

辽河盆地大民屯凹陷流体动力场特征*

叶加仁,郝芳,陈建渝

(中国地质大学石油系,湖北武汉 430074)

摘要:辽河盆地大民屯凹陷的地下流体动力场特征表明该区古地温梯度大于今地温梯度,泥岩压实可划分为正常压实-常压型、单段欠压实-弱超压型和双段欠压实-强超压型3大类;现今剖面压力系统由浅部正常压力、中部弱超压和深部强超压3部分组成,断裂系统、不整合面和相互连通的孔隙系统及底辟构造组成了凹陷内流体纵、横向输导的复杂网络系统;古压力场演化经历超压原始积累和释放2大阶段,断层对压力的演化与分布起重要的控制作用;流体势在剖面上呈“双层”式结构,洼陷为供流区,斜坡带为主要泄流场所。

关键词:地温场;压力场;势能场;大民屯凹陷

第一作者简介:叶加仁,男,34岁,副教授(博士),石油地质

中图分类号:TE121.1⁺4

文献标识码:A

石油和天然气作为埋藏在地下的天然流体,其渗流过程必然遵循流体运动的动力学机理^[1-3]。地下流体动力场的构成不仅对油气的排出和运聚有直接的控制作用,且对油气的生成与保存等也有重要的影响,国内外广大油气地质工作者都对流体动力场的研究十分重视和关注^[4-6]。

笔者在综合分析区域地质、钻探、地球物理和分析测试等资料的基础上,采用静态描述和动态模拟相结合的方法,对大民屯凹陷的温度场、压力场和流体势能场及其对油气聚集成藏的影响等进行了系统研究,以正确认识研究区地下流体动力场的空间分布规律和展布模式,分析盆地流体系统的构成,掌握油气运聚规律,为油气勘探服务。

1 地温场

沉积盆地实际上是一个巨大的低温热化学反应器,地温是决定有机质成烃演化的最重要控制因素,与油气形成关系密切。据152口井358个测温点的温度测试资料,大民屯凹陷的今地温梯度为每百米2.92℃(图1),地温梯度低于全球平均值,且各组地层具有较统一的地温梯度。有机包裹体分析表明,研究区内曾发生两期大规模的油气运移:第一期均一温度为90~119℃,相当于烃源岩埋深达2500~3200m;第二期均一温度为137~180℃,

相当于烃源岩埋深达3900~5200m(图2)。

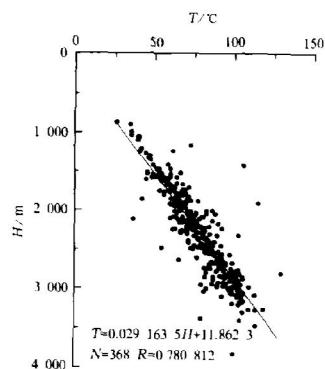


图1 大民屯凹陷试油温度-深度关系图

Fig.1 Relationship between temperature and depth in Damintun Depression

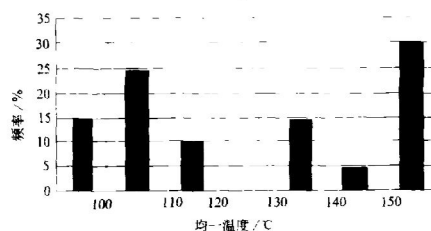


图2 大民屯凹陷岩样中有机包裹体均一温度分布图

Fig.2 Distribution Showing homogeneous temperature of organic inclusions of rock samples of Damintun Depression

2 压力场

压力是油气排出、运移和聚集的前提与基础,且与油气生成、保存及成岩-成矿流体的关系十分

* 国家自然科学基金(批准号:49732005)和高等学校骨干教师资助计划资助

收稿日期:2000-06-19

密切^[7]。据统计,世界上超压盆地有180多个,其中160多个是富含油气的盆地,超压油气田约占全球油气田的三分之一左右^[8]。

迄今为止,可用于研究和预测地层压力的方法虽然很多,但以利用钻井和地震速度资料最为重要^[9]。

2.1 钻井

综合57口代表性探井的泥岩声波时差资料,本区钻井的泥岩压实可分为3种类型:(1)正常压实-常压型:声波时差与深度呈对数正相关关系

(图3a),单井压力为常压,凹陷内大部分钻井(约72%)的泥岩压实状况属该类型;(2)单段欠压实-弱超压型:压实曲线表现为“单峰”型,超压主要出现在沙河街组三段下部和沙河街组四段(图3b),且压力系数较小,该类钻井约占19%;(3)双段欠压实-强超压型:压实曲线表现为“双峰”型,超压主要出现在 E_{s3}^3 和 E_{s4} 中(图3c),其压力系数较大,该类钻井约占9%,且主要分布于凹陷沉积中心(荣胜堡洼陷)及其周围。

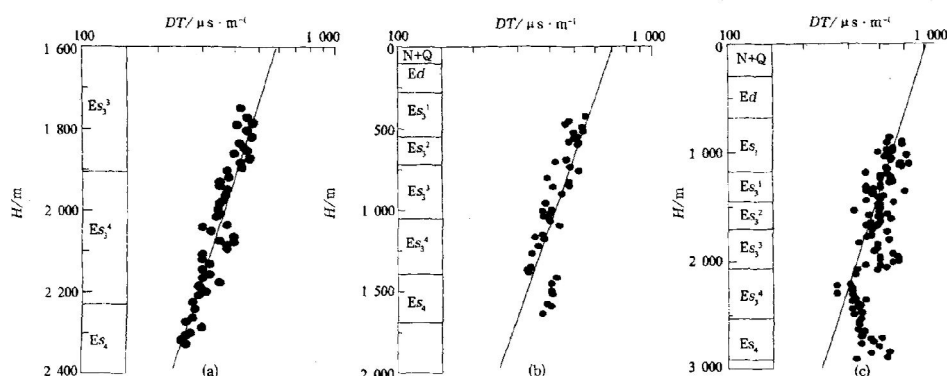


图3 大民屯凹陷代表性钻井泥岩声波时差(DT)-埋深(H)关系图

A—前8井;B—安36井;C—安10井

Fig.3 Relationship between acoustic time and buried depth of drilled mudstones in Damintun Depression

另外,陈振岩等曾运用等效深度法对辽河盆地东部凹陷、西部凹陷及大民屯凹陷40多口井的声波测井资料进行了压力换算^{*}。计算结果表明,东部凹陷、西部凹陷和大民屯凹陷内均有超压体系的存在,其中大民屯凹陷的超压体系主要发育于凹陷西侧,纵向上可分为上、下两套超压体系,钻井揭示的最大压力系数可达1.74。

2.2 地震

大民屯凹陷的钻井资料无论在横向上的测点分布还是在纵向上的深度范围都不能满足剖面和平面的压力场分析的精度要求。研究区地震施工条件良好,大部分地震剖面质量较高,且速度谱的分布满足地层压力剖面和平面的精度要求。本次研究利用“公式法”^{**}计算了凹陷内47条代表

性剖面的地层压力、剩余压力和压力系数,以研究其平、剖面地下流体压力场特征。

2.2.1 剖面压力场

(1)总体上,沙河街组一段及其以上地层一般为正常压实,地层压力为静水压力;沙河街三段上部(E_{s3}^1 和 E_{s3}^2)内发育弱异常高压带,最大压力系数多小于1.4;沙河街组三段下部和四段内发育相对强异常高压带,最大压力系数可达1.7(图4)。

(2)超压带的横向稳定性较差,往往被断层切断而复杂化。

(3)靠近凹陷中心部位的异常压力带厚度大,幅度高;往斜坡部位其厚度逐渐减小,直至变为正常压力。

(4)剖面上段局部发育有一定强度的剩余流体压力,反映了一定规模的热流体活动,在特定的条件下也具备油气成藏的物质基础。

(5)底辟构造内部往往发育有较高的剩余流体压力,其与围岩间存在着较为明显的速度与压力差异,说明底辟构造是本区内部流体重要的泄压通道

* 陈振岩. 辽河盆地深层天然气远景评价. 辽河石油勘探与开发科学研究院, 1995

** Fillippone W R. On the prediction of abnormally pressured sedimentary rocks from data. OTC 3662, 1979

之一。

(6) 断裂系统、不整合面和相互连通的孔隙系统及底辟构造组成了凹陷内流体纵、横向输导的复杂网络系统。

2.2.2 平面压力场

大民屯凹陷各地质-物理界面的地下流体压力场既有一定的相似性,又具较强的变化性规律(表1)。

表1 大民屯凹陷平面压力系统参数对比表

Table 1 Parameter comparison of planar pressure system in Damintun Depression

参数	E_{s1}	E_{s1}^1	E_{s1}^2	E_{s1}^3	E_{s1}^4	E_{s4}
最大压力/MPa	11.3	20.83	24.74	32.24	33.88	59.66
平均压力/MPa	2.14	3.03	3.48	4.16	4.41	5.00
最大压力系数	1.57	1.83	1.75	1.75	1.87	2.03
平均压力系数	1.16	1.17	1.15	1.15	1.14	1.12
超压占总面积	1/10	1/10	1/11	1/8	1/11	1/12

(1) 各界面超压带覆盖范围总体较小;

(2) 自浅至深,虽然各界面的平均压力系数较接近,但最大压力系数依次变大,反映超压强度逐渐加强;

(3) 各界面上超压带的连续性总体较差,其中以沙河街组三段3亚段底的超压带连续性相对较

好,且具一定的区域展布方向;

(4) 各界面靠近凹陷沉降中心部位的剩余压力值大于靠近斜坡部位的值,总体具东低西高的特点;

(5) 凹陷的现今地下流体超压以沙河街组三段下部和沙河街组四段内最为显著,沙河街组三段上部及其以上地层内较弱;

(6) 规模较大的断层两侧剩余压力和压力系数具明显的差异性,断层对压力的形成、演化与分布起重要的控制作用。

2.3 古压力场演化

异常流体压力是在盆地的演化过程中,由于沉积物埋藏压实、孔隙介质经受连续变形、孔隙流体运动状态不断变化而形成的^[7]。根据异常高压形成的物理化学机制,从质量守恒连续性方程和渗流力学机理出发,以研究区的实际油气地质资料为基础,通过建立和求解异常超压的形成与演化的数值模拟方程,在时间序列上“正演”研究区的异常超压演化历史。本次研究对大民屯凹陷4条代表性测线(F171.0, SZ200.0, F181.5和F727.2)各CDP点的古压力演化史在计算机上进行了自动模拟恢复(图4)。

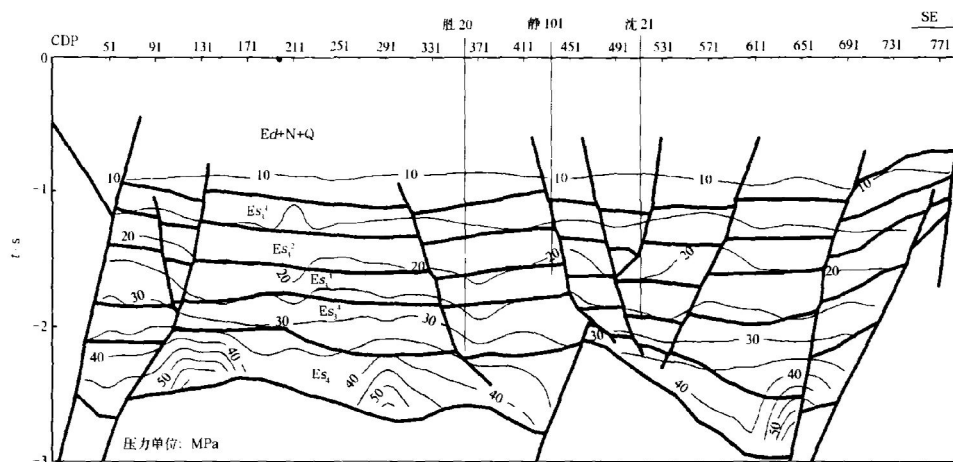


图4 F181.5剖面流体压力分布图

Fig. 4 Distribution of fluid pressure in F181.5 profile

综合各测线的压力演化史,凹陷的古压力演化具如下特征。

(1) 沙河街组三段和一、二段沉积期为超压原始积累阶段(43.0~36.9 Ma):自沙河街组三段沉积起,由于埋藏深度的不断增加和沙河街组内烃类的逐渐生成,地层中超压不断积累,至沙河街组一段沉积末(36.9 Ma左右)达到极大值。

(2) 东营组沉积期及其以后为超压释放阶段(36.9~现今):自东营组沉积起,由于其沉积速率低、岩性粗(以河流沉积体系的砂岩、砾岩及粉砂岩为主体),且超压积累超过了岩石临界破裂压力,致使超压释放,并伴随烃类的排出,这与凹陷的烃类主要运移期相一致;另外,由于早第三纪末构造运动的影响,地壳遭受抬升剥蚀,此时超压释放强烈。

(3)断层对超压的积累与释放起着重要的控制作用;在超压的积累与释放的演化历史中,断层两侧的压力梯度与展布状况存在着较为明显的差异,顺断层的垂向泄压与朝潜山部位的向下注入是本区超压释放的两大主要方向。

3 势能场

运移是油气聚集成藏的关键,在同一输导系统内,对油气运聚起控制作用的主导因素是油气势能^[1,3]。

3.1 流体势模型

流体势的定义很多^[1,10-12],其中以 Hubbert 的表达式最为重要且应用广泛^[1],其数学模型为^[1,13]

$$\Phi = gZ + \int_0^p \frac{dp}{\rho} + \frac{q^2}{2} \quad (1)$$

式中,Φ 为流体势;g 为重力加速度;Z 为测压点高程;P 为孔隙流体压力;ρ 为地下流体密度;q 为流体流动速度。

上式表明,流体的势由位能、单位质量的压能和机械能组成。一般地,由于地下流体流动的速度比较缓慢,可将其动能忽略不计。

对油、水而言,由于其压缩性极小,计算油势和水势的公式可简化为

$$\Phi = gZ + \frac{P}{\rho} \quad (2)$$

对于天然气而言,由于气体密度是一个随压力、温度变化非常明显的函数,所以其积分号不能省略。因此,处于地下某一空间位置的流体,其流体势大小取决于流体压力、高程、密度以及所在地区的重力加速度等因素。在前述压力计算的基础上,利用上述数学模型即可对大民屯凹陷各测线的所有 CDP 点上的油、气、水势进行插值计算,并用计算机自动绘制有关剖面图和平面图。

3.2 剖面分布

大民屯凹陷的流体(油、气、水)势在剖面上大致以沙河街组一段底面为界,呈“双层”式结构,之上的等势线基本上为正常连续变化,表现出重力流特征(图 5);之下的等势线横向变化较大,局部出现异常区,表现出压实流特征;由于流体密度间的差异,导致气势大于油势,水势最小;剖面上靠近洼陷部位的流体势大于斜坡部位的流体势,同一输导层内的流体总体上由凹陷向斜坡高部位运移;在靠近凹陷的第一个与第二个断阶上往往出现流体势分布的相对低值区,是有利的流体聚集部位;断层对流体势的剖面分布有分割作用,底辟构造也是本区一个不可忽视的油气运移通道。

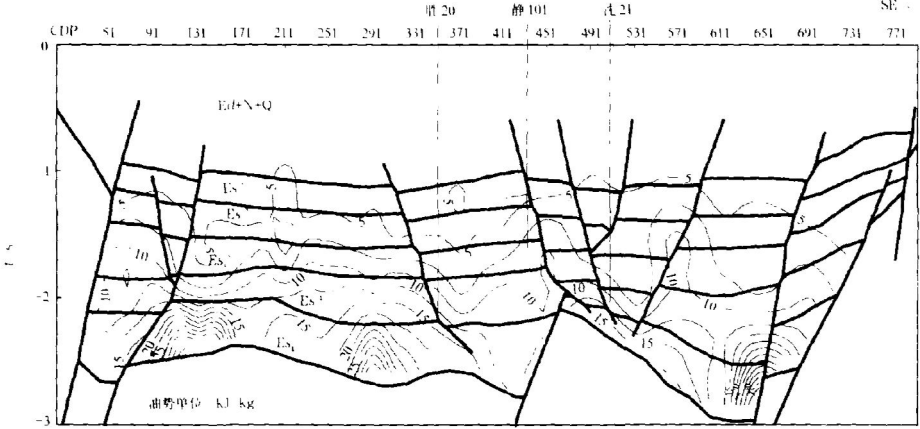


图 5 F181.5 剖面油势分布图
Fig.5 Distribution of oil potential in F181.5 profile

3.3 平面分布

大民屯凹陷各界面在靠近洼陷(如荣胜堡洼陷)部位的流体势高,往斜坡部位的流体势相对较低,洼陷为供流区,斜坡带为主要的泄流场所;总体上,流体势分布表现出东低西高的特点;在同一界面上,气势值最大,水势值最小,油势值居中;不同界面的流体势值大小不一,自沙河街组一段经沙河街组三段至沙河街组四段,各界面流体势值逐渐增

高(表 2);平面超压系统发育区往往为流体势高值

表 2 大民屯凹陷各界面流体势参数对比表

Table 2 Correlation of fluid potential parameters in each stratigraphic boundary damintun Depression

参数	E ₃	E ₃ ¹	E ₃ ²	E ₃ ³	E ₃ ⁴	E ₃ ⁵
最大油势	16.54	29.41	36.09	50.68	48.05	96.71
平均油势	4.68	6.71	8.32	10.46	12.44	16.00
最大气势	127.29	135.18	144.59	149.81	174.20	201.23
平均气势	118.85	118.14	128.88	128.09	130.78	147.35
最大水势	11.00	20.33	24.17	33.48	33.13	58.41
平均水势	2.03	2.91	3.35	4.02	4.27	4.86

区,流体势高值区大体呈 NE-SW 向展布,大致与凹陷走向平行;沙河街组三段下部和沙河街组四段内流体流动方向明显受压实流的控制,呈向四周发散的“离心流”,高势区中的相对低势区为有利的油气聚集区;规模较大断层两盘的等势线不相连,尤其是凹陷西部的继承性大断裂(如前当堡断裂)对流体势的分布起明显的分割作用,现有的油气勘探与开发成果也充分证实了这一认识;凹陷东部的流体势总体变化较平缓,这可能意味着凹陷东部在其整个发育过程中油气运移强度较小,且断层对流体势的控制作用较弱,油气富集条件相对较差。

4 结论

(1)大民屯凹陷的今地温梯度低于全球平均值,且古地温梯度大于今地温梯度,有利于烃源岩成熟与油气的生成。

(2)钻井泥岩压实特征可分为正常压实-常压型、单欠压实-弱超压型和双欠压实-强超压型三大类;地层压力系统在剖面上由正常压力、弱超压和强超压系统三大部分组成,平面上各界面超压带的覆盖范围总体较小,多分布在荣胜堡洼陷及其周围;古压力演化历经超压原始积累和超压释放两大阶段,断层对压力的形成、演化与分布起着重要的控制作用。

(3)流体势在剖面上大致以沙河街组一段底界面为界,呈“双层”式结构,靠近凹陷的第一个与第二个断阶上是有利的流体聚集部位;平面上,洼陷

为供流区,斜坡带为主要的泄流场所,底辟构造是本区一个不可忽视的油气运移通道。

参考文献

- 1 Hubbert M K. The theory of ground-water motion[J]. *Journal of Geology*, 1940, 48: 783 ~ 944
- 2 Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions [J]. *AAPG Bull*, 1953, 37(8): 1 954 ~ 2 026
- 3 陶一川. 油气运移聚集的流体动力学机理问题[J]. *石油与天然气地质*, 1983, 4(3): 254 ~ 268
- 4 Dahlberg E C. *Applied hydrodynamics in petroleum exploration* [M]. New York: Springer-Verlag, 1982
- 5 叶加仁, 王连进, 邵荣. 油气成藏动力学中的流体动力学[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(2): 182 ~ 185
- 6 龚再升, 杨甲明. 油气成藏动力学及油气运移模型[J]. *中国海上油气(地质)*, 1999, 13(4): 235 ~ 239
- 7 Osborne M J, Swarbrick R E. Mechanisms for generating overpressure in sedimentary basins: a reevaluation [J]. *AAPG Bull*, 1997, 81(6): 1 023 ~ 1 041
- 8 杜树, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. *地学前缘*, 1995, 2(3~4): 137 ~ 148
- 9 叶加仁, 杨香华, 孙永传, 等. 歧南断阶带温度压力场研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 1997, 11(3): 161 ~ 167
- 10 England W A, Mackenzie A S, Mann D M, et al. the movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface[J]. *Journal of Geological Society of London*, 1987, 144: 327 ~ 347
- 11 陈章明, 徐景波. 油气圈闭评价方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1993. 23 ~ 44
- 12 刘斌, 沈昆. 包裹体流体势图在油气运移研究方面的应用[J]. *地质科技情报*, 1998, 17(增刊): 81 ~ 86
- 13 Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model[J]. *AAPG Bull*, 1997, 81(9): 1 451 ~ 1 481

CHARACTERISTICS OF FLUID DYNAMICAL FIELD IN DAMINTUN DEPRESSION, LIAOHE BASIN

Ye Jiaren Hao Fang Chen Jianyu

(Department of Petroleum Geology, China University of Geosciences, Wuhan)

Abstract: Fluid dynamical fields in Damintun Depression, Liaohe Basin show that: the paleogeothermal gradient in the study area is greater than present one; the mudstone compaction could be classified into three types such as normal compaction-normal pressure, uncompaction-low overpressure in single interval, and uncompaction-high overpressure in double intervals. The present profile pressure system consists of normal pressure, slight overpressure and intense overpressure from top to bottom. The fault systems, unconformity surfaces, interconnecting pore systems and diapir structures constitute the complex network system of vertical and horizontal transportation within the depression. Pressure evolution can be divided into two stages of initial overpressure accumulation and overpressure expulsion, and faults had an important controlling role to the formation, evolution and distribution of the pressures. The fluid potential energy in profiles present a “double-layer” structure, and the depocenter was the fluid supply area whereas the slope was the main fluid discharge area.

Key Words: geothermal field; pressure field; potential energy field; Damintun Depression