

准噶尔盆地腹部地层压力异常特征与控制因素

吴海生,郑孟林,何文军,杨彤远,陈磊,郭建辰,杨翼波
(中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000)

摘要:应用钻井地层压力实测资料、测录井资料和地震速度资料等,结合盆地地层沉积结构分析,对准噶尔盆地腹部地区地层超压异常的横、纵向空间分布特征及其成因控制因素进行综合研究。研究表明:1)超压异常在盆地腹部地区普遍存在,其出现的顶界面具有穿层性,整体具有向西北方向超压顶面埋深变浅、向凹陷内埋藏变深的特点;超压顶面在莫索湾地区为侏罗系三工河组,顶面埋深在4 400 m左右,向西到夏盐-达巴松和玛湖地区超压顶面为三叠系,埋深在3 500 m左右,在莫南凸起的永进油田超压顶面在白垩系底部,埋深在5 800 m左右。2)莫索湾地区的侏罗系以下地层都存在超压异常,侏罗系的异常压力值最高,在二叠系-石炭系有所降低;同时,根据压力系数结构剖面特征分析,将超压异常划分为两种类型。3)分析盆地腹部超压异常的空间特征,认为不同层系、不同构造位置的超压异常形成具有不同的控制因素。

关键词:地层压力结构;压力异常成因;超压异常;准噶尔盆地腹部

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Formation pressure anomalies and controlling factors in central Juggar Basin

Wu Haishen, Zheng Menglin, He Wenjun, Yang Tongyuan, Chen Lei, Guo Jianchen, Yang Yibo

(Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina Xinjiang Oil Company, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: Formation pressure measurements and logging and seismic data were combined with basin sedimentary texture to analyze the spatial distribution of formation overpressure and its controlling factors. The results show that 1) overpressure zone is widely distributed in the central part of the basin. It has a diachronous top surface, shallows overall in NW direction and deepens toward the centre of the sag. In Mosuwan area, the top surface of the overpressure zone corresponds to the Jurassic Sangonghe Formation and has a burial depth of about 4 400 m. In Xiayan-Dabasong and the Mahu areas to the west, it corresponds to the Triassic and shallows to 3 500 m. In an oil field called Yongjin in Munan uplift, it corresponds to the bottom of the Cretaceous and deepens to about 5 800 m. 2) Overpressure can be observed in layers at and below the Jurassic in Mosuwan area with the highest values measured in the Jurassic and some lower values measured in the Permian - Carboniferous. Two types of overpressure are classified based on profile characteristics of pressure coefficient structure. 3) Spatial characteristics of the overpressure anomalies in central Basin reveal the roles of different controlling factors upon the forming of overpressure in different tectonic locations in the basin.

Key words: formation pressure structure; pressure anomaly genesis; overpressure anomaly; central Juggar basin.

准噶尔盆地是石炭纪以来的多期叠合盆地,盆地不同地区的不同层系存在不同程度的地层压力异常。盆地腹部地区的钻井普遍钻遇明显超压地层,分布于白垩系、侏罗系、三叠系、二叠系和石炭系等不同的层位。盆地南缘古近系的压力异常受安集海河组顶面的控制^[1],可能与前陆盆地的膏泥岩欠压实及挤压应力有关^[2-3];盆地西北部的玛湖凹陷三叠系及其以

下中-深部地层异常高压发育^[4],认识还需要进一步深化。盆地油气勘探实践证实,异常高压分布区往往是油气成藏有利区^[5],也是油气高产区。因此,前人对准噶尔盆地超压异常特征、形成机理及对油气的控制作用等方面做了许多研究^[1,4,6-16],取得了丰富的成果,推动了盆地的油气勘探。限于盆地腹部的钻探主要在侏罗系,对盆地腹部超压异常的研究多集中在侏

收稿日期:2016-05-06;修订日期:2017-11-07。

第一作者简介:吴海生(1968—),男,高级工程师,地震资料解释、储层预测、压力预测。E-mail:wuhaisheng@petrochina.com.cn。

通讯作者简介:郑孟林(1968—),男,教授级高级工程师,盆地构造。E-mail:zhengml@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05008006-003-001,2017ZX05001-004);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239002)。

罗系的超压异常带^[7-11],而对三叠系^[4]及以下层系的超压异常研究很少。相关研究涉及了异常高压分布特征、成因与机理,异常高压与碳酸盐 and 胶结物含量的关系,以及超压与油气分布和油气成藏等。近年来,随着油田公司在准噶尔盆地腹部实施钻井数量的增加,特别是多口深井的钻探,不仅揭示了腹部的石炭系和二叠系,也为研究腹部地区深层压力结构提供了实测数据,为详细刻画超压异常空间分布提供了基础资料。本文根据准噶尔盆地的勘探研究现状,以盆地腹部为研究区,应用钻井、测井、地震和试油等资料对超压异常的纵、横向变化特征以及压力结构类型及其形成的控制因素等进行了深化研究。研究区涵盖了中央坳陷的莫索湾凸起、莫南凸起、达巴松凸起、阜康凹陷的中西部、盆1井西凹陷、沙湾凹陷东北部及玛湖凹陷等地区(图1)。

1 地质背景

准噶尔盆地位于新疆北部,盆地周缘被北天山造山带、西准噶尔造山带及东准噶尔造山带(克拉美丽造山带)所围限,盆地面积约 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$,为赋存于拼合地块之上的多期叠合盆地^[17]。盆地地层发育齐全,自下而上存在石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及新生界,发育二叠系、侏罗系等多套烃源岩层系,油气资源丰富,是中国西部重要的富油气盆地。

盆地地层自下而上可划分为4套岩性组合:一套为石炭系一下二叠统佳木河组的火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩组合,包括安山岩、玄武岩、辉绿岩、凝灰岩及火山碎屑岩夹砂、泥岩;第二套岩性组合为下二叠统风城组一中二叠统下乌尔禾组,为一套碎屑岩、湖相碳酸盐岩组合,主要有砾岩、砂岩、泥岩、含膏泥岩、泥质白云岩、白云质泥岩、砂质白云岩、白云质砂岩等;第三套岩性组合是上二叠统上乌尔禾组—三叠系—侏罗系,为湖相的含煤碎屑岩组合,为褐灰、灰、深灰、黑色泥岩、砂岩、炭质泥岩、煤层或煤线,盆地边缘存在砾岩;第四套为白垩系—第四系,为灰绿、棕红色泥岩、砂岩、砾岩。

准噶尔盆地经历了石炭纪、二叠纪、三叠纪、侏罗纪、白垩纪及新生代等不同时期、不同性质的多期叠合演化与后期改造,存在多期断裂构造和地层不整合。石炭纪经历了伸展断陷成盆和晚期萎缩消亡的演化过程,形成大套中基性、中酸性火山岩、火山碎屑岩夹海—陆过渡相的碎屑岩^[18]。下石炭统滴水泉组泥质岩主要分布于陆东地区和五彩湾凹陷内,彩25井以北厚度较大,中心厚度可达1300 m;上石炭统巴塔玛依内山组主要为火山岩夹炭质泥岩,分布于陆东地区和五彩湾凹陷,由南向北减薄,最大厚度可达1600 m。莫深1井钻遇下石炭统凝灰岩,揭示厚度693 m。石炭纪末的构造事件结束了该区海相盆地的演化历史,盆地的隆升、剥蚀强烈,导致了二叠系与石炭系的不整合接触。

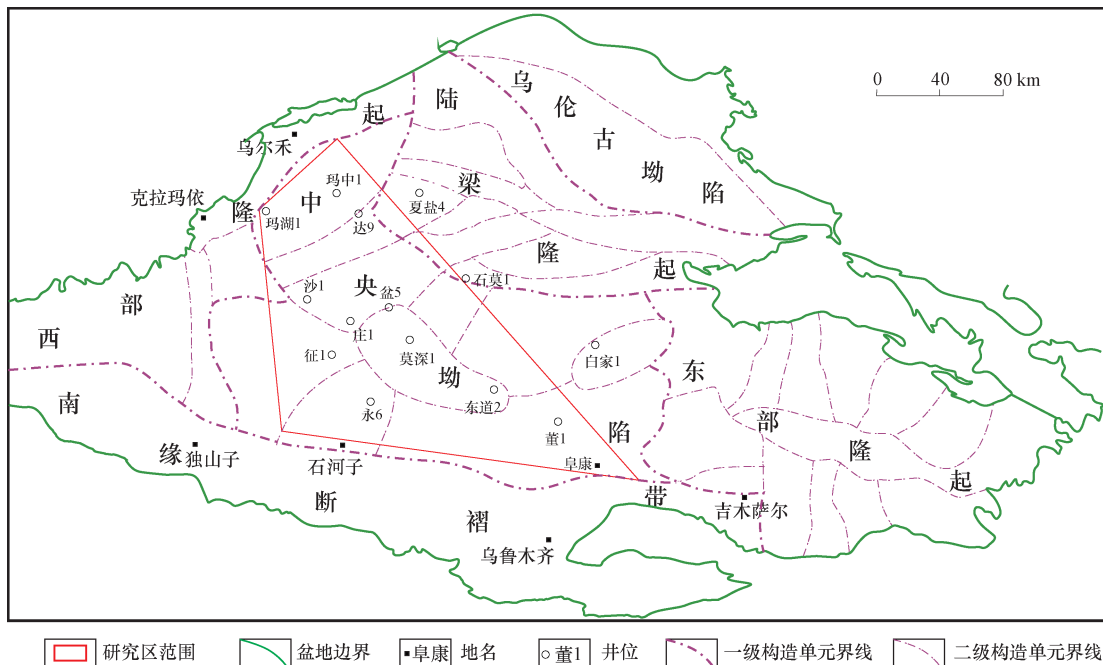


图1 研究区地理位置及构造单元划分

Fig.1 Location of the study area and division of tectonic units

中-下二叠统是陆内盆地演化早期形成的建造,自下而上分为下二叠统佳木河组、风城组及中二叠统夏子街组、下乌尔禾组(平地泉组);自下而上可划分为早二叠世和中二叠世两大沉积旋回,存在玛湖、盆1井西、沙湾、东道海子、阜康、吉木萨尔和五彩湾-大井等多个沉积中心,主要沉积中心在盆地西部。风城组沉积末期,盆地发生了一次构造事件,导致西北缘冲断带的形成和盆地地层的变形及断裂的发育。中二叠世,盆地经历了夏子街组沉积期的砂、泥岩互层建造及下乌尔禾组沉积期的泥岩、砂岩、碳酸盐岩建造。中二叠世末的构造事件导致了盆地隆升剥蚀,特别是盆地边缘隆升、剥蚀强烈,西北缘地区、玛湖凹陷及夏盐-达巴松凸起等构造单元上发育了逆冲断裂构造。

晚二叠世(上乌尔禾组沉积期)-三叠纪为大型拗陷盆地形成期,盆地沉积范围扩大,由二叠纪早、中期的多沉积中心向单一沉积中心转变。盆地北部的乌伦古拗陷和南部的中央拗陷在晚三叠世形成,自下而上划分为上二叠统上乌尔禾组及三叠系百口泉组、克拉玛依组和白碱滩组,与下伏中-下二叠统呈区域角度不整合或平行不整合接触。上乌尔禾组(梧桐沟组)为一套砾岩和砂、泥岩沉积;百口泉组主要为一套砂岩(砾岩)建造;克拉玛依组以一套泥岩为主,夹薄层细砂岩、粉砂岩;白碱滩组(东部称黄山街组-郝家沟组)主要为一套砂、泥岩互层沉积。三叠纪末的构造事件在盆地边缘表现强烈,玛湖凹陷和西北缘逆冲断裂、褶皱构造发育,东部隆起隆升剥蚀强烈,盆地内也普遍发育了高陡的逆冲断裂构造,为石炭系-二叠系油气向上覆地层运移提供了条件。

侏罗纪为大型泛盆演化期,沉积范围大于三叠系,与下伏三叠系呈区域性角度不整合或平行不整合接触,盆地边缘超覆于不同的老地层之上,自下而上划分为下侏罗统八道湾组和三工河组、中侏罗统西山窑组和头屯河组以及上侏罗统齐古组和喀拉扎组。从八道湾组到西山窑组,盆地沉积由底部粗碎屑岩沉积,向上转变为泥岩、砂岩互层夹煤层建造,是盆地腹部发育超压异常的重要层系。西山窑组沉积期末,盆地发生了一次重要的构造事件,导致盆地车莫古隆起的形成,在盆地东部也形成了北北东向展布的隆起,在隆起高部位地层剥蚀强烈。中-上侏罗统头屯河组-齐古组在盆地凹陷区与下伏地层整合接触,在隆起区为超覆不整合接触,为一套砂、泥岩互层建造,沉积厚度一般在200 m左右,在南部沉积中心厚度可达800 m。上侏罗

统喀拉扎组仅在南缘山前局限分布。侏罗系沉积后的构造事件结束了盆地的沉积,盆地整体隆升剥蚀。特别是在白垩系沉积前或沉积初,盆地形成了一系列的高陡正断层,在白家海北部、莫索湾凸起、莫北凸起西缘及滴南凸起的南缘等都形成了由系列正断层组成的雁列组合构造带。

白垩系自下而上分为下白垩统吐谷鲁群(清水河组、呼图壁河组、胜金口组、连木沁组)和上白垩统东沟组。下白垩统与下伏侏罗系呈区域性角度不整合接触,底部存在一套几十米至上百米的底砾岩、砂岩,向上岩性变细,为一套泥岩夹砂岩和砂、泥岩互层沉积。白垩纪末的构造事件导致了盆地的整体隆升、剥蚀。

古近纪,盆地首先在南缘山前沉降接受沉积,盆地开始发生向南的倾伏,与下伏白垩系呈区域性角度不整合接触。沉积中心位于盆地南缘石河子-奎屯附近,沉积厚度可达1 200 m,由南向西、北、东3个方向地层厚度逐渐减薄至尖灭,主要为一套泥岩、膏泥岩夹细砂岩、粉砂岩建造,是盆地南缘发育地层超压异常的重要层系。中-上新统沙湾组-第四系的沉积范围扩大到整个盆地,下部地层沉积较细,为砂、泥岩互层;上部地层逐渐变粗,与下伏渐新统在局部地区呈角度不整合接触。沉积中心位于南缘山前,最大沉积厚度可达4 000 m,由南向西、北、东3个方向地层厚度逐渐减薄至尖灭。新近纪,受印度板块向欧亚大陆俯冲挤压的持续影响,北天山造山带复活,在南缘形成三排断裂-褶皱构造带,在三排断裂-褶皱构造带的北部沿董2井-芳草1井形成由南向北的逆冲断裂带,发育层位主要在侏罗系-白垩系。

2 地层压力分布特征

2.1 地层超压异常分布

通过对夏盐-达巴松凸起、盆1井西凹陷、莫索湾凸起和阜康凹陷的钻井、测井声波时差、深感应测井的视电阻率、密度测井、VSP测井和地震速度与地层压力之间关系的研究,结合探井实测压力数据,对石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系及白垩系的现今压力特征进行分析。盆地在莫索湾凸起、莫北、石西、石南、陆南、夏盐和玛湖凹陷内部均有异常高压存在,普遍存在于侏罗系、三叠系及以下地层中,白垩系的高压异常仅出现在中央拗陷南部。

侏罗系在董1井、东道2井和芳3井的头屯河组出

现高压异常,压力系数分别为 1.92, 1.31 ~ 1.72 和 1.96。普遍出现高压异常的层系为三工河组和八道湾组。莫索湾凸起三工河组异常高压达 60.8 ~ 106.0 MPa, 压力系数为 1.34 ~ 1.71; 八道湾组最高压力系数为 2.11 (盆参 2 井八道湾组)。向北东方向至白家海凸起, 地层压力逐渐过渡为正常压力, 压力系数为 0.90 ~ 1.10 (彩参 2 井三工河组、八道湾组)。向北至莫北 2 井的八道湾组, 地层压力系数为 1.55; 石西 1 井、夏盐 1 井、向西至新光 1 井, 八道湾组及以上地层均为正常压力, 地层压力系数为 0.99 ~ 1.06。向南到齐古地区, 三工河组为正常地层压力, 齐 009 井三工河组地层压力系数为 1.04; 八道湾组出现高压异常, 压力系数为 1.30。

钻遇三叠系的探井主要在盆地周缘和玛湖凹陷; 盆地腹部莫索湾凸起的莫深 1 井钻遇三叠系, 地层压力系数分布在 1.85 ~ 1.90, 为超压异常。盆地腹部三叠系普遍存在高压异常, 向西、西南和北部的玛 4 井、玛东 1 井和金龙 1 井地区, 克拉玛依组及以上地层为正常压力, 压力系数分别为 1.19, 0.97 和 1.09, 而进入百口泉组开始出现高压异常; 达巴松凸起地区的克拉玛依组出现高压异常, 达 1 井和达 9 井区压力系数分别为 2.02 和 1.93。

二叠系在盆地腹部也普遍存在高压异常。莫深 1 井在二叠系的地层压力系数为 1.85 ~ 1.90。石莫 1 井下乌尔禾组异常压力为 69.587 MPa, 压力系数为 1.49。向北东到石南 1 井, 佳木河组地层压力系数为 1.40。西部玛湖凹陷的艾湖 1 井, 下乌尔禾组地层压力系数为 1.67。西北缘地区的金龙 1 井在上乌尔禾组出现高压异常, 地层压力系数为 1.36; 但其下部的佳木河组地层压力系数逐渐变小, 为 1.11。出现这种现象的钻井还有白 22 井和风城 1 井等, 风城 1 井的风城组在 4 307 ~ 4 319 m 深度的压力系数为 2.14, 在佳木河组 5 490 ~ 5 542 m 深度的地层压力系数为 1.48。二叠系的地层超压具有由腹部向盆地边缘逐渐减小的趋势, 超压顶面埋深变浅, 金龙 1 井在 2 818 ~ 2 830 m 深度就已经开始出现高压异常。

石炭系与上覆二叠系和三叠系类似, 在腹部普遍存在高压异常。莫索湾凸起的莫深 1 井石炭系异常压力为 132.932 MPa, 压力系数为 1.90; 向北到石西 1 和石南 1 井, 地层压力系数分别为 1.53 和 1.37, 超压异常逐渐减弱; 向北东方向的彩 25 井, 地层压力系数为 1.09, 已经变为正常地层压力; 向北西方向的夏盐 2 井, 地层压力系数为 1.69。

综上所述, 准噶尔盆地腹部超压出现的主要地层

层位为石炭系、二叠系、三叠系和侏罗系。超压的分布纵向上具有明显的不均衡性。

2.2 超压形成深度

盆地地层超压层段的地震速度和声波测井速度均出现反转, 超压地层呈现低速异常。前人^[19]应用地震资料计算了腹部地区低速异常带出现的顶面, 限于地震资料的分辨率问题, 对超压异常的顶面的估算与钻井资料存在一定的偏差。本文对腹部不同构造部位探井地层压力按照海拔深度进行统计 (图 2), 高压异常出现在海拔 4 000 m 左右 (顶面埋深在 4 400 m 左右), 不同地区存在差异。莫索湾凸起各井 (如盆参 2、盆 4、莫 1、莫 2 井) 在 4 450 ~ 4 485 m 以浅地层均为正常压力, 其下存在明显异常高压, 层位是侏罗系及以下地层。达巴松凸起和夏盐凸起的异常高压出现深度一般在 4 000 m 以下, 为三叠系及以下地层。玛湖凹陷地层超压异常出现层位为三叠系, 埋深变浅, 在 3 500 m 左右, 但与莫索湾地区相比, 其超压强度明显变弱, 埋深也明显变浅。

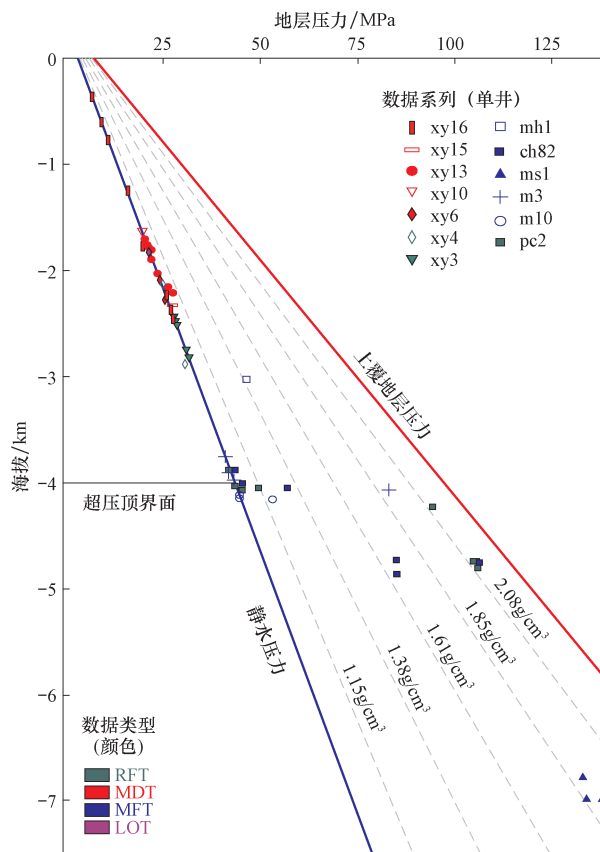


图 2 准噶尔盆地腹部地区典型井地层压力随深度的变化
Fig. 2 Formation pressure vs. depth in typical wells in central Juggar Basin

RFT. 重复式地层测试 (电缆式地层测试); MDT. 组装机地层动态测试; MFT. 小直径过钻头重复式地层测试; LOT. 地层漏失试验

莫南凸起永1井超压顶界为5 880 m,是西山窑组顶界。永1井5 873.4~5 888.1 m深度细砂岩的实测地层压力为97.45 MPa,压力系数为1.66,为超压异常。永6井白垩系清水河组5 858.4~5 869.7 m深度的实测地层压力为107.78 MPa,地层压力系数为1.84^[11]。这说明自莫索湾凸起向莫南凸起的超压顶界面与达巴松地区相比深度是加深的,白垩系的超压异常在清水河组底部的砂岩层也存在,上面被清水河组上段的泥岩所封盖。

上述事实说明,准噶尔盆地腹部存在的超压异常与地层的埋深密切相关,同时地层岩性对超压异常的形成也具有一定的控制作用。莫索湾凸起向莫南凸起方向发育的超压顶界面虽然是一个穿越地层界限的面(图3),但超压顶界面深度和温度与侏罗系的埋深有关,即超压顶界面顺侏罗系顶界或白垩系底界深度分布,超压带顶界深度随侏罗系埋深的增加而增大,压力异常梯度也随之增大,这可能与侏罗系岩性密切相关。

董1井位于阜康凹陷,在深度4 871.18 m以浅地层压力正常,仅在深度为4 871~4 873 m的侏罗系头屯河组出现高压异常,其下钻遇的近1 000 m的地层也属于正常地层压力,该井钻遇最深层位为西山窑组。头屯河组中的高压异常特征与其他钻井的高压异常是存在差异的,该高压层段也是高产油气层位。

2.3 地层压力结构类型

通过盆地钻遇地层较为齐全的莫深1、夏盐1和夏盐2井以及腹部钻遇超压地层的钻井的综合研究,可总结为两种类型。一种类型就是以莫深1井为代表

的超压异常,自侏罗系三工河组开始增压,超压异常面向深层开始增压,为正压力梯度,在八道湾组达到最大,形成超高压层;随后在三叠系以下地层超压强度逐渐降低,为负压力梯度(图4)。由于腹部多数钻井仅仅钻遇到侏罗系的上部超压地层,深层超压异常应该具有莫深1井类似的特征,这种类型代表了盆地腹部深、浅层压力异常的差异。在夏盐凸起的夏盐1和夏盐2井以及玛湖凹陷的玛18井也具有类似结构,只是存在超压异常地层层位为三叠系和二叠系。玛18井在白碱滩组及以浅地层为正常压力,到百口泉组高压异常增高到地层压力系数为1.74;但在下乌尔禾组虽然仍然为高压异常,但地层压力系数降低为1.35。

另一种类型以董1井为代表,在侏罗系的头屯河组砂岩储层中形成高压异常,其上、下地层均为常压地层(图4)。这种局部的高压异常应该与局部因素相关。

1) 莫深1井

莫深1井是盆地腹部地区最深的一口预探井,是莫索湾凸起唯一钻穿三叠系和二叠系、钻达石炭系的深井。该井从500 m开始进行岩屑录井,自上而下所钻地层依次为古近系,白垩系东沟组、吐谷鲁群,侏罗系三工河组、八道湾组,三叠系白碱滩组、克拉玛依组、百口泉组,二叠系上乌尔禾组、下乌尔禾组、夏子街组和石炭系。

莫深1井采用dc指数法从40~7 500 m进行地层压力随钻监测,全井地层压力梯度呈有规律的变化(图4)。在白垩系以浅,井深40~4 360 m,dc指数在0.26~2.16;dc指数随井深增加逐渐增大,但始终属正常压力系统,地层压力系数在1.05左右。在侏罗系

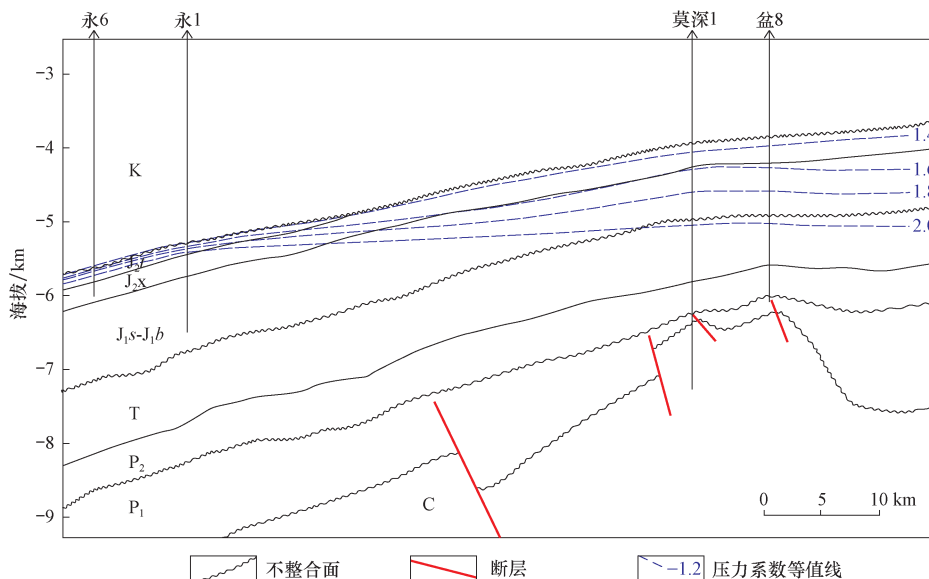


图3 准噶尔盆地腹部永6—永1—莫深1—盆8井地层压力系数剖面

Fig. 3 Formation pressure coefficient profiles of Yong6 - Yong1 - Moshen1 - Peng8 wells in central Juggar Basin

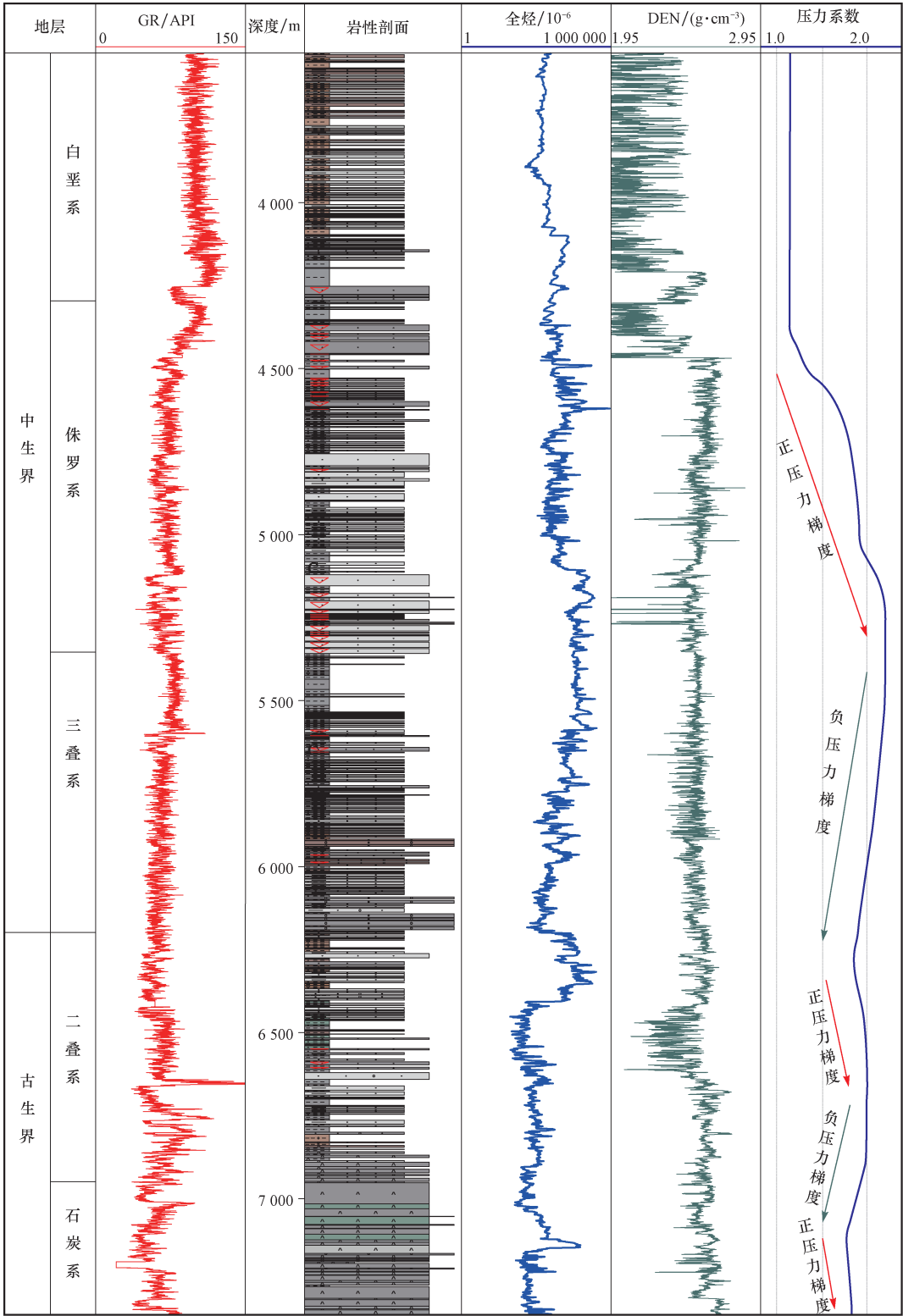


图 4 准噶尔盆地腹部莫深 1 井地层压力系数变化综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive column showing formation pressure coefficient variations of well Moshen 1 in central Juggar Basin

三工河组,自井深 4 360 m 到 4 530 m,在 170 m 的深度范围内,地层压力急剧增加,压力系数由 1.05 增大到 1.50。从三工河组到八道湾组,自井深 4 530 m 到 4 950 m,dc 指数在 0.66 ~ 1.01,dc 指数虽然继续偏离

趋势线,但压力增加趋势随深度变缓,地层压力系数在 1.60 ~ 1.70。

在八道湾组中、下部,井深 4 950 ~ 5 350 m,dc 指数开始急剧偏离趋势线,地层压力急剧增加,地层压力

系数增大到 2.10 左右。自三叠系到石炭系, dc 指数开始向趋势线回靠, 从井深 5 350 m 到 7 500 m, 虽然在三叠系下部到二叠系的 5 900 ~ 6 900 m 深度出现了地层压力系数略有增大的地层段(地层压力系数 1.85 ~ 1.90), 但整体表现出了 dc 指数开始向趋势线回靠, 地层压力系数比上部明显降低, 地层压力系数由 2.00 左右下降到 1.80 左右。石炭系 6 900 ~ 7 500 m 井段的地层压力系数在 1.75 ~ 1.80。

可见, 在三工河组和八道湾组中、下部出现了地层压力急剧增加的两个层段, 以八道湾组的地层压力系数最大达到 2.10。三工河组主要以灰色泥质粉砂岩、粉-细砂岩、灰色、深灰色泥岩为特征。八道湾组主要以灰白色泥质粉砂岩与灰色泥岩、粉砂质泥岩、厚层灰

白色粉-细砂岩为主, 夹灰色粉砂质泥岩、泥岩及煤层。三叠系和二叠系也是一套砂、泥岩建造。这种压力的变化似乎与岩性之间没有必然的联系。

2) 董1井

董1井位于阜康凹陷的中部, 自上而下钻遇地层分别为新近系、古近系、白垩系上统东沟组、白垩系下统吐谷鲁群(涟沐沁组、胜金口组、呼图壁组、清水河组)及侏罗系中统头屯河组和西山窑组(未穿)(图5)。

该井钻至西山窑组 4 872 m 深度时, 泥浆密度从 1.19 g/m^3 突然增至 1.68 g/m^3 , 在深度 4 873 ~ 5 113 m 井段泥浆密度增加到 $1.90 \sim 1.95 \text{ g/m}^3$, 在深度 5 120 ~ 5 630 m 泥浆密度回落到 $1.19 \sim 1.36 \text{ g/m}^3$ 。在深度为 4 871.18 ~ 4 873.00 m 的地层测试结果为异常高压,

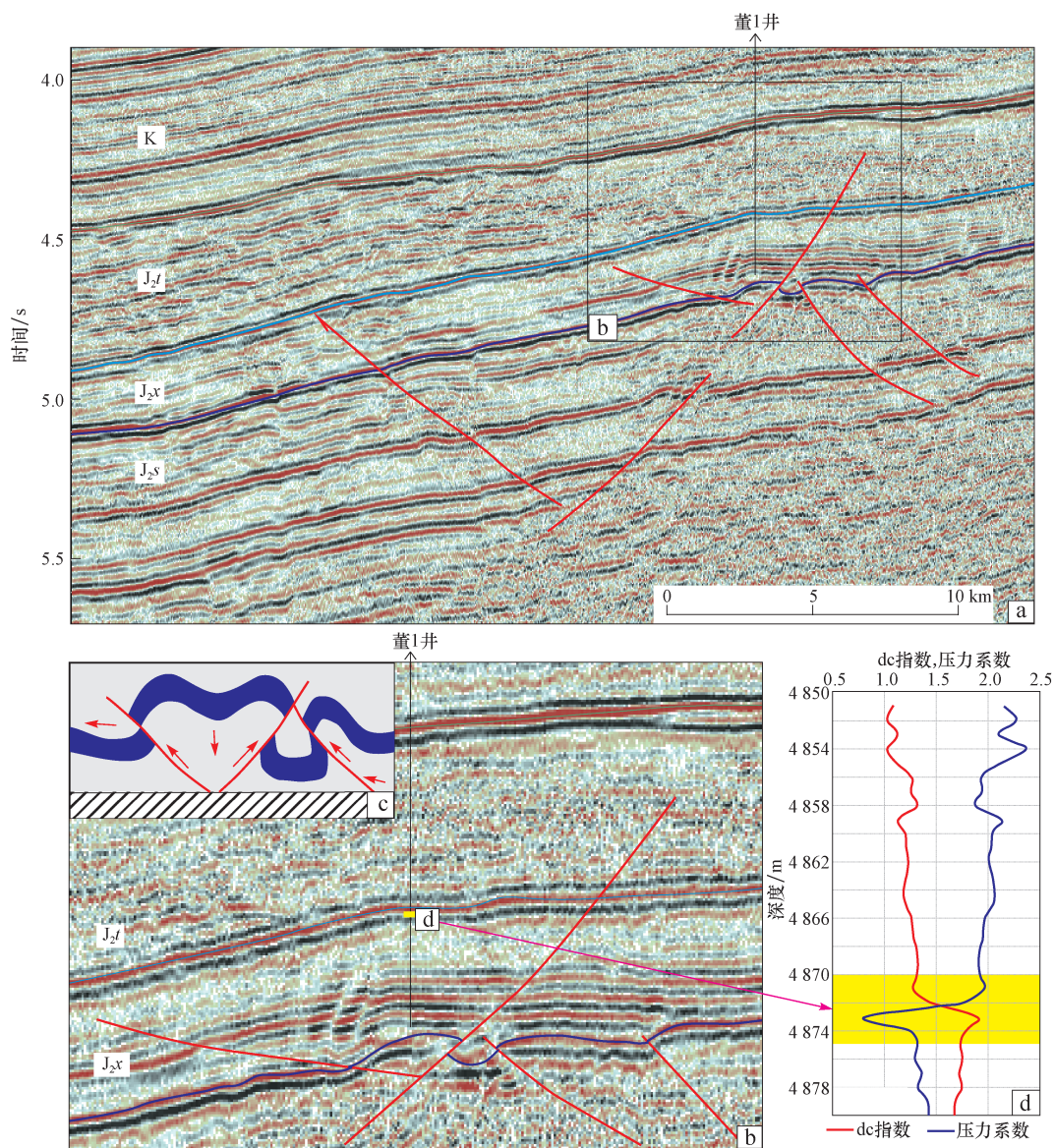


图5 准噶尔盆地腹部董1井地层超压异常特征综合图

Fig. 5 Comprehensive diagram showing formation overpressure anomalies of well Dong 1 in central Juggar Basin

a. 过董1井地震-地质解释剖面; b. 地震-地质解释剖面局部放大; c. 挤压构造模式; d. 单井井段压力系数

压力为 93.62 MPa, 压力系数为 1.92, 地温为 110 ℃, 渗透率为 $9.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据 dc 指数和地层压力解释成果, 在侏罗系头屯河组 4 850 m 深度以浅为正常压实地层。2 350 ~ 4 850 m 井段 dc 指数在 0.75 ~ 2.28, 地层压力系数为 1.03 ~ 1.20。在 4 871 m 深度 dc 指数突然变小, 压力系数急剧增大; 4 870 ~ 4 875 m 井段的 dc 指数在 0.80 ~ 1.95, 地层压力系数为 1.28 ~ 1.89, 为异常高压地层。本层上覆地层 4 847 ~ 4 854 m 井段为致密泥岩, 为下部高压油气层的盖层。钻过高压层后, 4 875 ~ 5 615 m 井段为正常压力地层(图 5d)。

3 超压异常控制因素

前人研究表明, 含油气盆地中超压的成因主要有^[4,11,20-22]: 1) 快速沉积导致大套泥质沉积物的欠压实, 即高孔隙度; 2) 粘土脱水 - 蒙脱石转化为伊利石; 3) 热作用导致的有机质的热演化、油气生成和流体热膨胀含水热增压等; 4) 构造应力挤压。准噶尔盆地存在的超压异常的成因较为复杂。根据莫深 1 井、庄 1 井和盆参 2 井的资料, 增压层段以砂岩与泥岩不等厚互层为主, 夹薄层粉砂岩和泥质粉砂岩, 庄 1 井和盆参 2 井砂岩分别占 46.7% 和 63.8%, 岩石组成以砂岩占优势, 这与人对该区的岩性研究结果基本一致^[23]。莫深 1 井钻揭的侏罗系三工河组岩性主要为一套灰色、深灰色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉 - 细砂岩, 厚 353.5 m, 其中泥质粉砂岩、粉砂岩、粉 - 细砂岩、中砂岩厚 169.5 m, 占组厚 47.95%, 单层最大厚度 36 m, 一般 2 ~ 5 m, 测井孔隙度在 4.51% ~ 11.22%, 一般为 5.08% ~ 8.88%, 岩石密度 2.09 ~ 2.62 g/cm³。盆 1 井西凹陷南部沙 1 井深度为 4 860 ~ 5 096 m 的岩心孔隙度为 6% ~ 8%。盆地腹部超压层段的实测砂岩样品物性主要为低 - 特低孔渗特征^[11], 莫深 1 井、盆参 2 井和沙 1 井超压带中泥岩的密度属正常压实。玛湖凹陷及其西北部地区的超压出现在三叠系百口泉组及以下地层, 上部的克拉玛依组和白碱滩组以泥岩为主的地层基本属于正常压力。因此, 欠压实作用在盆地的超压异常形成中没有起到主导作用。

3.1 油气生成导致地层超压

准噶尔盆地腹部存在二叠系风城组、下乌尔禾组和侏罗系烃源岩已经得到勘探、研究证实。下二叠统风城组烃源岩形成于碱湖环境, 在玛湖凹陷厚度可达 200 m, 有机质丰度高 (>1.0%)、类型好 (偏腐泥型,

Ⅱ₁ 型)、生烃潜量高 (>6.0 mg/g), 具有长期生烃的特点^[11,24]。该套烃源岩在早二叠世晚期进入生油门限, 晚二叠世进入生油高峰。中二叠统乌尔禾组烃源岩有机质丰度高 (残余有机碳含量在西北缘平均为 1.99%, 东部平均为 3.17%, 南缘平均为 3.07%), 有机质类型为腐泥、偏腐泥型 (南缘 I 型, 西北缘 Ⅱ₂, 东部 Ⅱ₁ 型), 生烃潜量高 (南缘平均为 3.5 mg/g, 东部平均为 3.7 mg/g), 烃源岩厚度在 100 ~ 500 m。通过盆地腹部地区地层埋藏史和生烃史恢复, 该套烃源岩在中二叠世晚期进入生烃门限, 晚三叠世达到生油高峰, 早侏罗世开始进入生气阶段。三叠系在盆地腹部除底部存在砂岩, 白碱滩组和克拉玛依组以泥岩为主, 是盆地重要的盖层层系。二叠系烃源岩在三叠纪末期大量生成的油气被三叠系封盖, 充注于二叠系和三叠系储层中, 为超压形成阶段早期。侏罗纪中、晚期, 盆地发生了隆升剥蚀和挤压变形, 盆地内车莫古隆起形成, 并发育了深、浅层断裂构造的沟通, 导致了深层高压系统的泄露, 二叠系生成油气通过断裂构造充注于侏罗系八道湾组、三工河组和西山窑组, 并有油气散失。随着白垩系 - 新生界的沉积, 侏罗系及以下地层埋深增大, 三工河组成为高压封闭层, 其以下地层压力增高。

准噶尔盆地中部侏罗系发育较厚的煤层和暗色泥岩。八道湾组、三工河组和西山窑组的有机质丰度平均在 1.75%, 1.12% 和 1.39%, 干酪根类型以 Ⅱ₂ 和 Ⅲ 型为主。八道湾组烃源岩生油高峰在 100 Ma, 为早白垩世晚期, 在沙湾凹陷和阜康凹陷的生气强度在 $300 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (图 6); 三工河组和西山窑组烃源岩生烃高峰在 80 Ma 左右, 相当于晚白垩世中、后期。由于侏罗系烃源岩的生烃作用, 进一步促进了侏罗系内部砂岩储层超压异常的发育。准噶尔盆地腹部八道湾组烃源岩的生烃强度与腹部的超压等值线具有耦合性 (图 6), 显示二者之间密切相关。

综上所述, 超压异常与盆地侏罗系和二叠系富含有机质的烃源岩有密切关系。需要说明的是, 三叠系、二叠系和石炭系的地层超压异常与侏罗系相比要低, 其原因与腹部深层在早期的泄压有关, 也与侏罗系烃源岩后期的生烃增压相关。

3.2 构造挤压应力与油气充注对地层超压异常形成的影响

阜康凹陷董 1 井在深度达 4 871 m 的头屯河组发现了工业油气流, 油气藏压力系数 1.96; 随后在深度 4 955 ~ 4 957 m 压力系数降低至 1.47。其油气来源于下伏的侏罗系八道湾组煤系烃源岩^[25]。根据地震

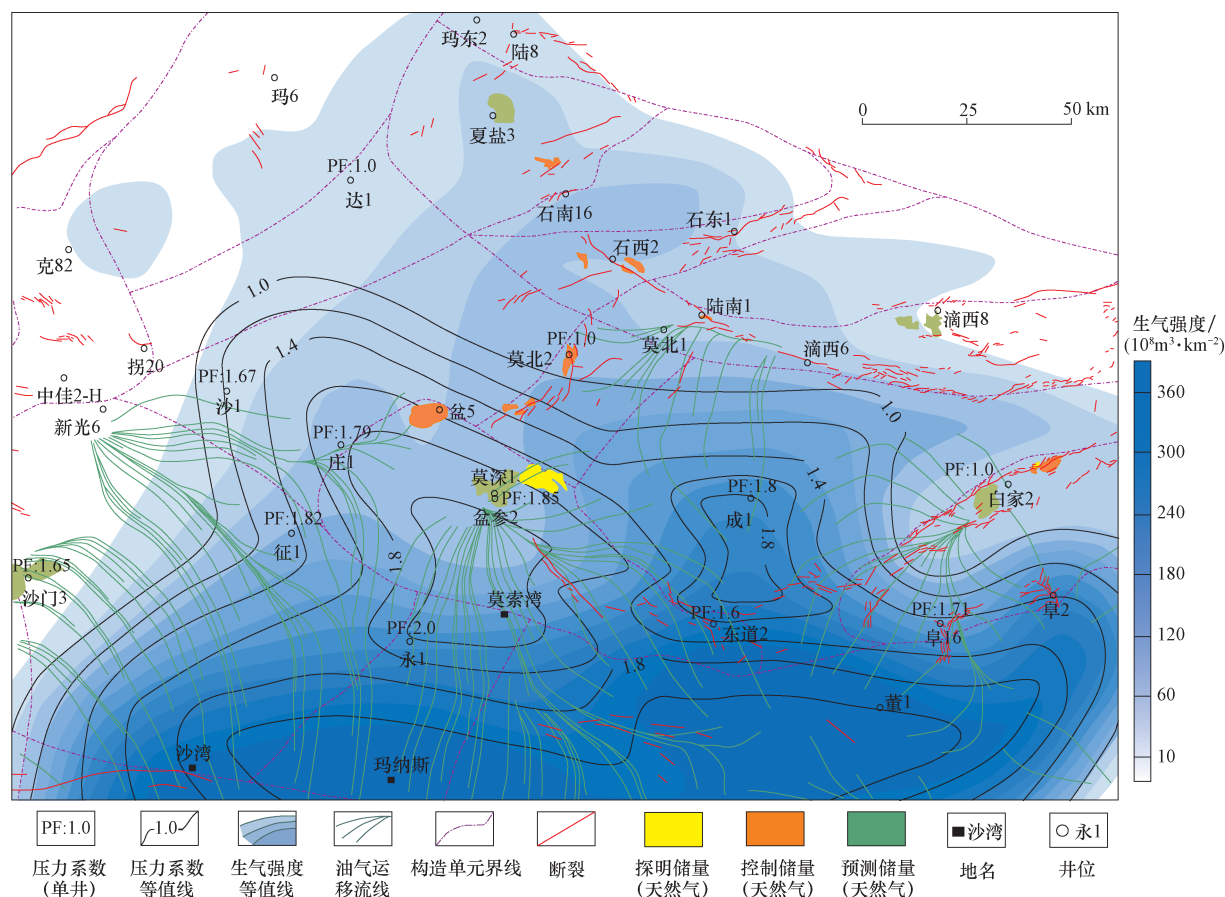


图6 准噶尔盆地侏罗系八道湾组烃源岩生气强度与压力系数叠合平面图

Fig. 6 The overlay map of gas generation intensity of source rocks and pressure coefficient of Badaowan formation in Junggar basin

资料,该区发育由南向北的逆冲断层(图5a—c),处于准噶尔盆地北天山造山带向盆地逆冲的前锋带。这种挤压作用形成的局部构造为油气的充注提供了有利场所。同时,侏罗系烃源岩生烃形成的强超压引发水力破裂,烃类沿着水力破裂进行运移,在上覆头屯河组的圈闭中聚集成藏,形成了传递性超压油气藏^[26]。因此,董1井所揭示的超压是构造应力挤压与油气充注联合作用的结果。

3.3 构造抬升对异常超压带的影响

在实际情况下,地层完全封闭的条件很难形成。一方面,砂泥岩沉积中的泥岩封堵只是渗透率极低的相对封闭;另一方面,构造抬升是一个长期而缓慢的过程,其间地层温度不断下降,温度的下降必将导致地层压力的降低。

地层的剥蚀导致上覆载荷卸载,假如地层中的压力接近并等于上覆地层压力时,地层将产生断裂、裂缝等,地层中流体向上散失,直到压力逐渐达到新的平衡状态。无论是上覆地层卸载,还是地层中流体散失,都将导致地层温度也逐渐降低,这又进一步导致地层压

力下降。因此,构造抬升是地层流体压力下降的重要因素^[27]。这可能是盆地超压地层具有穿层性的重要因素。此外,地层抬升活动中,深部地层较浅部地层受到的影响要小,地层中异常高压保存相对较好。

对于准噶尔盆地而言,白垩系沉积前,盆地腹部存在车莫古隆起^[28],并遭受了较为强烈的剥蚀作用。根据地层趋势法恢复的地层剥蚀厚度,莫索湾地区的莫深1井三工河组被剥蚀40 m,目前残余厚度353.5 m;西山窑组和头屯河组被剥蚀殆尽,剥蚀厚度475.2 m。莫索湾南部的永1井在白垩系沉积前处于较低部位,残余有西山窑组236 m,测试产油72.07 m³/d、产气10 562 m³/d。在白垩纪以来的盆地演化中,永1井埋藏加大,较莫深1井区深了1 533 m;永1井超压顶界埋深5 880 m,为西山窑组顶部。从永1井—莫深1井压力剖面可以看出,处于莫索湾凸起高部位的莫深1井,整个侏罗系三工河组压力系数为1.4~1.6,属于超压过渡带,直到八道湾组时,地层压力才进入超高压阶段;而处于莫索湾凸起斜坡区的永1井,整个三工河组异常压力均持续高达2.0以上,超压过渡段远远小于莫深1井;再向南的永6井,超压传递到白垩系底部

的清水河组砂岩,压力系数为1.84^[11];莫索湾凸起上位于构造高部位的盆5井区,地层压力小于盆参2井区。区域上,达巴松和夏盐地区构造高于莫索湾地区,同样表现为异常高压值整体低于莫索湾地区。

以上事实表明,在盆地腹部的莫索湾地区,侏罗系被白垩系埋藏前,岩石成岩已经达到了具备对超压异常的封盖能力,而地层在白垩系-新生界的翘倾埋藏导致莫索湾凸起地层压力下降。莫南凸起的永6井显示了超压传递到了白垩系清水河组底部砂岩层,被清水河组泥岩所封盖,另一方面也说明了莫索湾凸起及莫南侏罗系岩性对超压异常具有封盖作用。

由于盆地后期的翘倾作用,盆地北部抬升,导致了莫索湾及以北地区超压顶面的压力梯度明显小于南部的永1井地区,说明北部存在后期的泄压作用。

3.4 超压顶面碳酸盐岩胶结带

碳酸盐胶结物是碎屑岩中最为常见的成岩自生矿物之一。对于储层物性而言,碳酸盐胶结作用是一种破坏性的成岩作用,当砂岩中碳酸盐胶结物含量超过一定含量时,储层性质迅速变差^[29-33]。鄂尔多斯盆地二叠系砂岩的碳酸盐岩含量超过10%时,孔隙度一般在6%以下^[31],导致砂岩致密,储层的渗透性变差,成为重要的封隔层。因此,地层中碳酸盐胶结带可以作为有效的封隔层^[34-35]。

准噶尔盆地腹部钻井资料统计,高压异常顶面附近碳酸盐岩含量急剧增高,存在碳酸盐胶结带(图7),深度在4 000~4 400 m;埋深达到4 000 m的超压顶面附近,碳酸盐岩含量由不到10%急剧增加,最高含量近70%;埋深超过5 000 m后,碳酸盐岩含量减少到10%以下。碳酸盐岩含量增大的位置与钻井超压异常急剧增加的深度具有耦合性。莫深1井在三工河组深度4 360~4 530 m的170 m的厚度内,地层压力系数由1.05增大到1.50。盆参2井在三工河组深度4 422~4 470 m、厚约48 m的层段,地层压力系数由1.05增大到1.49,具有较高的压力梯度。庄1井在三工河组深度4 400~4 650 m、厚约250 m的层段,地层压力由略微负压快速递增为超压^[26,36]。

对碳酸盐致密胶结物成分的研究证实^[11,33],以含铁方解石和含铁白云石或铁白云石为主,形成温度集中分布在100~130℃范围内,胶结物中对应的碳、氧离子相当部分来源于深部超压层内,显示了泄压环境中的矿物析出特征。这种泄压可能与准噶尔盆地古近纪以来的翘倾作用密切相关。

统计盆地腹部侏罗系八道湾组钻井声波、密度数

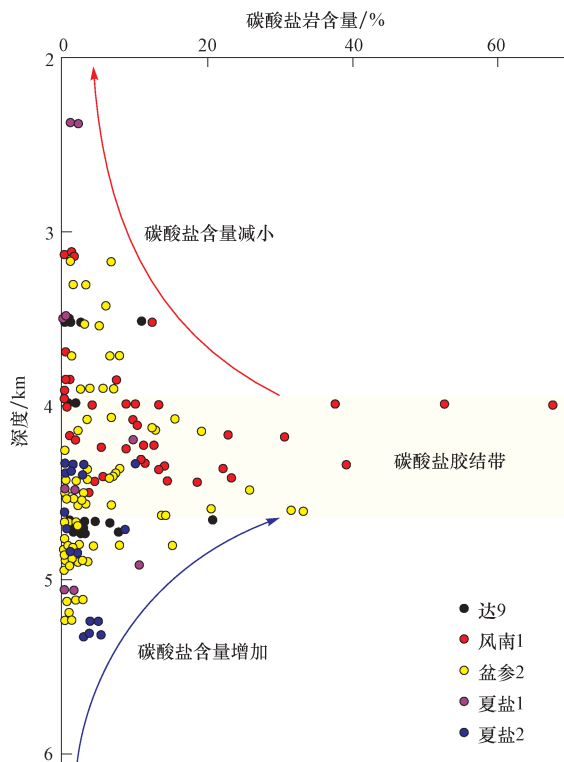


图7 准噶尔盆地腹部碳酸盐岩含量随深度的变化

Fig. 7 Carbonate rock content vs. depth in central Juggar Basin

据发现,在深度3 500 m左右岩石层速度达到4 500 m/s左右,密度达2.6 g/cm³左右。有效孔隙度随埋深增加快速减小,在4 000 m左右减小值在10%左右,岩层受到充分压实,这也是能够形成超压封隔层的重要因素。

4 结论

1) 准噶尔盆地腹部侏罗系及以下地层普遍存在超压异常。在纵向上,侏罗系超压异常最高,向下到三叠系、二叠系和石炭系变低。横向上,地层超压异常具有穿时性。

2) 超压异常的分布受多种因素的控制,烃源岩的生烃作用、成岩压实、地层的抬升剥蚀、构造挤压和油气的充注都与超压异常现今分布密切相关。侏罗系超压异常的形成除了深层超压泄压上窜至侏罗系外,与侏罗系烃源岩后期的生烃增压也密切相关。

3) 受车莫古隆起形成和后期翘倾抬升作用影响,盆地腹部侏罗系自南向北存在泄压现象,呈现自南向北地层压力梯度逐渐变小。

参 考 文 献

- [1] 张立强. 准噶尔盆地南缘古近系超高压带砂岩铁方解石胶结物

- 的分布及形成机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(6): 625–632.
- Zhang Liqiang. Distribution and origin of ferrocalcite cements in Paleogene overpressure sandstones on the south margin of Junggar Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(6): 625–632.
- [2] 赵桂萍. 准噶尔盆地南缘异常高压及其与油气成藏的关系[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 327–331.
- Zhao Guiping. Overpressure and its relation to petroleum accumulation in southern edge of Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 327–331.
- [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]. 成都理工学院学报, 2000, 27(3): 255–262.
- Xu Guosheng, Kuang Jianchao, Li Jianling, 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] 冯冲, 姚爱国, 汪建富, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷异常高压分布和形成机理[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(6): 640–645.
- Feng Chong, Yao Aiguo, Wang Jianfu, et al. Abnormal pressure distribution and formation mechanism in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(6): 640–645.
- [5] 孙冬胜, 金之钧, 吕修祥, 等. 沉积盆地超压体系划分及其与油气运聚关系[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1): 1–14.
- Sun Dongsheng, Jin Zhijun, Lv Xiuxiang, et al. Classification of overpressure systems in sedimentary basins and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1): 1–14.
- [6] 王屿涛, 范光华, 蒋少斌. 准噶尔盆地腹部高压和异常高压对油气生成和聚集的影响[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(5): 1–7.
- Wang Yutao, Fan Guanghua, Jiang Shaobin. The effect of high pressure and abnormally high pressure on the generation and accumulation of petroleum in mid-land Junggar basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(5): 1–7.
- [7] 吴晓智, 李策. 准噶尔盆地莫索湾地区异常地层压力与油气聚集[J]. 新疆石油地质, 1994, 15(3): 208–213.
- Wu Xiaozhi, Li Ce. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation in Mosuowan area of hinterland of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1994, 15(3): 208–213.
- [8] 刘得光. 准噶尔盆地马桥凸起异常高压成因及油气成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 21–26.
- Liu Deguang. Over pressure origin and hydrocarbon pool forming mode of Maqiao uplift in Junggar basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(1): 21–26.
- [9] 查明, 张卫海, 曲江秀. 准噶尔盆地异常高压特征、成因及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 31–35.
- Zha Ming, Zhang Weihai, Qu Jiangxiu. The character and origin of overpressure and its explorational significance in Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 31–35.
- [10] 李忠权, 陈更生, 郭冀义, 等. 准噶尔盆地南缘西部地层异常高压基本地质特征[J]. 石油实验地质, 2001, 23(1): 47–51.
- Li Zhongquan, Chen Gengsheng, Guo Jiayi, et al. Basic geologic character of the abnormal formation overpressure in the western part of southern fringe of Junggar basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2001, 23(1): 47–51.
- [11] 何生, 何治亮, 杨智, 等. 准噶尔盆地腹部侏罗系超压特征和测井响应以及成因[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2009, 34(3): 457–470.
- He Sheng, He Zhiliang, Yang Zhi, et al. Characteristics, well-log responses and mechanisms of overpressures within the Jurassic formation in the central part of Junggar basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(3): 457–470.
- [12] 刘震, 金博, 贺维英, 等. 准噶尔盆地东部地区异常压力分布特征及成因分析[J]. 地质科学, 2002, 37(增刊): 91–104.
- Liu Zhen, Jin Bo, He Weiying, et al. Generation and distribution of abnormal formation pressures in eastern part of the Junggar basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(S1): 91–104.
- [13] 王震亮, 孙明亮, 耿鹏, 等. 淮南地区异常地层压力发育特征及形成机理[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 32–34.
- Wang Zhenliang, Sun Mingliang, Geng Peng, et al. The development features and formation mechanisms of abnormal high formation pressure in southern Junggar region[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 32–34.
- [14] 李铁军. 准噶尔盆地南缘异常高压及其成因机制初探[J]. 地质科学, 2004, 39(2): 234–244.
- Li Tiejun. Overpressure and its generation in south edge of Junggar basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(2): 234–244.
- [15] 罗晓容, 肖立新, 李学义, 等. 准噶尔盆地南缘中段异常压力分布及影响因素[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2004, 29(4): 404–412.
- Luo Xiaorong, Xiao Lixin, Li Xueyi, et al. Overpressure distribution and affecting factors in southern margin of Junggar basin[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(4): 404–412.
- [16] 陈景阳. 准噶尔盆地异常压力演化及成藏机制研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
- Chen Jingyang. Study on abnormal formation pressure evolution and petroleum accumulation mechanism in Junggar Basin[D]. Beijing, China: China University of Geosciences(Beijing), 2007.
- [17] 郑孟林, 邱小芝, 何文军, 等. 中国西北地区含油气盆地动力学演化[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(5): 1–16.
- Zheng Menglin, Qiu Xiaozhi, He Wenjun, et al. Geodynamic evolution of petroliferous basins in Northwest China[J]. Journal of Earth Sciences & Environment, 2015, 37(5): 1–16.
- [18] 唐勇, 王刚, 郑孟林, 等. 新疆北部石炭纪盆地构造演化与油气成藏[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 241–253.
- Tang Yong, Wang Gang, Zheng Menglin, et al. Carboniferous basin evolution and its hydrocarbon accumulation in the north of Xinjiang[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 241–253.
- [19] 杨智, 何生, 武恒志, 等. 准噶尔盆地腹部超压层分布研究[J]. 石油物探, 2007, 46(2): 137–142.
- Yang Zhi, He Sheng, Wu Hengzhi, et al. Study into the distribution of overpressure stratum in the hinterland of Junggar basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2007, 46(2): 137–142.
- [20] Yardley G S, Swarbrick R E. Lateral transfer: A source of additional overpressure? [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(4):

- 523-537.
- [21] 王连进,叶加仁. 沉积盆地超压形成机制述评[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 17-20.
Wang Lianjin, Ye Jiaren. A comment on forming mechanism of overpressure in sedimentary basins [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1): 17-20.
- [22] 何惠生,叶加仁,陈景阳. 准噶尔盆地腹部超压演化及成因[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2009, 31(1): 87-91.
He Huisheng, Ye Jiaren, Chen Jingyang. Overpressure evolution and genesis in central Junggar Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 87-91.
- [23] 杨智,何生,李奇艳,等. 准噶尔盆地腹部盆1井西凹陷超压研究[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 239-245.
Yang Zhi, He Sheng, Li Qiyang, et al. Overpressure in the well Pen-1 West subbasin in the interior of the Junggar basin [J]. Geology in China, 2008, 35(2): 239-245.
- [24] 曹剑,雷德文,李玉文,等. 古老碱湖优质烃源岩准噶尔盆地二叠统风城组[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 781-790.
Cao Jian, Lei Dewen, Li Yuwen, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng formation, Junggar basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 781-790.
- [25] 徐兴友,孔祥星,郭春清,等. 准噶尔盆地腹地董1井和成1井的油源分析及其地质意义//第十届全国有机地球化学学术会议论文摘要汇编[C]. 第十届全国有机地球化学学术会议, 2005: 118-119.
Xu Xingyou, Kong Xiangxing, Guo Chunqing, et al. Dong 1 well and Chen 1 well in the hinterland of Junggar basin oil source analysis and its geological significance//Proceedings of the tenth national symposium on organic geochemistry [C]. Tenth National Symposium on Organic Geochemistry, 2005: 118-119.
- [26] 胡海燕,王国建. 准噶尔盆地中部超压形成机理及其成藏意义[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2009, 31(1): 1-6.
Hu Haiyan, Wang Guojian. Mechanism of super-pressure and its implication of hydrocarbon accumulation in the center of Junggar Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(1): 1-6.
- [27] 李传亮. 地层抬升会导致异常高压吗? [J]. 岩性油气藏, 2008, 20(2): 124-126.
Li Chuanliang. Can uplift result in abnormal high pressure in formation? [J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(2): 124-126.
- [28] 武恒志,孟闲龙,杨江峰. 准噶尔盆地腹部车-莫古隆起区隐蔽油气藏形成条件与勘探技术[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 779-803.
Wu Hengzhi, Meng Xianlong, Yang Jiangfeng. Formation conditions and prospecting technologies for subtle reservoirs in the Che-Mo palaeohigh of central Junggar basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 779-803.
- [29] Roberts S J, Nunn J A. Episodic fluid expulsion from geopressed sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(2): 195-204.
- [30] 纪友亮,赵登林,刘孟慧. 东蹠凹陷沙河街组碎屑岩成岩作用与有机质演化的关系[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 148-154.
Ji Youliang, Zhao Chenling, Liu Menghui. Diagenesis of clastic rocks in Shahejie Formation, Dongpu Depression and its relation to organic matter evolution [J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2): 148-154.
- [31] 胡宗全. 鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层方解石胶结物特征[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 40-43.
Hu Zongquan. Calcite cements in Upper Palaeozoic sand reservoir of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 40-43.
- [32] 张永旺,曾溅辉,高霞,等. 东营凹陷古近系储层碳酸盐胶结物分布特征及主控因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(1): 16-22.
Zhang Yongwang, Zeng Jianhui, Gao Xia, et al. Distribution characteristics and main controlling factors of carbonate cements in the Paleogene reservoirs in Dongying Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(1): 16-22.
- [33] 杨智,邹才能,何生,等. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近碳酸盐胶结带的成因机理[J]. 中国科学, 2010, 40(4): 439-451.
Yang Zhi, Zou Caineng, He Sheng, et al. Formation mechanism of carbonate cemented zones adjacent to the top overpressured surface in the central Junggar Basin, NW China [J]. Chinese Science: Earth Science, 2010, 40(4): 439-451.
- [34] Chowdhury A H, Noble J P A. Origin, distribution and significance of carbonate cements in the Albert Formation reservoir sandstones, New Brunswick [J]. Marine & Petroleum Geology, 1996, 13(7): 837-846.
- [35] 邹华耀,郝芳,张柏桥,等. 准噶尔盆地中部超压封闭层的岩石学特征与封闭机理[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2213-2219.
Zou Huayao, Hao Fang, Zhang Boqiao, et al. Petrologic feature and sealing mechanism for the pressure seal in the center of Junggar basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2213-2219.
- [36] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-414.
Hao Fang. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanism of hydrocarbon accumulation in overpressure basins [M]. Beijing: Science Press, 2005: 1-414.

(编辑 李 军)