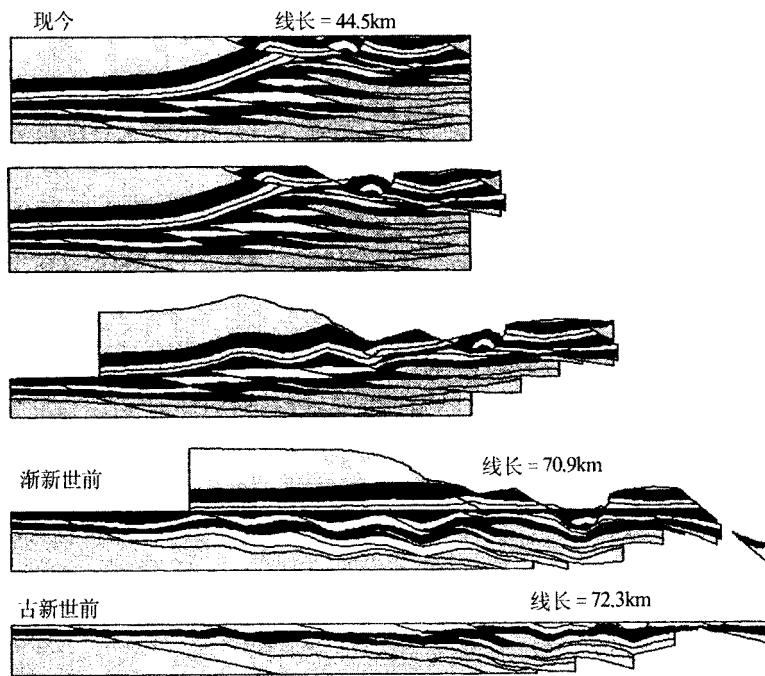


图4 库车拗陷西部克拉苏地区平衡剖面(BB', BC93(94)-187叠偏剖面)

与传统的按地面构造将库车拗陷划分为北部单斜带、直线背斜褶皱带、拜城向斜沉降带和秋里塔格褶皱带(李启明,库车逆冲带构造分析、油气藏描述及勘探部署,1998)不同,上述分析突出了下第三系的塑性层在构造变形中所起的举足轻重的作用。至于为什么说塑性体决定了变形的机制和样式,这还要从它们的物性分析入手。

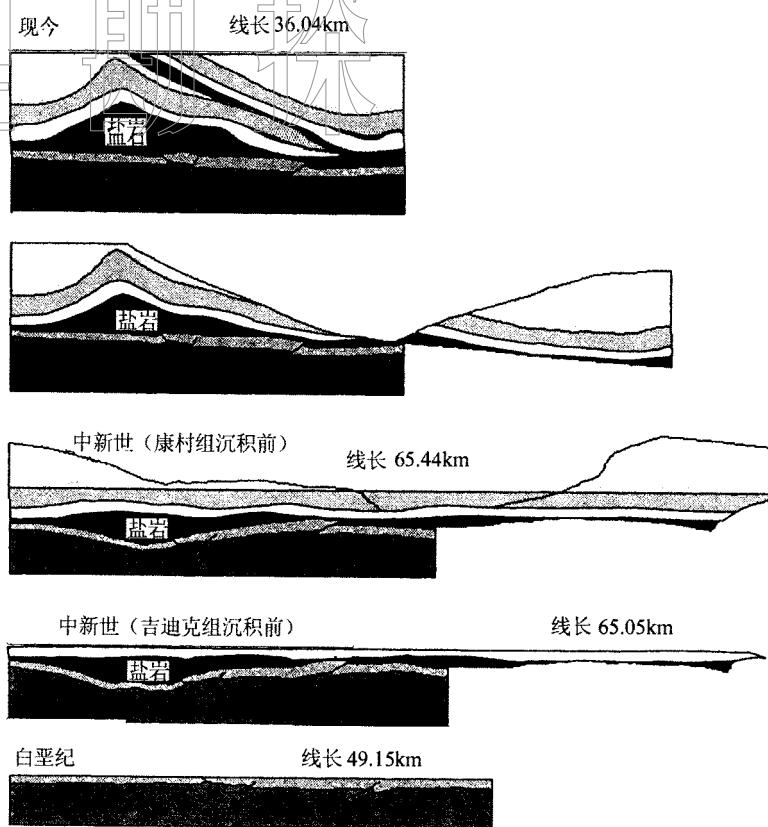


图5 库车拗陷西部却勒塔格地区平衡剖面(DD', BC99—104剖面)

变形物质基础的塑性体特征分析

塑性体特征分析

库车拗陷晚古生代末期以来沉积了陆相碎屑岩,如泻湖、湖泊相的盐、膏、泥及煤层与河流—湖泊相的粗碎屑岩。这些塑性为主的软硬层间互地层组合为后期的盐、膏、泥底辟和逆冲断层及相关褶皱的构造变形提供了物质基础。

库车拗陷地层组合可以分为中生界和新生界两套。中生界为一套砂、砾、泥岩为主夹薄层煤的陆相碎屑岩系。其中三叠系底部俄霍布拉克群厚层杂色砾岩在库车河附近厚达500m以上,向拜城处减薄到150m左右。侏罗系下部阿合组厚层灰白色中砂岩全区分布稳定,又称标准砂岩段,在克拉苏河厚450m,向盆缘变薄到300m左右。白垩系下部的杂色砾岩又称城墙砾岩,全区分布广泛,厚度在300~50m之间。这些刚性岩层在中生代地层所经历的构造变形过程中起到了能干层的作用,从而塑造了中生界冲断层系统的构造样式。

新生界主要为粉砂岩、泥岩、砂岩、砾岩和膏、盐岩等。下部以粉砂、泥岩等细粒岩石为主,上部以砾岩、砂岩为主,成岩较差。下第三系库姆格列木群中部为一套白色盐岩、紫红色泥岩、石膏及棕红色砂质泥岩为主,厚度在拜城地区有834m以上,向西南加厚至1540余米。

从拗陷西部地震剖面可以看出,只有下第三系具有塑性变形特征(图3),影响着构造样式

物探技术

和变形机制。钻井发现,拗陷西部下第三系在吐北1井厚1857m,大宛1井钻遇1810m,克参1井钻遇834m(1866~2700m),克拉1井为775.5m,克拉2井507m,克拉3井为828m,东部依南2井为424m。整体表现为拗陷西侧较厚,向东北减薄的特点。克参1井曾分为4个岩性段,从克拉1井开始钻井划分为8个层段。以现有几口井的岩性、电性特征看具有一定的相似性和可比性(图6)。对于苏维依组与库姆格列木组分界问题,目前各家意见不一。我们从岩性、电性分层角度出发,

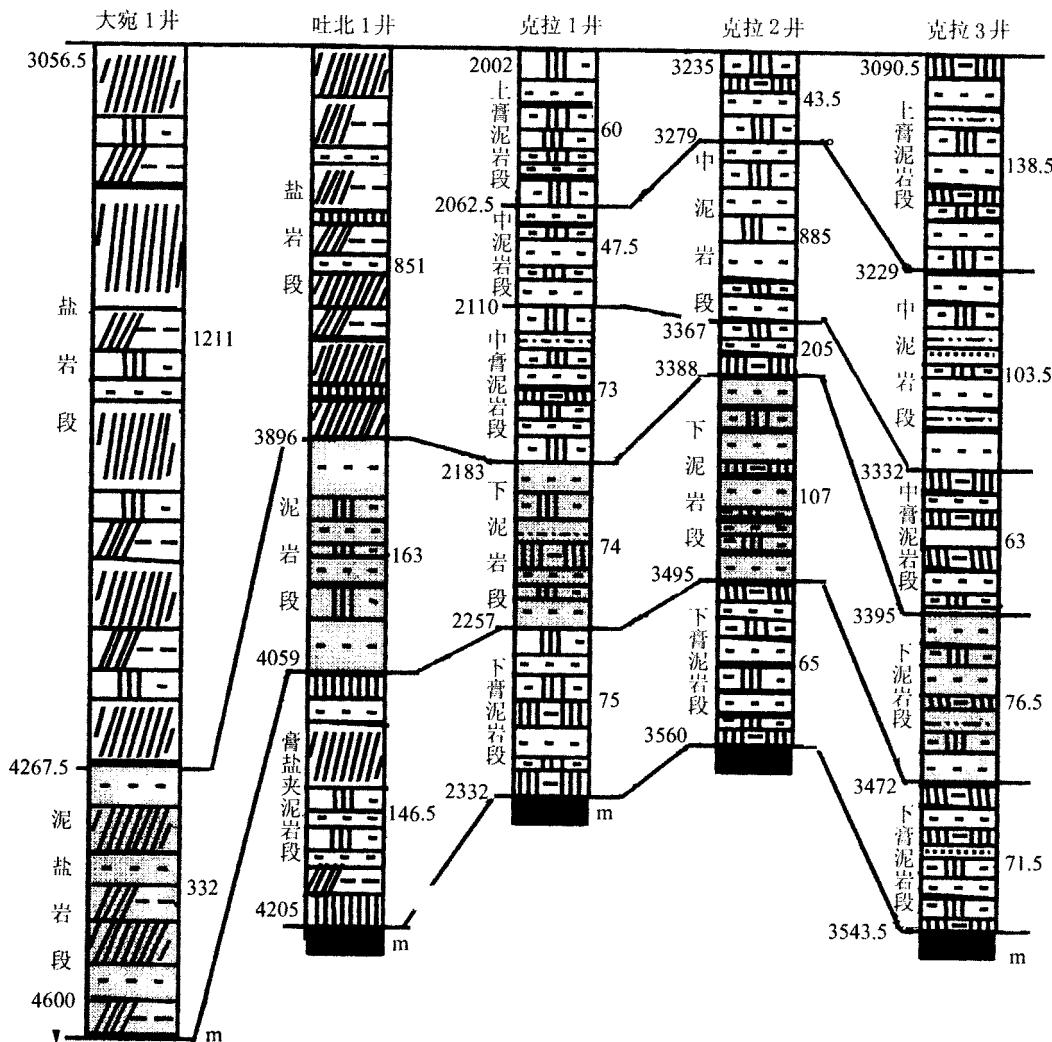


图6 库车西部地区下第三系库姆格列木组连井地层对比

将地震剖面中塑性变形段看作库姆格列木组。

库姆格列木组在大宛1井厚1543.5m,纯盐岩段1211m;在吐北1井厚1220m,纯盐岩段851m;在大北1井厚207m,缺少纯盐岩段,膏泥岩厚135m;在克拉1井厚350m,没有纯盐岩段,含盐膏泥岩段330m;在克拉2井厚344m,含盐膏泥岩段为320m;在克拉3井厚463m,含盐膏泥岩段为440m。塑性层对比结果如图6。盐岩层主要集中在大宛齐和却勒塔格地区。

库车下第三系特殊塑性沉积体古环境恢复分析

晚古生代天山裂陷海槽缝合后,自晚二叠世开始,研究区进入了陆内造山与前陆盆地形成

的耦合演化阶段。二叠纪晚期到中生代发育浅水陆相磨拉石建造,与典型前陆盆地相比,缺乏其早期的深水海相复理石沉积建造。中生代盆地沉降中心靠近北部造山带,地层向盆地北缘变厚,向南灭尖到塔北继承性隆起之上。同时,古流向分析表明,在拜城地区为北偏向南东,库车地区为北偏向南西,也说明库车盆地中生代处于盆地的连续发育期,类似于典型前陆盆地晚期阶段的沉积演化特征。新生代库车盆地沉降中心向南迁移,沉积厚度巨大,发育陆相河流、湖泊相沉积建造。尤其是库车西部早第三纪曾经与塔西南海侵短暂停连通,形成泻湖—蒸发湖泊相沉积。在沉积中心大宛齐—却勒塔格附近发育巨厚的盐岩沉积(图7)。蒸发湖盆早期低浓度盐水中先沉淀膏盐,后期高浓度盐水中沉淀岩盐^[1],加之与海水短期沟通形成了高盐度都有利于厚盐层的沉淀。受雨季洪水的补给盐度交替变化,长期的干燥环境最终形成了特殊的盐、膏、泥等交互的塑性沉积体。

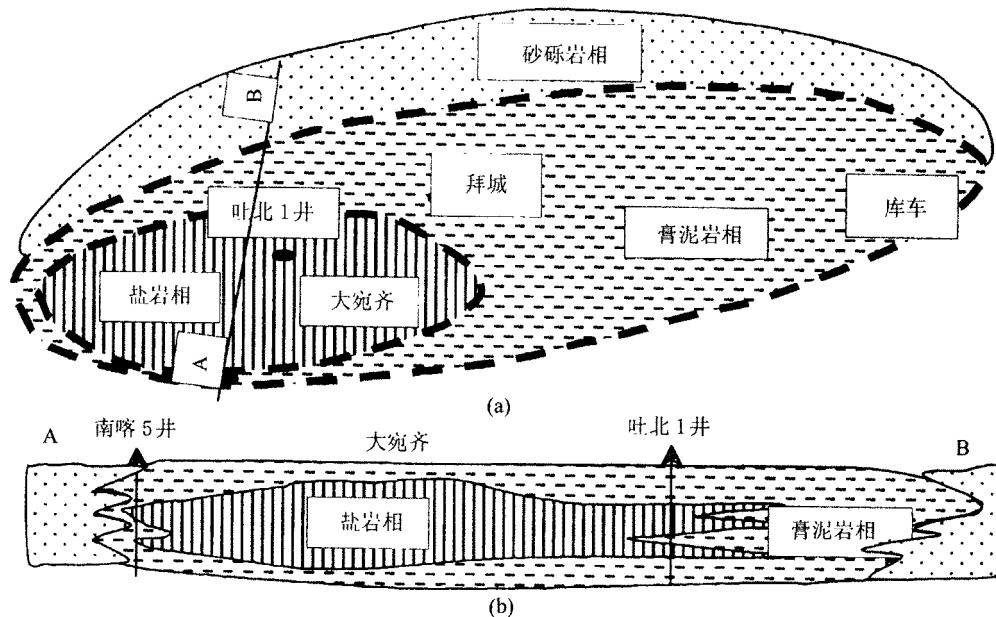


图7 库车西部下第三系异常沉积体沉积相恢复示意图。(a)平面图;(b)剖面图

塑性体对构造样式、变形过程的影响机制

盐、膏、泥等塑性体对构造变形有重要的作用,一般可以归纳为两种典型类型。其一是由于重力或浮力作用产生盐、泥底辟,其二是作为韧性滑脱层为复杂的构造变形提供通道等。

盐岩层在常温常压下为固态或弱塑性,但是在温度压力增加时塑性明显变好,据计算埋藏500m盐岩开始进入软化点,到3000m时可以达到极强的流动性^[5]。盐底辟通常是由密度倒转引起的,当盐的密度(一般为2.15~2.2g/cm³)低于上覆沉积层的密度(2.4g/cm³以上),而盐层有足够的厚度时,就会上覆层起伏或负荷压力不均匀的地方发育盐丘。Seni 和 Jackson 对发育成熟的盐丘的演化作了深入的研究和概括,典型为三个阶段,即盐枕、底辟、底辟后阶段^[6]。如东得克萨斯的盐枕,经历了由水平层到盐丘的变化^[7];德国西北部的盐底辟即是盐丘顶部刺穿形成的穹隆^[8](图8)。

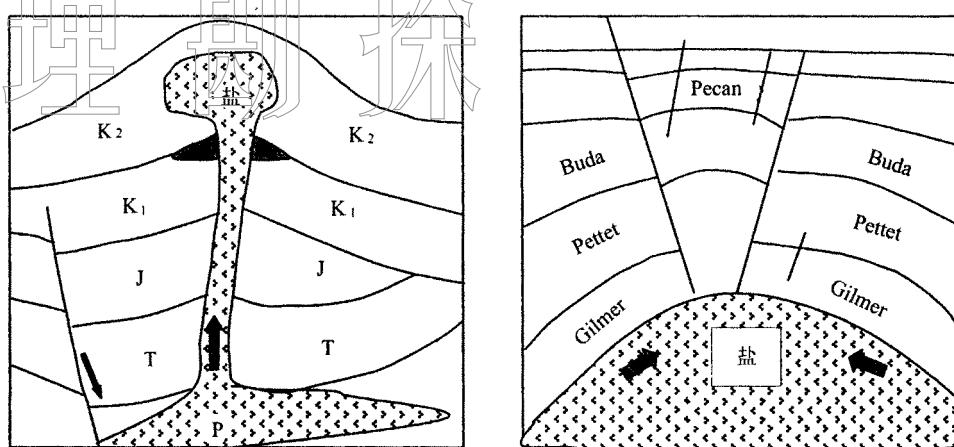


图8 盐岩变形机制实例分析

库车拗陷西南部库姆格列木组盐岩的变形经历了早期的却勒塔格山一带的大盐丘阶段(图9a),随着顶部底辟进行,沿着断裂形成盐刺穿,伴随着构造挤压应力的作用,造成盐岩逸流地表形成现今的盐山和盐湖,盐岩逸流后亚克里克背斜受逆冲挤压造成大幅度缩短,然后盐岩在大盐隆两翼部位重新积聚形成大宛齐穹隆背斜和米斯坎塔克背斜隆起(图9c)以及吐孜玛扎盐隆。

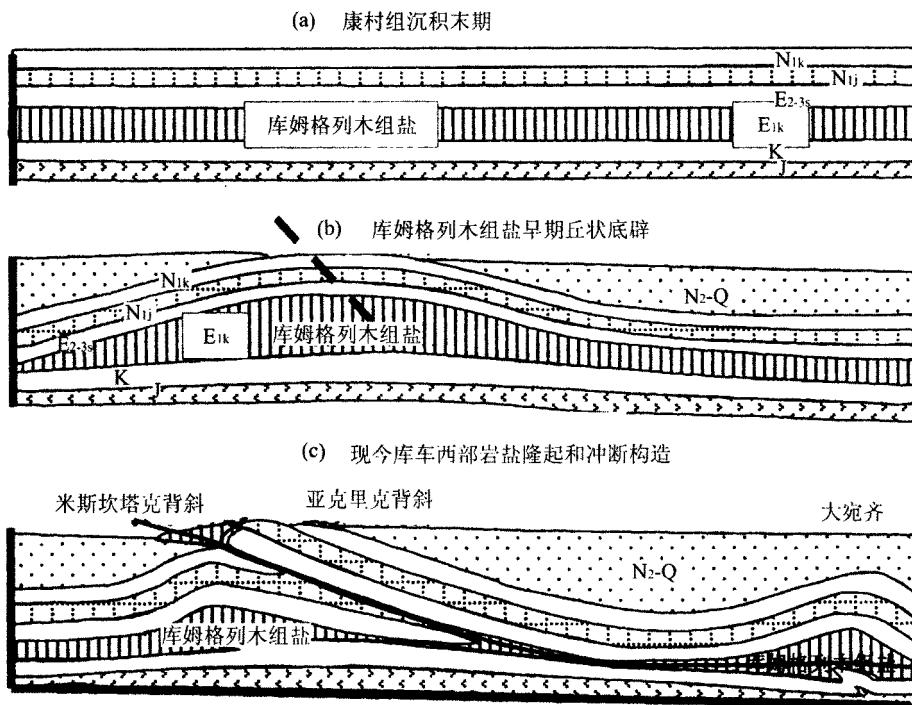
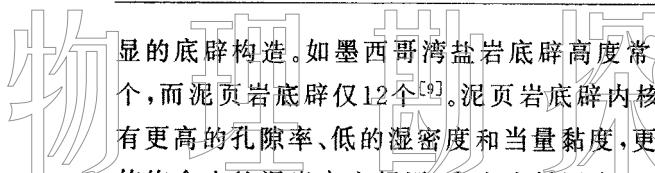


图9 库车拗陷西部盐岩构造发育机制和过程

石膏的塑性流动机理与盐岩相似,但塑性要差得多,软化点也比盐高,同时当埋深超过2000m时,石膏就会变成硬石膏,析出近一半体积的水,而当石膏与盐、泥层交互沉积时会大大增加盐、泥岩的塑性。泥页岩的底辟发育更为广泛,但变形大多较盐弱,很少刺穿,难以形成明



显的底辟构造。如墨西哥湾盐岩底辟高度常在5~10km,泥页岩都小于1km,盐丘的数量有300个,而泥页岩底辟仅12个^[9]。泥页岩底辟内核的泥岩常常处于欠压实状态,较正常压实的泥岩有更高的孔隙率、低的湿密度和当量黏度,更容易变形。尤其是在水平挤压应力作用下,还可能使饱含水的泥岩产生超压,大大降低泥岩的内摩擦角而使其塑性增强。

库车坳陷西部克拉苏一带库姆格列木组发育大套的膏、泥、盐层,随着后期的苏维依组、吉迪克组较粗物质沉积埋藏后,库姆格列木组顶部泥岩(上泥岩段)孔隙流体被排除进入上部砂岩中,上泥岩段孔隙率、渗透率降低,从而起到封闭层的作用造成下部的膏泥岩的欠压实超压现象。随着后期构造挤压作用,在克拉苏塑性层中下部以及塑性体底下的中生界砂岩中产生了异常超压,这已为克拉1井、克拉2井、克拉3井等证实。克拉苏构造带的塑性体在构造变形的早期为层状有起伏的丘隆状,当深层中生界大幅度缩短时,塑性体充当了滑脱层和填空隙的物质,使中生界可以产生叠瓦扇和双重构造;而对塑性体之上的新生界影响较小,仅仅是在早期盐、泥岩隆起的顶部破裂产生通天断层。

塑性层对圈闭的影响

圈闭形成的机制和过程

下第三系塑性体在库车坳陷西部的圈闭形成中起着决定作用,主要体现在:塑性体作为中生界生油层、储层的遮挡层,在侏罗系、三叠系生油岩生烃过程中,一直起到了保护层的作用。在后期构造缩短时受塑性体减薄和冲断层通达地表的影响,可能使油气有局部泄漏到浅层并聚集成藏,而大部分油气被封闭在塑性体之下得以成藏。再有塑性体作为构造运动的滑脱层,调节着构造形变,并充填了刚性地层间不同缩短作用造成的楔形空间,使得塑性层下的中生界断块有明显不同于新生界的重叠,有利于其下的断背斜的形成,塑造了克拉苏、却勒塔格等圈闭带(如图2、图3)。

圈闭类型及特征

盐隆背斜型圈闭

由盐岩在重力作用下形成盐丘,从而使塑性层之上的新生界地层形成背斜圈闭。典型的有大宛齐圈闭。该圈闭在康村组砂岩中聚集油气,受上部泥岩和正断层的遮挡得以成藏。其它类似的圈闭还有喀桑托背斜、喀拉巴赫背斜、吐孜玛扎、米斯坎塔克背斜等浅层背斜构造。从现在的钻探结果(大宛1井浅层发现丰富的油气显示,获高产工业油气流)来看,类似圈闭也有可能寻找到浅层油气藏。

泥、膏、盐(欠压实带)异常高压遮挡型气藏圈闭

主要分布于塑性层下部的克拉苏断裂构造带。目前钻井已获得突破的有克拉2井、克拉3井、克拉201井、克拉202井等。克拉2井位于克拉苏构造带中部,塑性层下的圈闭构造是由于冲断层使中生界形成双重构造的结果。库姆格列木组塑性层下部砂岩段、白垩系砂岩段都获得了高产气流,带来了克拉苏地区塑性层下构造带勘探的重大突破和进展。同一构造带上的克拉3井亦在塑性层下部底砂岩获得工业气流。这为寻找塑性体下的圈闭展现了良好的前景。该圈闭的特点是油气显示段有超高压存在,在克拉1井的欠压实带(井深2050~2310m),测井响应为低电阻率、高声波值,声波值高于正常声波压实趋势线,主要发生在中泥岩段一下膏泥岩段。其

余几口井见表1。油气基本上发现于欠压实带下。

表1 欠压实带、测井解释统计表(据塔指吴远东等,1998年改编)

井名	欠压实带	测井解释	试油结果	岩性段
克拉1井	2050~2310m	2330~2340m 含气水层	2328~2420m, 中试出水327m ³ /d	中泥岩段 下膏泥岩
克参1井	2302~2380m	2654~2658m 含气水层	钻至2650~3009m, 井口喷盐水,点火高1.5m	上膏泥岩 —中泥岩
克拉2井	3235~3367m	3530~3539m 气层	3499~3534m, 中试出气277109 m ³ /d	上膏泥岩 —中泥岩
克拉3井	3350~3435m	3347~3348m 水层	3352~3354m,3366~3367m, 扩射产气11959m ³ /d	中泥岩 中膏泥岩

类似的塑性层膏、泥岩下圈闭还有克拉202井所钻到的克拉2号圈闭的下盘圈闭,南秋里塔格构造带塑性层下圈闭构造也将成为油气勘探的重点区带之一。盐下圈闭构造的实例有却勒塔格带的却勒2号、却勒3号圈闭。随着却勒3井的钻探可能有重要的突破。

结 论

库车拗陷由于第三系的塑性层出现的层位不同(西部为下第三系库姆格列木组,东部为上第三系吉迪克组)以及库车河附近的侧向滑动的断层(侧断坡)的作用,造成了东西两部分的不同构造样式。在以往的分析中习惯于用冲断层相关褶皱形成机理来解释拗陷西部的上下构造分层现象。通过对盐岩等塑性体受重力(不同的密度差造成)作用容易产生底辟隆起现象的类比,提出了塑性层的变形决定了拗陷西部现今构造样式和油气圈闭的新观点。

通过露头、钻井、地震资料的综合分析,恢复了古沉积环境的原貌,得出了拗陷西部早第三纪因受海水短暂侵入影响形成蒸发泻湖,在大宛齐却勒塔格附近沉积了巨厚的盐岩,克拉苏一带发育有很厚的膏、泥、盐岩,从而产生了大宛齐附近盐隆底辟变形为主,克拉苏塑性层滑脱和填隙作用形成中生界断块堆叠为主的结论。也为寻找大宛齐一带的盐下圈闭以及克拉苏一带的泥、膏岩异常压实带下的断块圈闭提供了依据。

应用平衡剖面技术对拗陷西部采用塑性滑脱体(E_{ik})分层法分别处理滑脱体以上的断裂、褶皱和以下的被动双重构造,得出定量的分析结果。其中克拉苏构造带中生界与新生界间存在着近25km的缩短量差(图4),与西秋里塔格(即却勒塔格)的新生界和中生界间的28km以上缩短量(图5)相差不多。如果将克拉苏构造带与西秋里塔格构造带综合起来考虑,则中、新生界的变形就是协调的了。这也说明了中生代末期没有大的缩短变形,上下构造层的变形差异是塑性层在构造变形中流动和滑脱作用的结果。

用地震模型正演验证和叠前深度偏移成像技术验证地震资料的解释方案是合理的;用石蜡等材料按挤压模型做的地质正演模拟作了比较,在挤压缩短率达到40%时,变形结果与克拉苏地区盐下双重构造样式相符。

参加本项研究工作的还有文桂华硕士、胡少华硕士、张成元工程师等。

参考文献

- 1 Dahlstrom C A D. Balanced cross section. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1969, 6, 743~757
- 2 McClay K R. Glossary of thrust tectonics terms. In McClay K R editor: *Thrust Tectonics*, Chapman and Hall, London, 1992
- 3 Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 1983, 283: 684~721
- 4 Matter A and Tucker M E. *Modern and Ancient Lake Sediment*. Edited by Matter A and Tucker M E. Published by Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, 1978
- 5 王燮培, 费琦, 张家骅. 石油勘探构造分析, 中国地质大学出版社, 1990
- 6 Seni S J and Jackson M P A. Evolution of Salt Structures, East Texas Diapir Province Part 1: Sedimentary record of HaloKinesis. *AAIG*, 1983, 67(8)
- 7 Jackson M P A and Seni Steven J. Atlas of salt domes in the East Texas Basin, Report of Investigations. Bureau of Economic Geology, The University of Texas at Austin, 1984, 140
- 8 Bally A W. Seismic expression of structural style. *AAIG Study in Geology Series*, 1983, 1(15)
- 9 Lowrie A and Fairbridge R W. Role of eustasy in Holocene Mississippi delta lobe switching, extended abs.; Coastal depositional systems in the Gulf of Mexico, Quaternary framework and environmental issues, Twelfth annual research conference, Gulf Coast Section/SEPM, Program with extended and illustrated abstracts, p. 111~115
- 10 吴奇之, 王同和, 李明杰, 杨德垠. 中国油气盆地构造演化与油气聚集, 石油工业出版社, 1997

(本文编辑:冯小球)

(上接第59页)

谱图;图3b是本方法拟合剖面的频谱图。由图可知,拟合剖面的主频更高,有效频带更宽。

结 论

本文提出的时频域零炮检距地震道拟合技术,可以对地层吸收进行补偿,从而获得更高的分辨率。基于 Wiener 滤波器原理设计的时频最佳滤波器,有效地提高了拟合结果的信噪比,在分辨率和信噪比之间取得了很好的折衷。时频表示技术可以处理时变信号,从而在处理地震信号时和实际情况更吻合,处理结果更可靠。

利用本文提出的方法对实际地震资料进行了处理,效果明显,说明本方法具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 张贤达. 现代信号处理, 清华大学出版社, 1995
- 2 俞寿朋. 高分辨率地震勘探, 石油工业出版社, 1993
- 3 Oppenheim A. V, Shafer R W. *Discrete-Time signal processing*. N. J, Prentice Hall, 1989
- 4 张贤达. 时间序列分析——高阶统计量方法, 清华大学出版社, 1996
- 5 张贤达. 非平稳信号分析与处理, 国防工业出版社, 1998

(本文编辑:刘宝玉)