

文章编号:0253-9985(2010)04-0486-07

松辽盆地西斜坡泥岩地层压实规律

赵健

(中国科学院地质与地球物理研究所 油气资源重点实验室,北京 100029)

摘要:根据泥岩压实作用规律,利用地球物理测井资料,系统研究了松辽盆地西斜坡地区泥岩地层压实状态,定量计算并分析了地层过剩压力。研究区西部隆起带地层基本处于正常压实状态,而龙虎泡阶地和齐家-古龙凹陷区内青山口组和嫩江组泥岩地层存在欠压实现象。通过压实曲线关键参数对比,结合实际地质资料分析了不同区域地层压实作用差异性产生的原因。在此基础上,定量计算了研究区地层过剩压力大小,获得了研究区地层压力结构特征和平面分布特征,并预测了地下流体的运聚特征。

关键词:泥岩压实曲线;过剩压力;压力结构;西斜坡;松辽盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Laws of mudstone compaction on the west slope of the Songliao Basin

Zhao Jian

(Key Laboratory of Petroleum Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the basic law of mudstone compaction, this paper does a systematic research on the mudstone compaction characteristics in the west slope of Songliao Basin by using various logging data. The overpressure is quantitatively calculated and analyzed. The results show that the strata in the western uplift zone of the study area are basically in normal compaction state, while the Qingshankou and Nenjiang Formations in the Longhupao terrace and Qijia-Gulongkou sag show undercompaction. The causes of difference in compaction in different areas are analyzed through comparison of the key parameters of compaction curves and in combination with real geologic data. On the basis of this, we quantitatively calculate the overpressure in the study area, analyze the structural features and planar distribution of formation pressures, and predict the features of subsurface fluid migration and accumulation.

Keywords: mudstone compaction curve, overpressure, pressure structure, west slope, Songliao Basin

对泥岩地层而言,其成岩过程主要是机械压实作用:随上覆载荷增加孔隙度逐渐减小^[1]。这种规律可以用 Athy 公式来表示^[2,3]。但在实际地质研究过程中,通常不具备系统的孔隙度采样数据,必须借助地球物理手段来间接完成^[1,4-8]。由于声波测井资料具有丰富易取,且分辨率高等特点,成为研究泥岩压实规律的主要方法和手段。它不仅能够定性判断地层压实状态,而且可定量计算泥岩孔隙流体压力^[1,9,10]。

钻杆测试数据(DST)和重复地层测试资料(RFT)均证实松辽盆地西斜坡储层内发育有超

压,但有关超压的成因机制、发育规模、分布范围等一直缺少系统定量的研究。

前人对松辽盆地深层孔隙流体压力预测及水动力场形成与演化等方面开展过研究工作^[11-16],但主要是从水文地质角度来研究储层内部流体运移特征,并没有从根本上回答储层高压产生的原因及分布规律。近年来研究证实,含油气盆地中储层高压可能主要源于比邻高压泥岩地层,是压力传递的结果^[1,5,17]。因此,深入研究泥岩地层压实规律将有助于对储层超压成因的理解,同时可有效预测地下流体宏观运移规律^[18,19]。

收稿日期:2010-04。

作者简介:赵健(1982—),男,博士研究生,盆地模拟分析与油气成藏动力学。

鉴于此,笔者结合研究区实际地质情况,利用测井资料系统研究了研究区泥岩压实特征,并定量计算了地层过剩压力,分析了地层压力结构及盆地流体动力场特征。

1 地质背景

松辽盆地是我国东部中生代重要的裂谷型盆地,近菱形,面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地从形成到结束依次经历了热膨胀期、裂陷期、坳陷期和萎缩期等发展阶段,具有典型的下断上凹双层结构^[11,20]。研究区位于松辽盆地北部大庆长垣以西,主要包括大庆长垣、齐家-古龙凹陷、龙湖泡阶地、泰康隆起带和西部超覆带等二级构造单元,勘探面积约 $1.75 \times 10^4 \text{ km}^2$,是松辽盆地重要的产油区之一(图1)。

受盆地构造演化控制,白垩纪之前研究区主要是复理石沉积和火山碎屑沉积。从早白垩世开

始盆地进入了坳陷演化阶段,研究区依次沉积了白垩统登娄库组、泉头组,上白垩统青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组,古近系伊安组、大安组、泰康组及第四系。多年油气勘探和地质研究证实,白垩系青山口组、姚家组和嫩江组是研究区主要的勘探目的层,同时也是本次研究的重点。

2 泥岩压实曲线

2.1 单井压实曲线

选取测井类型齐全,匹配关系良好,测井段长度较大(优选涵盖目的层)的探井为研究对象,根据岩性测井曲线,结合地层测试、取心等资料,在准确识别泥岩地层的基础上,综合考虑井径变化,地层厚度等影响声波时差的地质因素^[21],编绘了80余条泥岩声波时差-深度关系曲线,并对比分析了研究区泥岩压实曲线特征。

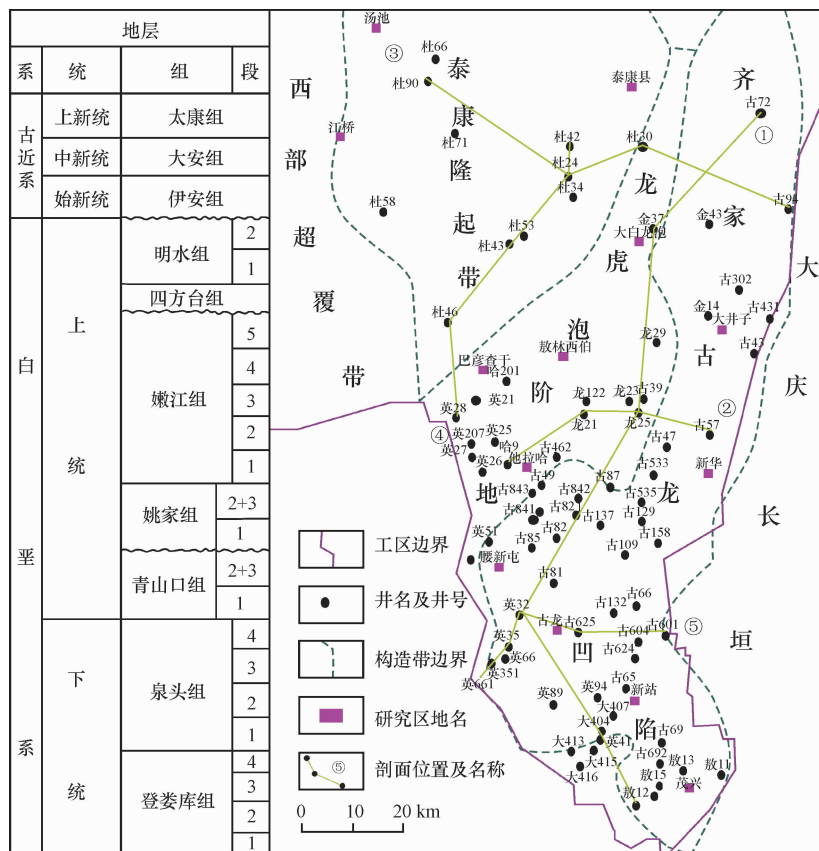


图1 松辽盆地西斜坡构造单元划分与沉积充填特征

Fig. 1 Structural unit division and sedimentary characteristics of the west slope in the Songliao Basin

结果表明,研究区主要存在两种类型压实曲线:正常压实曲线和欠压实曲线。两者的主要区别在于在单对数坐标系内,声波时差随深度增加是否呈线性降低趋势。对正常压实曲线而言,在单对数坐标系中声波时差随深度增加线性减小。如杜 90 井压实曲线属正常压实曲线,且拟合曲线斜率为 4.31×10^{-4} (图 2a);而欠压实曲线通常具有分段性,如杜 30 井压实曲线在地表附近声波时差随深度增加线性降低,拟合曲线斜率为 4.72×10^{-4} ,但从 850 m 左右开始声波时差便偏离正常压实趋势,地层开始出现欠压实,并且欠压实幅度(实测声波时差与相同深度处声波时差理论值之间的比值)随深度呈增大趋势,在 1 250 m 左右声波时差突然降低,向正常压实趋势线靠拢,之后声波时差又逐渐偏离正常压实趋势,并且欠压实幅度也随之增加,至 1 600 m 左右欠压实幅度达到最

大,从而形成了“斜列三段式”结构(图 2b)。

对比研究区其他探井压实曲线可以发现,正常压实段是普遍存在的。任何一条压实曲线在地表一定深度范围内,声波时差(单数坐标)和深度都符合线性关系。但是,正常压实段拟合曲线斜率存在差异,全部探井拟合曲线斜率对比分析结果表明,曲线斜率具有明显分带性:同一构造单元内地层正常压实段拟合曲线斜率相近,不同构造单元存在显著差异。研究区西部泰康隆起带正常压实段曲线斜率是所有构造带中最小的,平均值为 4.4×10^{-4} ,而齐家-古龙凹陷区正常压实段拟合曲线斜率是 3 个构造带中最大的,平均值达 5.5×10^{-4} 。分析认为,泥岩压实曲线斜率的差异可能与地层厚度、上下地层叠置关系等有关。杜 90 井泥岩单层厚度较小,平均为 1.2 m,以砂泥薄互层产出,在上覆载荷增加情况下,泥岩孔隙流体

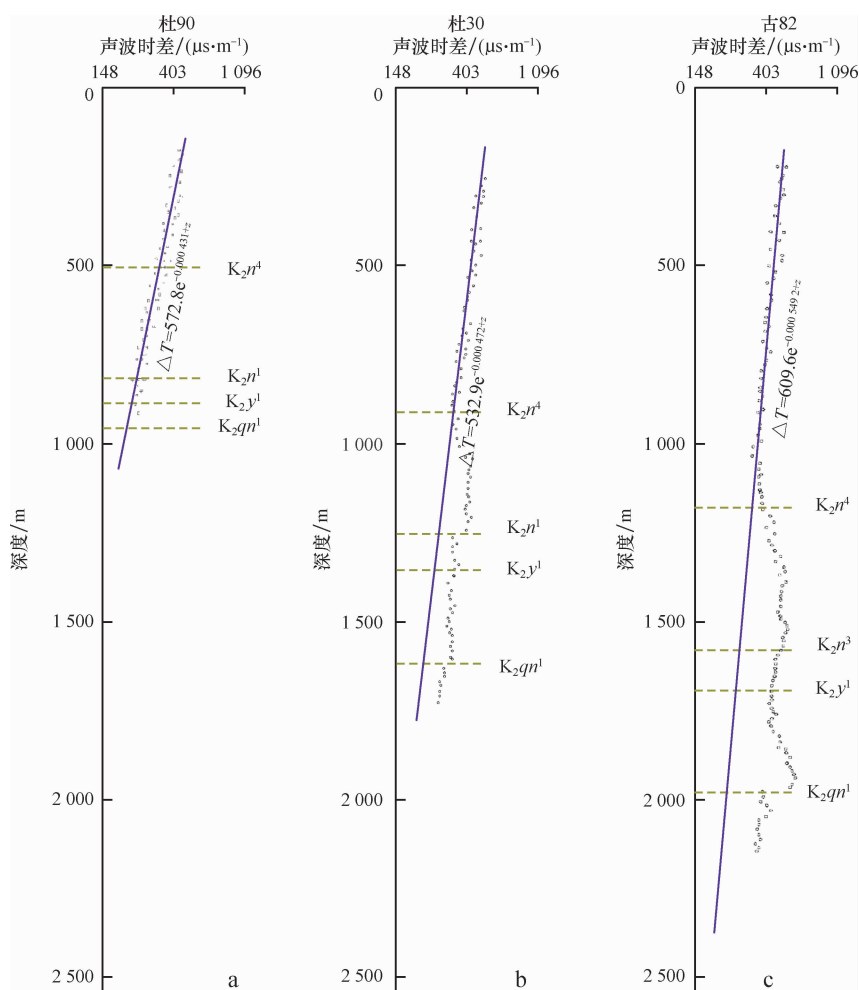


图 2 松辽盆地西斜坡声波时差-深度关系

Fig. 2 Acoustic travel time vs. depth of the west slope in the Songliao Basin

容易排出,孔隙度显著降低,对应曲线斜率偏小;古82井泥岩单层厚度较大,平均为2.8 m,且泥岩层附近砂体不发育,单层厚度小,造成了泥岩地层排水困难,孔隙度下降不明显,对应的压实曲线斜率偏大。据此可推测,压实曲线斜率在某种程度上可反映地层的沉积环境。因为在相同或相似的沉积环境下,地层不仅具有相近的岩性特征,而且具有相似的空间展布特征和相互叠置关系,在某种程度上决定了泥岩地层压实曲线特征^[1,22],体现了压实曲线的区域差异性。

对欠压实曲线而言,差异性主要体现在欠压实出现深度及欠压实幅度两个方面。如古82井压实曲线总体与杜30井相似,但欠压实开始出现的深度更大,达到1 250 m左右,并且欠压实幅度也较杜30井偏大(图2b,c)。结合探井分层数据可以发现,尽管不同探井欠压实开始出现的深度不同,但均对应于同一套地层——嫩江组顶部,并且对应的声波时差值也基本相同,平均值为339.3 $\mu\text{s}/\text{m}$ 。分析原因后认为,泥岩声波时差受控于泥岩孔隙度,因此声波时差-深度关系曲线实质上反映的是孔隙度-深度关系。正常压实状态下,泥岩孔隙度随深度增加规律性减小,整个地层处于压实-排水平衡状态。随着压实程度增加,地层孔、渗性降低,当其低于某一临界值时,往往会出现压实-排水不平衡,致使地层内孔隙流体无法排出,地层孔隙度得以维持,从而形成欠压实^[23~25]。从正常压实到欠压实过程中必然存在一个能够维持压实-排水平衡的最大深度点,即临界深度,此时声波时差即为临界声波时差。根据声波时差和孔隙度之间的关系^[6,26,27],结合实际地质资料可获得研究区泥岩地层的临界孔隙度大约为12%,这意味着当泥岩地层孔隙度小于此值时可能会发生排水不畅形成欠压实。

2.2 地层压实规律

根据上述分析可知,压实曲线的各种异同均是地层压实特征的客观体现。因此,通过对研究区压实曲线的对比分析,得出了研究区地层压实规律。首先,研究区地层压实具有区域性。西部隆起区地层基本处于正常压实状态,欠压实主要发育在龙虎泡阶地和齐家-古龙凹陷区。在欠压实发育地区,欠压实同样具有区域性:由西向东,由南向北,欠压实程度呈增加趋势,临界深度由浅到

深。这种分带与研究区构造单元划分基本一致。

其次,研究区地层压实具有分段性,不同地层欠压实程度存在差异。嫩江组和青山口组欠压实幅度高,而姚家组欠压实幅度偏小。欠压实幅度整体表现为:“两高一低”的特征。

综合分析各地层及其上覆、下伏地层的沉积环境、岩性组合、泥岩厚度、现今埋深、所处构造位置及构造演化等可以发现,研究区西部超覆带和泰康隆起带自泉头组三、四段沉积以来,沉积环境主要为河流相、滨浅湖相、三角洲平原相,主要是砂泥薄互层,青山口组、嫩江组不发育厚度较大、纯度较高的泥岩层,并且地层埋藏总体较浅,因此,泰康隆起带及西部超覆带地区地层主要以正常压实为主,各地层均没出现欠压实现象。齐家-古龙凹陷、龙虎泡阶地在青山口组、嫩江组沉积时期,主要为深湖相环境,沉积了巨厚、质纯、富含有机质的泥岩,且埋深相对较大。在埋藏过程中,地层中流体往往由于无法及时排出而形成欠压实。嫩二段沉积后,研究区开始大规模湖退,到嫩五段沉积时研究区已经开始平原化,这段时期沉积物主要以砂泥岩薄互层或夹层为主,且埋藏较浅,从而导致了嫩四段以上地层主要也以正常压实为主。

3 地层压力特征

地下流体的运移、聚集是发生在三维空间内的地质过程,受到其所处动力背景控制,与对应深度处过剩压力大小密切相关^[19,23]。因此,在定性判断地层压实状态的基础上,笔者利用平衡深度法定量计算了研究区地层过剩压力,并综合分析了研究区地层压力特征。

3.1 地层压力结构

根据研究区构造发育特征,充分运用上述所获得的泥岩压实规律,定量计算了地层过剩压力,并结合地层测试、试油数据资料,编制了5条不同走向的过剩压力连井剖面(图1),以剖面①为重点介绍其所在位置地层压力结构特征(图3)。

剖面①是一条横跨齐家-古龙凹陷区,南北走向的过剩压力连井剖面,纵轴表示深度,横轴为敖12—英41—龙25—龙29—金37—古72井连线。根据各单井不同深度过剩压力大小,获得了过剩压力等值线剖面拓扑图。研究表明,研究区地

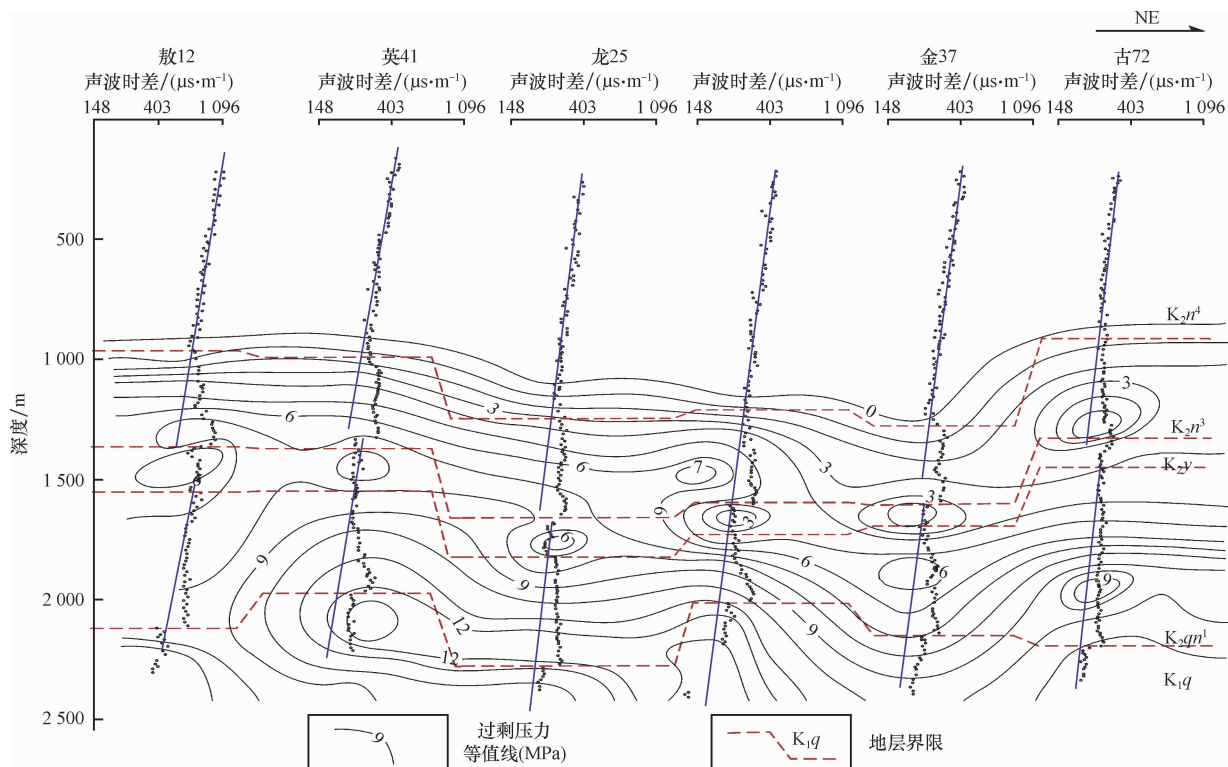


图 3 松辽盆地西斜坡过剩压力连井剖面

Fig. 3 Well-tie section showing the overpressure of the west slope in the Songliao Basin

层压力在垂向上具有分段性,以 K_2n^4 底为界分成上下两部分,上覆地层基本处于静水压力状态,下部是超压发育带(图 3)。根据超压发育程度不同,又可把此超压带分成青山口组和嫩江组两个强超压带以及姚家组弱超压带。过剩压力分布具有较强差异性,一般均小于 13 MPa,主要在 6 ~ 10 MPa 之间。从浅到深,过剩压力呈增大趋势,高值主要分布在青山口组底部,该剖面过剩压力最高值出现在英 41 井 2 000 m 深度处,达到了 13 MPa;横向上,同一地层在不同地区所对应的过剩压力也存在明显差异,比如在南部凹陷区敖 12 井和英 41 井附近青山口组地层过剩压力要明显高于北部凹陷区金 37 井和古 72 井附近对应值。

综合其他 4 条过剩压力剖面成果,可初步判定研究区地层在纵向上至少存在 4 个压力系统: K_2n^4 上部的静水压力系统、嫩江组强超压系统、青山口组强超压系统和姚家组低压系统。之所以把嫩江组和青山口组分成两个独立的压力系统主要考虑到姚家组低压层的存在。因为,如果两者同属于一个压力系统,压实曲线应该是连续的,过剩压力在剖面上分布也应该是连续的,而实际并非如此。

3.2 过剩压力平面分布特征

在压力剖面分析的基础上,利用上述计算获得的过剩压力,结合探井实测地层压力资料,并综合考虑研究区沉积、构造等特征,获得了研究区主要目的层段过剩压力平面分布图(图 4,图 5,图 6)。

由图可知,研究区青山口组一段、青山口组二、三段和嫩江组一段在凹陷区普遍发育超压。过剩压力平面分布整体上具有凹陷区较高,向四周呈逐渐减小趋势,且具有南部凹陷区高,北部凹陷区偏低的特征。同时,过剩压力与地层埋深密切相关,青山口组一段过剩压力最大,主要在 4 ~ 6 MPa 之间,最高值出现在南部凹陷中心部位,达 8 MPa。青山口组二、三段过剩压力分布与青山口组一段相似,但整体小于青山口组一段,且高值分布区与青山口组一段高值分布区基本吻合,主要分布在古 132 - 古 625 井一带,最大值达 6 MPa;嫩江组一段过剩压力无论大小还是分布范围均较青山口组偏小。

根据研究区地层过剩压力平面、剖面分布特征,可以推测地下流体宏观运移规律。首先,根据超压的垂向分带性,可知研究区地下流体在垂向

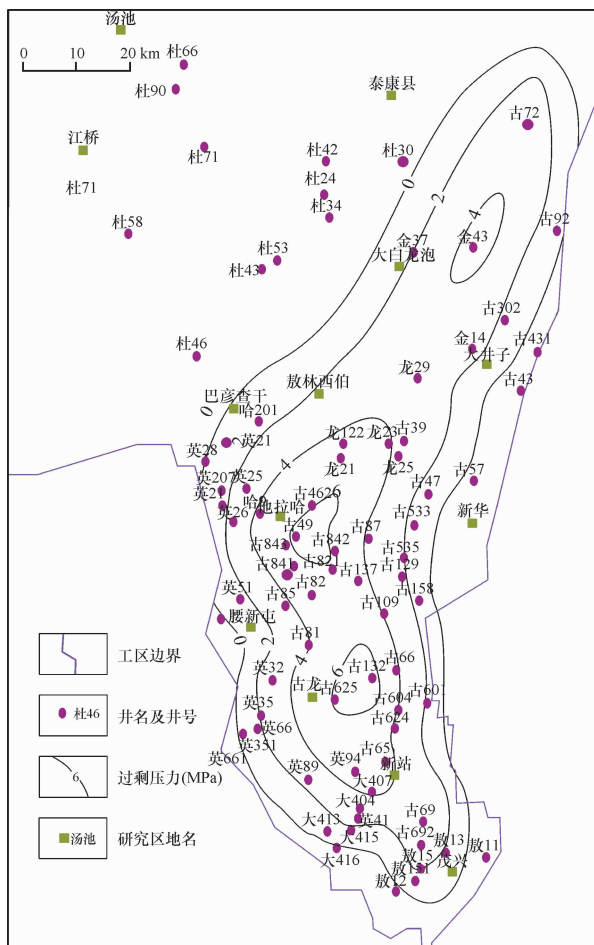


图4 松辽盆地西斜坡上白垩统青山口组一段地层过剩压力分布

Fig. 4 Overpressure distribution of the first member of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation on the west slope of the Songliao Basin

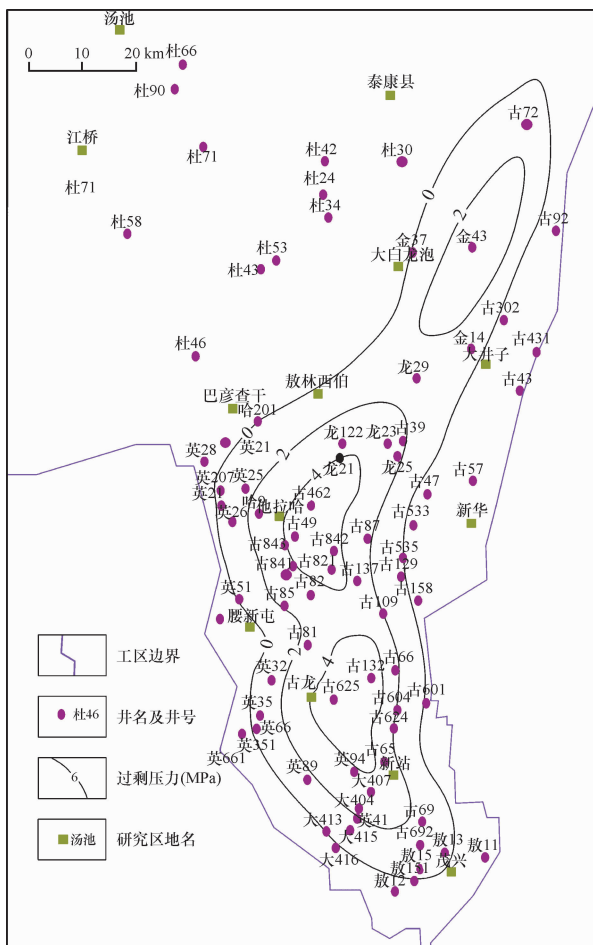


图5 松辽盆地西斜坡上白垩统青山口组二、三段地层过剩压力分布

Fig. 5 Overpressure distribution of the second and third members of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation on the west slope of the Songliao Basin

上是不连通的,或者连通性较差。流体垂向的连通通常需要有其他地质事件完成,如断裂系统活动或局部岩层受压破碎等。上下压力系统一旦连通,受压差控制流体具有从深部向浅部运移趋势。

通常情况下,研究区地下流体可能主要在各自的压力系统内侧向运移,受过剩压力分布及区域构造控制,流体具有从齐家-古龙凹陷高压区向四周低压区运移趋势。研究区西部泰康隆起区和东部大庆长垣及长垣两翼鼻状构造等继承性古隆起部位是油气等地下流体的优势运移指向区。

4 结论

1) 地层压实具有区域性。泰康隆起带和西

部超覆带地层处于正常压实状态,而龙虎泡阶地和齐家-古龙凹陷区深部地层发育欠压实。

2) 地层压实垂向具有分段性。嫩江组以上地层基本处于正常压实状态,其下覆地层不同程度地发育欠压实作用。与姚家组地层欠压实相比,青山口组和嫩江组地层欠压实更加明显。

3) 研究区地层垂向上至少存在四个压力系统。超压分布具有从凹陷部位向四周呈降低趋势,并且同一地层过剩压力在南部凹陷区较北部凹陷区偏高。

4) 主要目的层过剩压力分布具有继承性。受其控制,油气等地下流体具有从深部向浅部、从凹陷中心向四周运移的趋势。泰康隆起带和大庆长垣等继承性古隆起是流体运移指向区。

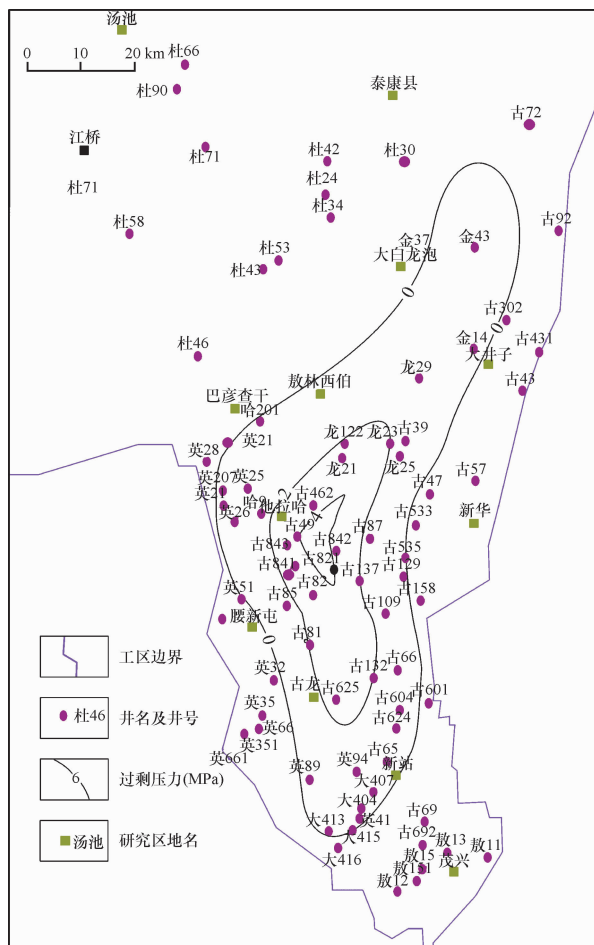


图6 松辽盆地西斜坡上白垩统嫩江组一段地层
过剩压力分布

Fig. 6 Overpressure distribution of the first member of
the Upper Cretaceous Nenjiang Formation on the west
slope of the Songliao Basin

参考文献

- Magara K. Compaction and fluid migration practical petroleum geology[M]. Amsterdam:Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 1-139
- Athy L F. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks [J]. AAPG Bulletin, 1930, 14(1): 1-21
- Burykovskiy L A. Mathematical simulation of sediment compaction [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1991, 5(2): 151-161
- Hottmann C E, Johnson R K. Estimation of formation pressure from log-derived shale properties[J]. Journal of Petroleum Technology, 1965, 17(6): 717-722
- Fertl W H. Abnormal formation pressures[M]. New York: American Elsevier Publishing Company, 1976. 1-382
- Serra O. Diagraphies différées: bases de l'interprétation[M]. Paris: Editions Technip, 1985. 625
- 陈荷立, 罗晓容. 砂泥岩中异常高流体压力的定量计算及其地质应用[J]. 地质论评, 1988, 34(1): 54-63
- Hamouz M A. Using well logging information to predict some of the new concepts of the formation pressure [J]. Overseas Drilling Technology, 1992, 7(6): 144-171
- 李明诚. 石油与天然气运移(第二版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 1-350
- Serebryakov V A. Methods of estimating and predicting abnormal formation pressures[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1995, 13(2): 113-123
- 杨万里, 高瑞祺, 郭庆福, 等. 松辽盆地陆相油气生成、运移和聚集[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1985. 200-208
- 楼章华, 高瑞祺, 蔡希源. 论松辽盆地地下水动力场演化与油气运移、聚集[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 115-120
- 楼章华, 程军蕊, 金爱民. 沉积盆地地下水动力场特征研究——以松辽盆地为例[J]. 沉积学报, 2006, 24(2): 192-201
- 张维琴, 杨玉峰. 松辽盆地西斜坡油气来源与运移研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(1): 17-19
- 向才富, 冯志强, 吴河勇, 等. 松辽盆地异常压力系统及其形成原因探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(11): 112-119
- 许洪东, 王朋岩, 金曙光. 松辽盆地西斜坡水动力场演化特征与油气聚集[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(6): 13-15
- Smith J E. The dynamics of shale compaction and evolution of pore-fluid pressures[J]. Mathematical Geology, 1971, 3(3): 239-263
- 陈荷立, 罗晓容. 泥岩压实曲线研究与油气运移条件分析[J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(3): 233-242
- Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1-12
- 杨继良, 史若衍. 松辽盆地构造特征及其与油气的关系[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989. 47-63
- 张发强, 王震亮, 吴亚生, 等. 消除影响压实趋势线地质因素的方法——以莺歌海盆地为例[J]. 沉积学报, 2002, 20(2): 326-332
- Luo X R, Brigaud F, Vasseur G. Compaction coefficient of argillaceous sediments; their implications, significance and determination [A]. In: Dore A D, ed. Basin modeling: advances and applications [C]. Amsterdam: NPF Special Publication, 1993. 321-332
- Bradley J S. Abnormal formation pressure [J]. AAPG Bulletin, 1975, 59(6): 957-973
- Walder J, Nur A. Porosity reduction and crustal pore pressure development[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(B13): 11 539-11 548
- Audet D M, McConnell J D C. Forward modeling of porosity and pore pressure evolution in sedimentary basins [J]. Basin Research, 1992, 4(2): 147-162
- Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner G H F. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media [J]. Geophysics, 1956, 21(1): 41-70
- Wyllie M R J, Gregory A R, Gardner G H F. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media[J]. Geophysics, 1958, 23(3): 459-493

(编辑 张亚雄)