

准噶尔盆地南缘中段异常压力分布及影响因素

罗晓容¹, 肖立新², 李学义², 张立强¹, 曾治平¹, 王兆明¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 新疆石油管理局勘探开发研究院地球物理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011

摘要: 准噶尔盆地南缘地区盆地演化时间长, 近期构造活动剧烈, 构造应力场复杂, 地层异常压力高且分布极不规律, 对构造的形成演化及对油气的成藏过程影响极大。据实测资料和间接估算数据所展示的地层压力分布特征, 分析了砂砾岩地层和泥岩地层在压力成因和分布等方面的差异, 从不同渗透性地层内压力形成的机制和分布特征的角度讨论了控制和影响现今压力分布的地质因素。准噶尔盆地南缘存在的极高地层压力是在压实作用、构造挤压作用所形成的地层高压背景下, 叠加了近期因断裂活动和背斜构造快速形成所引起的他源高压而形成的。沉积相带分布、压实作用、构造应力、地层的形变和断裂的活动过程等都明显地影响了压力的演化和分布。

关键词: 准噶尔盆地南缘; 构造活动; 地层压力; 地质因素; 增压机制。

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2004)04-0404-09

收稿日期: 2004-03-18

Overpressure Distribution and Affecting Factors in Southern Margin of Junggar Basin

LUO Xiao-rong¹, XIAO Li-xin², LI Xue-yi², ZHANG Li-qiang¹, ZENG Zhi-ping¹, WANG Zhao-ming¹

1. Key Laboratory for Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oil, Karamary, Urumchi 830011, China

Abstract: As a part of Junggar basin, the southern margin region has received the sediments from Permian to Quaternary period. The tectonic activities, occurring intensively in the area during recent million years, cause strange tectonic stress in SN direction and result in a series of anticlines accompanied with different scales of faults. Very high overpressures, the largest one with the pressure coefficient of 2.4, are observed in the area. Pressures measured with DST/RFT methods and those estimated from acoustic logging data are used in this paper to characterize overpressure distribution in the basin. Pressuring effect of different geological factors in permeable sandy and sealing shaly formations are discussed. It indicated that the occurrence and distribution of overpressures in the southern margin have been seriously influenced by many geological factors, such as deposition facies, the tectonic stress action, deformation of sediments, as well as fractures occurrences and so on. Synthetically, the extremely high pressures encountered in the research area result from the effect of compaction caused by both the gravity and the tectonic stress, in combination with faulting that makes hydraulic connection among permeable formations, and with folding that makes the permeable formations incline.

Key words: southern margin of Junggar basin; tectonic activity; geopressure; geological factor; pressuring mechanism.

准噶尔盆地南缘是我国最早开始油气勘探的地区之一。近50年来,在此先后发现了独山子油田、齐古油田、三台油田、呼图壁气田、卡因迪克油田以及霍尔果斯背斜等多个含油气构造。1996年呼2井钻

穿安集海河组,在紫泥泉子组获得了高产工业油气流,发现了呼图壁中型天然气田,不仅确定了安集海河组下部和紫泥泉子组等新的勘探层位,而且形成了油气并举的勘探局面。近年来在四棵树凹陷西湖背斜、卡6井构造等构造上相继获得工业油气流;2002年在霍尔果斯构造霍10井成功地钻到日产三万余方的气层,进一步表明南缘地区具有良好的油气生成和聚集条件,是潜力巨大的含油气区带。

地处北天山山麓的准噶尔盆地南缘自新生代以来一直处于南北向的挤压构造环境。该区构造活动剧烈,构造应力场复杂,地层异常压力高且分布极不规则(吴晓智等,2000;曾武强等,2000),井下测得的压力系数最高可达2.4(徐国盛等,2000)。前人的研究发现,极高超压的存在与始渐新统安集海河组厚层泥岩关系密切,而且具有压力封存箱的特点(吴晓智等,2000;李忠权等,2001)。这些高压的形成既与准南缘地区上新世以来快速的沉积作用有关,也极大地受控于北天山相对北推挤而作用于沉积物上的构造应力(吴晓智等,2000;徐国盛等,2000;况军,1993)。这些极高异常压力的存在对钻井工程提出了非常高的要求。高压形成、分布及其与油气关系的复杂性和不确定性还造成人们对油气聚集成藏过程认识的分歧和疑惑。目前的勘探工作面临着高压顶界之下的地层压力分布及其控制油气聚集条件、高压区内能否形成油气藏、高压与深部油气成藏的关系、异常高压条件下油气成藏条件等问题。

本文通过对准噶尔盆地南缘地区中段地质条件及压力分布的分析,研究渗透性地层和泥岩地层在压力分布和成因等方面的差异,讨论可能的压力形成机制及影响因素。

1 地质背景

研究区位于北天山北麓的准噶尔盆地南缘(图1),北以乌伊公路、乌奇公路为界,南至北天山北麓,西抵独山子,东至乌鲁木齐,东西长约250 km,南北宽约50 km,构造分区上属准噶尔盆地南缘中段(吴晓智等,2000)。

准噶尔盆地南缘为一大型持续沉积拗陷,经历过多期构造运动的影响,发育从古生界二叠系到新生界第四系。沉积物基本由河湖相的泥岩、砂岩、砂砾岩、砾岩等碎屑岩组成,总厚达15 000 m。中新世以来,天山北翼向盆地内上冲,强烈的构造应力使得盆

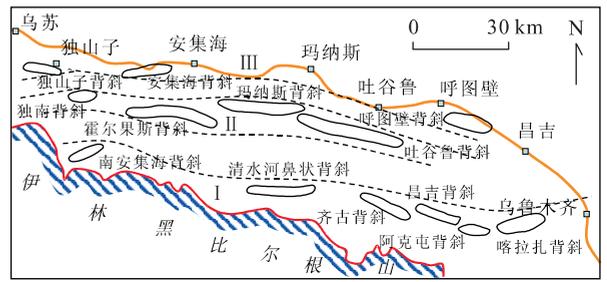


图1 研究区位置及构造分区

Fig. 1 Location and structures of research area

I. 山前推举带; II. 第二排背斜带; III. 第三排背斜带

地南缘沉积地层发生断裂及相关的褶皱变形,渐次形成三排背斜带及其间的宽缓向斜带(图1),并在挤压过程中派生出扭动现象和重力滑脱现象,形成不同构造尺度的三维复杂结构体(况军,1993)。地应力作用在区内表现异常活跃,最大主应力方向往往与现今构造形迹轴线相垂直(邓起东等,2000)。由同一构造纵向上地应力变化趋势反映出构造变形由东向西依次加强,具有明显的挤压扭动特征(吴晓智等,2000)。

第一排背斜带亦称南缘山前推举构造带,近东西走向,主要出露侏罗系、白垩系。背斜南翼往往被一系列叠瓦状推覆所破坏,二叠系、三叠系覆盖在侏罗系上。侏罗系和白垩系多构成长条形断层相关褶皱,因天山构造带的强烈推挤,地层抬升剥蚀严重,所残留者多为北翼发育的次级褶皱构造(图2)。

第二排背斜带主要包括霍尔果斯背斜、玛纳斯背斜、吐谷鲁背斜。其构造特征表现为紧密线型,南翼缓而北翼陡,局部出现倒转现象,背斜轴部出露第三系(图2)。一延伸长、横向位移量大的推覆滑脱逆冲断裂切过3个背斜的南翼。该断层基本沿安集海河组滑脱层移动,在背斜轴部附近逆冲出地表,并伴生形成倾角较大的次级断裂,破坏了浅部构造的完整性。而滑脱层以下褶皱形态完整,上下构造表现为明显的不协调构造,层次分明。从上第三系的展布分析,背斜轴部地层曾遭受剥蚀,独山子组底界与背斜构造范围外的地区相比,厚度相差近2 300~2 500 m(图2)。

呼图壁背斜、安集海背斜及呼西背斜同属第三排背斜带。这些背斜基本为一东西向长轴背斜,北翼陡、南翼缓。背斜轴部遭受剥蚀,上第三系独山子组直接出露地表,而在背斜翼部及背斜范围以外,独山子组及上覆第四系厚度较大,厚度差值超过2 200 m

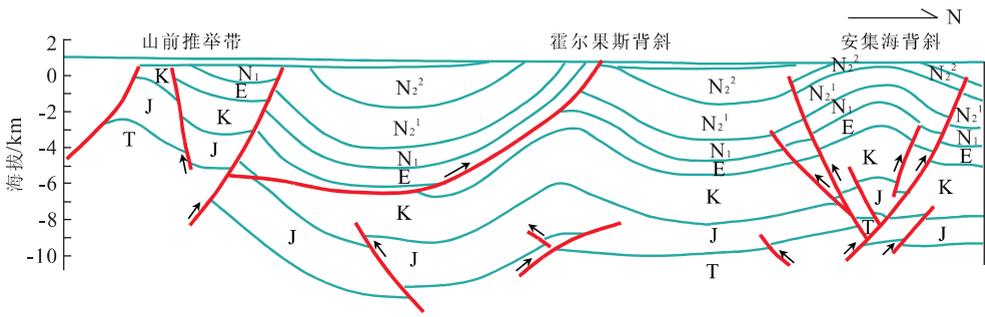


图 2 准噶尔盆地南缘典型地质剖面显示出三排构造带的特征(吴晓智等,2000)

Fig. 2 A typical geological section in NS direction, showing the tectonic characteristics of three structure zones (Wu et al., 2000)

(图 2). 安集海背斜两翼被数条向轴倾斜的逆断层分割成上、下 2 个断垒构造. 断层上陡下缓, 近东西走向, 均未切穿独山子组(图 2).

DST 测试需要在测试过程中等待地层基本恢复与井筒间的压力平衡, 测试时间较长, 一般只在部分试油过程中才进行测量. 因而这种资料数据比较少, 单凭这种数据往往很难系统获得对地层压力分布特征的认识. RFT 资料的测试相对简单, 在井筒条件允许的条件下可以系统测试, 获得较多的资料. 但这种测试所受井下影响较多(常子恒, 2001), 特别在地层渗透性较差或探测头与井壁的接触不好的条件下, 所测得的压力不能反映实际地层压力. 为此, 我们特意采用同井中资料对 2 种实测压力进行了对比(图 3). 结果显示, 在研究区中 2 种压力测试结果吻合程度良好, RFT 资料都比较可靠.

2 压力的分布

在各种可能的地层压力估测方法中, 以通过钻井内各种资料直接或间接获得的地层流体压力最为常见也最为可靠. 在我们的研究中, 渗透性地层内的压力取自钻井试油过程中的钻杆测试(DST)结果和重复地层压力测试(RFT)资料; 而泥质岩层内的压力则通过对泥质岩压实作用的研究, 按照平衡深度法估算(Fertl, 1976; Magara, 1978).

图 3 中的压力剖面反映出准噶尔盆地南缘高异常压力普遍, 压力分布复杂. 除独山子及以西地区, 一般在上第三系内未测到异常高压. 在独山子构造上沙湾组内异常压力普遍, 一般超压幅度不大; 不同

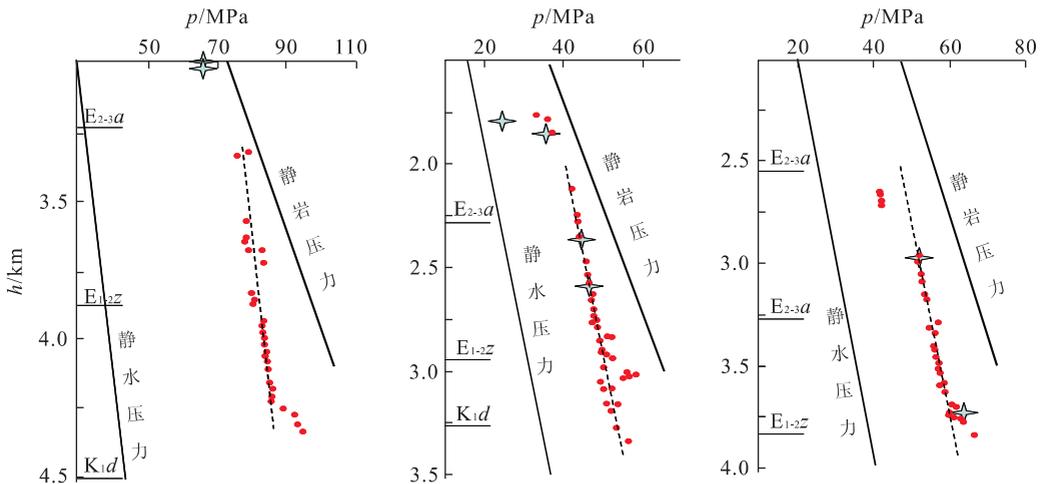


图 3 淮南缘部分井中测得的地层压力

Fig. 3 Measured pressures from some boreholes in the south margin of Junggar basin

实心小圆点为 RFT 测点, 星形符号为 DST 测点

井内测得的压力大小不同,明显未构成统一的压力动力系统。向下,许多井在安集海河组下部—紫泥泉子组内都测到了较高的地层压力,每个构造上在安集海河组下部—紫泥泉子组层段范围内压力基本上随深度沿静水压力梯度增加,反映了流体在该层段内基本连通,构造一个统一的压力系统。但各个构造之间过剩压力相差较大,未构成一个全区的压力系统。部分深井中的实测压力显示(图 3),紫泥泉子组下部一直到上白垩统东沟组,测得的压力已明显偏离安集海河组下部—紫泥泉子组层段内压力随深度增加的趋势,似乎构成了一个过剩压力更高的系统。

三排构造的压力分布存在明显的差异,总体趋势上是西高东低,第三排压力大于第二排,第二排大于第一排。在紧靠天山的第一排构造上测得的压力普遍较低,由于上新世以来强烈的抬升剥蚀,中生界直接出露地表,正常压实段很难划分,泥质岩内的压力估算也就无法给出。同属第二排构造的玛纳斯背斜和吐谷鲁背斜在安集海河组下部地层内测得的过剩压力基本相同,但霍尔果斯背斜上测得的地层压力非常高,在 3 070 m 深度用 DST 方法测得 74.5 MPa 的地层压力,过剩压力为 44.0 MPa。第三排构造的安集海背斜在安 6 井安集海河组下部地层内用 RFT 方法测得的压力系数为 2.4,对应的过剩压力为 43.0~46.7 MPa。而在其东边的呼图壁背斜

上,安集海河组下部及以下地层内的压力接近静水压力(图 3,4)。

从实测压力考虑,目前独山子、独南等构造未测量压力,山前推举带只在齐古油田有一些压力资料,压力系数均小于 1.3;在北小渠子小 3 井中在侏罗系地层内测得一个压力系数为 1.6 的压力值。说明第一排构造带上仍有异常高压存在,但由于剥蚀较为严重,剩余的异常高压取决于各个构造的地质条件,各构造之间不相通。霍尔果斯构造和安集海构造上在安集海河组—紫泥泉子组层系内测得的压力相差不大,可能是 2 种测量方法造成的误差,可以认为两构造属于同一压力系统。第二排构造中玛纳斯构造和吐谷鲁构造上测得的过剩压力系统,应属于同一个压力系统。呼图壁为第三排构造,在沙湾组内测得了压力系数 1.1~1.3 的低幅度异常高压;但在安集海河组—紫泥泉子组层系内测得的压力均为静水压力,表现出与研究区其他构造天波能够的压力分布。

对于泥质岩中压力的求取采用间接估算的方法。首先应用伽玛、电阻率和声波时差测井曲线划分泥岩段,在厚度相对较大、含砂量较少的泥岩层中按一定的间距读取声波时差值;以深度为纵坐标、声波时差的对数为横坐标,制作泥岩压实趋势图(图 4);在考虑地层特征、不整合面和断层位置等条件下拟合确定正常压实趋势线;采用平衡深度法估算地层压力。

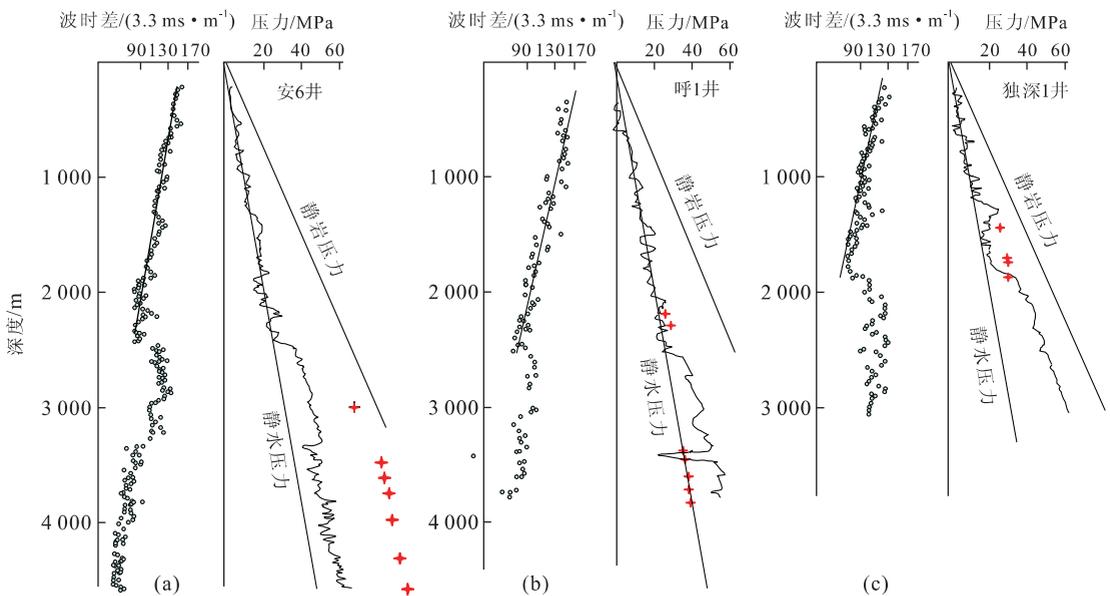


图 4 准噶尔盆地南缘代表性井中的压实曲线及压力纵向分布

Fig. 4 Compaction curves and pressure distribution in some representative profiles from boreholes in south margin of Junggar basin

图 4 给出了研究区部分钻井中的泥岩压实曲线和压力剖面. 各组图中左侧为内泥质岩压实曲线, 右侧图中曲折的实线为利用平衡深度法估算的压力, 星形符号则代表了渗透性地层内的钻杆测试(DST)压力, 圆点符号表示重复地层测试(RFT)压力.

泥岩内异常高压的出现往往与区域上大段厚泥岩层有关, 特别是在安集海河组上部. 但安集海河组及紫泥泉子组泥岩层内的过剩压力的幅度并不太高——压力系数大约为 1.5~1.7. 若将同一口井内砂岩层内的实测压力与由压实曲线计算的相邻泥岩层内压力加以对照, 可以发现两者间存在相当大的差异(图 4), 前者往往比后者高.

砂岩层内纵向上压力的分布也很不一致. 一般, 泥岩中压力起伏较大, 主要受泥岩性质控制; 而在砂岩中压力分布较有规律, 主要受区域性重要的泥岩盖层所分隔的压力系统的控制. 安集海河组以上的沙湾组内压力异常较小, 压力分布往往不规律(图 4). 砂岩层内压力在安集海河组下部和紫泥泉子组构成了高异常压力系统, 其内压力按静水压力梯度随深度增加(图 3, 4); 部分深井中的实测压力反映出白垩系东沟组(可能还包括其下伏吐谷鲁群)地层内存在压力更高的压力系统(图 3). 这与通常认识到的砂岩层内的异常压力主要来自相邻泥岩的传递、两者间压力基本保持一致的模型(Magara, 1978)不同. 这种压力的分布特征似乎表明, 该系统内砂岩地层压力不仅得自于相邻泥岩的传递, 而且有其他更为有效的增压机制的作用.

3 影响异常高压系统的地质因素

研究区盆地演化时间长, 经历的盆地演化阶段多, 而自上新世以来的因南北向强烈的构造挤压在盆地内形成最大主应力水平的应力场(吴晓智等, 2000)、山前大幅度的抬升剥蚀、大规模的断裂活动和与之相关的强烈褶皱变形(吴晓智等, 1994; 况军和刘得光, 2001). 这些地质过程和现象都不可避免地会对地层内的流体压力的分布和演化产生影响.

3.1 沉积相分布

淮南缘盆地自形成以来一直处于持续活动的天山造山带的边缘. 尽管盆地的类型不断变化(陈新和卢华复, 2003): 从二叠纪的周缘前陆盆地阶段(P), 到中生代的陆内拗陷阶段(T-E1), 再到晚新生代的再生前陆盆地(N-Q)阶段, 盆地沉积沉降的基本面貌都是南厚北薄, 以河湖相沉积物为主, 夹有大量的洪积扇体堆积. 物源基本来自南边的天山. 以冲积扇、河流、三角洲等相带为主的粗粒碎屑岩层沿天山山前形成多个扇状体, 其间是细粒的湖相沉积. 这些扇状体的展布特征在很大程度上限制了异常压力的分布范围, 也多少决定了压力分布的特征.

对于目前钻井实测资料较多的安集海河组—紫泥泉子组流体压力系统, 淮南缘中段至少存在 4 个主要的物源及与之相关的沉积体系(图 5). 它们由西向东分别对应于现今的奎屯河系、安集海河系、玛纳斯河系和呼图壁河系. 淮南缘中段几个安集海河组—紫泥泉子组压力系统在空间上的分布大致与这

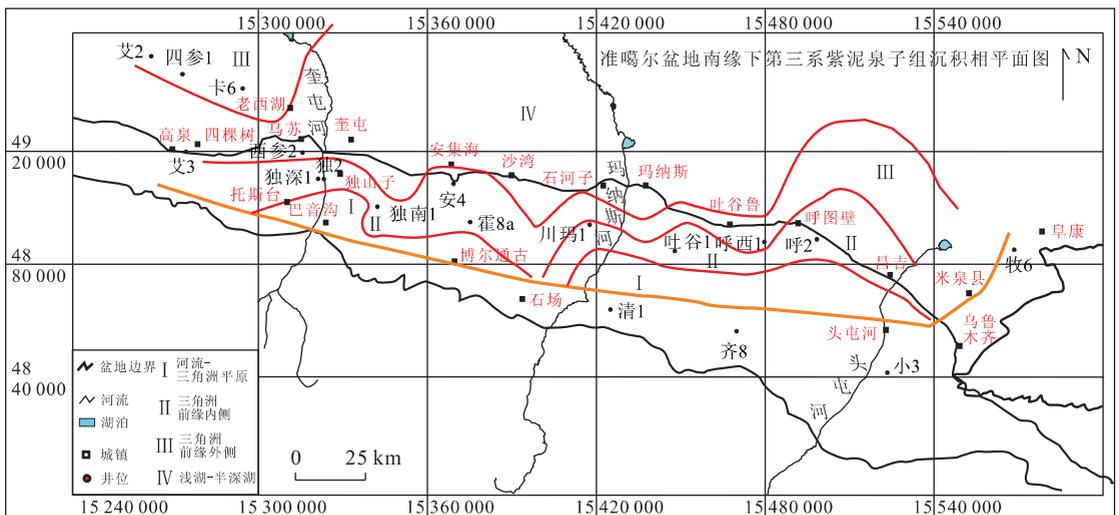


图 5 准噶尔盆地南缘紫泥泉子组沉积相分布

Fig. 5 Facies of Ziniquanzi Formation in south margin of Junggar basin

些扇状粗粒岩层的沉积有关,分别对应于前述的独山子—独南、霍尔果斯—安集海、玛纳斯—吐鲁鲁及呼图壁异常流体压力系统。

3.2 压实作用

压实作用始终是沉积盆地内最重要、最持久的增压机制(Magara, 1978)。这种机制起作用的条件基本可归结为2个方面的地质因素:具有一定厚度的低渗透性地层以及相对快速的上覆负荷沉积(Audet and McConnell, 1992)。

研究区长期的盆地沉积过程中形成了一系列由泥质沉积物构成的区域性低渗透性地层。其中对于目前在钻井中钻遇高压的层段,主要有上第三系塔西河组、下第三系安集海河组、下白垩统吐鲁鲁群的杂色泥岩段、中下侏罗统的湖相泥岩等。这些地层多为湖相沉积,分布范围广,沉积厚度大,往往构成区域上的油气运聚成藏盖层(房德权等, 1999)(图3)。

在淮南缘中段,安集海河组—紫泥泉子组发育大套绿灰、灰绿色、棕色、棕褐色泥岩层,岩石颗粒细、粘土矿物含量高,构成了非常有效的异常压力形成环境。在淮南缘地区,异常压力带的顶界基本上为安集海河组的顶界,到独山子以西,才在塔西河组内产生一定程度的异常压力,但分布不稳定、异常幅度小。塔西河组之下的沙湾组砂岩层内一般压力不大。独山子构造上在各井内压力大小不一,反映在此构造上储层之间流通性较差,各个小砂体被泥岩或胶结带封隔(图3)。

压实作用对于地层压力产生和增加起作用的另一方面是上覆沉积物的沉积速度。在研究区内,钻井一般都设计在各构造的轴部高点,多为上新世以来持续抬升、遭受剥蚀的位置。剥蚀的厚度在三排构造带上自南而北渐次减小。在第一排构造带上中生界直接出露地表,由向斜部位上新统以下地层的厚度估算,剥蚀厚度在2 000~3 000 m之间。由地震剖面上看(图2),第二排构造和第三排构造与期间向斜地层的厚度及地层形态、估计的剥蚀厚度分别在1 500~500 m之间。剥蚀作用可以看作是负向的沉积作用,其结果使得下伏地层内已存在的异常压力较小,并可能在适当的条件下造成负压(Luo and Vasseur, 1995)。

但与构造轴部的剥蚀作用对应,研究区构造之间的向斜带一直保持快速沉积的趋势,自上新世以来沉积速度非常快,约在400~600 m/Ma之间(图2)。分析结果表明,在第四纪应该达到最大的沉积速

度,如在独南1井,第四系快速堆积物的厚度竟达1 744 m。但第四系沉积物大都是山前洪积堆积,在盆地内的分布极不均一。正是在这样快速的沉积条件下,淮南缘地区在安集海河组等细粒岩层中较早地产生了异常压力,使得安集海河组内的高压基本不受埋藏深度的控制。由于盆地内上新世以来接受沉积的范围远大于各构造轴部接受剥蚀的范围,快速沉积作用造成的异常压力增量通过渗透性地层传递到背斜轴部,不仅弥补了因剥蚀作用造成的压力降低,还形成了通过渗透性地层的连通作用而引起的他源高压(罗晓容等, 2000)。其作用的方式和机理在下面讨论。

3.3 构造应力的增压作用

尽管构造应力作用一直被认为是一种非常重要的超压机制(Fertl, 1976; Magara, 1978; Bethke, 1986; Osborne and Swarbrick, 1997),但目前人们对这种异常压力机制研究还很不深入,还停留在定性描述和估算的水平。罗晓容(2004)利用数值盆地模型模拟了对构造应力直接作用于沉积地层之上对地层压力的影响。他们发现,在地层完全封闭条件下作用于地层的构造应力的30%~50%可转化为地层流体压力;随构造压力的增加,整个地层岩石柱的重量因孔隙度整体的减小而增加,平均的上覆静岩压力系数可达2.4以上;而随地层异常流体压力的增加,地层孔隙度相对增加,表明构造应力对沉积地层作用的方式与重力相似,是一种侧向上的压实作用。

在天山山前观察到的野外地质及地貌现象都反映出现代构造应力场以近南北向的挤压为基本特征(邓起东等, 2000)。淮南缘最大主应力方向基本为南北方向,略偏北北东方向($1^{\circ}\sim 15^{\circ}$),仰角一般小于 25° ,接近水平;中等主应力为垂直向,最小主应力近于水平(吴晓智等, 2000; Nelson *et al.*, 1987)。

通过对中国西部地壳块体侧向移动和青藏高原的隆升研究表明,中国西部受印度板块的碰撞和向北挤压的过程中,构造应力向北的传递随时间逐渐增加,到目前应为最大(丁国瑜, 1991; 钟达赉和丁林, 1996; 邓起东等, 2000)。徐国盛等(2000)利用有限元方法对研究区地史时期构造应力场进行模拟计算,并根据国家地震局地壳应力研究成果进行标定。他们得出构造应力随深度的变化可按 $p=16.5+0.011H$ 的关系估算,其中 H 为深度(m), p 的单位为MPa。

但从已钻井中获得的泥岩压实曲线及换算的地

层压力来看,这种由压实作用(包括重力和构造应力)所能在安集海河组及紫泥泉子组泥岩地层形成的异常压力的系数一般不超过 1.8(图 3),不可能造成安集海构造砂岩中测得的极高压。后者的形成必然有其他的地质作用和增压机制。

3.4 褶皱的形成

在构造的轴部较为严重的剥蚀作用应该导致地层压力的快速降低(Neuzil and Pollock, 1983; Luo and Vasseur, 1997)。但研究区钻井内实测的压力却反映出非常高的地层压力。能够解释这种压力分布的一种可能机制是渗透性地层在侧向上的连通作用(Yardley and Swarbrick, 2000)。这种超压起因于所观察的渗透性地层具有一定的倾斜度,并在侧向上有较大距离的延伸。在其上倾方向上具备了良好的水动力封闭条件而在下倾方向上地层延伸到高超压带内。在此情况下,该地层不同的部位都接受其相邻超压泥质岩的压力和流体传递。但在不同的部位,由于相邻泥质岩内的过剩压力梯度不相同,所传递的压力的大小也不一致;而在渗透性地层内,较高的水动力传导能力使得其间不同部位接受的原本差异较大的超压很快调整,在该地层内达到平衡,具有相同的过剩压力。这样,在浅部的地层层段就具有更高的压力系数,显示出更高的超压。

在研究区,褶皱是地层形变的重要形式。褶皱作用的结果对于地层压力变化而言主要表现在 2 个方面:褶皱造成上覆负荷在水平方向上的不均匀变化,地层压力形成条件在侧向上不同;褶皱还使得地层的埋深在侧向上发生起伏变化,同一渗透性地层在不同的深度与具不同过剩压力的地层接触,渗透性地层内发生流体压力及流体的侧向传递(罗晓容等, 2000; Yardley and Swarbrick, 2000)。

因为压力沿着倾斜的渗透性地层侧向传递,砂泥岩层压力间的关系在不同的构造位置有所不同。在背斜翼部及水平段,泥岩层内先形成高压,并不断向砂岩层内传递,而在背斜的轴部,砂岩层内因压力的侧向传递而先形成高压,然后向相邻的泥岩层内传递。

3.5 断裂的开启

断裂也是研究区常见的构造现象(图 2),其形成速度快,涉及的深度范围可以很大,有可能将不同压力系统的地层在水动力上联系起来。当开启断裂所连通的地层内超压程度不同时,这些地层间的流体压力就迅速调整,达到平衡,构成新的压力系统。这时在系统内各渗透性地层过剩压力完全一致,地

层压力以静水压力梯度随深度增加,但压力系数则在浅部的地层中最大(罗晓容等, 2000)。

由上述对模拟结果的分析可知,对于与开启断裂连通的浅部地层而言,渗透性地层内异常压力的形成是由于与过剩压力(流体势能)更高的渗透地层发生水动力连通而实现的。整个压力系统内的超压源自深部地层,只要断裂连通的深部地层的总体积足够大,浅部地层本身所产生和维持的超压并不需要很高。在这种异常压力形成过程中,渗透性地层周围的泥岩地层往往只起到阻隔封闭流体的作用,砂岩内的压力往往相对较高。这种浅部渗透性地层内极高异常压力形成的机制合理地解释了在霍尔果斯和安集海构造上观察到的压力系数高达 2.4,而且与这些高压层相邻的泥质岩层估算的地层压力系数只有 1.7 和更少的事实(图 4a, 4b)。

当开启的断裂穿过了压力系统的封盖层,同样,系统内的高压将与其他系统间发生流体的流动和压力的平衡。当外部系统为承压水系统,即地层压力保持为静水压力,则无论系统内原先压力是多少,都将变为静水压力。呼图壁构造上压力产生的条件与安集海构造相似,但由于断裂的作用,安集海河组泥岩地层之下实测的地层压力均为静水压力,而安集海河组泥岩本身仍具有明显的欠压实现象(图 4e)。由于地下压力场在三维空间上分布,这种破坏原先压力系统特征的断裂不一定能在一两条地质剖面上看出来,也不一定破坏该构造上油气圈闭的完整性。

3.6 其他可能的增压作用

前人曾讨论过淮南缘异常压力的成因,除压实作用和构造应力外,曾提出的增压机制还有水热增压作用、烃类生成作用和蒙脱石向伊利石转化过程中的脱水作用等(况军, 1993; 徐国盛等, 2000)。

在研究区,第一排构造上中生界直接出露地表,但地层压力已因近期大规模的剥蚀作用而散失,讨论各种增压作用的贡献已无意义。在第二、三排构造上,钻井可达到的安—紫(安集海河组+紫泥泉子组)高异常压力系统范围内,可能烃源岩地层的有机质演化成熟度都不太高,镜煤反射率高者不过 1.12%,基本上处于低—中高成熟度。在这种有机质成熟度条件下,有机质基本不能裂解成气。而中下侏罗统煤系中有机质发生高温裂解过程中肯定会对地层压力起重要作用,但因白垩系吐谷鲁群钙质泥岩良好的封闭作用,这种增压过程似乎不会直接造成安集海河组—紫泥泉子组压力系统内压力的增加。

Shi and Wang(1986)、Luo and Vasseur(1992)等曾利用数值模型定量讨论过泥质岩中水热增压机制的效率,他们都认为在上部地壳的绝大多数地质条件下这种超压生成机制的效率非常微弱。Bethke(1986)也曾定量分析过蒙脱石向伊利石转化过程中的脱水作用对地层压力的作用效率,其结果表明这种增压作用与压实作用比起来,基本上可忽略不计。而硬石膏—石膏的相变及地层水的渗析作用等可能的增压机制比起上述作用增压效率更低,一般不在压力机制的分析中讨论(Magara, 1978)。

4 讨论与结论

在碎屑岩沉积盆地中,渗透性砂岩颗粒强度较大,在其主要的压实作用阶段渗透性较好,不易产生异常压力;而在其成岩作用后期岩石的可压缩性很小,形成异常压力的主要作用—压实作用—的效应很低(Magara, 1978)。渗透性砂岩层中的异常压力一般来自于邻近异常高压泥质岩层的压力传递(Fertl, 1976; Magara, 1978; Osborne and Swarbrick, 1997)。但当构造应力使得地层发生形变和断裂,渗透性好的砂质岩地层内部及各原本相互独立的砂岩体间将产生流体的流动和压力的调整,从而形成复杂的压力分布状态,在很多情况下砂岩内的压力将明显高于其互层泥岩。

准噶尔盆地南缘中生界地层中广泛分布的高异常压力与新生代以来,特别是第四纪以来,盆地与北天山构造带间相对挤压而引起的构造应力及相应的构造活动关系密切。准噶尔盆地南缘钻井过程中所发现的压力系数达2.4的极高地层压力是在压实作用、构造挤压作用所形成的高地层压力背景下,叠加了近期因断裂活动和背斜构造快速形成所引起的他源高压而形成的。

单纯的压实作用是异常压力得以形成的基础,但其造成的压力相对较小,压力系数一般不超过1.6。对于压力的演化,构造应力起着与压实作用相似的作用并带来一些沉积物物理性质的变化,如岩石密度增加、压实趋势变化、压实强度增加等。

开启断裂的发生沟通了原先具不同异常压力特征的地层,极大地改变了地下流体的动力学环境。他源高压起因于目前或近期(地质时间)开启的断裂,连通了上下原为水动力封隔层所分隔的渗透性地层。断裂造成了始—渐新统安集海河组厚层泥岩以

下安集海河组下部—紫泥泉子组渗透性砂岩层间的相互连通。在各个构造上,这些层段内构成了统一的压力系统;但各构造之间并不完全连通。

背斜的形成不仅造成地层在侧向上的差异沉积或剥蚀,还造成渗透性地层在侧向上接受来自相邻泥岩流体和压力条件的差异,从而形成异常压力在该渗透性地层内的侧向传递和调整,可极大地改变地层压力分布的形式。这也是研究区极高异常流体压力产生的主要原因。

References

- Audet, D. M., McConnell, J. D. C., 1992. Forward modelling of porosity and pore pressure evolution in sedimentary basins. *Basin Research*, 4: 147—162.
- Bethke, C. M., 1986. Inverse hydrologic analysis of the distribution and origin of gulf coast-type geopressed zones. *J. Geophys. Res.*, 91: 6535—6545.
- Chang, Z. H., 2001. Techniques for petroleum exploration and development. Petroleum Industry Press, Beijing, 1316 (in Chinese).
- Chen, X., Lu, H. F., 2003. The new developments of petroleum exploration in the Junggar basin. Xinjiang Scientific Press, Urumchi (in Chinese).
- Deng, Q. D., Feng, X. Y., Zhang, P. Z., et al., 2000. Active tectonics of the Tianshan Mountains. Seismology Press, Beijing, 1—399 (in Chinese).
- Ding, G. Y., 1991. Lithospheric dynamics of China. Seismology Press, Beijing, 1—600 (in Chinese).
- Fang, D. Q., Song, Y., Xia, X. Y., 1999. Effectiveness of natural gas seals in the western part of the southern fringe of the Junggar basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 21(2): 137—140 (in Chinese with English abstract).
- Fertl, W. H., 1976. Abnormal formation pressure: Implication to exploration, drilling, and production of oil and gas reservoirs. Elsevier, Amsterdam, 1—382.
- Kuang, J., 1993. The superpressure mud seams in the southern margin of the Junggar basin and their significance in structure geology. *Petroleum Geology and Experiment*, 15(2): 168—173 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, J., Liu, D. G., 2001. Comparative analysis on natural gas reservoir-formation conditions between south margin of Junggar basin and Kuche depression of Tarim basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 22(4): 287—290 (in Chinese).
- Li, Z. Q., Chen, G. S., Guo, J. Y., et al., 2001. Basic geologic

- characters of the abnormal formation overpressure in the western part of southern fringe of Junggar basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 23(1): 47—51 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. R., Vasseur, G., 1992. Contributions of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environment conditions. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 76: 1550—1559.
- Luo, X. R., Vasseur, G., 1995. Modelling of pore pressure evolution associated with sedimentation and uplift in sedimentary basins. *Basin Research*, 7: 35—52.
- Luo, X. R., Vasseur, G., 1997. Sealing efficiency of shales. *Terra Nova*, 9: 71—74.
- Luo, X. R., Yang, J. H., Wang, Z. F., 2000. The overpressuring mechanisms in aquifers and pressure prediction in basins. *Geological Review*, 46: 6—10 (in Chinese with English abstract).
- Luo, X. R., 2004. Quantitative analysis on overpressuring affected by tectonic stress. *Chinese Journal of Geophysics* (in press) (in Chinese with English abstract).
- Magara, K., 1978. Compaction and fluid migration: practical petroleum geology. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1—319.
- Nelson, M. R., McCaffey, R., Molnar, P., 1987. Source parameters for 11 earthquakes in the Tianshan region. *J. Geophys. Res.*, 92: 12629—12648.
- Neuzil, C. E., Pollock, D. W., 1983. Erosional unloading and fluid pressures in hydraulically "tight" rocks. *J. Geol.*, 91: 179—193.
- Osborne, M. J., Swarbrick, R. E., 1997. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: A reevaluation. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 81: 1023—1041.
- Shi, Y. L., Wang, C. Y., 1986. Pore pressure generation in sedimentary basins: Overloading versus aquathermal. *Journal of Geophysical Research*, 91: 2153—2162.
- Wu, X. Z., Wang, L. H., Song, Z. L., 2000. The Relations between structural stress field and hydrocarbon migration and accumulation in south margin of Junggar basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 21(2): 97—100 (in Chinese).
- Wu, X. Z., Wang, L. H., Xu, C. L., 1994. The structure characteristics and prospects for hydrocarbon exploration in Qigu-Xiaoquzi area in southern margin of Junggar basin. *Petroleum Exploration & Development*, 21(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. S., Kuang, J. C., Li, J. L., 2000. Research on the genesis of abnormal high pressure in the forland basin to the north Tianshan. *J. Chengdu University of Technology*, 27(3): 255—262 (in Chinese with English abstract).
- Yardley, G. S., Swarbrick, R. E., 2000. Lateral transfer: A source of additional overpressure? *Marine and Petroleum Geology*, 17: 523—537.
- Zeng, W. Q., Zheng, J. H., Feng, C. L., et al., 2000. The drilling technics used in highly difficult deep boreholes on pre-mountain structures in the South Margin of the Zhungaer basin. *Natural Gas Industry*, 20(1): 44—47 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, D. L., Ding, L., 1996. Raising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its mechanism. *Sci. China (Series D)*, 39: 369—379.

附中文参考文献

- 常子恒, 2001. 石油勘探开发技术. 北京: 石油工业出版社, 1316.
- 陈新, 卢华复, 2003. 准噶尔盆地油气勘探研究新进展. 乌鲁木齐: 新疆科学出版社.
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等, 2000. 天山活动构造. 地震出版社, 北京, 1—399.
- 丁国瑜, 1991. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1—600.
- 房德权, 宋岩, 夏新宇, 1999. 准噶尔盆地南缘西部天然气封盖层的有效性. *石油实验地质*, 21(2): 137—140.
- 况军, 1993. 准噶尔盆地南缘超压泥岩层及其构造意义. *石油实验地质*, 15(2): 168—173.
- 况军, 刘得光, 2001. 准噶尔盆地南缘与塔里木盆地库车坳陷天然气成藏条件对比. *新疆石油地质*, 22(4): 287—290.
- 李忠权, 陈更生, 郭冀义, 等, 2001. 准噶尔盆地南缘西部地层异常高压基本地质特征. *石油实验地质*, 23(1): 47—51.
- 罗晓容, 杨计海, 王振峰, 2000. 盆地内渗透性地层超压形成机制及钻前压力预测. *地质论评*, 46(1): 22—31.
- 罗晓容, 2004. 构造应力对盆地超压作用的模拟分析. *地球物理学报* (待刊).
- 吴晓智, 王立宏, 宋志理, 2000. 准噶尔盆地南缘构造应力场与油气运聚的关系. *新疆石油地质*, 21(2): 97—100.
- 吴晓智, 王立宏, 徐春丽, 1994. 准噶尔盆地南缘齐古—小渠子构造特征及油气勘探远景. *石油勘探与开发*, 21(1): 1—7.
- 徐国盛, 匡建超, 李建林, 2000. 天山北侧前陆盆地异常高压成因研究. *成都理工大学学报*, 27(3): 255—262.
- 曾武强, 郑基恒, 冯才立, 等, 2000. 准噶尔盆地南缘山前构造高难度深井钻井工艺技术. *天然气工业*, 20(1): 44—47.
- 钟达贵, 丁林, 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. *中国科学(D辑)*, 28(4): 289—295.